

水质参数的遥感反演和遥感监测

付宇, 韦玉春, 王国祥
(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要: 遥感技术由于具有快速、宏观、低成本和周期性的优点, 便于探测水质的时空变化, 已成为水质参数监测的重要手段。目前能够直接进行遥感反演的水质参数主要是悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度、可溶性有机物等光学活性物质, 并已经建立了许多反演模型。但是这些模型直接用于水质的遥感监测仍存在一些问题。今后, 利用 3S 技术将地面观测和遥感观测结合起来, 可望推动水色遥感的实际应用。

关键词: 水质参数; 水质反演; 水质监测; 遥感

中图分类号: X 87 **文献标识码:** B **文章编号:** 1674-6732(2010)-06-0027-04

Retrieval and Monitoring of Water Quality Parameters based on Remote Sensing Data

FU Yu, WEI Yu-chun, WANG Guo-xiang
(Key Lab of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

ABSTRACT: Remote sensing technology has become an important way of monitoring water quality parameters because of its advantages such as fast, regional, global, low-cost and periodic. Now, the water quality parameters retrieved by remote sensing are mainly optically active substances in water such as the concentration of suspended solids, chlorophyll-a and colored dissolved organic matter. Although many retrieval models of water quality parameters based on remote sensing data have been established, they still have some problems when be used in remote sensing monitoring of water quality directly. Combination of ground observation and remote sensing observations by 3S technology will be a useful way to promote the practical application of water color remote sensing.

KEY WORDS: water parameters; water quality inversion; water quality monitoring; remote sensing

水环境保护的基础工作之一是水质监测, 监测项目一般包括水温、pH、悬浮物(SS)、溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD)、化学氧量(COD)、叶绿素 a、有毒物质等。常规水质分析是实地测量或取水样在实验室分析, 它可精确地测定出某一位置水体表层水质的各项指标, 但成本高、耗时长, 无法给出这些水质参数在空间和时间上的分布信息。水质遥感监测是通过研究水体反射光谱特征与水质参数浓度之间的关系, 建立水质参数的遥感反演算法, 进而利用遥感图像估算水质参数的浓度, 它具有快速、宏观、低成本和周期性等优点, 可以探测水质参数在空间和时间上的变化, 还能发现一些常规方法难以揭示的污染源和污染物的迁移特征。

遥感反演是遥感监测的基础。水质参数的遥感监测首先需要建立水质参数的遥感反演模型。遥感分析使用的数据来源包括地面遥感、航空遥感和航天遥感 3 种。其中, 地面遥感是航空和航天遥

感工作的基础, 航空和航天遥感为遥感图像。

1 水质参数遥感研究现状

当前, 借助遥感手段, 科研人员已经能够进行较高精度的水域识别, 进行一定精度的水质参数遥感反演和制图。一般认为, 按照水质参数的光学特性, 目前能够直接进行遥感反演的水质参数主要有悬浮物、叶绿素 a、可溶性有机物(CDOM)等水体中的光学活性物质。同时, 借助于红外和近红外遥感, 可以反演水体的温度。水体中的非光学活性物质没有直接的光学特性, 例如总氮、总磷、DO、COD、

收稿日期: 2010-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“湖泊藻类不同色素组分的高光谱定量反演研究”(40771152), 江苏省普通高校自然科学基金研究计划资助项目(07KJB420062)。

作者简介: 付宇(1986—), 女, 硕士, 从事遥感与 GIS 应用研究。

BOD₅ 等,无法直接进行遥感反演,往往需要利用水体中不同物质之间的关系进行间接的遥感分析。

1.1 叶绿素 a 浓度的遥感

叶绿素 a 浓度是水环境遥感监测的主要参数之一。水体中的叶绿素 a 浓度反映了浮游植物的分布状况,是衡量水体初级生产力(水生植物的生物量)和富营养化作用的基本指标。叶绿素 a 在藻类物质中所占的比例比较稳定,是藻类的主要色素,其浓度易于在实验室测量。随着水体中叶绿素 a 浓度的不同,其在 430 ~ 700 nm 的光谱波段会选择性地出现较明显的差异。叶绿素 a 在 440 nm 和 670 nm 附近有吸收峰,在 550 ~ 570 nm 有一反射峰。因为

藻青蛋白的吸收峰在 624 nm 处,所以 630 nm 附近出现反射率谷值或呈肩状。由于浮游植物分子吸收光后再发射引起的拉曼效应激发出的能量荧光化,在波长 685 nm 附近有明显的荧光峰,叶绿素 a 的吸收在该处达到最小。685 ~ 715 nm 荧光峰是含藻类水体最显著的光谱特征,通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素 a 的依据。

叶绿素 a 浓度的遥感主要利用水体反射光谱与叶绿素 a 浓度之间的关系模型。目前通过各种研究已经建立了许多反演模型,但即使是同一水体,模型的形式和参数在不同季节之间也存在较大的差异(见表 1)。

表 1 近年来国内太湖水体的叶绿素 a 浓度遥感反演模型

模 型	区 域	来 源	数据类型	注 释
$-167.55 \times \ln B3 - 48.14$	太湖,2002 年 7 月	马荣华等, 2005	航天遥感, ETM 数据	B3 为 ETM3/ETM1
春季: $177.89 \times (R3/R1) - 102.59$ 夏季、秋季: $-2\,913.8 \times (R1 - R2) + 58.962$	太湖,2003 年 10 月、 2004 年 3 月等	王世新等, 2008	航天遥感, MODIS 数据	R1, R2, R3 分别为 1, 2, 3 波段数据
$-28.491DVI_{(3,19)} + 22.562$	太湖,2005 年 8 月	顾 亮等, 2008	航天遥感, MODIS 数据	$DVI_{(3,19)}$ 为 MODIS 的 3, 9 波段的差值植被指数
$23.09 \times (M2/M8)(M2/M9) - 41.78 \times (M2/M8) + 32.08$	太湖,2000—2003 年	吕 恒等, 2009	航天遥感, MODIS 数据	M2、M8、M9 分别为 2, 8, 9 波段数据
$\exp[2.4782 + 16.378 \times (R_{696} - R_{661}) / (R_{696} + R_{661})]$	太湖,2004 年 7、8 月	韦玉春等, 2007	地面遥感	R_{696} 、 R_{661} 分别为 696 nm、661 nm 处的遥感反射率
$246.2[R_{666}^{-1} - R_{688}^{-1}]R_{725} + 12.46$	太湖,2004 年 10 月	周冠华等, 2008	地面遥感	R_{666} 、 R_{688} 、 R_{725} 分别为 666 nm、688 nm、725 nm 处的遥感反射率
$1\,674.4 \times (R_{814} - R_{706}) + 39.248$	太湖,2007 年 11 月	杜 聪等, 2009	地面遥感	R_{814} 、 R_{706} 分别为 814 nm、706 nm 处的遥感反射率

大洋水体中的叶绿素 a 浓度遥感反演模型比较成熟,而且精度较高。内陆水体,特别是浑浊水体中,大量悬浮物和 CDOM 会使背景光学特性发生显著变化,导致蓝波段范围内叶绿素 a 的光谱吸收特性会被 CDOM 的吸收掩盖。夏季水体中悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度可能会有很大的相关性,进而影响到叶绿素 a 最佳遥感反演波段的选择和遥感反演算法的精度。这些因素进一步增加了水体叶绿素 a 浓度遥感的复杂性。

1.2 悬浮物浓度的遥感

悬浮物指水体中固体状的不溶解物质,如各类矿物微粒,含铝、铁、硅水合氧化物等无机物质,以及腐殖质、蛋白质等有机大分子物质,前者往往称

为悬浮泥沙或无机悬浮物,后者往往称为有机悬浮物。水体中的悬浮物浓度是重要的水质参数之一,影响着水体的透明度、浑浊度、水色等光学性质。不同水域不同季节,水体中的悬浮物成分、粒径分布和浓度差异较大。

自然环境下清水和浊水的反射光谱曲线差异明显。随着悬浮物浓度的增加,水体在可见光及近红外波段范围的反射率增加,同时反射峰值波长向长波方向移动,反射峰形态变得更宽。对可见光遥感而言,不同悬浮泥沙浓度往往在 580 ~ 680 nm 波段出现峰值,该波段范围对水体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,被 NOAA、风云气象卫星及海洋卫星选择用来建立反

演模型。研究表明,500 ~ 600 nm 波段适合用来监测悬浮物,700 ~ 900 nm 波段反射率对悬浮物浓度变化敏感,是遥感估算悬浮物浓度的最佳波段。

遥感中往往使用总悬浮物作为指标,它是无机悬浮物和有机悬浮物浓度之和。应用遥感方法测

定水体悬浮物浓度的关键问题是建立水体反射率与悬浮物浓度之间的定量关系。国内外已经建立了许多水体悬浮物的遥感反演模型,这些模型因水体、季节有较大的不同,实际应用时需要具体分析(见表 2)。

表 2 近年来国内典型水体的悬浮物浓度遥感反演模型

模 型	区 域	来 源	数据类型	注 释
$-64.678 + 325.736 \times (B4/B1)$	滇池,1999 年 4 月	赵碧云等,2001	航天遥感,TM 数据	$B4$ 、 $B1$ 为 4, 1 波段数据
冬季: $\ln SS = 14.66 \times (B2 + B3)/(B2/B3) + 1.66$ 夏季: $\ln SS = 12.25 \times (B3 - B2)/(B3 + B2) + 3.04$	太湖,2001 年 1 月、 2002 年 8 月	光 洁等,2007	航天遥感,TM 数据	$\ln SS$ 表示悬浮物取自然对数后的值; $B2$ 、 $B3$ 为 TM/ETM 的 2, 3 波段数据
$\ln C_{ss} = 7.17 + 15.4 \times (B3 - B1)/(B3 + B1)$	太湖,2001 年 1 月	韦玉春等,2006	航天遥感,TM 数据	$B1$ 、 $B3$ 为 TM/ETM 的 1, 3 波段数据
$S = 3.6913 \times B4/B1 + 0.6028$	长江南京段	李洪灵等,2006	航天遥感,TM 数据	$B4$ 、 $B1$ 为 4, 1 波段数据
$1799.55 \times B4 - 209.07$	太湖,2002 年 7 月	马荣华等,2005	航天遥感,ETM 数据	$B4$ 为 ETM4/ETM1
$-12466 \times R8 + 8684.9 \times R11 - 414.6 \times R13 + 234.5 \times R14 + 118.7$	太湖,2003 年 10 月	祝令亚等,2007	航天遥感,EMODIS 数据	$R8$ 、 $R11$ 、 $R13$ 、 $R14$ 为 8, 11, 13, 14 波段反射率
$12.46 \times R_{819} - 31.316$	巢湖,2001 年 11 月	李素菊等,2003	地面遥感	R_{819} 为 819 nm 处的反射率
$289.18 \times R_{580}$	太湖,2003 年 11 月	吕 恒等,2005	地面遥感	R_{580} 为 580 nm 处的反射率
$\ln C_{ss} = 1.199 + 52.031 \times R_{576}$ $\ln C_{ss} = 0.0213 + 35.13 \times B1$	太湖,2004 年 10 月	王艳红等,2007	地面遥感、航天遥感,EMODIS 数据、MODIS 数据	$\ln C_{ss}$ 为总悬浮物浓度的对数变换; R_{576} 为 576 nm 处的反射率; $B1$ 为 1 波段反射率

1.3 可溶有机物(CDOM)浓度的遥感

水体中的可溶性有机物最早称为黄质,在 20 世纪 30 年代就开始了研究,后改用现在的名称——有色可溶性有机物。CDOM 是一个很重要的生物光学参数,影响着浮游植物的光合作用,并往往与溶解有机碳(DOC)具有较好的相关性,多被用来表示水体中的碳的变化。在全球变暖的研究中,它也是个有意义的指标。CDOM 的光学性质稳定,主要表现为对光的吸收,通常利用 CDOM 在 440 nm 处的吸收系数表示其浓度的高低。

20 世纪 90 年代以来,国外学者对内陆水体中 CDOM 的光学吸收特性和遥感进行了许多研究。研究集中在水质参数遥感反演时如何消除 CDOM 的干扰和遥感探测 CDOM 浓度的方法等方面。国际上对 CDOM 浓度提取方法有:直接提取浓度信息;计算在某一特征波段的吸收系数,用吸收系数来表示浓度。前者考虑到 CDOM 检测的复杂性和化学分析检测的现状,以及水色遥感技术在水环境监测中的实际应用,通常视可溶性有机碳(DOC)

为 CDOM 的一种替代物。研究表明,DOC 浓度与波段组合 R716/R670、R706/R670、R670/R412 等具有很好的相关性。

目前,我国已先后对海河、渤海湾、蓟运河、大连海、长春南湖、于桥水库、珠江、苏南大运河、滇池、太湖、巢湖、鄱阳湖、长江三峡等大型水体进行了有机物污染、油污染、富营养化等遥感研究,利用水体热污染原理先后对湘江、大连海、海河、闽江、黄浦江等进行了红外遥感分析。

2 反演方法与技术

遥感的本质是反演和监测。遥感传感器收集到各种数据后,通过适当的处理来构建遥感数据与水质参数之间的关系,这个过程为遥感反演。反演的模型经过检验和验证后,可用于遥感监测。针对不同水域、不同季节的水质参数特征,如何建立合适的反演模型并用于遥感监测是难点,也是当前工作的重点。

常用的遥感反演方法分为分析方法、半分析方

法和经验方法。分析方法以辐射传输模型为基础,利用遥感反射率计算水体的吸收系数与后向散射系数的比值,并与水体中各组分的特征吸收系数、后向散射系数相联系,进而反演水质参数的浓度。这种方法具有普遍性,可以产生高精度的反演结果。但是由于模型的假设和参数取值的复杂性,常常导致较低精度的模型外推结果。半分析方法是利用已知的水质参数光谱特征,通过统计方法选择最佳波段或波段组合作为遥感指标来估算水质参数的浓度,这是目前常用的方法。经验方法通过直接建立遥感数据与水质参数浓度值之间的统计关系模型,其反演结果的精度较高,区域性强,存在的问题是水质参数与遥感数据之间的事实相关性可能不能保证。

由于水体中各种组成物质的相互影响,常规反演方法所建立的波段与组分之间的函数关系往往难以实际应用。而神经网络反演模型是一种非常有效的反演策略,可模拟复杂的关系,充分利用各种遥感传感器的优点,有望提高反演精度。在具有充分的大量的调查数据的基础上,区域化的神经网络模型不失为一个较好的反演方法。

3 问题与展望

目前,遥感在内陆水体环境监测中得到了较多的应用,但仍存在一些问题。

(1) 遥感传感器的分辨率是首要的问题。其中,传感器的辐射分辨率影响着水质参数可分辨的数量级,空间分辨率影响着可识别的区域大小,时间分辨率影响着遥感数据在监测中的可用性,而光谱分辨率影响着水质参数的反演精度。很难找到分辨率指标均满足水质参数遥感反演的遥感数据。随着我国环境一号小卫星的发射,遥感数据的部分问题有望能够得到解决。

(2) 大气对遥感图像辐亮度的影响。在辐射传输的过程中,大气成分的自然波动会造成遥感图像数据中依附在辐射亮度里的各种失真。虽然很多学者提出了不同的大气校正模型,但对于一幅图像,其对应的当时的大气物理和化学数据几乎永远是变化的且难以得到,所以,遥感图像的大气校正仍然是个难题。针对水体的高光谱图像的大气校正仍然缺乏通用的高精度的解决方案。

(3) 遥感图像中的光谱值是水体中不同物质组成的综合信息,尚不能精确地确定水体中各种光学组分对辐射值的单独贡献。还需要进一步系统

深入地研究水体中各组分的内在光学特性及其差异,充分挖掘遥感数据中的信息。

(4) 当前的水质参数研究多集中在叶绿素 a、悬浮物、水温和 CDOM,对于富营养化评价的关键指标总氮、总磷的遥感反演研究较少,且比较困难。

(5) 相对于大洋水体较高精度的水质参数遥感反演和遥感监测,内陆水体,特别是浑浊水体的水质由于影响因素众多,水质参数的遥感反演和遥感监测发展缓慢,而且精度不很理想。

(6) 虽然通过测量的水体中叶绿素 a 浓度,各种光学性质及光谱数据可以建立起较高精度的遥感反演模型,但是,这些模型往往仅适用于宏观的水质评价、分类和管理(主要是遥感制图),而不能替代精确的现场水质监测程序。由于自然地理环境的差异和水环境不同,所建立的反演模型用于水质参数的遥感监测往往精度不高,仍然需要大量的现场验证工作。

水质参数的遥感反演和遥感监测是一个复杂的过程,仅仅采用遥感一种手段是不够的,重要的是如何扬长避短,发挥遥感的优势。利用 3S 手段并结合物联网技术,将遥感观测、GPS 空间定位、断面监测、在线监测相结合,通过 GIS 的空间分析技术,通过地学分析,并充分利用积累的历史数据来加大信息挖掘的深度,可望会取得较大的进展,从而为我国江河湖海的治理规划和管理提供更科学的依据。

[参考文献]

- [1] 尹改,王桥,郑丙辉,等. 国家环保总局对中国资源卫星的需求与分析(上)[J]. 中国航天,1999(9):3-7.
- [2] 张溯智,聂跃平,蔺启忠,等. 表面水质遥感监测研究[J]. 遥感技术与应用,2000,15(4):214-219.
- [3] 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报,2000,4(1):41-45.
- [4] 杨一鹏,王桥,王文杰,等. 水质遥感监测技术研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):6-12.
- [5] 蔡伟,余俊清,李红娟. 遥感技术在湖泊环境变化研究中的应用和展望[J]. 盐湖研究,2005,13(4):14-20.
- [6] 吕恒,江南,李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展,2005,20(2):185-191.
- [7] 喻欢,林波. 遥感技术在湖泊水质监测中的应用[J]. 环境科学与管理,2007,32(7):152-155.
- [8] 于德浩,王艳红,邓正栋,等. 内陆水体水质遥感监测技术研究进展[J]. 中国给水排水,2008,24(22):12-16.
- [9] 马荣华,唐军武,段洪涛,等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学,2009,21(2):143-158.

(本栏目编辑 邓爱萍)