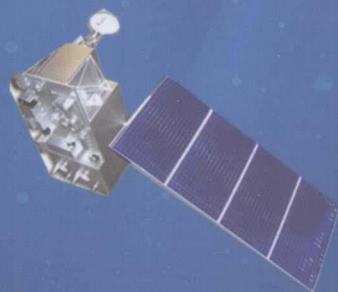


卫星遥感太湖蓝藻水华监测 评估及系统建设

韩秀珍 郑伟 刘诚 著



气象出版社

China Meteorological Press

国家自然科学基金项目“基于风云三号卫星的太湖蓝藻监测
模型的研究”资助

卫星遥感太湖蓝藻水华监测 评估及系统建设

韩秀珍 郑伟 刘诚 著

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 提 要

本书是作者所完成的中国气象局项目“蓝藻水体监测系统建设”和国家自然科学基金项目“基于风云三号卫星的太湖蓝藻监测模型的研究”等成果的提炼和总结。本书围绕太湖蓝藻水华监测、评估、预警模型及业务软件系统的建设,系统地介绍了以太湖为主的内陆湖泊水体环境遥感的基本原理和方法,以大量的野外观测实验数据为依据,建立了蓝藻水华监测和评估模型,建立了蓝藻水华监测评估软件系统,开展了监测业务和服务工作,为各级政府及相关部门的决策提供了科学依据。本书可供从事水环境遥感的相关领域专家、学者、大专院校师生,以及环境保护、水利、城市规划等部门从事遥感和 GIS 的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星遥感太湖蓝藻水华监测评估及系统建设/韩秀珍等著.

北京:气象出版社,2010.12

ISBN 978-7-5029-5126-9

I. ①卫… II. ①韩… III. ①卫星遥感-应用-太湖-
蓝藻纲-藻类水华-监测 IV. ①Q949.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 241598 号

卫星遥感太湖蓝藻水华监测评估及系统建设

韩秀珍 郑伟 刘诚 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

总 编 室:010-68407112

发 行 部:010-68409198

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:王桂梅

终 审:汪勤模

封面设计:王 伟

责任技编:吴庭芳

责任校对:石 仁

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:12.25

字 数:314 千字

版 次:2011 年 1 月第 1 版

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价:88.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

序

改革开放以来,我国的国民经济得到了长足的发展,但是环境污染问题日趋严重。水污染是其中之一,已形成点源(如工业废水、城镇生活污水等)与面源(如农村生活污水、农业地表径流等)污染共存、生活污水与工业污水叠加,新旧污染相互复合的态势。据有关部门估计,2003年我国七大水系中,劣五类水体占三成左右。这些水体已经失去了使用功能,成为有害的脏水。内陆湖泊富营养化导致的水体蓝藻水华暴发也已经成为我国面临的一个重要环境问题。2007年6月份,无锡市贡湖水源地曾一度受到太湖蓝藻严重污染,水质变腥、变臭,丧失饮用水功能,100多万市民饮用水受到影响。

水资源的安全问题关系到13亿人民的身体健康。党中央、全国人大、国务院历来十分重视水资源的保护工作。胡锦涛总书记、吴邦国委员长、温家宝总理在他们的批示和讲话中都强调,要让人民群众喝上干净的水,呼吸新鲜的空气,有更好的工作和生活环境。温家宝总理还亲临太湖现场视察,对今后的防范治理做出了部署,体现了我国政府对湖泊水质问题的高度重视。

为了尽快改变我国水资源安全的严峻局面,必须对污染物进行定量的监测和分析。只有深入地了解污染物质的源和汇,以及它们的传播过程,才能找到控制污染的办法。卫星遥感具有观测范围广,时间同步好,定量处理精度高等特点,是获取大面积地表信息的有效手段。尤其对于如太湖这样的超大型湖泊,利用常规手段很难获取大范围蓝藻水华的监测信息,卫星遥感可以发挥其独特的作用。因此,积极开展太湖水体蓝藻监测研究,对于我国水污染的防治具有重要的示范意义。

过去,世界上很多国家包括美国、荷兰、澳大利亚等国家的科学家就对水体环境的遥感监测进行了大量研究,建立了包括回归模型、水体生物-光学模型等方法反演水质参数。在我国,也有遥感部门开展利用高分辨率陆地资源卫星监测太湖蓝藻的研究工作。但由于高空间分辨率卫星的观测频次较低,对于蓝藻水华这种时空分布变化十分剧烈的现象,难以进行日常业务监测。

风云三号气象卫星的发射为水体蓝藻遥感监测提供了丰富的数据来源,风云三号气象卫星数据不仅空间分辨率高,达到250 m,而且可每天可以对同一地点观测两次。利用风云三号气象卫星数据,结合其他高分辨率卫星遥感,为水体环境遥感监测业务化奠定基础。

2008年,中国气象局设立了卫星遥感蓝藻水华监测预警系统建设项目,国家卫星气象中心联合江苏省气象局、安徽省气象局、云南省气象局和浙江省气象局等多家单位,开展了一系列方法研究和科学实验,研发了具有多种功能的卫星遥感蓝藻监测评估系统。项目针对特定的传感器开展了内陆水体蓝藻信息提取算法研究,建立了湖泊水质预警系统,实现了大面积湖泊水质的快速监测。建立了完善的内陆湖泊蓝藻暴发监测评估预警机制,及时获取了蓝藻产生、分布、暴发强度等信息。这不仅为决策部门针对蓝藻暴发建立应急处理措施提供可信的数

据支持,也为研究蓝藻暴发的生物学机制、评价蓝藻及其毒素的生态与环境风险和治理水体环境污染提供科学依据。该系统迅速在太湖蓝藻监测工作中发挥了重要作用,为气象系统蓝藻监测预测服务提供了大量重要信息。

本书是卫星遥感蓝藻水华监测预警系统建设项目的工作成果总结。本书在蓝藻监测评估系统建设中积累的技术经验和取得大量监测数据的基础上,从卫星遥感蓝藻监测评估原理、技术方法、野外实验和精度验证等多个方面,全面、系统地介绍了基于气象卫星数据的、以太湖为主的内陆湖泊水体环境遥感的基本原理和方法,以大量的野外观测试验数据为依据,建立了蓝藻水华监测、评估模型,以及基于研究成果研发的蓝藻水华监测评估软件系统,并开展了监测业务和服务工作。

本书内容有助于人们了解湖泊蓝藻水华的卫星遥感原理,同时带动蓝藻遥感监测技术推广以及蓝藻评估和预警关键技术的研发,研究成果进行业务转化后,可实现对湖泊蓝藻遥感监测、评估和预警,能够每日及时提供更多大尺度的湖泊蓝藻和水质信息,可用于气象和环境等部门对湖泊蓝藻的业务化监测和有关地方蓝藻防治部门的业务管理,增强对湖泊蓝藻监测的能力;将增大遥感监测信息的用户范围,为气象、渔业、水产、统计及环境保护部门的宏观决策提供数据和方法支持;研究成果的推广应用,将促进生态环境功能的提升与重点湖泊防灾减灾能力的增强,可及时为各部门和大众了解蓝藻及水质情况、有关部门制定防灾减灾措施提供帮助,能够最大限度地减少经济损失。

本书有多方面的内容可能会引起读者的关注:首先,本书介绍了以气象卫星资料为主的蓝藻水华监测技术和实用化处理方法,由于高观测频次的气象卫星适用于对蓝藻水华这一时空大幅度动态变化现象的跟踪监测,这些技术方法将为信息源丰富的气象卫星及环境卫星在蓝藻监测业务中提供技术支撑;其次,本书提出了基于亚像元分解技术的蓝藻水华覆盖度分级估算方法,该方法可根据理论估算的蓝藻水华实际覆盖面积,对蓝藻水华程度进行分级。通过在太湖进行的数次星地同步野外实验,验证了该方法的可行性,从而提高了利用气象卫星资料对大范围蓝藻水华监测的精度;第三,本书介绍了利用系统研发的蓝藻水华统计功能,对2003年以来卫星遥感太湖蓝藻水华时间序列信息进行的统计分析,包括各年的频次、累计面积、分级强度、最大单次面积等距平和差异统计信息。这些信息可为评估某一时段的蓝藻水华时空分布特点和蓝藻暴发现象提供重要依据,也可为蓝藻暴发预测研究提供有价值的参考信息。

近年来,巢湖、滇池等湖泊也时常出现蓝藻暴发事件。对湖泊蓝藻的治理将是一项长期而艰巨的任务。本书将为遥感部门在对我国各大湖泊蓝藻的日常监测、预测和评估应用中提供参考。

舒地凡

2010年9月

前 言

太湖是我国第三大淡水湖泊,湖面面积达 2000 多 km^2 ,整个流域面积涉及上海市、江苏省和浙江省等省(市),是我国人口最集中,也是经济最发达的地区之一。

近年来,由于太湖环湖地区工业发展,造成了严重的生态破坏和环境退化,太湖的水质遭到破坏,出现了富营养化现象,几乎每年夏天都有蓝藻水华暴发,造成了水质性资源短缺及太湖生态环境的严重破坏,严重影响了区域社会经济发展。特别是 2007 年 6 月份,无锡市贡湖水源地曾一度受到太湖蓝藻严重污染,水质变腥、变臭,丧失饮用水功能,100 多万市民饮用水受到影响。

蓝藻水华是蓝藻暴发的主要表现形式,也是蓝藻影响造成多种危害的主要方式。由于蓝藻水华具有大幅度时空变化的特点,利用常规观测手段难以满足对太湖等超大湖泊的日常蓝藻监测需求。

卫星遥感具有时间分辨率高、空间覆盖范围广的特点,是获取大面积地表信息的有效手段。过去,国内已有遥感部门开展利用高分辨率陆地资源卫星监测太湖蓝藻的研究工作,并取得重要成果。研究表明,利用近红外、可见光等光谱通道可获取蓝藻水华信息。但由于高分辨率卫星观测频次低,对于蓝藻水华这种时空分布日变化剧烈的现象,难以用于日常业务监测。近年来,多时空分辨率的对地观测卫星陆续发射为水体蓝藻遥感监测提供了充分的数据来源,针对湖泊水体蓝藻遥感监测对遥感数据的要求,建立基于卫星遥感等多源数据的蓝藻监测、评估和预警模型,已成为蓝藻监测的迫切需要。

中国气象局国家卫星气象中心等单位,从本世纪初开始利用气象卫星遥感监测太湖蓝藻。2008 年,中国气象局设立了卫星遥感蓝藻水华监测评估系统建设项目,国家卫星气象中心联合江苏省气象局、安徽省气象局、云南省气象局和浙江省气象局等多家单位,在以往各单位应用卫星遥感监测蓝藻的基础上,开展了卫星遥感蓝藻监测的深入研究。根据气象系统在蓝藻监测预测服务中的需求,研究以气象卫星资料为主的蓝藻监测及评估方法,提出适用于不同种类蓝藻水华的多种蓝藻监测方法模型,并多次在太湖、巢湖和滇池等湖泊进行卫星同步实地观测实验,获得大量卫星同步的实地蓝藻水华及水面光谱测量数据,为验证监测模型方法精度提供了重要依据。同时,根据气象卫星的特点及日常蓝藻监测服务的需要,开展了亚像元蓝藻水华面积估算和基于时间序列信息的蓝藻现象时空变化统计分析等方法研究,提出像元级蓝藻水华覆盖度分级估算方法、蓝藻水华频次分布、累计面积等统计分析方法,在提高蓝藻监测精度、利用卫星遥感评估蓝藻水华现状等方面起到有效作用。

在卫星遥感蓝藻水华监测评估方法研究基础上,项目研发了具有多种功能的卫星遥感蓝藻监测评估系统,可处理 EOS/MODIS, FY—3A/MERSI 等卫星资料,生成近实时蓝藻水华监测产品,并迅速在太湖蓝藻监测工作中发挥了重要作用,为气象系统蓝藻监测预测服务提供了大量重要信息。

本书从卫星遥感太湖蓝藻水华监测、评估、预警模型及业务软件系统建设等多个方面,系统地介绍了以太湖为主的内陆湖泊水体环境遥感的基本原理和方法、有关的星地同步光谱测量实验、以大量的野外观测实验数据为依据建立的蓝藻水华监测和评估模型,并建立了蓝藻水华监测评估软件系统,以及系统的业务应用和服务情况。

全书共分七部分。第1部分主要介绍了太湖水体环境背景、蓝藻水华研究的目的和意义、国内外研究现状及存在问题等。第2部分阐述了太湖水体环境遥感监测、评估和预警的方法模型,对目前蓝藻水华监测中主要采用的NDVI、RVI、CI和叶绿素a等水质反演模型进行了详细的介绍。第3部分系统地论述了卫星遥感数据的云检测及大气校正等预处理方法。第4部分详细介绍了野外实验数据采集、处理和分析方法,主要从水面光谱及水质数据采集与分析基础、野外水面光谱实验、太湖水体水质参数的时空变化规律分析等几个方面介绍了太湖水面光谱及水质数据采集与分析工作。第5部分基于MODIS和FY-3A/MERSI数据对各种监测方法提取蓝藻信息的结果进行了对比分析,提出了适用于太湖蓝藻监测的综合遥感模型方法;介绍综合利用野外采集的水质数据开展了太湖叶绿素a、悬浮物浓度和蓝藻密度遥感监测模型的初步研究,并对模型进行了验证;对太湖蓝藻水华时空分布特点进行分析,包括蓝藻水华与近年平均值差异统计分析,水华年、季、月变化分析等。第6部分阐述了太湖水华监测评估业务软件及系统集成,首先在进行太湖水华监测评估业务软件需求分析的基础上,对太湖水华监测评估业务软件总体结构和功能进行了全面设计,分别对数据管理、遥感图像处理、遥感产品交互分析、专题数据产品制作等模块进行了设计与开发,最后给出了太湖水环境遥感监测实验软件应用实例。第7部分介绍了系统的应用简况,产品内容和形式,日常业务处理流程,以及日常监测个例和基于时间序列数据的太湖蓝藻水华月、季、年空间分布特点分析。

希望本书的出版能够给我国水环境遥感工作带来一些可以借鉴的实用方法,给从事相关工作的同行和学者提供一些有益的参考。由于水环境遥感技术还处于探索发展阶段,加之本实验的时间紧、投入相对较少和人员水平所限,本书难免会存在许多不足,恳请读者批评指正。

本书的出版首先要感谢中国气象局蓝藻项目和国家自然科学基金项目(40801176/D010702)的资助,也要感谢项目合作单位江苏省气象局、安徽省气象局、云南省气象局、浙江气象局、无锡市气象局、苏州市气象局、湖州市气象局和无锡市水环境监测中心等单位的大力支持,还要感谢全体项目参加人员的共同努力,感谢国家气象中心副主任朱小祥(原中国气象局蓝藻项目负责人),在项目建设和实施中做了大量的组织管理工作,并在本书编写的过程中给予了建设性的意见和指导。感谢濮梅娟、曾明剑、荀尚培、谢国清、武胜利、蔡菊珍、赵长海、王萌等为项目实施所付出的辛勤劳动。感谢李三妹、李亚君、龙辉在系统建设中的参与。感谢戎志国、钱鹰、朱玮、朱莲芳、朱红、祁杰、沈建、黄伶俐、张玉香、孙凌、张勇、李元等同志在太湖野外实验中给予的大力支持和充分保障。特别感谢国家卫星气象中心许健民院士、刘扬副主任和刘玉洁研究员在项目实施过程中给予的精心指导和支持。

韩秀珍

2010年9月

目 录

序

前言

0 绪 论	(1)
0.1 蓝藻水华研究的目的和意义	(1)
0.2 国内外研究进展及存在的主要问题	(2)
0.2.1 国外研究进展	(2)
0.2.2 国内研究现状	(3)
0.2.3 存在的主要问题	(4)
0.3 蓝藻监测主要遥感仪器	(5)
0.3.1 海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS)	(6)
0.3.2 中分辨率成像光谱仪(MODIS)	(6)
0.3.3 中等分辨率成像频谱仪(MERIS)	(7)
0.3.4 水色水温扫描仪(COCTS)	(8)
0.3.5 甚高分辨率扫描辐射计(AVHRR)	(9)
0.3.6 中分辨率光谱成像仪(MERSI)	(9)
0.3.7 陆地卫星(Landsat TM/ETM+)	(10)
0.3.8 中巴地球资源卫星(CBERS)	(11)
0.3.9 环境减灾卫星(HJ)	(11)
0.4 主要技术路线	(12)
1 卫星遥感蓝藻水华监测原理与模型方法研究	(14)
1.1 基本原理	(14)
1.2 监测算法模型	(15)
1.2.1 研究方法	(15)
1.2.2 归一化植被指数(NDVI)监测模型	(16)
1.2.3 比值植被指数(RVI)监测模型	(16)
1.2.4 蓝藻指数(CI)监测模型	(17)
1.2.5 水质遥感反演模型	(19)
1.3 评估方法初步研究	(19)
1.3.1 蓝藻水华评估研究需求	(19)
1.3.2 建立蓝藻水华评估方法	(20)
1.3.3 建立蓝藻水华评估处理方法	(21)
1.3.4 蓝藻覆盖度分级方法验证	(22)

1.4	预警方法初步研究	(25)
1.4.1	太湖蓝藻水华预警研究	(25)
1.4.2	初步建立蓝藻水华预警处理方法	(26)
2	卫星遥感数据处理	(28)
2.1	云检测	(28)
2.2	大气校正	(28)
2.2.1	基本原理	(28)
2.2.2	大气校正方法	(30)
2.2.3	大气校正结果分析	(30)
3	野外实验数据采集、处理和分析	(34)
3.1	野外实验日的	(34)
3.2	野外实验内容	(34)
3.3	野外实验仪器	(34)
3.4	野外实验实况	(35)
3.5	水面光谱测量、处理和结果分析	(39)
3.5.1	测量仪器	(39)
3.5.2	测量方法	(39)
3.5.3	遥感反射率计算方法	(39)
3.5.4	遥感反射率计算结果分析	(39)
3.5.5	卫星通道遥感反射率转换	(42)
3.6	气溶胶光学特性测量和处理	(43)
3.6.1	大气气溶胶光学厚度测量原理	(43)
3.6.2	测量仪器和方法	(44)
3.6.3	数据处理	(44)
3.6.4	太湖附近能见度数据收集	(45)
3.7	水质数据采样及化验分析	(45)
3.7.1	监测要素	(45)
3.7.2	监测方法	(45)
3.7.3	质量控制	(46)
3.7.4	结果分析	(47)
3.8	太湖水质时空变化规律分析	(48)
4	蓝藻水华研究结果分析	(51)
4.1	蓝藻水华监测结果分析	(51)
4.1.1	基于 NDVI 的蓝藻水华覆盖度分级监测	(51)
4.1.2	基于 RVI 的蓝藻水华覆盖度分级监测	(52)
4.1.3	基于 CI 的蓝藻水华覆盖度分级监测	(53)
4.1.4	综合 NDVI 和 CI 的蓝藻水华覆盖度分级监测	(53)
4.2	监测结果对比分析	(55)
4.2.1	EOS/MODIS, FY-3A/MERSI NDVI 对比分析	(57)

4.2.2	综合 CI 和 NDVI 指数提取结果分析	(58)
4.3	水质遥感模型及其验证	(59)
4.3.1	水质参数与遥感指数相关分析	(60)
4.3.2	叶绿素 a 遥感反演模型及其验证	(60)
4.3.3	悬浮物浓度遥感反演模型及其验证	(62)
4.3.4	蓝藻密度遥感反演模型及其验证	(65)
4.4	蓝藻水华评估研究结果	(67)
4.4.1	2008 年全年太湖蓝藻水华时空分布特点评估	(67)
4.4.2	2008 年太湖蓝藻水华与近年同期平均值差异统计分析	(69)
4.4.3	2008 年太湖蓝藻水华月际变化分析	(69)
4.4.4	2008 年太湖蓝藻水华现象分月评估	(71)
4.4.5	2008 年与 2007 年逐月太湖分区蓝藻水华现象差异统计	(99)
4.4.6	2003—2008 年逐年太湖分区蓝藻水华空间分布评估	(109)
4.4.7	2003—2008 年太湖分区蓝藻水华现象差异特点评估	(121)
4.4.8	2003—2008 年多年累计太湖蓝藻水华空间分布特点分样	(129)
4.5	蓝藻水华预警初步研究结果	(130)
4.5.1	太湖蓝藻暴发气象条件分析	(130)
4.5.2	数值模拟	(132)
5	蓝藻水华监测评估系统	(140)
5.1	软件结构功能	(140)
5.2	主要功能介绍	(141)
5.2.1	数据读取	(142)
5.2.2	图像处理功能	(142)
5.2.3	交互式分析	(143)
5.2.4	专题图制作	(144)
5.2.5	相关统计	(144)
5.2.6	参数设置	(144)
5.3	输入/输出数据说明	(145)
5.3.1	输入数据	(145)
5.3.2	输出数据	(146)
5.4	主要界面	(146)
5.5	软件试运行	(150)
5.5.1	硬件环境	(150)
5.5.2	软件环境	(150)
5.6	数据库的初步建设	(150)
5.6.1	数据库设计方案	(151)
5.6.2	数据库详细设计	(153)
6	业务应用与服务情况	(157)
6.1	应用服务简况	(157)

6.2	业务运行流程	(159)
6.3	业务产品内容和形式	(159)
6.3.1	产品内容	(159)
6.3.2	产品形式	(159)
6.4	应用个例	(163)
6.4.1	监测个例	(163)
6.4.2	评估个例	(168)
6.5	展望与建议	(180)
参考文献		(182)

0 绪 论

0.1 蓝藻水华研究的目的和意义

内陆湖泊富营养化导致的蓝藻暴发,已经成为我国面临的一个重要的环境问题。近年来,我国太湖等内陆湖泊的蓝藻暴发给周边地区带来了巨大的影响,尤其是2007年6月,江苏省无锡市贡湖水源地曾一度受到太湖蓝藻严重污染,水质变腥、变臭,丧失饮用水功能,100多万市民饮水受到影响。

国务院2006年制定的国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)中重点领域和优先主题里提到:“要重点开展流域水环境和区域大气环境污染的综合治理、典型生态功能退化区综合整治的技术集成与示范,开发饮用水安全保障技术以及生态和环境监测与预警技术,大幅度提高改善环境质量的科技支撑能力。”

蓝藻的暴发过程不仅与富营养化条件下蓝藻的生物学特性有关,也受到温度、风力、风向和水流等多种因素的影响,具有暴发面积大、时空变化剧烈的特点。对于这些特点,传统的逐点监测方式无法满足时效性与空间覆盖范围两方面的需求。卫星遥感具备了监测范围广、时间分辨率高的特点,是获取大面积地表信息的有效手段。而多时空分辨率的对地观测卫星陆续发射,为蓝藻遥感监测提供了充分的数据来源,根据湖泊蓝藻遥感监测对遥感数据的时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率的要求,建立基于卫星遥感等多源数据的蓝藻监测、评估和预警模型,已成为蓝藻监测的迫切需要。

本书从蓝藻发生的生物学机制出发,以水体生物光学模型为理论基础,研究蓝藻在EOS/MODIS和FY—3A/MERSI等卫星遥感数据的光谱响应机制;开展蓝藻生长期水体光学特征模拟与蓝藻特征波段选择;结合地面观测数据,建立基于多源数据的蓝藻遥感监测模型。在地理信息系统(GIS)等空间信息技术支持下,开展蓝藻影响评估方法研究,建立蓝藻暴发的空间分布和分级的评估模型,并建立了蓝藻水华监测评估软件系统,并阐述了其在业务运行中的作用。

本书的研究内容有助于人们了解湖泊蓝藻的遥感机理,理解气象因子等环境要素对蓝藻生消的影响,同时带动蓝藻遥感监测技术的发展以及蓝藻评估和预警关键技术的开发,为研究蓝藻暴发的生物学机制、评价蓝藻及其毒素的生态与环境风险及治理水体环境污染提供科学依据。本研究成果进行业务转化后,可用于气象和环境等部门业务化监测及有关地方各级管理部门的业务管理,增强湖泊蓝藻监测的能力;该方法可实现对湖泊蓝藻遥感监测、评估和预警,能够每日大尺度地及时提供更多的湖泊蓝藻和水质信息,将增大遥感监测信息的用户范围,为气象、环境、渔业、水产、统计及环境保护部门的宏观决策提供数据和方法支持;研究成果的推广应用,将促进生态环境功能的提升与重点湖泊防灾、减灾能力的增强,可及时为各部门和大众了解蓝藻及水质情况、有关部门制定防灾减灾措施提供帮助,能够最大限度地减少经济损失。

0.2 国内外研究进展及存在的主要问题

0.2.1 国外研究进展

美欧等西方国家在工业发展时期都面临蓝藻暴发和治理问题(卫之奇,2008)。1947年,美国佛罗里达州阿勃卡(Apopka)湖首次发生蓝藻水华。20世纪70年代,日本第二大湖(霞浦湖)的水质污染达到最高峰,蓝藻暴发;1950年,位于瑞士、德国和奥地利交界处的康士坦茨湖生态环境开始恶化,至1970年,康士坦茨湖生态环境极度恶化。

现在,蓝藻暴发问题在美欧等发达国家依然存在,甚至连非洲的一些国家也出现蓝藻暴发。如美国西海岸加利福尼亚州和华盛顿州等出现不同程度的水体污染及蓝藻暴发问题(卫之奇,2008),2005年9月美国环境保护局牵头,联合美国国家海洋大气局、食品及药物管理局、美国地质调查局、国立卫生研究院、美国疾病预防控制中心以及美国农业部等机构,在北卡研究三角园召开有害蓝藻暴发国际研讨会,讨论通过国家蓝藻研究计划大纲。2006年,加拿大魁北克全省有70处水源遭到蓝藻的侵袭,引发了周围居民的诸如呕吐、发烧、头疼等疾病,而且影响了正常的航运、渔业和旅游业。近几年,比利时在浅水湖泊和池塘内发现蓝藻暴发现象,南部瓦隆地区饮水池有富营养化趋势,为此,比利时联邦政府实施了蓝藻暴发防治研究计划B-BL(OOMS(王景文,2007)。2007年,世界第二大、非洲第一大淡水湖——维多利亚湖暴发大面积蓝藻(赵卓昀,2007)。

为了做好蓝藻的监测和预警工作,世界上很多国家(如美国、荷兰、澳大利亚等)的科学家就水体环境的遥感监测进行了大量的研究,建立了包括回归模型、水体生物-光学模型等方法反演水质参数,为水体蓝藻遥感监测奠定了基础。而多时空分辨率的对地观测卫星陆续发射,为水体蓝藻遥感监测提供了充分的数据,因而针对特定的传感器开展内陆水体蓝藻信息提取算法研究、建立湖泊水质预警系统,从而实现对水体蓝藻的遥感监测,不仅具备良好的数据来源与研究基础,而且符合大面积快速实施湖泊水质监测的现实需求。

2007年,美国宇航局(NASA)和美国国家海洋大气局(NOAA)合作,利用飞机装载高光谱成像仪监测五大湖(苏必利尔湖、休伦湖、密歇根湖、伊利湖和安大略湖)的蓝藻生长,以获得更加清晰的蓝藻水华照片(新京报,2007)。2000年,葛兰研究中心开始介入大湖区研究。通过NASA的Terra卫星和Aqua卫星的图像,研究者对湖面漂浮物的种类进行分析,并推测其毒素含量,结果与水样品里测出的毒素含量一致。之后,NOAA更进一步地信任了卫星技术在水藻监测方面的运用,他们开始使用装备了更加精确的图像系统的Landsat卫星来监测蓝藻水华。芬兰赫尔辛基技术大学空间技术实验室利用Terra/MODIS和ENVISAT/MERIS数据监测芬兰湾的蓝藻水华,并对二者的性能进行了比较。他们认为,Terra/MODIS波段设置主要针对一类大洋水体,缺乏预警藻蓝素的有效波段,MERIS传感器设置了620 nm~665 nm波段,基本对应藻蓝素的吸收峰(630 nm)和反射峰(650 nm),具有蓝藻水华探测的潜力,但在蓝藻水华未成型之前,海岸带水体不同优势藻类具有相似的叶绿素特征,较难辨别蓝藻水华。总的来说,仅靠MODIS和MERIS数据实现蓝藻水华的初期预警比较困难,但它可以有效监测已成型的蓝藻水华。这一方法可以用于中国内陆湖泊或者海岸带水体蓝藻水华探测和监测研究。

在内陆水体,特别是大型的浅水湖泊中,由于含有较高浓度的 DOC 和悬浮物质,对单一色素进行遥感提取具有一定的难度。20 世纪 90 年代初,Gitelson 等(1992)采用高光谱方法研究了内陆水体中叶绿素 a 的生物光学模式,利用红光和近红外之间的比值与叶绿素 a 浓度之间进行了回归,取得了较好的效果;Gons 等(1999,2005)进一步利用水面下向上辐照度与向下辐照度的比值,对太湖、巢湖等湖泊水体中的叶绿素 a 进行了提取,并对后向散射的生物光学模式提取进行了研究;Gordon 等(1998),Morel(1988)和 Lee 等(2004)在一类水体叶绿素 a 分析方法的基础上,建立了二类水体中叶绿素 a 光谱吸收的卫星遥感模式。Kutser 等(2004,2006)通过 Hyperion 传感器监测了芬兰湾的叶绿素浓度和蓝藻水华;Wang Yunpeng 等(2004)利用 Landsat TM 数据构建水质模型研究深圳的水质变化;Liisa Metsama (2005)研究指出,蓝藻的暴发过程受到温度、风力、风向和水流等多种因素的影响,具有暴发面积大、时空变化剧烈的特点。Dekker 等(1993)也采取对藻蓝蛋白进行监测的方法,对澳大利亚东部城市昆兰士的东南水域中蓝藻作了较为详细的研究。这些方法能够较为成功地避开 DOC 和悬浮物质的影响,为藻蓝蛋白的卫星遥感生物光学提取提供了思路。

然而,在采用卫星遥感生物光学模式对水体中藻蓝蛋白和藻红蛋白进行提取时依然存在较多问题,如与叶绿素相比,藻蓝蛋白和藻红蛋白的吸收峰相对较小,在运用生物光学模式对其进行提取时受到其他色素,尤其是叶绿素的影响较大。Kutser 等(2001,2004,2006)利用星载高光谱传感器 MERIS 成功监测了波罗的海蓝藻的暴发,同时发现利用多光谱传感器 ALI 和 Landsat,或者 MODIS 却很难将蓝藻与水体中其他藻类分开。研究结果表明,不同蓝藻体内的藻红蛋白和藻蓝蛋白的吸收峰或荧光发射峰会有漂移;当藻类密度过大(如形成水华)时,光吸收与含量之间的线性关系出现饱和;现场采样和卫星遥感数据之间的时空吻合性较差等(Hoge 等,1998)。

0.2.2 国内研究现状

国内在应用遥感技术研究内陆河湖与近海的水质方面也做过大量工作,多数仅限于定性研究或进行已有的航空和卫星遥感数据分析,却很少进行纯水以及不同水质的波谱特性研究,尤其是缺乏实验室和多种传感器的波谱数据及其定量分析结果。匡定波(1998)应用 TM 图像解译太湖水质状况,结果表明,卫星图像(TM)及水面反射光谱可以反映湖泊中泥沙和叶绿素特征;赵冬至等(2001)基于 TM 图像数据的神经网络模型估算了海面叶绿素浓度;濮静娟等(1997)利用热红外遥感对唐山陡河水库的水质及其生态环境进行实验研究,结果表明,热红外可有效地监测库区水质受热污染的状况。尽管国外许多科学家从 20 世纪 70 年代就开始进行水的光学特性及其波谱吸收和散射特性的研究,但其波段范围多数选择在可见光或近红外,而且光谱分辨率大小不等(5~7 nm),尤其是缺乏微波波段表面水质的研究情况。张渊智等(2000)在芬兰赫尔辛基技术大学空间技术实验室进行水质遥感合作研究,先后进行了如下研究:①纯水在 400~1100 nm 之间,光谱分辨率为 1 nm 的波谱吸收和散射特征研究;②微波波段与可见光或近红外复合反演表面水质参数的可行性研究;③多种遥感数据对叶绿素(2.1~9.2 $\mu\text{g/L}$)和浊度(1.1~7.5 FTU)的模拟与反演。

近几年来,国内在水体生物光学的研究方面有了一定的发展,如疏小舟等(1998,2000)对太湖水体中的叶绿素浓度的提取进行了回归,并利用藻蓝蛋白的光谱吸收作为校正,并用航空成像光谱仪 OMIS2 II 反射比波段 R(21)/R(18)(中心波长分别为 704.8 和 669.9 nm)反演

了飞机飞行航线的叶绿素浓度分布,均取得了较好的效果。马荣华等(2005)采用反射比 R706/R682 和 706 nm 反射峰的位置对梅梁湾附近水体叶绿素进行线性反演。李云梅等(2006)由同步水体波谱实测和水体取样分析数据,在前人对太湖水体组分光学特性研究的基础上,利用 Gordon 模型建立了 R(02) 的模拟模型,最后用优化函数的方法反演出水体叶绿素浓度。李炎等(1999)采用光谱分析的方法对珠江口悬浮物质浓度进行了提取;闻建光等(2006,2007)分别基于地面高光谱数据、Hyperion 及其他遥感数据(TM,MODIS 和 OMIS),建立起太湖叶绿素 a 浓度的混合光谱分解模型。吕恒等(2006)结合利用太湖 TM(ETM+) 数据与准实时地面采样数据,建立了两层 BP 神经网络叶绿素 a 模型。杨顶田等(2002,2004,2005,2006)、张运林等(2004)对太湖水体中的光谱分布及水体中叶绿素、悬浮物质的生物光学模式进行了较为详细的研究;曹文熙等(2003)对珠江口及南海北部海域的叶绿素、悬浮物质的光谱吸收进行了分析;李铜基等(2003)、唐军武等(1998)对水体光学测量方法进行了较为详细的介绍;何贤强等(2004)对海水透明度的遥感模式进行了较为系统的研究;陈楚群(2006)对珠江口水体中黄色物质浓度的提取进行了回归。这些研究为藻蓝蛋白和藻红蛋白卫星遥感生物光学模式的建立提供了较好的基础,而且,在实验室对藻蓝蛋白和藻红蛋白的提取技术及分析已经较为成熟,对其光谱吸收和荧光发射的研究相对也较多。

国家卫星气象中心从 2000 年初就开始利用 EOS/MODIS 的 250 m 空间分辨率资料对太湖和巢湖进行蓝藻水华的研究和应用。根据蓝藻水华在可见光和近红外波段的光谱特性,生成多通道蓝藻水华监测图像,利用 NDVI 提取蓝藻水华信息并估算面积。2007 年 6 月中旬和 7 月下旬,2008 年 11 月和 2009 年 11 月,国家卫星气象中心和国家气象中心、江苏、无锡、苏州气象局合作开展了太湖蓝藻水华综合观测实验,利用与卫星同步的地面光谱测量、水体采样分析(叶绿素浓度、总悬浮物浓度和蓝藻浓度等)、无人驾驶飞机拍照、现场拍照、测风、测水温等观测手段,获得大量有关蓝藻的地面观测资料和测量数据。Han Xiuzhen 等(2007)利用水体生物光学模型建立了基于 MODIS 数据的太湖蓝藻的监测指数,实时、快速地监测了太湖蓝藻的动态变化。

总之,针对我国内陆湖泊富营养化导致的水体蓝藻暴发遥感监测的迫切需求,常规陆地卫星系列遥感数据时间分辨率低、重访周期长、数据花费高,因此,不能及时获取蓝藻水体情况。虽然目前大范围、实时、快速的遥感监测手段主要采用的是 MODIS 卫星数据来反演,但实际监测过程中发现 MODIS 数据在波段设置和空间分辨率上不能完全满足内陆湖泊蓝藻监测的要求,相对 MODIS 而言,作为国内第一颗多载荷的气象卫星 FY-3A 有 5 个 250 m 的波段恰好在一定程度上弥补了 MODIS 的不足,因此,建立基于卫星遥感等多源数据的蓝藻监测、评估和预警模型,已成为蓝藻监测迫切需要解决的问题。

0.2.3 存在的主要问题

基于卫星遥感技术的蓝藻监测是一个非常复杂的任务。总结众多国内外对其研究的进展,目前蓝藻监测的主要问题包括以下几个方面:

(1)蓝藻监测理论研究有待进一步拓展和完善。遥感基于特定波段的反射率特征,通过构建模型综合评价水体的光学特性,进而获取蓝藻暴发和空间分布等信息。这一过程中,水体光学特性的研究限制了目前众多光谱模型的应用。例如,通常认为有较大应用潜力的红光波段在蓝藻监测模型却并没有达到预期的效果。主要原因是水体色素含量反演的精度不仅受色素

本身的信号影响,而且和水体的光学特性相关(Dall'Olmo 等,2005)。

(2)卫星遥感数据的处理过程非常复杂。卫星遥感是一种远距离的探测方式,这一特性决定了遥感数据的质量控制对实际遥感应用的必要性。例如,水体色素反演的反射率模型使用中必须确保严格的大气校正。因为来自大气的散射和天空光都会影响到色素的反射信号,进而对最终的反演精度产生影响。此外,模型的普适性同样受到大气校正的影响,尤其是反演参数的确定。因此,准确地大气校正仍然是水体参数反演中的一个重要内容。

(3)混合像元的问题。卫星影像获取的光谱特征是一定区域地表的反映,水体实际蓝藻的采样方法不可避免地会引起混合像元的问题。对于不同的水体采样区域,水的光学特性和物理特性都有差异,这种差异又进一步降低了蓝藻监测的精度。因此,新型传感器(高空间分辨率、光谱分辨率)的研制也是蓝藻监测亟待解决的问题。

0.3 蓝藻监测主要遥感仪器

世界上很多国家都发射了具有海洋水色遥感功能的卫星,比较有代表性的为美国的 SeaWiFS、美国地球观测系统卫星的上午星 TERRA/MODIS、下午星 AUQA/MODIS、欧洲空间局的 ENVISAT/MERIS,日本的 GLI,中国的 HY-1A、HY-1B、FY-1 系列、FY-3A/MERSI。另外,陆地资源卫星也可用于海洋水色的遥感,比较常见的有美国陆地资源卫星 Landsat TM/ETM+、法国陆地资源卫星 SPOT 和中巴地球资源卫星 CEBERS 等。

上述卫星在蓝藻的监测应用中发挥了非常重要的作用。Gross 等(1999)利用 SeaWiFS 数据和 BP 神经网络模型反演了近海岸水体的叶绿素浓度。国内,詹海刚等(2000)利用 SeaWiFS 数据反演了二类水体的叶绿素浓度。Hellweger 等(2004)结合 TM 和 MODIS 数据对纽约港进行了研究,Lenvine 等(2002)利用 Landsat TM 数据对 Champlain 湖和 Vermont 湖蓝藻进行了监测;Vincent 等(2004)利用 Landsat TM 数据对 Erie 湖中的藻蓝蛋白进行了监测,以藻蓝蛋白与叶绿素 a 的荧光比作参照,相关系数达 0.7,并建立了相应的算法。国内李旭文等(1995,2008)以 Landsat TM 影像为数据源,利用叶绿素 a 与差值植被指数(DVI)之间很高的相关性,对太湖梅梁湾叶绿素 a 及蓝藻生物量进行了遥感估算;黄家柱等(1999)曾利用 Landsat TM 数据成功地监测了 1998 年 8 月太湖水域的蓝藻暴发事件;段洪涛等(2006,2008)利用 Landsat ETM+对蓝藻水华空间分布分级进行五级划分。SPOT 卫星数据也被应用于水质研究中,如利用 SPOT 数据来估算悬浮物质浓度和估计藻类生物参数,效果显著。陈云等(2008)利用 CBERS-02/CCD 数据开展了归一化差异植被指数(NDVI)方法的蓝藻水华识别方法研究。

Pena-Martinez 等(2004)运用 MERIS 的第 9 波段与第 6 波段的比值对西班牙水库中的藻蓝蛋白的浓度进行了提取;Simis 等(2005)利用 MERIS 资料对浊度较高的内陆湖泊中藻蓝蛋白的分布进行了检测,对水体中波长为 620 nm 的光吸收进行了遥感提取,建立了适用于较高浊度的内陆湖泊中的藻蓝蛋白浓度的生物光学算法。李国砚等(2008)开展了 MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用,对影像大气校正前后的 NDVI 值进行了对比分析,以检测大气校正的效果;徐萌等(2007)利用 MODIS 资料对 2005 年江苏省湖泊进行了遥感监测,特别是对太湖水质及蓝藻的暴发、分布进行动态监测;徐京萍等(2008)利用 MODIS 对 2007 年 5 月太湖暴发的蓝藻水华事件,利用植被指数数据对其进行遥感监测;王得玉等

(2008)利用 MODIS 高光谱遥感数据动态监测太湖地区蓝藻水华发展过程,并结合水温环境因子,探讨蓝藻暴发的环境条件。胡雯等(2002)利用 FY-1C 星数据估算巢湖蓝藻叶绿素的含量。丛丕福等(2005)利用 HY-1 海洋卫星数据反演叶绿素 a 的浓度。彭文祥等(2008)利用 CBERS 和北京一号小卫星的数据对 2007 年 3-5 月的太湖蓝藻进行了监测。

0.3.1 海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS)

美国国家宇航局(NASA)于 1997 年 9 月成功发射海洋水色卫星(SeaStar),星上装载海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS),国家海洋局第二海洋研究所接收并向全国有关单位分发该卫星资料,为我国的可见光遥感研究提供了良好的资料来源。具体波段、动态范围和应用对象见表 0.1。

表 0.1 宽视场水色扫描仪(SeaWiFS)传感器的波段、动态范围及应用对象

通道	波段/nm	应用对象
1	402~422	黄色物质、水体污染
2	433~453	叶绿素吸收
3	480~500	叶绿素、测冰、污染、浅海地形
4	500~520	叶绿素、水深、污染、泥沙
5	545~565	叶绿素、植被、低含量泥沙
6	660~680	高含量泥沙、大气校正、污染、气溶胶
7	745~785	大气校正、高含量泥沙、植被
8	845~885	大气校正、水汽总量

0.3.2 中分辨率成像光谱仪(MODIS)

MODIS(Moderate-resolution imaging Spectroradiometer)是搭载在 NASA 地球观测系统(Earth Observing System,EOS)Terra 和 AUQA 卫星上最重要的传感器。其中 TERRA 卫星 1999 年发射,AUQA 卫星 2002 年发射。MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 0.4~14 μm 的电磁波谱范围内,其中可见光-近红外 19 个通道(通道 1~19),热红外 17 个通道(通道 20~36),具体的波段设置见表 0.2。

NASA 对 MODIS 数据实行全球免费接收的政策,大大降低了利用 MODIS 监测水质的费用,并且 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(12 bit,TM 图像是 8 bit)成为内陆较大湖泊水质遥感监测最有潜力的遥感数据源之一。

另外,先进的空间热发射和反射辐射计(ASTER)是由日本通产省(MITI)研制的搭载在美国 Terra(EOS AM-1)卫星上的 5 种有效荷载之一,它有 3 个独立的光学系统,可见光与近红外辐射计(VNIR),短波红外辐射计(SWIR)和热红外辐射计(TIR)。其可在 3 个 VNIR 谱段、6 个 SWIR 谱段和 5 个 TIR 谱段成像,相对应的地面分辨率分别为 15,30 和 90 m,理论上可以利用这三个可见光和近红外波段来监测水质。