

湖泊渔业研究: 进展与展望*

谷孝鸿, 毛志刚, 丁慧萍, 王银平, 曾庆飞, 王莲莲

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 作为一种传统产业, 渔业在我国经济社会发展中具有不可缺少的重要地位. 而渔业作为湖泊最重要的功能之一, 其资源变动是湖泊生态系统演变的重要影响因子, 同时湖泊渔业资源的变动和退化也是对环境变化最直接的响应. 自 1980s 以来, 随着湖泊水环境的改变, 湖泊渔业资源衰退趋势明显, 中上层浮游生物食性鱼类在鱼类群落中占优势, 鱼类资源小型化、低龄化现象严重. 本文以湖泊渔业发展的历程为切入口, 系统阐述人类活动及湖泊环境变化对渔业资源及生态系统的影响, 厘清现阶段湖泊水环境管理、湖泊生态系统修复、湖泊渔业可持续发展等关系, 展望我国湖泊渔业的发展前景及新型模式.

关键词: 湖泊渔业; 人类活动; 富营养化; 功能定位; 生态调控

Progress and prospect of lake fishery in China

GU Xiaohong, MAO Zhigang, DING Huiping, WANG Yiping, ZENG Qingfei & WANG Lianlian

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China)

Abstract: As a traditional industry, fishery plays an important role in the economic and social development of our country. The fishery is one of the most important functions of lakes, fishery resources change is an important factor affecting the evolution of lake ecosystem. Meanwhile, the change and degradation of lake fishery resources are the most direct response to environmental changes. But since 1980s, with the change of water quality and environment, lake fishery resources declined obviously, pelagic and planktivorous fish predominated in the fish community, showing a smaller size and lower aging tendency. Based on the history of lake fishery development, we expounded the influence of human activities and lake environment change on fishery resources and ecological system profoundly, clarified the relationships among water environment management, lake ecosystem restoration and sustainable development of lake fishery, and finally provided an outlook of the future of lake fishery.

Keywords: Lake fishery; human activities; eutrophication; functional orientation; ecological regulation

中国人口众多, 渔业及渔业经济在经济社会发展和人们生产生活中有着十分重要的地位^[1-3]. 中国作为世界渔业大国, 水产品产量约占世界水产品总量的 1/3, 其中淡水产品产量占世界淡水产品总量的 1/2 以上^[2]. 随着淡水渔业的大力开发, 尤其是淡水养殖渔业的快速发展, 湖泊和水库等大水面资源也被高强度利用. 目前我国面积 1.0 km² 以上的自然湖泊 2693 个, 湖泊总面积 8.14 万 km². 其中湖泊可养面积 1.87 万 km², 水库可养面积 2.0 万 km², 占全国内陆可养水面的 70% 以上^[4]. 我国湖泊主要分布于亚热带和温带, 有得天独厚的淡水渔业的自然条件, 湖泊渔业在渔业生产中占举足轻重的地位, 2015 年湖泊和水库的淡水养殖产量占我国淡水养殖总量的 18%^[3].

近 30 年来工业和农业现代化进程加快, 水体环境污染加剧, 加之酷渔滥捕以及渔具渔法的改进提高, 湖泊渔业资源逐年衰退, 渔产量不断下降, 湖泊渔业潜力及资源可持续利用受到较大影响^[5-6]. 鱼类在湖泊生态系统中处于顶级调控地位, 它与其他生物之间通过食物网密切相连. 鱼类群落结构的变化及其种群衰退, 往往会导致湖泊生态功能的退化. 与此同时, 湖泊集约化养殖模式带来大量外源性营养物质, 也加速了

* 国家科技支撑计划项目 (2015BAD13B00, 2015BAD13B06) 和国家自然科学基金项目 (31270506) 联合资助. 2017-09-07 收稿; 2017-11-02 收修改稿. 谷孝鸿 (1966-), 男, 博士, 研究员; E-mail: xhgu@niglas.ac.cn.

水体的富营养化进程^[7-8].

渔业作为湖泊最重要的功能之一,其资源变动是湖泊生态系统演变的重要驱动因子,也是湖泊管理与生态系统恢复的关键^[9]. 现阶段我国内陆水体管护的基本要求是“保护水质,兼顾渔业,适度开发,持续利用”. 实施湖泊生态修复,在保护水环境的基础上,有效控制湖泊渔业资源的衰退趋势并使之得到改善和维护,是目前面临和需要迫切解决的问题. 本文以湖泊渔业发展的历程为切入口,综述人类活动及湖泊环境变化对渔业资源的影响,展望我国湖泊渔业的发展前景与新型模式,以期为湖泊水环境改善及湖泊渔业的可持续发展厘清关系并提供决策参考.

1 湖泊渔业现状与发展趋势

1.1 我国湖泊渔业的发展历程及主要渔业方式

我国湖泊渔业主要有传统捕捞、人工增殖放流和综合养殖 3 种方式. 湖泊渔业发展从原始低效率自然捕捞、追求捕捞产量,逐渐转至通过“三网”养殖等养殖方式提高养殖产量,再到保护湖泊生态、保证渔业可持续发展等 3 个阶段.

(1) 原始发展阶段

从湖泊中直接捕获自然渔业生物是最传统的湖泊渔业方式,也是古代最朴素的渔业活动. 自有人类就有狩猎和捕鱼行为,人们在岸边、沟滩等浅水处或在洞里、石缝中摸鱼,规模捕捞工具的产生见于千年内的记载. 据考证,明清时期,太湖周边的造船业十分发达,“处处舟为业”也从侧面反映出当时湖泊渔业的兴盛状态^[10]. 原始发展阶段,湖泊渔业在自然调节状态中缓慢发展.

(2) 以产量为主的快速发展阶段

1949 年,我国以湖泊捕捞为主的淡水渔业产量仅为 15 万 t. 1950s 后,渔业生产快速发展,渔船、渔具数量增加,类型多样,捕捞产量数十倍增长. 捕捞渔业迅猛发展,但捕捞渔业管理滞后,使得湖泊渔业生物无法休养生息,渔业资源量急剧下降,导致湖泊渔业资源退化严重,尤其是长江中下游地区,湖泊鱼类资源小型化和单一化现象十分严重^[11]. 受捕捞产量的制约,渔产量无法满足人们日益增长的需求,同时人们对湖泊渔业保护的认知逐渐加强,湖泊人工养殖成为增加渔业产量的突破口.

人工增殖放流是通过向自然水体投放由人工繁殖而获得的苗种或经人工培育后的天然苗种,以达到恢复其自然种群的目的^[12]. 1950s 末,“四大家鱼”人工繁殖成功^[13],使得渔业人工放养成为可能. 1950s 后,太湖人工增殖放流鳊鲢取得了明显的增产效果^[14],洞庭湖等长江中下游湖泊甚至东北地区湖泊也相继开始了以放流增殖为目标的湖泊养殖模式^[15-16]. 1982 年太湖开展了网围养殖试验,太湖的渔业形式和结构发生了重大改变^[17]. 1985 年,中央 5 号文件《关于放宽政策、加速发展水产业的指标》提出了“以养为主”的水生产方针. 随着“以养为主”发展方针的贯彻,综合养殖成为主要的湖泊渔业方式,并出现了多种养殖模式和类型,如单养、混养,网箱养殖、围栏养殖,精养、粗养等. 1990 年,全国水产养殖产量首次超过捕捞产量,同时也成为世界上唯一养殖产量超过捕捞产量的国家^[18]. 江苏、浙江等地在继续实施湖泊鱼类资源增殖保护的同时,深入发展湖泊“三网”养殖技术(即网拦、网围、网箱)^[19]. 综合养殖充分利用小水面精养的成熟养殖技术,提高了湖泊渔业的生产效率,突破了传统渔业资源有限性的制约^[20].

(3) 以生态为重的可持续发展阶段

自 1980s 中后期开始,随着区域经济社会的发展、人口的增长和资源消耗,工业废水、农业面源污染、生活污水和沿湖岸畜禽养殖废水等直接排入河湖,湖泊水体富营养化及生态环境恶化明显,江湖阻隔、围湖造田等破坏了大量的鱼类产卵场等重要栖息地如同雪上加霜,湖泊渔业发展面临严峻考验. 湖泊渔业强度的提高,使得湖泊综合养殖成为湖泊水体富营养化的重要原因之一,导致湖泊生物多样性下降、生态系统稳定性降低,水华事件频发^[21]. 如何在发挥湖泊渔业功能的同时而不对湖泊水质产生污染,成为湖泊渔业发展的核心. 由此,生态渔业及其发展模式成为湖泊渔业可持续发展的新方向.

1984 年,太湖首次实行了半年封湖的管理规定^[22]. 1997 年太湖网围养殖由最初的以养殖植食性的草鱼、鳊为主,转向了以养殖具有高附加值的河蟹为主,在提高品质的同时也相应减少了湖泊外来物质的输入,从而强化了对湖泊环境的调控^[23]. 随着养殖规模和效益的不断提高,长江中下游地区湖泊网围养殖面

积占湖泊总面积的比例不断上升. 2007年“太湖蓝藻事件”暴发时,太湖东太湖湾的网围养殖面积达到1.2万 hm^2 ,占整个东太湖水域面积的85%以上.“太湖蓝藻事件”催生了对湖泊网围养殖的整治,也开启了真正的生态渔业模式的实践.

以生态保护为核心的养护型湖泊渔业成为当今湖泊渔业发展的迫切需求.生态渔业以可持续发展理论、渔业生态学和生态经济学原理为指导,坚持生态效益与经济效益、社会效益相协调的原则,以生态环境为前提、生态经济为主导,着力改变渔业经济增长方式^[24].近几年为改善湖泊水环境,学者们提出的“保水渔业”^[7]、“净水渔业”^[25]、“以渔改水”的渔业思路,目前在太湖、东湖、千岛湖、梁子湖等得到实施.以生态保护为前提的湖泊渔业最终出路需要新的思考和探索实践.

1.2 世界湖泊渔业发展及其借鉴

世界湖泊渔业历经了几个世纪的发展,其主要方式有自然捕捞、人工放养、湖泊养殖和游钓渔业等.从1950年开始至今,世界水产品总产量保持持续增长态势.1950年,世界水产品总产量不足2000万t,1960年水产品总产量超过6000万t,1980年末超过1亿t,2002年为1.33亿t,创历史新高,2003年总产量为1.32亿t,比上年下降约1%.生产方式方面,早期一般以捕捞生产为主.自1980年以后,养殖生产迅速发展,到2003年达到4190万t.1980年中期养殖产量占水产品总产量的比重为10%,1990年为20%,2002年为30%,2003年已经达到31.69%^[26].

世界各国对湖泊的利用因社会、文化、经济基础等不同而有所侧重.19世纪以前,湖泊渔业的主要方式为自然捕捞.位于东非的维多利亚湖,在很久以前就开始了原始的捕鱼活动,使用摸捉、篮舀或鱼叉等古老工具进行捕捞^[27].早在17世纪,贝加尔湖的自然捕捞就已经发展起来.19世纪,南非开始渔业立法,发展内陆渔业和基于引进外来物种的休闲渔业^[28].到19世纪中后期,世界各大湖泊由以天然捕捞为主,兼或进行放养、移植或繁殖保护,逐渐向养殖发展,欧洲一些国家的鱼类养殖已经初具企业化规模,其捕捞业出现了由生计捕捞向商业捕捞的转变^[29].同期,美国和加拿大也创建了诸多渔业科研机构和院校,以支持北美五大湖区的渔业发展.1870年,美国又创立了美洲水产学会,进一步发展本国的湖泊渔业^[30-31].加拿大的马尼托巴湖在1950s之前以自然捕捞为主,1950s后期渔业资源过度捕捞现象明显^[30],渔业资源量明显下降,资源增殖成为湖泊渔业后续发展的重要方向.贝尔加湖的自然捕捞业在经历了两个世纪的发展后,有关该湖鱼类资源的限制捕捞规定才得以出台^[29].南非随着1980s渔业政策的转变,不再推广基于外来物种的内陆渔业以保护土著鱼类区系,从而结束了国家对渔业的支持,导致内陆渔业机构的减少,传统和小规模捕鱼权从未得到认可,导致渔业逐步边缘化;直到2009年,内陆渔业被纳入新成立的农业、林业和渔业的综合部门,这为重新建立制度、促进内陆渔业的公平和发展铺平了道路^[28].

从世界湖泊渔业发展历程看,1950s后,世界各地湖泊天然渔业资源匮乏、环境破坏、气候演变是普遍趋势,在有限的渔业资源情况下,促使湖泊养殖渔业迅速发展,养殖成为湖泊的主要渔业方式,高效的集约式养殖技术,如网箱养鱼、工厂化养鱼等在一些国家逐渐发展起来.集约式养殖业比较先进的有日本、欧洲和美国等.1950s网箱养鱼首先在日本兴起并逐渐发展成熟,利用网箱完成亲鱼产卵、苗种培育、商品鱼养殖以及饵料培养等一系列生产过程.日本的海水网箱以养殖鲷鱼、真鲷为主,淡水网箱以养殖鲤、罗非鱼、香鱼、虹鳟等为主,一般产量达70 kg/m^3 ^[32].与此同时,日本从1950s开始从各国引进鱼种及鱼类颗粒饲料的制造方法^[33],以推进其淡水养殖业的发展.1963年,日本提出“栽培渔业”的概念,采用人工孵化的方法培养幼鱼后,将苗种放流到自然水体中,用天然饵料使其生长,待长至成体后再进行捕捞^[34].前苏联从1920s开始了水生生物的移植驯化工作^[35],建立了多处网箱养殖场,养殖鲤和草鱼,一般产量为60 kg/m^3 ,而温流水网箱养鱼可达115 kg/m^3 .近年来,淡水网箱趋向于养殖名贵鱼类,如鳟、鳊、西伯利亚鲟、斑点叉尾鲟等.美国1964年引进网箱养鱼技术,并采用1 m^3 正方形小体积网箱养殖斑点叉尾鲟,产量最高达到600 kg/m^3 ^[32].1960s中期,美国五大湖放流银鲑获得成功^[30-31].在维持和保护生态环境、使之不遭受破坏的同时,发展游钓渔业是发达国家湖泊渔业的又一特点.1920s美国开始发展湖泊游钓渔业,这种低投入高产出的渔业方式,具有参与对象广泛、环境保护好、经济效益明显的特点.1980s初,美国淡水游钓渔业的参与人数达到2000万人次以上.美国湖泊增殖养殖业逐渐成为游钓渔业的服务产业^[30].

尽管国外渔业资源状况、开发利用强度以及在渔业资源管理方面的侧重点与我国不同,但是国外渔业

资源管理的一些卓有成效的经验和做法,值得我们学习和借鉴。以欧盟为例,其完善的渔业管理政策,合理的准入体制,以及减少渔船等强有力的资源保护措施值得我们借鉴。欧盟的渔业管理和产业政策的核心是1983年正式形成的共同渔业政策(Common Fishery Policy, CFP),其主要目的是实现渔业资源的可持续利用,缓解海产品消费需求增加与过度捕捞之间的矛盾,实现欧盟成员国之间的共赢。CFP的实施为解决欧盟渔业自然资源的可持续性、渔业发展和渔民收入增加的可持续性和水产品有效供给的可持续性方面的矛盾提供了依据。CFP是一个完整的体系,该政策体系涵盖海洋资源利用与养护和水产养殖、渔业生产和水产品市场流通、规制制定和技术研发等,并在不同时期通过实施相应的财政手段予以资金支持。欧盟从规则制定、资金技术支持、市场保护等方面确定了共同渔业政策的发展方向,并在发展过程中持续改革。目前,欧盟共同渔业政策体系已日臻完善^[36-37]。

2 人类活动对湖泊渔业的影响

2.1 河湖水利工程对湖泊渔业功能的影响

水利工程设施是人类根据生产生活需要而建立的功能性设施,其数量和规模的不断增长对水域生态环境产生巨大影响,渔业功能受损是其中最重要的影响之一。国内外较多的研究表明,水利工程建设往往会造成鱼类生境的破坏,导致鱼类种类数减少,濒危种群灭绝。

水利工程建设改变了河流和湖泊的原有生境,给鱼类带来众多的负面影响^[38]。大坝的建设直接导致水域环境退化和鱼类生境破碎化^[39],阻隔鱼类栖息和迁徙通道,致使溯河产卵鱼类上下游间的迁徙活动受到限制,阻碍了产卵繁殖的顺利完成,种群无法补充更新,鱼类数量急剧减少^[40]。生境破碎化还会导致不同水域群体间的遗传交流减少,种群整体遗传多样性丧失^[41-42]。以长江为例,兴修水利、建闸筑坝造成江湖隔绝是长江鱼类资源衰退的重要原因之一,江湖隔绝直接阻断了“四大家鱼”等经济鱼类的河湖洄游生活史,使这些鱼类的摄食肥育、越冬和繁殖等生命机能均不能正常完成;建闸筑坝也影响或某种程度上阻断了过河口性鱼类(如鲢、中华鲟等)的生殖洄游,种群的繁殖部分或全部受阻,某种程度上会导致生殖群体结构趋向简单化^[43]。例如,江湖阻隔对长江武汉涨渡湖渔业具有明显影响,导致野生鱼类资源的进一步衰退,该湖野生渔业产量的比例由1949年的95%,降低到2002年的不足5%;鱼类种类由1950s的约80种下降到近阶段的52种,其中,洄游性和流水型鱼类比重由50%下降至不足30%;迷魂阵渔获物在单位产量、个体大小上极显著($P < 0.01$)高于通江湖泊,但在物种数和多样性指数上则要低得多($P < 0.01$)^[44]。又如太湖地区自1950s以来水利工程建设设施众多,流域水资源开发利用程度相当高,江河、湖泊、海洋之间鱼类天然洄游通道受阻,洄游、半洄游鱼类减少或灭绝,如“四大家鱼”、鳊、鲮、鲸、鲟、刀鲚、鳊、鳊以及甲壳类河蟹等,水系和水环境的改变对该地区的渔业产生了较大影响,造成渔业产量和质量明显下降^[45]。水利工程设施本身对鱼类的直接伤害也是鱼类种群数量锐减的关键因素。幼鱼和某些鱼类经过溢洪道、水轮机等设施时,因高压高速水流的冲击而受伤和死亡,某些鱼类无法通过大坝闸口,拥挤在一起且不断撞击墙体等也造成鱼类死亡^[46-47]。

水利工程对湖泊自然渔业功能的影响一方面直接造成了鱼类种群资源衰减,另一方面也引起饵料生物供给能力的减弱。水利工程建设改变了原有生态环境,自由流动水体转为相对静止的库区^[48],流速的减小使得水体中污染物的迁移扩散能力下降,水质逐渐变差^[49]。富营养化导致浮游植物形成以蓝绿藻为主的群落结构,鱼类喜食的藻类及浮游动物丰度降低,削弱了水体供饵能力^[50]。另有研究指出,河湖工程建设一般会抬升湖体水位,增加水深,导致底栖生物及水生植物生长环境的改变,部分底栖生物死亡,沉水植物多样性降低,渔业功能弱化^[51]。围湖造田是严重影响我国内陆水域生态环境和鱼类资源的另一重要的原因,其最直接的后果是损害了湖泊水质保护的第一保护屏障,同时大面积减少了鱼类生活多样化生境,或破坏产卵场,使物种多样性下降,渔产量大幅度减少^[43]。

2.2 过度捕捞对湖泊渔业资源的影响

人工捕捞是湖泊自然渔业的主要手段,捕捞在有效移除目标鱼类的同时,通过改变生境及调整行为等方式对非目标生物产生间接影响,最终对渔业资源产生二次影响^[52]。渔业捕捞强度超出合理水平下的过度捕捞,常造成鱼类种群退化、渔获物质量下降、捕捞成本提高和无鱼可捕等后果^[28]。在此情况下,捕获鱼类

由营养级高的食鱼性鱼类向生活周期短、以无脊椎动物为食和以浮游生物为食的中上层鱼类发展,鱼类营养级下降^[53]。过度捕捞是捕捞渔船吨位、渔网网目和其他捕鱼设备以及捕鱼作业时间的综合结果。过度捕捞形成恶性循环,渔业资源遭受严重破坏,种群资源恢复难度极大^[54]。

过度捕捞不但破坏渔业资源,还导致鱼类初次性成熟时间提前,个体小型化趋势明显^[55]。有两种理论解释这种现象:过度捕捞后,“幸存者”能够得到更多的食物,从而使其在较小的年龄就能发育成熟;另一种理论认为,捕捞是一种“人工选择”,成熟年龄较小的鱼类能够在被捕捞之前将基因传给后代,成熟晚的鱼类在繁殖后代前就被捕获。这样,早熟的小型鱼类在整个种群中的比例就会越来越大^[56]。由于过度捕捞及环境变化,近年来我国大多湖泊均表现出明显的渔业资源小型化现象,1970s、1980s 呼伦湖鱼类中鲤、鲫、鲈等大中型鱼类的比例占 28.7%~31.9%,渔业结构相对合理;而 2010s,大中型鱼类比例下降至 4.5%,小型浮游食性鱼类贝氏鲮产量急剧上升,占总产量比例高达 95% 以上^[57]。

2.3 增殖放流与湖泊渔业

受生态环境恶化和捕捞强度增加等因素影响,渔业资源不断衰退、湖泊渔业不可持续态势明显^[58-59]。为恢复资源、增加资源补充量,确保渔业可持续发展,各国渔业管理部门实施了一系列的管理措施,包括控制捕捞努力量,在重要水域设立渔业保护区和开展鱼类增殖放流^[60-61]。增殖放流可补充和恢复生物资源群体,改善种群结构,保持生物多样性,有利于水生生态系统的稳定和可持续发展^[62-63],同时还可提高湖泊水生生物资源的利用效率、优化食物网结构并增加渔民收入,被当前国内外水生生物资源养护和水域生态修复领域普遍采用^[64-65]。

从湖泊生态保护及生态安全角度看,增殖放流在修复衰退渔业资源、提升增殖水域渔业产出能力的同时,也可能给水生生态系统带来潜在生态风险,如影响自然种类的种群结构、遗传多样性、健康状况及水域生态系统结构与功能的稳定性等^[66-67]。野生种群会因较大的放流密度而显现负密度依赖效应,生长和繁殖及存活等可能受到影响^[68]。野生群体遗传多样性的降低,一方面与放流群体同野生种群竞争导致野生种群规模减小,降低其遗传多样性水平有关^[69];另一方面与放流群体同野生种群进行遗传交流并发生基因渗入,弱化其遗传基因有关^[70]。一般来讲,增殖群体适应野外环境的能力减弱,捕食功能退化,在自然生境中的适合度远不及野生种群,通过种群基因交流,种群整体适合度降低^[71]。此外,目前我国大多水域增殖放流的主要鱼类是鲢、鳙^[72-74],其高强度滤食导致排泄物大量增加,加速了水体营养盐循环,有促进小型藻类繁殖的潜在能力^[75-76]。因此,增殖放流需针对水体的不同营养阶段,合理配置鱼类放养密度,同时对放养种类进行甄选,以免适得其反。

2.4 城镇化发展对湖泊渔业的影响

随着城镇化的推进,内陆渔业生产活动也在悄然变化。主要表现为以下几个方面:1)野生渔业资源不断减少,随着各地工业化进程的大力推进,环境污染问题日益严重,水体污染和富营养化造成内陆水域野生渔业资源急剧减少;2)新型城镇化建设的过程导致水域空间用途的变化,自然河道被赋予更多的价值,例如作为通航、景观河道等的价值需要,由此使得渔业权与其他基于同一水域的权利发生价值冲突;3)养殖业和休闲渔业发展迅猛,养殖模式从传统的以家庭为单位的小规模养殖逐渐转变为更接近市场的以渔业合作社为主体的较大规模养殖。与此同时,休闲渔业也逐步发展起来,虽然我国的休闲渔业仍处于起步阶段,但是随着社会的发展,休闲渔业必将为我国今后渔业和渔业经济发展带来新的生机和活力;4)内陆专业渔民不断减少,城镇化终究是人的城镇化,随着城镇化的逐步推进,渔民上岸安居成为必然,相应的内陆传统的粗犷渔业生产模式产生的经济价值将不断萎缩^[77-78],由此,湖泊中“无渔民”的状态不可避免地将带来湖泊渔业模式及渔业结构的自然演替,这客观上为渔业“工业化”及湖泊的休养生息和自然恢复奠定了基础。

3 湖泊环境变化对湖泊渔业的影响

3.1 湖泊富营养化与渔业资源变化

湖泊富营养化是水体中氮、磷等营养物质浓度超过一定界限,在光照和水温适宜的情况下,藻类及其他水生生物异常繁殖,水体透明度和溶氧浓度大大降低,水质恶化的现象^[79]。富营养化湖泊的渔业产量与浮游生物生物量^[80]、水体理化指标(如总磷浓度)^[81-82]密切相关。富营养化水体往往透明度下降,沉水植被退

化消失、食鱼性鱼类(如鲃、鲢)生境遭到破坏,浮游生物食性鱼类种群数量增加,鱼类种群结构趋于简单化、小型化。以太湖为例,太湖水体的富营养化及“水华”频繁发生,成为太湖渔业可持续发展的制约性因素。杨再福等^[83]利用灰色相对关联分析方法对1981—2000年太湖渔业与环境的可持续发展能力进行了定量评估分析,发现太湖渔业资源的可持续利用水平越来越低,1980—2000年的可持续发展指标的最大与最小值相差仅为0.0587,表明从1980年开始,太湖渔业就面临不可持续发展的问題,太湖渔业不断向小型化方向发展,并一直未得到解决,这与太湖不断增加的捕捞力和水体的不断富营养化是相对应的。水体富营养化程度的不断加深,污染的加重,是对太湖渔业可持续发展的一个相当大的潜在威胁。

一般情况下,富营养化湖泊中的鱼类群落结构及生物多样性下降^[84-85]。在逐渐富营养化情况下湖泊渔业产量会逐渐增加,鱼类群落结构也随之变化,优质大型鱼类逐渐减少,低值小型鱼类比例不断增加^[86],特别是鲤科鱼类中一些浮游食性小型鱼类成为优势种群^[87],其中敞水湖区的鱼类种群变化更明显^[88]。近年来太湖的渔获物中,浮游动物食性的湖鲢产量及其占渔获物的比例从1952年的640.5 t和15.8%增加至2006年的21130 t和60.2%^[89],而近10年统计数据显示,湖鲢捕捞量占捕捞总产量的比例最高甚至高达75%以上。

湖泊富营养化导致藻类暴发,一些藻类产生藻毒素,对水体及鱼类等水生生物产生较大危害,如微囊藻毒素干扰胚胎的发育,降低孵化率,增加畸形率,影响存活率,对鱼类补充群体毒害明显^[90]。同时,藻毒素还会引起的鱼类组织病理变化,如肝损伤、肾脏病变和脑神经坏死等^[91]。由藻毒素引起的鱼类行为、生长的改变及组织病变等均会直接或间接的影响湖泊鱼类种群,最终导致鱼类群落结构变化,生物多样性降低,不利于鱼类群落的稳定。

3.2 湖泊自然特征变化对鱼类群落结构及多样性的影响

有研究表明,热带、亚热带和温带地区,江河中的鱼类物种多样性与流域面积呈高度正相关^[92]。杨君兴等^[93]报道,云南省滇中6个高原湖泊鱼类物种丰富,其特有种数和属数与湖泊面积呈显著正相关;湖泊缩小对那些具有广适应性和地理分布范围广泛的种类,如鲫、鲤等影响较小,而对裂腹鱼属、四须鲃属和金线鲃属等狭适应性鱼类影响较大。湖泊萎缩将极大地压缩淡水鱼类的生存空间,甚至会导致珍稀、特有种濒危、灭绝^[94]。

水利工程建设显著改变了湖泊原有环境条件,水体流速降低,水体净化能力减弱,饵料生物种类减少,造成鱼类生境的丧失,导致鱼类多样性锐减^[95]。水利工程阻断洄游“走廊”,影响洄游性鱼类的洄游生活史,使这些鱼类的摄食、越冬和繁殖等生命机能均不能正常完成^[43],造成鱼类种类减少,群落结构简化^[92]。对于一些通江湖泊,大坝的建设不仅干扰溯河性鱼类的生殖洄游,大坝以上鱼类的原有生境也因江段水面增宽、水深加大、流速减少、饵料生物数量和组成变化等发生极大改变,例如长江葛洲坝水利枢纽兴建后,鲟属、铜鱼属、白甲鱼属及岩原鲤、胭脂鱼和倒刺鲃等长江上游珍稀特有鱼类数量急剧减少^[96]。通江湖泊阻隔后,湖泊形态及生态系统发生改变,由此导致了鱼类群落组成甚至生态类群的巨大变化。据报道,长江中下游湖泊鱼类资源结构自1970s来发生了明显变化,半洄游性鱼类“四大家鱼”在渔获物中的比例下降,而定居性鱼类(鲤、鲫、鲢等)的比重增高,渔获物趋于低龄化和小型化,大量幼鱼和各种低值小型鱼类已成为湖泊的主要捕捞对象^[97]。

4 我国湖泊渔业展望

4.1 新时期湖泊渔业发展的现实需求与途径

由于过度捕捞和生境退化,世界范围内普遍出现了优质高营养层次鱼类资源相继衰退、而低营养层次小型鱼类资源逐渐增加的趋势^[53]。增殖放流被认为是现有条件下增加鱼类种群数量和优化渔业资源群落结构最直接、最重要的恢复措施之一^[98]。我国渔业资源增殖研究和放流活动始于1950s,即“四大家鱼”的人工繁殖取得成功。随着国家对增殖放流资源养护工作的不断重视及资金投入的增加,渔业增殖放流种类不断增多,并取得了一定的生态、经济和社会效益^[99]。但由于目前增殖放流工作中增殖放流效果评价体系不完善,对试验性增殖放流重视不够以及后续配套管理措施不足等,使得放流种苗成活率低、增殖放流效果不明显,并且还引发了外来鱼类入侵、生态系统失衡等诸多负面效应^[64]。鉴于增殖放流资源养护是今后湖泊

渔业资源恢复的必然之路,基于国内外增殖放流的经验研究,我们建议可以从增殖放流的规划、目标、实施和管理等多个环节入手,提高放流成效与生态安全:(1)科学制定增殖水域的增殖放流规划.实施增殖放流之前,筛选合适的放流种类,建立合理的增殖放流目标以及确定适量的增殖放流规模;(2)强化苗种遗传资源和健康状况管理.放流苗种的质量是影响增殖放流效果的重要因素,因此需要加强对亲本来源的监管和亲本种质的检查;(3)构建增殖放流生态风险的适应性管理体系.增殖放流在考虑苗种培育、检验检疫、生态环境监测的同时,要考虑水生生物多样性的保护及外来种入侵风险等;(4)加强对生物资源养护与增殖的效应评估.在富营养化水体实施以滤食性鱼类等放流为主的措施,要与水体藻类暴发强度及其他生物操纵措施结合与配套,合理评估放养养护品种规格等综合效应;(5)实施增殖放流的科学机制与体系化建设.增殖放流与养护是渔业环保等综合性的调控手段,需要政府管理部门、科研单位以及企业的合作和衔接,要建立完善的科学研究、监测评估和政策配套等管理体系.

网箱、网围养殖是我国湖泊渔业发展的重要模式之一,但随着网箱、网围面积的不断扩大,及高密度集约化养殖的大量外源性饵料的投入,养殖水域水质恶化及水产品品质下降的问题日益突出^[100].新时期湖泊网箱、网围养殖亟需实施原有模式的提升.从湖泊渔业发展与水环境保护的综合面考虑,湖泊渔业需要:(1)明确以湖泊水环境保护为前提,根据环境容量控制和削减养殖面积,并减少与控制饵料等外源营养的输入;(2)发展和推广新型生态养殖模式(例如蟹—虾—鱼高效生态混养),通过合理的养殖种类搭配和水生植物净化系统的构建,实现营养物质的多级利用和养殖污染的原位修复;(3)强化集约化养殖管理,规范网箱、网围养殖技术,减少养殖成本与环境污染.

4.2 湖泊渔业监测与管理新技术的应用

随着科学技术的高速发展,地理信息系统(GIS)、水声学探测、鱼类标记等诸多技术逐步应用到湖泊渔业的生产、加工、管理、服务等领域,以达到合理利用渔业资源、降低生产成本、改善生态环境等目标. GIS作为一种高效的时空分析工具,广泛应用于渔业资源评估与分析、鱼类栖息地评价、渔业资源分布及其与环境的关系、养殖选址以及渔情预报等方面^[101]. GIS技术目前在海洋渔业中的应用已较为成熟,内陆水体中该技术的运用正逐步发展起来.例如杨英宝等^[102]利用遥感技术对太湖网围养殖面积的动态变化进行了监测分析,并据此提出了控制太湖网围养殖发展的措施;任黎华等^[103]将GIS应用与区域养殖池塘管理结合起来.未来GIS技术有望在湖泊渔业模型建立、渔业资源的长期监测与管理、增殖方案确定和配额管理等方面得到进一步应用.

水声学作为一种水下探测鱼类的方法在评估鱼类资源量、监测鱼群行为、鉴别鱼类种类、评估其他水生生物及探测水体底部类型等方面具有重要作用,在渔业研究中的应用越来越广泛^[104].与传统评估方法相比,水声学方法具有快速有效、调查区域广、不损坏生物资源、可提供持续的数据等优点,在我国湖泊水库的渔业资源研究中也得到快速发展.孙明波等^[105]运用回声探测仪对天目湖鱼类资源的捕捞与放流进行了动态监测,陶江平等^[106]也采用水声学方法完成了楠溪江鱼类资源空间分布的评估.这些研究也将水声学评估与GIS技术进行了较好的结合,可以更直观地反映鱼类资源的变化与分布特征.但水声学方法的运用也会受到一些因素干扰,包括回声探测仪自身存在的盲区、鱼类对调查船和声波的逃避以及水体中气泡和波浪的干扰等,而这些局限在浅水湖泊的水声学调查中尤为突出,因此在这些水域使用时需尽量避免这些不利因素的影响^[107].

鱼类标志技术是进行渔业资源评估的重要方法,在鱼类种群数量、死亡率、个体增长、运动模式等研究中广泛运用^[108].目前常用的鱼类标志物可以分为天然标志物和人工标志物,其中天然标志物包括基因标记技术、微量元素和稳定同位素分析技术等,而人工标志物则包括烙印法、化学标记法、线码标志法、电子标记物等^[109].国外生物标志放流的研究较早,我国的鱼类标志技术研究起步较晚,但目前国内鱼类标志物研究也逐步开展起来,除体外挂牌、荧光色素标记等传统方法外,基因标记、稳定同位素、被动式整合雷达标志和生物遥测标志等技术也开始运用到湖泊渔业的研究与管理中.例如耿波等^[110]利用微卫星标记技术分析转基因鲤和杂交鲤对天然野生鲤群体的遗传污染程度;Mao等^[111]利用稳定同位素技术分析了太湖等水域鱼类食性的变化;Wang等^[112]运用被动式整合雷达标志技术研究了长江流域中华鲟产卵群体的空间分布特征.随着这些标志技术的不断改进和完善,其在湖泊渔业资源管理中将具有良好的应用和发展前景,而鱼类

标志技术的深入应用也将推动我国淡水渔业的快速发展,特别是在渔业增殖放流方面,利用鱼类标志技术定量评估资源增殖的效果以及渔民的增产增收状况,开展经济水产动物的跨地域移植等工作.此外,在工程建设中还可利用标志放流探讨堰坝对鱼类洄游的影响^[113].

4.3 湖泊生态渔业规划与区域协调管理

湖泊由于缺乏合理的规划与管理,造成湖泊渔业资源出现掠夺式捕捞及区域不合理养殖等问题,湖泊生物资源遭到破坏,湖泊水环境质量下降,进而影响到湖泊渔业资源的可持续利用及渔业潜力发挥.目前,有一种倾向,即在湖泊水体富营养化下似乎完全否认渔业的功能甚至将湖泊富营养化完全归咎于渔业,这也是不完全了解湖泊生态系统及其功能的一种偏颇“学说”.渔业是湖泊的重要功能之一,鱼类是生态系统的顶端调控者,富营养化湖泊的生态恢复在外源污染控制后最终要依靠生态系统结构的自我完善和调控,实现水体的自我修复,实现最终的平衡和健康持续.因此,以保护湖泊水环境为前提,对湖泊渔业功能合理定位,合理规划水域渔业区域,确定湖泊渔业环境容量,提出最优的渔业规模和渔业方式,将是有序调控和管理湖泊渔业资源的重要手段.我国湖泊生态渔业规划与区域协调管理需要开展以下工作:

1) 湖泊流域水生态功能分区.如能将湖泊渔业纳入其流域范围内统一规划和管理,将有利于流域水生态系统结构与功能的保护.水生态区划最早由美国环境保护署于1970s提出,其基本目的是通过研究流域或水体生态因子及水生态系统组成、结构、格局、过程和功能的空间分异规律,揭示流域水生态系统的层次结构与空间特征差异,为水生态系统差别化管理和水质目标管理提供支撑^[114].目前,水生态功能分区已逐渐发展成为国际研究热点,其中鱼类由于具有生活周期长、活动范围较大等优点,经常被学者直接用来进行生态区划研究.例如,世界自然基金会和美国大自然保护协会利用淡水鱼类的生物多样性差异绘制了世界淡水生态区划图^[115].我国早期也开展过淡水鱼类区划、内陆水域渔业区划等研究,但多以单因素自然区划方法为主;近年来随着水生态区划受到重视,相继开展了水生态区划、流域水环境功能区划等研究^[116].这些研究为我国水生态系统的科学管理积累了宝贵经验,但这仍是一项全新的工作,科学、合理的分区技术尚需深入探讨.因此,今后的湖泊渔业区域规划与协调管理应当上升到流域层面,与流域水生态功能分区等研究工作互为基础和补充,以推进我国湖泊渔业规划与管理水平的提升.

2) 湖泊生物资源及渔产潜力评估.渔产潜力评估的实质是研究水体中不同营养级生物通过能量转化和利用后最终可形成渔产品的最大量,对于合理开发利用湖泊等水体的天然饵料资源具有十分重要的意义^[117].根据湖泊不同水生生物的生物量、PB系数(生物年生产总量与生物量比值)、饵料系数及饵料利用率等,可估算水域内不同食性鱼类的渔业潜力,并在此基础上指导湖泊鱼类资源结构的合理放流与优化调控.以渔产潜力评估结果为依据的湖泊渔业调控,一方面可以更精确地实现饵料资源的多级利用,提高渔业产量和产值;另一方面也有利于维持水生生物群落结构的稳定与健康,实现湖泊生态系统的自我调控和完善^[118].因此,进行增殖放流、鱼类资源结构优化等渔业调控管理工作时,应以该水域水生生物资源调查和渔产潜力评估为前提和实施基础.

3) 湖泊渔业功能区域设置.湖泊渔业功能区域设置实质是对湖泊水域的渔业功能进行界定和分区,采取有效措施,切实保护和管理好湖泊水环境和天然生物资源,充分发挥湖泊水质保护、景观生态和生物多样性保护的功能.湖泊渔业区域的设置往往结合遥感技术,通过解译遥感图像定位湖区及边界,并根据湖泊生物资源分布和水动力格局,在不破坏水生态系统和水环境的前提下,规划不同湖区功能的边界.谷孝鸿等^[118]曾进行过太湖渔业功能区域的设置,在湖滩湿地较完整的东部湖区设立了渔业生物资源综合自然保护区,包括鱼类繁殖保护区、螺蚬资源保护区、放流增殖区、生物多样性保护区和定置渔具禁止捕捞区以及一定范围的资源增效养殖区;对于遭到严重破坏的太湖西部湖岸湿地及东部局部水域,设立生态恢复区;同时结合沿湖岸经济的发展,在一定区域发展休闲渔业和建立渔港,开拓渔业经济新途径.因此,通过湖泊渔业功能区域的设置,可以保护和修复湖泊生态系统结构和功能,合理有序地发展湖泊渔业,促进旅游业和休闲渔业的健康发展,实现湖泊综合资源的可持续利用.

5 参考文献

[1] Tang QS. Advantages and prospects of Chinese fisheries. *Chinese Fisheries*, 2005, (2): 2-5. [唐启升. 中国发展渔业的

- 优势及前景. 中国水产, 2005, (2): 2-5.]
- [2] FAO RF. The state of world fisheries and aquaculture 2014: Opportunities and challenges. 2014. [联合国粮食及农业组织. 世界渔业和水产养殖状况 2014: 机遇与挑战. 2014.]
- [3] Fisheries Bureau of the Ministry of Agriculture ed. China fishery statistical yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 23-94. [农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴 2016. 北京: 中国农业出版社, 2016: 23-94.]
- [4] Zhang YM. Advance on aquaculture and propagation technology of lake and reservoir in China. *Journal of fisheries of China*, 1992, **16**(2): 179-187. [张幼敏. 中国湖泊和水库水产增殖技术的进展. 水产学报, 1992, **16**(2): 179-187.]
- [5] Gu XH, Zhu SQ, Wu LK *et al.* The natural fishery and the development countermeasures in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(1): 94-100. DOI: 10.18307/2009.0112. [谷孝鸿, 朱松泉, 吴林坤等. 太湖自然渔业及其发展策略. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 94-100.]
- [6] Hu CL, Wan CY, Ding QQ *et al.* Effect of reservoir fisheries on water quality of Chinese reservoirs and bionomic control countermeasures. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 161-168. DOI: 10.18307/2010.0202. [胡传林, 万成炎, 丁庆秋等. 我国水库渔业对水质的影响及其生态控制对策. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 161-168.]
- [7] Liu QG, He GX, Chen MK. Theoretical conception and application of Water Conservation Fisheries. *Chinese Fisheries*, 2009, (5): 20-22. [刘其根, 何光喜, 陈马康. 保水渔业理论构想与应用实例. 中国水产, 2009, (5): 20-22.]
- [8] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF *et al.* Status and changes of fishery resources (2009-2010) in Lake Taihu and their responses to water eutrophication. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 967-973. DOI: 10.18307/2011.0621. [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 太湖渔业资源现状 (2009—2010 年) 及与水体富营养化关系浅析. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 967-973.]
- [9] Scheffer M. Alternative attractors of shallow lakes. *Scientific World Journal*, 2001, (1): 254. DOI: 10.1100/tsw.2001.62.
- [10] Fang F. On the development of fishery produces in Taihu Lake area during the Ming & Qing dynasties [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. [方芳. 明清时期太湖地区渔业生产技术发展研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2010.]
- [11] Wu RJ. Lake water resources and environments in China and countermeasures. *Bull Chin Acad Sci*, 2001, **16**(3): 176-181. [吴瑞金. 我国湖泊资源环境现状与对策. 中国科学院院刊, 2001, **16**(3): 176-181.]
- [12] Yang JX, Pan XB, Chen XY *et al.* Overview of the artificial enhancement and release of endemic freshwater fish in China. *Zoological Research*, 2013, **34**(4): 267-280. [杨君兴, 潘晓赋, 陈小勇等. 中国淡水鱼类人工增殖放流现状. 动物学研究, 2013, **34**(4): 267-280.]
- [13] Wang W ed. Artificial breeding of fish. In: Shi YC, Zhang XQ eds. Chinese academic ceremony in 20th: Agricultural Science. Fuzhou: Fujian Education Press, 2002: 406-409. [王武. 家鱼人工育苗. 见: 石元春, 张湘琴编. 20 世纪中国学术大典: 农业科学. 福州: 福建教育出版社, 2002: 406-409.]
- [14] Lu WM, Tong HY. Effect of artificial stocking of silver carp and bighead in Lake Taihu. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1994, **3**(3): 112-120. [陆伟民, 童合一. 太湖人工放流鲢、鳙效果的研究. 上海水产大学学报, 1994, **3**(3): 112-120.]
- [15] Tu FM. Situation, potential and countermeasures of lake fishery development in Hunan Province. *Hunan Fisheries*, 1985, (2): 15-17. [涂福命. 湖南湖泊渔业开发的现状、潜力及对策. 湖南水产, 1985, (2): 15-17.]
- [16] Huang YK. Situation and potential analysis of fishery production in Hunan Province. *Hunan Fisheries*, 1985, (4): 6-11. [黄玉昆. 湖南省渔业生产现状与潜力分析. 湖南水产, 1985, (4): 6-11.]
- [17] Wu LK. Development and thinking of net fish farming in Taihu Lake. *Aquiculture*, 1999, (1): 20-22. [吴林坤. 太湖网围养殖的发展与思考. 水产养殖, 1999, (1): 20-22.]
- [18] Li ZX. Brilliant achievements in 60 years of fishery in China. *Chinese Fisheries*, 2009, (10): 14-16. [李振雄. 中国渔业 60 年辉煌成就. 中国水产, 2009, (10): 14-16.]
- [19] Qi GY, Chen L. Investigation report on large water fishery in Jiangsu and Zhejiang Province. *Heilongjiang Fisheries*, 1993, (2): 11-14. [戚国扬, 陈龙. 江苏、浙江大水面渔业考察报告. 黑龙江水产, 1993, (2): 11-14.]
- [20] Zhu QS, Lu QP. Study on high yield and high efficiency technology of small area net fish farming in lake. *Inland Fisheries*, 1992, (1): 15-17. [朱清顺, 陆全平. 湖泊小面积网围精养高产高效技术的研究. 内陆水产, 1992, (1): 15-17.]
- [21] Xie P, Cui YB. Biodiversity and fishery development of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, (S1): 1-5. [谢平, 崔奕波. 长江中下游湖泊生物多样性与渔业发展. 水生生物学报,

- 1996, (增刊): 1-5.]
- [22] Tang H. Remarkable achievement of Taihu Lake for six months prohibit fishing. *Chinese Fisheries*, 1987, (4): 13. [唐宏. 太湖半年封湖成效显著. 中国水产, 1987, (4): 13.]
- [23] He J, Gu XH, Zhang XZ. Study on structure characteristics and driving mechanism of natural fishery in Taihu Lake. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, (3): 287-291. [何俊, 谷孝鸿, 张宪中. 太湖自然渔业结构特征及其变化驱动机制研究. 江苏农业科学, 2011, (3): 287-291.]
- [24] Chen HS. Restoration project of the ecosystem in Tai Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(2): 173-178. [陈荷生. 太湖生态修复治理工程. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 173-178.]
- [25] Di Y. Technology research of water purification fisheries in Lihu Lake [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [狄瑜. 蠡湖净水渔业技术研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [26] Gao HQ. Current status of international fisheries and resources. *Chin J Anim Sci*, 2006, 42(6): 48-50. [高宏泉. 国际渔业及资源现状. 中国畜牧杂志, 2006, 42(6): 48-50.]
- [27] Cen YJ. Present situation and prospect of freshwater fisheries abroad. *Freshwater Fisheries*, 1979, (S1): 1-29. [岑玉吉. 国外淡水渔业的现状与展望. 淡水渔业, 1979, (S1): 1-29.]
- [28] Britz P. The history of South African inland fisheries policy with governance recommendations for the democratic era. *Water Sa*, 2015, 41(5): 624-632.
- [29] Li JC, Chen G. Overfishing of marine fisheries and private transferable quotas. *Ecological Economy*, 2009, (4): 52-54. [李家才, 陈工. 海洋渔业过度捕捞与私人可转让配额. 生态经济, 2009, (4): 52-54.]
- [30] Zhang YM. Fisheries of the Great Lakes in the United States. *Chinese Fisheries*, 1987, (4): 25-25. [张幼敏. 美国五大湖的渔业. 中国水产, 1987, (4): 25-25.]
- [31] Chen ZX. Brief introduction to fisheries and management in the United States. *Chinese Fisheries Economics*, 2004, (1): 53-55. [陈宗尧. 美国渔业及其管理简介. 中国渔业经济, 2004, (1): 53-55.]
- [32] Yang NS. World fisheries development trend. *Chinese Fisheries Economics*, 2001, (1): 19-20. [杨宁生. 世界渔业发展的趋势. 中国渔业经济, 2001, (1): 19-20.]
- [33] Wang PY, Ymda K. The comparison between the development of Pipa Lake and traditional agriculture of Taihu Lake. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, 19(2): 86-88. [王培英, 山田国广. 日本琵琶湖开发与太湖传统复合农业环境利用比较研究. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 86-88.]
- [34] Li ZL. Cultivation fisheries in Japan. *Fishery Modernization*, 1988, (6): 19-20. [李兆龙. 日本的栽培渔业. 现代渔业信息, 1988, (6): 19-20.]
- [35] Chen ZL. Lake fisheries in the Soviet Union. *Freshwater Fisheries*, 1979, (6): 36-39. [陈曾龙. 苏联的湖泊渔业. 淡水渔业, 1979, (6): 36-39.]
- [36] Sun C, Liang GF. EU fisheries common policy and fishery subsidy. *World Agriculture*, 2016, (6): 78-85. [孙琛, 梁鸽峰. 欧盟的渔业共同政策及渔业补贴. 世界农业, 2016, (6): 78-85.]
- [37] Duan ZZ, Lin H, Yu G. 30 years of EU Common Fisheries Policy. *World Agriculture*, 2014, (2): 67-72. [段子忠, 林海, 于戈. 欧盟共同渔业政策 30 年. 世界农业, 2014, (2): 67-72.]
- [38] Huang L. Impacts of hydraulic works on fish biodiversity in the Yangtze River Valley and counter-measures. *J Lake Sci*, 2006, 18(5): 553-556. DOI: 10.18307/2006.0520. [黄亮. 水工程建设对长江流域鱼类生物多样性的影响及其对策. 湖泊科学, 2006, 18(5): 553-556.]
- [39] Welcomme RL. River fisheries in Africa: their relationship to flow regimes. *Naga*, 2003, 26(3): 22-26.
- [40] Lucas MC, Baras E, Thom TJ *et al* eds. Migration of freshwater fishes. Oxford: Blackwell Science, 2001.
- [41] Whittaker RH. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251. DOI: 10.2307/1218190.
- [42] Patil GP, Taillie C. Diversity as a concept and its measurement. *Journal of the American statistical Association*, 1982, 77(379): 548-561. DOI: 10.2307/2287709.
- [43] Yin MC ed. Fish ecology. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 250-253. [殷名称. 鱼类生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995: 250-253.]
- [44] Wang LM, Hu HJ, Wang D. Ecological impacts of disconnection from the Yangtze on fish resources in Zhangdu Lake. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 287-292. [王利民, 胡慧建, 王丁. 江湖阻隔对涨渡湖区鱼类资源的生态影响. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 287-292.]

- [45] Xu JH. The water conservancy projects and the environmental ecology in Taihu Lake valley. *Journal of Suzhou Railway Teachers College*, 1991, **8**(2): 51-58. [许京怀. 太湖地区水利工程与环境生态. 苏州科技学院学报: 社会科学, 1991, **8**(2): 51-58.]
- [46] Peet RK. The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, **5**(1): 285-307.
- [47] Gowans ARD, Armstrong JD, Priede IG. Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *Journal of Fish Biology*, 1999, **54**(4): 713-726. DOI: 10.1111/j.1095-8649.1999.tb02028.x.
- [48] Jager HI, Chandler JA, Lepla KB *et al.* A theoretical study of river fragmentation by dams and its effects on white sturgeon populations. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, **60**(4): 347-361.
- [49] Carstensen J, Andersen JH, Gustafsson BG *et al.* Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(15): 5628-5633. DOI: 10.1073/pnas.1323156111.
- [50] Cai YP. Effect of large water project on the key ecological functional region in the middle and lower reach regions of Yangtze River [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2007. [蔡玉鹏. 大型水利工程对长江中下游关键生态功能区影响研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [51] Zhang ZS, Zhou CS, Deng ZL. The ecological influence of the high dam in Aswan, Egypt and the fishery of Nasser reservoir. *Journal of Hydroecology*, 1983, (4): 64-65. [章宗涉, 周春生, 邓中林. 埃及阿斯旺高坝的水生态学影响和纳赛尔水库的渔业. 水库渔业, 1983, (4): 64-65.]
- [52] Crowder LB, Hazen EL, Avissar N *et al.* The impacts of fisheries on marine ecosystems and the transition to ecosystem-based management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008: 259-278. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173406.
- [53] Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J *et al.* Fishing down marine food webs. *Science*, 1998, **279**(5352): 860-863.
- [54] Yang QL, Liu QZ. Problems and development approaches of lake fisheries in China. *Freshwater fisheries*, 1992, (2): 43-45. [杨秋玲, 刘其哲. 我国湖泊渔业存在的问题及其发展途径. 淡水渔业, 1992, (2): 43-45.]
- [55] Wang YP. Studies on the population feature of *Coilia nasus taihuensis* and interspecific relationship among fishes in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, 2016. [王银平. 太湖湖鲢种群特征及鱼类种间关系研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2016.]
- [56] Pala C. Detective work uncovers under-reported overfishing. *Nature*, 2013, **496**(7443): 18. DOI: 10.1038/496018a.
- [57] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF. The structure of fish community and changes of fishery resources in Lake Hulun. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2): 387-394. DOI: 10.18307/2016.0219. [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞. 呼伦湖鱼类群落结构及其渔业资源变化. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 387-394.]
- [58] Yang ZF, Chen LQ, Chen Y *et al.* Changes and countermeasures of fishery resources in Taihu Lake. *Freshwater Fisheries*, 2004, **34**(6): 3-5. [杨再福, 陈立侨, 陈勇等. 太湖渔业资源量变化与对策. 淡水渔业, 2004, **34**(6): 3-5.]
- [59] Agriculture Organization of the United Nations. Fisheries Dept. The state of world fisheries and aquaculture. Food & Agriculture Org, 2002.
- [60] Blankenship HL, Leber KM. A responsible approach to marine stock enhancement. In: Sass GG, Allen MS eds. Foundations of fisheries science. American Fisheries Society, Bethesda: Maryland, 2014: 659-668.
- [61] Lorenzen K. Understanding and managing enhancement fisheries systems. *Reviews in Fisheries Science*, 2008, **16**(1/2/3): 10-23. DOI: 10.1080/10641260701790291.
- [62] Hedrick PW, Hedgecock D, Hamelberg S *et al.* The impact of supplementation in winter-run chinook salmon on effective population size. *Journal of Heredity*, 2000, **91**(2): 112-116. DOI: 10.1093/jhered/91.2.112.
- [63] Berejikian BA, Johnson T, Endicott RS *et al.* Increases in steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) redd abundance resulting from two conservation hatchery strategies in the Hama Hama River, Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, **65**(4): 754-764. DOI: 10.1139/F08-014.
- [64] Jiang YZ, Lin N, Yang LL *et al.* The ecological risk of stock enhancement and the measures for prevention and control. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, **21**(2): 413-422. DOI: 10.3724/SP.J.1118.2014.00413. [姜亚洲, 林楠, 杨林林等. 渔业资源增殖放流的生态风险及其防控措施. 中国水产科学, 2014, **21**(2): 413-422.]
- [65] He J, Gu XH, Wang XL *et al.* Fish stocking quantities and structures of the fishery resources enhancement in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 104-110. DOI: 10.18307/2012.0114. [何俊, 谷孝鸿, 王小林等. 太湖鱼类放流增殖的有

- 效数量和合理结构. 湖泊科学, 2012, 24(1): 104-110.]
- [66] Eby LA, Roach WJ, Crowder LB *et al.* Effects of stocking-up freshwater food webs. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(10): 576-584. DOI: 10.1016/j.tree.2006.06.016.
- [67] Lorenzen K, Beveridge M, Mangel M. Cultured fish; Integrative biology and management of domestication and interactions with wild fish. *Biological Reviews*, 2012, 87(3): 639-660. DOI: 10.1111/j.1469-185X.2011.00215.x.
- [68] Rose KA, Cowan JH, Winemiller KO *et al.* Compensatory density dependence in fish populations; importance, controversy, understanding and prognosis. *Fish and Fisheries*, 2001, 2(4): 293-327. DOI: 10.1046/j.1467-2960.2001.00056.x.
- [69] Bert TM, Crawford CR, Tringali MD *et al.* Genetic management of hatchery-based stock enhancement. *Methods & Technologies in Fish Biology & Fisheries*, 2007, 6: 123-174.
- [70] Uglem I, Bjørn PA, Dale T *et al.* Movements and spatiotemporal distribution of escaped farmed and local wild Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture Research*, 2008, 39(2): 158-170. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2007.01872.x.
- [71] Araki H, Cooper B, Blouin MS. Genetic effects of captive breeding cause a rapid, cumulative fitness decline in the wild. *Science*, 2007, 318(5847): 100-103. DOI: 10.1126/science.1145621.
- [72] Smith DW. Biological control of excessive phytoplankton growth and the enhancement of aquacultural production. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1985, 42(12): 1940-1945. DOI: 10.1139/f85-240.
- [73] Domaizon I, Devaux J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir (France). *Aquatic Ecology*, 1999, 33(2): 193-204.
- [74] Xie P ed. Silver carp, bighead carp and algae bloom control. Beijing: Science Press, 2003. [谢平. 鲢, 鳙与藻类水华控制. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [75] Wang YP, Gu XH, Zeng QF *et al.* Growth and photosynthetic activity of *Microcystis* colonies after gut passage through silver carp and bighead carp. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1707-1715. DOI: 10.5846/stxb201211151602. [王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 控(微囊)藻鲢, 鳙排泄物光能与生长活性. 生态学报, 2014, 34(7): 1707-1715.]
- [76] Wang YP, Gu XH, Zeng QF *et al.* Impacts of faeces from microcystis-dietary silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) on the aquatic environments and the transferring of faeces-sourced nitrogen. *J Lake Sci*, 2015, 27(3): 475-485. DOI: 10.18307/2015.0315. [王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 食微囊藻干粉鱼类对水环境的影响及氮素迁移转化规律. 湖泊科学, 2015, 27(3): 475-485.]
- [77] Yang HH, Ni Q. Discussion on inland fishery law enforcement management under the background of new urbanization. *Chinese Fisheries*, 2016, (9): 30-32. [杨浩昊, 倪琪. 浅论新型城镇化背景下的内陆渔政执法管理. 中国水产, 2016, (9): 30-32.]
- [78] Yin HT. The fishing village in the south of Jiangsu space adaptive strategies under the process of urban and rural integration research-take the Taihu Lake as an example [Dissertation]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016. [殷焜焱. 城乡一体化进程下苏南渔村空间适应性策略研究[学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.]
- [79] Carey CC, Ibelings BW, Hoffmann EP *et al.* Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. *Water Research*, 2012, 46(5): 1394-1407. DOI: 10.1016/j.watres.2011.12.016.
- [80] Oglesby RT. Relationships of fish yield to lake phytoplankton standing crop, production, and morphoedaphic factors. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1977, 34(12): 2271-2279. DOI: 10.1139/f77-305.
- [81] Hanson JM, Leggett WC. Empirical prediction of fish biomass and yield. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, 39(2): 257-263. DOI: 10.1139/f82-036.
- [82] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF *et al.* Status and changes of fishery resources (2009-2010) in Lake Taihu and their responses to water eutrophication. *J Lake Sci*, 2011, 23(6): 967-973. DOI: 10.18307/2011.0621. [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 太湖渔业资源现状(2009-2010年)及与水体富营养化关系浅析. 湖泊科学, 2011, 23(6): 967-973.]
- [83] Yang ZF, Zhou ZL, Wang XW *et al.* Assessment of lake fishery and environmental sustainable development capacity. *J Hydroecol*, 2005, 25(2): 55-57. [杨再福, 周子力, 王新伟等. 湖泊渔业与环境可持续发展能力的评估. 水生生态学杂志, 2005, 25(2): 55-57.]
- [84] Tonn WM, Magnuson JJ, Rask M *et al.* Intercontinental comparison of small-lake fish assemblages: The balance between local and regional processes. *American Naturalist*, 1990, 136(3): 345-375. DOI: 10.1146/annurev.es.11.110180.000245.
- [85] Tammi J, Lappalainen A, Mannio J *et al.* Effects of eutrophication on fish and fisheries in Finnish lakes: a survey based on random sampling. *Fisheries Management and Ecology*, 1999, 6(3): 173-186. DOI: 10.1046/j.1365-2400.1999.00152.x.

- [86] Colby PJ, Spangler GR, Hurley DA *et al.* Effects of eutrophication on salmonid communities in oligotrophic lakes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1972, **29**(6): 975-983. DOI:10.1139/l72-141.
- [87] Reynolds C. Eutrophication of fresh waters; Principles, problems and restoration. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1993, **3**(4): 376-377. DOI: 10.1016/0921-8696(86)90297-5.
- [88] Scasso F, Campos H. Pelagic fish communities and eutrophication in lakes of an Andean basin of central Chile. *Journal of Freshwater Ecology*, 2000, **15**(1): 71-82. DOI: 10.1080/02705060.2000.9663723.
- [89] Liu ES, Liu ZW, Chen WM *et al.* A study on the chaise of Lake anchovy (*Coilia ectenes taihuensis* Yen et Lin) catches and its mutual relationship to the biological environment in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, **17**(4): 340-345. DOI: 10.18307/2005.0410. [刘恩生, 刘正文, 陈伟民等. 太湖湖鲢渔获量变化与生物环境间相互关系. 湖泊科学, 2005, **17**(4): 340-345.]
- [90] Wei LL. Effects of microcystins on fish. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(12): 3304-3310. [隗黎丽. 微囊藻毒素对鱼类的毒性效应. 生态学报, 2010, **30**(12): 3304-3310.]
- [91] Fischer WJ, Dietrich DR. Pathological and biochemical characterization of microcystin-induced hepatopancreas and kidney damage in carp (*Cyprinus carpio*). *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2000, **164**(1): 73-81. DOI: 10.1006/taap.1999.8861.
- [92] Xie P, Chen YY. Threats to biodiversity in freshwater ecosystems. *Science and Society*, 1995, (4): 15-24. [谢平, 陈宜瑜. 淡水生态系统中生物多样性面临的威胁. 科学与社会, 1995, (4): 15-24.]
- [93] Yang JX, Chen YR, He YH. Fish diversity in lakes of central Yunnan Plateau. *Chinese Biodiversity*, 1994, **2**(4): 204-209. [杨君兴, 陈银瑞, 何远辉. 滇中高原湖泊鱼类多样性的研究. 生物多样性, 1994, **2**(4): 204-209.]
- [94] Zhang ZY, Yuan Y. Discussion on the influence of Xiluodu water conservancy project on the rare fishes in the upper reaches of the Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2001, **31**(2): 62-63. [张志英, 袁野. 溪落渡水利工程对长江上游珍稀特有鱼类的影响探讨. 淡水渔业, 2001, **31**(2): 62-63.]
- [95] Li SF, Wu LZ, Wang Q *et al* eds. Studies on the germplasm resources of silver carp, bighead carp and grass carp in the Yangtze River, Pearl River, Heilongjiang River. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990. [李思发, 吴力钊, 王强等. 长江, 珠江, 黑龙江鲢, 鳙, 草鱼种质资源研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.]
- [96] Dodson S. Predicting crustacean zooplankton species richness. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(4): 848-856.
- [97] Chen YY. Several biodiversity problems in freshwater ecosystems. *Chinese Bulletin of Life Science*, 1990, (5): 197-200. [陈宜瑜. 淡水生态系统中的若干生物多样性问题. 生命科学, 1990, (5): 197-200.]
- [98] Welcomme RL. A history of international introductions of inland aquatic species. FAO Fisheries Technical Paper No. 294. FAO, Rome, 1992: 318.
- [99] Wu XC. Discussion on the opening and development of aquatic resources conservation in China. *Chinese Fisheries*, 2009, (6): 4-7. [吴晓春. 浅谈我国水生生物资源养护事业的开启与发展. 中国水产, 2009, (6): 4-7.]
- [100] Chen SW, Zhu WD. Effect and solutions of crib cultivation on water environment. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, **35**(30): 9538-9540. [陈苏维, 朱文东. 网箱养殖对水环境的影响及解决方法. 安徽农业科学, 2007, **35**(30): 9538-9540.]
- [101] Lucas MC, Baras E. Methods for studying spatial behaviour of freshwater fishes in the natural environment. *Fish and Fisheries*, 2000, **1**(4): 283-316. DOI: 10.1046/j.1467-2979.2000.00028.x.
- [102] Yang YB, Jiang N, Yin LQ *et al.* RS-based dynamic monitoring of lake area and enclosure culture in East Taihu Lake. *J Lake Sci*, 2005, **17**(2): 133-138. DOI: 10.18307/2005.0207. [杨英宝, 江南, 殷立琼等. 东太湖湖泊面积及网围养殖动态变化的遥感监测. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 133-138.]
- [103] Ren LH, Lu XP, Dai YL *et al.* Discussion on the construction, function and existing problems of pond geographic information system in Kunshan. *Chinese Fisheries*, 2016, (10): 41-44. [任黎华, 陆小平, 戴永良等. 昆山池塘地理信息系统建设、作用与存在的问题浅析. 中国水产, 2016, (10): 41-44.]
- [104] Zhang HJ, Wei QW, Yang DG. The development trend of echo sounder and its application in fishery. *Freshwater Fisheries*, 2008, **28**(1): 9-13. [张慧杰, 危起伟, 杨德国. 回声探测仪的发展趋势及渔业应用. 水利渔业, 2008, **28**(1): 9-13.]
- [105] Sun MB, Gu XH, Zeng QF *et al.* Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(23): 7553-7562. DOI: 10.5846/stxb201209071265. [孙

- 明波, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测. 生态学报, 2013, **33**(23): 7553-7562.]
- [106] Tao JP, Ai WM, Gong YT *et al.* Assessment of fish abundance and distribution using fisheries acoustics and GIS modeling in the Nanxi River of Wenzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(11): 2992-3000. [陶江平, 艾为明, 龚昱田等. 采用渔业声学方法和 GIS 模型对楠溪江鱼类资源量及空间分布的评估. 生态学报, 2010, **30**(11): 2992-3000.]
- [107] Kubecka J. Use of horizontal dual-beam sonar for fish surveys in shallow water. In: Cowx IG ed. Stock assessment in inland fisheries. Oxford: Fishing News Books, Blackwell Science Ltd, 1996: 165-178.
- [108] Zhang TL, Li ZJ, Shu SW. A review on marking techniques in fish. *Journal of Fishery Science of China*, 2003, **10**(3): 246-253. [张堂林, 李钟杰, 舒少武. 鱼类标志技术的研究进展. 中国水产科学, 2003, **10**(3): 246-253.]
- [109] Roussel JM, Haro A, Cunjak RA. Field test of a new method for tracking small fishes in shallow rivers using passive integrated transponder (PIT) technology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, (57): 1326-1329. DOI: 10.1139/f00-110.
- [110] Geng B, Liang LQ, Guan YT *et al.* Ecological safety assessment of the transgenic carp containing a growth hormone gene using genetic marker. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(3): 1139-1144. [耿波, 梁利群, 关云涛等. 转大麻哈鱼生长激素基因鲤鱼生态安全性检测与分析. 生态学报, 2007, **27**(3): 1139-1144.]
- [111] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF *et al.* Seasonal and spatial variations of the food web structure in a shallow eutrophic lake assessed by stable isotope analysis. *Fisheries Science*, 2014, **80**(5): 1045-1056. DOI: 10.1007/s12562-014-0771-5.
- [112] Wang C, Kynard B, Wei Q *et al.* Spatial distribution and habitat suitability indices for non-spawning and spawning adult Chinese sturgeons below Gezhouba Dam, Yangtze River; effects of river alterations. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, **29**(1): 31-40. DOI: 10.1111/jai.12094.
- [113] Xiong GY. Researches on the tagging technology in fishery. *Journal of Nanchang Teachers College*, 2008, **29**(6): 42-44. [熊国勇. 渔业研究中的标志放流. 南昌师范学院学报, 2008, **29**(6): 42-44.]
- [114] Karr J, Dudley D. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 1981, **5**(1): 55-68.
- [115] Abell R, Thieme ML, Revenga C *et al.* Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 2008, **58**(5): 403-414. DOI: 10.1641/b580507.
- [116] Tang T, Cai QH. The essential issues in aquatic ecological function regionalization. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(22): 6255-6263. [唐涛, 蔡庆华. 水生态功能分区研究中的基本问题. 生态学报, 2010, **30**(22): 6255-6263.]
- [117] Lu JD, Fang HY. Study on potential productivity of bait organisms of the large and middle lakes and reservoirs in Hubei Province. *Journal of Hubei University: Natural Science*, 1995, **17**(4): 422-426. [卢进登, 方辉亚. 湖北省大中型湖泊、水库饵料生物资源的鱼产潜力研究. 湖北大学学报, 1995, **17**(4): 422-426.]
- [118] Gu XH, Bai XL, Jiang N *et al.* Fishery development, regional classification and functional positioning of Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(7): 2247-2254. [谷孝鸿, 白秀玲, 江南等. 太湖渔业发展及区域设置与功能定位. 生态学报, 2006, **26**(7): 2247-2254.]