

长荡湖叶绿素 a 浓度卫星遥感 反演研究

梁文广¹, 蒋志昊¹, 王金东², 王轶虹¹, 王冬梅¹

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 江苏省骆运水利工程项目管理处, 江苏 宿迁 223800)

摘要:以江苏典型湖泊长荡湖为研究区,结合 20 个站点实测光谱数据和叶绿素 a 浓度数据,建立了长荡湖叶绿素 a 浓度卫星遥感反演模型,并对长荡湖叶绿素 a 浓度开展监测。结果表明遥感技术能够快速实现长荡湖叶绿素 a 浓度的监测,监测结果能够反映湖泊叶绿素 a 浓度的分布状况,是水环境监测的一种先进的技术手段。

关键词:叶绿素 a 浓度; 遥感反演; 水环境监测; 长荡湖

中图分类号:X87

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)08-0019-04

Research on satellite remote sensing retrieval of chlorophyll-a concentration in Changdang Lake

LIANG Wenguang¹, JIANG Zhihao¹, WANG Jindong²,
WANG Yihong¹, WANG Dongmei¹

(1. Jiangsu Institute of Water Resources Research, Nanjing 210017, China;

2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China)

Abstract: Taking Changdang Lake, a typical lake in Jiangsu Province, as a study area, combining the measured spectral data and chlorophyll-a concentration data from 20 stations, a satellite remote sensing retrieval model of chlorophyll-a concentration in Changdang Lake was established, and the chlorophyll-a concentration was monitored. The results showed that the remote sensing technology could quickly realize the monitoring of chlorophyll-a concentration in Changdang Lake, and the monitoring results could reflect the distribution of chlorophyll-a concentration in the lake, which was an advanced technical means for water environment monitoring.

Key words: Chlorophyll-a concentration; remote sensing retrieval; water environment monitoring; Changdang Lake

水中叶绿素 a 浓度是浮游生物分布的指标,是衡量水体初级生产力(水生植物的生物量)和富营养化作用的最基本的指标^[1]。因此监测叶绿素 a 浓度是水环境遥感中的主要的监测项目之一^[2]。关于水体叶绿素 a 浓度的遥感监测研究,朱冰川等^[3]利用静止轨道海洋水色遥感器(GOCI)遥感数据构建了太湖叶绿素 a 反演的三波段模型,可以用

于 GOCI 遥感数据反演太湖叶绿素 a 浓度;包颖等^[4]以太湖为研究区,针对不同水体类型分别建立基于 GOCI 影像的叶绿素 a 反演模型,实现不同类型水体的叶绿素 a 浓度反演。黄启会等^[5]结合 HJ-1A 卫星数据与 2012 年 4 月实测的光谱数据,建立百花湖叶绿素 a 的遥感反演模型,结果表明第 1 波段和第 2 波段比值(B2/B1)与叶绿素 a 浓度的相

收稿日期:2021-01-03

基金项目:江苏省科技厅创新能力建设计划—省属公益类科研院所自主科研经费项目(BM2018028),江苏水利科技项目(2019049)

作者简介:梁文广(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事水利遥感研究工作。E-mail:82335673@qq.com

关性最好,利用波段比值构建的回归模型具有不错的反演效果。王珊珊等^[6]根据太湖 2007 年 11 月、2009 年 4 月和 2011 年 8 月实测水质参数以及同步光谱数据,结合水色遥感传感器 MODIS、MERIS、GOCI 及我国自主发射的 HJ-1 号卫星 CCD 传感器波段参数,基于差值模型、比值模型、三波段模型及 APPEL 模型,分别建立太湖水体叶绿素 a 浓度反演模型,并分析模型的适宜性。江辉^[7]通过分析水体叶绿素 a 浓度与高光谱反射特征的相互关系,采用一阶微分值和峰值比值法分别建立了叶绿素 a 的高光谱定量反演模型,在此基础上与同步 MODIS 数据敏感波段建立卫星定量反演模型。

考虑到江苏省水质监测以常规的人工取样—实验室分析为主,为了探索利用遥感数据对水体叶绿素 a 浓度进行监测,本研究以江苏省典型湖泊长荡湖为研究区,利用实测水体光谱数据与水质数据构建叶绿素 a 浓度遥感反演模型,采用同期哨兵二号遥感数据开展长荡湖叶绿素 a 浓度反演研究。为我省水质监测提供新的技术方法。

1 研究区

长荡湖又名洮湖,位于江苏省南部、太湖流域上游,跨金坛、溧阳两地,京杭运河以南,溧湖以西,东经 119°30′~119°40′,北纬 31°30′~31°40′,系古太湖分化湖之一,属太湖水系。长荡湖是典型的浅水草型湖泊,湖底平均高程为 2.36 m(吴淞高程基准),长荡湖保护范围面积 120.74 km²,水域面积 85 km²,是江苏十大淡水湖之一。长荡湖为太湖流域湖区重要的调蓄性湖泊之一,具有行洪泄洪、饮用水源、旅游观光、渔业生产等功能。属于北亚热带海洋性气候,常年气候温和,雨量充沛,四季分明。春末夏初时多有梅雨发生,夏季炎热多雨,最高气温达 36℃ 以上,冬季空气湿润,气候阴冷。

2 数 据

遥感数据选用 2020 年 5 月 3 日的欧洲哨兵二号(Sentinel 2)多光谱成像仪(MSI)卫星。多光谱成像仪覆盖 13 个光谱波段(表 1),幅宽达 290 km。地面分辨率分别为 10 m、20 m 和 60 m。哨兵二号具有 S2A 和 S2B 2 颗卫星,1 颗卫星的重访周期为 10 d,2 颗互补,重访周期为 5 d。本项目采用的哨兵二号(Sentinel 2)多光谱数据为欧空局 ESA 数据分发系统提供 L2A 级地表反射率产品数据,该数据经过大气校正后的地表反射率数据。

表 1 Sentinel 2 图像各个波段中心波长和空间分辨率

波段名称	中心波长/ μm	空间分辨率/m
波段 1(B1)	0.443	60
波段 2(B2)	0.49	10
波段 3(B3)	0.56	10
波段 4(B4)	0.665	10
波段 5(B5)	0.705	20
波段 6(B6)	0.74	20
波段 7(B7)	0.783	20
波段 8(B8)	0.842	10
波段 8A(B8A)	0.865	20
波段 9(B9)	0.945	60
波段 10(B10)	1.375	60
波段 11(B11)	1.61	20
波段 12(B12)	2.19	20

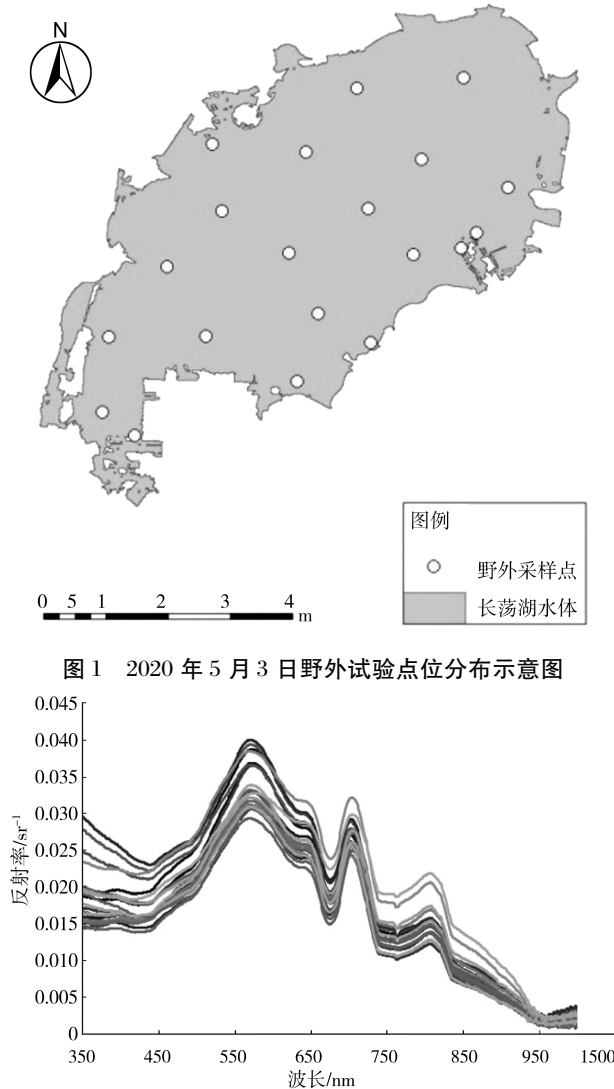
项目组于 2020 年 5 月 3 日在长荡湖湖面开展星—地同步遥感试验,在长荡湖全湖布设站点 20 个(图 1),获取每个样点水面光谱数据、水样、地理位置坐标和气象数据等。其中光谱数据采用美国 ASD 光谱仪测量 350~2 500 nm 水面光谱反射率曲线,水样在实验室基于热乙醇萃取的分光光度法测试得到每个水样叶绿素 a 浓度。其中获取的 20 个站点的光谱数据和实测叶绿素 a 浓度数据作为遥感建模的主要数据。

3 遥感建模

根据研究区域的水体光谱特征,分析不同水质参数的特征波段,再将不同波段的光谱反射率数据与地面实测水质参数数据进行数学分析,选择最优波段。在此基础上,构建基于 Sentinel-2 影像的水质参数反演模型。

(1) 多光谱波段等效

实测的光谱数据是间隔 1 nm 的连续光谱曲线,而 Sentinel-2 卫星是离散的多光谱波段,各波段都有一定的波长响应宽度。为了将实测光谱反射率 R_{rs} 应用到 Sentinel-2 影像中,需要将实测光谱反射率 R_{rs} 通过计算等效模拟到 Sentinel-2 卫星多光谱



小, 所以往往选择波长 675 nm 处的反射率谷值。由于波长 675 nm 反射率的吸收谷会引起在 700 nm 处存在反射率峰值, 因此往往利用 675 nm 处和 700 nm 处的反射率比值反演叶绿素 a 浓度, 对应的 Sentinel-2 影像的波段 4 (B4, 中心波长 665 nm) 和波段 5 (B5, 中心波长 705 nm)。

(3) 长荡湖叶绿素 a 浓度遥感反演模型构建

为了进一步用实测数据分析叶绿素 a 浓度模型构建的特征波段, 对 Sentinel-2 数据 B3、B4、B5、B8 这 4 个波段及波段间组合与叶绿素 a 浓度实测值之间进行相关性分析, 以寻求反演长荡湖叶绿素 a 浓度的特征波段, 相关系数如下表 2 所示。

这 4 个波段及波段间组合与叶绿素 a 浓度的相关分析可知, B4/B5 和 B5/B4 与叶绿素 a 浓度相关系数最高, 分别为 -0.347 和 0.358。

结合长荡湖试验实测的水样叶绿素 a 浓度与经过波段等效模拟到 Sentinel-2 卫星多光谱波段数据共有 20 个对应数据构建叶绿素 a 浓度反演模型。结果显示, 采用 B4/B5 波段建模精度更高, 因此采用 B4/B5 的比值模型反演长荡湖叶绿素 a 浓度。构建的叶绿素 a 浓度参数 (Chl-a) 模型如下:

为了评价反演精度, 通过模型计算得出的数据结果与实测的 20 个采样点叶绿素 a 浓度数据进行比对, 分别采用平均相对误差 (MRE, 式中用 E_{MRE} 表示) 和均方根误差 (RMSE, 式中用 E_{RMSE} 表示) 用于模型评价。其计算公式为

$$E_{\text{MRE}} = \left(\sum_{i=1}^n (|T_{\text{Pre},i} - T_{\text{Mea},i}| / T_{\text{Mea},i}) / n \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{\text{Pre},i} - T_{\text{Mea},i})^2 / n} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{Pre},i}$ 为反演得到的叶绿素 a 浓度; $T_{\text{Mea},i}$ 为实测的叶绿素 a 浓度; n 为采样点个数。

结果如图 3 所示。

可以看到, 叶绿素 a 浓度的平均相对误差 MRE 为 25.56%、均方根误差 RMSE 为 4.91 $\mu\text{g/L}$ 。对于遥感监测, 该误差是可以接受的。由图 3 散点图来看, 部分叶绿素 a 浓度的反演值和实测值相差较大, 可能是由于实测的叶绿素 a 浓度存在一定的误差而导致的。

4 应 用

利用长荡湖 2020 年 5 月 3 日的哨兵二号多光

表 2 Sentinel-2 波段及波段组合与叶绿素 a 浓度的相关分析

波段	B3	B4	B5	B8	B3/B8	B4/B8	B8/B3	B8/B4	1/B3	B4/B5	B5/B4
与叶绿素 a 浓度的 相关系数	-0.090	-0.230	-0.061	-0.155	0.073	-0.015	-0.095	0.035	0.090	-0.347	0.358

表 3 长荡湖叶绿素 a 浓度反演模型

水质参数	模型
Chl-a	$\rho(\text{Chl-a}) = -92.606 * (\text{B4/B5}) + 88.4785$

注:模型的输入 B4、B5 为大气校正后的遥感反射率图像(单位:sr⁻¹)。

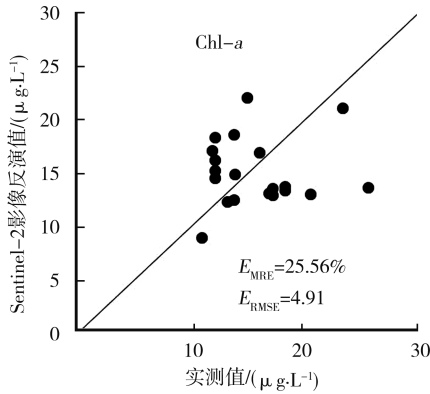


图 3 模型的精度评价

谱影像数据,代入构建的叶绿素 a 浓度反演模型得出反演结果如图 4 所示。对卫星数据反演结果经过统计分析,长荡湖叶绿素 a 浓度主要位于11.03 ~ 21.21 μg/L 之间,平均值为 15.00 μg/L。从分布来看,长荡湖叶绿素 a 浓度西部高、东部低。

5 结 语

本试验利用实测叶绿素 a 浓度和光谱数据,建立了长荡湖叶绿素 a 浓度反演模型;结合哨兵二号多光谱遥感数据,实现了长荡湖叶绿素 a 浓度卫星遥感的反演。试验结果表明:遥感方法能够快速实现长荡湖叶绿素 a 浓度的监测,监测结果能够反映湖泊叶绿素 a 浓度的分布状况,是水环境监测的一种先进的技术手段,值得进一步推广应用。后续的研究主要围绕叶绿素 a 浓度遥感监测精度的提高和全省河湖的应用。

参考文献:

[1] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
[2] 王桥, 吴传庆. 水环境遥感应用原理与案例[M]. 北京:科学出版社, 2013.

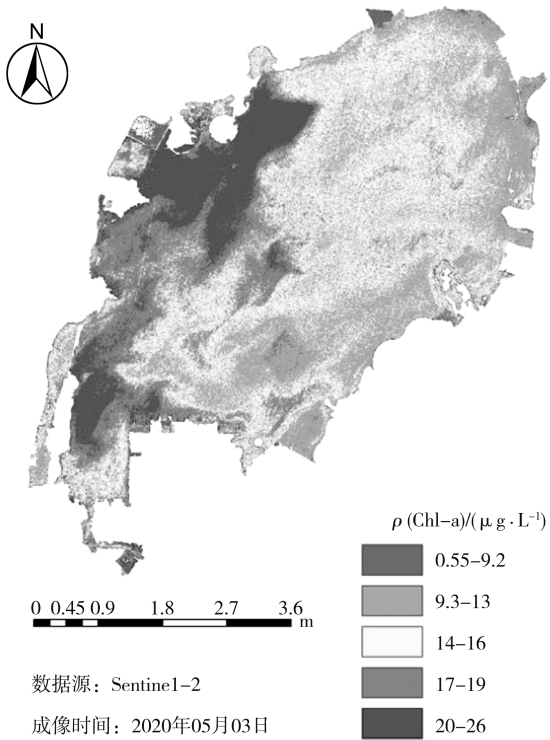


图 4 2020 年 5 月 3 日长荡湖叶绿素 a 浓度分布图

[3] 朱冰川, 尤凯, 石浚哲, 等. 基于 GOCI 数据的太湖叶绿素 a 浓度反演和蓝藻水华遥感监测[J]. 环境污染与防治, 2020(8):1021-1025.
[4] 包颖, 田庆久, 陈旻, 等. 基于 GOCI 影像分类的太湖水体叶绿素 a 浓度日变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016(8):2562-2567.
[5] 黄启会, 贺中华, 梁虹, 等. 基于 HJ-1A CCD 数据的湖泊叶绿素 a 浓度反演——以贵阳市百花湖为例[J]. 人民长江, 2019, 50(3):66-72.
[6] 王珊珊, 李云梅, 王永波, 等. 太湖水体叶绿素 a 浓度反演模型适宜性分析[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1):150-162.
[7] 江辉. 鄱阳湖叶绿素 a 浓度遥感定量模型研究[J]. 测绘科学, 2012, 180(6), 49-52.