

武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究

张萌, 曹特, 过龙根, 倪乐意*, 谢平

(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, 东湖湖泊生态系统研究站, 湖北 武汉 430072)

摘要: 普遍存在的水体富营养化及水生植被衰退引起水生态系统崩溃和水质恶化, 受损湖泊进行水生植被 (特别是沉水植被) 的修复/重建被认为是改善湖泊水质和湖泊生态恢复的重要手段。研究在严重富营养化的东湖水果湖边建立的围隔中开展, 采用多种措施对围隔的底质和水质进行适当改善, 依据自然湖泊中水生植被分布和植物种类组成的特点, 选用 14 种常见的土著水生植物在该区进行移栽与群落构建。经过水生植被的重建, 所移栽的 14 种水生植物全部存活, 并建立起相对稳定的植被群落, 而且经过随后 4 个月的水质监测, 发现植被重建后围隔内的水质得到显著改善, 尤其是水的色度、透明度和叶绿素含量改善最为明显, 与围隔外 (即东湖 I 站) 相比, 围隔内除 NO_3^- 外湖水中的各种营养盐含量以及底泥中 TP 的含量都不同程度的降低, 其中以 TP_w 降幅最大; PCA 分析发现构建的植物群落结构主要受水体的 TP_w 、氨氮浓度、电导率、水下消光系数以及底泥的 TP_s 影响; pH、COND、ORP、 TP_s 、DO、碱度、 K_d 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 TP_w 和 DIC 这些主要的环境梯度对构建的水生植物群落中各层片上的各种优势物种体内 TN、TP 含量影响最大。总而言之, 本研究实现了水体从“浊水态”向“清水态”的快速转换。这一结果表明在富营养湖泊中通过建立围隔, 采用“化整为零”的策略逐步恢复水生植被是一个可行方案。此外, 增加水生植物物种多样性可以增加植被恢复的成效。

关键词: 富营养化; 水生植物; 生态修复; 水质改善; 东湖

中图分类号 X524 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2010.06.036 文章编号:1003-6504(2010)06-0154-06

Restoration of Constructed Hydrophytes Community in East Lake of Wuhan and Experimental Study on Water Quality Improvement

ZHANG Meng, CAO Te, GUO Long-gen, NI Le-yi*, XIE Ping

(East Lake Experimental Station of Lake Ecosystem, State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: Worldwide water eutrophication and hydrophytes declines render the collapse of water ecosystem and the deterioration of water quality. Restoration/reconstruction of aquatic macrophytes vegetation, especially submersed macrophytes vegetation is considered as an important tool for improvement of water quality and ecological restoration of the lakes. Taking enclosure of heavily eutrophic Shuiguohu of East Lake, Wuhan as a case, several steps were applied to evenly improving sediment and water quality in enclosures, and 14 autochthonic species of aquatic plants, according to respective distribution and construction in natural lakes, were chosen to replant in the Lake and construct macrophytes community. Through half a year restoration of hydrophytes vegetation, all of 14 macrophytes replanted survived and relatively steady community was established. Water quality, in particular water chroma, SD and *Chl a* contents in enclosures was improved after vegetation reconstruction. Compared with outside, all of nutrients other than NO_3^- from water and TP of sediment in enclosures decreased at different degrees, with TP_w decreasing at the largest. Through PCA analysis, TP_w , $\text{NH}_4\text{-N}$, conductivity, K_d and TP_s were found to affect structure of community. Main environmental gradients such as pH, COND, ORP, TP_s , DO, alkalinity, K_d , PO_4^{3-} , NO_3^- , TP_w and DIC could affect dominant species in different synusia structures of constructed macrohytes community at largest. The study made the rapid shift of the Lake water from turbid state to clear state, indicating it was a feasible scheme to take a policy of turning integer to integrant parts to restore vegetation gradually through building enclosures in entrophic lakes. Enlarging the species biodiversity of aquatic plants could heighten the success rate of hydrophytes restoration.

Key words: eutrophication; aquatic macrophytes; ecosystem restoration; improvement of water quality; East Lake

水体富营养化及水生植被衰退引起的水生态系统崩溃和水质恶化是很多国家所面临的一道难题^[1-7],

收稿日期 2009-02-12; 修回 2009-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.30570280); “863 计划”研究课题资助 2006AA06Z342)

作者简介: 张萌 (1983-), 男, 博士, 主要从事水环境科学、水生态恢复工程学、水生植物生理生态学等方面的研究 (电话) 027-67780702 (电子信箱)

tomdeshiye@126.com; * 通讯作者, 女, 研究员, 博士生导师 (电子信箱) njly@ihb.ac.cn

我国的众多湖泊也深受其害^[8-11]。东湖 E114°23′, N30°34′) 位于武汉市内, 是长江中下游地区典型的亚热带浅水湖泊。已有的研究表明, 东湖富营养化状况从 20 世纪 60 年代开始加剧, 水生植被大面积衰退, 生态系统发生明显的逆行演替 (Retrogressive Succession)^[12-13], 蓝藻水华在 20 世纪 80 年代也曾大面积暴发^[13-14], 水质恶化, 以子湖之一的水果湖为甚^[14]。

大型水生植物在维持湖泊的清水稳态^[15-16]和物种多样性^[17]、介导湖泊的氮磷生物地球化学循环^[18]以及健康生态服务功能 (如健康养殖^[19]等) 上起到关键作用, 其中沉水植物作用尤为显著^[20-22]。因此, 在受损湖泊进行水生植被 (特别是沉水植物) 的修复/重建被认为是改善湖泊水质和湖泊生态恢复的重要手段^[23]。我国已在几个重要的湖泊 (如滇池、太湖、巢湖、五里湖、武汉月湖等) 进行大面积重建水生植被的尝试, 结果表明水生植被重建困难重重, 初步建立起来的植被缺乏稳定性, 当人工辅助修复措施移除后水生植被随即崩溃。这可能是多方面因素造成的: 首先, 富营养湖泊中松软的底质、大量的悬浮物、过高的氮和磷营养盐含量、水下弱光等因素都不利于水生植物的生长; 其次, 不同水生植物的耐污能力存在巨大差异, 人为选择一种或少数几种水生植物进行植被重建会减少筛选出合适植物的机率, 也弱化了不同植物间的相互作用, 使得植被恢复的成功率下降。

本研究采用多种措施对试验区的底质和水质进行适当改善, 依据自然湖泊中水生植被分布和植物种类组成的特点, 选用 14 种常见的土著水生植物在试验区进行移栽与人工构建, 监测植物的生长情况和水质指标, 分析了水生植被恢复与水质的关系, 并探讨水生植被恢复成败的可能因素。

1 材料与方法

1.1 研究地点及围隔构建

试验区位于武汉东湖的水果湖湾 (E30°34′, N114°23′), 平均水深 1.5m, 试验区在 20 世纪 70 年代水生植被就已经消失。试验区共设 2 个围隔 (每个 24×25m²) 进行水生植被恢复及水质改善研究, 以试验区外的东湖常规监测 I 站 (见图 1) 作为水质对照研究。围隔的人工构建的操作工艺流程如图 2 所示。

本研究选用 14 种常见的水生植物在试验区进行移栽, 植物配置如表 1 所示。在水深 0~1m 的沿岸带移栽挺水植物香蒲、芦苇和莲, 浮叶植物白睡莲、睡莲、黄睡莲、二角菱和黄花荇菜, 以及沉水植物苦草、菹草和大茨藻; 在水深 1.0~1.9m 区域移栽沉水植物金鱼藻和狐尾藻, 浮叶植物二角菱和黄花荇菜。工程

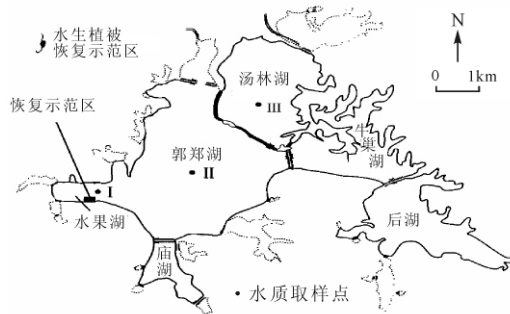


图1 武汉东湖水生植被恢复示范区位置示意图
Fig.1 Location of the enclosures for the restoration of macrophytes in Donghu Lake

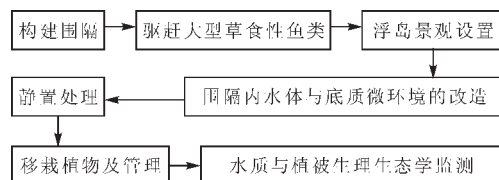


图2 围隔水生植物人工恢复操作工艺流程
Fig.2 Steps of the restoration of macrophytes in the enclosures in Donghu Lake

于 2006 年 4 月开工, 试验区的各种水生植物的构建于同年 6 月完成。在每个围隔内构建 2 座人工浮岛, 面积大约 20m², 主要种植景观效果较好的彩叶草 (*Coleus scutellarioides* L.) Benth.)。围隔经过 6 个月的人工恢复, 其主要的群落形态如图 3 所示。



图3 人工浮岛和围隔内水生植物群落
Fig.3 Flowers and macrophytes planted in the enclosures

1.2 样品采集及分析

植物移栽完成 2 个月后, 每月中旬目测评估植被分布面积, 在每个围隔内选择 3 个样点进行水生植物的生物量调查和采集水样和底泥样品, 即水质和水生植物监测时间为 2006 年 7 月中旬~10 月中旬。每次采集的植物样品经自来水清洗干净后于 80℃ 烘干用于化学组分的测定, 底泥样品 40℃ 缓慢干燥后用于化学成分测定。植物样品研磨成粉末并过 100 目筛子, 准确称取 0.1g 样品经湿式消解后用瑞士 BUCHI B-339 型凯氏定氮仪分析总氮 (TN)。植物总磷 (TP) 的测定采用钒钼黄比色法, 称干粉 0.1g, 经浓硫酸和过氧化氢消解至无色清亮, 显色后在分光光度计下比色测定^[24]。

水质物理指标和部分化学指标采用现场测定方式。使用 HORIBA 多参数水质监测系统 U-20 系列, 日产) 测定水体中的 pH、电导率 (COND)、浊度

(TURB)、水温 T)、溶氧 DO)、总悬浮固体量 TDS)、氧化电位 ORP) 和测定深度 Dep)。采集的水样经 0.7 μ m 的 Whatman GF/C 滤膜过滤后用于测定各种化学成分, 滤膜经 95%乙醇萃取后测定叶绿素和脱镁叶绿素。总氮 TN_w)、总磷 TP_w)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻、总碱度 alkalinity)、色度、SiO₂、高锰酸盐指数、BOD₅ 测定的具体方法参照黄祥飞^[25]、总溶解性氮 TDN)、总溶解性磷 TDP) 采用国标方法^[26]。水样中的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 用孔径 0.45 μ m 的混合纤维树脂滤膜过滤后采用离子色谱仪 DX-100) 测定。溶解性无机碳 DIC) 和溶解性有机碳 DOC) 采用总有机碳分析仪测定 (O I Analytical 1010 TOC Analyzer, O. I. Corporation)。水体透明度 SD) 用透明度盘测定。底泥总磷 TP_s) 用硫酸-高氯酸消化钼锑抗比色法分析^[24]。水下辐射采用 Li-Cor 公司生产的 LI-192SA 探头和 Li-1000 数据采集器测定, 水下消光系数 K_d 计算参看 Kirk^[27]。

1.3 数据处理

所获得的数据采用 SPSS 15.0 分析软件进行方差齐性检验、主成分分析 PCA) 和各指标间的相关性分析。对所有样点植物样品的数据采用 STATISTIC 6.0 进行独立变量的 t-test, 采用 Pearson 相关分析筛选出对植物 TN、TP 含量影响相对重要的环境因子, 并进行环境因子-植物 TN、TP 的 PCCA 分析。

2 结果

2.1 生物群落变化

移栽的 14 种水生植物全部存活, 并建立起相对稳定的群落。在水生植物移栽的初期, 经过改善后的水质和底质均较适合沉水植物的生长, 金鱼藻和苦草都可以在水深 1.5m 处存活, 这一时期以沉水植被为主。移栽 2 个月后植被总盖度达到 90% 以上, 约 58.3% 的水面为金鱼藻所覆盖, 苦草和睡莲的盖度也较高。此后, 金鱼藻和苦草的优势逐步被菱、狐尾藻和大茨藻所取代。菱的盖度最高时达到围隔内水面的 80% 以上。芦苇和香蒲的种群扩增较慢, 盖度分别只有 0.25% 和 0.33%。围隔内虽未引入浮萍, 但其曾一度迅速发展, 盖度达到围隔面积的 13.3%。此外, 围隔内有大量水绵 *Spirogyra* sp.) 生长, 水生植被重建 2 个月后青虾 *Macrobrachium nipponense*)、环棱螺 *Bellamyia* sp.) 随处可见。各种植物移栽 2 个月后的分布面积和所占比例详见表 1。

2.2 围隔内水质的变化

水生植物移栽 4 个月后, 围隔内除 NO₃⁻ 外湖水中的各种营养盐含量以及底泥中 TP 的含量均比围隔

表 1 恢复实验区(围隔)水生维管束植物组成、生活型及其盖度
Table 1 List of aquatic vascular plants, their life-forms and coverage in restorational experimental areas(enclosures)

物种	生活型	分布面积	盖度(%)
		围隔(m ²)	围隔
浮萍 <i>Lemna minor</i> L.	漂浮	160	+13.3
大茨藻 <i>Najas marina</i> L.	沉水	30	+2.5
金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> L.	沉水	700	+58.3
苦草 <i>Vallisneria spiralis</i> (Lour.) H.	沉水	200	+16.7
白睡莲 <i>Nymphaea alba</i> L.	浮叶	8	+0.67
红睡莲 <i>Nymphaea rubra</i> L.	浮叶	8	+0.67
黄睡莲 <i>Nymphaea mexicana</i> Z.	浮叶	10	+0.83
芦苇 <i>Phragmites communis</i> T.	挺水	3	+0.25
狭叶香蒲 <i>Typha angustifolia</i> L.	挺水	4	+0.33
荇菜 <i>Nymphoides peltatum</i> (Gmel.) O. K.	浮叶	40	+3.3
狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	沉水	6	+0.50
二角菱 <i>Trapa bispinosa</i> Roxb.	浮叶	40	+3.3
莲 <i>Nelumbo nucifera</i> G.	挺水	2	+0.17
水鳖 <i>Hydrocharis dubia</i> (Bl.) B.	漂浮	零星	-
菹草 <i>Potamogeton crispus</i> L.	沉水	零星	-

注: +表示出现或是栽培后存活的植物; 两个大型围隔栽培种基本相同; -分布面积上表示数值为零, 以及盖度上表示 <0.01%。

外的东湖 I 站的大幅降低, 其中 TP_w 降低幅度最大, 并且水体的 TN、TP 都已经降到 2.50mg/L、0.08mg/L 以下。围隔内的透明度 SD) 与水下消光系数 K_d 显著低于围隔外的东湖 I 站 (P<0.001); 围隔内的水的色度、叶绿素 a 含量和可溶性 SiO₂ 含量显著低于围隔外的东湖 I 站 (P<0.01); 围隔内溶氧和脱镁叶绿素 a 含量比围隔外显著下降 (P<0.05)。各种指标的数值详见表 2。总体上看, 植被重建后围隔内的水质已经得到改善, 特别是水的色度、透明度和叶绿素含量等表观指标和水柱溶解氧含量和光消减率的改善最为显著。营养指标如氨氮、水柱 TP 和 TN (TP_w 和 TN_w) 等的清除率达到近 30%~50% (表 2)。

2.3 围隔内环境因子与植物群落结构间的相关关系

从东湖的情况来看, 该湖由于人为干扰的作用, 植物群落呈现出逐渐严重的逆行演替; 超富营养的水果湖因水质恶化严重早在 20 世纪 90 年代初就成为次生裸地, 并且非常难以成功开展恢复工作^[28], 目前该实验围隔在较短的时间内成功的构建了水生植物群落。主成分分析 PCA) 发现围隔的植物群落重要值偏向于第一象限, 主要受到水体的 TP_w、氨氮浓度、电导率、水下消光系数以及底泥的 TP_s 影响 (图 4)。表明群落组成和结构受到这些主要因素的影响。

2.4 植物体内氮、磷含量与环境因子的关系

沉水植物狐尾藻、苦草、金鱼藻和大茨藻的磷含量高于浮叶植物菱、荇菜和水鳖以及挺水植物莲。挺水植物莲的氮含量显著低于沉水植物狐尾藻、苦草和金鱼藻 (P<0.05)。各种植物的氮磷含量详见图 5。植物种

表 2 围隔内和东湖 I 站的水质指标对比表
Table 2 Water chemistry in the enclosure and Station I in Donghu Lake

水质指标	围隔区	对照区(I 站)	P
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.159(0.053~0.247)	0.234(0.127~0.324)	0.294
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.012(0.008~0.016)	0.012(0.008~0.172)	0.825
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.674(0.573~0.853)	0.528(0.513~0.552)	0.087
TDP(mg/L)	0.051(0.042~0.062)	0.053(0.046~0.061)	0.846
TP _w (mg/L)	0.064(0.055~0.078)	0.092(0.072~0.133)	0.076
TDN(mg/L)	1.030(0.498~1.399)	1.158(0.645~1.868)	0.798
TN _w (mg/L)	1.388(0.921~1.767)	1.606(1.298~1.795)	0.482
SD(m)	1.276(1.02~1.56)	0.46(0.40~0.55)	0 [*]
Chroma(°)	21(15~28)	44(32~48)	0.001 [*]
COD _{Mn} (mg/L)	4.98(4.65~5.68)	5.65(4.73~6.78)	0.192
Chla(μg/L)	24.53(11.72~37.70)	54.40(37.70~63.51)	0.007 [*]
Chla-Mg(μg/L)	64.3(31.7~91.9)	158(89.7~236.4)	0.018
pH	7.51(7.82~8.51)	8.09(7.23~7.98)	0.094
COND(S/cm)	41.37(39.13~44.6)	41.29(39.8~43.53)	0.997
TURB(NTU)	8.17(0~22.67)	22.9(14.8~34.9)	0.067
DO(mg/L)	5.76(4.34~6.08)	8.38(7.11~10.40)	0.032 [*]
TDS(g/L)	0.269(0.254~0.289)	0.268(0.259~0.282)	0.993
ORP(mV)	145(115~187)	145(112~200)	0.75
K _d (m ⁻¹)	1.73(1.57~2.45)	3.03(2.74~3.478)	0
SiO ₂ (mg/L)	2.56(1.53~3.48)	5.39(3.48~6.80)	0.004 [*]
TP _s (P%)	0.154(0.116~0.192)	0.171(0.170~0.172)	0.484

注: * 数值表示 P<0.05。

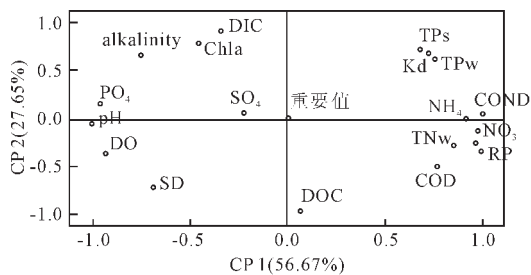


图4 围隔内32个环境因子-植物群落的重要值的主成分分析 (PCA) 散点图

Fig.4 PCA scatterplots of 32 environmental factors—important value of aquatic macrophytes communities in the enclosures

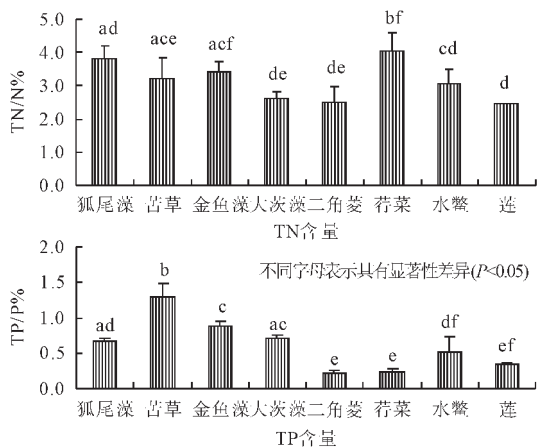


图5 围隔水生植物的氮磷含量

Fig.5 Contents of TN and TP of aquatic macrophytes in the enclosures

类序列上 PCCA 分析结果见图 6,分析结果表明,前 2 个主成分的累计贡献率为 77.50%,第一主成分主要与 K_d、pH、COND、DO、ORP、TP_s、NH₄⁺、NO₃⁻、PO₄³⁻、TN_w、SD、高锰酸盐指数和 TP_w 成正相关,与 DO、碱度和 pH 值成负相关;第二主成分主要与 TP_s、碱度、K_d、TP_w、DIC 和 chla 成正相关,与 SD、DOC 成负相关。pH、COND、ORP、TP_s、DO、碱度、K_d、PO₄³⁻、NO₃⁻、TP_w 和 DIC 对两主成分轴的影响最大。即这些主要的环境梯度对水生植物群落中各层片上的各种优势物种体内 TN、TP 含量影响最大。

Projection of the variables on the factor-plane (1 x 2)

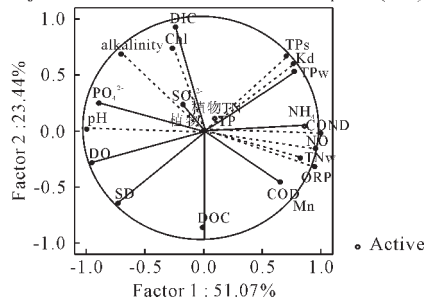


图6 围隔内的22个环境因子与植物TN、TP含量间的PCCA散点图
Fig.6 PCCA Scatter-plots of 22 environmental factors TN and TP contents of the aquatic macrophytes in the enclosures

3 讨论

Gerloff 和 Krombholz (1966) 发现水生植物生长需求的组织氮和磷的最低含量分别是 1.3% 和 0.13%^[31]。本原位研究显示, 各种常见土著水生植物体内 TN 和 TP 含量都远超过这个极限, 并且不同物种间的累积能力的差异很大。表明这些土著水生植物对水柱营养都具备过剩富集的能力。这一结果对湖滨带植被恢复的物种筛选具有现实意义。

本研究结果表明, 通过建立围隔并适当改善水质和底质微环紧后可以成功重建水生植被, 水生植被的重建又进一步改善了围隔内的水质和生物群落, 使得围隔内的生态系统得到良性循环。Scheffer 等^[22]提出的“浅水湖泊稳态转换”理论阐明了在适当的营养条件下 TP=0.05~0.15mg/L 浅水湖泊可处于两个不同的状态, 浮游植物占优势的“浊水态”和沉水植物占优势的“清水态”。该理论认为, 大型沉水植物在维持湖泊的清水稳态中起到关键作用, 主要的机制包括: (1) 与浮游植物竞争养分和光照; (2) 释放化感物质抑制浮游植物的生长; (3) 为植食性浮游动物提供繁育场所和庇护; (4) 为附着藻类提供生长基质, 增加对养分的吸收; (5) 加速悬浮物的沉降和减少底泥的再悬浮等。

因此, 在受损湖泊中恢复水生植被对改善水质起到重要的作用, 但是湖水的营养盐含量需要降低到水生植被消失时期更低的浓度才有利于水生植被的修复。湖水的 TN 含量一般要小于 2mg/L 才有利于沉水植被的发展, 否则将可能延缓湖泊生态恢复进程^[29]。本研究中, 水生植被修复后, 围隔水体的总氮和总磷含量大幅减少, 它们的浓度已经低于“浅水湖泊稳态转换理论”指明的向“稳定清水态”转换的需要的临界值^[22, 29], 水体透明度显著提高 ($P < 0.001$), 实现了水体从“浊水态”向“清水态”的快速转换。这一结果表明在富营养湖泊中通过建立围隔, 采用“化整为零”的策略逐步恢复水生植被是一个可行方案。本研究发现, 试验期间优势植被类群发生变化, 移栽初期的优势植被类群以金鱼藻为主, 但后来逐步被二角菱和狐尾藻所取代。这可能与不同植物的最佳生长季节和耐污能力存在差异有关。不同植物对不同营养 (如各形态 N 和 P) 的吸收偏好的差异最终能协同改善水质^[30]; 此外, 多种物种以及多种生活型的水生植物的有机组合能提高小生境生物多样性, 并最终能增强人工恢复群落的抗逆和抗干扰能力。因此, 同时移栽多种水生植物可以增加植被恢复的成效。

在重富营养化水体的水草恢复工作中, 应重视水草的长期管理和维护, 同时, 对莲的选择要谨慎, 由于它的促淤能力往往导致富营养底质营养的快速释放, 经过 3 年的长期观测发现这不利于水质清澈的长期

保持。但总体来讲, 该植被重建工程的生态建成和净化效果尚佳。

4 结论

(1) 水生植物人工构建 4 个月后, 移植的 14 种水生植物全部存活, 并建立起相对稳定的群落。

(2) 构建 4 个月后, 以围隔形式的恢复工程对水质表观指标的改善效果显著, 对水柱主要营养物质的清除率部分最高达到 30%~50%。

(3) 采用“化整为零”的策略逐步恢复水生植被是一个可行方案; 同时移栽多种水生植物可以增加植被恢复的成效。

【参考文献】

- [1] Moss B. The effects of fertilization and fish on community structure and biomass of aquatic macrophytes and epiphytic algal population: an ecosystem experiment[J]. *J Ecol*, 1976, 64:313-342.
- [2] Jupp B P, Spence D H N. Limitation on macrophytes in an eutrophic lake, Loch Leven[J]. *J Ecol*, 1977, 65:175-186.
- [3] Orth R J, Moore K A. Chesapeake Bay: an unprecedented decline in submerged aquatic vegetation[J]. *Science*, 1983, 222:51-53.
- [4] Ozimek T, Kowalczewski A. Long-term changes of the submerged macrophytes in eutrophic lake Mikolajskie (North Poland) [J]. *Aquat Bot*, 1984, 19:1-11.
- [5] Broenmark C, Weisner S E B. Indirect effects of fish community structure on submerged vegetation in shallow, eutrophic lakes: An alternative mechanism[J]. *Hydrobiol*, 1992, 243-244:293-301.
- [6] Nichols S A, Lathrop R C. Culture impacts on macrophytes in the Yahara lakes since the late 1800s[J]. *Aquat Bot*, 1994, 47:225-247.
- [7] Krolkowska J. Eutrophication processes in a shallow, macrophyte dominated lake: species differentiation, biomass and the distribution of submerged macrophytes in Lake Luknajno (Poland) [J]. *Hydrobiol*, 1997, 342-343:411-416.
- [8] Ni L. Long-term changes of the structure and biodiversity of aquatic vegetation of Lake Donghu, Wuhan[J]. *Acta Hydrobiol. Sinica*, 1996, 20(s):60-74.
- [9] Ni L. Growth of *Potamogeton maackianus* under low-light stress in eutrophic water[J]. *J Freshwat Ecol*, 2001(a), 16:249-256.
- [10] Ni L. Effects of water column nutrient enrichment on the growth of *Potamogeton maackianus* A. Been[J]. *J Aquat Plant Manage*, 2001(b), 39:83-87.
- [11] Yu G, Liu Y, Qiu C, et al. Aquatic vegetation of Lake Dianchi: succession and its relation with environmental changes [J]. *Lake Sci*, 2000:73-80.

- [12] 于丹,种云霄,涂芒辉,等. 中国水生高等植物受危种的研究[J]. 生物多样性, 1998, (1):13-21.
Yu Dan, Chong Yun-xiao, Tu Mang-hui, et al. Study on the threatened aquatic higher plant species of China [J]. Chinese Biodiversity, 1998, (1):13-21.
- [13] 严国安,马剑敏,邱东茹,等. 武汉东湖水生植物群落演替的研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(4):319-327.
Yan Guo-an, Ma Jian-min, Qiu Dong-ru, et al. Succession and species replacement of aquatic plant community in East Lake [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(4):319-327.(in Chinese)
- [14] 刘健康. 东湖生态学研究[M]. 北京:科学出版社, 1995.
Liu Jian-kang. Research on Ecology of Lake Donghu(II) [M]. Beijing: Science Press, 1995.(in Chinese)
- [15] Scheffer M, Hosper H, Meijer M L, et al. Alternative equilibria in shallow lakes[J]. Trends Ecol Evol, 1993, 8:275-279.
- [16] Scheffer M, Carpenter S R, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems[J]. Nature, 2001, 413:591-596.
- [17] Wetzel R G. Structure and productivity of aquatic ecosystems. Limnology[M]. 2nd ed. New York: Saunders College Publishing, 1983.
- [18] Nogueira F, de Assis Esteves F, Prast A E. Nitrogen and phosphorus concentration of different structures of the aquatic macrophytes *Eichhornia azurea* Kunth and *Scirpus cubensis* Poep & Kunth in relation to water level variation in Lagoa Infernao (Sao Paulo, Brazil) [J]. Hydrobiologia, 1996, 328:199-205.
- [19] Canfield D E J, Bachmann R W, Hoyer M V A. Management alternative for Lake Apopka[J]. Lake and Reservoir Manage, 2000, 16:205-221.
- [20] Hosper S H, Meijer M L. Biomaniplulation will it work for your lake. A simple test for the assessment of chances for clear water, following drastic fish-stock reduction in shallow eutrophic lakes[J]. Ecological Engineering, 1993, 2:63-72.
- [21] James W F, J W Barko, M G Butler. Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass[J]. Hydrobiologia, 2004, 515: 181-191.
- [22] Scheffer M. Ecology of Shallow Lakes[M]. Dordrecht Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [23] 许木启,黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究[J]. 生态学报, 1998, 18(5):547-557.
Xu Mu-qi, Huang Yu-yao. Restoration and reestablishment of the damaged ecosystem of inland waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5):547-557.(in Chinese)
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
Lu Ru-kun. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.(in Chinese)
- [25] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法[M]. 北京:中国标准出版社, 2000.
Huang Xiang-fei. Observation and Analysis of Ecological Survey for Lake. Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network[M]. Beijing: China Standard Press, 2000.(in Chinese)
- [26] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002: 88-438.
State Environmental Protection Administration of China. Methods for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88-438.(in Chinese)
- [27] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [28] 邱东茹,吴振斌,刘保元,等. 武汉东湖水生植被的恢复试验研究[J]. 湖泊科学, 1997, (2):168-174.
Qiu Dong-ru, Wu Zhen-bin, Liu Bao-yuan, et al. Ecological restoration of aquatic vegetation in a eutrophic shallow lake, Donghu Lake, Wuhan[J]. Lake Science, 1997, 9(2):168-174.(in Chinese)
- [29] Sagrario M A G, Jeppesen E, Goma J, et al. Does high nitrogen loading prevent clear water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations[J]. Freshwater Biology, 2005, 50:27-41.
- [30] 李睿华,管运涛,何苗,等. 用美人蕉、香根草、荆三棱植物带处理受污染河水[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3):366-370.
Li Rui-hua, Guan Yun-tao, He Miao, et al. Treating polluted river water with *Canna glauca* L, *Vetiveria zizanioides* and *Scirpus yagara ohw* zones[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2006, 46(3):366-370. (in Chinese)
- [31] Gerloff G C, Krombholz P H. Tissue analysis as a measure of nutrient availability for the growth of angiosperm aquatic plants[J]. Limnol Oceanogr, 1966, 11:529-537.

※ 致谢:感谢国家自然科学基金项目(No.30570280)和“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)研究课题(2006 AA06Z342)的支持,以及东湖风景区管理处的专项资助,感谢在采样过程中王松波博士等人的帮助,感谢郝乐等人在部分水质指标测定上帮助。