



作
金

“十” 图书出版规划项目

地球空间信息学前沿丛书 丛书主编 宁津生

近岸/内陆水环境 定量遥感时空谱研究及应用

李 建 陈晓玲 田礼乔 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



湖北省学术著作

Hubei Special Funds for
Academic Publications

出版专项资金

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

地球空间信息学前沿丛书

丛书主编 宁津生

近岸/内陆水环境 定量遥感时空谱研究及应用

李 建 陈晓玲 田礼乔 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

近岸/内陆水环境定量遥感时空谱研究及应用/李建,陈晓玲,田礼乔编著. —武汉:武汉大学出版社,2018.1

地球空间信息学前沿丛书/宁津生主编

湖北省学术著作出版专项资金 “十三五”湖北省重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-307-19321-5

I. 近… II. ①李… ②陈… ③田… III. 水环境—环境遥感—研究—中国 IV. X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 330256 号

责任编辑:王金龙 谢文涛

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:8.5 字数:199千字 插页:2

版次:2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19321-5 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

李 建



男，讲师。2015年毕业于武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室，获理学博士学位。主要从事水环境定量遥感、多源时序遥感数据时空统计及应用、传感器辐射特性等研究。目前已在 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Optics Express, International Journal of Remote Sensing等遥感科学领域SCI期刊上发表论文10余篇。申请国家发明专利3项，软件著作权授权5项。

联系方式：027-68779233；

lijian@whu.edu.cn

前 言

近岸水体和内陆湖泊区域承载着全球超过 70 % 的人类活动。随着全球气候变化及人类活动的加剧,近岸和内陆湖泊水体面临着水质下降和富营养化等一系列水环境问题。卫星遥感作为一种长时间和大范围的水环境监测手段,在海洋环境监测中已经得到了成功应用。然而,由于近岸/内陆湖泊水体面积相对较小,光学特性较复杂,水环境变异时空尺度较高,对卫星传感器的时间、空间、辐射分辨率都有着较高的要求,致使近岸/内陆湖泊水环境卫星定量遥感研究很难取得突破性进展。传统的水色传感器虽然在光谱分辨率以及信噪比等方面具有极大的优势,但空间分辨率普遍不高,时间分辨率受到卫星重访周期以及天气因素的限制,因此传统的水色传感器在近岸/内陆湖泊水体水环境监测中的实际应用仍较为有限。同时在多源遥感数据水环境监测的背景下,传感器辐射特性的不一致性和时序的不稳定性导致水环境定量遥感监测仍面临较大挑战。本书针对近岸/内陆湖泊水环境定量遥感应用中的关键问题,包括高动态水环境监测对空间尺度-时间尺度-辐射特性的定量化需求开展研究,涵盖多源遥感数据源、数据/产品一致性、多源遥感数据定量应用等。

全书共分 7 章。第 1 章为绪论,介绍了水环境及水环境定量遥感的发展现状和关键问题,提出了本书的主要章节内容。第 2 章介绍了目前常用的水环境遥感观测平台和现场观测仪器、观测方法等。第 3 章重点阐述了水环境定量遥感的关键辐射指标,包括信噪比、辐射灵敏性、辐射不确定等问题。第 4 章针对水环境监测的时间尺度问题,利用高频次的现场观测和同步卫星观测手段进行了论述。第 5 章针对水环境监测的空间尺度问题,包括空间变异尺度、多源多尺度遥感数据空间尺度误差及校正进行了阐述。第 6 章介绍了利用多源遥感数据进行水环境定量遥感监测的关键辐射技术问题,包括辐射不一致性和辐射不稳定性校正等。第 7 章为本书的总结以及展望。

本科研项目获得国家自然科学基金(41701379, 41571344)、国家重点研发计划项目(2016YFC0200900)、高分辨率对地观测系统重大专项(41-Y20A31-9003-15/17)、测绘遥感信息工程国家重点实验室专项经费资助;国家重点研发计划青年项目(2016YFC0200900)、国家重点研发计划资助(2016YFB0502603);湖北省自然科学基金(2016CFB244)、中央高校基本科研业务费专项资金资助。在此一并表示感谢!

作 者

2017 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 中国近岸/内陆水环境问题	1
1.2 水环境遥感的发展	2
1.2.1 多源传感器辐射稳定性和一致性研究进展	2
1.2.2 近岸/内陆水环境遥感时空分辨率研究进展	4
1.3 近岸/内陆水环境定量遥感问题	6
第 2 章 水环境观测平台	8
2.1 多源遥感观测平台	8
2.1.1 Terra/Aqua MODIS 传感器	8
2.1.2 ENVISAT-1 MERIS 传感器	10
2.1.3 CMOS GOCI 传感器	12
2.1.4 Landsat TM/ETM+/OLI 传感器	15
2.1.5 HJ-1A/1B CCD 传感器	16
2.1.6 GF 系列卫星	18
2.2 现场观测	21
2.2.1 光谱观测	21
2.2.2 水体透明度	22
2.2.3 总悬浮物	23
2.2.4 叶绿素 a	23
2.2.5 总氮、总磷	23
2.2.6 CDOM 吸收系数	23
第 3 章 水环境定量遥感辐射特性	24
3.1 传感器辐射参数	24
3.1.1 常用传感器辐射特性	24
3.1.2 水环境定量监测辐射灵敏性分析	27
3.2 信噪比需求分析	28
3.2.1 基于 Hydrolight 的 I 类水体遥感反射率光谱模拟	29
3.2.2 Modtran 天顶辐射亮度模拟	29

3.2.3 光谱积分	30
3.2.4 信噪比计算	30
3.2.5 不同叶绿素浓度下的水体光谱模拟结果与分析	30
3.2.6 天顶辐射亮度曲线模拟结果	31
3.3 辐射不确定性影响	35
3.3.1 传感器辐射定标特性对水环境定量遥感影响研究	35
3.3.2 辐射不确定性对水环境定量遥感影响分析	35
3.3.3 辐射不稳定性对水环境定量遥感影响分析	36
3.4 本章小结	38
第4章 水环境定量遥感时间尺度	40
4.1 基于自动浮标系统的典型内陆水体——鄱阳湖水环境变异时间尺度研究	40
4.1.1 研究思路与设计	40
4.1.2 水环境高动态变化特性	42
4.1.3 水环境关键参数时间尺度分析	45
4.1.4 水环境关键参数时间尺度变化对定量遥感影响研究	47
4.2 基于高频次地球同步卫星 GOCI 数据的近岸水环境时间尺度研究	53
4.2.1 GOCI 数据处理与分析	53
4.2.2 近岸水环境要素观测误差与策略分析	55
4.3 本章小结	62
第5章 水环境定量遥感空间尺度	64
5.1 典型水环境参数空间尺度研究的理论基础	64
5.2 典型水环境参数空间尺度变化分析	66
5.2.1 研究区域与数据	66
5.2.2 空间尺度分析	68
5.3 典型水环境参数空间尺度差异对定量遥感影响的研究	72
5.3.1 尺度误差分析理论	73
5.3.2 近岸/内陆典型水环境空间尺度误差	74
5.4 近岸/内陆典型水环境空间尺度校正	79
5.5 本章小结	91
第6章 水环境定量遥感多源数据应用	93
6.1 交叉辐射定标原理	94
6.2 基于时序 MODIS 数据的国产卫星辐射定标	95
6.3 多源传感器辐射数据和产品一致性研究	106
6.4 本章小结	112

第7章 结语.....	113
7.1 总结	113
7.2 展望	115
参考文献.....	117

第1章 绪 论

1.1 中国近岸/内陆水环境问题

海岸带和内陆湖泊区域承载着全球超过 70 % 的人类活动。但是, 随着全球气候变化及人类活动的加剧, 海岸带水环境面临水质下降和富营养化等一系列问题, 内陆湖泊正经历剧烈变化, 面积萎缩、水质恶化、生态环境遭受严重破坏、湖泊功能和效益不断下降等一系列问题日益凸显。

卫星遥感具有大尺度、周期性、快速同步获取水体信息的优点, 其对大范围水质动态分布与变化的有效监测, 有助于弥补常规观测方法的不足。因此, 作为一种大面积水生态环境监测的快捷手段, 水色遥感在针对海洋及海岸带水体的研究时已经被广泛地利用。由于内陆湖泊面积相对较小, 水环境状况复杂, 对卫星遥感传感器的时间、空间、光谱、辐射分辨率都有着较高的要求, 致使内陆湖泊水环境卫星定量遥感研究很难取得突破性进展。但随着卫星遥感传感器技术的迅猛发展, 湖泊水色定量遥感研究逐步成为国内外湖泊研究的前沿与热点。

自 19 世纪 70 年代以来, 随着水色遥感传感器的技术发展, 海洋水色遥感逐渐受到国内外的广泛关注, 并在理论研究、科学应用、技术进步等环节得到了持续的链式发展, 并基本实现了大洋 I 类水体水色遥感的业务化应用。在水色卫星遥感传感器发展方面, 自 1978 年第一颗装载有海岸带水色扫描仪 (Coastal Zone Color Scanner, CZCS, 1978—1986) 的水色卫星由美国国家宇航局 (NASA) 发射并得到成功应用以来 (Gordon et al., 1983), 水色遥感在海洋环境监测等方面的应用越来越广泛, 海洋水色遥感进入快速发展阶段, 一大批先进的水色遥感传感器被搭载在了卫星平台上, 包括美国的 the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS, 1997—2010) (O'Reilly et al., 1998), the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Terra/Aqua MODIS, 1999—present) (Esaias et al., 1998), 欧空局的 the Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS, 2002—2012) (Antoine and Morel, 1999)。随着对地观测技术的不断发展和进步, 以及水色遥感科学和应用的提高与推动, 一批新增的国外先进的海洋水色遥感传感器也在陆续规划与发射之中, 主要有可见光红外成像辐射计 (Visible Infrared Imager Radiometer Suite, VIIRS) (Lee et al., 2006)、第二代海洋水色监视仪 (Ocean Colour Monitor, OCM-2) (Barre, Duesmann and Kerr, 2008)、地球静止海洋水色成像仪 (Geostationary Ocean Color Imager,

GOCI) (Ryu et al., 2012)、海洋和陆地颜色仪 (Ocean and Land Color Instrument, OLCI) (Aschbacher and Milagro-Pérez, 2012)。这些新型的水色遥感传感器有效延续了传统的水色遥感监测能力,并进一步提高了水色遥感传感器的辐射、空间和时间等分辨能力。我国的首颗海洋卫星 HY-1A 于 2002 年 5 月成功发射,标志着我国海洋遥感的新纪元。近几年,我国发射的 HY-1B 等,同时规划了海洋动力环境 (海洋二号, HY-2) 卫星、海洋雷达 (海洋三号, HY-3) 卫星三个系列发展我国的海洋卫星,进一步丰富了我国水色遥感的数据源。

然而相比于传统的海洋遥感,湖泊、河口面积相对较小,时空动态变化频次较高,传统的海洋水色遥感传感器虽然在光谱分辨率以及信噪比等方面具有极大的优势,但空间分辨率普遍不高,时间分辨率受到卫星重访周期以及天气因素的限制,故传统的水色遥感传感器在近岸/内陆水体水环境监测中的实际应用仍较为有限。因此,针对湖泊、河口水色/水质遥感,陆地卫星多光谱遥感传感器也得到了应用,如 Landsat TM/ETM+、SPOT HRV、CBERS CCD、EO-1 ASTER、HJ-1 CCD 等。这些卫星遥感传感器虽具有较高的空间分辨率 (20~30 m),但时间分辨率较低 (4~30 d),很难及时监测高动态水体的污染,对整个水质时空动态过程不能形成有效监测,实用性受到很大的限制 (马荣华,唐军武和段洪涛,2009)。因此,选择具有高时间分辨率和高空间分辨率的光学传感器,实现多源卫星遥感数据的优势互补,将有效提高湖泊、河口水质遥感监测的能力和水平。

1.2 水环境遥感的发展

1.2.1 多源传感器辐射稳定性和一致性研究进展

多源、长时序的遥感观测数据已经得到了不同领域越来越广泛的关注和应用。然而,定量遥感应用的关键前端问题之一是不同遥感传感器之间辐射特性差异,以及不同时刻观测遥感传感器辐射响应衰减引起的辐射信号不一致,从而引起下游产品的不一致甚至时间趋势错误的问题 (DeVisser and Messina, 2013; Chander et al., 2013; Wang et al., 2012)。尤其是水体区域作为一种暗目标信号,其有效辐射信号 (离水辐亮度) 仅占传感器总信号的 10% 左右 (大洋 I 类水体) (唐军武等, 2006), 因此水色遥感定量应用更需要精确的传感器辐射定标或辐射不一致性误差控制 (Zibordi et al., 2015)。目前针对陆地遥感应用的辐射一致性研究方法已经比较成熟,尤其是针对国外成熟应用的卫星遥感传感器,如 MODIS, AVHRR, Landsat 系列等 (DeVisser and Messina, 2013; Campbell et al., 2013; Angal et al., 2013; Markham and Helder, 2012; Latifovic, Pouliot and Dillabaugh, 2012; Chander and Groeneveld, 2009)。随着中国卫星技术的快速发展,近年来成功发射运行了多颗对地观测卫星,包括 CERBS, HJ-1A/B, ZY 和 GF 等系列卫星 (Xu, Gong and Wang, 2014), 大大提高了国产卫星在各个对地观测领域的应用 (Chen et al., 2013; Yu et al., 2012)。然而国产卫星普遍缺少星上定标装置,且发射前基于标准灯或积分球

的实验室定标一般精度较差，特别是在蓝波段，标准源的亮度很低。另外，星载遥感传感器存在不同程度的通道衰减。因此，遥感器发射后，如何能准确地对遥感传感器系统进行辐射定标一直是困扰我国遥感定量化应用的难题之一。目前已有的针对国产卫星辐射定标的研究，多针对单一传感器、单一时刻的辐射响应研究，相对于国外已经较为成熟且可业务化应用的辐射定标技术，国产卫星的辐射一致性研究仍处于起步阶段。

目前常用的卫星遥感传感器定标方法包括发射前的实验室定标 (preflight calibration) 和在轨辐射定标 (onboard calibration) 两大类方法 (Dingirard and Slater, 1999)，其中在轨辐射定标包括星上定标、场地替代辐射定标以及交叉定标三种方法 (Teillet et al., 1990)。发射前定标是一种在实验室理想状态下，对传感器的辐射响应基于积分球或标准灯进行标定，但其精度较差，尤其在蓝光波段，标准光源的不稳定性严重限制了其定标系数的准确性 (Hlaing et al., 2014)；并且在传感器发射及卫星在轨运行过程中辐射特性会随环境的变化和时间的推移而发生变化。因此，在轨辐射定标方法对于传感器辐射稳定性监测和定量遥感应用具有重要的意义。例如，基于高亮辐射场地替代辐射定标方法已成功地应用于 Landsat-4、5/TM (Thome, 2001)，EO-1 传感器 (Biggar, Thome and Wisniewski, 2003)，SeaWiFS (Barnes and Zalewski, 2003)，NOAA-9、10、11/AVHRR (Loeb, 1997; Koslowsky, 1997; Teillet et al., 1990)；交叉定标方法采用一个辐射精度较高的传感器作为参考传感器，在保证两个或多个传感器在同样的观测条件下观测同一目标地物时，使用定标结果精度高的卫星遥感传感器来标定待标定的传感器，以提高待标定传感器的辐射精度。例如，基于沙漠定标场使用高辐射精度的 MODIS 对 NOAA16 AVHRR 进行交叉定标 (Vermote and Saleous, 2006)，使用 Landsat 7 ETM+ 对多种其他传感器如 Landsat-5 TM (Thome et al., 2004)、EO-1 ALI (Chander, Meyer and Helder, 2004)、ResourceSat-1 AwiFS (Goward et al., 2012) 和 HJ-1 CCD (Bo et al., 2014) 等进行交叉定标。

虽然针对陆地目标的辐射定标技术已经非常成熟并得到了广泛的应用，但是水体区域作为一种暗目标信号，其有效辐射信号仅占传感器总信号的 10 % 左右，因此其对定标精度的要求更高 (IOCCG, 2013)。在针对水体目标的传感器交叉定标方法研究上，近几年国内外相关学者进行了一些尝试：如利用 SeaWiFS、MODIS 等高精度水色传感器对 Landsat-7 ETM+ 进行了交叉定标，并实现了利用 SeaWiFS、MODIS 大气参数辅助 ETM+ 的大气校正以获取水色参数反演结果 (Hu et al., 2001)；Nima Pahlevan 选取清洁水体区域，评估了 Landsat-7 ETM+ 和 Terra/MODIS 数据在水环境定量应用中的一致性 (Pahlevan and Schott, 2012)；Nima Pahlevan 等为提高新型传感器 OLI (Landsat-8) 在水体目标的辐射精度，采用高精度的 MODIS/Aqua 和 the VIIRS/SNPP 传感器，结合 the Ocean Color Aerosol RObotic NETwork (AERONETOC) 实测的气溶胶等辅助信息，将不同传感器之间的辐射差异控制在 2 % 以内 (Pahlevan, Lee, Wei et al., 2014)。我国针对水体目标进行的不同传感器间交叉定标研究起步较晚：针对第一颗海洋卫星 HY-1A 上的 COCTS 传感器在陆地场辐射校正的基础上，初步尝试了利用 SeaWiFS 对其进行交叉定标 (Pan, He, and Zhu, 2004; Jiang et al., 2005)；唐军武等利用高精度的 MODIS 数据对中巴地球资源卫星 02 星 (CBERS-02) CCD 相机进行了交叉辐射定标，取得了较好的效果 (唐军武 et al., 2006)。

而到目前为止 HJ-1 卫星 CCD 水环境应用的定标研究还很少出现,尤其是针对长时序多源数据的辐射一致性和稳定性的研究还较缺乏。

在水环境遥感数据长时序辐射一致性和稳定性研究方面,当前的研究重点多以 MODIS 时序数据作为参考基准,评估校正其他传感器的辐射数据质量。例如, Hlaing 等采用此策略评价了 VIIRS 数据在水色遥感中的应用能力 (Hlaing et al., 2013); Hu 等以 MODIS 数据为参考,定量分析了 VIIRS 数据在水色遥感观测的延续性和一致性 (Hu and Le, 2014); Barnes 采用长时序的 Landsat 和 MODIS 数据,在一致性分析的基础上,实现了 Florida Keys 的自 20 世纪 80 年代以来的水环境时空变化监测,为多源遥感数据长时序水环境应用提供了示范 (Barnes et al., 2014)。

在气候变化和人类活动影响的背景下,水环境的变化是一个长期的、动态的过程 (Olmanson, Bauer, and Brezonik, 2008),因此对水环境的遥感监测不可避免地需要多个遥感平台、多种遥感数据源协同实现。如何有效提高国产传感器系统的定标水平是影响国产遥感数据国际化推广和应用的关键问题之一,尤其是针对水色定量遥感领域,如何有效地评价国产遥感数据与国际一流遥感传感器之间的辐射一致性,对于推进我国定量遥感的基础研究具有重要的意义。

1.2.2 近岸/内陆水环境遥感时空分辨率研究进展

水环境遥感时空分辨率是伴随着水环境时空变异尺度产生的,其对应了水环境遥感监测的两个关键问题:①采用何种空间尺度/空间分辨率可以最优地表征水环境的空间变化信息;②最佳的时间分辨率(观测频次和观测时刻)如何确定。遥感的尺度问题是伴随着地表的空間异质性产生的,“美国地理遥感之父” Simonett 教授在 1970 年代末期,就指出“尺度问题是遥感科学的核心问题”(李小文和王祎婷, 2013)。根据地学现象的尺度本身出发选择最佳空间分辨率(optimal scale)的遥感数据,研究不同遥感影像空间分辨率之间的定量对应关系,是非常有现实意义的。目前已有的最优尺度选择方法主要包括基于局部方差的方法(Woodcock, Strahler and Jupp, 1988; Woodcock and Strahler, 1987)、基于变异函数(Variogram)的方法(Atkinson and Curran, 1997; Atkinson and Curran, 1995)。且目前的尺度效应研究领域多集中于陆表生态过程遥感监测,如土壤水分变化(Entin et al., 2000)、植被生长状况(Stellmes et al., 2010)、土地利用/土地变化(Ju, Gopal and Kolaczyk, 2005)、森林生态系统监测(Treitz and Howarth, 2000)等。而水环境定量遥感监测中的尺度效应目前还鲜有研究。水环境物理及生物化学过程发生的空间尺度从千米到毫米级不等(Bissett et al., 2004),而时间尺度则跨越小时到月、年甚至更长(图 1-1)。遥感监测必须能够有效地捕捉到典型水环境要素(如叶绿素,悬浮物浓度,黄色物质等)的时空变异信息,尤其是针对近岸及内陆湖泊区域,水体环境变化剧烈,亟须有效地平衡监测需求与传感器发展的技术、资金等限制(Aurin, Mannino and Franz, 2013; Olmanson, Brezonik and Bauer, 2011; Davis et al., 2007),其基础研究在于考虑水环境信息时空变化尺度的最优化的时间、空间分辨率以及空间覆盖范围。而前已有的水环境遥感监测研究多集中于水色参数的各类反演算法,而针对时空尺度的研究还较为鲜见。

Lee 等 (Lee, Hu et al., 2012) 研究了亚像元级变化对水色产品的影响, 认为由于空间分辨率的降低, 引起了对水环境遥感产品的低估。Doney 等 (Doney et al., 2003) 以 Seawifs 水色遥感产品为基础, 分析了大范围尺度的水环境要素空间格局与尺度; Saulquin 等 (Saulquin, Gohin and Garrello, 2011) 则以空间变异研究为基础, 开发了一种多空间分辨率水色遥感数据融合方法。

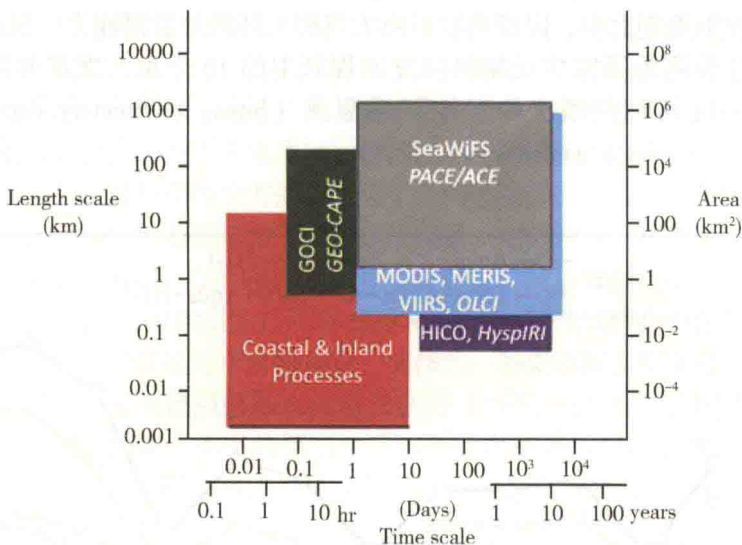


图 1-1 遥感时空分辨率与近岸/内陆水环境变化过程尺度差异 (Mouw et al.)

在遥感时间尺度研究方面, 国际水色协调组织 (International Ocean Colour Coordinating Group, IOCCG) 推荐针对典型的内陆湖泊和近岸高动态水体, 水色遥感卫星的时间尺度/重访周期至少需要每天一次 (IOCCG, 2000)。但是受到云、天气等因素的影响, 当前情况下, 单颗水色卫星一天的空间覆盖范围仅为整个大洋的 15 %, 重复观测 4 天仍仅能覆盖整个大洋的 40 % (IOCCG, 1999)。在鄱阳湖已有的研究也证明, 针对单颗 Terra/MODIS 或者 Aqua/MODIS, 其时间覆盖比率最低在 10 % (每月), 尤其是在雨季受天气影响非常严重 (图 1-2)。然而根据已有的研究, 近岸和内陆水环境存在典型的日内变异特征。Lee 等人使用地球同步卫星 GOCI 的高频次观测结果表明, 太湖的浮游植物和生物量存在典型的日内变化, 传统的极轨水色卫星如 MODIS 无法满足对其动态特征的捕捉 (Lee, Jiang et al., 2012), Lou 等人针对中国东海的监测分析也论证了类似的结论 (Lou and Hu, 2014)。同样, 对水体浑浊度 (turbidity) 和透光层深度 (light attenuation) 的分析结果也表明了显著的日内动态变化的特征, 传统的现场采样和水色遥感卫星监测这种高动态变化的能力十分有限 (He et al., 2013; Neukermans, Ruddick and Greenwood, 2012)。因此, 地球同步静止卫星的高频次观测的能力越来越受到水色遥感的关注, IOCCG 也将同步地球卫星的需求和发展计划列入了水色遥感报告的关键问题 (IOCCG, 2012, 2013)。随着全球第一颗地球同步水色卫星——韩国 Geostationary Ocean Color

Imager (GOCI, Korea, 2010—present) (Choi et al., 2012) 的成功发射和有效应用, 以及欧空局同步气象卫星 Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI, ESA, 2012—present) 在水环境监测中的研究 (Vanhellemont, Neukermans and Ruddick, 2014), 地球同步卫星的高频次观测的能力及水环境监测的需求, 促进了各国对区域性同步卫星的发展。美国的沿海和空气污染地球静止卫星探测项目 the Geostationary Coastal and Air Pollution Events (GEO-CAPE, NASA, in preparation) (Pahlevan, Lee, Hu et al., 2014) 已列入 NASA 发射规划之中, 以提高对沿海大气和水环境的监测能力。我国也已将高分辨率对地观测工程列为国家中长期科技发展规划中的 16 个重大发展专项之一, 已于 2015 年 12 月实现高时空频次的对地环境监测 (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-1>)。

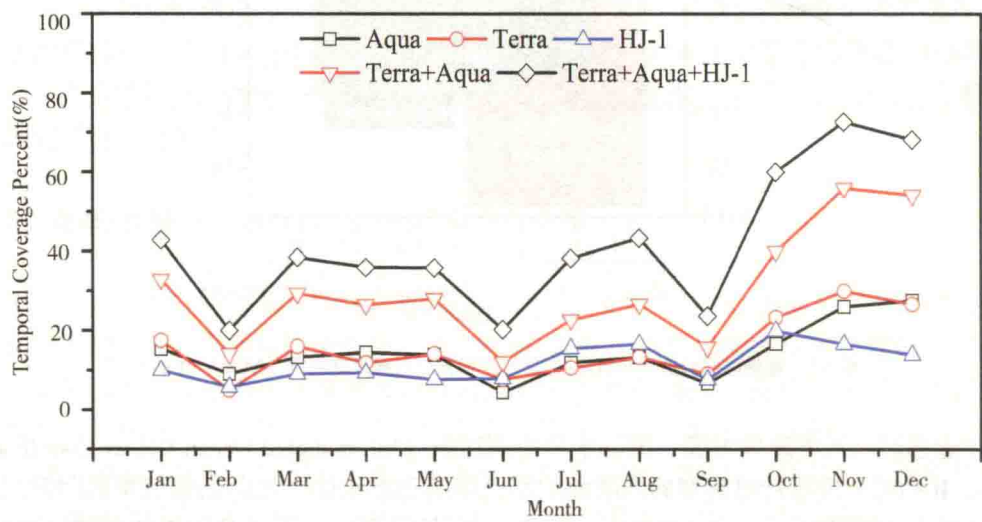


图 1-2 鄱阳湖卫星有效时间覆盖率统计

综上所述, 虽然时空尺度研究在水环境定量遥感领域得到了初步开展, 但仍缺乏系统性的水环境定量遥感最优化时空尺度分析研究, 以及不同空间尺度定量遥感数据和产品的转换为误差分析研究, 尤其是针对高动态的近岸/内陆水环境应用, 随着多源遥感传感器的快速发展, 亟须开展该领域的深入探索。

1.3 近岸/内陆水环境定量遥感问题

多源卫星遥感数据的爆发式增长, 为海岸带及河口、湖泊水环境监测提供了空前的应用潜力。多源传感器数据的综合互补弥补了单一传感器可能存在的时间分辨率、空间分辨率或光谱分辨率的不足。湖泊、河口水环境定量遥感监测由于受多重因素的综合影响, 表现出高度的时空异质特点, 同时, 由于水体光学特性复杂, 辐射信号传输过程受大气、陆

表信号影响严重,因此传统的水色遥感应用受到了极大的限制。根据 IOCCG 的最新报告,1000 m 的空间分辨率遥感数据可以满足全球尺度的海洋水色应用,但是考虑到区域性的海岸带及内陆湖泊的水环境定量监测,推荐采用空间分辨率优于 50 m 的遥感数据,同时推荐多源传感器的综合时间分辨率约为 0.2 d,以及典型水环境参数(如叶绿素 Chla、悬浮颗粒物 TSS、黄色物质 CDOM 等)的光敏感波段配置。然而,较高的时间、空间和光谱分辨率需求同时受到传感器硬件配置的限制,针对典型的内陆湖泊及近岸水环境三要素时空变异特点及定量监测的需求,如何有效地平衡传感器时空分辨率配置与近岸/内陆水色定量遥感的应用需求是新一代水色传感器发展的根本问题之一,也是本书的出发点之一。

同时,在多源遥感数据水环境监测的背景下,由于多个传感器、多时相、长时序水环境监测的应用需求,会引起由于传感器辐射特性的不一致性和不稳定性导致的水色遥感数据和产品的精度问题,其包括两个方面:①由于不同传感器辐射特性的差异,即使在观测同一目标地物时,不同传感器观测由于波谱响应函数、中心波长、观测几何、信噪比等内在因素引起的辐射信号差异;②即使对于同一个传感器,仪器辐射响应水平会随着在轨运行时间而衰减,因此,同一传感器在不同时刻的辐射不一致性同样会引起水环境定量产品应用的时序不一致性。尤其是对于水体目标,其作为一种低辐射强度信号,传感器辐射特性的差异或者不稳定会带来量级倍的水体像元信号(如归一化离水辐亮度、遥感反射率等)定量反演的误差。因此,本书的第三个目标是针对多源传感器数据以及长时序遥感观测数据,尤其是针对国产陆地观测卫星(多缺乏星上定标系统),分析其辐射特性的差异,定量获取传感器时序衰减参数,校正多源传感器长时序水环境定量遥感应用数据和产品的一致性。

第2章 水环境观测平台

水环境的变化和监测是动态、连续和持续的过程。然而,单一的监测手段(如实地考察,单一的遥感卫星观测等)受到时空分辨率、云雨天气等的影响,严重限制了其在水环境变化过程的高时空动态捕捉能力。因此,针对典型近岸/内陆水环境高动态变化特征,选择覆盖多种空间、时间和光谱分辨率的遥感数据,结合传统走航观测数据等,实现对水环境典型要素的协同监测,对于发展多源数据一体化的观测体系和思路具有借鉴意义。本章着重介绍水环境遥感监测常用的平台和手段,包括多源卫星遥感监测平台以及现场观测手段等。

2.1 多源遥感观测平台

卫星遥感具有大尺度、周期性快速、同步获取水体信息的优点,可以有效地监测水体组分含量的分布和动态变化,克服常规观测的不足,在水环境监测中的应用日益广泛。本节介绍的多源卫星遥感数据主要包括典型的水色卫星遥感传感器——美国的 Terra/Aqua MODIS 传感器、欧空局的 ENVISAT-1 MERIS 传感器和韩国的高时间分辨率的地球静止水色成像仪 GOCI 传感器。另外,也介绍了针对内陆水体具有高时间和高空间分辨率的国产 HJ-1 CCD、GF-1 WFI 数据和应用广泛的 Landsat 7 ETM+和 Landsat 8 OLI 数据。

2.1.1 Terra/Aqua MODIS 传感器

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer), 即中分辨率成像光谱仪,搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上,是美国对地观测系统(EOS)计划中用于观测全球生物和物理过程的重要传感器。它是继第一代水色传感器 CZCS (Coastal Zone Colour Scanner) 后出现的高性能第二代水色传感器, Terra 和 Aqua 卫星分别于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日发射升空,向地面发送数据。MODIS 与 CZCS 相比,其主要特点为:①低噪声,信噪比大幅度提高;②合理的大气校正波段设置,配备了更加合理的波段进行大气校正;③合理的色素波段分离设置,波段配置方便建立更加有效的色素反演算法。

MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,有 36 个离散光谱波段,光谱范围宽从 $0.4\ \mu\text{m}$ (可见光)到 $14.4\ \mu\text{m}$ (热红外)全光谱覆盖,数据地面分辨率为 250 m (1~2 波段), 500 m (3~7 波段), 1000 m (8~36 波段), 扫描幅宽 2330 km (表

2-1)。NASA 对 MODIS 数据实行全球免费接收政策，且 Terra 卫星和 Aqua 卫星相互配合，MODIS 传感器具有较高的时间分辨率，每天可至少获得覆盖研究区的影像 2 景，加上其适中的空间分辨率和较高的光谱分辨率，在湖泊水质监测中具有较大的优势，得到了广泛的应用。

表 2-1 MODIS 传感器波段设置和主要用途

波段号	空间分辨率 (m)	波段宽度 (μm)	频谱强度	主要应用	信噪比
1	250	0.620~0.670	21.8	植被叶绿素吸收	128
2	250	0.841~0.876	24.7	云和植被覆盖变换	201
3	500	0.459~0.479	35.3	土壤植被差异	243
4	500	0.545~0.565	29.0	绿色植被	228
5	500	1.230~1.250	5.4	叶面/树冠差异	74
6	500	1.628~1.652	7.3	雪/云差异	275
7	500	2.105~2.155	1.0	陆地和云的性质	110
8	1000	0.405~0.420	44.9	叶绿素	880
9	1000	0.438~0.448	41.9	叶绿素	838
10	1000	0.483~0.493	32.1	叶绿素	802
11	1000	0.526~0.536	27.9	叶绿素	754
12	1000	0.546~0.556	21.0	悬浮物	750
13	1000	0.662~0.672	9.5	悬浮物，大气层	910
14	1000	0.673~0.683	8.7	叶绿素荧光	1087
15	1000	0.743~0.753	10.2	气溶胶性质	586
16	1000	0.862~0.877	6.2	气溶胶/大气层性质	516
17	1000	0.890~0.920	10.0	云/大气层性质	167
18	1000	0.931~0.941	3.6	云/大气层性质	57
19	1000	0.915~0.965	15.0	云/大气层性质	250
20	1000	3.660~3.840	0.45	洋面温度	0.05
21	1000	3.929~3.989	2.38	森林火灾/火山	2.00
22	1000	3.929~3.989	0.67	云/地表温度	0.07
23	1000	4.020~4.080	0.79	云/地表温度	0.07
24	1000	4.433~4.498	0.17	对流层温度/云片	0.25
25	1000	4.482~4.549	0.59	对流层温度/云片	0.25
26	1000	1.360~1.390	6.00	红外云探测	150