

极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响*

李映瑜^{1,2}, 何亮^{1,2}, 葛刚^{1,3}, 李述^{1,2**}

(1: 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室)

(2: 南昌大学资源与环境学院)

(3: 南昌大学生命科学学院)

摘 要: 水文过程是影响洪泛湿地水鸟栖息地适宜性和面积变化的重要因素。当前全球变暖引起的极端水文事件频发, 鄱阳湖在 2020 年和 2022 年分别发生了极端洪水和极端干旱, 2015 年又发生了冬季洪水, 但极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响并不清楚。本文基于 2013-2023 年的卫星影像, 提取了每年 9 月至次年 2 月的鄱阳湖越冬水鸟栖息地数据, 然后通过对比极端水文事件年份与平水年的水鸟越冬生境的时空变化, 探讨了极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响。研究发现: 1) 夏季极端洪水、夏秋季极端干旱和冬季洪水导致的鄱阳湖水鸟越冬生境的面积损失分别高达 67.62%、29.83%和 18.18%; 2) 夏季极端洪水和夏秋季极端干旱在 9-11 月导致鄱阳湖水鸟越冬生境面积明显减少, 但它们并未减少水鸟越冬关键期(冬季)的生境面积, 冬季洪水的影响强度虽然不及夏季极端洪水和夏秋季极端干旱, 但是冬季洪水导致水鸟越冬关键期的生境面积平均损失了 14.31%; 3) 极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境的影响存在明显的时空差异, 它与极端水文事件的过程和湖底高程有关。本文的研究结果对鄱阳湖及其类似洪泛湿地的管理以及水鸟保护都有参考意义。

关键词: 极端水文事件; 鄱阳湖; 越冬水鸟; 栖息地

Impacts of extreme hydrological events on waterbirds' wintering habitats area in Poyang Lake

Li Yingyu^{1,2}, Liang He^{1,2}, Ge Gang^{1,3} & Li Shu^{1,2**}

(1: Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang, China)

(2: School of Resources & Environment Nanchang University, Nanchang, China)

(3: School of Life Sciences Nanchang University, Nanchang, China)

Abstract: Hydrological processes are crucial factors affecting the suitability and area changes of waterbird habitats in floodplain wetlands. Currently, extreme hydrological events triggered by global warming have become more frequent. Poyang Lake experienced extreme flooding in 2020 and extreme drought in 2022, and a winter flood in 2015. However, impacts of extreme hydrological events on wintering habitat area of waterbirds in Poyang Lake remain unclear. This study extracted data on the wintering waterbird habitats in Poyang Lake from satellite imagery between 2013 and 2023 for the period from September to

* 2024-08-13 收稿; 2024-11-29 收修改稿。

国家自然科学基金项目(72364023、32360292 和 32260290)联合资助。

** 通讯作者; E-mail: lishu@ncu.edu.cn。

February of the following year. By comparing the spatial and temporal changes in waterbird wintering habitats between extreme hydrological event years with normal hydrological years, the study explores the impact of extreme hydrological events on wintering waterbird habitats area at Poyang Lake. The findings are: 1) The area loss of wintering habitats for waterbirds in Poyang Lake caused by extreme flooding in summer (EFS), extreme drought in late summer and autumn (EDSA), and winter flooding (WF) reached as high as 67.62%, 29.83%, and 18.18%, respectively; 2) EFS and EDSA led to a significant reduction in the area of waterbird wintering habitats from September to November, but they did not reduce the habitat area during the critical wintering period (winter) for the waterbirds. Although the intensity of WF was not as severe as that of EFS and EDSA, WF resulted in an average habitat area loss of 14.31% during the critical wintering period for waterbirds; 3) There are significant spatiotemporal differences in the impact of extreme hydrological events on the waterbirds' wintering habitats in Lake Poyang, which are related to the process of the extreme hydrological events and the lake's elevation. The study's results are valuable for the management of Lake Poyang and similar floodplain wetlands, as well as for waterbird conservation.

Keywords: Extreme hydrological events; Lake Poyang; wintering waterbirds; habitats

洪泛湿地是维持生物多样性的宝贵生态系统^[1, 2]，由全球变暖导致的降水空间分布变化极大地改变了区域的水文节律，进而导致极端水文事件频发^[3, 4]，未来洪泛湿地的变化，将以洪水和干旱的发生频率、持续时间和强度增加为特征^[5, 6]。水鸟是湿地生境质量的重要指示性动物类群^[7, 8]，由于水文过程决定着洪泛湿地生态系统的结构、功能，并在湿地水鸟群落变化中都起着关键作用^[9, 10]，因此极端水文事件对洪泛湿地水鸟栖息地的影响开始备受关注^[1, 11, 12]。

极端水文事件能从多方面影响洪泛湿地中的水鸟栖息地。首先，极端水文事件会导致水生植被大量死亡，从而降低栖息地的质量^[12, 13]。第二，极端洪水能形成大面积水鸟无法利用的深水区域，从而减小草滩、浅水等可利用区域的面积^[7]，而极端干旱则会形成大面积水鸟无法利用的无植被沙滩，从而使栖息地面积减小^[8]。第三，极端干旱还会导致洪泛湿地提前退水，草洲生长时间过长，草食性越冬水鸟到达时已无法取食^[14]，而极端洪水能形成更高的水位，增加水鸟获取食物的难度^[7, 10, 15]。针对极端水文事件对水鸟栖息地造成的不利影响，水鸟只能寻找新的栖息地或者扩展觅食的范围^[12, 16]。

鄱阳湖是国际重要的水鸟越冬地^[17, 18]，平均每年有超过 40 万只水鸟到此越冬，其中包括全球 85% 以上的白鹤^[19, 20]。由于气候变化和人类活动的共同影响，鄱阳湖越冬水鸟正遭受前所未有的生存压力。首先是鄱阳湖的沉水植被已严重退化，导致部分鸟类的食物短缺已成为一种新的常态^[13]，越来越多的水鸟只有到鄱阳湖周边的人工湿地中觅食^[16, 21, 22]。其次是近年来鄱阳湖出现持续的低枯水位，主要表现为秋季水位过低、退水过快、枯水期提前和低枯水位持续时间延长^[23, 24]，提早退水已导致鄱阳湖的苔草提前生长，草食性越冬水鸟到达时已无法取食^[10, 14]。

近年来鄱阳湖流域极端水文事件频发，而且有增加的趋势^[12, 25]，这使鄱阳湖越冬水鸟面临比以往任何时候都更大的生存压力。2020 年鄱阳湖发生特大洪水，湖区 80% 的水文站超过历史最高水位^[26]，2022 年鄱阳湖流域特大干旱，星子站水位于 8 月 6 日退至 11.99m（枯水期）、8 月 19 日退至 9.99m（低枯期），9 月 6 日再退至 7.99m（极枯期），均为 1951 年有记录以来同期最低水位^[27]。有研究发现，即使短期的水文变化也会对鄱阳湖越冬水鸟栖息地的景观格局产生重大影响^[18]，从不同水文年来看，平水年时鄱阳湖能为越冬水鸟提供充足的食物和栖息地，洪水和干旱都会对水鸟越冬造成不利影响^[12, 28]。极端水文事件究竟会减小多少越冬生境面积，尚不清楚。因此，开展极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响研究，对鄱阳湖以及类似洪泛湿地的管理和水鸟保护都有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部，长江以南，是我国最大的淡水湖泊，也是一个典型的洪泛湿地，它的水位受上游赣江、饶河、抚河、信江、修河来水和长江顶托作用的双重影响（图 1）。鄱阳湖的年内水位落差平均超过 10 米，最大年份甚至超过 15 米。鄱阳湖流域旱涝急转事件主要分布在 3-10 月，其中 3-6 月主要表现为“旱转涝”，7-10 月主要表现为“涝转旱”，不同年份也存在一定的时间差异^[29]；鄱阳湖的干旱在 8-9 月频繁发生，一般在 10-11 月停止^[30]。近年来鄱阳湖极端水文事件频发，夏季极端洪水年、极端干旱年、冬季洪水年以及平常水文年鄱阳湖星子站的水位变化见图 2。

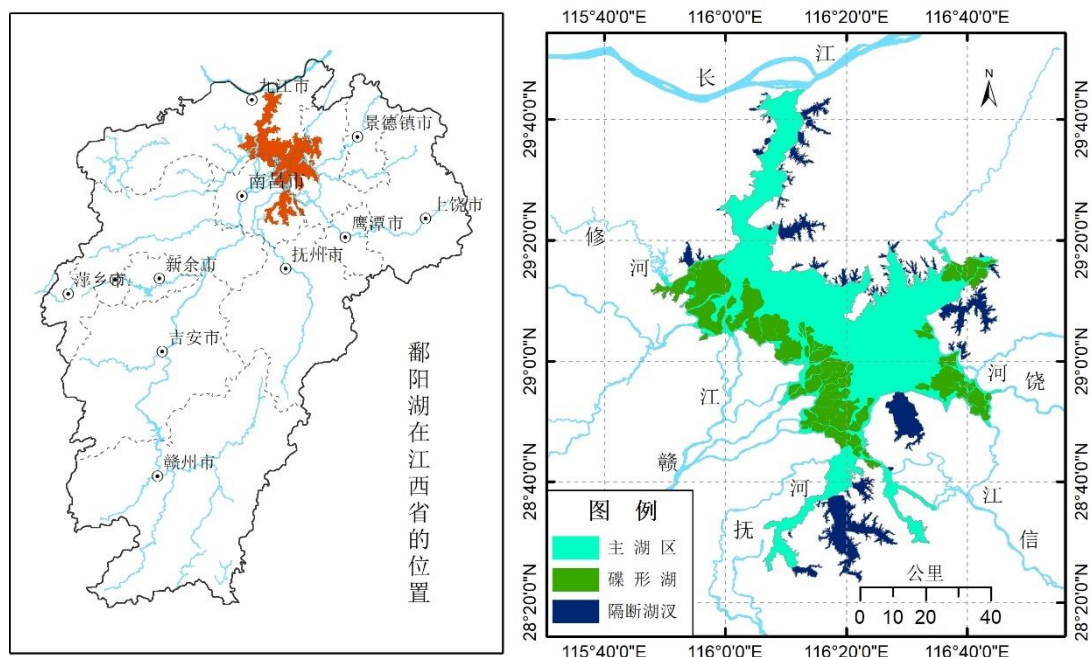


图 1 研究区的位置及其分区
Fig.1 Location and zoning of the study area

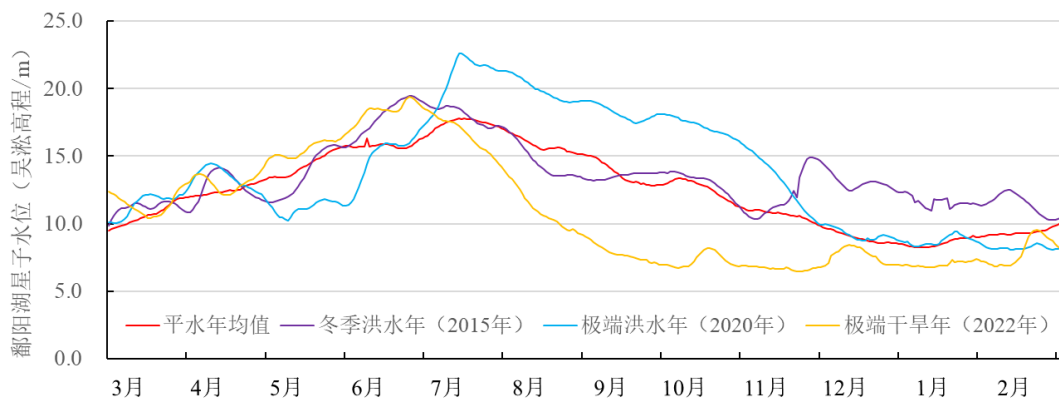


图 2 不同水文年鄱阳湖星子水文站水位变化图

Fig.2 Variation of water levels at the Xingzi Hydrological Station in Lake Poyang for different years

每到秋季，鄱阳湖水位逐渐下降，依次形成浅水、泥滩、草洲等湿地景观，能为不同类群水鸟提供觅食和栖息场所，由于草洲的生长时间与水鸟的到来重合，使鄱阳湖成为候鸟的天堂^[31]。在三峡大坝运行与采砂等人类活动的共同作用下，鄱阳湖出现持续低枯水位、枯水期提前和枯水期延长等现象^[22]。

1.2 研究数据

Landsat 卫星数据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 1 GRD 格式，哨兵 2 (Sentinel-2) 多光谱数据为 L2A 格式的地表反射率数据，哨兵数据都来自欧空局网站 (<https://scihub.copernicus.eu/>)。鄱阳湖地形数据为 2010 年实测数据，格式为 5m×5m 的栅格，水位数据来源于江西省水文监测中心，所用卫星影像及当日星子站水位见表 1。

表 1 卫星影像和对应的星子站水位

Tab.1 Satellite images and corresponding water levels of the Xingzi hydrological station

年份	参数	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月
2013	卫星/日期	LC/10 月 5 日	LC/10 月 21 日	LC/11 月 22 日	LC/12 月 24 日	LC/1 月 9 日	LE/2 月 2 日
	水位	11.59	7.57	7.12	7.26	5.92	5.6
2014	卫星/日期	S1/10 月 3 日	LC/10 月 24 日	S1/11 月 20 日	S1/12 月 19 日	LE/1 月 4 日	LC/2 月 13 日
	水位	14.32	9.61	9.63	7.6	6.24	5.86
2015	卫星/日期	LC/9 月 9 日	LE/10 月 19 日	S1/11 月 20 日	LC/12 月 30 日	S1/1 月 19 日	LC/2 月 16 日
	水位	11.64	10.83	12.54	10.36	9.68	8.23
2016	卫星/日期	S2/9 月 24 日	S1/10 月 15 日	S2/11 月 3 日	LC/12 月 16 日	S1/1 月 13 日	S2/2 月 11 日
	水位	8.78	7.98	8.72	7.5	7.9	6.6
2017	卫星/日期	LC/9 月 14 日	S2/10 月 24 日	LE/11 月 9 日	LC/12 月 19 日	S2/1 月 12 日	LE/2 月 13 日
	水位	12.21	13.8	11.37	6.45	6.9	7.44
2018	卫星/日期	S2/9 月 4 日	LE/10 月 11 日	S2/11 月 23 日	S1/12 月 16 日	LC/1 月 23 日	S1/2 月 14 日
	水位	12.54	9.79	10.04	8.43	9.52	7.42
2019	卫星/日期	S2/9 月 9 日	S2/10 月 4 日	LE/11 月 15 日	S2/12 月 13 日	S2/1 月 30 日	S1/2 月 27 日
	水位	10.53	8.92	7.47	5.58	8.47	8.51
2020	卫星/日期	S2/9 月 3 日	S2/10 月 23 日	S2/11 月 12 日	S2/12 月 22 日	LC/1 月 28 日	S2/2 月 20 日
	水位	17.03	14.58	11.22	7.22	6.42	6.36
2021	卫星/日期	S2/9 月 18 日	S2/10 月 3 日	LC/11 月 12 日	S2/12 月 2 日	LC/1 月 15 日	LC092 月 24 日
	水位	15.01	14.55	9.35	7.45	6.13	10.71
2022	卫星/日期	LC/9 月 12 日	LC/10 月 14 日	S2/11 月 12 日	S2/12 月 12 日	S2/1 月 11 日	S2/2 月 15 日
	水位	5.82	6.31	4.78	6.25	5.07	7.63
2023	卫星/日期	S2/9 月 18 日	S2/10 月 23 日	LC/11 月 18 日	LC09/12 月 28 日	LC09/1 月 13 日	S1/2 月 18 日
	水位	9.66	9.72	8.89	6.83	5.9	9.02

注：S1 和 S2 分别表示 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据，LE 表示 Landsat7 ETM+数据，LC 表示 Landsat8/9 OLI 数据；水位为黄海高程，单位为米；2020 为极端洪水年，2022 为极端干旱年，2015 为冬季洪水年，其它年份为平水年。

1.3 研究区分区

基于水文过程的差异和现有研究成果^[28]，鄱阳湖可划分为主湖区（2278 km²）、碟形湖（972 km²）和人控湖汊（487 km²）三个区域。主湖区是指水文过程仅受自然降水和自然退水过程影响的水体连通区域；碟形湖是指秋冬季退水过程受人为因素影响的区域；人控湖汊是指鄱阳湖圩堤之外人为控制水位的区域，三个区域的分布见图 1。

碟形湖是鄱阳湖内的碟形洼地，也称“湖中湖”。“塹秋湖”是碟形湖群广泛存在的一种传统捕鱼方式，渔民利用人工闸门在秋季蓄水拦鱼，冬季排水抓鱼^[32]。在鄱阳湖的退水过程中，蓄水捕鱼直接导致碟形湖的退水过程变缓延长，它不仅能减缓水文变化对湿地植被生长的影响^[33, 34]，而且能显著提高碟形湖中适宜水鸟越冬的栖息地面积^[35]。碟形湖缓慢下降的水位，逐渐伸展的泥滩，周边湿生与水生植物群落有序分布，能为越冬水鸟持续提供丰富的食物和歇息环境，因此全湖 70%以上的水鸟在碟形湖区域越冬^[31]。

1.4 栖息地分类体系

近年来，到鄱阳湖越冬的水鸟多达 60 万只/年，种类超过 60 种^[21]，不同种类水鸟利用的栖息地虽然存在差异，但也普遍存在重叠^[36]，因此，从单种水鸟的视角无法反映鄱阳湖越冬水鸟对栖息地的整体需求。本文将越冬水鸟划分为雁类、鸕鹚类、鹭鸶类、鸭类、鹤类、小天鹅、深水区鸟类七个功能团类型，各功能团的主要越冬生境见图 3。

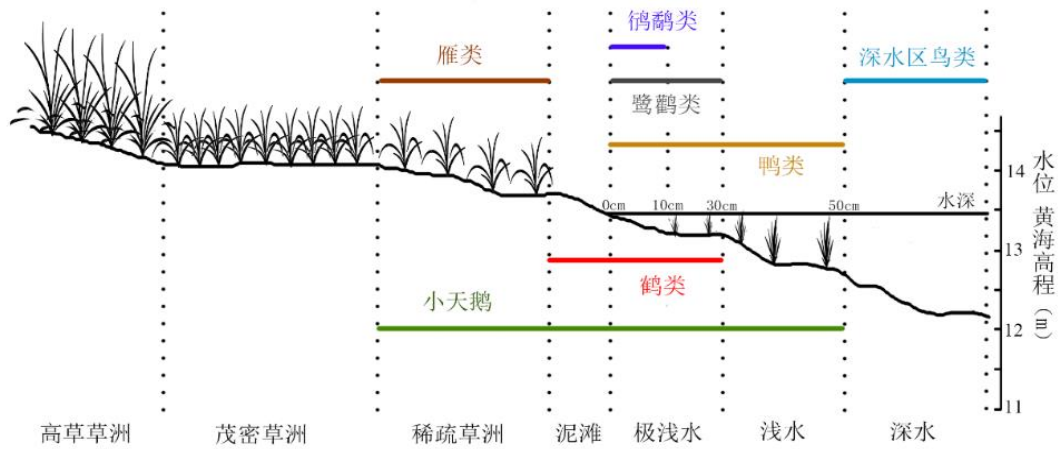


图 3 鄱阳湖自然保护区大湖池越冬水鸟的栖息生境分布

Fig.3 Distribution of wintering waterbird habitats in the Dahuchi of Lake Poyang Nature Reserve

根据越冬水鸟的食性及觅食生境需求^[37-39],并参考现有的水鸟栖息生境分类体系^[40,41],将鄱阳湖越冬水鸟栖息地分为:深水(水深>50cm)、浅水(30cm<水深≤50cm)、极浅水(0cm<水深≤30cm)、泥滩、沙滩(包括干涸的泥滩)、稀疏草洲、高草草洲、茂密草洲和湖中高地(高程≥21 m)。

1.5 栖息生境遥感分类方法

构建水鸟越冬栖息地分类体系过程中,综合了水文、水鸟越冬习性、地形等多方面的知识,因此本文用基于知识的决策树分类方法逐步提取各类栖息地类型。基于专家知识的决策树分类方法是一种广泛使用的遥感分类方法^[42],它不仅可以解决数据中的不确定性和分类参数的一致性,而且通过引入多源数据,能明显提高分类的精度^[43,44]。越冬水鸟栖息生境遥感识别方法及流程见图 4。

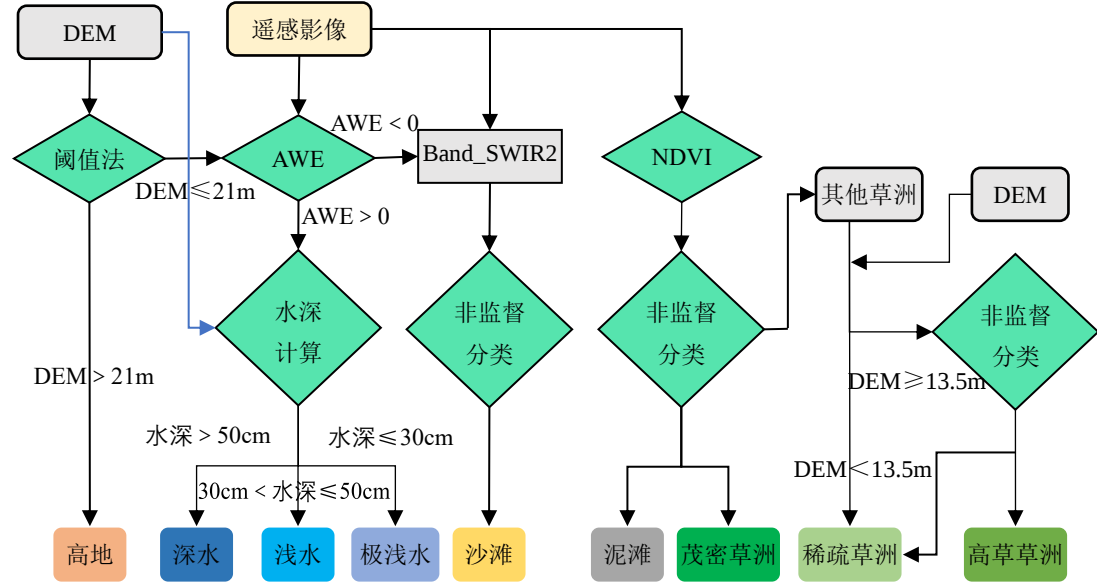


图 4 鄱阳湖越冬水鸟栖息生境遥感识别流程图

Fig.4 Flowchart of remote sensing identification for wintering waterbird habitats in Lake Poyang

- 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 21m 的区域;
- 2) 水域: 先利用 AWI (Automated Water Extraction Index) 水体指数从遥感影像提取水域范围^[45], 然后再结合 DEM 数据计算每个像元的水深^[46], 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^[47]，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 值中等的区域为其它草洲；

5) 稀疏草洲和高草草洲：其它草洲中将高程小于 13.5 米的区域划分为稀疏草洲，高于 13.5 米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。

对于个别无多光谱影像的月份，本文先用当月的 Sentinel-1 影像提取三类水域，然后将其融合到临近月份的栖息地分类结果中，并基于水位下降过程中景观的演替规律完成部分栖息地类型的转化，从而得到该月的栖息地分类数据。

2 结果与分析

2.1 湿地景观分类结果及分类精度

共完成 66 景卫星影像的湿地景观类型识别。极端水文情景下鄱阳湖湿地景观分布见图 5，其中 A、B、C、D 分别是极端洪水、极端干旱、冬季洪水和正常水文情景下的湿地景观。由图 5 可见，极端洪水形成以水域占主导的湿地景观，越冬水鸟所需的泥滩和稀疏草洲几乎为 0；极端干旱导致无植被的沙滩面积大增，越冬水鸟所需的浅水、极浅水和泥滩面积大量减少；冬季洪水导致水域面积较正常水文年的同期值明显增加，特别是水鸟无法利用的深水类型，而泥滩和稀疏草洲面积明显减少。

12 月和 1 月是越冬水鸟数量最多，也是可利用越冬生境面积最大的月份。本文对 2021 年 12 月 2 日和 2024 年 1 月 13 日的景观分类结果进行了精度验证，首先对两期数据都产生 1000 个随机点，然后基于影像进行目视判别，给出每个随机点的验证类型值，最后对 2000 个随机点的结果一并计算分类精度，得到表 2 所示的分类精度评价表。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三类水体内部和三类草洲内部。

表 2 分类精度评价混淆矩阵
Tab.2 Confusion matrix for classification accuracy evaluation

	深水	浅水	极浅水	泥滩	沙滩	稀疏草洲	高草草洲	茂密草洲	高地	合计	用户精度
深水	318	3	11	2	0	1	2	1	0	338	94.08%
浅水	6	56	1	0	0	0	0	0	0	63	88.89%
极浅水	13	6	253	7	0	2	1	1	0	283	89.40%
泥滩	2	0	14	314	8	7	1	0	0	346	90.75%
沙滩	0	0	1	9	191	13	2	0	0	216	88.43%
稀疏草洲	1	0	2	11	11	388	14	10	0	437	88.79%
高草草洲	0	0	0	1	0	16	113	3	0	133	84.96%
茂密草洲	0	0	0	1	1	6	4	149	0	161	92.55%
高地	0	0	0	0	0	0	0	0	23	23	100.00%
合计	340	65	282	345	211	433	137	164	23	2000	
生产者精度	93.53%	86.15%	89.72%	91.01%	90.52%	89.61%	82.48%	90.85%	100.00%		
Kappa 系数：0.8854					总体精度：90.25%						

2.2 不同水文年的湿地景观组成及其年内变化

2013-2023 年不同月份鄱阳湖各湿地景观类型的面积变化见图 6，可见鄱阳湖水鸟越冬栖息地的景观组成存在明显的年内和年际差异。即使是平常水文年，鄱阳湖湿地景观组成也存在明显的年内和年际差异，因此，平水年均值能更好地反映平常水文年鄱阳湖湿地景观结构和变化特征。图 6 可见，深水、浅水、极浅水类型的面积都随着鄱阳湖的退水过程逐渐变小，一般在 12 月或 1 月时面积最小。泥滩、沙滩、稀疏草洲、高草草洲的面积会因水退而逐渐增大。沙滩和高草类型的面积先增加然后逐渐减少。湖中高地的面积则长期保持不变。

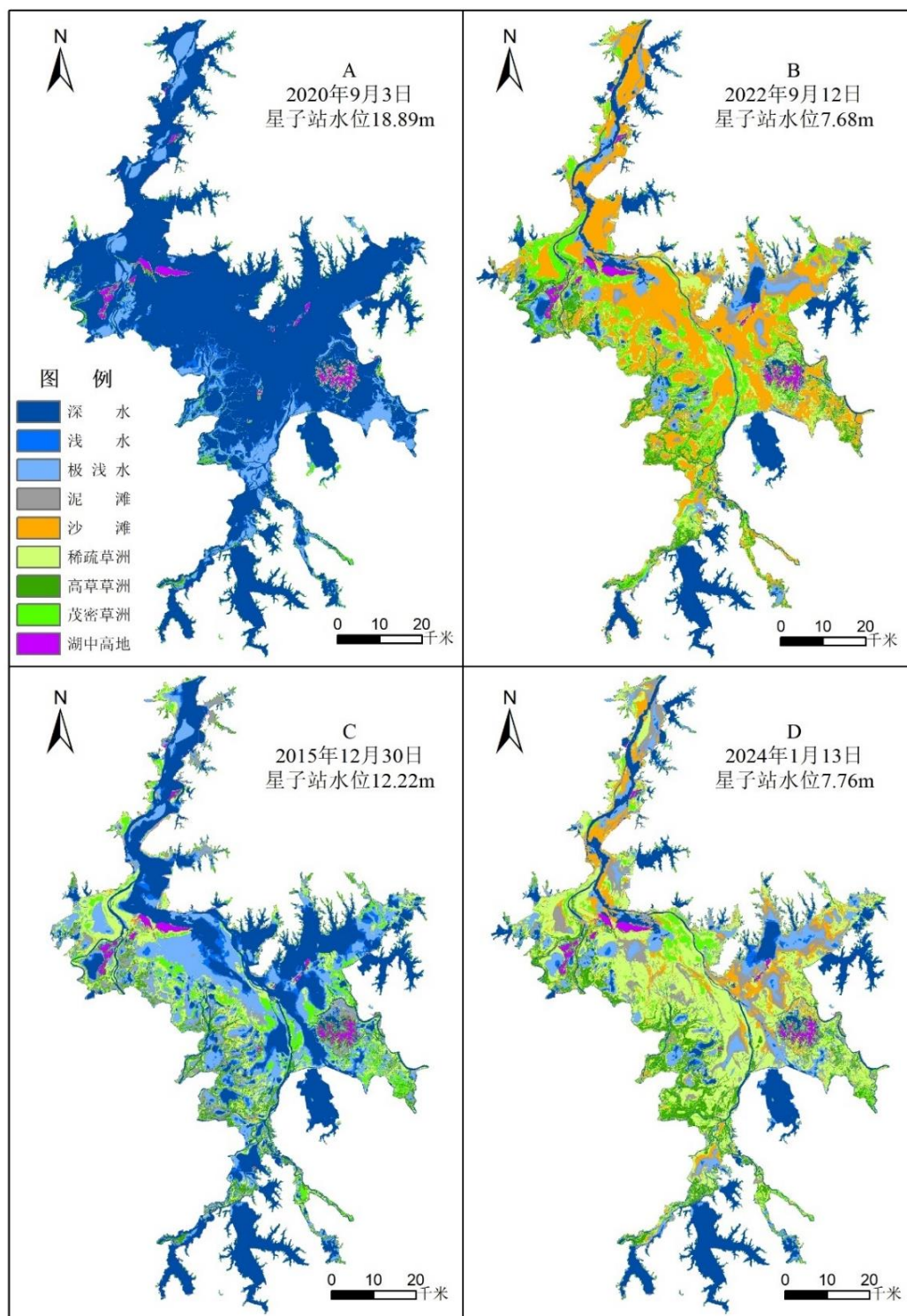


图 5 不同水文情景下鄱阳湖的湿地景观

Fig.5 Wetland landscapes of Lake Poyang under different hydrological scenarios

(图中 A: 2020 极端洪水年; B: 2022 极端干旱年; C: 2015 冬季洪水年; D: 2023 冬季平常水文年)

2020 年极端洪水，9 月 3 日子站水位高达 17.03 米，使深水的面积占比超过 80%，而其它类型（湖中高地类型除外）的面积都低于正常年份。随着洪水的消退，浅水、极浅水、泥滩和草洲的面积依次增长，但各类型的面积恢复到平水年均值的时间明显不同。深水和泥滩的面积在 11 月达到常年水平，而浅水、极浅水和各类草洲的面积在 12 月也恢复到常年水平，可见夏季极端洪水并未明显改变冬季的景观结构。

2022 年极端干旱，9-11 月的深水、浅水和极浅水的面积都明显小于正常水文年份，而沙滩面积由平常水文年的不足 150 km² 增加到 1200 km²，面积净增加超过 1000 km²，高草草洲的面积也有明显增加。2022 年 12 月至次年 2 月，由于干旱消退，深水、浅水都恢复到正常水文年的面积，大面积沙滩变成稀疏草洲类型，可见 2022 年夏秋季的极端干旱并未明显改变冬季的景观结构。

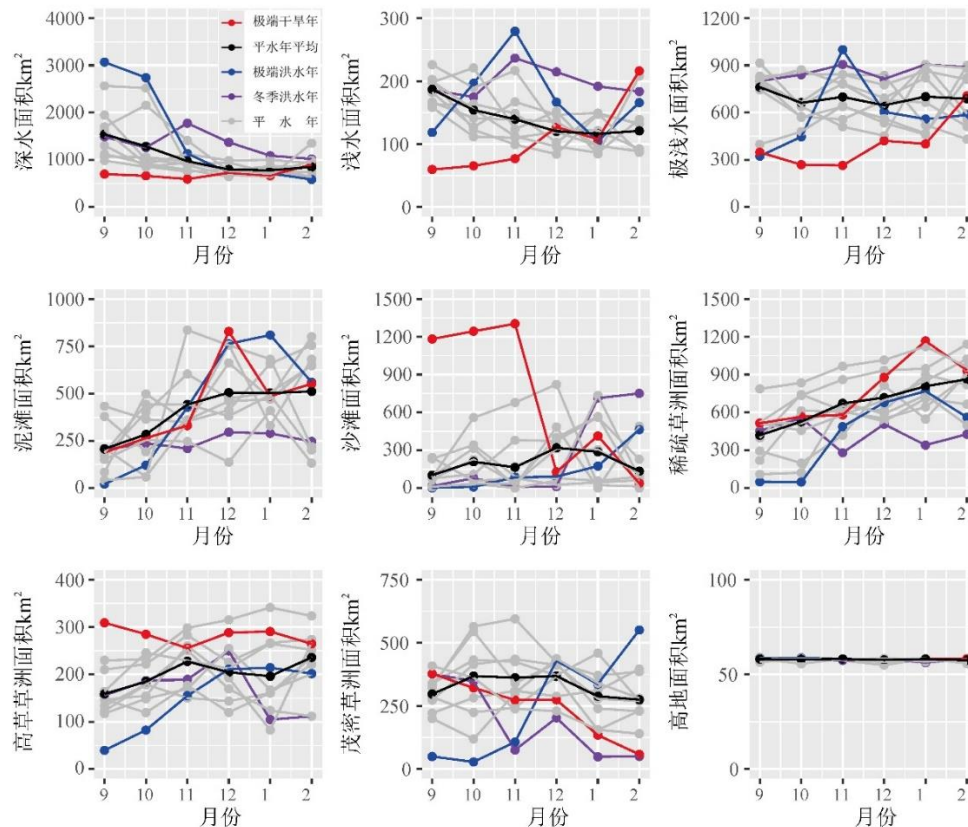


图 6 2013-2023 年鄱阳湖各湿地景观类型的面积变化

Fig.6 Area changes of various wetland landscape types in Lake Poyang from 2013 to 2023

在冬季洪水的 2015 年，景观与其它年份的差异发生在 11 月至次年 2 月。从图 6 可见，冬季洪水造成各类水域面积明显大于其它年份的同期值，特别是越冬水鸟无法利用的深水类型。各类草洲面积总体减小，1-2 月的沙滩类型面积大增，而多数水鸟能利用的泥滩和稀疏草洲的面积都明显减少。由于冬季是鄱阳湖越冬水鸟对生境需求最大的时期，泥滩和稀疏草洲的面积减少势必会对水鸟顺利越冬造成不利影响。

鄱阳湖湿地景观组成的主成分分析结果见图 7。在不同月份，第一、第二主成分的主要决定因子都有变化，说明鄱阳湖的景观组成在秋冬季有很大变化。第一、第二主成分的贡献率之和在 66.4%—81.3%之间，它们代表了鄱阳湖秋冬季景观结构的主要信息。

从图 7 中 9 月的 PCA 分析结果来看，2020 年和 2022 年都在 95%置信区间之外，表明极端洪水和极端干旱都明显地改变了 9 月份的湿地景观。PC1 的贡献率为 47.3%，深水面积与其密切负相关；PC2 贡献率为 29.3%，沙滩与其密切负相关，表明 2020 年极端洪水对 9 月湿地景观的改变要大于 2022 年极端干旱导致的景观变化。从图 7 中 10 月和 11 月的结果来看，由于洪水消退，2020 年的极端洪水并未导致 10-11 月鄱阳湖湿地景观的明显变化，但 2022 年的极端干旱却明显改变了 10-11 月鄱阳湖的湿地景观。

从图 7 中 11 月至次年 2 月的结果看，2015 年的湿地景观连续 4 个月份都与其他年份显著不同，这说明 2015 年冬季洪水明显改变了湿地的景观结构，12 月和 1 月是鄱阳湖越冬水鸟最多的月份，冬季洪水

导致湿地景观的明显变化，必定会对水鸟越冬造成不利影响。

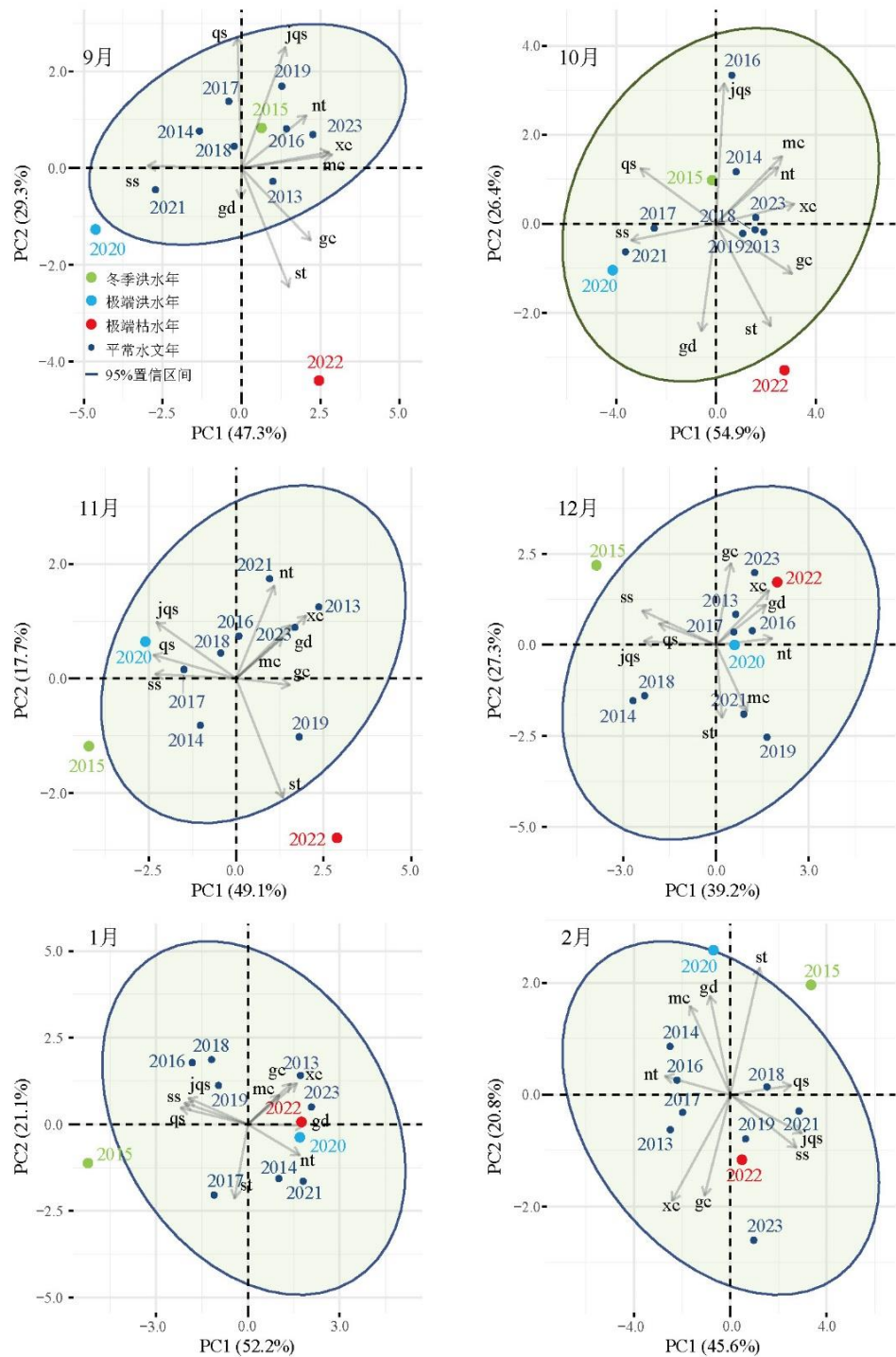


图 7 鄱阳湖湿地不同月份景观主成分分析图(ss, 深水; qs, 浅水; jqs, 极浅水; nt, 泥滩; st, 沙滩; xc, 稀疏草洲; gc, 高草草洲; mc, 茂密草洲; gd, 湖中高地)

Fig.7.Principal component analysis of wetland landscapes in Lake Poyang across different months

2.3 不同水文年鄱阳湖水鸟越冬生境的面积变化

从图 3 可见，稀疏草洲、泥滩、极浅水、浅水和深水是鄱阳湖水鸟越冬的五类生境。由于绝大多数水鸟都无法利用深水越冬，深水面积越大，则越不利于鄱阳湖越冬水鸟的整体越冬，所以本文对深水类型进行单独统计。由于稀疏草洲、泥滩、极浅水和浅水同时能为不同的功能团提供越冬生境，而且不同水鸟利用的生境又普遍存在交叉和重叠，因此，本文对该四类越冬生境的总面积进行统计和分析，不同水文年鄱阳湖水鸟越冬生境面积见表 3。

平水年均值代表了众多正常水文年中水鸟越冬生境面积的平均水平，它能更好地表征鄱阳湖水鸟越冬生境的正常水平和变化特征。从表 3 可见，越冬生境的平水年均值从 9 月的 1581.66 km² 逐步增加到次年 2 月的 2134.98 km²，相应的面积占比从 42.37% 增加到 57.14%，表明不同月份鄱阳湖提供的水鸟越冬生境数量有所变化，并呈逐步增加的趋势。

表 3 不同水文年鄱阳湖水鸟越冬生境逐月面积及占比

Tab.3 Areas and proportions of waterbird habitats in Lake Poyang across different hydrological years and months

月份	极端洪水年（2020）			极端干旱年（2022）			冬季洪水年（2015）			平水年均值		
	越冬生境面积	越冬生境占比	越冬生境面积占比	越冬生境面积	越冬生境占比	越冬生境面积占比	越冬生境面积	越冬生境占比	越冬生境面积占比	越冬生境面积	越冬生境占比	越冬生境面积占比
9 月	512.22	13.73	82.25	1109.79	29.69	18.73	1641.90	43.93	39.85	1581.66	42.37	41.12
10 月	811.48	21.75	73.47	1164.95	31.17	17.74	1807.06	48.35	33.70	1646.30	44.10	34.37
11 月	2192.55	58.76	30.37	1251.78	33.49	15.90	1631.12	43.64	47.53	1916.07	51.30	28.42
12 月	2212.50	59.34	19.51	2254.00	60.44	19.48	1830.21	49.13	36.86	1971.23	52.79	23.05
1 月	2241.53	59.97	19.09	2162.29	57.97	17.97	1726.61	46.17	29.13	2082.99	55.74	21.77
2 月	1871.53	50.16	15.70	2407.23	64.59	24.18	1746.93	46.74	27.27	2134.98	57.14	23.25

注：面积单位为 km²，占比单位为 %

极端洪水年越冬生境占湿地总面积的 13.73%-59.97%，在洪水尚未消退的 9 月，越冬生境仅有 512.22 km²，比同期的平水年均值减少了 67.62%，而深水面积占比高达 82.25%，随着洪水的迅速消退，越冬生境在 11 月就恢复到正常年份水平。极端干旱年越冬生境占湿地总面积的 29.69%-64.59%，在干旱的秋季，其越冬生境面积比平水年均值减少了 471.87-664.29 km²，随着干旱缓解，冬季的越冬生境面积恢复到常年水平。冬季洪水年越冬生境占湿地总面积的 43.64%-49.13%，冬季洪水导致次年 1 月和 2 月越冬生境面积占比分别减少 9.57 和 10.40 个百分点，面积分别减少 356.38 km² 和 388.05 km²。

上述不同水文年越冬生境的面积变化说明，鄱阳湖水鸟越冬生境的面积大小与水文过程密切相关，极端洪水年和极端干旱年的最小越冬生境面积占比分别为 13.73% 和 29.69%，都明显小于平水年的均值 42.37%，说明极端洪水和极端干旱都会减少水鸟的越冬生境面积，但是这些影响仅发生在水鸟越冬的初期，冬季时越冬生境面积又恢复到正常水平。冬季洪水的强度虽然不大，但它减少了水鸟越冬关键期的生境面积。

2.4 不同水文年三个分区内的水鸟越冬生境面积变化

根据图 1 的三个分区，本文统计了不同水文年中，不同月份各个分区内水鸟越冬生境的面积信息，从表 4 可见，不同水文年和不同月份，水鸟越冬生境面积和面积占比都有明显的空间差异。从表 4 中的平水年均值来看，主湖区逐月的越冬生境面积占比值分别为 42.49%、45.70%、53.28%、54.20%、58.11%、59.57%，碟形湖区的值分别为 56.59%、55.66%、63.26%、65.58%、66.85%、68.67，人控湖汉区的值分别为 13.38%、13.66%、18.29%、20.78%、22.60%、22.83%。三个分区越冬生境面积基本都呈逐月增加的趋势，碟形湖区的越冬生境面积占比值高于主湖区 10 个百分点左右，而人控湖汉内的越冬生境面积占比值远远小于主湖区和碟形湖区。可见单位面积碟形湖中的水鸟越冬生境面积最大，主湖区次之，人控湖汉最小，单位面积内碟形湖中的水鸟越冬生境面积基本是人控湖汉内的 3 倍。

表 4 不同水文年鄱阳湖各分区内的水鸟越冬生境面积及占比
Tab.4 Areas and proportions of wintering waterbird habitats in different regions of Lake Poyang across different hydrological years

月份	年份	主湖区			碟形湖			人控湖汉		
		越冬生境面积(km ²)	越冬生境占比(%)	越冬生境深水面积占比(%)	越冬生境面积(km ²)	越冬生境占比(%)	越冬生境深水面积占比(%)	越冬生境面积(km ²)	越冬生境占比(%)	越冬生境深水面积占比(%)
9 月	极端洪水年	257.26	11.30	83.71	209.88	21.71	76.99	45.09	9.25	85.91
	极端干旱年	716.72	31.46	10.06	343.69	35.36	5.46	49.38	10.13	85.67
	冬季洪水年	955.42	41.94	41.76	625.19	64.32	13.29	61.29	12.57	83.84
	平水年均值	967.24	42.49	40.78	549.18	56.69	21.48	65.24	13.38	81.68
10 月	极端洪水年	386.69	16.99	77.11	357.49	36.96	60.02	67.30	13.80	83.17
	极端干旱年	759.32	33.33	8.81	346.56	35.65	5.11	59.06	12.11	84.64
	冬季洪水年	1121.11	49.22	31.52	625.70	64.37	13.22	60.25	12.35	84.71
	平水年均值	1040.37	45.70	30.71	538.90	55.66	18.80	66.66	13.66	82.37
11 月	极端洪水年	1384.28	60.82	28.08	661.77	68.41	17.77	146.50	30.04	66.01
	极端干旱年	787.14	34.56	7.40	378.24	38.91	4.07	86.40	17.72	79.18
	冬季洪水年	938.32	41.20	49.94	605.03	62.30	26.46	87.77	17.95	78.16
	平水年均值	1213.08	53.28	24.56	613.33	63.26	12.33	89.26	18.29	78.39
12 月	极端洪水年	1467.31	64.50	12.62	608.35	62.97	11.29	136.84	28.06	67.99
	极端干旱年	1500.66	65.96	13.43	666.65	68.98	3.69	86.69	17.77	79.00
	冬季洪水年	1037.26	45.61	40.33	684.50	71.02	10.31	108.46	22.24	73.10
	平水年均值	1233.98	54.20	19.08	635.39	65.58	6.47	101.39	20.78	74.53
1 月	极端洪水年	1464.41	64.29	12.52	639.37	65.78	10.70	137.75	28.24	66.47
	极端干旱年	1409.10	61.93	10.96	666.41	68.94	3.62	86.78	17.79	79.07
	冬季洪水年	1092.23	47.94	28.04	538.14	55.36	7.90	96.24	19.68	76.42
	平水年均值	1323.40	58.11	17.90	648.92	66.85	5.43	110.29	22.60	72.35
2 月	极端洪水年	1124.89	49.42	10.51	565.98	58.51	8.48	180.66	37.05	54.27
	极端干旱年	1553.64	68.31	20.99	766.94	79.50	4.39	86.66	17.77	78.16
	冬季洪水年	1107.45	48.62	25.91	528.34	54.35	7.83	111.14	22.79	72.38
	平水年均值	1356.67	59.57	20.29	666.85	68.67	5.57	111.46	22.83	72.28

2020 年夏季极端洪水，导致 9 月的水位仍然很高，主湖区和碟形湖的深水面积占比分别高达 83.71% 和 76.99%，而它们的越冬生境面积占比仅为 11.30% 和 21.71%，都比平水年同期值低 30 个百分点以上，2020 年 10 月越冬生境面积占比也比同期平水年均值低 28 个百分点以上。从平水年 9-10 月的越冬生境面积来看，主湖区为 967.24 km² 和 1040.37km²，碟形湖区为 549.18 km² 和 538.9 km²，主湖区基本是碟形湖区的 2 倍，2020 年 9-10 月主湖区越冬生境面积分别为 257.26 km² 和 386.69 km²，碟形湖区对应值为 209.88 km² 和 346.56 km²，二者差异明显缩小，可见极端洪水对主湖区的影响更大，这可能是因为碟形湖区的高程整体上比主湖区高，在相同的水位下，碟形湖的深水面积占比更小。

2022 夏秋极端干旱，9-11 月主湖区越冬生境面积占比分别为 31.46%、33.33%、34.56%，9-11 月主湖区平水年均值分别为 42.49%、45.70%、53.28%，越冬生境的面积占比相对平水年同期值减少 10 个百分点左右。在碟形湖区，2022 年 9-11 月数据为 35.36%、35.65%、38.91%，平水年均值分别为 56.69%、55.66%、63.26%，越冬生境的面积占比相对平水年同期值减少都在 20 个百分点以上，说明极端干旱对水鸟越冬生境的影响在碟形湖区更大，可能是由于碟形湖的平均高程比主湖区更高，更容易受地下水位下

降的影响。

2015 年鄱阳湖发生冬汛，从 11 月中下旬到次年 2 月中旬，持续 3 个月，冬汛期间星子站平均水位高出多年同期平均值 3.38m（见图 2），导致水鸟越冬生境发生明显的时空变化。表 4 可见，11 月至次年 2 月，主湖区的越冬生境面积占比都小于 50%，基本都比平水年均值低 10 个百分点左右。在碟形湖区，11 月至次年 2 月的越冬生境面积占比分别为 62.30%、71.02%、55.36%、54.35%，11-12 月的越冬生境面积占比并未因洪水而减小，次年 1-2 月却比平水年均值分别下降了 11.49 和 14.32 个百分点。可见冬季洪水对主湖区和碟形湖区的影响也有明显的时空差异。

人控湖汉通过堤坝与鄱阳湖的水体隔断，因此它不受鄱阳湖水位波动的影响。从枯水年的深水面积占比来看，2023 年 1 月，主湖区和碟形湖的深水面积占比分别低至 10.96%和 3.62%，而人控湖汉的深水面积占比却高达 79.07%，表明人为控制是人控湖汉水文过程的决定性因素，即使是枯水年，人控湖汉也能长期维持高水位。在 11 月至次年 2 月的四个月中，人控湖汉内的深水面积占比情况是：极端洪水年分别为 66.01%、67.99%、66.47%、72.35%，平水年均值分别为 78.39%、74.53%、72.35%、72.28%、极端干旱年分别为 79.18%、79.00%、79.07%、78.16%，可见人控湖汉内的深水面积占比排序为：极端干旱年>平水年均值>极端洪水年，与自然的水文过程完全相反，这可能是人为排水防洪和蓄水抗旱的结果。12 月至次年 2 月，人控湖汉内越冬生境面积占比情况是：极端洪水年分别为 28.06%、28.24%、37.05%，平水年均值分别为 20.78%、22.06%、22.83%，极端干旱年分别为 17.77%、17.79%、17.77%，水鸟越冬生境占比的排序为：极端洪水年>平水年均值>极端干旱年，也与碟形湖的排序完全相反，说明人控湖汉内越冬生境面积也主要受人为控水过程的影响。

2.5 冬季洪水年主要景观类型和越冬生境的面积变化

冬季洪水减少了水鸟越冬关键期的越冬生境面积，有必要进一步分析其景观变化过程和水鸟越冬生境面积减小的原因。冬季洪水年主湖区的主要景观类型和越冬生境的统计信息见表 5。从表 5 可见，冬季洪水导致 2015 年 11 月至次年 2 月主湖区的越冬生境面积占比基本都比平水年均值下降了 10 个百分点，11 月和 12 月主湖区水鸟越冬生境减少的主要原因是洪水导致深水面积大增，泥滩和稀疏草洲的面积大幅减少。进入 1 月至 2 月，洪水逐步消退，主湖区越冬生境面积减少的主要原因是沙滩面积大量增加。

表 5 冬季洪水年主湖区主要景观类型面积和越冬生境面积（面积单位：km²）

Tab.5 Major landscape types and wintering habitat information in the main lake area (area unit: km²)										
月份	类型	深水	浅水	极浅水	泥滩	沙滩	稀疏草洲	越冬生境面积	越冬生境占比	深水面积占比
11 月	冬季洪水年	1137.26	138.76	560.94	113.51	4.72	125.11	938.32	41.20%	49.94%
	平水年均值	559.23	82.92	441.71	289.37	122.88	399.09	1213.08	53.28%	24.56%
12 月	冬季洪水年	917.23	140.94	491.34	136.89	8.33	268.09	1037.26	45.61%	40.33%
	平水年均值	434.32	74.58	417.28	299.47	222.22	442.65	1233.98	54.20%	19.08%
1 月	冬季洪水年	638.99	128.60	593.14	175.93	429.37	194.56	1092.23	47.94%	28.04%
	平水年均值	407.57	74.56	457.43	300.57	236.03	490.85	1323.40	58.11%	17.90%
2 月	冬季洪水年	590.22	122.79	585.04	140.13	457.22	259.50	1107.45	48.62%	25.91%
	平水年均值	462.06	77.17	444.04	302.70	146.69	532.75	1356.67	59.57%	20.29%

冬季洪水年碟形湖区的主要景观类型和越冬生境的统计信息见表 6，从表 6 可见，11 -12 月，碟形湖区越冬生境面积与平水年均值基本持平，但次年 1-2 月碟形湖区越冬生境面积占比同期平水年均值都下降了 10 个百分点以上，主要表现为沙滩面积大量增加，而泥滩和稀疏草洲面积明显减少。上述结果表明，11-12 月冬季洪水处于高水位时，洪水对主湖区的影响明显大于碟形湖区，2016 年 1-2 月洪水消退后，主湖区和碟形湖区的越冬生境面积占比都下降了 10 个百分点以上，主要表现为沙滩面积增加，泥滩和稀疏草洲面积明显减小。

表 6 冬季洪水年碟形湖区主要景观类型面积及越冬生境信息（面积单位：km ² ）										
Tab.6 Major landscape types and wintering habitat information in the dish-shaped lake area (area unit: km ²)										
月份	类型	深水	浅水	极浅水	泥滩	沙滩	稀疏草洲	越冬生境面积	越冬生境占比	深水面积占比
11 月	冬季洪水年	256.94	78.48	300.88	73.75	2.83	151.92	605.03	62.30%	26.46%
	平水年均值	119.53	51.63	237.72	103.48	19.81	220.51	613.33	63.26%	12.33%
12 月	冬季洪水年	99.39	59.51	276.66	114.31	3.21	234.02	684.50	71.02%	10.31%
	平水年均值	62.64	39.25	202.17	149.95	53.40	244.01	635.39	65.58%	6.47%
1 月	冬季洪水年	76.83	45.86	269.40	85.79	278.02	137.09	538.14	55.36%	7.90%
	平水年均值	52.70	33.23	217.53	142.96	88.97	255.20	648.92	66.85%	5.43%
2 月	冬季洪水年	76.11	42.76	256.00	75.31	285.19	154.27	528.34	54.35%	7.83%
	平水年均值	54.06	33.46	217.15	145.42	51.74	270.81	666.85	68.67%	5.57%

3 讨论

3.1 极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响

极端水文事件会改变湿地的景观，必然引起鄱阳湖水鸟越冬生境的面积变化。研究发现，极端洪水能形成大面积水鸟无法利用的深水区域，从而减小草滩、浅水等可利用区域的面积^[7]，而极端干旱则会形成大面积水鸟无法利用的无植被沙滩，从而使越冬生境面积减小^[8]。2020 年 9 月和 2022 年 9 月的水鸟越冬生境面积分别为 512.22 km² 和 1109.79 km²，都远低于同期平水年的均值 1581.66 km²，越冬生境面积减小的主要原因分别是深水和沙滩面积大量增加。研究发现，平水年时鄱阳湖能为越冬水鸟提供充足的食物和栖息地，洪水和干旱都会对水鸟越冬造成不利影响^[12, 28]，与干旱年相比，洪水年能提供的水鸟越冬生境面积最小，最不利于水鸟正常越冬^[21, 22, 28]，这些都与本文的结果一致。

随着夏季洪水的消退和夏秋干旱的缓解，鄱阳湖的水鸟越冬生境面积逐渐增加，自 12 月开始，其水鸟越冬生境面积恢复到平水年均值，面积占比达到 60%左右，数量与夏少霞等的研究结果一致^[37]。鄱阳湖流域早涝急转事件主要分布在 3-10 月，其中 3-6 月主要表现为“早转涝”，7-10 月主要表现为“涝转旱”，不同年份也存在一定的时间差异^[29]；而鄱阳湖的干旱以夏秋持续干旱为主，8-9 月频繁发生，一般在 10-11 月停止^[30]。早涝转换的发生时间也说明，夏季极端洪水和夏秋季的极端干旱对水鸟越冬生境面积的影响主要在水鸟越冬初期，而对冬季水鸟越冬生境面积的影响不大。

虽然 2020 年的极端洪水和 2022 年的极端干旱对冬季的水鸟越冬生境面积影响不大，但极端水文事件会对水鸟越冬生境的质量造成影响。研究发现极端洪水会导致水生植被大量死亡，从而降低栖息地的质量^[12, 13]，而极端干旱则会导致洪泛湿地提前退水，草洲生长时间过长，草食性越冬水鸟到达时已无法取食^[10, 14]，由于食物短缺，越来越多的水鸟只有到鄱阳湖周边的人工湿地中觅食^[16, 21, 22]。

历年的水鸟观测数据表明，鄱阳湖的越冬水鸟最先在 10 月初开始到达，然后平稳增加，11 月开始数量急剧增加，12 月中旬至 1 月中旬数量达到峰值，因此冬季需要更大的可利用生境面积。2015 年鄱阳湖发生冬季洪水，导致次年 1 月和 2 月鄱阳湖水鸟越冬生境的面积占比明显下降，面积比同期平水年均值分别减少 356.38 km² 和 388.05 km²。Wang 等对鄱阳湖 9 个子湖泊的水鸟调查数据研究发现，2015 年冬季洪水极大影响了子湖中水鸟的丰度，与正常水文年的数据相比，冬季洪水导致 9 个子湖中鸟类的丰度下降了 19.7-75.5%^[15]，说明冬季洪水不仅减少了水鸟越冬生境的面积，也确实降低了越冬水鸟的数量和丰度。

3.2 极端水文事件对水鸟越冬生境面积影响的空间差异

对越冬生境面积占比的平水年均值分析发现，单位面积中碟形湖区的水鸟越冬生境面积最大，主湖区次之，人控湖汉最小，单位面积内碟形湖中水鸟越冬生境面积基本是人控湖汉的 3 倍。有研究发现，在鄱阳湖的退水过程中，蓄水捕鱼直接导致碟形湖的退水过程变缓延长，它不仅能减缓水文变化对湿地植被生长的影响^[33, 34]，而且能显著提高碟形湖中适宜水鸟越冬的栖息地面积^[28, 35]。有研究发现，每单位面积中，碟形湖中适宜雁类的栖息地面积是主湖区的 1.67-1.80 倍^[35]。碟形湖缓慢下降的水位，逐渐伸展的泥滩，周边湿生与水生植物群落有序分布，能为越冬水鸟持续提供丰富的食物和歇息环境，因此全湖 70%以上的水鸟在碟形湖区域越冬^[31]。

本研究还发现，极端干旱对水鸟越冬生境的影响在碟形湖区更大，可能跟鄱阳湖的地形有关。极端干旱会形成大面积水鸟无法利用的无植被沙滩，从而使越冬生境面积减小^[8]，这可能跟极端干旱导致洪泛平

原的地下水位大幅下降密切相关。Chen 等研究发现,2022 年极端干旱导致鄱阳湖洪泛平原东部地区 9-11 月的地下水位降幅超过 4m^[48]。根据 2010 年鄱阳湖地形测绘的结果,主湖区的范围包括了高程最低的河道以及湖中高地等范围,高程分布从-20m 到 123m,但主要集中在 12m 以下,而碟形湖区分布高程基本在 10m-15m 之间,主要集中在 12m-14m 之间^[49]。碟形湖分布区的高程普遍高于主湖区,碟形湖受到地下水下降的影响应该更大,所以极端干旱对水鸟越冬生境的影响在碟形湖区更大。

通过对比极端洪水对水鸟越冬生境影响的空间差异发现,极端洪水对主湖区的影响明显大于对碟形湖区的影响。有研究发现,干旱和洪水都会导致栖息地适宜性指数下降,尤其是洪水,水文连通的子湖泊比水文受控的子湖泊更容易受到水文异常的影响^[34]。由于水文自由连通的子湖泊与主湖区的水文过程更趋一致,这也说明极端洪水在主湖区的影响更大。从分布高程来看,主湖区的高程普遍低于碟形湖的分布区,相同水位下,主湖区更容易形成水鸟无法利用的深水区域,因此极端洪水对主湖区的影响应该比碟形湖区更大。

2015 年冬季鄱阳湖发生洪水,其对水鸟越冬生境影响的空间差异结果表明,冬季洪水处于高水位时(11-12 月),洪水对主湖区的影响明显大于碟形湖区。从表 1 可知,2015 年 11 月和 12 月影像获取当日鄱阳湖星子水文站的水位分别为 12.54m 和 10.36m,虽然都比正常水文年的水位高,但碟形湖的分布高程主要集中在 12m-14m 之间,主湖区主要在 12m 以下^[49],因此导致 2015 年 11-12 月主湖区深水面积占比超过分别为 49.94%和 40.33%,而碟形湖同期的深水面积占比分别为 26.46%和 10.31%,可见碟形湖区受冬季洪水的影响明显更小。

2015 年冬季洪水消退时期(次年 1-2 月),主湖区和碟形湖区的越冬生境面积占比都下降了 10 个百分点以上,主要表现为沙滩面积增加,泥滩和稀疏草洲面积明显减小。可能是因为冬季气温太低,植被停止生长,退水后形成的泥滩不能变成稀疏草洲,泥滩长时间出露后变干,转变成了水鸟无法利用的沙滩类型。研究发现,苔草生长对气温比较敏感,日平均温度低于 10℃时,苔草就处于停滞萌发和生长状态^[50],鄱阳湖的日平均气温基本在 11 月底就降至 10℃以下,低温要持续到 3 月初^[51],由于 1-2 月气温过低,鄱阳湖的苔草基本停止生长^[52]。

4 结论

当前全球变暖导致的极端水文事件频发,本文以我国最大的淡水洪泛湿地鄱阳湖为例,探讨了极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的影响,主要结论有:

1) 影响鄱阳湖水鸟越冬生境的极端水文事件有夏季极端洪水、夏秋季极端干旱和冬季洪水,它们都导致了鄱阳湖湿地景观的显著变化,不同极端水文事件导致的湿地景观变化差异很大。极端洪水会形成以水域为主的湿地景观;极端干旱则会大量增加无植被沙滩的面积;冬季洪水的高水位会明显增加水域的面积,但退水后会大量增加无植被的沙滩。

2) 极端水文事件都会减少鄱阳湖水鸟越冬生境的面积,从比平水年同期越冬生境面积减少的最大值来看,夏季极端洪水年>夏秋季极端干旱年>冬季洪水年,分别减少了 1069.44 km²、664.29 km² 和 388.05 km²,比平水年均值分别减少了 67.62%、29.83%和 18.18%。但夏季极端洪水和夏秋季极端干旱的影响发生在秋季,它们并没减少水鸟越冬关键期的水鸟越冬生境面积。冬季洪水的影响强度虽然不及夏季极端洪水和夏秋季极端干旱,但是冬季洪水导致水鸟越冬关键期的生境面积平均损失了 14.31%,冬季洪水可能会对水鸟越冬带来更加不利的影响。

3) 极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境的影响存在明显的时空差异,这与极端水文事件的过程和鄱阳湖的地形密切相关。从时间上来看,2020 年夏季的极端洪水只减小了 9-10 月的越冬生境面积,2022 年的夏秋季干旱也只是减小了 9-11 月的越冬生境面积,而 2015 年的冬季洪水则减少了 11 月至次年 2 月的越冬生境面积。从空间差异来看,极端洪水对主湖区的影响比碟形湖区大,而极端干旱对碟形湖区的影响比主湖区大。2015 年冬季洪水的前期,只减小了主湖区的水鸟越冬生境面积,而后期同时减小了主湖区和碟形湖区的水鸟越冬生境面积。

4) 人控湖汉的水位受人为控制,其景观结构和水鸟越冬生境面积都不受极端水文事件的影响,在排水防洪和蓄水抗旱的人为调控下,人控湖汉内的水文过程和水鸟越冬生境面积变化甚至出现与主湖区和碟形湖完全相反的过程,这有利于减小极端水文事件对鄱阳湖水鸟越冬生境面积的损失,但人控湖汉仅占全湖面积的 13.03%,其可利用生境的面积占比均值也仅有 19.12%,因此人控湖汉能增加的栖息生境面积十分有限。

5) 碟形湖是鄱阳湖水鸟越冬的关键区域,传统的“蜆秋湖”渔业活动使碟形湖形成更缓慢的退水过程,有利于越冬水鸟持续利用生境。长江流域十年禁渔后大量碟形湖的水闸和圩堤被破坏,碟形湖快速退水,导致鄱阳湖水鸟越冬生境面积锐减。因此,恢复碟形湖禁渔前的水文节律,是鄱阳湖应对极端水文事件和保护水鸟顺利越冬的重要举措。

5 参考文献

- [1] Pearse A T, Caven A J, Baasch D M, et al. Flexible migration and habitat use strategies of an endangered waterbird during hydrological drought . *Conservation Science and Practice*, 2024, **6**(5): e13120. DOI:13110.11111/csp13122.13120.
- [2] Capellotto Costa F R, Sampaio Zuanon J A, Baccaro F B, et al. Effects of climate change on central Amazonian Forests: A two decades synthesis of monitoring tropical biodiversity . *Oecologia Australis*, 2020, **24**(2): 317-335.
- [3] Min, SK., Zhang, X., Zwiers, F. et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature* **470**, 378–381 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature09763>.
- [4] Seneviratne S I, Donat M G, Mueller B, et al. No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(3): 161-163.
- [5] Royan A, Hannah D M, Reynolds S J, et al. River birds' response to hydrological extremes: New vulnerability index and conservation implications. *Biological Conservation*, 2014, **177**: 64-73.
- [6] Pall P, Aina T, Stone D A, et al. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 2011, **470**(7334): 382-385.
- [7] Li L, Zhou L, Cheng L, et al. Impact of habitat changes in the riparian zone at Shengjin Lake under extreme flooding on the community structure of wintering waterbirds. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(18): 7731-7745.[李凌晨, 周立志, 程磊等. 极端洪水作用下升金湖消落带生境变化对越冬水鸟群落结构的影响. 生态学报, 2023, **43**(18): 7731-7745.]
- [8] Gao X, Liang J, Zhu Z, et al. Drought-induced changes in hydrological and phenological interactions modulate waterbird habitats dynamics. *Journal of Hydrology*, 2023, **626**: 130228. DOI:130210.131016/j.jhydrol.132023.130228.
- [9] Shariati M, Hemami M-R. The drying of Lake Urmia and its consequences for waterbird assemblages. *Bird Conservation International*, 2024, **34**: e15. DOI:10.1017/s0959270924000029.
- [10] Chastant J E, Gawlik D E. Water level fluctuations influence wading bird prey availability and nesting in a subtropical lake ecosystem. *Waterbirds*, 2018, **41**(1): 35-45.
- [11] Reiter M E, Elliott N K, Jongsomjit D, et al. Impact of extreme drought and incentive programs on flooded agriculture and wetlands in California's Central Valley. *PeerJ*, 2018, **6**: e5147. DOI:5110.7717/peerj.5147.
- [12] Teng J, Xia S, 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:117210.111016/-j.jenvman.112023.117239.
- [13] Li Y, Zhong Y, Shao R, et al. Modified hydrological regime from the Three Gorges Dam increases the risk of food shortages for wintering waterbirds in Poyang Lake. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **24**: e01286. DOI:10.1016/j.gecco.2020.e01286.
- [14] Mei X, Dai Z, Fagherazzi S, et al. Dramatic variations in emergent wetland area in China's largest freshwater lake, Poyang Lake. *Advances in Water Resources*, 2016, **96**: 1-10. DOI:10.1016/j.advwatres.2016.1006.1003.
- [15] Wang W, Wang Y, Hou J, et al. Flooding Influences Waterbird Abundance at Poyang Lake, China. *Waterbirds*, 2019, **42**(1):30-38.
- [16] Wang W, Wang Y, Chen Q, et al. Effects of diet shift on the gut microbiota of the critically endangered Siberian Crane. *Avian Research*, 2023, **14**:100108. DOI:10.1016/j.avrs.2023.100108.
- [17] Shi L, Wang Y, Jia Y, et al. Vegetation Cover Dynamics and Resilience to Climatic and Hydrological Disturbances in Seasonal Floodplain: The Effects of Hydrological Connectivity. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 2196. DOI:2110.3389/fpls.2017.02196.
- [18] Yao S, Chen C, Chen Q, et al. Impact of Short-Term Hydrological Components on Landscape Pattern of Waterbird Habitat in Floodplain Wetlands. *Water Resources Research*, 2022, **58**:e2021wr031822. DOI:10.1029/2021wr031822.
- [19] Li Y, Qian F, 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.
- [20] Wen L, Wang L, Ding H, et al. Using unmanned aerial vehicle for a population and wintering distribution survey of Siberian crane (*leucogeranus leucogeranus*). *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(18):7693-7700. [温立嘉, 王槐华, 丁洪安等. 无人机调查白鹤种群数量和越冬分布. 生态学报, 2023, **43**(18): 7693-7700.]
- [21] Zhang C, Li Y, Ren Q, et al. Species diversity, spatial distribution and protection strategies of wintering waterbirds after extreme summer flood in Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(5): 1584-1595. [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): 1584-1595.]
- [22] Burnham J, Barzen J, Pidgeon A M, et al. Novel foraging by wintering Siberian Cranes *Leucogeranus leucogeranus* at China's Poyang Lake indicates broader changes in the ecosystem and raises new challenges for a critically endangered species. *Bird Conservation International*, 2017, **27**(2): 204-223.
- [23] Wang J, Sheng Y, Wada Y. Little impact of the Three Gorges Dam on recent decadal lake decline across China's Yangtze Plain. *Water Resources Research*, 2017, **53**(5): 3854-3877.
- [24] 戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究. 北京: 科学出版社, 2019.
- [25] Xu C, Yuan C, Li X, et al. Projection of disaster-causing risk of extreme precipitation in the Yangtze River Basin based on CMIP6. *Hydrology Research*, 2023, **54**(3): 401-417.
- [26] Lei S. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(6): 7-12. [雷声. 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考. 水资源保护, 2021, **37**(6): 7-12.]
- [27] Lei S, Shi S, Qu Y, et al. Characteristics of extreme drought in the Poyang Lake Basin in 2022 and implications for future response. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, **54**(3): 333-346. [雷声, 石莎, 屈艳萍等. 2022 年鄱阳湖流域特大干旱特征及未来应对启示. 水利科学, 2023, **54**(3): 333-346.]
- [28] Hu Z-P, Ge G, Liu C-L. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. *Journal Of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1770-1779. [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.]
- [29] Wang R, Li X, Xue C, et al. Spatio-temporal variations of the drought-flood abrupt alternation events in the Lake Poyang Basin from 1960 to 2012. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(1): 207-222. [王容, 李相虎, 薛晨阳等. 1960-2012 年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 207-222.]
- [30] Xing Z, Yu Z, Wei J, et al. Lagged influence of ENSO regimes on droughts over the Poyang Lake basin, China. *Atmospheric Research*, 2022, **275**:e106218. DOI:10.1016/j.atmosres.2022.106218.
- [31] 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.
- [32] Nie X, Hu X-R, Liu G-H, et al. Effects of water level on zooplankton community during "plate-shaped lake enclosed in autumn" in a sub-lake of the Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(02): 402-414. [聂雪, 胡旭仁, 刘观华等. 鄱阳湖子湖“壅积秋

- 湖”过程中水位变化对浮游动物群落结构的影响. 水生生物学报, 2019, **43**(02): 402-414.]
- [33] Shi L, Jia Y, Zuo A, et al. Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(8): 828-837.[史林鹭, 贾亦飞, 左奥杰等. 基于 MODIS EVI 时间序列的鄱阳湖湿地植被覆盖和生产力的动态变化. 生物多样性, 2018, **26**(8): 828-837.]
- [34] Chen W, Zhang F, Shang X, et al. The study on the comparative responses of aquatic vegetation to the interannual water level variation in different hydrologically connected sub-lakes based on GEE technology. *Ecohydrology*, 2022: e2514. DOI:10.1002/eco.2514.
- [35] Xia S, Yu D, Cui P, et al. Suitable-habitat dynamics for wintering geese in China's largest freshwater lake. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **27**: e01528. DOI:10.1016/j.gecco.2021.e01528.
- [36] Bai J, Zhang H, Zhou H, et al. Winter coexistence in herbivorous waterbirds: Niche differentiation in a floodplain, Poyang Lake, China. *Ecology and Evolution*, 2021, **11**(23): 16835-16848.
- [37] Xia S, Yu X, 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. 鄱阳湖越冬候鸟栖息地面积与水位变化的关系. 资源科学, 2010, **32**(11): 2072-2078.]
- [38] Shao M-Q, Jiang J-H, Dai N-H. 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.[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.]
- [39] Tang X, Li H, Xu X, 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**: 296-306.
- [40] Liu C, Tan Y, Lin L, et al. The wetland water level process and habitat of migratory birds in Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 129-135. [刘成林, 谭胤静, 林联盛等. 鄱阳湖水水位变化对候鸟栖息地的影响. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 129-135.]
- [41] Wu H, Dai J, Sun S, et al. Responses of habitat suitability for migratory birds to increased water level during middle of dry season in the two largest freshwater lake wetlands of China. *Ecological Indicators*, 2021, **121**: 107065.
- [42] Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, **540**(7633): 418-422.
- [43] Kartikeyan B, Majumder K L, Dasgupta A R. An expert system for land cover classification. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1995, **33**(1): 58-66.
- [44] Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 2007, **28**(5): 823-870.
- [45] Feyisa G L, 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.2013.1008.1029.
- [46] Zhang S, Liu Y, Yang Y, et al. Erosion and deposition within Poyang Lake: evidence from a decade of satellite data. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, **42**(2): 364-374.
- [47] Ke Y, Im J, Lee J, et al. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **164**: 298-313.
- [48] Chen J, Li Y, Shu L, et al. The influence of the 2022 extreme drought on groundwater hydrodynamics in the floodplain wetland of Poyang Lake using a modeling assessment. *Journal of Hydrology*, 2023, **626**: 130194. DOI:10.1016/j.jhydrol.2023.130194.
- [49] 纪伟涛. 鄱阳湖地形—水文—植被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [50] Ji W-L, Li W-Z, Wang C-J, et al. A review: seeds dormancy and germination of genus *Carex* speices. *Grassland and Turf*, 2009, (02): 98-102. [吉文丽, 李卫忠, 王成吉等. 苔草属植物种子休眠与萌发研究现状. 草原与草坪, 2009, (2): 98-102.]
- [51] Meng Z J, Xia S X, Yu X B, et al. A study on the suitable time window of feeding vegetation fit for overwintering geese in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21) : 7539-7548. [孟竹剑, 夏少霞, 于秀波等. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口. 生态学报, 2018, **38**(21): 7539-7548.]
- [52] Yao X, Zhu J, Zeng H, et al. Impact of Accumulated Temperature on Wetland Vegetation Area in Poyang Lake. *Cmc-Computers Materials & Continua*, 2022, **73**(1): 1915-1926.