

DOI: 10.20103/j.stxb.202208232408

汪洁, 韩祯, 刘晓波, 黄爱平, 王世岩. 江湖关系变化下雁类生境格局模拟及雁类种群的响应——以都昌保护区为例. 生态学报, 2023, 43(21): 9024-9037.

Wang J, Han Z, Liu X B, Huang A P, Wang S Y. Simulation of habitat pattern and population response of geese under the change of river-lake relationship: a case study of Duchang Nature Reserve, Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 9024-9037.

江湖关系变化下雁类生境格局模拟及雁类种群的响应 ——以都昌保护区为例

汪 洁^{1,2}, 韩 祯^{1,2}, 刘晓波^{1,2,*}, 黄爱平^{1,2}, 王世岩^{1,2}

1 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038

2 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038

摘要: 2003 年后江湖关系变化导致鄱阳湖湿地秋季快速退水, 滩地提前出露, 草洲面积不断扩张。1998—2020 年环湖调查数据表明: 越冬候鸟种群总量稳中有升, 但雁类种群数量急剧增加。为分析候鸟生境及数量变化成因, 从“水文-洲滩-植被-雁类”耦合关系入手, 针对鄱阳湖雁类分布最为集中的都昌保护区, 基于水动力模型分析了 2003 年前后保护区水域、洲滩的动态变化规律, 根据洲滩梯次出露的特征, 结合苔草(*Carex* spp.)、蓼子草(*Polygonum criopolitanum*) 两种优势洲滩植物群落的淹水时长建立了反映高程梯度的生境适宜度评价模型(Habitat suitability index, HSI), 结合鸿雁(*Anser cygnoides*)、豆雁(*Anser fabalis*)及白额雁(*Anser albifrons*)的数量变化分析了模型的敏感性。结果表明: 2003 年后, 同一高程带洲滩在退水期的出露时间比 2003 年前提前约 30 d, 2003 年后相同日期的洲滩出露面积较 2003 年前增加约一倍。1990—2019 年雁类生境适宜度指数(HSI)分值总体呈增加态势。9—12 m 不同高程带洲滩的出露时间及其面积占比是 HSI 分值变化的主要因素。相关性分析结果表明鸿雁、豆雁和白额雁的数量随 HSI 分值增大显著增加, 并呈指数曲线变化。当 HSI 分值大于 0.5 时, 雁类数量急剧增长, 尤其在 2017—2019 年表现明显, 洲滩出露过程与雁类迁飞节律较为匹配是该现象的主要成因, 确定了洲滩适宜出露时间窗口期——从 9 月 15 日(年内自然日第 258 天)到 11 月 4 日(年内自然日第 308 天)。提出了江湖关系变化下雁类生境保护的对策。研究可为基于越冬雁类保护的生态水文过程调控方案提供科学依据。

关键词: 江湖关系; 都昌保护区; EFDC 模型; 生境适宜性指数 HSI; 越冬雁类

Simulation of habitat pattern and population response of geese under the change of river-lake relationship: a case study of Duchang Nature Reserve, Jiangxi Province

WANG Jie^{1,2}, HAN Zhen^{1,2}, LIU Xiaobo^{1,2,*}, HUANG Aiping^{1,2}, WANG Shiyan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China

2 Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: After 2003, the river-lake relation between Poyang Lake and Yangtze River has been changed significantly in autumn. Mudflats were being exposed earlier than before 2003 and the area of wetland plants was increasing. The data from the multi-year survey around the lake from 1998 to 2020 show that the total population of wintering migratory birds is steadily increasing, but the population of geese is increasing sharply. In order to analyze the causes of migratory birds' habitat and population changes, we started from the coupling relationship of hydrology-mudflats-vegetation-geese. Based on

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009148); 国家重点研发计划(2022YFC3201804); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金(WE1203B082022); 河北省湿地生态与保护重点实验室基金(hk1201914)

收稿日期: 2022-08-23; **网络出版日期:** 2023-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xblu@iwhr.com

the hydrodynamic model—the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), the dynamic changes of waters and mudflats in the reserve before and after 2003 were analyzed in Duchang Nature Reserve, which had the most concentrated distribution of geese in Poyang Lake. According to the characteristics of cascade exposure of mudflat, habitat suitability index (HSI) was established based on the flooding duration and growth distribution of *Carex* spp and *Polygonum criopolitanum*. And the sensitivity of the habitat suitability model was analyzed in relation to the population changes of *Anser cygruoles*, *Anser fabalis*, and *Anser albifrons*. The results showed that after 2003, the mudflats in the same elevation zone were exposed about 30 days earlier during the receding period than before 2003, and the area of exposed mudflats on the same dates after 2003 was approximately doubled compared to the period before 2003. From 1990 to 2019, The HSI for geese showed an overall increasing trend. The exposure time of mudflats and their area shares in different elevation zones of 9—12 m were the main factors of interannual variation of HSI. The correlation analysis showed that the number of *Anser cygruoles*, *Anser fabalis* and *Anser albifrons* increased significantly with the increase of HSI, and showed an exponential curve. When the HSI was greater than 0.5, the number of geese increased sharply, especially in 2017—2019, and the main reason for this phenomenon was that the mudflat exposure process matched the migration rhythm of geese. Therefore, based on the results and discussion, the appropriate exposure time window of mudflat was determined—from September 15 (258th day of the year) to November 4 (308th day of the year). The suggestions for wintering geese habitat protection were proposed under the change of river-lake relation between Poyang Lake and Yangtze River. The findings of this study can provide scientific basis for the regulating scheme of eco-hydrological process based on the protection of wintering geese.

Key Words: river-lake relationship; Duchang Nature Reserve; the environmental fluid dynamics code (EFDC); habitat suitability index (HSI); overwintering geese

鄱阳湖(东经 115°49′—116°46′, 北纬 28°24′—29°46′)位于江西省北部,是我国面积最大的浅水湖泊湿地,它承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大江河(以下简称“五河”)来水,经调蓄后由湖口注入长江,是一个过水性、吞吐型、季节性通江湖泊,也是长江流域生态系统的重要组成部分^[1-2]。

2003 年后,随长江干流控制性水库蓄水运用,长江与鄱阳湖的“江湖关系”发生显著变化,主要表现为 9—11 月退水过程加快、枯水期提前、枯水期延长等水文现象^[3-6]。鄱阳湖湿地植被面积广阔,多样性丰富,主要分布于湖区 9—15 m 高程(黄海高程,下同)洲滩,随水位涨落季节性淹露。江湖关系变化导致洲滩淹水时间缩短,湿地植被的水分需求难以得到保障,鄱阳湖湿地植被的群落结构和空间分布在 2003 年前后变化明显,主要表现为:湿地植被分布高程整体下移 1—2 m,中生植被如狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria sibirica*) 在 15 m 以上高程带形成中生化草甸,湿生植被如苔草(*Carex* spp.)、藨草(*Ass. P. arundinacea*)、蓼子草(*Polygonum criopolitanum*) 则不断向下扩张,占据了 9—11 m 高程带的泥滩地和浅水水域,水生植被的分布范围不断收缩,湿地植被退化态势显现^[7](图 1)。

在水文节律和洲滩淹露关系变化驱动下,鄱阳湖湿地植被秋季生长发育形成广阔草洲,为越冬候鸟提供了良好觅食栖息生境,使之成为东亚—澳大利西亚候鸟迁徙路线上最重要的候鸟栖息地和全球重要的物种基因库^[8]。根据 1998—2020 年环湖调查数据,鄱阳湖越冬候鸟年均数量为 43 万只,总体稳中有升,但种群结构发生了明显变化:栖息于泥滩和浅水水域的白鹤(*Grus leucogeranus*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*) 近年来数量变化不大;栖息于草洲之上,觅食湿生植被嫩叶的雁类数量增加,特别是其中的鸿雁(*Anser cygnoides*)和豆雁(*Anser fabalis*)种群数量将近达到全湖越冬候鸟数量的 1/3。

近年来,国内外学者利用不同手段和方法开展了对湿地水文—植被—候鸟耦合关系的研究。一是基于统计模型探究鸟类适宜水位或栖息面积与鸟类丰度的关系,如贾亦飞^[9]、夏少霞^[10]和 Faragó S 等^[11]等,研究发现了不同的水位变幅对典型越冬水鸟栖息地及其食物资源影响各异:维持鄱阳湖白鹤栖息地的冬季水位下限为 6.51—7.11 m;雁类的数量与栖息地面积显著正相关。在低植被覆盖度下($NDVI \leq 0.50$),雁类数量与 GWI

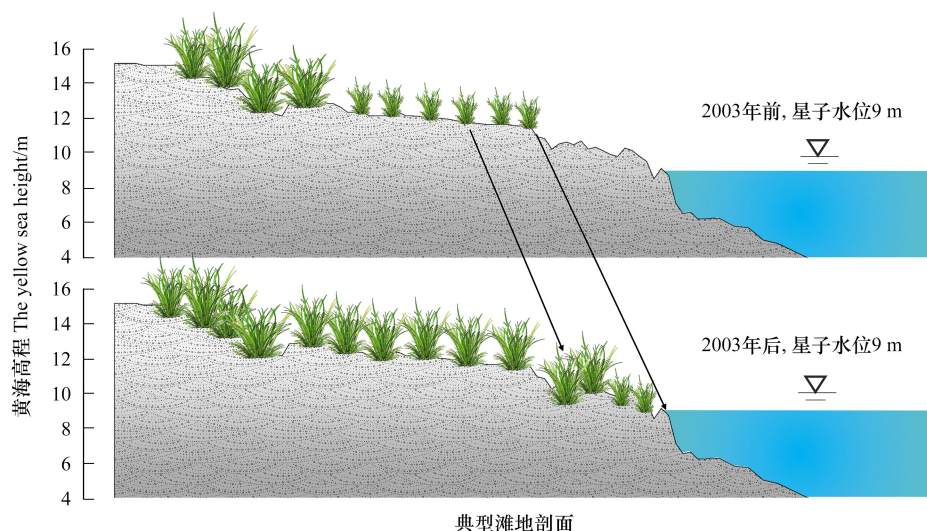


图1 2003年前后草洲分布高程变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of elevation change of wetland vegetation distribution before and after 2003

呈显著正相关($\text{NDVI} > 0.50$),而在高植被覆盖度下则相反。二是基于物种分布模型和地理信息技术,从食物资源适配与错配的角度探究水位变化与候鸟摄食的湿地被之间关系,如 Zou 等^[12]、孟竹剑等^[13]等,研究发现不同的退水模式(包括正常退水、提前退水、推迟退水)会显著影响鸟类的数量与分布,非最优退水时间导致鸟类与物候错配加剧;洲滩退水时间推迟超过 20 d,苔草生长节律将难以满足雁类数量达到峰值期的食物需求。三是耦合水动力学模型探究分析水鸟生境变化与水位的定量关系,评估了不同水情景下鸟类生境的适宜性,如文献^[14–17]分别建立了越冬水鸟适宜生境面积和与水位变化的定量响应函数,其中,陈炼钢等^[17]提出当鄱阳湖星子站水位在 11.7 m 左右,潜在适宜生境达到最大面积 564 km²。这些研究从不同角度和不同尺度揭示了越冬候鸟种群对水文过程的响应规律。

随长江干流冲刷持续加剧与河床高程不断降低,鄱阳湖枯水情势常态化和趋势性已形成广泛共识^[18–20]。鄱阳湖剧烈的丰枯水文节律,塑造了水域、草洲、滩地 3 类动态明显、相互转化的生境格局,“水落滩出”决定了植被的秋季生长过程和分布特征,影响鸟类生境的出现和维持时间。这种动态性极强的生境格局是否满足候鸟越冬节律,仍需耦合建立“水—滩—草—鸟”的关系链条,准确刻画生境格局动态,继而揭示种群越冬节律对生境动态的响应关系。因此,本研究通过水动力模型模拟了水文过程驱动下的生境格局的连续动态变化,并基于野外调查构建反映植物生长过程及空间分布特征的生境适宜性指数,揭示雁类种群与生境格局的定量关系,旨在建立完善“水文—洲滩—植被—雁类”的关系链条,阐明 2003 年后雁类生境扩张和种群数量增加的水文驱动机制,在江湖关系持续变化背景下,为通过生态水文过程调控保护雁类生境提供科学参考。

1 研究区概况

2004 年,江西省人民政府批准建立都昌省级候鸟自然保护区,包括位于北部的多宝区,面积 57 km²,高程集中在 10—11 m;位于南部的泗山区,面积约 354 km²,高程大部为 9—10 m。都昌保护区位于通江水道东侧,秋冬季主要生境类型为水域、草洲和泥滩地,3 类生境面积及空间结构随水位消落动态变化,优势湿地植物群落为苔草与蓼子草^[21–22]。1998—2020 年环湖调查数据表明,都昌省级候鸟保护区是近年来鄱阳湖雁类越冬期间的主要栖息地,数量上占绝对优势的越冬候鸟种群则为豆雁、鸿雁和白额雁,密度高达 211 只/km²、367 只/km²、43 只/km²^[23–24]。

2 数据与方法

2.1 数据收集

水文数据源于江西省水利厅提供的鄱阳湖都昌水文站 1956—2021 年逐日水位,湖区 DEM 数据采用 2010 年湖区实测地形(1:25000)插值得出。越冬候鸟数据来源于环湖调查(1998—2020 年)与逢 8 监测(2015—2020 年),由江西省林业局提供。环湖调查主要指鄱阳湖 1998—2020 年冬季 12 月—1 月期间开展的环湖水鸟调查统计结果。调查区域涉及环鄱阳湖的新建区、进贤县、永修县、濂溪区、都昌县、柴桑区、庐山市、共青城市、湖口县、余干县、鄱阳县、彭泽县、万年县等 13 个县(区、市),覆盖面积约为 5000 km²。“逢 8 监测”主要指自 2015 年以来,每年 10 月—次年 3 月期间,每月 8 日、18 日、28 日在鄱阳湖碟形湖、主湖区与隔断湖汊开展的水鸟同步调查,调查方法同环湖调查。相关数据可在文献^[10,25–26]与《江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源监测报告》(2016—2020 年)^[27–30]中查阅。1990—2020 年气压、气温、降雨、蒸发、相对湿度、太阳辐射等气象数据,以及风速和风向等风场数据均来自鄱阳国家气象站。

2.2 野外调查

2021 年 10—12 月对都昌保护区开展了植被调查,采用群落生态学、类型学方法,在保护区范围内按斑块逐个调查湿地中植物群落的分布范围及面积。调查样带沿高程梯度从高到低布设,每隔 50 m 设置 3 个平行样方,样方面积为 1 m×1 m。以面积占植被总面积 5%的群落作为优势植物群落。采用 2010 年湖区实测 1:25000 数字地形图,选取都昌保护区区域作为植被调查的工作底图。采用手持式 GPS 仪采集并记录各个群落斑块边界的主要控制点坐标;其次,根据工作底图和 GPS 定位点信息,将野外调查的群落斑块的位置、形状勾绘在工作底图上;最后,将野外调查采集的 GPS 数据,导入 GIS 系统,再以 GPS 记录的控制点坐标为依据,将群落斑块和形状在 GIS 中转绘,形成群落斑块边界并计算斑块面积。根据每种植物包含的斑块个数、斑块面积,即可得到某一类型湿地植物群落总面积以及在都昌保护区不同高程带的分布情况(图 2)。

2.3 分析方法

2.3.1 水文过程及洲滩出露过程模拟

(1) 水动力模型构建

利用 EFDC(The Environmental Fluid Dynamics Code)建立鄱阳湖水动力模型。EFDC 是一款用于模拟江河、湖泊、河口、水库、湿地、近海表层水系统中三维流动,溶质运输以及生物化学过程的数学模型^[31]。相较遥感手段,水动力学模型能够根据研究需要量化日、月、年等不同时间尺度的水位变化洲滩出露过程^[20]。近年来,EFDC 模型在水鸟生境因子模拟中进行了应用,Wang 等^[15]、崔桢等^[16]、陈炼钢等^[17]基于耦合水动力模型探究了生境变化与越冬候鸟的响应关系。

模型边界范围基于鄱阳湖 1998 年洪水遥感影像确定,剔除了湖区内地形较高的岛屿以及与主湖区无水力联系的滞洪区,以加快模型计算效率。为了充分考虑鄱阳湖漫滩对于湿地的影响以及湖岸线的变化情况,经多次调试,模型采用 180 m×180 m 的矩形网格。模型网格地形通过 2010 年湖区实测地形(1:25000)插值得出。

水平涡粘系数采用 Smagorinsky 子网格方法求解。综合考虑模型计算稳定性和计算效率,经多次调试,模型采用动态步长,基本时间步长取 8 s,同时考虑了科氏力对水动力的影响。模型采用冷启动,初始流速为零,初始水位采用湖区水文站点水位的平均值,模型预热 2 个月以消除初始条件的影响。

(2) 模型率定验证

鄱阳湖水动力模型的率定期为 2009 年 8 月 1 日至 2010 年 7 月 31 日完整水文年,率定的参数主要有干网格水深和底部粗糙高度,初始值分别为 0.05 m 和 0.02 m。鄱阳湖洲滩存在明显的周期性干湿交替,为准确反映鄱阳湖这一独特的水文节律,水动力模型的干网格水深不宜过大。参考鄱阳湖粗糙高度的相关研究成果,鄱阳湖滩地的粗糙高度应大于河道。通过与湖区实测水位数据的对比,经多次测试率定,最终干网格水深

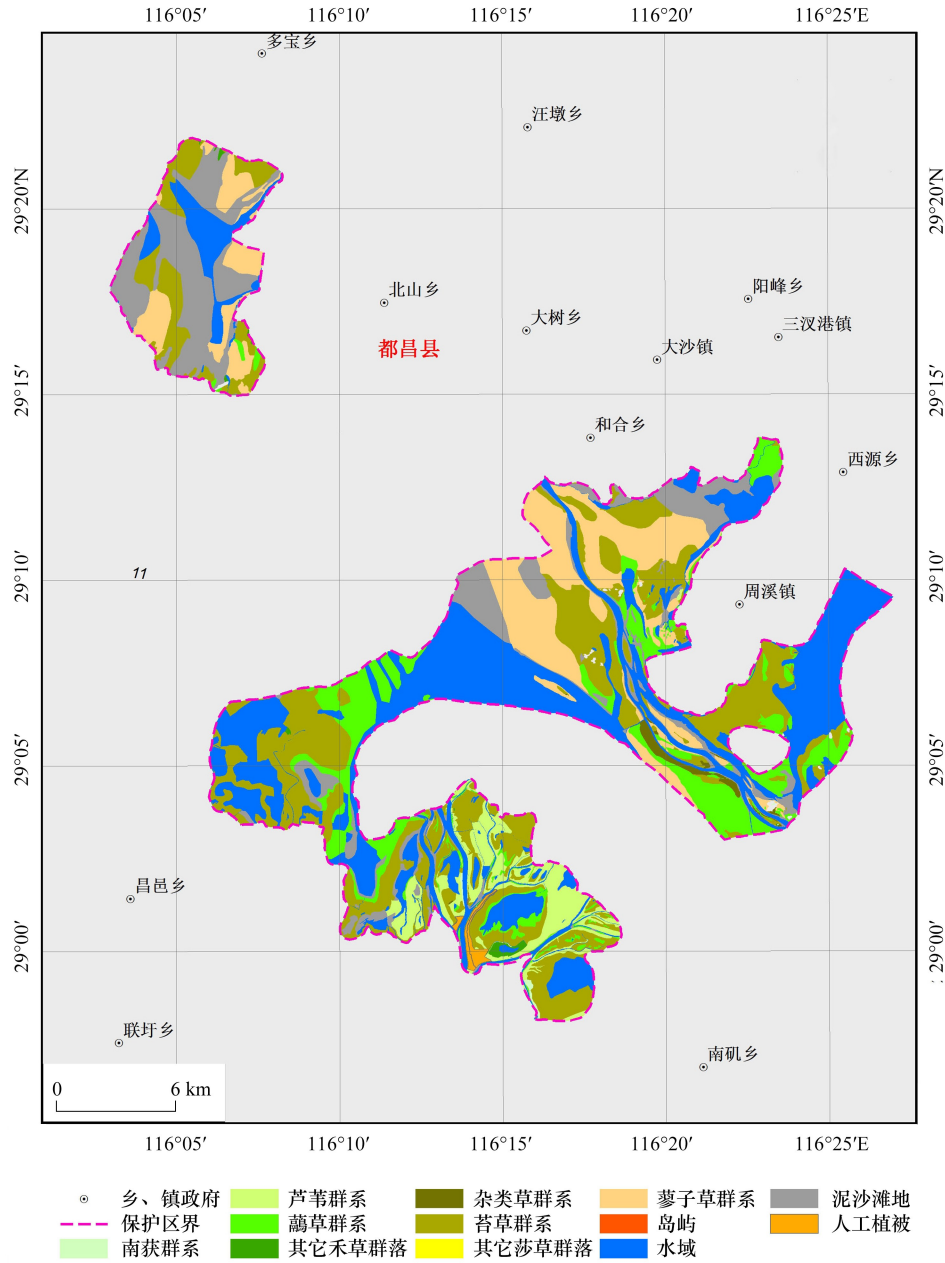


图2 都昌保护区植被图

Fig.2 The vegetation distribution in Duchang Nature Reserve

取 0.15 m,湖区河道的粗糙高度取 0.01 m,湖区滩地的粗糙高度取 0.02 m。模型验证期为 2010 年 8 月 1 日至 2014 年 7 月 31 日共计 4 个完整水文年,进行水位、流量和水面面积的模拟与实测值误差分析。

根据水动力模拟结果得到逐日水域范围及每个网格单元的逐日水位,结合都昌保护区边界矢量数据和 DEM 数据进行叠加分析,当洲滩高程高于水位,即可判定洲滩出露。逐日统计退水期保护区的洲滩出露面积,绘制洲滩面积变化曲线。

2.3.2 生境适宜度评价指标构建

(1) 评价指标

生境适宜度评价(Habitat suitability index, HSI)是指通过分析生物的生境需求及其与分布区自然环境的匹配关系,明确其生境分布范围与特征,HSI 模型自 20 世纪 80 年代由美国渔业与野生动物局提出^[32],在水生

动物生境^[33]、陆生生物生境^[34]、鸟类生境^[35]等研究领域均得到广泛应用,计算公式如下:

$$HSI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (1)$$

式中, HSI 为生境适宜性指标; n 为评价因子个数; w_i 为第 i 个评价因子权重; f_i 为第 i 个评价指标计算值。

根据野外调查结果, 苔草与蓼子草是都昌保护区的优势湿地植物群落(图 2), 也是越冬雁类的主要食物来源^[36]。两种植物群落沿高程梯度呈条带状分布, 其中苔草群落集中分布在都昌保护区 11—12 m 高程滩地; 蓼子草则集中分布在 9—11 m 高程滩地。随水位消落, 洲滩沿高程逐渐出露, 两种湿地植物群落随之生长发育, 不断形成雁类觅食生境。因此, 按照高程梯度定义并量化都昌保护区候鸟生境适宜性, 更加符合保护区生态水文过程。湿地植被对年内淹水时长的生态阈值, 是决定生境适宜程度的直接原因^[37]。某一高程带洲滩淹水时长适宜, 植物生长发育良好, 候鸟生境适宜度高; 反之, 年内淹水过长或过短, 植物生长都将受到胁迫, 候鸟生境适宜度也随之降低。

考虑实际退水过程, 评价时间范围以每年水位从峰值消落到 12 m 时的日期作为起始时间, 以 11 月 30 日作为终止时间(气温低于 8℃、不适合植被生长)^[38]。在该时段内, 依次计算各高程带生境适宜度, 计算过程如下:

$$HSI_{(9-10m)} = w_i \times f_{\text{苔草}} \times a + w_i \times f_{\text{蓼子草}} \times a \quad (2)$$

$$HSI_{(10-11m)} = w_i \times f_{\text{苔草}} \times b + w_i \times f_{\text{蓼子草}} \times b \quad (3)$$

$$HSI_{(11-12m)} = w_i \times f_{\text{苔草}} \times c + w_i \times f_{\text{蓼子草}} \times c \quad (4)$$

$$HSI_{\text{总}} = HSI_{(9-10m)} + HSI_{(10-11m)} + HSI_{(11-12m)} \quad (5)$$

式中, w_i 参照^[39], 按等比例划分, 分别为 0.5。

$f_{\text{苔草}}$ $f_{\text{蓼子草}}$ 根据^[37, 39], 将苔草与蓼子草淹水天数划分四个区间。将淹水天数对应适宜程度区间, 四个区间对应的适宜程度计算值分别为 0.75—1、0.5—0.75、0.25—0.5 和 0—0.25(图 3), 通过插值计算得到适宜程度计算值(表 1)。

$$a = \text{高程带面积}_{9-10m} / \text{高程带面积}_{9-12m} \quad (6)$$

$$b = \text{高程带面积}_{10-11m} / \text{高程带面积}_{9-12m} \quad (7)$$

$$c = \text{高程带面积}_{11-12m} / \text{高程带面积}_{9-12m} \quad (8)$$

式中, a 、 b 、 c 为不同高程带占高程带面积 $_{9-12m}$ 的比例。其中, 高程带面积 $_{11-12m}$ 、高程带面积 $_{10-11m}$ 、高程带面积 $_{9-10m}$ 和高程带面积 $_{9-12m}$ 基于都昌保护区 DEM 数据在 ArcGIS 10.2 中提取。

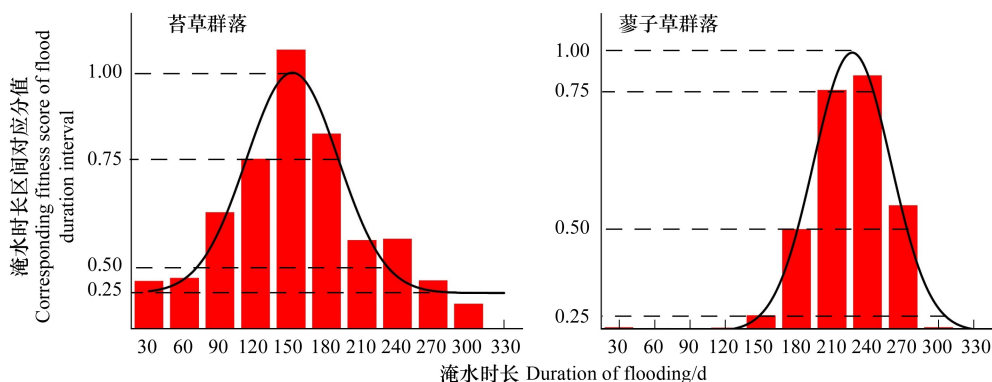


图 3 淹水时长对应适宜度区间计算值示意图(改编自韩祯 2019^[31])

Fig.3 Schematic diagram of the calculated value of the suitability interval corresponding to the duration of flooding (adapted from Han Zhen 2019)

(2) 计算过程

由以上数据可进行生境适宜性评价,如 2017 年,首先分别统计该年在 12—11 m、11—10 m、10—9 m 各高程带的淹水天数,对应为 191、234 和 239 d;其次,将所统计的淹水天数分别对应到苔草与蓼子草的适宜度区间,插值计算得到 $f_{\text{苔草}}$ 分别为 0.7042、0.525、0.5042, $f_{\text{蓼子草}}$ 分别为 0.5917、0.85、0.767;然后,将 $f_{\text{苔草}}$ 、 $f_{\text{蓼子草}}$ 在不同高程带的分值代入到公式(2)、(3)、(4),得到不同高程带的生境适宜性评价结果;最后,通过将各高程带的生境适宜性评价结果求和(公式 5),即得到 2017 年都昌保护区的生境适宜性评价结果。

基于以上计算结果,结合相关学者研究^[34—36],将 HSI 指数从低到高划分为 4 个等级,分别为:不适宜生境(0—0.25)、低适宜生境(0.25—0.50)、中适宜生境(0.50—0.75)和高适宜生境(0.75—1.00)。

表 1 生境适宜性指数 HSI 划分标准

Table 1 Habitat suitability index classification criteria

评价因子/ 适宜程度 Evaluation factors/ suitability level	生境适宜度指数等级划分 Evaluation standard				权重 Weights
	高适宜/ High suitable (淹水时长/ Flooding duration)	中适宜/ Moderate suitable (淹水时长/ Flooding duration)	低适宜/ Low suitable (淹水时长/ Flooding duration)	不适宜 Unsuitable (淹水时长/ Flooding duration)	
苔草 <i>Carex</i> spp	120—180	60—120&180—240	240—300	0—60&300—365	0.5
蓼子草 <i>Polygonum criopolitanum</i>	210—240	180—210&240—270	150—180	0—150&270—365	0.5
分值 Scoring	0.75—1	0.5—0.75	0.25—0.5	0—0.25	

2.3.3 指标敏感性分析

将雁类数量与 HSI 指数之间是否存在显著相关关系定义为生境适宜性指数的敏感性。雁类种群数量源于环湖调查(1998—2020 年)与逢 8 监测(2015—2020 年),由于调查数据的原始单位差异较大,通过 $\ln(x+1)$ 将雁类原始调查数据进行了对数转化,将 1998—2020 年雁类数据与 HSI 指数进行相关性分析和回归分析,通过显著性水平($P<0.05$)和回归系数判断生境适宜性指数的敏感性。

3 结果与分析

3.1 越冬雁类种群数量变化

根据 1998—2020 年环湖调查都昌保护区的鸟类数据统计,结果表明:鸿雁、豆雁与白额雁是保护区优势种群。从多年数量变化看,除鸿雁种群表现为 4 至 5 年的波动规律,豆雁与白额雁种群数量相对稳定,但三者数量近年来均呈增加趋势(图 4),此规律与植毅进等^[23],钱法文等^[24],Xia 等^[40],吕蒙等^[41]相关文献一致。对于都昌保护区雁类年内变化(图 5),鸿雁在 12 月上旬达到峰值,豆雁在 11 月中下旬达到峰值,白额雁在 1 月中旬达到峰值。

3.2 水文过程和雁类生境格局变化

统计都昌站水文数据可知(图 6):相比于 1956—2002 年多年平均逐日水位,都昌站 2003—2021 年水位各日均下降,最大降幅为 3.02 m,平均降幅 1.03 m;2003 年后 12 m 水位比 2003 年前提前 25 d,2003 年后 10 m 水位比 2003 年前提前 33 d,并且 2003 年后比 2003 年前最大水位变幅有 2.64 m;相对 1956—2002 年,2003—2021 年都昌站水位的月变化幅度在 10 月明显增大,退水期退水速率显著加快。

基于水动力模型所得关键时间节点(9 月 15—12 月 15 日)水位数据,模拟都昌保护区 2003 年前后的淹没范围变化(图 7)。10 月 15 日都昌保护区淹没范围,2003 年后淹没范围比 2003 年前小。这也说明 2003 年后退水时间提前,洲滩出露更早。

基于模型数据得到 2003 年前后多宝和泗山区退水期洲滩面积变化(图 8):多宝区洲滩从 11 月 15 日开始出露;而在 2003 年后,同一区域洲滩从 10 月 15 日开始出露,提前了一个月;泗山区也表现出类似规律,2003 年后洲滩出露明显提前,10 月 15 日即达到 250 km²以上;而在 2003 年前,同一区域洲滩 11 月 15 日以后

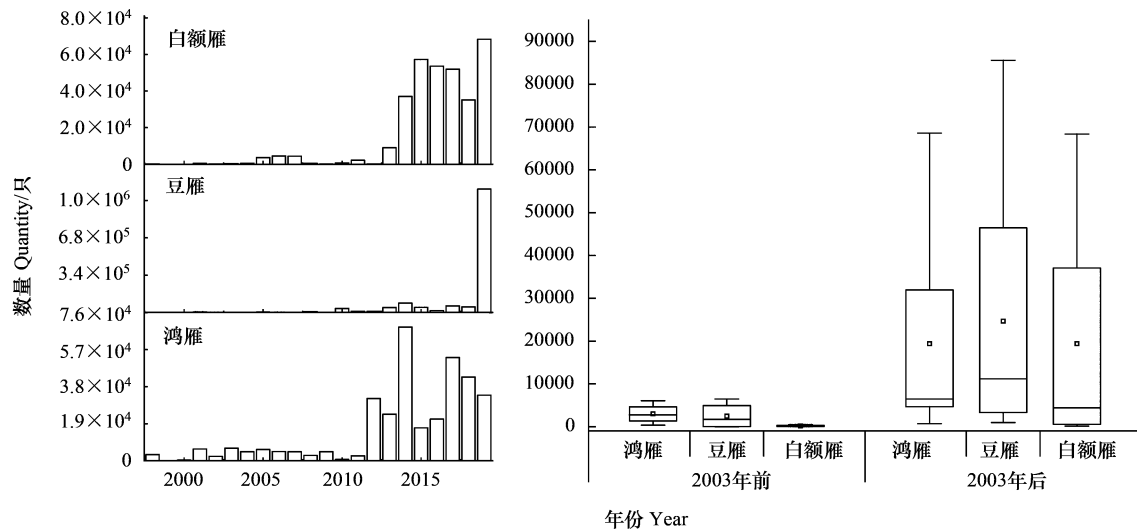


图4 都昌保护区越冬雁类种群数量年际变化

Fig. 4 Interannual variation of overwintering geese populations in Duchang Nature Reserve

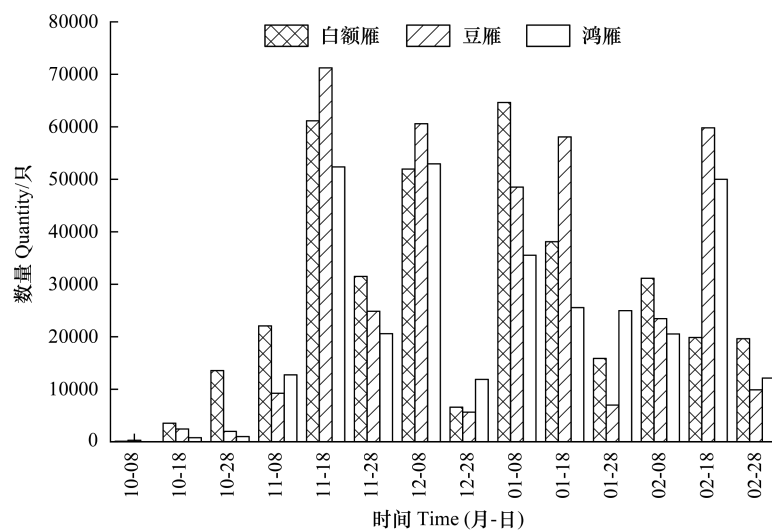


图5 都昌保护区越冬雁类种群数量年内变化

Fig.5 Intra-annual variation of overwintering geese populations in Duchang Nature Reserve

才达到相同规模的出露面积。

3.3 雁类生境适宜度分析

HSI 指数分值总体上呈增加趋势(图9),2003年后 HSI 指数较2003年前增加明显,中位值和平均值分别增加了0.4和0.31(图10),表明自2003年后雁类种群的生境条件不断改善。

从高程梯度看,11—12 m、10—11 m 和9—10 m 高程带面积分别占保护区总面积的19%、47%和35%。对于苔草和蓼子草,HSI 指数贡献最大的高程带分别为10—11 m 和9—10 m,2003年前苔草、蓼子草两类草洲生境适宜度的平均值分别为0.196和0.009,2003年后存在显著变化:苔草、蓼子草两类草洲生境适宜度的平均值分别为0.35和0.9。

相关性分析结果表明:鸿雁、豆雁和白额雁数量与 HSI 分值的相关关系显著, ($R_{\text{鸿雁}} = 0.572$, $P < 0.01$; $R_{\text{豆雁}} = 0.593$, $P < 0.01$; $R_{\text{白额雁}} = 0.508$, $P < 0.05$)。除豆雁外,此规律与夏少霞^[10]栖息地面积显著影响雁类种群

丰度的认识基本一致。本研究豆雁与生境适宜度相关性较好的原因可能是样本时间序列及种群数量差异,本研究时间序列为 1998—2019 年,而夏少霞(2016)^[10]的研究年份为 2003—2013 年;2013 年后豆雁数量急剧攀升,尤其近 3 年年均多达 4 万多只,而 2013 年前豆雁数量大多在 1 万只以下,仅 2010 年达到 3 万只左右。根据 1998—2020 年 HSI 指数与雁类数量的拟合曲线,鸿雁、豆雁与白额雁数量与生境适宜度呈指数关系,随生境适宜度分值增加($HSI > 0.5$),雁类数量呈指数增加(图 11)。

4 讨论

4.1 水文驱动下雁类生境格局演变

研究发现,温度是影响植被萌发和生长速率的主要原因之一^[42]。对比各高程带出露时的多年平均气温发现(表 2),2003 年后 9—12 m 高程出露时的温度均显著高于 2003 年前。相关研究证明,鄱阳湖流域湿地植被、农作物生长的温度下限为 8—10℃,高于此温度植被正常生长,反之则生长停滞^[38]。以蓼子草为例,其分布下限为 9 m 高程洲滩,该区域在 2003 年前的出露时间为 12 月初,此时多年平均气温已低于 10℃,无法满足生长要求;而在 2003 年后,该区域的洲滩出露时间提前至 10 月 27 日,此时气温为 17℃左右,距温度降至 8—10℃尚有 35 d 以上,为蓼子草在该高程段的生长扩张提供了充分时间和充足光热条件。

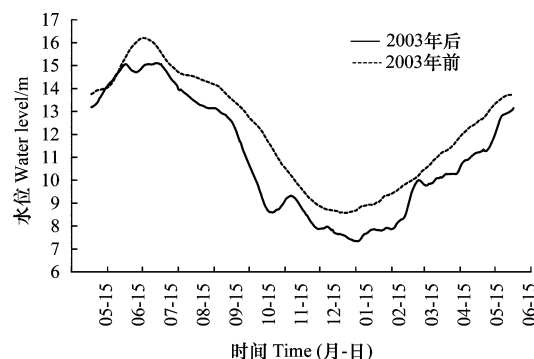


图 6 都昌保护区 2003 年前后水位对比图

Fig 6 Comparison of water level in Duchang Nature Reserve before and after 2003

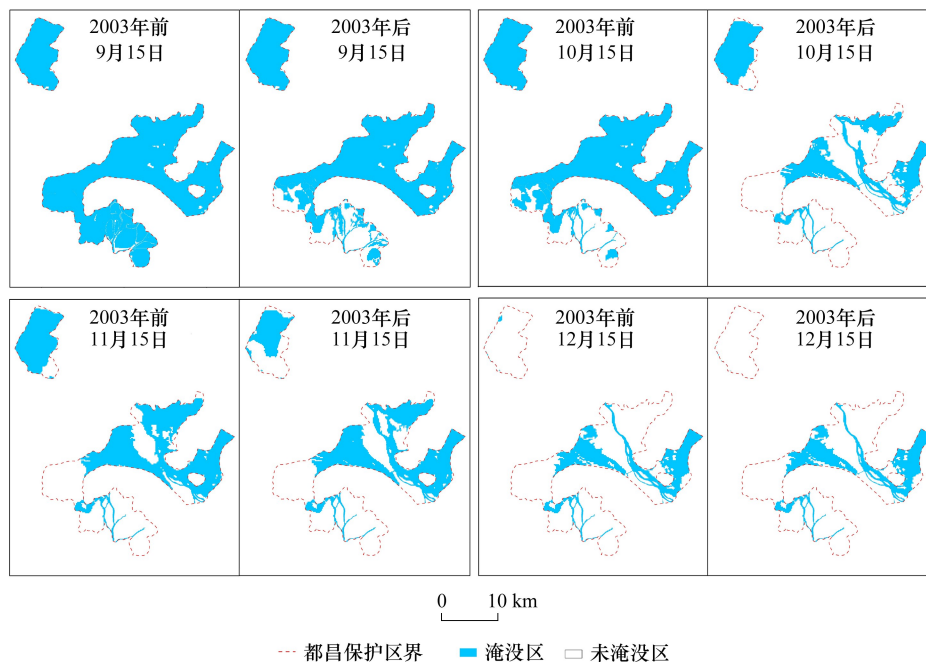


图 7 2003 年前后都昌保护区淹没变化对比图

Fig.7 Comparison of inundation changes in Duchang Nature Reserve before and after 2003

不同高程带洲滩的面积占比及其出露过程是影响 HSI 指数大小的主要因素,也是决定苔草和蓼子草生长发育和雁类生境格局的根本原因。洲滩梯次出露的特征同时也决定了草洲面积的扩张态势及雁类食物资源。

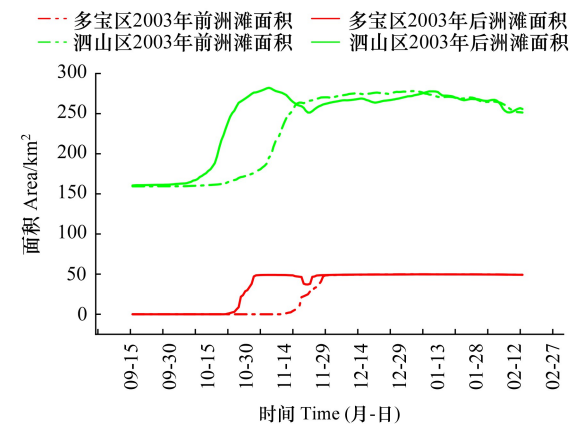


图 8 2003 年前后都昌保护区洲滩出露过程对比

Fig.8 Comparison of mudflat exposure process in Duchang Nature Reserve before and after 2003

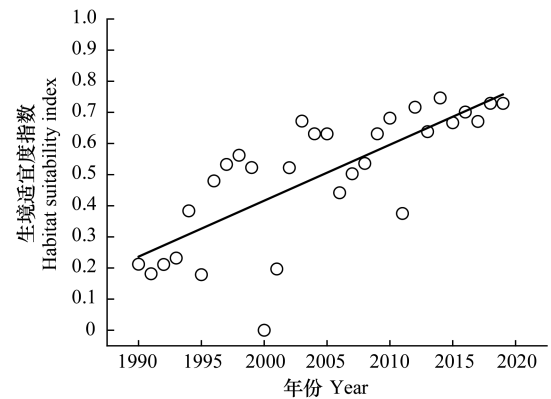


图 9 1990—2019 年生境适宜性指数 HSI 变化趋势图

Fig.9 Trends in the Habitat suitability index (HSI) from 1990 to 2019

根据相关文献^[43],鄱阳湖 1999 年苔草分布面积为 702.73 km²,2006 年面积为 1019.7 km²;2012 年分布面积为 737.72 km²;这 3 个年型的 HSI 分值与草洲面积变化相互吻合。1999 年是典型丰水年,高水位持续时间较长,11 月 20 日 10 m 高程带还未出露,因此 HSI_(10—11 m)、HSI_(9—10 m) 数值均小于 0.25,对应草洲面积相对较小,生境处于不适宜水平;2006 年退水时间较往年提前,9 月 1 日水位已低于 10 m,HSI_{苔草(9—10 m)} 的分值较高,苔草面积也较大。相关研究表明^[21],2006 年鄱阳湖 12 m 以下高程的苔草面积占比高于其他调查年份,而 14—16 m 高程的苔草面积低于其他高程,反映 2006 年水位变化导致苔草分布高程出现一定程度的下移扩张。对于 2012 年,虽相较 2003 年前水位消落到 12 m 的时间提前,但后续退水缓慢,虽然 HSI_(10—11 m) 数值较高,但洲滩在 9—10 m 高程带出露时间相对 2006 年较短,从而导致 HSI_(9—10 m) 数值较 2006 年小,此结果也与苔草面积分布规律一致。相比于苔草,蓼子草研究文献报道较少,但扩张态势明显。根据鄱阳湖第一次科学考察报告^[44],20 世纪 80 年代蓼子草的分布面

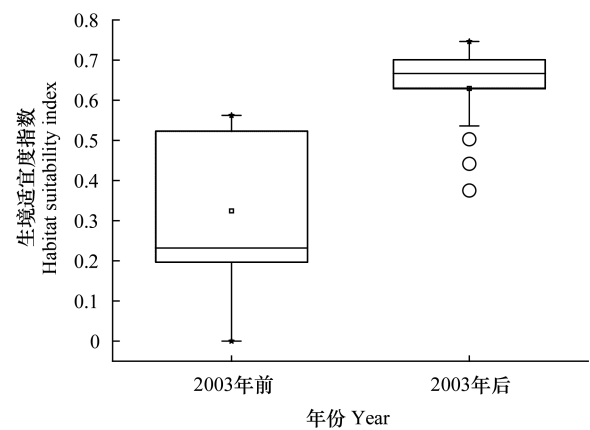


图 10 2003 年前后生境适宜性指数 HSI 对比箱线图

Fig.10 Box plot of Habitat suitability index (HSI) comparison before and after 2003

表 2 2003 年前后 9—12 m 洲滩出露过程对比

Table 2 Comparison of 9—12 m mudflat exposure process before and after 2003

洲滩高程 Elevation/m	2003 年后 出露时间 Exposure time after 2003	气温 Temperatures/℃	2003 年前 出露时间 Exposure time before 2003	气温 Temperatures/℃	2003 年后提前 出露天数 Days of earlier exposure after 2003/d
12	10 月 3 日	22	10 月 27 日	17.7	24
11	10 月 11 日	22.1	11 月 7 日	17.7	27
10	10 月 19 日	20.3	11 月 19 日	11.8	31
9	10 月 27 日	17.7	11 月 30 日	10.8	34

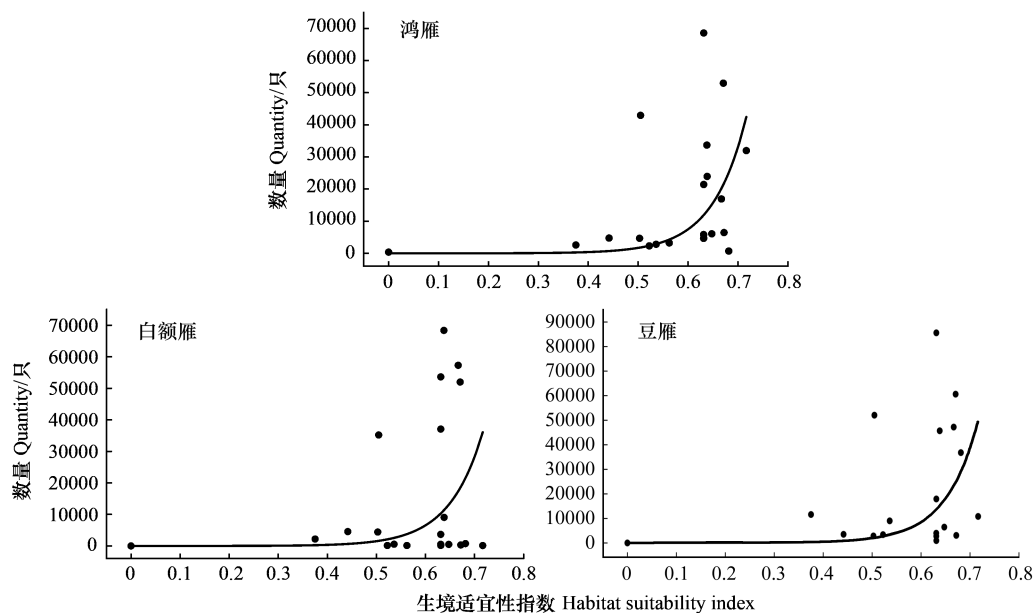


图 11 生境适宜性指数 HSI 与雁类数量定量关系

Fig.11 Quantitative relationship between Habitat suitability index (HSI) and the number of geese

积不足 20 km², 而 2010 年后鄱阳湖蓼子草的分布面积已达 200 km² [45], 其分布高程也下移到曾是泥滩地和浅水水域的 9 m 高程带。结合水位数据与 HSI 计算结果可知, 2003 年后退水早, 洲滩出露时间提前, 且枯水年份较多, 为蓼子草在 9—10 m 高程带生长和扩张提供了基本条件, 因此该区域的 HSI_(9—10 m) 分值也显著提高。

4.2 越冬雁类种群对生境的响应

除总体变化趋势外, 不同水文年型生境适宜度与雁类数量关系, 也能证实雁类对生境变化的敏感程度。如 1998 年高水位持续时间长, 退水时间较晚, 11 月以后水位才消退到 12 m, 12—11 m 高程带生境适宜度较低, 虽后续退水加快, 11 m 以下高程带生境适宜度有所改善, 但雁类抵达初期可利用草洲面积相对较小, 无法尽快获取充足食物以补充长途迁徙消耗的能量, 造成该年度保护区内雁类数量也较少, 部分雁类可能分散到保护区周边生境中觅食栖息 [30]。相关文献研究表明 [46], 大量越冬候鸟在到达后集中在某一空间范围内, 会造成食物和栖息地等资源竞争激烈。根据环湖调查数据, 2006 年都昌周边入江水道、南矶湿地等区域雁类数量有一定增加; 2010、2011 和 2012 年也表现出类似规律: 都昌保护区雁类数量相对较少, 但周边鄱阳县的种群数量却有所增加 [41], 这些现象均在一定程度上反映了雁类种群对生境变化的敏感程度。

2006 年退水早, 洲滩出露提前, 草洲分布范围扩张, HSI_{蓼草(9—10 m)} 的分值较高, 但从统计数据发现, 鸿雁数量却有一定减少。究其原因, 过早退水可能导致蓼草秋季生长提前, 与雁类越冬节律不匹配。孟竹剑 [13] 认为洲滩出露天数达到 12 d 时适宜雁类取食, 出露时间超过 28 d 后, 植株高度、纤维素和蛋白质的含量以及“鲜绿”程度不适宜雁类取食。Zhao 等 [47] 研究也表明, 雁类丰度对植被盖度响应不同, 相对于高大植被或高生物量的植被, 矮小植被群丛的营养含量更高。夏少霞 [10] 的研究也证实鄱阳湖雁类更喜在低矮 (120—220 mm)、稀疏 (盖度 < 50%) 的蓼草丛中觅食栖息。与 2006 年类似, 2011 年是典型枯水年, HSI 指数分值较低, 到 10 月中旬 9—12 m 高程洲滩便已全部出露, 在雁类越冬高峰期, 已没有适宜的稀疏草洲可供栖息, 食物资源可利用性会受到限制 [23], 可能导致该年度雁类数量少于其它年份。

相比之下, 2017—2019 年雁类数量显著多于其他年份, 洲滩出露节律与雁类迁飞节律 (图 5) 更匹配可能是主要原因, 分析发现 2017—2019 年出露时间均处于或接近最佳出露时段。从高程梯度看, 12—11 m 高程带出露时间在 9 月中旬 (第 250 天后), 每年 9 月底 10 月初, 首批雁类抵达都昌保护区的马影湖 [41], 这一时期的新生秋草嫩叶可作为雁类的主要食物来源。11 月份是雁类到达的高峰期, 种群食物资源需求较大, 11—

10 m高程带在 10 月中旬渐次出露,是保障雁类越冬的必要条件。

Zou 等^[12]与 Zhang 等^[48]在洞庭湖水位消落过程对小白额雁生境的研究中,结合水位与草洲出露时间定义了适宜的退水时间段。考虑 2003 年后生境适宜性水平相对较好,将 2003 年后洲滩开始出露到完全出露的时段定义为适宜出露时间窗口期,对应日期从 9 月 15 日(年内自然日第 258 天)到 11 月 4 日(年内自然日第 308 天)。按照不同高程带洲滩可出露日期,可将 1990—2019 年这 30 个年份分为三类(表 3):出露较早年份、较晚年份及适宜年份,处于适宜出露时间窗口期的年份,HSI 数值均处于中适宜或高适宜区间;而出露时间偏早或偏晚的年份,HSI 数值均处于不适宜或低适宜区间(图 12)。

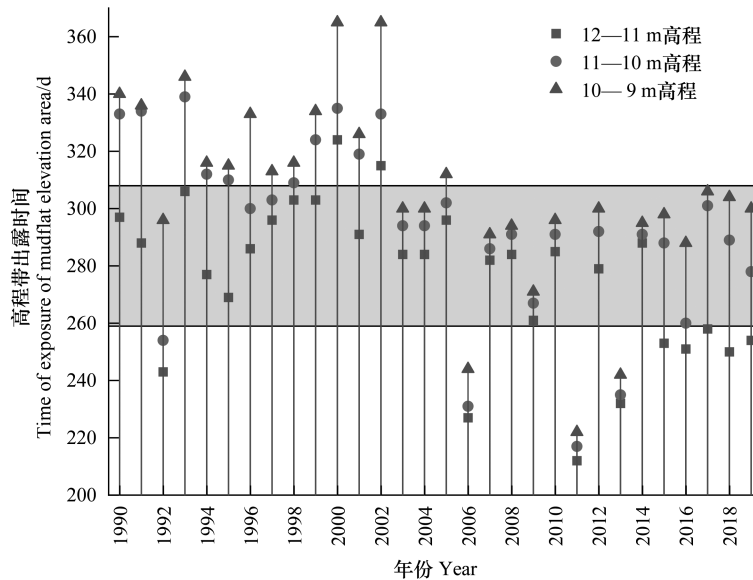


图 12 1990—2019 年洲滩高程带出露时间

Fig.12 Mudflat elevation zone exposure times from 1990 to 2019

灰色矩形表示所定义的洲滩出露时间窗口

表 3 1990——2019 年洲滩出露时间分类

Table 3 Classification of mudflat exposure time from 1990 to 2019

出露时间 适宜年份 Year with suitable exposure time	出露时间 偏早年份 Years with early exposure	出露时间 偏晚年份 Years with late exposure	出露时间 适宜年份 Year with suitable exposure time	出露时间 偏早年份 Years with early exposure	出露时间 偏晚年份 Years with late exposure
1991	1992	1990	2010	2018	1998
2003	2006	1993	2012	2019	1999
2004	2011	1994	2014		2000
2007	2013	1995	2017		2001
2008	2015	1996			2002
2009	2016	1997			

4.3 雁类生境保护建议

未来随鄱阳湖枯水情势加剧,洲滩各高程出露时间相比适宜出露时间窗口将进一步提前^[18—20],秋草在雁类越冬期开始之前即完成生活史并迅速老化,雁类可能面临越冬期食物资源短缺的风险。结合生境格局动态模拟及适宜度评价结果,可从以下几方面提出雁类生境保护的相关建议。一是将 20 余万只越冬雁类的生境需求纳入到三峡及其上游水库群调度原则,结合丰、平、枯不同水文年型的汛后蓄水情况开展适应性调度。尽量保证都昌保护区 12 m 高程洲滩开始出露时间控制在 9 月 15 日前后(年内自然日第 258 天),11 m 高程洲

滩开始出露时间控制在 10 月中旬,10 m 高程洲滩在 11 月 4 日(年内自然日第 308 天)开始出露,使洲滩出露时间处于适宜出露时间窗口,维持当前“水文节律—植物生长节律—雁类迁飞节律”适配的生态格局。二是严控采砂规模和范围,适度修复入江水道地形。2001—2010 年间,鄱阳湖采砂面积范围大约为 260.4 km²,采砂平均深度 4.95 m,采砂量达到 1.29×10⁹ m³[49—50],都昌以下采砂量超过 3 亿 m³[51],采砂活动扩大了过水断面,加快了泄水过程,如采砂活动加剧,未来都昌以下水位将进一步降低,洲滩出露将继续提前,目前的生境格局难以为继。因此,应考虑在保护区范围内及都昌以下断面严控采砂,研究在入江水道内建设丁坝、潜坝等阻水设施,从而增加入江水道的水流阻力和糙率,增加水面坡降,适当抬高秋季水位,减缓水位消落过程。

5 结论

本文基于野外调查、水动力模拟及评价指标构建等方法手段,针对鄱阳湖都昌省级候鸟保护区建立了“水文—洲滩—植被—雁类”的关系链条,揭示了江湖关系驱动下的雁类生境格局动态、生境适宜度变化,及种群数量的耦合关系。研究结果表明:2003 年后鄱阳湖秋季快速退水,洲滩出露提前,秋草大幅扩张,为越冬雁类种群提供了丰富的食物资源和适宜栖息条件。未来随鄱阳湖枯水情势加剧,洲滩出露进一步提前,秋草在越冬期开始前即完成生长而迅速老化,给雁类带来食物资源短缺的风险。未来可根据雁类生境格局梯次出露的动态特征,联合三峡及其上游水库群,结合丰、平、枯不同水文年型的汛后蓄水情况开展适应性调度;同时考虑严控采砂规模和范围,人工适度修复入江水道地形,通过壅高水位适度减缓水位消落,确保洲滩出露和秋草生长节律满足雁类的越冬需求。

参考文献(References):

- [1] 唐国华. 鄱阳湖湿地演变、保护及管理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [2] 闵骞. 鄱阳湖简介. 湖泊科学, 1993, 5(1): 96-97.
- [3] 刘晓波, 韩祯, 王世岩, 彭文启. 长江大保护视角下鄱阳湖湿地保护的研究思考. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 201-209.
- [4] 邴建平, 邓鹏鑫, 吕孙云, 张翔. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 856-870.
- [5] 卢金友, 朱勇辉. 三峡水库下游江湖演变与治理若干问题探讨. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 98-107.
- [6] 方春明, 曹文洪, 毛继新, 黎海军. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报, 2012, 43(2): 175-181.
- [7] 胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被 30 年演变及其驱动因素分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1947-1955.
- [8] 徐昌新, 阮禄章, 胡振鹏, 李述. 鄱阳湖越冬鸟类种群动态与保护研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 407-414.
- [9] 贾亦飞. 水位波动对鄱阳湖越冬白鹤及其他水鸟的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [10] 夏少霞. 鄱阳湖水文节律对越冬水鸟丰度和栖息地结构的影响[D]. 北京: 中国科学院, 2016.
- [11] 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.
- [12] Zou Y A, Tang Y, Xie Y H, Zhao Q H, Zhang H. Response of herbivorous geese to wintering habitat changes: conservation insights from long-term population monitoring in the East Dongting Lake, China. Regional Environmental Change, 2017, 17(3): 879-888.
- [13] 孟竹剑, 夏少霞, 于秀波, 饶滴滴, 金斌松. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口. 生态学报, 2018, 38(21): 7539-7548.
- [14] 姚斯洋, 李昕禹, 刘成林, 柳波, 张静, 况卫明. 不同水位下拟建鄱阳湖水利枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性的影响研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3998-4009.
- [15] Wang P, Lai G Y, Li L. Predicting the hydrological impacts of the Poyang Lake project using an EFDC model. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(12): 05015009.
- [16] 崔桢, 章光新, 张蕾, 武瑶. 基于白鹤生境需求的湿地生态水文调控研究——以莫莫格国家级自然保护区白鹤湖为例. 湿地科学, 2018, 16(4): 509-516.
- [17] 陈炼钢, 陈黎明, 徐祎凡, 贾建伟, 栾震宇, 施勇, 金秋, 胡腾飞. 基于越冬水鸟生境模拟的拟建鄱阳湖水利枢纽生态控制水位探讨. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1519-1528.
- [18] 戴雪, 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系. 地理科学, 2014, 34(12): 1488-1496.
- [19] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 秦年秀, 戴雪. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. 湖泊科学, 2014, 26(1): 1-8.
- [20] 张云昌, 张业刚, 宋秋龄, 沈东亮, 许娟. 江湖关系的历史和未来. 水利学报, 2021, 52(10): 1183-1192.

- [21] 叶春, 刘元波, 赵晓松, 吴桂平. 基于 MODIS 的鄱阳湖湿地植被变化及其对水位的响应研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 705-712.
- [22] 杨中华, 朱政涛, 槐文信, 白凤朋. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究. 水利学报, 2018, 49(2): 156-167.
- [23] 植毅进, 刘威, 邵明勤, 伊剑锋. 鄱阳湖康山和都昌水鸟多样性动态研究. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1149-1153.
- [24] 钱法文, 李言阔, 陆军, 涂晓斌, 单继红, 江红星, 张国钢, 李跃. 鄱阳湖都昌候鸟自然保护区丰水期和枯水期鸟类多样性. 动物学杂志, 2013, 48(4): 537-547.
- [25] Wang W J, Fraser J D, Chen J K. Distribution and long-term population trends of wintering waterbirds in Poyang Lake, China. Wetlands, 2019, 39(1): 125-135.
- [26] 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.
- [27] 刘观华, 廖宝雄, 余定坤. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2016-2017 年监测报告. 南昌: 江西科学技术出版社, 2019.
- [28] 刘观华, 詹慧英, 祁红艳. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2017-2018 年监测报告. 南昌: 江西科学技术出版社, 2019.
- [29] 刘观华, 聂旸, 黄锦波. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2018-2019 年监测报告. 南昌: 江西科学技术出版社, 2019.
- [30] 刘观华, 余定坤, 罗浩. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2019-2020 年监测报告. 南昌: 江西科学技术出版社, 2020.
- [31] 黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 韩祯, 王伟杰. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析. 水利学报, 2021, 52(9): 1082-1090.
- [32] Jin L R, Sun K P, He H S, Zhou Y F. Research advances in habitat suitability index model. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(5): 841-846.
- [33] Chen X J, Feng B, Xu L X. A comparative study on habitat suitability index of bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean. Journal of Fishery Sciences of China (in Chinese), 2008, 15(2): 269-278.
- [34] 张鑫, 尹文萍, 谢菲, 樊辉, 陈飞. 元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性评价——基于荟萃分析和遥感大数据分析. 生态学报, 2022, 42(12): 5067-5078.
- [35] 王志强, 陈志超, 郝成元. 基于 HSI 模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价. 湿地科学, 2009, 7(3): 197-201.
- [36] 涂业苟, 俞长好, 黄晓凤, 单继红, 孙志勇, 汪志如. 鄱阳湖区域越冬雁鸭类分布与数量. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 760-764, 771.
- [37] 韩祯, 王世岩, 刘晓波, 彭文启, 葛刚, 黄爱平. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值. 水利学报, 2019, 50(2): 252-262.
- [38] 李相虎, 张奇, 邵敏. 鄱阳湖流域叶面积指数时空变化特征及其与气候因子的关系. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 296-301.
- [39] Mu S J, Yang G S, Xu X B, Wan R R, Li B. Assessing the inundation dynamics and its impacts on habitat suitability in Poyang Lake based on integrating Landsat and MODIS observations. Science of the Total Environment, 2022, 834: 154936.
- [40] Xia S X, Wang Y Y, Lei G, Liu Y, Lei J Y, Xiubo Yu, Wen L, Zhou Y M. Restriction of herbivorous waterbird distributions in the middle and Lower Yangtze River floodplain in view of hydrological isolation. Wetlands, 2017, 37(1): 79-88.
- [41] 吕蒙. 鄱阳湖湿地 NDVI 变化与越冬候鸟时空分布的关系研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2011.
- [42] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006.
- [43] 周云凯, 白秀玲, 宁立新. 鄱阳湖湿地苔草(*Carex*)景观变化及其水文响应. 湖泊科学, 2017, 29(4): 870-879.
- [44] 张本. 鄱阳湖研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [45] 纪伟涛. 鄱阳湖: 地形·水文·植被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [46] 郭宏. 鄱阳湖东方白鹤及两种雁类越冬生态的初步研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.
- [47] Zhao M J, Cong P H, Barter M, Fox A D, Cao L. The changing abundance and distribution of Greater White-fronted Geese *Anser albifrons* in the Yangtze River floodplain: impacts of recent hydrological changes. Bird Conservation International, 2012, 22(2): 135-143.
- [48] Zhang P Y, Zou Y A, Xie Y H, Zhang S Q, Zhu F, Chen X S, Li F, Deng Z M, Yao Y, Song Y C. Phenological mismatch caused by water regime change may explain the population variation of the vulnerable lesser white-fronted goose in east Dongting Lake, China. Ecological Indicators, 2021, 127: 107776.
- [49] 胡振鹏, 王仕刚. 鄱阳湖冲淤演变及水文生态效应. 水利水电技术: 中英文, 2022, 53(6): 66-78.
- [50] 江丰, 齐述华, 廖富强, 张秀秀, 王点, 朱静瑄, 熊梦雅. 2001—2010 年鄱阳湖采砂规模及其水文泥沙效应. 地理学报, 2015, 70(5): 837-845.
- [51] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12.