

北京什刹海生态修复试验工程*

屠清瑛¹ 章永泰² 杨贤智²

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008; 2:上海佛欣爱建河道治理有限公司,上海 200031)

提 要 什刹海是北京市一个小型浅水城市风景游览的富营养湖泊。生态恢复试验工程以物理除藻为前提,通过实施基底修复而后开展水体充氧等手段,达到恢复水生植被的根本目的。应用的修复技术有(1)臭氧/超声波除藻(2)基底修复(3)水下曝气充氧及冬季冰下底部充氧(4)上游区复合生物浮床(5)冰下水光补偿技术(6)高等水生植物栽植与优化配置(7)水生植物调控与机械割草;(8)水质净化与保洁管理。工程实施近1年(2001年8月-2002年6月)后效果明显,总氮、总磷分别下降了4.74 mg/L和0.45 mg/L,去除率达到79%和91%,什刹海的水质也由V类上升为IV类。

关键词 什刹海 生态修复 生态工程

分类号 Q147

什刹海作为北京市城市中心风景游览湖泊,历史悠久。沿湖居民密集,市场繁荣,娱乐活动众多,生活污染严重,水体氮磷负荷逐年增加,污染淤积日盛,湖泊富营养化发展迅速。2001年夏天,蓝藻“水华”暴发,湖水发臭,鱼类大量死亡。根据2001年夏实测资料(表1)证实,生态修复试验工程前,什刹海是一个严重富营养水体。

表1 试验开始前什刹海(后海和前海)的水质状况*

Tab.1 Water quality of Lake Shishahai (Houhai and Qianhai) before test

湖区	pH	SS	DO	透明度(m)	COD _{Mn}	BOD ₅	氨氮	亚硝酸盐氮	硝酸盐氮	Chl.a	总氮	总磷
后海	8.42	46	6.32	0.21	19.9	12.5	1.22	0.015	0.83	0.451	6.5	0.68
前海	8.62	35	4.62	0.26	17.0	11.5	0.83	0.03	0.79	0.168	5.14	0.44

* 除pH为无量纲值,透明度单位为(m)外,其余项目单位均为(mg/L)。表中数据为2001年6月28日、7月23日和8月2日的平均值或单次测值。

1 试验研究背景

1.1 水质

于2001年8月年6月在北京什刹海的后海(水域面积18.4 km²,平均水深1.5 m)进行试验,对照区为前海。治理试验前什刹海水质共进行了3次监测,其中2001年7月23日还同步进行了底质及生物特征的采样。试验开始前什刹海的水质监测(表1)表明,2001年夏季什刹海超过V类水体的指标有BOD₅、氨氮、COD_{Mn}和总磷。如按照湖泊水库富营养化特定项目标准值评价,总氮、总磷、叶绿素a、透明度都严重超过V类水体标准,其中总磷、总氮、叶绿素a

* 国家可持续发展实验区科技示范项目。2003-10-04收稿,2003-12-21收修改稿。屠清瑛,女,1932年生,研究员。

含量均超过 V 类水体指标 3–10 倍 ,呈现严重富营养化状态.

1.2 生物

什刹海水体的浮游植物、浮游动物、底栖动物和微生物均呈现严重富营养化特征. 镜检显示 ,什刹海藻类种类和数量均很多 ,有蓝藻门、绿藻门、硅藻门、裸藻门、隐藻门、甲藻门等 ,优势种是水华微囊藻(*M. flos-aquae*) 铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*) 2001 年 7 月 ,前海对照区表层水体中藻类数据达 1506×10^4 个/L ,底层达 1856×10^4 个/L ,而后海东部和西部藻类数量分别达 2285×10^4 个/L 和 2972×10^4 个/L. 按照湖泊水库富营养化特定项目标准值评价^[1 2] ,叶绿素 a 含量已远远超过 V 类水体(0.065 mg/L) ,达 3–8 倍. 调查表明 ,什刹海根据 Koikwitz 和 Marson 提出的污水生物系统评价 ,什刹海的浮游生物多属于多污带物种^[2](表 2)

表 2 治理前什刹海浮游生物调查结果
Tab.2 Plankton investigated before engineering in Lake Shishahai

原生动物：半眉虫(<i>Idemioporys</i> sp.) 喇叭虫(<i>Stendor</i> sp.) 睥睨虫(<i>Askenasia</i> sp.) 双环栉毛虫(<i>Diadinium nasutum</i>) 浮游累枝虫(<i>Epistylis rotans</i>) 钟虫(<i>Vorticella</i> sp.)	
轮 虫	萼花臂尾轮虫(<i>Branchionus calyciflorus</i>) 角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i>) 剪形臂尾轮虫(<i>B. forficula</i>) 裂足臂尾轮虫(<i>B. diversicornis</i>) 曲腿龟甲轮虫(<i>Keretella volga</i>) 前节晶囊轮虫(<i>Asplanchna priodonta</i>)、顶生三枝轮虫(<i>Filina tenminalis</i>)、多肢轮虫(<i>Polyanthra</i> sp.)、变尾轮虫(<i>Trichocerca</i> sp.)、单趾轮虫(<i>Monostyla</i> sp.)
枝 角 类	短尾秀体蚤(<i>Diaphanosoma brachyurun</i>)、微型裸腹蚤(<i>Monina micrura</i>)
桡 足 类	广布中剑蚤(<i>Mesocyclops leuckarti</i>)

1.3 底泥

2001 年 7 月 23 日 ,对后海和前海的柱状底泥样进行分层分析 ,两海的底泥表面腐泥层厚度后海为 25 cm ,前海为 15 cm 左右 ,以下均为硬质底泥.测试结果表明 ,底泥总氮、总磷、有机质的含量很高 ,呈现严重富营养化特征(表 3)

表 3 后海和前海的底泥营养盐含量
Tab.3 Observed nutritional contents in sediments of Houhai L. and Qianhai L.

采样点		氨氮(mg/kg)	硝酸盐氮(mg/kg)	总氮(mg/kg)	总磷(mg/kg)	有机质(mg/kg)
后 海	0–10cm	70.9	0.41	3064.2	1413.1	7.94
	10–20cm	92.2	0.52	6131.4	1388.9	10.54
	20–30cm	103.3	1.08	3038.9	1425.5	7.20
	0–10cm	106.2	0.51	2892.5	1014.5	6.29
前 海	10–25cm	35.4	0.46	2336.3	1932.4	5.61

2 生态修复工程试验

2.1 臭氧/超声波除藻

分别于 2001 年 9 月 6–8 日和 14–20 日在什刹海后海实验区(50 m×50 m)进行了两次超声波/臭氧复合试验. 按每天作业 7 h 计. 臭氧/超声波试验证明对藻类有明显的去除作用.

当水中臭氧浓度 5 mg/L 时,1h 后藻类的去除率平均在 30%–50%左右;充入臭氧 2 h(浓度约 10 mg/L),藻类去除率平均在 80%左右. 试验结果证明,总磷也有明显的递减趋势. 但是,对 COD 的作用不甚明显.

2.2 曝气充氧

曝气充氧由自制移动式水质净化船和风动曝气装置两种设施进行. 鉴于后海是与前海连通的开放水域,经常受到水流动的影响,故选择后海的西北部(受水流影响相对小些)为重点试验区. 2001年7–8月,后海水体溶解氧和水温呈现明显的分层状况,即表层因藻类的光合作用,溶解氧饱和或过饱和,而光补偿层以下水体耗氧过程明显,溶解氧随水深逐渐减少,底层溶解氧小于 2 mg/L 或近为零. 8月22–9月13日实施了曝气充氧试验,累计总充氧量为 3240 kg,充氧的有效率达30%. 结果后海水体底部溶解氧含量有明显提高,1 m以下底部溶解氧平均提高2–3 mg/L. 其中,9月1日–5日,在试验区进行了重点曝气试验,该试验区的溶解氧分布与非曝气区呈现明显的不同,0.75–1.75 m水层曝气充氧的效果十分显著,各层水中溶解氧的增加量可达3–5 mg/L. 由于水质净化船在后海中的往复运行曝气,造成水层的对流交换条件,因此曝气充氧除造成下层溶解氧明显提高外,湖中藻类的数量也明显减少(图1),由大量藻类聚集而成的水华程度已大大减轻.

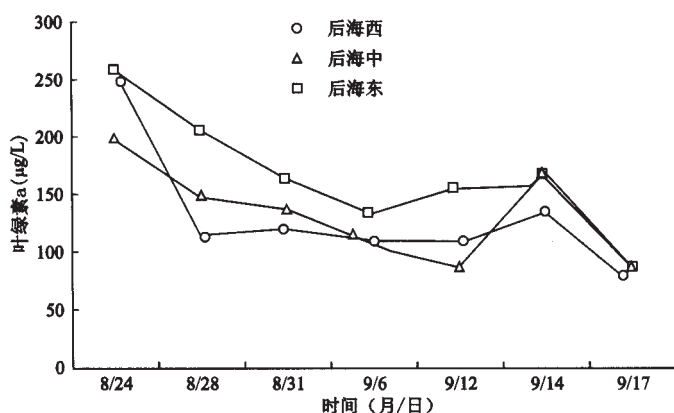


图1 试验期间后海叶绿素 a 指标的变化

Fig.1 Change of chlorophyll-a concentration within the test in Houhai L.

在什刹海后海治理中,安装了两台风动电力曝气机,带有 16 个园盘曝气头,全部设置在位于底泥层附近进行底层曝气,在曝气盘的水面顶部,安放了桔红色指示球标明曝气位置. 该风动电力曝气机,既解决了水体深层的曝气充氧问题,又在冬季结冰期进行冰层下的底泥修复工作,促使底部好氧细菌对腐殖淤泥的有机污染物进行生物降解,修复基质和底层水体生态环境.

2.3 生物浮床

什刹海是开放性水域,其上游来水系密云水库—怀柔水库—经京密引水渠道至昆明湖储水备放. 每年枯水期、丰水期,北京市水利部门以 0.1 m/s 的流速放水,来水污染严重. 2001 年 9 月为减轻上游来水的污染,在后海西的上游来水区构筑了生物浮床.

生物浮床呈四方体结构, $50\text{ m}^2 \times 1.2\text{ m}$, 表面以钢丝网覆盖, 两侧各有一个空心浮筒, 使其半沉浮于水体表层。沉于水中的框架内, 放置滤材及植株支撑物, 共分四层。下三层为硝化—反硝化—抑藻滤材, 最上层为植株根系支撑物并栽植高等水生植物。浮床上架设有风力发电曝气机和风动曝气机两种, 并带有若干曝气头沉于水下, 浮床底面装有纳米灯管, 由风力发电机提供水下照明能源。水体底层光照条件的改善, 有利于沉水植物、附植藻类的提早萌发、生长和繁衍, 极大地改善水底生态环境, 促进健康水生生态系统的恢复。生物浮床具有风动曝气、接触氧化、抑藻和提高水底光照强度等功能。

2.4 基底修复

基底修复的目的是去除高含量的有机污染物和有毒有害物质, 阻断内源污染, 为草籽的萌发、生长创造有利环境。什刹海基底修复试验使用的是微生物无机化减量技术, 该项技术由三部分主要内容组成: (1) 载体基材; (2) 土著复合菌群; (3) 高分子絮凝剂。本次试验工程中, 什刹海后海底泥有机质平均去除率达 15% 左右, 其中总氮 11%; 氨氮 14%; 总磷 21%。

2.5 水生植物的恢复

恢复试验是在底质修复的基础上, 采用人工修复和自然恢复两种方法实行。选择的先锋植物是在北京地区生长良好、具有很强净化能力的微齿眼子菜 (*P. Potamogeton maackianus*) 和菹草 (*Potamogeton crispus*) 等, 于 2002 年 2—3 月, 在基底已经修复的基础上进行, 5—6 月份, 高等水生植物群落覆盖度已达水域的 50% 以上, 抑制蓝藻“水华”形成的作用明显。鱼类、底栖动物和浮游动物种类和数量增加, 透明度提高, 水体感官性状明显好转。试验证明, 改善光照和溶氧条件, 人为扶持沉水植物的空间生态位, 使其成为优势种群, 能有效降低生物性和非生物性悬浮物浓度, 提高水体透明度, 为其它牧食类生物创造了良好的生境条件, 从而增加了水生生态系统修复的有效性。

2.6 沉水植物控制

沉水植物一方面有利于抑制浮游植物的异常增殖和控制湖泊富营养化的发展, 另一方面, 也因其生活周期较短, 后期植株的衰竭和腐烂, 容易造成水体的次生污染。因此, 适时适度的收割调控, 并将其茎、叶输出水体, 是有效削减氮磷、培育维护良好生态系统、促进健康水体形成的有力措施。什刹海的沉水植物控制主要采用机械收割。使用自主设计制造的水草收割船及牵引运输船和运草船, 实施割草工程。2002 年 5 月总计收割水草量约 150 t 左右。根据水草中含氮磷量(氮 0.464%, 磷 0.013%)计算, 试验工程从水体中输移出总氮约 0.696 t; 总磷 0.02 t。

3 试验研究效果

通过 10 个多月生态修复的试验研究, 什刹海水域的生态环境有了比较明显的改善。

3.1 水质变化

2001 年夏天, 什刹海总氮的平均水平在 6 mg/L 以上, 总磷位于 0.5 mg/L 左右。治理后这两项指标分别下降到 2 mg/L 及 0.2 mg/L 的范围内, 根据 2002 年 5 月 28 日北京市水利局对北京市中心城区的水质的监测结果(表 4), 2002 年 5 月后海总氮、总磷分别为 1.26 mg/L 以及 0.046 mg/L , 与治理前相比, 总氮下降了 4.74 mg/L , 总磷下降了 0.454 mg/L , 去除率分别达到了 79% 及 91%, 同时, 水体叶绿素-a 显著下降, 透明度明显上升。由此证明, 一年来的

治理试验研究具有明显的效果。其水质的总体评价水平为 IV 类 ,好于与其相邻的西海(劣 V 类)和前海(劣 V 类)水质 ,较治理前提高了一个等级。

表 4 后海水质监测结果(2002 年 5 月)
Tab.4 Observed water quality of Houhai L. on May, 2002

指标	pH	DO	氨氮	总磷	总氮	透明度	COM _{Mn}	叶绿素
后海	8.1	12.4	0.44	0.046	1.26	0.52	6.3	0.00134

* 除 pH 为无量纲数据 ,透明度单位为 m 外 ;其余项目单位均为 mg/L.

3.2 底质变化

2002 年 3 月进行的底质监测与试验研究前的监测点位置相同 ,结果表明 ,经过治理后的后海底泥中的有机质有一定下降 ,约降低 15% ;而且总氮、总磷均有所下降 ,本试验中 ,后海底泥中的总氮去除率约为 11% ,氨氮为 14% ,总磷约为 21%(表 5)。但是与对照区相比 ,效果不明显。

表 5 试验后底泥营养物质含量(2002 年 3 月)
Tab.5 Nutrient contents in sediment of Lake Houhai after test,May, 2002

采样点		氨氮(mg/kg)	总氮(mg/kg)	总磷(mg/kg)	有机质(mg/kg)
后 海	0-10cm	57.3	2713.3	1028.9	6.38
	10-20cm	80.6	5478.8	1067.4	8.93
	20-30cm	92.5	2729.4	1252.7	6.55
	0-10cm	107.1	2938.1	1129.8	6.58
前 海	10-25cm	54.9	2452.2	2001.4	5.73

3.3 生物种类变化

2002 年 5 月对后海水体中的浮游生物进行了监测(表 6)。从前后两次监测可以看出在什刹海后海出现的浮游生物中 ,浮游生物种群及结构发生了变化 ,多污带常出现的萼花臂尾轮虫及角突臂尾轮虫在治理后的检测中未发现 ,而中污带的曲腿龟甲轮虫等数量在增多 ,同时少污带中常出现的二刺异尾轮虫等种群开始出现。经统计 ,治理后 ,后海湖区又见到了 7 种以前未见到的浮游生物 ,这些新出现的物种主要是少污带及中污带常出现的物种^[2]。4 种原有多污

表 6 治理后什刹海浮游生物调查结果
Fig.6 Plankton investigated after engineering in Lake Shishahai

原生动物：普通表壳虫(<i>Arcella vulgaris</i> Erhenberg)、喇叭虫(<i>Stendor</i> sp.)、睥睨虫(<i>Askenasia</i> sp.)、双环栉毛虫(<i>Diadinium nasutum</i>)、冠砂壳虫(<i>Diffugia corna wallich</i>)、钟虫(<i>Vorticella</i> sp.)	
轮 虫	二刺异尾轮虫(<i>Trichocerca bitristata</i>)、长刺异尾轮虫(<i>Trichocerca cylindrica</i>)、剪形臂尾轮虫(<i>B. forficula</i>)、裂足臂尾轮虫(<i>B. diversicornis</i>)、曲腿龟甲轮虫(<i>Keretella volga</i>)、前节晶囊轮虫(<i>Asplanchna priodonta</i>)、顶生三枝轮虫(<i>Filina tenminalis</i>)、无常胶鞘轮虫(<i>Collotheca mutabilis</i>)、多肢轮虫(<i>Polyantra</i> sp.)、变尾轮虫(<i>Trichocerca</i> sp.)、单趾轮虫(<i>Monostyla</i> sp.)
枝 角 类	短尾秀体蚤(<i>Diaphanosoma brachyurum</i>)、长额象鼻蚤(<i>Bosmina longirosstris</i>)、微型裸腹蚤(<i>Monina micrura</i>)
桡 足 类	英勇中剑蚤(<i>Cyclops strenuous</i> Fischer)、广布中剑蚤(<i>Mesocyclops leuckarti</i>)

带常见的物种未检测到. 因此,从浮游生物种群在数量上的变化可以看出,后海的水体水质正向着良性生态的方向发展.

4 结语

近年来,湖泊水污染问题愈加严重.“十五”期间国家将重点对“三湖”进行综合治理,而在许多城市及周边地区,在人类活动影响下,这些湖泊最容易受到严重污染和富营养化的威胁.天然水体遭破坏以后,由于水体本身的多种状态,恢复到健康的水生态系统往往需要长期、不懈的努力^[3-5].在目前的经济条件下,重点开展重点水域的环境治理,是先行一步,同时也是为今后更大范围内恢复湖泊等地表水体良性生态提供技术经验.诚然,在目前的中国,这些尝试还是初步的,不仅有待于技术上进一步完善,同时也期待更多成功的湖泊治理个例出现.

致谢 治理试验前什刹海水质由北京市西城区环境监测站完成,底质及生物特征分别由地质矿产部天津市中心实验室、上海师范大学水生生物研究所采样分析测定.治理后期,2002年5月的后海水质资料主要由北京市水利局监测、提供,后海水体中的浮游生物监测由华东师范大学海洋河口研究所完成.参加本工程研究的还有朱萱高工、章宗涉教授、翁建华教授、吴开明工程师等,在此深表感谢.

参 考 文 献

- 1 刘健康. 高级水生生物学. 北京:科学出版社,1999
- 2 国家环境保护总局. 水和废水监测方法. 北京:中国环境科学出版社,1998
- 3 魏振枢. 环境水化学. 北京:化学工业出版社,2001
- 4 濮培民,王国祥,李正魁等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用. 湖泊科学,2001,13(3):193-203
- 5 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学,1997,9(2):97-104

Approaches to the Ecological Recovery Engineering in Lake Shishahai, Beijing

TU Qingyin¹, ZHANG Yongtai² & YANG Xianzhi²

(1: *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China;*

2: *Shanghai Foxin River Channel Engineering Co.Ltd., Shanghai 200031, P.R.China*)

Abstract

Shishahai Lake is a scenic and sightseeing lake in central Beijing. Before the ecologic recovery testing, it was under heavy eutrophication. Indexes of BOD₅, NH₃-N, Permanganate Index and TP were over V-Class of Chinese Environmental Quality Standards For Surface Water with dominant alga of bellamyia microcystis. Several technologies were used in the ecological recovery for Lake Shishahai, i.e., ozone/supersonic algae removal, aeration, floating bio-bed technology, lake bottom recovery, hydrophyte planting and recovering and biological adjustment and control. After more than ten months 'testing of ecological recovery, the ecological environment has improved obviously. TN and TP content are 1.26mg/L and 0.046mg/L, which were reduced 79% and 91% separately for TN and TP. Meanwhile, the chlorophyll. a content was decreased with notable deeper transparency in the lake. The general evaluation of water quality is IV Class.

Keywords: Lake Shishahai ; ecological recovery engineering