

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.028

河泥与海泥陶粒填料生物滞留设施径流控制试验

李俊奇^{1,2}, 张兴宇¹, 林 聪³, 吴允红¹

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044; 3. 北京雨人润科生态技术有限责任公司, 北京 100080)

摘要:为探讨河道疏浚泥(河泥)和海洋疏浚泥(海泥)资源化用于生物滞留填料的可行性,分别以河泥和海泥为主要原料制备陶粒,并以两种陶粒为填料搭建了生物滞留试验柱,通过径流雨水渗透模拟试验,研究了两种试验柱在不同降雨重现期、不同降雨历时和不同污染物质量浓度条件下的运行效果。结果表明:河泥与海泥陶粒作为填料时,生物滞留柱中 COD、TP、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的淋失量较低,污染物淋失风险较小;在降雨重现期为 0.5 a 时,河泥与海泥陶粒填料生物滞留柱出流时间分别为 49 min 和 48 min,平均水量削减率分别为 34.36% 和 44.87%,比传统砂土填料生物滞留柱分别提高了 34.75% 和 75.96%;河泥与海泥陶粒填料生物滞留柱对污染物的削减效果明显,对 COD、TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均负荷削减率分别为 50.27%、99.08%、50.72%、79.15% 与 54.20%、99.58%、55.43%、80.86%,均高于传统砂土填料生物滞留柱。

关键词:河道疏浚泥;海洋疏浚泥;陶粒;生物滞留设施;径流污染控制;城市雨水管理

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0229-08

Experiment on runoff control of bioretention facilities using river mud and sea mud ceramsite as fillers // LI Junqi^{1,2}, ZHANG Xingyu¹, LIN Cong³, WU Yunhong¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Beijing University of Civil Engineering and Architecture), Ministry of Education, Beijing 100044, China; 2. Collaborative Innovation Center for Energy Conservation & Emission Reduction and Sustainable Urban-Rural Development in Beijing, Beijing 100044, China; 3. Beijing Yuren Raineco Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of recycling river dredged mud (river mud) and sea dredged mud (sea mud) to bioretention fillers, we prepared two kinds of ceramsite with river mud and sea mud, respectively. Bioretention experiment columns were built using the two kinds of ceramsite as fillers. The efficiency of the two columns under different rainfall return periods, rainfall durations and pollutant mass concentrations were studied by simulation experiments of runoff rainwater infiltration. The results showed that the leaching amount of COD, TP, TN and $\text{NH}_3\text{-N}$ in bioretention columns were low when river mud and sea mud ceramsite were used as fillers, which means that there was little risk of pollutant leaching. When the return period of rainfall was 0.5 a, the outflow duration of bioretention columns with river mud and sea mud ceramsite fillers were 49 min and 48 min, and the average water reduction rates were 34.36% and 44.87%, respectively, which are 34.75% and 75.96% higher than traditional bioretention columns with sandy soil filler. Bioretention columns with river mud and sea mud ceramsite fillers show significant effect on pollutants reduction, with average load reduction rates of COD, TP, TN, $\text{NH}_3\text{-N}$ being 50.27%, 99.08%, 50.72%, 79.15% and 54.20%, 99.58%, 55.43%, 80.86%, respectively, which were better than traditional bioretention columns with sandy soil filler.

Key words: river dredged mud; sea dredged mud; ceramsite; bioretention facility; runoff pollution control; urban stormwater management

生物滞留设施作为一种常见的雨水控制设施,具有良好的径流量控制和污染物负荷削减功能^[1-3],而生物滞留设施中的填料类型是影响其径

流控制效果的主要因素之一^[4]。与悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)和重金属相比,生物滞留设施对于磷的去除效果并不稳定^[5],研究表明富含铁、铝、钙

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(8191001)

作者简介:李俊奇(1967—),男,教授,博士,主要从事城市雨水控制利用与水环境生态技术研究。E-mail:lijunqi@bucea.edu.cn

等金属成分的填料能提高生物滞留设施对径流中磷的去除效果,如给水厂污泥、生物炭、椰子壳和粉煤灰等已被证明可作为生物滞留填料改良剂^[6-8]。在选择生物滞留设施填料时也可考虑具有本地化和固废资源化特点的材料^[9],如河道疏浚泥(以下简称“河泥”)和海洋疏浚泥(以下简称“海泥”)也含有部分 Fe₂O₃、CaO、MgO 等金属氧化物,可用作生物滞留设施填料,但直接作为填料时,会出现本底污染物淋失现象,造成设施前期运行效果较差^[10]。

河泥与海泥大多是地表冲刷流入的尘土和废水直排携带的管道沉积物等,成分中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 占 78% 左右,在一定的配比和工艺条件下可作为陶粒制备的原料。Liu 等^[11]使用污水处理厂污泥和河道底泥制备陶粒,发现 SiO₂ 和 Al₂O₃ 最佳含量(质量分数)范围分别为 30% ~ 45% 和 11% ~ 19%,此时制备出的陶粒抗压强度较高、吸水率较低;肖继波等^[12]使用某河道河泥为主要原料,制备出一种高效除磷型陶粒,20℃ 时最大磷吸附量为 0.61 mg/g。研究表明,河泥陶粒对废水中 COD、氨氮(NH₃-N)的去除率在 50% ~ 65% 之间^[13];海泥在一定条件下也能制备出对 COD、NH₃-N 等具有较好吸附效果的陶粒滤料^[14]。若能将河泥与海泥陶粒用于生物滞留设施中,既能降低河泥与海泥堆积造成二次污染的风险,又能为雨水源头减排设施提供一种新型滤料,提高设施运行效率。

河泥与海泥在经过高温煅烧后仍含有部分污染物,在应用过程中容易造成污染物的淋失,可能会对生物滞留设施的径流水质净化效果产生影响。Sang 等^[8]在使用上游河段底泥生物炭和感潮河段底泥生物炭作为生物滞留设施填料的研究中发现,两种生物炭填料均出现 COD、总磷(TP)和总氮(TN)的淋失现象。除了填料本身特性之外,进水负荷和进水污染物质量浓度也会影响生物滞留设施水量调控和污染物去除效果,降雨重现期和降雨历时是影响进水负荷的重要因素,降雨重现期和降雨历时越大,生物滞留设施水量削减率和流量峰值削减率越低^[15],而污染物去除效率随进水污染物质量浓度的

升高而降低^[16]。本文将河泥与海泥陶粒作为生物滞留设施填料,通过淋失试验和不同降雨重现期、不同降雨历时及不同污染物质量浓度条件下的雨水渗滤试验,分析生物滞留设施水量控制和水质净化效果,评价河泥与海泥陶粒在生物滞留设施中应用的可行性。

1 试验设计与方法

1.1 河泥与海泥陶粒制备

河泥与海泥陶粒制备所用河泥与海泥分别为大连庄河市鲍码河的疏浚淤泥与庄河港建设过程中产生的废弃海泥,主要化学成分均为 SiO₂ 和 Al₂O₃。为了增加河泥与海泥陶粒中的钙、铁含量,从而提高两种陶粒的磷吸附性能^[17],选择贝壳粉和铁基污泥作为陶粒制备辅助原料,其中贝壳粉由蚬子壳经机械粉碎后得到,蚬子壳取自庄河市沿海养殖区,主要成分为 CaCO₃;铁基污泥为庄河市城东污水处理厂的出泥,含水率为 80%,干燥后的成分中含有 25.10% 的 Fe₂O₃。蚬子壳和污水处理厂污泥均为城市发展中产生的废弃物,作为陶粒制备辅助原料不仅能提高河泥与海泥陶粒的吸附性能,又能实现废弃贝壳和污水处理厂污泥的有效处理和处置。各种原料主要化学成分与物理特性见表 1。

河泥与海泥陶粒的制备过程包括原料干燥、混合、造粒、预热、煅烧和冷却,为确定两种陶粒最佳制备条件,以陶粒的吸水与保水能力和磷吸附量作为评价指标进行了陶粒制备预试验,试验结果表明河泥陶粒的最佳配比为 15:1:4(河泥、贝壳粉、铁基污泥质量之比),最佳煅烧温度为 950℃,海泥陶粒的最佳配比为 15:3:2(海泥、贝壳粉、铁基污泥质量之比),最佳煅烧温度为 850℃,两种陶粒的具体制备条件及性能见表 2,因河泥与海泥的化学成分和粒径等存在差异,两种陶粒的最佳制备工艺也有所不同。

1.2 试验装置

如图 1 所示,试验装置由 3 个生物滞留柱及相关配水系统组成。生物滞留柱高为 165 cm,直径为 35 cm;柱体使用透明有机玻璃材料制作而成,外部

表 1 原料主要化学成分与物理特性
Table1 Main chemical composition and physical properties of the raw materials

原料	主要化学成分的质量分数/%								堆积密度/ (g·cm ⁻³)	平均粒径/ μm
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaO + MgO + K ₂ O + Na ₂ O	Cl	有机质	烧失量		
河泥	64.40	14.59	4.32		6.90	0.06	5.66	8.18	1.02	74.95
海泥	63.46	13.86	5.44		8.35	0.76	3.04	10.74	1.09	56.69
铁基污泥	4.22	2.34	25.10		7.27	0.33	25.50	47.22	0.59	106.40
贝壳粉	0.16	0.02	0.06	97.88	0.78	0.10		43.85	1.04	90.10

注:表中均为干燥原料的数据。

表 2 河泥与海泥陶粒制备条件与性能

Table 2 Preparation conditions and properties of the river mud and sea mud ceramsite

陶粒类型	预热 温度/℃	预热 时间/min	煅烧 温度/℃	煅烧 时间/min	粒径/mm	堆积密度/ (g·cm ⁻³)	表观密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	1 h 吸水 率/%	磷吸附量/ (mg·g ⁻¹)
河泥陶粒	350	20	950	25	5~15	0.807 5	1.522 1	1.47	15.79	0.137 0
海泥陶粒	350	20	850	25	5~15	0.808 8	1.608 5	1.32	15.01	0.173 6

注:1 h 吸水率为干燥陶粒淹没于清水中 1 h 后的含水率。

用泡沫棉锡纸包裹,可起到避光和保温的效果;柱体上安装有 PVR 溢流管、排水管,管径均为 50 mm,上部蓄水层高度为 15 cm,底部排水管设于碎石排水层(高 20 cm)中,内部管体均匀设置 5~20 mm 的集水圆孔,并用透水土工布包裹;种植土层(高 25 cm)上设置约 5 cm 厚的新鲜松树皮覆盖层,可有效减小径流雨水的侵蚀,保持土壤湿度,避免表层土壤发生板结而导致生物滞留系统渗透能力下降^[18]。试验重点研究填料层对典型污染物的净化效果,装置内未种植相应植物;为防止进水产生壁流,在柱体内部进行了粗糙化处理。配水系统包括水箱(280 L)、潜水泵、电磁流量计、花洒(直径 245 mm)和 PVR 配水管(管径 15 mm)等。

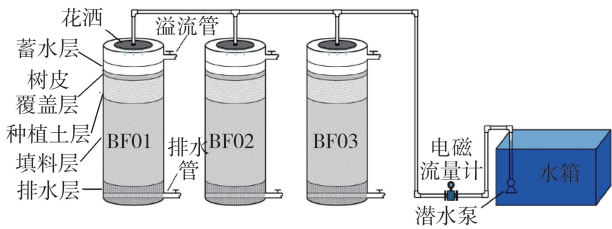


图 1 生物滞留试验装置

Fig. 1 Device for bioretention experiment

3 个生物滞留柱编号分别 BF01、BF02 和 BF03,其中 BF01 为对照组,填料层为砂土(砂和种植土体积各占一半),BF02 和 BF03 填料层则分别为河泥陶粒与海泥陶粒。试验所用新鲜松树皮、种植土、砂和碎石(粒径为 5~30 mm)等材料均取自庄河市。

1.3 试验方案

1.3.1 淋失试验

使用试验装置所在实验基地中储水池的水作为试验进水进行生物滞留设施淋失试验,以生物滞留柱填料层空床体积(86.59 L)作为每次进水水量,保证试验进水与生物滞留柱填料能充分接触;为分析填料污染物淋失是否会对雨水径流渗滤试验结果产生影响,淋失试验进水流量不应大于雨水径流渗滤试验中的最小进水流量(24.71 L/h),设计淋失试验进水时间为 4 h,设计进水流量为 21.65 L/h,在出水后的不同时间收集出水水样并检测 COD、TP、TN、NH₃-N 质量浓度,经过 7 d 雨前干期后重复试验,以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》作为参考,

分析生物滞留柱污染物淋失情况。

1.3.2 雨水径流渗滤模拟试验

为模拟典型城市道路径流水质情况,根据北京城区道路径流污染监测研究成果,选择两种污染物质量浓度(表 3)作为试验条件,进水中 COD、TP、TN 和 NH₃-N 分别使用葡萄糖(C₆H₁₂O₆)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、硝酸钾(KNO₃)和氯化铵(NH₄Cl)配制,检测方法分别为快速消解分光光度法、钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和纳氏试剂分光光度法;按照北京暴雨强度公式(式(1))和产流公式(式(2))设计不同降雨重现期和不同降雨历时条件下的径流流量进行均匀降雨,模拟生物滞留设施运行情况。试验模拟降雨时间间隔为 3 d,径流系数取 0.90,设施与汇水面积比为 1:20,试验方案及相关参数见表 4。在模拟降雨过程中,出水后开始计时,每 10 min 记录一次出水水量,并收集不同时间出水水样和混合水样检测污染物质量浓度,分析生物滞留柱径流量控制及污染物负荷削减效果。

$$q = \frac{1602(1 + 1.037 \lg P)}{(t + 11.593)^{0.681}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\Psi q A}{1000} \quad (2)$$

式中:q 为设计降雨强度,L/(hm²·s);P 为设计降雨重现期,a;t 为降雨历时,min;Q 为径流流量,m³/s;Ψ 为径流系数;A 为汇流面积,km²。

表 3 径流污染物质量浓度

Table 3 Mass concentration of runoff pollutants

径流类型	污染物质量浓度/(mg·L ⁻¹)			
	COD	TP	TN	NH ₃ -N
主干道径流 ^[19]	5.35~143.53	0.01~1.16	0.41~10.20	
路面径流 ^[20]	122.00~643.00	0.37~6.50	8.10~49.00	3.70~18.40
本文低质量浓度径流	131.41±30.76	1.23±0.03	7.92±1.06	3.94±1.04
本文高质量浓度径流	579.91±88.63	5.99±0.18	25.07±0.69	17.57±0.70

1.4 试验评价方法

生物滞留设施淋失试验中使用污染物淋失负荷

表4 径流雨水渗滤模拟试验方案与参数

Table 4 Scheme and parameters of runoff rainwater infiltration simulation experiment

编号	降雨重现期/a	降雨历时/min	污染物质量浓度
1	0.5	60	低
2	1	60	低
3	2	60	低
4	0.5	120	低
5	1	120	低
6	2	120	低
7	0.5	60	高
8	1	60	高
9	2	60	高
10	0.5	120	高
11	1	120	高
12	2	120	高

注:污染物质量浓度“低”和“高”分别对应表3中“本文低质量浓度径流”和“本文高质量浓度径流”。

量作为评价指标,污染物淋失负荷量为出水污染物负荷量与进水污染物负荷量之差。径流雨水渗滤模拟试验中,从生物滞留柱的水量控制和水质净化两个方面出发,以评估河泥与海泥陶粒在生物滞留设施中的应用效果,其中水量控制指标包括出流时间、水量削减率等,水量削减率为生物滞留柱中削减的水量与进水量之比;水质净化指标包括COD、TP、TN和NH₃-N 4种污染物的出流质量浓度和污染物负荷削减率等,污染物负荷削减率为生物滞留柱中削减的污染物负荷量与进水污染物负荷量的比值。

2 结果与分析

2.1 污染物淋失分析

淋失试验所用进水在试验前长期储存在储水池中,其本身为微污染水,经检测,进水中COD、TP、TN和NH₃-N的质量浓度分别为7.877 mg/L、0.003 mg/L、2.195 mg/L和0.060 mg/L。生物滞留柱污染物淋失情况见图2,总体上看,3个生物滞留柱出流TP、TN和NH₃-N质量浓度均随淋失时间和淋失次数逐渐降低,其中TP、NH₃-N平均质量浓度均高于进水,说明这两种污染物在3个生物滞留柱中均表现为淋失,但出流质量浓度满足GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水要求,不会造成水体污染;TN在第一次试验中呈现淋失,平均出流质量浓度低于V类水标准,第二次试验中则表现为削减,平均出流质量浓度满足V类水要求。河泥陶粒填料生物滞留柱(BF02)和海泥陶粒填料生物滞留柱(BF03)在第一次进水试验中出流COD平均质量浓度高于砂土填料生物滞留柱(BF01),且高于进水质量浓度,说明河泥与海泥陶粒在第一次进水过程中淋失了COD;第二次试验中,3个生物滞留柱出流COD平均质量浓度接

近,高于进水质量浓度但满足Ⅳ类水要求,说明此时淋失的COD主要来自树皮覆盖层和种植土层,不会对3种填料的对比分析造成影响;覆盖层树皮在第二次试验中出现明显腐烂现象,可能是第一次试验进水加速了覆盖层树皮的腐烂,导致第二次试验有机物的持续淋出,这也是砂土填料生物滞留柱第二次试验出流COD质量浓度高于第一次的主要原因。

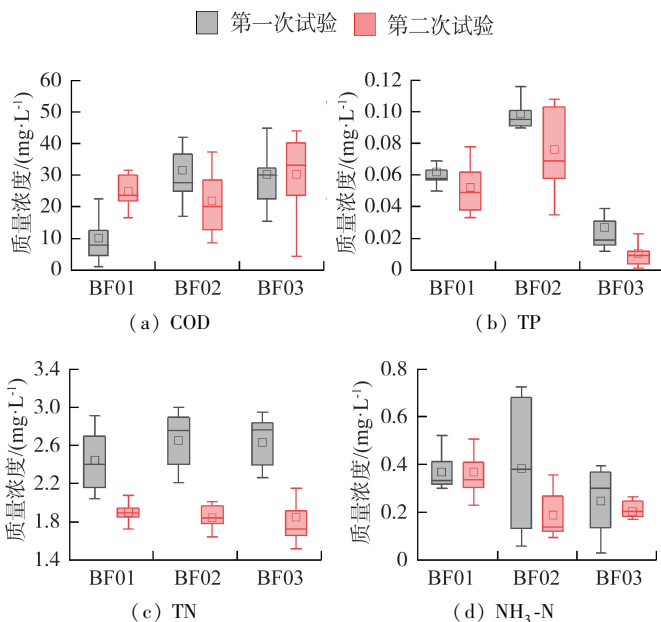


图2 生物滞留柱污染物淋失情况

Fig. 2 Leaching of pollutants in bioretention columns

3个生物滞留柱污染物淋失负荷量见表5。除砂土填料生物滞留柱中的COD外,3个生物滞留柱第二次试验中污染物淋失负荷量均低于第一次试验,其中TN淋失负荷量出现负值,即3个生物滞留柱在第二次试验中去除了进水中的TN,由于两次试验中NH₃-N淋失负荷量均为正值,说明第二次试验中生物滞留柱去除的是除NH₃-N外的其他形态氮,且去除负荷量高于NH₃-N淋失负荷量;第二次试验中砂土填料生物滞留柱NH₃-N淋失负荷量远高于河泥与海泥陶粒填料生物滞留柱,说明生物滞留柱淋失的NH₃-N主要来自河砂或种植土。河泥陶粒填料生物滞留柱中TP淋失负荷量高于砂土填料生物滞留柱和海泥陶粒填料生物滞留柱,这是由于河泥中有效磷含量较高的缘故^[10]。

表5 生物滞留柱污染物淋失负荷量 单位:mg

Table 5 Leaching load of pollutants in bioretention columns

unit: mg

编号	第一次试验				第二次试验			
	COD	TP	TN	NH ₃ -N	COD	TP	TN	NH ₃ -N
BF01	102.66	4.67	4.71	24.22	1305.32	3.89	-38.51	24.14
BF02	1767.10	7.38	15.24	24.51	1010.87	5.64	-47.42	9.28
BF03	1551.83	1.72	4.47	13.16	1550.48	0.49	-53.49	9.85

2.2 水量控制效果分析

2.2.1 出流时间

生物滞留设施出流时间为底部开始出流时刻与顶部开始进水时刻的差值,3 个生物滞留柱出流时间与降雨强度的关系如图 3 所示。3 个生物滞留柱出流时间均在 10 ~ 50 min 之间,且随着降雨强度升高而降低;在降雨强度为 39.71 L/(s · hm²) 时(此时降雨重现期为 0.5 a),两种陶粒填料生物滞留柱(BF02 和 BF03)出流时间分别为 49 min 和 48 min,与砂土填料生物滞留柱(BF01)相比分别高出 10 min 和 9 min,随着降雨强度的升高差距不断缩小,最后低于砂土填料生物滞留柱。主要原因是生物滞留设施出流时间不仅与降雨强度有关,还与填料的组成和结构等因素有关。陶粒表面及内部存在大量孔隙结构(图 4),前期预试验结果表明河泥陶粒与海泥陶粒的饱和吸水率分别为 21.07% 和 18.64%,其吸水过程主要发生在水接触后 5 min 之内,且在吸水饱和和后置于干燥环境中 6 h 含水率分别为 18.24% 和 15.06%,与对应饱和吸水率比值分别为 0.87 和

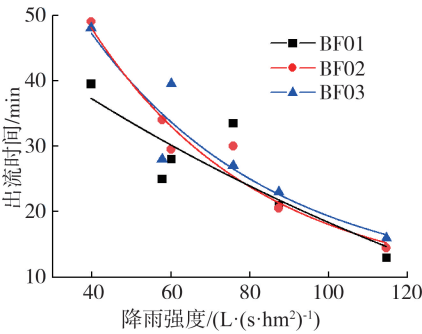


图 3 出流时间随降雨强度变化情况

Fig. 3 Variation of outflow duration with rainfall intensity

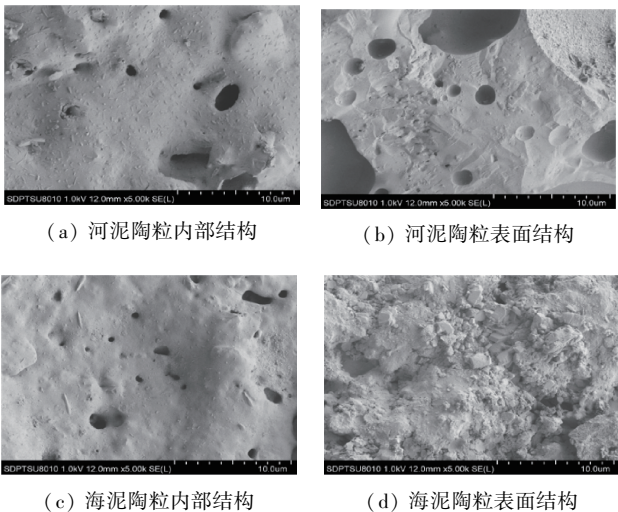


图 4 河泥陶粒与海泥陶粒内部及表面结构

Fig. 4 Internal and surface structure of river mud ceramsite and sea mud ceramsite

0.81,说明河泥陶粒与海泥陶粒具有快速吸水 and 一定的保水能力。河泥陶粒与海泥陶粒空隙率分别为 46.94% 与 49.72%,陶粒间空隙率较大,输水能力较好,当试验进水流量较小时,进水优先被陶粒孔隙空间吸收并固定,随着进水流量的增大,陶粒孔隙迅速达到饱和,大进水流量比小进水流量出流时间缩短 32 ~ 35 min。本试验采用的是 3 种小降雨重现期(0.5 a、1 a 和 2 a),在此条件下,BF02 和 BF03 平均出流时间大于 BF01。

2.2.2 水量削减率

水量削减率是评价生物滞留设施运行效果的重要指标之一,较高的水量削减率代表生物滞留设施具有较好的滞水能力,有助于设施内植物的生长,并且对于部分入渗型或防渗型生物滞留设施,水量削减率越高,市政管网系统压力越小。3 个生物滞留柱在不同降雨重现期和不同降雨历时条件下的平均水量削减率见图 5。总体上看,生物滞留柱水量削减率随降雨重现期和降雨历时的升高而降低,在降雨重现期为 0.5 a 时,BF02 和 BF03 平均水量削减率分别为 34.36% 和 44.87%,与 BF01 的 25.50% 相比分别提高了 34.75% 和 75.96%,这是由于陶粒内部存在较多微孔和中孔结构,在相同体积填料条件下可储存更多的雨水,即河泥与海泥陶粒填料在小降雨重现期下具有较好的水量控制效果。

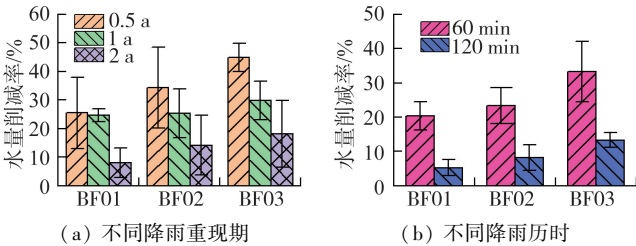


图 5 生物滞留柱水量削减率

Fig. 5 Water reduction rates of bioretention columns

2.3 水质净化效果分析

2.3.1 出水污染物质量浓度

雨水径流渗滤模拟试验共进水 12 次(依次编号为 1 ~ 12),前 6 次为低污染物质量浓度进水,后 6 次为高污染物质量浓度进水,生物滞留柱出水污染物质量浓度见图 6。试验表明,在低、高污染物质量浓度进水条件下生物滞留柱均有一定的污染物净化能力且后 6 次试验的出水 COD、TN、NH₃-N 质量浓度明显高于前 6 次试验,即径流污染物质量浓度越高,生物滞留柱出水污染物质量浓度也越高,故在城市雨水控制设施的设计过程中,为达到控制效能最大化,应充分考虑地区径流污染特征和设施对污染物的净化效果。

整体上看,BF02 和 BF03 对径流 COD、TN 和

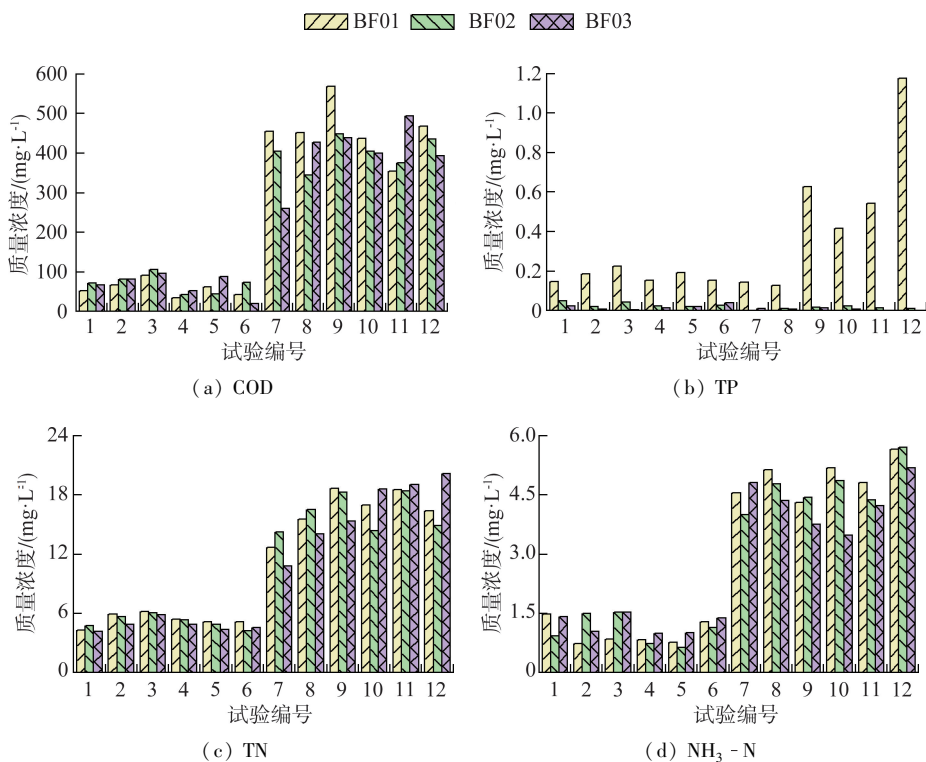


图6 生物滞留柱出水污染物质量浓度

Fig. 6 Mass concentration of pollutants in effluent from bioretention columns

NH₃-N 的调控效果优于 BF01,同时也出现了 BF02、BF03 出水污染物质量浓度较高的情况,主要原因可能是覆盖层树皮有机质的不规则淋失,导致 3 个生物滞留柱出水 COD 和氮的质量浓度存在不确定性,且由于常规生物滞留设施无法为氮的反硝化反应提供充分的厌氧环境,致使氮在生物滞留设施中的去除效果很不稳定^[21]。设计进水中 NH₃-N 在 TN 中的占比在 50% 以上,即 NH₃-N 质量浓度高于其他形态氮的质量浓度,出水中 NH₃-N 在 TN 中的占比则远低于 50%,这表明在本试验条件下,生物滞留设施对 NH₃-N 的去除效果优于其他形态氮。BF02 和 BF03 出水 TP 质量浓度范围分别为 0.01 ~ 0.05 mg/L 和 0.00 ~ 0.04 mg/L,远低于 BF01 的 0.13 ~ 1.18 mg/L,说明河泥与海泥陶粒作为填料可大幅提高生物滞留设施对径流中磷的去除效果,且在低、高污染物质量浓度径流条件下均具有良好的磷吸附能力。

2.3.2 污染物负荷削减率

3 个生物滞留柱在不同模拟径流条件下污染物负荷削减情况见图 7。

a. COD 负荷削减率。生物滞留设施中 COD 的去除方式主要是填料的固-液相吸附作用,吸附过程包括膜扩散快速吸附和内扩散缓慢吸附两个阶段^[22]。如图 7(a) 所示,BF01、BF02 和 BF03 对 COD 的负荷削减率范围分别为 8.20% ~ 90.41%、27.93% ~ 86.33% 和 30.11 ~ 94.96%,浮动范围较

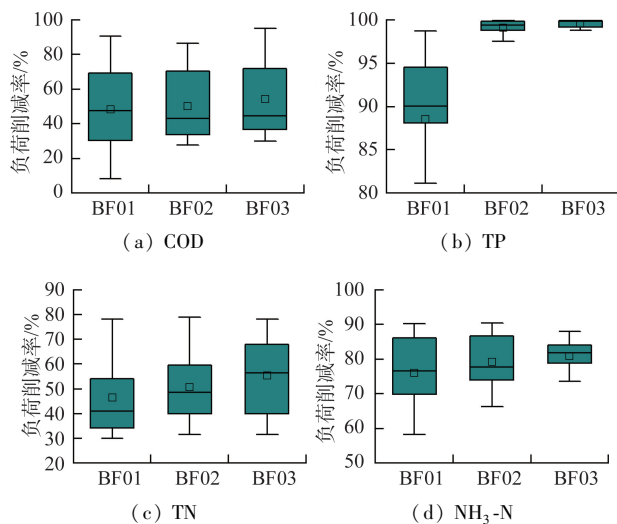


图7 生物滞留柱污染物负荷削减率

Fig. 7 Pollutant load reduction rate of bioretention column

大,平均负荷削减率最大的是 BF03 (54.20%),其次是 BF02 (50.27%),相较于对照组 BF01 (48.35%) 分别提高了 12.10% 和 3.97%。

b. TP 负荷削减率。磷的去除方式以表面吸附和共沉降为主,其中表面吸附又包括物理吸附和化学吸附,有研究表明,在化学吸附过程中,铁、铝、钙、镁等金属离子与磷吸附高度相关^[23],且钙与磷吸附能力相关性最强。本文河泥与海泥陶粒是以贝壳粉和铁基污泥为辅助原料制备的新型滤料,成分中含

有大量铁和钙,径流模拟试验结果也证明了河泥与海泥陶粒填料具有较好的磷吸附能力(图7(b)),BF02和BF03的TP负荷削减率均在96%以上,平均值分别为99.08%和99.58%,相较于BF01的88.55%分别提高了11.89%和12.46%。

c. TN与NH₃-N负荷削减率。如图7(c)和(d)所示,3个生物滞留柱的TN和NH₃-N负荷削减率范围基本一致,均在29.90%~79.06%和58.18%~90.41%之间,其中BF03的TN和NH₃-N平均负荷削减率最高,分别为55.43%和80.86%;BF02次之,分别为50.72%和79.15%;BF01最低,分别为46.39%和75.99%。与BF01相比,BF02的TN、NO₃-N平均负荷削减率提高了9.33%、4.16%,BF03提高了19.49%、6.41%。BF02和BF03的氮负荷削减率高于BF01的主要原因是河泥与海泥陶粒具有较丰富的孔隙结构和较强吸附能力,除吸附作用外,生物滞留设施对氮的去除方式还包括硝化-反硝化作用^[24]。试验进水温度为(25±5)℃,设计进水中TN包括NH₃-N和NO₃-N,3个生物滞留柱中NH₃-N平均负荷削减率均高于TN,说明生物滞留设施对NH₃-N的去除效果优于对NO₃-N的去除效果。

3 结 论

a. 在低污染物质量浓度进水条件下,河泥与海泥陶粒填料生物滞留柱存在一定的COD、TP、TN和NH₃-N淋失现象,但淋失量较低,不会造成水体污染。

b. 在降雨重现期为0.5a的条件下,河泥陶粒与海泥陶粒填料生物滞留柱的出流时间和平均水量削减率分别为49min、48min和34.36%、44.87%,与砂土填料生物滞留柱相比分别延后10min、9min和提高了34.75%、75.96%。

c. 海泥陶粒填料生物滞留柱对COD、TP、TN、NH₃-N去除效果比河泥陶粒填料要好,平均负荷削减率分别为54.20%、99.58%、55.43%、80.86%和50.27%、99.08%、50.72%、79.15%,与砂土填料生物滞留柱相比,分别提高了12.10%、12.46%、19.49%、6.41%和3.97%、11.89%、9.33%、4.16%。

d. 河泥陶粒和海泥陶粒作为生物滞留设施填料时具有良好的径流控制效果,其中海泥陶粒优于河泥陶粒。在海绵城市建设中,两种陶粒均可作为雨水控制设施填料的优化选择,既能提高传统设施的运行效率,又能在一定程度上促进河泥、海泥等废弃资源的有效利用。

参考文献:

- [1] DEBUSK K M, WYNN T M. Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(9): 800-808.
- [2] 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.
- [3] 李俊奇, 孙梦琪, 李小静, 等. 生物滞留设施对雨水径流热污染控制效果试验 [J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 6-12. (LI Junqi, SUN Mengqi, LI Xiaojing, et al. Experimental study on thermal pollution control of stormwater runoff by bioretention [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 6-12. (in Chinese))
- [4] 郭娉婷, 王建龙, 杨丽琼, 等. 生物滞留介质类型对径流雨水净化效果的影响 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(3): 60-67. (GUO Pingting, WANG Jianlong, YANG Liqiong, et al. Effect of bioretention media on pollutions removal from stormwater runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(3): 60-67. (in Chinese))
- [5] 李家科, 张兆鑫, 蒋春博, 等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 1-8. (LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 1-8. (in Chinese))
- [6] POOR C J, CONKLE K, MACDONALD A, et al. Water treatment residuals in bioretention planters to reduce phosphorus levels in stormwater [J]. Environmental Engineering Science, 2019, 36(3): 265-272.
- [7] TIRPAK R A, AFROOZ A R M N, WINSTON R J, et al. Conventional and amended bioretention soil media for targeted pollutant treatment: a critical review to guide the state of the practice [J]. Water Research, 2021, 189(1): 116648.
- [8] SANG Min, HUANG Mian Dong, ZHANG Wei, et al. A pilot bioretention system with commercial activated carbon and river sediment-derived biochar for enhanced nutrient removal from stormwater [J]. Water Science and Technology, 2019, 80(4): 707-716.
- [9] 赵云云, 李骐安, 陈正侠, 等. 基于多目标评价的市政道路径流污染控制生物滞留设施填料优化 [J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 96-101. (ZHAO Yunyun, LI Qian, CHEN Zhengxia, et al. Optimization of bioretention facility media for municipal road runoff pollution control based on multi-objective evaluation [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 96-101. (in Chinese))
- [10] 钟兴, 张伟, 田笑尘, 等. 基于黑臭河道底泥利用的生物滞留设施对雨水径流污染的净化效果 [J]. 环境工程

- 学报,2018,12(8):2193-2201. (ZHONG Xing,ZHANG Wei,TIAN Xiaochen,et al. Runoff pollutants purification effect of bioretention media improved by black-odorous river sediments [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2018,12(8):2193-2201. (in Chinese))
 - [11] LIU Mingwei, LIU Xiao, WANG Weiguo, et al. Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment[J]. Ceramics International,2018,44(4):4313-4319.
 - [12] 肖继波,陈玉莹,瞿倩,等. 高效除磷型底泥陶粒对水体中磷的去除特性[J]. 环境污染与防治,2018,40(10):1122-1125. (XIAO Jibo, CHEN Yuying, QU Qian, et al. Phosphorus removal properties of sediment-ceramsite with high phosphorus removal efficiency [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40 (10): 1122-1125. (in Chinese))
 - [13] 陈玉莹. 底泥陶粒的研制及其在生物滤池中的应用研究[D]. 温州:温州大学,2017.
 - [14] XIA Ting, LI Yue, XIAO Zhixing, et al. A study on ceramsite production using dredging sea mud and its biofilm formation capacity evaluation [J]. Advances in Civil Engineering,2018,2018:2401984.
 - [15] 张炜,王浩远,赵玉华,等. 基于 hydrus-1d 生物滞留设施雨水径流水文调控模拟[J]. 水资源保护,2022,38(3):102-108. (ZHAN Wei, WANG Haoyuan, ZHAO Yuhua, et al. Hydrological regulation simulation of rainwater runoff of bioretention based on HYDRUS-1D [J]. Water Resources Protection,2022,38(3):102-108. (in Chinese))
 - [16] ZHANG Hongwei, AHMAD Z, SHAO Yalu, et al. Bioretention for removal of nitrogen: processes, operational conditions, and strategies for improvement [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(9):10519-10535.
 - [17] ZHU T, JENSSEN P D, MAHLUM T, et al. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA): potential filter media in treatment wetlands[J]. Water Science and Technology, 1997, 35 (5):103-108.
 - [18] 杜晓丽,韩强,于振亚,等. 海绵城市建设中生物滞留设施应用的若干问题分析[J]. 给水排水,2017,43(1):54-58. (DU Xiaoli, HAN Qiang, YU Zhenya, et al. Some issues of the bioretention application in sponge city construction[J]. Water & Wastewater Engineering,2017, 43(1):54-58. (in Chinese))
 - [19] 王海邻,曹雪莹,任玉芬,等. 北京城市主干道降雨径流污染负荷分析[J]. 环境科学学报,2019,39(6):1860-1867. (WANG Hailin, CAO Xueying, REN Yufen, et al. Analysis on pollution load of rainfall runoff in Beijing urban arterial roads [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(6):1860-1867. (in Chinese))
 - [20] 欧阳威,王玮,郝芳华,等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. 中国环境科学,2010,30(9):1249-1256. (OUYANG Wei, WANG Wei, HAO Fanghua, et al. Pollution characterization of urban stormwater runoff on different underlying surface conditions [J]. China Environmental Science, 2010, 30 (9): 1249-1256. (in Chinese))
 - [21] OSMAN M, WAN Y K, TAKAIJUDIN H, et al. A review of nitrogen removal for urban stormwater runoff in bioretention system [J]. Sustainability, 2019, 11 (19): 5415-5436.
 - [22] 刘芳. 秸秆生物炭生物滞留改良填料研制与参数优化 [D]. 西安:西安理工大学,2020.
 - [23] MARVIN J T, PASSEPORT E, DRAKE J. State-of-the-art review of phosphorus sorption amendments in bioretention media: a systematic literature review [J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2020, 6 (1):03119001.
 - [24] 张飞剑,彭云清,章茹. 潮汐流人工湿地处理南方农村黑臭水体实验研究[J]. 水处理技术,2022,48(4):114-118. (ZHANG Feijian, PENG Yunqing, ZHANG Ru. Experimental study on the black and odorous water body in southern rural areas by tidal flow constructed wetland [J]. Technology of Water Treatment,2022,48(4):114-118. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-06-21 编辑:熊水斌)
- +++++
- (上接第 125 页)
- [44] PROBST P,BOULESTEIX A L. To tune or not to tune the number of trees in random forest[J]. Journal of Machine Learning Research, 2018, 18:6673-6690.
 - [45] 周赓,侯精明,陈光照,等. 基于机器学习的山洪灾害快速预报方法[J]. 水资源保护,2022,38(2):32-40. (ZHOU Nie, HOU Jinming, CHEN Guangzhao, et al. A rapid forecasting method for mountain flood disaster based on machine learning algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022,38(2):32-40. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-04-03 编辑:王芳)

