

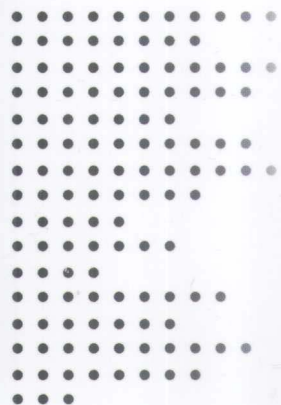


◎ 李云梅 王 桥 黄家柱 等 著
吕 恒 韦玉春

太湖水体光学特性及 水色遥感



530.78



 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书对内陆水体水色遥感的基本概念、方法原理进行了系统、全面的介绍,并结合多年对太湖研究区的地面遥感实验,详细介绍了水体固有的光学特性参数和表观光学特性参数的实验观测方法,分析了太湖水体光学特性及其有关参数的参数化方法,探讨了湖泊水色遥感中的不确定性因素,对水体组分如叶绿素浓度、悬浮物浓度、有色可溶性有机物的交叉影响,以及水体底质、天空云量、风速、太阳高度角等对水面遥感反射率的影响进行了较为系统的研究,介绍了叶绿素_a浓度、悬浮物浓度、有色可溶性有机物的遥感反演技术流程和模型构建方法。

本书适合从事水环境遥感、生态环境遥感等工作的广大科研工作者阅读,也适合遥感科学、地理信息系统专业的研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

太湖水体光学特性及水色遥感/李云梅等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027839-5

I. ①太… II. ①李… III. ①太湖-水体-光学性质-研究②太湖-水色-遥感-研究 IV. ①P942.537.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 103544 号

责任编辑:赵 峰 沈晓晶/ 责任校对:朱光光

责任印制:钱玉芬/ 封面设计:耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 6 月第一次印刷 印张:15 插页:2

印数:1—2 000 字数:358 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

由于常规水环境参数监测是基于地面布点采样的物理或化学分析测量方法进行的,缺乏空间的连续性,且费用较高,特别是现有环境监测站点主要分布在城市、重点地区和重点流域,站点稀少,代表性不够,难以适应全面监测水环境的任务,因此,迫切需要利用遥感技术全面、及时和准确地监测水体环境状况。

就我国内陆水体水环境现状来说,多数水域是二类水体,特别是像太湖这样的富营养化湖泊,水体环境状况复杂,水面光谱由多种因素主导,导致其水体光学特性形成机理十分复杂。所以,从遥感信息中准确地分离、提取水色参数一直是内陆水色遥感的一大难点。

水体光学特性及其形成机理的研究是提高水色参数遥感反演精度的前提。目前,针对海洋一类水体的光学特性研究已经比较成熟,但是,对内陆水体而言,由于不同水体组成成分复杂多变,且存在很大的区域差异,目前对其进行的研究还很不充分。我国内陆水体光学特性的研究可以说才刚刚起步,因此我们将近年的研究成果整理归纳,以期为相关的研究提供参考。

本书共分7章,第1章讲述了水色遥感研究进展及水色遥感的基本原理,其中包括水色模型方法研究进展和遥感数据源进展,水色遥感的基本概念和辐射传输原理,水色主要组分的吸收、散射特性等;第2章讲述了水体光学特性观测方法,主要包括固有光学特性参数的野外观测和室内测量及表观光学特性的野外观测等;第3章讲述了太湖水体固有光学特性及参数化方法,主要包括颗粒物、浮游藻类、有色可溶性有机物(CDOM)的吸收、散射特性及季节差异,并对其参数化方法进行了探讨;第4章讲述了太湖水体表观光学特性,主要包括水体遥感反射率、真光层深度、漫衰减系数的特性及变化规律,并对水体散射相函数、平均散射次数进行了模拟;第5章讲述了太湖水色参数反演中的不确定性因素,主要分析了叶绿素、无机悬浮物、CDOM的交叉影响,以及底质边界、太阳天顶角、天空云量、风速等环境条件对遥感反射率的影响;第6章讲述了太湖水色遥感中的大气校正方法,讲述了水色遥感大气校正的原理,并利用6S(second simulation of the satellite signal in the solar spectrum)模型、黑暗像元法、Gordon大气校正法等,结合同步气象观测数据、MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)数据,对太湖的TM(thematic mapper)影像进行了大气校正;第7章讲述了太湖水色参数反演的具体实例,其中包括叶绿素浓度、悬浮物浓度、CDOM的分季节反演模型、神经网络反演模型、生物光学模型以及三波段支持向量机模型等。

本书编写分工如下:第1章由王桥、黄家柱、李云梅编写;第2章由吕恒、陆皖宁、杨煜、武蓝、张红、王彦飞、金鑫编写;第3章由孙德勇、乐成峰、黄昌春编写,第4章由孙德勇、乐成峰、黄昌春编写;第5章由黄昌春、王利珍编写;第6章由王海

君、龚绍琦编写；第7章由孙德勇、乐成峰、韦玉春、光洁、李云梅、龚绍琦编写。插图由徐昕校绘。全书由李云梅统稿。

感谢无锡市环境监测站、江苏省环境监测中心、中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖实验站对实验的大力支持，感谢张运林博士在室内实验中的无私帮助。此外，在项目研究以及本书的写作过程中，许多专家学者提出了宝贵建议，在此一并表示感谢。

李云梅

2009年12月

目 录

前言

第 1 章 水色遥感原理及进展	1
1.1 水色遥感进展	1
1.1.1 水色遥感模型方法进展	1
1.1.2 水色遥感数据源进展	10
1.2 水体的辐射传输	15
1.2.1 水色的遥感参数	15
1.2.2 表观光学特性与固有光学特性	16
1.2.3 水体辐射传输	23
1.3 水体组分的光学特性	24
1.3.1 纯水的吸收和散射特性	24
1.3.2 浮游植物的吸收和散射特性	26
1.3.3 悬浮物的吸收和散射特性	28
1.3.4 CDOM 的吸收和散射特性	29
1.4 水面反射波谱构成	30
第 2 章 水体光学特性观测	31
2.1 固有光学量观测	31
2.1.1 吸收系数的野外观测	31
2.1.2 散射系数的野外观测	34
2.1.3 水体组分吸收系数的室内观测	38
2.2 表观光学量观测	44
2.2.1 水表面以上测量法	44
2.2.2 剖面测量法	51
2.3 水色要素浓度测量	53
2.3.1 叶绿素浓度测量	53
2.3.2 浮游植物个数统计	54
2.3.3 悬浮物浓度测量	54
2.3.4 CDOM 浓度测量	54
2.4 太湖水环境现状及实验观测	55
2.4.1 太湖水环境现状概述	55
2.4.2 地面遥感实验介绍	55
2.4.3 太湖水色因子的时空分布规律	63

第3章 太湖水体固有光学特性及参数化	71
3.1 太湖水体吸收特性及季节差异	71
3.1.1 颗粒物吸收特性及季节差异	71
3.1.2 浮游藻类吸收系数及季节差异	74
3.1.3 CDOM 吸收系数及季节差异	76
3.1.4 不同季节各组分吸收对总吸收的贡献	77
3.1.5 吸收系数的剖面差异	78
3.2 太湖水体组分吸收系数参数化	81
3.2.1 非藻类颗粒物吸收系数参数化	81
3.2.2 藻类颗粒物吸收系数参数化	83
3.2.3 CDOM 吸收系数参数化	84
3.3 太湖水体散射特征	86
3.3.1 散射光谱特征及其空间分异	86
3.3.2 散射的主导影响因子	93
第4章 太湖水体表观光学特性	98
4.1 遥感反射率等表观光学特性	98
4.1.1 不同季节遥感反射率的异同	98
4.1.2 不同营养状态遥感反射率的异同	99
4.1.3 真光层深度	99
4.1.4 漫衰减系数	102
4.2 水体光场参数模拟	112
4.2.1 散射相函数	112
4.2.2 平均散射次数	120
第5章 太湖水色参数反演中的不确定性因素	125
5.1 研究方法	125
5.1.1 遥感反射率模拟原理	125
5.1.2 HYDROLIGHT 软件简介	127
5.2 各组分对遥感反射率的交叉影响	128
5.2.1 参数模拟方案	129
5.2.2 CDOM 和无机悬浮泥沙对叶绿素反射光谱的影响	129
5.2.3 CDOM 和叶绿素对无机悬浮泥沙反射光谱的影响	131
5.2.4 叶绿素和无机悬浮泥沙对 CDOM 反射光谱的影响	132
5.3 环境因素的影响	133
5.3.1 底质边界状况对遥感反射率的影响	133
5.3.2 太阳天顶角和天空云量对遥感反射率的影响	135
5.4 生物光学模型中环境参数的不确定影响因素	136
5.4.1 Q 值的影响因素及参数化	137
5.4.2 f 值的影响因素及参数化	144

第 6 章 太湖水色遥感中的大气校正	156
6.1 水色遥感大气校正方法	156
6.1.1 水色遥感大气校正的基本原理	156
6.1.2 水色遥感大气校正的一般方法	157
6.2 太湖大气校正	163
6.2.1 6S 辐射传输模型法	163
6.2.2 黑暗像元法	167
6.2.3 Gordon 大气校正算法改进方法.....	170
6.2.4 大气校正结果分析	176
第 7 章 太湖水色参数反演	183
7.1 基于半经验模型的水色参数反演	183
7.1.1 基于地面实测光谱的叶绿素浓度分季节反演模型	183
7.1.2 基于地面实测光谱的悬浮物浓度反演	188
7.1.3 基于地面实测光谱的 CDOM 浓度的神经网络估算.....	193
7.1.4 利用 TM 数据建立的悬浮物浓度分季节反演模型	199
7.2 基于生物光学模型的水色参数反演	202
7.2.1 CBERS 图像预处理.....	203
7.2.2 前向模拟模型的建立	204
7.2.3 基于地面实测数据的后向反演	205
7.2.4 基于 CBERS 数据的太湖水体组分浓度反演	208
7.2.5 基于 TM 数据的太湖悬浮物浓度反演	211
7.3 叶绿素浓度反演的三波段支持向量机模型	213
7.3.1 三波段模型机理	213
7.3.2 因子的选择	216
7.3.3 支持向量机模型	218
参考文献	223

第1章 水色遥感原理及进展

1.1 水色遥感进展

水色遥感源于海洋水色遥感 (ocean color remote sensing), 是利用可见光近红外光谱对海洋进行遥感的技术。按照研究对象的不同, 可以分为内陆 (inland) 水体、近岸 (coastal) 水体、大洋开阔水体 (open sea 或 CASE I water) 等的遥感。Gordon 和 Morel (1983) 根据水体光谱特征将水体分为一类水体和二类水体。一类水体定义为水体中的浮游植物 (包括其附属物质及与之相关性较高的物质) 对水体光谱特征变化起主要作用的水体。与之相对的, 二类水体就是不仅受到浮游植物及其相关物质的影响, 而且受到其他与浮游植物相对独立的物质, 尤其是无机悬浮物质及有色可溶性有机物影响的水体。

一般而言, 一类水体主要是大洋水体。在这类水体中, 除浮游植物外, 其他很多物质, 如牧草的残骸、浮游植物腐烂后的物质、生物体排放的可溶性有机质等, 都会对一类水体的光谱特性产生影响, 特别是影响水体的吸收特性 (Sathyendranath et al., 1989)。事实上, 人们越来越多地发现, 除了浮游植物外, 鞭毛虫、异养细菌和病毒等与浮游植物相关的小的有机体对一类水体的光谱特征也有很重要的影响 (Morel and Gentili, 1991; Stramski and Kiefer, 1991)。由于浮游植物及其相关物质对水体光谱起主要作用, 因此, 可以用浮游植物来表征水体光谱的变化, 特别是当叶绿素 a 可以作为估算浮游植物量的一个指数时, 可以用叶绿素 a 浓度来模拟一类水体的光谱特性。

二类水体主要是近岸水体和内陆水体。与一类水体相比, 二类水体的光学特性和影响因素要复杂得多。二类水体中, 水体光谱的主要影响因素包括浮游植物、悬浮物质和有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) (通常称为水色三要素)。由于这三种相关量以及水体底部的反射均独立变化, 但同时又相互影响, 因此, 不能再简单地假设某个波段的光谱特性和色素浓度之间有一一对应的关系, 适用于一类水体的大气校正方法的假设前提对二类水体也不再适用。对二类水体水色遥感而言, 必须同时考虑不同因素对水面光谱的交互影响, 因此, 对其数据源的光谱分辨率及参数反演的模型方法都提出了更高的要求, 研究中的数据处理方法、模型构建方法都将受到研究区域的限制, 具有一定的适用范围。本书的研究区域为太湖水体, 因此, 研究方法和模型等主要适用于近岸和内陆水体。

1.1.1 水色遥感模型方法进展

利用遥感传感器获取水面光谱, 根据水色要素与水面光谱特征的关系, 通常利用经验模型、半经验模型、物理机理模型、神经网络模型等方法提取水体叶绿素浓度、悬浮物浓度、透明度等水环境参数。

1.1.1.1 经验、半经验模型方法

经验模型法是基于经验或遥感波段数据与地面实测数据的相关性统计分析的,选择最优波段或波段组合数据与水环境参数实测值建立统计回归模型,进而反演水环境参数。半经验模型法是根据水环境参数光谱特征,结合统计分析,确定用于水环境参数反演的波谱范围、波段、波段组合等,从而建立遥感数据和水环境参数间的定量经验性算法。叶绿素 a 浓度、浮游植物、悬浮物、CDOM 的遥感反演的半经验模型原理和方法介绍如下。

1) 叶绿素 a

叶绿素是植物光合作用中重要的光合色素,它可以将阳光转变成能量。叶绿素存在于植物细胞内的叶绿体中,反射绿光并吸收红光和蓝光,使植物呈现绿色。叶绿素 a 是浮游植物或藻类植物中最丰富的色素,也是藻类浓度、种类等的重要指示因素,因此监测藻类中的叶绿素 a 浓度是水环境遥感主要的监测项目之一,也是反映水体富营养化程度的一个重要的参数指标。

叶绿素的光谱特征:叶绿素具有特定的吸收和反射光谱,在 440nm 附近有一个吸收峰,在 550nm 附近有一个反射峰,在 685nm 附近有较明显的荧光峰。一般说来,随着叶绿素含量的不同,在 430~700nm 光谱段会有选择地出现较明显的差异。图 1-1 显示了不同叶绿素浓度水面光谱曲线,当藻类密度较高时水体光谱反射率曲线在这两处出现峰值,但同时由于散射作用的影响,因此对藻类密度变化不敏感。400~480nm 光谱段反射辐射随叶绿素浓度加大而降低;550~570nm 光谱段的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素的弱吸收以及细胞的散射作用形成的,该反射峰值与色素组成有关,可以作为叶绿素定量的标志(张渊智等,2000);因为藻青蛋白的吸收峰在 624nm 处,所以 630nm 附近出现反射率谷值或呈肩状(疏小舟等,2000);在波长 685nm 附近有明显的荧光峰,这是由于浮游植物分子吸收光后,再发射引起的拉曼效应——即进行水分子破裂和氧分子生成的光合作用,激发出的能量荧光化的结果,叶绿素 a 的吸收系数在该处达到最小。685~715nm 光谱段荧光峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据,反射峰的位置和数值是叶绿素 a 浓度的指示。从图 1-1 可知,由于波峰-波谷带宽较窄,为了获取这些有指示意义的信息,需要选择的波段间隔不宜过宽,最好小于 5nm。水体中叶绿素浓度的增加,将引起蓝光波段辐射量的减少及绿光波段和红光波段辐射量的增加。Gitelson (1992) 首先观察到叶绿素在 700nm 附近的反射峰的位置随着藻类叶绿素浓度的增大向长波方向移动的特征。

基于图 1-1 的叶绿素光谱特征,常用单个波段、波段比值、波段差值等遥感指标建立叶绿素定量遥感模型。例如,记传感器不同波段的光谱值或其对数运算、算术运算为遥感指标 $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 、 $R(n_3)$ 、 $R(n_4)$ 、 $\dots$, 其中, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 $\dots$ 表示中心波长,则这些遥感指标形如: TM_1 、 TM_2 、 TM_3 、 TM_4 、 $TM_3 \times TM_4$ 、 $\frac{TM_3 \times TM_4}{\ln TM_1}$ 、 $TM_4 - TM_3$ 、

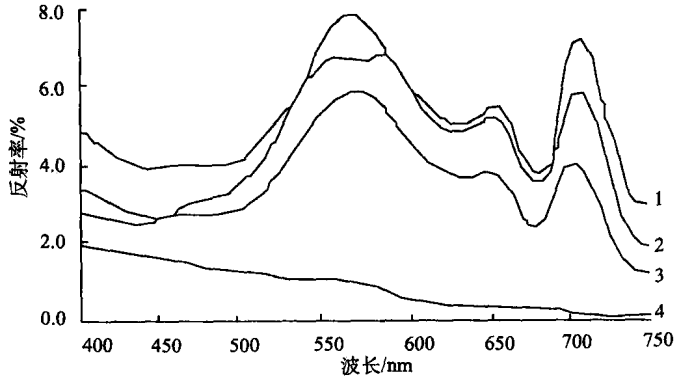


图 1-1 不同叶绿素浓度内陆水体的光谱反射率

1. 90 $\mu\text{g/L}$; 2. 70 $\mu\text{g/L}$; 3. 48 $\mu\text{g/L}$; 4. 2 $\mu\text{g/L}$

$\frac{\text{TM}_3 \times \text{TM}_4}{\ln(\text{TM}_1 + \text{TM}_2)} \cdot \frac{R_{\text{active}}}{R_{\text{reference}}}$ ($R_{\text{active}} = R_{700\text{nm}}$, $R_{\text{reference}} = R_{560\text{nm}}$ 或 $R_{675\text{nm}}$) 等 (TM_i 为 TM 影像第 i 波段, R_i 为 i 波段光谱值)。

所建立的统计模型主要有以下形式:

(1) 根据两个波段的比值, 建立线性回归方程。

一阶线性回归方程形如:

$$C_{\text{chla}} = a_1 + a_2 \times \frac{R(n_1)}{R(n_2)} \quad (1-1)$$

式中, C_{chla} 为叶绿素 a 含量 (mg/m^3); a_1 、 a_2 为回归系数; $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 为传感器的两个不同波段的遥感信息 (n_1 、 n_2 表示中心波长), 通常为叶绿素的特征吸收谷和反射峰所在波段。特征吸收谷 (负相关系数最大) 常选 675nm 附近波段, 特征反射峰 (正相关系数最大) 常选 700nm 附近波段 (Gitelson, 1992; 疏小舟等, 2000; 李素菊等, 2002; Iluz et al., 2003), 对于 TM 影像, 有研究认为 TM_4/TM_3 的反演效果较好 (杨一鹏, 2003)。

二阶线性回归方程形如:

$$C_{\text{chla}} = a_1 + a_2 \frac{R(n_1)}{R(n_2)} + a_3 \left(\frac{R(n_1)}{R(n_2)} \right)^2 \quad (1-2)$$

式中, $n_1=705\text{nm}$; $n_2=675\text{nm}$ (疏小舟等, 2000)。

(2) 针对不同波段建立多元线性回归方程 (陈晓翔等, 1995):

$$C_{\text{chla}} = a_1 \times R(n_1) + a_2 \times R(n_2) + a_3 \times R(n_3) + a_4 \times R(n_4) \quad (1-3)$$

式中, C_{chla} 为叶绿素 a 浓度 (mg/m^3); a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为回归系数 (下同); $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 、 $R(n_3)$ 、 $R(n_4)$ 为传感器的不同波段 (n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 表示中心波长) 的遥感信息, 如 $\text{TM}1\sim4$ 波段。

(3) 建立反射峰位置与叶绿素含量对数值的线性回归方程 (疏小舟等, 2000; 马荣华等, 2005):

$$\lg C_{\text{chla}} = a_1 + a_2 \lambda_{\text{maxn}} \quad (1-4)$$

式中, λ_{maxn} 为第 n 波段附近反射峰的位置 (nm)。该模型只适用于高光谱数据。

(4) 对不同波段或波段组合进行处理 (如加、减、乘、除、取对数等) 后, 建立回归方程: $C_{\text{chla}} = a_1 \times x + a_2$, 式中, x 为处理后的值 (余丰宁和李旭文, 1996; 陈楚群等, 1996)。例如:

$$C_{\text{chla}} = 0.035\ 013x_1 - 0.366\ 984, x_1 = \text{TM}_3 \times \text{TM}_4 \quad (1-5)$$

$$C_{\text{chla}} = 0.114\ 975x_2 - 0.387\ 297, x_2 = \frac{\text{TM}_3 \times \text{TM}_4}{\ln \text{TM}_1} \quad (1-6)$$

$$C_{\text{chla}} = 0.130\ 428x_3 - 0.382\ 138, x_3 = \frac{\text{TM}_3 \times \text{TM}_4}{\ln(\text{TM}_1 + \text{TM}_2)} \quad (1-7)$$

$$C_{\text{chla}} = 0.213\ 500x_4 - 0.405\ 492, x_4 = \frac{\text{TM}_3 \times \text{TM}_4}{\ln(\text{TM}_1 \times \text{TM}_2)} \quad (1-8)$$

$$C_{\text{chla}} = 0.099\ 423x_5 - 0.437\ 805, x_5 = \frac{\text{TM}_3 \times \text{TM}_4}{\ln \text{TM}_2} \quad (1-9)$$

Tassan 模型:

$$\lg C_{\text{chla}} = c_0 + c_1 \times \lg x + c_2 \times \lg^2 x \quad (1-10)$$

式中, $x = (R_{443}/R_{555})(R_{412}/R_{490})^a$; a 为区域常数; c_0 、 c_1 、 c_2 为回归系数。

(5) 指数回归模型 (余丰宁和李旭文, 1996; Gitelson, 1992):

$$C_{\text{chla}} = aZ^b \quad (1-11)$$

式中, $Z = \frac{R_{\text{active}}}{R_{\text{reference}}}$; $R_{\text{active}} = R_{700}$; $R_{\text{reference}} = R_{560}$ 或 R_{675} 。

陈楚群等 (2001) 采用 SeaWiFS 资料建立了叶绿素 a 浓度估算模式:

$$C_{\text{chla}} = 10b - 0.04 \quad (1-12)$$

式中, $b = 0.341 - 3.001 [\lg(R_{490}/R_{555})] + 2.811 [\lg(R_{490}/R_{555})]^2 - 2.041 [\lg(R_{490}/R_{555})]^3$; R 为反射率, 下标表示波长, 单位为 nm。

(6) 利用植被指数建立回归模型:

$$C_{\text{chla}} = a_1 \times v + a_2 \quad (1-13)$$

式中, v 为植被指数。

例如, 若 v 为差异植被指数 $\text{DVI} = \text{TM}_4 - \text{TM}_3$, 则 $C_{\text{chla}} = 5.204\ 388 \times 10^{-3} \text{DVI} + 0.145\ 26$ 。

2) 浮游植物

浮游植物是指悬浮在水体中的植物, 多半形态简单, 只有一个细胞, 是地球上资格相当老的一种低等生物。在淡水中, 浮游植物主要是藻类, 它们以单细胞、群体或丝状体的形式出现, 靠太阳光和吸收水中的营养盐生活。浮游植物光谱特征与叶绿素的光谱特征相似。

浮游植物的定量估算通常经过以下两个步骤: ①建立浮游植物与叶绿素的相关关

系；②利用叶绿素含量估算浮游植物的含量。浮游植物估算的遥感指标类似于叶绿素的估算，即 $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 、 $R(n_3)$ 、 $R(n_4)$ 、 $\dots$ 或其对数运算、组合运算， $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 、 $R(n_3)$ 、 $R(n_4)$ 、 $\dots$ 为传感器的不同波段（ n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 $\dots$ 表示中心波长）的 DN 值或表观反射率或遥感反射率或水面反射率。此外，也可由叶绿素 a 含量、温度、水体参数估算浮游植物量。

例如，陈晓翔等（1995）从遥感光谱信号在海水中的传播特点出发，分析了遥感探测港湾初级生产力精度不高的原因，并从港湾初级生产力的生存条件着手，提出水交换状态是一种有效的监测因素，可将其引入到港湾初级生产力模型中，以改善模型，提高模型的精度，将模型的误差从 6.5% 下降到了 0.26%。

仅利用光谱数据建立的模型：

$$\lg(\text{PL}) = 55.25 - 1304.6\text{TM}_1 + 3093.5\text{TM}_2 - 3079.6\text{TM}_3 - 99.65\text{TM}_4 \quad (1-14)$$

式中，PL 为浮游植物量（个/ m^3 ）。

引入水交换状态数据后建立的模型：

$$\text{PL} = -0.416 + 0.247 T + 1.698 \text{WC} + 00.85 \text{Wb} - 0.336 \text{Ca} \quad (1-15)$$

式中，PL 为浮游植物量（个/ m^3 ）；T 为温度（由远红外探测仪探测）；WC 为水表波动状态等级系数；Wb 为水体边界数；Ca 为叶绿素含量。

3) 悬浮物

悬浮物是指不能通过孔径为 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜的固体物，常悬浮在水流之中。水产生的浑浊现象多是由此类物质所造成。水体中悬浮物浓度是最重要的水质参数之一，其含量的多少直接影响水体透明度、浑浊度、水色等光学性质。

悬浮物的光谱特征：悬浮物的含量和类型、悬浮颗粒大小、水底亮度以及遥感器的观测角等都会影响悬浮物的光谱反射率，其中悬浮物浓度、颗粒大小和矿质组成是主要的影响因素。在可见光及近红外波段范围，随着悬浮物含量的增加，水体的反射率增加，且随着悬浮物浓度的增大，反射峰位置向长波方向移动。

悬浮物颗粒粒径越小，散射系数越大，相应的反射率越大。在可见光波段亮色水底（水底亮度较高的水底）对悬浮物水体的光谱反射率影响最大；在 $740\sim 900\text{nm}$ 处由于水的吸收作用，水底亮度对反射率没有影响。

悬浮固体的后向散射导致浑浊水体通常比清澈水体的光谱反射率要高一些，当悬浮固体的浓度增大时，水体的反射率也增大。实验表明，浑浊河水（含悬浮物质 99mg/L ）比清澈湖水（含悬浮物质 10mg/L ）的光谱反射率高 $1.5\%\sim 6.0\%$ ，其中在 $500\sim 550\text{nm}$ 波段，前者比后者光谱反射率高 1.5% ；在 $550\sim 600\text{nm}$ 波段，前者比后者约高 3% ；而在 $600\sim 750\text{nm}$ 波段，前者比后者高 $4\%\sim 6\%$ 。 $600\sim 700\text{nm}$ 波段的光谱反射率与水体的浑浊度（即悬浮物质含量差异的程度）等级呈线性相关的关系。

图 1-2 为 Doxaran 等（2002）对法国西南部 Gironde 河口地区 6 种不同悬浮物浓度的水体进行反射率测定所得的水体反射光谱曲线与悬浮泥沙浓度的关系。悬浮物浓度在 $35\sim 250\text{mg/L}$ 时，反射率在 $400\sim 700\text{nm}$ 增加；悬浮物浓度大于 250mg/L 时，反射率

在 400~700nm 趋向饱和,但在 750~950nm 强烈增加,峰值位于 800nm 波长处。一般来说,可见光的 580~680nm 波段对不同悬浮泥沙浓度出现辐射峰值,即对水中悬浮泥沙反映最敏感,是遥感监测水体浑浊度的最佳波段。

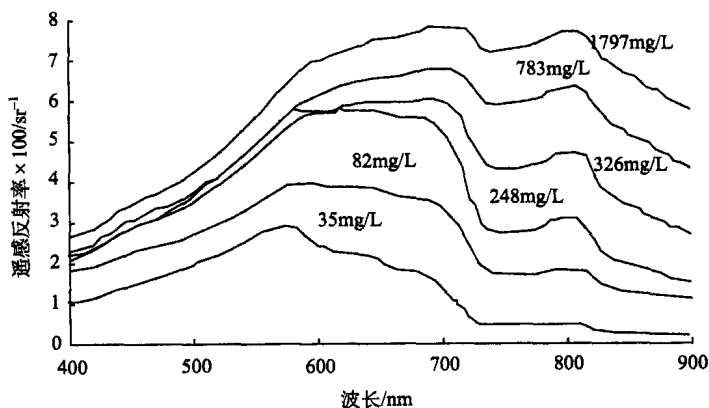


图 1-2 不同悬浮物浓度的典型水面反射光谱曲线

悬浮物浓度反演的常用算法模式有线性模式、对数模式、Gordon 模式、负指数模式及统一模式等。

(1) 线性模式:

$$S = A + BR \quad (1-16)$$

式中, R 为敏感波段的水体反射率; S 为水面悬浮泥沙浓度; A 、 B 为待定系数。

该算法只适用于低浓度的悬浮泥沙水体。

(2) 对数模式:

$$R = A + B \lg S \text{ 或 } S = 10^{(R-A)/B} \quad (1-17)$$

式中, R 为敏感波段的水体反射率; S 为水面悬浮泥沙浓度; A 、 B 为待定系数。

在悬浮泥沙浓度不高的情况下,该式能真实地反映悬浮泥沙浓度和卫星数据的关系。

(3) Gordon 模式:

$$R = C + S / (A + BS) \text{ 或 } S = \frac{A}{\left(\frac{1}{R-C} - B\right)} \quad (1-18)$$

式中, R 为敏感波段的水体反射率; S 为水面悬浮泥沙浓度; A 、 B 、 C 为待定系数 (Gordon and Morel, 1983)。

该式根据准单次散射近似公式得到,适用区间包括低含沙量区和高含沙量区。

(4) 负指数模式:

$$R = A + B(1 - e^{-DS}) \text{ 或 } S = A + B \ln(D - R) \quad (1-19)$$

式中, R 为敏感波段的水体反射率; S 为水面悬浮泥沙浓度; A 、 B 、 D 为待定系数。

该式很大程度上克服了估算误差随悬沙浓度增大而增加的弱点,并可以近似地概括

线性和对数关系式。

(5) 统一模式:

$$R = A + B [S / (G + S)] + C [S / (G + S)] e^{-DS} \quad (1-20)$$

式中, R 为水体反射率; S 为水面悬浮泥沙浓度; A 、 B 、 C 、 D 、 G 为待定系数。

此模式在一定条件下包含了 Gordon 式和负指数式。

4) 有色可溶性有机物

有色可溶性有机物 CDOM, 是一类含有富里酸 (fulvic acid, 能溶解于酸和碱) 和胡敏酸 (humic acid, 溶于碱但不溶于酸) 的溶解性有机物。内陆水体中的 CDOM 有外源和内源两个来源, 外源主要指来源于流域中土壤腐殖质的淋溶, 内源主要指来源于水体自身生物体的分解。CDOM 可能由氨基酸、氨基糖、脂肪酸类、类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚等组成 (Gagosian and Stuermer, 1977)。

CDOM 的光谱特征: 有色可溶性有机物在紫外和蓝光范围具有强烈的吸收特性, 在黄色波段吸收最小, 使其呈黄色, 故常称这类复杂的混合物为“黄色物质” (yellow substance)。CDOM 能够产生感光分解作用, 因此, 局地产生的 CDOM 在水体较深处的富集比表层可能多得多。此外, 已知 CDOM 的吸收性质也是多变的。

Bricaud 等 (1981) 发现波段 350~700nm 对 CDOM 的光吸收有响应并提出了适用于紫外光波段和可见光波段的吸收曲线描述方程:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (1-21)$$

式中, $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 为波长为 λ 时的光吸收系数; λ_0 为参考波段值; $a_{\text{CDOM}}(\lambda_0)$ 为参考波段的光吸收系数; S 为吸收系数曲线的指数斜率参数, 通常取值为 0.014, 或为 0.011~0.018 (S 值随着地理位置和时间的变化而变化, 同时它还依赖于计算时的波长范围)。根据 NASA 报告 (Mueller et al., 2003) 的分析可知, CDOM 的吸收光谱特性如图 1-3 所示。

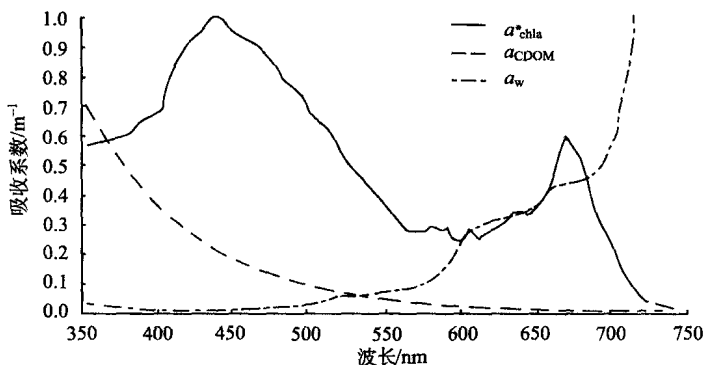


图 1-3 CDOM、纯水和浮游植物在不同波长处的吸收光谱

a_w 为纯水的吸收系数; $a_{\text{chl } a}^*$ 为叶绿素 a 单位吸收系数; a_{CDOM} 为 CDOM 的吸收系数

利用遥感信息提取 CDOM 浓度,常用的模式有两类:一类是直接提取浓度信息的模式,在此类模式中,CDOM 的浓度常以溶解性有机碳(DOC)浓度来表征(潘德炉等,2004);另一类是计算 CDOM 在某一特征波段的吸收系数,然后用吸收系数来表示 CDOM 浓度。例如,Tassan 根据那不勒斯海湾的有关资料,建立了利用 SeaWiFS 资料提取 CDOM 在 440nm 波长的吸收系数的模式:

$$\lg[a_{\text{CDOM}}(440)] = 3.0 - 1.93 \lg[(R_1/R_3)(R_2)^{0.5}] \quad (1-22)$$

式中, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 SeaWiFS 波段 1、2、3 的反射率; $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 为 CDOM 的吸收系数。

半经验模型的建立需要大量的地面同步观测数据,此外,模型的区域限制和时间限制制约了其外推应用。

1.1.1.2 神经网络模型方法

与统计回归法相比,神经网络模型的自适应性、自组织性和容错性能,使其在模拟光谱反射率(或辐亮度值)与水体组分之间的错综复杂的关系中表现出一定的优势。理论上已经证明(Hornik et al., 1989),具有偏差和至少一个“S”形隐含层加上一个线性输出层的网络,能够逼近任何有理函数,因此理论上用神经网络模型进行水质参数的反演是完全可行的。神经网络用已知的多对参数值/观测值进行学习训练,经多次反馈和自学习后,确定网络的最优化结构,并用于反演未知参数。

如图 1-4 为 BP 神经网络的结构示意图。BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,也是目前应用最广泛的神经网络模型之一。BP 网络能学习和存储大量的输入-输出模式映射关系,而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程。它的学习规则是使用最速下降法,通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小。BP 神经网络模型拓扑结构包括输入层(input)、隐层(hidden layer)和输出层(output layer)(图 1-4)。

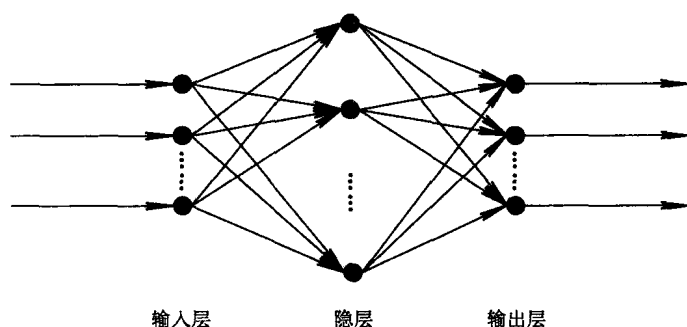


图 1-4 BP 神经网络结构示意图

在神经网络输入层和输出层中包含着很多节点,在输入层和输出层之间有很多隐含层。输入层的每个节点对应各个的预测变量。输出层的节点对应目标变量,可有多。在输入层和输出层之间是隐含层(对神经网络使用者来说不可见),隐含层的层数和每

层节点的个数决定了神经网络的复杂度。在神经网络前馈输入层中,每个节点和上一级的输出层的所有节点相连。对每个节点的输入是由输入权重决定的,权重则通过对数函数或非线性函数来确定。输出节点和下层的所有神经相连。由于水体中组分浓度的对数和反射率的关系符合对数函数的特征,因此对数函数更适合遥感图像的处理。因为每个节点都有不同的系数,所以神经网络几乎可以描述所有的非线性关联。

所有神经的权重是在训练学习阶段确定的,主要是通过把用来模拟的水体组分反射率的浓度和用神经网络法得到的浓度之间的方差最小化实现的。权重的确定过程,即训练学习,可以应用常用的误差反向传输算法等不同的最小化方法来进行。在允许的误差范围内,当水体组分浓度和反射率的关系反演有很多解决方法时,就可能会有问题出现。因此,一个成功的学习阶段要尽量避免这样的问题出现。

此外,过度学习也是要避免的。由于神经网络隐含层中的可变参数很多,从理论上讲,如果训练时间足够长的话,神经网络很可能把训练集的所有细节信息都“记”下来,而不是建立一个忽略细节只具有规律性的模型,由此导致训练过度。显然这种“模型”对训练集会有很高的准确率,但是,一旦离开训练集应用到其他数据,很可能会使准确度急剧下降。为了防止这种训练过度的情况,可以建立测试集来终止训练。即建立一个测试集来计算神经网络在此测试集上的正确率,一旦这个正确率不再升高甚至开始下降时,则认为该神经网络已经达到训练要求,可以停止训练。

利用神经网络模型进行水色参数反演,首先,需要利用大量的水体组分浓度和水体反射率作为训练样本,建立模型算法;其次,向训练好的模型中输入反射率和其他一些参数,输出结果为水体组分浓度。

从理论上讲,神经网络模型方法能够解决一切非线性关系的参数反演,但是,神经网络模型训练需要大量样本数据的现实,限制了其推广应用。

1.1.1.3 物理机理模型方法

为了克服以上模型应用中存在的局限性,基于水体光学传输机理的物理机理模型应运而生。机理模型以辐射传输理论为依据,根据水体组分如悬浮物、CDOM、叶绿素、纯水等的吸收、散射等光学特性,结合信息获取时的环境因素,如太阳辐射入射角和反射角、水面粗糙度等,建立水体反射光谱的模拟模型,进而实现水质参数的反演。目前应用较多的机理模型主要有生物光学模型。

该类方法利用生物光学模型描述水质参数与离水辐亮度或反射光谱之间的关系,同时利用辐射传输方程来模拟太阳光经过水和大气时被散射和吸收的情况。例如,式(1-23)建立了水表面下的辐照度比值与吸收系数和后向散射系数之间的数学关系。

$$R(0^-, \lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1-23)$$

式中, $R(0^-, \lambda)$ 为刚好位于水面下的辐照度比,即水表面在波长为 λ 时的向上辐照度与向下辐照度的比值; $a(\lambda)$ 为波长为 λ 时的吸收系数; $b_b(\lambda)$ 为波长为 λ 时的后向散射系数; f 为可变参数。其中, $a(\lambda)$ 、 $b_b(\lambda)$ 为水中各种组分贡献的线性和:

$$a(\lambda) = a(\lambda)_w + \sum_{i=1}^n a(\lambda)_i \quad (1-24)$$

$$b_b(\lambda) = b_b(\lambda)_w + \sum_{i=a}^n b_b(\lambda)_i \quad (1-25)$$

式中, $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为组分数; $a(\lambda)_w$ 、 $b_b(\lambda)_w$ 分别为纯水的吸收和后向散射。

一般来说只考虑叶绿素、悬浮物、CDOM, 并且各组分吸收系数和后向散射系数与其浓度有关, 则式 (1-24)、式 (1-25) 可写成

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{chl a} a_{chl a}^*(\lambda) + C_{sus} a_{sus}^*(\lambda) + C_{CDOM} a_{CDOM}^*(\lambda) \quad (1-26)$$

$$b_b(\lambda) = \bar{b}_{bw} b_w(\lambda) + \bar{b}_{bchl a} b_{chl a}(\lambda) + \bar{b}_{bsus} b_{sus}(\lambda) \quad (1-27)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水在波长为 λ 时的吸收系数; $C_{chl a}$ 为叶绿素 a 浓度; $a_{chl a}^*(\lambda)$ 为叶绿素在波长为 λ 时的单位吸收系数; C_{sus} 为悬浮物浓度; $a_{sus}^*(\lambda)$ 为其在波长为 λ 时的单位吸收系数; C_{CDOM} 为 CDOM 的浓度; $a_{CDOM}^*(\lambda)$ 为 CDOM 在波长为 λ 时的单位吸收系数; b_w 为纯水的体散射系数 (volume scattering coefficient); $\bar{b}_{bw}$ 为纯水的后向散射比例 (%); $b_{chl a}$ 为叶绿素的体散射系数; $\bar{b}_{bchl a}$ 为叶绿素的后向散射比例 (%); b_{sus} 为悬浮物的体散射系数; $\bar{b}_{bsus}$ 为悬浮物的后向散射比例 (%)。

因此, 在已知 3 种物质的散射特性 (散射系数) 和吸收特性 (吸收系数) 的条件下, 就可以根据其浓度模拟出不同组分水体的地面反射光谱或大气顶部 (top of atmosphere, TOA) 的反射光谱。反之, 当已知不同波段的地面反射率或大气顶部的反射率时, 通过建立线性方程组可以求出相对应的各组分浓度值。

在生物光学模型的求算中, 参数 f 与气-水界面折射率、太阳入射角、观测角、水表面粗糙度、风力等诸多因素有关。在实际应用中, 该参数往往难以准确确定, 因此制约了该模型方法的应用。

机理模型的建立, 充分考虑了辐射光束与水体内部介质的相互作用机理, 从理论上讲, 只要水体组分光学特性没有发生质的变化, 模型都具有广泛的适用性, 因此, 此类模型的构建方法技术代表了水质遥感监测的重要发展方向。物理机理模型必须建立在对水体组分的固有光学特性和表观光学特性 (如光束衰减系数、吸收系数、散射系数、散射相函数等) 的准确表达的基础上。然而, 这些光学特性参数的获取, 对地面观测仪器设备提出了很高的要求, 导致数据缺乏, 因此大大制约了该类模型的研究和发展。

综上所述, 半经验模型方法虽然缺乏物理机理解释, 但是简单适用, 是目前应用最多的方法; 神经网络模型精度高, 但是由于需要大量的训练样本, 模型方法难以大量推广使用; 机理模型方法具有明确的物理解释, 精度高, 需要大量的实测水体光学特性参数进行模型构建, 由于这些参数难以获取, 并且变化较大, 因此, 机理模型方法主要还处于研究阶段, 目前还难以在水环境遥感监测中大量应用。

1.1.2 水色遥感数据源进展

要了解水色遥感的发展, 必须追溯到空间海洋水色遥感的起源。1978 年, NASA 发射了第一颗海洋水色监测卫星——CZCS (coastal zone color scanner)。该卫星发射的初步目标是: 利用可见光波段中有限的波段量测水体离水辐射, 同时利用测得的信号量, 推算海洋表层水体浮游植物的浓度。CZCS 的参数设置见表 1-1。CZCS 数据在影响