

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.04.017

基于遥感的北京城区水体悬浮物浓度监测

王 昉¹,王 巍¹,史 明¹,刘 林²,李 丽³

(1.北京市水利自动化研究所,北京 100036; 2.二十一世纪空间技术应用股份有限公司,北京 100096;
3.宇视蓝图信息技术有限公司,北京 100096)

摘要:利用 2011 年 6 月 8 日同步获取的地面实测数据与 TM 遥感影像,以北京城区重点水体为研究对象,探讨利用卫星遥感数据定量反演夏季城市湖泊悬浮物浓度的可行性与方法。在对遥感影像进行大气校正的基础上,通过相关性分析选择最佳反演波段,并利用经验方法建立基于 TM 多光谱影像的定量反演模型;通过 2008—2009 年 4 景 TM 影像及人工准同步测量的地面数据,对模型的精度及适用性进行分析。结果表明,模型在春季具有较好的适用性,相对误差为 25.06%,接近太湖等大江大湖先进反演模型的精度。

关键词:定量反演;悬浮物;TM 数据;遥感;北京城区

中图分类号:X832,TP7 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)04-0082-05

Monitoring of concentrations of water-suspended solids by remote sensing in Beijing urban area

WANG Fang¹, WANG Wei¹, SHI Ming¹, LIU Lin², LI Li³

(1. Beijing Research Institute of Hydraulic Automation, Beijing 100036, China;
2. Twenty-First Century Aerospace Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China;
3. Beijing Landview Mapping Information Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China)

Abstract: A thematic mapper (TM) remote sensing (RS) image and simultaneously acquired survey data from June 8, 2011 were used to explore the approach to quantitatively retrieving the concentrations of suspended solids in urban lakes in Beijing City and to analyze the feasibility of the approach. Based on analysis of the correlations between suspended solids (SS) and measured spectra reflectivity, the most appropriate bands were selected based on the atmosphere correction of RS data. A quantitative retrieval model was developed using the TM multi-spectral image to estimate the SS concentrations. The precision and applicability of the model were analyzed using the parallel acquired field measured data and four scenes of TM data from the years 2008 to 2009. The results show that the model was applicable to the urban lakes in spring, and its relative error was 25.06%, which is close to the accuracy of the advanced model applied to big lakes such as Taihu Lake.

Key words: quantitative retrieval; suspended solids; TM data; remote sensing; Beijing urban area

悬浮物(suspended solids)指水中呈固体状的不溶解物质^[1],是目前北京城区河湖水体磷营养盐类污染的重要来源^[2],是衡量水环境质量的重要指标之一。业务化应用的悬浮物监测方法,包括人工采样结合实验室检测、自动站点监测等,在获取指标空

间连续分布方面存在不足;而遥感技术具有连续、可视化程度高等特点,在反映悬浮物浓度变化的连续性、空间性和规律性方面具有明显优势^[1],是对业务方法的有效补充。随着遥感技术的发展,国内外学者已在水环境遥感监测研究方面取得了大量成

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07318-002)

作者简介:王昉(1970—),女,高级工程师,主要从事水务信息化研究工作。E-mail:buwf1970@126.com

果^[1-6],但研究多集中在大洋、近海以及内陆大型河流湖泊区域,针对城市水环境的遥感应用研究开展得很少。

笔者选取辐射定标系数公开、易获取、价格低的 TM5 多光谱影像(美国陆地卫星 5 号专题制图仪所获取的多波段扫描影像)开展针对城市水体特点的悬浮物浓度遥感定量反演方法研究,助力遥感技术在水体水环境管理中的业务化应用。城市水体具有面积较小、周边高层建筑多、大气影响复杂的特点,研究采用水体指数结合人工判读的方法,排除建筑阴影的影响,准确快速地提取城市水体边界;并利用 FLAASH 大气校正模型对城区 TM 影像进行大气校正,削弱大气散射、折射等因素的影响。在此基础上,分析 TM 影像各波段值与地面同步测量数据的相关性,选取最佳波段组合,建立悬浮物反演回归模型,通过对比分析将 2008、2009 年的 4 景 TM 影像的模型反演结果与同期的地面人工采样检测数据,验证模型方法的适用性与精度。

1 研究区概况

选取北京城区水体中具有代表性、水体功能定位不同、水环境及空间形态存在明显差异的清河(河宽约 30 m,排水河道)、高碑店湖(最宽处约 200 m,景观水体)以及玉渊潭西湖(宽约 1 000 m,景观水体)部分河面、湖面进行水质采样(图 1)。

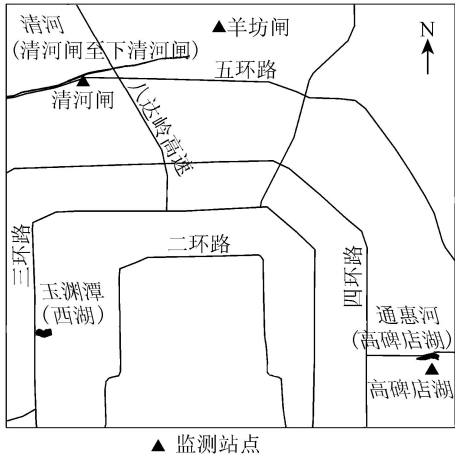


图 1 研究区范围示意图

2 数据采集及处理

2.1 研究数据采集

采集 2011 年 6 月 8 日 10:40 拍摄的 Landsat-5/TM 多光谱遥感影像,并于当日 10:00—12:00 时在清河、通惠河(高碑店湖)及玉渊潭研究区内采集 41 个水样,利用 ASD 光谱仪实时测量各采样点的水体光谱曲线。通过实验室检测,获取与遥感影像同步

的地面实测悬浮物浓度值。目前,北京城区水体中的悬浮物主要来源于冲刷作用所产生的土壤流失以及水体底质受到扰动产生的悬浮^[2]。

此外,采集 2008 年 5 月 30 日,2009 年 3 月 14 日、5 月 17 日、7 月 20 日 4 景历史遥感数据,以及遥感影像拍摄当天羊坊闸、清河闸、高碑店湖等人工监测站点监测的悬浮物浓度数据,以对研建的模型方法进行精度验证与适用性分析。

2.2 遥感图像预处理

a. 辐射定标。通过辐射定标,把数字图像中影像按照一定的量级进行量化的数字 D_N 值转化为有物理意义的辐射率,用以确定传感器入口处的准确辐射值。

$$L_\lambda = D_N G_r + B_r \quad (1)$$

式中: L_λ 为大气层顶太阳辐亮度; G_r 为通道增益; B_r 为偏移量。

b. 大气校正。输入大气环境、卫星传感器等参数,并选择软件固化的大气环境模型,采用商业软件提供的 FLAASH 辐射传输模型对辐射定标后的 TM 影像进行大气校正,计算得到经大气校正后的 TM 影像各像元反射率值。

c. 几何校正。以经过几何精校正的 TM 影像作为基准参考影像,在待校正的 TM 影像范围内均匀选取 36 个控制点,采用二次多项式校正模型对校正影像进行几何校正,纠正控制点中误差,范围控制在 0.52 个像元以内。

d. 水体边界提取。城市地区的建筑阴影对水体遥感信息提取有较大影响,采用水体指数 (I_{NDWI})^[7] 结合人工干预的方法,以削弱建筑物阴影的影响,更精确地提取城市信息。水体指数计算公式为

$$I_{NDWI} = \frac{\lambda_{TM2} - \lambda_{TM5}}{\lambda_{TM2} + \lambda_{TM5}} \quad (2)$$

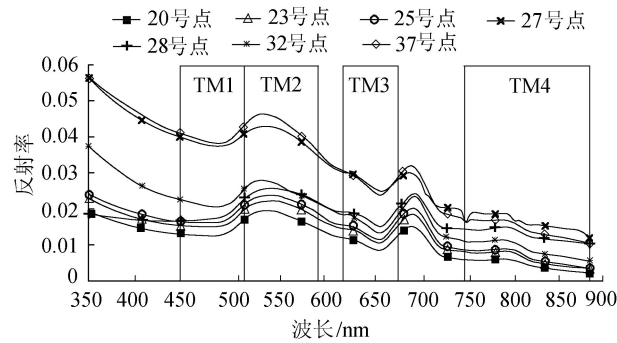
式中: λ_{TM2} 、 λ_{TM5} 分别为 TM 影像第 2、5 波段反射率。

2.3 地面实测数据处理

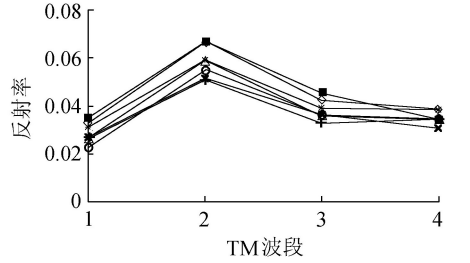
根据采样点、人工监测站点的 GPS 坐标,对用于研究及验证的地面实测悬浮物浓度数据进行空间化,建立遥感影像像元与地面采样点的一一对应关系。

通过对比分析地面实测光谱与对应位置的影像光谱特征,去除地面实测光谱与对应影像光谱差异较大的样点(图 2),以削弱水体周边环境对反演结果的影响。

此外,采用格鲁布斯(Grubbs)法对地面实测数据的异常值进行去除:



(a) 采样点实测光谱特征(反射率)



(b) 采样点对应的TM影像光谱特征(反射率)

图2 玉渊潭采样点实测光谱特征与对应TM的影像光谱特征

$$\begin{cases} T = \frac{\chi_n - \bar{\chi}}{s} & (3) \\ T = \frac{\bar{\chi} - \chi_n}{s} & (4) \end{cases}$$

式中: T 为异常值判断的统计量; χ_n 为实测数据; $\bar{\chi}$ 为实测数据的平均值; s 为实测数据的标准方差。

当实测数据大于平均值时,采用式(3)计算;小于平均值时,采用式(4)计算。通过查表对比 T 值的方法检测异常值。最终保留 36 个有效样本。

3 方法研建

3.1 最佳波段选择

将地面实测悬浮物浓度值与对应的 TM 反射率影像像元值、不同波段像元组合值进行相关性分析,结果如表 1 所示。经分析得出,在所有波段组合中, $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$ 与地面实测悬浮物浓度的相关系数最高,绝对值达到了 0.617,其次为 $\lambda_{TM1}/\lambda_{TM2}$ 、 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM4})$,均在 0.6 以上。因此,研究采用上述波段组合来反演悬浮物浓度。

3.2 模型研建

基于 TM 反射率影像最佳波段组合以及单波段值,通过统计回归分析,分别研建一元回归、多元回归模型。

以 $\lambda_{TM1}/\lambda_{TM2}$ 、 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$ 、 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM4})$ 为自变量,分别采用乘幂、指数数学方程形式进行一元回归拟合;同时利用 TM 可见光波段的反射率值作为自变量,进行多元回归拟合,得到拟合方程,如表 2 所示。

表1 地面实测悬浮物浓度与 TM 波段组合值的相关系数

波段及组合	相关系数	波段及组合	相关系数
λ_{TM1}	0.214	$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM4} + \lambda_{TM3})$	-0.422
λ_{TM2}	0.540	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM4} + \lambda_{TM3})$	0.455
λ_{TM3}	0.505	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM3})$	0.594
λ_{TM4}	0.560	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM4})$	0.571
$\lambda_{TM1}/\lambda_{TM2}$	-0.611	$\lambda_{TM3}/(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM4})$	-0.145
$\lambda_{TM1}/\lambda_{TM3}$	-0.363	$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$	-0.617
$\lambda_{TM1}/\lambda_{TM4}$	-0.444	$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM4})$	-0.614
$\lambda_{TM2}/\lambda_{TM4}$	0.206	$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM4}\lambda_{TM3})$	-0.605
$\lambda_{TM3}/\lambda_{TM1}$	0.376	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM4}\lambda_{TM3})$	-0.492
$\lambda_{TM3}/\lambda_{TM2}$	-0.559	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM1}\lambda_{TM3})$	0.223
$\lambda_{TM3}/\lambda_{TM4}$	-0.407	$\lambda_{TM2}/(\lambda_{TM1}\lambda_{TM4})$	-0.163
$\lambda_{TM4}/\lambda_{TM1}$	0.414	$(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})$	0.421
$\lambda_{TM4}/\lambda_{TM2}$	-0.237	$(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM4})/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})$	-0.497
$\lambda_{TM4}/\lambda_{TM3}$	0.366	$(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})/(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM4})$	0.487
$\lambda_{TM2}/\lambda_{TM1}$	0.573	$(\lambda_{TM4} - \lambda_{TM3})/(\lambda_{TM4} + \lambda_{TM3})$	0.377
$\lambda_{TM2}/\lambda_{TM3}$	0.535	$(\lambda_{TM2} - \lambda_{TM4})/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM4})$	0.203
$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})$	-0.575	$(\lambda_{TM1} - \lambda_{TM4})/(\lambda_{TM1} + \lambda_{TM4})$	-0.433
$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM4})$	-0.572	$(\lambda_{TM2} - \lambda_{TM3})/(\lambda_{TM2} + \lambda_{TM3})$	0.552

注: λ_{TMn} 代表 TM 影像的第 n 个波段反射率值的 10^{-3} 。

表2 基于 TM 影像的悬浮物遥感反演模型与误差描述

自变量 x	数学类型	拟合方程	相关系数
$\lambda_{TM1}/\lambda_{TM2}$	乘幂	$\rho(SS) = 8.610x^{-2.18}$	0.506
	指数	$\rho(SS) = 318.0e^{-4.12x}$	0.553
$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$	乘幂	$\rho(SS) = 0.008x^{-1.27}$	0.553
	指数	$\rho(SS) = 104.1e^{-729x}$	0.602
$\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM4})$	乘幂	$\rho(SS) = 0.036x^{-1.07}$	0.554
	指数	$\rho(SS) = 91.19e^{-534x}$	0.596
$\lambda_{TM1}, \lambda_{TM2}, \lambda_{TM3}, \lambda_{TM4}, \lambda_{TM5}, \lambda_{TM7}$	多元一次	$\rho(SS) = -0.185\lambda_{TM1} + 0.062\lambda_{TM2} + 0.346\lambda_{TM3} - 0.111\lambda_{TM4} - 0.349\lambda_{TM5} + 0.159\lambda_{TM7} - 1.479$	0.514

经分析,以 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$ 为自变量的指数方程拟合度最高,相关系数达到了 0.602。已有的理论研究成果也验证了该悬浮物反演波段组合的合理性与科学性;实测光谱的研究表明,估测悬浮物较好的波段位于 TM 的第 2、3 波段^[8],且由于单一影像波段与悬浮物的相关性不高,利用相关波段进行比值计算,可以部分消除周围环境等背景噪声的干扰,在一定程度上减少悬浮物颗粒物不同特性的影响,从而提高定量反演精度^[9-11]。因而,基于 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$ 自变量构建北京城市水体悬浮物质量浓度定量反演模型,模型如式(5)所示。

$$\rho(SS) = 104.1e^{-729x} \quad (5)$$

式中: $\rho(SS)$ 为悬浮物质量浓度, mg/L; x 为 $\lambda_{TM1}/(\lambda_{TM2}\lambda_{TM3})$ 值; λ_{TMn} 为 TM 反射率影像第 n 波段反射率值的 10^{-3} 。

3.3 方法精度验证与适用性分析

对 2008 年 5 月 30 日, 2009 年 3 月 14 日、5 月 17 日、7 月 20 日 4 景春、夏季的历史 TM 遥感影像

进行大气校正等预处理,利用研建的一元指数模型对遥感影像进行计算,反演得到北京城区主要水体的悬浮物浓度(图3)。

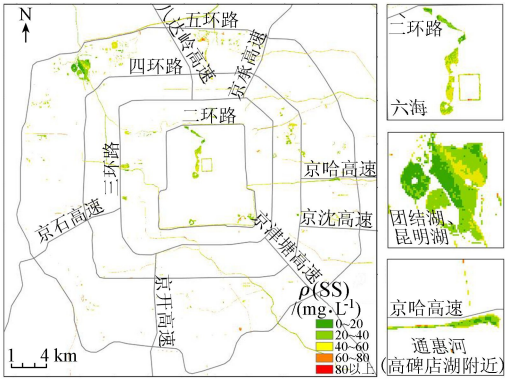


图3 2011年6月8日基于一元指数模型的北京城区水体悬浮物TM反演结果

基于研建的模型,利用2008年5月30日,2009年3月14日、5月17日、7月20日TM遥感影像反演当日北京城区重点水体的悬浮物质量浓度(图4)。将反演结果与当月羊坊闸、清河闸、高碑店湖3个人工站点(图1)的悬浮物质量浓度监测值以及常年监测得到的北京悬浮物分布规律进行对比分析,以验证模型方法的反演精度与适用性。

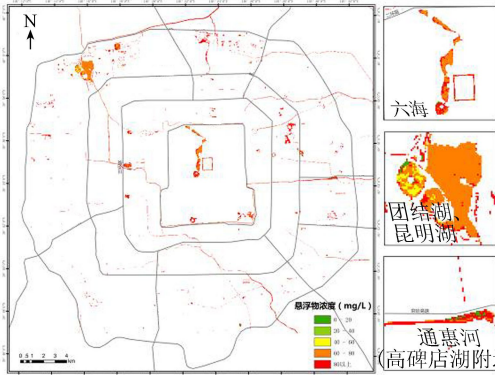
通过与人工监测站点监测数据对比分析得出,反演模型的均方根误差为9.95 mg/L,平均相对误差

为31.32%(表3)。其中,由于本文反演模型是基于春季的水质数据及同步遥感影像研建的,因而模型在春季有较好的使用性;2008年5月及2009年5月的4个验证数据的平均相对误差为20.17%,已接近太湖等大江大湖成熟反演模型^[1]20%左右的反演相对误差;而模型在冬季、夏季的适用性相对较差;2009年3月验证数据的平均相对误差为53.37%,2009年7月验证数据的相对误差达到了44.62%。

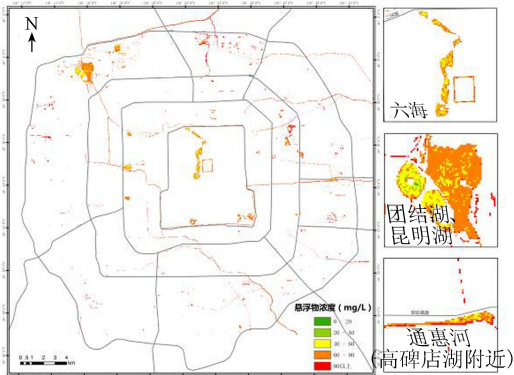
表3 模型精度验证

日期	人工监测点	$\rho(SS)/(mg \cdot L^{-1})$			相对误差/%
		实测值	模型反演值	绝对误差	
2008-05-30	羊坊闸	60.00	66.35	-6.35	10.58
	清河闸	71.00	77.48	-6.48	9.13
2009-03-14	高碑店湖	24.00	39.90	-15.90	66.25
	清河闸	26.00	36.53	-10.53	40.50
2009-05-17	高碑店湖	31.00	37.00	-6.00	19.35
	羊坊闸	31.00	43.90	-12.90	41.61
2009-07-20	高碑店湖	21.00	27.68	-6.68	44.62

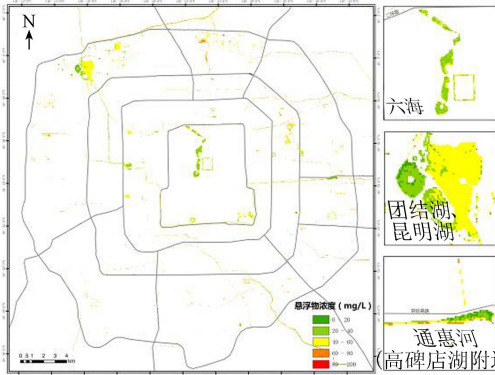
将2008—2011年不同时期模型反演结果(图3、图4)与北京城区水体悬浮物浓度分布规律^[12-13]进行对比分析得出,模型反演的北京城区水体悬浮物浓度空间分布符合常年人工监测规律,例如:不同时相下团城湖的悬浮物浓度模型反演值均小于其他水体,这与其作为北京重要的水源地、水质



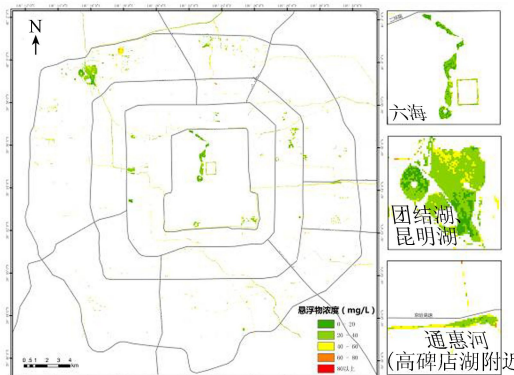
(a) 2008年5月30日



(b) 2009年3月14日



(c) 2009年5月17日



(d) 2009年7月20日

图4 不同历史时期北京城区主要水体悬浮物反演结果

状况优于其他水体的规律相吻合。此外,反演结果中部分较窄河流出现异常高值(如通惠河部分河段),分析认为主要原因是由于河岸陆地光谱的干扰造成的,说明模型对 30 m 左右的河流及岸边水域的适用性较差。

在羊坊闸、清河闸、高碑店湖 3 个人工站点监测数据的基础上,加入空间位置不明确的玉渊潭、普济闸等人工监测站点数据,计算主要人工站点监测的悬浮物浓度均值来表征北京城区水体悬浮物浓度整体情况,将其与北京城区水体的模型反演均值进行比对分析(表 4)得出,冬季模型中北京城区范围内的整体反演误差较大,均方根误差为 17.14 mg/L,平均相对误差达到了 38.90%,适用性较差。分析其原因,主要是由于水体悬浮物具有季节性特征^[8],而本研究研建的反演模型是基于春季采样数据的经验模型,对非采样样本季节的适用性相对较弱。而通过验证,春季北京城区主要水体悬浮物模型反演均值的相对误差为 6.11%,整体反演精度较高,接近业务化应用的要求。因而,基于遥感的悬浮物反演模型在城市水环境整体监测、变化趋势及变化规律分析等方面具有较大的应用潜力。

表 4 北京城区水体整体反演精度验证

日期	$\rho(SS)/(mg \cdot L^{-1})$			相对 误差/%
	测量均值	反演均值	绝对误差	
2008-05-30	74.33	84.28	9.95	13.39
2009-03-14	24.33	65.7	41.37	170.04
2009-05-17	49.33	49.97	0.64	1.30
2009-07-20	56.67	56.72	0.05	0.09
2011-06-08	47.50	42.89	-4.61	9.71

4 结 语

针对北京城区水体悬浮物浓度参数开展遥感半经验式的反演方法研究。基于北京市典型城市水体采集的水质样品以及准同步获取的 TM 多光谱影像、SPOT5 多光谱影像,通过影像预处理、统计回归分析等方法,构建了一套基于卫星遥感数据的悬浮物浓度参数反演模型;并利用多期历史遥感影像与同步测量的历史水质数据,对参数反演模型进行了精度验证与适用性分析,得出以下结论。

- a. 本文研建的反演模型适用于悬浮物为水体中主控因子时,对宽度在 30 m 以上的城市水体中悬浮物信息进行提取。
- b. 模型在春季有较好的适用性,反演相对误差为 20.17%,接近太湖等大江大湖先进的反演模型精度,在城市水环境整体监测、变化趋势及变化规律分析等方面具有较大的应用潜力。
- c. 模型反演误差主要来源于遥感影像大气校

正误差、水体周边地物光谱影响等方面。

d. 在城市水环境监测预警领域,遥感技术离业务化应用还有一定距离。更高分辨率遥感数据的应用、更准确的大气校正方法研究都是城市水环境遥感应用研究的发展方向。

参考文献:

[1] 王桥,张兵,韦玉春,等. 太湖水体环境遥感监测实验及其软件实现[M]. 北京:科学出版社,2008:8-96.

[2] 楼春华,廖日红,侯德,等. 北京城区河湖富营养化特征及对策分析[J]. 北京水利,2003 (6): 18-19. (LOU Chunhua, LIAO Rihong, HOU De, et al. Analysis on eutrophication characteristics and countermeasures in the lake and river in urban district of Beijing [J]. Beijing Water Resources,2003(6):18-19. (in Chinese))

[3] COSKUN H G, TANIK A, ALGANCI U, et al. Determination of environmental quality of a drinking water reservoir by remote sensing, GIS and regression analysis [J]. Water Air & Soil Pollution,2008,194(1):275-285.

[4] 尹秋,巩彩兰,匡定波,等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用[J]. 红外与红米波学报,2005,24(3):198-202. (YIN Qiu, GONG Cailan, KUANG Dingbo, et al. Method of satellite remote sensing of lake water quality and its applications[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2005,24(3):198-202. (in Chinese))

[5] 何隆华,杨金根. 长江三角洲主要水体水质污染的遥感研究[J]. 水产学报,2005,29(2):173-177. (HE Longhua, YANG Jingen. Remote sensing study of main waterbody pollution in Changjiang delta region[J]. Journal of Fisheries of China, 2005,29(2):173-177. (in Chinese))

[6] 黄耀欢,王浩,肖伟华,等. 内陆水体环境遥感监测研究评述[J]. 地理科学进展,2010,29(5):549-556. (HUANG Yaohuan, WANG Hao, XIAO Weihua, et al. The review of inland water environment monitoring based on remote sensing[J]. Progress in Geography,2010,29(5):549-556. (in Chinese))

[7] 赵碧云,贺彬,朱云燕,等. 滇池水体中总悬浮物含量的遥感定量模型[J]. 环境科学与技术,2001(2):16-18. (ZHAO Biyun, HE Bin, ZHU Yunyan, et al. Remote sensing quality model of SS (suspended solid) in the dianchi lake water bodies[J]. Environmental Science and Technology,2001(2):16-18. (in Chinese))

[8] 光洁,韦玉春,黄家柱,等. 分季节的太湖悬浮物遥感估测模型研究[J]. 湖泊科学,2007,19(3):241-249. (GUANG Jie, WEI Yuchun, HUANG Jiazhu, et al. Seasonal suspended sediment estimating models in Lake Taihu using remote sensing data [J]. Journal of Lake Sciences,2007,19(3):241-249. (in Chinese))

(下转第 94 页)

矿井排水水质完全满足农业灌溉要求,通过建设灌溉渠道,把矿井水引至周边农田,以满足农田灌溉用水需求,减少泉群开采量。

3.3 科学开采泉域内地下水

在泉口出水量有足够保证的情况下,可适量开采,但应合理布局,全面控制,严格禁止增加新的地下水开采工程。

4 结 语

通过调查研究,基本查明了龙门泉群断流的原因及影响因素,同时提出了切合实际的防治对策,为龙门泉域地下水资源环境治理工作提供了科学依据。2011年9月洛阳市政府组织实施了龙门泉群复涌综合治理工作,通过减少龙门及常村煤矿的矿坑排水使龙门泉群成功复涌,使龙门泉群恢复了昔日泉涌水淌的秀丽景色,有效保护了龙门石窟及景区的生态环境,有利于专家学者更加全面地研究龙门石窟文化,将世界文化遗产的美丽自然景观更加靓丽地呈现在中外游客面前。

参考文献:

[1] 王春帅,梁毅,施强,等. 关于龙门石窟景区泉水间歇性

(上接第86页)

[9] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, CASTAING P A, et al. Reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23):5079-5085.

[10] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, LAVENDER S, et al. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1):149-161.

[11] MOORE G F, AIKEN J, LAVENDER S J, et al. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters:

(上接第90页)

[16] 潘纲,张明明,闫海,等. 黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理[J]. 环境科学, 2003, 24(5):1-10. (PAN Gang, ZHANG Mingming, YAN Hai, et al. Kinetics and mechanism of removing *Microcystis aeruginosa* using clay flocculation [J]. Environmental Science, 2003, 24(5):1-10. (in Chinese))

[17] 余志,王仕汇. 天然黏土治理赤潮的研究进展[J]. 山西建筑, 2008, 34(1):191-192. (YU Zhi, WANG Shihui. Research advancement on controlling red tide by natural clay[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(1):191-192. (in Chinese))

[18] 黄斌,余国忠,栗印环. 沸石去除铜绿微囊藻的试验研究[J]. 信阳师范学院学报, 2004, 17(4):433-436.

断流影响因素的分析[J]. 地下水, 2009, 31(2):56-62. (WANG Chunshuai, LIANG Yi, SHI Qiang, et al. Analysis of influencing factors of spring water intermittent zero flow in Longmen Grotto Scenic Region[J]. Groundwater, 2009, 31(2):56-62. (in Chinese))

[2] 王建锋. 龙门石窟区域岩溶环境系统及其对石窟文物保护的影响[D]. 武汉:中国地质大学, 1992. :60-73.

[3] 张先,周亮. 许昌麦岭水源地可开采量的水均衡法计算[J]. 水文地质工程地质, 2004(1):83-87. (ZHANG Xian, ZHOU Liang. Calculation of the allowable withdrawal of groundwater in the Mailing wellfield near Xuchang with the water balance method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(1):83-87. (in Chinese))

[4] 曹少娟,丁万根,周拓疆. 常村煤矿矿井充水规律及防治对策[J]. 中州煤炭, 2009(11):103-108. (CAO Shaojuan, DING Wangen, ZHOU Tuojiang. Water filling law and countermeasures of Changcun Coal Mine [J]. Zhongzhou Coal, 2009(11):103-108. (in Chinese))

[5] 申志雄. 长治市煤炭开采对水资源的影响及对策[J]. 山西水利科技, 2011(1):74-79. (SHENG Zhixiong. Impact of coal mining on water resources and countermeasure of Changzhi City[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2011(1):74-79. (in Chinese))

(收稿日期:2012-11-05 编辑:徐 娟)

application to MERIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9):1713-1733.

[12] 荆红卫,华蕾,孙成华,等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):357-363. (JING Hongwei, HUA Lei, SUN Chenghua, et al. Analysis on urban lakes eutrophication status in Beijing[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3):357-363. (in Chinese))

[13] 杜桂森,吴玉梅,扬忠山,等. 北京城区河湖水质分析[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4):373-377. (DU Guisen, WU Yumei, YANG Zhongshan, et al. Analysis of water quality on urban rivers and lakes in Beijing[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(4):373-377. (in Chinese))

(收稿日期:2013-01-15 编辑:徐 娟)

(HUANG Bin, YU Guozhong, LI Yinhuan. Removing of *Microcystis aeruginosa* by use of zeolite powder [J]. Journal of Xinyang Normal University, 2004, 17(4):433-436.)

[19] 赵杏媛,张有瑜. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 济南:海洋出版社, 1990:45-48.

[20] 邹华,潘纲,阮文权. 壳聚糖改性黏土絮凝除藻的机理探讨[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5):8-9, 13. (ZOU Hua, PAN Gang, RUAN Wenquan. Mechanism of flocculation and removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan-modified clays [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(5):8-9, 13. (in Chinese))

(收稿日期:2013-01-23 编辑:高渭文)