*J. Lake Sci.*(湖泊科学), 2027, 39(3):000-000
DOI 10.18307/2027.0353
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

# 三峡工程运用前后长江中游洲滩植物群落演替动态与规律分析*

石　希[1]，夏军强[1**]，周美蓉[1]
（武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，武汉 430072）

**摘　要：**植物是河流洲滩系统的重要组成部分，既承担关键生态服务功能，也是反映外界干扰对洲滩系统影响的核心载体。水库运用调控坝下游洲滩水文地貌条件，显著影响植物群落演替过程。然而，现有全球土地利用数据集与植被类型图受限于时空分辨率不足、分类粒度宽泛，难以支撑长时序、大尺度的植物群落演替研究。本文以长江中游洲滩植被系统为研究对象，构建了融合高分辨率与长时序遥感影像的群落识别方法，反演了近 40 年洲滩植物群落的时空分布格局，揭示了三峡工程运用前后洲滩植物群落演替规律。主要结论如下：（1）近 40 年来，长江中游裸露洲滩占比下降 17.3%，植被覆盖洲滩占比上升 13.0%，人类垦建洲滩占比上升 4.3%；（2）洲滩植被面积扩张主要集中在三峡工程运用后 10 年内，受洲滩淹没频率降低影响，该阶段洲滩植被覆盖面积净扩张约 91.0 km²；（3）三峡工程运用后，由演替早期群落正向演替为后期群落的洲滩面积占比先升后降，而发生逆向演替的洲滩面积占比持续增加；（4）洲滩群落演替方向主要受淹没频率变化驱动，流量过程坦化和局部滩地淤积引发洲滩淹没频率下降，驱动群落正向演替；滩岸崩退导致淹没频率上升，驱动群落逆向演替。本文研究结果为长江中游洲滩生态系统保护与修复提供了理论基础。
**关键词：**三峡工程；长江中游；洲滩植被；群落演替；水文地貌

# On the succession dynamics of floodplain vegetation along the Middle Yangtze River in response to the operation of the Three Gorges Project*

Shi Xi[1]，Xia Junqiang[1**] & Zhou Meirong[1]
(1：*State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan* 430072, *P.R. China)*

Abstract: Vegetation is a core component of riverine floodplain ecosystems. It performs key ecological and environmental functions and serves as a major indicator of external disturbance. Dam regulation alters hydrogeomorphic processes and further changes the succession trajectories of downstream floodplain vegetation. Existing global land-use datasets and vegetation maps have low spatiotemporal resolution and coarse classification accuracy, which limits their use in fine-scale floodplain research. This study focuses on the floodplains of the Middle Yangtze River (MYR) and develops a vegetation identification method based on high-resolution and long-term time-series remote sensing images. This study reconstructs the spatiotemporal distribution of floodplain vegetation communities over the past 40 years and clarifies vegetation succession dynamics before and after the operation of the Three Gorges Project (TGP). The main results are summarized as follows. First, the proportion of bare floodplain areas in the MYR decreased by 17.3% over the past 40 years, while the area of vegetated floodplains increased by 13.0%. Second, the expansion of floodplain vegetation mainly occurred after the TGP operation and before the impoundment of cascade reservoirs. Reduced inundation frequency during this period led to a net vegetation expansion of approximately 91.0 km² in the MYR floodplains. Third, the progressive succession of vegetation communities from early-stage to late-stage types increased significantly after the TGP operation and then gradually decreased. In contrast, retrogressive succession has shown a continuous increasing trend due to persistent river bank collapse. Fourth, the succession direction of vegetation communities is mainly controlled by variations in inundation frequency. Reduced inundation frequency, which is induced by stabilized flow regimes and floodplain aggradation, promotes progressive vegetation succession. Increased inundation frequency caused by river bank collapse leads

*　2026-04-30 收稿；2026-07-13 收修改稿；2026-07-29 录用。
国家自然科学基金项目（52479075；51725902）资助。
**　通信作者；E-mail：xiajq@whu.edu.cn。

to retrogressive succession. This study provides a reliable scientific reference for the protection and ecological restoration of floodplain ecosystems in the Middle Yangtze River basin.

Keywords: Three Gorges Project; the Middle Yangtze River; floodplain vegetation; vegetation succession; hydrogeomorphic process

植物是河流洲滩系统的重要组成部分，既提供关键的生态与环境服务功能，也是指示外界干扰对洲滩系统影响的核心载体。植物群落演替广义上指群落优势种与伴生种相互关系的变化；狭义上可理解为区域内优势群落被其他群落替代的过程[1-2]。自然状态下，洲滩植物群落演替由水文地貌过程协同驱动[3-4]。侧向水文梯度塑造了从临水岸滩至陆地、由演替早期至演替后期的群落分布格局，而滩地地形变化则通过调控生境适宜度与稳定性影响群落演替进程[5-6]。

近几十年来，全球水库建设规模持续扩张。水库运用通过改变坝下游水文地貌过程，驱动洲滩植被系统沿多路径发生演替[7]。水文节律变化影响原有水文连通性与物质输移过程，进而改变优势群落分布；河道下切与滩岸崩退改变局部洲滩地貌，抑制植物群落定殖与扩张[8]。然而，现有研究多聚焦于水文节律变化对洲滩植物群落演替的影响，而对水库运用背景下水文与地貌过程协同驱动群落演替的机制认知较为欠缺。此外，已有研究多基于实地监测或模型模拟，分析坝下游洲滩植物群落演替动态[9-11]。随着卫星遥感技术的快速发展，利用卫星遥感影像解译植物群落演替过程成为可能[12-13]。然而，现有土地覆盖分类图的分类粒度较粗、植被类型图时空覆盖范围有限，均难以满足大范围洲滩植物群落演替的研究需求[14-15]。此外，植物群落演替对水库运用的响应具有滞后性，往往需数十年方可达到平衡态[16]。因此，亟须结合实地观测数据与多源卫星遥感影像，构建流域尺度、长时序植物群落分布数据集，进而揭示坝下游洲滩群落演替对水文地貌过程变化的响应机制。

本文以长江中游洲滩植被系统为研究对象，开展群落实地调查与监测，融合 PlanetScope 与 Landsat 遥感影像构建群落识别方法，生成近 40 年长江中游洲滩植物群落分类图。在此基础上，结合洲滩淹没频率与断面地形资料，从群落面积、演替动态与演替格局三个维度，分析三峡工程运用前后洲滩植物群落的演替规律。研究结果可为长江中游洲滩生态保护及修复提供数据与理论支撑。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 长江中游水沙与洲滩概况

长江中游河段上起宜昌、下迄湖口，全长约 955 km，根据水文地貌特征与河型差异，可划分为宜枝、荆江、城汉、汉湖四个河段。三峡大坝位于宜昌水文站上游约 44 km 处，自 2003 年正式蓄水运用以来，长江中游水沙节律发生显著变化：年径流量虽保持相对稳定，但年内流量过程坦化，枯水与中水流量级下的水位显著降低，高水位历时缩短、退水期提前，洲滩淹没频率显著下降[17]；年输沙量较工程运用前减少约 90%，致使河床持续冲刷下切，局部滩岸大幅崩退。

受水沙节律变化影响，部分洲滩丧失与主河道之间的水文连通性，其植被动态不再受河道水位波动调控。因此，本文研究的长江中游洲滩特指三峡工程运用前后与主河道始终保持水文连通性的区域。为明确其范围，选取工程运用前后最高水位洪水事件（1998 年与 2020 年大洪水），分别采用 Landsat 和 Sentinel-2 遥感影像提取其最大淹没范围，并将两者交集作为研究区域（图 1）。据此界定的长江中游洲滩，汛期出露面积为 620～980 km²，枯水期出露面积为 1110 km²，其中江心洲面积约 350 km²（32%），主槽两侧滩地面积约 760 km²（68%）。此外，本研究所采用的断面地形资料均来自水利部长江水利委员会水文局，涵盖 2003—2023 年宜枝至汉湖河段 431 个断面的汛后地形数据。

### 1.2 卫星遥感数据收集与预处理

1.2.1 Landsat 遥感影像　Landsat 是全球连续观测时序最长的陆地卫星计划，自 1982 年起提供 30 m 多光谱遥感数据；单星重访周期 16d，当双星组网协同观测，同一区域有效重访周期缩短至 8 天。本研究从 USGS Earth Explorer 平台（https://earthexplorer.usgs.gov）检索并下载了 1988—2023 年覆盖研究区域的所有 Tier 1 级 Landsat Level 2 产品，共计 4079 景，包含可见光至短波红外波段的地表反射率。针对 Landsat 7 ETM+传感器 SLC 失效问题，选用原始影像以避免空间插值对时序分析的影响。

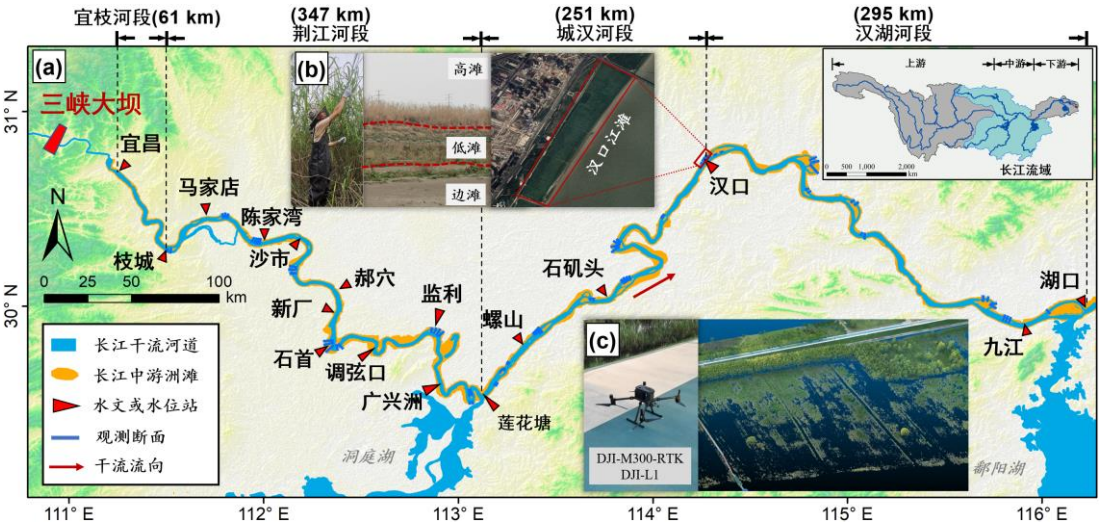


图 1 长江中游河段概况及洲滩分布图

Fig.1 Distribution of riverine floodplains in the Middle Yangtze River

预处理采用自主开发的 Landsat 工具箱对所有产品进行光谱谐和与去云处理（https://github.com/shixi2ng/HydroSedVeg_module/Landsat_toolbox）。光谱谐和采用 Roy 等（2016）构建的光谱谐和方程，将 Landsat OLI 各波段反射率校正至 TM/ETM+观测基准[18-19]。去云处理则遵循 USGS 官方产品指南，结合 CFMask 4.0 算法生成的质量评估波段[20]，剔除受云、云阴影及卷云污染的像元。

1.2.2 PlanetScope 遥感影像　PlanetScope 卫星星座自 2017 年正式组网运行，可提供 3 m 空间分辨率的逐日或隔日遥感影像。本研究从 Planet Explorer 平台（https://planet.com/explorer）检索并下载了 2023 年 7—9 月覆盖研究区域、云量低于 5%的 PlanetScope Level-3B 产品，共计 84 景，包含经正射校正与大气校正处理后的可见光至近红外波段地表反射率。该时段受流域极端干旱气候影响，滩地充分出露且植物多处于成熟期，不同群落冠层特征差异显著，利于群落识别。本研究采用 ArcMap 对所有影像进行镶嵌与裁剪处理，生成覆盖研究区域的 2023 年高分辨率无云影像。

### 1.3 长江中游洲滩植物实地调查数据收集

1.3.1 沿岸洲滩植物群落实地调查　为构建长江中游洲滩植物群落分布数据集，本研究于 2020—2024 年开展多期野外调查，覆盖江心洲及两侧滩地，调查时段选为每年植物生长季与非汛期重叠期。野外调查开始前，基于 PlanetScope 遥感影像，沿河道深泓线布设 76 组观测断面，并在各断面不同高度层共设置 198 个 1 m×1 m 的临时观测样方（图 1）。

调查过程中，逐样方获取其内优势种植物影像，使用 iNaturalist 平台结合植物图鉴，确定各样方主要群落类型；同时利用 DJI Phantom 4 Pro 无人机获取覆盖所有样方的航拍影像，经过 Pix4D 进行几何校正与影像镶嵌、eCognition 10.3 进行多尺度分割后，以样方尺度群落分布数据为语义层进行对象标注，构建斑块尺度植物群落分布数据集。

1.3.2 典型洲滩植被生长动态监测　为确定洲滩不同群落优势种植物的年内生长特征，于 2021—2023 年在汉口江滩与天兴洲开展生物量监测。生长季开始前，依据前一年航拍影像在边滩、低滩、高滩各布设 10 m×10 m 采样区，确保样区内植物群落构成与长势具有较高的空间同质性。生长季开始后，快速生长期每 2 周采样 1 次，成熟期每月采样 1 次。每次采样过程中，逐样区选取 0.25 m×0.25 m 的代表性样方，齐地表刈割地上部分并带回实验室。样品经 105 °C 杀青 30 min 后，于 80 °C 烘至恒重，以恒重值作为该样方地上生物量。通过多时段重复采样，构建典型洲滩生物量监测数据集。

1.3.3 洲滩植物群落分层情况　实地调查与已有研究表明[21-23]，长江中游洲滩沿侧向水文梯度可划分为边滩、低滩和高滩三层（图 2）。各层植被在群落组成、演替阶段与物候节律方面存在明显差异：

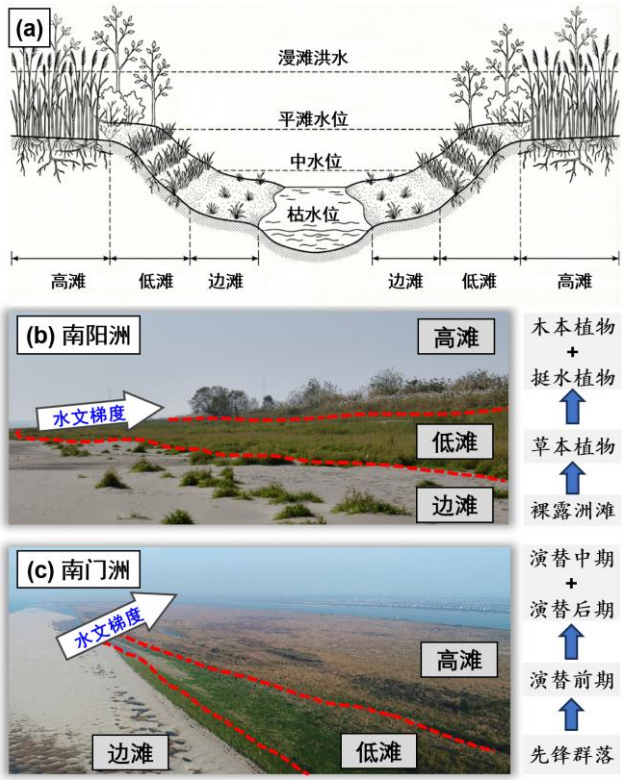


图 2 长江中游洲滩植物侧向分层及各层群落组成

Fig.2 Lateral zonation and community composition of floodplain vegetation in the Middle Yangtze River

（1）边滩中水位淹没，枯水位出露水面。该层以裸露洲滩为主，仅分布酸模（*Rumex acetosa*）和荠菜（*Capsella bursa-pastoris*）等少量先锋植物群落。受汛期淹没影响，边滩植物呈现汛前、汛后一年两季的物候节律，植被覆盖度和生物量极低；

（2）低滩位于中水位以上，受汛期水位涨落影响呈季节性淹没。该层以一年生草本植物为主，包括虉草（*Phalaris arundinacea*）和灰化薹草（*Carex cinerascens*）等演替早期群落，同时伴生少量低矮挺水植物[24]。此类植物耐淹能力较强，可适应周期性淹没，植被覆盖度和生物量高于边滩；

（3）高滩位于洲滩最上层，仅洪水位时淹没。该层以多年生植物为主，包括芦苇（*Phragmites australis*）、南荻（*Miscanthus lutarioriparius*）和白茅（*Imperata cylindrica*）等演替中期挺水植物与中后期木本植物[25]。此类植物耐淹能力随生长阶段变化，植被覆盖度高且冠层茂密。

生物量监测数据与 Landsat 植被指数（OSAVI）时间序列均表明，低滩草本与高滩挺水、木本植物的年内生长过程可划分为休眠期、快速生长期、成熟期和枯萎期四个阶段，但物候节律差异显著（图 3）：（1）草本植物快速生长期最短，地上生物量于四月中旬达到峰值，OSAVI 在成熟期缓慢下降，枯萎期迅速下降，呈双阶段下降模式；（2）挺水植物快速生长期于 4 月下旬结束，地上生物量于 7 月中旬达到峰值，OSAVI 亦呈双阶段下降；（3）木本植物快速生长期最长，于 5 月上旬结束，OSAVI 呈枯萎期单阶段下降。

## 2 研究方法

### 2.1 洲滩植物群落识别方法

基于植物群落物候节律与冠层结构差异，本文构建融合 PlanetScope 与 Landsat 遥感影像的植物群落识别方法，包含面向对象的群落分类模型与基于连续变化检测与分类算法（continuous change detection and classification，CCDC）的时序分类模型（图 4）。

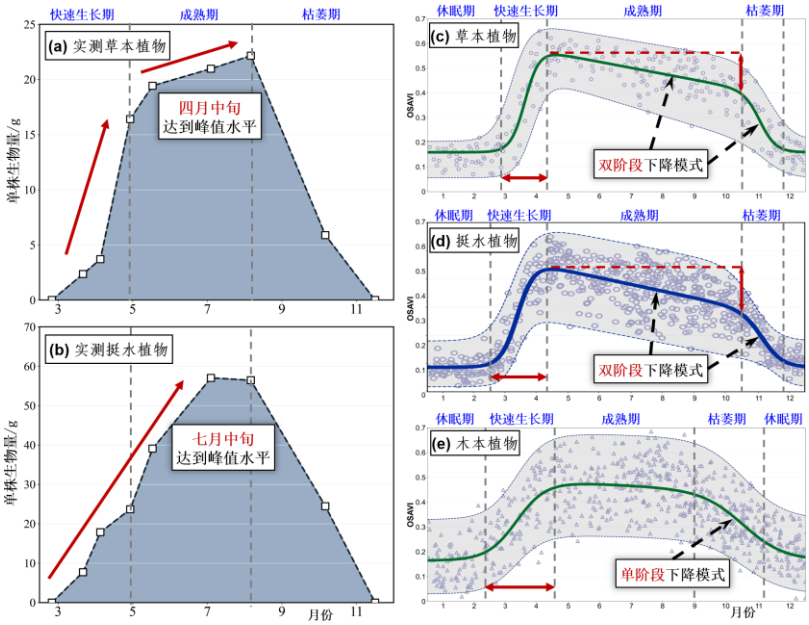


图 3 基于实地监测与 Landsat 植被指数序列的不同植物群落物候过程对比

Fig. 3 Comparison of phenological processes among different vegetation communities based on in-situ biomass and Landsat-derived OSAVI series

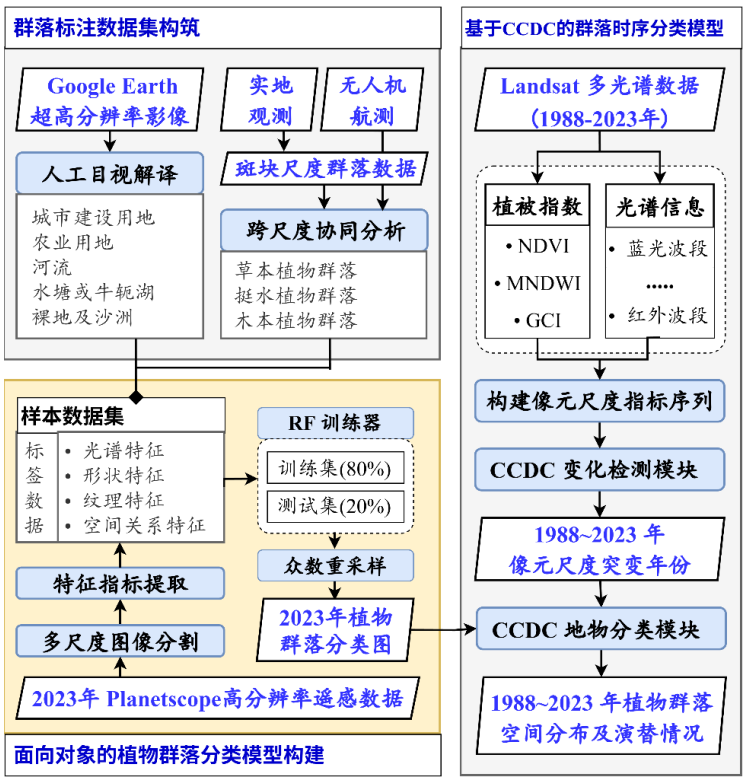


图 4 融合 PlanetScope 与 Landsat 遥感影像的洲滩植物群落识别方法流程

Fig. 4 Flowchart of floodplain vegetation community identification method integrating PlanetScope and Landsat imagery

2.1.1 面向对象的群落分类模型构建　基于群落冠层结构差异与 PlanetScope 高分辨遥感影像，在空间维度构建面向对象的群落分类模型，以获取 2023 年洲滩植物群落分布图，为后续构建时序分类模型提供样本数据集，包括以下三步（图 4）：

（1）样本构筑。依据 Anderson 分类体系[26]，将研究区域划分为裸露洲滩、植被覆盖洲滩、人类垦建洲滩与永久性水体四类。结合实地观测数据与《湿地资源调查技术规程（TD/T 1109-2025）》，将植被覆盖洲滩细分为草本、挺水与木本植物群落，人类垦建洲滩划分为农业用地与建设用地，永久性水体划分为河道、水塘与牛轭湖。随后，采用斑块尺度群落分布数据集标注植物群落类型，并采用目视解译法标注高分辨率遥感影像中的人类垦建洲滩、裸露洲滩与永久性水体，同时确保各河段内各类型样本数量均衡。

（2）影像分割。采用 eCognition 10.3 中的多尺度分割算法，将 PlanetScope 影像分割为光谱与纹理特征高度同质的独立对象。分割所用光谱特征包括 8 个波段的地表反射率及 NDVI、GCI、NDWI 三种指数，分别用于反映植被覆盖度与生物量、植被冠层叶绿素含量以及判别水体范围[27-29]。

计算光谱异质性时，将 NDVI、GCI、NDWI 的权重系数设为 0.2，其余各波段权重系数设为 0.05；计算形状异质性时，考虑到河流洲滩系统中地物对象多呈条带状，将紧凑度指数的权重系数设为 0.1。光谱异质性与形状异质性的权重比设定为 7:3。最优分割尺度参数采用 Dragut 等（2014）基于局部方差法开发的 ESP2 工具箱确定[30]。

（3）特征指标提取。在对象尺度提取以下四类特征指标：①光谱特征：各对象内部像元 8 波段与三种指数的平均值、标准差、峰度、最大值与最小值；②纹理特征：各对象 NDVI 与 NDWI 灰度共生矩阵在 0°、45°、90°、135°四个方向上的角二阶矩、不相似性、同质性及方差；③形状特征：各对象面积、长宽比与不对称性；④空间关系特征：各对象与最近河道水体对象间的欧氏距离。

群落分类模型采用随机森林算法，将样本数据按河段分布等比例划分为训练集（80%）和验证集（20%）。通过调整超参数优化模型精度和泛化能力。最终，利用训练后模型生成 2023 年 3 m 分辨率洲滩植物群落与土地覆盖分类图，并采用众数重采样至 Landsat 30 m 格网。

2.1.2 基于 CCDC 的群落时序分类模型构建　基于群落物候节律差异与 Landsat 长时序遥感数据，以§2.1.1 提取的植物群落分布图为样本数据，在时间维度构建基于 CCDC 的群落时序分类模型，主要包括以下两步（图 4）：

（1）突变时点识别。采用 CCDC 谐波回归逐像元拟合 Landsat 时序数据，结合卡方检验识别土地覆盖类型突变时点，将长时序数据分割为若干子序列。各子序列包括反映年际变化的趋势项和年内变化的谐波项。为充分反映不同植物群落物候节律差异并避免过拟合，将谐波项总阶数设定为 3。所用波段及光谱指数包括可见光至短波红外波段地表反射率与 OSAVI、GCI 和 MNDWI[31]。此外，将 CCDC 算法（https://github.com/GERSL/CCDC）移植至 Landsat 工具箱中，以实现模块调用与并行处理。参照既有研究结果，将 CCDC 算法中最少观测数设为 5，卡方检验阈值设为 0.99，子序列最小长度设为 2 a[14]。

（2）时序分类模型构建。为融合群落分类图与土地覆盖变化过程，采用 XGBoost 算法构建群落时序分类模型[32]。模型以各像元各波段的谐波项系数为自变量，以相应年份土地覆盖与植物群落类型为因变量。

模型训练与验证以 2023 年 30 m 洲滩植物群落与土地覆盖分类图为样本数据。为降低像元混合效应对分类精度的影响，剔除重采样过程中由两种以上土地覆盖类型构成的混合像元，并将河道水体、水塘与牛轭湖合并为水体。将样本数据按河段分布等比例划分为训练集（80%）和验证集（20%），并采用四折交叉验证法调优模型超参数。最终，利用训练后模型生成 1988—2023 年长江中游洲滩植物群落与土地覆盖分类图。

### 2.2 洲滩淹没频率反演方法

本文采用 Shi 等提出的动态淹没阈值法，结合 Landsat 遥感影像与土地覆盖分类图提取洲滩淹没范围[33]。该方法利用同一像元在相同土地覆盖类型下汛期（5—10 月）与非汛期（11—翌年 4 月）MNDWI 的差异，结合直方图双峰分析法构建动态淹没阈值，进而判别各时相该像元的淹没状态。随后，汇总相同时相下的淹没像元，采用八向连通性法则判别淹没斑块与主河道间的水文连通性，剔除非漫滩洪水引起的淹没区域。最终，基于多时相数据统计不同时段内的洲滩淹没频率。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 洲滩植物群落识别方法精度评价

洲滩植物群落时序分类模型在训练集与验证集上均表现出较高的精度，总体精度分别为 0.78 和 0.75。从不同植物群落来看，模型分类精度存在一定差异（表 1）：挺水植物分类性能最佳，训练集和验证集 F1-score 分别为 0.84 与 0.82；木本植物次之，训练集和验证集 F1-score 分别为 0.68 与 0.62，表明模型对两者物候节律的解释能力较强。

相比之下，草本植物、农业用地与裸露洲滩的召回率相对较低，主要原因如下：（1）存在大量挺水植物与草本植物及农业用地混合的像元，由于挺水植物占比较高，模型倾向于预测多数类；（2）草本植物与农业用地的时序和光谱特征高度相似，易产生错分与漏分。然而，鉴于农业用地与挺水、草本植物之间的转换不属于洲滩自然演替过程，故可忽略其对群落演替规律的影响。

表 1 洲滩植物群落识别方法精度评价

Tab. 1 Accuracy assessment of floodplain vegetation community identification method

| 精度指标 | | 植物群落或土地覆盖类型 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 裸露洲滩 | 草本植物 | 挺水植物 | 木本植物 | 农业用地 | 永久性水体 |
| 训练集（80%） | 精确率 | 0.83 | 0.62 | 0.75 | 0.84 | 0.75 | 0.83 |
| | 召回率 | 0.66 | 0.30 | 0.97 | 0.57 | 0.45 | 0.93 |
| | F1-score | 0.73 | 0.39 | 0.84 | 0.68 | 0.56 | 0.88 |
| 验证集（20%） | 精确率 | 0.75 | 0.52 | 0.72 | 0.77 | 0.70 | 0.79 |
| | 召回率 | 0.59 | 0.26 | 0.95 | 0.52 | 0.40 | 0.83 |
| | F1-score | 0.65 | 0.34 | 0.82 | 0.62 | 0.51 | 0.81 |

### 3.2 近 40 年长江中游不同类型洲滩面积的变化特征

近 40 年来，长江中游裸露洲滩、植被覆盖洲滩与人类垦建洲滩总面积稳定在约 1110 $km^2$，但三者占比持续变化。从长时间尺度来看，裸露洲滩占比持续下降，植被覆盖洲滩占比相应上升，人类垦建洲滩占比小幅增长（图 5）：裸露洲滩占比由 1988 年的 32.1%降至 2023 年的 14.8%，面积净萎缩约 187.8 $km^2$；植被覆盖洲滩占比由 1988 年的 56.7%增至 2023 年的 69.7%，面积净扩张约 142.5 $km^2$。其中，挺水、草本与木本植物群落占比均呈增长态势：挺水与木本植物群落增幅较大，占比分别由 1988 年的 29.6%和 13.3%增至 2023 年的 37.9%和 17.3%，面积分别净扩张约 90.6 $km^2$ 和 44.0 $km^2$；草本植物群落增幅较小，由 1988 年的 13.8%微增至 2023 年的 14.5%，面积净扩张仅 7.9 $km^2$。

从河段尺度来看，除宜枝河段外，其余河段各类型洲滩占比的变化特征与长江中游整体一致，但不同河段植被覆盖洲滩扩张幅度存在明显差异：城汉河段裸露洲滩的萎缩幅度最大，1988—2023 年净萎缩约 62.8 $km^2$，而植被覆盖与人类垦建洲滩的净扩张面积基本持平，分别为 30.0 $km^2$ 和 29.5 $km^2$；荆江河段与汉湖河段植被覆盖洲滩的扩张幅度显著高于同期人类垦建洲滩，两河段植被覆盖洲滩分别净扩张约 62.3 $km^2$ 和 50.1 $km^2$，而垦建洲滩仅扩张约 1.9 $km^2$ 与 7.3 $km^2$。相比之下，城汉河段垦建洲滩扩张面积远大于荆江与汉湖河段，表明城汉河段受滩地垦殖建设活动的影响更为显著。

### 3.3 三峡工程运用前后植被覆盖洲滩的扩张规律

为明确三峡工程运用前后洲滩植物群落的扩张规律，计算各河段植被覆盖洲滩面积占比，采用 Dynp 突变检测法分析其年际变化特征（图 6）。结果表明，除宜枝河段外，其余各河段植被覆盖洲滩面积占比均呈阶段性变化，突变年份均为 1998 年和 2013 年：（1）1998 年之前，各河段植被覆盖洲滩占比较低，植被覆盖面积基本维持稳定；（2）1998—2013 年，植被覆盖洲滩占比迅速增长，植物群落向裸露滩地拓殖，植被覆盖面积净增加约 91.0 $km^2$；（3）2013 年之后，植被覆盖洲滩占比维持在较高水平，群落拓殖过程放缓，植被覆盖面积重新趋于稳定。

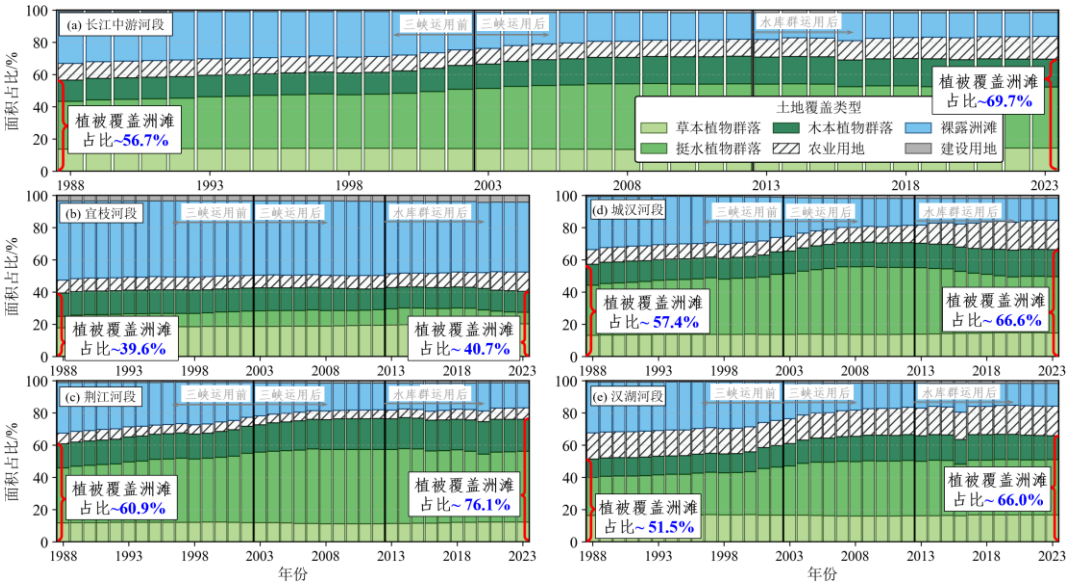


图 5 1988—2023 年长江中游各河段不同类型洲滩占比变化特征

Fig.5 Proportions of different floodplains among reaches in the Middle Yangtze River from 1988 to 2023

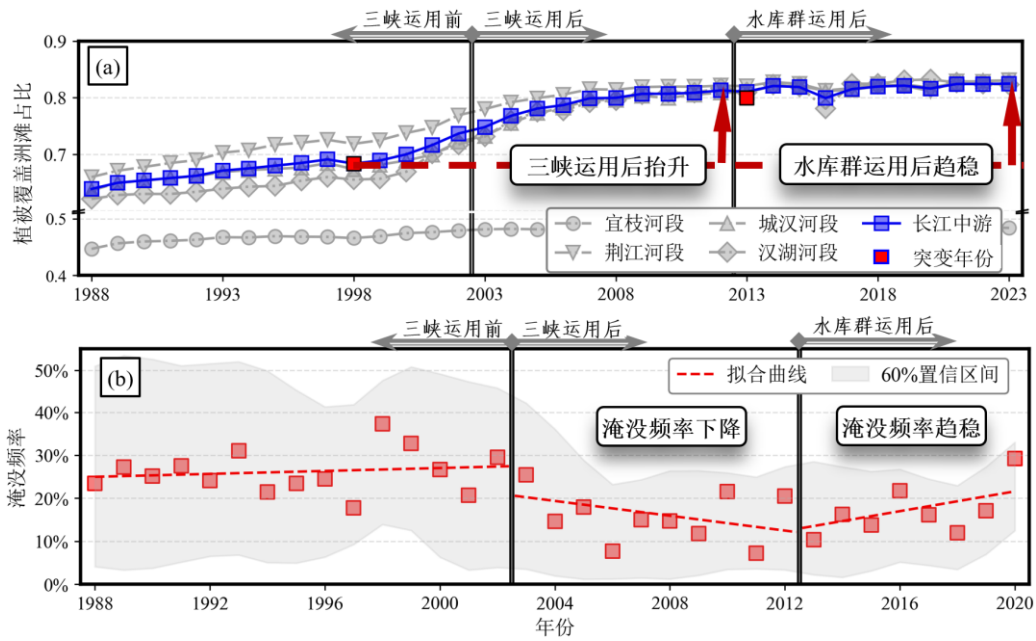


图 6 1988—2023 年长江中游各河段植被覆盖洲滩占比变化特征

Fig.6 Proportion of vegetated floodplain among reaches in the Middle Yangtze River from 1998 to 2023

进一步结合洲滩淹没频率解析洲滩植被面积扩张规律，结果表明，植被覆盖洲滩的分阶段变化特征与流域水库运用时点高度吻合：（1）三峡工程运用前（1988—2002 年），中游洲滩淹没频率稳定在较高水平，植被覆盖面积基本维持稳定；（2）三峡工程运用后 10 年内（2003—2012 年），洲滩淹没频率大幅下降，更多裸露洲滩满足植物群落定殖和生长条件，驱动植被覆盖面积迅速扩张；（3）上游水库群运用后（2013—2023 年），中游水文节律较三峡工程运用后重新趋稳，洲滩淹没频率稳定在较低水平，植被覆盖面积随之趋于稳定。

### 3.4 三峡运用前后中游洲滩植物群落演替规律

伴随洲滩植被面积持续扩张，群落演替过程发生定向变化。为系统解析三峡工程运用前后洲滩植物群落演替规律，基于各阶段植物群落与土地覆盖分类图，根据演替方向不同，采用桑基图对比分析三个阶段内发生正向演替（指由裸露洲滩或演替早期群落转变为中后期群落的过程[34]）与逆向演替（指由演替中后期群落转变为早期群落乃至退化为裸露洲滩的过程）的洲滩面积占比（图 7）。

结果表明，三峡工程运用后 10 年内，发生正向演替的洲滩面积占比大幅提升，但在上游水库群运用后明显回落；而发生逆向演替的洲滩面积占比则在三峡及上游水库群运用后持续增长：（1）三峡工程运用前，发生正向与逆向演替的洲滩面积占比分别为 8.1%和 2.5%；（2）三峡工程运用后 10 年内，正向与逆向演替的洲滩面积占比分别升至 15.7%与 3.2%；（3）上游水库群运用后，正向演替面积占比回落至 8.5%，逆向演替面积占比升至 4.4%。从不同群落类型来看，由裸露洲滩正向演替为各类植物群落的洲滩面积占比均呈先升后降的态势，而受滩地垦殖影响由其他群落转变为木本植物的面积占比则在工程运用后持续上升。

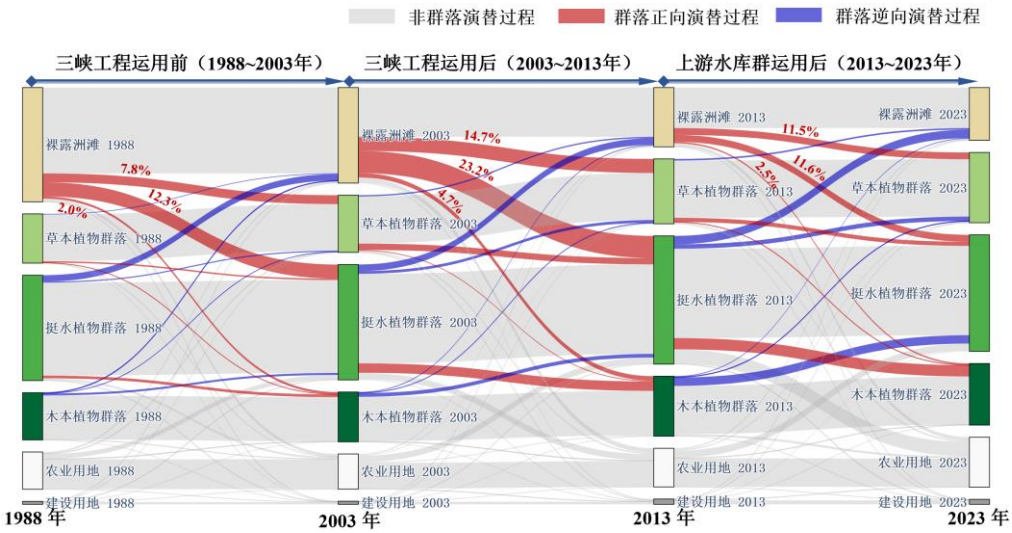


图 7 1988—2023 年长江中游洲滩植物群落与土地覆盖类型变化桑基图

Fig.7 Sankey diagram of floodplain vegetation succession in the Middle Yangtze River from 1988 to 2023

### 3.5 三峡工程运用后典型江心洲植物群落演替格局

为阐释坝下游洲滩植物群落演替对水文地貌过程变化的响应机制，选取城汉河段南阳洲作为典型江心洲分析其群落演替格局。与中游河段整体一致，南阳洲群落演替过程可分为三个阶段：

（1）三峡工程运用前，南阳洲群落分布基本稳定，仅洲尾局部裸露洲滩正向演替为挺水植物（图 8a、b）。该阶段年均正向演替面积为 0.014 $km^2/a$，年均逆向演替面积为 0.008 $km^2/a$；

（2）三峡工程运用后 10 年内，植被面积迅速扩张，左缘大范围裸露洲滩正向演替为挺水植物；右缘少部分区域退化为裸露洲滩（图 8b-d）。该阶段年均正向演替面积升至 0.9 $km^2/a$，年均逆向演替面积小幅升至 0.1 $km^2/a$；

（3）上游水库群运用后，植被面积扩张趋缓，左缘部分裸露洲滩恢复为草本与挺水植物；同期右缘退化范围扩张（图 8d~e）。该阶段年均正向演替面积降至 0.5 $km^2/a$，年均逆向演替面积增至 0.2 $km^2/a$。

结合断面地形资料与淹没频率分布图，进一步分析群落演替过程对水文地貌变化的响应机制。结果表明，群落演替方向与淹没频率变化呈显著负相关：正向演替主要发生在淹没频率降低的区域；逆向演替集中在淹没频率升高的区域（图 9）。

分阶段来看，三峡工程运用后，南阳洲左缘支汊因淤积和流量过程坦化，局部淹没频率降低，驱动挺水植物群落向新淤滩扩张；右缘受持续崩退影响，部分植物群落逆向演替退化为裸露洲滩。上游水库群运

用后，水文节律趋于稳定，因而正向演替趋缓；但右缘在 2019 汛后修筑护岸整治工程前持续崩退，驱动逆向演替加剧。

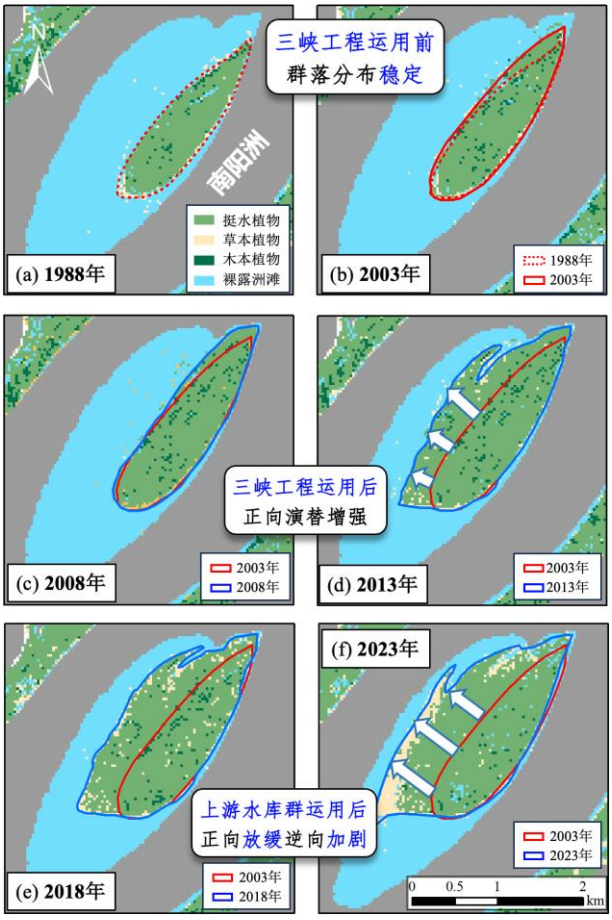


图 8 1988—2023 年南阳洲植物群落演替格局

Fig. 8 Vegetation succession pattern on Nanyang mid-channel bar from 1988 to 2023

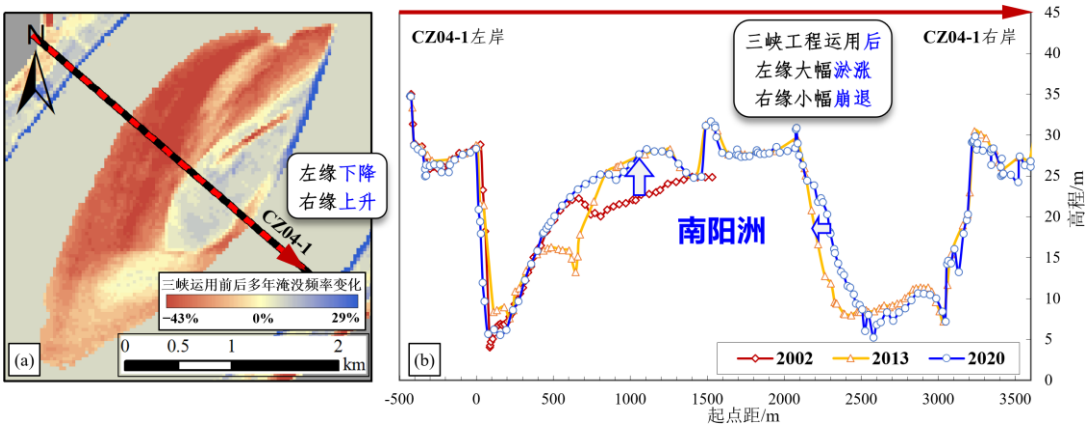


图 9 三峡工程运用后南阳洲水文地貌变化特征

Fig. 9 Hydrogeomorphic changes on Nanyang mid-channel bar after the Three Gorges Project operation

### 3.6 坝下游洲滩植物群落演替动态对河流系统影响

三峡工程运用后，长江中游洲滩植物群落演替动态发生显著变化，进而影响流域生态系统及防洪安全。在生物多样性方面，三峡工程运用初期，先锋植物群落快速拓殖于裸露洲滩，生境异质性短暂提升，局部生物多样性可能存在小幅增长。但随着水文节律趋于稳定，演替中期的挺水植物（芦苇和南荻群落）快速向低滩扩张并成为优势种，导致洲滩植物群落构成趋于单一，低滩生境向高滩趋同，洲滩物种丰富度明显下降，生物多样性可能面临衰退[35]。

在防洪安全方面，随着三峡工程运用后洲滩植被面积快速扩张，正向演替强度持续增强，演替中后期挺水植物与木本植物群落面积大幅增加，洲滩植被覆盖度、冠层茂密程度也持续提升，大幅抬升滩地糙率，降低其过流能力，进而对洪水位产生一定抬升效应[36]。此外，演替后期群落增多会增强滩地泥沙沉积过程并抬高洲滩高程，但三峡及上游水库群运用后，中游河段沙量显著降低，且漫滩洪水频率下降，故群落演替动态对洲滩地貌过程的影响并不显著。

此外，长江中游洲滩植物群落所呈现的正向和逆向演替强度异步变化规律表明，当前三峡水库调度对长江中游洲滩植物群落演替动态的影响已趋于稳定；但在持续冲刷背景下，局部岸滩崩退与河床下切对群落演替动态的影响仍在持续增强，因此未来应重点关注长时间、长距离冲刷对坝下游洲滩植物群落演替动态的影响。

## 4 结论

水库运用通过改变坝下游水文地貌条件，影响洲滩植物群落演替过程，但缺乏长时序、大尺度数据揭示群落演替规律。本文以长江中游洲滩植被系统为研究对象，融合 PlanetScope 与 Landsat 遥感影像构建植物群落识别方法，生成了 1988—2023 年洲滩植物群落分类数据集，系统解析了三峡工程与上游水库群运用影响下洲滩植物群落演替规律。主要结论如下：

（1）近 40 年来，长江中游裸露洲滩占比由 32.1%降至 14.8%，植被覆盖洲滩占比由 56.7%升至 69.7%。其中，挺水与木本植物群落扩张幅度高于草本植物群落。除宜枝河段外，其余河段洲滩面积变化特征与中游整体一致；

（2）植被覆盖洲滩扩张呈现三阶段变化特征。三峡工程运用前，洲滩植被覆盖面积稳定；三峡工程运用后，受淹没频率降低影响，植被覆盖面积扩张 91.0 $km^2$；三峡及上游水库群运用后，水文节律趋于稳定，植被覆盖面积随之趋稳；

（3）三峡工程运用后，发生正向演替的洲滩面积占比大幅增长，而在上游水库群运用后回落，发生逆向演替的洲滩面积占比则在三峡以及上游水库群运用后持续增长；

（4）群落演替方向与淹没频率变化呈显著负相关：流量过程坦化和局部滩地淤积引发的淹没频率下降驱动群落正向演替，滩岸崩退引发的淹没频率上升驱动群落逆向演替。

## 5 参考文献


[1] Du F, Shan L, Liang ZS. Studies on vegetation succession of abandoned arable land in Loess Hilly Regions of northern of Shaanxi Province-analyses of community composition and structure. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, **13**(2): 140-143, 158. [杜峰, 山仑, 梁宗锁. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究-群落组成与结构分析. 草地学报, 2005, **13**(2): 140-143, 158.]

[2] 常恩浩. 黄土高原植被群落恢复演替对坡面侵蚀产沙阻控作用研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2020.

[3] Hughes FMR. Floodplain biogeomorphology. *Progress in Physical Geography*: *Earth and Environment*, 1997, **21**(4): 501-529. DOI: 10.1177/030913339702100402.

[4] Naiman RJ, Bechtold JS, Drake DC *et al*. Origins, patterns, and importance of heterogeneity in riparian systems. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2007: 279-309. DOI: 10.1007/0-387-24091-8_14.

[5] Ward JV. Riverine landscapes: Biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biological Conservation*, 1998, **83**(3): 269-278. DOI: 10.1016/S0006-3207(97)00083-9.

[6] Tockner K, Stanford JA. Riverine flood Plains: Present state and future trends. *Environmental Conservation*, 2002, **29**(3): 308-330. DOI:

10.1017/s037689290200022x.

[7] Gurnell AM, Bertoldi W. Plants and river morphodynamics: The emergence of fluvial biogeomorphology. *River Research and Applications*, 2024, **40**(6): 887-942. DOI: 10.1002/rra.4271.

[8] Nilsson C, Svedmark M. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: Riparian plant communities. *Environmental Management*, 2002, **30**(4): 468-480. DOI: 10.1007/s00267-002-2735-2.

[9] Benjankar R, Jorde K, Yager EM *et al*. The impact of river modification and dam operation on floodplain vegetation succession trends in the Kootenai River, USA. *Ecological Engineering*, 2012, **46**: 88-97. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.05.002.

[10] Yang WJ, Xia SX, Yu XB. Effects of different water level recession timing on the growth and reproduction of the dominant plant in the *Carex cinerascens* marshland of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2025, **37**(2): 590-600. DOI：10.18307/2025.0221. [杨雯娟，夏少霞，于秀波．不同退水时间对鄱阳湖洲滩优势植物灰化薹草(*Carex cinerascens*)生长和繁殖的影响．湖泊科学, 2025, **37**(2): 590-600.]

[11] Zhou F, Chen C, Xu T *et al*. Succession characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in a typical plateau reservoir in Yunnan-Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2024, **36**(3): 695-707. DOI: 10.18307/2024.0313. [周帆，陈晨，徐韬等．云贵高原一座典型高原水库浮游植物群落演替特征及其与环境因子的关系．湖泊科学, 2024, **36**(3): 695-707.]

[12] Zhou HP, Jiang H, Zhou GM *et al*. Monitoring the change of urban wetland using high spatial resolution remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(7): 1717-1731. DOI: 10.1080/01431160902926608.

[13] Zhao B, Yan YE, Guo HQ *et al*. Monitoring rapid vegetation succession in estuarine wetland using time series MODIS-based indicators: An application in the Yangtze River Delta area. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(2): 346-356. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.05.009.

[14] Zhang X, Zhao TT, Xu H *et al*. GLC_FCS30D: The first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. *Earth System Science Data*, 2024, **16**(3): 1353-1381. DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.

[15] Su YJ, Guo QH, Hu TY *et al.* An updated vegetation map of China (1:1000000). *Science Bulletin*, 2020, **65**(13): 1125-1136. [苏艳军，郭庆华，胡天宇等．中国植被图(1:1000000)现实性更新（英文）．科学通报, 2020, **65**(13): 1125-1136.]

[16] Merritt DM, Scott ML, LeROY POFF N *et al*. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: Riparian vegetation-flow response guilds. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(1): 206-225. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02206.x.

[17] Li YT, Xue JL, Sun ZH *et al*. Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(4): 1-13. DOI: 10.11660/slfdxb.20210401. [李义天，薛居理，孙昭华等．三峡水库下游河床冲刷与水位变化.水力发电学报, 2021, **40**(4): 1-13.]

[18] Xu YW, Zhang H, Chen ZC *et al*. A case study on pixel-by-pixel radiometric normalization between Sentinel-2A and Landsat 8 OLI. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019, (10): 61-66. [徐玉雯，张浩，陈正超等. Sentinel-2A 与 Landsat 8O LI 逐像元辐射归一化方法研究．测绘通报, 2019, (10): 61-66.]

[19] Roy DP, Kovalskyy V, Zhang HK *et al*. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **185**(1): 57–70. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.

[20] Qiu S, Zhu Z, He BB. Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4–8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **231**: 111205. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.024.

[21] Xu QQ, Yuan SB, Shen MH *et al*. Assemblage structure characteristics of hygrophytic plants and their driving factors in sand bars in Yichang-Jianli section of the Yangtze mainstem. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(4): 928-937. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202004014. [徐强强，袁赛波，申明华等．长江干流宜昌-监利段洲滩湿生植物群落特征及其驱动因子分析．长江流域资源与环境, 2020, **29**(4): 928-937.]

[22] Li M, Zhou CC, Xia K *et al*. Analysis on the evolution trend of floodplain in the middle Yangtze River since the operation of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2024, **49**(1): 31-37. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2024.01.005. [李明，周成成，夏楷等．三峡水库运用后长江中游河漫滩演变趋势分析．泥沙研究, 2024, **49**(1): 31-37.]

[23] Yuan CW, Shi YH, Pan L *et al*. The preliminary study on survey of vegetation of wetland in middle-reaches of Yangtze River (Hubei section). *Hubei Forestry Science and Technology*, 2002, **31**(2): 13-15. [袁传武，史玉虎，潘磊等．长江中游(湖北段)湿地植被调查初报．湖北林业科技, 2002, **31**(2): 13-15.]

[24] Walker LR, Zasada JC, Chapin III FS. The role of life history processes in primary succession on an Alaskan floodplain. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1243-1253.

DOI: 10.2307/1938680.

[25] Huang W, Wang WD. Effects of Three Gorges dam project on Dongting lake wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6345-6352. DOI: 10.5846/stxb201503300611. [黄维, 王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响. 生态学报, 2016, **36**(20): 6345-6352.]

[26] Alshari EA, Gawali BW. Development of classification system for LULC using remote sensing and GIS. *Global Transitions Proceedings*, 2021, **2**(1): 8-17. DOI: 10.1016/j.gltp.2021.01.002.

[27] Yin YM, Jia L. Sentinel-2 study on crop mapping of Shandian River Basin based on images. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, **36**(2): 400-410. [尹燕旻, 贾立. 基于 Sentinel-2 的闪电河流域农作物分类研究. 遥感技术与应用, 2021, **36**(2): 400-410.]

[28] Zeng LL, Wardlow BD, Xiang DX *et al*. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **237**: 111511. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111511.

[29] Martins VS, Kaleita AL, Gelder BK *et al*. Deep neural network for complex open-water wetland mapping using high-resolution WorldView-3 and airborne LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **93**: 102215. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102215.

[30] Drăguţ L, Csillik O, Eisank C *et al*. Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **88**(100): 119-127. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.11.018.

[31] Zhu Z. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, **130**: 370-384. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013.

[32] Chen TQ, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: Chen TQ, Guestrin C. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016: 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

[33] Shi X, Xia JQ, Zhou MR *et al*. Investigation into the long-term response of vegetation to dam operation in a large river using Landsat time-series data. *Journal of Hydrology*, 2024, **633**: 130977. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130977.

[34] Huang JL. The area change and succession of Dongtinghu wetland. *Geographical Research*, 1999, **18**(3): 297-304. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.1999.03.011. [黄进良. 洞庭湖湿地的面积变化与演替. 地理研究, 1999, **18**(3): 297-304.]

[35] 袁正科, 李星照, 田大伦等 洞庭湖湿地景观破碎与生物多样性保护. 中南林学院学报, 2006, (1): 109－116.

[36] Zhou MR, Xia JQ, Shi X *et al*. Hydrologic and geomorphic effects on the reduction of channel discharge capacity in the Middle Yangtze River. *Science of the Total Environment*, 2023, **866**: 161279. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161279.