

城市湖泊富营养生态修复技术研究与应用

范敬兰¹, 刘 奉², 刘 雨³

(1. 徐州市水利科学研究所, 江苏 徐州 221018; 2. 徐州市水利学会, 江苏 徐州 221018;
3. 江苏永冠给排水设备有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘要: 本文在依托最前沿的理念和理论成果, 因地制宜地把工程措施与植物措施有机结合起来, 通过应用水下森林、生态浮岛、生态陷阱等生态治理技术, 进行城市湖泊大水体综合治理试验示范, 探索出适宜在城市湖泊的生态治理技术, 实现对城市湖泊长效治理的目标。

关键词: 湖泊; 富营养化; 生态修复; 长效

中图分类号: TV882.9 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2016)02-0021-07

Research and application on ecological rehabilitation technology of urban eutrophic lakes

FAN Jinglan¹, LIU Feng², LIU Yu³

(1. Xuzhou Water Conservancy Science Research Institute, Xuzhou 221018, Jiangsu;

2. Xuzhou Water Conservancy Society, Xuzhou 221018, Jiangsu;

3. Jiangsu Yongguan Water Supply and Drainage Equipment Co. Ltd, Xuzhou 221116, Jiangsu)

Abstract: Based on the Frontier concept and theoretical results, engineering measures and planting measures are combined with local conditions. Such as underwater forest, the ecological floating island, ecological trap, many ecological management techniques are applicate on urban lakes comprehensive experiment and demonstration. Suitable ecological management technology is explored to achieve the goal of long term control in urban lakes.

Key words: lakes; eutrophication; ecological rehabilitation; long term

0 前言

城市湖泊是指位于大中城市城区或近郊的湖泊。城市湖泊的流速普遍较小且无定向流动, 湖水滞留时间长, 不利于污染水体的稀释扩散。城市湖泊位于人类活动密集区, 在面源污染进入以及引水所带来的大量营养物质超过其自身自净能力时, 其生态脆弱性相较于其他湖泊更为明显地表现出来。城市湖泊治理首先要治污, 清除排污口, 加强雨水、污水排放系统的分流改道, 阻止污水入湖。其次要保护城市湖泊水生态安全, 让湖泊休养生息, 就要加强整个水域的管理。通过生态水网工程建设来构建生态水网湿地群, 建立湖泊水

系的良性循环系统, 提高湖泊水体自净能力。

近年来, 徐州市大力修复生态, 为民造绿, 把昔日煤城留下的塌陷地和风景区, 打造成“一城青山半城湖”的绿色城市。然而拥有“九湖绕城”的美丽徐州, 湖泊水体的富营养化问题也非常突出, 如部分湖泊沉水植物消失, 水中蓝、绿藻大量繁殖, 浮游植物个体数剧增, 水中的悬浮物量(浮游生物、细菌)增加, 形成“水华”, 影响了景区质量, 群众提升水质的呼声很高, 因此, 湖泊的生态修复、提升湖泊水质已刻不容缓。

1 徐州城市湖泊主要水体生态状况分析

徐州市城市湖泊主要有云龙湖、大龙湖、九

收稿日期: 2015-12-30

第七届江苏水论坛优秀青年论文

作者简介: 范敬兰(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事水土保持、水生态治理和农田水利工作。

里湖、如意湖、金龙湖、九龙湖等。为了解徐州市重要水体的生态状况,课题组选取了云龙湖、大龙湖、楚王陵如意湖及入湖的玉带河、军民河、王瑶河和滨湖公园如意河、由采煤塌陷地修复成的九里湖及其附属的东沟、南沟、西沟、北沟作为重要水体代表,通过原位监测或室内分析,调查了水体浊度、透明度、溶解氧、电导率、氧化还原电位(Eh)、铵态氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数等指标,基本查明了徐州市重要水体的本底生态状况,为水体生态修复和生态文明建设提供理论基础和科技支撑。

1.1 云龙湖水质状况及分析

云龙湖位于徐州南部风景区,属浅水城市湖泊,2002年景区被水利部评选为国家级水利风景区。云龙湖包括东湖、西湖和小南湖,其中东湖和西湖以湖中路为界,小南湖为新开发的景区,水面彼此连通,湖区水域总面积达7.05 km²,最大水深5.1 m,平均水深约2.5 m。云龙湖地势较高,集水面积小,来水受季节性影响较大,徐州年降雨不均,年内大部分时间来水较少,加之本地区年平均蒸发量大于年平均降雨量,因此云龙湖蓄水需通过补水解决,从丁万河通过天齐站、大孤山站翻引京杭运河水,经故黄河、闸河、玉带河调入云龙湖。

近年来,徐州市政府投入大量人力、物力,持续开展云龙湖的综合整治工作,取得了显著成效。通过实施云龙湖截污、引水等综合整治工程,水体中的COD_{Mn}、氨氮、总磷、总氮等污染物浓度明显降低。根据对云龙湖的水质监测结果(见表1),湖水的色、味等感官性状指标也较为良好,水质改善显著。其中东湖和西湖整体水质优于小南湖;总氮和总磷仍存在超标情况,这两项污染指标控制是云龙湖水质提升的关键所在。现行地表水环境质量标准对湖、库总氮(磷)规定的限值较严,一般城市湖泊水体的总氮(磷)较难达标。

根据监测结果(表1),用高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)和透明度(SD)等指

标来反映云龙湖的富营养化状况,采用综合营养状态指数法进行评价。东湖和西湖均为轻度富营养化,小南湖为中度富营养化。小南湖富营养化程度偏高主要原因可能有:一是小南湖水面较小,水湾和死角区多,水体流动性差,自净能力弱;二是部分生活污水经军民河汇入小南湖,造成该区域氮、磷含量偏高。

目前,云龙湖水体污染的主要途径为:(1)区域内居民生活污水未经处理直接排入城市雨水管道,而后直接进入湖泊,也是造成湖泊污染的重要原因。虽然对云龙湖实施了环湖污水截流,但王瑶河及军民河沿线区域仍存在雨污混排情况;(2)补水水源带来污染。云龙湖出水线路较长,丁万河、故黄河、闸河、玉带河等补水线路沿岸存在禽畜养殖及生活排污等,导致补水水质不达标。(3)景区内娱乐设施、餐饮及旅游带来的污染。(4)通过大雨、暴雨形成地表径流将污染物带入。

1.2 采煤塌陷地修复成的九里湖、东沟、南沟、西沟、北沟区域水质现状分析

九里湖位于徐州城市北部,由采煤塌陷地改造而成,因在原九里区境内又与九里山组成“湖光山色”而得名。2007年初,九里湖生态湿地公园正式开工建设,2013年初,国家林业局命名九里湖湿地为国家湿地公园。九里湖主体湖面为3.5 km²,是徐州首个“生态湿地公园”,使徐州形成“南有云龙山、云龙湖,北有九里山、九里湖”的山水格局。

根据水质监测结果来分析(表2),九里湖、东沟、南沟、西沟、北沟水质状况总体较差,水体富营养化状态较重,受污染状况严重。特别是东沟、南沟、西沟、北沟等塌陷地复垦时挖掘的灌溉沟渠,水质状况更差,浮萍等大量漂浮植物铺满水面,导致水体的溶解氧含量极低。

九里塌陷地复垦区水质较差的可能原因有:存在大量工业污染源,该区域有大量工矿企业,如电力、锻造、建材、采矿等行业的工厂,多为高能耗且对环境污染大的企业,监管难度较大。此外,该区

表1 云龙湖主要水质指标统计表

监测区	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 (μS/cm)	氨氮(mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	总磷(mg/L)	总氮(mg/L)
东湖	8.21	9.7	23	34	1061	0.35	4.0	0.079	1.03
西湖	8.22	9.9	19	36	1101	0.31	3.9	0.072	1.03
小南湖	8.22	9.5	32	32	1108	0.44	4.4	0.100	1.31

表 2 九里湖、东沟、南沟、西沟、北沟主要水质指标统计表

监测区	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	COD _{Mn} (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)
九里湖(东湖)	8.79	8.60	36	29	2280	6.05	0.26	0.07
九里湖(西湖)	9.01	11.60	51	23	2290	6.04	0.28	0.08
东沟	7.76	1.10	21	浮萍铺满	2250	6.20	0.31	0.12
南沟	7.51	0.57	18	浮萍铺满	1373	6.30	0.29	0.13
西沟	7.16	0.34	23	浮萍铺满	1356	6.40	0.42	0.18
北沟	7.48	1.15	22	浮萍铺满	1373	5.60	0.28	0.12

域的生活污水的排放也是水质较差的原因之一。

水体污染治理措施与建议: 加强对工矿企业污水排放的监管, 实施全面控源截污, 在此基础上, 尽快开展对该区域水体生态修复的研究与实践。

1.3 楚王陵如意湖水质现状分析

楚王陵如意湖区域, 位于徐州市汉文化景区内, 水域总面积达 6.7 hm², 最大水深 5 m 左右, 平均水深约 2.5 m 左右。

根据水质监测结果来分析(表 3), 楚王陵如意湖水质状况同样较差, 水体富营养化严重, 污染程度较高, 水体中的总氮含量较高, 水质总体为 V 类水。楚王陵景区内生活污水是水体重要的污染源。由于水质较差, 每年夏秋季节都会有大量的鱼虾等水生动物死亡。楚王陵是徐州汉文化景区的重要组成部分, 徐州汉文化景区作为徐州城

市名片。目前, 如意湖的水质状况显然难以达到要求, 迫切需要行之有效的水体生态修复措施。

1.4 大龙湖水质现状分析

根据水质监测结果来分析(表 4), 大龙湖与云龙湖水质状况相当, 水质状况优于楚王陵如意湖以及采煤塌陷地修复成的九里湖和沟渠水系。但是大龙湖的水质状况仍然不容乐观, 总氮含量较高, 从总氮含量来, 水体水质为 V 类水, 呈现出一定程度的富营养化。

1.5 玉带河、军民河、王瑶河和滨湖公园如意河水质现状分析

根据水质监测结果来分析(表 5), 玉带河的水质良好, 而王瑶河、如意河和军民河的水质较差, 富营养化程度较高, 尤其是军民河的水质。玉带河的水是用来补给云龙湖的清水, 主要引自水质好的河水和地下水, 水体的透明度较高, 浊度较

表 3 楚王陵如意湖主要水质指标统计表

监测区	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	COD _{Mn} (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
楚王陵如意湖	8.47	6.5	14	41	1063	5.3	0.15	0.069	1.72

表 4 大龙湖主要水质指标统计表

监测区	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	COD _{Mn} (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
大龙湖	8.83	12.40	19.00	35.00	656.00	4.50	0.33	0.08	1.17

表 5 玉带河、军民河和王瑶河主要水质指标统计表

监测区	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	COD _{Mn} (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
玉带河	7.83	10.3	5.5	90	1456.0	4.0	0.26	0.069	1.01
军民河	7.42	2.3	17.0	39	622.5	5.4	0.36	0.330	2.59
王瑶河	7.75	6.0	14.0	33	950.0	5.0	0.33	0.290	1.54
如意河	8.30	5.6	13.0	31	1131.0	5.1	0.31	0.102	1.64

低,高锰酸钾指数、氨氮和总磷均可以达到 III 类水质,总氮稍微有一点超标,在 IV 类水的范围内。王瑶河、如意河和军民河的水体透明度较差,浊度较高,水体中的总氮总磷含量较高,水质为 V 类水。军民河是周围区域向云龙湖排污通道之一,水质较差,富营养化程度较高。王瑶河和如意河是云龙湖换水时,湖水重要的下泄通道,对比玉带河与王瑶河和如意河之间的水质状况的表明,除了有外来污染源,云龙湖底泥营养元素向上覆水层的释放,是进入云龙湖的水与云龙湖输出的水之间水质差异显著的重要原因。

2 城市湖泊水体污染治理措施与建议

(1) 实施全面控源截污

首先,控制污染源头,采用各种措施对云龙湖入湖河道及补水线路沿线存在的污染源实施综合整治,如关闭搬迁排污企业、养殖业等污染源,生活污水截污接入管网,面污染源实施口门控制。治理重点为云龙湖上游养殖业、火花工业片区及王瑶河两岸排污企业关停转迁;其次,扩大截污范围,完善补水线路沿线截污管网,将污水全部引入污水处理厂。

(2) 环保清淤,水系贯通

一方面,科学制定湖区清淤计划,采取环保生态清淤方法,重点清理小南湖等局部区域的湖底面层淤泥,提高湖区深度,同时去除底泥的污染物含量,有效控制由于夏、秋季温度升高后,底泥中有机物分解释放对水体水质产生不良影响。另一方面,对玉带河、王瑶河等入湖河道实施清淤和河道综合整治,通过生态清淤,消减底泥中总氮总磷,保障河道水系畅通,从而提高入湖河道水质。

(3) 生态补水

定期补水,加速湖水交换,使湖泊水体“动起来”,提高其自净能力,从而可大大提高湖泊的水质,降低湖泊的富营养化程度。

(4) 生态修复

城市湖泊的自然生态系统以景观植物为主,应增加一些具有净化富营养化水体功能的水生植物,建议种植一些长得过快可适当收割的挺水植物,如芦苇、菱草等;而在湖沿岸及湖湾处,可以种植一些沉水植物,如马来眼子草、苦草、金鱼藻等,这些水生植物能吸收底泥和水体中的氮磷等营养物质,抑制藻类的生长和繁殖。同时,水生植

物以收获生物产品的途径输出湖外,促进湖区氮磷的输出。发展适量的水生养殖,如放养一定数量、种类并且比例相当的鱼类。严禁人工投饵,采用水层食物链的控制法,增加以藻类为食的鱼类投放,减少以吃浮游动物为主和吃水生植物的鱼类投放。通过这些途径逐步改善湖的生态结构,达到增大水体的自净能力和防治富营养化的目的。

(5) 加强管理

建立长效管理机制,全面规范城市湖泊及补水线路的环境管理,严禁丢弃生活垃圾和污水排放,政府投入专项资金全面实施污染源截污工程、水质提升工程、生态治理工程等,加强湖泊水体水质监测及水生态监测。同时,加大宣传教育,不断提高公众的环境意识。建议在实施全面截污的基础上,重点研究引进浅水湖泊水体生态治理技术,不断提高水体自净化能力,确保各项水质指标持续达标。

3 探讨城市湖泊富营养化水体生态修复技术途径

探讨徐州市云龙湖、如意湖、奎河及青岛市少海湖城市湖泊富营养化水体的生态修复的集成方案,通过构建水下森林、生态浮岛、生态陷阱等对城市湖泊水体进行生态修复。

3.1 “水下森林”生态修复技术

“水下森林”顾名思义就是在水下形成以沉水植物繁衍的水草群落。沉水植物的茎、叶和表皮都与根一样具有吸收作用,增加水体透明度,直接从水体中吸收氮、磷等营养物质,有效降低沉积物悬浮和内源污染的释放。同时,沉水植物作为水生生态系统的初级生产者,为水生动物提供食物和栖息场所,提高水体的生物多样性,促进水生生态系统结构和功能逐渐完善。利用沉水植被可以构建“水下森林”,使水体呈现清澈见底的景观效果,充分展示生态修复的景观效应。因此,沉水植被恢复是富营养化水体生态修复和重建的首要 and 关键驱动因素。

水下森林构建选择的是一种特殊的苦草种群,多年生,在水下生长最大高度 70 ~ 80 cm,它开花结果种子不成熟、有性繁衍少,主要是依靠发达的根系无性繁衍,一年四季均能生长,夏、秋季生长旺盛。

2014年7月中旬,楚王陵如意湖试验区构建

完毕, 试验区内的水质状况逐渐优化(表 6)。随着沉水植物的逐渐生长, 现已铺满湖底。与试验区外相比, 试验区的水质逐步改善。在 2014 年 9 月中旬沉水植物密齿苦草铺满试验区的水体后, 试验区内水体的浊度降低至 1NTU 左右, 远低于试验区外的水体浊度, 同时也远低于沉水植物种植前的试验区内的水体浊度。试验区内水体透明度可到 120 cm, 显著高于试验区外的水体透明度, 同时也显著高于沉水植物密齿苦草种植前的试验区内的水体透明度。沉水植物密齿苦草的生长, 通过光合作用, 向水体分泌氧气, 显著增加了试验区内水体溶解氧含量。此外, 沉水植物密齿苦草在试验区内的生长为底栖生物提供了食物和生境, 据观察, 试验区内的底栖生物的种类和数量明显低于试验区外。

表 6 随着密齿苦草的生长, 试验区内外主要水质指标对比

日期	浊度 (NTU)		透明度 (cm)		溶解氧 (mg/L)	
	试验区内	试验区外	试验区内	试验区外	试验区内	试验区外
2014年8月10日	13.28	18.15	41	37	9.1	8.80
2014年8月25日	7.52	9.92	55	41	7.3	5.80
2014年9月4日	8.14	11.43	53	48	10.4	6.20
2014年9月8日	2.03	8.84	69	47	12.1	5.70
2014年9月12日	4.64	11.23	65	49	11.2	6.30
2014年9月20日	0.76	8.13	78	47	12.6	7.50
2014年12月6日	1.11	8.73	125	65	10.6	7.71
2015年1月31日	1.21	8.96	121	55	9.5	5.90
2015年3月20日	0.95	14.00	125	38	10.1	6.20

“水下森林”构建效果:

(1) 景观效果: 清澈见底、一年四季均为水下绿色水草, 使沉水植物净化有更多的亮点。

(2) 水质景观效果: 提高了水体透明度, 同时会伴随着水体富营养化物质下降, 水体水质国标等级提高。

(3) 可持续性: 由于定向培育纯化的沉水植物群落, 发达无性繁衍根系, 多年生的水生植物生态特征, 使它能够保持种群延续性。

3.2 “生态陷阱”生态修复技术

该技术利用风场、水体流场和蓝藻(微囊藻)自身水平迁移规律, 在蓝藻水华暴发的早期, 识别出大面积水体蓝藻控制的关键区域, 在这些关键区域内利用水流流量调控, 结合食物链控藻, 建立一个蓝藻与枝角类、滤食性鱼类等之间的生态位

高度重合模式, 从而最终达到有效完全地控制蓝藻水华灾害的目的。基于此原理构建的能高效消灭蓝藻的区域称之为“生态陷阱”。

本研究探讨利用枝角类、鲢鱼协同滤食作用清除关键区域水体早期生长的蓝藻颗粒。首先, 仅投鲢鱼品种、禁用鳙鱼是少海湖控藻重要措施之一, 鳙鱼禁止投放目的是让少海湖内枝角类有更多的生存空间, 从而发挥高效滤藻效应。其次, 实施生态技术给少海湖创造水体微型动物“枝角类”生存空间环境, 利用它高密度生长和与蓝藻颗粒同分布、能滤食细小蓝藻颗粒特点, 从而弥补鲢鱼在空间分布上滤藻效率不足, 提高生态治藻的早期效果。主要控藻原理是: 由于湖内无鳙鱼存在, 使少海湖内枝角类有了巨大繁衍生长的空间, 从 3 月份开始枝角类大量繁衍并形成巨大的生物量, 在

鲢鱼还未滤食之前, 枝角类大量清滤水体越冬蓝藻复苏的早期细胞, 从而减少了早期蓝藻生物量。蓝藻可随风漂移到下风区域、芦苇丛中繁衍, 枝角类能随风漂移能进入任何滞留水面所以枝角类能与蓝藻颗粒同分布, 可以随时随地清滤蓝藻繁衍幼体细胞, 而鲢鱼滤食大颗粒蓝藻细胞。随着水温的增加, 少海湖内鲢鱼发挥高效滤藻作用。同时, 鱼加速生长, 投放时 1.2 斤/尾, 现增长 4.2 斤/尾, 每尾鲢鱼约增重 3 斤左右, 按鱼的增长速率与滤食量规律, 每增重一斤需要滤藻 100 斤, 少海湖投放大规格鲢鱼 24 万尾, 共约消耗藻类 7 千万斤左右。鲢鱼与枝角类两种滤食动物协同作用, 大大提高了生态治藻效率。

示范结果: 通过对比少海湖 2010 年和 2014 年同期的遥感影像, 2010 年少海湖大面积爆发蓝

藻水华,而2014年少海湖全湖无蓝藻水华发生,表明利用枝角类、鲢鱼协同构建的生态陷阱完全控制了蓝藻水华。对比相同位置生态治理蓝藻前后的照片发现,治理前,蓝藻水华爆发严重,治理后,无蓝藻水华发生。

浮岛制作过程:把植物种在花盆营养土中,然后把整个盆栽移动到载体上,盆底部要留有洞,让植物根系向下延伸接触水面,吸收水分和其他营养,载体采用拼装的方式安装。

本课题的生态浮岛从开始运行至今,长势良

表7 生态陷阱技术治理蓝藻前后的少海湖蓝藻数量及水质状况对比

	2010年7月19日		2014年7月6日	
	南湖	北湖	南湖	北湖
水体状况	蓝藻水华 有异味	蓝藻水华 有异味	无蓝藻 无异味	无蓝藻 无异味
优势种类	微囊藻	微囊藻	小环藻、隐藻	小环藻、隐藻
叶绿素	498.12 mg/m ³	352.4 mg/m ³	75.2 mg/m ³	55.3 mg/m ³
总氮	2.1 mg/l	1.98 mg/l	3.2 mg/l	6.1 mg/l
总磷	0.11 mg/l	0.23 mg/l	0.13 mg/l	0.2 mg/l

3.3 “生态浮岛”生态修复技术

生态浮岛是利用生态学原理,在水面人工种植一定的植物,以降解水中COD、氨氮、总氮、总磷含量的人工浮岛。浮岛上植物的根系伸入水体,吸收水体富营养物质,使水体透明度得以提高,同时水质指标也得到有效的改善,特别是对藻类有很好的抑制效果。生态浮岛对水质净化最主要的功效是利用植物的根系吸收水中的富营养物质,例如总磷、氨氮、有机物等,使得水体的营养得到转移,减轻水体由于封闭或自循环不足带来的水体腥臭、富营养化现象。

植物的生长繁殖过程需要大量营养,生态浮岛植物的根系在水中形成的富氧环境和根系表面的生物膜能高效的降解水中的COD、氮、磷的含量,而根系膜内微生物产生的多聚糖能有效吸附水中悬浮物,使水质变好。

主要选择多年生草本植物,选取的植物要净化污水能力强,易于维护等特点,本次示范选取主要有美人蕉、千屈菜、菖蒲和狐尾藻这4种植物。

好。2015年8月份测得根须最长达70cm,千屈菜植株高度在1.0~1.5m,其他植物长势也良好。浮岛的植株根系逐步生长,吸收水体有害物质会逐步提高。奎河是流动性的省际河流,由于其有泄洪任务,无法进行拦挡,生态浮岛只能在开放的河道进行布设。在一般没有降水泄洪的情况下,其流量基本保持在1m³/s左右,每天断面水量交换达24t。生态浮岛处理的水体会随着水流流走,故生态浮岛处的水质化验指标变化不会太大。

生态浮岛能有效净化水质:生态浮岛利用水生植物、动物、昆虫以及微生物在自然水环境中的吸收、摄食、消化、分解等一系列生物、化学功能,实现富营养水体的生态治理。

生态浮岛能提升河道景观:河道上应用生态浮岛既可修复水体、治污防污,还可以美化水域环境,打造亮丽的水上景观,提升城市园林建设的整体档次和品位。

生态浮床有净化水质、美化水面景观、提供水生生物栖息空间、进行环境教育等多种功能。优

表8 奎河生态浮岛处水质化验结果对比表

地点	时间	pH	溶解氧 (mg/L)	浊度 (NTU)	透明度 (cm)	电导率 (μS/cm)	COD _{Mn} (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
浮岛上游1km	2015年5月	7.57	5.35	24.5	25	715	8.9	0.68	0.098	2.95
浮岛中游	2015年5月	7.75	8.45	21.3	30	843	7.8	0.57	0.085	2.52

点:①浮岛浮体可大可小,形状变化多样,易于制作和搬运;②跟人工湿地相比,植物更容易栽培;③无需专人管理,只需定期清理,大大减少人工和设备的投资,降低了维护保养费和设备的运行费用等。

4 结论

近年来,徐州市为了城区水体的水质改善,修建了大量水利工程,进行水系的贯通,但是水体自身的生态系统结构和功能不健全,水体基本没有自净能力,外源营养和污染物输入以及水体底泥的内源性营养元素持续向水体的释放,往往导致水体富营养化或水体污染,导致水质恶化。由此可见,仅通过修建水利工程,难以彻底改善水体的水质状况。当务之急的是,对重要水体进行生态修复,逐步恢复由水生植物、水生动物和微生物等组成的水体生态结构,完善其生态功能,使水体具备强大的自净能力。对水体的生态修复,是实现水生态文明建设的必由之路。

从调查的徐州市重要水体云龙湖、军民河、王瑶河、玉带河、滨湖公园如意河、大龙湖、楚王陵如意湖,以及由采煤塌陷地修复成的九里湖及其附属的东沟、南沟、西沟、北沟水质状况看,除玉带河外的水体均表现出了富营养化,水体的总磷总氮含量较高,透明度较低,约为30至40 cm,其中云龙湖和大龙湖的水体水质相对较好,采煤塌陷区的九里湖及其东沟、南沟、西沟、北沟的水质相对最差。玉带河的水是用来补给云龙湖的清水,主要引自水质好的河水和地下水,水体的透明度较高,浊度较低,高锰酸钾指数、氨氮和总磷均可以达到Ⅲ类水水质,总氮稍微有一点超标,在Ⅳ类水的范围内。徐州其他重要水体水质多为Ⅴ类水。

根据在如意湖1万 m^2 开放水体进行沉水植物种植试验,通过构建沉水植物,如意湖水体的透明度提高很快,浊度比所调查的徐州市重要水体都低,其他水质指标都得到了很大的改善。在

徐州地区利用沉水植物规模化修复水体,恢复水体的自净能力,是完全可行的。

通过实施生态陷阱控藻的技术方案,少海湖蓝藻水华现象消失,治理后的水体有些小环藻、隐藻等浮游生物,水体无异味。水体中叶绿素含量显著降低,由 500 mg/m^3 降至 50 mg/m^3 左右。通过纯生态的方式,即构建生态陷阱来治理治理蓝藻水华的技术方案,完全可以控制住蓝藻水华的爆发。

本课题研究为分步骤、分阶段的解决治理蓝藻水华及修复富营养化水体的两大难题提供了新思路,即在短期内无法解决水体富营养化问题的情况下,能够通过生态陷阱的构建有效控制和预防蓝藻水华暴发,为解决水体富营养化问题赢得时间;再通过沉水植物和生态浮岛的构建,对水体从底泥到水体全方位的生态治理,在中长期的时间尺度上逐步解决水体富营养化的问题。

参考文献:

- [1] Annadotter, H., G. Cronberg, R. Aagren, B. Lundstedt, P. A. Nilsson, and S. Strobeck [J]. Multiple techniques for lake restoration. *Hydrobiologia* 1999, 395: 77-85.
- [2] Carpenter, S. R.. Eutrophication of aquatic ecosystems: Bistability and soil phosphorus [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2005, 102: 10002-10005.
- [3] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策 [J]. *中国农学通报* 2006 (22): 335-340.
- [4] 邓红兵, 王青春, 王庆礼, 等. 河岸植被缓冲带与河岸带管理 [J]. *应用生态学报* 2001 (12): 951-954.
- [5] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理 [J]. *科学通报* 2004 (49): 1523-1528.
- [6] 国家环保总局科技标准司. 2001. 中国湖泊富营养化及其防治研究. [M] 北京: 中国环境科学出版社.
- [7] 郝红艳, 单爱琴, 纪振, 等. 徐州市云龙湖富营养化特征分析与评价 [J]. *资源开发与市场* 2006 (22): 121-122.

(责任编辑: 张亚男)