贡湖生态修复区鱼类群落结构调控对水质及沉水植物恢复的影响

潘 辉[1],关保华[2],钱 新[3]*,陆亚琪[4] (1. 无锡市瑞景城市服务有限公司,江苏无锡 214000;2. 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,江苏南京 210008;3. 南京大学环境学院,江苏南京 210023;4. 无锡市生态湿地保护建设研究会,江苏无锡 214000)

摘要 针对贡湖湾退渔还湖生态修复区内沉水植物覆盖度及水体透明度出现下降趋势,通过原位围隔试验研究鱼类群落结构调控对湖体水质及沉水植物恢复的影响,结果表明,解除鱼类扰动及摄食影响后,水体透明度从0.6 m快速提升至1.5 m以上,水体中TN、TP、COD_{Mn}和浊度等水质指标均下降,2年内沉水植物覆盖度可从30%恢复到90%。生态修复区规模性鱼类种群结构调控效果表明,合理调控鱼类种群结构、及时清除大规格鱼类有助于沉水植物群落的恢复和稳定。

关键词 湖泊生态修复;沉水植物;鱼类调控;群落结构;透明度;覆盖度
中图分类号 X171.4 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2022)15-0070-05
doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.15.019
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Fish Community Structure Regulation on Water Quality and Restoration of Submerged Macrophytes in Gonghu Lake Ecological Restoration Area

PAN Hui[1], GUAN Bao-hua[2], QIAN Xin[3] et al (1. Wuxi Ruijing City Service Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008; 3. School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023)

Abstract In view of the decreasing trend of submerged vegetation coverage and water transparency in the ecological restoration area of Gonghu Bay, the effects of fish community structure regulation on lake water quality and submerged macrophyte restoration were studied by in-situ enclosure experiment, the results showed that the water transparency increased rapidly from 0.6 m to more than 1.5 m after fish disturbance and feeding disturbance was removed, and the water quality indexes such as TN, TP, COD and turbidity decreased. The submerged macrophyte community subsequently restored from 30% to 90% within 2 years. The regulation effect of large-scale fish population structure in ecological restoration area showed that reasonable regulation of fish population structure and timely elimination of large-scale fish were helpful to the recovery and stability of submerged macrophyte community.

Key words Ecological restoration of lakes; Submerged macrophyte; Fish regulation; Community structure; Transparency; Coverage

沉水植物是草型湖泊生态系统中重要的初级生产者,对湖泊生态系统的稳定性有重要影响,提高本土沉水植物群落的覆盖度是恢复浅水湖泊生态系统结构的重要措施[1]。相关研究表明,恢复沉水植物群落结构有助于降低水体营养盐水平[2-3],沉水植物群落为水生动物提供产卵栖息场所的同时还可作为重要食物来源,在抑制生物性和非生物性悬浮物质、改善溶解氧条件、提高水体透明度及增加水体空间生态位等方面也有重要作用[4]。李英杰等[5]研究发现水草可使湖泊系统维持在清水状态,在一定条件下,甚至可使富营养化湖泊维持在清水状态。年跃刚等[6]认为浊水稳态向清水稳态转换的驱动力主要包括营养盐条件、透明度条件、生物牧食条件、底质条件,然而开放型富营养化湖泊治理过程中沉水植物恢复涉及风浪[7]、气象[8]、水位[9]、真光层深度[10-12]等系列因素制约,修复难度极大。田伟等[13]认为可通过逐步恢复沉水植被并辅以生物调控,提高物种多样性,从而提升湖体自身净化能力。

2007年太湖蓝藻暴发导致无锡市饮用水危机后,沿岸线建立了系列环湖生态净化缓冲带。贡湖湾退渔还湖生态修复区是缓冲带的重要组成部分,位于太湖贡湖东北角,西至许仙港,东至大溪港,北至亲水河,总面积2.32 km^2,原貌为20世纪60年代围湖造田运动形成的160余个鱼塘,鱼塘淤积严重且水质恶化为劣Ⅴ类,2010年启动退渔还湖生态修复工程后,水域面积达1.29 km^2,属于典型的人工湖泊,该区域与太湖及滨湖河网水系通过闸控限制性连通。2012年生境条件改善后开始沉水植物恢复工程,经过水质水量调控、沉水植物群落结构调控、鱼类群落结构调控等系列工程措施,至2015年工程竣工后沉水植物覆盖度高达80%,具备了滨湖缓冲带的生态净化功能。跟踪调查发现2017年生态修复区透明度明显下降,沉水植物覆盖也出现降低趋势,为了探究原因,在修复区内进行了原位围隔试验,并且根据围隔试验效果,在整体退渔还湖生态修复区开展了鱼类调控推广应用,跟踪研究了鱼类调控后整体退渔还湖修复区水体透明度及沉水植物群落恢复的状况,以期为生态修复区长效稳定运行提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 围隔试验区试验设置。2018年9月在退渔还湖生态修复区选择透明度较低区域(图1),采用透水无纺布围隔进行原位围隔试验,围隔区域水域面积40 000 m^2,平均水深1.5 m,最大水深2.5 m。2018年10月在围隔区域内进行以清鱼为主要手段的调控措施,根据围隔区域地形环境采用网孔2 cm的3层刺网划分区间单元,再用捕鱼器对每个区间单元进行清除捕捞,统计鱼群种类及渔获物产量。围隔内外设置固定监测点位1~10号(图1),1号点位为试验围隔区域内,2号点位作为围隔外对照点位,2018年9月—2020年12

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101014);国家自然科学基金重点项目(31930074)。
作者简介 潘辉(1986—),男,安徽六安人,工程师,硕士,从事水环境治理与生态修复研究。*通信作者,教授,博士,博士生导师,从事流域污染控制与生态修复研究。
收稿日期 2022-03-08

月每月中旬采用塞氏盘法测量水体透明度，并于每季度（3、6、9、12 月）采水样检测，同时采用现场勘察结合无人机航拍图片分析沉水植物覆盖度。

1.1.2　围隔外技术推广应用效果研究。围隔外（退渔还湖生态修复区）2012 年 9 月退渔还湖生态修复之初，就设置了固定的长期水质监测点位（3~10 号点），每月均采样监测。2019 年 5 月—2020 年 3 月进行了大规模的围网清鱼调控工程。取 3~10 号点位透明度的月均值代表对照区月平均透明度，取 3~10 号点位每季度（3、6、9、12 月）水质 TN、TP、COD_{Mn} 和叶绿素 a 均值代表对照区。采用现场勘察结合无人机航拍图片观测统计沉水植物覆盖度。选取 2012—2020 年每年 6—7 月沉水植物生长旺盛季节的覆盖度进行沉水植物群落恢复状况及鱼类种群调控推广应用效果的对比分析。

1.2　调查和测定方法　鱼类群落根据《全国淡水生物物种资源调查技术规定（试行）》中鱼类物种资源调查、《生物多样性观测技术导则 内陆水域鱼类》（HJ 710.7—2014）的相关规范和要求进行统计分析，结合原位围隔区域实际清鱼状况，采用刺网划分控制单元，再利用捕鱼器进行捕捞，称量统计渔获物，仪器设备及试剂主要有量鱼板、塑封袋、样本瓶、电子天平、托盘、鱼箱、乳胶手套、量筒、记录本、记号笔、福尔马林等。沉水植物覆盖度根据《全国淡水生物物种资源调查技术规定（试行）》中大型水生植物物种资源调查的相关规范及有关研究报道，采用现场勘察结合无人机航拍图片分析沉水植物覆盖度。水质指标按《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）要求进行检测，水体透明度采用塞氏盘法进行现场测量。

图 1　原位围隔区域和围隔外监测点位示意图

Fig. 1　Schematic diagram of monitoring points of the in-situ enclosure area and andoutside the enclosure

2　结果与分析

2.1　原位围隔区域内鱼类群落结构调控及沉水植物恢复研究

2.1.1　鱼类结构调控对透明度的影响。监测数据表明，围隔试验区域在实施鱼类结构调整前，其透明度与对照点透明度都处于 0.5~0.7 m 较低状态，鱼类群落结构调整后，围隔内水体透明度显著提升至透明见底（平均水深 1.5 m），并保持稳定（图 2）。2019 年 7 月开始透明度出现降低趋势，现场运营管理过程中发现有大量鱼群跃入围隔内，主要为规格较大的鲤鱼、鲫鱼、鲢鱼，2019 年 9 月再次对围隔区域进行清鱼，渔获物总计 110.5 kg，再次进行鱼类群落调控后，透明度很快再次提升至透明见底（图3）。围隔外水域在鱼类群落结构调整之后，透明度也逐步上升至 1.0 m 以上。

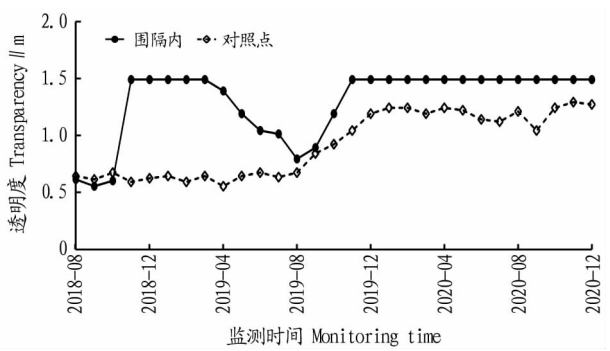

图 2　2018 年 9 月—2020 年 12 月试验围隔内外透明度变化趋势

Fig. 2　The change trend of transparency inside and outside the test enclosure from September 2018 to December 2020

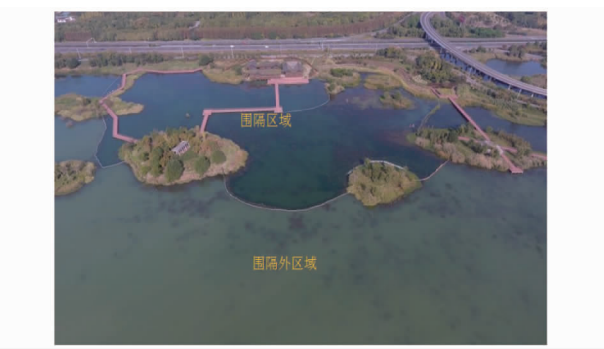

图 3　2019 年 9 月围隔内外透明度对比

Fig. 3　Comparison of transparency inside and outside the enclosure in September 2019

2.1.2　围隔内外水质变化情况。从围隔区域及对照点位 2018 年 9 月—2020 年 12 月季度监测的水质数据分析（图 4）可以看出，清鱼前后围隔内外水体 TN 变化不明显，均在 0.4~0.6 mg/L。围隔外水体 TP 总体在 0.019~0.040 mg/L，围隔外 TP 平均值（0.032 mg/L）高于围隔内平均值（0.025 mg/L）。鱼类结构调控前围隔内外水体 COD_{Mn} 及浊度基本持平，调控后围隔内水体 COD_{Mn} 及浊度均低于围隔外水平。

2.1.3　围隔区域渔获物统计分析。2018 年 10 月在 40 000 m^2 围隔区域内捕获总渔获物 751.0 kg（图 5），围隔区

域鱼类平均生物量达 18.78 g/m^2;鱼群个体重量统计结果表明,鲤鱼 416~6 500 g,草鱼 1 295~2 812 g,鲢鱼 372~1 560 g,鲫鱼 15~339 g,鳜鱼 476~1 952 g,乌鳢 320~3 490 g,鲌类 68~324 g,餐类 20~35 g,黄颡鱼 43~125 g。渔获物生物量百分比显示(图 6),鲢鱼最多,占 30.64%,鲤鱼其次,占 21.57%,草鱼占 19.97%,鲫鱼占 5.99%。

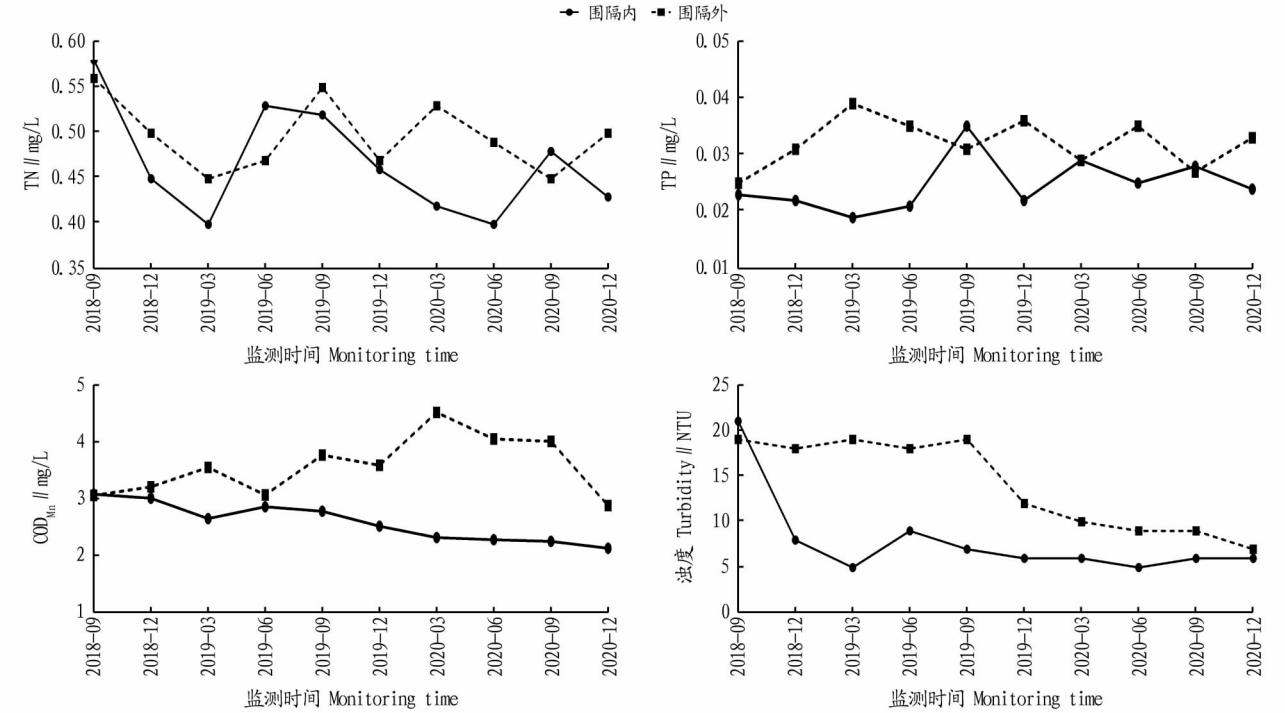

图 4 2018 年 9 月—2020 年 12 月围隔内外水质 TN、TP、COD_{Mn} 和浊度变化趋势

Fig. 4 Variation trends of TN, TP, COD_{Mn} and turbidity of water quality inside and outside the enclosure from September 2018 to December 2020

注:a~d 分别为鲤鱼、草鱼、鳜鱼、鲢鱼种群;e~h 分别为最大规格的鲤鱼(6.50 kg)、草鱼(2.81 kg)、鳜鱼(1.95 kg)、鲢鱼(1.56 kg);i. 鲌类;j. 乌鳢;k. 黄颡鱼;l. 鲫鱼;m~n. 杂鱼

Note: a-d are the populations of common carp, grass carp, mandarin fish, and silver carp, respectively; e-h are the largest carp (6.50 kg), grass carp (2.81 kg), mandarin fish (1.95 kg), silver carp (1.56 kg), respectively; i. tuna; j. snakehead; k. yellow catfish; l. crucian carp; m-n. miscellaneous fish

图 5 2018 年 10 月围隔区渔获物

Fig. 5 Enclosure catch in October 2018

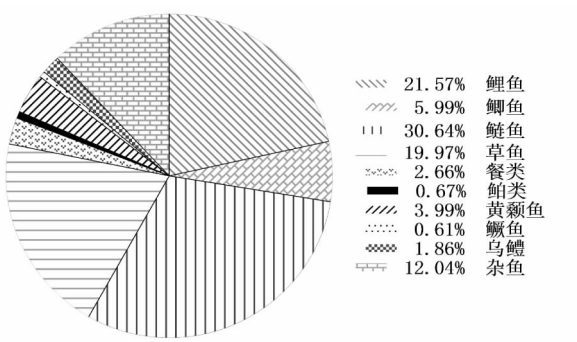

图 6 2018 年 10 月围隔区渔获物生物量百分比

Fig. 6 Percentage of fish biomass in enclosures in October, 2018

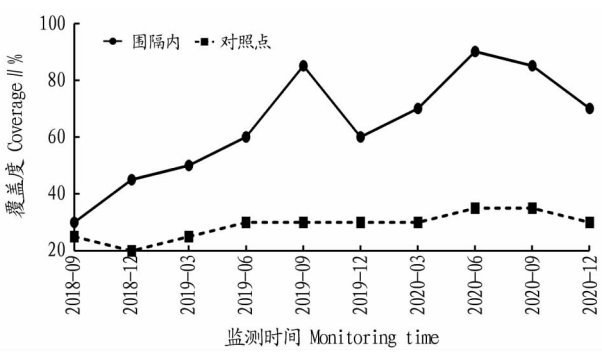

图 7 围隔内外沉水植物覆盖度变化趋势

Fig. 7 Variation trend of submerged plant coverage inside and outside the enclosure

2.1.4 围隔内外沉水植物覆盖度变化。季度监测数据(图 7)表明,围隔区域沉水植物群落从 2018 年 9 月 30%的覆盖度开始恢复,至 2019 年 9 月覆盖度高达 85%,冬季部分沉水植物凋亡,覆盖度下降至 60%。2020 年 6 月围隔内沉水植物

覆盖度高达 90%,冬季也稳定在 70%。围隔外对照点沉水植物覆盖度维持在 25%~35%。

2.2 围隔外鱼类群落结构调控效果研究

2.2.1 围隔外水质变化情况。围隔外(整个退渔还湖生态修复区)2012 年 9 月—2020 年 12 月每季度水质监测数据(图 8)分析发现,生态修复区水质相对稳定,整体保持在地表水 Ⅲ~Ⅳ 类,TN 为 0.17~1.50 mg/L,TP 为 0.009~0.063 mg/L,COD_{Mn} 为 1.50~5.33 mg/L,叶绿素 a 为 0.87~5.63 μg/L。

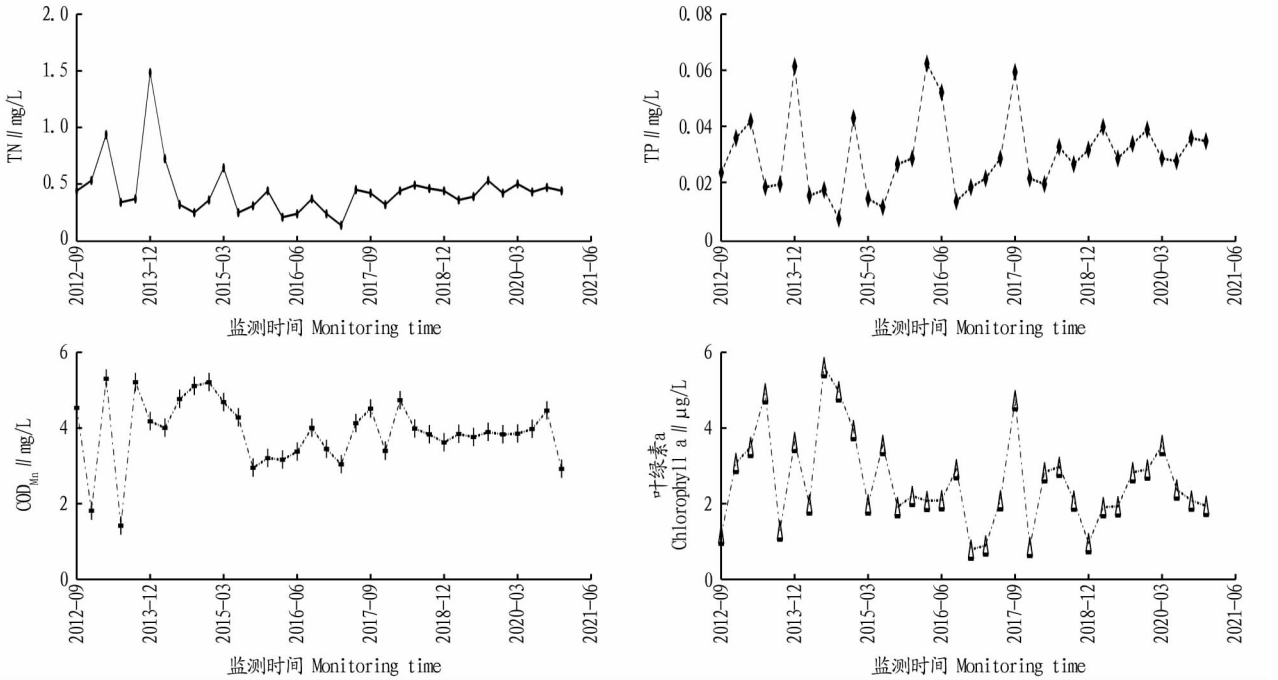

图 8　2012—2020 年围隔外 TN、TP、COD_{Mn} 和叶绿素 a 变化趋势

Fig. 8　Variation trends of TN, TP, COD_{Mn} and chlorophyll a outside the enclosure from 2012 to 2020

2.2.2 围隔外透明度与沉水植物覆盖度变化。逐月监测的透明度数据(图 9)表明,围隔外透明度 2012—2014 年总体呈上升趋势,至 2014 年 7 月透明度高达 226 cm,2016 年 7 月太湖蓝藻倒灌前,水体透明度虽有波动,但总体仍处于较高水平,2016 年 7—8 月蓝藻大量侵入,水体透明度下降至 75~80 cm,9 月后生态系统发挥净化功能,透明度再次提升至 11 月的 140 cm。围隔外透明度从 2017 年 3 月开始下降,至 2019 年 10 月水体透明度均低于 100 cm 以下,最低时降至 60 cm。2019 年 5 月—2020 年 3 月生态修复区进行了大规模的围网清鱼调控工程,随着鱼类群落结构调控效果的显现,水体透明度从 2019 年底出现逐步上升趋势,2020 年平均透明度稳定在 100 cm 以上。

整个生态修复区(包括围隔内外)2012 年开始沉水植物群落恢复工程,长期跟踪调查结合夏季沉水植物覆盖度较高季节无人机航拍资料(图 10)分析,发现全区沉水植物覆盖度 2012—2015 年呈上升趋势(图 9),2015 年 7 月最高(80%),优势种为马来眼子菜、微齿眼子菜、穗花狐尾藻和苦草,2016 年后覆盖度逐渐下降,2019 年覆盖度为 40%,沉水植物主要分布在浅水区,优势种为苦草、穗花狐尾藻、黑藻、金鱼藻,2020 年随着透明度提升,沉水植物覆盖度略有上升(45%)。

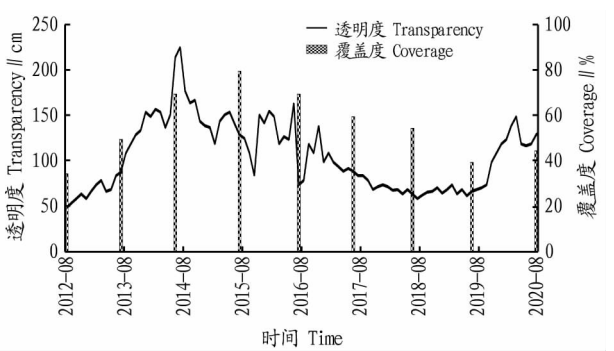

图 9　2012—2020 年围隔外透明度及沉水植物覆盖度变化趋势

Fig. 9　Variation trends of transparency and submerged macrophyte coverage outside the enclosure from 2012 to 2020

3 讨论

贡湖湾生态修复区 2012 年蓄水进行沉水植被恢复,建设初期鱼类总生物量少,鱼体规格较小,优势种主要是生物操控投放的鲢鱼、鳜鱼及自然种群繁殖的棒花鱼、餐、鳙类。随着生态修复区与滨湖河网及太湖的水体连通交换,鲤、鲫等繁殖力极强的底栖杂食性鱼类进入生态修复区,此外,运营管理中发现人为放生大量的鲫鱼、草鱼,这些鱼类在良好的生境条件下大量繁殖,快速生长。相关研究报道湖泊饵料组成和捕捞压力等方面的差异导致草型湖泊中鲫鱼的种群中雌、雄鱼的肥满度均显著大于藻型湖泊[14]。修复区 2019 年前一直处于保护阶段,未进行过有效的鱼类资源的开发利用,湖体中鱼类总生物量不断增多,鱼体规格也越来越大,杂食性鲤、鲫鱼类占比不断加重。数量众多的大规格鱼群不断

扰动水体,致使湖水透明度不断降低,影响真光层深度,严重威胁深水区沉水植物群落的恢复和稳定。相关研究也报道了在以沉水植物为主要初级生产者的水体中,减少或去除鲫鱼等杂食性鱼类,有利于降低水中总磷含量,减少浮游植物生物量,提高水体透明度,从而保护或改善水质[15],原位围隔试验结果也证明了鱼类群落结构调控后,水体透明度得到了快速提升,沉水植物群落实现了快速恢复。

图 10 2012—2020 年全湖区夏季沉水植物覆盖度航拍

Fig. 10 Aerial photography of the coverage of submerged macrophytes in summer in the whole lake area from 2012 to 2020

相关研究认为促进湖泊由藻型浊水稳态向草型清水稳态转变,提高透明度、恢复沉水植物为核心的生态优化调控十分必要[16]。沉水植物可促进水体悬浮颗粒的沉降[17-19],提高水体透明度,水体透明度的提高又有利于沉水植物群的恢复和稳定[20],二者可形成良性循环,生态修复区建设初期人工种植诱导了沉水植物群落的恢复,覆盖度不断提高,水体透明度也保持较高水平,且一直稳定。随着生态修复区内鱼类总生物量的增多、单尾体型增大、底栖杂食性鱼类占比加重,三重因素叠加引起的水体扰动是生态修复区水体透明度下降的主要驱动力。透明度降低导致湖底可利用光强的减少,加之草食性鱼群的大量牧食,导致了生态修复区内尤其是深水区沉水植物群落退化和覆盖度的降低。随着生态修复区大规模的鱼类结构调控工程的实施,水体透明度得到了提升,然而在没有人工干预措施种植沉水植物诱导群落恢复的情况下,沉水植物群落自然恢复的周期可能比较长,群落结构演替方向充满不确定性。

大型生态修复工程往往耗资巨大,修复时间长,尤其在复杂的水环境体系中,维持沉水植物群落的稳定性至关重要,一旦沉水植物群落结构遭到破坏,生态系统向“藻型”生态系统转变,加上蓝藻水华暴发阶段和成因复杂多变[21-22],沉水植物群落重新恢复的难度和工程量都非常巨大。相关研究也表明鱼类群落结构调控对水生态系统结构稳定性具有重要意义[23-24]。贡湖湾生态修复区作为环太湖生态缓冲带的重要组成部分,面积超 2 km^2,修复后水体透明度>100 cm,TN<1.5 mg/L,TP<0.1 mg/L,水生植物覆盖度>50%,生物多样性显著提高,修复区内沉水植物群落结构的稳定对其发挥生态净化功能至关重要。为确保贡湖湾生态修复区沉水植物群落的稳定,有必要进行鱼类群落结构的常态化调控,然而区域地形多样复杂,鱼类调控清除难度大,但其仍属于相对独立的水体,使得系统调控具有操作性,因此在后期的长效运行管理中应加强对生态系统结构的调查,及时掌握基础数据的变化,针对性制定科学合理的运营管理方案。

4 结论

通过恢复沉水植物来修复富营养化湖泊常常能很快见效,但经过 3~5 年后,则可能会由于鱼类群落不合理增加,破坏水环境和沉水植物群落,导致沉水植物覆盖度及水体透明度出现下降趋势。贡湖湾生态修复区长期监测及原位围隔研究表明,虽然修复区氮、磷等水质指标相对稳定且一直较低,但沉水植物覆盖度最高在 2015 年 7 月达 80%,后逐渐降低至 2019 年的 40%。结合生态修复区规模性鱼类种群结构调控效果分析,认为在生境条件优良的生态修复区内鱼类总

(下转第 94 页)

轻微分离造成的[10]。通过分子标记和田间纯度鉴定结果比较分析,父母本在某个位点轻微分离,但不会造成品种表现型的变化,分子标记纯度鉴定时应排除该标记位点[11]。

表 3 润稻 118 的纯度鉴定结果

Table 3 Purity identification results of Rundao 118

引物 Primer	供检株数 Number of plants for inspection	株数 The number of plants	混杂株数 Number of mixed strains	纯度 Purity %
RM224	94	94	0	100
RM8277	95	95	0	100
RM19	95	94	1	98.9

该试验研究的多重毛细管电泳检测技术,通过不同标记的产物进行混合多重电泳,即混合不同大小的 DNA 片段在一个毛细管上进行电泳,混合 3 个 PCR 产物成本可以从 2~3 元降低到 0.7~1.0 元,相应的电泳时间也缩短了 2 倍,多重毛细管电泳既降低检测成本又提高试验效率[12],进一步提升了毛细管电泳使用效能,为分子标记鉴定技术更广泛的应用提供技术支撑。

安徽省地方标准 DB 34/T 3308—2018《两系杂交水稻种子纯度检测 分子标记法》规范了两系水稻分子纯度检测的流程[13],针对的是 PAGE 电泳方法。国家标准 GB/T 39917—2021《主要农作物真实性和纯度 SSR 分子标记检测 稻》[7],该标准的纯度检测毛细管电泳部分主要是针对 DNA 分析仪的多色荧光毛细管电泳技术。该试验研究一种混合单色多重 PCR 产物的电泳技术,综合了 PAGE 电泳与 DNA 分析仪的优点,既可以克服单重电泳成本高的问题,又进一步规范毛细管电泳的技术流程和操作细节,保证试验结果的稳定性。

参考文献

[1] 于守江. 水稻品种纯度鉴定方法及应用现状[J]. 黑龙江农业科学,2015(8):145-148.

[2] 郭承亮. SSR 分子标记在杂交稻种子纯度精确鉴定中的应用[J]. 中国种业,2014(1):21-23.

[3] 马建. 几种电泳技术在水稻品种鉴定上的比较研究[D]. 延吉:延边大学,2005.

[4] 程本义,夏俊辉,龚俊义,等. SSR 荧光标记毛细管电泳检测法在水稻 DNA 指纹鉴定中的应用[J]. 中国水稻科学,2011,25(6):672-676.

[5] 潘振朝,叶为果. 高效毛细管电泳在食品安全检测中的应用实践分析与研究[J]. 现代食品,2017(13):34-36.

[6] 刘宇奇,黄艳智,孙利伟,等. 基于毛细管电泳多重 PCR 方法对小儿呼吸道感染病原分析[J]. 中国小儿急救医学,2019,26(10):764-770.

[7] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 主要农作物品种真实性和纯度 SSR 分子标记检测 稻:GB/T 39917—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 粮食作物种子 第 1 部分:禾谷类:GB 4404.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[9] 涂藤,尹清清,张鹏飞,等. 基于毛细管电泳的 7 种猪源性疫病的多重 PCR 检测方法的建立[J]. 浙江农业学报,2021,33(4):618-631.

[10] 朱国奇,陈静萍,詹祎捷,等. 不同引物鉴定同一杂交水稻种子样品纯度结果的差异及其原因分析[J]. 杂交水稻,2015,30(3):81-84.

[11] 曹栋栋,詹艳,王洋,等. 杂交水稻种子纯度鉴定方法对比研究[J]. 浙江农业科学,2015,56(5):718-722.

[12] 孙宁,于娟,余柏增,等. 多重 PCR 联合毛细管电泳技术检测碳青霉烯酶基因[J]. 临床检验杂志,2021,39(5):340-345.

[13] 安徽省市场监督管理局. 两系杂交水稻种子纯度检测 分子标记法:DB 34/T 3308-2018[S]. 安徽省市场监督管理局,2018.

(上接第 74 页)

生物量的增多、单尾体型增大、底栖杂食性鱼类占比加重三因素叠加引起的水体扰动是生态修复区水体透明度下降的主要驱动力,透明度降低导致深水区底部可利用光强的减少和草食性鱼类摄食的双重压力是贡湖湾生态修复区沉水植物群落覆盖度降低的主要诱因。因此,合理调控鱼类种群结构及时清除大规格鱼类有助于沉水植物群落的恢复和稳定。

参考文献

[1] VAN NES E H,SCHEFFER M,VAN DEN BERG M S,et al. Aquatic macrophytes:Restore,eradicate or is there a compromise? [J]. Aquatic botany,2002,72(3/4):387-403.

[2] SCHEFFER M. Multiplicity of stable states in freshwater systems[J]. Hydrobiologia,1990,200/201:475-486.

[3] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(8):1351-1353.

[4] 张聪. 杭州西湖湖西区沉水植物群落结构优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012:3-4.

[5] 李英杰,胡小贞,胡社荣,等. 草、藻型湖泊水体生态及理化特性的实验对比[J]. 生态环境学报,2009,18(5):1649-1654.

[6] 年跃刚,宋英伟,李英杰,等. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. 环境科学研究,2006,19(1):67-70.

[7] 秦伯强,胡维平,刘正文,等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报,2007,27(1):5-12.

[8] 李静泰,闫丹丹,戚丽萍,等. 太湖湿地植被时空变化特征及其驱动机制[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(1):94-103.

[9] 刘向东,侯志勇,谢永宏,等. 水位对洞庭湖湿地 4 种典型沉水植物的影响[J]. 湖泊科学,2021,33(1):181-191.

[10] 邹丽莎,聂泽宇,姚笑颜,等. 富营养化水体中光照对沉水植物的影响研究进展[J]. 应用生态学报,2013,24(7):2073-2080.

[11] 张运林,秦伯强,朱广伟. 过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义[J]. 湖泊科学,2020,32(5):1348-1359.

[12] 徐德瑞,周杰,吴时强,等. 夏季东太湖光合有效辐射衰减特征及其对沉水植物恢复的指示[J]. 湖泊科学,2021,33(1):111-122.

[13] 田伟,杨周生,邵克强,等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. 环境科学,2020,41(1):183-193.

[14] 程琳,叶少文,李钟杰. 长江中游典型草型湖泊与藻型湖泊鲫种群结构和生长比较[J]. 水生生物学报,2012,36(5):957-964.

[15] 张曙光,高珊珊,刘阳,等. 鲫(*Carassius auratus*)对沉水植物占优水体水质的影响[J]. 安徽农业大学学报,2020,47(6):927-930.

[16] 姜霞,王书航,杨小飞,等. 蠡湖水环境综合整治工程实施前后水质及水生态差异[J]. 环境科学研究,2014,27(6):595-601.

[17] 殷春雨. 沉水植物群落在修复后湖泊中演替趋势的研究[D]. 上海:上海海洋大学,2018.

[18] 王阳阳. 沉水植被恢复对贡湖水源保护区河流污染削减技术研究[D]. 上海:上海海洋大学,2011.

[19] 孙志林,郑佳芸,祝丽丽,等. 沉水植物对水流结构与泥沙淤积的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(1):71-80.

[20] 刘凤茹,雒翠,张扬,等. 沉水植物水生态修复作用及应用边界条件[J]. 安徽农业科学,2021,49(9):66-69,94.

[21] 杨柳燕,杨欣妍,任丽曼,等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. 湖泊科学,2019,31(1):18-27.

[22] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,25(3):589-595.

[23] 蔡杏伟,熊鹰,郭超,等. 饮用水水源地盐龙湖鱼类群落结构特征及调控策略研究[J]. 淡水渔业,2019,49(2):39-45.

[24] 咸义,叶春,李春华,等. 太湖竺山湾缓冲带鱼类资源现状及调控措施研究[J]. 南京师大学报(自然科学版),2016,39(4):86-91.