

DOI: 10.20103/j.stxb.202206161714

李凌晨, 周立志, 程磊, 姚简, 宋昀微. 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.

Li L C, Zhou L Z, Cheng L, Yao J, Song Y W. 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.

# 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

李凌晨<sup>1,2,3</sup>, 周立志<sup>1,2,3,\*</sup>, 程磊<sup>1,2,3</sup>, 姚简<sup>1,2,3</sup>, 宋昀微<sup>3,4</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

3 安徽升金湖湿地生态学国家长期科研基地, 池州 247200

4 安徽升金湖国家级自然保护区管理处, 池州 247200

**摘要:**水鸟是湿地生境质量的重要指示性动物类群,可敏感地反映湿地环境变化。浅水通江湖泊消落带具有复杂多样的生境和丰富的食物资源,是水鸟特别是越冬水鸟的重要聚集区,其食物资源的丰富度和可获得性受水文节律影响。在极端洪水作用下,消落带生境变化对越冬水鸟群落结构及其多样性的影响是一个值得关注的水鸟及湿地生态学问题。选择了具有典型消落带生境的升金湖作为研究区域,对 2019 年(正常水位)和 2020 年(异常水位)两个越冬季水鸟的数量、种类进行调查统计,分析了消落带的生境变化情况对越冬水鸟群落结构的影响。2019 年越冬期,记录到水鸟(50984.20±9595.71)只( $n=5$ ),隶属 7 目 13 科 51 种;2020 年越冬期,记录到水鸟(27923.00±13808.47)只( $n=5$ ),隶属 7 目 12 科 53 种。整个越冬季消落带的水鸟种类略增但数量减少,2019 年游禽中的优势种为豆雁,2020 年游禽中的优势种增加为豆雁和斑嘴鸭,但涉禽中的优势种由白琵鹭、反嘴鹬、凤头麦鸡转变为苍鹭、大白鹭和反嘴鹬。洪水导致的草滩-水域混合区生境面积减小使湿生植物退化,可能是导致以豆雁为主的食苔草水鸟数量大幅度减少的重要原因;因湖水延迟消退,裸露的泥滩面积大幅度下降,可能致使食底栖动物水鸟数量减少;湖泊水位上升和消落带水域面积的增加,加大了食鱼水鸟的捕食难度,导致数量锐减;提供植物种子的生境缺少,使觅食种子的斑嘴鸭和绿翅鸭数量明显下降;沉水植物的适宜生境面积下降直接影响到食地下茎的水鸟分布,并致其数量减少。研究结果有利于理解升金湖消落带生态系统的健康状况,为越冬水鸟的保护和湿地的管理提供基础资料。

**关键词:**越冬水鸟;栖息地;取食集团;消落带;空间分布;升金湖

## Impact of habitat changes in the riparian zone at Shengjin Lake under extreme flooding on the community structure of wintering waterbirds

LI Lingchen<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Lizhi<sup>1,2,3,\*</sup>, CHENG Lei<sup>1,2,3</sup>, YAO Jian<sup>1,2,3</sup>, SONG Yunwei<sup>3,4</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

3 Anhui Shengjin Lake Wetland Ecology National Long-Term Scientific Research Base, Chizhou 247200, China

4 Administration of Anhui Shengjin Lake National Nature Reserve, Chizhou 247200, China

**Abstract:** Waterbirds are important indicators of wetland habitat quality. The riparian zones of shallow river-connected lakes provide the complex and diverse habitats and rich food resources for waterbirds, especially wintering waterbirds. Hydrological rhythms determine the richness and availability of the food resources for wintering waterbirds. Under the extreme flood pulse, the influence of habitat changes in the riparian zone on the structure and diversity of the wintering

基金项目:国家自然科学基金项目(32171530, 31772485)

收稿日期:2022-06-16; 网络出版日期:2023-05-08

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

waterbird community is a noteworthy problem of waterbirds and wetlands. In this study, we chose Shengjin Lake with typical riparian habitats as research area, surveyed the number and species of waterbirds in 2019 (normal water level) and 2020 (abnormal water level), and analyzed the effects of habitat changes on the community structure of wintering waterbirds in the riparian zone. A total of  $50984.20 \pm 9595.71$  ( $n = 5$ ) waterbirds were counted during winter of 2019, belonging to 7 orders, 13 families, and 51 species, whereas only  $27923.00 \pm 13808.47$  ( $n = 5$ ) waterbirds were recorded in 2020, belonging to 7 orders, 12 families, and 53 species. In the whole winter, the species diversity of waterbirds increased slightly but the number decreased in the riparian zone. In 2019, the dominant species of swimming birds were *Anser fabalis*. In 2020, the dominant species of swimming birds increased to *Anser fabalis* and *Anas poecilorhyncha*. But the dominant species of wading birds changed from *Platalea leucorodia*, *Recurvirostra avosetta* and *Vanellus vanellus*, to *Ardea cinerea*, *Egretta alba* and *Recurvirostra avosetta*. The decrease of habitat area in the vegetation-water mixed area caused by flooding negatively impacted wet plant populations, which might be an important reason for the significant decrease in grass forager number (mainly *Anser fabalis*). Due to the delayed lake water recession, the area of bare mudflats has decreased significantly, which might lead to a decrease in the number of invertebrate foragers. Water level raise and water area increase in the riparian zone increased the difficulty of predation by fish foragers, resulting in the number of them drops sharply. The lack of habitats providing plant seeds significantly reduced the number of *Anas poecilorhyncha* and *Anas crecca*. The habitats suitable for the submerged plants decreased, directly affecting the distribution of tuber foragers, resulting in their number reduction. The study results are helpful to understand the health status of the ecosystem in the riparian zone at Shengjin Lake, and provide basic data for the protection of wintering waterbirds and wetland management.

**Key Words:** wintering waterbird; habitat; foraging group; riparian zone; spatial distribution; Shengjin Lake

水鸟是湿地生态系统中重要的组成部分,是食物链较高营养级的重要功能群,对环境改变十分敏感,因此被认为是湿地生境质量的重要指示性物种<sup>[1]</sup>。湖泊消落带是指水体与陆地之间的交错过渡带,其对整个湖泊生态系统的物质交换等生态过程以及水鸟群落多样性的维持具有十分重要的作用<sup>[2]</sup>。浅水通江湖泊水文节律决定其食物资源的丰富度和可获得性,消落带具有复杂多样的生境和丰富的食物资源,是水鸟特别是越冬水鸟重要的栖息地。湖泊消落带对于外部条件变化和干扰极为敏感,许多因素的变化都会导致消落带内的生境产生改变(如水文<sup>[3]</sup>,温度<sup>[4]</sup>,海拔高度<sup>[5]</sup>),进而影响消落带生物群落的种类与数量的动态变化。在极端洪水作用下,湖泊异常水文节律所引起的消落带生境变化对越冬水鸟群落结构及其多样性的影响是一个值得关注的水鸟与湿地生态学问题。

升金湖位于长江中下游,是永久性天然闸控浅水通江湖泊,具有典型的消落带。其季节性的水文变化,为水鸟提供了丰富的食物资源、觅食生境等活动场所<sup>[6]</sup>。因秋冬季湖泊水位的下降,升金湖消落带的生境也相应地发生改变,最为明显的就是草滩和泥滩大面积暴露。消落带中植物块茎生长的泥滩<sup>[7]</sup>和浅水区是白头鹤(*Grus monacha*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)等水鸟觅食活动的集中区;裸露的草滩为雁鸭提供觅食场所<sup>[8]</sup>;深水区是鸕鹚类和鸥类所偏好的深水觅食区<sup>[9]</sup>。湖泊水位波动幅度的大小,对消落带内生境产生不同程度的影响,如水位波动幅度较大的湖泊比水位波动幅度小的湖泊具有异质性程度更高的消落带基质,滩涂区域含有更低的植物覆盖率<sup>[10]</sup>。因此适宜的水文条件是维持湖泊消落带生态系统健康的重要保障,也是维持水鸟适宜生境的前提条件。

2020年夏季长江流域发生了强降雨,降雨量比同期多年平均值增加30%<sup>[11]</sup>,升金湖的水位最高达到16.99 m(2020年8月3日,黄湓闸闸上水位),比2019年最高水位上升了2.49 m。到了秋冬季,升金湖水位依旧比往年同期高出许多。这一异常的湖泊水文节律给升金湖消落带生境带来了巨大的变化,对于需要在非繁殖期寻找足够食物资源的水鸟来说,这是一个巨大的挑战<sup>[12]</sup>。因此,需要加强升金湖消落带越冬水鸟多样性监测,及时掌握越冬水鸟的变化情况,同时需要深入研究消落带生境变化对水鸟群落结构的影响,以便采取积

极水鸟资源保护应对措施。

本研究通过野外调查,掌握升金湖极端与非极端洪水作用下的消落带越冬水鸟特征,研究消落带越冬水鸟的空间分布格局、群落多样性和取食集团的变化,进一步探究消落带生境变化对水鸟群落结构、物种多样性和取食集团的影响。本研究有利于揭示越冬水鸟对环境因子变化的响应和生态适应机制,并且有助于理解升金湖消落带生态系统的健康状况,为越冬水鸟的保护和湿地的管理提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

升金湖(116°55′—117°15′E, 30°15′—30°30′N)是长江右岸的永久性天然浅水通江湖泊,位于安徽池州市境内(图1)。湖区的地形多样,湖盆的形状和水流的方向将湖分为三个部分:上湖,中湖和下湖,上湖承接张溪河等来水,唐田河流入中湖,湖水经下湖从黄盆闸流入长江。该地区是亚热带湿润气候,年平均气温为16.1℃,1月平均气温为4.0℃。在冬季,湖区温度低于0℃的天数较少,湖面有少量结冰而无全湖冰封期。年平均降雨量为1600 mm,冬季降雨少。每年夏季,八月是湖泊丰水期,此后水位逐渐下降,冬季在12月进入枯水期,水位在翌年的4月恢复上涨。冬季湖泊水位较低,裸露出大面积的滩涂,为越冬鸟类提供良好的栖息觅食生境。湖区的主要植被有挺水植物,如芦苇(*Phragmites australis*)、菰(*Zizania latifolia*)和香蒲(*Typha orientalis*);浮水植被包括菱(*Trapa bispinosa*)和芡(*Euryale ferox*);沉水植被主要包括刺苦草(*Vallisneria spiralis*)、马来眼子菜(*Potamogeton wrightii*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等。这些植物在冬季死亡,枯萎植被留下的果实、块茎等营养体,以及底栖动物为越冬水鸟提供丰富的可供利用的食物资源。

升金湖位于东亚—澳大利西亚水鸟迁徙路线上,每年10月初迁徙水鸟陆续迁来,次年4月末陆续迁离。根据调查,每年在这里聚集的水鸟超过70000只,约占长江中下游流域珍稀水鸟总数的5%—10%<sup>[13]</sup>。记录到的全球濒危物种有白鹤(*Grus leucogeranus*)、白头鹤、黑鹳(*Ciconia nigra*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、鸿雁(*Anser cygnoides*)和小白额雁(*Anser erythropus*)。同时,也是小天鹅和豆雁(*Anser fabalis*)在东亚—澳大利西亚水鸟迁徙路线上最重要的越冬地,拥有该迁徙路线上75%的种群数量<sup>[13]</sup>。作为安徽省内以越冬珍稀水鸟为主要保护对象的国家级自然湿地,该湖于1986年建立升金湖省级自然保护区,1997年建立国家级自然保护区,并于2015年被列入国际重要湿地名录。保护区总面积333.4 km<sup>2</sup>,核心区101.5 km<sup>2</sup>,占保护区总面积的30.5%;缓冲区面积103.0 km<sup>2</sup>,占保护区总面积的30.9%;实验区128.9 km<sup>2</sup>,占保护区总面积的38.7%。本研究区域为湖泊的消落带(消落区或水位波动区),是由于周期性水位波动而在湖泊周围形成的最高水位和最低水位之间的区域<sup>[14—16]</sup>。

受夏季洪水的影响,升金湖秋冬季水文动态有所改变,2020—2021年越冬季水位变化十分明显,特别是越冬前期水位较高,且水位下降速度快,随后水位又因人为控闸骤然下降(图2)。而未经历过夏季洪水的2019—2020年越冬季水位较为平稳,与之相比,2020—2021年越冬季升金湖水鸟的栖息地可能会对越冬水鸟产生不利影响。

### 1.2 越冬水鸟数据获取

本文根据具体研究区地形、地貌和鸟类集群情况,在升金湖消落带共选择22个样点对升金湖水鸟群落进行调查(图1),每个样点观测范围为半径约1 km的区域,观测时间至少为20 min。在调查时间上,分别于未发生洪水的2019—2020年和发生洪水后的2020—2021年两个越冬季(即当年的10月份至次年2月份)进行水鸟调查,每月中下旬调查一次,每次2—3 d。由于两年越冬季12月份的调查日期相近且调查日湖泊水位相当,可排除调查时间和水位这两种可能会影响对比的干扰因素,则针对水鸟群落状况及空间分布进行分析,具体调查时间为2019年12月15—17日以及2020年12月12—13日。调查人员分为两队,每队2—3名人员,在固定样点进行监测。调查时尽可能避免恶劣天气,一般从7:00开始,17:00结束,随机选择观测时间以避免时差影响水鸟数据,以识别物种并获得准确的计数<sup>[17,18]</sup>。在观察过程中,用单筒望远镜(SWAROVSKI,



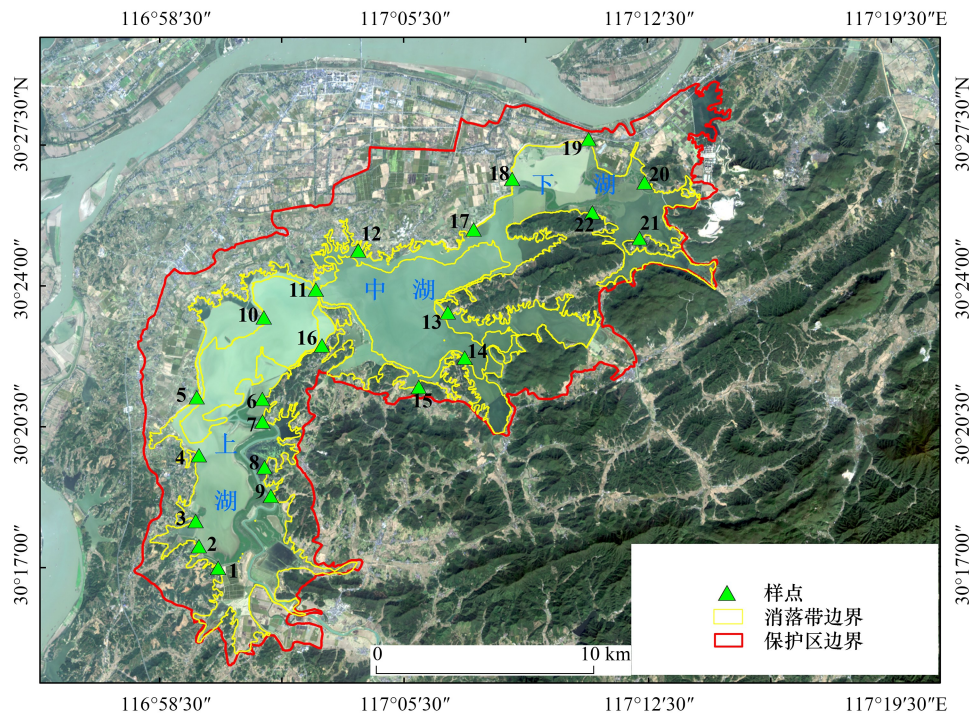


图1 升金湖消落带区域水鸟监测样点

Fig.1 Survey sites of wintering waterbirds in the riparian zone at Shengjin Lake

1:洲河;2:烂稻陈;3:神山咀;4:联合;5:新胜圩;6:舍甘;7:白莲圩;8:杨峨头;9:西湖;10:赤岸;11:小路咀;12:姜坝;13:沙山;14:坦埠圩;15:刘家汉;16:毕村;17:龙家咀;18:八百丈;19:三千亩;20:燕窝;21:缸窑;22:外排;样点1—9属于上湖;样点10—16属于中湖;样点17—22属于下湖

ATM 20-60×85, Austria) 和双筒望远镜(SWAROVSKI, 8.5×42, Austria) 扫描整个可见区域, 并使用GPS接收机进行样点定位(eTrex30, Garmin, 中国)。采用直接计数的方法, 记录水鸟的数量、种类和生境类型。

根据越冬水鸟的觅食习性, 将升金湖消落带越冬水鸟群落分为5个取食集团<sup>[19-20]</sup>: G1 食鱼水鸟集团: 主要取食深水或浅水中的鱼虾; G2 食苔草水鸟集团: 主要取食莎草和禾本科植物的嫩叶; G3 食种子水鸟集团: 主要取食植物种子, 以及一些嫩叶和鱼虾; G4 食底栖动物水鸟集团: 主要取食泥滩、甲壳类中的水生昆虫和软体动物; G5 食地下茎水鸟集团: 主要取食水生或陆生块茎。对于在不同栖息地觅食的物种, 在分组时我们使用其主要的食物进行分组(表1)。

表1 升金湖越冬水鸟取食集团  
Table 1 Foraging guilds of wintering waterbirds at Shengjin Lake

| 取食集团 Foraging guilds              | 代表物种 Typical species                                                   |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 食鱼水鸟 Fish forager (G1)            | 苍鹭 ( <i>Ardea cinerea</i> ), 东方白鹳 ( <i>Ciconia boyciana</i> )          |
| 食苔草水鸟 Grass forager (G2)          | 豆雁 ( <i>Anser fabalis</i> ), 白额雁 ( <i>Anser albifrons</i> )            |
| 食种子水鸟 Seed forager (G3)           | 斑嘴鸭 ( <i>Anas poecilorhyncha</i> ), 绿头鸭 ( <i>Anas platyrhynchos</i> )  |
| 食底栖动物水鸟 Invertebrate forager (G4) | 反嘴鹬 ( <i>Recurvirostra avosetta</i> ), 鹤鹬 ( <i>Tringa erythropus</i> ) |
| 食地下茎水鸟 Tuber forager (G5)         | 小天鹅 ( <i>Cygnus columbianus</i> ), 白头鹤 ( <i>Grus monacha</i> )         |

1.3 生境变量数据获取

在实地考察和前人研究的基础上<sup>[8]</sup>, 本研究选取6个生境变量, 包括: 水域面积、泥滩面积、草滩面积、泥滩—草滩混合区生境面积、水域—草滩混合区生境面积、水域—泥滩混合区生境面积。根据调查日期和遥感影像质量, 选择距离调查日期较近的哨兵2号影像, 可从欧洲空间局 (European Space Agency, ESA; <https://>

scihub.copernicus.eu/) 下载。本研究选取的两幅影像日期分别为 2019 年 12 月 13 日(闸上水位:10.44 m;空间分辨率:10 m)和 2020 年 12 月 12 日(闸上水位:10.22 m;空间分辨率:10 m)。

由于定义消落带区域为升金湖最低水位线与最高水位线之间的区域。根据黄湓闸水位数据资料,选取丰水期和枯水期的哨兵 2 号无云影像作为确定消落带区域最小边界和最大边界的数据源,最小边界影像日期为 2020 年 5 月 11 日(闸上水位:8.61 m;空间分辨率:10 m),最大边界影像日期为 2020 年 8 月 4 日(闸上水位:16.92 m;空间分辨率:10 m)。水位信息来源于安徽水文遥测信息网(<http://yc.wswj.net/ahyc/>,黄湓闸闸上,图 2)。

选用升金湖消落带区域的草滩、泥滩、水域等土地类型变化信息,结合研究区域的矢量图层,使用 SNAP 软件和 ENVI 软件进行遥感影像预处理。在对区域影像预处理后,以最大似然法进行区域影像的监督分类,并以监督分类结果为参考,利用人工目视解译并辅之以野外调查进行精度验证,精确度较高均达 85% 以上,可以作为研究使用<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据分析与处理

使用 Shannon-Wiener 多样性指数(以“ $H$ ”表示)和 Simpson 优势度指数(以“ $D$ ”表示)衡量越冬水鸟的生物多样性。公式如下:

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

式中, $i$  表示第  $i$  个物种的序列号, $P_i$  表示第  $i$  个物种在物种总数中的百分比。

Pielou 均匀度指数(以“ $J$ ”表示)计算为:

$$J = \frac{H}{H_{\max}}$$

式中, $H_{\max}$  为最大物种多样性。

优势种为  $P_i \geq 10\%$  的水鸟。

平均值表示为平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 消落带越冬水鸟群落种类与数量的变化

2019 年和 2020 年两个越冬季,在消落带记录到越冬水鸟 39453.60 $\pm$ 20955.31 ( $n=10$ ,  $n$  表示调查次数)只,隶属 7 目 13 科 59 种(表 2)。其中 2019 年越冬季升金湖消落带观察到 50984.20 $\pm$ 9595.71 ( $n=5$ ) 只,属 7 目 13 科 51 种;在 2020 年越冬季观察到 7 目 12 科 53 种,总数量为 27923.00 $\pm$ 13808.47 ( $n=5$ ) 只。两个越冬季的优势物种均为雁形目鸭科的豆雁。在两个越冬季所记录到的 59 个物种中,有 13 种被列入了 IUCN 红色名录,其中,极危物种(CR)有青头潜鸭(*Aythya baeri*)和白鹤;濒危物种(EN)有东方白鹤;5 种易危物种(VU):鸿雁、小白额雁(*Anser erythropus*)、白头鹤、白枕鹤(*Antigone vipio*)和红头潜鸭(*Aythya ferina*);以及 5 种近危物种(NT):白腰杓鹬(*Numenius arquata*)、斑尾塍鹬(*Limosa lapponica*)、白眼潜鸭(*Aythya nyroca*)、罗纹鸭(*Mareca falcata*)和凤头麦鸡(*Vanellus vanellus*)。

2019 年越冬季的水鸟以雁形目种类最多,其次为鸻形目;雁形目包含了 1 科 20 种,均为雁鸭类;鸻形目有 4 科 13 种,分别为反嘴鹬科、鹬科、鹬科和水雉科;鸻形目种类最少,仅有鸻鹬科 1 种。2020 年越冬季最多的水鸟同样是雁形目鸟类,有 1 科 18 种,主要为雁鸭类;其次为鸻形目,共 3 科 15 种,包括反嘴鹬科、鹬科和鹬科,未观测到水雉科水鸟;与 2019 年越冬季相同的是,2020 年越冬季种类最少的也是鸻形目,即 1 科 1 种。此外,仅在 2019 年越冬季记录到的水鸟有中凤头潜鸭(*Aythya fuligula*)、白眼潜鸭、赤颈鸭(*Anas penelope*)、雪雁(*Anser caerulescens*)、斑尾塍鹬、水雉(*Hydrophasianus chirurgus*);仅在 2020 年越冬季记录到的水鸟有草鹭(*Ardea purpurea*)、灰雁(*Anser anser*)、赤膀鸭(*Anas strepera*)、白枕鹤、灰头麦鸡(*Vanellus cinereus*)、灰鹬

(*Pluvialis squatarola*)、白腰杓鹬、泽鹬(*Tringa stagnatilis*)。

表 2 升金湖消落带越冬水鸟及取食集团组成

Table 2 The species composition of wintering waterbirds and their foraging guilds in the riparian zone at Shengjin Lake

|     | 种类<br>Species                     | 两个越冬季水鸟数量/只<br>Waterbird number in the two winter seasons |                     |             |             | 保护等级<br>Protection<br>grade | 取食集团<br>Foraging<br>guild |
|-----|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|
|     |                                   | 2019—2020<br>越冬季                                          | 2020—2021<br>越冬季    | 2019 年 12 月 | 2020 年 12 月 |                             |                           |
|     |                                   | 2019—2020<br>winter                                       | 2020—2021<br>winter | Dec. 2019   | Dec. 2020   |                             |                           |
|     |                                   |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 一   | 鸬鹚目 Podicipediformes              |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| (一) | 鸬鹚科 Podicipedidae                 |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 1   | 小鸬鹚 <i>Tachybaptus ruficollis</i> | 329.80±175.10                                             | 519.60±539.72       | 657         | 72          |                             | 食鱼水鸟                      |
| 2   | 凤头鸬鹚 <i>Podiceps cristatus</i>    | 440.80±183.16                                             | 538.00±553.97       | 452         | 9           |                             | 食鱼水鸟                      |
| 二   | 鹈形目 Pelecaniformes                |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| (二) | 鸬鹚科 Phalacrocoracidae             |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 3   | 普通鸬鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>   | 1432.00±1074.58                                           | 1440.80±772.49      | 1515        | 647         |                             | 食鱼水鸟                      |
| 三   | 鹈形目 Ciconiiformes                 |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| (三) | 鹭科 Ardeidae                       |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 4   | 苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>           | 573.00±235.07                                             | 934.80±939.10       | 552         | 642         |                             | 食鱼水鸟                      |
| 5   | 草鹭 <i>Ardea purpurea</i>          | —                                                         | 0.20±0.40           | —           | —           |                             | 食鱼水鸟                      |
| 6   | 大白鹭 <i>Egretta alba</i>           | 536.00±434.25                                             | 663.40±561.91       | 148         | 280         |                             | 食鱼水鸟                      |
| 7   | 中白鹭 <i>Egretta intermedia</i>     | 5.40±10.80                                                | 0.80±1.60           | 27          | —           |                             | 食鱼水鸟                      |
| 8   | 白鹭 <i>Egretta garzetta</i>        | 587.40±871.30                                             | 308.60±231.09       | 59          | —           |                             | 食鱼水鸟                      |
| 9   | 池鹭 <i>Ardeola bacchus</i>         | 1.00±2.00                                                 | 77.40±154.80        | —           | —           |                             | 食鱼水鸟                      |
| 10  | 夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i>   | 46.20±89.91                                               | 93.20±101.54        | 5           | —           |                             | 食鱼水鸟                      |
| (四) | 鹬科 Ciconiidae                     |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 11  | 东方白鹬 <i>Ciconia boyciana</i>      | 5.80±6.97                                                 | 118.40±160.93       | 5           | 411         | I, 濒危                       | 食鱼水鸟                      |
| (五) | 鸻科 Threskiornithidae              |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 12  | 白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>    | 1498.80±1221.38                                           | 480.00±177.83       | 2800        | 411         | II                          | 食底栖动物水鸟                   |
| 四   | 雁形目 Anseriformes                  |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| (六) | 鸭科 Anatidae                       |                                                           |                     |             |             |                             |                           |
| 13  | 小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>     | 828.60±653.85                                             | 171.80±130.77       | 1992        | 207         | II                          | 食块茎水鸟                     |
| 14  | 鸿雁 <i>Anser cygnoides</i>         | 693.60±569.90                                             | 12.20±13.27         | 693         | 2           | II, 易危                      | 食块茎水鸟                     |
| 15  | 豆雁 <i>Anser fabalis</i>           | 32942.80±7782.74                                          | 14324.20±8603.63    | 45105       | 19880       |                             | 食苔草水鸟                     |
| 16  | 白额雁 <i>Anser albifrons</i>        | 1709.80±1954.39                                           | 1157.80±1060.24     | 3235        | 1263        | II                          | 食苔草水鸟                     |
| 17  | 小白额雁 <i>Anser erythropus</i>      | 31.20±59.93                                               | 18.80±23.10         | —           | —           | II, 易危                      | 食苔草水鸟                     |
| 18  | 灰雁 <i>Anser anser</i>             | —                                                         | 20.20±40.40         | —           | —           |                             | 食苔草水鸟                     |
| 19  | 雪雁 <i>Anser caerulescens</i>      | 0.40±0.49                                                 | —                   | —           | —           |                             | 食苔草水鸟                     |
| 20  | 赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>     | 141.40±129.93                                             | 26.00±16.76         | 69          | 21          |                             | 食种子水鸟                     |
| 21  | 翘鼻麻鸭 <i>Tadorna tadorna</i>       | 1.40±2.80                                                 | 9.00±13.21          | —           | —           |                             | 食种子水鸟                     |
| 22  | 赤颈鸭 <i>Anas penelope</i>          | 65.60±81.88                                               | —                   | 139         | —           |                             | 食种子水鸟                     |
| 23  | 罗纹鸭 <i>Anas falcata</i>           | 285.00±345.79                                             | 79.40±95.10         | 19          | 6           | 近危                          | 食种子水鸟                     |
| 24  | 赤膀鸭 <i>Anas strepera</i>          | —                                                         | 8.40±13.57          | —           | 7           |                             | 食种子水鸟                     |
| 25  | 绿翅鸭 <i>Anas crecca</i>            | 2162.60±2288.03                                           | 867.00±198.68       | 1828        | 869         |                             | 食种子水鸟                     |
| 26  | 绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>     | 648.60±457.59                                             | 298.20±135.46       | 775         | 205         |                             | 食种子水鸟                     |
| 27  | 斑嘴鸭 <i>Anas poecilorhyncha</i>    | 2764.20±732.49                                            | 2762.20±2893.19     | 3305        | 1458        |                             | 食种子水鸟                     |
| 28  | 针尾鸭 <i>Anas acuta</i>             | 28.60±45.56                                               | 11.20±19.54         | —           | —           |                             | 食种子水鸟                     |
| 29  | 琵嘴鸭 <i>Anas clypeata</i>          | 43.60±86.70                                               | 9.20±18.40          | —           | —           |                             | 食种子水鸟                     |
| 30  | 红头潜鸭 <i>Aythya ferina</i>         | 15.00±22.86                                               | 0.80±1.60           | 59          | —           | 易危                          | 食种子水鸟                     |

续表

| 种类<br>Species                         | 两个越冬季水鸟数量/只<br>Waterbird number in the two winter seasons |                                         |                          |                          | 保护等级<br>Protection<br>grade | 取食集团<br>Foraging<br>guild |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                                       | 2019—2020<br>越冬季<br>2019—2020<br>winter                   | 2020—2021<br>越冬季<br>2020—2021<br>winter | 2019 年 12 月<br>Dec. 2019 | 2020 年 12 月<br>Dec. 2020 |                             |                           |
|                                       |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 31 青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>           | 0.40±0.80                                                 | 0.60±1.20                               | —                        | —                        | 极危                          | 食种子水鸟                     |
| 32 白眼潜鸭 <i>Aythya nyroca</i>          | 0.40±0.80                                                 | —                                       | —                        | —                        | 近危                          | 食种子水鸟                     |
| 33 凤头潜鸭 <i>Aythya fuligula</i>        | 2.40±4.80                                                 | —                                       | —                        | —                        |                             | 食种子水鸟                     |
| 34 普通秋沙鸭 <i>Mergus merganser</i>      | 51.40±82.09                                               | 0.20±0.40                               | —                        | —                        |                             | 食鱼水鸟                      |
| 五 鹤形目 Gruiformes                      |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| (七) 鹤科 Gruidae                        |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 35 白鹤 <i>Grus leucogeranus</i>        | 11.60±7.39                                                | 4.00±4.15                               | 15                       | —                        | I, 极危                       | 食块茎水鸟                     |
| 36 白枕鹤 <i>Grus vipio</i>              | —                                                         | 1.00±1.26                               | —                        | —                        | I, 易危                       | 食块茎水鸟                     |
| 37 灰鹤 <i>Grus grus</i>                | 0.20±.40                                                  | 2.40±2.24                               | —                        | 3                        | II                          | 食块茎水鸟                     |
| 38 白头鹤 <i>Grus monacha</i>            | 134.00±71.98                                              | 83.20±43.16                             | 229                      | 118                      | I, 易危                       | 食块茎水鸟                     |
| (八) 秧鸡科 Rallidae                      |                                                           |                                         |                          |                          | II                          |                           |
| 39 黑水鸡 <i>Gallinula chloropus</i>     | 145.00±90.31                                              | 8.00±6.84                               | —                        | —                        |                             | 食种子水鸟                     |
| 40 白骨顶 <i>Fulica atra</i>             | 252.40±275.32                                             | 83.00±71.80                             | 63                       | 13                       |                             | 食种子水鸟                     |
| 六 鸻形目 Charadriiformes                 |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| (九) 水雉科 Jacanidae                     |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 41 水雉 <i>Hydrophasianus chirurgus</i> | 8.40±16.80                                                | —                                       | —                        | —                        | II                          | 食底栖动物水鸟                   |
| (十) 反嘴鹬科 Recurvirostridae             |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 42 反嘴鹬 <i>Recurvirostra avosetta</i>  | 961.60±1541.33                                            | 1175.40±1000.19                         | —                        | 1260                     |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| (十一) 鸻科 Charadriidae                  |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 43 凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>      | 856.40±555.14                                             | 347.20±223.76                           | 614                      | 415                      | 近危                          | 食底栖动物水鸟                   |
| 44 灰头麦鸡 <i>Vanellus cinereus</i>      | —                                                         | 11.00±22.00                             | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 45 灰鸻 <i>Pluvialis squatarola</i>     | —                                                         | 4.20±8.40                               | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 46 金眶鸻 <i>Charadrius dubius</i>       | 0.60±0.80                                                 | 0.80±0.75                               | —                        | 1                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 47 环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i> | 17.00±30.16                                               | 0.20±0.40                               | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| (十二) 鹬科 Scolopacidae                  |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 48 扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i>    | 1.60±2.33                                                 | 1.80±1.60                               | —                        | 3                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 49 斑尾塍鹬 <i>Limosa lapponica</i>       | 120.20±186.29                                             | —                                       | 120                      | —                        | 近危                          | 食底栖动物水鸟                   |
| 50 白腰杓鹬 <i>Numenius arquata</i>       | —                                                         | 7.60±12.01                              | —                        | —                        | II, 近危                      | 食底栖动物水鸟                   |
| 51 鹤鹬 <i>Tringa erythropus</i>        | 65.20±70.89                                               | 395.20±320.97                           | 110                      | 752                      |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 52 泽鹬 <i>Tringa stagnatilis</i>       | —                                                         | 2.20±4.40                               | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 53 青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i>        | 144.00±138.99                                             | 10.20±6.31                              | 240                      | 8                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 54 白腰草鹬 <i>Tringa ochropus</i>        | 33.40±50.04                                               | 5.00±4.94                               | 2                        | 12                       |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 55 林鹬 <i>Tringa glareola</i>          | 3.00±3.69                                                 | 3.20±6.40                               | 8                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 56 矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i>       | 0.40±0.49                                                 | 0.80±1.17                               | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 57 黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>        | 68.00±136.00                                              | 35.20±70.40                             | —                        | —                        |                             | 食底栖动物水鸟                   |
| 七 鸥形目 Lariformes                      |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| (十三) 鸥科 Laridae                       |                                                           |                                         |                          |                          |                             |                           |
| 58 银鸥 <i>Larus argentatus</i>         | 186.80±240.81                                             | 32.20±33.10                             | 6                        | 17                       |                             | 食鱼水鸟                      |
| 59 红嘴鸥 <i>Larus ridibundus</i>        | 101.20±113.50                                             | 756.80±632.30                           | 29                       | 280                      |                             | 食鱼水鸟                      |

I、II 分别为国家 I 级、II 级重点保护野生动物物种;极危、濒危、易危、近危分别表示 IUCN 物种濒危等级;分类系统依据《中国鸟类分布与分类名录(第二版)》(郑光美,2011)<sup>[22]</sup>

2019 年越冬季调查共记录到消落带游禽(44907.60±9994.44)只( $n=5$ ),隶属 4 目 4 科 25 种,包括鸻鹬



科、鸬鹚科、鸭科和鸥科,优势种为豆雁;涉禽( $6076.60\pm1450.02$ )只( $n=5$ ),3目9科26种,包括括鹳形目、鹤形目、鸬鹚目(除鸬鹚科、鸬鹚科、鸭科和鸥科外),优势种为白琵鹭(*Platalea leucorodia*)、反嘴鹬(*Recurvirostra avosetta*)和凤头麦鸡。2020年越冬季调查共记录到游禽( $23064.60\pm12388.77$ )只( $n=5$ ),隶属4目4科23种,包括的科、目均与2019年相同,优势种为豆雁和斑嘴鸭(*Anas poecilorhyncha*);涉禽( $4858.40\pm2870.78$ )只( $n=5$ ),隶属3目8科30种,包含科、目与上一越冬季相同,优势种为苍鹭(*Ardea cinerea*)、大白鹭(*Egretta alba*)和反嘴鹬。

因极端洪水,2020—2021年越冬季水位波动趋势较大,整个越冬季水鸟总数动态变化明显(图2)。2020—2021年越冬季不仅在12月份水鸟总数少于2019—2020年越冬季,其他月份水鸟数量均有不同程度的下降。2020年12月后,水位趋于平稳,水鸟数量也趋于稳定。

2.2 越冬水鸟取食集团的变化

水鸟群落的组成在取食集团水平表现出明显的变化,但两个越冬季12月份各取食集团的优势物种均为豆雁。2019年12月记录到食鱼水鸟共有11种、3455只,其中普通鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)数量占比最多;食苔草水鸟主要为豆雁和白额雁(*Anser albifrons*)2种,总数共48340只;食种子水鸟主要为鸭类,共8种、6257只,其中斑嘴鸭的数量最多;食底栖动物水鸟共有7种、3849只,白琵鹭的数量最多;食地下茎水鸟共有4种、2929只,小天鹅的数量最多。

2020年12月记录到食鱼水鸟共有8种、2358只,普通鸬鹚与苍鹭的数量最多;食苔草水鸟依旧为豆雁和白额雁2种、共21143只;食种子水鸟共7种、2579只,斑嘴鸭的数量最多;食底栖动物水鸟共有8种、2861只,数量最多的水鸟种类是反嘴鹬;食地下茎水鸟共有4种、330只,数量最多的仍是小天鹅。

取食集团的Shannon-Wiener多样性指数变化在2019年12月表现为食鱼水鸟>食种子水鸟>食底栖动物水鸟>食地下茎水鸟>食苔草水鸟;而在2020年12月表现为食鱼水鸟>食底栖动物水鸟>食种子水鸟>食地下茎水鸟>食苔草水鸟(表3)。5个取食集团的水鸟数量在2020年12月均有不同程度的下降,其中,食鱼水鸟数量在2020年12月减少了近30%,主要因为普通鸬鹚和小鸬鹚(*Tachybaptus ruficollis*)数量的减少;食苔草水鸟数量仅为2019年12月数量的43.7%,主要是豆雁数量大幅度锐减所导致;食种子水鸟数量减少了58.8%,主要是斑嘴鸭和绿翅鸭(*Anas crecca*)的减少;食底栖动物水鸟数量相差不大,物种数增加1种,因此多样性增加,数量最多的水鸟由白琵鹭变为了反嘴鹬;食地下茎水鸟主要变化为:小天鹅数量下降了约89.6%,2020年12月仅记录到两只鸿雁。

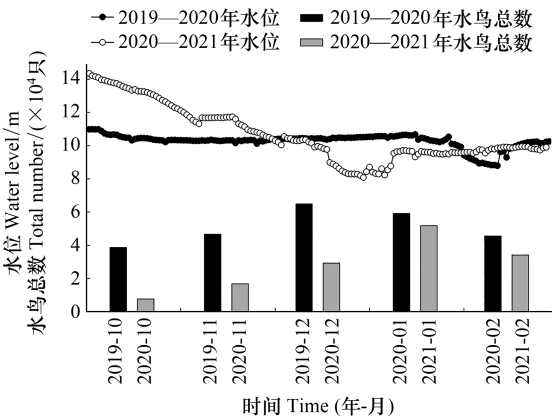


图2 升金湖2019—2020年与2020—2021年越冬季水位变化趋势与水鸟总数动态变化  
Fig.2 Water level in winter season and dynamic changes of the total number of waterbirds at Shengjin Lake in 2019—2020 and 2020—2021

表3 升金湖2019年与2020年12月份研究区域水鸟取食集团多样性

| 取食集团<br>Foraging guilds       | 水鸟物种数<br>Waterbird species richness |           | 水鸟数量/只<br>Waterbird number/ind. |           | Shannon-Wiener 指数<br>Shannon-Wiener index |           |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------|
|                               |                                     |           |                                 |           |                                           |           |
|                               | 2019—2020                           | 2020—2021 | 2020—2019                       | 2020—2021 | 2019—2020                                 | 2020—2021 |
| 食鱼水鸟 Fish foragers            | 11                                  | 8         | 3455                            | 2358      | 1.55                                      | 1.68      |
| 食苔草水鸟 Grass foragers          | 2                                   | 2         | 48340                           | 21143     | 0.25                                      | 0.23      |
| 食种子水鸟 Seed foragers           | 8                                   | 7         | 6257                            | 2579      | 1.20                                      | 0.99      |
| 食底栖动物水鸟 Invertebrate foragers | 7                                   | 8         | 3849                            | 2861      | 0.92                                      | 1.32      |
| 食地下茎水鸟 Tuber foragers         | 4                                   | 4         | 2929                            | 330       | 0.83                                      | 0.73      |



食鱼水鸟在空间上的主要分布区域由下湖的燕窝、缸窑转变为 2020 年 12 月中湖的刘家汉和下湖的龙家咀、缸窑,分布区域的转移偏向中湖;食苔草水鸟在 2019 年 12 月的主要分布区域位于上湖东侧的杨峨头、西湖的草滩以及中湖赤岸处的泥滩中,而在 2020 年 12 月主要分布于上湖杨峨头和下湖外排的浅水区域;食种子水鸟由升金湖下湖龙家咀的深水区和燕窝的圩区转变为下湖的缸窑;食底栖动物水鸟在 2019 年 12 月主要分布于升金湖西侧消落带和下湖燕窝地,在 2020 年 12 月主要分布在中湖;食地下茎水鸟主要分布在升金湖的上湖东侧和西侧,以及下湖的燕窝、缸窑等地,而在 2020 年 12 月主要分布在上湖东侧,且中湖和下湖区域几乎无分布(图 3)。

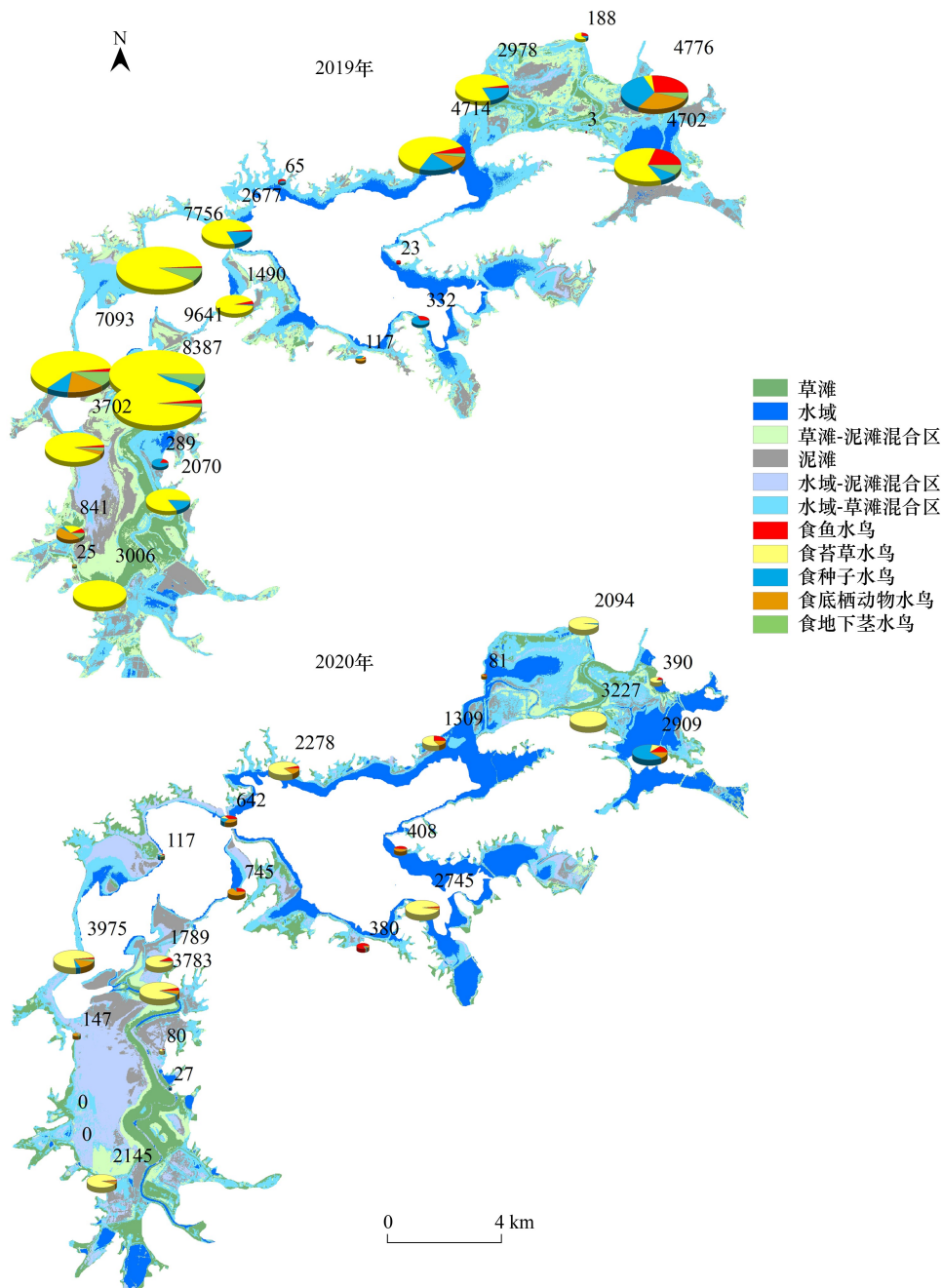


图 3 升金湖 2019 年与 2020 年 12 月份不同水鸟取食集团空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of different waterbird foragers at Shengjin Lake in the December of 2019 and 2020

图中每个饼状图的大小以及数字表示每个样点的水鸟数量/只;各研究样点位置见图 1

2019 年 12 月记录到白鹤 15 只,其中 12 只位于上湖西侧的草滩生境中,3 只位于下湖南侧的浅水区;而 2020 年 12 月未记录到白鹤。2019 年 12 月记录到白头鹤,229 只,全部位于上湖东侧,大部分位于草滩生境中,分布较为集中;而 2020 年 12 月仅记录到 118 只白头鹤,并且其分布在上湖和中湖较为分散,在下湖的龙家咀处观测到 2 只。2019 年 12 月观测到鸿雁 693 只,超过 70%的鸿雁分布在上湖东侧的西湖,与豆雁混群在草滩中觅食与栖息;2020 年 12 月仅观测到 2 只鸿雁。2019 年 12 月在杨峨头记录到 5 只东方白鹳;但是在 2020 年 12 月共记录到 411 只东方白鹳,主要分布在中湖(水域中,集群觅食),少数分布在下湖的龙家咀处(表 4)。

表 4 升金湖 2019 年与 2020 年 12 月受胁水鸟的分布/只

Table 4 Distribution areas of endangered waterbird species at Shengjin Lake in the December of 2019 and 2020

| 观测地点<br>Observation<br>site | 白鹤<br><i>Grus leucogeranus</i> |           | 白头鹤<br><i>Grus monacha</i> |           | 鸿雁<br><i>Anser cygnoides</i> |           | 东方白鹳<br><i>Ciconia boyciana</i> |           |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
|                             | 2019—2020                      | 2020—2021 | 2019—2020                  | 2020—2021 | 2019—2020                    | 2020—2021 | 2019—2020                       | 2020—2021 |
| 烂稻陈                         | 3                              |           |                            |           | 6                            |           |                                 |           |
| 神山咀                         | 3                              |           |                            |           | 90                           |           |                                 |           |
| 联合                          |                                |           | 42                         | 20        | 70                           |           |                                 |           |
| 新胜圩                         |                                |           |                            | 31        |                              |           |                                 |           |
| 舌甘                          |                                |           | 33                         |           |                              |           |                                 |           |
| 白莲圩                         | 3                              |           |                            | 8         |                              |           |                                 |           |
| 杨峨头                         |                                |           | 150                        | 3         |                              |           | 5                               |           |
| 西湖                          | 3                              |           | 4                          | 34        | 517                          |           |                                 | 153       |
| 赤岸                          |                                |           |                            | 7         |                              |           |                                 |           |
| 沙山                          |                                |           |                            | 13        |                              |           |                                 | 167       |
| 毕村                          |                                |           |                            |           |                              |           |                                 | 3         |
| 龙家咀                         |                                |           |                            | 2         |                              |           |                                 | 87        |
| 三千亩                         |                                |           |                            |           |                              |           |                                 | 1         |
| 燕窝                          |                                |           |                            |           | 7                            |           |                                 |           |
| 缸窑                          | 3                              |           |                            |           |                              | 2         |                                 |           |

### 2.3 越冬水鸟栖息生境的变化及多样性空间差异

经过遥感解译以及实地调查,进一步将升金湖消落带分为草滩、泥滩、水域、草滩—水域混合区、泥滩—水域混合区和草滩—泥滩混合区 6 种生境类型(图 3)。对比分析了 2019 年 12 月和 2020 年 12 月升金湖消落带的生境状况:2019 年 12 月消落带内水域面积达到 1173.31  $\text{hm}^2$ ,泥滩面积 1879.41  $\text{hm}^2$ ,草滩面积 949.93  $\text{hm}^2$ ,草滩—水域混合区面积 4294.25  $\text{hm}^2$ ,泥滩—水域混合区面积 391.05  $\text{hm}^2$ ,草滩—泥滩混合区面积 2164.38  $\text{hm}^2$ 。2020 年 12 月水域面积为 2726.89  $\text{hm}^2$ ,泥滩面积 938.66  $\text{hm}^2$ ,草滩面积 1679.29  $\text{hm}^2$ ,草滩—水域混合区面积 3028.74  $\text{hm}^2$ ,泥滩—水域混合区面积 1791.18  $\text{hm}^2$ ,草滩—泥滩混合区面积 705.96  $\text{hm}^2$ 。受强降雨影响,使得 2020 年升金湖退水时间滞后,在同一时期,6 种生境的面积产生巨大变化。

将实地调查的水鸟数据按分布生境划分,分析得出 6 种生境中 5 个水鸟集团的种类和数量变化情况(表 4)。2019 年 12 月水鸟分布在纯水域生境的种类最多,主要为食鱼水鸟和食种子水鸟;分布在草滩—水域混合区生境的种类最多,主要为食苔草水鸟。2020 年 12 月水鸟分布在泥滩生境的种类最多,主要为食底栖动物水鸟和食种子水鸟;分布在泥滩—水域混合区生境的种类最多,主要为食苔草水鸟。

5 种鸟类集团在 6 种生境中的种类和数量变化为:食鱼水鸟分布在水域的种类和数量均最多;食苔草水鸟在各生境的种类分布比较平均,但在泥滩生境和草滩—水域混合区分布的数量明显减少;食种子水鸟主要在含水域生境分布,但有部分水鸟转向草滩和泥滩生境;食底栖动物水鸟在泥滩的种类明显增多,在水域分布的数量明显减少;食块茎水鸟在水域分布的种类和数量均明显减少(表 5)。

表 5 2019 与 2020 年 12 月份越冬季升金湖消落带不同生境水鸟分布

Table 5 Distribution of waterbirds in different habitats in the riparian zone at Shengjin Lake in December of 2019 and 2020

| 生境类型<br>Habitat types         | 类别<br>Category | 食底栖动物水鸟<br>Invertebrate foragers |      | 食块茎水鸟<br>Tuber foragers |      | 食苔草水鸟<br>Grass foragers |      | 食鱼水鸟<br>Fish foragers |      | 食种子水鸟<br>Seed foragers |      | 合计<br>Total |      |
|-------------------------------|----------------|----------------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-----------------------|------|------------------------|------|-------------|------|
|                               |                | 2019                             | 2020 | 2019                    | 2020 | 2019                    | 2020 | 2019                  | 2020 | 2019                   | 2020 | 2019        | 2020 |
| 草滩                            | 种类数            | 1                                | 2    | 2                       | 2    | 3                       | 2    | 1                     | 4    | /                      | 3    | 7           | 13   |
| Vegetation area               | 数量/只           | 28                               | 89   | 159                     | 45   | 5967                    | 4522 | 13                    | 38   | /                      | 62   | 6167        | 4756 |
| 水域                            | 种类数            | 5                                | 4    | 2                       | /    | 2                       | 2    | 10                    | 8    | 9                      | 5    | 28          | 19   |
| Water area                    | 数量/只           | 2034                             | 322  | 673                     | /    | 2655                    | 3047 | 2497                  | 1164 | 4255                   | 1164 | 12114       | 5697 |
| 草滩-泥滩混合区                      | 种类数            | 2                                | /    | /                       | /    | /                       | 2    | 1                     | 1    | /                      | /    | 3           | 3    |
| Vegetation-Mudflat mixed area | 数量/只           | 402                              | /    | /                       | /    | /                       | 3670 | 24                    | 60   | /                      | /    | 426         | 3730 |
| 泥滩                            | 种类数            | 2                                | 7    | 1                       | 4    | 2                       | 2    | 2                     | 4    | /                      | 5    | 7           | 22   |
| Mudflat area                  | 数量/只           | 2865                             | 1261 | 42                      | 39   | 10492                   | 305  | 35                    | 414  | /                      | 1109 | 13434       | 3128 |
| 泥滩-水域混合区                      | 种类数            | 4                                | 4    | 1                       | 2    | 2                       | 1    | 5                     | 3    | 5                      | 2    | 17          | 12   |
| Mudflat-Water mixed area      | 数量/只           | 708                              | 1140 | 989                     | 85   | 5560                    | 6612 | 185                   | 196  | 1057                   | 42   | 8499        | 8075 |
| 草滩-水域混合区                      | 种类数            | 1                                | 1    | 1                       | 3    | 2                       | 1    | 5                     | 5    | 5                      | 3    | 14          | 13   |
| Vegetation-Water mixed area   | 数量/只           | 22                               | 49   | 336                     | 161  | 21943                   | 2987 | 319                   | 486  | 1615                   | 202  | 24235       | 3885 |

升金湖不同湖区消落带越冬水鸟物种组成变化较大(表 5);2019 年 12 月升金湖上湖消落带水鸟物种数最多,为 27 种;2020 年 12 月升金湖下湖消落带水鸟物种数最多,为 21 种。从空间分布上比较,两个越冬季的水鸟主要都集中在上湖消落带,在中湖消落带分布的数量最少。

2019 年 12 月升金湖不同湖区水鸟 Shannon-Wiener 多样性指数大小关系为下湖>上湖>中湖,2020 年 12 月则为下湖>中湖>上湖,均为下湖消落带最高,分别为 1.94 和 1.54,但 Shannon-Wiener 指数最低由中湖转变为上湖(表 5)。两年的 Simpson 指数与 Shannon-Wiener 指数的变化情况相同。但在 2019 年 12 月,Pielou 均匀度指数在下湖消落带最高为 0.08;在 2020 年 12 月转变为中湖消落带最高为 0.08(表 6)。

表 6 2019 与 2020 年 12 月份升金湖消落带不同湖区水鸟多样性指数

Table 6 Winterbird diversity indices in different areas at Shengjin Lake in December of 2019 and 2020

| 多样性<br>Diversity           | 上湖 Upper lake            |                          | 中湖 Middle lake           |                          | 下湖 Following lake        |                          |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                            | 2019 年 12 月<br>Dec. 2019 | 2020 年 12 月<br>Dec. 2020 | 2019 年 12 月<br>Dec. 2019 | 2020 年 12 月<br>Dec. 2020 | 2019 年 12 月<br>Dec. 2019 | 2020 年 12 月<br>Dec. 2020 |
| 物种数 Species diversity      | 27                       | 19                       | 19                       | 19                       | 25                       | 21                       |
| 数量 Number/只                | 35054                    | 11946                    | 12460                    | 7315                     | 17361                    | 10010                    |
| 多样性指数 Shannon-Wiener index | 1.12                     | 1.03                     | 0.74                     | 1.48                     | 1.94                     | 1.54                     |
| 优势度指数 Simpson index        | 0.43                     | 0.40                     | 0.28                     | 0.58                     | 0.74                     | 0.61                     |
| 均匀度指数 Pielou index         | 0.04                     | 0.05                     | 0.04                     | 0.08                     | 0.08                     | 0.07                     |

### 3 讨论

#### 3.1 消落带生境变化与水鸟食物资源

升金湖消落带是水鸟越冬的重要场所,消落带区域生态十分敏感,其受湖泊水位变化的影响十分显著<sup>[8]</sup>。2020 年的强降雨是使水位异常的原因之一,研究结果显示,2020—2021 年越冬季升金湖水位异于正常水位(图 2),并严重影响到消落带生境(水域、草滩和泥滩)的变化。因极端洪水致使的水位异常,也导致了水鸟总数的大幅度下降。在 2020 年越冬季前期,水位保持在较高水平,湖水消退时间滞后,于 12 月开始,湖水退去使得水位逐渐降低,与 2019 年同期基本持平。此时大面积的泥滩暴露,湿生草本植物也开始生长<sup>[23]</sup>,草滩面积逐渐增加。复杂多样的生境为水鸟提供丰富的食物资源和栖息地。

水域是消落带区域重要的组成部分,水域中的动物和植物为越冬水鸟提供丰富的食物资源和食物种类,并减少了干扰竞争<sup>[24]</sup>。消落带中的水域生境是多种游禽和涉禽的重要觅食地,本研究也监测到大部分食鱼水鸟、食种子水鸟以及少部分雁类在水域中栖息和觅食。研究表明,水域面积在研究期间变化趋势较为明显,两个越冬季相比,2020 年水域面积较大且湖水较深,大部分河岸生境也被淹没,无法为部分水鸟,特别是游禽和涉禽提供栖息地<sup>[8]</sup>,这可能是 2020 年越冬水鸟数量较少的原因。

裸露的泥滩是食底栖动物水鸟的最佳觅食地,以底栖动物为食的水鸟,从小型的金眶鸻(*Charadrius dubius*)和环颈鸻(*Charadrius alexandrinus*)到大型白琵鹭,经常在湖泊边缘附近觅食,包括裸露的泥滩以及浅水和滩涂的混合区域。它们主要取食软体昆虫、甲壳类和腹足类动物,而泥滩和浅水区域正是这些生物集中的地方。同时,浅水和泥滩的混合区也聚集着大量鱼虾,使得湿地生产力更高<sup>[25]</sup>。2020 年以鸻形目为主的食底栖动物水鸟种类的增加,可能是泥滩—浅水面积增加导致的结果。

草滩区域包含了生长在浅滩的草洲、生长旺盛的水生植被以及乔木灌木,草滩区域因其植被物种高度异质性可能是水鸟物种丰富度和密度最高的生境,这种高度的生境异质性可能为多种水鸟提供了广泛而丰富的食物资源,同时也为其提供了栖息地和避难所<sup>[26]</sup>。有研究表明,白头鹤主要喜爱在草滩觅食<sup>[27]</sup>,取食植物的地下部分(块茎、球茎、根等);同时草滩中丰富的苔草也为雁形目水鸟提供良好的食物资源<sup>[28]</sup>。草滩区域的复杂性可以很好的反映出不同食性越冬水鸟的觅食偏好。在两个越冬季中,均为雁形目的水鸟数量最多,这与草滩生境的贡献密不可分。

### 3.2 消落带生境变化对不同水鸟取食集团的影响

对比两个越冬季 12 月份升金湖消落带的水鸟总数,2020 年 12 月水鸟数量下降了 54.88%,不同水鸟集团的鸟类数量都呈现出不同比例的减少,湖水退水时间的延迟引起剧烈的栖息地面积变化是影响水鸟数量和物种丰富度的重要因素<sup>[29]</sup>。其中,食苔草水鸟数量下降最为庞大,主要是豆雁数量的急剧减少;而食地下茎水鸟数量下降的比例最大达到 88.73%,主要是小天鹅数量减少所导致。这些水鸟主要在草滩取食<sup>[30]</sup>,而湖泊的高水位淹没了它们大面积的栖息地<sup>[31]</sup>。在水鸟群落水平,虽然水鸟总数量有大幅度下降,但食鱼水鸟和食底栖动物水鸟的多样性却有所增加,另外两个越冬季的物种丰富度基本无太大变化。导致这种现象的可能原因是 2020 年越冬季每种鸟类的数量具有很高的均匀性,不同种类的越冬水鸟有相似的栖息地选择,另外升金湖水鸟保护措施的实施也是原因之一。

生境变化的影响本质上反映了物种对其生活史的功能需求,如觅食、繁殖和防御<sup>[32]</sup>,由于特定的形态、觅食生境和获取食物的方法,每种取食集团水鸟的栖息地利用效率是不同的<sup>[33]</sup>。与其他国际重要湿地越冬水鸟一样<sup>[34]</sup>,升金湖消落带水鸟群落都是高度可变的,这种可变性在取食集团水平得到了实现。在水鸟取食集团水平,生境变化可能对不同取食集团的水鸟产生不同的影响<sup>[35]</sup>,从而导致五个取食集团水鸟的数量变化。

食苔草水鸟主要以豆雁为主,在 2020 年 12 月所监测到的豆雁数量仅为 2019 年 12 月的 43.78%。在本研究中,2020 年 12 月草滩生境面积有所增加,但草滩发育并不成熟,且草滩—泥滩混合区和草滩—水域混合区面积均下降。虽然有研究表明,草滩面积与豆雁的关系呈强烈的正相关<sup>[36]</sup>,但豆雁主要取食湿生植物的嫩叶,湿生植物主要分布于草滩—水域混合区,其面积的下降导致豆雁真正可利用的觅食生境减少,从而数量锐减。

食底栖动物水鸟主要以鸻鹬类为主,在 2019 年 12 月监测到白琵鹭的数量最多,在 2020 年 12 月转变为反嘴鹬数量最多,整体上食底栖动物水鸟数量略有减少。许多研究表明<sup>[35,37-38]</sup>,鸻鹬类倾向栖息在湿润的泥滩生境中,在枯水期水位降低,泥滩裸露面积增大,该区域的底栖生物较为丰富,能够为食底栖动物水鸟提供充足的食物。2020 年越冬季湖水消退延迟,12 月份消落带大部分被水域覆盖,使消落带出现较多泥滩—水域混合的生境,而裸露的潮湿泥滩面积减少,可能导致底栖动物没有一个稳定的生存环境,不利于水生昆虫和软体动物的生存,从而导致食底栖动物水鸟的食物资源匮乏;另外泥滩—水域混合生境不利于鸻鹬类水鸟探索食物,因其更喜爱在泥滩的基质硬度较低的地方发生觅食行为<sup>[38]</sup>,这可能都是致使食底栖动物水鸟数量减少



的原因。

水域中鱼类资源丰富,对于食鱼水鸟至关重要。研究期间由于较高水位的维持,水域面积变化较为明显,但过高的水位和过于庞大的水域面积似乎不利于部分食鱼水鸟在消落带栖息。湖泊水域面积的增加,使湖泊连通性加强,鱼类的活动空间不受制约,分布较为分散,这影响了食鱼水鸟的觅食成功率。食鱼水鸟的食物资源获取困难,从而导致食鱼水鸟数量减少。但对于部分迁移能力较强的水鸟(如东方白鹳)影响不大,由于体型较大,活动不受限制,主要在水域生境觅食,因此在 2020 年 12 月监测到 411 只东方白鹳,而在 2019 年 12 月仅监测到 5 只。

食种子水鸟大多数是鸭科水鸟,它们主要以浮水植物种子、嫩茎叶芽为食,因此偏好在生长着浮水植物的水域或有植物种子的泥滩觅食与栖息。在 2020 年 12 月食种子水鸟下降了 58.8%,主要是斑嘴鸭和绿翅鸭的减少。草滩—水域混合区生境与草滩—泥滩混合区生境面积的减少,可能是其数量下降的重要原因。

对于食地下茎水鸟而言,草滩中的植物或者沉水植物的块茎为其提供丰富的食物资源。但因符合沉水植物生长的生境发生改变,使其数量锐减,进而草滩—水域混合区生境下降,这直接影响到食地下茎水鸟的分布,并致其数量减少<sup>[39]</sup>。如白头鹤数量仅为 2019 年 12 月的一半,甚至白鹤、鸿雁在 2020 年同期并未被监测到。

### 3.3 消落带生境变化对越冬水鸟多样性空间分布的影响

两个越冬季相比,越冬水鸟的空间分布变化较为明显。从水鸟数量上来看,越冬水鸟都是主要分布于上湖消落带,在中湖消落带分布最少。2019 年 12 月升金湖上湖消落带不仅面积庞大且生境类型种类丰富,草滩、泥滩和浅水均有分布且分布较为均匀,可以给予水鸟更多的生境进行选择,而中湖消落带面积较小,生境类型少,基本是草滩—水域混合区生境;因此大部分水鸟选择在上湖消落带觅食栖息。2020 年 12 月上湖消落带主要为泥滩—水域混合区生境和草滩生境,虽然生境类型减少但这两种生境吸引了大量的食苔草水鸟和食底栖动物水鸟,因此成为水鸟分布最多的区域;中湖消落带因湖泊的持续高水位,并且围湖的大坝使湖水不能迅速退去,进而泥滩生境暴露不了,因此水鸟便迁往其他区域<sup>[40]</sup>。

下湖消落带水域面积较多,吸引大量食鱼水鸟和食种子水鸟,这些水鸟主要分布在外排、缸窑和枫墩。下湖消落带地形复杂且湖汊较多,因此湖水可以流入湖汊以降低水深,为水鸟提供觅食栖息地,尤其是食种子水鸟。食种子水鸟主要以鸭科为主,下湖消落带水鸟种类较多以及水鸟 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数较高可能也与之有关。而 2020 年 12 月上湖消落带 Shannon-Wiener 多样性指数最低可能是因为烂稻陈和神山咀都未监测到水鸟,2020 年 12 月这两个地区的生境均为草滩—水域混合区和泥滩—水域混区,且湖水较深。最高 Pielou 均匀度指数的湖区转变主要还是因为下湖水位较高,水位较高会导致湖水高速流动以及水域浑浊等不利条件,使水鸟在下湖消落带觅食成功率降低<sup>[41]</sup>。

两个越冬季的 12 月份,珍稀鸟类的空间分布具有较大的变化。白鹤、白头鹤和鸿雁均属于食地下块茎水鸟,在 2020 年 12 月,三种受胁水鸟的数量均有下降,主要原因可能是洪水未及时退去导致其觅食生境发生改变。白头鹤虽然数量下降但其分布地点明显增多,可能是其没有找到长期生存适宜生境<sup>[42]</sup>;相反的是,在 2020 年 12 月的消落带并未观测到鸿雁踪迹,可能是鸿雁适宜的觅食生境丧失所致,本研究的水鸟调查中,发现了部分雁类在消落带区域以外的稻田中觅食和栖息。东方白鹳主要取食鱼类,水域中鱼类丰富,是食鱼鸟类的主要觅食地,因此水域对于东方白鹳至关重要。而湖泊持续的高水位,使升金湖消落带产生大面积的水域生境,这十分有利于东方白鹳觅食栖息,因此在 2020 年 12 月监测到东方白鹳的数量上升,分布地点也相对增加。

## 4 基于越冬水鸟多样性的湖泊管理建议

升金湖湿地是东亚—澳大利西亚迁徙路线上重要的水鸟越冬地和中途停歇地,其消落带区域受水位的影响较大,异常的水位波动使生境发生剧烈变化,进一步影响了越冬水鸟的群落结构和空间分布。了解和认识

生境变化对水鸟栖息地利用的影响状况,有利于人类开展水鸟栖息地保护与恢复措施。极端洪水导致湖泊持续高水位且退水滞后,因此要制定合理的湖泊水位调控方案。对于升金湖上湖消落带的堤坝制定控水方案,使得消落带的生境有序出露,提高越冬水鸟对栖息地的有效使用;湖泊周围的稻田和人工鱼塘在收获时,建议农民预留适量水稻和鱼虾,以备升金湖泥滩和草滩被淹没时或者水域面积较小时,食苔草水鸟、食鱼和食种子水鸟替代的觅食生境。由于多数受胁水鸟分布在升金湖上湖消落带,建议减少该区域的人为干扰,设立警示牌,加强教育,以期减少人类对水鸟的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] Adav S S, Lee D J, Show K Y, Tay J H. Aerobic granular sludge: recent advances. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(5): 411-423.
- [2] Fu B L, Li Y, Wang Y Q, Campbell A, Zhang B, Yin S B, Zhu H L, Xing Z F, Jin X M. Evaluation of riparian condition of Songhua River by integration of remote sensing and field measurements. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2565.
- [3] Zheng Y X, Zhang G X, Wu Y F, Xu Y J, Dai C L. Dam effects on downstream riparian wetlands: the Nenjiang River, northeast China. *Water*, 2019, 11(10): 2038.
- [4] Bara M, Segura L N. Effect of air temperature and water depth on bird abundance: a case study of Rallidae and Anatidae in the northeastern Algerian Garaet Hadj Tahar. *Pakistan Journal of Zoology*, 2018, 51(1): 211-217.
- [5] 黄杰, 李晓玲, 王雪松, 杨进, 黄成名. 三峡库区不同消落带下中华蚊母树群落特征及其与土壤环境因子的关系. *植物生态学报*, 2021, 45(8): 844-859.
- [6] Jia Q, Koyama K, Choi C Y, Kim H J, Cao L, Gao D L, Liu G H, Fox A D. Population estimates and geographical distributions of swans and geese in East Asia based on counts during the non-breeding season. *Bird Conservation International*, 2016, 26(4): 397-417.
- [7] Jia Y F, Jiao S W, Zhang Y M, Zhou Y, Lei G C, Liu G H. Diet shift and its impact on foraging behavior of Siberian crane (*Grus leucogeranus*) in Poyang Lake. *PLoS ONE*, 2013, 8(6): e65843.
- [8] 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*, 2018, 29(1): 100-114.
- [9] 陈锦云, 周立志. 安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构. *生态学报*, 2011, 31(18): 5323-5331.
- [10] Evtimova V V, Donohue I. Water-level fluctuations regulate the structure and functioning of natural lakes. *Freshwater Biology*, 2016, 61(2): 251-264.
- [11] 邴建平, 邓鹏鑫, 徐高洪, 贾建伟. 2020 年长江中下游干流高洪水位特点及成因分析. *水利水电快报*, 2021, 42(1): 10-16.
- [12] Vafidis J O, Vaughan I P, Jones T H, Facey R J, Parry R, Thomas R J. Habitat use and body mass regulation among warblers in the Sahel region during the non-breeding season. *PLoS ONE*, 2014, 9(11): e113665.
- [13] Zhang Y, Cao L, Barter M, Fox A D, Zhao M J, Meng F J, Shi H Q, Jiang Y, Zhu W Z. Changing distribution and abundance of Swan Goose *Anser cygnoides* in the Yangtze River floodplain: the likely loss of a very important wintering site. *Bird Conservation International*, 2011, 21(1): 36-48.
- [14] 叶飞. 三峡库区消落带土壤氮循环关键过程微生物群落特征研究[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2018.
- [15] 涂建军, 陈治谏, 陈国阶, 李德清. 三峡库区消落带土地整理利用—以重庆市开县为例. *山地学报*, 2002, 20(6): 712-717.
- [16] 刁承泰, 黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(1): 75-80.
- [17] Robinson V, Pizo M A. A floodplain with artificially reversed flood pulse is important for migratory and rare bird species. *Ornithology Research*, 2017, 25(3): 155-168.
- [18] Woldemariam W, Mekonnen T, Morrison K, Aticho A. Assessment of wetland flora and avifauna species diversity in Kafa Zone, Southwestern Ethiopia. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 2018, 11(4): 494-502.
- [19] Xia S X, Liu Y, Wang Y Y, Chen B, Jia Y F, Liu G H, Yu X B, Wen L. Wintering waterbirds in a large river floodplain: Hydrological connectivity is the key for reconciling development and conservation. *Science of The Total Environment*, 2016, 573: 645-660.
- [20] Wang Y Y, Jia Y F, Guan L, Lu C, Lei G C, Wen L, Liu G H. Optimising hydrological conditions to sustain wintering waterbird populations in Poyang Lake National Natural Reserve: Implications for dam operations. *Freshwater Biology*, 2013, 58(11): 2366-2379.
- [21] Zhou Y K, Ning L X, Bai X L. Spatial and temporal changes of human disturbances and their effects on landscape patterns in the Jiangsu coastal zone, China. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 111-122.
- [22] 郑光美. 中国鸟类分布与分类名录(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.

- [23] 王晓荣,程瑞梅,肖文发,潘磊,曾立雄.三峡库区消落带水淹初期主要优势草本植物生态位变化特征.长江流域资源与环境,2016,25(3):404-411.
- [24] van Dijk J G B, Duijns S, Gyimesi A, de Boer W F, Nolet B A. Mallards feed longer to maintain intake rate under competition on a natural food distribution. *Ethology*, 2012, 118(2): 169-177.
- [25] Isola C R, Colwell M A, Taft O W, Safra R J. Interspecific differences in habitat use of shorebirds and waterfowl foraging in managed wetlands of California's San Joaquin Valley. *Waterbirds*, 2000, 23(2): 196-203.
- [26] Wang R X, Wu F, Chang Y Y, Yang X J. Waterbirds and their habitat utilization of artificial wetlands at Dianchi Lake: implication for waterbird conservation in Yunnan-Guizhou Plateau Lakes. *Wetlands*, 2016, 36(6): 1087-1095.
- [27] 陈薇,周立志,王维晴,宋昀微,张宏.升金湖和菜子湖越冬白头鹤栖息地适宜性分析.湿地科学,2020,18(3):275-286.
- [28] 张娜,李言阔,单继红,涂小斌,张育慧,李跃,汪凌峰,应钦.鄱阳湖枯水期延长背景下越冬水鸟群落结构、丰富度及其空间分布格局.湖泊科学,2019,31(1):183-194.
- [29] Cumming G S, Paxton M, King J, Beuster H. Foraging guild membership explains variation in waterbird responses to the hydrological regime of an arid-region flood-pulse river in Namibia. *Freshwater Biology*, 2012, 57(6): 1202-1213.
- [30] 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.
- [31] Xia S X, Liu Y, Chen B, Jia Y F, Zhang H, Liu G H, Yu X B. Effect of water level fluctuations on wintering goose abundance in Poyang Lake wetlands of China. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(2): 248-258.
- [32] Zhang C, Yuan Y J, Zeng G M, Liang J, Guo S L, Huang L, Hua S S, Wu H P, Zhu Y, An H X, Zhang L H. Influence of hydrological regime and climatic factor on waterbird abundance in Dongting Lake Wetland, China: Implications for biological conservation. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 473-481.
- [33] Chatterjee A, Adhikari S, Pal S, Mukhopadhyay S K. Foraging guild structure and niche characteristics of waterbirds wintering in selected sub-Himalayan wetlands of India. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105693.
- [34] Hamza F, Hammouda A, Selmi S. Species richness patterns of waterbirds wintering in the gulf of Gabès in relation to habitat and anthropogenic features. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 165: 254-260.
- [35] Bellio M G, Kingsford R T, Kotagama S W. Natural versus artificial- wetlands and their waterbirds in Sri Lanka. *Biological Conservation*, 2009, 142(12): 3076-3085.
- [36] 孟竹剑.鄱阳湖越冬雁类栖息地模型及环境容纳量研究[D].南昌:南昌大学,2018.
- [37] 胡越凯,庞毓雯,焦盛武,黄雨馨,徐俊锋.基于遥感的杭州湾湿地鸕鹚类水鸟适宜生境时空变化特征研究.杭州师范大学学报:自然科学版,2019,18(3):319-328.
- [38] 李艳英,田杰,刘红磊,徐威杰,周滨.鸕鹚类水鸟的生境需求选择与生境恢复策略.湿地科学与管理,2020,16(4):23-26.
- [39] Fox A D, Cao L, Zhang Y, Barter M, Zhao M J, Meng F J, Wang S L. Declines in the tuber-feeding waterbird guild at Shengjin Lake National Nature Reserve, China-a barometer of submerged macrophyte collapse. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2011, 21(1): 82-91.
- [40] Hong S Y, Sharp S P, Chiu M C, Kuo M H, Sun Y H. Flood avoidance behaviour in Brown Dippers *Cinclus pallasii*. *Ibis*, 2018, 160(1): 179-184.
- [41] Faragó S, Hangya K. Effects of water level on waterbird abundance and diversity along the middle section of the Danube River. *Hydrobiologia*, 2012, 697(1): 15-21.
- [42] 张双双,董斌,杨斐,徐文瑞,崔杨林,冯丽丽,陈凌娜.升金湖湿地景观格局变化对越冬鹤类地理分布的影响.长江流域资源与环境,2019,28(10):2461-2470.