

升金湖湿地水鸟越冬期季节性 景观格局变化及其影响因素研究¹

陈心桐^{1,2,3}, 何彬方^{1,2,3}, 霍彦峰^{1,2,3},

张宏群^{1,2,3}, 刘惠敏^{1,2,3}, 荀尚培^{1,2,3*}

(1. 安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 寿县国家气候观象台, 安徽 寿县 232200; 3. 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 安徽 寿县 232200)

【摘要】: 安徽省升金湖湿地是长江中下游重要的水鸟越冬栖息地, 作为浅水通江湖泊其景观格局存在明显季节性变化, 并影响越冬水鸟栖息。基于 2021 年 11 月至 2022 年 4 月共 9 期 Landsat 和 GF6 号卫星影像以及升金湖水位和气象数据, 探究升金湖水鸟越冬期季节性景观格局变化规律及其影响因素。结果表明, 水位是影响湿地季节性景观格局变化的主要因素。越冬前期, 升金湖水位低于 11 m, 湖区草滩、泥滩出露面积较大, 最大值分别为 51.6 和 14.4 km², 为水鸟提供充足的觅食地; 越冬中期, 随水位升高, 水域面积扩大, 草滩和泥滩出露面积迅速减少, 最小值分别为 5.6 和 8.5 km²; 越冬末期, 水位高于 13 m, 湖区被水域覆盖, 草滩和泥滩斑块零碎分布在湖岸边缘, 总面积均小于 5 km²。黄溢闸泄水引发的水位变化是导致 3 月初草滩面积增加的主要因素。景观尺度下, 水位与最大斑块指数和蔓延度指数显著正相关($p < 0.05$), 与斑块密度和香农多样性指数显著负相关($p < 0.05$)。回归分析表明, 气象因素中累计降水量是影响升金湖水位的主要因素($p < 0.05$), 越冬中期和后期, 降水通过影响升金湖水位进而影响湿地景观格局。保护区可依据湿地景观格局变化情况结合水鸟习性, 合理调控升金湖水位, 满足水鸟越冬需求。

【关键词】: 湿地; 越冬水鸟; 景观格局; 水位; 气象因素

【中图分类号】: K903 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023)08- 1653- 11

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj202308009

湿地是水陆生态系统的交界面, 是生物多样性最丰富的生态系统之一, 具有调节气候、涵养水源、维持生物多样性等重要生态功能[1,2,3]。水鸟是依赖湿地生存的鸟类, 保护湿地生态系统对水鸟种群多样性保护有重要意义[4,5,6,7,8]。湿地景观格局变化是影响水鸟种群多样性和丰富度的重要因素[4,6,9,10,11,12]。越冬期是水鸟迁徙周期中的关键时期, 探究水鸟越冬期湿地景观格局变化规律及其影响因素, 为湿地生物多样性保护提供重要基础数据和科学参考。

湿地景观格局是影响水鸟行为及其觅食区域分布的重要因素[13,14,15]。不同种类水鸟的喙长、腿长、体型以及取食方式不

¹ 收稿日期: 2023- 02- 13; 修回日期: 2023- 04- 06

基金项目: 中国气象局气象能力提升联合研究专项(22NLTSY006); 风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-2022.0603); 安徽省气象局创新发展专项(CXM202203)

作者简介: 陈心桐(1992~), 男, 工程师, 主要研究方向为生态遥感。E-mail: chenxt_bnu@163.com

*** 通讯作者** E-mail: xunsp@sina.com

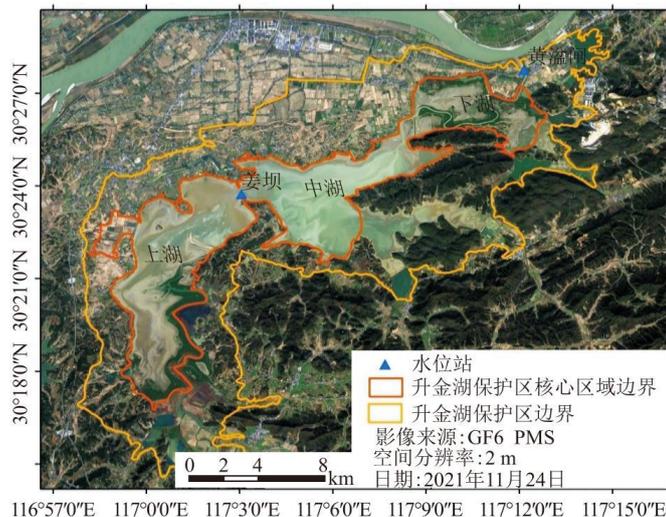
同,对栖息地的利用方式以及觅食地选择有明显差异[7],如鸬鹚类、鹭类和鹤鹑类等涉禽主要采用间歇性啄食行为方式在无植被的浅水区和泥滩觅食;雁类主要采用间歇型啄食行为方式在草滩和泥滩觅食;鸭类、鸥类水鸟主要采用垂直入水取食方式在中水区和深水区觅食[16]。因此,湿地景观类型的面积及其分布决定了水鸟觅食区域分布和食物丰富度,影响水鸟对湿地利用程度[17,18]。当湿地食物来源不足时,水鸟会在湿地附近的农田中觅食,并造成农户经济损失,导致部分农户驱赶或扑杀水鸟[19]。探究湿地景观格局季节性变化规律,保障水鸟食物来源和栖息空间,将为湿地生态保护以及人与自然和谐相处提供重要基础数据和科学建议。

安徽省升金湖国家级自然保护区是长江中下游地区重要的水鸟越冬栖息地[20]。升金湖作为浅水通江湖泊,水位存在季节性变化,并受黄湓闸人为调控[21]。已有研究基于多期同时相卫星遥感数据讨论越冬期升金湖湿地景观格局长期变化[22,23],但缺乏对越冬期间升金湖湿地景观格局演变规律的研究。水鸟越冬期间升金湖水位差超过 2 m[21,24],景观格局变化较大,直接影响越冬水鸟可栖息生境面积及其分布。当前研究主要关注人为干扰对湿地景观格局的影响[14],降水、温度等气象因素对湿地景观格局影响的研究还较匮乏。2022 年 1~4 月,升金湖累计降水量为 678 mm,超往年(2000~2020)同期均值 4 成以上,进而影响水鸟越冬期湿地景观格局。因此,本研究基于卫星遥感数据探究 2021~2022 年水鸟越冬期升金湖湿地景观格局变化规律,结合水位和气象数据讨论升金湖湿地景观格局的影响因素,为升金湖水位管理和湿地生物多样性保护提供科学依据。

1 研究区概况

升金湖国家级自然保护区位于安徽省池州市境内(116° 55' E ~ 117° 15' E,30° 15' N ~ 30° 30' N),保护区总面积约为 33 340 hm²。升金湖湿地位于东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上,同时也是长江中下游水鸟重要的越冬栖息地,越冬期间升金湖湿地水鸟总数约占长江中下游湿地水鸟总数的 5%~10%,越冬水鸟的种类超过 60 种[11,14,16,25]。其中,被列入《国家重点保护野生动物名录》的越冬水鸟有 8 种,包括国家一级保护动物:东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、白头鹤(*Grus monacha*)、白枕鹤(*Grus vipio*),国家二级保护动物白琵鹭(*Platalea leucorodia*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、白额雁(*Anser albifrons*)、鸿雁(*Anser cygnoides*)[14,16]。

升金湖保护区功能区划分为核心区、缓冲区和实验区。其中,核心区域覆盖主要湖区,面积约为 10 150 hm²,占保护区总面积的 30.4%,是珍稀水鸟的主要分布区域[26]。升金湖自西向北自然分成 3 个相连的湖面,分为上湖、中湖和下湖,上湖和中湖由姜坝相连,下湖与长江由黄湓闸相连(图 1)。作为浅水通江湖泊,升金湖水位存在季节性变化,每年丰水期为 5~8 月,枯水期为 11 月至翌年 4 月,黄湓闸在汛期关闭防止江水倒灌,汛后排泄渍水[21]。



2 数据与方法

2.1 数据来源

选取 2021 年 11 月至 2022 年 4 月间 8 期 Landsat 8 OLI 和 1 期 GF6 PMS 卫星遥感影像探究水鸟越冬期(11 月至次年 4 月)升金湖土地利用和景观格局变化情况(表 1),影像获取时间覆盖整个越冬期。Landsat 影像分辨率分别为 30 m, GF6 影像分辨率为 2 m。Landsat 卫星数据来源于美国地质调查局(USGS,<http://glovis.usgs.gov/>),GF6 号卫星数据来源于中国资源卫星应用中心(<https://data.cresda.cn/#/home>)。水鸟越冬期升金湖姜坝水位日数据来源于安徽省水信息系统。降水量、日照时数和平均气温日数据来源于东至县国家基本气象观测站。结合升金湖水位变化特征和水鸟越冬周期,将越冬期分为前期(11~12 月)、中期(次年 1~2 月)和后期(次年 3~4 月)[18,24]。

表 1 卫星遥感影像信息

影像期数	日期	传感器	越冬周期
1	2021 年 11 月 12 日	Landsat 8 OLI	前期
2	2021 年 11 月 24 日	GF6 PMS	前期
3	2021 年 12 月 6 日	Landsat 8 OLI	前期
4	2021 年 12 月 30 日	Landsat 8 OLI	前期
5	2022 年 1 月 15 日	Landsat 8 OLI	中期
6	2022 年 2 月 24 日	Landsat 8 OLI	中期
7	2022 年 3 月 12 日	Landsat 8 OLI	后期
8	2022 年 3 月 28 日	Landsat 8 OLI	后期

9	2022年4月21日	Landsat 8 OLI	后期
---	------------	---------------	----

2.2 数据处理与分析

2.2.1 遥感影像处理

使用 ENVI 5.4 对卫星遥感影像进行预处理, 对 Landsat 8 和 GF6 号卫星遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、影像拼接, 基于 GF 6 号卫星遥感影像对 8 期 Landsat8 卫星遥感影像进行配准, 获取 9 期 2021~2022 年水鸟越冬期升金湖湿地卫星遥感影像。使用 ENVI 5.4 采用面向对象法对升金湖湿地地物类型进行分类, 将土地利用类型划分为水田、旱田、水域、泥滩、草滩、林地和建筑用地 7 种地物类型。面向对象法基于多尺度分割算法将遥感影像在特定尺度下分割, 依据像元的亮度、颜色、形状和邻接关系等属性特征, 将具备相近属性特征的像元区域合并, 划分为无数个具备相同属性特征的区域, 并依据像元属性特征阈值对地物类型进行识别分类。为提高分类精度采用归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)阈值对水体和植被进行提取, 公式如下:

$$NDWI = (P_{Green} - P_{NIR}) / (P_{Green} + P_{NIR}) \quad (1)$$

式中: NDWI 代表归一化水体指数; pGreen 代表绿光波段; pNIR 代表近红外波段。

$$NDVI = (P_{NIR} - P_{Red}) / (P_{NIR} + P_{Red}) \quad (2)$$

式中: NDVI 代表归一化植被指数; pNIR 代表近红外波段; pRed 代表红光波段。

基于目视解译选取各类地物样本进行训练, 以此获取各类地物形状、纹理和光谱特征(亮度、颜色、NDWI 和 NDVI)阈值。基于各类地物属性特征阈值对 9 期升金湖湿地遥感影像进行分类, 采用目视解译基于总体精度和 kappa 系数验证土地利用分类精度。本研究中 9 期土地利用分类结果总体精度均大于 91%,kappa 系数均大于 0.86。

2.2.2 景观格局指数

景观格局指数能够以高度浓缩信息量反映景观格局信息, 本研究选取斑块数目(NP)、斑块密度(PD)、斑块所占景观面积比例(PLAND)、最大斑块指数(LPI)探究斑块类型水平下景观格局变化情况; 斑块密度、最大斑块指数、香农多样性指数(SHDI)、周长面积分维数(PAFRAC)和蔓延度指数(CONTAG)探究景观水平下景观格局变化情况(表 2)。保护区核心区域是珍稀水鸟的主要栖息区域[26],也是升金湖湿地存在季节性景观格局变化的主要区域, 因此使用 Fragstats 4.2 分别计算分类尺度和景观尺度下升金湖保护区核心区域景观指数, 以此探究升金湖湿地季节性景观格局变化规律。

表 2 景观格局指数说明 导出到

景观指数	说明
斑块个数 (NP)	$NP=n$ <p>式中：n 为景观或某一类斑块类型的斑块数量；NP 越大说明景观越破碎</p>
斑块密度 (PD)	$PD=(NP/A)$ <p>式中：A 为景观或某一类斑块的面积；PD 表示单位面积上的斑块数，反映景观破碎化程度，PD 值越大，景观破碎程度越高</p>
最大斑块指数 (LPI)	$LPI = \frac{a_{max}}{A} \times 100\% (0 < LPI \leq 100\%)$ <p>式中：amax 为景观或某一类斑块类型的最大斑块面积，A 为景观或某一类斑块类型的总面积；LPI 反映景观中优势斑块类型</p>
斑块所占景观面积比例 (PLAND)	$PLAND = \frac{a_n}{A} \times 100\% (0 < PLAND \leq 100\%)$ <p>式中：an 表示第 n 类斑块的总面积，A 为景观总面积；PLAND 反映该类斑块占景观面积比例大小</p>
香农多样性指数 (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) (0 \leq SHDI)$ <p>式中：Pi 为第 i 类斑块面积占景观总面积的比例；m 表示景观中斑块类型数目；SHDI 反映了景观异质性，当 SHDI 为 0 时表明景观由单一斑块类型组成，SHDI 增加表明景观异质性变强</p>
周长面积分维数 (PAFRAC)	$PAFRAC = \frac{[\sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} \times \ln a_{ij})] - [(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij}) (\sum_{j=1}^n \ln a_{ij})]}{(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2) - (\sum_{j=1}^n \ln p_{ij})^2} (1 \leq PAFRAC \leq 2)$ <p>式中：pij 为第 i 个斑块类型第 j 个斑块的周长；aij 为第 i 个斑块类型第 j 个斑块的面积 ni 为第 i 个斑块类型的斑块数目；PAFRAC 越接近 1 表明斑块形状越规律，PAFRAC 越接近 2 表明斑块形状越复杂</p>

蔓延度指数 (CONTAG)	$CONTAG = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \times 100 (0 < CONTAG \leq 100)$
	<p>式中：P_i 表示第 i 类型斑块所占面积百分比；g_{ik} 表示第 i 类斑块和第 k 类斑块相邻的个数；m 表示景观中斑块类型数目；CONTAG 反映景观中斑块的聚集程度或延展趋势，蔓延度指数高则表明景观由连通性较好的优势斑块类型组成，反之则表明景观由连通性较差的多种斑块类型组成</p>

2.2.3 数据分析

使用 SPSS 24.0 采用逐步回归模型分析气象因子对升金湖水位的影响，采用“向前法”筛选对水位变化影响显著的因子，采用 K-S 检验方法(Kolmogorov-Smirnov test)检测残差正态性；采用 Spearman 相关分析法分析水位、气象因子和景观格局指标间的相关性；采用曲线估算法基于线性、二次、指数和幂函数等多种模型拟合升金湖湿地主要景观类型面积与水位间的回归关系，并选取拟合度最高的回归模型分析水位对湿地景观面积变化的影响。

3 结果与分析

3.1 水鸟越冬期升金湖景观格局变化情况

本研究基于 2021 年 11 月 24 日 GF6 号高分辨率卫星遥感影像对升金湖自然保护区内地物进行分类，探究升金湖自然保护区土地利用类型分布特征(图 2)。结果表明，保护区内水域面积为 51.09 km²，林地面积为 83.34 km²，旱田面积为 66.92 km²，水田面积为 19.88 km²，建筑用地面积为 18.58 km²。其中，保护区核心区域水域、泥滩、草滩、旱田和水田面积存在明显季节性变化(表 3、图 3)。

表 3 2021~2022 年水鸟越冬期升金湖保护区核心区域景观类型面积(km²)

日期	泥滩	草滩	水域	旱田	水田
2021-11-12	41.6	13.4	49.7	2.1	0.2
2021-11-24	51.6	14.4	39.0	1.8	0.3
	50.7	13.6	40.0	1.9	0.4

2021-12-6					
2021-12-30	39.6	14.1	51.0	1.8	0.4
2022-1-15	34.3	20.4	49.9	1.8	0.6
2022-2-24	5.6	8.5	90.5	1.4	1.1
2022-3-12	2.4	12.7	89.4	1.1	0.9
2022-3-28	1.1	2.2	101.4	1.1	1.5
2022-4-21	1.0	1.1	102.6	0.9	1.5

注：日期为年-月-日.

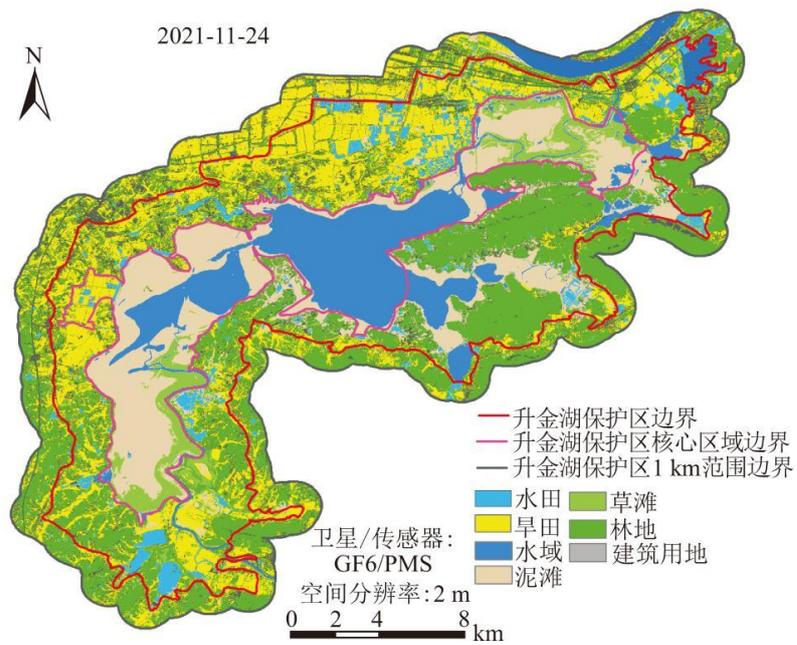


图2 升金湖保护区土地利用类型分布特征

越冬前期, 出露的泥滩面积较大, 最大面积为 51.6 km², 主要分布在上湖和下湖, 呈片状分布, 可为鸕鹚类、鹭类和鹤鹑类等涉禽提供充足食物来源; 草滩面积基本保持稳定, 平均面积为 13.9 km², 主要分布在上湖东南侧沿岸和下湖沿河流、沿岸地区, 呈带状分布, 可为采用间歇性啄食方式以草滩为主要觅食地的水鸟如鸿雁、豆雁(*Anser fabalis*)等提供食物来源; 中湖被水域覆盖, 上湖和下湖水域面积较小, 下湖水域除河流外呈斑块状分布, 越冬前期水域最小面积为 39.0 km², 鸭类和鸥类等水鸟主要在泥滩浅水区及中水区觅食[16](表 3、图 3)。

越冬中期, 泥滩面积大幅减少至 5.6 km², 主要分布在上湖和下湖草滩附近, 呈斑块状; 草滩面积减少至 8.5 km², 主要沿河流呈带状和斑块状分布; 水域面积增加至 90.5 km², 完整覆盖上湖和中湖大部分区域, 下湖被草滩分割为两部分, 呈片状分布, 随着泥滩浅水区面积减少, 水域面积增加, 鸭类和鸥类水鸟可能转向中水区和深水区觅食[16]。

越冬后期, 水域覆盖主要湖区, 3 月下旬后水域面积大于 100 km², 4 月末水域面积达到水鸟越冬期最大值 102.6 km², 完整覆盖升金湖湖区; 草滩和泥滩面积均为越冬期最低值, 中湖和下湖出露的泥滩和草滩基本被水域覆盖, 上湖东南侧河流边有少量草滩出露, 泥滩和草滩平均面积分别为 1.5 和 5.3 km²。

水鸟越冬期间升金湖保护区核心区域不同景观类型景观指数变化趋势存在明显差异。水鸟越冬期各景观类型中泥滩的平均斑块个数最多, 为 337 个, 其次是草滩和水域分别为 253 和 125 个。越冬前期, 泥滩和草滩的斑块密度较低且变化趋势相对稳定, 景观破碎度较低; 越冬中期, 泥滩和草滩的斑块密度逐渐增加并在后期达到最大值分别为 146.0 和 168.8 个/km²; 泥滩和草滩的斑块所占景观面积比例分别在越冬前期和中期达到最大值分别为 48.2% 和 19.1%, 并在中后期呈降低趋势, 在越冬末期达到最小值, 小于 1%; 水鸟越冬期水域斑块密度较低且变化趋势较为稳定, 最大斑块指数和斑块所占景观面积比例呈增加趋势, 并在越冬末期达到最大值(表 4)。

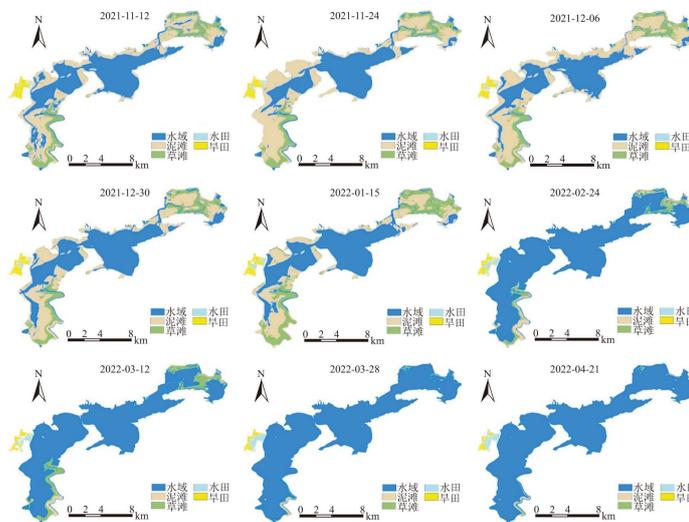


图 3 2021~2022 年水鸟越冬期升金湖保护区核心区域土地利用变化情况

景观水平下, 水鸟越冬前期斑块密度最大, 随后呈降低趋势, 在越冬后期达到最小值; 最大斑块指数在水鸟越冬期总体呈升高趋势, 在越冬后期达到最大值 95.82%; 香农多样性指数在越冬前期保持稳定, 在越冬中期和后期呈降低趋势, 在越冬末期达到最低值 0.23; 蔓延度指数在越冬前期保持稳定, 在越冬中期和后期呈升高趋势, 说明升金湖保护区核心区域在水鸟越冬前期景观丰富度最大, 破碎度最高, 不同斑块类型间连通性较差, 在越冬中期和后期景观异质性逐渐降低, 优势斑块类型面积逐渐增大, 并在越冬末期基本覆盖核心区域(表 5)。周长面积分维数在水鸟越冬期间基本保持稳定, 说明升金湖保护区核心区域景观格局变化受人为干扰较少。

3.2 水位、气象因子与景观格局变化间的关联

水鸟越冬前期、中期和后期升金湖的平均水位分别为 10.3、11.0 和 12.8 m，水位在越冬前期持续降低，在 1 月 4 日达到越冬期最低值 9.98 m，随后水位持续升高，在 3 月 3 日通过黄溢闸排泄升金湖湖水，水位由 13.06 m 降低至 11.49 m，随后在 3 月 31 日达到越冬期最高值 13.56 m(图 4)。

表 4 斑块类型水平下景观格局指数变化

	日期	2021- 11-12	2021- 11-24	2021- 12-6	2021- 12-30	2022- 1-15	2022- 2-24	2022- 3-12	2022- 3-28	2022- 4-21
泥滩	NP	471	549	415	391	425	363	176	159	82
	PD	11.3	10.6	8.2	9.9	12.4	65.1	72.1	146.0	80.0
	LPI	12.6	29.3	16.2	9.9	11.9	2.3	1.4	0.6	0.7
	PLAND	38.9	48.2	47.6	37.0	32.0	5.2	2.3	1.0	1.0
草滩	NP	263	279	225	198	240	248	368	277	179
	PD	19.7	19.4	16.5	14.1	11.7	29.2	28.9	127.9	168.8
	LPI	4.6	5.3	4.2	4.2	8.5	1.4	4.3	0.5	0.4
	PLAND	12.5	13.4	12.8	13.2	19.1	8.0	11.9	2.0	1.0

水域	NP	284	171	191	157	131	67	100	22	4
	PD	5.7	4.4	4.8	3.1	2.6	0.7	1.1	0.2	0.0
	LPI	41.2	25.4	33.4	43.4	43.8	83.7	78.0	94.0	95.8
	PLAND	46.4	36.4	37.5	47.7	46.6	84.6	83.8	94.6	95.8
旱田	NP	12	14	9	13	12	13	14	11	10
	PD	5.8	7.6	4.8	7.1	6.8	9.5	12.4	10.1	11.1
	LPI	0.8	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
	PLAND	1.9	1.7	1.7	1.7	1.6	1.3	1.1	1.0	0.8
水田	NP	15	17	18	9	15	34	24	15	27
	PD	60.8	51.1	50.0	21.2	23.2	31.9	25.7	10.3	18.2

LPI	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	0.5	1.3	0.6
PLAND	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6	1.0	0.9	1.4	1.4

注:NP 表示斑块数目(个);PD 表示斑块密度(个/km²);LPI 表示最大斑块指数(%);PLAND 表示斑块所占景观面积比例(%);日期为年-月-日.

表 5 景观水平下景观格局指数变化

日期	PD	LPI	SHDI	PAFRAC	CONTAG
2021-11-12	9.77	41.20	1.07	1.42	57.10
2021-11-24	9.62	29.33	1.08	1.42	58.09
2021-12-6	8.05	33.44	1.07	1.41	58.32
2021-12-30	7.18	43.42	1.08	1.38	58.34
2022-1-15	7.69	43.79	1.13	1.39	56.74
2022-2-24	6.78	83.67	0.60	1.44	76.30
2022-3-12	6.40	77.98	0.58	1.43	77.47
	4.51	94.00	0.28	1.43	88.94

2022-3-28					
2022-4-21	2.82	95.82	0.23	1.38	91.26

注：PD 表示斑块密度(个/km²);LPI 表示最大斑块指数(%);SHDI 表示香农多样性指数；PAFRAC 表示周长面积分维数；CONTAG 表示蔓延度指数；日期为年-月-日。

2021~2022 年水鸟越冬期升金湖降水主要集中于 2022 年 1 月 22 日至 29 日和 3 月 17 日至 26 日，累计降水量分别为 134.3 和 264.8 mm，两次降水过程后升金湖水位均明显升高(表 6)。越冬前期和后期日照均较为充足，累计日照时数分别为 384.1 和 332.2 h，越冬中期日照时数较短，累计日照时数为 147.9 h。

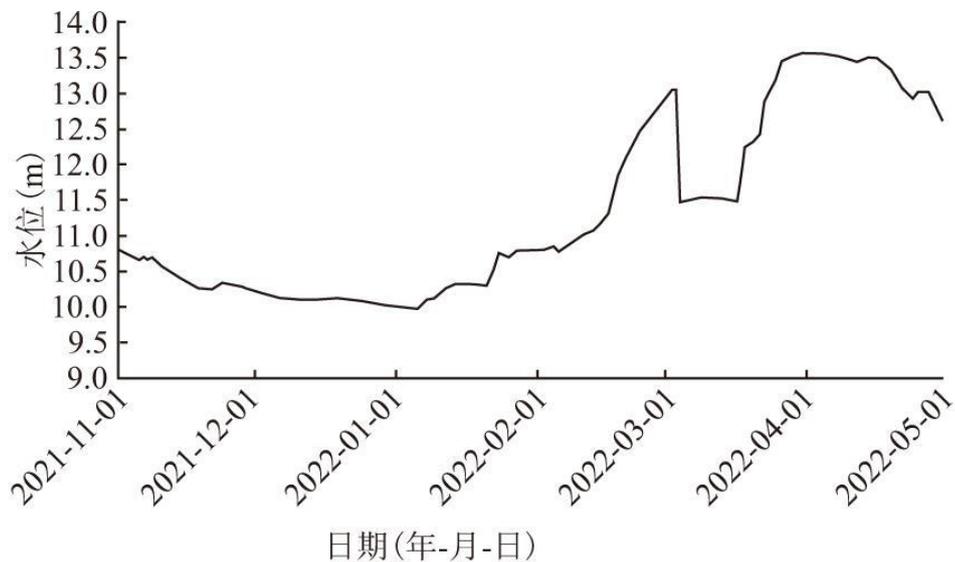


图 4 2021~2022 年水鸟越冬期姜坝水位变化

相关分析结果表明，景观水平下水位与最大斑块指数、蔓延度指数、水域面积和水田面积显著正相关($p < 0.05$)，与斑块密度、香农多样性指数、泥滩面积、草滩面积和旱田面积显著负相关($p < 0.05$) (表 7)；景观水平下，水位与除周长面积分维数外的景观格局指数均显著相关，水位较低时，升金湖湿地景观破碎度较大，异质性较强，随水位升高，湿地景观类型趋于统一，景观破碎度降低。气象因子中累计降水量与香农多样性指数和草滩面积显著负相关($p < 0.05$)，其它气象因子与景观格局指数均没有显著相关性；水位与累计降水量显著正相关($p < 0.01$)，与累计日照时数和平均气温没有显著相关性。累计降水量与景观指数的相关性趋势和水位与景观指数的相关性趋势一致，但相关系数较水位更低，表明水位是影响升金湖景观格局的直接因素，累计降水量通过影响水位影响升金湖景观格局。

表 6 水鸟越冬期升金湖气象条件与水位变化

影像获取日期	累计降水量 (mm)	累计日照 时数(h)	平均气温 (°C)	水位变化值 (m)
2021-11-12	29.8	67.8	13.9	-0.29
2021-11-24	23.6	78.1	11.5	-0.17
2021-12-6	0.0	106.5	9.6	-0.18
2021-12-30	8.4	131.5	7.8	-0.12
2022-1-15	14.4	59.5	5.6	0.30
2022-2-24	198.8	61.0	4.1	2.03
2022-3-12	18.4	131.3	13.5	0.74
2022-3-28	264.8	40.2	13.4	2.00
2022-4-21	76.0	168.4	16.7	-0.48

注：累计降水量和日照时数为距上期影像获取期间日数据总和；平均气温为距上期影像获取期间日数据平均值；水位变化值为距上期影像获取期间水位高度差值，计算 3 月 12 日水位变化值时去除了 3 月湖水排泄导致水位降低的影响；首期数据计算以 2021 年 11 月 1 日为起始日期。

表 7 水位和气象因子与景观指数相关关系(n = 9)

	水位	累计降水量	累计日照时数	平均气温
水位	1.00			
累计降水量	0.90**	1.00		
累计日照时数	-0.28	-0.40	1.00	
平均气温	0.43	0.28	0.38	1.00
LPI	0.80**	0.63	-0.03	0.20
PD	-0.67*	-0.45	-0.18	-0.20
SHDI	-0.87**	-0.70*	-0.13	-0.63
PAFRAC	0.56	0.60	-0.58	-0.10
CONTAG	0.67*	0.50	0.33	0.38
泥滩面积	-0.79**	-0.57	-0.03	-0.30
	-0.85**	-0.72*	-0.12	-0.50

草滩面积				
水域面积	0.76*	0.62	0.07	0.22
旱田面积	-0.78**	-0.58	-0.02	-0.23
水田面积	0.73*	0.53	0.02	0.08

注：PD 表示斑块密度；LPI 表示最大斑块指数；SHDI 表示香农多样性指数；PAFRAC 表示周长面积分维数；CONTAG 表示蔓延度指数；* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

逐步回归模型表明气象因子对升金湖水位变化存在显著影响，回归方程 R^2 值为 0.73, $p < 0.01$, 残差符合正态分布。其中，累计降水量对水位变化影响显著($p < 0.01$), 标准化系数为 0.85, T 值为 4.33; 累计日照时数和平均气温对升金湖水位变化均没有显著影响($p > 0.05$)(表 8)。

表 8 气象因子对升金湖水位变化的影响

	气象因子	标准化系数	T	p
回归变量	累计降水量	0.85	4.33	<0.01
排除变量	累计日照时数	-0.21	-0.91	0.40
	平均气温	-0.31	-1.84	0.12

回归模型表明，水位对泥滩、草滩和水域面积均存在显著影响($p < 0.01$), 回归方程 R^2 值均大于 0.85(图 5)。当水位低于 11 m 时，泥滩和草滩面积分别大于 30 和 13 km^2 , 水域面积小于 55 km^2 ; 当水位高于 11 m 时，泥滩和草滩出露面积迅速减少；当水位高于 13 m 时，湖区出露的泥滩和草滩基本被水域完全覆盖，面积均小于 5 km^2 , 水域面积超过 100 km^2 。当水位低于 11 m 时草滩和泥滩的景观面积较大且景观破碎度较低，能够为鸕鹚类、鹭类和鹤鹑类等以泥滩为觅食地以及鸿雁、豆雁等以草滩为觅食地的水鸟提供充足食物来源；当水位高于 13 m 时，草滩和泥滩呈斑块状零碎分布在湖区边缘位置且景观破碎度较高，不利于以草滩和泥滩为觅食地的水鸟觅食、栖息。

4 讨论

升金湖保护区核心区域景观格局存在明显季节性变化,水位是影响越冬期间升金湖景观格局变化的主要因素。王晓媛等 [27] 和齐述华等 [28] 对菜子湖和鄱阳湖的研究均表明水位显著影响湿地类型面积及其空间分布。升金湖中湖地势较低,主要被水域覆盖,越冬期间景观格局变化较小;上湖和下湖地势较高,受水位影响景观格局变化较为明显。越冬前期,升金湖进入枯水期,水位降至年最低值,上湖和下湖泥滩和草滩出露面积最大,景观异质性最强,随水位上涨,草滩和泥滩被水域覆盖,景观异质性降低。杨阳等 [24] 和高祥等 [15] 研究均表明随水位上涨升金湖湿地景观多样性和均匀度下降,与本研究结果相一致。

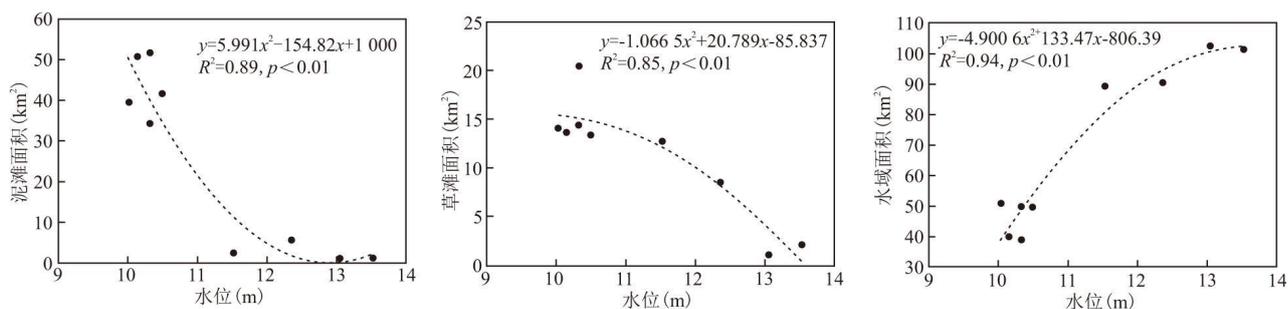


图5 水位对升金湖保护区核心区域各类景观斑块面积的影响

水鸟越冬期间,鹤类和雁鸭类水鸟会将上湖和下湖附近的冬小麦、油菜种植区作为夜宿地和觅食区,导致农作物减产[19,29]。本研究表明泥滩面积在2月下旬大幅减少且破碎化严重,3月初黄湓闸泄水后泥滩面积并未增加,仍保持低位,鹤类和雁鸭类水鸟食物来源不足可能是该类水鸟在湖区附近的农田中取食的主要原因。Zhang等[30]建议在越冬后期将升金湖水位维持在8.09~9.40 m以满足水鸟越冬需求。保护区可以在越冬后期对鸕鹚类、鹭类和鹤鹑类等以泥滩为主要觅食地的水鸟数量进行观测,估算水鸟所需食物量,在水鸟聚集区投放食物,弥补觅食区域面积大幅减少对水鸟栖息的负面影响,并降低农户经济损失。

枯水期黄湓闸关闭,升金湖水位高于长江水位,水域面积相较于长江连通时扩大[21],气象因素是影响该时期升金湖水位的的重要因素。降水是湖水的重要补给源,一部分降水形成地表径流汇入湖泊,另一部分下渗通过地下径流补给河流后汇入湖泊[31]。崔玉环等[32]基于同位素实验表明,升金湖水及湖区附近地表水主要受降水补给。1月下旬和3月下旬的持续降水是导致升金湖水位在2~3月上升共计4.1 m的重要因素之一。回归分析表明降水显著影响升金湖水位,进而改变湿地景观格局。水鸟越冬期间保护区可以通过气象预报信息,判断升金湖水位涨落变化趋势,结合水鸟习性及其迁飞时间通过黄湓闸科学管理升金湖水位,为越冬水鸟提供充足觅食区域和食物来源。

5 结论

本文探究了2021~2022年水鸟越冬期升金湖景观格局季节性变化规律。结果表明,越冬前期升金湖水位较低,草滩和泥滩出露面积最大,水域面积最小,湿地景观破碎度最大,异质性最强;越冬中、后期,随水位上涨,草滩、泥滩面积迅速减少,湿地景观破碎度降低;越冬末期,湖区被水域覆盖,湿地景观类型趋于统一。水鸟越冬期升金湖水位受降水和人为控制影响。3月初黄湓闸泄水是影响越冬后期景观指数波动的主要因素。降水量是影响升金湖水位的重要因素,越冬中期和后期,降水通过影响升金湖水位影响湿地景观格局。保护区可调控升金湖水位或通过观测水鸟类型及其数量,结合水鸟习性以及水位变化情况在越冬后期调控升金湖水位或在水鸟栖息区域投放食物,为越冬水鸟提供适宜栖息生境。

本文揭示了水鸟越冬期气象因素、水位和升金湖景观格局变化间的关联,为浅水通江湖泊季节性景观格局变化规律及其影响因素研究提供新的认识和理解。2021年水鸟越冬中期和后期升金湖降水量较往年(2000~2020年)同期平均值增加46.2%,越冬期间水位变化较大,尤其是越冬后期受降水影响水位持续上涨,鸕鹚类、鹭类、鹤鹑类以及鸿雁、豆雁等水鸟可栖息面积迅速

减少, 进而对该部分水鸟栖息产生负面影响。目前, 随着湿地保护修复项目开展和保护区生态管护能力的提升, 人为因素导致的负面影响大幅降低。未来研究需进一步关注气象因素对浅水通江湖泊景观格局变化的贡献度, 分析旱涝等气象灾害对湿地植被以及生物种群的影响, 以期更全面、科学的开展湿地保护工作。

参考文献:

- [1] 李玉凤, 刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(1): 102- 108. LI Y F, LIU H Y. Advance in wetland classification and wetland landscape classification researches [J]. Wetland Science, 2014, 12(1): 102- 108.
- [2] GHERMANDI A, VAN DEN BERGH J C J M, BRANDER LM, et al. Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis [J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): W12516.
- [3] MITSCH W J, GOSSELINK J G. Wetlands [M]. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- [4] YUAN L, LIU D, TIAN B, et al. A solution for restoration of critical wetlands and waterbird habitats in coastal deltaic systems [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302 : 113996.
- [5] XU T, WENG B, YAN D, et al. Wetlands of international importance: Status, threats, and future protection [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(10): 1818.
- [6] ZHANG S, ZHANG P, PAN B, et al. Wetland restoration in the East Dongting Lake effectively increased waterbird diversity by improving habitat quality [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 27 : e01535.
- [7] MA Z, CAI Y, LI B, et al. Managing wetland habitats for waterbirds: An international perspective [J]. Wetlands, 2010, 30(1): 15-27.
- [8] LI D, CHEN S, GUAN L, et al. Patterns of waterbird community composition across a natural and restored wetland landscape mosaic, Yellow River Delta, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(2): 325-332.
- [9] 陈薇, 周立志, 王维晴, 等. 升金湖和菜子湖越冬白头鹤栖息地适宜性分析 [J]. 湿地科学, 2020, 18(3): 275-286. CHEN W, ZHOU L Z, WANG W Q, et al. Analysis of suitability of wintering *Grus monacha* habitats at Shengjin Lake and Caizi Lake [J]. Wetland Science, 2020, 18(3): 275-286.
- [10] GONZÁLEZ-GAJARDO A, SEPÚLVEDA P V, SCHLATTER. Waterbird assemblages and habitat characteristics in wetlands [J]. Waterbirds, 2009, 32(2): 225-233.
- [11] 范少军, 周立志, 于超. 长江中下游升金湖湿地越冬鸭属(*Anas*) 鸟类群落结构和行为特征 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1596- 1608. FAN S J, ZHOU L Z, YU C. Community structure and behavioral characteristics of wintering dabbling ducks (*Anas*) at Lake Shengjin, the middle and lower reaches of the Yangtze River floodplain [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1596- 1608.
- [12] ZHU F, ZOU Y, ZHANG P, et al. Dyke demolition led to a sharp decline in waterbird diversity due to habitat quality reduction: A case study of Dongting Lake, China [J]. Ecology and Evolution, 2022, 12(4): e8782.

-
- [13] 王成,董斌,朱鸣,等.升金湖湿地越冬鹤类栖息地选择[J].生态学杂志,2018,37(3):810-816.WANG C, DONG B, ZHU M, et al. Habitat selection of wintering crane in Shengjin Lake wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3): 810-816.
- [14] 张双双,董斌,杨斐,等.升金湖湿地景观格局变化对越冬鹤类地理分布的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2461-2470.ZHANG S S, DONG B, YANG F, et al. Influence of landscape pattern change of Shengjin Lake wetland on the geographical distribution of overwintering cranes[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2461-2470.
- [15] 高祥,戚雨婷,董斌,等.基于多光谱数据的湿地景观格局变化对越冬候鸟生境影响[J].光谱学与光谱分析,2021,41(2):579-585.GAO X, QI Y T, DONG B, et al. Impact of water level fluctuations on habitats of wintering migratory birds based on multispectral data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(2): 579-585.
- [16] 王新建,周立志,陈锦云,等.长江下游沿江湿地升金湖越冬水鸟觅食集团结构及生态位特征[J].湖泊科学,2021,33(2):518-528.WANG X J, ZHOU L Z, CHEN J Y, et al. Foraging guild structure and niche characteristics of wintering waterbirds at Lake Shengjin, lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 518-528.
- [17] 陈炼钢,陈黎明,贾建伟,等.鄱阳湖枯季水位变化对越冬水鸟生境面积的定量影响[J].水利学报,2019,50(12):1502-1509.CHEN L G, CHEN L M, JIA J W, et al. Quantitative effects of water level variation on the habitat area of wintering waterfowl in dry season of the Poyang Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1502-1509.
- [18] YANG L, ZHOU L, SONG Y. The effects of food abundance and disturbance on foraging flock patterns of the wintering Hooded Crane (*Grus monacha*) [J]. Avian Research, 2015, 6: 15.
- [19] 张贵友,李广梅,刘良田,等.升金湖越冬水鸟在周边农田觅食造成的农户经济损失评估与补偿研究[J].湿地科学,2019,17(5):504-510.ZHANG G Y, LI G M, LIU L T, et al. Assessment on economic loss of farmers caused by overwintering water birds in Shengjin Lake feeding in surrounding farmlands and compensation[J]. Wetland Science, 2019, 17(5): 504-510.
- [20] 王昱熙,赵青山,谢彦波,等.长江中下游湿地大型水鸟种群动态和幼鸟比例研究[J].生态学报,2023,43(2):868-877.WANG Y X, ZHAO Q S, XIE Y B, et al. Population dynamics and age ratio of large-bodied waterbird species in the wetlands of the Yangtze River floodplain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 868-877.
- [21] 崔玉环,王杰.控水闸对通江湖泊水位及面积变化的影响分析—以升金湖为例[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):47-52.CUI Y H, WANG J. Influence of the sluice on water level and area of Yangtze River-connected Lakes: A case study in Shengjin Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 47-52.
- [22] 陈凌娜,董斌,彭文娟,等.升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):556-563.CHEN L N, DONG B, PENG W J, et al. Study on the change of landscape pattern on habitat environment of winter cranes in Shengjin Lake nature wetland[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(3): 556-563.
- [23] 杨李,董斌,汪庆,等.安徽升金湖国家级自然保护区水鸟生境适宜性变化[J].湖泊科学,2015,27(6):1027-1034.YANG L, DONG B, WANG Q, et al. Habitat suitability change of water birds in Shengjinhu National Nature Reserve, Anhui Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(6): 1027-1034.
- [24] 杨阳,李皖彤,周忠泽,等.升金湖湿地景观格局与水位关系的研究[J].生物学杂志,2019,36(2):61-64,

72. YANG Y, LI W T, ZHOU Z Z, et al. The study on the relationship between wetland landscape pattern and water level in Shengjin Lake [J]. Journal of Biology , 2019 , 36(2) : 61 -64 ,72.

[25] 卡特·马克, 雷刚, 曹垒. 长江中下游水鸟调查报告(2005 年 2 月) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006. BARTER M, LEI G, CAO L. Waterbird survey of the middle and lower Yangtze River floodplain (February 2005) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House , 2006.

[26] 杨永峰, 赵有贤, 袁军, 等. 安徽升金湖国家级自然保护区总体规划(2021 ~ 2030 年) [R]. 北京: 国家林业和草原局林草调查规划院, 2022. YANG Y F, ZHAO Y X, YUAN J, et al. General Planning of Shengjin Lake National Nature Reserve in Anhui Province (2021 ~ 2030) [R]. Beijing: Academy of Inventory and Planning , National Forestry and Grassland Administration , 2022.

[27] 王晓媛, 江波, 田志福, 等. 冬季安徽菜子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响[J]. 湖泊科学, 2018 ,30(6) : 1636- 1645. WANG X Y, JIANG B, TIAN Z F, et al. Impact of water level changes in Lake Caizi(Anhui Province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period [J]. Journal of Lake Sciences , 2018 , 30(6) : 1636- 1645.

[28] 齐述华, 张起明, 江丰, 等. 水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究 [J]. 自然资源学报, 2014 , 29(8) : 1345- 1355. QI S H, ZHANG Q M, JIANG F, et al. Study on the effects on the landscape spatial pattern of the wintering birds ' habitat from lake level in Poyang Lake wetland [J]. Journal of Natural Re-

[29] FAN Y, ZHOU L, CHENG L, et al. Foraging behavior of the Greater White - fronted Goose (Anser albifrons) wintering at Shengjin Lake: Diet shifts and habitat use [J]. Avian Research , 2020 , 11(1) : 65-73.

[30] ZHANG Y, ZHOU L, CHENG L, et al. Water level management plan based on the ecological demands of wintering water- birds at Shengjin Lake [J]. Global Ecology and Conservation , 2021 , 27 : e01567.

[31] 陈建生, 彭靖, 詹泸成, 等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析[J]. 水资源保护, 2015 , 31 (4) : 1-7. CHEN J S, PENG J, ZHAN L C, et al. Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection , 2015 , 31 (4) : 1 -7.

[32] 崔玉环, 王杰, 刘友存, 等. 长江下游沿江升金湖河湖过渡带地下水来源及水质影响因素分析 [J]. 湖泊科学, 2021 , 33(5) : 1448- 1457. CUI Y H, WANG J, LIU Y C, et al. Groundwater sources and the influencing factors on water quality in the river-lake transition zone of Lake Shengjin , lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences , 2021 , 33(5) : 1448- 1457.