

文章编号:1001-9014(2005)03-0198-05

湖泊水质卫星遥感方法及其应用

尹球, 巩彩兰, 匡定波, 周宁, 胡勇, 张凤丽, 许卫东, 马永泉

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:通过系统性的常规水质采样分析与水面光谱测量外场同步试验,建立了由FY-1C多通道扫描辐射计、Landsat卫星TM和Seasat卫星SeaWiFS等在轨卫星多通道遥感器以及一组设想的遥感通道遥感反演叶绿素a浓度和总悬浮物浓度的优化通道组合模型,提出了一种利用水面上标准反射板的反射光谱和遥感图像本身确定大气透过率和反射率从而实现大气校正的水质指标卫星遥感反演方法.所建立的模型和方法被用于遥感解译我国典型富营养化湖泊太湖和滇池从80至90年代的富营养化程度及其分布状况随年份的变化.本研究为进一步开展湖泊水质业务化卫星监测打下了基础.

关键词:卫星遥感;水环境;富营养化湖泊;光谱响应模型

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

METHOD OF SATELLITE REMOTE SENSING OF LAKE WATER QUALITY AND ITS APPLICATIONS

YIN Qiu, GONG Cai-Lan, KUANG Ding-Bo, ZHOU Ning, HU Yong,
ZHANG Feng-Li, XU Wei-Dong, MA Yong-Quan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: By field experiment in water sampling for chemical analysis and synchronous measurement of reflected light spectrum of water, the optimal channel combination models were obtained to retrieve chlorophyll-a concentration and suspended sediment concentration from remote sensing data of FY-1C multi-channel scanning radiometer, Landsat-5 TM, SeaWiFS of Seasat and a supposed set of remote sensing channels. A method retrieving water quality parameters by satellite remote sensing was suggested, in which the atmospheric transmittance and reflectance were determined by the reflected light spectrum of standard reflecting board on water and satellite remote sensing images themselves for the atmospheric calibration. The models and methods were used to retrieve the eutrophic degree, its space distribution and its change with year of Tai lake and Dianchi lake, which are typical eutrophic lakes of china, in 1980s and 1990s. The results of this study could be as the bases for operational satellite remote sensing of water quality of lake.

Key words: satellite remote sensing; water environment; eutrophic lake; spectral response model

引言

水是影响我国经济和社会可持续发展的重要因素,目前,水量的缺乏和水质的低劣两种情况并存,解决我国水问题应节流与开源并重,监测与治理并重.污染治理要达到预期效果,监测是基础.一方面,只有全面客观地掌握把握污染状况,追寻污染发生的原因,才能对症下药;另一方面,污染治理的效果需要经过长期系统的监测才能作出客观评价.目前我国的环保和水利等部门均建立起了各自的水环境

监测网.以采样分析为主,可以获得20多项水质指标,目前已积累了大量的基础资料,非常宝贵.但也存在一些薄弱环节,例如:对水环境状况的宏观把握不足,对污染事件的响应受到限制等.这些问题的存在影响了污染治理决策和治理效果评价的科学性.

与常规方法相比,遥感技术具有宏观、快速、经济等独特优势,可以作为水环境常规监测手段的有效补充.作为一种区域性水环境调查和监测手段,遥感技术日益受到重视.早期的卫星遥感监测内陆水体水质研究以彩色合成图像为主,信息量十分有

收稿日期:2004-05-11,修回日期:2004-10-08

Received date: 2004-05-11, revised date: 2004-10-08

基金项目:国家自然科学基金(40271084),国家863计划(863-2-7-4-25,2002AA130010-1-4),及上海市科技发展基金资助项目(011661077,02DZ15001,02DZ15002)

作者简介:尹球(1963-),男,江苏太仓人,中国科学院上海技术物理研究所研究员,博士,现主要从事遥感信息处理与应用技术研究.

限^[1,2],因此,人们开始尝试从分析水环境指标的光谱响应特征入手,进而根据卫星遥感对应通道的遥感数据反演水质状况^[3~5].九五期间,中科院上海技术物理研究所在国家 863 计划支持下,以光谱测量与采样分析同步、地面光谱测量与遥感配合为基础,建立水质遥感模型与方法^[6,7],开展陆域水质遥感应用研究,取得成功.本文对其中的卫星遥感湖泊水质研究的研究进展进行总结.

1 优化的遥感通道组合

考虑到湖泊富营养化是一个突出问题,巢湖、滇池和太湖等许多湖泊处于中富营养乃至重富营养状态.1999 年和 2000 年夏季在太湖北部进行了同步实验,根据同时具有采样分析数据、光谱测量数据和 GPS 数据且数据可靠的原则,在 1998 年、1999 年、2000 年夏季太湖水面同步测量数据中筛选出 60 组数据.基于太湖水环境的特点,主要研究了 3 个水质指标的卫星遥感问题,它们是叶绿素 a 浓度(Chl-a)、总悬浮物浓度(SS)及高锰酸盐指数(COD_{Mn}).统计分析表明:高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度存在很好的相关性,线性相关系数达 0.9573,线性统计公式为:

$$(COD)_{Mn} = 4.4688 + 0.0547Chl-a. \quad (1)$$

与根据 1997 年冬季和 1998 年夏季实验数据的分析结果一致^[7].这反映了太湖藻类产生的原因.如果我们能够通过遥感反演叶绿素 a 浓度,那么高锰酸盐指数也能间接确定.

就 FY-1C 多通道扫描辐射计、Landsat 卫星 TM、Seastar 卫星 SeaWiFS 以及一组设想的遥感通道,分析遥感叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度的优化通道情况.涉及的遥感通道如下表所示(见表 1):

对不同遥感通道水面反射率比值与水质指标浓度的关系进行了详细的统计分析,得到的各卫星遥感传感器遥感水质的优化通道组合如下表(见表 2).由于考虑到实际应用时各通道所受大气影响不同,一般说来,波长越短,大气影响越大,因此不仅列出了相关系数最大的通道组合,还列出了其它可供使用的通道组合.

对表 1 所列各遥感通道反射率与叶绿素浓度和悬浮物浓度的相关性进行了统计分析,与根据地物光谱仪各通道反射率(可见近红外波段,带宽 1.5nm)与叶绿素浓度和悬浮物的相关性分析结果^[7]一样,就具体的每个通道而言,夏季太湖水面反射率主要反映叶绿素浓度作用,无法反演悬浮物

表 1 各种遥感器的通道及其代号

Table 1 Channels of different remote sensing sensors & its simple code

卫星遥感器	通道	代号
FY-1C 多通道扫描辐射计	0.43 ~ 0.48um	CA1
	0.48 ~ 0.53um	CA2
	0.53 ~ 0.58um	CA3
	0.58 ~ 0.68um	CA4
	0.84 ~ 0.89um	CA5
Landsat TM	0.45 ~ 0.52um	TM1
	0.52 ~ 0.60um	TM2
	0.63 ~ 0.69um	TM3
	0.76 ~ 0.90um	TM4
SeaStar SeaWiFS	402 ~ 422nm	SW1
	433 ~ 453nm	SW2
	480 ~ 500nm	SW3
	500 ~ 520nm	SW4
	545 ~ 565um	SW5
	660 ~ 680nm	SW6
	745 ~ 785nm	SW7
	845 ~ 885nm	SW8
设想的遥感通道	416.69 ~ 418.31nm	WQ1
	450.9 ~ 500.1nm	WQ2
	531.37 ~ 559.22nm	WQ3
	664.25 ~ 684.90nm	WQ4
	706.0 ~ 900.0nm	WQ5

表 2 水质遥感优化通道组合模型

Table 2 Optimized channel combination model for water quality remote sensing images retrieving

卫星遥感器	优化的通道组合	截距 A	斜率 B	相关系数 r
FY-1C 卫星				
多通道扫描辐射计	CA5/CA4 = A + B * Chl	0.4241	0.0061	0.8129
	CA3/CA1 = A + B * Chl	1.4731	0.0018	0.6094
	CA3/CA2 = A + B * Chl	1.2164	0.0009	0.5757
	CA4/CA2 = A + B * SS	0.9703	0.0015	0.5492
Landsat-5 卫星 TM	CA4/CA1 = A + B * SS	1.1848	0.0021	0.5255
	TM4/TM3 = A + B * Chl	0.5303	0.0071	0.8155
	TM2/TM1 = A + B * Chl	1.2922	0.0010	0.5575
	TM3/TM1 = A + B * SS	0.9570	0.0022	0.6370
SeaSt 卫星 SeaWiFS	SW7/SW6 = A + B * Chl	0.6092	0.0085	0.8156
	SW5/SW2 = A + B * Chl	1.5546	0.0024	0.6358
	SW5/SW3 = A + B * Chl	1.3291	0.0017	0.6335
	SW5/SW4 = A + B * Chl	1.2047	0.0010	0.6041
	SW6/SW1 = A + B * SS	1.0146	0.0054	0.7717
	SW6/SW2 = A + B * SS	1.0245	0.0033	0.7183
	SW6/SW3 = A + B * SS	0.8945	0.0023	0.6626
设想的遥感通道 (见表 1)	SW6/SW4 = A + B * SS	0.7939	0.0022	0.6500
	WQ5/WQ4 = A + B * Chl	0.6111	0.0082	0.8162
	WQ5/WQ1 = A + B * Chl	0.8028	0.0089	0.8123
	WQ3/WQ2 = A + B * Chl	1.3568	0.0018	0.659
	WQ3/WQ1 = A + B * Chl	1.6588	0.0019	0.5659
设想的遥感通道 (见表 1)	WQ4/WQ1 = A + B * SS	1.0104	0.0051	0.7729
	WQ4/WQ2 = A + B * SS	0.9105	0.0026	0.6880

浓度. 而表 2 表明, 通过通道组合的办法可以反演悬浮物浓度, 也就是说, 通道组合可以起到滤除干扰、突出目标的作用. 在遥感器从多光谱向高光谱发展的时候, 如何进行通道的合并、通道的组合, 是高光谱信息提取的一个重要问题.

2 水质的卫星遥感反演方法

相比于陆地, 水体反射光谱信号总的来说比较弱, 因此卫星遥感水污染受到大气的影 响比卫星遥感陆地大. 如何进行大气校正, 将卫星接收到的反射光信号换算成水面反射光信号是水环境遥感的一项关键技术. 完全按理论模型进行大气校正, 能够清晰地反映各参数的物理关系, 但从遥感应用的实用性角度, 尤其是将定量化遥感作为目标时, 并不十分合适. 为使遥感取得可靠的反演结果, 应在卫星和航空遥感的同时或在相近天气气候条件下, 在水面选择若干特征点, 进行水面光谱测量和常规采样分析, 利用水面得到的信息帮助卫星和航空遥感数据的使用. 基于这些原因, 采取以下方法进行水质的卫星遥感反演:

- a) 根据水面测得的白板反射光谱确定大气透过率.
- b) 根据各通道 DN 灰度图象统计直方图, 确定各通道大气反射率.
- c) 根据定标数据将各通道 DN 值转换为辐射值.
- d) 根据卫星过境时间计算大气顶向下太阳辐射光谱, 从而将各通道辐射值转换为反射率.
- e) 利用前面给出的大气透过率和反射率作为大气辐射传输方程底输入参数, 将卫星测得的反射率转换成水面反射率.
- f) 选择适当的通道组合, 由通道组合模型确定叶绿素 a 和总悬浮物等水质指标的浓度.

3 太湖和滇池富营养化变化的卫星遥感解译

位于云南的滇池、江苏的太湖和安徽的巢湖是我国的 3 大富营养化湖泊. 运用太湖水面同步测量建立的卫星遥感优化通道组合模型和遥感反演方法, 以叶绿素 a 作为富营养化指标, 对太湖 1994 年至 1998 年、滇池 1987 年至 1998 年 Landsat-1 TM 遥感图像进行解译. 解译结果如图 1、图 2 所示. 由图可见:

- 1) 太湖藻类浓度与季节有关, 夏季明显高于其

它季节. 而滇池藻类浓度的季节特征弱些.

- 2) 从 1984 年到 1998 年, 太湖富营养化逐步加剧. 1998 年 8 月高温, 蓝藻爆发. 总体上, 富营养化状况, 太湖比滇池要好些.

- 3) 太湖富营养化主要发生在太湖西北部的梅梁湖和竺山湖, 即无锡和常州的南部.

- 4) 滇池藻类浓度的季节特征比太湖弱些, 在春季即比较明显, 这与当地气候特征有关.

- 5) 从 1987 年到 1998 年, 滇池富营养化状况有起伏, 但总的趋势是在加剧, 至少没有明显改善.

- 6) 滇池富营养化在北部比较明显, 有逐渐向南扩展趋势.

由于水的流动性, 藻的分布随风向风速会有明显变化, 又难以在卫星过境时在湖泊上布置许多采样点进行同步测量, 而且遥感结果与采样结果相应的空间尺度不同. 因此, 试图由采样分析结果一一对应的方式检验遥感解译结果是不现实的. 遥感解译结果与采样分析结果的对比应从时空分布和量值范围的宏观特征出发加以判断. 遥感解译与采样分析各具特色, 二者相辅相成而不是相互替代.

上述关于叶绿素浓度变化特征的遥感解译结果与太湖和滇池多年采样分析结果基本吻合^[8], 主要表现在以下方面: 1) 反演出的叶绿素浓度动态范围与采样分析结果相符; 2) 叶绿素浓度高低的空 间分布与常规采样调查结果一致; 3) 富营养化状况的发展趋势符合实际情况. 当然, 也发现太湖竺山湖污染比环保部门结论要严重, 特别是 1998 年, 为此, 当时本项目研究人员特地作了现场考察, 实际情况证实了遥感结果. 应该指出, 上述反演都采用太湖水面同步测量实验结果建立的通道组合模型, 为了取得更符合滇池实际的反演结果, 需要获取滇池水面同步测量数据, 修正通道组合模型.

4 结语

以上根据 1998 年至 2000 年夏季在江苏太湖进行的水面光谱测量与采样分析同步实验结果, 分析了 FY1-C 扫描辐射计、Landsat-5 TM、SeaStar SeaWiFs 和一组假设的可见光近红外通道遥感水质指标是应使用的通道、它们的组合方法及优化通道水面反射率组合与水质指标浓度的定量关系. 给出了一种卫星反演陆域水质的方法, 除利用优化通道组合模型外, 还提出根据遥感图像本身和水面标准板光谱测量进行大气校正. 通过对太湖和滇池的 80 至 90 年代 TM 图像解译验证了所建模型和方法的可行性,

得到了这 2 个湖泊富营养化空间分布及随年份的变化特征. 提供了一种快速、宏观掌握水质情况的技术手段, 为湖泊污染治理提供了常规测量以外的科学

数据, 为陆域水质业务化遥感监测提供了技术方法. 目前, 上海技术物理所正进一步开展航空高光谱水质遥感研究, 并将研究对象拓展到江河水质.

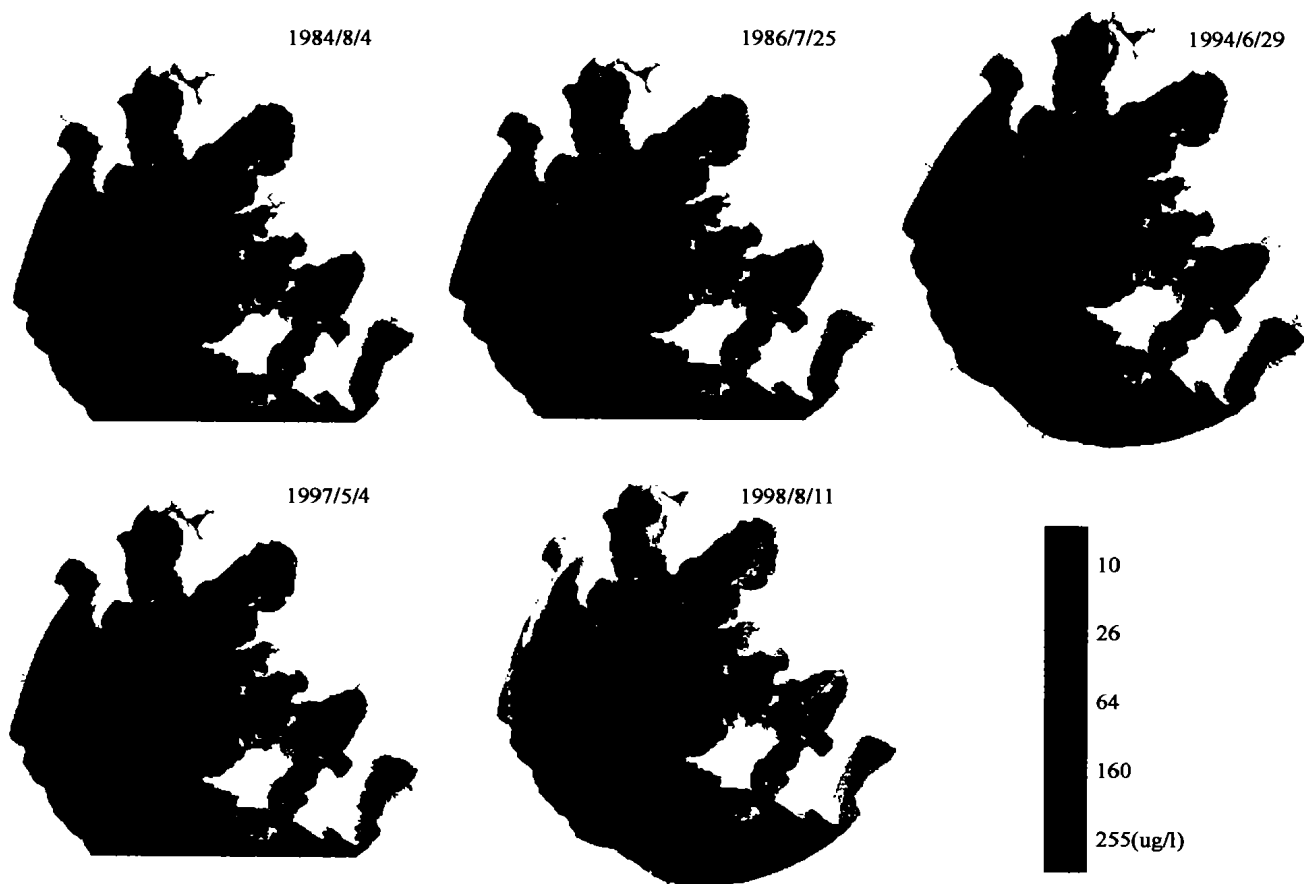


图 1 太湖叶绿素-a 浓度分布 Landsat-5 卫星 TM 遥感反演图
Fig. 1 Distribution map of chlorophyll-a concentration of Taihu Lake retrieved from Landsat-5 TM data

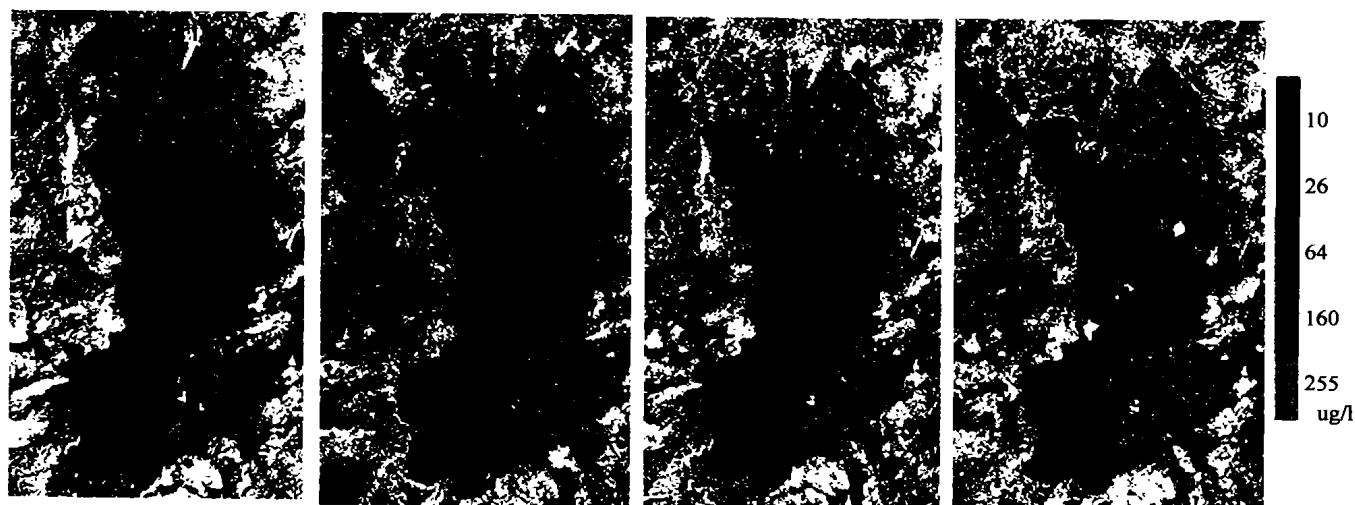


图 2 滇池叶绿素-a 浓度分布 Landsat5 卫星 TM 遥感反演图
Fig. 2 Distribution map of chlorophyll-a concentration of Dianchi Lake retrieved from Landsat-5 TM data

REFERENCES

- [1] Li X W, Ji G S, Yang J. Analysis of water quality in Suzhou Canal with TM images [J]. *Remote Sensing of Environment* (李旭文, 季耿善, 杨静. 苏州运河水质的 TM 分析. *环境遥感*), 1993, 1: 36—44.
- [2] Korn J, Eckhardt D. Using remote sensing for predictive modeling of water quality on Lake Powell [J]. *Lake and reservoir management*. 1994, 9(2): 88
- [3] Xu J, Fu S X, Huang X. Application of remote sensing and GIS in the analysis of the environmental background of river water quality—take Jilong river in Taiwan province for example [J]. *Science of Environment* (许珺, 傅肃性, 黄绚. 遥感和 GIS 在河流水质环境背景分析中的应用—以台湾基隆河为例. *环境科学*), 2000, 21(4): 1—5.
- [4] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland water quality [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(7): 1269—1295.
- [5] Ming-Der Yang, Merry C J, Sykes R M. Adaptive short-term water quality forecasts using remote sensing and GIS. Proceedings AWRA Annual Symposium, Proceedings of 32nd Annual Conference on GIS and Water Resources. GIS and Water Resources [C]. 1996: 109—18.
- [6] Su X Z, Yin Q, Kuang D B. Relationship between algal chlorophyll concentration and spectral reflectance of inland water [J]. *J. Remote Sensing* (疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射率光谱特征的关系. *遥感学报*), 2000, 4(1): 41—45.
- [7] Yin Q, Su X Z, Xu Z A, et al. Analysis on the Ultra-spectral Characteristics of Lake Water Environmental Parameters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 疏小舟, 徐兆安, 匡定波. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外毫米波学报*) 2004, 23(6): 427—430.
- [8] Jin X C. Chinese Lake Environment [M]. Beijing: Ocean press (金相灿等, *中国湖泊环境*, 北京: 海洋出版社), 1995.