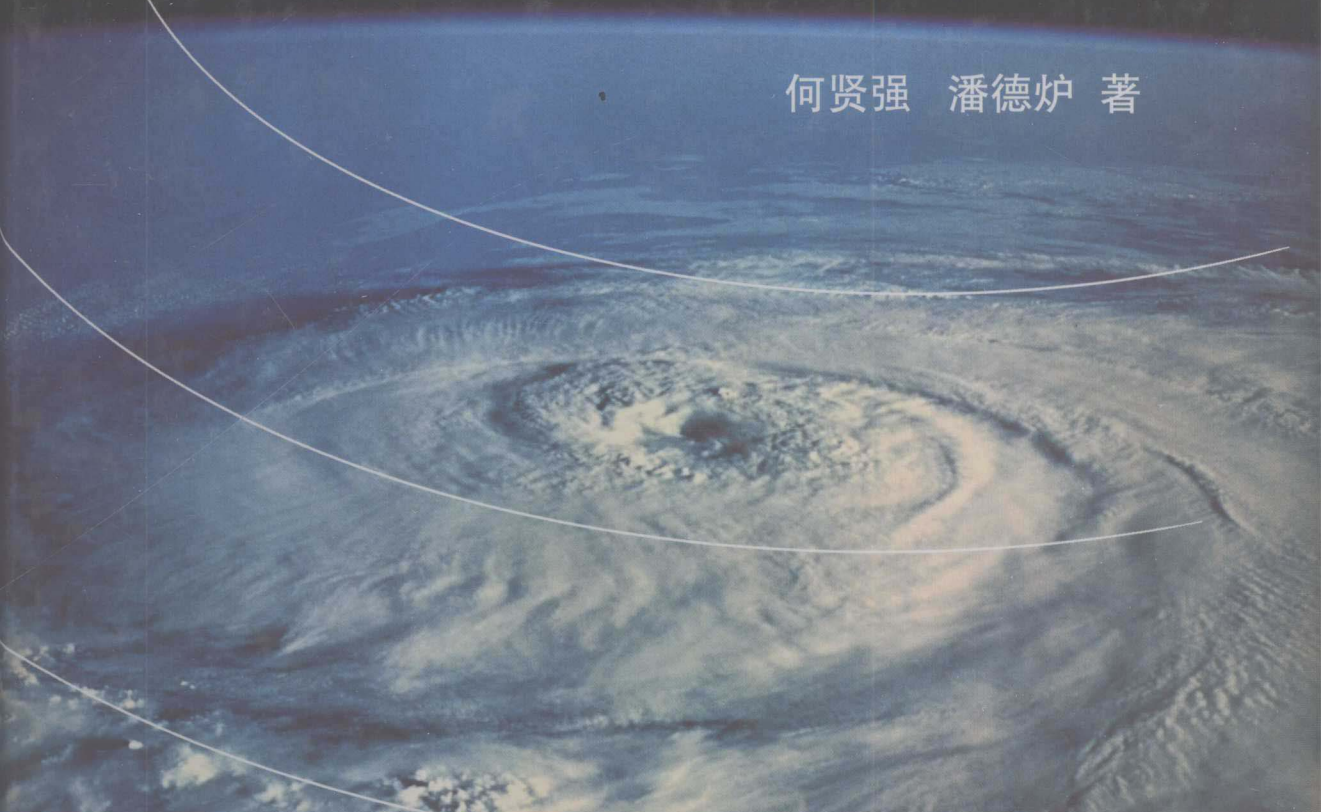


海洋—大气

耦合矢量辐射传输模型 及其遥感应用

何贤强 潘德炉 著



海洋出版社

海洋 - 大气耦合矢量辐射传输 模型及其遥感应用

何贤强 潘德炉 著

海洋出版社

2010年·北京

内 容 简 介

本书主要系统性地讲述海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART 及其在海洋水色卫星遥感(HY-1B 卫星为例)及大气遥感(云顶高度、海面风速偏振遥感)的应用技术。全书共分 10 章,第 1 章绪论主要阐述研究的背景、目的、国内外研究现状等。从第 2 章至第 10 章内容分为三大部分。第一部分为第 2 章和第 3 章,主要阐述海洋和大气辐射传输理论的基础知识以及海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART 的开发。第二部分为第 4 章至第 8 章,主要阐述 PCOART 模型在海洋水色卫星遥感领域的应用。第 4 章至第 7 章以我国第二颗海洋水色卫星 HY-1B 的精确大气校正算法开发为例,详细讲述如何利用 PCOART 模型生成 HY-1B 卫星的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表和大气漫射透过率查找表以及在此基础上开发精确大气校正算法。第 8 章针对 HY-1B 卫星 COCTS 遥感器具有相对较大的辐射偏振响应的问题,利用 PCOART 模型开发了 HY-1B/COCTS 辐射偏振响应度的在轨估算模型和辐射偏振响应校正算法。第三部分为第 9 章和第 10 章,主要阐述 PCOART 模型在大气遥感领域的应用尝试,主要是利用 PCOART 模型具有辐射偏振模拟计算的能力,开展了云顶高度和海面风速的偏振遥感机理和方法的研究。

本书可供海洋遥感、大气遥感、海洋光学、海洋监测及其他相关领域的科技工作者参考,也可作为上述专业研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

海洋-大气耦合矢量辐射传输模型及其遥感应用/何贤强,潘德炉著. —北京:海洋出版社,2010.8

ISBN 978-7-5027-7806-4

I. ①海… II. ①何… ②潘… III. ①海洋-大气遥感-研究 IV. ①P732.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158956 号

责任编辑:杨传霞

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:13.75

字数:316 千字 定价:68.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

海洋水色卫星遥感是利用光学遥感器在空间平台接收大气、海洋上行的光谱辐射,经大气校正后获取海洋水色要素基础信息,如水体中浮游植物色素浓度(叶绿素浓度)、悬浮物浓度、有色溶解有机物浓度等,是当前全球尺度海洋生态环境监测的唯一有效手段。由于卫星遥感技术较传统的船测技术具有观测范围广(全球性)、空间分辨率高、长时间连续观测等优点,已成为全球观测系统的重要组成部分。自1978年NASA成功发射世界上第一台星载海洋水色遥感器CZCS(Coastal Zone Color Scanner)以来,许多国家陆续发射了多颗性能更为先进的海洋水色卫星或可用于探测海洋水色信息的遥感器,至今共发射了20多颗具有海洋水色探测功能的卫星遥感器(<http://www.ioccg.org/>),其中包括全球广泛使用的SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)、MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)和MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer),并且已计划在2015年再发射15颗左右的海洋水色卫星遥感器(<http://www.ioccg.org/>)。

我国的海洋水色卫星遥感研究起步于20世纪80年代。1988年在极轨气象卫星FY-1A上加载了海洋水色通道,开始了我国自主卫星获取海洋水色信息的尝试。经过10余年的发展,我国制定出了自主的专用海洋水色卫星系列计划。2002年成功发射了第一颗海洋水色卫星HY-1A,成为继美国、日本、欧盟等之后世界上拥有自主海洋水色卫星的7个国家或地区之一。继HY-1A卫星成功发射之后,我国又于2007年4月成功发射了第二颗海洋水色卫星(HY-1B卫星),至今正常在轨运行已超过3年,获得了我国海区及全球部分海区的宝贵的海洋水色信息。我国已计划在2015年前再发射4颗专用海洋水色卫星(HY-1C/D/E/F系列卫星),实现全球连续观测,在全球对地观测系统中占据重要的国际地位。

海洋、大气辐射传输是海洋水色卫星遥感的理论基础,也是水色卫星数据高精度、定量化处理的核心,其进展程度在某种意义上可以说代表了该国家或地区的海洋水色卫星遥感信息处理技术的水平。为了从水色卫星遥感器接收

的总辐射信号中提取海洋水色要素信息,需要对太阳辐射在整个海洋-大气耦合系统中的传输过程有深入、定量的了解,而这必须基于完善的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型。到目前为止,国际上针对不同的辐射传输问题,开发了多种辐射传输数值模型,有些已成为商业化软件(如 Hydrolight 等);但这些模型通常只考虑平静海面、单纯大气或海洋的标量辐射传输问题,同时考虑粗糙海面、海-气耦合的矢量辐射传输数值模型很少。在国家自然科学基金、国家“863”计划和 HY-1B 卫星项目的共同资助下,我们系统性地开展了海洋、大气辐射传输数值模型研究,自主研制了我国首个海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART,并开展了其在我国第二颗海洋水色卫星 HY-1B 及大气遥感方面的应用技术研究,取得了一些创新性成果,相关研究成果已在国际辐射传输理论专业期刊《Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer》及《中国科学(D辑)》等刊物发表。利用 PCOART 针对 HY-1B 卫星建立的精确大气校正算法、辐射偏振响应在轨估算和校正算法,已作为核心算法用于 HY-1B 卫星数据的业务化处理(从 2007 年发射至今已业务化运行 3 年),为 HY-1B 卫星数据的产品制作、分发和应用提供了可靠的信息源,取得了显著的经济效益和社会效益。同时,本项技术也可用于我国计划发射的后续海洋水色卫星(如 HY-1C/D/E/F)及国内外同类遥感器。

本书系统地述海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART 及其在海洋水色卫星遥感(以 HY-1B 卫星为例)及大气遥感(云顶高度、海面风速偏振遥感)的应用技术。全书共分 10 章,第 1 章绪论主要阐述研究背景、目的、国内外研究现状等。从第 2 章至第 10 章内容分为三大部分。第一部分包括第 2 章和第 3 章,主要阐述海洋和大气辐射传输理论的基础知识以及海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCAORT 的开发。第二部分为第 4 章至第 8 章,主要阐述 PCOART 模型在海洋水色卫星遥感领域的应用。第 4 章至第 7 章以 PCOART 模型在我国第二颗海洋水色卫星 HY-1B 的精确大气校正算法开发应用为例,详细讲述如何利用 PCOART 模型生成 HY-1B 卫星的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表和大气漫射透过率查找表以及在此基础上开发精确大气校正算法。第 8 章针对 HY-1B 卫星水色水温扫描仪 COCTS 具有相对较大辐射偏振响应的问题,利用 PCOART 开发了 HY-1B/COCTS 辐射偏振响应度的在轨估算模型和辐射偏振响应校正算法。第三部分包括第 9 章和第 10 章,主要阐述 PCOART 模型在大气遥感领域的应用尝

试,主要是利用 PCOART 模型具有辐射偏振模拟计算的能力,开展了云顶高度和海面风速的偏振遥感机理和方法的研究。

本项研究得到了国家“973”计划课题(2009CB421202)、国家自然科学基金项目(40506036,40976110,40706061)、国家“863”计划项目(2007AA12Z137,2008AA09Z104)和 HY-1B 卫星项目的共同资助。特别应感谢的是唐军武研究员为本研究无私地提供了现场光谱测量数据,国家卫星海洋应用中心(NSOAS)为本研究提供了 HY-1A 和 HY-1B 卫星遥感数据,卫星海洋环境动力学国家重点实验室(SOED)卫星地面站为本研究提供了 SeaWiFS、MODIS、HY-1B 卫星遥感数据,法国空间局(CNES)为本研究提供了 POLDER 偏振卫星遥感数据。在此一并深表谢忱。

由于时间和水平所限,书中不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

何贤强 潘德炉

2010 年春于国家海洋局第二海洋研究所

卫星海洋环境动力学国家重点实验室

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究目的和问题提出	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 国外研究现状	(3)
1.2.2 国内研究现状	(6)
1.3 研究内容	(7)
第 2 章 海洋和大气辐射传输理论基础	(9)
2.1 辐射传输相关物理量	(9)
2.2 辐射偏振特性描述	(11)
2.3 大气光学特性	(12)
2.3.1 光学有效成分	(12)
2.3.2 吸收特性	(12)
2.3.3 散射特性	(13)
2.4 海洋光学特性	(17)
2.4.1 光学有效成分	(17)
2.4.2 吸收特性	(17)
2.4.3 散射特性	(19)
2.5 辐射传输方程	(21)
第 3 章 海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值计算模型	(24)
3.1 海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值计算模型 PCOART	(24)
3.1.1 矢量辐射传输方程	(24)
3.1.2 单一折射率介质矢量辐射传输数值计算模型	(26)
3.1.3 海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值计算模型	(31)
3.2 PCOART 验证	(41)
3.2.1 PCOART 计算矢量辐射传输问题的验证	(41)
3.2.2 PCOART 计算水体辐射传输问题的验证	(41)
3.2.3 PCOART 计算海洋 - 大气耦合辐射传输问题的验证	(47)
第 4 章 HY - 1B 卫星精确瑞利散射查找表	(53)
4.1 概述	(53)
4.2 HY - 1B/COCTS 波段等效参数计算	(54)
4.3 HY - 1B/COCTS 精确瑞利散射查找表生成	(55)
4.4 通用精确瑞利散射查找表生成	(56)

4.5	GR-LUT 与 HY-1B/COCTS 精确瑞利散射查找表比较	(60)
4.6	瑞利散射近似计算法误差分析	(61)
4.6.1	单次散射近似法精度分析	(61)
4.6.2	多次散射近似法精度分析	(61)
第5章	HY-1B 卫星气溶胶散射查找表	(64)
5.1	概述	(64)
5.2	忽略偏振引起的气溶胶散射计算误差	(65)
5.3	MERIS 气溶胶散射查找表方式的计算误差分析	(68)
5.4	SeaWiFS 气溶胶散射查找表方式的计算误差分析	(71)
5.5	海洋水色系列卫星气溶胶散射查找表	(74)
5.5.1	气溶胶模式	(74)
5.5.2	气溶胶模式光学特性	(75)
5.5.3	气溶胶散射查找表生成	(85)
第6章	HY-1B 卫星大气漫射透过率查找表	(88)
6.1	概述	(88)
6.2	大气漫射透过率计算模型	(89)
6.2.1	Gordon 近似计算模型	(89)
6.2.2	Wang 近似计算模型	(89)
6.2.3	查找表精确计算模型	(90)
6.3	HY-1A/COCTS 大气漫射透过率模型误差分析	(91)
6.4	PCOART 精确计算大气漫射透过率	(92)
6.4.1	大气漫射透过率精确计算方法	(92)
6.4.2	计算精度验证	(93)
6.4.3	与 Gordon 近似计算模型比较	(94)
6.5	海洋水色系列卫星大气漫射透过率查找表生成	(96)
第7章	HY-1B 卫星精确大气校正算法	(98)
7.1	概述	(98)
7.2	HY-1A/COCTS 业务化大气校正算法	(99)
7.3	海洋水色系列卫星业务化大气校正算法	(101)
7.4	海洋水色系列卫星业务化大气校正算法验证	(104)
7.4.1	PCOART 模拟数据验证	(104)
7.4.2	SeaWiFS 遥感资料验证	(104)
7.4.3	现场实测光谱资料验证	(105)
7.4.4	与 HY-1A/COCTS 业务化大气校正算法比较	(107)
第8章	HY-1B 卫星辐射偏振响应在轨估算与校正	(114)
8.1	概述	(114)
8.2	辐射偏振校正原理	(115)
8.3	HY-1B/COCTS 辐射偏振响应度在轨估算	(120)

8.3.1	HY-1B/COCTS 偏振响应度在轨估算算法	(120)
8.3.2	PCOART 计算传感器入瞳处辐射 Stokes 矢量精度验证	(122)
8.4	HY-1B/COCTS 辐射偏振校正	(151)
8.4.1	MODIS 辐射偏振校正算法分析	(151)
8.4.2	HY-1B/COCTS 辐射偏振校正算法	(157)
8.4.3	HY-1B/COCTS 辐射偏振校正效果检验	(161)
8.5	HY-1B/COCTS 辐射偏振响应在轨估算和校正软件	(170)
第9章	云顶高度偏振卫星遥感	(172)
9.1	概述	(172)
9.2	有云情况下影响大气顶线偏振辐射的因素分析	(172)
9.2.1	云层反射的影响	(172)
9.2.2	气溶胶散射的影响	(173)
9.2.3	云顶高度的影响	(175)
9.3	云顶高度偏振卫星遥感反演方法	(176)
9.4	算法应用及验证	(177)
第10章	海面风速偏振卫星遥感	(181)
10.1	概述	(181)
10.2	海面风速偏振遥感机理	(182)
10.2.1	海面风速对 412 nm 上行辐射 Stokes 矢量 Q 分量的影响	(182)
10.2.2	海面风速对 412 nm 上行辐射 Stokes 矢量 U 分量的影响	(182)
10.2.3	气溶胶对 412 nm 上行辐射 Stokes 矢量 Q 分量的影响	(186)
10.3	海面风速偏振遥感反演算法	(186)
10.4	算法应用及验证	(196)
附录 I	Stokes 矢量中各元素关于方位角的奇偶特性证明	(199)
附录 II	强前向散射矩阵的 Delta - M 变换	(201)
参考文献		(203)

第1章 绪论

1.1 研究目的和问题提出

继2002年5月成功发射第一颗海洋水色卫星(HY-1A卫星)之后,我国又于2007年4月成功发射了第二颗海洋水色卫星(HY-1B卫星),并计划在“十二五”发射HY-1C/D/E/F系列卫星,实现对我国整个海区及全球的连续观测。与HY-1A相同,HY-1B装载有两个海洋水色遥感器,分别为十波段海洋水色水温扫描仪COCTS(Chinese Ocean Color and Temperature Scanner)及四波段海岸带成像仪CZI(Coastal Zone Imager)^[1]。COCTS主要用于探测中国周边海域的海洋水色(叶绿素浓度、悬浮物浓度、黄色物质吸收系数、海水透明度等)及海表温度信息,同时具有探测全球部分海域水色、水温信息的功能。COCTS、CZI与美国SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)的比较见表1.1。与HY-1A卫星相比,HY-1B及后续HY-1C/D/E/F在辐射探测性能上有很大的提高,可获得更高精度的海洋水色信息。

随着遥感器辐射探测性能的提高,对卫星遥感数据的定量化处理提出了非常高的精度要求,以达到海洋水色遥感信息(叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度、有色溶解有机物、水质信息等)精确定量化应用的目的。从水色卫星遥感器接收信号中(光谱辐亮度)定量反演海洋水色信息,需要解决两个关键技术——大气校正和水色信息提取。大气校正主要实现从水色遥感器接收总辐亮度扣除大气程辐射及海表面反射辐射,最终获得真正携带水色信息的离水辐亮度^[2]。水色信息提取则是实现从大气校正获得的离水辐亮度中反演获得诸如叶绿素浓度、悬浮物浓度、有色溶解有机物等水色要素信息。因此,实现高精度的海洋水色信息提取,必须具备两个前提条件:一是水色遥感器具有较高的辐射探测性能,二是大气校正必须精确。在水色遥感器辐射性能提高的情况下,大气校正的精度将是实现高精度海洋水色信息提取的决定性因素,而开发高精度的大气校正算法必须基于复杂的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型。正是由于缺乏自主的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型,我国第一颗海洋水色卫星(HY-1A)的大气校正只能采用单次散射近似算法,在一定程度上限制了HY-1A卫星水色信息的提取精度和应用。随着HY-1B等后续卫星遥感器性能的不提高,单次散射近似算法不再满足精度要求,迫切需要研制海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型,并开发考虑多次散射及辐射偏振的精确大气校正算法。

同时,随着HY-1B等后续卫星辐射探测性能的提高,对直接决定后续海洋水色信息反演精度的遥感器辐射定标提出了更高的要求,原先在HY-1A可以忽略的一些影响因素需要在HY-1B及后续水色卫星中加以考虑。遥感器的辐射偏振响应就是这类影响要

素之一。HY-1B 卫星水色水温扫描仪 COCTS 的辐射偏振响应度设计指标为 $\pm 20^\circ$ 视场内小于 5%，但由于 COCTS 的实际视场可达 $\pm 57^\circ$ ，超出 $\pm 20^\circ$ 视场的辐射偏振响应度很有可能大于 5%。且 HY-1B/COCTS 发射前的辐射偏振响应度是根据光路模拟估算的，并非真正实验室测得。假设 HY-1B/COCTS 的偏振响应度为 5%，到达遥感器入瞳处的辐射线偏振度为 70%（由于大气分子瑞利散射的作用，在蓝光波段大气顶上行辐射线偏振度通常可达 70% 以上），则偏振响应引起的辐射定标误差将超过 3% ($0.05 \times 0.7 \times 0.9 = 0.0315$, 0.9 表示大气程辐射占遥感器接收总辐射的 90%)，这将引起 30% 以上的离水辐亮度反演误差（国际上的精度要求为 5%）。因此，在轨估算 HY-1B/COCTS 辐射偏振响应度，并进行辐射偏振校正，对 HY-1B 及后续卫星高精度反演海洋水色信息非常重要。

在国家自然科学基金、国家“863”计划和 HY-1B 卫星项目的共同资助下，我们系统性地开展了海洋、大气辐射传输数值模型研究，自主研制了我国首个海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART，并开展了其在我国第二颗海洋水色卫星 HY-1B 及大气遥感方面中的应用技术研究。

表 1.1 COCTS、CZI 与 SeaWiFS 的比较

参数	卫星				HY-1B(中国)			SeaStar(美国)		
卫星高度/km	798							705		
卫星轨道周期	100.83 min							102.3 min		
卫星轨道倾角/(°)	98.8							98.2		
发射日期	2007年4月							1997年8月		
过境时间	10:30AM \pm 30 min							12:00 AM \pm 20 min		
遥感器	COCTS				CZI			SeaWiFS		
覆盖周期/d	1				7			1		
视场角/(°)	114				34.8			116.6		
像数/行	1 664				2 048			1 285		
量化等级/bit	10				12			10		
空间分辨率/km	1.1				0.25			1.1		
波段设置	波段序号	中心波长 /nm	带宽 /nm	信噪比 /SNR	中心波长 /nm	带宽 /nm	信噪比 /SNR	中心波长 /nm	带宽 /nm	信噪比 /SNR
	1	412	20	349	443	20	340	412	20	499
	2	443	20	472	565	20	320	443	20	674
	3	490	20	467	665	20	250	490	20	667
	4	520	20	448	685	20	232	510	20	640
	5	565	20	417				555	20	596
	6	670	20	309				670	20	442
	7	750	20	200				765	40	455
	8	865	40	327				865	40	467
	9	10 850	1 100	0.2K(300K)						
10	11 950	1 100	0.2K(300K)							

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

1.2.1.1 辐射传输理论研究

辐射传输理论研究始于 20 世纪上半叶,最初用于天文学研究,其目的是从光学望远镜观测到的辐射光谱中提取关于恒星和行星表面的信息。从那时起,在一批杰出科学家如 Chandrasekhar、Mihalas 和 Van de Hulst 等人的努力下,这个领域得到了迅速发展,获得了许多优秀的辐射传输理论、模型和数值计算方法。到目前为止,国际上发展的海洋、大气辐射传输数值计算方法主要有矩阵算法、离散纵标法、球谐函数法、蒙特-卡罗模拟法、不变嵌入法、 $X-Y$ 函数法、逐次散射法和有限元法等^[3-11]。利用辐射传输理论和数值计算方法,已开发了几十种适用于大气、海洋辐射传输数值计算的模型和软件包,如表 1.2 所示,其中较著名的有 DISORT 和 Hydrolight 等^[12, 13]。但适用于海洋-大气耦合介质系统辐射传输数值计算的模型较少,较典型的是 COART 和 MOMO^[14, 15],但它们均只考虑了标量辐射传输问题,而没有开发海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型。

表 1.2 适用于大气和海洋的辐射传输数值计算模型模型

模型名称	开发者	类型	说明
SBDART	P. Ricchiazzi	离散纵标法	适用于平面平行分层介质,用于分析卫星遥感中的辐射传输及大气能量平衡研究
ATRAD	W. Wiscombe	矩阵算法	适用于平面平行分层介质
DISORT	Stamnes	离散纵标法	适用于平面平行分层介质
STREAMER	J. Key	离散纵标法	适用于平面平行分层介质
PolRadTran	Frank Evans	矩阵算法	适用于平面平行分层介质,考虑偏振
DOORS	Chris Godsolve	离散纵标法	适用于平面平行分层介质
DOM	Jeff Haferman	离散纵标法	适用于三维介质
MC-LAYER	Andreas Macke	蒙特-卡罗法	适用于平面平行分层介质
SHDOM	Frank Evans	离散纵标法	适用于三维介质
COART	Zhonghai Jin	离散纵标法	适用于平面平行分层海洋-大气耦合辐射传输计算,目前公开发布版本没有考虑偏振
FEMRAD	Kisselev	有限元法	适用于平面平行分层介质
Hydrolight	C. D. Mobley	不变嵌入法	商业软件包,适用于平面平行分层水体辐射传输计算
MOMO	Frank Fell	矩阵算法	适用于平面平行分层海洋-大气耦合辐射传输计算,目前公开发布版本没有考虑辐射偏振

1.2.1.2 海洋水色遥感大气校正算法研究

在海洋水色遥感大气校正算法的研究及应用方面,到目前为止,主要经历了三个阶段。

(1) 一类水体近似大气校正算法

该阶段大气校正算法主要针对 NASA 1978 年发射的第一颗海洋水色卫星传感器 CZCS (Coastal Zone Color Scanner) 而研制。奠基性工作主要是由美国迈阿密大学物理系 Gordon 教授完成。1976 年, Gordon 利用蒙特-卡罗方法模拟了气溶胶垂直分布及水次表面反照比 $R (R = E_u/E_d)$, 水色特征量) 对大气顶上行总辐亮度(通过传感器光谱响应, 得到传感器接收总辐亮度) 的影响, 发现气溶胶垂直分布的影响并不大, 在此基础上分析了海洋水色卫星传感器应具有的信噪比^[16]。1978 年, Gordon 基于以下三个结果: ①卫星接收到的非离水辐亮度部分可以分离为大气分子散射(瑞利散射) 和气溶胶散射(Mie 散射) 两部分; ②气溶胶散射相函数随波长变化不大; ③大气分子散射可以近似单次散射计算, 提出了假设 750 nm 波段水体完全吸收的 CZCS 清洁水体大气校正算法^[17]。但由于没有给出参数 ϵ (可见光波段与参考近红外波段气溶胶散射反射率的比值) 的取值, 该算法还不实用。1981 年, Gordon 和 Clark 提出了实用的 CZCS 大气校正算法^[18]。该算法是在大量实测叶绿素浓度、归一化离水辐亮度(L_w) 光谱数据的基础上, 发现在叶绿素浓度小于 0.25 $\mu\text{g/L}$ 时, $L_w(520 \text{ nm})$ 和 $L_w(550 \text{ nm})$ 变化很小, 且与叶绿素浓度的相关性很强。因此, $L_w(520 \text{ nm})$ 和 $L_w(550 \text{ nm})$ 可以近似计算出来(仅跟太阳天顶角、瑞利光学厚度及臭氧浓度等有关), 而 $L_w(670 \text{ nm})$ 可近似为零, 从而得到这 520 nm, 550 nm 和 670 nm 三个波段的气溶胶散射辐亮度, 进而外推到获得 CZCS 443 nm 波段气溶胶散射辐亮度。该算法只要找出清洁水体, 利用上述算法可求出各波段的 ϵ 值, 并将该 ϵ 值应用于整幅遥感图像。这个算法要求研究区域的气溶胶类型均一, 但其浓度可以变化。1987 年, Gordon 和 Castaño 研究了大气多次散射对 CZCS 大气校正算法的精度影响, 主要考虑到该算法在将来更高信噪比传感器的应用, 指出 CZCS 大气校正算法的主要误差在于假设大气分子散射和气溶胶散射可以完全分离, 也就是可以各自分别计算(满足线性可加性); 系统地论述了传感器观测天顶角、太阳天顶角等变化引起的 ϵ 值变化大小, 发现传感器观测天顶角变化可引起 CZCS 443 nm 波段大气校正结果有 2.7 ~ 5.4 个计数值 DC [1 个 DC, 对应 CZCS 443 nm, 520 nm, 550 nm 和 670 nm 波段的辐亮度分别为 0.045、0.031、0.025、0.011, 单位为 $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$] 的变化, 而太阳天顶角的变化也可引起达 3 个 DC 的变化。因此, 建议将来最好能每个像元计算 ϵ 值, 同时也指出将 CZCS “清洁水体” 像元求得蓝光波段的 ϵ 值降低 5%, 可以达到 CZCS 大气校正误差小于 2 个 DC 的要求^[19]。1988 年, Gordon 等利用逐次散射项法数值解大气矢量辐射传输方程, 深入研究了 CZCS 精确大气瑞利散射计算, 指出在中、低太阳天顶角时, CZCS 单次瑞利散射近似计算可产生达 5% 的相对误差, 而在大太阳天顶角(或传感器观测天顶角) 时, 可产生 10% 以上的相对误差。同时, 也指出在数值解大气辐射传输方程时, 若只考虑多次散射而忽略辐射偏振, 则在中、低太阳天顶角能产生与单次瑞利散射近似计算相当的误差, 并不能提高精度^[20]。1988 年, Gordon 和 Castaño 研究了火山喷发造成的平流层气溶胶对 CZCS 大气校正算法的影

响,发现该影响较小,主要的影响在于系统性地增加了大气顶的上行辐亮度,从而增加传感器的饱和机会,在传感器没有达到饱和的情况下,可以直接利用 CZCS 大气校正算法处理^[21]。1989 年,Gordon 和 Castaño 利用数值模拟发现在水体为完全吸收情况下,大气顶上行总辐亮度扣除瑞利散射后的辐亮度($L_t - L_r$,一般称为气溶胶多次散射辐亮度)与气溶胶单次散射辐亮度(L_{as})成线性关系,即 $L_t - L_r = AL_{as}$,系数 A 随太阳、传感器观测几何方位及气溶胶类型变化,从而提出了一种计算气溶胶多次散射的简单方法^[22]。1992 年,Gordon 和 Wang 研究了粗糙海面对 CZCS 大气校正算法(主要是瑞利散射)的影响,结果表明:只要不处于 CZCS 扫描行的边缘,对于中等太阳天顶角,忽略海面粗糙引起的瑞利散射计算误差小于 1 个 DC,大约与气压误差 ± 15 hPa 或臭氧浓度误差 ± 5 Dobson [1 Dobson 等于 0.001 标准状态下厚度 $\text{cm} - \text{atm}(\text{STP})$]相当。同时,指出当像元处于非太阳耀斑区时,由于忽略海面粗糙度引起的大气校正误差比忽略气溶胶 - 大气分子复合散射引起的大气校正误差小,对将来高信噪比的水色传感器大气校正算法研制要重点解决气溶胶 - 大气分子复合散射的影响^[23]。

(2) 一类水体精确大气校正算法

一类水体近似大气校正算法存在的严重缺陷在于忽略了大气分子和气溶胶的复合散射作用,导致其在高气溶胶浓度情况下精度较差。同时,由于第二代高性能海洋水色卫星遥感器的计划发射(主要是 SeaWiFS、MODIS),对大气校正算法的精度提出了更高的要求。该阶段的一类水体精确大气校正算法主要是针对 SeaWiFS、MODIS (Moderate - resolution Imaging Spectroradiometer) 和 MERIS (Medium resolution imaging spectrometer) 研制。

1994 年,Gordon 和 Wang 指出随着第二代海洋水色卫星传感器(SeaWiFS)的研制,需要研究比 CZCS 更为精确的大气校正算法^[24]。因此,他们针对 SeaWiFS 提出了一类水体精确大气校正算法,该算法是现用 SeaWiFS 和 MODIS 业务化大气校正的标准算法,其核心思想源于此。此后,对该算法中各项影响因子进行深入研究,并进行了改进和完善。Gordon 和 Wang 研究了海面白沫对大气校正算法的影响^[25]。Ding 和 Gordon 研究了地球曲率对大气校正算法的影响^[26]。1994 年,为了避免复杂的气溶胶多次散射查找表的生成,Wang 和 Gordon 提出了一种中等精度的气溶胶外推算法,但该算法主要适用于低气溶胶光学厚度($\tau_{865} < 0.2$)条件下^[27]。Gordon 研究了水色传感器波段带外响应的处理方法,并将它应用于 SeaWiFS 中^[28]。Ding 和 Gordon 研究了 765 nm 波段 $\text{O}_2 - \text{A}$ 带吸收对大气校正算法的影响^[29]。Morel 和 Gentil 研究了离水辐射二向性对大气校正的影响,并给出了其校正方法^[30]。Gordon 阐述了 EOS 时期水色传感器(SeaWiFS、MODIS 及 MISR)大气校正算法的相关技术问题^[31]。Fukushima 等研究了强吸收性的东亚沙尘气溶胶对大气校正算法的影响^[32]。Gordon 和 Zhang 利用模拟方法研究了平流层气溶胶及薄卷云对大气校正算法的影响^[33]。Gordon 和 Du 研究了水色卫星传感器偏振响应对大气校正算法的影响^[34]。Yang 和 Gordon 研究了离水辐射二向性对大气校正算法中大气漫射透过率计算的影响^[35]。Chomko 和 Gordon 提出利用变化复折射指数、Junge 粒径谱分布来处理强吸收性气溶胶问题^[36]。Wang 研究了大气校正算法中大气漫射透过率的简便精确计算方法^[37]。Hu 等研究了利用 SeaWiFS 670 nm 波段代替 765 nm 波段(受 $\text{O}_2 - \text{A}$ 带吸收严重)进行大气校正,结果能减少斑点噪声^[38]。Moulin 和 Gordon 研究了厚层撒哈拉沙漠尘埃

覆盖下的海洋水色卫星遥感的大气校正算法^[39]。Wang 研究了粗糙海面对 SeaWiFS 大气校正算法中精确瑞利散射计算的影响,并生成了带风速的瑞利散射查找表^[40]。Yan 等提出了一种更为精确的气溶胶光学特性计算方法以应用于大气校正算法^[41]。Wang 研究比较了两种由近红外波段气溶胶散射反射率外推到可见光波的方法,分别为气溶胶单次散射外推法和多次散射外推法^[42]。

Antoine 和 Morel 针对 MERIS 提出了一种类似 Gordon 和 Wang 标准算法的大气校正算法,该算法不直接区分大气分子散射和气溶胶散射,而是将两者合为一个整体(称为大气程辐射)进行校正^[43]。Antoine 和 Morel 算法已经被 MERIS 采纳作为其业务化的大气校正算法^[43]。此外,Chomko 和 Gordon 提出了一种光谱优化的大气校正算法,指出在中高气溶胶浓度下,光谱优化方法可得到比标准算法更好的色素浓度反演结果,但在低气溶胶浓度下,效果不理想^[44]。

(3) 浑浊二类水体大气校正算法

随着 SeaWiFS、MODIS、MERIS 等遥感资料的业务化应用,大洋清洁一类水体大气校正算法日趋成熟,在开阔大洋水体可获得较高的校正精度(可实现 443 nm 波段离水辐亮度反演相对误差小于 5%)^[31]。而在近海浑浊二类水体,由于近红外波段离水辐亮度较大,导致一类水体大气校正算法“过校”,甚至校正后离水辐亮度出现负值,进一步造成反演获得的叶绿素浓度明显偏高。为了弥补一类水体大气校正算法在浑浊水体应用的缺陷,国际上已提出了多种实用的浑浊二类水体大气校正算法。Land 和 Haigh 提出基于光谱匹配的二类水体大气校正算法,该算法首先利用气溶胶模式、水色要素浓度正演得到大气上行光谱总辐亮度,然后与遥感器接收光谱辐亮度比较,获得最接近遥感器接收光谱辐亮度的离水辐亮度、水色要素浓度及气溶胶参数作为最终的校正结果^[45]。Schilier 和 Doerffer 针对 MERIS 提出基于神经网络模型的二类水体大气校正算法,该算法通过预先训练好的神经网络模型,实现从遥感器接收辐亮度中直接反演得到浮游植物色素浓度、悬浮物浓度、黄色物质吸收系数及气溶胶散射辐亮度^[46]。Siegel 和 Wang 分析了一类水体大气校正的基本假设(即假定近红外两个波段离水辐亮度为零)的有效性,提出利用叶绿素浓度进行近红外波段离水辐亮度迭代的二类水体大气校正算法,该算法已被集成到 SeaDAS 标准大气校正算法中,但也仅适用于中低浑浊度水体(总悬浮物浓度 TSM 小于 2 mg/L)^[47]。Hu 等提出了一种实用的浑浊水体大气校正算法,该算法中浑浊水体的气溶胶参数借用邻近的清洁水体气溶胶参数^[48]。Ruddick 等利用设定近红外两波段气溶胶散射反射率比值和离水反射率比值,代替标准一类水体大气校正算法中近红外两个波段离水辐亮度为零的假定,提出了一种适用于浑浊二类水体的大气校正算法,并集成到 SeaDAS 标准大气校正算法中^[49]。Lavender 等提出利用气溶胶散射 Ångström 指数和悬浮物浓度计算近红外两波段离水反射率辐亮度,进而获得近红外两波段的气溶胶散射反射率,实现浑浊水体的大气校正^[50]。

1.2.2 国内研究现状

国内对大气辐射传输数值计算模型的研究文献较多,但绝大部分只是应用国外现有

的数值计算模型,如胡丽琴、汪宏七、吴北婴、孙毅义、王新炜、鲍嘉明等人的研究工作^[51-56]。国内对海洋(或水体)辐射传输数值计算的研究很少,从目前公开发表的文献看,只有唐军武等为了研究水体光场的非朗伯特性,利用蒙特-卡罗模拟方法开发的海洋光学辐射传输数值计算模型^[57]。但该模型是标量辐射传输模型,而非矢量辐射传输模型。国内对海洋-大气耦合辐射传输数值计算模型的研究不多。段民征等在 DIS-TORT 的基础上开发了海洋-大气耦合辐射传输模型^[58],但实际上,该模型并非实际意义上的海洋-大气耦合辐射传输数值计算模型,因为它只对大气辐射传输进行数值计算,而将复杂的海洋辐射传输问题直接利用经验关系式等效为水体反射效应。张鉴等利用矩阵算法处理海洋-大气耦合辐射传输来模拟水色遥感信息量的变化特性,其开发的数值计算模型是实际意义上的海洋-大气耦合辐射传输数值计算模型,但也只是标量辐射传输模型^[59]。总而言之,目前国内外还没有可共享的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型,因此,自主研究开发海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型十分必要。

在海洋水色遥感大气校正算法研究及应用方面,到目前为止,主要是借鉴国外的大气校正算法思想,对其作相应的改进以适用于中国近海水体。陈楚群针对 CZCS 资料提出一种利用红光波段进行大校正的方法^[60]。Pan 和 Mao 等在分析标准 SeaWiFS 大气校正算法在中国近海存在问题的基础上,提出一种适用中国近海水体的大气校正算法^[61,62]。韦钧等利用 SeaWiFS 遥感资料,针对珠江口海域提出了二类水体大气校正算法^[63]。Li 对 Ruddick 二类水体大气校正算法进行了改进^[64]。He 等针对 SeaWiFS,提出了一种利用蓝紫光波段辅助近红外波段的二类水体大气校正算法^[65]。何贤强等研究了水色遥感卫星姿态对瑞利散射计算的影响^[66]。何贤强等基于矩阵算法解大气矢量辐射传输方程,生成了 HY-1A/COCTS 的精确瑞利散射查找表,其精度达 0.5%^[67]。孙凌等利用 6S 生成 HY-1A/CZI 的瑞利散射查找表^[68]。何贤强等针对当前瑞利散射查找表均是仅针对特定遥感器生成,无法适用于新水色遥感器的不足,基于矩阵算法解大气矢量辐射传输方程,生成了一个可适用于所有水色遥感器的精确瑞利散射查找表,且其精度优于 0.5%^[69]。丁静等提出将中国近岸浑浊水体进一步区分为中低和中高浑浊水体,用光谱优化方法对中高浑浊水体进行水色大气修正^[70]。

虽然国内在海洋水色遥感大气校正算法研究方面基本可保持与国际水平同步,但是由于缺乏自主的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型,致使许多算法只是针对 SeaWiFS、MODIS 等国外水色卫星遥感资料进行研究(直接利用 SeaWiFS、MODIS 等查找表),无法用于我国海洋水色系列卫星遥感资料的大气校正。如由于无法生成针对 HY-1A/COCTS 水色遥感器的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表、大气漫射透过率查找表, HY-1A/COCTS 大气校正算法只是采用单次散射近似算法^[71]。

1.3 研究内容

针对我国目前缺乏自主的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型现状,基于矩阵算法开发了海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型 PCOART(Polarized Coupled Ocean-Atmospheric Radiative Transfer numerical model)。在此基础上,利用 PCOART 生成

我国海洋水色系列卫星的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表和大气漫射透过率查找表,并开发精确大气校正算法,为我国海洋水色系列卫星遥感资料的精确处理打下基础。针对我国水色遥感器具有相对较大的辐射偏振响应的问题,利用 PCAORT 开发水色遥感器辐射偏振响应度的在轨估算模型及辐射偏振响应校正算法。同时,利用 PCOART 开展云顶高度、海面风速的大气偏振遥感研究。主要内容安排如下。

第一部分:海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值模型 PCOART

第 2 章简要介绍海洋和大气辐射传输理论基础,包括相关物理量定义、辐射偏振特性描述、大气光学特性、海洋光学特性及辐射传输方程,为第 3 章开发海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值计算模型打下理论基础。

第 3 章主要是开发海洋 - 大气耦合矢量辐射传输数值计算模型(PCOART),并对 PCOART 进行精度验证,为生成我国海洋水色系列卫星遥感器的精确瑞利散射查找表、气溶胶查找表和大气漫射透过率查找表提供精确的数值计算模型。

第二部分:PCOART 在海洋水色卫星遥感的应用

第 4 章至第 6 章主要是利用 PCOART 生成 HY - 1B 卫星的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表和大气漫射透过率查找表,为开发 HY - 1B 卫星精确大气校正算法打下基础。

第 7 章利用生成的瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表和大气漫射透过率查找表,开发 HY - 1B 卫星精确大气校正算法。

第 8 章利用 PCOART 开发 HY - 1B 卫星辐射偏振响应度在轨估算模型和辐射偏振响应校正算法。

第三部分:PCOART 在大气卫星遥感的应用

第 9 章利用 PCAORT 研究云顶高度的偏振卫星遥感原理及方法。

第 10 章利用 PCAORT 研究海面风速的偏振卫星遥感原理及方法。