

湖泊水环境遥感

马荣华 段洪涛 唐军武 陈兆波 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

湖泊水环境遥感

马荣华 段洪涛 唐军武 陈兆波 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细阐述了湖泊水环境遥感的基础理论、实践应用及系统集成。全书共 11 章。第 1~5 章阐释了湖泊水环境遥感的理论基础,重点介绍湖泊水环境遥感的物理概念、辐射传输以及大气校正,突出固有光学量以及表观光学量的测量方法,并分析了两者的光学特性;第 6~10 章为湖泊水环境遥感的实践应用,主要阐述湖泊水体水色参数遥感反演、水体富营养化遥感评价、水生植被遥感监测与生物量遥感估算、湖泊水体表层水温反演以及湖泊蓝藻水华监测;第 11 章为湖泊水环境遥感的软件系统集成,介绍了太湖 MODIS 卫星遥感监测系统、中国湖泊水环境遥感监测系统的总体框架、开发模式、系统功能以及业务流程等。

本书可读性强,适合具有地学、环境、空间信息等地球系统科学背景的本科生、硕士生和博士生作为参考教材,也可作为湖泊科学和遥感科学工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊水环境遥感/马荣华等著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028776-2

I. ①湖… II. ①马… III. ①遥感技术-应用-湖泊-水环境-环境监测-研究
IV. ①X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 165531 号

责任编辑:关 焱 彭胜潮 / 责任校对:朱光兰

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 9 月第一次印刷 印张:34 1/2

印数:1—1 500 字数:818 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

(按姓氏笔画排序)

丁 静	马荣华	王艳红	王得玉	邓世赞
朱建华	刘晓峰	李文娟	杨 伟	宋庆君
张民伟	张寿选	陈兆波	周冠华	赵文经
赵晨露	郝景燕	胡传民	段洪涛	徐京萍
席红艳	唐军武	覃志豪		

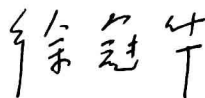
序 一

自 1957 年苏联成功发射第一颗人造地球卫星以来,全球对地观测技术快速发展;今天,一个综合的全球性对地观测网络正在形成。作为对地观测的重要技术手段,卫星遥感在探测地球资源与环境等方面表现出强大的生命力,方兴未艾。随探知对象的不同,出现了诸多学科分支,湖泊水环境遥感即是其一。欣喜地看到,我国在湖泊水环境遥感研究方面已取得了显著成绩,马荣华等撰写的《湖泊水环境遥感》是目前这一领域一项开拓性成果。

湖泊作为流域系统内的重要单元,承载并始终参与了全球气候变化过程,是全球气候变化区域响应的一个重要记录器。水环境遥感作为记录器中参数提取的一个重要手段,将发挥越来越重要的作用。面向我国湖泊水环境修复与治理的实际需求,在“十五”中期马荣华研究员及其团队组织开展了湖泊水环境遥感方面的应用研究工作,并在“十一五”期间进一步深化。通过近十年的艰苦努力,紧紧围绕湖泊水环境遥感的关键科学问题,进行重点攻关,在湖泊水色遥感大气校正、湖泊区域性生物光学特性及模型等方面取得了一定的研究进展和突破,并在太湖的实际应用中得到实践检验,获得了江苏省科技进步二等奖。

该书系统、完整地描述了作者近年来在湖泊水环境遥感方面所取得的研究成果,包括湖泊表观光学特性和固有光学特性的高精度测量、湖泊水色参数及水体表层水温的定量反演、湖泊富营养化遥感监测、蓝藻水华信息提取、水生植被信息提取及其生物量遥感估算等。难能可贵的是,作者把这些研究成果进行了集成,开发了相应的软件系统,部分实现了业务化运行,在太湖蓝藻遥感监测中发

挥了重要作用。该书是作者多年工作的总结和研究成果的综合体现。我相信,随着研究工作的继续深入,马荣华研究员及其团队将为我国的湖泊水环境遥感事业作出更多、更大的贡献。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '马', '荣', and '华' (Ma Ronghua).

2010年6月1日

序 二

在文人眼里,湖泊是点缀地球的明珠;在游客眼里,湖泊是风景优美的旅游胜地;在气象学家眼里,湖泊能调节气候;在地质学家眼里,湖泊有取之不尽的盐矿和肥沃的湖泊滩地,蕴藏着巨大能量水力;在生物学家眼里,湖泊是生物多样性的“展览厅”,并起着改善周边生态的重要作用;而在卫星眼里,湖泊又呈现出完全不同的模样。中国科学院南京地理与湖泊研究所马荣华等博士所撰写的《湖泊水环境遥感》一书,详细论述了利用人造地球卫星监测我国湖泊的水环境变化;在“千里眼”之下,所呈现的是别具一格的湖光水色光谱;而这些光谱的五彩缤纷,也照亮了这本独树一帜的著作。作为卫星海洋水环境遥感的老兵,本人在此衷心祝贺该书的出版。

我国的湖泊研究最早可以追溯到明代,那时人们就对湖泊有了粗浅认识,意识到湖泊是“生命之源”。新中国成立以后,国家加强了对湖泊水环境的科学研究,从零星调查升级到涉及国民经济发展、民生和生态安全的系统调查,湖泊研究正式步入科学殿堂。近年来,人们兴奋地看到我国社会经济持续、快速的发展,然而,又痛心见到内陆水体尤其是湖泊水体的生态环境遭受破坏,水质持续变差,并引发了诸如蓝藻水华等生态灾害。2007年无锡太湖的“5·29”饮用水危机事件给人们敲响了湖泊环境与民生安全的警钟,也触动了马荣华等一批湖泊研究者的心灵。他们借助“千里眼”,以卫星水色遥感为基础,开展湖泊水环境的动态监测,为湖泊水质及其生态环境的恢复与治理提供科学依据。

从卫星提取水的成分、认识水质类型需要付出极大努力,因为绝大部分湖泊水体的物质组分及其光学特性很复杂,实施湖泊环境参数高精度定量反演的难度很大。但我很欣喜地看到,由马荣华研究员领军的湖泊水环境遥感研究团队,在包含湖泊水色在内的水环境遥感方面做出了突出成绩,构建了湖泊水色参数以及其他相关水

环境参数的遥感定量反演与监测模型,开发了具有业务化运行能力的软件系统平台,实现了太湖蓝藻卫星遥感监测的业务化。《湖泊水环境遥感》这部学术专著因此显得内容丰富、新颖。在这本专著中,作者通过近十个湖泊的试验测量,对湖泊水体的固有光学特性、表观光学特性以及生物光学模型等进行了系统、深入的分析解剖;在湖泊水色遥感的难点——大气校正方面,该书也给予了重点论述。同时,该书还在湖泊水体的底质影响、水下光场结构、水体表层水温定量反演、水生植被遥感监测及其生物量遥感定量反演、蓝藻水华遥感监测等方面向读者奉献了创新性研究成果,可喜可贺。该书不仅可作为从事湖泊科研工作者的参考书,也可以作为本科生、硕士以及博士研究生的参考教材。

“百尺竿头,更进一步”。殷切希望马荣华博士的湖泊水环境遥感研究团队再接再厉,为大自然给中华子孙留下的明镜——湖泊的秀丽作出更大贡献。

潘继华

2010年3月于杭州

前 言

近年来,我国湖泊水环境遥感发展迅速,一方面受到现实需求(即湖泊水环境的日益恶化)的强烈推动,另一方面得益于遥感技术本身的迅猛发展。最新调查表明,我国目前水面面积大于 1 km^2 的自然湖泊有 2693 个,湖泊总面积约 81415 km^2 ,约占我国国土面积的 0.9%;它们主要分布在长江中下游、东北地区和青藏高原等地。近年来,在自然和人为因素的共同作用下,湖泊生态与环境遭受严重破坏,湖泊功能和效益不断下降,特别是长江中下游湖泊水环境变化剧烈。湖泊水环境问题已成为制约社会、经济可持续发展的“瓶颈”,越来越成为政府和公众关注的焦点。遥感技术具有快速、大范围、周期性的特点,具有常规水质监测不可比拟的优越性。新发射的卫星传感器,其分辨率基本上都为满足湖泊等内陆水体水质遥感监测提供了技术支持,这些卫星传感器在保证较高空间分辨率的同时,大大提高了光谱分辨率;而一些新的水色遥感器在保证高辐射性能的前提下,大大提高了空间分辨率(如 MERIS 为 300 m , HY-1B CZI 为 250 m)。传统的陆地卫星遥感器在高空间分辨的情况下,普遍提高了信噪比,且加大了刈幅,缩短了重复周期,如 Landsat TM 设置了水体观测增益,我国的北京 1 号小卫星有约 600 km 的刈幅。另外,我国的环境与灾害监测预报小卫星(A、B 星)已经成功发射升空,携带的光学传感器具有高空间分辨率($20\sim 30\text{ m}$)、高时间分辨率(2 天)、高光谱分辨率($0.45\sim 0.95\text{ }\mu\text{m}$ 波谱范围内有 128 个波段)以及宽观测幅宽(720 km)的性能。这些卫星传感器都为湖泊水色/水质参数遥感反演精度的提高奠定了良好的技术基础,为湖泊水色/水质遥感的发展与应用提供了广阔舞台。湖泊作为流域系统内的重要单元,承载并始终参与了全球气候变化过程,是全球气候变化区域响应的一个重要记录器,水色/水质遥感作为记录器中参数提取的一个重要手段,将发挥越来越重要的作用。另外,湖泊水色遥感模型与地球系统科学的其他模型(如湖泊水生态模型、湖泊水动力模型等)相结合,将一并纳入相关行业领域的业务化模式中,共同服务于湖泊水体污染事件的预测和预警。

定量遥感的发展,使得以湖泊水色/水质遥感为基础的湖泊水环境遥感的地位日益显现。目前,湖泊科学的诸多研究领域均涉及湖泊水环境参数的遥感定量反演问题。随着遥感技术的发展以及相关研究的不断深入,遥感可以获取的湖泊水环境参数日渐增多,但这些参数的遥感反演精度还有待进一步提高,还不能完全满足湖泊科学日益增长的需要,也还没有充分发挥遥感的真正效能。水色遥感在海洋方面的应用已经较为成熟,并实现了业务化运行,正在走向实用化。湖泊水色遥感继承了海洋水色遥感的理论、技术和方法,但由于其复杂且多变的水生态环境而具有更大的挑战性,虽然相关研究已经取得了十分丰富的成果,但仍需进一步深化。本书以笔者多年的研究为基础,试图阐释和完善湖泊水环境遥感的基础理论、技术路线和研究方法,旨在推动水色遥感的进一步发展和深入应用,同时丰富和完善湖泊水环境遥感的科学内涵。

2002年,以中国科学院南京地理与湖泊研究所众多前辈的相关研究为基础,结合研究所的优势学科方向和中长期发展目标,我们确定了“湖泊水环境遥感”这一极具生命力的研究方向,并沿着该方向一路前行。期间,曾受到诸多问题的困扰,艰难困苦,冷暖自知。幸运的是,在行进过程中,我们对科学问题的理解日渐深厚,科研经验与日俱增,同时收获了大量研究成果。在国内外各种学术会议上,通过与湖泊科学领域的诸多专家学者进行交流,我们逐步认识到湖泊科学的发展以及湖泊水环境问题的解决对卫星遥感具有巨大的现实需求,但也让我们对遥感在湖泊科学的深入应用产生了一丝担忧,深知目前遥感的弱势所在,这恰恰也给我们下一步的研究提出了新的目标,指明了未来的研究方向。2008年年初的一次学术讨论会上,大家对湖泊水环境遥感涉及的一些科学问题进行了讨论和分析,对前期的研究进行了较为系统的总结,于是萌生了写一本书的念头,目的有二:一是作为前期成果的总结,与相关专家学者切磋交流;二是作为下一步研究的起点,与大家取得共识。领域内相关专家对写作提纲进行了审核、补充和修改;在漫长的写作过程中,得到了诸位好友的支持和帮助,他们为本书贡献了许多研究成果,以使本书更为系统和完善,才能共同为读者奉献精彩的“湖泊水环境遥感”系列成果。2009年12月,经研究组成员共同努力,第六稿完成,并最终成稿。在本书的写作过程中,得到了潘德炉院士、李忠平教授、张渊智教授、冯学智教授、孔繁翔研究员、杨桂山研究员等同志的关心和指导,同时得到了中国科学院南京地理与湖泊研究所众多同事的支持和帮助。徐冠华院士和潘德炉院士于百忙之中为本书作序。

全书共分11章。第1章简要指出了研究背景,阐释了相关概念,由马荣华撰写;第2章介绍了湖泊水体的光学特性测量方法和部分湖泊的测量实践,由唐军武、宋庆君、朱建华、段洪涛、马荣华撰写;第3章主要论述了湖泊水体的表观光学特性,由马荣华、段洪涛、赵晨露撰写;第4章论述了湖泊水体的固有光学特性,由段洪涛、马荣华、徐京萍、郝景燕撰写;第5章论述了湖泊水色遥感的大气校正原理、技术和方法,由唐军武、张民伟、丁静、宋庆君、马荣华撰写;第6章论述了湖泊水色参数的遥感定量反演模型和方法,由徐京萍、马荣华、王得玉、王艳红、周冠华、杨伟、赵文经、段洪涛等撰写;第7章论述了湖泊水体富营养化遥感评价技术,由段洪涛、席红艳、刘晓峰撰写;第8章论述了湖泊水生植物的遥感提取及其生物量遥感估算技术,由马荣华、张寿选、段洪涛撰写;第9章论述了湖泊水体表层水温遥感反演的理论和方法,由覃志豪、李文娟、段洪涛等撰写;第10章主要论述了湖泊蓝藻水华的遥感提取方法、时空分布规律及其环境响应,由段洪涛、马荣华、胡传民撰写;第11章是湖泊水环境参数遥感监测算法与模型的系统集成,由陈兆波、马荣华、邓世赞撰写。全书由马荣华、段洪涛、唐军武、陈兆波统稿。

本书得到国家自然科学基金(40871168、40801137、40671138)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-QN311)以及浙江省自然科学基金重点项目(z507024)等课题的资助,在此一并致谢!

在本书即将出版之际,谨向为我们提供资助的单位、参与研究的全体成员以及提出宝贵意见的各位有识之士表示诚挚的谢意!向给予我们支持、理解和帮助的同行与学者表示诚挚的谢意!另外,还有许多人为了本书的顺利出版提供了帮助,感谢他们的热情帮助和无私支持!这里,特别感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊水环境遥感”研究团

队,团队中的每一位成员都为本书作出了贡献!他们是:马荣华、段洪涛、丁又专、张寿选、孔维娟、张静、邓世赞、李晶晶、尚琳琳、周琳、王贞、肖凯、郝景燕、刘晓峰、刘臣炜、吕春光、许金朵、赵晨露、饶加旺、姜广甲、王长凤、王泽人。本书引用了许多学者的研究成果和学术思想,虽然已有标注和说明,但在主要参考文献中未完全列出,敬请谅解!

应用是遥感生命力的源泉;面向应用,探讨遥感的基础理论,发展遥感科学,是遥感持续发展的动力。湖泊水环境遥感是遥感科学日益发展壮大的一个具体体现,包含着众多的科学问题和研究内容。我们仅结合自己的研究心得,关注了遥感在湖泊水环境方面的应用及其由此涉及的部分基础理论问题,试图从湖泊水环境的应用视角,为遥感科学的发展添砖加瓦,此为第一部,希望不久的将来,《湖泊水环境遥感》(第二部)顺利问世。

由于知识所限,学识疏浅,加之时间仓促,难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 湖泊水色遥感的现状与问题	2
1.3 基本概念	6
参考文献	10
第 2 章 湖泊水体的光学特性测量	14
2.1 水体光学特性的有关概念	14
2.2 水体的表观光学特性测量	17
2.3 水体的固有光学特性测量	31
2.4 水体生物光学特性测量试验	51
参考文献	78
第 3 章 湖泊水体的表观光学特性	81
3.1 遥感反射光谱特征分析方法	81
3.2 湖泊水色参数光谱特征	85
3.3 太湖水体水下光场特征	105
3.4 太湖水体的生物光学模型参数	137
参考文献	148
第 4 章 湖泊水体的固有光学特性	152
4.1 太湖水体的吸收光谱特征	152
4.2 巢湖水体的吸收光谱特征	180
4.3 玄武湖水体的吸收光谱特征	187
4.4 石头口门水库水体吸收光谱特性	193
4.5 典型沙漠湖泊水体吸收光谱特征	200
4.6 总颗粒物吸收光谱模拟与分解	208
4.7 太湖水体的后向散射概率	212
4.8 太湖水体的后向散射特征	216
参考文献	234
第 5 章 湖泊水色遥感的大气校正	239
5.1 大气校正研究进展	240
5.2 适合湖泊水色遥感的大气校正	249

5.3 湖泊水色遥感的 MODIS 精确大气校正	254
参考文献	266
第 6 章 湖泊水色参数的遥感定量反演	272
6.1 水底底质对遥感反射比的影响和贡献	272
6.2 基于实测高光谱的水色参数经验/半经验反演算法	288
6.3 基于实测高光谱的水色参数半分析反演算法	317
6.4 基于卫星遥感图像的水色参数反演	333
参考文献	368
第 7 章 湖泊水体富营养化遥感评价	374
7.1 湖泊富营养化评价方法	374
7.2 基于实测高光谱的湖泊富营养化评价	376
7.3 基于卫星遥感定量反演的湖泊富营养化评价	382
参考文献	405
第 8 章 湖泊水生植物生物量遥感估算	408
8.1 水生植物遥感的研究进展	408
8.2 太湖水生植物遥感监测数据获取	410
8.3 湖泊水生植物时空分布遥感监测	414
8.4 湖泊水生植物生物量遥感估算	428
8.5 湖泊水生植物遥感的精度评价	438
参考文献	443
第 9 章 湖泊水面温度遥感定量反演	445
9.1 湖泊水面温度遥感反演原理	445
9.2 基于 Landsat TM 数据的湖泊水面温度遥感反演	448
9.3 基于 EOS MODIS 数据的湖泊水面温度遥感反演	450
参考文献	459
第 10 章 湖泊蓝藻水华的卫星遥感监测	461
10.1 蓝藻水华卫星遥感监测方法	461
10.2 蓝藻水华多源卫星遥感监测	467
10.3 太湖蓝藻水华的时空分布规律	473
10.4 太湖蓝藻水华对环境变化的响应	482
参考文献	487
第 11 章 湖泊水环境遥感监测系统	489
11.1 太湖 MODIS 卫星遥感监测系统	495
11.2 中国湖泊水环境遥感监测系统	503
参考文献	521
附录一 太湖蓝藻卫星遥感监测报告(摘录)	522
附录二 水色遥感常用符号	535

第 1 章 绪 论

1.1 背景与意义

水是生命之源,是自然环境中最重要、最活跃的生态要素之一,水质状况直接关系到人类与社会的生存和发展(刘昌明,2001)。因此,无论是发达国家还是发展中国家,都非常重视水资源和水质状况的研究与监测。这对于水资源贫乏,又亟待发展经济的人口大国中国来说,更具有紧迫的现实意义。湖泊是地球上最重要的淡水资源之一,同时具有水产、灌溉、调蓄、旅游和生态平衡等多种功能,是湖泊流域地区经济可持续发展和人们赖以生存的重要基础(秦伯强等,2004)。我国是一个多湖泊的国家,国家科技基础性工作专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”的最新研究结果表明,全国面积大于 1 km^2 的湖泊目前共有 2 693 个,其中 $1\ 000\text{ km}^2$ 以上的 10 个, $100\sim 1\ 000\text{ km}^2$ 的 126 个, $10\sim 100\text{ km}^2$ 的 557 个,湖泊总面积约 $81\ 415\text{ km}^2$,约占我国国土面积的 0.9%,主要分布在长江中下游、东北和青藏高原等地区。近年来,在自然因素和人为因素的共同作用下,我国特别是长江中下游湖泊水环境变化剧烈,面积持续萎缩,湖泊水质持续恶化,湖泊生态与环境遭受严重破坏,湖泊功能和效益不断下降,成为制约社会经济可持续发展的“瓶颈”,越来越成为公众媒体关注的焦点(中国科学院南京地理与湖泊研究所,2008)。

特别自 20 世纪 80 年代以来,随着社会经济的迅速发展,我国的湖泊水质开始持续恶化,东部发达地区的湖泊水质平均每 10 年下降 1 个等级。我国 66% 以上的湖泊和水库处于富营养化水平,其中 22% 属于重富营养和超富营养(黄漪平,2001),五大淡水湖全年水质为Ⅲ到Ⅴ类,长江中下游湖泊全部处于富营养状态。与湖泊富营养化相伴的一个普遍现象是蓝藻水华的频繁发生(孔繁翔和高光,2005)。目前,蓝藻水华已经成为一个世界性的环境问题(Ahn and Shanmugam, 2007)。太湖是我国富营养化湖泊的典型代表,蓝藻水华暴发频繁;1987 年以来,太湖蓝藻水华初次暴发的时间逐渐提前,初次暴发的地点从梅梁湾等北部湖区逐渐转移至南部、西南部沿岸区,暴发的强度也逐渐增大(Duan et al., 2009; 马荣华等,2008)。特别是近年来,湖泊蓝藻水华暴发引起的水环境突发事件频繁发生,如 2007 年 5 月底以蓝藻水华暴发为诱因发生的太湖水危机,导致无锡市停水 3 天,引起国务院高度重视,在全国乃至国际上产生了很大影响。2007 年 7 月上旬,秦皇岛市饮用水水源地由于蓝藻水华的污染而发生供水危机事件,导致全市居民饮用水困难。2008 年和 2009 年的夏秋季节,太湖、巢湖、滇池等所在地政府均采取了各种严格措施以控制蓝藻水华的暴发,虽没有出现 2007 年无锡太湖那样的水危机事件,但仍旧出现了因大面积蓝藻水华积聚而引起的污水团(湖泛)事件。可以说,2007 年无锡太湖的饮用水危机事件,使人们对富营养化湖泊蓝藻水华的危害产生了更加深刻的认识。这些富营养化湖泊在蓝藻水华不断暴发的同时,水生植被也在不断萎缩,整个水体的生态环境逐渐恶

化,亟须加大科学治湖的力度。而以水质监测和评价为基础,实时掌握水环境动态,是实现科学治理决策的基础和依据。另外,就太湖而言,全湖的平均氮、磷含量近期一直居高不下,蓝藻水华的发生已经成为常态,其污染问题难以在短期内得到根本解决(孔繁翔等, 2009)。因为即使在外源输入减少后,在相当长的一段时间内,长期积累在湖泊底泥中的内源营养盐仍然足以支撑水华蓝藻的生长,很难杜绝水华的发生。因此,在采用各种方法治理蓝藻水华的同时,必须认识蓝藻水华形成的基本规律,发展敏感湖区,尤其是水源地和重点景观湖区蓝藻水华发生的预测预报技术,提高环境管理部门的决策能力,并及时采取应急措施,成为当务之急。

常规水质/水环境监测与评价需要在水域布置大量的人工监测点,然后通过实验室分析才能得到准确的水质或其他水环境参数的时空分布信息,这种人工取样—实验室分析的方法受人力、物力、财力、天气和水文条件的限制,难以长时间跟踪监测,且只能了解监测断面上的水质或水环境状况,对于整个水体而言,这些数据只具有局部和典型样点的代表意义,不能满足实时、大尺度的监测评价要求。随着湖泊生态环境问题的日益突出,变革湖泊常规监测手段,利用卫星遥感技术对湖泊水体进行水环境动态监测的需求越来越迫切。遥感技术具有快速、大范围和周期性的特点,可以弥补常规定时、定点监测的不足,节省大量人力、物力和财力,具有常规湖泊水体监测不可比拟的优越性,已经成为水环境动态监测以及蓝藻水华预测、预警不可缺少的手段之一。

水体中的某些水质参数引起水体光学特性发生变化,这种变化可以通过遥感光谱信号反映出来,因此通过基于接收和记录电磁辐射的遥感技术可以量测水体的光学特性,进而量测其物质含量(齐峰和王学军, 1999; Ritchie and Cooper, 1991; Lathrop et al., 1991)。随着对物质光谱特性研究的深入、算法的改进以及遥感技术本身的不断革新,遥感从定性发展到定量,通过卫星遥感图像较为准确地获取水体的物质含量及其水生态环境的其他参数(如表层水温、水生植被等)成为可能,水色/水质/水环境遥感成为遥感应用的一个重要方向,也是定量遥感研究的一个重要分支,除涉及遥感本身的相关理论外,还涉及具体应用领域(如水体光学、水生生物学等)的学科内容。

1.2 湖泊水色遥感的现状与问题

水色遥感是水质遥感和水环境遥感的基础。水色遥感的观测能力得到证实后,最先应用于大洋开阔水体(I类水体),先后有10多个水色传感器如CZCS(Coastal Zone Color Scanner, 1978~1986年)、SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view, 1997年至今)、MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, 1999年至今)、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer, 2002年至今)以及我国海洋一号卫星(HY-1)上的水色水温扫描仪COCTS(Chinese Ocean Color and Temperature Scanner, 2002年至今)、GOCI(Geostationary Ocean Color Imager, 2009年12月至今)等已经或即将入轨,推动着海洋水色遥感日趋成熟。目前,水色遥感在海洋科学中已经形成了一个重要的学科分支,即海洋水色遥感,并有着相对稳定的研究队伍。

地球上绝大部分海水属于I类水体,影响光学特性的物质组成较为简单,主要的光活

性物质是浮游植物色素(叶绿素)。目前,Ⅰ类水体的水色遥感从试验观测到算法应用,都形成了一套较为成熟的标准规范(Mueller et al., 2003),对固有光学量和表观光学量的认识较为深刻,水色参数的反演模型较为稳定,反演的精度也较高(如叶绿素浓度的反演误差小于 35%)。

近年来,随着社会经济的快速发展,海洋沿岸以及内陆湖泊水生态环境发生了非常大的变化,水色遥感研究的重点和热点逐渐转向海洋沿岸以及内陆湖泊等Ⅱ类水体,建立适合Ⅱ类水体组分含量的遥感反演算法成为Ⅱ类水体水色遥感的客观要求。通过遥感反演的Ⅱ类水体水质参数的种类包括悬浮颗粒物、浊度、透明度、叶绿素、溶解性有机物(Dissolved Organic Matter, DOM)、水中入射与出射光的垂直衰减系数以及一些综合污染指标(如营养状态指数)等(齐峰和王学军, 1999; Cairns et al., 1997; Wezernak et al., 1976)。高分辨率遥感图像还可用于监测河流入湖口处的汇流、扩散等影响水体污染的流体动力学现象(Lathrop and Lillesand, 1989; Abiodun, 1976; Goldman et al., 1974)。20 世纪 70 年代末、80 年代初,航空遥感被广泛应用于监测海水中浮游植物的空间分布和色素浓度(Johnson and Harries, 1980; Viollier and Deachmaps, 1978; Johnson, 1978); 80 年代中期以来,水质遥感监测主要利用卫星数据和航天平台上的多光谱扫描仪以及成像光谱仪数据。利用 Landsat MSS 可以预测悬浮物含量,有研究证明了遥感定量监测悬浮物含量以及水体污染的可行性(邓儒儒等, 2003; 李炎和李京, 1999; Ritchie and Cooper, 1987; Lindell et al., 1986; Carpenter and Carpenter, 1983); 另外,通过 MSS 数据可以监测或评价的湖泊水环境参数还有营养状态(Wezernak et al., 1976)、混浊度(Carpenter and Carpenter, 1983)、藻类色素浓度等(Verdin, 1985; Carpenter and Carpenter, 1983)。Landsat 5、7 发射后,利用 TM/ETM 进行湖泊水质监测与评价的研究和应用越来越多(马荣华和戴锦芳, 2005a; 尹球等, 2005; 周艺等, 2004; 王建平等, 2003; Tassan, 1998; 余丰宁和蔡启铭, 1997; 陈楚群和施平, 1996; Baban, 1993; Dekker and Peters, 1993; 李旭文等, 1993; Lathrop, 1992; Lathrop et al., 1991; Lathrop and Lillesand, 1986), 或者使用 TM/ETM 的单波段, 或者使用其中的组合波段, 与水质参数(如叶绿素 a、悬浮物、透明度)进行统计相关分析, 通过经验反演模型估测水体组分含量。法国 SPOT 卫星发射升空后, 许多学者在利用 SPOT 卫星图像监测水质方面作过一些工作; 许珺等(1999)利用 SPOT 数据对台湾淡水河和吉隆河流域的悬浮固体浓度做了较为深入的研究; Cairns 等(1997)利用 SPOT 卫星数据与美国得克萨斯北部水库的水质监测数据进行比较, 发现两者具有显著相关性; Doxaran 等(2002)、Dekker 等(2001)、Lathrop 和 Lillesand(1989)也发现 SPOT 卫星数据与诸多水质参数特别是悬浮物质高度相关。另外, 使用的卫星数据还有 IRS-1C(Thiemann and Kaufmann, 2000)、NOAA/AVHRR(Gould and Armone, 1997)以及 SeaWiFS(Vos et al., 2003; 陈楚群等, 2001)等; 随着 SAR 的应用与发展, ERS-1 SAR(Nilsson and Tildesley, 1995)以及 ERS-2 SAR(Zhang et al., 2002)等在湖泊水质遥感监测中也取得了较好的效果。最近, 雷坤等(2004)利用我国和巴西共同研制的中巴地球资源 1 号卫星(CBERS-1)对太湖表层水体的水质参数(叶绿素 a、总氮、总磷等)的物质含量进行反演研究, 认为利用 CBERS-1 进行湖泊水体水质指标监测具有重要的现实意义和应用前景; 尹球等(2005)还以叶绿素浓度和悬浮物浓度为监测目标, 对

FY-1C以及 SeaWiFS 进行了通道优化分析;唐军武等(2005)对利用我国资源二号 CCD 传感器进行水质参数反演进行了初步研究。目前,遥感在湖泊的富营养化监测与评价^①、水生植被监测与生物量估算(Ma et al., 2008)、初级生产力(张运林等, 2008)、水体表层水温(马荣华等, 2009;孔维娟等, 2009)等方面都取得了显著进展。

目前,内陆水体水质遥感研究所使用的绝大多数卫星遥感传感器都是面向陆地资源的多光谱传感器,所利用的遥感数据包括未经校正的灰度值、经校正转换的向上辐射值以及反射率值等,所使用的方法主要为半经验方法。半经验方法主要以波段组合为基础,建立遥感数据与实时或准实时的实测水质参数之间的统计回归分析模型,应用简便,运算快捷,但模型具有很强的区域性,通用性较差;另外,多光谱传感器的波段设置较宽(一般超过 60 nm),远远大于水体物质组分指示性波段的响应宽度(小于 10 nm),两者的波段位置也不能很好地对应,因此上述卫星多光谱传感器获取的遥感图像不能充分反映某一物质组分的波谱特征,基于多光谱遥感的经验方法不是湖泊水质遥感监测的最佳方法(马荣华和唐军武, 2006)。但由于多数面向陆地资源的多光谱传感器具有较高的空间分辨率,目前在湖泊遥感中具有其他水色传感器不可替代的作用,因此有必要对其探测潜力和水色应用模型进行研究。随着高光谱遥感的发展和应用,诸多学者认识到高光谱遥感在湖泊水质监测中的重要性(段洪涛等, 2006a、2006b;周艺等, 2004),把专用的海洋水色传感器 SeaWiFS(Vos et al., 2003)、携带有水色传感器的 MODIS(吴敏和王学军, 2005)以及 CASI(Flink et al., 2001)应用到湖泊水质遥感监测中,取得了令人满意的效果;刘堂友等(2004)使用 OMIS 成像光谱仪数据建立了叶绿素浓度和悬浮物浓度的反演公式,阎福礼等(2006)、闻建光等(2006)使用 EO-1 携带的 Hyperion 传感器数据反演太湖水体叶绿素 a 的浓度。

随着野外光学仪器的发展,水体辐射传输模型得到了广泛的应用,分析/半分析方法随之产生,其基础是表观光学量(如离水辐亮度、遥感反射比)和固有光学量(如吸收系数、散射系数),能够反演的水质参数包括叶绿素、悬浮物和 DOC(dissolved organic carbon)等。分析方法把水体固有光学参数直接用于辐射传输方程,推导出所需要的量,但由于理论基础尚不成熟,模型的假设使得反演值精度较低,不能满足需要(李素菊和王学军, 2002)。半分析方法的基础是辐射传输理论以及水体光学参数间的经验关系,核心是生物光学模型,关键是大气校正,即从卫星遥感图像中高精度地获取离水辐亮度或遥感反射比,大气校正的精度决定着半分析算法应用的成败。半分析算法涉及正演和反演两个过程(图 1.1),正演是反演的基础和前提,反演是正演的发展和应用,两者相辅相成;所得结果能够通过独立于遥感图像的野外数据进行校正,降低了对地面实测数据的依赖度,适合于湖泊水色遥感监测,将逐步取代原有的统计回归模型(IOCCG, 2000)。

绝大多数湖泊属于 II 类水体,物质组成较为复杂,受陆源的影响较大,其中的光活性物质包括浮游植物色素(叶绿素)、非色素悬浮颗粒以及 CDOM(colored dissolved organic matter)等。由于物质颗粒的物理性质有一定的季节性变化,同一湖泊,不同的湖区,也表现出一定的差异;另外,湖泊面积远小于海洋水体,大部分湖泊存在光学浅水,光学浅水的

^① 段洪涛. 2007. 查干湖水水质遥感模型及富营养化状况评价研究. 中国科学院研究生院博士学位论文.