

利用 MODIS 反演长江中游悬浮泥沙含量的初步研究

刘灿德^{1,2}, 何报寅¹, 李茂田³, 任宪友¹

(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;

3. 华东师范大学教育部地理信息开放实验室, 上海 200062)

摘要:在众多卫星传感器中,中等分辨率成像光谱仪(MODIS)数据因其高的时间分辨率和中等空间分辨率,对于水质研究具有自身的潜力和优越性。选取长江中游主河道武汉至宜昌段为例,利用 MODIS 250 m 波段数据定量反演了内陆河流悬浮泥沙的质量浓度。研究表明,地面实测的悬浮泥沙质量浓度与 MODIS 1,2 波段的反射率组合 $(R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$ 有很好的相关关系(相关系数 $R^2 = 0.72$, 样品数 $n = 41$)。基于这种相关性建立了长江中游主河道武汉至宜昌段表层悬浮泥沙的遥感定量反演经验模型。

关键词:MODIS; 悬浮泥沙; 反演模型; 长江中游

中图分类号:TV152

文献标识码:A

文章编号:1000-7849(2006)02-0099-04

传统的泥沙监测和分析方法主要为实地调查和采样分析,易受人力、物力、气候和水文条件的限制,因而不能从更广阔的范围给出水质的空间和时间变化规律。采用遥感定量技术能迅速获得大面积水域的含沙量资料,其瞬间同步性好,重复获取数据的周期短,能有效地监测含沙量的分布和动态变化。

1 含沙水体的光谱特征

悬浮泥沙水体的光谱反射特征是利用遥感数据提取含沙量信息、建立遥感信息-悬浮泥沙质量浓度定量模型的重要基础。含有泥沙浑浊水体的反射波谱曲线一般整体高于清水,由于泥沙的散射,在可见光及近红外波段范围内,随着泥沙质量浓度的增大,水体的反射率增大,且反射峰位置向长波方向移动。悬浮泥沙质量浓度不同的含沙样本均在波长为 $0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 的可见光波段出现辐射峰值^[1],即该可见光波段对水中泥沙反映最敏感,是遥感监测水体悬浮泥沙的最佳波段。在此波段范围内水体的光谱反射率与水体的混浊度等级(悬浮泥沙质量浓度差异的程度)呈线性相关关系。

2 研究区域和数据处理

长江发源于青藏高原,全长大于 6 300 km,自西向东注入东海。其水流量占世界第 5 位,在西太

平洋区域是最大的,其泥沙负荷在世界上占第 4 位。根据地质和气候因素,可以把长江分为上游、中游和下游 3 部分。

从发源地到湖北宜昌称为上游,长 4 300 km,河道宽 0.5 ~ 1.5 km,深 5 ~ 20 m;从宜昌到湖口称为中游,其宽度和深度均比上游大,河道宽 1 ~ 2 km,深 6 ~ 20 m;湖口以下称为下游,河道宽 2 ~ 4 km,深 10 ~ 20 m,其中长江口的宽度超过 15 km。由此可知,用中等分辨率成像光谱仪(MODIS) 250 m 分辨率数据来监测长江水质是可行的。

尽管遥感数据能够反演悬浮泥沙质量浓度^[2-3],然而,对于小水体,有些因子会限制遥感的应用。这些因子包括遥感传感器的特性、相关费用、处理软件的可得性等。其中最普通的限制因素是传感器的空间或地面分辨率。例如,AVHRR 和 SeaWiFS 的空间分辨率约为 1 km,尽管它们用于大尺度的水体研究是足够的,但对于小水体研究则相对逊色。陆地卫星系列传感器有 15 ~ 30 m 的空间分辨率,但它们的重访周期为 16 d,时间分辨率较低。相比之下,MODIS 影像数据由于接近于日常覆盖而具有自身的潜力和优越性。MODIS 中的分辨率波段,最初设计用于土地测量,其灵敏度是增强型专题成像仪(ETM+)的 4 ~ 5 倍,超过了海岸带颜色扫描仪(CZCS)的灵敏性。这种中等分辨率数据可以从几个分发中心免费得到,显示和处理程序也可以免费

收稿日期:2005-09-12 编辑:杨勇

基金项目: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)

作者简介:刘灿德(1980—),男,现正攻读自然地理学专业硕士学位,主要从事遥感技术和地理信息系统等方面的研究工作。

获取,并可在一般计算机上运行。MODIS 由于高的时间和波谱分辨率而得到广泛应用。

用遥感技术监测长江水体中的悬浮泥沙,前人也进行过这方面的研究^[4],但用 MODIS 数据来监测内陆河流悬浮泥沙的报道则较少。因此笔者拟以长江中游河段为例,探讨采用 MODIS 数据来监测内陆河流的悬浮泥沙。

2003 年 4 月 10~18 日,笔者对长江主河道武汉到宜昌段进行了样本点的测量,重点实测了水体中悬浮泥沙的质量浓度。剔除仪器或人为操作等原因造成的个别奇异值和错误值,并留出等样本间距选取的 10 个实测值用于对悬浮泥沙遥感模式的检验,最终选取了 41 个实测值与遥感影像进行分析,样本点如表 1。

表 1 样本点名称及其编号

Table 1 Samples and their numbers

样本点	编号	样本点	编号	样本点	编号
沌口	1	骡山	15	古长堤	29
军山	2	乌石矶	16	古长堤右	*
双窑	3	城陵矶	*	周公堤	30
南丰垸中	4	观音洲	17	刘家台	31
南丰垸右	*	八仙洲	18	郝穴镇	32
大兴洲尾	5	梁家门	19	祁家渊	33
盘家湾	6	荆江门	20	祁家渊左	*
天门洲	7	团洲子	*	公安	34
复兴洲河口	8	长江古道	21	太平口下	35
上姚家墩	9	庙岭	22	太平口上	36
上姚家墩左	*	陈家门	23	太平口上右	*
复兴洲汉道	10	马家湾	24	陈家河右	37
赤壁山	11	马家湾左	*	丁家垄	38
石码头	12	菜家铺	25	阮家湾	39
石码头左	*	调关镇	26	刘巷	40
新堤	13	黄石担	27	宜都河	41
张家码头	14	石道	28	宜都	*

*表示用于检验模型的样本点

由于在实地测量的 9 d 里,天气状况良好,成像质量较好,因此,选取 2003 年 4 月 16 日的 MODIS 遥感影像作为研究对象。大气通常是导致误差的主要因素,为了减小大气的影响,采用了内部相对反射率纠正法来进行影像纠正。内部平均相对反射率法(IARR)是利用整个影像的平均波谱曲线来对影像进行标准化处理,IARR 校正处理将计算整个影像的平均波谱曲线,并将其作为参考波谱曲线,然后用影像中每一个像素的波谱曲线值除以该参考波谱曲线值,计算得出相对反射率。当没有地面测量值,且对整个区域不太了解时,这种方法能很有效地将成像光谱仪数据转换为该地区的相对反射率。这种方法在没有植被覆盖的干旱区域能取得非常好的效果。

为了减小薄云和附近陆地对实测像元点的影响,对大气校正后的影像做了如下处理:利用 MODIS 影像自身携带的地理定位数据进行定位,并转换到 WGS-84 坐标系统。通过掩膜处理来提取长江水体。对地面监测点最近的像元进行定位,然后记录相应像元的反射率值。像元定位一般通过遥感影像处理软件中的地理定位功能来实现,即在定位器中输入实测站点的地理坐标,软件会自动在经过几何校正的影像上定位。但由于在获取实测站点的地理坐标时存在误差,且对影像进行几何校正时也存在误差,使得匹配结果不够精确。为了减小误差,在进行匹配时,可以在影像匹配点周围选取 3 像素×3 像素,5 像素×5 像素两类窗口,最后以所选像元的平均值作为最终像元值,或根据以距匹配点的远近给像元赋权值,由近到远,权值依次减小,最后取加权平均值作为最终像元值。提取最近点周围的像元值。计算所取像元的平均反射率作为最终像元值。

3 反演模型与结果

如何从遥感获取的水体光谱数据中提取出悬浮泥沙的专题信息,许多学者^[5-7]对此进行过研究,并建立了不同的理论或半经验模型来定量表达悬浮泥沙质量浓度与遥感数据间的关系,以反演悬浮泥沙质量浓度。

(1) 线性关系式

$$R = A + B \quad (1)$$

式中: R 为反射率; C 为悬浮泥沙质量浓度; A, B 均为系数。

该式是最早作为模拟悬浮泥沙质量浓度与遥感数据关系的最简单的关系式。该式虽然简单,但误差较大。

(2) 对数关系式

$$R = A + B \lg C \quad (2)$$

或 $R = A + B \lg R$

该式比较接近于实际情况。特别是在悬浮泥沙质量浓度不高的情况下,该式能较真实地反映悬浮泥沙质量浓度与卫星数据的相关关系。但当悬浮泥沙质量浓度很高时,该式存在很大的误差。该式广泛应用于悬浮泥沙的定量研究中。

(3) Gordon 关系式

$$R = C + 1 / (A + B) \quad (3)$$

式中: C 为系数。

该式根据准单散射近似公式得到,在实际应用中用得不多。

(4) 负指数关系式

$$R = A + B(1 - e^{-D}) \quad (4)$$

式中: D 为系数。

该式虽克服了以上模型在高质量浓度悬浮泥沙定量研究中误差较大的缺点,但由于式中采用了一些近似条件,致使该模型也存在一些缺陷。

(5) 统一关系式

$$L = A + B[/(G +)] + C[/(G +)]e^{-D} \quad (5)$$

式中: L 为亮度值; A, B, C 为相关式的待定系数,由遥感数据与实测数据经统计回归得到; G, D 为待定参数; $/(G +)$ 和 $[/(G +)]e^{-D}$ 为相关项。

实践证明^[6],该统一关系式的精度和相关系数高于其他关系式,但较复杂。

笔者经过反复实验,最终选用了对数关系模型。在求得 MODIS 1, 2 波段的光谱反射率后,根据回归分析原理,通过计算表明悬浮泥沙质量浓度与遥感参数 X 间存在如下关系:

$$\lg = A + BX \quad (6)$$

式中: A 为常数; B 为回归系数,可由实验确定。

通过式(6),对遥感参数 X 与悬浮泥沙质量浓度的对数值 \lg 分别进行了回归分析,建立了与之对应的悬浮泥沙遥感算法。由于泥沙遥感参数的选取对于模拟结果至关重要,因此笔者分别就单波段和波段组合模式进行了实验研究,得出了几个相关性较高的回归模式(表 2)。

表 2 悬浮泥沙质量浓度的遥感算法模式及相关分析

Table 2 Remote sensing arithmetic model of suspended sediment concentration and regression analysis

遥感参数	遥感算法模式	常数 A	回归系数 B	相关系数 R^2
$X_1 = R_2 / R_1$	$\lg = A + BX_1$	2.872	- 1.064	0.70
$X_2 = R_1 - R_2$	$\lg = A + BX_2$	1.802	1.624	0.68
$X_3 = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$	$\lg = A + BX_3$	1.810	2.495	0.72

注: R_1, R_2 分别为经过大气校正的 MODIS 1, 2 波段的反射率值; 为悬浮泥沙质量浓度

实验结果表明,只利用某一波段的数据则不能很好地反映悬浮泥沙的信息。因此只有确定一个有效的遥感参数,才能更好地反映复杂的悬浮泥沙信息。研究发现,参数 X_3 与实测悬浮泥沙质量浓度有更好的相关性(相关系数 $R^2 = 0.72$, 样品数 $n = 41$, 图 1), 可以更好地反映表层悬浮泥沙的信息。这里不妨将此参数定义为泥沙指数 I_s 。

应用泥沙指数得到的基于 MODIS 的长江中游主河道武汉到宜昌段表层悬浮泥沙的遥感定量模式

如下:

$$\lg = 1.810 + 2.495 I_s \quad (7)$$

式中: $I_s = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$; R_1, R_2 分别为经过大气校正的 MODIS 1, 2 波段反射率值。

得出遥感定量模式后,利用选取的 10 个样本点的实测值对遥感模式进行了检验,验证结果见表 3。

从表 3 可以看出,在 10 个验证结果中,有 5 个相对误差的绝对值小于 0.1,占 50%,其中相对误差绝对值最小的为 0.022 2,最大相对误差为 0.347 4; 10 个验证结果的相对误差绝对值平均为 0.142 5,由此判断该研究结果的精度约为 85.75%。

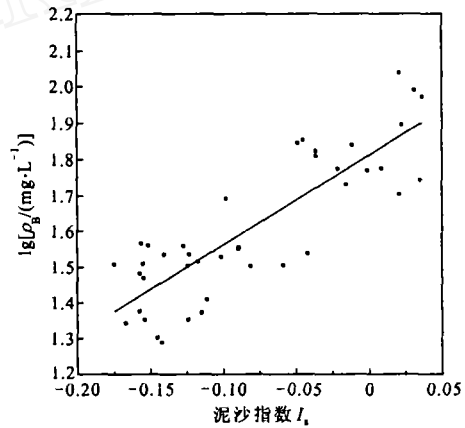


图 1 悬浮泥沙质量浓度回归模拟

Fig. 1 Regression simulation of suspended sediment concentration

表 3 悬浮泥沙验证结果

Table 3 Results of accuracy evaluation of suspended sediment concentration

编号	样本点	泥沙指数 I_s	悬浮泥沙质量浓度 $B / (mg \cdot L^{-1})$		相对误差
			计算值	实测值	
1	南丰垸右	- 0.017 611	58.41	54.80	0.065 8
2	上姚家墩左	- 0.044 924	49.93	54.53	- 0.084 3
3	石码头左	- 0.013 382	59.84	61.20	- 0.022 2
4	城陵矶	- 0.098 328	36.74	46.01	- 0.201 6
5	团洲子	- 0.051 024	48.21	35.78	0.347 4
6	马家湾左	- 0.100 142	36.36	33.50	0.085 3
7	古长堤右	- 0.179 493	23.05	29.00	- 0.205 2
8	祁家渊左	- 0.158 730	25.97	23.38	0.111 0
9	太平口右	- 0.126 278	31.29	32.94	- 0.050 0
10	宜都	- 0.140 647	28.81	38.50	- 0.251 7

注: 相对误差等于计算值减实测值之差除以实测值

4 结论和讨论

卫星传感器为水质研究提供了新的思路,与传统的水质采样监测分析方法相比,具有以下显著优

点: 利用覆盖全球的遥感影像使得对遥远偏僻区域的水体进行研究成为可能; 利用较长的遥感影像记录来探寻水质的历史变化规律, 即使没有地面数据也行得通。然而, 用遥感技术来反演水质参数也有其不足之处: 没有一种传感器同时具有高的空间分辨率、时间分辨率和波谱分辨率, 因此, 在选择具体传感器时常用上述 3 种分辨率的折中; 监测精度不高, 各种算法以经验、半经验方法为主, 且算法具有局部性、地方性和季节性, 可移植性差, 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; 采用遥感技术来研究水质大都限于水体表层, 且遥感监测水质的波段范围小, 多集中于可见光和近红外范围, 微波遥感研究少。

利用 MODIS 影像监测长江中游主河道表层悬浮泥沙的研究结果表明:

(1) 如果只利用 MODIS 单个波段的光谱信息, 则不能很好地反映悬浮泥沙的信息, 其反射率与悬浮泥沙质量浓度的相关性较低, 因此不宜采用单波段来建立该区域的悬浮泥沙遥感定量模式。

(2) 泥沙指数法综合应用了 MODIS 250 m 波段的光谱信息, 得到了对悬浮泥沙质量浓度变化较为敏感的特征参数, 泥沙指数与实测悬浮泥沙质量浓度之间的相关性较好, 更适用于该研究区域。

(3) 通过上述处理得到的区域悬浮泥沙遥感定

量模式具有较好的代表性和适用性。

(4) 引起误差的因子主要有以下几方面: 数据的误差。实地测量时由于仪器或操作人员引起的误差。数据匹配方法。在该项研究中, 遥感影像上与实测数据对应点的选取是手工匹配完成的。大气的影响。大气通常是最重要的误差源。

武汉大学 MODIS 遥感卫星地面站 (<http://www.modis.whu.edu.cn/>) 给予了 MODIS 数据支持, 在此深表谢意。

参考文献:

- [1] Thomas J, William P K. Remote Sensing in Hydrology[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25:1 367 - 1 385.
- [2] Li R R, Kaufmon Y J. Remote Sensing of Suspended Sediments and Shallow Coastal Waters[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, 41(3): 559 - 566.
- [3] Hua C M, Chen Z Q, Tonya D, et al. Assessment of Estuarine Water-Quality Indicators Using MODIS Medium-Resolution Bands: Initial Results from Tampa Bay, FL [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 93: 423 - 441.
- [4] 李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. *遥感学报*, 2001, 5(2): 154 - 160.
- [5] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 黎夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用[J]. *环境遥感*, 1992, 7(2): 106 - 114.
- [7] 马蔼乃. 遥感信息模型[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.

Preliminary Study on Remote Sensing of Suspended Sediment Concentration in the Middle Yangtze River Using MODIS

LIU Can-de^{1,2}, HE Bao-yin¹, LI Mao-tian³, Ren Xian-you¹

(1. Institute of Geodesy & Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China;

2. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China;

3. Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Remote sensing techniques are used widely to observe water bodies. Among satellite sensors commonly used for water quality studies, the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) has potential in water quality monitoring, because of its moderate spatial resolution and high temporal resolution. In this paper, the utility of MODIS data for suspended sediment monitoring in the middle Yangtze River is investigated. It is concluded that suspended sediment concentration correlates well with reflectance values $(R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$ retrieved from MODIS 250 m image data ($R^2 = 0.72$, $n = 41$). Based on this correlation, the empirical model of suspended sediment concentration is obtained in the middle Yangtze River from MODIS. It is shown that it is useful for MODIS data to monitor this parameter of water quality.

Key words: MODIS; suspended sediment; empirical model; middle Yangtze River