J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(4):000-000
DOI 10.18307/2027.0421
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

鄱阳湖湿地植被地上部分固碳速率的时空演变及其水文驱动机制*

周家杰[1]，万荣荣[1,3,4**]，戴　雪[2,5,6**]，杨桂山[2,5,6]，王浩然[1,3]，李　冰[1,3]，姚　静[1,3]，王晓龙[1,3]

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135)

(2: 河海大学地理与遥感学院，南京 211000)

(3: 中国科学院大学南京学院，南京 211135)

(4: 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049)

(5: 河海大学流域水土过程江苏省高校重点实验室，南京 211000)

(6: 河海大学水灾害防御全国重点实验室，南京 210098)

摘　要：鄱阳湖是长江中游的重要通江湖泊，近年来在气候变化与人类活动影响下水文情势改变显著，湿地植被结构与功能随之发生快速演变。植被地上部分固碳速率是评价湿地植被碳汇功能的重要指标，但目前针对鄱阳湖湿地植被地上部分固碳格局及其水文驱动的定量研究仍存在不足。本研究利用 Sentinel-1 雷达与 Sentinel-2 光学数据，结合 2016—2024 年植被调查与水文数据，构建随机森林模型反演鄱阳湖湿地植被地上生物量（碳存量），并采用累积存量法估算其年地上部分固碳速率，系统揭示了其空间分布格局、季节差异、年际变化及其对水文梯度的响应。结果表明：（1）鄱阳湖湿地年均固碳速率约为 100−200 g C/(m^2·a)，空间上整体呈“外围高、中心低”的环状格局，高值集中于湖滨洲滩和入湖三角洲等低－中淹没频率带，湖心高频淹没的低洼区则为碳汇冷点。植被固碳过程具有显著季节差异与空间互补性，春季高值主要位于湖滨高滩，秋季高值则向湖心及低洼洲滩迁移，全湖平均固碳速率秋季（53 g C/m^2）略高于春季（50 g C/m^2）。（2）2016—2024 年鄱阳湖植被年固碳速率总体呈波动略降趋势，多数区域变化不显著（79.6%），湖心及低洼洲滩出露区呈弱升高趋势（18.2%），而部分高滩边缘区域显著下降（2.2%）。极端洪水与干旱年份普遍削弱当年秋季固碳能力，且洪水具有更强的“滞后效应”。（3）淹没频率对植被固碳具有显著调控作用，沿水文梯度表现为“中等偏低淹没最优”的单峰响应，中等偏低淹没频率区域碳汇能力最强，极端高频和极端低频淹水区因长期淹水或干旱胁迫而碳汇受限。研究结果揭示了水文过程，特别是淹没频率梯度与极端水文事件，在塑造鄱阳湖湿地植被固碳格局中的关键作用，为洪泛湿地生态保护提供了重要科学依据。

关键词：鄱阳湖；湿地生态系统；植被固碳速率；淹没频率；随机森林；遥感监测

Spatiotemporal evolution of aboveground vegetation carbon sequestration in the Lake Poyang wetland and its hydrological driving mechanisms*

Zhou Jiajie[1], Wan Rongrong[1,3,4**], Dai Xue[2,5,6**], Yang Guishan[2,5,6], Wang Haoran[1,3], Li Bing[1,3], Yao Jing [1,3]&Wang Xiaolong[1,3]

(1: *State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)*

(2: *College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing* 210098, *P.R.China*)

(3: *College of Nanjing, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *P.R.China*)

(4: *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P.R.China*)

(5: *Key Laboratory of Soil and Water Processes in Watershed, Hohai University, Nanjing* 211000, *PR China*)

* 2026-01-16 收稿；2026-07-07 收修改稿；2026-07-08 录用。

教育部基础学科和交叉学科突破计划“水工程生态学科突破先导”项目（JYB2025XDXM907）和国家自然科学基金项目（42571146，42471125，42271110）联合资助。

** 通讯作者：E-mail: rrwan@niglas.ac.cn, daixue@hhu.edu.cn。

(6: *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing* 210098, *P.R.China*)

Abstract: Lake Poyang is a typical river-connected lake in the middle reaches of the Yangtze River. In recent years, climate change and human activities have greatly altered its hydrological regime, which has further driven rapid changes in the structure and function of wetland vegetation. The vegetation aboveground carbon sequestration rate is a core indicator for assessing the carbon sink function of wetland ecosystems. However, quantitative studies on the spatial and temporal patterns of wetland vegetation aboveground carbon sequestration and its hydrological drivers in Lake Poyang remain inadequate. Based on Sentinel-1 radar data, Sentinel-2 optical data, and field vegetation survey and hydrological datasets from 2016 to 2024, this study built a random forest model to estimate the aboveground biomass (carbon stock) of wetland vegetation in Lake Poyang. We applied the cumulative stock method to calculate the annual aboveground carbon sequestration rate and systematically analyzed its spatial distribution, seasonal and interannual variations, and responses to hydrological gradients. The results show three key findings. First, the annual average carbon sequestration rate of wetland vegetation in Lake Poyang ranges from 100–200 g C/(m2·a), with a ring-shaped spatial pattern of high values in the periphery and low values in the center. High carbon sequestration values mainly occur in lakeside shoals and delta regions with low to medium inundation frequency. The central low-lying areas with frequent inundation act as cold spots of carbon sequestration. Vegetation carbon sequestration shows clear seasonal differences and spatial complementarity. High spring values are concentrated on elevated lakeside shoals, while high autumn values shift toward the lake center and low-lying shoals. The lake-averaged carbon sequestration rate is 50 g C/m² in spring and 53 g C/m² in autumn, with a slightly higher value in autumn. Second, the annual vegetation carbon sequestration rate in Lake Poyang showed a slight decreasing trend from 2016 to 2024. A total of 79.6% of the lake area showed no significant temporal change. About 18.2% of the area, mainly the lake center and exposed low-lying shoals, exhibited a weak increasing trend, and 2.2% of the area, mainly partial margins of elevated shoals, showed a significant decreasing trend. Extreme flood and drought events reduce autumn vegetation carbon sequestration capacity, and flood events exert a stronger lag effect. Third, inundation frequency is a critical regulatory factor for vegetation carbon sequestration, with a unimodal response along hydrological gradients. Areas with moderately low inundation frequency maintain the highest carbon sink capacity. In contrast, areas with extremely high inundation frequency suffer from long-term flooding stress, and areas with extremely low inundation frequency experience severe drought stress. Both stressors limit vegetation carbon sequestration. This study demonstrates that hydrological processes, particularly inundation frequency gradients and extreme hydrological events, dominate the spatial and temporal patterns of wetland vegetation carbon sequestration in Lake Poyang. The results provide a scientific reference for the ecological protection and management of floodplain wetlands.

Keywords: Lake Poyang; wetland ecosystem; vegetation carbon sequestration rate; inundation frequency; random forest; remote sensing monitoring

湖泊湿地在全球碳循环中扮演重要角色，其植被固碳过程对于缓解气候变化具有重要意义[1]。洪泛湖泊湿地系统受到周期性洪水脉冲的强烈影响，使得水文要素成为主导其演变的主要驱动力[2]。鄱阳湖湿地是我国典型的洪泛平原湿地，位于长江中下游南岸，是我国最大的淡水湖湿地生态系统之一。鄱阳湖水文情势年内变化剧烈，年内水位变幅在 8~20 m，随着水位的波动，鄱阳湖呈现出开阔水域、滩涂和湿地植被交替分布的景观。湖泊水文条件塑造了独特的湿地植被群落结构，从而影响物种多样性和生产力[3-5]。因此，研究湖泊湿地植被固碳功能必须充分考虑水位涨落及其生态效应[3-4]。

自 2003 年三峡工程投入运行以来，叠加气候变化影响，鄱阳湖的水文情势发生了显著改变[6-7]，湖泊出现洪水峰值下降、退水提前且加快、秋冬季低水位频现等新水文特征[8-11]。在此影响下[12-13]，鄱阳湖体提早被分割成众多子湖，洲滩提前暴露，对湿地植被系统产生了显著影响。与此同时，2016、2020 等年份发生的大洪水事件，又凸显了极端洪水水情在季节性干旱加剧背景下对湖泊生态系统仍存在较大的影响。在此综合影响下，近 20 年来鄱阳湖湿地植被的生物量和生产力均发生了显著变化。例如，戴雪等[14]的研究基于 EVI 指数分析发现，2000—2020 年间鄱阳湖湿地植被生产力总体呈增长趋势，秋冬季的偏枯水情使得湖心区逐渐成为区域植被生产力中心；相反，湖滨高滩则由于枯水期的延长出现植被生产力的

下降。史林鹭等[15]同样基于鄱阳湖 EVI 指数的时序变化指出，水文连通性的变化深刻影响湿地植被动态，三峡蓄水后鄱阳湖退水期的提前驱动了湖区不同位置植被覆盖和生长趋势的分化。

湿地植物通过光合作用将大气 CO_2固定为有机碳，湿地植被固碳速率直接反映单位时间内植被碳存量的积累速率，是衡量湿地碳汇功能的重要指标。而且，湿地植被固碳速率与土壤呼吸速率及水体 CO_2排放速率的相对关系，直接决定了湿地作为碳汇或碳源的状态。然而，目前针对鄱阳湖湿地植被固碳速率的研究仍存在一定问题。一方面，部分研究采用植被指数或覆盖度等代用指标间接表征湿地植被固碳速率的时空变化[14-15]，且不同研究结果计算的湿地植被固碳速率存在较大差异；对湿地固碳过程的水文响应也以定性分析为主，缺乏基于高精度计算结果的深入机制分析。这不仅限制了对后三峡工程时代鄱阳湖湿地碳汇变化规律的科学认知，也影响了对这一脆弱湿地生态系统的科学保护与管理[3, 16]。

鉴于鄱阳湖湿地植被固碳过程具有显著的水文敏感性和空间异质性，本文以鄱阳湖湿地为研究对象，综合利用 Sentinel-1 与 Sentinel-2 遥感数据，构建随机森林模型重建植被地上部分碳存量时空变化过程，并据此估算其固碳速率及分析其水文驱动机制。具体研究内容包括：重建研究区 10 米、6 天分辨率的碳汇时空变化序列，分析其近 10 年来的植被固碳速率空间分异特征、季节变化动态及年际变化规律，在此基础上分析其与淹没频率的相关关系，揭示水文情势对湿地植被固碳速率的影响及作用机制。研究旨在提出适用于通江湖泊湿地的高精度植被固碳速率遥感计算方法，量化鄱阳湖湿地 2016–2024 近 10 年的植被固碳速率时空格局变化，并阐明不同淹没频率下植被固碳速率的响应差异和潜在驱动机理，为深入理解湖泊湿地碳循环过程及评估水文调控措施的生态效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部（28°22′~29°45′ N,115°47′~116°45′ E），是长江中下游南岸的通江湖泊，汇集了赣江、抚河、信江、修水、饶河等五大河流，湖盆形态呈不规则葫芦形，北端通过湖口与长江相连（图 1）。鄱阳湖流域属亚热带季风气候，年均气温 17 ℃左右，年降水量约 1600 mm，雨热同期。湖区水文季节性极强：每年 4–6 月受长江和流域来水影响进入汛期，7—9 月水位高涨形成丰水期，10 月后水位迅速消退进入枯水期。湖面水域面积在丰、枯季节相差悬殊，可由约 3000 平方公里骤减到不足 500 平方公里。湖盆底部及周边广阔的滩地随水位起伏周期性出露，发育出大片季节性洪泛湿地，包括洲滩草洲、沼泽和浅水湿地等多种生境类型。主要植被类型为草本湿生植物群落，如南荻（*Miscanthus sacchariflorus*）、苔草属（*Carex*）、芦苇（*Phragmites australis*）等为优势种，其群落在不同高程梯度呈明显带状分布。一般而言，中低海拔洲滩长时间淹水，枯水期才短暂裸露，生长有耐淹的沉水和挺水植物；中高海拔滩地淹水频度较低，发育有草甸和灌丛植被。这些植被群落的空间分布对水位高度和持续时间高度敏感，长期的水陆变迁塑造了鄱阳湖“水进则草退，水退则草生”的动态景观[17]。特别值得关注的是，受近年来长江中游江湖关系调整影响，鄱阳湖季节性洪枯水特征发生显著改变，引起了湿地植物群落的演替和生产力中心迁移[11]，成为该区域生态安全与可持续发展管理的重要议题。

1.2 数据来源

本研究采用欧洲航天局（ESA）的 Sentinel-1 与 Sentinel-2 遥感数据反演鄱阳湖湿地植被碳存量。Sentinel-1 提供 VV/VH 双极化、10m 分辨率的 C 波段 SAR 影像，具备穿云及一定浅水的能力，对植被结构和含水状况敏感，可实现多云多水环境下的连续监测。Sentinel-2 提供包含红边波段在内的 13 个多光谱影像。数据获取时段为 2016—2024 年，在融合策略上，优先使用无云光学影像提取植被指数，当光学数据缺失或质量较差时，结合同期雷达后向散射及历史光学数据，通过插值重构植被指数时间序列。

本研究共收集了 2016—2024 年间的 12 期湿地植被样方调查数据，即 2016、2017、2020、2022、2023 和 2024 年春、秋两季的鄱阳湖环湖植被调查数据[18-21]。其中，样方数据包括本研究实地采集的数据以及前期研究中已积累的数据。各样方面积均为 1 m^2，样方总数 310 个。各样方数据记录均包括样方的 GPS 定位、植被类型及其植被地上生物量鲜重等数据，采集样品经实验室烘干后获得地上生物量干重，并基于配对样品计算鲜重–干重转换关系。本文后续以遥感反演得到的地上鲜重生物量为基础，依据样方实测

干鲜比换算为地上干重，再采用 0.47 的碳转换系数将干重换算为地上碳存量。该碳转换系数采用 IPCC 推荐的草本植被干重碳含量默认值（0.47 kg C·kg⁻¹ dry matter）。需要说明的是，本研究样方调查和后续遥感建模均针对植被地上部分。样方实测数据优先与同日遥感影像进行匹配；若当日无可用影像或影像受云污染影响，则选取时间上最近且影像质量满足要求的遥感影像进行匹配，用于模型构建与验证。

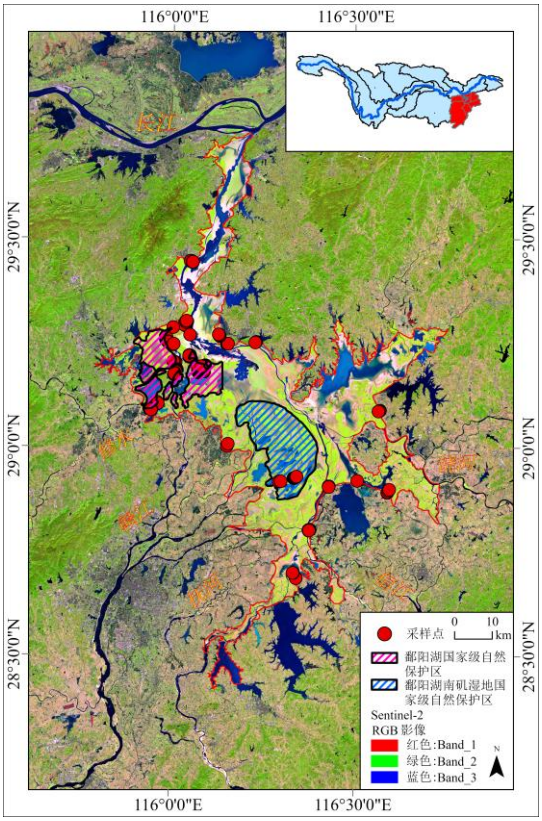

图 1 鄱阳湖湿地位置与范围（底图为 Sentinel-2 影像 B11、B8、B4 波段的假彩色合成影像，其中水体显示为蓝色、湿地植被显示为绿色、泥滩或裸地显示为褐色）

Fig.1 Location and extent of the Poyang Lake wetland（The base map is a false-color composite image composed of Sentinel-2 imagery from bands B11, B8, and B4, where water bodies appear blue, wetland vegetation appears green, and mudflats or bare land appear brown）

鄱阳湖湿地逐日水深空间分布数据来自仝钰等[22]。本研究将水深≥0.1 m 视作淹没状态，统计得到各点位的淹没频率数据，用于定量表征鄱阳湖洲滩湿地在不同水文情景下的植被固碳速率响应。此外，为分析地形因子的影响，本研究同时使用了湖区空间分辨率为 30 m 的数字高程模型（DEM），提取各像元高程和坡度等指标，用于地形影响分析。

1.3 研究方法

1.3.1 植被碳储量遥感反演模型　采用随机森林(random forest, RF)算法构建植被碳存量遥感反演模型。随机森林 RF 是一种以决策树为基础的集成学习方法，通过引入随机采样和多棵树表决，具有较强的非线性拟合能力和抗过拟合性能[23]。研究基于鄱阳湖湿地植被对环境因子的响应机制，建立包含归一化植被指数 NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）、增强型植被指数 EVI（Enhanced Vegetation Index）、哨兵 2 号红边位置指数 S2REP（Sentinel-2 Red-Edge Position）等 15 个特征变量的全要素特征变量集（表 1）。然后根据各变量的特征重要性排序和相关性进行变量剔除，仅筛选关键变量用于湿地植被碳存量遥感反演模型的构建。将样方实测数据按空间分层随机方法分为训练集（约 80%样本）和验证集（约 20%样本）。训练集用于以 RF 算法拟合实测碳存量与各关键特征变量的关系，验证集用于评估模型在独立数

据上的预测精度。以 k 折交叉验证方法评估模型性能、防止过拟合，模型精度表征指标选择决定系数 R^2、均方根误差 RMSE 以及平均绝对误差 MAE。

表 1 模型特征变量集

Tab.1 Model feature variable set

变量名	变量中文名	主要表征	计算方法
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	归一化植被指数	基于近红外与红光的归一化差值，反映植被绿度与覆盖程度的变化	$\frac{B8-B4}{B8+B4}$
EVI (Enhanced Vegetation Index)	增强型植被指数	在 NDVI 基础上引入蓝光与校正项，降低大气与土壤背景影响，改善高覆盖条件下的敏感性	$2.5\times\frac{B8-B4}{B8+6B4-7.5B2+1}$
GREENESS (Greenness Index)	绿度指数	综合表征植被“绿度/繁茂度”的指标，用于反映植被季节变化与物候过程	$\frac{B8-B3}{B8+B3}$
NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	红边归一化差值指数	利用红边波段与近红外构建的差值指数，对叶绿素变化相对敏感，常用于作物长势与营养状况表征	$\frac{B8A-B5}{B8A+B5}$
S2REP (Sentinel-2 Red-Edge Position)	红边位置指数	估算红边“位置/拐点”变化的指标，常用于表征叶绿素含量变化与植被胁迫响应	$705+35\times\frac{(B4+B7)/2-B5}{B6-B5}$
CIrededge (Red-Edge Chlorophyll Index)	红边叶绿素指数	基于红边与近红外构建的叶绿素指数，常用于叶绿素相对变化监测	$\frac{B8A}{B5}-1$
SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)	土壤调节植被指数	在 NDVI 中引入土壤亮度校正因子 L，减弱裸土背景对植被信号的影响	$1.5\times\frac{B8-B4}{B8+B4+0.5}$
MSAVI (Modified SAVI)	修正型土壤调节植被指数	对 SAVI 进一步改进，在低覆盖/裸土背景较强时更稳定地表征植被信号	$\frac{2B8+1-\sqrt{(2B8+1)^2-8(B8-B4)}}{2}$
NDWI (Normalized Difference Water Index)	归一化水体指数	基于绿光与近红外构建，用于增强水体信息、反映水分/湿润程度差异	$\frac{B3-B8}{B3+B8}$
NBR (Normalized Burn Ratio)	归一化燃烧指数	基于近红外与短波红外构建，对火烧扰动与地表干湿/炭化变化较敏感，常用于火烧迹地识别与恢复监测	$\frac{B8-B12}{B8+B12}$
elevation	高程	表示地表海拔高度，可用于刻画地形梯度与相关环境差异	/
slope	坡度	表示地表倾斜程度，影响汇流、侵蚀与局地环境分布	/
VH/VV	VH/VV 后向散射	Sentinel-1 不同极化通道的后向散射，对地表结构、粗糙度与含水状况变化较敏感，且不受云影响	/
SoilCarbon	土壤碳含量	表示土壤中碳的含量/储量水平	/

1.3.2 植被年固碳速率计算 本文所定义的植被固碳速率，是指湿地植被地上部分碳存量在一年中的累积增加量，用以表征单位面积地上植被碳库在一年内的碳积累过程。除特别说明外，下文所述“植被固碳速率”均特指植被地上部分固碳速率。具体而言，首先基于随机森林模型反演各时相植被地上鲜重生物量；其次，根据样方实测的地上生物量鲜重与烘干干重配对数据，建立鲜重向干重的换算关系，将遥感反演得到的鲜重生物量换算为地上干重；最后，采用草本植被干重碳转换系数 0.47 kg C·kg^{-1} dry matter，将地上干重换算为地上碳存量：

$$\mathrm{B}io.\mathrm{C}_t = \mathrm{B}\times\lambda\times 0.47 \tag{1}$$

其中，$Bio.C_t$ 为 t 时刻遥感反演得到的地上生物量鲜重，λ 为样方观测确定的地上生物量干鲜比系数。在此基础上，再按累积存量法计算年地上部分固碳速率：

$$CSQ = \sum_{t=1}^{n} k_t \ , \ k_t = \begin{cases} Bio.C_{t+1} - Bio.C_t & ,if\ Bio.C_{t+1} - Bio.C_t. > 0 \\ 0 & ,otherwise \end{cases} \quad (2)$$

其中，CSQ 指湿地植被地上部分年固碳速率；kt 是 t+1 时刻与 t 时刻间的湿地植被碳存量累积增长量；Bio.Ct 是 t 时刻的湿地植被瞬时碳存量。n 为时序影像中每年的影像数量。对于鄱阳湖湿地来说，每年植被生长呈双峰模式：即春季开始生长，春季生长期在夏季洪水来临后结束；秋季退水后重新开始生长，秋季生长期在冬季低温影响下结束。因此，其年植被固碳速率可直接以年内所有时相的碳存量遥感反演结果进行累积计算，春秋季植被固碳速率则根据物候数据确定的春秋季生长期开始与结束时间分段计算。

1.3.3 统计方法　针对计算得到的 2016—2024 年各年度及分季节固碳速率，采用 Mann-Kendall 非参数检验结合 Theil-Sen 方法进行斜率估计，在像元尺度上判别其变化趋势及显著性[24-27]，从而获得研究区湿地植被固碳速率“显著增加”、“显著减少”及“不显著变化”等各类型变化模式的空间分布。

此外，为识别鄱阳湖湿地植被固碳速率的空间集聚格局，本研究还以多年平均的年植被固碳速率栅格为基础，采用 Getis-Ord Gi*统计量进行植被固碳速率的冷热点分析[28]。并将标准化 Gi*值按 90%、95%、99%的置信水平划分为显著热点、显著冷点和不显著区，用于刻画碳汇高值和低值区域的空间聚集程度与范围。

2 结果

2.1 模型构建与精度验证

本研究基于鄱阳湖湿地植被对环境因子的响应机制，初选了包含 NDVI、EVI、S2REP 等在内的 15 个特征变量构成初始特征集。以随机森林模型对初选 15 个变量的特征重要性进行排序，并进行各变量间的相关性分析(图 2)。由图可见，NDVI、GREENESS、S2REP、Cirededge、MSAVI、NDWI、Slope 以及 VH 为湿地植被碳存量遥感反演的 8 个最关键变量，其涵盖了光学指数、雷达散射和地形水文指标等，可有效支撑对鄱阳湖湿地植被碳存量的遥感反演工作。其中，就贡献度而言，重要性最高的前三个变量分别是归一化植被指数 NDVI、叶绿素红边指数 CIrededge 和绿度指数 GREENESS。

基于随机森林算法，以遴选出的 8 个关键变量构建鄱阳湖湿地植被碳存量遥感反演模型，对 2016—2024 年的鄱阳湖湿地植被碳存量进行遥感反演，精度验证结果如图 3 所示。模型验证结果表明，本研究构建的湿地植被碳存量遥感反演方法具有较高的精度和可靠性。训练集和验证集决定系数分别约为 0.89 和 0.72，验证集 RMSE≈0.198 kg C/m²。如图所示，模型预测值与实测值散点接近 1:1 直线，说明随机森林能够准确刻画植被碳储量从低到高的连续变化。雷达数据有效弥补了光学数据在水淹条件下的信息缺失，随机森林则充分挖掘了变量间复杂关系，提升了总体精度。总体而言，所建立的植被固碳速率遥感反演模型精度可满足鄱阳湖湿地高时空分辨率湿地植被碳存量时空变化过程重建的分析需要，为后续年植被固碳速率计算提供了可靠的数据基础。

2.2 植被固碳速率的时空动态特征

2.2.1 季节变化特征　按春秋两季对植被碳存量观测序列进行累积量计算，得到鄱阳湖湿地植被春季和秋季的植被固碳速率。将年固碳速率拆分为春季和秋季两部分，可以更细致地刻画不同季节的碳汇格局。统计结果表明（图 4b），从 2016—2024 年整体来看，全湖秋季固碳量略高于春季，秋季植被平均固碳速率约为 53 g C·m⁻²，而春季约为 50 g C·m⁻²，两者相差约 6%。这种季节差异在空间上并不均一，而是表现为显著的东西向对照分布（图 4a）。

结合各年春秋季植被固碳速率的空间分布(图 4a)和各年春秋季植被固碳速率时序(图 4b)可以看出，水文情势的影响并不局限于单一水文年，而是存在明显的跨年“滞后效应”。在 2020 年特大洪水年和 2022 年极端干旱年，其当年秋季的固碳速率都显著低于相邻年份，但对次年春季的影响表现出明显差异：2021 年春季全湖固碳中位数仍维持在整个序列的低值区间，而 2023 年春季的固碳水平则基本恢复至多年平均。这表明，不同类型极端水文事件对植被固碳速率的跨年影响存在明显差异。2020 年特大洪水之后，

次年春季固碳水平仍处于较低区间，表现出较强的滞后影响；相比之下，2022 年极端干旱虽显著抑制了当年秋季固碳，但其次年春季整体已基本恢复至多年平均水平。总体上，洪水事件对植被固碳的持续影响强于干旱事件。

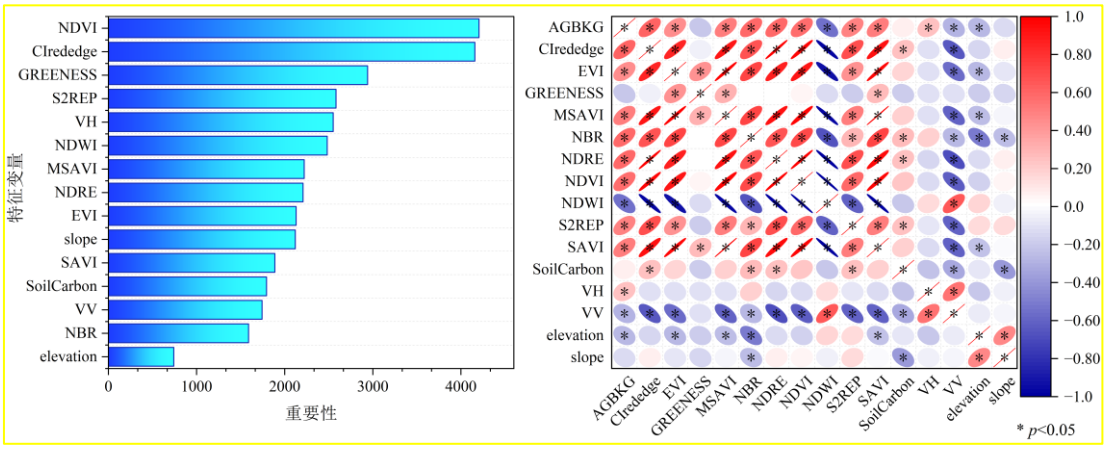

图 2 特征变量重要性及相关性计算结果

AGBKG：地上生物量；NDVI：归一化植被指数；EVI：增强型植被指数；GREENESS：绿度指数；NDRE：红边归一化差值指数；S2REP：红边位置指数；CIrededge：红边叶绿素指数；SAVI：土壤调节植被指数；MSAVI：修正型土壤调节植被指数；NDWI：归一化水体指数；NBR：归一化燃烧指数；elevation：高程；slope：坡度；VH/VV：雷达极化特征；SoilCarbon：土壤碳含量。

Fig.2 Calculation results of feature variable importance and correlation

AGBKG:Aboveground biomass;NDVI:Normalized Difference Vegetation Index;EVI:Enhanced Vegetation Index;GREENESS:Greenness Index;NDRE:Normalized Difference Red Edge Index;S2REP: Sentinel-2 Red-Edge Position;CIrededge:Red Edge Chlorophyll Index;SAVI:Soil-Regulated Vegetation Index;MSAVI:Modified Soil-Regulated Vegetation Index;NDWI:Normalized Difference Water Index;NBR:Normalized Burn Ratio;elevation; slope;VH/VV: Radar polarization characteristics;Soil Carbon: Soil Carbon Content

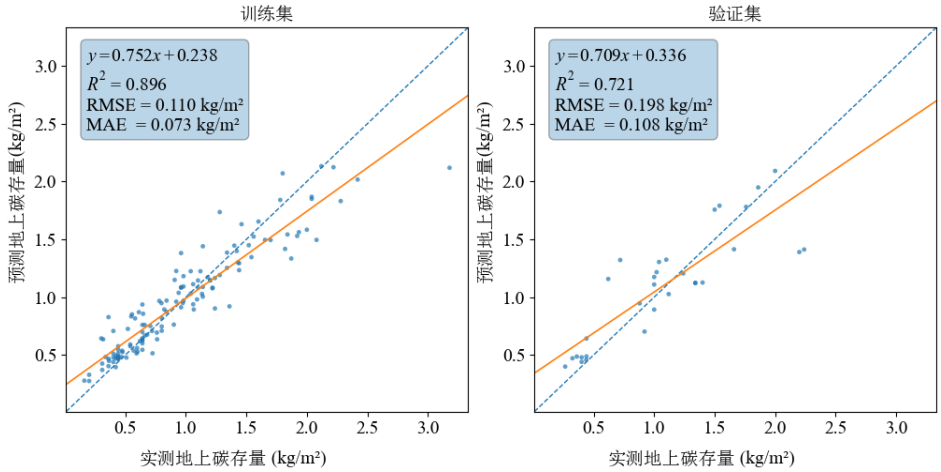

图 3 鄱阳湖湿地碳存量遥感反演模型精度验证 (a) 训练集实测碳存量与预测碳存量；(b) 验证集实测碳存量与预测碳存量

Fig.3 Regression analysis of the training and validation datasets for the biomass inversion model (a) Relationship between observed and predicted biomass for the training dataset; (b) Relationship between observed and predicted biomass for the validation dataset

从多年平均的春秋季植被固碳速率差异可以看出（图 4c），春、秋两季植被固碳速率在空间上呈现出较为清晰的分界特征。总体而言，西部湖区和南部湖区，尤其是鄱阳湖国家级自然保护区吴城片区及赣江河口三角洲一带，春季植被固碳速率显著高于秋季；相反，入江水道及中部湖区等低海拔区域则表现为秋季植被固碳速率明显高于春季。两者大致以 14~15 m 等高线为界。总体而言，鄱阳湖湿地植被的固碳速率在一年中呈现典型的“双峰型”季节分配特征，不同高程带和功能区在“春峰”和“秋峰”上的权重不同。叠加极端水文事件影响时，秋季碳汇对当年水文异常更为敏感，而春季碳汇则对前一年水文过程具有更强的记忆效应。这些结果表明，在评估鄱阳湖乃至长江中下游大型通江湖泊的年碳汇能力时，需要分别考虑春秋两季的水位过程及其跨年的累积影响，而不能仅考虑单一年份的水文极值。

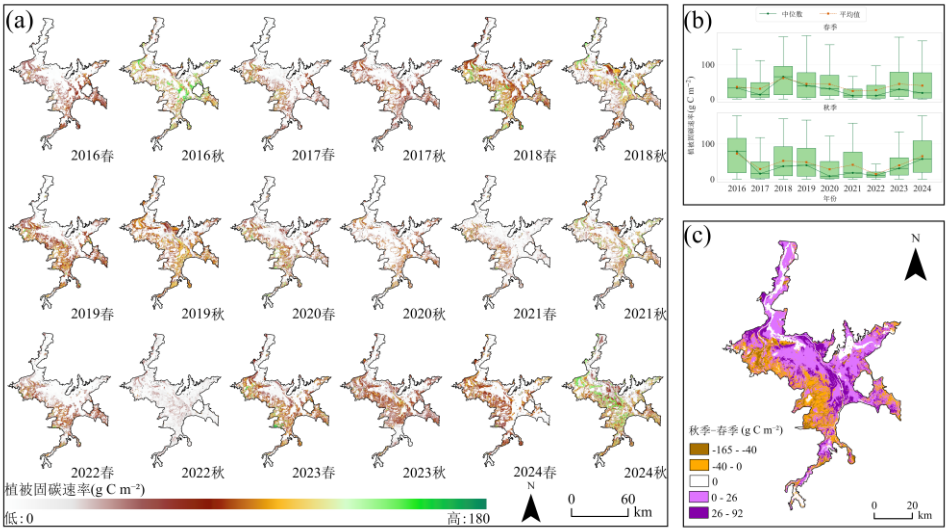

图 4 鄱阳湖春秋季植被固碳速率的时空分异特征。 (a) 2016—2024 年春、秋季植被固碳速率的空间分布；(b) 2016—2024 年春、秋季植被固碳速率变化；(c) 多年平均春秋季植被固碳速率差异

Fig.4 Spatiotemporal variations of spring and autumn vegetation carbon sequestration rates in the Poyang Lake wetland (a) Spatial distribution of spring and autumn vegetation carbon sequestration rates from 2016 to 2024; (b) Changes in vegetation carbon sequestration rate in spring and autumn, 2016–2024; (c) multi-year mean difference map of autumn minus spring vegetation carbon sequestration rate

2.2.2 年际变化趋势 2016—2024 年间，受不确定的极端水文事件影响，鄱阳湖湿地植被年固碳速率整体呈现显著的年际波动，并未表现为单调的增加或减少(图 5b)。具体来说，2017 年相较 2016 年平均植被固碳速率显著下降，2018 年是整个时序中固碳水平最高的一年，全湖平均植被固碳速率为 192 g C/(m^2·a)；此后的 2019—2020 年湿地植被年固碳速率持续降低，并在 2020 年达到近 10 年内的一个主要低谷。2021 年开始，全湖固碳水平受上年影响依旧保持较低水平，且在 2022 年因极端干旱事件的影响出现再次下跌，2023—2024 年才重新恢复并略有抬升，至 2024 年整体水平仍略低于 2016 年。总体来看，鄱阳湖湿地年固碳速率在近 10 年呈现显著起伏叠加轻微下降的整体趋势，其中 2017、2020 和 2022 年是时段偏低年份的主要拐点。

从空间格局看，各年份的高值区始终主要分布在湖盆中南部的低洼洲滩，以及西部湖湾的部分区域（图 5a）。然而，在低值年份，这些区域的高值带明显收缩，而西南缘和局部高滩则更容易维持相对稳定或中等水平的固碳速率。随着 2021、2023、2024 年固碳水平的逐步回升，湖心和低洲滩的高值区域重新扩展，但其范围和强度整体仍低于 2016 年。

结合 Mann-Kendall 检验与 Sen’s 斜率估计的像元级趋势分析结果（图 5c）表明，在 2016—2024 年期间，大部分湿地像元的年固碳速率变化在统计上不显著，表现为围绕多年平均值的波动。显著上升像元

（P<0.05）主要集中在湖盆中上部以及和入湖河道沿线，面积占湖区的 18.2%。显著下降像元（P<0.05）则零星分布于湖泊西北缘及个别高滩和沙洲边缘，面积占湖区的 2.2%，总体而言，显著增加区的空间范围略大于显著减少区，但两者都远小于不显著变化区。

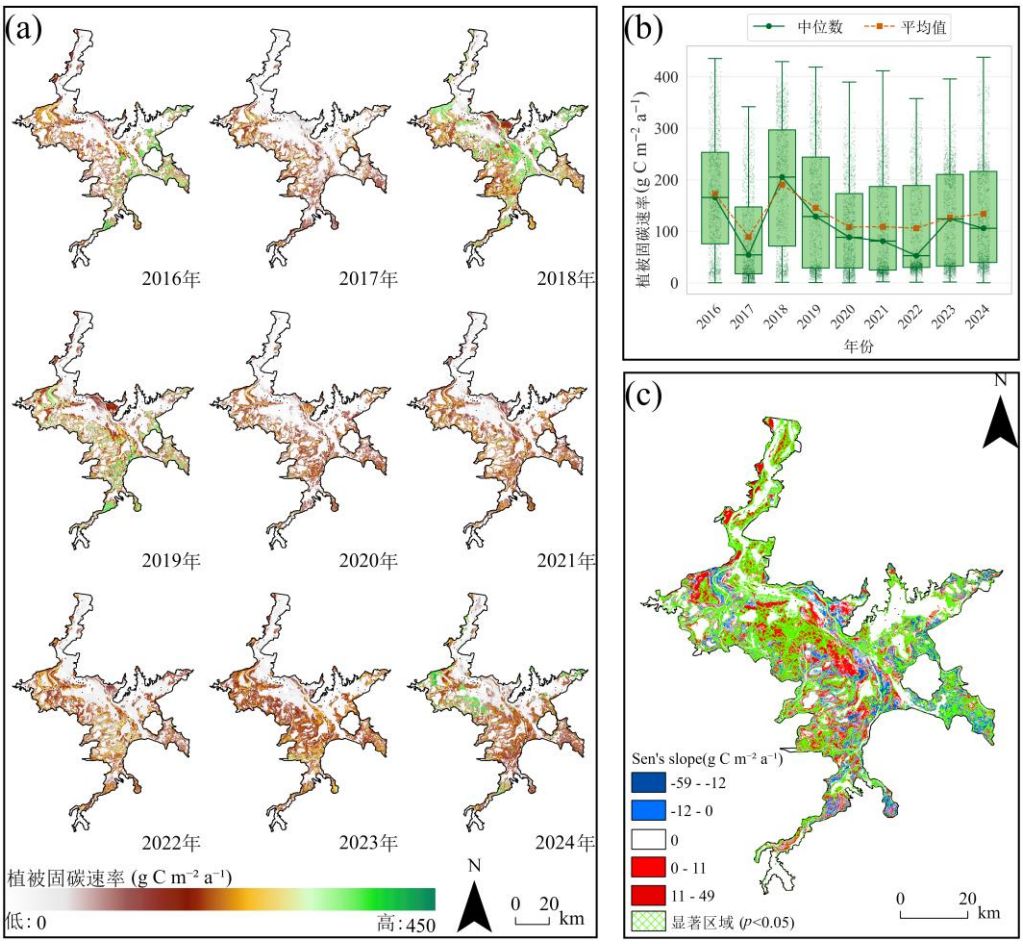

图 5 2016—2024 年鄱阳湖湿地植被固碳速率的时空演变 （a）2016—2024 年各年的植被固碳速率空间分布图；（b）2016—2024 年植被固碳速率的年际变化；（c）基于 Sen’s 斜率和 Mann-Kendall 检验的植被固碳速率趋势分区图

Fig.5 Spatiotemporal evolution of vegetation carbon sequestration rate in the Poyang Lake wetland, 2016-2024 (a) Annual spatial distribution of vegetation carbon sequestration rate from 2016 to 2024; (b) Interannual variation of vegetation carbon sequestration rate from 2016 to 2024; (c) trend classification map based on Sen’s slope and the Mann–Kendall test

2.2.3 空间分异格局　鄱阳湖湿地植被年固碳速率的空间分布极具异质性，高值区和低值区在湖区内呈现出集聚分布特征（图 6）。热点分析结果显示，高固碳速率热点主要集中于鄱阳湖的南部和西南部洲滩，以及西岸和北岸的一些中高程滩地；低固碳的冷点则显著聚集在湖盆中央和入湖河口附近深槽区域以及部分低洼碟形湖区。具体而言，鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区的南矶山一带广阔草洲是突出热点，该区域多年处于中等水位、高养分环境，优势植物每年生长繁茂，固碳速率长期维持较高水平；另外，赣江、抚河入湖三角洲的周边滩地也有零散高值分布。相反，湖心区形成大片冷点区，由于该区域地势

最低，几乎全年长时间淹没，植物生长期极短，导致年净固碳量极低。同样在鄱阳湖南部的通江水道和北部湖口附近深泓区，常年水深难以长出挺水植被，也属碳汇低值区。总的来说，鄱阳湖湿地植被固碳速率空间格局不均衡：西南高，东北低；边缘高滩高，中央深洼低，呈环湖高值、中心低值的分布态势。这种空间分异与湖内水位梯度密切相关，水文条件决定了各地点植被生长时间和群落类型，从而影响其年碳同化累积量。

2.3 淹没频率对植被固碳速率的影响

淹没频率作为湖泊湿地水文条件的关键指标，深刻影响着植被的生长周期和碳累积能力。本研究在像元尺度上，将多年平均淹没频率划分为若干梯度区间，分别统计各区间春季、秋季及其年度植被固碳速率（图 7a~c），并进一步按年份考察其变化情况（图 7d），以揭示鄱阳湖湿地植被碳汇对水文梯度的响应规律。在进行年际变化分析时个别极端年份在部分淹没频率有效像元数较少。为避免小样本导致统计结果不稳定，本研究仅保留有效像元数≥50 的分段进行年际比较。

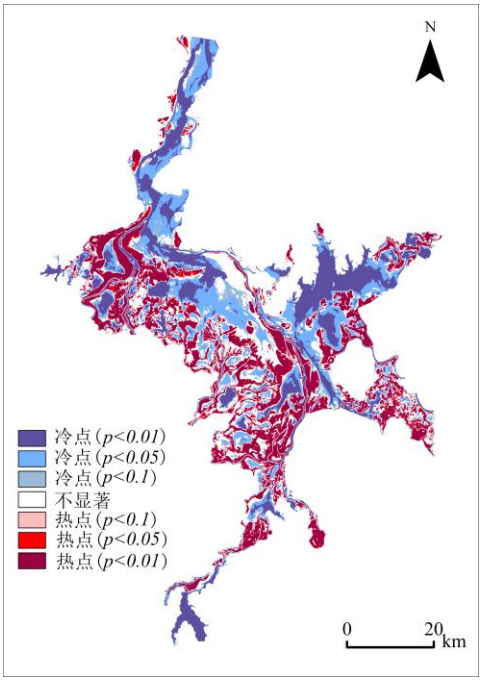

图 6 鄱阳湖湿地植被固碳速率冷热点空间格局

Fig.6 Spatial pattern of hot and cold spots of vegetation carbon sequestration rate in the Poyang Lake wetland and their interannual variations

从多年平均情况来看，无论在年尺度还是季节尺度，植被固碳速率与淹没频率之间都表现出显著的负相关关系：即随着淹没频率从低到高的增加，高频淹没区的植被固碳速率明显偏低；反之亦然。其原因为低频淹水区的植被能够完成相对完整的生长周期；而高频淹水区植被常常仅在短暂退水时段才有机会生长，很快又被重新淹没，因此其年净碳增量普遍较小。

需要注意的是，这种梯度关系并非简单的反比。从图 7a 可以看到，在年度固碳速率上，中等偏低的淹没频段（约 0.1~0.4）往往具有最高的中位值，而几乎不淹水的最低频组并没有明显高于该频段，部分像元的固碳水平甚至略低。这一单峰型特征在秋季固碳速率中更为突出，而春季植被固碳则整体呈近似单调下降的格局。这表明，在鄱阳湖这种通江湖泊中，适度的季节性淹水既能保证植物在关键生长季获得充足水分和营养，又不会长时间抑制其生长，从而形成“中等偏低淹没频率最有利于植被固碳”的最

优解，因为过高的淹没频率会导致植物生长期受限，而过低的淹没频率则可能使高滩区植物在生长季后期面临土壤干旱胁迫，从而限制其固碳能力。

按年份分组的箱线图进一步表明，中等偏低频段最优、随淹没频率的进一步升高整体下降的关系在大多数年份中都相对稳定。常规水文年中，各淹没频段固碳分布的形态大致相似，只是在整体高低水平上略有区别。2020 年极端洪水年植被固碳速率的中位数仍随淹没频率单调下降，说明洪水对各淹没梯度的生产力均产生了整体限制。与之相比，2022 年极端干旱年呈现出更为异常的格局，在约 0.4~0.8 的中高淹没频段内，随着淹没频率升高植被固碳速率高值反而升高，这表明在持续干旱背景下，低淹没区整体受到强烈抑制，而少数保持中高淹没条件的洼地仍能维持相对较高的固碳速率，该偏离典型递减曲线的现象说明极端干旱不仅降低了整体固碳水平，也改变了淹没梯度上的分布形态。总体而言，淹没频率是决定鄱阳湖湿地植被碳汇空间格局的关键水文因子之一，高频淹没显著抑制植被碳固定，中等偏低的季节性淹没则有利于形成高固碳带，而几乎不淹水的高滩区多因干旱胁迫和植被类型转变，碳汇潜力并不一定更高。

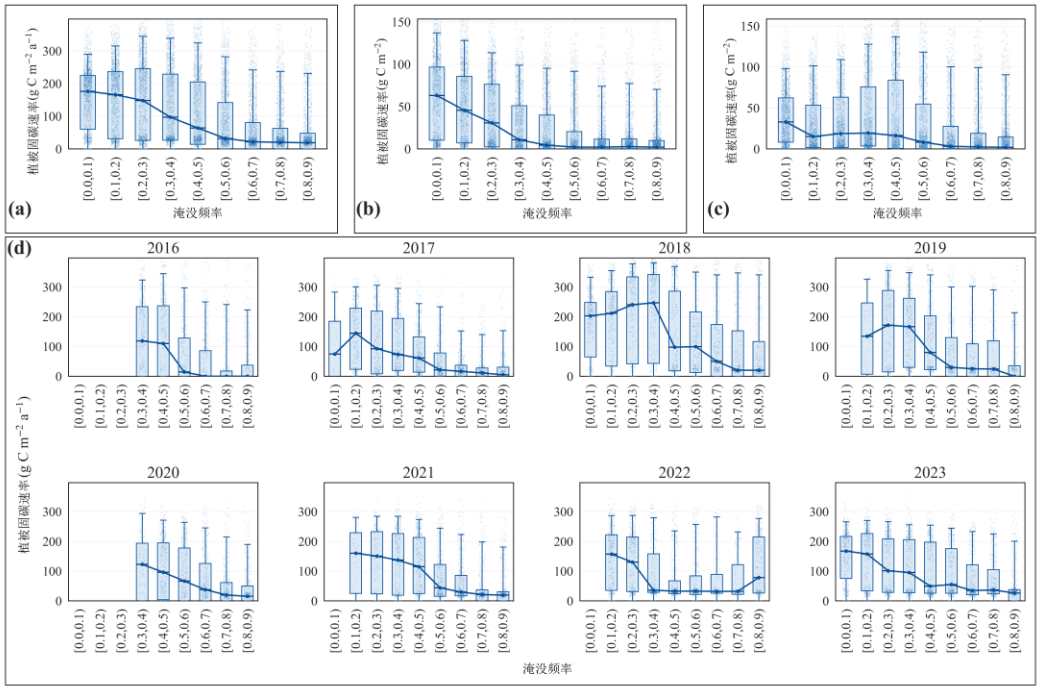

图 7 植被固碳速率与淹没频率关系的统计特征 (a－c:春季、秋季及年度植被固碳速率在不同淹没频率下的分布；d: 2016–2024 年植被固碳速率对淹没频率的响应) Fig.7 Statistical relationships between vegetation carbon sequestration rate and inundation frequency (a–c) Distribution of vegetation carbon sequestration rates in spring, autumn, and annually under different flooding frequencies; (d) Response of vegetation carbon sequestration rate to inundation frequency, 2016–2024

3 讨论

3.1 鄱阳湖植被固碳速率影响因素分析

在数值量级上，鄱阳湖湿地植被固碳速率与既有研究及相似纬度湿地总体一致，但不同研究之间受指标口径、空间范围及是否包含地下生物量等影响，存在明显差异。以正增量累加的植被累计固碳口径为例，Dai 等[29]基于 MODIS EVI 时间序列与地面观测，在 2016 年估算鄱阳湖湿地植被累计固碳范围为 193–1221 g/(m²·a)，均值 401 g/(m²·a)，且高生产力斑块可显著高于区域平均。过程模型研究亦表明，鄱阳湖湿地 1986—2020 年 NPP 年值约为 222.7~736.3 g/(m²·a)，并随水文异常出现显著波动[30]。本研究结果

与Dai等关于鄱阳湖湿地植被生产力演变的结论在总体上具有一致性，也存在一定差异。一致之处在于，两项研究均表明秋冬低水位偏长背景下，湖心及低洼洲滩区域的植被生长/固碳能力增强，而部分湖滨高滩区域则呈下降趋势，说明近年来鄱阳湖湿地植被功能中心总体上存在由高滩向湖心低滩迁移的空间重组过程。差异主要体现在总体趋势判断上：Dai 等基于 2000—2020 年 EVI 时序分析指出，鄱阳湖湿地植被生产力在后三峡时期总体呈增长趋势；而本研究基于 2016—2024 年多源遥感与样方数据估算的植被地上部分固碳速率则表现为显著波动基础上的轻微下降。造成这种差异的原因主要有以下几方面：首先，两项研究的指标内涵不同。Dai 等采用 EVI 表征植被生产力，属于基于植被指数的遥感代用指标；而本文估算的是基于地上生物量累积变化得到的植被地上部分固碳速率，对碳积累过程的刻画更直接。其次，两项研究的时间尺度不同。Dai 等覆盖 2000—2020 年，反映的是较长时间尺度上的总体演变方向；而本文聚焦 2016—2024 年这一近年阶段，研究期内同时包含 2020 年极端洪水和 2022 年极端干旱两个显著低谷年份，因而更容易表现出阶段性的波动与回落。再次，数据源与方法体系也存在差异。本文基于 Sentinel-1/2 的高时空分辨率数据重建湿地植被碳存量过程，能够更敏感地识别湖心低滩—高滩边缘之间的局地差异以及极端水文事件带来的短期扰动。因此，本文与 Dai 等的研究是在不同指标体系和时间窗口下对鄱阳湖湿地植被功能变化作出的互补性刻画。长江中下游其它湿地的植被固碳速率也呈现出与鄱阳湖大致相当的量级，具体因植被类型和水文环境而异。长江口东滩崇明岛湿地的植被由先锋草本和大型芦苇组成。基于 CASA 模型的最新研究显示，在植被演替过程中，不同群落类型的 NPP 存在显著差异[31]，芦苇群丛的年均 NPP 约为(1079.64±168.34) g/(m^2·a)，而莎草科植物群丛的 NPP 仅为(72.12±53.20) g/(m^2·a)。江苏盐城滨海湿地作为亚热带沿海滩涂湿地的代表，不同植被类型的碳汇能力差异显著。观测研究显示，入侵的互花米草湿地年均净固碳速率约 811.1 g/(m^2·a)，本地芦苇湿地约 760 g/(m^2·a)，而植被稀疏的盐地碱蓬湿地仅约 145.9 g/(m^2·a)[32]。与相邻的洞庭湖相比，鄱阳湖更直接受到三峡水库运行的下切效应影响，秋冬低水位提前且延长[33]，使得秋季第二轮植被生长带来的碳汇增量尤为突出；而洞庭湖在调蓄作用下夏季生产力占比相对更高[34]。与国外部分自然洪泛平原相比，鄱阳湖湿地年固碳速率整体处于亚热带草本湿地的中等水平，略低于热带沼泽森林[35]，这与其以一年生或短生草本为主、洪枯振幅大、生长期相对受限密切相关。尽管单位面积碳汇能力有限，但由于湿地面积广阔，鄱阳湖的年总固碳量在中国湖泊湿地中仍位居前列。

从驱动机理看，水文过程是鄱阳湖植被固碳时空格局的首要控制因子。三峡蓄水后，长江－鄱阳湖水位过程被重塑，年内水位的季节性振幅加大，秋冬低水位—湖心裸滩扩展—湿生植被向湖心推进的演替路径日益明显[36]。多年趋势显示，湖盆中部和南部低洼洲滩固碳速率整体上升，而西北缘较高滩地则出现一定程度下降，这与苔草等湿生草本在湖底裸滩扩张、高程较高芦苇带在夏季高洪或秋季干旱下萎缩的已有认识相吻合[37]。从趋势分区结果看，显著增加像元主要集中于湖盆中上部、湖心低洼洲滩及部分入湖河道沿线区域，这些区域近年来受秋冬低水位偏长和退水提前影响，洲滩出露时间增加，湿生草本植物得以向中低高程带扩展，从而促进了植被地上部分固碳速率的提升。相对而言，显著减少像元多零星分布于西北缘及部分高滩边缘区，这些区域淹没频率本已偏低，在持续偏枯或极端干旱背景下更易受到土壤失水和生长季后期干旱胁迫的影响，同时群落结构也可能向固碳能力较弱的旱生或退化类型转变，导致其固碳速率下降。说明鄱阳湖湿地近年植被固碳功能的变化，并非整体同步增减，而是在水位过程重塑、地形梯度约束和群落演替共同作用下表现出显著的空间分异。春秋对比结果进一步揭示了这种高程分异：春季处于枯水末期至涨水初期，高滩和入湖三角洲在气温回升、土壤水分充足条件下率先进入快速生长期，是春季固碳高值区；汛后秋季水位回落，湖心低洼泥滩暴露并发生大面积第二轮生长，使得秋季固碳高值向湖心和东部低滩迁移，两季大体以 14~15 m 等高线为分界线，形成整体上“秋略强于春”的季节碳汇格局。

淹没频率梯度则塑造了植被固碳潜力的空间上限，本研究的统计结果很好地印证了洪水脉冲理论：在多年平均尺度上，年固碳速率随淹没频率整体呈单峰型变化。低-中等淹水区（约 0.2~0.4 频段）像元的中位数及上分位固碳水平最高，高频淹没区（>0.6）植被固碳长期维持在低值，说明持续水淹显著压制净初级生产力；但几乎不淹水的高滩像元固碳速率与中等淹水区相比并无明显优势，部分年份甚至偏低，

表明适度洪泛才是维持生产力的最优水文情景[38]。与其他洪泛湖泊和大型河漫滩的研究结果相比，鄱阳湖同样呈现中等或中等偏低淹水最利于生产力的规律，但由于秋冬退水更早、更剧烈，其“最优淹水带”在空间位置及季节贡献上更偏向秋季湖心草甸带。

在此背景上，极端水文事件叠加了显著的年际与滞后效应。本研究期内2020年极端洪水和2022年极端干旱构成两个明显低谷：前者导致当年秋季各淹没频段固碳整体下移，湖心和低洼区几乎错失秋季生长季，并通过植株死亡、根茎腐烂等过程削弱多年生草本越冬基质，使得 2021 年春季固碳仍显著偏低[39]；相比之下，极端干旱主要在当年秋季造成中低淹水区生产力的普遍塌陷，仅少数残余积水洼地维持较高固碳水平，且 2023 年春季整体已接近多年平均，表明干旱的影响更集中于当年生长季[40]。与针对鄱阳湖进行的研究结果类似，洪水事件往往带来更强的“滞后效应”，而干旱效应则相对短平快[41]。

需要强调的是，本文估算的植被地上部分固碳速率主要反映了湿地生态系统碳输入端的变化，而系统净碳汇功能还受到土壤碳库变化、CO_2释放以及 CH_4排放等多过程共同调控。湿地在固定 CO_2的同时，亦是重要的天然 CH_4 排放源，且 CH_4 排放对水位涨落、淹没持续时间、土壤还原状态及植被类型变化高度敏感；因此，仅依据植被碳积累过程尚不足以完整评估鄱阳湖湿地的真实净碳汇效应。IPCC 也将湿地 CH_4排放纳入湿地温室气体清单框架之中，近期研究进一步指出，水文波动是影响湿地 CH_4通量时空不确定性的关键因素[42]。结合本研究结果可以推测，不同淹没频率带可能对应不同的植被固碳−土壤呼吸−CH_4 排放权衡关系，中等偏低淹没频率区域往往具有较高的植被固碳能力，但在季节性出露阶段也可能伴随较强的土壤有机碳分解与 CO_2释放；而高频淹没区虽然植被固碳能力较弱，却可能因长期厌氧环境而具有更强的 CH_4 产生潜力。因此，鄱阳湖湿地不同水文梯度下的碳汇/碳源状态，实质上取决于多种碳通量过程的综合平衡，而非单一植被固碳指标[43]。未来研究可在本文植被地上部分固碳速率遥感估算框架基础上，进一步结合土壤碳库调查、静态箱/涡度协方差 CH_4 通量观测以及水体−大气界面温室气体交换监测，构建覆盖植被−土壤−水体−大气各组分的鄱阳湖湿地综合碳收支评估体系；同时，可结合极端洪水与极端干旱事件开展过程对比研究，以明确不同水文情景下 CO_2吸收与 CH_4排放之间的协同或抵消关系，从而更系统地评估鄱阳湖湿地在区域气候调节中的真实作用。

3.2 鄱阳湖湿地植被固碳速率时空格局的特征与演变

本研究结果表明，鄱阳湖湿地植被固碳速率在季节、年际和空间三个维度上均表现出显著异质性，反映出通江湖泊洪泛湿地碳汇过程对水文节律变化的高度敏感性。从季节尺度看，鄱阳湖植被固碳呈现明显的春、秋“双峰型”特征，但两季在空间上并非同步增强，而是表现出显著的空间互补性：春季高值主要分布于湖滨高滩及入湖三角洲边缘，秋季高值则向湖心及低洼洲滩迁移。这说明鄱阳湖湿地碳汇并非由某一固定区域全年持续主导，而是随着年内水位涨落在不同高程带之间发生阶段性转移。也就是说，湖区不同部位在不同季节承担着不同的碳汇功能，共同构成了具有明显水位调节特征的动态碳汇格局。

从多年平均空间格局看，鄱阳湖湿地植被固碳速率总体呈现“外围高、中心低”的环状分布，高值区主要位于南部、西南部洲滩及入湖三角洲周边，中高程湖滨滩地也形成若干热点，而湖心深槽区、通江水道及高频淹没低洼区则长期表现为碳汇冷点。这种格局表明，鄱阳湖湿地中真正具有较高固碳潜力的区域，并非长期深水区或几乎不受淹的极高滩地，而主要是能够获得适度洪泛、又能维持较完整生长季的中低高程带。换言之，植被固碳高值区实质上对应的是水文适宜区，而低值区则主要受长期淹没或过度干旱双重限制。

从年际演变看，2016—2024 年鄱阳湖湿地植被固碳速率并未呈现单调变化，而是表现为显著波动叠加轻微下降的阶段性特征，其中2017、2020和2022年是较为明显的低谷年份。这说明鄱阳湖湿地碳汇格局并非稳定背景下的缓慢演替，而是在长期水文格局调整基础上，持续受到极端洪水和极端干旱事件的脉冲式扰动。尤其值得注意的是，近年固碳高值区总体仍集中于湖心和低洼洲滩出露带，而部分高滩边缘区域则持续下降，表明后三峡时期鄱阳湖湿地碳汇中心存在由传统湖滨高滩向中低高程带迁移的趋势。这种迁移说明，湿地植被固碳功能的空间重组已成为近年来鄱阳湖生态演变的重要表现之一。

因此，鄱阳湖湿地植被固碳速率的时空格局并不仅仅是植被生长差异的表象，更反映了湖泊水位节律、地形梯度和极端事件共同作用下湿地生态功能中心的动态调整过程。对这一时空格局的识别，有助于从碳汇功能角度重新认识鄱阳湖湿地不同功能区的生态价值，也为后续讨论其水文驱动机制和管理调控意义提供了基础。

3.3 误差与不确定性分析

本研究通过融合多源数据和改进模型，提高了鄱阳湖湿地植被固碳速率估算的精度，但仍存在一些误差来源和不确定性需要讨论。首先，也是最重要的一点，本文仅以地上生物量为基础构建植被碳库并估算其年内累积增量，未纳入地下根系生物量。因此，本文结果表征的是植被地上部分碳积累速率，而非整株植被总固碳速率；对于根茎发达、地下生物量占比较高的湿地草本群落，本文估算结果可能低估其总固碳能力。且生物量样方主要集中于典型植被群落，难以覆盖所有空间异质性。第二，遥感数据不确定性，主要来自光学影像的云影响和水体对植被指数的干扰。尽管模型应用了时空插值校正淹水期植被指数的断裂，但插值精度在植被突增或突减时段可能不够完美，例如洪水暴涨暴落过程中植被信号复杂变化，模型或插值未能完全捕捉。这导致对一些年份峰值碳存量和增长时序的把握存在偏差。SAR 数据虽提供了重要补充，但其对生物量饱和的问题可能存在——高密度植被达到一定高度后，SAR 后向散射不再明显增加，模型可能低估高生物量像元的碳值。哨兵 10 m 分辨率能够更充分地解析植被—裸滩—浅水镶嵌格局，使大量低值像元被识别出来，从而扩大分布的左尾并增强空间异质性表达，也会使均值被低估。第三，碳转换系数的不确定性，研究假定鲜干比为 0.32、生物量碳含量为 0.47，但不同植物组织和物种碳含量有差异。若某区域群落碳含量偏低或偏高，都会引入系统误差。最后，时空代表性方面，9 年的研究期在气候尺度上仍较短，推断长期趋势具有不确定性。尤其 2020 年的极端洪水和 2022 年的极端干旱对趋势线的影响很大，如果未来 10 年持续偏枯，则趋势可能不同。目前结果更多代表 2010 年代中后期至 2020 年代初的阶段性特征，需在更长时间序列上验证。

3.4 管理启示

基于上述机制分析，对鄱阳湖湿地管理提出以下几点建议。首先，鄱阳湖湿地碳汇管理应优先从局地可控的水文过程入手，充分利用碟形湖与主湖的季节性连通特点，通过优化碟形湖及连通通道的水位调控，缓解因退水过快或极端枯水导致的淹没频率骤降，从而减轻高滩湿生植被的干旱胁迫，抑制旱生植物入侵，同时避免因长期极端低水位造成土壤有机质暴露氧化、增加碳排放。在此基础上，可通过微地貌改造与适度水分维持，增强生境异质性与蓄水能力，配套恢复芦苇、苔草等原生高产群落，并控制退化草甸以抑制外来旱生草扩张，从而提升植被生物量与碳吸收能力。适度的秋季生态补水也有助于在湖滨高滩维持湿生植被群落，进一步提升整体碳汇功能。最后，值得探索结合碳交易的湿地保护策略。若湿地植被碳汇能够得到可靠量化，可探索将鄱阳湖湿地作为重要的内陆湿地碳汇纳入区域生态补偿与碳交易机制。这要求持续改进遥感监测技术，提高碳汇评估精度，并通过多学科研究统筹湿地碳汇与生物多样性保护、洪水调蓄等服务功能之间的关系，制定综合性管理政策。

4 结论

本研究基于多源遥感和野外观测数据，刻画了 2016—2024 年鄱阳湖湿地植被固碳速率的时空格局及其水文驱动机制。主要结论如下：

1）鄱阳湖湿地单位面积年固碳速率约为 100~200 g C/(m^2·a)，全湖年总固碳量在我国湖泊湿地中处于较高水平。全年碳汇呈春、秋“双峰型”，秋季略高于春季。空间上整体呈“外围高、中心低”，湖滨洲滩和入湖三角洲前缘等中低洼地带为主要碳汇区，湖心深泓高频受淹，植被稀疏，为长期冷点。春季高值主要位于高滩和三角洲边缘，秋季高值向湖心及低洼洲滩转移，反映了水位涨落与植被生长在空间上的互补。

2）2016—2024 年间，鄱阳湖植被固碳整体呈显著年际波动叠加缓慢调整的格局，大部分区域变化不显著，稳定在多年平均附近；显著上升像元集中于湖盆中南部低洼洲滩，显著下降像元主要出现在西北缘及部分高滩。三峡运行导致秋冬低水位偏长，促进湿生草本沿高程梯度向湖心推进，同时加剧高滩偏

枯和群落退化。不同水文事件对植被固碳速率的影响具有差异，洪水通过长期淹没抑制当年秋季及次年春季固碳，表现出明显滞后效应；干旱则主要压制当年秋季固碳，次年恢复较快，影响相对短暂。

3）淹没频率是决定鄱阳湖湿地植被固碳空间差异的关键水文因子。多年统计表明，固碳速率整体上随淹没频率升高而下降，高频淹没区年碳增量仅为低淹没区的约 1/3~1/2。但关系并非单调，适度、季节性的洪泛是维持最高生产力的最优水文情景，而长期高频淹水和长期干旱两端环境均不利于碳汇发挥。维持中等偏低淹没频段的面积和连通性，应作为未来流域-湖泊调度与湿地恢复的重要目标。

本研究定量揭示了 2016—2024 年鄱阳湖湿地植被固碳速率的时空演变规律，突出表明水文过程在塑造植被碳汇格局中的核心作用，为提出维持其湿地植被系统结构与功能稳定的水资源管理策略提供了科学依据。

5 参考文献

[1] Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik AM *et al*. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, **28**(4): 583-597. DOI: 10.1007/s10980-012-9758-8.

[2] Crawford RMM. Eco-hydrology: Plants and water in terrestrial and aquatic environments. *Journal of Ecology*, 2000, **88**(6): 1095-1096.

[3] Xu LG, Lai XJ, Wan RR *et al*. Review of the development of lake wetlands eco-hydrology and case studies. *Progress in Geography*, 2019, **38**(8): 1171-1181. [徐力刚, 赖锡军, 万荣荣等. 湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析. 地理科学进展, 2019, **38**(8): 1171-1181.]

[4] Huang WQ, Hu TF, Mao JQ *et al*. Hydrological drivers for the spatial distribution of wetland herbaceous communities in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 2022, **14**(19): 4870. DOI: 10.3390/rs14194870.

[5] Zheng LL, Wang XL, Li DH *et al*. Spatial heterogeneity of vegetation extent and the response to water level fluctuations and micro-topography in Poyang Lake, China. *Ecological Indicators*, 2021, **124**: 107420. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107420.

[6]杨桂山, 陈剑池, 张奇等. 长江中游通江湖泊江湖关系演变及其效应与调控. 北京: 科学出版社, 2021.

[7] Chen J, Finlayson BL, Wei TY *et al*. Changes in monthly flows in the Yangtze River, China–With special reference to the Three Gorges Dam. *Journal of Hydrology*, 2016, **536**: 293-301. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.008.

[8] Zhang ZX, Chen X, Xu CY *et al*. Examining the influence of river–lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 510-521. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.008.

[9] Li B, Yang GS, Wan RR. Reassessment of the declines in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): Uneven trends, risks and underlying causes. *Journal of Environmental Management*, 2023, **342**: 118157. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118157.

[10] Yang GS, Zhang Q, Wan RR *et al*. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river–lake interactions: Advances in research on the middle Yangtze River. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 1-7. DOI: 10.2166/nh.2016.003.

[11] Dai X, Yu ZB, Yang GS *et al*. Investigation of inner-basin variation: Impact of large reservoirs on water regimes of downstream water bodies. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(5): e14241. DOI: 10.1002/hyp.14241.

[12] Lai XJ, Jiang JH, Yang GS *et al*. Should the Three Gorges Dam be blamed for the extremely low water levels in the middle–lower Yangtze River *Hydrological Processes*, 2014, **28**(1): 150-160. DOI: 10.1002/hyp.10077.

[13] Li B, Yang GS, Wan RR *et al*. Impacts of hydrological alteration on ecosystem services changes of a large river-connected lake (Poyang Lake), China. *Journal of Environmental Management*, 2022, **310**: 114750. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114750.

[14] Dai X, Yang GS, Wan RR *et al*. Vegetation productivity of the Lake Poyang Wetland in the post Three Gorges Dam era. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 577-586. DOI: 10.18307/2023.0215. [戴雪, 杨桂山, 万荣荣等. 后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被生产力演变. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 577-586.]

[15] Shi LL, Jia YF, Zuo AJ *et al*. Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(8): 828-837. [史林鹭, 贾亦飞, 左奥杰等. 基于 MODISEVI 时间序列的鄱阳湖湿地植被覆盖和生产力的动态变化. 生物多样性, 2018, **26**(8): 828-837.]

[16] Hu ZP, Lin YR. Analysis of evolution process and driving factors for aquatic vegetations of Poyang Lake in 30 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(8): 1947-1955. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201908018. [胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被 30 年演变及其驱动因素分析.长江流域资源与环境, 2019, **28**(8): 1947-1955.]

[17]朱海虹, 张本. 鄱阳湖——水文·生物·沉积·湿地·开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.]

[18] Wan RR, Wang P, Wang XL *et al*. Mapping aboveground biomass of four typical vegetation types in the Poyang Lake wetlands based on random forest modelling and landsat images. *Frontiers in Plant Science*, 2019, **10**: 1281. DOI: 10.3389/fpls.2019.01281.

[19] Li XH, Lin YL, Ye XC *et al*. The impacts of drought on the ecological niches of typical wetland plants in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2024, **55**(9): 890-904. DOI: 10.2166/nh.2024.033.

[20] Lin YL, Li XH, Tan ZQ *et al*. Dynamic characteristics of vegetation communities in the floodplain wetland of Lake Poyang based on spatio-temporal fusion of remote sensing data. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1408-1423. DOI: 10.18307/2023.0434. [蔺亚玲, 李相虎, 谭志强等. 基于遥感时空融合的鄱阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1408-1423.]

[21]万荣荣, 戴雪, 王鹏. 鄱阳湖湿地时空格局演变及其水文响应机制. 南京: 东南大学出版社, 2020.

[22] Tong Y, Yao J, Wan RR *et al*. Spatiotemporal variations in residence time and response to hydrological regime during the receding period of Lake Poyang(1980-2020). *J Lake Sci*, 2026, **38**(3): 1210-1221. [仝钰, 姚静, 万荣荣等. 1980—2020 年鄱阳湖退水期水体滞留时间时空演变及对水情的响应. 湖泊科学, 2026, **38**(3): 1210-1221.]

[23] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32. DOI: 10.1023/A: 1010933404324.

[24] Mann HB. Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 1945：245-259.

[25] Hoeffding W, Kendall MG. Rank correlation methods. *Econometrica*, 1957, **25**(1): 181. DOI: 10.2307/1907752.

[26] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Indagationes mathematicae*, 1950, **12**(85):173.

[27] Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, **63**(324): 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.

[28] Getis A, Ord JK. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, **24**(3): 189-206. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

[29] Dai X, Yang GS, Liu DS *et al*. Vegetation carbon sequestration mapping in herbaceous wetlands by using a MODIS EVI time-series data set: A case in Poyang Lake wetland, China. *Remote Sensing*, 2020, **12**(18): 3000. DOI: 10.3390/rs12183000.

[30] Yuan CY, Li XH, Zhang D *et al*. Quantifying the impact of drought on net primary productivity of different vegetations in a typical large lake floodplain wetland, China. *Ecological Informatics*, 2025, **90**: 103268. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2025.103268.

[31] Yuan YQ, Xue LM, Li XZ. Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh vegetation in Chongming Dongtan of the Yangtze Estuary based on CASA model. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(2): 334-342. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.025. [原一荃, 薛力铭, 李秀珍. 基于 CASA 模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力. 生态学杂志, 2022, **41**(2): 334-342.]

[32] Cheng YR, Zha Y, Chen LJ *et al*. Soil respiration in different vegetation types in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(12): 4090-4097. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202012.012. [程寅瑞, 查勇, 陈丽娟等. 盐城滨海湿地不同植被类型土壤呼吸. 生态学杂志, 2020, **39**(12): 4090-4097.]

[33]胡春宏, 阮本清, 张双虎等. 长江与洞庭湖鄱阳湖关系演变及其调控. 北京: 科学出版社, 2017.

[34] Zhang M, Chen SD, Lin H *et al*. Net primary productivity estimation of Dongting Lake wetland. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(6): 1454-1466. DOI: 10.11834/jrs.20221744. [张猛, 陈淑丹, 林辉等. 洞庭湖湿地净初级生产力估算研究. 遥感学报, 2023, **27**(6): 1454-1466.]

[35] Zhai XJ, Cui LJ, Li W *et al*. Carbon sequestration by typical wetland ecosystems in China. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(6): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202208110321. [翟夏杰, 崔丽娟, 李伟等. 中国典型湿地生态系统的固碳价值研究. 水生态学杂志, 2024, **45**(6): 1-8.]

[36] Yao J, Zhang Q, Li YL *et al*. Hydrological evidence and causes of seasonal low water levels in a large river-lake system: Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 24-39. DOI: 10.2166/nh.2016.044.

[37] Dai X, Wan RR, Yang GS *et al*. Impact of seasonal water-level fluctuations on autumn vegetation in Poyang Lake wetland, China. *Frontiers of Earth Science*, 2019, **13**(2): 398-409. DOI: 10.1007/s11707-018-0731-y.

[38] Junk WJ, Bayley PB, Sparks RE. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge DP. Proceedings of the International Large River Symposium. Ottawa: NRC Research Press, 1989: 110-127.

[39] Dai X, Yu ZB, Yang GS *et al*. Role of flooding patterns in the biomass production of vegetation in a typical herbaceous wetland, Poyang Lake wetland, China. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**: 521358. DOI: 10.3389/fpls.2020.521358.

[40] Lai XH, Zeng H, Zhao XM *et al*. Impact of extreme drought on vegetation greenness in Poyang Lake wetland. *Forests*, 2024, **15**(10): 1756. DOI: 10.3390/f15101756.

[41] Peng K, Tang XQ, Li R *et al*. From flood to drought: Integrating water level magnitude and timing to predict floodplain vegetation dynamics in Poyang Lake. *Ecological Indicators*, 2025, **177**: 113798. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113798.

[42] Zhao LJ, Zhao XS, Fan XW *et al*. Moderate hydrological droughts maximized CO_2 sink in China's largest floodplain lake. *Environmental Science & Technology*, 2025, **59**(33): 17606-17616. DOI: 10.1021/acs.est.5c06316.

[43] Liu Y, Chen C, Chen QW *et al*. Improve carbon budget assessment in floodplain wetlands using hydrodynamic and integrated machine learning models. *Water Resources Research*, 2025, **61**(10): e2025WR040128. DOI: 10.1029/2025WR040128.