

目 录

一、开阔海业务化水色遥感器最低技术要求

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)报告之一,1998年	(1)
第1章 前言	(3)
第2章 水色遥感器清单:光谱波段、带通、等效噪声辐射率	(5)
第3章 科学背景:海洋光谱反射率解译、水体信息与波段数	(8)
3.1 信息含量与光谱分辨率	(8)
3.2 浮游植物色素及其对吸收光谱和反射光谱的影响	(9)
3.3 增加波段的必要性	(10)
3.4 相同波长是否总是载有相同的信息	(11)
3.5 高噪声环境中需要解决的问题	(11)
3.6 波段减少时水体信息的损失	(11)
第4章 实际问题:波段数与目标	(13)
4.1 大气订正的技术要求	(13)
4.2 色素(叶绿素)指数反演	(14)
第5章 其他技术要求	(17)
5.1 辐射定标、太阳定标、替代定标	(17)
5.2 动态范围	(18)
5.3 避免太阳耀斑区	(19)
第6章 业务工作方面的其他问题	(21)
6.1 地面分辨率、时间分辨率、覆盖率	(21)
6.2 数据分发和可存取性	(22)
6.3 地球同步轨道上的遥感器	(22)
6.4 其他轨道选择	(24)
第7章 结论	(25)
附 录	(26)
1 1978~2000年各类水色遥感器的波段位置	(26)
2 关于各水色遥感器辐射特性的详细资料	(27)
参考文献	(34)

二、卫星海洋水色遥感现状与计划:对于遥感器性能互补的考虑

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)报告之二,1999年	(37)
摘 要	(39)
第1章 前言	(42)
第2章 海洋水色数据的应用	(44)
2.1 海洋碳通量	(44)

2.2	海洋生物学与上层海洋过程	(44)
2.3	海岸带的科学分析和管理	(45)
第3章	卫星海洋水色遥感器的技术要求	(47)
3.1	开阔大洋全球使命的技术要求	(47)
3.2	海岸带应用的技术要求	(49)
3.3	新应用对海洋水色数据的技术要求	(51)
3.4	海洋水色遥感新技术	(54)
3.5	满足技术要求	(55)
第4章	对2005年以前现有的和已规划遥感器的评估	(56)
4.1	对满足最低技术要求的遥感器的评估	(56)
4.2	全球覆盖	(56)
4.3	纬度覆盖	(58)
4.4	时间覆盖	(59)
第5章	数据融合和真实性检验	(60)
5.1	数据融合与集成	(60)
5.2	真实性检验	(62)
5.3	集成	(62)
第6章	制订2005年以后空间海洋水色测量协调战略的步骤	(63)
6.1	引言	(63)
6.2	未来(2005年以后)海洋水色遥感器的试验性计划	(63)
6.3	2005年以后的战略	(65)
	参考文献	(66)

三、近海和其他光学性质复杂水体的水色遥感

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)报告之三,2000年	(69)
摘 要	(71)
第1章 前言	(72)
1.1 海洋水色被动遥感	(72)
1.2 一类水体和二类水体	(76)
1.3 分类法的应用	(78)
1.4 二类水体相对于一类水体的复杂性	(79)
1.5 新算法的必要性	(79)
1.6 优于 CZCS 的新水色遥感器的优点	(80)
1.7 新方法的必要性	(81)
第2章 二类水体水色	(82)
2.1 前言	(82)
2.2 海洋水色	(83)
2.3 固有光学性质和表观光学性质	(84)
2.4 深海水体水色模式	(86)
2.5 海底对水色的影响	(88)

2.6	体积光学性质与海水成分之间的关系	(88)
2.7	水中物质固有的光学性质	(90)
2.8	非弹性散射的性质	(94)
2.9	有关大气订正的问题	(95)
2.10	小结	(95)
第3章	二类水体算法	(97)
3.1	前言	(97)
3.2	需要的产品	(100)
3.3	经验法	(101)
3.4	模型法	(102)
3.5	水深测量和海底特性	(109)
3.6	小结	(109)
第4章	二类水体的测量要求	(112)
4.1	前言	(112)
4.2	遥感系统的设计要求	(112)
4.3	模式参数化和真实性检验的现场数据	(116)
4.4	真实性检验程序和误差估算	(119)
第5章	二类水体水色遥感的应用	(122)
5.1	前言	(122)
5.2	二类水体水色产品	(123)
5.3	按问题或产业划分的应用	(127)
5.4	小结	(133)
第6章	结论与建议	(135)
6.1	一类水体遥感成果的应用	(135)
6.2	我们能否获得全球应用的一个简单的二类水体算法	(136)
6.3	我们怎样很好地认识影响水色的水中物质固有光学性质的 地区变化	(136)
6.4	对二类水体水色遥感数据反演量,我们期望得到怎样的 准确度和精度	(137)
参考文献		(138)
数学符号		(152)

一、开阔海业务化水色遥感器 最低技术要求

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)
报告之一, 1998 年

第 1 章 前 言

第一台水色卫星传感器 CZCS(1978~1986 年)之后,日益复杂的系列仪器逐渐问世,其中有:1996~1997 年发射的 MOS、OCTS、POLDER 和 SeaWiFS,以及预计在 1998~2000 年发射的 MODIS、MISR、OCM、GLI、OCI、OSMI、MERIS 和 POLDER-2 等。仪器的复杂性和预期的改进主要体现在更佳的辐射性能(按动态范围和信噪比衡量)和光谱通道数的增加(由 CZCS 5 通道增加到 MODIS 和 GLI 的 36 个通道)。许多附加通道实际上用于陆地植被和大气特征的探测,因为这些新仪器的设计要完成多目标的任务。其他类型的改进还增加了多角度观测能力(POLDER、MISR)。此外,改进还包括测定反向辐射的极化状态(POLDER 1 和 2)。传感器设计复杂性的增强是为了满足科学界的需求,基本上以新的科研目标或勘探计划为依据。此目标意味着要开发新的试验算法,定义用户的新产品。

本文件提出的观点有意定位在相反方向上,因为这些观点涉及以下问题:简单化传感器是否有可能满足业务化水色使命的要求?尤其是如果传感器的光谱通道数减少,能否提供有用的信息?如果波段最低数可以确定,那么无论波段的其他性能如何,无论传感器有多少通道数,所推荐的必然结果是所有传感器都应包括这些波段。光谱获取的通用性带来了重要的实践和科学优点。实际上这一通用性可做到以下几点:

- 在确定条件下,传感器间便利的相互比较和相互间辐射定标。
- 大气订正及终端产品反演算法的充分兼容。
- 在地球物理产品级(色素指数、气溶胶光学厚度),或在初始量级(如光谱归一化辐射率)有意义的数据库融合。
- 在稳定而完全可比较参数基础上的水色观测的长期连续性。
- 为生物地球化学研究和有关模拟活动、物理学研究和模式(加热速率、混合层动力学),以及有关辐射收支和气溶胶负载效应的气候研究等建立统一的数据库。

现在的讨论就有关主要问题采取了若干限制和假设。假设以水色观测为主的环境监测计划,实质上类似于气象业务和某些海洋变量(如海平面)的观测计划都是需要的,而且监测计划必须覆盖整个开阔海和海岸带。海洋藻类生物量分布、活动及其影响的监测是国际地图-生物圈计划(联合全球海洋通量研究、全球海洋生态系统动力学、海岸带海陆相互作用及其后续计划)的重要目的。可利用简单的、小型廉价的传感器进行低成本监测。这样的业务化系统可设想主要依靠专用水色传感器,因此在设计仪器时,没有必要与其他类型的任务进行协调,但这需要几个同样的传感器同时在轨运行。这样简单的传感器投入使用绝不会与为高级研究设计的更复杂仪器的概念、开发和应用发生冲突。实际上,在不久的将来,若干传感器将同时投入使用,各传感器性能不同,并具有某些互补性和部分的设计备份能力。最后,算法问题超出本报告的范围,不必予以讨论。然而人们认识到,常规产品的基本算法至

少已经存在(例如,可参见 John O'Reilly 和 Stéphane Maritorena: SeaBAM 算法评价, NOAA, NASA, 私人通信, 1997), 高级产品算法仍在开发, 而对于全球监测而言, 高级产品算法并非必不可少。

第2章 水色遥感器清单:光谱波段、带通、等效噪声辐射率

本章给出过去和现在的水色遥感器(表1a)和未来水色遥感器(表1b)的基本资料。表2给出以上遥感器的光谱波段以及标称带宽和等效噪声辐射率。附录1(见本报告后面的附录)形象化地给出了波段位置。请注意,波段(见表和图)仅是指专用于水色观测和有关大气订正的那些波段。大多数未来的仪器还包括其他用途(如氧气吸收带、植被、水气)的波段通道,这里不予考虑。

表 1a 过去和现在的水色遥感器的性能

遥感器	CZCS	OCTS	POLDER	MOS	SeaWiFS
平台	Nimbus-7	ADEOS-1	ADEOS-1	IRS-P3	OrbView-2
机构	NASA	NASDA	CNES	DLR	OSC/NASA
国家	美国	日本	法国	德国/印度	美国
发射日期	1978.10	1996.8	1996.8	1996.3	1997.9
运转终止日期	1986.6	1997.6	1997.6	2001.3	2002.9
轨道倾角(°)	99.3	98.6	98.6	98.7	98.2
赤道降交点时间(h)	12:00	10:41	10:41	10:30	12:00
高度(km)	955	804.6	804.6	817	705
天底点分辨率(km)	0.825	0.7	6×7	0.5	1.1
对幅(km)	1566	1400	2400	200	2800
倾角(°)	±20	±20	可变	无	±20
下传线路	无	UHF/X波段	X波段	S波段	L波段
记录	有	X波段	X波段	无	S波段
太阳定标	无	有	无	有	无
月球定标	无	无	无	无	有
校准灯定标	有	有	无	有	无

注: NASA——美国国家航天局; NASDA——日本国家宇宙事业开发团; CNES——法国国家空间研究中心; DLR——德国航天中心; OSC——科学轨道公司(美国)。

表 1b 未来水色遥感器性能

遥感器	OCM	MODIS-AM	MISR	OCI	OSMI	MERIS	GLI	POLDER-2	MODIS-PM
平台	IRS-P4	EOS-AM1	EOS-AM1	ROCSAT	KOMP-SAT	Envisat	ADEOS-2	ADEOS-2	EOS-PM1
机构	ISRO	NASA	NASA	CHINATaiwan	KARI	ESA	NASDA	CNES	NASA
国家和地区	印度	美国	美国	中国台湾	韩国	欧洲	日本	法国	美国
发射日期	1998.11	1999	1999	1999.2	1999.7	2000.3	2000.6	2000.6	2000.12

续 表

传感器	OCM	MODIS-AM	MISR	OCI	OSMI	MERIS	GLI	POLDER-2	MODIS-PM
运转终止日期	2003.11	2003.6	2003.6	2003.2	2002.7	2004.2	2005.6	2005.6	2005.12
轨道倾角(°)	98.3	98.2	98.2	35	98.13	98.5	98.6	98.6	98.2
赤道降交点时间(h)	12:00	10:30	10:30	09:00/15:00	10:50	10:00	10:30	10:30	13:30
高度(km)	720	705	705	600	685	800	803	803	705
天底点分辨率(km)	0.36	1	0.25	0.8	0.85	1.2/0.3	1/0.25	6×7	1
扫描(km)	1420	2330	360	704	800	1150	1600	2400	2330
倾角(°)	+20	无	可变	无	无	无	+20	可变	无
上传线路	X波段	X波段	无	S波段	X波段	X波段	UHF/X波段	X波段	X波段
记录	有	X波段	X波段	无	有	X波段	X波段	X波段	X波段
太阳定标	有	有	无	—	有	有	有	无	有
月球定标	无	有	有	—	无	无	无	无	有
校准灯定标	有	有	无	—	无	无	有	无	有

注: ISRO——印度空间研究组织; KARI —— 韩国航天研究院。

表 2 水色应用所采用光谱波段一览表(传感器性能详见附录)

中心 λ (nm), 带通 (FWHM, nm), NE ΔL ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

CZCS			OCTS			POLDER			MOS			SeaWiFS		
中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL
443	20	0.208	412	20	0.186	443	20	0.138	408	10	0.192	412	20	0.092
520	20	0.173	443	20	0.109	490	20	0.147	443	10	0.124	443	20	0.077
550	20	0.166	490	20	0.089	565	20	0.088	485	10	0.148	490	20	0.056
670	20	0.094	520	20	0.121	670	20	0.063	520	10	0.141	510	20	0.049
750	100	0.040	565	20	0.091	763	10	0.090	570	10	0.150	555	20	0.043
			670	20	0.037	765	40	0.086	615	10	0.105	670	20	0.031
			765	40	0.057	865	40	0.034	650	10	0.141	765	40	0.019
			865	40	0.031	910	20	0.045	685	10	0.088	865	40	0.015
									750	10	0.102			
									815	10	0.034			
									870	10	0.033			
MISR			MODIS			MERIS			OCI			OSMI		
中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL
466	41	0.063	412	15	0.048	412.5	10	0.026	443	20	—	443	20	—
557	27	0.061	443	10	0.032	442.5	10	0.025	490	20	—	490	20	—
672	20	0.050	488	10	0.025	490	10	0.022	510	20	—	510	20	—
867	39	0.031	531	10	0.018	510	10	0.019	555	20	—	555	20	—
			551	10	0.019	560	10	0.016	670	20	—	670	20	—
			667	10	0.008	620	10	0.014	865	40	—	865	40	—
			678	10	0.007	665	10	0.013						
			748	10	0.009	681	7.5	0.014						
			870	15	0.006	709	9	0.011						
						779	14	0.008						
			469*	20	0.145	870	20	0.007						
			555*	20	0.127	890	10	0.011						
			645**	50	0.170	900	10	0.010						
			858**	35	0.123									

续 表

GLI			OCM			POLDER - 2			S-GLI		
中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL	中心 λ	FWHM	NE ΔL
380	10	0.076	412	20	0.26	443	20	0.138	412	10	0.081
400	10	0.051	443	20	0.22	490	20	0.147	443	10	0.067
412	10	0.045	490	20	0.17	565	20	0.088	490	10	0.054
443	10	0.054	510	20	0.17	670	20	0.063	520	20	0.052
460	10	0.055	555	20	0.15	763	10	0.090	565	20	0.029
490	10	0.027	670	20	0.10	765	40	0.086	625	20	0.021
520	10	0.044	765	40	0.05	865	40	0.034	680	20	0.012
545	10	0.044	865	40	0.08	910	20	0.045	710	20	0.007
565	10	0.018							749	20	0.009
625	10	0.017							865	20	0.006
666	10	0.015									
680	10	0.014									
710	10	0.012									
749	10	0.010									
865	20	0.007									

* 空间分辨率 0.5 km;

** 空间分辨率 0.25 km;

其他: 1 km。

附录 2(见本报告后面的附录)提供了各遥感器辐射特性更详尽的信息及其推导的方式。

第3章 科学背景:海洋光谱反射率 解译、水体信息与波段数

此问题的总评述前提条件是:大气订正是百分之百的“完善”。第4节探讨精确的大气订正所施加的限制,同时考虑推导有用水色信号的限制。

3.1 信息含量与光谱分辨率

1996年以前,我们关于卫星水色技术的实际经验全部来自1978年后期NASA发射的惟一实验卫星遥感器:海岸带水色扫描仪(CZCS),此遥感器一直工作到1986年上半年。最近,日本、法国、印度与德国、美国已发射了新的改进型水色遥感器,但是这些新实验的潜力仍有待调查。今后若干年,各国计划发射的卫星遥感器更加复杂。CZCS具有极其有限的光谱分辨率和估算浮游植物色素指数的有限目标,而现在和将来新一代的卫星遥感器已提高了光谱分辨率,目的在于通过反演获得更丰富的海洋水色信息,或提高色素浓度的反演精度和准确度。这些宏伟目标的实现仍有待评价。

在这样的条件下,如果可能的话,也难以完全依靠卫星实践经验,评价水色信号的信息量,或讨论水色遥感的波段选择。相反,本节的探讨将以理论依据、现场光学测量结果,以及航空遥感实践经验为依据。在卫星遥感条件下,为了获得正确的分析结论,大气订正必须十分完善。以此附带条件,本节将全面评述水色遥感的潜力和问题。

在理论讨论中,我们认识到,水色或海表面光谱分辨反射率模式一般被视为水体吸收系数和后向散射系数的简单函数(如, Gordon 等 1975; Morel 和 Prieur 1977; Kirk 1981; Aas 1987; Sathyendranath 和 Platt 1997),其附加影响来自如 Raman 散射(Sugihara 等 1984)、叶绿素 a 荧光(Neville 和 Gower 1997; Morel 和 Prieur 1977; Gordon 1979)和可溶性有机物荧光(Hawes 等 1992; Lee 等 1994)等非弹性过程。我们还认识到,除非在叶绿素 a 荧光(在 685 nm 附近)或胆蛋白质荧光(Yentsch 和 Phinney 1985)明显地改变特定波段的信号时,浮游植物色素通过其对吸收光谱的影响,影响着绝大部分水色。大洋(一类)水体的反射光谱可分割成两个光谱区(如, Haltrin 等 1997):受弹性散射效应显著影响的蓝光部分($\lambda < 590$ nm)和受非弹性过程显著影响的红光部分($\lambda > 590$ nm)。在寡营养和中营养水域,当藻类浓度很大时,叶绿素引起 685 nm 附近的红色荧光起着显著作用。Raman 辐射是主要的非弹性过程,实际上影响到整个光谱(Stavn 1990, 1992)。对于可溶性有机物丰富的二类水体(以黄色物质为主的二类水体)而言,此黄色物质引起的蓝色荧光可以成为反射率的重要来源。在此背景下,我们才能探讨遥感波长的用途。

3.2 浮游植物色素及其对吸收光谱和反射光谱的影响

作为确定携带水色遥感有用信息波长的第一步,我们可以分析浮游植物色素及其吸收光谱之间的关系。在基础层级可以这么认为,惟一最重要的浮游植物是叶绿素 a。如果我们只对反演一种变量感兴趣,那么只要我们知道浮游植物在一个合适波长的吸收率,目标应该是可以达到的。在很大的程度上,尤其对于一类水体,这一方式是可行的。实际上,开阔海域简化光学模式主要依靠实际观测。如果我们掌握了水体叶绿素 a 浓度,光谱可分辨的整个水体的光学性质有可能做到参数化(Gordon 等 1998; Morel 1988)。最近, Bricaud 等(1995)已证实,可见光区每个单一波长的浮游植物吸收率都可作为叶绿素 a 浓度的函数加以参数化(参见 Cleveland 1995)。这种参数化的内涵假设是:藻类色素成分按常规(和可预测)方式从一类水体寡营养向中营养和富营养化方向发展。

然而,在参数化过程中,总会存在大量的不可解释变量。而且,我们还要探讨次复杂层级残余变量是否携带一些有用的信息。这一变量的一个潜在来源是附属色素浓度相对于叶绿素 a 浓度的波动。从代表性植物生理考虑,我们认识到,浮游植物色素精确成分随着浮游植物物种成分,或一定浮游植物物种的生理状态的变化而变化。近些年来若干研究表明,浮游植物吸收谱形态的某些变化与组合效应(Morel 和 Bricaud 1981; Roesler 等 1989; Sosik 等 1989)以及色素成分(Mitchell 和 Kiefer 1988; Bricaud 和 Stramski 1990; Hoepffner 和 Sathyendranath 1992)的变化相关。鉴于种种原因,根据吸收谱进行的色素成分逆反演是很有价值的:在自然浮游植物群落中,存在大量的浮游植物色素[“高效液相色谱法”曾探测到一个浮游植物样品,有 15 种色素及其降解产品(不包括胆蛋白质)],个别色素的吸收带相互重叠,浮游植物细胞色素组合的变化能影响色素的吸收效率。

然而,根据吸收光谱提取某些色素信息的技术是最有前途的(Bidigare 等 1989)。例如, Hoepffner 和 Sathyendranath(1991, 1993)开发的技术可以将单一吸收光谱分解成十多个与叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 c 以及胡萝卜素相关的高斯带。这类分析表明,关于浮游植物色素成分的某些信息是可以反演的,条件是获得十多个波长的吸收数据,选择的数据要与单一色素的最大吸收相匹配。

因此,如果信息反演的目标是色素成分,而不是主要的色素叶绿素 a,那么对波长的技术要求会增大一个数量级。新的结果(Sathyendranath 尚未公开)还表明,当浮游植物聚集包含 Prochlorophytes(Chisholm 等 1988; Morel 等 1993)时,高斯波段位置或其中波段宽度的细小变化可以与色素成分的更大变化(如与正常叶绿素 a 相关的二乙烯基叶绿素的变化)密切相关。但是,要获得有关单个高斯波段波段宽度或有关波段位置的微小变化(1~3 nm),要求我们在 400~700 nm 光谱范围内,可分辨约 1 nm 的吸收光谱。因此,分辨率要求再次增大 1 个数量级。

在讨论近海表层藻类浓度反演时,我们还必须牢记的另一点是:存在一种通过阳光诱发荧光信号的叶绿素 a 被动遥感的可能性(Neville 和 Gower 1977; Gower 和 Borstad 1981)。虽然利用卫星数据,这种方法的效果不很理想,但是有充分的证据证明,这一方法可用于二类水体,甚至可用于叶绿素浓度中等的大洋一类水体(Babin 等 1996)。MODIS 和 MERIS 仪器是为这一应用而设计的(Letelier 和 Abbott 1996)。除低等效噪声辐射率外,荧光探测

要求在红光光谱区增加通道。为了监测荧光信号高于利用发射峰两侧 2 个通道测定基线的高度,必须至少增加 3 个专用通道。

至此,我们仅讨论了浮游植物光学性质的信息量。在讨论自然海水水样反射谱时,还必须考虑另外一些问题。尤其是波长大于 590 nm 时,海水本身高吸收系数掩盖了其他物质的吸收特征。此外,反射率受吸收和后向散射两种光谱函数的制约。即使在一类水体中,生物活动往往产生大量悬浮物,光谱函数和后向散射系数大小不能完全为人们所认识(亦不可预测)。因此,反射谱为吸收的非线性函数,而且吸收的强信号可能减弱为小的反射信号。所以,根据光学数据,反演色素信息的问题,对于海表反射率要比浮游植物吸收谱复杂得多。

但是 Gege(1997)分析了康斯坦茨湖船测的高分辨率(400~800 nm 范围 512 通道)反射率谱,表明这些光谱可用来量化已知湖水中极丰富的 4 个浮游植物种的浓度。他的研究以这些浮游植物物种吸收光谱差异的调查为依据,此差异反过来与色素浓度的差异相关。光谱吸收信息或藻类异常旺发(如颗石藻等)的反射率特征还表明,某些过量繁殖的藻类具有明显不同于常见的浮游植物成分的光谱特征。这再次表明,利用遥感数据,有可能识别这类藻类的旺发。

实际上,尽管过量繁殖藻类内色素浓度的量化仍存在很大问题,但是利用 CZCS 数据识别颗石藻或 *Trichodesmium* 过量繁殖的方法早已存在(Brown 和 Yoder 1994; Subramaniam 和 Carpenter 1994)。这些结果至少在某些有利条件下是令人鼓舞的,这些研究结果支持这样的设想:如果获得高分辨率光谱信息,根据反射光谱可以得到有关色素成分或有关浮游植物物种成分的补充信息。

3.3 增加波段的必要性

迄今,当我们探讨利用大洋水色数据反演一类水体一个以上色素指数的可能性时,我们主要考虑如何增强波段技术要求问题。在沿岸二类水体,可溶性有机(有色)物质和悬浮泥沙等物质的影响是很重要的,而且这些物质的变化与叶绿素浓度无关。可溶性有色物质仅影响吸收系数,而悬浮矿物极大地增强了散射系数,对吸收的影响尽管不可忽视,但影响很小。大洋水色数据应用于更复杂的水体,亦能采取上述类似依据;根据技术要求,为了区分各种可溶性物质和颗粒物,有必要增加波段。在这方面,很快还可明确地认识到:反演的可能性往往随着光谱分辨率的提高而增强。

这方面的目标识别,最好是量化 3 个变量:浮游植物色素指数,可溶性有机物浓度和悬浮泥沙浓度。因此,如果我们获得 3 个适当波长的水色信息,并且可以依靠这 3 个变量稳定的光学(特别的吸收和后向散射)系数,那么这些问题应该能够解决。但是一般来说,要使这些问题的解决达到一定的置信度,需要获得 3 个以上波段的信息。这一要求来源于以下许多因素。

- 感兴趣的光谱特征要很宽阔,它们相互重叠,而且在某些光谱窗口,它们彼此相似;
- 任一波长都不能被视为是任何感兴趣成分的惟一信号载体;
- 感兴趣成分的水色和光学性质之间的关系是非线性的。

在这些条件下,复杂的优化技术预计可解决以上问题,当该技术应用于数据无错误的条件时,数据冗余对约束解决方案往往是至关重要的。

3.4 相同波长是否总是载有相同的信息

海洋是复杂多样的,所以经常作为给定变量信号载体的波段可能因受其他变量的影响而被污染。因此,这些波段信号的解译就很困难。例如,在浮游植物色素指数反演的时间优化算法中,蓝绿反射率比值的变化解释为叶绿素 *a* 的变化。

然而据我们所知,叶绿素 *a* 以外的物质也能改变蓝绿光比值。其中最重要的是可溶性有机物或黄色物质,这些物质对蓝绿光比值产生很强的影响。在存在着大量黄色物质的二类水体中,如果采用蓝绿光比值算法,不可能将这些物质与浮游植物色素区分开来(Fischer 等 1986)。

物种成分的变化也能改变蓝绿光比值,而叶绿素 *a* 浓度却没有任何变化。例如,岩藻黄素相对于叶绿素 *a* 比例的变化可以改变浮游植物蓝绿光吸收率比值达 6 倍(Hoepffner 和 Sathyendranath 1992)。Morel(1997)已阐明,以 *Synechococcus* 藻过量繁殖为主的水域的蓝绿光比值不同于具有“正常”浮游植物群落,且叶绿素 *a* 量相等的水域。如果采用常规算法,这样的差别可使叶绿素 *a* 值过高估算达 3 倍。因此,有必要利用增加的波段来识别这样的特殊情况,并且如果可能的话,还可能应用订正因子加以订正。

因此,海洋水色数据的高光谱分辨率是必要的,这不仅是从水色中反演补充信息的需要,也是使色素指数估算严格而可靠的需要。如果通道数不得不减少(见第 4 章)的话,那么必须承认,常规的估算必然存在不确定性和模糊性。

3.5 高噪声环境中需要解决的问题

遥感中多波段的用途与数据的精度密切相关,这里指出这一点是很重要的。许多高级的应用,像色素成分信息的推导主要靠极少量信号的反演,因此,如果水色信息达不到必要的精度和准确度,多波段的用途可能会丧失。例如,Fischer(1985)曾证实,对于一定数量的波段而言,能反演的独立段信息数随着数据中噪声的增加而急剧下降。因此,为了满足水色遥感使命不断增长的要求,遥感器光谱分辨率的提高一定要与反演的水色信号精度的提高相匹配,这又要求仪器设计和大气订正技术两方面都应有所改善。

以上所有分析表明,水色反演所要求的波长分辨率和所需的精度均与遥感实验的目的密切相关。更宏伟的目标和更严格的要求只有通过极高的光谱分辨率和水色光谱反演的极高精度才能予以满足。所以,卫星遥感使命中,选择少量波段应视为一种折衷方案,希望从潜在有用波段中,选择部分波段来满足所有偶发事件的要求是不合理的。

3.6 波段减少时水体信息的损失

上一节,我们分析了在目标要求越来越高时,遥感研究所需的波段数是如何增加的。反之,我们可以研究全光谱信息是否总是需要的,或波段数下降是否能保持高分辨率数据所包含的所有有用信息。这一复杂问题只能根据具体情况进行研究。现在已经证明,成功的技术是以高分辨率光谱信息为起点,评价数据集的信息量。然后,数据集的波段数连续下降,

如果反演信息有任何变化,需对这种变化进行评价。信息反演所采用的技术的质量可根据水色信号(如果转换后仍有必要)和感兴趣的海洋性质之间关系的严格性、发生扰动时以上关系的稳定性,以及上述关系的线性程度来进行评价。

在某些研究中,采用主成分分析法来解决这一问题。Sathyendranath 等(1989)分析了二类水体中光学性质活跃的 3 种成分,即藻类色素、悬浮物和可溶性有机物的反演(参见 Dowell 和 Hoeffner 1997)。保留波段的选择有许多标准。在某些光谱区段,如果变量的特征光谱彼此类似,则可认为,这些区段不能用来区分感兴趣的变量。在不损失信息情况下,遥感器相应波段可以减少。反过来,我们可以选择各个变量特征光谱彼此极不相同的那些波段。后者,人们可以研究波段之间的相关性,如果两个波段完全相同,那么其中之一可以减掉。Sathyendranath 等(1989)的研究表明,对保留的波段进行审慎地选择之后,波段数可以从 30 个减到 5 个,而信息不会有明显的损失。利用 5 波段方法,人们能重建全光谱曲线,这已得到证实(Wernand 等 1997)。在类似研究中,Sathyendranath 等(1994)曾分析过区分叶绿素 a 与藻红蛋白(胆蛋白质)的波段要求,他们再次发现,利用 5 个波段可以成功地完成任务,而如果仅利用 3 个波段,会导致性能的明显下降。

在解译分析结果时,认识到所用技术的限制也是重要的。这一问题本质上是非线性的,而主成分分析是线性技术。这一方法完全是统计法,至于如何外推到其他情况,这一方法并未明示。此分析可使用反射率光谱的观测值或模型值作为输入值,如果输入值无充分代表性,结果将是折衷的。上述研究表明,在这些限制中,如果目标是从水色数据中估算 2 个或 3 个独立变量,则需要至少 5 个波段,因而 CZCS 类仪器的 3 个波段是不能完成任务的。

第4章 实际问题:波段数与目标

4.1 大气订正的技术要求

在对海洋信号进行任何解译之前,空间海洋水色探测的关键问题是进行准确的“大气订正”。众所周知,空气分子和气溶胶的后向散射辐射在可见光谱区大气顶(TOA)辐射率中占绝对优势(80%或80%以上)。气溶胶性质和光学厚度是海洋水色遥感问题中另外两个未知的问题。无论采取什么技术消除大气的影响(这里不予讨论),都需要有关气溶胶的专门信息。近红外光谱区(NIR)可提供这一信息。而在这一光谱区,大气对大气顶辐射率的贡献为100%。在这一光谱波段,海洋信号一定程度上会消失,至少对于一类水体是如此。因为气溶胶散射在光谱上会发生变化,假设变化以平滑方式进行,则至少必须在两个波段有两次测量,这是最低的技术要求。在近红外区,这两个波段(或通道)相互之间必须有一定的距离,光谱测量才能达到一定的精度;此外,这两个波段距可见光区又不能太远,以保证向可见光区外推的可靠性。在进行近红外通道选择时,最近的考虑是避免存在于这一光谱区突出的大气吸收带(水气和氧)。具有充分宽度的安全而“清洁”的窗口[参见“高分辨率透射分子吸收数据库”(HITRAN), Rothman 等 1987, 1992]如下表所列。

(0)	1 024 ~ 1 064 nm	透过率高于 0.998
(1)	855 ~ 890 nm	透过率高于 0.998
(2)	772 ~ 786 nm	透过率高于 0.998
(3)	744 ~ 757 nm	透过率高于 0.995
(4)	704 ~ 713 nm	透过率高于 0.978*

* 用于 2 cm 降水探测

通道(1)实际上几乎是所有仪器采用的通道,显然这是一种很好的选择。这一大气窗口的可用宽度亦即带通宽度能保证良好的信噪比;此外,这一波段距可见光区有充分大的距离,所以,光谱散射性能估算能取得良好的结果。

通道(1)和通道(3)的结合看来是最好的。实际上,通道(4)距可见光区较近,而距通道(1)较远,故比通道(3)更为方便。然而,此通道的信息偶尔会受到高叶绿素水域,或一类水体与浑浊的二类水体之间过渡带残余海洋信号的影响。所以,从这一点考虑,通道(3)比通道(4)更加安全,而且更宽。

MERIS 采取的是通道(1)和通道(2)(替代通道(3))结合的方式。这一选择是与

MERIS 另一使命——云顶高度探测——折衷的结果。此探测要求在氧吸收带($\lambda = 760$ nm)附近有一个狭窄的基准波段(无氧吸收);该波段位于 754 nm 附近。因此,对应于通道(3)大气订正的位置不再存在,所以,MERIS 仪器采取通道(2)与通道(1)相结合的方式。

采用通道(1)和通道(3),在出现白浪(whitecap)时,大气订正的误差很大(Frouin 等 1996;Gordon 1997);增加通道(0),并利用气溶胶散射光谱性质和近红外区白浪反射率的差异,可以减小误差。

由此可以得出初步的结论:最低技术要求是通道(1)和(3)的结合。如果存在灵活性,则增加通道(4)和(或)通道(0)可能具有更多优势。在多数情况下,如果有通道(4),即使海洋信号不十分显著,向可见光区外推也是很可靠的。从这一通道,还能提取有关气溶胶(在其存在时)吸收的补充信息。由于白浪的问题,有人建议进一步采用通道(0)。

4.2 色素(叶绿素)指数反演

大洋一类水体的“颜色”从寡营养水域(叶绿素浓度极低)的深蓝色向富营养水域(叶绿素高浓度)暗绿色转变。在蓝光波段(最大在 445 nm 附近),这种转变是由于藻类色素(不仅是叶绿素,还包括各种胡萝卜素)的强吸收造成的,这与绿、黄波段(550~580 nm)的弱吸收形成对比。对于这两个波段,反射率 R 或归一化离水辐射率 $(L_w)_N$ 通过两者的比值进行组合。采用比值法而不是另一类组合(例如差分法)的基本依据是,影响 R 或 $(L_w)_N$ 绝对值的因子变化和不确定性。

自然的变化和误差以及由所采用方法引起的变化和误差,两者之间必然相互干扰。 R 和 $(L_w)_N$ 直接敏感于散射系数和后向散射系数,而且对于一定的叶绿素浓度而言,这些量的变化可达到 2 倍或 2 倍以上,而光谱比值实际上并不受影响。如果使用比值法,还可以大大减少海洋反射率二向特征的影响。在大气订正过程之后,余差会持续存在,而且可附加在两个波段的海洋信号上。就比值法而言,该误差的影响可极大地缩小。

还可以得到初步的明确结论,两个波段是最低的基本要求。最低吸收的绿光区必要通道的位置受大气吸收波段(由于水气的关系,此波段为 567~637 nm)存在的限制。所以,波段 555 nm(宽 20 nm)或 560 nm(宽 10 nm)最为便利,这与波段宽度密切相关。其他配置通道一定要处在藻类蓝吸收波段内。最适宜通道应对应于浮游植物最大吸收值,平均值位于 443 nm 处。实际上,比值 $R(443)/R(555)$ 跨度范围很宽;当叶绿素尝试从 0.02 mgm^{-3} 变化到 20 mgm^{-3} 时,该比值从 10 降至 0.3。由于该蓝波长距近红外通道太远,人们对外推法的应用提出了异议,因此大气订正多少存在一些问题。另一反对意见是:当色素浓度高于 2 mgm^{-3} , 443 nm 处小的海洋信号会逐渐消失。

有人已提出一个替代方案(如见目前使用的 SeaWiFS 算法),即以比值 $R(490)/R(555)$ 取代上述比值。然而,在上述同一叶绿素浓度范围内,该比值会从 5 降至 0.5。因此灵敏度明显下降。尽管如此,人们还是认为,在叶绿素含量很高时,490 nm 大气订正精度高于 443 nm 大气订正所能达到的精度,以及 490 nm 更强的海洋信号可以弥补这一缺点。必须承认,这一问题仍未公开,在近期(尤其是 SeaWiFS 传感器)积累更多的经验之前,会仍然存在。尽管如此,人们注意到,在叶绿素低浓度范围(一般为开阔海域, $< 0.30 \text{ mgm}^{-3}$),当浓度从 0.03 mgm^{-3} 升至 0.3 mgm^{-3} 时,使用第一种水色比值具有明显的优点。因为比值

降低了3倍,而在相同浓度范围,第二种比值仅降低1.3倍。有人已提出从第一种比值到第二种比值的转换程序,以使当443 nm处的信号低于490 nm处时,很快就能投入使用。这样的程序看来是很合理的。

因此在此阶段,将估算一类水体叶绿素浓度作为主要目的,得出的结论可能是:(1)与前面的选择保持一致,作为优先措施,首选490~560 nm两个波段;(2)现极力主张采用443~490~560 nm三个波段,以提高附加能力。

CZCS的经验告诉我们,海洋信号应用临界点方法,可增强浑浊水体所有要素(Bricaud和Morel 1987),近红外通道和可见光通道可以区分一类水体与浑浊二类水体。如根据反射率值,555 nm波段可以进行泥沙含量的粗略估算。尽管如此,泥沙量的准确量化仍需有专门的现场研究,目的在于获得浓度与地区泥沙散射特性的相关性,某些干扰是不可避免的;高泥沙含量水体在红外区表现出非零信号,所以对气溶胶贡献的估算可能偏高。气溶胶和水溶胶散射的不同光谱性质可能有助于消除这种模糊性;以“亮度象元”为基础的其他方法正在开发。

利用2~3个最少波段不能进行以黄色物质为主的二类水体探测。一般来说,这些水体被视为含有相当高浓度叶绿素的一类水体。藻类和黄色物质光学特征之间的差异发生在较短波长,这时浮游植物吸收呈下降趋势(380~440 nm之间),而黄色物质吸收则呈指数形式持续上升。除受仪器本身的限制外,进行近紫外区的大气订正难度极大,因此有人建议在410 nm附近设紫外通道。设置此通道看来是获得有关黄色物质信息的惟一解决方案,至少对于简单的仪器和以反射率比值为基础的简单算法是如此。从此角度看,对 $R(410)/R(555)$ 和 $R(443)/R(555)$ (或其他可能的组合)比值的比较可能为识别以黄色物质为主要光学性质活跃物质的区域提供了一种思路。必须承认,如果说已经提出了黄色物质探测和量化的试验性算法,那么此算法的有效性尚未得到令人信服的验证。由于新传感器使用取得的经验,这一形势将很快得到改观。

一旦4个可见光通道(410,443,490,555 nm)的组合能被接受,即使对于简单的仪器而言,其他比简化比值法更为复杂的方法也可认为具有潜在应用能力。其中,非线性转换法或神经网络法可能被采用。大体上来说,当通道数和光谱信息增加时,新方法的性能也会增强,这时问题则带有更多的限制。但是,当可见光区有4个以上通道时,我们将放弃简单传感器领域,而进入复杂传感器领域。

总之,经分类后,各通道如下表所列:

0	1 024 ~ 1 064 nm	宽	30 nm(可能宽度 40 nm)
1	855 ~ 890 nm	宽	20 nm(可能宽度 35 nm)
2	744 ~ 754 nm	宽	14 nm
3	704 ~ 713 nm	宽	10 nm
4	550 ~ 565 nm	宽	10 nm
5	485 ~ 495 nm	宽	10 nm
6	438 ~ 448 nm	宽	10 nm
7	407 ~ 417 nm	宽	10nm

下列组合(“C_n”)可设想为:

C1 = 通道	1, 2, 4, 5
C2 = 通道	1, 2, 4, 5, 6
C3 = 通道	1, 2, 4, 5, 6, 7
C4 = 通道	1, 2, 3, 4, 5, 6
C5 = 通道	0, 1, 2, 4, 5, 6
C6 = 通道	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
C7 = 通道	0, 1, 2, 3, + 可见光波段 n 通道

说明如下:

C1 组合(仅限于 4 个通道)在大气订正和水色信息获取方面体现了最低技术要求,可进行一类水体单一色素(叶绿素)估算和浑浊二类水体粗略描述;

C2 组合(5 个通道)可进行全量程叶绿素浓度的较好评价(叶绿素浓度从低到极低)和浑浊水体的可靠区分(包括浑浊水体反射率的定量信息);

C3 组合(6 个通道)与 C2 组合具有同样的能力;此外,利用中心波长 412 nm 的特殊通道能消除藻类色素效应和黄色物质效应之间的模糊性;除此之外,412 nm 通道不利于开阔海上空吸收气溶胶的探测;

C4 组合(也是 6 个通道)在海洋信息获取方面,也有与 C2 组合相同的能力,但是由于在近红外区有 3 个通道,大气订正可以得到改善,并有望得到更准确的产品;

C5 组合(也是 6 个通道)仅是大气订正程序与 C4 不同,可具有区分白浪与气溶胶的能力;

C6 组合(7 个通道)综合了 C3 和 C4 的优点,即改善了大气订正效果,提高了黄色物质探测能力;

C7 组合($N > 7$ 个通道)代表了更先进、更高级遥感器的组合,仪器性能有所增强,但是这已超出本报告的讨论范围。

对于可见光通道来说,为了最大限度地区分通道 4~7 之间的差异,提高藻类色素成分信息反演的潜力,建议 10 nm 带宽是必要的。尽管色素成分遥感反演效果无疑有待验证,但是 10 nm 带宽被认为是未来传感器必要的配置。

第5章 其他技术要求

5.1 辐射定标、太阳定标、替代定标

作为前提条件,水色应用需要对遥感器进行准确的辐射定标,才能达到遥感信号规定的精度。CZCS 受内定标重大故障的影响,大部分时间必须依赖于替代定标,这一经验已引起人们对制订明确而可靠的定标程序的重要性的重视。例如,为 SeaWiFS 和 MODIS 规定的辐射精度指标为:绝对辐射值为 5% (可见光范围),相对值(反射率)为 2%。遥感器的整个光谱范围和视场必须满足这些技术指标。一般通过星上内定标程序和以现场测量为基础的替代定标的组合来达到目的。

5.1.1 内定标

为了符合上述定标的高标准,基本要求是采用星上飞行定标系统。一般而言,新遥感器依靠面向太阳的漫射板(代替内定标灯,CZCS 证明定标灯不可靠)。受阳光照射的漫射板提供相对于太阳辐照度的定标。已知太阳常数(随太阳周期仅有微小变化),假设漫射板是稳定的,那么就可以监测仪器可能出现的漂移。太阳观测通常在极地上空进行,以便最大限度地减少海洋测量的损失,太阳观测可以每条轨道进行一次。

显而易见,在发射前阶段,必须采用实验室定标设备,精确地测定太阳漫射板的反射率和二向性。然而,因为发射之后太阳漫射板长期暴露在太阳光和紫外线辐射之下,可以预料,其性能将随时间而衰退。所以,像 SeaWiFS 那样,增加一块衰减器板,以衰减太阳漫射板上受到的入射通量,减缓漫射板的退化。然而,即使在这种情况下,跟踪太阳漫射板的性能衰退,仍是必要的。

SeaWiFS 和 MODIS 则利用月球表面作为另一个漫射器,这一概念即是进行月球表面散射的阳光与太阳漫射板的的散射光的比较。基本的假定是:月球表面的稳定性完全不随时间变化。然而,月球表面反射率在空间上是不均匀的,所以校正程序必须考虑到反射率空间变化和观测的几何特征。目前,已建立了 SeaWiFS 月球辐射观测数据库。月球观测频次(全照度时每月一次)实际上是根据太阳漫射板的衰减速率决定的。

除月球观测外,MODIS 仪器通过增加了“太阳漫射板稳定性监测器”,控制漫射板性能。该监测器由具有 9 个滤波探测器的球形积分源构成,交替观测直射阳光和受照射的太阳漫射板,所以漫射板反射率的变化能在 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间的 9 个波长上监测到。MERIS 开发了另一种方案,即在“定标轮”上安装两台漫射板,第一个漫射板永久地暴露在太阳辐照之下,而第二个漫射板极少暴露在辐照之下,用于监测主漫射板的性能的退化。系统无论采取

哪种方案,上述监测对于测量辐射率的精确定标都是至关重要的。

5.1.2 替代定标

替代定标即是在适当的大气订正后,对海面离水辐射率和根据卫星测量信号导出的离水辐射率进行比较。作为检查遥感器功能的补充测试手段,替代定标是很有用的。然而,现在的难题是:不仅遥感器定标,而且大气订正的质量也需要采用此方法进行测试。所以,替代定标仅作为整个系统(遥感器+大气订正算法)功能的附加检测手段予以考虑,而遥感器的定标主要依靠飞行漫射板系统。替代定标和星上定标之间差别的分析对确定误差源也是有用的。

替代定标通常在光学性质变化很少的海区(如寡营养水域)进行。即使在这样的条件下,离水辐射率的时空变化必须予以考虑(尤其在 443 nm,低叶绿素含量水域,辐射率变化很大)。为了最大限度地减少大气订正的误差,大气性质(如气溶胶光学厚度、气溶胶相位函数、臭氧含量)也需予以准确测量。因此,在卫星过境时,一定要进行同步的海洋和大气大范围现场测量,与“真实性检验实验”方式相同。这种测量可以在船上进行。然而,CZCS 经验表明,如果测量频度高,则系统的监测更为可靠。因此在这样的实验中,既包括船上测量数据,又包括提供众多参数时序资料的锚定光学浮标的测量数据,是很有用的。

总之,无论预见的低成本遥感器简化到什么程度,辐射的高稳定性和控制能力不能低于未来复杂遥感器所预期的能力。换言之,在这方面,限制不可能简化或松弛。

5.1.3 等效噪声辐射

对于所有通道,包括专用于大气订正的通道的等效噪声辐射,同样的结论都是适用的。不同的机构和科研组织进行的研究,为下一代遥感器提出了现代技术可以达到的,实际上极相似的指标。即使简单的遥感器也一定要保持这样的指标:NE ΔL 一般在 $0.05 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 以下,在可见光和近红外波段,NE ΔL 低于 $0.035 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 。在近红外波段,NE ΔL 低于 $0.025 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 。MODIS、MERIS 和 GLI 等未来仪器实际上都达到以上等效噪声辐射的要求,这样的要求同样适于不太复杂的遥感器。

5.2 动态范围

每一个通道的动态范围必须进行调整,以便在遥感器指向海洋时,能达到最大的灵敏度。海洋水色观测的这一技术要求(暗目标最优化)是仪器设计时考虑的一个主要因子。所采用的一种方法是,使遥感器对亮目标(如云层,可能还包括许多陆地)达到饱和;反之,对于无云的海洋象元,仅仅收到所需要的辐射率。这样,如果需要校正,无需知道最亮象元的亮度。

由于气溶胶光学厚度和性质是极有价值的产品,而且从原理上讲,它的测定可以像大气那么精确,所需达到的动态范围必须据此确定。在这方面,即使海洋信号被淹没,不能再从过高的气溶胶信号中提取出海洋信号,气溶胶信号本身也能成功地加以利用。当气溶胶出现显著载荷时,遥感器尚不饱和,这种可能性也是存在的。下表给出了主要通道的光学厚度大气的逸出辐射率[在导致最大信息的几何体制中(尽管在太阳耀斑区以外),550 nm 处

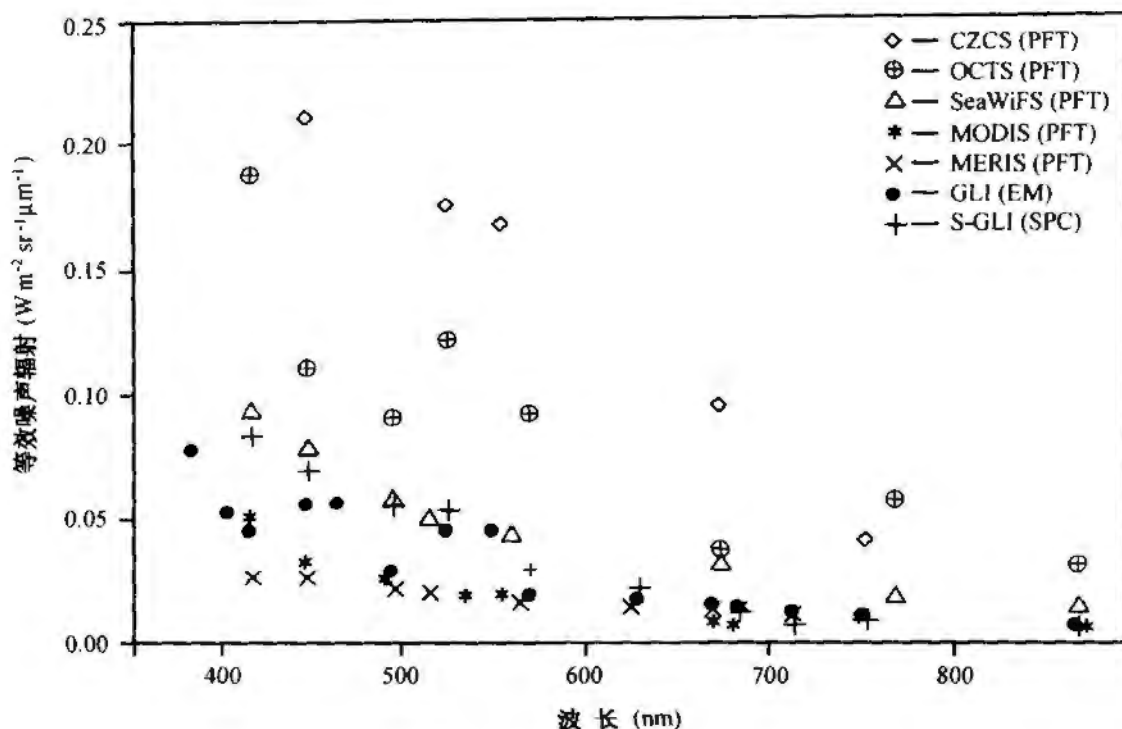


图1 不同卫星水色遥感器等效噪声辐射

$\tau_a = 2$ 。在这一计算中,气溶胶模型是海洋型的,相对湿度 70%。

在约 41° 太阳天顶角,已发现最大信号,此时在太阳平面,观测角大约为 41° ,所以,气溶胶相位函数的后向瓣与逸出辐射率(多次散射)直接相关。请注意,在这种情况下,海洋信息对 TOA 信号的相对贡献率基本上为零(遥感器“看”不到海洋),只有在寡营养水域,在蓝光波段和紫外波段,则属例外(然而,后者的相对贡献率不超过 2%)。下列数字不是定值,仅是高气溶胶载荷条件下,辐射率的合理估算值。

通道(nm)	410	443	560	710	750	865
$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$	205	189	138	92	82	58

在水平能见度为 23 km 时,即在良好观测条件下,上表所列值约增加 1.4 倍(410 nm 处)或 2.9 倍(865 nm 处)而趋于最大值。因此,由于气溶胶监测能力的影响,近红外通道比可见光通道的重要得多。很有可能,通过双线增益(如 SeaWiFS 所采用的)或其他等效手段,在有利的大气条件下,进行海洋观测时,可使传感器容纳如此高的辐射值而不降低高灵敏度。最近,探测器的改进,多重增益或二元数字化等方法的使用,可使探测器容纳亮目标和暗目标,其性能只有极小的牺牲。这使得遥感器对于地学其他学科更加有用。

5.3 避免太阳耀斑区

对于光学遥感而言,太阳对地面的照射几何体制至为关键;当地面反射的太阳光非常接近于仪器主轴方向时,接收能量使遥感器达到饱和,以至于所记录的信号毫无用处。这一现

象称为太阳耀斑效应,主要发生在水体上空观测的时候。由于水面的波动,可能使水体小平面对反射的阳光直接对准遥感器,产生延伸的太阳耀斑图形。太阳耀斑的亮度与海面的结构有关,所以它的变化与局部粗糙度和波浪陡度有关,最终与局部风场相关。

太阳耀斑图形现象的发生妨碍了遥感器对所观测地面的完全覆盖。现在已提出几种解决办法,避免或尽可能地减少仪器因太阳耀斑而饱和时的数据损失。避免耀斑的可能机制包括倾斜仪器,使之避开阳光的直接反射,或采用通常的多角度观测模式。然而,由于需要改变遥感器的构造,这些机制不可避免地会造成一定的数据损失(如在赤道过境期间改变倾斜方向)。其他的动态避免机制考虑采用特殊扫描(如锥形扫描)技术或遥感器与卫星平台旋转技术。可替代的办法是:适当轨道参数的选择能最大限度地减少耀斑的发生,保证受影响的地区在合理时间内(如几天)得到覆盖。最后,利用遥感器群也能提供无耀斑的卫星影像,这时至少要有两台仪器从不同的角度,同时观测相同的目标。

第6章 业务工作方面的其他问题

6.1 地面分辨率、时间分辨率、覆盖率

特定传感器所能探测区域的范围受瞬时视场(IFOV)的限制,而空间和时间覆盖率均受卫星轨道特性以及传感器扫描能力的控制。换言之,对任务目标达成一致意见之后,在任务形成的初级阶段,卫星和传感器地面分辨率和时间覆盖率的特性就必须设计好。

过去、现在和将来极轨平台上的“中低分辨率”水色传感器天底点地面分辨率大约为250 m~7 km,全球覆盖率1~3 d(见表3),但是CZCS和MOS例外,前者每天仅限于工作2 h,后者并非系统地工作。在无星载记录系统的情况下,MOS对现有接收站的覆盖率有所下降。需要指出的是:每一台传感器的特性是根据众多表层水现象的监测,以及不同领域的应用要求(从全球气候模式至海岸带小规模业务管理等)选择的。

因此,保证未来星载水色传感器时空采样性能连续性的任何“标准化”设计或建议需要在不同应用层次和卫星技术水平之间进行折衷平衡。例如300 m地面分辨率全球覆盖的技术要求过高(大量的地面接收站或星上过多的存储装置),而7 km的象元分辨率(如POLDER)又不适合海岸带应用。

表3 各种水色传感器的时空分辨率

传感器	地面分辨率(天底点,m)	卫星重复周期(d)	覆盖
CZCS	825	6	非全球覆盖
MOS	520	24	非全球覆盖
OCTS	700	41	3 d 全球覆盖
SeaWiFS	1 130	16	2 d 全球覆盖
POLDER	6 × 7 000	41	1 d 全球半覆盖
MODIS	1 000	16	1~2 d 全球覆盖
MERIS	1 200/300	35	3 d 全球覆盖
GLI	1 000/250	4	3 d 全球覆盖

作为折衷方案,未来水色传感器的建议如下:

- 全球尺度4 km地面分辨率数据的星上存储能力;
- 满足地区研究特殊要求的较高分辨率数据(1 km)的直接下传能力;
- 为了海岸带研究及云层覆盖地区的充分显示,每天的全球覆盖是合理的。

• 即使现在的经验和近期的计划仅局限于极轨平台水色遥感器的使用,但是有人极力主张发射地球同步轨道或低倾角轨道平台的类似传感器,以便能提供较高频度的监测以及热带地区更好的覆盖(见以下说明)。

6.2 数据分发和可存取性

通常由空间机构管理(或直接管理,或根据合同管理)的专用专业化设备完成数据搜集和存档。在相当一段时间内这一趋势会依然存在。在这一方面已经达到一定程度的标准化,并延伸到拥有数据直接搜集能力的终端用户。

总之,用户期待着拥有长期连续的数据,以用于科学和(准)业务应用。建立提供有质量保证的和多年数据的业务系统是非常必要的。这方面已取得的经验表明,遥感器产生的大量数据以及反演环境要素的数据处理(尤其是光学数据的处理)过程所固有的科学复杂性,是这些数据应用的最大障碍。

遥感数据信息潜力的综合管理和开发,要求在高附加值信息产品的制作与分析方面开展大量的实质性工作,这还需要使用专门的科学设备。

支持海洋环境研究和应用的专门(准)实时数据生产线和相应的历史时序数据,以及专用算法和模式的开发,被认为是保障数据可存取性的前提条件。新遥感器产生的最新数据在规定的处理阶段,都应予以显示、选择和组合,并以反演要素的有质量控制的数据集予以建库。为处理新数据而研制的工具,应该用于更新时间序列的历史数据(可能与适当的辅助数据,如大气、气象及气候参数等相结合),以提高数据系列的统计价值,或开辟新的信息线。这些活动还应该与数据搜集和(或)管理、数据处理及分析工具的开发相结合,并将这些工具与数据集一并提供。这将确保利用库存数据时,总可找到相关的算法和模式(如特定的场地或时间)。

建立在电子出版技术基础上的适当的数据存取和分发手段还应该予以确定,并投入使用。数据存档、检索和分发的格式是一个应由有权威的组织[如地球观测卫星委员会(CEOS)特别工作组]予以明确的重大问题。总之可以预见到,这些工作应遵循当前这一领域的研究工作[如地球观测中心(CEO)、意大利伊斯普拉联合研究中心的计划]所确定和建立起来的原则。

6.3 地球同步轨道上的遥感器

太阳同步极轨卫星上的水色遥感器能提供高光谱和高空间分辨率的离水辐射率及2~3 d的重复周期。在有云时,这种相对低频度的覆盖会进一步缩小,这对于较小尺度的海洋过程研究是不够充分的。地球同步轨道平台的水色观测可用于研究一天之内需要多次水色观测的过程。可以预见,在地球同步轨道上,遥感器以高空间分辨率瞄准有限的特殊监测区域,也可以进行地球全面观测;根据现有文献的思路,后一观测方案更适用于全球监测。

地球同步卫星可进行大范围地理区(高纬度区除外)环境的高频度观测,使动态过程的分辨率达到数小时至数天的时间尺度。这些平台的“固定观测”可增强遥感器能力,如提供任一指定地点的几何特征一致的观测,给出只有被“详查”仪器才能探测到的监测特征,通过

同一天搜集到的多个单张图像无云区的重叠,增强每日的图像覆盖率。而且,利用极地轨道器的高光谱和高空间分辨率数据,可加大地球同步轨道平台的水色连续观测,这将使得单一平台不能观测的海洋过程得以进行调查。然而,当前的地球同步轨道平台不具备水色观测能力,而且政府部门目前也没有把它作为一个技术要求进行考虑。

当前,由国家海洋大气局(NOAA)管理的地球同步轨道业务环境卫星(GOES)系统可每半小时进行一次地球发射和反射辐射的观测。每一颗 GOES 卫星搭载两台仪器:成像仪和探测器。这两台仪器可同时获得可见光和红外高分辨率数据以及大气的温度和湿度剖面,据此可以反演大气温度、风、湿度和云层数据。在过去,一直在讨论增加 GOES 卫星的水色观测能力,但是进展不大。我们再次提出这个问题,建议将水色观测能力作为下一代地球同步轨道平台 GOES N-R 的技术要求。欧洲气象卫星(Eumetsat)计划由自 1977 年以来连续运转的地球同步轨道卫星(Meteosat)系列组成。这一系列卫星上的遥感器提供 3 个波段(热红外、水气通道和可见光)的图像(5 000 象元 2 500 条扫描线)。第二通道,中心波长 $0.7\ \mu\text{m}$,波长范围 $0.3\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 。印度也拥有了地球同步轨道卫星系列(Insat 系列)。目前国际社会尚未得到这些卫星的数据。

在这些仪器上增加水色波段,技术上是可行的,如 GOES 高级成像仪研究评论给出了以 NOAA 现有技术要求为基础的高级成像仪概念设计研究的结果。结果表明,这类遥感器早已在使用。在当前的结构下,遥感器可以很容易地增加有限数量的水色波段。这一观点在后来的评述中得到响应,当时建议:水色应成为遥感器基本的技术要求。除技术可行性外,将海洋水色作为 GOES 或 Meteosat 的技术要求在计划上还必须进行论证。

促进地球同步轨道海洋水色观测,存在许多科学理由。然而人们必须明白,在地球同步轨道上保持严格的等效噪声辐射率可以使象元尺寸大大增加,同时在一定程度上(对于一定的探测技术而言),瞬时视场又不能极大地缩小。因此,可达到的几何分辨率限制了调查和监测的性质和空间尺度,而数据频繁采集的可能性则带来明显的优点。在这一条件下,地球同步轨道上的遥感器可以作为太阳同步轨道上遥感器的补充,但决不能取代它。这些数据对于解决以下问题是有益的:

- 探测、监视和预报有害或有毒藻类大范围的大量繁殖;
- 中尺度沿海环流模式的初始化与检验;
- 风暴和其他短期事件(如烟尘带)地质和生物响应的评估;
- 监测海表瞬时特征(如扩散的河流羽状流、潮汐锋等)的生物和非生物物质;
- 跟踪灾害物质,如溢油(需要有窄的瞬时视场)。

NOAA 若干专业办公室和部门已阐述了对地球同步轨道水色遥感的兴趣或技术要求。例如,美国海军希望每隔 2 h 获得一次水色图像。国家台风中心热带风暴预报中心对利用这些数据,改善台风强度估算,预报滑坡也有兴趣。其他国家的科学家也表示了类似的兴趣。

如果地球同步轨道海洋水色监测成为一个技术条件,权衡设计方案则需要开展各种研究,以形成可接受的设计。现已有若干的可能设计方案。例如,在 GOES 主成像仪上增加 2~3 个波段,或将几个焦平面分开,但共用扫描镜和望远镜,就可以进行水色观测。另一种可用的办法是研制分离式遥感器。前者的成本效率比最高。然而 GOES 进行水色观测所必须的光谱波段设置、宽度和信噪比等最低技术条件还有待确定。定标和辐射测量稳定性

控制也是有待解决的问题。

地球同步轨道水色观测至少在下一个 10 年还不能实现。NOAA 或欧洲气象卫星 (Eumetsat) 完成地球同步轨道平台, 从设计至发射大约需要 10 年。预计在 2007 年(发射准备时间: 2006 年) 发射的 GOES-P 卫星上增加水色波段的可能性很小, 或根本不可能。然而, 在 GOES-Q 上增加水色技术要求的机会还是有的, 该卫星将于 2010 年发射(发射准备时间: 2008 年)。

总之, 地球同步轨道平台的海洋水色观测将是极轨平台同步观测的补充, 可进行目前不能开展的海洋动态调查。在下一代 GOES 平台上增加水色观测能力是有科学依据并在技术上是可行的(据笔者所见)。然而, 将增加这一能力作为一个技术条件, 并获得财政支持, 尚有待 NOAA 及其他有关部门的批准。

6.4 其他轨道选择

选择其他轨道能提高时间覆盖率的频度。例如, 中国台湾省 ROCSAT 将像航天飞机一样, 置于低倾斜轨道。其结果是, 在热带地区的时间覆盖率较高, 而太阳同步极地轨道在热带地区的时间覆盖率最糟。这一结果具有很大的潜在价值; 支持地球同步轨道观测也是鉴于许多同样的理由, 尤其是由于热带地区白天云多和存在太阳耀斑, 此方式可提高覆盖率。当然, 地球同步轨道观测方式的缺点是一定程度上缺乏对高生产力的高纬度地区的覆盖。

达到较高时间覆盖率的第三种方法是布放一个极轨海洋水色遥感器星座, 这可以保持对高纬度地区的观测, 而各卫星会在各自的轨道平面上发生漂移。例如, 假设遥感器内定标问题可以完全解决, 那么尽管太阳同步轨道上的 8 台 SeaWiFS 级遥感器的星座的赤道过境时间有所不同, 但将极大地提高全球的空间和时间覆盖。本文件采纳的低成本, 最少遥感器的方法将降低同类遥感器重复制造的成本, 在空间和时间上改善全球海洋覆盖, 并为地球同步轨道观测平台的布放提供另一可行的方法。从多遥感器组合能力最优化考虑, 国际协调是迫切需要的。

第7章 结 论

(1) 据认为,在不久的将来,海洋水色全球长期监测,同气象和海洋监测的需求一样,是完全必要的。海洋水色业务计划为了实现完全重复的覆盖,一定要以最少数量的专用传感器为基础。按照当前的技术水平,这些传感器尽管符合准确反演最重要性质的科学要求,但还是应该尽可能地简化和降低成本。对于生物地球化学(碳循环)、海洋上层动力学过程以及地球辐射收支平衡(气溶胶)等极端重要的最基本特性是藻类生物量的分布及演化、泥沙分布及输移、气溶胶的光学厚度和性质(海洋上空)。

(2) 传感器星座是一个理想的解决方案,在地球同步轨道(4~5条)运转的星座可保证高时间频度的经度全覆盖,同时,在太阳同步极地轨道上工作的星座以对称模式(升、降轨)保证2~3 d内全(低频度)覆盖。其他还可以预见到的配置,包括低纬度在轨传感器和适当相位的极轨传感器。

(3) 目前和不久将来的仪器在光谱通道方面已存在某些共性(参见图1);其中,典型的代表是 SeaWiFS(实际上是一台低成本传感器)。因此,在通道聚合、趋于同一(最低限度)方面所需开展的工作并没有过量,并将很快形成一致意见,包括带宽的一致协议。

(4) 受一类水体(占整个海洋的97%)色素指数监测、沿海环境泥沙探测和气溶胶估算等任务目标的限制,致使只能采取最低限度的5通道组合(见4.2节C2组合),其中2个通道用于大气订正和气溶胶监测(通道744~757 nm和855~890 nm),3个通道用于测定海洋变量(通道438~448 nm,485~495 nm和550~565 nm)。2~3个独立变量的探测原则上至少需要可见光谱段的5个通道(加上用于大气订正的近红外2~3个波段);3种光学性质活跃物质的反演算法目前尚未统一。所以,尽管当前的知识水平对解决上述大部分应用问题是充分的,然而现实较低的目标是采取5~6个通道的最低组合(C2组合,或C3组合更好,其中包括407~417 nm处的增加通道)。

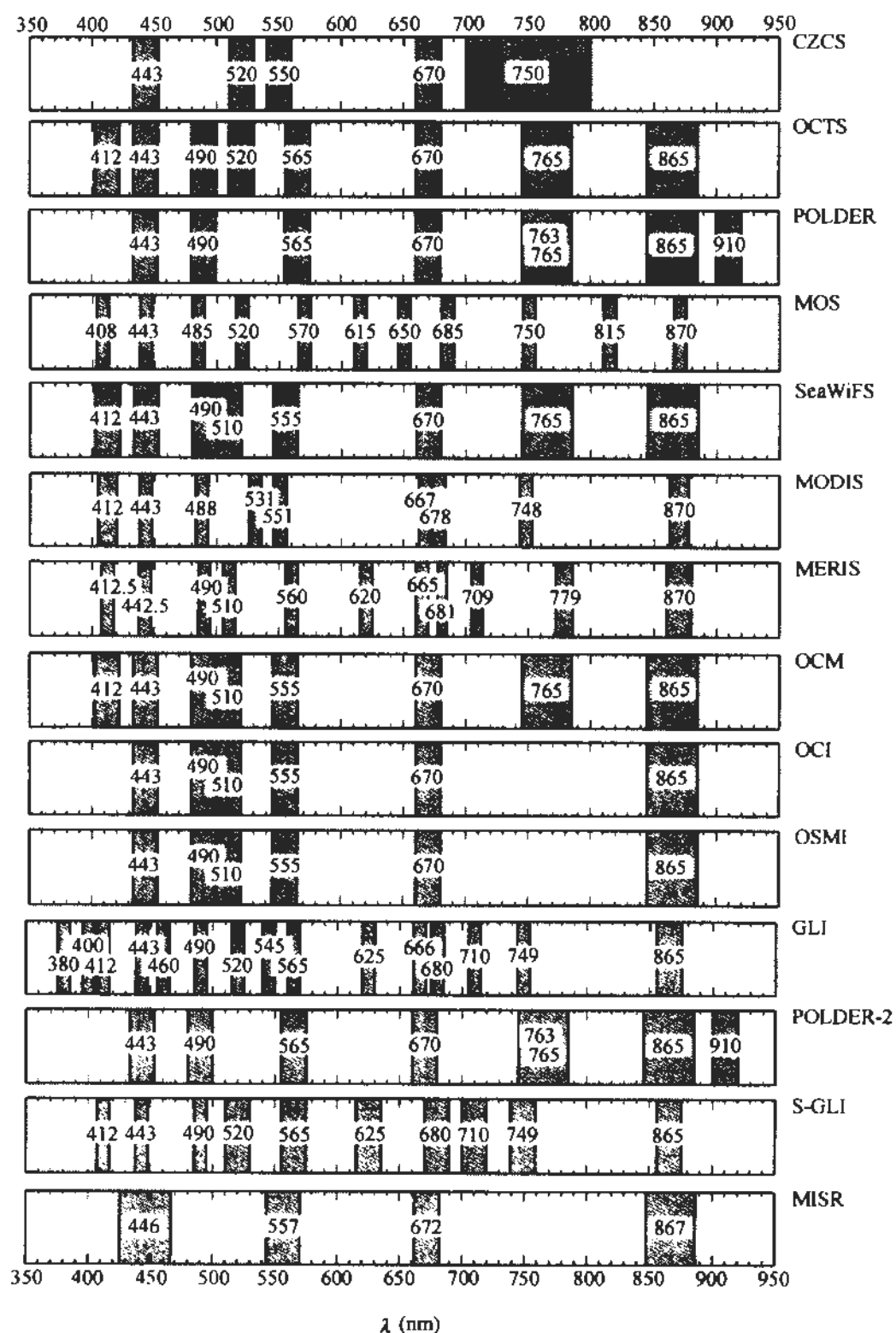
(5) 即使在通道数方面做了简化,而在若干敏感点和以下关键能力方面,传感器不能简化:

- 辐射测量精度,即很高的信噪比[全部通道(包括近红外通道)的低等效噪声辐射率];
- 控制辐射测量稳定性的能力(包括整个光学仪器的飞行定标和传感器之间的相互定标);
- 充分的动态范围,在清洁大气条件下和在相对很高的气溶胶载荷(2倍以上)情况下,能够容纳极低的海洋信号。

(6) 人们认为,利用建立在类似的、可能是同样仪器基础上的观测系统,有可能采用通用的基本算法,并且实现分发产品的标准化。这样,数据的交换与管理,终端产品的融合和分发将变得非常容易。在这样的业务化系统确定之前,可以谋求近来的传感器的性能的聚合,如果仍有可能的话,为了最佳的利用,可依据这些传感器的轨道相位进行协调。

附录

1 1978~2000 年各类水色遥感器的波段位置



2 关于各水色遥感器辐射特性的详细资料

(1) CZCS

通道	波长 (nm)	波段宽度 (nm)	景辐射率 ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	SNR:PFT	NE Δ L:PFT ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)
1	443	20	54.2	260	0.2085
2	520	20	45	260	0.1731
3	550	20	38.6	233	0.1657
4	670	20	13.4	143	0.0937
5	750	100	10.8	267	0.0404
NE Δ T:PFT					
	(μm)	(μm)	(K)	(K)	
6	11.5	2	270	0.25	

表中:SNR:PFT:信噪比:最初飞行测试值

NE Δ L:PFT:噪声等效 δ 辐射率 = 景辐射率/信噪比。

参考:NIMBUS-7 卫星海岸带水色扫描仪研究;第2卷——测试与性能数据。NASA 最后报告 F78-11, 述评 A, 1979 年 5 月。

(2) OCTS

通道	波长 (nm)	波段 宽度 (nm)	高	低	SNR:SPC		SNR:PFT		NE Δ L:PFT
			($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	高	低	高	低	高
1	412	20	145	10	450	30	779	32	0.1861
2	443	20	150	8	500	25	1373	41	0.1092
3	490	20	130	11	500	40	1453	120	0.0895
4	520	20	120	12	500	50	994	136	0.1207
5	565	20	90	8	500	40	988	126	0.0911
6	670	20	60	3	500	25	1603	54	0.0374
7	765	40	40	2	500	25	706	61	0.0567
8	865	40	20	2	450	45	637	70	0.0314
NE Δ L:SPC NE Δ T:PFT									
	(μm)	(μm)	TST (K)	TLW (K)	TST (K)	TLW (K)	TST (K)	TLW (K)	
9	3.715	0.33	300	250	0.15	1.4	0.13	1.34	
10	8.525	0.55	300	200	0.15	1.2	0.07	0.44	
11	10.85	1.1	300	180	0.15	1.1	0.09	0.63	
12	12.05	1.3	300	180	0.2	1.1	0.16	1.07	

表中:高:高电平;低:低电平;SNR:SPC:信噪比:技术性能;SNR:PFT:信噪比:最初飞行测试值;

TST:标准输入温度;TLW:低电平输入温度;NE Δ L:PFT:等效噪声 δ 辐射率 = 辐射率/信噪比(高)。

参考:OCTS 定标/检验文件,第1版,NASDA/EORC,1995年5月。

(3) POLDER

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	极 化	反 射 范 围	
				高	低
1	443	20	否	—	0.05 - 0.22
2	443	20	是(3个角/通道)	0.05 - 1.1	—
3	490	20	否	—	0.034 - 0.17
4	565	20	否	—	0.019 - 0.11
5	670	20	是(3个角/通道)	0.1 - 1.1	0.013 - 0.25
6	763	10	否	0.07 - 1.1	0.008 - 0.25
7	765	40	否	0.07 - 1.1	0.008 - 0.25
8	865	40	是(3个角/通道)	0.07 - 1.1	0.008 - 0.25
9	910	20	否	0.1 - 1.1	0.007 - 0.25

参考: ADEOS 参考手册(NASDA)

通 道	波 长 (nm)	反射电平 R	NEΔR									
			反射率电平高动态模式					NEΔR 反射率电平低动态模式				
			0.05	0.10	0.20	0.50	1.00	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20
1	443	443NP	0.19	0.25	0.36	Sat.	Sat.	NA	NA	0.19	0.25	0.36
2	443	443P	0.44	0.53	0.68	1.00	1.38	NA	NA	0.44	0.53	0.68
3	490	490NP	0.15	0.20	0.27	Sat.	Sat.	NA	NA	0.15	0.20	0.27
4	565	565NP	0.10	0.14	Sat.	Sat.	Sat.	NA	0.07	0.10	0.14	Sat.
5	670	670P	0.42	0.51	0.66	0.97	1.30	NA	0.11	0.15	0.20	0.29
6	763	763NP	0.57	0.67	0.84	1.20	1.60	0.13	0.15	0.20	0.26	0.35
7	765	765NP	0.42	0.51	0.66	0.97	1.30	0.09	0.11	0.16	0.21	0.29
8	865	865P	0.42	0.51	0.66	0.97	1.30	0.09	0.11	0.16	0.21	.29
9	910	910NP	0.52	0.53	0.55	0.61	0.69	0.14	0.16	0.21	0.28	0.38

NP: 非极化测量

Sat.: 饱和

P: 极化测量

NA: 不可应用

NEΔR: 噪声等效 δ 反射率(PFT)($\times 10^3$)

(4) SeaWiFS

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	MAX	STR	SNR: SPC	SNR: PFT	NEΔL: PFT
			($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)			
1	412	20	136.3	91	499	990	0.0919
2	443	20	132.5	84.1	674	1091	0.0771
3	490	20	105	65.6	667	1170	0.0561

续 表

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	MAX ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	STR ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR:SPC	SNR:PFT	NE Δ L:PFT
4	510	20	90.8	56.4	640	1152	0.0490
5	555	20	74.4	45.7	596	1069	0.0428
6	670	20	42	24.6	442	781	0.0315
7	765	40	30	16.1	455	859	0.0187
8	865	40	21.3	10.9	467	726	0.0150

表中:MAX:饱和辐射率;STR:标准辐射率;SNR:SPC:信噪比:技术性能;SNR:PFT:信噪比:最初飞行测试值;NE Δ L:PFT:噪声等效 δ 辐射率=标准辐射率/信噪比:最初飞行测试值。

参考:Barnes, R. A., Barnes, W. L., Easias, W. E., and McClain, C. R.: SeaWiFS 辐射计发射前的验收报告, NASA, 1996 年 12 月, SeaWiFS 技术报告系列, 第 22 卷。

(5) MODIS

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	光谱辐射率 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR:SPC*	NE Δ L ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	主要应用
1	645	50	21.8	128	0.1703(250 m)	陆地/云层
2	858.5	35	24.7	201	0.1229(250 m)	边界
3	469	20	35.3	243	0.1453(500 m)	陆地/云性质
4	555	20	29	228	0.1272(500 m)	
5	1240	20	5.4	74	0.0730(500 m)	
6	1640	24	7.3	275	0.0265(500 m)	
7	2130	50	1	110	0.0091(500 m)	
8	412.5	15	44.9	933	0.0484	水色/浮游植物
9	443	10	41.9	1325	0.0317	生物地球化学
10	488	10	32.1	1308	0.0247	
11	531	10	27.9	1385	0.0183	
12	551	10	21	1114	0.0189	
13	667	10	9.5	1163	0.0082	
14	678	10	8.7	1265	0.0069	
15	748	10	10.2	1077	0.0095	
16	869.5	15	6.2	1000	0.0062	
17	915	30	10	167	0.0599	大气中水蒸气
18	936	10	3.6	57	0.0632	
19	940	50	15	250	0.0600	
20	3.75	0.18	0.45	0.05		表面/云层温度
21	3.959	0.6	2.38	2		
22	3.959	0.6	0.67	0.07		

续 表

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	光谱辐射率 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	NE Δ T ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR	主要应用
23	4.05	0.06	0.79	0.07	150	大气温度
24	4.465	0.065	0.17	0.25		
25	4.515	0.067	0.59	0.25		
26	1.375	0.03	6	—		卷云/水气
27	6.715	0.36	1.16	0.25		
28	7.325	0.3	2.18	0.25		臭氧 海面/云层温度
29	8.55	0.3	9.58	0.05		
30	9.73	0.3	3.69	0.25		
31	11.03	0.5	9.55	0.05		
32	12.02	0.5	8.94	0.05		
33	13.335	0.3	4.52	0.25		云顶高度/大气剖面
34	13.635	0.3	3.76	0.25		
35	13.935	0.3	3.11	0.25		
36	14.235	0.3	2.08	0.35		

* (通道 8~16 提供的为 SNR-PFT 值)。

参考: Barnes 等(1998); Esaias 等(1998)。

(6) MIERIS

通 道	波 长 (nm)	波段宽度 (nm)	* LST ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR-PFT	NE Δ L
1	412.5	10	47.9	1871	0.0256
2	442.5	10	41.9	1650	0.0254
3	490	10	31.2	1418	0.0220
4	510	10	23.7	1222	0.0194
5	560	10	18.5	1156	0.0160
6	620	10	12.0	863	0.0139
7	665	10	9.2	708	0.0130
8	681.25	7.5	8.3	589	0.0141
9	709	9	6.9	631	0.0111
10	753.75	7.5			
11	760	2.5			
12	779	14	4.9	628	0.0078
13	870	20	3.2	457	0.0070
14	890	10			
15	900	10			

* 典型 L 值(太阳天顶角 60°; 能见度 23 km; 海洋型气溶胶; 臭氧 350 DU, 水气 2 gcm^{-2} ; 星下点 58.6°N, 天数 80; 象元处于视角中心; 叶绿素浓度 0.3 mgm^{-3})。NE Δ L 为下降空间分辨率模式($1.2 \text{ km} \times 1.2 \text{ km}$)等效噪声辐射率通道 10 和 11 为 O_2 波段; 通道 14 和 15 为 H_2O 植被波段。

(7) GLI

通道	波长 (nm)	波段宽度 (nm)	LST ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	LMX		SNR:SPC	SNR:EM	NE Δ L:EM
				海洋	陆地/大气			
				($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)			
1	380	10	59	—	365	600	779	0.0757
2	400	10	70	139	—	800	1373	0.0510
3	412	10	65	130	—	800	1453	0.0447
4	443	10	54	109	560	800	994	0.0543
5	460	10	54	108	624	800	988	0.0547
6	490	10	43	86	—	800	1603	0.0268
7	520	10	31	64	539	600	706	0.0439
8	545	10	28	56	549	600	637	0.0440
9	565	10	23	47	—	800	1262	0.0182
10	625	10	17	33	—	800	996	0.0171
11	666	10	13	26	—	800	863	0.0151
12	680	10	12	24	—	800	853	0.0141
13	678	10	12	—	438	200	260	0.0462
14	710	10	10	18	—	700	826	0.0121
15	710	10	10	—	311	250	300	0.0333
16	749	10	7	14	—	550	684	0.0102
17	763	8	6	—	350	130	164	0.0366
18	865	20	5	9	—	450	739	0.0068
19	865	10	5	—	304	130	151	0.0331
20	460	70	36	—	624	200	284	0.1268
21	545	50	25	—	549	150	221	0.1131
22	660	60	14	—	150	100	202	0.0693
23	825	110	21	—	257	140	334	0.0629
24	1050	20	8	—	203	300	359	0.0223
25	1135	70	8	—	200	350	366	0.0219
26	1240	20	5.4	—	138	70	355	0.0152
27	1380	40	1.5	—	94	120	149	0.0101
28	1640	200	5	—	69	109	268	0.0187
29	2210	220	1.3	—	30	105	129	0.0101
通道	波长 (μm)	波段宽度 (μm)	TST (K)	TLW (K)	NE Δ T:SPC		NE Δ T:EM	
					TST	TLW	TST	TLW
					(K)	(K)	(K)	(K)
30	3.715	0.33	300	250	0.15	1.8	0.15	1.4100
31	6.7	0.5	300	200	0.1	1.5	0.07	1.1500
32	7.3	0.5	300	200	0.1	1	0.07	0.8500

续 表

通道	波长 (μm)	波段宽度 (μm)	TST (K)	TLW (K)	NE Δ T:SPC		NE Δ T:EM	
					TST (K)	TLW (K)	TST (K)	TLW (K)
33	7.5	0.5	300	200	0.1	1	0.07	0.7600
34	8.6	0.5	300	180	0.1	0.5	0.03	0.4900
35	10.8	1	300	180	0.1	0.5	0.06	0.4300
36	12	1	300	180	0.1	0.5	0.09	0.4800

表中:LST:标准输入辐射率; LMX:最大辐射率; SNR:SPC:信噪比:技术性能; SNR:EM:信噪比:工程技术模式测试

值; TST:标准输入温度; TLW:低电平输入温度; NE Δ L: PFT: 噪声等效 δ 辐射率 = 标准输入温度/信噪比。

参考: ADEOS-II/GLI CDR 文件(日文), 1997 年 1 月。

(8) S-GLI

通道	波长 (nm)	波段宽度 (nm)	LST ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	LMX ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR:SPC	NE Δ L:SPC
海洋水色成像仪(OCI)						
1	412	10	65	130	800	0.0813
2	443	10	54	109	800	0.0675
3	490	10	43	86	800	0.0538
4	520	20	31	64	600	0.0517
5	565	20	23	47	800	0.0288
6	625	20	17	33	800	0.0213
7	680	20	12	24	1000	0.0120
8	710	20	7	14	1000	0.0070
9	749	20	7	14	800	0.0088
10	865	20	5	9	800	0.0063
大气与陆地成像仪(ALI)						
1	380	10	60	400	500	0.1200
2	400	10	60	400	500	0.1200
3	443	10	50	600	800	0.0625
4	460	10	50	650	800	0.0625
5	545	20	30	550	600	0.0500
6	678	20	23	450	400	0.0575
7	710	20	20	350	400	0.0500
8	763	8	6	350	400	0.0150
9	865	20	5	304	400	0.0125
10	460	50	40	624	400	0.1000(250 m)
11	545	50	25	549	400	0.0625(250 m)
12	678	50	15	250	400	0.0375(250 m)

续 表

通道	波长 (nm)	波段宽度 (nm)	LST ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{\dagger}\mu\text{m}^{-1}$)	LMX ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{\dagger}\mu\text{m}^{-1}$)	SNR:SPC	NE Δ L:SPC	
13	865	50	20	257	400	0.0500(250 m)	
14	940	20	10	200	400	0.0250(250 m)	
15	1050	20	8	203	400	0.0200(250 m)	
红外成像仪(IRI)							
1	1.24	0.02	5	138	400	0.0125	
2	1.38	0.04	1.5	94	400	0.0038	
3	1.64	0.2	5	69	400	0.0125(250 m)	
4	2.21	0.1	1.3	30	40	0.0033(250 m)	
NE Δ T:SPC							
	(μm)	(μm)	TST	TLW	TST	TLW	TMX
1	3.7	0.3	300	250	0.1	0.5	340
2	6.7	0.5	300	200	0.1	0.5	340
3	7.3	0.5	300	200	0.1	0.5	340
4	7.4	0.5	300	200	0.1	0.5	340
5	8.6	0.5	300	180	0.1	0.5	340
6	10.8	0.7	300	180	0.1	0.5	340
7	12	0.7	300	180	0.1	0.5	340

表中:LST:标准输入辐射率; LMX:最大辐射率; SNR:SPC:信噪比:技术性能; TST:标准输入温度; TLW:低电平输入温度; NE Δ L:PFT; 噪声等效 δ 辐射率=标准输入辐射率/信噪比。

参考:T.Nakajima(私人通信)。

参考文献

- Aas, E. 1987. Two-stream irradiance model for deep waters. *Appl. Optics*, **26**: 2095~2101.
- Ackelson, S. G., Balch, W. M. and Holligan, P. M. 1994. Response of water-leaving radiance to particulate calcite and chlorophyll-*a* concentrations: A model for Gulf of Maine coccolithophore blooms. *J. Geophys. Res.*, **99**: 7483~7499.
- Babin, M., Morel, A. and Gentili, B. 1996. Remote sensing of sea surface sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll-*a* fluorescence. *Int. J. Remote Sensing*, **17**: 2417~2448.
- Balch, W. M., Kilpatrick, K. A., Holligan, P. M. and Trees, C. 1996. The 1991 coccolithophore bloom in the central north Atlantic. I: Optical properties and factors affecting their distribution. *Limnol. Oceanogr.*, **41**: 1669~1683.
- Barnes, W. L., Pagano, T. S. and Salomonson, V. V. 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AMI. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **36**: 1088~1100.
- Bidigare, R. R., Morrow, J. H. and Kiefer, D. A. 1989. Derivative analysis of spectral absorption by photosynthetic pigments in the western Sargasso Sea. *J. Mar. Res.*, **47**: 323~341.
- Bricaud, A. and Morel, A. 1987. Atmospheric corrections and interpretation of marine radiances in CZCS imagery: use of a reflectance model. *Oceanol. Acta, Symposium Proceedings*: 33~50.
- Bricaud, A. and Stramski, D. 1990. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 562~583.
- Bricaud, A., Babin, M., Morel, A. and Claustre, H. 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.*, **100**: 13 321~13 332.
- Brown, C. and Yoder, J. A. 1994. Coccolithophorid blooms in the global ocean. *J. Geophys. Res.*, **99**: 7467~7482.
- Chisholm, S. W., Olson, R. J., Zettler, E. R., Goericke, R., Waterbury, J. B. and Welschmeyer, W. A. 1988. A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature*, **334**: 340~343.
- Cleveland, J. S. 1995. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll-*a* concentration. *J. Geophys. Res.*, **100**: 13 333~13 344.
- Dowell, M. and Hoepffner, N. 1997. Reflectance modeling in case II waters: contamination of the elastic signal by CDOM fluorescence. *Proc. International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour* (Berlin, 28~30 April 1997).
- Esaias, W. E., Abbott, M. R., Barton, I., Brown, O. B., Campbell, J. W., Carder, K. L., Clark, D. K., Evans, R. L., Hodge, E. E., Gordon, H. R., Balch, W. P., Letelier, R., Minnet, P. J. 1998. An Overview of MODIS capabilities for Ocean Science observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **36**: 1250~1265.
- Fischer, J. 1985. On the information content of multispectral radiance measurements over an ocean. *Int. J. Remote Sensing*, **6**: 773~786.
- Fischer, J., Doerffer, R. and Grassl, H. 1986. Factor analysis of multispectral radiances over coastal and open ocean water based on radiative transfer calculations. *Appl. Optics*, **25**: 448~456.

- Frouin, R., Schwindling, M. and Deschamps, P-Y. 1996. Spectral reflectance of sea foam in the visible and near infrared: In situ measurements and remote sensing implications and aerosols. *J. Geophys. Res.*, **101**: 14 361-14 371.
- Garver, S. A., Siegel, D. A. and Mitchell B.G. 1994. Variability in near-surface particulate absorption spectra: What can a satellite ocean colour imager see? *Limnol. Oceanogr.*, **39**: 1349-1367.
- Gege, P. 1997. Characterization of the phytoplankton in Lake Constance for classification by remote sensing. *Arch. Hydrobiol.* In press.
- Gordon, H. R. 1979. Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation via chlorophyll-*a* fluorescence at 685 nm. *Appl. Optics*, **18**: 1161-1166.
- Gordon, H. R., Brown, O. B. and Jacobs, M. M. 1975. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat, homogeneous ocean. *Appl. Optics*, **14**: 417-427.
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S. and Clarke, D. K. 1988. A semianalytic radiance model of ocean colour. *J. Geophys. Res.*, **93**: 10 909-10 924.
- Gordon, H. R., 1997. Atmospheric correction of ocean colour imagery in the Earth Observing System era. *J. Geophys. Res.*, **102**: 17 081-17 106.
- Gower, J. F. R. and Borstad, G. 1981. Use of *in vivo* fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll-*a*. In: *Oceanography from Space*, J. F. R. Gower edit., New York Plenum Press, 329-338.
- Haltrin, V. I., Kattawar, G. W. and Weidemann, A. D. 1997. Modeling of elastic and inelastic scattering effects in ocean optics. In: *Ocean Optics XIII. Proc. SPIE*, **2963**: 597-602.
- Hawes, S. K., Carder, K. L. and Harvey, G. R. 1992. Quantum fluorescence efficiencies of fulvic and humic acids: effect on ocean colour and fluorometric detection. In: *Ocean Optics XI, Proc. SPIE*, **1750**: 212-223.
- Hoepffner, N. and Sathyendranath, S. 1991. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **73**: 11-23.
- Hoepffner, N. and Sathyendranath, S. 1992. Bio-optical characteristics of coastal waters: Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, **37**: 1660-1679.
- Hoepffner, N. and Sathyendranath, S. 1993. Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter. *J. Geophys. Res.*, **98**: 22 789-22 803.
- Kirk, J. T. O. 1981. Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationships between optical properties of, turbid yellow waters. *Aust. J. Freshwater Res.*, **32**: 517-532.
- Letelier, R.M. and Abbott, M.R. 1996. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Rem. Sens. Environ.*, **58**: 215-223.
- Lee, Z., Carder, K. L., Hawes, S. K., Steward, R. G., Peacock, T. G. and Davis, C. O. 1994. Model for the interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance. *Appl. Opt.*, **33**: 5721-5732.
- Mitchell, B. G. and Kiefer, D. A. 1988. Variability in pigment specific particulate fluorescence and absorption spectra in the north-eastern Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, (Part A), **35**: 665-689.
- Morel, A. and Prieur, L. 1977. Analysis of variations in ocean colour. *Limnol. Oceanogr.*, **22**: 709-722.
- Morel, A. and Bricaud, A., 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, (Part A), **28**: 1375-1393.

- Morel, A. 1988. Optical modeling of upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case 1 waters). *J. Geophys. Res.*, **93**: 10 749-10 768.
- Morel, A., Ahn, Y.-H., Partensky, F., Vaulot, D. and Claustre H. 1993. *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: A comparative study of their optical properties in relation to their size and pigmentation. *J. Mar. Res.*, **51**: 617-649.
- Morel, A. 1997. Consequences of a *Synechococcus* bloom upon the optical properties of oceanic (Case 1) waters. *Limnol. Oceanogr.*, **42**: In Press.
- Mueller, J. L. and Austin, R. W., 1995. Ocean Optics protocols for SeaWiFS validation. Revision 1. *NASA Tech. Memo.*, **Vol. 25**: 66.
- Neville, R. A. and Gower, J. F. R. 1977. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-*a* fluorescence. *J. Geophys. Res.*, **82**: 3487-3493.
- Roesler, C. S., Perry, M. J. and Carder K. L. 1989. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 1510-1523.
- Rothman, L. S., Gamache, R. R., Goldman, A., Brown, L. R., Toth, R. A., Pickett, H. M., Poynter, R. L., Flaud, J.-M., Camy-Peyret, C., Barbe, A., Husson, N., Rinsland, C. P. and Smith, A. H. 1987. The HITRAN database: 1986 edition. *Appl. Optics*, **26**: 4058-4097.
- Rothman, L. S., Gamache, R. R., Tipping, R. H., Rinsland, C. P. and Smith, M. A. 1992. The HITRAN molecular database: Editions of 1991 and 1992. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **48**: 469-507.
- Sathyendranath, S., Prieur, L. and Morel, A. 1989. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Int. J. Remote Sensing*, **10**: 1373-1394.
- Sathyendranath, S., Hoge, F. E., Platt, T. and Swift, R. N. 1994. Detection of phytoplankton pigments from ocean colour: improved algorithms. *Appl. Optics*, **33**: 1081-1089.
- Sathyendranath, S. and Platt, T. 1997. Analytic model of ocean colour. *Appl. Optics*, **36**: 2620-2629.
- Sosik H. M., Chisholm, S. W. and Olson R. J. 1989. Chlorophyll fluorescence from single cells: Interpretation of flow cytometric signals. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 1749-1761.
- Stavn, R. H. 1990. Raman scattering effects at the shorter wavelengths in clear ocean waters. In: *Ocean Optics X. Proc. SPIE*, **1302**: 94-100.
- Stavn, R. H. 1992. External factors and water Raman scattering in clear ocean waters: skylight, solar angle, and the air/water interface. In: *Ocean Optics XI. Proc. SPIE*, **1750**: 138-148.
- Subramaniam, A. and Carpenter, E. J. 1994. An empirically derived protocol for the detection of blooms of the marine cyanobacterium *Trichodesmium* using CZCS imagery. *Int. J. Remote Sensing*, **15**: 1559-1569.
- Sugihara S., Kishino, M. and Okami, N. 1984. Contribution of Raman scattering to upward irradiance in the sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**: 397-403.
- Viollier, M. and Sturm, B. 1984. CZCS data analysis in turbid coastal water, *J. Geophys. Res.*, **89**: 4977-4985.
- Yentsch, C. S. and Phinney, D. A. 1985. Spectral fluorescence: an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations. *J. Plankt. Res.*, **7**: 617-632.
- Wernand, M. R., Schimwell, S. J. and de Munk, J. C. 1997. A simple method of full spectrum reconstruction by a five-band approach for ocean colour applications. *Int. J. Remote Sensing* **18**: 1977-1986.

二、卫星海洋水色遥感现状 与计划:对于遥感器性能 互补的考虑

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)
报告之二,1999 年

摘 要

本报告解释海洋水色数据的利用,总结一类水体(开阔大洋)和二类水体(沿岸水域)全球尺度海洋水色业务遥感和科学遥感的技術要求,阐述几个同时在轨运行的、功能类似传感器的互补性问题。目的在于为各空间机构制订国际协调一致计划,以保持海洋水色数据的连续性提供必要的信息。

海洋水色数据的利用

现在我们认识到海洋水色数据的三大类科学应用。第一大类应用与海洋碳循环和海洋在气候变化中的作用有关。因此,各国政府和部门响应《京都议定书》具有深刻的意义。海洋水色遥感的主要目的是获得大范围的叶绿素色素——浮游植物生物量指数的数据。它是我们要以天气尺度测量的海洋生态系的最主要的特性。浮游植物通过光合作用消耗基本营养盐类中的二氧化碳。从全球尺度来看,海洋浮游植物在初级生产过程中每年消耗约 500 亿吨碳。

海洋气候研究的目的之一就是量化这一碳通量,认识碳通量如何受控制,为什么逐年都发生变化。这是国际地圈生物圈计划(IGBP)中海洋子计划的一项任务,海洋水色遥感在这些计划中起着不可替代的作用。它可作为海洋初级生产力计算方法的依据,还可以提供叶绿素场,作为海洋及其生态系耦合数值模式的初始化值并对结果予以验证。展望未来,遥感方法将用于像全球海洋观测系统(GOOS)一类地球观测计划,探测海洋生态系统的结构和功能,海洋生态系统是引起气候变化的各种力的源泉。

海洋水色数据的第二大类应用是为海洋生态系统发育与混合层物理过程之间的联系提供大范围的观测。因为浮游植物控制着大部分海洋的光学浑浊度,所以它也控制着在太阳影响下混合层增温的方式。混合层的物理模式包括因增温而引起的层化与因湍流而引起的层化侵蚀之间的平衡。光学浑浊度是这些模式的一个关键参数,海洋水色遥感可大范围提供这类参数。混合层模式主要是预报海表温度,这类预报对于海区,尤其是热带海区的天气预报至关重要。因此,海洋水色数据在诸如全球海洋数据同化实验(GODAE)等全球综合观测战略(IGOS)计划中是很重要的。在 GOOS 等地球观测计划中十分重要。

海洋水色数据的第三大类应用是包括渔业管理在内的海岸带管理。当今渔业科学的核心问题之一是:研究由于生态系统在大尺度环境变化中的波动而引起的生物资源量的波动范围。这是一个惟有海洋水色遥感提供海洋生态系统的时序资料才能解决的问题。现代生物海洋学的悲剧之一是:在世界范围的鱼类资源正在衰竭时,我们在讨论这些问题时却没有可以利用的海洋水色数据流。除渔业问题外,海洋水色数据在海岸带管理的其他许多方面都是很有价值的。例如监测有害藻类的旺发和沿海污染等。这方面的应用随着海岸带地区

人口压力的增大而显得更加重要。

覆盖的基本尺度

通常讨论的海洋水色数据有两种最基本的尺度,即全球尺度和局地尺度。

全球尺度(和地区)尺度数据的分辨率一般为 4~8 km。这类数据在有关全球碳循环问题的研究方面非常重要。因此,对解决《京都议定书》、IGBP 和 GOOS 等所涉及的一些问题都有价值。这类数据基本上是开阔海域或一类水体的数据。

局地尺度数据的分辨率一般为 1 km 或小于 1 km。这类数据对于沿岸水域或二类水体研究特别有用。全球海洋生态系统动力学(GLOBEC)、海岸带陆海相互作用(LOICZ)和有害藻类过量繁殖(HAB)等计划对这类数据也特别感兴趣。

上述两种基本尺度典型应用的技术要求各不相同,本报告将分别予以阐述。

主要使命类型

海洋水色遥感分类的另一种方式是根据使命类型。支持政府计划的业务使命(如支持天气预报中心的气象卫星)、科学研究使命(如 OCTS 和 SeaWiFS)和概念验证使命(CZCS)之间存在着最基本的差别。以上 3 种使命类型的技术要求各不相同,遥感使命规程必须考虑到这些差异。

全球尺度和局地尺度海洋水色遥感的科学要求需要近一段时期不间断的连续观测。至今,海洋水色遥感不存在业务使命,从一定意义上来看,编号已到 14 的 NOAA 系列卫星的海表温度遥感已成为一项业务。如本报告和其他报告(如 JGOFS 报告 20 号,1996)所论述的那样,全球连续观测是非常必要的。可以说,目前海洋水色遥感正处于从实验与科学使命过渡到业务化使命的逐渐成熟的阶段。

互补性

我们已经论述了开阔大洋和沿岸地带海洋水色测量的技术要求各不相同,因此,这两种测量的互补性必须分别予以考虑。

全球海洋观测的技术要求如下:(1) 全球空间覆盖,分辨率为 4~8 km;(2) 时间分辨率 3~5 d;(3) 设置最少波段:3 个可见光通道,2 个近红外通道,而且有足够的光谱分辨率和信噪比。

除时间分辨率外,OCTS、POLDER、SeaWiFS、MODIS-AM、MERIS、GLI 和 MODIS-PM 都可以满足上述技术要求。然而,现在没有任何一台遥感器自身能够或即将能够达到时间分辨率的要求。根据 OCTS 和 SeaWiFS 的经验,一台遥感器的分辨率受太阳耀斑和云覆盖的极大限制(由于 POLDER 具有多角度观测能力,太阳耀斑对它不成为问题)。据计算,上述任何一台遥感器(除 POLDER 外)在一个重复观测周期内完成的空间覆盖最多为 15%(Gregg 等 1998)。因此,有必要将不同卫星上的若干仪器的数据综合使用。利用 3 台仪器,每 4 天我们可以观测 60% 的全球海洋。

2000~2005 年,要达到全球海洋观测的时间分辨率技术要求,需要集成 GLI、POLDER、MODIS-AM 和 MERIS 的海洋水色数据才能完成。SeaWiFS 在这 5 年的前半期,可以提供数据,后半期则由 MODIS-PM 提供数据。这一时间安排已为防止发射的延

误和操作的失效,留有了充分的余地。在这一时期,我们还可以获得赤道过境不同时间的观测数据,例如 MERIS 在 10:00, MODIS-PM 在 13:30(上升点)。

沿海监测的技术要求正在取得进展,高光谱分辨率、高空间分辨率(0.1~0.5 km)和高时间分辨的综合要求是极难满足的。在 2000~2005 年期间,MODIS、MERIS 和 GLI 在沿海水域成像方面将取得重大进展,将达到二类水体在光谱与空间分辨率方面的多项技术要求。因此有可能开发出针对以上遥感器的新的水色要素反演算法。例如,在浮游植物丰富的水域,叶绿素 a 荧光(685nm 附近)的算法将提高常规叶绿素反演算法的反演精度。荧光算法对二类水体特别有帮助。因为常规叶绿素反演算法的精度在二类水体受到很大影响,需要不断地修订。为了开发、验证通用的二类水体算法,还必须搜集大量的现场观测数据。

2005 年以后,将为具有技术性能(包括轨道)互补的多用途遥感器成立协调定标、验证、产品制作和产品分发的任务组,向国际用户提供比非协调情况下单位成本更低的宝贵数据。要实现遥感器性能间真正的互补,各空间机构在任务的规划阶段就需要密切合作。显而易见,协调未来任务的最终责任落在各国空间机构身上,而不在国际水色协调工作组(IOCCG),IOCCG 愿意向各空间机构提供帮助,但是在开展详细计划活动的协调方面,它没有得到各空间机构的授权。IOCCG 目前的作用是提供咨询(例如此种形式和其他形式的报告),并随着空间机构计划的开展,就有关空间使命(如第 4 章列举的 2005 年时间段的使命)进行评估。随着空间机构计划的进展,IOCCG 将定期探讨这一重要的课题。

2005 年以后航天海洋水色遥感的目标是:更有效地提供地区和全球尺度的连续测量数据,水色数据在几何性能、光谱和时间性能等方面均有所改善。这些目标将提高开阔大洋和海岸带两类地区的地球物理参数的推导精度,增进人们对海岸带水生生态系统的认识,增强水质评价的能力,提高对特殊(和有毒)藻类过量繁殖的观测和定量分析水平。

第1章 前言

国际海洋水色协调工作组(IOCCG)的目的之一是:就有关现在和将来的水色遥感使命的技术问题向空间机构提供咨询。为此目的,IOCCG正在起草一系列报告,探讨水色技术及其应用发展过程中的关键问题。这些报告是IOCCG主持召开的技术讨论会的成果,参加讨论会的都是该领域的主要专家,会议由权威专家主持。

系列报告的第一个报告(IOCCG 1998)探讨开阔海域(一类水体)水色遥感的光谱最低技术要求,旨在确定将来所有卫星使命携带的遥感器的波段设置。

系列报告的第二个报告探讨一类水体^①和二类^②水体水色全球尺度的业务化遥感和科学遥感的不技术要求。本报告还讨论了一个以上性能类似的遥感器同时在轨运行时所出现的性能互补问题。目的是为空间机构提供必要的信息,以便它们为未来不间断的多源水色数据的利用制订更好的国际协调计划。我们为了解决遥感器性能互补问题以及制订和集成符合洋盆和海岸带用户要求的全球水色观测计划,提供一些原则和技术依据,并将这些原则和技术依据应用于2005年前发射的遥感器分析之中。扼要阐述了2005年以后观测战略的发展趋势(在全球集成使命的开发方面,存在着国际合作机遇),并建议将这一战略的执行视为是一项紧迫的任务。

鉴于本报告的目的,我们将水色遥感使命分为三大类:业务化使命、科学研究使命和概念验证(技术验证)使命。未来商业化使命可能具有如业务化或科研使命类似的技术要求,但是本报告没有进行具体的考虑。业务化使命(如支持天气预报中心的各类气象卫星计划)的主要目的是向政府部门提供数据。科学研究使命(如SeaWiFS和OCTS)支持如联合全球海洋通量研究(JGOFS)等科学计划。空间机构利用概念验证使命,验证新技术或新能力。有些使命的用途是多样化的[例如业务卫星搭载的改进型甚高分辨率辐射率(AVHRR),它提供的数据也广泛应用于科学研究]。但是,技术要求一般取决于用户的要求。

本报告的另一动机是起草全球综合观测战略(IGOS)文件。IGOS的目的是获取丰富的地球物理变量,这与IOCCG已经制订的水色目标是一致的。目标之一是,通过国际合作,确定各种使命的组合方式,以求以最优的性价比,满足连续全球观测及时间覆盖率要求。

在海洋生物学领域内,IOCCG已考虑到IGOS的利益,需要制订一项保证数据长期提供的策略,以确保提供内部一致、空间覆盖完整、时间连续的水色数据。

① 一类水体指水体光学性质由浮游植物及其有关物质(如碎屑、异养细菌、较大异养生物和土生黄色物质)所决定的水体。

② 二类水体指水体光学性质由再悬浮泥沙、陆源颗粒、陆源黄色物质或源自人类的其他物质(这些物质不随浮游植物浓度的变化而变化)所决定的水体。

本报告的基本结论是:仅仅一颗卫星不可能满足上述所有的要求,多颗卫星是必要的。而且,正如本报告的后一部分所论述的,需要多颗卫星同一时间在轨运行,才能提供满足不同时间尺度应用要求的全球覆盖。密切的国际合作和协调也是完全必要的。正是本着这一精神,JOCCG 才得以诞生。

第2章 海洋水色数据的应用

卫星海洋水色数据的应用可分为三大类:(1) 海洋碳通量的定量研究,认识碳通量如何受控制及为什么逐年发生变化;(2) 海洋生态系统发育与混合层物理特性之间相联系的天气尺度观测;(3) 海岸带的科学分析和管理,包括渔业管理。第一大类应用通常涉及海盆尺度的分析和模拟,第二大类应用强调海盆至全球尺度,第三大类应用的重点是局地地区尺度。

2.1 海洋碳通量

卫星导出的洋盆至全球尺度浮游植物叶绿素场的基本用户是全球变化计划,尤其是像 JGOFS 这类与海洋生物地球化学过程及其与全球碳循环密切相关的计划。这些计划需要长期数据集(包括卫星数据集),定量研究像厄尔尼诺等周期性气候现象的影响,并使之与人类活动对海洋环境(包括气候长期变化)的周期变化影响区分开来。

生物过程通过两种基本方式影响海-气 CO_2 净通量。首先,通过光合作用吸收表层水中 CO_2 ,将它转换为有机碳,最初固定在浮游植物(微型植物)和其他颗粒物内。其次,在水体表层内生成的大量有机颗粒最终经海洋主温跃层发生沉降。沉降颗粒按密度垂直梯度和 CO_2 浓度的不同而吸收碳。这种“生物泵”的长期作用是造成深水层总的 CO_2 (TCO_2 , 结构为 $\text{CO}_2 + \text{CO}_3 + \text{HCO}_3$) 浓度比表层水高得多的基本原因之一。最近的模式研究表明,生物和物理过程对于确定 21 世纪海洋 CO_2 吸收及其与全球变暖的相关性相当重要。

现在卫星海洋水色遥感器已成为测定浮游植物叶绿素 a 洋盆至全球分布的标准(实际上是惟一的)工具。海洋初级生产量(植物对 CO_2 的吸收)不能直接从空间测量,但是它可以根据叶绿素 a 的浓度进行计算。模式研究表明,全球生产力计算对输入的表层叶绿素场非常灵敏(Platt 和 Sathyendranath 1998; Behrenfeld 和 Falkowsk 1997; Field 等 1998)。因此,卫星水色图像对于海洋初级生产力的全球分布平均量和随时间的变化量的准确计算十分重要。最近基于卫星的海洋与陆地初级生产量的估算表明,它们对全球生产力是同等重要的(Field 等 1998)。

2.2 海洋生物学与上层海洋过程

浮游植物和其他颗粒吸收海洋上层的热量,在某些情况下,它们是海洋热收支平衡的一个重要项。水色图像已用于海洋上层热通量计算。在阿拉伯海(Sathyendranath 等 1991)和赤道太平洋(Lewis 等 1990)等海区,这一新方法使计算的热通量以及海洋上层热垂直分布的差异十分明显。水色图像是定期获得全球生物信息的惟一来源,因此,它也是验证根据地区至全球尺度数值模式预报浮游植物分布所能使用的少数信息源之一。为了提高海洋模拟

的预报能力,卫星推导的叶绿素场通过数据内插和结合的方法,能直接同化到数值模式,早期的结果是令人鼓舞的(Hofmann 和 Lascara 1998)。

水色图像还直接用来观测气候变化及其大尺度现象(如厄尔尼诺)对浮游植物叶绿素洋盆尺度分布的影响(Fiedler 1984;Feldman 等 1984)。卫星的这一能力为只依据少数测站的现场观测进行海洋现象详尽解释提供了广阔的前景,因此可提高现场观测的水平。1997~1998 年的厄尔尼诺现象探测给我们提供了一个良好的范例,表明多用途卫星水色遥感的必要性,以及认识遥感器信息如何相关的重要性。在 OCTS 仍在工作时发生了强烈的厄尔尼诺,然而,北美洲感受到的最大影响发生在 OCTS 失效之后,SeaWiFS 开始搜集数据之前。所以,厄尔尼诺对太平洋和其他洋盆表层叶绿素场可能影响的解释和量化需要有两种不同的卫星遥感器。由于人类活动继续在改变着环境,某些影响利用今后 10 年或十多年的卫星水色遥感器系列是能观测到的。例如,通过河流和大气,人类活动造成陆地氮(海洋中生产量限制营养盐类)的输运是海洋中新生氮的一个重要来源(Cornell 等 1995)。十多年以后,海洋的这一氮通量对沿岸和开阔海域浮游植物生产力和生物量就会产生显著影响。

2.3 海岸带的科学分析和管理

海岸带传统上是重要经济活动、贸易往来和人类居住的中心。日益增加的上述活动给旅游、农业、工业和渔业等造成了很大的压力。深刻认识海岸带个别用户及自然事件对整个生态系统的影响,将有利于上述人类活动的综合规划和更好的协调。国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心计划之一——海岸带海陆相互作用计划于 1993 年制订,为未来海岸带可持续综合管理提供了可靠的科学依据(Pernetta 和 Milliman 1995)。

海岸带地区环境的日益恶化引起了人们的极大关注。因此,开发为沿岸水域资源和过程监测的科学应用与业务使用的综合系统十分必要。现在人们的共识是,地球观测数据,尤其是卫星水色数据在提供有关水质参数方面可起到关键作用。因此,可以利用足够时空分辨率的卫星数据,辅以常规取样技术,解决特殊的环境问题。下面是一些海岸带环境影响源的实例。

2.3.1 人类活动

城市与工业的扩展

经济和与之相关的社会发展对沿岸生态系统、海岸线及海底地貌等的影响是深刻的,有可能改变水体的理化特性和海洋生物的多样性。

旅游

旅游开发不加控制或规划失当,可能会严重地损害生态系统。例如,海洋水体受污染(生活污水未经充分处理)和海滩侵蚀(宾馆、饭店、旅游设施的建设)。旅游对于特殊的沿岸生态环境(如红树林和珊瑚礁等)也是有害的。

渔业

世界 98% 以上的海洋生物捕捞量来源于海岸线 300 km 以内的海域,一半以上的海洋生物总生产量也存在于这一地区。各国和国际上应有效地、可持续地保护和管理渔业资源,使鱼类资源不断满足全球营养的需求。

农业

已有记录表明,在许多沿海地区,沿岸水域营养盐含量急剧增加。这些营养盐的主要来源就是农业和大规模的畜牧业。农业大量使用化肥和农药,其中的化学物质被排放到流域盆地。水域富营养化刺激浮游植物的生长,在某些情况下,导致藻类过量繁殖和水体底层缺氧,海底动植物随之死亡。

2.3.2 自然事件

粘液水域

粘液现象的出现是由于海洋水体存在悬浮的胶质物质。此物质(由单细胞藻类在一定气象条件下分泌的多糖类构成)聚集,形成大面积的浮块,受局地风和海流的驱动而聚散。这一现象会对地区旅游业和渔业造成严重的影响。

有害藻类过量繁殖

世界大洋的许多地区,尤其是沿岸海域,经常出现有害藻类旺发现象。它是由特定气象作用力和营养盐场共同作用引发的。这些藻类意外的过量繁殖(正常的是每年“春季过量繁殖”)的有害影响与甲藻(所谓的赤潮生物)、硅藻或蓝藻细菌(*Cyanobacteria*)等各种生物分泌的毒素有关。

侵蚀与泥沙搬运

海岸线侵蚀或改变往往是由水体中泥沙含量变化所引起的。泥沙含量受泥沙输移和河流径流的影响。

2.3.3 监测技术

沿海资源可持续管理的必要性日益为人们所认识。因此,急需开发定量、高效而经济的方法来探测、认识沿海环境长期和短期的变化。

水质监测

目前,沿海水域的水质业务信息基本上由海表面测量(如浮标、船舶)而获得,这些信息直接用来监测海水状态,或者直接用于局地预测模式。该类信息的搜集成本很高,因此时间上和空间上均受到极大的限制。近些年来,科学调查证实了卫星水色测量资料具有提供水质信息的能力(Holligan 等 1983; Dupouy 等 1988; Tassan 1993; Sathyendranath 等 1997)。

渔业信息

最近,数据采集系统、分析方法和通讯技术的发展大大促进了渔业领域卫星数据的应用,可以近实时地支持日常的捕捞活动,可以用来分析鱼类种群 10 年的发展趋势。目前,已有几个国家开发成功专家系统,支持渔船在沿海水域的日常作业(Sugimoto 和 Tameishi 1992)。另一渔业问题是鱼类种群间隔若干年会发生衰退的现象,这已在世界范围内观测到。1994~1996 年,尽管采取了合理的管理措施,几个大渔场的重要鲱科经济鱼类资源仍急剧衰退。根据最近的研究(Pauly 和 Christensen 1995; Pauly 等 1998),鱼类资源 10 年趋势预测的失效,主要原因是低估了环境和远洋生态系统在恢复模式中的作用。

遥感器可获得重要的生态系统信息,如根据水色数据导出的浮游植物生物量和初级生产力,其尺度分辨率比船舶测量高得多。这类遥感器的问世,有可能增进人们对生态系统因子与鱼类资源恢复之间关系的认识。

第3章 卫星海洋水色遥感器的技术要求

科学研究与业务化卫星海洋水色遥感的技术条件必须包括以下几点:

- (1) 性能适当的遥感器,包括波段数量与配置、信噪比性能和满足覆盖率要求的刈幅要求等;
- (2) 定标计划,保证遥感器性能的稳定性,或确定遥感器发射后,在轨测量值与初始定标值之间的变化;
- (3) 适当的水色算法,反演制作科学家和管理者感兴趣的数据产品;
- (4) 真实性检验计划,验证数据产品实际上是否达到遥感预期目标;
- (5) 形成数据产品及时向用户分发的机制。

IOCCG 主要关注符合上述 5 项标准的业务化使命和科学使命,但同时还认识到,技术论证或概念验证计划是国家空间计划所关注的重点。水色遥感器对于技术论证计划具有特别的吸引力,因为遥感器制造和发射的难度相对较小,成本也较低。然而,NASA 的 CZCS 经验表明,在上述 5 项标准全部得到满足之前,技术论证或概念验证使命所获得数据的科学用途不大(CZCS 为一项概念验证使命,但是在发射之后约 10 年,NASA 才按科学研究数据集处理、存档和分发 CZCS 图像)。IOCCG 愿意帮助国家空间计划达到概念验证计划的目标,但它同时还关心这些使命与满足上述 5 项标准的使命不要发生混淆。因此,第 4 章的分析不包括技术论证或概念验证使命。

3.1 开阔大洋全球使命的技术要求

IOCCG 第一个报告(1998 年)探讨了开阔大洋水色遥感的最低技术要求,其要点扼要总结如下。

3.1.1 空间与时间技术要求

全球变化计划关注的时间尺度从季度至年际之间,空间尺度从较大的海洋涡漩至全球海洋。水色遥感器时空分辨率要求决定于海洋中生物过程发生的尺度以及实践的限制。7~10 d 的平均叶绿素场一般可以分辨像浮游植物过量繁殖一类的季节性生物现象。然而,因为“平均”需要至少两次的测量值,所以,达到全球海洋覆盖的适当时间分辨率是 3~5 d。

4 km 的象元分辨率是常用的全球覆盖率技术指标。开始时水色使命选择这一指标是为了与 AVHRR 遥感器导出的海表温度全球区域覆盖(GAC)产品保持一致,因为海表温度(SST)与叶绿素场的直接比较具有较大的科学价值。采用 4~5 km 象元分辨率的另一有力科学依据与数值模式的初始化值、真实性检验和数据同化程序相关。当前的全球涡漩分辨

模式常采用 20 km(0.2°)的网格间距,基本的统计表明,应以空间分辨率至少 2 倍于模式网格间距的要求,为这些模式采集初始值和真实性检验场(包括叶绿素 a 场)数据。因此,10 km 象元应是当前水色遥感器最低限度空间分辨率;若在不久的将来,模式网格分辨率提高到 0.1°(10 km),全球覆盖 4~5 km 象元分辨率是今后 10 年水色遥感器合理的技术要求。

3.1.2 光谱技术要求

光谱分辨率技术要求的依据源自有效地排除卫星所搜集到的总信号中大气影响的需要,以及根据海洋发出的光谱辐射率计算生物产品(主要是叶绿素)的准确表达。大气对大气顶(TOA)辐射率的贡献与吸收气体、分子散射及颗粒(气溶胶)散射和吸收有关。吸收气体和分子散射可通过光活跃大气量(如臭氧、水气、气压)分布的辅助信息和详尽的辐射传输计算等予以消除。气溶胶散射和吸收必须通过水色遥感器本身予以确定,因为目前在全球范围,尚无关于这类散射和吸收分布及性质的其他辅助信息。海洋水色理论及经验分析表明,在太阳光谱近红外区至少需要两个波段,才能提供水色反演所必需的气溶胶辐射特性参数。同时,为了简化与气溶胶特性有关的问题,有必要避免水气和氧吸收。因此,处于 855~890 nm 之间的波段及处于 744~757 nm 之间的另一波段被认为是大气订正需要的最少波段数(IOCCG 1998)。为了区分气溶胶和泡沫的影响以及将气溶胶特性更可靠地外推到可见光波段,有必要在 704~713 nm 之间以及 1 024~1 064 nm 之间增设波段。

表 1 生物变量高质量遥感观测所要求的最少波段数和波段带宽

中心波长(nm)	波段带宽(nm)	用 途
438~448	20	叶绿素(低-中含量)
485~495	20	叶绿素(中-高含量)
550~565	30	叶绿素(所有含量/泥沙浑浊度)
744~757	40	气溶胶特性
855~890	40	气溶胶特性

大气订正之后,为了测量关键海洋生物参数(主要是叶绿素及其他色素)的丰度和分布,遥感器需要增加波段。表 1 列出了达到这些目标所必须的最少 3 个波段(IOCCG 1998)。尽管 20 nm 波段宽度是可见光波段最低技术要求,但是为了获取色素成分的特定信息,10 nm 的波段带宽是理想的(IOCCG 1998)。

3.1.3 全球观测技术要求

如上所述,每 3~5 天的全球海洋观测对于支持全球海洋生物地球化学循环研究和气候研究的水色测量来说,是适当的目标。可是,可见光和近红外波段海表面遥感观测受太阳耀斑的影响,使生物产品的准确反演更为复杂;或者受云层影响,使海表面完全被掩盖。实际上,一颗水色卫星 1 天仅能观测 15%的海洋,4 天大约观测 40%(Gregg 和 Patt 1994)。多颗卫星短期内能极大地提高整个观测的覆盖率。两颗卫星可提高海洋日覆盖率约 20%,三颗卫星提高覆盖率约 23%(见图 1)。图 1 表示多颗卫星覆盖率比一颗卫星所达到的分别提高约 30%和 50%。与三颗卫星组网相比,增加更多卫星,覆盖率仅有稍许改善。如果对 4 天以上观测汇总合计,覆盖率会有相似改善,三颗卫星的海洋覆盖率最大约为 60%(Gregg

等 1998)。覆盖率的这些改善没有考虑轨道相位和节点交互选择,考虑到后两者能进一步提高综合覆盖率。鉴于海面观测的限制,为了取得认识全球范围生物过程作用所必需的大范围观测,最低技术要求是考虑同时在轨运行三颗全球覆盖卫星。明智的轨道选择可进一步提高覆盖率。

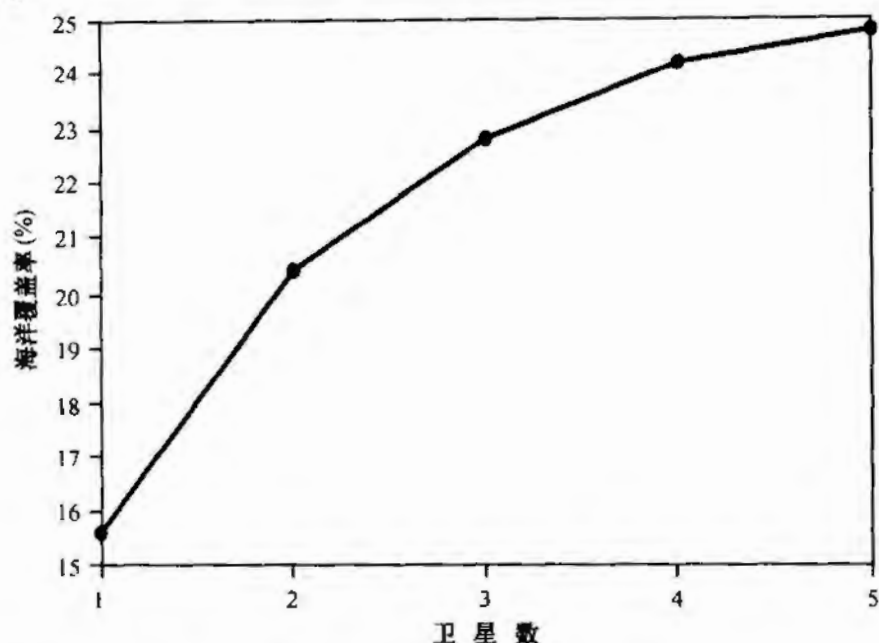


图1 相同设计的多颗卫星 1 天的综合海洋覆盖率(%)。卫星及通感器为 SeaWiFS 类型;正午降交点、705 km 高度、扫描宽度 45°,具有侧视能力。卫星轨道仅存在平均差异,这种差异设定产生综合覆盖率。在进行此类分析时,由于海面观测受太阳耀斑和云层掩盖影响,致使海洋覆盖率估算偏低。太阳耀斑的计算依据以相对于卫星轨道的观测角和太阳几何体制为函数的气候风速进行。太阳耀斑的临界值规定为 4 倍于 SeaWiFS 噪声等效 δ 辐射率(NE Δ L)。这是太阳耀斑污染极大估算值。然而,太阳耀斑能使气溶胶特性测量发生混乱,尤其是当气溶胶辐射特性极不同于太阳耀斑的特性时,它可以造成叶绿素反演的很大误差。在使用多颗卫星数据时,这些可能的误差需要予以确定,以便从融合数据集中消除这些误差。因此,太阳耀斑的此类估算是多使命应用的基础。云量根据全球 6 年的气候资料予以推导

3.2 海岸带应用的技术要求

第 2 章介绍的海岸带应用对水色遥感器的时空覆盖率、光谱分辨率和信噪比提出了很高的要求。遥感界目前尚无为沿岸水色应用专门设计的卫星遥感器使用经验。建议的大多数沿岸水色产品都是试验性的,至今的开发集中在航空遥感产品方面。在不久的将来,随着中分辨率成像光谱仪(MERIS)等遥感器的发射,这一形势将有新改观,此遥感器提供的光谱分辨率和空间分辨率是为海岸带产品的开发专门设计的。

3.2.1 时空技术要求

沿岸水域的有效成像一般要求比全球大洋所必需的时空覆盖率严格得多。因此,当代

卫星仅能部分满足沿岸要求。大陆架和大陆坡水域变化的一个重要来源,通常是风作用力引起的每隔 2~10 天发生的“事件”。因此,1 天的覆盖率是分辨“事件”时间尺度的最低要求,但是根据大部分地区云量平均覆盖统计,这一要求也不是经常可以达到的。潮汐能的耗散也是影响沿岸水域生物生产力的一个重要过程,而且其重要性一般与水深成反比。在世界许多地方,近岸和河口水域的混合和对流主要受潮流控制。为了直接观测潮汐信号,在 1 天之内需要进行多次观测,但是利用现代极轨、非定点卫星达到这一点是很困难的,甚至根本是不可能的。直接观测一个潮汐周期内的变化将需要新的技术和方法(见 3.4 节)。

除锋面地区外,中大陆架至外大陆架和大陆坡水域,1 km 象元覆盖十分合理。然而,1 km 象元对于近岸和河口水域就远远不够了。某些重要的应用,例如透明度小的水域海底成像要求象元分辨率为 10m 或 10m 以下。如此高的空间分辨率(适当的光谱和信噪比要求),尽管现在的卫星在理论上有可能达到,但是在可预见的将来,实际上则不可能做到[尽管机载遥感器(如 AVIRIS)能达到,甚至超过这一要求]。然而,0.1~0.5 km 象元的图像提供了大部分海湾和河口的有用科学信息,是下一个 10 年的现实目标(如 MERIS 象元将达到 0.3 km)。

3.2.2 光谱技术要求

沿岸水体或二类水体的性质受光学重要成分(尤其是叶绿素色素、黄色物质和悬浮泥沙)浓度独自变化的影响。这些成分(尤其是悬浮泥沙)的固有光学性质在时间和空间上还有变化。因此,简化的一类水体波段比值算法是不适用的,因为此算法的依据是:以叶绿素浓度为指数的水体仅存在一个参数。叶绿素和其他物质成分浓度也构成海岸带管理应用的重要产品,为了分别估算每种物质,还需要增加光谱信息。

IOCCG 报告之一(1998 年)探讨了分辨海岸带成分所需的遥感器光谱特性。该报告建议,一类水体在波段上最少在蓝光区(约 410 nm 处)增加一个光谱波段(见第 3 章),以区分在短波长呈指数增长的黄色物质吸收的影响与峰值处于 440 nm 的叶绿素吸收的影响。该报告还给出了进一步提高光谱分辨率的有力证据。由于各成分之间极强的非线性相互作用,研究人员越来越多地转向半经验分析或模式反演技术。以反射率模式拟合离水辐射率谱,同时估算水中成分的浓度。这些反演技术对于辐射率估算的观测误差和模式假设失效都很灵敏,并能使用增设的光谱波段减少或消除这些误差。

根据阳光在 680 nm 所激发的荧光测量值估算叶绿素的算法可避免水中其他成分对吸收和散射的不确定影响。这一技术利用了叶绿素在 685 nm 左右的被动荧光发射。荧光信号的高度按有关基线[利用发射峰两侧的两个通道(如 665 nm 和 710 nm)予以测定],或相对于邻近单波段(如 MODIS 的 667 nm)进行测量。荧光技术在沿岸水域高叶绿素浓度估算方面似乎更为实用(参见 3.3 节)。然而,新成果表明,荧光探测在寡营养水域也是可行的(Babin 等 1996)。

区分不同种类浮游植物色素,尤其是与有害藻类过量繁殖有关的色素算法的开发工作一直在进行。例如,利用 480~560 nm 范围藻青素(phycobilin)吸收峰可以区分蓝藻细菌大量繁殖。因此,这些方法在藻类过量繁殖浓度估算方面可能有更大的实际用途。

海水浑浊度也是海岸科学家和管理者所关注的。有人建议,可以使用 620 nm 处的一个波段来量化海水浑浊度。

未来的水色遥感器需要有更多的光谱波段,因为海岸带管理人员欲使用水色遥感器监测海底生境的覆盖和状态的变化。这一应用需要开发一些算法,分辨和区分水中成分和海底反射率对离水辐射率光谱的贡献。

浑浊沿岸水域的大气订正因 700 nm 以上非零离水辐射率而复杂化。气溶胶订正既需要在近红外区增设通道,也需要采用反演技术,同时估算水中成分和气溶胶。

下一代水色遥感器(如 MODIS、MERIS 和 GLI)为叶绿素荧光测量提供了 660~680 nm 两个波段或 660~680~710 nm 3 个波段(IOC CG 1998)。MERIS 和 GLI 提供了 620 nm 波段,用于悬浮泥沙测量,而且 GLI 几乎是一台超光谱遥感器,从 380 nm 至 680 nm 有 12 个 10 nm 光谱波段。MERIS 和 GLI 有 3 个近红外波段进行大气订正。拟定的新的高分辨率超光谱遥感器,如澳大利亚资源信息与环境卫星(ARIES)和海军地球制图观测者(NEMO)在整个可见光和近红外区将设置连续的 10 nm 或 20 nm 波段。

3.2.3 全球沿岸水域的观测技术要求

与开阔大洋的应用相比,沿岸应用所涉及的现象发生变化的时空尺度较短。同时,提高时空分辨率的需求最终导致巨大数据量而难以处理,遥感器与卫星性能达到满足沿岸水域水色测量全部要求的愿望目前尚无法实现。除非经费不成问题,否则同时实现高光谱分辨率、高空间分辨率(0.1~0.5 km)和高频度观测是特别难以达到的技术要求。然而,从 2000~2001 年开始, MERIS 和 GLI 同时在轨运行,沿岸水域成像应取得重大进展,因为这两台遥感器波段设置很宽,而且 MERIS 能获得 0.3 km 象元分辨率的数据。还有几种适用于不同应用的采样策略可供选择。

SeaWiFS、MODIS、MERIS 和 GLI 等宽刈幅水色遥感器提供约 1 km 空间分辨率,其潜在的全球覆盖时间尺度为数天(见第 4 章),适用于大陆架和沿海区尺度的过程研究。海陆相互作用及其在全球变化中作用的研究需要 1 km 分辨率全球(沿岸)产品(如 LOICZ 计划)。实际上,确定 1 km 分辨率与 SeaWiFS 局地覆盖(LAC)地面站的覆盖率,以及此分辨率条件下星上储存数据的后处理能力密切相关。MERIS 具有特别的吸引力,因为它在保持宽刈幅的同时,其空间分辨率提高到 0.3 km。

3.3 新应用对海洋水色数据的技术要求

水色卫星的技术要求显然与预见的的应用密切相关。迄今,我们主要探讨了利用光谱蓝绿光部分的浮游植物吸收率来反演沿岸水域和开阔大洋叶绿素 a 浓度的技术要求。然而,人们越来越清楚地认识到,水色数据还可用来监测浮游植物的其他性质。例如,正在制订计划监测光谱红光部分的浮游植物荧光(见 3.2.2 节)。显而易见,用于监测叶绿素荧光的遥感器除需要有蓝绿光波段外,还需要有红光波段。具有荧光探测能力的遥感器预计可提供浮游植物生物量相对较高水域的信息,无论此水域是一类水体,还是二类水体。因此,此类遥感器将跨两类应用。然而重要的是认识到,叶绿素 a 荧光监测不能代替叶绿素 a 浓度的测量,它仅提供辅助信息。在本节,我们探讨了具有荧光探测能力的遥感器如何为利用常规方法的叶绿素 a 浓度测量提供辅助信息。

常规水色遥感器已选择的波段是用来监测离水辐射率在蓝绿光谱范围的变化。这些变

化通常与浮游植物吸收率的变化和目前使用的将这些变化转换为浮游植物主要色素(叶绿素 a)的定量估算值的算法密切相关。计划在不久的将来发射的新型遥感器,如 MODIS、MERIS 和 GLI,将有 660~680 nm 两个波段,以红光部分监测浮游植物荧光(IOC CG 1998)。这仅是一次实验,在一定意义上,以上计划的基础是航空遥感实验(Gower 1980; Gower 和 Borstad 1990)。在实验中,根据叶绿素 a 浓度成功地进行了叶绿素荧光的标定,使荧光信号可以用来测量叶绿素 a 浓度。乍看起来,蓝绿光波段和红光波段的水色数据似乎产生相同的结果。然而,仔细的检验表明,这两种技术必然会产生不相同的信息,但是两者在很多方面可相互补充。现将两种技术之间的主要差异说明如下。

3.3.1 叶绿素浓度测量法与叶绿素荧光测量法之间的技术差异

在自然环境中,每单位叶绿素 a 浓度的浮游植物吸收和每单位叶绿素 a 浓度的荧光两者都易发生某些变化,所以,反演这些量的算法需要根据色素浓度的现场测量进行定标。若存在这样的定标,两种方法都可以用来监测浮游植物浓度。可是,人们可以预见到两种技术性能的如下差异。表 2 还列出了两种方法的比较。

- 浮游植物吸收以非线性方式影响离水辐射率。尽管荧光和叶绿素 a 之间的关系在局地尺度往往是线性的,但是有人也观测到了两者的非线性关系(Kishino 等 1984; Karabashev 1998),而且这种关系既不普遍,也不稳定。

表 2 叶绿素 a 吸收信号法与荧光信号法技术差异的比较

吸 收 信 号 法	荧 光 信 号 法
叶绿素 a 的非线性函数	经常是叶绿素 a 的线性函数
低叶绿素 a 浓度算法灵敏度最大	算法对高叶绿素 a 浓度最有效
易受有色可溶性有机物吸收的影响	算法受有色可溶性有机物吸收影响很小
蓝绿波段“穿透深度”大	红光波段“穿透深度”小
大气订正极为关键	大气订正不太关键
可潜在提供有关有色可溶性有机物和悬浮泥沙信息的副产品	信号明显,与其他物质无关

- 基于吸收的信号是叶绿素 a 的递减函数(在一定意义上蓝波段离水辐射率随浮游植物浓度的增加而下降),荧光随叶绿素 a 而增强。

- 与浮游植物吸收密切相关的算法对于低浮游植物浓度(例如浓度范围 $0.1 \sim 1 \text{ mgm}^{-3}$)条件下,色素浓度的变化非常灵敏,因为在此条件下,水体和浮游植物浓度对吸收过程起着关键作用。在这样的浓度,荧光信号是几乎不可探测的。另一方面,在高色素浓度情况下,荧光算法是最有效的。这时吸收算法的效率则较低,在蓝光波段,由于浮游植物的高吸收率,信号降到了探测极限以下。为了提请注意,必须指出,荧光信号在高叶绿素 a 浓度可能达到饱和(Kishino 等 1984)。

- 其他物质,如有色可溶性有机物(C-DOM)在蓝绿光谱波段也发生吸收,所以吸收算法可能受 C-DOM 的影响。在极端情况下,如二类水体中出现大量的光活跃物质时,藻类色素特征可能被淹没。相反,C-DOM 在红光波段的吸收可忽视不计,因此荧光算法不可能直接受 C-DOM 吸收的影响。然而,人们可以预测到一些间接影响,在这个意义上,蓝绿光谱段的 C-DOM 吸收将减少浮游植物吸收的光量,因此也减少了每单位叶绿素 a 浓度

的荧光量(Fischer 和 Kronfeld 1990)。然而,当荧光出现时,荧光信号的产生只能归于叶绿素 a,因此它不可能与任何其他信号发生混淆。

- 穿透深度在蓝绿光波段比在红光波段大得多,所以水柱的垂直结构对蓝绿谱段算法的影响比对荧光算法的影响大得多。Gorodon 和 McIluney(1975)定义“穿透深度”为产生 90% 离水辐射率的深度。蓝绿光波段的穿透深度一般比红光波段大 5 倍。换言之,人们可预测到,蓝绿光信号包含的水柱垂直结构信息比红光波段的荧光信号丰富得多。

- 大气订正算法通常利用近红外波段确定气溶胶衰减的光谱形式,并据此外推到可见光波段。这一外推的误差,在蓝绿光波段可能比在红光波段大得多,所以,以吸收率为依据的算法比荧光算法更容易在大气订正中引起误差。而且荧光探测所使用的差值技术采用了彼此非常接近的波长,因而其结果是荧光技术可能对大气订正的光谱误差不很灵敏。

- 因为 C-DOM 和悬浮泥沙等物质也影响蓝绿光波段的离水辐射率,所以只要有这类物质存在,对于正在开发的可应用于这一光谱范围的高级算法来说,在原理上也可获得这些物质的信息,荧光算法则不存在这样的可能性。

除了导致基于吸收和基于荧光的浮游植物信号差异的技术因素外,生理因素也能影响荧光信号。下节将较详细地探讨这一影响。

3.3.2 两种信号之间的生理差异

浮游植物吸收系数及其对离水辐射率的影响完全决定于水中浮游植物群落的理化特征,如浮游植物群落的色素互补性(包括叶绿素 a 各种附加色素的变化率、细胞的大小与形状、细胞内吸收色素的组织(即色素的充填效应)。由于荧光与被吸收能量密切相关,人们可以认为,浮游植物所有这些特征也影响浮游植物的荧光。而且荧光还与浮游植物细胞的生理特性密切相关。

例如,只有与浮游植物细胞光合体系 II 相关的色素对环境温度下的叶绿素 a 的荧光有贡献,其他所有色素都被吸收。这就是说,某些只具有光保护作用的色素对荧光没有贡献。而且在像蓝藻植物一类的浮游植物中,大部分叶绿素 a 主要与光合体系 I 有关,而与光合体系 II 无关,所以在环境温度下不会产生荧光(Prezelin 和 Boczar 1986; Johnsen 和 Sakshaug 1996)。光合体系 II 所受的光损害也减少了荧光的产生(Demmig - Adams 和 Adams 1992)。

被光合体系 I 所吸收的光在环境温度下对荧光没有贡献,除这一事实外,人们还认识到,被所谓光保护色素吸收的光达不到光合体系,所以不能对荧光有所贡献。一般而言,光保护色素在大洋表层比在下层更为重要,如果光保护色素的数量增长,那么蓝绿光波段的浮游植物吸收率也上升,而荧光则没有相应的增长。

人们一定要明白,荧光只是光子被吸收的三种可选择的途径之一。一旦被吸收,光子可能参与光合作用,并对储藏的化学能有所贡献,或者光子能量以“热”或荧光的形式耗散掉。这些过程的量子产生量是不固定的(Kiefer 和 Reynolds 1992; Babin 等 1996)。现已知,荧光的量子产生量实际上经历着昼日变化(Loftus 和 Seliger 1975; Abbott 等 1982)。营养盐限制还可能间接影响荧光产量(Loftus 和 Seliger 1975; Maerker 和 Szeikielda 1976; Greene 等 1992)。尽管现在公认,荧光信号是多变的,而且其解释是复杂的,但仍存在每单位色素浓度和每单位吸收能量的荧光产量的变化,并与光合作用率参数呈逆相关,Topliss 和 Platt (1986)证实了这一点。因此,如果将遥感可探测的基于吸收的信号和基于荧光的信号按独

立信息予以处理,那么,人们就能获得有价值的大洋天气尺度的初级生产率信息。然而,卫星的这一应用仍有待于验证。

总之,即使荧光信号按叶绿素浓度很难予以解释,并难以定量化,但人们一定要明白,这是从许多沿岸水域二类水体浮游植物中得到的惟一可用信息,我们一定要学会最好地加以利用。这是一个研究活跃的领域(Letelier 和 Abbott 1996)。最初,一定要将荧光产品视为研究产品,这与现在被视为业务化产品的蓝绿光谱算法的情形正好相反。

3.3.3 数据融合的重要性

由于两种技术的性能互不相同,因此人们期待着,在荧光算法的性能最糟时,基于吸收的算法的性能最好,反之也一样;在这一意义上两种技术可相互补充。而且在两种技术相互结合使用时,有可能提取有关浮游植物种群光合作用能力之外的重要信息。反过来,这一信息可用于初级生产力模式。因此,在讨论卫星水色使命的互补性时,具有荧光探测能力的卫星和不具备该能力的卫星不能同等对待,这一点很重要。进而,在探讨水色数据融合时,利用浮游植物吸收和浮游植物荧光数据测定的叶绿素 a 浓度不应该融合,因为它们并不等同;这些反演提取的量的精度和准确度不相同,而对观测资料的解释也可能不相同。

叶绿素 a 浓度反演技术和叶绿素 a 荧光反演技术差异的讨论仅仅解释了不同的水色卫星具有不同的技术能力。除监测叶绿素 a 荧光的工作之外,现在还正在开展利用超光谱水色数据的工作(详见 3.4.2 节),以提取有关浮游植物更丰富的信息,例如有关异常(或有害)藻类过量繁殖的信息。当然不可否认,大部分这类工作仍处于研究和发展阶段。在水色界现在存在一种普遍的认识,即水色技术的潜力尚未充分挖掘出来,进一步的调查研究应有序开展。其结果是:在越来越多的水色数据的试验应用进入业务化阶段的同时,概念验证应用也正在开展并进行试验。为后一类应用而设计的遥感器一般更为先进,人们期待着,先进技术的回报将是双重性的:首先,反演标准产品(如叶绿素 a 浓度)的精度有所提高;其次,可获得副产品,如浮游植物荧光。因此重要的是,所有水色卫星彼此不应视为是完全相同的。相反,在讨论卫星的互补性时,我们还应该考虑某一卫星的特定能力是否与其他卫星的能力匹配,正在考虑的卫星产品彼此是否真正类似或相同。

3.4 海洋水色遥感新技术

海洋水色数据新的、正在出现的应用与获取水色数据的新技术密切相关。这包括地球同步轨道成像仪和超光谱成像仪。

3.4.1 地球同步轨道成像仪

NASA 和 NOAA 在 1999 年 3 月论证在地球同步轨道业务环境卫星(GOES-N)的同步轨道上飞行海洋水色成像仪(特殊事件成像仪,SEI)的可能性,暂定发射时间是 2002 年。SEI 包括 10~12 个可见光至近红外波段,象元分辨率 0.3 km,覆盖范围 300 km×300 km。该仪器可为一个研究区提供达到 SeaWiFS 质量的观测资料,每 30 min 成像一次。主要应用如下:

- 测定风暴和潮汐混合对浮游植物种群的影响;

- 监测河口羽状流和潮汐锋中的生物和非生物物质;
- 跟踪有害物质(如溢油和有毒藻类过量繁殖)。

该类型仪器是为极专门的应用而设计的,它不可能像极轨太阳同步卫星上的仪器那样,提供常规的全球覆盖。然而,地球同步轨道卫星上的一台特殊事件成像仪在一天之内可提供许多地点的多次观测,而多台(如3台)该类遥感器则能定期观测南纬与北纬 60° 之间的全球沿岸水域。

3.4.2 超光谱成像仪

如前面(3.2节和3.3节)所指出的那样,海洋水色数据正在出现的应用需要超光谱成像仪。美国海军的NEMO卫星是一颗集军用、商用及其他应用于一体的超光谱遥感卫星。NEMO计划在2000~2001年发射。超光谱成像仪像底点分辨率为 $30\sim 60\text{ m}$,可进行 $400\sim 2\,500\text{ nm}$ 波段范围的光谱测量,光谱分辨率为 10 nm 。尽管研究区的地点并不确定,但是以单一工作模式工作时,仅仅数量有限的研究区可以成像(约50个 $200\text{ km}\times 50\text{ km}$ 的研究区)。该仪器能定向观测,优先研究区的重访时间可缩短到2.5 d。该仪器的数据政策目前还不清楚。海岸科学家和管理人员对该仪器图像抱有特别的兴趣,对河口、海湾和内陆水域图像感兴趣的科学家也如此。在以下网址可查到其他详细信息:<http://nemo.nrl.navy.mil/public/concept.html>。

澳大利亚ARIES计划预计在2000年发射一台高空间分辨率超光谱遥感器进入地球低轨道。这颗卫星发射后将进入 500 km 高度太阳同步极地轨道,遥感器主要应用于环境和矿产,在 $400\sim 1\,100\text{ nm}$ (可见光与近红外)之间分32个连续波段,在短波红外($2\,000\sim 2\,500\text{ nm}$)也有32个连续波段,另加一个全色波段。该光谱仪的空间分辨率为天底点 30 m ,全色波段分辨率为 10 m ,地面刈幅为 15 km 。该遥感器还能垂直倾斜 30° (沿刈幅),重复周期为7 d。仪器 600 nm 信噪比大于600:1,反照率30%, 45° 纬度太阳角为 60° 。该卫星计划和遥感器性能详细资料可在以下网址查到:<http://www.cossa.csiro.au/ARIES>。

3.5 满足技术要求

全球开阔海水色测量的技术要求已经确定,在不久的将来计划发射的卫星将满足2000~2005年这段时间的要求(见第4章)。所不同的是,沿岸水域的海洋水色测量远比开阔海域复杂,满足全球沿岸海域所有要求的使命至今尚未制订出来。然而,预计在2005年之前发射的某些水色卫星遥感器为沿海产品的开发、测试和应用提供了令人鼓舞的机会。在这些遥感器中,MERIS由于高光谱分辨率和 0.3 km 的空间分辨率,可主要用于沿海产品的开发。二类水体中黄色物质、叶绿素和悬浮泥沙都是特定的MERIS产品。

概念验证计划为2005年以后沿岸成像提供了新的选择。利用像ARIES、NEMO和SEI等新遥感器的高空间和时间分辨率和(或)高光谱分辨率,开发海岸带系列新产品及其应用,这种潜在可能性是存在的。若这些产品能及时分发,且成本效率比较高的话,那么,这些产品有可能为沿海环境管理带来变革。人们可以预测,未来业务化应用将是极轨卫星(可能具有定点测量能力)和地球同步轨道卫星相结合,以合理成本满足沿海用户众多需求(假定空间机构之间会开展合作与协调)。

第4章 对2005年以前现有的和已规划遥感器的评估

4.1 对满足最低技术要求的遥感器的评估

在探讨业务化水色遥感器最低技术要求时,我们根据 IOCCG 报告之一(1998 年)建议的光谱波段组,首先考虑了现有的和拟定的宽刈幅水色遥感器的光谱波段特性。表 3 所列的所有遥感器包含了 IOCCG 报告之一所提出的最少可见光波段组(440, 490, 560 nm),许多遥感器包含 412 nm 处的增加(选择)波段。然而请注意,如目前所规定的那样,海洋水色成像仪(OCI)和海洋扫描多光谱成像仪(OSMI)不包含用于大气气溶胶订正的两个最少的特定近红外波段(OSMI 为成像光谱仪,波段可选择,它可能改变基本波段组)。

其他遥感器都能满足最低光谱波段的要求。然而表 3 表明,在各遥感器之间,在精确的中心波长和每个标准波段的带通方面都存在很大的变化。这些变化反映了遥感器设计、要求的信噪比(SNR)和避开大气吸收区等方面的差异。

表 3 根据 IOCCG 报告之一(1988 年)建议的一类水体最低波段要求,现有的和拟定的宽刈幅水色扫描仪光谱波段中心波长(nm)和带通[在半最大值的全带宽(FWHM), nm]

IOCCG 波段号	SeaWiFS	MODIS	OCM	MERIS	OCI	OSMI	GLI	POLDER-2
1(865 nm)	865/20	870/15	865/40	870/20	865/40	865/40	865/20	865/40
2(750 nm)	765/20	748/10	765/40	779/14			749/10	763/10
3(710 nm)				709/9			710/10	
4(560 nm)	555/20	551/10	555/20	560/10	555/20	555/20	565/20	565/20
5(490 nm)	490/20	488/10	490/20	490/10	490/20	490/20	490/10	490/20
6(440 nm)	443/20	443/10	443/20	442.5/10	443/20	443/20	443/10	443/20
7(410 nm)	412/20	412/10	412/20	412.5/10			412/10	

4.2 全球覆盖

设想发射全部成功,到 2002 年,可能有多至 11 颗水色卫星投入运行。在这 11 颗卫星中,只有 SeaWiFS、MODIS-AM、MODIS-PM、MERIS、POLDER-2 和 GLI 符合第 3 章论述的开阔海科学使命的所有 5 项技术标准。OCM 和 OSMI 为全球概念验证使命,OCI 将仅覆盖亚热带纬度,SEI 和 NEMO 在沿岸水域水色成像方面是极不相同的概念。

图2表示 CZCS 之后,国际社会已发射或计划发射的 6 台全球水色遥感器(按发射顺序为 OCTS、SeaWiFS、MODIS-AM、MERIS、GLI 和 MODIS-PM)提供的假设全球覆盖。POLDER 未包括在内,因为它与 OCTS 共用相同的平台,还将与 GLI 共用同一个平台。还应指出,在遥感器发射顺序改变时,与图 2 中每一台遥感器有关的覆盖图形将有变化。图 2 所列的结果表明,由于太阳耀斑和云层掩盖的影响,需要有 3 颗卫星才能在 3~5 天内提供 60% 全球海洋覆盖。MODIS-AM、MERIS 和 GLI 在 1999~2002 年期间能满足 3 颗卫星的要求,SeaWiFS 则是这一期间初期的第四颗备用星,MODIS-PM 则是这一期间后期的备用星,并延伸到 2005 年。如果 POLDER 取代图 2 所示的 OCTS 和 GLI,由于仪器的较大刈幅和处理太阳耀斑的能力,海洋覆盖率将有所提高。如果 5 颗卫星中的 1 颗卫星达不到其

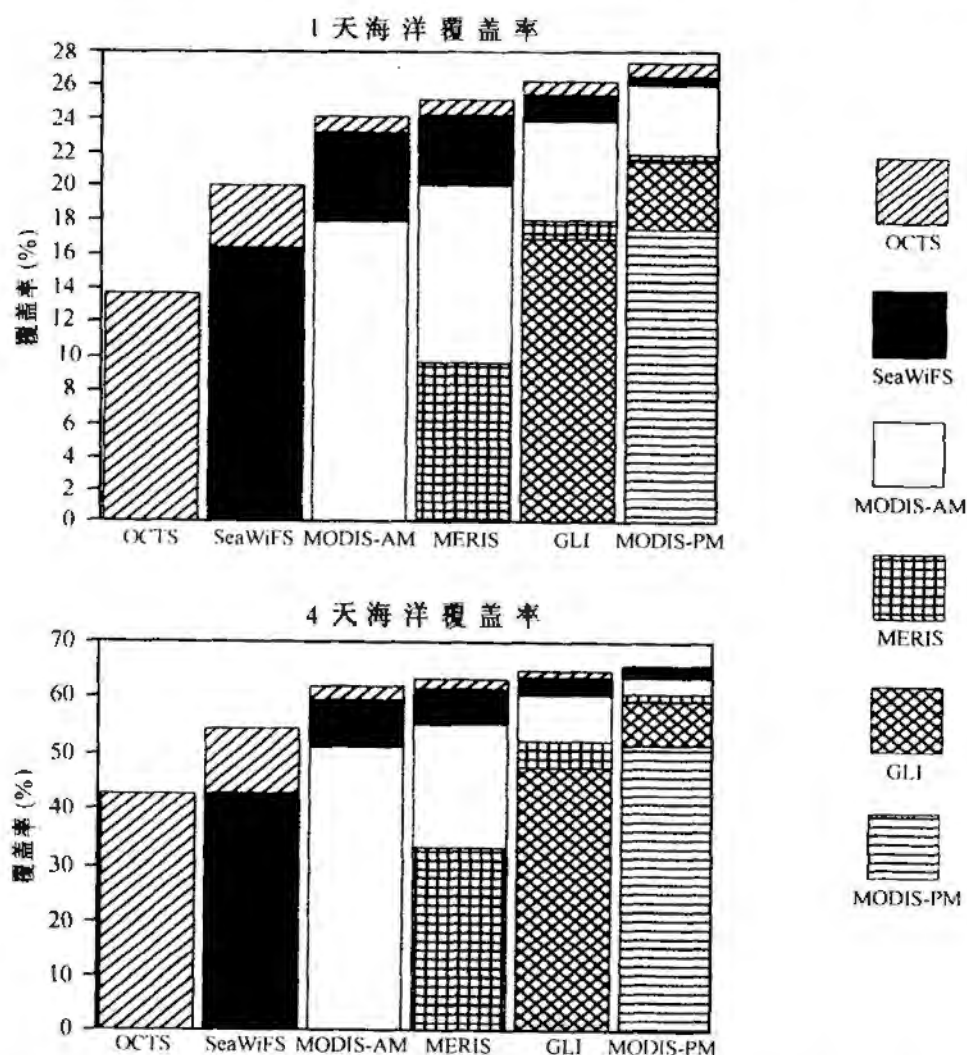


图2 利用今后 5 年飞载或计划飞载的全球 6 台海洋水色遥感器,假设的 1 天和 4 天的海洋覆盖率估算。实际的覆盖率图形将随发射顺序和其他情况而变化。(OCTS 已不再起作用,但是这里仍列入,用以说明多颗卫星总的覆盖率。在消除受过量太阳耀斑(见图 1)和云盖影响的污染区之后,进行覆盖率计算。云层仅允许在逐日的基础上变化,如果允许云层当天内的变化,1 天内的覆盖率可能更大,但是不可能希望覆盖率继续增大。每个柱状图底部部分表示单颗卫星的覆盖率,接着的下一柱状图表示该卫星与前面卫星组合的综合覆盖率。这能帮助我们评估前面卫星使命失效对覆盖率的影响,理解单颗卫星覆盖率的意义

设计寿命,或卫星发射延时,那么为了在 2005 年达到 60% 的覆盖率,这些后备卫星可能是必要的。

尽管 5 颗卫星都符合以前规定的开阔海域的最低要求(IOC CG 1998),但是 5 颗卫星的性能极不相同。MODIS-AM 和 PM、MERIS 和 GLI 都能测量叶绿素荧光,可提供有关海洋生产力的新的信息。而且, MERIS 和 GLI 还具有其他光谱波段和较高空间分辨率(MERIS 分辨率 0.3 km),可提供新的重要的海岸带成像能力。POLDER 增加了如下测量能力:陆地双向反射率分布函数(BRDF)、陆地和海洋气溶胶性质、云层物理和辐射性质等。

4.3 纬度覆盖

对地面覆盖率分布方式的改进具有重要的意义。例如,由于 SeaWiFS 倾角的变化,太阳偏角附近的数据丢失能由如 MODIS-AM 等非倾角卫星予以补偿,其结果是:这些地区覆盖率可提高 100% 以上(图 3)。相反,由于太阳耀斑引起 MODIS-AM 在中纬度海洋覆盖率上的损失能由 SeaWiFS 予以补偿,结果覆盖率比仅利用 SeaWiFS 高出 50% 以上。这样的互补性使得海洋在整体上的观测分布更加均等。这是单一一颗卫星所不能达到的,而且这一扩大的覆盖率对于海洋生物过程的观测具有重要的意义。这些实例表明,刈幅宽度、赤道过境时间和倾斜能力是评价 2005 年以后的全球覆盖率方案需要考虑的重要性能。

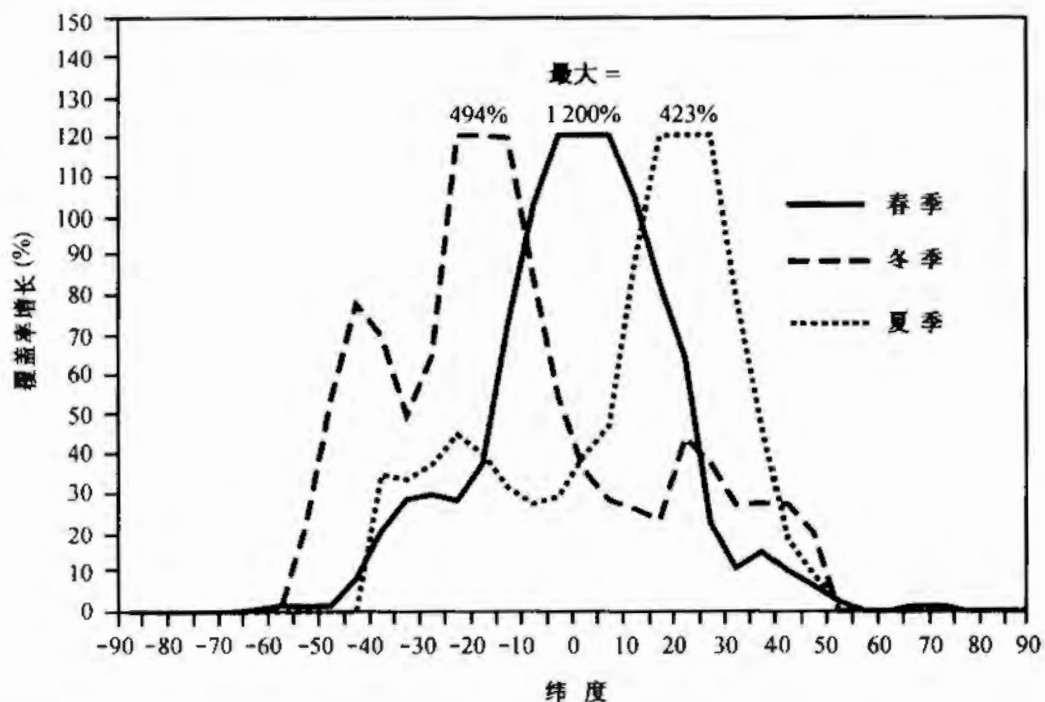


图 3 利用 SeaWiFS 和 MODIS-PM 组合数据,扩大纬度上覆盖率(引自 Gregg 和 Woodward 1998),单颗卫星的覆盖率在全球海面上不会均等分布,而数据的组合能极大地提高某一颗卫星或另一颗卫星观测不到地区的覆盖率。在这种情况下,覆盖率的增加以百分比表示,而不是按海洋的百分覆盖率表示,例如 10% 的增加表示覆盖率比 SeaWiFS 单独所达到的覆盖率大 10%

4.4 时间覆盖

2000~2005 年时间段全球计划发射的水色卫星轨道的多样性还为评估生物过程日变化的重要性提供了研究机会。尤其值得指出的是赤道过境时间和交点的不一致性。这种不一致性可能导致卫星在极不相同的地方时对同一地区进行观测。赤道过境时间相差最多的两颗卫星是 MERIS 和 MODIS-PM, 前者的降交点为 10:00h, 后者的升交点为 13:30h。这两颗卫星之间地方观测时之差在低至中纬度地区为 4~6 h(图 4), 在高纬度地区超过 12 h(后者仅在最高点才可能)。这样的观测可能获得关于生物过程时间变化的新的重要信息, 可监视单个平台每天观测的可靠性。

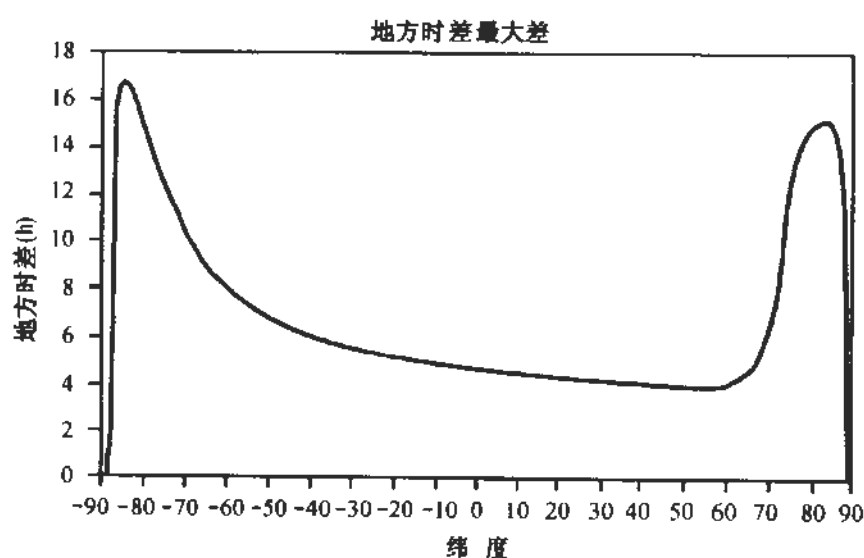


图4 MODIS-PM 和 MERIS 同一地点的最大时间差(地方时), 表示利用不同卫星在时间观测上可能出现的大扩展(引自 Gregg 等 1998)

第5章 数据融合和真实性检验

在前一章,我们阐述了多个遥感器观测能明显地提高全球海洋的覆盖率。这一分析的关键前提是:多个遥感器的数据能融合生成单一的全球产品,并提供时空连续场。海洋水色数据的融合至今尚未完成,这是一项潜在的困难任务。NASA的海洋生物及多学科海洋研究遥感器相互比较(SIMBIOS)计划是一项确定如何完成数据融合的新研究计划。本章的目的是列出这一任务考虑的主要问题。

5.1 数据融合与集成

为了确立海洋水色数据集成的基础,以下几个主要问题需予以解决,如:确定特定遥感器对反演产品的限制;保证处理数据级别相同格式统一;研制针对导出的地球物理特性的融合方法。

5.1.1 卫星海洋水色数据的限制

水色遥感器是按照不同的技术指标制造的,这些指标的确立符合个别使命的具体目标。反之,这些指标对数据产品也有限制,这需予以明确的限定。这些限制包括辐射测量和光谱测量。

辐射测量

不同条件下获取的各水色数据集的辐射性能和光谱性能需专门列表,并进行评估。从理想条件来看,不同性能应符合通用的质量标准。遥感器刈幅宽度上的辐射性能需予以适当重视,并考虑到不同观测几何体制下所获取数据的融合的潜在需要。例如,关于太阳耀斑的处理问题,阈值需予以确定,根据受太阳耀斑污染数据推导的地球物理量超过阈值的,不能用于数据集成和融合。像变形和校准误差等几何性能的限制以及轨道运动造成的数据质量问题,都需一一阐明。

光谱测量

不同观测角和太阳天顶角条件下导出的离水辐射率的相对光谱精度对导出的地球物理产品的精度产生直接的影响,因此这是每一台遥感器都必须已知的量。此外,考虑二向性影响的方法(Morel 和 Gentili 1996)也必须已知,同时还需要知道分发产品(海洋反射率、归一化离水辐射率或方向辐射率)的准确定义;实际上,各部门目前采用的定义各不相同。光谱校准或将相对结果转换为绝对辐射单位所采用的(外陆地)太阳常数光谱值,也存在上述问题。认识以上限制能使根据水色数据导出的地球、生物、物理变量之间进行相互参照,并评价导出产品的潜在精度;反过来,这一精度又与推导产品所使用的光谱波段和算法相关。在

以绝对辐射率而不是以相对辐射率为依据的算法情况下,绝对光谱精度列表表示的要求比相对光谱精度列表表示的要求严格得多。在产品之间存在根本性的技术和概念明显差别(见 3.3 节)的情况下,两种产品均需予以保持,而不是进行融合,因为它们之间的比较可能会提供新的启示。

5.1.2 水色数据的可获得性

所有处理数据应按同一级别和同一格式获得。

数据级别和质量定义

以当前的能力,适用于融合和集成的数据级别处在导出的地球物理变量的等级(即按 ESA 标准的第 2 级,或按 NASA 标准的第 3 级)。这就意味着,对于开阔海域而言,数据融合可以在叶绿素 a、黄色物质浓度或悬浮泥沙分布等数据产品基础上进行。这并不排除利用通用的生物光学算法,融合 3 级离水辐射率场来产生其他导出产品(如叶绿素 a)的可能性。

一旦确定了有关遥感器性能的各种限制,包括在数据分析中大气订正程序引入数据的误差,数据融合才能有效地进行。而且人们还必须确定来自这些误差源的可接受的最大误差,而不牺牲融合数据所要求的质量标准。可接受的标准必须一致地应用于产生集成和融合数据产品的所有海洋水色数据产品。有必要指出的是,这一做法的前提是制订国际上一致认可的导出地球物理产品的质量标准。建立这样的标准,还必须与国际用户界协商。这本身是一项艰巨的任务,因为水色数据已在众多领域(包括气候变化研究、污染与水质监测)得到应用,而且不同应用本身具有各自的可允许误差标准。

大气订正

由于数据分析中所采用的辐射传输程序的质量和可靠性在确定反演的地球物理变量的精度以及确定这些变量在其后的集成数据中的应用起着至关重要的作用,因此,确保处理过程中所使用的大气订正程序和水中辐射程序在所有水色数据集中都有明确的文档说明,是相当重要的。各卫星使命的业务计划应对各种不同现实情况进行比较。

反演算法

采用可比较算法来反演通用级特殊地球物理产品,也是至关重要的。如果个别部门采用的初级程序,或历史数据处理程序不符合为融合产品制订的标准,那么,以前从 1b 级数据(即大气顶辐射率)中得到的历史数据(存档)有必要进行再处理,新遥感器获得的数据也是如此。经验算法,如基于叶绿素蓝绿反射率比值算法,应利用通用数据集予以确立。

定标

为了有利于评介和比较利用不同定标方法处理的数据,人们必须了解数据定标所依据的定标程序和标准。

5.1.3 高等级数据的融合方法

海洋水色数据产品融合方法需要进行严格的评价,目的在于保持可预见应用所必需的质量。可能的技术包括镶嵌、求平均值、加权、“混合”和优化内插等。对于同时的大区域地图与不同遥感器和不同来源数据的集成和融合,或对于地区多时相数据集的集成而言,通常选用常用的地理网格,并进行配准。还有必要确立数据流的层次结构,据此结构,具有最高

估算反演精度的遥感器数据具有最大优先权,并直接成图在集成数据集网格上。被认为精度较低的遥感器数据据此加权,如果必要,在新网格上成图之前,可对数据进行重新采样。

5.2 真实性检验

集成数据集生成所使用的地球物理数据在各阶段都必须进行真实性检验。使命数据产品的真实性检验由个别使命团队负责,但是需要国际合作的支持。没有任何一个国家或空间机构能搜集到海洋水色反演综合评价所需的充足数据集。不同遥感器数据的融合意味着,真实性检验数据集将由数据融合参与者共同分担。

真实性检验活动包括以下性质的监测:

- 现场大气条件,包括瑞利散射、气溶胶、水气和云层的影响。理想条件是:可比较大气传输程序(例如考虑到多重散射和方向性效应)将用来推导融合所使用的地球物理变量。大气测量能用来测试辐射传输程序是否符合现实情况下的现有条件,还用来确定大气订正算法推导某些大气性质时所引起的误差。

- 还必须监测次表层和水-气界面的光学条件(固有光学性质),再次验证所用算法能否正确估算这些条件,并评价计算阶段引起的误差。

- 根据卫星数据估算的地球物理量还一定要进行现场测量,以便估算数据产品的最终误差。有必要指出,卫星数据与现场测量估算之间的比较应考虑到尺度的意义:地球物理性质现场测量的尺度一般比卫星数据估算的有效尺度小得多。

5.3 集成

经真实性检验的地球物理数据集应应与所谓的海上真值点(sea-truth points)挂钩,这项工作属于连续现场测量和真实性检验计划的一部分。全球范围分布的锚定浮标或平台的投入使用,可以构成海上真值点网的基础。参照海上真值基准点,现正在建立海水要素叶绿素a的地区数据库。遥感水色数据推导值也能输入这些数据库。

第6章 制订2005年以后空间海洋水色测量协调战略的步骤

6.1 引言

20多年前,美国NASA以Nimbus-7卫星上的CZCS传感器开展海洋叶绿素浓度测量的概念验证使命,开创了空间海洋水色遥感。在20世纪80年代前5年,利用海上实测资料,进行了CZCS数据分析和真实性检验。通过这些科学活动,反演算法得到改进,并制订了后续水色传感器新的技术指标。自1988年开始,CZCS数据得到广泛地传播(大约在卫星发射之后10年),海洋学家和其他人员看到了利用其后续卫星图像,研究沿岸及开阔海过程和支持商业性及政府业务应用的多种可能性。海洋生物学家极力支持在可预见的将来开展连续卫星水色观测。实际上,在未来许多大型海洋研究计划中没有连续的卫星水色数据源是难以想象的。尤其是国际地圈生物圈计划(IGBP)等全球变化研究计划以及全球海洋观测系统(GOOS)等观测计划更是如此。

20世纪80年代中期,空间机构通过密切的国际合作,开始了全球变化研究的创新。然而,自CZCS失效之后,直至1996年MOS-1和OCTS等后续卫星发射,获得新的水色图像,科学家等待了大约十多年。我们现在即将进入利用MOS、OCTS和SeaWiFS传感器数据,进行全球海洋生物过程研究的新阶段。

SeaWiFS和OCTS之后,MODIS-AM和MODIS-PM(NASA投资)、MERIS(ESA投资)、GLI(NASDA投资)和POLDER-Z(CNES投资)等综合观测传感器的新时代将要开始。这些仪器以可见光和近红外区的多个波段覆盖整个地球,用来测量陆地、海洋和大气中的物质。

多用途卫星对于海洋水色科学家而言既有好处,也存在问题。IOCCG认识到了多用途卫星在有关成本和其他方面的益处。整个地学界强有力的支持是空间机构完成耗费巨大的遥感使命的必要条件之一。另一方面,多用途使命使得多卫星协调更加困难,因为每个学科(陆地、海洋、大气)都有不同的技术要求。海洋水色测量可能不是技术要求(包括波段选择和赤道交点时间等)的主要决定性因素。2005年以后,海洋水色遥感使命协调的一个可行策略是必须考虑多用途卫星的特殊协调问题。

6.2 未来(2005年以后)海洋水色遥感器的试验性计划

6.2.1 国家航空航天局(NASA)

尽管目前尚无确定的计划,但NASA正在制订2005年以后的海洋水色测量计划。NASA已向美国政府上报了“国家极轨业务环境卫星系统”(NPOESS)计划。这是继国家海

洋大气局(NOAA)极轨系列卫星[电视、红外观测卫星(TIROS)]和国防部气象卫星计划(DMSP)之后的业务卫星计划。据预测,NPOESS将在2008年投入运行,当前的计划是考虑在测量要素中列入海洋水色测量。目前,合同承包商正根据以下最低技术要求设计水色仪器:全球区域覆盖(GAC)和局部区域覆盖(LAC)的空间分辨率分别为2.6 km和1.3 km,叶绿素测量范围 $0.05 \sim 50 \text{ mgm}^{-3}$,测量精度20%,准确度30%,重复覆盖周期48 h。

NASA认识到,EOS-AM和PM平台的寿命较短,不能完全达到地球观测系统(EOS)计划的科学目标。因此,目前它正在制订EOS-PM之后搜集地球遥感数据的计划,而且正竭力影响NPOESS上搭载的仪器类型和质量,并希望NPOESS上的业务遥感器符合NASA的某些科学要求。正在考虑的2004年的建议之一是高级全球成像仪(AGI)。像MODIS一样,AGI是一台用于与EOS计划目标有关的大气、陆地和海洋测量的多用途遥感器。正在评价的概念设计包括7个水色波段,波段中心分别在412,443,490,555,645,748,854 nm,因此,该遥感器符合全球开阔海遥感器最低光谱波段的技术要求。AGI将采取极地太阳同步轨道,上午赤道交点时间,无倾斜能力。尽管有人建议AGI仅作为科学仪器用,但是它还是可能成为NPOESS业务成像仪的样机。

6.2.2 国家宇宙事业开发团(NASDA)

NASDA已制订了ADEOS-3卫星上搭载超GLI(S-GLI)遥感器的计划,该卫星预计在2004年发射。该仪器类似于ADEOS-2卫星上的GLI,然而,仪器通道数和体积将有所减少。仪器包括3个独立部分:海洋水色成像仪(OCI)、大气与陆地成像仪(ALI)和红外成像仪(IRI)。其中,只有OCI具有倾斜能力。OCI目前计划包括10个波段:412,443,490,520,565,625,680,710,749,865 nm,空间分辨率约1 km。这些指标将符合开阔海一类水体以及二类水体的全球观测要求。

NASDA还在考虑海岸带高分辨率遥感器的计划。此遥感器专用于亚洲海岸带水域监测,空间分辨率约100m。该遥感器详细设计现在尚未确定,但是它可能作为“使命示范卫星”(MDS)而发射。

6.2.3 欧洲空间局(ESA)

目前,ESA正在建设MERIS地面站,开发MERIS观测资料的解译算法。关于MERIS数据产品检验计划的专门研究也正在开展。搭载MERIS遥感器的环境研究卫星(ENVISAT)在2000年初发射之后,ESA今后10年的地球观测策略将集中于“生命星球计划”(Living Planet Programme)。ESA理事会于1998年3月已批准了该计划,该计划将全面考虑从科学研究到应用等各个方面。研究驱动的“地球勘探者使命”与以应用驱动的“地球观测使命”平行发展,后者主要用于特定地球观测资料的应用和服务。目前,尽管ESA尚未制订MERIS使命后续的成形计划,但是在“地球勘探者”和“地球观测”计划中,ESA成员国将有机会开发未来的海洋水色观测系统。

6.2.4 国家空间研究中心(CNES)

在研制ADEOS-1和ADEOS-2卫星上的POLDER遥感器、参与MERIS计划,并为ENVISAT计划作出贡献之后,CNES目前没有2005年以后的水色遥感器明确计划。研究

与开发方面的探索性设想均与 POLDER 和植被使命的后续多用途任务有关。这一设想以大刈幅仪器为基础,其空间、光谱和角分辨率性能将有所提高。尽管目前这一任务尚未完全明确,但是这一任务有可能重点用于全球开阔海监测。

6.3 2005 年以后的战略

本节的目的是给出关于未来海洋水色使命协调的某些重要的考虑。这一战略的必要性包含的基本概念是:为了满足用户对一类水体和二类水体全球时空覆盖的需求,需要有协调良好的多种水色使命。具有互补性技术指标(包括轨道)的多种遥感器以及协调遥感器定标、真实性检验、产品制作和数据分发的任务组将向国际用户提供远比没有协调时价值高得多的单位成本数据。实际的互补性要求空间机构在任务的规划阶段就已开展合作。然而,协调未来水色使命的最终责任落在空间机构身上,而不是落在 IOCCG 身上。IOCCG 愿意协助空间机构做好协调,可是它没有得到空间机构的委托,也没有经费和技术资源,故难以制订未来的详细计划。IOCCG 愿意在规划过程中发挥更积极的作用,但是它目前的作用仅限于提供咨询(例如,以本报告和其他报告的形式),以及在空间机构提出计划时,开展计划任务的评估(如第 4 章对 2005 年以前时间段所做的评估)。在空间机构计划形成时,IOCCG 将定期开展这一重要项目的评估工作,并愿意介入高层协调活动。

2005 年以后空间海洋水色测量的目标是以经济高效方式提供地区尺度和全球尺度的连续测量,并改善数据集的几何、光谱和时效性能。这样的目标可保证开阔海和海岸带地球物理量反演精度有所提高,另外,附加产品可增进人们对海岸带水生生态系统作用的认识,提高频繁而准确的水质评估能力,开展特殊(和有害)藻类过量繁殖的观测和定量分析。

为了达到以上目标,实现本报告的精心设计,有必要制订卫星水色观测的战略计划,以满足用户团体科学的和其他的需求,同时考虑到已规划好的卫星计划和个别国家和空间机构的具体目标。而且战略计划应保证数据处理的一致性、数据存取的便利性,并包括协调的、互补的和综合的定标和评估计划。应强调以下观测技术要求及其相应的依据:① 在一定时间内需要有一定数量的海洋水色观测系统;② 这些系统在时间和空间性能上彼此之间应有差异;③ 在特殊应用和测量目标方面,系统性能应有互补性。为了保证未来水色观测系统的适当差异及其互补性,在制订不同遥感器的技术要求时,以下性能应予以适当的考虑:

- 时间性能:包括发射时间、轨道倾角和路径(降交点和升交点时间);
- 辐射性能:包括噪声等效 δ 辐射率(NE Δ L)、双向反射率分布函数(BRDF)能力、辐射定标标准、动态范围和量化等级等;
- 光谱性能:包括波段数、位置、带宽、光谱采样宽度和波段间定标;
- 几何性能:包括空间(象元)分辨率、观测刈幅宽度对称性(如偏离天底点的刈幅或倾斜)、地理定位和定向观测能力。

为了提高全球覆盖率和出于对其他方面的考虑,用户还想融合一台以上遥感器的数据。因此,多台遥感器数据融合和产品制作应该是此项战略的组成部分,这有可能从 NASA 的海洋生物及多学科海洋研究遥感器相互比较(SIMBIOS)计划中汲取教训。为了发挥有效的作用,各卫星和遥感器供应商有必要尽快制订并通过一项协调一致的战略,最好在 1999 年年底通过这项战略。现在是开始详细规划的时候了!

参考文献

- Abbott, M. R., Richerson, P. J. and Howell, T. M. (1982). *In situ* response of phytoplankton fluorescence to rapid variations in light. *Limnol. Oceanogr.*, 27: 218-225.
- Babin, M., Morel, M. and Gentili, B. (1996). Remote sensing of sea-surface sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll-*a* fluorescence. *Int. J. Remote Sensing*, 17: 2417-2448.
- Behrenfeld, M. J. and Falkowski, P. G. (1997). A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnol. Oceanogr.*, 42: 1479-1491.
- Cornell, S., Rendell, A. and Jickels, T. (1995). Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans. *Nature*, 376: 243-246.
- Demmig-Adams, B. and Adams III, W.W. (1992). Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Ann. Rev. Plant Physiol. & Plant Biol.*, 43: 599-626.
- Dupouy, C., Petit, M. and Dandonneau, Y. (1988). Satellite detected cyanobacteria bloom in the southwestern tropical Pacific: implication for oceanic nitrogen fixation. *Int. J. Remote Sens.*, 9: 389-396.
- Feldman, G. C., Clark, D. and Halpern, D. (1984). Satellite color observations of the phytoplankton distribution in the eastern equatorial Pacific during the 1982-83 El Niño. *Science*, 226: 1069-1071.
- Fiedler, P. C. (1984). Satellite observations of the 1982-1983 El Niño along the U.S. Pacific coast. *Science*, 224: 1251-1254.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T. and Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281: 237-240.
- Fischer, J. and Kronfeld, U. (1990). Sun-stimulated chlorophyll fluorescence 1: Influence of oceanic properties. *Int. J. Remote Sensing*, 11: 2125-2147.
- Gordon, H. R. and McCluney, W. R. (1975). Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Optics*, 14: 413-416.
- Gower, J. F. R. (1980). Observations of *in situ* fluorescence of chlorophyll-*a* in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18: 235-245.
- Gower, J. F. R. and Borstad, G. A. (1990). Mapping of phytoplankton by solar-stimulated fluorescence using an imaging spectrometer. *Int. J. Remote Sensing*, 11: 313-320.
- Greene, R. M., Geider, R. J., Kolber, Z. and Falkowski, P. G. (1992). Iron-induced changes in light harvesting and photochemical energy conversion processes in eukaryotic marine algae. *Plant Physiol.*, 100: 565-575.
- Gregg, W. W., Esaias, W. E., Feldman, G. C., Frouin, R., Hooker, S. B., McClain, C. R. and Woodward, R. H. (1998). Coverage opportunities for global ocean color in a multimission era. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36: 1620-1627.
- Gregg, W. W. and Patt, F. S. (1994). Assessment of tilt capability for spaceborne global ocean color sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32: 866-877.

- Gregg, W. W. and Woodward, R. H. (1998). Improvements in coverage frequency of ocean color: Combining data from SeaWiFS and MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36: 1350-1353.
- Hofmann, E. E. and Lascara, C. M. (1998). Overview of interdisciplinary modeling for marine ecosystems. In: *The Sea*, Volume 10 (Brink, K. H. and Robinson, A. R., eds.). John Wiley & Sons, Inc. 507-540.
- Holligan, P. M., Viollier, M., Harbour, D. S., Camus, P. and Champagne-Philippe, M. (1983). Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge. *Nature*, 304: 339-342.
- IOCCG (1998). Minimum Requirements for an Operational, Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean. *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 1*. IOCCG, Dartmouth, Canada, 46.
- JGOFS Report No. 20. (1996). Remote Sensing in the JGOFS Program. JGOFS Core Projects Office, Bergen, Norway.
- Johnsen, G. and Sakshaug, E. (1996). Light harvesting in bloom-forming marine phytoplankton: species-specificity and photoacclimation. *Scient. Mar.*, 60: 47-56.
- Karabashev, G. S. (1998). On concentration dependence of chlorophyll fluorescence in the oceanic waters of diverse trophicity. *Oceanology*, 38: 342-346.
- Kiefer, D. A., and Reynolds, R. A. (1992). Advances in understanding phytoplankton fluorescence and photosynthesis. In: *Primary Production and Biogeochemical Cycles in the Sea*, P. G. Falkowski and A. D. Woodhead (eds.), Plenum Press, New York, 155-174.
- Kishino, M., Sugihara, S. and Okami, N. (1984). Estimation of quantum yield of chlorophyll *a* fluorescence from the upward irradiance spectrum in the sea. *La mer*, 22: 233-240.
- Letelier, R. M. and Abbott, M. R. (1996). An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Remote Sens. Environ.*, 58: 215-223.
- Lewis, M. R., Carr, M.-E., Feldman, G. C., Esaias, W. and McClain, C. (1990). Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 347: 543-545.
- Loftus, M. E. and Seliger, H. H. (1975). Some limitations of the *in vivo* fluorescence technique. *Chesapeake Bay Sci.*, 16: 79-92.
- Maerker, M. and Szekiolda, K. H. (1976). Chlorophyll determination of plankton: a comparison of *in vivo* fluorescence with spectrophotometric absorption. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, 36: 217-219.
- Morel, A. and Gentili, B. (1996). Diffuse reflectance of oceanic waters: III. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem. *Appl. Opt.*, 35: 4850-4862.
- Pauly, D. and Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 374: 255-257.
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R. and Torres, F. (1998). Fishing down marine food-webs. *Science*, 279: 860-863.
- Pernetta, J. C. and Milliman, J. D. (1995). Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone: Implementation Plan. *IGBP Global Change Report*, Vol. 33, 215.

- Platt, T. and Sathyendranath, S. (1988). Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*, 241: 1613-1620.
- Prézelin, B. B. and Boczar, B. A. (1986). Molecular bases of cell absorption and fluorescence in phytoplankton: potential applications to studies in optical oceanography. *Prog. Phycol. Res.*, 4: 349-464.
- Sarmiento, J. L., Hughes, T. M. C., Stouffer, R. J. and Manabe, S. (1998). Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. *Nature*, 393: 245-249.
- Sathyendranath, S., Gouveia, A. D., Sherye, S. R., Ravindran, P. and Platt, T. (1991). Biological control of surface temperature in the Arabian Sea. *Nature*, 349: 54-56.
- Sathyendranath, S., Subba Rao, D. V., Chen, Z., Stuart, V., Platt, T., Bugden, G. L., Jones, W. and Vass, P. (1997). Aircraft remote sensing of toxic phytoplankton blooms: a case study from Cardigan River, Prince Edward Island. *Can. J. Remote Sens.*, 23: 15-23.
- Sugimoto T. and Tameishi, H. (1992). Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan. *Deep-Sea Res.*, 39: S183-S201.
- Tassan, S. (1993). An algorithm for the detection of the White-Tide ("mucilage") phenomenon in the Adriatic Sea using AVHRR data. *Remote Sens. Environ.*, 45: 29-42.
- Topliss, B. J. and Platt, T. (1986). Passive fluorescence and photosynthesis in the ocean: implications for remote sensing. *Deep-Sea Res. I*, 33: 849-864.

三、近海和其他光学性质 复杂水体的水色遥感

——国际海洋水色协调工作组(IOCCG)
报告之三, 2000 年

摘 要

海洋水色遥感正在静悄悄地发生变革, IOCCG 本篇报告目的在于向海洋界报告海洋水色遥感的最新进展。

为了理解水色遥感变革的深度和广度, 我们有必要回顾一下空间海洋水色遥感的起源。1978 年, 美国国家航空航天局(NASA)发射了监测海洋水色的第一台卫星遥感器——海岸带水色扫描仪(CZCS)。当时, 水色监测的目标是明确而适当的, 那就是测量可见光范围有限波段的离水辐射率, 再利用测量信号推断海洋近表层浮游植物色素的浓度。当时, 常用算法假定: 利用大气辐射传输理论模式, 可以分辨卫星遥感器接收到的总信号中的大气信号和海洋信号。然后, 经验算法利用大气噪声订正信号反演浮游植物色素浓度。尽管遥感器命名为“水色扫描仪”, 但是当时人们都理解并承认: 当时使用的方法对于近海和其他光学性质复杂海域的水色遥感是无效的, 因为这些海域存在着复杂的物质, 可能掩盖、甚至改变了浮游植物的信号。因此, 当时水色遥感反演数据的定量应用基本上仅限于开阔大洋。

现在所有这些基本法则正在改变。根据 CZCS 的经验, 根据理论研究和海上平台和飞机现场观测所获得的知识, 近些年空间海洋水色遥感的范围和要求已非昔日所比。由于我们深入认识了水生物质的光学性质及其对水色的影响, 我们利用海洋水色数据反演, 有可能获得除浮游植物之外物质的信息, 在有利条件下, 甚至可以分辨浮游植物的类型。以上可能性的实现要求新传感器具有比 CZCS 更佳的光谱分辨率和更高的信噪比, 而且大气订正有较大的改善。所以, CZCS 以后的海洋水色遥感器不是 CZCS 的复制品, 而是具有不同性能的不同类型的仪器。为了迎接新的挑战, 每种新仪器问世时同时推出新算法。有些新算法也属新类型, 不是老的算法的微小的改动。例如, 目前普遍的趋势是: 大气和海洋系统被视为一个耦合系统, 海洋和大气性质同时予以解决。反演水生物质性质的经验算法正逐步弃之不用, 而使用理论基础性更强的算法。可处理多变量和非线性系统的新的数学方法和统计法正用于解决问题。

最近的大部分进展集中于近海以及光学性质复杂水体的水色遥感。这同样也是本报告的重点。本报告将回顾这一领域迄今所取得的进展, 评价现存的限制, 探讨有前途的进一步改进路线。本报告第 1 章前言部分概述水色遥感的背景知识, 第 2 章扼要阐述海洋水色的理论概念, 第 3 章重点阐述光学性质复杂水体定量遥感所采用的各种方法, 第 4 章探讨光学性质复杂水体成功遥感实验的需求, 第 5 章评述了水色遥感数据主要的潜在应用, 本报告最后部分是“结论和建议”。报告作者努力增强本报告的可读性, 使遥感专家和非遥感专家同样可以从中受益。

第 1 章 前 言

S. Sathyendranath

本报告探讨光学性质复杂水体(例如近海地区和湖泊)遥感的有关问题。此类水体常称之为二类水体。人们普遍认识到,二类水体的组成和光学性质比一类水体复杂得多,因此二类水体光学信号的解读也困难得多。迄今,海洋水色遥感的重点基本上放在相对简单的一类水体,而且目前卫星数据叶绿素反演所采用的标准算法不适用于二类水体。

最初开发海洋水色遥感数据解译算法的限制在一定程度上至少反映了卫星技术本身的局限性,已发射的第一台卫星水色传感器 CZCS 只有 6 个波段。CZCS 运行期间和 CZCS 失效之后,实践使我们认识到:海洋水色遥感比我们当初设想的复杂得多,新一代水色传感器的设计已极大地改善了仪器的性能(主要体现在光谱分辨率和辐射分辨率性能方面)。随着新传感器的问世,二类水体算法也有极大的改进。这些技术进步与二类水体水色解译的科研工作相辅相成的。本篇报告有 5 个目的:

- 探讨影响二类水体水色的各种物质和光学过程;
- 评述二类水体遥感算法开发的进展,明确遗留的问题;
- 明确二类水体成功水色遥感的需求;水色遥感必须与现场实验相结合;
- 总结潜在的应用;
- 明确水色遥感需要进一步解决的问题。

1.1 海洋水色被动遥感

海洋水色遥感被动系统利用窄视场传感器,以电磁波谱可见光和近红外谱段若干选择波长监测到达传感器的辐射通量。传感器安装在卫星、飞机或其他遥感平台上,指向地面某一点。传感器白天工作,到达传感器的最终光源是太阳。然而,太阳光子沿着不同的路径才能到达远距离探测器(见图 1.1)。我们要考虑遥感信号的以下主要因素:

- 经大气光子散射之后到达传感器的光;
- 海表面阳光直射形成镜反射到达传感器的光;
- 水中后向散射之后,从海表面上行的光。

请注意:从海表层上行的光在从海表面到达传感器的行程中,因干扰大气的吸收和散射而发生衰减。

只有从海表层上行的光携带着水体的有用信息。大气的贡献和海表层的镜反射都是水色遥感的噪声,必须予以订正。海洋水色卫星传感器往往具有定向探测能力,可避免阳光镜反射,但避免大气散射则无好办法。实际上,在卫星传感器高度,到达探测器 80% 以上的光

均来源于大气(Morel 1980),大气贡献微小的估算误差可能造成水体要素信息估算的显著偏差。而且,如果遥感器和水体之间不存在大气,水中上行的光必须经过处理,才可估算离水辐射率包含怎样的信息。因此,大气订正是水色遥感极重要的因素(Gordon 和 Morel 1983;Gordon 1993;Sturm 1993;Gordon 和 Wang, 1994;Gordon 1997)。然而,本报告的重点是论述光学性质复杂水体的有关问题,有关大气订正问题仅在其与二类水体特别相关时,略加阐述。

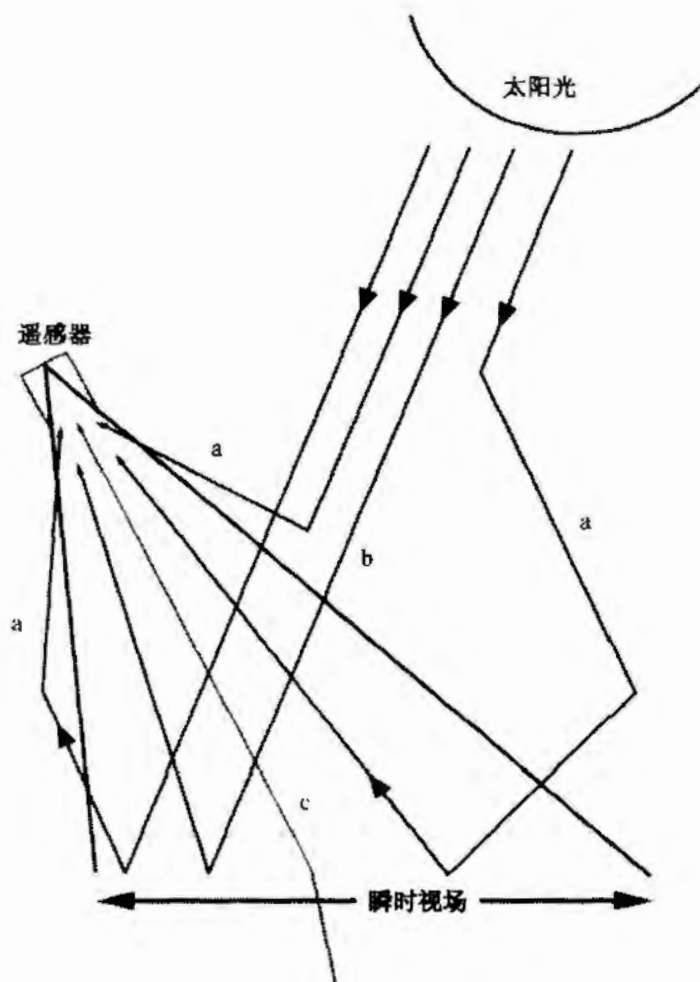


图 1.1 到达遥感器的光路线(据 Sathyendranath 1986)。a. 大气散射的光,有可能发生多重散射,还有可能在大气散射前后,到达遥感器的某些光在海表面发生反射;b. 海表层阳光直射的镜反射;c. 离开水面,朝传感器方向的上行光。c 是携带着水体有用信息的光通量,图 1.2 将予以详尽解释。请注意,来自海洋中的上行光通量已受干扰大气的改变。传感器几何体制、高度及其观测角决定着传感器在水体表层的瞬时视场(IFOV)或象元大小

如果详尽地分析离水信号,我们可以发现若干因素影响这一信号(见图 1.2)。穿透海表层的太阳直射光和散射天空光可能被水分子或者被水中各种悬浮物和可溶性物质吸收或散射。在清澈的浅海,大部分的阳光可以直达海底,并从海底反射回来。部分散射的和反射的光子最终到达传感器。遥感就是要分析离水辐射的量及其光谱质量的变化,来反演水中各类物质及其浓度的定量信息。显而易见,定量反演必须以对介质光学性质及发生在介

质中的光学过程的可靠认识为依据。

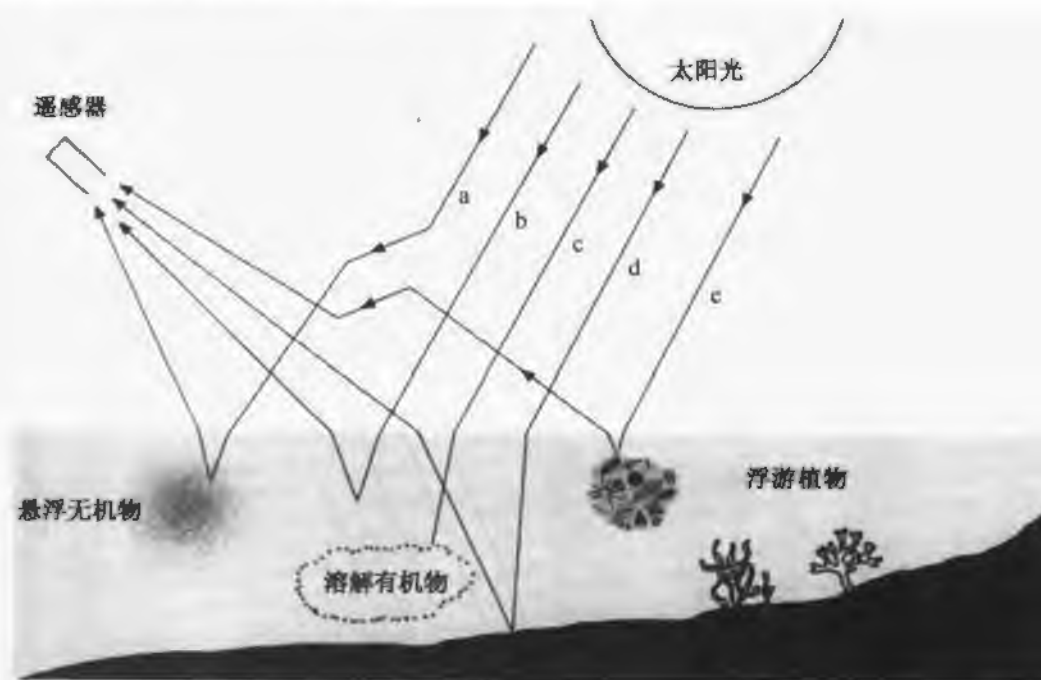


图 1.2 影响海面上行光的因子。a. 悬浮无机物的向上散射;b. 来自水分子的向上散射;c. 黄色物质的吸收(据认为黄色物质本身不是重要的散射体,但在本报告中,我们将碎屑物列入黄色物质一类,而碎屑物可发生散射);d. 海底反射;e. 浮游植物的向上散射。请注意:以上物质成分和海底的吸收都将削弱离水信号。太阳光在到达海表面之前,可能受到大气成分的散射。同样,离开水体的光受大气散射可能偏离传感器或直达传感器

在分析水介质光学性质时,有必要将水本身对光场的影响及水中溶解物和悬浮物对其的影响加以区分。在这方面,按惯例用“纯水”表示除水分子外没有无机盐等其他物质的假想介质。必要时,我们还要区分纯淡水(无溶解盐类)和纯海水(含有溶解盐类,一般系指大洋水)。我们认为,自然水体的光学性质受多种物质的影响。从现实的光学观点出发,我们认为除纯水本身外,以下 3 种主要物质的影响最大:

(1) 浮游植物。此类物质包括浮游植物及其他微型生物。但在分析其对海水光学性质的主要影响时,为方便起见,我们将其统称为“浮游植物”。

(2) 悬浮物(无机):尽管微型生物也属“悬浮”物质,但是这里的“悬浮物”仅代表无机性质的悬浮物。

(3) 黄色物质:系有色的溶解有机物。我们将具有类似于黄色物质吸收特性的“碎屑”颗粒物也列为黄色物质。

分述如下:

浮游植物成分

这是在受光照的海洋表层普遍存在的、自由浮动的微型生物。这些生物都是单细胞植物,是水生食物链的基础,也是全球碳循环的重要组成成分。据估算,当前大洋浮游植物全球碳固定量每年大体相当于陆地碳固定量。现已知,在水生环境中存在着数以千计的具有特定大小、形状和生理性质的浮游植物物种,这些物种的组成和密度随时间和空间而变化。

浮游植物主色素——叶绿素 a 的浓度经常视为浮游植物生物量的指数。然而,在浮游植物细胞中,叶绿素 a 伴生着许多辅助色素[采用高效液相色谱法(HPLC)进行的色素分析表明:海洋浮游植物典型样品中色素多达 15 种以上]。水样中色素成分随样品中浮游植物种群群落结构以及细胞生理状态(如趋光性和营养状态)而变化。

如果某类物质被确认为是引起水生环境光学性质变化的最重要的物质,则这类物质就是浮游植物。即使在最纯净的水生环境中,与浮游植物共生的还有浮游动物、异养细菌和病毒等其他微生物。这些生物的降解物还会在环境中以碎屑形式存在。当我们量化自然水生环境中浮游植物的光学性质时,受实验技术的限制,微型颗粒的影响与浮游植物的影响往往无法区分。例如,这些生物的光谱发生重叠,即使经过滤波,也很难将它们分开,甚至不可能分开。而且在分析从自然环境中取得的光学数据时,浮游植物信号与其共生的其他物质信号的区分往往也是有问题的。因此,在遥感领域,除非另有说明,“浮游植物成分”一般包括了其他微生物。从光学观点考虑,高色素含量的浮游植物通常决定了微生物光学信号的强弱。有机碎屑颗粒不列入此类。

1.1.1 悬浮物(无机)

在这一比较笼统的物质类中,我们将不属于浮游植物成分的所有无机颗粒物都归并其中。在近岸浅海和内陆水体中,波浪和海流的作用可造成海底沉积物悬浮,极大地改变了海水颜色。浑浊河流和河口、受河流径流影响的大洋以及大潮差地区是人们可以想象到的其海水光学性质主要由颗粒物决定的海区。与浮游植物成分不同,悬浮颗粒的影响一般仅限于近岸水体和内陆水体。这里,“悬浮物”不指单一物质类,而指具有各自特性的整个物质“族”。例如,反射很强的珊瑚滩白沙,悬浮时,它对水色的影响绝然不同于河口悬浮的褐粘土。悬浮物还包括其他来源的颗粒物质,如由风带入海洋的大陆尘埃或火山灰等。

1.1.2 黄色物质

黄色物质有时称之为“gelbstoff”、“gilvin”或“有色可溶性有机物”(CDOM),是一类含有腐殖酸和灰黄霉酸(fulvic acids)的可溶性有机物。此类有机物可能来源于当地,例如浮游植物细胞和其他有机颗粒的降解,或是通过对流远距离地输送到当地。例如,流经高植被覆盖和土地肥沃地区的河流聚集了沿途大量的黄色物质。聚集了多源黄色物质的地区的浓度比仅仅由局部地点产生黄色物质的地区高得多。现已知,黄色物质产生感光分解作用,因此,局地产生的黄色物质在水体较深处的富集比表层可能大得多。另外,已知黄色物质的吸收性质也是多变的。

如第 2 章论述所指出:所谓非色素“碎屑”颗粒物的吸收谱与黄色物质的吸收谱非常类似。因此,从遥感应应用角度出发,碎屑成分往往与黄色物质成分一并考虑。然而也有人认为,黄色物质应属于浮游植物成分或悬浮物成分。

1.1.3 海底效应

水体中除上述 3 类物质外,如果水域较浅,水质清澈,则水体底部反射的光也能影响水色。水体底部对水色的影响因水体深度、水透明度、水中物质类型和海底类型而异。海底可能是岩石,也可能是砂质的,可能部分或全部覆盖着各种底栖生物(如藻类、软体动物等),或

者完全无覆盖。所有这些因素都是影响遥感器水色观测的海底效应。

人们已认识到,上述三类物质和海底特性都能影响水色。然而,水色数据最大的应用是研究海水中浮游植物的分布。一般是通过对海表层叶绿素 a 浓度变化来订正海洋水色的变化,开发卫星数据反演算法。如果除浮游植物外,其他物质较少,或者这些物质与浮游植物相关,则简化算法就能很好地满足上述应用。有幸的是,大范围海水,甚至内陆水体通常会符合上述标准之一。因此,简化算法可成功地应用于卫星数据叶绿素反演。然而我们还认识到,简化算法应用于受颗粒物(不属于浮游植物成分)、黄色物质或海底效应显著影响的海域,失效率会很高。所以,了解算法的适用性,以及如何提高算法的性能和拓宽其应用领域是非常有益的。在这里,一类水体和二类水体的概念很有用。

1.2 一类水体和二类水体

1977 年 Morel 和 Prieur 引用二分法,将海水分为一类水体和二类水体。1983 年, Gordon 和 Morel 对此分类法进行了修订。根据定义,一类水体系指浮游植物(包括源自生物的伴生物和协变物)是造成海水光学性质变化的主要物质的水域。二类水体则不仅受浮游植物和相关颗粒物的影响,还受其他物质(主要是悬浮无机颗粒物和黄色物质)的影响,这些物质的变化与浮游植物无关。

以上分类法不排除浮游植物以外的物质也影响一类水体光学性质的可能性。实际上, Sathyendranath 和 Morel(1983)认为,草食动物产生的生物碎屑、浮游植物的腐殖质和生物颗粒分解的可溶性有机物(黄色物质)等许多物质都能影响一类水体的光学性质,尤其是改变了水体的吸收特性。近些年,人们还深刻认识到,除浮游植物以外,与其共生的小型生物(如鞭毛生物、异养细菌和病毒等),在确定一类水体光学性质方面也起着重要作用(More 和 Ahn 1991; Stramski 和 Kiefer 1991; Ulloa 等 1992)。因此,该方法的基本思路是:浮游植物不是主宰一类水体颜色的惟一物质。相反,该方法仅指出,如果存在浮游植物,一类水体中其他物质的影响相对较小,而且这种影响能以浮游植物浓度的函数予以模拟。另一方面,二类水体中的颗粒物或黄色物质(或这两种类型物质)可对光学性质造成显著影响。而且这些影响与浮游植物浓度没有关系,因此不得不作为自变量予以处理。

两类水体的图示如图 1.3 所示。此图表示特定时间和地点某一波长的相关光学性质(如吸收率或反射率),并计算浮游植物(P)、黄质物质(Y)和悬浮物(S)的贡献率。样本的光学特性由三角图上的单点予以表示,其轴表示三种物质每一种物质的贡献率(利用三角图表示一个样本的实例,如图 1.4 所示)。如果任何一种物质作用信号增强,占主导地位,则表示样本的“点”将向相应的顶点移动(见图 1.4)。另一方面,如果三类物质的作用比较均等,样本点则向等边三角形的中央移动。由图 1.3 可清楚看出,在整个区域,能确定若干显著的类型,现分述如下:

- 仅有一种物质(P、S 或 Y)为主的情况。属于此种情况的水域分属图 1.3 中靠近 3 个顶点的 3 个较小的三角之一。在三个小三角内,每种物质的作用占总数的 2/3 以上;

- 第 3 种物质所起的作用很小,而以其他两种物质的作用为主的情况。这种情况由沿 3 个轴的 3 个梯形表示;

- 所有 3 种物质(P、S 和 Y)都起着重要作用的情况,由图 1.3 中央的内三角表示。从

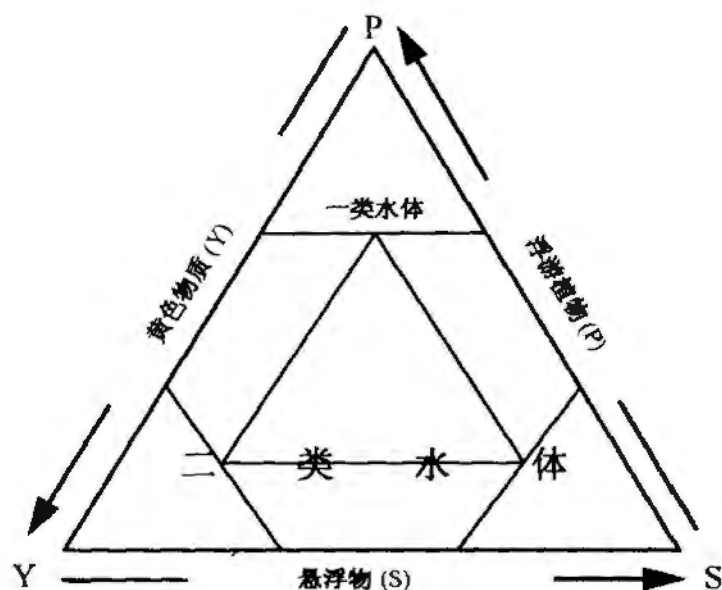


图 1.3 一类水体和二类水体图示(据 Prieur 和 Sathyendranath 1981;
还可参见 Morel 和 Antoine 1997;Dowell 1998)

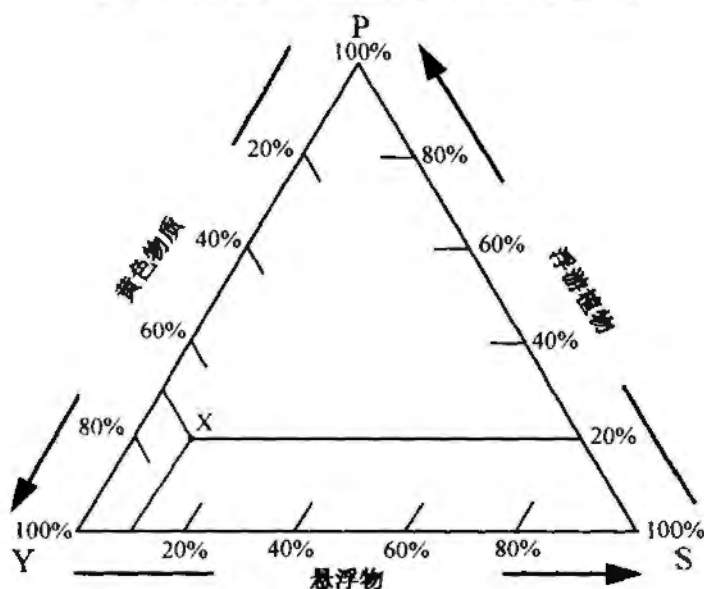


图 1.4 水体分类三角图(又称三线图)的示意图。该分类方法以浮游植物、黄色物质和悬浮物质等影响海水光学性质的 3 种成分的相对作用为依据,纯水光学性质本身不影响分类。我们希望基于 440 nm 的吸收系数进行水体分类(Prieur 和 Sathyendranath 1981)。三角图比例尺是按下述方法选定的:每一顶点的高度表示一种物质 100% 的吸收率。例如,P 顶点的高度表示 440 nm 浮游植物 100% 的吸收率,其他两个顶点的情况类似。假设,在 X 观测站 3 类物质 440 nm 的吸收率分别为:黄色物质吸收率 $a_y(440) = 0.7 \text{ m}^{-1}$,浮游植物吸收率 $a_p(440) = 0.2 \text{ m}^{-1}$,悬浮物质吸收率 $a_s(440) = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 。那么,黄色物质、浮游植物和悬浮物质每种成分的贡献比例分别为 70%、20% 和 10%。三角图上的 X 点表示 X 站,通过 X 点平行于 PS 边的下降线与黄色物质轴的交点值为 70%,平行于 YS 的下降线与浮游植物轴的交点值为 20%,另一下降线与表示悬浮物质的轴交于 10% 处。请注意:因为这种表示方法依据的是吸收率的相对值,而不是绝对值。所以,在另一观测站,3 种成分的吸收率可能不同于 X 站,但它们之间的比例相同,这样在三角图上该站会与 X 站的位置重叠。图上 X 站靠近 Y 顶点,表明该站是以黄色物质为主的二类水体。如果水体成分的吸收率靠近 S 顶点,则该水体属于以悬浮物质为主的二类水体。还要指出的一点是,一类水体都在 P 顶点附近。关于三线图应用和解释的详细信息可参见 Harris(1996)

光学观点来看,这种情况原理上属于最复杂的水体。

一类水体表示浮游植物起主要作用的情况,而二类水体代表了所有其他情况(见图 1.3)。要引起重视的是:分类的依据是三类物质所起的相对作用,与个别物质所起作用的大小无关。例如,一类水体可以分为寡营养(浮游植物缺乏)和富营养化(浮游植物丰富)条件,前提是:其他物质所起的作用相对很小。还要说明一点,净水的作用是恒定的背景光学性质,没有进行分类;这里,只有这 3 种变量成分与分类有关。

还应重申,图上的采样地点与所采用的波长有关。在多波长应用时,要保持谨慎,确保分类对所应用的所有波长都适用。还要明白的另一点是,图 1.3 和图 1.4 的三角表示法仅对光学深度水柱有效。在水体光学深度很小时,我们还应该认识到,水体底部也能对离水信号产生显著影响。

从一类水体和二类水体定性定义出发,我们利用图 1.3 推导出了定量定义。然而,必须强调指出,就其根本性质而言,分类不能应用于严格的定量方式。例如,由图 1.3 可清楚看出,即使在一类水体的上三角,沉积物和黄色物质相对于浮游植物浓度还有微小变化的空间。此分类方案的价值在于,作为一种简化手段,它将把以浮游植物相关信号为主的水体与光学性质复杂的水体区分开来,对于光学性质复杂的水体,这种简化设想可能是不成立的。

1.3 分类法的应用

从光学数据模拟和解译的观点来看,尽管一类水体和二类水体之间的区分非常简单,但这种区分具有重要意义。例如,分类就意味着一类水体的光学性质可以以叶绿素 a 浓度的函数进行模拟。此分类的依据基于以下假设:浮游植物及其衰变物质决定着一类水体的光学性质,叶绿素 a 可以视为是浮游植物浓度的指数。如果我们已知任一波长的光学性质值,则单变量模拟法还意味着,任一波长的光学性质可予以预测,因为这些关系带有普遍性。在海洋环境中,生物及色素成分,以及随叶绿素 a 浓度而变化的浮游植物特征光学性质经常改变。仅以叶绿素 a 浓度单一函数模拟一类水体不会完全忽视浮游植物种群性质的这种改变。可以假设,这类改变遵循某种可预测的规律。在发生变化时,与以上假设不符合的偏差,均作为噪声处理。

定义一类水体的笼统假设适用于广阔的大洋水域。这就使得应用完全依靠叶绿素 a 浓度作为输入的大尺度光学模式成为可能。从纯遥感角度考虑,导致了产生适用于一类水体浮游植物色素的反演算法。这些算法利用了一类水体的附加性质。例如,一类水体的大气订正利用这样的事实:在近红外波段,这类水体对水色的贡献可忽略不计(或可预测)(详见 2.9 节和 3.1.2 节)。

尤其在遥感条件下,过分强调分类法的重要性是很难的。当我们回顾 CZCS 的经验时,领会此分类法的价值特别容易:我们主要依据 CZCS 数据,获得了浮游植物分布的有用信息,因为 CZCS 算法利用了对一类水体适用的若干简化程序。如果人们坚持使用对所有可能条件都适用的算法,那么可能得出以下错误的结论:CZCS 没有用处,因为 CZCS 光谱分辨率有限。实际上,CZCS 色素反演算法利用蓝波段和绿波段两个波段简单之比,开发至少对一类水体有效的折中算法的思想是明智的,因为据认为,一类水体占世界大洋和某些内陆水体的 90% 以上。因此,即使一类水体仅占所有可能情况的一小部分(见图 1.3),但是这类水

体的地理范围广泛。实际上 CZCS 的成功是人所共知的,所以海洋水色遥感界的结论是:将来类似 CZCS 的简单仪器仍然有用,它将与现在已出现的更复杂的水色传感器同时发挥作用(IOC CG 1998)。

1.4 二类水体相对于一类水体的复杂性

在处理二类水体时,单变量模式的简便性不得不放弃,因为我们承认,至少有三种相关量(浮游植物、悬浮物和黄色物质,或许还有海底反射)彼此互不相关地变化。由图 1.3 可清楚看出,一类水体仅占所有可能情况的一小部分,而“二类水体”则是表示非一类水体的所有水体的专业术语。从建模角度考虑,这就意味着我们再也无法把给定波长的光学性质和色素浓度之间设想为一对一的对应关系。

从第 3 章和第 4 章我们将详尽地了解到,二类水体算法的开发增加了对水色遥感器的技术要求,特别在光谱分辨率及其辐射精确度和准确率方面。而且三变量反演算法更为复杂,并要求揭示至少三种变量和遥感信号之间非线性光谱变化的相互作用。遥感信号随物质成分浓度的变化而变化的量往往是极微小的,使得所提取信息的质量和可靠性难以保证。在某些波段,两种或两种以上物质可能以类似方式影响光学信号,使得物质区分特别困难。因此,在对待二类水体的问题上,人们不得不特别重视波段选择,重视算法中所采用的波段数。二类水体算法必须解决一类水体处理时所回避的若干问题。仅与二类水体算法有关的问题包括如下:

- 为一类水体开发的大气订正算法适用于二类水体吗?如果不适用,如何改正?是在算法中增加新波段,还是修改数学方法?
- 我们要求水色卫星增加哪些波段才能区分浮游植物、黄色物质和悬浮物?
- 设想在具有 3 个或 3 个以上自变量的复杂非线性系统情况下,我们如何能保证反演变量永远满足最低限度的精度和准确率性能指标?
- 算法中如何考虑不同类型悬浮物和黄色物质的不同光信号?
- 我们如何测定光信号是否受到海底反射的影响?
- 我们如何考虑浅海海底类型(如白砂海底、红泥海底、岩石海底、海藻覆盖海底)的自然变化及由此导致的光学性质的变化?
- 开发适用于各种条件的通用算法,或开发最适用于局部条件的地区算法,哪种方案更加合理?

以上问题将在第 2 章中予以详尽说明。

1.5 新算法的必要性

二类水体的地理分布是很广泛的:随着环境作用力的变化,由于某一特定地点水域性质的转变,一类水体和二类水体之间条件发生变化。在最初阶段,我们需要有一种算法区分一类水体和二类水体。这使得一类水体算法不适用的地区受到掩盖,人们把这些水域划分为更复杂的二类水体。在更高级阶段,我们需要能提取二类水体更丰富信息的算法。

尽管地球上被水覆盖的总面积仅有一小部分属于二类水体,但是这一部分水域却很重

要。它包括沿岸和内陆水体,其经济、社会和生态的重要意义是不可否认的(见第5章)。遥感是我们以天气时间尺度观测大洋环境的惟一手段。自 CZCS 发射以来,水色遥感科学稳步发展。随着水色遥感的进展,处理二类水体的新思路开始出现,而且有了实现的可能。因此水色遥感界有责任进一步抓住机会,掌握尽可能多的遥感信息提取方法。

我们之所以重视二类水体问题,还有另一方面的原因。例如,寡营养区和富营养区最新研究(Siegel 和 Michaels 1996; Bouman 等 2000)表明,黄色物质对光学性质的影响比人们至今想象的重要得多,变化多得多。有人可能认为,这些水域应属于一类水体,因为这些水域中的黄色物质来源于局地。然而,假设黄色物质对光学性质的影响只是叶绿素 a 浓度影响的一小部分,或光学性质可以仅仅以叶绿素 a 函数进行模拟,不再是合理的。因此从实际建模观点来看,将这些水域当做一类水体处理的意见是站不住的,这就提出这样一个问题:传统上一直作为一类水体看待的开阔大洋是否总是属于一类水体,或者是否间歇性或周期性地向二类水体转换?

二类水体算法的开发最终对一类水体也是有益的。一般算法或忽视其他物质对一类水体光学性质的影响,或认为其随浮游植物的变化而变化。正在开发的可应用于一类水体和二类水体的算法将使这一假设甚至在一类水体条件下得以放宽,因而有可能提高浮游植物浓度的反演精度。事实上有实例表明,考虑到除叶绿素 a 以外物质影响的算法改善了叶绿素自身的反演精度(Sathyendranath 等 1994)。

1.6 优于 CZCS 的新水色遥感器的优点

从以上讨论可清楚看出,当我们讨论二类水体算法时,我们不是指对一类水体算法微小的改动。相反,人们所要求的是实现大气订正和海洋要素成分反演的全新的算法。这一点是非常必要的,因为许多对一类水体适用的简化假设对于二类水体都不适用。大气订正算法不得不面对二类水体的现实:一类水体条件下,被当做只受大气影响的波段含有了不可忽视的、来自海洋的多变信号。一类水体许多通用算法是基于 2~3 个波段上水色信号的简单函数与叶绿素 a 浓度之间的相关性。实践证明,对一类水体非常有效的以上算法,对于二类水体的应用并不完全有效,因为影响水色的变量在一个以上。因此,为了开发适用于二类水体的有效算法,我们不得不放弃只采用 2~3 个波段的简单算法,转而使用多变量反演的多波段算法。利用 CZCS 的少量波段不可能开发出精细的多波段算法。

二类水体遥感对传感器提出了额外的要求:如第 2 章所述,水生环境中物质浓度与海洋水色之间的关系是非线性的,人们为了获得有用信息,不得不研究信号的微小变化。这就是说,我们需要具有高信噪比的仪器。邻近陆地以及碰到高反射水体的可能性使得传感器必须具有宽的动态范围。上述因素一并予以考虑,就构成了比陆地遥感和开阔海域遥感更加严格的技术条件(表 1.1)。若干第二代水色遥感器技术指标比 CZCS 高得多,符合二类水体遥感的要求(IOCCG 1999)。二类水体遥感前景看好,必然带来二类水体遥感算法开发研究的“热潮”。目前正是评价二类水体水色遥感领域迄今所取得的进展(第 3 章),制订二类水体水色遥感进一步发展策略(第 6 章)的最佳时机。

表 1.1 陆地、开阔海和二类水体可见光遥感(引自 Janet Campbell 提供的资料)

陆 地	开阔海域(一类水体)	近海和内陆水域(二类水体)
传感器指标		
宽波段	窄波段	窄波段
宽动态范围	窄动态范围	宽动态范围
低信噪比	高信噪比	高信噪比
技 术		
聚类分析、分类	大气订正、色素算法	辐射传输、多变量技术
被监测特征指标		
空间尺度~10m	空间尺度~1 km	空间尺度~30m
时间尺度~10~100d	时间尺度~1d	时间尺度~0.2d
固定边界	流体边界	流体边界
多光谱特征	一种光谱特征	多光谱特征
预期的应用		
土地利用/土地覆盖	色素浓度	三种物质浓度
随时间的变化	藻类过量繁殖动态、生产力	藻类过量繁殖动态、生产力、泥沙输运、海岸动态
破坏与疾病	碳循环、有害藻类 过量繁殖	碳循环、有害藻类过量繁殖、 水质、水产养殖、渔业、休闲活动

1.7 新方法的必要性

二类水体遥感与沿岸和内陆水体遥感几乎是同义语,因为正是在沿岸和内陆水域,人们才最可能碰到二类水体的情况。在沿岸和内陆水体,监测特征的时空尺度通常不同于其他环境的时空尺度,所预测的应用更是多种多样(见表 1.1)。这方面我们需要的是新的方法,而不是为其他环境研制的传感器和技术的简单改造。二类水体成功遥感需要使用地面分辨率和重复周期与被监测特征的尺度一致的合适传感器,并辅以周密设计的现场实验。第 4 章将详尽探讨二类水体传感器的技术性能。

遥感具有明确的应用性,遥感工作及其投资与所预测的应用密切相关。遥感在沿岸和内陆水体上的应用是多方面的。表 1.1 列出了一些主要的应用,第 5 章将就应用主题进行详尽探讨。

在第 2 章,我们将详细讨论浮游植物、黄色物质和悬浮物的光学特征,通过简单的模型,讨论这些物质对水色的影响。

第2章 二类水体水色

S.Sathyendranath R.P.Bukata R.Arnone M.D.Dowell
C.O.Davis M.Babin J.F.Berthon O.V.Kopelevich
J.W.Campbell

2.1 前言

水色取决于纯水自身以及水中有机物、无机物、颗粒和溶解物对可见光的吸收和散射。我们认为,二类水体中的这些物质彼此独自变化,所以我们必须分别予以考虑。另外,在水质清澈的浅海,二类水体的水色还受海底反射的影响,因此我们一定要研究光学深度有限的水体(开阔海光学深度无限系假想水体、一类水体)。而且,我们还必须了解二类水体大气订正程序的意义。

水色信号解译的第一步是认识如何以水体中各种物质浓度的函数表达遥感探测的信号(图 2.1)。人们可以将此视为前向模拟(forward modelling)问题,这是本章讨论的主题。从遥感信号反演水中各物质浓度的逆向问题(图 2.1)将在第 3 章进行讨论。

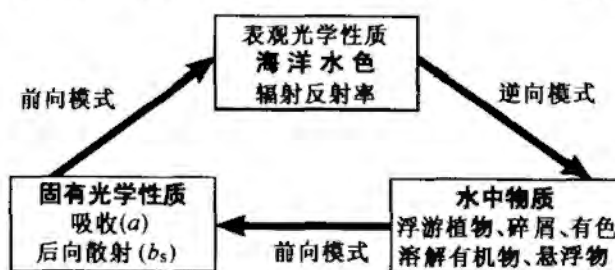


图 2.1 水色等表观光学性质、水中物质和固有光学性质之间相互关系示意图

本章和下一章是本报告中技术性最强的部分,包括了许多科学术语和符号。本章给出每条术语的定义及扼要说明。这些术语和符号为海洋光学文献广泛采用,感兴趣的读者可参考几本优秀的教材,如 Jerlov(1976)、Monin(1983)、Shifrin(1988)、Kirk(1994)、Mobley(1994)和 Bukata 等(1995)的著作。

本章的目的是扼要阐述并确定影响二类水体水色观测变化的过程。为此目的,我们将逐一解答下列问题:

- 哪些光学过程决定海洋水色? 这些光学过程如何用数学公式表达?
- 水体底部的光反射如何影响水色?
- 我们需了解重要海水成分的哪些光学性质? 这些性质如何量化?

• 二类水体大气订正有哪些特殊考虑?

本章主要探讨二类水体的水中过程和模拟,有关大气订正问题不是重点。但从科学的完整性考虑,有关二类水体大气订正的特殊问题将略加阐述。

我们首先探讨水色研究所必须了解的基本概念,并不想向读者提供有关水色问题的大量文献,而只是提供认识本章讨论的海洋水色模式所必需的基本概念。在讨论二类水体特殊问题之前,首先给出一般的概念。

2.2 海洋水色

海洋本来颜色取决于海面反射率 R 的光谱变化。在 z 深度处, R 定义为

$$R(\lambda, z) = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} \quad (2.1)$$

式中, $E_u(\lambda, z)$ 为所有上行方向的辐照度(单位面积的辐射通量),或波长为 λ 、深度为 z 的上行辐照度; $E_d(\lambda, z)$ 为所有下行方向的辐照度,或相同波长和深度的下行辐照度。

同时还使用反照率,某种意义上可代替反射率。例如,海底反照率 A (见 2.5 节)定义为水柱底部上行辐照度与下行辐照度之比。

海水光学性质均与波长相关。但是在以下讨论之中,为阐述的简便起见,符号中的波长标注有时会省略。光的波长随介质的折射指数变化,所以本报告所提到的特定波长,系指真空中波长。

从实践观点来看, E_u 为面朝下余弦平板采集器所接收到的通量与采集器表面积之比。同样, E_d 则采用表面直接朝上的平板采集器予以测量。反射率 R 为一无量纲量。

平板表面所测量到的以上辐照度必须区别于标量辐照度,即球面采集器所接收到的所有方向的测量通量。标量辐照度通常用 E_0 表示, E_0 的量纲与辐照度相同,而且还分为下行量和上行量(分别用 E_{0d} 和 E_{0u} 表示)。

上行辐照度(海表反射率分子)为离开海表面所有光的量度。然而,窄视场遥感探测器接收不到所有的离水辐照度,因为探测器的形状及其几何体制限制了探测到的信号只是这一通量的一小部分。因此,如果光场不包括通量如何按方向而变化的信息,则对光场的描述是不完全的。单位面积和单位立体角测量到的辐射通量——辐射率,是对光场的完整描述。如果 $L(\theta, \phi)$ 为天顶角 θ 和方位角 ϕ 限制方向内的辐射率,则通过对 L 进行适当角度区间上的积分,就能获得各有关辐照度。例如,我们具有:

$$E_d(\lambda, z) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\lambda, z, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.2)$$

和
$$E_{0d}(\lambda, z) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\lambda, z, \theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.3)$$

上式中垂直向下指向表示天顶角为零。根据辐射率分布,对 $\pi/2$ 至 π 范围内所有天顶角辐射率积分,即获得上行辐照度(E_u 和 E_{0u})。就遥感而言,通常使用与海面反射率 R 密切相关的遥感反射率(R_{RS}),但是通常使用“上行辐射率”,而不用“辐照度”,遥感反射率定义为

$$R_{RS}(\theta, \phi, \lambda, 0) = \frac{L(\theta, \phi, \lambda, 0)}{E_d(\lambda, 0)} \quad (2.4)$$

辐射率中的 θ 和 ϕ 表明, 离水辐射率随观测角(在海面 $z=0$)而变化。遥感反射率具有量纲为 sr^{-1} 。换句话说, 遥感反射率按观测角(θ 和 ϕ)的函数, 将反射率 R 分解为分量反射率。通过比例因子, 如 $Q(\theta, \phi, \lambda)$, 建立 $R_{\text{RS}}(\theta, \phi, \lambda, 0)$ 与 $R(\lambda, 0)$ 的关系

$$Q(\theta, \phi, \lambda) = \frac{R(\lambda, 0)}{R_{\text{RS}}(\theta, \phi, \lambda, 0)} \quad (2.5)$$

比例因子 Q 量纲为 sr 。

说明: (2.5) 式中遥感反射率(R_{RS})和反射率(R)系指刚好在海表面以下的信号。因此, 水气界面效应(透射率, 内反射和折射)必须予以适当考虑后, 才能将水面以下的 R_{RS} 与遥感信号进行比较。

水色遥感的目标是根据水色信号光谱形式和量的大小, 推导获得水中物质类型及其浓度的定量信息。因此, 这需以影响水色的水中物质浓度函数, 表达反射率和遥感反射率。这不是一项简单的任务, 它包括了许多步骤。第一步是认识水色遥感的各种光学性质。

2.3 固有光学性质和表观光学性质

入射光场的天顶角角度结构能改变水色和遥感反射率。换言之, 它是 Preisendorfer (1976) 定义的表观光学性质。**表观光学性质**系指受光场角分布以及受介质中物质的性质和数量影响的那些光学性质。本报告讨论的另一表观光学性质是下行辐照度漫射衰减系数, 或下行辐照度随水深增加的递减率 K_d 。根据定义, 我们得出

$$\frac{dE_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} = -K_d(\lambda) dz \quad (2.6)$$

衰减系数 K_d 用于光穿透模式, 如计算光照深度的初级产量(见第 5 章)。衰减系数还常常用做海水透明度的指数, 也是根据水色数据能推导的地球物理量之一(见第 5 章)。此系数还出现在水色模式之中, 这将在本章后部分讨论。

两类上行辐照度漫射衰减系数也是水色遥感研究所感兴趣的。第一类系数定义为**上行辐照度随水深增加的递减率**(K_u)。 K_u 公式与 (2.6) 式类似, 惟一差别是 K_u 用于处理上行辐照度 E_u , 而不是处理下行辐照度 E_d 。若上行辐照度所处水深较浅(如在海表层), K_u 系数就是用于计算深度 z 处上行辐照度的适当衰减系数。它也是经典海洋光学文献中常出现的上行辐照度漫射衰减系数。然而近十多年来, 上行辐照度另一衰减系数在水色模式的开发中得到普遍的应用。Kirk(1989)引入的此量通常记为 κ , 定义为某一深度产生的**上行辐照度随水深下降的递减率**。若在较大深度处产生一定的上行通量, κ 的作用是用于计算达到较浅深度(如海面)的上行辐照度。所有上述衰减系数的量纲均为 L^{-1} 。

依据水中物质定量解译遥感信号要求我们能确认和分离入射光场变化对所产生的信号的影响。因此, 水色模拟的第一步是利用**固有光学性质**(Preisendorfer 1976)表达遥感反射率, 而此表达与入射光场角分布的变化无关, 仅取决于水中物质的类型和浓度。

为了认识水色和海水固有光学性质之间的关系, 已开展了多项海洋辐射传输研究。这些研究考虑到控制着自然水体中光子传播碰撞方式的吸收和散射过程。吸收过程排除光场的光子。然而散射过程改变了光子传播方向, 影响介质的光收支平衡。散射可以分为弹性散射和非弹性散射。如果发生**弹性散射**, 散射光子具有与入射光子相同的波长; 而非弹性散

射则意味着散射光子的波长有所改变。水的拉曼(Raman)散射(非弹性散射过程)是遥感领域的重要量。溶解有机物和浮游植物荧光发射在水色模式中也类似地模拟为非弹性散射。

当撞冲辐射是可见光谱区(波长约 400~700 nm)的自然光时,上述过程将决定着海洋水色,因此,被观测水体的颜色就是观测入射通量(下行的、太阳直射、天空漫射辐照度)与水体及水中有机物和无机物发生相互作用的直接结果,二类水体中的有机物和无机物呈现时空变化,因此水体也呈现相应的水色变化。

与此有关的固有光学性质是**吸收系数** a (决定着由于吸收过程介质中单位光学路径长度通量和单位入射通量的衰减指数)和**散射系数** b (同样决定着由于散射引起的通量衰减指数)。弹性散射和非弹性散射过程的散射系数必须分别予以确定。介质通常的配准单色通量入射和无限薄介质表面的吸收和散射两种系数也要予以确定。与表观光学性质不同,自然光照条件的吸收和散射两种系数不予确定。吸收和散射系数的量纲为 L^{-1} 。

由于散射意味着入射光子方向的改变,除非我们将散射通量描述为散射角的函数,否则散射的描述是不完整的。**体散射函数** $[\beta(\chi)]$ 是以散射角 χ 的函数描述散射的固有光学性质,它的量纲为 $L^{-1}sr^{-1}$ 。所有立体角体散射函数的积分得到散射系数。在非弹性散射情况下,我们还必须描述散射通量的波长分布。

根据以上基本量能导出其他固有光学性质。例如,水色模式中经常出现的**后向散射系数** b_b 定义为所有向后方向($\chi > 90^\circ$)体散射函数 $\beta(\chi)$ 的积分。注意: b_b 不同于水色模式中常用的**上行散射系数** b_u (有时系指漫射后向散射系数)。上行散射系数系指自然光照条件下的散射,因此它属于表观光学性质。而且,此系数表示上行方向(天顶角 $\theta > 90^\circ$),而不是后方向上的 $\beta(\chi)$ 的积分。另一固有光学性质,**总的体积衰减系数** c 定义为吸收和散射系数之和($c = a + b$)。此处需说明的是:总衰减系数 c 不同于前面定义的表现光学性质 K_d 、 K_u 和 κ 。例如,我们已了解水生介质通常适用的以下关系: $a \leq K_d \leq c$, 和 $K_d \approx K_u$, 但是 $K_d < \kappa$ 。

利用面朝下或朝上的平板采集器可进行 K_d 和 R 等表观光学性质测量,而采集器入射通量的角分布则依据环境条件判定。另一方面,固有光学性质则根据标准入射进行估算。在测量固有光学性质时,沿入射通量方向进行距离测量,而像 K_d 等表观光学性质则依据水体垂直间隔进行测量。因此,固有光学性质和表观光学性质之间的关系与进行表观性质测量的光场角分布密切相关。所以,在固有光学性质和表观光学性质结合时,通常有必要描述光场角分布。通常用来描述光场角分布的两种光场性质是 μ_d 和 μ_u , 分别表示**下行辐照度平均余弦**和**上行辐照度平均余弦**。平均余弦为光子通量入射角余弦加权平均值,加权函数为每一入射方向的辐射量。平均余弦根据辐射场或根据对 E_{0d} 和 E_d 的测量进行估算。 μ_d 定义为

$$\mu_d = \frac{E_d}{E_{0d}} \quad (2.7)$$

同样,根据平面上行辐照度与上行标量辐照度之比,也能进行 μ_u 的估算。

平均余弦的倒数确定了单位垂直偏移量的平均路径长度。海表层上行通量入射的平均余弦则根据光在大气中传输的条件加以测定。但是散射可改变水柱内的平均余弦。

与表观光学性质不同,固有光学性质具有不受上述光照条件影响的优点。处理这些量还有以下优点:在多物质介质中,只需增加单个物质的贡献,就可获得**体积(或总的)固有光学性质**。这种严格的添加性不适用于表观光学性质,尤其是高散射性介质中的表观光学性质。

现已认识到,造成一类水体固有光学性质变化的主要物质是浮游植物种群和与浮游植物协同变化的伴生物。在二类水体中,除浮游植物外,水生的和陆源悬浮颗粒物及溶解有机物的浓度随时在变化,这些物质的变化与浮游植物浓度无关。事实上,二类水体中浮游植物以外物质的光学性质通常决定了体光学性质。因为水色遥感的目标是定量反演水体物质的信息,我们只有获得这些主要物质的固有光学性质信息,才能成功地模拟海洋水色。

遥感应用的水色模拟工作围绕以下两大问题进行:

- 以固有光学性质函数表达水色的理论模式的开发;
- 水体中物质固有光学性质及其随物质浓度的变化而变化的分类归纳。

第二步对于以单个物质光学性质及其浓度为函数表达体积固有光学性质至关重要。而且,水色数据的实际解译还应考虑这些物质光学特征的自然变化。

在下一节,我们将概述把固有光学性质和表现光学性质结合起来的水色模式。

2.4 深海水体水色模式

表现光学性质和固有光学性质之间关系的测定,要求我们以切实可行的方式模拟海洋中的辐射传输过程。这方面已采用了若干辐射传输方法。

其中一种方法是水生介质中光子传播的蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法。此方法应用概率函数决定光子与介质相互作用的归宿,并求出许多光子的平均值,以便计算合成光场。概率函数则根据介质固有光学性质进行选择。Plass 和 Kattawar(1972)与 Kattawar 和 Plass(1972)开创了蒙特卡罗分析法在大气和海洋光子相互作用上的应用。自此以后,许多学者,如(Gordon 和 Brown(1973)、Gordon 等(1975)、Kirk(1981a, b; 1984)、Jerome 等(1988)、Stavn 和 Weidemann(1989)、Bannister(1990)、Morel 和 Gentili(1991, 1993)以及 Sathyendranath 和 Platt(1997, 1998)使用蒙特卡罗模拟法分析自然水体固有光学性质与表现光学性质的关系。

研究复杂光学介质中辐射传输的其他技术也用于水色研究。这些技术包括双流(two-flow)法(Kozlyaninov 和 Pelevin 1965; Aas 1987)、准单次散射近似法(Gordon 等 1975, Sathyendranath 和 Platt 1997, 1998)和散射连续阶法(Morel 和 Prieur 1977)。

上述研究所得出的结论存在微小的差别,这或许是不足为奇的。这些差异有些是由于所采用的技术不同的缘故,有些则是由于介质光学性质的技术规范不同的缘故,但是在实践中不会有太大的变化。所有上述研究都得到以下可靠的一致性结果:在无弹性散射的过程中,海面反射率能用后向散射系数(b_b)和吸收系数(a)的简单公式表达。换言之,

$$R(0) = f \frac{b_b}{(a + b_b)} \quad (2.8)$$

式中, f 为已知的具有某种变化的参数。在 $b_b \ll a$ 的情况下,如 Morel 和 Prieur(1977)所指出,(2.8)式可以用 $R = fb_b/a$ 予以取代,这对于一类水体是适用的。然而,有必要说明一点, b_b 比 a 小得多,这一假设将是以悬浮颗粒物为主的二类水体的最糟糕的近似值。海面的反射率还可以用下行和上行通量衰减系数的函数予以表达。例如,我们可以得到下式(Aas 1987; Kirk 1989):

$$R(0) = [\mu_d(K_d + \kappa)]^{-1} b_u \quad (2.9)$$

如果我们注意到(Sathyendranath 和 Platt 1997) $b_u = sb_b$ (式中 s 为与光入射角和体散射

函数形状相关的状态因子), K_d 近似等于 $(a + b_b)/\mu_d$, 而且 κ 等于 $(a + b_b)/\mu_u$, 将此代入 (2.9) 式, 并设定

$$f = \frac{S\mu_u}{(\mu_d + \mu_u)} \quad (2.10)$$

即可恢复到 (2.8) 式。因此, 以漫射衰减系数和以固有光学性质为基础的模式彼此都是一致的。我们根据 (2.10) 式 (见 Gordon 等 1975; Morel 和 Gentili 1991; Kirk 1994; Sathyendranath 和 Platt 1997), 能进行以下推导: 比例因子 f 与体散射函数形状与光场天顶角分布密切相关。二类水体颗粒的体散射函数不同于一类水体的体散射函数。分子散射和颗粒散射的相对重要性在一类水体和二类水体之间还发生变化。人们可以预测到: 这些因子将影响 f 值, 一类水体和二类水体之间 f 值的差异非常明显。

如前所述的那些模式, 在遥感应用上非常重要, 因为这些模式将反射率 (R) 与固有光学性质 (吸收和后向散射系数) 关联起来, 从环境影响中分离出参数 f 。大多数上述模式的理论研究都将 b_b 和 a 与反射率 R 相关。但是一些理论研究还集中于遥感反射率 R_{RS} 和海水的固有光学性质关系研究 (Morel 和 Gentili 1993; Jerome 等 1996) 上。

上述结果可应用于匀质水体的深海水域。对层化水体还开发了相应的数值模式 (Gordon 和 McCluney 1975; Gordon 和 Clark 1980; Sathyendranath 和 Platt 1989)。Gordon 及其同事 (Gordon 和 McCluney 1975; Gordon 和 Clark 1980) 建议, 如果匀质水柱模式所采用的固有光学性质经适当方式的加权, 匀质水柱模式能用于处理非匀质水体。所采用的加权函数要考虑以下事实: 水体深水层对于离水辐射率只有渐次的较小贡献, 因为光在水体中向下传输时发生衰减, 散射之后向上传输时再次发生衰减。

2.4.1 非弹性过程对水色的影响

至今所讨论的反射率模式无一例外地只考虑对漫射反射率有影响的弹性过程。换句话说, 我们只处理弹性散射, 在这种散射中, 入射光或激励波长 (λ_{ex}) 和散射光或发射波长 (λ_{em}) 之间没有差异。这就是说, 在弹性散射情况下, $\lambda_{em} = \lambda_{ex}$ 。另一方面, 非弹性或全光谱 (trans-spectral) 过程与光的重新分布有关, 因此 $\lambda_{ex} \neq \lambda_{em}$ 。总之, 波长越长, 这一波长改变越明显 ($\lambda_{ex} < \lambda_{em}$)。

被动水色研究中具有重要意义的全光谱过程可以分为拉曼散射 (由于纯水) 和太阳激发荧光。在近岸海域, 溶解有机物和两类浮游植物色素 (叶绿素 a 和藻红素) 产生荧光。对叶绿素 a 荧光已进行了广泛的研究。有人提出, 叶绿素 a 荧光可以用做根据遥感水色数据推导叶绿素 a 浓度的替代技术 (例如 Gower 1980; Gower 和 Borstad 1990)。藻红素产生的荧光已由辐射测量数据观测到 (Culver 1996), 使用主动激光雷达技术的遥感亦观测到此荧光 (Hoge 等 1986)。

Haltrin 和 Kattawar (1993)、Lee 等 (1994)、Haltrin 等 (1997) 和 Sathyendranath 和 Platt (1998) 调查了反射率模式包纳非弹性过程的问题。根据 Haltrin 等人 (1997) 的意见, 在寡营养水域, 拉曼散射以叶绿素和溶解有机物的荧光 (特定波长除外) 影响为主。在二类水体, 总的非弹性反射率所受到的影响可能发生变化, 以致人们不认为拉曼散射有那么显著, 因为已知海水拉曼散射的重要性随海水透明度的下降而减小。

2.5 海底对水色的影响

对于任何二类水体而言,人们不能忽视这样的可能性:海水的光学深度很浅(浅的光学深度的含义是:漫射衰减系数 K_d 与几何深度 z 的乘积很小)。在这种情况下,海表层反射率和海水其他光学性质之间的关系,如[(2.8)式和(2.9)式],将有所不同,因此必须考虑以下事实:浅水体的信号比深水体的信号弱得多。另一方面,离水辐射率将增加一个量——海底反射光。

在浅海水域,遥感系统可频繁获得海底图像。遥感器接收到明显信号的最大深度随波长和海水透明度而变化。海水自身的吸收作用限制了较长波长的穿透深度,而溶解有机物和浮游植物的吸收作用限制了 480nm 以下波长的穿透深度。在最清澈的水域,490 nm 处窄波段可探测的海底深度在 30m。在同一海域,达到 20m 的光谱范围为 430~580 nm。达到 10m 深度,光谱范围为 400~610 nm。光谱衰减随深度的变化是利用遥感数据进行水深和海底特征测量的关键因素。穿透深度和穿透的光谱范围随海水透明度急剧变化。在典型的近岸水域,可探测 10m 或 10m 以下海底。在高度浑浊的水域,如悬浮泥沙浓度极高的河流出口,所有波长上光的穿透深度都在 1m 以下,海底是不可见的。

浅海水域水色模拟法一直采用双流方程获得辐射传输方程的近似解。早期的工作(如 Lyzenga 1978; Philpot 1987, 1989)主要是利用具有高空间分辨率的多光谱数据(如 Landsat 卫星 TM 数据)。最近的方法(Maritorena 等 1994; Lee 等 1998 a, 1999)利用了高光谱分辨率数据已有的信息。Maritorena 等(1994)采用的双流方程,功能上类似于早期文献中的方程,能用来描述带普遍性的问题。在海底为可探测时,我们认为 $E_u(0)$ 包含两个量,一个是水柱的量,另一个是海底的量。

在水深 H 处,对于受全吸收海底限制的水体而言,对深度间隔 0 至 H 所有深度上行辐射度贡献的积分得到水柱的贡献。如果现在我们假定海底为一具有反照率 A 的朗伯(均匀漫射)反射体,已知上行和下行辐照度衰减系数,就能计算出海底的贡献。最后,我们得到下式(Maritorena 等 1994)

$$R(0, H) = (K_d + \kappa)^{-1} b_u + [A - (K_d + \kappa)^{-1} b_u] \exp[-(K_d + \kappa)H] \quad (2.11)$$

式中 $R(0, H)$ 表示深度 H 水体表层的反射率,而且我们假定应用于水体和海底的 κ 值是相同的。

(2.11)式结果的真实性必须与蒙特卡罗模拟和现场观测进行比较而予以检验(Maritorena 等 1994)。这些方程是影响浅海水体水色因子最简单的表达,却能完全表达出浅海遥感的复杂性,尤其当我们考虑到(2.11)式所有光学量均与波长相关时。

人们一旦充分认识了水色与固有光学性质之间的关系,下一步分析就是以海水成分及其浓度表达固有光学性质。下一节讨论这方面的问题。

2.6 体积光学性质与海水成分之间的关系

迄今所使用的固有光学性质为**体积光学性质**,在这一意义上它表示海水及其成分的综合效应。为了定量表达单个成分的作用,吸收系数 a 可以用上述每种成分贡献之和予以表

达。反过来每种成分的贡献能以该种成分物质浓度和相应的比(Specific)吸收系数(量纲 $L^2 M^{-1}$)的乘积表达,此处设被测浓度量纲为 ML^{-3} 。其他体积固有光学性质按吸收系数作类似处理,以贡献物质浓度简单线性函数表达。要说明的是,在湖沼学文献中,比系数系指光学横截面(Bukata 等 1981 b, 1995)。比固有光学性质建立了自然水体体积固有光学性质及其中有机物和无机物浓度之间的联系。

介质的比固有光学性质就是该介质单个物质,即物质单位浓度的固有光学性质。除海水自身恒定背景贡献外,若浮游植物、无机悬浮颗粒和黄色物质(和碎屑颗粒)对海水体积吸收系数有贡献,我们则可写出下式:

$$a = a_w + Pa_p^* + Ya_y^* + Sa_s^* \quad (2.12)$$

式中,下标 w, p, y 和 s 分别表示水、浮游植物、黄色物质和无机悬浮颗粒, P、Y 和 S 分别表示相应物质的浓度。上式使用的符号中,星号表示比系数。

同样,后向散射系数也分为三部分:

$$b_b = b_{bw} + Pb_{bp}^* + Sb_{bs}^* \quad (2.13)$$

说明:(2.13)式假定黄色物质(溶解物)不对体积散射系数作出显著贡献。但是在以上分类中,黄色物质还包括碎屑物,从原则上来看,碎屑物产生散射。如果必要的话,(2.13)式可增加考虑碎屑颗粒散射的补充项。

按水中物质划分体积固有光学性质的类型对于一类水体和二类水体应同等有效。二类水体区分于一类水体的标志就是除浮游植物外,增加了悬浮颗粒物(在一类水体中,对此项有贡献的因子或假定很小,可忽略不计,或假定它与浮游植物项协同变化)。而且人们承认这种可能性:二类水体黄色物质吸收贡献比一类水体重要得多,而且其变化与浮游植物无关。

海水表观光学性质、固有光学性质和比光学性质都与波长相关。正是个别物质特定波长函数决定着二类水体的水色信号。图 2.2 给出不同类型水体的遥感反射率光谱。由图

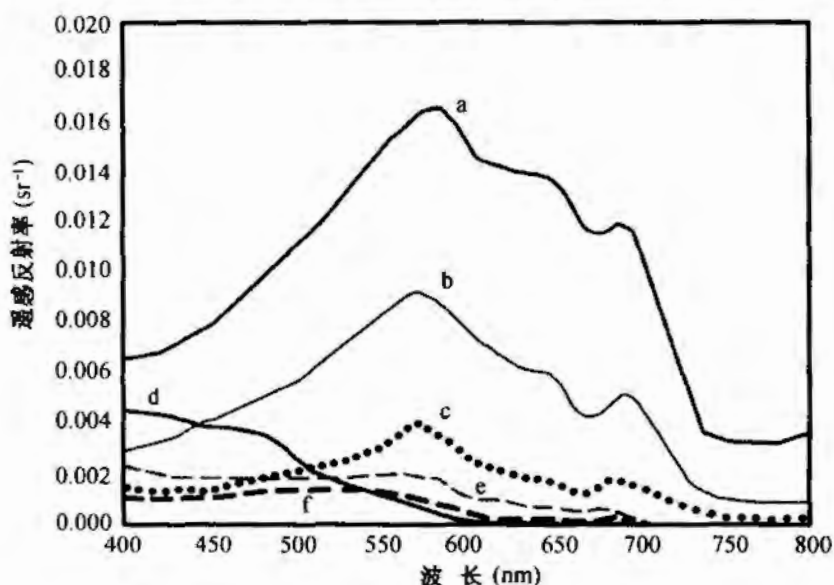


图 2.2 不同类型水体遥感反射率光谱示例

a. 极高泥沙含量和黄色物质浓度的水体; b. 高泥沙含量和黄色物质浓度的水体; c. 中等泥沙含量和黄色物质浓度(含浮游植物)的水体; d. 清澈水体; e. 中等叶绿素和泥沙含量的水体; f. 中等叶绿素含量的水体。a、b、c 和 e 为二类水体; d 和 f 为一类水体。Robert Arnone 提供数据

2.2 可清楚看出, 遥感反射率(R_{RS})信号随水中成分的变化而有明显的变化。单个物质比光学性质的光谱质量决定着水中单个成分与 R_{RS} 信号之间相关性的准确性质。下一节我们将扼要地探讨已知的特征光谱。

2.7 水中物质固有的光学性质

2.7.1 浮游植物吸收特征

在研究浮游植物光学性质时, 浮游植物主色素叶绿素 a 的含量被视为浮游植物浓度的指数。据估算, 吸收和散射的比系数与叶绿素 a 浓度相关。因为含色素的浮游植物是一类水体中的主要染色剂, 所以在浮游植物比吸收谱研究方面已开展了大量的工作。理论研究 (Duysens 1956; Kirk 1975 a, b; Morel 和 Bricaud 1981) 和直接观测 (Kirk 和 Tyler 1986; Sathyendranath 等 1987; Mitchell 和 Kiefer, 1988 a, b; Morel 1988; Bricaud 和 Stramski 1990; Bukata 等 1991; Gallie 和 Murtha 1992; Hoepffner 和 Sathyendranath 1992, 1993) 已使人们认识到: 浮游植物比吸收系数的数值范围较宽。现已证实, 这些数值与构成浮游植物种群的藻类及其生理状态密切相关。因此, 这些数值有时空变化。例如, 图 2.3(a) 表示康斯坦茨湖可能发生的某种浮游植物的比吸收光谱 (Gege 1998), 图 2.3(b) 表示浮游植物吸收特征随生长环境的变化而变化 (Johnsen 等 1994)。

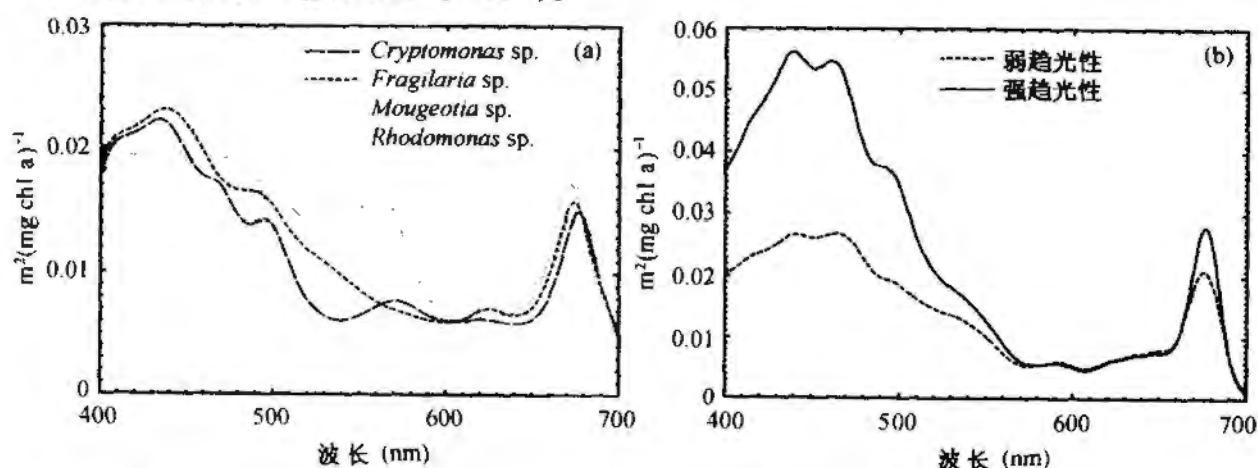


图 2.3 浮游植物吸收光谱示例。(a) Gege(1998)编辑的康斯坦茨湖优势浮游植物物种数据; (b) 强趋光性和弱趋光性 *Prorocentrum minimum* 细胞的比吸收光谱 (Geir Johnsen 提供数据, 引自 Johnsen 等 1994)

已观测到一类水体中浮游植物动态及相应的浮游植物光学性质的一些常见趋势。例如, 一般而言, 在寡营养水域观测到的浮游植物具有比富营养化(浮游植物丰富)水域的浮游植物较高的比吸收系数(图 2.4)。某些学者(如 Prieur 和 Sathyendranath 1981; Bricaud 等 1995; Cleveland 1995)利用浮游植物吸收和叶绿素 a 浓度之间的非线性关系, 进行了上述普遍趋势的参数分析, 并给出不同地区的变化 (Lutz 等 1996)。

这类浮游植物吸收模式不可直接用于二类水体, 因为沿岸水体和内陆水体浮游植物种群成分和动力机制明显地不同于开阔大洋的观测值。例如, Stuart 等(1998)进行了阿拉伯

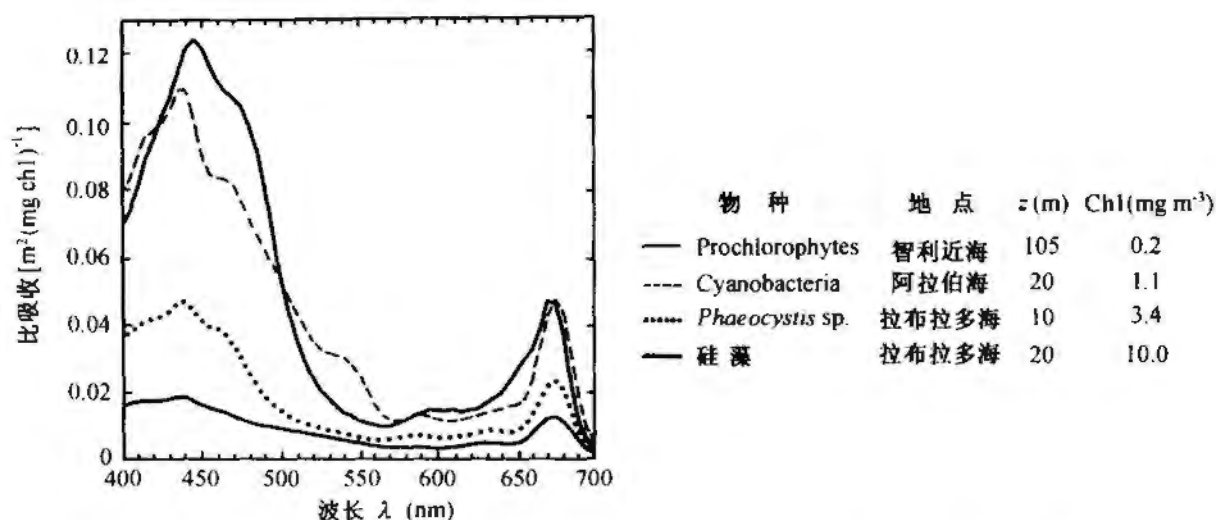


图 2.4 不同海洋环境自然浮游植物种群比吸收光谱示例。该图表示了每个样本的优势浮游植物类或物种(根据高效液相色谱法分析和显微镜观察确定)。采样时环境叶绿素 a 浓度为已知。引自加拿大贝德福海洋研究所海洋生物学组未公开的数据。

海与温哥华岛沿岸水域浮游植物光学性质的比较,发现差异很大。

如第 1 章所述,从遥感应用方面考虑,浮游植物往往也对其他微生物光学性质产生影响。这为从自然环境中获取数据提供了便利的条件。然而,与现场采样不同,实验室内浮游植物养殖能保持其更大的“纯粹性”,使得直接比较浮游植物光学性质现场测量与实验室测量十分困难。而且在自然环境中,浮游植物任何时候都同时存在若干物种,而实验室测量一般是进行单一特定培育物种的测量,这也使得浮游植物光学性质实验室测量与现场测量的比较十分困难。

2.7.2 无机悬浮物的吸收

自然水体中悬浮无机颗粒物通常反映了相邻陆地或海盆区的地质结构和物质组成。沿岸地区的地质多样性、海流的动态变化和余流的多变性,造成当地悬浮物散射特性和吸收特性的巨大差异。二类水体水色数据解译的难点之一是缺乏有关陆源悬浮物比固有光学性质光谱变化的充分信息。无机物比吸收系数和散射系数谱与颗粒形状、粒径分布和折射指数密切相关。根据 Morel 和 Prieur (1977)、Whitlock 等 (1981)、Prieur 和 Sathyendranath (1981)、Bukata 等 (1991)、Gallie 和 Murtha (1992) 等有关光谱性质不一致性的报告,这一点非常明显。有关无机悬浮物吸收特性的详细探讨,请参见 Bukata 等 (1995) 的报告。这里定义的无机物不包括一类水体测量的颗粒“碎屑”物,它显然是有机物的来源。这将在下面详细讨论。

2.7.3 黄色物质的吸收

许多学者(如 Unoki 等 1978; Bricaud 等 1981; Bukata 等 1981 b; Roesler 等 1989; Gallegos 等 1990)报告称,溶解有机物吸收光谱具有良好的一致性。根据他们的研究,黄色物质吸收谱 a_y 能以指数函数形式表达:

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0)\exp[-S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2.14)$$

式中 λ_0 为基准波长; S 为指数曲线斜率的经验值。Roesler 等(1989)指出, 黄色物质已公开的 S 平均值为 0.016 nm^{-1} , 标准偏差为 0.002 nm^{-1} 。Roesler 等的结论与 Kopelevich 等(1989)根据各学者 400 多次的大洋、近海和淡水光谱测量结果非常一致。各学者报道的 $280 \sim 490 \text{ nm}$ 光谱范围 S 的平均值为 0.017 nm^{-1} (标准偏差 SD 为 0.001 nm^{-1})。根据 Carder 等(1989)的研究, 黄色物质吸收谱斜率的变异与黄色物质的成分, 灰黄霉酸(fulvic)和腐殖酸的变化密切相关。Carder 等人报告称, 海洋灰黄霉酸的斜率为 0.019 nm^{-1} , 海洋腐殖酸的斜率为 0.011 nm^{-1} (还可以参见 Kopelevich 和 Ershova 1997 年的报告)。然而, 这一范围以外的值也有报道。例如, Hojerslev(1998)报告称斜率范围为 $0.008 \sim 0.042 \text{ nm}^{-1}$ 。这些极值是测量误差, 还是其他的吸收源, 这是值得调查的。Kopelevich 等(1989)已有报告称, $500 \sim 600 \text{ nm}$ 波段平均斜率降至 0.011 nm^{-1} 。

现在, 对所谓颗粒物碎屑成分[类似于黄色物质的物质, 参见(2.14)式]的吸收谱, 已进行了常规测量, 主要对现场采样的颗粒物, 经过滤器过滤后进行测量。碎屑吸收谱则是在从总颗粒吸收谱减去浮游植物色素吸收谱时所剩余的残留颗粒吸收谱。一般使用过滤技术进行测量(Yentsch 1962), 此过滤技术经过了 Mitchell 和 Kiefer(1984, 1988a)和 Kishino 等(1985)的改进。根据文献调查, Roesler 等(1989)报告称, 碎屑吸收谱斜率的平均值为 0.011 nm^{-1} (标准偏差 0.002 nm^{-1})。即使二类水体中可能存在其他来源(如海底、河流和陆地流域有机物的再次悬浮), 碎屑物通常也被认为只有当地生物来源。

碎屑场和黄色物质吸收系数的相似性, 从遥感观点来看, 为区分碎屑物的吸收与黄色物质的吸收带来了问题。这就是为什么我们在本报告中将碎屑物归并于黄色物质的主要原因。然而, 如果出现区分这两种物质作用的技术(或许可利用吸收谱斜率的细微差别), 那么, 它们就可以作为独立变量处理。

利用滤波技术测量二类水体的吸收特性, 在实践上存在一些问题, 在减去色素的吸收之后, 过滤器上残余物质的吸收将代表碎屑物 and 无机悬浮物吸收之和。现在尚无区分这两种物质的标准程序。但是据预测, 利用碎屑物已知吸收谱形式的统计优化技术可达到此目标。

在黄色物质吸收模式开发方面, 此物质数量的变化是通过 $a_y(\lambda_0)$, 而不是通过物质浓度常规测量而实现参数化。

2.7.4 纯水的吸收

尽管纯水自身的光学性质经过再次分析(Morel 和 Prieur 1977; Smith 和 Baker 1981; Pope 和 Fry 1997), 但是, 可以很有信心地说, 纯水的吸收特性是不变的。在撰写本报告时, 海洋光学界一致认为, Pope 和 Fry(1997)的结果是迄今可见光波段纯水吸收系数谱变化的最佳测量。纯淡水的吸收测量对于纯海水也是有效的, 因为如果海水的主要吸收波段处于紫外和红外范围, 海水中溶解盐类对于可见光波段的吸收性质不会有明显的影响。

2.7.5 浮游植物的后向散射

理论研究和实验室测量均表明, 浮游植物后向散射系数极低(Bricand 等 1983)。最近的报告(Morel 和 Ahn 1991, Stramski 和 Kiefer 1991; Ulloa 等 1992)已引起人们对细菌和病毒等微生物后向散射重要性的关注, 微生物的后向散射补充并增强了浮游植物的后向散射。

以上研究指出,单纯浮游植物的后向散射不能完全解释即使在一类水体中也观测到的后向散射,这表明与浮游植物一道变化的微生物的后向散射可能占所观测到的海洋生物后向散射的绝大部分。一般而言,这部分的散射按叶绿素 a 浓度的函数予以参数化(Gordon 等 1988; Morel 1988; Ulloa 等 1994)。

对所观测到的后向散射的另一可能的解释是,散射源可能是由河流和风带入海洋的陆源微小颗粒(Kopelevich 1983b)。最近的研究工作(Stramski 1994; Zhang 等 1998)还指出了海洋气泡后向散射的重要性。因此,在被观测到的后向散射的物质来源和机制方面,还存在很大的不确定性,即使一类水体亦如此。在目前阶段,我们尚不清楚浮游植物后向散射参数化是否不同于二类水体。目前,对一、二类水体处理这一物质都使用相似的模式。

2.7.6 无机悬浮物的后向散射

Bukata 等 1995 年对安大略湖、拉多加湖和奇尔卡湖悬浮颗粒后向散射系数现有的有限光谱与 Whitlock 等(1981)推导的美国弗吉尼亚州 3 条河流的光谱进行了比较。光谱比较表明,光谱向波长末端逐渐增强,这与 Morel(1973)根据理论研究提出的观点:颗粒散射的波长函数可以用 λ^{-n} 定律(n 指数在 0~2 之间变化)表达,具有良好的一致性。海洋自然环境水色数据分析亦得出以下结论:颗粒后向散射的波长函数也以 λ^{-n} 定律表达。其指数 n 的变化为:浑浊近岸水域为 0,寡营养水域为 2(Sathyendranath 等 1989; Carder 等 1999)。但这些只是有限的观测值,超出这一范围的 n 值也可能在二类水体遇到。

悬浮物后向散射特性或利用理论计算,或根据水色数据分析进行间接估算。直接测量后向散射的仪器现在才开始出现(Maffione 和 Dama 1997; Dana 等 1998)。以上学者测量 140° 的体散射函数,然后利用经验关系式,将其转换为后向散射系数。

人们有关无机悬浮物散射和后向散射系数的知识仍很贫乏。为了发展二类水体遥感能力,无机悬浮颗粒吸收和散射谱现有数据库一定要予以改善。

2.7.7 纯水的后向散射

Morel 1974 年曾对水散射进行过研究和探讨。他指出,纯水散射遵循 λ^{-n} 定律,指数 n 的适当值为 4.32。Shifrin(1988)还对水的分子散射进行过详细研究,根据理论分析和不同学者的实验数据得出以下结论: n 适当值介于 4.05~4.35 之间。根据 Morel(1974)表格,500 nm 纯海水散射系数 b_w 为 0.00288 m^{-1} ,纯淡水的相应值为 0.00222 m^{-1} 。另一方面,Shifrin(1988)的结论是:546 nm 散射系数能从淡水的 0.00149 m^{-1} 上升到海水盐度为 35 时的 0.00207 m^{-1} 。以上引用的 Shifrin(1988)的结果的水温为 20°C 。Shifrin 还有报告称,水的散射随温度的降低而缓慢递减。在一定条件(如以黄色物质为主的二类水体)下,纯水的后向散射能对总后向散射作出显著的贡献。因此,如果我们处理受河流径流影响的沿岸水域或河口的问题,应考虑盐度对分子散射的影响。

水的体散射函数有相对 90° 角的对称,所以后向散射总是为水总散射的 50%。比较而言,颗粒物后向散射约为总散射的 1%。即使总的分子散射只占总的颗粒散射的很小一部分,但由于后向散射相对于水的总散射的高散射率,其在遥感应用方面往往起着重要的作用(Morel 和 Prieur 1977)。

2.7.8 水生颗粒的体散射函数

水色蒙特卡罗模式采用海洋中颗粒物体散射函数,而不是仅仅只采用后向散射系数(例如, Gordon 等 1975; Kirk 1981 a, b; Morel 和 Gentili 1991)。根据水样总体散射函数的测量,能估算海洋颗粒的体散射函数。从测量总值中减去纯水体散射函数,便得到颗粒物的体散射函数。水样体散射函数的直接测量至今仍属空白(参见 Petzold 1972; Morel 1973; Kullenberg 1974 和 Haltrin 引证 1997)。

Kopelevich(1983 b)导出颗粒体散射函数模式,此模式用来再现自然环境中以体散射函数形式出现的被观测变化(Kopelevich 1983 a)。此模式基于以下假设:颗粒物由小粒径无机物和大粒径有机物两种成分构成。此模式具有与颗粒散射理论一致的特点, Shifrin(1988)指出,模式结果与许多地方的观测值相匹配。但是 Mobley(1994)则指出了 Kopelevich(1983 b)模式与 Petzold(1972)观测值之间的差异。米氏(Mie)散射理论也用于分析海洋颗粒物体散射函数随颗粒粒径分布和折射率的变化而发生的变化(Beardsley 1968; Beardsley 等 1970; Pak 等 1971; Gordon 和 Brown 1972; Brown 和 Gordon 1973; Kullenberg 1974)。Kullenberg(1974)根据体散射函数观测值与模式计算值的比较指出,近岸地区的体散射函数不同于大洋水域的观测值。

可惜的是,我们对自然水体中体散射函数形状变异的认识很有限,还停留在 20 世纪 60 年代和 70 年代的有关研究。Volten 等(1998)最近的研究工作属于例外,他们最近报告了两类淤泥的体散射函数的研究进展。为了改善二类水体散射模式,还需要开展大量此类研究。

2.8 非弹性散射的性质

纯水拉曼散射一般通过水的拉曼散射系数 b_R 辐射传输方程予以考虑。 b_R 系数的波长相关性类似于水的弹性散射系数的波长相关性,即 λ^{-n} 相关性。Bartlett 等(1998)报告了 488 nm 纯水的拉曼散射系数为 $2.7 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,这一结果与早期许多报告(Marshall 和 Smith 1990)非常一致。在辐射传输方程中, $b_R(\lambda)$ 通常表达如下:

$$b_R(\lambda_{\text{ex}}) = b_R(\lambda_{\text{ref}}) \left(\frac{\lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ex}}} \right)^n \quad (2.15)$$

式中 λ_{ref} 为 b_R 已知的基准激励波长, λ_{ex} 为任一激励波长。拉曼散射的特征是 3350 m^{-1} 附近的恒定频移(Marshall 和 Smith 1990)。根据 Bartlett 等(1998)报告, $n = 5.5$, 接近于 Sugihara 等(1984)报告提出的值, $n = 5$ 。

在考虑辐射传输计算的荧光时,荧光物质的吸收系数必须是已知的,荧光量子效应 $\phi_F(\lambda_{\text{ex}}, \lambda_{\text{em}})$ 用来表达特定波长(λ_{ex})吸收的光子在更大波长(λ_{em})再次发射的输出量。还必须进行激励波长和发射波长辐射传输的平行计算。

在溶解有机物条件下, $\phi_F(\lambda_{\text{ex}}, \lambda_{\text{em}})$ 可由 λ_{ex} 和 λ_{em} 量纲呈对数正态分布的三维函数表达(Hawes 1992)。在叶绿素和藻红素荧光条件下, $\phi_F(\lambda_{\text{ex}}, \lambda_{\text{em}})$ 呈高斯分布,通常随 λ_{em} 而变化。在基本上存在非光合作用色素时,还可以引用 λ_{ex} 相关性。溶解有机物 ϕ_F 典型值范围在 0.005~0.03(无量纲),叶绿素 a 的 ϕ_F 值为 0.005~0.05。目前可提供藻红素荧光 ϕ_F 值范围,但数据仍不充分。

溶解有机物荧光影响中心波长 $\sim 430\text{ nm}$ 的蓝光部分,而藻红素荧光中心波长在 585 nm 左右,叶绿素荧光约 685 nm 。拉曼散射影响整个光谱波段,然而,这种影响随着水柱衰减的增强(即二类水体)而削弱。

2.9 有关大气订正的问题

无论是飞机还是卫星传感器接收到的信号,都包含有大气的回波。正是该辐射项模糊了被遥测水体的真实水色。这一点上最明显的例子是云层对目标的遮掩作用。但是即使在无云条件下,如果不适当地考虑大气信号的变化,水色数据的解译也是有难度的。高空飞机或地球轨道卫星是通过另一光学干扰介质观测一种光介质。因此,水色数据解译要求我们除认识水光学过程外,还要认识大气中光传输的物理机制。

进入大气层的太阳辐射经历了空气分子和气溶胶的吸收和散射(气溶胶系指以不同来源的以各种形式和形状存在的悬浮液体和颗粒物总称。气溶胶包括烟雾、水、硫化氢微滴、尘埃、灰粉、花粉、孢子和其他形式的大气悬浮物)。因此,到达地面的是性质不同的两种辐射量:太阳直接辐射和太阳漫射辐射(通常指天空光)。直接辐射由于存在于大气层之外,保持着太阳辐射的方向性,而漫射量由于气溶胶和大气分子的散射,从多个角度到达海面。正如水生介质依据表观光学性质和固有光学性质予以定义一样,大气衰减介质也如此予以定义。

水色数据大气订正程序一定要对大气光学性质进行精密而准确的评估,以便人们可以计算无干扰大气时的水色信号。水色算法开发设计时所使用的的大气过程模式通常综合采用了瑞利散射效应(分子散射)和米氏散射效应(气溶胶散射)。

一般而言,一类水体大气订正方法依据以下事实:在近红外波段离水辐射率趋于零。到达卫星传感器近红外波段的信号经过分析,推断相同波段的大气层光学性质,再利用大气光学模式将这一结果外推到可见光波段(Gordon 和 Morel 1983; Gordon 1993; Sturm 1993; Gordon 和 Wang 1994; Gordon 1997)。这样就可以进行可见光波段离水辐射率的计算。

近红外波段零离水辐射率的这种假设在强散射二类水体(以悬浮颗粒为主的水域)不适用。这包含两层含义,首先,我们一定要增进对于近红外波段水中成分固有光学性质的知识,以便将这些知识应用于大气订正。其次,我们必须认识到,为一类水体开发的大气订正法不一定适用于所有二类水体。

2.10 小结

以上是对影响二类水体水色因子的扼要评述,并扼要探讨了二类水体水色相对于一类水体水色而言更加复杂的原因。综上所述,我们尤其强调以下几点:

- 在二类水体,水色受水中多种成分非线性方式的影响。在浅水区,水色还进一步受水深和海底性质的影响。

- 影响水色的水中成分的某些固有光学性质彼此类似,在整个光谱范围都存在这种类似性,如有色溶解有机物和碎屑颗粒吸收谱。或者这种类似性仅在部分波段范围很突出(例如,一般而言,浮游植物和黄色物质的吸收系数从 $\sim 440\text{ nm}$ 到 $\sim 550\text{ nm}$ 递减)。类似性妨

碍了遥感对物质的区分。

- 水中成分的浓度具有很宽的动态范围,例如叶绿素 a 浓度变化从 $0.01 \sim 100 \text{ mgm}^{-3}$,相差 4 个量级。趋于变化动态范围高端的浓度,在二类水体比在一类水体更为常见。

- 影响二类水体水色的水中 3 种主要物质(浮游植物、悬浮颗粒和黄色物质),每一种代表着一类物质,并非单一物质,因而光学特征存在变化。

在开发二类水体水色解译算法时,必须牢记以上 4 点。下一章从二类水体水色信号出发,探讨解决水生物质信息推导逆问题的方法。

第3章 二类水体算法

A. Neumann R. Doerffer H. Krawczyk M. D. Dowell R. Arnone
C. O. Davis M. Kishino A. Tanaka C. Hu R. P. Bukata
H. R. Gordon J. Campbell S. Sathyendranath

3.1 前言

第2章描述了二类水体的特征以及水中有色成分和水体上行光谱之间的基本相关性和关系。

卫星海洋水色数据常规解译现在可以利用算法进行。这些算法(如 SeaWiFS 和 OCTS 卫星遥感器数据分析算法)所依据的基本原则是:对卫星接收信号首先利用大气辐射传输模式进行大气效应订正。大气订正程序一般以电磁谱近红外谱段的信号为依据,在此谱段一类水体中离水辐射率一般可忽略不计。因此,近红外谱段的大气光学特征就能予以确定,然后,其结果外推到可见光波段。再对卫星接收的可见光信号进行大气作用和大气对海表层信号改变的订正,从而得到离水辐射率。然后利用简单的经验关系,通过离水辐射率来推导有关浮游植物主要色素——叶绿素 *a* 的信息。事实证明,此类方法对于一类水体很有效,但是对于二类水体则不适用。

二类水体算法的开发远非是仅对一类水体算法做简单的修改。实际上,构成一类水体算法基础的假设,对于二类水体都不适用。例如,在强散射的二类水体和某些浅海水域,近红外离水辐射率都很显著。在这些水域,一类水体中近红外离水辐射率为零的假设可带来大气订正误差,因而给可见光波长离水辐射率估算带来误差。如前两章所述,许多因素影响二类水体水色,而一类水体基本上作为单变量问题对待。二类水体水色遥感是一个非线性、多变量问题,算法必须据此重新设计。

本章扼要综述当前根据二类水体水色数据推导相关海洋量所采用的方法和算法。图 3.1 可用来解释不同的方法。

根据遥感测量,可以得到一组表示水体表观光学性质的光谱辐射率或反射率值($R_1, \dots, R_n$)。如果没有应用大气订正程序,这些辐射率还包含有关大气状况的信息。光谱波段的数量(n)则与测量所使用的仪器有关。除光谱辐射率或反射率数据外,还需要几何信息 $|G|$ 描述探测器的几何特征和特定象元相对于太阳和地球的观测角,同时还需要有辅助信息 $|A|$, 如地理地区、季节、表面风场和水深图。这些输入值被认为是描述卫星图像上特定象元的已知值 $|I|$ 矢量。在图 3.1 的右侧,是根据输入变量,即叶绿素类色素(C)、无机悬浮颗粒(S)和黄色物质(Y)的浓度等推导出的物理量。尽管其他的量有时也可以反演,但是推

导出的变量主要与二类水体遥感的主要成分有关。水色算法将输入矢量 $[I]$ 转换到未知矢量 $[U]$,这些关系均以固有光学性质(IOP)为依据。在最简单情况下,水色算法可以是与叶绿素等导出性质的两个波段反射率比率相关的算法。在相关计算过程中,大量数学和物理模式的使用,要应用到复杂的迭代程序。下一节将探讨这些方法的优缺点。

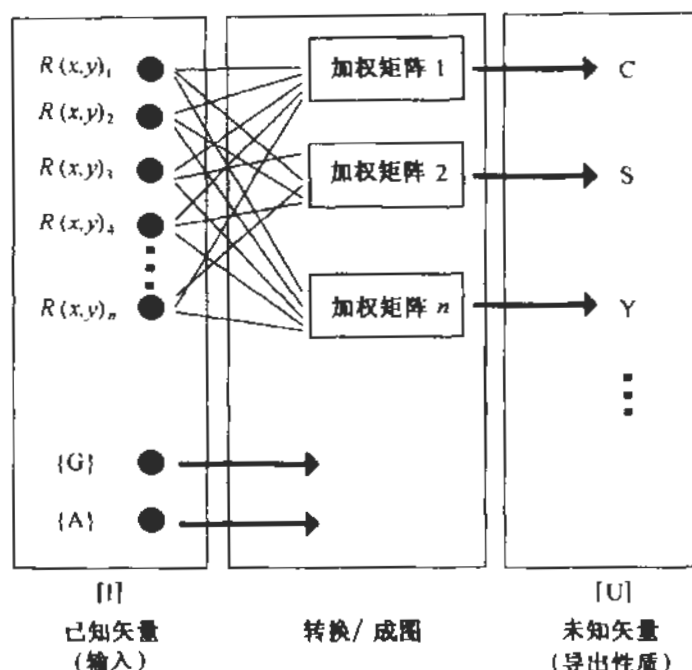


图 3.1 水色反演算法示意图。图中 (x,y) 坐标表示数据的地理位置

3.1.1 有关二类水体算法的特殊问题

二类水体主要特征取决于若干光学性质彼此独立变化的活跃物质,许多情况下,它们同时发生较强的散射。为一类水体开发的算法不适用于二类水体,二类水体需要特殊算法,主要理由如下:

- 许多变量影响被测光谱,必须有考虑到多变量特征的特殊算法。
- 由于吸收谱和散射谱重叠,辐射率(或反射率)的变化不能与任何物质直接相关。总之,所有成分不得不同时予以解决。
- 不同水域的固有光学性质受每类物质主要成分季节性变化的影响,这就要算法考虑到地区和季节上的差异。这一点说明,没有哪一种全球二类水体算法可同样适用于所有地区(见 3.2 节)。
- 许多情况下,二类水体是近岸浅水区和内陆水域,水深浅于 30m 的海域需要有考虑海底反射效应的特殊算法。

由此可见,二类水体需要有比为开阔大洋海域(一类水体)开发的算法更复杂的高级算法。

3.1.2 浑浊水体的大气订正

在判读过程中,大气订正程序至关重要,反演算法的性能和导出量的质量和精度均受大

气极大影响。典型的大气订正方案假定,离水辐射率在近红外谱段为零。然而,最近星载遥感数据(如 SeaWiFS 和 MOS)和船用仪器光学测量清楚地表明,这一假定对于浑浊水域不适用。其主要的作用因素如下:

- 高浓度的散射成分可以造成近红外谱段(波长 $\lambda > 700\text{ nm}$)的离水信号明显地大于零,这就是说,浑浊水体不是像大气订正程序通常假定的那样,在近红外是“黑体”(见图 3.2)。

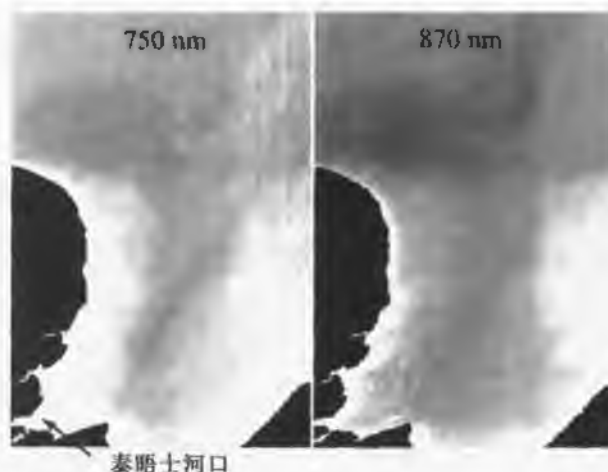


图 3.2 MOS-IRS 两个近红外通道大气顶辐射率示例。数据采集自英国泰晤士河口(1997 年 4 月 1 日)。图像进行了亮度增强,定量显示出泰晤士河悬浮颗粒的散射效应。这些波段上的辐射率分布表明是泰晤士河悬浮颗粒物而不是气溶胶的影响。德国柏林 DLR Harald Krawczyk 提供数据

- 在浅水区上空,海底后向散射信号可传输到海面,造成近红外波段残余离水辐射率。

近红外波段非零离水信号可造成气溶胶光学厚度(一般根据近红外波段信号推导)估算过高,从而造成可见光波段大气订正“过高”。因此,最近二类水体大气订正算法应用区分大气和水生物质对信息贡献的耦合方法,考虑近红外波段非零离水信号。

例如,图 3.2 表示 MOS-IRS 通道 9(750 nm)和通道 11(870 nm)大气顶的辐射率。此图清楚地显示出泰晤士河悬浮颗粒的散射效应。在典型的一类水体算法中,上述通道的离水辐射率均取为零。这可能使该算法在浑浊水域的应用失效。实际上,如果大气订正程序经过修改,考虑到近红外波段的非零离水辐射率,一类水体算法标准性能在浑浊水域能得到改善(Hu 等 2000 a; Ruddick 等 2000; 还可参见彩图 1)。尽管采用迭代法(Arnold 等 1998; Land 1999; Lavender 和 Groom 1999; Moore 等 1999),或采用综合法(Krawczyk 等 1993; Kopelevich 等 1998 a)已经开发出浑浊水域大气订正算法,但是现在的问题是:需要开展更广泛的研究,提供可靠的订正程序。这些程序还必须考虑到内陆或近岸水域上空发生的不同类型气溶胶潜在的复杂混合。

现在还认识到,一类水体大气订正标准算法在存在强吸收气溶胶时会失效。这类物质包括随风飘散的矿物尘埃和源自人类活动的气溶胶。可见光波段强吸收气溶胶的存在只能推断得知,因为此处多重散射很强。在此情况下,人们再也不能依据两步过程——大气订正以及估算海水性质的生物-光学算法推导海水性质。相反,现在所需要的是同时反演大气

和水体性质的一步过程。Chomko 和 Gordon(1998)提出了利用非线性优化技术处理这一问题的光谱优化算法。另一方面, Gordon 等(1997)应用光谱匹配算法,通过模式中所有未知量的系统变化使算法得以优化。目前,这些算法的应用均根据以下假设:近红外波段离水辐射率可忽略不计。因此,一类水体算法的应用受到限制。然而,如果增加处理时间,有可能放松这一限制条件。当然,这将使这些算法更适用于二类水体。因此,这是一类水体算法和二类水体算法聚合的一个研究领域。两类算法均可从彼此积累的经验中获得好处。

3.2 需要的产品

离水辐射率光谱特征可通过水色遥感(大气影响一旦予以订正)直接进行估算。描述水色的这一特征取决于水中成分的固有光学性质,即光谱吸收和散射特性(见第2章)。所以,第一类推导产品是描述水体整体性质的光学性质产品(如漫射衰减系数,水中各种物质的固有光学性质,如溶解或颗粒有机物光谱吸收系数,或颗粒散射系数)。

然而,水色推导产品的许多用户需要的是生物学、生态学和海洋学应用的数据。所需要的产品是水中成分的浓度(如叶绿素 *a* 浓度),而不是各种成分的光学性质。遥感只能通过水中物质固有光学性质对水体发射光光谱特征的影响,间接估算物质浓度。水体一种成分浓度的计算可以使用经验回归方程,或者使用生物光学模式,这两种方法均采用有关特殊光学性质光谱变化的实验数据。对于二类水体而言,难点在于:按照藻类物种成分、浮游植物细胞粒径分布、悬浮无机颗粒矿物成分,或溶解有机物的化学成分,水色与水中物质成分之间关系可呈现出地区变化或季节变化。所以二类水体算法一般来说,实质上是本地的或地区性算法。

某些研究已经注意到浮游植物不同成分及其对水色影响的问题。例如,现在可利用水色数据色彩合成来跟踪颗石藻过量繁殖(见彩图2)。监测 *Trichodesmium* 过量繁殖的算法也正在开发(Subramaniam 1999 a, b)。Gege(1998)曾说明,船测的高光谱分辨率水色数据,可用来监测康斯坦茨湖主要藻类浓度。

然而,Gege(1998)的结果是否能扩大到卫星测量仍有待确定,因为大气的影响可掩盖离水辐射率细微特征。北海赤潮光谱反射率的现场测量数据(见彩图3)揭示了某些明显的特征,说明了遥感在赤潮特征识别方面的潜力。藻类成分在生物学和生态学研究中具有极重要的意义,因此人们对于开发遥感在浮游植物种类识别潜力的研究必定抱有很大兴趣。然而,二类水体的此项任务比一类水体的难度大得多。我们工作的重点放在二类水体中浮游植物与其他物质区分方面。

根据卫星数据,除推导前面讨论的初级产品外,还能推导其他量,如初级产量。据认为,这些量是次级产品,因为这些量的计算除需要卫星推导的“光学”数据外,还需要有辅助信息。第5章讨论应用时,将详尽讨论这些次级产品。表3.1列出了根据二类水体水色数据推导的初级产品。

除与水柱自身有关的产品外,还有另一组所需要的与海底有关的产品:尤其对于浅水区而言,需要有可推导水深信息、海底特征及海底生长的巨藻的算法。海洋学家和生物学家对这些产品特别感兴趣。然而,今天日常应用的算法不能适当地用来解决浅海的问题。3.5节讨论浅海的有关问题,接下来讨论深海的问题。

表 3.1 根据二类水体水色数据推导产品一览表

产	品	备	注
光学性质	无机悬浮物(泥沙)散射系数 $b_s(\lambda)$	大气订正算法改善所必需。尤其在二类水体,为了推导如初级产量等产品,需要改进光传输计算	
	溶解有机物(黄色物质)吸收率 $a_y(\lambda)$	对于生物地球化学模型具有潜在应用的信息,它还是光传输模型必不可少的量	
	漫射衰减系数 $K_d(\lambda)$	用于光传输模型	
	浮游植物色素吸收率 $a_p(\lambda)$	在海洋生物学领域具有普遍的应用价值,在初级产量模型中特别有用	
水中成分	叶绿素 a 浓度,藻类成分	根据水色数据推导的主要生物产品	
	无机悬浮物	在二类水体中具有潜在的重要性,泥沙输运研究需要此产品	
	总悬浮物	在二类水体中具有潜在的重要性,泥沙输运研究需要此产品	
其他性质	水深及海底特征、巨藻、珊瑚礁	浅海应用,海岸带管理	

除光学性质和有关成分浓度估算外,算法精度的估算也是必要的。由于推导产品中存在许多不同的误差源,这种计算并不简单,这些误差源如下:

- 违背应用模型或实验数据集的统计规律(可能与假定的水中物质成分、各物质浓度分布函数或物质之间的协变相关);
- 特定地区算法推导所用模式中物理表达的缺陷;
- 大气订正程序造成的误差;
- 卫星遥感器测量的辐射率数据定标误差;
- 现场测量和卫星观测空间尺度的不一致性;
- 现场测量和卫星观测之间精确时间配准的难度。

上述误差源中仅有一些直接与解译算法有关。其他问题还包括如真实性检验等理想实验设计的实际困难。然而,或是依据灵敏度分析,或是利用真实性检验现场测量,进行误差估算仍是可能的。而且通过基于反演浓度的辐射率谱前向计算结果与被测光谱的比较,可以显示反演变量的精度。我们较详尽地探讨了用于解决深海问题(据认为,海底影响可忽略不计的水域)的特殊算法。下面将讨论有关浅海的问题。

以有待回答的问题和解决这些问题所采用的方法为依据,现有算法和方法分类可使用不同的术语。本章广泛评述了经验法和模型法两类主要算法。

以下章节将更详尽地讨论各类算法的原理、假定和限制。

3.3 经验法

所有经验算法建立了光学测量值和以实验数据集为基础的成分浓度,即海表层以上或以下反射率(或辐射率)光谱和现场同步测量浓度之间的关系。最常见的关系为采用(3.1)式描述的所谓色度比

$$\hat{p} = \alpha \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^\beta + \gamma \quad (3.1)$$

式中 $\hat{p}$ 为待估算的物理量(如叶绿素浓度、悬浮物、黄色物质和衰减系数), R_i 为光谱通道 i 的反射率(或辐射率)。系数 α 、 β 和 γ 则根据辐射率比和所求性质之间的回归方程推导, 而且其依据是实验数据集。

Gordon 和 Morel(1993), Sathyendranath 和 Morel(1983)详尽地讨论了这类经验算法。使用更多的波段(多重色度比或曲率算法)来覆盖较宽的变化范围, 或评价特殊光谱特征(Hoge 和 Swift 1986; Cippolini 等 1999), 可以提高在二类水体条件下采用此类算法的相对低精度。二类水体经验算法通过利用更适合于此类水体的波段, 其精度也能予以改善。例如, 已有报告指出, 采用比一类水体所使用的典型蓝波段和绿波段更大波长的波段能改善高叶绿素浓度二类水体的色素算法(Dekker 等 1991; Gitelson 1992; Sathyendranath 等 1997a; Schalles 等 1998)。此方法可减轻黄色物质对算法的影响。经验推导算法的优点是: 算法简单, 即使根据有限数次的测量(只覆盖所需要的测量范围)也便于进行推导, 而且算法操作和测试简便。由于算法数学运算简单, 计算时间短, 算法可得到稳定的结果, 而且不会破坏算法的适用范围。就其实质而言, 二类水体经验算法其应用范围总是地区性的。

然而, 经验算法也受若干限制。推导出的关系式仅仅对于具有与确定关系式时所采用的数据集统计性质相同的统计数据才有效。因此, 这些算法对于水中成分构成(例如地区性或季节性影响)的变化特别灵敏。推导产品的综合误差可以很快超过可接受的限度。进一步的问题是: 利用经验关系, 而不是利用数学公式很难进行系统灵敏度分析, 以获得不同误差源的误差估算值。

3.4 模型法

模型算法的普通特征是: 这些算法使用生物光学模型, 描述水中物质成分与离水辐射率和反射率光谱之间的关系, 也利用辐射传输模型, 模拟光在水和大气层中的传播(见第 2 章)。这些模型用来产生水中不同物质给定范围浓度或不同大气状况下, 海表面以上或大气顶(TOA)的模拟光谱数据集。然后用此信息来推导算法, 建立从辐射率光谱或反射率光谱到欲测水中成分的逆向测量关系。不同复杂程度的各种数学原理可以用于这类算法的开发。迄今已开发的算法综述如下。

3.4.1 代数法

模型法最简单的形式是一种代数表达式, 它将水色半经验分析模型与反演的地球物理产品关联起来。应用此方法, 水色模型首先使用有关模型物质固有光学性质的光谱形式和有关这些性质与模型中个别物质浓度之间关系的经验数据。正是对经验数据的需要, 使得水色理论模型被称之为“半经验分析”模型。然后, 模型经过简化, 采用近似值, 减少未知数或未知数之间内部相关性。其结果是一组能依序求解, 得到模型未知量的代数方程。如果关系呈非线性, 可利用查询表, 或利用减少预测和观测值之间差异的二分法, 找到解决方案。Carder 等(1999)和 Lee 等(1996, 1999)给出了此方法的实例。此方法结果示例如彩图 4 所示。

第 2 章论述表明, R_{rs} 信号为后向散射系数 [$b_b(\lambda)$] 与吸收系数 [$a(\lambda)$] 比率的函数, 而 b_b 和 a 能依次分解为具有光谱性能特征的量。而且发生后向散射和吸收的每一种物质(浮

游植物、黄色物质、其他颗粒物)可以通过各自特殊的光学性质,与物质浓度建立联系。每种物质的光谱性质均根据经验数据确定。这些关系能重新予以定义,并“调整”到特定地区。

此方法的优点是,它可以利用特定物质的已知光学性质,使光学性质与 R_{RS} 理论模型结合起来。尽管存在与经验关系中采用的测量值相关的和与辐射传输模型相关的误差,但是在应用于特定二类水体时,其结果是很精确的(Carder 等 1999; Lee 等 1996, 1999)。该方法的缺点是,该方法只能在模型未知参数和变量(有待反演的浓度)的数量有限时才能使用。随着未知量数量的增加,不得不放弃此方法,而采用能同时反演多种未知量的方法。下面讨论一些更加复杂的方法。

3.4.2 非线性优化法

以非线性优化方案为依据的卫星辐射率转换技术,提供了一种可替代方法。此方法无论应用于水层或应用于大气顶,通过最大限度地减少计算的辐射率值和被测辐射率值之差,可对前向模式(见第 2 章)进行直接转换。最小化可利用不同方法,如 Levenberg - Marquardt 算法和简单算法(Nelder 和 Mead 1965)。用户通过 Netlib 网站(<http://www.netlib.org>)或国际数学和统计图书馆(IMSL)等来源,可以得到最小化转换所需要的数学函数,还能从中获得 Levenberg - Marquardt 型程序。

非线性优化法的基本概念是:这些方法通过改变作为模型输入的变量(即叶绿素、总悬浮物、黄色物质和气溶胶光学厚度)的浓度,尽量最大限度地减少模拟辐射率和被测辐射率之差 χ^2 。 χ^2 定义为:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} (L_{sat} - L_{mod})^2 \quad (3.2)$$

式中 L_{sat} 为卫星遥感器测量的辐射率, L_{mod} 为模式辐射率,并取所有波长之和。 χ^2 收敛的阈值通常设定为迭代的结束值。

此类转换法可以再现模拟环境的非线性性。而且转换法不同于神经网络或主成分法(见后两节)等其他方法,这些方法不依赖于预定的模拟数据集。在与模拟数据集密切相关的方法中,数据集可以涵盖很宽的物质浓度范围,而且往往很难选择像幅中能够表示海洋成分自然变化的物质浓度范围和频率特征。

许多学者曾试图将转换法应用于遥感辐射率测量,或现场反射率测量。Bukata 等人(1981 a, b; 1991)利用有关该地区特有的固有光学性质信息进行安大略湖研究,发现了叶绿素、悬浮物和溶解有机碳的模拟值与被测值之间良好的一致性。Doerffer 和 Fischer(1994)提供了另一重要实例,他们使用北海 CZCS 数据,应用简单算法和大气顶模型,反演叶绿素、悬浮泥沙、溶解有机物有色成分和气溶胶辐射率(见彩图 5)。研究证明,反演变量的频率分布与根据在相同时间采集的现场数据的反演结果相当一致。Roesler 和 Perry(1995)以及 Lee 等人(1996, 1999)给出转换法的另一应用实例。他们采用 Levenberg - Marquardt 方法,根据现场测量的反射率光谱,反演固有光学性质。结果显示与光学性质被测值呈正相关。Garver 和 Siegel(1997)应用高斯 - 牛顿算法,根据水色数据反演海水物质成分,发现叶绿素 a 浓度被测值与估算值之间非常一致。

优化法的基本假设是前向模式代表了自然环境特征。然而,这一假设经常用于所有以生物光学模型为基础的转换方法。除此之外,其他误差源包括卫星测量的噪声。然而,在利

用误差估算的模型计算中,亦包含多种方法。考虑到此方法固有的不同误差源,显而易见,上述 χ^2 仅被视为“最小误差”。然而,根据 χ^2 计算所产生的图件能用来显示算法收敛性的地理变化。

假设水中物质成分的固有光学性质或为已知,或能予以推导,则以非线性最佳化方法为依据的水色数据判读算法可同时估算水中所有成分的浓度。这样的多变量分析被视为既与确定特定场地固有光学性质的前向模拟有关,也与利用这些固有光学性质,从水色数据中提取水中物质浓度的逆模拟有关。以上分析作业的前向模拟部分必须以处于仔细观察下的地区每种水中成分代表性浓度范围为基础。如第2章所讨论的一样,我们关于某些水中成分的固有光谱光学性质的知识还存在空白,关于前向模式的光学性质的假设也不完善,因而导致算法性能欠佳。

此方法在使用中,应对几个方面予以重视,尤其是应该考虑前向模式的参数化问题,以确保被反演的未知量尽可能彼此不相关。

在导出量之间(例如在叶绿素 a 和总悬浮物之间),总是存在某种程度的“区域相关性”,这可以导致需要量估算的模糊性。初始假设值的恰当选择也非常重要。在可能的地方,应为每种反演量设定充分的上限和下限。这有助于确保选择正确的最小值(在 χ^2 有多个极小值情况下,意味着存在多个解决方案),还可以加速每个象元计算的收敛时间。各种方法,包括初始假设的经验算法,或利用相邻象元值,均可以用来达到这一目的。

建议的转换方法的主要缺点是所需的计算时间过长。如果适当地重视方案初始假设的形成,重视模式编码,那么这一缺点的不便利性可以大大降低。然而,计算时间仍然很长。另一方面,这一方法能便利地进行模式变换,如果模式必须调整到地方状态,这一点是一大优点。据认为后两种方法,可以减少卫星数据处理的过长计算时间。

3.4.3 主成分法

在水色数据所有判读算法中,大气散射和吸收必须予以考虑,因为大气散射和吸收会对大气顶的辐射率测量产生重大影响。在经典方法中,主要是利用大气订正程序取得离水辐射率。一种替代方案就是采用综合方法,其中大气光学性质被视为转换问题中的附加变量。在该方法中,转换的初始点就是水色遥感器测量的大气顶辐射率。根据遥感器测量数据推导的量是表示水质特征的3种主要成分,即叶绿素 a、黄色物质和无机悬浮颗粒的浓度,以及大气光学性质。在本节我们讨论一种应用于二类水体的上述算法,此算法可按水体有关的不同固有光学性质进行系统地调整。为了在二类水体中发挥作用,算法使用多光谱、多变量数据集,一定能区分水中不同的成分。高速计算是进一步的目标。

判读算法的基本思想是找到一组大气顶光谱辐射率与一组地球物理量之间的逐段线性图。尽管本节的讨论限于叶绿素 a、悬浮颗粒和黄色物质的推导,但是指出该算法并不仅限于上述量是很重要的,而且该算法可以修改,以满足不同的要求。算法的开发引出最优加权系数[见(3.3)式]的定义,而且与多变量线性回归分析密切相关。二类水体水色数据分析需要有特殊方法,因为数据的特殊性带来了不同波长信号之间的强相关性。主成分分析(PCA)法是可以用来处理这种强相关性的方法之一(Mueller 1973, 1976; Fischer 1985; Sathyendranath 等 1989; Sathyendranath 等 1994)。

辐射传输模型用来产生相应于水中成分变化和大气性质的大气顶辐射率数据集,这些

数据集也是为正在考虑的遥感器光谱性能选择准备的 (Krawczyk 等 1993, 1999)。然后, 通过模拟数据的主成分分析来确定数据的光谱维数和有关地球物理量反演所需的每个光谱通道的加权数。此方法考虑到不同光谱通道信号之间的相关性, 与可利用波段数据子集的应用相比较, 此方法提高了反演成分的识别潜力和重建精度。Sathyendranath 等 (1989, 1994) 还采用类似方法, 判读离水信号, 而不是判读大气顶信号。在 Krawczyk 等 (1993, 1999) 的方法中, 所有计算都是利用误差标准化值进行的, 因此, 测量精度对反演量质量的影响自动予以考虑。为了从大气顶测量值计算地球物理量, 下面给出线性估算公式

$$\hat{p}_i = \sum_j k_{ij} L_j + A_i \quad (3.3)$$

式中 $\hat{p}_i$ 为地球物理量, 如色素、气溶胶光学厚度的估算值; k_{ij} 为变量 i 在通道 j 的加权系数; L_j 为通道 j 的被测辐射值; A_i 为变量 i 的补偿值, j 为 $1 \sim n$ 的测量通道数, 此处 n 为仪器光谱通道数。

基本思想之一是将拟定算法直接应用于大气顶辐射率值, 因此考虑到了隐含的大气影响。此方法的背景是, 明确的大气订正法的应用不会增加有关水中成分的信息量。尽管大气散射对卫星数据产生明显影响, 但是卫星数据还包含了水中成分引起的所有信号变化。换言之, 大气顶数据不能分辨的信号变化, 在大气订正之后也不能分辨。大气订正只是取得了某种“降维”效果。因此, 根据大气顶测量数据, 开发重新构建水中成分的算法, 应是可能的。本报告还要进一步探讨此算法, Neumann 等 (1995) 详尽地介绍了此算法。图 3.3 为此算法方案说明示意图。

潜力和限制 上述方法具有很多优缺点。主要优点是算法具有线性特征, 由此可以得到一个快速 (即使对于大景数据也是如此) 的极简便、稳定的算法, 而且能在任何计算机系统上运行。例如一景 MOS-IRS 数据经全转换, 计算色素、泥沙、黄色物质和气溶胶光学厚度, 在 Sun Sparc 工作站上仅需数秒就能完成。

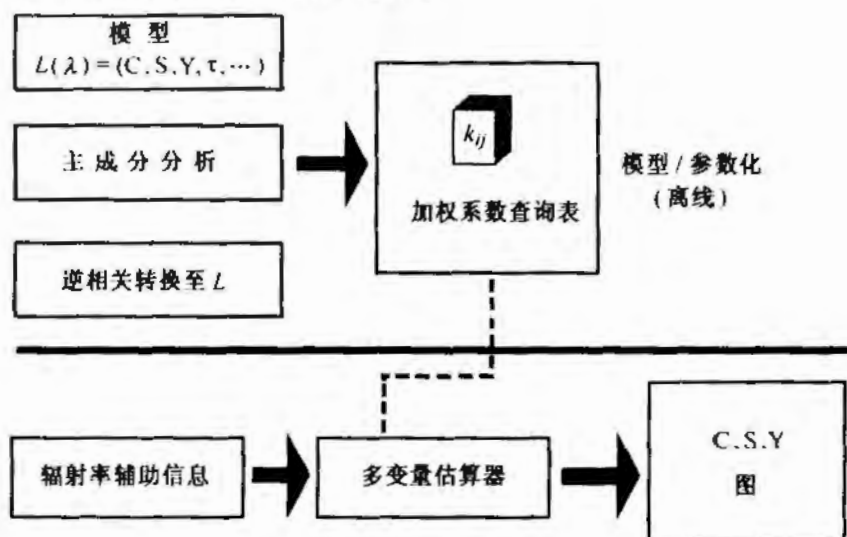


图 3.3 主成分分析框图

由于此算法的线性特征, 所以不存在迭代转换法中所存在的收敛问题。数据强相关性的原因在于使用了有可利用的光谱通道。然而应该指出, 光谱通道的增加, 并非必然带来可

反演变量或要素数量的增加,而是提高不同变量(叶绿素、泥沙和黄色物质)之间的识别和判读精度。此方法的另一优点是,大气以水体同样的方法进行综合,所以,与大气和水相关的要素和变量起着同等的作用。有鉴于此,显大气订正程序是不必要的。大气影响在估算器的一组加权系数中自动予以考虑(3.3式)。通过应用地区光学模式,推导估算器加权系数,并考虑到地区或季节变化,可使算法得到优化。

主要限制则是由于光学重要物质与辐射率之间函数关系的非线性。因此,利用子区数据的线性关系,可使算法性能得到改善,但是这也导致要素空间的分段化。此外,辅助要素(q)也能用来考虑非线性性。辅助要素与取半对数形式的原始地球物理量(p)密切相关:

$$q = p + m \log(p) \quad (3.4)$$

式中 m 根据模型限制导出。

此式具有两种主要效应。首先,对于较大值而言, q 趋向于原始地球物理量 p 。其次,对于较小值而言,在吸收效应非线性起重要作用时, q 趋向于 p 的对数函数关系。这也保证了经计算的地球物理量总为正值。此思想类似于神经网络算法所采用的 S 形函数。

多变量准线性回归法是使推导模式型二类水体算法易于实现和使用的有力手段。利用欧洲沿岸 MOS-IRS 数据取得的结果证实了此方法的可行性(见彩图 6)。误差分析显示,反演变量在很大数值范围内能达到优于 30% 的精度(Krawczyk 等 1999)。分析还显示,根据大气顶测量,有可能以同样精度直接推导水中成分。然而,在算法开发阶段,黄色物质的反演仍是有问题的。

Levin 和 Zolotukhin(1997)和 Levin 等(1998)根据适当光谱通道选择最佳策略,根据水色数据水中成分最佳反演的中心波长和带宽,提出了一种类似算法。

3.4.4 神经网络法

解决水光学遥感逆问题可以采用的另一种方法是神经网络(NN)法,它与不同波段的反射率和多种类型水中成分的浓度之间关系的转换有关。为此,神经网络作为一种多重非线性回归法使用,因而与线性回归的简单情况有关。神经网络法的优点是,该方法以前向模式的形式将遥感过程的详细物理描述与快速应用结合起来。我们在本节按不同的回归分析,扼要描述神经网络。在 Doerffer 和 Schiller(1998),Sandidge 和 Holyer(1998)和 Lee 等(1998 b)文章中能找到光学遥感神经网络应用的实例。

一类水体遥感应应用线性回归分析确定叶绿素浓度对数和蓝绿波段比值对数之间的关系。在二类水体,如果色素和黄色物质的效应很小,可根据光谱红光区波段之比,应用此类线性回归法推导高浓度的悬浮颗粒物。

当一个波段的反射率与多个变量相关时,如在包含色素、黄色物质和悬浮颗粒物的水域,多重线性回归可在有限范围浓度内使用。在必须考虑较大浓度范围时,非线性回归法,必须采用如高次多项式。Chebychev 多项式是确定多波段与水中 3 种物质浓度之间复杂非线性关系的一种方法。另一种方法就是神经网络法。

回归既能根据一组测量值(即浓度和反射率),也可依据一组模拟反射率予以确定。在采用辐射传输模型进行模拟的情况下,水中成分的固有光学性质必须为已知。物质浓度与固有光学性质之间的关系能根据线性或非线性回归分析予以确定,而且还必须假定如水中成分垂直分布等有关的性质。

神经网络由按输入层和输出层形式排列的大量节点(或神经原)构成,两层之间包括许多隐含层。在前向反馈神经网络中,某一层的每个节点连接着前一层所有节点的输出。一个节点的所有输入单独予以加权,偏差求和,并反馈给逻辑或其他非线性函数。输出与下层的所有神经原连接。逻辑函数特别适用于遥感,因为浓度对数和反射率之间也遵循类似逻辑函数关系。由于每一个节点有不同的系数,所以网络几乎能描述任何非线性关系。

这些系数(即所有神经原的权和偏差)在学习或训练阶段予以确定,最大限度地缩小反射率模拟所使用的浓度和具有相应反射率的神经网络所产生的浓度之间的偏差。

利用通常使用的如后向传播算法等不同的最小化方法,能确定上述系数(即训练)。在误差范围内,当浓度和反射率之间转换关系存在一个以上解决方案时,会产生问题。因此,学习步骤的成功与避免这类问题密切相关。

然而,过度学习一定要避免。当训练点的网络精度高于训练点之间的精度时,这种情况往往发生,这一情况类似于描述数据的多项式,但是不能正确进行点内插。

最终的网络既能采取子程序代码的形式,也能采取系数表的形式加以组织。在生产阶段,网络作为子程序使用,其中反射率和其他信息作为输入,浓度则作为输出。如果这些输入和输出系数超出了训练范围,程序会发出警告。对其他变量,如特定波长下行辐照度漫射衰减系数,或光合作用活跃的辐射(PAR,通常定义为400~700 nm可见光区的总辐射)也能进行模拟,并包含在神经网络之中。

前向模式 网络的成功主要依赖于生成训练表所使用的模式。此模式一定要尽可能精确地描述水中物质成分的光学性质和辐射传输过程。下面从众多数值模式中给出两个作为示例。

在第一个示例中,利用简化双流模式描述水下部分,利用单次散射传输模式模拟大气路径辐射和传输。Tanaka等(1998)采用此方法,分析了OCTS数据(ADEOS-1卫星)。彩图7是分析结果图。

一个更复杂的示例是为MERIS和MOS开发的二类水体算法。此算法基于蒙特卡罗光子跟踪模型进行辐射率模拟,根据太阳角和观测角得到结果(见图3.4)。此模型的使用可避免由于 Q 因子[见(2.5)式]、 f 参数[(2.8)式和(2.10)式]和状态因子 s [见(2.10)式]的近似值误差所造成的误差。此模型还包括粗糙海面对上升通量海气传输的影响和不同太阳天顶角入射辐射率的复杂分布。由于对计算性能要求极高,以蒙特卡罗法为基础的模型不能使用优化技术进行直接转换。彩图8表示此算法用于MOS数据的输出结果。此例表明,神经网络技术为将计算结果真实但计算量大的辐射传输模式的优点与处理卫星数据的神经网络的高速相结合,提供了唯一的可能性。对于一景约100万个象元的MOS数据而言,在300 MHz微机上的处理时间约为1 min。

大气订正 为了进行一步程序的大气订正,神经网络的训练既能采用大气顶的模拟反射率,也能采用大气瑞利散射效应已被去除的辐射率。换言之,利用神经网络单独进行大气订正,推导离水反射率和辐射率是可能的。具有如水中成分反演神经网络一样的界面,MOS算法理论基础文档(ATBD)(Doerffer和Schiller 1999)介绍了这样的两步神经网络。在此情况下,可见光波段的大气路径辐射率和透射率根据近红外波段的大气顶反射率推导。对于浑浊水域而言,由高浓度悬浮颗粒物引起的近红外波段离水反射率一定要包含在模拟之中。

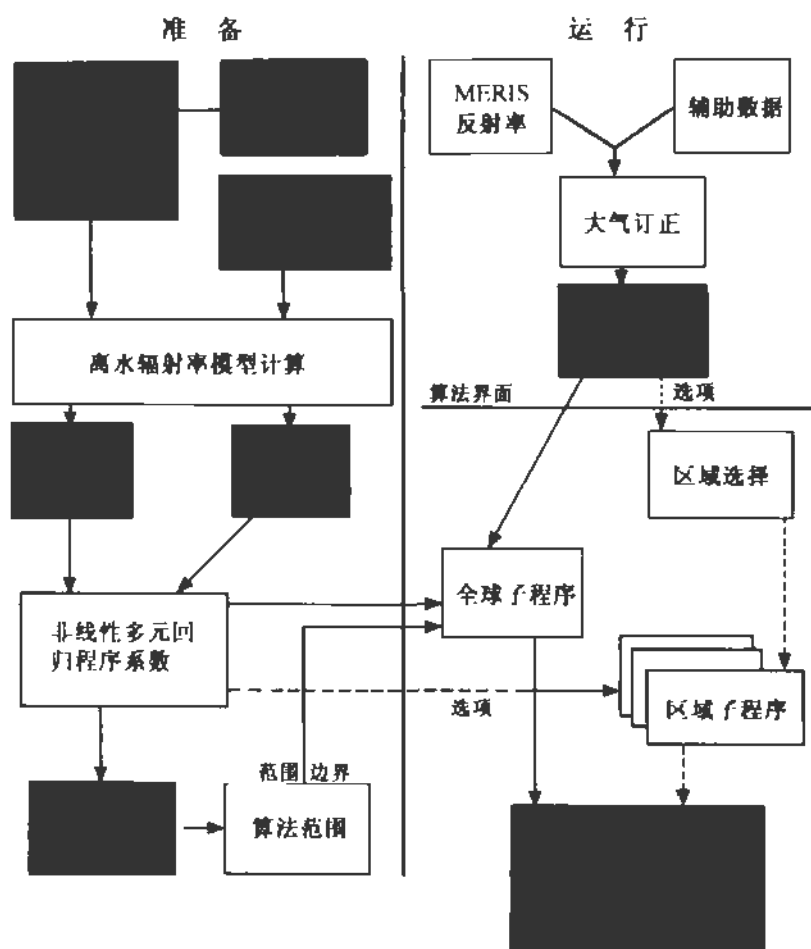


图 3.4 MERIS 神经网络算法流程图

界面:光学成分与水中物质成分 可应用不同界面构建神经网络算法。例如,可能有以下输入选择:

- 大气顶辐射率或反射率;
- 瑞利修正辐射率或反射率;
- 大气订正之后遥感方向离水反射率;
- 大气订正之后,遥感归一化离水反射率。

输出结果为水中成分浓度,或是作为中间变量使用的光学成分,利用地区转换因子(与特定固有光学性质的地区信息有关),可将其转换为浓度。

假设与限制 训练表计算所使用的前向模式必须包括所有的假设,主要包括:浓度范围,任何两种浓度之间协方差(如果训练使用的话),特定固有光学性质和垂直分布。在将简化模式用于训练表计算时,这里的所有假设,如关于辐照度与辐射率转换因子等,都是反演成功的重要因素。对于大气订正神经网络而言,假定的气溶胶光学性质范围是主要限制性因子。其精度受反演时产生的模糊性的限制,重要的是保证这些模糊性限制在可接受的误差范围之内。神经网络的缺点是训练费时。无论模式或任何模式参数发生变化,神经网络必须进行重新训练。

误差确定与定标灵敏度 一种物质的反演误差与该物质浓度以及其他物质的浓度有

关。此误差可利用一组经计算的反射率测试数据集按输入误差函数进行计算。在经过仪器和大气订正误差真实假设训练的神经网络中,精确的测试数据集应用来确定此输入误差对反演误差的影响。为了测定误差的传播,测试数据集一定要使用误差模型进行计算。

地区性和季节性应用 因为神经网络算法非常严密,有可能要开发地区性或季度性神经网络,每一种神经网络要利用对特定地区或季节有效的光学性质予以训练。神经网络的选择还可以以具有各种指示标志的海水分类(如颗石藻过量繁殖或赤潮)为依据。

产品 神经网络算法的输出有水成分的浓度(或主要光学成分的散射系数和吸收系数)和指示数据是否越过训练范围的标识。还产生一个误差图,逐象元地显示与每种反演物质成分相关的误差。为了进行独立的大气订正,还能产生大气路径辐射率和离水辐射率(或反射率)的神经网络图。

小结;必要性、要求和建议 神经网络是用于海水成分反演和二类水体大气订正的多用途的有效方法。它能将最复杂的辐射传输模型和海量卫星数据处理所要求的高速结合起来,对于实时处理尤其有用。神经网络的缺点是,神经网络建设费用较高,尤其当训练数据和测试数据集计算使用复杂的模型时。此外,神经网络的设计和训练需要有丰富的经验。总之,神经网络建设需要有前向模式,进行训练数据集和测试数据集计算,同时还需要神经网络训练程序。根据前向模式的种类,每种海水成分或光学物质的特定固有光学性质 a 、 b 和体散射函数形状必须为已知。

3.5 水深测量和海底特性

清澈水域水深估算算法已开发成功。在此,需估算以下 3 种性质:水深、海底反射率和海水透明度。此类估算的基础是第 2 章(2.11 式)介绍的浅水反射率计算原理。此公式应用的难点在于:为了计算第三个未知数,人们需要估算 3 个未知数中的两个未知数。例如,根据遥感数据计算水深,需要进行海底反照率(A)和水体性质(光谱反射率和漫射衰减系数)的估算。通常的操作程序是:首先推导相邻深水区水柱光学性质,然后假定相邻深水区的海水性质与浅水区相同,再利用水深图,或利用像幅中至少三点的海面实况等辅助数据源,取得海底反照率的初步估算值。

近海浅水区环境遥感需要 30 m 或优于 30 m 的高空间分辨率,才能对于航海或其他应用具有实用价值。遥感数据高光谱分辨率的必要性最近也受到重视(Maritorena 等 1994)。

Lee 等(1999)提出了一种可用于超光谱数据的方法。他们采用半经验分析模型(见 Lee 等 1998 a),将遥感反射率作为吸收、散射、海底反照率和水深的函数;采用预测值纠正法,通过减小误差函数对结果进行优化,同时反演海底深度、海底反照率和海水性质。他们应用模拟数据和野外光谱仪采集的现场遥感反射率数据,取得了很好的结果。然而必须指出,他们的模式假定海底反照率光谱形式为已知的砂质海底,而且假定转换法只应用于砂质环境。

3.6 小 结

第 2 章讨论了二类水体光学性质的复杂性,第 3 章概述了为处理这种复杂性而发展的算法和方法。表 3.2 列出了第 3 章讨论的各类算法。

表 3.2 转换法性能一览表

算法性质	经验法	代数法	非线性优化法	主成分分析法	神经网络
输入要求	生物光学测量和现场测量代表性数据集	生物光学模型	生物光学模型	生物光学模型或生物光学测量和现场测量代表性数据集	生物光学模型或生物光学测量和现场测量代表性数据集
复杂性程度	低	中	高	模型/训练——中, 计算——低	模型/训练——高, 计算——低
反演精度	低至中	中	高	中至高	中至高
对模型与训练数据集的依赖性	无	无	无	有	有
CPU 荷载	低	低	高	模型与训练——中; 计算——低	模型与训练——高; 计算——低
应用的空间尺度 (局部性与全球性)	与数据集相关	通过“局部 (local)”模型可调	通过“局部 (local)”模型, 可调	通过“局部 (local)”查询表, 可调	通过“局部 (local)”网络, 可调

近些年来, 尽管这方面取得了显著进展, 但是仍存在一些重大问题, 值得进一步予以重视。与为一类水体开发的简化算法相比, 本章讨论的算法在数学和计算方面要复杂得多。这些算法的非线性系统处理更多的变量和未知数。然而, 数据和模式中变量数的增加可以使逆问题数学求解变得不稳定, 使支撑算法的迭代法, 逆向模拟或简化法失效。二类水体水色遥感的主要难点是问题的非线性性和被反演物质光学性质特征之间的类似性。即使个别物质的固有光学性质和物质浓度(通过比固有光学物质)之间的关系为已知, 没有任何不确定性或误差, 这些问题仍然存在。但是, 固有光学性质本身以及比固有光学性质的变化更增加了数学上的难度。

如果人们仅仅利用水色反演固有光学性质, 则结果中由固有光学性质与物质浓度之间的假设关系的误差所引起的任何误差都应避免。因此, 科学界有一种讨论, 算法是否应该限于反演光学性质(光谱吸收、散射、衰减系数), 而不是反演海水成分浓度。然而, 以这种方式限制生物光学模型的潜力, 也就限制了这些模型随之而来的应用。人们不应忘记, 遥感的动力在于应用。目前, 科学界还存在以下一种观点: 如果最终结果定位在光学性质, 则二类水体的全球有效应用就可得到更顺利的发展, 光学性质与海水成分浓度之间的关系就可以采用地区性或季节性算法求解。

然而, 这种观点忽略了这样的可能性, 即地区海水成分的变化还可以引起该物质固有光学性质光谱形式的变化。尽管如此, 仍然有必要根据水色数据推导出作为中间产品的体积固有光学性质。当测试模式和分离误差源时, 这都是有帮助的。

就各实验室已开发和使用的数学方法而言, 尽管本章对算法的综述不是很全面, 但是我们至少给出了应用于这类问题的主要技术的基本知识。

根据本章的讨论, 我们能得出哪些基本的结论呢?

- 由于二类水体光学性质复杂, 所使用的算法不得不比一类水体所使用的复杂得多。

这些算法必须考虑到二类水体多变量性质。

- 反演需要有比一类水体更丰富的光谱信息,即具有更高光谱分辨力的更多光谱通道。对于某些应用而言,超光谱数据集也是必须的。

- 二类水体算法改进(甚至要求)的一般方法是产生有助于算法方案优化的输出变量的先验信息。统计关系(最简单的情况是回归方程)或有关能反演未知量性质的物理模型能用来获得正确的解。理想方案是,有关水成分构成的地区变化或季度变化、固有光学性质、变化范围或参数与变量之间相关性也必须予以考虑。

- 二类水体算法的优化需要有各类水体固有光学性质广泛而精确的测量,并建立光学性质综合数据库。光谱范围需要扩展到近红外波段,如体散射函数等辅助量也必须包括在内。

- 二类水体算法的测试和验证将需要有比一类水体已确定的更严格、更广泛的光学规程(protocols)。这有利于算法和结果的相互比较。光学仪器定标、样本采集和测量也应该制订规程。

- 二类水体卫星定量产品要求:遥感器定标应是连续的。为了获得海水成分、大气订正、 R_{rs} 信号转换等,都需要有遥感器绝对辐射率。

总之,人们普遍认为,最近若干年已为二类水体专门设计了一些有前途的算法。然而,这些算法距离全球尺度的业务应用仍很遥远。虽然解决问题的基本方法已被证明是可行的,但是算法以及海水光学模式和大气光学模式仍需要作出重大改进,确保业务化反演精度能被认可。但是根据现有调查和实验结果,人们认为,与一类水体误差极限既定目标相比,二类水体小于 30% 的反演误差是现实的。

第4章 二类水体的测量要求

C.O.Davis J.T.O.Kirk J.S.Parslow S.Sathyendranath

4.1 前言

从第2章讨论中我们得知,二类水体水色信号为许多自变量和参数的复杂非线性函数。这自然需要复杂的数学方法和统计方法来处理遥感信号反演浮游植物浓度(可能包括浮游植物种类)、悬浮泥沙和黄色物质浓度等地球物理变量的逆问题(见第3章)。现已预见到的二类水体遥感数据的应用(见第5章)也是很广泛的,而且特殊应用在测量时空尺度方面对遥感数据有着特殊要求。遥感数据在困难情况下的成功应用需要谨慎规划、精心测量和持之以恒的勤奋工作。在缺乏二类水体验证算法的情况下,最好能将每次数据采集当做适当算法开发和验证的一次实验。因此,无论任何时候,遥感数据采集应与现场数据采集同时进行,人们应适当重视以下步骤:

- 遥感设备、平台和采样策略的选择:遥感器性能指标和数据时空覆盖率应适合于可预见的应用;
- 支持遥感的适当现场测量的选择:算法开发以及遥感数据反演地球物理变量的精度和准确度验证都需要有现场测量;
- 验证测量与误差分析:遥感数据和现场观测一定要进行认真的、严格的比较。比较的目的就是确定结果有效性范围,评价遥感数据的精度,确保遥感数据的质量符合应用的要求。

本章将讨论遥感实验,尤其是二类水体水色遥感的上述三方面内容。

4.2 遥感系统的设计要求

二类水体水色遥感仪器与国际水色协调工作组(IOCCG)第一个报告(1998)所列举的一类水体水色遥感器技术要求相比,必须满足以下4项附加要求。首先,需要增加测量叶绿素荧光、悬浮无机颗粒和浅海海底反射率的光谱通道;第二,需要增加浅水或含泥沙水体大气订正通道;第三,动态范围需要扩大,使遥感器对海滩或海岸带等典型亮物体成像时不至于达到饱和。Hu等(2000b)还说明,有必要扩大数字量化比特数,提高卫星采集数据的精度,避免各类推导产品因数字化误差导致的“斑点”及其他问题。这些问题在浑浊水体比在开阔大洋清洁水体严重得多。最后,海岸带空间特征比开阔大洋空间特征复杂得多,因此要求有较高的空间分辨率。此外,近岸海域动态变化极快,某些应用可能要求逐日或逐小时的

采样。下面我们首先探讨二类水体水色遥感器一般技术要求,然后结合特定应用,讨论空间分辨率和采样频率。由于可预见的应用多种多样(见第5章),一个遥感器系统难以充分而恰当地满足所有的应用要求。

二类水体叶绿素 a 浓度往往很高,范围为 $1 \sim 100 \text{ mgm}^{-3}$ 或更高。在高叶绿素浓度水域,叶绿素 a 荧光信号很强,中心波长大约在 685 nm 。MODIS、MERIS 和 GLI 等卫星遥感器都具有 685 nm 和 665 nm 窄光谱波段,可测量荧光峰的高度。每单位叶绿素的荧光变化极大,因此,此信号的判读存在一定的不确定性。此外,叶绿素还是浮游植物丰度和生产力的指示物。

悬浮颗粒的特征信号是宽光谱范围内的强后向散射,而平直光谱信号是由波长小于 500 nm 浮游植物色素和黄色物质的吸收以及波长大于 600 nm 海水的吸收效应造成的(图 4.1)。图 4.1 表示水深 $1 \sim 30 \text{ m}$ 极清澈水域珊瑚砂的海底遥感测量反射率的模拟。无限深深水情况亦列出,以供比较。整个水体均含大量悬浮珊瑚砂的海域的光谱特征与 1 m 深水域的光谱极为类似。悬浮颗粒信号在 $550 \sim 600 \text{ nm}$ 光谱范围最强。在此范围内,即使是中等浑浊水域(如叶绿素 a 为 4.0 mgm^{-3}),海底信号也很容易探测到,可探测的海底最大深度约为 10 m 。中心波长 570 nm 和 590 nm 窄光谱通道(10 nm 宽)对于悬浮颗粒和水深测量很有用。由于 590 nm 海水吸收率比 570 nm 强得多,作为深度函数,两个通道之间信号的斜率变化很大。如果海底反射率为已知,或者能根据光谱数据进行估算,则根据这些通道数据可计算水深。相反,如果水深为已知,则海底反射特征也能根据光谱数据进行估算。

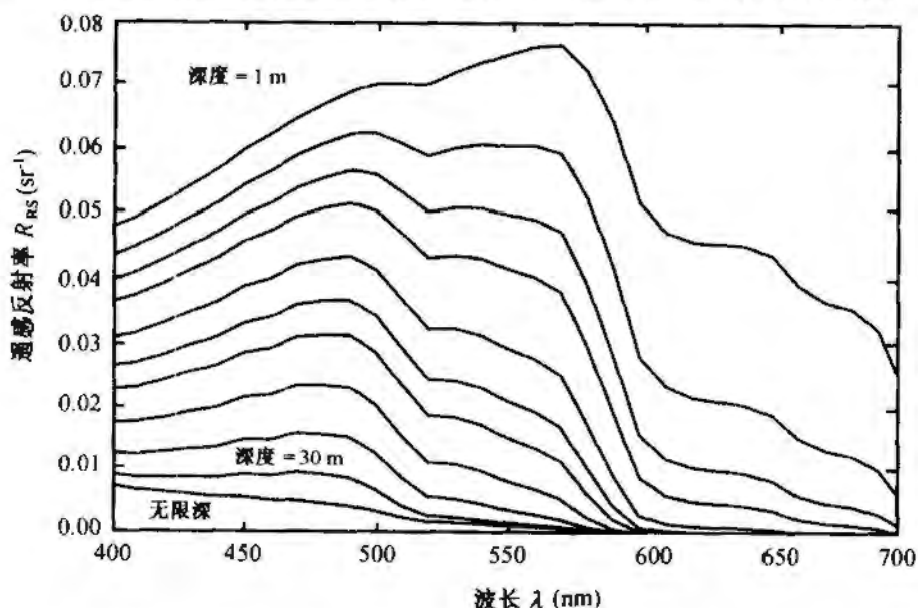


图 4.1 利用商业软件包(HYDROLIGHT 3.0, 美国 Sequoia 科学公司)产生的水上遥感反射率曲线,供水下辐射传输数值计算使用。计算假设是珊瑚砂海底,叶绿素 a 浓度为 0.1 mgm^{-3} 。水深为 $1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 20, 30 \text{ m}$ 。水体无限深度亦标出,以供比较

国际水色协调工作组建议增加 1040 nm 通道,以有利于海面出现“白浪”和泡沫海况时的大气订正。鉴于类似原因,建议在近红外波段增加 $1 \sim 2$ 个通道,以利于含泥沙水体或浅海的大气订正。颗粒物含量很高的水体(泥沙或高浓度浮游植物)在 670 nm 和 760 nm (甚

至在 870 nm, 见图 3.2) 具有很高反射率。海水吸收率随波长增加而急剧上升。1 040 nm 和 1 240 nm 处的大气传输窗口通道即使在最浑浊的水体, 也探测不到离水辐射率, 因此适用于浑浊二类水体的大气订正。

许多海岸带地区已城市化, 因而在沿岸水域经常出现吸收气溶胶。增加 380 nm 波段对于吸收气溶胶特征探测也是有用的。在存在吸收气溶胶时如果将其当做典型的海洋气溶胶, 则大气订正去除的大气辐射率比实际存在的要多得多, 因此在短波长会出现负离水辐射率。增加 380 nm 光谱通道有利于识别吸收气溶胶, 并予以订正。此通道对于黄色物质的测量也证明是很有用的, 因为黄色物质在 380 nm 处的吸收很强。第三种应用是探测甲藻引起的赤潮。这些浮游植物由于含有光保护色素, 在该波段具有特征性吸收, 可以用来判断浮游植物的种类(Kahru 和 Mitchell 1998)。

二类水体遥感器的信噪比应类似于其他水色遥感器。含高浓度颗粒物的二类水体的遥感反射率高于一类水体。然而, 浮游植物含量或有色溶解有机物(CDOM)含量高的二类水体在 380~440 nm 光谱范围的信号极低, 因此需要提高灵敏度和信噪比。许多一类水体遥感器已达到要求的高信噪比, 遥感器对云层或其他亮目标的观测可达到饱和。然而对二类水体的应用而言, 遥感器对云层或海岸的观测一定不能饱和, 因为这些特征是海岸带最常见的景观, 许多建议的应用认为有必要获得最浅海域和相邻滩涂区的图像。此要求只能由现代探测器和仪器的精心设计予以满足。阵列探测器在每一光谱通道可使用若干探测元件, 对探测器芯片上和读出后的象元值进行巧妙的求和, 可以达到高信噪比和极宽的动态范围。这些宽动态范围仪器的数据记录量化等级要求达到 12 比特或 14 比特, 才能保证数据在全动态范围内的足够精度。

二类水体水色遥感器的定标技术要求与一类水体遥感器类似(IOC CG 1998)。发射之前, 二类水体水色遥感器应该在实验室定标, 以达到最佳状态。这包括光谱定标和辐射定标, 以及对遥感器探测如漫射光等人工干扰因素的性能评价, 并通过硬件或定标软件的修改予以改正。机载遥感器在每次现场使用前应在实验室重新定标。理想的情况是, 这些遥感器还应该装备现场或在轨定标系统, 以便每天至少进行一次相对定标, 评价遥感器的稳定性。

卫星遥感器常规在轨定标是必不可少的。利用月球的在轨定标是最理想的, 因为利用月球可进行已知反射率的目标观测, 而不必进行通过多变大气观测的订正。目前 SeaWiFS 计划就是利用月球观测进行定标, 其结果良好(Barnes 等 1999)。MODIS 和 NEMO 等卫星遥感器也计划使用月球成像。此方法的另一好处是可进行这些遥感器的相互定标。为了进行定标和遥感器之间的相互定标, 二类水体遥感器还应该按常规获得开阔海域特征明显的试验场的图像。试验场具有被测反射率均匀一致的宽阔场地, 对于定标和大气订正综合效应测试非常有益。另外, 特征明显的陆地试验场(如干涸的湖床), 对于检验亮目标的性能也是有用的。最后, 对生物性质和光学性质特征典型的海岸带试验场例行成像, 对于算法验证也是必不可少的。

二类水体遥感器空间分辨率、视场和采样频率的技术要求与计划的应用密切相关(表 4.1)。

不同的应用有不同的空间分辨率技术要求。包括近岸或海底特征或人造目标物(如渔场)在内的成像区域, 空间分辨率要求为 30 m 或 30 m 以下。ARIES 和 NEMO 两个正在规

划的星载系统将提供 30 m 分辨率的超光谱数据。NEMO 专为二类水体应用设计了高信噪比。许多机载系统也能为各种应用提供 1~20 m 空间分辨率。

表 4.1 海岸带水色应用区、空间分辨率及范围和时间分辨率的技术要求示例,
以及符合以上技术要求的现有的或规划的平台和传感器示例

应用/问题	空间分辨率 × 范围	时间分辨率	合适平台/传感器示例
河流羽状流排放	(30 m~1 km) × (300 m~100 km)	小时~周	GLI、MERIS、MODIS、 NEMO、SeaWiFS
潮汐羽状流、射流 锋面动力	(100 m~1 km) × (1~10 km)	小时	机载传感器、SEI
有害藻类过量繁殖、 海水养殖、沿岸水质	(100 m~1 km) × (1~100 km)	天~周	GLI、MERIS、MODIS、 NEMO、SeaWiFS
水深测量和浅海海 底生境:分布、现状	(1~30 m) × (1~100 km)	周~月	航空平台、ARIES、 NEMO、
海上作业:航行、能见度	(30 m~1 km) × (30~100 km)	小时~天	MERIS、MODIS、 NEMO、SeaWiFS
溢 油	(100 m~1 km) × (1~100 km)	小时~天	机载传感器、MERIS、 MODIS、NEMO、SEI
渔业海洋学	1 km × 1 000 km	天	GLI、MERIS、MODIS SeaWiFS
地区综合管理	(30~300 m) × (30~300 km)	天	MERIS、NEMO

对于需要对水体特征成像的许多二类水体应用而言,分辨率较粗的系统也是很好的。MERIS(300 m)和 GLI(250 m)高分辨率模式对于空间分辨率要求在 1 km 以下的沿岸特征研究和大范围覆盖而言,是特别有用的。特殊事件成像仪(SEI)是一颗地球静止卫星上的拟定成像仪。它的空间分辨率为 300 m,可每 30 min 重复观测一次,对于锋面、河流羽状流、赤潮或其他动力特征的研究尤其有用。

对于大陆架大特征而言,1 km 分辨率成像是合适的。尽管现在使用和规划中的传感器,没有一台的性能完全适用于二类水体,但是 MERIS、MODIS 和 GLI 有一类水体波段,增加的波段适用于二类水体叶绿素荧光测量和大气订正,还有可能用于悬浮泥沙测量的波段。1 km 分辨率的成像兼顾了整个大陆架的成像需要,对于研究大尺度海洋强迫力(如厄尔尼诺效应)对沿岸动力的影响特别有用。

近海动态变化激烈,某些过程(如潮汐动力)要求每天进行数次数据采集,遥感平台的特性决定了其重复采集的频率。

- 一颗极轨卫星最好时也只能每 2~3 d 成像一次;
- 两颗极轨卫星能实现每天覆盖;
- 地球静止卫星上的成像仪(分辨率>300 m)能达到视场范围 30 min 重复覆盖率;
- 飞机适用于需要对特定场地或特征频繁采样的特殊研究。

二类水体各种过程和特征的全程成像将需要不同传感器系统的组合应用。利用 300~

1 000 m分辨率大范围覆盖重复采集,对于海洋学有关研究特别有用,而 100 m 或更高分辨率的成像适用于对感兴趣特征的详细研究。

由于云的影响,常会造成大量数据丢失,因此,应该做好数据采集计划。全球平均云盖为 50%,因此,最初良好的估算至少要进行 2 倍次数据采集才能完成。这对于计划中的实验和应用而言,往往是最低的技术要求。

4.3 模式参数化和真实性检验的现场数据

今后若干年研究的主要目标是验证机载和星载水色成像仪在近海光学性质特征信息获取上的应用,检验根据遥感数据推导的基本海洋产品的真实性。达此目标需要在有沿岸环境代表性的许多沿海试验场进行一系列的真实性检验实验。每次实验应包括遥感系统的过境飞行,并有算法开发和真实性检验所需的现场测量相配合。

4.3.1 海水成分与光学性质

水色遥感的目的是获取海洋产生的辐射通量特征信息,经过对辐射通量(辐射总强度和光谱分布)的分析,获得水中成分(尤其是浮游植物、黄色物质和悬浮泥沙)的信息。如第 2 章(2.8 式)所述,每单位入射太阳能量的辐射通量的大小随着水中光散射的增强而增强,随着海水吸收的增强而减少,依据下式,近似表达为

$$R(0, \lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{[a(\lambda) + b_b(\lambda)]} \quad (4.1)$$

式中 $R(0, \lambda)$ 为海表面之下,波长 λ 的太阳下行辐照度归一化的上行辐照度; $b_b(\lambda)$ 为后向散射系数; $a(\lambda)$ 为吸收系数; f 为可变的比例系数。正是不同波长的差异吸收以及散射的光谱变化的作用,使得发生辐射通量获得特征光谱能量分布。

因此,正是海水的固有光学性质(即光谱变化的吸收系数和散射系数)决定了发生通量的特性。依据对此通量的严格分析,我们希望了解有关决定着海水光学性质的海水成分的信息。

在根据大气层上空遥感辐射率反演离水辐射率的光谱分布方面,人们正在开发许多不同的计算程序或算法。这些算法用于估算光学特征显著的海水成分的浓度(见第 3 章)。所有方法的设计开发需要输入介质成分吸收和散射特性的可靠数据。

二类水体所需的信息包括:各种类型的浮游植物,有色溶解有机物(CDOM),碎屑有机颗粒,悬浮泥沙和各种矿物类的陆生河源颗粒。人们普遍认为,开发可应用于所有二类水体的单一遥感算法是不可能的,但开发对特定成分或特定地点有效的算法则是完全可行的。然而,这将需要输入从该地点专门测量的光学数据。

在算法开发完成并投入使用时,对该算法有必要进行真实性检验。换言之,有关光学性质分布的经计算的输出数据,或有关浮游植物、黄色物质和悬浮颗粒浓度的输出数据都必须依据直接现场测量数据进行检验。

因此,海水成分固有光学性质及其比值(每单位浓度的值)测量的可靠方法对于算法的初期开发和算法投入使用时的真实性检验都是必不可少的。海水成分测量和海水表面固有光学性质测量的算法和规程已经制订, Mueller 和 Austin(1995)、Fargion 和 Mueller(2000)

以及他们引用的参考文献对这些方法进行了归纳总结。

4.3.2 吸收率的测量

无论是数据输入,还是模式真实性检验,为了达到目的,我们不仅需要测量吸收率,而且还要测定吸收率在 CDOM、浮游植物和非生物颗粒等不同物质之间是如何分布的。进行上述测量有 3 种方法。第一种方法是颗粒吸收率的测量过滤法与黄色物质吸收率测量的分光光度计法的结合使用。第二种方法是使用现场吸收测量计。第三种方法是采用集成空腔计(cavimeter)。每种方法应用于特定类二类水体都有优缺点,下面逐一予以讨论。

颗粒吸收率测量最常用的方法(Yentsch 1962)是首先将其聚集在玻璃纤维过滤器上。利用另一个清洁而湿润的过滤器作为参考目标,在过滤器上进行光谱测量。此方法的问题是:为了消除过滤器散射对光束路径长度的扩大,必须确定相应的订正因子。该项订正的经验公式业已存在(Mitchell 和 Kiefer 1988a;Bricaud 和 Stramski 1990;Cleveland 和 Weidmann 1993;Hoepffner 和 Sathyendranath 1993)。然而,有关的大型订正存在显著的不确定性。Roesler(1998)最近的研究表明,如果工作特别认真,使参考过滤器(blank filter)的过滤程序与采集过滤器完全相同,大部分的不确定性是可以消除的。玻璃纤维过滤器上颗粒谱测量的另一种方法是首先将颗粒收集在膜过滤器上,然后利用冻结传输法(Allali 等 1995),使颗粒在水中再次悬浮。此方法避免了吸收扩大问题,但是此方法劳动强度大,而且在传输过程中可能造成物质损失。

下一步就是区分由于浮游植物引起的颗粒吸收和由于有机碎屑物或矿物质颗粒引起的颗粒吸收。为了完成这一步工作,要从过滤器上提取浮游植物色素,然后进行残余光谱(假设为非浮游植物颗粒物)测量(Kishino 等 1985)。浮游植物色素的提取不使用甲醇或丙酮,而使用次氯酸盐(此盐类使有机碎屑和矿物颜色灵敏度明显下降),使色素脱色(Tassan 和 Ferrari 1995),然后收集滤液,并对其用 10 cm 路径长度的分光光度计测量其吸收率,以获得黄色物质的吸收率。对于像波罗的海等海域黄色物质浓度很高的二类水体海区,此方法特别有效。然而在黄色物质浓度极低的许多二类水体海区,此方法测量精度较低。

第二种方法是使用吸收测量计。此仪器采用反射管,在反射管内散射误差被减小,并能进行订正,若采用较长的路径长度,还可提高仪器灵敏度。此方法对许多水域都有效,而且此类仪器已商品化(Moore 1994;Twardowski 等 1999)。商品化仪器“ac-9”以 9 波长测量吸收率和波束衰减,而新型仪器(HySTAR)采用 400~800 nm 范围分光计,测量 a 和 c 。路径长度更长(25 cm)的仪器可以进行大部分二类水体吸收率精确测量。670 nm 叶绿素 a 吸收峰可用来单独估算浮游植物生物量,并将其与总颗粒吸收率区分开来。经常使用两台 ac-9 吸收光度计,一台用于测量海水性质,另一台以大容量过滤器测量水中溶解物。因此,ac-9 吸收光度计能用于 3 种物质吸收率测量。此方法的主要优点是:ac-9 吸收光度计是一种可用于剖面系统、径流系统(flow-through)和锚定系统上的现场仪器。

第三种方法是使用集成空腔吸收光度计(ICAM)。此仪器对于海水测量特别有用,因为测量结果完全不受散射的影响。ICAM 具有很长的有效路径长度,可用于测量极低的吸收率值(Fry 等 1992)。最近, Kirk(1997)介绍了另一仪器——点源集成空腔吸收光度计(PSICAM)。尽管这两种仪器都没有商品化,但是 PSICAM 制造较容易(现已有实验室样机),使用者可自己动手制造。使用 ac-9 吸收光度计,670 nm 叶绿素 a 吸收峰可用来获得

浮游植物吸收率的独立估算值,并将其与总颗粒吸收区分开来。PSICAM 也能使用过滤水,测量有色溶解有机物的吸收率。该方法的主要优点是有效的长路径长度,而且总吸收率的测量不受散射的影响,因此海水不必过滤,也不需要订正系数。

利用 Gershun 方程,根据水柱内测量的光场下行辐照度(E_d)、上行辐照度(E_u)和标量辐照度(E_0)光谱值,还可以间接得到吸收系数值

$$-a = \frac{dE}{dz} \left(\frac{\mu}{E_d - E_u} \right) = \frac{dE}{dz} \frac{1}{E_0} \quad (4.2)$$

式中 E 为净下行辐照度($E_d - E_u$), μ 为一定深度处净辐照度平均余弦,可定义为: $\mu = (E_d - E_u)/E_0$, 其中 $E_0 = E_{0d} + E_{0u}$ 。许多学者多年来一直使用此方法,近些年来还研制了以这种方式专门测量现场吸收率的仪器(O'Mongain 等 1997, 还可参见 Højerslev 1975; Spitzer 和 Wernand 1981)。此方法的主要限制是:只能测量总吸收系数,无法区分不同物质的影响。Gordon 和 Boynton(1998)还提出了根据上行辐照度和下行辐照度剖面,估算吸收系数和后向散射系数的算法。

无论采用以上哪种方法,重要的是进行 380~800 nm 光谱范围的测量。380~420 nm 范围的吸收对于估算黄色物质的吸收率尤为有用。在更大波长处,由于许多二类水体区十分浑浊,造成近红外波段存在自然发生的显著辐射通量,这使得波长大于 700 nm 时海水是有效“黑体”的通常假设不成立。而且在波长大于 700 nm 时,有机碎屑和悬浮矿物质的吸收也十分显著。因此从遥感应用考虑,不仅在可见光波段,而且还应该在近红外波段进行吸收率测量。这种惯例性测量至少应达到近 800 nm,如果可能,最好达到 800 nm 以上。

由于现在有许多吸收测量法可以利用,如果可以组建不同二类水体地点可能发生的各种生色物质(如不同的优势浮游植物种,尤其是水生生物过量繁殖或赤潮生物物种、再悬浮的海底颗粒类和可溶的微粒状腐殖物)比吸收系数的光谱数据库,对于模式的开发是很有价值的。无论在哪里进行测量,这都是向特定物质算法开发迈出的关键一步。

4.3.3 散射和后向散射测量

目前尚无能直接测量总散射系数 b 的商品化仪器。然而,通过测量特定波段波束衰减系数 c ,能间接获得 b 值。因为 $c = a + b$,所以从 c 值减去 a (吸收系数)值,能得到 b 值, a 值和 c 值是在同一波段分别测量获得的。例如,两用的 ac-9 反射管吸收光度计就能完成此类测量。

在极浑浊的二类水体,尤其在主要因矿物质颗粒引起散射的二类水体,应使用悬液浊度计,进行 NTU 单位浊度测量。据观测,此类测量的优点是:散射系数值(单位为 m^{-1})和浊度值(单位为 NTU)之间存在着近似数值等式关系。

后向散射系数 b_b 在遥感应用上具有特殊意义。尽管目前没有任何仪器能测量 b_b ,但是,现在已研制成功 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围总散射测量仪器(Maffione 和 Dana 1997),可产生某一角度(120°)测量的估算值,这一特殊角度的散射与总的后向散射之比对于不同散射相函数而言,是相对恒定的(Oishi 1990)。对于后向散射与总散射之比随水柱中不同物质的作用而变化的二类水体,这是一种特别有价值的测量方法。

有关二类水体散射相函数的信息,我们知之甚少,许多学者不得不仍然依靠 Petzold (1972)取得的圣地亚哥港数据集。人们迫切需要不同类型二类水体的散射相函数。然而,

目前尚无进行这些测量的直接方法或商品化仪器。

我们还必须切记,少量的测量不可能获得悬浮颗粒的典型分布特征。在这方面,根据光场现场测量,估算固有光学性质的间接方法(如 Gordon 和 Boynton 1998)也是有益的。

4.3.4 反射率

任何水色遥感算法必须开展的一项重要工作(即使这项工作总是不那么明确),就是计算发生辐射通量的光谱分布,并通过计算消除所有大气路径的辐射。因此任何给定算法,在进行实际海水成分预测之前,要进行一种测试,首先测定其再现离水辐射率实际光谱分布的能力。然而,如果这样的测试不得不按常规进行,那么人们所需要的是海表面之上“遥感反射率”[光谱上行辐射率除以下行辐射率,即 $L_u(\lambda)/E_d(\lambda)$]的光学满意度标准化规程测量。此值估算的标准方法就是测量 $L_u(\lambda)$ 和 $E_d(\lambda)$ 剖面,利用依据以上剖面计算的 K_u 和 K_d 值,将剖面外推到海面。然后利用标准近似值外推整个海表层(Mueller 和 Austin 1995; Siegel 等 1995)。大风造成的粗糙海面、部分多云天空、船影和其他常见障碍使这种测量和计算十分困难。此外,在浑浊的或高吸收的二类水体,由于测量 L_u 的辐射计引起显著的自影效应(Gordon 和 Ding 1992),所以测量的有效性可能有所降低。尤其在强吸收的海域,需要使用窄横截面的辐射计,而且对大于 600 nm 的波长,还要进行订正。

另一种方法是使用指向海面的手持光谱仪进行遥感反射率测量(Corder 和 Steward 1995, 1997 年经 Rhea 和 Davis 改进)。对海表和 30°天底点观测角条件下标准灰板反射率(10% 反射率 Spectralon)以及 30°天顶角条件下的天空进行测量。所有以上测量均在与太阳平面相交 90°的同一垂直平面上进行。天空测量用于海表反射天空光的订正。无论海水光学性质如何,此方法都是有效的;在遥感系统发射之前,此方法是实验算法开发的良好基准参考。在恶劣海况条件下,测量很难进行,在海面出现白浪和泡沫等严重干扰时,这类测量是不现实的。

海表遥感反射率估算的第三种方法是使用 a 和 b_b 的被测值,并利用辐射传输模型,由海水固有光学性质计算遥感反射率。对于许多遥感实验而言,应通过二次或二次以上计算进行结果比较,确保数据集的连续性。

二类水体海区往往很浅,如果水质清澈,海底反射对离水辐射率通量可能产生影响。如果从遥感数据中提取水深信息,海底反射是很有价值的。为了进行此类情况的必要计算,需要有海底的光谱反射数据。这方面,我们还需要建立各类二类水体环境的海底反射数据的数据库。海底反射率数据采集光学满意度标准化规程也需要编制。

4.4 真实性检验程序和误差估算

如本章前言所指出的那样,在缺少二类水体真实性检验算法时,每次数据采集应视为一次算法开发实验。因此,为了支持大气订正、叶绿素、黄色物质、悬浮泥沙、水深测量和海底反射率等算法的真实性检验,需要有最低限度的测量数据集。对于特殊环境或进行新产品开发算法测试时,还需要有补充测量。二类水体水色遥感数据算法真实性检验数据采集方法建议如下:

(1) 过境飞行时采集的大气和天气数据

- 风速;
- 气压;
- 相对湿度;
- 温度;
- 光度计测量。

(2) 过境飞行时采集的海水上空测量值

- 遥感反射率;
- 光谱下行辐照度 [$E_d(\lambda)$];
- 海况和天空条件 180° 相片。

(3) 海水光学性质

- 现场光谱仪器测量的总吸收系数和总体积衰减系数;
- 现场仪器测量的海水中溶解物质光谱分辨吸收系数和总体积衰减系数;
- 后向散射系数(光谱可分辨);
- 使用现场荧光计测量的叶绿素和 CDOM 荧光;
- 利用避免船影效应最小化仪器测量的遥感反射率 (R_{RS});
- 光谱 E_d 和 L_u (如果可能, 还有 Q 光谱 E_u), 最好使用可以扫描整个感兴趣光谱域的高光谱分辨率仪器, 否则只能进行多波长的分散测量。

(4) 在过境飞行 1 h 内采集上层两个光学深度上 2~3 层水样, 并进行以下分析

- 叶绿素(荧光计测量, 或最好进行高效液相色谱法测量);
- 过滤器上残留颗粒物的吸收系数(或点源集成空腔吸收光度计测量);
- 色素提取后过滤器上残留物质的吸收系数;
- 利用 10 cm 或 10 cm 以上路径长度测量过滤海水的吸收系数(或点源集成空腔吸收光度计测量)。

(5) 光照浅水区辅助测量建议:

- 水深测量(过境飞行两周之内);
- 海底反射率(如果海底发生变化, 应在一周之内或在同一天);
- 海底特征(泥沙类型、珊瑚类型等, 应在两周之内)。

星载成像仪在发射之前, 可利用以船为主的实验, 开展真实性检验场特性详查; 发射后, 应定期进行调查。然而, 每次卫星过境安排一个航次的调查是不现实的。因此, 对于星载仪器而言, 真实性检验场需要有锚定仪器, 进行最低限度的物理、光学和生物性质测量, 测量数据则用来进行遥感反射率、离水辐射率、海水透明度和叶绿素产品的真实性检验。这些锚定仪器需要定期进行清洁处理和维护, 并按船舶测量数据进行定标, 以确保其测量的精度。每一个真实性检验场至少需要有一台锚定仪器; 为了保证数据冗余, 并进行岸上与海上梯度评价, 最好布放 2 台或 2 台以上锚定仪器。

锚定仪器测量建议如下:

- 海水上空光谱 E_d ;
- 近表面光谱 L_u , 或若干深度层 L_u , 用以计算 K_u , 并外推到海面, 获得海水上空的 L_u ;
- 根据以上测量和其他测量(固有光学性质), 计算海面以上的 R_{RS} ;

- 叶绿素荧光;
- CDOM 荧光;
- 波束透射率;
- 水温;
- 盐度;
- 风速;
- 气温;
- 相对湿度;
- 气压。

近海水域的光学性质时空变化很大,每次现场测量和遥感测量之间存在误差,然而与这些测量的时空相关性有关的误差一般会更大。由于受潮汐、沿岸流和与风暴过境有关的不定风的驱动,羽状流和锋面等沿岸强特征变化迅速(Rennie 等 1999)。2~5 km h⁻¹或更大流速的潮流在许多沿岸海域较常见。因此,尽可能同步取得卫星过境时的真实性验证数据至关重要。如果当地海域自然变化很大,即使相差 1 h,测量结果的比较也可能失败。

即使取得同步数据,在 1 km 距离内海水类型变化急剧的任何近岸海域,从定点采样升级到 1 km 象元分辨率也是很难的。遥感系统采取了象元遥感反射率加权平均措施,但往往也难以与单点采集值建立相关。走航船舶采集数据有助于改善这一状况,而且过境飞行的装有 1~20 m 空间分辨率的航空成像仪的卫星成像仪提供的数据集,能弥补现场测量尺度与卫星测量尺度之间的差距。

第5章 二类水体水色遥感的应用

J.S.Parslow N.Hoepffner R.Doerffer J.W.Campbell
P.Schlittenhardt S.Sathyendranath

5.1 前言

二类水体水色算法主要(但不完全)是为海岸带应用而设计的。人口和人类活动都集中在海岸附近(表 5.1)。60%以上的人口生活在海岸带,Pernetta 和 Milliman(1995)将海岸带定义为平均海平面以上 200m 至以下 200m 的地区。由于人类在沿海流域的活动(如土地开垦、农业、采矿、城市和工业开发),使得向沿岸海域排放和输入营养盐类及泥沙的方式发生改变。海岸带开发导致前滨改变、红树林和海草床等关键湿地丧失、冲刷速度加剧、泥沙再悬浮,泄洪管道直接将营养盐类和有毒物质排放到近岸海域。

近岸海域也是人类的重要资源,这一海域的渔获量占世界渔获量的 90%(见表 5.1),也是迅速增长的海水养殖业的基地。人类娱乐活动和旅游业也集中在近岸海域,往往与良好水质保持,与珊瑚礁、海草和海藻群落等关键生境及相关植物区系的保护密切相关。

表 5.1 海岸带一览(引自 Pernetta 和 Milliman 1995)

占世界人口 60%	占全球海洋初级产量的 14%
占世界大城市的 2/3	占世界渔获量的 90%
占大洋表面的 8%	占全球河流悬浮泥沙沉降量的 75%~90%

由于影响和利用之间的这种冲突,海岸带人类活动和影响的管理在各沿海国家占有重要地位。在全球范围,此类管理已成为国际地圈生物圈计划(IGBP)核心计划“海岸带海陆相互作用”(LOICZ)的中心课题(Pernetta 和 Milliman 1995)。许多国家已制订了一个或几个大型地区计划,探讨海岸带系统变化的监测、预报和管理方法。

由于陆源物质输入和海底再悬浮,海岸带生物光学物质成分,如浮游植物色素、悬浮泥沙和溶解有机物的变化互不相关。海岸带水域光学深度较浅,因此离水辐射率受海底反射率的影响。二类水体算法的复杂程度需要增强,才能分辨离水辐射率光谱所受的影响。然而,这些算法还将产生附加产品,并支持更加广泛的应用。

在本章中我们认为,海洋水色产品能在海岸带监测和管理中发挥作用。从一开始我们就强调指出,水色和遥感一般不能孤立地被视为是海岸带监测独一无二的手段。有许多相关的性质,遥感方法是不能测量的,只有将遥感数据与现场数据或辅助数据结合使用,才能推导其他产品。科研人员和管理人员正在研究将遥感数据和现场数据同化到诊断模式和预测模式之中的集成方法。在气象业务中类似方法已得到成功的应用。

遥感产品在时空覆盖率方面对于现场测量数据的互补性是很明显的,它可以进行其他手段不能实现的大范围空间分布观测,非常适合于与海岸带应用相关的广泛时空尺度的覆盖。主要空间机构已计划安排的卫星传感器序列同相互定标及数据融合[如传感器相互比较与生物跨学科海洋研究的结合(SIMBIOS),McClain 和 Fargion 1999]计划相结合,为提供从其他来源不能得到的长期一致数据集展示了良好前景。

下面讨论的许多应用与时序图像的获得密切相关。云量能极大地损害时间覆盖率,现在正在发展地理统计法或动态模式同化法,通过在无云图像间内插,提高短期时间覆盖率。

海洋科学家已认识到国际上协调一致的业务化海洋监测计划,有必要支持海洋环境、资源和产业的管理。近十多年来,在政府间海洋学委员会(IOC)的主持下,已制订了全球海洋观测系统(GOOS)计划(IOC 1998)。据认为,在 GOOS 中,遥感将起到关键作用,尤其是在 GOOS 海岸带模块中,已建议启动一项示范计划,验证水色遥感在海岸带监测中的作用(IOC 1999)。

因此此项示范计划提供了跨国界的公认一致的指标,所以遥感产品对于遵循国际协议和公约的全球监测至关重要。例如,欧盟已制订出沿海水质指标监测的环境指南,指标包括透明度、水色和悬浮固体(表 5.2)。据认为,海洋水色传感器提供了一种成本-效率比高的监测手段。

表 5.2 欧盟环境指南监测变量示例简表

指 南	关注的问题	监测的变量
76/160/EEC	浴场水质	嗜状大肠杆菌、海水透明度、pH、粪链球菌
79/923/EEC	贝类养殖场、水质	盐度、氧、pH、温度、有色悬浮物、碳氢化合物、大肠菌
91/271/EEC	城市污水处理	生物需氧量、悬浮固体、总磷、总氮

注:EEC——欧洲经济共同体 表中黑体字表示水色数据的潜在应用

尽管传感器研制和算法开发的费用很高,但是遥感产品的边际成本很低,许多全球产品和地区产品实际上是免费分发。因此,遥感对于第三世界国家环境监测是一种成本-效率比很高的手段。国际海洋水色协调组(IOC CG)已认识到这一点,为发展中国家举办了一系列地区水色培训研讨会(参见 <http://www.ioccg.org>)。

5.2 二类水体水色产品

第 3 章介绍的二类水体水色基本算法可以估算光学深度大的海域浮游植物色素(叶绿素 a)、悬浮泥沙、黄色物质的浓度,亦可估算光衰减系数。下面扼要地讨论各种应用的有关附加产品,包括叶绿素荧光总量、色素成分或藻类过量繁殖类型、海底深度或透光浅海域的光谱反射率。我们还认为,诸如水体和海底初级产量、水平交换和沉降速率等推导产品也可以通过综合水色产品与辅助数据和模型得到。

5.2.1 光的衰减和水色

二类水体水色算法可进行沿岸水域特定波长光衰减(K_d)的直接定量估算(见彩图 9)。这类估算与海水透明度传统测量(如透明度深度)和水色相关,海水透明度和水色深刻地影

影响着人们对利用沿岸水域休闲适宜性的感受,因此被特定为水质指标。例如欧盟环境指南关于浴场水质的文件(欧洲经济共同体文件 76/160 号)要求成员国标明浴场区,并在游泳季节每隔两周进行一次包括水色和透明度等项目的水质监测。

至少以下 3 种物质的光学性质影响沿岸浑浊海域的水色和透明度:有机生物量(叶绿素和其他色素)、溶解物(黄色物质)和矿物质颗粒。因此,根据光学遥感反演这些物质将是评价和解译海水透明度、支持政府政策的贯彻执行和检验政府政策正确性的直接而有效的方法。

5.2.2 叶绿素荧光

多光谱和超光谱高级遥感器具有足够的光谱分辨率和辐射分辨率,在有利条件下,至少可测量叶绿素浓度大于 0.5mg m^{-3} 的 685nm 被动太阳荧光峰(Babin 等 1996; Letelier 和 Abbott 1996)。对于在沿岸水域比在大洋区更常见的高浓度叶绿素环境,证明此特征测量很有用(Gower 等 1999)。荧光测量能够当做生物量独立量度使用,或者与标准叶绿素 a 产品结合,作为浮游植物生理状况的指标,这些测量都有利于提高初级产量算法的精度(见以下阐述)。

5.2.3 色素成分和水生生物过量繁殖类型

海藻类色素成分的差异已众所周知,例如高效液相色谱法(HPLC)可将色素成分转换成藻类成分。尽管某些色素变化(如在类胡萝卜素成分中)对吸收峰只有很小的影响,但是色素成分的差异也可转换成色素吸收谱形状的差异(Sathyendranath 等 1987; Bidigare 等 1990; Babin 等 1993; Hoepffner 和 Sathyendranath 1993)。在藻类族中,后向散射谱也存在差异(Ahn 等 1992)。然而,我们掌握的有关此类差异的信息甚少,至今还不清楚逆问题(根据 R_{RS} 之差,区分色素成分或藻类种类)可处理到怎样的程度(Cullen 等 1997; Millie 等 1997; Gege 1998)。然而,肯定存在某些易于区分的海藻类和色素族,如蓝菌藻类 *Trichodesmium* sp. 和颗石藻类,至少在藻类过量繁殖密度上升时是如此(见彩图 10 和彩图 2)。在紫外波段,还存在能用来区分类别的光保护色素的特征(Kahru 和 Mitchell 1998)。

5.2.4 海底深度、海底反射率和生境

在光学深度浅的海岸带海域,水体成分算法需要消除海底反射率的影响。目前已开发出估算海底深度和测量浅海水深的算法(见第 3 章水深测量)。在有利条件下,还可以消除水柱影响,估算海底反射率谱(Lee 等 1999)。在充分积累了不同类型海底反射率谱的实测数据或知识后,才有可能绘制海底生境类型图。Jupp 等(1996)已利用超光谱机载遥感器数据,进行了有意义的探索。

沿岸浅海环境遥感需要达到 30m 或 30m 以下的高空间分辨率,才能对导航或其他应用具有实用价值。此外,Maritorena 等(1994)建议,光谱成像系统在用于水深和海底特征测量时,可利用水体和海底反射多变的吸收特性。澳大利亚资源信息和环境卫星(ARIES)和海军地图观测者卫星(NEMO)这两颗处于研制阶段的超光谱卫星系统可满足浅海水深测量的需要(Wilson 和 Davis 1998; Davis 等 1998)。尤其是 NEMO,其主要目标是进行 30m 空间分辨率的浅海水深和海底特征测量,可满足海军浅海航行的需求。

5.2.5 水体初级生产力

浮游植物初级生产力构成大洋和许多近岸海域海洋食物网的基础。初级生产速率的知识对于提高有关远洋和底栖生态系、野生渔业资源、海水养殖和营养盐增加的影响(富营养化)的认识和管理是极其重要的。无论是一类水体,还是二类水体,对于根据水色数据预测初级生产力和制作各类辅助产品,都存在迫切的需求。利用光合作用与辐照度的关系,估算水体初级生产力的标准算法与遥感的叶绿素 *a*、光衰减和估算的海面辐照度密切相关。在一类水体中,水体中光衰减可近似表达为叶绿素 *a* 浓度的函数。另一方面,二类水体中光衰减的计算必须考虑悬浮泥沙和溶解有机物的作用。灵敏度分析(Platt 等 1988)表明,计算的水体初级生产力对于浮游植物以外物质的光衰减极敏感。因此,二类水体生物量算法的改进,既提供了浮游植物生产量估算的较好结果,也提高了光衰减估算的精度,将有利于二类水体初级生产力的计算。

叶绿素荧光总量(每单位叶绿素荧光)可以用做生理状态指数来分辨光合参数的变化(Topliss 和 Platt 1986; IOCCG 1999)。初级生产力算法需要从海表叶绿素浓度外推到叶绿素垂直剖面;此类外推可根据现场测量历史数据、遥感辅助数据(如海表层温度)或基于遥感数据与预测混合层深度的物理模型的综合而进行。

5.2.6 海底初级生产力

沿岸浅海海底植物也对初级生产力产生重要影响,并形成包括重要经济物种在内的各种动物区系的关键生境。人们早已认识到海底大型水生植物,如海草、巨藻以及珊瑚和海绵上共生藻类的作用,同时还日益深刻地认识到,海底微型植物(如海底硅藻)也能对水体生产力产生重大影响(Beardall 和 Light 1996)。利用遥感表面辐照度和衰减系数,预测海底光强,并依次利用此光强以及通过遥感或现场采样获得的植物生物量的分布,预测海底初级生产力(Zimmerman 和 Mobley 1996),具有良好前景。海底光强也是海底植物群落(如海草)分布的决定性因素。

5.2.7 悬浮泥沙和污染物

第3章二类水体“标准”水色产品部分详尽地讨论了悬浮泥沙浓度(或颗粒后向散射)。悬浮泥沙浓度可用于跟踪河流浑浊羽状流,或研究浅海区由于潮汐、风和浪的作用引起的海底泥沙再悬浮。细泥沙对许多污染物(有机物和重金属)具有很强的吸附能力,作为一种载体,泥沙使水体中的污染物有所减少(Kersten 等 1994)。在此情况下,污染物的水平分布、输运、沉降、来源以及食物网的生物吸收均与悬浮颗粒物(SPM)的动态变化有关。悬浮物中的细颗粒($<0.63\mu\text{m}$),其表面相对很大,对某些污染物具有特别强的影响。像铜一类污染物,通过浮游植物等微生物吸收,进入到颗粒中,显示出与悬浮颗粒物中碳含量的极强关系。

由于悬浮颗粒物的变化比溶解物的变化大得多,所以很难利用常规方法开展与悬浮颗粒有关的污染物监测(Kammann 等 1994)。许多时候,根据每年少数船舶调查航次的数据,判断悬浮颗粒物变化的趋势是很难的,甚至是不可能的。监测主管部门强烈要求获得悬浮颗粒物分布的遥感数据,以便更好地解译有关颗粒污染物数据。

5.2.8 黄色物质

第3章二类水体标准产品部分还详细地讨论了黄色物质。有色溶解有机物(CDOM)在生物过程和光化学过程中起着重要作用。因为这种物质能有效地吸收有害的紫外辐射,所以它在水生生态系统中起着生物保护物的作用。在海洋环境中,它在过氧化氢产生期间起着能量吸收介质的作用(Moore 等 1993)。在无机碳产生时,它是碳的来源(Miller 和 Zepp 1995)。溶解有机碳(DOC)(CDOM 是其中的有色成分)是全球碳循环的重要参与者,河源 DOC 是陆地入海碳通量的最大来源。现有的二类水体算法可提供黄色物质信息。这些算法不能区分 CDOM 和类似的有色碎屑颗粒。然而,遥感数据能提供 CDOM 一类物质动态变化有价值的信息。

尽管现在还不清楚海洋中 CDOM 在多大程度上是陆地产生的残余物还是海洋产生物,但是一些学者已发现,CDOM 是河源输入物中保守性良好的示踪物。在这种情况下,CDOM 与盐度之间的逆线性相关已充分揭示了这种保守性(Laane 1982; Mantoura 和 Woodward 1983; Blough 等 1993)。现已确定,CDOM 吸收和 DOC 质量之间(Ferrari 和 Mingazzini 1995; Vodacek 等 1997; Del Castillo 等 1999)、某些水环境中 CDOM 吸收和生物生产力之间(Prakash 等 1973; Vinebrooke 和 Leavitt 1998)还存在某种弱相关性。

5.2.9 物理动力学

多种类型卫星传感器能用于物理动力学研究,每种传感器各有优缺点。大洋环流及其变化在海洋地形上有所显示,可利用卫星高度计推导大洋环流地转流(Koblinsky 1993)。然而在水深小于 50m 的地区,高度计测量数据难以重新构建动力高度;合成孔径雷达海面粗糙度信号能提供海流边界图像,但是粗糙度信号受风况的极大影响;海表温度(SST)和水色图像能用来研究中尺度环流的表层平流。根据热红外传感器推导的 SST 图像可反映极薄表层的温度,但是 SST 图像受白天增温或风力混合的影响,反映较厚表层光学性质的水色图像则稳定得多。一些学者指出,水色图像确定动力特征优于红外图像(Arnore 和 La Violette 1986; Ahlmas 等 1987; Sur 等 1996)。

河流羽状流、海洋锋、不稳定的曲流(meanders)、丝状流(filaments)、相干偶极流(coherent dipole)、单极涡漩和射流等各种环流特征都能利用水色图像进行研究(见彩图 11)。即使被测浮游植物色素不是保守的示踪物,在叶绿素浓度场中这些特征往往也清晰可见(Yentsch 1984)。其他物质,如黄色物质和悬浮泥沙可能是比叶绿素 a 更好的示踪物。彩图 12 是根据 SeaWiFS 数据推导的地中海 440nm 黄色物质吸收系数冬季(1997 年 11 月至 1998 年 3 月)平均分布(Kopelevich 等 1998b)。黄色物质的重要来源及其从来源向外数英里距离的扩散,在图上清晰可见。

依据不同的平台,水色遥感可提供间隔时间为数小时至数天的示踪物场(叶绿素、黄色物质、悬浮固体等)时序图。利用直接相关法,或通过与环流模式的同化,分析以上时序图,可以估算水平流速场。通过黄色物质和悬浮颗粒物场从点源扩散的演化过程比较,便可以估算沉积速度。更为常见的是,悬浮泥沙场可用于泥沙输运、再悬浮和沉淀模式的定标或真实性检验。

5.3 按问题或产业划分的应用

5.3.1 土地利用和河流径流的影响

在流域的人类活动(如放牧、农业、林业、采矿、筑坝、灌溉、城市和工业开发)都能使径流流量和走势发生重大变化,使得河口和相邻沿岸海域的营养盐类和泥沙含量增加。由于流域改变而引起的淡水径流走势的变化会对河口和相邻沿海地区的环流及盐度机制产生深刻的影响,尤其是对关键生境(如红树林、盐沼地)和渔业资源恢复的影响更明显。

海岸带海陆相互作用(LOICZ)主要研究河流径流变化对地区尺度和全球尺度的生物地球化学循环产生的影响(Pernetta 和 Milliman 1995)。环境管理人员主要关注局地尺度至全球尺度水质、沉积物质量和沿岸生态系统所受的影响。人们共同关注的问题包括由于直接的破坏而引起的底栖生物群落的消失、浊度和泥沙沉降加剧,以及由于富营养化而引起的有害藻类过量繁殖。人们日益要求河流管理者考虑下游对河口和海岸系统的影响。

目前,由于以适当时空尺度监测海洋的难度和巨额经费的限制,对下游河口和沿岸影响的认识和监测还不充分,尤其是对僻远地区或大型生态系统的监测更少。海洋水色产品,如悬浮泥沙、光衰减和叶绿素 a 浓度,是这些系统所受影响的重要指示物。人们经常关注大洪水泛滥事件影响的空间范围,然而此类影响存在不确定性。悬浮泥沙和黄色物质浓度能用来跟踪河流羽状流的分布、稀释和沉淀,进行扩散模式的定标或真实性检验,以及识别与底栖生态系统(如珊瑚礁)的相互作用或与近岸水体的交换。

流域径流的空间尺度通常为数百米至数千米,时间尺度为数小时至数周。

5.3.2 海岸带开发的影响

海岸带开发(如城市和旅游业的发展、港口开发、疏浚、排污等)改变了海岸带流域自然景观,海岸带环境受到直接影响,致使前滨滩涂改变、红树林和海草等海岸带生境遭到破坏而消失或海岸冲蚀加剧。

海岸带基础设施,如港口和航道的开发和治理往往造成泥沙再悬浮,光衰减因而受到暂时性或永久性增强,海底生境受遮光或泥沙窒息作用而消失,污染物和有机物受扰动而活化(Wakeman 等 1975; Moore 1977; Appleby 和 Scarrat 1989)。另外,水色还可以用来监测悬浮泥沙的分布及沉降并监测水深的变化。

泥沙动力来源于时间尺度在数小时的引潮力,由其产生的河口羽状流和锋面的空间尺度约在 100 m 或 100 m 以下。由于机载遥感器的高空间分辨率和分辨潮汐周期的测量能力,因而在这方面具有特殊的应用价值。

5.3.3 富营养化

富营养化是自然系统中营养盐类富集的现象。在海岸带海洋系统中,此种现象是由于流域土地利用,河流排放量增加,城市污水处理厂、工业排污和雨水沟直接排放等所造成的。富营养化通常促使藻类生物量激增,达到一定程度时暴发有害藻类过量繁殖。在自然寡营养的沿岸系统中,富营养化常导致海草为底栖大型藻类取代,随后出现浮游植物的大量繁

殖。

富营养化是海岸带管理者面临的最严重、最普遍的环境问题之一。叶绿素 *a* 是富营养化的标准指标。二类水体水色遥感为叶绿素 *a* 例行监测提供了一种成本-效率比较高的手段,将极大地有利于加强对富营养化,尤其是对僻远地区富营养化的管理。

5.3.4 全球变化和区域性生物地球化学循环

20 世纪内,气候变化的影响和人口增长的压力预计会对沿海社区和海岸带海洋环境造成巨大冲击。这就要求建立协调一致的海岸带综合管理策略及监测系统。现预测的气候变化的影响包括海平面上升、风暴频次和强度增加、海岸线侵蚀加剧、河流流量和沉积作用增强。海平面上升将引起居民区洪水泛滥、海岸带蓄水层海水倒灌。风暴和海啸的应急措施应引起人们更大的重视。

近些年,人类已大大改变了河流流量及其化学成分。在近 30~40 年期间,排入近岸海域的淡水流量已减少 15%,可是由于人口增长,世界河流氮平均浓度则呈线性增长。如此高含量的营养盐类以及全球渔业过度捕捞和气候变化引起的海洋上层温度和层化的变化,从基本上改变了海洋生态系统动力,改变了大陆边缘在全球碳循环中的作用。

近岸营养盐类和污染物以气溶胶和雨水的形式由大气向海上的输运是大陆与海洋之间的另一种联系。生物量剧增造成近岸海域氮量急剧上升,实际上促使浮游植物旺发,极大地改变了沿岸海域的初级生产力。

陆源物质(碳、营养盐、泥沙等)大量注入到海岸带特定地区(如河口),所以流域盆地人类活动所产生物质的输入的任何变化对于近岸海域泥沙和碳的整体平衡都会产生显著影响。

据认为,全球海洋是人类活动排放到大气层的化石碳和生物碳的主要沉降地。一种机制是热力平衡,促使大气层 CO_2 增加;另一种机制是浮游植物对溶解碳的固化,其结果是海洋深层和沉积层中的有机物增加(“生物泵”,Longhurst 和 Harrison 1989)。这两种机制发生在海岸带地区,“生物泵”的作用随着土地利用的改变短期内或增强,或削弱。

据 Smith 和 Hollibaugh(1993)研究,掩埋在海岸带的碳的变化在 $0.03 \sim 1.68 \text{ Gta}^{-1}$ 之间,“最佳估算”平均值为 0.13 Gta^{-1} 。与河流碳排放量 0.3 Gta^{-1} 和 0.4 Gta^{-1} 平均值相比,海岸带地区是全球大气中 CO_2 的净来源。

除 $\pm 0.1 \text{ Gta}^{-1}$ 估算的不确定性外,海岸带地区作为全球碳来源的趋势在地区(国家)尺度,不是对任何地方都适用的。河流系统之间差异很大,邻近工业化地区的河流,其高含量的营养盐类吸收的无机碳可能比重新矿化作用释放到上层大气中的无机碳多得多。近些年来,欧洲沿岸海域从大气层 CO_2 净来源变化到净沉降(Kempe 1995)。

因此,沿岸海洋环境是确定碳基线的一个不可缺少的因素。根据气候变化框架公约,在实施抑制土地利用现状改变的计划时,海洋水色可为碳平衡的监测作出贡献(Kyoto 1997)。与沿岸水域碳循环相关的重要生物地球化学变量包括生物量(单位为: $\text{mgm}^{-3}\text{chl}a$)、初级产量($\text{mgm}^{-2}\text{d}^{-1}\text{C}$)和直接与“生物泵”有关的所谓“新生产力”。根据十多年的卫星数据处理经验,海洋学界还利用水色图像和热图像,有效地反演全球尺度的上述参数,反演参数的时空分辨率适用于分辨沿岸动力特征。

为了调查影响沿岸藻类过量繁殖和物理过程的复杂机制,需要开展一系列测量,开发生

物、气象、水文、物理化学过程综合模型。包括水色在内的长期业务化遥感,在评价气候变化和人口压力如何影响海洋资源和生物地球化学循环方面,起着关键作用。

5.3.5 有害藻类过量繁殖

藻类过量繁殖可以分为有害的或简单的。前者发生时,产生毒素的有关藻类可造成动物死亡,危及人类健康;后者发生时,稠密藻类水华中生物量激增,动植物因阳光被遮挡或因窒息而死亡。近十多年来,世界范围有害藻类过量繁殖发生率与日俱增(Anderson 1989)。有害藻类过量繁殖暴发可能是由于营养盐含量增加,或是由于沿岸水域营养盐比值的变化(如 Smayda 1990),或是由于压载舱水排放,造成外来有毒生物入侵所致(Hallegraeff 1991)。即使很少数量的有毒生物也能造成鱼类死亡,危害人类健康。在某些地区有毒藻类过量繁殖已有很长的历史。

有害藻类过量繁殖(HAB)对于海水养殖来说,是一个特别严重的问题。由于毒素的污染,藻类过量繁殖事件造成网箱养殖鱼类大量死亡,贝类养殖场长期关闭,还迫使野生贝类渔业停产,危害人类健康;同时,也造成娱乐海滩关闭,致使旅游业蒙受损失,此类事件的经济影响是巨大的。

理想的管理措施可分为3类:预防、减灾和控制(Boesch 等 1997)。预防措施主要是认识和改变有利于藻类水华形成的因素,如营养盐含量和冲刷作用。如上面讨论流域和海岸带开发时,水色指标可用来监测营养盐含量,指导如何减少这类物质含量或者改变冲刷速率。

控制措施仍处于发展初期阶段,大部分实用措施仅与减灾有关。在海水养殖方面,这些措施是尽早收获贝类或转移养鱼网箱。这些减灾措施很大程度上依赖于水质监测,尤其依赖于早期的探测。国际专家认为,一般的生物光学方法,尤其是水色遥感器在水质监测和探测方面发挥着重要作用(SCOR 1998)。在藻类过量繁殖事件能为肉眼明显察觉之前,水色遥感器就能探测到叶绿素含量增加。在藻类过量繁殖分散为一个个单独的水团运动时,遥感技术还能用来进行跟踪。Anderson(1994, 1995)提供了卫星海表温度图在藻类过量繁殖跟踪应用上的实例。

藻类过量繁殖藻类区分算法的开发至今仍是一个活跃的研究领域(Cullen 等 1997)。如前面讨论所指出的那样,若含有色素的藻类群异常的光谱特征能被识别,则就有办法区别藻类过量繁殖有害藻类与其他无害藻类。然而一般而言,水色遥感器不能任意地区分有毒藻类和无毒藻类。但是,如果了解现场海况,掌握辅助数据,则可以利用水色产品识别高度危险的藻类过量繁殖藻类,关键在于现场取样。

还应该指出,藻类过量繁殖藻类的垂直分布也限制了水色遥感器在藻类过量繁殖监测上的应用。某些藻类过量繁殖或在次表层形成,或进行垂直位移(Clementson 等 1998),使水色生物量估算不可靠。因此,有关当地现场生物的知识对于遥感数据的解译至关重要。

减灾措施与藻类过量繁殖动力预测能力密切相关,藻类过量繁殖发生区以及随之而来的藻类过量繁殖发育和平流现象的识别是很有用的。水色遥感器提供的水色空间分布时序图能用来确认藻类过量繁殖发生地,即使在事件过后也能确认。时序图还能用来认识和模拟水华事件发生时上升流,或锋区,或径流的作用(Millie 等 1997)。即使藻类过量繁殖动力没有被人们完全认识,但是通过羽状流空间分布知识与环流模式相结合,也能进行藻类过量

繁殖平流的短期预报,这对决定是否转移养鱼网箱极为关键(SCOR 1998)。

有害藻类过量繁殖的空间尺度一般为数百米至数十千米,时间尺度为数天至数周,当前迫切需要有间隔时间从一天到数天的,空间分辨率为 30m~1km 的时序产品。极轨卫星可做到这一点。

5.3.6 保护

近些年来,除珊瑚礁一类的高剖面系统外,海洋生态系统的保护价值和生物多样性一直不被重视。一些底栖生物群落和大洋生物群落一直被忽视,从而受到底拖网等活动的严重破坏。海岸带环境管理人员现在正采取空间区划和建立保留区等手段,保护海洋生物多样性。

欧洲共同体生物多样性战略[COM(1998)42]的实施包括制订自然资源、农业和渔业保护开发以及经济合作的行动计划。生物多样性战略的研究目标已高度综合,随着欧洲研究与开发第五框架计划的相关主题及定向计划和关键行动(尤其是“全球变化、气候和生物多样性”的关键行动)的执行而得到进一步的发展。指标的制订是一个优先的主题,欧洲环境部现正在研制全欧洲生物多样性现状及趋势的监测系统。监测系统计划认为有必要保持地球观测空间计划的连续性,开展生物圈大范围变化监测,开展包括整个生物量生产水平研究在内的生物多样性研究。

海洋生态系统和生物多样性的保护需要有各种信息。在保留区选址时,管理人员必须了解生态群落的种类及其空间分布。大部分大洋生态系统和底栖海洋生态系统受年度内气候和海洋作用力的影响,也受气旋和洪水等极端事件以及相邻流域和海岸带开发的影响,其分布的状态可以迅速改变。现在尚不清楚,陆地上传统的管理方法——孤立固定的国家公园是否可以有效地保护海洋生境和生物多样性。在任何情况下,保留区规划和管理的重要性在于管理者要熟悉环境力量的时空变化和海洋生态系统的动态响应。

悬浮固体、叶绿素、光衰减、海底光强度、水体和海底初级生产力等海洋产品为了解环境关键作用力以及广泛的生态系响应,开辟了一个直接窗口。底栖海洋系统的恢复动力往往与幼体的补充和孤立空间单元之间平流和连通模式密切相关。对如黄色物质、悬浮物和色素等水色示踪物的时序分析可以用来直接估算流速场,或者进行环流与连通模式的定标。

为了论证海洋保留区符合保护目标,生态系统状态指标一定要予以确定,而且必须在保留区内外对其进行监测。标准水质指标(叶绿素、悬浮泥沙、光衰减等)既是大洋生态系统状态的量度指标,也是底栖群落所受威胁的量度指标。超光谱水色遥感器可提供在光学深度浅的海域的关键底栖群落(如海草)分布、生产力及健康状况图(如 Mumby 等 1997)。因为在生物多样性保护管理中,生境实际上是生物多样性的代名词,所以这些图件特别重要。

除生境和生物多样性之外,还存在重要或濒危物种(如海龟和儒艮、鲸等海洋哺乳动物)的保护问题。与卫星跟踪动物标志环等方法相结合,水色产品可用来了解以上动物的运动和生态,改善管理,减少副渔获物(Polovina 等 2000)。对于许多大型生物,航空定点观测可用来监测其种群丰度。能见度图可用来确定航空观测的适宜条件,评价观测程序的效率。

现在人们日益深刻地认识到,从有毒浮游植物(Hallegraeff 1991)到无脊椎动物等的外来海洋生物入侵是保护的一大难题。压舱水是外来物种入侵的主要途径,现在许多国家已制订法规,要求在外海排放压舱水。水色产品可以用来确定压舱水排放的低危险区。

保护涉及广泛的空间尺度,海底生境分辨需数米尺度,气候与海洋作用力识别则需数百千米尺度。同样,时间尺度包括洪水和气旋等短期极端事件,也包括海洋作用力等的年际变异。

5.3.7 旅游业

鉴于全球经济中服务业发展趋势,无论是发达国家还是发展中国家,旅游业在国民经济和地区经济中的重要性与日俱增。许多国家的海岸带环境吸引了大批游客(海水浴、冲浪、珊瑚礁等生态系统,游乐鱼钓)。因此,海岸带健康环境的监测和保持对于地区经济具有重要意义。具有讽刺意味的是,由于规划不妥、管理失控,旅游业开发本身构成了对海岸带环境的一大威胁。

如上所述,叶绿素、浊度和海水透明度等水色产品可用于沿岸水质监测。因此,水色产品也是制订国家或国际环境法规的依据。同样,水色产品也能用于珊瑚礁、海草等关键海洋生态系统的管理和保护。

5.3.8 渔业

迄今,渔业管理一直以单一种群模式的资源评价为依据。一系列高度洄游种群资源的枯竭,与环境的可疑变化或已知变化有关,也与公众对副渔获物、拖网的影响和营养层相互作用等问题的态度和关注有关。因此,渔业管理试图建立在生态系统理论的基础上(Sherman 等 1996)。然而,这样做的知识和手段至今仍不完善。

即使采取单一种群模式管理方法,人们一直关注影响种群恢复的过程,包括幼体移栖、红树林和海草场等繁殖生境的保护等。在海岸带渔业管理方面,沿岸水质退化以及因营养盐和泥沙含量增加和海岸带开发造成生境破坏的影响也受到关注。人们还关注不良渔捞法的影响,尤其如海底拖网对海底生境的破坏,造成悬浮泥沙含量增加。如前所述,水色遥感器能为上述许多问题的解决提供系列产品。高级渔业管理信息系统(Rothschild 等 1998)就是遥感器和现场传感器观测与渔船队获得的信息相结合的现代手段。观测数据经动态模式同化,用于种群丰度评价和预报。

海表层温度(SST)和水色遥感在渔业上的传统应用已经业务化。它可帮助渔民确定高密度鱼群的渔场,尤其是如金枪鱼和鲭科鱼等中上层鱼。许多鱼类群集在锋面两侧,或涡漩或上升流地带,从 SST 和水色图像上,可识别上述水体特征。

以上特征往往与 SST 和水色同步图像一致,揭示出与营养盐供给或混合层深度变化相关的浮游植物生物量和初级生产力涡漩和锋面。在一定程度上,较高植物生物量与浮游动物和饵料鱼类有关,人们根据水色色素场,可以获得有关鱼类种群分布的辅助信息。

Laurs 和同事们的共同研究(Laurs 等 1984)得出以下结论:水色图实际上可提供有关长鳍金枪鱼位置的很好信息。原先认为,金枪鱼选择在某一有限温度范围群集,这样可以解释金枪鱼群集于温度锋面的现象。然而,在水色锋和 SST 锋被空间分割的地方,人们发现,金枪鱼实际上多群集于水色锋清澈的一侧。Laurs 已经发现,金枪鱼垂直穿越的水温范围比在穿越水面锋的水温范围大得多。据认为,与水色锋相关的现象是:金枪鱼是凭视觉觅食的,因此需要看清猎物。在水色锋清澈的一侧,金枪鱼能捕获到在水色锋另一侧绿色水域觅食的鱼类。

迄今大部分此类工作集中在外大陆架或开阔海域的中上层鱼类,可以认为,此类研究工作实际上属于一类水体的应用。然而,随着二类水体产品投入应用,尤其是这类产品与海底生境分布的知识相结合,将种群分布模式扩大应用于更广泛的沿岸渔业和大陆架渔业应该是可能的。

许多鱼类资源被充分利用。甚至过度利用。有人认为,利用遥感技术提高捕捞效率,将使过度捕捞问题日趋严重。然而,这种观点是十分天真的。目前大多数渔船队已经拥有充分的技术能力,完全可以实现过度捕捞。加强鱼类资源管理主要应依据强制性渔获量配额,而不是限制渔船的数量。渔业管理的失败基本上是由于对以下事实的无知造成的:对鱼类资源分布和其对变化的海洋状况响应的深入认识可以更好地解释渔获能力的年度变化,开展更可靠的资源管理。渔业的经济活力仍决定于效率,并与所取得的渔获量配额密切相关。

副渔获物及其倾倒是渔业存在的主要问题。副渔获物包括非商业性濒危物种以及低价值物种。在多物种渔业且单个鱼种的渔获量配额已定的地方,渔民捕获到无配额的鱼类,不得不将其倒回海里。对目标物种和非目标物种分布的深入认识,可以使渔民减少副渔获物和向大海的倾倒入量(Polovina 等 2000)。

5.3.9 海水养殖

世界范围的海水养殖业迅速发展,日益成为高价值海产品的重要来源。海水养殖业面临的重大问题包括产业发展所需合适场地的选择,产业自身的环境影响及对所受环境影响的管理。海水养殖业基本上可大致分为大型藻类与微藻养殖、贝类养殖、甲壳动物与鱼类鱼池养殖和网箱养鱼等。

大型藻类养殖显然与水质(包括光衰减和营养盐利用)密切相关。水色产品可用来获得有关大型藻类生长环境的直接和间接信息。

贝类养殖的饵料源通常是天然浮游植物,因此,与浮游植物生物量及其组成以及浮游植物生物量的季度变化和年度变化密切相关。如前所述,有害藻类过量繁殖的毒素可在贝类体内积聚,贝类养殖场可因此蒙受巨大经济损失(除危害人类健康外,监测成本也会上升等)。如果领取许可证的相邻养殖场过多,可能导致局地浮游植物的枯竭,其有害的生态和经济影响也是人们所关注的。二类水体水色产品尤其适用于贝类养殖场选择合适场址以及对周围养殖水域的环境监测。贝类养殖特别易受颗粒污染物的影响,因此颗粒物跟踪及其分布预测技术也很重要(Karbe 等 1994)。

甲壳动物养殖池和养鱼池是集约式的,大部分养殖池有充足的营养物供给,养殖生物的生长依赖于饵料的添加和养殖现场的生产力。养殖池和相邻水域之间通常还有一定程度的高速水交换,养殖池水排放对周围水域的影响,以及养殖池周围水域水质对养殖的影响(例如周围水域藻类群落可起着苗种的作用,导致养殖池生产力枯竭或发生有害藻类过量繁殖),也是人们所关注的。

网箱养鱼已高度集约化,同海上牧场一样有效。许多养鱼网箱的养殖方向是生产高价值鱼类,所以保持高质量的环境对于产量和鱼产品上市至关重要。有害藻类过量繁殖和沉积层及海底水层缺氧极易造成网箱养殖鱼类死亡。养鱼场需要有供营养盐循环的大量水源,因此鱼场经常设置在海水冲刷速率低的封闭海湾。某些地方无节制的网箱养鱼已导致富营养化。

海水养殖与高质量环境维持和业务化的环境质量常规监测密切相关。同时,海水养殖对水质和相邻海区生态系统的影响已引起人们的关注。水色产品具有满足业务化观测和保护观测需要的潜力,成本—效率比较高,其时空覆盖率是其他手段无法达到的。许多海水养殖场现在已制订了广泛的业务化现场监测计划,现场测量(包括生物光学测量)和水色遥感之间的协同配合前景广阔(Sathyendranath 等 1997b)。

与海水养殖应用有关的空间尺度一般很小,水质所需的分辨率一般为 100m 或 100m 以下,海底生境测量所需分辨率为 30m 或 30m 以下。与藻类过量繁殖和径流事件相关的时空尺度为数天至数周,极轨卫星数据采集完全可以满足需要。

5.3.10 海上作业

能见度、水深和海底类型等水色产品可用于支持导航、航运、潜水和海岸带水域灾害监测等,这些方面的应用既有民用,也有军用。通过示踪物时序分析所获得的速度场还可以用于船舶航线选择。机载和船用激光雷达(LIDAR)系统还用于水深测量和灾害监测,水色传感器能见度指数可用于激光雷达性能预测,指导激光雷达系统的布放。

5.3.11 海岸带综合管理

高级多光谱和超光谱遥感器的结合丰富了人们关于固有光学性质的基础知识,为新的前向模式和可逆模式开发提供了强有力的技术支持,带来了二类水体水色遥感的创新。如我们在本章中所述,核心新产品和推导产品对于广泛的海岸带管理应用和问题的解决,具有同等重要的影响。

从潜在水色指标及支撑过程和判读两方面考虑,前面讨论的各种问题和产业部门的应用存在很大程度的重叠。这是不足为奇的,因为这些应用和问题通过海岸带生态系统而发生很强的相互作用。由于这些相互作用,任何对个别产业部门实行单独管理的企图既是无效的,也是不起作用的,因此管理人员日益趋向于地区多样化利用的综合管理方法。综合管理概念仍在发展,但是大多数管理方法涉及到地区生态系统和利用的综合数据库模式开发、监测计划和多样化利用管理战略的制订,这些都以有关的空间区划为依据。依据不同的重点,系统模式和监测计划的范围可以跨流域、跨河流、河口,甚至跨相邻的陆架水域。

地区综合管理为巩固水色产品的各种作用带来了机会,叶绿素、悬浮泥沙、光衰减、藻类过量繁殖和海底生境分布等水色产品既能起到指标的作用,又能为系统模式所同化。地区综合管理还为相互补充地开展和制订现场监测计划和遥感监测计划,为包括现场水色数据集、现场生物光学数据在内的遥感产品集成带来了大好的机会。因为地区管理计划促使现场数据、遥感数据和模式的结合。所以,地区管理计划为直接的和推导的水色产品的进一步开发和应用提供了理想的机会。

5.4 小 结

由于海岸带人口增长、人口密度增大和资源过度利用,海岸带环境和生态系统所承受的巨大压力是摆在海岸带管理者面前的巨大挑战。无论是在地区尺度,还是在局地尺度,跨部门和跨国的影响现在极为常见。海洋系统实施监测总是有难度的,而且费用高昂,因此上述

许多影响迄今仍无简单的记录。如果对这些影响进行管理,使之有所减轻,那么,适当时空尺度的充分监测则是非常必要的。

在这一方面,水色科学技术的进步及其对不同时空尺度关键指标的监测能力,将起着关键的作用。当遥感技术进步与现场观测仪器自动化和海岸带系统建模能力及卫星数据和现场数据同化能力的提高相结合时,我们可以毫不夸张地说,海岸带生态系统的知识和管理将发生革命性变革。

计划在今后 5 年发射的试验卫星将为算法、模型和管理策略的发展及检验带来机会。然而从长远来看,海岸带管理计划的成功与否,与长期连续数据集的获取密切相关。航天部门和水色界(IOCCG 1999)已认识到长期连续水色数据的重要性。随着二类水体产品在今后若干年从科研阶段向业务化应用的过渡,用户、水色界和航天部门一定要共同努力,确保未来的卫星计划和地面处理系统能提供适用于多样化应用的长时间序列的产品。

第 6 章 结论与建议

S. Sathyendranath

在 IOCCG 的本篇报告中,我们扼要地回顾了二类水体水色遥感的有关问题(第 1 章),阐明了解决这些问题所采用的方法,评述了迄今已解决问题的深度(第 2 章和第 3 章)。根据 2、3 两章的分析,二类水体水色定量遥感比一类水体遥感(第 2 章)复杂得多,为二类水体应用(第 3 章)所开发的算法反映了这种复杂性。二类水体水色遥感的技术要求(第 4 章)远比一类水体的更加严格,条件要求更高。这些要求包括遥感观测需要更高的光谱分辨率、辐射分辨率和时空分辨率,以及遥感数据真实性检验所必需的庞大的现场观测设施。遥感本身多方面的应用(第 5 章)正好证明了数据采集技术以及数据判读算法需要特别的发展和提高。二类水体算法的改善还将有益于一类水体遥感,指出这一点也是很重要的。

6.1 一类水体遥感成果的应用

(1) 在一类水体算法不能便利地适用于二类水体的地方,逆应用也是不存在的。事实上,为复杂二类水体开发的算法能方便地应用于一类水体较简单的问题。

(2) 二类水体算法开发的普遍趋势是朝模型化方向发展,模型方法首先以海洋光学原理为可靠的依据,而不是依赖于纯经验方法。我们提高对影响水色因子的认识,也将有利于一类水体算法的改进。

(3) 人们对提取一类水体中除浮游植物主色素(叶绿素 a)浓度以外的辅助色素信息的兴趣越来越大。例如,人们希望了解辅助色素的成分,或是认识海水中浮游植物物种的构成。为二类水体多变量、非线性系统的处理而研制的方法也易应用于一类水体多变量的反演。

(4) 一类水体算法的设计思想是海水中影响水色的每一种物质的变化均与海水中叶绿素 a 浓度相关。二类水体算法则无需这样简化的假设。因此,如果打破海水中叶绿素 a 和其他物质成分之间的这种假设,二类水体算法应用于一类水体时,实际上应该提高色素浓度的反演精度。

(5) 近红外波段的海水上行信号在二类水体往往是不可忽视的,因此要求我们放弃一类水体常见的另一假设:大气信号与近红外波段的海水信号不耦合。在一类水体中存在吸收气溶胶(见第 3 章 3.1.1 节)时,大气与海洋不耦合也往往是很困难的。因此,在处理大气订正问题时,无论是一类水体算法,还是二类水体算法,均要求将海水和大气作为一个耦合系统对待。

上述考虑表明,二类水体算法的改进将使一类水体直接受益。将来,更加通用而功能强

大二类水体算法可以取代一类水体算法。实际上,开发对一、二类水体同等有效的算法将消除因两类水体分界引起的潜在问题,以及两类算法无缝集成所遇到的问题。然而,对于统一算法的客观需要则引出如下另一问题。

6.2 我们能否获得全球应用的一个简单的二类水体算法

本报告强调了这一点:二类水体水色必须作为一个多变量、非线性问题对待。由于对水色产生影响的某种物质浓度范围极宽,使上述问题更为复杂。算法开发要求:遥感探测信号与被反演变量之间的转换存在惟一性。鉴于解决所有变量以及水中物质整个浓度范围相关问题的难度,更加现实的办法是:以一系列分支算法,而不是以单一的通用算法来处理上述问题。初期算法可能是粗糙的,仅仅能识别可求解范围内某一范围浓度。第二代算法,可将解决问题的方案缩小到一个狭小的范围,必要时处理过程可重复多次。此算法可使算法在小范围浓度内的使用达到最佳化,反演量达到相应的精度。

采用此类分支算法,多种算法的无缝集成不成问题。如果人们在定义影响水色的个别物质成分特定固有光学性质时具有灵活性,则将会产生更为严重的问题。我们已知,海洋水色模式中的每一物质属于一类物质,人们根据每类物质的精确构成,希望能得到此类物质一定量的光学性质变化。显而易见,经局部条件优化的算法性能,比全球通用算法好得多。然而,若干地区算法无缝集成仍是一个问题。如果人们希望集成使用已对不同类型浮游植物过量繁殖进行过优化的算法,一类水体算法也可能产生类似问题。

因此,今天存在的现实问题或许不是如何无缝集成一类水体和二类水体算法,而是如何耦合不同的算法,无论是一类水体,还是二类水体,这些算法对于特殊情况都是最佳的。此问题需引起进一步重视,开展深入研究。

地区算法的必要性和性能的评价与水中物质固有光学性质的局地变化密切相关,这就提出下一个问题。

6.3 我们怎样很好地认识影响水色的水中物质固有光学性质的地区变化

有关二类水体水中物质固有光学性质的应用仍存在不确定性。例如,我们已经认识到如何在一类水体中对以叶绿素 a 浓度为函数的浮游植物的光学性质实现参数化。光学性质的参数化利用了开阔海域物种成分已知的一般趋势和物种的连续性。然而,人们对这些已知的一般趋势是否适用于二类水体还存在疑问。事实上,根据藻类生态的地区差异,有充分的理由预测到,浮游植物光学性质与不同二类水体叶绿素 a 浓度之间的关系也存在很大的地区差异。

除浮游植物以外,对颗粒物光学性质特征的描述甚至存在更大的问题,尤其是无机物,我们所掌握的信息甚少。因此,需要开展更多的研究来填补此项空白。而且,还需要建立不同水生物质固有光学性质的国际数据库[现已建立世界海洋光学数据库(WOOD),网址为 wood.jhuapl.edu——译者注],感兴趣的学者可登陆该网站,免费获得已有数据。这一点对于二类水体的研究是非常重要的,因为一些有用的信息经常以地区报告形式发表,因此不广

为人们所知。

这方面还应指出的另一点是：因为二类水体离水信号在近红外波段很明显，所以二类水体的固有光学性质测量必须扩大到近红外波段。因此，二类水体光学模型除包括可见光波段，还应该包括近红外波段。这不是一类水体的特殊技术要求。

我们希望通过增进对固有光学性质的认识，确保模型的局地环境条件优化来提高反演量的精度，这就提出下一个问题。

6.4 对二类水体水色遥感数据反演量，我们期望得到怎样的准确度和精度

系统的非线性以及若干数量级范围的物质浓度变化，决定了我们不能得到在各种环境条件和浓度下相同准确度和精度的反演量。实际上，其准确度和精度与以下精度密切相关：

- 反演浓度与海水中共存的其他物质的浓度；
- 遥感数据具有足够波段的、适用于特定问题的波段选择；
- 物质固有光学性质的选择；
- 大气订正误差；
- 采集数据的噪声。

通过模型灵敏度分析以及与现场数据的比较，可进行误差估算。与现场观测数据的比较可以使我们考虑到正式灵敏度分析碰不到的某些误差源，如模型本身的误差。然而，一定要注意避免因数据不匹配而得出不正确的结论。尤其在卫星推导数据与现场数据比较时，两类观测的时空尺度很难匹配。由于不匹配引起的误差一定不能错误地归之为算法误差。

据我们所知，在二类水体算法误差估算方面已开展了大量的工作，这是一项困难的任务（见第3章）；为了确保误差信息的正常获得途径，还需要开展更大量的工作。如果我们要避免遥感数据的不当应用，这些研究工作则是完全必要的。

参考文献

- Aas, E. (1987). Two-stream irradiance model for deep waters. *Appl. Optics* 26: 2095~2101.
- Ablinas, K., Royer, T. C. and George, T. H. (1987). Multiple dipole eddies in the Alaska coastal current detected with Landsat thematic mapper data. *J. Geophys. Res.* 92: 13 041~13 047.
- Ahn, Y.-H., Bricaud, A. and Morel, A. (1992). Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Res.* 139: 1835~1855.
- Allali, K., Bricaud, A., Babin, M., Morel, A. and Chang, P. (1995). A new method for measuring spectral absorption coefficients of marine particles. *Limnol. Oceanogr.* 40: 1526~1532.
- Anderson, D. M. (1989). Toxic algal blooms and red tides: a global perspective. In: *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, T. Okaichi, D. M. Anderson and T. Nemoto (eds.), Elsevier, New York, 11~16.
- Anderson, D. M. (1994). Red tides. *Sci. Amer.* 271: 62~68.
- Anderson, D. M. (1995). Toxic red tides and harmful algal blooms: A practical challenge in coastal oceanography. *Rev. Geophys. Suppl.*: 1189~1200.
- Appleby, J. A. and Scarrat, D. J. (1989). Physical effects of suspended solids on marine and estuarine fish and shellfish with special reference to ocean dumping: A literature review. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquatic Sci.* 1681: 1~33.
- Arnone, R. and La Violette, P. (1986). Satellite definition of the bio-optical and thermal variation of coastal eddies associated with the African current. *J. Geophys. Res.* 91: 2351~2364.
- Arnone, R. A., Martinolich, P., Gould, R. W., Stumpf, R. and Ladner, S. (1998). Coastal optical properties using SeaWiFS. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Babin, M., Morel, A. and Gentili, B. (1996). Remote sensing of surface Sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll *a* fluorescence. *Int. J. Remote Sensing* 17: 2417~2448.
- Babin, M., Therriault, J.-C., Legendre, L. and Condal, A. (1993). Variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimates of primary production. *Limnol. Oceanogr.* 38: 154~177.
- Balch, W. M., Kilpatrick, K. A. and Trees, C. C. (1996). The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. 1. Optical properties and factors affecting their distribution. *Limnol. Oceanogr.* 41: 1669~1683.
- Bannister, T. T. (1990). Empirical equations relating scalar irradiance to *a*, *b/a*, and solar zenith angle. *Limnol. Oceanogr.* 34: 173~177.
- Barnes, R. A., Eplee, R. E. J., Patt, F. S. and McClain, C. R. (1999). Changes in the radiometric sensitivity of SeaWiFS determined from lunar and solar-based measurements. *Appl. Optics* 38: 4649~4664.
- Bartlett, J. S., Voss, K. L., Sathyendranath, S. and Vodacek, A. (1998). Raman scattering by pure water and seawater. *Appl. Optics* 37: 3324~3332.
- Beardall, J. and Light, B. (1996). Microphytobenthos in Port Phillip Bay: seasonal and spatial distributions. Tech. Report 35, CSIRO Port Phillip Bay Environmental Study, Melbourne, Australia.

- Beardsley, G. F. (1968). Mueller scattering matrix of sea water. *J. Opt. Soc. Am.* **58**: 52~57.
- Beardsley Jr., G. F., Pak, H. and Carder, K. (1970). Light scattering and suspended particles in the eastern equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* **75**: 2837~2845.
- Bidigare, R. R., Ondrusek, M. E., Morrow, J. H. and Kiefer, D. A. (1990). *In vivo* absorption properties of algal pigments. *Proc. SPIE Ocean Opt. X* **1302**: 290~302.
- Blough, N. V., Zafiriou, O. C. and Bonilla, J. (1993). Optical absorption spectra from the Orinoco River outflow: Terrestrial input of colored organic matter to the Caribbean. *J. Geophys. Res.* **98**: 2271~2278.
- Boesch, D. F., Anderson, D. M., Horner, R. A., Shumway, S. E., Tester, P. A. and Whittedge, T. E. (1997). Harmful algal blooms in coastal waters: options for prevention, control and mitigation. NOAA Coastal Ocean Program. Decision Analysis Series 10.
- Bouman, H. A., Platt, T., Sathyendranath, S., Irwin, B. D., Wernand, M. R. and Kraay, G. W. (2000). Bio-optical properties of the subtropical North Atlantic. II. Relevance to models of primary production. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **200**: 19~34.
- Bricaud, A. and Stramski, D. (1990). Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.* **35**: 562~582.
- Bricaud, A., Morel, A. and Prieur, L. (1981). Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 43~53.
- Bricaud, A., Morel, A. and Prieur, L. (1983). Optical efficiency factors of some phytoplankters. *Limnol. Oceanogr.* **28**: 816~832.
- Bricaud, A., Babin, M., Morel, A. and Claustre, H. (1995). Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.* **100**: 13 321~13 332.
- Brown, O. B. and Gordon, H. R. (1973). Two component Mie scattering models of Sargasso Sea particles. *Appl. Optics* **12**: 2461~2465.
- Bukata, R. P., Bruton, J. E., Jerome, J. H., Jain, S. C. and Zwick, H. H. (1981a). Optical water quality model of Lake Ontario. 2. Determination of chlorophyll *a* and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude remote sensors. *Appl. Optics* **20**: 1704~1714.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Bruton, J. E., Jain, S. C. and Zwick, H. H. (1981b). Optical water quality model of Lake Ontario. 1. Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. *Appl. Optics* **20**: 1696~1703.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Kondratyev, K. Y. and Pozdnyakov, D. V. (1991). Satellite monitoring of optically-active components of inland waters: an essential input to regional climate change impact studies. *J. Great Lakes Res* **17**: 470~478.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Kondratyev, K. Y. and Pozdnyakov, D. V. (1995). *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 362.
- Carder, K. L. and Steward, R. G. (1985). A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 286~298.
- Carder, K. L., Steward, R. G., Harvey, G. R. and Ortner, P. B. (1989). Marine humic and fulvic acids: Their effect on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 68~81.
- Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K. and Kamykowski, D. (1999). Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate- depletion temperatures. *J. Geophys. Res.* **104**: 5403~5421.

- Chomko, R. and Gordon, H. R. (1998). Atmospheric correction of ocean color imagery: use of the Junge power-law aerosol size distribution with variable refractive index to handle aerosol absorption. *Appl. Optics* 37: 5560~5572.
- Cipollini, P., Barale, V., Davidov, A. and Melin, F. (1999). Updated MOS bio-optical algorithms in the Northwestern Black Sea. 3rd International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 93~100.
- Clementson, L. A., Turnbull, A. R., Bonham, P. I. and Parslow, J. S. (1998). Changes in pigment and spectral characteristics of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* during bloom conditions. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Cleveland, J. S. (1995). Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll *a* concentration. *J. Geophys. Res.* 100: 13 333~13 344.
- Cleveland, J. S. and Weidemann, A. D. (1993). Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnol. Oceanogr.* 38: 1321~1327.
- Cullen, J. J., Ciotti, A. M., Davis, R. F. and Lewis, M. R. (1997). Optical detection and assessment of algal blooms. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1223~1239.
- Culver, M. E. (1996). *Applications of chlorophyll *a* fluorescence to estimates of phytoplankton biomass and productivity*, Ph.D., University of Washington, Seattle, WA.
- Dana, D. R., Maffione, R. A. and Coenen, P. E. (1998). A new *in situ* instrument for measuring the backward scattering and absorption coefficients simultaneously. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Davis, C. O., Kappus, M., Gao, B.-C., Bissett, W. P. and Snyder, W. (1998). The Naval EarthMap Observer (NEMO) science and naval products. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Dekker, A. G., Malthus, T. J. and Seyhan, E. (1991). Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution MSS systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 29: 89~95.
- Del Castillo, C. E., Coble, P. G., Morell, J. M., Lopex, J. M. and Corredor, J. E. (1999). Analysis of the optical properties of the Orinoco plume by absorption and fluorescence spectroscopy. *Mar. Chem.* 66: 35~51.
- Doerffer, R. and Fischer, J. (1994). Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods. *J. Geophys. Res.* 99: 7457~7466.
- Doerffer, R. and Schiller, H. (1998). Determination of Case 2 water constituents using radiative transfer simulation and its inversion by neural networks. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Doerffer, R. and Schiller, H. (1999). Determination of water constituents from water leaving radiance reflectances of the ocean colour sensor MOS using inverse modelling. Algorithm Theoretical Basis Document, ESA-ESRIN / GMV No. 11672/95/I-HGE.
- Dowell, M. D. (1998). *Optical characterisation and reflectance modelling in Case II waters: quantitative tools for investigations of coastal environments*, Ph.D., University of Southampton, Southampton, UK, 192.
- Duysens, L. N. M. (1956). The flattening of the absorption spectrum of suspensions, as compared to that of solutions. *Biochim. Biophys. Acta* 19: 1~12.
- EEA (1997). European Environment Agency, Annual Report. Copenhagen, Denmark. (Web reference: <http://org.eea.eu.int/documents>).

- Fargion, G. S. and Mueller, J. L. (eds.) (2000). *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation*, Revision 2, National Aeronautical and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 184.
- Ferrari, G. M. and Mingazzini, M. (1995). Synchronous fluorescence spectra of dissolved organic matter of algal origin in coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 125: 305-315.
- Fischer, J. (1985). On the information content of multispectral radiance measurements over an ocean. *Int. J. Remote Sensing* 6: 773-786.
- Fry, E. S., Kattawar, G. W. and Pope, R. M. (1992). Integrating cavity absorption meter. *Appl. Optics* 31: 2055-2065.
- Gallegos, C. L., Correll, D. L. and Pierce, J. W. (1990). Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnol. Oceanogr.* 35: 1486-1502.
- Gallie, E. A. and Murtha, P. A. (1992). Specific absorption and backscattering spectra for suspended minerals and chlorophyll *a* in Chilko Lake, British Columbia. *Remote Sens. Environ.* 39: 103-118.
- Garver, S. A. and Siegel, D. A. (1997). Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Time series from the Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.* 102: 18 607-18 625.
- Gege, P. (1998). Characterization of the phytoplankton in Lake Constance for classification by remote sensing. *Archiv. Hydrobiol.* 53: 179-193.
- Gitelson, A. (1992). The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *Int. J. Remote Sensing* 13: 3367-3373.
- Gordon, H. R. (1993). Radiative transfer in the atmosphere for correction of ocean color remote sensing. In: *Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience*, V. Barale and P. M. Schlittenhardt (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 33-77.
- Gordon, H. R. (1997). Atmospheric correction of ocean color imagery in the earth observing system era. *J. Geophys. Res.* 102: 17 081-17 106.
- Gordon, H. R. and Boynton, G. C. (1998). Radiance-irradiance inversion algorithm for estimating the absorption and backscattering coefficients of natural waters: vertically stratified water bodies. *Appl. Optics* 37: 3886-3896.
- Gordon, H. R. and Brown, O. B. (1972). A theoretical model of light scattering by Sargasso Sea particles. *Limnol. Oceanogr.* 17: 826-832.
- Gordon, H. R. and Brown, O. B. (1973). Irradiance reflectivity of a flat ocean as a function of its optical properties. *Appl. Optics* 12: 1549-1551.
- Gordon, H. R. and Clark, D. K. (1980). Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. *Appl. Optics* 19: 3428-3430.
- Gordon, H. R. and Ding, K. (1992). Self-shading of in-water optical instruments. *Limnol. Oceanogr.* 37: 491-500.
- Gordon, H. R. and McCluney, W. R. (1975). Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Optics* 14: 413-416.
- Gordon, H. R. and Morel, A. (1983). *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review*, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, R. T. Barber, N. K. Mooers, M. J. Bowman and B. Zeitzschel (eds.), Springer-Verlag, New York, 114.
- Gordon, H. R. and Wang, M. (1994). Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Appl. Optics* 33: 443-452.

- Gordon, H. R., Brown, O. B. and Jacobs, M. M. (1975). Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat, homogeneous ocean. *Appl. Optics* 14: 417-427.
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S. and Clark, D. K. (1988). A semianalytic radiance model of ocean color. *J. Geophys. Res.* 93: 10 909-10 924.
- Gordon, H. R., Du, T. and Zhang, T. (1997). Remote sensing of ocean color and aerosol properties: resolving the issue of aerosol absorption. *Appl. Optics* 36: 8670-8684.
- Gower, J. F. R. (1980). Observations of *in situ* fluorescence of chlorophyll-*a* in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Meteorol.* 18: 235-245.
- Gower, J. F. R. and Borstad, G. A. (1990). Mapping of phytoplankton by solar-stimulated fluorescence using an imaging spectrometer. *Int. J. Remote Sensing* 11: 313-320.
- Gower, J. F. R., Doerfler, R. and Borstad, G. A. (1999). Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. *Int. J. Remote Sensing* 20: 1771-1786.
- Hallegraeff, G. M. (1991). Transport of toxic dinoflagellate cysts via ship's ballast water. *Mar. Pollution Bull.* 22: 27-30.
- Haltrin, V. I. (1997). Theoretical and empirical phase functions for Monte Carlo calculations of light scattering in seawater. *Proc. 4th Intl. Conf. Remote Sens. Mar. Coastal Environ.* 1: 1-509-1-517.
- Haltrin, V. I. and Kattawar, G. W. (1993). Self-consistent solutions to the equation of transfer with elastic and inelastic scattering in ocean optics: 1. Model. *Appl. Optics* 32: 5356-5367.
- Haltrin, V. I., Kattawar, G. W. and Weidemann, A. D. (1997). Modeling of elastic and inelastic scattering effects in oceanic optics. In: *Ocean Optics XIII*, S. G. Ackleson and R. Frouin (eds.), Proc. SPIE 2963, Bellingham, USA, 597-602.
- Harris, R. (1996). *Information Graphics. A Comprehensive Illustrated Reference*, Management Graphics, Atlanta, Georgia, 448.
- Hawes, S. K. (1992). *Quantum fluorescence efficiencies of marine fulvic and humic acids*, M.Sc. Thesis, Dept. of Marine Sci., Univ. of South Florida, St. Petersburg, FL, 92.
- Hoepffner, N. and Sathyendranath, S. (1992). Bio-optical characteristics of coastal waters: Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.* 37: 1660-1679.
- Hoepffner, N. and Sathyendranath, S. (1993). Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter. *J. Geophys. Res.* 98: 22 789-22 803.
- Hoge, F. E. and Swift, R. N. (1986). Chlorophyll pigment concentration using spectral curvature algorithms: an evaluation of present and proposed satellite ocean color sensor bands. *Appl. Optics* 25: 3677-3682.
- Hoge, F. E., Swift, R. N. and Yungel, J. K. (1986). Active-passive airborne ocean color measurement. 2: Applications. *Appl. Optics* 25: 48-57.
- Højerslev, N. K. (1975). A spectral light absorption meter for measurements in the sea. *Limnol. Oceanogr.* 23: 1024-1034.
- Højerslev, N. K. (1998). Spectral light absorption by gelbstoff in coastal waters displaying highly different concentrations. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Hu, C., Carder, K. L. and Müller-Karger, F. E. (2000a). Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method. *Remote Sens. Environ.* 74: 195-206.

- Hu, C., Carder, K. L. and Müller-Karger, F. E. (2000b). How precise are SeaWiFS ocean color estimates? Implications of digitization-noise errors. *Remote Sens. Environ.* In press.
- IOC (1998). Global Ocean Observing System (GOOS) Status Report, April, 1998. Intergovernmental Oceanographic Commission, GOOS Report No. 59, UNESCO, Paris.
- IOC (1999). Coastal Panel of the Global Ocean Observing System (GOOS). Second Session, Curitiba, Brazil, 29 October - 1 November, 1998. Intergovernmental Oceanographic Commission, GOOS Report No. 63, UNESCO, Paris.
- IOCCG (1998). *Minimum Requirements for an Operational Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean*, Reports of the International Ocean Colour Coordinating Group, IOCCG, Dartmouth, Canada, 46.
- IOCCG (1999). *Status and Plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions*, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, J. A. Yoder (ed.), IOCCG, Dartmouth, Canada, 43.
- Jerlov, N. G. (1976). *Marine Optics*, Elsevier, Amsterdam, 231.
- Jerome, J. H., Bukata, R. P. and Bruton, J. E. (1988). Utilizing the components of vector irradiance to estimate the scalar irradiance in natural waters. *Appl. Optics* 27: 4012~4018.
- Jerome, J. H., Bukata, R. P. and Miller, J. R. (1996). Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural waters. *Int. J. Remote Sensing* 17: 3135~3155.
- Johnsen, G., Nelson, N. B., Jovine, R. V. M. and Prézelin, B. B. (1994). Chromoprotein- and pigment-dependent modeling of spectral light absorption in two dinoflagellates, *Prorocentrum minimum* and *Heterocapsa pygmaea*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 114: 245~258.
- Jupp, D. L. B., Byrne, G., Anstee, J. M., Harris, G., Parkin, D. and Smith, J. (1996). The use of highly discriminating spectral information for mapping and monitoring optical water quality and shallow benthic cover. 8th Australasian Remote Sensing Conference, Canberra, Australia, 1~9.
- Kahru, M. and Mitchell, B. G. (1998). Spectral reflectance and absorption of a massive red tide off southern California. *J. Geophys. Res.* 103: 21 601~21 609.
- Kammann, U., Haarich, H., Heyder, K., Hühnerfuß, H., Karbe, L., Kersten, M., Schmidt, D. and Steinhart, H. (1994). Large-scale distribution of contaminants in spring 1986 and winter 1986/87. In: *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea*, J. Sündermann (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 90~137.
- Karbe, L., Aletsee, L., Dürselen, C. D., Heyer, K., Kammann, U., Krause, M., Rick, H. J. and Steinhart, H. (1994). Bioaccumulation and effects of plankton and benthos on the fate of contaminants. In: *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea*, J. Sündermann (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 555~597.
- Kattawar, G. W. and Plass, G. N. (1972). Radiative transfer in the Earth's atmosphere-ocean system: II. Radiance in the atmosphere and ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 2: 146~156.
- Kempe, S. (1995). Coastal seas: a net source or sink of atmospheric carbon dioxide? Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Reports and Studies, Number 1, 27.
- Kersten, M., Kriews, M., Kühn, W. and Rick, H.-J. (1994). Combined effects of abiotic and biotic factors on heavy metal fluxes. In: *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea*, J. Sündermann (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 598~619.
- Kirk, J. T. O. (1975a). A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. I. General treatment of suspensions of pigmented cells. *New Phytol.* 75: 11~20.

- Kirk, J. T. O. (1975b). A theoretical analysis of the contributions of algal cells to the attenuation of light within natural waters. II. Spherical cells. *New Phytol.* 75: 21~36.
- Kirk, J. T. O. (1981a). Monte Carlo procedure for simulating the penetration of light into natural waters. *CSIRO Aust. Div. Plant Ind. Tech. Pap.* 36: 1~16.
- Kirk, J. T. O. (1981b). Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationship between optical properties of, turbid yellow waters. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.* 32: 517~532.
- Kirk, J. T. O. (1984). Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnol. Oceanogr.* 29: 350~356.
- Kirk, J. T. O. (1989). The upwelling light stream in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 34: 1410~1425.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge, 509.
- Kirk, J. T. O. (1997). Point-source integrating-cavity absorption meter: theoretical principles and numerical modeling. *Appl. Optics* 36: 6123~6128.
- Kirk, J. T. O. and Tyler, P. A. (1986). The spectral absorption and scattering properties of dissolved and particulate components in relation to the underwater light field of some tropical Australian freshwaters. *Freshw. Biol.* 16: 573~583.
- Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N. and Ichimura, S. (1985). Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sci.* 37: 634~642.
- Koblinsky, C. J. (1993). Ocean surface topography and circulation. In: *Atlas of satellite observations related to global change*, R. J. Gurney, J. L. Foster and C. L. Parkinson (eds.), Cambridge University Press, New York, 223~236.
- Kopelevich, O. V. (1983a). The experimental data on seawater optical properties. In: *Ocean Optics. Vol. 1. Physical Ocean Optics (in Russian)*, A. S. Monin (ed.), Nauka Publishers, Moscow, 166~208.
- Kopelevich, O. V. (1983b). Small-parameter model of optical properties of sea water. In: *Ocean Optics. Vol. 1. Physical Ocean Optics (in Russian)*, A. S. Monin (ed.), Nauka Publishers, Moscow, 208~234.
- Kopelevich, O. V. and Ershova, S. V. (1997). Model for seawater optical characteristics at UV spectral region. In: *Ocean Optics XIII*, S. G. Ackleson and R. Frouin (eds.), Proc. SPIE 2963, Washington, USA, 167~172.
- Kopelevich, O. V., Lutsarev, S. V. and Rodionov, V. V. (1989). Light spectral absorption by yellow substance of ocean water (in Russian). *Okeanologiya* 29: 409~414.
- Kopelevich, O. V., Rogozkin, D. B. and Sheberstov, S. V. (1998a). Results of application of the new atmospheric correction method to the Pacific ocean color stimulated data sets. *Proceedings of PORSEC '98, Qingdao, China* 1: 54~58.
- Kopelevich, O. V., Sheberstov, S. V., Burenkov, V. I., Evdoshenko, M. A. and Ershova, S. V. (1998b). New data products derived from SeaWiFS ocean color data: examples for the Mediterranean Basin. International Symposium Satellite-based Observation: A Tool for the Study of the Mediterranean Basin. Tunis, 23~27 November, 1998.
- Kozlyaninov, M. V. and Pelevin, V. N. (1965). Sur l'utilisation de l'approximation unidirectionnelle pour l'étude de la propagation du flux lumineux en mer. *Acad. Nauka SSSR Tr. Oceanogr. Inst.* 77: 73~79.

- Krawczyk, H., Neumann, A., Walzel, T. and Zimmermann, G. (1993). Investigation of interpretation possibilities of spectral high dimensional measurements by means of principal component analysis - a concept for physical interpretation of those measurements. *Proc. SPIE* 1938: 401~411.
- Krawczyk, H., Neumann, A. and Hetscher, M. (1999). Mathematical and physical background of principal component inversion. In: *Proceedings 3rd International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour*, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 83~92.
- Kullenberg, G. (1974). Observed and computed scattering functions. In: *Optical Aspects of Oceanography*, N. G. Jerlov and E. Steemann Nielsen (eds.), Academic Press, London, 25~49.
- Laane, R. W. P. M. (1982). Sources of dissolved organic carbon in the Ems-Dollart Estuary. *Neth. J. Sea Res.* 15: 311~339.
- Land, P. (1999). Contextual atmospheric correction of MOS. In: *Proceedings 3rd International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour*, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 111~120.
- Laurs, R. M., Fiedler, P. C. and Montgomery, D. R. (1984). Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep-Sea Res.* 31: 1085~1099.
- Lavender, S. and Groom, S. (1999). The SeaWiFS automatic data processing system (SeaAPS). *Int. J. Remote Sensing* 20: 1051~1056.
- Lee, Z. P., Carder, K. L., Hawes, S. K., Steward, R. G., Peacock, T. G. and Davis, C. O. (1994). Model for the interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance. *Appl. Optics* 33: 5721~5732.
- Lee, Z. P., Carder, K. L., Peacock, T. G., Davis, C. O. and Mueller, J. L. (1996). Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance. *Appl. Optics* 35: 453~462.
- Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G. and Patch, J. S. (1998a). Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Appl. Optics* 37: 6329~6338.
- Lee, Z. P., Zhang, M. R., Carder, K. L. and Hall, L. O. (1998b). A neural network approach to deriving optical properties and depths of shallow waters. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G. and Patch, J. S. (1999). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Appl. Optics* 38: 3831~3843.
- Letelier, R. M. and Abbott, M. R. (1996). An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Remote Sens. Environ.* 58: 215~223.
- Levin, I. M. and Zolotukhin, I. V. (1997). Applying the theory of an optical experiment to problems of the remote probing of the ocean in the visible region. *J. Opt. Technol.* 64: 244~248.
- Levin, I. M., Zolotukhin, I. V., Stewart, S. E. and Gilbert, G. D. (1998). Application of experimental design theory to ocean remote sensing with a hyperspectral detector. *Proceedings of the 5th International Conference "Remote Sensing for Marine and Coastal Environments"* 1: 467~473.
- Longhurst, A. R. and Harrison, W. G. (1989). The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog. Oceanogr.* 22: 47~123.
- Lutz, V. A., Sathyendranath, S. and Head, E. J. H. (1996). Absorption coefficient of phytoplankton: Regional variations in the North Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 135: 197~213.
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Appl. Optics* 17: 379~383.
- Maffione, R. A. and Dana, D. R. (1997). Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters. *Appl. Optics* 36: 6057~6067.

- Mantoura, R. F. C. and Woodward, E. M. S. (1983). Conservative behaviour of riverine dissolved organic carbon in the Severn Estuary: Chemical and geochemical implications. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 47: 1293-1309.
- Maritorena, S., Morel, A. and Gentili, B. (1994). Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. *Limnol. Oceanogr.* 39: 1689-1703.
- Marshall, B. R. and Smith, R. C. (1990). Raman scattering and in-water ocean optical properties. *Appl. Optics* 29: 71-84.
- McClain, C. R. and Fargion, G. S. (1999). SIMBIOS Project 1998 Annual Report. NASA Technical Memorandum, 1999-208645, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 105.
- Miller, W. L. and Zepp, R. G. (1995). Photochemical production of dissolved inorganic carbon from terrestrial organic matter: Significance to the oceanic carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.* 22: 417-420.
- Millie, D. F., Schofield, O. M., Kirkpatrick, G. J., Johnsen, G., Tester, P. A. and Vinyard, B. T. (1997). Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: A case study of the Florida red tide dinoflagellate, *Gymnodinium breve*. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1240-1251.
- Mitchell, B. G. and Kiefer, D. A. (1984). Determination of absorption and fluorescence excitation spectra for phytoplankton. In: *Marine Phytoplankton and Productivity*, O. Holm-Hansen, L. Bolis and R. Giles (eds.), Springer-Verlag, Berlin, 157-169.
- Mitchell, B. G. and Kiefer, D. A. (1988a). Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton. *Deep-Sea Res.* 135: 639-663.
- Mitchell, B. G. and Kiefer, D. A. (1988b). Variability in pigment specific particulate fluorescence and absorption spectra in the northeastern Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* 135: 665-689.
- Mobley, C. D. (1994). *Light and Water; Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego, 592.
- Monin, A. S. (ed.) (1983). *Ocean Optics. Vol 1. Physical Ocean Optics (in Russian)*, Nauka Publishers, Moscow.
- Moore, C. (1994). *In-situ* biochemical, oceanic, optical meters. *Sea Technology* 35: 10-16.
- Moore, C. A., Farmer, C. T. and Zika, R. G. (1993). Influence of the Orinoco River on hydrogen peroxide distribution and production in the Eastern Caribbean. *J. Geophys. Res.* 98: 2289-2298.
- Moore, G. F., Aiken, J. and Lavender, S. J. (1999). The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters: application to MERIS. *Int. J. Remote Sensing* 20: 1713-1733.
- Moore, P. G. (1977). Inorganic particulate suspensions in the sea and their effects on marine animals. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 15: 225-363.
- Morel, A. (1973). Diffusion de la lumière par les eaux de mer. Résultats expérimentaux et approche théorique. In: *AGARD Lecture Series No.61. Optics of the Sea (Interface and In-water Transmission and Imaging)*, North Atlantic Treaty Organisation, London, 3.1.1-3.1.76.
- Morel, A. (1974). Optical properties of pure seawater. In: *Optical Aspects of Oceanography*, N. G. Jerlov and E. Steemann Nielsen (eds.), Academic Press Inc., New York, 1-24.
- Morel, A. (1980). In-water and remote measurement of ocean color. *Boundary-Layer Meteorol.* 18: 177-201.
- Morel, A. (1988). Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I waters). *J. Geophys. Res.* 93: 10 749-10 768.

- Morel, A. and Ahn, Y.-H. (1991). Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells. *J. Mar. Res.* 49: 177~202.
- Morel, A. and Antoine, D. (1997). Pigment index retrieval in Case 1 waters. ATBD 2.9 - MERIS Workshop, Villefranche-sur-mer, October 2-3, 1997.
- Morel, A. and Bricaud, A. (1981). Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.* 28A: 1375~1393.
- Morel, A. and Gentili, B. (1991). Diffuse reflectance of oceanic waters: its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution. *Appl. Optics* 30: 4427~4438.
- Morel, A. and Gentili, B. (1993). Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects. *Appl. Optics* 32: 6864~6879.
- Morel, A. and Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22: 709~722.
- Mueller, J. L. (1973). *Influence of phytoplankton on ocean color spectra*, Ph.D., School of Oceanography, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- Mueller, J. L. (1976). Ocean color measured off the Oregon Coast: characteristic vectors. *Appl. Optics* 15: 394~402.
- Mueller, J. L. and Austin, R. W. (1995). *Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation, Revision 1*, SeaWiFS Technical Report Series, Vol. 25, S. B. Hooker, E. R. Firestone and J. G. Acker (eds.), NASA Technical Memorandum 104566, Greenbelt, Maryland, 66.
- Mumby, P. J., Green, E. P., Edwards, A. J. and Clark, C. D. (1997). Measurement of seagrass standing crop using satellite and digital airborne remote sensing. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 159: 51~60.
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 7: 308~313.
- Neumann, A., Krawczyk, H. and Walzel, T. (1995). A complex approach to quantitative interpretation of spectral high resolution imagery. *Third Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Seattle, USA* II-641 ~ II-652.
- Oishi, T. (1990). Significant relationship between the backward scattering coefficient of sea water and the scatterance at 120°. *Appl. Optics* 29: 4658~4665.
- O'Mongain, E., Buckton, D., Green, S., Bree, M., Moore, K., Doerffer, R., Danaher, S., Hakvoort, H., Kennedy, J., Fischer, J., Fell, F., Papantoniou, D. and McGarrigle, M. (1997). Spectral absorption coefficient measured *in situ* in the North Sea with a marine radiometric spectrometer system. *Appl. Optics* 36: 5162~5167.
- Pak, H., Zaneveld, J. R. and Beardsley, G. F. (1971). Mie scattering by suspended clay particles. *J. Geophys. Res.* 76: 5065~5069.
- Pernetta, J. C. and Milliman, J. D. (1995). Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Implementation Plan. IGBP Report No. 33, Stockholm, 215.
- Petzold, T. J. (1972). *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*, Scripps Institute of Oceanography, San Diego, CA, SIO Ref. 72~78.
- Philpot, W. D. (1987). Radiative transfer in stratified waters: a single-scattering approximation for irradiance. *Appl. Optics* 26: 4123~4132.
- Philpot, W. D. (1989). Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Appl. Optics* 28: 1569~1578.

- Plass, G. N. and Kattawar, G. W. (1972). Monte Carlo calculations of radiative transfer in the earth's atmosphere-ocean system: I. Flux in the atmosphere and ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 2: 139-145.
- Platt, T., Sathyendranath, S., Caverhill, C. M. and Lewis, M. R. (1988). Ocean primary production and available light: Further algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.* 35: 855-879.
- Polovina, J. J., Kobayashi, D. R., Parker, D. M., Seki, M. P. and Balazs, G. H. (2000). Turtles on the edge: Movement of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) along oceanic fronts spanning longline fishing grounds in the central North Pacific, 1997-1998. *Fish. Oceanogr.* 9: 1-13.
- Pope, R. M. and Fry, E. S. (1997). Absorption spectrum (380 - 700 nm) of pure water: II. Integrating cavity measurements. *Appl. Optics* 36: 8710-8723.
- Prakash, A., Rashid, M. A., Jensen, A. and Subba Rao, D. V. (1973). Influence of humic substances on the growth of marine phytoplankton: Diatoms. *Limnol. Oceanogr.* 18: 516-523.
- Preisendorfer, R. W. (1976). *Hydrologic optics. Vol. I. Introduction*, U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, Environment Research Laboratory, Honolulu, 218.
- Prieur, L. and Sathyendranath, S. (1981). An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.* 26: 671-689.
- Rennie, S. E., Largier, J. L. and Lentz, A. J. (1999). Observations of a pulsed buoyancy current downstream for Chesapeake Bay. *J. Geophys. Res.* 104: 18 227-18 240.
- Rhea, W. J. and Davis, C. O. (1997). A Comparison of the SeaWiFS chlorophyll and CZCS pigment algorithms using optical data from the 1992 JGOFS Equatorial Pacific Time Series. *Deep-Sea Res.* 44: 1907-1925.
- Roesler, C. S. (1998). Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1649-1660.
- Roesler, C. S. and Perry, M. J. (1995). In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance. *J. Geophys. Res.* 100: 13 279-13 294.
- Roesler, C. S., Perry, M. J. and Carder, K. L. (1989). Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnol. Oceanogr.* 34: 1510-1523.
- Rothschild, B. J., Robinson, A. R., Miller, M., Gangopadhyay, A., Bisagni, J. J., Cabeza, A., Cai, D., Fortier, P., Haley, P., Kim, H. S., King, E., Lanerolle, L., Leslie, W. G. and Lozano, C. (1998). Management information systems and the precautionary approach. Proc. ICES, Council Meeting, 16-19 September, Cascais, Portugal, 24.
- Ruddick, K. G., Ovidio, F. and Rijkeboer, M. (2000). Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. *Appl. Optics* 39: 897-912.
- Sandidge, J. C. and Holyer, R. J. (1998). Coastal bathymetry from hyperspectral observation of water radiance. *Appl. Optics* 37: 341-352.
- Sathyendranath, S. (1986). Remote sensing of phytoplankton: A review, with special reference to picoplankton. In: *Photosynthetic Picoplankton (Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, Volume 214)*, T. Platt and W. K. W. Li (eds.), Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, 561-583.

- Sathyendranath, S. and Morel, A. (1983). Light emerging from the sea — interpretation and uses in remote sensing. In: *Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology*, A. P. Cracknell (ed.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 323~357.
- Sathyendranath, S. and Platt, T. (1989). Remote sensing of ocean chlorophyll: Consequence of non-uniform pigment profile. *Appl. Optics* 28: 490~495.
- Sathyendranath, S. and Platt, T. (1997). Analytic model of ocean color. *Appl. Optics* 36: 2620~2629.
- Sathyendranath, S. and Platt, T. (1998). Ocean colour model incorporating transspectral processes. *Appl. Optics* 37: 2216~2227.
- Sathyendranath, S., Lazzara, L. and Prieur, L. (1987). Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 32: 403~415.
- Sathyendranath, S., Prieur, L. and Morel, A. (1989). A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Int. J. Remote Sensing* 10: 1373~1394.
- Sathyendranath, S., Hoge, F. E., Platt, T. and Swift, R. N. (1994). Detection of phytoplankton pigments from ocean colour: Improved algorithms. *Appl. Optics* 33: 1081~1089.
- Sathyendranath, S., Platt, T., Cota, G., Stuart, V. and Borstad, G. (1997a). Some Canadian experiments on modelling and interpreting ocean-colour data. In: *1st International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour, Berlin, April 28-30, 1997*, Institute of Space Sensor Technology, DLR (ed.), Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin.
- Sathyendranath, S., Subba Rao, D. V., Chen, Z., Stuart, V., Platt, T., Bugden, G. L., Jones, W. and Vass, P. (1997b). Aircraft remote sensing of toxic phytoplankton blooms: a case study from Cardigan River, Prince Edward Island. *Can. J. Remote Sens.* 23: 15~23.
- Schalles, J. F., Gitelson, A. A., Yacobi, Y. Z. and Kroenke, A. E. (1998). Estimation of chlorophyll a from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake. *J. Phycol.* 34: 383~390.
- SCOR (1998). GEOHAB: Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms. Joint SCOR-IOC Workshop, Havreholm, Denmark, 43.
- Sherman, K., Jaworski, N. A. and Smayda, T. J. (1996). *The Northeast Shelf Ecosystem: Assessment, Sustainability and Management*, Blackwell Science, Inc., Cambridge, MA, 564.
- Shifrin, K. S. (1988). *Physical Optics of Ocean Water*, American Institute of Physics, New York, 285.
- Siegel, D. A. and Michaels, A. F. (1996). Quantification of non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: Implication for biogeochemistry and remote sensing. *Deep-Sea Res. II* 43: 321~345.
- Siegel, D. A., O'Brien, M. C., Sorensen, J. C., Konnoff, D. A., Brody, E. A., Mueller, J. L., Davis, C. O., Rhea, W. J. and Hooker, S. B. (1995). Results of the SeaWiFS Data Analysis Round Robin (DARR), July 1994. *NASA Tech. Memo. 104566*, Vol. 26, S. B. Hooker and E. R. Firestone, (Eds.), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 58.
- Smayda, T. J. (1990). Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In: *Toxic Marine Phytoplankton*, E. Graneli, B. Sundström, L. Edler and D. M. Anderson (eds.), Elsevier, London, 29~40.
- Smith, R. C. and Baker, K. S. (1981). Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Appl. Optics* 20: 177~184.
- Smith, S. V. and Hollibaugh, J. T. (1993). Coastal metabolism and the oceanic carbon balance. *Rev. Geophys.* 31: 75~89.

- Spitzer, D. and Wernand, M. R. (1981). *In situ* measurements of absorption spectra in the sea. *Deep-Sea Res.* 28A: 165~174.
- Stavn, R. H. and Weidemann, A. D. (1989). Shape factors, two flow models, and the problem of irradiance inversion in estimating optical parameters. *Limnol. Oceanogr.* 34: 1426-1441.
- Stramski, D. (1994). Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas. In: *Proc. SPIE Ocean Opt. XII*, J. S. Jaffe (ed.), 704~710.
- Stramski, D. and Kiefer, D. A. (1991). Light scattering by microorganisms in the open ocean. *Prog. Oceanogr.* 28: 343~383.
- Stuart, V., Sathyendranath, S., Platt, T., Maass, H. and Irwin, B. D. (1998). Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: Effect on the absorption spectra. *J. Plankton Res.* 20: 187~217.
- Sturm, B. (1993). CZCS data processing algorithms. In: *Ocean Colour: Theory and Applications in a decade of CZCS Experience*, Barale V. and Schlittenhardt P. M. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 95~116.
- Subramaniam, A., Carpenter, E. J. and Falkowski, P. G. (1999a). Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. II. A reflectance model for remote sensing. *Limnol. Oceanogr.* 44: 618~627.
- Subramaniam, A., Carpenter, E. J., Karentz, D. and Falkowski, P. G. (1999b). Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. I. Absorption and photosynthetic action spectra. *Limnol. Oceanogr.* 44: 608~617.
- Sugihara, S., Kishino, M. and Okami, N. (1984). Contribution of Raman scattering to upward irradiance in the sea. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 40: 397~404.
- Sur, H. I., Ozsoy, E., Ilyin, Y. P. and Unluata, U. (1996). Coastal/deep ocean interactions in the Black Sea and their ecological/environmental impacts. *J. Mar. Sci.* 7: 293~320.
- Tanaka, A., Oishi, T., Kishino, M. and Doerffer, R. (1998). Application of the neural network to OCTS data. In: *Proceedings, Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Tassan, S. and Ferrari, G. M. (1995). An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. *Limnol. Oceanogr.* 40: 1358~1368.
- Topliss, B. J. and Platt, T. (1986). Passive fluorescence and photosynthesis in the ocean: implications for remote sensing. *Deep-Sea Res.* 133: 849~864.
- Twardowski, M. S., Sullivan, J. M., Donaghay, P. L. and Zaneveld, J. R. V. (1999). Microscale quantification of the absorption by dissolved and particulate material in coastal waters with an ac-9. *J. Atmos. Ocean Technol.* 16: 691~707.
- Tyrrell, T., Holligan, P. M. and Mobley, C. D. (1999). Optical impacts of oceanic coccolithophore blooms. *J. Geophys. Res.* 104: 3223~3241.
- Ulloa, O., Sathyendranath, S., Platt, T. and Quiñones, R. A. (1992). Light scattering by marine heterotrophic bacteria. *J. Geophys. Res.* 97: 9619~9629.
- Ulloa, O., Sathyendranath, S. and Platt, T. (1994). Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater. *Appl. Optics* 33: 7070~7077.
- Unoki, S., Okami, N., Kishino, M. and Sugihara, S. (1978). Optical Characteristics of Sea Water at Tokyo Bay. Science and Technology Agency Report, Japan, 1978.
- Vinebrooke, R. D. and Leavitt, P. R. (1998). Direct and interactive effects of allochthonous dissolved organic matter, inorganic nutrients and ultraviolet radiation on alpine littoral food webs. *Limnol. Oceanogr.* 46: 1065~1081.

- Vodacek, A., Blough, N. V., DeGrandpre, M. D., Peltzer, E. T. and Nelson, R. K. (1997). Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation. *Limnol. Oceanogr.* 42: 674~686.
- Volten, H., de Haan, J. F., Hovenier, J. W., Schreurs, R., Vassen, W., Dekker, A. G., Hoogenboom, H. J., Charlton, F. and Wouts, R. (1998). Laboratory measurements of angular distributions of light scattered by phytoplankton and silt. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1180~1197.
- Wakeman, T. R., Peddicord, R. and Sustar, J. (1975). Effects of suspended solids associated with dredging operations on estuarine organisms. *Proc. Ocean 75, Mar. Tech. Soc.* 431~436.
- Whitlock, C. H., Poole, L. R., Ursy, J. W., Houghton, W. M., Witte, W. G., Morris, W. D. and Gurganus, E. A. (1981). Comparison of reflectance with backscatter for turbid waters. *Appl. Optics* 20: 517~522.
- Wilson, T. and Davis, C. O. (1998). Hyperspectral Remote Sensing Technology (HRST) Program and the Naval EarthMap Observer (NEMO) satellite. In: *Proc. Ocean Optics XIV*, S. G. Ackleson and J. Campbell (eds.), Office of Naval Research, Washington, DC.
- Yentsch, C. S. (1962). Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnol. Oceanogr.* 7: 207~217.
- Yentsch, C. S. (1984). Satellite representation of features of ocean circulation indicated by CZCS colorimetry. In: *Remote Sensing of Shelf Sea Hydrodynamics*, J. C. J. Nihoul (ed.), Elsevier, Amsterdam, 336~354.
- Zhang, X., Lewis, M. and Johnson, B. (1998). Influence of bubbles on scattering of light in the ocean. *Appl. Optics* 37: 6525~6536.
- Zimmerman, R. C. and Mobley, C. D. (1996). Radiative transfer within seagrass canopies: impact on carbon budgets and light requirements. In: *Ocean Optics XIII*, S. G. Ackleson and R. Frouin (eds.), Proc. SPIE 2963, Washington, DC. 331~335.

数学符号

符 号	说 明	量 纲	单 位
a	吸收系数	L^{-1}	m^{-1}
A	反照率	无量纲	
a_p^*	浮游植物比吸收系数	L^2M^{-1}	m^2chl^{-1}
a_s^*	无机悬浮物比吸收系数	L^2M^{-1}	m^2mg^{-1}
a_y^*	黄色物质比吸收系数	L^2M^{-1} 或无量纲(如果测量的浓度以吸收系数表示)	m^2mg^{-1}
a_p	浮游植物吸收系数	L^{-1}	m^{-1}
a_s	无机悬浮颗粒吸收系数	L^{-1}	m^{-1}
a_y	黄色物质吸收系数	L^{-1}	m^{-1}
b	散射系数	L^{-1}	m^{-1}
b_b	后向散射系数	L^{-1}	m^{-1}
b_R	水的拉曼散射系数	L^{-1}	m^{-1}
b_s	无机悬浮物引起的散射系数	L^{-1}	m^{-1}
b_u	上行散射系数	L^{-1}	m^{-1}
b_w	纯海水散射系数	L^{-1}	m^{-1}
c	总的体积衰减系数	L^{-1}	m^{-1}
E	单位时间和单位面积能量净下行辐照度($E_d - E_u$)	MT^{-3}	Wm^{-2}
E_0	总标量辐照度($E_{0d} + E_{0u}$)	MT^{-3}	Wm^{-2}
E_d	下行辐照度	MT^{-3}	Wm^{-2}
E_u	上行辐照度	MT^{-3}	Wm^{-2}
E_{0d}	下行标量辐照度	MT^{-3}	Wm^{-2}
E_{0u}	上行标量辐照度	MT^{-3}	Wm^{-2}
H	水体深度	L	m
K_d	下行辐照度漫射衰减系数	L^{-1}	m^{-1}
K_u	上行辐照度漫射衰减系数	L^{-1}	m^{-1}
I	辐射率,即单位时间、单位面积和单位立体角内发出的能量	$MT^{-3}sr^{-1}$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
I_{mod}	建模辐射率	$MT^{-3}sr^{-1}$	$Wm^{-2}sr^{-1}$

续 表

符 号	说 明	量 纲	单 位
L_{sat}	卫星遥感器测量的辐射率	$MT^{-3}sr^{-1}$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
L_u	光谱上行辐射率	$MT^{-3}sr^{-1}$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
R	反射率	无量纲	
R_{RS}	遥感反射率	sr^{-1}	sr^{-1}
z	深度	L	m
β	体散射函数	$L^{-1}sr^{-1}$	$m^{-1}sr^{-1}$
θ	天顶角		
κ	浅海某一水层上产生的上行辐照度衰减系数	L^{-1}	m^{-1}
λ	波长	L	nm
λ_{em}	发射波长	L	nm
λ_{ex}	激励波长	L	nm
μ	净辐照度平均余弦	无量纲	
μ_d	下行辐照度平均余弦	无量纲	
μ_u	上行辐照度平均余弦	无量纲	
τ_a	气溶胶光学厚度	无量纲	
ϕ	方位角		
ϕ_F	荧光量子产量	无量纲	
χ	散射角	无量纲	
χ^2	χ 均方差统计	无量纲	