

孤东水库水体富营养化评价及其生态控制研究

曹溪禄

(胜利油田供水公司,东营 257000)

摘要:对孤东水库水生生物状况进行系统调查和水体富营养状态进行评价,在此基础上,提出了生态修复技术,通过理论计算与试验确定草食性和滤食性鱼类的投放量,并进行了围格试验.结果表明,孤东水库菹草优势度达 80%,浮游植物量为 22.32 mg/L,单位面积上的总磷浓度是 0.310 g/(m²·a),水体处于富营养化状态.通过保持孤东水库鲢、鳙鱼的水体生物量在 19~25 g/m³左右,在 9 月藻类繁殖高峰期,生物量由 14.6 mg/L 降为 3 mg/L.总磷、总氮和高锰酸盐指数年均值分别由生态控制前的 0.06 mg/L、3.06 mg/L 和 4.42 mg/L 降为 0.03 mg/L、1.58 mg/L 和 3.73 mg/L,水库水质改善效果明显.同时下游水厂的单方水药耗也由生态控制前的 42 g/m³ 降至 25 g/m³.试验证明,通过采用合理投放草食性和滤食性鱼类的生态修复技术,可以有效控制水库富营养化状态,并取得显著的社会、经济效益.

关键词:生物状况;富营养化;生物修复;水质;水库

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)04-0990-05

Evaluation and Ecological Control of the Eutrophic State of Gudong Reservoir

CAO Xi-lu

(Water Supply Company, Shengli Petroleum Management Bureau, Dongying 257000, China)

Abstract: The eutrophic state of Gudong reservoir and relative factors were investigated and evaluated. Then a comprehensive ecological control technology was proposed. The amount of herbivorous fish and filter-feeding fish was determined both through theoretic calculation and experimental test. The results demonstrated that *Potamogeton crispus* was the dominant grass over 80%, the phytoplankton biomass was 22.32 mg/L, and the total phosphorus was 0.310 g/(m²·a), which suggested that Gudong reservoir was on the eutrophic state. Through ecological engineering by controlling the biomass of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* at 19-25 g/m³, the algae biomass was reduced from 14.6 mg/L to 3 mg/L at September, the annual average total phosphorus, nitrogen and permanganate index were reduced from 0.06 mg/L, 3.06 mg/L and 4.42 mg/L to 0.03 mg/L, 1.58 mg/L and 3.73 mg/L, respectively, which showed that the reservoir water quality has been obviously improved. Also, the flocculant dosage to treat this reservoir water was reduced from 42 g/m³ to 25 g/m³ after ecologic control. The results showed that the eutrophication could be controlled effectively by adopting the ecological restoration technology with rationally introducing the herbivorous fish and filter-feeding fish, and significant benefits can also be achieved.

Key words: biological state; eutrophication; bioremediation; water quality; reservoir

我国湖泊富营养化形势严峻,66%以上的湖泊、水库处于富营养化的水平^[1],根据目前的发展速度,预计到 2015 年,我国发生富营养化的湖泊面积将超过 6 700 km².由于湖泊水库水源水质污染,水厂传统的常规处理工艺设施难以有效解决这些污染问题,尤其是我国中小城市水厂将面临巨大的安全供水压力.防治与恢复富营养化湖泊水库是我国当前面临的一个重大问题^[2,3].

治理湖泊富营养化的措施主要为控制外源污染与内源污染、生态工程和生态恢复等^[4].陶益等^[5]采用综合治理工程对深圳荔枝湖治理后,湖水水质由重营养化水平改善为富营养化水平.然而,外源性污染的控制只是湖泊恢复的前提,进入富营养化后的湖泊即使在采取污染控制措施后,水质在很长时间内也难以发生显著的改观,在一些水污染控制做得比较好的发达国家,蓝藻水华暴发现象仍然时

有发生^[4,6].生物调控、生态工程与生态恢复已成为湖泊富营养化治理的重要措施.生物调控(Biomanipulation)是通过重建生物群落,以达到减少藻类生物量,保持水质清澈并提高生物多样性.目前在这方面已开展了大量的工作,如水生高等植物吸收水体中的营养盐^[7-10],也可通过鱼类种群进行调控浮游动物,进而控制藻类的生长^[11-14],或其他滤食性动物如牡蛎、斑马蚌等直接吸收去除营养盐^[15].

孤东水库位于东营市河口区境内,担负着胜利油田滨海地区工农业生产和居民生活的源水供应.近年来山东省境内的黄河河口部水环境逐年恶化,其总氮、总磷逐年增加,胜利油田各水库的水

收稿日期:2010-09-09;修订日期:2010-10-29

作者简介:曹溪禄(1963~),男,高级工程师,主要研究方向为给水净化处理,E-mail: caoxilu2009@163.com

体逐步呈富营养化状态. 为改善水质状况, 以孤东水库为试点, 针对库区内水体生物状况, 开展了一系列水体生态修复试验和应用研究. 通过生态系统的食物链功能, 将水库内营养物质通过食物链的相促关系转化成鱼类等水产品, 又以捕捞水产品的形式将其提出水库, 从而有效降低水体中氮、磷等营养元素的数量, 有效缓解库区内水体的富营养化现象.

1 材料与方法

1.1 水库营养状态评价方法

采用 Vollenweider 型总磷负荷模型对孤东水库富营养化状况进行评价. 假定湖泊是完全的连续搅拌的反应池, 磷负荷模型考虑了平均深度、水力停留时间和磷沉积, 如下式所示^[16].

$$L_p = 100 + 10Z/\tau_w$$

$$L_p^{\text{MAX}} = 200 + 20Z/\tau_w$$

式中 L_p 为磷的允许负荷 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; L_p^{MAX} 为磷的过量负荷 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; Z 为平均深度 (m); τ_w 为水力停留时间 (a). 评价涉及数据均以 2005 年水库运行与水质检测数据为依据 (见表 1).

表 1 孤东水库总磷负荷模型参数

Table 1 Model parameters of the total phosphorous loading in Gudong reservoir

项目	状态参数	项目	状态参数
表面积 $\times 10^4/\text{m}^2$	318	TP 入流负荷 $/\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	0.985
Z 平均深度/m	3.5	TP 表面负荷 $/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	0.310
水量 $\times 10^4/\text{m}^3$	1 100	TP 允许负荷 $/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	0.152
τ_w 水力停留时间/a	0.67	TP 过量负荷 $/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	0.303

1.2 鲢、鳙鱼直接控藻的围隔试验

试验建立围隔共 3 个 (编号分别为 1 号、2 号、3 号), 设在库区东南角岸边, 用不透水的聚乙烯材料制成, 围隔尺寸 $4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$, 每个水深 2.0 m , 即每个围隔盛库水 32 m^3 . 围隔上方敞开, 底部直接贴着库底, 以毛竹做框架固定在水库里. 围隔及周围库区中的藻类数量、生物量每月进行 2 次检测. 各围隔投放鲢、鳙鱼的具体情况如表 2 所示, 10 月底将围隔中鱼全部捞起称重.

孤东水库菹草的生物量在测定期间接近 $2.5 \text{ kg}/\text{m}^2$, P/B 系数取 1.2, 鱼类对水草的利用率为 20% 左右, 水草到鱼的转化效率取 1/50, 那么 $10\,000 \text{ m}^2$ (1 hm^2) 水面能产出草鱼约为:

$$1.2 \times 2.5 \text{ kg}/\text{m}^2 \times 20\% \\ \times (1/50) \times 10\,000 \text{ m}^2 = 120 \text{ kg}$$

孤东水库水面以 318 万 m^2 计, 菹草覆盖率现场调查约为 40%, 则年产草鱼可得:

$$120 \text{ kg}/\text{hm}^2 \times 318 \text{ hm}^2 \times 40\% = 1.526 \times 10^4 \text{ kg}$$

正常 150 g 草鱼的年增重倍数是 10, 由于水库中优势种群菹草的主要生长期相当于鱼类年生长期的 1/3, 因而水库中草鱼的年增重倍数考虑按 3 计算, 草鱼成活率按 70% 计, 则草鱼种苗投放量为:

$$1.526 \times 10^4 \text{ kg} \div 3 \div 70\% \approx 7\,300 \text{ kg}$$

根据孤东水库平均生物量, 大体推算出水库鲢、鳙鱼的鱼苗投放量 (如表 2 所示).

表 2 孤东水库鲢、鳙鱼投放量计算表

Table 2 Calculated *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* to be put in Gudong reservoir

鱼类	平均生物量 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水库水体 $\times 10^4/\text{m}^3$	鱼类利 用率/%	饵料 系数	P/B 系数	投放量 $/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
鲢鱼	22.32 (藻类)	1 113	30	40	100	9.30
鳙鱼 (浮游动物)	3.485	1 113	30	10	25	3.27

2 结果与讨论

2.1 孤东水库营养状态评价

2.1.1 孤东水库水体生物状况调查

对孤东水库水生物状况进行了全面调查, 结果表明: 菹草为孤东水库中的优势水草, 优势度可达 80% 左右. 浮游植物则以藻类为主, 浮游植物年平均数量为 $2\,508 \times 10^4 \text{ cells}/\text{L}$, 变动范围为 $222.8 \times 10^4 \sim 5\,859 \times 10^4 \text{ cells}/\text{L}$, 年平均生物量为 $22.31 \text{ mg}/\text{L}$, 共 7 门 54 属, 其中绿藻门、硅藻门和蓝藻门为优势种属. 浮游动物年平均数量为 $4\,289 \text{ 个}/\text{L}$, 变动范围为 $1 \sim 2.888 \times 10^4 \text{ 个}/\text{L}$, 年平均生物量为 $3.485 \text{ mg}/\text{L}$, 共检出四大类 21 属, 优势种属为脾睨虫、似铃壳虫、筒壳虫、异尾轮虫、多肢轮虫、龟甲轮虫、同尾轮虫、象鼻蚤、无节幼体、秀体蚤、剑水蚤等. 底栖动物 $149 \text{ 个}/\text{m}^2$, 生物量 $0.764 \text{ g}/\text{m}^2$, 主要种类为摇蚊幼虫和水蚯蚓. 按浮游植物生物量评级, 该库的现存量 $22.32 \text{ mg}/\text{L}$, 高于山东省确定的 $4.2 \text{ mg}/\text{L}$ 富营养型水库的标准, 应属富营养型水库.

2.1.2 水库营养状态评价

蓝藻门和绿藻门是孤东水库的主要优势藻类, 大概占该库浮游植物总量 60%, 对孤东水库富营养化状况可以采用 Vollenweider 型总磷负荷模型进行评价. 根据 Vollenweider 的经典模型计算: 孤东水库当年 $L_c = 0.152 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $L_c^{\text{MAX}} = 0.303 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 目前水库单位面积上的总磷浓度是

0.310 g/(m²·a), 补充给水库的磷大约是 L_c 的 2.04 倍, 是 L_c^{MAX} 的 1.02 倍. 由此可知: 孤东水库水体呈富营养化状态, 水库磷负荷需要被削减.

2.1.3 水质的影响因素分析

尽管水库藻类生物量与水生维管束植物(水草)相比较小, 且不稳定, 可一旦条件适宜, 藻类生物量的增长速度极快(图1). 研究发现12月~次年5月因水库中菹草的生长对氮、磷的竞争作用较强, 春季以硅藻类为优势种群的藻类的生长受到抑制, 特别是5月份菹草生物量大幅增加时期, 藻类生物量骤降至2.12 mg/L. 6月底菹草大量死亡后, 植株腐烂释放出大量氮、磷, 水库水温此时也逐步升高, 喜高温的蓝藻类开始大量繁殖, 7月后蓝藻类逐步进入生物量高峰期, 直到10月底水温降低后, 喜低温的硅藻、金藻等藻类再次大量增长. 同时, 藻类吸收磷增加, 水中无机磷减少, 导致底泥释放总磷增加, 进一步促进了藻类的生长. 蓝藻在代谢过程中产生藻毒素, 严重威胁饮用水安全. 蓝藻大量繁殖以及死亡藻类的降解, 会消耗水中大量溶解氧, 导致水体缺氧进而败坏水质, 散发腥臭味. 蓝藻大量繁殖是水质变坏的直接表现, 因此, 在6~10月藻类的爆发性增长期采取措施降低藻类的数量对改善水质具有重要意义.

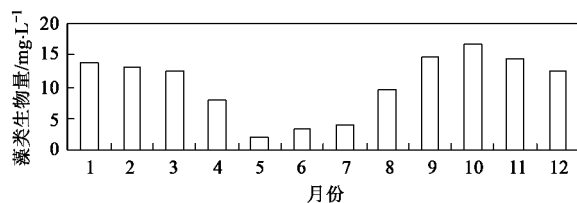


图1 孤东水库藻类生物量变化曲线

Fig. 1 Variation of the algae biomass in Gudong reservoir

每年春季孤东水库呈明显的草型水体状态, 水草中菹草的优势度为80%. 菹草对氮、磷等营养盐类具有较强的吸附降解作用, 净水效果较好^[17], 但是孤东水库中的菹草不便收割, 6月上中旬以后便大量死亡, 死亡植株腐败后将大量磷、氮等营养盐类释放, 使水中总磷等营养盐含量猛增, 随后便导致水中藻类数量大幅增长^[18], 高含藻给饮用水安全带来威胁. 因此, 季节性生物量极大的菹草以及其生长特性对水库水质的影响具有重要作用.

浮游动物利用藻类, 在一定程度上可控制水华发生, 起水质改善的作用. 浮游动物本身又可成为其它肉食性动物的食物, 在物质循环和能量传递中

起着重要作用^[19]. 因此, 采取措施把菹草和藻类的生物量控制在合理范围内是改善水质的关键.

2.2 生态控制方案的确定及实施

2.2.1 利用食草鱼类对菹草进行合理调控

对于菹草既要利用它的净水作用, 又要防止其大量死亡, 产生二次污染, 由于不便采用水中收割, 采用向水中投放数量合理的草食性鱼类, 利用草食性鱼类摄取水生植物的生物学特性进行生物防治, 适量的草食性鱼类不但能保持菹草等水生植物的茁壮生长, 而且能直接将水生植物转化为鱼产品, 防止菹草因季节性衰亡污染水质.

菹草的主要生长期在春季, 因此草鱼的投放时间安排在初冬较为合适. 因菹草在每年6月后会大量死亡, 而水中其他水草的数量又不多(菹草的优势度为80%), 为防止草鱼对水体水生植物群落的过渡捕食破坏, 6月底以后应安排进行草鱼的捕捞, 捕捞量控制在 1×10^4 kg左右. 冬季根据夏季捕捞量、水库草鱼越冬的存活量计算出草鱼的再次投放量.

2.2.2 合理投放鲢、鳙鱼, 有效抑制藻类

投放滤食性鱼类, 利用鲢、鳙鱼的滤食作用来直接摄食控制水体中的浮游动植物, 从而达到抑制藻类水华暴发、控制水体富营养化的效果^[20]. 放养滤食性鲢、鳙等鱼类, 可以稳定浮游生物群落的结构, 防止水生植物量的激烈变化, 促进水质的逐步改善. 试验期间(6~10月)平均水温约10~28℃. 6月中旬以后, 3个围隔及水库中的藻量开始大幅增长, 7月底陆续放入鲢、鳙鱼后, 各围隔里的藻类生物量都明显下降(图2), 藻类数量也有大幅下降(图3), 对照水库水中的藻量则呈继续上涨状态, 说明鲢、鳙鱼的投放能有效控制藻类数量.

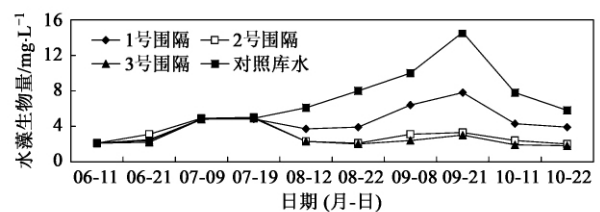


图2 分组围隔及对照库水藻类生物量变化情况

Fig. 2 Variation of the algae biomass in different groups

从图2和3可看出: 2号、3号围隔的藻量较为接近, 都明显比1号少, 说明1号鱼密度不够, 2号、3号围隔内投放的鲢、鳙鱼有足够的捕食能力控制藻类. 10月底将3个围隔中鱼全部捞出后称重: 1

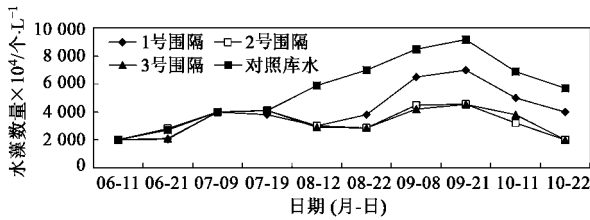


图3 分组围隔及对照库水藻类个数变化情况
Fig.3 Variation of the algae units in different groups

号围隔的鱼体重增幅 1.21 倍,水体鱼生物量达到 15.5 g/m^3 ;2 号围隔的鱼体重增幅 0.96 倍,水体鱼生物量达到 24.3 g/m^3 ;3 号围隔的鱼体重增幅只有 0.28 倍,水体鱼生物量达到 28.1 g/m^3 . 说明 3 号围隔投鱼密度过大;对比藻量的控制情况 2 号围隔投鱼密度较为合适,能有效控藻,而 1 号围隔投鱼密度偏小,未能完全控制藻类的生长. 因此,孤东水库鲢、鳙鱼的水体生物量保持在 $19 \sim 25 \text{ g/m}^3$ 左右时,能有效控藻. 至于本试验数据明显低于武汉东湖 $33 \sim 69 \text{ g/m}^3$ 的鲢、鳙鱼控藻阈值,可能是由于孤东水库水体营养物以及适宜鱼类生存的水温时间都较东湖水体少.

通过试验可以看出:利用鲢、鳙鱼的滤食作用来直接摄食控制水体中的浮游动植物,可达到有效抑制藻类水华暴发、控制水体富营养化的效果. 同时放养滤食性的鲢、鳙等鱼类,还可以起到稳定浮游生物群落结构的作用.

3 水质改善及经济效益

3.1 总磷的变化

2005 年秋末,孤东水库开始实施生物调控,根据前期试验结果向水体中投放草食性、滤食性鱼类. 至 2008 年,水库水体生态环境得到了恢复,水质明显改善,治理效果明显.

从图 4 可以看出:2005 年孤东水库总磷的年均值为 0.06 mg/L ,2006 年年均值为 0.03 mg/L 左右,总磷的降低效果很明显,水体已趋于中营养水平. 每年的 3~7 月茭草是大量繁殖与死亡期,水体总磷不再急剧变化而趋于平缓,说明生物控草发生了效果.

3.2 总氮的变化

氮是水生生物的重要营养元素,是衡量水体营养水平的重要指标. 生物修复前后总氮变化明显,呈总体下降的趋势. 2005 年孤东水库总氮均值为 3.06 mg/L ,2006 年年均值为 2.77 mg/L ,2007 年年均

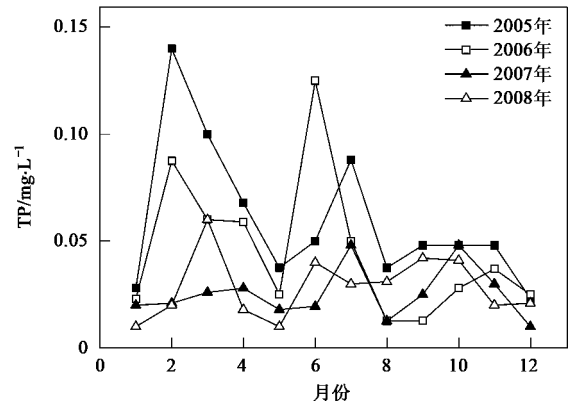


图4 孤东水库总磷的变化
Fig.4 Variation of total phosphorous in Gudong reservoir

为 1.81 mg/L ,2008 年年均值为 1.58 mg/L (图 5),水质改善效果明显.

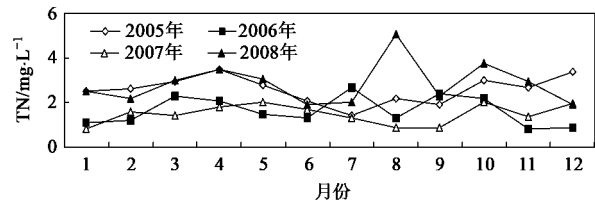


图5 孤东水库总氮的变化
Fig.5 Variation of total nitrogen in Gudong reservoir

3.3 高锰酸盐指数的变化

图 6 为孤东水库高锰酸盐指数的变化. 孤东水库 2005 年高锰酸盐指数均值为 4.42 mg/L ,2006 年年均值为 4.51 mg/L ,2007 年年均值为 3.90 mg/L ,2008 年年均值为 3.73 mg/L . 由上升态势平缓下降,并趋于稳定.

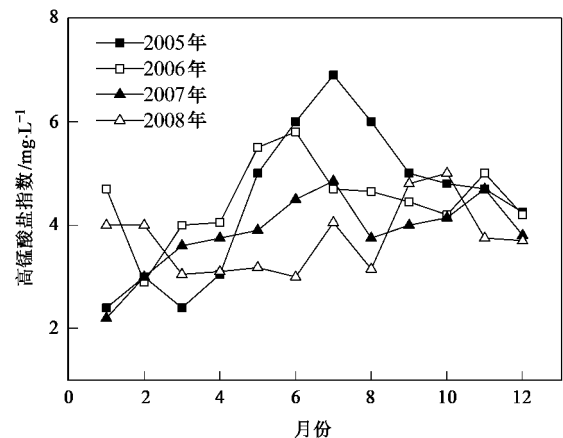


图6 孤东水库高锰酸盐指数的变化
Fig.6 Variation of permanganate index in Gudong reservoir

3.4 水处理药耗对比

由于水库水质明显改善,供水水厂在水净化处理上不但全年运行状况平稳,而且净水药剂使用量明显降低(表3),单位水药耗由2005年的 42 g/m^3 降至2008年的 25 g/m^3 ,降幅达到46%.

表3 孤东水库下水厂净水药剂及费用统计表

年份	净水药剂 用量/t	药剂费用 $\times 10^4$ /元	年出厂水量 $\times 10^4/\text{m}^3$	单位水量 用药量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
2005	436	58.86	1 042	0.042
2006	301	40.63	1 051	0.029
2007	260	35.10	1 040	0.025
2008	262	35.21	1 042	0.025

3.5 水产品经济效益

自生物控制技术推广以来,孤东水库的水质得到了明显改善,逐步形成一个良好的水体生态系统.通过定期捕获鱼类,不仅实现了营养盐的循环上岸,也取得了相应的经济效益(表4).

表4 孤东水库水产经济效益统计表

年份	鱼捕获量 $\times 10^4/\text{kg}$	经济效益 $\times 10^4$ /元
2005	6.31	31.55
2006	5.22	26.10
2007	5.04	25.20

4 结论

针对孤东水库的水生物特性,采取生物调控生态修复技术,可使库区内水体的富营养化状况得到有效改善.鲢、鳙鱼混养,按一定的比例和投放密度控制,可有效抑制藻类数量,起到稳定浮游生物群落结构的作用.在带来直接经济效益的同时,由于水质的改善,减轻了下游供水厂处理的难度,降低水处理药耗成本,带来显著的经济与社会效益.

参考文献:

[1] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
 [2] 霍守亮,席北斗,姚波,等. 中国湖泊富营养化防治策略研究[J]. 环境保护, 2009, 414(2B): 16-18.
 [3] 郑丙辉,许秋瑾,朱延忠. 湖泊营养盐控制标准制订方法的初步研究[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2497-2501.
 [4] 王国祥,成小英,濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 273-282.

[5] 陶益,毛献忠,段余杰,等. 深圳荔枝湖富营养化综合治理工程效果研究[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 879-883.
 [6] Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection [A]. In: Mellish C S, (ed). Proceedings of IJCAI-95 [C]. 1995. 1137-1143.
 [7] Gulati R D, Donk E V. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review [J]. Hydrobiologia, 2002, 478: 73-106.
 [8] 胡绵好,袁菊红,张玲,等. 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1740-1749.
 [9] 朱泽聪,胡春华,胡维平. 水花生投放密度对富营养化湖水净化效果影响的试验研究[J]. 海洋湖沼通报, 2008, 4: 49-55.
 [10] 成小英,李世杰,濮培民. 城市富营养化湖泊生态恢复——南京莫愁湖物理生态工程试验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 218-224.
 [11] Dund W J V, Donk E V. Short-term and long-term effects of zooplanktivorous fish removal in a shallow lake: a synthesis of 15 years of data from Lake Zwemlust [J]. Freshwater Biology, 2002, 47: 2380-2387.
 [12] 陆开宏,晏维金,苏尚安. 富营养化水体治理与修复的环境生态工程——利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 732-737.
 [13] Olin M, Rask M, Ruunhijarvi J, et al. Effects of biomanipulation on fish and plankton communities in ten eutrophic lakes of southern Finland [J]. Hydrobiologia, 2006, 553: 67-88.
 [14] Gifford S, Dunstan R H, O' Connor W, et al. Aquatic zooremediation: deploying animals to remediate contaminated aquatic environments [J]. Trends in Biotechnology, 2006, 25(2): 60-65.
 [15] Pires L M D, Ibelings B W, Brehm M, et al. Comparing grazing on lake Seston by *Dreissena* and *Daphnia*: Lessons for biomanipulation [J]. Microbial Ecology, 2005, 50: 242-252.
 [16] Vollenweider R A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in Lake Eutrophication [J]. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, 1976, 33: 53-83.
 [17] 陈济丁,任久长,蔡晓民,等. 利用大型浮游动物控制浮游植物过量生长的研究[J]. 北京大学学报, 1998, 31(3): 373-382.
 [18] 王庭健,苏睿,金相灿,等. 城市富营养化湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1999, 7(4): 12-19.
 [19] 刘春光,邱金泉,王雯,等. 富营养化湖泊治理中的生物操纵理论[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 198-201.
 [20] 刘健康,谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2006, 22(3): 193-196.