

富营养化水体的水生植物净化试验研究*

童昌华^{1**} 杨肖娥¹ 濮培民^{1,2}

(¹ 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; ² 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

【摘要】 利用水生植物净化和底泥遮蔽的方法对养鱼池的富营养化水体进行控制研究. 结果表明, 金鱼藻等6种水生植物对水中总氮、总磷和硝态氮有较好的去除效果, 而以狐尾藻和微齿眼子菜两种效果最好, 1个月后对总氮的去除率分别为83.84%和77.54%, 对硝态氮的去除率分别为95.85%和90.65%, 磷的去除率都达到了91.7%. 但对氨氮的去除效果稍差, 1个月时去除效果只有14%~70%. 底泥进行塑料遮蔽处理后在前期(15~20 d)能控制底泥中营养盐的释放, 但不能保持长久; 并在后期表现出“补偿效应”. 试验结果还表明, 水生植物能有效提高水体透明度和水体观感, 但对改善COD和DO的效果不明显.

关键词 富营养化 植物修复 底泥 水生植物

文章编号 1001-9332(2004)08-1447-04 **中图分类号** X173, X171.4 **文献标识码** A

Purification of eutrophicated water by aquatic plant. TONG Changhua¹, YANG Xiao e¹, PU Peimin^{1,2}
(¹ College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; ² Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(8): 1447~1450.

In this study, aquatic plants were used to control the pollution of eutrophicated water. The results showed that aquatic plants had a higher ability to remove total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and nitrate nitrogen. Among them, foxtail alga (*Myriophyllum verticillatum*) and grain leaf pondweed (*Potamogeton maackianus*) could effectively remove TN (83.84% and 77.54%), TP (91.3%) and nitrate nitrogen (95.85% and 90.65%), but had no significant effect on removing ammonia nitrogen (only 14% to 70%). Sediment shielded by plastic could prolong the release of the nutrients from it for 15 to 20 days, and show the compensation effect later. The results also showed that aquatic plants could greatly improve the transparency of water, but could not improve the COD and DO of water effectively.

Key words Eutrophication, Phytoremediation, Sediment, Aquatic plant.

1 引言

近年来城市环境污染加剧, 一些湖泊水体水质恶化, 大部分城市湖泊水体已出现富营养化. 国内外对控制湖泊水体富营养化问题已进行了较多的研究和报道^[1~6], 试图用不同的方法进行控制, 包括物理疏浚、生态工程^[12]等.

过去由于对富营养化的防治措施都集中在理化方法和工程措施, 对利用生态学方法, 即从生态系统结构和功能的调整来进行治理很少注意. 20世纪70年代以来不少学者强调了生物的作用, 提出了生物操纵(biomanipulation)这一名词. 这种观点强调整个生态系统的管理, 从营养环节来控制富营养化. 水生高等植物和藻类在光能和营养物质上是竞争者, 适当恢复水生高等植物, 从而抑制浮游植物的生长, 对改进水质是有利的, 而且水生高等植物易于收获和利用, 是防止湖泊富营养化的有效措施. 实验证明, 水生植物修复对去除氮、磷具有明显的效果^[7~11], 可用于控制湖泊富营养化. 应用水生植物和物理措

施相结合的方法来控制富营养化水体报道尚很少. 本研究采用水生植物净化和底泥遮蔽相结合的方法, 对人工设置的污水系统进行控制, 以探索治理湖泊水体富营养化的更有效方法, 为今后实地工程示范提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 供试材料

水生植物包括金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、微齿(禾叶)眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、苦草(*Vallisneria spiralis*). 以上植物中金鱼藻、微齿眼子菜、马来眼子菜和苦草均取自江苏太湖, 其他采自浙江杭州郊区. 2002年10月25日将水生植物从湖中取来, 集中放养到本试验基地的池塘中进行驯养适应, 于11月19日将水生植物移植到试验用的水桶中, 并在自然条件下越

* 国家科技部中澳合作项目([2002]1168)和国家教育部重点资助项目(2003-58).

** 通讯联系人.

2003-05-19 收稿, 2003-09-09 接受.

冬(历时2个月). 试验期间通过加自来水来补充蒸发和蒸腾所耗的水分, 以保持容器中的水位. 底泥取自杭州市西湖湖底, 污水则取自浙江大学华家池的养鱼池中.

2.2 试验方法

试验设在带有玻璃棚顶的网室里, 相当于露天条件下的光照和温度, 但不会被淋雨. 采用75 L的白色半透明水桶, 桶的高度为55 cm, 每桶盛装湿润底泥10 kg, 厚度约10 cm, 再加入部分污水后种养水生植物, 然后将污水加满水桶, 因此试验条件的水深为45 cm. 经测定, 试验之前污水中的总氮为 4.282 mg L^{-1} , 硝态氮为 2.708 mg L^{-1} , 氨氮为 0.926 mg L^{-1} , 总磷为 0.027 mg L^{-1} , COD为 15.96 mg L^{-1} , DO为 8.7 mg L^{-1} , pH为7.9. 从这些指标来判断, 此污水属于富营养化水体.

试验采用6种水生植物进行对比, 对底泥采取了裸露和遮蔽两种不同处理. 底泥裸露就是将底泥直接装入水桶, 然后加入污水; 底泥遮蔽就是将底泥用黑色塑料袋先包好, 然后放入桶中, 再刺破塑料袋, 种上水生植物, 对照同样刺破若干小孔, 但不种植物.

试验开始后每隔一定时间测定水中与富营养化相关的参数(包括总氮、总磷、硝态氮、氨氮、COD、DO、SD等), 每处理3个重复(桶). 总氮和硝态氮采用紫外分光光度法测定, 总磷采用钼锑抗分光光度法测定, 氨氮用纳氏试剂光度法测定, COD用改良碱性高锰酸钾法测定, DO、SD(透明度)等用仪器现场测定.

3 结果与分析

3.1 水生植物对不同营养盐的去除效果

3.1.1 水生植物对水中总氮的去除效果 从图1看出, 水生植物能有效去除污水中的氮, 使水中总氮明显下降, 其中以狐尾藻和微齿眼子菜的效果最好, 处理30 d后分别只有对照的16.16%和22.46%(图1), 去除率达83.84%和77.54%. 不同水生植物对水中氮的去除效果有差别, 并且其作用随时间的推移而逐渐显现. 经过2个月, 除漂浮植物凤眼莲以外, 其它沉水植物对总氮都有较好的去除效果.

3.1.2 水生植物对水中总磷的去除作用 水生植物对磷的去除效果较明显, 1个月后总磷都降低到较低水平. 狐尾藻和微齿眼子菜的磷去除率达到91.7%. 虽然对照也随着时间推移在降低, 但在整个过程中对照始终高于其他各个处理, 尤其是前20 d(图2). 由于试验水中总磷含量比较低, 因此即使在较低含磷量时, 水生植物也能较好地去除水中的总磷.

3.1.3 水生植物对水中硝态氮的去除作用 水生植物对硝态氮的去除效果最明显, 30 d以后狐尾藻和微齿眼子菜的硝态氮只有对照的4.15%和9.35%(图3), 去除率达95.85%和90.65%. 这可能是由

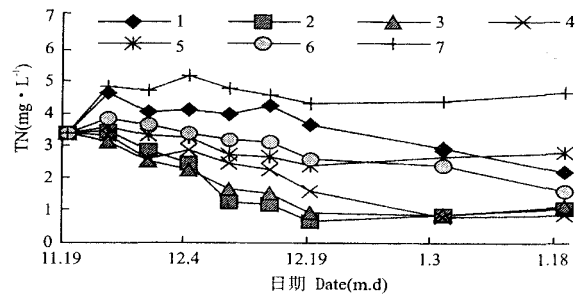


图1 水生植物对富营养化水中总氮的去除效果

Fig. 1 Effect on total nitrogen removal from eutrophicated water by aquatic plant.

1) 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*, 2) 狐尾藻 *Myriophyllum verticillatum*, 3) 微齿(禾叶)眼子菜 *Potamogeton maackianus*, 4) 马来眼子菜 *Potamogeton malayanus*, 5) 凤眼莲 *Eichhornia crassipes*, 6) 苦草 *Vallisneria spiralis*, 7) 污水污泥 Polluted water with sediment. 下同 The same below.

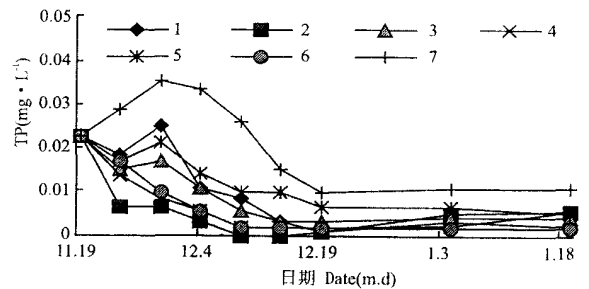


图2 水生植物对总磷的去除效果

Fig. 2 Effect on total phosphorus removal from eutrophicated water by aquatic plant.

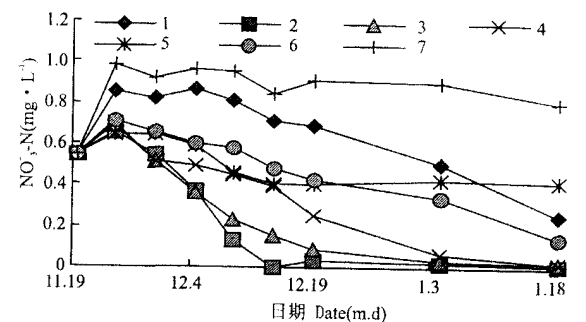


图3 水生植物对硝态氮的去除效果

Fig. 3 Effect on nitrate nitrogen removal from eutrophicated water by aquatic plant.

于硝态氮是氮循环中微生物等作用的直接底物, 是最活跃的氮的形态, 而总氮的变化还取决于氮的其他形式. 随着时间延长, 2个月后, 除凤眼莲外其他几种沉水植物的效果也比较明显.

3.1.4 水生植物对水中氨氮的作用 水生植物对氨氮虽然也有一定的去除作用, 但与总氮、总磷以及硝态氮相比, 其作用效果相对较差, 去除率只有14%~70%. 这可能与冬季低温、一些细菌的活跃程度下降有关. 在第2个月对照和凤眼莲两个处理的氨氮去除率不但没有下降, 反而上升, 而其他处理则有表现出一定的效果, 尤其是金鱼藻和狐尾藻两个处理,

与这两种植物在冬季仍保持生长有关.

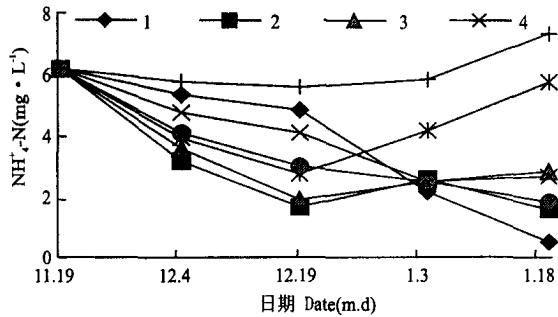


图4 水生植物对氨氮的去除作用
Fig.4 Effect on ammonia nitrogen removal from eutrophicated water by aquatic plant.

3.2 水生植物对其他水质指标的影响

水生植物能快速提高水体透明度,植物种养后2d就开始见效,4~8d就能使污水澄清见底(水体透明度从20cm提高到45cm.因试验容器所限,45cm已见底)而对对照需30d.但对COD及DO的影响没有明显规律性(表1、2).生长前期水生植物能降低COD,但后期又有所反弹,这主要是由于水生植物虽然去除了水中的营养物质,但整个系统中的有机物并没有消除,只是发生了转化,后期水生植物的老叶分解会产生新的有机物质,因此COD又回升.总体来看,金鱼藻对COD的去除效果最好.由于水生植物的生长需要消耗氧气,而另一方面水生植物的光合作用又能释放出氧气,因此水中溶解氧的高低主要取决于水生植物的生长活动.不同水生植物

表1 水生植物对COD的影响

Table 1 Effect on COD of aquatic plant (mg L⁻¹)

植物 Plant	日期 Date(m. d)					
	11. 19	11. 29	12. 09	12. 19	01. 04	01. 19
CE	15.96	2.86	13.00	7.92	7.04	7.44
MY	15.96	4.84	11.80	11.22	9.02	12.10
POB	15.96	5.28	11.80	10.12	9.90	11.00
POM	15.96	4.62	11.80	7.04	13.42	9.02
EI	15.96	4.84	10.00	10.12	10.34	10.78
VA	15.96	4.40	10.40	9.90	8.80	10.34
PM	15.96	11.71	12.00	9.90	6.82	11.00

CE:金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*, MY: 狐尾藻 *Myriophyllum verticillatum*, POB: 微齿(禾叶) 眼子菜 *Potamogeton maackianus*, POM: 马来眼子菜 *Potamogeton malaianus*, EI: 凤眼莲 *Eichhornnia crassipes*, VA: 苦草 *Vallisneria spiralis*, PM: 污水底泥 Polluted water with sedimen. 下同 The same below.

表2 水生植物对DO的影响

Table 2 Effect on DO of aquatic plant (mg L⁻¹)

植物 Plant	日期 Date(m. d)					
	11. 19	11. 29	12. 09	12. 19	01. 04	01. 19
CE	8.70	5.60	6.25	5.50	8.35	6.80
MY	8.70	5.17	7.60	2.30	6.90	5.20
POB	8.70	5.85	5.70	5.00	8.40	7.10
POM	8.70	5.60	6.30	5.30	7.50	6.70
EI	8.70	4.43	4.93	4.40	5.60	4.40
VA	8.70	5.90	5.90	5.20	7.50	6.40
PM	8.70	6.60	6.13	5.30	5.40	5.00

以及在不同时期表现都不同,总的来说,金鱼藻和微齿眼子菜的增氧效果好,而凤眼莲始终低于对照和其他水生植物,这也可能是沉水植物和漂浮植物的差异所在.此外试验中水体处在非流动状态,也影响了水中的供氧水平.

3.3 底泥处理后营养盐释放的动态变化

从整个过程来看,底泥遮蔽在前期(15d内)能延缓底泥营养盐中总氮、硝态氮(NO₃⁻-N)的释放,但不能长期有效地抑制其释放.由于有刺破的小孔与污水之间进行交换,前期虽然抑制了营养盐的释放,后期仍不断向水中释放营养盐,而且似乎有弥补前期释放不足而加速释放的现象,出现“补偿效应”,且释放高峰向后推迟(图5).由于总磷和氨氮的含量相对较低,底泥遮蔽的影响效果不明显.

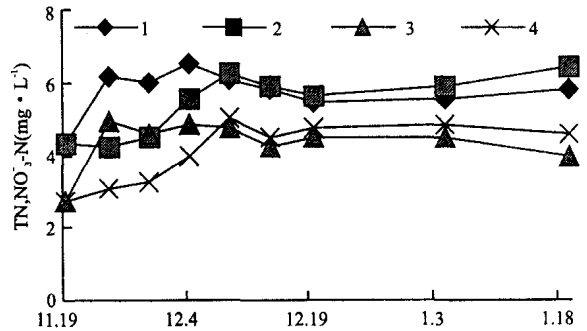


图5 底泥遮蔽对TN、硝态氮释放的作用效果
Fig.5 Effect of sediment shielded on the release of TN and nitrate nitrogen.
1) 底泥裸露 Naked sediment (TN), 2) 底泥遮蔽 Shielded sediment (TN), 3) 底泥裸露 Naked sediment (NO₃⁻-N), 4) 底泥遮蔽 Shielded sediment (NO₃⁻-N).

在底泥处理的基础上种植水生植物,能降低水中营养盐的浓度,但其变化规律与没有种水生植物的相似.与底泥遮蔽的方法相比,用种植水生植物的方法来降低水中营养盐的效果显然要好得多(比较图1~4和图5).这是因为底泥遮蔽只是暂时抑制了营养盐的释放,而种植水生植物则是把水中的营养物质转化为植物体内的营养物.

3.4 底泥处理对COD、DO的影响

底泥处理对COD的影响是:前期(20d内)底泥遮蔽的COD低于裸露,后期相反(表3);对DO的影响则是:前15d,底泥遮蔽的DO高于底泥裸露,之后又低于后者(表4).这表明,底泥遮蔽只能暂时缓解底泥中有机物的向外释放,并未去除有机物,因而在后期得到补充释放.而有机物的释放会消耗部分氧气,对DO的影响也就因此而产生.从本试验结果来看,采用底泥遮蔽的方法来控制水体富营养化的效果是有限的.

表3 底泥遮蔽对 COD 的影响

Table 3 Effect of sediment shielded on COD (mg L^{-1})

项目 Item	日期 Date(m. d)									
	11. 19	11. 24	11. 29	02. 04	12. 09	12. 14	12. 19	01. 04	01. 19	
底泥裸露 Naked sediment	15. 96	11. 22	11. 71	10. 40	12. 00	10. 40	9. 90	8. 82	8. 10	
底泥遮蔽 Shielded sediment	15. 96	8. 8	9. 04	10. 08	11. 80	13. 40	10. 78	9. 80	8. 48	

表4 底泥遮蔽对 DO 的影响

Table 4 Effect of sediment shielded on DO (mg L^{-1})

项目 Item	日期 Date(m. d)											
	11. 19	11. 21	11. 23	11. 25	11. 27	11. 29	12. 04	12. 09	12. 14	12. 19	01. 04	01. 19
底泥裸露 Naked sediment	8. 70	4. 00	5. 50	6. 50	6. 37	6. 60	6. 20	6. 13	6. 90	5. 30	5. 40	5. 00
底泥遮蔽 Shielded sediment	8. 70	4. 90	6. 80	7. 50	7. 35	6. 60	6. 45	5. 80	5. 70	5. 10	5. 30	4. 80

4 讨 论

关于植物修复对富营养化水体的作用,有报道认为是由于水生植物利用发达的根系吸收水中的营养盐等物质(如凤眼莲在生长过程中需要大量的氮、磷营养物^[7]),对于富营养化水体起到明显净化作用.本研究开始时已处在低温的冬季,凤眼莲的生长处于越冬状态,很不活跃,但仍具有吸收营养盐的能力,净化效果明显.因此,去除氮、磷除了水生植物生长过程中吸收氮、磷营养物,还可能与其它因素如植物及其共生细菌的分泌物有关.本试验还表明,水生植物在冬季也具有净化水体的功能,而且生长旺盛的水生植物去除氮、磷的效果更好,如狐尾藻.

利用植物净化富营养化水体,对营养盐的去除效果不尽相同,而且因季节不同也有差别^[1,8].除了温度影响植物对营养盐的吸收外,在本试验中,不同植物之间差异也很大.在去除总氮、硝态氮等方面,狐尾藻、微齿眼子菜和马来眼子菜的效果比其它几种植物好,对 COD 的去除作用除金鱼藻外其他水生植物效果不明显.

李科德等^[2]认为,含氮有机化合物分解所产生的氨氮一部分通过植物吸收和挥发作用而去除,但大部分是通过硝化作用和反硝化作用的连续反应而去除.一旦这两个连续过程不能顺利进行,氨氮的去除效果就不理想.由于硝化细菌和反硝化细菌的数量和活跃程度与温度有密切关系,因此在冬季或低温时节氨态氮的去除效果会相对差些.

结果表明,在冬季低温条件下,浮水植物凤眼莲易遭受冻害,叶片枯萎,净化水质效果受到影响,马来眼子菜和苦草在冬天也不能生长,而金鱼藻、微齿眼子菜和狐尾藻等沉水植物不易遭受冻害,即使在寒冷季节(气温低于零度,水结冰)对去除水中营养

盐、净化水质也有一定的作用.

参考文献

- Hu C-H(胡春华), Pu P-M(濮培民), Wang G-X(王国祥), et al. 1999. Effects and mechanism on purifying lake water quality in winter. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), **19**(6): 561 ~ 565 (in Chinese)
- Li K-D(李科德), Hu Z-J(胡正嘉). 1995. Mechanism of sewage purification by reed bed system. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), **15**(2): 140 ~ 144 (in Chinese)
- Li W-C(李文朝). 1997. Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an atrophic lake. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), **17**(1): 53 ~ 57 (in Chinese)
- Quo J(郭静), Ruan Y-L(阮宜纶). 1995. Purification capacity of aquatic plants in treatment of geothermal wastewater. *Acta Sci Circums* (环境科学学报), **15**(2): 251 ~ 255 (in Chinese)
- Reuter J E, et al. 1992. The use of wetlands for nutrient removal from surface runoff in a cold climate region of California: Results from a newly constructed wetland at Lake Tahoe. *J Environ Man*, **36**(1): 35 ~ 53
- Schnoor JL, Licht LA, McCutcheon SC, et al. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminations. *Environ Sci Technol*, **29**: 318 ~ 323
- Tang S-Y(唐述虞), Shi J-W(史建文), et al. 1994. Application of *Eichhornia crassipes* on treatment of refinery wastewater. *Acta Sci Circums* (环境科学学报), **15**(1): 98 ~ 104 (in Chinese)
- Tong C-H(童昌华), Yang X-O(杨肖娥), Pu P-M(濮培民). 2003. Effect on polluted water decontaminated by hydrophytes in low temperature. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), **17**(2): 159 ~ 163 (in Chinese)
- Wu Z-B(吴振斌), Qiu D-R(邱东茹), et al. 2001. Studies on eutrophicated water quality improvement by means of aquatic macrophytes. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), **19**(4): 299 ~ 303 (in Chinese)
- Wu Z-B(吴振斌), Qiu D-R(邱东茹), et al. 2003. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(8): 1351 ~ 1353
- You W-H(由文辉), Liu S-Y(刘淑媛), Qian X-Y(钱晓燕). 2001. A study on polluted water body purification with economical aquatic plants. *J East China Normal Univ* (Nat Sci) (华东师范大学学报(自然科学版)), (1): 99 ~ 102 (in Chinese)
- Zhang SZ, Pu PM, Wang GX. 1998. Physical-ecological engineering for purifying water quality in alga-type eutrophic lake-reconstruction of macrophytes in Wulihu of Taihu lake, China. *J Lake Sci*, **10** (supp.): 529 ~ 537

作者简介 童昌华,男,1963年生,博士生,讲师,主要从事逆境生理、环境生态、水污染治理等研究和管理工作,发表论文 30 篇. E-mail: tongch2001@yahoo.com