

DOI: 10.20103/j.stxb.202311032392

滕佳昆, 陈继龙, 杨慧, 王冉, 夏少霞, 段后浪, 于秀波, 朱玉扣. 长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化. 生态学报, 2024, 44(20): 9233-9241.

Teng J K, Chen J L, Yang H, Wang R, Xia S X, Duan H L, Yu X B, Zhu Y K. Habitat suitability changes of herbivorous waterbirds in the middle and lower Yangtze River floodplain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9233-9241.

## 长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化

滕佳昆<sup>1,\*</sup>, 陈继龙<sup>2</sup>, 杨慧<sup>1</sup>, 王冉<sup>1</sup>, 夏少霞<sup>2,3</sup>, 段后浪<sup>2,3</sup>, 于秀波<sup>2,3</sup>, 朱玉扣<sup>1</sup>

1 中国矿业大学, 资源与地球科学学院, 徐州 221116

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

**摘要:** 长江中下游湿地是东亚-澳大利西亚迁徙路线水鸟重要的越冬地, 也是全球生物多样性保护的热点区域。近年来, 气候变化和人类活动改变了长江中下游湖泊湿地的人文情况和自然生境, 湿地变化对水鸟产生的影响尚未得到有效评估。了解湿地水鸟的分布动态, 分析模拟湿地水鸟栖息地的分布变化至关重要。基于长江中下游植食性水鸟公民科学数据, 结合 MaxEnt 模型, 模拟了 2012—2021 年长江中下游 25 个湖泊植食性水鸟栖息地的适宜性及变化趋势, 并探究湖泊洪泛区面积对植食性水鸟栖息地适宜性的影响。研究评估的长江中下游湖泊中, 鄱阳湖 2012—2021 年栖息地适宜性呈现下降趋势, 长湖和武湖呈上升趋势, 其他湖泊并无显著上升或下降的趋势。湖泊洪泛区面积与湖泊植食性水鸟栖息地适宜性呈现显著相关关系, 可作为水鸟栖息地适宜性的预测指标, 研究可为湿地水鸟栖息地预测及湿地生态系统管理提供科学方法和结果参考。

**关键词:** 水鸟栖息地; 长江中下游; 植食性水鸟; 洪泛区; 最大熵模型

## Habitat suitability changes of herbivorous waterbirds in the middle and lower Yangtze River floodplain

TENG Jiakun<sup>1,\*</sup>, CHEN Jilong<sup>2</sup>, YANG Hui<sup>1</sup>, WANG Ran<sup>1</sup>, XIA Shaoxia<sup>2,3</sup>, DUAN Houlang<sup>2,3</sup>, YU Xiubo<sup>2,3</sup>, ZHU Yukou<sup>1</sup>

1 School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The middle and lower Yangtze River floodplain is a hot spot for global biodiversity conservation and an important wintering ground for the East Asia-Australia migration route. In recent years, climate change and human activities have dramatically changed the hydrological conditions and natural habitats of lakes in the middle and lower Yangtze River floodplain, and the effects of these changes on waterbirds habitat have not been effectively evaluated. It is very important to understand the distribution dynamics of wetland waterbirds and analyze the distribution changes of simulated wetland waterbird habitats. Based on the MaxEnt model and the filtered citizen science data of herbivorous waterbirds in the middle and lower Yangtze River floodplain, this paper simulated the suitability and distribution trend of herbivorous waterbirds habitats of 25 lakes in the middle and lower the Yangtze River from 2012 to 2021, and explored the relationship between the change of inundation area of lake and the habitat suitability of herbivorous waterbirds. The results show that the spatial distribution of suitable habitats for herbivorous waterbirds in typical lakes in the middle and lower Yangtze River floodplain

**基金项目:** 国家自然科学基金 (42201115, 42171105); 江苏省自然资源厅科技创新项目 (2023029, 2022008)

**收稿日期:** 2023-11-03; **网络出版日期:** 2024-07-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tengjiakun@cumt.edu.cn

showed a decreasing trend from the surrounding area to the center of the lake. In the middle and lower reaches of the Yangtze River, the area of habitat suitability of herbivorous waterbirds greater than 0.5 was the smallest in 2013 (1580km<sup>2</sup>), and the area was the largest in 2012 (4018km<sup>2</sup>) except for 2014 (low fitting accuracy). The habitat suitability of Poyang Lake in the middle and lower Yangtze River floodplain has shown a downward trend in the past 10 years. The reason may be that the water level of Poyang Lake continues to decline and the water surface area decreases. Among the other lakes, Chang Lake and Wu Lake showed an upward trend, and the rest showed no significant upward or downward trend. The study also found that the inundation area was significantly correlated with the habitat suitability of lake herbivorous waterbirds. The inundation area of growing vegetation formed by water level difference provides habitats and food sources for herbivorous waterbirds, and the area of inundation area can be used as a predictor of habitat suitability of waterbirds. This study can provide a scientific method and result for the simulation and prediction of wetland waterbird habitat, wetland ecosystem management, and biodiversity protection.

**Key Words:** waterbird habitat; the middle and lower Yangtze River; herbivorous waterbirds; inundation area; MaxEnt

湿地生态系统是地球上生物多样性最高的生态系统之一,为水生动植物提供了生存和繁衍的空间<sup>[1]</sup>。过去的几十年里,在水资源开发、水污染和土地复垦等巨大压力下,湿地面积急剧萎缩,生物多样性严重下降<sup>[2]</sup>。水鸟是湿地保护的旗舰物种和表征生态系统变化的生物指标<sup>[3]</sup>,湿地的丧失和退化对水鸟产生了负面影响<sup>[4]</sup>。因此了解湿地水鸟的分布动态,并评估湿地变化如何影响水鸟栖息地分布和适宜性变化至关重要。

水鸟时空分布差异受到自身物种特征和环境要素的影响,不同物种在湿地生态系统中具有不同的生态位<sup>[5]</sup>。环境要素中,湿地的水文特征(如面积、水深、淹没时长)<sup>[6]</sup>、食物资源<sup>[7]</sup>以及人为干扰<sup>[8]</sup>被认为是影响水鸟在越冬地分布和丰度的重要因素。植食性水鸟以湿地植被为主要食物资源,同时,湿地植被的生物量和分布与水文情况密切相关<sup>[9]</sup>。长江中下游湿地是东亚-澳大利西亚迁徙路线迁徙水鸟的重要越冬地湿地,为数百万只水鸟提供了越冬地<sup>[10]</sup>。长江中下游湿地夏季水位高,秋冬水位下降,水位差异形成的植被洲滩为植食性水鸟提供了食物来源;因此也有研究认为,湿地洪泛区面积是预测湿地植食性水鸟栖息地适宜性的重要指标<sup>[11]</sup>。

栖息地模型是开展物种分布及其栖息地预测的重要方法之一,是进行物种及其栖息地保护的前提和基础。对湿地水鸟栖息地适宜性的模拟已经开展了大量的研究,所涉及的方法也很多<sup>[12]</sup>。物种分布模型(Species Distribution Models, SDM)和栖息地适宜性指数模型(Habitat Suitability Index, HSI)等均被广泛使用<sup>[13-14]</sup>。其中,物种分布模型是基于统计或理论上得出的将物种实地观测与环境预测变量相关联的经验模型<sup>[15]</sup>,常用的模型包括随机森林模型(Random Forest)和最大熵模型(MaxEnt)等。与其他常用的模型相比(如广义线性模型、随机森林等),MaxEnt模型仅需要物种出现位置数据对物种分布进行建模,并具有良好的预测效果。同时具有操作简单、对样本量要求较低的特点,已被广泛应用于预测物种的潜在地理分布<sup>[16]</sup>。对于大范围的区域来说,系统的生物调查数据往往很少或覆盖面有限,相关研究存在一定困难<sup>[17]</sup>。公民科学数据可以提供长时间、大范围的水鸟种类、位置、时间等信息,有效填补了这一空白<sup>[18]</sup>。

本文为探究长江中下游湖泊近十年植食性水鸟栖息地适宜性变化:基于筛选后的植食性水鸟公民科学数据,结合 MaxEnt 模型模拟了长江中下游 25 个湖泊 2012—2021 年植食性水鸟栖息地面积变化及空间分布变化特征;同时计算湖泊洪泛区面积并分析其与植食性水鸟栖息地之间的关系。研究探究湖泊植食性水鸟栖息地变化特征分析,对理解湿地生态系统变化特征及各要素之间的相互作用关系有重要贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

长江中下游湖泊湿地位于中国东部,包括湖南、湖北、江西、安徽、江苏和上海(图 1),是东亚-澳大利西亚

迁徙路线水鸟的重要越冬地<sup>[19]</sup>。该地区属亚热带季风气候,雨量充沛,年均气温在 14—18℃ 之间,年平均降水量约 1300mm<sup>[20]</sup>。长江中下游湖泊湿地是一个复杂的江湖生态系统,该区域的大多数湖泊都是中小型湖泊,平均水深(2.74±1.29)m<sup>[21]</sup>。长江及其支流与湖泊在水文上相互作用<sup>[10]</sup>,丰水期的水位上涨为湖泊带来丰富的有机物,枯水期水位衰退为水鸟提供了广阔的觅食低地<sup>[16]</sup>。调查表明,有超过 900 万只水鸟在长江中下游湖泊湿地越冬<sup>[10]</sup>,其中,雁鸭类水鸟为优势种群<sup>[22]</sup>。长江中下游湖泊湿地中,有大约 24 个湖泊至少含有一种超过迁飞路线种群总数 1% 的水鸟物种,其中鄱阳湖、洞庭湖和升金湖是对于保护性物种极其重要的湖泊<sup>[10]</sup>。本研究根据水鸟公民科学数据分布情况和实地调查经验,选择了长江中下游 25 个湖泊作为研究区。然而,受水鸟记录数据数量限制,研究范围并未包括洞庭湖。



图 1 研究区范围

Fig.1 Study area

## 1.2 水鸟调查记录

长江中下游湖泊湿地水鸟记录来源于 eBird (<https://ebird.org/home>)、全球生物多样性信息网络 (GBIF) (<http://www.gbifchina.org/>) 和鸟类报告 (<http://www.birdreport.cn/>)。下载的数据包括物种名称、经度、纬度、地名和调查日期。这些数据记录通常由观鸟爱好者上传,并由专业的检查人员筛选过滤,因此不常见物种识别错误。将获取的水鸟公民科学数据通过按位置筛选出在研究区范围内的数据,并将去除相同位置数据。为了解决空间和时间偏差,使用高分辨率遥感地图手动验证与实际地名明显偏离的坐标。选择其中以植物性食物为主要食物来源的物种。清理后的数据集包含 17 个物种的 22547 条记录(表 1),包括:11 种鸭类(主要以水生植物叶、芽、种子、农作物幼苗、谷物等植物性食物为食);6 种雁类(主要以植物性食物为食)。

## 1.3 环境数据

研究选取了 12 个指标作为模型模拟时的环境变量。植被指数可以作为反应植食性水鸟栖息地分布的重要指标<sup>[23]</sup>,本文研究对象为以植被为主要食物来源的雁鸭类水鸟,因此选取了 MOD13Q1 V6.1 植被指数产品 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>)。该产品提供全球 16 天/景,250m 分辨率归一化植被指数 (NDVI),研究以年为时间单位,分别计算了 2012—2021 年每年最大 NDVI,最小 NDVI 和平均 NDVI。温度和降雨也是影响水鸟分布的重要环境要素<sup>[24—26]</sup>,研究使用逐日 1km 分辨率的地表温度 MOD11A1.061 陆地表面温度产品 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>),并计算每年最大地表温度、最小地表温度和平均地表温度。降雨则使用空间分辨率为 0.05° 的 CHIRPS 全球降雨数据集<sup>[27]</sup>,并同样以年为时间单位,计算了年最大降雨量,最小降雨量和平均降雨量。研究同样考虑了地形要素对水鸟分布的影响<sup>[28]</sup>,使用了基于

ALOS 卫星生成 30m 分辨率的数字地表模型产品<sup>[29]</sup>,并基于此产品计算了坡度和坡向数据。由于一定时间范围内地形相关要素变化较小,因此研究时间范围内视为不变。

表 1 雁鸭类功能组 23 种水鸟物种数据信息

Table 1 Data information of 23 waterbird species in geese and ducks functional groups

序号 Number	中文名称 Chinese name	英文名称 English name	拉丁文名称 Scientific name	分布数据记录 Number of data
1	青头潜鸭	Baer's pochard	<i>Aythya baeri</i>	27
2	红头潜鸭	Common pochard	<i>Aythya ferina</i>	67
3	赤颈鸭	Eurasian wigeon	<i>Mareca penelope</i>	46
4	罗纹鸭	Falcated duck	<i>Mareca falcata</i>	49
5	赤膀鸭	Gadwall	<i>Mareca strepera</i>	48
6	白眉鸭	Garganey	<i>Spatula querquedula</i>	19
7	绿头鸭	Mallard	<i>Anas platyrhynchos</i>	259
8	针尾鸭	Northern pintail	<i>Anas acuta</i>	58
9	赤麻鸭	Ruddy shelduck	<i>Tadorna ferruginea</i>	62
10	斑嘴鸭	Chinese spot-billed duck	<i>Anas zonorhyncha</i>	700
11	绿翅鸭	Eurasian teal	<i>Anas crecca</i>	188
12	白额雁	Greater white-fronted goose	<i>Anser albifrons</i>	188
13	豆雁	Bean goose	<i>Anser fabalis</i>	132
14	短嘴豆雁	Tundra bean goose	<i>Anser serrirostris</i>	49
15	鸿雁	Swan goose	<i>Anser cygnoid</i>	186
16	灰雁	Greylag goose	<i>Anser anser</i>	143
17	小白额雁	Lesser white-fronted goose	<i>Anser erythropus</i>	33

#### 1.4 最大熵模型(MaxEnt)模拟

MaxEnt 是依据最大熵理论,根据物种分布位置和环境变量运算得物种的潜在地理分布<sup>[30]</sup>。将所有环境护具重采样为 1km,并将环境数据范围裁剪一致。将长江中下游雁鸭类水鸟的分布位置数据和环境数据分别导入 MaxEnt 模型(v3.1.1)构建越冬水鸟分布模型,随机选取 80%的水鸟分布数据用作模型训练数据,余下 20%的分布数据作为模型测试数据,模型重复运行 5 次,其余参数设为默认值,选择重复模拟的平均值作为最终模拟结果。采用受试者工作特征曲线下的面积 AUC(Area under the curve)值验证了模型的准确性。AUC 值不受阈值影响,评估结果相对客观。模型预测的准确性与 AUC 值成正比,范围从 0 到 1,一般认为 AUC 值>0.7 表示模型性能良好<sup>[31-32]</sup>。

#### 1.5 计算湖泊洪泛湿地面积占比

Liu 等提供了的基于 MODIS 数据反演的 GLOBMAP SWF(Global annual surface water cover frequency dataset)产品<sup>[33]</sup>,该产品提供了 2000—2020 年全球 500m 地表水覆盖频率数据集。研究将湖泊洪泛区定义为每个湖泊地表水覆盖频率范围在 20%—70%区域<sup>[34]</sup>。通过空间分析,提取计算了长江中下游湖泊群在 2012—2020 年之间,每年每个湖泊的洪泛区占全湖面积的比例。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型预测结果评估

根据模拟结果,2012—2021 年长江中下游湖泊群植食性水鸟栖息地模型评估效果见表 2。结果显示 2012—2021 年训练集的 AUC 值范围是 0.82—0.97,训练集平均 AUC 值为 0.87;测试集的 AUC 值范围是 0.55—0.85,平均 AUC 值为 0.69。其中,2014、2020、2021 年测试集 AUC 值小于 0.7,其他年份,训练集 AUC 值均大于 0.8,测试集 AUC 值均大于 0.7,表明 Maxent 模型在大部分年份能够较为准确地反映长江中下游湖泊



群植食性水鸟生境适宜性时空分布。

表 2 2012—2021 年训练数据和检验数据的 AUC 值

Table 2 AUC values of training and test data from 2012 to 2021

年份 Year	训练集 AUC Test set AUC	测试集 AUC Training set AUC	年份 Year	训练集 AUC Test set AUC	测试集 AUC Training set AUC
2012	0.90	0.73	2017	0.84	0.70
2013	0.97	0.70	2018	0.88	0.73
2014	0.85	0.55	2019	0.84	0.76
2015	0.89	0.85	2020	0.82	0.60
2016	0.90	0.72	2021	0.85	0.64

AUC: 受试者工作特征曲线下的面积 Area under the curve

## 2.2 长江中下游典型湖泊适宜栖息地分布变化

研究范围内 25 个湖泊总面积为 6815km<sup>2</sup>, 研究统计了研究范围内植食性水鸟适宜性大于 0.5 的面积。从统计结果来看, 水鸟栖息地适宜性大于 0.5 的面积最小值为 2013 年(1580km<sup>2</sup>), 最大值为 2014 年, 但 2014 年模型拟合精度较差, 其次为 2012 年(4018km<sup>2</sup>); 面积在 2012—2021 虽呈下降趋势, 但并未通过检验 ( $P > 0.05$ )。图 3 为 2012—2021 年长江中下游典型湖泊植食性水鸟适宜栖息地空间分布变化特征, 从分布上可以看出, 植食性水鸟栖息地适宜性呈现从湖周围向湖心递减的趋势。其中, 鄱阳湖适宜性的高值区域主要分布在以碟形湖为主的洪泛湿地。

## 2.3 植食性水鸟栖息地适宜性变化特征及其与洪泛湿地面积关系

图 4 为 2012—2021 年长江中下游不同湖泊群植食性水鸟年平均适宜性, 其中, 固城湖、溇湖、枫沙湖、武昌湖、升金湖、大官湖、龙感湖、泊湖、黄湖、陈瑶湖、破罡湖、白荡湖、网湖、涨渡湖、斧头湖、洪湖、西凉湖、东湖和石臼湖呈离散分布, 无显著变化趋势; 沉湖 ( $P = 0.08$ )、保安湖 ( $P = 0.10$ ) 和梁子湖 ( $P = 0.05$ ) 有上升趋势, 但未通过相关性检验; 武湖和长湖呈现显著上升趋势 ( $P < 0.05$ ), 鄱阳湖呈显著下降趋势 ( $P < 0.05$ )。研究同时分析了 2012—2020 年洪泛湿地占全湖面积比例与长江中下游植食性水鸟栖息地适宜性的相关关系 (图 5), 结果表明, 两者呈显著正相关 ( $P < 0.001$ )。

## 3 讨论

经数据库后台专业人员矫正的水鸟公民科学数据可以提供有效的水鸟分布信息<sup>[35]</sup>。本研究基于清洗和筛选后的水鸟公民科学数据模拟了长江中下游近 10 年水鸟栖息地的分布及变化, 并通过训练集和测试集的 AUC 值<sup>[36]</sup>, 评估模型模拟的准确性。模型模拟的训练集的 AUC 值全部大于 0.8, 测试集 AUC 值中除 2014 年和 2020 年和 2021 年小于 0.7, 其余年份均大于 0.7。部分年份模拟准确度不高, 主要原因是可供模型模拟的数据较少。因此该年份对于长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地的空间分异特征模拟不足, 对时间变化特征分析仅提供参考。

分析长江中下游 25 个湖泊面积近十年变趋势, 其结果显示鄱阳湖呈现显著下降趋势, 长湖、武湖和梁子湖呈上升趋势。Teng 等通过长时间序列遥感数据分析得到鄱阳湖在 2003 年以后白额雁和豆雁的越冬季水鸟到达时间栖息地面积在持续减小, 并推测原因主要原因是鄱阳湖水位持续下降, 水面面积减小导致的<sup>[23]</sup>。近年来, 气候变化和人类活动 (如上游水库运行) 导致了长江中下游河流流量减小<sup>[37]</sup>, 长江连通的湖泊生态

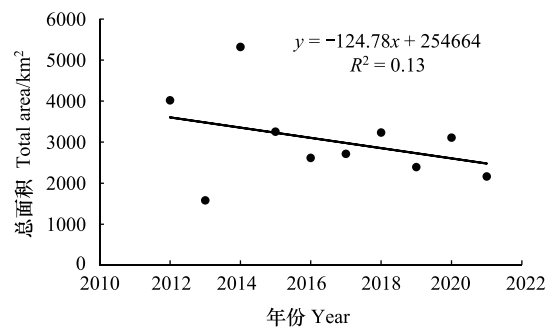


图 2 2012—2021 年植食性水鸟栖息地适宜性大于 0.5 面积  
Fig.2 Habitat suitability for herbivorous waterbirds greater than 0.5 area from 2012 to 2021

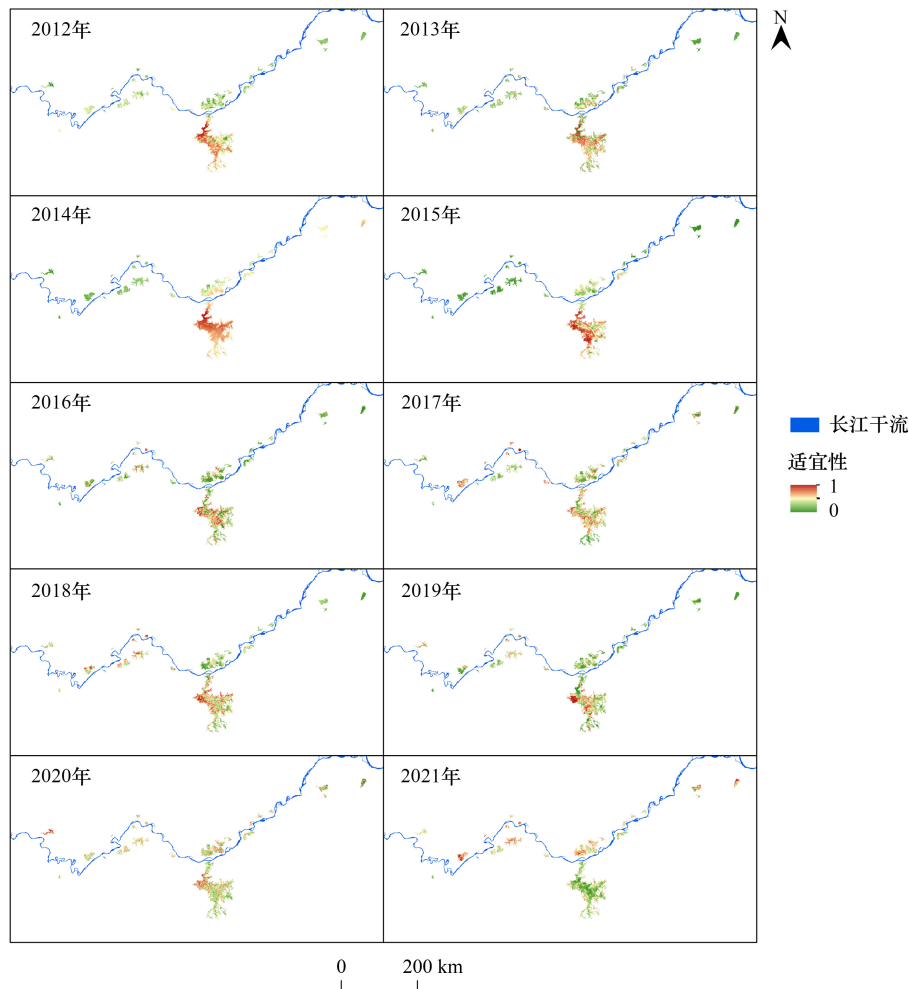


图3 长江中下游湖泊植食性水鸟适宜栖息地时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of suitable habitats for herbivorous waterbirds in lakes of the middle and lower Yangtze River

系统结构和功能受到严重影响。有研究发现三峡运行导致了长江中下游洪泛湿地不同植被类型面积发生明显变化<sup>[38]</sup>,这种变化也会影响以植物性食物为主的雁鸭类水鸟栖息地的适宜性。

相比于与长江连通的鄱阳湖,阻隔湖泊相对更稳定<sup>[34, 39]</sup>。结果显示长江中下游其他的湖泊没有显著变化趋势,长湖、武湖和梁子湖近十年植食性水鸟栖息地适宜性呈上升趋势,可能是水文与长江阻隔原因。因此,在气候变化对湖泊湿地生态系统影响日益严重的情况下,可通过适当的水文调控可减缓其负面影响。但是需要说明的是,研究中除鄱阳湖为连通湖泊,其他 24 个湖泊均与长江隔离,其中 21 个湖泊并未呈现显著上升或下降趋势。同时,由于水鸟公民科学数据量的限制,研究的时间尺度仅为近 10 年的演变趋势,因此导致这种现象的成因复杂,水文连通性可能只是原因之一。

基于经典的物种-面积关系<sup>[40]</sup>,湖泊总面积往往被认为是影响水鸟丰度和水鸟多样性的关键指标。在洪泛湿地中,水位波动导致湖泊面积季节性涨落。雁鸭类水鸟多以草本植物为食,主要分布在水位下降后湖泊的浅水区和洲滩之上<sup>[41]</sup>。因此,有学者提出,最大水面淹没面积与最小水面淹没面积之差也可以作为预测水鸟的丰度和多样性的指标<sup>[11]</sup>。研究基于 MODIS 反演的地表水覆被频率数据集,计算了地表水覆盖频率范围在 20%—70%区域作为湖泊洪泛区。并拟合了 2012—2020 年湖泊洪泛区面积与植食性水鸟栖息地适宜性的关系,结果表明,两者显著相关( $P < 0.001$ ),有效验证了此假设。

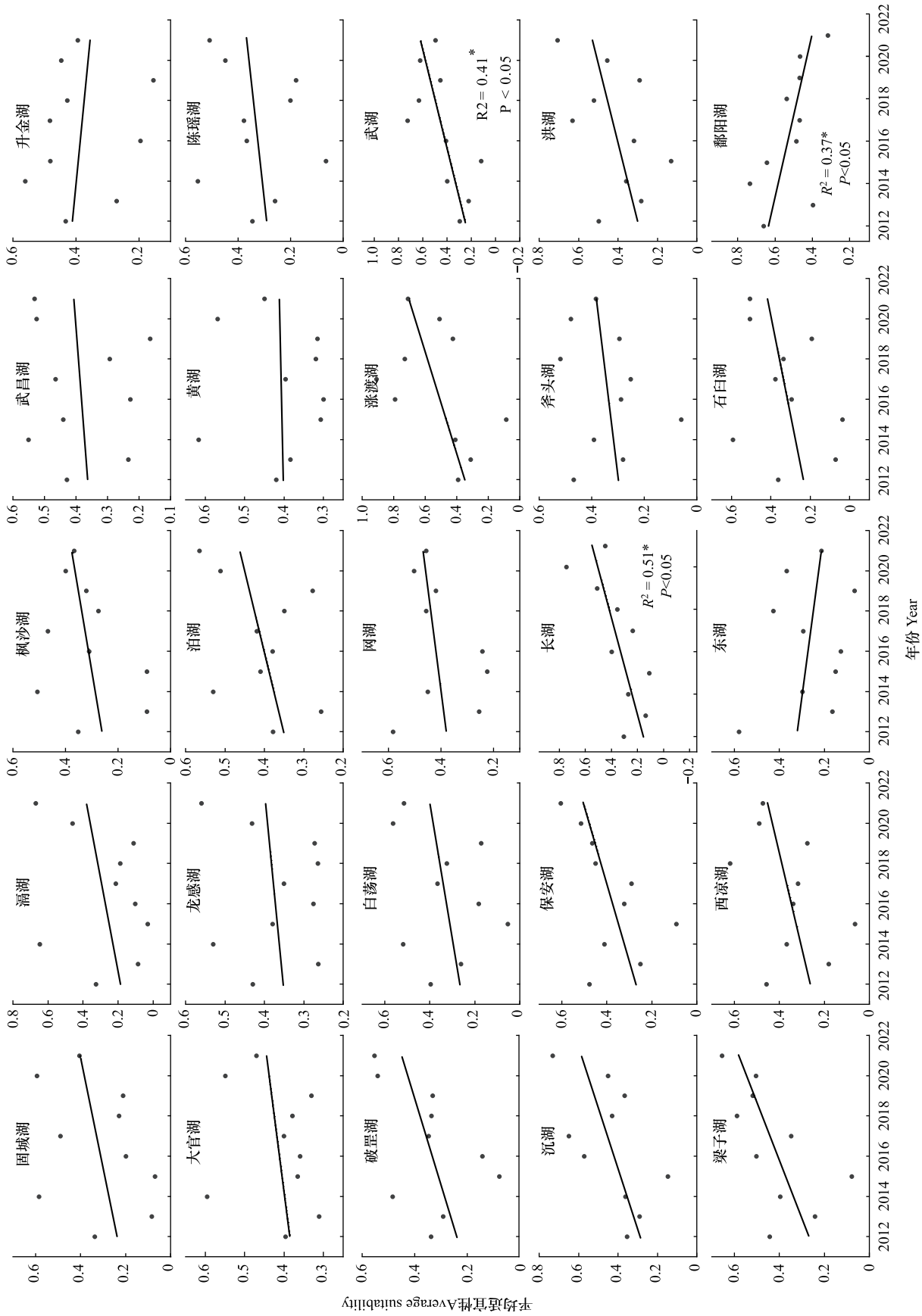


图4 长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化特征

Fig.4 Habitat suitability variation characteristics of herbivorous waterbirds in lakes of the middle and lower Yangtze River

由于水鸟公民科学数据缺乏长期性和系统性<sup>[18]</sup>, 尽管通过多个途径获取这些数据, 但是经过数据清洗和筛选后, 符合模型模拟要求的数据十分有限。洞庭湖作为长江中下游重要的水鸟越冬地<sup>[42]</sup>, 但是在本研究中该区域可供模拟数据年均不超过 2 个, 导致该区域模拟精度较差, 因此并未对洞庭湖的植食性水鸟栖息地分布情况进行分析。针对整个长江流域的水鸟栖息地变化模拟和分析需要整合更多水鸟调查资源完成, 为长时间、大尺度水鸟保护研究做出科学有效的评估和分析。

#### 4 结论

本文基于公民科学数据使用 MaxEnt 模型模拟了 2012—2021 年长江中下游典型湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化, 并分析其与湖泊洪泛区面积的关系。研究发现, 在 2012—2021 年鄱阳湖植食性水鸟栖息地显著下降, 长湖和武湖显著上升, 其他湖泊无明显变化, 这可能与湖泊与长江的连通情况有关。长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性大于 0.5 的面积最小为 2013 年 (1580km<sup>2</sup>), 除去拟合精度较差的 2014 年, 面积最大年份为 2012 年 (4018km<sup>2</sup>)。长江中下游典型湖泊植食性水鸟栖息地与湖泊洪泛区面积变化显著相关, 说明洪泛区面积可以作为表征湖泊植食性水鸟栖息地适宜性的有效指标。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Gibbs J P. Wetland loss and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 314-317.
- [ 2 ] Junk W J, An S Q, Finlayson C M, Gopal B, Květ J, Mitchell S A, Mitsch W J, Robarts R D. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 2013, 75(1): 151-167.
- [ 3 ] 王强, 吕宪国. 鸟类在湿地生态系统监测与评价中的应用. *湿地科学*, 2007, 5(3): 274-281.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Zhang P Y, Zou Y A, Xie Y H, Zhang H, Liu X K, Gao D L, Yi F Y. Shifts in distribution of herbivorous geese relative to hydrological variation in East Dongting Lake wetland, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 30-38.
- [ 6 ] Teng J K, Yu X B, Xia S X, Liu Y. Suitable habitat dynamics of wintering geese in a large floodplain wetland: insights from flood duration. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 952.
- [ 7 ] Liang J, Meng Q F, Li X, Yuan Y J, Peng Y H, Li X D, Li S, Zhu Z Q, Yan M. The influence of hydrological variables, climatic variables and food availability on Anatidae in interconnected river-lake systems, the middle and lower reaches of the Yangtze River floodplain. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144534.
- [ 8 ] Donnelly J P, King S L, Silverman N L, Collins D P, Carrera-Gonzalez E M, Lafón-Terrazas A, Moore J N. Climate and human water use diminish wetland networks supporting continental waterbird migration. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2042-2059.
- [ 9 ] Shi L L, Wang Y Y, Jia Y F, Lu C, Lei G C, Wen L. Vegetation cover dynamics and resilience to climatic and hydrological disturbances in seasonal floodplain: the effects of hydrological connectivity. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2196.
- [ 10 ] Wang W J, Fraser J D, Chen J K. Wintering waterbirds in the middle and lower Yangtze River floodplain: changes in abundance and distribution. *Bird Conservation International*, 2017, 27(2): 167-186.
- [ 11 ] Jia Q, Wang X, Zhang Y, Cao L, Fox A D. Drivers of waterbird communities and their declines on Yangtze River floodplain lakes. *Biological Conservation*, 2018, 218: 240-246.
- [ 12 ] Knutson M G, Hines R K, Powell L A, Friberg M A, Niemi, G J. An assessment of bird habitat quality using population growth rates. *The Condor*, 2006, 108(2): 301-314.
- [ 13 ] Brotons L, Thuiller W, Araújo M B, Hirzel A H. Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, 2004, 27(4): 437-448.

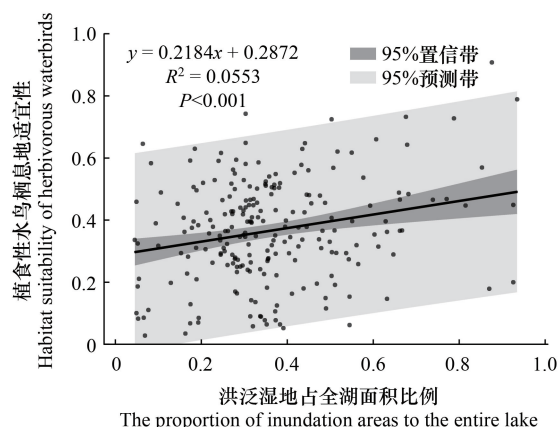


图5 洪泛湿地占全湖面积比例与植食性水鸟栖息地适宜性关系  
Fig.5 Relationship between the proportion of inundation area in the total lake area and the suitability of herbivorous waterbird habitats



- [14] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [15] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models; ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [16] 刘小燕, 周铁尘, 张增信, 张佳敏, 朱斌, 田佳西, 邱健. 长江中下游地区越冬水鸟潜在适宜栖息地分布预估. *东北林业大学学报*, 2023, 51(8): 90-97, 126.
- [17] Duan H L, Xia S X, Yu X B, Liu Y, Teng J K, Dou Y H. Using citizen science data to inform the relative sensitivity of waterbirds to natural versus human-dominated landscapes in China. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(14): 7233-7241.
- [18] 段后浪, 于秀波, 石建斌, 雷进宇, 夏少霞. 中国大陆沿海水鸟栖息地保护优先区及空缺分析. *生态学报*, 2021, 41(24): 9574-9580.
- [19] Cao L, Fox A D. Birds and people both depend on China's wetlands. *Nature*, 2009, 460: 173.
- [20] Li X M, Xiao W F, Sun G, Ma T, Liu F G, Liu X Y, Su H L, Pan K J, Cheng R M, Qian F W. Changes in the waterbird community of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir Region, China, 2003-2013. *Biologia*, 2022, 77(4): 1057-1065.
- [21] 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.
- [22] 邵明勤, 陈斌, 蒋剑虹. 鄱阳湖越冬雁鸭类的种群动态与时空分布. *四川动物*, 2016, 35(03): 460-465.
- [23] Teng J K, Xia S X, Duan H L, Liu Y, Yu X B, Yang W J. Temporal and spatial evolution of herbivorous waterbird habitat in floodplain wetland driven by hydrology. *Water Resources Research*, 2023, 59(8): e2022WR034399.
- [24] Amano T, Székely T, Wauchope H S, Sandel B, Nagy S, Mundkur T, Langendoen T, Blanco D, Michel N L, Sutherland W J. Responses of global waterbird populations to climate change vary with latitude. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 959-964.
- [25] Canepuccia A D, Isacch J P, Gagliardini D A, Escalante A H, Iribarne O O. Waterbird response to changes in habitat area and diversity generated by rainfall in a SW Atlantic coastal lagoon. *Waterbirds*, 2007, 30(4): 541-553.
- [26] Studds C E, DeLuca W V, Baker M E, King R S, Marra P P. Land cover and rainfall interact to shape waterbird community composition. *PLoS One*, 2012, 7(4): e35969.
- [27] Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015, 2: 150066.
- [28] Wang C X, Yu X B, Xia S X, Liu Y, Huang J L, Zhao W. Potential habitats and their conservation status for swan geese (*Anser cygnoides*) along the East Asian flyway. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1899.
- [29] Takaku J, Tadono T, Tsutsui K. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-4: 243-248.
- [30] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [31] Dyderski M K, Paź S, Frelich L E, Jagodziński A M. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1150-1163.
- [32] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*, 2012, 48(1): 53-59.
- [33] Liu Y, Liu R G, Shang R. GLOBMAP SWF: a global annual surface water cover frequency dataset during 2000-2020. *Earth System Science Data*, 2022, 14(10): 4505-4523.
- [34] Teng J K, Xia S X, Liu Y, Cui P, Chen J, Si W W, Duan H L, Yu X B. Differences of regulative flexibility between hydrological isolated and connected lakes in a large floodplain: insight from inundation dynamics and landscape heterogeneity. *Water*, 2020, 12(4): 991.
- [35] 段后浪, 于秀波. 黄渤海濒危水鸟栖息地动态变化研究. *生态学报*, 2023, 43(15): 6354-6363.
- [36] 赵宁, 夏少霞, 于秀波, 段后浪, 李瑾璞, 陈亚恒. 基于 MaxEnt 模型的渤海湾沿岸鸕鹚类栖息地适宜性评价. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 194-205.
- [37] Gao B, Yang D W, Yang H B. Impact of the Three Gorges Dam on flow regime in the middle and Lower Yangtze River. *Quaternary International*, 2013, 304: 43-50.
- [38] 李峰, 谢永宏, 陈心胜, 邓正苗, 邹业爱, 李旭, 侯志勇, 曾静, 胡佳宇. 三峡工程运行对洞庭湖湿地植被格局的影响及调控机制. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 937-944.
- [39] Teng J K, Xia S X, Liu Y, Duan H L, Yu X B, Chen J. An integrated model for prediction of hydrologic anomalies for habitat suitability of overwintering geese in a large floodplain wetland, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117239.
- [40] Triantis K A, Mylonas M, Lika K, Vardinoyannis K. A model for the species-area-habitat relationship. *Journal of Biogeography*, 2003, 30(1): 19-27.
- [41] Wei J, Xin Q C, Ji L Y, Gong P, Si Y L. A new satellite-based indicator to identify spatiotemporal foraging areas for herbivorous waterfowl. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 83-90.
- [42] Zhang P Y, Zou Y A, Xie Y H, Zhang S Q, Zhu F, Chen X S, Feng L, 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(3): 107776.