

城市人工湖泊水生植被生态恢复技术*

陈 灿¹, 王国祥², 朱增银¹, 尹大强^{1**}

(1: 南京大学环境学院, 南京 210093)

(2: 南京师范大学地理科学学院 南京 210097)

摘 要: 本实验在藻类响应型城市人工湖泊中, 用围格恢复沉水植被, 修复退化的生态系统. 结果证明: 夏季透明度 < 0.4 m 时, 应用凤眼莲可快速改善透明度, 0.30 盖度的凤眼莲在夏季 30-40 d 内使水体透明度从不足 0.3 m 提高到 0.6 m 以上, 并验证了透明度的改善与盖度的正相关程度. 通过短期引种漂浮植物调节水体透明度, 成功恢复了菹草 + 伊乐藻群落, 透明度较上年同期稳定提高 70%, Chl. a 浓度降低 50%, 水体富营养水平下降, 有效修复了生态系统.

关键词: 城市人工湖泊; 植被恢复; 透明度; 光补偿深度

Study on eco-remediation in urban-ponds: restoring submerged macrophytes

CHEN Can¹, WANG Gouxiong², ZHU Zengyin¹ & YIN Daqiang

(1: School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

(2: School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, P. R. China)

Abstract: In allusion to the algal eutrophication problem of urban shallow lakes, four enclosures were set up in an urban eutrophic pond of Nanjing City to restore submerged macrophytes communities. Results showed that *Eichhornia crassipes* can be used to improve the transparency of water body, and its effect was relative to its coverage when its coverage was less than 0.3. With the coverage no less than 0.3 *Eichhornia crassipes* can make transparency improved from lower than 0.3m to higher than 0.6m during 30 to 40 days in summer. The submerged vegetation was availablely restored after transparency improved to higher than 0.6m. Compared to the period without submerged vegetation, the transparency of the water body was enhanced 70% and Chl. a concentration were reduced 50% correspondingly.

Keywords: Urban ponds; vegetation restoration; transparency; light compensation depth

我国城市湖泊退化问题日趋严重, 近年来尽管严格控制点源污染, 而高强度的非点源(NPS)仍使得大量城市湖泊已处于富营养状态, 植被消失, 生态系统退化, 功能丧失, 严重损害了湖泊价值^[1]. 如杭州的西湖, 将湖体外源磷控制在 0.65 g/(m²·a) 以下, 但夏季常暴发蓝藻水华, 透明度 0.5 m 左右^[2]; 南京玄武湖 20 年来出现富营养问题, 1998 年清淤后富营养问题依然严重. 我国城市湖泊多以小型为主, 多数水面积在 10 hm² 以下, 较低的环境缓冲力和较强边际效应使得湖泊生态系统极其脆弱. 水生植被保持生态系统健康的功能已被证实^[3,4], 而且旅游景区水体恢复水生植被有利于增大景区容量和提高景观价值^[5]. 前人从多种途径研究证明: 去除和削弱环境胁迫因子是恢复沉水植被及其生态系统结构与功能的重要手段. 合田健提出光补偿深度的概念, 认为水下光照是沉水植物生存的必要条件^[6]; 任久长等等制定光补偿深度与透明度的回归方程, 把限制沉水植物生存的光因子与透明度结合起来, 更具操作性^[7]; Vanden Berg 等认为水下光照时数是沉水植物生长的限制性因子^[8]. 由此可见, 生物和非生物悬浮颗粒影响水下有效光合辐射是限制沉水植物生长的关键因子之一. 国内生态修复研究主要针对太湖、滇池等大型湖泊, 而忽视了对城市小

* 国家“973”项目(2002CB412307)资助. 2005-05-31 收稿; 2005-10-24 收修改稿. 陈灿, 男, 1972 年生, 博士.

** 通讯联系人

型水体的研究. 城市水体边际效应强, 对环境污染的缓冲力弱, 和大型湖泊相比有其特殊性. 而应用漂浮植物快速提高透明度, 调节水下光照条件, 恢复沉水植被, 修复城市小型湖泊生态系统的研究较少. 此问题对于解决城市小型湖泊生态系统退化问题很有意义. 本研究选取一个小型城市湖泊月亮湾为对象, 开展透明度调节与沉水植被恢复野外现场研究, 为城市小湖泊恢复沉水植被、重建并长期保持健康生态提供实用型技术指导.

1 材料与方法

1.1 试验区情况

南京市仙林大学城内人工湖泊月亮湾, 面积 3000 m², 最大水深 2.3 m, 平均水深 1.5 m, 水位变化 ±0.1 m, 容积约 4500 m³. 水源为学生生活区的地表径流和降水, 径流区面积 1.5 hm², 入水量约 10000 t/a, 无工业和生活污水的污染. 近年来, 虽严格控制点源污染, 水质仍恶化, 达富营养水平(表 1), 沉水植物消失, 每逢春夏暴发蓝绿“藻华”, 景观效果极差, 散发恶臭, 严重影响周边生态环境和景观.

表 1 月亮湾水质指标¹⁾
Tab. 1 The water quality of Moon-pond

水样	SD	DO	COD	TP	TN	NH ₄ ⁺ - N
1	40	6.35	11.26	0.16	2.9	0.45
2	40	6.75	11.94	0.18	3.0	0.45
平均植	40	6.55	11.6	0.17	2.95	0.45

1) 透明度单位为 cm, 其他均为 mg/L.

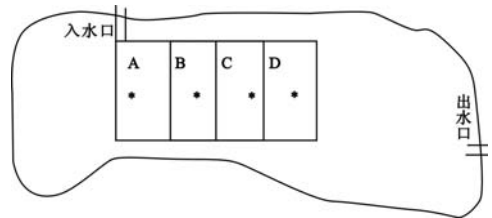


图 1 月亮湾试验区示意图

Fig. 1 Sketch-map of the test area in Moon-pond

1.2 引种植物及来源

物种选择地方种, 菹草 (*Potamogeton crispus*)、轮叶狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum*)、伊乐藻 (*Elodea nantali*)、刺苦草 (*Vallisneria spirulosa*)、大茨藻 (*Najas marima*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*), 植物来源主要是太湖及南京周边河道.

1.3 实验设计与方法

采用围隔在湖泊的中设定 A、B、C、D 四个试验区(图 1), 规格 10 × 30 m². 实验分三个阶段: 2003 年 3 月 - 8 月, 沉水植被直接恢复; 8 月 - 10 月, 透明度调节; 10 月 - 2004 年 1 月, 沉水植被重建. 凤眼莲改善透明度实验用外裹防雨布的泡沫控制凤眼莲生长范围. 实验期间进行监测: 透明度、水温、pH、TN、TP、COD、Chl. a 浓度、浮游植物密度. 检测方法参照《水和废水检测分析方法》^[9] 采用 A 类方法: 透明度: 塞氏盘法; COD_{Cr}: 高锰酸钾法; TP: 钼锑抗分光光度计法; TN: 钼锑抗分光光度计法; Chl. a 浓度: 丙酮法; 藻类种群调查: 显微镜计数筐法. 沉水植被恢复调查采用宏观形态学指标(如: 生长状况与生存状态)评价, 恢复等级采用任久长等采用的群落级、种群级分类. 差异性检验采用 ANOVA 分析方法.

2 结果与讨论

2.1 沉水植被直接恢复

实验中引种各种沉水植物见表 2, 经记录和观察, 直接引种试验沉水植被恢复没有成功. 原因是 2003 年 4 月 - 8 月, 透明度在 0.5 m 以下, 最低 0.2 m. TN、TP 浓度较高, 随水温升高, 区内藻类暴发, Chl. a 浓度最高达 289.7 μg/L, 根据任久长等光补偿深度与透明度的回归方程, 各区的平均补偿深度在 0.98 m 左右, 均小于水深. 浮游藻类除造成光学衰减系数的增加外, 还由于色素的吸收引起光合有效辐射的衰减^[10], 同时浮游藻类与沉水植物在光能竞争中占据优势. 原因有二: 藻类漂浮水面在光能获取上处于生态位优势; 蓝、绿等浮游藻类的叶绿体光反应中心的天线色素分子数是高等植物的数十倍^[11]. 实验过程中也观察到: 藻类暴发频繁, 水体透明度低, 沉水植物生长势差.

表2 实验三个阶段的植物引种方案¹⁾

Tab.2 The test plan of aquatic macrophytes incitation in the three test phases

时间(年.月.日)	A	B	C	D	
第一阶段	2003.2.5	菹草(3kg)	菹草(3kg)	菹草(3kg)	空白(CK)
		伊乐藻(3kg)	伊乐藻(3kg)	伊乐藻(3kg)	
第二阶段	2003.7.5	苦草(3kg)	苦草(3kg)黑藻(+)	苦草(3kg)	
		大茨藻(+)	大茨藻(+)	大茨藻(+)	
第三阶段	2003.8.5	凤眼莲(0.5)	凤眼莲(0.3)	凤眼莲(0.1)	空白(CK)
	2003.10.5	狐尾藻(+)	狐尾藻(+)	狐尾藻(+)	
	2003.11.5	菹草鳞芽 30 枚	菹草鳞芽 30 枚	菹草鳞芽 20 枚	空白(CK)
	2004.1.5	伊乐藻(2kg)	伊乐藻(2kg)	伊乐藻(2kg)	空白(CK)

1) 为做标记的均为植株鲜重(kg)为生物量;(0. *)表示引种盖度;(+)表示引种植物生物量在1kg以下。

2.2 透明度生物调节

2003年8月5日引种凤眼莲(表2)到月末,各围区间透明度无明显差异($P=0.671 > 0.05$),9月初开始出现差异,盖度达超过0.3的A、B区迅速提高,透明度的改善与盖度存在一定的正相关性,且 R^2 有随时间先增大后减小的趋势(表3)。原因与凤眼莲吸收营养盐和释放克藻物质抑制浮游藻类的繁殖^[12];且凤眼莲的克藻物质可能存在浓度阈值,盖度大的区域效快达到效应浓度有关。

表3 透明度(m)与凤眼莲盖度变化关系¹⁾

Tab.3 The variations of transparency on condition of different covered of *Eichhornia crassipes*

盖度	8月上旬	中甸	下旬	9月上旬	中甸	下旬	10月上旬	中甸	下旬	11月上旬	中甸	下旬
0.5	0.25	0.35	0.55	0.61	0.71	0.97	0.85	0.95	-	1.04	1.22	1.34
0.3	0.22	0.33	0.53	0.50	0.53	0.63	0.65	1.08	-	0.99	1.18	1.39
0.1	0.22	0.25	0.55	0.43	0.35	0.38	0.42	0.68	-	0.68	0.78	1.00
0	0.23	0.28	0.28	0.33	0.30	0.32	0.35	0.40	-	0.41	0.42	0.54
R^2	0.27	0.82	0.55	0.97	0.99	0.98	0.99	0.69	-	0.87	0.85	0.75

1) 透明度为10d内测试值的平均, R 为同时期透明度与盖度相关系数。

2.3 透明度调节后植被恢复

2003年10月后,透明度稳定在60cm以上,开始沉水植物引种,随后的跟踪监测中发现引种植物能存活、生长。2004年3月调查发现:除D区外,均形成了菹草+伊乐藻+狐尾藻群丛。D区没有引种漂浮植物,但其透明度也有所提高,推测与水温随气温下降,微生物活动减少有关。

2.4 沉水植被对水生态的修复与稳定作用

沉水植被恢复后(2004年3月)平均透明度与上年同期(2003年3月)相比,提高60%,恢复后各试验区透明度存在差异显著($P=0.002 < 0.05$),恢复前各试验区透明度差异不显著($P=0.099 > 0.05$)。说明沉睡植被恢复能显著改善水体透明度,保证水下有效光合辐射的分配,维持沉水植物的生长。植被恢复区水体叶绿素a浓度比上年同期降低50%(表4),和对照D

表4 比较植被恢复前后同期透明度和Chl. a浓度月平均值的变化

Tab.4 The compare of transparency and Chl. a before and after submerged vegetation restored

透明度(m)			Chl. a 浓度($\mu\text{g/L}$)		
2003年3月	2004年3月	升幅	2003年3月	2004年3月	降幅
A 0.47	0.85	79%	71.1	33.7	52.7%
B 0.49	0.94	90%	69.2	32.3	53.3%
C 0.47	100	110%	67.5	21.0	68.9%
D 0.48	0.50	4.9%	68.9	56.1	37.3%

区相比也有明显的降低,说明植被恢复对于控制浮游藻类密度有显著效果,原因一方面沉水植物通过资源的竞争和化感作用抑制了藻类的繁殖^[12,13],另一方面是沉水植物的发育为浮游动物提供栖息、繁殖的场所和条件,通过下行控制理论控制浮游植物种群的发育^[14,15]。随着沉水植被的恢复和植物进入生长期,水体总氮和总磷的浓度逐步降低,而无植被区水体总氮和总磷的浓度却随这水温上升而升高。原因:沉水植物拦截外源营养,积累 N、P,阻止底泥中化合物的释放,增强底质稳定性,减少了营养物质的循环速率。

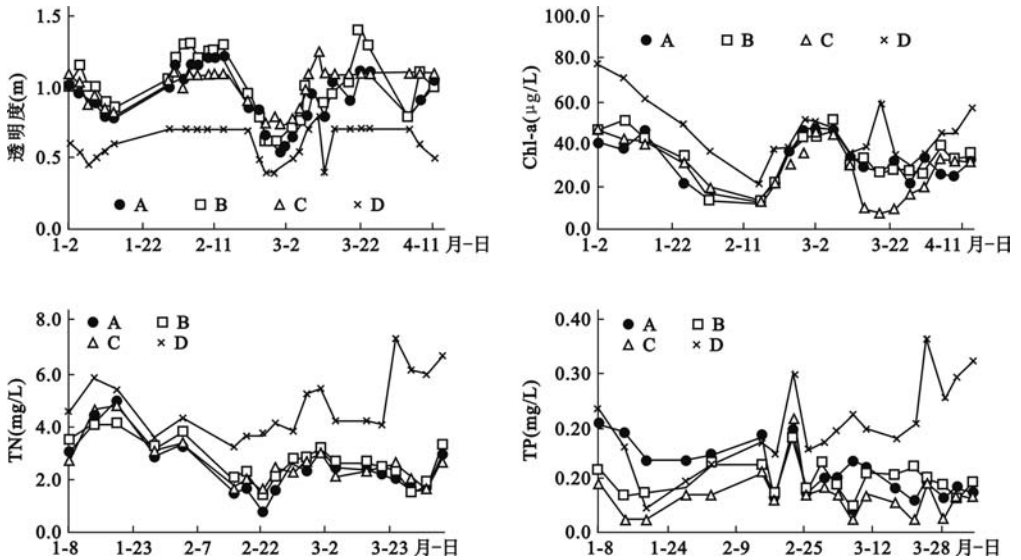


图2 沉水植被恢复期各区透明度(m)、Chl. a($\mu\text{g/L}$)、TN(mg/L)和TP(mg/L)浓度的动态变化
Fig. 2 The variations of transparency, and Chl. a, TN and TP concentration in test zones with reconstructing of submerged vegetation

在后续的研究和调查中发现:2004年冬季和2005年春季原实验区仍保持菹草+伊乐藻+狐尾藻群落,水体清澈,过去有的难闻气味消失。2005年夏季引种成功了微齿眼子菜和黑藻种群,水体出现了各种鱼虾和大型底栖动物如环棱螺和耳萝卜螺等,生物和景观多样性等生态指标趋向良性发展。现在,原实验区水体——月亮湾已成为广大师生课余闲暇时的休闲处。

3 结论

(1)在城市小型湖泊中应用凤眼莲可有效改善透明度,透明度改善后(月平均透明度达到0.6 m左右),沉水植被可以有效恢复,与恢复前相比可稳定提高水体透明度70%,降低水体Chl. a浓度50%,沉水植被的盖度与水体的透明度有一定的正相关性,与Chl. a浓度有一定反相关性。

(2)在生态系统退化的城市小型湖泊中,可以通过夏季短期大量放养大型漂浮植物,控制藻华暴发,调节透明度,降低氮磷浓度,先恢复冬季型水生植被,再恢复夏季型植被,从而修复水生生态系统,恢复城市小型湖泊的生态功能。

(3)城市小型湖泊生态修复是一个长期的系统的工程,本实验只是初步恢复了沉水植被,对于植被的更新,系统环境容量,外源污染负荷,外来物种的迁入,生态系统的可持续演替等,仍需进一步研究。

4 参考文献

- [1] 杨柳, 马克明, 郭庆海等, 城市化对水体非点源污染的影响. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
- [2] 马玖兰. 西湖引流钱塘江水9年后的水质分析. 环境污染与防治, 1996, 18(5): 31-46.
- [3] Ellen van Donk, Wouter J van de Bund. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto-

- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany*, 2002, **72**: 261-274.
- [4] Horppila J & Nurminen L. The effect of an emergent macrophyte (*Typha angustifolia*) on sediment resuspension in a shallow north temperate lake. *Freshwater Biology*, 2001, **46**: 1447-1455.
- [5] 张运林, 陈伟民, 杨顶田等. 天目湖水环境与渔业生产及旅游发展的关系. *生态科学*, 2003, **22**(3): 271-274.
- [6] 合田健. 水环境指标. 北京:中国环境科学出版社, 1989:262-269.
- [7] 任久长, 周红, 孙亦彤. 滇池光照强度的垂直分布与沉水植物的光补偿深度. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, **33**(2):211-214.
- [8] Van den Berg M S, Coops H, *et al.* Competition between *Chara aspera* and *Potamogeton pectinatus* L. as a function of temperature and light. *Aquat Bot*, 1998, **60**: 241-250.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法. 第4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 张运林, 秦伯强. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响. *水科学进展*, 2004, **25**(5): 615-620.
- [11] 武维华. 植物生理学. 北京:科学出版社, 2003:122-124.
- [12] Jiang X, Xu S F, Martens D, *et al.* Polychlorinated organic contaminants in waters, suspended solids and sediments section, Yangtze River. *China Environ Sci*, 2000, **20**:193-197.
- [13] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M. Algal growth inhibition effects and inducement modes by plant-producing phenols. *Water Research*, 2001, **35**(7):1855-1859.
- [14] 王海珍, 陈德辉, 王全喜等. 水生植被对富营养化湖泊生态恢复的作用. *自然杂志*, 2002, **24**(1): 33-36.
- [15] 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. *应用生态学报*, 2003, **14**(8):95-99.