

2000 - 2024 年鄱阳湖碟形湖水量时间序列精准估算：基于多源遥感融合与水文连通分析*

杨春^{1,2}; 杨扬³; 陈婷³; 李云良^{1,4}; 姚静^{1,4}; 蔡永久^{1,4}; 王晓龙^{1,4}; 谭志强^{1,4**}

(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:中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(3:江西省煤田地质勘察研究院, 南昌 330029)

(4:中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 九江 332899)

摘要: 鄱阳湖是中国最大的淡水湖, 在区域水安全和湿地生态系统完整性保护中发挥着关键作用。碟形湖作为鄱阳湖湿地系统的重要组成部分, 其水位和水量变化直接影响鄱阳湖湿地水量平衡和生物多样性保护。然而, 由于原位观测有限, 地物类型复杂, 加之干湿交替频繁, 现有水量估算方法在精度和适用性方面仍存在显著不足。本研究基于多源遥感数据融合、水文连通分析、数字高程模型 (DEM) 及有限的水文观测数据, 提出了一种新的碟形湖水量估算方法, 并首次以 8 d、30 m 分辨率重建了 2000–2024 年间 102 个碟形湖的水面积、水位和水量时间序列。结果表明: (1) 碟形湖孤立形态出现的时机存在空间异质性, 赣江北支水系的碟形湖孤立形态开始和结束时的星子水位平均为 13.85 m 和 14.28 m。(2) 102 个碟形湖多年平均面积为 305.20 km², 占鄱阳湖水体面积的 17.98%; 孤立形态的碟形湖年均面积最大值出现在 2023 年 (134.03 km²), 占当年鄱阳湖平均面积的 8.29%。(3) 孤立形态的碟形湖在涨水期、退水期和枯水期的水量占比分别为 1.91%、4.13%和 6%; 2000–2024 年北部湖区碟形湖水量呈现减少趋势, 而中部和南部碟形湖水量呈现增加趋势, 对缓解湖区干旱情势起到重要作用。总体而言, 本研究提出的水量估算方法为鄱阳湖及其他小型、浅水、季节性湖泊的水文监测与管理提供了新的技术路径, 并为鄱阳湖水资源的可持续利用和生态保护提供了科学依据。

关键词: 鄱阳湖; 碟形湖; 遥感; 水量估算; 水文连通性

Time-Series Accurate Estimation of Seasonal Isolated Lake Water Volume in Lake Poyang (2000–2024) Based on Multi-Source Remote Sensing Fusion and Hydrological Connectivity Analysis*

Yang Chun^{1,2}, Tan Zhiqiang^{1,3}, Li Yunliang^{1,3}, Chen Ting⁴, Yao Jing^{1,3}, Cai Yongjiu^{1,3}, Wang Xiaolong^{1,3}

(1: 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: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, P.R.China)

(3: Lake Poyang Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899, Jiangxi, P.R.China)

(4: Jiangxi Coalfield Geological Prospecting Research Institute, Nanchang 330001, P.R.China)

* 2025-05-19 收稿; 2025-09-10 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2023YFF0807203)、国家自然科学基金项目 (U2240219, 42171104, 32471651)、"赣鄱英才计划" 创新领军人才项目 (gpyc20240050)、江西省水资源基础调查项目 (赣自然资办函 (2024) 362 号)、江西省技术创新引导类计划 "科技+地质" 联合计划项目 (2023KDG01008、2023KDG01009) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: zqtan@niglas.ac.cn.

Abstract: Lake Poyang, the largest freshwater lake in China, is critical to regional water security and wetland ecosystem integrity. Seasonal isolated lakes (SILs), key components of the Lake Poyang wetland system, experience dynamic changes in water level and volume that directly influence the lake's water balance and biodiversity conservation. However, due to sparse in situ observations, complex surface conditions, and frequent wet–dry transitions, existing water volume estimation methods remain limited in accuracy and applicability. Here, we develop a novel framework for estimating SIL water volume by integrating multi-source remote sensing data, hydrological connectivity analysis, digital elevation models (DEMs), and limited hydrological measurements. For the first time, high-resolution time-series (8-day, 30-m) data on water surface area, water level, and water volume were reconstructed for 102 SILs from 2000 to 2024. The results indicate that: (1) the timing of isolation varies spatially, with average Xingzi Station water levels of 13.85 m and 14.28 m marking the start and end of isolation in the Ganjiang North tributary; (2) the 102 SILs had an average area of 305.20 km², accounting for 17.98% of Lake Poyang's surface water area, with the largest isolated area recorded in 2023 (134.03 km², 8.29% of the lake's area that year); (3) during the rising, falling, and dry stages, the water volume of SILs represented 1.91%, 4.13%, and 6% of the total lake volume, respectively. From 2000 to 2024, water volume in northern SILs showed a declining trend, while lakes in central and southern regions exhibited increasing trends, contributing positively to drought mitigation in the basin. Overall, this study provides a robust approach for hydrological monitoring and management of Lake Poyang and other small, shallow seasonal lakes, offering a scientific basis for sustainable water resource use and ecological conservation.

Keywords: Lake Poyang; Seasonal isolated lakes; Remote sensing; Water volume estimation; Hydrological connectivity

作为中国最大的淡水湖，鄱阳湖不仅在区域水资源供应、长江流域洪水调节和改善局地气候中发挥着关键作用，还为众多珍稀物种提供了重要栖息地^[1-2]。过去20年来，受入湖水量调控、三峡水库调节、湖区采砂等人类活动和气候变化的共同影响，鄱阳湖的水文特征发生了显著变化，出现了枯水期提前、持续时间延长以及湖泊面积缩小等干旱化现象^[3]。这种快速退化对区域供水安全和生态环境保护带来了严重挑战，并引发了广泛的担忧^[4]。

鄱阳湖是一个高度动态的大型洪泛湿地系统，主要由碟形湖群、沟壑水系和大片滩地构成^[5-6]。“碟形湖”是指鄱阳湖湖盆区内枯水季节显露于洲滩之中的季节性子湖泊^[7]。碟形湖的形成与鄱阳湖的水文特征密切相关，洪水和枯水季节的交替导致其水位动态变化。有资料显示，当鄱阳湖水位降至14.50 m，碟形湖陆续显露；水位降至约12.00 m时，碟形湖成为孤立水域，形成独特的湖中湖景观^[7-8]。作为鄱阳湖湿地生态系统的一部分，碟形湖不仅拥有丰富的植被生物量和物种多样性，为候鸟提供了重要的越冬栖息地^[9]，还通过储存和调节水资源，尤其在枯水期补充湖区水位，发挥了关键的生态调节功能^[10]。因此，碟形湖在水资源的调配、生物多样性的保护以及湿地生态功能的维持方面都发挥着重要作用。

查明碟形湖的形态特征与水体空间分布是深入理解其在鄱阳湖洪泛区水文过程中关键作用的基础。季节性水位波动与蓄水量变化构成了碟形湖的典型特征^[11]，其中水位、水面积和水量作为关键参数，既关系到湖泊水量平衡，也反映了其对气候和环境变化的敏感响应^[12-14]。因此，系统刻画碟形湖水位、水面积及水量的时空变化特征及其驱动机制，对于深入理解其在鄱阳湖洪泛区的水文功能和生态服务价值具有重要意义。然而，受限于碟形湖位置偏远、形态复杂多样等特点，传统水量估算方法面临较大挑战。

现有的湖泊水量估算方法主要包括实地观测、水动力模拟和遥感反演^[15]。实地观测虽能获取较高精度的水位数据，但在广阔且难以到达的碟形湖区，实地观测往往难以全面覆盖且成本高昂^[16]。水动力模拟可以用于模拟湖泊的水文过程^[17-18]，但其准确性依赖于详细的水文输入数据和建模经验，在缺乏足够数据的情况下，模型的预测结果可能存在较大偏差。

此外，利用卫星测高数据实现水位动态监测也是一种常用方法，如ICESat/ICESat-2^[19]、CryoSat-2^[20-21]、Jason-1/2/3^[22-23]、搭载SAR高度计的Sentinel-3^[24-25]等。然而，测高技术的剖

面测量特性决定了其空间分辨率有限^[26], 无法有效覆盖复杂地形区域的微小水体, 不足以捕捉碟形湖快速变化的水位波动。此外, 雷达高度计的测量精度受水面平整度影响, 特别是在碟形湖这种季节性洪泛湖泊中, 雷达回波质量有限^[11]。

相比之下, 光学遥感技术不仅覆盖面积广、时空连续性强, 还能通过多源数据的融合, 补充单一数据源的精度不足, 提升时空监测的全面性^[30]。因此, 多源遥感影像数据融合不仅为复杂、偏远的季节性水体——碟形湖提供了一种科学的水文过程监测方法, 同时也在经济性和精度方面展现出独特的优势, 适用于长时序的水文过程监测。

综上所述, 本研究利用分层自适应模型融合Landsat和MODIS影像数据, 提取长时序的高时空分辨率的水面积序列, 从而能够有效检测频繁变化的小湖和浅湖的淹没范围。在此基础上, 进一步开展水文连通性分析, 识别主湖与碟形湖之间的水文关系, 明确碟形湖出露的时机与相应水位条件。依据湖泊连通状态的不同, 本研究分别对连通形态与孤立形态下的碟形湖水位与水量进行了分类估算。这项研究将为湖泊水量监测和水资源管理提供了新的思路和方法, 为深入理解鄱阳湖系统及洪泛平原湖泊的复杂水文行为提供了科学依据。

1 研究区

鄱阳湖位于115°49'-116°46'E与28°24'-29°46'N之间, 是我国最大的淡水湖泊。鄱阳湖其上游承接赣江、抚河、信江、饶河和修水五大水系, 下游经湖口与长江直接相通, 属典型的过水型湖泊(图1)。受入湖径流和长江洪水的双重影响, 鄱阳湖水位年内波动显著, 呈现出四个水文阶段: 涨水期(4-5月)、丰水期(7-9月)、退水期(10-11月)和枯水期(12-翌年3月), 年内水位落差平均可达10m以上。这种巨大的年内水位落差, 使湖泊呈现出“洪水一片, 枯水一线”的独特景观。在旱季, 鄱阳湖洪泛湿地洲滩裸露, 其间分布有102个相连和不相连的季节性积水洼地, 称为碟形湖, 本文基于遥感数据提取了面积不小于0.36 km²的碟形湖共102个。碟形湖与鄱阳湖通江水体之间表现为高水位相连, 中水位相关, 低水位分离的特点。附表1中列出了具有固定名称的碟形湖及其分属水系情况。这102个碟形湖的边界范围在0.36 km²至71.26 km²之间, 平均面积8.00 km², 总面积达816.32 km², 其中边界范围最大的碟形湖为蚌湖。需要强调的是, 这些面积值代表的是碟形湖在连通状态下的最大扩张边界, 并非枯水期孤立状态下的

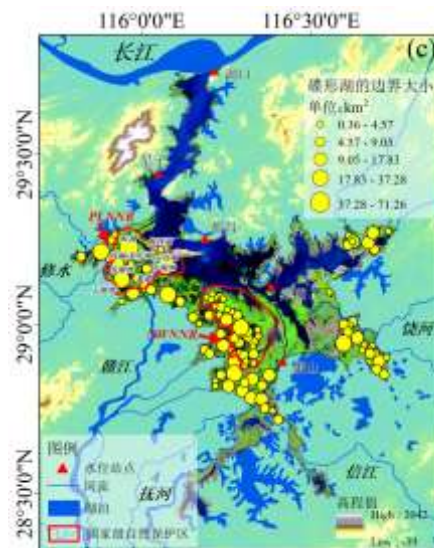


图1 碟形湖地理位置和主要站点位置

Fig.1 Geographical location of seasonal isolated lakes and main hydrological stations.

实际水体面积。鄱阳湖湖区内设有两个国家级自然保护区，分别为鄱阳湖国家级自然保护区（Lake Poyang National Natural Reserve, PLNNR）和南矶湿地国家级自然保护区（Nanji Wetland National Natural Reserve, NWNRR），是鄱阳湖洪泛湿地最重要的栖息地。PLNNR和NWNRR内分别有碟形湖9个和30个，占各自保护区总面积的68.95%和44.18%。

2 数据和方法

2.1 技术流程

本研究基于2000–2024年MODIS3Q1、MYD13Q1和Landsat TM/ETM+/OLI遥感数据，构建了高时空分辨率的湖泊水文动态监测框架。研究流程包括：首先，对Landsat影像进行预处理，并对MODIS数据进行滤波降噪；其次，采用HSTAFM（Hierarchical Spatiotemporal Adaptive Fusion Model）算法融合两类数据，生成时空精细的NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）数据序列；再次，基于NDVI序列提取水体范围，并利用CAST（Connectivity Assessment Tool）软件开展水文连通性分析；最后，根据连通性结果，分别计算连通与孤立形态碟形湖的水位和水量。连通状态下采用最近的站点观测水位。孤立状态下通过地形高程构建虚拟水位/水面积序列，搜寻与遥感提取水面积无限逼近的水位，据此推算水位与水量。下面将详细介绍研究所用的数据和具体方法。

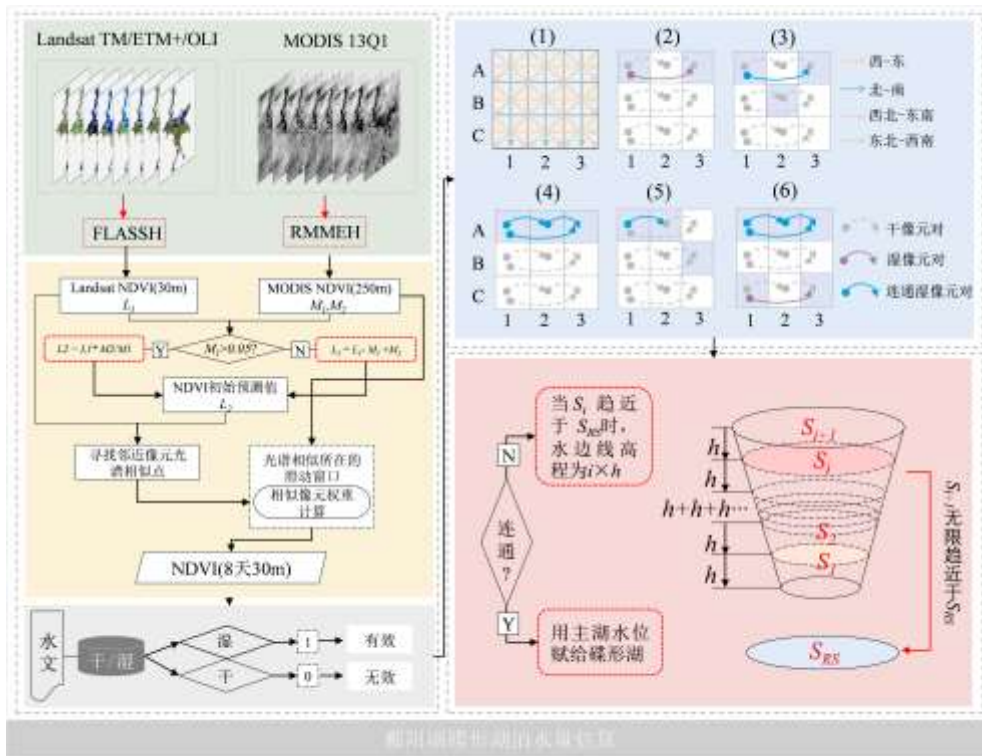


图 2 技术路线图

Fig.2 Technical flowchart

2.2 数据来源

2.2.1 Landsat 系列 从美国地质调查局地球探测网站（<http://earthexplorer.usgs.gov/>）下载 2000 年至 2024 年鄱阳湖湿地所有可用的 Landsat 数据，包括 Landsat TM/ETM+/OLI。为了确保影像质量，首先筛选了云量小于 10% 的影像，并通过目视检查剔除了云量过多的影像，最终获得了 193 景 Landsat 影像用于数据融合。此外，利用 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes（FLAASH）大气校正

算法^[31]对 193 组 Landsat 数据进行大气校正，以此来消除气溶胶散射带来的误差，从而得到地表真实反射率。最后，利用反射率数据计算得到 Landsat NDVI 影像用于计算水文因子。

2.2.2 MOD13Q1 和 MYD13Q1 产品 本研究所用 MODIS 数据包括 Terra 卫星的 MOD13Q1 产品与 Aqua 卫星的 MYD13Q1 产品，均为 250 m 空间分辨率、16 天周期合成的地表植被指数 (NDVI) 产品，从 NASA 的地球观测系统数据和信息系统 (EOSDIS) 网站和数据门户网站 (<http://reverb.echo.nasa.gov/>) 获得，时间范围覆盖 2000 - 2024 年。由于 Terra 和 Aqua 卫星轨道交错运行，二者 NDVI 产品联合使用后可形成 8 天时间间隔的高频 NDVI 时间序列。考虑到 MOD13Q1 产品从 2000 年第 49 天 (第 1 景) 开始发布，研究通过对比同期水位变化与区域物候特征，采用邻近年份数据对部分缺失影像进行补齐处理，最终共整理获得 1150 景 MODIS 影像，用于与 Landsat 影像融合，构建高时空分辨率 NDVI 数据集。

2.2.3 地形、水文数据 地形数据来源于江西省水文监测中心提供的 2010 年 5m 空间分辨率的数字高程模型 (DEM)，经重投影和重采样后生成 30 m×30 m 的数字高程模型，以匹配遥感影像的空间分辨率。水位观测数据为 2000-2024 年日尺度资料，来自鄱阳湖代表水文站湖口站、星子站、都昌站、棠荫站和康山站，由江西省水文监测中心和长江水利委员会水文局联合提供。水位数据一方面用于 MODIS 与 Landsat NDVI 影像的时空配准，通过水位同步性与物候一致性双重约束准则筛选最佳匹配影像对；同时作为水量估算的核心参数——独立水体通过虚拟面积逼近算法估算水位，结合 DEM 计算水量，主湖区及其连通区域采用对应泰森多边形水文站实测水位结合 DEM 估算水量。

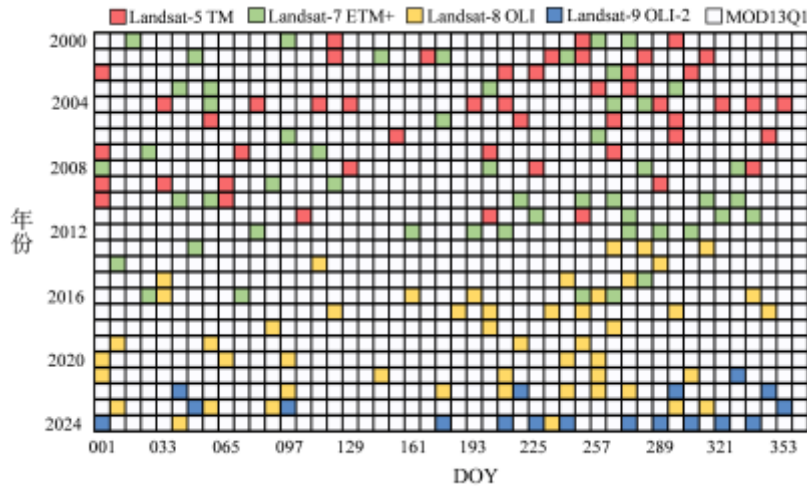


图3 研究获得Landsat和MOD13Q1数据时间分布

Fig.3 Temporal distribution of acquired Landsat and MOD13Q1 datasets used in this study

2. 3 方法

2.3.1 RMMEH 滤波 采用运行中位数、均值、最大值操作、终点处理和 Hanning (RMMEH) 平滑方法消除了 NDVI 数据的残差噪声^[32]，用于降低 MOD13Q1 NDVI 时间序列的噪声。运行中值平滑是一种简单的非线性平滑，与经典的线性数字滤波器（如移动平均）相比，它更能抵抗离群值，因此在非线性平滑方法去除尖峰后，可以安全地应用线性滤波器。由于连续出现 3 次以上 NDVI 峰值的可能性极小，即连续 24 天内 NDVI 被污染的概率极小，所以选择以 5 为跨度使用非线性运行中值平滑器平滑原始 NDVI 时间序列。首先，通过式 (1) 计算 t 时刻的中位数平滑值；其次是生成一个新的 NDVI 时间序列，其中每个 NDVI 值是使用它周围两个相邻点的算术平均值来计算的 (式 (2))；再次，通过式 (3) 在原始 t 时刻的 NDVI 值 $[NDVI]_t$ 、t 时刻的中位数平滑值 R_t 和 t 时刻的均值平滑值 M_t 三者最大值来获得最佳估计值。最后两个步骤包括端点处理和加权移动平均。由于 NDVI 时间序列的初值和终值没有邻居包围，如果按照上述方法进行平滑处理，会受到边界效应的影响，这里采用外推策略^[33]来获得新的端点值。这里使用了权重分别为 1/4、1/2 和 1/4 的经典平滑器 Hanning^[34]。通过使用 RMMEH 平滑的方法，

有效降低了 MOD13Q1 NDVI 时间序列的噪声，重建高质量的 NDVI 时间序列数据集。

$$R_t = \text{med}\{NDVI_{t-2}, NDVI_{t-1}, NDVI_t, NDVI_{t+1}, NDVI_{t+2}\} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{NDVI_{t-1} + NDVI_{t+1}}{2} \quad (2)$$

$$RMM_t = \text{MAX}\{NDVI_t, R_t, M_t\} \quad (3)$$

式中 $NDVI_t$ 和 R_t 分别为 t 时刻的原始 NDVI 值和运行中位数平滑 NDVI 值， M_t 是算术平均运算的结果， M_t 代表平均值， RMM_t 表示最佳估计， MAX 表示最大操作。

2.3.2 HSTAFM 数据融合 本研究改进了 Chen 等^[35-36]提出的 HSTAFM (A hierarchical spatiotemporal adaptive fusion model, 分层时空自适应融合模型)，将 MODIS 数据的高频时间信息 (8 d) 和 Landsat 数据的高分辨率空间信息 (30 m) 融合，生成 2000-2024 年时间分辨率为 8 天、空间分辨率为 30 m 的鄱阳湖洪泛湿地 NDVI 数据集 (1150 景)。与原始 HSTAFM 模型直接采用乘法生成初始预测影像不同，本文在初始预测阶段基于 MODIS 像元实际值 (M_1) 确定模型选择：当 M_1 小于 0.05 时，采用加法模型以提升稳定性；当 M_1 大于等于 0.05 时，采用乘法模型以增强对变化区域的敏感性，从而提高初始预测的可靠性。此外，为更好适配湖区水文节律和植被物候动态，我们引入水位与物候特征的协同约束机制，在辅助影像对选择中优先匹配水位变化趋势一致、物候相近的影像对，从而增强 NDVI 变化过程在时间维度上的连贯性。在空间加权阶段，我们延续了原始 HSTAFM 模型中以光谱相似性 (S_{ij}) 与空间距离差 (d_{ij}) 为核心的加权思想，综合利用 NDVI 值差异和空间结构关系计算权重 (W_{ij})，并通过以下公式完成中心像素 NDVI 值的估算：

$$F_2\left(x_{\frac{\omega}{2}}, y_{\frac{\omega}{2}}, b\right) = \sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{\omega} W_{ij} \times P_{ij} \times [L_2(x_i, y_j, b) + M_2(x_i, y_j, b) - M_1(x_i, y_j, b)] \quad (4)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{S_{ij} \times d_{ij}} \frac{1}{\sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{\omega} S_{ij} \times d_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{P_{ij} \times |L(x_i, y_j) - L\left(x_{\frac{\omega}{2}}, y_{\frac{\omega}{2}}\right)|}{\sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{\omega} P_{ij} \times |L(x_i, y_j) - L\left(x_{\frac{\omega}{2}}, y_{\frac{\omega}{2}}\right)|} \quad (6)$$

$$d_{ij} = 1 + \frac{\sqrt{\left(x_i - x_{\frac{\omega}{2}}\right)^2 + \left(y_j - y_{\frac{\omega}{2}}\right)^2}}{1 + \omega} \quad (7)$$

式中， ω 是移动窗口大小， W_{ij} 是由光谱相似性 (S_{ij}) 和空间距离差 (d_{ij}) 确定的权重， P_{ij} 是由二进制矩阵表示的相似像素集。通过上述流程构建的融合 NDVI 产品，在保持高时间频率的同时兼顾了空间细节，并更精准地反映了碟形湖水文动态与植被响应之间的耦合关系。

2.3.3 水体提取 针对鄱阳湖洪泛湿地的时空异质性特征 (如季节性水位涨落、植被演替和泥沙沉积)，传统固定阈值法难以适应水体光谱特征的动态变化。因此，本研究采用 Jenks 自然断裂法 (Jenks Natural Breaks, JNB)^[37] 进行逐像元动态阈值分割，以实现水体提取。该方法通过最小化类内方差 (Sum of Class Deviations from Mean, SDCM) 与最大化类间方差 (Sum of Deviations from Array Mean, SDAM) 的平衡机制，动态确定每幅遥感影像的最优分割点，从而实现水体与非水体的稳健分类。具体而言，JNB 方法首先计算影像数据的均值偏差平方和 (SDAM)，该值代表数据的总体方差。随后，对所有可能的分割点组合计算类内方差平方和 (SDCM)，并选择使 SDCM 最小的分割点组合，以实现最佳分类效果。为了评估分割的适应性，JNB 方法引入方差拟合优度 (Goodness of Variance Fit, GVF)，计算公式为 (8)：

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM} \quad (8)$$

其中,GVF值范围为0至1,值越高表示分割效果越优。通过逐幅影像的动态阈值调整,JNB方法能够自适应不同影像特征,最大程度减少类内变异,增强水体与非水体的区分效果,从而为后续水体面积的高精度提取提供坚实的数据支撑。

2.3.4 连通性分析 在碟形湖水位和水量估算中,水文连通性分析发挥着双重关键作用:一是识别碟形湖“形态”的演变过程,明确其与主湖之间的连通与孤立状态及其持续时间;二是据此区分不同的水位估算路径,为精准估算提供判据基础。本研究采用Tan^[13,38]开发的水文连通性评估工具CAST,对鄱阳湖典型洪泛区碟形湖与主湖之间的连通性进行动态监测。CAST利用MATLAB的bwlabel函数,结合8邻域(8D)路径分析策略,在二值矩阵上执行计算,沿正交方向(N-S和W-E)及对角方向(NE-SW和NW-SE)判断特定距离内湿单元是否连通。此外,方法同步输出连续体的空间分布信息,从1到NCC(Number of Connected Components,连通体的数量)逐个标识连通体,为水位及水量估算提供科学支撑。

2.3.5 水位和水量估算 如图2所示,碟形湖的水位和水量估算基于水文连通性的判断,分为两种情况进行讨论:一是与主湖连通的形态,二是独立的碟形湖形态。在主湖连通形态下,碟形湖的水位通过泰森多边形确定最近的主湖区水文站点,并采用该站点的观测水位赋值。在独立碟形湖形态下,首先在每个独立水体的最小矩形范围内,利用高分辨率数字高程模型(DEM)数据,将每个像元的地形高程作为潜在水位,所有高程低于当前水位的像元即被视为水体单元,形成对应的虚拟水面积序列。随后,通过将遥感提取的水面积与虚拟水面积进行比较,确定两者最接近时水体范围的交集作为此时的碟形湖湖面,并以其覆盖的最高海拔定义为独立碟形湖的水位。最终,基于该水位及其对应淹没区域,采用逐像元积分法计算碟形湖水量。

3 结果

3.1 不确定性评价

3.1.1 相对精度 碟形湖独立时,本研究采用遥感提取的水体范围与基于DEM确定的最佳湖泊淹没范围进行对比,将两者的空间重叠面积与遥感提取水体面积之比定义为水位估算的相对精度。图4展示了鄱阳湖国家级自然保护区9个碟形湖水位估算的相对精度,并附其对应水位。

鄱阳湖102个碟形湖中,预测的平均相对精度介于58.90%~93.94%之间,编号为08的预测精度最高,池州湖预测精度最低。整体来看,有88个碟形湖水位预测的相对精度都在70%以上。鄱阳湖国家级自然保护区内9个碟形湖中,预测精度最高的是大汉湖的,平均精度达到92.76%,大湖池次之,达到89.47%,朱市湖的预测精度最低为75.93%,预测结果整体可靠。

3.1.2 绝对精度 本研究搜集了沙湖与大湖池两个碟形湖的多年实测水位数据作为代表性样本对估算水位进行验证。结果如图5所示,沙湖和大湖池估算水位的平均绝对误差分别为0.39 m和0.56 m, R^2 分别为0.91和0.87,两湖水位估算与实测数据之间具有良好的一致性。

3.2 碟形湖孤立形态的出现时机

碟形湖在丰水期通常被主湖水体淹没,与主湖区连为一体,仅当水位降至特定阈值时才逐步出露,形成相对独立的水体。因此,探讨碟形湖的出露时机及其孤立形态的持续时间,对于理解其水文演变过程具有重要意义。

与南部和中部湖区相比,北部湖区的碟形湖孤立形态结束时间更晚,对应的水位更高。例如,赣江北支、中支、南支水系碟形湖孤立形态结束的时间分别为6月12日、5月22日和5月24日,对应星子水位分别为14.25 m、12.35 m和14.06 m;北支、中支、南支水系碟形湖孤立形态开始的时间为9月5日、10月3日和9月10日,对应星子水位13.85 m、12.36 m和12.81 m。整体来看,赣江北支水系碟形湖孤立时长为280d,显著长于南支(258d)和中支(244d)。此外,低滩地碟形湖孤立形态结束时间早于高滩地,开始时间晚于高滩地。研究显示,低滩地碟形湖平均于4月20日结束孤立形态,高滩地碟形湖平均于5月29日,提前39d;低滩地碟形湖平均于9月23日开始渐次出露,高滩地碟形湖平均于8月20日开始出露,晚34d。高滩地碟形湖由于出露时间更早、结束孤立形态时间更晚,其孤立形态平均持续时间(282d)显著长于低滩地(209d)。

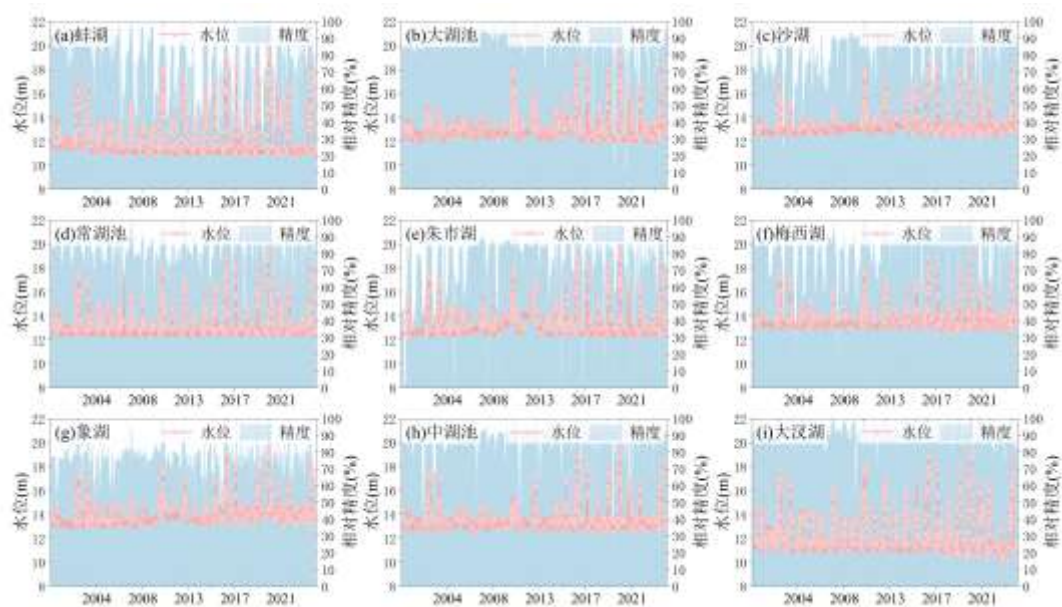


图4 2000-2024 年鄱阳湖国家级自然保护区内9个碟形湖的估算水位变化和相对精度。(a) 蚌湖、(b) 大湖池、(c) 沙湖、(d) 常湖池、(e) 朱市湖、(f) 梅西湖、(g) 象湖、(h) 中湖池、(i) 大汉湖估算水位变化及其相对精度

Fig.4 Estimated water level variations and relative accuracy of nine seasonal isolated lakes in the Lake Poyang National Nature Reserve from 2000 to 2024. (a) Lake Banghu, (b) Lake Dahuchi, (c) Lake Shahu, (d) Lake Changhuchi, (e) Lake Zhushihu, (f) Lake Meixihu, (g) Lake Xianghu, (h) Lake Zhonghuchi, (i) Lake Dachahu

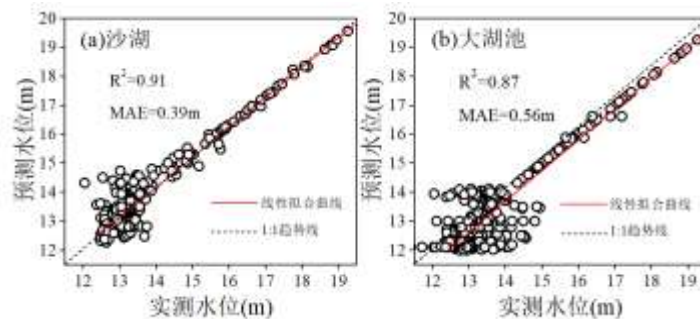


图5 2016年至2022年 (a) 沙湖和 (b) 大湖池的估算水位与观测水位之间的关系
 R^2 表示决定系数, MAE表示平均绝对误差 (m)

Fig.5 Relationship between estimated and observed water levels for (a) Lake Shahu and (b) Lake Dahuchi from 2016 to 2022. R^2 denotes the coefficient of determination, and MAE represents the mean absolute error (in meters).

鉴于以往研究发现三峡工程运行影响碟形湖出露过程, 本文选取三峡蓄水前(2001年)与初期蓄水阶段(2006年)作为对比年份^[39]。结果表明, 三峡工程运行后, 碟形湖孤立形态结束时间普遍推迟, 导致其出露时机相应延后。102个碟形湖的连通时长由2001年平均59天延长至2006年平均88d, 碟形湖的出露时机由2001年3月12日推迟至2006年5月12日, 整体推迟61d。如赣江南支水系的碟形湖孤立形态结束时间由2001年4月6日推迟至2006年5月9日; 出露时间由2001年5月7日推迟至2006年7月2日, 整体推迟56d; 赣江中支水系的碟形湖孤立形态结束和开始时间分别为2001年4月10日和2001年7月3日, 分别推迟至2006年5月21日和2006年9月16日; 赣江北支水系的孤立形态结束和开始时间分别由2001年4月7日和2001年5

月15日推迟至2006年5月21日和2006年8月2日。在三峡工程运行前后鄱阳湖区域水位变化特征的对比分析中, 本文基于星子水文站2001年与2006年的逐日水位数据, 计算了不同阶段的水位涨退水速率。结果表明, 三峡工程运行后鄱阳湖区域的水位变化速率有所增大: 2001年涨水速率为0.0385 m/d, 退水速率为0.0393 m/d; 2006年涨水速率提升至0.0499 m/d, 退水速率提升至0.0455 m/d。

此外, 本文选取2020年、2015年和2023年作为典型丰水年、平水年和枯水年, 进一步分析不同水文年鄱阳湖孤立形态的时序特征。总体而言, 水量丰沛年份, 出露时间更晚, 碟形湖孤立形态结束时间更早, 孤立状态持续时间更短。丰水年, 碟形湖平均在2020年6月6日结束孤立形态, 平水年为2015年6月21日, 而枯水年则推迟至2023年7月26日。不同水文年碟形湖的出露时间存在明显差异: 平水年为2015年10月7日, 丰水年和枯水年分别为2020年10月23日和2023年10月23日。枯水年碟形湖的孤立形态持续时间最长, 达268d, 丰水年与平水年分别为235d和234d。

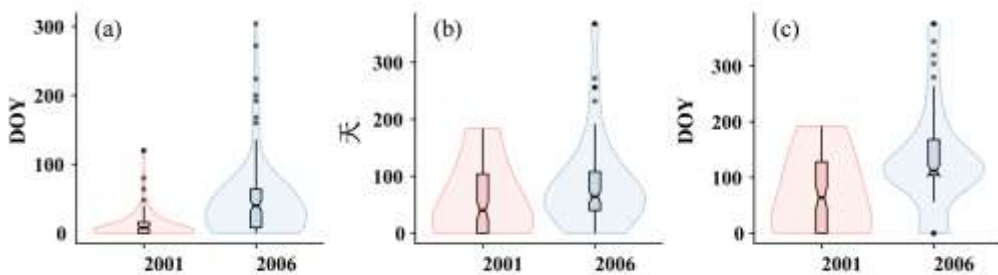


图6 2001年和2006年（三峡大坝建成前后）鄱阳湖区102个碟形湖出露和持续的时间。(a)显示了碟形湖孤立形态结束的时机;(b)显示了碟形湖与主湖连通的时长;(c)显示了碟形湖孤立形态开始的时机。

Fig.6 Emergence timing and duration of 102 seasonal isolated lakes in the Lake Poyang region in 2001 and 2006 (before and after the completion of the Three Gorges Dam). (a) shows the end timing of the isolated phase; (b) shows the duration of hydrological connection with the main lake; (c) shows the onset timing of the isolated phase.

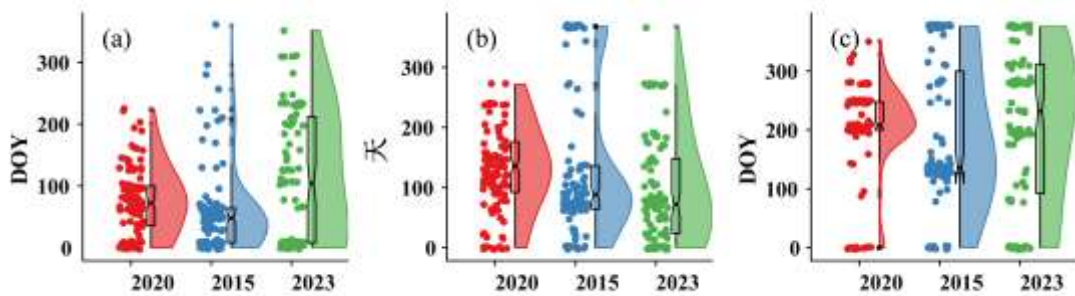


图7 典型丰水年（2020）、平水年（2015）和枯水年（2023）碟形湖出露和持续的时间。(a)显示了碟形湖孤立形态结束的时机;(b)显示了碟形湖与主湖连通的时长;(c)显示了碟形湖孤立形态开始的时机。

Fig.7 Timing of exposure and duration of seasonal isolated lakes in typical wet (2020), normal (2015), and dry years (2023). (a) Timing of the end of isolated phase of seasonal isolated lakes; (b) Duration of connectivity between seasonal isolated lakes and main lake; (c) Timing of the onset of isolated phase of seasonal isolated lakes.

3.3 碟形湖的面积动态

为综合评估连通与孤立状态下碟形湖的整体面积变化, 采用碟形湖边界范围代表其在连通状态下的

面积。据此测算，2000年–2024年，鄱阳湖面积范围为157.64~3186.97 km²，多年平均面积为1697.19 km²，最大湖区面积出现在2020年8月28日；碟形湖的面积在53.25 km²~573.40 km²之间波动，平均面积为305.20 km²，占鄱阳湖水体面积的17.98%。

仅考虑孤立形态下，102个碟形湖的总面积在0.22~364.16 km²之间波动，最大面积出现在2019年9月14日，多年平均面积117.39 km²，占鄱阳湖多年平均面积的6.92%。从年际变化看，孤立状态下碟形湖年均面积最大值为134.03 km²，出现在2023年，占当年鄱阳湖年均面积（1616.03 km²）的8.29%；年均面积最小值为77.46 km²，出现在2002年，占比为3.81%（当年鄱阳湖平均面积为2033.08 km²）。各碟形湖所在水系的总面积中，面积最大的水系为赣江南支，该水系19个碟形湖的总平均面积为26.92 km²。其次为修河水系，该水系7个碟形湖的总面积为26.87 km²。最小为抚河水系，该水系4个碟形湖的总面积为1.22 km²。PLNNR内9个碟形湖总面积在0.56~75.27 km²波动，多年平均面积为30.49 km²；NWNRR内30个碟形湖的总面积在0.23~93.58 km²波动，多年平均面积为16.75 km²。

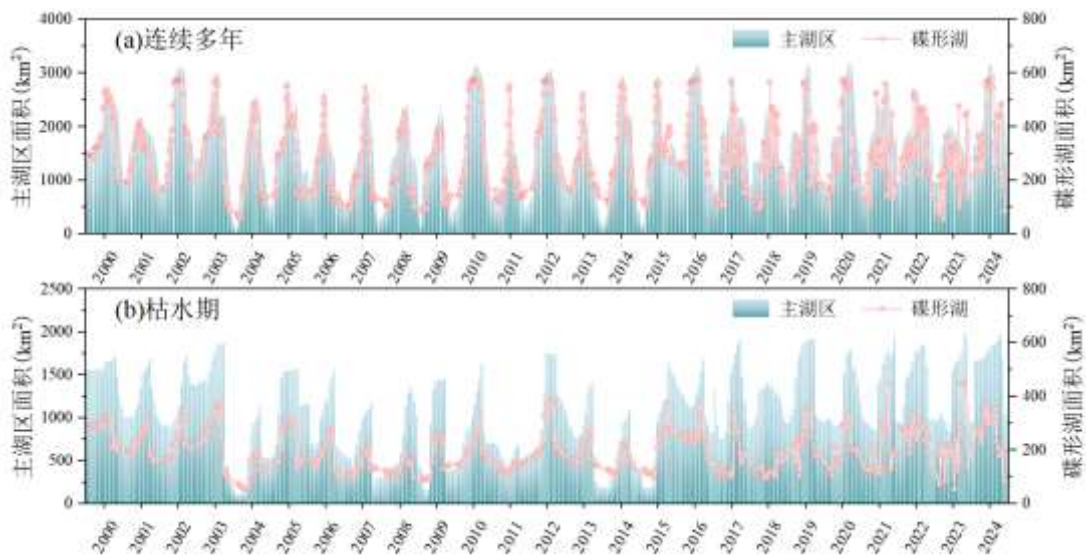


图8 鄱阳湖主湖区和碟形湖的面积动态。

(a)、(b)分别描述了从2000年至2024年总湖区和洪泛区碟形湖泊连续多年和枯水期的面积变化

Fig.8. Area dynamics of the main lake and seasonal isolated lakes in Lake Poyang. Panels (a) and (b) show the multi-year and dry-season area variations of the entire lake and floodplain dish-shaped lakes from 2000 to 2024, respectively.

3.4 碟形湖的水量动态

为统一评估尺度，连通状态下的碟形湖水量以其最大容积代替，进而得出碟形湖在全时段（包括连通与孤立状态）的总水量。结果显示，2000年–2024年，鄱阳湖的水量介于3.76亿m³~218.58亿m³之间鄱阳湖多年平均蓄水量为43.35亿m³，洪泛区碟形湖的水量在0.11亿m³~7.13亿m³之间波动，平均蓄水量为2.73亿m³，占鄱阳湖总水量的6.30%。

为了量化碟形湖对鄱阳湖整体水量的贡献，本研究统计了每个碟形湖在孤立形态下的多年平均蓄水量。结果显示，102个碟形湖中，单湖多年平均蓄水量的范围为0~0.08亿m³，其中赣江中支水系的编号为04的碟形湖多年平均水量接近于0；而修河水系的大湖池多年平均蓄水量最高，达到0.08亿m³。各水系的碟形湖总水量中，最大的水系为赣江南支，该水系19个碟形湖的总平均水量为0.19亿m³。其次为修河水系，该水系7个碟形湖的总水量为0.14亿m³。最小为官刚河水系，该水系3个碟形湖的总水量为0.001亿m³。PLNNR内9个碟形湖总水量在0~0.62亿m³波动，多年平均水量为0.14亿m³；NWNRR内30个碟形湖的总水量在0~0.71亿m³波动，多年平均水量为0.07亿m³。

2000年–2024年，孤立状态碟形湖的总水量在0~3.03亿m³之间波动，最大值出现在2019年9月30日，多年平均水量为0.73亿m³，占鄱阳湖多年平均蓄水量（43.35亿m³）的1.68%。在全样本（n=1150）尺度

上，碟形湖占鄱阳湖总水量的 $4.44\% \pm 4.43\%$ （均值±标准差），其中99分位数达到20.74%。如图9(a)所示，鄱阳湖水量在年内呈现明显波动特征，周期性“波峰”与“波谷”交替出现，且主湖与碟形湖水量的变化趋势基本一致。进一步按水文阶段分析，涨水期，鄱阳湖平均水量为38.92亿 m^3 ，孤立碟形湖平均水量为0.74亿 m^3 ，占比为1.91%；退水期，两者水量分别为24.55亿 m^3 与1.02亿 m^3 ，后者占比为4.13%；枯水期鄱阳湖的平均水量降至13.38亿 m^3 ，而碟形湖的平均水量为0.74亿 m^3 ，占比达到6%。

此外，研究发现碟形湖水量变化存在空间异质性。以赣江水系的碟形湖为例，2000年–2024年，赣江北支水系8个碟形湖的平均水量呈下降趋势，水量的平均下降速率为0.15亿 m^3 /year。而赣江中支27个碟形湖和赣江南支19个碟形湖的平均水量在过去25年中呈上升趋势，水量的平均增长速率分别为0.12亿 m^3 /a和0.02亿 m^3 /a。

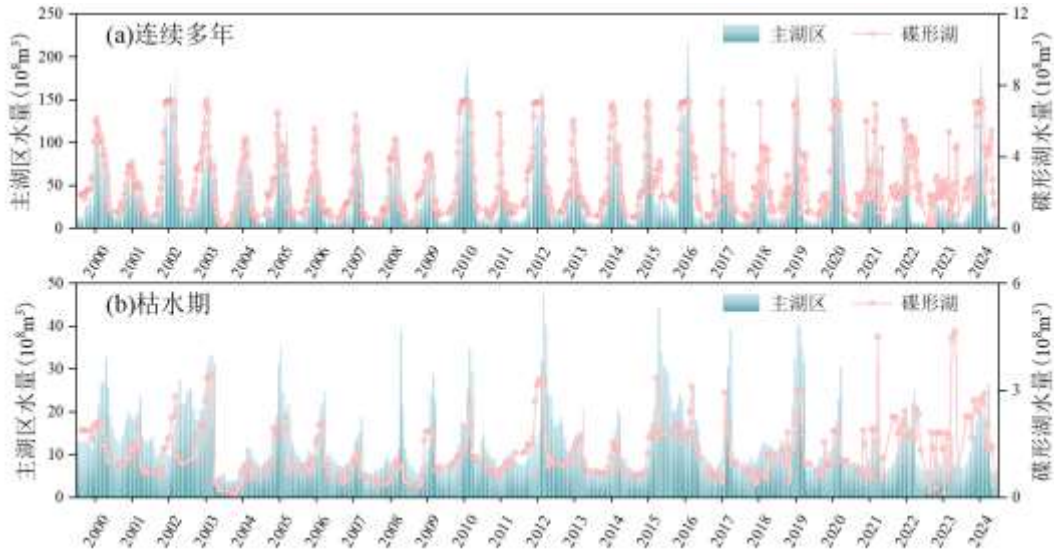


图9 2000年–2024年鄱阳湖整体以及碟形湖 (a) 连续多年和 (b) 枯水期的水量变化。

Fig.9 Water volume variations of the entire Lake Poyang and seasonal isolated lakes from 2000 to 2024: (a) multi-year continuous changes; (b) dry season variations.

4讨论

4.1 碟形湖在干旱期的水文调蓄功能

鄱阳湖洪泛区碟形湖在主湖退水加剧背景下展现出的蓄水稳定性与生态缓冲功能。近年来，受全球气候变化和三峡工程调度双重影响，鄱阳湖水文过程发生深刻变化，特别是2003年之后“水来得早、去得快”的典型退水节律被广泛记录。本研究基于2000年–2024年多时相遥感数据，揭示了研究区内孤立碟形湖平均水面面积达117.39 km^2 、年均蓄水量约0.73亿 m^3 ，虽与主湖体相比体量有限，但在主湖水位下降乃至干涸时，碟形湖因其地形封闭性及水体稳定性，仍能维持较高水位，有效延缓湖区整体干涸过程。例如，2022年严重干旱期^[40]，星子最低水位下降到6.63 m，湖区最小面积降至972.62 km^2 ，湖区内发生大规模鱼群搁浅事件，引发社会广泛关注，而同期碟形湖因水位下降更缓、出露时间更晚，面积维持在144.73 km^2 ，成为鱼类和底栖动物的“庇护所”^[41-42]。再如，2023年，鄱阳湖主湖区平均蓄水量降至12.86亿 m^3 ，相比多年平均蓄水量下降65.82%，而碟形湖平均蓄水量达到1.09亿 m^3 ，较多年平均蓄水量上升49.32%。枯水期，碟形湖的平均蓄水量为0.74亿 m^3 ，而湖区平均蓄水量为13.38亿 m^3 ，碟形湖的水量贡献占比相对于多年平均水平提升至6%，表明在水资源极端紧张情境下，碟形湖相对稳定的蓄水能力成为缓解干旱的关键生态储备力量。本研究首次从湖区整体尺度定量评估了碟形湖的水源涵养功能及其对湿地生态系统的支撑意义，验证了“以小湖稳全湖”的理论基础，为鄱阳湖流域生态补水与干旱期水资源管理提供了关键数据支撑。

4.2 水文过程变化对碟形湖生态功能的影响及管理启示

鄱阳湖水文节律深受三峡工程调度、湖区降水变化及人类干预影响^[43],进而显著改变了碟形湖的连通时间与生态功能。本研究表明,碟形湖连通起始时间由2001年4月19日推迟至2006年5月21日,2020年丰水年连通始于6月6日,而2023年干旱年份延迟至7月26日,连通持续时长缩短至97d。这些变化反映出碟形湖对人类活动和气候波动的敏感响应,其水文过程的改变进而影响了湿地生态系统的稳定性。在宏观层面,水文过程驱动着湖区生态节律。连通时间的推迟和碟形湖形态持续时长的缩短,直接压缩了鱼类繁殖和底栖动物生长的窗口期,也改变了沉水植物的萌发与生长环境。同时,水位的提前退落或过度波动会导致候鸟迁飞期栖息地面积减少,进而威胁其觅食与越冬需求。这说明碟形湖水文过程的扰动不仅是水资源问题,还通过生态链条传导,影响湿地生态系统的完整性与多样性。

本研究的长时序水位与水量精准估算,不仅揭示了碟形湖水文过程的动态变化规律,也为生态保护与管理提供了可量化的工具和指标。首先,它弥补了偏远、缺测碟形湖在水文观测上的不足,使得洪泛区整体的水文过程能够被系统认知。其次,较高的时间分辨率使研究能够捕捉短时间尺度内的水位波动,从而更好解释植被物候变化及其对候鸟取食窗口的制约作用。最后,在低坡度湖盆环境下,即便微小的水位变化也会导致浅水生境面积的显著增减,精准估算为识别这些生态敏感阈值提供了必要前提。由此,研究成果可直接转化为管理实践:在枯水期设定最低生态水位触发补水调度,在湖群间开展水文连通性优化,在适宜水深范围内推动沉水植被恢复,科学安排鱼类与底栖动物的增殖放流,并保障候鸟迁飞关键期的浅水栖息地。这些启示表明,精准估算不仅是对水文过程本身的科学补充,更是推动湖区生态修复和保护区管理的核心支撑。

4.3 方法适用性与研究展望

本研究构建了基于多源遥感融合与水文连通分析的碟形湖水量估算框架,结合湖泊连通状态分类,实现了对季节性碟形湖水位与水量的动态识别与估算。相较于传统的实地观测、水动力模型或卫星测高方法,该方法具有数据获取广、空间覆盖强、适应性高等优势。Landsat和MODIS数据的融合提升了监测的时空连续性,DEM推导的水面-水位关系则为水量估算提供了可靠支撑,解决了实地测量困难和建模数据不足的问题。尽管如此,本方法仍存在一定局限。其适用于水位波动显著、水边线变化清晰的湖泊或子湖,并要求具备较高精度的DEM作为地形支撑。在水位相对稳定、岸线较为陡峭,或湖泊面积极小的情况下,本方法难以有效应用。展望未来,可从以下几个方面进一步改进与拓展:首先,有必要改进或建立新的多源遥感数据融合方法,以实现逐日尺度的动态监测,从而更好地捕捉短时间尺度的水位与面积变化。其次,在重点区域可联合采用机载激光雷达与船载多普勒测深,获取高精度、最新的湖盆DEM,为水量估算提供更可靠的地形基础。最后,在不同湖区布设更多原位观测站点,通过长期水位与面积观测资料对该水量估算框架进行验证与优化,有望提升估算结果的精度与可靠性。

5 结论

本研究以中国最大的泛洪湖泊——鄱阳湖为研究对象,提出了一种基于融合多源遥感影像与水文连通性分析的水位-水量快速估算方法,在长时间序列上实现了高精度水文动态重建。主要结论如下:(1)碟形湖的出露时机受控于主湖水位变化,表现出明显的时空差异和工程扰动响应特征。(2)碟形湖孤立形态下的水面面积在年际尺度上波动显著,是主湖区水位退缩后维持湿地生态格局的重要组成。(3)孤立状态下的碟形湖蓄水量占比有限,但其在主湖低枯水位时期的调蓄作用愈发显著,具有重要生态与水资源缓冲价值。综上所述,尽管洪泛区碟形湖在鄱阳湖整体水量中占比有限,但其在水资源调蓄、生态功能维系和生物多样性保护等方面的作用不可替代。本研究提出的基于多源遥感融合和水文连通性分析的水量估算方法,为鄱阳湖及类似浅水、季节性湖泊的动态监测与科学管理提供了技术支持,也为提升区域水资源管理与生态保护水平提供了重要的科学依据。

6 附件

附表1见电子版(DOI: 10.18307/2025.0445)。

7 参考文献

- [1] Li Y, Zhang Q, Zhang L, et al. Investigation of water temperature variations and sensitivities in a large floodplain lake system (Poyang Lake, China) using a hydrodynamic model. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1231. DOI:10.3390/rs9121231.
- [2] Cao S, Li Y, Li N, et al. Groundwater numerical simulation in the typical floodplain of Lake Poyang. *J. Lake Sci.*, 2023, 35(1): 298–312. DOI:10.18307/2023.0123. [曹思佳, 李云良, 李宁宁, 等. 鄱阳湖典型洪泛区地下水数值模拟研究. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 298–312.]
- [3] Zhang Q, Xue C, Xia J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2023, 38(12): 1894–1902. DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.20230813005. [张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策. *中国科学院院刊*, 2023, 38(12): 1894–1902.]
- [4] Zhang Y, Zhang R, Ma M, et al. Spatio-temporal variations of terrestrial water storage in the five rivers of the Lake Poyang Basin and its impact on lake water volume during 1960–2019. *J. Lake Sci.*, 2024, 36(4): 1204–1221. DOI:10.18307/2024.0451. [章阳, 张润润, 马苗苗, 等. 1960–2019年鄱阳湖五河流域陆地水储量变化及其对主湖区水量的影响. *湖泊科学*, 2024, 36(4): 1204–1221.]
- [5] Li Y, Yao J, Zhao G, et al. Evidences of hydraulic relationships between groundwater and lake water across the large floodplain wetland of Poyang Lake, China. *Water Sci. Technol. Water Supply*, 2018, 18(2): 698–712. DOI:10.2166/ws.2017.150.
- [6] Li Y, Zhang Q, Liu X, et al. Water balance and flashiness for a large floodplain system: A case study of Poyang Lake, China. *Sci. Total Environ.*, 2019, 710: 135499. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135499.
- [7] Hu Z, Zhang Z, Liu Y, et al. The function and significance of the shallow-lakes in the Poyang Lake wetland ecosystem. *Jiangxi Hydraul. Sci. Technol.*, 2015, 41(5): 317–323. DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2015.05.01. [胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍, 等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义. *江西水利科技*, 2015, 41(5): 317–323.]
- [8] Zhao J, Li J, Yan H, et al. Analysis on the water exchange between the main stream of the Yangtze River and the Poyang Lake. *Procedia Environ Sci*, 2011, 10: 2256–2264. DOI:10.1016/j.proenv.2011.09.353.
- [9] Li B, Yang G, Wan R, et al. Impacts of hydrological alteration on ecosystem services changes of a large river-connected lake (Poyang Lake), China. *J. Environ. Manage.*, 2022, 310: 114750. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.114750.
- [10] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2023, 7(3): 358–389. DOI:10.5194/hess-7-358-2003.
- [11] Alsdorf D, Han S C, Bates P, et al. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sens. Environ.*, 2010, 114(11): 2448–2456. DOI:10.1016/j.rse.2010.05.020.
- [12] Crétaux J F, Abarca-del-Río R, Bergé-Nguyen M, et al. Lake volume monitoring from space. *Surv. Geophys.*, 2016, 37: 269–305. DOI:10.1007/s10712-016-9362-6.
- [13] Tan Z, Wang X, Chen B, et al. Surface water connectivity of seasonal isolated lakes in a dynamic lake-floodplain system. *J. Hydrol.*, 2019, 579: 124154. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.124154.
- [14] Lesack L F, Melack J M. Flooding hydrology and mixture dynamics of lake water derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resour. Res.*, 1995, 31(2): 329–345. DOI:10.1029/94WR02271.
- [15] An C, Zhang F, Chan N W, et al. A review on the research progress of lake water volume estimation methods. *J. Environ. Manage.*, 2022, 314: 115057. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.115057.
- [16] Zhao Y, Fu J, Pang Z, et al. Validation of inland water surface elevation from SWOT satellite products: A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Remote Sens.*, 2025, 17(8): 1330. DOI:10.3390/rs17081330.

- [17] Zhang X L, Zhang Q, Werner A D, et al. Characteristics and causal factors of hysteresis in the hydrodynamics of a large floodplain system: Poyang Lake (China). *J. Hydrol.*, 2017, 553: 574–583. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.08.027.
- [18] Li Y, Yao J, Zang Q. Numerical study on the hydrodynamic influences of the Yangtze River backflow into Poyang Lake. *J. Lake Sci.*, 2017, 29(5): 1227–1237. DOI:10.18307/2017.0521. [李云良, 姚静, 张奇. 长江倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的数值模拟. *湖泊科学*, 2017, 29(5): 1227–1237.]
- [19] Xie Y, Liu S, Zhang J, et al. Inland water level measurement from spaceborne laser altimetry: Validation and comparison of three missions over the Great Lakes and lower Mississippi River. *J. Hydrol.*, 2021, 597: 126312. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126312.
- [20] Jiang L, Nielsen K, Andersen O B, et al. CryoSat-2 radar altimetry for monitoring freshwater resources of China. *Remote Sens. Environ.*, 2017, 200: 125–139. DOI:10.1016/j.rse.2017.08.015.
- [21] Jiang L, Nielsen K, Andersen O B, et al. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *J. Hydrol.*, 2017, 544: 109–124. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.11.024.
- [22] Hwang C, Cheng Y S, Yang W H, et al. Lake level changes in the Tibetan Plateau from CryoSat-2, SARAL, ICESat, and Jason-2 altimeter. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2019, 30(1): 1–18. DOI:10.3319/TAO.2018.07.09.01.
- [23] Chen J, Liao J. Monitoring lake level changes in China using multi-altimeter data (2016–2019). *J. Hydrol.*, 2020, 590: 125544. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125544.
- [24] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. *Remote Sens. Environ.*, 2012, 123: 187–195. DOI:10.1016/j.rse.2012.01.001.
- [25] Shu S, Liu H, Beck R A, et al. Analysis of Sentinel-3 SAR altimetry waveform retracking algorithms for deriving temporally consistent water levels over ice-covered lakes. *Remote Sens. Environ.*, 2020, 239: 111643. DOI:10.1016/j.rse.2020.111643.
- [26] Tan Z, Melack J, Li Y, et al. Estimation of water volume in ungauged, dynamic floodplain lakes. *Environ. Res. Lett.*, 2020, 15: 054021. DOI:10.1088/1748-9326/ab82cb.
- [27] Qiao B, Zhu L, Yang R. Temporal-spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau. *Remote Sens. Environ.*, 2019, 222: 232–243. DOI:10.1016/j.rse.2018.12.037.
- [28] Yang R, Zhu L, Wang J, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. *Clim. Change*, 2016, 140: 621–633. DOI:10.1007/s10584-016-1877-9.
- [29] Fang Y, Li H, Wan W, et al. Assessment of water storage change in China's lakes and reservoirs over the last three decades. *Remote Sens.*, 2019, 11(12): 1467. DOI:10.3390/rs11121467.
- [30] Crétaux J F, Arsen A, Calmant S, et al. SOLS: A lake database to monitor in near real time water level and storage variations from remote sensing data. *Adv. Space Res.*, 2011, 47(9): 1497–1507. DOI:10.1016/j.asr.2011.01.004.
- [31] Cooley T, Anderson G P, Felde G W, et al. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. In: *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, Toronto, Canada, 2002.
- [32] Jin Z, Xu B. A novel compound smoother—RMMEH to reconstruct MODIS NDVI time series. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2013, 10(4): 942–946. DOI:10.1109/LGRS.2013.2253760.
- [33] Velleman P F, Hoanglin D C. Applications, basics, and computing of exploratory data analysis. *J. R. Stat. Soc. C Appl. Stat.*, 1983, 32(3): 320–321. DOI:10.2307/2347963.
- [34] Dodge Y. *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York: Springer Verlag, 2008.

- [35] Chen B, Huang B, Xu B. A hierarchical spatiotemporal adaptive fusion model using one image pair. *Int. J. Digit. Earth*, 2017, 10(6): 639–655. DOI:10.1080/17538947.2016.1235621.
- [36] Chen B, Chen L, Huang B, et al. Dynamic monitoring of the Poyang Lake wetland by integrating Landsat and MODIS observations. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2018, 139: 75–87. DOI:10.1016/j.isprs.2018.02.021.
- [37] Jenks G F. Optimal data classification for choropleth maps. *Occas. Pap., Dept. of Geography, Univ. of Kansas*, 1977.
- [38] Trigg M A, Michaelides K, Neal J C, et al. Surface water connectivity dynamics of a large-scale extreme flood. *J. Hydrol.*, 2013, 505: 138–149. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.09.035.
- [39] 刘星根. 鄱阳湖洪泛湿地地表水文连通性时空变化特征及生态环境意义研究. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2020.
- [40] Xia Y, Liu Y, Wang Z, et al. Damage inflicted by extreme drought on Poyang Lake delta wetland and the establishment of countermeasures. *Water*, 2024, 16(16): 2292. DOI:10.3390/w16162292.
- [41] Liu X J, Qin J J, Yang X H, et al. Biodiversity pattern of fish assemblages in Poyang Lake Basin: Threat and conservation. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(20): 11672–11683. DOI:10.1002/ece3.5661.
- [42] Li K, Liu X J, Zhou Y, et al. Temporal and spatial changes in macrozoobenthos diversity in Poyang Lake Basin, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(11): 6353–6365. DOI:10.1002/ece3.5207.
- [43] Ye X, Xu C Y, Zhang Q. What caused the decline of China's largest freshwater lake? Attribution analysis on Poyang Lake water level variations in recent years. In: *Proc. EGU General Assembly, Vienna*, 2017.

附表 1 碟形湖名称及其所在水系

Appended Tab.1 Names of seasonal isolated lakes and their Corresponding River Systems

碟形湖	所在水系	碟形湖	所在水系	碟形湖	所在水系
周边湖	博阳河	山南湖	赣江南支	北口湖	饶河
南湖 2	博阳河	大车荒	赣江中支	四望湖	饶河
牛鸭湖	博阳河	大沙坊湖	赣江中支	云湖	饶河
杨家湖	博阳河	上北甲	赣江中支	北角湖	饶河
王罗湖	抚河	下北甲	赣江中支	大莲子湖	饶河
北口湾	抚河	边湖	赣江中支	七金湖	饶河
鲫鱼湖	抚河	明溪湖	赣江中支	南尖湖	饶河
独洲湖	抚河	流芳湖	赣江中支	编号 07	饶河
梅西湖	赣江北支	上段湖	赣江中支	编号 06	饶河
中湖池	赣江北支	下段湖	赣江中支	编号 04	饶河
小滩湖	赣江北支	草鱼角湖	赣江中支	编号 01	饶河
常湖池	赣江北支	红兴湖	赣江中支	编号 02	饶河
象湖	赣江北支	泥湖	赣江中支	交汉湖	潼津河
大汉湖	赣江北支	编号 05	赣江中支	雪湖	潼津河
蚕豆湖	赣江北支	双岭湖	赣江中支	企湖	潼津河
董家湖	赣江北支	编号 11	赣江中支	编号 08	潼津河
战备湖	赣江南支	编号 10	赣江中支	茶塘湖	潼津河
下深湖	赣江南支	编号 09	赣江中支	坎下湖	信江
常湖	赣江南支	编号 18	赣江中支	大场湖北汉湖	信江
上深湖	赣江南支	编号 21	赣江中支	晚湖	信江
朱湖	赣江南支	编号 17	赣江中支	沙塘池	信江
三湖	赣江南支	编号 15	赣江中支	上水湾下水湾	信江
三泥湾	赣江南支	编号 16	赣江中支	编号 03	信江
白沙湖	赣江南支	编号 12	赣江中支	湛公湖	信江
林充湖	赣江南支	编号 14	赣江中支	蚌湖	修河
西湖	赣江南支	编号 22	赣江中支	大湖池	修河
三水湖	赣江南支	编号 20	赣江中支	池洲湖	修河
二水湖	赣江南支	编号 19	赣江中支	沙湖	修河
南湖 1	赣江南支	大伍湖	官刚河	长湖	修河
程家池	赣江南支	茶叶港	官刚河	芟湖	修河
草湾湖	赣江南支	饭湖	官刚河	朱市湖	修河
六潦湖	赣江南支	盘湖	饶河	白池湖	漳田河
东江湖	赣江南支	上港湖	饶河	大野湖	漳田河
石湖	赣江南支	南口湖	饶河	太阳湖	漳田河