

水体石油类污染遥感 探测机理与信息提取方法

黄妙芬 等◎著

Remote Sensing Detection Mechanism and Information
Extraction Method of Water Petroleum Pollution



科学出版社

水体石油类污染遥感探测机理 与信息提取方法

黄妙芬 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要是针对未形成明显油膜,以分散、乳化及溶解等形式存在于水体的石油类污染物质的遥感探测机理与信息提取方法展开介绍。在国内外首次系统地介绍以这些形式存在的石油类物质,从多个角度分析并讨论其对水体表观光谱、吸收系数、后向散射系数的影响及自身的特性,提出多种水体石油类污染识别方法和含量提取模型。全书共分为9章,以水体石油类物质作为一个新的水色因子,参照国际上水色遥感技术对水色三要素的成熟研究体系,在分析石油类污染水体辐射传输特性的基础上,着重介绍水体石油类污染遥感探测机理、表观光学特性、固有光学特性、荧光图谱、石油含量遥感提取模型。

本书主要供海洋、生态、环境保护、石油等部门的管理者和决策者以及相关技术人员参考,也可以供高等院校相关研究领域的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水体石油类污染遥感探测机理与信息提取方法 / 黄妙芬等著. —北京:科学出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-03-046882-6

I. ①水… II. ①黄… III. ①水体—石油污染—环境—遥感—研究 IV. ①X5
中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第308505号

责任编辑:张震 孟莹莹 / 责任校对:郑金红

责任印制:张倩 / 封面设计:无极书装

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年5月第一次印刷 印张:11

字数:210 000

定价:66.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

黄妙芬，广东海洋大学教授、博士、博士生导师

宋庆君，国家卫星海洋应用中心副研究员、硕士

邢旭峰，广东海洋大学讲师、硕士

刘 扬，中国石油勘探开发研究院高级工程师、博士

前 言

在我国无论是海洋还是陆地水体，常规的水质监测项目都包含石油类污染含量的测定，而且国家海洋局和环境保护部每年都会发布几大河流、湖泊和近岸水体的环境公报。但这些数据的获取存在费时费力、以有限点代面、数据发布滞后等问题，常规方法难以实现实时掌握污染状况并及时采取相应的处理措施。遥感技术具有大面积、快速、动态、低成本获取区域信息的优势，是解决上述问题的有效手段之一。

水色遥感技术经过近半个世纪的发展，在该领域中对水色三要素（叶绿素、黄色物质、悬浮物）的研究体系已经相当成熟。本书充分利用这一成熟的研究体系，将“未形成明显油膜的水中油”作为一个新的水色因子引入该体系，围绕遥感探测机理研究中的“表观光学量、固有光学量（吸收系数和散射系数）、荧光特性”等方面进行研究，立足于实验，获取翔实的数据，展开分析与讨论。

目前国内外有关石油类遥感监测的专著研究内容主要集中在溢油方面，而本书针对以分散、乳化和溶解形式存在的石油污染，立足于未形成明显油膜情况的遥感监测，首次在国内外系统地介绍以这些形式存在的石油类物质，对海洋环境监测具有一定的指导意义。出版此书旨在展示水体石油类污染的表观光学特征和固有光学特性，拓展水色遥感的研究范畴，为水体石油类污染遥感监测提供依据。

全书内容共 9 章。第 1 章为绪论，在分析水体石油类污染现状和特点的基础上，主要阐述遥感技术在水体石油类污染监测中的作用，分析国内外遥感技术在探测水体石油类污染的研究现状，并对遥感探测水体石油类污染存在的一些问题进行探讨。第 2 章为海洋水色遥感基本原理，主要介绍水色遥感的基本概念、水色遥感对传感器的要求、常用的水色传感器以及可用于近岸海域水色遥感研究的陆地传感器；探讨宽波段非水色传感器应用于 II 类水体时需要解决的一些关键性问题；阐述遥感信息提取模型的建立方法等。第 3 章为遥感探测水体石油类机理分析，首先，从测量的角度对石油类物质的组成及其在水体中的存在形式进行分析；其次，介绍水体石油类含量常用测量仪器的使用方法，并从这些方法的基本原理入手，剖析各自特点和适用范围；然后，对国内外利用遥感探测溢油的机理展开分析；最后，探讨利用水体表观光学特性和固有光学特性（吸收系数和散射系数）提取水体石油类含量信息的可行性。第 4 章为数据采集与处理，主要对实验场地进行描述，详细介绍数据测量所使用的仪器和采用的方法、实验，以便更好地理解水体石油类物质的遥感特性，在此基础上，对本书将使用的陆地卫星数

据做简单介绍。第 5 章为石油类污染水体表观光学特性, 首先分析油膜的波谱特征, 其次从现场测定的离水辐射和遥感反射率入手, 结合 MERIS 和 Landsat 8/OLI 传感器数据, 分析石油污染水体中水体光谱曲线的变化特征和归一化波谱特征, 最后对石油类污染水体红外波段的特征进行分析。第 6 章为水体石油类污染吸收特性分析及参数化, 通过对石油类污染水体吸收特性进行分析, 从而建立石油类物质的吸收特性参数化模型, 同时建立含油水体吸收系数的分离算法。第 7 章为水体石油类污染后向散射特性分析及参数化, 在介绍后向散射系数基本概念的基础上, 分析石油类污染水体后向散射特性, 对石油类单位后向散射系数进行参数化, 并从 Mie 散射理论入手分析石油物质与悬浮颗粒物的分离算法。第 8 章为水体石油类污染浓度遥感反演模式, 主要从三个角度介绍水体石油类含量遥感反演模式, 分别为基于归一化遥感反射比提取油含量模式、生物-光学遥感反演模型、利用 CDOM 提取石油含量模型, 涵盖水体石油类物质的表观光学特性、吸收特性和散射特性等方面。第 9 章为水体石油类污染荧光遥感特征, 通过对 CDOM 和石油类物质主要荧光成分进行分析, 依托实验数据, 对自然水体、石油类物质与 CDOM 混合水体、仅含油污染水体三种状态下的荧光图谱进行分析研究。

本书的出版与众多专家学者的大力支持是分不开的。在这里, 首先感谢我的博士生导师朱启疆教授和张仁华研究员, 是他们把我引入定量遥感的大门, 培养我从事实验遥感的科研思路; 接下来, 感谢唐军武研究员和毛志华研究员, 是他们把我带入水色遥感的领域, 并给予我学术指导; 还要感谢于五一老师, 是她启发我把遥感技术应用于水体石油类污染监测的研究, 并为我提供科研平台; 同时, 感谢我的大学同学张香平研究员和范树印研究员, 在我的科研路上给予的指导与帮助; 感谢简伟军女士在实验过程中的辛勤付出; 最后, 感谢所有给予我帮助的老师、同事、同行、朋友和学生们。

本书由国家自然科学基金面上项目“石油类污染水体固有光学特性研究与反演”(批准号: 41271364)和国家科技支撑计划项目“粤港澳水量与水环境遥感监测应用系统”(批准号: 2012BAH32B01-4)经费资助出版。同时本书的部分研究内容得到国家自然科学基金面上项目“水体石油类污染遥感机理和识别模型研究”(批准号: 40771196)资助。

由于作者水平有限, 本书难免存在不足之处, 敬请读者和有关专家批评指正, 以便今后修订完善。



2016 年 5 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 遥感技术在水体石油类污染探测与信息提取中的作用	1
1.2 国内外遥感技术探测与提取水体石油类污染信息的研究现状	2
1.3 遥感探测与提取水体石油类污染信息亟待解决的科学问题	5
第2章 海洋水色遥感基本原理	7
2.1 海洋遥感光谱分类和探测的基本物理量	7
2.1.1 海洋遥感光谱分类	7
2.1.2 海洋遥感探测的基本物理量	7
2.2 水色遥感基本概念	8
2.2.1 海洋水体分类	8
2.2.2 海水的光学特性	8
2.3 海洋水色遥感机理分析	14
2.3.1 卫星传感器接收的辐射组成	14
2.3.2 海洋水色要素遥感反演机理	14
2.4 常用海洋水色传感器简介	16
2.4.1 水色传感器的要求	16
2.4.2 国外主要的水色传感器	16
2.4.3 国内主要的水色传感器	18
2.5 陆地卫星及传感器简介	18
2.5.1 陆地卫星用于水色遥感研究的利弊分析	18
2.5.2 国外主要的陆地卫星传感器	19
2.5.3 国内主要的陆地卫星传感器	21
2.6 宽波段非水色传感器应用于水体石油类污染监测的关键技术	23
2.6.1 相对辐射定标	23
2.6.2 半分析模式假设及参数随波段变化问题	23
2.6.3 浑浊水体大气校正算法	24
第3章 遥感探测水体石油类机理分析	26
3.1 石油类物质的组成及其在水体中的存在形式	26
3.1.1 石油类物质的组成	26

3.1.2	石油类物质在水体中的存在形式	26
3.2	水体石油类仪器检测原理与仪器	26
3.2.1	水体石油类仪器检测原理	26
3.2.2	常用的检测仪器适用范围分析	28
3.3	溢油遥感探测方法	29
3.3.1	可见光-近红外多光谱遥感监测海面油膜机理分析	29
3.3.2	热红外遥感监测海面油膜机理分析	29
3.3.3	微波遥感监测海面油膜机理分析	30
3.3.4	激光荧光遥感监测海面油膜机理分析	30
3.4	水中油遥感探测机理	31
3.4.1	水体石油类物质对离水辐射的贡献	31
3.4.2	石油类污染水体的固有光学特性	32
3.4.3	生物-光学模型的拓展	32
第4章	数据采集与处理	33
4.1	实验场地描述	33
4.2	实验仪器与测定方法	33
4.2.1	光谱测量仪	33
4.2.2	分光光度计与吸收系数的测量	35
4.2.3	后向散射测量仪 HS-6	38
4.2.4	粒度测量仪 LISST100X	41
4.2.5	18 角度激光散射测量仪 DAWN HELEOS	43
4.2.6	油浓度测定仪器	44
4.2.7	荧光计	45
4.3	辅助数据测定	46
4.4	配比实验方法	47
4.4.1	模拟水体污染过程配比实验	47
4.4.2	模拟水体自净过程配比实验	48
4.4.3	水砂配比和油砂配比实验	48
4.5	遥感数据	48
4.5.1	ENVISAT/MERIS 数据	48
4.5.2	HJ-1/CCD	49
4.5.3	Landsat8/OLI	50
4.6	小结	52
第5章	石油类污染水体表观光学特性	53
5.1	油膜波谱特征	53

5.2	遥感反射率数据处理	53
5.3	石油类污染水体段特征分析	54
5.3.1	自然水体波谱特征	54
5.3.2	悬浮物水体波谱特征	55
5.3.3	叶绿素水体波谱特征	55
5.3.4	石油类污染水体	56
5.4	石油类污染水体归一化遥感反射比	67
5.4.1	归一化方法	67
5.4.2	现场光谱数据归一化特征分析	67
5.4.3	Landsat 8/OLI 对应光谱数据归一化特征分析	70
5.5	基于 ENVISAT/MERIS 光谱模拟的水体石油类污染可探测性分析	72
5.5.1	ENVISAT/MERIS 光谱数据模拟	73
5.5.2	模拟 ENVISAT/MERIS 水体石油类污染可探测波段	73
5.5.3	基于 ENVISAT/MERIS 水体石油类污染对遥感离水辐射的贡献程度	74
5.6	石油类污染水体中红外波段吸收特性的分析	76
5.6.1	中红外波段遥感探测石油类污染水体机理分析	76
5.6.2	数据测量方法	76
5.6.3	石油类污染中红外波段吸收光谱曲线特性分析	77
5.7	小结	80
第 6 章	水体石油类污染吸收特性分析及参数化	82
6.1	石油类污染水体吸收特性分析	82
6.1.1	水色三要素的吸收特性	82
6.1.2	石油类污染对可溶性有机物 CDOM 吸收特性的影响	84
6.1.3	石油类污染对色素吸收特性的影响	86
6.1.4	石油类污染的吸收特性波谱曲线	87
6.2	石油类污染的吸收特性参数化模型	88
6.2.1	水色要素吸收特性参数化模型	88
6.2.2	石油类污染的吸收系数参数化	90
6.2.3	CDOM、石油类污染和非色素颗粒物指数函数斜率分析	90
6.3	特征波段吸收系数 $a_{oil}(440)$ 的遥感反演方法	91
6.3.1	CDOM $a_g(440)$ 遥感反演算法	91
6.3.2	石油类污染 $a_{oil}(\lambda_0)$ 反演算法	92
6.4	石油类污染水体吸收系数分离算法	92
6.4.1	$a_{d/g/oil}(\lambda)$ 遥感化提取算法	93

6.4.2	$a_d(\lambda)$ 和 $a_{g/oil}(\lambda)$ 的分离算法	97
6.4.3	$a_g(\lambda_0)$ 和光谱斜率 S_g 的遥感化算法	98
6.4.4	$a_{oil}(\lambda)$ 的计算	99
6.5	小结	99
第 7 章	水体石油类污染后向散射特性分析及参数化	101
7.1	后向散射系数间接获取方法	101
7.2	含油水体颗粒物的后向散射特性	102
7.2.1	水体后向散射系数与石油类污染及悬浮物相关性	102
7.2.2	含油水体后向散射系数与悬浮物浓度的定量关系	104
7.2.3	水体颗粒物后向散射系数光谱模型	105
7.2.4	含油水体悬浮物对后向散射光谱变化的影响	107
7.3	石油类污染单位后向散射系数参数化	108
7.3.1	石油类污染对后向散射系数的影响	108
7.3.2	石油类污染单位后向散射系数	109
7.4	石油类污染与悬浮颗粒物后向散射系数分离算法	111
7.4.1	实验设计	112
7.4.2	数据处理与参数计算	114
7.4.3	分离算法建立	123
7.5	结论	127
第 8 章	水体石油类污染浓度遥感反演模式	129
8.1	归一化遥感反射比提取石油类污染浓度模式	129
8.1.1	归一化遥感反射比指数 NDPRI	130
8.1.2	石油类污染浓度提取模式的建立	130
8.1.3	模式反演结果精度分析	131
8.2	水体石油类污染生物-光学遥感反演模型	132
8.2.1	转化遥感反射比数据	132
8.2.2	计算固有光学量	133
8.2.3	分离吸收系数	133
8.2.4	水色要素反演	134
8.2.5	反演模型验证	134
8.3	利用 CDOM 提取石油类污染浓度模型研究	135
8.3.1	石油类污染水体 CDOM 吸收系数分布特征	136
8.3.2	石油类污染光谱斜率 S 的确定	137
8.3.3	基于 CDOM 吸收光谱特性反演水体石油类污染模式	139
8.4	小结	139

第9章 水体石油类污染荧光遥感特征.....	141
9.1 问题的提出.....	141
9.2 特征数据的获取方法.....	141
9.3 CDOM 和石油类污染主要荧光成分.....	142
9.3.1 CDOM 主要荧光成分.....	142
9.3.2 石油类污染主要荧光成分.....	143
9.4 水体石油类污染荧光特征.....	143
9.4.1 自然水体 CDOM 荧光特征.....	143
9.4.2 石油污水中提取的石油烃荧光特征.....	146
9.4.3 油与 CDOM 混合水样荧光图谱.....	149
9.5 小结.....	153
参考文献.....	154

第1章 绪 论

1.1 遥感技术在水体石油类污染探测 与信息提取中的作用

面对日趋严重的环境污染问题,世界各国都加大了治理的投资力度,并制定了相应的法律法规政策。在众多的环境污染问题中,水体污染的影响最为严重,而其中油田开采、油田事故、油轮泄漏、航道油污水排放等人类活动对水体(河流、湖泊、海洋)造成的油污染等引发的环境问题日益凸显。1989年3月“瓦尔迪兹”号油轮原油泄漏、2007年11月俄罗斯油轮原油泄漏、2010年4月墨西哥湾溢油、2010年7月大连湾石油管线爆炸溢油、2011年6月渤海油田溢油、2011年10月新西兰货轮漏油、2013年7月泰国湾海域石油泄漏、2013年8月菲律宾沉船燃油泄漏、2013年11月中石化青岛开发区输油管线破裂造成原油泄漏并流经地下雨水涵道入海、2014年6月大连中石油输油主管道爆裂起火、2015年5月美国加利福尼亚州输油管破裂致使漏油进入太平洋等重大污染事件,给海洋生态环境造成巨大的灾难。对这些灾难的评估和消除迫切需要时间和空间上连续的观测数据来支撑。水体石油类污染已经成为国家环保部门、石油部门及其他各生产部门共同关注的焦点。面对突发性和缓发性的水体石油类污染事件,加大监测力度,及时掌握水体石油类污染的空间分布和时间变化信息势在必行,遥感技术可以作为重要的手段之一。遥感技术具有大面积、动态、低成本获取区域信息的优势,利用遥感技术可有效而准确地监测水体石油类物质的变化过程、移动路径、空间分布规律,这是传统点观测方法无法比拟的。

在我国无论是海洋还是陆地水体,常规的水质监测项目都包含石油类污染物含量的测定,而且国家海洋局和环境保护部每年都会发布几大河流、湖泊和近海海域的环境公报。但这些举措存在以下三点问题:①石油类污染浓度测定大多采用野外采样,然后实验室分析的方法,野外采样较为困难,且样品分析费用昂贵;②野外采样基本以点方式进行,即使是海洋监测站采用拉剖面的方式,也存在空间设点不足的问题,另外在时间上一般一年只进行几次定期观测;③每年的环境公报给出的情况一般是通过一年几次的点或线观测后将所有数据进行汇总,然后次年第一季度进行信息发布,这种方式具有明显的滞后性。这三个问题使得利用传统的方法难以实现对水体有机污染进行空间和时间变化的连续监测,特别是难

以实时掌握污染状况而及时采取相应的处理措施。遥感技术具有低成本、高时效性的特点,是解决上述问题的有效手段之一。

卫星遥感技术的出现已有半个世纪,经历了从定性到半定量,进而走向定量化的发展历程,在大气、海洋、陆地等相关领域得到广泛应用。随着遥感技术成功应用于地表时空多变参数(地表反照率、植被叶绿素、叶面积指数、地表温度、土壤蒸发、植被蒸腾等)和Ⅰ类水体水色因子(叶绿素)的定量反演,人们对遥感定量化的需求进一步提高。一方面要求提高地表时空多变参数的反演精度;另一方面要求利用遥感技术探测出更多的目标,比如作物营养组分(N、P、蛋白质)、Ⅱ类水体组分(黄色物质、叶绿素、悬浮泥沙)、土壤和水体中污染物浓度、植物和水体对重金属的响应等,这些需求使遥感技术迎来了新的发展机遇并面临新的挑战,拓展遥感技术探测目标和应用领域是该学科的发展趋势之一。

水色遥感技术是遥感技术的一个重要分支。对Ⅰ类水体,应用遥感技术监测水体叶绿素含量和动态变化已经进入业务化运行阶段。在Ⅱ类水体叶绿素、黄色物质、悬浮物等水色因子监测中,遥感机理和遥感模型的研究也较为全面,取得不少研究成果,并服务于社会。水体中含有的石油类物质属于污染物质,其存在同样会影响到水色。目前利用遥感技术探测水体石油类污染主要集中在 SAR 探测溢油方面,其遥感机理与模型研究取得了长足的进展,在加拿大、美国、德国等国家已经初步形成海上溢油业务化运行的监测系统。对于水体中石油类污染已经存在,但未形成明显的可探测油膜的情况,国内外都未见相关的研究报道,对该领域的研究尚属空白,而在此情况下进行遥感探测机理与信息提取方法研究具有重要的科学意义和应用价值。第一,可拓展定量遥感的研究与应用范畴;第二,可及时地定量获取河流、湖泊、海洋石油类污染空间分布特征和时间变化规律,为河流、湖泊、海洋石油类污染状况提供动态监测技术,使水体石油类污染遥感监测更为全面;第三,可为未来能对水体石油类物质进行探测的传感器的发展提供指导;第四,可对油气微渗漏进行探测,为海上找油提供信息依据;第五,可为油田活动区域环境效应评价提供技术服务。

1.2 国内外遥感技术探测与提取水体 石油类污染信息的研究现状

现行的国内外水体石油类污染遥感监测主要集中于海面油膜探测,对未形成明显油膜的石油类污染情况未加考虑。国内外许多学者都从机理和方法上证明了利用遥感技术探测海面油膜的可行性(刘良明,2005;Otremba,2000),涵盖可见光-近红外、热红外、微波辐射计、雷达等航空及卫星传感器,以及激光扫描成

像等其他遥感技术, 这为未形成明显油膜的水体石油类污染情况的遥感探测机理研究与信息提取模型建立奠定了良好的基础 (Zielinski, 2003; Lu et al., 2013; Otremba and Piskozub, 2003a; Hu et al., 2003; Otremba and Król, 2002; Bolus, 1996; Marghany et al., 2009)。

在可见光-近红外波段, 水面油膜的反射率与洁净海面的反射率相比有较大差别, 可见光-近红外多光谱遥感监测水面油膜正是利用这一特性, 实现从遥感图像中提取溢油信息。在热红外波段, 遥感探测水面油膜的机理是利用水与油膜的发射率之间的差别来提取油膜信息 (Fingas, 1998); 在微波遥感中, 雷达探测原理是利用油膜的存在使得海洋表面雷达后向散射系数降低造成回波的减少而出现暗区 (Simecek, 2004); 微波辐射计探测水面油膜的原理是基于油膜的微波辐射率比海水高的特点。

从卫星遥感技术来看, 水体石油类污染物质在没有形成明显油膜之前, 热红外辐射计、微波辐射计和雷达难以将其检测出来, 需要用到可见光-近红外传感器。因此充分利用现有的光学传感器来探测水体石油类污染浓度具有较大的优势。要确定已有传感器的探测波段最好的方法是进行精确的现场光谱测定, 然后利用各种传感器的波段响应函数, 模拟各传感器的波段, 确定石油类物质的探测波段并进行验证。水体的测定要求特别高, 这方面的工作已经有了大量研究, 形成了精确现场测定水体光谱的方法 (唐军武等, 2004a; 唐军武等, 2004b; Mueller et al., 2003)。

对于水体石油类污染物质未形成明显的成片可探测油膜的情况, 可以将其视为水色因子的一种, 因而可以借用水色因子的遥感探测机理和信息提取的研究思路, 在水色遥感领域, 对于水色因子信息提取模型的建立, 主要采用以下两大类方法: 经验方法/半经验方法和半分析方法。经验方法/半经验方法又包括两种方式: ①利用光谱实测值和水色因子含量测量值, 通过回归分析方法, 建立利用遥感反射率估算水色因子含量的经验模型; ②直接利用卫星遥感影像的灰度值和实测水色因子含量, 通过统计分析方法建立二者之间的经验关系模型。半分析方法中最典型的是生物-光学模型法, 也包括两种方式: ①利用实测光谱, 通过生物-光学模型来推算水色因子含量; ②利用去除大气影响后的卫星遥感影像, 通过生物-光学模型来推算水色因子含量 (马荣华等, 2006)。

经验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水色因子含量值之间的统计关系来推算水色因子含量值, 由于水色因子含量的多少与遥感数据之间的相关性不能保证, 所以该方法结果缺乏一定的理论依据。半经验方法是将已知的水色因子光谱特征与统计模型相结合, 选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水色因子含量。这种方法具有一定的物理意义, 是目前最常用的方法。半经验方法采用的统计模型主要有神经网络、偏最小二乘法、主成分分析、多元回归分析、模糊分类、判别分析等。其缺点在于要求有足够多的样本, 尤其是对非线性回归模型

的建立,要求有更多的样本,采用这种方法成本高、工作量大。另外,模型中的参数往往取决于研究区域的背景,在推广应用时需要修正相应参数,否则容易造成较大误差,因此所建立的模型在推广应用上会受到一定的限制。

生物-光学模型属于半分析模型,其基本原理是以辐射传输模型为基础,将各种水色因子的固有光学特性(吸收系数和后向散射系数)与表观光学特性(遥感反射率)联系起来,根据多光谱遥感数据源同时反演出各种水色因子。其优点是:①同时考虑水色因子的固有光学特性和表观光学特性,反演精度相对较高;②可同时反演各水色因子,直接利用卫星遥感影像反演水质参数,符合水质监测的实际要求,是水质参数反演的理想模型;③已经业务化运行于Ⅰ类水体中叶绿素浓度的反演。其缺点是:①可同时反演的水色因子受到传感器波段数的限制;②需要测定水色因子的固有光学特性。

将水色因子固有光学特性(吸收系数和后向散射系数)进行参数化是开发各类水色模型的前提条件,国内外学者对常规水色因子(叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质等)的固有光学特性做了大量的研究,并建立了众多的参数化模型(Gallegos and Neale, 2002; 朱建华和李铜基, 2004; 宋庆君和唐军武, 2006; 李俊生等, 2008; 杨伟等, 2009; 施坤等, 2010)。要用生物-光学模型反演水体石油类污染浓度,必须先确定石油类物质的固有光学特性。目前这方面研究在国内尚属空白,国外也正在研究的初始阶段。

研究表明,石油类物质对水体吸收系数的影响主要通过黄色物质(可溶性有机物, chromophoric dissolved organic matter, CDOM)来体现,且与 CDOM 和非色素颗粒物具有相似的吸收光谱曲线,皆遵循以 e 为底的指数函数衰减方程(黄妙芬等, 2010a),可采用 Bricaud 等(1981)提出的 CDOM 吸收系数参数化模型来表示,即

$$a_i(\lambda) = a_i(\lambda_0) \exp[-S_i(\lambda - \lambda_0)] \quad (1-1)$$

式中, $a_i(\lambda)$ 为波长 λ 对应的吸收系数(m^{-1}), i 取不同的值分别代表石油类物质、CDOM 和非色素颗粒物; $a_i(\lambda_0)$ 为各水色因子在参考波长 λ_0 处的吸收系数(m^{-1}),在水色遥感中一般取 $\lambda_0 = 440\text{nm}$; S_i 为各水色因子对应的吸收光谱斜率。

$a_i(\lambda_0)$ 和 S_i 是决定式(1-1)准确性的两个关键参数。大量的研究表明, CDOM 的光谱斜率 S 与浓度无关,但与组成及参考波段的选择有关,因而具有很强的区域性(Kowalczyk et al., 2005; Twardowski et al., 2004; 汪小勇等, 2004; 周虹丽, 2005; 段洪涛等, 2009)。国内外不同学者分别建立了利用遥感反射比估算河口区域 CDOM 的 $a_i(\lambda_0)$ 遥感模型(Hirtle and Rencz, 2003; Bowers et al., 2004; 黄妙芬等, 2011; Xing et al., 2012)。关于水体石油类污染的这两个参数,目前局限在利用有限的实验样本测定值进行应用方面。

Lee 等提出半分析算法 (quasi-analytical algorithm, QAA), 该算法综合了国际公认并得到验证的多种模型 (包括分析方法、半分析方法和经验方法模型), 以遥感可提取的水体遥感反射比作为输入参数, 通过一系列运算, 实现水体总吸收系数 $a(\lambda)$ 、总颗粒物的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 、浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和有色碎屑物的吸收系数 $a_{d/g}(\lambda)$ 的提取 (Lee et al., 2002)。QAA 算法所输出的有色碎屑物的吸收系数 $a_{d/g}(\lambda)$, 是由 CDOM 的吸收系数 $a_g(\lambda)$ 和非色素颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 构成。国内外有一些学者致力于从 $a_{d/g}(\lambda)$ 分离 $a_g(\lambda)$ 和 $a_d(\lambda)$ 的算法研究 (Lee et al., 1994; Zhu et al., 2011)。对于石油类污染水体, 利用 QAA 算法得到的 $a_{d/g}$ 可认为是由 CDOM 的吸收系数 $a_g(\lambda)$ 、非色素颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 和石油类物质的吸收系数 $a_{oil}(\lambda)$ 三者构成, 记为 $a_{d/g/oil}$ 。要从遥感角度获取水中石油类物质的含量, 面临着从 $a_{d/g/oil}$ 中将 $a_{oil}(\lambda)$ 提取出来的问题, 目前尚无相关研究。

水体石油类污染提供的离水辐射信息较微弱, 为了提高反演精度可考虑结合其他信息源。从前人的研究成果中发现, 石油类物质中的非饱和烃及其衍生物具有荧光特性 (Zepp et al., 2004; 韩宇超和郭卫东, 2008; 刘明亮等, 2009; Patricia et al., 2011; 吴静等, 2012), 如果在遥感模型反演的结果中, 再考虑石油类物质的荧光特性, 可进一步提高反演精度。利用物质的荧光特性结合遥感技术来探测物质的浓度和是否存在的研究越来越引起人们的重视 (慈兴华等, 2004)。在石油的应用方面, 主要是利用荧光特性录井, 以及利用荧光探测油膜。在油膜监测方面主要是利用激光作为诱导 (主动式), 利用自然光作为诱导的很少 (被动式)。为了充分利用光学传感器, 研究石油类污染自然光条件下的荧光特性也很有意义。

1.3 遥感探测与提取水体石油类污染信息 亟待解决的科学问题

综上所述可见, 现有遥感技术监测水体石油类污染主要集中在油膜探测上, 对未形成明显油膜的水体石油类污染未加考虑。虽然利用遥感技术监测水体石油类污染已具备了一定的理论基础和实验技术条件, 但是要充分利用传感器实现更全面的对水体石油类污染的监测, 还存在下列问题:

(1) 由于水色遥感获取的基本物理量是离水辐射, 而离水辐射的大小取决于水色因子的吸收和后向散射等固有光学特性, 所以研究水色因子的遥感探测机理, 首先要确定水色因子的这些固有光学特性。目前对 II 类水体中常规的水色因子 (叶绿素、悬浮物、黄色物质等) 的吸收和散射特性已经进行了大量研究, 但是对水

体石油类物质这类水色因子的吸收和后向散射特性的研究还较少。

(2) 遥感探测水面油膜是基于其表面特性,而遥感探测未形成明显油膜的水体石油类污染是基于其对离水辐射的贡献。遥感传感器接收到的总辐射中 90% 是大气辐射,10% 是离水辐射,而要从这 10% 的离水辐射中确定有多少来自水体石油类物质,属于弱信息提取。那么水体石油类污染浓度达到多大,传感器才能将其探测出来呢?对这个界限值的研究是本书充分利用遥感技术来实现对水体石油类物质监测的关键,目前相关研究仅停留在可探测油膜的波段比方面。

(3) 针对 II 类水体中常规水色因子(叶绿素、悬浮物、黄色物质等)的遥感反演,目前已经建立了不少针对不同传感器的经验/半经验模型以及具有物理机制的半分析模型,但针对水体石油类污染浓度的遥感定量反演模型尚未展开。

(4) 目前已经积累了许多遥感数据源,但这些卫星传感器对应波段是否可用于水体石油类物质探测的相关研究尚未开展。

(5) 关于水体石油类物质的荧光特性,利用激光作为诱发源来实现对水面油膜探测的研究已经开展,但是以自然光作为诱发源的研究还不多见,还未将其应用到光学遥感上。

(6) 要充分利用水色遥感的优势,全面实现对水体石油类污染进行较高精度的动态监测,从其固有光学特性和含量反演模型建立等方面来看,尚有一些科学问题需要解决。第一,在已建立的水体石油类污染吸收系数参数化模型中,参考波长 λ_0 处的吸收系数 $a_{\text{oil}}(\lambda_0)$ 是关键参数之一,该参数在模型的应用中主要采用现场实测值,未进行遥感参数化,因此局限了模型的推广应用。利用水体可见光-近红外传感器接收的基本信息量(离水辐亮度或遥感反射比)来反演该值,可实现该参数的遥感化,目前相关研究在国内外尚未开展。

(7) 石油类物质对水体吸收系数的影响主要通过黄色物质来体现,两者具有相似的吸收光谱曲线,要提高水体石油类含量的遥感反演精度,必须找到将两者区分开来的方法。

(8) 石油类物质对水体散射系数的影响主要通过无机悬浮物来体现,因而在已确定的水体石油类污染后向散射特性参数化模型中,需要进一步区分石油类物质和颗粒物对后向散射的影响。如果在实验中同时测量粒径分布、相对折射指数以及石油类和悬浮物的体积浓度,再根据 Mie 散射理论做进一步的理论计算和模拟,将有助于提高石油类污染水体后向散射系数参数化模型的精度。