

王 桥 吴传庆 等 著

水环境遥感应用 原理与案例



科学出版社

水环境遥感应用原理与案例

王 桥 吴传庆 等 著

水专项课题“国家水环境遥感技术体系研究与示范”(2009ZX07527-6)

国家自然科学基金项目“基于光谱识别和元胞自动机的水华亚像元级遥感定位研究”(41001245)



科学出版社

北京

内 容 简 介

从遥感信息中准确地分离和提取水色参数一直是内陆水色遥感分析的一大难点,对很多学生而言,水环境遥感很难入门。而对于大多数从事环境保护、监测工作的人员来说,水环境遥感是一个新兴事物。本书面向直接应用,并通过具体案例来介绍相关原理和操作等。全书共6章,包括水环境遥感应用基础知识、地物光谱采集与处理、水色遥感反演模型方法、基于GIS的遥感数据管理与空间分析、水环境遥感业务案例及水环境遥感的关键问题与解决方法。具体介绍了水环境遥感工作中的部分案例和一些关键问题的解决方法。

本书可供从事水色遥感应用研究的高校学生、科研工作者参考使用,也可作为水环境保护等领域相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水环境遥感应用原理与案例 / 王桥等著. —北京: 科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-037647-3

I. ①水… II. ①王… III. ①遥感技术—应用—水环境—环境监测
IV. ①X832

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第116200号

责任编辑: 周 炜 李 静 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张: 17 1/4 插页: 28

字数: 331 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书参编作者

(按姓氏汉语拼音排序)

马万栋 王 桥 王雪蕾

吴 迪 吴传庆 姚延娟

殷守敬 张永军 朱 利

前 言

随着遥感技术的不断发展，特别是专门针对环境保护应用的环境卫星的发射升空，利用遥感数据对生态环境进行实时、动态、准确的监测和分析，已经作为生态破坏、污染防治监控预警的新手段，在我国的环保工作中逐步得到应用。遥感技术具有快速、连续、大范围、可视化程度高等特点，在大尺度环境状况和非点源污染监测方面具有明显优势，环境遥感信息已经成为环境保护最重要的、具有核心价值的信息资源类别。而水环境遥感由于水体的反射信号弱，一直是环境遥感研究中的难点。

随着世界各国政府和公众对水环境问题的日益关注，以及遥感技术和传感器的发展，水环境遥感科学进入一个新的发展时期。在理论研究上从定性发展到半定量、定量，从分散发展到集成；在技术上已由可见光发展到红外、微波，从单一波段发展到多波段、多极化、多角度，从单一传感器发展到多传感器相结合；在应用上已从区域应用扩展到全球范围应用，并正在向产业化方向发展。特别是近年来，随着遥感与全球定位技术和地理信息系统技术集成应用的不断扩展，水环境遥感技术已经成为环境科学研究、环境监测和环境保护工作不可缺少的手段，为环境科学发展注入了新的活力，为水环境管理带来了新的变革。

对于大多数从事环境保护和监测工作的人员来说，水环境遥感是一个新兴事物。常规的水环境参数监测是基于地面布点采样的物理或化学分析测量方法进行的，缺乏空间的连续性且费用较高；遥感技术能够更全面、及时、准确地监测水面上的环境状况。就我国内陆水体的水环境状况来说，多数水域是二类水体（水遥感界根据水体光学特性将水体分为一类和二类，杂质少的大洋水体属一类，像太湖这样的富营养化湖泊和近岸海域水体则属二类），水体环境状况复杂，水面光谱由多种因素主导，导致其水体光学特性的形成机理十分复杂，从遥感信息中准确地分离提取水色参数一直是内陆水色遥感的一大难点。因此，对很多学生而言，水环境遥感也很难入门。

正因为如此，我们将近年的研究成果整理归纳，对多年来的业务化运行工作经验进行总结，并对水环境遥感的需求进行分析，撰写了本书。以期为相关工作和研究提供参考，为刚刚接触水环境遥感的同学和环保工作人员引路。

本书直接面向应用，并通过具体案例来介绍相关原理和操作等。全书共包括6章，第1章介绍水环境遥感应用基础知识，包括水环境遥感应用现状，水体遥

感的基本概念与辐射传输原理及大气校正的原理与方法；第2章介绍地物光谱采集与处理，包括水面以上测量法和剖面测量方法，光谱特征参量化、光谱特征位置搜索和光谱曲线距离统计等；第3章介绍了水色遥感反演模型方法，主要包括统计模型、生物光学模型和神经网络模型的构建原理和思路等；第4章介绍了基于GIS的遥感数据管理与空间分析，主要包括环境遥感中的GIS基础知识，地理信息技术与遥感技术的综合使用，并结合ArcGIS中的地理处理模块介绍了空间数据分析、地理过程建模；第5章具体介绍了水环境遥感业务案例，主要包括蓝藻水华遥感监测、饮用水源地遥感监测、流域非点源氮磷监测、核电站温排水遥感监测和赤潮、溢油、海冰等方面的应急监测；第6章介绍了水环境遥感的关键问题与解决方法，如利用Excel软件进行地物光谱分析，利用地面实测数据校正遥感反演结果，利用ArcGIS进行赤潮区制图等。

本书具体分工如下：第1章由马万栋、吴传庆撰写，第2章由吴传庆、殷守敬撰写，第3章由吴迪、吴传庆、王桥撰写，第4章由张永军、王雪蕾撰写，第5章由朱利、吴传庆、姚延娟、马万栋、王雪蕾撰写，第6章由姚延娟、吴传庆、朱利、张永军、马万栋、王雪蕾、殷守敬撰写。全书由王桥、吴传庆、吴迪统稿。

本书由水专项课题“国家水环境遥感技术体系研究与示范”（2009ZX07527-6）和国家自然科学基金项目“基于光谱识别和元胞自动机的水华亚像元级遥感定位研究”（41001245）支持完成；同时感谢江苏省环境监测中心、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国科学院遥感应用研究所及南京师范大学的老师和同事对项目 and 实验的大力支持；感谢李云梅教授和李俊生、许华、申茜博士在撰写本书过程中的无私帮助；此外，在项目研究及本书的写作过程中，许多专家学者提出了很好的建议，在此一并致谢。

作者

2013年1月

目 录

前言

第 1 章 水环境遥感应用基础知识	1
1.1 水环境遥感应用现状	1
1.1.1 水环境遥感数据源进展	4
1.1.2 遥感监测指标体系	8
1.2 水体遥感原理	17
1.2.1 水面反射波谱构成	17
1.2.2 水体辐射传输	19
1.2.3 水体遥感参数	20
1.2.4 水体表观光学特性与固有光学特性	23
1.2.5 大气辐射传输	30
1.3 大气校正原理与方法	31
1.3.1 Gordon 方法	31
1.3.2 Gordon 大气校正算法改进方法	34
1.3.3 6S 辐射传输模型法	40
1.3.4 暗像元法	43
1.3.5 查找表法	45
参考文献	47
第 2 章 地物光谱采集与处理	51
2.1 水体光谱采集方法	51
2.1.1 水面以上测量法	51
2.1.2 剖面测量法	58
2.2 光谱分析方法	60
2.2.1 光谱特征参量化	60
2.2.2 光谱特征位置搜索	66
2.2.3 光谱曲线距离统计	69
参考文献	70
第 3 章 水色遥感反演模型方法	72
3.1 模型总体介绍	72

3.1.1 统计方法	72
3.1.2 分析方法	72
3.1.3 其他方法	73
3.2 统计模型	74
3.2.1 叶绿素 a	74
3.2.2 悬浮物	78
3.3 生物光学模型	82
3.3.1 矩阵反演模型	83
3.3.2 非线性优化模型	87
3.3.3 水质参数反演波段选择	89
3.4 神经网络模型	90
参考文献	92
第4章 基于GIS的遥感数据管理与空间分析	94
4.1 环境遥感中的GIS基础	94
4.1.1 常用GIS软件	94
4.1.2 地理坐标系统	94
4.1.3 地理空间数据模型	98
4.2 地理信息技术与遥感	100
4.2.1 GIS与遥感的关系	101
4.2.2 GIS与遥感的集成方法	101
4.2.3 栅格数据与矢量数据的综合	102
4.2.4 ArcGIS和ENVI的集成一体化	102
4.3 空间数据分析	105
4.3.1 矢量数据分析	105
4.3.2 栅格数据分析	106
4.3.3 矢量和栅格的分析	107
4.3.4 空间插值	108
4.4 地理过程建模	109
4.4.1 二值分析模型	109
4.4.2 指标模型	110
4.4.3 回归模型	112
4.4.4 过程模型	112
4.5 ArcGIS中的地理处理模块	113
参考文献	113

第 5 章 水环境遥感业务案例	114
5.1 蓝藻水华遥感监测	114
5.1.1 概述	114
5.1.2 蓝藻水华光谱特征分析	115
5.1.3 蓝藻水华分布遥感识别	116
5.1.4 蓝藻水华暴发等级识别	123
5.1.5 蓝藻水华年度统计分析	125
5.1.6 蓝藻水华暴发因子分析	125
5.1.7 案例	127
5.2 饮用水源地遥感监测	133
5.2.1 概述	133
5.2.2 水源地分类介绍	134
5.2.3 监测指标简介	135
5.2.4 水源地安全监测	137
5.2.5 水源地安全综合评价	152
5.2.6 案例	153
5.3 流域非点源污染监测	159
5.3.1 基于遥感技术的非点源污染研究进展	159
5.3.2 非点源污染估算方法体系	161
5.3.3 模型数据库构建及参数获取方法	167
5.3.4 案例	170
5.4 核电站温排水遥感监测	179
5.4.1 概述	179
5.4.2 原理与方法	180
5.4.3 案例	184
5.5 水环境遥感应急监测	189
5.5.1 赤潮遥感应急监测	189
5.5.2 溢油	204
5.5.3 海冰	218
参考文献	222
第 6 章 水环境遥感的关键问题与解决方法	230
6.1 如何利用 Excel 软件进行地物光谱分析	230
6.2 基于 GIS 的遥感数据管理与空间分析问题举例	233
6.2.1 如何利用地面实测数据校正遥感反演结果	233

6.2.2	利用 Model Builder 工具简化日常工作	237
6.3	蓝藻水华遥感监测的关键问题与解决方法	240
6.3.1	如何判定水体中是否发生蓝藻水华	240
6.3.2	蓝藻水华的遥感提取方法	240
6.4	饮用水源地监测的关键问题与解决方法	246
6.4.1	水源地天地一体化监测边界的确定	246
6.4.2	指标选取的原则	247
6.4.3	各指标权重的确定方法	247
6.4.4	各评价指标等级的划分	249
6.4.5	水源地监测与评价所用的数据源	250
6.4.6	实际水源地监测评价注意事项与处理技巧	250
6.5	非点源污染监测的关键问题与解决方法	250
6.5.1	流域边界提取	250
6.5.2	社会空间数据库构建	251
6.6	核电站温排水遥感监测的关键问题与解决方法	253
6.6.1	遥感反演的温度与船只观测站实测海表温度的差异	253
6.6.2	卫星遥感监测温排水热污染与环境评价中温排水热污染模拟的区别	253
6.6.3	HJ-1B 红外相机天顶角对热污染监测的影响分析	254
6.6.4	水汽含量参数如何获得	254
6.7	赤潮遥感应急监测的关键问题与解决方法	254
6.7.1	如何判定是否发生赤潮	254
6.7.2	赤潮区面积提取方法	255
6.7.3	如何利用 ArcGIS 进行赤潮区制图	260
	参考文献	263

彩图

第 1 章 水环境遥感应用基础知识

1.1 水环境遥感应用现状

水环境遥感即利用遥感技术对水体的环境状况进行监测，其最早源于对海洋的水色遥感 (ocean color remote sensing)。在遥感领域，将水体主要分为内陆 (inland) 水体、近岸 (coastal) 水体、大洋开阔水体 (open sea 或 case I water) 三类。按照水体光谱特征的不同，也可分为一类水体和二类水体 (Gordon and Morel, 1983)。一类水体定义为：水体中浮游植物 (包括其附属物质及与之相关性较高的物质) 对水体光谱特征变化起主要作用的水体。一般而言，一类水体主要是大洋水体。这类水体中，除浮游植物外，其他很多物质，如牧草的残骸、浮游植物腐烂后的物质、生物体排放的可溶性有机质等，会对一类水体的光谱特性产生影响，特别是影响水体的吸收特性 (Sathyendranath et al., 1989)。二类水体则不仅仅受到浮游植物及其相关物质影响，并且受到其他与浮游植物相对独立的物质，尤其是无机悬浮物质及有色可溶性有机物影响的水体。二类水体主要是近岸水体和内陆水体，该类水体中，水体光谱的主要影响因素包括浮游植物、悬浮物质和有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM, 通常称为水色三要素)。而由于人类活动的影响，二类水体中的排放物质越来越多，其光学特性和影响因素要复杂得多，并且水环境遥感常关注水体中的污染物质等。因此，对于二类水体水色遥感而言，必须同时考虑不同因素对水面光谱的交互影响，对其数据源的光谱分辨率及参数反演的模型方法都提出了更高的要求。在研究中所使用的数据处理方法、模型构建方法都具有区域性。

随着世界各国政府和公众对环境问题的日益关注，水环境遥感科学也进入一个新的发展时期。在理论研究上正从定性发展到半定量、定量，从分散发展到集成；在技术上已由可见光发展到红外、微波，从单一波段发展到多波段、多极化、多角度，从单一遥感器发展到多遥感器相结合；在应用上已从区域应用扩展到全球范围应用，并正在向产业化方向发展。特别是近年来，随着遥感与全球定位技术和地理信息系统技术集成应用的不断扩展，水环境遥感技术已经成为环境科学研究、环境监测和环境保护工作不可缺少的手段，为环境科学发展注入了新的活力，为水环境管理带来了变革。

目前，遥感技术广泛应用于水表温度、悬浮物质、浑浊度、叶绿素、黄色物

质等的识别或监测,以及水体热污染、水污染事故、灾害(溢油、赤潮等)等监测。早在20世纪70年代,美国等发达国家就开始利用航空遥感监测入海的工业废水、生活污水和海上溢油、赤潮事件。80年代以来,越来越多的国家开始利用卫星遥感监测污染物浓度场的变化,并利用该技术对水温、悬浮物质、叶绿素等水环境因素进行了广泛而深入的研究。我国也于80年代开始展开了水质的遥感波谱分析和应用研究。

水中悬浮物浓度是最重要的水质参数之一,可作为污染物的示踪剂,其浓度的大小直接影响水体透明度、浑浊度、水色等光学性质,也影响水生生态条件和河口近岸冲淤变化过程,对近岸工程、港口航道建设等都具有重要意义,是了解和管理海岸信息的重要依据。悬浮物在红外和近红外波段具有显著的光谱特征,基于半经验算法的反演精度明显高于叶绿素a等(马荣华和戴锦芳,2005)。早在20世纪70年代初Landsat-1刚刚发射成功,Klemas等(1974)提出了用多光谱扫描仪(multispectral scanner, MSS)遥感数据估算 Delaware 海湾悬浮物含量的线性统计模型。随后许多学者提出了不同模式来模拟悬浮物与遥感数据的关系。Stumpf和Pennock(1989)在Gordon模型和Gordon大气校正方法的基础上,建立了由AVHRR的CH1、CH2资料来获取中等浑浊度海湾的悬浮物含量的实用系统。早年,我国学者多利用AVHRR的资料提取悬浮物的信息。李炎和李京(1999)提出的以海面-传感器的光谱反射率传递现象为基础的 αR_1-R_2 算法,适用于近海悬浮物的遥感监测。Salama和Monbaliu(2004)检验了使用星载成像光谱仪(compact high resolution imaging spectrometer, CHRIS)数据反演近岸水体悬浮物的可行性:利用单波段比值模型来反演叶绿素a浓度,然后将叶绿素a浓度代入简化的生物光学模型,忽略叶绿素a和悬浮物以外的影响因素,从而计算得到悬浮物浓度。实验结果表明,星载成像光谱仪CHRIS数据可以以较高的精度反演近岸水体悬浮物浓度,而且为动态监测近岸水体水质提供了依据。吕恒等(2005)利用实测光谱和模拟MERIS(medium resolution imaging spectrometer)数据对太湖的悬浮物浓度进行了遥感定量模型的构建。吴传庆等(2009a)利用实测光谱建立了去除叶绿素a影响的高光谱悬浮物反演模型,进一步提高了水体悬浮物浓度反演精度。

叶绿素不仅能反映水中浮游生物和初级生产力的分布,其含量变化还是反映水体富营养化程度的一个指标。如何用遥感方法估算水体中的叶绿素,国内外学者已做了大量研究。Sathyendranath等(1989)、Ekstrand(1992)利用TM资料和实测数据建立了估算海水叶绿素浓度的回归模型。陈楚群等(1996)利用灰色系统理论,分析TM各波段组合与叶绿素浓度之间的关联度。Tang等(1997)利用海岸带水色仪(coastal zone color scanner, CZCS)等资料,模拟了中国沿

海大陆架 1978~1986 年色素浓度的年际变化和空间分布。Habbane 等 (1998) 根据波谱曲率理论, 拟合出叶绿素浓度与 SeaWiFS 波段间的经验关系式, 并估算了 Saint Lawrence 海湾水体的叶绿素浓度。Keiner 和 Brown (1999) 利用 SeaWiFS 的 5 个可见光波段, 通过神经网络模型来估算海面叶绿素浓度与反射率之间的非线性关系。Giardino 等 (2005) 利用 MERIS 数据对意大利北部加尔达湖中的叶绿素 a 浓度进行了反演。基于实测光谱, 吴传庆等 (2009b) 提出了动态峰建模概念, 并建立了基于高光谱遥感数据的叶绿素 a 浓度动态峰反演方法, 比常规固定波长建模方法的精度提高了 2 个百分点。马荣华等 (2009) 的研究表明在太湖的蓝藻暴发季节, 对于非蓝藻水华集聚水体, 当叶绿素和藻蓝素分别在 $20 \sim 120 \mu\text{g/L}$ 和 $40 \sim 800 \mu\text{g/L}$ 时, 基于中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 250m 卫星影像半经验算法的反演精度平均分别可达 70% 和 65%。

除单项指标外, 不少学者进行了一些水环境问题的遥感监测。

湖泊富营养化的遥感监测研究自 20 世纪 80 年代开始开展, 并取得了一定的成果; 但这些研究多基于多光谱传感器。多光谱传感器能够提供水体的一些基本特征, 然而与高光谱遥感相比, 多光谱信号无法提供丰富的光谱特征 (Chomko et al., 2003)。90 年代开始, 人们展开了高光谱遥感对湖泊富营养化监测的研究, 经过十多年发展已取得了重要的进展。Kallio 等 (2003) 利用 AISA 数据和实地水质采样数据, 采用经验方法对影响芬兰两个中营养状态湖泊的叶绿素 a 浓度进行了定量遥感反演和时空变化分析, 并基于叶绿素 a 浓度制作了湖泊营养状态时空分布图。Giardino 等 (2007) 重新使用 HYPERION 数据, 基于生物光学模型对意大利 Garda 湖的叶绿素 a 和悬浮物浓度进行了反演, 并对湖水营养状况进行了遥感评价。期间很多研究者利用多种遥感数据对富营养化水体中主要指标 (叶绿素 a、悬浮物、透明度、浑浊度等) 进行了定量遥感反演对比, 研究表明, 对于湖泊水体和海岸带水体, 高光谱数据 (如 MERIS、HyMap 等) 对水质指标的反演效果明显好于 Landsat/TM 和 MODIS。我国的科学工作者在此期间也有不少人应用遥感技术对富营养化中的部分问题进行了研究。吴传庆 (2008) 通过实验室实验和高光谱图像对富营养化水体主要指标和富营养化水体进行了光谱分析和研究, 并建立相关遥感反演模型, 取得了较好的效果。王志辉和易善楨 (2007) 以洞庭湖水体富营养化监测为最终目的, 基于 MODIS 遥感数据通过对五种不同水质指数模型进行应用, 从而确定在不同时期和不同用途时所采用的最佳水质模型。任春涛 (2007) 将乌梁素海作为研究区, 利用 Landsat5 TM 遥感数据, 以总氮、总磷、叶绿素 a、化学需氧量和透明度为研究对象, 采用径向基 (RBF) 神经网络方法对水质的富营养化状态进行研究, 结果显示 Landsat5 TM

遥感数据的 1~4 波段对湖泊水体水质参数反应比较灵敏。李小斌等 (2007) 利用珠江口海域实测遥感反射率和总无机氮数据, 基于偏最小二乘回归思想, 建立了珠江口海域无机氮浓度估算的遥感模型。将该模型用于 1998 年 12 月 31 日的 SeaWiFS 数据, 所得结果的平均相对误差为 31.9%, 可为珠江口海域无机氮含量的分布及富营养化问题研究提供定性的依据。

赤潮遥感监测方面, 很早就有研究和应用, 例如, Kutser 等 (2006) 利用卫星遥感技术对近海赤潮进行遥感监测, 并对其中的叶绿素 a 浓度进行定量反演; 黄韦良等 (1998) 根据赤潮水体光谱特征和赤潮环境要素 (如海面温度、叶绿素、流场、气象要素等), 提出了赤潮卫星遥感监测和实时预报的方法, 利用 SeaWiFS 资料, 成功地监测和预报了 1997 年 11 月发生在广东沿海的金囊藻赤潮和 1997 年 7 月发生在浙江海区的夜光藻赤潮。我国的卫星环境应用中心利用环境一号卫星 CCD 数据也多次监测到浙江沿海 (2009 年 4 月和 2011 年 5 月) 及珠江口 (2009 年 10 月底) 的赤潮爆发。

海上溢油污染遥感监测始于 1969 年, 美国利用航空遥感技术对加利福尼亚附近的海上油膜及其扩散进行了跟踪测量。1974 年, 美国建立了航空油膜污染监测系统。20 世纪 80 年代以后, 各国多利用 TM、NOAA 数据监测海面溢油的污染范围和扩散方向。我国的环境保护部利用 ENVISAT 和德国 TerraSAR 对 2007 年 12 月韩国近海溢油事件成功地进行了多时相监测。2010 年美国的墨西哥湾油井爆炸, 利用 MODIS 数据和环境卫星数据均能快速地监测到溢油的分布和变化趋势。近年来, SAR 图像带来了溢油事故遥感监测的新方法, 对解决油膜厚度等能提供较大的帮助。利用 RS 和 GIS 相结合监测和分析海面溢油的技术也得到发展。现在遥感技术已经能对海面油膜的覆盖范围、油膜厚度、溢油数量和油污种类进行监视测量。

近年来, 我国的技术人员还对核电站温排水、海冰、浒苔和水色异常等进行了遥感监测, 取得了很好的效果。但是水环境遥感应用依然存在一些技术问题。例如, 普适性模型精度很差; 狭义模型只在特定的地点和时间段有效; 精度高的模型软件化困难、操作性差等, 难以满足实用性和业务化需要。

1.1.1 水环境遥感数据源进展

1978 年, NASA 发射了第一颗海洋水色监测卫星传感器——CZCS。该传感器发射的初步目标是: 利用可见光波段中有限的波段量测水体离水辐射, 同时利用测得的信号量来推算海洋表层水体浮游植物的浓度。CZCS 数据在研究影响全球的碳循环、海洋生物初级生产力及区域环境变化等多个重大研究课题中的应用, 促进了水色遥感的发展, 也促进了第二代水色遥感卫星的研究 (唐军武, 1998)。

第二代水色遥感器的代表是 NASA 1997 年 8 月发射成功的 SeaWiFS (宽视场水色扫描仪) 和在 1999 年前后发射的 MODIS, 欧洲太空局的 MERIS。SeaWiFS 有 8 个光谱波段, 经过带通滤波, 波段 1~6 的带宽达到 20nm, 波段 7、8 的带宽为 40nm。SeaWiFS 的数据类型有两种: 全球数据 (global area coverage) 和局域数据 (local area coverage)。全球数据覆盖全球大部分海洋地区, 分辨率约为 4km。局域数据为局部地区数据, 分辨率约为 1km, 数据可以由高分辨率图像传输地面站 (HRPT) 接收。SeaWiFS 的性能指标较 CZCS 有了很大的提高, 从而使得必须对原来基于较低精度遥感器的大气修正算法、水色反演模型及被忽略的一些所谓“次要”因素 (如离水辐射的二向性等) 进行更进一步的深入研究 (Morel and Gentili, 1991, 1993, 1996)。

MODIS 是搭载在 Terra (EOS AM) 和 Aqua (EOS PM) 上最重要的传感器, 它是一个扫描成像辐射计, 拥有 36 个波段, 分布在 0.4~14 μm 电磁波谱范围内, 扫描宽度为 2330km。波段 1、2 的地面分辨率为 250m, 波段 3~7 的地面分辨率为 500m, 波段 8~36 的地面分辨率为 1000m。MODIS 较高的时间分辨率 (一天可以接收两次多光谱数据) 及其多达 36 个波段的光谱数据和较高的辐射分辨率 (12bit, TM 图像是 8bit) 使其成为水色遥感监测的重要数据源。

MERIS 是搭载在 ENVISAT-1 极轨对地观测卫星上专门针对水色遥感的传感器, 波谱范围为 412~1050nm, 在海岸带和陆地, 它收集的数据在星下点的分辨率为 300m, 在开阔的海洋上, 它收集的数据分辨率有所降低, 为 1200m, 是通过合并沿航迹方向与垂直航迹方向上的 4 \times 4 个相邻像元来获取的。重复观测周期 2~3 天。MERIS 能够在 15 个波段上收集数据, 波段设置的数目、位置等可以由地面命令编程来控制, 每个光谱波段的宽度能够在 0.4~1.05 μm 变化。MERIS 设置的三个近红外波段可以用来完成精确的大气校正, 这就大大地提高了水色参数的反演精度。MERIS 数据以其较多的光谱波段、中等尺度的地面分辨率、较好的时间分辨率、较优的波段设置成为水色遥感监测的有力工具。

表 1-1 是 CZCS、MERIS、SeaWiFS 和 MODIS 的参数对比。

表 1-1 CZCS、MERIS、SeaWiFS、MODIS 数据对比

传感器	CZCS	MERIS	SeaWiFS	MODIS
空间分辨率	825m	300m	1.1km	0.25~1km
光谱分辨率	20~100nm, 红外 2 μm	3.75~20nm	20nm	10~15nm
波段数	6	15	8	9

续表

传感器	CZCS	MERIS	SeaWiFS	MODIS
相应波段比较	—	407.5~417.5nm CDOM 与碎屑	402~422nm 溶解性有机质	405~420nm 叶绿素
	433~453nm 叶绿素吸收	437.5~447.5nm 叶绿素吸收最大值	433~453nm 叶绿素	438~448nm 叶绿素
	—	485~495nm 叶绿素等	480~500nm 色素, K490	483~493nm 叶绿素
	510~520nm 叶绿素关联校正	505~515nm 悬浮泥沙、赤潮	500~520nm 叶绿素	526~536nm 叶绿素
	545~565nm 叶绿素反射峰、 低悬浮泥沙	555~565nm 叶绿素吸收与荧光特性	545~565nm 色素, 悬浮物质	546~556nm 沉积物
	—	615~625nm 悬浮泥沙敏感波段	—	—
	660~680nm 大气校正	660~670nm 叶绿素吸收与荧光特性	660~680nm 叶绿素	662~672nm 沉积物, 大气层
	—	677.5~685nm 叶绿素荧光峰	—	673~683nm 叶绿素荧光
	—	703.75~713.75nm 叶绿素荧光性大气校正	—	—
	700~800nm 地表植被	750~757.5nm 植被指数与云	745~785nm 大气校正	743~753nm 气溶胶性质
	—	758.75~762.5nm 氧气吸收	—	—
	—	771.25~786.25nm 大气校正	—	—
	—	855~875nm 植被、水汽	845~885nm 大气校正	862~877nm 气溶胶性质
	—	885~895nm 大气校正	—	—
—	895~905nm 含水量、陆地	—	—	
量化级数	8bit	16bit	10bit	12bit

海洋一号卫星 (HY-1A) 是我国第一颗应用于海洋水色遥感和海洋环境监测的海洋卫星, 于 2002 年 5 月发射, 星上有效载荷为一台 10 波段 COCTS 水色扫描仪, 主要用于探测海洋水色要素 (包括叶绿素浓度、悬浮固体含量和可溶性有机物浓度等) 和海洋表面温度分布, 扫描幅宽为 1350km, 重复周期为 3 天; 有 8 个可见光与近红外通道和 2 个热红外通道, 空间分辨率 1.1km, 每行 1024 个像元, 量化级数为 10bit。

在二类水体特别是内陆水体遥感中, 对传感器的空间分辨率有较高要求, 因此导致现有的水色遥感传感器在内陆水环境监测中的作用有限。目前, 在内陆水环境中使用较多的数据是 TM、SPOT、MODIS 和我国的环境卫星数据。TM 和 SPOT 数据历史悠久, 我国的遥感工作者非常熟悉, 本书就不再加以说明。环境卫星是我国于 2008 年 9 月成功发射的环境与灾害监测预报小卫星星座, 该星座包含两颗光学小卫星: 环境一号 A 星 (HJ-1A)、环境一号 B 星 (HJ-1B)。HJ-1A 光学有效载荷为两台宽覆盖多光谱可见光相机 (CCD) 和一台超光谱成像仪 (HSI), HJ-1B 光学有效载荷为两台 CCD 相机和一台红外相机 (IR)。CCD 相机观测重访周期为 48h 并基本覆盖我国 80% 以上的国土和海域, 其地面像元分辨率 (星下点) 为 30m; 光谱通道数为 4, 分别是: $0.43\sim 0.52\mu\text{m}$ 、 $0.52\sim 0.60\mu\text{m}$ 、 $0.63\sim 0.69\mu\text{m}$ 和 $0.76\sim 0.90\mu\text{m}$; 幅宽为 720km; 量化级数为 8bit。这几个传感器波段设置较宽, 对于水环境遥感来说还不尽合理, 一些水体参数的特征光谱并不能反映出来, 但其较高的空间、光谱和辐射分辨率及较高的性价比吸引着众多研究者对其在水环境遥感监测中的应用进行研究, 并取得了一定的成果。

此外, 近些年高光谱遥感的发射也为水环境遥感带来了新的数据源。美国的 HYPERION 和欧洲太空局的 CHRIS 是其中的代表。HYPERION 搭载于地球观测一号卫星 (earth observing 1, EO-1), 是地球观测卫星体系中第一台星载高光谱传感器, 采用了推扫式扫描成像方式, 每幅图像覆盖地面 $7.5\text{km}\times 100\text{km}$ 的范围, 提供了 220 个光谱波段的数据, 光谱范围在 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$, 地面分辨率为 30m, 光谱分辨率 10nm, 550~700nm 的信噪比为 144~161, 能够进行详细精确的目标类型识别。HYPERION 虽然不是专门监测水色的传感器, 但其较高的光谱分辨率和地面分辨率对内陆湖泊的水色遥感监测而言有着巨大的潜在价值。然而, 由于 HYPERION 数据的幅宽较窄, 仅为 7.5km, 因此对于较大面积水体的监测具有局限性。

欧洲太空局的 CHRIS (图 1-1) 搭载于 2001 年 10 月 22 日成功发射的 PROBA (project for on-board autonomy) (图 1-2) 卫星上。CHRIS 是新一代高光谱卫星传感器, 有 5 种工作模式, 其中模式 2 是专门为水体研究而设计的, 它在 400~1050nm 的可见光至近红外范围有 18 个波段, 每个波段数据的空间分辨率为 17m,