

近岸河口与 内陆水环境遥感

韩留生 周成虎 李勇 杨骥 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑 王启

微信号: Waterpub-Pro



唯一官方微信服务平台

销售分类: 资源环境

X143
Z116

ISBN 978-7-5170-6657-6



9 787517 066576 >

定价: 48.00 元

近岸河口与 内陆水环境遥感

韩留生 周成虎 李勇 杨骥 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书基于地面实测光谱及水质参数构建并评价了近岸河口叶绿素 a 的两波段、三波段、四波段、NDCI、SCI 算法；利用大量的悬浮物实测数据，提出了适用于宽浓度范围的悬浮物对数比率反演模型；采用反射光谱、各种变换形式以及各种波段组合分析和构建了有色可溶性有机物的光学特性和遥感反演模型；建立了基于两波段遥感反射率比值和潮汐系数修正的适用于近岸海水透明度反演的简易光谱模型；以兖州矿济宁矿区南四湖为研究区，重点研究矿业扰动区水体组分的敏感波段的选择，并基于敏感性分析构建水质参数的反演模型；基于近岸河口实测数据，优化了悬浮物后向散射系数模型和双向反射因子；基于优化的生物光学模型参数开发了水色三参数反演模型。本书具体内容包括：水色遥感研究进展；水体光谱测量以及卫星影像处理；水色三参数以及透明度的反演算法；生物光学正演和反演模型。

本书可供环境工程、市政工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

近岸河口与内陆水环境遥感 / 韩留生等著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5170-6657-6

I. ①近… II. ①韩… III. ①水环境—环境遥感—研究—中国 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第170327号

书 名	近岸河口与内陆水环境遥感
作 者	JIN'AN HEKOU YU NEILU SHUIHUANJING YAOGAN 韩留生 周成虎 李勇 杨骥 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.5印张 176千字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

FOREWORD

水体是人类赖以生存的生命线，是地理环境的重要组成部分。内陆水体与仅占海洋表面 15% 的海岸带，对全球生物地球化学循环、海岸生态系统及气候变化有很大影响。这里聚集了全球 90% 的人口，提供了全球约 45% 的生物量，并占据着全球 95% 的捕鱼量及其他有价值的生物资源。近岸河口与内陆水体汇集各种流域物质，如泥沙、营养物质以及各种化学物质，直接影响并改变着其侧边界、底边界以及区域生态环境。本书主要基于三种在轨的中高分辨率成像光谱仪 (MODIS)、近海高光谱成像仪 (HICO) 与 Hyperion 高光谱影像，探索适合于我国近岸河口与内陆水体叶绿素 a (Chl-a)、总悬浮物 (TSS)、有色可溶性有机物 (CDOM) 以及透明度等水质参数的经验或半经验模型、生物光学模型算法，旨在解决近岸河口与内陆水体水色参数及透明度的高光谱遥感反演问题，主要包括以下内容：

(1) 基于地面实测光谱及水质参数构建并评价了近岸河口 Chl-a 的两波段、三波段、四波段、NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index)、SCI (Synthetic Chlorophyll Index) 算法。结果表明：三波段算法优于四波段算法；四波段算法优于两波段算法。将开发的模型用于 HICO 影像制图，验证结果表明三波段、四波段算法能够精确反演实验区 Chl-a 的浓度。

(2) 为寻找适用于河口及近岸宽浓度范围 TSS 的最优反演模型，利用大量的高浓度 TSS 实测数据，比较了基于 MODIS 250m 波段开

发的 TSS 反演模型, 发现当 TSS 浓度小于 31mg/L 时, 即 $\lg(\text{TSS}) \leq 1.58$, 对数比率值随着 TSS 浓度的增加而增大, 当 TSS 浓度大于 31mg/L 时, 对数比率值随着 TSS 浓度的增加而减小。考虑到同一个对数比率值可能得到两个 TSS 浓度值, 提出了基于顶点的分类算法。将文中开发的对数比率模型用于 MODIS 250m 影像制图, 并得到一个较好的反演结果。同时构建了 HICO 的 TSS 反演模型, 结果证明 HICO 反演结果优于 MODIS 反演结果。

(3) 采用反射光谱 (R)、各种变换形式 $[\text{DR}, \lg(1/R)]$ 以及各种波段组合 (波段比值 SR、波段差值 BR) 分析 CDOM 的光学特性, 并选择最优波段或者波段组合, 构建 CDOM 的遥感反演模型。结果证明 DR (687nm)、SR (512nm, 504nm) 模型精度最好。将文中开发的 CDOM 模型用于 HICO 制图, 结果证明比值模型能够较精确反演广东省近岸河口 CDOM 的浓度。

(4) 基于 Preisendorfer 与 Tyler 提出的 Zsd (Secchi 透明度) 反演理论, 建立了基于两波段遥感反射率比值和潮汐系数修正的适用于近岸海水透明度反演的简易光谱模型。利用同步实测数据验证发现: 大潮期间, 该模型计算的透明度比实测值整体偏高 0.4m 左右; 小潮期间, 该模型计算的透明度与实测值比较吻合。通过潮汐系数修正, 反演的透明度与实测数值吻合较好。将开发的透明度模型用于 HICO 影像制图, 结果证明比值模型能够精确反演广东省近岸河口透明度。

(5) 本书以兖州矿济宁矿区南四湖为研究区, 重点研究矿业扰动区水体组分的敏感波段的选择, 并基于敏感性分析构建水质参数的反演模型, 实现矿业扰动区地表水体的遥感反演。研究区水域面积较小, 需使用高分辨率的遥感影像, 然而高分辨率影像邻近效应严重, 采用辐射传输方程对影像进行邻近效应的去除。结果表明目标的反射率受到邻近效应的影响, 反射率曲线向着接近于背景的方向发生变化, 邻近效应去除后的光谱更接近地物实际的光谱。基于 Hyperion 高光谱影像进行了空间分布制图。

(6) 基于珠江口、韩江河口、徐闻珊瑚礁保护区实测数据, 采用模拟退火算法优化了生物光学模型中的 TSS 后向散射系数模型 (b_{bx})

和双向反射因子 (f/Q)。基于优化参数开发了生物光学正演模型,输入实测的水质数据即可模拟出波长 531nm 处的遥感反射率,并外推到其他波段 (412nm、443nm、490nm、555nm、667nm)。验证结果说明迭代优化的 b_{bx} 以及 f/Q 能够适用于广东省河口和近海岸的水体生物光学参数模拟。

(7) 为解决生物光学模型水体各组分之间组合的非线性问题,本书基于优化的生物光学模型参数开发了水色三参数反演模型,采用实测的 $R_{rs}(531)$ 对其他波段进行纠正,将纠正后的反射率输入到构建的反演模型,极大地提高了反演精度。


本书撰写过程中得到了广州地理研究所陈水森研究员、山东科技大学孙林老师、北京航空航天大学周冠华老师、山东理工大学韩保民院长和范俊甫老师等的大力帮助,在此一一表示感谢。感谢国家海洋局南海分局卢楚谦高级工程师和中国科学院南海海洋研究所曹文熙研究员为首的课题组及课题组成员,在试验采样与化学分析方面给予的帮助。感谢广州地理研究所周成虎院士地理空间智能与大数据创新创业团队对本书撰写过程提供的支持。

本书的出版得到了广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目 (2016ZT06D336)、广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项 (2016GDASRC - 0211、2017GDASCX - 0101、2018GDASCX - 0101)、广东省科技计划项目 (2017010117008、2017B030314138)、广州市科技计划项目 (201806010106、201604016047)、广州市水务科技项目 (MZSK - 2016 - 01、SW - 2018 - 001) 的资助。

本书是在作者多年来第一手实验数据的基础上编写的有关近岸河口水色参数遥感反演的专著,主要结论的支持数据可靠。但因综合性强、涉及学科多、覆盖面广,还有不少科学问题需要进一步研究与探索。作者历时两年,科学谨慎地几易其稿、增删数次,但错误与疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作者

2018年4月



目录

CONTENTS

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 水质遥感的理论基础	3
1.3 水质参数遥感研究进展	7
1.4 研究中存在的问题	17
1.5 研究的目标及内容	18
1.6 技术路线	20
第 2 章 水体光谱的测量与数据处理	21
2.1 近岸河口	21
2.2 内陆水体	24
2.3 水体光谱测量	25
2.4 水体采样及测定	26
2.5 光谱数据及处理	27
2.6 遥感数据及处理	30
2.7 精度评价	45
第 3 章 基于经验/半经验模型的水质参数反演	46
3.1 近岸河口水色参数遥感反演	46
3.2 内陆水体水色参数遥感反演	92
3.3 本章小结	107
第 4 章 基于分析模型的水质参数遥感反演	111
4.1 生物光学模型参数优化	112
4.2 生物光学正演模型及结果分析	116
4.3 生物光学反演模型及结果分析	119

4.4 本章小结	123
第5章 结论与展望	125
5.1 结论	125
5.2 创新点	128
5.3 展望	129
附录 算法	130
参考文献	133

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景及意义

水体是人类赖以生存的生命线,是地理环境的重要组成部分。内陆水体与仅占海洋表面 15% 的海岸带,对全球生物地球化学循环、海岸生态系统及气候变化有很大影响。这里聚集了全球 90% 的人口,提供了全球约 45% 的生物量,并占据着全球 95% 的捕鱼量及其他有价值的生物资源。河口是海岸带的组成部分,也是海洋与河流两种不同类型水体关联的枢纽,既是流域物质的最后的归宿,也是海洋的开始。作为联系大陆与海洋之间能量和物质交换的重要场所,河口汇集各种流域物质,如泥沙、营养物质以及各种化学物质,直接影响并改变着其侧边界、底边界以及区域生态环境。

随着经济的快速发展,内陆以及近海岸人口剧增,人类开始不断加大对河流、湖泊以及海洋资源的开发强度,并向内陆水体以及近岸河口排放大量的生活和生产污染物。研究表明,全球范围内的内陆水体以及近岸河口正遭受着前所未有的强烈扰动(养殖、捕捞、排污、港口、航运、疏浚等),并且已经呈现出生产力下降、生物多样性减少以及水质富营养化等严重的生态与环境问题。可见,人类高强度活动赋予流域生态环境的压力正在向内陆以及近岸河口快速汇集、转移,通过物质与能量通量的变化对河口三角洲及其临近海域的环境产生前所未有的影响。

根据《中国海洋环境质量公报》(2006—2010年),我国监测的 21 个典型海洋生态系统中,有多个海洋生态系统发生了健康级别的恶化:2006 年,黄河河口生态系统、雷州半岛西南沿岸珊瑚礁生态系统由健康降为亚健康状态;2008

年,西沙珊瑚礁生态系统由健康降为亚健康状态;2009年,渤海湾由健康降为不健康状态,广西北海海草床生态系统由健康降为亚健康状态,华南沿海的大亚湾、珠江口和雷州半岛西南沿海海域3个生态监控区,全部处于亚健康和亚健康状态,据第二次全国污染基线调查资料显示,珠江口已成为仅次于渤海湾的全国第二个重点污染海域,已连续5年(2005—2009年)处于不健康状态,雷州半岛西南沿岸包括了很重要的我国大陆唯一的国家级珊瑚礁生态系统,其生态监控区2005年为健康状态,2006年即降为亚健康;2010年,北仑河河口生态系统、海南东海岸珊瑚礁生态系统均由健康降为亚健康状态;我国已没有处于健康状态的河口。可见,我国河口和近岸海域生态系统正承受着日益增加的环境压力。因此,加强我国近岸海洋生态系统的健康变化监测研究日趋紧迫。

水质是评价近岸海洋以及内陆水体生态健康的重要影响因素。水体的富营养化、透明度降低、化学需氧量的升高会导致水体变臭、水质变差,从而使水生植物减少,降低了初级生产力,严重危害了海洋生态健康。因此,美国“河口营养状况评价综合法”(ASSETS)、“全国近岸状况报告”(national coastal condition report,简称NCCR)与欧盟“综合评价法”(OSPAR-COMPP)等都将水质参数作为评价海洋生态健康的重要因子。然而,需要全过程、高密度网的实测站点观测才能准确了解大范围的近岸河口水质状况,面对广阔的水域面积,传统的采样监测显得力不从心,不仅无法准确了解任何水域生态系统的全貌,而且需花费大量的人力物力。

定量遥感恰恰可以克服传统实地采样的缺点,提供了满足内陆水体以及海洋水质监测和制图要求的可行手段。目前,多源遥感器以及相关水质反演算法已经大大改善了内陆水体以及海岸海洋的监测能力。但是,由于近岸海洋地理上空间尺度大以及海岸海洋生态系统学科交叉的本质,也有需要实地、卫星观测和模型进行综合分析的内在要求,以理解、表达和预测与海岸海洋生态系统有关的环境过程。达到这个科学目标的战略之一就是从事实地观测到卫星观测,以增加观测的空间覆盖范围和时间分辨率,然后应用到模型模拟(即再分析),这样可以对时间上连续的监测近岸海洋生态系统及其未来环境的变化更好地认识。可见,遥感方法已经变成了在空间尺度收集许多环境数据最有效的方法。

与大洋水体相比,近岸河口以及内陆水体光学特性复杂,有限的波段及有限的光谱分辨率(Landsat MSS/TM/ETM, SPOT, CZCS)不能准确反映水体复杂的波谱特征,从而限制了它们在近岸河口以及内陆水体水质遥感中的应用,特别是在多种类污染物、严重污染的河流、湖泊、河口、近岸海域的应用。高光谱遥感技术有望解决这一难题。高光谱的光谱分辨率小于10nm,能产生一条

连续的波谱曲线,不同水质的水体会不同的波谱曲线。通过测量水体的光谱,分析水体光谱与水质之间的关系,可以获取水体的水质信息。目前专门为水体设计的高光谱(时间)分辨率传感器如 SeaWiFS、MODIS、MERIS 在水质遥感监测中已经发挥了重要作用。尤其是美国海军研究室于 2009 年发射的高光谱卫星,这是专门为海岸海洋设计的近海高光谱成像仪(HICO),目标就是解剖海岸水体的复杂性。高质量的 HICO 影像势必会在近岸河口以及内陆水体水质的研究中发挥重要作用。

1.2 水质遥感的理论基础

1.2.1 水体光学特征

水体光学特征常用的物理量包括表观光学量和固有光学量。

表观光学量(Apparent Optical Properties,简称 AOPs)是随光照条件变化而变化的量,包括离水辐射亮度 L_{sw} 、归一化离水辐射亮度 L_{wn} 、刚好在水面以下的辐射照度比(或漫反射比) $R(0^-) = E_u(0^-)/E_d(0^-)$ 、遥感反射率 $Rrs = L_{sw}/E_d(0^+)$ 等。

固有光学量(Inherent Optical Properties,简称 IOPs)是只与水体成分有关而不随光照条件变化而变化的量,包括:

- (1) 水分子的吸收系数 a_w 、散射系数 b_w 、散射相函数 β_w 。
- (2) 叶绿素 a (Chl-a) 的吸收系数 a_c 、散射系数 b_c 、后向散射系数 b_{bc} 、前向散射系数 b_{fc} 。
- (3) 有色可溶性有机物(CDOM)的吸收系数 a_g 。
- (4) 总悬浮物(TSS)的吸收系数 a_x 、散射系数 b_x 、后向散射系数 b_{bx} 、前向散射系数 b_{fx} 。

1.2.2 水质参数光谱特征

水体的波谱特征是由水体自身的组成物质决定的,但又受到其他各种外界状态的影响。小于 600nm 的可见光波段,水体以透射为主,吸收少、反射率较低。其中,水面反射率约为 5%,并随着太阳高度角的变化呈 3%~10% 的变化;水体可见光反射率包括水底反射、水表面的镜面反射以及水中光学物质(Chl-a、TSS、CDOM)反射。目前对水体的研究多选择不受底质影响的光学深水,采用一定的观测几何回避水表面的镜面反射,水体的反射主要由水中光学物质贡献。

水体中的 Chl-a 是浮游植物分布的指标,也是衡量水体初级生产力和水体

富营养化的基本指标。Chl-a 与水体的光谱响应关系的研究非常重要。一般来说，随着 Chl-a 浓度的不同，在波段 430~700nm，光谱会选择性出现明显的差异。图 1.1 是不同 Chl-a 浓度的水面光谱曲线。从图可知，在波长 440nm 处出现一个吸收峰；波段 400~480nm 反射率随着 Chl-a 浓度的增加而降低；在波长 520nm 处出现“节点”，该处的反射率不再随着 Chl-a 浓度的增加而变化；在波长 550nm 处出现一个反射峰，这个反射峰随着 Chl-a 浓度的增加而上升；在波长 685nm 附近出现明显的荧光峰，这是由于浮游植物分子吸收光子后，再发射引起的拉曼效应，激发出的能量发出的荧光的结果。上述 Chl-a 的光谱特征是其反演的理论基础。

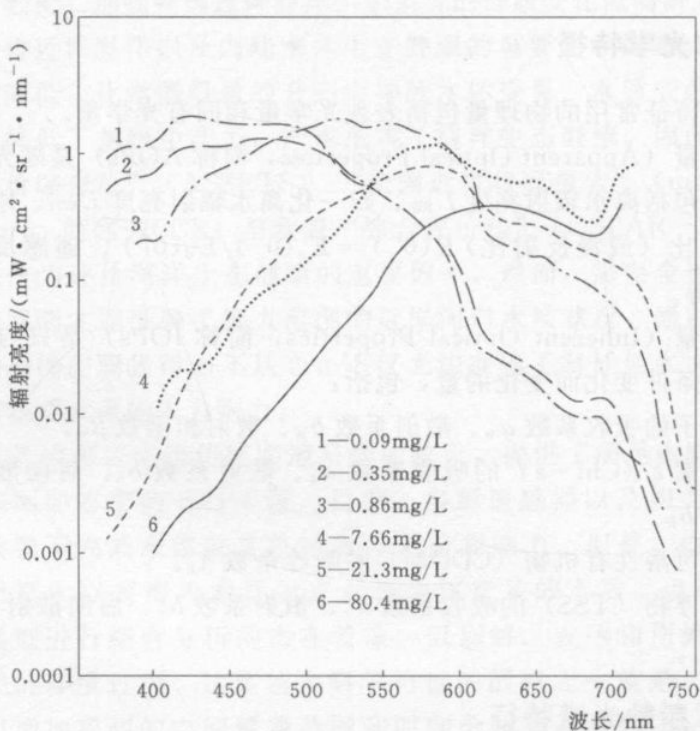


图 1.1 不同 Chl-a 浓度的水面光谱曲线

水体反射率与混浊度之间存在密切的关系。随着 TSS 的增加，水体在整个可见光波段的反射率增加，水体由暗变亮，同时反射峰值向长波方向移动，即蓝—绿—红光波段移动，反射峰值的宽度也变得越来宽。图 1.2 为不同 TSS 的水体光谱曲线，清澈水体与混浊水体光谱差异明显，清水的反射率比混浊水体的要低，混浊水体的反射峰值与清水相比出现在更长的波段，正是由于水色与 TSS 含量之间的关系，水色成为 TSS 含量的一种精确指标。

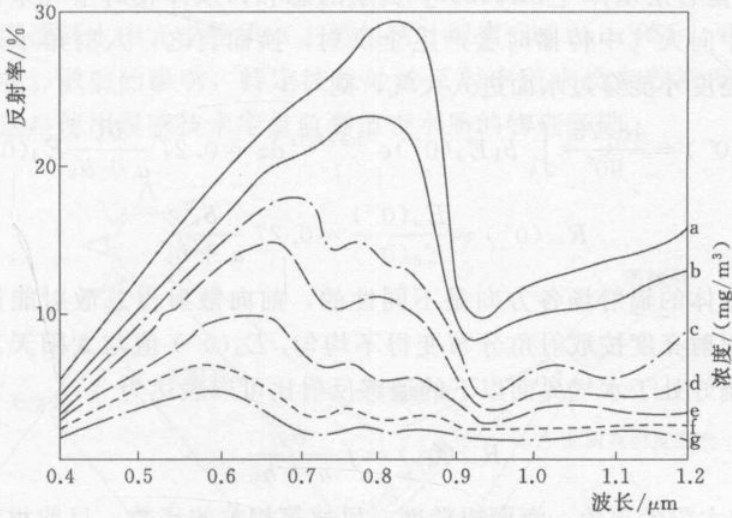


图 1.2 不同 TSS 的水体光谱曲线

1.2.3 水下辐射传输方程

光在水中的传播可以用经典的辐射传输方程来表达, 这个传播包括粒子的吸收与散射两个物理过程。在假定水体的光学特性是水平均一、垂直分层的情况下, 可以用式 (1-1) 表达:

$$\frac{dL(z, \theta, \phi)}{dz} = -cL(z, \theta, \phi) + \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \beta(\theta, \phi, \theta', \phi') L(z', \theta', \phi') d\Omega' \quad (1-1)$$

如果假定: ①辐射场各向同性性质, 那么辐射以漫射辐射向下传输, $L(z, \theta, \phi) = L(z)$; ②所有水体的光学参数只与 z 有关; ③大颗粒物占优势的情况下前向散射远大于其后向散射, 即 $b_f > b_b$ 。式 (1-1) 可以表达为

$$\frac{dE_d(z)}{dz} = -cE_d(z) + b_f E_d(z) \quad (1-2)$$

式中, $c = a + b_f + b_b$; a 为总吸收系数。则

$$\frac{dE_d(z)}{dz} = -(a + b_b) E_d(z) \quad (1-3)$$

$$E_d(z) = E_d(0^-) e^{-(a+b_b)z} \quad (1-4)$$

在水深 z 处, dz 层对向上辐射传输通量密度的贡献可以表示为

$$dE'_u(z) = b_b E_d(z) dz = b_b E_d(0^-) e^{-(a+b_b)z} dz \quad (1-5)$$

$dE'_u(z)$ 向上辐射传输过程会再一次衰减, 所以公式可以进一步表达为

$$dE_u(z) = dE'_u(z) e^{-(a+b_b)z} = b_b E_u(0^-) e^{-2(a+b_b)z} dz \quad (1-6)$$

$E_u(0^-)$ 是各层水体 $[dE_u(z)]$ 贡献的总和, 水体相对空气来说为光密介质, 光从水中向大气中传播时会产生全反射, 换言之, 入射角小于 48.75° 的向上的辐射亮度才能穿过水面进入大气, 则

$$E_u(0^-) = \frac{48.75^\circ}{90^\circ} \int_0^\infty b_b E_d(0^-) e^{-2(a+b_b)z} dz = 0.27 \frac{b_b}{a+b_b} E_d(0^-) \quad (1-7)$$

$$R_\infty(0^-) = \frac{E_u(0^-)}{E_d(0^-)} = 0.27 \frac{b_b}{a+b_b} \quad (1-8)$$

事实上水体的辐射场各方向是不同性的, 前向散射占总散射能量的绝大部分时, 散射辐射亮度按散射角分布变得不均匀, $E_d(0^-)$ 值与太阳天顶角有密切关系, 于是刚好处于水气界面以下的遥感反射比可以表达为

$$R_\infty(0^-) = f \frac{b_b}{a+b_b} \quad (1-9)$$

式中: f 为与太阳天顶角、海面粗糙度、风速等相关的函数, 目前很多研究中取常数 $0.27 \sim 0.33$; b_b 为水体总的后向散射系数; a 为水体总的吸收系数。

光穿过水体继续向大气传播, 刚好处于水气界面以上的遥感反射率可以表达为

$$R_{rs} = \frac{ft}{Qn^2} \frac{b_b}{a+b_b} \quad (1-10)$$

式中: t 为水气界面的透射率; n 为水体的折射系数; b_b 为水体总的后向散射系数; a 为水体总的吸收系数; $\frac{t}{n^2} = 0.54$; Morel 和 Gentili 的研究表明, f/Q 为太阳天顶角的弱函数。

上述公式表达了固有光学量与表观光学量的关系, 海洋水色遥感的目的是通过光学量反演水体中的水色参数及透明度。

1.2.4 水色遥感辐射传输方程

星载或者机载的传感器接收到的总电磁波谱信息主要包括以下三部分: 大气对太阳光的散射、水体后向散射和水底的反射以及水表面产生的镜面反射。电磁波与水体的相互作用如图 1.3 所示。镜面反射导致数据无法使用, 通常来说水质监测的传感器通过设定一定的观测角和方位角, 即可避免太阳光镜面反射的影响, 在此不考虑它的影响。其次就是水底的反射影响, 目前研究的主要是针对光学深水, 如果不考虑水底的反射, 水色遥感辐射传输方程可以表达为

$$L_t = L_r + L_{ra} + L_a + Tl_g + tL_w \quad (1-11)$$

传感器接收的辐射通量 90% 以上都是由大气因素产生的, 主要包括大气分子和气溶胶散射。大气校正对水色遥感来说非常重要。水体后向散射能量才是

可以用来监测水质参数的信号,称为离水辐射亮度 (water-leaving radiances)。离水辐射亮度受到水中光学物质 (主要包括叶绿素 Chl-a、TSS、可溶性有机物 CDOM) 吸收、散射的影响,特定波长处的反射率随水质参数浓度的变化具有显著差异,这是使用遥感技术定量监测地表水质的物理基础。

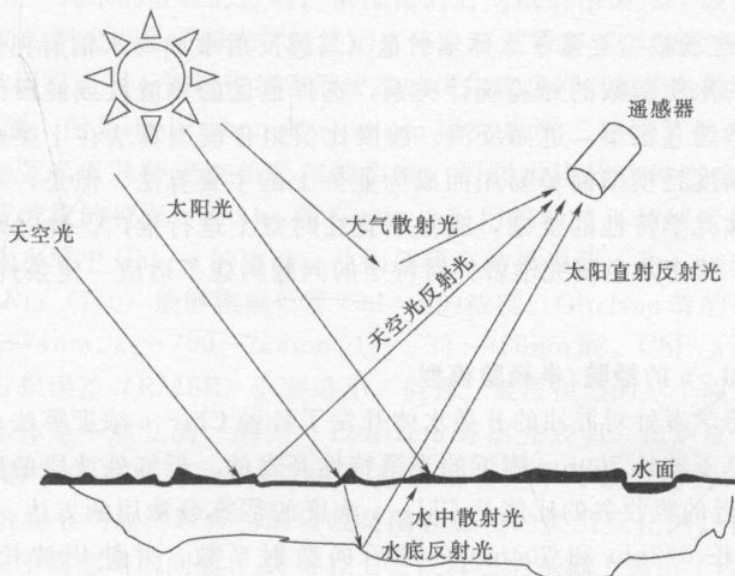


图 1.3 电磁波与水体的相互作用

1.3 水质参数遥感研究进展

水体成分的遥感反演算法与水体的复杂性有很大关系。Morel 和 Prieur 根据水体的光学特性将海水分为 I 类水体和 II 类水体。I 类水体的光学特性主要由浮游植物及其降解物所决定。典型的 I 类水体是大洋开阔水体。II 类水体是对除 I 类水体以外的所有其他自然水体的统称,如近岸、河口、内陆湖泊、河流与水库等。II 类水体的光学特性不仅受浮游植物及其降解物的影响,还受悬浮无机颗粒物与黄色物质的影响,并且这些物质的变化与浮游植物无关。

Morel 和 Gordon 把水色反演算法归为三类:①经验/半经验模型 (Empirical), 主要基于水体辐射量 (遥感反射率或离水辐射亮度等) 与某一水体成分之间的统计关系;②半分析模型 (Semi-analytic), 基于表观光学量与固有光学量之间的经验关系, 导出水体辐射量与水体成分之间的关系;③物理模型, 以由辐射传输理论提出的上行辐射与水体中光学活性物质特征吸收和后向散射特性之间的关系为基础, 利用遥感测量得到的水体反射率反演水体中各组分的特征吸收系数

和后向散射系数,并通过水体中各组分浓度与其特征吸收系数、后向散射系数相关联,反演水体中各组分的浓度。20世纪90年代中后期,出现了正向模拟与优化算法相结合的反演算法。这类算法对于Ⅱ类水体可能会更加有效。

1.3.1 经验/半经验模型

经验/半经验模型是基于水体辐射量(遥感反射率或离水辐射亮度等)与现场同步测量的水质参数的经验统计关系,选择最优的单波段或波段组合数据与实测水质参数建立模型,进而反演。波段比值组合模型算法在Ⅰ类水体中具有较高的反演精度且模型简单易用而成为业务上的主要算法。但是,对于Ⅱ类水体,由于水体光学特性的复杂,通常不宜在时空上进行推广。针对水体光学特性的复杂性,很多水色研究学者针对特定的问题构建了适应一定条件的经验/半经验模型。

1.3.1.1 Chl-a 的经验/半经验模型

水色遥感学者针对混浊的Ⅱ类水体开发了各种 Chl-a 浓度算法。所有的这些算法都是基于波长 700nm 附近的光谱特性开发的。近红外波段的反射峰与波长 675nm 附近的吸收谷的比值是 Chl-a 浓度的估算最常用的方法。Gons 等首次获得了波长 672nm 和 704nm 处的后向散射系数,并使用波长 704nm 与 672nm 处的吸收来估算 Chl-a 浓度。焦洪波使用波长 719nm 与 667nm 处反射率的比值估算了太湖 Chl-a 的浓度。Thiemann 和 Kaufman 使用波长 705nm 与 678nm 外反射率的比值估算了 Mecklenburg 湖泊的 Chl-a 浓度。也有其他研究者使用波长 725nm 以外的波段与波长 675nm 反射率的比值估算 Chl-a 浓度。这些算法都是假设 Chl-a 的特定波长的吸收系数或者 Chl-a 的荧光值为常量,这些假设极大地影响了反演精度。实际上,这些参数是随浮游植物群落的生理和生态的变化而改变的。例如,Chl-a 的特定波长的吸收是受其他颗粒物或者包裹效应影响的。Chl-a 荧光效应的产生受浮游植物颗粒物的类别组成、光照条件、营养状况的影响。因为反射率数据的收集是在太阳光下的,而太阳光为 Chl-a 荧光效应的激发提供能量。Chl-a 荧光信号随反射率的减小向短波方向移动。

随后,荧光基线高度 FLH 以及一阶微分算法用于估算混浊水体中 Chl-a 的浓度。由于浮游植物群落结构以及水体成分的吸收降低了荧光效应需要的能量,荧光基线高度定量精度降低。光学特性变化明显,尤其对于混浊的水体,一阶微分法也只能去除纯水的影响。由于 TSS 以及可溶性有机物浓度的影响,一阶微分估算 Chl-a 的精度是有限的。这些算法都不可用于光学特性变化显著的混浊水体中 Chl-a 的估算。