引文格式：朱洪江. 北方典型内陆湖泊有害藻类遥感监测[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 80-84. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.017

# 北方典型内陆湖泊有害藻类遥感监测

朱洪江[1]
（1. 河南省测绘院，河南 郑州 453000）

**摘　要：**以呼伦湖和乌梁素海为研究区，构建适用于北方典型内陆湖泊的有害藻类光谱监测指数，实现了内陆湖泊有害藻类监测和预警。通过分析Landsat8遥感影像湖泊湿地植被与藻华的光谱特征，提出了综合修正漂浮藻类指数（CMFAI）。利用CMFAI对呼伦湖有害藻类进行提取和监测；利用Albedo、NDWI、EVI与CMFAI构建基于专家经验的决策树模型，对乌梁素海进行藻华和水生植被信息提取。实地观测数据验证以及与Sentinel-2提取结果的交叉验证表明，总体精度均大于90%，CMFAI具有较好的精度、实用性和普适性，可实现内陆湖泊有害藻类的高效自动监测。研究结果表明，乌梁素海有害藻类分布面积较小，无明显变化趋势；但呼伦湖有害藻类爆发频次较高，具有一定的暴发性。

**关键词：**乌梁素海；呼伦湖；有害藻华；CMFAI
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0080-05

## Remote Sensing Monitoring of Harmful Algae in Typical Inland Lakes of Northern China

ZHU Hongjiang[1]
(1. Henan Provincial Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 453000, China)

**Abstract:** Taking Hulun Lake and Ulansuhai as the research areas, we developed a spectral monitoring index suitable for harmful algae in typical inland lakes of northern China to enable the monitoring and early warning of harmful algal blooms. By analyzing the spectral characteristics of various wetland vegetation types and algal blooms in Landsat8 remote sensing images, we proposed the comprehensive modified floating algae index (CMFAI). We used CMFAI to extract and monitor harmful algae in Hulun Lake. We used Albedo, NDWI, EVI, and CMFAI to construct a decision tree model based on expert knowledge to extract algal blooms and aquatic vegetation information of Ulansuhai. Validations through field observation data and cross-verification with Sentinel-2 derived results show that the overall accuracy exceeding 90%, indicating CMFAI has good accuracy, practicality, and generalizability, and is capable of efficient and automated monitoring of harmful algae in inland lakes. The research results show that the distribution area of harmful algae in Ulansuhai has remained relatively small and stable, while Hulun Lake has experienced frequent outbreaks of harmful algae, indicating a tendency toward episodic blooms.

**Key words:** Ulansuhai, Hulun Lake, harmful algal, CMFAI

近年来内陆湖泊逐渐出现湖泊萎缩、水位下降、水质恶化、富营养化等生态环境问题[1-2]。开展藻华的空间测度与业务化监测不仅有助于及时掌握藻华的空间分布进行湖泊污染灾害预警，而且为内陆水生态系统稳定与可持续发展提供了重要支撑。传统藻华监测以船舶实地调查为主，存在耗时耗力、监测范围有限和时空连续性差等弊端，难以满足宏观范围监测的需求。遥感技术的快速发展为内陆湖泊水生态系统的实时监测和灾害预警提供了有效手段。Landsat系列卫星数据在长时间序列观测和数据可用性方面具有优势，适用于有害藻类的长期动态监测[3]。将光谱指数与基于专家经验的决策树相结合的方法具有较高的精度和实用性，已广泛应用于有害藻类的提取研究[4-7]。本文选取乌梁素海、呼伦湖两个北方典型内陆湖泊作为研究对象。漂浮藻类指数（FAI）已被广泛应用于内陆湖泊藻类的识别与监测中，通过可见光与近红外波段的组合运算放大藻华与其背景像元的光谱特征差异，增强藻华信息，抑制背景像元的信息[8]。然而，在乌梁素海等草型湖泊中，水生植物与藻华在近红外波段的反射特征高度相似，单独采用FAI进行监测将增加提取结果的不确定性。鉴于此，本文构建了一种综合修正漂浮藻类指数（CMFAI）。对于呼伦湖，该指数可直接用于有害藻类的信息提取与监测；对于乌梁素海，则结合多特征光谱指数构建决策树模型，实现藻华与水生植被类群的有效区分。本文进一步分析了呼伦湖和乌梁素海有害藻类的空间分布特征和时间变化

项目来源：河南省自然资源科研资助项目（2022-13）。
作者简介：朱洪江（1971—），本科，高级工程师，主要研究方向为导航定位、遥感应用，E-mail：zhihp@126.com。

趋势，以期为北方半干旱区湖泊生态环境治理与生态保护工作提供数据基础与技术支持。

## 1　数据来源与研究方法

呼伦湖位于内蒙古自治区东北部，地处呼伦贝尔市的新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗与满洲里市交界处（48°33′~49°20′N、116°58′~117°48′E），是我国第四大淡水湖。湖区内浮游植物以蓝藻、绿藻和硅藻为主，另有少量裸藻、甲藻、金藻和黄藻，其中蓝藻在不同季节中均占主导[9-10]。乌梁素海位于内蒙古自治区中西部，地处巴彦淖尔市乌拉特前旗（40°36′~41°03′N、108°43′~108°57′E），湖区分布多种类型的水生植被[11]。近年来，受人类活动加剧与气候变化双重作用影响，部分区域呈现明显的沼泽化趋势，并出现多次有害藻类大规模异常增殖的现象。

### 1.1　数据来源与预处理

本文选取2017—2023年乌梁素海和呼伦湖藻华爆发高峰时期（7—8月）的Landsat系列影像进行有害藻类和水生植被的时空变化特征分析。Landsat8卫星的重访周期为16 d，搭载OLI和TIRS两个传感器。本文选取无云覆盖、质量较好的16幅Landsat影像作为主要数据源，首先进行辐射定标和大气校正，通过计算呼伦湖与乌梁素海的水体指数提取湖区水体信息；然后通过阈值分割提取湖区的边界矢量，利用确定好的湖区边界对预处理后的遥感影像进行裁剪得到湖区的观测数据源。Sentinel-2卫星搭载的多光谱成像仪（MSI）可获取13个波段的遥感数据，涵盖可见光、近红外和短波红外范围，空间分辨率最高可达10 m。本文选取与Landsat8 OLI时间相近的3景Sentinel-2多光谱影像，以Sentinel-2影像10 m数据为精度验证依据，对基于CMFAI方法提取的藻华遥感识别结果进行精度验证。

### 1.2　CMFAI的构建和检验

基于水生植被类型、水体和有害藻类的光谱特征，针对Landsat8 OLI和Sentinel-2 MSI的波段设置，本文建立了CMFAI，用于识别呼伦湖和乌梁素海有害藻类。同时，本文采用FAI、MFAI和AFAI等光谱指数与CMFAI进行对比分析，具体计算方法见表1。

### 1.3　决策树分类模型构建

本文利用CMFAI对呼伦湖进行有害藻类遥感提取；利用Albedo、增强型植被指数（EVI）结合CMFAI等光谱指数构建的决策树分类模型进行乌梁素海有害藻类与水生植被信息提取。Albedo用于去除高反射率的码头、湖内建筑台和内陆滩涂，NDWI用于提取和剔除水体信息，EVI用于剔除挺水植被，而CMFAI则用于提取有害藻华信息，剩余的未分类影像信息被归为沉水植被。

表1　光谱指数计算方法

| 光谱指数 | 表达式 |
|---|---|
| Albedo[4] | $\mathrm{MNDSI}=0.356\rho_{blue}+0.13\rho_{red}+0.373\rho_{NIR}+0.085\rho_{SWIR1}+0.072\rho_{SWIR2}-0.001\,8$ |
| FAI[8] | $\mathrm{FAI}=\rho_{green}+\rho_{red}-\rho_{SWIR1}-(\rho_{blue}-\rho_{SWIR1})\frac{(\lambda_{SWIR1}-\lambda_{blue})}{(\lambda_{SWIR1}+\lambda_{blue})}$ |
| AFAI[10] | $\mathrm{AFAI}=\rho_{green}+\rho_{red}-\rho_{SWIR1}-0.5(\rho_{blue}-\rho_{SWIR1})$ |
| MFAI[9] | $\mathrm{MFAI}=\rho_{green}+\rho_{red}-\rho_{SWIR1}-(\rho_{blue}-\rho_{SWIR1})\frac{(\lambda_{SWIR1}-\lambda_{blue})}{(\lambda_{SWIR1}+\lambda_{blue})}$ |
| CMFAI | $\mathrm{CMFAI}=\rho_{green}+\rho_{red}-\rho_{SWIR1}(\rho_{blue}-\rho_{SWIR1})\times\frac{(\lambda_{SWIR1}-\lambda_{blue})}{(\lambda_{SWIR1}+\lambda_{blue})}-\frac{(\rho_{green}-\rho_{NIR})}{(\rho_{green}+\rho_{NIR})}$ |

注：$\rho$为Landsat OLI对应波段的地表反射率。

### 1.4　精度验证

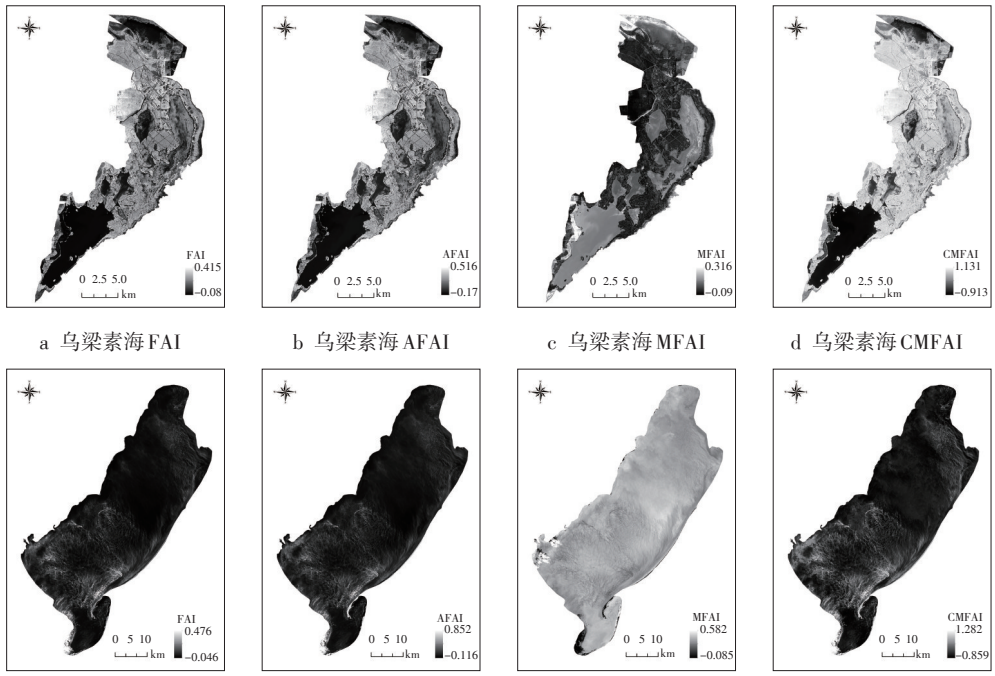
本文将Sentinel-2遥感影像提取的分类结果与Landsat8提取的结果进行交叉验证，计算二者的决定系数（$R^2$）、均方误差（NSE）、平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE），对分类结果进行精度评价。同时，利用实测站点数据制作验证样本集计算混淆矩阵，计算分类结果的总体精度和Kappa系数来评估模型精度。

## 2　研究结果与分析

### 2.1　提取结果与精度验证

基于Landsat8 OLI影像，本文利用CMFAI提取呼伦湖的有害藻华信息，利用Albodo、NDWI、EVI与CMFAI协同构建的多特征决策树提取乌梁素海的有害藻华信息。经多次试验确定分类阈值，各指数同时满足阈值要求则为藻类。由乌梁素海与呼伦湖各漂浮藻类光谱指数影像图（图1）可知，相较于FAI、AFAI和MFAI，CMFAI可有效扩大藻华与背景水体之间的差异，虽然在乌梁素海藻华监测中对其他水生植物造成了很大干扰，但通过Albedo、NDWI、AEVI与CMFAI协同构建多特征决策树可实现藻华提取。

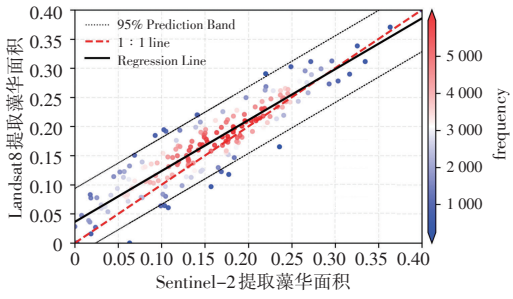
为验证CMFAI识别有害藻类的精度，本文以Sentinel-2提取结果为标准，利用皮尔逊系数和统计验证方法对分类结果进行精度验证。结果表明（图2），藻华的提取结果与Sentinel-2影像遥感提取结果基本一致，乌梁素海中藻华的$R^2$=0.917，NSE、MAE和RMSE分别为0.791、0.028和0.035；呼伦湖中藻华的$R^2$=0.956，NSE、MAE和RMSE分别为0.901、0.020和0.024。



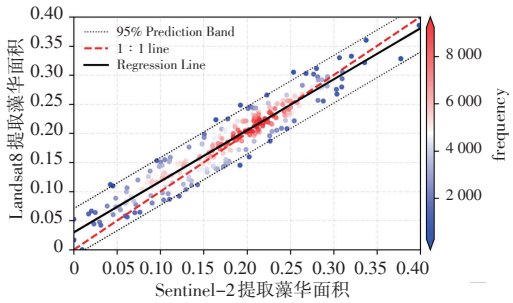

a 乌梁素海FAI　b 乌梁素海AFAI　c 乌梁素海MFAI　d 乌梁素海CMFAI

e 呼伦湖FAI　f 呼伦湖AFAI　g 呼伦湖MFAI　h 呼伦湖CMFAI

图1　乌梁素海和呼伦湖各漂浮藻类光谱指数影像图




a 乌梁素海




b 呼伦湖

图2　CMFAI提取结果与Sentinel-2提取结果的交叉验证散点图

本文利用野外实测站点数据制作验证集，基于验证集数据计算分类混淆矩阵进行精度验证。结果表明，CMFAI在内陆湖泊有害藻类提取中表现出较高的精度，乌梁素海藻华提取的总体精度、Kappa系数、错分误差、漏分误差分别为92.72%、0.93、2.32%和2.82%；呼伦湖藻华提取的总体精度、Kappa系数、错分误差、漏分误差分别为97.49%、0.94、1.75%和1.68%。综上所述，本文方法具有较高的精度和稳定性，适用于北方内陆湖泊藻华业务化监测与预警。

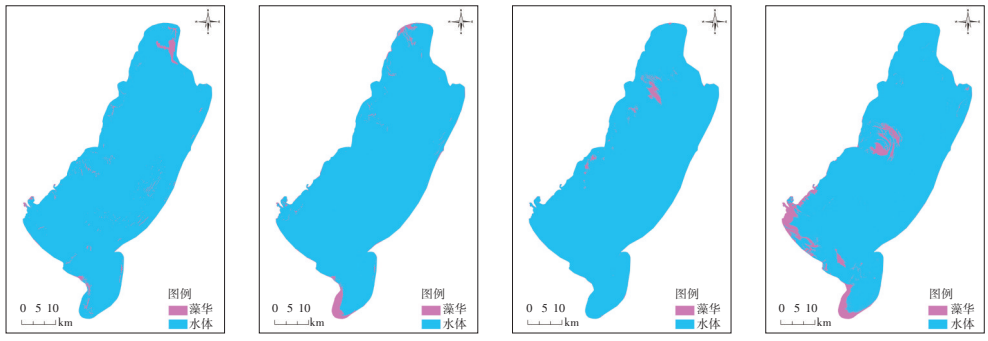
### 2.2　内陆湖泊有害藻类的时空分布特征

由2017—2023年呼伦湖有害藻类的空间分布（图3a）可知，呼伦湖藻华多以条状或絮状形式集中分布于近岸水域、西北沿岸和北部湖区，西南角克鲁伦河入湖口区域次之，湖心区域较少，这可能与近岸区域水体受人为污染、水流缓慢导致污染物易于富集有关[12-13]；藻华面积呈逐年增加趋势，2023年达到峰值，主要集中于湖区中部、西部、南部沿岸区域。由2017—2023年乌梁素海有害藻类的空间分布（图3b）可知，乌梁素海挺水植物分布广泛，几乎覆盖整个湖区，整体呈现明显的沼泽化趋势；沉水植物则主要集中在东大滩区域，而明水区主要分布于北部、南部及码头周边区域；有害藻类覆盖范围较小，且无明显的年际变化趋势。

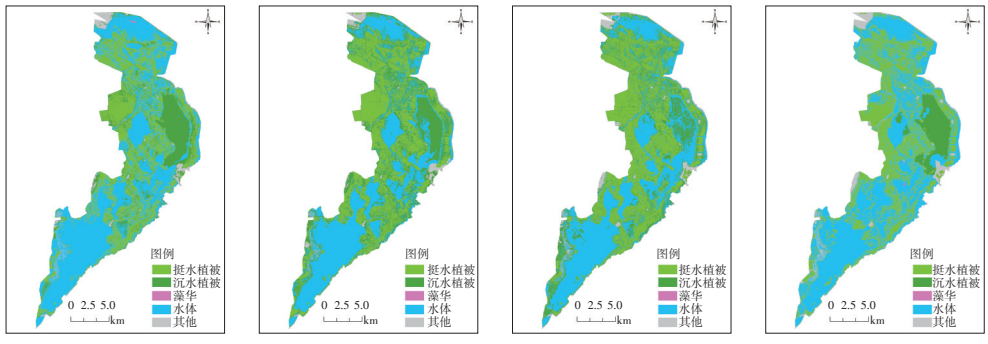
### 2.3　普适性检验

为验证CMFAI在不同区域有害藻类遥感提取中的适用性，本文选取巢湖和太湖两个典型湖泊进行检验分析。巢湖和太湖的有害藻类主要为蓝藻，基于Landsat8数据利用CMFAI提取的藻华结果见图4，二者的提取精度均较高，且与影像中藻华分布范围高度一致，总体精度分别为92.83%和91.25%，说明CMFAI可识别和捕捉藻华的真实分布状态，具有较好的普适性。

随着人类活动的持续扰动和全球气温变暖，内陆湖泊水生态系统出现了一系列生态问题。然而，内陆湖泊水生环境复杂多样，基于遥感的藻华监测方法具

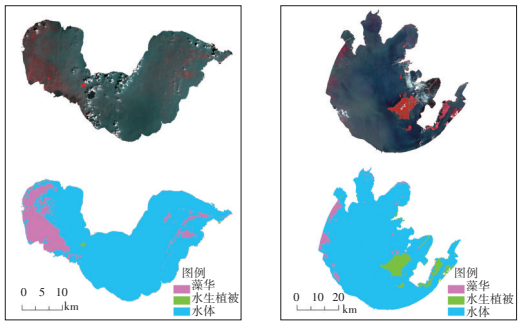



a 2017年呼伦湖　b 2019年呼伦湖　c 2021年呼伦湖　d 2023年呼伦湖




e 2017年乌梁素海　f 2019年乌梁素海　g 2021年乌梁素海　h 2023年乌梁素海

图3　呼伦湖、乌梁素海有害藻类提取结果




a 巢湖　b 太湖

图4　基于CMFAI指数的巢湖和太湖藻华提取结果图

有一定的局限性[14]。本文通过深入分析乌梁素海与呼伦湖中藻华、水体和水生植被的光谱特征，提出了一种新型藻华监测指数——CMFAI。分析结果表明，与FAI、AFAI和MFAI等指数相比，CMFAI在增强藻类与背景水体之间光谱反差方面表现更优越，有助于提高分割阈值设定的合理性，对于实现有害藻类的高效识别与动态监测具有重要应用价值，体现了其良好的实用性与适应性。为进一步验证CMFAI跨区域的适用性，本文选取水体富营养化严重的两个湖泊进行普适性检验，结果表明CMFAI在不同区域均具备较好的藻华信息识别能力。然而，部分地区由于藻华密度较低，漂浮于水体中，CMFAI对该类藻华提取能力有限，且面对复杂背景时精度也会受到一定影响。综上所述，CMFAI在水质清澈、背景干扰较小的内陆湖泊具备较高的精度和实用性；但在藻华分布低密度区和水生环境复杂区域，识别结果存在不确定性。

## 3　结　语

1）本文利用CMFAI进行呼伦湖的有害藻华遥感识别，并针对乌梁素海水生环境复杂、多类目标易混淆的特点，构建了融合多特征光谱信息的决策树分类模型，实现对藻华与水生植被的遥感分类及其时空演变特征的系统分析。

2）利用野外实测数据制作验证集，并与Sentinel-2 10 m分辨率遥感影像提取结果进行交叉验证。结果表明，交叉验证的 $R^2$ 分别达到0.917和0.956；混淆矩阵计算得到的总体精度和Kappa系数分别为92.72%和0.90、97.49%和0.94，说明CMFAI在藻华提取中具有较高的精度和稳定性。

3）2017—2023年乌梁素海藻华面积分布范围较小，无明显年际变化趋势，主要集中于东大滩和码头周边区域；呼伦湖藻华多以条状或絮状形式集中分布于近岸水域、西北沿岸和北部湖区，西南角克鲁伦河入湖口区域次之，而湖心区域藻华出现的概率较低。

本文仍存在一定的不足：首先由于所选影像的空间和时间分辨率存在一定的局限，尚难以实现对藻华进行高频率连续观测，后续研究将考虑引入Sentinel-1 SAR、Sentinel-2多光谱影像和Landsat9等

数据源实现主被动观测相结合的协同监测，以增强对内陆湖泊有害藻类在短时间尺度上的动态识别能力；其次内陆湖泊藻华在发生发展过程中受到多种环境因素影响（气温、降水和人类活动等），形成机制复杂，而本文尚未对藻华与影响因子之间的响应关系开展深入分析，未来将融合气象数据、土地利用数据和社会经济数据从多角度探讨其对藻类时空演化的驱动机制。

## 参考文献


[1] Zhang Y, Jeppesen E, Liu X, et al. Global Loss of Aquatic Vegetation in Lakes[J]. Earth-science Reviews, 2017, 173: 259-265

[2] Wu G, Liu Y. Satellite-based Detection of Water Surface Variation in China's Largest Freshwater Lake in Response to Hydro-climatic Drought[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11):4 544-4 558

[3] Luo X, Wang Y, Luchovich J. Mapping Submerged Aquatic Vegetation in Albemarle Sound, North Carolina, USA Using Landsat8 and SONAR Data[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2016, 168: 194-204

[4] 孙衍建.混合像元分解结合SVM的水生植物遥感信息提取[J].地理空间信息,2023,21(3):72-76

[5] Yoichi O, Bunkei M, Takehiko F. Distinguishing Surface Cyanobacterial Blooms and Aquatic Macrophytes Using Landsat/TM and ETM+ Shortwave Infrared Bands[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 157:35-47

[6] Brooks C, Grimm A, Shuchman R, et al. A Satellite-based Multi-temporal Assessment of the Extent of Nuisance Cladophora and Related Submerged Aquatic Vegetation for the Laurentian Great Lakes[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 157:58-71

[7] 杨冬.基于资源三号遥感影像的湿地信息提取[J].地理空间信息,2022,20(4):65-68

[8] Hu C M, Lee Z P, Ma R H, et al. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Observations of Cyanobacteria Blooms in Taihu Lake, China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115:4 002

[9] Qing S, Runa A, Shun B, et al. Distinguishing and Mapping of Aquatic Vegetations and Yellow Algae Bloom with Landsat Satellite Data in a Complex Shallow Lake, China During 1986-2018[J]. Ecological Indicators, 2020, 112:106 073

[10] Chen J, Wang J, Wang Q, et al. Common Fate of Sister Lakes in Hulunbuir Grassland: Long-term Harmful Algal Bloom Crisis from Multi-source Remote Sensing Insights[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594:125 970

[11] 阿如娜,青松,包玉海.基于Landsat8 OLI数据的乌梁素海总溶解性固体质量浓度遥感反演[J].灌溉排水学报,2018,37(4):99-105

[12] Olthof I, Fraser R, Schmitt C, et al. Landsat-based Mapping of Thermokarst Lake Dynamics on the Tuktoyaktuk Coastal Plain, Northwest Territories, Canada Since 1985[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 168:194-204

[13] Cao M M, Qing S, Du Y C Z, et al. Remote Sensing Classification of Aquatic Vegetation in Ulansuhai Lake Based on Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 102(1):176-186

[14] 牛全福,傅键恺,陆铭,等.基于随机森林的GF-6 WFV和Landsat8 OLI遥感影像分类比较[J].地理空间信息,2022,20(8):49-54


（上接第26页）


[12] Wang D, Qian H. CatBoost-based Automatic Classification Study of River Network[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2023, 12:416

[13] Yan C, Liu X, Boota M W, et al. A Comparison of Machine Learning Methods Applied to the Automated Selection of River Networks [J]. The Cartographic Journal, 2022, 59(3): 187-202

[14] Touya G, Zhang X, Lokhat I. Is Deep Learning the New Agent for Map Generalization? [J]. International Journal of Cartography, 2019, 5(2/3):142-157

[15] 赵天明,孙群,马京振,等. 融合路段和stroke特征的道路自动选取方法[J]. 地球信息科学学报,2024,26(12):2 673-2 685

[16] Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1):269-271

[17] Haeupler B, Hladik R, Rozhon V, et al. Universal Optimality of Dijkstra Via Beyond-Worst-Case Heaps [C]// IEEE 65th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). Chicago, Illinois, USA, 2024:2 099-2 130

[18] 严步青,毛成阳,龚康,等. 基于DEM的高原湖泊班公湖流域数字河网提取分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 97-99

[19] 张飞凯,黄永忠,李连茂,等. 基于Dijkstra算法的货运索道路径规划方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 176-182