

应用 HJ CCD 传感器指数的鄱阳湖 TSM 浓度遥感监测

代侦勇^{1,2} 张 伟^{1,3} 陈晓玲¹ 田礼乔¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 四川省基础地理信息中心,成都市九兴大道 7 号,610041)

摘要:分别于 2008 年 10 月、2009 年 10 月和 2011 年 7 月对鄱阳湖地区开展三个航次的科学调查,在分析实测数据基础上,利用 TSM 浓度应用 HJ 卫星 CCD 传感器数据,提出一种 TSMI 遥感反演的新方法,并与传统基于实测光谱与 TSM 浓度建立的方法对比分析,模型反演平均相对误差分别为 17.5% 和 20.01%。实验结果显示,利用 TSMI 指数方法反演结果较优,不仅可以提高 TSM 浓度遥感反演精度,而且有利于解决内陆浑浊水体遥感监测中水色大气校正算法研究不足的问题。

关键词:HJ CCD;总悬浮物;总悬浮物指数;鄱阳湖

中图分类号:P237.9

随着全球气候变暖及人类活动的加剧,世界上很多湖泊面临水质下降和富营养化等一系列问题,严重影响湖泊功能的可持续利用^[1-4]。总悬浮物(total suspended matter, TSM)是影响水色要素的主要因素之一。TSM 浓度含量的高低直接影响水体的透光性和富氧条件,并且影响水生生物的光合作用,对水生态环境产生重要影响^[5]。因此,针对水体 TSM 浓度遥感监测研究对保护湖泊及其流域水生态环境具有重要意义。

本文针对 HJ 卫星 CCD 传感器数据提出一种遥感反演新方法——总悬浮物指数(total suspended matter index, TSMI)方法,结合现场 TSM 浓度数据,建立基于 TSMI 指数的总悬浮物浓度反演模型,并传统方法对比分析,达到应用非水色遥感器在内陆浑浊水体中的遥感应用监测目的。

1 研究区域和数据

鄱阳湖是中国第一大淡水湖泊^[6]。2008 年

10 月、2009 年 10 月和 2011 年 7 月三个时间段(以下简称三个时间段)针对鄱阳湖研究区域开展了三个航次的野外观测,获取光谱数据、水样滤膜称重法 TSM 浓度数据。光谱数据采用美国 Spectra Vista 公司生产的便携式地物光谱仪 SVC HR-1024 进行观测,光谱测量方法采用 NASA 和 SIMBIOS 推荐的观测几何对,水体采用水面以上法进行光谱测量;TSM 浓度数据由水样称重获取;现场水体采样应用 0.45 μm 的 WaterMan GF/F 滤膜过滤,内业烘干,称重后获取。

本文所用卫星影像为中国资源卫星应用中心提供的 HJ 卫星 CCD 传感器 L1B 级产品。考虑大气吸收和散射的影响,臭氧、气压、风速等辅助数据分别来源于 NASA Ocean Color 和中国气象数据共享服务网(CMDSSS)。

2 方 法

2.1 TSMI

水色定量遥感需要解决大气校正问题,由于

收稿日期:2013-07-25。

项目来源:国家 863 计划资助项目(2012AA12A304);国家自然科学基金资助项目(41071261,41101415,40906092);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(111044);水利部公益性行业科研专项资助项目(201001054);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助项目。

缺乏实测数据,气溶胶光学厚度观测困难,且大气气溶胶在时间和空间上变化较快,目前针对内陆浑浊水体大气校正的算法尚不成熟。借鉴荧光高度法 FLH/MCI 反演叶绿素浓度^[7]和 FAI 方法监测水表浮游植物的经验^[8],本文针对 HJ 卫星 CCD 传感器提出一种 TSMI 新方法。

卫星影像在大气层顶(TOA)接收到的总辐亮度信号为 $L_t = DN \times gain + offset$,增益 gain 和偏移系数 offset 从 CCD 传感器 L1B 级产品 XML 头文件中获取,根据 Gordon 单次瑞利散射计算理论^[9],各通道瑞利散射校正反射率可表示为:

$$\rho_{rc}(\lambda) = \frac{\pi L_t(\lambda)}{E'_0(\lambda) \cos \theta_0} - \rho_r(\lambda) \quad (1)$$

式中, $E'_0(\lambda)$ 为双层臭氧吸收修正后的太阳辐照度; $\rho_r(\lambda)$ 为瑞利散射反射率; θ_0 为太阳天顶角。

TSMI 的计算是以 CCD 传感器数据各通道瑞利散射校正结果为输入,蓝光通道 $\rho_{rc}(475) \sim$ 近红外通道 $\rho_{rc}(830)$ 为基线,红光通道 $\rho_{rc}(660)$ 相对基线的高度变化表征水体 TSM 浓度的变化快慢趋势。TSMI 可以有效抵消各通道的分子-气溶胶多次散射的影响,使 TSMI 仅表征水体蓝光、红光和近红外三个通道的综合水体光谱信息。TSMI 可由式(2)表示为:

$$TSMI = \rho_{rc}(660) - \rho'_{rc}(660) \quad (2)$$

$$\rho'_{rc}(660) = \rho_{rc}(475) + [\rho_{rc}(830) - \rho_{rc}(475)] \cdot \left(\frac{660 - 475}{830 - 475} \right) \quad (3)$$

TSMI 计算应用 2011 年 7 月 23 日与 HJ-1A

CCD1 传感器同步过境获取的鄱阳湖三种不同浑浊程度水体 TSM 浓度的实测站位数据,对应实测站位 CCD 传感器 TSMI 计算采用影像 3 像元 \times 3 像元取均值进行匹配,三个站位的 TSM 浓度观测值分别为 6.9, 31.6, 84.9 mg/L, TSMI 分别为 0.002 19, 0.005 31, 0.031 68。从三个站位高、中、低 TSM 浓度的现场照片和卫星影像的目视解译看, TSMI 的高度与水体 TSM 浓度高低变化呈现相同变化趋势,水体越浑浊, TSM 浓度值越高, TSMI 数值越大;相反,在水体较清洁区域, TSM 浓度值越低, TSMI 数值越小。分析三个时间段三个航次获取的 7 景 HJ CCD 同步影像和地面实测 TSM 浓度采样数据,发现 TSMI 指数数值变化能够真实反映 TSM 浓度变化趋势,因此考虑应用 TSMI 直接参与建立 TSM 浓度一次遥感反演模型,该方法有利于提高反演精度,弥补传统浑浊水体水色大气校正算法的不足。

2.2 TSM 浓度反演

2.2.1 利用传统实测光谱的反演模型

应用三个时间段实测光谱和水样过滤称重法获取的 TSM 浓度数据建立遥感反演模型。光谱应用 HJ CCD 传感器各通道波谱响应函数进行等效计算。实验采用蓝光: 560 nm, 红光: 660 nm, 近红外: 830 nm, 单通道和多通道结合的方式构建的遥感因子建立反演经验模型。经过实验结果分析 TSM 与实测光谱拟合回归模型,求解模型相关系数、平均相对误差(MRE)以及误差标准差(Std Error),选取效果较好的几种模型列于表 1。

表 1 HJ CCD 传感器遥感因子与实测 TSM 回归模型

Tab. 1 Regression Model Between Remote Sensing Factors of HJ CCD and In-situ TSM Concentration

遥感因子 X	模型表达式	R^2	MRE/%	Std Error/%
$R_{rs}(660)$	$X = 0.033 + 0.0125 \times \ln(TSM)$	0.79	35.46	24.66
$R_{rs}(830)$	$X = 0.0063 + 0.0002 \times TSM$	0.87	28.75	19.11
$R_{rs}(660)/R_{rs}(560)$	$X = 0.5687 + 0.1075 \times \ln(TSM)$	0.79	31.82	21.61
$R_{rs}(830)/R_{rs}(560)$	$X = -0.3021 + 0.1815 \times \ln(TSM)$	0.76	27.49	17.58
$\frac{R_{rs}(660) + R_{rs}(830)}{R_{rs}(560)}$	$X = 0.2692 + 0.2882 \times \ln(TSM)$	0.92	20.01	15.67
$\frac{R_{rs}(660) + R_{rs}(830)}{R_{rs}(560) + R_{rs}(660)}$	$X = 0.2631 + 0.1103 \times \ln(TSM)$	0.90	21.42	14.89

图 1(a)~1(d)中,纵坐标为 TSM 浓度对数, TSM 浓度单位为 mg/L,横坐标为单波段或波段组合构建的遥感因子,图 1(b)纵坐标为 TSM 浓度,横坐标为遥感因子, sr^{-1} 为各弧度角倒数。对比表 1 与图 1(b),使应用单波段 $R_{rs}(660)/R_{rs}(830)$ 构建遥感因子 X 建立的 TSM 浓度反演模型中, CCD 近红外波段 $R_{rs}(830)$ 作为遥感因子建立的线性模型效果相对较优,模型相关系数 R^2 为

0.87,平均相对误差 MRE 为 28.75%,主要原因是鄱阳湖水体具有高 TSM 浓度特性,但是模型线性拟合程度低,样本点数据比较发散,构建单波段遥感因子的反演模型对光谱观测绝对误差的控制要求较高。鄱阳湖具有典型内陆湖泊高浑浊水体特征,光谱观测数据显示,随着 TSM 浓度的持续增加,反射峰向红光波段偏移,甚至在较高浑浊程度的区域,水体在近红外波段也有很强的反射

信号。兼顾红光和近红外波段,采用波段组合方式能够提高模型的反演精度,其中以 $(R_{rs}(660)+R_{rs}(830))/R_{rs}(560)$ 作为遥感因子与水样 TSM 浓度建立的反演模型效果较好。如图 1(c)所示,模型相关系数 R^2 为 0.92,平均相对误差 MRE 为 20.01%。结合表 1 和图 1 综合分析,应用 CCD 传感器绿光:560 nm,红光:660 nm 和近红外:830 nm 波段组合构建的遥感因子建立的反演模型比较适合鄱阳湖 TSM 浓度的遥感反演。

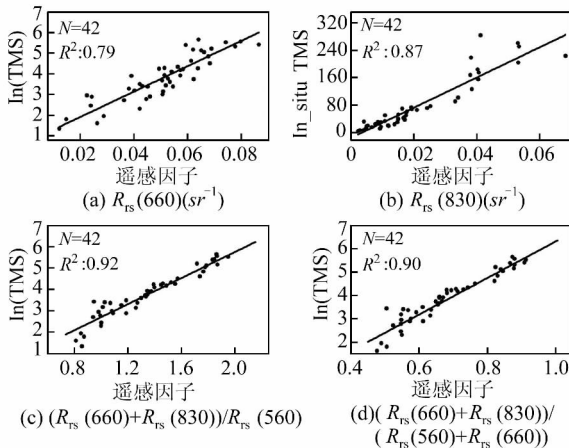


图 1 遥感因子 X 与 TSM 浓度线性回归

Fig. 1 Linear Regression Between Remote Sensing Factors X and In-situ TSM Concentration

2.2.2 基于 TSMI 反演模型

如图 2 所示,应用与地面水体采样同步过境获取的 7 景 HJ 卫星 CCD 传感器影像,计算分析 CCD 传感器 TSMI 与实测 TSM 浓度,结果表明, $\ln(\text{TSM})$ 与 TSMI 两者呈现比较好的线性关系。在 $\text{TSMI} < 0.04$ 时呈现快速变化趋势,TSM 浓度几乎接近线性变化;而当 $\text{TSMI} > 0.04$ 时,随着水体浑浊程度加大,TSM 浓度含量增加,CCD 红光波段的瑞利散射校正反射率随着 TSM 浓度升高呈现缓慢上升趋势,即反映出 TSMI 与 TSM 变化快慢不一致,对比分析基于传统实测光谱与 TSM 浓度建立的反演模型得到类似结论。因此,基于 TSMI 与 TSM 建立的对数模型能够有效反演水体 TSM 浓度,如图 2 所示,基于 TSMI 的 TSM 浓度建立的对数反演模型,模型系数 R^2 为 0.94,平均相对误差 MRE 为 17.5%。

2.2.3 模型误差分析

通过对 TSM 浓度遥感反演模型对比分析,选用卫星过境地面同步采样的 42 个站位水体 TSM 浓度数据作为样本数据,在基于传统实测光谱数据作为遥感因子建立的 TSM 浓度反演模型中,选取遥感因子 $X = (R_{rs}(660) + R_{rs}(830))/R_{rs}$

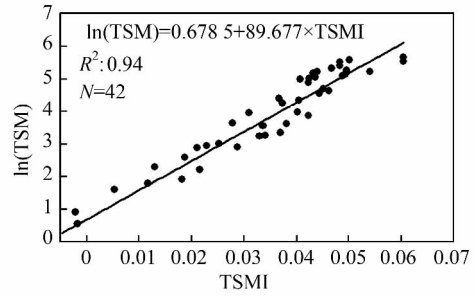


图 2 基于 TSMI 模型回归

Fig. 2 Inversion Model with HJ CCD TSMI and TSM

(560)与 TSM 浓度建立的 TSM 浓度反演模型图 1(c),以及应用 HJ CCD 影像 TSMI 直接与 TSM 浓度建立的遥感反演模型图 2,综合分析两种模型反演的结果并讨论。

1) 基于 TSMI 的新方法相对较优,如图 2 所示,模型反演平均相对误差 17.5%,能够满足内陆浑浊水体水色参数遥感反演平均相对误差小于 30%的需求;

2) 传统基于实测光谱的 TSM 浓度反演方法,如图 1(c)所示,模型反演平均相对误差为 20.01%,但是未考虑大气校正算法误差的影响。二类浑浊水体水色遥感大气校正算法基本要求为平均相对误差 $< 15\%$,由于目前尚未有成熟的内陆浑浊水体大气校正算法,因此,应用传统卫星影像大气校正-水体遥感反射率(或离水辐亮度)-TSM 浓度,二次模型逐级反演,根据模型误差累积效应的影响,反演误差可能大于 30%,甚至更高。

基于 TSMI 与 TSM 浓度直接建立的一次反演模型,可以避免同时引入光谱和水样 TSM 数据的测量误差,并减小传统方法大气校正模型和 TSM 浓度反演模型的累积误差。因此,应用 HJ CCD 传感器影像的 TSMI 新方法具有一定的优势,可以有效提高 TSM 浓度遥感反演精度,弥补传统二类浑浊水体大气校正算法研究的不足。

3 结果与分析

应用基于 HJ CCD 传感器 TSMI 方法,根据鄱阳湖研究区域地理位置特征,按四季划分共计挑选 2009 年至 2011 年 3 a 共 12 景 CCD 传感器影像进行 TSM 浓度遥感反演。结果如图 3 所示。结果表明:①鄱阳湖在冬季枯水期的 1 月水体 TSM 浓度相对较高,如 2009 年 1 月 2 日、2010 年 1 月 12 日和 2011 年 1 月 12 日 TSM 浓度反演结果,大部分湖区水体 TSM 浓度值大于 80 mg/L,主要影响因素是枯水期水位较低,水面积较

小,水体流动性降低,鄱阳湖换水周期时间增加,另外河道受船舶航运以及其他人为经济活动的影响,湖区水体 TSM 浓度呈较高值;② 在春季 4~5 月,鄱阳湖进入枯水期-丰水期转换季节,鄱阳湖水位上涨,水面积增加。2010 年 4 月 27 日的 TSM 浓度反演结果表明,受春季赣江上游河流输沙的影响,在卫星获取影像的当日具有较高的 TSM 浓度值,相比较而言,2009 年和 2011 年 TSM 浓度较低,2011 年鄱阳湖遭遇近 60 年来严重的旱灾,湖区水面积为三年来最小,上游无降雨和河流无输沙影响,与湖区 5 月 11 日影像的 TSM 浓度表现较低值的情况一致;③ 鄱阳湖夏季 7 月一般为丰水期水面积最大月,受鄱阳湖流

域降雨量增加,湖区换水周期缩短,TSM 浓度时间和空间分布变化较快,从 2009 年 7 月 19 日、2010 年 7 月 18 日和 2011 年 7 月 23 日影像的 TSM 浓度结果看,以松门山道为界的北部入江水道 TSM 浓度具有较高值,大于 30 mg/L,而在南湖区大部分区域 TSM 浓度小于 30 mg/L;④ 鄱阳湖秋季 9~10 月一般为丰水期-枯水期转换月,从 2010 年 10 月 8 日的影像结果看,该年属于鄱阳湖进入枯水期比较晚的年份,南湖区 TSM 浓度值较低,北湖区较高。单日 TSM 浓度影像能够反映当日水体 TSM 浓度的空间分布状况,可以为水色遥感监测,湖区水质评估提供科学依据。

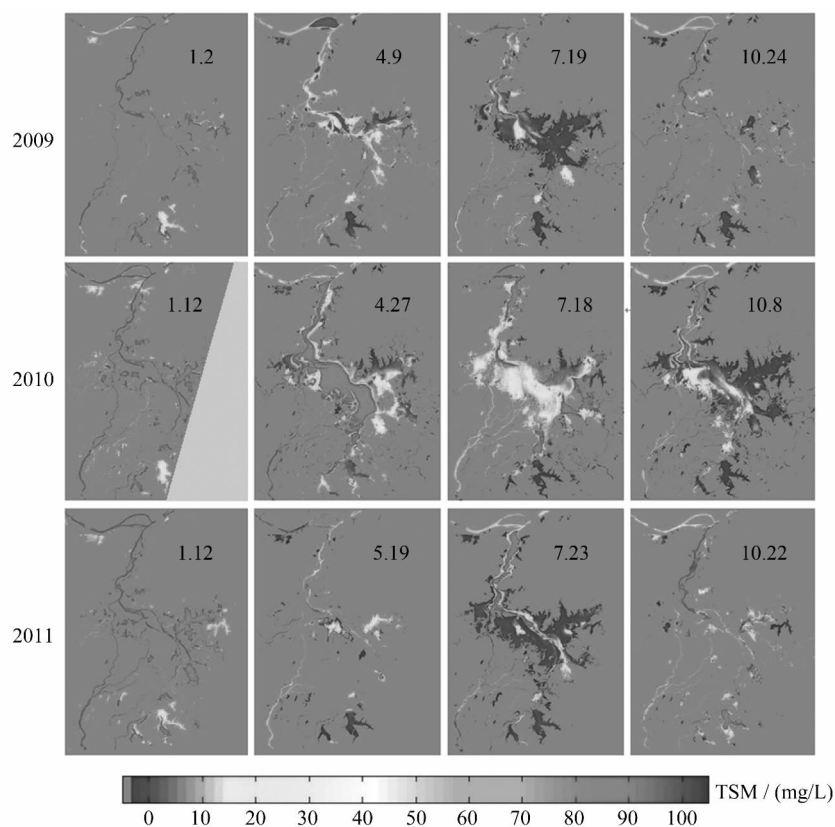


图 3 总悬浮物浓度反演

Fig. 3 Total Suspended Matter Concentration Retrieval

4 结 语

针对 HJ 卫星 CCD 传感器数据提出针对典型内陆浑浊水体鄱阳湖研究区域的总悬浮物浓度遥感反演 TSMI 新方法,可有效解决浑浊水体大气校正算法研究不足的问题。直接应用基于 TSMI 的 TSM 浓度遥感反演方法,能够减小传统大气校正-水体遥感反射率-TSM 浓度两次逐级反演的模型累积误差,提高了 HJ 卫星 CCD 非水色

传感器在内陆浑浊水体水色遥感定量监测能力。在后续开展的工作中,将针对不同区域的浑浊水体和不同卫星传感器数据,以内陆浑浊水体遥感定量监测为目标,开展多传感器 TSMI 的 TSM 浓度遥感监测方法研究,解决目前水色遥感监测在内陆浑浊水体中 TSM 浓度遥感监测不足的问题。

参 考 文 献

[1] ILEC. World Lake Vision: a Call to Action[C]. In-

- ternational Lake Environment Committee Foundation and United Nations Environment Programme, Kusatsu, Japan, 2003
- [2] 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, 2: 143-158
- [3] Miller R L, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m Imagery to Map Concentrations of Total Suspended Matter in Coastal Waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93: 1-2, 259-266
- [4] Liis S, Urmas R, Tarmo K. Operational Monitoring of Suspended Matter Distribution Using MODIS Images and Nericel Modeling[J]. Advances in Space Research, 2006, 38: 2 182-2 188
- [5] 陈晓玲,吴忠宜,田礼乔,等. 水体悬浮泥沙动态监测的遥感反演模型对比分析——以鄱阳湖为例[J]. 科技导报, 2007, 25(6): 19-22
- [6] 张伟,陈晓玲,田礼乔,等. 鄱阳湖 HJ-1-A/B 卫星 CCD 传感器悬浮泥沙遥感监测[J]. 武汉大学学报 • 信息科学版, 2010, 35(12): 1 466-1 469
- [7] Gower J F R, Doerffer R, Borstad G A. Interpretation of the 685 nm Peak in Water-leaving Radiance Spectra in Terms of Fluorescence, Absorption and Scattering, and Its Observation by MERIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20: 1 771-1 786
- [8] Hu C M. A Novel Ocean Color Index to Detect Floating Algae in the Global Oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: 2 118-2 129
- [9] Gordon H R, Castano D J. Aerosol Analysis with the Coastal Zone Color Scanner: a Simple Method for Including Multiple Scattering Effects[J]. Applied Optics, 1989, 28(7): 1 320-1 326

第一作者简介:代侦勇,副教授,主要研究方向为遥感及 GIS 应用及遥感。

E-mail: dai_whu@263.net

Monitoring TSM by HJ CCD Imagery Index in Poyang Lake

DAI Zhenyong^{1,2} ZHANG Wei^{1,3} CHEN Xiaoling¹ TIAN Liqiao¹

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Sichuan Geomatics Center, 7 Jiuxing Road, Chendu 610041, China)

Abstract: Poyang Lake is the largest freshwater lake in China, with dramatic variation of the water total suspended matter (TSM) concentration. Three cruises of investigation data were collected in Oct 2008, Oct 2009 and Jul 2011 in Poyang Lake. A total suspended matter index (TSMI) approach was used with data from HJ satellite charge coupled device (CCD) instruments to characterize the TSM concentration. The result showed that accuracy of total suspended matter retrieval model was improved. The model established by between TSMI and in-situ TSM concentration, and the model built by remote sensing reflectance and in-situ TSM concentration were compared. The TSMI method with high accuracy for the inland turbid water of Poyang Lake, was more effective way to monitor TSM concentration by remote sensing.

Key words: HJ CCD; LISST; total suspended matter (TSM); total suspended matter index (TSMI); Poyang Lake

About the first author: DAI Zhenyong, associate professor. His research are in application GIS and remote sensing.

E-mail: dai_whu@263.net