

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240048

基于多源数据多特征组合的白洋淀生态 修复工程前后湿地变化

郑晓玲^{1,2} 于一雷^{2,3} 吕翠翠³ 李文彦³ 姜纪沂¹ 王仕琴⁴

(1. 防灾科技学院生态环境学院, 河北 三河 065201; 2. 河北大学生态环境系, 河北 保定 071002; 3. 中国科学院雄安创新研究院(筹), 河北 雄安 071899; 4. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源中心, 河北 石家庄 050022)

摘要:【目的】白洋淀湿地是华北平原最大的淡水湿地生态系统, 对改善和调节雄安新区乃至整个京津冀的气候和生态环境具有重要作用。探究白洋淀湿地生态修复前后下垫面的变化特征, 旨在为后续的生态修复工程提供理论参考。【方法】本研究通过选取生态修复前后(2017年和2022年)的 Sentinel-1 SAR 影像和 Sentinel-2 多光谱影像, 提取光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征, 结合随机森林方法, 对白洋淀湿地进行分类; 从下垫面类型、面积和景观格局指数变化, 分析生态修复前后白洋淀湿地的变化情况。【结果】(1)同时使用光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征 3 种特征进行分类的总体精度最高, 光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征的重要性贡献率分别为 40.713%、27.269% 和 32.018%。(2)2017—2022 年, 耕地面积明显减少, 湿地面积显著增加, 湿地面积的增长主要来自耕地的转换。(3)生态修复后, 2022 年林地和水体的破碎化程度均有减小的趋势, 水体、挺水植物和林地的聚集度和连通性都有不同程度的提升, 其中最明显的为林地。【结论】生态修复之前白洋淀湿地景观趋于破碎化, 生态修复后白洋淀湿地的水体、挺水植物以及林地各自的连通性和聚集度明显提升。淀区内的退耕还淀、生态清淤和生态补水等工程增加了白洋淀湿地面积, 提升了白洋淀水体的连通性。

关键词: 白洋淀湿地; 生态修复; 湿地分类; 特征组合; 景观指数; 随机森林分类法

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)02-0152-11

引文格式: 郑晓玲, 于一雷, 吕翠翠, 等. 基于多源数据多特征组合的白洋淀生态修复工程前后湿地变化 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 152-162. Zheng Xiaoling, Yu Yilei, Lü Cuicui, et al. Wetland changes before and after Baiyangdian ecological restoration project based on multi-source data and multi-feature combination [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 152-162.

Wetland changes before and after Baiyangdian ecological restoration project based on multi-source data and multi-feature combination

Zheng Xiaoling^{1,2} Yu Yilei^{2,3} Lü Cuicui³ Li Wenyan³ Jiang Jiyi¹ Wang Shiqin⁴

(1. Academy of Ecological Environment, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. School of Eco-Environment, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;

3. Xiongan Institute of Innovation, Xiongan 071899, Hebei, China;

4. Center of Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, Hebei, China)

Abstract: [Objective] Baiyangdian wetland is the largest wetland ecosystem in the North China Plain, and plays an important role in improving and regulating the climate and ecological environment of Xiongan

收稿日期: 2024-02-29 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 国家重点研发计划(青年科学家项目)(42071053), 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心开放基金(GW203312)。

第一作者: 郑晓玲。主要研究方向: 遥感水文。Email: zxlorz@163.com 地址: 065201 河北省三河市燕郊高新区学院街 465 号防灾科技学院。

责任作者: 于一雷, 博士, 研究员。主要研究方向: 同位素水文、遥感水文。Email: yuyilei1222@126.com 地址: 071002 河北省保定市五四东路 180 号河北大学生态环境系。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

New Area and even the whole Beijing Tianjin Hebei Region. Exploring the changing characteristics of Baiyangdian wetland underlying surface before and after ecological restoration aims to provide theoretical reference for the subsequent ecological restoration project. [Method] Sentinel-1 SAR images and Sentinel-2 multi-spectral images before and after ecological restoration (2017 and 2022) were selected to extract spectral index features, SAR index features and texture features. Combined with random forest method, the Baiyangdian wetland was classified, and the changes of Baiyangdian wetland before and after ecological restoration were analyzed from the changes of underlying surface type, area and landscape pattern index. [Result] (1) The overall accuracy of classification using spectral index features, SAR index features and texture features was the highest. The importance contribution rates of spectral index features, SAR index features, and texture features were 40.713%, 27.269%, and 32.018%, respectively. (2) From 2017 to 2022, the area of cultivated land decreased significantly, while the area of wetland increased significantly. The increase of wetland area mainly comes from the conversion of cultivated land. (3) After ecological restoration, the fragmentation degree of forest land and water body in 2022 had a decreasing trend, and the aggregation degree and connectivity of water, emergent plants and forest had been improved to varying degrees, among which the most obvious was forest. [Conclusion] The landscape of Baiyangdian wetland tends to be fragmented before the ecological restoration, while after ecological restoration, the connectivity and aggregation of water bodies, emergent plants, and forest land have been improved, which shows that the projects of returning farmland to lake, ecological dredging and water replenishment have increased the area of Baiyangdian wetland and improved the connectivity of water body.

Key words: Baiyangdian wetland; ecological restoration; wetland classification; feature combination; landscape indices; random forest classification method

湿地是“地球之肾”，是全球三大生态系统之一，在维护生态安全和提升人类福祉方面发挥着不可替代的作用。作为华北地区最大的淡水湿地生态系统，白洋淀湿地对调节整个京津冀地区的气候和生态环境起着至关重要的作用。然而，近几十年来在人类活动和气候变化的长期影响下，白洋淀湿地生态环境遭到破坏，面临着水量减少、泥沙淤积、生物多样性减少和污染加重等问题，生态功能逐渐减弱^[1]。2017年4月1日，中共中央、国务院印发通知，决定设立河北雄安新区，这是千年大计、国家大事^[2]，白洋淀迎来了最大规模的生态修复工程，实施生态环境治理和保护规划。截至2022年底，生态修复工程已经开展实施了5年，具体内容包括生态补水、河道清理与污水处理、生态清淤等，并且成立了生态环境监测中心，生态得到了很大程度上的改善^[3]。研究白洋淀湿地下垫面和景观格局的变化情况，总结生态修复工程对白洋淀湿地生态环境的改善作用具有重要意义。

目前学者们使用遥感技术对白洋淀湿地的研究包括水体时序变化研究^[4-5]、土地覆盖变化^[6-7]和景观格局动态变化分析^[8-9]等。朱金峰等^[6]使用 Landsat 影像辅以 GF-2 影像，结合野外考察资料，对 1975—2018 年白洋淀湿地进行人机交互解译，分析土地覆盖类型和景观格局变化。梁爽等^[10]在白洋淀每个季

节选取一期具有代表性的 Sentinel-2 影像，通过多季相组合，以光谱指数特征、主成分变换特征、缨帽变换特征和纹理特征为分类特征，使用决策树、支持向量机和随机森林方法进行分类，总体分类精度最高达到了 91%。然而，自雄安新区建立以来，大规模的生态修复工程实施之后，对白洋淀下垫面变化情况的研究相对较少。已有研究大多采用多光谱遥感数据，未引入合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 数据对湿地进行监测。SAR 能够穿透植被冠层，探测浅层植被下方的下垫面情况，同时对水体的提取能力较强，因此其可用于监测湿地下垫面变化情况。Mahdianpari 等^[11]使用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像，对加拿大纽芬兰的湿地进行识别，其中所有湿地和非湿地类别的正确识别精度分别超过 70% 和 90%。Slagter 等^[12]使用随机森林算法，组合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像，完成了对南非圣卢西亚湿地类型的划分，总体精度达到 76.40%。常文涛等^[13]结合了 Sentinel-2 红边波段和 Sentinel-1 雷达波段影像数据，对黑龙江流域扎龙湿地进行分类，分类结果的总体精度达到了 88.72%。以上研究结果揭示了 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像在湿地分类方面的潜力。

本研究拟通过选取生态修复前后 (2017 年和 2022 年) 的 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像，在已有研

究的基础上,提取光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征对白洋淀湿地进行分类,从湿地下垫面的面积变化、不同类型之间的转化以及景观格局变化分析白洋淀湿地的变化情况,旨在为后续的生态修复工程提供参考依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

白洋淀湿地位于华北平原中部地区,属于海河流域大清河水系,大部分隶属于河北省雄安新区安新县(图 1),是华北地区最大的天然淀泊,也是华北平原最大的淡水湿地生态系统,拥有“华北之肾”之称。本文选择的研究区经纬度范围为 $115^{\circ}45' \sim 116^{\circ}06'E$, $38^{\circ}43' \sim 38^{\circ}59'N$ 。白洋淀地区属于典型的温带大陆性季风气候,气温年较差大,年平均降水 563.9 mm ,降水集中于 7—8 月份,季节分配不均,年际变化较大,年平均蒸发量 1369 mm ,蒸发量远大于降水量^[8]。

白洋淀淀区规划面积约 360 km^2 ,包含白洋淀、藻荇淀、马棚淀等 143 个淀泊,潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、萍河、白沟引河和小白河汇集于此。白洋淀对维护湿地生态系统平衡、调节河北平原及京津地区气候、改善温湿状况、补充地下水及保护生物多样性和珍稀物种资源发挥着重要作用^[14]。

淀区内丰富的水生动植物资源维持了湿地生态系统的稳定,同时也为周围的居民提供了一定的经济来源。

1.2 数据来源

1.2.1 Sentinel-1 的 SAR 数据

Sentinel-1 是 C 波段合成孔径雷达卫星,属于主动式微波遥感卫星,单颗卫星重访周期为 12 d ,其条带的扫描模式包括条带模式(strip map mode, SM)、干涉宽幅模式(interferometric wide swath, IW)、超宽幅模式(extra wide swath, EW)和波模式(wave mode, WV)4 种,其中 IW 是陆地上的主要采集模式,幅宽 250 km ,空间分辨率 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。Sentinel-1 影像极化方式包括单极化(VV 或 HH)和双极化方式(HH + HV 或 VV + VH),数据产品主要分为 L0 级数据、L1 级的 SLC(single look complex)数据和 GRD(ground range detected)数据,以及 L2 级数据。本文使用谷歌地球引擎平台筛选与 Sentinel-2 影像时间相近的 IW 模式下 VV + VH 极化的 Sentinel-1 GRD 影像作为 SAR 数据源,分辨率为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。

1.2.2 Sentinel-2 的多光谱数据

Sentinel-2 是欧空局哥白尼计划的一项地球观测任务,包括 A、B 两颗极轨卫星,携带多光谱成像仪,该成像仪涵盖 13 个光谱波段,从可见光到近红外再到短波红外,具有不同的空间分辨率,可用于陆

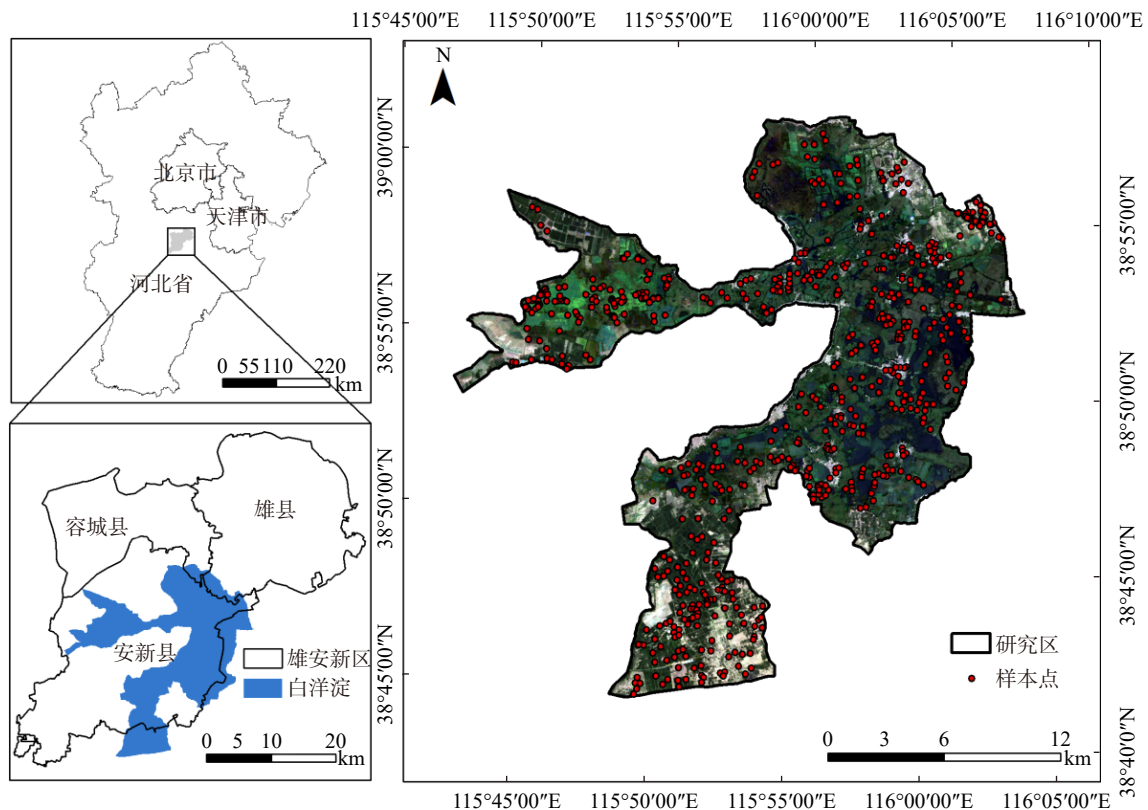


图 1 白洋淀湿地地理位置和样本点分布

Fig. 1 Geographic location and sample point distribution of Baiyangdian wetland

地监测, 提供植被、土壤和水覆盖、内陆水路及海岸区域等图像, 还可用于紧急救援服务。Sentinel-2 飞行高度 786 km, 幅宽 290 km, 重访周期为 10 d, 两颗卫星互补, 可达到 5 d 的周期。通过谷歌地球引擎平台筛选 2017—2022 年研究区云量小于 20% 的 Sentinel-2 影像, 并进行去云和大气校正处理。考虑到植被生长最旺盛的季节为夏季, 为便于识别研究区地表地类分布, 选择夏季的影像进行分类。华北地区最主要的农作物为冬小麦 (*Triticum aestivum*) 和夏玉米 (*Zea mays*), 冬小麦于 6 月中下旬成熟, 冬小麦收获后, 开始种植玉米, 夏玉米于 10 月上旬成熟。作物与湿地植被较为相似, 在分类时容易产生误分的情况。7 月小麦收割完毕, 玉米刚种下还未长成, 湿地植被疯长, 此时农作物对分类的干扰最小。因此本文使用 2017 年和 2022 年 7 月的 Sentinel-2 多光谱影像作为多光谱数据源。Sentinel-2 影像分辨率因波段而异, 最常用的可见光和近红外波段分辨率为 10 m × 10 m。

1.3 研究方法

1.3.1 湿地分类体系

根据已有湿地边界提取方案^[15], 对研究区的光学影像进行缨帽变换, 获取亮度、绿度和湿度分量, 分别作为 RGB 波段合成影像, 叠加在谷歌地球的高分辨率影像上作为参考, 通过目视解译的方法, 沿堤坝和道路人工勾勒白洋淀的边界和范围作为研究区, 研究区总面积约 347.65 km²。

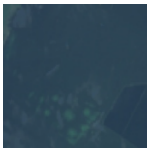
参考《湿地公约》、白洋淀湿地的已有分类体系^[6]和白洋淀的实地考察情况, 将研究区下垫面类型分为湿地区域的纯水体、浮水植物、挺水植物, 以及非湿地区域的耕地、建设用地和林地共 6 类(表 1)。纯水体为未被浮水植物覆盖的可见水体, 浮水植物主要包括莲花 (*Nelumbo nucifera*) 和芡实 (*Euryale ferox*) 等生长在水面的植物, 挺水植物主要由芦苇 (*Phragmites australis*) 和香蒲 (*Typha orientalis*) 构成。研究区内还有少量的滩地和裸土地, 但相较于其他地物, 其占地面积微乎其微, 且在遥感影像上不易识别, 人工选择样本时会产生较大误差, 故本文不考虑这两类地物。确定分类体系后, 结合野外实地考察数据和谷歌地球高分辨率影像, 以 Sentinel-2 影像作为底图选择分类样本, 除林地外(林地较分散, 在影像上分布较少), 其他地物每一类的样本数量不少于 100, 共计 785 个样本, 样本点分布如图 1 所示。所有样本中 70% 作为测试集进行分类, 30% 作为验证集进行精度验证。

1.3.2 特征选择

为了精细识别湿地的变化, 获取了研究区

表 1 白洋淀湿地下垫面分类体系

Tab. 1 Classification system of Baiyangdian wetland underlying surface

一级分类	二级分类	三级分类	描述	解译标志
	纯水体		沟渠、湖泊和鱼塘中被植被覆盖的水体	
湿地	水生植物	浮水植物	荷花、芡实等	
		挺水植物	主要为芦苇和香蒲	
	耕地		主要种植冬小麦和夏玉米	
非湿地	建设用地		居民地、道路等人为建筑	
		林地	零散分布的树林	

2017 年 7 月和 2022 年 7 月 Sentinel-1 SAR 影像和 Sentinel-2 多光谱影像, 分别提取了 Sentinel-2 多光谱影像的 7 个光谱指数特征和 Sentinel-1 SAR 影像的 6 个由后向散射系数计算而来的特征。对多光谱影像进行主成分分析, 选择第 1 主成分提取 7 个纹理特征, 共计 20 个特征, 组合形成特征数据集, 各特征的说明见表 2。该特征数据集融合了多源数据, 同时包含了光谱特征、SAR 指数特征和纹理特征。利用典型地物的以上 3 个特征差异, 进行白洋淀湿地的分类与制图。

1.3.2.1 光谱指数特征

根据已有研究^[16-17]对光谱指数在地物分类和信息提取方面的探索, 提取研究区归一化植被指数、归一化水体指数、裸土指数、地表水体指数、绿度叶绿素植被指数、增强型植被指数和植被衰减指数作为光谱指数特征。其中, 归一化植被指数、绿度叶绿素植被指数、增强型植被指数 3 个植被指数用于区分

表2 用于分类的光谱指数特征、SAR指数特征和纹理特征

Tab. 2 Spectral index features, SAR index features and texture features for classification

特征变量	名称	缩写
光谱指数特征	归一化植被指数	NDVI
	归一化水体指数	NDWI
	裸土指数	BSI
	地表水体指数	LSWI
	绿色叶绿素植被指数	GCVI
	增强型植被指数	EVI
	植被衰减指数	PSRI
SAR指数特征	后向散射强度差	Diff
	后向散射强度和	Sum
	频率差异指数	RFDI
	散射比率	Ratio
	平方比	Ratpow
	散射总功率	Span
	纹理特征	角二阶矩/能量
对比度		CONTRAST
相关性		CORR
方差		VAR
反差分矩阵		IDM
熵		ENT
集群凸显性		PROM

植被类型与其他地物, 归一化水体指数和地表水体指数用于识别水体, 裸土指数用于识别裸露的土地(耕地或建筑)。

1.3.2.2 SAR 指数特征

使用 SAR 影像的后向散射系数计算的特征包括后向散射强度差、后向散射强度和、频率差异指数、散射比率、平方比和散射总功率^[1]。选取的 SAR 指数特征可表征地物后向散射特性, 水体的后向散射系数远低于其他地物, 而建筑的后向散射系数明显高于其余地物, 因此 SAR 指数特征在区分湿地水体、建筑和其他地物时更有优势。

1.3.2.3 纹理特征

图像纹理特征的提取方法包括统计法、结构法、模型法和信号处理法^[18], 其中基于图像统计法的灰度共生矩阵是较为简单普遍的纹理特征提取方法。本文使用灰度共生矩阵提取影像纹理特征, 首先对 Sentinel-2 多光谱影像进行主成分分析, 将第 1 主成分的灰度级压缩至 32 bit, 再计算灰度共生矩阵, 根据各特征的意义, 从中选择角二阶矩、对比度、相关性、方差、反差分矩阵、熵和集群凸显性作为研究区

的纹理特征。角二阶矩可识别水体和建设用地; 对比度、方差和集群凸显性有利于提取建设用地信息; 相关性对同类地物的边界有一定的表征能力; 水体的熵远低于其他地物, 耕地和水体的反差分矩阵较高, 因此熵可用于提取水体信息, 反差分矩阵可用于辨别水体和耕地^[19]。

1.3.3 基于不同特征组合的分类方案

为探究不同类型特征组合对分类结果的影响, 实行 7 种分类方案(表 3), 分别对 2017 年和 2022 年的研究区进行分类处理。

表3 分类方案

Tab. 3 Classification schemes

方案编号	分类特征
方案1	光谱指数特征
方案2	SAR指数特征
方案3	纹理特征
方案4	光谱指数特征和SAR指数特征
方案5	光谱指数特征和纹理特征
方案6	SAR指数特征和纹理特征
方案7	光谱指数特征、SAR指数特征和纹理特征

1.3.4 随机森林分类法

随机森林分类算法由 Leo Breiman^[20]于 2001 年提出, 其原理是将 Bagging 集成学习思想与随机子空间方法相结合, 以决策树作为基本构成单元, 通过将多棵决策树组合在一起来提高分类的准确性, 由此构建了随机森林分类器。

本文以光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征作为随机森林分类模型的分类特征, 根据 7 个分类方案分别构建随机森林模型, 确定最佳森林棵数, 当决策树数量 ≥ 40 时, 分类精度逐渐收敛并趋于稳定, 因此选择决策树数量为 40。对白洋淀湿地进行分类处理, 最终将湿地下垫面类型分为建设用地、耕地、纯水体、浮水植物、挺水植物和林地 6 类。通过袋外数据(OOB)计算误差, 生成每个参与分类的特征的相对重要性, 并进行排序。

1.3.5 土地利用转移矩阵

本研究采用土地利用转移矩阵量化白洋淀湿地下垫面的变化情况。土地利用转移矩阵来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述, 其方法就是根据研究区两个时相的土地覆盖类型的变化情况, 叠加分析并做差, 最终求得一个二维的矩阵, 通过对转移矩阵的分析解读, 可以得到研究区两个时相不同地物类型之间的相互转换情况^[21]。为更直观地展示下垫面类型之间的转换, 利用土地利用转移矩阵绘制桑基图。

1.3.6 精度评价

在精度评价中, 主要采用混淆矩阵(又称误差矩阵)比较分类结果和实际测得值之间的混淆程度^[22]。本文采用总体精度、Kappa 系数、生产者精度和用户精度作为评价指标对分类结果进行评价。

1.3.7 景观格局指数

本研究采用景观生态学的方法, 利用景观格局的原理, 使用 Fragstats 4.2 计算研究区景观格局指数, 评价各地物的景观破碎化程度、连通性和聚集程度。选择的指标包括斑块数量、平均斑块面积、聚集指数、凝聚度和连通性共 5 个指标^[23]。白洋淀湿地夏季水域内浮水植物生长旺盛, 水体被浮水植物大面积覆盖, 因此在计算景观格局指数时, 将浮水植物和纯水体合并, 作为研究区总的水体。此外, 部分挺水植物也生长在水域, 但要得到此部分水体面积有一定的困难, 因此本文不予考虑。

2 结果与分析

2.1 精度评价

通过计算 7 种分类方案的混淆矩阵, 得到各自的分类精度(表 4、5)。使用一种特征的分类方案(方案 1~3)的精度普遍较低: 仅使用纹理特征分类的方案 3 在 2017 年的总体精度最低(0.867 0), 仅使用 SAR 指数特征分类的方案 2 在 2022 年的总体精度最低(0.896 8)。随特征种类的增加, 分类的总体精度有所提升。使用光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征 3 种特征组合的方案 7 的总体精度最高, 2017 年和 2022 年的精度分别为 0.977 2 和 0.978 9, 相

于方案 1, 分别提高了 3.21% 和 2.89%。多光谱影像体现了地物的光学特性, 而 SAR 影像能够捕捉地物的后向散射特性, 将二者相结合, 增加了分类特征的维度, 可以有效减少“同谱异物”或“同物异谱”影响, 增强湿地地类区分能力, 提高分类精度。具体来说, 方案 7 中, 光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征的重要性贡献率分别为 40.713%、27.269% 和 32.018%(表 6)。可见光谱指数特征是最重要的特征变量, 纹理特征次之。

特征类型和数量是影响分类精度的重要因素之一, 除此之外, 样本的选择和分类方法的使用, 都有可能影响最终的分类精度。从各地类的生产者精度和用户精度来看, 林地的生产者精度和用户精度相差较大(表 4, 表 5)。林地在研究区内零散分布, 在影像上多为单个像素点, 若选择样本数量较少, 且较为集中, 在分类时容易与挺水植物混淆, 导致其分类可信度较低。除林地外, 大多情况下, 用于分类的特征类型数量越多, 地物的生产者精度和用户精度越高。

2.2 湿地下垫面分类

对分类精度最高的方案 7 的分类结果进行湿地制图发现, 2017 年和 2022 年分类结果相似(图 2)。淀区中部为水体、浮水植物和挺水植物, 即湿地区域; 水体包括淀泊、河流、航道和鱼塘等开阔水面, 水体表面靠近岸边的区域被浮水植物覆盖, 大面积的挺水植物沿水体生长, 多为芦苇。研究区西部为藻荇淀, 北部为烧车淀, 南部为马棚淀, 耕地主要分布在藻荇淀南北两侧、烧车淀东侧以及马棚淀整个

表 4 2017 年 7 种方案分类精度
Tab. 4 Classification accuracy of 7 schemes in 2017

方案	评价指标	建设用地	耕地	纯水体	浮水植物	挺水植物	林地	总体精度	Kappa系数
方案1	生产者精度	0.955 9	0.926 6	0.988 5	0.886 1	0.963 5	0.777 8	0.946 8	0.932 8
	用户精度	0.970 1	0.921 3	0.988 5	0.958 9	0.885 9	1.000 0		
方案2	生产者精度	0.951 0	0.898 3	0.994 3	0.860 6	0.839 4	0.666 7	0.913 8	0.891 0
	用户精度	0.910 8	0.878 5	0.971 9	0.871 8	0.905 5	1.000 0		
方案3	生产者精度	0.955 9	0.824 9	0.913 8	0.772 2	0.795 6	0.777 8	0.867 0	0.831 7
	用户精度	0.874 4	0.858 8	0.908 6	0.824 3	0.825 8	0.933 3		
方案4	生产者精度	0.980 4	0.966 1	0.994 3	0.974 7	0.956 2	0.777 8	0.970 8	0.963 3
	用户精度	0.990 0	0.955 3	0.994 3	0.939 0	0.963 2	0.875 0		
方案5	生产者精度	0.995 1	0.932 2	0.994 3	0.924 1	0.956 2	0.722 2	0.960 7	0.950 5
	用户精度	0.980 7	0.970 6	0.994 3	0.924 1	0.909 7	0.866 7		
方案6	生产者精度	0.980 4	0.920 9	0.988 5	0.924 1	0.934 3	0.722 2	0.949 3	0.936 0
	用户精度	0.956 9	0.958 8	0.971 8	0.869 0	0.941 2	1.000 0		
方案7	生产者精度	0.990 2	0.966 1	0.988 5	0.962 0	0.992 7	0.777 8	0.977 2	0.971 2
	用户精度	0.990 2	0.977 1	0.994 2	0.950 0	0.951 0	1.000 0		

表5 2022年7种方案分类精度

Tab. 5 Classification accuracy of 7 schemes in 2022

方案	评价指标	建设用地	耕地	纯水体	浮水植物	挺水植物	林地	总体精度	Kappa系数
方案1	生产者精度	0.982 6	0.972 2	0.991 5	0.959 3	0.986 4	0.866 7	0.951 4	0.940 2
	用户精度	0.965 8	0.990 6	0.991 5	0.983 3	0.941 9	1.000 0		
方案2	生产者精度	0.921 7	0.848 0	0.991 5	0.918 7	0.891 9	0.566 7	0.896 8	0.872 8
	用户精度	0.861 8	0.898 3	0.983 2	0.904 0	0.840 8	1.000 0		
方案3	生产者精度	0.973 9	0.984 0	0.991 5	0.878 0	0.837 8	0.566 7	0.912 0	0.891 6
	用户精度	0.903 2	0.931 8	0.915 0	0.830 8	0.898 6	1.000 0		
方案4	生产者精度	0.991 3	0.944 4	0.991 5	0.975 6	0.986 5	0.900 0	0.974 3	0.968 9
	用户精度	0.974 4	1.000 0	0.991 5	0.975 6	0.941 9	1.000 0		
方案5	生产者精度	1.000 0	0.976 0	0.991 5	0.975 6	0.959 5	0.666 7	0.965 1	0.957 0
	用户精度	0.974 6	0.983 9	1.000 0	0.937 5	0.934 2	1.000 0		
方案6	生产者精度	1.000 0	0.992 0	0.991 5	0.918 7	0.945 9	0.600 0	0.951 4	0.940 2
	用户精度	0.905 5	0.946 6	0.991 5	0.982 6	0.933 3	1.000 0		
方案7	生产者精度	1.000 0	0.972 2	0.991 5	0.967 5	0.986 5	0.900 0	0.978 9	0.974 3
	用户精度	0.974 5	0.990 6	0.991 5	0.991 6	0.954 2	0.964 3		

表6 方案7特征变量重要性排序

Tab. 6 Importance ranking of feature variables of scheme 7

特征变量	重要性/%	特征变量	重要性/%
植被衰减指数	7.695	地表水体指数	5.318
对比度	6.398	集群凸显性	4.716
裸土指数	6.397	熵	4.667
反差分矩阵	6.201	增强型植被指数	4.044
归一化植被指数	6.029	平方比	3.641
后向散射强度和	5.902	散射比率	3.542
归一化水体指数	5.780	相关性	3.441
散射总功率	5.571	角二阶矩	3.420
绿度叶绿素植被指数	5.450	后向散射强度差	3.249
频率差异指数	5.364	方差	3.175

区域,耕地与湿地边界处表现出耕地—挺水植物—浮水植物—水体的逐渐过渡,与朱金峰等^[6]的研究结果基本一致。

对比2017年和2022年白洋淀各地类面积及占比发现:2017年白洋淀湿地面积156.74 km²,占研究区总面积的45.08%,其中纯水体65.15 km²,浮水植物21.05 km²,挺水植物70.55 km²;2022年白洋淀湿地面积达226.56 km²,占研究区总面积的65.17%,其中纯水体29.35 km²,浮水植物66.15 km²,挺水植物131.05 km²(表7)。2017—2022年间,白洋淀的湿地面积显著增加,耕地面积显著降低,林地面积增加(表7)。对比2017年和2022年的分类结果图(图2),目视有明显变化的地区为藻荇淀南部和马棚淀北部(羊角淀),在2022年耕地转变为湿地,烧车淀东侧

的部分湿地转变为林地;相较于2017年,2022年的浮水植物长势更加旺盛。

2.3 土地利用转移分析

通过白洋淀湿地的随机森林分类结果,计算得到2017—2022年的土地利用转移矩阵(表8)。湿地面积的增长主要来自于耕地的转换,图3直观地展示了地类之间相互转换的数量,其中较为明显的有耕地向浮水、挺水植物区域和林地的转换,转换面积分别为15.987 0、51.415 9和10.534 5 km²。2019年7月,白洋淀开始实施退耕还淀还湿,从府河入藻荇淀、到孝义河入马棚淀、再到唐河入羊角淀的河口区域,退耕还淀面积近16 500亩(11 km²),建成功能性生态湿地^[4]。2020年,白洋淀子淀区进一步实施大规模退耕还淀。退耕还淀工程的成功实施,将白洋淀湿地面积从2017年的156.74 km²增加到了2022年的226.56 km²。

淀区内总的水体面积(浮水植物+纯水体)从86.2 km²增加到了95.5 km²。水体面积的增长一方面来源于退耕还淀,另一方面来源于生态补水,黄河、长江和水库等多水源渠道为白洋淀提供外部补给,维持了淀区水位稳定。除了湿地和非湿地之间的转换,湿地景观类型之间的转换也很显著,其中纯水体向浮水植物的转换(36.296 6 km²)最为明显。开阔水体大面积被浮水植物覆盖,一定程度上说明白洋淀湿地的水质和生态环境自2017年以来得到了改善。

2.4 景观格局指数分析

斑块数目和平均斑块面积一定程度上揭示了景

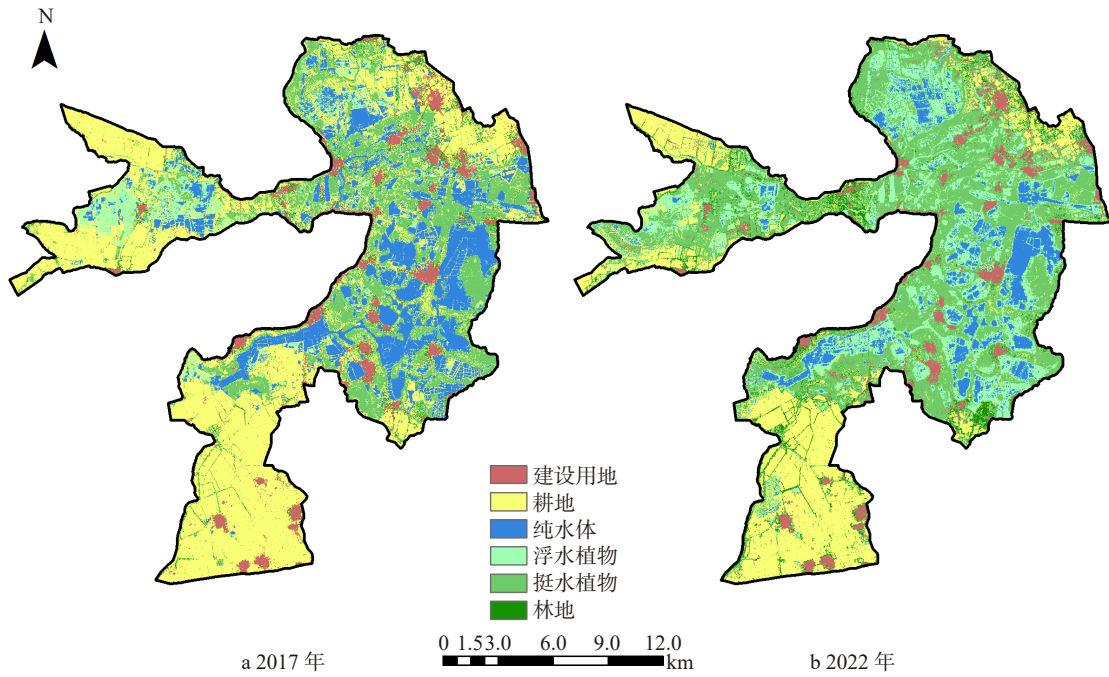


图 2 2017 年和 2022 年方案 7 的分类结果

Fig. 2 Classification results of scheme 7 in 2017 and 2022

表 7 白洋淀湿地下垫面各地类面积及占比

Tab. 7 Area and proportion of various types of underground surface in Baiyangdian wetland

地类	2017年		2022年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
建设用地	20.58	5.92	18.44	5.30
耕地	158.92	45.71	82.19	23.64
纯水体	65.15	18.74	29.35	8.44
浮水植物	21.05	6.05	66.15	19.03
挺水植物	70.55	20.29	131.05	37.70
林地	11.42	3.29	20.47	5.89
湿地	156.74	45.08	226.56	65.17

观类型的破碎化程度,同一地物斑块数目越多,平均斑块面积越小,则表示该景观类型越破碎。2017年,水体、挺水植物和林地的斑块数目大于2022年,平

均斑块面积低于2022年,说明相比于2017年(生态修复前),2022年(生态修复后)白洋淀湿地景观破碎化程度变低。连通性、凝聚度和聚集指数可以表征同一景观类型的斑块连通性和聚集程度,值越大表示该景观类型连通性好或高度聚集。2017—2022年,水体的连通性从0.0321增加到0.0428,挺水植物区域从0.0161增加到0.0234;水体的聚集指数从91.8446增加到94.1134,挺水植物区域从86.1290增加到88.5146,林地从59.7432增加到71.7496(表9)。这说明生态修复后,水体、挺水植物和林地自身的连通性和聚集度都有不同程度的提升。杨苗等^[24]分析白洋淀区域的景观变化趋势并推测:2017—2030年,白洋淀区域斑块分布将趋于集中,连通性增强,环境治理和生态修复措施将会对白洋淀景观格局变化起主导作用。本研究结果与该推测基本一致。

表 8 白洋淀湿地土地利用转移矩阵

Tab. 8 Land use transfer matrix of Baiyangdian wetland

年份	项目	2022年					
		建设用地	耕地	纯水体	浮水植物	挺水植物	林地
2017年	建设用地	13.062 0	1.181 8	0.011 4	0.124 0	5.073 4	1.122 1
	耕地	3.596 1	73.670 7	3.752 1	15.987 0	51.415 9	10.534 5
	纯水体	0.120 2	0.934 3	22.730 1	36.296 6	4.830 7	0.245 9
	浮水植物	0.053 6	1.904 1	1.955 7	9.962 7	6.713 9	0.459 8
	挺水植物	1.110 9	3.534 1	0.853 1	3.463 1	56.984 9	4.617 0
	林地	0.493 5	0.984 8	0.056 4	0.330 6	6.065 1	3.495 1

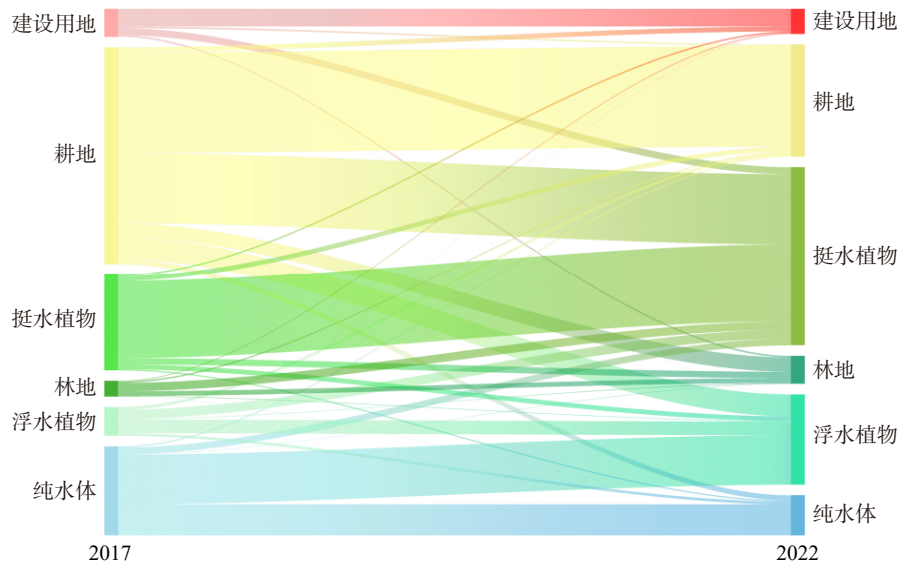


图3 土地利用转移桑基图

Fig. 3 Sankey chart of land use transfer

表9 2017年、2022年白洋淀景观格局指数

Tab. 9 Landscape pattern indices of Baiyangdian in 2017 and 2022

地类	斑块数目		平均斑块面积		连通性		凝聚度		聚集指数	
	2017年	2022年	2017年	2022年	2017年	2022年	2017年	2022年	2017年	2022年
建设用地	4 256	6 812	0.483 4	0.270 6	0.032 3	0.026 8	97.064 5	95.608 0	87.053 3	82.622 9
耕地	16 890	16 884	0.940 5	0.486 7	0.017 1	0.011 0	99.557 5	99.341 2	89.436 8	89.642 3
水体	6 194	4 161	1.390 9	2.294 0	0.032 1	0.042 8	99.428 7	99.322 4	91.844 6	94.113 4
挺水植物	13 236	11 495	0.532 6	1.139 5	0.016 1	0.023 4	98.101 1	99.781 8	86.129 0	88.514 6
林地	13 664	12 649	0.083 6	0.161 6	0.012 5	0.014 5	81.414 0	93.071 4	59.743 2	71.749 6

3 讨 论

白洋淀湿地下垫面复杂,空间异质性强,景观破碎化程度较高,使用单一数据源或特征的分类结果精度较低。而基于多源数据多特征组合的分类方法,同时考虑了地物在多光谱影像上的光谱特性和纹理,以及在 SAR 影像上的后向散射特性,在提高分类精度的同时,有效避免了“同物异谱”或“同谱异物”现象。

在分类方法上,本研究选择了较为成熟的机器学习算法—随机森林分类法,该方法普遍应用于地物分类研究中,经大量研究^[25-27]验证具有较高的可信度。但仅使用随机森林分类器的分类方法具有单一性,白洋淀湿地较强的空间异质性使得单分类器分类方法的性能变差。使用多分类器组合对比分析或深度学习框架进行分类,能够有效减小分类器本身对分类精度的影响。此外,增加样本点数量,提高样本点选择的准确性(实地考察与 GPS 定位),可以有效降低人工目视选择样本时造成的误差,提高分类精度。本研究对白洋淀湿地的分类是基于遥感影

像像素进行的,而基于像素的分类结果普遍存在一定的“椒盐”噪声。要想从根本减少或避免“椒盐”噪声的产生,可考虑在分类前将影像分割为对象,使用面向对象的方法进行分类。Zhang 等^[28]使用 Sentinel-1 和 GF-6 影像对湿地进行集成分类,对比了基于像素和基于对象的分类结果,发现基于对象的分类结果“椒盐”现象要少得多,并且有更加清晰的地类边界和更高的精度。

在对白洋淀湿地变化情况的分析中,讨论了湿地下垫面类型之间的转换和景观格局的变化,但缺少对白洋淀地区水质变化的研究分析。2018 年府河口采用“前置沉淀生态塘+潜流湿地+水生植物塘”的近自然水质净化工艺,从源头上改善了白洋淀的水质^[29]。与此同时,淀区内开展污水、垃圾综合治理,减少氮、磷的输入。白洋淀水质已经从 2017 年的劣五类逐年改善,截至 2021 年,淀区已达三类水标准。水质变化也是生态修复工程带来的重大改变,在未来的研究中,可以考虑水质指标与遥感影像波段之间的关系,建立水质参数反演模型,研究白洋淀湿地的水质变化情况。

4 结 论

本研究引入提取能力更强的 SAR 数据, 基于 Sentinel-1 SAR 影像和 Sentinel-2 多光谱影像, 提取了光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征, 使用 7 种分类方案, 结合随机森林分类方法对白洋淀湿地进行分类, 并分析了生态修复前后, 白洋淀湿地下垫面和景观格局指数的变化情况。研究得到以下主要结论。

(1) 随分类特征数量的增加, 分类精度有所提升, 使用光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征 3 种特征组合的分类方案总体精度最高, 3 种特征的重要性贡献率分别为 40.713%、27.269% 和 32.018%, 验证了多特征组合的随机森林分类算法在白洋淀湿地分类的可行性。

(2) 分类结果显示, 2017—2022 年, 耕地面积明显减少, 湿地面积显著增加, 湿地面积的增长主要来自耕地的转换。

(3) 生态修复后, 2022 年林地和水体的破碎化程度均有减小的趋势, 水体、挺水植物和林地的聚集度和连通性都有不同程度的提升, 其中最明显的为林地。

本研究使用多源数据, 提取光谱指数特征、SAR 指数特征和纹理特征对白洋淀湿地进行分类, 探明了白洋淀湿地生态修复前后的变化情况, 验证了生态修复工程的成效。白洋淀湿地下垫面的变化与白洋淀所开展实施的生态修复工程息息相关, 生态修复后, 白洋淀生态总体上得到了改善, 湿地面积增加, 总水体面积增加, 水体连通性变好。白洋淀湿地位于雄安新区, 对于雄安新区乃至整个京津冀地区的生态调节作用至关重要, 目前白洋淀地区的生态环境已经有所改善, 但由于湿地内存在大量村落, 湿地的生态极易遭到人类活动的破坏, 生态修复工作仍需继续。本研究的结果可为后续生态修复及湿地保护工程提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 张素珍, 田建文, 李贵宝. 白洋淀湿地面临的生态问题及生态恢复措施[J]. 水土保持通报, 2007(3): 146–150.
Zhang S Z, Tian J W, Li G B. Ecological problems and restoration measures of Baiyangdian wetland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007(3): 146–150.
- [2] 新华社. 中共中央、国务院决定设立河北雄安新区[J]. 河北水利, 2017(4): 5.
Xinhua News Agency. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council have decided to establish Xiong'an New Area in Hebei Province[J]. Hebei Water Resources, 2017(4): 5.
- [3] 张腾扬. 白洋淀生态修复记[N]. 人民日报, 2022–05–27(13).
Zhang T Y. Ecological restoration of Baiyangdian Lake[N]. People's Daily, 2022–05–27(13).
- [4] 沈占锋, 李均力, 于新菊. 基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 690–698.
Shen Z F, Li J L, Yu X J. Water information extraction of Baiyangdian wetland based on the collaborative computing method[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(5): 690–698.
- [5] 尹德超, 王旭清, 王雨山, 等. 近 60 年来白洋淀流域河川径流演变及湿地生态响应[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 2122–2133.
Yin D C, Wang X Q, Wang Y S, et al. Runoff evolution and wetland ecological response in Lake Baiyangdian Basin in recent 60 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6): 2122–2133.
- [6] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 1975 年—2018 年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 971–986.
Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, et al. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 23(5): 971–986.
- [7] 吕婷婷, 李林森, 朱世峰, 等. 近 30 年来白洋淀土地利用变化规律及驱动力分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 37–44.
Lü T T, Li L S, Zhu S F, et al. Analysis on land use variation law and its driving force of Baiyangdian Lake since recent 30 years[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(3): 37–44.
- [8] 白军红, 房静思, 黄来斌, 等. 白洋淀湖沼湿地系统景观格局演变及驱动力分析[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1634–1644.
Bai J H, Fang J S, Huang L B, et al. Landscape pattern evolution and its driving factors of Baiyangdian lake-marsh wetland system[J]. Geographical Research, 2013, 32(9): 1634–1644.
- [9] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4780–4791.
Zhang M, Gong Z N, Zhao W J, et al. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4780–4791.
- [10] 梁爽, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 基于多季相 Sentinel-2 影像的白洋淀湿地信息提取[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 777–790.
Liang S, Gong Z N, Zhao W J, et al. Information extraction of Baiyangdian wetland based on multi-season Sentinel-2 images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 777–790.
- [11] Mahdianpari M, Salehi B, Mohammadimanesh F, et al. The first wetland inventory map of Newfoundland at a spatial resolution of 10 m using Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the google earth engine cloud computing platform[J]. Remote Sensing, 2019, 11(1): 43.
- [12] Slagter B, Tsendbazar N, Vollrath A, et al. Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: a case study in the St. Lucia wetlands, South Africa[J]. International Journal of Applied Earth Observation and

- Geoinformation, 2020, 86: 102009.
- [13] 常文涛, 王浩, 宁晓刚, 等. 融合 Sentinel-2 红边波段和 Sentinel-1 雷达波段影像的扎龙湿地信息提取 [J]. 湿地科学, 2020, 18(1): 10-19.
- Chang W T, Wang H, Ning X G, et al. Extraction of Zhalong wetland information based on images of Sentinel-2 red-edge bands and Sentinel-1 radar bands[J]. Wetland Science, 2020, 18(1): 10-19.
- [14] 李英华, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响 [J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 62.
- Li Y H, Cui B S, Yang Z F. Influence of hydrological characteristic change of Baiyangdian on the ecological environment in wetland[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(1): 62.
- [15] 王凯霖, 赵凯, 李海涛, 等. 基于综合识别方法的河北白洋淀湿地提取研究 [J]. 现代地质, 2017, 31(6): 1294-1300.
- Wang K L, Zhao K, Li H T, et al. Study on wetland extraction based on the synthetic identification method in the Baiyangdian wetland[J]. Hebei Province Geoscience, 2017, 31(6): 1294-1300.
- [16] Xiang K, Yuan W, Wang L, et al. An LSWI-based method for mapping irrigated areas in China using moderate-resolution satellite data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24): 4181.
- [17] Ren S, Chen X, An S. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(4): 601-612.
- [18] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 622-635.
- Liu L, Kuang G Y. Overview of image textural feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622-635.
- [19] 胡玉福, 邓良基, 匡先辉, 等. 基于纹理特征的高分辨率遥感图像土地利用分类研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(5): 42-45.
- Hu Y F, Deng L J, Kuang X H, et al. Study on land use classification of high resolution remote sensing image based on texture feature[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(5): 42-45.
- [20] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [21] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨 [J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.
- Liu R, Zhu D L. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [22] 张磊, 宫兆宁, 王启为, 等. Sentinel-2 影像多特征优选的黄河三角洲湿地信息提取 [J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 313-326.
- Zhang L, Gong Z N, Wang Q W, et al. Wetland mapping of Yellow River Delta wetlands based on multi-feature optimization of Sentinel-2 images[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 23(2): 313-326.
- [23] Zhang L, Hou G, Li F. Dynamics of landscape pattern and connectivity of wetlands in western Jilin Province, China[J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, 22(3): 2517-2528.
- [24] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7165-7174.
- Yang M, Gong J G, Zhao Y, et al. Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7165-7174.
- [25] 崔小芳, 刘正军. 基于随机森林分类方法和多源遥感数据的湿地植被精细分类 [J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(3): 113-116.
- Cui X F, Liu Z J. Wetland vegetation classification based on object-based classification method and multi-source remote sensing images[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(3): 113-116.
- [26] 宗影, 李玉凤, 刘红玉. 基于面向对象随机森林方法的滨海湿地植被分类研究 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2021, 21(4): 47-55.
- Zong Y, Li Y F, Liu H Y. A study of coastal wetland vegetation classification based on object-oriented random forest method[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2021, 21(4): 47-55.
- [27] 姚杰鹏, 杨磊库, 陈探, 等. 基于 Sentinel-1, 2 和 Landsat 8 时序影像的鄱阳湖湿地连续变化监测研究 [J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 760-776.
- Yao J P, Yang L K, Chen T, et al. Consecutive monitoring of the Poyang Lake wetland by integrating Sentinel-2 with Sentinel-1 and Landsat 8 data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 760-776.
- [28] Zhang M, Lin H. Wetland classification using parcel-level ensemble algorithm based on Gaofen-6 multispectral imagery and Sentinel-1 dataset[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127462.
- [29] 李凤双, 张涛, 白明山, 等. “华北之肾”修复记——白洋淀生态文明实践进行时 [J]. 决策探索 (上), 2021(12): 58-60.
- Li F S, Zhang T, Bai M S, et al. Restoration of the “Kidney of North China”: practice of ecological civilization in Baiyangdian[J]. Policy Research & Exploration, 2021(12): 58-60.

(责任编辑 赵田芸 吴娟
责任编委 臧润国)