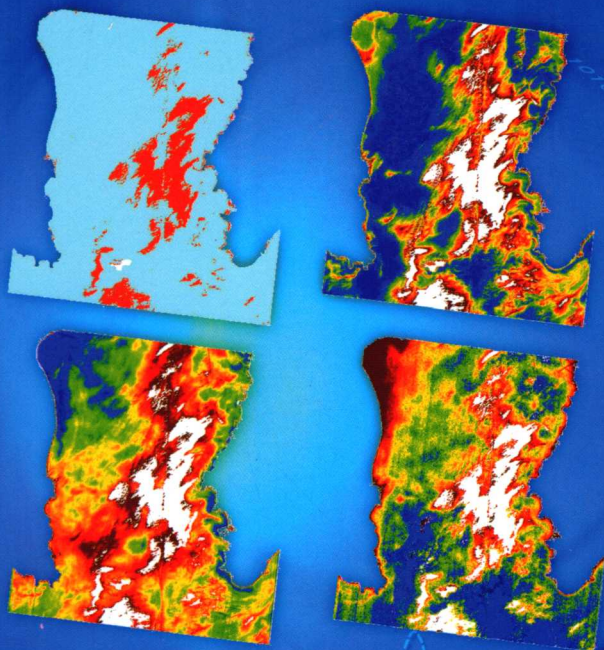




地球观测与导航技术丛书

# 内陆水体高光谱遥感

张兵 李俊生 王桥 申茜 编著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

# 内陆水体高光谱遥感

张兵 李俊生 王桥 申茜 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

随着内陆水体污染日趋严重,内陆水体遥感备受关注。高光谱遥感技术的发展为内陆水体遥感监测带来了契机。内陆水体高光谱遥感已经成为一个重要的学科发展方向和研究热点。本书系统性地介绍了内陆水体高光谱遥感的原理和方法,全书分为七章,涵盖了内陆水体高光谱遥感各个主要方面,从辐射机理、数据测量、数据分析到大气校正、要素反演和分类识别。本书力求系统性和基础性,结构上尽量覆盖内陆水体高光谱遥感机理、关键问题等各方面,内容深度上尽量融入最基本的原理、近年内最新的前沿性成果等。

本书可以作为从事水色遥感、高光谱遥感水体应用研究的科研工作者的专业书,也可以作为水环境保护、湖泊生态学等其他领域的相关专业人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

内陆水体高光谱遥感/张兵等编著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035475-4

(地球观测与导航技术丛书)

I. ①内… II. ①张… III. ①光谱分辨率-光学遥感-应用-内陆水域-环境测量 IV. ①X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 207144 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 李 静 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

**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>

**北京天时彩色印刷有限公司**印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年10月第一次印刷 印张:15

字数:340 000

**定价:79.00**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《地球观测与导航技术丛书》编委会

## 顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南

王家耀 李小文 叶嘉安

## 主 编

李德仁

## 编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军 陈 戈 程鹏飞 房建成 龚建华 龚健雅

顾行发 江碧涛 江 凯 景贵飞 李加洪 李 京

李 明 李增元 李志林 林 瑋 林 鹏 卢乃锰

孟 波 秦其明 施 闯 史文中 吴一戎 许健民

尤 政 郁文贤 张继贤 张良培 周成虎 周启鸣



# 《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示 973 和 863 主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009 年 10 月

## 序

水是支持人类生存和社会发展最重要的因素,它既是一个资源问题,又是一个环境问题。水资源短缺是人类未来面临的一个比能源更加严重的巨大挑战,而这种挑战随着全球气候的变暖更突显其严峻性。水资源的核心是淡水资源,2009年5月联合国发布的一份关于水资源的报告估计,到2030年,全球近半人口将会面临缺水的威胁。中国本是一个水资源匮乏的大国,我国人均淡水资源占有量在世界上仅位列第121名,仅为世界平均水平的25%,是全球13个人均水资源最贫乏的国家之一。缺水已成为中国政府和人民十分关心的一个重要问题。随着中国经济社会的高速发展,对水资源的需求也日益剧增,水资源的不足在很大程度上已成为我国经济社会发展的重要制约因素。由于经济的快速发展,工业、农业和城市生活废水的排放加剧,而对水污染控制不力,污水处理能力不足,甚至对水处理重视不够等因素使得水环境问题在我国日益严重。中国分布广泛的内陆水体支撑着绝大多数中国人的生存并提供着发展的空间,而事实上,全国大多水体和多数城市地下水都在不同程度上受到污染,并有逐年加重的趋势。水质下降和日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能,进一步加剧了水资源短缺的矛盾,而且严重威胁到城乡居民的用水安全和健康。水环境的恶化在本来已十分严峻的资源性缺水基础上又造成水资源的功能性短缺,使我国的水资源问题更是雪上加霜。工农业污染、生活废水的污染,特别是近年来不断加剧的水环境和水污染事件,如从松花江的苯泄漏到广东北江的镉污染,从滇池水葫芦疯长到太湖蓝藻的大面积泛滥都在不断挑战着我国本已十分脆弱的水环境能力。对水环境,特别是水污染的监测、控制与治理已是迫在眉睫、刻不容缓。

水污染和水环境的治理已成为我国可持续发展的重要议题,也是对政府执政能力和决策水平以及落实科学发展观的重大考验。在政府层面上,除采取最严格的水资源管理措施,加大投入和治理力度以外,最重要的就是要强化科学发展,更好地发挥科学技术的作用。我国正在实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》中,水体污染控制与治理(简称水专项)也已被列为16个重大科技专项之一,它的设立也说明了我国对水环境的高度重视,其目的是为中国水体污染控制与治理提供先进、及时和强有力的科技支撑。

遥感技术的发展为监测内陆水体,开展大范围水环境研究,进而为控制和治理水环境提供一个快、好、省的科学技术途径。高光谱遥感的发展是遥感技术发展的一项重大突破,它以其纳米级的光谱分辨率和在可见光到短波红外甚至热红外波段的超多波段成像特点拓宽和深化了遥感的应用领域,从而受到广大从事遥感技术和应用人士的高度重视。在全球先进对地观测遥感领域中高光谱遥感系统也占有重要而不可替代的位置,其应用领域涉及全球环境、土地利用、农林海洋、地质矿产、自然灾害,甚至星际探测等方面,而影响当今社会经济发展的资源环境问题理所当然地成为了高光谱遥感探测研究和应用的优先领域。内陆水体,特别是以水质和水污染为主要内容的水环境更是高光谱遥感的一个

非常重要的应用领域。我们可以期待,随着星载和机载高光谱遥感技术探测能力的不断增强以及全球性和区域性数据的日益增多和普及,高光谱遥感将在内陆水体水质的应用以至在重大水环境事件的监测、预测和预警中发挥越来越大的作用。

该书作者张兵是我国高光谱遥感应用领域的重要研究人员和学术带头人,也是较早并系统开展水质和水环境高光谱遥感研究的学者之一。在国家和部委一系列科研项目支持下,经过多年的不断创新发展,他所带领的内陆水体高光谱遥感研究团队在该领域取得了一批重要的科研成果,积累了丰富的科研理论和实践经验。该书就是他们多年研究的积淀和结晶,是一本理论和应用相结合的介绍内陆水体高光谱遥感的专著。该书系统地介绍了内陆水体高光谱遥感的基本概念和原理、数据获取和分析、大气校正、参数反演等各方面的内容并力图在研究前沿与实际应用之间建立起一座桥梁。作者力图在内陆水体辐射传输机理、生物光学模型、大气校正等核心理论和技术探讨基础上,着力引导读者将这些知识运用到具体的内陆水体水质高光谱遥感应用中去。

随着航空航天高光谱遥感技术的发展,内陆水体高光谱遥感也正经历着一个从起步到飞跃的发展过程。我国环境与减灾小卫星以及后续的高分辨率卫星计划将为国家大江大河和众多湖泊的水质遥感监测提供业务化运行的可能。科学技术的发展是永无止境的,水质和水环境遥感正是顺应当今的急迫需求而发展起来的,它更需要一批立志于本领域研究的遥感的科技工作者尤其是青年科技才俊们坚持不懈、锲而不舍的追求和努力。我十分欣赏该书作者多年来在这一领域顺应需求、不畏艰难、持之以恒、艰苦细致的研究精神,祝贺他们在内陆水体高光谱遥感方面所取得的重要成果并热烈祝贺该书的面世。殷切希望他们再接再厉,为我国的内陆水体遥感事业及高光谱遥感技术和应用的发展做出更大的贡献。



2012年3月于北京

# 前 言

利用遥感技术监测地球表面水体具有监测范围广、频率高、速度快、成本低等优势。其中,能够穿透水面进而获取水中物质信息的光学遥感是最常用的对地观测手段,利用光学遥感监测水体又称为水色遥感。根据研究对象的不同,水色遥感可以分为大洋Ⅰ类水体水色遥感、内陆和近海Ⅱ类水体水色遥感。随着内陆水体污染越来越严重,内陆水体水色遥感受到越来越多的关注,已经成为国内外的一个研究热点。2011年8月,本人有幸作为大会主席主持了在哈尔滨举办的“第十一届全国Ⅱ类水体水色遥感研讨会”,来自全国30余家单位的代表参加此次会议,这次会议无论参会人数还是学术报告数量都是历届中最多的一次,充分展现了全国Ⅱ类水体水色遥感研究蓬勃发展的现状。但是,与海洋水色遥感相比,内陆水体水色遥感无论在专用遥感器的研发还是在算法模型的研究方面都明显发展不足。目前内陆水体水色遥感监测中经常使用的宽波段多光谱遥感数据无法精确捕捉内陆水体复杂多变的光谱特征,内陆水体要素反演和分类识别的精度往往不高。高光谱遥感技术的发展为内陆水体水色遥感监测带来了契机,内陆水体高光谱遥感已经成为一个重要的学科发展方向,而且是一个研究热点。

我们的研究团队从2003年开始从事内陆水体高光谱遥感方面的研究工作,承担过国家“863”、“973”、自然科学基金、环境保护部、中国科学院、科技支撑计划、水专项等多个涉及内陆水体高光谱遥感的科研项目,这些项目对于促进我们在内陆水体高光谱遥感理论、方法和运行性系统研发等方面的科研工作具有巨大的推动作用。同时,我们在工作中也发现涉及海洋遥感方面的著作比较多,而内陆水体遥感、尤其是内陆水体高光谱遥感方面的系统性著作非常缺乏。参考资料的缺乏一定程度上限制了内陆水体高光谱遥感理论的发展和应用的推广。经过多年的研究积累,我们觉得有责任、有必要编写一部系统介绍内陆水体高光谱遥感原理和方法的著作。我们凭借在内陆水体高光谱遥感方面多年的研究经验,同时借鉴国内外已有资料和前人成果,撰写了本书,系统地介绍内陆水体高光谱遥感的基本原理和应用方法。本书的编写从2008年开始,历时三年多,为了使其更全面和更完善,期间改了数次,不断加入最新的研究成果。

本书特别强调系统性和基础性,结构上尽量覆盖内陆水体高光谱遥感的各个主要方面。该书除了阐述水体遥感中常见的基本概念和基础知识外,还针对一些容易被混淆的概念进行了详细的阐述和区分。例如,阐述了经常被提起的经验方法、半经验方法、分析方法和半分析方法的区别联系,并对水色要素反演模型进行了系统性地分类;针对一直以来一致公认的模型追溯了由来。例如,生物光学模型从辐射传输方程如何一步步推导而来;针对水体光学特性的测量进行了详细讲解。例如,水体吸收系数、光束衰减系数的测量原理用生动的图示予以说明;针对水体固有光学特性分析、大气校正等关键问题进行了归纳和总结。例如,阐述了国内外典型内陆水体的固有光学量光谱数据的拟合模型、季节



性和区域性变化;按照大气校正方法本质的不同分为基于常规辐射传输模型的大气校正方法和基于水气辐射耦合传输模型的大气校正方法;向读者提供了分析和处理数据的方法和经验,以便在研究其他类型的内陆水体时借鉴等。

全书分为七章,涵盖了内陆水体高光谱遥感辐射机理、数据测量、数据分析大气校正、要素反演和分类识别各个主要方面。第1章总体概述了内陆水体高光谱遥感的主要概念和一般性原理,通过对比多光谱遥感与高光谱遥感在内陆水体应用中的差异,分析了高光谱遥感在内陆水体研究发展历程中体现出来的优势。第2章系统论述了水体遥感中常用物理量的基本概念,包括辐射度量学物理量、水体表观光学量和水体固有光学量等,在此基础上重点描述了水体辐射传输方程和模型的推导。第3章详细介绍了内陆水体光学量光谱测量实验,包括内陆水体表观光学量和固有光学量光谱测量的原理、操作流程和数据处理方法等。第4章针对内陆水体固有光学量和表观光学量光谱数据的多方面分析工作,首先综述了国内外已有的研究结果,然后以环保部重点关注的“三湖一库”——太湖、巢湖、滇池和三峡水库的数据为例,详细描述了水体固有光学量和表观光学量光谱的分析方法和结果。第5章在详细介绍水体遥感数据大气校正原理的基础上,重点描述了基于通用大气辐射传输模型和基于水气辐射耦合传输模型的两类水体遥感图像大气校正方法的原理和典型算法。第6章首先将内陆水体要素高光谱遥感反演模型分为三大类:半经验模型、半解析模型和人工智能模型,然后分别介绍了每类模型的原理、构建流程及应用示例。第7章介绍了内陆水体优势藻类和蓝藻水华的高光谱遥感分类识别的原理和方法。第2章~第4章是相对比较成熟的内容,本书进行了系统性的描述,其中尤其强调了基础数据测量需要满足的测量规范;第5~7章是在不断发展的内容,而且有些还是研究热点,本书对其进行了归纳分类,并介绍了典型示例。

本书的出版凝聚了内陆水体高光谱遥感研究团队多年的心血,这里要特别感谢张浩、吴迪、张方方、邹雷、宋阳、王胜蕾、张民伟、吴艳红、吴远峰、王甘霖等为本著作编写所做出的贡献。本专著也是对于我们所承担的水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07527-006-5)、国家科技支撑计划项目(2008BAC34B05-2)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-14-2)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-350)等课题科研成果的系统总结,得到以上项目的重要支持。

本书力求能够全面、系统地讲述内陆水体高光谱遥感的原理、方法和应用,但不可避免地会存在一些重要内容和文献的欠缺、遗漏等问题,望广大读者不吝赐教。



2012年3月于北京

# 目 录

丛书出版说明

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 内陆水体遥感简介	1
1.2 多光谱遥感在内陆水体中的应用	2
1.2.1 陆地卫星数据在内陆水体中的应用	2
1.2.2 海洋水色卫星数据在内陆水体中的应用	4
1.3 高光谱遥感在内陆水体应用中的优势	5
1.3.1 高光谱遥感简介	5
1.3.2 高光谱遥感监测内陆水体优势分析	5
1.4 内陆水体遥感常用的高光谱遥感器简介	6
1.4.1 机载高光谱遥感器	7
1.4.2 星载高光谱遥感器	7
参考文献	10
第 2 章 水体辐射传输机理与模型	12
2.1 水体辐射传输机理	12
2.1.1 辐射度量学物理量	12
2.1.2 水体表观光学量	17
2.1.3 水体固有光学量	19
2.1.4 水体辐射传输方程	26
2.2 水体辐射传输模型	29
2.2.1 简化的生物光学模型	29
2.2.2 Hydrolight 模型	31
参考文献	35
第 3 章 内陆水体光学量光谱测量	37
3.1 内陆水体表观光学量光谱测量	37
3.1.1 “剖面法”表观光谱测量	38
3.1.2 “表面法”表观光谱测量	44
3.2 内陆水体固有光学量光谱测量	53
3.2.1 水体固有光学量测量的物理基础	54
3.2.2 野外原位水体固有光学量光谱测量	56

3.2.3 实验室水样固有光学量光谱测量 .....	62
参考文献 .....	74
<b>第4章 内陆水体光学量光谱数据分析 .....</b>	<b>77</b>
4.1 内陆水体固有光学量光谱数据分析 .....	77
4.1.1 非色素颗粒物吸收系数光谱数据分析 .....	78
4.1.2 黄色物质吸收系数光谱数据分析 .....	84
4.1.3 浮游植物吸收系数光谱数据分析 .....	90
4.1.4 总颗粒物体散射函数及后向散射系数光谱数据分析 .....	99
4.1.5 固有光学量光谱数据中各组分所占比例 .....	103
4.1.6 内陆水体固有光学量数据库 .....	114
4.2 内陆水体表观光学量光谱数据分析 .....	115
4.2.1 内陆水体遥感反射率光谱特征分析 .....	116
4.2.2 内陆水体遥感反射率季节差异分析 .....	121
4.2.3 内陆水体遥感反射率区域差异分析 .....	122
参考文献 .....	124
<b>第5章 内陆水体高光谱图像大气校正 .....</b>	<b>130</b>
5.1 水体遥感数据大气校正原理 .....	131
5.1.1 水色遥感信号组成 .....	131
5.1.2 水色遥感信号中各部分贡献 .....	133
5.1.3 水色遥感大气校正过程 .....	134
5.2 基于通用大气辐射传输模型的水体遥感图像大气校正 .....	136
5.2.1 通用大气辐射传输模型及特点 .....	136
5.2.2 基于通用大气辐射传输模型的水体遥感图像大气校正过程 .....	138
5.2.3 区域气溶胶光学特性数据在大气校正中的应用 .....	142
5.3 基于水气辐射耦合传输模型的水体图像大气校正 .....	146
5.3.1 海洋水色遥感图像的标准大气校正方法 .....	146
5.3.2 内陆水体高光谱图像大气校正方法 .....	151
参考文献 .....	162
<b>第6章 内陆水体要素高光谱遥感反演 .....</b>	<b>165</b>
6.1 内陆水体要素高光谱遥感反演模型分类 .....	165
6.1.1 半经验模型 .....	165
6.1.2 半解析模型 .....	166
6.1.3 人工智能模型 .....	166
6.2 内陆水体要素反演半经验模型概述 .....	167
6.2.1 构建半经验模型的一般流程 .....	167
6.2.2 叶绿素 a 浓度反演半经验模型 .....	169
6.2.3 悬浮物浓度反演半经验模型 .....	173
6.2.4 藻蓝素浓度反演半经验模型 .....	174
6.3 内陆水体要素反演半解析模型概述 .....	175

6.3.1	半解析模型的基本原理	175
6.3.2	非线性优化法	177
6.3.3	矩阵反演法	180
6.3.4	代数法	185
6.4	人工智能模型	186
6.4.1	人工智能算法简介	186
6.4.2	人工智能建模过程	189
6.4.3	人工智能模型在水体要素反演中的应用	191
	参考文献	193
<b>第7章</b>	<b>内陆水体要素高光谱分类识别</b>	<b>197</b>
7.1	内陆水体优势藻类高光谱分类识别	197
7.1.1	基于浮游植物荧光光谱特征的藻类识别	198
7.1.2	基于浮游植物吸收光谱特征的藻类识别	200
7.1.3	基于浮游植物反射率光谱特征的藻类识别	205
7.2	蓝藻水华高光谱分类识别	207
7.2.1	蓝藻水华和水草的反射光谱特征分析	208
7.2.2	基于高光谱指数的蓝藻水华识别	209
7.2.3	基于高光谱分类和目标识别方法的蓝藻水华识别	216
	参考文献	221
	附录	224

# 第 1 章 概 论

## 1.1 内陆水体遥感简介

水是生命之源。位于陆地表面的内陆水体(湖泊、水库和河流)更是人们生产、生活最重要的水源,对于人类的生存和发展具有至关重要的作用。然而,目前水资源紧缺及水体质量下降已成为全球面临的重大水环境问题。建立准确、客观、动态、快速的水环境监测、评价及趋势预报系统对于水环境污染治理和环境保护具有非常重要的意义(王桥等, 2005)。但是,现有的地面监测数据的频次、时效和代表性已经滞后于环境管理与决策的需求,特别是一些突发性、大范围的水环境质量变化不能被及时捕捉。例如,有害藻类爆发的监测和预警、跨行政区水环境污染事故的防范和应急监测等,都因缺少大覆盖范围的宏观观测能力而力不从心。

利用遥感监测内陆水体具有监测范围广、速度快、成本低、便于进行长期动态监测等优势,还可以发现一些常规方法难以揭示的污染源和污染物的迁移特征,遥感在内陆水体监测中发挥着越来越重要的作用(Doerffer and Murphy, 1989; 齐峰和王学军, 1999; Dekker et al., 2001; Bukata, 2005)。

根据传感器利用的电磁波段的不同,遥感可以分为可见光/近红外遥感、热红外遥感和微波遥感。可见光/近红外遥感的电磁辐射能够穿透一定深度的水体并被水中物质反射回水面而到达传感器,因此可见光/近红外遥感能够获取水中物质的信息,应用范围比较广泛。到达热红外遥感器的热红外辐射往往是水体表面发射出的,无法表征水体内部信息,因此热红外遥感一般只用于获取水体表面温度信息。微波遥感同样无法穿透水体,一般用于获取影响水面粗糙度的物质(如油膜、浒苔、波高等)信息。总之,相比于只能提取水体表面部分信息的热红外遥感和微波遥感而言,能够提取水中信息的可见光/近红外遥感是水体遥感最为重要的数据源。

利用可见光/近红外遥感数据监测水体称为水色遥感。水色可以理解为水体的颜色,水色遥感就可以简单的理解为通过水体的颜色来判断水体的性质。严格的讲,水色遥感是利用可见光/近红外遥感数据探测水体生物、物理、化学等要素的一门交叉应用学科,是定量遥感的一个重要应用方向。

水色遥感的原理可以简单描述如下(Mobley, 1994):如果太阳辐射在入射到水面以前的辐射光谱特征是已知的,当其入射到水体时其辐射光谱特征被改变,这种改变是主要由水体的吸收和散射决定的,当然也就是由该水体中各种组分的类型和浓度决定的;一部分被改变的太阳辐射最终被反射出水体,进而被传感器接收到;如果已知不同的物质如何改变太阳辐射,如随波段变化的吸收、散射特征,那么可以期待从改变的太阳辐射中推出水中存在的物质组成及其浓度。

水色遥感最初发展并应用于海洋水体,称为海洋水色遥感或者海色遥感。随着内陆



水体生态环境问题的逐渐突出、水资源紧缺及水环境质量的下降,遥感器的空间分辨率不断提高,海洋水色遥感的理论和方法被逐步应用于内陆水体,并结合内陆水体光学特性,发展为内陆水体水色遥感。

内陆水体水色遥感虽然源于海洋水色遥感,但是由于内陆水体与海洋水体尤其是大洋开阔水体的光学特性存在明显差别,因此海洋水色遥感的很多理论和方法无法直接应用于内陆水体水色遥感。水色遥感中通常根据水体的光学特性将水体分为两类,水体光学特性仅由浮游植物及其降解物决定的大洋开阔水体称为Ⅰ类水体,水体光学特性受浮游植物、非色素悬浮物和黄色物质共同影响的近海和内陆水体称为Ⅱ类水体(Morel and Prieur, 1977; Gordon and Morel, 1983)。

面向光学特性相对简单的大洋水体的海洋水色遥感,在专用遥感器研制和遥感应用模型研发等方面都已经相对比较成熟,能够支持业务化运行;而面向光学特性相对复杂的内陆水体,专用遥感器和遥感应用模型还都在不断的研究之中。目前,内陆水体水色遥感能够探测的水体要素可以分为五大类,分别为光学指标、生物指标、物理指标、化学指标和综合指标,每类指标包含的水体要素分别如下所示(Bukata, 1995)。

光学指标:离水辐射(离水辐亮度),遥感反射率(离水反射率),辐照度比,漫衰减系数,吸收系数,散射系数,光束衰减系数等。

生物指标:叶绿素 a,有害藻类爆发,优势藻种类,水草类型等。

物理指标:悬浮物,透明度,浊度,水深,水底类型等。

化学指标:有色溶解有机物,溶解有机碳等。

综合指标:初级生产力,富营养化状态等。

根据可见光/近红外遥感数据的光谱分辨率,可以将其分为多光谱遥感和高光谱遥感。多光谱遥感的出现早于高光谱遥感,最早应用于内陆水体遥感。高光谱遥感的出现为内陆水体遥感带来契机,极大地推动了内陆水体遥感的发展。

## 1.2 多光谱遥感在内陆水体中的应用

多光谱遥感卫星一般都有专门的应用目标,根据应用目标可以分为陆地卫星、海洋水色卫星、气象卫星等。其中,在内陆水体遥感中较为常用的是陆地卫星和海洋水色卫星。气象卫星一般是宏观的大尺度的,空间分辨率较低,不适于监测面积较小的内陆水体。

### 1.2.1 陆地卫星数据在内陆水体中的应用

用于陆地资源和环境探测的卫星一般称为陆地卫星。从1972年美国 Landsat 1 发射开始,各国先后发射了多个系列的陆地卫星,其中典型的陆地卫星及其遥感器技术指标见表 1.1。

Landsat-TM 可以说是陆地卫星多光谱遥感器的代表,各种陆地卫星多光谱遥感器的波段设置与 Landsat-TM 大同小异。由于 Landsat-TM 的使用历史较长,数据丰富,因此它也是在内陆水体遥感中应用最为广泛的陆地卫星多光谱遥感数据源。Landsat-TM 每个波段的技术指标见表 1.2。

表 1.1 典型的陆地卫星及其遥感器技术指标

遥感器	卫星	国家	发射日期	空间分辨率/m	幅宽/km	波段数量/个	重返时间/天
MSS	Landsat 1	美国	1972年 7月23日	78	185	4	18
TM	Landsat 5	美国	1984年 3月1日	30 120(热红外波段)	185	7	16
HRVIR	SPOT 4	法国	1998年 3月24日	20 10(全色波段)	60	5	26
CCD	CBERS-02B	中国/巴西	2007年 10月29日	20	113	5	26
CCD	HJ	中国	2008年 9月6日	30	≥700	4	2

表 1.2 Landsat-TM 每个波段的技术指标

波段序号	光谱响应范围/ $\mu\text{m}$	所属光谱区间	空间分辨率/m
1	0.45~0.52	蓝光	30
2	0.52~0.60	绿光	30
3	0.63~0.69	红光	30
4	0.76~0.90	近红外	30
5	1.55~1.75	短波红外	30
6	10.40~12.50	热红外	120
7	2.08~2.35	短波红外	30

陆地卫星的特点是波段扫描,遥感器的光谱探测范围主要集中在可见光至近红外谱段,一般包括4~6个波段;每个波段光谱分辨率都不高,一般为25~70nm;一般具有中高空间分辨率,通常为10~30m。

陆地卫星应用到内陆水体遥感的优势是较高的空间分辨率,这对于空间尺度远小于海洋的内陆水体是非常有益的;而且陆地卫星数据源非常丰富,因此陆地卫星在内陆水体遥感中的应用较为广泛。早在1972年Landsat 1发射后,其搭载的多光谱扫描仪(MSS)数据就开始被用于内陆水环境的评价中(Kritikos et al., 1974)。之后各种陆地卫星多光谱遥感数据被不断应用到内陆水体监测中,促进了内陆水体遥感的发展(Miller et al., 2005)。

陆地卫星多光谱遥感器具有较少并且光谱范围较宽的波段,不能捕捉内陆水体细微的光谱特征;利用陆地卫星多光谱遥感数据反演内陆水体要素的时候一般采取基于统计回归的经验方法,其中使用的多光谱波段及波段组合形式往往都是采用枚举比对的方法进行确定的,模型的反演结果通常不稳定。

## 1.2.2 海洋水色卫星数据在内陆水体中的应用

用于海洋探测的光学遥感卫星一般称为海洋水色卫星。海洋面积占地球的 3/4, 由于各国对于海洋资源和环境的日益重视, 能够探测海水内部要素的海洋水色卫星得到了蓬勃发展, 从 1978 年海洋水色卫星 CZCS 发射开始, 各国先后发射了多颗海洋水色卫星, 其中典型的海洋水色卫星及其遥感器技术指标见表 1.3。

表 1.3 典型的海洋水色卫星及其遥感器技术指标

遥感器	卫星	国家	发射日期	幅宽/km	空间分辨率/m	可见光近红外波段数
CZCS	Nimbus-7	美国	1978 年 10 月 24 日	1556	825	5
SeaWiFS	OrbView-2	美国	1997 年 8 月 1 日	2806	1100	8
COCTS	HY-1B	中国	2007 年 4 月 11 日	1400	1100	8
OCM-2	Oceansat-2	印度	2009 年 9 月 23 日	1420	360/4000	8

在海洋水色卫星中, CZCS 是开创者, 但是由于当时技术条件和理论方法的欠缺, CZCS 的波段设置并不完善。之后 1997 年发射的 SeaWiFS 成为海洋水色卫星遥感器的代表, 它的八个波段是根据具体的海洋水色遥感应用进行设计的。后面的很多海洋水色卫星(COCTS 的前八个波段、OCM-2 等)的设置都与 SeaWiFS 大同小异。SeaWiFS 每个波段的技术指标及其主要用途见表 1.4。

表 1.4 SeaWiFS 每个波段的技术指标及其用途

波段	中心波长/nm	波段宽度/nm	主要用途
1	412	20	黄色物质(紫外光吸收)
2	443	20	叶绿素(蓝光吸收)
3	490	20	叶绿素(蓝/绿光吸收)
4	510	20	叶绿素(绿光吸收)
5	555	20	叶绿素, 低浓度悬浮物(绿/黄光反射)
6	670	20	大气校正, 高浓度悬浮物
7	765	40	大气校正
8	865	40	大气校正

相比于陆地卫星遥感器来说, 海洋水色卫星遥感器的波段位置和光谱分辨率都更利于内陆水体遥感应用。而且, 海洋水色卫星的辐射定标精度比较高, 且具有较高的信噪比, 对于提取水体弱信号中的信息非常重要。此外, 海洋水色卫星的重返周期非常短, 这对于开展内陆水环境动态监测是十分有益的。另外, 随着海洋水色卫星硬件的日益成熟, 海洋水色遥感的理论和方法也越来越深入, 这对于内陆水体遥感的理论和方法研究具有很好的借鉴意义。因此, 海洋水色卫星为推动内陆水体遥感应用起到了重要作用。

由于海洋水色卫星是为探测海洋水体而专门设计的, 海洋水体与内陆水体的光学特性存在一定的差异, 因此海洋水色卫星应用到内陆水体遥感时也会遇到一些困难。海洋

水色卫星的空间分辨率一般较低,通常在 1 km 左右,因而无法应用于小型内陆水体。海洋水色卫星的波段动态范围和波长位置也是针对于相对清洁的海洋水体设计的,不一定适用于相对浑浊的内陆水体。

## 1.3 高光谱遥感在内陆水体应用中的优势

### 1.3.1 高光谱遥感简介

在遥感技术的发展经历了多光谱扫描成像之后,20 世纪 80 年代初期光学遥感进入了一个崭新的阶段——高光谱遥感(童庆禧等,2006)。高光谱遥感(hyperspectral remote sensing)全称是高光谱分辨率遥感,是指用很窄且通常连续的光谱通道对地物遥感成像的技术。高光谱遥感在可见光到短波红外波段的光谱分辨率高达纳米(nm)数量级,通常具有波段多的特点,光谱通道多达数十甚至数百个,且各光谱通道间往往是波长连续的,因此高光谱遥感又被称为成像光谱(imaging spectrometry)遥感。

高光谱遥感区别于多光谱遥感的最大特征是高光谱图像中每个像元都具有一条连续的、高光谱分辨率光谱曲线。传统多光谱遥感只能接收个别波段的地物反射信息,而这些波段间的反射信息都缺失了,所以多光谱遥感无法全面地捕捉地物光谱特征,而高光谱遥感技术的出现为这一问题提供了解决之道。由于高光谱遥感器的光谱通道很窄且波长连续,因而高光谱遥感能连续地刻画每个像元的反射光谱,而不再是像多光谱遥感那样,只能在某些不连续的波长上获取地物反射信息。

### 1.3.2 高光谱遥感监测内陆水体优势分析

高光谱遥感数据能够捕捉内陆水体精细的光谱特征。

由地面光谱仪测量得到的一条太湖夏季水面遥感反射率光谱曲线,等效为 Hyperion 高光谱遥感器和 Landsat TM 多光谱遥感器光谱曲线,如图 1.1 所示。可以观察到

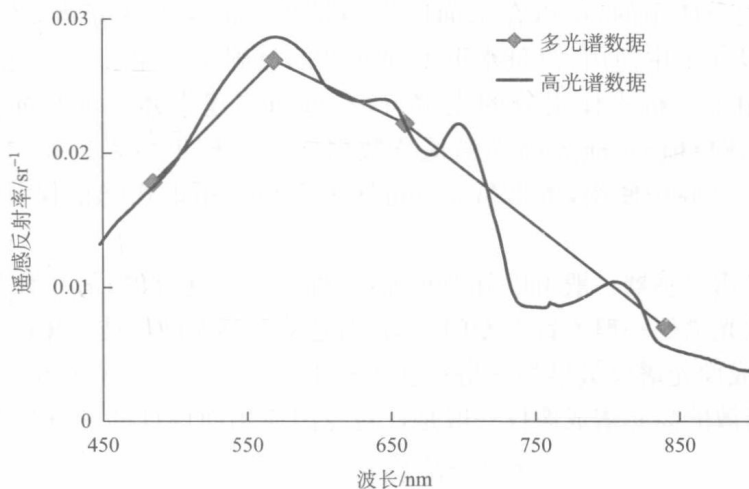


图 1.1 高光谱与多光谱遥感水面反射曲线对比