

利用 Landsat-8 OLI 进行汉江下游水体浊度反演

冯奇¹ 程学军² 沈欣^{3,4,5} 肖潇² 王立辉¹ 张文⁶

1 中国科学院测量与地球物理研究所,湖北 武汉,430077

2 长江科学院,湖北 武汉,410010

3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

4 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

5 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

6 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

摘要:综合 Landsat8-OLI 遥感影像与地面同步水质监测,发现 Landsat8 的近红外波段与其他波段的组合和水体浊度具有较高的相关性,以此为基础运用 OLI 的第 1、3、5 波段组合建立了汉江中下游浊度的遥感反演数学模型。根据该模型生成了 2013 年 4 月至 11 月共 3 幅汉江中下游浊度分布图,并进行了空间分析。精度验证表明,模型相对误差在 15% 左右, $R^2=0.71$, 结果表明运用 Landsat8 OLI 可有效地监测该区域水体浊度分布情况。

关键词:汉江; Landsat8; 浊度; 反演模型

中图法分类号: P237

文献标志码: A

近年来,随着宇航技术的飞速发展,卫星遥感技术广泛应用于环境监测、资源调查、城市规划、等领域。特别是在水质监测方面,由于卫星遥感技术具有快捷、经济、覆盖范围广等传统地面监测手段所不具备的优势,且能直接获取水质空间分布和时序变化情况^[1-3],越来越多的应用于海洋及内陆水体的水质监测。水质遥感反演的精度依赖于卫星传感器的辐射分辨率和光谱分辨率,而其所能反演的时空尺度则依赖于遥感图像的空间分辨率和时间分辨率。因此,在实际工作中,一般根据监测区域的时空分布和精度需求,选择适当的卫星遥感数据开展遥感反演的工作,在保证监测质量、精度的同时,采用经济和时序长的卫星遥感数据资料,对水质的长期动态监测成为水质卫星遥感监测的普遍原则^[4]。

美国 Landsat 系列卫星作为地表水环境遥感领域应用较为广泛的卫星之一,其较高的空间分辨率,完备的观测数据积累,在区域尺度的地表水环境监测中发挥了重要作用^[5-7]。但是,由于其两颗主力卫星中的 Landsat7 号星于 2003 年发生的

故障,使其实用价值大打折扣;而 Landsat 5 号星也于 2012 年底退役,从而造成 Landsat40 年的连续对地观测一度中断。美国地质调查局 USGS 及太空总署 NASA,于 2013 年 2 月成功发射了 Landsat-8,使得该系列卫星的对地观测得以延续。目前 NASA 已开放了该数据库,用户注册后可下载^[8]。

已有研究表明,水体浊度作为河流的重要水质参数,可反映内陆水体的泥沙含量、悬浮物浓度,甚至水华和重金属污染情况^[9]。同时,水体浊度所具有的光谱特征,使其可以被卫星传感器所探测^[3,10]。研究区域位于南水北调中线水源地丹江口水库下游,是武汉、仙桃、潜江等沿岸城市的重要饮用水源。上世纪 90 年代以来,随着区域经济的发展,高强度的人类活动作用下,该区域发生了数次“水华”事件,严重威胁当地人民生活。随着南水北调中线工程的输水,汉江中下游江段流量减少,流速变缓,水体对沿岸污染的稀释自净能力减弱,区域水环境将面临更大挑战。

在此背景下,本文以汉江下游为研究对象,以

收稿日期:2014-00-00

项目来源:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2012323/KY);国家自然科学基金资助项目(41301098);湖北省公益性科技研究项目(2013BCB017);武汉大学自主科研项目(2042014k0059)。

第一作者:冯奇,博士,副研究员,主要从事遥感在环境科学中的应用。E-mail: fengqi@asch.whigg.ac.cn

通讯作者:沈欣,博士后。E-mail: xinshen@whu.edu.cn

Landsat-8 搭载的新传感器 OLI 影像为数据来源,研究该传感器对水体浊度反演方法,评价该传感器不同波段组合对反演精度的影响。为该传感器数据的在该研究区域的水环境遥感研究提供实例。

1 数据源及数据预处理

1.1 数据源

已有分析表明,Landsat8 卫星数据很好地延续了 Landsat 系列卫星的一贯特点,其搭载的 OLI 成像仪采用推扫式结构设计。使得 OLI 成像仪比扫摆式结构设计的 Landsat-5/7 成像仪具有更好的几何稳定性,同时,该成像仪获取的遥感

图像辐射分辨率达到 12 比特,图像的几何精度和数据信噪比更高^[11]。

本文采用了 3 幅 Landsat-8 OLI 遥感影像,时相分别为 2013-04-26,2013-06-13 和 2013-11-20,影像获取当天天空非常晴朗,风力小于 2 级。研究区域位于汉江下游潜江-仙桃段,研究区域江面宽 800~1 500 m,长度约 50 km,可以满足影像分辨率条件。本文作者在卫星过境当天使用 HACH 2100P 便携式浊度仪,根据仪器操作手册,在江面每隔 2~3 km 设立一个监测点进行采样监测,每时相设立 20 个监测点,总共 60 个监测数据。研究区域和采样信息见图 1 和表 1。各采样点水体透明度均较低,所以不必考虑水底反射的影响。

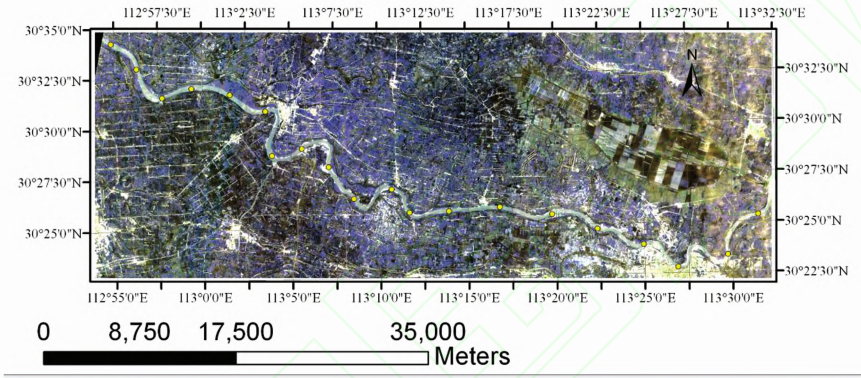


图 1 研究区域及样点分布图(图中圆点)

Fig. 1 Study Area and Location of Sampling Points

表 1 研究所用影像和实测浊度数据描述表

Tab. 1 Description of Landsat8/OLI Images and In-situ Turbidity Used in this Paper

浊度采样与卫星过境日期	影像号	卫星过境时间	浊度采样时间	浊度值范围 (NTU)	浊度平均值 (NTU)
2013-04-26	LC81230392013116LGN01	02:58 UTC	02:46UTC-05:39UTC	20.8~49.7	32.3
2013-06-13	LC81230392013164LGN00	02:58 UTC	01:52UTC-05:06UTC	39.3~54.4	47.5
2013-11-20	LC81230392013324LGN00	02:58 UTC	02:44UTC-06:04UTC	15.8~25.9	20.3

1.2 影像数据预处理

遥感数据预处理包括辐射定标、几何校正、大气校正、水体提取。辐射定标采用 Landsat8 定标参数与定标公式进行定标^[12];在 ENVI5.1 支持下,采用一幅经过几何精校正的同区域 2011-06-08 的 TM 影像(空间分辨率 30 m)为参考底图进行几何校正,校正精度控制在 0.5 个像元以内;由于本文试验样区缺少同步的大气资料,故采用暗目标标对影像进行大气校正^[13];水体范围提取采用归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, WNDWI)的方法^[14]。

2 反演建模

2.1 相关性分析

基于 Landsat 卫星的遥感水质反演模型的建立通常有经验、半经验,神经网络等方法^[3,6,15-17],本文采用经验模型中的多元逐步回归分析方法。反演采用预处理后的 OLI 影像反射率为模型输入,选取汉江 45 个样点的浊度实测值与对应监测点在影像上各波段遥感反射率 B_n 以及它们的波段组合做线性、对数、多项式等多元逐步回归分析,通过对剩下 15 个样点的验证,筛选出相关性高而且参数项少的最优模型。回归分析采用

Grapher8.0 软件完成。

设定 F 检验的显著性概率 $p \leq 0.05$, 通过初步筛选后, 选择了十种相关系数较大的波段反射率组合进行比较(表 2)。

根据表 2 所示, 相关性最大的为 B5 × B1 (第五波段与第三波段反射率乘积), 达到了 -0.897, 但是考虑到对水体光谱辐射亮度的不同波段作比值处理, 可以部分消除大气影响, 也可以消除在空间上和时间上水面粗糙度变化的干扰。同时, 已有学者^[5,17-18]运用地物光谱仪对水体光谱进行了实测, 发现悬浮物含量高的水体在近红外波段反射作用增强, 使得其在 0.772~0.889 μm 以及 0.893~0.909 μm 的波段上形成了较强的相关关系, 这一位置正好位于 Landsat-8 OLI 的第五波段(0.845 - 0.885 μm), 因此, 本文使用了该波段来估测浊度。综合考虑相关性和理论依据, 本文选用相关性较高的波段反射率组合 B3 / (B1 + B5) 为自变量进行定量遥感反演。

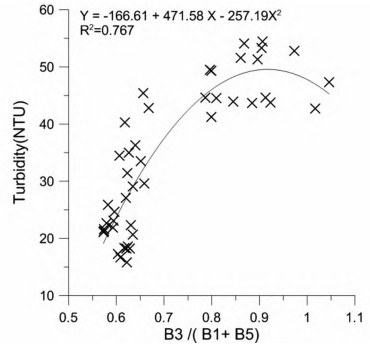


图 2 基于 OLI 第 1,3,5 波段反射率的浊度反演模型
Fig.2 Scatter Plot and Regression Relationship between Turbidity and the Combination Factor of X Consisting of Reflection at OLI Band 1, 3 and 5

三个时像的汉江下游浊度空间计算, 运用 ENVI5.1 和 ARCGIS10 即可得到浊度的空间分布图(图 3)。

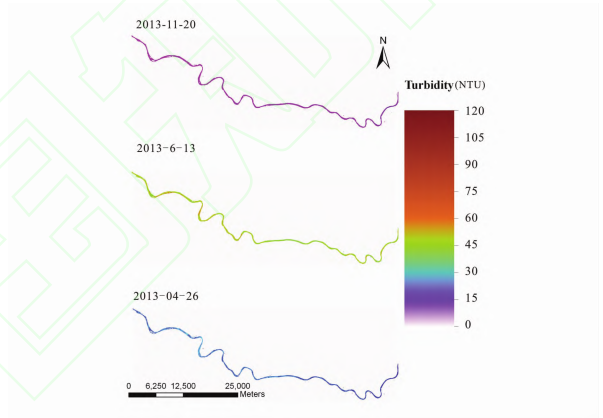


图 3 三个时像的汉江下游浊度空间分布图
Fig.3 Turbidity Distribution Retrieved from Landsat 8 OLI Images

从图 3 可以看出, 同一时像的浊度分布空间差异较小, 这与泥沙在河流中经过充分混合后的特征相符。通过不同的时像比较中发现, 2013-06-13 的浊度整体水平最高, 作者在当时的野外采样监测过程中发现, 当时在研究区域潜江段的江面上进行泥沙挖掘作业的船只较多, 在挖沙过程中, 机械对水体的搅拌导致局部浊度偏高, 此外。而另外两时相的同步采样中由于江面泥沙挖掘作业偏少, 使得水体整体透明度相对较好。

表 3 验证数据误差分析表

Tab.3 Static Index Applied to Models for Turbidity Validation

R ²	MAE	RMSE	MAPE/%
0.71	5.04	6.65	15.44

运用该模型得出的 60 个点的反演值和实测值比较(图 4), 可以看出, 在变化的趋势上, 两者

表 2 波段反射率组合与浊度实测值相关关系

Tab.2 Correlation Coefficient of Turbidity and Reflection of Bands Combination

序号	波段组合	相关系数
1	B3/B2	0.728
2	B3/B1	0.703
3	B3/B2+B3/B1	0.719
4	B4/B1	0.722
5	(B4+B3)/B1	0.739
6	B5 × B1	-0.897
7	(B5 × B1) ^{1/2}	-0.882
8	B2/(B1+B5)	0.714
9	B3/(B1+B5)	0.822
10	B4/(B4+B5)	0.785

注: B_n代表经大气校正的 OLI 影像的第 n 波段反射率

2.2 模型构建

基于以上分析, 本文选取 B3 / (B1 + B5) 作为自变量进行建模, 考虑到模型的稳定性, 本文最终采用一元二次模型构建反演模型:

$$Y = -166.61 + 471.58X - 257.19X^2 \quad (1)$$

式中, X 为 B3 / (B1 + B5), Y 为浊度(单位: NTU)。

图 2 是该模型在 45 个建模样点处的预测值和实测值散点图, 直观显示了模型的拟合效果。方差分析显示, 相关系数 R² = 0.767, 相关系数显著。

3 监测实验与结果分析

将上述得到的浊度反演模型用于表 1 所列的

非常接近,只是在个别数值上出现较大的误差。表3是运用该模型得出的反演值和验证数据的实测值之间的比较,可以看出,两者 R^2 可达0.71,平均相对误差(MAPE)在15%左右。误差的来源有可能是大气校正,采样过程中船只的移动,以及采样的时间点难以完全和卫星过境时间吻合,造成采样所在的点与影像像元难以完全一一对应。总体来看,运用该波段组合的回归模型可以较为准确地反映研究区域实际的浊度分布状况。

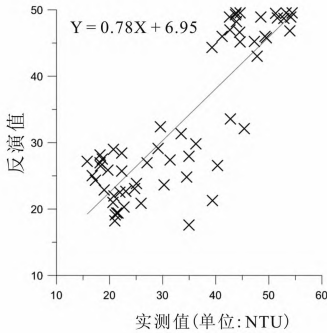


图4 反演值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of Turbidity Between the Retrieval Values from the Landsat 8 Images and the in-situ Data

4 结 语

通过与 Landsat 8 卫星影像基本同步的水质参数的实地测量,获取了汉江下游潜江-仙桃段 20 个点三个时相的水质参数,进行了建模和水体浊度的反演分析,精度可满足实际内陆水体水质动态监测应用的需求。作为最新的 Landsat 8 卫星,和该系列卫星保持着相同的空间分辨率和时间分辨率,随着该卫星的相关反演模型研究进一步深入,该星在内陆水环境监测中的应用将更为广泛。

致谢:感谢在水样采集分析中作出贡献的长江科学院汪朝辉工程师,中科院测量与地球物理研究所徐梦博士、李思思博士;感谢凌峰副研究员、李晓冬副研究员给本文的建议。感谢中科院测量与地球物理研究所“一二四”项目对本文的支持。本文所用 Landsat 8 数据均来自于 USGS: <http://glovis.usgs.gov/>。

参 考 文 献

[1] Tong Xiaohua, Xie Huan, Qiu Yanlin, et al. Multi-spectral Remote Sensing Based Water Quality Monitoring and Inversion Modeling in Upper Stream of Huangpu River[J]. *Geomatics and Information Sci-*

ence of Wuhan University, 2006, 31(10): 851-854 (童小花, 谢欢, 仇雁翎, 等. 黄浦江上游水域的多光谱遥感水质监测与反演模型[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(10): 851-854)

[2] Zhang Youjing, Deng Shizan, Ma Ronghua, et al. Design and Development of Remote Sensing Lake Water Environment Monitoring System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1 017-1 019 (张友静, 邓世赞, 马荣华, 等. 湖泊水环境卫星遥感监测系统的设计与实现[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(9): 1 017-1 019)

[3] Guttler F N, Niculescu S, Gohin F. Turbidity retrieval and Monitoring of Danube Delta Waters Using Multi-sensor Optical Remote Sensing Data: An Integrated View from the Delta Plain Lakes to the Western-Northwestern Black Sea Coastal Zone[J]. *Remote sensing of Environment*, 2013, 132: 86-101

[4] He Baoyin, Ding Chao, Yang Xiaoqin, et al. Recovering of Landsat7 ETM+ SLC-OFF Data and Its Application on Water Quality Retrieval in East Lake in Wuhan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(1): 90-95 (何报寅, 丁超, 杨小琴, 等. Landsat7 ETM+ SLC-OFF 数据的修复及其在武汉东湖水质反演中的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(1): 90-95)

[5] Ghabavati E, Firouzabadi P Z, Jangi A, et al. Monitoring Geomorphologic Changes Using Landsat TM and ETM+ Data in the Hendijan River Delta, Southwest Iran [J]. *International Journal of Remote Sensing*. 2008, 29, 4: 945-959

[6] Onderka M, Pekárová P. Retrieval of Suspended Particulate Matter Concentrations in the Danube River from Landsat ETM data [J]. *Science of the Total Environment*. 2008, 397: 238-243

[7] Yang Yipeng, Wang Qiao, Xiao Qing, et al. Quantitative Remote Sensing Inversion Methods of Chlorophyll-a Concentration in Taihu Lake Based on TM Data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(2): 5-8 (杨一鹏, 王桥, 肖青, 等. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量遥感反演方法研究 [J]. 2006, 22(2): 5-8)

[8] NASA. A Closer Look at LDCM's First Scene. [EB/OL]. http://www.nasa.gov/mission_pages-landsat/news/first-images-feature.html, 2013

[9] Wang B B, Cao M H, Zhu H D, et al. Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Hanjiang River in Wuhan, China [J]. *Chemosphere*, 2013, 93, 3: 468-473

[10] Shen F, Salama M H D, Zhou Y X, et al. Remote-Sensing Reflectance Characteristics of Highly Tur-

- bid Estuarine Waters : A Comparative Experiment of the Yangtze River and the Yellow River[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(10):2 639-2 654
- [11] NASA. A Closer Look at LDCMs First Scene[EB/OL]. http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/news/first-images-feature.html, 2013
- [12] Chen Yun. A Preliminary Study on the Urban Heat Island Effect Based on Landsat8; Case of Xiamen City[J]. *Geomatics& Spatial information Technology*, 2014, 37(2):123-128(陈云. 基于 Landsat8 的城市热岛效应研究初探:以厦门市为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(2):123-128)
- [13] 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
- [14] Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index(MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5):589-595(徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5):589-595)
- [15] Pahlevan N, Schott J R. Characterizing the Relative Calibration of Landsat-7 (ETM+) Visible Bands with Terra(MODIS) over Clear Waters; The Implications for Monitoring Water Resources [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125:167-180
- [16] Chebud Y, Naja G M, Rivero R G, et al. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2012, 223:4 875-4 887
- [17] Lü Heng, Jiang Nan, Li Xinguo, et al. The Study on Water Quality of Inland Lake Monitoring by Remote Sensing [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(2): 185-192(吕恒, 江南, 李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2):185-192)
- [18] Ma Ronghua, Dai Jingfang. Quantitative Estimation of Chlorophyll-a and Total Suspended Matter Concentration with Landsat ETM Based on Field Spectral Features of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(2):97-103(马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(2):97-103)

Performance Assessment of Landsat 8 OLI Imagery for Inland Riverine Turbidity Estimation: A Case Study on Hanjiang River

FENG Qi¹ CHENG Xuejun² SHEN Xin^{3,4,5} XIAO Xiao² WANG Lihui¹ ZHANG Wen⁶

1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

4 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

6 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China.

Abstract: The Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) was investigated for its performance in monitoring dynamic riverine turbidity. China's Hanjiang River, the largest tributary of the Yangtze River, was used as a case study. Field surveys conducted between April and November 2013 showed a wide range of turbidity range (15.8~54.4 NTU). A practical exponential retrieval algorithm used in conjunction with the OLI bands 1, 3 and 5 on Landsat 8 was developed to assess compatibility between satellite remote sensing reflectance and in-situ measured data. Results obtained for the whole area accurately matched in-situ data at most stations ($R^2=0.71$, MAPE=15.44%) during the validation phase.

Key words: Hanjiang River; Landsat 8; turbidity; inland water systems

First author: FENG Qi, PhD, associate professor, specializes in the remote sensing application. E-mail: fengqi@asch.whigg.ac.cn

Corresponding author: Shen Xin, postdoctoral. E-mail: xinshen@whu.edu.cn

Foundation support: The CRSRI Open Research Program No. CKWV2012323/KY; the National Natural Science Foundation of China, No. 41301098; the Non-profit scientific and technological research projects in Hubei, No. 2013BCB017; Independent research of Wuhan University No. 2042014kf0059.

