

## 鄱阳湖洪泛区碟形湖数量、空间分布及其影响因素探析\*

牛汇林<sup>1,2,3</sup>, 王明星<sup>4</sup>, 施以兵<sup>5</sup>, 吴桂平<sup>1,3\*\*</sup>,

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

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 江西省水利科学院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 南昌 330029)

(4: 江苏省地质局第六地质大队, 连云港 222023)

(5: 江苏省地质测绘院, 南京 211102)

**摘要:** 碟形湖是鄱阳湖湿地中植被生物量最大、物种多样性最为丰富的区域, 承载了全湖 80%以上的越冬候鸟, 在维护湿地生态系统完整性和物种多样性方面起到至关重要的作用。全面掌握鄱阳湖洪泛区碟形湖的规模及分布特征, 对于区域水资源优化配置及湿地生态系统健康保障具有重要意义。本研究以 Google Earth Engine 云平台为基础, 通过融合多时相 Sentinel-2A/B 卫星影像, 充分挖掘多源辅助资料信息, 利用地理空间大数据技术, 构建了鄱阳湖洪泛区碟形湖精细化空间编目数据库, 系统阐明了洪泛区碟形湖真实的数量、大小及其空间分布格局, 进而探讨了其分布特征的成因以及当前碟形湖所面临的重大问题。研究表明: 1) 鄱阳湖洪泛区共有 0.01km<sup>2</sup> 以上的碟形湖 319 个, 总面积为 557.68km<sup>2</sup>, 约占全湖平均面积的 28.88%。其中, 0.01~1km<sup>2</sup> 的碟形湖分布最为广泛, 约占总量的 70.85%, 随着斑块面积分级的增加, 碟形湖数量以幂函数的方式逐渐递减; 2) 区域分布上, 赣抚河口三角洲碟形湖总面积的贡献最大, 达到 242.82 km<sup>2</sup> (43.54%), 其次是赣修河口以及饶河河口三角洲, 分别为 149.67 km<sup>2</sup> (26.84 %) 和 138.62 km<sup>2</sup> (24.86 %), 南部通江水体区由于地处主航道范围, 碟形湖面积仅占 4.76%; 3) 洪泛区碟形湖总体呈现“一主、两次、多中心”的团簇状空间聚集模式, 且空间密度演化表现为以高密度为核心向外围呈环带状扩散的趋势, “西南密、东北疏”的异质性特征显著; 4) 随着湖盆高程的升高, 碟形湖数量和面积呈现出“先增长后骤降”的变化趋势, 且集中分布在水力条件较适宜 12~14m 高程带上, 具有明显的高程选择性; 5) 在季节性洪泛脉冲为主导的水情条件作用下, 鄱阳湖洪泛区碟形湖的规模及分布是区域地形地貌、水文过程、人类活动等多重因素共同驱动的结果。本研究可为鄱阳湖湿地水文过程变化及其生态环境效应等研究提供高质量的数据支持, 有望提升当前鄱阳湖枯水期水资源调配及干旱预警的科学性。

**关键词:** 鄱阳湖湿地; 碟形湖; 空间分布; 多时相遥感; 哨兵 2 号; GEE 云平台

## Numbers, spatial distribution and characteristics of saucer-shaped lakes in Lake Poyang wetland and influencing factors \*

Niu Huilin<sup>1,2,3</sup>, Wang Mingxing<sup>4</sup>, Shi Yibing<sup>5</sup> & Wu Guiping<sup>1,3\*\*</sup>

(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, Beijing 100049, P.R.China )

(3: Jiangxi Province Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Jiang xi Institute of Water Science, Nanchang 330029, P.R.China )

(4: The Sixth Geological Party, Jiangsu Geological Bureau, Lianyungang 222023, P.R.China )

(5: Jiangsu Geologic Surveying and Mapping Institute, Nanjing 211102, P.R.China )

**Abstract:** Saucer-shaped lakes within the Poyang Lake wetlands are regions with the largest vegetation biomass and the richest species diversity, supporting over 80% of the overwintering migratory birds of the entire wetland. These sub-lakes play a crucial role in maintaining the integrity of the wetland ecosystem and preserving species diversity. A comprehensive understanding of the distribution characteristics of the saucer-shaped lakes in the Lake Poyang floodplain is of great significance for the optimal allocation of regional water resources and the health of the wetland ecosystem. Supported by Google Earth Engine cloud platform, this study constructed a refined spatial catalog database of saucer-shaped lakes in Lake Poyang floodplain by integrating high-resolution, multi-temporal Sentinel-2A/B satellite imagery and multi-source auxiliary data to employ geospatial big data techniques. Based on this database, the study first systematically elucidated the true number, size, and spatial distribution patterns of these sub-lakes, and then explored the causes of the spatial distribution patterns and the major challenges faced by the saucer-shaped lakes in Lake Poyang wetlands. The results showed that the Lake Poyang floodplain contained 319 saucer-shaped lakes larger than 0.01 km<sup>2</sup>, with a total area of 557.68 km<sup>2</sup>, accounting for approximately 28.88% of the annual average area of Lake Poyang area. Among them, lakes ranging from 0.01 to 1 km<sup>2</sup> are the most widely distributed, constituting about 70.85% of the total saucer-shaped lakes. As the area of graded patches increased, the number of saucer-shaped lakes gradually decreased following a power function pattern. Regionally, the Gan-Fu estuarine delta contributed the most to the total area of saucer-shaped lakes, with 242.82 km<sup>2</sup> (43.54%), followed by the Gan-Xiu and Raohe River deltas, with 149.67 km<sup>2</sup> (26.84%) and 138.62 km<sup>2</sup> (24.86%) respectively. The southern lake-type water body zone has the smallest share of saucer-shaped lakes, accounting for only 4.76%, due to its location within the main navigation channel. Overall, the saucer-shaped lakes in the floodplain exhibited a "one main core, two secondary cores, and multi-centers" clustered spatial aggregation pattern, with spatial density evolving from high-density cores spreading outward in concentric zones. The spatial heterogeneity characteristics were marked by a "densely packed southwest, sparsely packed northeast" distribution. As the elevation of the lake-bottom increased, the number and area of saucer-shaped lakes showed a trend of initial growth followed by a sharp decline, with a significant distribution dominance in the 12~14 meter elevation range. Under the influence of seasonal flood pulses, the scale and distribution of saucer-shaped lakes in the Lake Poyang floodplain are the result of the combined effects of regional topography, hydrological processes, and human activities. This study will provide high-quality data support for research on hydrological process changes and their ecological impacts in Lake Poyang wetlands, and is expected to enhance the scientific basis for water resource management and drought early warning during the dry season in Lake Poyang.

**Key Words:** Lake Poyang wetland; saucer-shaped lake; spatial distribution; multi-temporal remote sensing; Sentinel-2; GEE Cloud Platform

鄱阳湖是我国的第一大淡水湖泊，也是入选世界生命湖泊网的重要成员<sup>[1-2]</sup>，在涵养水源、调蓄长江洪水、调节气候以及维护区域生态系统平衡等方面发挥着举足轻重的作用<sup>[3]</sup>。作为我国长江中下游湖群的典型代表，鄱阳湖接纳流域内五条支流来水，经调蓄后由湖口注入长江，其与五河及长江之间密切相关的水量交换关系造就了鄱阳湖独特的水情特征<sup>[4-5]</sup>：丰水期时水域面积可达 3000 km<sup>2</sup>，而枯水期时则不足 1000 km<sup>2</sup>，呈现出“洪水一片、枯水一线”的景观<sup>[6-8]</sup>。尤其是枯水期，入湖三角洲区域水面支离破碎，自然形成众多具有特殊水文过程和生态学特征的“碟形湖”<sup>[9-11]</sup>。这些碟形湖在鄱阳湖湿地中植被生物量最大、物种多样性最为丰富，并承载了全湖 80% 的越冬候鸟，在维护湿地生态系统完整性和物种多样性上起到了至关重要的作用<sup>[4, 12-13]</sup>。

进入到 21 世纪以来，在气候变化和人类活动的叠加影响下，鄱阳湖水文情势发生了显著变化，具体表现在水位持续偏低、枯水期提前等干旱化现象<sup>[14-16]</sup>。特别是 2022 年的超历史旱情导致鄱阳湖水域面积减少 7 成以上，极端干旱情景下部分碟形湖出现水量亏缺、甚至快速干涸的现象，严重威胁到越冬候鸟的觅食与生境条件，并危及湿地系统的生态健康<sup>[17-18]</sup>。面对变化环境下日趋严峻的水资源压力，迫切需要全面摸清鄱阳湖洪泛区真实的碟形湖数量、大小及其分布状况，这是当前精准量化鄱阳湖洪泛区水资源变化，

进而科学制定水量调控策略的基础性和关键性工作<sup>[19-20]</sup>，对于区域水资源优化配置、保障未来鄱阳湖水利枢纽工程科学实施以及湿地生态系统健康等具有十分重要的意义<sup>[21-23]</sup>。

有关湖泊数量、大小及分布状况调查，传统的手段是基于野外考察、实地测量辅以专家咨询等方式来开展的<sup>[3,24]</sup>，这一手段不但耗时费力，而且现势性不高<sup>[25]</sup>。近年来，遥感技术因其具有覆盖范围广、快速准确且低成本的宏观监测能力，逐渐成为大尺度湖泊调查的重要工具<sup>[26-27]</sup>。鉴于鄱阳湖洪泛区碟形湖独特的水情特征及其重要的生态功能价值，部分研究人员也尝试基于遥感手段开展了相关的调查研究工作。譬如，张祖芳<sup>[28]</sup>和胡振鹏等<sup>[9]</sup>分别基于 30m 空间分辨率的 Landsat/TM 影像以及 1:10000 数字地形数据，识别出了鄱阳湖 102 个碟形湖的面积、周长等信息；李琴等<sup>[29]</sup>结合文献资料和调查等手段，初步分析了鄱阳湖南矶自然保护区碟形湖的分布状况及特征；最近，刘星根等<sup>[30]</sup>基于湖区 DEM 模型、Landsat 影像及辅助信息，研究了赣江尾闾区碟形湖的形态及分布特征。然而，季节性碟形湖水面是高幅变化的，现有研究中基于特定时相的遥感数据存在时效性不足、空间分辨有限等问题，并不足以准确表征其真实的水面分布范围。迄今为止，尚缺乏全面反映鄱阳湖洪泛区碟形湖空间信息的编目数据，一定程度上制约了区域水资源科学管控及湿地生态环境的综合治理。

基于此，本研究拟以高时空分辨率遥感数据为基础，通过充分挖掘多源辅助资料信息，利用地理空间大数据技术，构建一套现势性强的鄱阳湖洪泛区碟形湖精细化数据库，进而系统阐明洪泛区碟形湖水体的空间分布特征及其影响因素，期望能够为鄱阳湖湿地水文过程变化及其生态环境效应等研究提供高质量的数据支持，有效提升当前鄱阳湖枯水期水资源调配及干旱预警的科学性。

## 1 研究区概况

鄱阳湖（28°24′~29°46′N，115°49′~116°46′E）位于江西省北部，居长江中游与下游分界处，是我国第一大淡水湖，也是长江流域最大的自由通江湖泊<sup>[12]</sup>。其接纳江西省境内修水、赣江、抚河、信江和饶河等五河的来水及来沙，通过湖盆调蓄后经湖口汇入长江（图 1 所示）。鄱阳湖湖盆结构复杂，主要由水道和洲滩组成，西南部略高，东北部略低，空间形状形似一个葫芦。根据水文和地形特征差异，整个湖盆大体上可划分为五个部分（图 1 所示）：以松门山为界，主湖体分为南、北两个通江水体区，北部湖面（I 区）窄且深，南部湖面（II 区）宽而浅；“五河”河口形成三角洲地形，分别为赣修河口三角洲（III 区）、赣抚河口三角洲（IV 区）、饶河河口三角洲（V 区）<sup>[7,31]</sup>。受流域和长江来水的双重影响，鄱阳湖水位呈现显著的季节性变化，影响湖区周围河流的水力坡降，进而影响到水道及洲滩的冲淤变化，使得三角洲前缘地带形成众多独立的季节性积水洼地，形状如碟子，故而得名“碟形湖”，也称为鄱阳湖的“湖中湖”（图 1 中黄色框所示）。这些碟形湖形态大小不一、土壤肥沃，是鲤、鲫等鱼类的主要产卵场所，也是越冬候鸟的主要觅食场所，其生态价值在鄱阳湖湿地生态功能维持中具有不可替代的作用<sup>[12]</sup>。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究数据

#### (1) 卫星遥感影像

哨兵二号（Sentinel-2）数据：Sentinel-2 卫星是欧洲空间局推出的一颗高分辨率多光谱成像卫星，旨在为地球观测和资源环境监测提供全球高质量的数据。相较于 Landsat 数据，Sentinel-2 MSI 具有更高的空间、光谱和时间分辨率，在小型水体提取中更具优势<sup>[32-33]</sup>，可以为研究区碟形湖提供 10m 空间分辨率、5 天重访周期的动态观测数据。基于 Google Earth Engine（GEE）云平台，本文首先系统搜寻并获取研究区所有经过辐射和几何校正的 Sentinel-2 MSI L1C 数据，时间跨度为 2015-2022 年，进而基于 Sentinel-2 的质量波段“QA60”，进行初步云量筛选，共选取了覆盖研究区的 1691 幅影像（不同时期获取影像的数量分布情况如图 2 所示），同将 20m 空间分辨率的短波红外波段重采样至 10 m，用于后续碟形湖水体的高精度提取。

高分系列光学数据：通过中国资源卫星应用中心（<https://data.cresda.cn/>），分别获取了 2021 年 3 月 22 日和 2022 年 10 月 12 日的 GF-1 及 GF-2 号多光谱数据（MSS），主要用于碟形湖水面信息提取的精度验证工作。

Google Earth 历史影像：基于 Google Earth Pro 获取研究区历史高分辨率影像，主要用于判读水边线轮廓走向，区分和剔除水库、堤防、鱼塘等经过人工改造的非自然水体。

#### (2) 其它辅助数据

其它辅助数据包括：1:25 万基础地理信息数据集、鄱阳湖 1:1 万大比例尺地形数据（1985 国家高

程基准)、湖区 1:5000 圩堤分布图、江西省 1:1 万土地利用数据、五河入湖水量及泥沙数据、相关文献记录和历史图件资料等, 主要用于碟形湖数据库的优化筛选, 以及碟形湖分布格局的影响因素分析。  
详细的数据描述及用途如表 1 所示。

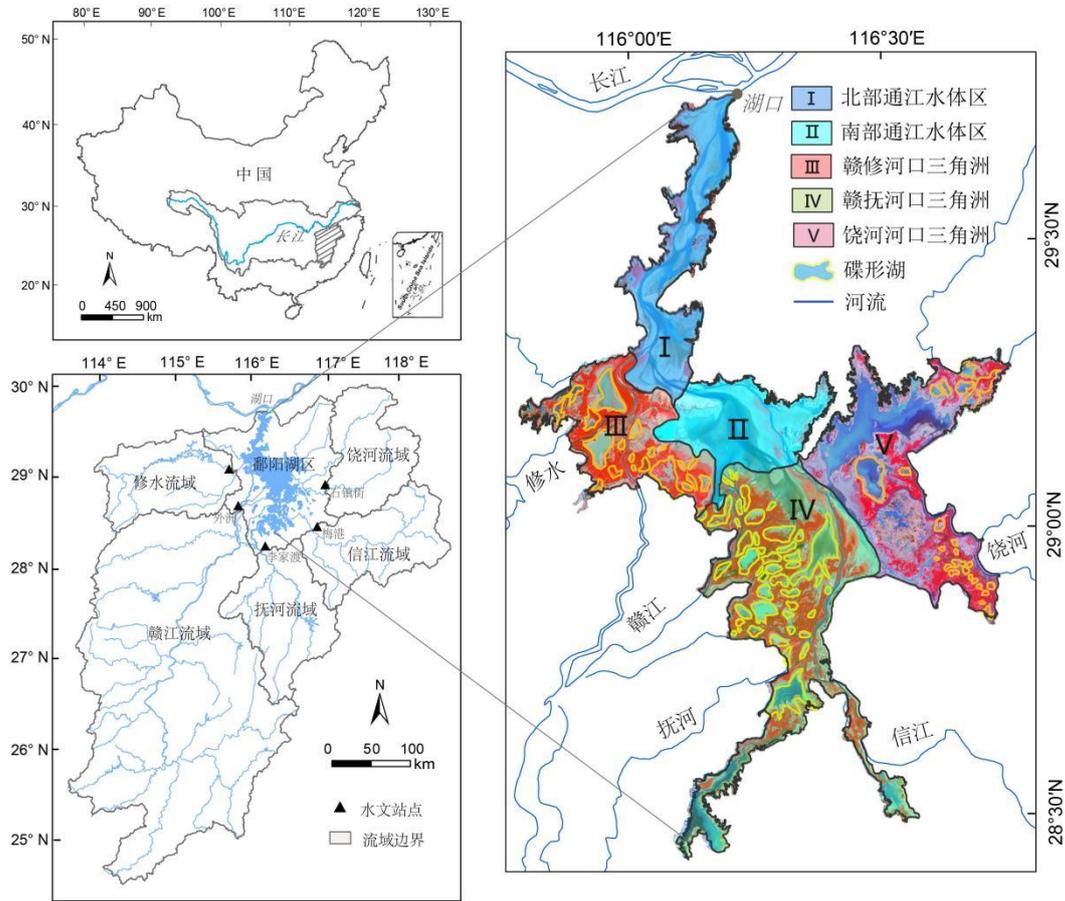


图 1 研究区域地理位置示意图 (底图为 2021 年 2 月 Sentinel-2 标准假彩色合成)  
Fig.1 Schematic map of the study area's geographic location  
(Base map is a standard false-color composite from Sentinel-2, February 2021)

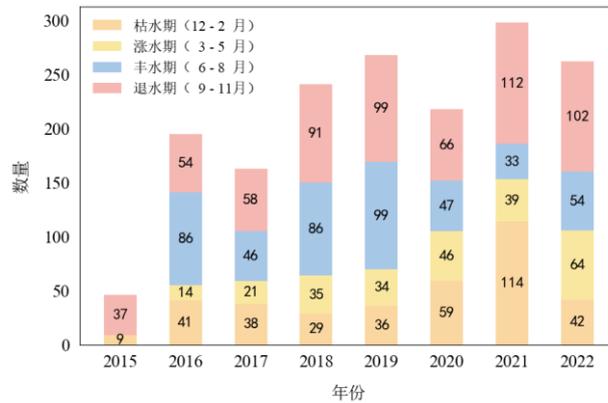


图 2 研究时段筛选的 Sentinel-2 MSI L1C 影像数量分布  
Fig.2 Number distribution of the selected Sentinel-2 images during the study period

表 1 研究数据来源及用途说明

Tab.1 Description of data sources and their applications in the study

数据名称	空间尺度	主要用途	数据来源
Sentinel-2 MSI	10 m	碟形湖识别和提取	GEE 平台 ( <a href="https://code.earthengine.google.com/">https://code.earthengine.google.com/</a> )
GF-1 MSS	8 m	水面提取结果的精度评估	中国资源卫星应用中心 ( <a href="https://data.cresda.cn/">https://data.cresda.cn/</a> )
GF-2 MSS	3.2 m	水面提取结果的精度评估	中国资源卫星应用中心 ( <a href="https://data.cresda.cn/">https://data.cresda.cn/</a> )
Google Earth 历史影像	0.5 m		Google Earth Pro
基础地理信息数据	1:25 万		国家基础地理信息中心
土地利用数据	1:1 万	碟形湖数据库优化与筛选	江西省自然资源厅
湖区圩堤分布图	1:5 千		江西省水文局
湖盆地形数据	1:1 万		江西省水文局
五河年均入湖径流量	—	碟形湖分布影响因素探析	江西省水文局
五河年均输沙量	—		《2020 长江泥沙公报》

## 2.2 研究方法

在 GEE 平台支持下,以 Sentinel-2 数据为基础,提取研究区多时相水体信息,结合水体精度验证和淹没频率阈值,通过多源辅助数据的判读、比对和筛选,实现碟形湖水体的制图综合,最终基于拓扑检查、字段定义、属性标识等规范化处理,实现鄱阳湖洪泛区碟形湖水体数据库的构建。总体技术路线包括数据收集与处理、碟形湖水体数据库构建及碟形湖空间分布特征与影响因素分析几个部分(图 3)。

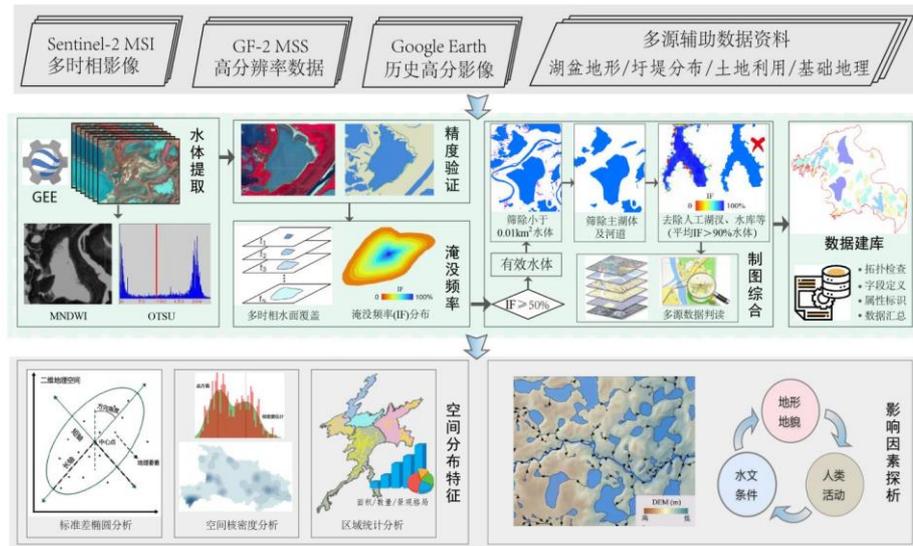


图 3 研究技术路线与方法

Fig.3 Methodology and Technical Route

### (1) 多时相水体信息提取

采用改进的归一化差异水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 结合最大类间方差算法 (OTSU) 实现鄱阳湖洪泛区多时相水体信息的自动提取。其中, MNDWI 指数能够有效削弱土壤及阴影的影响<sup>[34]</sup>, 已被广泛应用于水体遥感制图研究中, 计算公式如下:

$$MNDWI = \frac{R_{Green} - R_{SWIR}}{R_{Green} + R_{SWIR}} \quad (1)$$

式中,  $R_{Green}$  和  $R_{SWIR}$  分别为绿波段与短红外波段的反射率。OTSU 算法是一种自动选取最优阈值进行图像二值化的高效算法, 该方法可以使类间方差最大、类内方差最小, 实现水体目标的错分概率最小<sup>[35]</sup>。

### (2) 水体提取精度评价

以 GF 系列影像人工目视解译的水边线范围为参考, 采用混淆矩阵方式对水体提取结果进行定量的精度评价, 具体评价指标包括总体精度 (OA)、Kappa 系数、错分误差 (CE, Commission Error) 和漏分误差 (OE, Omission Error)。其中, 总体精度 OA 代表分类正确的像元占总像元的比例, Kappa 系数是用于评价提取结果受偶然性因素的影响程度, 各评价指标公式如下:

$$OA = \frac{TP + TN}{N} \times 100\% \quad (2)$$

$$kappa = \frac{OA - Pe}{1 - Pe} \times 100\% \quad (3)$$

$$CE = \frac{FP}{TP + FP} \times 100\% \quad (4)$$

$$OE = \frac{FN}{TP + FN} \times 100\% \quad (5)$$

$$Pe = \frac{(TP + FN) \times (TP + FP) + (TN + FN) \times (TN + FP)}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $N$  为总像元数;  $TP$  表示正确提取的水体像素数;  $TN$  表示被提取正确的背景像元数;  $FP$  为被错提为水体而实际为背景的像元数;  $FN$  为被错提为背景而实际为水体的像元数。水体 Kappa 系数值越大, 表明提取结果精度越高。

### (3) 碟形湖制图综合与建库

具体包括如下操作步骤和方法:

① 计算研究时段内任一像元位置上的淹水次数与观测总时相的比值, 绘制研究区淹水频率分布图<sup>[7]</sup>:

$$IF(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n B_i(x, y)}{n} \times 100\% \quad (7)$$

其中  $IF(x, y)$  表示像元  $(x, y)$  位置的淹没频率,  $n$  是获取遥感数据的总期数;  $B_i(x, y)$  表示像元  $(x, y)$  在第  $i$  期的淹没状态 (1 表示有水; 0 表示无水)。

② 鉴于丰、枯季湖泊面积存在较大差异, 参考以往研究成果<sup>[36]</sup>, 采用平均  $IF \geq 50\%$  的淹没程度来表征研究时段内平均水体范围, 作为本研究的有效水体信息; 借鉴现有高分辨率湖泊数据库建库经验<sup>[37-38]</sup>, 以及研究区淹没频率分析的相关成果<sup>[7]</sup>, 依次剔除  $0.01\text{km}^2$  以下的水体、主湖体和河道水体、以及平均  $IF \geq 90\%$  的水体信息 (人工湖汉、水库等); 进一步借助湖区 DEM 数据、圩堤数据、高分影像等多源辅助资料, 采用知识规则约束、人机交互以及图形综合等手段, 生成规范化碟形湖水体边界。

③ 基于生成的水体边界, 在数据完整性、逻辑性及拓扑关系检查基础上, 开展字段定义、属性挂接和成果汇总等处理, 实现研究区碟形湖水体数据库的构建, 最终形成空间信息标准数据集。

### (4) 空间分布特征分析

采用标准差椭圆分析<sup>[39]</sup>、核密度测算<sup>[40]</sup>以及景观格局分析<sup>[41]</sup>等手段, 对鄱阳湖洪泛区碟形湖的空间

聚焦、分散及结构等特征进行定量分析。

①标准差椭圆分析：用于定量解析碟形湖空间分布的中心性、方向性和延展性特征。其中，长短轴主要反映碟形湖分布的范围及离散程度，方位角揭示其分布的主导趋势，平均中心表征洪泛区碟形湖分布的重心。

②空间核密度分析：是一种非参数密度估计的统计方法，其主要思想是通过一个核函数对空间点集进行平滑处理，生成一张密度热力图，函数值越高，说明碟形湖在该区域聚集程度越高。具体的核密度计算通常采用 Rosenblatt-Parzen 核测算模型：

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (8)$$

式中， $x_i$  是从分布密度函数总体中抽取的独立分布样本， $n$  为碟形湖斑块数量； $k$  为核函数； $x - x_i$  为估计点到样本点  $x_i$  的欧氏距离； $h$  为核密度测算带宽。

③ 景观格局分析：景观格局是景观组成单一在空间上的布局样式、分布特征即相互组合规律，能够反映景观要素在一定时空范围内的配置和组合方式<sup>[42-43]</sup>。综合数据的可获取性以及研究区实际情况，本研究基于 Fragstats4.2 软件，从形状复杂性、连通性、聚集度及破碎化度等多个维度上共选取斑块密度 (PD)、平均形状指数 (SHAPE\_MN)、和连通性指数 (CONNECT) 等景观格局指数，开展洪泛区碟形湖的结构组成与空间格局特征的定量分析。其中，PD 是描述景观破碎化程度的指标，SHAPE\_MN 是用于描述斑块形状的复杂性指标，CONNECT 则反映了斑块之间的连通性和集聚性。各指数的具体生态学意义及计算公式详见文献<sup>[44]</sup>。

### 3 研究结果

#### 3.1 碟形湖制图和数据库构建

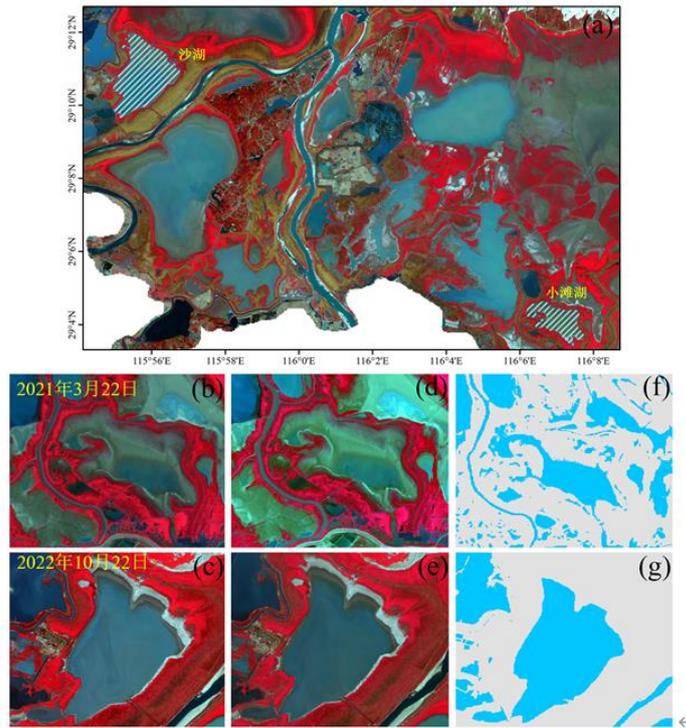


图 4 基于 GF-2 影像的碟形湖水面提取精度验证

(b & c) GF-2 假彩色合成；(d & e) Sentinel-2 假彩色合成；(f & g) Sentinel-2/MNDWI 水体提取结果

Fig.4 Validation of water surface extraction accuracy of saucer-shaped lake based on GF-2 imagery.

(b & c) GF-2 false color composite; (d&e) Sentinel-2 false color composite; (f&g) water extraction results based on Sentinel-2/MNDWI

为了有效评估洪泛区碟形湖水体提取结果的精度，我们选取了赣-修河口三角洲区域（III区）的两个典型碟形湖（小滩湖和沙湖），以同期高分系列影像为参照，通过随机选取的样本点对 Sentinel-2 水体提取结果进行了对比验证（图 4）。表 2 的各项精度检验指标显示，对于小滩湖和沙湖，提取的总体精度 OA 分别达到了 94.8%和 96.52%，Kappa 系数均在 0.88 以上，可以满足洪泛区多时相碟形湖水体信息的有效提取。

表 2 基于 GF-2 影像的水体提取精度检验指标

Tab.2 Accuracy assessment metrics for water body extraction using GF-2 imagery

碟形湖	精度检验指标			
	OA (%)	Kappa 系数	CE (%)	OE (%)
小滩湖	94.80	0.88	9.40	7.95
沙湖	96.52	0.92	7.31	4.61

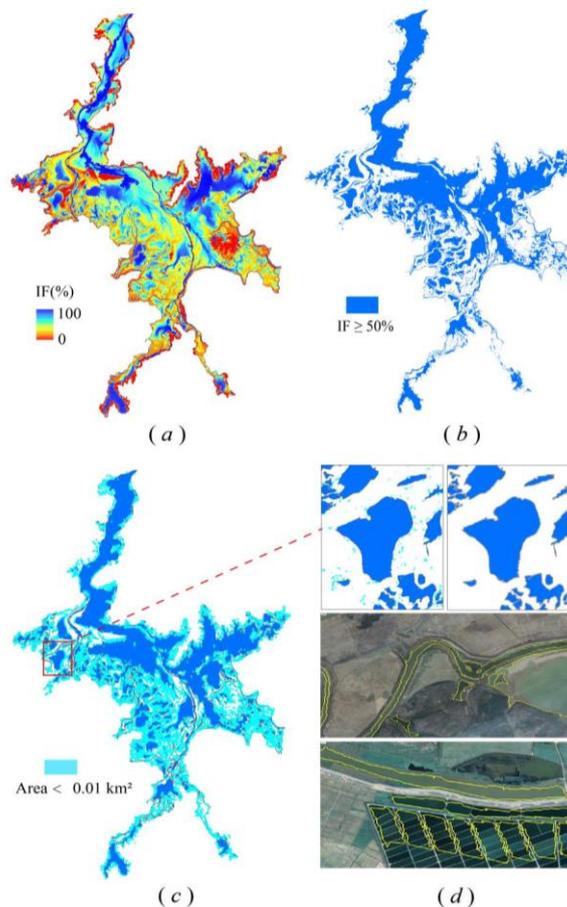


图 5 鄱阳湖洪泛区碟形湖制图综合过程 (a) 研究区淹没频率; (b) 筛选 IF 大于 50%的区域; (c&d) 筛选并删除面积小于 0.01km<sup>2</sup>; (e&f) 人机交互剔除水田、河道等非碟形湖

Fig.5 Integrated mapping process of saucer-shaped lakes. (a) Inundation frequency mapping; (b) Selection of areas with inundation frequency greater than 50%; (c&d) Filtering and removal of areas smaller than 0.01 km<sup>2</sup>; (e&f) Removal of non-saucer-shaped water bodies such as artificial farmland and river channels

图 5 展示了基于提取的多时相水体信息，结合淹没频率分析、知识规则约束及人机交互等手段，进行判读、比对和筛选的碟形湖制图综合过程。淹没频率结果显示（图 5a），受湖盆地形的控制，除了青岚湖和军山湖等人工湖汊以外，鄱阳湖洪泛湿地总体上表现为“北高南低”的淹水概率分布模式。相较于北部通江水体的主航道区域，南部五河入湖尾闾区淹水频率较低，且高频值呈现出离散“岛屿型”环状分布特征，以  $IF \geq 50\%$  为阈值提取的平均淹水范围可以发现，南部三角洲区域水面所反映的这一离散型岛状特征尤为明显（图 5b）。基于筛选的面积小于 0.01 km<sup>2</sup> 的淹没范围结果，进一步表明细小破碎的水体斑块大多聚集在南部三角洲前缘及北部主湖体湖汊地带（图 5c）。通过将这部分水体筛除过滤，进而结合湖区 DEM、高分影像等多源辅助资料，在人机交互等手段的支撑下剔除部分人工水田、河道等水体斑块（图 5d），得到碟形湖的制图综合结果。在此基础上，通过数据逻辑性、拓扑关系检查以及属性标识和汇总，获得鄱阳湖洪泛区最终的碟形湖水体空间分布数据集，如图 6 所示。

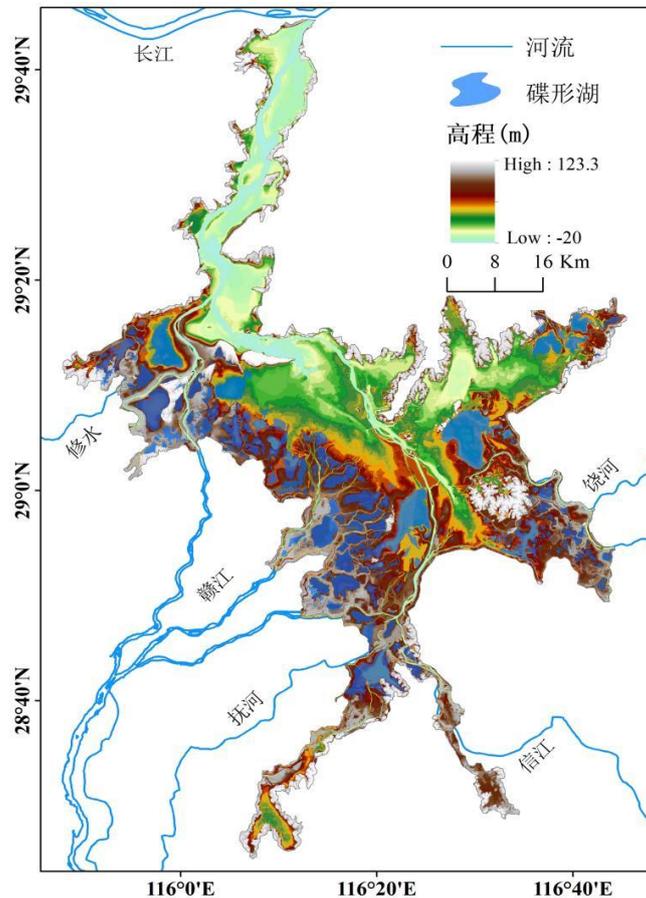


图 6 鄱阳湖洪泛区碟形湖空间分布数据集

Fig. 6 Spatial distribution dataset of saucer-shaped lakes in the Lake Poyang floodplain

### 3.2 洪泛区碟形湖数量规模特征分析

基于构建的碟形湖空间分布数据集，统计结果表明，鄱阳湖洪泛区共有 0.01km<sup>2</sup> 以上的碟形湖 319 个，总面积为 557.68km<sup>2</sup>，约占枯水期鄱阳湖面积的 28.88%。不同面积分级的统计结果显示，随着碟形湖斑块大小的增加，洪泛区碟形湖数量急剧减少，呈幂函数递减分布规律，而对应的面积总体上呈现先增加后减

少的趋势（表 3、图 7c）：具体而言，0.01~1km<sup>2</sup>的碟形湖数量最多且分布最为广泛（高达 226 个），约占洪泛区碟形湖总量的 70.85%，而面积占比则不足 11%；1~5km<sup>2</sup>的碟形湖数量虽然只有 73 个，但其总面积达到 174.7km<sup>2</sup>，面积占比接近三成；面积大于 5km<sup>2</sup>的大型碟形湖数量最少，仅 20 个，却对碟形湖总面积的贡献最大，面积占比高达 57.70%。其中，30km<sup>2</sup> 以上的碟形湖骤减至 3 个，分别为饶河口三角洲（V区）的汉池湖，以及赣抚河口三角洲（IV区）的东湖和金溪湖。由此可见，对于鄱阳湖洪泛区而言，5km<sup>2</sup> 以上的大中型碟形湖对整个洪泛水体面积的贡献较大，而对于数量贡献最大的则是处于 1km<sup>2</sup> 以下的小型碟形湖，这些小型碟形湖虽然面积小，但其规模较大，在维护湿地生态系统完整性和物种多样性方面起着关键作用。

表 3 鄱阳湖洪泛区碟形湖面积分级统计表

Tab.3 Area classification statistics of saucer-shaped lakes in the Lake Poyang floodplain

面积分级 (km <sup>2</sup> )	数量	碟形湖面积 (km <sup>2</sup> )	数量占比	面积占比
0.01~1	226	61.15	70.85%	10.97%
1~5	73	174.7	22.88%	31.33%
5~10	9	61.47	2.82%	11.02%
10~30	8	132.86	2.51%	23.82%
>30	3	127.5	0.94%	22.86%
合计	319	557.68	100.00%	100.00%

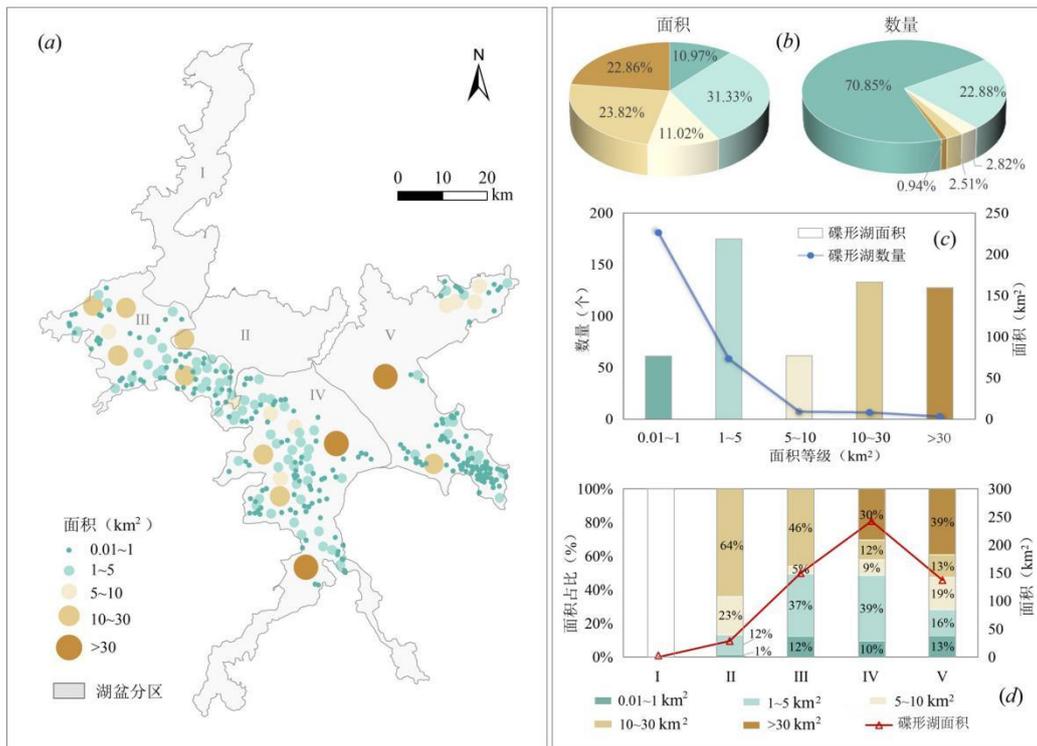


图 7 鄱阳湖洪泛区碟形湖分布特征及统计结果 (a) 面积分级统计分布图；(b) 不同面积等级下面积与数量占比；(c) 不同面积等级下数量与面积统计分布；(d) 各分区不同面积等级下碟形湖规模统计

Fig.7 Distribution characteristics and statistical results of saucer-shaped lakes in the Lake Poyang floodplain

(a) Area classification statistical distribution map; (b) Proportion of saucer-shaped lake area and number at different area classifications; (c) Statistical distribution of saucer-shaped lake number and area at different area classifications; (d) Saucer-shaped lake area statistics within different sub-regions

### 3.3 空间分布格局及特征

按照碟形湖编目分区统计,鄱阳湖洪泛区碟形湖的数量和面积从南到北分布具有相当大的空间差异性(图7d、表4)。碟形湖数量最集中的地区是赣抚河口三角洲(IV区)和饶河河口三角洲(V区),约为118个,占碟形湖总数的36.99%;其次是赣修河口三角洲(III区),大约分布78个,占总数的24.45%;通江水体区域基本没有碟形湖分布。不同分区的面积统计结果显示,赣抚河口三角洲(IV区)碟形湖总面积的贡献最大,达到242.82 km<sup>2</sup>,约占总面积的43.54%;赣修河口及饶河河口三角洲(III区、V区)碟形湖总面积次之,分别为149.67 km<sup>2</sup>(26.84%)和138.62 km<sup>2</sup>(24.86%);南部通江水体区(II区)由于地处主航道范围,碟形湖面积仅占4.76%。从面积组成来看,各分区中不同规模碟形湖的组分也存在着显著差异(图7d):其中,南部通江水体区(II区)和赣修河口三角洲(III区)的碟形湖,总体上以10~30 km<sup>2</sup>面积等级的碟形湖为主,其占比分别达到64%和46%;赣抚河口三角洲(IV区)1-5 km<sup>2</sup>之间的碟形湖占比最大达到39%,饶河河口三角洲区域(V区)的碟形湖面积组成中大于30 km<sup>2</sup>的碟形湖面积占比最大;30km<sup>2</sup>以上的碟形湖仅在赣抚河口三角洲(IV区)和饶河河口三角洲(V区)有所分布。值得注意的是,从北到南在越靠近入湖河口的区域,小规模碟形湖的比重,总体上呈现出逐渐增加的趋势。

表4 鄱阳湖不同分区碟形湖面积及数量统计表

Tab.4 Statistics of saucer-shaped lake area and quantity by region in Lake Poyang

分区	碟形湖数量	数量占比(%)	区域面积(km <sup>2</sup> )	面积占比(%)
I	0	0	0	0
II	5	1.57%	26.57	4.76%
III	78	24.45%	149.67	26.84%
IV	118	36.99%	242.82	43.54%
V	118	36.99%	138.62	24.86%
总计	319	100%	557.68	100%

进一步运用核密度分析和标准差椭圆分析,对鄱阳湖洪泛区碟形湖空间分布的结构形态进行可视化表达。从图8可以看出,碟形湖空间分布的标准差椭圆涵盖了入湖三角洲大部分区域,主要集中在赣修河口三角洲东南部、赣抚河口三角洲北部以及饶河河口三角洲南部,椭圆的长半轴与短半轴差距明显,空间分布具有显著的指向性,整体呈现“西北—东南”走向,与鄱阳湖主航道方向基本一致。采用Natural Breaks自然断点法将碟形湖空间分布核密度测算值进行等级分类,依次划分为“高密度、中高密度、中密度、中低密度和低密度”5个等级,以此进一步刻画鄱阳湖洪泛区碟形湖分布的空间异质性(如图8所示)。可以发现,洪泛区碟形湖总体呈现“一主、两次、多中心”的团簇状空间聚集模式,同时空间密度演化具有以高密度为核心向外围呈环带状扩散的趋势,“西南密、东北疏”的异质性特征显著。其中,高密度“主核”聚集中心主要位于地势平坦的饶河河口三角洲区域,中高密度“两次核”聚集中心主要分散于赣江三支的汇流处,并以其为中心向四周呈圈层式扩散,中密度聚集中心主要位于西部的修河和东北部的西河汇流处。此外,北部通江水体区和南部的青岚湖、军山湖等人工湖汊区域由于缺乏碟形湖形成的条件,则表现为低密度区。

地形条件在一定程度上造就了复杂的自然环境,可以直观揭示各种地表要素的分布格局及规律。为了探究鄱阳湖洪泛区碟形湖空间分布对地形因子的响应程度,我们将重分类后的湖盆DEM与碟形湖分布矢量数据进行空间叠置分析(图6所示),得到碟形湖在不同高程梯度上的面积及数量统计结果(图9所示)。可以发现,洪泛区碟形湖在垂直空间分布上具有较明显的高程带状分布模式。整体来看,不同高程带上碟形湖数量和面积分布曲线均起伏较大,随着湖盆高程的升高,数量和面积呈现出“先增长后骤降”的变化趋势,并且在12~14m高程带上分布优势显著(多达250个),其面积和数量分别占洪泛区碟形湖总量的57.81%和71.79%。湖盆高程大于14m的区域也有少许的碟形湖分布,其数量和面积仅占洪泛区碟形湖总量的4.89%和15.67%。进一步在核密度估计值与湖盆DEM叠置结果上进行随机点筛选,获得不同高程点

上核密度估计散点分布图，如图 10 所示。与面积和数量的分布曲线一致，核密度散点呈现出近似高斯正态分布模式，散点大多集中在 10~14m 的高程带上，同时在 12m 高程值左右散点分布最为密集，而在高程较高和较低处，核密度散点仅零星分布且密度值较低，基本维持在 0.2 以下。由此可见，鄱阳湖洪泛区碟形湖对湖盆高程具有较强的选择性，碟形湖集中分布在水力条件较适宜的 10~14m 的高程带上。

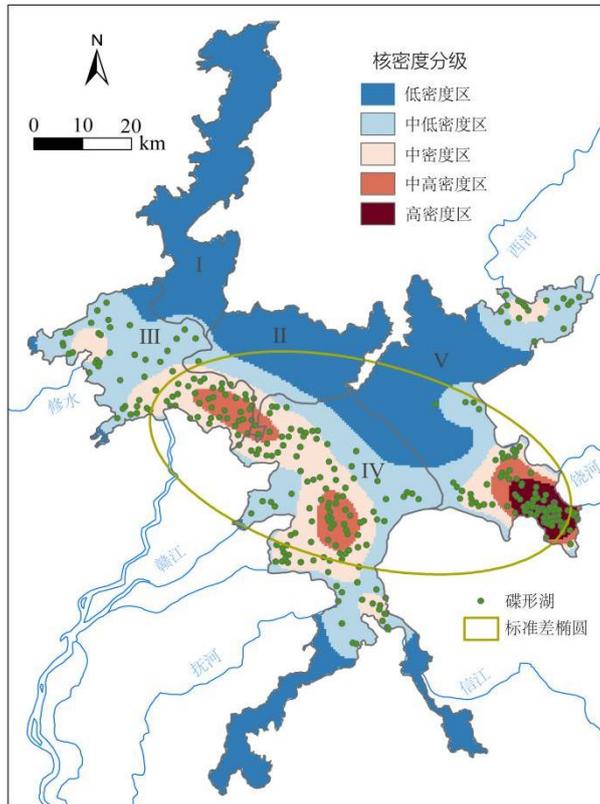


图 8 鄱阳湖洪泛区碟形湖标准差椭圆分析及核密度分级特征

Fig.8 Standard deviation ellipse analysis and kernel density classification characteristics of saucer-shaped lakes

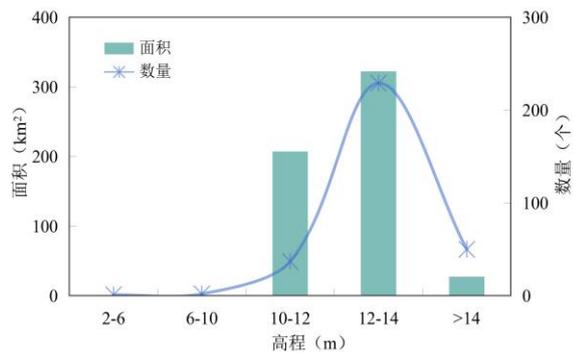


图 9 鄱阳湖洪泛区不同高程带上碟形湖数量及面积分布

Fig.9 Distribution of saucer-shaped lakes across different elevation zones in the Lake Poyang floodplain

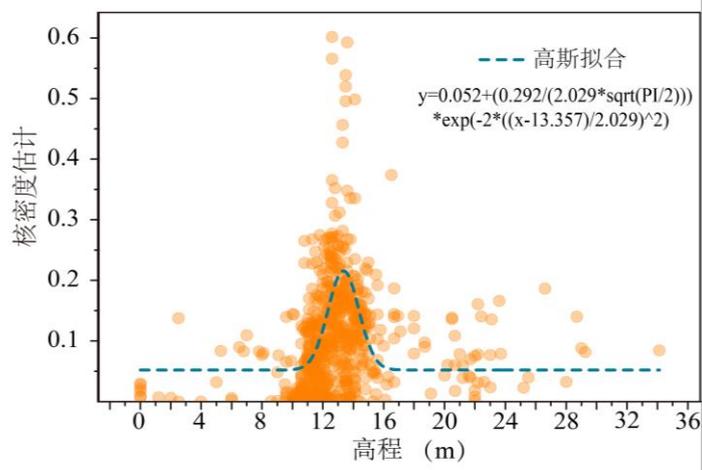


图 10 鄱阳湖洪泛区不同高程点上核密度估计散点分布特征

Fig.10 Scatter distribution characteristics of kernel density estimation at different elevation points

### 3.4 碟形湖分布的影响因素探析

鄱阳湖洪泛区碟形湖是经过长期的自然、社会、经济等因素共同作用而形成的特定景观类型，其形成的原因错综复杂，受地形地貌、水文过程、人类活动等多重因素的综合影响。

首先，湖盆地形对鄱阳湖洪泛区碟形湖分布、形态及规模起着基石性的作用。鄱阳湖东、南、西三面环山，湖区地势由南向北逐渐走低，受地貌组合结构及河床往返摆动和分汊的影响，在三角洲前缘区域形成扇形冲积<sup>[45-46]</sup>。涨水期间，这些冲积低洼地带易于积水，微小的地势高差以及周围天然堤的阻挡作用，导致水量不断聚集并最终融入主湖体；退水期间，湖泊水位下降，远离主流的水域逐步与主湖体脱离，同时由于河漫滩坡度平缓，有助于水体滞留，进而在 12~14m 高程区间上形成了众多碟形湖的独特景观。结合图 8 的高程分级统计测算结果显示，受湖盆地势的影响，鄱阳湖洪泛区近 72% 的碟形湖分布在此高程带上，具有显著的高程选择性。尤其是赣抚河口三角洲区域，12~14m 的高程面积占比最大，形成于此的碟形湖面积占比也相应最高，达到 43.54%（表 4）。由此可见，湖盆地形特征直观揭示了鄱阳湖洪泛区碟形湖的形成和发育，是影响碟形湖规模数量及空间分布格局的直接原因。

其次，水力作用和泥沙淤积是造就洪泛区碟形湖分布格局差异的动力因素。鄱阳湖湖区河流纵横交错，以赣江、抚河、修水、饶河、信江等为主体的 69 条河流进入主湖体时，在水动力和水量交换的作用下，所携带的泥沙随流速的减少产生不均匀淤积，加上鄱阳湖南高北低的比降所形成的重力型湖流作用，导致入湖泥沙顺河口两侧加积延伸形成天然堤和漫滩，相邻分汊河道天然堤向湖方向不断迂回，在特定高程区间上便逐渐封闭成碟形洼地<sup>[1, 12]</sup>。图 11 展示了鄱阳湖五河年均入湖水量及泥沙量的对比情况，可以发现，众多入湖河流中，赣江、抚河入湖水量大、水力条件好，三角洲前缘泥沙淤积作用最为活跃（图 11 所示），加上上游分汊河道少且河道间滩地空间大的缘故<sup>[47-48]</sup>，该三角洲区域易于发育大量的碟形湖，且碟形湖分布的景观复杂程度低，变化相对稳定。景观格局分析显示（表 5），其斑块密度（PD）、平均形状因子（SHAPE\_MN）以及连通性指数（CONNECT）仅为 0.096、1.396 和 0.901。这一现象也间接印证了前文分析的研究结果，即该区域碟形湖面积等级在各分区中居于首位，5km<sup>2</sup> 以上的斑块面积占比高达 51%（图 7d、表 3）。相较而言，赣修、饶河三角洲区域由于分汊频繁、分汊河道间滩地空间受限，区域发育的碟形湖破碎度强、形状较为复杂，尤其以吴城国家级自然保护区所在的赣修河口三角洲为甚，其 PD、SHAPE\_MN 及 CONNECT 指数均达到 0.122、1.645 和 2.191（表 5）。由此可见，对于不同入湖河口而言，水文条件（包括水动力与泥沙运动）的差异塑造了不同规模和形态特征的碟形湖地貌景观，是驱动洪泛区碟形湖空间分布格局的外部因素。

此外，社会经济发展与人类活动也是鄱阳湖洪泛区碟形湖形成及演化的主要诱因。鄱阳湖区良好的光、热、水条件，为生物资源的繁盛提供了适宜的生态条件，是江西省重要的水产养殖基地。新中国成立后，湖区周边居民捕鱼方式及农户生计方式的转变，也显著影响着洪泛区碟形湖分布的数量及形态特征。以南矶山湿地国家级自然保护区为例，早期保护区的居民大都以种棉、采石为生，随着经济的发展，湖区居民为了增加经济收入，将区域洼地四周的土埂筑高变成矮堤，并建起了一些排水闸，形成了“斩秋湖”的独

特捕鱼方式<sup>[45]</sup>。长期以往，在人为改造的作用下，原有自然状态下的泥沙冲积扇区不断地形成了一个又一个新的碟形湖，一定程度上扩大了越冬候鸟觅食和栖息的生境范围<sup>[29]</sup>。未来，随着鄱阳湖“十年禁渔”政策的全面实施，周边农户生计方式的转变，也必将在一定程度上改变洪泛区现有碟形湖的规模和分布格局。2020年以来，为了修复长江生态、保障流域渔业的长期发展，当地政府全面实施了“十年禁渔”政策，“斩秋湖”的捕捞方式告一段落<sup>[49]</sup>，部分碟形湖由于失去必要的维护和管理，出现淤塞破损等现象，由此也必将在一定程度上改变洪泛区未来碟形湖的数量及分布格局。在此政策背景下，为有效应对鄱阳湖湿地连年遭受的极端干旱事件，提高碟形湖的生态承载力，需要从本研究的结果出发，严格划定碟形湖的管控范围，加强碟形湖水域的空间管理，控制碟形洼地的沉积和侵蚀，以维持或恢复洪泛区湿地的水文连通性，实现碟形湖“水-土-人-鸟”的和谐共生。

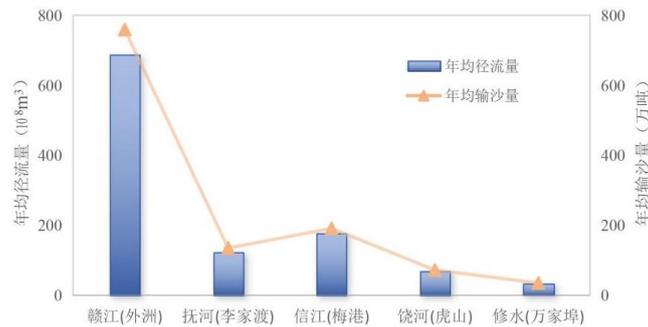


图 11 鄱阳湖五河年均入湖水量和泥沙量统计

Fig.11 Annual runoff and its suspended sediment loads in the five tributaries of the Lake Poyang

表 5 鄱阳湖不同分区碟形湖景观格局指数统计表

Tab.5 Statistics on the landscape pattern index of saucer-shaped lake in different zones of Lake Poyang

NAME	PD (n/100ha)	SHAPE_MN	CONNECT (%)
赣抚河口三角洲	0.096	1.396	0.901
饶河河口三角洲	0.101	1.435	1.503
赣修河口三角洲	0.122	1.645	2.191
松门山以南通江水体区	0.009	1.678	0

## 4 讨论

### 4.1 洪泛区碟形湖分布范围的界定

“碟形湖”是鄱阳湖洪泛区内枯水期显露于洲滩之中的季节性湖泊，理论上边界的界定是退水过程中，其与主湖体失去水力联系时的水面分布范围。现有的研究中，已有相关学者基于 2010 年单一时相的 Landsat 数据，识别和提取了区域内的主要碟形湖<sup>[28]</sup>，然而在鄱阳湖水位下降的过程中，由于湖盆高程的差异，不同区域的碟形湖并非同一时间出露，不能简单地利用某一时期的影像来界定整个洪泛区的碟形湖分布格局，现有研究在时效性和空间分辨率上尚存在着不足。本研究通过淹没频率手段，参考了 Song 等使用的 50% 作为淹没频率阈值<sup>[36]</sup>，首先获取了 2015-2022 近 10 年来鄱阳湖洪泛区的平均水面范围，进而设置了 90% 的淹没频率上限，实现了对人工湖汉、坑塘等永久水域的筛除，最终量化出区域内碟形湖的数量规模及空间分布格局。值得一提的是，相关研究中，Aires 等<sup>[37]</sup>以及宋松等<sup>[50]</sup>同样指出，在长时间尺度上，90% 的淹没频率阈值对于区分季节性水体和永久性水体的效果最佳，如果阈值过低，季节性水域将被归类为永久性水体，而如果阈值过高，错误的分类将会抑制真正永久性的水体像元。尽管如此，受遥感影像时相差异的影响，本研究中所确定的淹没频率阈值，对于碟形湖空间范围的界定仍可能存在潜在的不确定性 & 误差。

## 4.2 本文的潜在应用及未来研究展望

本文依托 Google Earth Engine 云计算平台, 通过融合多时相 Sentinel-2 卫星影像, 借助于 GIS 制图综合、标准差椭圆分析、核密度分析等方法, 构建了一套现势性强的鄱阳湖洪泛区碟形湖编目数据库, 系统阐明了鄱阳湖湿地碟形湖水体的规模以及空间分布格局, 并结合自然、社会等因素, 初步探析了影响洪泛区碟形湖规模及其分布特征的成因。本研究所构建的鄱阳湖洪泛区碟形湖编目数据库, 将在一定程度上填补区域碟形湖本底数据的不足, 研究结果可为鄱阳湖湿地未来碟形湖空间布局优化提供数据支撑, 有望提升当前鄱阳湖枯水期水资源调配及干旱预警的科学性。当然, 由于数据的可获得性和文章篇幅的限制, 本研究在各驱动因素对洪泛区碟形湖分布特征综合定量分析方面尚有所欠缺, 尤其是周边农户生计方式的转变如何影响碟形湖的分布格局, 其影响的范围及时间尺度如何, 这些将是后续工作中需要进一步研究的重点。纵观本文的主要研究结果, 在“十年禁渔”政策的背景下, 未来建议严格划定碟形湖的管控范围, 建立碟形湖管理制度, 运用科学的方法维持或恢复洪泛区湿地的水文连通性, 实现碟形湖“水-土-人-鸟”的和谐共生。

## 5 结论

(1) 从数量规模角度来看, 鄱阳湖洪泛区共有 0.01km<sup>2</sup> 以上的碟形湖 319 个, 总面积为 557.68km<sup>2</sup>, 约占全湖平均面积的 28.88%。随着面积分级斑块的增加, 碟形湖数量以幂函数的方式逐渐递减, 其中, 0.01~1km<sup>2</sup> 的碟形湖面积虽小, 但是规模较大, 分布最为广泛, 约占总量的 70.85%, 在维护湿地生态系统完整性和物种多样性方面起着关键作用。

(2) 从空间分布格局来看, 鄱阳湖洪泛区碟形湖总体呈现“一主、两次、多中心”的团簇状空间聚集模式, 且空间密度演化表现为以高密度为核心向外围呈环带状扩散的趋势, “西南密、东北疏”的异质性特征显著。随着湖盆高程的升高, 碟形湖数量和面积呈现出“先增长后骤降”的变化趋势, 且集中分布在水力条件较适宜 12~14m 高程带上, 具有明显的高程选择性。

(3) 人地关系角度来看, 鄱阳湖湿地碟形湖规模及其分布格局是区域地形地貌、水文过程、人类活动等多因素共同作用的结果。湖盆地形直观揭示了鄱阳湖洪泛区碟形湖的形成和发育, 是影响碟形湖“位置-规模-形态”最直接的驱动; 局地水力作用和泥沙运动的差异塑造了不同规模和形态特征的碟形湖地貌景观, 是驱动洪泛区碟形湖分布格局的外部因素; 社会经济发展及“斩秋湖”等人类活动的干扰, 也显著影响着区域碟形湖的分布规模及形态特征, 是洪泛区碟形湖生消演化的间接诱因。

## 6 参考文献

- [1] 朱海虹. 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.
- [2] Report on Ramsar visit to Poyang Lake Ramsar site, PR China Secretariat of the Ramsar Convention 2010
- [3] 王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. 2014, 29(10): 1770-9. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.10.012. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 越冬候鸟对鄱阳湖水文过程的响应. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1770-9.]
- [5] 刘元波, 张奇, 刘健等. 鄱阳湖流域气候水文过程及水环境效应. 北京: 科学出版社, 2012.
- [6] Feng L, Hu CM, Chen XL et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80-92. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.014.
- [7] Wu GP, Liu YB. Capturing variations in inundation with satellite remote sensing in a morphologically complex, large lake. Journal of Hydrology, 2015, 523: 14-23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.048.
- [8] Wu J, Li YL, Ye XC. Spatiotemporal heterogeneity and driving mechanism of inundation dynamics in the floodplain system of Poyang Lake. 2023, 43(4): 81-7. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220004. [吴娟, 李云良, 叶许春. 鄱阳湖洪泛系统淹没动态时空异质性特征及驱动机制. 水文, 2023, 43(4): 81-7.]
- [9] Hu ZP, Zhang ZF, Liu YZ et al. The function and significance of the Shallow-Lakes in the Poyang Lake wetland ecosystem. 2015,

- 41(05): 317-23. 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(05): 317-23.]
- [ 10 ] Tao SY, Zhang X, Xia JQ et al. Variations of stable isotopic characteristics of shallow lake-river water system and its indicative significance in Lake Poyang wetland, China. 2024, 36(02): 487-98. DOI: doi:10.18307/2024.0226. [陶士勇, 张翔, 夏军强等. 鄱阳湖湿地碟形湖-河流水稳定同位素变化特征及其指示意义. 湖泊科学, 2024, 36(02): 487-98.]
- [ 11 ] Chen J, Li YL, Zhou JF et al. Assessing surface water-groundwater interactions in the seasonal lake-wetland system of Lake Poyang. 2021, 33(03): 842-53. DOI: 10.18307/2021.0317. [陈静, 李云良, 周俊锋等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖湿地系统地表地下水交互作用. 湖泊科学, 2021, 33(03): 842-53.]
- [ 12 ] 胡振鹏. 鄱阳湖水文生态特征及其演变. 北京: 科学出版社, 2020.
- [ 13 ] Tan ZQ, Chen P, Zhang Q et al. Vegetation Changes in the Poyang Lake Wetland Linked to the Three Gorges Dam: an Assessment Based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Observations from 2000 to 2012. Wetlands, 2019, 39: 151-63. DOI: 10.1007/s13157-019-01263-7.
- [ 14 ] Liu YB, Wu GP. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1): 93-107. DOI: 10.5194/hess-20-93-2016.
- [ 15 ] Wang JL, Hu ZP, Ran YY et al. Study on moorburn remote sensing monitoring on Poyang Lake wetland area and its influence. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 656-67. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.04.012.
- [ 16 ] Guo M, Yu DK, Li Z et al. The impact of extreme droughts on aquatic macrophyte communities in the sub-lakes of Poyang Lake. 2024, 40(06): 790-8. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.1045. [郭敏, 余定坤, 李浙等. 极端干旱对鄱阳湖碟形湖水生植物群落的影响. 生态与农村环境学报, 2024, 40(06): 790-8.]
- [ 17 ] Hu ZP. Serious drought in Poyang Lake in 2022 and countermeasures for drought prevention and disaster reduction. 2023, 33(2): 1-6, 39. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022491. [胡振鹏. 2022 年鄱阳湖特大干旱及防旱减灾对策建议. 中国防汛抗旱, 2023, 33(2): 1-6, 39.]
- [ 18 ] Liu YB, Chen JQ, Sun G et al. Catastrophic Shifts in Large Lake Levels. Fundamental Research, 2023. DOI: 10.1016/j.fmre.2023.07.004.
- [ 19 ] Zhang Q, Xue CY, Xia J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake. 2023, 38(12): 1894-902. 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): 1894-902.]
- [ 20 ] Wang CY, Xie WY, Li TT et al. Analysis of Spatial and Temporal Variation in Water Coverage in the Sub-Lakes of Poyang Lake Based on Multi-Source Remote Sensing. Remote Sensing, 2023, 15(11): 2788. DOI: 10.3390/rs15112788.
- [ 21 ] Qi SH, Liao FQ. A study on the scheme of water level regulation of the Poyang Lake hydraulic project. 2013, 68(1): 118-26. DOI: 10.11821/xb201301013. [齐述华, 廖富强. 鄱阳湖水利枢纽工程水位调控方案的探讨. 地理学报, 2013, 68(1): 118-26.]
- [ 22 ] 谭国良, 李国文, 喻中文等. 鄱阳湖动态水位—面积—容积关系研究 中国水利学会 2013 学术年会——S2 湖泊治理开发与保护 北京: 中国水利水电出版社, 2013:736-42.
- [ 23 ] Xu LG, Xie YH, Wang XL. Ecological environment problems and research prospect of flood wetlands of Yangtze River-connected lake in the middle reaches of yangtze river. 2022, 36(3): 406-11. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.008. [徐力刚, 谢永宏, 王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望. 中国科学基金, 2022, 36(3): 406-11.]
- [ 24 ] Yang GS, Ma RH, Zhang L et al. Lake status, major problems and protection strategy in China. 2010, 22(06): 799-810. DOI:

- 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(06): 799-810.]
- [ 25 ] Wan W, Xiao PF, Feng XZ et al. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. 2014, 8): 701-14. DOI: 10.1360/CSB2014-59-8-701. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智等. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化. 科学通报, 2014, 8): 701-14.]
- [ 26 ] Ma RH, Yang GS, Duan HT et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. 2011, 41(3): 394-401. DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量, 面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [ 27 ] Zhang WS, Song Cq. Spatial distribution and dynamics of lakes in China: Progress in remote sensing monitoring at national scale and new inventory of the maximum lake extent and change trajectory. 2022, 26(01): 92-103. DOI: 10.11834/jrs.20221290. [张闻松, 宋春桥. 中国湖泊分布与变化: 全国尺度遥感监测研究进展与新编目. 遥感学报, 2022, 26(01): 92-103.]
- [ 28 ] Zhang ZF. Wetland ecosystem function importance zoning of Poyang Lake [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2014. [张祖芳. 鄱阳湖湿地生态功能重要性分区研究. [学位论文] 南昌: 南昌大学, 2014.]
- [ 29 ] Li Q, Guo HC. Impact of Poyang Lake water level management through "enclosing sub-lake in autumn" on lake wetland and its enlightenment. 2017, 13(03): 27-31. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3290.2017.03.05. [李琴, 郭恢财. 鄱阳湖"斩秋湖"水位调控方式对湖泊湿地的影响及启示. 湿地科学与管理, 2017, 13(03): 27-31.]
- [ 30 ] Liu XG, Tan ZQ, Fan HX. 2021, 52(05): 66-72. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.05.011. [刘星根, 谭志强, 范宏翔. 赣江尾闾碟形湖水体季节性分布特征. 人民长江, 2021, 52(05): 66-72.]
- [ 31 ] 谭国良, 郭生练, 王俊等. 鄱阳湖生态经济区水文水资源演变规律研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [ 32 ] Wu QS, Wang MX, Shen Q et al. Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image. 2022, 26(4): 781-94. DOI: 10.11834/jrs.20229340. [吴庆双, 汪明秀, 申茜等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取. 遥感学报, 2022, 26(4): 781-94.]
- [ 33 ] Du Y, Zhang YH, Ling F et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. Remote Sensing, 2016, 8(4): 354. DOI: 10.3390/rs8040354
- [ 34 ] Xu HQ. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). 2005, 05): 589-95. DOI: 10.11834/jrs.20050586 [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 05): 589-95.]
- [ 35 ] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. Automatica, 1975, 11(285-296): 23-7. DOI: 10.1109/tsmc.1979.4310076.
- [ 36 ] Song LJ, Song CQ, Luo SX et al. Integrating ICESat-2 altimetry and machine learning to estimate the seasonal water level and storage variations of national-scale lakes in China. Remote Sensing of Environment, 2023, 294: 113657. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113657.
- [ 37 ] Aires F, Prigent C, Fluet-Chouinard E et al. Comparison of visible and multi-satellite global inundation datasets at high-spatial resolution. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 427-41. DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.015.
- [ 38 ] Verpoorter C, Kutser T, Seekell DA et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. Geophysical Research Letters, 2014, 41(18): 6396-402. DOI: 10.1002/2014GL060641.
- [ 39 ] Yuill RS. The standard deviational ellipse; an updated tool for spatial description. Geografiska Annaler: Series B, Human

- Geography, 1971, 53(1): 28-39. DOI: 10.1080/04353684.1971.11879353.
- [ 40 ]Hallin M, Lu ZD, Tran LT. Kernel density estimation for spatial processes: the L1 theory. *Journal of Multivariate Analysis*, 2004, 88(1): 61-75. DOI: 10.1016/S0047-259X(03)00060-5.
- [ 41 ]邬建国. 景观生态学: 格局, 过程, 尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [ 42 ]Lu XM, Peng SY, Cai FC et al. Impacts of human activities and climate change on wetland landscape pattern of the nine major plateau lake basins in Yunnan Province. 2024, 22(02): 191-206. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.02.004. [卢向美, 彭双云, 蔡福诚等. 人类活动与气候变化对云南九大高原湖泊流域湿地景观格局的影响. *湿地科学*, 2024, 22(02): 191-206.]
- [ 43 ] Xiong Y, Mo SH, Wu HP et al. Influence of human activities and climate change on wetland landscape pattern—A review. *Science of the Total Environment*, 2023, 879: 163112. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163112.
- [ 44 ]Chen WB, Xiao DN, LI XZ. Classification,application,and creation of landscape indices. 2002, 1): 121. DOI: doi:10.3321/j.issn:1001-9332.2002.01.027. [陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类, 应用及构建研究. *应用生态学报*, 2002, 1): 121.]
- [ 45 ]纪伟涛. 鄱阳湖——地形, 水文, 植被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [ 46 ]Ma YL, Xiong CY, Yi WP. Sedimentary characteristics and developing trend of sediments in Poyang Lake, Jiangxi province. 2003, 01): 29-37. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4814.2003.01.005. [马逸麟, 熊彩云, 易文萍. 鄱阳湖泥沙淤积特征及发展趋势. *资源调查与环境*, 2003, 01): 29-37.]
- [ 47 ]Liu XG, Duan XY, Yu H. Nonlinear characteristics of water level-inundated area and water level-hydrological connectivity in typical floodplain area of Poyang Lake. 2021, 08): 81-9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.08.014. [刘星根, 段夕跃, 虞慧. 鄱阳湖典型洪泛区水位-水面积、水位-水文连通性的非线性特征. *中国农村水利水电*, 2021, 08): 81-9.]
- [ 48 ]Xie B, Guan XZ, Lu JY et al. Analysis on the evolution of water and sediment fluxes into and out of Poyang Lake and the attribution of sediment transport. 2023, 43(6): 80-5. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220336. [谢彪, 关兴中, 卢静媛等. 鄱阳湖入出湖水沙通量演变及输沙量归因分析. *水文*, 2023, 43(6): 80-5.]
- [ 49 ]Gong ML, Zhang SQ. A study of livelihood transformation and resource allocation changes: a case of fishermen in Poyang Lake. 2023, 43(11): 167-75. DOI: [龚梦玲, 章思琴. 生计转型与资源配置变迁——以鄱阳湖渔民为例. *江西社会科学*, 2023, 43(11): 167-75.]
- [ 50 ]Song S, Wu ZF, Cao Z et al. The changing trend and driving factors of water frequency fluctuations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. 2023, 43(03): 372-83. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003642. [宋松, 吴志峰, 曹峥等. 粤港澳大湾区水体淹没频率变化及驱动力分析. *热带地理*, 2023, 43(03): 372-83.]