J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(3):000-000
DOI 10.18307/2027.0331
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

退水过程对鄱阳湖国家级自然保护区水鸟越冬生境结构的影响*

兰锦华[1,2]，何　亮[1,2,3]，赵旭远[4]，唐艺琳[1,2]，郭恢财[5]，李　述[1,2**]，葛　刚[2,6]

（1：南昌大学资源与环境学院，南昌 330031）

（2：南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室，南昌 330031）

（3：湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室，武汉 430068）

（4：中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 200082）

（5：江西鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区管理局，南昌 330100）

（6：南昌大学生命科学学院，南昌 330031）

摘　要：近年来鄱阳湖的水文情势发生了显著变化，它将如何影响水鸟越冬生境尚不清楚。本文以鄱阳湖国家级自然保护区的 9 个碟形湖为例，综合利用遥感、地理信息系统与时空变化分析等技术方法，从自然水文过程、水位人为调控、湖泊地形三个方面分析了碟形湖退水过程对水鸟越冬生境结构的影响，研究发现：1）2020 年的极端洪水，导致鄱阳湖自然保护区 9-10 月的越冬水鸟觅食生境面积比平水年分别减少了 82.32%和 75.65%。2022 年的极端干旱，导致研究区 10-11 月的越冬水鸟觅食生境面积比平水年分别减少了 26.21%和 37.84%。两次极端水文事件虽然都导致研究区秋季的越冬水鸟觅食生境面积锐减，但并未减少冬季的水鸟觅食生境面积。2）2022 年 9—11 月干旱期间，有闸的高高程浅水湖泊象湖的沙滩面积增至平水年同期值的 6~8 倍，使其水鸟觅食生境面积明显减小，而同期其它有闸碟形湖的水鸟觅食生境面积都有不同程度增加。2020 年 9—10 月洪水期间，平均高程最低的蚌湖和大汊湖，其水鸟觅食生境面积占比从平水年的 50%降至 10%左右，而平均高程最高的象湖的水鸟觅食生境面积占比反而从平水年的 50%增加至 60%，碟形湖的水鸟越冬生境变化与湖泊自身的地形特征密切相关。3）2022 年 9—11 月干旱期间，自然退水的蚌湖和大汊湖沙滩面积显著增加，而水位人为调控的大湖池、沙湖、常湖池、朱市湖、梅西湖和中湖池，其水鸟觅食生境面积占比约增加了 5~25 个百分点，碟形湖水位人为调控对于干旱年份保护水鸟顺利越冬有重要意义。在当前鄱阳湖枯水期提前、枯水期延长、干旱频发，以及长江流域“十年禁渔”政策实施的新形势下，为维持越冬水鸟适宜觅食生境，应加强碟形湖水位科学管理与合理调控。

关键词：鄱阳湖；碟形湖；退水过程；地形特征；水文驱动；越冬水鸟生境

Water recession and its influence on wintering waterbird habitat structure in the Lake Poyang National Nature Reserve*

Lan Jinhua[1,2], He Liang[1,2,3], Zhao Xuyuan[4], Tang Yilin[1,2], Guo Huicai[5], Li Shu[1,2**] & Ge Gang[2,6]

(1: *School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang* 330031, *P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Lake Poyang Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang* 330031, *P.R.China*)

(3: *Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan* 430068, *P.R.China*)

(4: *National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Shanghai* 200082, *P.R.China*)

(5: *Jiangxi Lake Poyang Nanji Wetland National Natural Reserve Authority, Nanchang* 330100, *P.R.China*)

(6: *School of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang* 330031, *P.R.China*)

* 2026-02-01 收稿; 2026-07-02 收修改稿;2026-07-07 录用。
国家自然科学基金（72364023、32360292)和江西省自然科学基金（20242BAB25197）联合资助

** 通讯作者；Email：lishu@ncu.edu.cn

Abstract：In recent years, the hydrological regime of Lake Poyang has undergone marked changes, yet the effects on wintering waterbird habitats remain unclear. This study focused on nine sub-lakes within the Lake Poyang National Nature Reserve. Using remote sensing, geographic information systems, and spatiotemporal analysis, we examined how water recession influenced the structure of wintering waterbird habitats from three perspectives: natural hydrological processes, artificial water level regulation, and lake topography. The results showed that: 1) During the extreme flood in 2020, the foraging habitat area for wintering waterbirds decreased by 82.32% in September and 75.65% in October relative to normal hydrological years. During the extreme drought in 2022, the foraging habitat area declined by 26.21% in October and 37.84% in November. Although both extreme events caused substantial reductions in autumn foraging habitat, they did not reduce winter foraging habitat area. 2) From September to November 2022, during the drought, Lake Xianghu—a shallow, artificially regulated lake with the highest mean elevation—experienced a 6- to 8-fold expansion in sandbar area compared with normal years, accompanied by a notable decrease in waterbird foraging habitat. In contrast, other artificially regulated sub-lakes showed varying increases in foraging habitat area. During the September–October flood in 2020, the proportion of foraging habitat in Lake Banghu and Lake Dachahu (the two sub-lakes with the lowest mean elevation) dropped from about 50% in normal years to around 10%, while that in Lake Xianghu (with the highest mean elevation) rose from about 50% to 60%. These spatial differences were closely linked to the topographic characteristics of individual sub-lakes. 3) During the September–November 2022 drought, naturally receding Lake Banghu and Lake Dachahu showed a marked expansion in sandbar area. Meanwhile, artificially regulated lakes (Lakes Dahuchi, Shahu, Changhuchi, Zhushi, Meixihu, and Zhonghuchi) experienced a 5- to 25-percentage-point increase in the proportion of waterbird foraging habitat. These findings suggest that artificial water level regulation in sub-lakes contributes considerably to the conservation of wintering waterbird habitats during drought years. Given the current trends of earlier and prolonged dry seasons, frequent droughts, and the implementation of the Yangtze River Basin ten-year fishing ban, targeted scientific management and rational water level regulation of sub-lakes are needed to maintain suitable foraging habitats for wintering waterbirds.

Keywords：Lake Poyang; dish-shaped lakes; water recession process; topographic characteristics; hydrological drivers; wintering waterbird habitat

鄱阳湖秋季退水后形成广袤的湿地，使之成为亚洲最大的水鸟越冬地，退水后形成的百余个碟形湖为全湖约70%的水鸟提供了越冬生境[1-2]。当前鄱阳湖呈枯水期提前、枯水期延长、极端水文事件频发的趋势，与此同时，长江流域“十年禁渔”也导致很多碟形湖失去了原有的水位人为调控能力[3]。因此开展退水过程对鄱阳湖国家级自然保护区水鸟越冬生境结构的影响研究具有重要的意义。

研究发现，水文条件变化会从多方面影响水鸟栖息生境。水文条件变化会改变土壤理化性质与微生物群落结构，从而影响湿地生态系统的物质基础[4]。水文条件变化通过影响水生或湿生植物的生长，进而影响水鸟的食物资源格局[5-6]，洪泛湿地提前退水导致洲滩过早出露，致使沉水与浮叶植物干枯，以刺苦草为例，其在低水位下各器官生物量显著减少，直接导致块茎类关键食物资源减少[7-8]。枯水情势加剧时，秋草会提前老化，引发食草性水鸟食物短缺[9-10]。对于季节性湖泊，年内涨水、高水位维持、退水过程的差异，以及地下水位埋深和土壤水分的时空变化，都会导致湿地空间结构出现显著的年际与年内波动，并最终决定水鸟栖息地的适宜性与分布格局[11]。

对鄱阳湖退水过程的驱动力研究发现，它受到自然因素与人为干预的双重驱动[12-15]。自然因素方面，流域降水变化与气候波动等导致极端水文事件频发[16-17]，极端干旱直接造成入湖水量减少与退水提前[18]，极端洪水则导致湖面面积显著扩张，水位异常抬升与汛期延长，从而影响后续的退水模式和水资源分布的空间格局[16,19]。人为因素方面，从早期的“堑秋湖”到当前的“协议管湖”等湖泊管理实践[20-21]、以及三峡工程调度等人类活动均显著改变了湖泊水文的自然节律，加剧了退水过程的不确定性与空间异质性[22-23]。自然与人为因素的叠加影响，共同塑造了鄱阳湖的生境结构，进而深刻影响水鸟的分布格局[24-25]。

鄱阳湖退水过程的驱动因子研究仍存在明显不足。既有研究多分别探讨自然水文过程或人类活动对鄱阳湖全湖的退水过程及生境的影响，很少考虑湖盆地形的作用，亦缺乏对三者协同机制的系统研究。

地形作为湿地景观格局的基础载体，其高程、形态等特征通过调控水分分布与淹没模式，直接影响植被的带状分布与生境异质性[26-27]，并与水文过程耦合共同决定生境的结构与动态[28]。不连续的高程梯度还会加剧景观破碎化，影响生境的完整性与稳定性[29]。在不同水文扰动条件下，坡度、坡向等地形因子亦通过土壤水分与微气候的调节，对生境质量产生差异化影响[30]。湖泊地形如何与自然水文过程、人为调控（保护区管理局或渔民对碟形湖的直接水位管理）相互作用并共同塑造水鸟越冬生境，其机制有待探究。本文拟探索“自然水文过程、水位人为调控与地形特征对鄱阳湖水鸟越冬生境的协同影响机制”，以期为鄱阳湖湿地精准管理和候鸟栖息地保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊，“洪水一片、枯水一线”是鄱阳湖最基本的自然特征，秋季退水后形成的广袤湿地，使鄱阳湖成为亚洲最大的水鸟越冬地，平均每年有超过 40 万只水鸟到此越冬[31]。鄱阳湖中数量众多的碟形湖（浅碟形子湖泊）是越冬水鸟的主要觅食地、休憩场所和栖息地[1]。近年来，鄱阳湖出现持续低枯水位，有枯水期提前和枯水期延长的趋势，并且到周边农田越冬的水鸟呈逐年增加的趋势[32]。

鄱阳湖国家级自然保护区总面积 224 km^2，包括大汊湖、蚌湖、大湖池等九个碟形湖（图 1a），它是鄱阳湖水鸟越冬最重要的区域之一。保护区共记录鸟类 381 种，占整个鄱阳湖鸟类物种总数的 89.4%[33]，这里曾栖息着全球 85%以上的白鹤、18%的白枕鹤、3%的白头鹤以及中国 50%的灰鹤，同时该区域也是东方白鹳和小天鹅的主要栖息地之一[34-35]。受水文变化等因素影响，保护区内水鸟种类和数量存在明显的年际差异[34]。

在丰水期，保护区内碟形湖与主湖区呈连通水体，秋季退水时，各碟形湖水面会依次与主湖区脱离，水面脱离后碟形湖的水位会逐渐高于主湖区星子站的水位（图 1b 和图 1c）。为了给越冬水鸟持续提供觅食生境，保护区管理局对具备控水条件的碟形湖进行水位调控，即在秋季退水时关闸蓄水，然后在冬季开闸缓慢排水（图 1c）。未经人为调控的碟形湖（如蚌湖）其退水过程迅速，基本在 11 月就完成退水，12 月份就完全干涸（图 1b），而有闸控水的碟形湖其退水过程被延缓，它们在 12 月份仍会保留较大的水域面积（图 1c）。

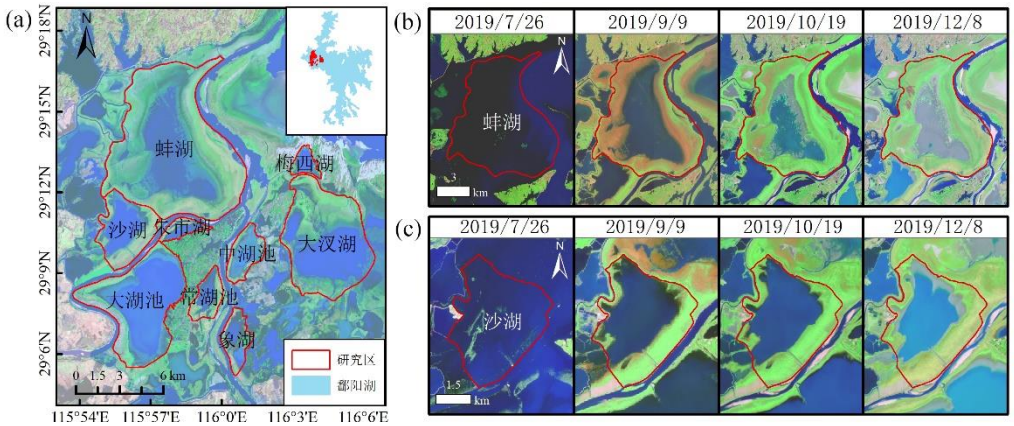

图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 研究数据

使用 2013 年 3 月—2025 年 2 月期间共 233 景多光谱卫星影像及雷达影像，其中 Landsat 卫星影像来源于美国地质调查局网站（https://earthexplorer.usgs.gov/），为 L2C2 格式的地表反射率数据。哨兵 1（Sentinel-1）雷达数据为 level 1GRD 格式，哨兵 2（Sentinel-2）多光谱数据为 L2A 格式的地表反射率数

据，所有哨兵数据来自欧空局网站（https://scihub.copernicus.eu/）。鄱阳湖地形数据为 2010 年实测数据，该数据为 5m×5m 的 DEM 格式数据。碟形湖边界矢量数据基于鄱阳湖 DEM 数据和高清卫星影像经数字化形成。星子站水位数据来源于江西省水文监测中心。

1.3 碟形湖水文过程遥感反演

(1)多光谱影像水域提取：基于 2013 年 3 月—2025 年 2 月的多光谱卫星影像，使用 AWEI 提取水体范围[36]；

(2)雷达影像水域提取：雷达影像经过预处理后将影像的后向散射系数 σ 转换为对数刻度（dB）形式，采用阈值法提取水体[37-38]；

(3)碟形湖水域面积占比计算：基于碟形湖的矢量数据，在 arcgis 中利用分区统计工具，计算各碟形湖内的水域面积，然后除以碟形湖自身面积得到碟形湖水域面积占比；

(4)碟形湖的水文过程：用水域面积占比的年内变化过程表征碟形湖的水文过程。

1.4 碟形湖特征指标计算

(1)平均高程：基于 2010 年实测的鄱阳湖高程数据，以 9 个碟形湖为统计区域，在 ArcGIS 中用分区统计工具计算各碟形湖平均高程；

(2)高程累积分布曲线：以 0.1 米为间隔完成研究区的高程数据重分类，然后在 Rstudio 中绘制高程累积分布曲线;

(3)最大控水面积占比：指碟形湖水闸能控制的水域面积占碟形湖面积的比例。秋季退水期，碟形湖的水面与主湖区脱离后，由于闸控原因，水域面积会在一段时间内基本不变，用该段时期水域面积占碟形湖总面积比值的多年平均值来表示，它实际表征了碟形湖的最大控水面积和最大控水深度;

(4)脱离水位：最大控水面积占比数据与高程累积分布曲线的交点即碟形湖与主湖区的脱离水位，它表示了碟形湖水闸调控的最高水位；

(5)最小水面面积占比：即碟形湖冬季完成退水后仍然无法排出的水域面积占比，通过计算多年年内最小水域范围占比数据的平均值获得，它实际表示碟形湖水闸无法排尽的水域范围；

(6)最小水面高程：最小水域面积与高程累计分布曲线的交点即碟形湖水面最小时的水面线高程，它表示了碟形湖水闸调控的最低水位；

(7)蓄水与调控能力：基于上述指标，计算碟形湖的最大调控水深、平均水深、蓄水容量密度等指标。

(8)平均水深：指碟形湖的水面与主湖区脱离时，碟形湖水域的平均水深；用脱离时的水位高程减去湖底高程再取均值；

(9)蓄水容量密度：碟形湖的总蓄水量与碟形湖面积的比值，它与干旱年碟形湖的景观演替速度密切相关;

(10)调控水深：脱离水位减去最小水面高程；

(11)调控面积占比：表示碟形湖水闸能调控的最大水域面积比例，实际为最大控水面积占比与最小水面面积占比的差值。

1.5 碟形湖分类

根据是否有闸控和控水过程差异，将碟形湖分为自然退水、人为调控和长期蓄水三类[39-40]。其中无闸控的碟形湖是自然退水，人为调控湖泊则根据保护越冬水鸟或者渔业的需求逐步排水，长期蓄水湖泊则长期维持高水位。针对人为调控的碟形湖，基于其地形特征指标，对标准化后的数据进行主成分分析（PCA）。然后依据各湖泊在 PCA 排序图中的聚集特征，进一步将其划分为不同的类型。

1.6 水鸟越冬生境分类系统与遥感分类方法

根据鄱阳湖越冬水鸟食性及觅食生境需求[41-43]，并参考现有的水鸟栖息生境分类体系，将越冬水鸟栖息生境分为：深水（水深＞50 cm）、浅水（30 cm＜水深≤50 cm）、极浅水（0 cm＜水深≤30 cm）、泥滩、沙滩、稀疏草洲、高草草洲、茂密草洲和湖中高地（高程＞21 m）九个类型，其中稀疏草洲、泥滩、极浅水和浅水四个类型是鄱阳湖水鸟越冬的主要觅食生境。越冬水鸟栖息生境类型的遥感识别流程见图 2。景观分类的总体精度为 90.25%，Kappa 系数为 0.8854，像元误分主要发生在 3 类水体内部和 3

类草洲内部，景观分类的精度评估详见李映瑜等[44]。

(1)湖中高地：是指常年不受水淹的区域，基于 DEM 提取高程大于 21 m 的区域；

(2)水域：先利用 AWEI（automated water extraction index）水体指数从遥感影像提取水域范围[36]，然后再结合 DEM 数据计算每个像元的水深[45]，最后根据水深划分出深水、浅水和极浅水类型；

(3)沙滩：用短波近红外波段（2.20 μm）进行非监督分类，亮度最高的类型为沙滩；

(4)泥滩和茂密草洲：先对未分区域计算 NDVI（normalized difference vegetation index）指数，然后对 NDVI 完成非监督分类，NDVI 值最高的区域为茂密草洲，NDVI 值最低的区域为泥滩，NDVI 值中等的区域为其他草洲；

(5)稀疏草洲和高草草洲：其他草洲中将高程小于 13.5 m 的区域划分为稀疏草洲，高于 13.5 m 的区域再进行非监督分类，NDVI 值大的区域划分为高草草洲，其余为稀疏草洲。

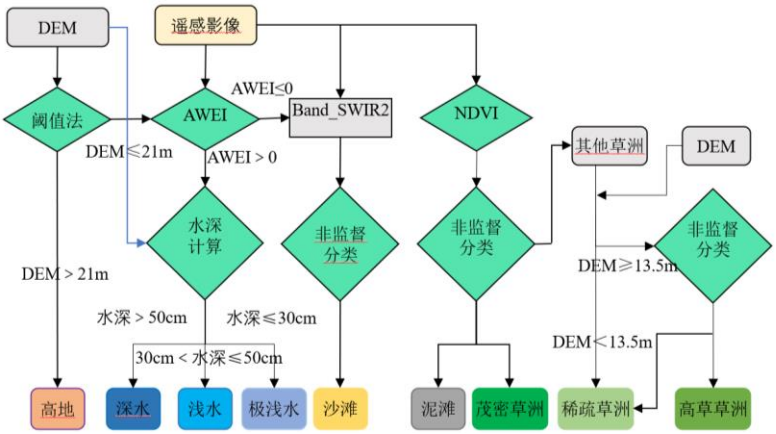

图 2 鄱阳湖越冬水鸟栖息生境遥感识别流程

Fig.2 Flowchart of remote sensing identification for wintering waterbird habitats in Lake Poyang

2 结果

2.1 碟形湖的地形特征与类型

2.1.1 碟形湖的地形特征　研究区 9 个碟形湖的高程累积分布曲线见图 3，其主要地形指标见表 1，不同碟形湖有明显的地形特征差异。从高程分布来看，象湖的平均高程最高，它比大汊湖的平均高程高了 2.68 m，其脱离水位比大汊湖高 3.34 m，碟形湖与主湖区的脱离水位与湖泊的平均高程正相关。从碟形湖的湖泊形态上看，平均高程位于累计面积百分比低值区时，湖泊大部分面积都在平均高程以上，湖底地形呈不连续的阶梯分布；平均高程位于累计面积百分比高值区时，表明湖泊主要面积都在平均高程以下，湖底基本呈锅底形，是更具调控潜力的湖泊。

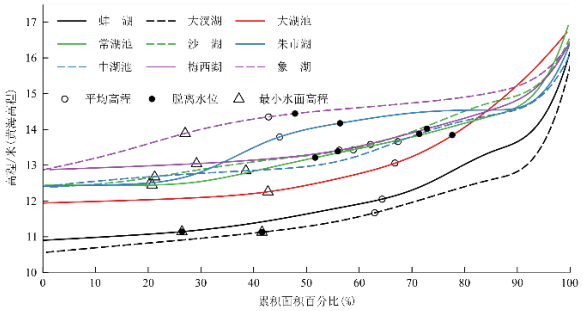

图 3 碟形湖的高程累积分布曲线

Fig. 3 Elevation cumulative distribution curves of the dish-shaped lakes

碟形湖的蓄水和水位调控能力差异明显。从图 3 的横坐标看，在累计面积占比低就脱离的湖泊，其控水面积占比越小，如无闸的蚌湖其最大控水面积占比小于 30%，而中湖池、梅西湖和大湖池的最大控水面积都大于 70%。无闸的蚌湖和大汊湖，脱离水位与最小水面高程重合，所以不具备水位调控能力，而朱市湖和大湖池可调控的水深超过 1.5m。

表 1 碟形湖地形特征 （面积单位 km²，水深及高程单位 m）

Tab. 1 Morphological characteristics of the dish-shaped lakes (unit: area in km², water depth and elevation in m)

名称	蚌湖	大汊湖	大湖池	常湖池	沙湖	朱市湖	中湖池	梅西湖	象湖
碟形湖面积	71.26	37.28	33.69	5.28	14.67	2.96	6.50	2.68	5.83
平均高程	12.05	11.67	13.06	13.43	13.58	13.79	13.42	13.66	14.35
脱离水位	11.18	11.14	13.83	13.17	13.43	14.14	13.85	14.03	14.48
平均水深	0.15	0.30	1.41	0.52	0.57	1.13	0.94	0.82	0.75
最大控水面积占比	26.39%	41.58%	77.65%	51.65%	55.95%	56.36%	71.39%	72.85%	47.84%
蓄水容量密度	0.04	0.12	1.09	0.27	0.32	0.64	0.67	0.60	0.36
最小水面面积占比	26.39%	41.58%	42.70%	20.73%	21.22%	20.38%	38.52%	29.16%	27.00%
最小水面高程	11.18	11.14	12.26	12.52	12.71	12.46	12.90	13.02	13.90
可调控面积占比	0.00%	0.00%	34.95%	30.92%	34.73%	35.98%	32.87%	43.69%	20.84%
可调控水深	0.00	0.00	1.57	0.65	0.72	1.68	0.95	1.01	0.58
是否闸控	否	否	是	是	是	是	是	是	是

2.1.2 碟形湖的类型 无闸或者水闸已损坏的碟形湖不具备水位调控能力，它们结束退水的时间明显早于水位人为调控的湖泊，首先将碟形湖分为有闸和无闸两大类型，有闸的碟形湖再根据它们在 PCA 图上的聚集情况划分不同类型。从图 4 可见，高程和水深方面的指标是影响有闸碟形湖在 PCA 图上分布位置的主要因素，大湖池平均高程最低、水最深，因此它远离其它湖泊；象湖平均高程最高、水浅，同样远离其它湖泊，常湖池与沙湖水最浅而且平均高程相近，因此二者聚集；梅西湖、中湖池和朱市湖三者聚集。无闸的蚌湖和大汊湖，因其平均高程和水深都相近，将其归为一类。基于水位人为调控方式、湖泊高程和湖泊调蓄能力（湖泊水深）差异，研究区的九个碟形湖可分为五个类型（表 2）。

表 2 研究区碟形湖分类结果

Tab. 2 Classification of the dish-shaped lakes in the study area

类型	类型名称	湖泊名称
Ⅰ	无闸低高程极浅水湖泊	蚌湖、大汊湖
Ⅱ	有闸低高程深水湖泊	大湖池
Ⅲ	有闸中高程浅水湖泊	常湖池、沙湖
Ⅳ	有闸中高程深水湖泊	朱市湖、中湖池、梅西湖
Ⅴ	有闸高高程浅水湖泊	象湖

2.2 碟形湖的水文过程

利用遥感监测技术获取的研究区九个碟形湖的水域面积变化(图 5)，可见自然降水过程决定着碟形湖水文过程的年内和年际变化。从年内变化上看，碟形湖水位呈明显的季节性波动，水域面积通常在 1—2 月最小，3—6 月逐渐增大，7—8 月达到峰值，9—12 月退水后面积逐渐减小，次年 1—2 月水域面积又减少到最小值。从年际差异上看，2020 年夏季发生洪水，9—11 月各碟形湖的水域面积明显大于平水年和枯水年，2022 和 2023 年鄱阳湖发生持续干旱，碟形湖的夏秋季水位明显低于正常水文年。

自然退水湖泊与水位人为调控湖泊的退水过程有明显差异。从平水年均值来看，无闸的蚌湖和大汊湖一般在 11 月就完成退水，整个退水过程中水域面积呈直线型下降。有闸的碟形湖一般在次年 1—2 月完成退水，其退水过程包括三个阶段，与主湖区水面脱离前的水位直线下降阶段，控水时期的水位不变阶段和排水时期的水位缓慢下降阶段。

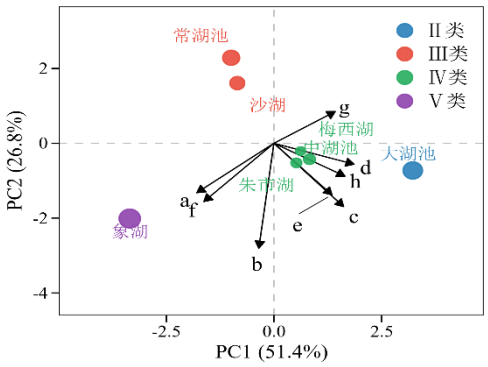

图 4 有闸碟形湖的 PCA 分析（a：平均高程，b：脱离水位，c：平均水深，d：最大控水面积占比，e：最小水面面积占比，f：最小水面高程，g：可调控面积占比，h：可调控水深）

Fig. 4 PCA of the gated dish-shaped lakes

平均高程和调蓄水能力等湖泊地形特征也影响着碟形湖的退水过程。2020 年夏秋季鄱阳湖流域发生洪水，导致平均高程最低的 I 类湖泊（蚌湖和大汊湖）11 月份水域面积占比仍超过 95%，同期平均高程最高的象湖水域面积仅占 60%左右，其它中高程湖泊为 80%左右（图 5），碟形湖平均高程决定着不同湖泊在洪水后的退水次序。2022 年干旱发生，平均高程低，蓄水容量密度大的大湖池长期维持了 60%的水域面积，平均高程最高，蓄水容量密度小的象湖在 10 月就完全干涸，其余中高程的有闸碟形湖其蓄水容量密度有明显差异（表 1），它们基本维持了 30%~40%的水域面积（图 5 中Ⅲ类、Ⅳ类）。

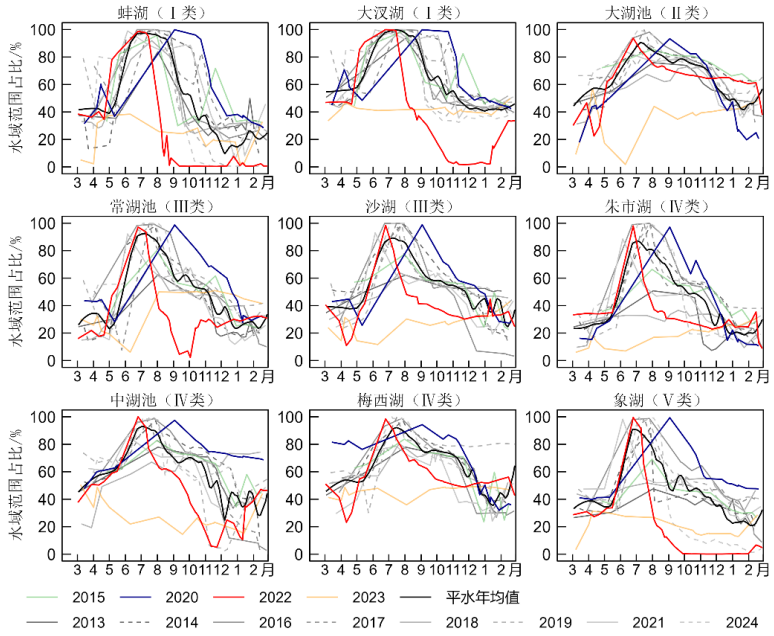

图 5 研究区内碟形湖 2013—2024 年水域面积占比变化图

Fig. 5 Variation in water area proportion of the dish-shaped lakes within the study area (2013–2024)

2.3 不同水文年鄱阳湖自然保护区的水鸟越冬生境变化

不同水文年的水鸟越冬生境差异直接反映了自然水文过程对水鸟越冬生境结构的影响，本文选取极端洪水年、极端干旱年和平水年均值进行对比，有利于准确评估自然降水对水鸟越冬生境影响的极端情况。三个年份鄱阳湖星子水文站的水文过程见图 6。7—10 月，极端洪水年比平水年的水位基本高出 4 m，

8—11 月，平水年的水位比极端干旱年也基本高出 4 m。

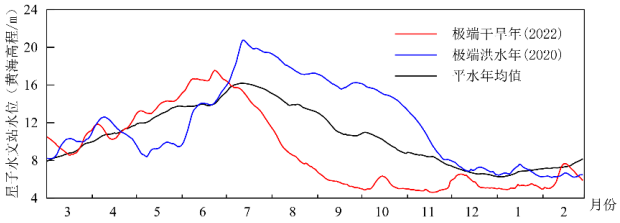

图 6 不同水文年鄱阳湖星子水位变化趋势

Fig. 6 Variation in water level at the Xingzi station of Lake Poyang under different water years

研究区不同水文年水鸟越冬生境和觅食生境的面积占比见表 3。2020 年 9 月和 10 月越冬水鸟可觅食的生境仅占 7.06%和 11.39%，分别占正常水文年同期值的 20.43%和 24.33%，极端洪水导致水鸟觅食生境面积减少 75%以上。2022 年极端干旱持续到 11 月（图 6），而 2022 年 9—11 月越冬水鸟的觅食生境面积比同期平水年分别减少了 13.61%、26.21%和 37.84%。进入 12 月以后，极端洪水和极端干旱的影响消失，越冬水鸟的觅食生境面积也恢复到正常水平。可见极端洪水和极端干旱都减少了越冬水鸟的觅食生境，但这种影响一般在秋季就会结束。

从表 3 中生境类型的变化来看，极端洪水时出现大面积深水，2020 年 9 月和 10 月深水面积占比分别高达 91.47%和 82.09%，分别比同期平水年高出 52.35 和 54.86 个百分点。极端干旱导致 2022 年 9—11 月沙滩面积占比分别高达 19.80%、21.80%和 24.54%，分别比同期平水年增加了 15.18%、19.64%和 22.6%。深水或沙滩（含干涸的泥滩）面积陡增分别是洪水年和干旱年越冬水鸟觅食生境面积减少的主要原因。

表 3 不同水文年鄱阳湖自然保护区水鸟越冬生境和主要觅食生境组成

Tab. 3 Composition of waterbird wintering and main foraging habitats in Lake Poyang Nature Reserve under different water years

月份	年份	深水	浅水	极浅水	泥滩	沙滩	稀疏草洲	高草草洲	茂密草洲	觅食生境	觅食生境变化
	洪水年	91.47%	1.65%	5.18%	0.06%	0.02%	0.17%	0.72%	0.71%	7.07%	-82.32%
9 月	干旱年	6.64%	3.99%	15.73%	2.73%	19.80%	12.10%	12.41%	26.60%	34.54%	-13.61%
	平水年	39.12%	6.26%	20.60%	2.25%	4.62%	10.87%	3.60%	12.67%	39.98%	0.00%
	洪水年	82.09%	3.50%	4.28%	2.90%	0.10%	0.71%	3.66%	2.75%	11.40%	-75.65%
10 月	干旱年	8.44%	4.03%	8.29%	7.66%	21.80%	14.57%	11.14%	24.07%	34.55%	-26.21%
	平水年	27.23%	5.31%	23.32%	3.66%	2.16%	14.52%	3.92%	19.86%	46.82%	0.00%
	洪水年	22.99%	14.72%	24.68%	3.15%	1.56%	21.14%	9.41%	2.35%	63.69%	7.40%
11 月	干旱年	7.47%	3.71%	6.24%	8.66%	24.54%	18.25%	8.18%	22.95%	36.86%	-37.84%
	平水年	14.98%	6.32%	24.46%	6.93%	1.92%	21.59%	4.78%	19.00%	59.30%	0.00%
	洪水年	5.35%	6.92%	33.23%	13.45%	0.34%	24.62%	9.92%	6.16%	78.22%	16.28%
12 月	干旱年	7.61%	3.77%	6.98%	25.74%	1.57%	29.66%	3.76%	20.89%	66.15%	-1.66%
	平水年	6.58%	5.50%	24.96%	11.13%	6.59%	25.68%	3.34%	16.20%	67.27%	0.00%
	洪水年	2.86%	3.36%	32.85%	12.94%	4.96%	24.56%	9.78%	8.68%	73.72%	-1.81%
1 月	干旱年	6.96%	3.99%	8.45%	24.00%	11.72%	40.16%	4.28%	0.45%	76.60%	2.02%
	平水年	3.53%	4.07%	28.68%	13.27%	9.20%	29.05%	3.27%	8.92%	75.08%	0.00%
	洪水年	1.11%	3.16%	29.24%	16.06%	0.25%	16.28%	9.35%	24.53%	64.75%	-19.63%
2 月	干旱年	5.74%	6.81%	13.99%	30.46%	2.19%	38.32%	2.22%	0.27%	89.57%	11.18%
	平水年	3.25%	4.24%	27.78%	13.80%	1.90%	34.74%	3.71%	10.58%	80.56%	0.00%

研究区内无湖中高地类型，觅食生境包括浅水、极浅水、泥滩和稀疏草洲四类，觅食生境变化=（平水年－洪水年或干旱年）/平水年。

2.4 不同水位调控方式和地形特征下碟形湖的水鸟越冬生境差异

研究区 9 个碟形湖在不同水文年的景观类型组成和越冬水鸟觅食生境面积占比年内变化见图 7。随着水位降低，生境类型从深水逐步演化为浅水、极浅水、泥滩、沙滩、稀疏草洲和茂密草洲。平水年觅食生境的年内变化过程表明，退水期间 9 个碟形湖的越冬水鸟觅食生境面积都逐渐增加，次年 2 月均增至 75%左右。

2022 年 9—11 月，由于极度干旱，自然退水的蚌湖和大汊湖以及平均高程最高的有闸浅水湖泊象湖的沙滩面积比平水年增加了 3~8 倍，其它水位人为调控的碟形湖沙滩面积变化不明显。2022 年 9—11 月干旱期间，水位人为调控的碟形湖（除象湖外），其水鸟觅食生境面积基本都大于平水年的同期数值。

2020 年 9—10 月洪水影响期间，平均高程低的蚌湖和大汊湖和大湖池的水鸟觅食生境面积占比都低于 10%，远小于平水年的同期值。平均高程中等的沙湖、常湖池、朱市湖、梅西湖和中湖池的水鸟觅食生境面积都低于平水年，而平均高程最高的象湖其水鸟觅食生境面积却明显大于平水年数值。

3 讨论

水退滩露，退水过程中景观类型从深水依次转变为浅水、极浅水、泥滩、沙滩、稀疏草洲、茂密草洲、高草草洲等类型，其中浅水、极浅水、泥滩、稀疏草洲是鄱阳湖水鸟越冬最主要的四种觅食生境。碟形湖退水过程的变化必然导致不同时段水鸟觅食生境的结构变化。

3.1 自然水文过程对越冬水鸟生境结构的影响

鄱阳湖汇集上游五条河流的入湖径流，4-6 月雨季后，鄱阳湖一般在 7—8 月达到最高水位，9 月开始退水（图 6），随着退水过程推进，深水面积逐渐减小，水鸟越冬的觅食生境面积则持续增加。流域的自然降水决定了鄱阳湖的退水起始时间和退水速度，进而影响越冬水鸟生境结构的变化。洪水年份，鄱阳湖的退水过程推迟，洪水期形成大面积深水景观，越冬水鸟的觅食生境面积锐减。2020 年的极端洪水，导致研究区 2020 年 9 月和 10 月越冬水鸟可觅食的生境仅占 7.06%和 11.39%（表 3），比平水年同期值减少了 75%以上。干旱年份，越冬水鸟无法觅食的沙滩（包括干涸的泥滩）面积陡增，也会导致水鸟的觅食生境面积减少。2022 年鄱阳湖极端干旱，导致研究区 9—11 月的越冬水鸟觅食生境面积比同期平水年分别减少了 13.61%、26.21%和 37.84%。相关研究发现，平水年鄱阳湖能提供充足的食物和栖息地，最适宜水鸟顺利越冬，洪水年能提供的栖息生境面积最小，最不利于水鸟正常越冬[46-47]。可见自然水文过程的确会影响鄱阳湖越冬水鸟的生境结构和觅食生境面积，极端水文事件都会减少研究区的越冬水鸟的觅食生境面积，极端洪水比极端干旱对觅食生境面积的影响更大，因此要特别关注洪水期的水鸟越冬生境保护。

进一步对比不同水文年鄱阳湖自然保护区的水鸟越冬生境组成后还发现，洪水消退后，2020 年 11 月至次年 2 月研究区的水鸟觅食生境面积基本恢复到平水年水平，2022 年 12 月—次年 2 月研究区的水鸟觅食生境面积也基本恢复到平水年水平。12 月—次年 2 月是鄱阳湖水鸟越冬的关键期，可见这两次极端水文事件都未明显改变研究区水鸟越冬关键期的觅食生境面积。相关研究也发现，虽然洪水或干旱会大幅减少水鸟的秋季觅食生境面积，但由于这些事件的影响通常在冬季前消退，不会影响冬季时的水鸟觅食生境面积[44]。相关气候方面的研究发现，鄱阳湖的干旱在 8—9 月频繁发生,一般在 10—11 月停止[48]。可见极端水文事件一般会明显减少鄱阳湖秋季的水鸟觅食生境面积，但对水鸟越冬关键期的觅食生境面积无明显影响。

3.2 水位人为调控对越冬水鸟生境结构的影响

“堑秋湖”即渔民利用人工闸门在秋季蓄水拦鱼，冬季排水抓鱼，它是广泛分布于长江中下游季节性浅水碟形湖中的一种传统渔业方式[49]。“堑秋湖”渔业活动是长江流域“十年禁渔”前碟形湖最主要的水位人为调控的驱动力。对碟形湖的退水过程研究结果显示，自然退水的蚌湖和大汊湖一般在 11 月就完成退水，水位人为调控的碟形湖一般在次年 1—2 月完成退水，水位人为调控的碟形湖其退水结束时间更晚，主要原因是“堑秋湖”渔业活动一般在 12 月份之后排水捕鱼[49]。

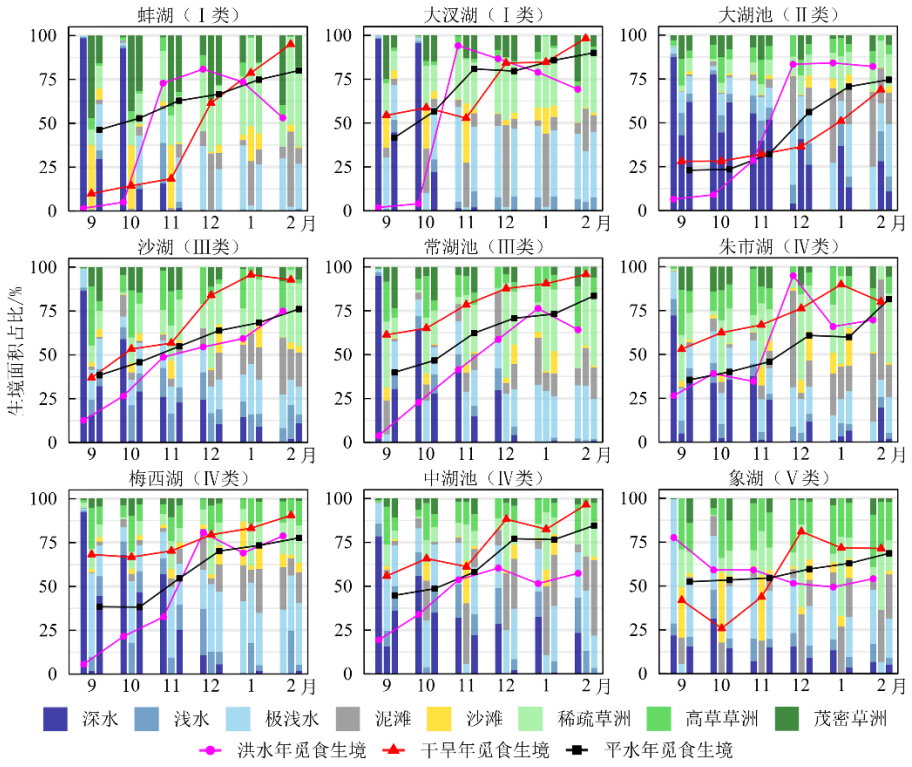

图 7 不同水文年各碟形湖生境结构及觅食生境占比变化图

Fig. 7 Dynamics of habitat structure and foraging habitat proportion in each dish-shaped lakes under different water years

本文对比不同水位调控方式下碟形湖的水鸟越冬生境发现，2022 年 9—11 月，由于极度干旱，自然退水的蚌湖和大汉湖，其沙滩面积都比平水年增加了数倍，导致水鸟的觅食生境面积或种类明显变化，而水位人为调控的碟形湖沙滩面积变化不明显，除象湖外，其它水位人为调控的碟形湖在 2022 年 9—11 月的水鸟觅食生境面积基本都大于平水年的同期数值，可见碟形湖水位人为调控对于干旱年保护水鸟顺利越冬有重要意义。相关研究也表明，“堑秋湖”活动在枯水季节构筑低矮堤坝，就地将浅水的滩地围护，造就了有利于涉禽觅食的生境，而且“堑秋湖”主要在 12 月份之后排水捕鱼，对于干旱的年份，“堑秋湖”增加的浅水区对水鸟顺利越冬有重要意义[49]。已有研究还表明：无论碟形湖长期积水或很快将积水放干，都不利于水鸟顺利越冬，只有使碟形湖的水位逐渐降低，才最有利于越冬水鸟持续觅食[50-51]。当前鄱阳湖出现持续低枯水位，有枯水期提前和枯水期延长的趋势，而且长江流域“十年禁渔”实施已导致众多碟形湖失去了原有的水位调控能力，建议尽快恢复碟形湖水位的科学管理与调控。

3.3 湖泊地形特征对越冬水鸟生境结构的影响

在极端洪水时期，平均高程最低的蚌湖和大汉湖，其深水面积占比超过 90%，因而水鸟的觅食生境面积占比不足 10%，随着湖泊平均高程增加，深水面积占比减小，水鸟的觅食生境面积逐步增加，平均高程最高的象湖，水淹形成大面积浅水区域，使其水鸟觅食生境占比反而比平水年更高，平均高程中等的沙湖、常湖池、朱市湖、梅西湖和中湖池的水鸟觅食生境面积都低于平水年，可见湖泊洪水期的越冬水鸟觅食生境面积与其平均高程密切相关，而与碟形湖水位人为调控方式无关。极端干旱时期，水位人为调控的碟形湖，只有象湖的水鸟觅食生境面积锐减，因为象湖不仅平均高程最高，而且其蓄水容量密度较小，长期干旱导致象湖在 2022 年 9—11 月基本干涸，沙滩面积陡增，水鸟觅食生境面积明显下降。可见湖泊的平均高程和自身地形特征对其景观结构都有重要影响，平均高程低的碟形湖受洪水的影响更大，平均高程高的碟形湖，其景观结构受干旱的影响更大，这与李映瑜等研究极端水文事件对鄱阳湖水

鸟越冬生境面积影响的空间分异特征一致[44]。

综上所述，自然水文过程、水位人为调控和湖泊地形都能改变碟形湖的退水过程，进而影响碟形湖的水鸟生境结构。极端水文事件会减少鄱阳湖秋季的水鸟觅食生境面积，通常不会影响冬季的水鸟觅食生境面积。碟形湖水位人为调控有利于保护水鸟，碟形湖水位人为调控对于应对当前鄱阳湖的持续干旱具有重要意义。碟形湖的景观结构与湖泊地形特征也密切相关，有必要实行“一湖一策”的碟形湖水位管理方案。本研究也存在一些不足：首先是研究区只有9个碟形湖，缺少长期蓄水和不同高程上的自然退水湖泊类型，因而无法探究这些湖泊类型的相应关系；其次是表征湖泊地形特征的指标众多，本文仅从湖泊高程和湖泊调蓄水能力方面做了简单探讨，后期的工作将以鄱阳湖中的102个碟形湖为研究对象，并进一步探究各地形因子对碟形湖退水过程和景观结构的影响机制。

4 结论

本文以鄱阳湖国家级自然保护区的 9 个碟形湖为例，探讨了自然水文过程、水位人为调控和湖泊地形特征对碟形湖越冬水鸟生境结构和觅食生境面积的影响，主要结论有：

1）2020 年的极端洪水，导致鄱阳湖自然保护区 9—10 月越冬水鸟觅食生境比平水年均值分别减少了 82.32%和 75.65%，2022 年的极端干旱，鄱阳湖自然保护区 10—11 月越冬水鸟觅食生境比平水年均值分别减少了 26.21%和 37.84%。虽然两次极端水文事件都明显减少了研究区秋季的水鸟觅食生境面积，但鄱阳湖的极端水文事件一般在秋季结束，不会影响冬季的水鸟觅食生境面积。

2）碟形湖水位人为调控对于干旱年份保护水鸟顺利越冬有重要意义。在当前鄱阳湖枯水期提前，枯水期延长、干旱频发和长江流域“十年禁渔”的新形势下，建议尽快恢复碟形湖水位的科学管理与调控。

3）2020 年 9—10 月洪水导致平均高程最低的蚌湖和大汊湖的水鸟觅食生境面积占比都不足 10%，而平均高程最高的有闸浅水湖泊象湖同期的觅食生境面积却增至 70%左右。2022 年 9—11 月的干旱导致自然退水的蚌湖和平均高程最高且水位人为调控的象湖其水鸟觅食生境面积明显下降，而其余人为调控水位碟形湖的水鸟觅食生境面积明显增加。碟形湖的水鸟越冬生境结构与湖泊自身的地形特征密切相关，有必要实行“一湖一策”的差异化水位管理方案。

5 参考文献

[1] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1770-1779. 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): 1770-1779.]

[2] Lu MJ, Zhang Z, Chen P *et al*. Shallow sub-lakes are essential for sustaining the successful wintering of waterbirds in Poyang Lake, China. *Avian Research*, 2024, **15**: 100178. DOI: 10.1016/j.avrs.2024.100178.

[3] Pan BZ, Liu XY. A review of water ecology problems and restoration in the Yangtze River Basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(3): 1-8. DOI: 10.11988/ckyyb.20200787. [潘保柱, 刘心愿. 长江流域水生态问题与修复述评. 长江科学院院报, 2021, **38**(3): 1-8.]

[4] Ma YT, Li JQ, Wu J *et al*. Bacterial and fungal community composition and functional activity associated with lake wetland water level gradients. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 760. DOI: 10.1038/s41598-018-19153-z.

[5] Chastant JE, Gawlik DE. Water level fluctuations influence wading bird prey availability and nesting in a subtropical lake ecosystem. *Waterbirds*, 2018, **41**(1): 35-45. DOI: 10.1675/063.041.0105.

[6] Liang J, Meng QF, Li X *et al*. The influence of hydrological variables, climatic variables and food availability on Anatidae in interconnected river-lake systems, the middle and lower reaches of the Yangtze River floodplain. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**: 144534. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144534.

[7] Han Z, Wang SY, Liu XB *et al*. Ecological thresholds for the dominated wetland plants of Poyang Lake along the gradient of flooding duration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(2): 252-262. [韩祯, 王世岩, 刘晓波等. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值. 水利学报, 2019, **50**(2): 252-262.]

[8] Kang CX, Li J, Liu YR *et al*. Effects of high nitrogen concentration and low water level on the growth of the submerged macrophyte *Vallisneria spinulosa*. *Journal of Freshwater Ecology*, 2022, **37**(1): 161-172. DOI: 10.1080/02705060.2022.2030817.

[9] Luo JH, Yan Y, Xiao F *et al*. Monitoring and analysis of the Lake Poyang wetland drought process in 2022 based on spatiotemporal information fusion model. *J Lake Sci*, 2024, **36**(5): 1525-1536. DOI: 10.18307/2024.0542. [罗佳欢, 严翼, 肖飞等. 基于时空信息融合模型的2022年鄱阳湖湿地干旱过程监测分析. 湖泊科学, 2024, **36**(5): 1525-1536.]

[10] Wang J, Han Z, Liu XB *et al*. Simulation of habitat pattern and population response of geese under the change of river-lake relationship: A case study of Duchang Nature Reserve, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(21): 9024-9037. DOI: 10.20103/j.stxb.202208232408. [汪洁, 韩祯, 刘晓波等. 江湖关系变化下雁类生境格局模拟及雁类种群的响应——以都昌保护区为例. 生态学报, 2023, **43**(21): 9024-9037.]

[11] Xu XL, Zhang Q, Tan ZQ *et al*. Effects of water-table depth and soil moisture on plant biomass, diversity, and distribution at a seasonally flooded wetland of Poyang Lake, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25**(6): 739-756. DOI: 10.1007/s11769-015-0774-x.

[12] Zhang Q, Ye XC, Werner AD *et al*. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake: Comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.051.

[13] Li QY, Lai GY, Devlin AT. A review on the driving forces of water decline and its impacts on the environment in Poyang Lake, China. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, **12**(5): 1370-1391. DOI: 10.2166/wcc.2020.216.

[14] Zhu LY, Xing HQ, Hou DY *et al*. A long-term analysis of SpatiotemporalChange and driving factors on Poyang lakeduring 1987-2019. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, **30**(5): 4389-4399. DOI: 10.15244/pjoes/131056.

[15] Wang YY, Molinos JG, Shi LL *et al*. Drivers and changes of the Poyang Lake wetland ecosystem. *Wetlands*, 2019, **39**(1): 35-44. DOI: 10.1007/s13157-019-01180-9.

[16] Yao SM, Fan DF, Luan HL *et al*. Recent extreme flood and drought hydrological situation in Poyang Lake and countermeasures. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(12): 171-179. DOI: 10.11988/ckyyb.20230913. [姚仕明, 范达福, 栾华龙等. 鄱阳湖近年极端洪枯情势分析及应对策略. 长江科学院院报, 2024, **41**(12): 171-179.]

[17] Zhan MJ, Wu Q, Zhan LF *et al*. Change in extreme precipitation events: Exposure and vulnerability in the Poyang Lake Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 2023, **11**: 1125837. DOI: 10.3389/feart.2023.1125837.

[18] Chen HX, Jin GQ, Tang HW *et al*. Spatiotemporal variations of water levels and river-lake interaction in the Poyang Lake basin under the extreme drought. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2025, **57**: 102165. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102165.

[19] Yu Y, Yao Y, Li CT *et al*. Hydrodynamic impacts of extreme drought-to-flood transition events: Insights from the Poyang Lake. *Journal of Water and Climate Change*, 2025, **16**(4): 1618-1637. DOI: 10.2166/wcc.2025.815.

[20] Zhang QM, Qi SH, Hu M. The positive evaluation of “lake enclosed in autumn” on the habitat of winter bird in Poyang Lake wetlands. *Jiangxi Science*, 2018, **36**(2): 250-255. [张起明, 齐述华, 胡梅. “堑秋湖”对鄱阳湖湿地越冬候鸟栖息功能的积极作用评价. 江西科学, 2018, **36**(2): 250-255.]

[21] Hu BH. Nanji mountain from “point bird award lake” to “agreement management lake”. *Green China*, 2022, (20): 72-77. [胡斌华. 南矶山从“点鸟奖湖”到“协议管湖”. 绿色中国, 2022, (20): 72-77.]

[22] Lai GY, Wang P, Li L. Possible impacts of the Poyang Lake (China) hydraulic project on lake hydrology and hydrodynamics. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 187-205. DOI: 10.2166/nh.2016.174.

[23] Wang D, Zhang SH, Wang GL *et al*. Quantitative assessment of the influences of Three Gorges Dam on the water level of Poyang Lake, China. *Water*, 2019, **11**(7): 1519. DOI: 10.3390/w11071519.

[24] Duan HL, Pan YW, Yu XB *et al*. Effects of habitat change on the wintering waterbird community in China’s largest freshwater lake. *Remote Sensing*, 2023, **15**(18): 1519. DOI: 10.3390/rs15184582.

[25] Xia J, Xue Y, Luo WG *et al*. Impacts of drought and flood disasters on the Poyang Lake ecosystem and adaptive strategies. *Water Resources Protection*, 2025, **41**(5): 11-21. [夏军, 薛颖, 骆文广等. 旱涝灾害对鄱阳湖生态系统的影响与适应性对策.水资源保护, 2025, **41**(5): 11-21.]

[26] Tan ZQ, Zhang Q, Li YL *et al*. Distribution of typical vegetation communities along elevation in Poyang Lake wetlands. *Wetland Science*, 2016, **14**(4): 506-515. [谭志强, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征. 湿地科学, 2016, **14**(4): 506-515.]

[27] Gong WF, Wang HB, Wang XF *et al*. Effect of terrain on landscape patterns and ecological effects by a gradient-based RS and GIS analysis. *Journal of Forestry Research*, 2017, **28**(5): 1061-1072. DOI: 10.1007/s11676-017-0385-8.

[28] Bertassello LE, Rao PSC, Jawitz JW *et al*. Wetlandscape hydrologic dynamics driven by shallow groundwater and landscape topography. *Hydrological Processes*, 2020, **34**(6): 1460-1474. DOI: 10.1002/hyp.13661.

[29] Zweig CL, Reichert BE, Kitchens WM. Implications of discontinuous elevation gradients on fragmentation and restoration in patterned wetlands. *Ecosphere*, 2011, **2**(8): art98. DOI: 10.1890/ES11-00119.1.

[30] Zhou X, Wen ZF, Wu SJ. How topographic factors regulate vegetation vigor in reservoir drawdown zones with different levels of hydrological disturbances *Ecological Indicators*, 2025, **178**: 114006. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114006.

[31] Li YK, Qian FW, Silbernagel J *et al*. Community structure, abundance variation and population trends of waterbirds in relation to water level fluctuation in Poyang Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, **45**(5): 976-985. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.08.002.

[32] Chen Q, Wang ZR, Tang WC *et al*. Carrying capacity of Siberian cranes (Leucogeranus leucogeranus) in the rice fields around Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(13): 5340-5347. DOI: 10.5846/stxb202108102197. [陈青, 汪志如, 汤文超等. 鄱阳湖周边稻田对白鹤的承载力. 生态学报, 2022, **42**(13): 5340-5347.]

[33] Zeng NJ, Liu GH, Wen SB *et al*. New bird records and bird diversity of Poyang Lake national nature reserve, Jiangxi Province, China. *Pakistan Journal of Zoology*, 2018, **50**(4): 1285-1291. DOI: 10.17582/journal.pjz/2018.50.4.1285.1291.

[34] Yu DK, Xu ZW, Liu W *et al*. A preliminary study on wintering waterbirds diversity and trend of sub lakes in Jiangxi Poyang Lake national nature reserve. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(11): 1403-1409. [余定坤, 徐志文, 刘威等. 江西鄱阳湖国家级自然保护区子湖泊越冬水鸟多样性及变化趋势. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(11): 1403-1409.]

[35] Zhu Q, Liu GH, Zeng NJ *et al*. Population sizes and distributions of *Grus leucogeranus*, *Ciconia boyciana* and *Ciconia boyciana* in Poyang lake national nature reserve during the winters of 2007 to 2009. *Wetland Science & Management*, 2012, **8**(4): 53-56. [朱奇, 刘观华, 曾南京等. 鄱阳湖国家级自然保护区白鹤、东方白鹳和小天鹅种群数量与分布. 湿地科学与管理, 2012, **8**(4): 53-56.]

[36] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R *et al*. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 23-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

[37] Sun YY, Huang SF, Li JR *et al*. The downstream flood monitoring application of Myanmar Irrawaddy River based on sentinel-1A SAR. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(2): 282-288. [孙亚勇, 黄诗峰, 李纪人等. Sentinel-1A SAR 数据在缅甸伊洛瓦底江下游区洪水监测中的应用. 遥感技术与应用, 2017, **32**(2): 282-288.]

[38] Tang LY, Liu W, Yang D *et al*. Flooding monitoring application based on the object-oriented method and sentinel-1A SAR data. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, **20**(3): 377-384. [汤玲英, 刘雯, 杨东等. 基于面向对象方法的 Sentinel-1A SAR 在洪水监测中的应用. 地球信息科学学报, 2018, **20**(3): 377-384.]

[39] Teng JK, Zhu YK, Duan HL *et al*. Linking hydrological connectivity and waterbirds habitat suitability in floodplain Wetlands: Implications for wetland management. *Ecological Indicators*, 2025, **176**: 113663. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113663.

[40] Wang H, Chen WB, He L *et al*. Responses of aquatic vegetation coverage to interannual variations of water level in different hydrologically connected sub-lakes of Poyang Lake, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(1): 191-200. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202201.013. [王欢, 陈文波, 何蕾等. 鄱阳湖不同水文连通性子湖水生植被覆盖度对年际水位变化的响应. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 191-200.]

[41] Xia SX, Yu XB, Fan N. The wintering habitats of migrant birds and their relationship with water level in Poyang Lake, China. *Resources Science*, 2010, **32**(11): 2072-2078. [夏少霞, 于秀波, 范娜. 鄱阳湖越冬季候鸟栖息地面积与水位变化的关系. 资源科学, 2010, **32**(11): 2072-2078.]

[42] Shao MQ, Jiang JH, Dai NH. Micro-habitat use of water birds in Poyang Lake and its response to water level during non-breeding period. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(10): 2759-2767. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201610.031. [邵明勤, 蒋剑虹, 戴年华. 鄱阳湖非繁殖期水鸟的微生境利用及对水位的响应. 生态学杂志, 2016, **35**(10): 2759-2767.]

[43] Tang XG, Li HP, Xu XB *et al*. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 296-306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.108.

[44] Li YY, He L, Ge G *et al*. Impacts of extreme hydrological events on waterbirds' wintering habitats area in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2025, **37**(5): 1683-1698. [李映瑜, 何亮, 葛刚等. 极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响.湖泊科学, 2025, **37**(5): 1683-1698.]

[45] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R *et al*. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 23-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

[45] Zhang Q, Liu JY, Singh VP *et al*. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(14): 2562-2576. DOI: 10.1002/hyp.10814.

[46] Zhang C, Li YK, Ren Q *et al*. Species diversity, spatial distribution and protection strategies of wintering waterbirds after extreme summer flood in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1584-1599. DOI: 10.18307/2022.0528. [张超, 李言阔, 任琼等. 鄱阳湖夏季极端水位条件下越冬水鸟多样性、空间分布及其保护对策.湖泊科学, 2022, **34**(5): 1584-1599.]

[47] Teng JK, Xia SX, Liu Y *et al*. An integrated model for prediction of hydrologic anomalies for habitat suitability of overwintering geese in a large floodplain wetland, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, **331**: 117239. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117239.

[48] Xing ZK, Yu ZB, Wei JH *et al*. Lagged influence of ENSO regimes on droughts over the Poyang Lake basin, China. *Atmospheric Research*, 2022, **275**: 106218. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106218.

[49] Qi SH, Liu Y, Yu XB *et al*. Effect of "lake enclosed in autumn" on the habitat of winter bird in Poyang lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(S1): 18-21. [齐述华, 刘影, 于秀波等. "堑秋湖"对鄱阳湖越冬候鸟栖息地功能影响的辨析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(S1): 18-21.]

[50] Bai JP, Zhang H, Zhou HK *et al*. Winter coexistence in herbivorous waterbirds: Niche differentiation in a floodplain, Poyang Lake, China. *Ecology and Evolution*, 2021, **11**(23): 16835-16848. DOI: 10.1002/ece3.8314.

[51] Aharon-Rotman Y, McEvoy J, Zheng ZJ *et al*. Water level affects availability of optimal feeding habitats for threatened migratory waterbirds. *Ecology and Evolution*, 2017, **7**(23): 10440-10450. DOI: 10.1002/ece3.3566.