

DOI: 10.20103/j.stxb.202404060734

张定勇, 石继业, 周立志. 浅水通江闸控湖泊越冬水鸟分类和功能多样性对水位变化的响应. 生态学报, 2025, 45(1): 265-279.

Zhang D Y, Shi J Y, Zhou L Z. The response of taxonomic and functional diversity in wintering waterbird community to water level changes in a shallow river-connected and gate-controlled lake. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 265-279.

# 浅水通江闸控湖泊越冬水鸟分类和功能多样性对水位变化的响应

张定勇<sup>1,2</sup>, 石继业<sup>1,2</sup>, 周立志<sup>1,2,\*</sup>

1 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601

2 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室(安徽大学), 合肥 230601

**摘要:**长江中下游洪泛平原浅水湖泊是重要的水鸟越冬地,为东亚-澳大利西亚迁徙路线上的越冬水鸟提供了丰富的食物资源和越冬保障。近年来,为满足湖泊周边居民生产和生活的需要,长江中下游多数浅水通江湖泊通过建立闸坝调控湖泊水位,闸控水位是目前通江湖泊最典型的水文扰动方式。水鸟作为湿地生态系统的指示物种,对水位变化敏感,其多样性变化可以反应水位变化对湿地生态系统的影响。基于分类和功能多样性,探究闸控湖泊水位变化对越冬水鸟群落的影响。2021—2022 年和 2022—2023 年水鸟越冬期对武昌湖进行了实地观测,结合遥感资料,获取了水鸟种类、组成和分布以及生境因子数据。基于不同年际水位条件下水鸟群落组成变化,分析了生境变化对越冬水鸟多样性的影响,进一步探讨了越冬水鸟群落对水位变化的响应。结果表明,在武昌湖的两个越冬期,雁形目鸟类均占优势,高水位年份的 Shannon-Wiener 多样性指数显著较高( $P < 0.05$ ),而功能分异度指数显著较低( $P < 0.05$ ),这表明两个年度间水鸟群落的种类组成、数量和性状特征存在显著差异。一般线性模型结果表明,生境面积受到水位的影响,水位与浅水面积、泥滩面积和深水面积具有显著的相关性( $P < 0.05$ ),而与挺水植物区面积的相关性不显著( $P > 0.05$ )。广义线性混合模型表明,水位引起的生境变化是水鸟群落多样性变化的主要原因,而水位变化也会直接影响越冬水鸟群落多样性,Shannon-Wiener 多样性指数和功能丰富度指数与水位之间具有显著的相关性( $P < 0.05$ )。水位、水鸟及其生境之间的相互关系分析,有助于阐明水位变化对越冬水鸟群落的影响,这些研究成果对于加强湖泊生态系统的保护和管理具有重要的指导意义。

**关键词:**越冬水鸟;分类多样性;功能多样性;水位;洪泛平原;武昌湖

## The response of taxonomic and functional diversity in wintering waterbird community to water level changes in a shallow river-connected and gate-controlled lake

ZHANG Dingyong<sup>1,2</sup>, SHI Jiye<sup>1,2</sup>, ZHOU Lizhi<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

2 Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration (Anhui University), Hefei 230601, China

**Abstract:** The shallow lakes in the middle and lower Yangtze River floodplain are essential wintering grounds, providing abundant food resources and wintering condition guarantee for waterbirds on the East Asian-Australasian Flyway. In recent years, to meet the needs of the residents around the lakes for production and living, many of these shallow river-connected lakes have water levels controlled by dams and sluices in the middle and lower Yangtze River floodplain. The gate-controlled water level is currently the most common hydrological disturbance used in the area. Waterbirds as indicator of wetland

基金项目:国家自然科学基金项目(32171530)

收稿日期:2024-04-06; 网络出版日期:2024-09-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoulz@ahu.edu.cn

ecosystem, exhibit sensitivity to shifts in water levels, and composition in their diversity can elucidate the effects of water level changes on wetland ecosystems. In this study, the impact of water level changes on wintering waterbird communities was investigated based on taxonomic and functional diversity. Over the wintering seasons during 2021—2022 and 2022—2023, field observations of wintering waterbirds were conducted at Wuchang Lake, along with remote sensing data, we obtained the waterbird species, composition, distribution, and habitat factors. Based on the changes in waterbird community composition across interannual water level conditions, we analyzed the effects of habitat changes on wintering waterbird diversity and examined the response of wintering waterbird communities to water level changes. The results indicate that throughout the two wintering years, the waterbirds of order Anseriformes were predominant at Wuchang Lake. Shannon-Wiener diversity index was significantly higher ( $P < 0.05$ ) during high water year, accompanied by a significant decrease in functional divergence index ( $P < 0.05$ ). This indicates substantial disparities in species composition, abundance, and trait characteristics between the two wintering years. The results by general linear models revealed that habitat area was affected by water level, with significant correlations ( $P < 0.05$ ) between water level and shallow water, mudflat, and deep water, but not with emergent plant area ( $P > 0.05$ ). The results by generalized linear mixed models revealed that the major cause of shifts in waterbird community diversity was habitat changes due to water level changes. Moreover, water level changes also directly impacted the diversity of wintering waterbird communities, with significant correlations noted between the Shannon-Wiener diversity index, the functional richness index, and water levels ( $P < 0.05$ ). This study elucidated the impact of water level changes on wintering waterbird communities by investigating the interconnections between water levels, waterbirds, and their habitats, thereby providing crucial scientific guidance for the conservation and management of lake ecosystems.

**Key Words:** wintering waterbirds; taxonomic diversity; functional diversity; water level; floodplain; Wuchang Lake

湖泊的水位变化是影响越冬水鸟生境的适宜性以及食物资源丰富程度和可获得性的主要因素<sup>[1-2]</sup>。退水时间、水位的高低以及持续时间等因素都会影响水鸟群落多样性<sup>[3-5]</sup>。湖泊长期维持高水位,淹没泥滩和草滩,导致适合越冬水鸟觅食和栖息的栖息环境单一化,生境异质性降低<sup>[6]</sup>。迁徙水鸟在湖泊退水后到达越冬地,这与水鸟生境和食物资源暴露之间具有同步性,这是越冬水鸟与自然水文节律长期适应的结果<sup>[7]</sup>。湖泊退水时间与水鸟迁徙时间不同步,会影响越冬水鸟食物资源的丰富程度和栖息环境的适宜性,从而影响水鸟群落的多样性<sup>[1, 5]</sup>。水鸟自身的形态特征、觅食行为和觅食地选择等的差异,也是影响水鸟群落多样性的主要原因<sup>[8]</sup>。水位过高对涉禽的影响最大,它们通常在泥滩和浅水生境中以底栖动物为食<sup>[9]</sup>。过高的水位会导致适宜涉禽觅食和栖息的泥滩和浅水面积减少,生境适宜性降低<sup>[10]</sup>。然而,当湖泊水位上升,扩大适合游禽觅食的生境,游禽数量增多<sup>[11]</sup>。为了探究水鸟多样性与水位的关系,国内外的研究主要关注于湿地水位变化对水鸟群落种类组成、数量分布以及生境利用等的影响<sup>[2, 10-12]</sup>。这些研究从分类多样性、功能多样性、谱系多样性等多个角度出发,采用野外实地调查、GPS 定位追踪技术、遥感技术等多种技术和手段来研究水鸟多样性<sup>[13-14]</sup>。然而,多数研究仅从某一方面探讨,基于分类和功能两个维度多样性,结合野外实地调查和遥感技术手段将有助于进一步揭示水鸟多样性与水位的关系。

水鸟群落多样性不仅包括物种的种类和数量,还与它们所具有的功能特征紧密相关,分类多样性和功能多样性是生态系统功能研究中非常重要的内容,二者能够帮助人们从不同的视角理解群落多样性的维持机制<sup>[15]</sup>。分类多样性既包含物种间以及物种与环境间复杂的相互作用,也反映了生物资源的丰富度<sup>[16]</sup>;功能性多样性则是群落中不同物种间的功能特征差异及其对环境变化或干扰的反应程度<sup>[15]</sup>。

武昌湖是长江中下游典型的浅水通江闸控湖泊,夏季丰水期,湖区水位持续上升,为武昌湖带来丰富的营养物质和沉积物<sup>[17]</sup>。随着秋冬季枯水期的到来,湖泊水位开始缓慢下降,暴露出许多形状、大小不一的生境斑块,为各类越冬水鸟提供了丰富的食物资源和适宜的栖息环境<sup>[10]</sup>。然而,由于 2022—2023 年长江中下游

地区夏季降雨减少,为了保障武昌湖周边居民的生产和生活用水,2月中旬才开闸放水。因此,2021—2022年和2022—2023年越冬期,水位调控方式有所差别。了解这种水位调控的差异对越冬水鸟的影响对于进一步优化湖泊水位调控方案具有积极意义。

本文在2021—2022年和2022—2023年的武昌湖湿地越冬水鸟及其生境调查和遥感影像资料解译的基础上,分析了不同水位状态下的水鸟群落的分类多样性和功能多样性,应用一般线性模型和广义线性混合模型,探讨不同水位状态下生境变化及其对越冬水鸟多样性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

武昌湖(30°14'—30°20' N,116°36'—117°53' E,图1)位于安徽省安庆市望江县境内,分为东西2个区域,其中西部为上湖,东部为下湖。武昌湖上湖植被覆盖度低,夏季丰水期(6月、7月和8月)以深水为主,占比超过三分之二,冬季枯水期(12月、1月和2月)水位下降,会有少量泥滩暴露。下湖植被覆盖度高,湿地植被主要是挺水植物菰(*Zizania latifolia*),生长茂盛,盖度可达总面积的60%—70%<sup>[18]</sup>。武昌湖湿地位于北亚热带湿润气候区,四季分明,丰富的生物资源,使得武昌湖成为东亚-澳大利西亚鸟类迁徙路线上重要的越冬场所和停歇地。

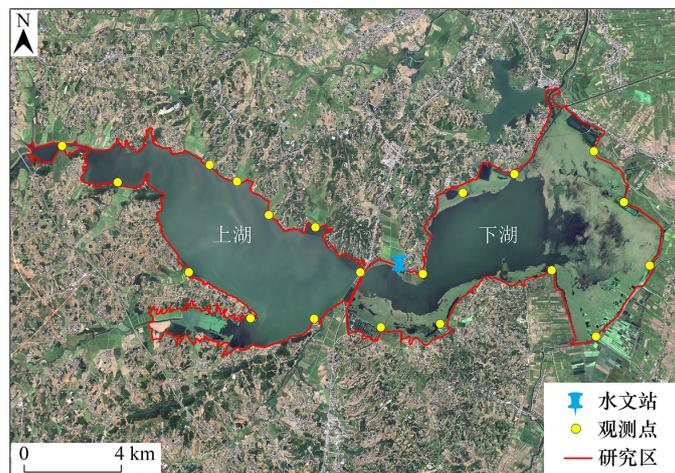


图1 武昌湖越冬水鸟观测点分布

Fig.1 Distribution of the wintering waterbird observation sites at Wuchang Lake

底图来源于(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),下载2021年10月3号的遥感影像数据

### 1.2 数据收集

#### 1.2.1 水位数据的收集

在本研究中,从安徽省水利厅官网(<http://slt.ah.gov.cn/>)获得了2021—2022年和2022—2023年10月1日至3月1日期间武昌渡水文站测得的每日上午8:00的水位数据。两个年度水位调控差异较大,2022—2023年水鸟越冬期,武昌湖水位高于2021—2022年越冬期(图2)。

#### 1.2.2 水鸟数据的收集

武昌湖是迁徙水鸟重要的迁徙停歇地和越冬场所,每年,从10月开始,水鸟陆续到达武昌湖,并在次年3月开始离开。10月、11月、3月和4月是水鸟迁徙期,水鸟的数量和分布不稳定。12月到2月份为水鸟越冬期,这时水鸟的数量达到峰值,并且分布和数量相对稳定,使得这段时间成为观察和研究武昌湖越冬水鸟与周围环境关系的最佳时段<sup>[19]</sup>。2021—2023年的12月到次年2月份对武昌湖水鸟进行两个越冬期的水鸟调查,每月中旬调查一次,共进行6次调查。在上湖和下湖各设置10个观测点,共设置20个观测点,选择晴天无大

风或大雾的情况下开展调查。在双筒望远镜 Binocular (Swarovski, 8.5 \* 42, Austria) 和单筒望远镜 Monocular (Swarovski, ATM 20-60 \* 85, Austria) 的有效视野范围内,对每个观测点半径约 1 km 范围内的水鸟种类进行了识别和计数<sup>[5]</sup>。利用全球鸟类特征数据集,从中共选取 18 个与形态、食性以及觅食层相关的功能性状(表 1),对越冬水鸟群落进行功能多样性计算<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2.3 生境因子数据的获取

从欧洲航天局 ESA 官网 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) 下载 2021—2023 年水鸟越冬期间,研究区云量小于 5% 或没有云层覆盖的哨兵 2 号遥感影像共 6 期,选取与水鸟调查日期相近(一周内)或水位高度相近(水位差控制在 0.15 m 以内)的遥感影像进行解译,以确保准确性。根据水鸟的生境需求,将研究区划分为 4 类生境变量,包括:浅水、深水、泥滩和挺水植物区。选取哨兵 2 号经过 Sen2Cor 辐射定标和大气校正的 Level-2A 级遥感影像,精度 20 m 的波段,并重新投影到 UTM WGS 1984 50N 坐标系上。首先,使用迭代自组织数据分析技术 (ISODATA) 的非监督分类方法将遥感影像生成 12 个自然光谱聚类,然后,通过实地调查和四类陆地卫星图像波段的最佳 RGB 组合进行目视解译,重分类成 4 类生境,即浅水、深水、泥滩和挺水植物区<sup>[7]</sup>。水对不同波长光的吸收透射能力具有显著差异。蓝光、绿光、红光、近红外波段对水体穿透能力依次减弱,并且水在红外部分会表现出强烈的吸收能力。水的这种光学特性导致不同水深表现出不同的水色,在近红外波段、短波红外波段和蓝光,深水是深蓝色的阴影,浅水是浅蓝色阴影。短波红外波段、近红外波段和红光的组合显示了水分的差异,提供了一个明确的泥滩-水域边界。植被区在近红外、红色和绿色的组合中展现出红色阴影<sup>[2]</sup>。从 2021 年 11 月 12 日获取的遥感影像输出的土地覆盖类型图经过野外实地调查和谷歌地球 (Google Earth) 地图进行了验证。总分类精度为 93.29%, Kappa 系数为 87.35%,表明图像分辨精度高。所有处理在 ArcGIS 10.8.1 中进行。

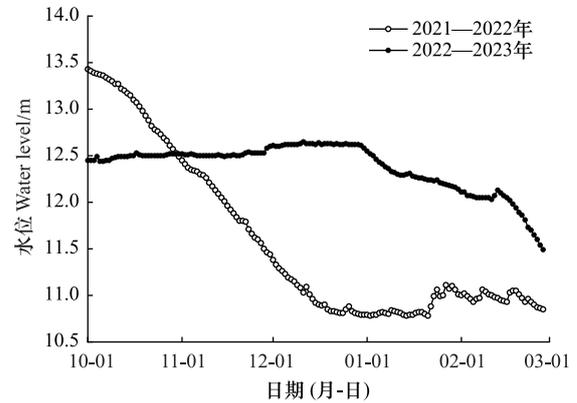


图 2 2021—2022 年和 2022—2023 年越冬期武昌湖水位的动态变化规律(参考水位基准:吴淞高程)

Fig.2 Dynamic of water level (reference water level zero: Wu Song Elevation) during the wintering periods of 2021—2022 and 2022—2023 at Wuchang Lake

表 1 武昌湖越冬水鸟群落功能多样性计算中使用的功能性状

Table 1 Functional traits used to calculate functional diversity of wintering waterbird communities at Wuchang Lake

功能性状类型 Type of functional traits	功能性状 Functional traits	数据类型 Data type
形态性状 Morphological traits	喙长 (Beak Length_Culmen)、喙宽 (Beak Width)、喙峰高 (Beak Depth)、跗蹠长 (Tarsus Length) 和体重 (Mass)	连续变量
食性 Diet	食无脊椎动物 (Diet-Inv)、哺乳动物 (Diet-Vend)、两栖爬行动物 (Diet-Vect)、食鱼 (Diet-Vfish)、其他脊椎动物 (Diet-Vunk)、食腐 (Diet-Scav)、食果 (Diet-Fruit)、食种子 (Diet-Seed) 和食其他植物 (Diet-PlantO)	二元变量
觅食层 Foraging strata	深水觅食 (ForStrat-watbelowsurf)、浅水觅食 (ForStrat-wataroundsurf)、陆地觅食 (ForStrat-ground) 和林地觅食 (ForStrat-understory)	二元变量

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 分类多样性计算

物种丰富度指数 (Species richness index,  $S$ ) 衡量越冬水鸟的物种丰富度<sup>[22]</sup>。公式为:

$$S = N$$

式中,  $S$  为物种丰富度指数;  $N$  为研究区内个体数 (多度) 大于 0 的物种。

多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index,  $H$ ) 衡量越冬水鸟的多样性<sup>[4]</sup>。公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

式中,  $S$  为研究区内水鸟的物种数;  $P_i$  为种  $i$  个体数在研究区内全部个体中的比例。

### 1.3.2 功能多样性计算

功能丰富度 (Functional richness index, FRic) 指数指生物个体在群落中所占据的功能空间的大小<sup>[23]</sup>。公式为:

$$\text{FRic} = \frac{\text{SF}_{ci}}{R_c}$$

式中, FRic 指在群落中的  $i$  中性状  $c$  的功能丰富度指数,  $\text{SF}_{ci}$  为在群落中物种所占据的是生态位空间,  $R_c$  为所有群落中性状  $c$  占据的生态位空间。

功能分异度 (Functional divergence index, FDiv) 指数表示群落内有机体特征值的差异性<sup>[23]</sup>。公式为:

$$g_k = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V x_{ik}$$

$$dG_i = \sqrt{\sum_{k=1}^T (x_{ik} - g_k)^2}$$

$$\overline{dG} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S dG_i$$

$$\Delta d = \sum_{i=1}^S w_i \times (dG_i - \overline{dG})$$

$$\Delta |d| = \sum_{i=1}^S w_i \times |dG_i - \overline{dG}|$$

$$\text{FDiv} = \frac{\overline{\Delta d + dG}}{\Delta |d| + \overline{dG}}$$

式中,  $x_{ik}$  为物种  $i$  性状  $k$  的值,  $g_k$  为物种的重心,  $dG_i$  为物种  $S$  到重心的欧式距离的平均距离,  $\Delta d$  为多度加权偏差的总和,  $\Delta |d|$  为绝对加权偏差的总和,  $S$  为物种数目。

### 1.3.3 数据分析

使用一般线性模型 (General Linear Model, GLM) 来预测武昌湖不同水位条件下与四种不同生境类型面积之间的关系<sup>[7]</sup>。用广义线性混合模型 (Generalized Linear Mixed Model, GLMM) 的泊松分布 (lme4 包) 来检验生境变量对越冬水鸟多样性 (取整) 的影响<sup>[2, 7, 10]</sup>。以分类多样性 (vegan 包计算) 和功能多样性 (FD 包计算) 为因变量, 以各调查区的 4 类生境变量 (除以标准差) 和水位作为固定效应, 考虑到年份差异对水鸟的影响, 以调查年份作为随机效应。利用候选模型的方差膨胀因子 (VIF) 检验固定变量间的多重共线性,  $\text{VIF} < 10$  说明固定变量间的共线性低<sup>[24]</sup>。对于最佳模型的选择, 本研究使用 AICc 值、 $\Delta\text{AICc}$  值、 $\log\text{Lik}$  值和赤池权重 (Akaike weights,  $w_i$ ) 四个评价指标来比较模型之间的拟合效果, AICc 和  $\Delta\text{AICc}$  值越低,  $\log\text{Lik}$  和  $w_i$  值越高说明模型拟合越好<sup>[25]</sup>。通过检查预测因子的 95% 置信区间是否包含 0 来评估其对因变量影响的显著性<sup>[26]</sup>。

模型平均 (Model Averaging) 是一种合成多个模型预测以减少模型选择不确定性的方法,  $\Delta\text{AICc} < 2$  的模型与最佳模型在统计意义上是相近的, 而赤池权重低于 0.9 的模型也存在很大的不确定性。模型平均被认为是解决此类不确定性的有效方法, 把所有  $\Delta\text{AICc} < 2$  的模型进行模型平均, 而不剔除一些看似不可能模型, 通过模型平均的方法计算固定效应在 95% 置信区间内的相对重要性、模型平均估值和标准误, 以排除模型选择中的不确定性<sup>[27, 28]</sup>。

使用 Berger-Parker 优势度指数 (Berger-Parker dominance index,  $D$ ) 来衡量越冬水鸟的优势度,  $D \geq 10\%$  为优势种,  $1\% \leq D < 10\%$  为常见种,  $D < 1\%$  为稀有种<sup>[29]</sup>。采用 Shapiro-Wilk 检验数据是否符合正态分布, 对于服

从正态分布的数据进行  $t$  检验,并对不服从正态分布的数据进行非参数 Wilcoxon 秩和检验<sup>[30]</sup>。所有分析均在 R 4.3.0 中进行,所有的制图均在 Origin 2022 中进行。所有统计检验均以  $P < 0.05$  为显著性水平。

## 2 结果

### 2.1 水鸟种类和数量

2021—2022 年和 2022—2023 年两个越冬期(12 月到 2 月)共进行 6 次水鸟调查(附表 1 和图 3),记录到水鸟(35300.17±6383.99)只( $n=6$ ),隶属 7 目 12 科 51 种。2021—2022 年越冬期记录到水鸟(33366.00±6272.30)只( $n=3$ ),2022—2023 年越冬期记录到水鸟(37234.33±7164.04)只( $n=3$ )。其中,在 2021—2022 年的 1 月份的水鸟最少,共记录到水鸟 29915 只,隶属 6 目 11 科 30 种,包括游禽 27714 只和涉禽 2201 只,而 2022—2023 年的 1 月份的水鸟最多,共记录到水鸟 44639 只,隶属 7 目 11 科 32 种,包括游禽 43251 只和涉禽 1388 只。2021—2022 年度越冬期( $n=3$ )优势种只有 1 种水鸟豆雁(*Anser fabalis*),记录到豆雁(20005.33±8176.91)只;而 2022—2023 年度越冬期( $n=3$ )优势种数目变多,均是雁形目(*Anseriformes*)水鸟,分别是豆雁、灰雁(*Anser anser*)、斑嘴鸭(*Anas zonorhyncha*)和绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)4 种,分别记录到(8418.67±5537.96)只、(6856.00±2073.49)只、(6691.67±3367.29)只和(5575.67±2216.18)只。

在两个年度越冬期的 51 种水鸟中(附表 1),有 9 种越冬水鸟纳入 IUCN 红色名录,包括极危物种(CR)青头潜鸭(*Aythya baeri*)和白鹤(*Leucogeranus leucogeranus*);濒危物种(EN)鸿雁(*Anser cygnoides*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*);易危物种(VU)、红头潜鸭(*Aythya ferina*)和白头鹤(*Grus monacha*);近危物种(NT)白眼潜鸭(*Aythya nyroca*)、罗纹鸭(*Mareca falcata*)和凤头麦鸡(*Vanellus vanellus*)。国家重点保护物种共有 10 种,包括 4 种国家一级重点保护动物和 6 种国家二级重点保护动物。在至少有一次调查中,灰雁、豆雁、青头潜鸭、

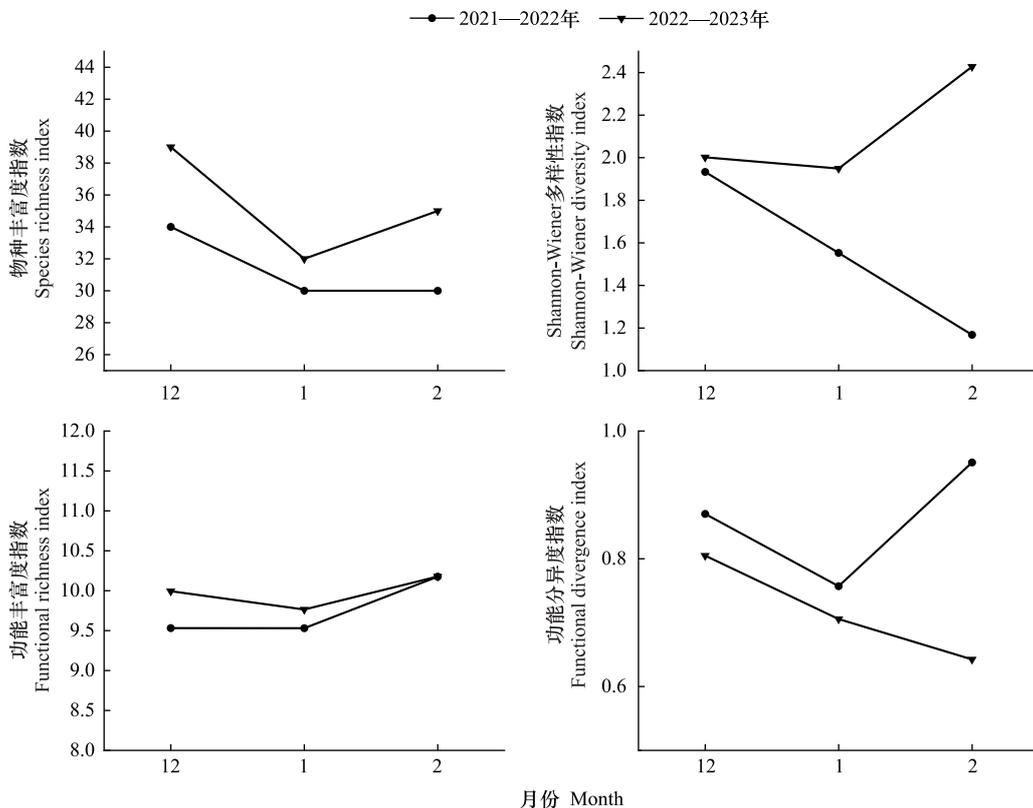


图3 2021—2022 年和 2022—2023 年越冬期武昌湖越冬水鸟群落的时间动态变化特征

Fig.3 Temporal dynamics characteristics of wintering waterbird communities during the wintering periods of 2021—2022 and 2022—2023 at Wuchang Lake

罗纹鸭、凤头鹳鹬(*Podiceps cristatus*)、白鹤、白头鹤、东方白鹤和白琵鹭(*Platalea leucorodia*)达到东亚-澳大利西亚迁徙路线种群数量 1% 的标准。

## 2.2 水鸟群落多样性

两个年度的越冬期,越冬水鸟分类多样性和功能多样性均表现出显著差异(图 4)。水鸟群落的 Shannon-Wiener 多样性指数差异显著(12 月: $Z = -2.137, P = 0.033$ ;1 月, $Z = -2.570, P = 0.009$ ;2 月: $Z = -1.975, P = 0.049$ ),2022—2023 年越冬期 Shannon-Wiener 多样性指数高于 2021—2022 年。然而,物种丰富度的差异并不显著( $P > 0.05$ )。功能多样性指数仅功能分异度在越冬期的 1 月( $Z = -2.516, P = 0.012$ )和 2 月具有显著性差异( $Z = -2.678, P = 0.007$ ),而且 2022—2023 年越冬期水鸟功能分异度更低,而功能丰富度( $P > 0.05$ )未见显著性差异。

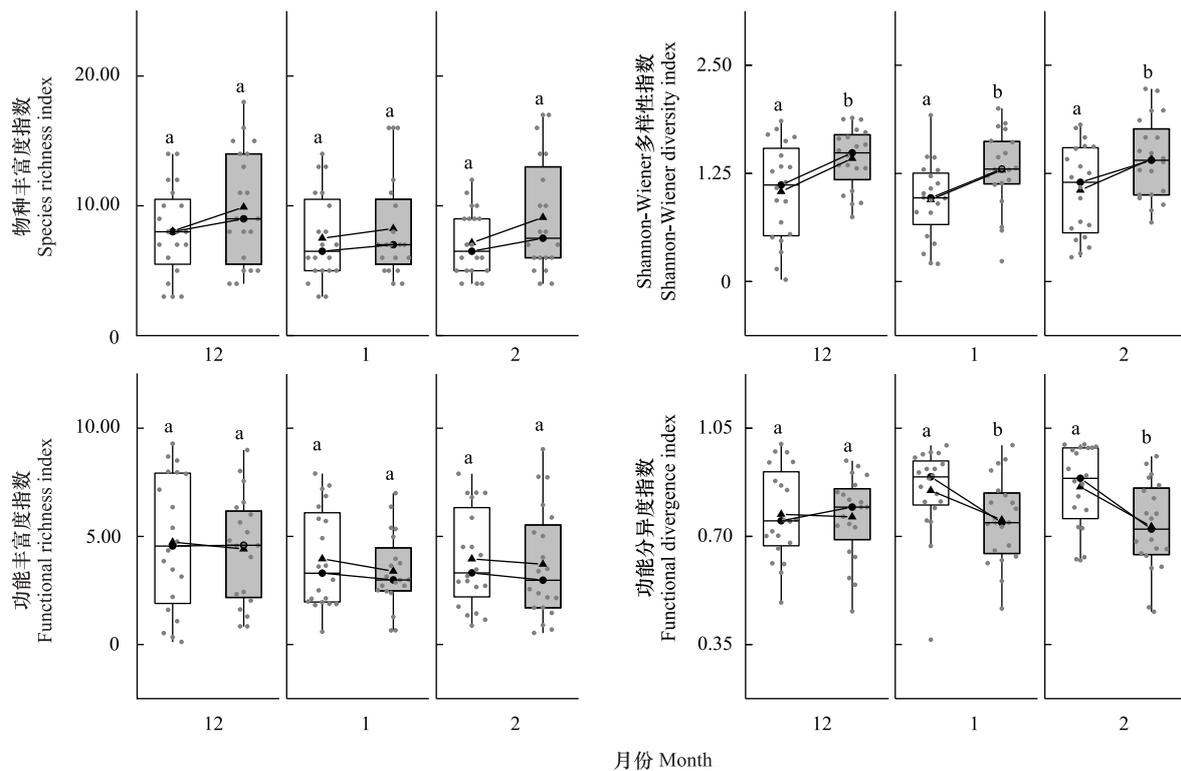


图 4 2021—2022 年和 2022—2023 年越冬期武昌湖越冬水鸟群落多样性指数差异

Fig.4 Difference in diversity index of wintering waterbird communities during the wintering periods of 2021—2022 and 2022—2023 at Wuchang Lake

白色代表 2021—2022 年的冬天,灰色代表 2022—2023 年的冬天

## 2.3 水位与水鸟群落多样性的关系

遥感解译发现(图 5 和图 6),不同水位年份下武昌湖的生境呈现出不同的变化特征。高水位年份湖泊生境深水区占主导,低水位年份泥滩和浅水面积增加。

水位与生境面积的一般线性模型拟合结果表明(图 7),水位与浅水面积( $R^2 = 0.695, P = 0.039$ )和泥滩面积( $R^2 = 0.852, P = 0.009$ )呈显著负相关,与深水面积呈显著正相关( $R^2 = 0.945, P = 0.001$ ),与挺水植物生境面积( $R^2 = 0.470, P = 0.133$ )的相关性不显著。

GLMM 模型的分析结果表明(表 2 和表 4),自变量间无显著自相关。挺水植物生境面积与 Shannon-Wiener 多样性指数(系数为 0.189)和物种丰富度指数(系数为 0.140)呈正相关;深水面积与 Shannon-Wiener 多样性(系数为 0.086)和物种丰富度指数(系数为 0.112)呈正相关;浅水面积与 Shannon-Wiener 多样性(系数为 -0.210)呈负相关;水位与 Shannon-Wiener 多样性(系数为 -0.355)呈负相关。在武昌湖湿地挺水植物生境面积大,水域面积广的区域,有更多的越冬水鸟分布。

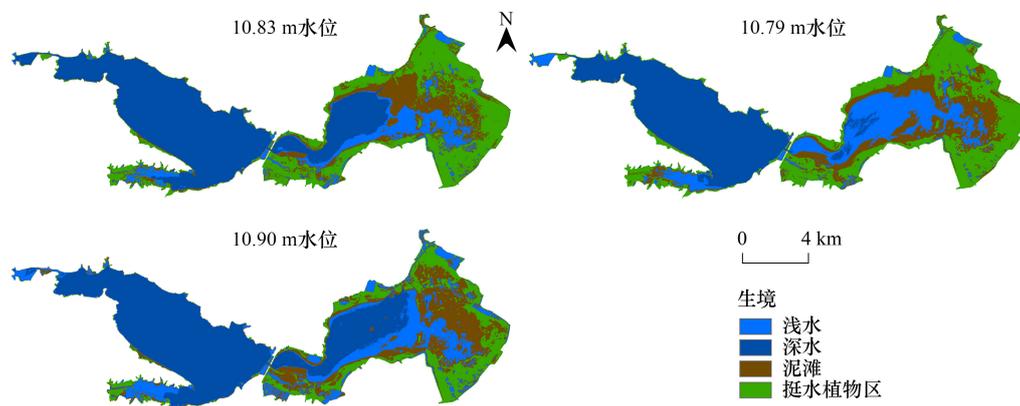


图 5 2021—2022 年越冬期不同水位条件下武昌湖土地覆盖类型图

Fig.5 Land cover map under different water levels during the wintering periods of 2021—2022 at Wuchang Lake

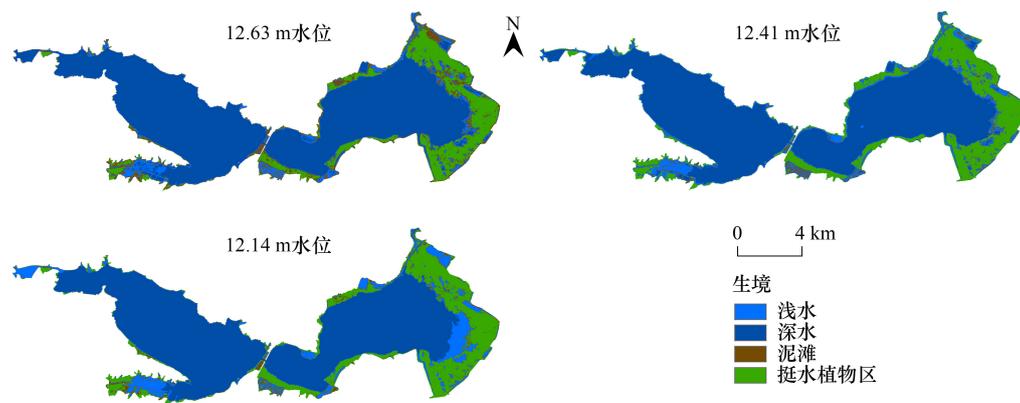


图 6 2022—2023 年越冬期不同水位条件下武昌湖土地覆盖类型图

Fig.6 Land cover map under different water levels during the wintering periods of 2022—2023 at Wuchang Lake

表 2 GLMM 候选模型 ( $\Delta AIC_c < 2$ ) 量化水位和生境变量对武昌湖越冬水鸟分类多样性的影响

Table 2 GLMM candidate models ( $\Delta AIC_c < 2$ ) quantify the effects of water level and habitat variables on taxonomic diversity of wintering waterbirds at Wuchang Lake

因变量 Dependent variable	模型 Model	水位 Water level	浅水 Shallow water	深水 Deep water	泥滩 Mudflat	挺水植物区 Emergent plant area	$df$	logLik	AICc	$\Delta AIC_c$	$w_i$
Shannon-Wiener 多样性指数	1	-0.355	-0.210	0.086	—	0.189	6	-80.90	181.40	0	0.478
Shannon-Wiener diversity index	2	—	-0.141	0.074	-0.122	0.215	6	-81.62	182.90	1.45	0.231
	3	—	-0.207	0.083	—	0.195	5	-84.06	183.10	1.68	0.206
物种丰富度指数	1	—	—	0.112	—	0.140	4	-49.04	109.2	0	0.359
Species richness index	2	0.144	—	—	—	0.172	4	-49.34	109.8	0.60	0.265
	3	—	—	—	—	0.152	3	-51.71	111.1	1.99	0.133

logLik: 似然值的对数 Logarithm of the likelihood value;  $w_i$ : 赤池权重 Akaike weights

GLMM 模型的分析结果表明(表 3 和表 4),自变量间无显著自相关。水位(系数为 0.036)、深水面积(系数为 0.022)和挺水植物生境面积(系数为 0.066)与功能丰富度指数呈正相关,挺水植物面积的正面影响更显著,表明挺水植物生境面积在增加生态系统的功能丰富度方面扮演了更重要的角色。泥滩面积(系数为 0.233)和水位(系数为 0.090)与功能分异度指数呈正相关,说明水位会影响水鸟群落的功能特征,而泥滩的存在促进了生态系统内部功能特征的多样化。

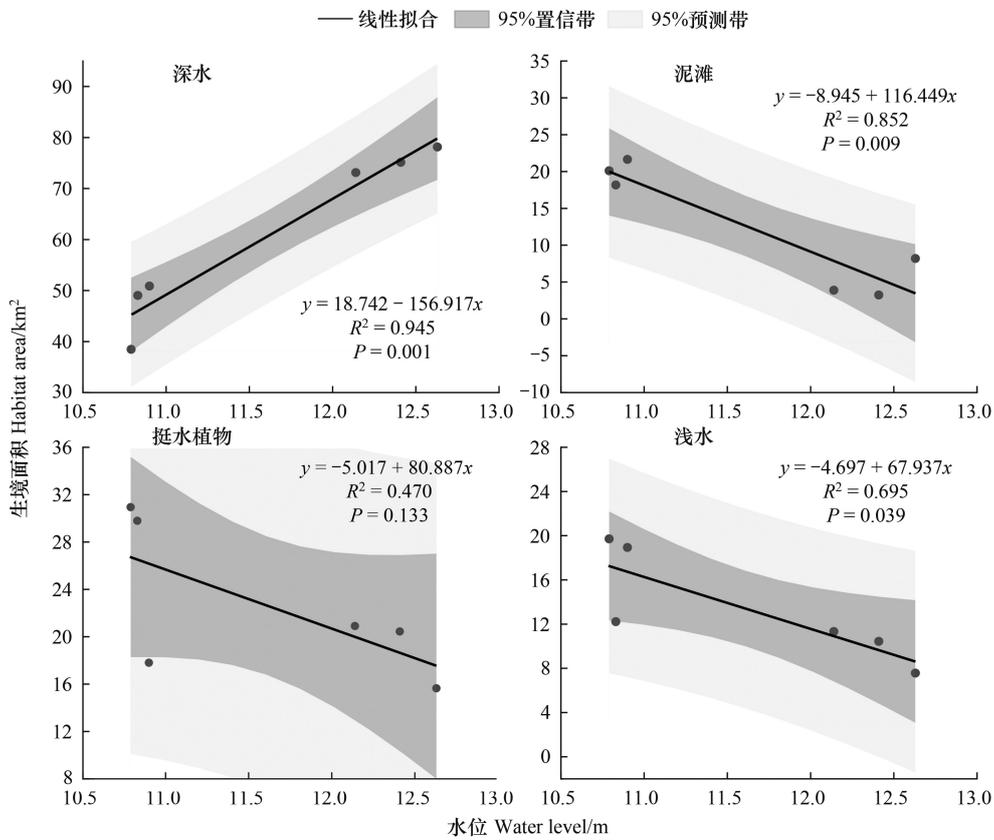


图 7 武昌湖水位与生境面积的关系

Fig.7 Relationship between water level and habitat area at Wuchang Lake

深灰色阴影代表 95% 置信带, 浅灰色阴影代表 95% 预测带

表 3 GLMM 候选模型 ( $\Delta AIC_c < 2$ ) 量化水位和生境变量对武昌湖越冬水鸟功能多样性的影响

Table 3 GLMM candidate models ( $\Delta AIC_c < 2$ ) quantify the effects of water level and habitat variables on functional diversity of wintering waterbirds at Wuchang Lake

因变量 Dependent variable	模型 Model	水位 Water level	浅水 Shallow water	深水 Deep water	泥滩 Mudflat	挺水植物区 Emergent plant area	df	logLik	AICc	$\Delta AICc$	$w_i$
功能丰富度指数 Functional richness index	1	0.036	—	0.022	—	0.066	5	-109.58	234.2	0	0.413
	2	—	—	0.026	—	0.064	4	-112.45	236.0	1.82	0.166
功能分异度指数 Functional divergence index	1	0.090	—	—	0.233	—	4	-68.21	147.5	0	0.333
	2	—	—	—	0.186	—	3	-69.97	147.6	0.15	0.309
	3	—	—	—	0.146	0.059	4	-68.93	148.9	1.44	0.162

表 4 武昌湖 2021—2022 和 2022—2023 两个年度的越冬水鸟群落多样性自变量多重共线性检验

Table 4 Multicollinearity test of independent variables for wintering waterbird community diversity during 2021—2022 and 2022—2023 at Wuchang Lake

自变量 Independent variable	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	物种丰富度指数 Species richness index	功能丰富度指数 Functional richness index	功能分异度指数 Functional divergence index
水位 Water level	2.044	2.247	2.089	2.282
浅水 Shallow water	7.285	5.697	6.507	6.276
深水 Deep water	1.308	1.546	1.534	1.502
泥滩 Mudflat	7.476	6.003	6.625	7.157
挺水植物区 Emergent plant area	3.164	2.695	2.810	2.556

模型平均结果表明(表 5),水位和不同的生境变量对分类多样性指标的相对重要性不同。水位、浅水面积、深水面积和挺水植物生境面积显著影响 Shannon-Wiener 多样性指数;挺水植物生境面积显著影响物种丰富度。

表 5 基于模型平均的各因子对武昌湖越冬水鸟分类多样性的相对重要性和相关系数(95%置信区间)

Table 5 The relative importance and correlation coefficient (95% confidence interval) of each factor to taxonomic diversity of wintering waterbirds at Wuchang Lake based on model averaging

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	相对重要性 Relative importance	相关性 Correlation	95%的置信区间 95% confidence interval
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	水位	0.52	-0.355 *	-0.58—-0.02
	浅水	1.00	-0.192 **	-0.33—-0.10
物种丰富度指数 Species richness index	深水	1.00	0.082 **	0.04—0.13
	泥滩	0.25	-0.122	-0.13—0.15
	挺水植物区	1.00	0.197 **	0.12—0.26
	水位	0.35	0.144	-0.04—0.18
	浅水	—	—	—
	深水	0.47	0.112	-0.02—0.18
	泥滩	—	—	—
	挺水植物区	1.00	0.153 *	0.06—0.26

\* 表示该自变量与因变量之间的相关性  $P < 0.05$ ; \*\* 表示该自变量与因变量之间的相关性  $P < 0.01$

模型平均结果表明(表 6),水位和不同的生境变量对功能多样性指标的相对重要性不同。水位、深水面积和挺水植物生境面积显著影响功能丰富度指数,而功能分异度指数仅受到泥滩面积的显著影响。

表 6 基于模型平均的各因子对武昌湖越冬水鸟功能多样性的相对重要性和相关系数(95%置信区间)

Table 6 The relative importance and correlation coefficient (95% confidence interval) of each factor to functional diversity of wintering waterbirds at Wuchang Lake based on model averaging

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	相对重要性 Relative importance	相关性 Correlation	95%的置信区间 95% confidence interval
功能丰富度指数 Functional richness index	水位	0.71	0.036 **	0.01—0.05
	浅水	—	—	—
	深水	1.00	0.023 *	0.004—0.04
	泥滩	—	—	—
功能分异度指数 Functional divergence index	挺水植物区	1.00	0.066 **	0.05—0.08
	水位	0.41	0.090	-0.02—0.14
	浅水	—	—	—
	深水	—	—	—
	泥滩	1.00	0.198 **	0.10—0.30
	挺水植物区	0.20	0.0591	-0.04—0.13

### 3 讨论

#### 3.1 越冬水鸟群落的分类多样性变化

在 2022—2023 年的高水位年份,武昌湖越冬水鸟群落的分类多样性相对较高。在高水位条件下,偏好深水或开阔水域的水鸟拥有更大的栖息和觅食地,雁形目、鸊鷉目(Podicipediformes)和鵜鸟目(Suliformes)等游禽倾向在开阔水域觅食,水域面积增大为其提供了丰富的食物资源,而不利于鸊鷉类等涉禽的栖息<sup>[11]</sup>。然而,在 2021—2022 年越冬期,未见涉禽的数量增加,这与武昌湖挺水植物菰占优势密切相关,因为挺水植物占优势不利于鸊鷉类等涉禽的觅食和栖息。首先,挺水植物在自然条件下具有很强的耐淹性,即使高水位,它们

也能维持生长,导致水鸟栖息环境同质化<sup>[31]</sup>。其次,高而密的挺水植物为水鸟提供比较隐蔽的生存空间,但也会增加其取食困难,尤其是那些体型较大的涉禽<sup>[32]</sup>。同时,挺水植物发达的根系和大量凋落物覆盖于土壤表面致使退水后泥滩无法裸露,不利于鹈形目(Pelecaniformes)、鸬形目(Ciconiiformes)、鹤形目(Gruiformes)和鸻形目(Charadriiformes)鸟类觅食<sup>[33-34]</sup>。因此,分类多样性增加不代表水位高适合水鸟栖息,而是武昌湖挺水植物占优势本就不利于鸻鹬类等涉禽栖息,而高水位更适合游禽觅食和栖息,游禽的优势种变多,数量增加,分类多样性增加,但群落的功能性状却趋于单一化。

### 3.2 越冬水鸟群落的功能多样性变化

在 2022—2023 年的高水位年份,武昌湖越冬水鸟群落的功能分异度指数相对较低,而功能丰富度未见显著性差异。功能分异度指数表示群落内不同物种性状间的差异性,体现了群落内不同物种间的生态位分化和资源竞争程度,该指数越低,说明群落内物种功能上的相似性较高,竞争较强<sup>[23]</sup>。在高水位条件下,一些浅水和泥滩等生境未裸露,形态相似的物种聚集在一个狭小的栖息环境中,群落内部物种间的竞争强度增加<sup>[35-36]</sup>。功能丰富度指数指物种功能特征在群落内所占据的功能空间的大小,反映了物种对生态空间的利用率,该指数越低,表明群落中潜在的生态资源未被充分利用<sup>[23]</sup>。武昌湖挺水植物占优势,限制了涉禽的觅食和栖息。在不同水位条件下,游禽始终占据优势地位,水鸟的种类能保持相对稳定,其功能丰富度也不会因水位的变化而受到显著影响。此外,在生态系统中,功能冗余意味着即便某些越冬水鸟因水位变化而受到影响,其他具有相似功能特征的物种会填补这些生态位,从而导致整体功能丰富度保持稳定<sup>[37]</sup>。

环境胁迫(水位上升)和生境退化(生境同质化)导致功能多样性的降低。在受胁迫的环境中,只有那些能够适应当前条件的物种(游禽)才能保留下来,而那些具有独特形态特征的物种则会消失,体现了环境对物种性状的选择过滤作用。同时,水位升高和同质化的生境减少了异质化生境需求的越冬水鸟生存空间,压缩了它们的生态位。随着分类多样性的增加,导致它们的生态位重叠,同资源种团(集团)物种间的竞争加剧,影响共存的物种数量,从而减少了生态系统内部的功能多样性。

### 3.3 水位对越冬水鸟群落多样性的影响

水位对越冬水鸟的多样性产生影响,主要体现在两个方面:首先是不同种类水鸟自身的形态特征、食性和觅食地选择的差异<sup>[20, 36, 38]</sup>;其次是水位变化引起的生境变化对越冬水鸟多样性的影响<sup>[39]</sup>。当湖泊水位上升,浅水区被淹没变成深水区,扩大适合游禽觅食的生境面积。深水区为某些特定物种(如潜水型和浮水型水鸟)提供了更适合的生存环境,同时也会淹没岸边的泥滩地,减少涉禽的生境面积<sup>[9, 11]</sup>。当湖泊水位下降,泥滩裸露,草滩生长,食物资源逐渐变得丰富且易获得<sup>[2]</sup>。泥滩对于涉禽而言,是觅食和栖息的理想场所,而较长时间暴露的草滩对于草食性雁类有利<sup>[7, 40]</sup>。涉禽利用其长腿和长喙,在浅水中或泥泞的泥滩地探寻食物,如鱼类、两栖类及水生无脊椎动物等<sup>[8]</sup>。泥滩地面积的扩大,能够提供更丰富的食物资源,从而支持更多的涉禽觅食和栖息,促进了某些物种的增长和扩散<sup>[8]</sup>。相反,这些区域的减少可能会导致食物资源紧缺,迫使涉禽迁往其他地区或者面临饥饿的风险。在本研究中,泥滩面积与功能分异度呈显著的正相关,说明随着泥滩面积的增加,武昌湖湿地能够支持更多在功能上互补或者功能差异较大的物种。同时,考虑到草滩生长的滞后性,在湖区退水一段时间后,草滩开始生长形成优质草甸,为草食性鸟类提供了良好的觅食地<sup>[10]</sup>。然而,武昌湖挺水植物占优势,阻碍了草滩的生长,菰在自然条件下也显示了很强的耐淹性,即使高水位,它们也能维持生长<sup>[31]</sup>。因此,水位变动对武昌湖沿岸挺水植物区的面积变化影响较小。

本研究结果表明,以挺水植物菰为主的武昌湖湿地生态系统中,挺水植物为游禽提供了丰富的食物资源和适宜的栖息环境,以及必要的隐蔽场所<sup>[2, 7, 11]</sup>。在野外调查中,经常观察到小天鹅(*Cygnus columbianus*)、鸿雁和白鹤等以地下块茎为食,灰雁、豆雁和白额雁(*Anser albifrons*)等以草甸植物为食,绿头鸭、斑嘴鸭、针尾鸭(*Anas acuta*)和绿翅鸭(*Anas crecca*)等浮水觅食水鸟在菰丛中觅食和栖息。这种现象可以解释本研究的分类多样性和功能多样性与挺水植物生境面积呈正相关,这是因为这些植物为越冬水鸟提供了丰富的食物资源和适宜的栖息环境,从而吸引并支持多种水鸟觅食和栖息。然而,挺水植物占优势却对涉禽的生存不利。在武

昌湖的野外调查中发现,不论是低水位还是高水位,涉禽的数量均无显著差异。相反,高水位却更有利于游禽的生存。这一现象可以解释为何武昌湖湿地深水面积与分类多样性和功能多样性成正相关,而泥滩和浅水面积与分类多样性呈负相关。

#### 4 结论

研究表明,水鸟分类和功能多样性年际间差异明显,说明两个年度间水鸟群落的种类组成、数量和性状特征存在差异。与 2021—2022 年低水位年份相比,2022—2023 年高水位年份水鸟群落的 Shannon-Wiener 多样性指数显著提高( $P<0.05$ ),而功能分异度指数显著降低( $P<0.05$ )。结果表明,高水位年份水鸟群落内的功能性状组成趋于相似,表现出功能性状的趋同现象。这种现象反映了高水位条件下越冬水鸟栖息环境的单一化,群落内物种间的竞争强度增加,功能分异度降低。相对而言,低水位年份为越冬水鸟提供了更为多样化和适宜的栖息条件,水鸟群落的功能性状更加多样化。水位与浅水、深水和泥滩面积具有显著相关性,水位通过影响越冬水鸟生境,显著影响越冬水鸟群落的分类和功能多样性。2022—2023 年的高水位年份,水域面积广阔,武昌湖湿地游禽占优势;而 2021—2022 年的低水位年份,武昌湖湿地泥滩面积相对较大,可以吸引更多形态特征各异的越冬水鸟觅食和栖息。高水位通常有利于游禽的栖息,因为它们适应于深水和开阔的水域环境;而低水位有利于涉禽,因为泥滩的暴露为涉禽提供了适宜的栖息环境和丰富的食物资源。Shannon-Wiener 多样性指数和功能丰富度指数与水位之间具有显著的相关性,提示水位变化也会直接影响越冬水鸟群落的多样性。本研究结果尽管对武昌湖水鸟多样性的保护具有重要意义,仍需要进一步细化水位调控方案后,水位状态以及挺水植物菰对水鸟多样性的影响研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Jing L, Lu C, Xia Y, Shi L L, Zuo A J, Lei J L, Zhang H, Lei G C, Wen L. Effects of hydrological regime on development of *Carex* wet meadows in East Dongting Lake, a Ramsar Wetland for wintering waterbirds. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41761.
- [ 2 ] Li C L, Yang Y, Wang Z, Yang L, Zhang D M, Zhou L Z. The relationship between seasonal water level fluctuation and habitat availability for wintering waterbirds at Shengjin Lake, China. *Bird Conservation International*, 2019, 29(1): 100-114.
- [ 3 ] 张超, 李言阔, 任琼, 单继红, 王贤芳, 方彭军, 邵瑞清, 申锦, 钱磊, 李安梅, 塔旗. 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.
- [ 4 ] 李凌晨, 周立志, 程磊, 姚简, 宋昀微. 极端洪水作用下降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.
- [ 5 ] Wei Z H, Zhou L Z. The impact of earlier flood recession on metacommunity diversity of wintering waterbirds at shallow lakes in the Middle and Lower Yangtze River floodplain. *Avian Research*, 2023, 14: 100102.
- [ 6 ] Sandi S G, Saco P M, Saintilan N, Wen L, Riccardi G, Kuczera G, Willgoose G, Rodríguez J F. Detecting inundation thresholds for dryland wetland vulnerability. *Advances in Water Resources*, 2019, 128: 168-182.
- [ 7 ] Li C L, Li H F, Zhang Y, Zha D D, Zhao B B, Yang S, Zhang B W, de Boer W F. Predicting hydrological impacts of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project on habitat availability for wintering waterbirds at Caizi Lake. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109251.
- [ 8 ] Zhang Z F, Xia S S, Sun X T, Zhou L Z. Effects of macrobenthos relative to floating-leaved plants on the wintering shorebird assemblages at Shengjin Lake, China. *Diversity*, 2022, 14(12): 1072.
- [ 9 ] Zhi Y J, Shao M Q, Li Q J. Wading bird habitat, water depth utilization and niche separation in Poyang Lake, China. *Pakistan Journal of Zoology*, 2020, 52(6): 2243-2250.
- [ 10 ] Zhang Y Q, Zhou L Z, Cheng L, Song Y W. Water level management plan based on the ecological demands of wintering waterbirds at Shengjin Lake. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01567.
- [ 11 ] Li Y K, Qian F W, Silbernagel J, Larson H. 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.
- [ 12 ] Hu B S, Zou L, Qi S H, Yin Q, Luo J, Zuo L J, Meng Y. Evaluating the vulnerability of Siberian crane habitats and the influences of water level intervals in Poyang Lake wetland, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2774.
- [ 13 ] Chao A N, Chiu C H, Jost L, Futuyma D J. Unifying species diversity, phylogenetic diversity, functional diversity, and related similarity and differentiation measures through hill numbers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45(1): 297-324.
- [ 14 ] Li J Y, Qian F W, Zhang Y, Zhao L N, Deng W Q, Ma K M. Identifying seasonal differences in migration characteristics of Oriental white stork (*Ciconia boyciana*) through satellite tracking and remote sensing. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109760.
- [ 15 ] Hu G, Jin Y, Liu J L, Yu M J. Functional diversity versus species diversity: relationships with habitat heterogeneity at multiple scales in a

- subtropical evergreen broad-leaved forest. *Ecological Research*, 2014, 29(5): 897-903.
- [16] 张建贵, 王理德, 姚拓, 李海云, 高亚敏, 杨晓玫, 李昌宁, 李琦, 冯影, 胡彦婷. 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究. *草业学报*, 2019, 28(5): 15-25.
- [17] 李学梅, 孟子豪, 胡飞飞, 刘璐, 龚森森, 朱永久, 杨德国. 安徽武昌湖丰、枯水期浮游植物初级生产力特征及其与环境因子的关系. *淡水渔业*, 2021, 51(6): 3-10.
- [18] 刘赵文, 周葆华, 寇乐勇, 刘海军, 赵宽. 武昌湖典型退化湿地菰草根际微生物群落结构. *地球与环境*, 2018, 46(4): 339-347.
- [19] 姚简, 周立志, 魏振华, 李凌晨. 莱子湖冬季水鸟空间分布与环境因子的关系研究. *生态科学*, 2022, 41(1): 1-10.
- [20] Wilman H, Belmaker J, Simpson J, de la Rosa C, Rivadeneira M M, Jetz W. EltonTraits 1.0: species-level foraging attributes of the world's birds and mammals. *Ecology*, 2014, 95(7): 2027.
- [21] Tobias J A, Sheard C, Pigot A L, Devenish A J M, Yang J Y, Sayol F, Neate-Clegg M H C, Alioravainen N, Weeks T L, Barber R A, Walkden P A, MacGregor H E A, Jones S E I, Vincent C, Phillips A G, Marples N M, Montañó-Centellas F A, Leandro-Silva V, Claramunt S, Darski B, Freeman B G, Bregman T P, Cooney C R, Hughes E C, Capp E J R, Varley Z K, Friedman N R, Korntheuer H, Corrales-Vargas A, Trisos C H, Weeks B C, Hanz D M, Töpfer T, Bravo G A, Remeš V, Nowak L, Carneiro L S, Matysioková B, Baldassarre D T, Martínez-Salinas A, Wolfe J D, Chapman P M, Daly B G, Sorensen M C, Neu A, Ford M A, Mayhew R J, Silveira L F, Kelly D J, Annorbah N N D, Pollock H S, Grabowska-Zhang A M, McEntee J P, Gonzalez J C T, Meneses C G, Muñoz M C, Powell L L, Jamie G A, Matthews T J, Johnson O, Brito G R R, Zyskowski K, Crates R, Harvey M G, Zevallos M J, Hosner P A, Bradfer-Lawrence T, Maley J M, Stiles F G, Lima H S, Provost K L, Chibesa M, Mashao M, Howard J T, Mlamba E, Chua M A H, Li B C, Isabel Gómez M, García N C, Päckert M, Fuchs J, Ali J R, Derryberry E P, Carlson M L, Urriza R C, Brzeski K E, Prawiradilaga D M, Rayner M J, Miller E T, Bowie R C K, Lafontaine R M, Scofield R P, Lou Y Q, Somarathna L, Lepage D, Illif M, Neuschulz E L, Templin M, Dehling D M, Cooper J C, Pauwels O S G, Analuddin K, Fjeldsø J, Seddon N, Sweet P R, DeClerck F A J, Naka L N, Brawn J D, Aleixo A, Böhning-Gaese K, Rahbek C, Fritz S A, Thomas G H, Schlegel M. AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds. *Ecology Letters*, 2022, 25(3): 581-597.
- [22] Tuomisto H. A consistent terminology for quantifying species diversity? Yes, it does exist. *Oecologia*, 2010, 164(4): 853-860.
- [23] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, Wilson J B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 2005, 111(1): 112-118.
- [24] Burnham K P, Anderson D R. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 2004, 33(2): 261-304.
- [25] Cameron R A D, Triantis K A, Parent C E, Guilhaumon F, Alonso M R, Ibáñez M, de Frias Martins A M, Ladle R J, Whittaker R J. Snails on oceanic islands: testing the general dynamic model of oceanic island biogeography using linear mixed effect models. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(1): 117-130.
- [26] Özgencil İ K, Beklioğlu M, Özkan K, Tavşanoğlu Ç, Fattorini N. Changes in functional composition and diversity of waterbirds: the roles of water level and submerged macrophytes. *Freshwater Biology*, 2020, 65(11): 1845-1857.
- [27] Aho K, Derryberry D, Peterson T. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology*, 2014, 95(3): 631-636.
- [28] Cade B S. Model averaging and muddled multimodel inferences. *Ecology*, 2015, 96(9): 2370-2382.
- [29] 何文韵, 邵明勤, 植毅进, 戴年华, 卢萍, 涂小云. 鄱阳湖三个垦殖场的水鸟多样性. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2765-2771.
- [30] Kitani M, Murakami H. The limiting distribution of combining the *t* and Wilcoxon rank sum tests. *Statistics*, 2020, 54(4): 871-884.
- [31] Zhang X K, Wan A, Wang H L, Zhu L L, Yin J, Liu Z G, Yu D P. The overgrowth of *Zizania latifolia* in a subtropical floodplain lake: changes in its distribution and possible water level control measures. *Ecological Engineering*, 2016, 89: 114-120.
- [32] Lantz S M, Gawlik D E, Cook M I. The effects of water depth and emergent vegetation on foraging success and habitat selection of wading birds in the Everglades. *Waterbirds*, 2011, 34(4): 439-447.
- [33] Brindock K M, Colwell M A. Habitat selection by western snowy plovers during the nonbreeding season. *The Journal of Wildlife Management*, 2011, 75(4): 786-793.
- [34] Larson D M, Cordts S D, Hansel-Welch N. Shallow lake management enhanced habitat and attracted waterbirds during fall migration. *Hydrobiologia*, 2020, 847(16): 3365-3379.
- [35] Bai J P, Zhang H, Zhou H K, Li S, Gao B, Chen P, Ma L, Xu Z F, Zhang Z, Xu C X, Ruan L Z, Ge G. Winter coexistence in herbivorous waterbirds: niche differentiation in a floodplain, Poyang Lake, China. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(23): 16835-16848.
- [36] Yu C, Zhang R L, Zhou L Z, Cheng L, Bao Y W, Song Y W. Morphological characteristics influence the spatial mixing patterns of shorebirds at Shengjin Lake. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(5): e10054.
- [37] 姚天华, 朱志红, 李英年, 潘石玉, 孔彬彬, 卫欣华, 杜家丽. 功能多样性和功能冗余对高寒草甸群落稳定性的影响. *生态学报*, 2016, 36(6): 1547-1558.
- [38] Pierce R L, Gawlik D E. Wading bird foraging habitat selection in the Florida Everglades. *Waterbirds*, 2010, 33(4): 494-503.
- [39] Lorenzón R E, Beltzer A H, Peltzer P M, Olguin P F, León E J, Sovrano L, Ronchi-Virgolini A L. Habitat-mediated influence of water-level fluctuations on waterbird occurrence in floodplain wetlands of the Parana River, Argentina. *River Research and Applications*, 2017, 33(9): 1494-1505.
- [40] Teng J K, Xia S X, Liu Y, Duan H L, Yu X B, Chen J. 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.

附表 1 2021—2022 年和 2022—2023 年越冬期武昌湖越冬水鸟的种类和数量(平均值±标准差)

Appendix Table 1 Species and numbers of wintering waterbirds during the wintering periods of 2021—2022 and 2022—2023 at Wuchang Lake (Mean±SD)

序号 Number	物种名 Species	水鸟数量 Number of waterbirds/只		保护等级 Protection level	迁徙路线 1%种群 1% of the population on the flyway	受胁等级 Threatened level
		2021—2022 (n=3)	2022—2023 (n=3)			
I	雁形目 Anseriformes					
(i)	鸭科 Anatidae					
1	小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	600.33±296.30	265.33±171.80	国二		LC
2	灰雁 <i>Anser anser</i>	1674.67±1700.74	6856.00±2073.49		√	LC
3	鸿雁 <i>Anser cygnoides</i>	10.67±12.90	230.00±50.24	国二		EN
4	豆雁 <i>Anser fabalis</i>	20005.33±8176.91	8418.67±5537.96		√	LC
5	白额雁 <i>Anser albifrons</i>	6.67±11.55	21.33±36.95	国二		LC
6	翘鼻麻鸭 <i>Tadorna tadorna</i>	2.00±3.46	0			LC
7	赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>	15.00±24.27	4.00±1.00			LC
8	棉凫 <i>Nettapus coromandelianus</i>	0	0.60±0	国二		LC
9	红头潜鸭 <i>Aythya ferina</i>	0	25.67±42.74			VU
10	青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	4.33±5.86	108.67±188.22	国一	√	CR
11	白眼潜鸭 <i>Aythya nyroca</i>	0	1.00±1.73			NT
12	凤头潜鸭 <i>Aythya fuligula</i>	0	5.00±6.24			LC
13	琵嘴鸭 <i>Spatula clypeata</i>	2.00±3.46	0			LC
14	花脸鸭 <i>Sibirionetta formosa</i>	0	666.67±1154.70	国二		LC
15	罗纹鸭 <i>Mareca falcata</i>	981.67±1559.59	2084.67±2302.74		√	NT
16	赤膀鸭 <i>Mareca strepera</i>	0	22.00±20.66			LC
17	赤颈鸭 <i>Mareca penelope</i>	0	21.67±37.53			LC
18	斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	2749.00±1997.01	6691.67±3367.29			LC
19	绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	1623.00±1748.72	5575.67±2216.18			LC
20	针尾鸭 <i>Anas acuta</i>	0.33±0.58	335.67±581.39			LC
21	绿翅鸭 <i>Anas crecca</i>	1281.00±1482.86	2517.33±1449.97			LC
II	鸕鹚目 Podicipediformes					
(ii)	鸕鹚科 Podicipedidae					
22	小鸕鹚 <i>Tachybaptus ruficollis</i>	62.67±14.29	25.67±4.04			LC
23	凤头鸕鹚 <i>Podiceps cristatus</i>	44.67±30.75	319.67±185.65		√	LC
III	鹤形目 Gruiformes					
(iii)	秧鸡科 Rallidae					
24	红脚田鸡 <i>Zapornia akool</i>	0.67±0.58	0			LC
25	黑水鸡 <i>Gallinula chloropus</i>	196.67±101.79	198.33±61.23			LC
26	白骨顶 <i>Fulica atra</i>	113.67±19.66	611.00±128.75			LC
(iv)	鹤科 [Gruidae					
27	白鹤 <i>Leucogeranus leucogeranus</i>	81.33±43.36	20.67±17.01	国一	√	CR
28	白头鹤 <i>Grus monacha</i>	2.67±4.62	37.00±39.15	国一	√	VU
IV	鹳形目 Ciconiiformes					
(v)	鹳科 Ciconiidae					
29	东方白鹳 <i>Ciconia boyciana</i>	601.67±416.14	20.67±17.04	国一	√	EN
V	鹭形目 Pelecaniformes					
(vi)	鹭科 Threskiornithidae					
30	白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	299.67±435.67	155.33±147.30	国二	√	LC
(vii)	鹭科 Ardeidae					

续附表

序号 Number	物种名 Species	水鸟数量 Number of waterbirds/只		保护等级 Protection level	迁徙路线 1%种群 1% of the population on the flyway	受胁等级 Threatened level
		2021—2022 (n=3)	2022—2023 (n=3)			
31	大麻鳎 <i>Botaurus stellaris</i>	0	0.33±0.58			LC
32	夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i>	29.67±44.56	19.00±28.58			LC
33	苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	213.33±110.91	231.00±145.68			LC
34	草鹭 <i>Ardea purpurea</i>	0.67±1.15	0			LC
35	大白鹭 <i>Ardea alba</i>	57.33±83.19	67.67±57.14			LC
36	白鹭 <i>Egretta garzetta</i>	17.33±12.22	21.00±10.39			LC
VI	鹭鸟目 Suliformes					
(viii)	鸬鹚科 Phalacrocoracidae					
37	普通鸬鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	20.00±32.08	173.00±105.53			LC
VII	鸻形目 Charadriiformes					
(ix)	反嘴鹬科 Recurvirostridae					
38	反嘴鹬 <i>Recurvirostra avosetta</i>	150.33±183.09	39.00±12.12			LC
(x)	鸻科 Charadriidae					
39	凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>	389.67±309.76	611.33±737.00			NT
40	灰头麦鸡 <i>Vanellus cinereus</i>	0.67±1.15	4.00±6.93			LC
41	金眶鸻 <i>Charadrius dubius</i>	0	0.33±0.58			LC
42	环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i>	0.67±1.15	0.33±0.58			LC
(xi)	鹬科 Scolopacidae					
43	黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	625.00±542.27	107.67±186.48			LC
44	扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i>	0	0.67±0.58			LC
45	矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i>	0.33±0.58	1.00±1.73			LC
46	白腰草鹬 <i>Tringa ochropus</i>	2.00±1.00	0.67±0.58			LC
47	鹤鹬 <i>Tringa erythropus</i>	95.33±93.83	68.67±53.78			LC
48	青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i>	9.00±10.15	10.67±13.43			LC
49	林鹬 <i>Tringa glareola</i>	0	0.33±0.58			LC
(xii)	鸥科 Laridae					
50	红嘴鸥 <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	1388.00±2166.17	619.33±248.37			LC
51	西伯利亚银鸥 <i>Larus vegae</i>	7.00±5.57	19.00±12.12			LC

参照《中国鸟类分类与分布名录(第四版)》;国一和国二分别为国家一级重点保护物种和国家二级重点保护物种;受胁等级指根据世界自然保护联盟(IUCN)红色名录对物种的受胁程度进行分类;其中,极危物种(Critically Endangered, CR)、濒危物种(Endangered, EN)、易危物种(Vulnerable, VU)、近危物种(Near Threatened, NT)和无危物种(Least Concern, LC)