

## 城镇水系统研究与应用

王琦, 颜亚玮, 王永, 等. 降雨间隔和填料组合对生物滞留设施净化效果的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(3):143-151.

WANG Q, XIE Y W, WANG Y, et al. Effect of rainfall interval and packing combinations on purification effectiveness of bioretention facilities [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3):143-151.

## 降雨间隔和填料组合对生物滞留设施净化效果的影响

王琦<sup>1,2</sup>, 颜亚玮<sup>1,\*</sup>, 王永<sup>3</sup>, 谢宇菲<sup>3</sup>, 刘宏远<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023; 2. 浙江省城市水业协会, 浙江杭州 310009; 3. 浙江省城乡规划设计研究院, 浙江杭州 310030)

**摘要** 降雨间隔和填料是生物滞留设施污染物净化效果的关键影响因素, 研究在不同降雨间隔(2、7 d 和 15 d) 和不同进水污染物负荷条件下, 研究了 3 种不同组合方式填料的生物滞留设施对污染物的净化效果。结果表明: 降雨间隔对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除效果影响最大, 降雨间隔越久, 越不利于  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除, 甚至出现去除率为负的现象; 长降雨间隔(15 d) 下,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率有所降低; 氨氮和 TP 的去除效果受降雨间隔影响较小。锰砂+麦饭石+沸石+土壤混合填料与其余两种组合方式填料相比, 能够提升生物滞留设施的抗干旱能力和抗污染物负荷冲击能力, 在高降雨间隔(15 d) 下能保持较优的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率(90% 左右) 和较稳定的  $\text{NO}_3^-$ -N 去除能力, 在不同污染物负荷下  $\text{NO}_3^-$ -N 去除率较优(40% 以上)。研究结果可为杭州地区生物滞留设施合理设计及应用提供参考。

**关键词** 生物滞留设施 组合填料 降雨间隔 污染物负荷 雨水净化

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0143-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.017

## Effect of Rainfall Interval and Packing Combinations on Purification Effectiveness of Bioretention Facilities

WANG Qi<sup>1,2</sup>, XIE Yawei<sup>1,\*</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, XIE Yufei<sup>2</sup>, LIU Hongyuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Urban Water Industry Association, Hangzhou 310009, China;

3. Zhejiang Urban & Rural Planning Design Institute, Hangzhou 310030, China)

**Abstract** Rainfall interval and packings are the essential factors impacting on the pollutant purification effectiveness of bioretention facilities. In this study, the performance of bioretention facilities with three different packing combinations on pollutants was investigated under different rainfall intervals (2, 7 days and 15 days) and different influent pollutant loading conditions. The results showed that: the rainfall interval had the greatest influence on the removal effect of  $\text{NO}_3^-$ -N, the longer the rainfall interval was, the more unfavorable the  $\text{NO}_3^-$ -N removal was, and there was even the phenomenon of a negative removal rate. The removal rate of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  decreased under long rainfall interval (15 days), and the removal effect of ammonia nitrogen and TP was slightly influenced by rainfall interval. Compared with the rest two packing combinations, manganese sand + maifanite + zeolite + soil hybrid packing could improve the drought resistance and pollutant load impact resistance of bioretention facilities, maintained superior  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removal rate (around 90%) and stable  $\text{NO}_3^-$ -N removal capacity under high rainfall interval (15 days), and  $\text{NO}_3^-$ -N removal rate was higher (more than

[收稿日期] 2023-04-02

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52070111, 52170093); 浙江省自然科学基金资助项目(LY22E080010)

[作者简介] 王琦(1996—), 男, 硕士, 研究方向为污水处理与回用技术, E-mail: 1776684082@qq.com。

[通信作者] 颜亚玮(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为废水处理技术, E-mail: xyw@zjut.edu.cn。

40%) under different pollutant loads. The study results can provide a reference for the reasonable design and application of biological detention facilities in Hangzhou.

**Keywords** bioretention facility combined packing rainfall interval pollutant load rainwater purification

降雨过程对大气中悬浮物质的淋洗和对地表污染物的冲洗使得雨水径流中含有大量污染物,并存在显著的初期冲刷效应<sup>[1]</sup>,未经净化后排放会对受纳水体造成污染,雨水地表径流污染已成为仅次于农业污染的第二大面污染源<sup>[2]</sup>。生物滞留设施是低影响开发(low impact development, LID)技术中的一种地表径流处理设施,不仅具有削减径流量、洪峰流量和延迟洪峰时间的能力<sup>[3]</sup>,在总悬浮固体(TSS)、油脂、病原微生物和重金属等去除方面也表现出较佳的性能<sup>[4]</sup>。

填料是生物滞留设施污染物净化效果的关键影响因素之一。国内外关于填料改良开展了大量研究,主要通过添加一定比例的改良填料来提升系统径流量和污染物控制效果<sup>[5-7]</sup>。相较于添加单一改良填料,组合填料能够发挥不同改良填料的优点。沸石和麦饭石具有多孔结构和较大的比表面积,作为改良填料能够有效提升系统污染物去除效果<sup>[8-9]</sup>。许萍等<sup>[3]</sup>的研究表明,麦饭石、沸石、铝污泥和河砂组合填料性能最佳,对TP的去除率高于93%,在最佳运行条件下对氨氮和TN的去除率均高于58%。周栋等<sup>[10]</sup>发现沸石和麦饭石体积比为3:7的填充柱综合性能最佳,对TP和TN的去除率能够达到78%以上。王金丽等<sup>[11]</sup>通过沸石、麦饭石和蛭石组合实现对氨氮、磷酸盐和COD<sub>Cr</sub>的高去除效果。Yang等<sup>[12]</sup>研究表明,在人工湿地系统中添加锰砂,使系统对磷的去除率由43.2%提升到65.1%。此外,降雨间隔对生物滞留设施的污染物净化效果存在明显影响,填料的干湿交替变化会影响系统中微生物群落结构和土壤中酶的扩散,还会影响填料对污染物的吸附效果<sup>[13-14]</sup>。陈焱等<sup>[15]</sup>分析了前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响机制,表明前期干旱天数会改变系统中氮还原酶空间分布及微生物群落结构,从而影响系统对不同形态氮的去除能力。黎雪然等<sup>[16]</sup>的研究表明,雨前干旱天数还会影响生物滞留系统中氮的转化机制如硝化、吸收、反硝化和矿化等。

目前关于改良填料的研究多注重在不同进水污染物负荷和不同降雨重现期下污染物的净化效果

上,针对降雨间隔对于生物滞留设施污染物净化效果影响的相关研究较少。本研究在杭州市海绵城市建设中生物滞留设施研究项目的支持下,探讨不同降雨间隔和污染物负荷条件下生物滞留设施中麦饭石、沸石和锰砂等多种填料组合的净化作用,以为生物滞留设施在实际工程中的应用提供参考。

## 1 方法与材料

### 1.1 试验方法

试验配制了3种填料,并对填料的渗透系数和持水量进行了测定;将3种填料以3种不同组合方式填充在3根生物滞留柱中,研究其在不同进水污染物负荷、不同降雨间隔下的污染物净化效果和对实际地表雨水径流的净化效果。

#### 1.1.1 填料渗透系数及持水量测定

装置如图1所示,有机玻璃管直径为10 cm,高为70 cm,自下而上依次为砾石(粒径为1.0~1.5 cm)集水层、中沙(粒径为1~3 mm)过滤层、细沙(粒径<1 mm)过滤层、填料层、淹没区。填料层和细沙层、中沙层和砾石集水层间铺设透水土工布。淹没区上方设有溢流口。

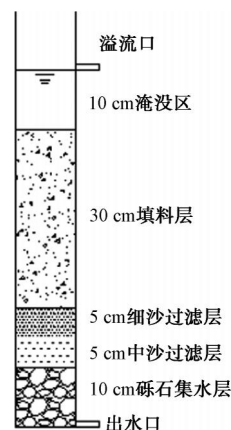


图1 渗透系数测定装置

Fig. 1 Permeability Coefficient Measuring Device

采用恒定水头法测定填料渗透系数。以恒定进水速度持续布水6 h,保持填料上方稳定有10 cm水柱,超出水头的水量从溢流口流出。自出水口出水开始监测出水流量,待出水流量稳定后每间隔0.5 h记录出水流量一次,直至布水结束,对测得的数据取

平均值,并通过计算得到渗透系数。填料持水量通过对试验进水量与出水量之间的差值分析而来。测定结果如表 1 所示。

表 1 不同类型填料持水量和渗透系数

Tab. 1 Water-Holding Capacity and Permeability Coefficients for Different Types of Packings

填料类型	持水量	渗透系数/ (mm·min <sup>-1</sup> )
锰砂+土(3:1)	20.6%	1.53
麦饭石+沸石+土(1.5:1.5:1.0)	18.6%	2.21
锰砂+麦饭石+沸石+土(1.0:1.0:1.0:1.0)	23.6%	1.32

注:表中比例均为质量比。

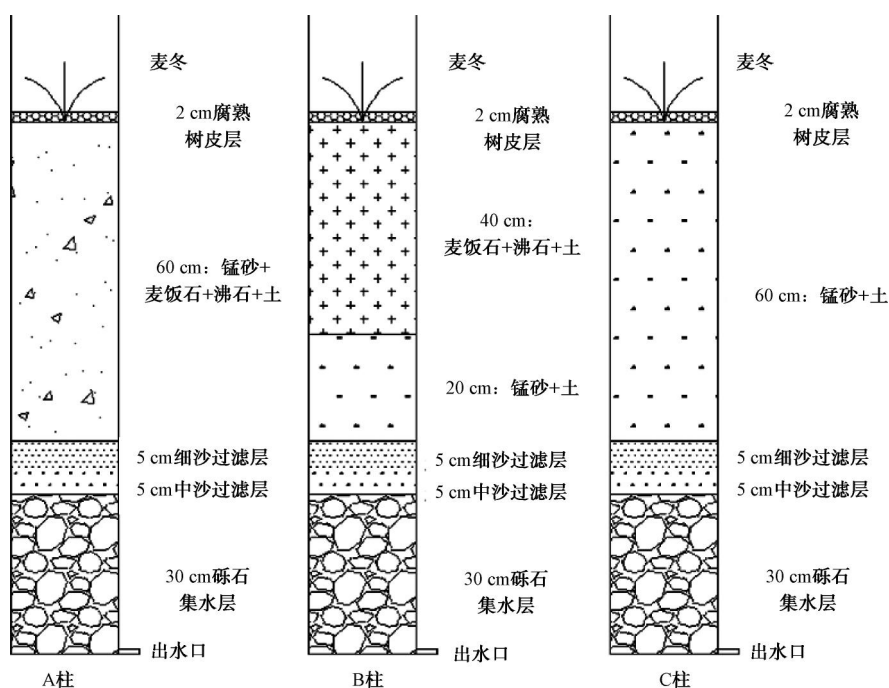


图 2 试验装置

Fig. 2 Test Device

中、低污染物负荷顺序进行,每个负荷条件运行 1 个周期,不同周期间隔 2 d。

不同降雨间隔:试验过程中,通过停止进水模拟晴天状态,研究不同降雨间隔对系统的影响。此部分试验采用中污染物负荷,共设置 2、7 d 和 15 d 3 个间隔,顺次进行。试验周期调整为 2 d,其余与不同进水污染物负荷试验相同。

实际地表径流净化:降雨间隔为 2 d,运行总时长为 12 h,其余与不同污染物负荷试验相同。

### 1.1.3 分析方法

COD<sub>Cr</sub>、TP、TN、氨氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SS 测定方法均采

### 1.1.2 生物滞留设施雨水径流净化

试验装置如图 2 所示,有机玻璃管内径为 20 cm,高为 120 cm,自下而上依次为砾石(粒径为 2~3 cm)集水层、中沙(粒径为 1~3 mm)过滤层、细沙(粒径<1 mm)过滤层、填料层、腐熟树皮层。填料层上方种植有麦冬。填料层和细沙层、中沙层和砾石储水层间铺设透水土工布。

不同污染物负荷:以 4 d 为一个周期,每天运行 12 h,考虑到生物滞留装置一般针对初期雨水径流,设置进水流量为 1 L/h。每天 9:00 开始进水,从出水口出水开始,每 2 h 取样一次。试验进水按照高、

用《水和废水监测分析方法》(第四版)<sup>[17]</sup>。

## 1.2 试验材料

### 1.2.1 试验土壤及改良填料

试验所用土壤取自浙江省杭州市西湖区小和山地区。土壤晾干后经孔径 1 mm 筛网去除土壤中的碎石和枯枝落叶等杂质后分析土壤粒径分布,结果如表 2 所示。根据国际通用土壤类型分类标准<sup>[18]</sup>,本试验土壤类型为粉质黏壤土。为保证填料结构的稳定性及其对污染物的净化效果,所用麦饭石、锰砂、沸石各自均由 3 种粒径(1~3、3~5、5~8 mm)混合而成,其质量比为 3:1:1。

表2 土壤粒径分布

Tab. 2 Distribution of Soil Particle Size

类型	粒径/mm	占比
黏粒	0~0.002	15.65%
粉粒	0.002~0.020	68.56%
沙粒	0.020~0.200	15.79%

### 1.2.2 试验用水

由于降雨时间不确定,影响试验连续性,不同污染物负荷、降雨间隔试验采用人工配水模拟地表雨水径流。根据课题组前期对杭州市部分社区地表径流水质监测结果及陈前虎等<sup>[19]</sup>和石万里等<sup>[20]</sup>对杭

州市路面雨水径流水质的研究,杭州市地表雨水径流中氨氮、TN、TP、COD<sub>Cr</sub>的平均质量浓度分别为1.51~6.14、3.29~11.35、0.06~0.32、15.93~124.79 mg/L。考虑到初期雨水径流污染物浓度较高,且受多种因素影响,模拟雨水设置高、中、低3种污染物负荷。COD<sub>Cr</sub>、TP、氨氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N分别由葡萄糖、磷酸二氢钾、氯化铵、硝酸钾提供。实际雨水地表径流净化试验用水来自浙江工业大学屏峰校区内路面雨水径流,取样时间为开始降雨后30 min内。水质如表3所示。

表3 试验用水

Tab. 3 Test Water

进水类型	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )
高污染物负荷(模拟)	250	1.5	10	5	-	-
中污染物负荷(模拟)	150	0.9	6	3	-	-
低污染物负荷(模拟)	50	0.3	2	1	-	-
实际雨水地表径流	40.08	0.05	1.86	2.23	5.75	37.99

目标水质:《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准(COD<sub>Cr</sub>质量浓度≤50 mg/L、TP质量浓度≤0.5 mg/L、氨氮质量浓度≤5 mg/L、TN质量浓度≤15 mg/L、SS质量浓度≤10 mg/L)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 填料组合的影响

图3为不同进水污染物负荷下生物滞留设施各污染物去除率情况。由图3(a)可知,A柱对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的去除效果及稳定性优于B柱和C柱,即使在低污染物负荷下,平均去除率也能保持在40%以上。由表1可知,A柱填料层所用填料持水量大于其他两种填料,渗透系数较小,在相同进水流量下,雨水径流在系统中停留时间较长,增加了污染物与填料的接触时间。

由图3(b)可知,A柱氨氮平均去除率稳定在95%以上,优于B柱(90%以上);而C柱对氨氮的去除效果随着试验的进行逐渐变差,低污染物负荷下去除率仅有56%。氨氮主要通过吸附作用被填料去除,相较于麦饭石和沸石,锰砂对氨氮的吸附效果较差<sup>[21-22]</sup>。B柱填料的分层填充形式下,麦饭石和沸石与雨水径流接触时间较A柱填料混合填充短,C柱填料中锰砂比例远大于其他两个生物滞留

设施。

由图3(c)和图3(d)可知,3种组合方式填料下TP平均去除率均在97%以上,稳定运行后COD<sub>Cr</sub>去除率均大于94%。TP主要通过填料吸附、化学沉淀和生物同化作用去除,研究<sup>[11-12]</sup>表明,麦饭石和沸石及锰砂对TP均有较好的吸附效果。初始运行时,COD<sub>Cr</sub>去除率偏低且波动范围较大,主要是运行前期填料层部分不稳定有机质随水流流出,A柱填料层填料渗透系数较小,填料结构较其余两种更加稳定,有机质流出较少;随着运行时间的延长,生物作用逐渐形成,各模拟柱COD<sub>Cr</sub>去除效果趋于稳定。

3种不同组合方式填料的生物滞留设施在抗污染物负荷冲击上表现出一定差异,锰砂+麦饭石+沸石+土壤混合填料(A柱)性能最佳,不同进水污染物负荷下对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、氨氮、COD<sub>Cr</sub>和TP的净化效果均表现出优势;其次为锰砂+土壤与麦饭石+沸石+土壤分层组合填料(B柱),二者净化效果均优于单独锰砂+土壤混合填料(C柱)。进水污染物负荷对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N去除率有较大影响,而改良填料种类对氨氮的去除效果有显著影响。

### 2.2 降雨间隔的影响

图4为不同降雨间隔下生物滞留设施各污染物

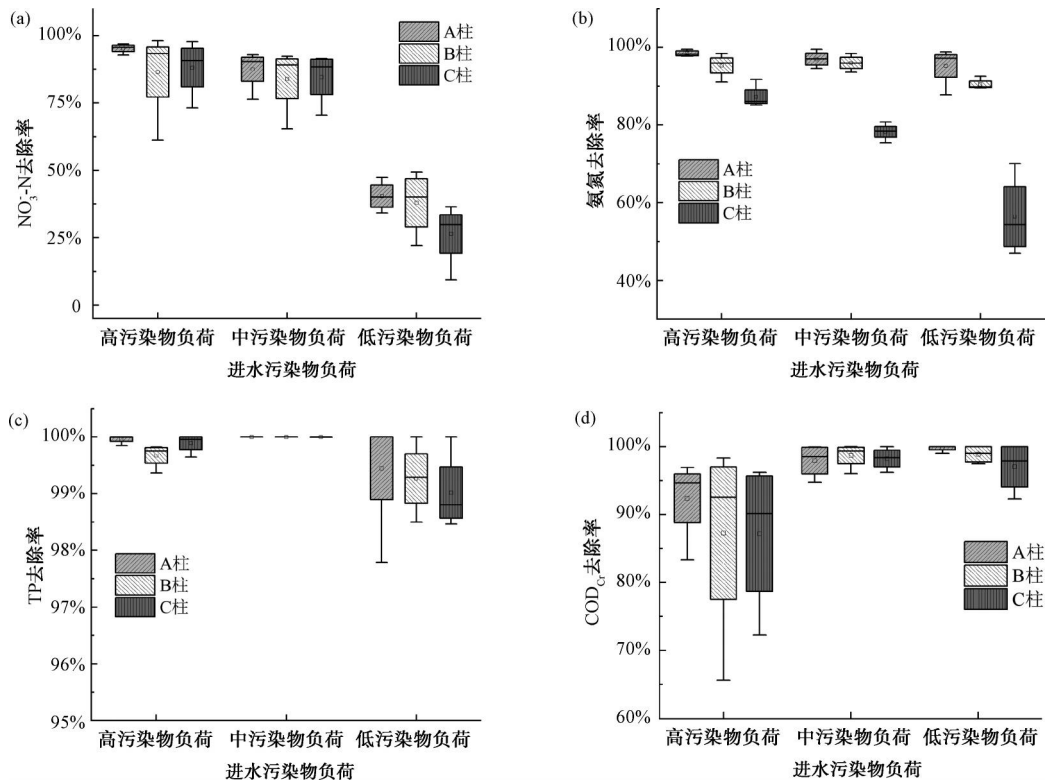


图3 不同进水污染物负荷下生物滞留设施污染物净化效果

Fig. 3 Purification Effect of Bioretention Facilities under Different Influent Pollutant Loads

平均去除率。由图 4(a)可知,长降雨间隔不利于  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除。降雨间隔为 2 d 时,各系统  $\text{NO}_3\text{-N}$  的平均去除率均在 77% 以上;降雨间隔为 7 d 时,A 柱  $\text{NO}_3\text{-N}$  的平均去除率为 12.47%,而 B 柱和 C 柱  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均去除率均为负值;降雨间隔为 15 d 时,  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均去除率均为负值。主要原因在于:一方面,较长的降雨间隔为微生物硝化作用提供了充分的时间,填料吸附的氨氮转化为  $\text{NO}_3\text{-N}$ ;另一方面,较长的降雨间隔使填料含水率降低,改变了填料孔隙度和系统氧气环境,不利于微生物反硝化作用<sup>[13]</sup>。张逸<sup>[23]</sup>针对干湿交替下生物滞留设施脱氮效果研究的结果表明,干旱期为 7 d 时系统  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效果达到最佳,干旱期为 15 d 时,出现  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋出现象。

由图 4(b)可知,长降雨间隔(15 d)下,各系统  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率出现不同程度地下降。A 柱  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率较降雨间隔为 2 d 和 7 d 时下降了 8% 左右,B 柱和 C 柱分别下降了 15% 和 22% 左右。这可能与高降雨间隔后,系统内微生物数量和活性降低及群落结构发生变化有关<sup>[13]</sup>。

由图 4(c)和图 4(d)可知,降雨间隔的增加并没有导致氨氮和 TP 的去除率下降,去除率均在 90% 以上。降雨间隔较长时,C 柱氨氮的去除效果趋好。降雨间隔为 2 d 时,C 柱氨氮平均去除率为 76.9%,降雨间隔为 7 d 和 15 d 时的氨氮平均去除率均在 92% 以上。原因是:较长的降雨间隔下,填料吸附的氨氮长时间停留在填料上,客观上促进了硝化作用,填料表面吸附位点空缺,再次布水时重新吸附氨氮。基于麦饭石和沸石对氨氮较好的吸附效果,A 柱和 B 柱氨氮去除率均在 93% 以上。

降雨间隔对生物滞留设施  $\text{NO}_3\text{-N}$  的净化效果有较大影响,降雨间隔越久,越不利于  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除,甚至出现去除率为负的情况。长降雨间隔(15 d)下, $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率有所降低。降雨间隔对 TP 及氨氮的去除效果影响较小。

图 5 为不同降雨间隔下生物滞留设施出水污染物浓度情况。由图 5(a)可知,长降雨间隔下(15 d),系统出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度波动性明显增加。其中,B 柱和 C 柱的波动范围远超 A 柱,运行首日 B 柱和 C 柱  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  平均出水质量浓度约为 A 柱

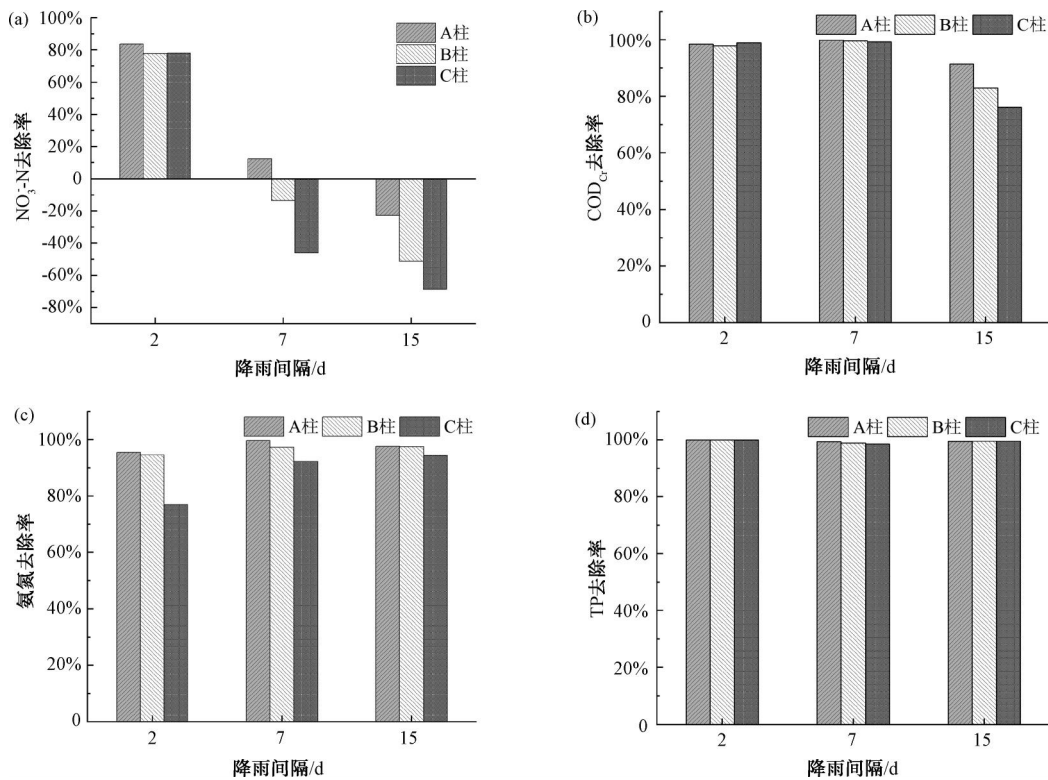


图4 不同降雨间隔下生物滞留设施污染物净化效果

Fig. 4 Purification Effect of Bioretention Facilities under Different Rainfall Intervals

(10.95 mg/L)的2倍。主要原因是:A柱内填料结构相对稳定且持水性能较好,在经历长降雨间隔后仍能保持较稳定的系统内部环境。

生物滞留系统中植物对NO<sub>3</sub>-N有一定吸收效果,但耗时长久;由于土壤本身带有负电,对NO<sub>3</sub>-N吸附作用较弱,NO<sub>3</sub>-N易随水流发生迁移<sup>[24]</sup>。由图5(b)可知,随着降雨间隔的延长,系统出水NO<sub>3</sub>-N浓度波动范围增大,主要是降雨间隔越久,系统中NO<sub>3</sub>-N累积量越多,再次布水时被淋出所导致。但A柱始终保持出水NO<sub>3</sub>-N浓度低于B柱和C柱的特征;降雨间隔为15 d时,运行第1 d A柱NO<sub>3</sub>-N平均出水质量浓度为5.67 mg/L,而同时期B柱和C柱NO<sub>3</sub>-N平均出水质量浓度均高于6.5 mg/L。

由图5(c)可知,各降雨间隔下C柱出水氨氮浓度始终表现出波动范围大于A柱和B柱的特性,降雨间隔为2 d时尤为突出,平均出水浓度接近A柱和B柱的2倍。主要原因是相较于沸石和麦饭石,锰砂表面氨氮吸附点位相对较少,短降雨间隔下,吸附点位较快被占据,未被吸附的氨氮随水流流出系统。

3种不同组合方式填料的生物滞留设施表现出不同的抗干旱能力,其中,锰砂+麦饭石+沸石+土壤混合填料(A柱)抗干旱能力最强,长降雨间隔下COD<sub>Cr</sub>和NO<sub>3</sub>-N去除效果较优且稳定;其次为锰砂+土壤与麦饭石+沸石+土壤分层组合填料(B柱),单独锰砂+土壤混合填料(C柱)最差。尽管长降雨间隔不利于NO<sub>3</sub>-N的去除,但系统始终保持对氨氮、COD<sub>Cr</sub>和TP的高去除效果,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

### 2.3 实际雨水地表径流的净化效果

生物滞留设施对实际地表径流的净化效果如表4所示。基于改良填料的生物滞留设施对实际地表径流中TP和氨氮的去除率与对模拟雨水径流的TP、氨氮去除率相近。各生物滞留设施对SS均有较好的处理效果,去除率均在95%以上。由于模拟雨水有机物、含氮物质来源较为单一,使得生物滞留设施中形成相应的微生物群落,而实际地表径流中有机物和含氮物质组成复杂,降解难度变大。因此,COD<sub>Cr</sub>去除率与低污染物负荷试验相比略低。此外,较低的C/N不利于微生物进行反硝化作用,

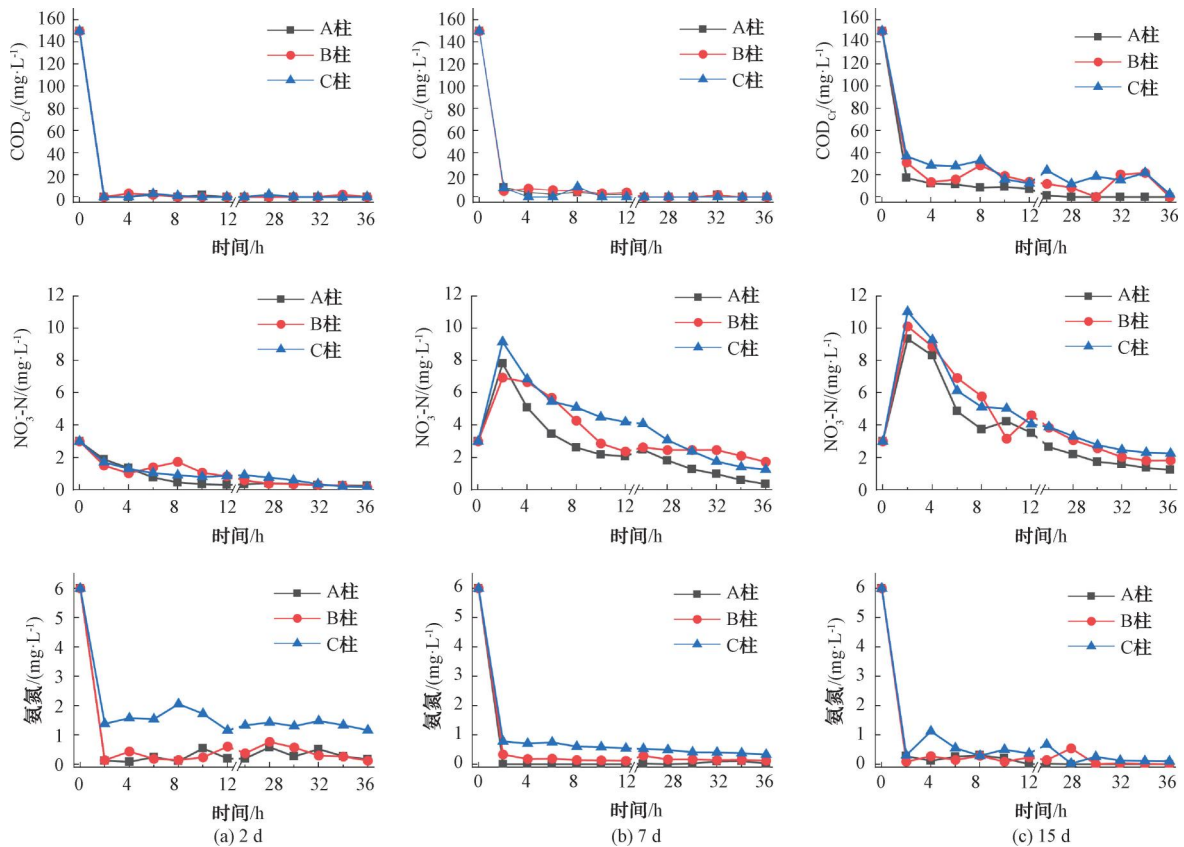


图5 不同降雨间隔下出水 COD<sub>Cr</sub>、NO<sub>3</sub>-N、氨氮浓度

Fig. 5 COD<sub>Cr</sub>, NO<sub>3</sub>-N and Ammonia Nitrogen Concentrations in Effluent under Different Rainfall Intervals

使得生物滞留设施对 NO<sub>3</sub>-N 的去除率均为负值, TN 去除率均低于 15%, 低于低污染物负荷试验。出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。

表4 生物滞留设施对实际地表径流的净化效果

Tab. 4 Purification Effect of Bioretention Facilities on Actual Surface Runoff

污染物	生物滞留设施	平均出水质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率
COD <sub>Cr</sub>	A 柱	7.67	80.9%
	B 柱	5.13	87.2%
	C 柱	1.40	96.5%
TP	A 柱	0.002	96.3%
	B 柱	0.007	87.1%
	C 柱	0.005	91.1%
氨氮	A 柱	0.15	92.1%
	B 柱	0.22	88.2%
	C 柱	0.10	94.6%

(续表4)

污染物	生物滞留设施	平均出水质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率
NO <sub>3</sub> -N	A 柱	2.56	-10.7%
	B 柱	2.83	-22.1%
	C 柱	2.65	-14.3%
TN	A 柱	4.94	14%
	B 柱	5.48	4.8%
	C 柱	5.16	10.3%
SS	A 柱	1.03	97.3%
	B 柱	1.35	96.4%
	C 柱	1.83	95.2%

### 3 小结

(1) 锰砂+麦饭石+沸石+土壤混合填料能够提升生物滞留设施抗污染物负荷冲击能力和抗干旱能力, 不同进水污染物负荷下 NO<sub>3</sub>-N 平均去除率大于 40%, 高降雨间隔(15 d)下 COD<sub>Cr</sub> 去除率能够稳定在 90%左右, 并且 NO<sub>3</sub>-N 去除效果较稳定。生物滞

留设施对实际地表径流  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP、氨氮和 SS 的去除率均在 80% 以上, 对  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 去除效果一般, 去除率低于 15%。不同试验条件下, 系统出水水质均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。

(2) 降雨间隔对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除效果影响显著, 且降雨间隔越久越不利于  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除, 降雨间隔为 7 d 和 15 d 时, 出现去除率为负的情况; 长降雨间隔(15 d) 下,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率有所降低; 氨氮和 TP 的去除效果受降雨间隔影响较小。

### 参考文献

- [ 1 ] 张香丽, 赵志杰, 秦华鹏, 等. 常州市不同下垫面污染物冲刷特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 644-654.  
ZHANG X L, ZHAO Z J, QIN H P, et al. Characteristics of pollutants flush on different types of underlying surface in Changzhou [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(3): 644-654.
- [ 2 ] 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, 17.  
LI J K, ZHANG Z X, JIANG C B, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 1-8, 17.
- [ 3 ] 许萍, 黄俊杰, 张建强, 等. 模拟生物滞留池强化径流雨水中的氮磷去除研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2): 107-112.  
XU P, HUANG J J, ZHANG J Q, et al. Research on simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in runoff rainwater by bioretention [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(2): 107-112.
- [ 4 ] ZANIN G, MAUCIERI C, FERRO N D, et al. Evaluating a controlled-release fertilizer for plant establishment in floating elements for bioretention ponds[J]. Agronomy, 2020, 10(2): 15. DOI:10.3390/agronomy10020199.
- [ 5 ] 胡爱兵, 李子富, 张书函, 等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 75-79.  
HU A B, LI Z F, ZHANG S H, et al. Simulated bioretention pond for improving quality of stormwater runoff on urban traffic road[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 75-79.
- [ 6 ] MAI Y P, HUANG G R. Hydrology and rainfall runoff pollutant removal performance of biochar-amended bioretention facilities based on field-scale experiments in lateritic red soil regions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 143252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143252.
- [ 7 ] 高晓丽, 张书函, 肖娟, 等. 雨水生物滞留设施中填料的研究进展[J]. 中国给水排水, 2015, 31(20): 17-21.  
GAO X L, ZHANG S H, XIAO J, et al. Research development of filter media in stormwater bioretention facilities [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(20): 17-21.
- [ 8 ] 王鑫, 刘雅慧, 宁梓洁, 等. 海绵城市下垫面基质优化及其对模拟雨水处理效果[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 1951-1958.  
WANG X, LIU Y H, NING Z J, et al. Matrix optimization for underlying surface in a sponge city and its effect on artificial rainwater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(7): 1951-1958.
- [ 9 ] 刘雅慧, 王鑫, 王洪, 等. 城市雨水径流下垫面基质优化与吸附性能[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 192-196.  
LIU Y H, WANG X, WANG H, et al. Optimization and adsorbability of underlying materials for treatment of urban water runoff[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2017, 29(3): 192-196.
- [ 10 ] 周栋, 陈振楼, 毕春娟, 等. 沸石和麦饭石组合滤料对城市降雨径流氮磷去除效率的研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(1): 185-193.  
ZHOU D, CHEN Z L, BI C J, et al. Efficiencies of different zeolite and medical stone combinations removing the nitrogen and phosphorus in urban rainfall runoff [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011(1): 185-193.
- [ 11 ] 王金丽, 孙永利, 郑华清, 等. 基于径流污染控制的生物滞留设施填料优化研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 110-116.  
WANG J L, SUN Y L, ZHENG H Q, et al. Optimization of bioretention facility filler based on runoff pollution control [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 110-116.
- [ 12 ] YANG Y X, LIU J H, ZHANG N, et al. Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 170: 446-452. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.024.
- [ 13 ] 高志远, 袁鸣, 姚槐应, 等. 极端干旱对土壤微生物群落和功能的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 35-45.  
GAO Z Y, YUAN M, YAO H Y, et al. Research progress on effect of extreme drought on soil microbial communities and their functions[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 35-45.
- [ 14 ] CHEN Z M, DING W X, XU Y H, et al. Importance of heterotrophic nitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in a cropland soil: Evidences from a N-15 tracing study to literature synthesis [J]. Soil Biology & Biochemistry,



- 2015, 91: 65–75. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.08.026.
- [15] 陈垚, 李欣芮, 郑爽, 等. 前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 263–273. CHEN Y, LI X R, ZHENG S, et al. Influence of antecedent dry days on nitrogen removal in bioretention systems [J]. Environmental Engineering, 2021, 42(1): 263–273.
- [16] 黎雪然, 王凡, 秦华鹏, 等. 雨前干早期对生物滞留系统氮素去除的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(3): 118–123, 140. LI X R, WANG F, QIN H P, et al. Effect of antecedent dry periods on the nitrogen removal in bioretention system [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(3): 118–123, 140.
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods* of the State Environmental Protection Administration of China. *Water and wastewater monitoring and analysis method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [18] 邸文正. 嘉兴市路面雨水土壤渗滤回用技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014. DI W Z. Research on infiltration and reuse of road runoff by artificial soil technology in Jiaxing City [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.
- [19] 陈前虎, 寿建伟, 吴松杰, 等. 城市道路和绿地布局对雨水污染状况的影响——以杭州城市中心区为例[J]. 浙江工业大学学报(社会科学版), 2015, 14(3): 254–260. CHEN Q H, SHOU J W, WU S J, et al. The impact of urban land-use spatial patterns on inland river water quality: A case study of Hangzhou City Center [J]. Journal of Zhejiang University of Technology (Social Sciences), 2015, 14(3): 254–260.
- [20] 石万里, 徐灵华, 陈国芬, 等. 杭州市不同道路雨水径流污染特性研究[C]. 南昌: 中国环境科学学会2022年科学技术年会, 2022. SHI W L, XU L H, CHEN G F, et al. Pollution characteristic study of stormwater runoff different roads in Hangzhou [C]. Nanchang: The 2022 Annual Conference of Science and Technology of the Chinese Society of Environmental Sciences, 2022.
- [21] 邹子介. 利用标记氮同位素示踪技术探究生物滞留系统氮的迁移转化规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017. ZOU Z J. Migration and transformation of nitrogen in bioretention system by nitrogen isotope tracing technique [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [22] 白雪莹. 人工湿地填料锰砂深度脱氮除磷特征及影响因素[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. BAI X Y. Characteristics and influencing factors of advanced denitrification and dephosphorization of manganese ore as constructed wetland filler [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [23] 张逸. 设置淹没区生物滞留设施径流调控及强化脱氮效应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021. ZHANG Y. Research on runoff regulation and enhanced nitrogen removal of bioretention facilities in submerged area [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [24] ZHANG J B, CAI Z C, CHENG Y, et al. Nitrate immobilization in anaerobic forest soils along a north-south transect in east China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1193–1200.

(上接第 133 页)

- [24] HE C J, HE X W, LI J J, et al. The spectral characteristics of biochar-derived dissolved organic matter at different pyrolysis temperatures [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106075. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106075.
- [25] HAN L, NIE X, WEI J, et al. Effects of feedstock biopolymer compositions on the physicochemical characteristics of dissolved black carbon from lignocellulose-based biochar [J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141491. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141491.
- [26] LIU G C, ZHENG H, JIANG Z X, et al. Formation and physicochemical characteristics of nano biochar: Insight into chemical and colloidal stability [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(18): 10369–10379.
- [27] 张宵, 刘一帆, 刘强, 等. 溶解性黑碳促进水环境中四环素的光降解[J]. 环境化学, 2023, 42(6): 2064–2075. ZHANG X, LIU Y F, LIU Q, et al. Dissolved black carbon enhanced the photodegradation of tetracycline in aqueous solution [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(6): 2064–2075.
- [28] GUI X Y, LIU C, LI F Y, et al. Effect of pyrolysis temperature on the composition of DOM in manure-derived biochar [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 197: 110597. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110597.