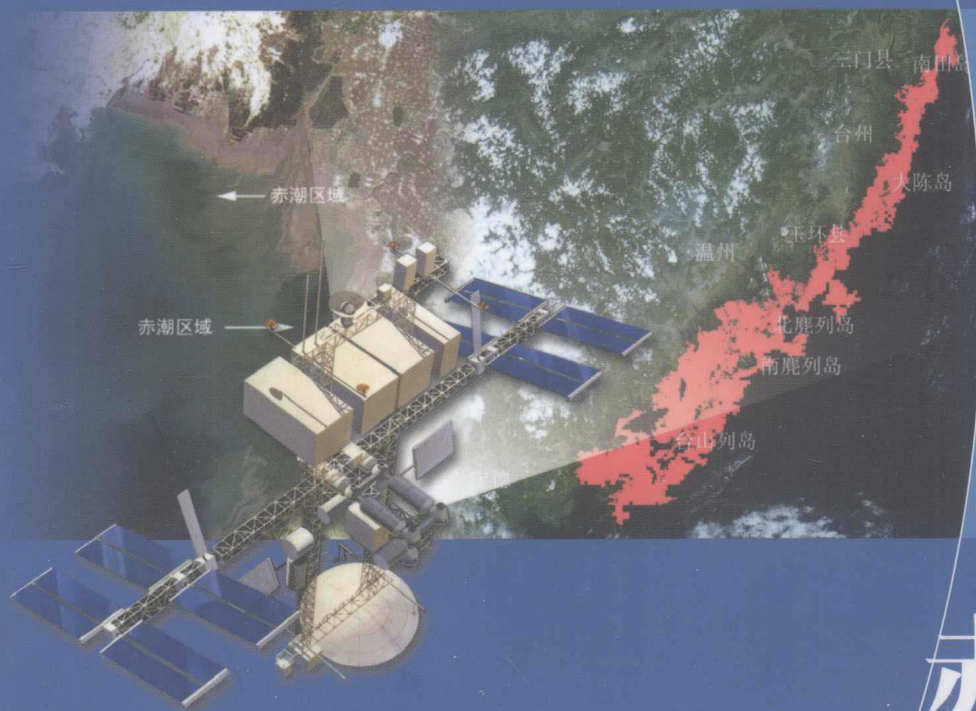




我国近海海洋综合调查与评价专项成果  
“十一五”国家重点图书出版规划项目



CHICHAO ZAIHAI  
WEIXING YAOGAN  
TANCE JISHU

# 赤潮灾害 卫星遥感探测技术

赵冬至 主编



海军出版社



THE UNIVERSITY OF CHINA PRESS



# 中國史學 與地理學的發展

作者：XXX



THE UNIVERSITY OF CHINA PRESS

# 赤潮灾害卫星遥感探测技术

赵冬至 主编

海洋出版社

2009年·北京

**图书在版编目(CIP)数据**

赤潮灾害卫星遥感探测技术/赵冬至主编. —北京:海洋出版社,2009. 12

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7602 - 2

I. ①赤… II. ①赵… III. ①红潮 - 卫星遥感 - 卫星探测 - 技术… IV. ①X834  
②X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 211089 号

•

责任编辑:陈莎莎

责任印制:刘志恒

**海洋出版社 出版发行**

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京顺诚彩色印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

开本:889mm×1194mm 1/16 印张:19

字数:487 千字 定价:80.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换



# 前言

## Foreword

赤潮或有害藻华这个全球性的海洋环境灾害,伴随着人类工业化进程在不断加剧,这是人类恣意改变自然界正常元素地球化学循环的后果。近年来,随着人类无节制的经济活动对自然界产生的耦合效应,气候出现了异常变化,这使海洋环境要素发生了改变,这些改变导致了赤潮灾害的种类、暴发机制、发生规模、持续时间、发生时间都出现了戏剧性的变化,其主要表现在赤潮藻种由硅藻类向甲藻类转变、由浮游植物向大型藻类转变。2008年发生在黄海南部海域的大规模浒苔绿潮灾害,向人们展示了自然界对人类活动响应的威力。

作为赤潮灾害减灾防灾的重要手段之一,卫星遥感技术在近十年的时间里,越发显示了其技术价值所在,对深入了解和认识赤潮灾害暴发机制、制定灾害应急方案、减灾防灾管理等方面都发挥了十分积极的作用,也充分显示了技术进步的作用。记得在1998年遥感监测渤海赤潮时,能够使用的卫星数据源十分有限,而在今天,无论是从数据的获取时效、卫星波段数量、可用反演参数、可得到的赤潮灾害参数都发生了巨大的变化,正是这些变化支撑了赤潮卫星遥感探测技术水平的大幅度提高。

本文汇集了近十年来我们这个团队在赤潮灾害遥感监测技术方面的研发成果。这些成果在早期国家“九五”科技攻关的支持下起步,在国家“863”技术的支持下得到了深化,在国家“908”专项的支持下得到了完善,在国家自然科学基金的支持下应用理论得到了提高,在国家海洋生态环境监测计划中赤潮监控区业务化监测工作的支持下得到了检验和业务化应用,真正实现了在应用基础研究的基础上开展应用技术开发,并将其应用到实际业务化工作中的成果转化工作。

在这个过程中,研究团队贯彻始终的坚持精神是这项成果得以面世的重要保障。本书的参编人员都是相关内容的亲历者,在技术困难面前不低头,在经费不足时不停顿,在艰苦的外业条件下能吃苦,所有成员既能高效完成自己的工作,又能密切协作,这些都是本研究团队宝贵的精神财富。同时,国家科技支撑计划、“863”计划、国家海洋局科技司、“908”专项办公室、国家自然科学基金委员会等为本团队提供了宝贵的资金支持,国家海洋局环境保护司、国家海洋环境监测中心为技术的业务应用提供的业



务支持,也是本项工作得以持续发展的重要保障。

尽管本书取得了一定的成果,但由于赤潮灾害的复杂性,面对越来越复杂的海洋环境灾害形势和气候变化对海洋的深入影响,赤潮灾害遥感监测技术研发还有很多未解难题,仍有待于我们和更多的有识之士共同迎接这个挑战,让卫星遥感技术在赤潮灾害减灾防灾工作中提供更多信息,发挥更大作用。

赵冬至

2009年6月29日于大连弘基书香园

# 目次

赤潮灾害卫星遥感探测技术

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| <b>第1章 赤潮卫星遥感监测绪论</b>       | (1)  |
| 1.1 水色遥感基本术语                | (1)  |
| 1.2 光学理论基础                  | (6)  |
| 1.3 赤潮遥感监测简述                | (8)  |
| <b>第2章 赤潮藻种光谱响应机理</b>       | (13) |
| 2.1 赤潮生消过程中生物光学特性的变化        | (13) |
| 2.2 蓝绿光波段赤潮水体的光谱响应          | (13) |
| 2.3 红光和近红外波段赤潮水体的光谱响应       | (14) |
| 2.4 基于吸收和荧光的光谱差异            | (16) |
| 2.5 对赤潮生消过程中光谱机理的认知         | (18) |
| <b>第3章 富营养化水体浮游藻类吸收特征</b>   | (20) |
| 3.1 近岸赤潮高发区浮游藻类吸收特征         | (20) |
| 3.2 养殖区浮游藻类吸收特征的季节性变化规律     | (26) |
| <b>第4章 赤潮藻类水体的荧光特性</b>      | (35) |
| 4.1 叶绿素荧光                   | (35) |
| 4.2 叶绿素荧光机理                 | (38) |
| 4.3 叶绿素荧光测量方法               | (44) |
| 4.4 太阳激发的叶绿素荧光峰(SICF)的表征方法  | (64) |
| 4.5 归一化荧光高度法与赤潮水体叶绿素 a 浓度关系 | (67) |
| 4.6 基线荧光峰高度与赤潮水体叶绿素浓度关系     | (71) |
| <b>第5章 黄色物质光学特性及其遥感反演</b>   | (75) |
| 5.1 黄色物质的研究历史               | (75) |
| 5.2 黄色物质的固有光学特性             | (80) |
| 5.3 典型海湾黄色物质光学特性研究          | (84) |

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 5.4 黄色物质卫星反演模型 .....                  | (91)         |
| <b>第6章 基于 AVHRR 的赤潮探测方法 .....</b>     | <b>(95)</b>  |
| 6.1 AVHRR 的特点 .....                   | (95)         |
| 6.2 AVHRR 探测藻华或叶绿素 a 的概念模型 .....      | (96)         |
| 6.3 AVHRR 的大气校正 .....                 | (97)         |
| 6.4 水色因子 $C_{21}$ 法 .....             | (98)         |
| 6.5 归一化差值法 .....                      | (106)        |
| 6.6 Rd 法 .....                        | (108)        |
| 6.7 AVHRR 赤潮探测的影响因素分析 .....           | (110)        |
| 6.8 结论 .....                          | (112)        |
| <b>第7章 基于吸收的叶绿素 a 探测技术 .....</b>      | <b>(114)</b> |
| 7.1 基本原理 .....                        | (114)        |
| 7.2 叶绿素 a 反演算法 .....                  | (115)        |
| 7.3 MODIS 生物光学算法 .....                | (124)        |
| 7.4 MODIS 生物光学算法评估 .....              | (130)        |
| <b>第8章 基于荧光的叶绿素 a 卫星探测技术 .....</b>    | <b>(140)</b> |
| 8.1 发展史 .....                         | (140)        |
| 8.2 叶绿素荧光卫星遥感原理 .....                 | (142)        |
| 8.3 卫星传感器性能参数 .....                   | (144)        |
| 8.4 不确定性分析 .....                      | (147)        |
| 8.5 卫星算法 .....                        | (150)        |
| 8.6 基线荧光高度算法的敏感性分析 .....              | (151)        |
| 8.7 基线荧光高度算法的现场研究 .....               | (165)        |
| 8.8 不同卫星赤潮探测精度比较 .....                | (174)        |
| 8.9 影响因素 .....                        | (177)        |
| 8.10 叶绿素荧光量子产量的现场测量 .....             | (179)        |
| 8.11 叶绿素荧光量子产量的 MODIS 算法 .....        | (188)        |
| <b>第9章 SST 在赤潮卫星遥感监测中的应用 .....</b>    | <b>(195)</b> |
| 9.1 赤潮生消过程中温度的变化 .....                | (195)        |
| 9.2 SST 信息提取原理 .....                  | (199)        |
| 9.3 基于温度的赤潮遥感探测 .....                 | (200)        |
| 9.4 结论与问题 .....                       | (203)        |
| <b>第10章 赤潮生消过程中透明度的变化及其卫星探测 .....</b> | <b>(204)</b> |
| 10.1 SDD 遥感定量原理 .....                 | (204)        |
| 10.2 透明度及相关参数的空间分布 .....              | (206)        |

|        |                         |       |
|--------|-------------------------|-------|
| 10.3   | 透明度遥感定量模型和讨论 .....      | (207) |
| 10.4   | 赤潮生消过程中 SDD 的变化 .....   | (210) |
| 第 11 章 | 赤潮灾情要素的遥感探测 .....       | (211) |
| 11.1   | 基于叶绿素的浮游植物细胞数探测 .....   | (211) |
| 11.2   | 浮游植物细胞数的遥感探测模型 .....    | (213) |
| 11.3   | 赤潮分布区判别模型 .....         | (216) |
| 11.4   | 赤潮浮游植物的细胞增殖速率 .....     | (217) |
| 11.5   | 结 论 .....               | (218) |
| 第 12 章 | 海洋赤潮卫星遥感监测系统 .....      | (220) |
| 12.1   | 总体框架 .....              | (220) |
| 12.2   | 系统界面 .....              | (223) |
| 12.3   | 系统功能及流程图 .....          | (225) |
| 第 13 章 | 赤潮管理信息系统 .....          | (229) |
| 13.1   | 系统的总体设计 .....           | (229) |
| 13.2   | 软件的安装和启动 .....          | (235) |
| 13.3   | 软件的使用方法 .....           | (235) |
| 第 14 章 | 赤潮卫星遥感监测业务化应用 .....     | (241) |
| 14.1   | 探测参数 .....              | (241) |
| 14.2   | 业务运行平台 .....            | (242) |
| 14.3   | 主要方法 .....              | (243) |
| 14.4   | 业务流程 .....              | (244) |
| 14.5   | 精度检验 .....              | (245) |
| 14.6   | 发展展望 .....              | (252) |
| 第 15 章 | 国家赤潮业务化立体监测预警系统构想 ..... | (253) |
| 15.1   | 系统建设目标 .....            | (253) |
| 15.2   | 系统技术构成 .....            | (254) |
| 15.3   | 系统监测对象与功能 .....         | (256) |
| 15.4   | 系统建立的可行性 .....          | (259) |
| 15.5   | 问题与展望 .....             | (262) |
| 参考文献   | .....                   | (264) |
| 附录 A   | 不同叶绿素 a 测试方法转换模型 .....  | (265) |
| 附录 B   | 赤潮灾害卫星遥感监测准确率检测方法 ..... | (274) |
| 图集     | 赤潮过程图集 .....            | (279) |

# 第1章 赤潮卫星遥感监测绪论

赤潮发生时，赤潮生物大量聚集，使水体颜色发生明显变化，进而赤潮水体的光谱特征发生变化，且存在明显差异，使得利用水色遥感监测赤潮成为可能，并可用来区分赤潮种类。水体光谱的变化特性（包括反射、吸收与散射特性），是水色赤潮遥感监测的基础，是水色遥感生物—光学算法开发的重要组成部分。本章首先介绍水色遥感的基本术语，并对光学理论进行简要阐述，最后简要说明赤潮遥感监测的方法依据。

## 1.1 水色遥感基本术语

水色遥感是利用机载或星载传感器探测与海洋水色有关参数的光谱信息，经过大气校正，根据水体生物光学特性求得水体中叶绿素浓度和悬浮物含量等海洋环境要素的一种方法。

### 1.1.1 水色组分

水色组分是指浮游藻类、非色素颗粒以及黄色物质。

#### 1.1.1.1 浮游植物组分

海洋透光表层普遍存在的微小、自由漂浮的有机质，即浮游植物。它们通常是单细胞植物，细胞最小可低于  $1\mu\text{m}$ ，最大则能超过  $200\mu\text{m}$ 。其构成了水生生物链的基础，同时也是全球碳循环的重要组成部分。目前已知数以千计大小、形状不同的浮游植物种类生活在水生环境中，其藻种组成和细胞数量随着时间和空间变化。主要浮游植物色素的浓度，即叶绿素  $a$  通常作为浮游植物细胞数量的指示因子，但是需要指出的是，在浮游植物细胞中还伴生有一定数量的辅助色素，其水样的色素组成随着浮游植物种群的群落结构以及细胞的生理状态不同而变化。

如果说有哪一种单一组分能够作为水生环境光学特性变化的代表，就是浮游植物。但是，即使在最简单的水生环境中，这些有机体通常与其他微小的有机体，如浮游动物、异氧菌和病毒等共生。这些有机体降解的非生命产物也以碎屑物的形式存在于环境中。从操作角度来看，当我们从天然水生环境中定量分离浮游植物的光学特性时，其他微小颗粒物的贡献通常无法从浮游植物中剔除。例如，这些有机体多条光谱曲线的叠加，使分离他们变得十分困难。进而，在分析自然环境中的光学数据时，从共存的其他物质中分离浮游植物信号通常会有些难度。因此，在遥感内容中，除非特别说明，浮游植物也同时包括其他微小有机体。从光学观点的实际情况来看，微小有机体的光学信号通常以高色素含量的浮游植物为主。

### 1.1.1.2 悬浮物组分

我们将所有无机颗粒物称为悬浮物组分。在近岸和内陆浅水中,波浪和水流能使底质沉积物再悬浮,明显影响水色。在检测水体的光学特性时,泥沙含量高的河流、海湾、受河流径流影响的大洋水体以及潮差较大的海域可以确定是悬浮颗粒物扮演重要角色的典型区域。与浮游植物组分不同,它们的影响通常界定在某些沿岸和内陆水域。需要特别明确的是“悬浮物”这一概念并不是指单一类型的物质,而是指具有各自独立特点的众多物质的总和。

### 1.1.1.3 黄色物质组分

黄色物质是有机、溶解物质的综合体,主要由腐殖酸和棕黄酸组成。黄色物质在黄色波段吸收最小使其呈黄色而得名。Kall (1966) 认为,黄色物质是由碳水化合物经麦拉德反应而形成的,即在含有碱和氨基酸的溶液中进行化学反应受热形成,成为黄色或棕色类黑精的终产物。之后,Gagosian 和 Stuermer (1977) 指出,黄色物质可能由下列成分组成:氨基酸、糖、氨基糖和脂肪酸类。另外,也还可能有类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚等。Kirk (1994) 认为,黄色物质在所有自然水体中能构成一定大小的可溶有机碎片,它由一些脂肪族、芳香族聚合物混合而成。《国际海洋水色协调工作组报告》(IOCG, 2000) 指出,黄色物质是一类含有腐殖酸和灰黄酶酸的可溶性有机物。黄色物质有两种来源:海源,由浮游植物细胞和其他有机颗粒物的降解产生;陆源,由河流远距离输送而来,如流经高植被覆盖和富含有机质的土壤时积聚了大量黄色物质。就目前的认识而言,远程运输积聚区域的黄色物质浓度远高于局部产生的黄色物质浓度。黄色物质易于受到光的降解,因此,水体深部的黄色物质浓度要高于表层。

## 1.1.2 水体类型

### 1.1.2.1 一类水体和二类水体

按照 Morel 和 Prieur (1977)、Gordon 和 Morel (1983) 等介绍的划分方法,海洋水体被分为一类水体和二类水体。按照定义,一类水体是指以浮游植物及其伴生、共变物为主要成分并主导水体光学特征变化的水体;二类水体是指不仅受到浮游植物及其相关颗粒物,同时也受到独立于浮游植物变化的其他物质,特别是悬浮态的无机颗粒物和黄色物质主导其水体光学特性的水体。大多数开阔海域的海水接近于一类水体。二类水体位于与人类关系最密切、受人类活动影响最强烈的近岸、河口等海域,其中总悬浮物、浮游藻类和黄色物质是影响海洋水色的三要素。

这个分类不能排除浮游植物之外的其他组分对一类水体光学特性有所贡献的可能性。事实上,已有研究者指出,包括有摄食和浮游生物有机体自然降解产生的生物碎屑及生物颗粒释放的溶解有机物(黄色物质)在内的众多组分均能影响一类水体的光学特性,特别是改变它们的吸收特征。与浮游植物共存的小有机体,如鞭毛类、异养菌和病毒在检测一类水体某些光学特性时也扮演了重要角色。因此,浮游植物不是主导一类水体水色特征的唯一代表,仅是规定了一类水体中其他组分的贡献相对较小,可模拟为浮游植物浓度的函数。另一方面,二类水体中,其他颗粒物或黄色物质(或两类组分)可以对光学特性有明显的贡献。



### 1.1.2.2 水体类别的定量划分

两种水体状态的划分通常采用 Prieur 和 Sathyendranath (1981)、Morel 和 Antoine (1997) 以及 Dowell (1998) 等建立的图示法来表示 (图 1.1)。其主要方法是用某一波长、特定地点和时间的特征参数 (如吸收或反射率) 的光学特征计算浮游植物、黄色物质和悬浮物的贡献率, 通过坐标轴上三个组分各自的贡献率, 确定三角图上的唯一点 (图 1.2)。如果组分中任何一个的贡献占优势, 则图 1.1 上的点就向相应的顶点方向移动。换句话说, 如果三类组分的贡献相等, 这个点将移向等边三角形的中心。图 1.1 清晰表明, 在所有可能的范围内, 可确定几个明确的类型如下。

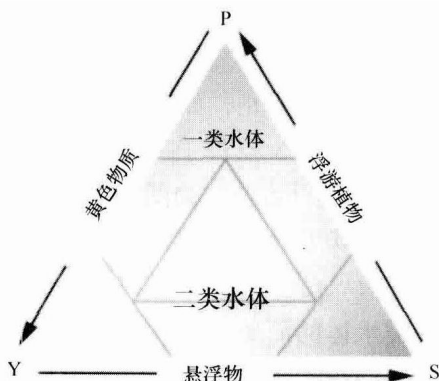


图 1.1 一类和二类水体分类图

(据《国际海洋水色协调工作组报告》)

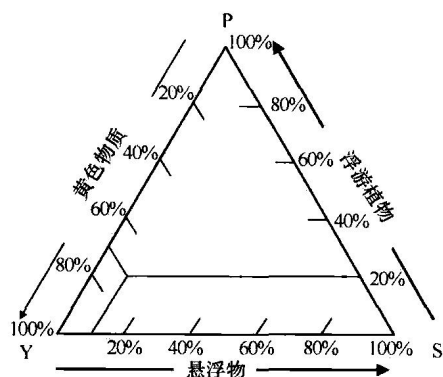


图 1.2 用于水体划分的图解说明

(据《国际海洋水色协调工作组报告》)

1) 仅有一种组分占优势的情况。属于这种情况的水体将落到图 1.1 中靠近三个顶点的三个小三角形中的一个内, 在这些小三角形之内, 一个组分的贡献将超出总体的 2/3。

2) 任意两个组分的贡献占优势时, 第三个组分处于次要角色。这种情况用沿三个轴的三个梯形区域表示。

3) 所有组分均扮演了重要角色。这种情况由位于图 1.1 中部的内三角来表示。从光学角度来看, 基本上这种情况属于最复杂的水体类型。

由图 1.1 可知, 一类水体表示了浮游植物为主的情况, 二类水体则表示了所有其他可能的情况。需要指出的是, 这个分类是基于三个组分的相对贡献, 而不是依据其单独贡献的数量。例如, 一类水体包含了从贫营养 (浮游植物较少) 到富营养 (浮游植物较多) 的不同情况, 其他组分的贡献仍然相对较小。同时也应指出, 构成背景光学特性的纯水的贡献不进入分类, 只与三个变化的组分有关。

需要进一步重申的是, 图形上样本位置的确定主要取决于使用的波长。在应用到多波段时, 要谨慎确保分类对所有应用到的波长都有效。另外需牢记的是, 图 1.1 的三角分类仅对有足够光学深度水体才有效。在水体的光学深度较小时, 我们要切记水体底部能对离水辐射信号产生重要的影响。

图 1.1 可帮助我们在一类、二类水体的定性划分实现更加定量的分类。但是需要强调的是这样简单的分类无法实现非常精确的定量。例如, 图 1.1 清晰地表明, 即使在表征为一类水体的顶部三角形, 相对于浮游植物浓度而言, 还是有一些悬浮物和黄色物质的波动空间。

这个分类方法最有价值之处在于它是一个简单的工具，能从这样的简单假设并不存在的光学复杂水体中区分出浮游植物有关的信号为主体的水体。

下面举例说明水体类别的具体界定方法。如前所述，这个分类主要基于三个水色组分，浮游植物、黄色物质和悬浮物对光学特性的相对贡献。纯水的光学特性不影响这个分类。下面举例说明依据 440nm 的吸收系数来对水体分类 (Priour Sathyendranath, 1981)。三角形三个边的每一边长表示为每个独立组分的 100% 吸收。也就是说，顶点 P 距基线 YS 的总高度表示为 440 nm 处浮游植物组分的 100% 吸收，同理适用其他两个组分。因此，我们假定，X 点按照如下每个组分在 440 nm 处的吸收值来确定：黄色物质吸收， $a_y(440) = 0.7 \text{ m}^{-1}$ ；浮游植物吸收， $a_p(440) = 0.2 \text{ m}^{-1}$  以及悬浮物吸收， $a_s(440) = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 。则黄色物质、浮游植物和悬浮物的贡献率分别为 70%、20% 和 10%。这样，在黄色物质轴上的 70% 处沿着与 PS 平行方向画一直线，在浮游植物轴上的 20% 处平行于 YS 轴画一直线，在悬浮物轴上的 10% 处平行于 PY 轴画一直线，三条直线的交点即为 X 点。需要指出的是，如果另一个站位各组分的吸收绝对数值不同，但相对比例却与 X 站位相同，那它将与 X 点位于三角分类图的同样位置上，这是因为这种表示方法是基于吸收的相对值而不是绝对数量。如图 1.2 所示，X 点靠近顶点 Y，表明 X 站位所在的水体为黄色物质占优势的二类水体。应指出的是，所有一类水体均出现在靠近顶点 P 处。

从光学数据的模拟和解释角度上看，一类水体和二类水体的简单区分具有某些重要的意义。例如，分类意味着一类水体的所有光学特性可模拟为叶绿素浓度的函数，其前提假设是浮游植物及其协变物决定了一类水体的光学特性和叶绿素可作为浮游生物细胞数的指示因子。但变量模拟方法意味着如果我们知道任何其他波长的光学特性值以及这些关系是恒定的，则在任何波长的光学特征值是可预测的。通常在海洋环境中，在藻类和色素组成以及随叶绿素浓度而变化的浮游植物光学特性中有一定的漂移。只将一类水体模拟为叶绿素的函数不能忽略在浮游植物种群特征上的漂移。这个分类仅仅假定了反演这些参量所遵循的可预测的方法。用这些假设反演时，通常简单视作总趋势下的噪声。

界定一类水体的全面假设在广阔的大洋水体上是有效的，这使得单纯依赖叶绿素作为输入的大尺度光学模型的应用成为可能。从遥感角度而言，这直接导致了专为一类水体设计的浮游植物色素反演算法的诞生，这样的算法也利用了一类水体的其他特性。例如，一类水体的大气校正利用了其水体光谱的红光和近红外部分对海洋水色的贡献可以忽略不计这个事实。但从遥感内容来看，也不能过分强调三角分类图的重要性。

### 1.1.2.3 二类水体的复杂性

在应用于二类水体时，单变量模型的简化已被放弃，这是因为我们已经认识到至少 3 个以上的变量（浮游植物、悬浮物和黄色物质，甚至底质反射）能各自独立地变化。正如图 1.1 所示，一类水体局限在所有可能情况的一小部分中，而二类水体则覆盖了除一类水体外的所有可能情况。从建模角度看，这意味着我们不再假设任何指定波长的光学特性和色素浓度之间的一一对应关系。

二类水体算法的开发不仅对水色遥感器的光谱分辨率，同时对其辐射精度均有较高的技术要求。因此，三个变量的反演算法变得更加复杂，现在的需求是在至少 3 个变量和遥感信号中拆分其非线性、随光谱变化的相互作用。随组分浓度变化的信号变化通常非常小，使得

确保提取信息的质量和可靠性变得非常困难。在某些波长上,两个或以上的组分对光谱信号影响的差异非常小,使得从一种组分中区分出另外一种组分非常困难。因此,在处理二类水体时,要特别注意波长的选择和算法中波段的数量。二类水体算法必须考虑几个在一类水体算法看来非常容易避开的问题。主要包括:

用于一类水体的大气校正算法对二类水体是否有效?如果不是,如何改进,是将新波段加进算法,还是改进数学方法?

我们需要增加什么水色卫星波段才能区分浮游植物、黄色物质和悬浮物?

给出一个包括3个或更多独立变量在内的复杂、非线性系统,如何确保反演结果达到最小的精度要求。

算法能否处理不同类型悬浮物和黄色物质的不同光学信号?

如何确定信号受到底质反射的影响?

如何处理浅水区底质类型的自然变化和人为扰动产生的光学变化?

能否期望开发出应付多种可能条件的通用算法,或应开发适用于局部条件的局域算法?

### 1.1.3 表观光学量

表观光学量是指受光场的角分布以及介质中组分的性质和数量影响的光学量,是随光照条件变化而变化的量,如向下辐照度  $E_d$ 、向上辐照度  $E_u$ 、离水辐射率  $L_w$ 、遥感反射率  $R_{rs}$ 、辐照度比  $R$  以及这些量的漫衰减系数等。这些参数必须进行归一化,才有可能进行不同时间、地点测量结果的比较。

海洋水色和遥感反射率是主要的表观光学量,随瞬时光场的天顶角不同而变化。另一个经常用到的表观光学量是漫衰减系数 ( $K_d$ )。

水色遥感反演模型利用的辐射参数,基本上有:离水辐射率  $L_w$ 、归一化离水辐射率  $L_{wn}$ 、刚好在水面以下的辐照度比(或漫反射比)  $R(0^-) = E_u(0^-)/E_d(0^-)$ 、遥感反射率  $R_{rs} = L_w/E_d(0^+)$  等。水色遥感就是利用表观光学量来反演出水体成分的浓度,其基本量是离水辐射率  $L_w$  或遥感反射率  $R_{rs}$ 。

### 1.1.4 固有光学量

固有光学量是指独立于瞬时光场的角分布变化的独立量。仅与介质中组分的类型和浓度有关。即只与水体成分有关而不随光照条件变化而变化的量。主要包括从光场中迁移光子的吸收过程和通过改变光子的传播方向而影响介质光场的散射过程。即它直接反映介质的散射和吸收特征,并且随水中的溶解和悬浮物以及媒介的电磁特性的变化而变化。吸收和散射系数的量纲为  $L^{-1}$ 。

吸收过程通常以吸收系数来表达,是指介质中由于吸收作用光通量在单位光程和单位瞬时通量下的指数衰减率,以  $a$  表示。这些量主要包括水分子的吸收系数 ( $a_w$ )、浮游植物吸收系数 ( $a_p$ )、黄色物质吸收系数 ( $a_y$ )、悬浮物吸收系数 ( $a_s$ ) 以及三水色组分的比吸收系数等。

散射过程通常以散射系数来表达,它定义为由于散射造成的通量指数衰减率。包括弹性散射和非弹性散射两个过程。主要有体积散射相函数  $\beta$ 、后向散射系数  $b_b$  和前向散射系数  $b_f$ 。

等。其中后向散射系数是水色算法中的重要参数,是所有后向(ψ>90°)体积散射函数的积分。

## 1.2 光学理论基础

光学理论是水色遥感研究的起点。本节首先介绍辐射传递方程,进而通过推导变形获得高斯方程,确定固有量和表观量之间的内在联系,最后简要说明建立水色遥感生物-光学反演模型的基础。

### 1.2.1 辐射传递方程

光在水体中的传播问题是研究各类稳态海洋光学现象的基础。通过研究水体对光的吸收和散射规律发现,辐射在假定固有光学特性水平均匀且没有内部光源的海洋中传递时,遵循辐射传递方程 RTE:

$$\begin{aligned} \cos\theta dL(z, \lambda, \theta, \phi)/dz = \\ -c(z)L(z, \lambda, \theta, \phi) + \int_0^{4\pi} \beta(z, \lambda, \theta, \phi, \theta', \phi') L(z, \lambda, \theta', \phi') d\omega' \end{aligned} \quad (1.1)$$

$\mu W/(cm^2 \cdot nm \cdot sr \cdot m)$

式中:

$z$ ——深度, m;

$\theta, \phi$ ——辐射起始方向的天顶角和方位角;

$\theta', \phi'$ ——辐射传递至其他方向的天顶角和方位角;

$\omega'$ ——对应( $\theta', \phi'$ )的立体角。

右面第一项表示辐亮度传输路程 $\frac{dz}{\cos\theta}$ 的衰减,第二项表示在该路程中由于光子从其他各(源)角度( $\theta', \phi'$ )散射到( $\theta, \phi$ )方向引起的辐亮度增加。

各种辐射传递模型的差别在于对该微分积分方程的不同求解方法和边界条件处理。辐射传输方程严谨地描述了海洋固有光学量(吸收 $a$ 、散射 $b$ 、光束衰减 $c$ )对光场的作用,因此几乎所有的理论工作都是基于 RTE 而展开的。

在无其他光源的情况下,准直光束辐亮度 $L(\lambda, \theta, \phi)$ 在 $z$  m 深度通过海水传输,在推导方程(1.1)的假定下沿 $|\Delta r(\theta, \phi)| = \left| \frac{\Delta z}{\cos\theta} \right|$ 路径衰减为:

$$\frac{dL(z, \lambda, \theta, \phi)}{dz} \cos\theta = -c(z, \lambda) L(z, \lambda, \theta, \phi), \quad \mu W/(cm^2 \cdot nm \cdot m) \quad (1.2)$$

对于辐亮度在 $\Delta r$ 程长的传递,方程(1.2)的解为

$$L(z, \Delta z, \lambda, \theta, \phi) = L(z, \lambda, \theta, \phi) e^{-\frac{1}{\cos\theta} \int_{\Delta z} c(z, \lambda) dz}, \quad \mu W/(cm^2 \cdot nm) \quad (1.3)$$

方程(1.3)称为 Beer-Lambert-Bouguer 定律,仅代表 RTE 中的衰减项。

Beer-Lambert-Bouguer 定律仅在纯吸收介质中成立,或者在单一光源产生狭窄准直光束传送到探测器,传递距离相当短,多次散射路径辐亮度可以忽略的情况下成立。后一情况是用光束透射率测定 $c(\lambda)$ 的基础。

### 1.2.2 Gershun 方程

由于被积分参数含有较少的变量,通常容易估算。如果假设方程(1.1)中的固有光学量是均一同性的,并对各个方向进行积分,则得到:

$$\begin{aligned} d[\cos\theta L(z, \theta, \phi) d\omega]/dz &= -c(z) \int_0^{4\pi} L(z, \theta, \phi) d\omega \\ &+ \int_0^{4\pi} \int_0^{4\pi} \beta(z, \theta, \phi, \theta', \phi') L(z, \theta', \phi') d\omega d\omega' \end{aligned} \quad (1.4)$$

基于以上方程,定义如下辐射量:

$$E(z) = \left[ \int_0^{4\pi} \cos\theta L(z, \theta, \phi) d\omega \right] \quad (1.5a)$$

$$E_0(z) = \left[ \int_0^{4\pi} L(z, \theta, \phi) d\omega \right] \quad (1.5b)$$

第一个量  $E(z)$  称为深度  $z$  m 处的辐照度,单位为  $W/m^2$ ,由下行辐照度  $E_d(z)$  和上行辐照度  $E_u(z)$  两部分构成;第二个量  $E_0(z)$  称为深度  $z$  m 处的标量辐照度,单位为  $W/m^2$ 。将这些量带入方程(1.4)得到:

$$dE(z)/dz = -c(z)E_0(z) + b(z)E_0(z) \quad (1.6)$$

即为 Gershun 方程。衰减系数  $c$  是散射和吸收系数之和,则方程(1.6)可变形为:

$$dE(z)/dz = -a(z)E_0(z) \quad (1.7)$$

方程(1.7)给出了辐照度与吸收系数的关系,从而说明固有量和表观量之间存在内在的联系。

### 1.2.3 水色遥感生物-光学反演模型基础

水色遥感反演是通过卫星传感器接收信号的变化,来获得水体中影响光学性质的组分浓度,模型基础在于明晰表观光学量与固有光学量的关系。

Gordon (1975) 在蒙特卡罗模拟中建立了刚好水面以下辐照度比与吸收系数和后向散射系数之间的多项式模型,简单表述为:

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda, 0^-)}{E_d(\lambda, 0^-)} = C(\mu_0) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1.8)$$

式中:

$C$  依赖于太阳天顶角、云层覆盖状况、海况、体散射函数的形状等。

Morel 和 Prieur (1977) 针对大洋一类水体,将方程(1.8)进一步表示为:

$$R(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (1.9)$$

式中:

$f$  是经验常数,与入射的太阳光场分布有关,并随水体类型和波长而变化。Morel 和 Prieur (1977) 研究表明,对于清洁的大洋一类水体  $f \approx 0.33$ 。然而, Gordon 和 Morel (1983) 的研究结果表明,  $f$  的变化小于  $\pm 0.05$ 。

由于在遥感中  $L_w$  比  $E_u$  容易得到,因此定义水面之上遥感反射率  $R_{rs}$ :

$$R_{rs}(\lambda) = L_w(\lambda) / E_d(\lambda, 0^+) \quad (1.10)$$

式中:

$E_d(0^+)$  可由辅助数据和模型计算得到。

Gordon (1988) 对  $R_{rs}$  与水体的总吸收系数  $a$  和总后向散射系数  $b_b$  建立关系式:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{ft}{Qn^2} \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1.11)$$

式中:  $f$  为经验常数, 变化范围为 0.32 ~ 0.33;  $Q$  和  $f$  都是太阳天顶角的函数, 但  $f/Q$  是太阳天顶角的弱函数。Gordon 等 (1988) 采用  $f/Q = 0.0945$  和  $t/n^2 = 0.54$ , 得到如下关系式:

$$R_{rs}(\lambda) = 0.051 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1.12)$$

反演关系式 (1.12) 中,  $a$ 、 $b_b$  可用固有光学量模型表征, 从而建立卫星传感器接收信息与水色组分浓度的关系, 最终达到反演目的。

### 1.3 赤潮遥感监测简述

赤潮遥感监测是水色遥感应用的拓展。本节简要介绍赤潮发生过程中水色变化以及利用光学特性的差异识别有害赤潮藻种。

#### 1.3.1 富营养水体与赤潮水体

海水中营养物质 (如氮、磷和硅等) 是海洋生物生长发育各阶段所必需的。但是如果水体中的营养物质输入过量, 营养物质就会在水中蓄积, 结果造成水体的富营养化。水体富营养化可分为自然富营养化和人为富营养化。自然富营养化是自然因素引起的缓慢变化过程, 时间尺度一般为  $10^3 \sim 10^4$  年, 其对生态系统中的物种影响较小, 各物种有足够的时间适应这个过程。人为富营养化是由人类活动引起的一种突变过程, 时间尺度较短, 它破坏了水域的生态平衡, 对环境和生物资源造成危害。现在所指的富营养化, 多是人为富营养化。随着沿海地区经济的快速发展、人口的趋海性移动以及海水养殖业的迅速发展, 沿岸海域、河口、港湾等面临着不同程度的富营养化。从环境学角度, 将富营养水体划分为富营养、中营养和贫营养三个级别; 从水色遥感角度来看, 这些均属二类水体的范畴。

在富营养化海域, 当水体中存在一定量的对赤潮生物增殖有特殊促进作用的物质, 在合适的水温、盐度、光照和气象条件下, 赤潮生物则会快速增殖, 并导致水体变色, 形成赤潮。在我国赤潮多发海域多为水体富营养化海域。

#### 1.3.2 赤潮遥感监测的基本过程

从遥感角度来看, 赤潮生消过程有着十分复杂的生物光学变化, 在赤潮从无到有直至消亡的过程中, 水体的光学特性经历了由悬浮物、浮游生物和黄色物质构成光学特性十分复杂的二类水体向浮游植物剧增、黄色物质浓度明显变化、悬浮物的组成结构发生明显变化的过程, 由于水色组分的变化, 导致水体颜色也由典型的近岸黄绿色、绿色和黄色水体变成褐色、淡黄绿色、红色、粉红色甚至白色等。从本质上看, 这是一个不同藻类在不同环境条件下的时空动态变化过程, 为遥感监测的实施增加了很大困难。同是也预示着赤潮遥感并非是一个简单的叶绿素  $a$  遥感问题, 仅从叶绿素角度入手是难以解决赤潮遥感问题的。基本过程见