

长江中游江湖生物通道恢复的关键生物学问题与框架构建 ——以武汉市涨渡湖群为例

陶江平¹, 刘宏高¹, 易 燃¹, 侯轶群¹, 蔡 露¹, 邱 凉²

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079;
2. 长江水利委员会水资源节约与保护局, 湖北 武汉 430010)

摘要:围绕生物通道恢复面临的科学、技术问题进行方案设计与分析, 搭建生物通道恢复技术框架, 为推动长江中下游江湖生态保护和修复工作提供技术参考。以涨渡湖群为研究试点, 系统总结了该水域江湖洄游鱼类在“长江-湖泊”的迁徙、洄游规律, 掌握鱼类入湖和出湖习性。围绕幼鱼入湖、成鱼入湖与出湖等不同生活史阶段的需求, 结合河湖水位变化特征与影响、现有工程及调度措施的局限性, 提出了“季节性灌江纳苗”“生态水网+过鱼设施”及调度运行等方案, 从保障江湖洄游性鱼类生活史完成的角度搭建生物通道恢复框架, 为解决江湖复合生态系统阻隔问题、恢复洄游鱼类及生物多样性、修复河湖水生生境提供了新思路。

关键词:水系连通; 生物通道; 鱼类洄游; 生态水网; 过鱼设施

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)05-0001-08

长江中下游是我国浅水湖泊分布最集中的地区, 据统计, 长江中下游湖泊占全国淡水湖泊总面积的 60% 以上, 1 km² 以上的湖泊有 651 个, 10 km² 以上的湖泊数量超 100 个(秦伯强, 2002; 陈昌仁, 2011)。历史上这些湖泊都与长江干支流自然连通, 塑造了全球独特的复合生态系统和生物多样性中心, 并被世界自然基金会(WWF)列为全球 233 个优先保护的生态区之一(Olson & Dinerstein, 1998)。在满足防洪、航运、供水、灌溉和生物资源利用等需求的过程中, 原通江湖泊水系连通的规律被忽视, 目前除了洞庭湖、鄱阳湖和石臼湖外, 其余湖泊均建设了闸、坝或堤等工程。据估算, 江湖阻隔使支撑长江中下游水生生物栖息的有效水域面积减少了 76%(万成炎和陈小娟, 2018)。

近年来, 长江中下游原通江湖泊生态环境的保护和修复越来越受到重视, 由于对复杂的江湖关系

(万荣荣等, 2014; 卢金友和姚仕明, 2018)、水文-环境-生态-经济协同机制(王洪铸等, 2015)等缺乏全面的认识, 治理效果不甚明显。江河阻隔或连通性丧失导致的湖泊与河流水力联系受控或切断, 造成河湖空间结构破碎化, 对区域物种丰度及多样性指数产生直接影响(Horváth et al, 2019)。实施河湖连通措施改善河湖水系连通状况, 进而恢复湖泊生态系统质量, 已被纳入《长江保护法》。然而, 在长江中下游湖泊水系连通恢复过程中, 怎样聚焦关键生物学问题, 引入水生态修复要素, 进而实现该水域的水生生物保护、湖泊水质改善、河湖复合生态系统恢复等目标, 为当前需要探讨和解决的关键问题。河湖生物通道恢复作为湖泊水系连通恢复与水生态修复相结合的重要措施, 是维持河湖连通性“物种流”的重要组成部分, 是减缓河湖阻隔和人类活动干扰对生物多样性影响的直接措施之一。开展长江中下游原通江湖泊生物通道恢复试点研究, 可以为“长江大保护”提供理论方法和技术支撑。

本研究以湖北省武汉市新洲区涨渡湖群为例, 以河湖阻隔对鱼类等水生生物生活史完成影响问题为导向, 围绕生物通道恢复面临的科学、技术问题进行方案设计与分析, 从保障江湖洄游性鱼类生活史完成的角度搭建生物通道恢复的技术框架, 以期为推动长江中下游江湖生态保护和修复工作提供技术思路与借鉴参考。

收稿日期: 2021-10-20 修回日期: 2023-08-30

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFC3200304, 2019YFC0408904); 湖北省自然科学基金计划青年项目(2020CFB322)。

作者简介:陶江平, 1981 年生, 男, 副研究员, 主要从事行为生态学及过鱼设施方面研究。E-mail: jptao@mail.ihe.ac.cn

通信作者:邱凉, 1975 年生, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源与水生态修复研究与管理。E-mail: 447048031@qq.com

1 研究区域及关键生物学问题

1.1 区域概况

涨渡湖群位于武汉市新洲区,是长江中下游极具代表性的原通江湖泊群。历史上该湖泊群直通长江,与举水、倒水等形成典型河湖水系自然连通的复合生态系统(图1)。受近现代人类活动的强烈影响,特别20世纪50年代后实施大规模围垦,以及长江和举水堤防、涨渡湖南岸涨渡湖闸(俗称“挖沟闸”)、举水西堤沐家泾闸和倒水下游改道等工程,导致涨渡湖面积由50年代约155 km²迅速减少到80年代不足40 km²,湿地水面由255 km²缩减到44.7 km²(朱江等,2005)。涨渡湖现有水面37.7 km²,平均水深1.3~1.5 m,最大水深2.3 m,湖底最低高程16.7 m。湖泊呈正方形,东西宽6.5 km,南北长6 km,常年调蓄水位20 m左右,最低水位为18.7 m,沿湖东、南、北三面筑有13.41 km长的围渍堤,堤高高程23 m左右,东北角建有齐头咀节制闸,通往东西向的十里主港,南线由长1 km的挖沟渠及涨渡湖闸通向长江干流(朱江,2005)。

涨渡湖群因围湖造田和工程建设等因素,加之涨渡湖面积锐减,面源污染和内源污染加重而污染物难以得到沉积、转换和降解,水体自净能力下降、水质恶化、水体富营养化程度加剧,涨渡湖群水环境呈逐年恶化趋势(张清慧等,2013),同时,鱼类物种多样性和遗传多样性显著下降。据统计,20世纪50年代涨渡湖鱼类有82种,80年代下降到63种,到21世纪初仅有46种(王利民等,2005)。目前,河海洄游型鱼类基本消失(如三线舌鲴、鲂等),主要江湖洄游鱼类种群(如四大家鱼等)需依靠人工放养才得以维系,喜流水性鱼类种群衰退甚至消失(如细鳞鲴、长吻鲴和中华沙鲴等),湖泊定居型鱼类种数也呈现下

降趋势(李立银等,2006)。总之,涨渡湖具有长江中下游原通江湖泊生态系统退化的典型特征,如面积萎缩、水质恶化、生物多样性下降等,因而可作为生物通道恢复试点的典型代表性。

1.2 关键生物学问题

河湖水系连通性恢复是江湖复合生态系统的基础,与工程建设运行、生境丧失和破碎化、水文情势改变、水环境污染、生物资源过度利用和生物入侵等主要生态胁迫因子皆存在紧密的因果关系(Liu & Wang, 2010; Wang et al, 2016)。其中,鱼类作为淡水生态系统的顶级类群,能够通过捕食关系调节其他水生生物的丰度,在维持河湖水生生物多样性、江湖复合生态系统的结构与功能方面发挥了重要作用(程馨雨等,2019; Zhang et al, 2021)。对长江中下游而言,江湖洄游性生活史过程为长江干流繁殖、湖区越冬与育肥。亲鱼在繁殖当年由湖区进入长江,繁殖后的幼鱼进入湖区生长、发育。长江中下游通江闸站的建设与运行切断了江湖洄游性鱼类的洄游通道,从而鱼类资源量锐减、生物多样性下降(常剑波和曹文宣,1999)。

长江与通江湖泊之间的闸坝建设是阻隔江湖洄游性生活史完成的关键。通过建设生物通道,实现江湖洄游鱼类在长江、通江湖泊之间洄游通道的恢复,是实现流域内河流与湖泊之间物质流、能量流、信息流和物种流畅通的重要条件(朱江等, 2005; 万成炎和陈小娟, 2018)。为此,生物通道恢复的关键生物问题便是通江闸站建设对鱼类洄游的影响,鱼类洄游行为、规律等生物学参数是生物通道设计的前提和依据。生物通道的构建需要满足幼鱼入湖育肥、鱼类出湖越冬及繁殖,以及繁殖、越冬后返湖育肥等生活史过程对通江闸站通过性的需求(图2)。

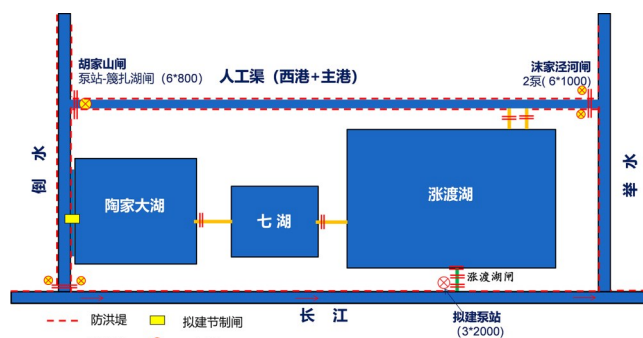
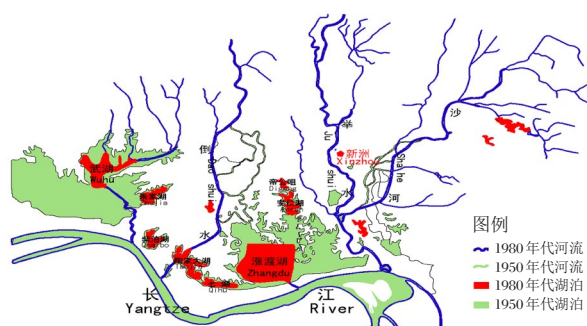


图1 涨渡湖群水面面积变化(左)及主要闸站控制示意(右)

Fig. 1 Changes in water surface area over different periods and the distribution of sluice gates in the Zhangdu Lake

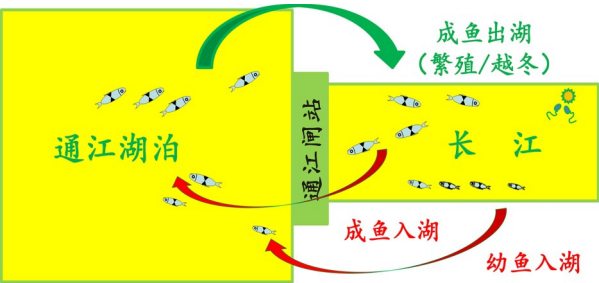


图2 通江闸站建设影响江湖洄游鱼类生活史过程
Fig. 2 Influence of sluice gate construction on the life history completion of river-lake migration species

2 基于鱼类洄游需求的生物通道恢复

2.1 鱼类洄游规律与生物学依据

2.1.1 幼鱼入湖时间 幼鱼入湖时间采用长江干流涨渡湖附近江段的鱼类早期资源出现时间进行界定。基于2004年中国水产科学院长江水产研究所和2020年水利部中国科学院水工程生态研究所在该水域的监测数据进行卵苗逐日分布的频数分析(内部资料),结果表明,长江干流涨渡湖附近水域的幼鱼等早期资源出现时间在6-8月,以6-7月卵苗径流量最高。该水域6-7月鱼苗径流量为253.8亿尾,其中6月30日-7月3日鱼苗径流量为124.8亿尾,约占总监测期的50%。因此,幼鱼入湖需在每年的6-8月开展协助,重点开展时间为每年的6-7月(图3)。

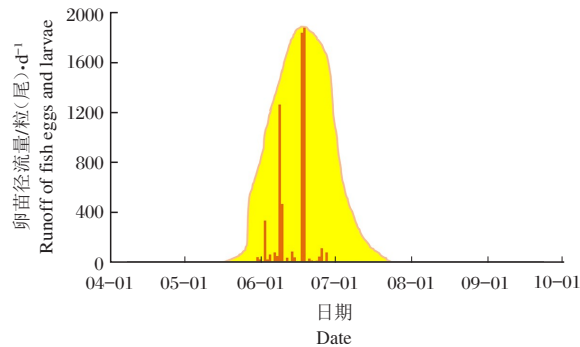


图3 江湖洄游鱼类卵苗出现时间及规律

Fig. 3 Occurrence peak and distribution patterns of fish eggs and larvae of river-lake migration species

2.1.2 幼鱼入湖方式 由于鱼类在早期资源阶段(卵苗阶段)不具有游泳能力或者游泳能力非常弱,主要是随水流迁移。在鱼类达到一定的规格,则要考虑鱼类游泳能力及要求。因此开展幼鱼入湖主要考虑该水域繁殖鱼类的卵苗随水流的被动扩散规律。对此,需要考虑江湖洄游鱼类幼鱼(卵苗)随水流扩散的

空间分布特征。结合洪湖灌江纳苗相关调查成果(常剑波和陈宜瑜,1995),早期卵苗生活史阶段,无论是江湖洄游鱼类,还是其他鱼类的卵苗均主要分布在水体的中表层,在水深0.25 m以上的卵苗占整个垂向空间总量的60%以上,不同水层鱼类卵苗分布数据见表1。

表1 不同水深范围内鱼类卵苗分布数量

Tab. 1 Vertical distribution of fish eggs and larvae of river-lake migration species

水深 /m	卵苗总密度 /粒(尾)·m ⁻³	不同深度 比例/%	江湖洄游鱼卵苗 /粒(尾)·m ⁻³	不同深度 比例/%
0.25	17.76±8.83	62.42	2.72±1.76	61.26
1.55	5.94±2.73	20.87	0.96±0.45	21.62
2.55	4.75±4.09	16.70	0.76±0.68	17.12

2.1.3 成鱼出入湖时间 通江湖泊内分布的江湖洄游性鱼类,除了需要生殖洄游之外,还有其他生活史阶段的洄游与迁徙(如育肥和越冬)。近30年来,涨渡湖处于阻隔或半连通状态,没有该水域成鱼入湖、出湖规律的研究成果,因此借鉴现有通江湖泊(洞庭湖)鱼类洄游规律进行类比分析作为参考(刘艳佳等,2020)。基于相关成果对鱼类迁徙规律总结,冬季(1-2月)基本处于最低水位时期,鱼类随着湖区水位短时间的涨落变化(日变动)会表现出与之适应的行为,即涨水入湖、退水出湖。春季(3-5月),随着汛期到来、水温升高,调查期间无论水位是整体上涨还是消落,鱼类均表现为入湖趋势。夏季(6-8月),湖泊水位和水温均处于较高时期,大量鱼类个体入湖索饵育肥,鱼类均表现为入湖行为。11-12月,随着水温下降、水位下降,鱼类行为以出湖为主,即使11月调查期间,水位整体有小幅度上涨,但由于该时期水温急剧下降,7 d内水温下降超过2℃,鱼类的以出湖为主。

因此,每年的2-4月(春季),随着汛期到来,水位、水温逐步升高,鱼类由长江干流迁徙入湖索饵和育肥;在10-12月,随着水位退落、湖区水温下降,鱼类出湖进入长江干流越冬。

2.1.4 成鱼出入湖方式 基于鱼类资源现状以及过鱼对象的分析成果,确定了涨渡湖水域的江湖联系的主要过鱼种类、规格。对此,初步选取了四大家鱼等江湖洄游鱼类为目标对象,结合文献资料(Newbold et al, 2016; Hou et al, 2018; 蔡露等, 2021; 王永猛等, 2021)进行鱼类游泳能力综合分析,用于为生物通道恢复方案(如过鱼设施、生态水网建设)提供设计流速等水力学参数和依据。基于特定规格目标鱼类的游泳能力测试成果,结合国内外相关成果的对

比分析,提出目标鱼类成鱼期出、入湖生物通道的设计流速,具体见表2。

表2 基于鱼类游泳能力的过鱼设施参数设计

Tab. 2 Parameters for fish passage facility design based on fish swimming abilities				
鱼类游泳能力	范围/m·s ⁻¹	过鱼设施参数	取值范围/m·s ⁻¹	取值依据
最大感应流速	0.09~0.14	最小设计流速	> 0.15	最小设计流速>最大感应流速
半数临界流速	0.67~0.92	入口诱鱼流速	0.40~0.74	诱鱼流速为半数临界流速的0.6~0.8倍
半数突进流速	1.03~1.32	过鱼孔口/断面流速	< 1.00	过鱼孔口/断面流速需小于最小突进速度

2.2 生物通道恢复方案

2.2.1 恢复框架构建 河湖水位关系及变化特征是生物通道设计的另一前提条件。结合长江干流(挖沟水位站)与涨渡湖水位关系的对比分析可知,1-12月,涨渡湖和长江干流的月均水位都呈先增大后减小的趋势,涨渡湖的月均水位差在0.4 m内,长江干流月均水位差最大为8.73 m。

在综合鱼类完成生活史需求、行为学依据及河湖水位关系的基础上,综合提出“季节性灌江纳苗”和“生态水网+过鱼设施建设”等生物通道恢复的建设与优化方案。每年6-8月,涨渡湖群水位低于长江干流水位,为促进长江干流繁育的鱼类卵苗和幼鱼进入涨渡湖群,需开展季节性灌江纳苗方案构建;每年2-4月以及10-12月,在涨渡湖群水位高于长江干流水位期间,为实现鱼类入湖育肥和鱼类出湖越冬,需开展“生态水网+过鱼设施”的建设(图4)。

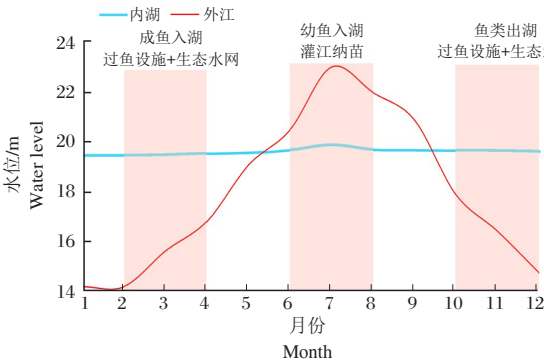


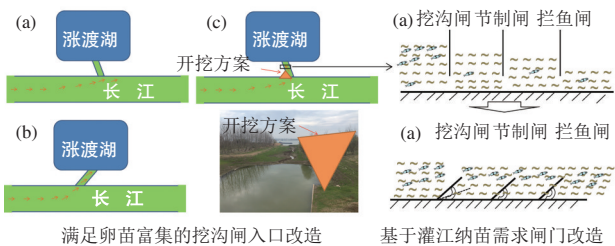
图4 生物通道实现方式

Fig.4 Restoration framework of biological corridor for river-lake connection

2.2.2 季节性灌江纳苗 在江湖洄游鱼类的繁殖季节(6-8月),涨渡湖闸外江平均水位在19~23 m。涨渡湖湖区内的水位控制在19.3 m左右,符合无游泳能力鱼类卵苗等随水流进入湖区的顺灌要求。开展

季节性灌江纳苗,可实现长江干流繁殖的幼鱼/苗入湖,也可实现成鱼出湖繁殖。

开展涨渡湖闸路线的季节性灌江纳苗需要3个保障条件:一是繁殖的鱼类卵苗在入湖口附近水域聚集;二是具有携带卵苗入湖的水流条件;三是卵苗随水流入湖无阻隔障碍。对此,需要采取的措施包括入湖通道的改造和优化及闸门改造,见图5。



(a为现有方案;b和c均为基于需求的改造及优化方案)

图5 基于幼鱼入湖需求的灌江纳苗

(a - the present scheme; b & c - the optimized scheme)

Fig.5 Scheme optimization by filling river flow to satisfy the flow requirements of fish fries entering the lake

(1)入湖通道改造及优化

针对长江干流与涨渡湖连接通道的水流方向呈锐角结构,难以满足鱼类卵苗随水漂流进入涨渡湖的问题,应对长江干流涨渡湖闸附近水域进行改造,以便鱼类卵苗可以在此水域富集。拟采取方案有2个。一是入湖通道整体改造。具体为改变涨渡湖闸通道的朝向,将干流-通道水流流向的夹角由锐角变为钝角,将水流直接引入涨渡湖内(开挖河段长度约为1 600 m,宽度约5~8 m,深度约6~9 m)。二是入湖通道局部改造。通过涨渡湖闸出口附近水域开挖,形成一个急流、缓流的交错区,即鱼类卵苗富集区(开挖方案为边长约为600 m的三角形,开挖底层高程约为8.7~11.7 m,坡降约10°~30°)。

(2)闸门改造

涨渡湖闸入湖通道长约1 600 m,设有3个闸门和3级沉沙池。从长江干流至湖区方向依次为涨渡湖闸、挖沟节制闸及挖沟拦鱼闸。针对60%以上鱼类卵苗分布在中表层水体的规律(表1),同时克服通过长江引水进行灌江纳苗过程中携带的大量泥沙并沉积在涨渡湖湖汊及主湖区等泥沙问题(严黎等,2006),需将底层进水型闸门改造成为中、表层进水型,通过闸门调整来实现入流方式由底层入流改成中、表层入流,在确保入湖卵苗资源最大化的同时,减少因长江引水携沙导致的涨湖淤积。

2.2.3 生态水网+过鱼设施 每年10月至次年的5月

为长江流域的非汛期,涨渡湖等湖区的水位维持在19.5 m左右,长江干流(汉口站)水位一般在13.0~19.0 m,水位差在0.3~6.3 m。针对涨渡湖江湖洄游成鱼在秋冬季出湖越冬及春季入湖育肥的生活史过程,协助鱼类在冬季(10~12月)出湖越冬和春季(2~4月)入湖育肥。

此阶段的生物通道恢复分为2个方面,一是基于生态水网的建设,实现长江干流-涨渡湖群之间的水系连通,保障江湖、湖群之间的水流条件;二是基于过鱼设施的建设,克服生态水网关键节点、水头差等造成的物理或流速障碍,保障连通水系内鱼类等生物的迁徙与洄游。生态水网建设根据涨渡湖群的现场条件,建立的形式分为微连通和全连通2种。微连通方案通过涨渡湖闸实现长江干流与涨渡湖之间直接的水系连通;全连通为恢复长江干流、涨渡湖及倒举之间的联系。其中全连通的生态水网建设方案为实现鱼类在“长江干流-涨渡湖群”之间迁徙的最佳方案。随后,在此生态水网建设基础上,在水系关键节点建设过鱼设施6座,确保流速、流场符合鱼类等生物的需求,保障生态水网体系内鱼类等生物自由迁徙(图6)。

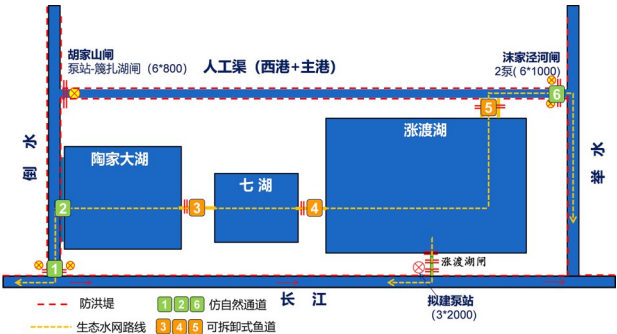


图6 基于成鱼出入湖需求的生态水网和过鱼设施构建
Fig.6 Combination of eco-friendly water network and fish passage facilities to satisfy the requirements of adult fish migration

建设的过鱼设施需满足江湖洄游鱼等的春季入湖和冬季出湖要求,具有双向通过性特征。基于“长江干流-涨渡湖群”的工程条件进行过鱼设施方案的比选,标号为(1、2、6)区域有固定水位差,可采用仿自然通道;标号(3~5)因调度运行导致水位差变动可采用可拆卸式鱼道。根据鱼类游泳能力及运行的水位差进行鱼类的方案初步设计(表1和图4),仿自然通道拟采用“阶梯-深潭”系统,大卵石堆积成阶梯,较细颗粒泥沙在深潭缓冲区沉积。仿自然通道坡度约为1/200,长约100~500 m,详细参数需根据水头

差、设计的坡度、糙率等确定。阶梯高度约为0.3~0.5 m,阶梯长度约3 m。通道断面为梯形,底部宽度约2 m,边坡系数2.5~3.0。在长期运行过程中,水流冲击和淤积可对仿自然通道进行二次调整,使其达到结构和生境的稳定状态。可拆卸式鱼道类似于集装箱结构,每个池室作为一节,可拆卸可组装,且可根据具体情况变化坡度。适用于水头差小、坡度变化大、鱼道结构不确定的试验设施。每节内设消能隔板,坡度约为1/100,长约2 m,宽约1.5 m,高约1.5 m,设连接结构和连接处防水设施。

2.3 调度运行保障措施

在生物通道建设后,需要开展生物通道的运行方案的编制,通过优化生态水网连通的闸、泵站等调度运行方案,实施联合调度方式,满足河湖鱼类等水生生物通道的连通性恢复。结合生物通道建设要求的运行期的水文条件、生物通道恢复措施以及生物通道设计的目标对象,综合提出面向生物通道恢复的调度方案或措施。按照鱼类入湖和出湖需求可分为3个阶段,如下:

- (1)每年2~4月,针对成鱼入湖育肥的需求,结合“过鱼设施+生态水网建设”方案,制定合理的调度措施,开展成鱼入湖育肥的调度工作;
- (2)每年6~8月,在涨渡湖水位处于防洪水位阶段,针对长江干流繁殖的河湖洄游等鱼类的繁殖群体,开展灌江纳苗的调度,促进长江干流繁育的相关鱼类的幼鱼进入涨渡湖群,实现相关物种在湖区的育肥;
- (3)每年10~12月,在涨渡湖群水位处于正常蓄水位阶段,针对鱼类出湖越冬的需求,结合“过鱼设施+生态水网建设”方案,开展鱼类出湖越冬的调度工作。

3 讨论

河湖阻隔(连通性丧失)对区域物种丰度及多样性指数的影响显著,是导致河湖生态功能衰退的一个主要因素(Horváth et al,2019)。同时,连通性恢复程度决定了河湖复合生态系统浮游生物、植物、鱼类等生物多样性水平。在工程学领域,当前围绕河湖连通性恢复开展了大量研究、设计与建设工作,如河湖水系连通、连通性修复、生态水网建设等(伍新木和高鑫,2005;赵军凯等,2015)。但是这些措施针对的是水资源配置和管理体系等问题,围绕的核心问题是水文过程的修复,对生物学及生态学的需求与问题缺乏关注。在生态学及生物学领域,相关研究的开展主要围绕河湖阻隔的生态学负效应,连通性

丧失对河湖生态系统影响等方面(Liu & Wang, 2018; 刘丹等, 2019), 缺乏基于生物或生态学需求的修复措施。

鱼类作为淡水生态系统的顶级类群, 为生物通道恢复的最优指示物种。因此生物通道恢复首先需要解决鱼类生活史完成的时空需求问题。灌江纳苗作为引导长江繁殖的卵苗或幼鱼入湖育肥的方式, 于20世纪80–90年代开展了大量研究与试验, 并取得了丰富成果(常剑波和陈宜瑜, 1995; 孙建贻等, 1998)。然而, 该措施仅考虑了幼鱼入湖的需求, 在江湖洄游鱼类出湖越冬和繁殖等多方面的需求仍没有有效得到解决, 更无法实现湖泊营养源向长江输送的生物转化。本研究在系统总结和掌握江湖洄游鱼类入湖和出湖迁徙、洄游规律的基础上, 提出的“季节性灌江纳苗”“生态水网+过鱼设施”等方案, 实现了江湖洄游性鱼类生活史的完成, 为长江中下游河湖连通性恢复提供了思路与方法。

生物通道为河湖水系连通性恢复与生态修复相结合的措施, 需要充分解决满足生物洄游需求的生物学问题(董哲仁等, 2020)。以涨渡湖群为例, 针对涨渡湖群突出生态环境问题, 地方采取了一些水生态环境保护措施, 包括水系连通工程措施、灌江纳苗、水污染防控与水质改善等。如在2005年, 由武汉市新洲区人民政府与世界自然基金会合作, 开展了涨渡湖“灌江纳苗”工作, 相关工作在促进江湖鱼类资源交流, 促进湖区生物多样性方面发挥了一定作用(朱江等, 2005; 吴波等, 2019)。然而, 由于对鱼类卵苗随水流扩散规律了解不透彻, 在一定程度制约了相关措施实施的有效性。灌江纳苗需要3个保障条件, 即针对性实施的入湖通道的改造和优化及闸门改造(图5)、在原有灌江纳苗的基础上有效增加卵苗输送效率、减少泥沙输入及降低湖泊淤积的风险(严黎等, 2006)。本研究针对成鱼入湖和出湖的越冬、繁殖和育肥等需求, 详细分析工程现状、水位关系以及水力学条件, 结合代表性鱼类游泳能力的测试结果与指标, 提出了“生态水网+过鱼设施”的方案及相应措施的建议参数, 论证了相关工程实施的可行性和可操作。

总之, 本文系统总结了涨渡湖群水域鱼类等水生生物的迁徙、洄游规律, 掌握鱼类入湖和出湖习性等要素。围绕幼鱼入湖、成鱼入湖以及鱼类出湖的需求, 结合河湖水位关系, 提出了“季节性灌江纳苗”“生态水网+过鱼设施”以及运行管理等方案。鉴于长江中下游生物通道恢复涉及的科学、技术问题复

杂, 长江中游生物通道的恢复还需深入研究, 具体内容包括:

(1) 统筹规划方面, 全面推动长江中下游流域层面河湖生物通道恢复, 需开展流域层面河湖生物通道本底数据调查研究, 推进生物通道恢复的顶层规划与设计。

(2) 研究设计方面, 生物通道恢复涉及鱼类生态学、水文水动力学、工程学等多学科内容, 也涉及防洪、血防、泥沙等方面的需求。为保证生物通道实施的科学性与有效性, 亟需深化科学、技术问题研究, 加强学科交叉问题探讨。

(3) 建设运行方面, 生物通道恢复工程涉及水利、农业、林业和生态环境等部门。建议加强跨专业、跨部门深入合作, 共同推进其研究、建设、运行管理以及效果评估工作, 共同维护长江中下游江湖生态系统结构与功能。

4 结论

以涨渡湖恢复试点区域, 从江湖洄游鱼类生活史完成对洄游通道需求的角度, 系统总结了江湖洄游鱼类的迁徙、洄游规律, 搭建了生物通道恢复框架, 结论如下。

(1) 生物通道恢复对象为江湖洄游鱼类, 具体为幼鱼入湖育肥、成鱼入湖育肥、出湖越冬和繁殖等3个关键生活史时期对河湖连通的需求。

(2) 生物通道拟采取2种构建形式: “季节性灌江纳苗”和“生态水网+过鱼设施”。“季节性灌江纳苗”针对幼鱼入湖的需求, 配套措施有涨渡湖闸通道构建、闸门改造和鱼类富集区构建等; “生态水网+过鱼设施建设”针对成鱼入湖、鱼类出湖需求, 其中生态水网涉及河湖、湖群之间水系连通, 过鱼设施用于克服生态水网中鱼类洄游的物理屏障及流速障碍。

(3) 通过工程建设、综合调度和管理措施解决江湖复合生态系统江湖阻隔问题, 以达到洄游鱼类及生物多样性恢复、河湖水生生境修复的目标。

(4) 河湖生物通道恢复涉及的科学、技术问题复杂, 为保证其实施的科学性与有效性, 还需深入开展研究。

参考文献

- 常剑波, 陈宜瑜, 1995. 洪湖灌江纳苗的可行性及效益评价[M]//陈宜瑜. 洪湖水生生物及其资源开发. 北京: 科学出版社: 220–231.
- 常剑波, 曹文宣, 1999. 通江湖泊的渔业意义及其资源管理对策[J]. 长江流域资源与环境, (2): 153–157.

- 蔡露,侯轶群,金瑶,等,2021.鱼游泳能力对体长的响应及其在鱼道设计中的应用[J].农业工程学报,37(5):209–215.
- 程馨雨,陶捐,武瑞东,等,2019.淡水鱼类功能生态学研究进展[J].生态学报,39(3):810–822.
- 陈昌仁,2011.不同水动力下水生植物群落底泥磷素迁移特征[D].南京:南京林业大学.
- 董哲仁,张晶,赵进勇,2020.论恢复鱼类洄游通道规划方法[J].水生态学杂志,41(6):3–10.
- 李立银,倪朝辉,李云峰,等,2006.涨渡湖渔业资源及鱼类多样性状况研究[J].淡水渔业,36(2):18–18.
- 刘艳佳,高雷,郑永华,等.洞庭湖通江水道鱼类资源周年动态及其洄游特征研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):104–113.
- 刘丹,王烜,李春晖,等,2019.水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J].长江流域资源与环境,28(7):1702–1715.
- 卢金友,姚仕明,2018.水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制[J].水利学报,49(1):36–46.
- 秦伯强,2002.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,14(3):193–202.
- 孙建贻,周春生,段中华,1998.网湖灌江纳苗的效益评价[J].淡水渔业,28(3):16–17.
- 万成炎,陈小娟,2018.全面加强长江水生态保护修复工作的研究[J].长江技术经济,2(4):33–38.
- 万荣荣,杨桂山,王晓龙,等,2014.长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J].湖泊科学,26(1):1–8.
- 王洪铸,王海军,刘学勤,等,2015.实施环境-水文-生态-经济协同管理战略,保护和修复长江湖泊群生态环境[J].长江流域资源与环境,24(3):353–357.
- 王利民,胡慧建,王丁,2005.江湖阻隔对涨渡湖区鱼类资源的生态影响[J].长江流域资源与环境,14(3):287–292.
- 王永猛,柯森繁,林晨宇,等,2021.红河(元江)流域的典型鱼类游泳能力探究及在过鱼设施流速设计中的应用[J].湖泊科学,33(6):1820–1831.
- 吴波,赵强,马方凯,2019.长江中下游江湖关系恢复研究[J].环境科学导刊,38(5):10–14.
- 伍新木,高鑫,2009.创新城市水环境治理机制及促进大东湖生态水网构建[J].环境科学与技术,32(11):7–11.
- 严黎,陈立,吴门伍,等,2006.浅析灌江纳苗对涨渡湖湿地水质及泥沙的影响[J].水资源与水工程学报,17(5):38–41.
- 张清慧,董旭辉,姚敏,等,2013.近200年来湖北涨渡湖对江湖联通变化的环境响应[J].湖泊科学,25(4):463–470.
- 赵军凯,蒋陈娟,祝明霞,等,2015.河湖关系与河湖水系连通研究[J].南水北调与水利科技,13(6):1212–1217.
- 朱江,王利民,雷刚,等,2005.重建江湖联系 保护涨渡湖湿地[J].人民长江,36(11):60–62.
- 朱江,2005.江汉平原湖泊湿地近代环境变迁——以涨渡湖、天鹅洲长江故道为例[D].北京:中国地质大学.
- Horváth Z, Ptácník R, Vad CF et al, 2019. Habitat loss over six decades accelerates regional and local biodiversity loss via changing landscape connectance[J]. Ecology Letters, 22: 1019–1027.
- Hou Y, Cai L, Wang X, 2018. Estimating fish swimming metrics and metabolic rates with accelerometers: the influence of sampling frequency[J]. Journal of Fish Biology, 93: 207–214.
- Liu X and Wang H, 2010. Estimation of minimum area requirement of river-connected lakes for fish diversity conservation in the Yangtze River floodplain[J]. Diversity and Distributions, 16(6): 932–940.
- Liu X, Wang H, 2018. Effects of loss of lateral hydrological connectivity on fish functional diversity[J]. Conservation Biology, 32: 1336–1345.
- Newbold L R, Shi X, Hou Y, et al, 2016. Swimming performance and behavior of *Hypophthalmichthys nobilis*: application to fish passage and exclusion criteria[J]. Ecological Engineering, 95: 690–698.
- Olson D M, Dinerstein E, 1998. The Global 200: a representation approach to conserving the Earth's most biologically valuable ecoregions[J]. Conservation Biology, 12(3): 502–515.
- Wang H, Liu X, Wang H, 2016. The Yangtze River floodplain: threats and rehabilitation[J]. American Fisheries Society Symposium, 84: 263–291.
- Zhang P, Zhang H, Wang H et al, 2022. Warming alters juvenile carp effects on macrophytes resulting in a shift to turbid conditions in freshwater mesocosms[J]. Journal of Applied Ecology, 59(1): 165–175.

(责任编辑 郑金秀)

Biological Problem and Framework Construction of Biological Corridor Restoration for River–lake Connection in the Middle and Lower Yangtze River: a Case Study of Zhangdu Lake

TAO Jiang-ping¹, LIU Hong-gao¹, YI Ran¹, HOU Yi-qun¹, CAI Lu¹, QIU Liang²

(1. Key Laboratory of Ministry of Water Resources for Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China;

2. Bureau of Water Resource Conservation and Protection, Changjiang Water Resources Committee, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract : The restoration of the biological corridor between the rivers and lakes is one of the direct measures to relieve the impact of river–lake blocking and human activities on the biodiversity. The construction of biological corridor is helpful for fish migration between rivers and lakes. In this study, Zhangdu Lake group in Wuhan City of Hubei Province was selected as research, we discussed the scientific and technological problem for the restoration of biological corridors and developed a technical framework for the restoration of biological passage in Zhangdu Lake group. First, we summarized the movement and migration patterns of the river–lake migratory fishes in this water area, and characterized the different biological requirements of larval fish and adult fish as well as the migration periods of key life stages for migratory fish species, bidirectional migration routes between rivers and affiliated lakes. Then, we proposed a systematical construction scheme for the restoration of biological corridors connecting the Zhangdu River and the Yangtze River, The optimized scheme includes filling water flow to rivers to satisfy the requirements of larval fish drifting from river to lake during the periods from June to August, constructing ecological–friendly water network and fish passage facilities in consider of bidirectional migration requirements and water fluctuations resulted from the operation and regulation of sluice stations. In conclusion, the proposed schemes in this study met the needs of migratory fish species to complete different life history stages such as fish fries entering the lake, adult fish entering and leaving the lake. Meanwhile, engineering construction, comprehensive scheduling and management measures solved the problem of river–lake separation in the river–lake complex ecosystem. The present study provided a restoration framework of biological corridors for river–lake connection, from which ecological protection and restoration in the middle and lower Yangtze River is benefited.

Key words: river–lake connection; biological passages; fish migration; ecological–friendly water network; fish passage facilities