

# 上海市大莲湖生态修复区富营养化评价及氮磷平衡研究

朱浩<sup>1,2</sup>, 刘兴国<sup>1</sup>, 吴宗凡<sup>1</sup>, 裴恩乐<sup>3</sup>, 郭文利<sup>3</sup>, 苗雷<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院 渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092; 3. 上海市野生动植物保护管理站, 上海 200023)

**摘要:** 利用营养状态下卡森指数和综合营养状态指数对上海市大莲湖生态修复区的富营养化状况进行了检测与评价。结果表明, 各监测点水体均达到富营养化水平。大莲湖富营养化主要影响因子氮磷的输入输出状况为: 氮输入总量 2 174 kg/a, 约占总量的 92%; 磷输入总量 466.27 kg/a, 约占总量的 97%; 氮磷的主要来源为上游外源水; 氮磷输出量分别为 1 963 和 352.1 kg/a, 截留率分别为 9% 和 24%。因此, 大莲湖生态修复区内水质虽然得到明显改善, 但各项水质指标要达到地表水 II 类标准, 还需要控制上游水源的污染物入湖负荷。

**关键词:** 生态修复区; 富营养化; 氮磷平衡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0157-04

中图分类号: X832

## Assessment of Eutrophication and N, P Balance in Dalian Lake Ecological Restoration Region of Shanghai City

ZHU Hao<sup>1,2</sup>, LIU Xing-guo<sup>1</sup>, WU Zhong-fan<sup>1</sup>, PEI En-le<sup>3</sup>, GUO Wen-li<sup>3</sup>, MIAO Lei<sup>1</sup>

(1. Institute of Fishery Machinery and Instrument, Chinese Academy of Fishery Science,

Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture,

Shanghai 200092, China; 3. The Center of Shanghai Wildlife Conservation & Management, Shanghai 200023, China)

**Abstract:** The assessment was conducted on the lake eutrophication in the Dalian Lake ecological restoration region using Garlson model and comprehensive trophic status index. The results revealed that the water at all monitoring sites are eutrophic and the main factors are nitrogen and phosphorous. The balance of nitrogen and phosphorous was poor with the total N input of 2 174 kg/a, 92% of the total N content, and the total P input of 466.27 kg/a, 97% of the total P content, which mainly come from the upper-stream, while the outputs of N and P are 1 963 and 352.1 kg/a, respectively, showing that the rates of retained N and P was 9% and 24%, respectively. Although the water quality of Dalian Lake ecological restoration region has been significantly improved, some measures still need to be taken to decrease the input of N and P from the upper-stream in order to reach the standard II of the surface water.

**Keywords:** ecological restoration region; eutrophication; balance of nitrogen and phosphorous

中国湖泊的富营养化和污染形势严峻, 水质的恶化加剧了水资源短缺的形势, 严重威胁了饮用水安全以及生态环境健康。近年来, 我国对湖泊富营养化状况、产生原因及防治对策也进行了一系列研究与实践, 诸如在太湖、巢湖、滇池、武汉东湖、杭州西湖等开展了较为系统的湖泊富营养化研究<sup>[1-5]</sup>, 并取得了一系列研究成果。但有关湖泊生态修复后的水体富营养化评价方面的研究相对较少, 本研究在生态修复措

施完 1 a 后, 对大莲湖富营养化现状进行监测及评价, 并对富营养化主要影响因子氮、磷进行输入—输出平衡分析, 旨在为制定该水体进一步恢复及保护措施方案提供科学依据。

## 1 大莲湖生态修复区概况

大莲湖生态修复区位于上海市青浦区西部(北纬 31°04', 东经 121°00'), 属于淀山湖下游, 是黄浦江上

收稿日期: 2013-02-19

修回日期: 2013-04-09

资助项目: 农业部、财政部“十二五国家大宗淡水鱼类产业技术体系”(nycytx-9-12); 上海市科学技术委员会资助(08DZ1203201; 08DZ1203203)

作者简介: 朱浩(1985—), 男(汉族), 江苏省句容市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事池塘生态工程方面的研究。E-mail: zhuhao0511@163.com。

通信作者: 刘兴国(1965—), 男(汉族), 上海市人, 博士, 研究员, 主要从事水生生物学与渔业生态工程方面研究。E-mail: liuxg1223@163.com。

游重要的水源地保护区。2008 年 12 月至 2009 年 5 月,上海市林业局野生动植物保护站组织多家单位和个人,对大莲湖进行了地型塑造,水系灌通等一系列的生态修复工程<sup>[6]</sup>,地型塑造和水系灌通后,对生态修复区进行了植被恢复,根据植物带配置数量的不同,由岛屿向水面方向根据坡降比的差异分别配置森林湿地带、灌丛湿地带、挺水植物带和沉水植物带<sup>[7]</sup>,2009—2010 年,根据鱼类生长特点,分别于 3 次对大莲湖进行人工渔业资源增殖放流。2011 年至今,淀山湖公司继续对大莲湖生态修复区进行管理,先后组织若干次清理水中杂物、放养土著鱼类等活动;并对大莲湖生态修复区周边建造了围墙,防止社会闲杂人员进入生态区进行电捕鱼活动,以保证生态区修复效果长期稳定。

## 2 研究方法

### 2.1 采样点布设

根据大莲湖水域状况,选择入湖口,出湖口,湖区 1,湖区 2,湖区 3 等 5 处作为水质监测点,2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间,对生态修复区进行了水质理化指标监测。

### 2.2 监测项目与方法

水质监测项目为 TP, TN, 叶绿素 a, 高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>), 透明度(SD), 氨氮和亚硝态氮, 所有项目均为采水器在水面下 0.5 m 处采样。透明度采用塞氏盘法;高锰酸盐指数按酸性法测定;叶绿素 a 采用分光光度法;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;TP 采用钼酸铵分光光度法,氨氮采用纳氏试剂比色法,亚硝态氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法<sup>[8]</sup>。

### 2.3 评价方法

选用卡森指数<sup>[9]</sup>和中国环境监测总站推荐使用的综合营养状态指数<sup>[10]</sup>两种方法进行对比评价。卡

森指数 TSI 公式为:

$$TSI(TP) = 10 \{6 - [\ln(48/TP)/\ln 2]\}$$

$$TSI(SD) = 10 \{6 - (\ln SD/\ln 2)\}$$

$$TSI(Chla) = 10 \{6 - [(2.04 - 0.68 \ln Chla) / \ln 2]\}$$

综合营养状态指数 TLI 计算公式为:

$$(Chla) = 10(2.5 + 1.086 \ln chl)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$$

$$TLI(COD) = 10(0.109 + 2.661 \ln COD)$$

相关加权综合营养状态指数为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI_j$$

式中:TLI(Σ)——综合营养状态指数;TLI<sub>j</sub>——第 j 种参数的营养状态指数。W<sub>j</sub>——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水质评价

大莲湖生态修复区水质监测结果表明(表 1),2011—2012 年各项水质指标基本稳定,重金属及其它有毒、有害物质优于 GB 3838—2002 地表水 II 类水质。按 GB 3838—2002 地表水特定项目评价标准, TN, TP 和 COD 达到 III 类水质,氨氮、亚硝态氮达到 II 类水质,叶绿素 a 达到 III 类标准。Tomas 和坂本根据各国研究结果提出了以水体中 TN, TP 对湖泊营养状况分级的标准。其中 Tomas 评价标准的中—富营养化 TP 范围为 0.03~0.1 mg/L,坂本评价标准的中营养化 TP 范围为 0.01~0.03 mg/L,中—富营养化 TN 范围为 0.5~1.3 mg/L。大莲湖生态修复区 TP 和 TN 监测结果平均值分别 0.35 和 1.31 mg/L,目前仍处于中—富营养化水平。

表 1 大莲湖水质监测结果

指标名称	1 <sup>#</sup>				2 <sup>#</sup>				3 <sup>#</sup>			
	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.0	1.6	1.9	1.5	0.8	0.5	2.0	1.7	0.8	1.1	1.25	1.6
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.36	0.41	0.25	0.38	0.31	0.43	0.23	0.31	0.49	0.56	0.19	0.37
叶绿素/(mg·m <sup>-3</sup> )	25.34	20.46	16.98	19.27	25.12	20.37	16.83	18.34	26.32	21.57	17.91	19.26
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	18	18	16	18	24	12	11	17	16	15	19	21
透明度/m	0.83	0.92	0.87	0.76	0.82	0.92	0.83	0.77	0.81	0.89	0.82	0.73
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.23	0.15	0.34	0.31	0.10	0.17	0.33	0.32	0.50	0.11	0.42	0.37
亚硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.06	0.03	0	0	0.02	0.02	0	0	0.05	0.02	0	0

注:1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>为湖区内采样点

### 3.2 富营养化评价

卡森指数法评价结果详见表 2。3 项参数的 TSI

计算平均结果为: TSI(TP) = 88.8, TSI(SD) = 62.6, TSI(Chl) = 60.2。评分标准为 0~100 分,其中 TSI<

37为贫营养,TSI在38~53为中营养,TSI>54为富营养。大莲湖生态修复区的3项指标都属于富营养型。

综合营养状态指数结果详见表3。在3个监测点位评价中,均达到中度富营养化。两种评价方法均表明,大莲湖生态修复区水质仍处于富营养化水平。

表2 卡森指数评价结果

TSI值	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	平均
TSI(TP)	88.6	87.3	90.6	88.8
TSI(SD)	62.4	62.6	62.9	62.6
TSI(Chla)	60.2	60.0	60.5	60.2
平均	70.4	69.9	71.3	70.5

表3 综合营养状态指数评价结果

指标名称	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.57	1.34	1.79
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.35	0.32	0.40
叶绿素/(mg·m <sup>-3</sup> )	20.51	20.16	21.26
高锰酸盐指数/(mg·L <sup>-1</sup> )	17.50	16.00	17.70
透明度/m	0.84	0.84	0.81
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.26	0.24	0.34
亚硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.02	0.01	0.01
TLI值	63.55	62.22	65.05
富营养化程度	中度	中度	中度

### 3.3 氮、磷平衡估算

3.3.1 氮、磷的输入 引起水体富营养化的物质有20余种,其中氮、磷是重要的控制因素<sup>[11]</sup>。湖泊流域氮、磷污染物来源主要是上游来水,水产养殖投饲和排水,农田径流产生的面源污染,湖区周围城镇生活污水输入,湖面降雨,地下水输入。由于大莲湖生态修复区在一期工程改造时,周围已无工矿企业和城镇居民,地下水输入量小,且周边农田经水系改造后,排水不经过大莲湖生态修复区。因此计算时大莲湖生态修复区的点源可以忽略不计。氮、磷的输入主要是上游外源河输入,湖面降雨,周围水产养殖排水和自身的内源污染。

(1) 河流进入。进入大莲湖生态修复区的主要河流仅有拦路港。根据2011—2012年对大莲湖入口处水质指标的实测,以进水闸门处的流速和闸门面积

进行负荷估算。大莲湖生态修复区输入总氮、总磷分别为454.5和5.48 kg/a。入口处指标浓度及氮磷负荷计算详见表4。

(2) 湖面降水进入。根据2006—2009年上海市青浦区大莲湖区域降水量和降水中氮、磷含量均值,以及湖面面积,估算湖面降水接纳营养物质的量。上海市青浦区降雨中总氮、总磷年均浓度分别约为1.8和0.065 mg/L<sup>[12-13]</sup>。年均湖水面积为8 km<sup>2</sup>,年均降雨约1 000 mm。降雨输入总氮、总磷分别为151.74和5.48 kg/a。

表4 入湖口及湖面降水氮磷输入状况

来源	水量/ 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	总氮浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总氮 量/kg	总磷浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷 量/kg
湖入口处	606	3.3	2 000	0.75	454.5
湖面降水	84.3	1.8	151.74	0.065	5.48

(3) 面源进入。大莲湖生态修复区经过一系列生态工程措施改造后,周边农田排污不经过生态修复区,农田径流污染可以忽略不计;但生态修复区内原有的池塘经地型改造后,其中的淤泥仍在生态修复区内,经过水体扰动后会逐渐的向水体释放,造成对生态修复区的内源污染,根据淀山湖区域(以大莲湖为核心)湖滨带污染控制及湿地修复示范课题成果估算大莲湖氮磷输入内源污染负荷。大莲湖生态修复区内源污染氮磷输入分别为17.6和2.93 kg/a。

(4) 水产养殖。生态修复区周边鱼塘截止2012年也基本完成了上海市标准化养殖场改造,仅生态修复区南侧有2 hm<sup>2</sup>鱼塘承包未到期,养殖高峰季节向生态修复区排水。根据上海环境科学研究院对大莲湖周边鱼塘污染负荷的调查研究结果,鱼类养殖年排放负荷TN为2.53 kg/hm<sup>2</sup>,TP负荷为1.68 kg/hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。估算大莲湖生态修复区内水产养殖氮磷输入分别为5.1和3.36 kg/a。

将氮、磷的主要输入量进行汇总分析(表5),大莲湖N的主要来源为外源河输入,占总量约92%;其次是湖面降雨,占总量的7%;内源污染和水产养殖仅占1%。P的主要来源基本上来自外源河输入,其它不足3%。氮、磷总输入是外源河所占比例最大,为92.95%;其次是湖面降雨,为5.95%。

表5 大莲湖氮磷输入状况

负荷计算	外源河输入	湖面降雨	内源污染	水产养殖	总计
总N负荷/(kg·a <sup>-1</sup> )	2 000	151.74	17.60	5.10	2 174.40
比例/%	91.98	6.97	0.82	0.23	100.00
总P负荷/(kg·a <sup>-1</sup> )	454.50	5.48	2.93	3.36	466.27
比例/%	97.47	1.20	0.63	0.72	100.00
N,P负荷总量/(t·a <sup>-1</sup> )	2 454.50	157.22	20.53	5.82	2 640.67
比例/%	92.95	5.95	0.78	0.22	100.00

3.3.2 氮、磷的输出 包括水生植物打捞和出水输出。生态修复区管理人员每年从湖区打捞水草约 20 t。水生植物含 N 量均值为 21 g/kg, 含 P 3.0 g/kg。通过水生植物打捞损失量为: 总 N 约 420 kg, 总 P 约 60 kg。有研究表明, 植物吸收的氮磷只占氮去除贡献率的 46.3%, 磷去除贡献率的 54.3%, 因此, 通过管理水草去除氮总量约为 907 kg, 磷总量约为 110.5 kg。大莲湖生态修复区现主要用于旅游和水源涵养, 因此, 农田灌溉水和饮用水 N、P 输出可忽略不计。污染物出湖量主要为大莲湖出水口排水流失量。出水闸门年均出口流量为  $6.90 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 总 N, 总 P 浓度分别为 1.53 和 0.35 mg/L, 大莲湖出水氮、磷输出量分别为 1 056 和 241.6 kg/a。

3.3.3 氮、磷的平衡计算 湖区污染物截留量为污染物入湖量减去出湖量, 由此计算氮、磷的截留率分别为 9% 和 24% (表 6)。水体中 N 可经硝化细菌和反硝化细菌的作用生成氮气或氨散到空气中, 但磷除被水生动植物吸收以外, 没有别的方式转移出去, 因此, 磷的截留率要相对高一些。

大莲湖生态修复区经修复改造后, 虽然污染源大大的减少, 并且每年都有一定的污染物从湖中转移出去, 但综合污染物的入湖量与出湖量的差值发现, 总 N、总 P 仍有一定的截留, 分析原因主要是外源水污染较为严重, 且上海地区降水中氮、磷含量偏高, 从而造成了大莲湖生态修复区内水体的氮磷指标目前仍处于 III 类水。

表 6 氮磷截留量

污染物	入湖量/ kg	出湖量/ kg	截留量/ kg	截留率/ %
总氮	2 174.4	1 963.0	211.4	9
总磷	466.3	352.1	114.2	24

## 4 结论

(1) 大莲湖生态修复区水体中氮磷等营养元素浓度高, 按 GB 3838—2002 地表水特定项目评价标准, TN、TP 和 COD 达到 III 类水质, 氨氮、亚硝态氮达到 II 类水质, 叶绿素 a 达到 III 类标准。

(2) 按国际上使用的富营养化的卡森指数方法评价, 大莲湖生态修复区各监测点均达到富营养化水平; 按综合营养状态指数法评价, 生态修复区湖区内的 3 个监测点达到中度富营养化水平。

(3) 大莲湖年总氮入湖量为 2 174.4 kg, 总磷为

466.27 kg; 截留量总氮为 211.4 kg, 总磷为 114.17 kg, 截留率分别为 9% 和 24%。

(4) 参照对比以往的课题研究结果, 大莲湖生态修复区内水质状况已经有了明显改善, 但仍处于富营养状态, 污染源主要来源是上游外源水, 建议应控制污染物入湖负荷, 防止湖泊富营养化加重; 其次, 坚持对湖区的的水草植被进行管理, 合理水草密度可以更有效地去除水体中氮、磷营养盐, 从而提高湖泊的自净能力。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘静, 杭小帅, 梁斌, 等. 太湖湖区敏感水域水质时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 628-632.
- [2] 刘妹, 孔繁翔, 蔡元锋, 等. 巢湖四条入湖河流硝态氮污染来源的氮稳定同位素解析[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 952-956.
- [3] 李中杰, 郑一新, 张大为, 等. 滇池流域近 20 年社会经济发展对水环境的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 875-882.
- [4] 唐汇娟, 谢平, 刘丽, 等. 武汉东湖浮游植物群落结构的时空变化与环境因子的关系[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 100-104.
- [5] 毛成贵, 余雪芳, 邵晓阳, 等. 杭州西湖总氮、总磷周年变化与水体富营养化研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(4): 1-6.
- [6] 朱浩, 刘兴国, 裴恩乐, 等. 大莲湖生态修复工程对水质影响的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1790-1794.
- [7] 朱浩, 张拥军, 裴恩乐, 等. 大莲湖生态修复工程对浮游植物群落结构的影响[J]. 环境工程学报, 2011, 5(10): 2391-2395.
- [8] 魏复盛. 水和废水监测方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [10] 董攸, 江敏, 刘其根, 等. 乌伦古湖水质及营养水平调查[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(5): 564-569.
- [11] 吴甫成, 邓学建, 吕焕哲, 等. 洞庭湖退耕还湖区水质监测与分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 134-136.
- [12] 黄文丹, 马晨辰, 周立旻, 等. 上海市浦东农业区降水氮浓度的时间分布[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 363-367.
- [13] 顾琦, 刘敏, 蒋海燕, 等. 上海市区降水径流磷的负荷空间分布[J]. 上海环境科学, 2002, 21(4): 213-215.
- [14] 沈根祥, 王振旗, 钱晓雍, 等. 上海大莲湖区域农业面源污染特征研究[J]. 上海农业学报, 2010, 26(1): 55-59.