

喷泉水景的复氧与控藻能力研究

海继平¹, 杨成建²

(1. 西安美术学院 建筑环境艺术系, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 喷泉水景被广泛应用于景观水体, 其扰动强度大、压力大、水交换量大、曝气量高等特点, 在改善水体水质方面具有广阔的应用前景。因此, 通过室内模拟实验, 研究了喷泉水景的复氧与控藻能力, 结果表明: 喷泉压力为 25 ~ 45 kPa 时, 作用 15 min 后, 喷泉能将水体中溶解氧含量接近饱和溶解氧 90 %, 喷泉复氧的 $K_{La}(20)$ 和 OC 平均值分别为 0.327 1/min 和 0.028 1 kgO₂/min; 喷泉水景能对水体微囊藻的生长起到很好的抑制作用, 压力越大, 抑制作用越强, 在 40 kPa、45 kPa 压力下, 最大控制率达到了 80 % 以上, 且能持续抑制藻类生长; 喷泉水景的控藻能力主要是基于喷泉的强大扰动作用及喷泉管内压力破藻作用。实际喷泉水景不但具有很好的景观效果, 而且在景观水体的复氧修复、抑制水华及破坏水体分层、改善底泥环境等方面具有重要作用。

关键词: 喷泉水景; 喷泉复氧; 控藻; 微囊藻

中图分类号: TU991.25

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0122-06

Study on reoxygenation and algal inhibition ability of fountain waterscape

HAI Jiping¹, YANG Chengjian²

(1. Architectural Environment Art, Xi'an Academy of Fine Arts, Xi'an 710065, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Fountain waterscape was widely applied to urban landscape water body. Based on the characteristics, such as high ability in aerating and perturbing, large internal pressure in pipeline and water exchange capacity between on the upper and low water layers, fountain waterscape has a wide application prospects for water purification in landscape water body environment. Therefore, laboratory experiments were carried out to study the reoxygenation and algal inhibition ability of fountain waterscape in this study. Results showed that the dissolved oxygen content in water was close to 90 % of its saturation value in about 15 min during the fountain reoxygenation with water-pump pressure ranged for 25 kPa ~ 45 kPa. The $K_{La(20)}$ and OC's average of fountain reoxygenation were 0.327 1 min⁻¹ and 0.0281 kgO₂ min⁻¹. Fountain waterscape for the growth of *Microcystis aeruginosa* had a certain effect, and the algal inhibition ability was proportional to the pressure in fountain pipeline. The algal inhibition effect of fountain was mainly based on fountain high ability in perturbing and algal cells were broken by the internal pressure in pipeline. An actual fountain waterscape not only had very good landscape effect, also played important roles in landscape water body reoxygenation and restoration, inhibiting blooms, destroying water temperature stratification and improving mud environment, and so on.

Key words: fountain waterscape; fountain reoxygenation; algal inhibition; *Microcystis aeruginosa*

目前, 景观水体(如湖泊、人工湖、护城河)已成为城市风景建设的重点内容, 为了满足人们的亲水需求, 喷泉已成为人们最喜爱的水景设施之一, 喷泉水景动感优美, 气质磅礴, 已被大量的应用于城市景观水体, 有的已成标志性景点^[1]。喷泉水景具扰动强度大、压力大、水交换量大、曝气量高等特点, 在改善水体水质方面也具有广阔开发与应用前景, 如破坏水体分层, 扬水曝气及破碎藻细胞等^[2], 钟建红等^[3]认为喷泉曝气改

善河湖水水质具有一定的可行性, 陈飞星等^[4]也发现喷泉对湖泊的增氧效果较为明显。但是, 在喷泉的设计与施工过程中, 往往以追求景观效果为主, 忽视了其改善水体水质的功能, 更遗憾的是, 有关喷泉改善水体水质的研究, 大部分停留在理论与定性分析, 喷泉复氧能力到底有多大? 扰动强度有多高? 对藻类生长是抑制? 还是促进? 去除率到底有多高? 等问题, 均亟待进一步挖掘。为此, 本文以常规的曝气复氧为类比对象, 通过

收稿日期: 2017-11-07

修改稿日期: 2019-01-15

第一作者: 海继平(1973—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事景观设计研究. E-mail: 852405252@qq.com

通信作者: 杨成建(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事景观水处理技术研究. E-mail: yangchengjian09@163.com

室内模拟实验分析了喷泉水景的复氧能力, 同时, 研究了喷泉对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) (为我国淡水湖泊中常见的水华蓝藻) 的抑制能力, 以期合理设计喷泉水景实现其景观效果与改善水体水质的“双赢”目标提供理论参考与数据支持。

1 材料与方法

1.1 喷泉复氧实验

1.1.1 实验装置

曝气复氧与喷泉复氧的实验装置如图1所示, (a)为曝气复氧, (b)为喷泉复氧。曝气复氧实验时, 曝气流量设 500 L/h、750 L/h、1 000 L/h、1 250 L/h、1 500 L/h 5 个梯度, 曝气反应器中水的体积为 10 L, 每 1 min 读取一次溶解氧量和溶解氧饱和度, 测量水温, 并记录。喷泉复氧实验时, 喷水压力设 25 kPa、30 kPa、35 kPa、40 kPa、45 kPa 5 个梯度, 有机玻璃容器中的水体积为 10 L, 每 5 min 读取一次数据, 测量水温, 并记录。

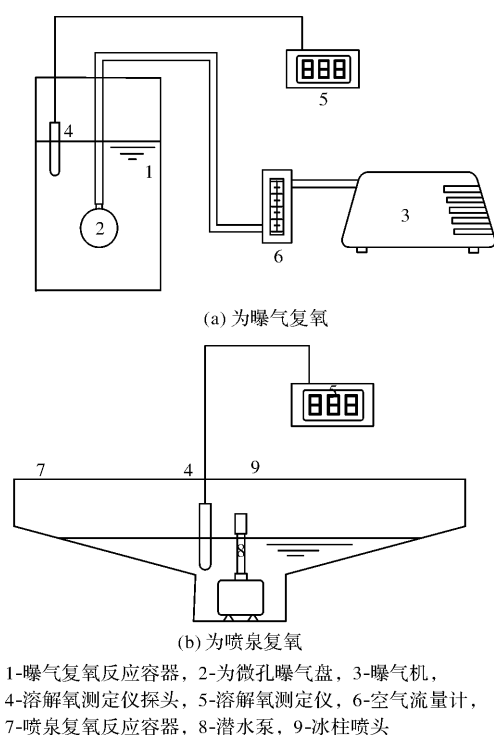


图1 复氧实验装置简图

Fig. 1 Reoxygenation experiment apparatus sketch

1.1.2 实验方法

复氧前, 用无水亚硫酸钠和催化剂氯化钴对蒸馏水进行脱氧, 将溶解氧含量降低至接近零; 通过反复实验发现, 当水亚硫酸钠和氯化钴在投加量分别为 0.6 mg/L 和 1.1 mg/L 时, 可将水中溶解氧含量降低至零。溶解氧测定仪在测前需输入所处环境的大气压, 可测出所测溶液中的溶解

氧含量及所处温度和大气压条件下的饱和溶解氧 (C_s) 以及此时的饱和度。由于实验水样体积较小, 加上紊动剧烈, 因此, 可以认为测定时水样是完全混和的, 并从反应器中部 1/2 深度处取样。研究表明, 氧传质能力可以用氧总转移系数 K_{La} 和复氧能力 OC 进行表征^[5], 氧传递基本方程式如下:

$$\frac{dC}{dt} = K_{La}(C_s - C) \quad (1)$$

积分得:

$$K_{La} \times t = 2.303 \times \ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} \quad (2)$$

式(1)和(2)中, C_s 为饱和溶解氧量, mg/L; C 为水中溶解氧含量, mg/L; t 为复氧时间, s; K_{La} 为氧总转移系数, min^{-1} 。将式(2)中的 $\ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C}$ 为 Y 轴, 时间为 X 轴, 其关系曲线能拟合成线性关系, 每条直线的斜率即为 K_{La} 的值^[5]。把非标准条件下的 K_{La} 转换成标准条件 (20 °C, 760 mm 汞柱) 下的 $K_{La(20)}$, 通常采用以下的公式计算:

$$K_{La(20)} = K_{La(T)} \times 1.024^{(20-T)} \quad (3)$$

式中: T 为实验时的水温, °C; $K_{La(T)}$ 为水温为 T 时测得的总传递系数, S^{-1} ; $K_{La(20)}$ 为水温为 20 °C 时的总传递系数, S^{-1} 。复氧能力 OC 是指在标准状态测试条件下, 单位时间向溶解氧浓度为零的水中传递的氧量, 其公式为

$$OC = (C_{S(\text{标})} - C_0)V \quad (4)$$

式中, OC 为标准条件下的充氧能力, kgO_2/min ; V 为曝气池体积, m^3 ; $C_{S(\text{标})}$ 为 20 °C 水中饱和溶解氧浓度, mg/L。

动力效率的计算公式为

$$E = \frac{OC}{N} \quad (5)$$

式中, E 为动力效率, $\text{kgO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$, N 为复氧所消耗的功率, kW。

1.2 喷泉控藻实验

1.2.1 实验材料

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*), 来源于中国科学院水生生物研究所, 用 BG-11 培养基进行培养^[6], 在光照度 3 000 lx, 25 °C 恒温条件下培养 7 d 左右, 使藻密度大于 $1.8 \times 10^6 \text{ cells/mL}$, 备用。

1.2.2 实验方法

实验前将图 1(a) 中的有机玻璃容器、喷头、潜水泵, 经高压灭菌锅高温灭菌 15 min 后, 备用 (温度 80 °C, 相对蒸汽压力 0.085 MPa)。实验在

自制的人工气候箱内进行,并控制一定的光照和温度条件,光源为日光灯冷光源。实验时,先用紫外灯对人工气候箱进行杀菌,将铜绿微囊藻细胞悬液 10 L,移入图 1(b)的喷泉复氧反应容器中。启动潜水泵,喷头喷水,将管内压力分别控制在 25 kPa、30 kPa、35 kPa、40 kPa、45 kPa 下,每 12 h 取 1 次水样,取样位置为水体表层下 3 cm 处,测定水样中活体藻细胞浓度与叶绿素 a 含量,并设置对照组。活体藻细胞浓度采用显微镜与血球计数板测定,叶绿素 a 含量采用乙醇萃取-分光光度法测定^[7]。

1.2.3 控藻效果评价指标的选取

许多研究通常采用处理前后藻悬浮液吸光度值、藻密度或叶绿素 a 的“去除率”表征超声对藻类作用的效果^[8],去除率能够比较直观的表征藻类的作用效果,但其将藻细胞浓度视为静止不动的,而实验时藻细胞往往处于对数生长期,在实验培养过程中,藻细胞增量是相当大的,计算喷泉控藻效果时应该考虑这部分值。因此,本文采用控藻率 $\eta(\%)$ 来表征喷泉控藻效果,在对照组与实验组初始藻密度一样,培养条件相同的前提下,按照式(6)计算 η ,控藻率与去除率的主要区别在于将藻密度初始值用同时刻对照组的藻密度代替了其自身的初始值。

$$\eta = \frac{CN_n - TN_n}{CN_n} \times 100\% \quad (6)$$

式中: CN_n 为对照组第 n 次测定时的藻密度, cells/mL; TN_n 为实验组第 n 次测定时的藻密度, cells/mL。

2 实验结果与分析

2.1 喷泉的复氧能力

就水体净化的机理来讲,无论是常规的生物处理技术,如活性污泥、好氧生物接触、扬水曝气等,还是生态处理技术,如氧化塘、人工湿地等,溶解氧都是整个反应系统中最重要的控制条件之一,而溶解氧的控制往往通过人工曝气来实现,如鼓风曝气、射流曝气等^[9]。因此,本文以常用的鼓风曝气为对比,研究喷泉的复氧能力。在实验曝气量为 500 L/h、750 L/h、1 000 L/h、1 250 L/h 及 1 500 L/h 的情况下,水体溶解氧饱和度与复氧时间的关系见图 2(a),在喷泉压力为 25 kPa、30 kPa、35 kPa、40 kPa、45 kPa 的情况下,水体溶解氧饱和度与复氧时间的关系见图 2(b);由图 2 可知,复氧过程中溶解氧含量先急剧

增加,接近饱和溶解氧 90 % 时,再缓慢增加,直至平衡,曝气复氧和喷泉复氧分别在 5 min 和 15 min 左右时达到缓慢增加段,因此,就复氧速度而言,曝气复氧约为喷泉复氧的 3.8 倍;同时,曝气复氧和喷泉复氧的复氧速度分别与曝气量和喷泉压力成正比;曝气复氧时,当通气流量为 1 500 L/h 时,在 4 min 便可将水中溶解氧的含量提高到饱和溶解氧含量的 90 %,而通气量为 500 L/h 时,则需 9 min 才可以达到接近饱和;同样,喷泉复氧时,当喷泉压力为 45 kPa 时,在 8 min 便可将水中溶解氧的饱和度达为 90 % 的水平,而喷泉压力为 25 kPa 时,则需 35 min 以后才可以达到接近饱和。表 1 为两种复氧方式的 K_{La} 、 $K_{La(20)}$ 及 OC ,由表 1 可知,在曝气量为 500 ~ 1 500 L/h 的情况下,曝气复氧的 $K_{La(20)}$ 和 OC 分别在 0.736 6 ~ 1.427 1/min 和 0.065 9 ~ 0.127 7 kgO₂/min 之间,平均值分别为 1.036 7 /min 和 0.093 0 /min;在喷泉压力为 25 ~ 45 kPa 的情况下,喷泉复氧的 $K_{La(20)}$ 和 OC 分别在 0.173 1 ~ 0.554 /min 和 0.014 8 ~ 0.047 3 kgO₂/min 之间,平均值分别为 0.327 1 /min 和 0.028 1 /min;曝气复氧的氧传质能力约为喷泉复氧的 3.2 倍。

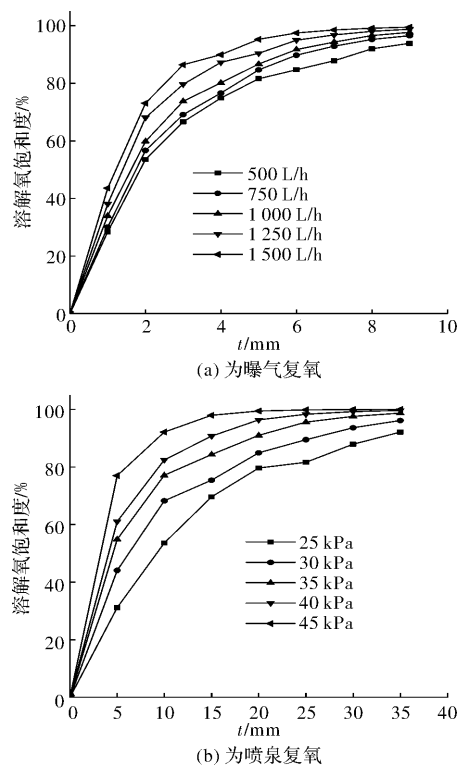


图2 两种复氧方式下溶解氧饱和度与复氧时间的关系

Fig. 2 The relationship between dissolved oxygen saturation and time under two differ reoxygenation modes

表 1 两种复氧方式下的复氧实验结果

Tab. 1 The reoxygenation experiment result under different reoxygenation modes

	Q	T	C_s	$K_{La(T)}$	$K_{La(20)}$	OC	E
	$/L \cdot h^{-1}$	$/^{\circ}C$	$/mg \cdot L^{-1}$	$/min^{-1}$	$/min^{-1}$	$/kgO_2 \cdot min^{-1}$	$/kgO_2 \cdot kWh^{-1}$
曝气复氧	500	18.2	9.41	0.705 8	0.736 6	0.065 9	3.95
	750	18.0	9.45	0.851 1	0.892 6	0.080 4	4.82
	100 0	18.2	9.41	0.925 2	0.965 6	0.087 2	5.23
	125 0	18.4	9.37	1.118 2	1.161 5	0.103 8	6.23
	150 0	18.5	9.36	1.377 2	1.427 1	0.127 7	7.66
	P	T	C_s	$K_{La(T)}$	$K_{La(20)}$	OC	E
	$/kPa$	$/^{\circ}C$	$/mg \cdot L^{-1}$	$/min^{-1}$	$/min^{-1}$	$/kgO_2 \cdot min^{-1}$	$/kgO_2 \cdot kWh^{-1}$
喷泉复氧	25	17.5	9.55	0.163 1	0.173 1	0.014 8	17.76
	30	17.5	9.55	0.211 5	0.224 4	0.019 1	19.10
	35	17.5	9.55	0.283 9	0.301 2	0.025 7	20.56
	40	17.8	9.49	0.371 9	0.391 8	0.033 4	20.04
	45	23.4	8.51	0.590 6	0.544 8	0.047 3	21.83

喷泉的复氧过程包括 2 个部分: 一是水柱在喷入空中、落回水体过程中的复氧, 以及发散水滴在空气中运动过程中的复氧, 胡立舜等^[10]认为当喷泉压力越大, 水柱喷射越高, 发散水滴越多, 水滴粒径越小, 水滴在空中运行的速度也越慢, 水滴与空气接触复氧的时间也越长, 同时, 单位水体与空气接触的比表面积也增加, 也会使得氧传质系数 K_{La} 值增大; 二是喷泉引起的水体紊动复氧, 首先, 水柱回落水体时会引起水体紊动, 促进大气复氧, 这类似表面曝气, 其次, 水泵抽吸作用对水体产生扰动, 引起大气复氧, 同时, 水泵循环提水也有有效的破坏了水体分层, 强化混合作用, 提高氧传质能力. 通过前述的比较可知, 曝气复氧的氧传质能力要大于喷泉复氧, 这可以用氧传质的菲克(Fick)定律加以解释^[5], 该定律认为, 氧的传质速率主要决定于气液界面积 A 和氧浓度梯度 dC/dX . 根据方立军等^[11]对内螺纹雾化喷泉喷头液滴颗粒数、水滴粒径等的研究及 Fayolle 等^[12]采用水下照相机对微孔曝气盘气泡个数、气泡等效直径等的统计分析, 可以推算, 在雾化喷头压力为 45 kPa、流量为 0.083 L/s, 微孔曝气盘曝气量为 1 500 L/h 时(这些参数与本研究接近), 曝气复氧的界面面积明显大于喷泉复氧, 约为喷泉复氧的 2.21~7.17 倍. 同时, 曝气复氧时, 气泡中的压力大于大气压, 也就是说相对于喷泉复氧时的大气中氧浓度 C 而言, 曝气复氧时气泡中的氧浓度 C 要大, 从而浓

度梯度 dC/dX 也要大些; 此外, 李然等^[13]认为水体的紊动能减少液膜的厚度 dX , 增强氧传质. 在进行曝气复氧时水体中的气泡存在变径、上升、碰撞、凝并及破碎等复杂的运动, 这引起的气液界面扰动必然大于水滴单纯在空中运动所引起的气液界面扰动, 从而表现出更大的氧传质能力.

2.1 喷泉的控藻能力

在不同喷泉压力作用下微囊藻生长的藻密度和叶绿素 a 含量变化见图 3 和图 4. 喷泉处理后, 实验组微囊藻生长的藻密度和叶绿素 a 含量逐渐减少; 在 25 kPa、30 kPa、35 kPa 压力下, 喷泉处理 35h 后, 藻密度和叶绿素含量又开始逐渐增加, 在 60 h 时接近初始量; 而在 40 kPa、45 kPa 压力下, 藻密度和叶绿素 a 含量一直呈现减少的趋势, 45 h 后达到平衡, 藻密度和叶绿素 a 含量分别约为 5.0×10^5 cells/mL 和 0.1 mg/L, 且压力越大藻密度和叶绿素 a 含量越低. 由此可知, 喷泉作用对水体微囊藻的生长起到很好的抑制作用, 由图 5 可知, 在 25 kPa、30 kPa 和 35 kPa 压力下, 控藻率呈现先增加, 后减少的趋势, 最大控藻率为 32%、39% 和 47%, 而在 40 kPa 和 45 kPa 压力下, 控藻率先增长后达到平衡, 最大控制率在 80% 左右. 这再次说明喷泉的控藻能力与喷泉压力成正比, 由于实验时的微囊藻处于对数增长期, 具有较强的自我恢复能力^[6], 在喷泉压力低时, 藻细胞生长在短时间内受到抑制, 但

很快能恢复生长;而喷泉压力较高低时,喷泉能持续抑制藻类生长,且无法恢复;就是实际喷泉工程而言,管内压力一般在 400 kPa 以上,扰动强度也远大于实验条件,因此,喷泉水景完全能有效控制景观水体藻类繁殖,达到防治景观水体蓝藻水华的目的。

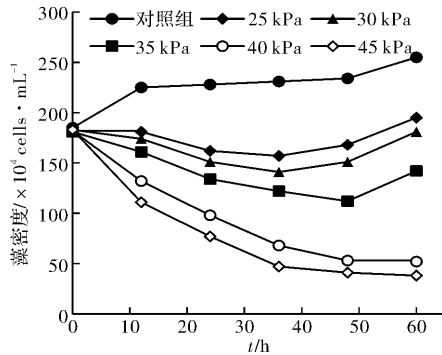


图3 在不同喷泉压力作用下微囊藻生长藻密度变化

Fig. 3 Change of algal density of algal blooms of *Microcystis sp.* under effect of fountain with different pressures

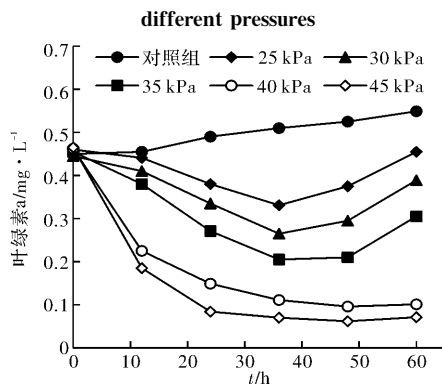


图4 在不同喷泉压力作用下微囊藻叶绿素 a 含量变化

Fig. 4 Change of chlorophyll a of *Microcystis sp.* under effect of fountain with different pressures

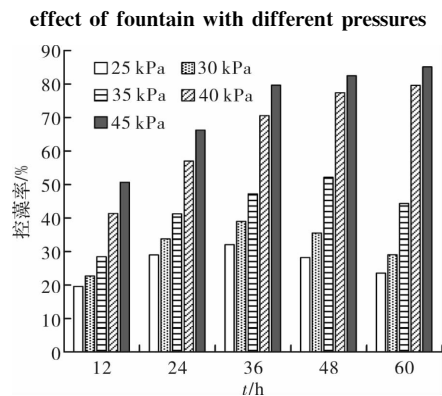


图5 不同喷泉压力作用对微囊藻的控藻率

Fig. 5 Algae control rate of *Microcystis sp.* under effect of fountain with different pressures

喷泉对微囊藻的控藻作用,主要是基于喷泉的扰动作用及喷泉管内的压力破藻作用^[2]。喷泉扬起的水柱下落后对周围体产生的强大扰动作

用,喷泉压力越大扰动强度越高。微囊藻一般生活在相对静止的表层水体(水深约 10 cm 左右),喷泉形成的强大表面扰动势必会影响到藻类的生长。Hondzo 等^[14]认为一定程度的紊动会造成绿藻叶绿体和尾脊的缺失,导致细胞破坏和生长抑制;张冰等^[6]发现,水体扰动强度大于 400 r/min 时,会对微囊藻构成机械损伤。此外,微囊藻主要由藻细胞气囊(gas vesicle)提供浮力,使之能长时间停留于水体表层光照区,获得生长繁殖的机会,微囊藻气囊能承受 0.4~0.7 MPa 的外部压力,当压力超过这一压力时,气囊将不可逆转地破裂,从而使蓝藻失去浮力而下沉^[15]。在本研究中,喷泉压力大于 0.04 MPa 时,微囊藻细胞出现了大量下沉现象,这可能是喷泉管道内压力与高强度扰动共同作用的结果。目前,去除蓝藻的技术比较多,如化学除藻、超声波除藻等,虽然这些技术的除藻效率比较高,但这些技术均会不同程度的引起藻细胞破裂,藻细胞内的藻毒素和藻液会泄漏到水中;而喷泉的扰动作用和压力作用,只会引起微囊藻藻细胞聚集形态损伤及内部气囊的破裂,避免了藻毒素和藻液的外泄^[16]。此外,有研究表明,在超声、压力作用后^[15,17],在一定的光照和营养条件下,蓝藻细胞具有一定的自我修复能力,有的甚至能恢复到破损前的水平;在本研究中,喷泉作用后微囊藻藻细胞的自我修复情况还有待进一步研究,但是在实际工程中,喷泉往往安装在一定水深的景观水体中,蓝藻细胞受损后会沉到水底,光照水平会严重受限,很难实现自我修复。

综上所述,喷泉不但具有很好的景观效果,而且在景观水体的复氧修复、抑制水华及破坏水体分层、改善底泥环境等方面有着不可忽视的作用。尽管如此,有关喷泉在景观水体修复方面的研究,还需进一步跟进,如喷头选型、水泵及管道安装与复氧的关系,喷泉作用下水体底泥环境的变化及藻类沉降与上浮规律,喷泉作用后蓝藻气囊及活性变化规律,喷泉作用下藻类与对光照和温度的响应,以及喷泉在改变河道流态和控制水流速度等方面的作用,喷泉作用与水幕、跌水、涌泉等其他水景的耦合关系,等等。

3 结论

(1)在实验条件下,喷泉压力为 25~45 kPa 时,作用 15 min 后,喷泉能将水体中溶解氧含量接近饱和和溶解氧 90%,喷泉复氧的 $K_{La(20)}$ 和

OC平均值分别为 0.327 1 / min 和 0.028 1 / min; 曝气复氧的氧传质能力约为喷泉复氧的 3.2 倍,这是由于曝气复氧的气液接触面积大于喷泉复氧,同时,曝气复氧的气液界面的紊动性要大于喷泉复氧。

(2)喷泉能抑制水体微囊藻的生长,压力越大,抑制作用越强,在 40 kPa、45 kPa 压力下,最大控制率达到了 80 % 以上,且能持续抑制藻类生长,无法恢复;喷泉的控藻作用主要是基于喷泉的强大扰动作用及喷泉管内的压力破藻作用。

(3)实际喷泉工程不但具有很好的景观效果,而且在景观水体的复氧修复、抑制水华及破坏水体分层、改善底泥环境等方面具有重要作用,随着喷泉工程在景观水体的广泛使用及喷泉控藻机理、复氧规律、喷泉工程设计优化等的进一步研究,喷泉将在景观水质稳定及河湖富营养化控制方面发挥更大的作用。

参考文献 References

- [1] 王乐松. 喷泉水体艺术景观的建设现状及管理对策[J]. 许昌学院学报, 2007, 26(2): 65-67.
WANG Lesong. The present situation of fountain water art and its development strategy[J]. Journal of Xuchang University, 2007, 26(2): 65-67.
- [2] 王云中, 杨成建. 生态喷泉运用于景观水体水质稳定的可行性分析[J]. 生态经济, 2009 (11): 180-182.
WANG Yunzhong, YANG Chengjian. Study on feasibility of applying ecological fountain in stabilizing landscape water quality [J]. Ecological Economy, 2009 (11): 180-182.
- [3] 钟建红, 黄廷林, 解岳, 等. 城市河湖水质改善与保障技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(6): 771-776.
ZHONG Jianhong, HUANG Tinglin, XIE Yue, et al. Study of water quality improvement and the protective technique of urban rivers and lakes[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2006, 38(6): 771-776.
- [4] 陈飞星, 刘晓燕, 张心海, 等. 北京动物园水禽湖溶解氧动态与喷泉增氧效果分析[J]. 环境工程, 2001, 19(6): 26-27.
CHEN Feixing, LIU Xiaoyan, ZHANG Xinhai. Study of the dynamic of dissolved oxygen and the effect of fountain in the waterfowl pool at Beijing Zoo[J]. Environmental Engineering, 2001, 19 (6): 26-27.
- [5] 刘星. 曝气技术中氧传质影响因素的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
LIU Xing. The experimental study on the influence factors of oxygen transfer in aeration system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [6] 张冰, 李飞鹏, 张月红, 等. 水体扰动对铜绿微囊藻生长影响的模拟实验[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 45-49.
ZHANG Bing, LI Feipeng, ZHANG Yuehong, et al. Simulation experiment on the effect of water disturbance on growth of microcystis aeruginosa[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(6): 45-49.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版)北京: 中国环境科学出版社, 2002.
The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [8] HAO H W, WU M S, CHEN W F, et al. Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2004, 39(6): 1435-1446.
- [9] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 水体修复装置——扬水曝气器的开发[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 41-45.
CONG Haibing, HUANG Tinglin, MIAO Jingguang, et al. Development of rehabilitation device for water body-Water Lifting Aerator[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(3): 41-45.
- [10] 胡立舜, 王兴军, 高邈, 等. 压力式喷嘴雾化过程气液传质性能[J]. 化工学报, 2008, 59 (11): 2732-2740.
HU Lishun, WANG Xingjun, GAO Miao, et al. Mass transfer of atomization from pressure-swirl nozzle[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59 (11): 2732-2740.
- [11] 方立军, 李斌. 压力式喷嘴雾化性能的试验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 202-205.
FANG Lijun. Experimental study of the atomization performance of a pressure type nozzle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25 (2): 202-205.
- [12] FAYOLLE Y, GILLOT S, COCKX A, et al. In situ characterization of local hydrodynamic parameters in closed-loop aeration tanks [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(2): 207-212.
- [13] 李然, 赵文谦, 李嘉, 等. 紊动水体表面传质系数的实验研究[J]. 水利学报, 2000(2): 60-65.
LI Ran, ZHAO Wenqiang, LI Jia, et al. Experimental study on interfacial mass transfer coefficient of turbulent water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000 (2): 60-65.
- [14] HONDZO M, LYN D. Quantified small-scale turbulence inhibits the growth of a green alga [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(1): 51-61.
- [15] 储昭升, 金相灿, 杨波, 等. 不同群体形态蓝藻的气囊与光的相互作用研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1909-1913.
CHU Zhaoshen, JIN Xiangcan, YANG Bo, et al. Interactions of light with gas vesicles in cyanobacteria of different colonial morphology[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(11): 1909-1913.
- [16] SYLVAIN M, DAVID W, RUTH C, et al. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins [J]. Environment International, 2013, 59 (1): 303-327.
- [17] 范功端, 林茜, 陈丽茹, 等. 超声波技术预防性抑制蓝藻水华的研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 158-164.
FAN Gongduan, LIN Qian, CHEN Liru, et al. Research on preventive inhibition for cyanobacteria blooms using ultrasound technology [J]. Water resources protection, 2015, 31(6): 158-164.

(编辑 桂智刚)