

南四湖水体浊度高光谱定量反演模型

曹引^{1,2}, 冶运涛², 张小娟³, 石玉波⁴, 蒋云钟², 赵红莉²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;
3. 水务局水务信息管理中心, 北京 100038; 4. 水利部水资源司, 北京 100053)

摘要: 根据实测高光谱数据和同步水质检测数据, 通过识别反演水体浊度的高光谱敏感波段, 分别建立了原始光谱反射率模型、归一化光谱反射率模型、波段比值模型和一阶微分模型, 并进行了验证。结果表明, 4种模型的决定系数 R^2 均在 0.75 以上, 其中 825 nm 处归一化光谱反射率模型和波段比值模型估测浊度精度较高, 均方根误差 RMSE 分别为 28.79 NTU 和 24.23 NTU。研究结果可以为南四湖水体浊度大面积遥感监测的业务化管理提供技术支持。

关键词: 南四湖; 遥感; 浊度; 高光谱; 反演

中图分类号: TP791 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0883-05

Quantitative inversion model of hyperspectral for turbidity in the Nansi Lake

CAO Yin^{1,2}, YE Yuntao², ZHANG Xiaojuan³, SHI Yubo⁴, JIANG Yunzhong², ZHAO Hongli²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Water Affairs Information Management Center, Water Authority, Beijing 100038; 4. Department of Water Resources Management, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: Based on the measured hyperspectral data and synchronous water quality measurement data, through the identification of high hyperspectral bands sensitive to water turbidity, the original spectral reflectance model, normalized spectral reflectance model, band ratio model, and first derivative model were built and verified respectively. The results showed that the determinative coefficients of the four models are all above 0.75, and the normalized reflectance model in 825 nm and band ratio model of provide a higher precision to estimate water turbidity with the RMSE of 28.79 NTU and 24.23 NTU, respectively. The result soft study can provide the technical support for the business-oriented management of large area water turbidity remote sensing monitoring in the Nansi Lake.

Key words: Nansi Lake; remote sensing; turbidity; hyperspectral; inversion

南四湖位于淮河流域北部, 东、西、北三面承接苏、鲁、豫、皖4省32个县(市)的来水, 流域面积3.17万 km², 是我国北方最大的淡水湖, 同时也是南水北调东线工程重要的水源地和调蓄湖泊, 具有防洪、排涝、灌溉、供水、养殖、通航及旅游等多种功能, 其水质好坏直接影响着“一湖清水向北流”调水目标的实现。2014年以来, 山东发生严重旱情, 南四湖水位持续下降, 甚至从六月份开始先后降至死水位和最低生态水位, 水体自净能力下降, 水体浑浊度增加, 水质恶化, 严

重影响南四湖附近居民的生活和养殖业。全面监测南四湖水体水质对南水北调东线工程的顺利实施和保障南四湖周边居民的饮用水安全具有重要意义。

浊度是评价湖泊水质的一个重要指标, 浊度大小直接影响光在水体中的衰减, 从而影响水体的初级生产力^[1-2]。利用遥感方法监测湖泊水体浊度具有范围广、时间短、成本低和便于长期进行动态监测的优势, 克服了常规监测手段存在的费时、费力、瞬间性和局部性等缺点^[3-4], 可以对大面积水

收稿日期: 2014-11-04 修回日期: 2015-08-15 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2107.031.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAB05B01); 高分辨率对地观测系统重大专项(08Y30B07-9001-13/15-01); 国家自然科学基金项目(51209223; 51209014; 51309254); 中国水利水电科学研究院科研专项(资基本科研1401)

作者简介: 曹引(1991-), 男, 安徽滁州人, 主要从事流域水环境定量遥感研究。E-mail: yinc0416@163.com

通讯作者: 冶运涛(1983-), 男, 河南许昌人, 高级工程师, 博士, 主要从事数字流域、流域水循环模拟及其要素定量遥感与水资源调度方面的研究。E-mail: yeyuntao@iw.hr.com

域进行快速监测。常用的方法有物理方法、经验方法和半经验方法,由于物理方法理论基础还不够完善,经验方法精度较低,所以半经验方法应用最多^[5]。郭邵萌^[6]对东昌湖水体实测高光谱反射率进行归一化处理,和浊度进行相关性分析,发现浊度与 480 nm 附近归一化光谱反射率呈现较好的负相关,与 670 nm 附近归一化反射率呈现出较高的正相关,相关系数达 0.8;段洪涛^[7]等对查干湖水体反射率和浊度进行研究,发现浊度与 400~900 nm 的波段反射率都呈正相关,相关系数在 0.4~0.6 之间;Chen^[8]等研究发现珠江河口水体 520 nm 处实测光谱反射率和浊度有较好的相关性。

本文通过分析南四湖水体反射光谱特征与浊度之间的关系,运用目前湖泊水质反演中常用的原始光谱反射率法、归一化反射率法、波段比值法和一阶微分法^[7,10,12,14],分别建立相应的半经验模型,为今后利用遥感数据对南四湖水体浊度大面积定量反演提供建模基础。

1 数据获取

2014 年 7 月 22 日至 23 日,在南四湖布设了 15 个采样点(图 1),测量了水面的反射光谱,同时对表层水进行取样。水体浊度用美国哈希 HACH 浊度仪 1900C 现场测定,数值在 39.5~338 NTU 之间,平均值为 147.97 NTU,变化范围较大。采样期间天空基本无云,风速较小,水面平静,无大面积蓝藻爆发。光谱测量采用 HR-1024(波段范围为 345~2509.9 nm)地物光谱辐射计,测量在船上进行,测量时垂直水面,借助白板量测,仪器自动将水体的向上辐射率转化为水体的反射率。剔除光谱异常值,选取 11 个样点分析,其中 8 个样点用于建模,剩下 3 个样点用于验证。

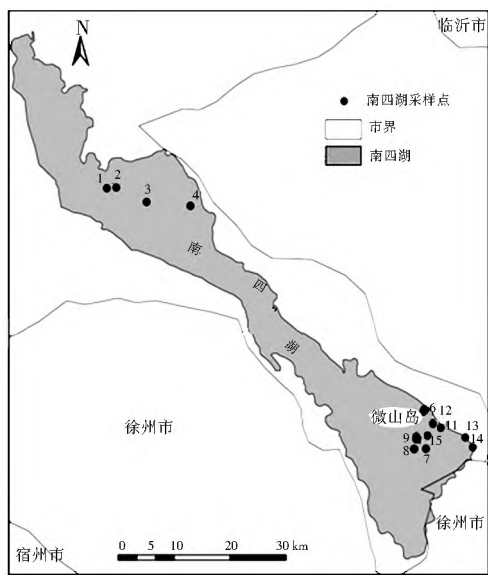


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

2 建模与分析

2.1 光谱特征分析

光谱测量结果见图 2。虽然不同采样点光谱反射率变化很大,但都表现出内陆水体的一般特征:在 400~500 nm 范围内,由于叶绿素 a 和黄色物质的强烈吸收,水体呈较低的

反射率;560 nm 附近的反射峰是由于叶绿素 a、胡萝卜素吸收较弱以及细胞和悬浮物的散射作用形成的;该反射峰值与色素组成有关,可以作为叶绿素 a 的定量标志;680 nm 附近出现叶绿素 a 的又一小吸收峰,是藻类叶绿素在红光波段强烈吸收的结果;700 nm 附近反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据之一^[9];大于 730 nm 的波段范围,纯水吸收系数迅速增大,所以水体光谱反射率迅速降低;直到 810 nm 附近又出现反射峰,该反射峰是由悬浮物散射形成的。

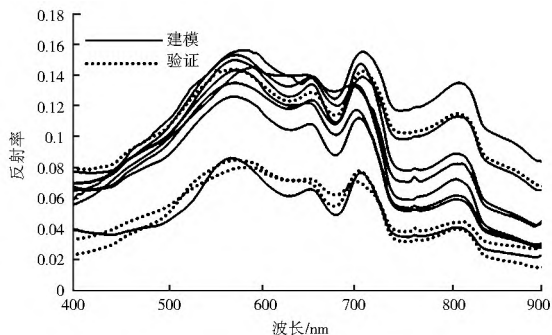


图 2 水体采样点光谱曲线

Fig. 2 Spectral reflectance curves of sampling sites

2.2 原始光谱反射率和归一化反射率模型

水体实测高光谱在 345~400 nm 以及 900 nm 以上噪声较大,选择 400~900 nm 原始光谱反射率和浊度进行相关性分析,结果见图 3。可以看出,715~900 nm 原始光谱反射率和浊度相关性较好,相关系数均大于 0.8,其中 838 nm 处的原始光谱反射率和浊度的相关系数最大,达到 0.9501,在 0.01 检验水平下显著相关。选择 838 nm 处原始处光谱反射率和浊度建立线性回归模型(Linear Regression Model, LRM),模型见公式(1)。

$$y = 3827.3x - 66.894 \quad (n = 8, p < 0.01) \quad (1)$$

式中: x 为 838 nm 处原始光谱反射率; y 为浊度; n 为样本数。

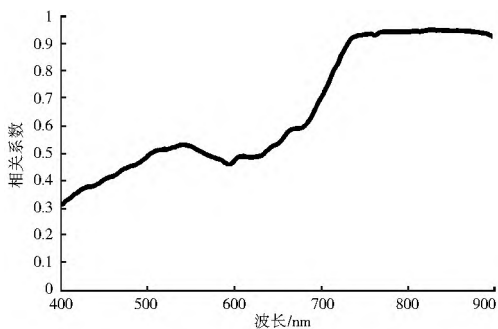


图 3 光谱反射率和浊度的相关性

Fig. 3 Correction between spectral reflectance and turbidity

为了使不同时间、地点和大气条件下测得的水体光谱具有可比性,同时寻找待测指标的特征波段,对原始光谱反射率归一化,即将太阳移到测量点的正上方,去掉大气的影响^[10]。利用可见光波段 400~750 nm 对原始光谱反射率进行归一化处理,模型如式(2)所示,光谱曲线见图 4。经归一化处理,光谱曲线变的相对集中,抑制或消除了环境因素对光谱曲线的整体性提高或降低^[11]。

$$R(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{\frac{1}{n} \sum_{400}^{750} R(\lambda_i)} \quad (2)$$

式中: $R(\lambda_i)$ 为 λ_i 处的归一化反射率; $R(\lambda)$ 为 λ 处的反射率; n 为 400~750 nm 的波段数。

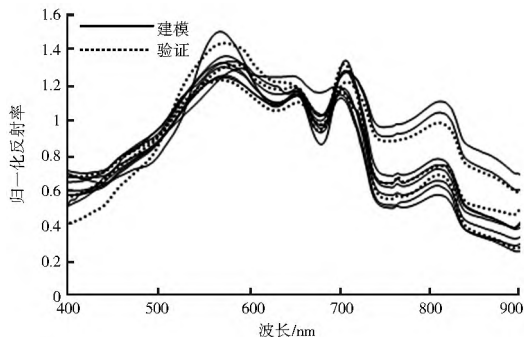


图4 归一化反射率曲线

Fig. 4 Normalized spectral reflectance curves

利用经归一化处理之后的反射率与浊度进行相关性分析(图5),发现580 nm附近、731~900 nm波段归一化反射率与浊度有较好的相关性,相关系数均在0.8以上,最大正相关系数出现在825 nm处,相关系数为0.8902,在0.01检验水平下显著相关。这与郭邵萌^[6]研究结果差异较大,可能是因为仅根据反射率数据与实测浓度值建立的统计模型缺乏物理基础支持,不同气象条件和不同时间条件等因素对最终的模型建立有较大的影响^[12]。用825 nm处的归一化光谱反射率和浊度建立线性回归模型,模型见式(3)。

$$y = 473.94x - 172.39 \quad (n = 8, p < 0.01) \quad (3)$$

式中: x 为825 nm处归一化光谱反射率,其它符号含义同式(1)。

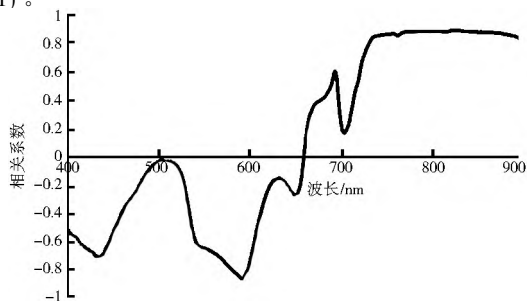


图5 归一化反射率与浊度的相关性

Fig. 5 Correlation between normalized reflectance and turbidity

2.3 一阶微分模型

对光谱的一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景噪声光谱对目标光谱的影响,微分光谱对信噪比非常敏感^[13]。由于光谱仪测量数据为离散型数据,因此用公式(4)近似计算,光谱反射率经一阶微分处理后见图6。

$$\dot{R}(\lambda) = \frac{R(\lambda_{+1}) - R(\lambda_{-1})}{\lambda_{+1} - \lambda_{-1}} \quad (4)$$

式中: λ_{-1} 、 λ 和 λ_{+1} 为相邻波长; $R(\lambda_{-1})$ 和 $R(\lambda_{+1})$ 分别为波长 λ_{-1} 、 λ_{+1} 的反射率, $\dot{R}(\lambda)$ 为波长 λ 处一阶微分反射光谱。

选择400~900 nm光谱反射率的一阶微分值与浊度进行相关性分析,结果见图7。可以看出,495 nm附近、750 nm附近、780 nm附近以及790~805 nm波段反射率和浊度有

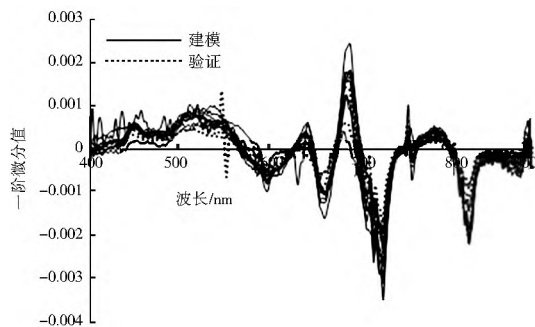


图6 反射率一阶微分曲线

Fig. 6 First derivative curves of reflectance

较高的正相关系数;虽然870~885 nm波段反射率和浊度有较高的负相关系数,但该波段反射率变化较小,微分处理会放大噪声^[14]。最终选择和浊度具有最大正相关系数的781 nm处反射率的一阶微分值和浊度建立线性回归模型,模型见公式(5)。

$$y = 1263096.23x - 182.02 \quad (n = 8, p < 0.01) \quad (5)$$

式中: x 为781 nm光谱反射率一阶微分值,其它符号含义同式(1)。

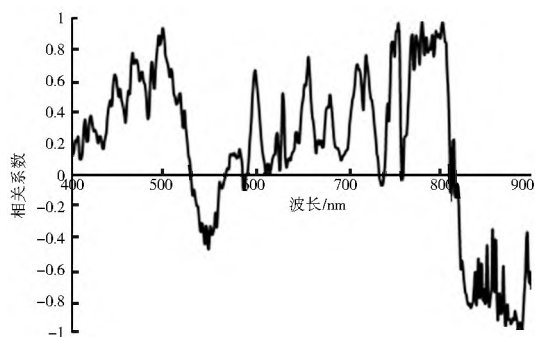


图7 一阶微分与浊度相关性

Fig. 7 Correlation between turbidity and first-derivative reflectance

2.4 波段比值模型

用波段比值可以部分消除水表面光滑度、周围环境等背景噪声的干扰^[15],并在一定程度上减少其他水色要素的影响^[16]。在研究归一化反射率与悬浮物浓度敏感性的基础上,选择和浊度具有最大正相关系数的825 nm处归一化反射率和与浊度具有最大负相关系数的591 nm处归一化反射率进行比值,然后和浊度进行相关性分析, R_{825}/R_{591} 和浊度的相关系数为0.8963,用 R_{825}/R_{591} 和浊度建立线性回归模型,模型见公式(6)。

$$y = 527.13x - 132.77 \quad (n = 8, p < 0.01) \quad (6)$$

式中: x 为825 nm处归一化反射率和591 nm处归一化反射率的比值,其它符号含义同式(1)。

3 模型验证

通过公式(7)的均方根误差RMSE,利用剩余的三个样点验证模型的预测精度,结果见图8。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{e,i} - X_{o,i})^2}{n}} \quad (7)$$

式中: $X_{e,i}$ 表示第 i 个反演值, $X_{o,i}$ 表示第 i 个实测值, n 为

评价个数。

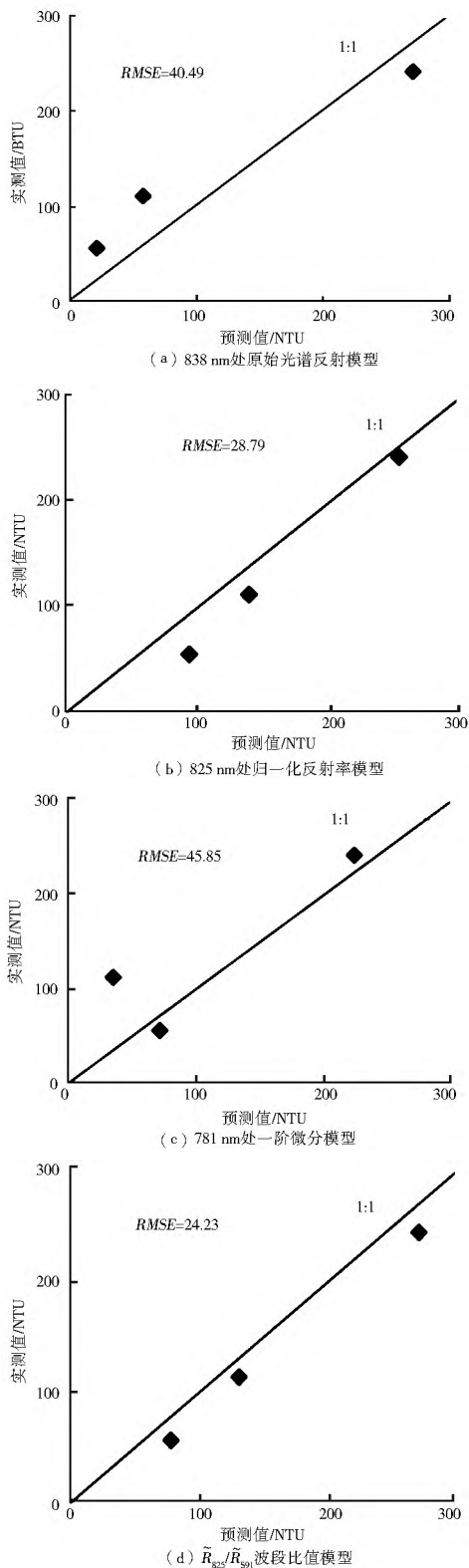


图 8 模型验证

Fig. 8 Model verification

由图 8 可以看出, 波段比值模型验证精度最高, $RMSE$ 为 24.23 NTU, 其次是 825 nm 处归一化反射率模型, $RMSE$ 为 28.79 NTU, 838 nm 处原始光谱反射率模型和 781 nm 处一阶微分模型验证误差相对较大, 分别为 40.49 NTU 和 45.85 NTU。总的来说, 四种模型的预测值和实测值散点均十分靠近 1:1 线两侧, 模型验证精度较好。

4 结论

利用南四湖水体实测高光谱数据和同步水质分析数据, 在分析南四湖水体光谱反射率和浊度相关性的基础上, 建立了反演南四湖水体浊度的半经验模型, 取得如下结果。

(1) 基于光谱反射率和浊度之间的关系分析表明: 838 nm 处原始光谱反射率、825 nm 处归一化反射率、781 nm 处一阶微分和波段比值模型可以较好地用于南四湖水体浊度的反演, 模型的均方根误差 $RMSE$ 分别为 40.49 NTU、28.79 NTU、45.85 NTU 和 24.23 NTU。

(2) 通过实测数据验证, 波段比值模型和 825 nm 处归一化反射率模型要好于 838 nm 处原始光谱反射率模型和 781 nm 处一阶微分模型, 这是因为对原始光谱进行归一化处理以及波段比值能有效去除环境因素的干扰, 可以明显的提高模型精度。这为今后利用高光谱遥感数据在南四湖进行大面积浊度反演提供了建模基础。

为了增强模型的实用性和通用性, 后续研究还应在多个时间段对多个采样点进行水质采样和实测光谱获取, 进一步完善模型。

参考文献(References):

- [1] Cloern J E. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in Estuaries [J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(11): 1367-1381.
- [2] Fisher T R, Gustafson A B, Sellner K, et al. Spatial and temporal variation of resource limitation in Chesapeake Bay [J]. *Marine Biology*, 1999, 133(4): 763-778.
- [3] 刘堂友, 匡定波, 尹球. 湖泊藻类叶绿素 a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(1): 11-15. (LIU Tang-you, KU ANG Ding-bo, YIN Qiu. Study on hyperspectral quantitative model of concentrations for chlorophyll a of alga and suspended particles in Tai Lake[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(1): 11-15. (in Chinese))
- [4] 刘剋, 黄家柱, 张强. 太湖水体藻类叶绿素浓度高光谱遥感监测研究[J]. *南京师大学报*, 2005, 28(3): 97-101. (LIU Ke, HU ANG Jia-zhu, Zhang qiang. Study on hyperspectral monitoring of concentrations for chlorophyll a of alga in Taihu Lake [J]. *Journal of Nanjing Normal University*. 2005, 28(3): 97-101. (in Chinese))
- [5] 周艺, 周伟奇, 王世新, 等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 312-317. (ZHOU Yi, ZHOU Wei-qi, WANG Shi-xin. Applications of remote sensing techniques to inland water quality monitoring [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 312-317. (in Chinese))
- [6] 郭邵萌. 基于高光谱遥感的湖泊水质污染研究—以聊城东昌湖为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2013. (GUO Shaomeng. A study of lake pollution based on hyperspectral data a case study of Dongchang Lake in Liaocheng[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese))
- [7] 段洪涛, 文钰, 张柏 等. 应用高光谱数据定量反演干旱湖水水质参数研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(6): 104-108. (DU-AN Hong-tao, WEN Yu, ZHANG Bai, et al. Application hyperspectral data in remote sensing inverse of water quality vari-

- bles in Lake Chagan [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 104-108. (in Chinese)
- [8] Chen S H, FANG L G, ZHANG L X, et al. Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River Estuary: A case study in Modaomen Water Way, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82: 119-127.
- [9] 焦洪波, 查勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型 [J]. 遥感学报, 2006, 10(2): 242-248. (JIAO Hong bo, ZHA Yong, LI Yun mei, et al. Modeling chlorophyll a concentration in Taihu Lake from hyperspectral reflectance data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(2): 242-248. (in Chinese))
- [10] 巩彩兰, 尹球, 匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析 [J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 910-916. (Gong Cailan, YIN Qiu, KUANG Ding bo. Correlations between water quality indexes and reflectance spectra of Huangpujiang River [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6): 910-916. (in Chinese))
- [11] 杨婧茹, 臧淑英, 惠洪宽. 松花江哈尔滨段总悬浮物浓度高光谱估测模型研究 [J]. 安全与环境学, 2014, 14(2): 239-243. (YANG Jing ru, ZANG Shu ying, HUI Hong kuan. An hyperspectral estimation model for testing the total suspended solid concentration in Harbin section of Songhua River [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2): 239-243. (in Chinese))
- [12] 高玉蓉, 刘明亮, 吴志旭, 等. 应用实测光谱估算千岛湖夏季叶绿素 a 浓度 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 553-561. (GAO Yurong, LIU Ming liang, WU Zhi xu, et al. Chlorophyll a concentration estimation with field spectra of summer water body in Lake Qiandao [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 553-561. (in Chinese))
- [13] 蒲瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. (PU Rui liang, GONG Peng. Hyperspectral remote sensing and its application [M]. Beijing: High Education Press, 2000. (in Chinese))
- [14] 王婷, 刘良云, 李存军, 等. 基于实测光谱估测密云水库水体叶绿素 a 浓度 [J]. 地理空间信息, 2007, 5(4): 64-66. (WANG Ting, LIU Liang yun, LI Cun jun, et al. Chlorophyll a concentration estimation with field spectra of water in Miyun Reservoir [J]. Geospatial Information, 2007, 5(4): 64-66. (in Chinese))
- [15] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K, et al. A Semi-operative Approach to lake water quality retrieval from remote sensing data [J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 79-93.
- [16] 刘英, 王珂, 周斌. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(6): 621-626. (LIU Ying, WANG Ke, ZHOU Bin, et al. Preliminary study on hyperspectral remote sensing of Qiandao Lake chlorophyll a concentration [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2003, 29(6): 621-626. (in Chinese))

(上接第 861 页)

- [8] 高安虎, 王明玉, 王慧芳. 南水北调中线总干渠焦作段两侧地下水六价铬污染风险研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(6): 763-769. (GAO An hu, WANG Ming yu, WANG Hui fang. Risk investigation of groundwater contamination of hexavalent chromium in Jiaozuo part of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2013, 30(6): 763-769. (in Chinese))
- [9] 任仲宇, 陈鸿汉, 刘国华. 南水北调中线干渠水污染途径分析研究 [J]. 环境保护, 2008, 392(6): 65-67. (REN Zhong yu, CHEN Hong han, LIU Guo hua. Research on the pathway of water pollution of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Environmental Protection, 2008, 392(6): 65-67. (in Chinese))
- [10] 张慧申. 南水北调中线焦作典型区地下水系统污染物迁移规律研究 [D]. 济南: 济南大学, 2012. (ZHANG Hui shen. South to North Water Transfer Jiaozuo typical contaminants migration characteristics of groundwater systems [D]. Jinan: Jinan University, 2012. (in Chinese))
- [11] 裴亮, 刘慧明, 莫家玉, 等. 南水北调中线工程农业非点源污染源及控制措施 [J]. 生态环境, 2011(6): 164-167. (PEI Liang, LIU Hui ming, MO Jia yu, et al. Countermeasures and origin against agricultural nonpoint pollution prevention in the Middle Route Project of the South to North Water Transfer [J]. Ecological Environment, 2011(6): 164-167. (in Chinese))
- [12] 任军. 南水北调中线总干渠两侧地下水风险源特征分析及保护 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013. (REN Jun. Risk Sources Analysis and quality protection of groundwater on both sides in the Middle Route of the main canal in South to North Water Transfer Project [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [13] 水利部河北水利水电勘测设计研究院. 南水北调中线京石段应急供水工程-初步设计报告 [R]. 2004. (Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower. Beijing Shijiazhuang Section of the Middle Route of South to North Emergency water supply project-The preliminary design report [R]. 2004. (in Chinese))
- [14] 朱德军. 南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007. (ZHU De Jun. Study on numerical methods for water pollution accidents in the Middle Route open channel of the South to North Water Transfer [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [15] 王世猛, 万宝春, 王路光, 等. 南水北调中线河北段水质保护风险分析研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 123-125. (WANG Shi meng, WAN Bao chun, Wang Lu guang, et al. Analysis on environmental risk of Hebei Section's water quality protection in the Middle Route of the South to North Transfer Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 123-125. (in Chinese))