

# 基于径流污染控制的生物滞留设施填料优化研究

王金丽, 孙永利, 郑华清, 葛铜岗, 穆莹, 李思雨, 刘嘉恒  
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 为实现对径流污染的有效控制,对生物滞留设施种植土层之下的人工填料层组成优化进行了系统性研究,在静态条件下考察了9组填料对氮磷营养物的吸附性能。结果显示,蛭石和沸石对氨氮的吸附性能较好,对氨氮的吸附量分别为3.7和3.2 mg/g,并且粒径越小,吸附性能越好;蛭石和麦饭石对磷酸盐的去除效果较好,磷酸盐去除量分别为0.13和0.1 mg/g。由此筛选出对污染物净化效果较好的1~3 mm沸石和蛭石、2~3 mm麦饭石作为去除污染物的功能性填料。动态水力循环试验显示,相同体积的蛭石和沸石对氨氮的吸附效果接近,水力停留时间(HRT)为60 min时,对氨氮的去除率均接近100%,此时麦饭石对氨氮的去除率为93%。对磷酸盐吸附效果的优劣排序为蛭石>麦饭石>沸石,当HRT为60 min时,对磷酸盐的去除率分别为78.8%、53%和19.7%。填料掺混体积比为沸石:蛭石:麦饭石:砂=3:7:1:6的组合系统对氨氮、磷酸盐和COD的去除效果最好,且下覆5 cm砂层有利于降低出水颗粒物导致的浊度。在此填料配比条件下,当填料层厚度在30~50 cm之间时,对氮、磷和COD的综合去除效果最好。

**关键词:** 生物滞留设施; 径流污染控制; 填料配比; 填料层厚度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0110-07

## Optimization of Bioretention Facility Filler Based on Runoff Pollution Control

WANG Jin-li, SUN Yong-li, ZHENG Hua-qing, GE Tong-gang, MU Ying, LI Si-yu,  
LIU Jia-heng

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** A systematic study was carried out on the optimization of the composition of artificial filler layers under the soil layer of bioretention facilities in order to achieve effective control of runoff pollution. The adsorption properties of nine groups of fillers to nutrients of nitrogen and phosphorus under static conditions were investigated. Vermiculite and zeolite had good ammonia nitrogen adsorption performance with adsorption capacity of 3.7 mg/g and 3.2 mg/g, respectively, and the smaller the particle size, the better the adsorption performance. Vermiculite and medical stone had good effect on phosphate removal, and the removal amount of phosphate was 0.13 mg/g and 0.1 mg/g, respectively. Thus, zeolite(1-3 mm), vermiculite(1-3 mm) and medical stone(2-3 mm) with good purification effect of pollutants were selected as the functional fillers. The dynamic hydraulic cycle test showed that the same volume of vermiculite and zeolite had similar adsorption effect on ammonia nitrogen. When the hydraulic retention time(HRT) was 60 min, the removal rate of ammonia nitrogen by vermiculite and

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106002); 住房和城乡建设部软科学研究项目/研究开发项目(R22018119); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司科研项目(HJ-2019-29-HJY)

zeolite was close to 100%, and that by medical stone was 93%. The order of phosphate adsorption performance was vermiculite, medical stone and zeolite. When HRT was 60 min, the phosphate removal rates were 78.8%, 53%, and 19.7%, respectively. The combined system with the mixture volume ratio of zeolite : vermiculite : medical stone : sand = 3 : 7 : 1 : 6 had the best removal effect on ammonia nitrogen, phosphate and COD, and underlying 5 cm sand layer was beneficial to reduce the turbidity caused by effluent particles. When the optimal filler volume ratio was adopted and the thickness of the filler layer was between 30 cm and 50 cm, the comprehensive removal effect of nitrogen, phosphorus and COD was the best.

**Key words:** bioretention facility; runoff pollution control; filler proportion; filler layer thickness

随着城市化进程的不断推进,建筑、路面等各种不透水构筑物不断增加,改变了原有下垫面的属性,雨水径流量持续增多,径流污染日趋严重<sup>[1]</sup>。美国环保署(USEPA)通过在全国范围内开展降雨事件地表径流污染负荷调研,已将雨水径流列为导致水体污染的主要来源之一<sup>[2]</sup>。我国污水处理率和排放标准的进一步提升,使城市点源污染得到有效控制,而雨水径流污染所占比重逐渐增加。城市地表径流污染已成为仅次于农业面源污染的第二大污染源,是城市水体的主要污染源<sup>[3]</sup>。

生物滞留系统通过植物、土壤、微生物和填料基质的物理和生物作用,能够有效容纳并净化雨水径流,是实现径流污染控制的有力措施<sup>[4]</sup>。而基质层是生物滞留系统发挥径流污染控制作用的关键要素<sup>[5]</sup>。复杂型生物滞留系统基质层包括种植土层和人工填料层两部分,种植土层提供植物生长所需养分并暂时滞留雨水径流,人工填料层用于承接上部种植土层来水并加以滞留净化<sup>[6]</sup>。生物滞留设施的人工填料层不但是系统构建的基础,同时还是实现雨水径流渗透、沉淀、吸附、过滤、净化等作用的主要依托。研究表明,生物滞留系统可选的人工填料种类繁多,其组成和结构对降雨径流水文特征及污染物的削减效果影响很大<sup>[7]</sup>。目前,基于径流污染物控制的生物滞留设施构造等相关研究还处于发展阶段,对填料种类、配比、厚度等参数的系统性探索还有待加强<sup>[8-9]</sup>。

为此,笔者通过试验模拟雨水径流水质,考察了几种常见的人工填料在不同组合条件下,对氮、磷等污染物的去除效果,进而提出了填料优化组合模式及相关参数,旨在为海绵城市生物滞留设施的建设提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工填料

对几种常见填料的吸附效果及来源进行对比分析后,选择河砂(0.3~0.5 mm)、蛭石(1~3、3~5 mm)、麦饭石(2~3、3~4 mm)、沸石(1~3、3~5 mm)、陶粒(5~10 mm)及火山石(3~5 mm)6种共9组填料进行试验研究。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 填料吸附静态试验

吸附动力学试验:称取洗净晾干的河砂、蛭石、麦饭石、沸石、火山石及陶粒各10 g置于锥形瓶中,分别加入300 mL氨氮浓度约为120 mg/L、磷酸盐浓度约为25 mg/L的溶液,在25℃下于恒温摇床中振荡(150 r/min),在振荡时间为0、30、60、120、180、240、300、360、420、480、540 min处取样测定氨氮和磷酸盐浓度,得出填料达到吸附饱和的时间。

等温吸附试验:选择对氨氮吸附效果较好的填料进行等温吸附试验,在不同初始氨氮浓度条件下,于吸附饱和后取样测定氨氮浓度,得到填料的等温吸附曲线,分析填料对氨氮的吸附特性。

#### 1.2.2 填料吸附动态试验

选择对氨氮和磷酸盐去除效果较好的填料进行洗净处理,装填至内径为19 cm、柱高为40 cm、底部设有出水口的有机玻璃柱中,该反应器已预先装填卵石层(厚度为5 cm)。卵石排水层与填料层之间以透水土布相隔,单一填料装填,填料层装填高度为25 cm。模拟雨水径流水质,配制7 L循环溶液,氨氮浓度为10 mg/L, TN浓度为15 mg/L,磷酸盐浓度为0.8 mg/L, COD浓度为80 mg/L。用蠕动泵抽取溶液,并通过填料上方的环形布水管为反应器供水,进水流量为300 mL/min,出水口连接另一蠕动

泵可将出水排回溶液箱。调节出水蠕动泵的转速,使进水和出水流量一致,填料循环处理径流,循环时间为120 min,间隔一定时间取样测定出水水质。

水力停留时间(HRT) = 循环时间 × 填料间隙水体积/循环水体积,填料配比及高度试验的HRT也依照此公式计算,或通过控制相应参数得到规律性的HRT。

### 1.2.3 填料配比与装填高度试验

根据填料吸附静态和动态试验的结果,选择污染物净化效果较好的填料,在沸石:蛭石:麦饭石的掺混体积比分别为2:2:1、2:4:1、1:4:2、4:2:1、2:1:4、3:3:1、3:7:1的条件下,按照与动态试验相同的条件进行操作,但调整取样时间,使每组配比下取样点的HRT规律相同,分析不同配比条件下污染物的去除效果,得到对污染物综合去除效果最优的填料配比,通过混掺砂来调节孔隙率,增设砂层以进一步截留污染物,进而提出填料优化配比的方案。

确定填料最优配比方案后,在20~75 cm之间改变填料层高度,同时调整相应的循环液体积,以保证相同循环时间条件下每组水样的HRT相近,分析径流污染的削减效果,得出最优填充高度。

### 1.2.4 分析项目及方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测定;TP采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定;COD采用重铬酸钾法测定;浊度采用便携式浊度计测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静态吸附效果分析

#### 2.1.1 对氨氮的吸附去除

河砂、沸石、麦饭石、蛭石、陶粒及火山石9组填料对氨氮的吸附动力学试验结果如图1所示。可知,蛭石和沸石对氨氮的吸附效果较好,麦饭石也有一定的氨氮吸附性能,河砂、火山石和陶粒则无明显吸附效果。另外,蛭石和沸石的粒径越小,吸附效果越好,1~3 mm的蛭石和沸石对氨氮的平衡吸附量可分别达到3.05和2.47 mg/g,而3~5 mm蛭石和沸石对氨氮的平衡吸附量分别为2.91和2.22 mg/g。分析原因,粒径越小,用于吸附氨氮的比表面积越大,且沸石对氨氮的平衡吸附量大于相同条件下许育新等人的研究结果(1.59 mg/g)<sup>[10]</sup>。而2~3

mm和3~4 mm的麦饭石对氨氮的吸附效果相近,平衡吸附量约为0.85 mg/g。从氨氮吸附动力学曲线可以看出,对氨氮吸附效果显著的蛭石和沸石两种填料,在前60 min吸附量快速上升,随后缓慢上升并逐渐趋于稳定。沸石在60 min内对氨氮的去除率约为28%,同等条件下蛭石对氨氮的去除率可达到61%;吸附至9 h时,1~3 mm的沸石和蛭石对氨氮的去除率分别为71%和88%。

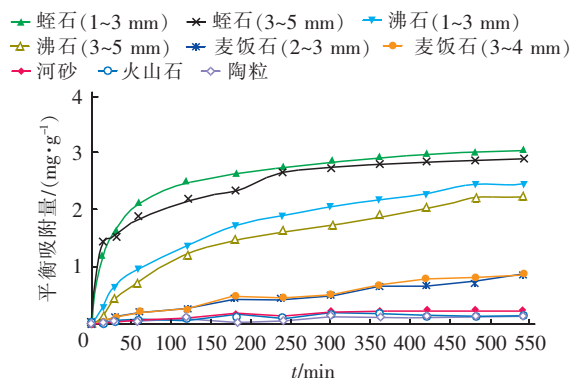


图1 不同填料对氨氮的吸附动力学曲线

Fig. 1 Adsorption kinetic curves of ammonia nitrogen by different fillers

基于上述不同填料对氨氮的吸附动力学曲线,进一步考察了1~3 mm的蛭石、1~3 mm的沸石和2~3 mm的麦饭石3种填料在不同初始氨氮浓度条件下,经恒温振荡处理后对氨氮的等温吸附情况,结果如图2所示。

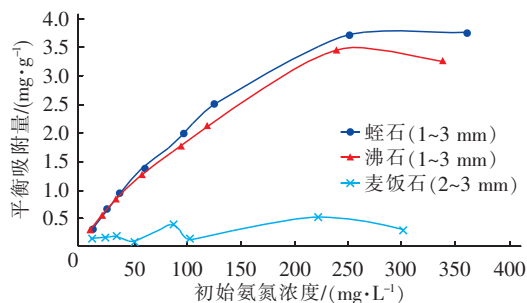


图2 蛭石、沸石和麦饭石对氨氮的吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherms of ammonia nitrogen by vermiculite, zeolite and medical stone

由图2可知,随着初始氨氮浓度增加,蛭石和沸石对氨氮的平衡吸附量逐渐增加,当氨氮浓度达到250 mg/L时,蛭石和沸石对氨氮的平衡吸附量均达到最大值,分别为3.7和3.2 mg/g。此后,即使继续增加氨氮浓度,蛭石和沸石的平衡吸附量也没有明显变化,这与唐超群等人的研究结果相似<sup>[11]</sup>。随

着初始氨氮浓度的变化,麦饭石对氨氮的平衡吸附量则无明显规律,基本在 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/g}$ 之间。

### 2.1.2 对磷酸盐的吸附去除

不同填料对磷酸盐的静态吸附曲线如图3所示。可以看出,蛭石对磷酸盐的去除效果最好,其次是麦饭石,且填料粒径越小,对磷酸盐的去除率越高。在初始磷酸盐浓度为 $25 \text{ mg/L}$ 的条件下,蛭石和麦饭石对磷酸盐的去除率在 $180 \text{ min}$ 内不断增加, $180 \text{ min}$ 以后逐渐趋于稳定,反应 $360 \text{ min}$ 后,对磷酸盐的去除率在 $10\% \sim 15\%$ 之间。 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 的蛭石对磷酸盐的吸附效果最好,去除率约为 $15\%$ ,平衡吸附量约为 $0.13 \text{ mg/g}$ 。 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 的麦饭石对磷酸盐的去除率为 $13\%$ ,平衡吸附量为 $0.1 \text{ mg/g}$ 。沸石、火山石、陶粒和河砂对磷酸盐的去除效果不明显,去除率曲线呈现一定的波动性,并有负值情况出现,这可能与填料本身存在磷释放有关,磷释放与吸附的动态变化导致磷酸盐去除率有所波动。

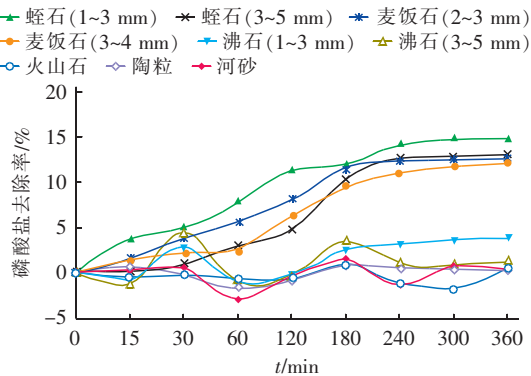


图3 不同填料对磷酸盐的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of phosphates by different fillers

### 2.2 动态吸附效果分析

根据填料静态吸附试验的结果,选定 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 的蛭石、 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 的沸石和 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 的麦饭石作为径流中氨氮和磷酸盐去除的功能性填料,在填料装填体积均为 $7 \text{ L}$ 条件下,3种填料的孔隙率分别为 $59.6\%$ 、 $46.2\%$ 和 $44\%$ 。动态条件下,3种填料对氨氮的去除率均较高,沸石和蛭石对氨氮的去除率较接近,当HRT为 $20 \text{ min}$ 时,氨氮去除率约为 $90\%$ , $30 \text{ min}$ 后去除率趋于稳定, $60 \text{ min}$ 后去除率均接近 $100\%$ 。当HRT为 $20 \text{ min}$ 时,麦饭石对氨氮的去除率约为 $80\%$ ,吸附 $60 \text{ min}$ 后氨氮去除率为 $93\%$ 。

3种填料对磷酸盐的去除效果差别较大(见图4),去除效果的优劣排序为蛭石>麦饭石>沸石。当HRT为 $20 \text{ min}$ 时,蛭石对磷酸盐的去除率接近

$70\%$ ,此后增长缓慢。当HRT为 $60 \text{ min}$ 时,蛭石、麦饭石和沸石对磷酸盐的去除率分别为 $78.8\%$ 、 $53\%$ 和 $19.7\%$ 。

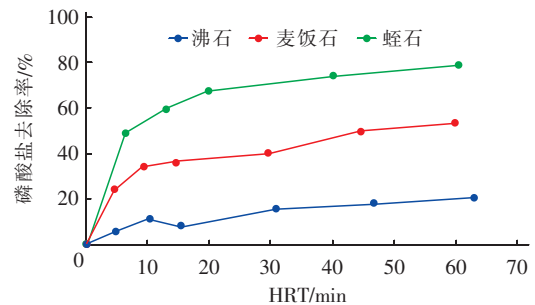


图4 动态试验下不同填料对磷酸盐的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of phosphate by different fillers under dynamic experiment

3种填料对COD的去除无明显的规律性,麦饭石和沸石对COD基本无去除效果,蛭石对COD的去除率也忽高忽低,最大去除率在 $20\%$ 左右。

### 2.3 填料优化配比分析

由动态试验结果可知,相同体积的蛭石、沸石和麦饭石相比,沸石对氨氮的去除效果较好,而麦饭石对磷酸盐有一定的去除效果,蛭石对氨氮和磷酸盐具有综合去除效果,并且蛭石的持水性能较好<sup>[12]</sup>,但考虑到蛭石的孔隙率大,对径流污染物的截留去除不利,而与其他功能填料掺混,可降低填料层的孔隙率,发挥污染物协同净化作用。因此,设定不同体积比的沸石、蛭石和麦饭石进行吸附试验。结果表明,3种填料在不同配比下对氨氮的综合吸附性能差异不大,当HRT为 $30 \text{ min}$ 时,除沸石:蛭石:麦饭石的体积比为 $2:1:4$ 时对氨氮的去除率有所波动以外,其他配比条件下对氨氮的去除率均在 $80\%$ 以上,并且当沸石:蛭石:麦饭石的体积比为 $4:2:1$ 、 $3:3:1$ 和 $3:7:1$ 时,氨氮的去除效果较好,当HRT为 $60 \text{ min}$ 时,对氨氮的去除率均在 $98\%$ 以上,这与沸石和蛭石的含量较高有关。

在不同配比条件下,对磷酸盐的去除效果差异较大(见图5),当体积比为 $3:7:1$ 时,对磷酸盐的去除效果最好,最大去除率在 $70.2\%$ 。当体积比为 $4:2:1$ 时,对磷酸盐的去除效果最差,最大去除率仅为 $32.1\%$ 。其余配比条件下,对磷酸盐的去除率在 $40\% \sim 55\%$ 之间。在反应开始的 $15 \text{ min}$ 内,不同配比条件下对磷酸盐的去除率均增长较快,随后去除率增幅逐渐减缓。

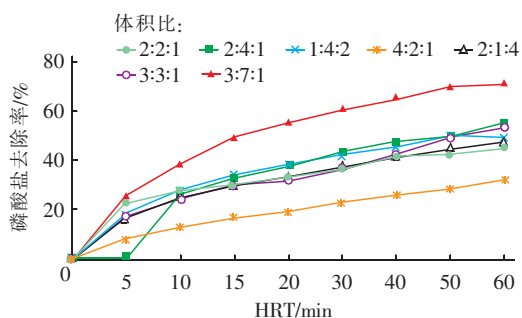
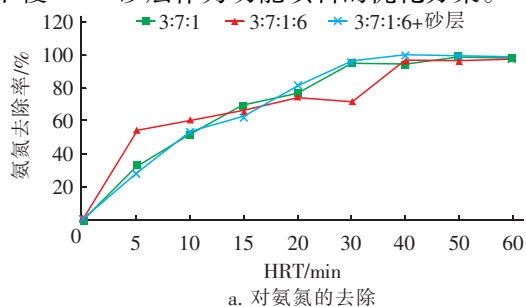


图5 不同填料配比条件下对磷酸盐的去除效果

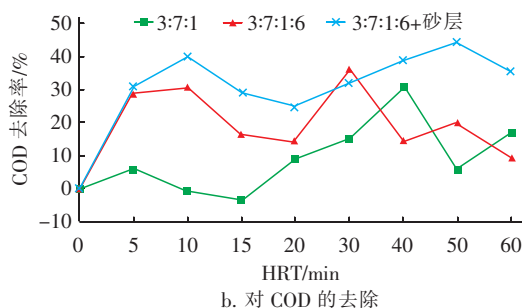
Fig.5 Removal efficiency of phosphate under different filler proportion

不同填料配比条件下,对 COD 的去除效果波动较大,无明显规律,但当体积比为 3 : 7 : 1 时,对 COD 的去除率相对稳定在 20% ~ 30%,比其他掺混比例条件下对 COD 的去除效果好。

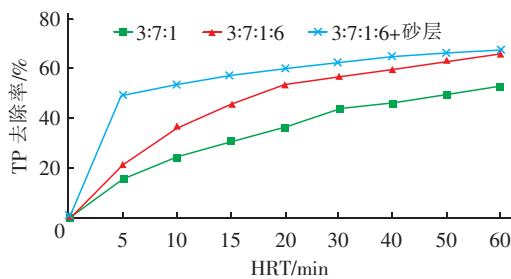
由于沸石、蛭石、麦饭石按照 3 : 7 : 1 的体积比掺混后孔隙率较大,约为 49.2%,径流进入后与填料接触时间短,下渗较快,且填料本身的细小颗粒随出水排出会导致出水浊度增加。为保证生物滞留设施对污染物的净化效能,向功能填料层中掺混河砂,并在填料下层布设砂层截留颗粒物进行对比分析,不同条件下对污染物的去除效果如图 6 所示。可以看出,当沸石 : 蛭石 : 麦饭石 : 河砂的体积比为 3 : 7 : 1 : 6 时,填料层的孔隙率为 37.8%,除氨氮去除率接近以外,对 COD 和 TP 的去除效果均好于不掺混河砂的方式。而掺混河砂且下覆 5 cm 砂层的方式对污染物的去除效果又优于只掺混河砂的方式,且出水浊度显著降低。显然,掺混河砂能够降低填料层的孔隙率、增加径流与填料的接触时间,有利于污染物的去除,增加砂层可以截留颗粒物,以进一步提升填料层的径流净化效能。因此,就营养盐、有机物及颗粒物的综合去除效果而言,选择沸石 : 蛭石 : 麦饭石 : 河砂 = 3 : 7 : 1 : 6 的体积比掺混,同时下覆 5 cm 砂层作为功能填料的优化方案。



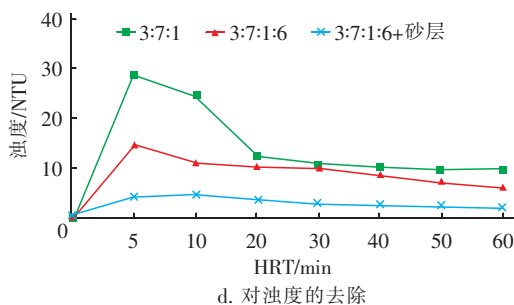
a. 对氨氮的去除



b. 对 COD 的去除



c. 对 TP 的去除



d. 对浊度的去除

图6 掺混河砂及下覆砂层对污染物的去除效果对比

Fig.6 Comparison of pollutant removal between mixed river sand and underlying sand layer

## 2.4 填料层厚度分析

采用优化后的填料配比,分析不同填料层厚度对污染物去除效果的影响,结果见图 7。可知,填料对氨氮的去除率高于对 TN 的去除率,同时不同厚度填料层对氨氮的去除率在 30 min 后趋于稳定且相差不大,均在 91% ~ 99% 之间。30 和 50 cm 厚的填料层对氨氮的吸附速率较快,吸附 15 min 后,对氨氮的去除率分别达到 96.8% 和 98.6%,40 和 60 cm 厚的填料层次之,20 和 75 cm 厚的填料层最慢。20 cm 厚的填料层对 TN 的稳定去除率最低,约为 52%,其他厚度条件下对 TN 的去除率在 82% ~ 83.5% 之间,60 和 75 cm 厚的填料层对 TN 的去除率增长较慢。30、40、50 cm 厚的填料层对 TP 的稳定去除率接近,在 80% ~ 82% 之间,20、60、75 cm 厚的填料层对 TP 的去除率在 64% ~ 74% 之间。30 ~ 50 cm 厚的填料层对 COD 也表现出较好的去除效

果,去除率在23%~38%之间。

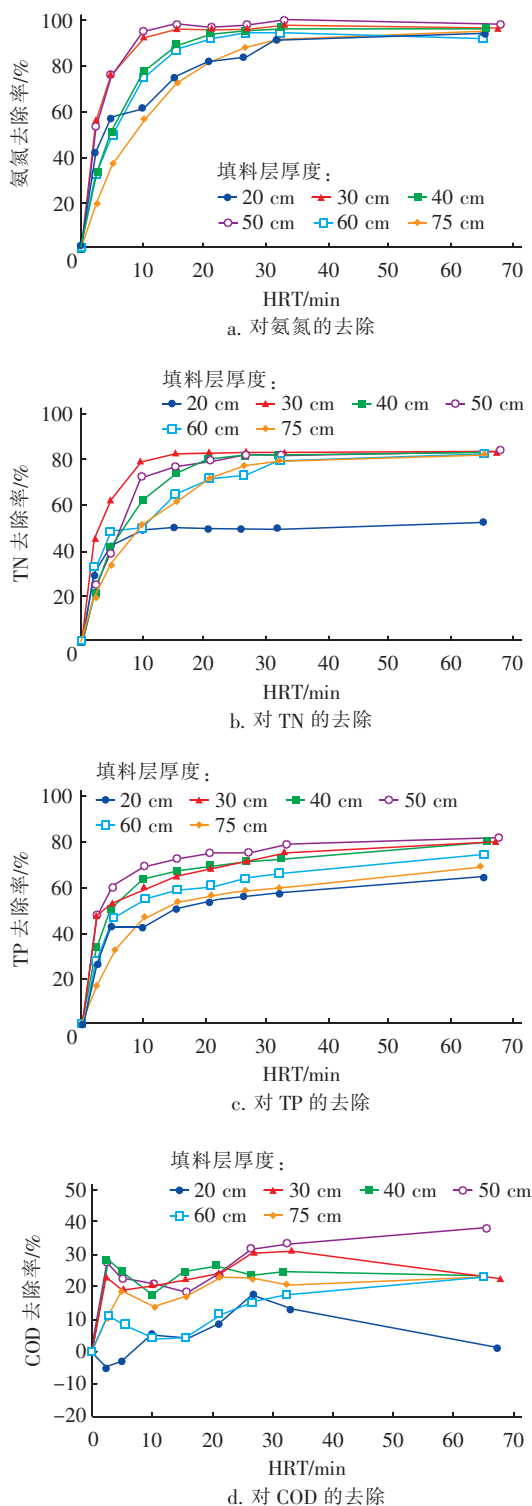


图7 不同填料厚度条件下对污染物的去除效果对比

Fig.7 Comparison of pollutant removal under different filler layer thickness

总体而言,30~50 cm厚的填料层对各项污染物的去除效果优于20、60和75 cm厚的填料层,这

可能是因为较小厚度的填料层对污染物的吸附路径短,而较大厚度的填料层又会导致内部DO低,影响氨氮的吸附和有机物的氧化去除,也会由于填料本身的磷溶出大,造成对磷的去除率降低,因此最优的功能填料层厚度为30~50 cm。

### 3 结论

① 静态吸附试验结果表明,单位质量蛭石和沸石对氨氮的去除效果较好,粒径越小,去除效果越好,且吸附性能随初始氨氮浓度的增加而增大,在初始氨氮浓度为250 mg/L的条件下,1~3 mm的蛭石和沸石对氨氮的最大平衡吸附量分别可达3.7和3.2 mg/g。蛭石和麦饭石对磷酸盐的去除效果较好,当初始磷酸盐浓度为25 mg/L时,对磷酸盐的平衡吸附量分别为0.13和0.1 mg/g,相应的去除率分别为15%和13%。陶粒、火山石和河砂对氨氮和磷酸盐无明显的去除效果,且有磷溶出的现象。由此选定1~3 mm的沸石和蛭石,以及2~3 mm的麦饭石作为功能性填料。

② 分别以蛭石、沸石和麦饭石为基质进行径流动态循环处理模拟试验,结果显示,相同体积的蛭石和沸石对氨氮的吸附效果比较接近,在水力停留时间为60 min的条件下,氨氮去除率均接近100%,麦饭石对氨氮的去除率为93%。对磷酸盐吸附效果的优劣排序为蛭石>麦饭石>沸石,当HRT为60 min时,对磷酸盐的去除率分别为78.8%、53%和19.7%。

③ 功能填料沸石:蛭石:麦饭石=3:7:1(体积比)的工况对污染物综合去除效果最好,而在功能填料中掺混河砂可以减小孔隙率,从而延长径流与填料的接触时间,当沸石:蛭石:麦饭石:河砂的体积比为3:7:1:6时,对氨氮、TP和COD的去除效果均有改善,并且下覆5 cm砂层有利于降低出水颗粒物导致的浊度。

④ 填料层厚度对污染物的去除有一定影响,最优的功能填料层厚度为30~50 cm。

### 参考文献:

- [1] 毛月鹏. 生物滞留池的水文效应与水质变化研究[D]. 天津:天津理工大学,2019.  
Mao Yuepeng. Study on Hydrological Effect and Water Quality Change of Bioretention [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019 (in Chinese).

- [2] 姜登岭,张丹荣,何连生,等. 生物滞留设施净化城市面源污染研究进展[J]. 环境工程技术学报,2019,9(1):96-102.  
Jiang Dengling, Zhang Danrong, He Liansheng, *et al.* Advance of research on urban non-point source pollution control by bioretention facilities [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 96-102(in Chinese).
- [3] 栾博,殷瑞雪,徐鹏,等. 基于绿色基础设施的城市非点源污染控制研究[J]. 中国环境科学,2019,39(4):1705-1714.  
Luan Bo, Yin Ruixue, Xu Peng, *et al.* Study for green infrastructure approach on urban non-point source pollution control [J]. China Environmental Science, 2019, 39(4): 1705-1714(in Chinese).
- [4] 仇付国,代一帆,付昆明,等. 生物滞留系统设置内部淹没区对径流污染物去除的影响[J]. 环境工程,2017,35(7):7-12.  
Qiu Fuguo, Dai Yifan, Fu Kunming, *et al.* Impact of a submerged zone on pollutants removal in WTR-modified bioretention [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(7): 7-12(in Chinese).
- [5] 刘增超,李家科,蒋春博,等. 4种生物滞留填料对径流污染净化效果对比[J]. 水资源保护,2018,34(4):71-79.  
Liu Zengchao, Li Jiake, Jiang Chunbo, *et al.* Comparison of purification effects of 4 kinds of bioretention fillers on runoff pollutants [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 71-79(in Chinese).
- [6] 殷利华,赵寒雪. 雨水花园构造及填料去污性能研究综述[J]. 中国园林,2017,33(5):106-111.  
Yin Lihua, Zhao Hanxue. Summary of the structure and substrates purification performance in rain garden [J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(5): 106-111(in Chinese).
- [7] 梁美琪,刘磊. 生物滞留设施基础研究和应用借鉴[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2017,42(7):99-104.  
Liang Meiqi, Liu Lei. Fundamental research and relevant application on bioretention facilities [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2017, 42(7): 99-104(in Chinese).
- [8] 万映伶,王美仙. 国内外雨水花园研究综述[J]. 建筑与文化,2015(7):127-129.  
Wan Yingling, Wang Meixian. Research progress of rain garden in domestic and foreign [J]. Architecture & Culture, 2015(7): 127-129(in Chinese).
- [9] 许浩浩,吕伟娅. 雨水花园净化雨水径流研究进展[J]. 环境科技,2018,31(3):74-78.  
Xu Haohao, Lü Weiya. Research progress on purification of runoff pollution by rainwater garden [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 31(3): 74-78(in Chinese).
- [10] 许育新,喻曼,陈喜靖,等. 天然沸石对水中氨氮吸附特性的研究[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(3):250-256.  
Xu Yuxin, Yu Man, Chen Xijing, *et al.* Characteristics of ammonia nitrogen adsorption on natural zeolite in water [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(3): 250-256(in Chinese).
- [11] 唐超群,何珊,张永祥,等. 几种氨氮吸附剂的对比实验研究[J]. 工业安全与环保,2014,40(12):15-17.  
Tang Chaoqun, He Shan, Zhang Yongxiang, *et al.* Comparative study of several ammonia adsorbents [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(12): 15-17(in Chinese).
- [12] 高晓丽. 道路雨水生物滞留系统内填料的研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.  
Gao Xiaoli. Study on Filter Media in Road Runoff Bioretention Systems [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014(in Chinese).



作者简介:王金丽(1983-),女,河北廊坊人,硕士,工程师,主要研究方向为水环境治理与水污染控制技术。

E-mail: wangjinli99@163.com

收稿日期:2019-09-09