

引用格式:Xing Xiaoda,Shen Qian,Li Junsheng,*et al.*Inversion of Suspended Matter Concentration of the River of Manwan Dam Regions based on HJ-CCD Data[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(4):682-690.[邢晓达,申茜,李俊生,等.基于 HJ-CCD 的漫湾坝区河流悬浮物浓度遥感反演[J].遥感技术与应用,2016,31(4):682-690.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.4.0682

基于 HJ-CCD 的漫湾坝区河流悬浮物浓度遥感反演

邢晓达^{1,2},申 茜²,李俊生²,张方方²,庞治国³,吕书强¹

(1.北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京 100044;
2.中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室,北京 100094;
3.中国水利水电科学研究院遥感中心,北京 100048)

摘要:坝区河流悬浮物浓度监测对于评估水利水电工程对河流水质影响具有较大的意义。HJ-CCD 重返周期短、空间分率高等优点,应用于漫湾这种中小尺度坝区水体悬浮物浓度监测有着重要的现实意义。大气校正采用暗像元、FLAASH 以及 QUick Atmospheric Correction(QUAC)几种常见的基于图像的大气校正方法。大气校正结果表明:暗像元法效果较好,其第 2 波段和第 3 波段的平均相对误差分别为 16.1%和 17.9%。然后,应用其大气校正较好的波段构建适用于研究区的悬浮物浓度反演模型。结果表明,该模型的决定系数为 0.92,均方根误差(RMSE)为 4.83 mg/L,平均相对误差为 33.1%。最后,将此反演模型应用于 2014 年影像质量较好的 HJ-CCD 数据上,得到了其悬浮物浓度空间分布图,反映了漫湾坝区附近的悬浮物浓度的变化规律。

关 键 词:HJ-CCD;悬浮物浓度;大气校正;暗像元;漫湾坝区

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)04-0682-09

1 引 言

悬浮物广泛分布于海洋、湖泊、河流之中,是水环境评价中非常重要的参数之一^[1]。由于滇西山区野外观测较为困难,利用遥感手段对研究区进行水体要素反演及其时空场变化分析具有较大的应用价值和实际意义。

当前研究内陆水体悬浮物浓度反演用到较多的遥感卫星数据集中在 Landsat TM、MSS、MODIS 等数据的应用上。应用 Landsat TM 数据^[2-3]和应用 MODIS 数据^[4]反演水体悬浮物的研究已经开展了很多。TM 空间分辨率高,但其时间分辨率和光谱分辨率较低,MODIS 时间分辨率很高,但其空间分辨率却相对较低,这对于坝区水体水质监测都具

有一定的局限性。2008 年 9 月我国发射的环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1A/1B)具有较短的重返周期和较高的空间分辨率,能够满足大范围动态监测坝区河流水环境的需求。

国内基于 HJ-CCD 数据对悬浮物浓度反演监测方面也取得许多研究成果。Chen 等^[5]对渤海和瓯江利用 HJ-CCD 影像的第 1、2、3 波段进行了悬浮物浓度的半分析模型的研究。Li 等^[6]通过对太湖水体光学特性数据的分析,研究了 HJ-CCD 近红外单波段与太湖悬浮物浓度之间的关系,并建立相应的反演模型。刘王兵等^[7]利用 HJ-CCD 影像对杭州湾的悬浮物浓度进行反演研究,并发现杭州湾区域悬浮物浓度与 HJ 星的第 3、4 波段有很好的相关性。肖艳芳等^[8]利用 HJ-CCD 对近海水体进行了

收稿日期:2015-03-13;修订日期:2016-05-13
基金项目:国家 863 计划项目(2013AA12A302),国家自然科学基金项目(41001205),北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目。
作者简介:邢晓达(1989—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事水体光学遥感研究。E-mail:xingxiaoda@126.com。
通讯作者:申 茜(1981—),女,甘肃兰州人,副研究员,主要从事高光谱遥感、水色遥感研究。E-mail:shenqian@radi.ac.cn。

悬浮物浓度的反演。乔晓景等^[9]利用 HJ-CCD 卫星数据的第 1、3 波段针对长江中游武汉河段建立悬浮物浓度反演模型,得到了其空间分布图。可以看出,近年有关悬浮物浓度的研究主要集中在大面积湖泊或近海岸大面水体区域,对于分布流域较长的河流区域的研究较少,本文针对 HJ-CCD 卫星数据,通过对比几种大气校正方法,选取大气校正效果较好的波段,并结合实测的光谱数据和悬浮物浓度数据,建立适用于漫湾大坝附近水域的悬浮物反演模型,得到漫湾大坝库区悬浮浓度空间分布图,进一步分析漫湾大坝附近悬浮物浓度分布规律,为 HJ-CCD 在坝区河流的水质遥感动态监测和预测中的应用提供技术支撑。

2 研究区域及数据

2.1 研究区域概况

本文研究区域漫湾水电站库区,位于云南省西部云县和景东县交界处的漫湾河口下游 1 km 的澜沧江中游河段上,地处 100°05′~100°25′E,24°25′~24°40′N 之间。水库所处河段距离临沧市 140 km,距离大理市 200 km,距离昆明约 500 km,是湄公河流域在中国境内重点河段之一。

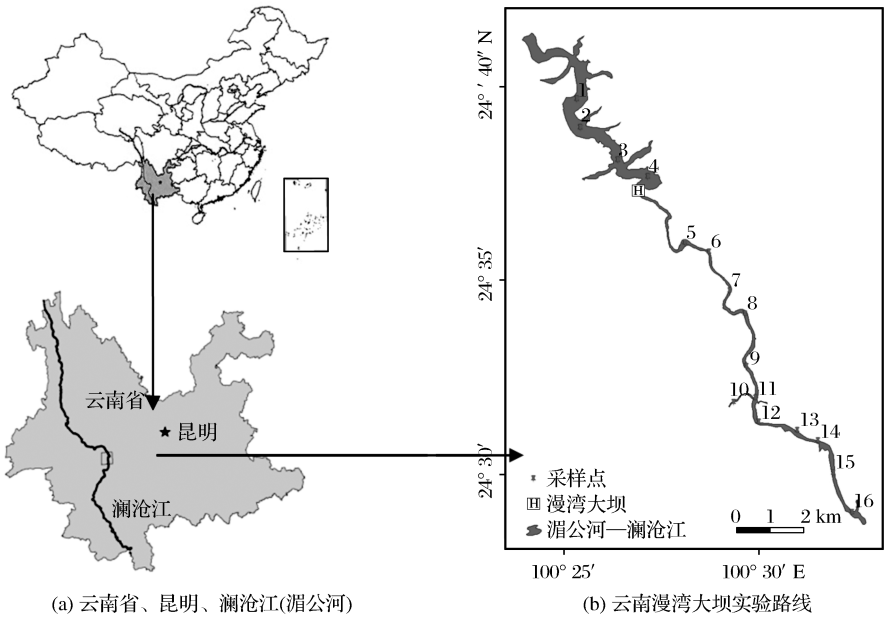


图 1 漫湾实验路线图
Fig.1 Map road of Manwan experiment

采集水体表面光谱的同时采集其表层水样,并低温冷藏带回实验室进行悬浮物浓度的测量。在实验室严格采用滤膜法进行悬浮物浓度的测量,所用滤膜采用孔径为 0.7 μm 的(Whatman GF/F)玻璃

2.2 水体实验数据获取

2013 年 11 月 2 日对漫湾大坝坝区进行了野外实验,共采集 16 个采样点的样本数据,采样点布设如图 1 所示。每个样本点采用美国 ASD 的 Filed-SpecR3 便携式光谱辐射计采集其水体表面光谱,每个采样点光谱测量采用 NASA 海洋光学规范^[10]和唐军武等提出的水体光谱测量方法^[11],为了避免太阳耀斑的影响,观测方位角选择为 135°,为了避免船体阴影影响,观测天顶角选择 40°。每个采样点光谱采集的顺序依次为参考板、水体、天空光、参考板,其中参考板和天空光各采集 10 条光谱,水体采集 15 条光谱。计算遥感反射率时,将采集的光谱分别剔除其异常光谱,然后对剩余的多条光谱求其平均值。求取遥感反射率的公式为:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - r \times L_{sky}(\lambda)}{L_p(\lambda) / \rho_p \times \pi}$$
 (1)

其中: $L_t(\lambda)$ 为水体上行辐亮度, r 为天空光反射率,它的计算由太阳位置、观测几何、风速风向等因素共同决定,当观测天顶角为 40°时,根据 Fresnel 公式,这里取 $r=0.0245$, L_{sky} 为天空光下行辐亮度, $L_p(\lambda)$ 为参考板辐亮度, ρ_p 为实验室标定得到的标准参考板反射率。

纤维滤膜进行,悬浮物浓度的测量采用常规的干燥、烘干、称重的方法。
降水量数据由中国气象科学数据服务网下载到。降水量数据主要收集了距离漫湾大坝较近的临

沧地面站(23°52'N,100°04')的日值降水数据集。

2.3 HJ-CCD 卫星影像数据

为了研究漫湾大坝附近悬浮物浓度的分布规律,本文获取了 2014 年全年覆盖漫湾大坝研究区域云量较少且图像质量较好的 8 景卫星数据,卫星数据由资源卫星应用中心网站下载得到,卫星数据具体情况见表 1。

表 1 漫湾大坝坝体区域 HJ-CCD 数据
Table 1 Data of HJ-CCD covered Manwan Dam

| 序号 | 数据类型 | 时间 | 备注 |
|----|-----------|------------|-----|
| 1 | HJ1B-CCD1 | 2013-11-02 | 少量云 |
| 2 | HJ1A-CCD2 | 2014-01-28 | 无云 |
| 3 | HJ1A-CCD2 | 2014-02-28 | 无云 |
| 4 | HJ1A-CCD2 | 2014-03-34 | 无云 |
| 5 | HJ1B-CCD1 | 2014-04-14 | 无云 |
| 6 | HJ1A-CCD2 | 2014-05-01 | 无云 |
| 7 | HJ1B-CCD2 | 2014-06-03 | 无云 |
| 8 | HJ1B-CCD2 | 2014-10-07 | 无云 |
| 9 | HJ1A-CCD2 | 2014-11-25 | 少量云 |

3 研究方法

为了消除数据获取和传输系统产生的辐射失真或畸变等引起的误差,首先利用原始数据的.xml 文件中的定标系数对其进行辐射定标,并将辐射定标后的影像数据几何校正到全球 Landsat ETM 精度上,投影采用 UTM 投影,椭球体采用 WGS-84,使误差值控制在 1 个像元之内。

3.1 大气校正

大气校正的目的是提取带有水体自身特性信息的离水辐射(离水辐亮度),这也是进行水体定量遥感研究的基础^[12]。本文利用暗像元法、FLAASH 大气校正和 QUick Atmospheric Correction (QUAC)大气校正 3 种基于图像自身的大气校正方法对研究区域进行了大气校正。

暗像元大气校正采用 Chavez^[13]提出的一种改进的暗像元法对研究区进行大气校正,以消除大气的散射作用。该算法对于暗像元的选取进行了改进,首先在可见光波段中选择初始波段的一个初始暗像元,然后对初始波段的初始暗像元值利用 Chavez 提出的相应的相对散射模型对其他波段的暗像元值进行计算,以消除各个波段的大气散射作用。本文初始波段选择在可见光波段中的红光波段,由于研究区域位于滇西山区,一般选择山体阴影

或厚云下的阴影作为初始暗像元。最后,将消除散射作用后的辐亮度图像进行地表反射率的转换,其计算公式为:

$$\rho = \frac{\pi (L_{\text{sat}} - L_p)}{T_v [E_0 \cos(\theta_s) T_z + E_{\text{down}}]} \quad (2)$$

其中: ρ 为地表反射率, L_{sat} 为卫星观测到的辐亮度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), L_p 为程辐射(暗像元值,单位($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), T_v 为大气上行透过率, T_z 为大气下行透过率, θ_s 为太阳天顶角, E_{down} 为天空光漫反射到地表的光谱辐照度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。根据 Song 等^[14]的研究,对 T_v 和 E_{down} 进行了简化,假设 $T_v = 1.0$, $E_{\text{down}} = 0$,地表反射率为 0.01。

$L_p = L_{\text{dos}} - 0.01 \{ [E_0 \cos(\theta_s) T_z + E_{\text{down}}] T_v / \pi \}$ (3)
其中: L_{dos} 为各波段选取的暗像元辐亮度值。根据 Chavez^[15]基于 Landsat 5-TM 影像的研究得出,当气溶胶光学厚度在 0.08~0.3 之间,太阳天顶角在 33°~55°之间时, T_z 可通过太阳天顶角的余弦值计算,即 $T_z = \cos(\theta_s)$,其中太阳天顶角 θ_s 可由影像数据中的.xml 文件中计算得出。

FLAASH 大气校正已经嵌入到 ENVI 软件中,本文利用 ENVI 4.8 中的 FLAASH 大气校正模块对影像进行 FLAASH 大气校正,其参数设置见表 2。

表 2 FLAASH 大气校正参数设置
Table 2 The parameter settings of atmospheric correction FLAASH

| 日期 | 大气能见 度/km | 传感器 高度/km | 海拔 高度/km | 大气 模式 | 气溶胶 类型 |
|------------|--------------|--------------|-------------|----------|-----------|
| 2013/11/02 | 40 | 650 | 0.94 | Tropical | 城市 |

QUAC 大气校正利用 ENVI 4.8 中的 QUAC 模块进行处理,在参数设置时传感器类型选择 Ukonwn,其他保持默认设置。

上述几种大气校正结果均为地表反射率 ρ ,实测的为遥感反射率数据。通过式(4)将地表反射率结果转换为遥感反射率 R_{rs} 。

$$R_{rs} = \frac{\rho}{\pi} - \frac{r_{sky} \cdot L_{sky}}{E_d} \quad (4)$$

其中: r_{sky} 为天空光散射率,取 $r = 0.0245$, L_{sky} 为天空光下行辐亮度, E_d 为水面下行辐照度。其中 L_{sky} 和 E_d 由 Hydrolight 辐射传输模型模拟得出。

3.2 悬浮物浓度反演方法

在利用实测数据进行悬浮物浓度反演之前,首先根据 HJ1B-CCD1 的波段设置,并按照相应的光谱响应函数计算相应波段的波段等效值。波段等效

计算方法如下:

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) R_{rs}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) d\lambda} \tag{5}$$

其中: R 为等效后的反射率值, R_{rs} 为实测的遥感反射率值, $f_i(\lambda)$ 为光谱响应函数, λ_1 、 λ_2 为光谱响应函数两端的光谱响应点。

由于实验数据较少,为了使建模过程更具统计意义,本文采用 4 拆交叉验证的方法进行悬浮物浓度反演的建模,选取交叉验证中预报误差较小的模型作为悬浮物浓度反演模型。模型的真实性的检验考虑到同步实验的卫星数据由于有云的影响数据质量较差,采用卫星图像上受云影响较小的点位数据进行。根据图 2 统计的水体悬浮物浓度实测值的结果表明,漫湾大坝附近水体的总悬浮物浓度平均值为 19.32 mg/L,其中无机悬浮物浓度平均值为 15.81 mg/L,有机悬浮物浓度平均值为 3.51 mg/L。可见漫湾大坝附近水体具有无机物主导的水体光学特性,而可见光波段比值算法通常适用于以无机悬浮物主导的水体的模型构建^[16],而且波段比值因子能在一定程度上进一步消除大气的影响,往往被用于参数反演之中。所以本文在可见光波段中选择大气校正效果较好的两个波段构建波段比值经验模型作为研究区悬浮物浓度反演模型。

3.3 悬浮物浓度反演精度评价方法

为了评价悬浮物浓度反演精度,本文主要利用

均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MAPE)用于模型评价。其计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Pre,i} - T_{Mea,i})^2 / n} \tag{6}$$

$$MAPE = \left(\sum_{i=1}^n (|T_{Pre,i} - T_{Mea,i}| / T_{Mea,i}) / n \right) \cdot 100\% \tag{7}$$

其中: $T_{Pre,i}$ 为反演得到的悬浮物浓度, $T_{Mea,i}$ 为实测的悬浮物浓度的平均值, n 为采样点个数。

4 结果分析

4.1 大气校正结果对比

评价大气校正结果是将大气校正结果数据与其相应研究区域的卫星同步实测数据进行比较分析。将上述大气校正方法结果转化为遥感反射率,以野外同步获取的 9 个试验点进行精度检验,大气校正结果分析如图 3 所示。根据曾群等^[17]的研究

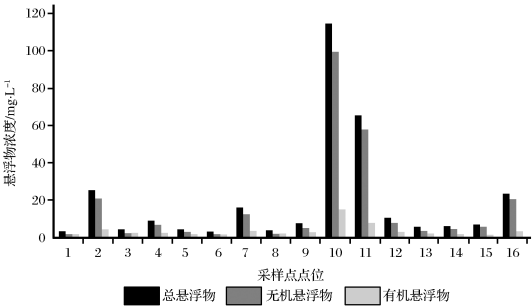


图 2 实测悬浮物浓度统计结果

Fig.2 Statistical results of measured suspended matter concentration

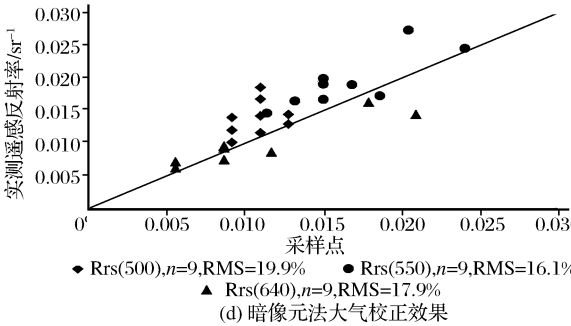
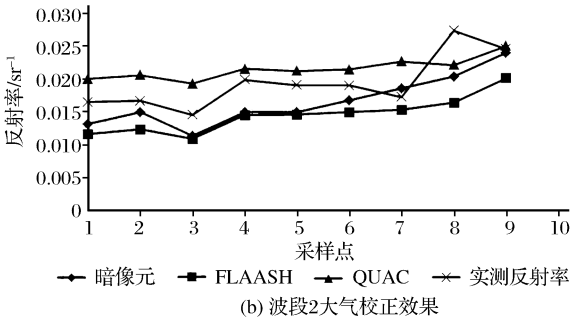
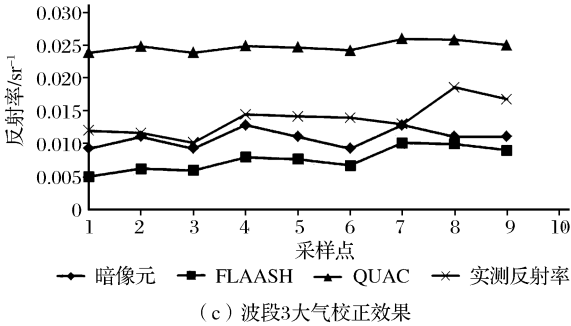
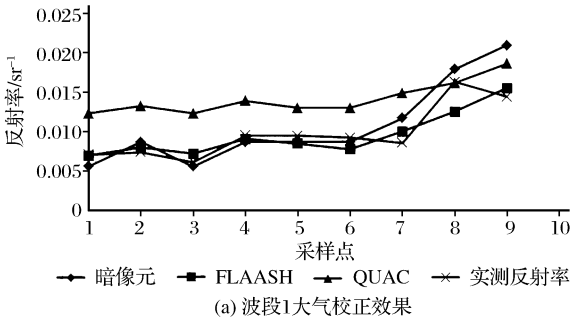


图 3 大气校正效果图

Fig.3 The effect of atmospheric correction

表明,HJ1A/1B 卫星 CCD 传感器在第 4 波段近红外光谱部分信噪比比较差,且存在大部分零值区域,所以本次大气校正结果和建模波段不再对第 4 波段进行讨论。

从大气校正效果看,各波段大气校正效果中,暗像元模型的大气校正效果较好,第 2 波段和第 3 波段的大气校正效果最好,相对平均误差分别为 16.1%和 17.9%,第 1 波段的效果略差,相对误差为 19.9%。QUAC 效果较差,存在“漂高”的现象,这可能是由于 QUAC 没有严密的公式推导和复杂的参数设定,从而使校正结果较差^[18]。FLAASH 的校

正效果介于暗像元法和 QUAC 之间。

4.2 悬浮物浓度反演精度

悬浮物浓度反演精度检验主要是利用各波段的比值建立遥感因子 X 与悬浮物浓度之间的线性关系,求解模型的拟合系数和反演值与实测值之间的平均相对误差和均方根误差作为模型检验的依据。精度检验点位选择上,在尽量均匀分布整个研究区的同时,避开云量较多且存在混合像元的点位(下游河流宽度较窄存在混合像元),最终选择 4、5、6、7、8、12、13、14、16 号采样点作为真实性检验点位。表 3 的结果表明,应用波段 3 和波段 2 的比值建立

表 3 漫湾坝区悬浮物模型精度评价

Table 3 The suspended matter concentration model of Manwan Region

| 遥感因子 | 模型(10 个) | R ² | 模型拟合 | | 模型预测 | |
|-----------|--------------------------------|----------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| | | | RMSE/mg · L ⁻¹ | MAPE/% | RMSE/mg · L ⁻¹ | MAPE/% |
| $X=b2/b1$ | $1\,038.4x^2-2\,971.3x+2\,132$ | 0.78 | 2.62 | 58.9 | 2.76 | 60.1 |
| $X=b3/b1$ | $15.448x^2+33.656x-19.434$ | 0.90 | 4.86 | 26.1 | 4.26 | 27.2 |
| $X=b3/b2$ | $252.2x^2-282.09x+83.853$ | 0.92 | 4.04 | 33.4 | 4.83 | 33.12 |

模型具有较高的精度,其决定系数 R^2 为 0.92,利用上述 9 个点检验得到的均方根误差(RMSE)为 4.83 mg/L,平均相对误差(MAPE)为 33.12%。为了进一步说明模型的适用性,图 4 显示了实测值和反演值之间的关系。可以看出,反演结果和实测值基本分布在 1 : 1 线附近,反演结果较为可靠,可以较好地反演漫湾坝区水体悬浮物浓度。

基于以上建立的反演模型,得到了 2013 年 11 月 2 日漫湾库区附近悬浮物浓度分布图,从图 5 可以看出,澜沧江—漫湾坝区上游附近的悬浮物浓度整

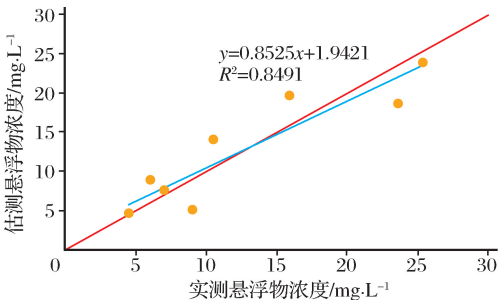


图 4 实测悬浮物与估算悬浮物比较散点图

Fig.4 Comparing the measured suspended matter concentration and the estimated

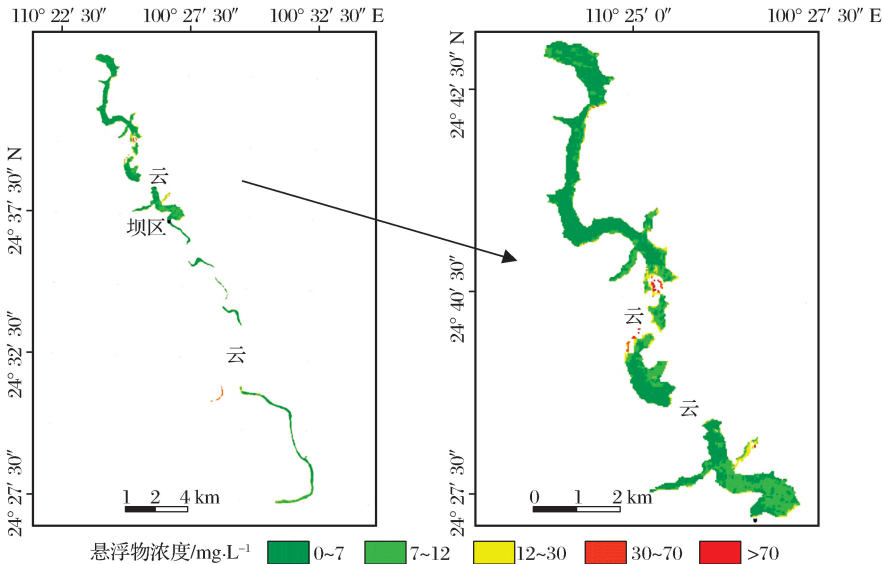


图 5 2013 年 11 月 2 日悬浮物浓度分布图

Fig.5 The distribution of suspended matter concentration on November 2,2013

表 4 2013 年 11 月 2 日悬浮浓度统计结果

Table 4 The statistical results of suspended matter concentration on November 2, 2013

| 区域 | 最小值 | 最大值 | 平均值 |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | /mg · L ⁻¹ | /mg · L ⁻¹ | /mg · L ⁻¹ |
| 上游 | 2.42 | 76.64 | 10.14 |
| 下游 | 2.76 | 23.01 | 4.56 |
| 支流 | 52.46 | 90.60 | 69.83 |

体偏高,坝区下游水体的悬浮物浓度较上游略小,只有支流部分悬浮物浓度较大。从坝区附近悬浮物统计结果来看,坝体上游悬浮物浓度最大值为26.64 mg/L,最小值为 2.42 mg/L,平均值为10.14 mg/L;坝体下游的悬浮物最大值为 23.01 mg/L,最小值为 2.76 mg/L,平均值为 4.56 mg/L;支流部分的悬浮物浓度最大值为 90.60 mg/L,最小值为 52.46 mg/L,平均值为 69.83 mg/L。根据当时实验记录情况,支流悬浮物

浓度较大是由于支流部分有人工采砂、工程施工等现象导致支流水体悬浮物浓度较大。反演统计结果与该河段现场实验记录情况吻合,基本符合上述悬浮物浓度空间分布情况。

4.3 悬浮物浓度长时间序列估算

由于澜沧江—漫湾坝区地处横断山脉,气候存在干湿季差异,一般 11 月至次年 4 月为旱季,5 月至 10 月为雨季,导致流量输入输出存在明显差异。而且水利部门会根据发电量需要适时调控水库水量,一般遵循“削峰补枯”的规律:在雨季为减少下游水量输送以蓄水为主,而在旱季补充为下游水量,以排水为主,这些因素都会导致库区悬浮物浓度的变化。为了探究漫湾坝区附近悬浮物浓度的分布规律,本文选取 2014 年全年 8 景图像质量较好的 HJ-CCD 数据对漫湾库区附近悬浮物浓度进行了时间序列的监测,反演结果如图 6 所示。

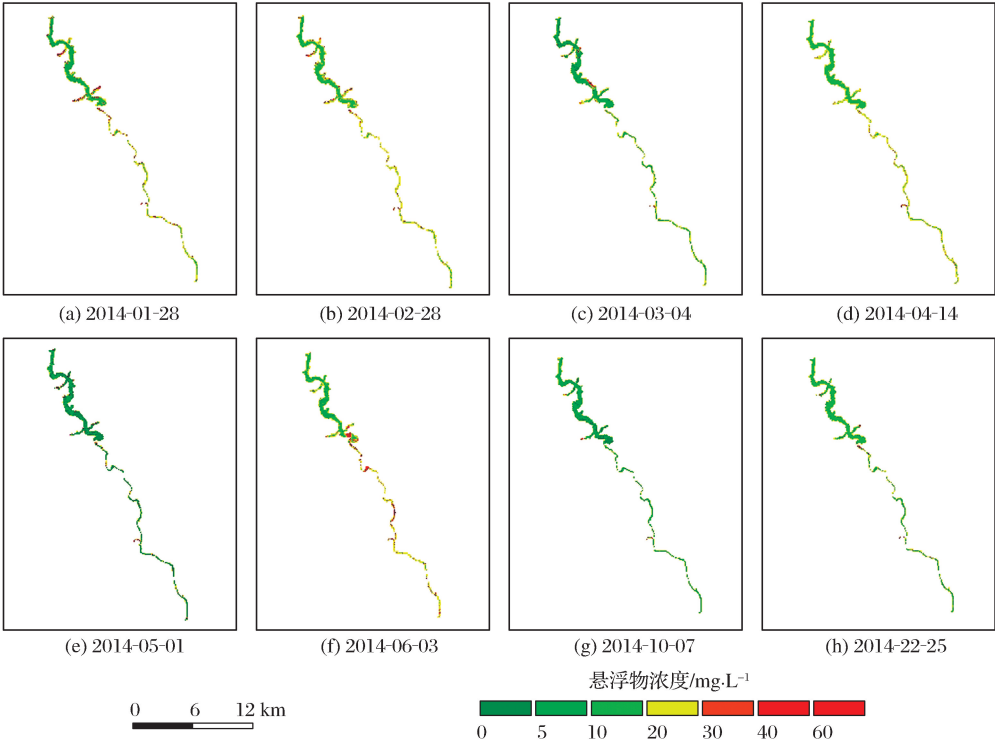


图 6 2014 年 1~11 月悬浮物浓度空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of suspended matter concentration from January to November in 2014

图 7 以漫湾大坝坝体为界,分别统计了坝体上游和下游的悬浮物浓度分布情况。从统计结果看,1~6月漫湾坝区的悬浮物浓度分布下游高于上游,而 10 月和 11 月悬浮物浓度分布则上游大于下游。为了进一步了解其悬浮物浓度整体分布情况,对 8 景图像反演结果的均值进行了统计分析,从图 8 的统计结果显示,1 月悬浮物浓度的均值较 2 月的高,

10 月和 11 月悬浮物浓度普遍偏高。体现在主要季节规律是,秋冬季节(10~11 月)的悬浮物浓度大于夏春季(1~6 月)的悬浮物浓度。

漫湾坝区悬浮物浓度分布规律的原因是多方面的:首先由于大坝的存在改变了河流的自然属性,水库区水流速度较慢,库区水体更多地体现为类似于湖泊的静水特性,而坝体下游仍具有河流特性,水流

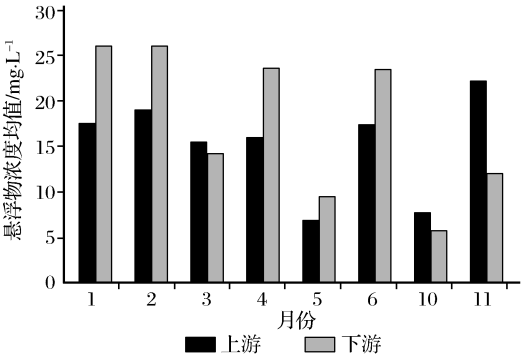


图 7 2014 年 1~11 月漫湾大坝悬浮物浓度均值分布统计

Fig.7 Statistics the mean concentration distribution of total suspended matter of Manwan Dam from January to November in 2014

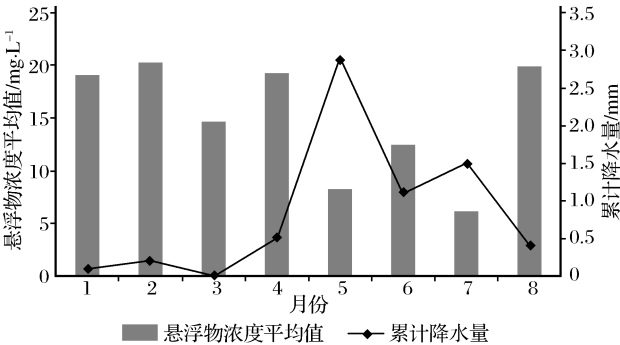


图 8 2014 年 1~11 月悬浮物浓度统计结果及累计降水量统计

Fig.8 Statistics of suspended matter concentration and accumulated precipitation from January to November in 2014

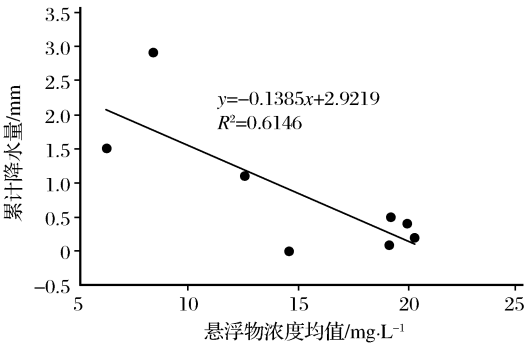


图 9 悬浮物浓度与累计降水量关系

Fig.9 The relationship between suspended matter concentration and accumulated precipitation

较快;另外由于水库受到人为调蓄径流情况的影响,在不同季节河流的输水输沙有很大的改变和差异,这些因素都决定了库区和坝体下游水体的悬浮物浓度分布规律的变化。由于漫湾坝区水文、气象等要素较难收集,在此分析了每月悬浮物浓度平均值与距离漫湾库区最近的地面气象站的降水量数据的相关性。降水量数据分别统计了 8 景影像获取当日前

5 天的累计降水量。从图 9 的结果看,降水量和平均悬浮物浓度具有较为显著的负相关性,相关系数为 -0.78 。当降水量增加时由于悬浮物浓度的“稀释”作用导致悬浮物浓度降低,此前日期长期缺少降水时,可能使当时悬浮物浓度升高。

5 结 语

本文基于漫湾库区附近悬浮物浓度反演工作,针对 HJ-CCD 数据比较了几种常见的基于图像自身的大气校正方法,建立了适用于漫湾坝区的悬浮物浓度反演模型,并利用此模型对漫湾坝区悬浮物浓度进行了时间序列的监测,得出以下结论:

(1)在缺少气溶胶数据的情况下,针对漫湾坝区 HJ-CCD 数据的大气校正,暗像元大气校正效果较好,且大气校正结果适用于可见光波段比值建模,而 FLAASH 和 QUAC 大气校正结果则较差。

(2)基于大气校正效果较好的第 2 和第 3 波段,构建适合于漫湾库区附近悬浮物浓度反演的波段比值经验模型,该模型的决定系数为 0.92,均方根误差 (RMSE)为 4.83 mg/L,平均相对误差为 33.12%,反演精度较高,反演结果比较可靠。

(3)漫湾大坝坝体附近悬浮物浓度空间分布,空间分布看,1~6 月下游悬浮物浓度大于上游,整体偏低;而 10 和 11 月上游悬浮物浓度大于下游的,且整体呈现了偏高的趋势。从时间分布看,秋冬季 (10~11 月)的悬浮物浓度平均值较春夏季节 (1~6 月)高,其悬浮物浓度的平均值整体趋势与降水数据呈现较为显著的负相关性。

本研究的结论证明 HJ-CCD 数据可以用于坝区水体水质参数的遥感研究,研究结果可以补充漫湾坝区水体水质遥感监测不足的情况,也为今后坝区遥感水质反演模式提供参考,同时对中、小尺度坝区河流水质监测具有重要的理论和现实意义!

参考文献 (References):

[1] Li Yuan, Li Yunmei, Shi Kun, *et al.* Evaluation of Suspended Matter based on Spectral Classification[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2721-2726. [李渊, 李云梅, 施坤, 等. 基于光谱分类的总悬浮物浓度估测[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2721-2726.]

[2] Kritikos H, Yorinks L, Smith H. Suspended Solids Analysis Using ERTS-A Data [J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3(1): 69-78.

- [3] Li Yunliang, Zhang Yunlin. Quantitative Estimation of Total Suspended Matter and Chlorophyll-a Concentration of Lake Taihu in Summer Using TM Data[J]. Remote Sensing Information, 2008, (6): 22-27. [李云亮, 张云林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演[J]. 遥感信息, 2008, (6): 22-27.]
- [4] Lü Heng, Huang Jiazhu, Jiang Nan. Quantitative Retrieval of Water Quality by Remote Sensing in Lake Taihu based on MODIS Data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2005, 11(1): 104-110. [吕恒, 黄家柱, 江南. 太湖水质参数 MODIS 的遥感定量提取方法[J]. 地球信息科学学报, 2005, 11(1): 104-110.]
- [5] Chen J, Cui T W, Qiu Z F, *et al.* A Three-band Semi-analytical Model for Deriving Total Suspended Sediment Concentration from HJ-1A/CCD Data in Turbid Coastal Waters[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, (93): 1-13.
- [6] Li J S, Shen Q, Zhang B, *et al.* Retrieving Total Suspended Matter in Lake Taihu from HJ-CCD Near-Infrared Band Data[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2014, 17(3): 280-289.
- [7] Liu Wangbing, Yu Zhifeng, Zhou Bin. Assessment of Suspended Sediment Concentration at Hangzhou Bay Using HJ CCD Imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(4): 905-918. [刘王兵, 于之峰, 周斌, 等. 杭州湾 CCD 影像悬浮泥沙遥感定量反演[J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 905-918.]
- [8] Xiao Yanfang, Zhao Wenji, Zhu Lin. Quantitative Retrieval Model of Suspended Sediment Concentration in Estuary based on HJ-1 CCD Image[J]. Marine Sciences, 2012, 36(8): 59-63. [肖艳芳, 赵文吉, 朱琳. 近海水体悬浮物 HJ-1 号小卫星 CCD 定量反演研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(8): 59-63.]
- [9] Qiao Xiaojing, He Baoyin, Zhangwen *et al.* Inversion of Suspended Matter Concentration in Wuhan Segment of the Middle Reaches of the Yangtze River based on HJ1A/B CCD Data[J]. Journal of Huazhong Normal University(Natural Science Edition), 2013, 47(5): 716-719. [乔晓景, 何报寅, 张文, 等. 基于 HJ-1 卫星 CCD 数据的长江中游武汉河段悬浮物浓度反演[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(5): 716-719.]
- [10] Mueller J L, Fargion G S, McClain C R, *et al.* Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation[S]. 2013.
- [11] Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong *et al.* The Methods of Water Spectral Measurement and Analysis I: Above Water Method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44. [唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.]
- [12] Zhang Bing, Li Junsheng, Wang Qiao, *et al.* Inland Water Monitoring Application Using Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张兵, 李俊生, 王桥, 等. 内陆水体高光谱遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [13] Chavez P S. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24(3): 459-479.
- [14] Song C, Woodcock C E, Seto K C, *et al.* Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(2): 230-244.
- [15] Chavez P S. Image-based Atmospheric Corrections-revisited and Improved[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [16] Sun Deyong, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.* Study on Remote Sensing Estimation of Suspended Matter Concentration based on In-situ Hyperspectral Data in Lake Taihu Water[J]. Journal of Infrared and Millimwaves, 2009, 28(2): 124-128. [孙德勇, 李云梅, 王桥等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 124-128.]
- [17] Zeng Qun, Zhao Yue, Tian Liqiao, *et al.* Evaluation on the Atmospheric Correction Methods for Water Color Remote Sensing by Using HJ-1A/1B CCD Image——Taking Poyang Lake in China As a Case[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(5): 1320-1326. [曾群, 赵越, 田礼桥, 等. 2013. HJ-1A/1B 卫星 CCD 影像水环境遥感大气校正方法评价研究——以鄱阳湖为例[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1320-1326.]
- [18] Wang Jia'nan, Ye Qin, Lin Yi. Comparing Effects Different Atmospheric Correction Algorithms in Remote Sensing Dynamic Monitoring of Cyanobacteria Bloom in Inland Lake[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): 157-165. [王嘉楠, 叶勤, 林怡. 不同大气校正方法对中小湖泊蓝藻遥感动态监测的影响[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 157-165.]

**Inversion of Suspended Matter Concentration of the River of
Manwan Dam Regions based on HJ-CCD Data**

Xing Xiaoda^{1,2}, Shen Qian², Li Junsheng², Zhang Fangfang²,
Pang Zhiguo³, Lü Shuqiang¹

*(1. Institute of Surveying and Mapping and the Urban Spatial Information, Beijing University of
Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China ;
2. Key Laboratory of Digital Earth Science Institute of Remote Sensing and Digital Earth ,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China ;
3. Remote Sensing Center, China Institute of Water Resources and
Hydropower Research , Beijing 100048, China)*

Abstract: It has a great significance in monitoring the suspended matter concentration of dam rivers to evaluate the impact of water conservancy and hydropower project on the water quality. The image of HJ-CCD has a high time and space resolution that apply to monitor the water quality of river near the Manwan Dam which is a kind of small and medium scale reservoir has greater practical significance. The atmospheric correction method is used the dark-object subtraction, FLAASH and QUick Atmospheric Correction (QUAC) which based on the satellite image for the atmospheric correction. Through comparing the atmospheric correction effect, the dark-object subtraction method has achieved a good result that the average relative error of band 2 and band 3 are 16.1% and 17.9% respectively, then we used the bands which has a good quality in atmospheric correction to construct a suitable inversion model for suspended matter concentration and the result shows that the decision coefficient of this model is 0.92, the root mean square error (RMSE) is 4.83 mg/L and the average relative error is 33.1%, then we used this model to apply to the images which have a good image quality and covers of the full year of 2014 and got the space distribution of suspended matter concentration and it reflects the change of suspended matter concentration near the Manwan Dam.

Key words: HJ-CCD; Suspended matter concentration; Atmospheric correction; Dark-object subtraction; Manwan Dam