

水生生物群落结构完整性对水环境的影响

薛同来¹, 佟素娟¹, 张为堂¹, 田彩云¹, 孟庆义², 侯达², 邱彦召²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 为了探究水生生物群落的自我维持能力以及恢复能力, 通过人工构建水生生物群落, 考察了关键水环境指标对群落要素的种类和密度的响应。结果表明: 人工构建的水生生态系统可改善水质, 提升透明度, 降低高锰酸钾指数、叶绿素 a、浮游动植物密度等指标, 效果良好, 但对总氮和总磷影响不显著; 放养密度影响人工生态系统的水质净化能力, 低放养密度(鱼类 25.0 g/m³, 蚌 1.0 g/L) 时优于高放养密度(鱼类 50.0 g/m³, 蚌 2.0 g/L) 时; 狐尾藻和金鱼藻有助于提升鱼蚌系统的水质净化效能。

关键词: 水生生态系统; 群落结构完整性; 放养密度; 水环境

中图分类号: Q 89

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)10-1540-07

doi: 10.11936/bjtxb2015110082

Effect of Aquatic Communities' Integrity on Water Environment

XUE Tonglai¹, TONG Sujuan¹, ZHANG Weitang¹, TIAN Caiyun¹, MENG Qingyi², HOU Da², QIU Yanzhao²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: An aquatic community was built artificially to explore its self-maintenance and resilience capability. Responses of key water environmental indicators to diversified varieties and densities of the aquatic community were investigated. Results show that the artificial aquatic system is efficient in improving water quality with increasing transparency and decreasing permanganate index (COD_{Mn}), chlorophyll-a, densities of zooplankton and phytoplankton, while no influences on TN (total nitrogen) and TP (total phosphorus) in the tested water were observed. Stocking density of fish and mussel impacted the efficiency of the artificial aquatic community on its water quality improving capacity with lower density (fish at 25.0 g/m³ and mussel at 1.0 g/L), taking advantage over higher density (fish at 50.0 g/m³ and mussel at 2.0 g/L). *Myriophyllum spicatum* and *ceratophyllum demersum* contributed to enhance the efficiency of the fish-mussel system in improving water quality.

Key words: aquatic ecosystem; community integrity; stocking density; water environment

水生生态系统是生态系统的重要组成部分, 具有物质循环、信息传递、能量流动等基本功能, 为人类提供必需的物质资源和生存环境, 是人类发展的重要基础^[1]。但近年来, 伴随经济社会的高速发展, 资源需求急剧上升, 带来了水资源过度开发、水污染加剧、

水生物种减少等一系列问题, 严重损害水生态健康。

人工构建水生生物群落是修复受损水生态系统的有效手段。水生生物群落是指生长在一定水域中彼此相互作用并与环境有一定联系的不同种类生物的集合体^[2]。一般来讲, 水生生物群落中包括水生

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 北京市科技计划资助项目(Z121100000312097)

作者简介: 薛同来(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事水污染控制及水资源综合利用方面的研究, E-mail: xuetonglai@126.com

植物、水生动物、浮游植物、浮游动物、微生物等^[3-4]。健康的水生生物群落结构有利于水生态系统抵抗外来干扰,从被损害状态下恢复原有状态,即群落的稳定性^[5-6]。基于以上原理,科学合理的物种搭配是人工构建水生生物群落修复受损水生态系统的核心技术^[7-8]。

群落的稳定性与其中的水生动植物等群落要素密切相关。傅玲等^[9]通过在人工构建的植物镶嵌群落中添加营养盐,研究了水体中营养盐的变化情况,表明植物群落类型对不同形态营养盐浓度影响不显著。目前,在利用群落中关键生物链改善水质、抑制藻类方面的研究取得了重要成果^[10-11],但由于水生态系统中水环境因子与水生生物群落相互作用的复杂性,关于人工构建水生生物群落对水环境的综合影响方面仍需要详尽信息。

水生态系统涉及生产者、消费者、分解者,过程涉及植物、动物、微生物等生命因子及水文因子、物化因子、空间因子等非生命因子之间的相互作用,非常复杂^[12-14]。本研究作为水生态系统构建的有益补充,以实际应用为目标,在前人研究的基础上,区别于已有的挺水植物和浮水植物研究,选取了较易控制的鱼蛙动物类和沉水植物类作为生物因子。本研究通过人工构建水生生物群落,对其中群落要素的种类、密度等进行控制和调整,考察生态系统结构对水质、藻类、浮游动植物三大关键水生态因子的影响,为该项技术在水生态修复中的应用提供支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的水生动植物均为本地常见种类,不存在外来入侵风险,水质净化效果好,易于获得,并且生命力强,易于存活。

1) 试验用水和水质

取自团城湖调节池,用水车运至试验现场,经检测取均值,其中:氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的质量浓度为 0.14 mg/L;高锰酸钾指数(COD_{Mn})的质量浓度为 2.83 mg/L;总氮(TN)的质量浓度为 2.73 mg/L;总磷(TP)的质量浓度为 0.01 mg/L。

2) 鱼类

鲢鱼和鳙鱼为北京地区常见鱼类,属于滤食性鱼类,对于控制浮游藻类尤其是蓝藻的生长繁殖具有一定作用。鲢鱼和鳙鱼在繁殖特性上,喜流水产卵,但目前北京地区河湖水体基本都不具备长流水的条件,所以,基本上不能自行繁殖。因此,鲢鱼和

鳙鱼的数量在一定程度上可以通过人工增殖放流和捕捞实现控制。本次试验使用的鱼类从顺义区某渔场采购,为鲢鱼和鳙鱼的夏花。采购时 2 种鱼的个体大小基本相同,体长约 33.0 mm,质量约 0.26 g。

3) 贝类

褶皱冠蚌为北京地区常见底栖软体动物,壳大,最大个体壳长可达 40.0 cm,后背缘伸展成巨大的冠,栖息于缓流的河流、湖泊及池塘内的泥底或泥砂底。褶皱冠蚌属大个体淡水贝类,成年个体比三角帆蚌的同龄个体大得多。

4) 沉水植物

狐尾藻和金鱼藻为北京本地常见沉水植物,广泛分布于河道、水库中,适应性强,易于成活,为鱼类、禽类等喜食种类。狐尾藻植株粗壮,单株生物量大,植株最高可达 200.0 cm,分枝较多。金鱼藻茎细长,长度一般 40.0 ~ 150.0 cm,在生长期中折断的植株可随时发育成新株,可无根生长。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,采用圆柱形塑料桶改装,顶部敞口,安装于可移动支架上,放置在室外,试验桶上方加盖透明塑料板制作的遮阳棚,避免中午阳光暴晒,同时防雨。

使用 3 个圆柱形试验槽开展试验。其中 2 个试验槽直径 2.0 m,高度 2.2 m,槽内装水深度 1.9 m,水体体积为 6.0 m³,分别记为 1 号和 2 号。1 号为高密度系统,2 号为低密度系统。另外一个试验槽直径 0.5 m,高度 1.2 m,槽内装水深度 1.1 m,水体体积 1.0 m³,作为空白对照,记为 0 号。

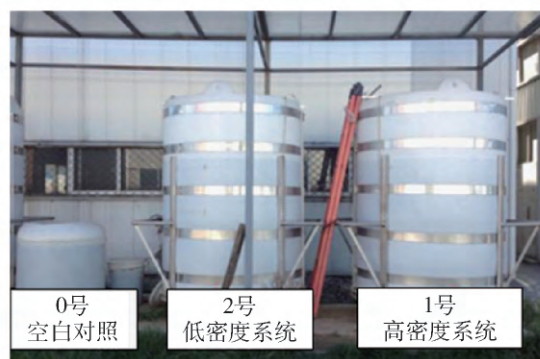


图 1 试验装置

Fig. 1 Tested system

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

1) 系统构建

构建 2 个不同放养密度的水生生态系统。

系统一(高放养密度):鲢、鳙鱼混养,密度为 50.0 g/m^3 ,褶纹冠蚌密度为 2.0 g/L .

系统二(低放养密度):鲢、鳙鱼混养,密度为 25.0 g/m^3 ,褶纹冠蚌密度为 1.0 g/L .

2个系统采用一种沉水植物密度,狐尾藻密度 6.0 株/m^2 ,金鱼藻密度 50.0 株/m^2 .

蚌类上层放养方式及悬挂放养对藻类的控制效果好于底部放养^[15].本试验中褶纹冠蚌采用水体上层悬挂放养.

2) 试验安排

根据试验进行过程中的水体变化情况和水生动植物的季节分布情况,将试验分为3个阶段.

第1阶段:鱼-河蚌系统试验阶段,试验时间为7月12日—8月18日;向试验桶内加入鲢、鳙鱼和褶纹冠蚌,考察系统对原水水质的维持效果.

第2阶段:水质调节阶段,试验时间为8月19日—29日;向水体加入营养盐和高含藻水,使水质变差,增加TN、TP和藻类浓度,满足下阶段要求.

第3阶段:鱼-河蚌-沉水植物系统试验阶段,试验时间为8月30日—9月24日;在原有鱼-河蚌系统基础上加入沉水植物,考察系统对较差水质的改善效果.

1.3.2 监测方案

试验自7月12日开始,至11月12日结束.现场监测指标、化学指标和浮游动植物指标在试验初始阶段每天取样1次,之后每隔1d取样1次,再之后每周取样1~2次.微生物指标在试验结束时测定1次.

现场监测指标:透明度、温度、pH和溶解氧(DO)的质量浓度,现场指标用便携式速测仪器进行测定.

化学指标:COD_{Mn}、TN、TP、叶绿素a的质量浓度.

浮游动植物指标:浮游动植物的密度.

2 试验结果与分析

2.1 物理指标

主要分析了透明度的变化,结果如图2所示.

对比3个试验组的透明度可以看到,试验初期,低密度和高密度鱼蚌系统透明度显著降低,7月19—25日分别降至最低值.分析认为,这一现象可能与鱼蚌加入系统后带来静止水体中沉降物再悬浮、藻类增殖有关.同时,鱼蚌在新环境适应过程中,滤食作用尚未发挥完全,会将摄入的浮游动植物等以假粪的形式排入水中^[16].7月25日之后透明

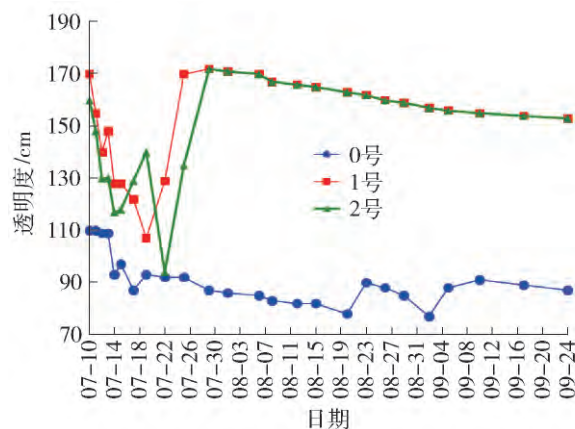


图2 试验过程中透明度变化

Fig. 2 Variation of transparency with testing time

度开始明显上升,从7月29日一直到试验结束,透明度清澈见底.而8月19日氮磷污染物和藻类加入后,空白对照系统透明度下降,与其相比,鱼蚌系统透明度良好,说明鱼蚌系统对于水体的透明度具有较好的改善效果,且在低密度鱼蚌系统即能发挥作用.

2.2 化学指标

2.2.1 pH和 $\rho(\text{DO})$

3个试验组的对比结果见图3.可以看到,低密度和高密度鱼蚌系统的pH和 $\rho(\text{DO})$ 变化趋势基本一致,均低于空白对照系统,分析认为这一规律与鱼蚌的代谢活动相关.研究表明:褶纹冠蚌的耗氧率与水中 $\rho(\text{DO})$ 水平有关,其耗氧速率相对较高.张许峰等^[17]测得的褶纹冠蚌的耗氧速率约为 $2.3\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$.

鱼蚌系统的pH均低于空白系统,这一规律与前人研究一致^[18].分析认为,这可能是由于鱼蚌系统中,鱼蚌代谢物的酸化和藻类密度降低造成的.空白对照系统中,藻类密度较鱼蚌系统高,藻类的光合作用消耗水中 CO_2 ,使水体pH趋高.

2.2.2 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$

由图4可知,在试验第1阶段,鱼蚌系统和空白对照系统的 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 差别不大.分析认为,这一阶段水质较好,有机污染物质量浓度较低,该阶段控制水质的关键因子是水化学组成本身,鱼蚌系统的代谢作用是水质净化的辅助作用.该阶段鱼蚌生长速率较缓慢.

在试验的第2阶段,加入TN、TP和藻类后,有机污染物质量浓度上升,可能与藻类的代谢有关.该阶段鱼蚌系统的 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 低于空白对照系统,系统表明鱼蚌系统可促进水中有机污染物的降解.

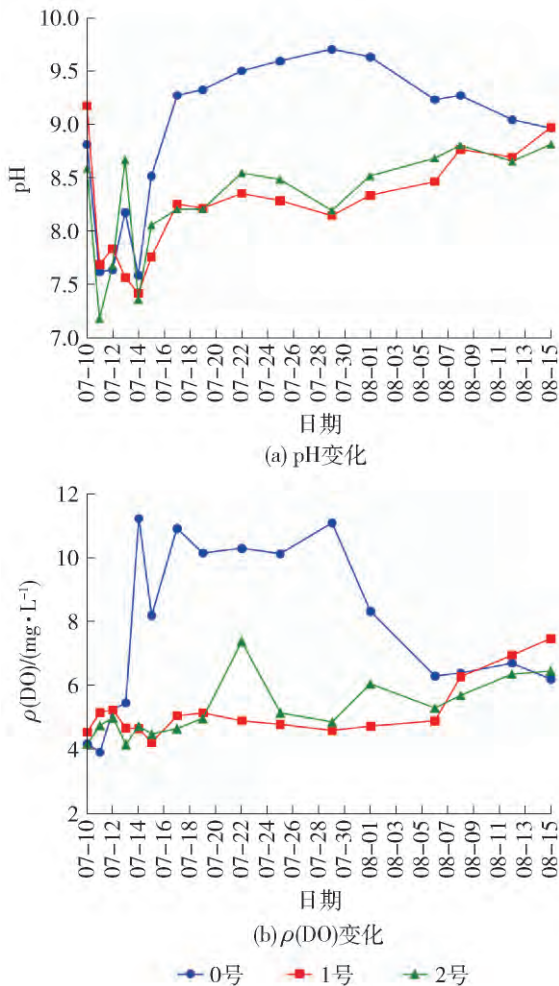


图 3 试验过程中 pH 和 $\rho(\text{DO})$ 的变化
 Fig. 3 Variation of pH and $\rho(\text{DO})$ with testing time

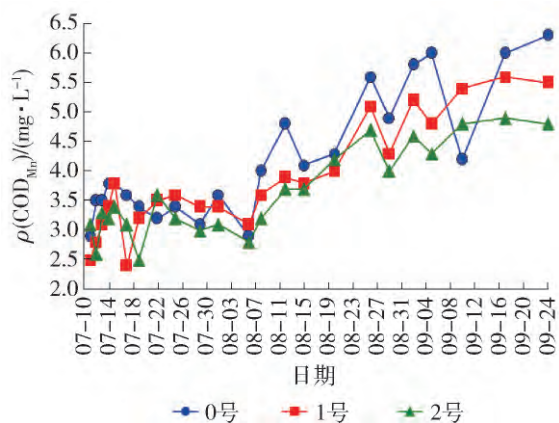


图 4 试验过程中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 的变化
 Fig. 4 Variation of $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ with testing time

在试验的第 3 阶段,即在鱼和河蚌系统中加入沉水植物后,鱼蚌植物系统的 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 明显低于空白对照系统,说明植物的加入有利于鱼蚌系统的除污染效果,且低密度鱼蚌系统的除污染效果优于

高密度系统. 分析认为,这一规律可能与系统内部鱼蚌和植物的组成结构平衡状态有关. 高密度鱼蚌系统中,鱼蚌和沉水植物对营养物质和 DO 的竞争,带来系统的不平衡,导致其除污染效果不理想. 这也说明,对于污染物的去除,并非生物密度越高越好.

2.2.3 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$

由图 5 可以看到,在整个试验过程中,3 个试验组的 $\rho(\text{TP})$ 相差不明显.

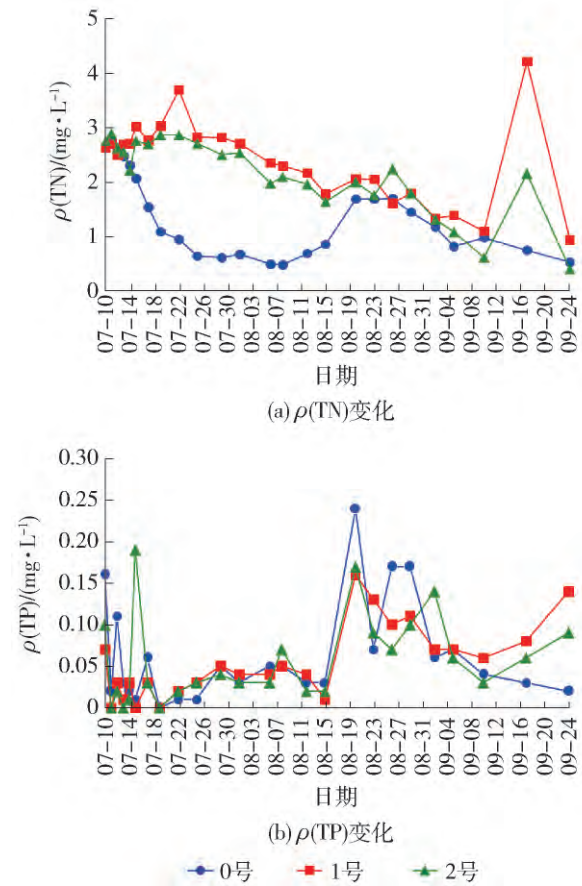


图 5 试验过程中 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 的变化
 Fig. 5 Variation of $\rho(\text{TN})$ and $\rho(\text{TP})$ with testing time

对于 TN,在试验第 1 阶段,试验开始后,0 号组水体 $\rho(\text{TN})$ 的出现快速降低,而 1 号组和 2 号组则降低趋势较缓;试验第 3 阶段,除 9 月 17 日 1 号组和 2 号组 $\rho(\text{TN})$ 极高外,其余时间各组相差不明显.

TN 出现上述变化可能与鲢鱼的活动有关. 根据以前鱼类放养试验的研究结果,鲢鱼放入围隔后,会使水体 TN 的质量浓度升高,因为鲢鱼是一种滤食性鱼类,对食物并没有十分明显的选择性,在摄食过程中会大量过滤水体中的藻类及浮游动物等^[19];而其排泄量很大,根据杨红生等^[20]的研究,蚌类摄食藻类后向水体排入排泄物,其中含有含氮物质,会

在水中沉积,若蚌密度过高,累积在水体中的排泄物不能得到及时分解,则会造成水体中 $\rho(\text{TN})$ 出现上升.因此,综合上述分析,1号组和2号组 $\rho(\text{TN})$ 降低程度明显小于0号组的原因可能与鱼和蚌的摄食和排泄有关.

2.3 生物指标

2.3.1 $\rho(\text{叶绿素 a})$

由图6可知,在试验第1阶段水质较好时,各组叶绿素a值基本相同;第2阶段,向系统中加入营养盐和含藻水后,各组的叶绿素a值会经过先升高后降低的变化过程,但是0组高于1、2组,说明系统对水质具有较好的维持效果.

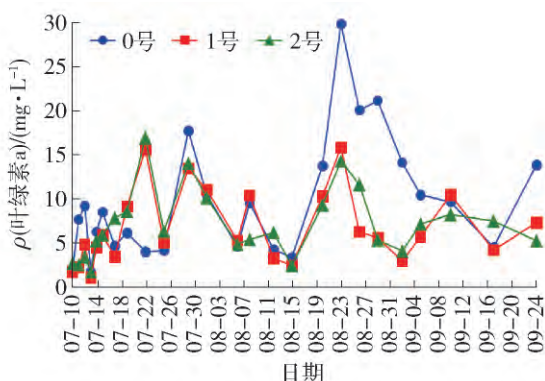


图6 试验过程中 $\rho(\text{叶绿素 a})$ 变化

Fig. 6 Variation of $\rho(\text{Chl-a})$ with testing time

2.3.2 浮游动物密度

由图7可知,试验过程中,0号组浮游动物密度较高,明显高于1号组和2号组;1号组和2号组相比,2号组浮游动物密度相对较高,1号组最低,与放养鱼类的密度相对应,说明浮游动物密度与鱼类密度有很大关系,鱼类密度越高,浮游动物密度越小.这与鱼类对浮游动物的滤食作用有关.

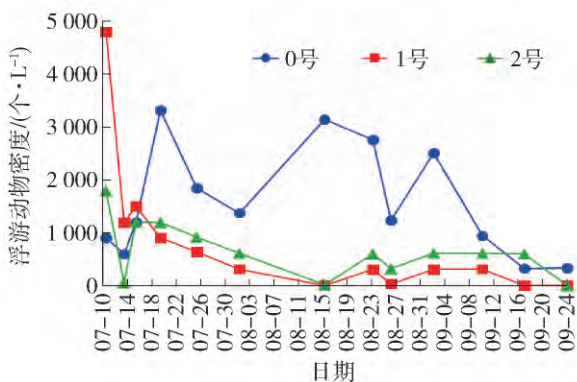


图7 试验过程中浮游动物密度变化

Fig. 7 Variation of zooplankton density with testing time

2.3.3 浮游植物密度

由图8可知,在试验第1阶段,试验开始时各组浮游植物密度基本相同,质量浓度较低.随着试验进行,0号组浮游植物密度出现明显增高,而1、2号组基本不变,说明系统对水体中的浮游植物密度具有较好的维持作用.在试验第2阶段,加入营养盐和含藻水后,各组浮游植物密度出现大幅度升高,2号组升高较晚.在试验第3阶段,0号组浮游植物密度开始较高,后来降低较多;1号组浮游植物密度则呈明显上升趋势,虽然试验结束时有所降低,但仍高于其余2组;2号组浮游植物密度基本呈降低趋势,至试验结束时质量浓度较低.试验期间3个组的浮游植物平均密度分别为1973万个/L、903万个/L和658万个/L,0号组最高,1号组次之,2号组最低,说明在放养密度低的水生生态系统中,浮游植物密度低.

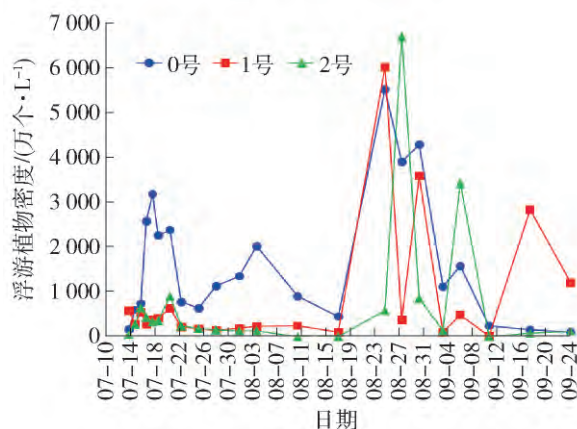


图8 试验过程中浮游植物密度变化

Fig. 8 Variation of phytoplankton density with testing time

结合系统中浮游动植物密度分析可知,水生生态系统对水体中浮游动植物密度具有较好的维持,并且能在一定程度上降低浮游动植物密度,同时,在低放养密度的水生生态系统中,浮游动植物密度较低.

2.3.4 讨论

人工构建生态系统对水体透明度有明显提升,且在鱼蚌低密度投加条件下即可达到良好效果.对 pH 、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{叶绿素 a})$ 等指标的影响的分析结果表明:在水质较好(团城湖调节池原水)时, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 2.5 \sim 3.0 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{氨氮}) = 0.1 \sim 0.3 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TN}) = 2.5 \sim 3.0 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TP}) = 0.01 \sim 0.05 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{叶绿素 a}) = 5.0 \sim 10.0 \mu\text{g/L}$; 浮游植物总密度 = (800 ~ 3200) 万个/L,水生生态系统对水质中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 $\rho(\text{叶绿素 a})$

等指标具有较好的维持作用,而当水质变差时(向水体加入营养盐和高含藻水后) $\rho(\text{COD}) = 4.0 \sim 4.5 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{氨氮}) = 0.5 \sim 0.6 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TN}) = 3.0 \sim 3.5 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TP}) = 0.2 \sim 0.3 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{叶绿素 a}) = 20.0 \sim 30.0 \mu\text{g/L}$; 浮游植物总密度 = (5 500 ~ 6 000) 万个/L, 系统对水质具有一定的改善作用,但对 TN 和 TP 处理效果较差。

可见,鱼-贝类-沉水植物组合生态系统对水体透明度和有机物有良好的改善作用,对浮游动植物控制作用明显,且在一定放养密度即可达到改善效果,并不需要过多投入。但是对 TN 和 TP 几乎没有去除效果,分析认为这一现象与水质组成和微环境有关。理论上,本系统的氮磷去除过程主要依靠微生物和植物吸收。对于微生物脱氮,试验水体中 $\rho(\text{DO})$ 较高,整个试验过程均在 3.0 mg/L 以上,不利于微生物反硝化脱氮的进行。水质组成亦不利于脱氮除磷过程。根据郝贝贝等^[21]对 10 个湖泊沉水植物碳、氮、磷化学计量学统计分析结果,沉水植物碳氮比、碳磷比和氮磷比分别为 37.21 ~ 188.47、83.18 ~ 468.02、1.57 ~ 4.90,而本项研究中,整个试验过程中水质的碳氮比、碳磷比和氮磷比分别为 1.0 ~ 1.5、10.0 ~ 250.0 和 15.0 ~ 250.0,对比分析可见,对于植物的氮磷吸收过程,本研究中碳氮磷比不适宜,主要为碳和氮比例偏低。

3 结论

1) 人工构建的水生生态系统对于改善水质具有较好效果,较低放养密度优于高放养密度。

2) 人工构建水生生态系统对水体 pH、DO、透明度、 COD_{Mn} 和叶绿素 a 净化效果显著,TN 和 TP 去除效果不明显。

3) 沉水植物的加入有助于提升鱼蚌系统的除污染能力。

4) 水生生态系统对水体中浮游动植物密度具有较好的维持,并且能在一定程度上降低浮游动植物密度。

参考文献:

- [1] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 10-12.
- [2] 胡肆慧. 水生植物群落[J]. 生物学通报, 1984(3): 5-6. HU Y H. Aquatic plant community [J]. Bulletin of Biology, 1984(3): 5-6. (in Chinese)
- [3] 秦保平, 翟德华. 海河水生生态系统的研究[J]. 城市

环境与城市生态, 1998, 11(1): 48-51.

QIN B P, ZHAI D H. Research on the aquatic ecosystem of the ocean and river [J]. Urban Environment and Urban Ecology, 1998, 11(1): 48-51. (in Chinese)

- [4] 王国江, 高淑慧. 水文因子与水生生物群落的关系[J]. 河北渔业, 2010(11): 52-54.

WANG G J, GAO S H. The relationship between hydrological factors and aquatic community [J]. Hebei Yuye, 2010(11): 52-54. (in Chinese)

- [5] 王文林, 唐晓燕, 胡孟春, 等. 人工重建的水生植物群落演替动态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 802-806.

WANG W L, TANG X Y, HU M C, et al. Dynamic study on the succession of artificially reconstructive aquatic community [J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(9): 802-806. (in Chinese)

- [6] 舒俭民, 刘晓春. 恢复生态学的理论基础, 关键技术与应用前景[J]. 中国环境科学, 1998, 18(6): 540-543.

SHU J M, LIU X C. The theoretical basis, key technology and application prospects of restoration ecology [J]. China Environmental Science, 1998, 18(6): 540-543. (in Chinese)

- [7] 胡光济. 水体生物修复研究与应用[C]//中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集(第一卷). 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 653-661.

HU G J. The research and application of bioremediation of waters [C] // 2009 Academic Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences (The First Volume). Beijing: Beihang University Press, 2009: 653-661. (in Chinese)

- [8] 曹加杰, 阮宏华. 受损水生生态系统中水生植物生态恢复研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(11): 125-129.

CAO J J, RUAN H H. Research advances of aquatic plants ecological restoration in degraded aquatic ecosystem [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2013, 33(11): 125-129. (in Chinese)

- [9] 傅玲, 赵凯, 王国祥, 等. 外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1278-1284.

FU L, ZHAO K, WANG G X, et al. Temporal and spatial variation of water nutrient level after exogenous nutrient input [J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1278-1284. (in Chinese)

- [10] 龚世园, 朱子义, 杨学芬, 等. 网湖绢丝丽蚌食性的研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(6): 589-593.

GONG S Y, ZHU Z Y, YANG X F, et al. Study on

- feeding habits of *lamprotula fibrosa* (Heude) in Wanghu Lake [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1997, 16(6): 589-593. (in Chinese)
- [11] 赵沐子, 费志良, 郝忱, 等. 不同贝类对水质净化效果的比较 [J]. *水产科学*, 2006, 25(3): 133-135.
ZHAO M Z, FEI Z L, HAO C, et al. Short-term purification of water by different mollusks [J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(3): 133-135. (in Chinese)
- [12] 张光生, 谢锋, 梁小虎. 水生生态系统健康的评价指标和评价方法 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 334-337.
ZHANG G S, XIE F, LIANG X H. Indicators and methods for assessing aquatic ecosystem health [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(24): 334-337. (in Chinese)
- [13] 廖静秋, 黄芝. 应用生物完整性指数评价水生态系统健康的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 295-302.
LIAO J Q, HUANG Y. Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 295-302. (in Chinese)
- [14] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨 [J]. *水生生物学报*, 2002, 26(3): 295-305.
HONG S, CHEN J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(3): 295-305. (in Chinese)
- [15] 廖日红, 胡秀琳, 吴晓辉, 等. 三角帆蚌对北京富营养化河湖水体的滤水效率和放养方式研究 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(5): 1425-1429.
LIAO R H, HU X L, WU X H, et al. Study on *hyriopsis cumingii*'s filtration rates and stocking mode in eutrophic water of Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5): 1425-1429. (in Chinese)
- [16] 胡秀琳, 廖日红, 孟庆义, 等. 鲢鱼放养控制北京市河湖水华实验研究 [J]. *环境工程学报*, 2007, 1(11): 29-35.
HU X L, LIAO R H, MENG Q Y, et al. Study on silver carp stocking for controlling water bloom in urban rivers and lakes in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(11): 29-35. (in Chinese)
- [17] 张许峰, 吴小平, 欧阳珊, 等. 四种淡水贝的摄食率和耗氧率的实验研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2008(3): 144-154.
ZHANG X F, WU X P, OUYANG S, et al. Experiment study on feeding rates and oxygen consumption rates of four species of freshwater mollusks [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(3): 144-154. (in Chinese)
- [18] 胡梦红, 武震, 周作强, 等. 鱼蚌混养对池塘水质、藻类结构及三角帆蚌生长的影响 [J]. *水产学报*, 2014, 38(2): 200-207.
HU M H, WU Z, ZHOU Z Q, et al. The impact of polyculture of freshwater mussel on water quality, plankton community and mussel growth performance in ponds of silver carp and bighead carp [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(2): 200-207. (in Chinese)
- [19] 向文英, 王晓菲. 不同水生动植物组合对富营养化水体的净化效应 [J]. *水生生物学报*, 2012, 36(4): 792-797.
XIANG W Y, WANG X F. Remediation of different aquatic animals and plants on eutrophic water body [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(4): 792-797. (in Chinese)
- [20] 杨红生, 周毅. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展 [J]. *海洋科学*, 1998, 22(2): 42-44.
YANG H S, ZHOU Y. Progress in studies on effect of filter-feeding bivalve on environment of mariculture area [J]. *Marine Sciences*, 1998, 22(2): 42-44. (in Chinese)
- [21] 郝贝贝, 吴昊平, 史俏, 等. 云南高原 10 个湖泊沉水植物的碳、氮、磷化学计量学特征 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 539-544.
HAO B B, WU H P, SHI Q, et al. Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in ten lakes of Yunnan plateau [J]. *Lake Sci*, 2013, 25(4): 539-544. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)