

草型生态系统构建技术在南湖富营养化防治中的应用

陈宗永¹, 马海霞¹, 韦兰英¹, 吴延志¹, 邓慧夫¹, 刘德海¹, 杨明慧²

(1.广西南宁市南湖公园, 广西南宁 530021;

2.广西南宁市新技术开发中心, 广西南宁 530012)

摘要:水体富营养化是一个全球性的问题,生态修复是富营养化治理的主要途径之一。为了探索南宁市青秀区南湖富营养化水体治理的方法及途径,观测生态系统演变过程中水质的变化情况,利用帆布及脚手架等材料在上湖区域搭建约 670 m²、水深 1.6~2.0 m 的围隔试验区。清除实验区内鱼类以减少对水体的搅动,投放 EM 菌种增加透明度,然后种植苦草(*Vallisneria spiralis*),待沉水植物生长良好后再投放鲢(*Cirrhinus molitorella*)、环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、河蚌(*Anodonta*)等水生动物,建立新的生态系统;苦草种植密度为 1.4 kg/m²,鲢、环棱螺、河蚌的投放密度分别为 6 g/m²、10 g/m²、1 g/m²。结果显示,新的生态系统经过 5 个月构建完成并趋于稳定,试验水体水质从原来的地表 V 类水提高至Ⅳ类(GB 3838-2002);透明度从 0.25 m 上升并稳定在 1.8 m,透明度增加了 6.2 倍;高锰酸盐指数(COD_{Mn})从 8.8 mg/L 下降至 2.6 mg/L,整体下降了 70%;总磷(TP)从 0.10 mg/L 下降至 0.04 mg/L,减少了 60%;总氮(TN)从 1.37 mg/L 下降至 1.17 mg/L,下降了 14.5%;叶绿素 a(Chl-a)从 51 mg/m³下降至 4.6 mg/m³,下降了 91.1%。与整个湖区相比,试验区透明度提高了 3 倍以上,高锰酸盐指数降了 3.7%,总磷降低了 63.6%,总氮减少了 4%;叶绿素 a 减少了 89.4%。试验表明,生态修复技术能够有效控制总磷,抑制藻类生长,显著提高透明度,对富营养化水体具有很好的改善作用,可以在南湖大面积推广和实施。

关键词:草型生态系统;富营养化;防治;南湖

中图分类号:X506 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)02-0035-06

水生态修复是将受损水生态系统最大限度地恢复到或接近水体受损前的水平,恢复其原有的生物多样性,让水生态系统重新获得协调的关系和高效的功能,使整个生态系统进入自我演替和自我维持的良性循环状态,是提高水质标准的有效方法(秦伯强,2007;魏薇等,2013)。由于水生态修复技术具有无二次污染、成本低、能够自我修复的特点,近年来备受关注。富营养化湖泊在外源污染得到控后,沿岸带生态修复是湖泊治理的必需环节,重建水生植被,构建草型生态系统则是浅水湖泊生态修复中的关键步骤。徐德文(2005)等研究了大型水生植物对湖泊生态修复的作用机制。国内利用围隔和围栏等工程措施重建水生植被,改善湖泊局部区域水质已有一些成功案例(吴晓东等,2013);但在南宁市南湖还没有进行类似试验。

南湖位于南宁市青秀区南部,地处城市核心区,

整个湖面呈狭长带状,东北-西南走向,长约 3 800 m,宽度 380~250 m,面积 107 hm²,平均水深 1.6 m,库容 1.8×10⁶ m³。南湖是在邕江古河道的基础上,于 1956 年建坝蓄水后形成的人工湖。地势西南高、东北低,西面有补水管与邕江连接,东面有连通渠与竹排冲相连;在旱季,南湖水面高出邕江水面约 9 m,高出竹排冲水面约 2 m,南湖水位通过连通渠船闸进行调控,常年保持在 70.1 m 的高程。建湖初期,南湖补水主要是降雨,水质比较清新,在计划经济时代南湖曾经是南宁市主要的水产品基地,由于城市化进程加快,从 20 世纪 90 年代开始,大量的生活污水直排湖区,造成水质逐步恶化,导致湖水发黑、发臭,经常发生因为缺氧死鱼的现象,严重影响了周边居民的身心健康和公园景观及城市形象。2002 年南宁市对南湖实施了包括截污、清淤、补水、护岸及景观建设等内容的综合整治工程,对进入南湖的污水进行了全部截污,同时进行了湖底的彻底清淤,并实施了从邕江河道抽提补水。综合整治工程完成后,湖水水质虽然较治理前有所改善,但仍然每年需要补水约 1.75×10⁸ m³,花费 175 万元才能保持地表水 V 类水平,水体仍然处在中度富营养状态(刘传,2010)。

收稿日期:2017-05-12

基金项目:南宁市科学研究与技术开发计划项目(编号:20133145)。

作者简介:陈宗永,1965 年生,男,高级工程师,主要从事湖泊生态监测与维护工作。E-mail: gxnnsczy@sina.com

为了降低南湖水体的维护费用,项目组于2013年8月至2014年2月在南湖湖区采用围隔方式建立了试验区,并对受试水体进行了生态修复试验,旨在探索改善水质的新方法,验证生态修复技术在南湖的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验选址与构建方法

试验地址选择在南湖上湖湖区靠近桃源路附近的水面,离湖岸大约4 m,占用水面 $45\text{ m}\times 38\text{ m}$,水深1.6~2.0 m(图1)。



图1 南湖及试验区

Fig.1 Map of Nanhu Lake and location of test area

试验区搭建材料包括建筑用脚手架、防水帆布、100目聚乙烯网、细沙、细石、聚乙烯绳、编织袋等。为了能够抵抗比较大的风浪,首先用脚手架搭建成 $33.5\text{ m}\times 20.0\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 、面积约 667 m^2 的框架;然后将帆布和聚乙烯网分别加工成 $33.5\text{ m}\times 20.0\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 、上下漏空的长方体。先通过帆布上部的孔眼用绳子将帆布上端立起固定在框架上,然后将聚乙烯网放入帆布圈内,固定帆布的上部;帆布及聚乙烯网的下底部沿四周反卷缝成直径为15 cm的囊带状,将囊带灌满砂子后再沉入水中,以保证每一段帆布及网都片能够与湖底紧贴,不留间隙;最后用编织袋装上细石,在帆布及聚乙烯网的底部每隔1 m压1袋约25 kg的细石,环绕一圈均匀压实,保证底部稳固,防止因为大风引起滑动,导致围隔底部飘离湖底,使围隔保持垂直状态。试验区既要保持水体与外界有一定交流,又要保持平衡,同时防止杂食性和草食性鱼类进入试验区。

1.2 试验区生态修复实施步骤及方法

1.2.1 清除试验区鱼类 试验围隔搭建完成以后,必须清除试验区所有的草食性及杂食性鱼类,才能保证沉水植物不被鱼类损害并正常生长。水体采用茶麸毒杀的办法(雷慧憎等,1981),茶麸使用量按 667 m^2 面积、1 m水深的水体使用20 kg计算,总共使用了72 kg。新鲜茶麸用水浸泡1 h后,沿整个试验区均匀进行泼洒,以达到清除鱼类的目的,确保试验区内在试验前没有鱼类存活。茶麸的使用虽然增加了水体的有机物含量,但通过植物可以消解,不会产生其它污染,效果比较好。

1.2.2 改良试验区水质及底质 在沉水植物种植前期,为了增加水体溶氧,减少有机耗氧量及氮磷等营养元素和水体有害物质,增加透明度,防止植物烂根,促进并保证沉水植物的正常生长,在种植初期30 d内,向试验水体投放活菌含量为 20×10^8 个/g的EM菌液体制剂100 kg,每15 d投放1次,连投两次,将水体的透明度控制在50 cm左右。

1.2.3 种植沉水植物 沉水植物采用当地采购的苦草(*Vallisneria natans*),每株高度在30~40 cm。由于水深超过1.6 m,采用扦插效果比较差,效率也不高。通过对比后采取抛播的方法,具体做法是将苦草用细绳捆绑成大约直径3 cm左右的一小扎,然后用石块作为沉子与苦草固定后一起抛入水中,在抛投的过程中尽可能做到均匀分布。苦草投放总量达到900 kg,种植密度平均约 1.4 kg/m^2 。

1.2.4 投放大型底栖生物和鱼类 沉水植物经过1个月的生长,植物体已经开始长出新根苗,根须已经扎入底泥,此时沉水植物种群已经开始形成一定规模,水体透明度大幅增加。在沉水植物覆盖率大约达到90%的时候,为了防止固着藻类附着在沉水植物的叶面影响植物生长,需要投放鱼类与底栖生物。投放的品种包括环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、河蚌(*Anodonta*)和鲢(*Cirrhinus molitorella*),投放密度分别为 10 g/m^2 、 1 g/m^2 和 6 g/m^2 。

1.2.5 日常维护管理 日常维护分两个阶段:一是试验初期,在没有投放鱼类和底栖动物前,要经常对一些因为捆扎不紧或者因为风浪搅动引起的沉水植物进行重新种植,对漂浮在水面上的断叶要及时打捞清除;二是在沉水植物形成优势,投放大型底栖动物和鱼类以后,为了防范大风大浪对围隔的冲击,需要经常巡查围隔是否有破损,防止湖区的鱼类进入围隔内,影响试验的顺利进行。

1.3 监测指标、方法及频率

试验在 2013 年 8 月至 2014 年 2 月进行。在试验围隔区和上湖敞水区(对照区)的中心设置监测点,每天监测试验区和上湖敞水区的水深和水温、气温和透明度的变化。水深通过标尺读取,水温采用水银温度计测定,用萨氏盘测定水体的透明度。监测试验区和敞水区水体总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸钾盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl-a)等指标,采样频率为每月 1 次,监测和分析方法参考相关文献进行(金相灿等,1990;国家环境保护总局,2002)。所得的试验数据采用 Microsoft Office Excel 2007 处理。

2 结果与分析

2.1 水体透明度变化

透明度的高低反映了水体悬浮物及浮游生物的多少。由于沉水植物具有减小风浪扰动和固着底泥的作用,水草种植前后水体的透明度发生了很大变化。表 1 为 2013 年 8 月至 2014 年 2 月试验区和大

湖透明度的监测数据。可见试验区与上湖的透明度都存在着季节变化,冬季温度低时较高,秋季水温比较高时较低。试验区的透明度从沉水植物种植开始时的 0.25 m,一个月后达到 0.6 m,经过 3 个月上升并稳定在 1.8 m,透明度增加了 6.2 倍;而同在附近的上湖水体始终在 0.20~0.55 m,与试验区相差近 3 倍。经过显著性 *t* 检验计算, $t = 2.9071$; $P = 0.0335$;取 $\alpha = 0.05$; $P < \alpha$,表明实验区与上湖的透明度存在显著性差异,草型生态系统构建技术实施后的效果非常明显。

2.2 水体总氮变化

氮是影响水体富营养化的主要指标。通过图 2 可以看出,试验区内水体氮含量存在从低向高走,然后降低的过程,与草型生态系统建立前相比,下降了 14.5%;与上湖敞开区相比,减少了 4%。试验区内氮的变化过程整体呈下降趋势,但下降幅度比较缓慢。对实验区与上湖的总氮浓度进行显著性分析, $t = -2.0561$, $P = 0.0949$;取 $\alpha = 0.05$;结果 $P > \alpha$,实验区与上湖的总氮没有显著性差别。

表 1 水温与透明度的变化统计

Tab.1 Monthly variation of water temperature and transparency

指 标	取 样 时 间						
	2013-08	2013-09	2013-10	2013-11	2013-12	2014-01	2014-02
月均水温/℃	32	32	30	28	20	18	16
实验区透明度/m	0.20	0.60	0.25	0.60	1.60	1.65	1.80
湖区透明度/m	0.25	0.40	0.20	0.32	0.20	0.40	0.55

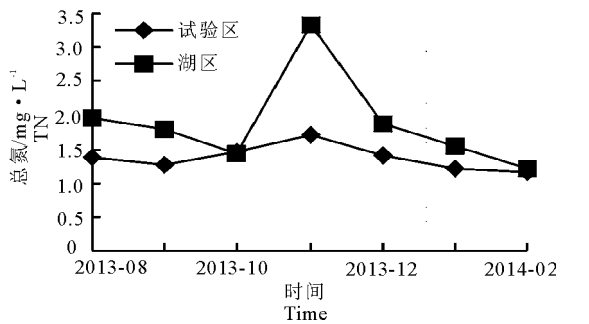


图 2 试验区与湖区的总氮变化比较

Fig.2 Variation of total nitrogen in the test and open areas of Nanhu Lake

2.3 水体总磷的控制作用

磷是藻类和植物必需的营养元素,是湖泊分类的主要指标,同时也是湖泊富营养化的主要控制因子。试验区浓度从 0.10 mg/L 下降至 0.04 mg/L,同比减少了 60%;下降幅度比较大。试验区与上湖敞开区相比,降低了 63.6%(图 3)。试验过程中,在 2013 年 10 月曾经出现过上升的现象,然后开始逐步下降。对试验区内外总磷含量进行显著性分析,

$t = -4.112$, $P = 0.0092$;取 $\alpha = 0.05$,结果 $P < \alpha$,两者存在显著性差异。

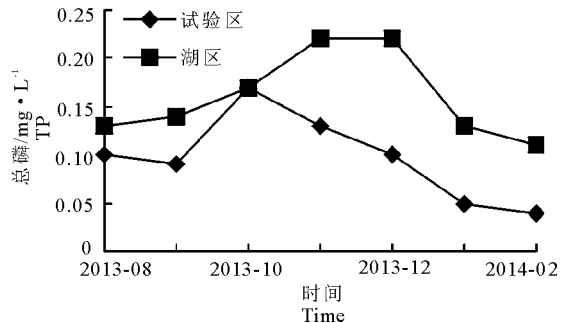


图 3 试验区与湖区的总磷变化比较

Fig.3 Variation of total phosphorus in the test and open areas of Nanhu Lake

2.4 水体 COD_{Mn} 浓度变化

由图 4 可见,从 2013 年 8 月开始,5 个月后,试验区 COD_{Mn} 浓度从 8.8 mg/L 下降到 2.6 mg/L,整体下降了 70%;与上湖敞水区相比,下降了 3.7%。显著性分析表明,试验区与上湖区的差异性不明显($t = 0.7433$, $P = 0.4853$;取 $\alpha = 0.05$, $P > \alpha$)。

2.5 水体叶绿素 a 含量变化

从图 5 可以看出,试验区内叶绿素 a 含量由 52 mg/m³下降至 4.6 mg/m³,整体下降了 91.1%;与上湖敞开区相比,减少了 89.4%。叶绿素 a 的含量随着沉水植物的不断生长及沉水植物对水体底部覆盖面积的增大而逐渐减少。叶绿素 a 的含量与水温呈正相关关系,温度高,藻类生长较快,密度就大;反之,温度低,藻类生长慢,密度就小。经过对试验区内及湖区叶绿素 a 的含量分析($t = -3.2905$; $P = 0.0166$;取 $\alpha = 0.05$, $P < \alpha$),试验区内外的叶绿素 a 含量存在显著性差异,试验区明显小于湖区。

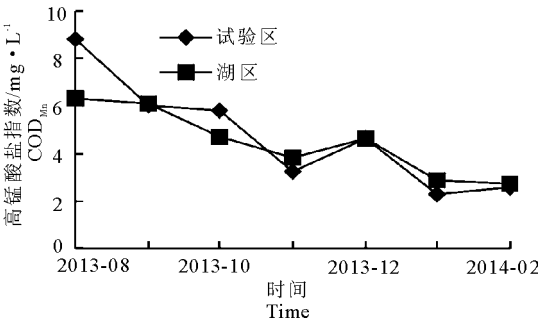


图 4 试验区与湖区水体的 COD_{Mn}变化比较
Fig.4 Variation of COD_{Mn} in the test and open areas of Nanhu Lake

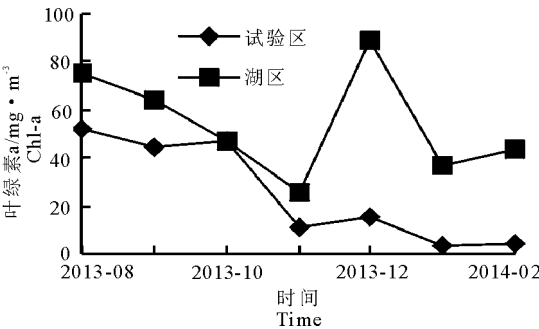


图 5 试验区与湖区的叶绿素 a 变化比较
Fig.5 Variation of chlorophyll a in the test and open areas of Nanhu Lake

3 讨论

3.1 草型生态系统对富营养化水体的影响

经建立草型生态系统后,试验区的透明度达到 1.8 m,叶绿素 a 含量为 4.6 mg/m³,高锰酸盐指数(COD_{Mn})为 2.6 mg/L,总氮(TN)为 1.17 mg/L,总磷(TP)为 0.04 mg/L;而同期湖区的透明度仅 0.55 m,叶绿素 a 含量为 43.4 mg/m³,COD_{Mn}为 2.7 mg/L, TN 含量为 1.22 mg/L, TP 为 0.11 mg/L;表明草型生态系统对富营养化水体有很大的改善和提升作用。由于试验直接在南湖内进

行,因此所使用的技术和方法完全可以在南宁市南湖以及类似的富营养化水体治理中进行推广和应用。

3.2 沉水植物的品种选择与种植密度

国内许多地方在水体生态修复中采用挺水植物、浮叶植物和多种沉水植物的方式进行,本次试验仅采用苦草一种沉水植物就能够达到比较好的效果。这是因为南湖周边已经完成截污,其富营养化问题的主要根源在于内源释放。苦草终生生活在水下,能够有效吸收和利用水体的营养元素,且其根系发达,具有较强的固着淤泥作用,降低了风浪对底泥的搅动,减少了底泥氮磷等营养物质的释放及底泥泛起导致的水体浑浊,增加了水体的透明度,结果与王立志(2012)等的室内试验结果一致。

苦草在亚热带地区是一种常绿型的多年生沉水植物,不存在因季节替换产生的植物腐败而引发的二次污染和水质恶化问题;苦草叶生长后不会漂浮于水面,不影响游船的航行,可以作为亚热带地区水体草型生态系统构建的首选沉水植物品种。试验也反映出,对内源性富营养化水体的修复,恢复沉水植物种群优势、建立草型生态系统是根本所在。由于本次试验沉水植物的种植量比较大,种植采用抛投的方式,受风浪影响较大,在沉水植物根基没有巩固之前,很容易造成植物移动,可能导致分布不均匀。因此,对于最佳的最初种植量需要进一步探讨。

3.3 草型生态系统对水体营养盐浓度的影响

本次试验中,总磷含量下降幅度比较大,在总磷浓度下降的同时,试验水体的藻类大幅降低,透明度大幅上升,水体的富营养化程度降低,说明磷是南湖藻类生长的限制营养元素,也是富营养化的主要控制因子;从另一个侧面验证了陈竑等(1999)的试验结论。

试验区内总氮浓度试验前后对比下降比较明显,但与湖区总氮浓度相比,整体差别不大,说明沉水水生植物对吸收氮的去除贡献较小,结果与吴晓东(2013)的试验相一致。从试验结果可以看出,沉水植物可以直接利用和吸收无机盐,但对有机物的能力比较弱。严永富等(2013)认为用 EM 菌和沉水植物去除 COD_{Mn}效果优于单独使用沉水植物;本次试验区内 COD_{Mn}的浓度与湖区的浓度相比,下降不明显。这是否与沉水植物对有机物的利用需要经过微生物的分解变成无机物后才能被吸收有关,或者与试验区内细菌的浓度低有关,尚有待进一步试验验证。

3.4 有关 EM 菌液投放问题

在试验前期,由于试验区的水比较深,透明度比较小,无法降低水位进行试验,为了增加水体的透明度,采用了投放 EM 菌液的方法,解决深水区种植沉水植物的问题。如果能够降低水位到 0.5 m 以下,然后种植沉水植物,再慢慢提高水位的方法,就可以减少 EM 菌液投放环节,并能在工程实施过程中减少投资费用。

3.5 鱼类及底栖动物的品种与密度控制

在试验过程中,曾经出现苦草连根浮起和叶子折断的问题,经过排查发现是由于试验区内混入了罗非鱼、鲤、露斯塔野鲮等鱼类,经清理后没有再出现类似情况。因此,在新的生态系统构建中,需要清除草食性鱼类和其他喜欢翻动底泥的鱼类,特别是食量比较大的鱼类;同时,鱼类和螺、蚌等都属于变温动物,其食量随着水温的变化而变化,生态系统也会随之变化,怎样在这些变化过程中找到一个较好的平衡点,需进行深入研究。

3.6 构建全南湖草型生态系统的建议

为了突破长期困扰南湖水质改善存在的瓶颈,解决其富营养化问题,减少维护费用,可以在全南湖范围内实施草型生态系统构建技术,根据需要采用两种不同的施工方法:

(1)对全湖采用条块分割、逐个实施,最后拆除围隔连成整体的施工方法。这种方法是采用围隔技术将整个湖区分成若干部分,在这些围隔内各自进行生态修复,待所有围隔的生态系统达到预定目标以后,再将围隔拆除,最后再把水面连为一体。其优点是施工作业面小,对湖面景观及游船的影响小,可以分步实施,费用可逐年投入,每次投入的人力物力少。缺点是过程比较繁琐、实施时间长、见效慢、使用建造围隔的材料多。如果将南湖全湖分三段实施,两年一段;费用按照本次试验采用搭建围隔的方式,取 100 元/m² 的成本计算,费用大约需要 1.1 亿元,6 年完工。

(2)采用全湖范围内同步一次性进行生态修复的方法。此方法就是对整个湖区的生态系统进行一次性推倒重建,全湖整体施工。其优点是时间短、见效快、效果明显,节省了围隔费用,总体费用低。缺点是施工作业面全湖铺开,短时间内游船的营业将会受到影响,需要一次性完成投入。如果根据本次试验的成本,按照去除围隔搭建费用后,按 90 元/m² 计算,全湖总费用 9 630 万元,两年时间完成。

参考文献

- 陈竑,刘文炜,陈宗永,1999. 南湖富营养化的主要控制因子分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 24(1):80-84.
- 国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法(4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社:243-285.
- 金相灿,屠清英,1990. 湖泊富营养化调查规范(2 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社:141-188.
- 雷慧憎,姜仁良,王道尊,等,1981. 池塘养鱼学[M]. 上海:上海科学技术出版社:161-164.
- 刘传,2010. 南宁市南湖水质状况及治理对策探讨[A]. 中国环境科学学会学术年会论集[C]. 北京:中国环境科学出版社.
- 秦伯强,2007. 湖泊生态恢复的基本原理与实现[J]. 生态学报, 27(11):4848-4858.
- 王立志,王国祥,2012. 苦草密度对扰动引起各形态磷释放的影响[J]. 生态环境, 21(6):1096-1101.
- 魏薇,曹文平,汪银梅,2013. 大型水生植物修复受损水环境机理及进展[J]. 广东农业科学, 40(16):160-162.
- 吴晓东,潘继征,李文朝,等,2013. 溇湖东岸生态修复试验区的水质净化效果[J]. 生态与农村环境学报, 29(3):284-289.
- 徐德文,刘正文,雷泽相,等,2005. 大型水生植物对湖泊生态修复的作用机制研究进展[J]. 长江大学学报(自然版), 2(2):14-18.
- 严永富,王锦堂,方琛亮,2013. EM 菌与沉水植物联合应用脱氮除磷试验研究[J]. 浙江水利科技, 41(4):19-20, 24.

(责任编辑 万月华)

Application of Macrophytic Ecosystem Construction Technology for
Eutrophication Prevention and Control in Nanhu Lake

CHEN Zong-yong¹, MA Hai-xia¹, WEI Lan-ying¹, WU Yan-zhi¹,
DENG Hui-fu¹, LIU De-hai¹, YANG Ming-hui²

(1.South Lake Park in Nanning, Nanning 530021,P.R.China;
2. New technology development center in Nanning, Nanning 530012,P.R.China)

Abstract: Eutrophication is a global problem and ecological restoration is a primary means for managing eutrophication. Nanhu Lake is located in the core area of Nanning City, Guangxi Province. From August 2013 to February 2014, our research team conducted an ecological restoration experiment in Nanhu Lake to explore methods for treating eutrophication and the feasibility of ecological restoration in Nanhu Lake. An enclosed experimental area was set up using canvas and scaffolding in the upper lake with the area of 670 m² and water depth of 1.6 – 2.0m. Herbivorous and omnivorous fish in the enclosure were removed to reduce mixing and EM strains were used to increase transparency. The macrophyte, *Vallisneria natans*, was then planted at a density of 1.4 kg/m². After vegetation coverage reached 90%, aquatic organisms, such as *Cirrhinus molitorella*, *Bellamya aeruginosa* and *Anodonta* were added at densities of 6 g/m², 10 g/m² and 1 g/m², respectively. Water quality was monitored during the experiment; water depth and temperature, air temperature and transparency of the test area and open area of Nanhu Lake were measured daily and TP, TN, COD_{Mn} and Chl-a were measured monthly in the test area and open area of Nanhu Lake. After 5 months, the newly constructed ecosystem was completed and stabilized and water quality in the test area increased from Grade V to Grade IV (GB 3838 – 2002). Transparency increased from 0.25 m to 1.8 m; COD_{Mn} decreased by 70%, from 8.8 mg/ L to 2.6 mg/ L; TP decreased by 60%, from 0.10 mg/L to 0.04 mg/L; TN decreased by 14.5%, from 1.37 mg/L to 1.17 mg/L and Chl-a decreased by 91.1%, from 51 mg/m³ to 4.6 mg/m³. Compared to the whole lake, transparency in the test area was >3 times higher, COD_{Mn} decreased by 3.7%, TP by 63.6%, TN by 4%, and Chl-a by 89.4%. Results indicate that ecological restoration effectively controlled TP, inhibited algal growth, significantly improved water transparency and effectively treated eutrophication. The process can be expanded and implemented throughout Nanhu Lake.

Key words: macrophyte dominated ecosystem;eutrophication;ecological restoration;Nanhu Lake