

DOI: 10.5846/stxb201912032616

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.

Yao S Y, Li X Y, Liu C L, Liu B, Zhang J, Kuang W M. Effect of the proposed construction of Poyang Lake Hydraulic Project on the habitat suitability for Tuber-eating Birds at different water levels. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3998-4009.

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

姚斯洋¹, 李昕禹^{1,2}, 刘成林¹, 柳波¹, 张静^{1,*}, 况卫明³

1 南昌大学建筑工程学院, 南昌 330031

2 南昌大学际鑫书院, 南昌 330031

3 江西水利职业学院, 南昌 330013

摘要: 鄱阳湖为亚洲最大的候鸟栖息地, 近十余年发生了枯水期提前且延长及湖区生态环境日益恶化的问题, 对于此问题江西政府提出了一种科学的工程措施——鄱阳湖水利枢纽(简称枢纽)。然而, 枢纽对越冬候鸟栖息地的影响尚无定量研究。以鄱阳湖食块茎鸟类——白鹤(*Grus leucogeranus*)、白枕鹤(*Grus vipio*)和小天鹅(*Cygnus columbianus*)的栖息地为研究对象, 利用 3S 技术结合生态学知识, 在 ArcGIS 平台上搭建了食块茎鸟类栖息地适宜性评价模型, 使用二维水动力模型联合适宜性评价模型, 生成鄱阳湖在建枢纽前、后的食块茎鸟类栖息地适宜性分布图。选取工程调度时期水位相对稳定时段, 以鄱阳湖无枢纽状态下星子水位为基础, 探究鄱阳湖在不同水位时, 有拟建枢纽和无拟建枢纽状态下食块茎鸟类的栖息地适宜性的变化, 定量分析拟建枢纽对候鸟栖息地适宜性造成的影响。研究发现: 枢纽的调度规则具有一定的科学性, 水位调度方案对湖泊食块茎鸟类越冬初期栖息产生的影响较小, 但会牺牲一部分越冬后期适合食块茎鸟类栖息的区域。拟建枢纽选址处至都昌站的食块茎鸟类栖息地适宜性受枢纽的负面影响最为显著, 各级自然保护区之中, 北部省级候鸟自然保护区受其负面影响最大, 此保护区将减少 18.01—39.80 km² 适合食块茎鸟类栖息的面积。但是枢纽的运行能增加湖泊土壤含水量, 使食块茎鸟类更易于觅食, 且能增加喜食块茎鸟类的食物丰富度。本研究可为今后鄱阳湖湖区水环境规划和水生态管理维护提供一定的科学参考。

关键词: 鄱阳湖水利枢纽; 鸟类栖息地适宜性; 二维水动力模型; 3S 技术

Effect of the proposed construction of Poyang Lake Hydraulic Project on the habitat suitability for Tuber-eating Birds at different water levels

YAO Siyang¹, LI Xinyu^{1,2}, LIU Chenglin¹, LIU Bo¹, ZHANG Jing^{1,*}, KUANG Weiming³

1 School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2 Jiluan Academy, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3 Jiangxi Water Conservancy Vocational College, Nanchang 330013, China

Abstract: Poyang Lake is the largest wintering habitat for migratory birds in Asia. In the last decade, the Lake has experienced early-occurring and prolonged dry season that has deteriorated the lake's ecological status. To tackle this issue, the Chinese government has proposed the construction of the Poyang Lake Hydraulic Project. However, there is no quantitative study on the impact of the Hydraulic Project on wintering migratory bird habitats. The habitats of the Tuber-eating Birds including *Grus leucogeranus*, *Grus vipio*, and *Cygnus columbianus*, etc. were studied. The 3S technology combined with ecological knowledge were used to build a suitability evaluation model for the habitat of the Tuber-eating

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51709142); 国家自然科学基金地区基金项目(52069012); 江西省水利科技计划项目(KT201326)

收稿日期: 2019-12-03; **网络出版日期:** 2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 416016217116@email.ncu.edu.cn

Birds on the ArcGIS platform. Then, we used the suitability evaluation model combined with a two-dimensional hydrodynamic model to generate the habitat suitability map of the Tuber-eating Birds, with and without the presence/operation of the hydraulic project. During the hydraulic project dispatch period, the period of stable water level was selected. Based on the Xingzi water level without the hydraulic project, we explored the habitat suitability changes of Poyang Lake in different water levels, with and without the presence/operation of the hydraulic project. The impact of the hydraulic project on the suitability of the Tuber-eating Birds habitats was quantitatively studied. The results showed that the scheduling rule of the hydraulic project were scientific. The scheduling rule had little impact on the habitat of the Tuber-eating Birds in the early winter, but still sacrificed some of the areas suitable for the Tuber-eating Birds in the late winter. The region of hydraulic project to Duchang station was significantly negatively affected by the hydraulic project. In the nature reserves at all levels, the northern provincial migratory bird nature reserve was most significantly negatively affected, and the area will reduce the area of 18.01—39.80 km² suitable for the Tuber-eating Birds. However, the operation of the hydraulic project could increase the soil water content, making it easier for the Tuber-eating Birds to eat and increase the food richness. Our study can provide a scientific reference for the future water environment planning and ecological management of the Poyang Lake.

Key Words: Poyang Lake Hydraulic Project; habitat suitability of migratory birds; two-dimensional hydrodynamic model; 3S technology

有“候鸟王国”之美称的鄱阳湖现为亚洲最大的候鸟越冬地^[1-3]。2003 年以后,鄱阳湖出现了枯水期提前和枯水位持续时间延长的现象^[4-5],这种湿地水文节律的改变导致部分水鸟赖以生存的特定水生植被衰退,从而使有效的觅食地面积减小。针对上述鄱阳湖枯水期提前的问题,江西省提出了为“一湖清水”——鄱阳湖水利枢纽(简称枢纽)建设的提议,以提高鄱阳湖枯水期水资源和水环境承载能力。在 2013 年 6 月江西省枢纽建设办公室初步拟定了枢纽规划调度方案^[6],每逢丰水期(约 3—9 月)枢纽不控水,保持全开;枯水期(约 10 月—翌年 3 月)枢纽下闸拦水,根据当年实际水情对湖区水位进行动态调控。

枢纽的实施对湿地生态尤其是候鸟可能产生的潜在影响,逐渐成为了国际的焦点^[7]。郭恢财等^[8]定性分析了枢纽对候鸟栖息地造成的影响,赖格英与王鹏等^[9-10]单方面地分析了这些影响。但是,在目前的研究中,鲜有定量、全面地进行枢纽对候鸟栖息地造成影响的研究。

众学者为量化人工控水措施对湿地生态、水文等方面影响展开过许多研究^[11-12],如:Li^[11]等利用 RS 技术与线性模型量化水位与湿地景观之间的关系,评估了长江至淮河调水工程对菜籽湖候鸟可利用栖息地面积的影响,发现 50% 以上的草地和泥潭将会因调水工程的运营而消失。但是,对于湿地候鸟而言,上述研究仅考虑了它们选择栖息地的单一因素,而候鸟选择栖息地考虑的因素往往是多样的^[13]。近些年来,学者们利用 3S 技术,通过建立水鸟栖息地适宜性模型来定量评估其生境质量的探讨已经逐渐成为热点^[14-15],其中栖息地适宜性被定义为环境为野生动物提供适当条件的能力^[15]。有学者^[15-18]通过量化研究水鸟栖息地的多种特征,选择影响水鸟选择栖息地的关键指标,运用 3S 技术构建栖息地适宜性模型,生成栖息地适宜性分布图取得了较好的效果。如 Tang 等^[15]根据越冬雁类(如:小天鹅、白额雁(*Anser albifrons*)等)的习性选取了归一化植被指数(NDVI)、景观分类、水源密度等评价指标,建立越冬雁类栖息地适宜性评价模型,探究了土地利用变化对其越冬栖息地适宜性的影响。因此,可以通过构建适宜性评价模型来定量全面地研究枢纽对越冬候鸟的栖息地的影响问题。但是,由于枢纽兴建后鄱阳湖的水情是未知的,构建枢纽兴建后的适宜性评价模型成为了难点。

近年来,随着数值模拟技术^[19-22]的发展,可通过数值模拟技术来得出枢纽兴建后鄱阳湖的水情^[9-10],从而计算枢纽兴建后的栖息地适宜性。本文根据鄱阳湖食块茎代表鸟类白鹤、白枕鹤、小天鹅选择栖息地的特点,利用 3S 技术在 GIS 平台上搭建了栖息地适宜性模型,并结合二维水动力模型,在枢纽建设办公室在 2017 年 5 月 20 日提出的工程规划调度方案^[23]的基础上,评估了枢纽兴建前、后,湖泊食块茎鸟类栖息地的适宜性,定

量分析拟建枢纽对食块茎鸟类栖息地面积造成的影响,揭示拟建鄱阳湖水利工程枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性的相互作用关系。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖是个过水性的吞吐型湖泊,是中国的第一大淡水湖泊,且其蓄水容积悬殊极大,丰水季节呈现湖泊状态,枯水季节呈现河流状态,由此形成了“高水是湖,低水似河”的奇特景观,如图 1。在鄱阳湖主湖区内共设有 7 个主要水文站,其中星子站(图 1)由于处于鄱阳湖入江主河道的瓶颈处,其水位常被研究学者当做反映鄱阳湖整体水位高低的代表^[1, 8-10],丰水期鄱阳湖一片汪洋,当星子水位低于 14.5 m 时,碟形湖开始依次显露(碟形湖是鄱阳湖盆区内枯水季节显现的碟形洼地,由于其春季孕育了大面积的湿地植被与底栖动物,为候鸟提供了优越的生境^[24]);当星子水位降到 10 m 左右时,碟形湖全部露出与主湖没有了联系,由此标志鄱阳湖进入枯水期^[25]。鄱阳湖于 10 月份左右进入枯水期,鄱阳湖中十分丰富的部分底栖动物以及沉水植被(如苦草(*Vallisneria natans*)等)开始露出并达到食块茎鸟类(如白鹤等)的取食条件,且部分滩涂植被(如苔草(*Carex spp.*)等)是食草鸟类(如白额雁)的主要食物。因此,越冬候鸟在此时相继到来,当次年的 3 月左右时长江中下游地区进入雨季,鄱阳湖的水位缓慢上涨,越冬候鸟在此时陆续离开。

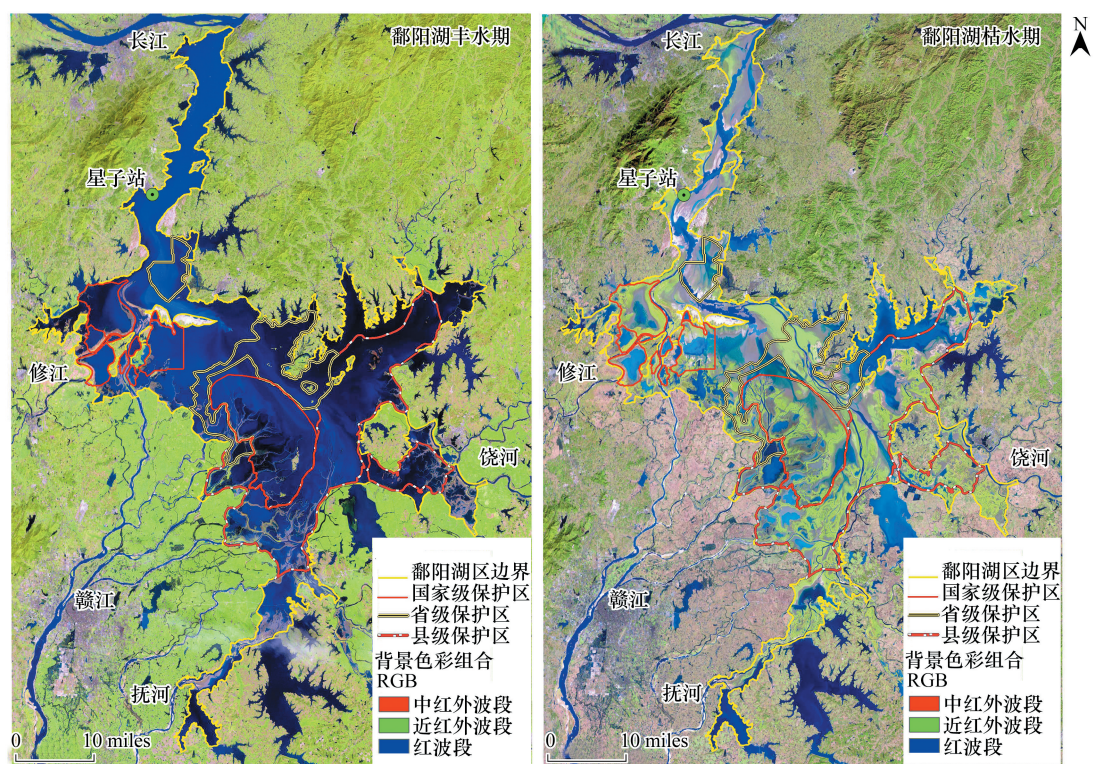


图 1 鄱阳湖丰水期与枯水期遥感图

Fig.1 Remote sensing map of the Poyang Lake during the wet and dry periods

1.2 数据来源

1.2.1 地形与水文数据

用于建模与水深计算的数据来自于 2010 年栅格分辨率 5 m×5 m 的实测 DEM 数字高程数据;用于设置模型边界条件与验证模型的水文数据分别来自于“五河七口”7 个水文站与湖区内 5 个水文站的实测数据(时间为 1970—2010 年)。

1.2.2 遥感影像与土地分类数据

图 1 的基础数据来自于选取的两景 LandSat 遥感影像数据(来源网址为 <http://earthexplorer.usgs.gov/>), 时间分别为 2010-12-08(星子水位 6.25 m, 黄海高程, 下同)、2010-10-05(星子水位 13.38 m); 用于进行景观分类、植被覆盖度估算和水深计算的数据来自于五景 LandSat 遥感影像数据, 时间分别为 1999-12-02(星子水位 9.75 m)、2006-11-03(星子水位 8.08 m)、2007-03-27(星子水位 9.07 m)、2010-12-08(星子水位 6.25 m)、2013-11-22(星子水位 7.12 m), 选择理由在下文中(1.4.2)提及; 用于计算人类活动距离的土地分类数据来自于 2010 年江西省土地利用矢量数据。

1.3 二维水动力模型

1.3.1 水动力模型的建立

鄱阳湖属宽浅型湖泊, 水体垂向混合状况较好^[25], 鄱阳湖岸线曲折复杂, 地形空间变异较大, 针对以上特点, 选择基于无结构网格的 Mike 21 模型^[26-27]。该计算模块原理基于不可压缩的雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深积分的连续方程和动量方程^[28], 描述平面二维水流的连续方程和动量方程见式(1)和式(2)。

连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 为水深; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 方向的流速; u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向上的分量; z 为水位; g 为重力加速度; C 为谢才系数; v_t 为紊动黏性系数。

湖泊地形的建立基于 2010 年实测数字高程 (DEM) 数据, 采用非结构化的三角形网格, 并对与地形变化较大的河道区域与区域内碟形湖进行网格加密, 湖泊边界根据丰水期遥感影像以及现修建的提防确定, 最终构建的地形文件网格数为 206970, 节点数为 106475。模型的入流条件来自“五河”实测的流量过程线, 模型的下游开边界条件为湖口水位过程线。为了保持入流与流出水量平衡, 本文根据赖格英等^[10]的研究, 将入流流量数据乘了一个比例系数为 1.15, 使在一个模拟的水文周期中, “五河”入流量大致等于湖口水文站的出流量, 模型概化如图 2 所示。糙率根据地形特点采用空间变化的糙率场, 由主河道的 0.018 过渡至植被区域的 0.028^[27]。

1.3.2 典型年的选取和枢纽兴建后水动力的模拟

考虑到地形数据的时效性, 又考虑到数据的可对比性(星子水位在调度时间内变幅较大(图 3)), 因此本文选择 2010 年作为典型年来进行枢纽调度模拟。考虑到候鸟越冬的时间、水动力模型的预热期, 故把有枢纽情景模拟时间设在当年的 8 月初至次年 3 月初, 调度水位按照枢纽建设办公室最新提出的工程规划调度方案设定, 如图 3。

由于鄱阳湖湖口处的水位受长江干流流量的影响较大^[29], 故本文构建鄱阳湖有拟建枢纽状态下的水动力模型是将“五河”来流过程及湖口实测水位过程分别作为总体模型的进、出口边界条件, 但是由于 Mike21 内置建筑物设置不能满足枢纽的水位调度要求, 根据以往研究^[9-10], 在枢纽处加设一开边界来控制枢纽的水位进行调度, 但利用此种方法不能很好的模拟工程选址下游区域的水情。考虑到枢纽实际蓄水过程中的闸上、下水位差, 把模型以枢纽选址位置为中心, 分为南、北两块区域, 南区域面积为 2846.1 km², 用来模拟枢纽上游水情, 北区域面积为 160.9 km², 用来模拟枢纽下游水情, 并提取一个计算周期内南区域枢纽处的流量, 把它作为北区域的进口边界条件, 由此来模拟拟建枢纽下游水情。

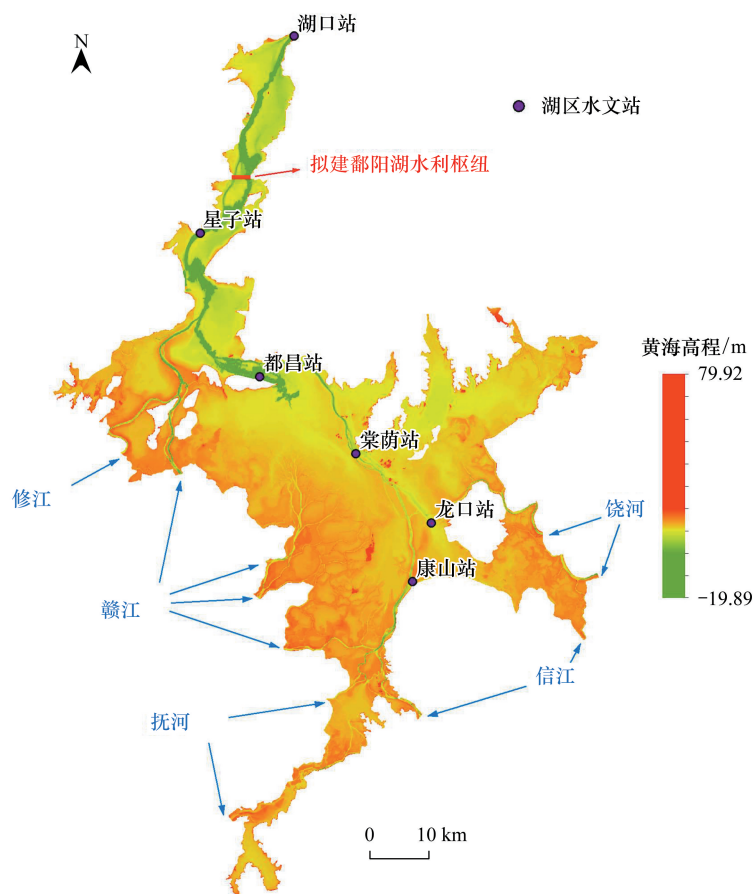


图2 模型概化图

Fig.2 Model generalization

1.4 适宜性评价模型

1.4.1 评价指标的选取与计算

指标的选取:

根据先前对鄱阳湖主要食块茎鸟类白鹤、小天鹅和白枕鹤的研究^[30-32],将影响鄱阳湖食块茎鸟类选择栖息地的主要指标定为: C_1 景观分类、 C_2 水深、 C_3 植被覆盖度、 C_4 人类活动距离、 C_5 保护区等级,具体选择理由如下。

湿地景观的不同,食块茎鸟类食物丰富度也存在着不同,因此湿地景观分类被选作代表食块茎鸟类的食物丰富度的评价指标^[1];食块茎鸟类需要一个适当的水深来满足其生境要求^[33],故水深是影响食块茎鸟类栖

息的重要条件,虽然不同食块茎鸟类对具体水深要求存在着不同(如,白枕鹤筑巢和觅食水深为 5—25 cm,白鹤的觅食以及夜憩水深为 20—30 cm,小天鹅的觅食水深为 30—70 cm^[33-35]),但是大体水深要求还是处于一个相近的范围,因此本文按照统一标准来划分;鄱阳湖枯水期丰富的植被为鸟类提供了隐蔽和休憩场所,对越冬鸟类的生存起到至关重要的作用,因此植被覆盖度被选取为一个重要评价指标^[36];鸟类在选择栖息地时,往往远离人口密集的城镇、居住地和道路,因此人类活动距离是影响候鸟栖息的关键因素之一^[31-32,36];近年

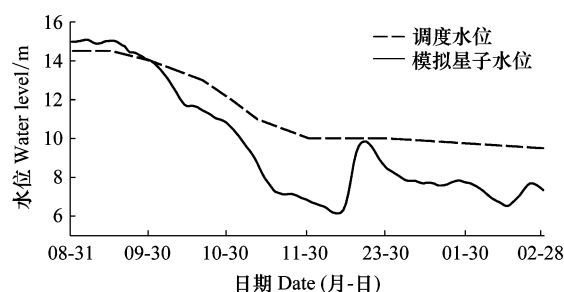


图3 拟建枢纽调度水位与2010年冬季星子水位

Fig.3 The regulating water level of the project and the water level of Xingzi in winter 2010

来,政府相关部门为了减小人类对鄱阳湖鸟类的干扰,在鄱阳湖湖区内划分了 2 个国家级,1 个省级,2 个县级候鸟自然保护区,对保护鸟类起到了关键作用,因此自然保护区等级也被选为本文的评价指标之一^[31-32]。以上评价指标分别被分为四类,依据与标准如下表 1。

表 1 评价因子的分类
Table 1 Classification of the evaluation factors for habitat suitability for migratory birds

评价指标 Evaluation index	评价标准 Evaluation standard				参考文献 References
	M ₀₁ 适合级 M ₀₁ Suitable level	M ₀₂ 较适合级 M ₀₂ Less suitable level	M ₀₃ 较不适合级 M ₀₃ Less unsuitable level	M ₀₄ 不适合级 M ₀₄ Unsuitable level	
C ₁ 景观分类 C ₁ Landscape classification	浅水、沼泽区	泥潭、稀疏草滩	沙滩、茂密草洲	深水区	[1,37]
C ₂ 水深 C ₂ Water depth	0—0.6 m	0.6—2 m	2—10、0 m	10— Max m	[33-35,38]
C ₃ 植被覆盖度 C ₃ Vegetation coverage	60%—100%	45%—60%	30%—45%	0%—30%	[36,39]
C ₄ 人类活动距离 C ₄ Human distance	1500—Max m	1000—1500 m	500—1000 m	0—500 m	[36]
C ₅ 保护区等级 C ₅ Protection zone level	国家级自然保护区	省级自然保护区	县级自然保护区	非自然保护区	[31-32]

枢纽兴建前指标的计算:

各景 LandSat 遥感影像在 ENVI 内进行校正、拼接等处理后,进行监督分类和 NDVI 计算,以得到景观分类指标 C₁和计算植被覆盖度指标 C₃所需的 NDVI 数据,其中植被覆盖指标利用 NDVI 对植被覆盖度进行估算^[39]。用于计算人类活动距离指标 C₄的数据来自与江西省 2010 年的土地分类数据在 ArcGIS 软件中进行欧氏距离(Euclidean distance)计算的结果数据;保护区级别指标 C₅数据根据文献^[37]整理出。其中景观分类指标与保护区级别指标的量化是分别将各适宜级别的区域由低到高依次赋值为 0、1、3、5;水深指标 C₂计算的步骤为,提取景观分类完成结果内水体景观,并转化为矢量数据,利用 2010 年实测 DEM(5 m×5 m)数据切割出水面线高程并进行插值得到水面高程,再利用得到的水面高程与 DEM 数据作差,从而得到所需水深指标。

其中,植被覆盖计算公式为:

$$F=\frac{\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}}-\text{NDVI}_{\text{soil}}}$$

(3)

式中,F 为整个区域的植被覆盖度,NDVI_{soil}为累计频率为 5%的 NDVI,NDVI_{veg}为累计频率为 95%的 NDVI。

枢纽兴建后指标的计算:

枢纽修建后的水深指标 C₂直接通过所建二维水动力模型的模拟结果提取,人类活动距离指标 C₄、保护区等级指标 C₅则与枢纽修建前保持一致。由于枢纽修建后的景观分类指标 C₁和植被覆盖指标 C₃是需要遥感影像作为基础数据来提取的,但目前还不存在这样的遥感图像。因此,枢纽修建后的 C₁和 C₃指标通过以下方式获得:

对于南部区域(从五条河流的入口到枢纽),利用相应的水动力模型模拟枢纽修建后的水情去校正枢纽修建前的景观分类结果和植被覆盖结果。对于景观分类结果,主要利用水动力模型模拟枢纽修建后的水深去校正相应枢纽修建前的景观分类结果中深水与浅水区域。对于植被覆盖结果,基于枢纽修建前的植被覆盖结果,根据水动力模型模拟枢纽修建后的水面将相应有水的区域赋值为 0,其他则不变;

对于北部区域(从枢纽的位置到湖口站),在水动力模型中,提取枢纽修建前、后的水位过程作比较,发现水位过程中相差并不大。因此,把枢纽修建前的评价指标当做枢纽修建后的评价指标来参与计算。

1.4.2 不同水位的典型日期与遥感影像的选取

由于枢纽建成后对星子水位会产生较大影响,对鄱阳湖食块茎鸟类栖息地进行定量分析时不能单独考虑

水位变化,还要考虑枢纽的调度时间。由图 3 得,当拟建枢纽建成后其调度水位在 9—1 至 12—1 变化幅度较大,而在 12—1 至次年 3—1 则相对稳定,故选择 12—1 至次年 3—1 进行面积变化分析。综上所述,以无拟建枢纽下星子水位为参考标准,在拟建枢纽调度水位稳定时期,寻找星子水位分别为由低向高变化相对应的典型日期。最终选择的日期为 2010-12-08(代表水位 6 m)、2010-12-15(代表水位 7 m)、2010-12-16(代表水位 8 m)、2010-12-18(代表水位 9 m)、2010-12-23(代表水位 9.8 m),又考虑到数据的可及性,若上述选择的日期的遥感影像无法获取,则利用星子水位一致的影像替代(文中 1.2)。

1.4.3 数据归一化处理与适宜性计算

其中各指标通过计算得到原始值之后通过下列公式进行归一化处理,以消除量纲的差异。

对于正向指标采用,

$$A_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (4)$$

对于负向指标采用,

$$A_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (5)$$

式中, A_{ij} 为标准化的数值, X_{ij} 为第 i 年的第 j 个指标的原始值, $\min X_{ij}$ 和 $\max X_{ij}$ 分别为第 j 个指标中的最小值和最大值。

采用层次分析法(AHP)来计算相应指标的权重,各个指标权重按照 $C_1 - C_5$ 排序为: $\bar{W} = [0.315 \ 0.118 \ 0.201 \ 0.183 \ 0.183]$ 。最后基于归一化后的指标,通过 Habitat Suitability Index(HSI)模型^[15]得出鄱阳湖越冬候鸟栖息地综合适宜性,其计算公式为:

$$HSI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (6)$$

式中,HSI 是栖息地适宜性; w_i 和 f_i 是评估指标 i 的权重和值; n 是评估指标的数量。

2 结果

2.1 二维水动力模型验证结果

分别利用湖区内的五个站点(星子、都昌、康山、龙口、棠荫)的 2010 年水位过程线对模型进行验证。根据表 2 可得,其中水位相对误差均在 0.09—0.40 m 之间,N-S 系数在 0.898—0.992 之间,其中星子、唐荫、龙口、都昌四站模拟结果相对较好,N-S 系数达 0.975 以上,但是康山站枯水期误差较大(可达 1—2 m),因此进一步分析造成此误差的原因:康山大堤修筑取土,从而导致康山站附近局部地形多变,现有模型网格的分辨率未能很好地反映康山站附近的实际地形变化情况,在地形插值后,原有的深窄主槽受周边较高滩地的影响,地形被抬高,从而水位升高,影响了模型的计算结果;而通过实地调查与咨询相关专家得知,康山站枯水期水位监测由于条件限制,多由人工观测记录,因此导致康山站枯水期实测水位记录水位存在一定的误差。本文的验证结果显示模拟误差在一个较可接受范围内,表明所建立的鄱阳湖水动力模型较好地模拟了鄱阳湖的水情。

2.2 拟建枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性影响

根据 1.4 中的计算步骤,先利用 RS 与 GIS 技术计算枢纽兴建前的各个评价指标,再在 ArcGIS 平台上通过式(6)得到枢纽兴建前的适宜性;再利用二维水动力模型模拟的枢纽兴建后的水情结合枢纽兴建前的各个指标,通过式(6)得到枢纽兴建后的适宜性。根据此方法,依次分别计算各个水位下(6—9.8 m)鄱阳湖在有、无枢纽下的适宜性,最后得到最终结果如图 4 和表 3 所示。

枢纽运行前,鄱阳湖动态水位下食块茎鸟类生境类型变化较不明显。在星子水位为 6.25 m 时,食块茎鸟类适宜生境分布最为广泛,面积为 1455.18 km²,占研究区总面积的 48.39%,在各级自然保护区中均有分布,不适宜生境主要包括深水湖泊以及河流。当水位持续升高时,适宜生境分布范围有所减小,但是总体分布仍

表 2 模型验证结果

Table 2 Model verification results

站名 Site name	实测水位平均值/m Average value of measured water level/m	模拟水位平均值/m Average value of simulated water level/m	水位平均误差/m Average error of water level/m	N-S 系数 N-S coefficient
星子	11.90	12.10	0.20	0.990
唐荫	13.32	13.43	0.09	0.975
龙口	13.68	13.83	0.15	0.982
康山	13.87	14.27	0.40	0.898
都昌	12.25	12.45	0.20	0.992

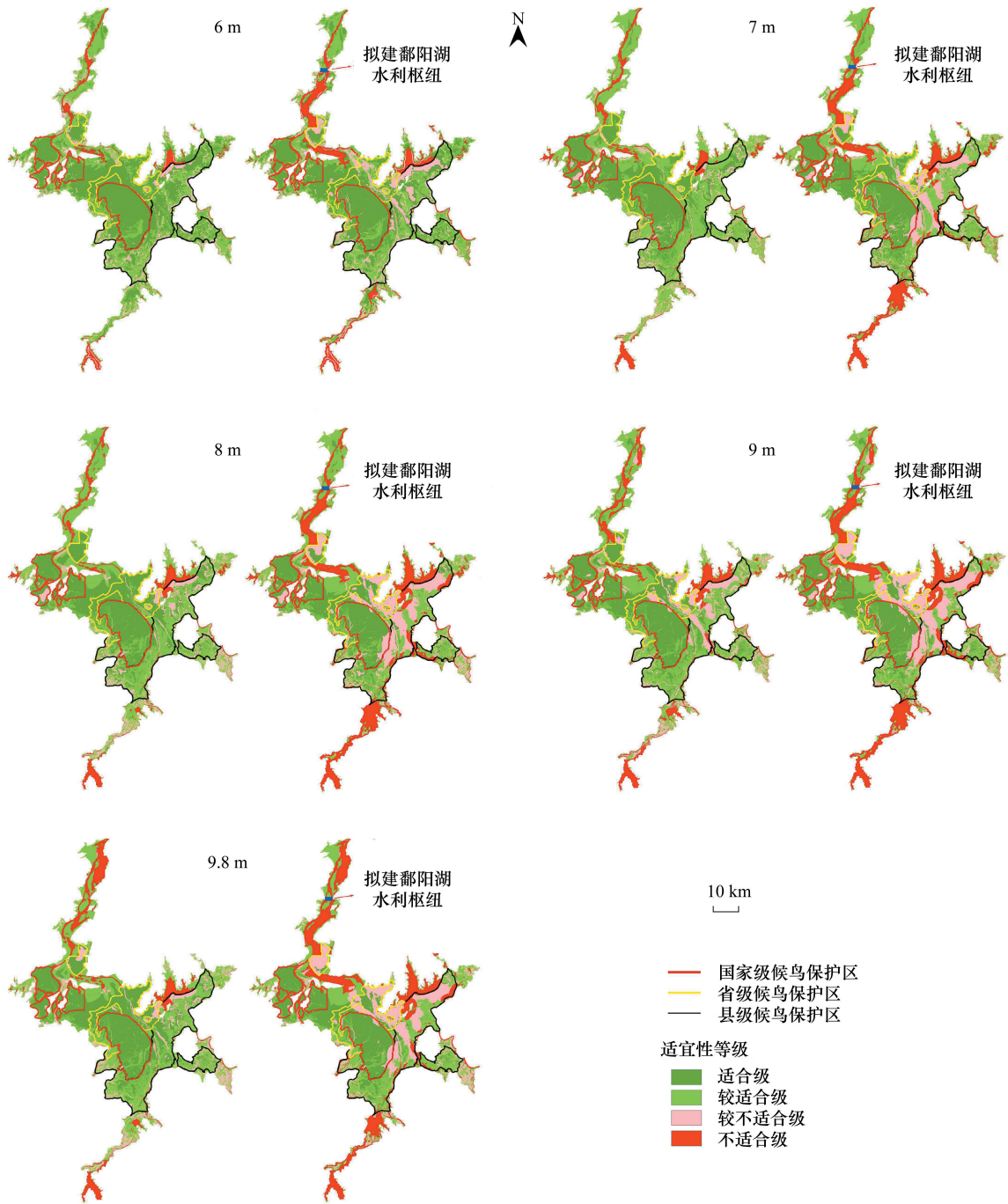


图 4 不同星子水位下,有、无拟建枢纽食块茎鸟类栖息地适宜性分布

Fig.4 The habitat suitability for Tuber-eating Birds with and without the Poyang Lake Hydraulic Project in different water levels

然集中在各级自然保护区当中。当水位达到 9.00 m 时,食块茎鸟类适宜生境面积减小为 999.62 km²,占研究区总面积的 33.24%,北部省级自然保护区出现了部分较不适宜的生境斑块。枢纽运行后,鄱阳湖动态水位下食块茎鸟类生境类型变化较明显。在星子水位为 6.25 m 时,食块茎鸟类适宜生境分布最为广泛,面积为 1183.83 km²,占研究区总面积的 39.37%,在各级自然保护区中均有分布,不适宜生境主要包括深水湖泊、河流以及枢纽选址处至都昌站区域。当星子水位持续升高,食块茎鸟类适宜生境分布持续减小,其水位上升至 8 m 左右时,县级和南部省级自然保护区出现了明显的较不适宜生境,当其水位上升至 9.8 m 时,食块茎鸟类适宜生境面积减小为 777.86 km²,占研究区总面积的 25.87%。

表 3 不同星子水位下,有、无拟建枢纽食块茎鸟类栖息地适宜性分布
Table 3 The habitat suitability for Tuber-eating Birds with and without the Poyang Lake

适宜性等级 Suitability level	6 m 无枢纽 6 m without the project		6 m 有枢纽 6 m with the project		7 m 无枢纽 7 m without the project		7 m 有枢纽 7 m with the project	
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion
适合级 Suitable level	1455.18	48.39	1183.83	39.37	1126.03	37.45	873.81	29.06
较适合级 Less suitable level	981.92	32.65	725.91	24.14	1265.94	42.10	1033.99	34.39
较不适合级 Less unsuitable level	414.19	13.77	719.31	23.92	372.55	12.39	522.94	17.39
不适合级 Unsuitable level	155.71	5.18	377.95	12.57	242.47	8.06	576.26	19.16
适宜性等级 Suitability level	8 m 无枢纽 8 m without the project		8 m 有枢纽 8 m with the project		9 m 无枢纽 9 m without the project		9 m 有枢纽 9 m with the project	
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion
适合级 Suitable level	1130.21	37.59	799.51	26.59	999.62	33.24	762.67	25.36
较适合级 Less suitable level	1157.57	38.50	897.20	29.84	1050.61	34.94	820.06	27.27
较不适合级 Less unsuitable level	465.58	15.48	671.72	22.34	565.25	18.80	722.69	24.03
不适合级 Unsuitable level	253.64	8.44	638.57	21.24	391.52	13.02	701.58	23.33
适宜性等级 Suitability level	9.8 m 无枢纽 9.8 m without the project		9.8 m 有枢纽 9.8 m with the project					
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion				
适合级 Suitable level	1095.72	36.44	777.86	25.87				
较适合级 Less suitable level	1109.03	36.88	883.05	29.37				
较不适合级 Less unsuitable level	474.36	15.78	694.06	23.08				
不适合级 Unsuitable level	327.88	10.90	652.03	21.68				

从表 3 结果可得,不同星子水位下,从有、无枢纽食块茎鸟类生境变化情况来看,随着星子水位的动态增加,适宜性在较不适合级增加的比例均集中在 5%—10%,适宜性在不适合级增加的比例集中在 7%—13%。由图 4 可知,当枢纽运行时,在枢纽选址处至都昌站附近不适合级区域显著增加,在县级自然保护区和省级自然保护区内的较不适合级区域显著增加,且随着水位的升高,这些区域的分布随之扩大,而国家级自然保护区内的适宜性受枢纽影响较小。因此,枢纽的运行对国家级自然保护区影响较小,对省级自然保护区和县级自然保护区影响较大,分析其原因:这些不适合级增加较多的区域均处于鄱阳湖主河道周边,枢纽的运行将不可

避免地抬高主河道的水位,使这些区域的水深增加,植被覆盖减小,从而达不到湖泊候鸟栖息所需要的条件,因此这些不适合级区域增加较大。据表 3 又可得,当星子水位处于 6—9.8 m 时,因枢纽的运行减少的鄱阳湖主湖区内适合食块茎鸟类栖息的面积(适宜性为适合级加较适合级)均集中在 500 km²左右。

3 讨论

鄱阳湖是典型的过水性吞吐型湖泊,水位呈现着明显的季节性变化^[24]。刘成林等^[1]把水陆过渡带以及其摆动地带作为候鸟栖息地,对鄱阳湖的水位变化对候鸟栖息地的影响进行了系统的观测和分析,发现水位越高鸟类的生存空间越小。每年九至十月,即鸟类越冬前期,此时由于大多数鸟类在迁徙途中且此时鄱阳湖水位较高,星子水位大约在 15 m 左右波动,适宜鸟类觅食的草洲尚未出露,浅水区的面积也相对较小,尚不能为已经到达的水鸟提供良好的觅食和栖息环境^[33],因此此时湖区食块茎鸟类较少,此时枢纽调度水位为 14—15 m,故枢纽对此时越冬的食块茎鸟类栖息影响不大。在十一月左右,星子水位下降至 10 m 左右时,碟形湖与主湖区没有直接的联系,形成孤立的水域,碟形湖周边更多的泥滩地外露,此内水陆过渡带面积越来越大,泥滩和草洲渐渐出露^[34],各种食块茎鸟类纷纷到此觅食和栖息,调控水位为 11—12 m。12 月—翌年 3 月份,星子水位逐步下降至 6 m 左右且各碟形湖水位也逐步下降^[40],此时,碟形湖内以苦草、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、马来眼子菜为代表的沉水植被带达到白鹤等食块茎鸟类的适宜觅食水深范围,大量鸟类集中觅食^[34],此时枢纽的调度水位由 10 m 逐步下降至 9.5 m。根据本文结果,在这段时间内,因枢纽运行而减少的适合和较适合食块茎鸟类栖息的面积均集中在 500 km²左右,这些区域主要分布在省级以及县级自然保护区。而在这段时间内的大部分时间,食块茎鸟类基本集中于碟形湖内栖息^[40-41],故此时枢纽对食块茎鸟类的栖息无较大影响。当时间至翌年 2 月份左右鸟类越冬后期时,随着食块茎鸟类的不断挖掘,碟形湖内食物减少,食块茎鸟类的觅食地点转移至主湖区的浅滩中^[34],此时枢纽将对食块茎鸟类栖息产生较大影响。

王鹏等^[8]认为枢纽对国家级候鸟自然保护区影响较小,郭恢财等^[9]认为枢纽将对省级自然保护区造成较大影响,保护区约 50% 的面积较受其严重的影响,这与本文的结果基本一致,但是根据本文结果,县级候鸟自然保护区也将受枢纽较大的影响。分析其原因:本文选取水动力模型的日期大多数与遥感影像的日期不一致,水动力模型选择的时刻多数处在鄱阳湖的涨水时段,与遥感影像的时刻相比,虽然星子水位一致,但是五河来水较多,而县级自然保护区距离五河入水口较近,因此结果放大了枢纽对县级自然保护区的影响。根据图 4 可得,北部的省级自然保护区受枢纽影响最大,当星子水位分别为:6、7、8、9、9.8 m 时,其将因枢纽的运行分别减小适合食块茎鸟类的栖息地面积为:18.01、26.49、33.80、39.80、32.79 km²。从湿地生态系统保护角度,枢纽如何控制湖区水位成为最为关键的问题^[42],由本文的结果来看,此水位调度方案虽对湖泊块茎鸟类越冬前期栖息产生的影响较小,但仍然会牺牲一部分越冬后期适合块茎鸟类栖息的区域,因此枢纽可执行动态调度方案,如:当湖泊内鸟类较多时加快湖泊的水位下降速度,以产生更加广阔适合候鸟栖息的区域,减小鸟类过多聚集时抢食造成的危害及传染病的风险。

近年来,由于全球气候变化与人类经济活动引发的江湖关系演变等共同影响,鄱阳湖枯水期延长,水环境与水资源承载力明显不足,已严重威胁到鄱阳湖湿地生态安全^[5]。食块茎鸟类主要以挖掘的方式觅食,枯水期延长导致的滩洲暴露时间过长会导致土壤变硬,从而阻碍食块茎鸟类觅食,而枢纽能改变水位的季节性变化,改善湿地土壤水分条件,提升湿地土壤水的深度、土壤含水量,从而对食块茎鸟类产生正面影响。另一方面,枢纽还可以增加湖泊水体容量,扩大食块茎鸟类的赖以生存的沉水植被(如:苦草等)的生长范围,从而增加食块茎鸟类的食物丰富度。

4 结论与展望

本文综合利用适宜性评估模型和水动力模型,分别进行了鄱阳湖在有、无拟建枢纽状态下的食块茎鸟类栖息地适宜性计算,通过比较鄱阳湖在有、无拟建枢纽状态下的食块茎鸟类栖息地适宜性,得出以下结论:

(1) 枢纽选址处至都昌站的食块茎鸟类栖息地适宜性受枢纽的负面影响最为显著, 各级自然保护区之中, 北部省级候鸟自然保护区受其负面影响最大, 此保护区将减少 18.01—39.80 km² 适合食块茎鸟类栖息的面积。但是枢纽的运行能增加湖泊土壤水含量, 使食块茎鸟类更易于觅食, 且能增加湖泊水体容量, 从而增加喜食块茎鸟类的食物丰富度。

(2) 枢纽的调度规则具有一定的科学性, 水位调度方案虽对湖泊越冬初期食块茎鸟类栖息产生的影响较小, 但会牺牲一部分越冬后期适合食块茎鸟类栖息的区域, 因此枢纽可执行动态调度方案, 如: 当碟形湖内鸟类转向主湖区觅食时加快湖泊的水位下降速度, 以产生更加广阔的适合候鸟栖息的区域, 减小鸟类过多聚集时抢食造成的危害及传染病的风险。

(3) 枢纽的运行将会使湖泊淹没要素发生改变, 从而影响湖泊内景观和植被覆盖, 本文方法并未对水域外的这些影响进行充分考虑, 因此本文研究具有一定的误差性, 而枢纽对湖泊内植被影响可成为今后研究重点。

参考文献 (References):

- [1] 刘成林, 谭胤静, 林联盛, 陶海南, 谭晦如. 鄱阳湖水位变化对候鸟栖息地的影响. 湖泊科学, 2011, 23(1): 129-135.
- [2] 朱琳, 赵英伟, 刘黎明. 鄱阳湖湿地生态系统功能评价及其利用保护对策. 水土保持学报, 2004, 18(2): 196-200.
- [3] 熊小英, 胡细英. 人工控湖对鄱阳湖区湿地生态的影响及对策研究. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 89-93.
- [4] Ye X C, Zhang Q, Liu J, Li X H, Xu C Y. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. Journal of Hydrology, 2013, 494: 83-95.
- [5] Liu Y B, Wu G P, Guo R F, Wan R R. Changing landscapes by damming: the Three Gorges Dam causes downstream lake shrinkage and severe droughts. Landscape Ecology, 2016, 31(8): 1883-1890.
- [6] 江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室. 为了“一湖清水”——鄱阳湖水利枢纽工程介绍. 江西水利科技, 2013, 39(2): 83-91.
- [7] Li J. Scientists line up against dam that would alter protected wetlands. Science, 2009, 326(5952): 508-509.
- [8] 郭恢财, 李琴, 胡斌华, 刘颖. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对自然保护区候鸟栖息地的影响. 环境科学与技术, 2016, 39(9): 181-186.
- [9] 王鹏, 赖格英, 黄小兰. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水位变化影响的模拟. 湖泊科学, 2014, 26(1): 29-36.
- [10] 赖格英, 王鹏, 黄小兰, 熊家庆, 刘影, 曾峰海. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟. 湖泊科学, 2015, 27(1): 128-140.
- [11] Li C L, Li H F, Zhang Y, Zha D D, Zhao B B, Yang S, Zhang B W, De Boer, W F. Predicting hydrological impacts of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project on habitat availability for wintering waterbirds at Caizi Lake. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109251.
- [12] Wang D, Zhang S H, Wang G L, Han Q Q, Huang G X, Wang H, Liu Y, Zhang Y P. Quantitative assessment of the influences of three gorges dam on the water level of Poyang lake, China. Water, 2019, 11(7): 1519.
- [13] Dong Z Y, Wang Z M, Liu D W, Li L, Ren C Y, Tang X G, Jia M M, Liu C Y. Assessment of habitat suitability for waterbirds in the West Songnen Plain, China, using remote sensing and GIS. Ecological Engineering, 2013, 55: 94-100.
- [14] 杨李, 董斌, 汪庆, 盛书薇, 韩文妍, 赵俊, 程明伟, 杨少文. 安徽升金湖国家级自然保护区水鸟生境适宜性变化. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1027-1034.
- [15] Tang X G, Li H P, Xu X B, Yang G S, Liu G H, Li X Y, Chen D Q. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in china's Poyang Lake region. Science of the Total Environment, 2016, 557-558: 296-306.
- [16] 董张玉, 刘殿伟, 王宗明, 任春颖, 张冷, 汤旭光, 贾明明, 丁智. 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价. 生态学报, 2014, 34(6): 1503-1511.
- [17] Shealer D A, Alexander M J. Use of aerial imagery to assess habitat suitability and predict site occupancy for a declining wetland-dependent bird. Wetlands Ecology and Management, 2013, 21(4): 289-296.
- [18] Van Schmidt N D, Barzen J A, Engels M J, Lacy A E. Refining reintroduction of whooping cranes with habitat use and suitability analysis. The Journal of Wildlife Management, 2014, 78(8): 1404-1414.
- [19] Yao S, Li X, Liu C, Zhang J, Li Y, Gan T, Liu B, Kuang W. New assessment indicator of habitat suitability for migratory bird in wetland based on hydrodynamic model and vegetation growth threshold. Ecological indicators, 2020, 117: 106556.
- [20] Craig MP. User' Manual for EFDC_Explorer: a pre/post Processor for the Environmental Fluid Dynamics Code. Knoxville: Dynamic Solutions-International, 2011.

- [21] Bilotta G, Cappello A, Hérault A, Del Negro C. Influence of topographic data uncertainties and model resolution on the numerical simulation of lava flows. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 112: 1-15.
- [22] Greco M, Di Cristo C, Iervolino M, Vacca A. Numerical simulation of mud-flows impacting structures. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(2): 364-382.
- [23] 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(02): 156-167.
- [24] 纪伟涛. 鄱阳湖——地形·水文·植被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [25] Li Y L, Yao J, Zhang L. Investigation into mixing in the shallow floodplain Poyang Lake (China) using hydrological, thermal and isotopic evidence. *Water Science & Technology*, 2016, 74(11): 2582-2598.
- [26] 胡春华, 施伟, 胡龙飞, 周文斌. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖区氮磷营养盐影响的模拟研究. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(6): 749-755.
- [27] 姚静, 李云良, 李梦凡, 张奇. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响. *湖泊科学*, 2017, 29(4): 955-964.
- [28] 姚斯洋, 刘成林, 魏博文, 陈良捷, 金戎, 程颖新. 基于 MikeFlood 的组合情景洪水风险分析. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 61-69.
- [29] 唐昌新, 张晓航, 邬年华, 黄志文, 邹文楠. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对水龄的影响模拟分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(3): 195-206.
- [30] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 越冬候鸟对鄱阳湖水文过程的响应. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1770-1779.
- [31] 张型东. 鄱阳湖生态系统空间结构与湿地功能分析及稳定性评价. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [32] 陈冰. 鄱阳湖不同水位情景下越冬水鸟种群数量变化及白鹤生境适宜性评价研究. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [33] 夏少霞, 于秀波, 范娜. 鄱阳湖越冬候鸟栖息地面积与水位变化的关系. *资源科学*, 2010, 32(11): 2072-2078.
- [34] 胡振鹏. 白鹤在鄱阳湖越冬生境特性及其对湖水位变化的响应. *江西科学*, 2012, 30(1): 30-35, 120-120.
- [35] 吴海峰, 金杰锋, Bathayar N, 李凤山, 丁长青. 鄱阳湖越冬白枕鹤活动区面积与水位和气温的关系. *动物学杂志*, 2018, 53(4): 497-506.
- [36] 陈凌娜, 董斌, 彭文娟, 高祥, 黄慧, 王成, 叶小康, 朱鸣, 吕典, 赵抗抗, 张双双, 倪燕华. 升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 556-563.
- [37] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 陈伏生, 李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 597-605.
- [38] 付波霖. 基于多源遥感的沼泽湿地水文边界界定方法研究. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [39] 王宇, 段永红, 白杰. 五台山风景区植被覆盖度近 25a 来的时空变化分析. *山西农业科学*, 2018, 46(5): 805-809.
- [40] 齐述华, 刘影, 于秀波, 廖富强. “玺秋湖”对鄱阳湖越冬候鸟栖息地功能影响的辨析. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(S1): 18-21.
- [41] 陈冰, 崔鹏, 刘观华, 李凤山, 伍旭东, 吴建东, 曾南京, 赵娜, 徐海根. 鄱阳湖国家级自然保护区食块茎鸟类种群数量与水位的关系. *湖泊科学*, 2014, 26(2): 243-252.
- [42] 葛刚, 纪伟涛, 刘成林, 熊舒, 吴志强. 鄱阳湖水利枢纽工程与湿地生态保护. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 606-613.