

Application of High Resolution Remote Sensing in Water Quality Monitoring of Plain Reservoir

Huifen Feng, Simin Zhang

College of Geomatics and Municipal Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou Zhejiang
Email:1749411551@qq.com

Received: Jul. 2nd, 2020; accepted: Jul. 15th, 2020; published: Jul. 22nd, 2020

Abstract

Plain reservoirs are closely related to urban water consumption and residents' life, and it is of great significance to monitor the water quality using the real-time dynamic remote sensing technology. Based on the four GF-1/WFV and DigitalGlobe/QuickBird images, the water quality parameters in Qianmu Dang—the typical plain reservoir in Haiyan, Zhejiang, including chlorophyll-a, suspended matter, transparency, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen and dissolved oxygen were estimated and the water quality distribution in spring and summer was discussed. The results show that the water quality of the main reservoir area in Qianmu Dang is relatively good, and the water quality of the surrounding river to the port is relatively poor, with the most serious area in the river channel to the north, and the reservoir eutrophication in summer is more obvious than in winter. Based on this application case, the main technical difficulties and development trend of atmospheric correction, water extraction and inversion model in the plain reservoir water quality monitoring using high resolution remote sensing are analyzed and summarized, so as to provide reference for water quality remote sensing model research and monitoring application of urban plain reservoir.

Keywords

Remote Sensing, GF-1/WFV, Google Image, Plain Reservoir, Water Quality Parameter

高分遥感在平原水库水质监测中的应用初探

冯惠芬, 章思敏

浙江水利水电学院, 测绘与市政工程学院, 浙江 杭州

Email:1749411551@qq.com

收稿日期: 2020年7月2日; 录用日期: 2020年7月15日; 发布日期: 2020年7月22日

摘要

平原水库与城镇用水和居民生活息息相关, 利用高分遥感技术对其进行实时动态监测具有重要意义。以浙江省海盐县典型平原水库——千亩荡为例, 使用四景GF-1/WFV和DigitalGlobe/QuickBird数据, 进行了7种水质参数, 包括叶绿素a、悬浮物、透明度、总氮、总磷、氨氮、溶解氧浓度的遥感估算, 并讨论了各水质参数春季和冬季的分布变化。结果表明, 千亩荡水库主体库区水质良好, 而通往外港的周围河道水质则相对较差, 以通往北部大横港的河道最为明显, 且水库夏季富营养化现象较冬季更为明显。以此应用案例为切入点, 总结分析了高分水质遥感在平原水库水质监测中大气校正、水体提取与反演模型三方面的技术难点与发展趋势, 从而为城市平原水库的水质遥感模型研究与监测应用提供参考。

关键词

遥感, GF-1/WFV, 谷歌影像, 平原水库, 水质参数

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

平原水库很大一部分是周围城镇的饮用水源地, 其水质的恶化严重影响了水体生态环境、饮用水安全和广大人民群众的身心健康, 迫切需要开展平原水库的水质监测研究, 以保障饮用水安全、保障人群健康。在浙江省“五水共治”和“剿灭劣V类水”政策的倡导下, 对面积较小的平原水库进行水质监测与生态修复研究显得尤其重要。常规的水质监测方法费时、费力, 且受到采样点的数目和次数的限制, 监测结果无法反映整个水域的水质分布状况。利用遥感方法监测水体水质速度快、成本低, 可以反映水质参数时空分布变化, 便于长期动态监测。

近年来, 遥感技术在水质监测中发挥了重要作用。由于不同水体水质参数的空间变化尺度不同, 水质遥感所使用的卫星数据源的空间分辨率相差也较大。对于开阔的海洋水体, 水域面积较大, 一般采用低空间分辨率的遥感数据, 如 SeaWiFS、MODIS、MERIS、HY-1 等[1]。对于大型湖泊水体, 空间尺度较小, 水质空间差异性明显, 一般采用中空间分辨率的遥感数据, 如 TM、HJ-1、CBERS 等[2]。然而, 与相对宽广的海洋、大型湖泊相比, 平原水库空间尺度极小, 且由于与人类生活关系密切, 水质空间变异极大, 需要使用高空间分辨率的遥感数据对其水质参数的空间分布变化特征进行监测。针对平原水库细小水体, 讨论高分遥感影像在水质监测中的适用性, 并研究适宜的水质参数遥感反演模型, 对平原水库水质遥感的监测应用研究具有重要意义。

本文以典型的平原水库——浙江省海盐县千亩荡水库为例, 参考已有的模型进行典型水质参数的遥感估算, 绘制不同季节水质参数时空分布变化图, 讨论高分遥感在平原水库水质监测应用中的可行性。结合应用案例, 总结分析高分水质遥感在平原水库水质监测应用中面临的主要技术难点和未来研究趋势。

2. 数据和方法

2.1. 研究区

千亩荡位于浙江省海盐县域西北部沈荡镇、百步镇和于城镇三镇交汇地带(图 1)。它平均水深 3 米, 水源地区域面积为 4.83 平方公里, 其中水域面积为 1.02 平方公里, 即 1500 亩, 故名“千亩荡”。千亩荡位于整个海盐的腹部, 属水网平原地区, 河道密布地势低平, 有 9 条河道通往外港, 有充足的补充水源。作为海盐县城乡供水一体化饮用水源地, 千亩荡是保障全县 50 万居民生活和企业生产的“生命线”, 其水质的优劣更是事关全县老百姓的饮水安全。目前千亩荡饮用水源保护地共设一级保护区、二级保护区和准保护区, 保护区面积合计 23.61 平方公里。利用遥感手段进行千亩荡水质的辅助监测, 对于区域河道生态治理和河网环境预警监控等具有重要意义。

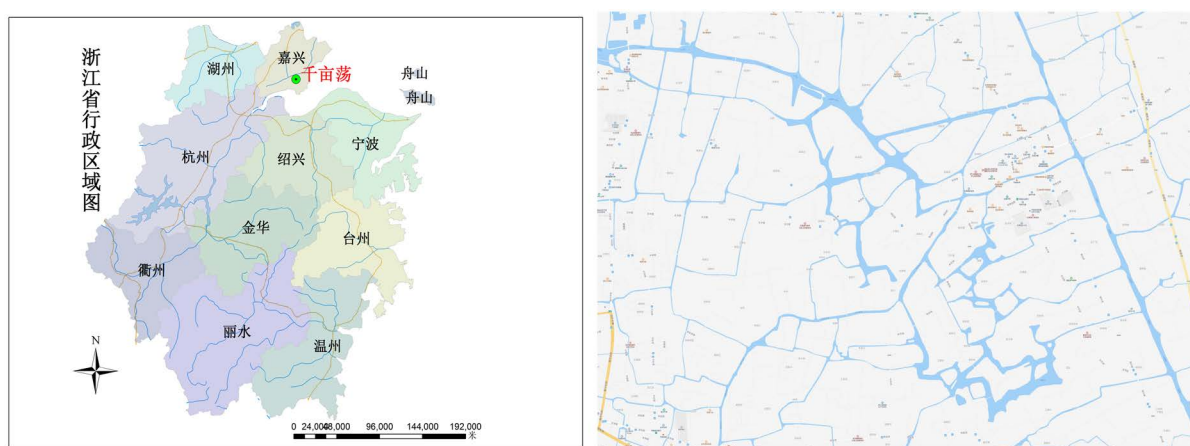


Figure 1. Location of Qianmu Dang reservoir

图 1. 千亩荡水库地理位置

2.2. 数据及处理

使用 GF1/WFV 和谷歌 DigitalGlobe/QuickBird 数据进行高分辨率遥感影像的数据处理和反演研究。前者分辨率为 16 米, 有 4 个光谱波段, 后者分辨率为 1.03 米, 有 R、G、B3 个光谱波段。其中 2 景 GF1/WFV 数据的影像日期为 2016 年 9 月 3 日和 2017 年 2 月 10 日, 2 景谷歌影像的影像日期为 2015 年 8 月 2 日和 2016 年 2 月 7 日, 分别代表典型夏季和冬季数据进行千亩荡水库的水质参数反演研究。

利用 ENVI5.1 软件对 GF1/WFV 数据进行辐射定标与 FLAASH 大气校正, 辐射定标参数可从中国资源卫星应用中心网站上获取。大气校正参数中, 传感器高度为 645 km, 像元大小为 16 m, 大气模型为中纬度夏季, 气溶胶模型为农村型, 并根据头文件查找影像获取时间等参数。以经过几何精纠正的 TM 图像为基准, 利用 ERDAS 9.2 软件的 Geo-referencing 模块进行几何精纠正, 纠正后的误差控制在 1 个像元范围以内。

谷歌历史影像从 91 卫图助手上下载得到, 影像级别为 17 级, 影像来源是美国 DigitalGlobe 公司的 QuickBird 数据。由于影像原始 DN 值与大气层顶太阳辐亮度具有线性关系, 且有研究直接使用影像 DN 值进行模型反演[3], 因此本文直接使用谷歌影像的灰度值进行模型反演。

千亩荡水库面积较小, 直接利用光谱信息进行水体提取较为困难, 因此基于高分影像底图采用数字化的方法进行水体提取。

2.3. 反演模型

选择 7 种平原水库典型水质参数进行研究,包括叶绿素 a (Chlorophyll a, Chla)、悬浮物(Total suspended sediment, TSS)、水体透明度(SD)、总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorus, TP)、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)。已有较多基于 HJ1/CCD 和 Landsat/ETM 等多光谱传感器数据的水质参数反演模型研究[4]-[9] (表 1), 由于 GF1/WFV 和 DigitalGlobe/Quickbird 传感器的波段设置与之类似, 因此本文直接将这些水质参数模型应用于本文的影像数据。Chla 反演需要 B4 波段, 使用 GF1/WFV 数据进行反演, 其余的水质参数均使用分辨率更高的 QuickBird 数据进行反演。

Table 1. Inversion modelss of typical water quality parameters

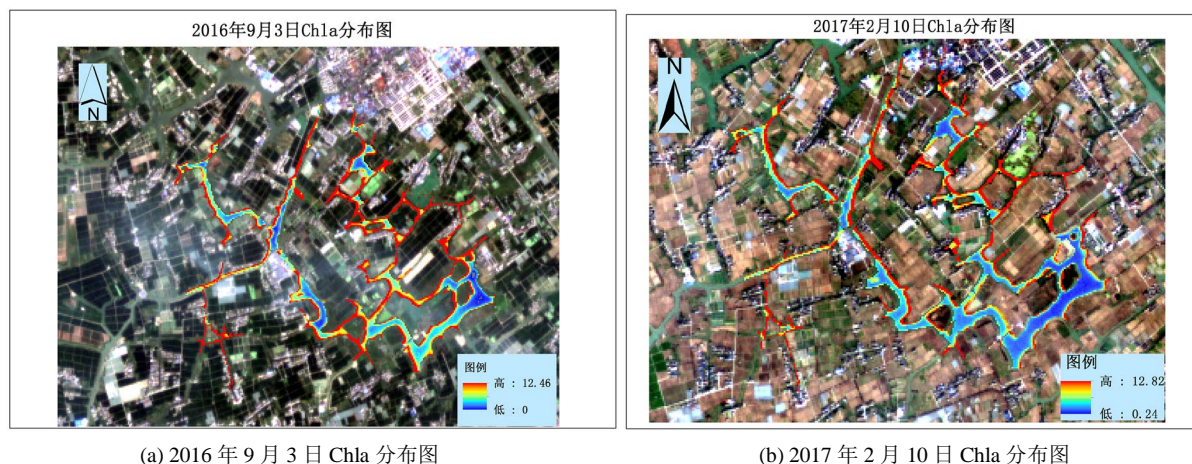
表 1. 典型水质参数的反演模型

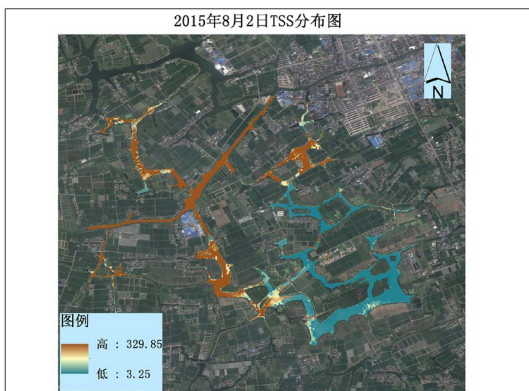
水质参数	模型	对应传感器
Chla [4]	$Chla = 0.456 + 1.8068 \times (B4/B3)$	HJ1/CCD
TSS [5]	$TSM = 119.62 \times (B3/B2)^{6.0823}$	GF-1/WFV
SD [6]	$SD = a \times e^{(TM1/TM3)}$	Landsat/TM
TN [7]	$TN = -317.494 \times ETM1 + 34.584$	Landsat/ETM
TP [8]	$TP = -21.45 \times (TM3/TM2) - 14.42 \times (TM1/TM3) + 42.99 \times TM1 + 27.1$	Landsat/TM
NH ₃ -N [7]	$NH_3-N = -277.191 \times ETM2 + 37.109$	Landsat/ETM
DO [9]	$DO = 0.319 \times (B1 + B3)/B2/B1 - 3.878$	Landsat/TM

由于缺少同步实测光谱对高分影像的大气校正结果进行验证, 根据千亩荡水库地面监测的水质参数浓度范围的经验值, 对各光谱波段组合计算出的水质参数浓度进行了部分拉伸处理, 使其结果与地面实测结果具有可比性。

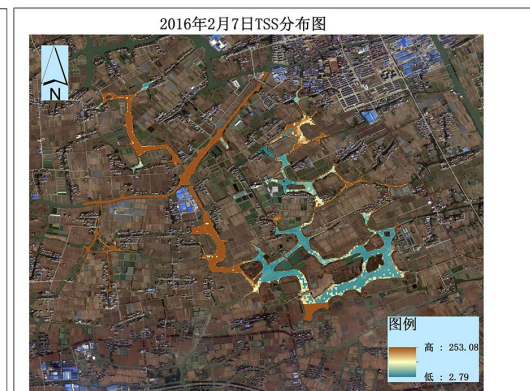
3. 千亩荡高分水质遥感监测应用

基于高分遥感影像估算的夏季和冬季各水质参数的分布图如图 2 所示, 其中图 2(a)和图 2(b)是由 GF1/WFV 数据反演出的 Chla 分布结果, 图 2(c)~(n)是由 DigitalGlobe/QuickBird 反演出的其它 6 种水质参数的分布结果。





(c) 2015年8月2日TSS分布图



(d) 2016年2月7日TSS分布图



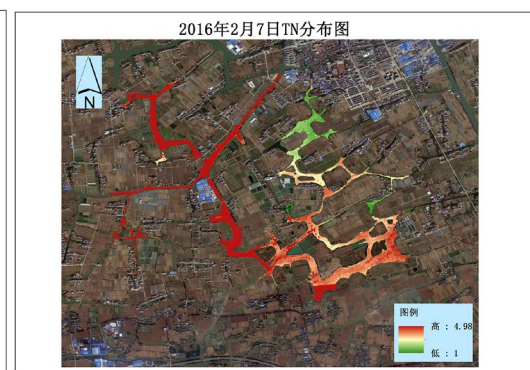
(e) 2015年8月2日SD分布图



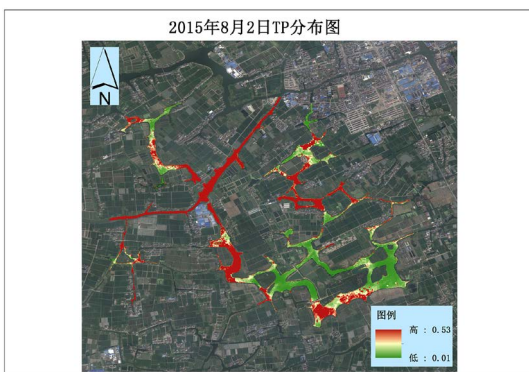
(f) 2016年2月7日SD分布图



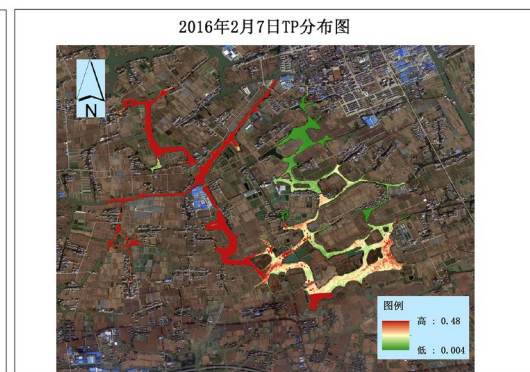
(g) 2015年8月2日TN分布图



(h) 2016年2月7日TN分布图



(i) 2015年8月2日TP分布图



(j) 2016年2月7日TP分布图

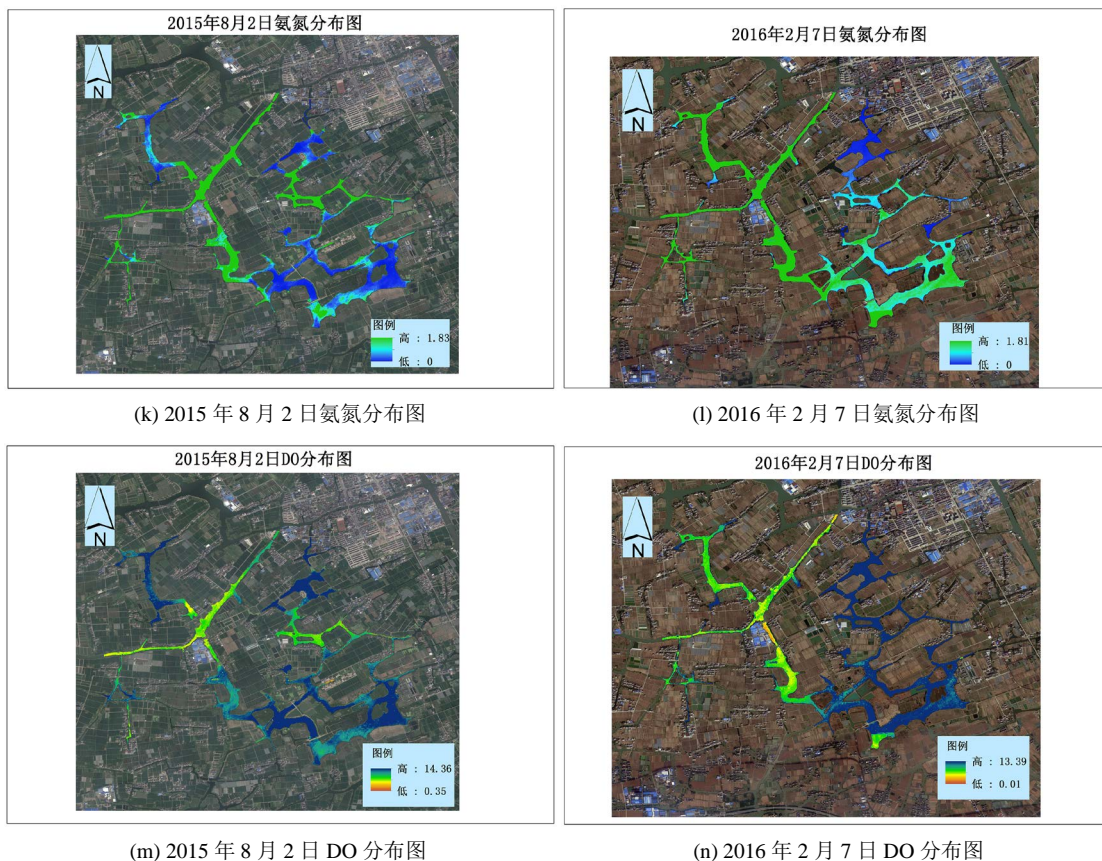


Figure 2. Distribution of water quality parameters in Qianmudang reservoir in winter and summer
图 2. 千亩荡水质参数冬夏季分布图

由图 2 看出, 使用 WFV 数据 B4/B3 波段组合反演的 Ch1a 结果受到河流岸边陆地像元的影响较大, 冬夏季 Ch1a 范围相当, 但夏季部分河段的 Ch1a 较冬季数值显著升高。TSS 高值主要集中在通往北边大横港和西边百步亭港的河道上, 而东南主体库区的水质则较为清澈, 而水体透明度(SD)则呈现出相反的分佈趋势。反映水体富营养化的 TN 和 TP 呈现出相同的变化规律, 靠近自来水厂取水口的“口形”主体水库水质较好, 而通往外港的河道中 N、P 浓度则较高, 且夏季的 N、P 浓度显著高于冬季。冬季整个区域氨氮浓度均较高, 而夏季部分区域氨氮值逐渐降低。除了通往外港的西北区河道外, 全区溶解氧值均较高, 水质较好, 而夏冬两季水质较差区域的 DO 分布(溶解氧低值区)则有所不同。

资料表明, 千亩荡北部的大横港是千亩荡水库的主要补给水源, 该区工矿企业相对较少, 生态环境较好, 水系发达, 湖荡众多, 是海盐应急备用水源引水的首选。而本文的水质空间分布图表明, 通往外港河道的水质明显低于主体水库, 且西北部河道水质尤其较差。千亩荡位于城镇交汇地带, 其水源与外围 9 条河道相通, 属于典型的“过境河”, 水体较容易受到上游来水和流经河道的污染影响。作为海盐县的饮用水源地, 千亩荡目前已产生了藻类水华频发的现象, 其水质情况仍不容乐观。因此, 研究与分析千亩荡水质分布的变化规律, 确定主要污染区域并进行针对性治理, 对水库水源地的保护有重要意义。

针对图 2 中水质参数的遥感估算结果, 有两点说明: 1) 由于缺乏实测光谱进行大气校正结果比对, 本文反演得出的水质参数浓度范围缺少数值上的精确可比性。虽然计算出的水质参数浓度量值缺乏实测数据的验证, 但本研究首次绘制了千亩荡平原水库夏冬季各水质参数的空间分布变化图, 有效地补充了地面监测的不足, 具有一定的参考价值。2) 使用的免费高分影像数据仍存在应用上的不足, GF1/WFV

数据虽具有 16 米的高空间分辨率和 4 个波段的有效信息, 但对于面积只有 4.83 平方公里的千亩荡水库仍显得分辨率太低, 较低的空间分辨率使得岸边陆地像元对反演结果影响较大, Chla 反演结果存在偏差。DigitalGlobe/QuickBird 数据具有极高的空间分辨率, 但获取的真彩色谷歌影像缺少有效的光谱波段信息, 导致反演结果不准确。因此, 针对小尺度的平原水库水质遥感估算, 仍需开发和寻找具有较高空间分辨率和有效多光谱信息的传感器。

4. 平原水库高分水质遥感的难点

基于千亩荡水库的高分水质遥感应用案例, 本文总结分析了高分水质遥感在小尺度平原水库水质监测应用中面临的主要技术难点和未来研究趋势, 以期后续开展相关研究提供借鉴。

4.1. 高分影像的大气校正

目前针对水质遥感的大气校正研究对象多集于水体面积较大的海洋和湖泊, 此类水体水质光学模型比较成熟, 而内陆河流或水库由于面积较小, 水质情况复杂, 水质光学模型不成熟, 针对性的高分影像大气校正研究还较少。一方面, 高分影像一般光谱波段较少, 且缺少短波红外数据, 使得精确的地表反射率确定非常困难; 另一方面, 平原水库尺度较小, 高分影像中低反射率的水体像元容易受到高反射率的沿岸地物影响, 即邻近像元效应显著, 使得精确大气校正困难。研究表明, 传感器空间分辨率越高, 大气校正中的邻近像元效应越明显[10]。

目前针对高分遥感影像的大气校正已开展了较多的研究, 如针对 GF-1 卫星数据的深蓝算法[11]、地表反射率数据支持的气溶胶算法[12]或基于辐射传输模型的大气校正方法[13]等, 但这些研究均主要关注气溶胶影响。高空间分辨率遥感影像邻近像元效应影响明显, 因此, 未来将有更多的研究关注细小水体水质遥感的大气校正中的邻近像元效应及其影响程度。

4.2. 细小水体信息提取

传统的水体信息提取方法主要依据水体的光谱特性, 基于影像像元的单个波段或多个波段组合运算进行, 例如单波段法、多波段法(谱间关系法、归一化水体指数 NDWI、改进的归一化差异水体指数 MNDWI 等)。由于高分影像光谱信息较少, 常规的分类方法的信息提取结果经常会产生严重的“椒盐效应”和图斑破碎[14], 不能高精度地识别地物信息, 因此很难满足高分辨率遥感影像中水体信息的提取要求。

为充分利用其高分辨率的特点, 突破基于像元的水体信息提取方法的局限性, 有研究将图像分割算法引入遥感影像分类当中, 提出了面向对象分类方法的水体信息提取技术。针对中高空分辨率的遥感影像如 ETM+ [15]和 QuickBird [16]等, 较多学者利用面向对象方法进行了水体信息提取实验, 认为面向对象的方法提取精度明显高于传统方法。后续研究将进一步针对其它类型的高空间分辨率传感器数据, 分析适宜的水体分割尺度、构建水体信息的特征规则集, 从而有效提取中小尺度研究区的水体空间分布信息。

4.3. 水质参数的遥感反演

根据水质参数是否可以通过遥感手段进行判别, 可以将其分为直接水质参数(也叫水色参数)和间接水质参数[17]。水色参数存在显著光谱特征, 包括叶绿素、悬浮物和黄色物质等, 可直接利用遥感影像光谱对其进行定量反演, 反演研究较为成熟。间接水质参数没有明显的水体光谱响应特征, 包括氮、磷、无机盐等, 目前常用的反演方法包括直接建立光谱与同期水质参数间的关系模型, 以及寻找其与水色参数间的相关关系, 间接进行反演。未来研究将关注间接水质参数, 深入分析其光谱响应特征, 并建立可行的物理模型。

在水色参数遥感反演模型方面, 目前普遍存在反演模型通用性不足的问题。不同水体光学特性变化复杂, 单一遥感反演算法难以适用于整个水域, 基于某个区域采样数据建立的反演模型也较难推广应用于其它水域。因此, 模型算法需要考虑不同类型水体的光学特性差异, 进行针对性地反演, 才能较好地提高监测模型的通用性。

5. 结论

本文基于 GF-1/WFV 和谷歌 DigitalGlobe/QuickBird 高分影像, 对浙江海盐千亩荡 7 种典型水质参数进行了遥感估算, 并绘制了春夏季分布变化图。结果表明, 千亩荡水库主体库区水质较好, 而通往外港的周围河道水质则相对较差, 以通往北部大横港的河道最为明显, 且夏季库区的富营养化现象较冬季更为明显。基于高分遥感的千亩荡水库不同季节水质参数的空间分布图, 有效地补充了地面监测的不足, 但已有高分数据在应用精度上仍存在不足, 需要寻找其它更适宜的传感器数据。

对平原水库高分水质遥感的技术难点分析表明, 高分影像的大气校正、细小水体信息提取和水质参数的遥感反演是平原水库高分水质遥感面临的主要问题, 未来研究将集中在大气校正的邻近像元效应、面向对象的细小水体提取、间接水质参数的光谱响应和反演模型等几个方面。

基金项目

浙江省水利厅科技项目(RC1814); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2019R423003); 大学生创新创业训练计划项目(S201911481011)。

参考文献

- [1] Odermatt, D., Gitelson, A.A., Brando, V.E. and Schaepman, M. (2012) Review of Constituent Retrieval in Optically Deep and Complex Waters from Satellite Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **118**, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.013>
- [2] Matthews, M.W. (2011) A Current Review of Empirical Procedures of Remote Sensing in Inland and Near-Coastal Transitional Waters. *International Journal of Remote Sensing*, **32**, 6855-6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>
- [3] 张寿选, 段洪涛, 谷孝鸿. 基于水体透明度反演的太湖水生植被遥感信息提取[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 184-190.
- [4] 旷达, 韩秀珍, 刘翔, 等. 基于环境一号卫星的太湖叶绿素 a 浓度提取[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1268-1273.
- [5] 朱利, 李云梅, 赵少华, 等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 113-120.
- [6] 王得玉, 冯学智. 基于 TM 影像的钱塘江入海口水体透明度的时空变化分析[J]. 江西师范大学学报(自然版), 2005, 29(2): 185-188.
- [7] 万风年, 纪晓亮, 朱元励, 等. 应用遥感监测城市水体水质研究[J]. 浙江农业科学, 2013, 1(3): 349-355.
- [8] Wu, C.F., Wu, J.P., Qi, J.G., et al. (2010) Empirical Estimation of Total Phosphorus Concentration in the Mainstream of the Qiantang River in China Using Landsat TM Data. *International Journal of Remote Sensing*, **31**, 2309-2324. <https://doi.org/10.1080/01431160902973873>
- [9] 王冰, 安慧君, 吕昌伟. 基于多源遥感数据的呼伦湖溶解氧反演模型[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 993-998.
- [10] 马晓珊, 郭晓勇, 孟新, 等. 光学遥感对地成像过程中的邻近效应模拟分析[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(2): 250-256.
- [11] 王中挺, 李小英, 李莘莘, 等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 353-360.
- [12] 孙林, 于会泳, 傅俏燕, 等. 地表反射率产品支持的 GF-1/PMS 气溶胶光学厚度反演及大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 216-228.
- [13] 侯旭洲. 高分一号卫星遥感影像大气校正与效果评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

- [14] 周文鑫, 何隆华, 马荣华, 等. 基于面向对象的 TM_LBV 变换水体信息提取[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(6): 775-779.
- [15] 张成才, 李艳桦, 姚亮亮. 面向对象的 ETM+影像分割尺度与水体信息提取[J]. 人民黄河, 2014(7): 54-56.
- [16] 衣燕. 面向对象的昆明滇池子流域高分辨率遥感影像地物信息提取[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [17] 王皓, 赵冬至, 王林, 等. 水质遥感研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 285-288.