J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(3):716-733
DOI 10.18307/2025.0301
© 2025 by *Journal of Lake Sciences*

三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征:回顾与展望*

宋继鹏[1,2],龚磊强[3],王晓龙[1,4**],万荣荣[1,2,4]
(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 211135)
(2:中国科学院大学,北京 100049)
(3:江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局,南昌 330038)
(4:中国科学院大学南京学院,南京 211135)

摘　要: 鄱阳湖是长江流域仅存的两个大型通江湖泊之一,在洪水调蓄、水资源供给、水质净化、生物多样性维持等方面发挥着重要作用。本文系统综述了三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势及水生态环境的演变特征及影响因素,主要结论为:三峡工程建设运行后,在气候变化和人类活动的综合影响下,鄱阳湖在水文情势方面呈现出枯水期提前、湖区退水速率加快、泥沙由淤积转为冲刷状态、倒灌天数和流量显著减少等特征;湖区水质整体呈稳中向好态势,但局部水域仍存在蓝藻水华暴发风险;水生生物面临鱼类多样性下降、大型底栖动物密度和生物量趋低的问题;湿地生态方面主要表现出洲滩植被分布向湖心区下延,越冬候鸟总数量保持稳定但少部分种群数量下降。已有研究多为基于湖区周期性的生态观测数据进行的趋势性分析,定量化的分析与研究相对较少,尤其是定量甄别三峡工程蓄水运行对鄱阳湖生态环境的影响分量及其过程机理方面的研究极为缺乏。因此,极有必要持续开展鄱阳湖水文情势与生态环境长期演变观测与研究,借助多维模型精准评估不同水文情势下重大水利枢纽工程等对鄱阳湖生态环境的影响,以期为大型通江湖泊的科学调控与保护管理提供依据。
关键词: 三峡工程;鄱阳湖;水文情势;生态环境演变

Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project: Retrospect and prospect*

Song Jipeng[1,2], Gong Leiqiang[3], Wang Xiaolong[1,4**] & Wan Rongrong[1,2,4]
(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 211135, *P.R.China*)
(2: *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *P.R.China*)
(3: *Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve Authority*, *Nanchang* 330038, *P.R.China*)
(4: *University of Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing*, *Nanjing* 211135, *P.R.China*)

Abstract: Lake Poyang is one of the last two large through-flow lakes in the Yangtze River Basin and plays an important role in flood regulation, water supply, water purification and biodiversity conservation. This paper provides a systematic review of the development patterns and influencing factors of the hydrological conditions and aquatic ecological environment of Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project. The main conclusions are as follows: after the construction and operation of the Three Gorges Project, under the combined influence of climate change and human activities, Lake Poyang has exhibited several hydrological characteristics, including an earlier onset and longer duration of the dry season, accelerated recession rates, a shift from sediment deposition to erosion, and a significant reduction in the duration and volume of backwater. While the o-

* 2024-04-23 收稿;2024-12-09 收修改稿。
国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240219)、江西省重点研发计划项目(20223BBG74003)和三峡工程运行安全综合监测系统库区维护和管理基金项目(2136703)联合资助。
** 通信作者;E-mail: wangxl@niglas.ac.cn。

verall aquatic environment has shown signs of stability and improvement, certain areas are at risk of cyanobacterial blooms. Aquatic ecosystems have been challenged by a significant decline in fish species diversity and a reduction in the density and biomass of large benthic organisms. In terms of wetland ecology, vegetation productivity has shifted towards the central zone of the lake, and the total number of overwintering migratory birds has generally increased, although some species have experienced population declines. However, existing studies have mainly relied on periodic ecological observation data for trend analysis, with relatively few quantitative assessments, particularly in quantifying the impact of the Three Gorges Project's water storage operations on the ecological environment of Lake Poyang and the mechanisms involved. Therefore, it is essential to continue long-term monitoring and research on the hydrological conditions and ecological environment of Lake Poyang. The use of multi-dimensional models will make it possible to accurately assess the impact of large-scale hydraulic engineering projects under varying hydrological conditions on the ecological environment of Lake Poyang. This research will provide a scientific basis for wetland conservation and comprehensive regulation of large through-flow lakes.

Keywords: Three Gorges Project; Lake Poyang; hydrological condition; ecological environment change

鄱阳湖是我国最大的淡水通江湖泊,位于长江中下游南岸,湖口距离三峡大坝约 600 km,承纳赣江、抚河、信江、饶河和修河"五河"来水,由湖口注入长江,与长江形成复杂的江湖水沙交换关系(图 1a)。鄱阳湖水位涨落受"五河"及长江来水的双重影响,年际间和年内季节性差异较大,遵循"枯—涨—丰—退"的水文节律,具有"高水湖相,低水河相"的地理特征(图 1b、c)[1]。因独特的水文节律,鄱阳湖湿地生态系统生境类型丰富,植被类型多样,为候鸟、鱼类、江豚等生物提供了理想的栖息地[2]。

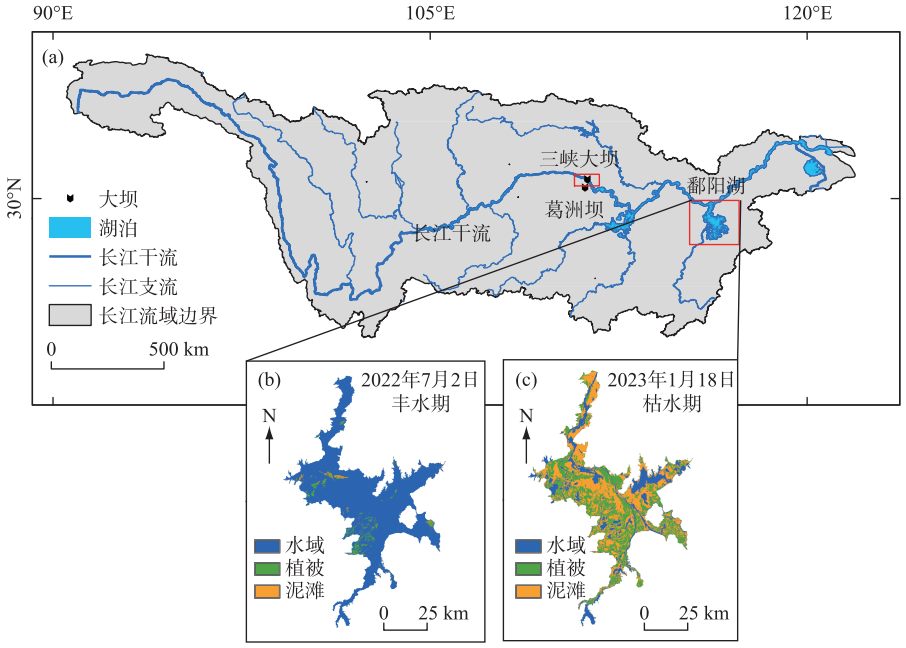

图 1 鄱阳湖概况:(a)鄱阳湖及三峡工程区位;(b)鄱阳湖丰水期景观;(c)鄱阳湖枯水期景观

Fig.1 Overview map of the Lake Poyang: (a) Location of Lake Poyang and the Three Gorges Project; (b) Landscape view of Lake Poyang during the flood season; (c) Landscape view of Lake Poyang during the dry season

21 世纪以来,受气候变化和人类活动的影响,鄱阳湖水文情势发生了显著改变,并引发出水生态环境等方面的新问题,如低水位持续时间延长、水质恶化、湿地面积萎缩和功能退化等[3-4]。2022 年,长江流域出现罕见的"汛期反枯"现象,鄱阳湖更是经历了严重的极端旱情,极大地影响了湿地生态系统的健康与稳定[5]。值得注意的是,2003 年后三峡工程建设运行与鄱阳湖出现水情变化在时间上的重合引发了三峡工程对鄱阳

湖影响的广泛关注[6]。

三峡工程坝址位于湖北省宜昌市三斗坪镇,距下游已建成的葛洲坝水利枢纽约 40 km(图 1a)。三峡工程自运行以来,在防洪、发电、航运及水资源利用等方面全面发挥了综合效益[7]。在三峡工程论证阶段,1991 年编制的《长江三峡水利枢纽环境影响报告书》(下称《三峡环评报告》)中关于三峡工程运行可能会对鄱阳湖产生的影响进行了科学论证和客观评价,并提出了可行的措施力求减少不利影响[8]。同时,学者们也在鄱阳湖水位、泥沙和候鸟等方面有相关的预测研究[9-11]。从现有观测与研究看,当前鄱阳湖湖区的生态环境变化基本符合当初《三峡环评报告》的预测[8]。然而,由于三峡工程建设运行期间气候、人类活动、社会经济等因素也发生了变化,尤其是在极端气候频发与社会经济快速发展背景下,鄱阳湖湖区呈现出《三峡环评报告》预测结果之外的新现象,如泥沙冲淤格局改变、水生植物优势种演替等[12-13]。

针对鄱阳湖面临的水文情势变化及水生态环境问题,学者们从气候变化、三峡工程运行和湖区采砂等角度开展了大量研究,但结论不一[6,14]。因此,在复杂变化环境下,正确认识三峡工程建设运行期间鄱阳湖生态系统的演变及驱动因素是亟需解决的科学问题。基于此,本文通过系统地综述三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势、水环境及生态等方面的演变特征,以期厘清三峡工程建设运行对鄱阳湖生态系统变化的真实影响,并就鄱阳湖的长期监测、多目标综合调控和湿地保护等方面提出展望。

1 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势的演变

近年来,受气候变化、三峡工程运行、采砂等因素的影响,鄱阳湖在水位、流量、泥沙方面出现显著变化,如枯水期提前且延长、枯水位降低、退水速率加快,泥沙由淤积转为冲刷状态,倒灌天数和流量显著减少等。

1.1 枯水期提前且延长,枯水位降低,退水速率加快

三峡工程不同运行水位可能对中下游产生不同影响[15]。根据时间脉络(图 2),三峡工程总体上经历了建设期(1994—2002 年)、建设运行期(2003—2020 年)和正常运行期(2021 年至今),其中建设运行期又可以细分为 135 m 初期蓄水阶段(2003—2006 年,水位 135~139 m)、145 m 过渡阶段(2006—2008 年,水位 145~156 m)和 175 m 试验性蓄水阶段(2008—2020 年,水位 145~175 m)[16]。

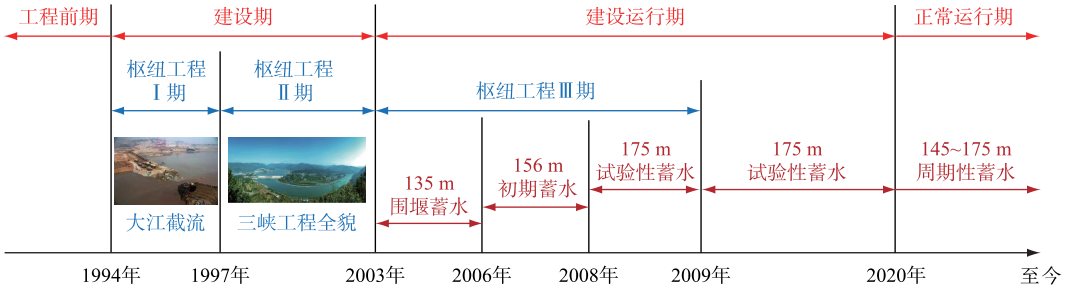

图 2 三峡工程建设运行时间轴[7,16]

Fig.2 The Three Gorges Project construction and operation timeline[7,16]

长时间序列监测数据表明(水位数据均以吴淞高程为基准),相比 1952—2002 年,2003—2021 年鄱阳湖星子站、都昌站、棠阴站和康山站的年均水位分别显著下降 0.87、1.07、0.70 和 0.51 m($P<0.05$),而湖口站未见显著变化[17]。就星子站而言,相比 1981—2002 年,2003—2021 年年内旬均水位均出现了不同程度降低(6 月上旬除外),极枯水位(低于 8 m)最低值由 7.39 m 刷新至 6.88 m,枯水期(低于 12 m)、低枯水期(低于 10 m)平均提前 1 个月,极枯水期(低于 8 m)提前了 20 d[15,17]。此外,相比于 1964—2002 年,2003—2014 年鄱阳湖退水过程历时缩短 25 d,退水速率加快,由稳定退水转变为迅速退水[18]。随着三峡工程的持续运行,胡挺等[15]发现 2003—2007 年和 2008—2021 年星子站年内旬均水位虽然均低于三峡工程运行前的同期水位(5 月下旬—6 月中旬除外),但 2008—2021 年 9 月至次年 3 月的最低水位均值比 2003—2007 年提升了 0.44 m。值得注意的是,三峡工程不同运行阶段对鄱阳湖水位具有不同影响,175 m 试验性蓄水阶段的消落补水调度能够在一定程度上缓解鄱阳湖枯期水位的下降趋势。一项近 40 年(1973—2011 年)的研究表明,

2003 年后鄱阳湖的水位变化不是自然的长期趋势,而是在 2006 年发生的突变[19]。随着三峡水库及其上游向家坝、溪洛渡、白鹤滩等工程陆续修建和运用,预计未来百年内长江中下游干流仍将持续冲刷,江湖关系仍将长期发生变化,汛后 9－10 月份长江中下游干流流量进一步降低,水位消落加快,提前进入枯水期将是长期且趋势性的[20]。

气候变化、水利工程建设、采砂等因素对鄱阳湖的水文过程变化均有不同程度的贡献[14,21-22]。郭华等[23]认为,在三峡工程建设运行初期(2004－2008 年),长江径流量及长江与鄱阳湖相互作用的变化主要受气候变化和"五河"入湖流量影响,三峡工程影响较小(除 10 月大量蓄水外,其对径流量变化的解释不超过 10%)。但在极端气候条件下,三峡工程运行初期蓄水和泄洪调度会增加鄱阳湖遭遇洪水和干旱的风险[23]。Wang 等[21]利用区域三维地下水数值模型,同时考虑地下水与地表水的相互作用,发现三峡工程(2003－2010 年)在 9－10 月蓄水导致的鄱阳湖地表水的减少量约为降水量的 7 倍,是造成鄱阳湖秋季干旱的主要原因。为了进一步区分不同影响因素的贡献量,叶许春等[24]通过人工神经网络进行水文模拟,发现相对于 1980－1999 年,2003－2014 年鄱阳湖湖盆地形变化、三峡工程运行、长江流域气候变化及其他人类活动对湖泊水位降低的平均贡献率分别为 50%、18% 和 32%,其中 9－10 月三峡工程蓄水期间鄱阳湖水位降低 0.42~1.03 m(占同期湖泊水位下降的 33%~42%)。同时,胡挺等[15]在更长时间尺度上从水量的角度量化了长江上游来水、三峡工程、三峡工程—九江区间来水减少、鄱阳湖五湖来水减少以及河道采砂导致的河床下切等多个影响因素对鄱阳湖水位变化的贡献。具体而言,9 月,三峡蓄水、三峡以上来水及三峡—九江区间来水减少、鄱阳湖来水减少对星子水位降低的贡献度分别为 36.4%、23.2%、15.5%,河床下切的贡献度为 24.9%;10 月,其贡献程度分别为 32.5%、22.9%、12.5%、32.1%;整个蓄水期,其贡献程度分别为 35.4%、24%、14.3%、26.3%。11 月—次年 3 月(消落期),三峡补水、三峡以上来水及三峡—九江区间来水增加对星子站水位抬升的贡献度分别为 20% 和 12.6%,鄱阳湖来水减少和河床下切对湖区水位抬升的贡献度分别-7.6% 和-125%,整体上河床及其他来水减少等因素对星子站水位抬升的贡献度为-120%[15]。综上,近年来鄱阳湖的低枯水情是多种因素共同作用的结果,不能将导致这一现象的原因归结于单一因素。在复杂的变化环境下,三峡工程对鄱阳湖水情变化有正反两方面的作用,主要体现在蓄水期和泄洪期,且在不同水文年也会有所差异。

1.2 泥沙由淤积转为冲刷状态

鄱阳湖净泥沙通量(输入泥沙通量减去输出泥沙通量)取决于上游"五河"入湖泥沙、湖口与长江的泥沙交换及人类活动(采砂等导致的泥沙损失)等因素[25-26]。不同时期研究结果表明,2000 年以前,鄱阳湖泥沙整体处于淤积状态,但 20 世纪 80 年代后期淤积量开始呈下降趋势[13];2001－2010 年,鄱阳湖区年均出湖泥沙量大于入湖泥沙量,总体上已经转变为冲刷状态,具有冲淤并存的特征,泥沙主要淤积在"五河"下游尾闾区和河口三角洲区域,湖区湖底高程年均下降 14.4 cm,入江水道湖盆高程年均下降 30.75 cm[13,26-28];2011—2020 年,鄱阳湖区开始整体上处于冲刷的状态[13],以棠荫为界呈"北冲南淤"态势,冲刷主要发生在棠荫以北的入江水道及赣—修河汇合口部分,湖盆中部、湖盆东北部仍将维持基本稳定态势,湖盆南部及青岚湖下游区由下切转为淤积状态[29]。当前比较明确的是,2000 年后鄱阳湖泥沙整体上已经由淤积转为冲刷状态,主河道湖底高程呈下降态势。

近年来,人类活动显著影响了鄱阳湖的净泥沙通量。1983 年后江西省实施的"山河湖开发治理工程"以及 2003 年后三峡工程建设运行是鄱阳湖泥沙状态转变的关键因素[26]。第一,江西省实施的水土保持措施使得 2010 年鄱阳湖森林覆盖率达到 61.7%,加上 1998 年后各类水库的蓄沙能力增加(年均拦截泥沙量由 1956－1989 年的 5.1 Mt/a 提高至 1990－2010 年的 13.3 Mt/a),二者共同导致入湖泥沙减少[13,30]。第二,入江水道是鄱阳湖和长江的联系纽带,在水沙、污染物、鱼类和长江江豚间进行江湖交流过程中发挥着关键作用[13,31]。胡振鹏等[13]重点关注了入江水道的泥沙冲淤情况,计算得到 2000－2010 年、2011－2018 年该区域的采砂量分别为 9348×10^4 m^3(按中粗砂密度折合为 1.2152×10^8 t)和 8157×10^4 m^3(折合为 1.0604×10^8 t),分别是同期自然冲刷量的 0.49 和 0.85 倍。第三,三峡工程运行后,长江主干道含沙量下降及河床侵蚀下切,增强了对鄱阳湖的拉空效应,导致倒灌鄱阳湖的泥沙量大大减少,间接加剧了鄱阳湖的侵蚀与输沙量[26]。鄱阳湖出湖沙量增加、入江水道断面扩大是自然冲刷和大规模采砂共同作用的结果,三峡工程建设

运行的影响相对较小[32]。

鄱阳湖泥沙从淤积转变为冲刷,导致湖盆地形的变化,又进一步影响了水文过程。一些学者通过实证研究、水力学谢才公式计算指出湖口的出湖流量没有出现趋势性变化[13,33]。也有研究指出,相比于三峡工程运行前,星子站的 9 m 水位出现时间提前了 40 d,都昌站的最低水位记录不断被打破[13]。综上,鄱阳湖泥沙的大量冲刷会不同程度地降低湖区水位,但关于湖口泄流能力的量化研究相对较少,需进一步开展研究。

1.3 倒灌天数和流量显著减少

鄱阳湖与长江的江湖关系可以概括为拉空、顶托和倒灌 3 种类型。"拉空"是指鄱阳湖水位高,长江水位低,鄱阳湖水快速流入长江;"顶托"是指长江水位与鄱阳湖水位基本持平,长江水顶托鄱阳湖水,鄱阳湖水不能快速流入长江;"倒灌"是指鄱阳湖水位低,长江水位高,长江水倒灌流入鄱阳湖[34]。倒灌是发生在湖泊与周围水体交汇处的一个重要物理过程[35-36],当湖口流量为负时表示长江水倒灌至鄱阳湖[37]。江水倒灌是长江与鄱阳湖关系的重要部分,学者们对倒灌判别关系进行了大量研究,从多个角度提出了倒灌的发生条件(表 1),不断深化对倒灌的理解。然而,目前关于长江倒灌鄱阳湖的量化指标还未形成统一的认识。江湖倒灌会改变鄱阳湖区的水动力条件,进而影响到洪水调蓄和防洪安全等。因此,形成准确、可靠的倒灌量化指标至关重要。

表 1 鄱阳湖倒灌指标及判别关系

Tab.1 Backflow indicators and discrimination relationships of Lake Poyang

倒灌指标	倒灌发生条件	文献来源
—	九江流量日涨幅超过了湖口前一天的流量	文献[38]
水龄	湖口水龄为零	文献[39]
"五河"来水与长江干流的流量比	当流量比低于约 5%时,倒灌可能发生且最大发生概率可达 25%;当流量比高于 10%时,倒灌发生概率则低于 2%	文献[36]
—	倒灌首日汉口流量大小和星子站水位高低是倒灌发生与否的重要水文条件,若星子水位为 10.5~16.5 m 且汉口流量大于 20000 m^3/s,出现长江向鄱阳湖倒灌的可能性较大,星子水位低于 8 m 或鄱阳湖主汛期一般不会发生倒灌	文献[34]
长江作用强度 鄱阳湖作用强度 江湖作用综合强度函数 $E(t)$	长江水位及其变化率可以表示长江作用强度($E_{River}(t)$),湖区的水面比降可以表示鄱阳湖作用强度($E_{Lake}(t)$)。$E(t)<0$ 时,即 $E_{Lake}(t)<E_{River}(t)$ 时,t 时刻的鄱阳湖作用弱于长江作用,鄱阳湖表现为倒灌流	文献[40]
—	九江与"五河"流量之差超过 30000 m^3/s 时可能发生长江水倒灌鄱阳湖	文献[37]

"—"代表无明确指标。

湖口站长序列流量数据表明,1956—2016 年长江倒灌鄱阳湖年均水量由 20 世纪 50 年代的 34.02 亿 m^3 波动下降至 21 世纪的 15.38 亿 m^3,反映出近 60 年年均倒灌水量整体呈现长期减少的趋势[41]。同时,与 1956—2002 年相比,鄱阳湖年均倒灌天数由 13.0 d 减少至 9.2 d,日均最大倒灌流量从 13600 m^3/s 减少为 6250 m^3/s[42]。此外,许斌等研究发现 1955—2003 年鄱阳湖倒灌现象在 6—12 月均有分布,而 2004—2013 年仅出现在 7—11 月[43]。更进一步,陈金凤等将三峡运行后的时期分为初期运行(2003—2008 年)和 175 m 试验性蓄水期(2009—2016 年)两个阶段,研究发现 2003—2008 年运行鄱阳湖倒灌未出现显著变化,但 2009 年后三峡工程的调度减少了鄱阳湖倒灌水量和倒灌天数,导致 2009—2016 年年均倒灌天数仅为 1.1 d[41]。由此可见,三峡工程建设运行期间,鄱阳湖倒灌现象无论是在年际还是在年内均出现变化,总体表现为年均倒灌天数、倒灌流量显著减少(特别是三峡工程 175 m 试验性蓄水后)。

倒灌是鄱阳湖"五河"入湖径流、长江干流径流以及鄱阳湖—长江共同作用的结果[36]。三峡工程建设运行初期,鄱阳湖倒灌水量和倒灌天数处于较高水平[41]。有研究认为这可能与该时期的航道整治和密集的采砂活动使得湖泊容积恢复(350 亿 m^3)、主航道宽度增加(与 1999 年相比,星子断面增加 100 m、屏峰断面增加 200 m)、湖底高程下降(与 1999 年相比,星子断面下降 2.4 m、屏峰断面下降 4.15 m)有关,间接增强了长江作用,从而促进了倒灌的发生[25,44]。2010 年后鄱阳湖倒灌水量和倒灌天数处于较低水平,这可能是由于

2008 年汛后三峡水库进入 175 m 试验性蓄水期,三峡工程在生态用水和中下游供水方面进行调度,长江对鄱阳湖的作用较弱,一定程度上减少了鄱阳湖的倒灌水量和倒灌天数[41]。

2 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水生态环境的演变

水文过程是洪泛湖泊湿地生态系统演变的主要驱动因素[13]。如前文所述,21 世纪以来,鄱阳湖在水位、流量、泥沙等方面均出现显著变化,这会不可避免地改变湖泊水生态环境。

2.1 鄱阳湖水质演变特征

2.1.1 水质在 21 世纪初下降后,近 10 年来呈稳中向好态势　不同时期的研究表明,2000 年以前,江西省工业废水、污水排放量小,这一时期鄱阳湖的水质处于较好状态,鄱阳湖Ⅰ~Ⅲ类水的年均占比高达 99% 以上[45];2003－2008 年,鄱阳湖Ⅰ~Ⅲ类水的年均占比下降至 71.8%,超标污染物主要是氨氮(NH_3-N)和总磷(TP)[45];江西省生态环境状况公报表明,2009－2014 年Ⅰ~Ⅲ类监测断面年均占比保持在 56.3%,2015－2019 年Ⅰ~Ⅲ类监测断面年均占比仅能维持在 10.3%,2020－2023 年Ⅰ~Ⅲ类监测断面年均占比回升至 27.0%(http://sthjt.jiangxi.gov.cn/col/col42073/index.html)。总体上,这一期间鄱阳湖水质先下降后上升,近 10 年呈稳中向好态势。从年内变化看,2000 年以前,鄱阳湖Ⅰ~Ⅲ类水年均占比在丰水期和枯水期均能达到 94% 及以上,差异较小;Li 等研究发现,鄱阳湖水质年内季节性变化主要与湖水稀释和生物降解过程有关[46],而长期干旱和严重水位冲刷的共同影响降低了鄱阳湖水环境容量[3]。2003－2008 年,Ⅰ~Ⅲ类水年均占比在丰水期和枯水期分别下降至 88.1% 和 70.1%[45];2017 年,丰水期和枯水期的水质均超过Ⅲ类标准[47]。21 世纪初,鄱阳湖水质呈下降趋势,这可能是营养盐收支和输移过程、水文水动力条件及社会经济活动因素共同作用的结果[48-50]。一方面,统计数据显示,2000－2008 年江西省化学需氧量(COD)、NH_3-N 排放量分别以年均 1.2×10^4、0.13×10^4 t 的速度递增[45]。二维水环境模型模拟结果也表明流域污染物输入对鄱阳湖水质变化的贡献高达 51.2%[51]。另一方面,2001 年后鄱阳湖的采砂活动愈发密集,而泥沙是流域中氮、磷的重要载体[52],采砂活动会扰动底泥,增强底泥氮、磷的释放强度[53]。近年来,在江西省实施“全面禁止采砂(2018 年)”[13]、开展“到 2020 年化肥使用量零增长行动方案(2015 年)”[54]、提高污水处理率[55]等一系列政策措施下,鄱阳湖水质在下降后逐渐稳中向好。

三峡工程运行后,鄱阳湖水文情势的相应改变引起的水域面积变化和水位波动可能会影响湖泊的水文连通性及流速,从而影响水体中营养物质的沉积或释放。BP 神经网络模型模拟结果表明,三峡工程运行初期(2003－2008 年)对湖区水质的影响主要集中在枯水期(枯水年最为明显)[56]。区铭亮等以 2009 年 8 月和 10 月分别代表三峡工程的泄洪期和蓄水期,选取 COD、TN、TP 为鄱阳湖污染物主要控制性指标,利用水环境数学模型研究了三峡工程调度下鄱阳湖水环境容量的变化特征[57]。其研究表明,三峡工程增泄流量时鄱阳湖的汛期高水位持续时间得以延长,湖区的 COD、TN、TP 水环境容量较工程运行前分别增加了 3.64%、4.88%、4.88%;然而,在三峡工程蓄水减泄流量时,鄱阳湖退水速度加快,水位显著下降,湖区的 COD、TN、TP 水环境容量较工程运行前分别下降了 14.0%、15.4%、15.4%,反映出三峡工程调度下鄱阳湖的水体净化能力下降[57]。

2.1.2 局部水域存在蓝藻水华暴发风险　目前,鄱阳湖整体处于“中偏富”营养水平,局部水域存在轻度富营养化现象。从不同营养盐指标来看,1990－2010 年鄱阳湖的总氮(TN)和 TP 浓度在年际、季节和月度时间尺度上均呈上升趋势,但未出现显著阶梯式变化[58];2009－2020 年鄱阳湖 TP、TN、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl.a)浓度分别以 0.005、0.0453、0.003 和 0.507 mg/(m^3·a)的速率缓慢增加,主要水质指标渐趋稳定[4,12]。2003－2008 年鄱阳湖大多处于中营养状态(2004 年呈轻度富营养状态,综合营养状态指数(TLI)值为 54.9),无明显变化趋势;2009－2020 年鄱阳湖水体 TLI 值以每年 0.505 的幅度波动增加,2020 年处于“中偏富”营养水平[59],已经有 15% 的水体处于中度富营养状态[12]。据报道,2012 年 10 月鄱阳湖南矶湿地自然保护区的蝶形湖暴发了蓝藻水华(时间约为 15 d),TLI 值在 52~63 之间,已经达到了轻—中度富营养状态[60]。从局部水域看,2012－2017 年鄱阳湖子湖蚌湖处于富营养状态的时间占比达到 30.56%[61];2017 年鄱阳湖平水期、丰水期和枯水期蛤蟆石、屏峰及都昌县至棠荫水域均处于轻度富营养状态[47];2017－2019 年金溪咀刘家和南湖村两个国控断面处于轻度富营养状态[62]。此外,娄保锋等研究了鄱阳湖营养水

平关键指标(Chl.*a*)的时空分布,发现 2018－2020 年鄱阳湖入湖河流尾闾、浅水湖湾、碟形湖(如南湖村、金溪咀、南矶山、蚌湖等)等水域的 Chl.*a* 浓度均较高[59]。近年来鄱阳湖水体正从中营养状态向轻度富营养状态转变,但尚未出现严重的富营养化情况。

湖泊中的 N、P 过量是导致富营养化的根本原因[63]。鄱阳湖的 TLI 值与湖区的 TN、TP 浓度呈显著正相关($P<0.01$),同时还与湖区的水文条件和生物化学过程密切相关[64]。一方面,近年来鄱阳湖区的 TN、TP 通量显著增加。研究表明,2008－2012 年鄱阳湖 TP 年均净通量为-7.2×10^5 kg[65],2010－2019 年湖区 TN 和 TP 的净通量分别在$-2.62\times10^8\sim1.12\times10^8$ kg 和$-2.25\times10^7\sim1.28\times10^7$ kg 之间波动[64]。另一方面,尽管夏季鄱阳湖的 TN 和 TP 浓度相对较高,但营养物质通常在高水位时期被降解和稀释,这也可能是鄱阳湖夏季罕见大规模藻华和保持中营养状态的主要原因[46,66]。鄱阳湖流域氮、磷污染负荷巨大,如果叠加枯水水情,湖区水体富营养化风险将会增大,进而可能驱动鄱阳湖生态系统从草型向藻型转变[67]。

2.2 鄱阳湖水生生物演变特征

2.2.1 *浮游生物密度及生物量增加,大型底栖动物密度及生物量下降* 近 20 年来鄱阳湖水体浮游植物密度与生物量明显增加。历史调查数据(1987－2017 年)共记录到浮游植物 319 种,近期研究表明鄱阳湖浮游植物在不同水文期均以硅藻门和绿藻门为主[68]。2009－2016 年鄱阳湖 15 个长期定位观测点检出浮游植物共 8 门 106 属,浮游植物生物量呈增加的趋势[69-70]。与此同时,鄱阳湖浮游植物密度也由 2011 年的 1.97×10^6 cells/L 增加至 2019 年的 6.75×10^6 cells/L。广义加性模型结果表明,影响浮游植物密度的关键因素为水温、流速和透明度[71]。此外,鄱阳湖浮游植物功能群分布受水环境因子影响较为明显,水位波动对鄱阳湖的理化条件有直接或间接的影响,因此,在湖区水生态管理中,考虑水位波动的影响对富营养化防控具有重要意义[69]。

鄱阳湖浮游动物种类先减少后增加,密度和生物量近年来显著增加。鄱阳湖浮游动物具有物种组成多样、生物量高的特点,以原生动物和轮虫为优势种群[70]。20 世纪 80 年代鄱阳湖浮游动物物种数为 205 种[72],1999 年下降为 150 种[73];2017－2018 年,鉴定出浮游动物 45 属 112 种,年平均密度和生物量分别为 1155.29 ind./L 和 2.01 mg/L[74];2021－2022 年,鉴定出浮游动物 3 门 107 属 212 种,年平均密度和生物量分别为 3365.12 ind./L 和 2.66 mg/L[68]。

鄱阳湖大型底栖动物多样性、密度和生物量均下降。20 世纪 80 年代鄱阳湖大型底栖动物的物种数、密度和生物量分别为 95 种、724 ind./m^2 和 250.24 g/m^2[75];2007－2008 年分别下降至 35 种、222 ind./m^2 和 245.94 g/m^2[76];2019 年物种数有所回升(48 种),但密度和生物量进一步下降为 158.38 ind./m^2 和 173.76 g/m^2[77]。1992 年底栖动物优势种为蚌类、河蚬及螺类,且优势种数量较多;而 1998 年后蚌类不再是优势种,优势种数量减少,到 2008 年后耐污类群颤蚓类成为优势种之一[78]。长期来看,随着鄱阳湖水体富营养化程度的逐渐加重,湖区底栖动物多样性逐渐呈降低趋势,耐污能力较强的类群逐渐占据一定的优势地位,近 20 年来鄱阳湖底栖动物群落变化可能与湖区大规模采砂活动及水环境变化有关,底栖动物优势类群的变化也反映出水环境的演变趋势[77,79-80]。

浮游植物是水生生态系统的初级生产者。浮游动物在以浮游植物为食物资源的同时又是鱼类和水体无脊椎动物的饵料。大部分鱼类的早期生命阶段都以浮游生物为主要食物资源,丰富的浮游生物资源使得鄱阳湖能够短暂成为许多鱼类的育苗场所[81]。底栖动物(如螺类、蚌类等)是许多底栖鱼类(如鲶鱼(*Silurus asotus*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)等)的重要食物来源[80],而鄱阳湖大型底栖动物优势种由螺类、蚌类转变为颤蚓类等,会导致底栖鱼类食源的减少。

2.2.2 *鱼类资源趋于小型化,洄游性鱼类种数显著下降* 鄱阳湖既是江湖洄游性鱼类重要的摄食和育肥场所,也是某些过河口洄游性鱼类的繁殖通道或繁殖场,对长江鱼类种质资源保护及种群的维持具有重大意义[82]。然而,21 世纪以来,鄱阳湖的鱼类群落出现显著变化,主要表现在以下两方面:

(1)鱼类多样性下降,鱼类资源小型化。据文献记载,鄱阳湖鱼类种数由 20 世纪 50、60 年代的 121 种下降至 2010 年的 72 种,后增加至 2018－2019 年的 93 种[83-85]。近年来鄱阳湖的优势种以鲫(*Cyprinus auratus*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、光泽黄颡鱼(*Pseudobagrus nitidus*)等中小型鱼类为主,有些年份还调查到光唇蛇鮈(*Saurogobio gymnocheilus*)、似鳊(*Pseudobrama simoni*)、短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)、鳊(*Megalobrama skolko-*

vii)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)及翘嘴鲌(*Culter alburnus*)等种类[84-86]。1997－1999 年、2000－2006 年鄱阳湖渔获物中鲤、鲫等中小型鱼类的占比分别为 27.2% ~ 41.0%、38.8% ~ 58.8%[82];2007－2009 年,长江湖口段优势种均为鲚(*Coila ectencs*)、短颌鲚、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)和粗唇鮠(*Leiocassis crassilabris*)等小型鱼类(平均体重分别为 35.3、29.6、71.0 和 95.5 g),体重>500 g 的大型鱼类仅占渔获总数量的 1.27%[87];2012－2013 年,方春林等在鄱阳湖开展了鱼类与渔业系统调查研究,结果表明鲤、鲫、鲇等中小型鱼类是鄱阳湖鱼类主体,草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲢、鳙等大型种类为次主体;同时,该时期鄱阳湖鱼类主要是当龄鱼、小型鱼,甚至是鱼苗[88];2014 年,长江湖口水域优势种为鲤、鲢、鲫、鳙、光泽黄颡鱼(平均体重分别为 125.7、513.1、56.1、2210.3、28.1 g)[86]。2020－2021 年,通过水声学与渔获物相结合进行调查,发现不同季节优势种有所差异,但均以中小型鱼类为主[89]。上述研究表明,21 世纪以来,通过对鄱阳湖鱼类的多次调查,采集到的鱼类种数均不超过 100 种,最少的仅有 42 种,显著低于 20 世纪中叶的物种水平;同时,鄱阳湖鱼类呈现小型化、低龄化的特征。

(2)洄游性鱼类物种显著下降。鄱阳湖的洄游鱼类包括江海洄游性鱼类(中华鲟(*Acipenser sinensis*)、鲚、鲥(*Tenualosa reevesii*)、窄体舌鳎(*Cynoglossus gracilis*)、弓斑东方鲀(*Takifugu ocellatus*)、暗色东方鲀(*Fugu obscurus*)、鳗鲡(*Anguilla japonica*))和河湖洄游鱼类("四大家鱼"(青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼、鲢、鳙)、鳡(*Elopichthys bambusa*)、鳤(*Ochetobibus elongatus*)、赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)等)。研究表明,2007－2009 年,虽然长江湖口江段"四大家鱼"在渔获物重量中的占比为 10.61%,但数量仅占 0.16%,江海洄游性鱼类(中华鲟、鲚、鳗鲡等)数量和重量分别占 8.41% 和 3.57%[87];2000－2017 年,鄱阳湖洄游性鱼类在鱼类减少总种数中占比最大(36.7%)[90]。近年来,鄱阳湖的洄游鱼类以青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳡、赤眼鳟和鳊(*Parabramis pekinensis*)等江湖洄游性鱼类为主[91],中华鲟、白鲟(*Psephurus gladius*)、鲥、鳗鲡、鳤等江海洄游性鱼类逐渐减少[87]。

鄱阳湖鱼类资源衰退的原因主要集中在过度捕捞、水质下降、无序采砂、水利工程建设、水文情势变化等方面。第一,研究表明,2000－2019 年鄱阳湖三分之二的主要经济鱼类种群处于不同程度的过度捕捞状态,这极大影响了鱼类的正常繁殖发育[92]。第二,透明度是影响鄱阳湖鱼类群落分布的重要因素之一,而无序采砂会增加水体悬浮物含量,导致透明度下降,破坏鱼类的栖息地,致使鄱阳湖鱼类资源减少[84]。第三,水利工程建设导致长江、"五河"的"四大家鱼"产卵场遭到破坏或变迁,因而进入鄱阳湖育肥的"四大家鱼"鱼苗显著减少;同时,铜九铁路大桥等涉水工程建设破坏了鱼类洄游通道,洄游性鱼类数量急剧减少[88]。第四,鱼类产卵场面积减少,并向湖心扩展。三峡工程建设运行后鄱阳湖水情显著变化,平均水深从 12.29 m 下降到 10.49 m,草洲型鱼类潜在产卵场向湖心扩展,2005 年后鄱阳湖平均产卵场面积从 814.40 km^2下降到 482.51 km^2[93]。在水生生态系统中,鱼类作为顶级群落对其他种群影响重大,是河湖生境评价中最常用的指示类群[94]。鄱阳湖鱼类群落的显著变化,将不可避免地影响到其水生生态系统健康。值得注意的是,2019 年开始的禁渔政策及 2020 年全面开始的"十年禁渔"政策对长江流域鱼类资源的恢复已经取得初步成效[95]。姜涛等通过对比禁渔前(2014－2018 年)和禁渔后(2019－2020 年)鄱阳湖溯河洄游型刀鲚(长颌鲚)资源群体及渔获量,发现禁渔后刀鲚单位渔获量((1.13±2.42) ind./d)较禁渔前((92.60±97.64) ind./d)增长约 82 倍,同时禁渔后刀鲚数量占比(1.42% ±2.41%)较禁渔前(60.56% ±40.87%)增长了约 43 倍[95]。此外,杨舒帆等基于 Ecopath 模型评估了鄱阳湖禁渔前后(2018 和 2021 年)的效果,表明禁渔后鄱阳湖的鱼类资源明显恢复(生态系统规模扩大了 8.07%,总生物量增加了 35.7%)[96]。

2.3 鄱阳湖湿地生态演变特征

鄱阳湖因年内水位周期性波动形成了广阔干湿交替的洲滩,发育了丰富的湿地植被,为鱼类、越冬候鸟等动物提供了重要的栖息地和繁殖地,在生物多样性维持方面发挥了巨大作用[79]。然而,近年来鄱阳湖枯水期提前及延长、低枯水位频现,湿地生态也随生态水文过程出现显著变化,如湿地植被数量与分布格局显著变化、植被生产力格局改变、越冬候鸟数量稳中有升但部分种群数量下降等。

2.3.1 *湿地植被数量与分布格局显著变化* 1983 年和 2013 年两次鄱阳湖综合科学考察表明,鄱阳湖湿地优势植被类型基本相似,但物种数量由 38 科 102 种大幅增加至 81 科 271 属 502 种,这是由于第二次科学考察发现湿地出现大量中生性植物(高达 150 多种),形成了以狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.)、牛鞭草

(*Hemarthria sibirica* (Gand.) Ohwi)为优势种的中生性草甸;同时,两次科学考察还发现群落物种多样性水平由 1983 年的 8~9 种明显下降至 2013 年的 3~4 种[97]。

多项研究表明,2000 年以来鄱阳湖洪泛湿地植被面积呈增加趋势,分布格局呈逐渐向湖心扩张的态势[98-100]。从植被数量来看,Han 等研究发现 2000－2014 年藨草(*Phalaris arundinacea* L.)－水蓼(*Polygonum hydropiper* L.)群落数量显著增加(32.1 km^2/a,$P<0.05$),苔草(*Carex* spp.)群落数量呈波动增长的趋势,菰(*Zizania*)群落的数量也在南部湖区增加较多,南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)/芦苇(*Phragmites australis*)群落数量相对稳定,但菱角(*Trapa bispinosa* Roxb.)等漂浮水生植物群落(包含永久水体)面积显著下降(-28.3 km^2/a,$P<0.05$)[98]。从植被分布格局来看(黄海高程),与 20 世纪 80 年代相比,21 世纪初鄱阳湖的苔草群落分布高程由 13~15 m 扩展至 10~15.5 m,芦苇、南荻群落分布高程由 14~16 m 扩展至 13~17 m,狗牙根群落分布高程下限降低至 13.5 m,苦草(*Vallisneria natans*)、马来眼子菜(*Potamogeton wrightii* Morong)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)等沉水植被的分布高程上限普遍下降了约 1 m[97]。

鄱阳湖湿地植被生长和分布与洲滩的淹没(出露)时间、持续时间紧密相关,湖区不同植被群落分布在各自适宜的高程区域,反映出其对于水分的差异化需求[101]。研究表明,南荻/芦苇群落、苔草群落和藨草/水蓼群落的适宜水深分别为 0.9~1.5、1.5~2.4 和 2.4~3.3 m[98]。当星子站水位低于 10 m(吴淞高程)时,洲滩则会全部出露,鄱阳湖进入低水位时期[101]。如前文所述,2003 年后鄱阳湖的水情呈现出退水速度变快、枯水期提前且延长的特征,湖区平均淹没时间和平均淹没深度分别减少了 15 d 和 0.32 m,提前和快速退水会使大量洲滩过早出露,导致土壤含水量难以满足湿地植物的生态需水,进而影响湿地植被的数量和分布格局[97,101-102]。此外,对水深变化和污染物敏感的物种(如水车前(*Ottelia alismoides*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)和马来眼子菜等)减少,而对水深适应性强和耐污染的物种(如菰、荆三棱(*Bolboschoenus yagara*)等)迅速增加[97]。相比较而言,鄱阳湖北部湖区湿地受三峡蓄水运行的影响更显著,湿地植被演替状态变化极为明显,而南部湖区湿地受流域水文过程影响更大[103],变化最大的区域位于赣江支口与饶河交汇处的三角洲和赣江南支口的洲滩[27]。在水位波动、水环境污染等因素的综合影响下,鄱阳湖湿地植被数量与分布格局显著变化,进而会影响到植被生物量生产力的分布。

2.3.2 植被生物量生产力格局向湖心区转移　植被生物量生产力格局显著改变。植物是湿地生态系统的主要生产者,而湿地植被格局的改变会影响其生物量的分布格局[104]。研究表明,2000－2020 年,鄱阳湖淹没历时在 70% 的湖区缩短(速率约为 2.19 d/a),而在碟形湖广布的洲滩延长[105],使得植被秋季生物量增加了 1.0% ~6.7%[106]。整体来看,鄱阳湖在经历原位增长、全面扩展以及向湖心转移 3 个阶段完成了湿地植被生物量生产力中心从边滩向湖心区的转移,形成了湖心区深泓线附近湿地植被生产力较高而入湖河流三角洲湿地植被生产力较低的新格局,近 20 年来鄱阳湖区显著的水情变化是导致湿地植被生产力显著变化的主要因素[107]。

2.3.3 越冬候鸟总数量稳中有升,但部分种群数量下降　鄱阳湖生物多样性丰富,是世界上重要的候鸟越冬地之一,每年越冬于此的候鸟超过 40 万只,其中雁鸭类数量在 30 万只以上,以白额雁(*Anser albifrons*)、小白额雁(*A. erythropus*)、豆雁(*A. fabalis*)和灰雁(*A. anser*)为主[108]。此外,每年越冬期栖息于鄱阳湖的白鹤(*Leucogeranus leucogeranus*)约占全球的 95%,白头鹤(*Grus monacha*)、白枕鹤(*Antigone vipio*)和灰鹤(*G. grus*)占中国种群的 50% 以上[109]。1998－2020 年环湖监测数据表明,鄱阳湖越冬候鸟数量整体稳中有升(年均 43 万只),但种群结构有所改变:以泥滩和浅水水域为栖息地的鸟类数量未见显著变化,如白鹤(*Grus leucogeranus*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)等;然而,以草洲为栖息地的鸟类数量增加,如近年来鸿雁(*Anser cygnoides*)、豆雁的数量在全湖越冬候鸟总量中占比达到 1/3 左右[110]。

雁类是长江中下游越冬水鸟中的优势种,对食物资源具有高度选择性,主要食用苔草(*Carex* spp.)等湿生植物[111]。由于植被的高度、营养成分等会影响鸟类对食物资源的选择,因此只有特定生长阶段的苔草更适宜被雁类取食[111]。汪洁等在都昌保护区的研究确定了苔草、蓼子草(*Persicaria criopolitana*)等洲滩植被适宜出露窗口期为 9 月 15 日(年内自然日第 258 天)－11 月 4 日(年内自然日第 308 天)[110]。孟竹剑等通过研究常湖池雁类取食植被特征与苔草生长过程及退水过程的关系,确定了雁类取食的时间窗口,即苔草在秋季生长期出露达到 12~28 d,春季生长期出露达到 83~182 d 时适宜雁类取食[111]。研究表明,2003－

2020 年,大白额雁、豆雁的适宜生境面积分别减少 683 和 591 km^2,适宜生境空间分布格局平均下降 1 m[112]。

鹤类主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地区域,对栖息地环境的变化十分敏感[113]。在极端不利的条件下,改变栖息地和食源可能是生存策略之一,生境选择的突然变化可能预示着生境质量的恶化[114]。苦草冬芽等沉水植物是鹤类重要的食物来源,但在苦草冬芽丰富度较低的年份,其他植物则会成为白鹤(水稻(*Oryza sativa* L.)、莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)和蓼子草)、白枕鹤(蓼子草、下江委陵菜(*Potentilla limprichtii*)、老鸦瓣(*Amana edulis*)等洲滩植物)、白头鹤(蓼子草、下江委陵菜、苔草等洲滩植物)和灰鹤(水稻、蓼子草、下江委陵菜等)的替代食物来源[115]。一项长期研究(2000—2019 年)发现,鄱阳湖越冬的 4 种鹤类均呈聚集型分布,但其种群数量呈现出不同的变化趋势,其中白鹤种群数量相对稳定((3058±797)只),白头鹤((322±192)只)和白枕鹤((1291±1016)只)数量减少,灰鹤((3594±3721)只)数量增加;此外,三峡工程正式运行后,4 种越冬鹤类较之前的分布更为集中,同时白鹤、白头鹤和白枕鹤的数量相对减少,灰鹤数量相对增加[113]。

鄱阳湖鸟类的数量与分布和不同退水模式有较大关系,提前退水或推迟退水均会导致鸟类取食与植被物候错配[110,116],如洲滩退水时间若超过 20 d,苔草的生长节律将难以有效满足候鸟数量峰值期的取食需求[111]。因此,极端气候叠加人类活动干扰导致的鄱阳湖枯水期持续干旱对越冬候鸟的觅食、栖息造成了一定影响。

3 与《三峡环评报告》预测结果的对比分析

三峡工程建设运行后,其在长江流域中下游防洪、提供水电资源、改善航运等方面产生了巨大的综合效益,这与《三峡环评报告》的论证结果相符。此外,三峡工程建设运行期间,鄱阳湖生态环境演变基本符合当初环境影响评价的论证预测,如水位变化趋势、洲滩植被生物量增加以及候鸟栖息地变化等;由于多重因素的综合影响,也有部分演变趋势,如泥沙冲淤变化、水生植物优势种演替等与当初预测有所不同。

3.1 水沙过程呈现新变化

在水位方面,《三峡环评报告》指出,三峡工程运行将导致鄱阳湖提前和加快退水,不同高程的洲滩出露时间也将提前并延长[8],现有研究也均证实了这一现象[34,105]。报告中对倒灌影响的预测提及较少,近年研究发现长江对鄱阳湖的倒灌在流量、天数方面均显著减少[35,40]。

在泥沙方面,《三峡环评报告》认为三峡工程运行近期内不会改变原有的冲淤规律和分配格局[8-9],在三峡工程运行前十年,长江中下游的侵蚀主要局限在坝下 700 km 内(三峡大坝和汉口之间),汉口以下河段将继续发生淤积。然而,2003 年后,鄱阳湖泥沙由淤积状态迅速转变为冲刷状态,但这一时期在鄱阳湖开展了大量采砂活动,通江水道主槽显著下切[25]。

3.2 洲滩植被、候鸟呈现新化

在植被方面,《三峡环评报告》指出,10 月鄱阳湖提前退水会延长苔草生长期并增加其生物量,这与现实情况一致,高滩植物如芦苇/南荻群落生物量呈上升趋势也进一步验证了当初预测的准确性[99]。《三峡环评报告》预测鄱阳湖主要植被群落的分布范围和出现高程均能适应三峡水库运行所引起的水情变幅和环境变化,这与监测到的高滩植被挤占中低滩植被分布空间、中低滩植被呈向更低高程洲滩扩张态势的情况不尽相同[99]。目前,鄱阳湖浮叶植物群落变化不大,但沉水植物由马来眼子菜向苦草转变,面积与物种数大幅下降[97],这与报告中预测的以马来眼子菜和苦草为主的沉水植物群丛会被菹草、菹草取代略有偏差[8]。

在越冬候鸟方面,《三峡环评报告》认为保护区内栖息地洲滩提前显露和浅水区域水面缩小对越冬候鸟不会产生明显影响,但一定程度上会导致候鸟错过最佳取食期、隐蔽条件变差、分布更为分散[8],这与近 20 年来长期观测发现有所偏差。随着三峡工程的建设运行,鄱阳湖的水文情势发生变化,导致植被分布格局改变,进而影响越冬候鸟的栖息地质量[2],主要体现在:植物生长物候和湿地景观格局改变,与越冬候鸟迁徒节律错配,导致候鸟种群结构发生显著变化,比如豆雁等植食性雁类在鄱阳湖数量急剧增加,觅食区间向湖心转移;沉水植被衰退导致白鹤等珍稀候鸟无法从天然湿地觅取足够的食物,只能向人工湿地和稻田转移,候鸟禽流感传染风险激增。

《三峡环评报告》中较少提及对鄱阳湖水环境的影响,但有部分学者进行了相关研究。如郑林等认为三峡水库运行引起鄱阳湖水位变化和泥沙变化,改变"五河"入湖水在湖内滞留时间及换水周期,进而影响水体中污染物的稀释和扩散,湖区整体水质有可能下降[117]。但该分析是基于三峡运行会导致鄱阳湖泥沙淤积的假设而开展的,而现有研究多数表明鄱阳湖水质主要与"五河"污染负荷和水动力条件相关[118]。Ding等[118]研究指出随着流域污染物排放的增加,若湖区 TN 和 TP 的浓度分别超过 1.60 和 0.133 mg/L,将可能打破鄱阳湖的营养平衡状态,引发生态风险,进而威胁湖区及长江中下游的水安全。

3.3 预测值与实测值存在差异的原因分析

三峡水库入出库及鄱阳湖流域上游入湖水沙条件发生变化。《三峡环评报告》预测结果指出,三峡工程运行的前 10 年,输沙量约为 170 Mt/a[8],但运行后监测到的输沙量仅为 50 Mt/a。这可能有两方面的原因:一是由于长江上游梯级水库先后建设运行、水土保持措施实施。2003－2021 年,三峡水库年均入库输沙量为 1.48×10^8 t,分别较 1950－1990 年、1991－2002 年减少 69.2%、57.8%[119],库区泥沙淤积量仅为论证结果的 34%[16]。二是入库泥沙细化现象明显,且存在絮凝现象,提升了水库泥沙的滞留率[16]。2003－2021 年坝下宜昌站输沙量较 1950－2002 年减少 93%(年均含沙量由 1.13 kg/m^3 减少至 0.08 kg/m^3)[119]。两方面的因素共同导致了三峡工程运行后长江中下游河道表现为长距离、长历时冲刷[120],在冲刷强度、范围和速度方面均高于《三峡环评报告》预测结果[8]。此外,2003 年后鄱阳湖"五河"流域陆续兴建了峡江水利枢纽(兴利库容 2.14 亿 m^3)、廖坊水库(兴利库容 1.14 亿 m^3)、山口岩水库(兴利库容 0.6 亿 m^3)等[121],加上 1998－2004 年江西省实施的鄱阳湖流域水土保持重点治理一期工程,使得"五河"年均输沙量显著减少[122]。

近年来极端气候频发。21 世纪以来,鄱阳湖在 2003、2006、2007、2009、2011 和 2022 年经历了较为严重的旱情,在 2020 年遭受了严重的洪水灾害[123-124]。2022 年极端干旱更是使得鄱阳湖湿地生态系统遭受重创,是引发沉水植被大面积丧失、底栖动物大量旱死、越冬候鸟食物缺乏等问题的重要原因之一[125]。极端气候事件频发的背景下,鄱阳湖与长江、"五河"的水沙关系更为复杂,使得定量甄别各种因素对鄱阳湖的影响更加困难。

4 结论与展望

4.1 主要结论

《三峡环评报告》指出,三峡工程运行后鄱阳湖汛期水位变化不大,而 10 月下泄流量减少时会对鄱阳湖水位和面积产生一定影响,在枯水期下泄流量增加时,湖区水位略有上升,长远来看湖口段和汛期湖区的淤积将增加。10 月鄱阳湖水位下降,洲滩出露时间提前并延长可延长苔草生长期,对植被群落特征影响不大。整体而言,《三峡环评报告》中关于三峡工程运行对鄱阳湖的影响进行了较为客观和充分的论证,但部分预测结果存在与实际监测结果不一致的地方,需要开展更为系统和深入的研究进行探讨。

本文系统梳理了三峡工程建设运行期间鄱阳湖水文情势、水生态环境的演变特征及影响因素,近年来,鄱阳湖水位下降是长江上游来水减少、三峡工程蓄水、三峡工程—九江区间来水减少、鄱阳湖"五湖"来水减少、湖盆地形变化及气候变化等多种影响因素共同作用的结果。三峡工程建设运行对鄱阳湖水位的影响主要集中在 9－10 月蓄水期间(对同期水位下降的贡献约为 33%~42%),在鄱阳湖枯水期能够在一定程度上抬高湖泊水位。

三峡工程对鄱阳湖的影响直接体现在水位变化方面,进而间接影响鄱阳湖的水生态环境。三峡工程建设运行期间,在多种因素的综合影响下,鄱阳湖在水文情势方面呈现出枯水期提前且延长、退水速率加快,泥沙由淤积转为冲刷状态;水环境整体上稳中向好,但局部水域存在富营养化风险;水生生物面临鱼类多样性显著下降、大型底栖动物的密度和生物量下降的问题;湿地生态方面表现出湿地植被数量与分布格局显著变化,植被生物量生产力格局向湖心区转移,越冬候鸟总数量稳中有升但部分种群数量下降。

目前,三峡工程建设运行对鄱阳湖水位变化量化影响的相关研究较多,但关于水环境水生态方面的量化研究还较为少见。现有研究多从不同阶段的表象数据变化来推测三峡工程的影响,需基于水文过程、冲淤过程、地球化学过程及生态过程的耦合关系开展更多的定量研究。

4.2 研究展望

鄱阳湖季节性水位变化大、换水周期快,加之与上游"五河"及长江之间复杂的江河湖联结关系,具有生物

多样性维持、水安全保障等重要生态服务功能。21 世纪以来,在极端气候频发、人类活动干扰加剧等多重因素影响下,鄱阳湖水文情势及水生态环境发生显著变化。三峡水库作为重要的水利工程和生态工程,在长江中下游防洪、生态调控等方面发挥了重要作用,逐渐形成一套完善的调度技术措施与方案。三峡水库通过对长江中下游的水量调节,能够在一定程度上缓解极端气候事件对鄱阳湖生态系统的不利影响。因此,充分发挥三峡水库的生态调度功能,保障鄱阳湖水量、水质、水生态安全,开展流域尺度与江湖关系变化驱动下的鄱阳湖水文和生态环境长期观测研究具有重要的科学意义。基于此,未来应重点关注下述方面的研究。

4.2.1 完善鄱阳湖水文情势与生态环境长期演变的持续观测与研究　水沙情势是流域生态保护和高质量发展最基础的边界条件[126]。2003 年三峡水库蓄水运用前后,长江干流冲淤平衡被打破,鄱阳湖水文情势出现趋势性变化,江湖关系更加复杂,进而鄱阳湖的水生态环境也发生不同程度的变化[20]。胡春宏等指出,随着三峡水库及其上游向家坝、溪洛渡、白鹤滩等工程陆续修建和运用,预计未来百年内长江中下游的干流仍将持续冲刷,江湖关系仍将长期发生变化,汛后 9－10 月长江中下游干流流量进一步降低、水位消落加快、提前进入枯水期将是长期且趋势性的[20]。目前,三峡工程建设运行对鄱阳湖水位变化量化影响的相关研究较多,但关于水环境水生态方面的研究多从不同阶段的表象数据变化来推测三峡工程的影响,量化研究还较为少见。因此,未来应基于长时间序列数据,强化直接受江湖关系变化影响的水文、水环境和水生态指标监测,以水文过程为切入点,定量建立水文过程、冲淤过程、地球化学过程及生态过程的耦合关系。例如将鄱阳湖水沙营养盐变化趋势、鄱阳湖湖盆演化与滞留效应加以耦合研究和定量预测,定量揭示鄱阳湖营养盐滞留率变化的主要驱动因子[50]。在此基础上,科学评估鄱阳湖湿地生态系统可能出现退化风险的时间段与区域,以及由此引发的水环境、水资源、水生态问题导致生态系统出现退化的时间和条件。

4.2.2 开展气候变化与水利工程等人类活动对鄱阳湖生态环境影响的机理过程研究　随着经济社会的快速发展,人类活动对长江水沙、江河湖库演变的影响越来越强烈,特别是长江干支流水库的建设运行,长江中下游江湖系统的水沙条件变化引起江湖系统水沙输移、冲淤演变及江湖关系等发生新的变化[127]。水利工程建设运行对生态系统的影响是一个长期、复杂的过程,需要从更长时间尺度、更宽广的流域整体视角去理解其产生的影响[128]。如前文所述,三峡工程在经历几个阶段后已经进入 175 m 正常运行阶段,不同运行阶段三峡大坝蓄/泄水量不同,对中下游的影响可能也存在差异。然而,现有研究多以 2003 年为界研究三峡工程运行前后鄱阳湖的变化,对不同阶段三峡工程对鄱阳湖影响的研究较少。同时,气候变化、人类活动在驱动鄱阳湖湿地生态系统演替过程中的贡献程度还未明晰。因此,亟需通过模型模拟等方法定量甄别出不同因素在这一过程中的作用,加强变化环境下长江中下游江湖系统响应机理研究[127]。例如刻画江湖关系变化下植被演替动态及空间格局结合鱼类产卵、鸟类越冬觅食等敏感生态保护目标的水文需求,建立“水－草－鸟－鱼”关系链条,确定适宜生态水文过程[129]。

4.2.3 加强极端气候对鄱阳湖生态环境影响的预警预测研究　极端气候在调节河湖生态系统结构及生物地球化学过程、重塑陆地－河湖连通性及河水质量过程中发挥着重要作用,应重视相关研究[130]。《三峡环评报告》中关于湿生植被、水生植被等方面的预测结果与实际变化有所差异,主要是由于环评过程只考虑了正常的平、枯、丰水年。鄱阳湖湿地保护物种多样、生境多样、生态需求多样。21 世纪以来,鄱阳湖发生了 6 次较严重的旱情[123],2022 年鄱阳湖发生了历史罕见的持续性干旱灾害,鄱阳湖水位刷新历史最低纪录[125,131]。胡振鹏等研究表明,2022 年旱情虽重,但得益于有效的抗旱措施和三峡工程科学的防洪调度,该年经济社会方面的灾害损失比 2003 年小[125]。然而,2022 年的干旱导致鄱阳湖面临沉水植被没有成熟就全部死亡、底栖动物和鱼类生存空间大面积丧失、越冬候鸟栖息地和食物极度缺乏等问题[125]。因此,在极端气候频发背景下,如何通过水利工程的科学调控尽可能保证其处于相对稳定的状态,需要在常规监测基础上,开展专项监测性研究课题与任务,例如在实施长江上游补水的同时,研究如何联合运用湖泊流域和湖区各类水利工程,科学实施江、湖、河协同调度,保障用水需求[5],为鄱阳湖生态系统保护与修复工作提供科学支撑。

5 参考文献

[1] Wan RR, Yang GS, Dai X *et al*. Water security-based hydrological regime assessment method for lakes with extreme seasonal water level

fluctuations: A case study of Poyang Lake, China. *Chinese Geographical Science*, 2018, **28**(3): 456-469. DOI: 10.1007/s11769-018-0958-2.

[2] 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. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.10.012. [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.]

[3] You QH, Fang N, Jian MF *et al*. A reliability-resilience-vulnerability framework for measuring the influence of changes in water level fluctuations on lake conditions. *Ecological Indicators*, 2022, **134**: 108468. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108468.

[4] Li B, Yang GS, Wan RR *et al*. Impacts of hydrological alteration on ecosystem services changes of a large river-connected lake (Poyang Lake), China. *Journal of Environmental Management*, 2022, **310**: 114750. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114750.

[5] Zhang Q, Xue CY, Xia J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(12): 1894-1902. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230813005. [张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策. 中国科学院院刊, 2023, **38**(12): 1894-1902.]

[6] Guo H, Hu Q, Zhang Q *et al*. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008. *Journal of Hydrology*, 2012, **416/417**: 19-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.027.

[7] Niu XQ. The Three Gorges Project. *Engineering*, 2022, **15**: 17-23. DOI: 10.1016/j.eng.2022.05.001.

[8] 中国科学院环境评价部长江水资源保护科学研究所. 长江三峡水利枢纽环境影响报告书. 武汉: 长江水资源保护科学研究所, 1991.

[9] Wang YF. Impacts of Three-Gorges Project on erosion and deposition of Poyang Lake and its prediction. *J Lake Sci*, 1994, **6**(2): 124-130. DOI: 10.18307/1994.0204. [王云飞. 三峡工程对鄱阳湖冲淤的影响和预测. 湖泊科学, 1994, **6**(2): 124-130.]

[10] Liu Y, Xu Y. The study of influence and countermeasure of Sanxia Project to Poyang Lake's migratory birds reserve. *Journal of Jiangxi Normal University* (*Natural Sciences Edition*), 1994, (4): 375-380. [刘影, 徐燕. 三峡工程对鄱阳湖候鸟保护区的影响及对策探讨. 江西师范大学学报(自然科学版), 1994, (4): 375-380.]

[11] Jiang JH, Huang Q. A study of the impact of the Three Gorges Project on the water level of Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 1997, **12**(3): 219-224. DOI: 10.11849/zrzyxb.1997.03.004. [姜加虎, 黄群. 三峡工程对鄱阳湖水位影响研究. 自然资源学报, 1997, **12**(3): 219-224.]

[12] 徐力刚, 徐伟民, 王晓龙等. 鄱阳湖生态环境研究. 北京: 科学出版社, 2023.

[13] Hu ZP, Wang SG. Evolution of scour and sedimentation and its hydrological and ecological effects in Poyang Lake. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(6): 66-78. [胡振鹏, 王仕刚. 鄱阳湖冲淤演变及水文生态效应. 水利水电技术(中英文), 2022, **53**(6): 66-78.]

[14] 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.

[15] Hu T, Qiu HY. Quantitative research on the water level change and its attribution of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (9): 54-61. DOI: 10.12396/znsd.230375. [胡挺, 仇红亚. 鄱阳湖水位变化及其归因量化研究. 中国农村水利水电, 2023, (9): 54-61.]

[16] Lin L, Dong L, Pan X *et al*. Water and sediment changes and the eco-environment response characteristics in Three Gorges Reservoir after the impoundment. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 411-423. DOI: 10.18307/2023.0204. [林莉, 董磊, 潘雄等. 三峡水库蓄水后库区水沙变化及其生态环境响应特征. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 411-423.]

[17] Li B, Yang GS, Wan RR. Reassessment of the declines in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): Uneven trends, risks and underlying causes. *Journal of Environmental Management*, 2023, **342**: 118157. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118157.

[18] Shi CL, Tang LM, Xiao Y. Analysis of character variation of water level at Duchang station of Poyang Lake for 50 years. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, **27**(2): 45-50. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.02.08. [史常乐, 唐立模, 肖洋. 鄱阳湖都昌水位站 50 年水位特征变化分析. 水资源与水工程学报, 2016, **27**(2): 45-50.]

[19] Liu YB, Wu GP, Zhao XS. Recent declines in China's largest freshwater lake: Trend or regime shift? *Environmental Research Letters*, 2013, **8**(1): 014010. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014010.

[20] Hu CH, Zhang SH. Strategies for water security and aquatic ecosystem restoration in the Yangtze River Economic Belt. *Strategic Study of CAE*, 2022, **24**(1): 166-175. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.018. [胡春宏, 张双虎. 长江经济带水安全保障与水生态修复策略研究. 中国工程科学, 2022, **24**(1): 166-175.]

[21] Wang ZC, Yang Y, Chen G *et al*. Variation of lake-river-aquifer interactions induced by human activity and climatic condition in Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2021, **595**: 126058. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126058.

[22] Li XH, Hu Q, Wang R *et al*. Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2021, **52**(1): 26-42. DOI: 10.2166/nh.2021.078.

[23] Guo H, Hu Q, Zhang Q. Changes in hydrological interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China during 1957-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(5): 609-618. DOI: 10.18307/2006.0501. [郭华, 胡琦, 张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化. 地理学报, 2011, **66**(5): 609-618.]

[24] Ye XC, Wu J, Li XH. Compound driving mechanism of water level change in the Poyang Lake. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(2):

352-361.［叶许春，吴娟，李相虎. 鄱阳湖水位变化的复合驱动机制. 地理科学，2022，**42**(2)：352-361.］

［25］ Min Q，Shi JG，Min D. Characteristics of sediment into and out of Poyang Lake from 1956 to 2005. *Journal of China Hydrology*，2011，**31**(1)：54-58.［闵骞，时建国，闵聃. 1956－2005 年鄱阳湖入出湖悬移质泥沙特征及其变化初析. 水文，2011，**31**(1)：54-58.］

［26］ Zhang SY，Liu YX，Yang YH *et al*. Erosion and deposition within Poyang Lake：Evidence from a decade of satellite data. *Journal of Great Lakes Research*，2016，**42**(2)：364-374. DOI：10.1016/j.jglr.2015.12.012.

［27］ Zha DP，Feng ML，Chen HW *et al*. Spatial-temporal changes of the typical wetland landscape of Poyang Lake. *Journal of Hydroecology*，2015，(5)：1-7. DOI：10.15928/j.1674-3075.2015.05.001.［查东平，冯明雷，陈宏文等. 鄱阳湖典型湿地植被景观格局的时空变化分析. 水生态学杂志，2015，(5)：1-7.］

［28］ Wu GP，Liu YB，Fan XW. Bottom topography change patterns of the Lake Poyang and their influence mechanisms in recent 30 years. *J Lake Sci*，2015，**27**(6)：1168-1176. DOI：10.18307/2015.0623.［吴桂平，刘元波，范兴旺. 近 30 年来鄱阳湖湖盆地形演变特征与原因探析. 湖泊科学，2015，**27**(6)：1168-1176.］

［29］ 欧阳千林. 鄱阳湖近 10 年来冲淤变化特征及成因分析. 江西水利科技，2021，**47**(5)：335-340.

［30］ Xu XN，Gao JH，Jia JJ *et al*. The quantitative estimation of sediment load changes entering Poyang Lake Basin induced by climate change and anthropogenic impacts. *Geographical Research*，2015，**34**(5)：838-850. DOI：10.11821/dlyj201505004.［徐夏楠，高建华，贾建军等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算. 地理研究，2015，**34**(5)：838-850.］

［31］ Qi S，Zhang X，Wang D *et al*. Study of morphologic change in Poyang Lake basin caused by sand dredging using multi-temporal landsat images and DEMs. *The International Archives of the Photogrammetry*，*Remote Sensing and Spatial Information Sciences*，2014，XL-**1**：355-362. DOI：10.5194/isprsarchives-xl-1-355-2014.

［32］ Fang CM，Guan JC，Shi HL. Relationship between sediment transport capacity of the Poyang Lake channel and sediment out of the lake and adjustment. *Journal of Hydraulic Engineering*，2023，**54**(8)：997-1004.［方春明，关见朝，史红玲. 鄱阳湖入江水道输沙能力与出湖沙量关系及冲淤调整规律. 水利学报，2023，**54**(8)：997-1004.］

［33］ Tang GH，Xu WT，Hu ZP. Effect from forest vegetation improvement on runoff and sediment transport processes within Poyang Lake Watershed. *Water Resources and Hydropower Engineering*，2017，**48**(2)：12-21.［唐国华，许闻婷，胡振鹏. 森林植被改善对鄱阳湖流域径流和输沙过程的影响. 水利水电技术，2017，**48**(2)：12-21.］

［34］ 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.］

［35］ Li YL，Zhang Q，Werner AD *et al*. The influence of river-to-lake backflow on the hydrodynamics of a large floodplain lake system (Poyang Lake，China). *Hydrological Processes*，2017，**31**(1)：117-132. DOI：10.1002/hyp.10979.

［36］ Li YL，Yao J，Zhang Q. Numerical study on the hydrodynamic influences of the Yangtze River backflow into Poyang Lake. *J Lake Sci*，2017，**29**(5)：1227-1237. DOI：10.18307/2017.0521.［李云良，姚静，张奇. 长江倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的数值模拟. 湖泊科学，2017，**29**(5)：1227-1237.］

［37］ Wang FL，Hu T. Research on the relationship between water level and discharge at the Poyang Lake estuary. *China Rural Water and Hydropower*，2023，(11)：112-118. DOI：10.12396/znsd.230773.［王飞龙，胡挺. 鄱阳湖口水位流量关系研究. 中国农村水利水电，2023，(11)：112-118.］

［38］ Fang CM，Cao WH，Mao JX *et al*. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*，2012，**43**(2)：175-181.［方春明，曹文洪，毛继新等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报，2012，**43**(2)：175-181.］

［39］ Tang CX，Xiong X，Wu NH *et al*. Simulation of the impact of the reverse flow from Yangtze River on the hydrodynamic process of Lake Poyang. *J Lake Sci*，2015，**27**(4)：700-710. DOI：10.18307/2015.0419.［唐昌新，熊雄，邬年华等. 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟. 湖泊科学，2015，**27**(4)：700-710.］

［40］ Wang ZH，Zhu LJ，Wang JZ *et al*. Reverse flow from Yangtze River to Poyang Lake：Causes and occurrence conditions quantization index. *Advances in Water Science*，2020，**31**(2)：203-213.［王志寰，朱立俊，王建中等. 长江倒灌鄱阳湖原因及发生条件的量化指标. 水科学进展，2020，**31**(2)：203-213.］

［41］ Chen JF，Qian XY. Variation characteristics of water recharge from Changjiang River into Poyang Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*，2019，**36**(5)：18-22，27. DOI：10.11988/ckyyb.20181255.［陈金凤，钱晓燕. 近 60 年来长江对鄱阳湖倒灌水量的变化特征. 长江科学院院报，2019，**36**(5)：18-22，27.］

［42］ Bing JP，Deng PX，Lv SY *et al*. The analysis of water exchange regime research on Poyang Lake and Yangtze River and driving factors. *Scientia Sinica Technologica*，2017，**47**(8)：856-870. DOI：10.1360/N092016-00347.［邴建平，邓鹏鑫，吕孙云等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析. 中国科学：技术科学，2017，**47**(8)：856-870.］

［43］ Xu B，Chen GC. Inner-annual allocations of backward flow of river-connected lake in changing environment. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*，2018，**35**(10)：30-35. DOI：10.11988/ckyyb.20170189.［许斌，陈广才. 变化环境下通江湖泊江水倒灌年内分配变化规律研究. 长江科学院院报，2018，**35**(10)：30-35.］

［44］ Ye XC，Li XH，Zhang Q. Temporal variation of backflow frequency from the Yangtze River to Poyang Lake and its influencing factors. *Journal of Southwest University*：*Natural Science Edition*，2012，**34**(11)：69-75.［叶许春，李相虎，张奇. 长江倒灌鄱阳湖的时序变化特征

及其影响因素. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, **34**(11): 69-75.]

[45] Mao ZP, Zhou HD, Wang SY *et al.* Characteristics of water environment in Poyang Lake. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, **9**(4): 267-273. [毛战坡, 周怀东, 王世岩等. 鄱阳湖水环境演变特征研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, **9**(4): 267-273.]

[46] Li B, Yang GS, Wan RR *et al.* Spatiotemporal variability in the water quality of Poyang Lake and its associated responses to hydrological conditions. *Water*, 2016, **8**(7): 296. DOI: 10.3390/w8070296.

[47] Wen CY, Liu JT, Hu F *et al.* Water quality change characteristics and eutrophication assessment of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (11): 83-88. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2020.11.015. [温春云, 刘聚涛, 胡芳等. 鄱阳湖水质变化特征及水体富营养化评价. 中国农村水利水电, 2020, (11): 83-88.]

[48] Liu RR, Deng XZ, Jin Q *et al.* Relationships between economic growth and emissions of nitrogen and phosphorus in the Poyang Lake Basin. *Resources Science*, 2011, **33**(11): 2169-2174. [刘润润, 邓祥征, 金琴等. 鄱阳湖流域经济增长与氮磷排放关系. 资源科学, 2011, **33**(11): 2169-2174.]

[49] Wang SY, Gao Y, Jia JJ *et al.* Water level as the key controlling regulator associated with nutrient and gross primary productivity changes in a large floodplain-lake system (Lake Poyang), China. *Journal of Hydrology*, 2021, **599**: 126414. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126414.

[50] Ge SL, Huang GX, Ren QH *et al.* Study on the transport processes and retention effects of water, suspended sediment, nitrogen and phosphorus in Poyang Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(2): 346-358. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.05. [葛士林, 黄国鲜, 任倩慧等. 鄱阳湖水沙与氮磷输移过程及滞留效应研究. 环境科学研究, 2024, **37**(2): 346-358.]

[51] Wang H, Kaisam JP, Fang SW *et al.* Exploring the water quality driving mechanism in Poyang Lake, the largest freshwater lake in China. *Water Supply*, 2020, **20**(2): 700-711. DOI: 10.2166/ws.2019.203.

[52] Zhong WJ, Wang SR, Dong Y *et al.* Trends of the response-relationship between net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI) and TN/TP export fluxes in Raohe Basin, China. *Chemosphere*, 2022, **286**(Pt1): 131662. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131662.

[53] 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. DOI: 10.31497/zrzyxb.20190114.

[54] Zhong WJ, Dong Y, Wang SR *et al.* Evolution of watershed phosphorus buffering capacity and its response to land-use change in Poyang Lake Basin, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **365**: 132606. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132606.

[55] Zhang C, Su GD, Li X. Changes in nutrient concentrations and limitations of Poyang Lake associated with socioeconomic development in the watershed from 1978 to 2021. *Water*, 2023, **15**(18): 3304. DOI: 10.3390/w15183304.

[56] Zhu XH, Dong ZC, Zhao J *et al.* Impact of the Three Gorges Project on the water quality of Poyang Lake. *Yellow River*, 2009, **31**(1): 57-58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.01.026. [朱信华, 董增川, 赵杰等. 三峡工程对鄱阳湖水质的影响. 人民黄河, 2009, **31**(1): 57-58.]

[57] Qu ML, Zhou WB, Hu CH. Variation characteristics of water environmental capacity in Poyang Lake under the scheduling of Three Gorges Reservoir. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(16): 9786-9788. [区铭亮, 周文斌, 胡春华. 三峡水库调度下鄱阳湖水环境容量变化特征. 安徽农业科学, 2011, **39**(16): 9786-9788.]

[58] Huang J, Wang XX, Xi BD *et al.* Long-term variations of TN and TP in four lakes fed by Yangtze River at various timescales. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3993-4009. DOI: 10.1007/s12665-015-4714-y.

[59] Lou BF, Zhou Z, Su H *et al.* Temporal and spatial characteristics of key indicators of nutritional level and control standards in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 897-908. DOI: 10.18307/2023.0311. [娄保锋, 周正, 苏海等. 鄱阳湖营养水平关键指标时空分布特征及适宜控制标准. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 897-908.]

[60] Dai GF, Zhang M, Feng ML *et al.* Analysis of cyanobacteria bloom in Nanjishan Natural Reserve in Poyang Lake. *Ecological Science*, 2015, **34**(4): 26-30. [戴国飞, 张萌, 冯明雷等. 鄱阳湖南矶湿地自然保护区蓝藻水华状况与成因分析. 生态科学, 2015, **34**(4): 26-30.]

[61] Wu Y, Wang H, Deng YQ *et al.* Evaluation and driving characteristics of water nutrients in Poyang Lake based on TLI method. *Environmental Engineering*, 2023: 1-9. [吴怡, 王华, 邓燕青等. 基于 TLI 法的鄱阳湖水体营养状态评价与驱动特征分析. 环境工程, 2023: 1-9.]

[62] Xie HY, Hu M, Ji XY *et al.* Water quality evolution characteristics and pollution factor analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5585-5597. DOI: 10.13227/j.hjkx.202112220. [谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕等. 2011—2019 年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析. 环境科学, 2022, **43**(12): 5585-5597.]

[63] Baulch HM. Asking the right questions about nutrient control in aquatic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(3): 1188-1189. DOI: 10.1021/es400134s.

[64] Wang YD, Jia JJ, Lu Y *et al.* Nitrogen and phosphorus budget and eutrophication impacts in Poyang Lake from 2010 to 2019. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024: 1-10. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0425. [王业迪, 贾珺杰, 陆瑶等. 鄱阳湖 2010—2019 年氮磷收支及其富营养化影响. 环境科学学报, 2024: 1-10.]

[65] Liu FG, Wang SG, Guo YY *et al.* Spatial-temporal variations of pollutant fluxes of inflow and outflow of Lake Poyang (2008-2012). *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 641-650. DOI: 10.18307/2014.0501. [刘发根, 王仕刚, 郭玉银等. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影

响因素(2008－2012 年). 湖泊科学, 2014, **26**(5): 641-650.]

[66] Wu ZS, Zhang DW, Cai YJ *et al*. Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 17999. DOI: 10.1038/s41598-017-18285-y.

[67] Du YL, Zhou HD, Peng WQ *et al*. Modeling the impacts of the change of river-lake relationship on the hydrodynamic and water quality revolution in Poyang Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1274-1284. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1047. [杜彦良, 周怀东, 彭文启等. 近 10 年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1274-1284.]

[68] 马吉顺. 季节性水位波动对鄱阳湖食物网结构的影响研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2024.

[69] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009－2016 年). 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1035-1044.]

[70] Yang X, Ma JS, Zhang H *et al*. Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1093-1103. DOI: 10.7541/2021.2020.148. [杨潇, 马吉顺, 张欢等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价. 水生生物学报, 2021, **45**(5): 1093-1103.]

[71] Xiong LL, Fang SW, Li KY *et al*. Temporal distribution patterns of phytoplankton and their drivers in Lake Poyang (China)—A monthly study from 2011 to 2019. *Ecological Indicators*, 2021, **133**: 108435. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108435.

[72] 张本. 鄱阳湖研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.

[73] Wang JQ, Wu JP, Yu YB *et al*. The specific list, quantitative distribution and change of zooplankton in the season of spring and autumn in Poyang Lake. *J Lake Sci*,2003, **15**(4): 345-352. DOI: 10.18307/2003.0408. [王金秋, 吴建平, 於燕斌等. 春秋两季鄱阳湖浮游动物的编目、数量分布与变动. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 345-352.]

[74] Chen JQ, Zhao K, Cao Y *et al*. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(18): 6644-6658. DOI: 10.5846/stxb201910282257. [陈佳琪, 赵坤, 曹玥等. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2020, **40**(18): 6644-6658.]

[75] 谢钦铭, 李云, 熊国根. 鄱阳湖底栖动物生态研究及其底层鱼产力的估算. 江西科学, 1995, **13**(3): 161-170.

[76] Wang HZ, Xu QQ, Cui YD *et al*. Macrozoobenthic community of Poyang Lake, the largest freshwater lake of China, in the Yangtze floodplain. *Limnology*, 2007, **8**(1): 65-71. DOI: 10.1007/s10201-006-0190-0.

[77] Zou LH, Zou W, Zhang QJ *et al*. Characteristics and driving factors of spatiotemporal succession of macrozoobenthos in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2881-2892. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2021.06.042. [邹亮华, 邹伟, 张庆吉等. 鄱阳湖大型底栖动物时空演变特征及驱动因素. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2881-2892.]

[78] 蔡永久, 龚志军, 李宽意等. 五大淡水湖大型底栖动物群落结构及演变特征. 南京: "全球变化下的海洋与湖沼生态安全"学术交流会, 2014.

[79] Li K, Liu XJ, Zhou Y *et al*. Temporal and spatial changes in macrozoobenthos diversity in Poyang Lake Basin, China. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(11): 6353-6365. DOI: 10.1002/ece3.5207.

[80] Yang CY, Zhang M, Qu XD *et al*. Patterns of the macroinvertebrate community in Poyang Lake and related environmental factors. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(4): 91-100. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20180312001. [杨晨昱, 张敏, 渠晓东等. 鄱阳湖大型底栖动物群落结构的空间分布及影响因子研究. 生态毒理学报, 2018, **13**(4): 91-100.]

[81] Wang H, Liu X, Wang H. The Yangtze River floodplain: Threats and rehabilitation. *American Fisheries Society Symposium*, 2016, **84**: 263-291.

[82] Zhang TL, Li ZJ. Fish resources and fishery utilization of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 434-444. DOI: 10.18307/2007.0412. [张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 434-444.]

[83] Guo ZZ, Zou DL, Liu RL *et al*. Poyang Lake fish survey report (one of the Jiangxi wildlife resources survey reports). 1964: 121-130. [郭治之, 鄒多祿, 刘瑞蘭等. 鄱阳湖鱼类调查报告(江西野生动物资源调查报告之一). 南昌大学学报(理科版), 1964: 121-130.]

[84] Yang SR, Li MZ, Zhu QG *et al*. Spatial and temporal variations of fish assemblages in Poyanghu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 54-64. [杨少荣, 黎明政, 朱其广等. 鄱阳湖鱼类群落结构及其时空动态. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(1): 54-64.]

[85] Jiang XL, Li MZ, Yang SR *et al*. Temporal variation of fish biodiversity in Poyang Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(3): 376-388. DOI: 10.7541/2023.2022.0317. [蒋祥龙, 黎明政, 杨少荣等. 鄱阳湖鱼类多样性的时空变化特征研究. 水生生物学报, 2023, **47**(3): 376-388.]

[86] Wang S, Duan XB, Chen WJ *et al*. Status and changes of fish resources in the Hukou area of Poyang Lake. *Freshwater Fisheries*, 2016, **46**(6): 50-55. [王生, 段辛斌, 陈文静等. 鄱阳湖湖口鱼类资源现状调查. 淡水渔业, 2016, **46**(6): 50-55.]

[87] Chen WJ, Zhang YP, Zhao CL *et al*. Species composition and biodiversity of fish community in Hukou section of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(6): 684-691. DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2009.04.013. [陈文静, 张燕萍, 赵春来等. 近年长江湖口江段鱼类群落组成及多样性. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(6): 684-691.]

[88] Fang CL, Chen WJ, Zhou HM *et al*. Fish resources in Poyang Lake and their utilization suggestions. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, **44**(9): 233-242, 243. [方春林, 陈文静, 周辉明等. 鄱阳湖鱼类资源及其利用建议. 江苏农业科学, 2016, **44**(9): 233-242, 243.]

[89] Li HF, Wang K, Yu XJ *et al*. Hydroacoustic surveys on spatial-temporal distribution of fishes during early fishing ban period in Poyang

Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(1): 147-157. DOI: 10.7541/2023.2022.0163. [李慧峰, 王珂, 余绪俊等. 禁渔初期鄱阳湖鱼类时空分布特征. 水生生物学报, 2023, **47**(1): 147-157.]

[90] Liu XJ, Qin JJ, Xu Y *et al*. Biodiversity pattern of fish assemblages in Poyang Lake Basin: Threat and conservation. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(20): 11672-11683. DOI: 10.1002/ece3.5661.

[91] Hu ML, Wu ZQ, Liu YL. Fish diversity and community structure in Hukou area of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2011, **23**(2): 246-250. DOI: 10.18307/2011.0213. [胡茂林, 吴志强, 刘引兰. 鄱阳湖湖口水域鱼类群落结构及种类多样性. 湖泊科学, 2011, **23**(2): 246-250.]

[92] Liu Y, Fu HY, Wang LL *et al*. Fishery status and rebuilding of major economic fishes in the largest freshwater lake in China based on limited data. *Fishes*, 2022, **7**(1): 47. DOI: 10.3390/fishes7010047.

[93] Li QY, Dai XF, Liu Y *et al*. Potential spawning grounds of phytophilic fish under a shifting hydrological regime in Poyang Lake, China. *Fisheries Management and Ecology*, 2022, **29**(5): 597-607. DOI: 10.1111/fme.12547.

[94] Yi YJ, Zhang SH. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling. *Scientia Sinica* (*Technologica*), 2019, **49**(4): 363-377. DOI: 10.1360/N092018-00217. [易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(4): 363-377.]

[95] Jiang T, Yang J, Xuan ZY *et al*. Preliminary Report on the effects of resource recovery on anadromous *Coilia nasus* in Poyang Lake under the national 10-year fishing ban. *Progress In Fishery Sciences*, 2022, **43**(1): 24-30. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210119001. [姜涛, 杨健, 轩中亚等. 长江禁渔对鄱阳湖溯河洄游型刀鲚资源恢复效果初报. 渔业科学进展, 2022, **43**(1): 24-30.]

[96] Yang SF, Ye SW, Xu J *et al*. Evaluation of the effects on "10-year fishing ban" in Poyang Lake ecosystem based on Ecopath Model. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(8): 1402-1420. DOI: 10.7541/2024.2023.0429. [杨舒帆, 叶少文, 徐军等. 基于 Ecopath 模型的鄱阳湖生态系统"十年禁渔"效果评估. 水生生物学报, 2024, **48**(8): 1402-1420.]

[97] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Cause analysis and early warning for wetland vegetation degradation in Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(3): 381-386. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201503005. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(3): 381-386.]

[98] Han XX, Feng L, Hu CM *et al*. Wetland changes of China's largest freshwater lake and their linkage with the Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **204**: 799-811. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.023.

[99] Lin YL, Li XH, Tan ZQ *et al*. Dynamic characteristics of vegetation communities in the floodplain wetland of Lake Poyang based on spatio-temporal fusion of remote sensing data. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1408-1423. DOI: 10.18307/2023.0434. [蔺亚玲, 李相虎, 谭志强等. 基于遥感时空融合的鄱阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1408-1423.]

[100] Zheng LL, Wang XL, Li DH *et al*. Spatial heterogeneity of vegetation extent and the response to water level fluctuations and micro-topography in Poyang Lake, China. *Ecological Indicators*, 2021, **124**: 107420. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107420.

[101] 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.]

[102] Huang AP, Liu XB, Peng WQ *et al*. Spatiotemporal heterogeneity of inundation pattern of floodplain lake wetlands and impact on wetland vegetation. *Science of the Total Environment*, 2023, **905**: 167831. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167831.

[103] Yu L, He LH, Zhang Q *et al*. Effects of the Three Gorges Project on the typical wetland vegetations of Poyang Lake. *Geographical Research*, 2011, **30**(1): 134-144. DOI: 10.11821/yj2011010013. [余莉, 何隆华, 张奇等. 三峡工程蓄水运行对鄱阳湖典型湿地植被的影响. 地理研究, 2011, **30**(1): 134-144.]

[104] Dai X, Yang GS, Liu DS *et al*. Vegetation carbon sequestration mapping in herbaceous wetlands by using a MODIS EVI time-series data set: A case in Poyang Lake wetland, China. *Remote Sensing*, 2020, **12**(18): 3000. DOI: 10.3390/rs12183000.

[105] Dai X, Qian XY, Zhu YT *et al*. Inundation dynamic changes of the Lake Poyang wetland in the post Three Gorges Dam era. *J Lake Sci*, 2023, **35**(6): 2048-2058. DOI: 10.18307/2023.0633. [戴雪, 钱心月, 朱昱腾等. 后三峡工程时代的鄱阳湖湿地淹没动态演变. 湖泊科学, 2023, **35**(6): 2048-2058.]

[106] Dai X, Yu ZB, Yang GS *et al*. Role of flooding patterns in the biomass production of vegetation in a typical herbaceous wetland, Poyang Lake wetland, China. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**: 521358. DOI: 10.3389/fpls.2020.521358.

[107] Dai X, Yang GS, Wan RR *et al*. Vegetation productivity of the Lake Poyang Wetland in the post Three Gorges Dam era. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 577-585. DOI: 10.18307/2023.0215. [戴雪, 杨桂山, 万荣荣等. 后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被生产力演变. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 577-585.]

[108] Li YK, Qian FW, Silbernagel J *et al*. Community structure, abundance variation and population trends of waterbirds in relation to water level fluctuation in Poyang Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, **45**(5): 976-985. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.08.002.

[109] Shao MQ, Jiang JH, Dai NH *et al*. Temporal and spatial variations in the group characteristics and adult-juvenile composition of four crane species in Poyang Lake, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(6): 1777-1785. DOI: 10.5846/stxb201508191733. [邵明勤, 蒋剑虹, 戴年华等. 鄱阳湖 4 种鹤类集群特征与成幼组成的时空变化. 生态学报, 2017, **37**(6): 1777-1785.]

[110] Wang J, Han Z, Liu XB *et al*. Simulation of habitat pattern and population response of geese under the change of river-lake relationship: A case study of Duchang Nature Reserve, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(21): 9024-9037. [汪洁, 韩祯, 刘晓波等. 江

湖关系变化下雁类生境格局模拟及雁类种群的响应——以都昌保护区为例. 生态学报, 2023, **43**(21): 9024-9037.]

[111] Meng ZJ, Xia SX, Yu XB *et al*. A study on the suitable time window of feeding vegetation fit for overwintering geese in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21): 7539-7548. DOI: 10.5846/stxb201711082003. [孟竹剑, 夏少霞, 于秀波等. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口. 生态学报, 2018, **38**(21): 7539-7548.]

[112] Teng JK, Xia SX, Duan HL *et al*. Temporal and spatial evolution of herbivorous waterbird habitat in floodplain wetland driven by hydrology. *Water Resources Research*, 2023, **59**(8): e2022WR034399. DOI: 10.1029/2022WR034399.

[113] Li AM, Li YK, Shap RQ *et al*. Population size dynamics and distribution of wintering cranes in Poyang Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(6): 777-786. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0420. [李安梅, 李言阔, 邵瑞清等. 鄱阳湖鹤类越冬种群数量动态和空间分布变化. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(6): 777-786.]

[114] Liu H, Zheng L, Jiang L *et al*. Forty-year water body changes in Poyang Lake and the ecological impacts based on Landsat and HJ-1 A/B observations. *Journal of Hydrology*, 2020, **589**: 125161. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125161.

[115] Hou JJ, Li L, Wang YF *et al*. Influences of submerged plant collapse on diet composition, breadth, and overlap among four crane species at Poyang Lake, China. *Frontiers in Zoology*, 2021, **18**(1): 24. DOI: 10.1186/s12983-021-00411-2.

[116] Zou YA, Tang Y, Xie YH *et al*. Response of herbivorous geese to wintering habitat changes: Conservation insights from long-term population monitoring in the East Dongting Lake, China. *Regional Environmental Change*, 2017, **17**(3): 879-888. DOI: 10.1007/s10113-016-1087-z.

[117] Zheng L, Wan LB. A preliminary analysis of three gorges project's influence on water environmental quality in Poyang Lake district. *Journal of Jiangxi Normal University* (*Natural Science Edition*), 1998, (2): 82-85. [郑林, 万良碧. 三峡工程对鄱阳湖水环境质量影响的初步分析. 江西师范大学学报(自然科学版), 1998, (2): 82-85.]

[118] Ding YK, Wang SR, Zhang WQ *et al*. A rule of hydrological regulating on nutritional status of Poyang Lake, since the operation of the Three Gorges Dam. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 535-542. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.054.

[119] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al*. Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI: 10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]

[120] Yang SL, Milliman JD, Xu KH *et al*. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River. *Earth-Science Reviews*, 2014, **138**: 469-486. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.07.006.

[121] 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.]

[122] Jun P. Spatial and temporal changes of runoff and sediment loads in the Poyang Lake basin since 1950 and their influence factors. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(10): 1751-1761. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201510018. [彭俊. 1950 年以来鄱阳湖流域水沙变化规律及影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(10): 1751-1761.]

[123] Jia JW, Wang D, Xu WF *et al*. Comprehensive evaluation and cause analysis of drought in Poyang Lake Basin in 2022. 2023, **54**(2): 36-42. [贾建伟, 王栋, 徐伟峰等. 2022 年鄱阳湖流域干旱综合评估及成因分析. 人民长江, 2023, **54**(2): 36-42.]

[124] Deng SP, Wu QQ, Wang ZC *et al*. Investigating flood characteristics and mitigation measures in plain-type river-connected lakes: A case study of Poyang Lake. *Water*, 2024, **16**(2): 281. DOI: 10.3390/w16020281.

[125] Hu ZP. Serious drought in Poyang Lake in 2022 and countermeasures for drought prevention and disaster reduction. *China Flood & Drought Management*, 2023, **33**(2): 1-6, 39. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022491. [胡振鹏. 2022 年鄱阳湖特大干旱及防旱减灾对策建议. 中国防汛抗旱, 2023, **33**(2): 1-6, 39.]

[126] Hu CH, Zhang XM. New pattern of river evolution and systematic protection and governance in China. *China Water Resources*, 2024, (7): 1-8, 16. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2024.07.002. [胡春宏, 张晓明. 我国江河演变新格局与系统保护治理. 中国水利, 2024, (7): 1-8, 16.]

[127] Lu JY, Yao SM. Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(1): 36-46. [卢金友, 姚仕明. 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制. 水利学报, 2018, **49**(1): 36-46.]

[128] Stanley EH. Taking a broader view of Three Gorges Dam. *National Science Review*, 2022, **9**(6): nwac032. DOI: 10.1093/nsr/nwac032.

[129] Han Z, Sun L, Wang SY *et al*. Research progress of numerical simulation of wetland plant ecology and research example of Poyang Lake wetland. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*. 2024, **22**(6): 539-557. [韩祯, 孙龙, 王世岩等. 湿地植物生态数值模拟进展及鄱阳湖湿地研究示例. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, **22**(6): 539-557.]

[130] Li L, Knapp JLA, Lintern A *et al*. River water quality shaped by land-river connectivity in a changing climate. *Nature Climate Change*, 2024, **14**: 225-237. DOI: 10.1038/s41558-023-01923-x.

[131] Tang GH, Hu ZP. Change characteristics of historical flood and drought disasters in Poyang Lake Basin with a view to climate change. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(8): 1274-1283. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201708017. [唐国华, 胡振鹏. 气候变化背景下鄱阳湖流域历史水旱灾害变化特征. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(8): 1274-1283.]