

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.01.013

改良填料生物滞留柱去除雨水径流中 污染物试验研究

付峥嵘¹, 倪尚源¹, 王耀辉¹, 唐宁远², 马满英¹, 刘岳林¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲华晟环保技术有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对传统类型生物滞留设施氮、磷去除效果不佳且不稳定性的问题, 对装填改良材料的传统生物滞留柱性能展开了研究。构建了4个生物滞留柱(Z1、Z2、Z3、Z4), Z1为对照生物滞留柱, 其余3个柱子分别装有麦饭石、沸石、蛭石填料层, 柱内均设置了35 cm的淹没区, 对滞留柱出水进行取样分析。结果表明: 4个生物滞留柱对TP、COD、氨氮、硝态氮的去除率分别为76.7%~85.6%、87.78%~94.19%、76.7%~87.67%和78%~88%。与Z1相比, Z2、Z3和Z4对不同污染物的去除效果都有提升, 其中Z4(蛭石填料)去除效果最优。

关键词: 生物滞留柱; 填料; 反硝化; 去除率

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)01-0095-06

引文格式: 付峥嵘, 倪尚源, 王耀辉, 等. 改良填料生物滞留柱去除雨水径流中污染物试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 95-100.

An Experimental Research on the Removal of Pollutants in Rainwater Runoff by Improved Filler Biological Retention Tanks

FU Zhengrong¹, NI Shangyuan¹, WANG Yaohui¹, TANG Ningyuan², MA Manying¹, LIU Yuelin¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Huasheng Environmental Protection Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the poor and unstable removal effects of nitrogen and phosphorus by traditional biological retention facilities, a research has thus been carried out on the performance of biological retention columns packed with improved fillers. Four biological retention columns have been constructed, one being a control biological retention column (Z1), and three equipped with different modified packing layers (maifanite, zeolite, vermiculite) biological retention columns, with a 35 cm submerged area set up in the column, followed by a sampling and analysis of the effluent of the retention columns. The results show that the removal rates of TP, COD, NH_4^+-N , and NO_3^--N by the four biological retention columns are 76.7%~85.6%, 87.78%~94.19%, 76.7%~87.67% and 78%~88%, respectively. Compared with Z1, it is obvious that Z2, Z3 and Z4 are characterized with improved removal effects of different pollutants, among which Z4 (vermiculite filler) has the best performance.

Keywords: biological retention column; packing; denitrification; removal rate

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 湖南省株洲市科技计划基金资助项目(2020-022, 2019-022); 株洲市海绵城市低影响开发技术工程研究中心基金资助项目(2018-015)

作者简介: 付峥嵘(1974-), 男, 湖南安化人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为绿色建筑, 海绵城市生物滞留技术, E-mail: 441680332@qq.com

0 引言

城市化发展使城区不透水地面比例持续增大,容易导致严重的城市内涝与非点源污染问题^[1],亟需有效的措施控制和管理城市雨水径流。随着城市点源污染得到有效控制,非点源污染问题越来越突出,已成为众多城市水体受到污染的根本原因^[2]。为了减轻城市化的负面影响,发达国家譬如美国已提出并实施低影响开发理念、设施来解决或缓解非点源污染带来的水量和水质问题,广泛利用了屋顶绿化、生物滞留池和多孔人行道等低影响开发控制设施^[3]。生物滞留池通过植物-土壤-微生物系统渗滤雨水径流,可有效控制水量,改善雨水径流水质,并已经在发达国家得到广泛应用^[4]。

传统的生物滞留系统由种植层、过渡层、砂砾层和底部排水收集装置组成,并未考虑设置缺氧区,不具备反硝化脱氮功能,因此对 N 的去除效果波动较大、不稳定^[5-6]。不同的填料特性对系统氮、磷去除有着至关重要的作用。填料的种类、材质不同,对污染物的去除效果也不同,选择合适的填料对提升生物滞留系统 N 去除效果很重要^[7]。

本研究构建了 1 个对照柱(Z1)和 3 个装有不同改良填料层(麦饭石、沸石、蛭石)的生物滞留柱(Z2、Z3 和 Z4),均设置了 35 cm 的淹没区,探究 4 个生物滞留柱对氨氮、TP(total phosphorus, TP)、COD(chemical oxygen demand, COD)、硝态氮的去除效果,并对生物滞留柱出水进行分层取样,在此基础上,分析了生物滞留柱对氨氮、总磷、化学需氧量、硝态氮的去除机理,为生物滞留设施的

设计、应用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验原料

本研究中,生物滞留池所用的主要填料为麦饭石、蛭石、沸石。种植土为校园内绿化带土壤和草炭土混合填料。

1.1.2 主要试剂

钼酸铵 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、硝酸钾 KNO_3 、酒石酸锑钾 $\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 、磷酸二氢钾 KH_2PO_4 、重铬酸钾 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、硫酸汞 HgSO_4 、乙酸乙酯 $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ 、次硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 。试剂均,均为化学分析纯,购自于阿拉丁试剂公司。

1.1.3 主要仪器

紫外-可见光分光光度计,UV-1800,上海美谱达仪器有限公司;超声清洗仪,SB-3200DT,宁波新芝生物科技有限公司;高压蒸汽灭菌锅,YXQ-LS-500SII,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;精密大流量蠕动泵,BT100-2J,保定兰格恒流泵有限公司。

1.2 试验装置

生物滞留柱由 PP 材料制成,高度为 1 000 mm,内径为 300 mm。该装置外部从各填料层底部区域埋设穿孔取样管,进行分层取样,便于研究各填料柱的水质情况。底部出水采用穿孔排水管,保证出水顺畅。该装置内部结构从上到下依次为种植土(100 mm)、承托层(300 mm)、改良填料层(200 mm)、砾石层(200 mm),如图 1 所示。

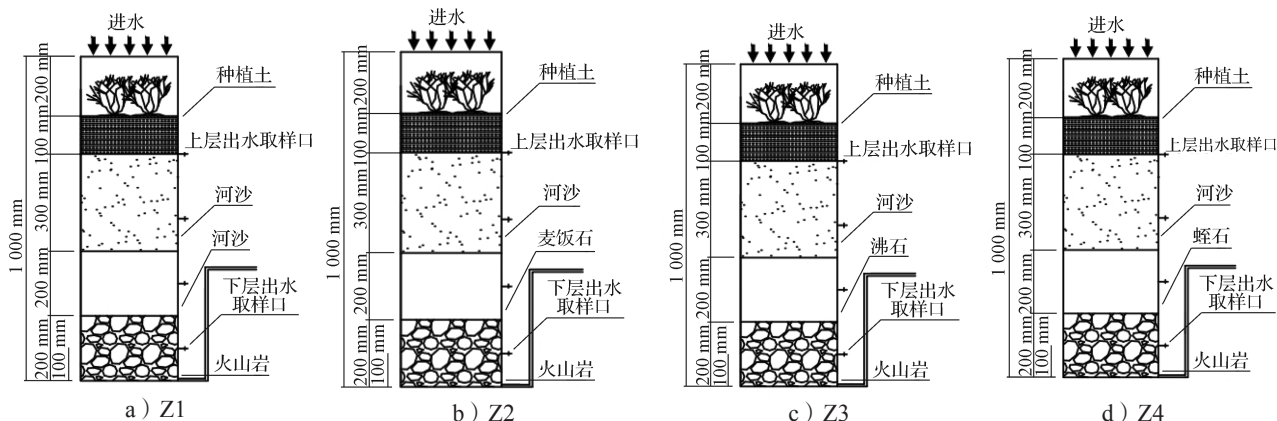


图 1 试验装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

种植土层采用草炭土与校园内绿化带土壤按照体积比为 2:1 的比例混合而成,土壤粒径范围小于 1.0 mm;承托层采用市购的河沙;改良填料层分别采用

麦饭石、沸石和蛭石进行装填;砾石层采用火山岩,目的是充分利用火山岩的大孔隙率的特性来存续水量以及对水中污染物质进行后续吸收处理,生物滞留

柱内填料的理化性质见表 1, 详细结构见表 2。

表 1 填料理化性质参数表

Table 1 Physical and chemical property parameters of fillers

填料	干密度 / (g·cm ⁻³)	阳离子交换量 / (mol·kg ⁻¹)	C _{TN} / (g·kg ⁻¹)	C _{TP} / (g·kg ⁻¹)	K ₈₀	有机质 / %
土壤	1.20	0.057	0.541	0.174	1.21	0.4
草炭土	0.63	0.048	3.870	0.245	—	40.1
河沙	1.58	0.021	0.785	0.187	2.35	0.21
麦饭石	0.85	0.016	0.848	0.058	1.68	5.80
沸石	1.18	0.031	0.598	0.079	1.45	1.11
蛭石	0.78	0.035	1.021	0.982	3.13	0.85

表 2 生物滞留柱填料结构

Table 2 Packing structure of biological retention columns

距顶端距离 /cm	Z1	Z2	Z3	Z4
0~10	种植土	种植土	种植土	种植土
10~40	河沙	河沙	河沙	河沙
40~60	河沙	麦饭石	沸石	蛭石
60~80	火山岩	火山岩	火山岩	火山岩

1.3 试验方法

1.3.1 进水水质与水量

试验用水参考校园道路地表径流各项实测数据进行半人工配制, 进水中各污染物浓度与配制药剂如表 3 所示。参考《海绵城市建设技术指南》, 全年的降雨事件中, 绝大部分为中小雨量的降雨事件, 本次试验进水量相当于一场累积雨量为 18.1 mm 的中雨。生物滞留设施与不透水下垫面的面积比一般为 5%~10%, 本次试验中取 5%, 径流系数按照 0.9 计算, 单次进水量为 23.0 L。

表 3 进水水质与来源

Table 3 Influent water quality with its source

检测指标	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	来源
SS	200~300	路面雨水篦子中沉积物
COD	300	葡萄糖
氨氮	3	氯化铵
TP	0.9	磷酸二氢钾
硝态氮	3	硝酸钾

注: SS 指固体悬浮物浓度 (suspended solid)。

1.3.2 试验方法

为保证植物正常生长及填料中微生物的活性, 同时降低种植土填料的淋洗作用对生物滞留柱污染物去除效果的影响, 在正式试验前, 用自来水对 Z1~Z4 进行淋洗, 单次进水量为 25 L, 间隔时间为 2 d, 淋洗持续时间为 14 d。淋洗期后正式试验, 每次试验取样完成后干燥 5~6 d, 共进行 10 次试验。

取样时间视柱子出水速度而定, 一般为 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 12, 16 h。采集上层和底部的出水水样。通过对出水水质的检测结果来观察不同停留时间对生

物滞留柱出水效果的影响。

1.4 分析方法

本次试验主要检测的水质指标为 COD、氨氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N)、TP。采用重铬酸钾氨氮法检测 COD 浓度, 采用纳氏试剂分光光度法检测氨氮浓度, 采用紫外分光光度法监测硝态氮浓度, 采用钼酸铵分光光度法检测 TP 浓度。

采用统计软件 SPSS 对进水和出水污染物浓度、生物滞留柱污染物去除效率进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 出水流量

渗透速率是生物滞留设施水量、水质控制性能的重要影响因素。

图 2 为生物滞留柱 Z1~Z4 的出流量和累积出流量。

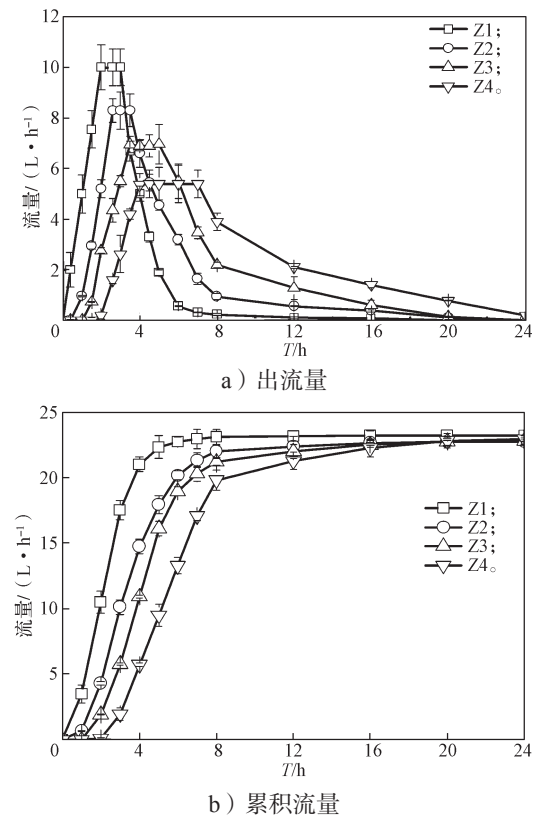


图 2 生物滞留柱 Z1~Z4 的出流量和累积出流量曲线
Fig. 2 Discharge and cumulative discharge of biological retention columns Z1~Z4

从图 2a 可以看出, Z1、Z2、Z3 和 Z4 柱出流峰值分别为 10.0, 8.3, 6.9, 5.4 cm/h。图 2b 累积出流量中, Z1~Z4 在前 8 h 的累积出流量分别占到各柱子总累积出流量的 99.7%, 96.00%, 92.09%, 85.52%。Z4 的出流时间较其他柱子晚, 出流速率峰值也低于其他柱子, 这可能与 Z4 的蛭石填料层的粒径分布有很大关系, 其均匀系数 (d_{80}/d_{10}) 较其他柱子对应层填料高, 填

料中小颗粒挤占大颗粒孔隙,影响了整个柱子的出水流速。

2.2 TP

图 3 为 Z1~Z4 的出水 TP 浓度变化和上层 10 cm 取样口出水浓度变化曲线。

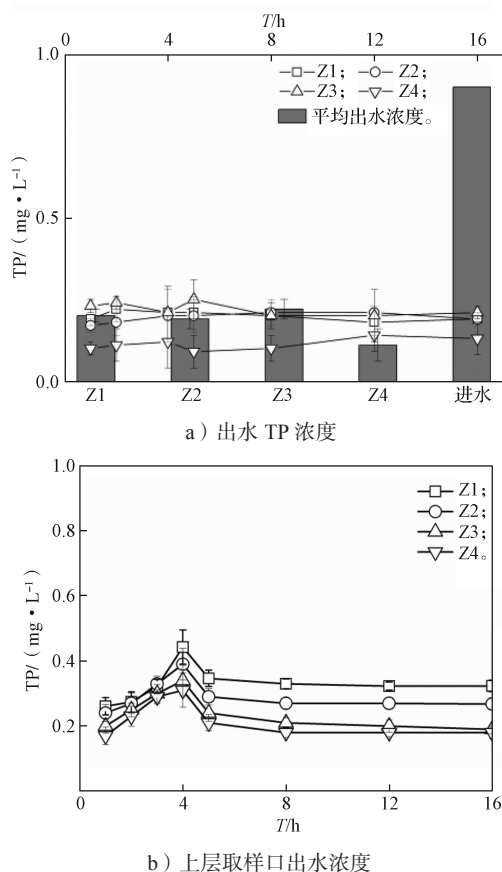


图 3 Z1~Z4 的出水 TP 浓度变化和上层 10 cm 取样口出水浓度变化曲线

Fig. 3 Changes of TP concentration in the effluent of the biological retention column Z1~Z4 and the change of the effluent concentration of the upper 10 cm sampling port

如图 3a 所示, Z1~Z4 生物滞留柱的 TP 出水浓度分别为 0.19, 0.19, 0.21, 0.13 mg/L, 显著低于试验模拟进水总磷浓度 ($p < 0.05$), 表明各生物滞留柱均对模拟径流中 TP 具有明显的去除效果。各生物滞留柱对 TP 的去除率范围分别在 75.5%~78.6%、76.6%~81.8%、72.22%~81.11% 和 88.33%~88.89%, 其中蛭石填料的 Z4 对 TP 的去除效果最佳。图 3b 给出了各生物滞留柱的上层取样结果。结果表明, 生物滞留柱表面 200 mm 填料可以去除大部分的 TP, 因为在雨水径流中磷的存在形态主要是颗粒态磷, 主要通过填料过滤截留去除, 并且水流流速越低, 除磷效果越好, 张小玲等学者也得出类似结果^[8]。Z4 对磷的去除效果好于其他柱子, 与柱子装填的蛭石有关, 方媛媛等^[9]研究发现蛭石对磷的吸附效果好于其他

填料。试验期间 Z1~Z4 装置对总磷的去除率有所下降的原因猜测是由于随着时间的增长会使填料的有效吸附位点数量逐渐减少^[10]。

2.3 COD

图 4 为 Z1~Z4 的出水 COD 浓度变化曲线和平均出水浓度。

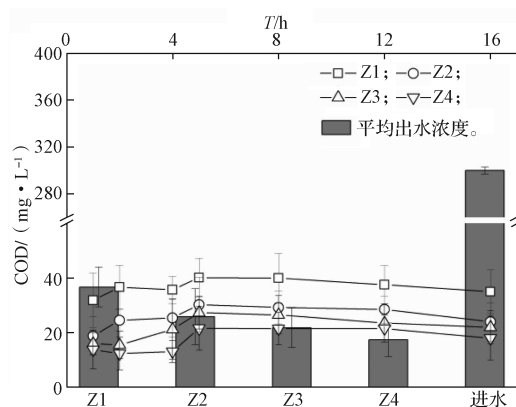


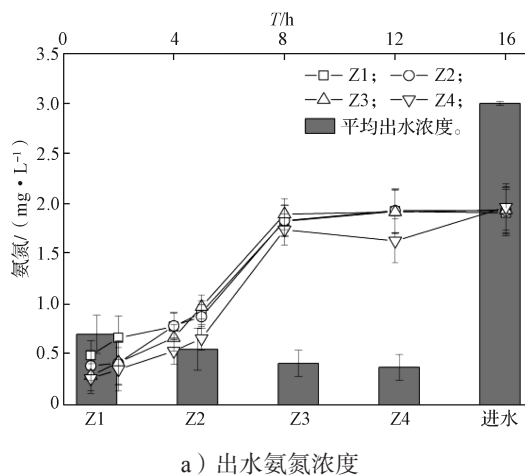
图 4 Z1~Z4 的出水 COD 浓度变化曲线和平均出水浓度

Fig. 4 Concentration change and average concentration of COD in the effluent of the biological retention column

试验阶段, 除 Z1 外其他生物滞留柱对 COD 的去除率均达 90% 以上, 如图 4 所示, 说明本试验选取的 3 种填料柱子 (Z2、Z3、Z4) 都提升了生物滞留柱对 COD 的去除能力, 显著低于试验模拟进水 COD 浓度 ($p < 0.05$)。国内多位学者^[11]研究显示雨水径流中 COD 与 SS 具有很大相关性, 由于填料的过滤拦截, 大部分颗粒态污染物得到了较好的处理。而溶解态 COD 则主要通过填料的吸附、生物降解得到了很好的去除。因此, 本试验的植物以及填料均对 COD 的去除产生了不同程度的促进作用。

2.4 氨氮

图 5 为 Z1~Z4 的出水氨氮浓度变化和分层取样浓度。



a) 出水氨氮浓度

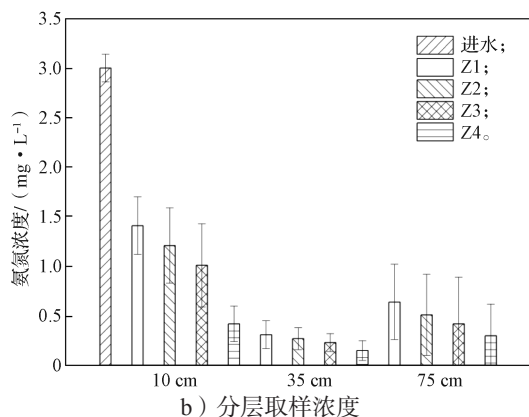


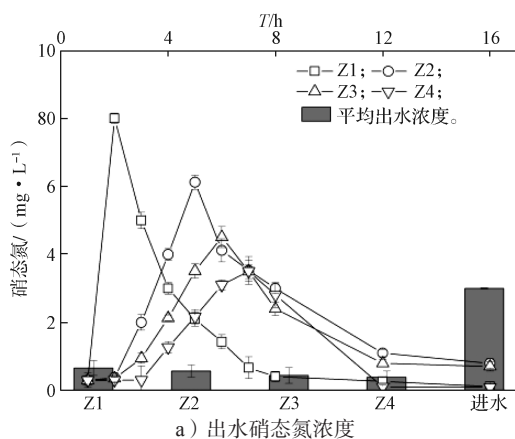
图5 Z1~Z4的出水氨氮浓度变化和分层取样浓度

Fig. 5 Changes in the concentration of NH_4^+-N in the effluent of the biological retention column Z1~Z4 and the concentration of stratified sampling

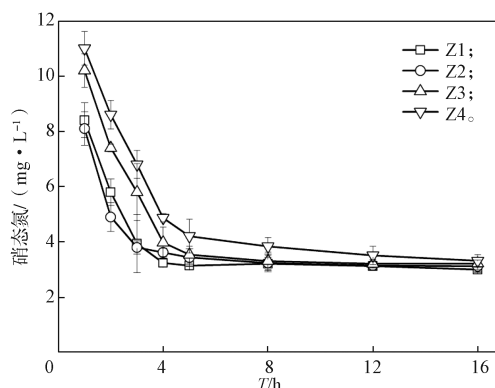
随着试验的进行, Z1~Z4 试验装置对氨氮的去除能力随时间逐渐下降, 逐渐趋于稳定, 平均出水浓度分别为 (0.70 ± 0.19) , (0.55 ± 0.021) , (0.41 ± 0.11) , (0.37 ± 0.13) mg/L 。4 个柱子对于氨氮的去除效率没有显著差异 ($p > 0.05$)。结合图 5b 的氨氮分层取样结果, 表明进水过程中, 表层填料对进水中氨氮具有较好的吸附作用, 大部分氨氮被表层填料吸附, 试验间歇期间通过微生物的硝化作用将表层填料上吸附的氨氮转化为硝态氮, 表层填料氨氮吸附能力得到恢复, A.M. O'reilly 等^[11]也报道了类似结果。Z2~Z4 生物滞留柱淹没区内装填了对氨氮具有较好吸附能力的麦饭石、蛭石、沸石, 试验初期 Z2~Z4 生物滞留柱取得了较好的处理效果, 因为淹没区残存液中溶解氧比较少, 空气中的氧也难以输送到淹没区, 在试验间隔淹没区内麦饭石、蛭石、沸石上吸附的氨氮, 仅有少量通过硝化作用转化为硝态氮, 随着试验的进行, 麦饭石、蛭石、沸石的吸附能力逐渐饱和, 试验后期 Z2~Z4 生物滞留柱氨氮去除效果下降, 并趋于稳定。

2.5 硝态氮

生物滞留柱 Z1~Z4 的出水硝态氮浓度变化和上层 10 cm 取样口出水浓度变化如图 6 所示。



a) 出水硝态氮浓度



b) 上层取样口出水浓度

图6 Z1~Z4的出水硝态氮浓度变化和上层 10 cm 取样口出水浓度变化曲线

Fig. 6 Changes of NO_3^--N concentration in the effluent of the biological retention column Z1~Z4 and the change of the effluent concentration of the upper 10 cm sampling port

从图 6b 中可知, Z1~Z4 装置在试验初期的硝态氮的上层出水浓度异常升高, 与试验间隔表层填料吸附的氨氮转化为硝态氮有关。下层取样口硝态氮的平均出水浓度为 (0.66 ± 0.22) , (0.57 ± 0.19) , (0.44 ± 0.23) mg/L 和 (0.36 ± 0.18) mg/L , 并且 4 个柱子对于硝态氮的去除率没有显著差异 ($p > 0.05$)。从图 6a 中可以看出在最初进水的 4 h 内, 4 个装置底部出水中硝态氮浓度很低, 这部分出水主要源自淹没区内填料孔隙中残存液, 在试验间隔, 通过反硝化作用残存液中硝态氮得到很好的去除, 因此底部最初出水水样中, 硝态氮浓度很低。

在随后的出水中, 由于上层填料中高浓度硝态氮随着进水进入淹没区, 导致接下来几个小时内, 出水中硝态氮浓度急剧上升, 甚至超过了进水浓度。

随着上层填料高浓度的淋洗液流出, 接下来的出水中主要为本次进水, 进水在淹没区的停留时间比较短, 在进水过程中, 进水中硝态氮很难通过反硝化完全去除, 因此出水中硝态氮接近或低于进水浓度^[12]。其中, 根据 4 个柱子的出水流速过程线, 可知蛭石出水速度低于其他 3 个柱子, 可能是因和蛭石粒径小, 且蛭石粒径的不均匀系数较高, 导致装填蛭石的生物滞留柱出水流速较慢, 进水在蛭石填料柱淹没区内的停留时间较其他几个柱子长, 出水中硝态氮浓度也低于其他柱子, 对硝态氮整体去除效果也好于其他柱子。

3 结论

1) 通过装填不同的改良填料来分析不同生物滞留池模拟装置对污染物质的去除效果, 在设置的 35 cm 淹没区高度下 4 个试验装置对 TP、COD、氨氮、硝态氮的去除率分别为 76.7%~85.6%、

87.78%~94.19%、76.7%~87.67% 和 78%~88%。

2) 在试验期间, 3 种填料在氨氮和硝态氮的去除效果上均有提升, 其中蛭石填料硝态氮 N 去除率相较于河沙填料的硝态氮去除率提升了 10%, 氨氮的去除率相较于河沙填料提升了 20%, 由于 Z4 柱子的均匀系数较其他柱子对应层填料高, 填料中小颗粒挤占大颗粒孔隙, 影响了整个柱子的出水流速, 使得蛭石的去除率提升了不少。

3) 随着面源污染问题的日趋严重, 改良生物滞留设施的填料能够提高设施对于污染物的处理效果, 更有效的控制污染源头。综合本研究得出结论, 由于蛭石填料对磷的去除效果好, 在富营养化高的地区可采用蛭石填料加强对磷的去除, 同时在实际工程应用中应结合场地的使用面积综合考虑选择生物滞留池的填料, 实际工程现场若有充足的使用面积, 可以使用均匀系数更低的填料, 反之若实际工程场地有限, 可以使用均匀系数高的蛭石填料。

本研究为生物滞留设施填料的优化设计提供了参考, 对实现海绵城市建设发展有一定的推进作用。未来的研究应着重关注生物滞留设施填料中长期使用情况, 以及不同运行工况下设施的处理效果。

参考文献:

- [1] JI M C, BAI X. Construction of the Sponge City Regulatory Detailed Planning Index System Based on the SWMM Model[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101645.
- [2] FRIAS R A, MANIQUIZ-REDILLAS M. Modelling the Applicability of Low Impact Development (LID) Technologies in a University Campus in the Philippines Using Storm Water Management Model (SWMM)[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1153(1): 012009.
- [3] CHUI T F M, LIU X, ZHAN W T. Assessing Cost-Effectiveness of Specific LID Practice Designs in Response to Large Storm Events[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 353-364.
- [4] 江 伟, 楼宇锋. 基于 SWMM 的低影响开发污染削减效果模拟研究[J]. 能源环境保护, 2020, 34(1): 103-108.
JIANG Wei, LOU Yufeng. Simulation of Pollution Reducing Effect of Different Low Impact Development Layouts Based on SWMM[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(1): 103-108.
- [5] ZHANG Y H, HU W P, HU Y M, et al. Resuspension Traps for the Removal of Nutrients and Algae From the Sediments of Shallow Lakes[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(10): 3451-3465.
- [6] 王书敏, 何 强, 徐 强, 等. 生物滞留系统去除地表径流中的氮素研究评述[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 140-150.
WANG Shumin, HE Qiang, XU Qiang, et al. Summary of Nitrogen Removal in Surface Runoff by Bioretention System[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 140-150.
- [7] 李 澄, 何伶俐, 周 洁, 等. 生物滞留设施建设常见问题及解决方案[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 105-112.
LI Cheng, HE Lingjun, ZHOU Jie, et al. Common Problems and Solutions in Construction of Bioretention Facility[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 105-112.
- [8] 张小玲, 朱光灿. 加气混凝土砌块吸附初期径流中磷的效果与机制[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2202-2209.
ZHANG Xiaoling, ZHU Guangcan. Effect and Mechanism of Phosphorus Adsorption in Initial Rainfall Runoff by Autoclaved Aerated Concrete Block[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 2202-2209.
- [9] TIE J X, NIU Y F, XIAO H, et al. Performance of Phosphorus Adsorption by Acid-Activated Iron-Based Waterworks Sludge Adsorbent[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2021, 20(2). Doi: 10.46488/Nept.2021.V20i02.035.
- [10] 方媛媛, 刘玲花, 吴雷祥, 等. 5 种填料对污水中氮磷的吸附特性研究[J]. 应用化工, 2016, 45(9): 1619-1623.
FANG Yuanyuan, LIU Linghua, WU Leixiang, et al. Study on the Adsorption Characteristics of Nitrogen and Phosphorous on Five Substrates[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(9): 1619-1623.
- [10] LEFEVRE G H, PAUS K H, NATARAJAN P, et al. Review of Dissolved Pollutants in Urban Storm Water and Their Removal and Fate in Bioretention Cells[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 141(1): 04014050.
- [11] O' REILLY A M, WANIELISTA M P, CHANG N B, et al. Nutrient Removal Using Biosorption Activated Media: Preliminary Biogeochemical Assessment of an Innovative Stormwater Infiltration Basin[J]. Science of the Total Environment, 2012, 432: 227-242.
- [12] 刘早红, 蔡官军, 徐 晨. 生物滞留池对氮磷去除的研究[J]. 节能与环保, 2020(9): 68-69.
LIU Zaohong, CAI Guanjun, XU Chen. Study on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biological Retention Tank[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2020(9): 68-69.

(责任编辑: 申 剑)