

两种生态净化措施对水源水库光学环境的影响

余柔柔¹, 钱佳欢², 朱宜平³, 张海平^{1*} (1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 3. 上海城投原水有限公司, 上海 200050)

摘要: 为了评估生态净化措施对水体光学环境的影响, 以上海金泽水库为例, 在微纳米曝气复氧和水生植物净化两种生态净化措施前后布设采样点进行了光学衰减系数(水体光合辐照度(PAR)衰减系数)、真光层深度和透明度及相关水质指标的监测和分析。结果表明: 水生植物净化和曝气复氧净化措施有利于水体光学环境的改善, 经微纳米曝气后, 水体透明度增大 20%~25%, 真光层深度增大 2.2%~14.8%, 光学衰减系数降低 0.4%~4.4%; 经水生植物净化后, 水体透明度增大 20%~29.4%, 真光层深度增大 6%~20%, 光学衰减系数降低 17.3%~20.5%。逐步回归结果表明不同生态净化措施的光学环境改善机制不同, 微纳米曝气主要通过叶绿素、溶解性有机物、温度、溶解氧影响水体光学环境, 水生植物净化主要通过浊度影响水体光学环境。冬季, 两种生态净化措施对总氮和溶解性有机物均没有改善效果。

关键词: 微纳米曝气; 水生植物净化; 生态净化; 光学衰减系数; 水体光学环境

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)02-0785-07

Influence of two ecological purification measures on water optical environment in a source water reservoir. YU Rou-rou¹, QIAN Jia-huan², ZHU Yi-ping³, ZHANG Hai-ping^{1*} (1. Department of Environmental Science, Tongji University, Shanghai 200092; 2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd, Shanghai 200120, China; 3. Shanghai Chengtou Raw Water, Ltd., Shanghai 200050, China). *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 785~791

Abstract: Photosynthetic active radiation (PAR) attenuation coefficient, euphotic depth, transparency and related water quality indices were measured in Jinze Reservoir in Shanghai to evaluate the influence of two ecological purification measures, i.e., aquatic plant purification and micro nano aeration, on water optical environment. Results showed that the two ecological purification measures could significantly improve the water optical environment. After aeration, transparency was increased by 20%~25% and euphotic depth by 2.2%~14.8%; PAR attenuation coefficient was decreased by 0.4%~4.4%. After aquatic plant purification, transparency was increased by 20%~29.4% and euphotic depth by 6%~20%; PAR attenuation coefficient was reduced by 17.3%~20.5%. The panel regressions results indicated that the influence mechanism of these two ecological purification measures were different. The water optical environment was improved by the micro nano aeration through control of chlorophyll, dissolved organic matter, temperature and dissolved oxygen, while it was improved by aquatic plants through turbidity control. On the other hand, the two ecological purification measures had no influence on the removal of total nitrogen and dissolved organic matter in winter.

Key words: micro nano aeration; aquatic plant purification; ecological purification; photosynthetic attenuation coefficient; aquatic water environment

湖泊水下光照对水生生态系统影响深刻, 不仅影响浮游藻类、沉水植物的生长、繁殖, 还决定了水体的初级生产力^[1-2], 浮游动物和鱼类的捕食^[3], 因此有必要研究水下光场的特征, 为水生生态系统的变化及水体富营养化研究提供基础数据。

已有大量针对如 Apopka 湖^[4-5]、太湖^[6-7]、三峡支流^[8]、巢湖^[9-10]、丹江口水库^[11]、长江中下游浅水湖泊^[12]等主要富营养化湖库水体的光学衰减特性和透明度、真光层深度的研究, 研究表明, 光的衰减主要影响因素有四方面, 分别是纯水自身、水体溶解性有机物、悬浮颗粒物和叶绿素 a。学者针对纯水自身、水体溶解性有机物、悬浮颗粒物、叶绿素 a

等消光因子对不同波长光的衰减效应做过大量分析, 同时也得出了一些与光的衰减有关的参数化的结果^[13-14], 为各光学指标的数学模拟提供了很好的模型支撑。然而, 这些研究多集中在一些天然湖泊, 针对人工型水源湖库的研究较少。所谓人工型水源湖库, 指的是为满足水质提升的要求, 人工生态净化技术诸如人工曝气^[15-17]、水生植物强化净化^[18-19]等在景观水体和湖泊河流的广泛应用。其中, 水体曝气作为一种投资少、见效快的治理技术得到广泛应用,

收稿日期: 2018-07-14

基金项目: 国家“十三五”水专项子课题(2017ZX07207003-02)

* 责任作者, 教授, hpzhang@tongji.edu.cn

我国常用曝气设备溶氧率低、能耗高,微纳米气泡发生装置能生产直径在 $50\mu\text{m}$ 和数十 nm 之间的微小气泡,溶氧效率高;水生植物净化技术利用水生植物治理水体富营养化,由于具有净化效果好、投资少,并且不产生二次污染等优点,越来越受到人们的重视和研究.从提升水体景观与改善水质的角度出发,人们通常在水域内种植浮水植物、挺水植物、沉水植物等水生植物^[18-19],通过植物的吸附、沉淀等作用改善水体污染状况,提升水域自净能力^[21-22].近年来,还出现了纳米吸附膜、沸石床面、物理化学试剂等各种水体生态净化措施^[21,23-24].

当下针对人工湖库研究较多的是富营养化条件下人工生态净化措施的氮磷等的去除效果^[25-26]及对水质的影响^[27].有关人工生态净化措施对水体光学环境的影响鲜见报道.金泽水库是典型的人工水源水库,布设有多种人工生态净化措施,目前还没有学者研究金泽水库人工净化措施对光学环境的影响,本文以金泽水库这一水源水库为例,针对人工生态净化措施对水体光学环境的影响展开研究和分析,为其他人工水源水库的生态光学影响提供数据支撑,为水源地生态规划的完善提供思路,有利于水体富营养化的预防.由于金泽水库处于运行初期阶段,因此本研究针对秋冬季基于上海金泽水库的野外原位水下光场的测定和实验室分析,得到微纳米曝气和水生植物净化两种生态净化措施对光学衰减系数、透明度、真光层深度的影响.

1 材料与方法

1.1 样点布设

金泽水库位于上海市青浦区金泽镇,于 2016 年 12 月 29 日正式投入使用.水库占地面积约 2.7km^2 ,水面积 1.92km^2 ,总库容约 910 万 m^3 ,根据各功能区的分布、近岸环境等情况,于 2017 年 11 月 21 日和 2018 年 1 月 17 日在金泽水库进行了 2 次采样.金泽水库生态净化措施由水生植物净化及微纳米曝气复氧构成.微纳米气泡发生装置主要由发生装置、微纳米曝气头及连接管件组成.通过水泵加压,由曝气头内部的曝气石高速旋转,在离心作用下,使其内部形成负压区,空气通过进气口进入负压区,在容器内部分成周边液体带和中心气体带,由高速旋转的气

石出气,将空气均匀切割成直径 $5\sim 30\mu\text{m}$ 的微纳米气泡.由于气泡细小,不受空气在水中溶解度的影响,不受温度、压力等外部条件限制,可以在水体中长时间停留,具有良好的气浮效果^[28-29].水库共设 30 套微纳米气泡发生装置,左右河岸各 15 套并联排列.设备特点是采用纯度达 93%~96% 的氧气作为气源,产生超饱和状态的微纳米气泡水,设备运行功率为 7.5kW ,增氧流量为 $20\text{m}^3/\text{h}$,进口管径 DN40,出口管径 DN50.金泽水库采用沉水植物和挺水植物结合的生态净化方式,沉水植物种植面积 12000m^2 ,种类为苦草和轮叶黑藻,各 6000m^2 ,挺水植物种植面积为 41300m^2 ,种类为芦苇、千屈菜、小叶香蒲等,挺水植物种植 7~8 月完成,沉水植物种植 9 月完成.分别在微纳米曝气区和水生植物净化区的上下游各布置 1 个测量点位,见图 1.1#($31^\circ 01' 40.7''\text{N}$; $120^\circ 56' 33.6''\text{E}$),2#($31^\circ 01' 45.4''\text{N}$; $120^\circ 56' 33.2''\text{E}$),3#($31^\circ 02' 28.8''\text{N}$; $120^\circ 56' 40.6''\text{E}$),4#($31^\circ 02' 02.6''\text{N}$; $120^\circ 57' 23.3''\text{E}$),其中,1#点位和 2#点位分布在微纳米曝气区进出口(前后)位置,3#和 4#点位分布在水生植物净化区进出口(前后)位置.

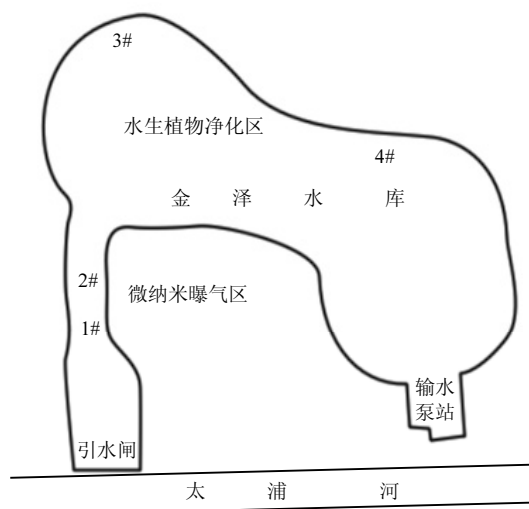


图1 微纳米曝气区和水生植物净化区前后采样点布置

Fig.1 Samplings before and after micro nano aeration and aquatic plant purification

1.2 测定方法

光合辐照度(PAR)的测定选用 LICOR192SA 水下光子计(美国 LICOR 公司),分水下 0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5m 共 8 层来测定,每个水深测量 10 次,用平均值代替该层数据.透明度采用塞式

圆盘法测定.浊度和叶绿素 a、溶解性有机物、温度、溶解氧采用 YSI-EXO2 多参数水质分析仪测定.水样采自表层 0.5m 深度处,总氮采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法(GB 11894-89)^[30]测定.真光层深度为水柱中支持净初级生产力的部分,又称光合层厚度、光补偿深度,浮游植物基本上分布在这一层,采用 1%表面光强深度统计^[31].

1.3 数据处理

PAR 在光学性质均一的水体中的衰减遵从下列衰减规律^[32]:

$$K_d = -\frac{1}{z} \ln \frac{E_d(\text{PAR}, z)}{E_d(\text{PAR}, 0)} \tag{1}$$

式中: K_d 为光学衰减系数, m^{-1} ; z 为从湖面到测量处的深度, m ; $E_d(\text{PAR}, z)$ 为深度 z 处的向下辐照度; $E_d(\text{PAR}, 0)$ 为水面起始向下辐照度. K_d 值通过对不同深度水下 PAR 强度进行指数回归得到,回归效果只有当 $R^2 \geq 0.95$ 、深度数 $N \geq 3$ 时其值才被接受,否则视为无用值^[33].

各指标变化趋势采用 Origin2017 软件完成,简单线性相关、一元线性回归和多元逐步回归均采用 SPSS 23.0 完成, $P < 0.05$ 表示结果差异显著, $P < 0.01$ 表示结果差异极显著.

2 结果与讨论

2.1 水体光学指标的变化

用于求解 K_d 的指数回归决定系数均在 0.95 以上,表明可利用式(1)计算有效光学衰减系数.经测量或计算得到的光学衰减系数、透明度和真光层深度的变化情况见图 2.

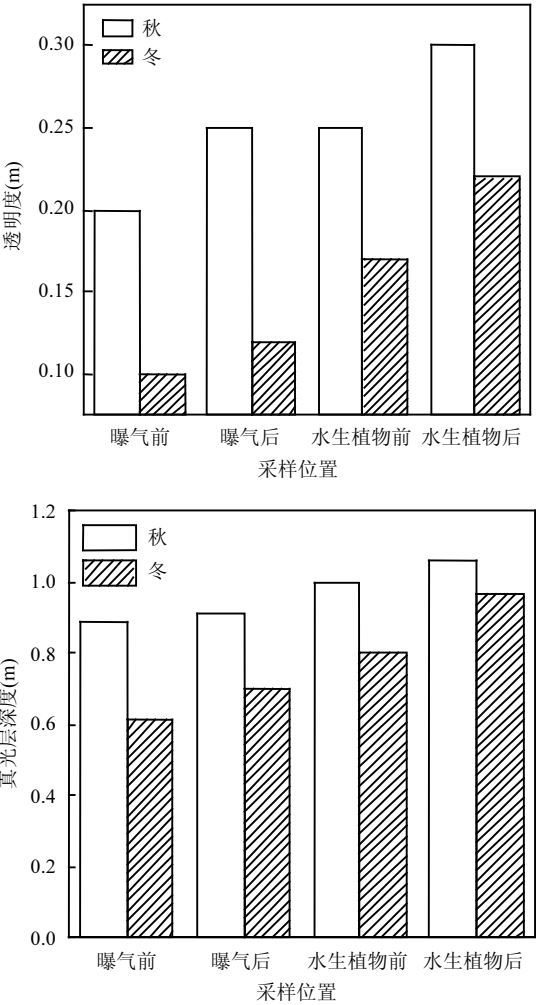
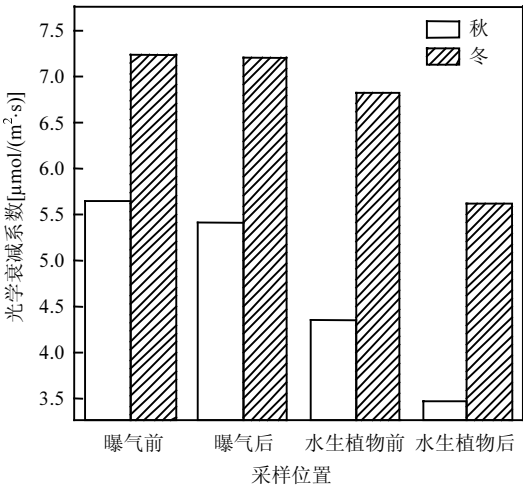


图 2 生态净化措施前后各光学指标变化
Fig.2 Main optical indexes by ecological purification

表 1 各光学指标间的相关性(R^2)
Table 1 Determination coefficients of optical indexes

区域	指标	光学衰减系数	塞式透明度	真光层深度
微纳米曝气区	光学衰减系数	1.000***	-0.976*	-0.970*
	塞式透明度		1.000***	0.963*
	真光层深度			1.000***
水生植物净化区	光学衰减系数	1.000***	-0.989*	-0.952*
	塞式透明度		1.000***	0.959*
	真光层深度			1.000***

注: *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

经微纳米曝气后,水体透明度增大 20%~25%,真光层深度增大 2.2%~14.8%,光学衰减系数降低 0.4%~4.4%;经水生植物净化后,水体透明度增大 20%~29.4%,真光层深度增大 6%~20%,光学衰减系数降低 17.3%~20.5%.说明经微纳米曝气和水生植物净化后,可被生物利用的光环境空间在增加,水生环境得到改善.同时,根据表 1,水体透明度

和光学衰减系数呈显著负相关,和真光层深度呈显著正相关.这与张运林等^[34]、张彦等^[35]的研究结果一致.

2.2 水体各光学影响因子的变化

光学影响因子种类繁多,变化复杂,选择监测因子溶解氧、水温,变化情况见图 3,秋季水温 14℃左右,溶解氧 8mg/L 左右,冬季水温 6.5℃左右,溶解氧 11mg/L 左右,对某一季节来说,微纳米曝气前后水温和溶解氧变化不明显.

由图 3 可见,从曝气前后和水生植物净化前后数据对比,水体叶绿素 a 表现为曝气后变化不明显;水生植物净化后增加 12.1%~17.5%,叶绿素 a 增加可能是因为水生植物净化区水体流速较缓^[36].溶解性有机物经曝气后秋季略有下降,冬季升高;经

水生植物净化后下降幅度增大,冬季略有升高这是因为冬季低温环境下,微生物的代谢活动降低或接近停止,水生植物腐败分解的废弃物增多.水体浊度经曝气后降低 6.3%~31.8%,浊度变化表现出明显的季节变化,冬季变化比秋季明显,其机理有待进一步分析;经水生植物净化后降低 27.3%~33.3%,秋季,总氮经曝气后降低 31.8%,经水生植物净化后降低 27.3%,冬季总氮和溶解性有机物不降反升,说明曝气和净化对 TN 没有去除效果,这与贡湖夏季生态修复区对总氮稀释净化效率高达 73.20%的结果^[37]截然不同,这是因为冬季低温环境下,微生物的代谢活动降低或者接近停止,微生物、植物的净化效果较差,净化能力降低,植物腐败分解释放氮气增多.

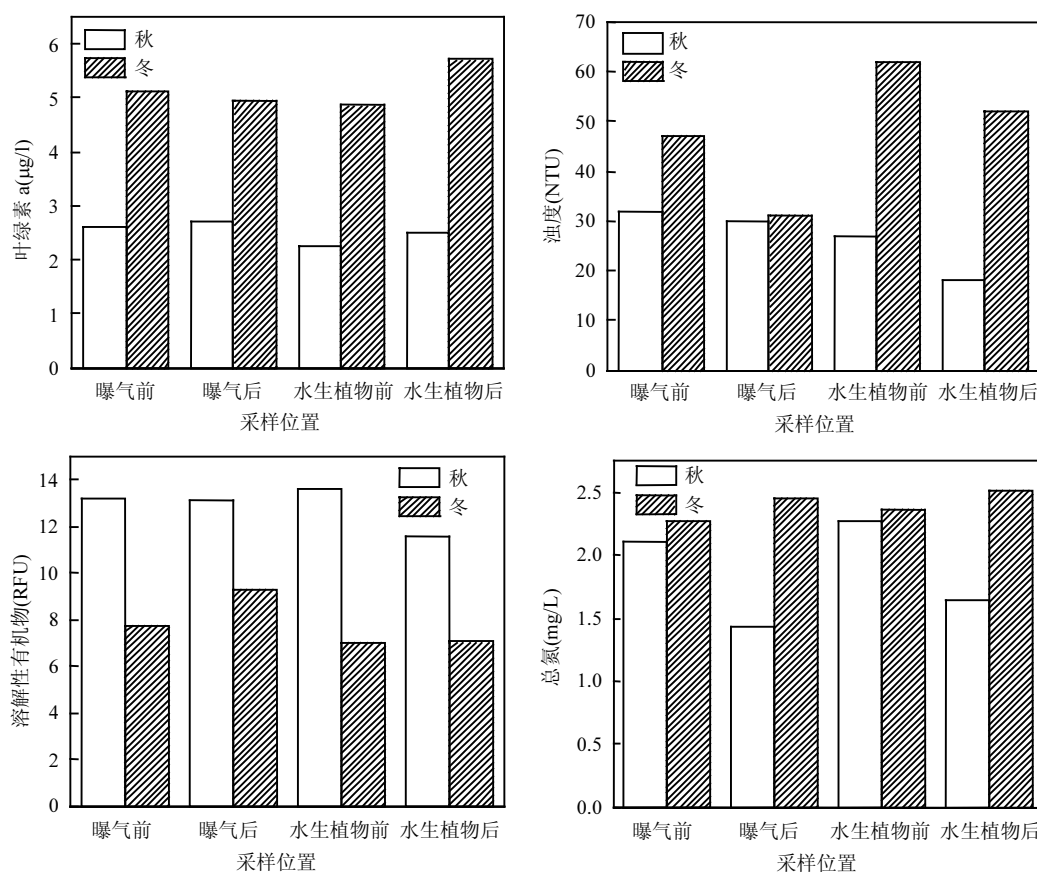


图 3 生态净化措施前后光学影响因子变化

Fig.3 Change of main extinction factors by ecological purification

2.3 生态净化措施对水体光学指标的影响机制讨论

水库的理化因子对各光学指标的大小有着间接或直接的影响,根据表 1 可知各光学指标间相关

性显著,选择其中一个指标光学衰减系数进行机制分析.

2.3.1 微纳米曝气 经过逐步回归方程得到各监测点位理化因子与光学衰减系数间的线性方程见

表 2.根据表 2,微纳米曝气区光学衰减系数和溶解性有机物、温度显著负相关,与叶绿素 a、溶解氧显著正相关,相关系数均在 0.9 以上,表明纳米曝气主要通过影响叶绿素 a 和溶解性有机物、温度及溶解氧影响光学衰减系数.单从某个季节曝气区溶解氧变化情况来看,该纳米曝气的曝气效果不明显,因此有必要加强曝气装置的曝气效果从而进一步减小光在水中的衰减.

表 2 曝气区各指标线性回归方程
Table 2 Linear relationships between different indexes through aeration

关系式	R^2	P
$K_d=2.306+0.454DO$	0.98	<0.01
$K_d=8.635-0.231T$	0.982	<0.01
$K_d=3.61+0.716Chl-a$	0.972	<0.01
$K_d=3.823+0.073Turbidity$	0.592	0.408
$K_d=10.149-0.349FDOM$	0.971	<0.05
$K_d=2.550+1.845TN$	0.824	0.176

注: DO-溶解氧,T-温度,Chl-a-叶绿素a,Turbidity-浊度,FDOM-荧光溶解性有机物,TN-总氮.

各理化因子间的 Pearson 相关系数及其检验结果见表 3,根据表 3,光学衰减系数的显著影响因子叶绿素 a 与溶解性有机物显著负相关,主要原因是因为溶解性有机物来源复杂,可能来自悬浮物的光降解,浮游植物的腐烂降解及其他植被^[11].叶绿素 a 与浊度显著正相关,表明纳米曝气也可能通过浊度影响光,这是因为浊度包括浮游植物和叶绿素 a,但从变化值来看,几次监测得到的表层浊度值较小,悬浮质浓度引起的光学指标变化因此也显的不那么明显,有待进一步研究.

表 3 曝气区各水质指标间的相关性分析(R^2)
Table 3 Correlation analysis between optical influencing factors through aeration

指标	DO	T	TN	Chl-a	Turbidity	FDOM
DO	1***	-0.998**	0.770	0.996*	0.548	-0.967*
T		1***	-0.759	-0.999**	-0.597	0.981*
TN			1***	0.740	0.368	-0.700
Chl-a				1***	0.612*	-0.985*
Turbidity					1***	-0.740
FDOM						1***

2.3.2 水生植物净化 经回归和逐步回归方程得到水生植物区各监测点位理化因子与光学衰减系

数间的线性方程见表 4.回归结果表明水生植物主要通过浊度作用影响光学衰减系数.水生植物可以通过茎叶拦截、吸附水中颗粒物且通过颗粒物吸收水中可溶性营养盐、吸附有机物,浊度主要是表现水中悬浮物对光线透过时所发生的阻碍程度,既反映水的表观质量,也反映水的内在质量^[38],因此水生植物主要通过浊度影响增加了可被生物利用的光环境空间.各理化因子间的 Pearson 相关系数及其检验结果见表 5,由于光学衰减系数和浊度正相关,而根据表 5,浊度又和溶解性有机物、温度、溶解氧偏相关,光学衰减系数和溶解性有机物、温度、溶解氧偏相关,这是因为悬浮泥沙会通过吸收、散射可见光从而影响光的入射效果,而光合作用产生有机物的主要参与指标包括溶解氧、温度等,另外,溶解氧的变化可能会影响藻类的生长与消亡,所以溶解氧、温度也是光场重要的影响因子.

表 4 水生植物净化区各指标线性回归
Table 4 Linear relationships between different indexes through water plant purification

关系式	R^2	P
$K_d=2.422+0.685Chl-a$	0.805	0.195
$K_d=2.269+0.07Turbidity$	0.987	<0.05
$K_d=8.606-0.363FDOM$	0.822	0.178
$K_d=-1.512+2.985TN$	0.771	0.229
$K_d=8.486-0.338T$	0.929	0.071
$K_d=-0.893+0.641DO$	0.829	0.171

表 5 水生植物净化区各水质指标间的相关性分析(R^2)
Table 5 Correlation analysis between optical influencing factors through plant purification

指标	DO	T	TN	Chl-a	Turbidity	FDOM
DO	1***	-0.972*	0.570	0.973*	0.900	-0.999**
T		1***	-0.719	-0.963*	-0.975*	0.966*
TN			1***	0.698	0.786	-0.539
Chl-a				1***	0.891	-0.963*
Turbidity					1***	-0.891
FDOM						1***

3 结论

3.1 微纳米曝气和水生植物净化措施有利于增大水体透明度和真光层深度,降低水体光学衰减系数,微纳米曝气和水生植物净化有利于水体光学环境

改善.上海金泽水库水体经微纳米曝气后,透明度增大 20%~25%,真光层深度增大 2.2%~14.8%,光学衰减系数降低 0.4%~4.4%;经水生植物净化后,透明度增大 20%~29.4%,真光层深度增大 6%~20%,光学衰减系数降低 17.3%~20.5%,增加了可被生物利用的光环境空间.

3.2 冬季,光学影响指标(总氮和溶解性有机物)不降反升,微纳米曝气和水生植物净化两种净化措施对光学影响指标(总氮和溶解性有机物)均没有去除效果.

3.3 两种生态净化措施对光学指标的影响机制不同.回归和相关性分析结果表明,曝气主要通过叶绿素 a、溶解性有机物、温度和溶解氧影响光学环境,水生植物净化主要通过浊度的作用影响光学环境.

参考文献:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge University Press, 1994:47-144.
- [2] Oliver R L, Whittington J, Lorenz Z. The influence of vertical mixing on the photoinhibition of variable chlorophyll a fluorescence and its inclusion in a model of phytoplankton photosynthesis [J]. Journal of Plankton Research, 2003,25(9):1107-1129.
- [3] 王 玲.富营养化条件下太湖梅梁湾藻类初级生产力的光、温影响研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2016.
- Wang L. Study on the influence of light and temperature on the primary productivity of algae in meiliang bay of Taihu under eutrophication [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2016.
- [4] Effler S W, Perkins M G, Ohrazda N, et al. Tripton, transparency and light penetration in seven New York reservoirs [J]. Hydrobiologia, 2002,468(1-3):213-232.
- [5] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield D E. Evaluation of recent limnological changes at Lake Apopka [J]. Hydrobiologia, 2001, 448(1-3):19-26.
- [6] 李一平,逢 勇,徐秋霞.动水条件下太湖水透明度及其影响因子模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009,37(6):625-630.
- LI Y P, Feng Y, Xu Q X. Simulation of water transparency and its factors in Taihu Lake under hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2009,37(6):625-630.
- [7] 贾后磊,苏 文,黄华梅,等.海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素 [J]. 光学学报, 2018,38(3):230-242.
- Jia H L, Su W, Huang H M, et al. Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters [J]. Acta Optica Sinica, 2018,38(3):230-242.
- [8] 周 红.三峡水库小江回水区水体光学特征与溶解性有机物的研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- Zhou H. Research on optical properties of water body and dissolved organic matters in xiaojiang river backwater area, three gorges reservoir [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [9] 金 鑫,李云梅,王 桥,等.基于水下光场结构的巢湖初级生产力评价 [J]. 环境科学, 2011,32(5):1257-1265.
- Jin X, Li Y M, Wang Q, et al. Primary productivity evaluation based on underwater light distribution in Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2011,32(5):1257-1265.
- [10] 金 鑫,李云梅,王 桥,等.巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因子分析 [J]. 环境科学, 2011,32(6):1581-1590.
- Jin X, Li Y M, Wang Q, et al. Analysis of diffuse attenuation coefficient characteristics and impact factors in Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2011,32(6):1581-1590.
- [11] 屈月明,蔡庆华,申恒伦,等.丹江口水库不同水文期真光层深度特征及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(1):53-59.
- Qu Y M, Cai Q H, Shen H L. Variation and influencing factors of euphotic depth in danjiangkou reservoir in different hydrological periods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(1): 53-59.
- [12] 时志强,张运林,王明珠,等.长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 [J]. 环境科学, 2013,34(2):517-524.
- Shi Z Q, Zhang Y L, Wang M Z, et al. Characteristics of diffuse attenuation coefficient of underwater irradiance in the lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Environmental Science, 2013,34(2):517-524.
- [13] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征 [J]. 水科学进展, 2003,14(4):347-353.
- Zhang Y L, Qing B Q, Chen W M, et al. Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water [J]. Advances in Water Science, 2003,14(4): 347-353.
- [14] Zhou Q, Zhang Y, Li K, et al. Seasonal and spatial distributions of euphotic zone and long-term variations in water transparency in a clear oligotrophic Lake Fuxian, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018,72(10):5.
- [15] 薛晓莉,张慧娟,杨文华,等.微纳米气泡技术及其在农业领域的应用 [J]. 农村科技, 2017,19(8):65-68.
- Xue X L, Zhang H J, Yang W H, et al. The Application of Micro-nano-aeration Technology in agriculture [J]. Rural Science and Technology, 2017,19(8):65-68.
- [16] 陆 晖,胡湛波,蒋 哲,等.微纳米曝气技术对城市景观水体修复的影响 [J]. 环境工程学报, 2016,21(4):1755-1760.
- Lu H, Hu Z B, Jiang Z, et al. The influence of Micro-nano-aeration Technology to urban landscape water restoration [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016,21(4):1755-1760.
- [17] 宋英伟,聂志丹,年跃刚,等.城市景观水体曝气与生物膜联合净化技术研究 [J]. 环境科学, 2008,29(1):58-62.
- Song Y W, Nie Z D, Nian Y G, et al. Research of aeration with bio-film technology to treat urban landscape water [J]. Environmental Science, 2008,29(1):58-62.
- [18] 鲁 飞.景观湖生态净化水系统的应用及研究 [J]. 江西建材, 2016,(17):125+124.
- Lu F. Application and research on ecological water purification system of landscape lake [J]. Jiangxi Building Materials, 2016,(17):125+124.
- [19] 钱 磊,陈雪初.大型人工水源湖生态净化系统设计 [J]. 中国给水排水, 2016,32(22):89-92.

- Qian L, Chen X C. Design of ecological purification system for a large artificial water source lake [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(22):89-92.
- [20] Gu S, Du F. Research on the Purification Effect of Aquatic Plants Based on Grey Clustering Method [J]. *Materials Science and Engineering*, 2018,301(1):12118.
- [21] Liang S X, Zhang Z R, Wang Y X, et al. Purification of Typical Emergent Aquatic Plant on Eutrophicated Water in Lake Baiyangdian [J]. *Science Technology & Engineering*, 2013,13(11):3048-3052.
- [22] Kim H D, Kim K H. Water Purification Using Aeration Techniques in the Lagoon [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014,675-677: 602-607.
- [23] Zhen W, Wang Y, Zhu Y. Effect of solar aeration technology on water treatment of polluted urban river [C]//International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering, 2008: 3472-3476.
- [24] Hayashi N, Ozaki Y, Sakai F. Role of aquatic animals for water purification on aquatic plant purification system [J]. *Japanese Journal of Water Treatment Biology*. 2011,47(3):119-129.
- [25] 李 欢,吴 蔚,罗芳丽,等.4 种挺水植物、4 种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较 [J]. *湿地科学*, 2016,14(2):163-172.
- Li H, Wu W, Luo F L, et al. The Comparison of removal effect of total nitrogen and total phosphorus in simulated eutrophic water among 4 kinds of emergent plants, 4 kinds of submerged plants and their mixed communities [J]. *Wetland Science*, 2016,14(2):163-172.
- [26] 于 磊.3 种挺水植物在不同曝气深度下的生长状况以及对水体中氮、磷去除效果的研究 [D]. 上海:华东师范大学, 2017.
- Yu L. The growth of three kinds of emergent water plants at different aeration depths and the effect of nitrogen and phosphorus removal in water were studied [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [27] 向速林,朱梦圆,朱广伟,等.太湖东部湖湾大型水生植物分布对水质的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(11):2881-2887.
- Xiang S L, Zhu M Y, Zhu G W, et al. Influence of macrophytes on water quality in the eastern bays of Lake Taihu, China [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(11):2881-2887.
- [28] Jiang H, Tao W U. The Application of Micro-nano-aeration Technology in Water Environment Treatment [J]. *Haihe Water Resources*, 2011,38(2):163-170.
- [29] Xiong Y L, Yang X L, Song H L. Review on application of micro-nano bubble in water treatment and its generator [J]. *Environmental Engineering*, 2016,34(6):23-27.
- [30] 水和废水监测分析方法 [M] 4 版.中国环境科学出版社, 2009: 254-257.
- Water and wastewater monitoring method [M]. *China Environmental Science Press*, 2009:254-257.
- [31] Reinart A, Arst H, Erm A, et al. Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake Ülemiste [J]. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, 2001,6(1):75-84.
- [32] Zhang Y, Liu X, Yin Y, et al. Predicting the light attenuation coefficient through Secchi disk depth and beam attenuation coefficient in a large, shallow, freshwater lake [J]. *Hydrobiologia*, 2012,693(1): 29-37.
- [33] Huovinen P S, Penttilä H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland [J]. *Chemosphere*, 2003,51(3):205-214.
- [34] 张运林,秦伯强,陈伟明,等.太湖水体光学衰减系数的特征及参数化 [J]. *海洋与湖沼*, 2014,35(3):209-213.
- Zhang Y L, Qing Q S Q, Chen W M, et al. Regression analysis on beam attenuation coefficient under water inland Taihu [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014,35(3):209-213.
- [35] 张 彦,窦 明,李桂秋,等.考虑光盐交互作用的湖泊富营养化数学模型 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(11):4312-4322.
- Zhang Y, Dou M, Li G Q, et al. A mathematical model of eutrophication lake accounting for the light nutrients interaction [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(11):4312-4322.
- [36] 王晓青,缪吉伦.澎溪河回水区水体叶绿素 a 含量与流速相关关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014,23(12):1693-1698.
- Wang X Q, Miao J L. Study on correlativity of chlorophyll-a content and flow rater in the region of pengxi backwater [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014,23(12):1693-1698.
- [37] 施芊芸,钱 新,高海龙,等.贡湖生态修复区水质净化模拟与净化能力 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(5):1878-1885.
- Shi Q Y, Qian X, Gao X L, et al. Numerical simulation of water purification and estimation of purifying capacity in Gonghu ecological restoration area [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(5):1878-1885.
- [38] 周 莉,冯 胜,李忠玉,等.夏季太湖浊度分布特征及其在水-沉积物界面识别中的应用 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(10):3108-3116.
- Zhou L, Feng S, Li Z Y, et al. Characteristics of turbidity in summer in Lake Taihu and its application to the identification of water-sediment interface [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(10):3108-3116.

致谢: 本研究的野外采样工作得到了金泽水库管理公司的大力协助, 在此表示感谢。

作者简介: 余柔柔(1992-),女,江西上饶人,同济大学硕士研究生,主要从事水环境治理和富营养化模拟。