

# 水绵强化浮床净化再生水补给的景观水体效果

王文怀<sup>1</sup>, 王 怡<sup>1</sup>, 韦存智<sup>1</sup>, 袁洛薇<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市清远中水有限公司, 陕西 西安 710086)

**摘 要:** 在补充再生水的模拟景观水体中采用黄菖蒲生物浮床,并引入网箱种植的水绵构建水绵强化浮床,从而探讨中低温条件下水绵强化浮床对再生水补给的城市景观水体水质的净化效果。试验结果表明,水绵对铜绿微囊藻的生长具有明显的抑制作用,水绵强化浮床可以控制再生水补给的景观水体中的藻密度和叶绿素 a(Chl-a)浓度,其中低温连续运行 60 d 过程中,水绵强化浮床水体的藻密度和 Chl-a 浓度均值分别为  $1.57 \times 10^4$  个/mL 和 5.59  $\mu\text{g/L}$ ,为浮床水体对应值的 34.28% 和 54.54%,为空白水体对应值的 4.89% 和 14.44%。同时,水绵强化浮床对再生水补给的模拟景观水体中的氮和磷具有较好的去除效果,在  $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的本底浓度分别为 7.52、1.71、5.53 mg/L 条件下,运行 60 d 后其对应的浓度分别降低至 0.20、0.08、0.06 mg/L;当 TP 和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的本底浓度分别为 0.75、0.70 mg/L 时,运行 60 d 后其对应的浓度分别降低至 0.01 mg/L 和检测限以下。因此,水绵强化浮床对再生水补给的景观水体中低温阶段的水质净化及藻类控制效果明显,可有效控制该类水体的富营养化,是一种高效的景观水体水质控制方法。

**关键词:** 景观水体; 再生水; 水绵强化浮床; 中低温; 净化

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0059-05

## Effect of Enhanced *Spirogyra* Floating Bed on Purification of Landscape Water Supplied with Reclaimed Water

WANG Wen-huai<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, WEI Cun-zhi<sup>1</sup>, YUAN Luo-wei<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Qingyuan Wastewater Treatment and Reuse Co. Ltd., Xi'an 710086, China)

**Abstract:** A floating bed system vegetated with calamus was built in a simulated landscape water supplied with reclaimed water, and an enhanced floating bed system with *Spirogyra* planted in a cage was established to explore its purification effect on the simulated urban landscape water under intermediate-low temperature. The results indicated that *Spirogyra* had obvious inhibitory effect on growth of *Microcystis aeruginosa* and the enhanced floating bed could reduce algae density and chlorophylla (Chl-a) concentration of simulated urban landscape water. During 60 days of continuous operation under intermediate-low temperature, the average values of algae density and Chl-a concentration in the enhanced floating bed water were  $1.57 \times 10^4$  cells/mL and 5.59  $\mu\text{g/L}$ , which were 34.28% and 54.54% of the corresponding values in the floating bed water, and 4.89% and 14.44% of that in the controlling water. On the other

hand, the enhanced *Spirogyra* floating bed had a high removal efficiency of nitrogen and phosphorus in the simulated urban landscape water. The concentrations of TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  were reduced to 0.20 mg/L, 0.08 mg/L and 0.06 mg/L after 60 days of operation when the corresponding background concentrations were 7.52 mg/L, 1.71 mg/L and 5.53 mg/L, respectively. Meanwhile, the concentrations of TP and  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  were reduced to 0.01 mg/L and below the detection limit after 60 days of operation when the corresponding background concentrations were 0.75 mg/L and 0.70 mg/L. In a word, the enhanced *Spirogyra* floating bed could effectively improve the water quality and inhibit algae growth of urban landscape water supplied with reclaimed water. Thus, the enhanced *Spirogyra* floating bed is an efficient method of controlling the landscape water quality, which can effectively prevent eutrophication of the urban landscape water.

**Key words:** landscape water; reclaimed water; enhanced *Spirogyra* floating bed; intermediate-low temperature; purification

近年来,再生水以水源稳定、成本低廉的优势在景观水体补给方面发挥着越来越重要的作用,但其较高的氮、磷浓度和城市景观水体较差的自净能力一直都是再生水景观回用的潜在威胁。采用生物浮床控制景观水体水质具有投资低、不侵占额外土地、维护简单等优势,已逐渐受到人们的青睐<sup>[1]</sup>,但低温时浮床对污染物的去除率较低是其主要弊端<sup>[2]</sup>。水绵作为一种大型丝状绿藻,能够在低温条件下正常生长,较大的比表面积使其对水体中氮和磷的吸收速率高于水生植物,但四散生长的特征降低了水体的景观效应。

笔者利用水绵低温优势生长的特性,采用其净化再生水补给的模拟景观水体,探索传统生物浮床基础上构建的水绵强化浮床在中低温条件下对景观水体中氮和磷的去除效果。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计及概况

试验地点位于西安市清远中水有限公司西南角一空旷区域,分别向3个四周采用遮阳网缠绕的800 L圆柱形水桶(直径为1 100 mm,高为900 mm,编号分别为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>)注入700 L试验原水。其中1<sup>#</sup>水桶为空白组;2<sup>#</sup>水桶中放置4个基座规格为330 mm的正方形花飞碟组件,每个组件上种植4株长势一致的黄菖蒲幼苗构建传统生物浮床;3<sup>#</sup>水桶中除了放置与2<sup>#</sup>水桶相同的传统生物浮床外,还加入1 000 g水绵(湿质量)来构建水绵强化浮床,将其置于边长为50 cm的正方体不锈钢框架内,框架四周由30目(0.595 mm)的尼龙网围隔。2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>水桶植物的覆盖率均为45%。装置运行时间为60 d,水温

为5.3~19.2℃。浮床和强化浮床装置见图1。

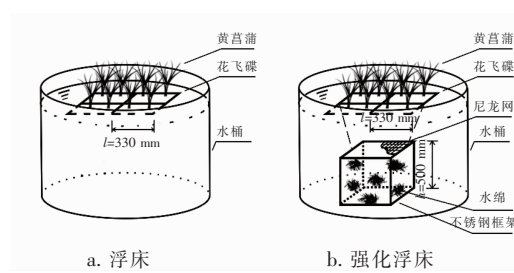


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experiment equipment

### 1.2 原水水质

试验原水为西安市清远中水有限公司生产的再生水,具体水质:TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、COD 分别为7.52、1.71、5.53、0.07、0.75、0.70、27.23 mg/L,浊度为4.78 NTU,Chl-a浓度为0.71  $\mu\text{g/L}$ ,藻密度为 $1.10 \times 10^3$  个/mL,pH值为7.24。

### 1.3 检测分析方法

试验期间,水样每5 d采集1次,采样时间为早上9:00,分别从四周及中心水面下25 cm处采集水样,混合后检测相关指标。水温采用温度计测定,pH值采用PHS-3C pH计测定,TN、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、浊度采用XINMAO752N分光光度计测定,Chl-a采用TDF-3DC延迟荧光仪测定,藻类采用Nikon 90i显微镜镜检并计数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH值和浊度的变化

图2为不同试验装置中pH值和浊度的变化。可知,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>水桶中pH值和浊度相差较小,均远小

于1<sup>#</sup>水桶对应值。尽管各装置中 pH 值均呈上升趋势,但2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>中的上升趋势均远小于1<sup>#</sup>的。试验装置运行25 d后,1<sup>#</sup>水桶中 pH 值达到最大值,而2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>水桶中 pH 值在40 d时才达到最大值。分析原因,藻类和水生植物的光合作用会消耗水体中的CO<sub>2</sub>,从而使得 pH 值上升,同时植物生长发育过程中分泌的质子和有机酸使得浮床水体和强化浮床水体的 pH 值上升趋势小于空白组<sup>[3]</sup>。

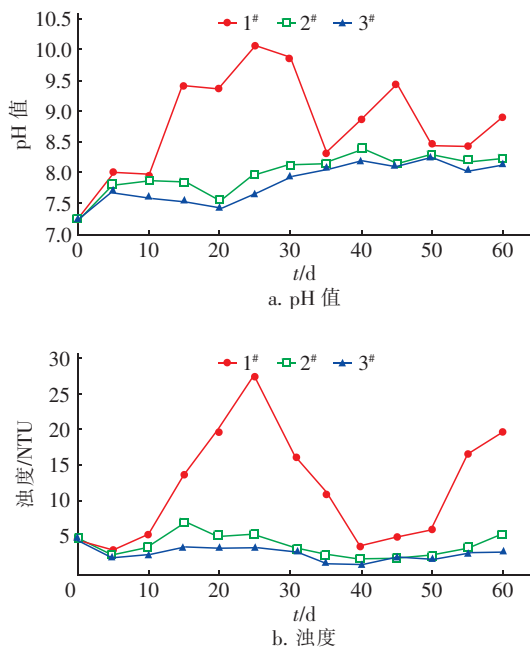


图2 不同试验装置中 pH 值和浊度的变化

Fig. 2 Change of pH value and turbidity in different experiment equipments

从图2还可知,3个装置中浊度的大小顺序依次为1<sup>#</sup> > 2<sup>#</sup> > 3<sup>#</sup>。0~25 d,1<sup>#</sup>水桶中浊度从4.78 NTU迅速上升到27.32 NTU,试验过程中,1<sup>#</sup>水桶中浊度的平均值为11.44 NTU,而2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>水桶中浊度的平均值分别为3.73、2.36 NTU,可见3<sup>#</sup>水桶的浊度分别是2<sup>#</sup>和1<sup>#</sup>水桶的63.27%和20.63%。有研究表明,浮床可有效降低水体的水力扰动,同时浮床中的植物根系和强化浮床中水绵的截留、吸附作用也对水体浊度降低有贡献<sup>[4]</sup>。

## 2.2 藻密度和 Chl-a 的变化

图3为不同试验装置中藻密度和 Chl-a 的变化。试验期间,水体中浮游植物以铜绿微囊藻为主,并伴有极少量的衣藻、铁杆藻、四尾栅藻和新月藻。从图3可以看出,补充再生水的模拟景观水体中藻密度和 Chl-a 浓度本底值较低,且两者的变化趋势

相似,1<sup>#</sup>水桶中藻密度和 Chl-a 浓度均在25 d时达到最大,而后由于营养物质的消耗导致大量藻类死亡,从而引起藻密度急剧下降,藻死亡解体释放的营养物质又促进了40 d后藻密度的再次增长。以上现象也发生在浮床水体中,只是藻密度变化幅度远小于空白组,但强化浮床水体中藻密度始终较低且保持相对稳定。试验期间,强化浮床水体的藻密度和 Chl-a 浓度的平均值分别为 $1.57 \times 10^4$  个/mL和 $5.59 \mu\text{g/L}$ ,分别为空白组的4.89%和14.44%,为浮床水体的34.28%和54.54%。

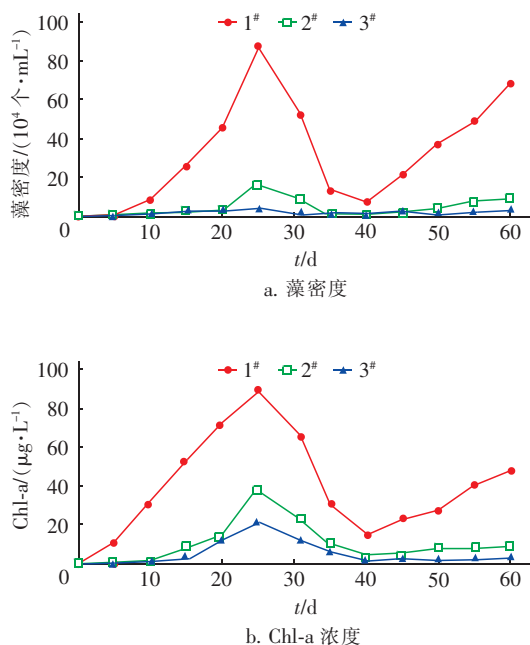


图3 不同试验装置中藻密度和 Chl-a 的变化

Fig. 3 Change of algae density and Chl-a concentration in different experiment equipments

浮床水体中植物对营养物质的竞争吸收及其自身的光屏蔽效应使得浮床水体藻密度和 Chl-a 浓度远小于空白组;强化浮床在浮床的基础上引入网箱种植的水绵,进一步强化了该区域水体对铜绿微囊藻繁殖的抑制作用。关于水绵的抑藻机理,刘辉<sup>[5]</sup>认为,水绵具有较大的比表面积且繁殖迅速,生长过程中吸收水体中氮、磷等营养物质并具有一定的光屏蔽效应,通过与藻类竞争阳光、空间、营养而达到抑藻效应;凡传明等<sup>[6]</sup>则认为,水绵生长会分泌破坏铜绿微囊藻细胞膜的化感物质(单宁酸),从而造成铜绿微囊藻的生长受到抑制。本试验结果表明,无论基于以上何种理论,水绵强化浮床均能明显抑制水体中铜绿微囊藻的繁殖。

### 2.3 氮浓度的变化

不同试验装置中氮浓度的变化如图4所示。可以看出,不同装置中氮浓度随时间的延长均呈下降趋势,但1#水桶的下降趋势远小于2#和3#的。

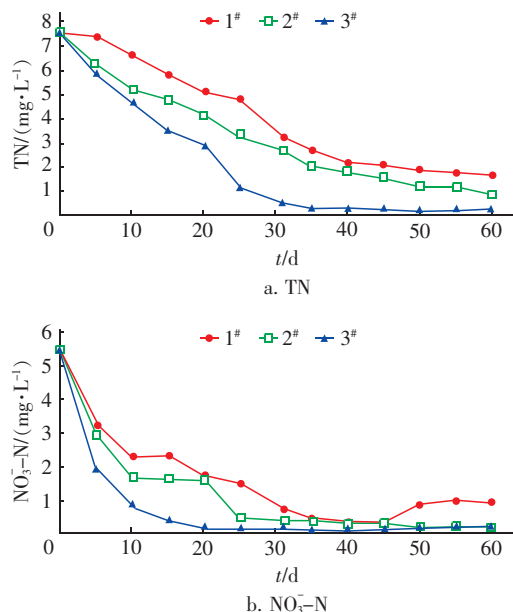


图4 不同试验装置中氮浓度的变化

Fig. 4 Change of nitrogen concentration in different experiment equipments

由图4(a)可知,装置运行25 d后,强化浮床水体中TN浓度迅速下降到1.14  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,为同时期空白组和浮床水体的23.65%和34.76%。随后3个装置中TN均进入平缓降低阶段。试验期间,强化浮床水体、浮床水体和空白组对TN的平均去除率分别为82.94%、61.30%和49.78%。由图4(b)可知,装置运行20 d时,强化浮床水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为0.15  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,为同时期空白组和浮床水体的8.67%和9.49%。试验过程中,强化浮床水体、浮床水体以及空白组对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均去除率分别为94.06%、85.02%和76.51%。另外,强化浮床水体和浮床水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在15 d内分别迅速降至0.17、0.25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,空白组在20 d内降至0.41  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,然后3个装置均进入相对稳定阶段。试验期间,强化浮床水体、浮床水体和空白组对氨氮的平均去除率分别为86.35%、78.07%和65.55%。各装置中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度整体较低( $< 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),运行25 d后强化浮床水体中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 已被完全去除。

试验中氮的去除途径包括生物硝化反硝化、挥发去氨、微生物同化作用、植物和水绵吸收等。Bar-

tucca等<sup>[7]</sup>认为,硝态氮和氨氮是浮游植物和水生植物首先利用的氮源,吸收是其主要去除途径。温子燕等<sup>[8]</sup>认为,水绵在低温下能良好生长,且对氮有较好的去除效果。前15 d水温低于10  $^{\circ}\text{C}$ ,植物生长处于迟缓期,藻类数量较少,故强化浮床水体对氮的去除效果远高于空白组和浮床水体。结合图3可知,随着温度升高和光照增强,植物和藻类开始生长,尤其是空白组藻类的暴发使浮床水体和空白组对氮的去除率明显上升,但仍低于强化浮床水体。

### 2.4 磷浓度的变化

图5为不同试验装置中磷浓度的变化。

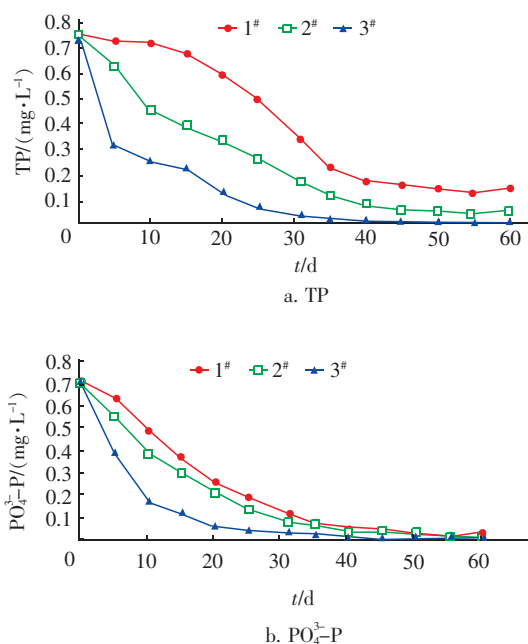


图5 不同试验装置中磷浓度的变化

Fig. 5 Change of phosphorus concentration in different experiment equipments

由图5可知,装置运行20 d时,强化浮床水体中TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度分别为0.13、0.05  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,分别为空白组的22.03%和20.06%,为浮床水体的38.24%和25.33%。35 d以后强化浮床水体中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度低于检测限,45 d后装置中TP浓度低于0.01  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验期间,强化浮床水体、浮床水体和空白组对TP的平均去除率分别为81.11%、70.22%和49.29%,对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均去除率分别为91.07%、79.52%和73.69%。有研究显示,水绵具有强效吸磷的特性,能快速降低水体中的磷浓度<sup>[9]</sup>。因此,装置运行前20 d,强化浮床水体中TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度远低于空白组和浮床水体,而后随



着植物和藻类的繁殖使得空白组和浮床水体中磷浓度逐渐降低,但仍高于强化浮床水体。本试验结果表明,引入水绵的强化浮床对补充再生水的模拟景观水体中磷的去除效果远高于空白组和传统浮床,可以在中低温条件下保持水体较低的磷浓度。

### 3 结论

① 中低温时,水绵强化浮床对再生水补给的模拟城市景观水体中氮、磷具有良好的去除效果,当 $TN$ 、 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 的本底浓度分别为7.52、1.71、5.53 mg/L时,运行60 d后其对应浓度分别降至0.20、0.08和0.06 mg/L;当 $TP$ 和 $PO_4^{3-} - P$ 本底浓度分别为0.75和0.70 mg/L时,运行60 d后其对应浓度分别降至0.01 mg/L和检测限以下。

② 水绵强化浮床对再生水补给的景观水体中的藻生长具有抑制作用,试验期间强化浮床水体的藻密度和Chl-a浓度均值分别为 $1.57 \times 10^4$  个/mL和5.59  $\mu g/L$ ,分别为浮床水体对应值的34.28%和54.54%,为空白水体对应值的4.89%和14.44%。

③ 在传统生物浮床的基础上构建的水绵强化浮床对再生水补给的模拟城市景观水体水质具有良好的改善效果,能避免传统生物浮床在中低温季节污染物去除率下降的缺陷。

### 参考文献:

- [1] Lu H L, Ku C R, Chang Y H. Water quality improvement with artificial floating islands[J]. Ecol Eng, 2015, 74: 371 - 375.
- [2] Duan J, Feng Y, Yu Y, et al. Differences in the treatment efficiency of a cold-resistant floating bed plant receiving two types of low-pollution wastewater[J]. Environ Monit Assess, 2016, 188(5): 283.
- [3] 游海林,徐力刚,姜加虎,等. 湿地植物根系生长动态及其环境响应性研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2013, (Z1): 52 - 58.  
You Hailin, Xu Ligang, Jiang Jiahu, et al. Research progress of growth dynamics and environmental adaptability of roots of wetland plants[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, (Z1): 52 - 58 (in Chinese).
- [4] Wu D, Hua Z. The effect of vegetation on sediment resuspension and phosphorus release under hydrodynamic disturbance in shallow lakes[J]. Ecol Eng, 2014, 69: 55 - 62.
- [5] 刘辉. 金鱼藻和水绵抑制铜绿微囊藻的机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.  
Liu Hui. Investigation on the Inhibition Mechanism of *Ceratophyllum demersum* and *Spirogyra* on *Microcystis aeruginosa*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [6] 凡传明,刘云国,郭一明,等. 水绵(*Spirogyra*)对蓝藻复苏及藻类群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2132 - 2137.  
Fan Chuanming, Liu Yunguo, Guo Yiming, et al. Effects of *Spirogyra* on the cyanobacteria recruitment and phytoplankton community structure[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2132 - 2137 (in Chinese).
- [7] Bartucca M L, Mimmo T, Cesco S, et al. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system[J]. Sci Total Environ, 2016, 542: 803 - 808.
- [8] 温子燕,凡传明. 水绵处理富营养化景观水体的试验研究[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(20): 177 - 180.  
Wen Ziyang, Fan Chuanming. Experimental study on the treatment of eutrophication of scenic waters with *Spirogyra*[J]. Sci - Tech Information Development & Economy, 2010, 20(20): 177 - 180 (in Chinese).
- [9] 雷国元,马军. 利用水绵(*Spirogyra*)深度处理生活污水强化除磷及其机制的探讨[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1066 - 1072.  
Lei Guoyuan, Ma Jun. Phosphorus removal and mechanisms for advanced treatment of sewage by *Spirogyra*[J]. Environmental Science, 2009, 30(4): 1066 - 1072 (in Chinese).



作者简介:王文怀(1994 - ),男,陕西渭南人,硕士,研究方向为景观水体修复技术。

E-mail: wangyi1003@sina.com

收稿日期:2018 - 05 - 18