

近 60 年鄱阳湖东部湖湾水文连通变化及其对湿地植物与候鸟的影响*

熊丽黎^{1,2,3,4}, 刘建新^{2,3}, 李宽意¹, 闵翔^{3,5}, 吴召仕^{1**}, 郭玉银^{3,5}, 王仕刚^{3,5}, 邓燕青^{2,3}, 欧阳千林^{3,5}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 江西省水文监测中心, 南昌 330002)

(3: 江西省鄱阳湖水文生态监测研究重点实验室, 南昌 330002)

(4: 中国科学院大学, 北京 100864)

(5: 鄱阳湖水文水资源监测中心, 南昌 330002)

摘要: 鄱阳湖碟形湖生物群落分布特征很大程度上受区域与主湖区水文连通性影响。由于水位波动, 东部湖湾水文连通性受鄱阳湖主湖区水位影响较为敏感。本文以东部湖湾为例, 分析主湖区水位变异程度及其影响, 并从连通天数和发生时间等方面定量表征东部湖湾与主湖区的水文连通性, 进而讨论水文连通性变化及其对湿地植物生境和候鸟栖息地的潜在影响。结果表明, 当水位在 13~16 m 时, 东部湖湾与主湖区存在着良好的水文连通关系, 湿地植物适宜生境面积最大。2003 年以后, 鄱阳湖主湖区水位普遍降低, 低枯水位持续时间延长, IHA/RVA 法分析表明主湖区水位发生了中等程度改变, 整体改变度为 40.2%, 东部湖湾与主湖区的连通关系发生明显改变, 年连通天数减少了 46.2 d, 变化幅度为 15.9%, 而非连通期发生时间提前约 1 个月且年内时间跨度更长。水文连通性减弱造成 3—10 月东部湖湾平均水位下降了 0.6 m, 其中 9—10 月减少了约 1 m, 使藃草 (*Carex* sp.) 和苦草 (*Vallisneria spiralis*) 适宜水深对应的水面面积在多数月份呈增加趋势, 特别是 9—10 月 (幅度超过 40%), 但枯水提前导致沉水植物面积减少, 湿生植物生物量增加。水文连通性减弱导致洲滩提前裸露, 藃草等湿生植物移向碟形湖湖心, 苦草等沉水植物分布上限降低约 1 m, 候鸟觅食地点可能转移至湖心或其他浅滩。为有效保护鄱阳湖湿地生态系统, 建议充分发挥长江三峡蓄洪补枯的调控作用等, 以减缓水文连通性改变对洪泛区湿地植物生长和候鸟栖息所造成的影响。

关键词: 水文连通性; 适宜水深; 水文变异程度; 湿地植物; 鄱阳湖

Variations of hydrological connectivity in the eastern bay of Lake Poyang in the last 60 years and its impacts on wetland plants and migratory birds*

Xiong Liyi^{1,2,3,4}, Liu Jianxin^{2,3}, Li Kuanyi¹, Min Xiang^{3,5}, Wu Zhaoshi^{1**}, Guo Yuyin^{3,5}, Wang Shigang^{3,5}, Deng Yanqing^{2,3} & Ouyang Qianlin^{3,5}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Jiangxi Hydrological Monitoring Center, Nanchang 330002, P.R.China)

(3: Jiangxi Province Key Laboratory of Poyang Lake Hydrology and Ecology Monitoring and Research, Nanchang 330002, P.R.China)

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, P.R.China)

(5: Poyang Lake Hydrological Resources Monitoring Center, Nanchang 330002, P.R.China)

Abstract: The distribution characteristics of the biological communities in the flood plain areas of Lake Poyang are greatly influ-

* 2022-01-25 收稿; 2022-04-23 收修改稿。

江西省水利厅科技项目 (201921YBKT06)、江西省水利厅科技项目 (202022YBKT02)、江西省水利厅科技项目 (202223YBKT29)、国家自然科学基金项目 (41977195) 和江西水文青年科技基金项目 (SWJJ-KT201806) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: zswu@niglas.ac.cn。

enced by the hydrological connectivity between a region and the main lake. Due to the water level fluctuations, the hydrological connectivity of the eastern bay of Lake Poyang is sensitive to the water level of the main lake. Taking the eastern bay of Lake Poyang as an example, this study analyzed the water level fluctuations in the main lake as well as its influences. The hydrological connectivity between the eastern bay and the main lake was quantitatively characterized from the aspects of connectivity days and occurrence time. Furthermore, the changes of hydrological connectivity and its potential impacts on the habitats of wetland plants and migratory birds were discussed. The results showed that when the water level was 13–16 m asl, there was a good hydrological connectivity between the eastern bay and the main lake, during which the suitable habitat area for the survival of wetland plants was the largest. The water level of the main lake has generally decreased since 2003, and the durations of low water levels have been prolonged. According to the results of IHA/RVA analysis, the water levels in the main lake had changed to a moderate extent, with an overall change degree of 40.2%. The hydrological connectivity between the eastern bay and the main lake has changed significantly, with annual connection days reduced by 46.2 days, and the variation is 15.9%. The occurrence time of non-connection period is about one month earlier, and the yearly time span is longer. The decreased hydrological connectivity caused the average water level of the eastern bay to drop by 0.6 m from March to October, with a decrease of about 1 m from September to October, while the water surface area corresponding to the suitable water depth for *Carex* sp. and *Vallisneria natans* increased in most months, especially from September to October (more than 40%), but the area of submerged macrophytes decreased and the biomass of hygrophytes increased. The weakening of hydrological connectivity led to the early emergence of the beaches, the transfer of hygrophytes such as *Carex cinerascens* to the center of the saucer-shaped lake, the decrease of the upper limit of submerged macrophytes such as *Vallisneria natans* by about 1 m, and the migration of migratory birds to the center of the lake or other shoals. In order to effectively protect the Lake Poyang wetland ecosystem, it is recommended that more attention should be paid to the regulating and control roles of the Three Gorges Dam on the Changjiang River in mitigating the impacts of changes in hydrological connectivity on wetland plants growth and migratory bird habitats in the flood areas of the lake.

Keywords: Hydrological connectivity; suitable water depth; hydrologic variability degree; wetland plants; Lake Poyang

水文连通指以水为介质的物质、能量及生物在水文循环要素内部或要素之间的传输转移^[1-2],在湖泊洪水调蓄、水质净化和生物保护等方面发挥重要作用。水文连通性变化与水文情势相互作用,进而影响生境面积、湖泊植被静态格局和水生生物动态迁移、觅食和繁殖特征等^[3-4]。维持连通性是河湖水系管理和健康维护的重要要求^[5]。然而近半个世纪以来,在气候变化和人类适应性水文调控的影响下,湿地局部水文连通性严重降低,造成湿地面积急剧萎缩和功能严重退化,损害水域生态完整性,制约流域经济、社会、环境的协同发展^[4,6-7]。Grill等构建了河流连通状态指数(connectivity status index),结果表明大坝阻隔及水库调节破坏了全球大约48.2%的河段水文连通性,影响了河流及河岸生态系统的自我修复能力^[8]。因此,水文连通研究对于湿地生态环境评估与健康维护等显得尤为重要。

鄱阳湖是长江流域典型的吞吐型、季节性湖泊,水文特征季节性差异明显。涨水时,主湖区水流将营养物质输送至洲滩、碟形湖及湖滨带,水生动物也进入洪泛区觅食、繁殖甚至避难,退水时归槽水流带走腐殖质,鱼类等水生动物回归主湖区,有效维持了洲滩、碟形湖及湖滨带生物群落结构的稳定性^[9]。碟形湖物种多样性丰富,是鄱阳湖80%以上候鸟(如白枕鹤(*Ciconia alba*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)等)的栖息地和觅食场所^[10-11]。湿地植物群落沿高程的分布特征是在多种环境因子综合作用下形成的,水文过程通常被认为是主导因子^[12]。主湖区与碟形湖的水文连通变化迅速,对水位、淹没面积等的影响十分明显^[13-14]。水文连通差异决定了碟形湖植被分布和生长特征的不同^[15]。2003年以后,长江对鄱阳湖的倒灌量平均下降了近90%,主湖区枯水期提前且延长、枯水位进一步降低,导致洲滩湿地的出露时间延长^[16]。根据1983年和2013年两次鄱阳湖科考成果,虽然因分布上下限拓宽各1 m,藃草群落面积增幅约为68.9%,但鄱阳湖沉水植物面积整体缩减37.7%,群落物种由5~8种降至3~5种,苦草(*Vallisneria natans*)替代竹叶眼子菜(*Potamogeton wrightii*)成为优势物种^[17]。

为了有效反映季节性洪泛湖泊水文连通状况,学者从不同角度提出了多种水文连通度的定量分析方法,如与水文特征相关的输移时间、换水周期等,与水动力特征相关的水沙通量、水流速率等,以及与生物相关的生物迁移能力等^[18-20]。针对鄱阳湖季节性洪泛过程形成的河道—洲滩—碟形湖之间的水文连通过程,已有研究采用统计方法,引入水文连通函数(connectivity function)来表征湖区空间上纵向和横向水文连通程

度的变化,并有效反映了湖区水动力学条件、碟形湖水面扩张和萎缩的程度^[21-22]。结合水面积、水深、流速等水文参数,Li 等基于湖泊洪泛水文水动力学,考虑连通性与生态环境指标之间的耦联关系,重新定义了水文连通性的概念及其意义^[23]。基于连通的定义,围绕水鸟、鱼类、浮游藻类和大型底栖动物等,Tan 等进一步探讨了鄱阳湖洪泛区水文连通与生态环境要素之间的联系,提升了对洪泛区水文连通及其生态环境服务功能的认识^[24]。

目前,相关研究主要是基于系统和宏观视角,侧重于水文连通的变化过程和影响机理,研究方式多基于遥感数据或者模型模拟^[25-26]。然而,针对大湖洪泛的典型区域,水文连通性的长期变化特征以及有关水文连通的影响研究尚需加强,基于长时间序列实测数据以及地理地形测量资料,聚焦不同时期的水文连通改变程度及对鄱阳湖典型洪泛系统水生生态的影响工作仍较为少见。同时 1962—2002 年鄱阳湖主湖区水位呈周期性变化且略有上升趋势,但受江湖关系变化的影响,2003 年以后水位呈现显著下降变化且波动较为剧烈^[15]。与南矶山等其他洪泛区不同的是,东部湖湾枯水期与主湖区存在水文连通出口仅有一处,为相对独立的水生态系统,水量交换特征与碟形湖类似,便于分析水文连通性改变程度以及潜在影响,且因地形和距离的差异而存在生态差异。因此,本文分析对比 2003 年前后鄱阳湖东部湖湾和主湖区的水文连通性变化及其影响,为进一步探讨碟形湖和洪泛区的水生态系统演变提供科学依据。主要研究目标为:(1)基于近 60 年实测水位数据以及近年湖泊地理地形测量数据 2003 年前后主湖区水文变异程度及其生态效应影响;(2)从连通天数、发生时间等方面定量反映与主湖区的水文连通变化程度;(3)探讨水文连通改变对湿地植物分布及候鸟栖息的潜在影响,提出相关保护对策。对东部湖湾这一典型区域开展水文连通性变化原因及其对湿地植物、候鸟的影响研究,有利于揭示鄱阳湖洪泛区水文连通性及其对湿地植被、候鸟影响的长期变化趋势,为其水生态保护提供依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区及数据

鄱阳湖东部湖湾,面积约为 580 km²,占鄱阳湖面积的 17.7%,系湖区最大湖汊(图 1)。区域分布有企湖、珠池湖、白池湖、汉池湖等多个碟形湖,这些碟形湖的水量交换也受东部湖湾水文连通性影响。东部湖湾月平均水深变化范围为 4~10 m,每年 3—9 月与主湖区保持良好的水文连通且存在着周期性的水量交换,9 月中旬以后东部湖湾流向主湖区径流量骤减,10 月中旬至次年 2 月与主湖区没有水量交换,仅在虎头渡口有径流流出。东部湖湾生长有藃草、芦苇等湿生植物以及竹叶眼子菜、苦草、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等沉水植物,是鄱阳湖国家鲫鱼鲤鱼产卵场保护区和鄱阳湖都昌候鸟省级自然保护区。近年来,多次现场调查发现东部湖湾植被群落发生较大改变^[21]。

本文选取棠荫水位站和塘美水位站进行计算分析。塘美站位于东部湖湾,建于 2018 年 7 月;棠荫站位于鄱阳湖主湖区邻近东部湖湾,建于 1961 年 11 月。数据序列选取棠荫站 1962 年 1 月 1 日—2019 年 10 月 22 日和塘美站 2018 年 8 月 8 日—2020 年 10 月 22 日的逐日水位数据。利用塘美和棠荫两站同时期水位资料分析两站水位关系,基于棠荫站水位数据分析主湖区水文变异程度。鄱阳湖湖底地形采用 2010 年 1:1 万实测高程数据。数据来源于江西省水文监测中心。

1.2 主要方法

水文变异会导致生物栖息地发生改变,Richter 等^[27]提出的 IHA (indicators of hydrologic alteration)/RVA (range of variability approach)法可定量评价生态环境水文过程,在河流湖泊水文变异及其生态效益评估中得到了广泛应用^[27-30]。本文选择 IHA/RVA 法分析评价主湖区水位变异程度及潜在生态影响,进一步分析水位变异对东部湖湾和主湖区的水文连通关系的影响。从适宜生境面积、连通天数以及非连通期发生时间 3 个方面量化表征水文连通性的改变程度。其中,适宜生境面积表征湿地植被适宜生境的大小,连通天数可反映水量与主湖区的交换频次,非连通发生时间则在一定程度上体现越冬候鸟取食时间及范围。

1.2.1 IHA/RVA 法 因鄱阳湖区不存在断流情况,本文采用的 IHA 方法包括月平均水位、年极端水位、极端水位出现时间、高低水位频率和持续时间、水位变化率 5 组 32 个水文指标^[30],可反映水文变化对湿地植物群落分布、生物觅食和栖息地塑造的影响程度(表 1)。

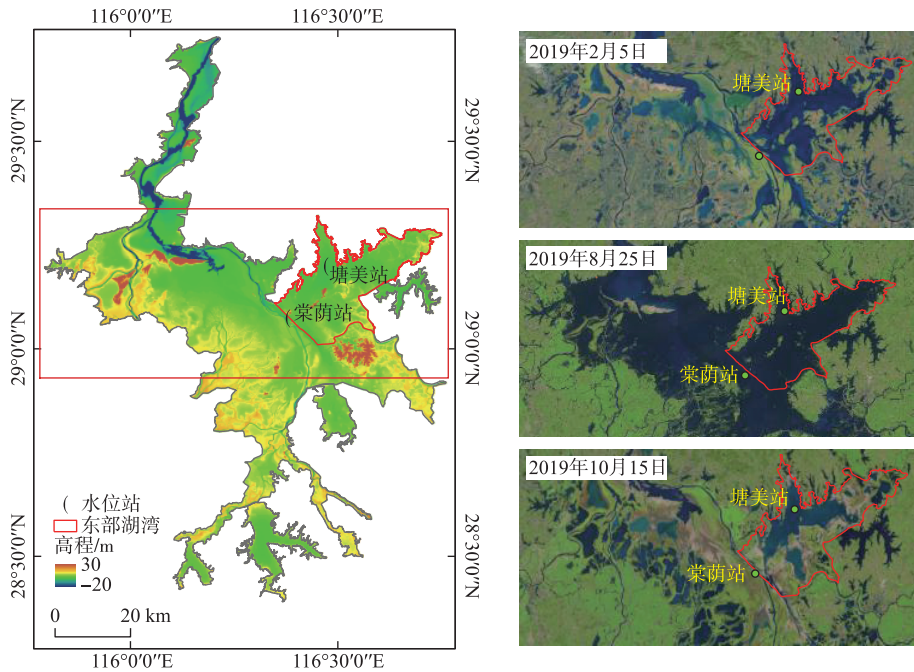


图 1 鄱阳湖东部湖湾位置及遥感影像图

Fig.1 Location of the eastern bay in Lake Poyang and its remote sensing images

表 1 IHA 评价指标及对湿地生态系统的影响

Tab.1 Index of IHA method and their ecological impact on wetland

类别	IHA 指标及序号	湿地生态系统影响
第 1 组:月平均水位	1—12 月平均水位(1~12)	满足水生生物栖息地要求;满足湿生植物土壤湿度等要求。
第 2 组:年极端水位	年平均 1、3、7、30、90 d 最小水位(13~17) 年平均 1、3、7、30、90 d 最大水位(18~22) 基本水位:最小 7 d 水位/年均水位(23)	满足湖库形态和自然生境培养和塑造要求;满足湖库能量物质交换要求;满足湖库生物之间竞争平衡要求;满足湿生植物群落分布要求。
第 3 组:年极端水位出现时间	年最低、最高水位出现时间(24~25)	满足生物的繁衍和栖息地要求;满足生物生命周期要求;满足生物行为演变和进化要求。
第 4 组:高低水位频率和持续时间	年低水位频率(26)及持续时间(27) 年高水位频率(28)及持续时间(29)	满足洪泛区物质运移、底层扰动等生物生境要求;满足湿生植物所需土壤湿度变化要求;满足水鸟觅食、栖息和繁殖要求。
第 5 组:水位变化率	水位平均增加率(30)和减少率(31) 年水位逆转次数(32)	满足植物缺水;满足洪泛区生物诱捕要求;满足低速生物干燥胁迫要求。

通常, RVA 阈值上下限为参照时段 IHA 指标发生率的 75% 和 25%, 该范围可认为能满足水生生物生态需水的变动要求。湖泊水位变化程度可采用分项指标改变度(A_i) 和整体改变度(A_0) 来表示, 计算公式见式(1)和(2)。分项指标改变度指每个指标的改变程度, 而整体改变度综合反映水位改变程度及其影响。当指标改变度小于 33% 时, 属于影响程度较小的低度改变; 当改变度大于 33% 并小于 67% 时, 属于具有一定影响的中度改变; 当改变度大于 67% 时, 属于影响程度较大的高度改变。

$$A_i = \left| \frac{e_i - e_0}{e_0} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$A_0 = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} A_i^2} \quad (2)$$

式中, A_i 为第 i 个指标的水文改变度; e_i 和 e_0 分别为水位变化时段指标在 RVA 阈值的上下限之间的实际年数和预期年数。预期年数为阈值上下限的中间值 (50%) 与变化时段总年数 (17 年) 之积, 本文为 8.5 年。

1.2.2 适宜生境面积与连通天数 利用 ArcGIS 10.2 从鄱阳湖东部湖湾 DEM 数据中提取不同高程的水面面积, 建立东部湖湾水位—面积关系。东部湖湾湿生植物和沉水植物的优势种分别为藁草和苦草^[31], 是鸿雁 (*Anser cygnoides*)、东方白鹳等越冬候鸟的主要食物来源^[32]。藁草适宜生境主要取决于适宜淹没时长和适宜水深, 分别为 71~225 d 和 0.16~1.16 m^[33-34]; 而苦草和大多数候鸟觅食的适宜水深分别为 0~1.0 m 和 0.2~0.4 m。根据东部湖湾水位—面积关系曲线, 利用不同水位差计算不同水位情况下的水深情况, 分析藁草、苦草生长以及候鸟觅食的适宜水深范围对应的生境面积, 建立东部湖湾水位与藁草、苦草生长以及候鸟觅食生境面积的关系, 以反映东部湖湾适宜生境面积随水位的变化情况。此外, 对于藁草适宜生境面积, 在适宜淹没水深对应的藁草生境面积基础上, 进一步考虑其对适宜淹没时长的影响。

通常, 每年 3—6 月鄱阳湖碟形湖与主湖区逐渐连通, 7—9 月保持高水位完全连通, 10 月后水位下降形成独立的子湖体。对比棠荫站和塘美站逐日水位变化, 当水位高于阈值 12.5 m 时, 东部湖湾与主湖区处于“连通”状态, 两者水位保持同步变化; 反之, 当水位低于该阈值时, 主湖区和东部湖湾处于“非连通”状态, 两者水位变化存在着明显差异。当东部湖湾与主湖区处于“连通”状态时, 棠荫站和塘美站水位变化相关性显著, 可通过建立两者水位相关关系方程, 利用棠荫站长序列的水位数据延长塘美站水位数据, 为东部湖湾藁草、苦草生长以及候鸟觅食适宜生境面积的分析提供数据支持。根据东部湖湾与主湖区连通时的水位阈值, 可统计获得研究时段内东部湖湾处于连通状态时各月份的平均天数, 即月平均连通天数。

1.2.3 非连通发生时间 水文非连通性通常具有明显的周期性特征, 运用圆形统计法 (circular statistics) 可直观判断东部湖湾与主湖区水文非连通的年内的季节性分布^[35], 由平均发生时间 $\bar{\Omega}$ 和合成长度 \bar{r} 等指标量化其平均发生时间和离散程度。对于非连通期 Z 的发生时间 D_z (儒略日) 可转化为单位圆上的极坐标 Ω_z , 公式为:

$$\Omega_z = D_z \frac{2\pi}{L} \quad 0 \leq \Omega_z \leq 2\pi \quad (3)$$

式中, L 为一年的天数; Ω_z 转化为弧度, 表示非连通期发生时间, 弧度 $0, 2\pi$ 分别表示 1 月 1 日和 12 月 31 日。对于某时段, 年内第 l 日 (儒略日) 处于非连通状态共计 n_l 天, 该时段非连通状态的平均发生时间和平均合成长度的计算公式为:

$$\bar{\Omega} = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4)$$

$$\bar{r} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (0 \leq \bar{r} \leq 1) \quad (5)$$

其中,

$$a = \sum_{l=1}^L (n_l \cos(\Omega_z)) / \sum_{l=1}^L n_l, \quad b = \sum_{l=1}^L (n_l \sin(\Omega_z)) / \sum_{l=1}^L n_l \quad (6)$$

式中, \bar{r} 可反映非连通状态的离散程度, 其取值范围为 0~1。一般来说, 如果 $\bar{r} \geq 0.6$, 则可以认为水文非连通状态在年内分布具有较明显的时间性。

2 结果与分析

2.1 水位与水文连通关系

2.1.1 东部湖湾水位—面积关系 以塘美站为依据分析鄱阳湖东部湖湾水位与水面面积及适宜生境面积的关系 (图 2)。水面面积随着塘美站水位的升高而增加, 但其增加值先增加后减少且大于 15.0 m 以后变化平缓, 水面面积最大增加值为 100.3 km², 相应的塘美站水位为 13.5 m。不同水位藁草、苦草生长和候鸟觅食的生境面积呈先增加后减少的变化。当塘美站水位为 13.5、14.4 和 13.6 m 时, 东部湖湾适宜藁草、苦草生长和候鸟觅食的生境面积达到最大, 分别为 187.9、194.4 和 40.1 km², 占相应水位水面面积的 58.7%、49.3% 和

13.2%。在塘美站水位低于 12.8、14.0 和 12.4 m 时, 薹草、苦草生长和候鸟觅食的适宜生境面积受东部湖湾水位变化影响较大; 但水位高于 15.6、15.8 和 13.2 m 时, 适宜水深对应的水面面积变化平缓, 此时水位的变化对东部湖湾生境的影响较小。

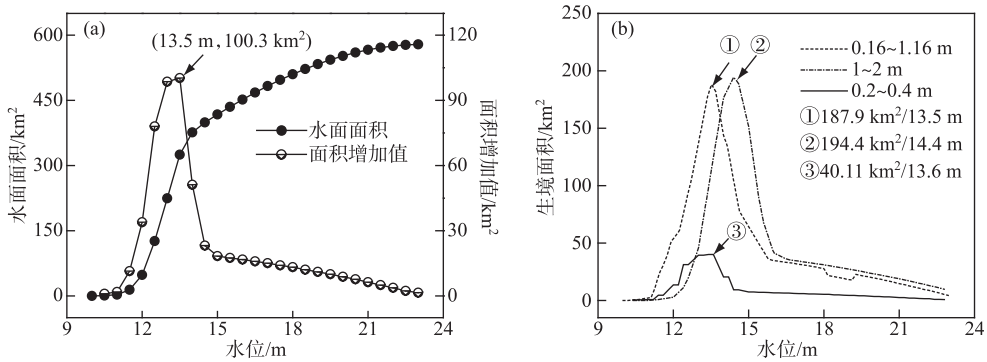


图 2 东部湖湾水位—水面面积曲线(a)及水位—适宜生境面积曲线(b)

Fig.2 Curves of water level and area (a), water level and suitable habitat area (b) of the eastern bay

2.1.2 水文连通关系 根据 2018 年 8 月 8 日—2020 年 10 月 22 日棠荫站和塘美站逐日水位数据变化过程 (图 3a) 和东部湖湾水位面积关系, 分析 2018—2020 年东部湖湾适宜生境面积变化过程 (图 3b)。从棠荫站和塘美站逐日水位变化结合实际调查可判断, 棠荫站水位 12.5 m 为东部湖湾与主湖区水文连通的阈值。当棠荫站水位高于 12.5 m 时, 棠荫站和塘美站水位保持同步变化, 东部湖湾与鄱阳湖主湖区保持全面连通, 属“连通”状态; 当棠荫站水位低于 12.5 m 时, 棠荫站和塘美站水位差异明显, 东部湖湾脱离主湖区独立成子湖, 属“非连通”状态。通常, 每年 3—9 月东部湖湾与主湖区处于“连通”状态, 年内其它月份多为“非连通”状态。当塘美站水位在 13~16 m 范围变化时, 薹草和苦草生长适宜生境面积较大; 而当塘美站水位小于 13 m 或大于 16 m 时, 薹草和苦草生长的适宜生境面积急剧下降, 而薹草主要受淹没时长不足或过长的影响, 在东部湖湾的适宜生境面积消失。

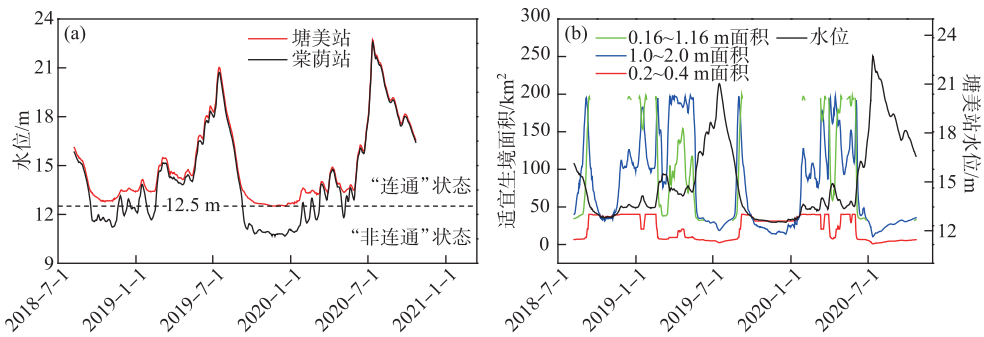


图 3 2018—2020 年东部湖湾水位(a)与适宜生境面积(b)

Fig.3 Daily water level (a) and suitable habitat area (b) of the eastern bay from 2018 to 2020

根据棠荫站和塘美站逐日水位变化, 分析“连通”、“非连通”两种状态东部湖湾与主湖区的水位相关性, 如图 4 所示。在水文连通状态, 棠荫站和塘美站年内水位变化范围较大, 约为 9.0 m, 但两者水位差始终保持在 0.30 m 左右, 决定系数 (R^2) 达 0.997, 可用于构建两站水位的函数关系。非连通状态通常处于枯水期, 棠荫站水位主要受五河来水的影响, 而塘美站水位则受到上游漳田河和漳津河来水影响, 两者水位 R^2 为 0.667。非连通状态棠荫站和塘美站的平均水位分别为 13.0 和 11.5 m, 水位变化范围分别为 12.5~13.5 m 和 10.7~12.5 m, 为分析枯水期适宜生境面积变化提供依据。

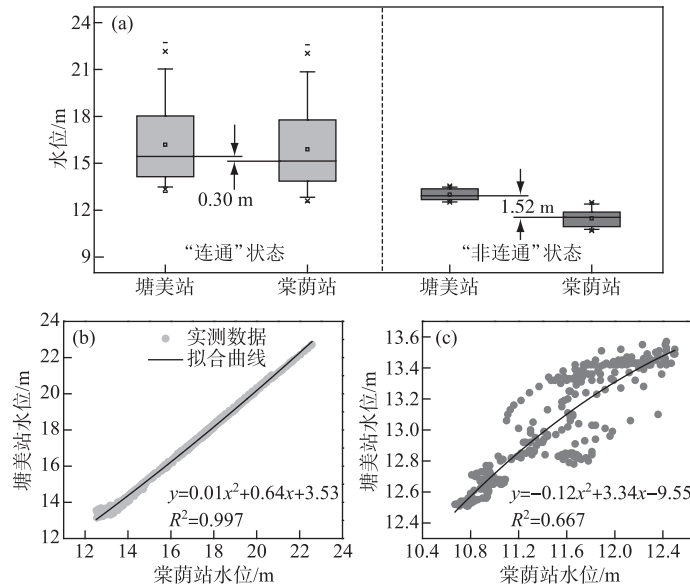


图 4 2018—2020 年棠荫站和塘美站水位差异 (a) 以及连通状态 (b) 和非连通状态 (c) 的相关关系
 Fig.4 Differences of daily water level (a), their correlation relationship under hydrological connectivity (b) and non-connectivity (c) between Tangyin Station and Tangmei Station from 2018 to 2020

2.2 主湖区水位变异程度

鄱阳湖主湖区年际年内水位变化较大,1962—2019 年棠荫站年最高水位和最低水位平均值分别为 19.2 和 11.3 m,2003 年以后平均降低约 0.7 m,水位差范围由 4.4~10.9 m 变为 5.6~10.1 m(图 5)。以 1962—2002 年为基准期,分析 2003—2019 年主湖区 IHA 指标改变程度(表 2)。第 1 组月平均水位改变度为 27.8%,2003 年以后月平均水位都有不同程度的下降,12 项指标中多数变化以低改变程度为主,其中 10—12 月为中改变程度;第 2 组年极端水位改变度为 33.4%,11 项极端水位指标为中低改变程度,其中年均 1、3、7 以及 90 d 最小值 4 项指标均为中改变程度,2004、2007 和 2008 年年均 7 d 最低水位均下降至 10 m 以下,不同时期的最大值指标为低改变程度,但其下降幅度多数为 1 m 以上,处于 16.5~18.5 m 之间;第 3 组年极端水位出现时间改变度为 65.8%,有 90% 以上的年份超过 RVA 上限值 67%,平均提前约 15 d,属于高改变度,而最高水位出现时间平均推后约 5 d,属于低改变程度;第 4 组高低水位频率和持续时间改变度为 30.6%,年

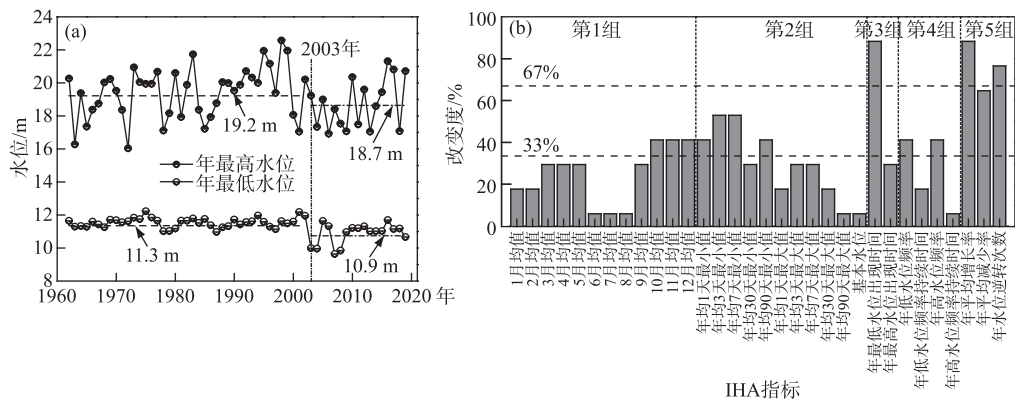


图 5 1962—2019 年棠荫站年水位序列 (a) 及 IHA 指标 (b)
 Fig.5 Water level series (a) and its IHA (b) of Tangyin Station from 1962 to 2019

高、低水位频率为中改变程度,相应地持续时间则为低改变程度,表现为低水位持续时间延长,平均增加 6.5 d,而高水位持续时间缩短,平均减少 6 d;第 5 组水位变化率改变度为 77.1%,3 项指标变异程度较高,其中年平均水位增长率和年水位逆转次数为高改变程度,而平均水位减少率为中改变程度。从 32 个 IHA 指标可知,低、中、高改变程度分别为 19、10 和 3 个,2003 年以后鄱阳湖主湖区水位降低集中在枯水期的 10—12 月,同时存在着湖区低水位进一步降低且年水位波动频率增加的变化。水位整体改变度为 40.2%,属于中改变程度,可导致洪泛区与主湖区的水文连通关系减弱。

表 2 2003—2019 年棠荫站 IHA 指标改变情况
Tab.2 Summary on IHA of Tangyin Station from 2003 to 2019

类别	IHA 指标个数(序号)			水位改变度
	低度改变	中度改变	高度改变	
第 1 组	9 个(1~9)	3 个(10~12)	—	27.8%
第 2 组	7 个(16,18~23)	4 个(13~15,17)	—	33.4%
第 3 组	1 个(25)	—	1 个(24)	65.8%
第 4 组	2 个(27,29)	2 个(26,28)	—	30.6%
第 5 组	—	1 个(31)	2 个(30,32)	77.1%
整体	19 个	10 个	3 个	40.2%

表 3 1962—2019 年东部湖湾与主湖区连通天数

Tab.3 Number of days under hydrological connectivity between the eastern bay and the main lake of Lake Poyang from 1962 to 2019

时段	连通天数/d		变化值/d	变化幅度
	1962—2002 年	2003—2019 年		
1—3 月	50.7	42.4	-8.3	-16.4%
4—6 月	90.0	85.1	-4.9	-5.4%
7—9 月	91.6	86.1	-5.5	-6.1%
10—12 月	58.7	31.2	-27.5	-46.8%
全年	291.0	244.8	-46.2	-15.9%

2.3 连通状况及适宜生境面积变化

2.3.1 连通天数与适宜生境面积 分析 1962—2002 年和 2003—2019 年不同时段平均水文连通天数变化(表 3),2003 年前后东部湖湾与主湖区年内不同时段水文连通时长均有不同程度的减少。1962—2002 年东部湖湾与主湖区年均水文连通天数为 291.0 d,而 2003—2019 年水文连通天数为 244.8 d,减少了约 46.2 d,变化幅度为 15.9%。对于不同季度,10—12 月水文连通天数的变化最大,缩短了 27.5 d,变化幅度达 46.8%,其次 1—3 月水文连通天数缩短了约 8.3 d,变化幅度为 16.4%,这主要由于 10—12 月和 1—3 月受长江与鄱阳湖关系的改变,鄱阳湖主

湖区枯水期提前且低水时段拉长;4—6 月和 7—9 月为丰水期,受流域“五河”来水以及长江水位顶托影响,两个时段鄱阳湖水位变化较小,连通天数缩短了 5 d 左右,变化幅度约为 6%。2003 年前后东部湖湾与主湖区年内不同时段水文连通时长均有不同程度的减少。

对于藁草和苦草生长,分析 1962—2002 年和 2003—2019 年两个时期 3—10 月逐月适宜生境面积情况变化(表 4)。对比 2003 年前后,3—10 月东部湖湾平均水位下降了 0.6 m,除了 6 月份水位不变以外,其他 7 个月东部湖湾平均水位均呈减少的变化,特别是 9 和 10 月,分别减少 1.2 和 1.0 m。对于藁草适宜生境而言,2003—2019 年较 1962—2002 年适宜水深相应的水面面积增加值最大的月份为 9 月,增加幅度为 73.9%;而减少的月份为 7 月,降幅为 4.1%。对于苦草适宜生境而言,2003—2019 年较 1962—2002 年适宜水深相应的水面面积增加值最大的月份依次为 9 和 10 月,增幅分别为 39.2%和 21.4%;而减少的月份为 3 月和 6 月,降幅分别为 10.4%和 10.5%。2003 年前后东部湖湾平均水位有所下降,藁草和苦草等典型湿地植物的分布将向湖中心转移,但其适宜水深对应的生境面积有所增加。

2.3.2 非连通天数与发生时间 分析 1962—2002 年和 2003—2019 年两个时期非连通天数和发生时间变化(表 5,图 6),结果表明东部湖湾与主湖区的非连通状态发生了明显的改变。1962—2002 年东部湖湾与主湖区平均年非连通天数为 74.2 d,而 2003—2019 年为 119.5 d,平均年非连通天数明显增加,增加幅度达

表 4 1962—2019 年东部湖湾藁草和苦草月适宜生境面积
Tab.4 Monthly suitable habitat area for *Carex cinerascens* and *Vallisneria natans*
in the eastern bay from 1962 to 2019

时间	平均水位/m		藁草适宜生境面积/km ²		苦草适宜生境面积/km ²	
	1962—2002 年	2003—2019 年	1962—2002 年	2003—2019 年	1962—2002 年	2003—2019 年
3 月	14.2	14.1	109.6	126.1	155.9	139.7
4 月	14.9	14.6	78.0	101.2	144.0	154.0
5 月	15.7	15.2	58.6	83.8	100.7	110.1
6 月	16.6	16.6	50.9	60.7	74.0	66.3
7 月	18.3	17.6	43.4	41.6	38.7	38.8
8 月	17.2	16.4	49.7	58.4	56.6	65.6
9 月	16.5	15.3	52.3	92.6	66.8	92.9
10 月	15.4	14.4	69.1	97.6	99.3	120.6

61.2%, 其中 2011 年非连天数达 257 d, 占全年的 70% 以上; 1962—2002 年东部湖湾非连通期平均角度为 6.2° (1 月 6 日), 而 2003—2019 年为 -6.9° (12 月 24 日), 平均提前了约 13 d, 且 2003 年以后非连通期开始时间明显提前了 1 个月, 大约提前至 10 月中旬; 1962—2002 年东部湖湾与主湖区非连通期从 11 月上旬至 2 月上旬, 而 2003—2019 年则从 10 月中旬至 2 月中旬, 两个时期非连通期合成长度分别为 0.81 和 0.64, 东部湖湾非连通状态在年内的时间跨度更长。

表 5 1962—2019 年东部湖湾非连通状态的变化
Tab.5 Results on the non-connectivity between the eastern bay and main lake of Lake Poyang from 1962 to 2019

指标	1962—2002 年	2003—2019 年	变化值
平均天数/d	74.2	119.5	45.4
平均角度 $\bar{\Omega}/(^{\circ})$	6.2	-6.9	-13.1
发生时间	1 月 6 日	12 月 24 日	提前 13 d
合成长度 \bar{r}	0.81	0.64	-0.17

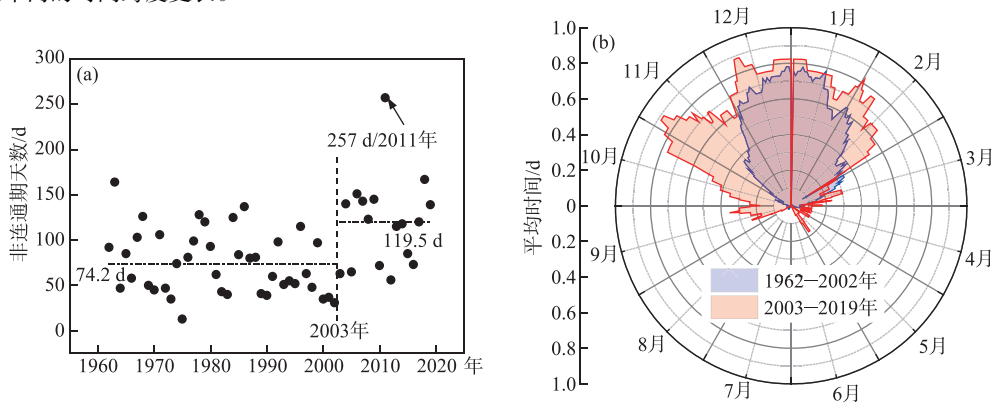


图 6 1962—2019 年东部湖湾非连通期天数(a)及方向(b)

Fig.6 Days (a) and directions (b) under the non-connectivity between the eastern bay and main lake of Lake Poyang from 1962 to 2019

3 讨论

3.1 水文连通性变化的主要原因

本研究认为鄱阳湖东部湖湾近年来与主湖区水文连通性呈下降趋势, 尤其 2003 年以来连通时间缩短, 这主要受主湖区水位变化的影响。2003 年以后主湖区枯水期提前且时间延长, 枯水期水位下降, 与前人关

于鄱阳湖水位变化的研究^[17]基本一致,表现为10—12月平均水位、年极端水位、年最低水位出现时间、高低水位频率以及水位变化率等水位指标发生中高度程度的改变。主湖区水位主要受到江湖关系、湖泊地形、气候变化等影响^[36-38]。根据1973—2011年多时相卫星遥感数据分析结果,三峡工程蓄水运行引发的长江与鄱阳湖关系变化是近20年鄱阳湖汛末水位突变的重要因素之一^[39],此外,2000年以后(特别是2003—2016年间)大规模的采砂造成湖盆局部形态发生改变^[40],导致北部湖区湖底大幅度下切变深、局部扩宽,10和11月棠荫站平均水位分别下降2.81和2.05 m^[37,40-42]。气候变化导致2003—2012年多年平均降雨量较1956—2002年偏少3.62%^[38]。

三峡工程的运行以及采砂、气候变化不同程度改变了主湖区水位变化,从而引起洪泛区与主湖区的连通性,而东部湖湾作为受主湖区水位影响最为密切的区域,其水文连通性变化更为敏感且影响深远。

3.2 水文连通性变化对湿地植物和候鸟生境的影响

随着水文连通性的下降,东部湖湾水面面积呈现萎缩趋势,植被及候鸟群落结构及分布特征发生较大变化。2003年以后,水文连通性变化导致草洲提前出露,苦草、黑藻、竹叶眼子菜等沉水植物种类和数量有所减少,但藁草等湿生植物移向湖心且分布有增加的趋势,改变了湿地植物的优势物种和群落结构^[43],鄱阳湖沉水植物分布上限降低1 m^[17]。近年来,东部湖湾湿地植物的适宜生境面积整体上升,但对于沉水植物和湿生植物的影响各不相同,尤其在9—10月份恰好是藁草秋草生长期以及苦草的果期^[42]。鄱阳湖汛末水位突变导致9—10月份鄱阳湖枯水提前、枯水水位下降^[38-39],将减少淹没时间,适宜生长面积增加,有利于藁草等湿生植物生长,使其面积呈上升趋势。对于苦草来说,3和6月分别是其萌发期和开花期,适宜生长面积减少影响其种群生长,而9—10月适宜生长面积增加,但是汛末突变同时也使得水位下降幅度的增加,导致其原生长空间被侵占,新增的生长空间不利于新的个体萌发,整体压缩了沉水植物的生存面积,导致东部湖湾沉水植物群落密度和生物量反而下降^[43]。该变化规律与鄱阳湖湿地洲滩植被整体变化趋势一致^[17,44-47]。

湿地植物的丰富性和可取食性是白鹤、鸿雁、东方白鹤等越冬候鸟选择栖息地的重要条件。藁草群落是鄱阳湖湿地分布最广、面积最大的植被群落类型,它的嫩芽是越冬候鸟的重要食物来源。藁草是东部湖湾重要的湿地植物,水文连通性变化导致藁草等湿生植物移向碟形湖湖心,可能会导致鄱阳湖越冬候鸟种群和栖息地发生变化,以藁草嫩芽为主要食物的雁类(如豆雁(*Anser fabalis*)和鸿雁)种群增加明显^[48]。每年10月主湖区适宜鸟类觅食的草洲尚未出露,浅水区的面积也相对较小,11月星子水位下降至10 m左右,洲滩和碟形湖与主湖区水文连通性逐渐变弱,水陆过渡带面积越来越大,12月至翌年3月份,星子水位逐步下降至6 m左右,碟形湖内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^[49]。对栖息地质量变化较为敏感的种群(如鹤类)觅食栖息地发生了转移,鄱阳湖越冬白鹤原来仅在碟形湖浅水区觅食,2010年首次发现在草洲取食下江菱、老鸭瓣的球茎。此外,近些年也发现越冬白鹤在湖区周边藕塘、稻田觅食的现象^[50]。

3.3 对鄱阳湖管理的启示

在自然和人类活动的双重作用下,水文连通发生变化,使湿地原有的生态平衡被打破^[51]。洪泛区是鄱阳湖重要的生态系统,其水文连通性的减弱与面积的萎缩将带来一系列的生态问题,如沉水植物的减少以及鸟类活动区域的转变等,必须引起高度重视。水利工程建设、采砂等人类活动以及气候变化引起鄱阳湖主湖区水位变化是东部湖湾水文连通性变化的重要影响因素。近年来,采砂活动得到较好的控制,而水利工程调度要考虑气候变化对水位的影响,还应充分考虑在3、6月沉水植物重要生长期以及秋冬季节的水位调控,并减少水位波动幅度,以进一步保护生态平衡。

4 结论

水文连通性是湖泊水文情势变化的重要组成部分,水文连通状况及改变程度很大程度上影响了鄱阳湖碟形湖及湖湾湿地植物群落和候鸟栖息地的分布特征。本文分析1962—2019年鄱阳湖主湖区水位的变异程度,定量探究东部湖湾与主湖区的连通天数和发生时间等水文连通特征的变化,讨论鄱阳湖水文连通性改变对湿地植物、候鸟觅食的潜在影响。

1)与1962—2002年相比,2003年以后鄱阳湖主湖区枯水期水位普遍降低,持续时间延长。从月平均水位、年极端水位、年极端水位出现时间、高低水位频率和持续时间、水位变化率5组32个水文指标分析,水位中高度改变指标为13个,整体改变度为40.2%,属于中度改变,对湿生植物和沉水植物的分布、候鸟越冬觅食栖息将产生一定的不利影响。

2)2003年以后东部湖湾与主湖区的水文连通发生了较为明显的改变,非连通期明显提前并延长。与1962—2002年比较,2003—2019年东部湖湾与主湖区连通天数减少了46.2 d,变化幅度为15.9%,其中10—12月连通天数的变化最大,变化幅度达46.8%;与主湖区的非连通期天数有大幅度增加,发生时间提前1个月且年内时间分布较为离散,可能导致藁草和苦草等湿地植物移向湖心且生长周期提前,越冬鸟类的觅食区域转移至主湖区的其他浅滩。

3)水文连通性改变将破坏鄱阳湖洪泛区现有的生态平衡,需要引起高度重视。采砂和水利工程建设是重要的影响因素,需要加强管理,科学调控,气候变化的影响也不容忽视。本文受篇幅和资料限制,对于东部湖湾湿地植被、候鸟研究主要基于文献数据,更加深入的研究还需要进一步调查,另外除水位变异影响之外,湿地植被还受到土壤、水动力条件、营养物质^[52-53]等的制约,可将其作为进一步研究的对象。对于湿地植物和候鸟对适宜生境及维持适宜生境的水文连通需求、如何调控以达到水文连通要求等方面量化研究还需要进一步加强。

5 参考文献

- [1] Pringle CM. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: A global perspective. *Ecological Applications*, 2001, **11**(4): 981-998. DOI: 10.1890/1051-0761(2001)011[0981: heatmo]2.0.co;2.
- [2] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important?. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(13): 2685-2689.
- [3] Yang ZF, Cui BS, Huang GH *et al.* Hydro-ecological processes, water-environmental effects and integrated control of ecological security for wetlands in Huang-Huai-Hai region of China. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(11): 1119-1126. [杨志峰, 崔保山, 黄国和等. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控. 地球科学进展, 2006, **21**(11): 1119-1126.]
- [4] Xia J, Gao Y, Zuo QT *et al.* Characteristics of inter connected rivers system and its ecological effects on water environment. *Progress in Geography*, 2012, **31**(1): 26-31. [夏军, 高扬, 左其亭等. 河湖水系连通特征及其利弊. 地理科学进展, 2012, **31**(1): 26-31.]
- [5] Liu D, Wang X, Li CH *et al.* Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: A review. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1702-1715. [刘丹, 王旭, 李春晖等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1702-1715.]
- [6] Chen YQ, Wu LL, Zhang GX *et al.* Review of wetland hydrological connectivity. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, **17**(1): 26-38. [陈月庆, 武黎黎, 章光新等. 湿地水文连通研究综述. 南水北调与水利科技, 2019, **17**(1): 26-38.]
- [7] Xie CJ, Xie T, Liu ZZ *et al.* Effects of hydrological connection on wetland organisms. *Environmental Ecology*, 2020, **2**(1): 26-34. [解成杰, 谢洁, 刘泽正等. 水文连通对湿地生物的影响. 环境生态学, 2020, **2**(1): 26-34.]
- [8] Grill G, Lehner B, Thieme M *et al.* Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, **569**(7755): 215-221. DOI: 10.1038/s41586-019-1111-9.
- [9] Shen RC, Lan ZC, Fang CM *et al.* The dikes of the sub-lakes change soil carbon cycle in the littoral wetland in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1260-1270. DOI: 10.18307/2018.0509. [沈瑞昌, 兰志春, 方长明等. “玺秋湖”围堤改变鄱阳湖洲滩湿地土壤碳循环过程. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1260-1270.]
- [10] Zhang LL, Yin JX, Jiang YZ *et al.* Relationship between hydrological conditions and vegetation communities in Poyang Lake national nature reserve of China. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(6): 768-775. [张丽丽, 殷峻暹, 蒋云钟等. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系. 水科学进展, 2012, **23**(6): 768-775.]
- [11] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1770-1779. [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.]
- [12] Tan ZQ, Zhang Q, Li YL *et al.* Distribution of typical vegetation communities along elevation in Poyang Lake wetlands. *Wetland Science*, 2016, **14**(4): 506-515. [谭志强, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征. 湿地科学, 2016, **14**(4): 506-515.]
- [13] Li YL, Zhang Q, Cai YJ *et al.* Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: Insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China). *The Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 245-259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.015.
- [14] Li YL, Zhang Q, Liu XG *et al.* The role of a seasonal lake groups in the complex Poyang Lake-floodplain system (China): Insights into

- hydrological behaviors. *Journal of Hydrology*, 2019, **578**: 124055. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124055.
- [15] Shi LL, Jia YF, Zuo AJ *et al.* Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(8): 828-837. DOI: 10.17520/biods.2018089. [史林鹭, 贾亦飞, 左奥杰等. 基于 MODIS EVI 时间序列的鄱阳湖湿地植被覆盖和生产力的动态变化. 生物多样性, 2018, **26**(8): 828-837.]
- [16] Hu ZP, Fu J. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(5): 570-579. [胡振鹏, 傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析. 水利学报, 2018, **49**(5): 570-579.]
- [17] Hu ZP, Lin YR. Analysis of evolution process and driving factors for aquatic vegetations of Poyang Lake in 30 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(8): 1947-1955. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201908018. [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.]
- [18] Zhang L, Pan BZ, Jiang XM *et al.* Research progress on the river-lake relation based on hydrological connectivity analysis. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(12): 2805-2816. [张磊, 潘保柱, 蒋小明等. 基于水文连通分析的江湖关系研究进展. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(12): 2805-2816.]
- [19] Dabrowski T, Hartnett M, Olbert AI. Determination of flushing characteristics of the Irish Sea: A spatial approach. *Computers & Geosciences*, 2012, **45**: 250-260. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.11.023.
- [20] Vogel JC, Talma AS, Heaton THE. Gaseous nitrogen as evidence for denitrification in groundwater. *Journal of Hydrology*, 1981, **50**: 191-200. DOI: 10.1016/0022-1694(81)90069-X.
- [21] Liu XG, Zhang Q, Li YL *et al.* Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China). *Journal of Hydrology*, 2020, **585**: 124810. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124810.
- [22] Tan ZQ, Wang XL, Chen B *et al.* Surface water connectivity of seasonal isolated lakes in a dynamic lake-floodplain system. *Journal of Hydrology*, 2019, **579**: 124154. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124154.
- [23] Li YL, Tan ZQ, Zhang Q *et al.* Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: Framework and implications for eco-environmental assessments. *Water Research*, 2021, **195**: 117005. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117005.
- [24] Tan ZQ, Li YL, Zhang Q *et al.* Assessing effective hydrological connectivity for floodplains with a framework integrating habitat suitability and sediment suspension behavior. *Water Research*, 2021, **201**: 117253. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117253.
- [25] Wang H, Chen WB, He L *et al.* Responses of aquatic vegetation coverage to interannual variations of water level in different hydrologically connected sub-lakes of Poyang Lake, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(1): 191-200. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202201.013. [王欢, 陈文波, 何蕾等. 鄱阳湖不同水文连通性子湖水生植被覆盖度对年际水位变化的响应. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 191-200.]
- [26] Liu XG, Duan XY, Yu H. Nonlinear characteristics of water level-inundated area and water level-hydrological connectivity in typical floodplain area of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, (8): 81-89. [刘星根, 段夕跃, 虞慧. 鄱阳湖典型洪泛区水位-水面积、水位-水文连通性的非线性特征. 中国农村水利水电, 2021, (8): 81-89.]
- [27] Richter B, Baumgartner J, Wigington R *et al.* How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 1997, **37**(1): 231-249. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x.
- [28] Yang ZF, Yan Y, Liu Q. Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China. *Ecological Informatics*, 2012, **10**: 56-64. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2011.10.002.
- [29] Wantzen KM, Rothhaupt KO, Mörtl M *et al.* Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: An urgent issue. *Hydrobiologia*, 2008, **613**(1): 1-4. DOI: 10.1007/s10750-008-9466-1.
- [30] Guo Q, Meng YK, Fan LF *et al.* Study on ecological water level variation of Poyang Lake based on IHA and RVA method in recent years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1691-1701. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201907019. [郭强, 孟元可, 樊龙凤等. 基于 IHA/RVA 法的近年来鄱阳湖生态水位变异研究. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1691-1701.]
- [31] Jian MF, Jian MF, Li LY *et al.* Distribution pattern of submerged plants in typical wetlands of Poyang Lake and its influencing factors of water environment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 765-772. [简敏菲, 简美锋, 李玲玉等. 鄱阳湖典型湿地沉水植物的分布格局及其水环境影响因子. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(5): 765-772.]
- [32] Gu YF, Wang J, Wang J *et al.* Morphological response and growth strategy of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* under different water depths. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 654-661. DOI: 10.18307/2017.0314. [顾燕飞, 王俊, 王洁等. 不同水深条件下沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 的形态响应和生长策略. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 654-661.]
- [33] 李文华, 刘兴土, 雷光春等. 鄱阳湖水利枢纽工程对湿地与候鸟的影响及对策研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- [34] Chen LG, Chen LM, Xu YF *et al.* Ecological water level for proposed hydraulic construction locking Lake Poyang based upon wintering waterfowls habitat modelling. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1519-1528. DOI: 10.18307/2020.0523. [陈炼钢, 陈黎明, 徐祎凡等. 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.]

- [35] Burn DH. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*, 1997, **202**(1/2/3/4): 212-230. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00068-1.
- [36] Zhang Q, Ye XC, Werner AD *et al.* An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake; Comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.051.
- [37] Lai XJ, Shankman D, Huber C *et al.* Sand mining and increasing Poyang Lake's discharge ability: A reassessment of causes for lake decline in China. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 1698-1706. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.058.
- [38] Xu ZM, Hu WZ, You ZQ. Analysis of low flow situation of Poyang Lake area after operation of Three Gorges Reservoir and its causes. *Yangtze River*, 2014, **45**(7): 18-22. [徐照明, 胡维忠, 游中琼. 三峡水库运用后鄱阳湖区枯水情势及成因分析. 人民长江, 2014, **45**(7): 18-22.]
- [39] Zhang Q, Li L, Wang YG *et al.* Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier?. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(20): 2012GL053431. DOI: 10.1029/2012gl053431.
- [40] Qi SH, Zhang XX, Jiang F *et al.* Research on the causes for hydrological drought trend in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(1): 168-178. [齐述华, 张秀秀, 江丰等. 鄱阳湖水文干旱化发生的机制研究. 自然资源学报, 2019, **34**(1): 168-178.]
- [41] Jiang F, Qi SH, Liao FQ *et al.* Hydrological and sediment effects from sand mining in Poyang Lake during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(5): 837-845. [江丰, 齐述华, 廖富强等. 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.]
- [42] Liu ZG, Ni ZK. The rules and the effects of varying river-lake relationships on the evolution of Poyang Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1265-1273. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1051. [刘志刚, 倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1265-1273.]
- [43] Ji ZG ed. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2017. DOI: 10.1002/9781119371946.
- [44] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al.* Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 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.]
- [45] Xu XL, Zhang Q, Li YL *et al.* Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in an islet in Poyang Lake. *Wetland Science*, 2014, **12**(6): 714-722. [许秀丽, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系. 湿地科学, 2014, **12**(6): 714-722.]
- [46] Guan SF, Lang Q, Zhang B. Aquatic vegetation of Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1987, **11**(1): 9-21. [官少飞, 郎青, 张本. 鄱阳湖水生植被. 水生生物学报, 1987, **11**(1): 9-21.]
- [47] Liu XL, Ding MJ, Li GC *et al.* Research on variation of wetland plant communities along elevation gradient around Poyang Lake. *Yangtze River*, 2013, **44**(5): 82-86. [刘肖利, 丁明军, 李贵才等. 鄱阳湖湿地植物群落沿高程梯度变化特征研究. 人民长江, 2013, **44**(5): 82-86.]
- [48] Liu XB, Han Z, Wang SY *et al.* A research thinking of Poyang Lake wetland from the perspective of Yangtze River protection. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, **19**(2): 201-209. [刘晓波, 韩祯, 王世岩等. 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.]
- [49] Hu ZP. The habitat characteristics of white cranes to live through the winter in Poyang Lake and the reaction for water level changing in the lake. *Jiangxi Science*, 2012, **30**(1): 30-35, 120. [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.]
- [50] Wu PJ, Wan XM, Xu JM *et al.* Changes of water levels in low-water season in Poyang Lake and its countermeasures. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(6): 104-108, 123. [吴培军, 万晓明, 徐继铭等. 鄱阳湖枯水期水位变化及应对措施. 水资源保护, 2019, **35**(6): 104-108, 123.]
- [51] He Y, Wang XH, Yang JS *et al.* Research progress on influencing factors and ecological effects of wetland hydrological connectivity. *Ecological Science*, 2021, **40**(6): 218-224. [贺怡, 王雪宏, 杨继松等. 湿地水文连通影响因素及生态效应研究进展. 生态科学, 2021, **40**(6): 218-224.]
- [52] Qian KM, Liu X, Duan M *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 261-267. [钱奎梅, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 261-267.]
- [53] Duan WL, He B, Nover D *et al.* Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods. *Sustainability*, 2016, **8**(2): 133. DOI: 10.3390/su8020133.