

# 水质遥感监测研究进展<sup>\*</sup>

刘灿德<sup>1,2</sup> \* \* 何报寅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 本文对近年来应用遥感技术对地表水水质进行监测的研究进展做了总结。在描述地表水体的光谱特征基础上, 简述了水质遥感监测的基本原理, 其次总结了水质反演的方法和可用的卫星遥感数据源; 最后, 对此领域存在的问题和今后的重点研究方向作了探讨。

**关键词:** 水质监测 卫星遥感 进展

## Progresses in Water Quality Monitoring Using Remote Sensing<sup>\*</sup>

LIU Cande<sup>1,2</sup> \* \* HE Baoyin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The paper reviewed the progresses in the application of remote sensing to surface water quality monitoring. Firstly, after describing the spectral properties of surface water body, the authors stated briefly the main principles of using remote sensing to monitor surface water quality. Secondly, the authors summarized the main retrieved algorithms and available satellite data sources. Finally, the existing problems in this field were discussed; the key research points and directions were also analyzed.

**Key words:** water quality monitoring, satellite remote sensing, progress

水质通常是关于水体物理、化学、热量和生物特性的描述。传统的水质监测和分析方法是实地调查和采样分析, 易受人力、物力和气候、水文条件的限制。遥感是 20 世纪 60 年代发展起来的一门科学, 是一种通过量测从陆地表面获取电磁辐射而推断地表参数的过程<sup>[1]</sup>, 遥感技术正好弥补了传统水质监测的缺陷, 以其实时、高效、持久、数据量大、观测范围广泛的优点在水质监测中发挥了重要作用。

## 1 水质遥感的基本原理

### 1.1 水体光谱特征

对水体来说, 水的光谱特征主要是由水本身的物质组成决定, 同时又受到各种水状态的影响<sup>[2]</sup>。水体的反射主要在蓝绿光波段, 其它波段吸收都很强, 特别到了近红外波段, 吸收就更强。水体可见光反射包含三部分: 水表面反射、水体底部物质反射和水中悬浮物质(浮游生物或叶绿素、泥沙及其它物

\* 基金项目: 本研究得到武汉大学测绘科学技术博士后流动站, 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12-1), 中国科学院测量与地球物理研究所知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-110)资助。

\* \* 通讯作者: 刘灿德, 中国科学院测量与地球物理研究所 524 室, 430077, E-mail: candel@asch.whigg.ac.cn。

质)的反射。当水中含有其它物质时,反射光谱曲线会发生变化。水中含泥沙时,由于泥沙的散射,可见光波段反射率会增加,峰值出现在黄红区<sup>[3]</sup>。水中含叶绿素时,近红外波段明显抬升。水中的分子对光的散射使光改变方向,其中的后向散射光与水底的反射光一起返回水面,通过水—气界面回到大气中,这是可以遥测的部分。这一部分光既反映了水体内部的吸收特征,也与不同物质的散射相关,可以反映水体的组分特征。

### 1.2 遥感监测水质的基本原理

影响水质的主要因子有水中悬浮物(浊度)、藻类(如叶绿素、类胡萝卜素)、化学物质(如营养物质、杀虫剂、金属)、溶解有机物(DOM)、热释放物、病原体和油类物质等<sup>[1]</sup>。

应用遥感科技来监测水质,就是依靠监测光谱信号的变化,再通过经验或分析模型把这些光谱的变化与水质参数联系起来。量测水质参数的最佳波段依赖于水质中的物质种类、浓度,还有传感器的特性。通过遥感预测的水质参数有<sup>[4]</sup>:悬浮颗粒物、水体透明度、叶绿素 a 浓度以及溶解性有机物、水中入射与出射光的垂直衰减系数和一些综合污染指标如营养状态指数等。

## 2 水质遥感的主要方法

### 2.1 理论分析方法

该方法是基于大气辐射传输理论及模型,利用遥感测得的反射率计算水中实际吸收系数与后向散射系数的比值,与水中各组分的特征吸收系数、后向散射系数相联系,反演组分含量。该方法对于多波段反演特别有用,且具有普遍适用性<sup>[5,6]</sup>。一些学者做了这方面的研究<sup>[7~9]</sup>,建立了叶绿素浓度预测模型,水下表面辐射反射率与水体内在光学参数的联系,后向散射反射率模型等。但由于理论基础尚不成熟,模型假设条件多,使得精度不够,往往只能用于研究区域,可移植性差。

### 2.2 经验方法

经验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水质参数值之间的统计关系外推水质参数值。

光谱特性和水质参数的经验关系式已经被确定,这类经验方程的一般形式为

$$Y = A + BX \text{ 或 } Y = AB^X$$

Y——遥感测量值(如辐射、反射能量值)

X——感兴趣的水质参数(如叶绿素)

A、B 为待定系数

由于水质参数与遥感数据之间的事实相关性不能保证,如实测数据与影像数据非同步等,所以该方法结果缺乏物理依据。

### 2.3 半经验方法

半经验方法是将已知的水质参数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质参数值的方法,这是目前最常用的方法。

经验方法与半经验方法都是对遥感数据进行适当的数学方法来得到水质参数的估测值。常用的数学方法有:线性回归、多元线性回归、对数转换线性回归、聚类分析、多项式回归、贝叶斯分析、灰色系统理论和逐步多元性回归、主成分分析、神经网络模型等等。

## 3 水质遥感数据源

### 3.1 卫星平台上的遥感数据

这是我们通常应用的遥感数据,包括美国 Landsat 卫星的 MSS、TM、ETM+ 数据,法国 SPOT 卫星的 HRV 数据,气象卫星 NOAA 的 AVHRR 数据,印度遥感 IRS 系统的 LISS 数据,日本 JERS 卫星的 OPS(光学传感器)接收的多光谱图像数据。还有一些高分辨率的卫星数据如 SPIN-2、IKONOS、QuickBird 数据等。

遥感所用的数据一般是经校正转换的向上辐射值或反射率值,方法以经验和半经验方法为主。从陆地卫星发射以来,学者和管理者们一直在进行用卫星数据对水质监测的研究。

水中悬浮物含量是首先被遥感的参数<sup>[5,10]</sup>,70年代末已有人提出悬浮物遥感定量的统一模式<sup>[11,12]</sup>,很多学者做了大量的研究,如 Ruhl 等人<sup>[13]</sup>用 AVHRR 数据结合光谱后向散射传感器获取的地面实测数据对圣弗朗西斯科湾悬浮物浓度进行了研究,取得了较好的效果,证明了遥感定量监测悬浮物含量是有效的。

Landsat 数据是目前应用较广的数据。自 1972 年 Landsat 1 发射后,MSS 数据便开始被用于水质研究中。如有的学者用 MSS 数据对我国黄河下游进行了研究,建立了遥感数据与悬浮物浓度的对数关系<sup>[14]</sup>;有人用 MSS 和 TM 数据建立了内陆水体的水质模型<sup>[15~17]</sup>。Iwashita 等<sup>[18]</sup>用转换的 TM 数据对日本的湖泊进行了研究,得出红波段和近红外

波段的比值对评定高浓度的叶绿素是有用的。Hellweger 等<sup>[19]</sup>结合 TM 和 MODIS 数据对纽约港进行了研究。Anne 等人<sup>[20]</sup>用 TM 和 ETM+ 数据对芬兰的海岸水体进行了研究。

SPOT 地球观测卫星系统,较陆地卫星,最大的优势是最高空间分辨率达 10 m。SPOT 数据应用于水质研究中,学者们也做了一些研究,如利用 SPOT 数据来估算悬浮物质浓度和估计藻类生物参数<sup>[21,22]</sup>,效果显著。

AVHRR(高级甚高分辨率辐射计)是装载在 NOAA 系列卫星上的传感器,每天都可以提供可见光图像和两幅热红外图像,在水质监测等许多领域广泛应用,如用 AVHRR 数据对河口复合水体清澈度进行的评价研究<sup>[23]</sup>。

MODIS(中等分辨率成像分光计)是一个具有 36 个波段的仪器,该数据的接收,象征着从太空进行高光谱扫描的一个新时代的开始。对于水体,其得出的主要产品有海洋颜色、叶绿素 a 的含量、叶绿素荧光等。

在为水中悬浮物质制图方面,MODIS 影像有其自身优势。常规遥感数据空间分辨率低、重访周期长、数据花费高。尽管陆地卫星系列,有 15 m ~ 30 m 的空间分辨率,但重访周期为 16 天,不能获取现势的水动力情况。但也有学者做了尝试性的研究<sup>[13]</sup>。相比之下,近乎日常覆盖的 MODIS 影像数据、显示和处理程序等都可以免费获取,并能一般在计算机上操作。

用遥感数据为悬浮物质制图,常用方法是把遥感获取的红色波段能量和水体悬浮物浓度联系起来。用 MODIS 250 m 数据为悬浮物制图,在墨西哥北部湾做了研究<sup>[24]</sup>,建立了第一波段(620 ~ 670 nm)数据和实测 TSM(总悬浮物质)数据之间的线性关系。研究表明 MODIS 250 m 数据在海岸环境特别是海湾或河口中的小水体监测中是有效的。

高分辨率商业卫星的发射成功,为我们监测水质参数提供了更高的光谱和空间分辨率数据。IKONOS 和 QuickBird 的空间分辨率分别达到了 1 m 和 0.61 m。Kali 等<sup>[25]</sup>利用这两种高分辨率影像,对美国明尼苏达州小尺度的湖泊水体清澈度进行了研究,精确度达 80% 以上。ERS(欧空局)系列,为太阳同步的极地轨道海洋卫星,使用全天候测量和成像的微波技术,提供全球重复性观测数据,观测领域包括海况、洋面风、海洋循环等。对于水质监

测,也有学者做了尝试,把微波数据和光学数据结合起来对芬兰湾水质进行了评价<sup>[26]</sup>。

### 3.2 高光谱遥感数据

高光谱(又称超光谱)传感器是一类可以在许多很窄的毗边光谱波段(包括整个可见光、近红外、中红外、热红外的部分光谱)获取图像的仪器。可以采集 200 或更多波段的数据,产生光谱分辨率足够的数据。由于有大量的窄波段的样例,高光谱的扫描数据使得遥感数据的采集代替了原来的受制于实验室和高昂花费的地面野外调查的数据采集。

#### 3.2.1 成像光谱仪数据

成像光谱仪也称高光谱成像仪,实质上是将二维图像和地物光谱测量结合起来的图谱合一的遥感技术,其光谱分辨率高达纳米数量级。主要的有:(1) CASI:盒式机载光谱成像仪,(2) AISA:航空影像应用分光计,(3) AVIRIS:机载可见红外成像光谱仪,(4) HYDICE:高光谱数字图像采集实验,(5) DAIS:数字机载成像光谱仪,(6) AAHIS:高级机载高光谱成像光谱仪,(7) TRWIS:TRW 成像光谱仪,(8) HyMap:高光谱测图,(9) 成像光谱仪 MAIS 和机载成像光谱仪 OMIS。

高光谱成像技术的发展,大大提高了光谱分辨率,在水体应用中有很大的潜力。Kallio 和 Koponen 等<sup>[27,28]</sup>分别用 AISA 数据监测了芬兰的 11 种湖泊和芬兰南部四个湖泊的水质,发现 685 ~ 691 nm 的波段有利于贫营养和中营养湖的监测,建立了叶绿素 a 浓度的经验算法。其他学者把 AISA 数据和 MODIS、MERIS 等数据结合,对湖泊水体进行了经验、半经验、半自动的水质分类研究,取得了很好的效果<sup>[29~31]</sup>。Flink 等<sup>[32]</sup>利用主成分分析方法分析从瑞典两个湖泊得到的 CASI 数据,绘制了叶绿素浓度图,并指出绘制叶绿素图的最佳波段位置和波段宽度。

Catherine 等<sup>[33]</sup>把 CASI 高光谱数据和 TM 多光谱数据结合,制作了瑞典的湖泊水质图。Sabine 等<sup>[34]</sup>把 CASI 数据和 HyMap 数据结合,对德国梅克莱堡湖区水质进行了监测,为营养参数和叶绿素浓度的定量化建立了算法。Herut 等<sup>[35]</sup>利用 CASI 数据精确绘制以色列海法湾的叶绿素 a 与悬浮物浓度分布图,研究表明,绘制叶绿素 a 浓度的最佳波长是 681、704 和 715 nm,绘制悬浮物浓度的最佳波长是 534、624 nm。很多学者对 AVIRIS 数据进行了应用研究<sup>[36~38]</sup>,如敏感度分析、水深和高光

谱数据的关系等方面,应用于荷兰中北部艾塞尔湖,得出估算叶绿素的最佳组合为 R713 nm/ R677 nm,为美国加州-内华达州 Tahoe 湖的叶绿素浓度和湖底深度制图。疏小舟等<sup>[39]</sup>利用我国自行研制的 OMIS- 成像光谱仪在太湖地区进行地表水质遥感实验,结果表明,OMIS- 能够提高藻类叶绿素定量遥感精度。

### 3.2.2 非成像光谱仪数据

非成像光谱仪主要指各种野外工作时用的地面光谱测量仪,地物的光谱反射率不以影像的形式记录,而以图形等非影像形式记录。常见的有 ASD 野外光谱仪、便携式超光谱仪等。如对我国太湖进行水质监测时,水面光谱测量就用了 GRE-1500 便携式超光谱仪,光谱的响应范围 0.30 $\mu\text{m}$  ~ 1.1 $\mu\text{m}$ ,共 512 个测量通道,主要将其中 0.35 $\mu\text{m}$  ~ 0.90 $\mu\text{m}$  的 316 个通道的数据用于水质光谱分析。

## 4 存在问题与研究展望

尽管遥感技术在水质研究方面取得了不少实质性的进展,但也存在不少问题:(1)监测精度不高,各种算法以经验、半经验方法为主。(2)算法具有局部性、地方性和季节性,适用性、可移植性差。(3)监测的水质参数少,主要集中在悬浮沉积物、叶绿素和透明度、浑浊度等参数。(4)遥感水质监测的波段范围小,多集中于可见和近红外范围,微波遥感研究少。

今后的重点研究方向应该是:(1)加深对遥感机理的认识,特别是水质对表层水体的光学和热量特性的影响机理上,以进一步发展基于物理的模型,把水质参数更好地和传感器获得的光学测量值联系起来。(2)深入研究地表水质各参数的光谱特性及光谱分析技术,加强除主要水质参数以外的其它参数的研究,以增加水质遥感的种类。(3)加深目视解译和数字图像处理的研究,提高遥感影像的解译精度。(4)增强高光谱遥感的研究,完善航空成像光谱仪数据处理技术。高光谱数据会更好地地区分水质参数,能更好地理解光、水和物质的相互作用。(5)加深对遥感建模机理研究,建立综合水质遥感信息模型;充分考虑模型的各种影响因子,增强模型的适用性和可移植性。(6)多种遥感数据结合,提高监测精度。如 TM 与 CASI 数据,MODIS、MERIS 与 AISA 数据,CASI 与 HyMap 数据的结合等。(7)统计方法的改进。回归分析方法是目前最常用的方法,应探讨和研究更有效的方法,如灰色系统理论、主成分分

析、神经网络模型等等。(8)遥感与地理信息系统的结合。GIS 可以更有效地组织、管理和分析遥测的数据,与遥感集成,便于水质的动态监测和分析。

## 参考文献

- [1] Thomas J. S., William P. K., Jerry C. R., et al. Remote sensing in hydrology [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 1367 ~ 1385
- [2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [3] 梅安新, 秦齐明, 刘慧平等. 遥感受论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [4] Wezernak C. T., Tanis F. J., Bajza C. A.. Trophic state analysis of inland lakes [J]. *Remote Sens Environ*, 1976, 5: 147 ~ 165
- [5] 齐峰, 王学军. 内陆水体水质监测与评价中的遥感应用 [J]. *环境科学进展*, 1999, 7(3): 90 ~ 99
- [6] Forget P., Ouillon. S, Lahet. F, et al.. Inversion of reflectance spectra of nonchlorophyllous turbid coastal waters [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, 68: 264 ~ 272
- [7] Gordon H. R., Morel A. Y.. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review, *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. 1983, 4
- [8] Kirk J. T. O.. Volume scattering function, average Cosines, and the underwater light field, *Limol [J]*. *Oceanogr*, 1991, 36: 455 ~ 467
- [9] Dekker A. G., Hoogenboom H. J., et. al.. The relationship between spectral reflectance, absorption and backscattering for four inland water types. *Proceedings of the Sixth International Colloquium on Physical Measurement and Signatures in Remote Sensing*, 1994: 245 ~ 252
- [10] Kritikos H., Yorinks L., Smith H.. Suspended solids analysis using ERTS-A data [J]. *Remote Sens Environ*, 1974, 3: 69 ~ 80
- [11] Holyer R. J.. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms [J]. *Remote Sens Environ*, 1978, 7: 323 ~ 338
- [12] Munday J. C., Alfoldi T. T.. Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement [J]. *Remote Sens Environ*, 1979, 8: 169 ~ 183
- [13] Ruhl C. A., Schoellhamer D. H., Stumpf R. P. Combined Use of Remote Sensing and Continuous Monitoring to Analyse the Variability of Suspended Sediment Concentrations in San Francisco Bay, California [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 53: 801 ~ 812
- [14] Arunavachapun S., Walling D. E.. Landsat-MSS radiance as a measure of suspended sediment in the Lower Yellow River [J]. *Remote Sens Environ*, 1988, 25: 145 ~ 165
- [15] D. J. Carpenter, S. M. Carpenter. Modeling inland water quality using Landsat data [J]. *Remote Sens Environ*, 1983, 13: 345 ~ 352
- [16] 张海林, 何报寅, 丁国平. 武汉湖泊富营养化遥感调查与评价 [J]. *长江流域资源与环境 (学报)*, 2002, 11(1): 36 ~ 39

- [17]张海林,何报寅.遥感应用于湖泊富营养化评价的研究[J].上海环境科学,2003,22(12):1030~1033
- [18]Iwashita K, Kudoh K. Satellite analysis for water flow of Lake Inbanuma[J]. Advances in Space Research, 2004, 33: 284~289
- [19]Hellweger F.L., Schlosser P. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 437~448
- [20]Anne E., Risto K. Patterns and dynamics of coastal waters in multi-temporal satellite images: support to water quality monitoring in the Archipelago Sea, Finland[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 165~177
- [21]David D., Jean-M. F. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sens Environ, 2002, 81: 149~161
- [22]Yang M.D., Sykes R.M. Estimation of algal biological parameters using water quality modeling and SPOT satellite data[J]. Ecological Modelling, 2000, 125: 1~13
- [23]Dana L. W., Richard P. S. Remote Estimation of Water Clarity in Optically Complex Estuarine Waters[J]. Remote Sens Environ, 1999, 68: 41~52
- [24]Richard L. M., Brent A. M. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sens Environ, 2004, 93: 259~266
- [25]Kali E. S., Leif G. O., Nathan J. H. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery[J]. Remote Sens Environ, 2003, 88: 144~156
- [26]Zhang Y. Z., Jouni P. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data[J]. Remote Sens Environ, 2002, 81: 327~336
- [27]Kallio K., Kutser T. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 59~77
- [28]Koponen S., Pulliainen J. Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish lakes[J]. The Science of the total Environment, 2001, 268: 95~106
- [29]Jouni P., Kari K. A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 79~93
- [30]Sampsa K., Jouni P., Kari K. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. Remote Sens Environ, 2002, 79: 51~59
- [31]Pekka H., Jenni V., Tuula H. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 107~121
- [32]Flink P., Lindell T., Ostlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 155~169
- [33]Catherine O., Peter F., Niklas S. Mapping of the water quality of Lake Erken, Sweden, from Imaging Spectrometry and Landsat Thematic Mapper[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 139~154
- [34]Sabine T., Hermann K. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data—a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany[J]. Remote Sens Environ, 2002, 81: 228~237
- [35]Herut B., Tibor G., Yacobi Y.Z., et al. Synoptic measurements of chlorophyll a and suspended particulate matter in a transitional zone from polluted to clean seawater utilizing airborne remote sensing and ground measurements, Haifa Bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(9): 762~772
- [36]浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [37]Hooenboom H. J., Dekker A. G., Althuis I. J. A Simulation of AVIRIS Sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters[J]. Remote Sens Environ, 1998, 65: 333~340
- [38]Sandidge J. C., Holyer, R.J. Coastal bathymetry from hyperspectral observation of water radiance[J]. Remote Sens Environ, 1998, 65: 341~352
- [39]疏小舟,汪骏发,沈鸣明等. 航空成像光谱水质遥感研究[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(4): 273~276

#### 作者简介

刘灿德(LIU Cande),男,山东新泰人,硕士研究生,主要研究方向为遥感技术及其应用。

何报寅(HE Baoyin),男,广西玉林人,副研究员,主要研究方向为“3S”技术在资源环境中的应用等。

(责任编辑:高利丹)