

三峡水库枯水期补水调度对洞庭湖越冬白鹤 (*Grus leucogeranus*) 摄食栖息地的影响*

戴凌全^{1,2,3**}, 王煜³, 汤正阳¹, 戴会超^{1,2}, 任玉峰¹, 常曼琪², 吴倩³, 毛劲乔⁴

(1: 中国长江三峡集团有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 宜昌 443133)

(2: 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038)

(3: 三峡大学三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 宜昌 443002)

(4: 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 摄食栖息地面积是反映越冬水鸟生存空间的直接指标, 三峡水库运行后洞庭湖枯水期水文节律出现新的变化, 给越冬水鸟摄食栖息地造成的影响尚不明确。为定量描述三峡水库枯水期不同出库流量对洞庭湖越冬水鸟摄食栖息地的影响, 以洞庭湖典型的珍稀越冬水鸟——白鹤 (*Grus leucogeranus*) 为指示性候鸟, 以白鹤摄食对栖息地水深需求作为关键生态因子, 建立白鹤摄食对水深需求的栖息地适宜度模型。构建涵盖长江干流、三口河系、洞庭湖及其四水尾间河段的江湖一体化耦合水动力模型, 实现栖息地水动力分布特征的精确模拟。在此基础上耦合栖息地适宜度模型和水动力模型, 建立了面向白鹤摄食对三峡水库出库流量需求的物理栖息地模型, 量化不同出库流量对应的白鹤摄食栖息地加权可利用面积, 定量分析水库运行对白鹤摄食栖息地面积的影响。结果表明: 1月中旬三峡水库不同出库流量下洞庭湖白鹤潜在摄食栖息地面积保持稳定并随出库流量的增加呈增大趋势, 维持在 101.40~121.84 km² 之间, 其中东洞庭湖摄食栖息地面积在 7.49~9.86 km² 之间, 南洞庭湖(含横岭湖)摄食栖息地面积在 47.37~60.34 km² 之间, 西洞庭湖摄食栖息地面积在 46.54~51.64 km² 之间。不同湖区摄食栖息地面积随着三峡水库出库流量的增加均呈增大的趋势, 说明三峡水库枯水期补水调度对于维持栖息地面积具有重要作用。较三峡水库运行前相比, 白鹤摄食栖息地面积最大增加 20.44 km², 对应的增幅为 20.16%。成果明晰了三峡水库运行对洞庭湖白鹤摄食栖息地面积的影响规律, 可为通过三峡水库补水调度改善洞庭湖越冬水鸟摄食栖息地生境提供理论基础。

关键词: 三峡水库; 洞庭湖; 白鹤; 摄食生境; 物理栖息地模型; 加权可利用面积

Impact of water supply of the Three Gorges Reservoir on the foraging habitat of *Grus leucogeranus* in Lake Dongting during the dry season*

Dai Lingquan^{1,2,3**}, Wang Yu³, Tang Zhengyang¹, Dai Huichao^{1,2}, Ren Yufeng¹, Chang Manqi², Wu Qian³ & Mao Jingqiao⁴

(1: Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, P.R.China)

(2: Yangtze River Eco-environmental Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P.R.China)

(3: Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(4: College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Foraging habitat area is the direct indicator of the living space of wintering waterbirds. After the operation of the Three

* 2021-10-28 收稿; 2021-11-04 收修改稿。

智慧长江与水电科学湖北省重点实验室开放研究基金项目 (ZH20020001)、国家自然科学基金青年基金项目 (51809150)、中国博士后基金特别资助项目 (2019T120119) 和中国博士后基金面上项目 (2020M670391) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: dai_lingquan@ctg.com.cn.

Gorges Reservoir (TGR), the hydrological regime of the Lake Dongting during the dry season has changed greatly. However, the impact of the impoundment on the foraging habitat area of wintering waterbirds is not clear. In order to quantitatively describe the impact of the TGR operation on the foraging habitat area of wintering waterbirds in Lake Dongting, the water depth requirement of the *Grus leucogeranus* foraging on the habitat is used as the key ecological factor to establish the water depth suitability model for foraging of the bird. The river-lake integrated hydrodynamic model was established covering the Yangtze River mainstream, Lake Dongting and its tributaries. We used the physical habitat simulation model (PHABSIM model) to quantify the weighted usable area (WUA) of the foraging habitat under different release from the TGR during the dry season, established the relationship between the release from the TGR and the WUA of the habitat, and quantitatively analyzed the influence of the TGR on the WUA. The results show that after the operation of the TGR in mid-January, the potential WUA of foraging habitat during the dry season of Lake Dongting was on the increase. The WUA ranges from 101.40 to 121.84 km², the WUA of eastern Lake Dongting is between 7.49–9.86 km², the WUA of southern Lake Dongting (including Lake Hengling) is between 47.37–60.34 km², and the WUA of western Lake Dongting is between 46.54–51.64 km². The WUA of each lake part gradually increased. Compared with the value before the impoundment of the TGR, the WUA of the foraging habitat of the *Grus leucogeranus* in Lake Dongting maximally increased by 20.44 km², an increase of 20.16%. The results clarify the influence of the TGR on the foraging habitat of *Grus leucogeranus*, and then could provide a theoretical basis for improving the foraging habitat of wintering waterbirds in Lake Dongting through an optimized reservoir operation.

Keywords: Three Gorges Reservoir (TGR); Lake Dongting; *Grus leucogeranus*; foraging habitat; physical habitat simulation model (PHABSIM model); weighted usable area (WUA)

洞庭湖处于东亚—澳大利西亚迁飞区上,广袤的湿地是越冬水鸟的理想栖息地,可为水鸟提供充足的食物资源以保证其生存的基本条件^[1-2]. 区域内水鸟具有种类多、数量大、珍稀濒危程度高等特点,目前已知越冬水鸟共有 7 目 12 科 53 种,其中国家一级保护鸟类 3 种,二级保护鸟类 4 种^[3]. 鹤类是洞庭湖区重要的濒危越冬水鸟,目前存在白鹤(*Grus leucogeranus*)、白头鹤(*G. monacha*)、白枕鹤(*G. vipio*)、灰鹤(*G. grus*)和蓑羽鹤(*G. virgo*)5 种鹤类. 对以沉水植物为主要食物来源的鹤类而言,湖泊水深是影响鹤类摄食可及性的决定性因子之一. 鹤类作为大型水禽,其摄食对水深变化非常敏感,高水深下鹤类的摄食范围、频率将有不同程度的降低,而过低水深条件下鹤类喜好的食物易枯死,且泥滩表面基质干燥也妨碍鹤类正常取食. 此外,水深变化节律直接影响到洲滩湿地淹没和出露日期及持续时间,对鹤类食物资源的产量和分布产生直接影响,进而对鹤类的数量和分布构成较大影响^[4]. 进入 21 世纪以来,受气候变化、水利工程运行、杨树(*Populus deltoides*)大面积种植等多重因素的影响,洞庭湖水文节律发生了明显变化^[5-9],枯水期湖泊水位下降、水域面积缩小、调蓄能力减弱,对越冬水鸟生境造成不利影响^[10-12],因此采取有效措施保障越冬水鸟水位需求已成为栖息地保护工作中的重点和难点问题^[13]. 维持洞庭湖适宜水位可采取工程方案和非工程方案,其中工程方案包括城陵矶建闸、三口建闸等^[14-15],但工程方案是否对洞庭湖生态产生不利影响,目前仍在论证阶段^[16-17]. 非工程方案包括保护区核心区杨树的清理,截止 2020 年底核心区杨树清理完毕,同时清理迹地的生态修复工作也正在逐步开展,主要包括封沟育洲、恢复洲滩植被、种植沉水植物等. 此外,随着三峡水库调度规程的逐步完善,通过水库优化调控对洞庭湖补水的非工程方案正受到各方的高度重视,然而由于三峡水库不同出库流量条件下洞庭湖珍稀水鸟摄食栖息地面积演变规律尚不明确,因此,量化三峡水库不同出库流量对水鸟摄食栖息生境的影响是开展补水调度的关键环节.

洞庭湖水鸟越冬栖息地主要分为两类:休息栖息地和摄食栖息地^[18],水鸟找到合适的生存环境时,不仅要考虑环境是否适合休息嬉戏,更要考虑能否方便的获得食物资源^[19]. 国内外学者对于休息栖息地开展了卓有成效的研究,多通过遥感解译获得不同水位下的生境面积,如关蕾等以卫星影像为基础,运用遥感技术解译洞庭湖内泥滩、草洲等水鸟休息栖息地分布状况^[20],周延等采用卫星图片提取东洞庭湖不同时期湿地景观格局数据,分析了鹤类种群动态与湿地景观格局之间的关联^[21],梁婕等在洞庭湖适宜生态水位的基础上,基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像数据分析了洞庭湖水体湿地和洲滩湿地的面积变化趋势^[22]. 洞庭湖湿地为越冬水鸟提供了丰富的食物和休息场所,从食性分析来看,鹤类的主要食物为沉水植物的冬芽,湖泊水深是鹤类摄食可及性的决定性因子之一^[23]. 栖息地面积可以反映生物平面生存空间,但无法表征不

同区域水深空间分布特征及获取食物的概率,因此在评判湖泊栖息地质量时,不仅要关注面积的大小,还应考虑不同生物对水深的需求^[24-26]. 相比于遥感解译的不足,考虑目标物种摄食对水深需求的物理栖息地模型(PHABSIM模型)可获得不同水文条件下大量的生境水动力特征数据,从而提高栖息地生境变化规律的确定性,但目前采用物理栖息地模型从水鸟摄食可及性所需的水动力条件角度确定洞庭湖候鸟栖息地面积方面的成果还较少.

本文以越冬白鹤重要的栖息地洞庭湖为研究区域,构建白鹤摄食水动力生境需求的物理栖息地模型,阐明三峡水库枯水期不同补水流量下洞庭湖白鹤摄食栖息地面积变化规律. 研究成果有助于更深入了解白鹤的摄食行为和水动力因子的关系,可为改善洞庭湖白鹤摄食栖息地的三峡水库枯水期补水调度方案的制定提供理论基础,进而为珍稀候鸟的保护和管理提供参考资料.

1 研究区域概况

洞庭湖属于季节性湖泊,4月水位开始上涨,7—8月达到最高,最大水域面积超过2500 km²,11月—次年3月为枯水期,最小水域面积不足500 km²,城陵矶站多年最大水位变幅达18.77 m^[27]. 当城陵矶水位降至28.0 m时,自西南向东北逐渐形成一个倾斜的水面,当城陵矶水位低于24.0 m时,洞庭湖形成西洞庭湖、南洞庭湖(包含横岭湖)、东洞庭湖3个不同的湖区^[28],研究区域如图1所示.

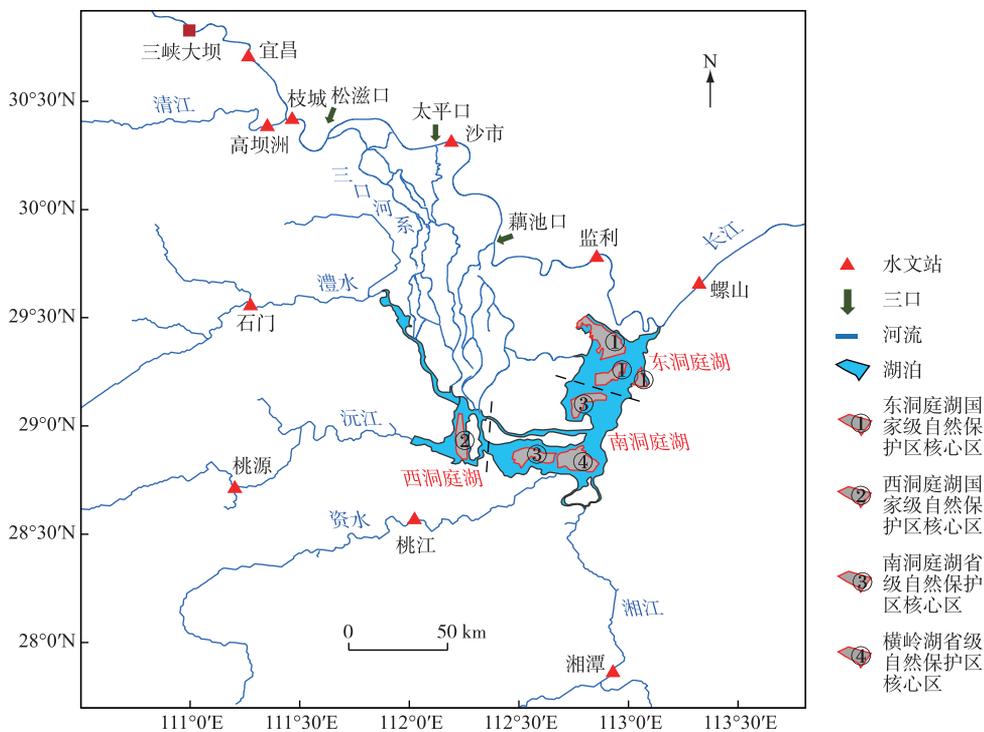


图1 洞庭湖位置及自然保护区核心区示意

Fig.1 Location of the Lake Dongting and core area of nature reserves

洞庭湖年内巨大的水位差异为洲滩湿地的发育提供了良好的水文条件,为越冬水鸟提供了丰富的食物来源,每年冬季有大量来自西伯利亚和蒙古等地的水鸟来此越冬^[29]. 为维持洞庭湖适宜的湿地面积,共建立了4个不同级别的自然保护区^[30]:东洞庭湖国家级自然保护区、西洞庭湖国家级自然保护区、南洞庭湖省级自然保护区和横岭湖省级自然保护区(图1),保护对象均以湿地生态系统和珍稀水禽为主,保护区基本情况如表1所示.

表1 洞庭湖自然保护区基本情况
Tab.1 Basic information of nature reserves in Lake Dongting

名称	级别	核心区面积/ hm ²	缓冲区面积/ hm ²	实验区面积/ hm ²	总面积/ hm ²	保护对象
东洞庭湖自然保护区	国家级	33286	32369	91972	157627	湿地生态系统及珍稀水禽
西洞庭湖自然保护区	国家级	9061	6165	14818	30044	湿地生态系统及黑鹳、白鹤等珍稀野生动植物
南洞庭湖自然保护区	省级	19714.68	23058.11	37352.49	80125.28	湿地生态系统及水禽
横岭湖自然保护区	省级	15000	12000	16000	43000	湿地生态系统及珍稀鸟类

2 材料与方法

2.1 物理栖息地模型

物理栖息地模型(physical habitat simulation model, PHABSIM 模型)分为水动力模型(hydrodynamic model)和栖息地模型(habitat model)两部分,水动力模型计算栖息地水位、水深及流速分布,栖息地模型将目标物种对栖息地的偏好性和生境因子之间的关系进行量化,根据不同流量下计算得到的水动力分布特征找出对应的栖息地生境适宜度指数(habitat suitability index, HSI),赋予各自权重后计算出可使用的栖息地面积.与其他方法相比,PHABSIM 模型考虑了生物本身对物理生境的要求,被认为是生态流量计算中最具科学依据的方法之一.具体步骤如下:

1)收集目标物种栖息时间、地点、数量以及对应的水动力条件;2)遴选关键生境因子,将栖息地适宜性指标与目标物种生境的水动力影响因子关联,量化目标物种对栖息地水动力因素的偏好程度,绘制目标物种水动力生境适宜性曲线;3)建立目标物种栖息地的水动力学模型,以不同流量为边界条件模拟目标物种栖息地水动力分布的空间特征;4)将目标物种生境适宜性曲线输入栖息地模型,得到影响因子的栖息地适宜度指数,结合水动力模型模拟的水动力分布特征计算栖息地的加权可利用面积,计算方法如下:

$$WUA = \sum_{i=1}^n HSI_i(H_i) \times A_i \quad (1)$$

式中, WUA 为目标物种的加权可利用面积, km^2 ; n 为网格单元的数量; HSI_i 是第 i 个网格单元的栖息地生境适宜度指数; H_i 是第 i 个网格单元水体的水深, m ; A_i 是第 i 个网格单元水域的面积, km^2 .

2.2 白鹤摄食生境适宜性曲线的构建

摄食生境适宜度曲线的构建采用栖息地模型,适宜度曲线以生境因子的数值为横坐标,以目标物种对此生境因子的适宜度为纵坐标,建立目标物种对生境因子的偏好与生境因子之间关系的连续曲线,定量描述物种在该条件下的生存质量.目标物种对生境因子的偏好设定在 0~1 之间,曲线峰值代表生物对该因子的最适宜值^[31].白鹤又名西伯利亚鹤(Siberian crane),全球数量仅有 3500~4000 只,已被世界自然保护联盟(IUCN)红色名录列为极濒等级.白鹤仅在西伯利亚靠近北极圈附近繁殖^[32],在长江中下游及以南地区越冬,其中在中国越冬的白鹤数量约占全球的 90%^[6,33],长江中下游地区的通江湖泊鄱阳湖是白鹤主要的越冬栖息地,而洞庭湖也是白鹤重要的栖息地之一^[34-35].根据自然保护区管理局、公开权威报道及已有文献数据统计^[36],每年在洞庭湖均能发现不同数量的白鹤(表 2),根据对白鹤出现时间的统计,白鹤越冬时间为 10 月一次年 4 月,一般在 1 月中旬达到峰值,因此研究时间集中在 1 月中旬.

白鹤摄食栖息地选择与水深、食物数量密切相关,其中水深不但决定摄食栖息地是否可以被白鹤利用,还能影响白鹤的取食行为和取食能耗,因此选择水深作为白鹤摄食的关键水动力因子.根据对白鹤食性的观察和分析,沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)的冬芽是白鹤越冬的主要食物来源.苦草隶属于沉水植物的水鳖科,是多年生、莲座型沉水草本植物.苦草是洞庭湖湿地分布范围最广、面积最大的典型沉水植物种类之一,主要分布在浅水洼地^[37].白鹤取食时通过喙部高频率挖掘底泥寻觅冬芽,对于基质干燥的区域,白鹤需消耗太多体力或无法取食.根据白鹤身体各部位的平均长度和取食时喙、头、颈没入水中的比例估算白鹤

表 2 洞庭湖 2006—2020 年白鹤数量变化及分布
Tab.2 Distribution and number of *Grus leucogeranus*
in Lake Dongting from 2006 to 2020

时间/ 年	白鹤 数量/只	分布区域
2006	17	东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖
2007	22	东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖
2008	39	东洞庭湖、西洞庭湖
2009	78	东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖
2010	86	东洞庭湖、西洞庭湖
2011	41	西洞庭湖
2012	57	东洞庭湖、西洞庭湖
2013	69	东洞庭湖、西洞庭湖
2014	45	东洞庭湖、西洞庭湖
2015	50	西洞庭湖
2016	76	南洞庭湖
2017	64	东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖
2018	119	西洞庭湖、南洞庭湖和横岭湖
2019	61	东洞庭湖、西洞庭湖
2020	47	东洞庭湖、西洞庭湖

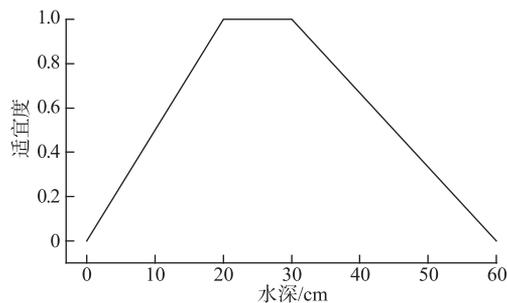


图 2 洞庭湖白鹤摄食水深—适宜度曲线

Fig.2 Foraging water depth-suitability curve of
the *Grus leucogeranus* in Lake Dongting

水文站点日平均流量过程(图 4),下游边界条件采用 2010—2020 年螺山站水位—流量关系曲线(图 5)。因此只需给定三峡水库下泄流量、清江流量、四水流量即可计算出整个区域内部的水位、流量、流速等水动力参数的时空变化过程。综合考虑模型稳定性及计算效率等因素,设定一维模型时间步长为 10 s,二维模型最大计算步长为 5 s,最小计算步长为 0.1 s,步长可根据流量与地形条件自动调整。

模型的主要参数为曼宁糙率系数,糙率是水动力学模型最重要且较为敏感的计算参数,反映了河湖底部及岸坡、湖区地表影响水流阻力的综合系数。以长江干流及洞庭湖主要站点水位为特征值率定模型,长江干流选取宜昌、枝城、沙市、监利为率定点,洞庭湖选取城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀为率定点(图 3)。主要水文站点水位率定结果如图 6 所示,从图可以看出各站点水位计算结果与实测水位基本一致,一维模型计算的长江干流 4 个水文站的水位模拟结果与实测水位吻合较好,计算值与实测值的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为 0.18 m,最大绝对误差为 0.29 m,相对误差(relative error, RE)不超过 5.0%。洞庭湖出口城陵矶站和西洞庭湖南咀站模拟效果较好,而东洞庭湖鹿角站、南洞庭湖杨柳潭站模拟效果略差,分析其

取食适宜的水深是 20~30 cm,当水深超过 30 cm 时取食效率与水深呈反比,当水深超过 60 cm 时白鹤发现食物非常困难且无法落脚^[24],根据白鹤摄食水动力条件^[38-39],制定洞庭湖白鹤摄食的水深适宜度曲线(图 2)。

2.3 白鹤栖息地水动力模型的构建与验证

为分析白鹤栖息地水动力分布特征,基于 MIKE Flood 构建了涵盖长江干流、三口河系、洞庭湖及其四水尾间河段的江湖一体化耦合水动力模型。长江干流、三口河系、四水尾间河段采用一维模型,洞庭湖及江湖交汇区采用二维模型,长江干流河段 5~10 km 布设一个断面,三口河系及四水尾间河段平均 10 km 布设一个断面。根据洞庭湖历史水文资料确定湖区最高水位淹没边界,据此设定二维模型的计算范围。根据边界和地形数据划分网格,洞庭湖枯水期呈现明显的“河相”,水流只在河道深槽中流动,大部分洲滩湿地显露^[40],为了精确反映洞庭湖特殊的地形,提高模型的精度,二维模型采用非结构不规则的三角形网格对湖区进行网格划分,网格大小根据地形的空间分布等确定,对湖区主河槽网格进行加密。地形边界采用长江干流、三口、四水尾间河道地形(2018 年)和洞庭湖 1:5000 实测水下地形(2011 年),洞庭湖地形及网格划分示意图如图 3 所示,可见模型所用网格清晰地描述了河槽(蓝色)、滩地(浅黄色)、岛屿(红色)等地形的变化。根据上述原则并兼顾计算时间,网格按最大面积不超过 0.1 km²生成,最终生成网格数量 49164 个,节点数量 27189 个。

由于研究时段集中在枯水期 1 月份,因此采用 2020 年 1 月 1 日—31 日实测的长江干流及洞庭湖水位数据对水动力模型的参数进行率定和验证。模型边界包括水文边界和地形边界,其中水文边界包括三峡水库出库流量、清江流量(高坝洲站)、四水入湖控制站流量(湘潭、桃江、桃源和石龟山),上游边界采用各

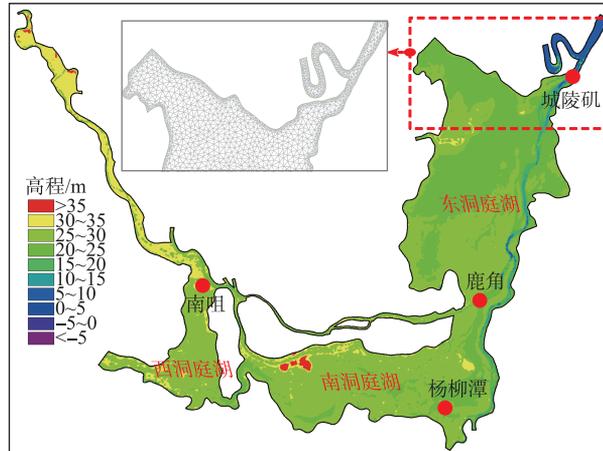


图3 洞庭湖地形及网格划分示意图

Fig.3 Topography of the Lake Dongting and mesh generation

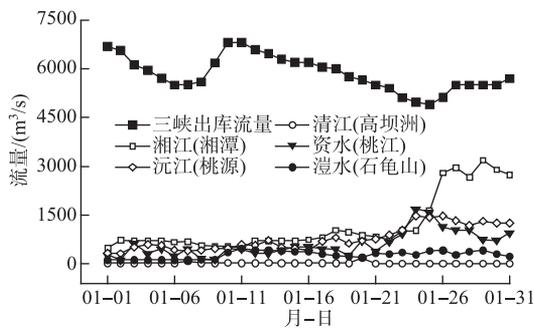


图4 上游边界流量过程

Fig.4 Discharge at upstream boundaries

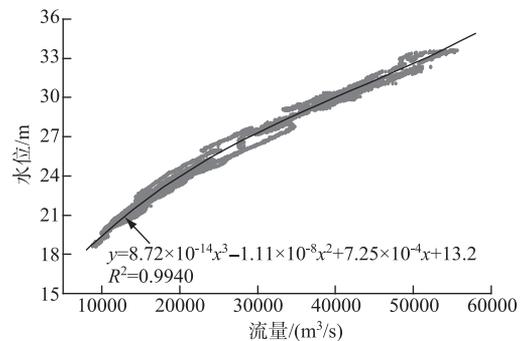


图5 螺山站水位-流量关系曲线

Fig.5 Relationship between the water level and discharge at Luoshan station

原因是城陵矶水位受长江干流水位影响明显,干流流量在枯水期保持稳定,南咀站水位主要受澧水及三口之一的松滋河影响,在枯水期流量较小且稳定,而洞庭湖内部站点受四水影响更为复杂,因此离干流较远的鹿角站和杨柳潭站模拟效果相对较差,但相对误差也控制在8.0%以内.总体来看所建立的水动力模型的计算误差均在可接受范围内,满足计算要求.通过率定和验证,河道糙率取值在0.023~0.029之间,湖底糙率在0.029~0.041之间.

3 结果与讨论

根据《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019年修订版)规定:1月三峡水库增大下泄流量,水库水位从正常蓄水位175 m开始下降,6月上旬降至防洪汛限水位145 m.为分析三峡水库不同出库流量对洞庭湖水位及白鹤摄食栖息地的影响,分别计算水库蓄水前后不同代表性出库流量条件下的栖息地加权可利用面积.根据1988—2002年三峡水库蓄水前宜昌站1月中旬流量统计:最小流量为3740 m³/s(1997年),最大流量为5280 m³/s(2001年),平均流量为4300 m³/s.2010年三峡水库首次蓄水至正常蓄水位175 m,根据2011—2020年出库流量统计,1月中旬出库流量最小值为5960 m³/s(2015年),最大值为9227.5 m³/s(2019年),平均出库流量为7000 m³/s,据此设定三峡水库运行后可能出库流量范围为5500~

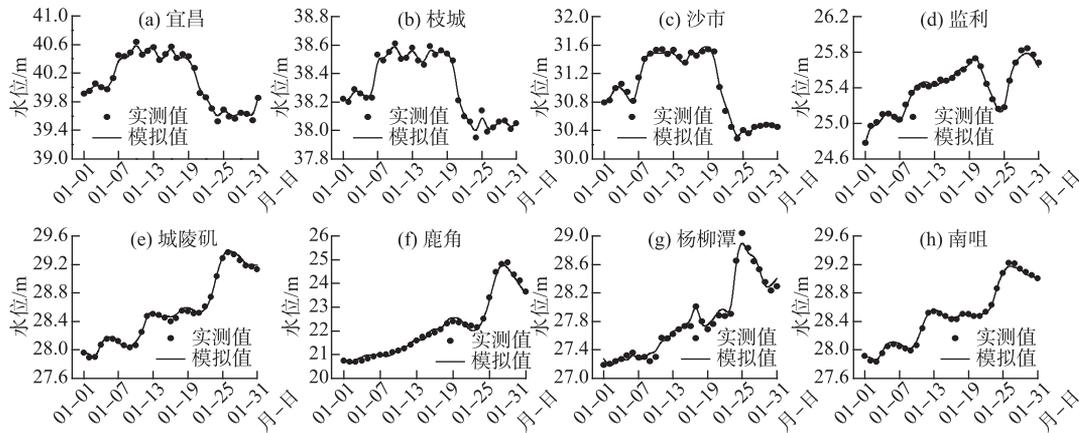


图6 长江干流及洞庭湖水文站点实测水位与计算水位对比

Fig.6 Comparison of observed and simulated water level on the mainstream of Yangze River and Lake Dongting

9500 m³/s,并以 500 m³/s 为流量间隔作为模拟出库流量. 根据 1988—2002 年清江及四水 1 月中旬流量统计,清江、湘江、资水、沅江、澧水 1 月中旬最小流量分别为 37.52、636.14、188.74、520.53、158.92 m³/s,平均流量分别为 77.18、1000.80、446.40、754.60、228.50 m³/s,最大流量分别为 95.42、1630.15、786.57、1213.62、295.97 m³/s. 取 3 种典型工况进行对比展示:(1)长江干流宜昌站流量为 3740 m³/s,代表三峡水库运行前 1 月中旬最小出库流量,对应的清江及四水流量取 1 月中旬最小流量;(2)长江干流宜昌站流量为 5280 m³/s,代表三峡水库运行前 1 月中旬最大出库流量以及三峡水库运行后 1 月中旬最小出库流量,对应的清江及四水流量取 1 月中旬同频率流量;(3)三峡水库出库流量为 9500 m³/s,代表三峡水库运行后 1 月中旬最大出库流量,对应的清江及四水流量取 1 月中旬最大流量.

3.1 三峡水库不同出库流量下洞庭湖水水位空间分布格局

三峡水库不同典型工况出库流量下洞庭湖水位的空间分布如图 7 所示,当水库出库流量为 3740 m³/s 时,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀的水位分别为 20.31、21.63、27.43、31.58 m. 当水库出库流量为 5280 m³/s 时,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀的水位分别为 20.64、22.26、27.64、31.28 m. 当出库流量为 9500 m³/s 时,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀的水位分别为 21.64、22.46、27.94、31.67 m. 从水位增幅的空间分布来看,三峡水库运行后增加下泄流量对洞庭湖水位的提高主要集中在东洞庭湖北部,城陵矶水位最大提高 1.33 m,而鹿角、杨柳潭、南咀水位最大分别提高 0.83、0.51、0.39m. 由此可见,枯水期 1 月中旬三峡水库增加出库流量时,洞庭湖水水位比水库运行前有所升高,但受洞庭湖西高东低地形的影响,水库增加出库流量对东洞庭湖北部的水位提升起到明显的作用,而对于南洞庭湖杨柳潭站和西洞庭湖的南咀站作用较小,因此可以认为三峡水库枯水期增加下泄流量对于维持东洞庭湖水水位作用明显,但对南洞庭湖和西洞庭湖而言作用有限.

3.2 洞庭湖水深变化对白鹤摄食栖息地适宜度指数的影响

图 8 显示了三峡水库不同典型出库流量下洞庭湖白鹤摄食栖息地适宜度指数空间分布特征,其中颜色越接近于红色表示适宜度越大,越接近蓝色表示适宜度越小. 三峡水库运行前长江宜昌站流量为 3740 m³/s,洞庭湖白鹤摄食栖息地平均水深为 1.03 m,不同区域的平均适宜度指数为 0.034;当水库出库流量为 5280 m³/s 时,摄食栖息地平均水深为 1.21 m,不同区域的适宜度指数较小,平均值为 0.040;当出库流量为 9500 m³/s 时,栖息地平均水深为 1.50 m,水深适宜度指数平均值达到 0.043. 从空间分布来看,适宜度指数较高的区域主要分布在南洞庭湖南部和西洞庭湖南部,此区域地势平坦,形成了大面积的浅水区域,而东洞庭湖在枯水期呈“河相”,水流只在河槽中流动,水深增加对栖息地适宜度指数影响较小.

3.3 三峡水库不同出库流量对白鹤摄食栖息地面积的影响

适宜度指数直接影响白鹤摄食栖息地加权可利用面积的大小,基于构建的 PHABSIM 模型得到不同出

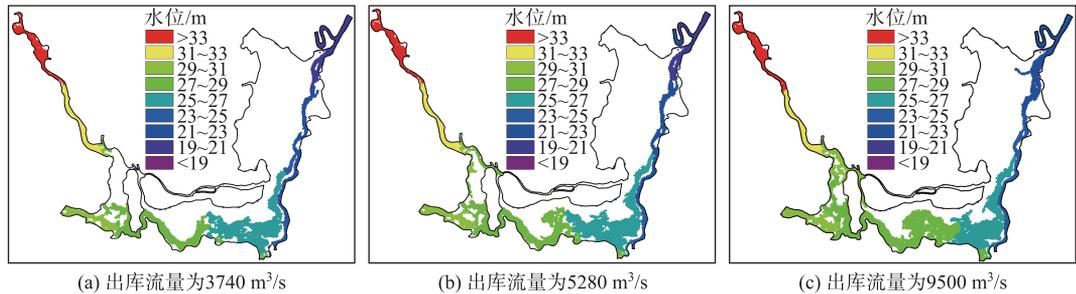


图7 三峡水库不同典型出库流量下洞庭湖水水位空间分布

Fig.7 Spatial distribution of water level in Lake Dongting under typical outflows from the TGR

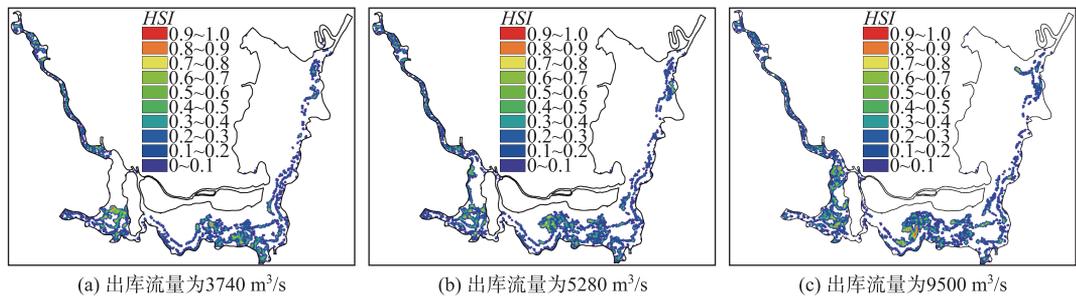


图8 三峡水库不同典型出库流量下洞庭湖适宜度指数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of *HSI* in Lake Dongting under typical outflows from the TGR

库流量对应的洞庭湖白鹤摄食栖息地加权可利用面积如图9所示。由图可知三峡水库运行后出库流量由小变大的过程中,洞庭湖白鹤摄食栖息地的加权可利用面积总体呈现缓慢增大的趋势。三峡水库出库流量为 $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地加权可利用面积 101.40 km^2 ;三峡水库出库流量为 $5280 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地加权可利用面积 113.44 km^2 ;当出库流量在 $6000 \sim 9500 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间时,加权可利用面积逐步增大;出库流量为 $9500 \text{ m}^3/\text{s}$,加权可利用面积为 121.84 km^2 。由此可见三峡水库运行后洞庭湖白鹤摄食栖息地面积最大增加 20.44 km^2 ,对应的增幅为 20.16% ,说明水库运行后洞庭湖枯水期白鹤潜在的摄食栖息地适宜生境面积随着三峡水库出库流量的增加呈增大的趋势,从而印证了三峡水库补水调度的积极作用。

洞庭湖不同湖区摄食栖息地加权可利用面积对三峡水库出库流量的响应关系如图10所示,不同湖区加权可利用面积总体保持相对稳定并呈逐步增大的趋势。三峡水库蓄水前当长江宜昌站流量为 $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,东洞庭湖摄食栖息地加权可利用面积仅为 7.49 km^2 ,当三峡水库出库流量为 $5280 \text{ m}^3/\text{s}$,摄食栖息地加权可利用面积持续增大,达到 9.28 km^2 ,随着出库流量的继续增大,加权可利用面积逐步增大,当流量为 $9500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,加权可利用面积达到 9.86 km^2 。对于南洞庭湖(含横岭湖),加权可利用面积变化趋势与东洞庭湖一致,当流量为 $3740 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,南洞庭湖白鹤摄食栖息地加权可利用面积为 47.37 km^2 ,当出库流量为 $9500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地加权可利用面积达到最大,为 60.34 km^2 。西洞庭主要由沅江、澧水及三口河系的松滋河汇聚而成,随着三峡水库出库流量的增加,松滋口分流量增加幅度较小,根据水动力模型计算结果:出库流

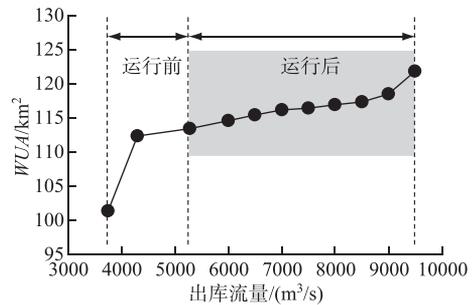


图9 三峡水库出库流量与栖息地加权可利用面积的关系

Fig.9 Relationship between the outflows from the TGR and the *WUA*

量由 $5280 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $9500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 松滋河分流量增加 $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 达到 $63.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 白鹤摄食所需的加权可利用面积呈缓慢增大的趋势. 由图 10 也可看出, 洞庭湖白鹤摄食栖息地加权可利用面积主要分布在南洞庭湖和西洞庭湖, 两者之和占总面积的 90% 以上, 从白鹤数量分布来看, 主要分布在南洞庭湖和西洞庭湖湿地, 也正说明广袤的浅水区域为白鹤摄食提供了良好的条件.

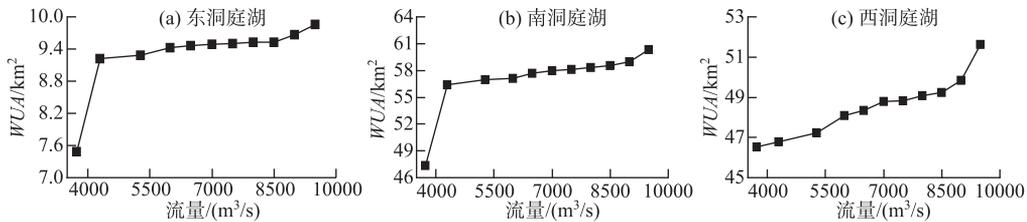


图 10 洞庭湖不同湖区白鹤摄食栖息地面积变化趋势

Fig.10 Changes in foraging habitat of *Grus leucogeranus* in different lake areas of Lake Dongting

4 结论

本文以洞庭湖珍稀越冬水鸟——白鹤作为指示性候鸟, 以水深作为白鹤摄食的关键生境因子, 构建针对洞庭湖枯水期越冬白鹤摄食的物理栖息地模型, 对三峡水库运行前后不同出库流量条件下洞庭湖枯水期白鹤潜在生境面积变化进行模拟.

1) 三峡水库运行后 1 月中旬出库流量范围在 $5280 \sim 9500 \text{ m}^3/\text{s}$, 洞庭湖城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀水位最大提高分别为 1.33、0.83、0.51、0.39 m, 说明三峡水库增加出库流量对洞庭湖水位的影响主要集中在东洞庭湖北部, 对其它湖区影响相对较小.

2) 三峡水库出库流量由小变大的过程中, 白鹤摄食栖息地的加权可利用面积总体呈现逐步增大的趋势, 栖息地面积维持在 $101.40 \sim 121.84 \text{ km}^2$ 之间, 最大值与最小值差值为 20.44 km^2 , 对应的增幅为 20.16%.

3) 不同湖区加权可利用面积随着三峡出库流量的增加均呈逐渐增大的趋势, 洞庭湖白鹤摄食栖息地主要分布在南洞庭湖和西洞庭湖, 两者之和占总面积的 90% 以上.

维持洞庭湖枯水期适宜水位的措施除了三峡水库补水调度外, 还应在杨树清理工作完成后持续开展湿地生态恢复. 此外, 白鹤在数量还受历史栖息地选择、忠诚度、食物资源、人类干扰、湖床底质等多种因素共同影响, 水深仅是白鹤摄食栖息地的限制性生境因子之一, 后续的研究将沿着“水文、气候等胁迫—栖息地生境(食物、摄食可及性)—水鸟数量及分布”这一思路, 构建多种关键生境因子共同作用下的栖息地模型, 详细全面评估栖息地质量的演变特征, 可为通过三峡水库生态补水调度改善白鹤等更多洞庭湖越冬水鸟的栖息地生境提供重要的科学依据.

5 参考文献

- [1] Chen LG, Chen LM, Jia JW *et al.* Quantitative effects of water level variation on the habitat area of wintering waterfowl in dry season of the Poyang Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(12): 1502-1509. [陈炼钢, 陈黎明, 贾建伟等. 鄱阳湖枯季水位变化对越冬水鸟生境面积的定量影响. 水利学报, 2019, **50**(12): 1502-1509.]
- [2] Duan YB, Tian XH, Ma JZ *et al.* Foraging habitat use of the oriental white stork during its breeding season. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(8): 2628-2634. DOI: 10.5846/stxb201308052025. [段玉宝, 田秀华, 马建章等. 黄河三角洲东方白鹤繁殖期觅食栖息地的利用. 生态学报, 2015, **35**(8): 2628-2634.]
- [3] Liu XK. There were 288157 wintering waterbirds in Lake Dongting. *Forestry and Ecology*, 2021, (2): 48. [刘向葵. 洞庭湖越冬水鸟达 288157 只. 林业与生态, 2021, (2): 48.]
- [4] Yuan LY, Li W. Effects of water depths and substrate types on the distribution in winter buds of *Vallisneria spinulosa* in Poyang Lake. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2008, **5**(1): 55-58, 100. [袁龙义, 李伟. 水深和基质对鄱阳湖刺苦草冬芽分布的影响. 长江大学学报: 自然科学版, 2008, **5**(1): 55-58, 100.]
- [5] Li YY, Yang GS, Wan RR *et al.* Change characteristics of water exchange between the Yangtze River and the Lake

- Dongting during 1960–2018 in China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, **18**(2): 3177-3193. DOI: 10.15666/aeer/1802_31773193.
- [6] Xia SX, Wang YY, Lei G *et al.* Restriction of herbivorous waterbird distributions in the middle and Lower Yangtze River floodplain in view of hydrological isolation. *Wetlands*, 2017, **37**(1): 79-88. DOI: 10.1007/s13157-016-0841-9.
- [7] Dai X, Yang GS, Wan RR *et al.* The effect of the Changjiang River on water regimes of its tributary Lake East Dongting. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(8): 1072-1084. DOI: 10.1007/s11442-018-1542-5.
- [8] Zhang DD, Dai ML, Xu GH *et al.* Research on change of the outflow of Dongting Lake during the refill period of the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(5): 613-622. [张冬冬, 戴明龙, 徐高洪等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化. 水科学进展, 2019, **30**(5): 613-622.]
- [9] Wang YJ, Li JB, Li YN *et al.* The evolution of water level in Three Outlets of the Southern Jingjiang River and its response to water exchange in the Dongting Lake. *Geographical Research*, 2019, **38**(9): 2302-2313. [汪雁佳, 李景保, 李雅妮等. 长江荆南三口河系水位演变规律及对江湖水量交换关系的响应. 地理研究, 2019, **38**(9): 2302-2313.]
- [10] Gao Y, Xie YH, Zou DS. Hydrological regime change and its ecological responses in East Lake Dongting, China. *Ecology & Hydrobiology*, 2020, **20**(1): 142-150. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.07.003.
- [11] Cheng JX, Xu LG, Wang XL *et al.* Assessment of hydrologic alteration induced by the Three Gorges Dam in Lake Dongting, China. *River Research and Applications*, 2018, **34**(7): 686-696.
- [12] Dai ML, Wang J, Zhang MB *et al.* Impact of the Three Gorges Project operation on the water exchange between Lake Dongting and the Yangtze River. *International Journal of Sediment Research*, 2017, **32**(4): 506-514.
- [13] Yang B, Liao DX, Li JB *et al.* Relationship between water level and wetland ecosystem health state in east Lake Dongting. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(8): 1145-1152.
- [14] Xiang F, Shi Y, Jin Q *et al.* Comparison and analysis of operation schemes for Dongting Lake hydroproject. *Hydro-Science and Engineering*, 2018, (2): 19-25. [向锋, 施勇, 金秋等. 洞庭湖枢纽调度方案比对分析. 水利水运工程学报, 2018, (2): 19-25.]
- [15] Niu XQ. Integrated management strategies for Dongting Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, **35**(1): 1-7. DOI: 10.11660/slfdbx.20160101. [钮新强. 洞庭湖综合治理方案探讨. 水力发电学报, 2016, **35**(1): 1-7.]
- [16] Xie P. Ecological impacts of Three Gorges Dam on Lakes Dongting and Poyang. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(10): 1607-1618. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201710013. [谢平. 三峡工程对两湖的生态影响. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(10): 1607-1618.]
- [17] Huang C, Chen YH, Li ZW *et al.* Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(5): 661-672. [黄草, 陈叶华, 李志威等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化. 水科学进展, 2019, **30**(5): 661-672.]
- [18] Zhang XC, Jin BS, Chen JK *et al.* Relationship between habitat use of four waterbird species and water depth and food resource in Poyang Lake. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, **49**(5): 657-665. DOI: 10.13859/j.cjz.201405004. [张笑辰, 金斌松, 陈家宽等. 鄱阳湖四种水鸟的栖息地利用与水深和食物的关系. 动物学杂志, 2014, **49**(5): 657-665.]
- [19] Guan L, Lei JL, Zuo AJ *et al.* Optimizing the timing of water level recession for conservation of wintering geese in Lake Dongting, China. *Ecological Engineering*, 2016, **88**: 90-98. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.009.
- [20] Guan L, Jing L, Lei JL *et al.* Distribution of wintering waterbirds and assessment of their habitat in Dongting Lake, China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, **38**(7): 64-70. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150279. [关蕾, 靖磊, 雷佳琳等. 洞庭湖鸟类资源分布及其栖息地质量评估. 北京林业大学学报, 2016, **38**(7): 64-70.]
- [21] Zhou Y, Jing L, Jia YF *et al.* Population dynamics of four endangered cranes and landscape patterns of habitats in the East Dongting Lake during recent 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1415-1423. DOI: 10.18307/2019.0515. [周延, 靖磊, 贾亦飞等. 东洞庭湖 4 种濒危鹤类近 30 年种群动态及栖息地景观格局变化. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1415-1423.]
- [22] Liang J, Cai Q, Guo SL *et al.* MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(21): 6628-6635. DOI: 10.5846/stxb201110041448. [梁婕, 蔡青, 郭生练等. 基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应. 生态学报, 2012, **32**(21): 6628-6635.]
- [23] Liu P, Sun ZY, Liu MJ *et al.* Research status and progress in stopover and wintering ecology of *Grus leucogeranus*. *Chinese Journal of Wildlife*, 2020, **41**(3): 826-830. [刘鹏, 孙志勇, 刘美娟等. 白鹤停歇与越冬生态学研究现状及展望. 野生动物学报, 2020, **41**(3): 826-830.]
- [24] Wu JD, Li FS, Burnham J. Numerical distribution of Siberian cranes and their relation to food and water depth in Sha hu at Poyang Lake, China. *Wetland Science*, 2013, **11**(3): 305-312. [吴建东, 李凤山, Burnham J. 鄱阳湖沙湖越冬白鹤

- 的数量分布及其与食物和水深的关系. 湿地科学, 2013, 11(3): 305-312.]
- [25] Li L, Zhang XC, Qin HM *et al.* Effects of tuber-feeding waterbird guild and water level fluctuation on tuber distribution of submerged macrophytes in Shahu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 661-669. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0091. [黎磊, 张笑辰, 秦海明等. 食块茎水鸟及水位对沙湖沉水植物冬芽分布的影响. 生态学杂志, 2015, 34(3): 661-669.]
- [26] Chen LG, Chen LM, Xu YF *et al.* Ecological water level for proposed hydraulic construction locking Lake Poyang based up on wintering waterfowls habitat modelling. *J Lake Sci*, 2020, 32(5): 1519-1528. DOI:10.18307/2020.0523. [陈炼钢, 陈黎明, 徐伟凡等. 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.]
- [27] Wang CM, Zhang Y, Tian Q *et al.* Dynamics of taxonomic and functional community structure in macrozoobenthos and the underlying driving factors in Lake Dongting during 1988 and 2016. *J Lake Sci*, 2021, 33(1): 218-231. DOI: 10.18307/2021.0112. [王丑明, 张屹, 田琪等. 1988—2016年洞庭湖大型底栖动物群落变化及驱动因素分析. 湖泊科学, 2021, 33(1): 218-231.]
- [28] Sun ZH, Li Q, Yan X *et al.* Analysis of the critical relationship between the water levels of Dongting Lake and Chenglingji station. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 496-506. [孙昭华, 李奇, 严鑫等. 洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析. 水科学进展, 2017, 28(4): 496-506.]
- [29] Zhang Y, Wang CM, Shi HH *et al.* Macrobenthic community succession during last thirty years in Dongting Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1348-1353. [张屹, 王丑明, 石慧华等. 洞庭湖近30年大型底栖动物的群落演变. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1348-1353.]
- [30] Wang R, Wu XF, Zhou XF. A management strategy for Dongting Lake wetland regarding ecological security. *Wetland Science & Management*, 2017, 13(4): 12-16. [王蓉, 吴晓芙, 周训芳. 基于生态安全的洞庭湖湿地管理策略. 湿地科学与管理, 2017, 13(4): 12-16.]
- [31] Liao CC, Mao Q, Shi HL *et al.* Study on habitat suitability evaluation for wetland birds in Dianchi Lake wetland. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2021, 41(1): 78-84. [廖辰灿, 毛茜, 史惠灵等. 滇池湖滨区湿地鸟类栖息地适宜性评价研究. 西南林业大学学报: 自然科学, 2021, 41(1): 78-84.]
- [32] Mudrik EA, Kashentseva TA, Politov DV. Long-term sperm storage in the Siberian crane (*Grus leucogeranus* Pallas): Analysis of paternity and relatedness under artificial insemination. *Russian Journal of Developmental Biology*, 2016, 47(3): 103-108. DOI: 10.1134/s106236041603005x.
- [33] Wen D, Hu YM, Xiong ZP *et al.* Potential suitable habitat distribution and conservation strategy for the Siberian crane (*Grus leucogeranus*) at spring stopover sites in northeastern China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(5): 3375-3384. DOI: 10.15244/pjoes/113453.
- [34] Huang ZQ, Lu L, Jiao GY *et al.* Analysis of the correlations between environmental factors and rare cranes in the Poyang Lake region of China. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(1): 140-148. DOI: 10.1016/j.jglr.2017.11.003.
- [35] Burnham J, Barzen J, Pidgeon AM *et al.* Novel foraging by wintering Siberian Cranes *Grus leucogeranus* at China's Poyang Lake indicates broader changes in the ecosystem and raises new challenges for a critically endangered species. *Bird Conservation International*, 2017, 27(2): 204-223. DOI: 10.1017/s0959270916000150.
- [36] Deng XJ ed. Lake Dongting vertebrate monitoring and bird resources: Focus on wetlands and Lake Dongting. Changsha: Hunan Normal University Press, 2007. [邓学建. 洞庭湖脊椎动物监测与鸟类资源: 关注湿地, 关注洞庭湖. 长沙: 湖南师范大学出版社, 2007.]
- [37] Liu XD, Hou ZY, Xie YH *et al.* Influence of water level on four typical submerged plants in wetlands of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2021, 33(1): 181-191. DOI: 10.18307/2021.0113. [刘向东, 侯志勇, 谢永宏等. 水位对洞庭湖湿地4种典型沉水植物的影响. 湖泊科学, 2021, 33(1): 181-191.]
- [38] Chen B, Cui P, Liu GH *et al.* Relationships between changing water levels and numbers of wintering tuber-eating birds in Poyang Lake National Nature Reserve. *J Lake Sci*, 2014, 26(2): 243-252. DOI:10.18307/2014.0211. [陈冰, 崔鹏, 刘观华等. 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.]
- [39] Wang WJ, Wang LH, Hou JJ. Man-made habitats have become important foraging areas of Siberian cranes. *Chinese Journal of Wildlife*, 2019, 40(1): 133-137. [王文娟, 王榄华, 侯谨谨. 人工生境已成为鄱阳湖越冬白鹤的重要觅食地. 野生动物学报, 2019, 40(1): 133-137.]
- [40] Zhan LC, Chen JS, Zhang SY *et al.* Relationship between Dongting Lake and surrounding rivers under the operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2015, 51(2): 255-270. DOI: 10.1080/10256016.2015.1020306.