DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250413

基于Sentinel-2影像的巢湖叶绿素a浓度遥感动态监测

陈鑫雨[1],黄诗峰[1,2],马荣华[3]

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100038;2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038;
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210000)

摘要:叶绿素a是衡量湖泊水质状况的重要指标,但传统点位水质监测存在局限性,遥感技术能够提供大范围、动态的水质监测。为此,利用多光谱遥感技术,针对Sentinel-2卫星谱段设置的特点,依托地面实测数据,构建三波段与四波段叶绿素a浓度反演模型,并采用留一交叉验证法对模型精度进行验证。基于最优模型开展2019~2023年巢湖叶绿素a浓度监测应用研究,结合GIS空间分析与统计方法系统解析巢湖叶绿素a浓度时空变化特征。结果表明,基于$b_4/b_5/b_7$的三波段模型反演精度最优,基于Sentinel-2A/2B三波段模型的决定系数(R^2)分别为0.763、0.766,平均相对误差(M_{MRE})分别为16.87%、16.66%,均方根误差(R_{RMSE})分别为4.26、4.22 μg/L。时空分析表明,近5年巢湖叶绿素a浓度呈现西高东低的显著空间异质性和夏秋高、春冬低的季节性波动,年际呈递减趋势,反演结果与巢湖水质监测情况相一致。所建立改进的叶绿素a浓度反演模型精度良好、适用性强,所提研究方法可行有效,可为巢湖等内陆Ⅱ类水体的水质遥感监测评价管理提供有力的技术支撑。

关键词:巢湖;Sentinel-2;叶绿素a;遥感反演;时空变化

中图分类号:X87 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)01-0062-05

Remote Sensing-Based Dynamic Monitoring of Chlorophyll-a Concentration in Chaohu Lake Using Sentinel-2 Imagery

CHEN Xin-yu[1], HUANG Shi-feng[1,2], MA Rong-hua[3]

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;
3. Nanjing Institute of Geography & Limnology Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210000, China)

Abstract: Chlorophyll-a is a key indicator for assessing lake water quality, but traditional point-based water quality monitoring has limitations. Remote sensing technology can provide large-scale and dynamic water quality monitoring. Therefore, utilizing multispectral remote sensing technology and considering the spectral band characteristics of the Sentinel-2 satellite, three-band and four-band chlorophyll-a concentration inversion models were constructed based on ground-measured data. The leave-one-out cross-validation method was adopted to validate the model accuracy. The optimal model was applied to monitor the chlorophyll-a concentration in Chaohu Lake from 2019 to 2023. GIS spatial analysis and statistical methods were combined to systematically analyze the spatiotemporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Chaohu Lake. The results showed that the three-band model based on $b_4/b_5/b_7$ achieved the highest inversion accuracy. For the Sentinel-2A and Sentinel-2B three-band models, the determination coefficients (R^2) were 0.763 and 0.766, the mean relative errors (M_{MRE}) were 16.87% and 16.66%, and the root mean square errors (R_{RMSE}) were 4.26 μg/L and 4.22 μg/L, respectively. Spatiotemporal analysis revealed that over the past five years, the chlorophyll-a concentration in Chaohu Lake exhibited significant spatial heterogeneity characterized by higher levels in the west and lower levels in the east, and seasonal fluctuations characterized by higher concentrations in summer and autumn and lower concentrations in spring and winter. An overall decreasing interannual trend was observed, and the inversion results were

收稿日期:2025-03-06,**修回日期**:2025-04-02,**接受日期**:2025-04-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42471353)

作者简介:陈鑫雨(1997-),女,博士研究生,研究方向为水灾害遥感应用,E-mail:1953024763@qq.com

通讯作者:黄诗峰(1972-),男,博士、教授级高级工程师、博导,研究方向为遥感和GIS应用,E-mail:huangsf@iwhr.com

中国知网 https://www.cnki.net

consistent with the water quality monitoring data for Chaohu Lake. The improved chlorophyll-a concentration inversion model established in this study demonstrates good accuracy and strong applicability. The proposed research method is feasible and effective, providing robust technical support for the monitoring, evaluation, and management of inland Type II water bodies such as Chaohu Lake using remote sensing.

Key words: Chaohu Lake; Sentinel-2; chlorophyll-a; remote sensing inversion; spatiotemporal variation

1　引言

近几十年来，在人为和气候变化的共同影响下水域水质问题日益严重[1]。叶绿素 a(Chl-a)是一项重要的水质指标[2]，然而人工采样和自动水质测站等常规点位监测，不足以代表全湖的水质状况。遥感技术为全面宏观、实时监测水质开辟了新的途径[3]。因此，建立 Chl-a 遥感反演模型，并进行长时序的面状水质监测尤为重要。大量 Chl-a 浓度的光学遥感反演模型是通过建立遥感数据和地面实测 Chl-a 浓度之间的统计关系，进而定量反演水体 Chl-a 浓度。DALL' OLMO G 等[4]最早提出反演 Chl-a 的三波段模型，此半经验模型基于水色三要素(Chl-a、非藻类颗粒物和有色可溶有机物(CDOM))之间存在的光谱差异，通过波段间的运算减小了非藻类颗粒物和 CDOM 对 Chl-a 的干扰，具有一定的物理意义；BI S 等[5]利用 Sentinel-3 卫星的 OLCI 数据，探索适用于反演洱海 Chl-a 浓度的估算模型，发现三波段模型的反演精度较高；LE C F 等[6]在三波段模型的基础上进行了改进，引入了第四个近红外波段，减少了悬浮物颗粒和纯水对 Chl-a 的影响，建立了适用于更为浑浊水体的四波段模型。为此，本文基于 Sentinel-2 卫星的高分辨率多光谱与短重访周期优势，联合遥感与实测数据构建三/四波段叶绿素 a 遥感反演模型，筛选最优模型解析 2019～2023 年巢湖 Chl-a 浓度时空分布特征，揭示近 5 年巢湖 Chl-a 浓度演变规律。

2　研究数据与方法

2.1　遥感数据

收集 2019～2023 年巢湖地区晴朗无云 Sentinel-2 遥感数据的 Level-2A 级大气表观反射率产品，共 99 景，其中 2019 年 20 景、2020 年 15 景、2021 年 21 景、2022 年 23 景、2023 年 20 景。Sentinel-2 的 A、B 两颗卫星的重返周期为 5 d，Sentinel-2 MSI 多光谱成像仪在 443～2 190 nm 范围内有 13 个波段，该遥感数据可通过欧空局官网(https://dataspace.copernicus.eu/)免费下载。Sentinel-2 数据需进行裁剪、重采样、镶嵌和水体提取等预处理步骤。

2.2　地面数据

本文地面数据采用 2020 年 4 月 28 日在巢湖野外实测的数据，主要包括巢湖水体 12 个采样点的波谱反射率及 Chl-a 浓度数据，采样点分布见图 1。采用 ASD Field Spec 地物波谱仪(350～1 075 nm/1nm)实施水面以上反射光谱测量。叶绿素 a 检测通过藻细胞破碎、热乙醇萃取后，依据《水质 叶绿素的测定 分光光度法》[7]采用分光光度法完成。其中，每个采样点的波谱反射率数据为多次光谱测量结果的均值，12 个样本的 Chl-a 浓度的均值、标准差分别为 23.56 μg/L、7.09。

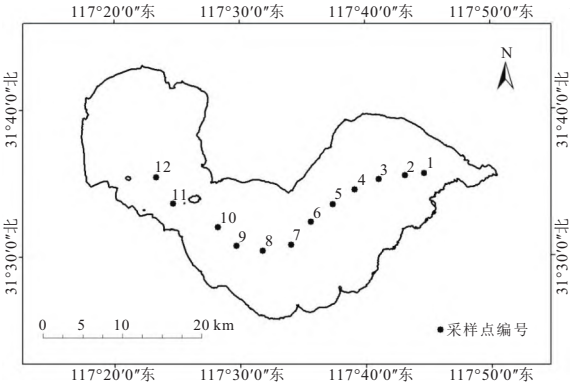

图 1　巢湖采样点分布图

Fig. 1　Distribution diagram of sampling points in Chaohu Lake

2.3　研究方法

2.3.1　Chl-a 浓度反演模型

Chl-a 浓度的反演是通过分析其在不同波段遥感反射率的变化特点，进而选择特征波段与 Chl-a 浓度建立模型。利用 Sentinel-2 光谱响应函数将 12 个实测点的高光谱反射率转换为 Sentinel-2 等效遥感反射率。基于模型对波段的选取要求，选用等效遥感数据特征波段的组合，建立与同步实测 Chl-a 浓度的线性拟合。三波段、四波段模型分别为：

$$Y \propto [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3) \quad (1)$$

$$Y \propto [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \cdot [R_{rs}^{-1}(\lambda_4) - R_{rs}^{-1}(\lambda_3)] \quad (2)$$

式中，Y 为 Chl-a 浓度的反演值；R_{rs} 为遥感反射

中国知网　https://www.cnki.net

率;λ_1～λ_4 为波段。

恰当的选取 λ_1、λ_2、λ_3、λ_4 波段,可有效地减小水色三要素中悬浮颗粒物、CDOM 对反演 Chl-a 浓度准确性的影响。模型中 λ_1～λ_4 波段的选取原则为:①λ_1 要求选择位于 660～690 nm 之间的 Chl-a 强吸收波段;②λ_2 要求位于 λ_1 附近,且 Chl-a 吸收较小的波段,同时满足悬浮颗粒物、CDOM 的吸收系数相近;③λ_3 要求选取总吸收系数接近纯水吸收系数、水体中各组分的吸收系数接近于零的波段;④λ_4 要求位于 730 nm 后,可去除高浑浊水体中悬浮颗粒物和 CDOM 的干扰。

2.3.2 评价指标

采用平均相对误差(M_{MRE})和均方根误差(R_{RMSE})计算模型精度,统计参数的表达式为:

$$M_{\mathrm{MRE}}=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|Y-X|}{X}\right)\times 100\% \tag{3}$$

$$R_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y-X)^2} \tag{4}$$

式中,X 为 Chl-a 浓度的实测值。

评价 Chl-a 浓度反演模型精度的方法采用留一交叉验证法,留一交叉验证法适用于样本点较少的情况,能够弱化可能存在的异常样本点对模型精度评价的影响,该方法实现的过程是选取 n 次不同的 $n-1$ 个样本点进行模型的构建,剩下的 1 个样本点用于模型的验证,计算 n 次统计参数的平均值作为误差来评价模型精度[8]。

3 结果与分析

3.1 Chl-a 浓度反演模型构建结果

本文基于 Chl-a 浓度反演模型对波段的选取要求,选取不同的波段组合($b_4/b_5/b_6$、$b_4/b_5/b_7$、$b_4/b_5/b_6/b_7$、$b_4/b_5/b_6/b_{8a}$),构建了三波段、四波段 Chl-a 浓度反演模型,其波段组合表达式和 R^2 见表 1。

表 1 反演模型表达式及决定系数

Tab. 1 Expression and determination coefficient of inversion model

模型分类	波段组合	R^2(S2A)	R^2(S2B)
三波段模型	$[1/R_{\mathrm{rs}}(b_4)-1/R_{\mathrm{rs}}(b_5)]R_{\mathrm{rs}}(b_6)$	0.761	0.765
	$[1/R_{\mathrm{rs}}(b_4)-1/R_{\mathrm{rs}}(b_5)]R_{\mathrm{rs}}(b_7)$	0.763	0.766
四波段模型	$\left[\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_4)}-\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_5)}\right]\left[\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_7)}-\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_6)}\right]$	0.212	0.371
	$\left[\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_4)}-\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_5)}\right]\left[\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_{8a})}-\frac{1}{R_{\mathrm{rs}}(b_6)}\right]$	0.449	0.422

由表 1 可知,三波段模型的 R^2 显著高于四波段模型,其中基于 $b_4/b_5/b_7$ 波段组合的拟合结果最优,模型构建见图 2。因此本文采用 $b_4/b_5/b_7$ 波段组合的三波段模型反演巢湖 Chl-a 浓度,基于 Sentinel-2A($R^2=0.763$)和 Sentinel-2B($R^2=0.766$)的半经验模型分别为:

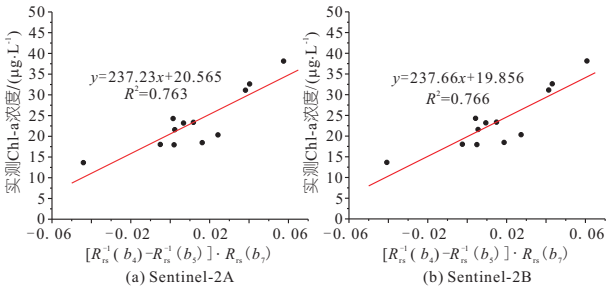

图 2 模型构建示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model construction

$$Y=237.23[(R_{\mathrm{rs}}^{-1}(b_4)-R_{\mathrm{rs}}^{-1}(b_5)]\cdot R_{\mathrm{rs}}(b_7)+20.565 \tag{5}$$

$$Y=237.66[(R_{\mathrm{rs}}^{-1}(b_4)-R_{\mathrm{rs}}^{-1}(b_5)]\cdot R_{\mathrm{rs}}(b_7)+19.856 \tag{6}$$

3.2 Chl-a 浓度反演模型精度评价

采用留一交叉验证法分别对基于 Sentinel-2A、2B 两颗卫星所构建模型的精度进行评价,基于 Sentinel-2A 所构建模型的平均相对误差、均方根误差分别为 16.87%、4.26 μg/L;基于 Sentinel-2B 所构建模型的平均相对误差、均方根误差分别为 16.66%、4.22 μg/L。巢湖 Chl-a 浓度反演值与实测值所绘制的散点在总体上分布于 1∶1 曲线的两侧(图 3),12 个样本点的结果误差在 20%以内的有 75%,最小误差为 0.04%,最大误差为 32.18%。

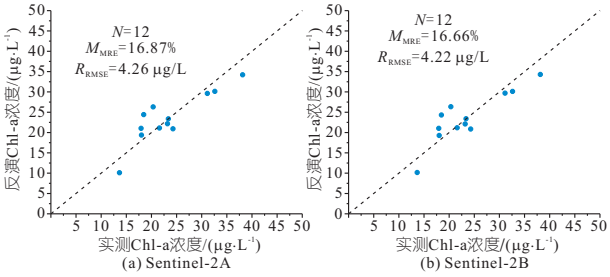

图 3 模型验证示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model validation

3.3 2019~2023 年巢湖 Chl-a 浓度时空变化

3.3.1 Chl-a 浓度的空间特征

为揭示巢湖水体 Chl-a 浓度的空间分布特征,依据湖泊营养化程度,将研究水域划分为西巢湖、中巢湖和东巢湖 3 个特征区域。基于 GIS 平台,通过整合 2019～2023 年期间 Chl-a 浓度反演模型输出的时空序列数据,最终得到了四季巢湖 Chl-a 浓度空间分布格局,见图 4。

中国知网 https://www.cnki.net

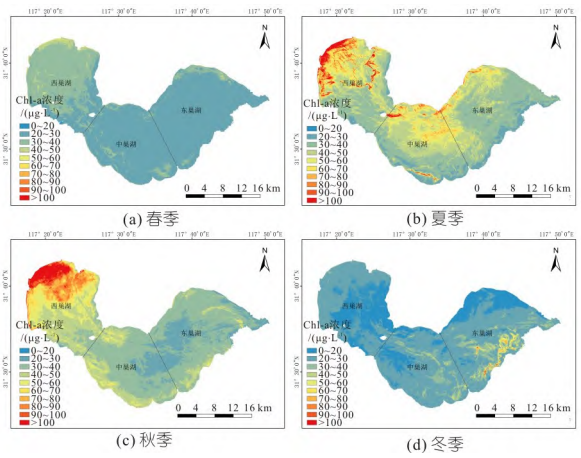

图 4　不同季节的巢湖 Chl-a 浓度空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of Chl-a concentration in Chaohu Lake in different seasons

由图 4 可知，巢湖 Chl-a 浓度空间分布的季节特征非常明显，夏、秋季西巢湖的 Chl-a 浓度在空间上的差异均显著高于中巢湖和东巢湖；春、冬季巢湖 Chl-a 浓度整体较低，大都处于 30 μg/L 以下。在夏季，全湖 Chl-a 浓度呈现南低北高的格局，50 μg/L 以上的区域集中在西巢湖的西北部、中巢湖北部区域，部分沿岸及巢湖姥山岛东部区域因蓝藻聚集，Chl-a 浓度超过了 100 μg/L。在秋季，Chl-a 浓度湖心较低、沿岸较高，西巢湖的大片区域浓度在 100 μg/L 以上。

巢湖 Chl-a 浓度的空间分布特征受营养盐的影响较大。在易发生水华的夏、秋季，巢湖 Chl-a 浓度在空间上呈现西高东低的分布特征，主要原因是合肥市位于巢湖的西北部，携带大量营养盐的生产和生活污水经由南淝河、十五里河等河流排入西巢湖，使得西巢湖总氮、总磷浓度明显高于中巢湖和东巢湖，为蓝藻生长提供了充足的物质源；部分沿岸 Chl-a 浓度较高，可能是由于农业污染物的排放导致岸边部分水域营养盐的浓度较高。

3.3.2　Chl-a 浓度的年内变化

为阐明巢湖 Chl-a 浓度年内动态变化特征，基于 2019～2023 年 Chl-a 遥感反演数据集，通过 ArcGIS 空间统计模块对三湖区实施系统性月均值提取，最终得到了具有显著时序差异的 Chl-a 浓度月际变化曲线，见图 5。

由图 5 可知，巢湖 Chl-a 浓度呈现显著季节性分异特征，冬、春季全湖浓度整体偏低，西巢湖略高于中、东巢湖；夏、秋季则显著升高，西、中巢湖呈现同步或交替激增趋势，并于 9～10 月达到峰值，其中西巢湖 Chl-a 浓度持续高于其他湖区。时序分析表明，2019 年冬春两季全湖浓度多维持

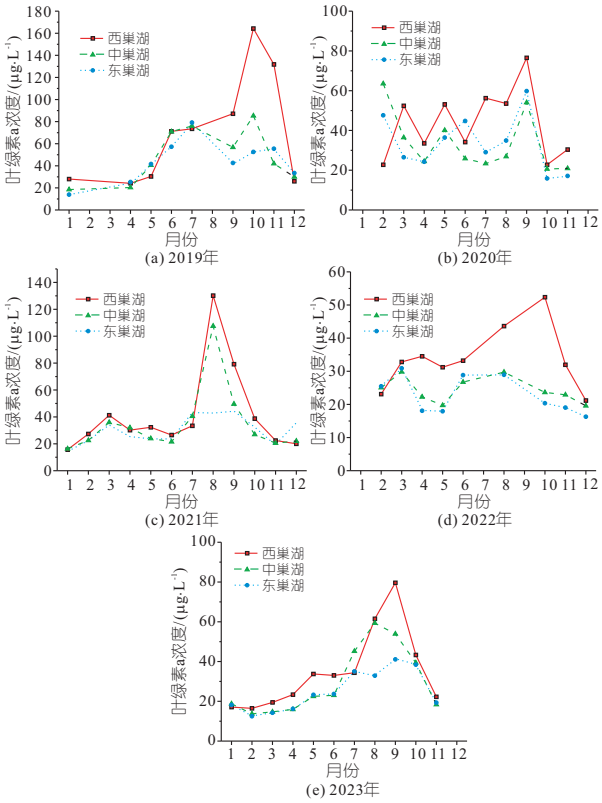

图 5　2019～2023 年巢湖水体 Chl-a 浓度的年内变化

Fig. 5　Annual variation of Chl-a concentration in Chaohu Lake water from 2019 to 2023

在 20～30 μg/L，秋季西巢湖持续高值，10 月西、中巢湖峰值分别达 164.32、85.28 μg/L。2020 年呈现显著年际异常，各湖区浓度剧烈波动，9 月西巢湖（76.55 μg/L）和东巢湖（59.79 μg/L）出现峰值，中巢湖异常提前至 2 月（63.53 μg/L），这与当年春季异常晴朗诱发罕见水华、夏季洪涝抑制藻类生长密切相关。2021 年全湖 1 月出现最低值（15 μg/L 附近），8 月西、中巢湖分别跃升至 130.18、107.51 μg/L。2022 年西巢湖夏季 Chl-a 浓度显著增长并于 10 月达峰值 52.36 μg/L，中、东巢湖则稳定在 20～30 μg/L。2023 年 7～10 月为 Chl-a 浓度高值期，中巢湖 8 月峰值为 59.32 μg/L，西巢湖 9 月达 79.62 μg/L。

在年内，巢湖 Chl-a 浓度随主导环境驱动因子的变化而变化。在四季分明的浅水湖泊中，冬季气温下降，蓝藻下沉到水体深处休眠，使得水体表面 Chl-a 浓度明显降低；春季气温回暖、光照强度和日照时长增加，蓝藻复苏，从水底开始上浮；夏、秋季，蓝藻大量增殖并聚集到水体表层。此外，根据巢湖管理局分享的湖区气象站数据，发现西巢湖的风速长时间低于中、东巢湖，低风速天气对水体的扰动作用小，加剧了蓝藻的聚集，导致 Chl-a 浓度大幅增加，这也可能是西巢湖 Chl-a 浓度较高的原因。

中国知网　https://www.cnki.net

3.3.3 Chl-a 浓度的年际变化

为探究巢湖水体 Chl-a 浓度的年际变化，依据温度和光照的协同作用，蓝藻生物学特性与水文条件的季节性差异，划分巢湖水华暴发期（5～10 月）和非水华暴发期（11 月～次年 4 月），利用 ArcGIS 软件的地图代数工具分别计算 2019～2023 年巢湖水华暴发期和非水华暴发期的 Chl-a 浓度均值，结果见图 6。

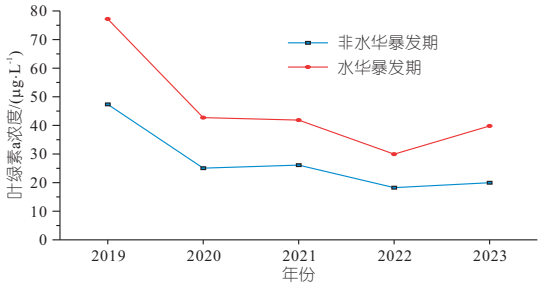

图 6 2019～2023 年巢湖 Chl-a 浓度年际变化

Fig. 6 Annual variation of Chl-a concentration in Chaohu Lake from 2019 to 2023

由图 6 可知，Chl-a 浓度在水华暴发期的平均值及变化幅度均明显高于非水华暴发期，两个时期的 Chl-a 浓度均值在年际上总体均呈下降的变化趋势。在水华暴发期，2019 年全湖 Chl-a 浓度值最高，为 77.17 μg/L；2020 年是重要的转折点，Chl-a 浓度跳跃式下降了 34.46 μg/L，2020 年后不同年份间的差异较小。在非水华暴发期，巢湖 Chl-a 浓度都相对较低且逐年下降，2019 年的 Chl-a 浓度值最高，为 47.37 μg/L。

针对蓝藻水华大规模爆发的问题，巢湖采取了沿湖建立打捞平台、藻水分离站、蓝藻深井处理装置及阻藻围隔，配备磁捕船及浅水区辅助打捞船只等措施，巢湖点、线、面和内源的同治及巢湖流域“山水工程”的推进、环巢湖十大湿地的全面建成，为巢湖水环境筑起了屏障，使得全湖水质大有提升，巢湖流域的综合治理取得了阶段性成效。

4 结论

a. 基于 Sentinel-2 卫星 $b_4/b_5/b_7$ 波段组合的三波段模型简便、实用性较强，在巢湖反演 Chl-a 浓度有较好的适用性，且该模型对内陆Ⅱ类水体 Chl-a 浓度的遥感反演具有一定的应用价值。Chl-a 浓度的时序变化和空间分布特征与巢湖营养盐的格局相一致，高温、晴空、少风可促进 Chl-a 浓度升高。

b. 本文研究主要基于 Sentinel-2 卫星遥感影像开展分析，由于数据源单一性的限制，在揭示巢湖 Chl-a 浓度时空动态特征的快速演变过程方面存在一定局限性。建议后续研究可融合 MODIS、Landsat-8/9 及高分系列等多平台遥感数据开展长时间序列的研究。

参考文献：

[1] 刘佳玥，姜翠玲，耿慧. 2010～2020 年太湖无锡水域水质时空变化及原因分析[J]. 水电能源科学，2023，41(7)：49-53.（LIU J Y，JIANG C L，GENG H. Water quality spatiotemporal variation and cause analysis of Wuxi water area of Taihu lake from 2010 to 2020[J]. Water resources and power，2023，41(7)：49-53.(in Chinese)）

[2] FENG C，JIN Q，WANG Y N，et al. Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in inland lakes based on GOCI image and optical classification of water body[J]. Huanjing kexue，2015，36(5)：1557-1564.

[3] ZHANG B，LI J S，SHEN Q，et al. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water[J]. National remote sensing bulletin，2021，25(1)：37-52.

[4] DALL'OLMO G，GITELSON A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters：Experimental results[J]. Applied optics，2005，44(3)：412-422.

[5] BI S，LI Y M，LV H，et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai based on OLCI data[J]. Journal of lake sciences，2018，30(3)：701-712.

[6] LE C F，LI Y M，ZHA Y，et al. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes：The case of Taihu Lake，China[J]. Remote sensing of environment，2009，113(6)：1175-1182.

[7] 中华人民共和国水利部. 水质 叶绿素的测定 分光光度法：SL88-2012[S]. 北京：中国水利水电出版社，2012.（Minstry of Water Resources of the People's Republic of China. Water quality-determination of chlorophyll by spectrophotometry：SL88-2012[S]. Beijing：China Water & Power Press，2012.(in Chinese)）

[8] 冯天时，庞治国，江威. 基于珠海一号高光谱卫星的巢湖叶绿素 a 浓度反演[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(8)：2642-2648.(FENG T S，PANG Z G，JIANG W. Remote sensing retrieval of chlorophyll-a concentration in lake Chaohu based on Zhuhai-1 hyperspectral satellite[J]. Spectroscopy and spectral analysis，2022，42(8)：2642-2648.(in Chinese)）

中国知网 https://www.cnki.net