

· 争鸣与探索 ·

生态围隔对水源地水质的改善效果

张路¹ 范云龙³ 杜应旻^{1,2} 蔡永久¹ 顾红斌³ 姜开荣³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 昆山市傀儡湖水源地生态保护有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要: 采用渔网及土工布挂片双层材料以及填充的水花生构建了生态围隔, 对藻类进行拦截, 降低取水口藻类密度, 同时通过水花生的吸收和拦截, 以及土工布挂片形成的附着生物群落的降解和吸收作用, 降低颗粒态以及溶解态营养盐, 达到取水口水质的改善效果。生态工程实施后, 取水口内悬浮颗粒物显著降低了29.8%, 同时透明度提高了27.5%。对藻类的拦截效果研究表明, 围隔对叶绿素a的去除率为23.0%, 对总藻类数量的去除率为20.7%。通过对围隔内外蓝藻数量在藻类数量的比例分析, 生态围隔对蓝藻的去除率高于总藻类的去除率, 说明了对于藻类拦截的效果具有一定的选择性。对营养盐的改善效果主要体现在颗粒态物质上, 其中颗粒态氮磷的去除率分别为48.4%和31.3%。

关键词: 水源地; 生态围隔; 水质; 蓝藻

中图分类号: Q148; X171.1 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2013)01-0049-06

Improvement of Ecological Enclosure on Water Quality in Drinking Water Source

ZHANG Lu¹, FAN Yun-nong³, DU Yin-yang^{1,2}, CAI Yong-jiu¹, GU Hong-bing³, JIANG Kai-rong³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, P. R. China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China; 3. Limited Company of Drinking Water Sources Protection on Kuilei Lake, Kunshan, Jiangsu 215300, P. R. China)

Abstract: Fishing net and geotextile, together with the Alternanthera philoxeroides, named as the composite ecological enclosure, was constructed in drinking water source to intercept the algae and decrease the algae density within water source. The water quality was also improved by the absorption and interception by Alternanthera philoxeroides and the degradation by biofilms attached on the enclosure media. As the enclosure constructed, the average suspended particulate content was decreased by 29.8%, and the water transparency (Secchi depth) was improved by 27.5%. The algae interception effect showed the chlorophyll a was removed by 23.0%, as well as 20.7% for total algae density. By analysis of the composition of algae colony, the blue-green algae was more effectively intercepted than total algae, which means the selective removal effect on the algae interception. The improvement effects on nutrients removal were mainly on particulate matter. The removal efficiency of particulate nitrogen and phosphorus was 48.4% and 31.3%, respectively.

Key words: Drinking water source; Ecological enclosure; Water quality; Algae

饮用水源是湖泊的重要功能。在长江中下游地区, 由水质型缺水带来的水资源短缺, 成为这一地区供水质量和量的重要问题。由于人类活动的影响及不合理的开发利用, 入湖污染负荷不断增加和累积, 超出了湖泊生态系统的自我修复能力, 湖泊

收稿日期: 2012-09-18; 修订日期: 2012-11-10

基金项目: 昆山市科技局重大项目基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(41271468)

作者简介: 张路(1975—)男, 江苏昆山人, 副研究员, 博士, 主要从事湖泊生态及湖泊环境研究工作。

生态系统受到了严重损害,因此导致水质恶化和富营养化的出现,严重影响了湖泊作为供水水源地功能的发挥。

我国长江中下游湖泊普遍受富营养化和藻类水华影响,其中 $> 10 \text{ km}^2$ 以上湖泊中有 88.3% 已进入富营养化状态,而重富营养的湖泊占 23.4%^[1]。富营养化湖泊往往以较高的初级生产力和藻类生物量为重要特征。而随着藻类的大量生长、堆积、衰亡、腐烂等生理过程,对湖泊水质、渔业生产、旅游等行业产生了重要影响^[2]。如巢湖、太湖、阳澄湖等大型湖泊,是周边城镇的重要水源地,其富营养化和藻类爆发问题,对湖泊水源地和城市供水构成极大的威胁。2007 年 5 月发生的震惊中外的无锡太湖蓝藻危机事件,影响了城市的供水安全,产生了极大的社会影响,造成了社会经济的极大损失^[3]。

为了保障湖泊水源地和城市供水的安全,除了设立多级水源地保护区,对取水口采取保护措施以外,针对富营养化湖泊藻类密度高,易在取水口堆积并影响城市供水水质和供水安全等现状,围隔导流、鱼控藻、贝控藻、絮凝控藻、黏土除藻、机械除藻、纳米气泡除藻甚至人工捞藻等措施,降低取水口藻类密度,保护供水安全的工程实践被广泛试验。鱼贝控藻往往在封闭或者半封闭小型水域成功运用,在具有较短水力停留时间的水源地则难以获得明显效果;絮凝、黏土控藻措施则由于引入了外来物质,从安全性考量,在水源地等敏感水域,难以获得广泛使用;机械除藻和纳米气泡除藻以及人工捞藻,则因不具备预见性,大都在藻类水华严重到一定程度时方得到使用,或作为补救措施,在水源地得到运用。围隔挡藻,作为一种常设性物理生态措施,除了直接起到隔离藻类的目的,同时还能削减取水口风浪,降低底泥悬浮,提高取水口透明度,达到促进取水口沉水植物恢复的目的^[4]。此外,围隔作为水体富营养化治理中常用的物理生态辅助技术,其介质本身还可能具有通过富集周丛生物和形成生物膜净化水质的作用^[5]。而围隔的形式较多样,既有橡胶、PVC 材料包覆的漂浮柔性围隔^[6-8],也有采用钢桩、水泥预制桩^[9]、毛竹等材料固定,工程无纺布、高密度渔网等^[5]等材料作为介质的硬性围隔。在封闭形式上,有全封闭、半封闭、间断性等多种类型。应用于取水口的围隔/围栏,由于考虑到透水率等问题,往往不能采用全封闭或

低透水率的围隔形式^[10]。

通过构建生物浮岛和围隔 2 种水质净化技术一体的生态围隔,运用于阳澄东湖水源地取水口,探讨新型的生态围隔对取水口水质的影响。

1 材料与方法

1.1 生态围隔结构和布设

傀儡湖是昆山市重要的湖泊水源地,其水源来自位于阳澄湖东部取水口,并通过野尤泾输送进入傀儡湖。为保护傀儡湖水源地水质,降低由阳澄湖输入的蓝藻数量,按照湖库型水源地一级保护区保护范围划分方法,将野尤泾入口外侧 500 m 半径作为水源地取水口一级保护区,建设总长为 1 200 m 的防蓝藻围栏,围隔面积 23.5 万 m^2 ,围隔区水量(按平均深度 1.8 m 计算)为 42 万 m^3 。昆山市引江工程投入使用后,长江水源作为昆山市的主水源,阳澄湖-傀儡湖水源的供应量大幅度降低,其中经过野尤泾进入傀儡湖的日取水量为 20 万 t,因此,围隔内换水周期约为 2 d。围隔框架由混凝土方桩与钢管桩组成,外挂镀锌低碳钢斜方眼网片,上挂土工布。为防止波浪对围栏的直接冲击,在围隔外侧设置简易毛竹桩围栏,挂渔网,围拦高度为 3 m,网上纲为直径 3 mm 聚乙烯绳,每间隔 2 m 设一竹桩固定,以加强抗风浪的能力,下端用石笼固定于底泥中,见图 1(a)(b)(c)(d)。其中:图(a)为取水口生态围隔走向及围合位置,图(b)为生态围隔俯视,A1~A2 为围隔内侧,B1~B2 为围隔外侧,图(c)为内侧垂向结构示意图,图(d)为外侧垂向结构。在双层围栏间,建立了以水花生为主要生物种群的漂浮植物拦截带,宽为 10 m。

漂浮植物拦截带的管理主要依植物生长季进行,投放于春季与夏季水华出现之前,在藻类水华出现前,植物覆盖度达到 100% (覆盖宽度 10 m),漂浮植物层厚度约为 30 cm。漂浮植物生长期间,对拦截带捕获的蓝藻群体进行打捞,并配合其他措施(如位于野尤泾的蓝藻收集装置),拦截并减少进入傀儡湖水源地的蓝藻。围隔区域内外均有沉水植物覆盖,主要群落为金鱼藻-马来眼子菜-狐尾藻,围隔外侧沉水植物覆盖度为 70%,内侧略低,为 50%。

1.2 研究方法

2010 年 9 月,围隔内投放水花生 4 个月后,覆盖度达到 100%。在围隔内外共布设了 8 个样点,

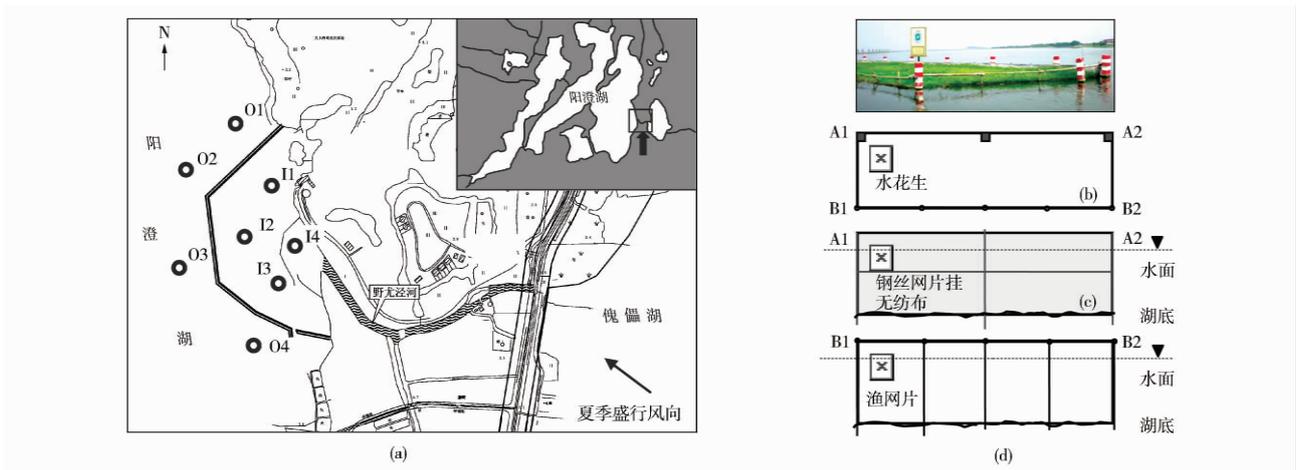


图 1 生态围隔布设及结构

Fig. 1 Sampling sites and construction of ecological enclosure

采样 2 次,其中围栏内 4 个(I 1 ~ I 4),围栏外 4 个(O 1 ~ O 4),水质指标包括:悬浮物(SS, mg/L),铵态氮(NH₄⁺, mg/L),硝态氮(NO₃⁻, mg/L),亚硝态氮(NO₂⁻, mg/L),溶解态磷酸盐(PO₄³⁻, mg/L),总磷(TP, mg/L),总氮(TN, mg/L),溶解态总磷(DTP, mg/L),颗粒态总磷(PP, mg/L),溶解态总氮(DTN, mg/L),颗粒态总氮(PN, mg/L),化学耗氧量(I_{Mn}, mg/L),叶绿素 a(Chla, mg/L),藻类密度及生物量(Algae density, AD, 万 L⁻¹; Algae Bio-mass, AB),透明度(SD, m)。去除率 = (围隔外浓度 - 围隔内浓度) / 围隔外浓度。研究目的主要针对围隔对水环境指标的改善以及藻类密度、生物量的削减以及生态围隔对不同藻类的削减规律。

测定方法均按文献 [11]。其中,悬浮物含量为重量法,氮磷为比色法,TP、TN 为碱性过硫酸钾联合消解法,Chla 为热乙醇萃取法,藻类密度及生物量均为显微镜计数法。颗粒态 TN 和 TP 为 TN、TP 与溶解态氮磷的差值。

2 结果与分析

2.1 悬浮物和透明度改善效果

生态围隔内外水体悬浮物含量及透明度见图 2 (a) (b)。

由图 2 可见,生态围隔投入使用后,围隔外侧 4 个样点水体的悬浮物为(31.28 ± 2.54) mg/L(平均值 ± 标准偏差,下同),其含量为 28.87 mg/L ~ 34.71 mg/L,而围隔内 4 个样点则为(21.96 ±

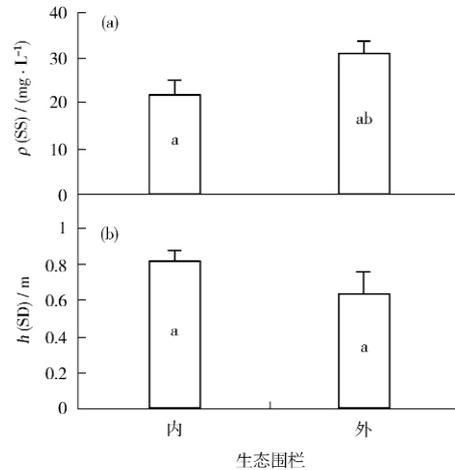


图 2 生态围隔内外水体悬浮物含量及透明度

Fig. 2 Suspended solids and secchi depth inside and outside of the enclosure

3.00) mg/L,范围为 19.86 mg/L ~ 29.29 mg/L。生态围隔对水体悬浮颗粒物含量削减率为 29.8%,围隔内外的差异达到显著水平(异方差 t 检验 $p < 0.05$)。围隔外侧水体透明度为(0.64 ± 0.13) m,内侧水体则为(0.81 ± 0.06) m。经过围隔的拦截,水体颗粒物含量下降,由此提高了水体透明度(27.5%)。图中不同字母表示平均值的差异达到了显著水平 $p < 0.05$ 相同字母表示平均值差异未达到显著水平 $p > 0.05$,下同。

2.2 营养水平改善效果

生态围隔内外水体氮磷含量见图 3 (a) (b) (c) (d) (e) (f)。

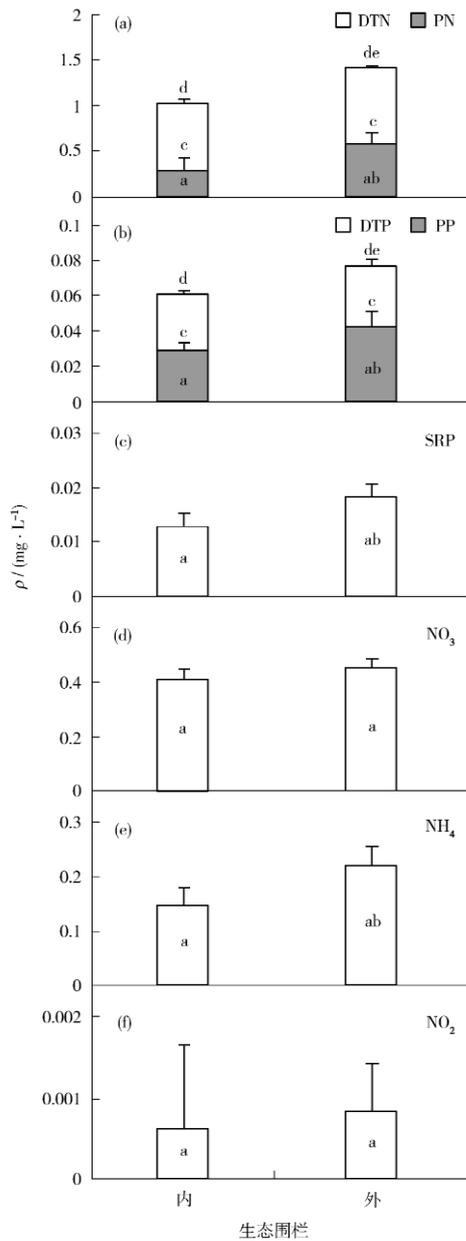


图 3 生态围隔内外水体氮磷含量

Fig. 3 Nitrogen and phosphorus contents inside and outside of the enclosure

由图 3 可见,围隔内外水体总氮和总磷浓度均有显著差异($p < 0.05$),但溶解性的 TN 和 TP 则没有显著差异,说明围隔对溶解态氮磷的去除作用较有限。从颗粒态氮和颗粒态磷含量的围隔内外的显著差异($p < 0.05$)看,也说明生态围隔对颗粒态物质具有显著的去除作用。其中,颗粒态氮的去除率为 48.4% 颗粒态磷的去除率为 31.3%。同时,尽管围隔对溶解态氮磷含量的影响不显著,但仍存

在一定的去除作用,其中对溶解态氮的去除率为 12.6%,对溶解态磷的去除率为 9.5%。

对离子态氮磷的改善,仅限于磷酸盐和铵态氮,这 2 种离子态物质在围隔内外的差异达到了显著水平(异方差 t 检验 $p < 0.05$),对磷酸盐的去除率达到 24.6%,对氨氮的去除率为 29.9%。对硝酸盐影响不显著,其去除率为 9.0%。对亚硝酸盐的去除率尽管达到了 22.3%,但由于其浓度的空间差异及标准偏差较大,其围隔内外的浓度差别并不显著($p > 0.05$)。生态围隔内外有机物含量差异见图 4 (a) (b) (c)。

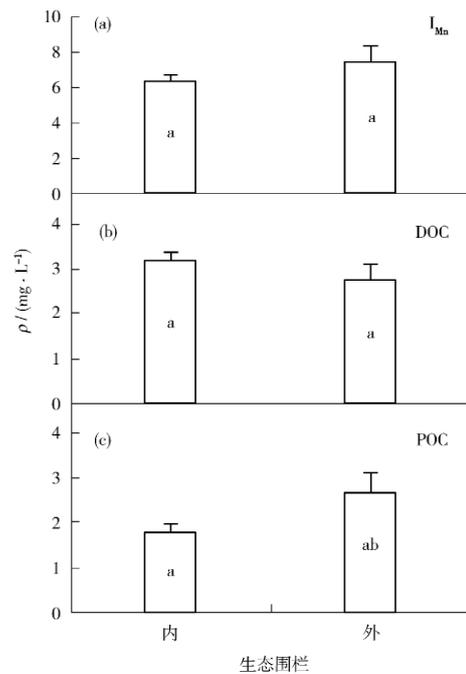


图 4 生态围隔内外有机物含量差异

Fig. 4 Organic contents inside and outside of the enclosure

由图 4 可见,生态围隔对有机物的去除作用并不明显。对 I_{Mn} 尽管有一定的去除作用(13.2%),但其围隔内外浓度的差别并未达到显著水平($p > 0.05$)。特别对溶解态有机物(DOC),围隔内的含量还略高于围隔外,但其差异未达到显著水平($p > 0.05$)。但是,颗粒有机物(POC)含量则不仅得到了改善(31.7%),而且围隔内外浓度的差异还达到了显著水平。

2.3 藻类去除效果

生态围隔内外叶绿素 a 和藻类数量差异见图

5(a) (b) (c) 。

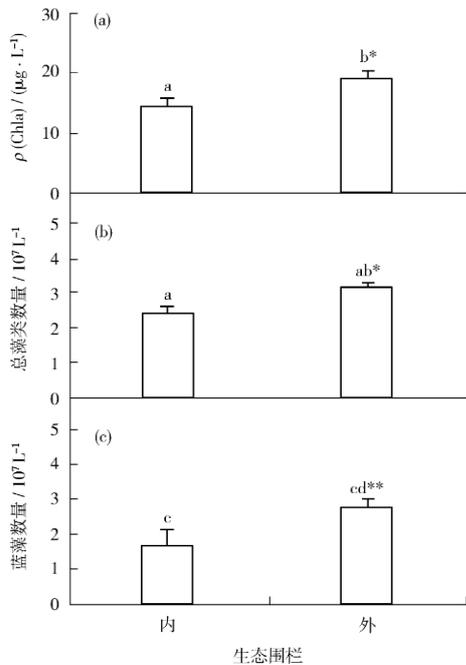


图 5 生态围隔内外 Chla 和藻类数量差异

Fig. 5 Chlorophyll a and algae biomass inside and outside of the enclosure

由图 5 可见,围隔外 Chla 质量浓度为(19.3 ± 2.1) $\mu\text{g}/\text{mL}$,围隔内为(14.9 ± 1.1) $\mu\text{g}/\text{mL}$,其差别达到了显著水平($p < 0.05$),Chla 的去除率为 23.0%。显微镜检结果显示,围隔内外藻类总数量达到了显著差异(异方差 t 检验 $p < 0.05$),其中,围隔外总藻类数量平均值为($3\ 092 \pm 474$) 万 L^{-1} ,而围隔内为($2\ 453 \pm 218$) 万 L^{-1} ,去除率为 20.7%。围隔内外的蓝藻数量差异更达到了统计极显著水平(异方差 t 检验 $p < 0.01$),去除率则达到 38.4%。从藻类种群组成分析,围隔外蓝藻的数量占总藻类数量的 90.0%,而围隔内仅为 69.8%。说明围隔对蓝藻的去除率高于总藻类的去除率,也即围隔对蓝藻的拦截具有一定的选择性。

2.4 讨论

由于水源地保护和供水安全的特殊性,取水口蓝藻去除,受到诸多限制。如不宜采用硫酸铜、化学除藻剂等化学药剂杀藻^[12]。而机械打捞等措施,则效率较为低下,且投资或管理成本较高。虽然恢复沉水植被对于拦截藻类以及净化水质具有

较好的效果,但受到水深的限制,在水深超过真光层深度的水域中,往往不能实施^[13]。而采用生物调控,如依食物链下行效应采用放养食蓝藻的鲢鳙鱼等措施,对换水周期较长的水体,特别是一些封闭湖体较为有效^[14],但对取水口等换水周期较短的水体,其效果尚未得到有效的验证。

生态围隔内采用漂浮植物作为生物拦截介质,其主要优点是不受水位影响、便于管理。由于拦截介质主要位于上层 30 cm 左右的水层内,因此,对于主要积聚于上层水体的藻类,特别是具有气囊结构,可在水柱中垂向运动,以获得光照优势的蓝藻的拦截效率较其他藻类要高。而绿藻、硅藻等不具有气囊结构的浮游藻类,则不具备在水层中垂向运动的能力,因此,较蓝藻而言,在水柱中更倾向于均匀分布。研究中发现围隔对蓝藻的拦截效率要高于总藻类的拦截效率,也说明了这一点。

由于藻类爆发季节一般从春末至秋初,该时段的盛行风向为东南风,而由于阳澄东湖位于阳澄湖的东部,因此,其取水口位于藻类爆发季节盛行风向的上端(见图 1),风浪作用较其他湖区要小。而较小的风浪作用更加有利于蓝藻向上层水体运动和积聚。而蓝藻在该湖区水体藻类群落结构中为优势群体,蓝藻与总藻类比为 61.8% ~ 91.8%,因此,在该取水口采用漂浮植物和土工布双层拦截措施,主要拦截上层水体的蓝藻,对于降低取水口藻类数量,保证供水安全,具有一定的可行性。

生物介质和土工布作为生态围隔的外层和内层拦截介质,不仅对藻类的拦截起到了一定的作用,同时对于改善水质,降低水体氮磷等含量,特别是氨氮含量,起到了较好的作用。在太湖梅梁湾牵龙口水厂水源地经过采用漂浮竹排、围隔以及种植水生植物等生态工程措施后,取水口水质的净化效果同样体现在叶绿素的降低以及氨氮水平的改善上^[9]。由于漂浮植物-水花生本身具有较强的吸收氮磷等营养盐的效果,同时,由于土工布作为拦截的介质,相对比表面积较大,为附着微生物提供了更多降解和吸收营养盐的位点,因此起到了一定固定化微生物膜的效果^[5]。由于水力停留时间较短,对生物介质和土工布介质联合运用的效果,主要体现在对颗粒营养盐的去除上,而对溶解态的营养盐,尽管有一定的去除作用,但并不显著。

阳澄湖为傀儡湖水源的唯一来源,采用生态围隔对水源地取水口进行藻类拦截,通过漂浮植物群

落及围隔介质拦截及其附生生物降解等作用,降低了进入水源地的蓝藻数量,提高了水源地水质。

3 结论

采用漂浮植物-土工布构建的生态围隔,具有管理维护简单的特点。对取水口藻类和水体营养盐的研究表明,围隔对藻类的去除率可达 20.7%,对 Chla 的去除率为 23.0%。对藻类的去除中具有一定的选择性,对能在水面积聚的蓝藻的去除率较其他藻类为高。通过漂浮植物拦截吸收,以及内层土工布附着生物的降解等作用,能显著的降低取水口颗粒态营养盐浓度,而对溶解态氮磷的去除效率略低,且主要体现在对氨氮等物质的去除上。

[参考文献]

- [1] 杨桂山,朱春全,蒋志刚. 长江保护与发展报告[M]. 武汉:长江出版社,2011.
- [2] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. 地球科学进展,2007(22): 896-906.
- [3] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望[J]. 湖泊科学,2009,21(4): 445-455.

- [4] 秦伯强,高光,胡维平等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. 湖泊科学,2005,17: 9-16.
- [5] 戴雅奇,甄或,吴健. 渔网围隔对太湖梅梁湾富营养化水体的改善[J]. 中国环境科学,2006,26(2): 176-179.
- [6] 钟远,金相灿,孙凌,等. 磷及环境因子对太湖梅梁湾藻类生长及其群落影响[J]. 城市环境与城市生态,2005,18(6): 32-36.
- [7] 李海英,冯慕华,李玲,等. 微曝气生态浮床净化入湖河口污染河水原位模型实验[J]. 湖泊科学,2009,21(6): 782.
- [8] 潘继征,李文朝,陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应——I. 抑藻效应[J]. 湖泊科学,2004,16(2): 141-148.
- [9] 秦伯强,胡维平,刘正文,等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报,2007,27(1): 5-12.
- [10] 黄沛生. 太湖消浪工程对沉积物再悬浮的抑制效应及其对水体营养结构的影响[D]. 广州:暨南大学,2005.
- [11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [12] 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,2001,14(3): 273-282.
- [13] 秦伯强. 湖泊生态恢复的基本原理与实现[J]. 生态学报,2007,27(11): 4848-4858.
- [14] 过龙根,邓永良,陶敏,等. 基于湖泊水源地保护的渔业发展模式探讨:以昆山傀儡湖为例[J]. 水生生物学报,2011,35(4): 693-697.

• 简讯 •

5 大原因使 2012 成为气候变化关注年

美国 Triple Pundit 网站近日刊登文章回顾和反思 2012 年,称气候变化在过去一年中备受关注,主要基于以下五大原因:

第五、2012 年是有史以来最热的一年。2012 年 12 月,独立的非盈利性组织“气候中心”发表报告指出“基于我们对截至 2012 年 12 月 10 日以来的 118 年的温度记录的分析,2012 年将是美国大陆 48 个州有记录以来最热的一年的可能性高达 99.999 999 99%。”这并不是说温度极低且寒风刺骨的天数变少了,而是这种天气将不会那么频繁地出现。这对地球而言不是个好消息,因为海平面在随之上升,北极栖息地也在消失。

第四、政客们开始注意气候变化。除了 2012 年秋天举行的美国总统大选辩论相当尴尬地没有提及气候变化之外,商界、政界和媒体领袖中有越来越多的人将这一问题放在了显著地位。10 家公司中有 8 家都将气候变化纳入其业务议程中,世界银行、美国气象学会等组织,乃至世界最大的矿业公司澳大利亚必和必拓公司,都已发声明强调气候变化这一现实及其威胁。纽约州州长科莫、纽约市市长布隆伯格和其他政要也开始将为气候变化做准备作为首要的政策问题。

第三、今年夏天美国遭受了近 50 年来最严重的干旱。不幸的是,气候科学家们预测类似的干旱将变得更加常见。乐施会表示,旱灾除了给农民和普通人带来经济影响外,不断上涨的农作物价格也将“给贫困人口岌岌可危的生活和生计造成严重后果”。专家称,这将导致食品骚乱以超出我们预期的速度蔓延,并最终引发政治动荡。

第二、滑雪产业开始关注气候变化。2012 年美国自然资源保护委员会的一份报告称,在降雪量较少的年份,美国滑雪产业损失了近 17 亿美元(1 美元约合 6.23 元人民币)的收入和 1.3 万个就业机会。报告指出,未来几年东北部地区的平均积雪天数将减少 50% 至 75%。

首要原因、飓风“桑迪”。气候科学家们长期以来一直警告说,曼哈顿的大部分地区到本世纪末将被水淹没。2012 年 10 月 29 日,这一切就在人们眼前上演。飓风过后,受灾严重的三个州能源供应短缺,很多人承受着洪水和大风造成的破坏,经历了交通瘫痪、学校停课、餐馆停业、车辆浸水等种种不便。

摘自 www.jshb.gov.cn 2013-01-09