

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.014

种植密度对绿萝浮床净化富营养水体效果的影响

张择瑞¹, 刘鑫², 胡淑恒², 汪家权²

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为获取浮床植物治理富营养化水体的最优种植密度,在室外条件下选取有观赏价值和绿化作用的植物绿萝作为浮床植物,以自行设计组装的生态浮床作为植物载体,对由湖水加一定量营养元素配制的富营养化污水进行为期39 d的处理,考察植物生长情况和对各污染物的净化效果。结果表明,溶解性磷(DP)、TN、TOC、电导率(COND)的下降率与种植密度呈正相关,种植密度越大,植物质量增加比例越小、水箱内叶绿素a(Chl-a)浓度和藻密度越小;Chl-a浓度与藻密度变化趋势一致,两者具有显著的相关性。试验条件下的最佳种植密度为3.13 g/L,对TN、TOC的去除率分别为96.8%和84.6%,种植密度过高,处理效果提高不明显。

关键词: 富营养化; 生态浮床; 绿萝; 种植密度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0081-06

Effect of Planting Density on Purification of Eutrophic Water by *Epipremnum aureum* Floating Bed

ZHANG Ze-ru¹, LIU Xin², HU Shu-heng², WANG Jia-quan²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to determine the optimal planting density of floating bed plants treating eutrophic water bodies, eutrophic wastewater prepared with lake water and a certain amount of nutrients was treated by a floating bed for 39 d, and the growth of plants and the purification effect of various pollutants were investigated. *Epipremnum aureum*, which has ornamental value and greening function, was selected as the floating bed plant under the outdoor conditions, and a self-designed and assembled ecological floating bed was used as a plant carrier. The decrease rates of DP, TN, TOC and conductivity (COND) had a positive correlation with the planting density. The higher the planting density was, the lower the increase rate in plant weight was observed, and the lower the chlorophyll a (Chl-a) concentration and algae densities in the water tank were detected. Profile of the algae density was consistent with that of Chl-a concentration, and a significant correlation existed between them. The optimal planting density was 3.13 g/L in the experiment, and the removal rates of TN and TOC were 96.8% and 84.6%, respectively. The improvement of treatment efficiency was not obvious if the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-004)

通信作者: 汪家权 E-mail: jiaquan.wang@163.com

planting density was too high.

Key words: eutrophication; ecological floating bed; *Epipremnum aureum*; planting density

富营养化是水体污染的主要表现之一。2018年《中国生态环境状况公报》显示,在监测营养状态的107个湖泊(水库)中,贫营养状态的有10个,占9.3%;中营养状态的有66个,占61.7%;轻度富营养状态的有25个,占23.4%;中度富营养状态的有6个,占5.6%。生态浮床技术是综合了物理、化学、生物方法的富营养化水体原位生态修复技术,得到了越来越广泛的应用,并取得了一系列让人满意的效果^[1-2]。

生态浮床技术对富营养化水体的处理效果与植物种植密度密切相关。以往对该技术的研究多集中于植物种类的筛选与组合、添加曝气和强化菌等辅助手段、比较不同季节的处理效果,以及研究植物根系作用等方面^[3-8],而针对使用观赏植物绿萝净化污水、比较绿萝不同种植密度对水质改善效果的研究尚不多见。笔者通过分析污染物在不同种植密度下的变化规律,确定适宜的浮床植物种植密度,从而为改善富营养化水体、恢复湖泊及其他类似水体健康生态系统提供技术支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于合肥工业大学纬地楼五楼的阳台上。试验初始装置如图1所示。

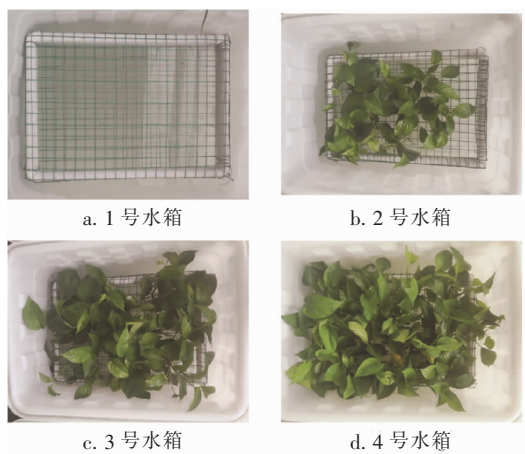


图1 试验初始装置

Fig. 1 Device at the beginning of the experiment

为方便观察和取样,在试验地点依次并列放置4个同一规格、容积为200 L的白色长方体水箱并编号(其中1号水箱内不种植绿萝,作为对照),向4

个水箱中分别加入160 L试验原水,将洗净后湿质量分别为250、500、750 g且预培养10 d的绿萝均匀种植在2、3、4号水箱内自行设计组装的浮床上,2、3、4号水箱绿萝的种植密度分别为1.56、3.13以及4.69 g/L,试验历时39 d。

1.2 试验用水

试验原水由校内湖水与自来水按一定比例混合而成,并添加了氯化铵、磷酸二氢钾、葡萄糖等。其中校内湖水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为0.24 mg/L,溶解性磷(DP)为0.11 mg/L,并含有一定量的营养物质、微量元素和微生物等。试验原水水质:DP为18.17 mg/L、TN为4.31 mg/L、TOC为32.28 mg/L、藻密度为 1.0×10^3 个/mL、叶绿素a(Chl-a)浓度为12 $\mu\text{g/L}$ 、电导率(COND)为320 $\mu\text{S/cm}$ 。

1.3 检测分析方法

每隔2~3 d采集1次水样,采样时间为上午9:30。DP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定,TOC、TN采用德国耶拿Multi N/C总有机碳分析仪测定,藻密度、Chl-a、COND采用YSI ProDSS多参数水质测量仪测定,株高采用卷尺测量,质量采用电子称量。

2 结果与分析

2.1 绿萝质量的变化

试验期间天气以多云为主。整个试验阶段最高气温为32 $^{\circ}\text{C}$,最低气温为14 $^{\circ}\text{C}$,大多在18~27.5 $^{\circ}\text{C}$ 之间。试验结束后,2、3、4号水箱中绿萝的质量(湿质量)分别为365、715、874 g,与试验前相比分别增加了115、215、124 g,增重比例分别为46%、43%、16.5%,差异显著($P < 0.01$)。可见,种植密度越大越不利于植物增殖。各水箱内绿萝的存活率都为100%,没有衰败现象,对水面的覆盖率都有所增加。2号水箱内水体为绿色,可见藻类;3号和4号水箱靠光一侧内壁有少量绿色藻类附着,水箱内水质清澈。

2.2 对DP去除的影响

浮床系统主要通过植物吸收、吸附、截留、沉淀和合成藻类物质等方式去除磷。对DP的吸附和解吸与天气状况、微生物活性和试验条件等因素有关。本试验中,DP的初始浓度很高,通过植物吸收的方

式去除 DP 的数量有限。试验结果表明,3 号水箱内 DP 浓度比另外两个水箱略低,因为在该种植密度条件下绿萝生长较快,质量增加较多,对磷的需求相对也较大。

图2为不同种植密度绿萝对 DP 去除的影响。可以看出,21 d 后,1 号水箱中 DP 浓度逐渐下降,试验结束后 DP 浓度为 9 mg/L,低于其他水箱。有研究表明,藻类的生长对水体中营养物质的脱除能力很强^[9]。1 号水箱中藻类生长迅猛,试验中后期藻密度一直保持在 1.0×10^4 个/mL 以上。该水箱中的磷主要被藻类吸收和储存,以及随着藻类残体沉淀到水箱底部。由于绿萝种植密度对藻类生长影响较大,因此会影响到对 DP 的去除。试验结束后,将 1 号水箱的含藻污水进行冻融-破壁处理,测得 DP 为 18.02 mg/L,即藻的吸收对 DP 的去除贡献率为 44.57%。

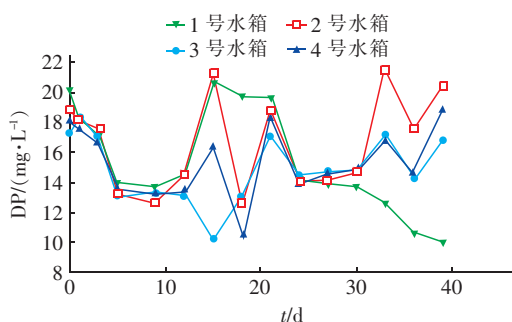


图2 不同种植密度绿萝对 DP 去除的影响

Fig. 2 Removal effect of DP by *Epipremnum aureum* under different planting densities

2.3 对TN 的去除效果

图3为不同种植密度绿萝对 TN 的去除效果。可以看出,各水箱中 TN 均呈下降趋势。试验结束后,3、4 号水箱内 TN 浓度皆为 0.14 mg/L,去除率均为 96.8%;1 号水箱和 2 号水箱内 TN 浓度分别为 0.77 和 0.61 mg/L,相应的去除率分别为 82.1% 和 85.8%。试验前 3 d 总氮浓度下降最快,1、2、3、4 号水箱的 TN 分别下降至 2.96、1.96、1.75 和 1.51 mg/L,相应去除率分别为 31.3%、54.5%、59.4% 和 65.0%。在整个试验阶段,1 号水箱中 TN 浓度下降速度最慢。试验后期(20 d 后),3 号和 4 号水箱的 TN 去除效果相似。氮素主要通过植物吸收、沉淀作用、挥发作用和硝化-反硝化作用去除^[10]。绿萝的根系向水体释放大量氧气,在水体内部和根系周围形成大量好氧-厌氧的微环境,有利于微生物的生

长和硝化-反硝化作用的进行。由于植物生长存在着竞争关系,种植密度过大会对水体产生很强的遮蔽作用,影响大气复氧和微生物的生长代谢,种植密度最大的 4 号水箱并没有明显增加 TN 的净化效果,所以该条件下的最适宜种植密度为 3.13 g/L。

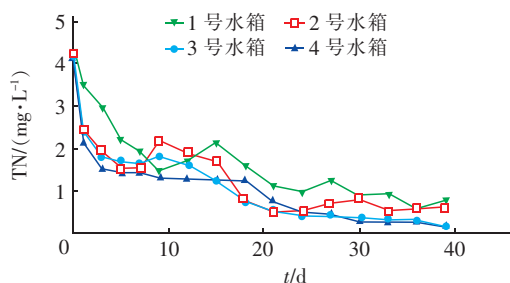


图3 不同种植密度绿萝对 TN 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of TN by *Epipremnum aureum* under different planting densities

试验结束后,测得绿萝的干湿比为 11.25 : 100,干质量含量为 17.78 mg/g,2、3、4 号水箱中绿萝去除 TN 的贡献率分别为 29.65%、55.30% 和 31.97%。试验结束后将对照组水样中的藻进行冻融-破壁处理,测得 TN 浓度为 2.75 mg/L,藻内含氮量占 TN 初始浓度的 45.98%。

采用回归方程 $y = ae^{-bx}$ 对各水箱中 TN 浓度-时间进行拟合,其中 y 为 TN 浓度,mg/L; x 为时间,d。1、2、3、4 号水箱对应的回归方程分别为 $y = 3.723726e^{-0.06525x}$ 、 $y = 3.131595e^{-0.067080x}$ 、 $y = 3.218767e^{-0.084374x}$ 、 $y = 2.918089e^{-0.085137x}$ 。可以看出,3 号、4 号水箱除 TN 的效果接近,综合考虑种植密度为 3.13 g/L 较合适。

2.4 对TOC 的去除效果

图4为不同种植密度绿萝对 TOC 的去除效果。可以看出,试验前 3 d,4 个水箱中 TOC 浓度迅速降低,分别降至 15.75、7.68、6.74 和 6.00 mg/L,去除率分别为 52.1%、76.2%、79.1% 和 81.4%,随后维持在这一水平并略有下降。试验结束后,4 个水箱中 TOC 浓度分别为 9.08、7.28、4.98 和 4.66 mg/L,去除率分别为 71.9%、77.4%、84.6% 和 85.6%。小分子有机物被植物直接吸收利用、微生物对有机物的好氧分解,以及植物根系吸附、截留是浮床技术去除 TOC 的主要途径^[11]。由于本试验 TOC 初始浓度不高,通过截留、吸附、沉降和吸收等多种作用,试验初期 TOC 浓度迅速降低,在后续试验过程中被逐

步利用。由于植物的吸收、根系的吸附,以及根系微生物作用,植物组对 TOC 的去除率大于对照组。2 号水箱植物较少,种植密度较低,效果稍差。4 号水箱绿萝种植密度过高,生长受限,效果与 3 号水箱相当。所以该条件下较适宜的种植密度为 3.13 g/L。试验结束后,将对照组含藻污水进行冻融-破壁处理,测得 TOC 浓度为 18.58 mg/L,藻的吸收对 TOC 的去除贡献率为 28.92%。

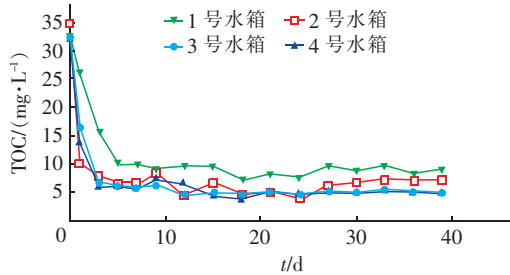


图4 不同种植密度绿萝对 TOC 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TOC by *Epipremnum aureum* under different planting densities

采用回归方程 $y = ae^{-bx} + c$ 对各水箱中浓度-时间进行线性拟合,其中 y 为 TOC 浓度,mg/L; x 为时间,d; c 为降解后逼近的浓度值, c 值越小,说明达到的去除效果越好。1、2、3、4 号水箱对应的线性回归方程分别为 $y = 24.805e^{-0.418x} + 8.683$ 、 $y = 28.418e^{-1.948x} + 6.244$ 、 $y = 27.774e^{-0.905x} + 5.038$ 、 $y = 27.189e^{-1.140x} + 5.080$ 。可以看出,种植密度为 3.13 g/L 时对 TOC 的去除效果最好。

2.5 各水箱中COND的变化

不同水箱中 COND 的变化如图 5 所示。

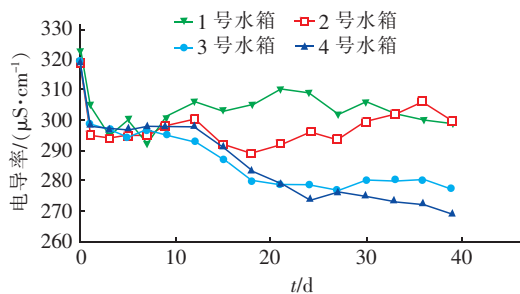


图5 不同水箱中 COND 的变化

Fig. 5 Change of COND in different water tanks

试验进行至第 2 天时,各水箱中 COND 均下降至 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,之后 1 号水箱一直维持在 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,2 号水箱在试验第 18 天下降至 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 然后又逐渐上升到 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,而 3 号

和 4 号水箱中 COND 的变化趋势相近,均呈现下降趋势。试验结束时,1、2、3、4 号水箱中 COND 分别为 299、300、277、269 $\mu\text{S}/\text{cm}$,分别下降了 6.56%、6.25%、13.4% 和 15.9%。

试验初期,由于微生物的降解和吸附、植物的吸收等作用,导致 TOC、DP、TN 等浓度下降,所以电导率迅速下降。对照组 COND 一直处于较高水平,该组污染物降解较少,离子浓度较高;虽然藻类生长可以吸收一部分污染物,但藻类死亡后分解会产生新的杂质。2 号水箱中有一定数量的藻类生长且污染物降解较少,故 COND 略有下降后又升高。3 号和 4 号水箱中的绿萝对水体覆盖好,水箱内藻类较少,各污染物浓度变化趋势一致且持续下降,所以 COND 变化趋势类似。种植密度较大的 4 号水箱中 COND 并没有比 3 号水箱明显降低,说明 3 号水箱中绿萝种植密度较为合适。

2.6 藻密度和Chl-a 的变化

不同水箱中藻密度的变化如图 6 所示。可知,试验开始后,1 号水箱中藻密度一直处于上升趋势并处于较高水平,试验进行第 7 天时达到了 9.7×10^3 个/mL,此后大多维持在 10^4 个/mL 以上。4 号水箱中藻密度在第 5 天、2 号和 3 号水箱均在第 7 天达到最大值,分别为 6.2×10^3 、 5.5×10^3 、 6.0×10^3 个/mL。此后 2 号水箱中藻密度维持在 5.0×10^3 个/mL 左右。3 号和 4 号水箱中藻密度则持续下降。试验结束的时候 4 个水箱内的藻密度分别为 1.0×10^4 、 4.3×10^3 、 1.5×10^3 、 1.0×10^3 个/mL。试验结束后,将对照组藻类进行电镜检测,结果表明藻类主要包括蓝藻和绿藻,占比分别为 92.29% 和 7.71%。

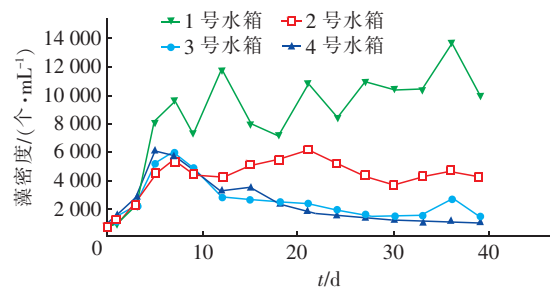


图6 不同水箱中藻密度的变化

Fig. 6 Change of algae density in different water tanks

不同水箱中 Chl-a 浓度的变化如图 7 所示。可以看出,试验开始后 1 号水箱中 Chl-a 浓度基本处

于上升状态并处于较高水平,第7天时接近 $200 \mu\text{g/L}$,此后大多维持在 $150 \mu\text{g/L}$ 以上。4号水箱 Chl-a 浓度在第5天、2号和3号水箱均在第7天达到最大值,分别为 165 、 131.3 、 $141.6 \mu\text{g/L}$ 。此后2号水箱中 Chl-a 浓度略有下降,然后维持在 $100 \mu\text{g/L}$ 左右;3号和4号水箱中 Chl-a 浓度持续降低,且变化趋势一致。试验结束时,4个水箱中 Chl-a 浓度分别为 191.9 、 97.2 、 16.7 、 $5.9 \mu\text{g/L}$ 。

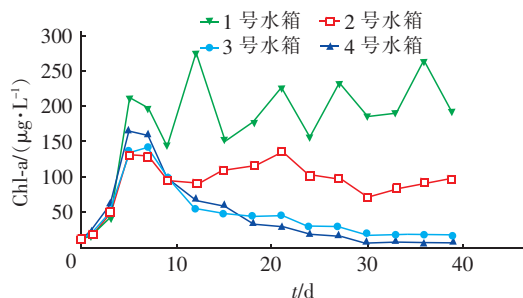


图7 不同水箱中 Chl-a 浓度的变化

Fig. 7 Change of Chl-a concentration in different water tanks

综上所述,各水箱中藻密度与 Chl-a 浓度的变化趋势一致,两者呈显著性相关。试验前7 d,水箱中营养物质充足,可同时满足绿萝和藻类生长,藻类经过调整期后大量繁殖。由于存在植物与藻类激烈的物种竞争,试验第9天后,根系发达、生长较快的植物能获得较多的营养物质,植株对阳光的遮蔽作用也能限制藻类的光合作用。另外,绿萝可能会分泌一些克藻物质从而限制藻类生长或杀死藻类。所以根系发达、植株发达、覆盖度较大的植物所在水箱内藻密度较小。对照组没有植株的竞争,阳光和营养物质充足,藻类在整个试验阶段一直大量繁殖。由于3号和4号水箱中绿萝覆盖度相当,各种营养物质的初始浓度相同,降解效率接近,所以两水箱中藻密度和 Chl-a 浓度变化趋势一致,都能很好地抑制藻类的生长繁殖。

3 结论

① 各水箱中不同种植密度的绿萝存活率都为100%,高种植密度可抑制水中藻类的生长。试验结束后2~4号水箱中绿萝质量为365、715、874 g,分别增加了115、215、124 g,增重比例为46%、43%、16.5%,差异显著($P < 0.01$)。若种植密度过大,则生长受到限制,植株增重较小。

② 对照组环境条件适宜,没有植物竞争,藻类

生长繁殖较快,试验第7天后藻密度大多维持在 10^4 个/mL 以上。藻类的生长是各污染物指标下降的主要原因,藻的吸收对 DP、TN、TOC 的去除贡献率分别为44.57%、45.98%和28.92%。对照组中的藻类主要是蓝藻和绿藻,优势度分别为92.29%和7.71%。

③ 种植密度为3.13和4.69 g/L的两个水箱中,DP、TN、TOC、COND、藻密度、Chl-a 浓度的变化趋势一致,对污染物的去除效果无明显差异,即种植密度增加50%并没有明显提高处理效果。在试验条件下,3.13 g/L 为最佳种植密度,指数模型模拟结果也获得了相同的结论。

参考文献:

- [1] Nakai S, Zou G, Okuka T, et al. Anti-cyanobacterial allelopathic effects of plants used for artificial floating islands[J]. *Allelopathy J*, 2010, 26(1): 113–121.
- [2] Korboulewsky N, Wang R, Baldy V. Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 105(4): 9–14.
- [3] 薛彦君,许秋瑾,冯胜,等. 曝气时间对美人蕉生态浮床去除水体中营养盐的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(11): 1749–1754.
Xue Yanjun, Xu Qiujin, Feng Sheng, et al. Impact of aeration time on nutrient removal by ecological floating bed of *Canna indica* in polluted water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(11): 1749–1754 (in Chinese).
- [4] 窦文清,何皓,宋文萍,等. 丛枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 761–767.
Dou Wenqing, He Hao, Song Wenping, et al. Treatment of simulated saline wastewater from the coal chemical industry using ecological floating beds enhanced with *Arbuscular Mycorrhiza* [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 761–767 (in Chinese).
- [5] 虞中杰,王东启,陈振楼,等. 人工浮床加挂填料对富营养化河水的净化效果[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(17): 31–35.
Yu Zhongjie, Wang Dongqi, Chen Zhenlou, et al. Purification of eutrophic river water in artificial floating beds combined with carriers [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(17): 31–35 (in Chinese).

- [6] 戴谨微,陈盛,曾歆花,等. 复合型生态浮床净化污水厂尾水的效能研究[J]. 中国给水排水,2018,34(3): 77-81.
- Dai Jinwei, Chen Sheng, Zeng Xinhua, *et al.* Treatment of tail water from wastewater treatment plant by integrated ecological floating-bed [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 77-81 (in Chinese).
- [7] Saeed T, Paul B, Afrin R, *et al.* Floating constructed wetland for the treatment of polluted river water: a pilot scale study on seasonal variation and shock load [J]. Chem Eng J, 2016, 287: 62-73.
- [8] Ijaz A, Shabir G, Khan Q M, *et al.* Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands [J]. Ecol Eng, 2015, 84: 58-66.
- [9] 朱广伟,秦伯强,张运林,等. 2005—2017年北部太湖水体叶绿素a和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 279-295.
- Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Zhang Yunlin, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 279-295 (in Chinese).
- [10] 丛海兵,吴黎明. 2种耐寒生态浮床植物的水质改善性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 51-56.
- Cong Haibing, Wu Liming. Study on water quality improvement capacity of two cold-resistant floating bed plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 51-56 (in Chinese).
- [11] 王国芳,汪祥静,吴磊,等. 组合型生态浮床中各生物单元对污染物去除的贡献及净化机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 136-141.
- Wang Guofang, Wang Xiangjing, Wu Lei, *et al.* Contribution and purification mechanism of bio-components to pollutants removal in an integrated ecological floating bed [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 136-141 (in Chinese).



作者简介:张择瑞(1985-),男,安徽利辛人,博士研究生,主要研究方向为环保装备及工程。

E-mail: zrs2020@163.com

收稿日期:2020-02-24

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次