

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.010

# 流速对再生水补水的景观水体藻类水华的影响

曹琛洁, 徐志婧, 龙怡静, 朱泓霓

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安  
710048)

**摘要:** 藻类水华一直是制约再生水景观水体利用的瓶颈,改善水动力条件是控制藻类生长的有效方法之一。在识别出典型再生水补水水体优势藻种类别(水华微囊藻、普通小球藻、四尾栅藻)基础上,分析流速(0、0.05、0.1、0.2 m/s)对模拟配水和实际再生水中3种优势藻种生长状况的影响。结果表明,当流速为0~0.05 m/s时,表现为促进藻类生长,优势流速为0.05 m/s;当流速 $\geq 0.1$  m/s时,表现为抑制藻类生长,3种优势藻种的藻密度在10 d内可下降80%以上,叶绿素a(Chl-a)浓度从180~200 mg/m<sup>3</sup>左右均降至35 mg/m<sup>3</sup>以下;当流速增加至0.2 m/s时,水体中的藻密度和Chl-a浓度在第9天便无法检出。所以,水体流速控制在0.1 m/s以上时,可以有效控制以再生水补水的水体中水华的发生。

**关键词:** 再生水; 景观水体; 流速; 藻类水华

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0065-05

## Effect of Flow Velocity on Algal Bloom in Landscape Water Replenished with Reclaimed Water

CAO Chen-jie, XU Zhi-qiang, LONG Yi-jing, ZHU Hong-ni

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Algal bloom has always been a bottleneck restricting the application of reclaimed water in landscape water, and improving hydrodynamic conditions is one of the effective methods to control algal growth. Based on the identification of dominant algal species (*Microcystis aquatica*, *Chlorella vulgaris* and *Tetraodonthora*) in a typical water body replenished with reclaimed water, this paper analyzed the effects of flow velocity (0, 0.05 m/s, 0.1 m/s, 0.2 m/s) on the growth of the three dominant algal species in simulated water and actual reclaimed water. When the flow velocity was in the range of 0–0.05 m/s, the algal growth was promoted, and the dominant flow velocity was 0.05 m/s. When the flow velocity was no less than 0.1 m/s, the growth of algae was inhibited, the algal density of the three dominant algal species decreased by more than 80% within 10 days, and the concentrations of chlorophyll a (Chl-a) decreased from approximately 180–200 mg/m<sup>3</sup> to below 35 mg/m<sup>3</sup>. When the flow velocity was increased to 0.2 m/s, the algal density and Chl-a concentration in the water could not be detected on day 9. Therefore, the occurrence of algal bloom in the water body replenished with reclaimed water could be effectively

基金项目: 陕西省教育厅重点项目(17JS103)

通信作者: 徐志婧 E-mail: 476539251@qq.com

controlled when the water flow velocity was controlled above 0.1 m/s.

**Key words:** reclaimed water; landscape water body; flow velocity; algal bloom

用再生水补充河湖水系不仅可以置换出大量新鲜水资源、缓解城市用水短缺、简化再生水输送管网过程、解决回用量受时间和空间限制等问题,还可以作为水源为工业、市政杂用等其他用途提供输送方式和储存场所,正成为我国北方缺水城市景观水体重要的补水水源。如北京高碑店污水厂生产的再生水通过护城河水系、永定河引水渠从东至西输送,作为城市河道景观补水,同时作为工业冷却水供给石景山和高井电厂<sup>[1]</sup>。

尽管污水经过深度处理后的再生水一般可满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)的要求,但是藻类水华频发是再生水补入景观水体中面临的最大问题,改善水动力条件、增加水流速度是控制藻类水华的有效方法之一。适当增加扰动强度或流速可抑制水体中藻类的生长<sup>[2-3]</sup>和集群<sup>[4]</sup>、促进水体中藻类的沉降<sup>[5]</sup>,而高强度的水流剪切会导致藻细胞壁破损<sup>[6]</sup>。Acuna等<sup>[7]</sup>的研究表明,低流速情况下水体环境较为稳定,此时对光的利用率较大、水力停留时间较长,更利于悬浮藻类的生长,而高流速情况下悬浮藻类的生长和集群受到抑制,不利于水华的形成与发展。龙天渝等<sup>[8]</sup>通过模型试算出最利于藻类生长繁殖的流速为0.04 m/s左右;王利利<sup>[9]</sup>的研究则表明,最适宜浮游藻类生长的流速在0.08~0.14 m/s之间;魏桢等<sup>[10]</sup>的研究表明,当流速在0.10~0.15 m/s时,藻类生长速率最慢,增加至0.20 m/s时,受到抑制的藻类生长速率将出现小幅度回升,这是由于促进了部分高流速优势藻种的生长,但此流速下的生物多样性大大降低;Escartiin等<sup>[11]</sup>的研究表明,当流速超过0.10 m/s时,藻类群落将被破坏,不利于藻类生长和集群。

目前研究的水动力条件和流速控制范围对藻细胞生长的影响效果不尽相同,且绝大部分研究集中于天然湖、库,流速对再生水补水的景观水体中藻类生长状况影响的研究还相对较少。笔者以西安市护城河再生水补水段鉴别出的3种优势藻种为例,通过室内模拟配水和实际再生水实验分析了不同流速条件下藻类的生长状况,旨在为以再生水补

水的景观水体藻类水华的控制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及装置

实验所用的水华微囊藻、普通小球藻和四尾栅藻均购自中国科学院淡水藻种库。以西安市护城河再生水补水段2018年9月—2019年9月春、夏季实际监测的TN和TP平均浓度为依据(TN为3.5 mg/L、TP为0.2 mg/L),用KNO<sub>3</sub>和KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>分别作为氮源和磷源进行模拟配水实验。实际再生水取自西安市某污水厂经过深度处理后的出水,主要水质参数:TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Mn</sub>分别为8.5、1.24、0.2、0.17、9.0 mg/L,DO为8.4 mg/L,pH为8.03。

实验装置由数显电动搅拌器和5 L透明塑料桶组成,模拟流速对水华微囊藻、普通小球藻和四尾栅藻的影响,流速范围为0~0.2 m/s。流速可通过搅拌器的搅拌强度进行调节,利用旋杯式流速测算仪换算流速和搅拌强度,其中流速为0.05、0.1、0.2 m/s时,对应的搅拌强度分别为30、40、60 r/min。实验装置置于人工气候室内进行,人工气候室运行参数调节至3种优势藻种最适宜生长的条件(水华微囊藻: $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光的照度=9 000 lx;普通小球藻: $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光的照度=5 000 lx;四尾栅藻: $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光的照度=7 000 lx)<sup>[12]</sup>。

### 1.2 实验方法

藻类的扩培:在无菌操作台上配制好BG-11培养基,取10~20 mL新鲜培养基于无菌锥形瓶中,加入5~10 mL藻密度为 $1.0\times 10^6$  cell/L的藻液,置于恒温培养箱中培养20~30 d(培养温度为20~25 $^{\circ}\text{C}$ ,光的照度为1 000~2 000 lx,光暗比为12 h:12 h)。

藻液的配制:将扩培好的、处于生长暴发期的3种优势藻种各取1 mL,分别置于浮游生物计数板上,在40倍显微镜下进行计数,根据设计实验中的藻密度和水样体积,计算实验所需藻液量。将适量的藻液放入无菌离心管内,在转速为4 000 r/min的低速离心机中离心15 min,倒去上清液,加入等量15 mg/L的NaHCO<sub>3</sub>溶液,再次离心,重复3次,洗掉藻液中的营养盐成分,得到实验所需藻液。

优势藻种生长实验:从配好的藻液中取实验所需的水华微囊藻(藻密度为 $1.0 \times 10^6$  cell/mL)、普通小球藻( $0.4 \times 10^6$  cell/mL)、四尾栅藻( $0.2 \times 10^6$  cell/mL),分别在5 L的透明塑料桶中进行模拟配水和实际再生水实验,光暗比为12 h:12 h,实验周期为10 d。

单因素实验:考察在3种优势藻种最适宜的温度和光照条件下,当流速分别为0、0.05、0.1、0.2 m/s时,3种优势藻种在10 d内的生长变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 优势藻种的鉴别

2019年5月—8月,采集西安市护城河再生水补水段水样,检测和鉴别优势藻种,结果如图1所示。可知,护城河再生水补水段以蓝藻和绿藻为主,其中蓝藻占54%,绿藻占29%;蓝藻中水华微囊藻占比最大,为63%,其余藻种占比均在11%以下;绿藻中普通小球藻占比最大,为47%,其次为四尾栅藻,占24%,其余藻种的占比均在11%以下。在藻类生长旺盛的春、夏季,西安市护城河再生水补水段的优势藻种为水华微囊藻、普通小球藻和四尾栅藻,分别占藻类总数的34%、14%和7%。

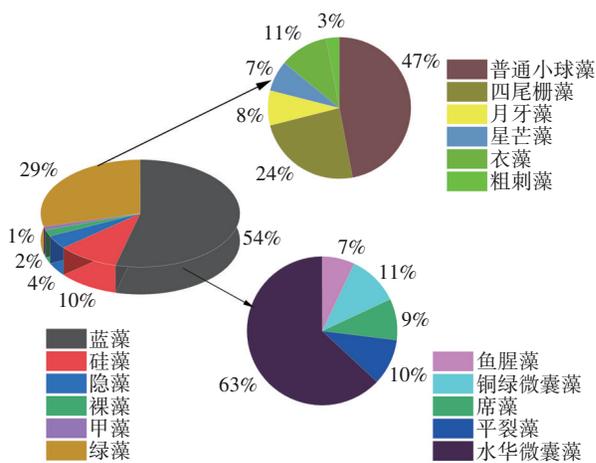


图1 护城河再生水补水段藻类组成及占比

Fig.1 Algae composition and proportion of reclaimed water replenishment section of the moat

### 2.2 流速对优势藻种生长的影响

#### 2.2.1 流速对藻密度和叶绿素a(Chl-a)的影响

模拟配水条件下,流速对3种优势藻种密度和Chl-a浓度的影响如图2所示。可以看出,在流速为0~0.2 m/s范围内,3种优势藻种生长状况较好的流速为0.05 m/s,在此流速下,水华微囊藻、普通小球

藻和四尾栅藻的密度分别增加3.2、3.8和4.2倍,Chl-a分别从179、211、174  $\text{mg}/\text{m}^3$ 增加到657、703、773  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。当流速 $\geq 0.1$  m/s时,3种优势藻种的生长均受到了抑制。当流速为0.1 m/s时,水华微囊藻在第9天的藻密度减少了75%左右,Chl-a从183  $\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到53  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;普通小球藻在第9天的藻密度减少90%,Chl-a从201  $\text{mg}/\text{m}^3$ 降低为15  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;四尾栅藻在第9天的藻密度减少95%,Chl-a从203  $\text{mg}/\text{m}^3$ 降低为11  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。可见流速对水华微囊藻的影响弱于其他两种藻种。当流速为0.2 m/s时,3种优势藻种在第9天均沉淀到容器底部,颜色也由绿色变成淡黄色,水体中的藻密度和Chl-a浓度均无法检出。可见,流速(扰动)对3种优势藻种的生长表现为低流速促进、中等流速抑制,相对不利流速 $\geq 0.1$  m/s。连续和较大强度的扰动,可能会通过影响藻类的光合作用来改变藻体的分布,并干扰藻体的正常代谢,抑制藻细胞的分裂,降低生长速率,从而表现出一定程度的生长抑制作用<sup>[13-14]</sup>。但当扰动剧烈、剪应力过大时,将会导致藻细胞被破坏和死亡。

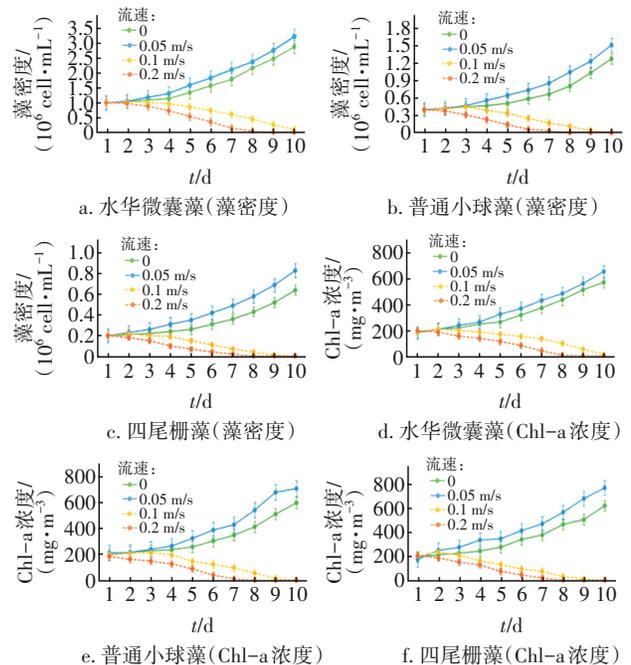


图2 流速对3种优势藻种密度和Chl-a浓度的影响

Fig.2 Effect of flow velocity on density and Chl-a concentration of three dominant algal species

#### 2.2.2 3种藻种密度和流速的相关性分析

根据流速水平对3种优势藻种密度的影响,采用回归分析法构建了优势藻种密度与流速的相关性曲线,如图3所示。可知,藻密度与流速之间符合

一元三次函数关系,3种优势藻种密度随流速的变化规律基本一致。当流速为0~0.05 m/s时,随着流速的增加,3种优势藻种密度整体呈增加趋势;而当水体流速≥0.1 m/s时,随着流速的增加,藻密度呈下降趋势,甚至无法检出。

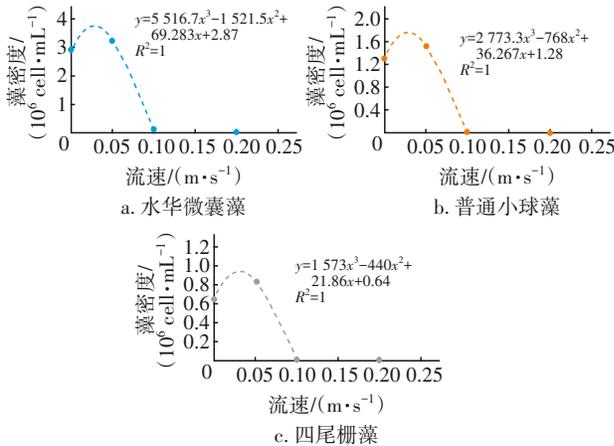


图3 流速与3种优势藻种藻密度的相关性

Fig.3 Correlation between flow velocity and algal density of three dominant algal species

### 2.3 流速对实际再生水中水华微囊藻生长的影响

图4为流速对实际再生水中水华微囊藻生长的影响。

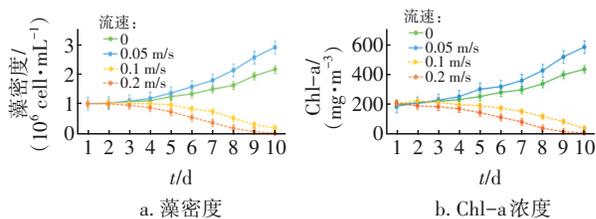


图4 流速对实际再生水中水华微囊藻生长的影响

Fig.4 Effect of flow velocity on the growth of *Microcystis aeruginosa* in reclaimed water

从图4可以看出,流速对实际再生水中水华微囊藻生长的影响与模拟配水时低流速促进生长和高流速抑制生长的规律基本一致。当流速从0增加到0.05 m/s时,促进了水华微囊藻的生长,在第10天时,与流速为零相比,藻密度从2.16×10<sup>6</sup> cell/mL增加到2.9×10<sup>6</sup> cell/mL,Chl-a从432 mg/m<sup>3</sup>增加到583 mg/m<sup>3</sup>。当流速为0.1 m/s时,第10天的水华微囊藻密度下降至0.18×10<sup>6</sup> cell/mL,与初始状态相比减少了82%,Chl-a浓度从199 mg/m<sup>3</sup>降至32 mg/m<sup>3</sup>;当流速为0.2 m/s时,10 d内水体中水华微囊藻的密度和Chl-a浓度均降为零。可见,对于TN浓度较高的再生水原水(TN=8.5 mg/L,TP=0.2 mg/L),同样可

以采用增加流速的方式来抑制再生水中优势藻种的生长,抑制优势藻种生长的流速为≥0.1 m/s。

根据理论和经验计算可知,1 m<sup>3</sup>的水维持0.1 m/s的流速时,需要约0.1 W的能耗。以10.0×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>的水量为基准,功耗约为10 kW,可采用大流量低扬程的水下推流设备。如果按1 d工作10 h、春夏季为100 d运行计(藻类暴发高潮时段),按照10 kW机组核算[0.5~0.8元/(kW·h)],每个暴发季平均处理费用为0.05~0.08元/m<sup>3</sup>。所以通过增加水体流速的扰动方式,其成本较低、经济可行。

### 3 结论

① 识别出西安市护城河再生水补水段水华暴发的优势藻种为水华微囊藻、普通小球藻和四尾栅藻,其中蓝藻门的水华微囊藻占比最多,占总藻藻数的34%,其次为绿藻门的普通小球藻和四尾栅藻,分别占14%和7%。

② 分析了0~0.2 m/s流速范围内水华微囊藻、普通小球藻、四尾栅藻密度与Chl-a浓度的变化,确定了流速促藻、抑藻、藻类死亡的临界范围:当流速为0~0.05 m/s时,促进藻类生长;当流速≥0.1 m/s时,表现为抑制藻类生长;当流速=0.2 m/s时,水体中的藻密度和Chl-a浓度均无法检出。

### 参考文献:

[1] 王佳伟,蒋勇,高琼,等.高碑店污水厂污水资源综合利用模式与实践[J].中国给水排水,2015,31(4):5-7.  
WANG Jiawei,JIANG Yong,GAO Qiong, et al. Patterns and practice on comprehensive utilization of wastewater resources in Gaobeidian WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 5-7(in Chinese).

[2] BORCHARDT M A. Effects of flowing water on nitrogen- and-phosphorus-limited photosynthesis and optimum N : P ratios by *Spirogyra fluviatilis* (Charophyceae) [J]. Journal of Phycology, 1994, 30 (3): 418-430.

[3] LI F P, ZHANG H P, ZHU Y P, et al. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake [J]. Science of the Total Environment, 2013, 447(1): 64-71.

[4] BIGGSB B J F, THOMSEN H A. Disturbance of stream periphyton by perturbations in shear stress: time to structural failure and differences in community resistance

- [J]. *Journal of Phycology*, 1995, 31(2): 233-241.
- [5] PANNARD A, BORMANS M, LAGDEUC Y. Short-term variability in physical forcing in temperate reservoirs: effects on phytoplankton dynamics and sedimentary fluxes [J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52(1): 12-27.
- [6] 陈瑞弘, 李飞鹏, 张海平, 等. 面向流量管理的水动力对淡水藻类影响的概念机制[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 24-30.  
CHEN Ruihong, LI Feipeng, ZHANG Haiping, *et al.* Conceptual mechanism of hydrodynamic impacts on freshwater algae for flow management [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 24-30 (in Chinese).
- [7] ACUNA V, VILCHES C, GIORGL A. As productive and slow as a stream can be: the metabolism of a Pampean stream [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(1): 71-83.
- [8] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟[J]. *环境科学*, 2010, 31(7): 1498-1503.  
LONG Tianyu, MENG Guohu, WU Lei, *et al.* Numerical simulation for effects of hydrodynamic condition on algae growth in Chongqing reaches of Jialing River [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1498-1503 (in Chinese).
- [9] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
WANG Lili. Research on the Related Factors of the Algae Growth in Hydrodynamic Condition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006 (in Chinese).
- [10] 魏桢, 贾海峰, 姜其贵, 等. 再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6540-6546.  
WEI Zhen, JIA Haifeng, JIANG Qigui, *et al.* Simulation experiment of phytoplankton growth induced by flow velocity in rivers replenished with reclaimed water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(12): 6540-6546 (in Chinese).
- [11] ESCARTIIN J, AUBREY D G. Flow structure and dispersion within algal mats [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(4): 451-472.
- [12] 龙怡静. 以再生水为水源的景观水体藻类水华暴发条件与控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
LONG Yijing. Study on the Outbreak Conditions and Control Strategies of Algae Bloom in Landscape Water with Reclaimed Water as Water Source [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [13] 宋洋, 张陵蕾, 陈旻, 等. 流速对水库水华优势种铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(S1): 25-32.  
SONG Yang, ZHANG Linglei, CHEN Min, *et al.* Impacts of flow velocity on growth of dominant species *Microcystis Aeruginosa* of algae-bloom in reservoirs [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(S1): 25-32 (in Chinese).
- [14] 李林, 朱伟. 连续水流与间歇水流对微囊藻生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(10): 34-37.  
LI Lin, ZHU Wei. Effect of water flow regimes on growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(10): 34-37 (in Chinese).

作者简介: 曹琛洁(1995-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水资源化利用。

E-mail: 1782037121@qq.com

收稿日期: 2020-07-28

修回日期: 2020-08-08

(编辑: 任莹莹)