

研究论文 ORIGINAL PAPERS

淮南越冬鸳鸯对城市近郊
人工湿地的生境利用和行为适应程磊^{1,2}, 李友菊¹, 高齐齐¹, 陈锦云^{1,2}, 刘刚^{3*}

- 淮南师范学院生物工程学院, 淮南 232038;
- 资源与环境生物技术安徽普通高校重点实验室, 淮南 232038;
- 安徽医科大学生命科学院, 合肥 230032)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-09-29
修回日期: 2024-12-18关键词: 生境利用;
行为时间分配;
人工湿地;
越冬鸳鸯;
采煤沉陷湿地Keywords: Habitat use;
Time-activity budget;
Artificial wetland;
Wintering mandarin duck
(*Aix galericulata*);
Mining subsidence wetland

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-03-0603-12

DOI: 10.12375/ysdwx.20250314

摘要

为探究采煤沉陷区生态修复而形成的人工湿地中越冬鸳鸯(*Aix galericulata*)生境利用模式及其行为变化规律,于2023年10月—2024年4月,在淮南鸳鸯湖城郊湿地公园采用定点观察法和瞬时扫描法对越冬鸳鸯在不同天气、越冬阶段以及雌雄个体间的生境利用和日行为模式进行研究,观察记录觅食、休息、游泳、移动、社群、维持、警戒和飞行等行为,共记录1628条有效数据,累积时长407 h。结果显示:(1)越冬鸳鸯种群数量在不同越冬阶段存在显著性差异($\chi^2 = 27.031, P < 0.001$),中期种群数量最多且相对稳定[(223.526 ± 11.026) 只,雌雄性比1:1.16]。(2)越冬鸳鸯对鸳鸯湖5种类型生境的利用存在明显偏向性特征($\chi^2 = 163.436, P < 0.001$),通常选择生境面积最小(0.034 hm^2)且可利用率最低(0.005)的水域-芦苇交错区栖息觅食(偏好指数128.074)。(3)不同天气条件下越冬鸳鸯的日行为时间分配具有显著性差异($P < 0.05$)。在晴天,越冬鸳鸯的觅食、游泳、维持、警戒和飞行行为相对于阴雨和雾霾天时间占比最高,休息行为占比最低;阴雨或雾霾天,越冬鸳鸯则增加个体静息等低能耗行为,减少觅食和飞行等高能耗行为。(4)不同越冬阶段以及性别之间越冬鸳鸯日行为时间分配模式不同。鸳鸯的日行为时间分配整体组成仅在越冬前期和后期之间存在显著性差异($P < 0.05$),具体表现为游泳和社群行为在越冬中期时间占比最高,均显著高于前期;警戒行为则随着越冬期进程呈现前期最高,中期次之,后期最低的变化趋势;觅食、休息、移动、维持和飞行等行为在不同越冬阶段不存在显著性差异。不同性别之间个体在休息、游泳、社群和维持行为上的日行为时间分配呈显著性差异($P < 0.05$),觅食、移动、警戒和飞行等行为则无明显差异。研究表明,在城郊人工湿地公园中,越冬鸳鸯展现出不同于传统越冬地的生境利用模式和行为特征。鸳鸯通常选择避开人类活动频繁的区域和时间,以减少人为干扰所带来的影响。研究结果为理解鸳鸯等越冬雁鸭类水鸟对生态修复后人工湿地的生态适应机制以及栖息地恢复和物种保护等提供科学依据。

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目(2024AH051748);国家自然科学基金面上项目(32470560);2024年安徽省大学生创新训练计划项目(S201410381145)

第一作者简介: 程磊(1993—),男,讲师;主要从事水鸟与湿地生态学研究。E-mail:chenglei@hnnu.edu.cn

* 通信作者: 刘刚, E-mail:liugang8966@163.com

Habitat Use and Behavioral Adaptation of the Wintering Mandarin Duck in Suburban Artificial Wetland, Huainan

CHENG Lei^{1,2}, LI Youju¹, GAO Qiqi¹, CHEN Jinyun^{1,2}, LIU Gang^{3*}

(1. School of Biological Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232038, China;

2. Key Laboratory of Bioresource and Environmental Biotechnology of Anhui Higher Education Institutes, Huainan 232038, China;

3. School of Life Sciences, Anhui Medical University, Hefei 230032, China)

Abstract: To understand the patterns of habitat use pattern and behavioral change of wintering mandarin ducks (*Aix galericulata*) in the artificial wetland by ecological restoration after the coal mining subsidence areas, we used instantaneous scanning and fixed-point observation methods to quantify weather, period, and sex induced differences in daily behavior patterns which included foraging, resting, swimming, walking, social group, maintenance, vigilance and flying, based on 1 628 records collected over 407 hours in Yuanyang Lake, Huainan, from October 2023 to April 2024. The results showed that (1) the population size of wintering mandarin ducks varied significantly through different wintering periods, with the population being largest and relatively stable in the middle period [population size (223.526 ± 11.026) Ind., sex ratio 1:1.16]. (2) these preferred to the open water-reeds area, even though this area had the smallest habitat area (0.034 hm^2) and the lowest availability (0.005) among the five habitat types ($\chi^2 = 163.436, P < 0.001$). (3) there was significant difference in the time allocation of daily behavior under three weather conditions ($P < 0.05$). Foraging, swimming, maintenance, vigilance, and flying behaviors percentage of time was significantly longer on sunny days compared to overcast-rainy and hazy days, while resting behaviors was at its lowest on sunny days. The wintering mandarin ducks reduced individual energy cost by increasing low-energy behaviors such as resting and decreasing high-energy behaviors such as foraging, and flying in overcast-rainy or hazy day. (4) there were differences in the time allocation of daily behavior among wintering periods and genders. The overall composition of daily behavioral time allocations of mandarin ducks differed significantly only in the early and later periods ($P < 0.05$). Swimming and social group had the highest percentage of time in the middle period, both significantly higher than in the early period, meanwhile, vigilance showed the highest in the early period, followed by middle and later periods of the wintering. Other behaviors, such as foraging, resting, walking, maintenance, and flying, showed no significant differences through the three wintering periods. Significant gender-based differences were observed in the time allocation of daily behaviors, including resting, swimming, social group and maintenance ($P < 0.05$), whereas foraging, walking, vigilance, and flying were not significantly different. Based on the results, the wintering mandarin ducks showed different habitat use patterns and behavioral rhythms from those of traditional wintering sites. They prefer to avoid areas and times of high anthropogenic activities in order to minimize the impact of human disturbance. The results of the study provide scientific basis in understanding the ecological adaptation of the wintering mandarin ducks and other water-birds in the artificial restored wetland, as well as for habitat restoration and species conservation.

水鸟是湿地生态系统的重要指示类群^[1],其中,迁徙水鸟的周年生活史与其迁徙路线上湿地斑块的生境质量和利用模式密切相关,同时也直接或间接影响鸟类的种群动态、活动规律和空间分布,进而导致栖息地偏好和行为节律的改变^[2]。近年来,由于沿海滩涂围垦以及内陆水利工程等人为因素的影响,自然湿地生境质量急剧下降、破碎化程度加

剧^[3-5]。自然湿地的退化致使鸟类适宜栖息地面积萎缩甚至消失,严重影响和限制了水鸟种群的生存和扩散^[6]。伴随城市化的快速发展,经生态修复而形成的众多城郊人工湿地有效降低了因自然湿地丧失或退化给水鸟带来的生存压力,为多种水鸟提供良好的栖息和觅食场所,如采煤沉陷湿地、水库等^[7-9]。然而,人工湿地特殊的生态特征和高强度的

人类活动,导致水鸟在栖息地利用模式、行为响应等方面表现出适应性调整,适应机制尚不明确。

淮河流域湖泊众多,是东亚—澳大利西亚水鸟迁徙路线的重要区域,维系了数量较多的全球受胁水鸟物种,为各类越冬水鸟提供重要的越冬栖息地^[10-11]。淮河安徽段水库闸坝众多,河湖水文连通受阻,生境斑块间的协同变化(物质交换、能量流动和生物交流)等过程受到抑制,对湿地生态系统结构和稳定造成不利影响。加之“两淮”地区(淮南、淮北)是我国重要的煤矿能源基地,伴随煤炭资源的不断开采,逐步形成了面积总量大、分布范围广的采煤沉陷区,致使淮河流域水系状况和湿地生态格局进一步发生改变^[8]。在此过程中,自然湿地生境质量持续下降,食物资源迅速减少,栖息环境不断恶化,水鸟为更好提高自身适合度,适当利用采煤沉陷区,人工湿地逐渐成为当地多种水鸟栖息觅食的重要替代性场所^[8]。尽管城市中的人工湿地可以为水鸟提供生存繁衍的栖息空间和觅食场所,但其不同于自然湿地的景观结构、水文节律及人为干扰等特征,使得水鸟面临众多生态风险和生存挑战,包括面对新的捕食者^[12]、有别于传统食物资源^[13]、异质性高的生境类型^[14]、波动频繁的温度^[15]及较低的能见度^[16]等压力。因此,在城市化进程中,区域景观类型的变化以及局部生境质量的改善,补充了野生鸟类的食物来源和适宜栖息地面积^[17],进而使鸟类表现出其对人工湿地灵活的空间响应模式以及行为适应性^[18]。

鸳鸯(*Aix galericulata*)属雁形目(Anseriformes)鸭科(Anatidae)鸟类,为国家二级重点保护野生动物^[19],是湿地生态系统中重要的指示物种^[20]。鸳鸯偏爱栖息于人为干扰小且隐蔽的林间溪流、湖泊和库塘等生境,属于杂食性鸟类,食性随季节变化存在差异,越冬期以植物为主,繁殖期则以动物为主^[13,21]。在我国,鸳鸯主要在东北平原中北部、华北及内蒙古东北部等地区繁殖,在华北一带至长江流域以南各省区越冬^[22]。21世纪初期,由于森林砍伐、围湖造田,以及全球变暖等宏观因素,使得部分原鸳鸯自然分布区的种群数量明显减少,甚至出现阶段性消失^[23],而一些新形成的保护程度较好且较为隐蔽的人工生境斑块逐渐成为鸳鸯种群越冬或繁殖的新栖息地^[20]。鸳鸯湖位于安徽省淮南市大通区,是采煤导致地表沉陷而形成的典型人工湿地,湖区生境异质性低,周边植被组成相对丰富,为越冬鸳

鸯提供适宜的栖息生境和丰富的食物来源。自2018年开始,每年10月—次年4月,约300只鸳鸯来此越冬(前期调查数据),因此该湿地逐渐成为华东地区鸳鸯种群数量较大且相对固定的集中越冬地。本研究于2023年10月—2024年4月,通过对鸳鸯湖越冬鸳鸯种群数量及其生态因子的调查,探究越冬种群的时空动态变化特征,揭示在人工湿地生态系统中越冬鸳鸯栖息地利用模式及其行为特征,为深入研究鸳鸯等越冬水鸟对生态修复后的人工栖息地利用模式、行为响应以及生态适应机制提供基础资料,也将为进一步开展采煤沉陷区生态修复、管理和合理利用提供科学指导意见。

1 研究方法

1.1 研究区概况

鸳鸯湖(32° 37' 11.74" — 32° 37' 23.43" N, 117° 03' 24.65" — 117° 03' 38.00" E)位于淮南市大通湿地核心区域,地处舜耕山北麓,是采煤沉陷区经生态修复而形成的人工湿地。大通湿地总面积约450 hm²,其中,水域面积经实地勘测约34.6 hm²,相对于自然湖泊,冬季水位波动不明显,湖区生境异质性较低。湿地公园周边人口密度较大,人类活动频繁,是目前集鸟类保护、生态观光和休闲娱乐为一体的开放式城市绿地。该区域属于典型的暖温带半湿润季风型气候,四季分明,冬季干冷,年平均气温为15.3℃,年降水量为918 mm,降水集中在7—9月^[24]。公园植被相对丰富,根据野外调查和文献记载,湖区周边乔木主要包括槐(*Styphnolobium japonicum*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、樟(*Camphora officinarum*)和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等;灌木主要包括黄荆(*Vitex negundo*)、柘(*Maclura tricuspidata*)和月季花(*Rosa chinensis*)等;草本植物主要包括芦苇(*Phragmites australis*)、粗毛碎米荠(*Cardamine hirsuta*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、节节麦(*Aegilops tauschii*)、小蓬草(*Erigeron canadensis*)和扁秆荆三棱(*Bolboschoenus planiculmis*)等^[24-25]。

1.2 种群及栖息地调查

1.2.1 监测样点设置

结合鸳鸯湖鸳鸯种群实际分布情况和前期调查数据,为保证每个监测样点的代表性和可通达性,将越冬鸳鸯集中分布的鸳鸯湖中湖区划分为5种栖息

地类型,分别为开阔水域区、水域-枯树区、水域-芦苇交错区、麻栎区和农田(表1),并沿湖岸带设置

5个固定观测样点,样点监测范围覆盖全部中湖水域面积,并涵盖所有栖息地类型(图1)。

表1 鸳鸯湖栖息地类型定义

Table 1 Habitat type definition of Yuanyang Lake

栖息地类型 Habitat type	栖息地描述 Habitat description
开阔水域区 Open water	开阔明水面, 生境不隐蔽, 人为干扰较强
水域-枯树区 Open water-tree branches	分布漂浮和枯树枝的明水面区域, 生境不隐蔽, 人为干扰较强
水域-芦苇交错区 Open water-reeds	水域和芦苇植被交错区域, 水生植被盖度大, 生境隐蔽, 无人工干扰
麻栎区 Quercus forest	麻栎分布区域, 人为干扰较弱
农田 Farmland	农作物分布区域, 人为干扰较强



YD-1 ~ YD-5. 固定观测样点。
YD-1 - YD-5. Fixed sampling site.

图1 淮南鸳鸯湖地理区位及周边生境(程磊 摄影)

Figure 1 The geographic location and habitat around Yuanyang Lake, Huainan (Photoed by CHENG Lei)

1.2.2 监测时间和频次

根据鸳鸯迁徙特点以及越冬期气候变化特征,将研究期划分为前期(2023年10月中旬—12月上旬)、中期(2023年12月中旬—2024年2月上旬)和后期(2024年2月中旬—4月上旬)3个阶段。研究期间,每10 d调查一次越冬鸳鸯数量分布,获取种群时空动态数据,并在种群数量波动阶段(越冬前期和后期)适当动态增加监测频次。

1.2.3 种群数量和空间分布调查

根据GPS(GARMIN eTrex32x)前期定位样点,5组调查人员在抵达5个固定观测样点后,使用单筒

望远镜(SWAROVSKI ATX 30—70×95HD)和激光测距仪(Nikon COOLSHOT PRO 7.5—1 090 m)同步对监测范围内(望远镜观测有效视野范围约为样点周围1 000 m湖区)的鸳鸯种群数量和性别进行计数,样点间不重复计数。其中,在样点1(YD-1)对湖区明水面区域中鸳鸯个体进行计数,在样点2~5(YD-2~YD-5)对分布在芦苇丛等不易直接观察区域的鸳鸯个体进行计数。借助参照物和激光测距仪,对鸳鸯目标群体进行空间定位,并将分布信息在野外工作地图上标记。同时,结合人工湿地景观特征,记录水域条件、栖息地隐蔽程度以及人为干扰强

度等生境要素。

1.3 行为数据收集

在完成对鸳鸯种群数量和空间位置等数据收集后,进行越冬日行为数据采集。通常选择在固定样点附近相对隐蔽且不影响鸳鸯正常行为活动的位置,例如灌木丛或斜坡背面,利用双筒望远镜(SWAROVSKI EL 10×42 WB)和单筒望远镜进行行为数据收集,并采用瞬时扫描取样法,每间隔 15 min

记录日行为数据。根据研究区域日出日落时间、能见度、研究对象活动规律及周边居民日常活动时间,确定越冬鸳鸯日行为观察时间为 07:00—17:00。研究期间,除雨雪等影响野外正常行为取样天气外,累计有效观察时间 57 d,其中,晴天 27 d、阴雨天 16 d、雾霾天 14 d。根据野外调查和相关文献^[26-27],确定鸳鸯越冬期活动行为谱,包括觅食、休息、游泳、移动、社群、维持、警戒和飞行八大类(表 2)。

表 2 越冬鸳鸯行为参数定义

Table 2 Behavior description and definition of the wintering mandarin ducks

行为 Behavior	行为定义及描述 Behavior definition and description
觅食 Foraging	个体在水面和陆地上寻找、捕捉和吞咽食物或者饮水
休息 Resting	陆地蹲伏或站立不动以及在水面漂浮或在枯树枝上站立等
游泳 Swimming	个体在水面上非取食、警戒等状态下匀速游动
移动 Walking	个体在陆地上非取食、警戒和社群等状态下匀速行走
社群 Social group	个体间的相互行为,包括追逐、驱赶、嬉戏、争斗、攻击及非惊扰的对鸣等
维持 Maintenance	个体在水面或陆地上用喙理羽、拍翅和抖身等
警戒 Vigilance	受惊扰而表现出伸颈抬头、四处张望、发出惊叫及逃逸等
飞行 Flying	离开水面或地面,展翅并发生位移,包括短距离和长距离飞行等

在行为记录的同时,观察并收集样点周围干扰源的类型,包括钓鱼、露营和拍鸟以及人流量,并根据鸳鸯的行为反应,将干扰强度量化,分为 5 个等级,由低到高依次为警戒、逃离、短暂惊飞、50% 以下个体惊飞和 50% 以上惊飞,分别记录为 1~5。

1.4 数据分析

1.4.1 栖息地利用模式分析

通过 Google Earth 高分辨率遥感影像测得各类型栖息地的实际面积,以各类栖息地面积占有所有栖息地总面积的比例来计算该栖息地的可利用率(S)。根据野外调查中监测到不同栖息地内鸳鸯数量分布比例,计算其对各类栖息地的实际利用率(N_b),并使用偏好指数(P_i)表征鸳鸯对不同类型栖息地的偏好程度, $P_i = N_b / S^{[28]}$ 。

1.4.2 行为节律差异分析

通过 R 4.3.3 中 Vegan 包(v2.0-2),对不同越冬阶段、不同天气条件下的越冬鸳鸯日行为节律组成进行非度量多维尺度分析(NMDS)和相似性分析(ANOSIM)。

使用 IBM SPSS 26.0 对不同性别之间越冬鸳鸯日行为节律组成进行差异性分析。通过 Kolmogorov-

Smirnov test(K-S 检验)对行为节律数据进行正态检验,若数据符合正态分布,则使用独立样本 t 检验分析其显著性,反之,则使用多个独立样本非参数 Kruskal-Wallis H 检验,分析不同天气、越冬阶段以及性别间鸳鸯各越冬行为的时间分配差异。

1.4.3 行为节律模型分析

采用广义线性混合模型(GLMMs)对影响越冬鸳鸯日行为节律组成的关键影响因素进行分析,将影响越冬鸳鸯日行为节律组成的潜在变量纳入模型,其中性别、天气、越冬阶段以及干扰强度为固定效应,监测时间为随机效应。使用赤池信息量准则(Akaike's information criterion, AICc)评价候选模型的拟合程度,选取 AICc 值最小的候选模型作为最佳模型,并对最佳模型进行模型平均,当模型中变量系数的 95% 置信区间不包含 0 时,则进一步证明该变量对模型影响具有统计学意义,包含 0 则无统计学意义。

以上所有数据显著性水平 α 均设为 0.05,当 $P < 0.05$ 时,表示具有显著性差异或有统计学意义。数据整理、统计与图表制作在 SPSS 26.0、R 4.3.3 和 SigmaPlot 12.5 中进行。数据以平均值 \pm 标准误(mean \pm SE)表示。

2 结果

2.1 越冬鸳鸯种群数量及性比结构特征

研究期间对鸳鸯湖越冬鸳鸯种群数量及分布进行了37次有效调查(前期13次、中期19次、后期5次),包括收集有效行为数据1 628条,累计407 h。最早记录到越冬鸳鸯为2023年10月14日,最晚记录为2024年3月11日。调查结果表明,鸳鸯种群数量在越冬前、中、后期存在显著性差异($\chi^2 = 27.031, P < 0.001$),分别为(94.769 ± 4.811)、(223.526 ± 11.026)、(102.800 ± 11.452)只,其中,越冬中期种群数量最多且相对稳定。越冬前、中、后期鸳鸯成鸟的平均雌雄比分别为1:1.21、1:1.16和1:1.10,雄性个体数在种群中略占优势。

性个体数在种群中略占优势。

2.2 越冬鸳鸯栖息地利用偏好

样点监测记录每种类型栖息地中越冬鸳鸯的只次,单次监测最大纪录为247只,分布在水域-芦苇交错区。开阔水域区最大纪录为5只,水域-枯树区最大纪录为78只,麻栎区最大纪录34只,农田生境未监测到鸳鸯个体。

越冬鸳鸯对鸳鸯湖5种类型栖息地利用存在明显的偏向性特征($\chi^2 = 163.436, P < 0.001$),主要选择水域-芦苇交错区、水域-枯树区和麻栎区,实际利用率分别为0.672、0.195、0.129,其中水域-芦苇交错生境的偏好指数最高,为128.074(表3)。

表3 鸳鸯湖越冬鸳鸯的栖息地利用特征

Table 3 Habitat utilization characteristics of the wintering mandarin ducks at Yuanyang Lake

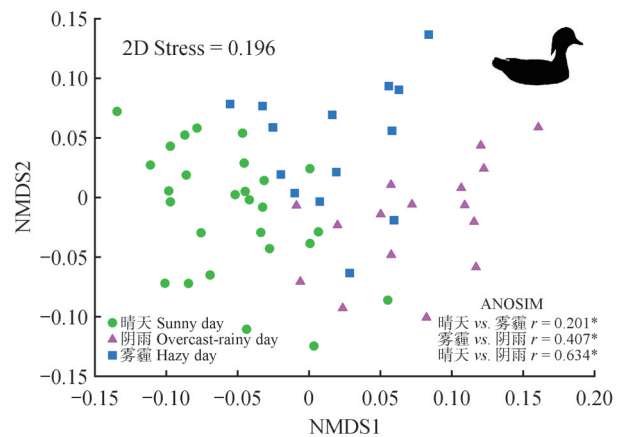
栖息地类型 Habitat type	栖息地面 /hm ² Habitat area	可利用率 Availability	实际利用率 Utilization	偏好指数 Preference index	累计只次 Total individuals
开阔水域区 Open water	3.640	0.565	0.003	0.006	20
水域-枯树区 Open water-tree branches	1.759	0.273	0.195	0.715	1 169
水域-芦苇交错区 Open water-reeds	0.034	0.005	0.672	128.074	4 030
麻栎区 Quercus forest	0.822	0.128	0.129	1.013	774
农田 Farmland	0.191	0.030	0.000	0.000	0

2.3 越冬鸳鸯日行为节律差异

2.3.1 不同天气条件下日行为节律差异

非度量多维尺度分析(NMDS)结果显示,在不同天气条件下越冬鸳鸯的日行为节律具有显著性差异(2D Stress = 0.196, $P < 0.05$,图2)。越冬鸳鸯在晴天主要以休息、觅食和游泳行为为主(73.170%),其次是移动、社群和维持行为(19.858%),警戒和飞行行为时间分配最少(6.972%)。与晴天相比,阴雨天越冬鸳鸯日行为节律发生改变,表现在增加休息时间,减少移动、游泳和飞行等其他行为时间占比;而雾霾天越冬鸳鸯则增加休息、移动和社群行为的时间分配,觅食、游泳和维持等行为时间占比降低(表4)。

具体来看,不同天气条件下越冬鸳鸯休息、游泳、社群、维持、警戒及飞行等日行为时间分配差异显著,而觅食和移动行为无显著性差异。休息行为在阴雨天的时间占比最高,其后依次是雾霾天和晴



*. 差异显著 ($P < 0.05$)。

*. Significant difference ($P < 0.05$).

图2 3种不同天气条件下越冬鸳鸯日行为节律组成差异的非度量多维尺度(NMDS)分析

Figure 2 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) showing daily activity rhythm characteristics of the wintering mandarin ducks under three weather conditions

天。社群行为则在雾霾天时间占比最高,晴天和阴雨天的行为时间分配显著降低。警戒和飞行行为的时间分配均呈现晴天最高,阴雨天和雾霾天降低的行为模式(表4)。

表4 不同天气条件下越冬鸳鸯日行为节律组成差异

Table 4 Differences of the daily activity rhythm of the wintering mandarin ducks under three weather conditions

行为 Behavior	行为时间分配 / % Time-activity budget			χ^2	P
	晴天 Sunny day	阴雨天 Overcast-rainy day	雾霾天 Hazy day		
觅食 Foraging	17.956 ± 0.729 ^a	15.316 ± 0.568 ^b	16.916 ± 1.107 ^b	5.597	0.061
休息 Resting	37.552 ± 1.255 ^c	55.486 ± 1.342 ^a	44.244 ± 1.647 ^b	33.642	< 0.001
游泳 Swimming	17.662 ± 0.725 ^a	14.098 ± 0.748 ^b	15.665 ± 0.555 ^b	8.215	0.016
移动 Walking	4.424 ± 0.286 ^b	3.629 ± 0.400 ^b	5.745 ± 0.697 ^a	4.169	0.124
社群 Social group	7.226 ± 0.589 ^b	4.419 ± 0.348 ^c	7.494 ± 0.535 ^a	13.327	0.001
维持 Maintenance	8.208 ± 0.442 ^a	3.232 ± 0.426 ^c	5.982 ± 0.725 ^b	26.838	< 0.001
警戒 Vigilance	3.214 ± 0.211 ^a	1.970 ± 0.206 ^b	1.872 ± 0.188 ^b	18.722	< 0.001
飞行 Flying	3.758 ± 0.283 ^a	1.848 ± 0.166 ^b	2.081 ± 0.219 ^b	23.407	< 0.001

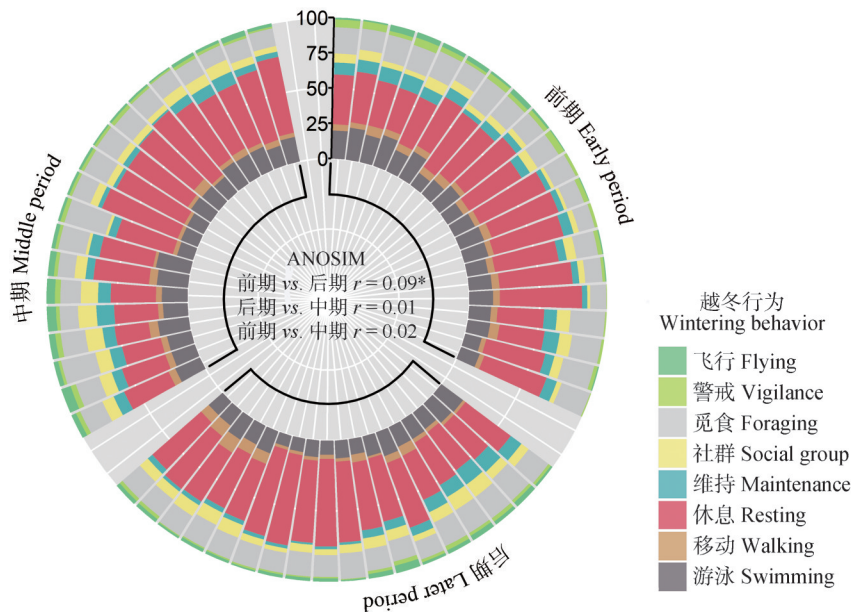
注：同行数据上标字母不同表示差异显著(P < 0.05)。

Note: Data in the same row labeled with the different letters indicate a significant difference (P < 0.05).

2.3.2 不同越冬阶段日行为节律差异

NMDS结果显示,在不同越冬阶段鸳鸯日行为节律仅在前期和后期存在显著性差异(前期 vs. 后期, r = 0.09, 2D Stress = 0.196, P < 0.05, 图3)。具体来看,游泳、社群和警戒的行为时间分配在不同越

冬阶段存在显著性差异,其他行为时间分配差异不显著。其中,游泳和社群行为在越冬中期时间占比最高,均显著高于越冬前期;警戒行为则随着越冬期进程呈现前期最高,中期次之,后期最低的变化趋势(表5)。



*. 差异显著 (P < 0.05)。

*. Significant difference (P < 0.05).

图3 不同越冬阶段鸳鸯日行为节律组成整体差异的非度量多维尺度(NMDS)分析

Figure 3 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) showing activity rhythm characteristics of the mandarin ducks among the different wintering periods

表5 不同越冬阶段越冬鸳鸯日行为节律组成差异

Table 5 Differences of the daily activity rhythm of wintering mandarin ducks among the different wintering periods

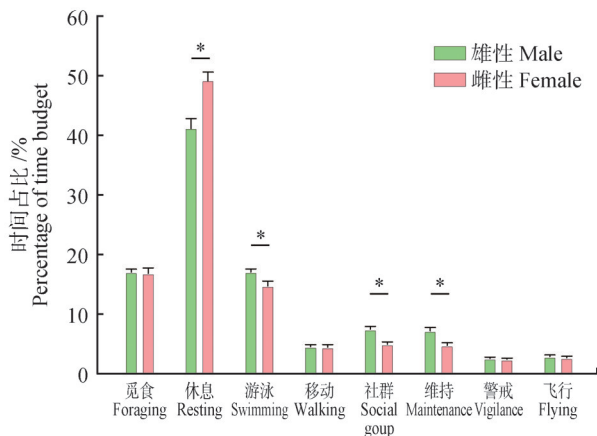
行为 Behavior	行为时间分配 / % Time-activity budget			χ^2	P
	前期 Early period	中期 Middle period	后期 Later period		
觅食 Foraging	17.451±0.853 ^a	16.495±1.083 ^b	16.904±0.432 ^a	1.965	0.374
休息 Resting	42.858±1.794 ^a	43.088±2.429 ^a	46.962±2.443 ^a	0.958	0.619
游泳 Swimming	16.853±0.763 ^b	17.355±0.756 ^a	14.164±0.738 ^c	6.151	< 0.05
移动 Walking	4.884±0.216 ^a	3.972±0.349 ^b	4.711±0.700 ^b	3.317	0.190
社群 Social group	5.263±0.486 ^b	7.213±0.760 ^a	7.134±0.535 ^a	6.680	< 0.05
维持 Maintenance	6.950±0.528 ^a	6.275±0.702 ^a	5.492±0.871 ^b	2.771	0.250
警戒 Vigilance	3.240±0.275 ^a	2.467±0.186 ^b	1.823±0.197 ^b	9.855	< 0.01
飞行 Flying	2.502±0.273 ^a	3.136±0.418 ^a	2.809±0.292 ^a	0.932	0.627

注：同行数据上标字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Data in the same row labeled with the different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$).

2.3.3 不同性别鸳鸯日行为节律差异

越冬鸳鸯日行为节律组成在雌雄个体之间存在差异(图4),其中,休息、游泳、社群和维持行为时间分配差异显著($P < 0.05$)。雌性个体在休息行为时间分配上显著高于雄性[雌性(49.14 ± 1.51)%,雄性(41.15 ± 1.68)%; $F_{(1,55)} = 5.16, P = 0.001$];在游泳[雌性(14.73 ± 0.83)%,雄性(17.08 ± 0.50)%; $F_{(1,55)} = 1.38, P = 0.013$]、社群[雌性(4.95 ± 0.40)%,雄性(7.48 ± 0.47)%; $F_{(1,55)} = 4.26, P < 0.001$]和维持[雌性(4.78 ± 0.43)%,雄性(7.20 ± 0.55)%; $F_{(1,55)} = 7.90, P = 0.001$]行为时间分配上,雌性显著低于雄性。此外,雌雄鸳鸯在觅食、移动、警戒和飞行行为上的时间分配无显著性差异。



*. 差异显著($P < 0.05$)。

*. Significant difference ($P < 0.05$).

图4 不同性别越冬鸳鸯日行为节律组成差异

Figure 4 The daily activity rhythm of the wintering mandarin ducks between sexes

2.4 影响越冬鸳鸯日行为节律组成的关键因素

利用重采样方法对广义线性混合模型(GLMMs)结果进行稳定性评估,得出所有变量的系数以及置信区间。结果显示,除觅食行为外,其余7种行为与性别、天气、干扰和越冬阶段等变量之间存在显著相关性。其中,雄性个体在晴天和雾霾天的休息行为时间分配显著低于阴雨天中的雌性个体。此外,除觅食、移动、警戒和飞行行为外,雄性个体与游泳、社群和维持行为时间分配存在显著正相关,与休息行为呈显著负相关。受天气条件影响,晴天鸳鸯个体增加游泳、维持和警戒行为的时间分配,雾霾天则会减少休息行为时间,增加移动、社群和维持行为的时间占比。此外,越冬阶段在社群和飞行行为时间分配上存在显著正相关,与维持和警戒行为呈显著负相关。相较于前期,越冬中期鸳鸯社群和飞行行为时间增加,警戒行为减少;后期则社群行为时间增加,维持和警戒行为减少(表6)。

3 讨论

鸳鸯传统越冬地多分布在水域面积宽阔的水库或是具有一定深度的坑塘生境,这有利于维持其较高的种群密度。淮南鸳鸯湖湿地公园水域面积相对较小,隔绝和缓冲人为干扰的能力较弱,同时区域内分布了较大规模的越冬鸳鸯种群。这种情况导致鸳鸯个体对栖息地的利用更加偏好植被盖度高、隐蔽性好但实际生境面积最小(0.034 hm²)且可利用率最低(0.005)的近岸水域-芦苇交错区(实际利用率

表6 影响鸳鸯湖越冬鸳鸯日行为节律的关键因子

Table 6 The key factors impacting on the daily activity rhythm of the wintering mandarin ducks at Yuanyang Lake

行为 Behavior	固定项系数[95%置信区间] Coefficients for fixed effects [95% credible intervals]							随机项标准误[95%置信区间] Standard deviation of random effects [95% credible intervals]	
	截距 Intercept	性别-雄 Sex-male	天气-晴天 Weather-sunny	天气-雾霾 Weather-hazy	人为干扰 Human disturbance	阶段-后期 Period-late	阶段-中期 Period-middle	调查时间 Survey date	残差 Residual
觅食 Foraging	14.253 [10.136, 18.578]	0.533 [-1.187, 2.185]	1.759 [-1.645, 5.396]	2.318 [-0.185, 4.695]	0.473 [-0.978, 1.794]	-0.202 [-2.488, 2.060]	-0.307 [-2.925, 2.158]	1.827 [0.469, 3.538]	3.216 [2.520, 3.740]
休息 Resting	61.093 [55.465, 66.631]	-7.714 [-9.838, -5.501]	-15.156 [-19.688, -10.761]	-11.545 [-14.627, -8.344]	-1.104 [-2.802, 0.7204]	1.304 [-1.683, 4.481]	-0.566 [-3.758, 2.720]	3.172 [0.785, 6.110]	4.121 [3.212, 4.826]
游泳 Swimming	15.074 [11.692, 18.225]	1.676 [0.290, 3.122]	3.634 [0.492, 6.422]	0.814 [-1.115, 2.821]	-0.357 [-1.417, 0.823]	-1.937 [3.800, -0.140]	-0.052 [-2.055, 2.164]	0.836 [0.000, 2.041]	2.711 [2.130, 3.173]
移动 Walking	4.620 [2.504, 6.753]	0.002 [-0.903, 0.890]	0.636 [-1.174, 2.513]	1.852 [0.563, 3.115]	-0.108 [-0.822, 0.586]	-0.184 [-1.383, 1.027]	-1.121 [-2.445, 0.189]	0.887 [0.000, 1.758]	1.721 [1.349, 2.004]
社群 Social group	0.511 [-1.634, 2.664]	2.533 [1.545, 3.521]	1.518 [-0.450, 3.484]	3.146 [1.797, 4.494]	0.550 [-0.186, 1.285]	2.064 [0.844, 3.287]	2.308 [0.930, 3.686]	0.000 [0.000, 0.826]	1.938 [1.527, 2.207]
维持 Maintenance	2.061 [-0.034, 4.285]	2.559 [1.605, 3.484]	5.192 [3.291, 7.063]	3.164 [1.861, 4.456]	0.023 [-0.708, 0.727]	-1.442 [-2.727, -0.239]	-0.717 [-2.120, 0.604]	0.514 [0.000, 1.236]	1.808 [1.422, 2.111]
警戒 Vigilance	3.165 [2.243, 4.063]	-0.014 [-0.406, 0.389]	1.503 [0.686, 2.298]	-0.235 [-0.785, 0.325]	-0.191 [-0.492, 0.123]	-1.333 [-1.846, -0.810]	-0.927 [-1.494, -0.349]	0.259 [0.000, 0.561]	0.766 [0.602, 0.889]
飞行 Flying	0.27 [-0.953, 1.494]	0.202 [-0.361, 0.764]	0.876 [-0.244, 1.996]	0.360 [-0.407, 1.128]	0.478 [0.059, 0.897]	0.586 [-0.108, 1.281]	1.148 [0.363, 1.932]	0.000 [0.000, 0.348]	1.103 [0.869, 1.256]

注：显著相关性由不包括0的95%置信区间确定，并以粗体显示。

Note: Significant correlations were determined by the 95% credible intervals not including zero and are displayed in bold.

为0.672, 偏好指数为128.074), 而实际生境面积最大(3.640 hm²)可利用率最高(0.565)的开阔水域, 实际利用率仅为0.003。这与青头潜鸭(*Aythya baeri*)等小型雁鸭类对栖息地的选择偏好^[28-29]具有一致性。此外, 水域周边的麻栎区对越冬鸳鸯产生较高吸引(实际利用率为0.129, 偏好指数为1.013), 这是由于麻栎果实中含有较高的脂肪成分, 在为越冬鸳鸯提供丰富食物资源的同时, 也满足其越冬阶段各项生命活动以及迁徙所需的能量维持和补充。然而, 传统越冬地鸳鸯多以鱼虾、藻类以及部分浮游生物作为主要食物来源^[20], 食物类型、营养价值和能量不同于麻栎果实, 这种食物资源类型的改变是引起水鸟栖息地利用和行为调节的重要原因^[30]。同时, 采煤导致的沉陷区地表水位抬高, 原先树木部分被淹没, 而高于水面的部分则为越冬鸳鸯休息和理羽等行为提供活动位点。因此, 鸳鸯将水域-枯树区作为其重要的休息区域(实际利用率为0.195, 偏好指数为0.715), 这与水库中鸳鸯对裸露地(岩石)的利用^[20]以及中华秋沙鸭(*Mergus squamatus*)在溪流生境中偏好选择在石滩上进行栖息^[31]相

类似。不同的是, 水库和溪流受自然水文变化和连续降雨的影响, 水域中裸岩会重复淹没或暴露, 进而导致停歇位点的时空动态变化。

越冬鸳鸯的行为时间分配在不同天气、越冬阶段以及性别之间存在差异, 多样化的行为模式特征是其对人工湿地生态适应的具体表现。动物通过食物资源摄入和降低能量消耗两种主要途径来维持日常生理代谢所需的能量平衡, 同时能量消耗会导致动物个体的行为时间分配产生适应性调整^[30]。相关研究表明, 休息是越冬期水鸟的主要行为类型之一, 在中华秋沙鸭、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、豆雁(*Anser fabalis*)和白额雁(*A. albifrons*)等雁鸭类群体中普遍存在^[32-35]。本研究表明, 在不同天气条件下, 休息是鸳鸯湖湿地公园越冬鸳鸯时间分配最高的行为类型。与晴天相比, 阴雨天和雾霾天鸳鸯个体的休息行为时间分配均有所增加, 而觅食、游泳、警戒和飞行等行为均相应减少。此外, 对于越冬期水鸟而言, 觅食行为是保证其顺利度过寒冷冬季的重要生态过程, 通常水鸟会根据环境条件、食物可获得性以及被捕食风险适当调整行为模式, 然而本次调查

发现觅食并不是鸳鸯湖湿地公园越冬鸳鸯的主要日行为类型。在3种天气条件下,鸳鸯个体的觅食行为占比均低于20.000%(表4),而在自然湖泊或有人工投食的传统越冬区域,鸳鸯日行为则表现出相对较高的觅食行为占比^[26-27],这与鸳鸯湖湿地公园内充足的麻栎资源以及周边频繁的人类活动有关。在雾霾天,越冬鸳鸯日行为在时间分配和优势行为等方面存在一定响应特征,其行为时间分配遵循能量法则,通过增加个体休息等低能耗行为时间分配,减少觅食和飞行等高能耗行为来降低个体能量消耗^[36],但各行为时间占比增加和减少幅度均小于阴雨天,移动和游泳则是各行为之间重要的过渡行为类型。

从不同越冬阶段鸳鸯日行为时间分配比较中可以看出,鸳鸯日行为节律在越冬前期和后期存在显著性差异,这与雁鸭类在自然湖泊中展现出的行为节律变化^[35]有所不同。一方面鸳鸯湖作为人工湿地公园,相对于自然湖泊越冬期水位波动不剧烈,湖区生境异质性程度较低,个体行为在不同越冬阶段变化不明显;另一方面,鸳鸯湖湿地公园内越冬鸳鸯的主要食物来源为麻栎果实,其丰富度和可获得性与越冬期湖区水位波动无相关关系,进而导致鸳鸯对食物资源的取食范围较为固定且方式相对单一。研究区域无人工投饲行为,随着越冬期时间的推移,鸳鸯个体间对食物资源的竞争逐渐加剧,致使追逐、打斗和驱赶等社群行为时间占比逐渐提高。此外,越冬中后期警戒行为时间占比显著低于越冬前期,表明越冬鸳鸯对人工湿地较强人为干扰的生境特征具有较高的适应性和“习惯化”。

越冬鸳鸯在行为节律方面存在显著性别差异,雌性个体在休息行为上的时间分配更高,而雄性个体在维持行为上的时间分配显著高于雌性,这是因为雄性鸳鸯更加偏爱炫耀羽色,进而在理羽、拍翅和抖羽等维持行为上花费更多时间来吸引异性个体^[27]。此外,雄性鸳鸯在种群内部个体间表现出较为强烈的领域性特征,通过追逐、驱赶、打斗以及攻击等游泳和社群行为来争夺食物资源并占据种群内部主导地位。研究发现,鸳鸯湖湿地公园内雌雄鸳鸯个体在觅食行为时间分配上无显著性差异,这与鸳鸯在鄱阳湖的相关研究结果^[27]保持一致,也侧面暗示了雌雄鸳鸯觅食活动水平和能量摄入对外界环境变化具有同步性的行为表现。移动、警戒和飞行

等行为在雌雄个体间差异不显著。

人为干扰是影响动物空间分布的重要因素之一,同时,也会降低水鸟的物种种类和种群数量,并影响它们的行为模式^[37],特别是在人类活动频繁的城郊湿地。淮南鸳鸯湖湿地公园因其特殊的城市绿地功能定位,是周边居民日常休闲、文化和游憩的重要场所,与自然湖泊湿地相比,干扰频繁且冬季水文变化不明显。本研究结果表明,越冬期鸳鸯的昼间整体觅食活动水平较低,个体将大部分时间分配在休息等能量消耗较低的行为活动上。此外,在调查过程中同步布设了4台红外相机(东方红鹰E3H,深圳),记录到鸳鸯个体夜间进入岸边麻栎区取食果实现象,表现出昼间休息夜间觅食的行为可塑性,后期将继续对夜间鸳鸯活动规律和行为方式进行深入研究。调查发现鸳鸯湖湿地公园内的人类活动,如钓鱼、露营和拍鸟,是影响越冬鸳鸯日行为节律的主要人为干扰源。加之鸳鸯湖水域面积相对较小,鸳鸯对人为干扰更为敏感,极易形成强烈的自我庇护行为,进而选择在面积小但隐蔽性高的水域-芦苇交错区栖息觅食。此外,鸳鸯湖湿地公园内人类活动强度和天气也存在相关性。在晴天,公园人流量增加,干扰加剧,导致鸳鸯表现出倾向避开人类活动区域和时间等压力的行为模式;阴雨天公园人流量减少,人为干扰强度相对降低,鸳鸯个体的领域行为逐渐减弱,警戒行为发生频率也随之降低。因此,人为干扰导致的动物个体觅食时间缩短和能量摄入减少,对越冬水鸟造成的负面影响比栖息地丧失更加显著^[38]。

4 小结

淮南鸳鸯湖湿地公园是华东地区较大的鸳鸯越冬地,其景观特征不同于传统越冬地如水库、自然湖泊和溪流等生境类型。这种由采煤沉陷而逐渐形成的城市近郊湿地已逐渐成为鸳鸯自然生境的替代性场所,对于越冬鸳鸯的物种保护和种群维持具有重要意义。研究表明,在淮南鸳鸯湖湿地公园中,越冬鸳鸯整体以休息等低能耗行为活动为主,同时展现出更加偏好高隐蔽性区域的栖息地利用模式,来适应不同天气条件下人为干扰所造成的能量消耗,进而增加个体适合度。本研究揭示了越冬鸳鸯在高强度干扰下的人工湿地中表现出较为多样且灵活的栖息地利用模式和行为策略,对以人类活动为主的景

观区域具有高度的生态适应性和行为可塑性。研究结果在鸳鸯物种保护、采煤沉陷区生态修复和管理等方面具有重要的科学参考价值。建议在鸟类越冬期,公园管理部门应适当控制人流量,减少人为干扰对鸳鸯种群的影响。同时,进一步开展采煤沉陷区水生植被人工恢复工作,为越冬鸳鸯提供潜在适宜生境。

参考文献:

- [1] AMANO T, SZÉKELY T, SANDEL B, *et al.* Successful conservation of global waterbird populations depends on effective governance[J]. *Nature*, 2018, 553(7687): 199–202.
- [2] MA Z J, CAI Y T, LI B, *et al.* Managing wetland habitats for waterbirds: an international perspective[J]. *Wetlands*, 2010, 30(1): 15–27.
- [3] WANG W J, FRASER J D, CHEN J K. Wintering waterbirds in the middle and lower Yangtze River floodplain: changes in abundance and distribution [J]. *Bird Conservation International*, 2017, 27(2): 167–186.
- [4] YANG H, MA M G, THOMPSON J R, *et al.* Protect coastal wetlands in China to save endangered migratory birds[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(28): E5491–E5492.
- [5] MURRAY N J, CLEMENS R S, PHINN S R, *et al.* Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 267–272.
- [6] HAIG S M, MURPHY S P, MATTHEWS J H, *et al.* Climate-altered wetlands challenge waterbird use and migratory connectivity in arid landscapes[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4666.
- [7] WANG X D, LI X H, REN X T, *et al.* Effects of anthropogenic landscapes on population maintenance of waterbirds [J]. *Conservation Biology*, 2022, 36(2): e13808.
- [8] LI C L, YANG S, ZHA D D, *et al.* Waterbird communities in subsidence wetlands created by underground coal mining in China: effects of multi-scale environmental and anthropogenic variables [J]. *Environmental Conservation*, 2019, 46(1): 67–75.
- [9] CHENG C Y, LIU J J, MA Z J. Effects of aquaculture on the maintenance of waterbird populations [J]. *Conservation Biology*, 2022, 36(5): e13913.
- [10] 凌化矾, 许莉, 刘嵩, 等. 安徽省秋冬季雁鸭类组成及其分布格局调查研究[J]. *安徽林业科技*, 2024, 50(3): 11–19; 24.
LING H F, XU L, LIU S, *et al.* Survey study on the composition and distribution pattern of Anatidae waterfowls in autumn and winter in Anhui Province [J]. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2024, 50(3): 11–19; 24.
- [11] 鲍方印, 王松, 王梅, 等. 安徽沿淮湖泊湿地水鸟资源调查[J]. *动物学杂志*, 2011, 46(4): 117–125.
- BAO F Y, WANG S, WANG M, *et al.* Field survey on wetland waterbird in Huaihe River basin in Anhui, China [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, 46(4): 117–125.
- [12] FISCHER J D, CLEETON S H, LYONS T P, *et al.* Urbanization and the predation paradox: the role of trophic dynamics in structuring vertebrate communities [J]. *BioScience*, 2012, 62(9): 809–818.
- [13] 王瑞坤, 尹昭华, 李星醇, 等. 2021年繁殖季野生鸳鸯对哈尔滨市兆麟公园中植物的利用状况[J]. *湿地科学*, 2022, 20(4): 507–516.
- WANG R K, YIN Z H, LI X C, *et al.* Utilization of plants by wild mandarin ducks in Zhaolin Park of Harbin City during the breeding season in 2021 [J]. *Wetland Science*, 2022, 20(4): 507–516.
- [14] TRYJANOWSKI P, MORELLI F, MIKULA P, *et al.* Bird diversity in urban green space: a large-scale analysis of differences between parks and cemeteries in central Europe [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 264–271.
- [15] MA L, LIU Y C, LU W J, *et al.* A highly effective incubation strategy enhanced the urban bird hatch success [J]. *Avian Research*, 2023, 14: 100074.
- [16] LI Z Q, COURCHAMP F, BLUMSTEIN D T. Pigeons home faster through polluted air [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18989.
- [17] 赵伊琳, 王成, 白梓彤, 等. 城市化鸟类群落变化及其与城市植被的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 479–489.
ZHAO Y L, WANG C, BAI Z T, *et al.* Changes of bird community under urbanization and its relationship with urban vegetation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 479–489.
- [18] 谢世林, 曹垒, 逯非, 等. 鸟类对城市化的适应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6696–6707.
- XIE S L, CAO L, LU F, *et al.* Adaptation of birds to urbanization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6696–6707.
- [19] 国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订)[J]. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 605–640.
List of national key protected wildlife in China (revised on February 1, 2021) [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2021, 42(2): 605–640.
- [20] 方忠艳. 贵州石阡鸳鸯湖鸳鸯(*Aix galericulata*)种群动态及其越冬生境选择[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
FANG Z Y. Population dynamics and overwintering habitat selection of mandarin duck (*Aix galericulata*) in Shiqian Mandarin Duck Lake, Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [21] 金志民, 杨春文, 刘铸, 等. 黑龙江省牡丹峰自然保护区鸳鸯繁殖习性观察[J]. *四川动物*, 2010, 29(3): 489–491.
JIN Z M, YANG C W, LIU Z, *et al.* A study on the breeding biology of *Aix galericulata* in Mudanfang Nature Reserve in Heilongjiang [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2010, 29(3): 489–491.
- [22] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 4版. 北京: 科学出

- 版社, 2023.
- ZHENG G M. A checklist on the classification and distribution of the birds of China[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023.
- [23] 江瑜. 时隔两年, 野鸳鸯再次现身玄武湖[N]. 南京日报, 2007-12-02(A05).
- JIANG Y. After two years, mandarin ducks have reappeared at Xuanwu Lake[N]. Nanjing Daily, 2007-12-02(A05).
- [24] 赵魁, 姚多喜, 张治国, 等. 大通芦苇生态湿地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 126-131.
- ZHAO K, YAO D X, ZHANG Z G, *et al.* Soil respiration characteristics and its influencing factors in Datong *Phragmites australis* ecological wetland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 126-131.
- [25] 王楠, 汪桂生, 郭伟玲. 安徽省淮南市城市湿地景观格局及其脆弱性: 以大通废弃矿生态湿地修复区为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 168-174; 330.
- WANG N, WANG G S, GUO W L. Landscape pattern and its vulnerability of urban wetland at Huainan County, Anhui Province: a case study at Datong abandoned mine ecological wetland restoration area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 168-174; 330.
- [26] NGO THI KIEU TRANG, 杨雨尘, 李浙, 等. 哈尔滨兆麟公园繁殖期鸳鸯日行为模式比较研究[J]. 野生动物学报, 2023, 44(4): 842-852.
- NGO THI KIEU TRANG, YANG Y C, LI Z, *et al.* Individual differences of daily behavior patterns of mandarin ducks during breeding in the Zhaolin Park, Harbin [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023, 44(4): 842-852.
- [27] ZHI Y J, SHAO M Q, CUI P, *et al.* Time budget and activity rhythm of the mandarin duck *Aix galericulata* in the Poyang Lake watershed [J]. Pakistan Journal of Zoology, 2019, 51(2): 725-730.
- [28] 李露, 马富光, 李杰, 等. 越冬青头潜鸭的栖息地利用和行为时间分配[J]. 动物学杂志, 2024, 59(1): 1-10.
- LI L, MA F G, LI J, *et al.* Habitat use and time-activity budget of wintering *Aythya baeri* in Minquan, Henan [J]. Chinese Journal of Zoology, 2024, 59(1): 1-10.
- [29] 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): 1596-1607.
- 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): 1596-1607.
- [30] 于超. 越冬小天鹅对食物资源变化的功能反应和行为适应 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- YU C. The functional response and behavioral adaptation to the changes of food resources for wintering Bewick's swans (*Cygnus columbianus*) [D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [31] 易国栋, 房健, 尹君龙, 等. 中华秋沙鸭越冬微生境选择与空间利用格局[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(11): 91-95.
- YI G D, FANG J, YIN J L, *et al.* Micro-habitat selection and spatial utilization patterns of wintering *Mergus squamatus* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(11): 91-95.
- [32] 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等. 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3712-3721.
- ZENG B B, SHAO M Q, LAI H Q, *et al.* The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3712-3721.
- [33] 张聪敏, 植毅进, 卢萍, 等. 鄱阳湖藕田越冬期小天鹅和鸿雁能量支出与取食行为比较[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 785-790.
- ZHANG C M, ZHI Y J, LU P, *et al.* Energy expenditure and foraging behavior of wintering tundra swan and swan goose in a lotus pond reclamation area in Poyang Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 785-790.
- [34] 刘静. 安徽升金湖国家级自然保护区豆雁的越冬食性和行为研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- LIU J. Diet and activities of wintering tundra bean geese *Anser fabalis serrirostris* at Shengjin Lake, NNR, Anhui Province [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [35] 范言广. 食物资源变化对升金湖越冬白额雁生境选择和觅食行为的影响 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- FAN Y G. Effects of changes in food resources on habitat selection and foraging behavior of greater white-fronted goose wintering at Shengjin Lake [D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [36] GUILLEMETTE M, RICHMAN S E, PORTUGAL S J, *et al.* Behavioural compensation reduces energy expenditure during migration hyperphagia in a large bird [J]. Functional Ecology, 2012, 26(4): 876-883.
- [37] MERETA S T, LEMMENS P, DE MEESTER L, *et al.* The relative importance of human disturbance, environmental and spatial factors on the community composition of wetland birds [J]. Water, 2021, 13(23): 3448.
- [38] WEST A D, GOSS-CUSTARD J D, STILLMAN R A, *et al.* Predicting the impacts of disturbance on shorebird mortality using a behaviour-based model [J]. Biological Conservation, 2002, 106(3): 319-328.