

DOI: 10.12264/JFSC2021-0012

鱼类群落调控在浅水湖泊生态修复中的作用：以傀儡湖为例

蔡杏伟^{1,2}, 李为¹, 樊厚瑞^{1,3}, 方涛¹, 李伟⁴, 常锋毅⁴, 刘家寿¹, 廖传松¹

1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 571126;
3. 武汉市社会科学院, 湖北 武汉 430019;
4. 中国科学院武汉植物园, 湖北 武汉 430073

摘要: 鱼类是湖泊食物网中的重要消费者, 占据食物网多个营养级。通过食物网营养级联效应, 鱼类对湖泊生物群落结构和水环境可产生重要影响。本研究以长江中下游浅水湖泊——傀儡湖为例, 研究了基于不同饵料类群渔产潜力估算前提下食鱼性鱼类、滤食性鱼类、碎屑食性鱼类的组合放养技术, 并探讨了底层杂食性鱼类针对性捕捞的复合调控策略对傀儡湖鱼类群落结构、沉水植物群落和水质产生的影响, 旨在揭示鱼类群落调控在优化湖泊生态系统结构方面的重要作用, 为湖泊生态修复提供新的思路 and 手段。

关键词: 湖泊; 鱼类群落调控; 水质; 沉水植物; 营养级联效应; 生态系统结构优化; 大水面; 生态渔业

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)06-0737-06

我国幅员辽阔, 湖泊众多且渔业资源丰富, 但受江湖阻隔等因素影响, 一些江湖洄游性鱼类资源不能补充, 人工放养成为修复湖泊生态系统、利用天然饵料资源的重要手段, 如何实现渔业资源利用和水环境保护的协调统一一直是湖泊生态渔业研究的重点。据统计, 全国共有面积大于 1 km² 的湖泊 2756 个, 总面积 8.05×10⁴ km² [1]。历史上这些湖泊在如何利用和保护渔业资源的问题上经历了不同的发展阶段, 总体上围绕如何发展渔业、保护渔业资源和保护水环境几方面不断调整。

我国湖泊渔业经历了 3 个主要发展阶段, 第一阶段是 20 世纪 50 年代以前, 以天然捕捞渔业为主, 鱼类通过“灌江纳苗”和种群自身增殖进行补充。第二阶段是 20 世纪 50 年代至 20 世纪末, 在天然湖泊放养鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)和草鱼(*Ctenopharyngodon*

idellus)等经济鱼类, 充分利用天然饵料资源。同时, 发展了湖泊网箱、围网养殖等, 进一步提升湖泊渔业功能。第三阶段则是进入 21 世纪后, 随着社会经济的发展, 湖泊水环境等问题日益显现, 如何协调湖泊渔业功能和水质保护越来越受关注, 渔业发展方式面临再转型, 人放天养、完全利用天然饵料的渔业方式越来越多地被使用, 湖泊渔业逐步进入以增殖渔业为主的发展阶段 [2-4]。

在湖泊渔业方式调整过程中, 以养殖为主的湖泊渔业方式, 尤其是集约化的养殖方式对湖泊水环境、鱼类多样性等产生了一定的负面影响。例如, 过度放养草食性鱼类, 导致大型沉水植物生物量下降; 人为干预力度加大、捕捞强度增大, 降低了湖泊鱼类多样性, 削弱了鱼类群落结构复杂度, 影响了生态系统的稳定性 [5]。产生这些影响的原因是多方面的, 渔业活动并非唯一因素, 从根本上来说是人为干扰下水生生物和水环境动态

收稿日期: 2021-01-07; 修订日期: 2021-03-16.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900504, 2019YFD0900600).

作者简介: 蔡杏伟(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事渔业生态学研究. E-mail: caixw618@163.com

通信作者: 廖传松, 博士后, 主要从事渔业生态学研究. E-mail: liaocs@ihb.ac.cn

平衡被破坏^[4]。湖泊渔业虽产生过一定的负面效应,但其在维护和调节湖泊生态系统健康、增加优质水产品供应方面的重要价值不容忽视。鱼类是水域生态系统中的顶级消费者和最大的脊椎动物群体,同时也是引起水域生态系统结构和功能变化的主要驱动力^[6],常用于湖泊鱼类群落调整和水生态系统调控。

傀儡湖(31°21'N, 120°39'E)位于太湖流域下游,是江苏省昆山市重要的饮用水水源地,通过天然河道和引水箱涵与阳澄湖相连,湖水主要通过降雨和阳澄湖进行补充。作为水源地湖泊,傀儡湖最主要的生态系统服务功能是保障供水安全。傀儡湖主要由养殖性湖泊经过退渔、清淤、加深等改造形成,水生态系统结构和功能较为简单,成熟度和稳定性差。从 2007 年开始向湖中投放鱼种,以鲢和鳙为主^[7]。据统计,2007—2012 年傀儡湖所投放的鱼类中,鲢鳙占比为 97.11%,其他鱼类比例为 2.89%。这些调控措施对优化傀儡湖水质和控制藻类取得了一定成效^[7]。然而,全湖鱼类种类丰富度较低,群落结构不合理的状况没有得到根本转变,表现为底层扰动性鱼类生物量偏高,食鱼性鱼类生物量偏低。这种不合理的鱼类群落结构最终导致该湖沉水植物几乎全部消亡,湖泊水质时空波动较大^[8-9]。为提高傀儡湖生态系统结构和功能稳定性,本研究于 2013 年起调整了鱼类群落调控策略,并分析了鱼类群落调控前后傀儡湖生态环境的变化,探讨鱼类群落调控后傀儡湖生态环境的响应机制,为浅水湖泊通过鱼类群落调控的生物操纵手段进行生态系统的修复积累基础资料 and 提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 采样方法

傀儡湖实施鱼类群落结构调控前鱼类群落中食鱼性鱼类[鳊(*Siniperca chuatsi*)、乌鳢(*Channa argus*)和蒙古鲃(*Culter mongolicus*)等]生物量偏低且种类较少,其次底层扰动性鱼类[鲫(*Carassius auratus*)和鲤(*Cyprinus carpio*)]和小型鱼类的生物量偏高,根据这些特点,同时考虑到草食性鱼类对沉水植物危害性,从 2013 年起对傀儡湖鱼类群

落结构进行人工调控,从三方面调整了鱼类放养和捕捞方案:(1) 2013 年起调整鲢、鳙放养数量、比例和规格;(2) 增加食鱼性鱼类放养比例,包括底层食鱼性鱼类鳊、乌鳢、鲃(*Silurus asotus*)和黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*),以及中上层的翘嘴鲃(*Culter alburnus*)和蒙古鲃(表 1);(3) 2012 年起增加底层鱼类鲤、鲫等和草食性的草鱼和团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)等捕捞量。2012—2015 年鱼类捕捞数据来自傀儡湖水源地有限公司之前积累的数据。2013—2015 年,在湖区选择 5 个采样点(图 1)季度性监测鱼类群落结构、沉水植物生物量、水体透明度和叶绿素 a。

表 1 2007—2012 年和 2013—2015 年傀儡湖的鱼种放养比例
Tab. 1 Stocking proportion of fishes during 2007—2012 and 2013—2015 in the Kuilei Lake

种类 species	年份 year	
	2007—2012	2013—2015
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	57.41	50.52
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	39.71	28.67
翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	0	1.86
蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	0	3.1
黄尾鲢 <i>Xenocypris davidi</i>	0	0.5
鲃 <i>Silurus asotus</i>	0	3.72
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	2.02	6.31
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	0.38	2.23
乌鳢 <i>Channa argus</i>	0.49	3.1

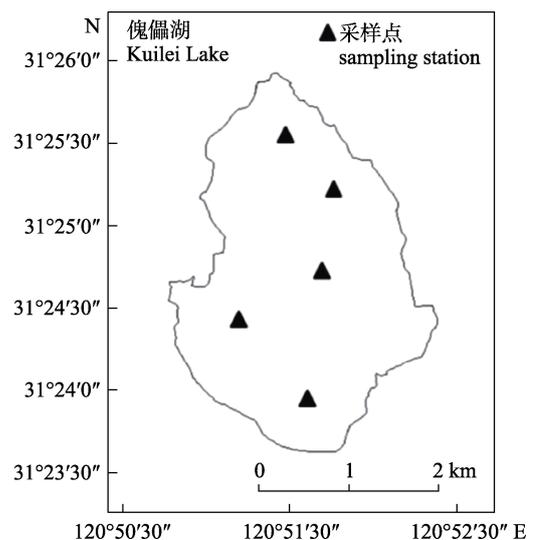


图 1 傀儡湖采样点布置图

Fig. 1 The map of samping sites in the Kuilei Lake

1.2 数据分析

水体透明度数据均表现为平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$), 2011—2012 年水体透明度和沉水植物的数据来自傀儡湖水源有限公司(未发表数据)。独立样本 *t* 检验被用于分析鱼类群落调控前后水体透明度、叶绿素 a 和沉水植物种类丰度和覆盖度等方面的差异性检验。数据均采用 SPSS18.0 软件分析, $P < 0.05$ 被认定为具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 鱼类群落结构

2013 年, 翘嘴鲌、蒙古鲌、鳊等食鱼性鱼类的生物量在鱼类群落中所占比例有所提升, 以鳊(*Hemiculter leucisculus*)为代表的浮游动物食性小型鱼类得到一定控制, 鳊的生物量在群落中的占比由 2012 年的 42% 下降到 2014 年的 8%。通过定向捕捞, 鲫的生物量占比由 2012 年的 19% 下降到 2014 年的 14% (图 2)。

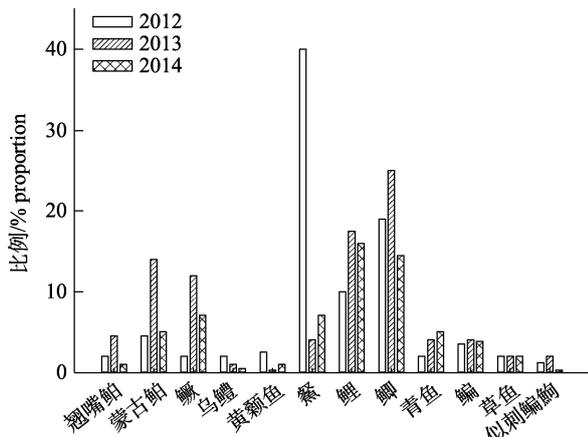


图 2 傀儡湖渔获物结构年际变化
Fig. 2 Comparison of catch structure during 2012 and 2014 in the Kuilei Lake

2.2 沉水植物

对 2011—2015 年傀儡湖的沉水植物情况进行了监测, 实施鱼类复合调控后, 沉水植物种类丰度和覆盖度都有了明显的增加。具体而言, 沉水植物种类数从 2011 年的 6 种上升至 2015 年的 12 种; 覆盖度由 2011 年的不足 20% 上升至 2015 年的 73% (图 3)。鱼类群落调控后, 该湖形成了以金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、菹草(*Potamo-*

geton crispus)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、刺苦草(*Vallisneria spinulosa*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)和穗状狐尾藻(*Muriophyllum spicatum*)为主要优势种的沉水植物群落。

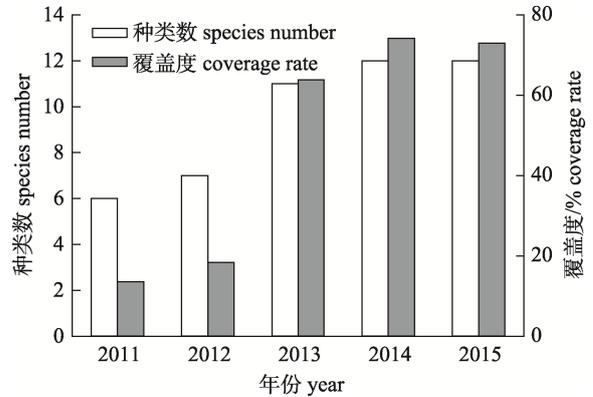


图 3 2011—2015 年傀儡湖沉水植物种类数和覆盖度变化
Fig. 3 Annual changes of species number and coverage rate of submerge plants in the Kuilei Lake

2.3 水体透明度和叶绿素 a

鱼类群落调控后, 傀儡湖水体的透明度从 2011 年的(50.75±9.78) cm, 增加至 2015 年的(115.75±22.63) cm。2013—2015 年, 年均透明度为(101.47±17.33) cm, 显著高于 2011—2012 年的(51.38±6.24) cm。叶绿素 a 的平均生物量从 2011 年的(6.30±1.34) μg/L 下降到 2015 年的(3.72±0.82) μg/L (图 4)。

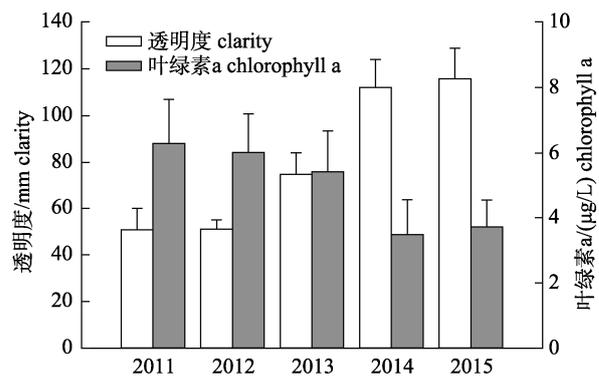


图 4 傀儡湖水体透明度的年度变化
Fig. 4 Annual changes of water clarity in the Kuilei Lake

3 讨论

群落中不同生态类型的鱼类可以通过上行和下行效应调整湖泊生态系统结构和能量流动, 因

此常用于湖泊生态系统调控。鱼类群落调控的手段可以概括为 4 个主要方面: 一是调控食鱼性鱼类; 二是调控滤食性鱼类; 三是调控草食性和底层杂食性鱼类; 四是复合调控。前两种分别被称为“经典生物操纵”(traditional biomanipulation)和“非经典生物操纵”(non-traditional biomanipulation)^[10]。本研究在傀儡湖综合采用放养滤食性与食鱼性鱼类, 结合定向捕捞等方法开展鱼类群落调控, 调控后沉水植物种类丰度、覆盖度和水体透明度相比之前有了明显的上升, 湖泊生态环境得到有效改善。

经典生物操纵研究在国外开展得较多, 但在我国长江中下游湖泊的研究仍不多。Li 等^[11]在长江中游湖泊扁担塘开展鳊放流调控效应研究, 连续 7 年监测发现, 13 种小型饵料鱼类生物量显著下降, 总氮和总磷含量有所降低, 调控效果明显。本研究得到了类似的结果, 通过放养翘嘴鲌、蒙古鲌、鳊等食鱼性鱼类, 傀儡湖中以鳊为代表的浮游动物食性小型资源得到一定控制。同时, 本研究也发现不同小型鱼类种群变化趋势不尽相同, 反映了经典生物操纵在实际操作中也存在一些不足: 随着传递的营养级增多, 调控效率逐渐减弱^[12]; 亦有研究认为食鱼性鱼类对小型鱼类个体具有摄食选择性, 可能会改变小型鱼类群落的优势种^[13]。

沉水植物是浅水湖泊生态系统富营养化水体生态修复的重要组成部分^[14], 鱼类是影响沉水植物生长的几个重要因素之一^[15]。傀儡湖的沉水植物群落在鱼类调控后得到明显改善, 可能与定向捕捞导致草食性鱼类和底层扰动性鱼类生物量逐渐减少有关。定向捕捞草食性鱼类(草鱼和团头鲂)和底层扰动性鱼类(鲤和鲫)减弱了它们对沉水植物的牧食压力, 为沉水植物群落的恢复提供了良好环境。

另一方面, 底层扰动性鱼类的扰动效应对沉水植物的影响也很大, 如在鲤入侵的北美东部湖泊中, 随着鲤的生物量增加, 被入侵水体中的沉水植物的生物量和覆盖度锐减^[16]。它们在觅食过程中会不断地搅动沉积物, 使得底质—水界面变得活跃, 沉积物中的营养盐再一次被释放进入水

体中, 促进了水体营养自下而上地补充, 最终导致水体中氮、磷含量上升^[17]。同时, 大量已沉积的藻细胞也再一次被搅起进入水体, 造成水体中悬浮物的增多, 水体透明度下降^[18]。此外, 觅食行为也会造成沉水植物根部脱落死亡, 最终导致沉水植物消亡^[17]。傀儡湖从 2013 年起对底层扰动性鱼类特别是鲤和鲫实施定向捕捞, 随着鲤和鲫等底层扰动性鱼类生物量的减少, 其引起的沉积物中营养盐再次释放量下降, 同时由于它们的觅食行为导致的沉水植物根部脱离而死亡的概率也降低, 这也是沉水植物恢复的原因之一。

傀儡湖调控后水体透明度明显提高, 可能与底层扰动性鱼类生物量降低有关。底层鱼类在觅食的时候会搅动底泥引起水体的悬浮物上升而导致水体透明度下降, 此外觅食活动还促进底泥中的营养盐再次进入水体促进水体藻类密度上升导致水体透明度下降, 因此通过调控降低底层扰动性鱼类生物量有利于提高水体透明度^[18-19]。此外, 随着食鱼性鱼类生物量的提高, 它们对浮游动物食性的小型鱼类的捕食压力也会提高, 进而减低对浮游动物捕食压力, 释放了浮游动物对浮游植物的牧食作用, 转而提高了水体透明度。

“非经典生物操纵”指通过放养滤食性鱼类调控湖泊水质和藻类。本研究对傀儡湖实施鲢鳙放养调控后叶绿素 a 浓度下降, 表明了在这类浅水湖泊开展滤食性鱼类放养具有一定作用。我国已有许多湖泊开展了许多鲢鳙控藻实验^[20-21], 其核心目标是控制藻类水华, 特别针对以丝状蓝藻为浮游植物优势类群的水体, 以弥补经典生物操纵的不足^[10]。但目前关于放养滤食性鱼类调控是否有效、对什么水体更有效、按什么比例放养更有效等问题仍存在争议^[22]。无论如何, 这种手段是带出营养物质并增加鱼产品的重要手段。

针对单一鱼类群落调控手段存在的不足, 研究人员提出了多种鱼类协同调控措施(integrated biomanipulation)。Peng 等^[23]基于 Ecopath 模型比较在福建龙湖(Longhu Lake)开展的经典生物操纵、非经典生物操纵、杂食性鱼类操纵和复合操纵的效果, 发现复合操纵综合了其他几类操纵的优势, 控制了藻类生物量, 且群落结构更优化,

食物网的能量传递效率更高, 捕食食物链与碎屑食物链的比例更均衡。Chen 等^[24]在四川眉山的东坡湖也发现, 复合调控使富营养化湖泊的透明度、沉水植物、浮游动物群落均得到了快速优化。本研究采用多种调控手段对傀儡湖的调控效果也表明复合调控能取得良好的生态效益。

本研究基于通过鱼类群落调控调整湖泊生态系统结构的生态学原理和主要手段, 以傀儡湖为例, 阐述基于食鱼性鱼类、滤食性鱼类等组合放养, 并结合底层杂食性鱼类针对性捕捞的复合调控策略对湖泊鱼类群落结构、沉水植物群落和水质产生的影响, 证实了鱼类群落调控在优化湖泊生态系统结构方面的重要作用, 提供了新的湖泊生态修复思路和手段。

参考文献:

- [1] Tao S L, Fang J Y, Ma S H, et al. Changes in China's lakes: Climate and human impacts[J]. *National Science Review*, 2020, 7(1): 132-140.
- [2] Zhang G H, Cao W X, Chen Y Y. Effects of fish stocking on lake ecosystems in China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, 21(3): 271-280. [张国华, 曹文宣, 陈宜瑜. 湖泊放养渔业对我国湖泊生态系统的影响[J]. *水生生物学报*, 1997, 21(3): 271-280.]
- [3] Gu X H, Mao Z G, Ding H P, et al. Progress and prospect of lake fishery[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 1-14. [谷孝鸿, 毛志刚, 丁慧萍, 等. 湖泊渔业研究: 进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 1-14.]
- [4] Liu J S, Wang Q D, Xie S Q, et al. Ranching management in lakes and reservoirs of China—community biomanipulation, restoration of biodiversity and resources utilization[J]. *Science & Technology for Development*, 2020, 16(2): 237-242. [刘家寿, 王齐东, 解绶启, 等. 内陆大水面生态牧场化管理——群落调控、生物多样性恢复与资源利用[J]. *科技促进发展*, 2020, 16(2): 237-242.]
- [5] Jia P Q, Zhang W B, Liu Q G. Lake fisheries in China: Challenges and opportunities[J]. *Fisheries Research*, 2013, 140: 66-72.
- [6] Power M E, Matthews W J, Stewart A J. Grazing minnows, piscivorous bass, and stream algae: Dynamics of a strong interaction[J]. *Ecology*, 1985, 66(5): 1448-1456.
- [7] Guo L G, Deng Y L, Tao M, et al. Discussion on fisheries development based on protection of water resources of lakes: A case in lake Kuileihu of Kunshan City[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(4): 693-697. [过龙根, 邓永良, 陶敏, 等. 基于湖泊水源地保护的渔业发展模式探讨: 以昆山傀儡湖为例[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(4): 693-697.]
- [8] Xiong J, Xie Z C, Zhang J Q, et al. Structure of benthic macroinvertebrate community and assessment of water quality in Kuilei Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(S1): 132-137. [熊晶, 谢志才, 张君倩, 等. 傀儡湖大型底栖动物群落与水质评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(S1): 132-137.]
- [9] Zhang J J. Study on structure of fish community and diet composition of dominant fishes in Lake Kuilei[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(6): 66-71. [张晶晶. 傀儡湖鱼类群落结构及其食物组成研究[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(6): 66-71.]
- [10] Cilinengbu, Mao J Z, Huang S F. Theory and application of biomanipulation and non-traditional biomanipulation[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(1): 86-90. [此里能布, 毛建忠, 黄少峰. 经典与非经典生物操纵理论及其应用[J]. *生态科学*, 2012, 31(1): 86-90.]
- [11] Li W, Hicks B J, Lin M L, et al. Impacts of hatchery-reared mandarin fish *Siniperca chuatsi* stocking on wild fish community and water quality in a shallow Yangtze lake[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11481.
- [12] Mcqueen D J. Manipulating lake community structure: Where do we go from here?[J]. *Freshwater Biology*, 1990, 23(3): 613-620.
- [13] Robinson C L K, Tonn W M. Influence of environmental factors and piscivory in structuring fish assemblages of small Alberta lakes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46(1): 81-89.
- [14] Hu L, Wan C Y, Shen J Z, et al. Function and prospect of submerged plants in ecological restoration of eutrophic water [J]. *Reservoir Fisheries*, 2006, 26(5): 69-71. [胡莲, 万成炎, 沈建忠, 等. 沉水植物在富营养化水体生态恢复中的作用及前景[J]. *水利渔业*, 2006, 26(5): 69-71.]
- [15] Bajer P G, Sorensen P W. Effects of common carp on phosphorus concentrations, water clarity, and vegetation density: A whole system experiment in a thermally stratified lake[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 746(1): 303-311.
- [16] Bajer P G, Beck M W, Cross T K, et al. Biological invasion by a benthivorous fish reduced the cover and species richness of aquatic plants in most lakes of a large North American ecoregion[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(12): 3937-3947.
- [17] Miller S A, Crowl T A. Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on macrophytes and invertebrate communities in a shallow lake[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(1): 85-94.
- [18] Pierce C, Hinrichs B. Response of littoral invertebrates to reduction of fish density: Simultaneous experiments in ponds

- with different fish assemblages[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(2): 397-408.
- [19] Bajer P G, Sorensen P W. Effects of common carp on phosphorus concentrations, water clarity, and vegetation density: A whole system experiment in a thermally stratified lake[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 746(1): 303-311.
- [20] Li L C. Study of fish culture manipulation on Nanwan Reservoir eutrophication water quality[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(4): 70-74. [李林春. 南湾水库鲢鳙放养比例对水质调控的研究[J]. *水生态学杂志*, 2010, 31(4): 70-74.]
- [21] Liu Q G, Wang Y B, Chen L Q, et al. Impacts of aquatic environment protection oriented fishery on the structure of food web in Lake Qiandaohu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2774-2783. [刘其根, 王钰博, 陈立侨, 等. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2774-2783.]
- [22] Jeppesen E, Meerhoff M, Jacobsen B A, et al. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake size and climate[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1): 269-285.
- [23] Peng G G, Zhou X J, Xie B, et al. Ecosystem stability and water quality improvement in a eutrophic shallow lake via long-term integrated biomanipulation in Southeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 159: 106119.
- [24] Chen Z Q, Zhao D, Li M L, et al. A field study on the effects of combined biomanipulation on the water quality of a eutrophic lake[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 115091.

Roles of fish assemblage regulation on ecological restoration in a shallow lake: A case study from the Kuilei Lake, China

CAI Xingwei^{1,2}, LI Wei¹, FAN Hourui^{1,3}, FANG Tao¹, LI Wei⁴, CHANG Fengyi⁴, LIU Jiashou¹, LIAO Chuansong¹

1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China;
3. Wuhan Academy of Social Sciences, Wuhan 430019, China;
4. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430073, China

Abstract: Fish are important consumers in the food web of lakes. Fish can have different diets and can therefore occupy multiple trophic levels in the food web, thereby strongly affecting aquatic organisms and environment through trophic cascade. In the present study, we first summarize the key mechanisms and methods of biomanipulation by regulating fish assemblage. We also consider the example of Kuilei Lake, a shallow lake located in the middle and lower reaches of the Yangtze River, to elaborate on the ecological effects of integrated biomanipulation, which combines the enhancement and release of planktivorous, carnivorous, and detritivorous fish species and the removal of omnivorous fish species. Our results demonstrated the positive effects of integrated biomanipulation in optimizing the fish assemblage, water quality, and submerged plant in such a shallow lake. In conclusion, the study summarizes the impact of fish community regulation in optimizing lake ecosystems and provides new ideas and means for lake restoration.

Key words: lake ecosystem; fish assemblage regulation; water quality; submerged plant; trophic cascade; optimization of ecosystem structure; large-scale ponds; ecological fishery

Corresponding author: LIAO Chuansong. E-mail: liaocs@ihb.ac.cn