

doi:10.3969/j.issn.1000-2162.2024.02.012

改良玻璃轻石对雨水径流污染物去除效果研究

韩梦梦, 粟春青, 罗忻武, 宫彦章*

(深圳文科园林股份有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要:以沸石、蛭石、陶粒为基础填料, 添加传统玻璃轻石和改良玻璃轻石, 采用人工调配雨水, 通过渗滤柱模拟生物滞留地, 在不同运行时间(5, 10, 20, 30, 40 h)及不同出水口对径流雨水的净化作用, 研究改良玻璃轻石作为海绵城市生物滞留地基质对径流雨水中污染物的去除效果。结果表明, 添加改良玻璃轻石的渗滤柱对污染物的综合去除效果最优, 对 COD, NH_4^+-N , TN, TP 的最高去除率分别达到 86.84%, 93.68%, 92.71%, 95.47%, COD 含量符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中一级 A 类标准, NH_4^+-N , TP, TN 含量均符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)III 类标准。在基础填料中添加改良玻璃轻石对 4 种污染物均具有较好的过滤吸附作用, 有效改善了填料渗滤性, 综合来看在运行 10 h 时最终出水口 4 即基质层深 65 cm 处达到最佳去除效果。

关键词:海绵城市; 改良玻璃轻石; 雨水径流; 过滤吸附; 污染物去除

中图分类号:X52; X703

文献标志码:A

文章编号:1000-2162(2024)02-0082-10

Research on the removal effect of pollutants in rainwater runoff by modified glass pumice

HAN Mengmeng, SU Chunqing, LUO Xinwu, GONG Yanzhang*

(Shenzhen Wenke Garden Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: Zeolite, vermiculite and ceramsite were used as basic filtration materials, adding traditional glass pumice and modified glass pumice. This study developed a system composed of artificial rainwater and infiltration column to simulate the purification effect of bioretention pool on rainwater runoff at different operation time (5, 10, 20, 30, 40 h) and different outlets, to study the pollutant removal effect in rainwater runoff of modified glass pumice as the substrate of sponge city bioretention pool. The results showed that the infiltration column with modified glass pumice had the best comprehensive pollutant removal effect, and the maximum removal rates of COD, NH_4^+-N , TN and TP were 86.84%, 93.68%, 92.71% and 95.47% respectively. The COD content met the Class A for Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB18918-2002), and the NH_4^+-N , TP and TN content all met the Class III standard of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838-2002). The addition of modified glass pumice to the basic filtration materials had a good filtration adsorption effect on the

收稿日期:2023-02-21

基金项目:深圳市科技计划项目(KCXFZ202002011006491)

作者简介:韩梦梦(1995—), 女, 湖南常德人, 深圳文科园林股份有限公司技术员, 硕士, E-mail: hmm1230@163.com;

* 宫彦章(通信作者), 深圳文科园林股份有限公司高级工程师, E-mail: 493783084@qq.com.

four pollutants, and effectively improves the permeability of filtration materials. In a comprehensive view, the best removal effect was achieved at the final outlet 4, i. e. at the depth of 65 cm of the substrate layer, when running for 10 h.

Keywords: sponge city; modified glass pumice; rainwater runoff; filtration adsorption; pollutant removal

近年来,受极端气候频发、建设强度增大、排水防涝系统不完善等因素影响,深圳市水安全保障能力不足、水环境污染、水资源短缺等问题日益凸显. 随着“海绵城市”概念的提出,雨水的净化与合理利用已经成为水环境研究的焦点之一,通过加强城市规划建设管理,充分发挥城市建筑、道路、绿地、水系等生态系统对雨水的吸纳、蓄渗、缓释作用,有效控制雨水径流,实现雨水“自然积存、自然渗透、自然净化”的城市发展^[1]. 然而目前海绵城市建设过程中存在着重“排”而轻“渗”的问题,雨水径流收集困难、水质差、利用率低等问题成为目前的研究重点. 综合国外的雨水径流处理技术,不难发现通过渗滤可以使雨水中的污染物在土壤的截留和吸附作用下得到很好的净化^[2-4].

国内外对渗滤系统的研究主要集中在植物类型、填料高度以及填料的选择上,已有学者对城市径流雨水污染物的渗滤介质做了大量研究,发现将陶粒、沸石、煤渣、蛭石等作为填料,对雨水径流中的污染物都有较好的去除效果^[5-7]. 此外,通过组合基质提高雨水净化效果的研究也越来越多,如煤渣+生物基质、活性污泥+棕黄壤+炉渣、腐熟牛粪+粉煤灰等,均具备一定的污水净化能力^[8-10]. 然而这些研究仍是利用天然渗滤介质进行组合,易受到周边环境的影响造成孔径的堵塞,对污染物的综合去除效果不佳,例如对某些雨水径流中高浓度的总氮去除率较低^[11]. 为实现雨水至城市海绵体的完全下渗过滤,应开展新型介质的研发,更多地关注能够吸附雨水径流中污染物的渗滤介质在实际工程中的应用.

玻璃轻石是高温焙烧发泡后形成的一种多孔轻质无机材料,传统玻璃轻石以废玻璃为主要原料,笔者实验室自主研发一种具有高效过滤吸附功能的改良玻璃轻石,其通过添加硫铁矿,借助天然基质和人工合成填料制成,具有较大比表面积的特点,对雨水中污染物的去除效果远远优于传统玻璃轻石. 该试验构建模拟渗滤装置,通过渗滤柱模拟生物滞留地对径流雨水的下渗、储蓄和净化作用,以传统玻璃轻石和传统基质沸石为对比,研究改良玻璃轻石作为海绵城市生物滞留地基质对径流雨水中污染物的去除效果,为海绵城市的建设提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 模拟装置构建

模拟装置包括潜水泵、进水桶、渗滤柱、供水管线等,装置结构如图 1 所示,进水桶盛放配制的模拟雨水,容积为 50 L,由潜水泵通过供水管线引入各渗滤柱. 渗滤柱尺寸:内径 20 cm,高 75 cm,材质为 PVC 管,装置由下往上依次为集水层(5 cm)、渗滤层(35 cm)、吸附层(28 cm)以及溢流层(7 cm),基质层采用分层填装的方式进行填充,具体见表 1. 渗滤柱顶部设溢水口,侧壁自下往上 0,2.5,17.5,32.5,47.5 cm 的高度位置分别设 1 个出水口,共计 4 个,直径 1 cm,并连接细 PVC 管,用以取渗出的水进行不同高度渗水性测定,渗滤试验共计设置 3 个处理,每个处理 3 个重复且并联运行.

表 1 渗滤柱基质层填充方式

基 质 层 级	基 质 填 料 构 成 (分 层 填 装)			填 充 高 度/cm
	处 理 1	处 理 2	处 理 3	
蓄 水 层	/	/	/	7
吸 附 层	$v(\text{沸石}):v(\text{蛭石}):v(\text{陶粒})=3:3:4$	$v(\text{传统玻璃轻石}):v(\text{沸石}):v(\text{蛭石}):v(\text{陶粒})=4:2:2:2$	$v(\text{改良玻璃轻石}):v(\text{沸石}):v(\text{蛭石}):v(\text{陶粒})=4:2:2:2$	28
渗 滤 层	$v(\text{工程弃土}):v(\text{煤渣}):v(\text{生物炭}):v(\text{膨润土})=12:4:3:1$ 混匀			35
集 水 层	细砂			5

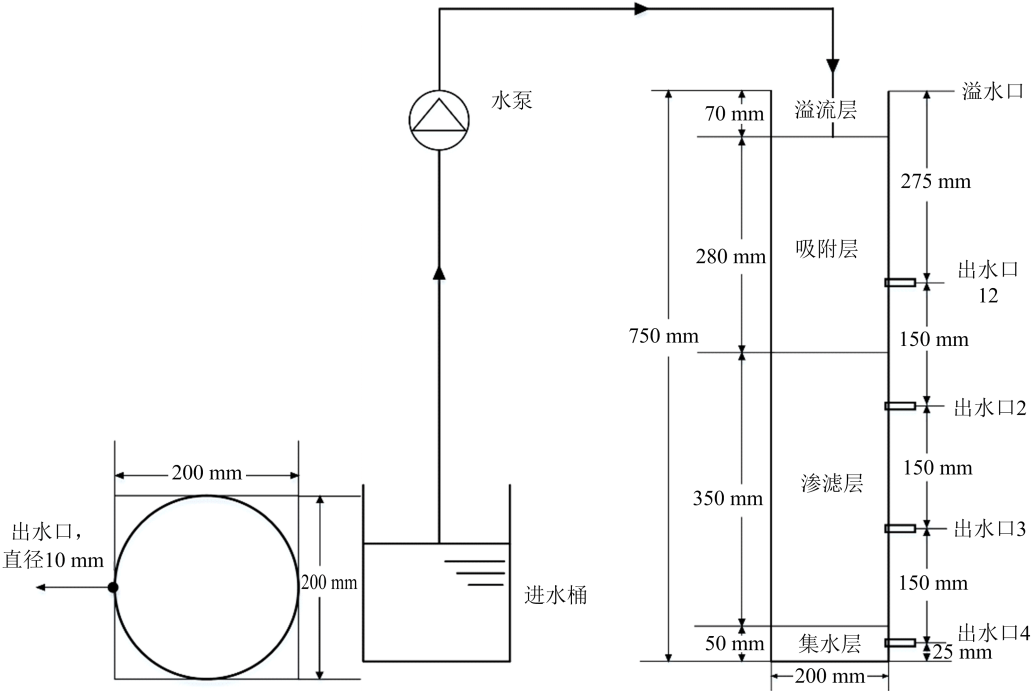


图 1 渗滤柱俯视、正视剖面图

1.2 供试基质

渗滤柱基质材料信息见表 2. 改良玻璃轻石通过改变其原料成分、配比、烧制温度、时间等参数确定最佳合成条件,具体制备过程如下:按质量份计,将玻璃粉 60~80 份、硫铁矿粉 25~35 份、工程弃土 5~10 份、绿碳化硅微粉 5~8 份研磨混合均匀,研磨后原料粒径 ≥ 100 目,加水 15~30 份制成混合料后在马弗炉中高温煅烧,在 400~450 ℃下预热 20~25 min,在 680~780 ℃温度下烧结 15~25 min 且中途翻面,退火 15~25 min,得到新型轻石,为无机多孔材料.

表 2 渗滤柱基质材料信息

基质层级	基质种类	粒径/mm	来源
吸附层	沸石	3~6	外购:广东省广州市
	蛭石	3~6	外购:广东省广州市
	陶粒	4~8	外购:广东省广州市
	传统玻璃轻石	5~8	外购:江苏省无锡市
	改良玻璃轻石	1~8	自制:高温烧结后粉碎
渗滤层	工程弃土	1~5	深圳市园林绿化工程弃土
	蜂窝煤渣	5~8	外购:河南省新乡市
	生物炭	5	外购:河南省巩义市
	膨润土	0.15	外购:河南省巩义市
集水层	细砂	0.15	外购:河南省巩义市

1.3 供试雨水

参考文献[12]提供的深圳降雨时期水质数据,采用人工配制径流雨水,模拟自然径流雨水中的总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)和氨氮(NH_4^+-N). 具体成分和配比如下: NH_4Cl 为 $(30 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, KNO_3 为 $(72.5 \pm 1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 为 $(17.5 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 为 $(250 \pm 2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,用自来水溶解并混合均匀,使用当天配置. 根据配比配置充分搅拌混匀后测定模拟雨水水质指标,测得其浓度区间为:TN 为 $7 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 为 $8 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,COD 为 $240 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.4 装置运行

试验时间为2022年10月中旬至12月下旬,试验地点为深圳文科园林股份有限公司研发部龙岗实验室,气温 $10\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气湿度 $40\%\sim 50\%$ 。每天自09:00开始布水,17:00停止进水,持续5 d,保持单个渗滤柱以 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度进水,系统持续运行时,只打开出水口4让多余雨水流出并将其接走倒掉,分别于5,10,20,30,40 h水力停留时间时取全部出水口的水样,同时在进水桶中取当次模拟雨水水样作为空白对照;取某一出水口水样时须封住其余3个出水口,且进水初期水流冲刷基质,携带出部分填充物质,待出水稳定、无泥沙流出后用250 mL锥形瓶采集出水后过滤于聚乙烯瓶中并在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,每批水样在3 d内测完全部水质指标^[13]。当天运行完成后关闭水阀,打开出水口4放空渗滤柱的水。

1.5 水质分析方法

采用重铬酸钾法测定COD,纳氏试剂比色法-分光光度法测定 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$,碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定TN,过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定TP。

1.6 数据处理

采用Excel 2013进行数据整理和图表制作,利用SPSS 16.0进行数据统计分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 各处理对COD的去除效果

3个处理各出水口的COD含量变化如图2所示,从上到下各出水口COD含量逐渐降低。处理1进水COD含量为 $272\sim 352\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4个出水口的COD含量变化较为一致,均在运行5,20 h时含量较高,运行10,30 h时含量较低,在运行10 h时出水口4的COD含量达到最低,为 $88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,结合表3可知此时的COD去除率仅为69.44%,效果较差。处理2进水COD含量为 $256\sim 288\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4个出水口的COD含量变化趋势较为稳定且一致,均在运行30 h时含量最低,出水口4的COD含量最低为 $64.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,结合表3可知此时的COD去除率为75.00%,效果同样不佳。处理3进水COD含量为 $248\sim 304\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4个出水口的COD含量波动较大,除出水口3外,其他出水口均在运行20,40 h时含量较高,在运行10 h时不同出水口间区别较大,出水口4的COD含量达到最低,为 $40.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)III类标准($\text{COD}\leq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[14],但符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中一级A类标准($\text{COD}\leq 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15],此时出水口3和出水口4之间COD含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表3可知此时的COD去除率为86.84%,达到试验预期效果。

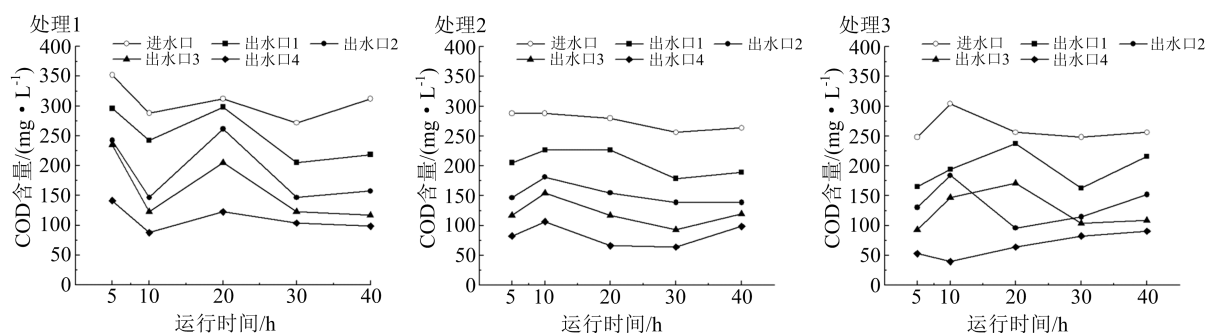
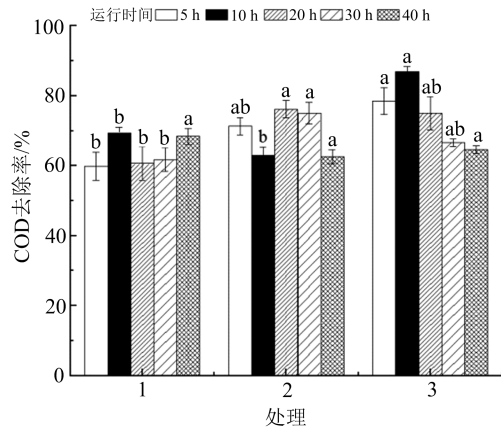


图2 不同出水口COD含量随时间的变化

如图3所示,对不同处理的COD去除率进行显著性差异分析发现,处理3的COD去除率在运行10 h时显著高于处理1和处理2($p<0.05$),达到86.84%,而处理3其他运行时间及处理1和处理2在运行5~40 h期间的COD去除率均低于85%,表明改良玻璃轻石对COD的过滤吸附作用优于传统玻璃轻石,且在运行10 h时最终出水口4即基质层深65 cm处达到最佳去除效果。

表 3 不同时间下水出口 4 的 COD 含量及去除率

运行时间/h	COD 含量/(mg · L ⁻¹)			COD 去除率/%		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 1	处理 2	处理 3
5	141.33	82.67	53.33	59.85	71.30	78.50
10	88.00	106.67	40.00	69.44	62.96	86.84
20	122.67	66.67	64.00	60.68	76.19	75.00
30	104.00	64.00	82.67	61.76	75.00	66.67
40	98.67	98.67	90.67	68.37	62.63	64.59



不同小写字母表示同一时间不同处理间存在显著性差异($p < 0.05$)。

图 3 不同处理对 COD 去除率的影响

2.2 各处理对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

3 个处理各出水口的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化如图 4 所示,从上到下各出水口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量逐渐降低。处理 1 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $9.71\sim 11.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4 个出水口的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量总体上随运行时间的增加逐渐上升,在运行 30,40 h 时含量较高,在运行 20 h 时出水口 4 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量达到最低,为 $1.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时出水口 3 和出水口 4 之间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 4 可知此时的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 85.18% ,达到试验预期效果。处理 2 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $9.98\sim 11.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水口 1 和出水口 2 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量总体上随运行时间的增加逐渐降低,出水口 3 和出水口 4 较为稳定,各出水口均在运行 5 h 时含量最高,运行 10 h 时出水口 4 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最低为 $2.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时出水口 2 和出水口 3 之间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 4 可知此时的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 77.49% ,效果较差。处理 3 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为 $7.37\sim 11.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水口 1 和出水口 2 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随运行时间的增加呈现先上升后下降的趋势,在 30 h 达到最高值,而出水口 3 和出水口 4 则随运行时间的增加呈现先下降后上升的趋势,在运行 20,30 h 时出水口 4 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 $0.97,0.73\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)III 类标准($\text{NH}_4^+\text{-N}\leq 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[14],此时出水口 2 和出水口 3 之间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 4 可知此时的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 $93.68\%,90.79\%$,达到试验预期效果。

如图 5 所示,对不同处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率进行显著性差异分析发现,处理 3 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在运行 10,20,30 h 时显著高于处理 2($p < 0.05$),分别达到 $85.51\%,91.68\%,90.79\%$,而处理 3 其他运行时间及处理 1 和处理 2 在运行 5~40 h 期间的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均低于 85% ,表明改良玻璃轻石对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的过滤吸附作用优于传统玻璃轻石,且在运行 20,30 h 时最终出水口 4 即基质层深 65 cm 处达到最佳去除效果。

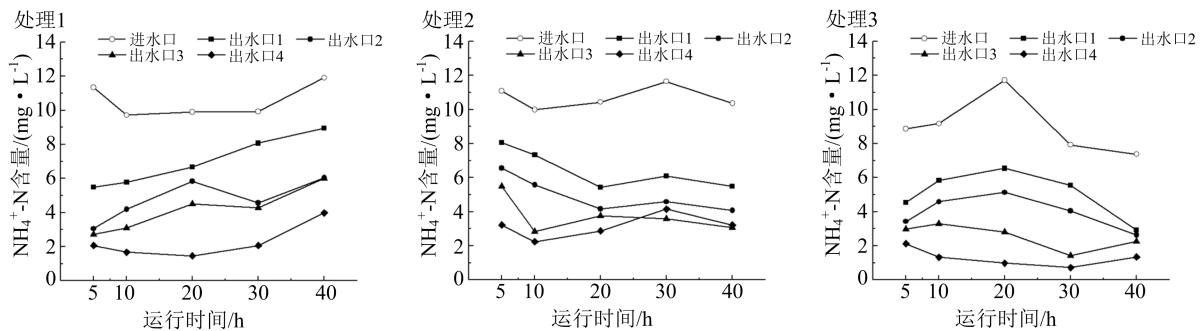
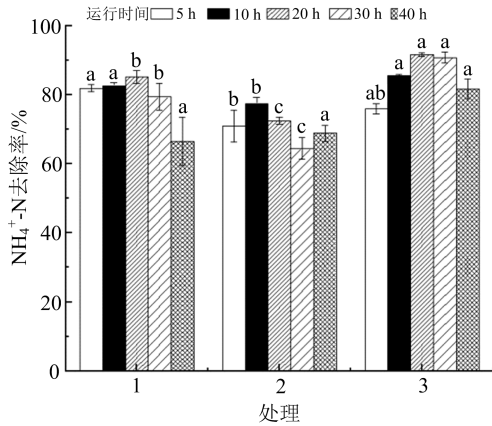


图 4 不同出水口 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量随时间的变化

表 4 不同时间下出水口 4 的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量及去除率

运行时间/h	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率/%		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 1	处理 2	处理 3
5	2.06	3.22	2.13	81.85	70.89	79.95
10	1.68	2.25	1.33	82.66	77.49	85.51
20	1.47	2.87	0.97	85.18	72.48	93.68
30	2.05	4.15	0.73	79.35	64.40	90.79
40	3.99	3.22	1.35	66.48	68.87	81.69



不同小写字母表示同一时间不同处理间存在显著性差异($p<0.05$)。

图 5 不同处理对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率的影响

2.3 各处理对 TN 的去除效果

3 个处理各出水口的 TN 含量变化如图 6 所示,除处理 1 在运行 5 h 有所不同外,另外 2 个处理在运行 5~40 h 期间从上到下各出水口 TN 含量逐渐降低. 处理 1 进水 TN 含量为 $8.60\sim8.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水口 1、出水口 2 和出水口 3 的 TN 含量总体上随运行时间的增加逐渐上升,在运行 40 h 时达到最高值,出水口 4 的 TN 含量波动较大,在运行 10 h 时达到最低,为 $2.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时出水口 3 和出水口 4 之间 TN 含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 5 可知此时的 TN 去除率为 75.20%,效果较差. 处理 2 进水 TN 含量为 $7.98\sim10.91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4 个出水口的 TN 含量变化趋势较为稳定且一致,各出水口在运行 40 h 时含量最高,运行 30 h 时出水口 4 的 TN 含量最低为 $1.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时出水口 2 和出水口 3 之间、出水口 3 和出水口 4 之间的 TN 含量下降幅度较大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 5 可知此时的 TN 去除率为 88.42%,达到试验预期效果. 处理 3 进水 TN 含量为 $10.21\sim11.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4 个出水口的 TN 含量总体上随运行时间的增加呈现先下降后上升的趋势,在 40 h 达到最高值,在运行 10 h 时出水口 4 的 TN 含量达到最低,为 $0.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到《地表水

环境质量标准》(GB3838-2002)III 类标准($TN \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[14],此时出水口 3 和出水口 4 之间 TN 含量下降幅度最大,该位置起到了主要过滤吸附作用,结合表 5 可知此时的 TN 去除率为 92.71%,达到试验预期效果.

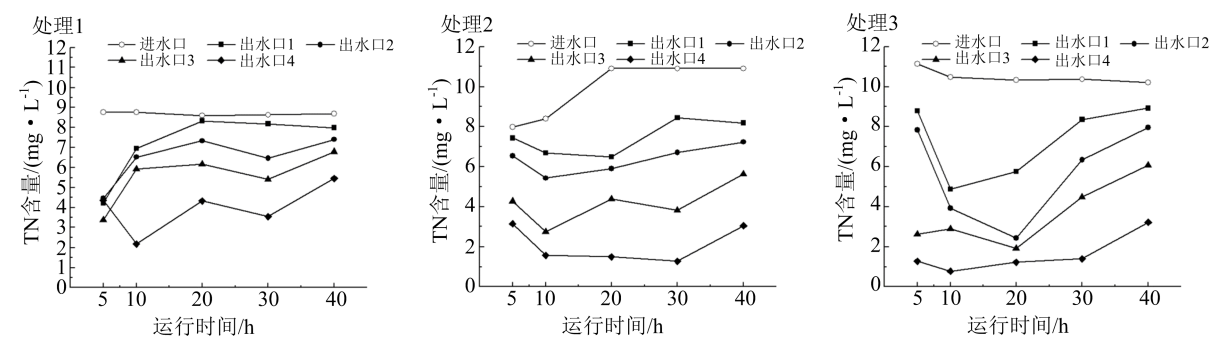
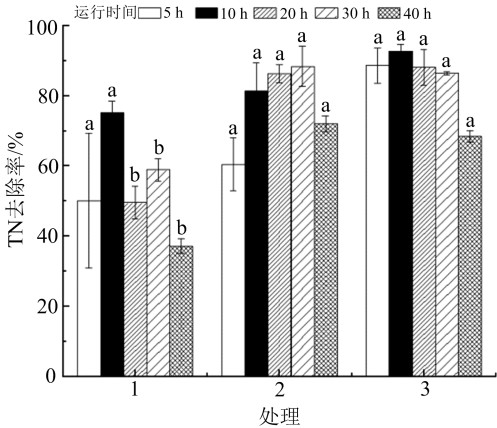


图 6 不同出水口 TN 含量随时间的变化

表 5 不同时间下出水口 4 的 TN 含量及去除率

运行时间/h	TN 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			TN 去除率/%		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 1	处理 2	处理 3
5	4.37	3.15	1.26	50.13	60.51	88.65
10	2.17	1.56	0.76	75.20	81.42	92.71
20	4.33	1.49	1.22	49.62	86.32	88.19
30	3.54	1.26	1.40	58.95	88.42	86.48
40	5.46	3.04	3.22	37.14	72.09	68.45

如图 7 所示,对不同处理的 TN 去除率进行显著性差异分析发现,在运行 20,30,40 h 时处理 2 和处理 3 的 TN 去除率显著高于处理 1($p < 0.05$),处理 2 和处理 3 在运行 5~40 h 期间没有显著性差异($p > 0.05$),但处理 2 仅在运行 20,30 h 时的 TN 去除率超过 85%,处理 3 在运行 5~30 h 期间的 TN 去除率均超过 85%,达到 86.48%~92.71%,表明改良玻璃轻石对 TN 有较好的过滤吸附作用,且在运行 10 h 时最终出水口 4 即基质层深 65 cm 处达到最佳去除效果.



不同小写字母表示同一时间不同处理间存在显著性差异($p < 0.05$).

图 7 不同处理对 TN 去除率的影响

2.4 各处理对 TP 的去除效果

3 个处理各出水口的 TP 含量变化如图 8 所示,3 个处理在运行 5~40 h 期间从上到下各出水口 TP 含量逐渐降低.处理 1 进水 TP 含量为 $2.14 \sim 2.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,4 个出水口的 TP 含量总体上随运行时间的增加逐渐上升,在 20,30 h 左右趋近平稳,达到较高值,出水口 4 运行 5 h 时的 TP 含量最低,为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时出水口 2 和出水口 3 之间 TP 含量下降幅度最大,起到了主要过滤吸附作用,结合

表 6 可知此时的 TP 去除率为 94.03%,达到试验预期效果. 处理 2 进水 TP 含量为 2.26~2.79 mg · L⁻¹,4 个出水口的 TP 含量变化趋势较为平稳,出水口 4 运行 5,10,20h 时的 TP 含量较低,分别为 0.16,0.18,0.18 mg · L⁻¹,此时出水口 2 和出水口 3 之间的 TP 含量下降幅度较大,起到了主要过滤吸附作用,结合表 6 可知此时的 TP 去除率分别为 94.14%,93.34%,93.62%,达到试验预期效果. 处理 3 进水 TP 含量为 2.50~2.97 mg · L⁻¹,出水口 1、出水口 2 和出水口 3 的 TP 含量总体上随运行时间的增加呈现先上升后下降的趋势,出水口 4 相反,在运行 10,20 h 时出水口 4 的 TP 含量达到最低,分别为 0.12,0.17 mg · L⁻¹,此时出水口 3 和出水口 4 之间 TP 含量下降幅度最大,起到了主要过滤吸附作用,结合表 6 可知此时的 TP 去除率为 95.47%,94.40%,达到试验预期效果.

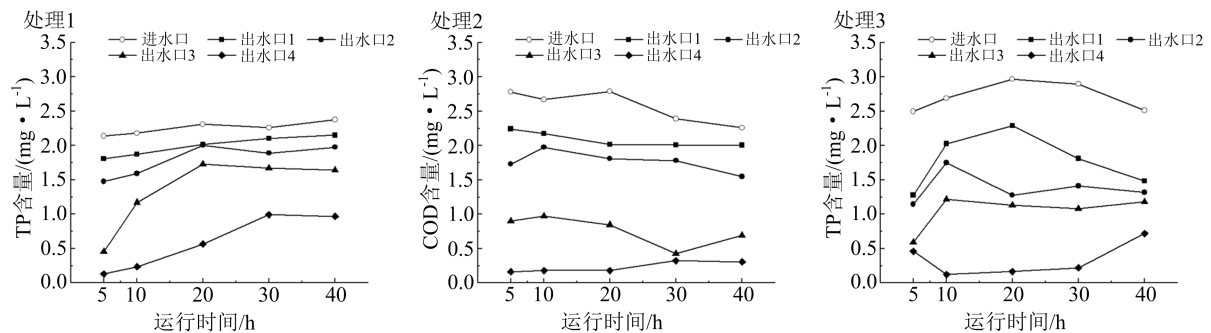
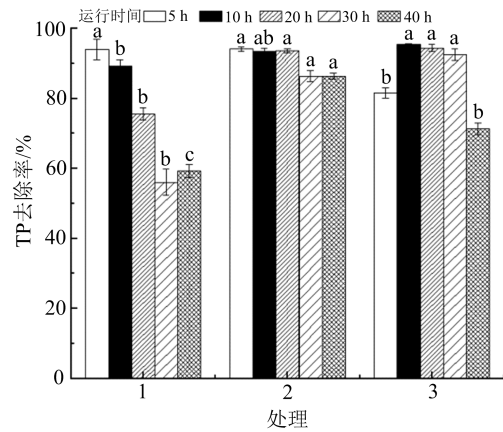


图 8 不同出水口 TP 含量随时间的变化

表 6 不同时间下出水口 4 的 TP 含量及去除率

运行时间/h	TP 含量/(mg · L ⁻¹)			TP 去除率/%		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 1	处理 2	处理 3
5	0.13	0.16	0.46	94.03	94.14	81.59
10	0.23	0.18	0.12	89.30	93.34	95.47
20	0.56	0.18	0.17	75.60	93.62	94.40
30	0.99	0.32	0.22	56.08	86.41	92.48
40	0.97	0.31	0.72	59.31	86.39	71.28

如图 9 所示,对不同处理的 TP 去除率进行显著性差异分析发现,除运行 5 h 外,处理 2 和 3 在其他运行时间的 TP 去除率均显著高于处理 1($p<0.05$),处理 2 在运行 5,40 h 时的 TP 去除率显著高于处理 3($p<0.05$),其他时间没有显著性差异($p>0.05$),3 个处理在运行 5~40 h 期间的 TP 去除率均可超过 85%,且出水口 4 的最低 TP 含量均符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)III 类标准($TP\leq 0.2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[14]. 结果表明不论是传统玻璃轻石还是改良玻璃轻石,均可在最佳运行时间下对 TP 有较好的过滤吸附作用,改良玻璃轻石在运行 10 h 时最终出水口 4 即基质层深 65 cm 处可达到最佳去除效果.



不同小写字母表示同一时间不同处理间存在显著性差异($p<0.05$).

图 9 不同处理对 TP 去除率的影响

3 讨论与结论

渗滤系统吸附层可以通过吸收和拦截去除径流雨水中的颗粒物和污染物,其性能直接影响生物滞留池的渗滤性能,从而影响整体运行效果,因此吸附层填料的选择至关重要^[13].沸石、蛭石和陶粒是市面上良好的吸附剂,对雨水中的部分污染物具有较好的去除能力^[16],笔者试验中由这 3 种材料组成的基础填料对 NH_4^+-N 和 TP 的最高去除率达到 85% 以上,但对 COD 和 TN 的去除率最高仅为 69.44%,75.20%,且除 TP 外其他指标均不符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准^[14].已有研究表明陶粒具有大量孔道、空洞,对雨水中的 TP 具有良好的吸附作用,而沸石不仅具有以上优势,其内部和表面还含有大量金属阳离子,可与磷酸根形成稳定的沉淀,对氨氮也具有相对较高的去除能力^[5,17].由此可见陶粒和沸石对雨水中 TP 和 NH_4^+-N 的去除起到了主要作用,但单纯以其作为基础填料对污染物的综合去除效果不佳.

玻璃轻石具有多孔结构,其孔隙之间相互连通,这一特点决定了其具有较高的吸水率,同时玻璃轻石作为一种过滤材料,可以高效拦截径流雨水中的污染物,在实现雨水收集的同时进行过滤^[18-19].试验中在基础填料中添加传统玻璃轻石,对 TN 和 TP 的最高去除率均超过 85%,但对 COD 和 NH_4^+-N 的去除率最高仅为 75.00%,77.49%,与单纯基础填料一样,除 TP 外其他指标均不符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准^[14]. NH_4^+-N 的去除主要是依靠基质吸附和微生物硝化反硝化作用,渗滤系统中的 NH_4^+-N 首先会被填料吸附,然后被填料内硝化细菌的硝化作用转化为硝酸盐和亚硝酸盐,最后在反硝化细菌的作用下转化为氨气^[20].传统玻璃轻石可能不利于渗滤柱内的复氧,使硝化细菌不能正常发挥作用,从而导致较低的 NH_4^+-N 去除率.由此可见传统玻璃轻石虽然在一定程度上提高了对 TN 的过滤吸附作用,但对 NH_4^+-N 的去除率较低.

硫铁矿烧渣可用于制作废水处理的净水剂,其具有强大的凝聚功能和净水效果^[21-22].笔者通过硫铁矿烧渣和人工合成填料制成的改良玻璃轻石,对雨水中污染物的去除效果远优于传统玻璃轻石.添加改良玻璃轻石后的渗滤柱在运行 10 h 时最终出水口 4 即基质层深 65 cm 处可达到最佳去除效果,对 COD, NH_4^+-N , TN, TP 的最高去除率分布达到 86.84%,93.68%,92.71%,95.47%,远超过预期的 85%,其中 NH_4^+-N , TN, TP 含量均符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准^[14],而 COD 含量则符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 中一级 A 类标准^[15].改良玻璃轻石有效改善了填料的通透性,在径流雨水下渗时打破了原有的厌氧环境,同时较大的比表面积有利于氨氮的吸附,使得硝化作用更彻底,从而提高了 NH_4^+-N 的去除率^[23],COD 的去除主要依靠填料的吸附作用和微生物生物氧化作用,后期可以考虑通过增加种植层、反冲洗措施或定时更换填料等方式提高填料渗滤性^[24].

综上,渗滤柱中加入由沸石、蛭石、陶粒组成的基础填料、基础填料+传统玻璃轻石、基础填料+改良玻璃轻石均对雨水径流中的 TP 有明显的去除效果,不同渗滤柱对 COD, NH_4^+-N , TN 的去除效果差异较大,在基础填料中添加改良玻璃轻石有效改善了填料渗滤性,使渗滤柱对雨水中的 COD, NH_4^+-N , TN, TP 均具有较好的去除效果,且在运行 10 h 时基质层深 65 cm 处过滤吸附作用最好.

参考文献:

- [1] 北京建筑大学. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建: 试行[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] ZHOU Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts[J]. Water, 2014, 6 (4): 976-992.
- [3] 白梅, 冀紫钰. 浅谈澳大利亚水敏感城市设计[J]. 建筑设计管理, 2014 (3): 62-64.
- [4] AHIABLAIME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223 (7): 4253-4273.

- [5] 王晓璐,左剑恶,千里里,等. 复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究[J]. 环境科学, 2015, 36 (7): 2518-2524.
- [6] 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.
- [7] 李慧莉,张榆敏. 黄土基改性陶粒对雨水径流中污染物的去除效能研究[J]. 当代化工, 2019, 48 (12): 2727-2730, 2734.
- [8] 严群,丁越,温慧凯,等. 生物基质对 SWIS 脱氮效果及微生物的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13 (5): 1099-1105.
- [9] 王敏,侯瑞彬,姬雅彤. 活性污泥增强地下渗滤系统去除生活污水中氮污染[J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (5): 544-552.
- [10] 杨峥峥,张思,刘春敬,等. 基质混配地下渗滤系统脱氮除磷机理研究[J]. 水处理技术, 2016, 42 (1): 56-61.
- [11] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园对不同赋存形态氮磷的去除效果及土壤中优先流的影响[J]. 水利学报, 2015, 46 (8): 943-950.
- [12] 赖后伟,黎京士,庞志华,等. 深圳大工业区初期雨水水质污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38 (3): 11-15.
- [13] 李晨,徐云兰,钟登杰,等. 渗滤作用在雨水资源化中的应用研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32 (5): 126-139.
- [14] 国家环境保护总局科技标准司. 地表水环境质量标准: GB3838-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 2.
- [15] 国家环境保护总局科技标准司. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB18918-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 5.
- [16] HALIM A A, AZIZ H A, JOHARI M A M, et al. Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment[J]. Desalination, 2010, 262 (1/2/3): 31-35.
- [17] 吴鹏,陆爽君,徐乐中,等. 改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制[J]. 环境科学, 2017, 38 (2): 580-588.
- [18] 齐艳丽,郝粼波,周俊. 浅析废玻璃资源化处理新技术——制备环保轻石[J]. 广东化工, 2018, 45 (4): 108-110.
- [19] 魏娜娜,于萍. 新型环保材料玻璃轻石的生产、应用现状和发展建议[J]. 玻璃, 2020, 47 (4): 53-57.
- [20] 潘晶,高蕊,郑翻萍,等. 水力负荷对地下渗滤系统净化效果及气体释放的影响[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2022, 40 (3): 270-276.
- [21] 杨智宽. 硫铁矿烧渣综合利用研究进展[J]. 环境与开发, 1995 (3): 18-22.
- [22] 王美霞,潘爱芳,马润勇,等. 白河硫铁矿弃渣全量资源化利用研究[J]. 化学工程, 2022, 50 (11): 1-5.
- [23] 赵凡,王洪浩,李京玲,等. 运行时长和淹没高度对雨水生物滞留系统氮素去除的影响[J]. 节水灌溉, 2022 (4): 16-20, 26.
- [24] 张鸿涛,于宝国,邓方园,等. 城市景观湿地系统去除初期雨水污染物效果研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50 (15): 78-82.

(责任编辑 于 敏)