

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 17. 020

活性炭改良生物滞留系统基质强化氮的去除

仇付国, 夏鑫, 刘玉君, 付昆明

(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)

摘要: 为解决传统雨水生物滞留系统出水氮淋失的难题,采用活性炭对系统填料进行改良,强化生物滞留系统对氮的去除效果。首先分别采用 $ZnCl_2$ 溶液和给水厂污泥盐酸浸出液对颗粒活性炭进行改性,以提高活性炭对 NO_3^- -N的吸附效果;然后将质量比为20%的改性活性炭和12%的给水厂污泥掺入滞留系统砂土基质中,考察基质改良后系统对氮、磷的去除效果。通过滞留柱模拟试验评估改良系统在无淹没饱和区及较长前期干燥时间下对氮、磷的去除效果,结果表明,改良生物滞留系统在无淹没饱和区时对 NO_3^- -N、TN和TP的去除率分别可达到90.98%、72.65%和95.85%;在较长前期干燥时间下,改良生物滞留系统能有效减少氮淋失,对TN的去除率可达到44.28%,而对TP的去除率均在97%以上。

关键词: 生物滞留系统; 改性活性炭; 强化除氮; 内部淹没饱和区; 前期干燥时间

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0124-07

Activated Carbon for Modification of Bioretention System Substrate to Enhance Nitrogen Removal

QIU Fu-guo, XIA Xin, LIU Yu-jun, FU Kun-ming

(Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper used activated carbon to modify the packing media of bioretention system and enhance its nitrogen removal performance to solve the problem of nitrogen leaching from the traditional rainwater bioretention system. Firstly, $ZnCl_2$ solution and hydrochloric acid leaching solution of sludge from water treatment plant were employed to modify granular activated carbon to improve its nitrate nitrogen adsorption capacity. Then, the modified activated carbon (20% by weight) and sludge from water treatment plant (12% by weight) were mixed into the sand media of the bioretention system to investigate the removal performance of nitrogen and phosphorus. The performance of the modified system for nitrogen and phosphorus removal were evaluated by the retention column experiment under the condition of no internal submerged saturation zone and long antecedent drying time. When there was no internal submerged saturation zone in the modified system, the removal rates of NO_3^- -N, TN and TP reached 90.98%, 72.65% and 95.85%, respectively. Under the long antecedent drying time, the modified bioretention system effectively reduced nitrogen leaching, the removal rate of TN reached 44.28%, and the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278024)

通信作者: 仇付国 E-mail: qiufuguo@bucea.edu.cn

removal rate of TP was above 97%.

Key words: bioretention system; modified activated carbon; enhanced nitrogen removal; internal submerged saturation zone; antecedent drying time

传统生物滞留系统对 NH_4^+-N 的去除率可达到60%~79%^[1],但对 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的去除率较低,甚至还会出现出水浓度高于进水浓度的淋失现象^[2]。除此之外,前期干燥时间(ADT)对于生物滞留池的处理性能具有较大的影响^[3]。为了提高生物滞留系统的处理性能,通常通过改良填料基质和设置内部淹没饱和区来强化对氮、磷的去除。饱和区的设置能够为氮的反硝化去除创造缺氧条件,但同时也会延长雨水径流在系统内的水力停留时间,减少单位时间内对径流的处理量,从而增加了溢流风险。因此,在不增加径流在系统内停留时间的前提下实现对氮、磷的良好去除值得进一步研究。

提高基质对 NO_3^--N 的吸附能力并将基质截留的 NO_3^--N 及时反硝化去除是控制氮淋失的关键,因此在生物滞留系统基质中加入对 NO_3^--N 具有良好吸附能力的材料截留降雨径流中的 NO_3^--N ,并创造适宜的反硝化条件在降雨结束后及时通过反硝化作用去除,为下次降雨释放吸附点位是一种控制氮淋失的可行方法。活性炭具有巨大的比表面积和发达的孔隙结构,且表面的官能团种类丰富,对水中的阴离子有一定的吸附效果,通过对活性炭进行负载金属离子改性可提高其对特定阴离子的吸附能力。同时活性炭也是一种高效的土壤改良剂,能够改善土壤结构,提高土壤基质的透水能力^[4]。给水厂污泥(WTR)中含有大量的铁、铝等金属元素,能够作为一种高效改良剂用于生物滞留基质,并有效去除径流中的磷;同时污泥中的金属离子提取后可以用于改性活性炭,提高活性炭对阴离子的去除效果。鉴于此,笔者采用 ZnCl_2 和WTR盐酸浸出液对活性炭进行改性,将质量比为20%的改性活性炭掺入滞留系统下部砂土基质中,提高基质对 NO_3^--N 的吸附能力,使径流中的 NO_3^--N 固定在下层基质中,在降雨过程中不设置淹没饱和区以提高透水能力,降雨结束时提升出水口高度,使下部基质处于淹没饱和状态,将其截留的 NO_3^--N 进行反硝化去除,为下一次进水更新 NO_3^--N 吸附点位,从而提升系统整体对总氮的去除效果。本研究利用滞留柱

试验考察了基质改良后系统对氮和磷的去除效能,以评估系统在无淹没饱和区和较长ADT下对氮、磷的控制效果。

1 材料和方法

1.1 活性炭改性与表征

试验采用的原始活性炭(GAC)为柱状煤质活性炭,直径约为1.5 mm,长度为2.0~5.0 mm。给水厂污泥取自北京市某水厂,经自然晾晒后风干研磨筛分,得到粒径为0.5~2.0 mm的颗粒污泥。

ZnCl_2 改性活性炭的制备:按照GAC质量和 ZnCl_2 溶液体积比为1 g:10 mL,将GAC样品浸入2.0 g/L的 ZnCl_2 溶液中,在25℃、120 r/min下振荡12 h,然后用去离子水反复洗涤3~4次,在105℃下干燥4 h得到 ZnCl_2 改性活性炭,记为ZAC。

WTR改性活性炭的制备:首先利用1+9盐酸按照体积和WTR质量比为4 mL:1 g浸提污泥中的铁、铝等金属离子,浸泡时间为3 d;然后利用污泥浸提液按照体积和活性炭质量比为3 mL:1 g对活性炭进行改性,在25℃、120 r/min下振荡12 h,用去离子水洗涤3~4次,在105℃下干燥4 h得到WTR改性活性炭,记为WAC。

利用X射线荧光光谱(XRF)分析仪对改性前后活性炭的化学成分及相对含量进行分析。活性炭改性前后的比表面积通过比表面积及孔径分布分析仪测量,并采用BET法进行计算分析。

通过静态吸附试验探究ZAC和WAC对 NO_3^--N 的吸附性能。在250 mL锥形瓶中按1 g:200 mL的比例分别加入不同的活性炭和初始浓度为10 mg/L的硝酸盐溶液。在25℃、120 r/min下振荡24 h,测定溶液中的 NO_3^--N 浓度,并计算其吸附量。

1.2 试验装置

平行构建3个有机玻璃生物滞留系统柱,直径为200 mm,如图1所示,滞留柱的基质层分为两层,每层高度为200 mm,中间由50 mm的砂砾层隔开。滞留柱顶部留有一定高度的蓄水层用以控制水力停留时间。滞留柱底部设有150 mm的砂砾排水层,底部出水口处沿竖直方向设置一根抬升管用以控

制出水口位置,两出水口间隔350 mm。为了突出滞留基质对污染物的去除效果,各滞留柱内均未种植植物。WTR 砂土滞留柱(WTR柱)的基质组成为85%砂土+15% WTR,空隙率为0.176;ZAC改良滞留柱(ZAC柱)的基质组成:上层为85%砂土+15% WTR、下层为68%砂土+12% WTR+20% ZAC,空隙率为0.215;WAC改良滞留柱(WAC柱)的基质组成:上层为85%砂土+15% WTR、下层为68%砂土+12% WTR+20% WAC,空隙率为0.215。

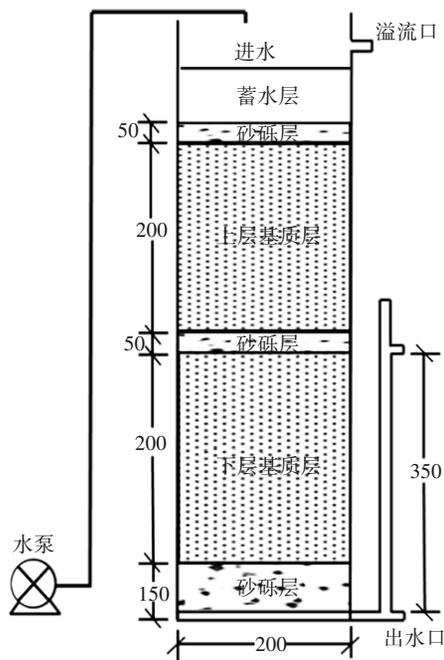


图1 生物滞留装置示意

Fig.1 Schematic diagram of bioretention column

1.3 试验方法

1.3.1 进水水质和运行控制

生物滞留柱采用人工配水来模拟降雨径流,自来水储存在容积为500 L的水箱内,通过搅拌的方式将投加的药剂充分混合。合成降雨径流根据北京市典型道路雨水径流水质进行配制,其中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP浓度分别为120~180、4.5~5.5、4.0~8.5、9.0~14.0、2.0~2.5 mg/L,由泵输送至各滞留柱内。试验开始前,各滞留柱用自来水以20 L/d持续进水两周,以冲洗基质中的本底氮、磷和其他化学物质,并预培养微生物。试验装置运行阶段分别控制进出水的pH、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)在6.98~7.29、8.28~8.81 mg/L、280.4~332.4 mV范围内。

1.3.2 径流模拟试验

按北京市年径流总量控制率为85%时对应的设计降雨量为33.6 mm,以及生物滞留池面积为汇水面积的5%计算,综合径流系数取0.95。计算得出每次降雨事件的降雨量为20 L,而为了在降雨结束后形成淹没饱和区,需预留1 L雨水,故最终进水量为21 L。通过蓄水层控制水力停留时间为1 h。试验期间,在底部出水口处按总出流体积为0、1、3、5、7、10、15、20 L时分别采集50 mL水样,经0.45 μm 膜过滤后检测其 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP浓度。最后一次采样后关闭出水口,利用剩余水量在滞留柱底部基质层形成20 cm的淹没饱和区。在下次进水前放出存水,并测定其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,以通过反硝化作用去除积累的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,为下次氮的吸附空出吸附点位。试验一共进行6场不同的降雨事件模拟,两场降雨事件间隔24 h。

1.3.3 长期干燥试验

上次进水结束后,放出滞留柱内的存水,在经过30 d的长期干燥后再恢复进水。降雨径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP、COD浓度分别为5.1、6.2、12.1、2.4、143 mg/L。在底部出水口按总出流体积为0、1、3、5、7、10、15、20 L时依次采集50 mL水样,进行水质分析。

1.4 分析方法

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD等水质指标分别采用紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法、重铬酸钾消解法测定。

2 结果与讨论

2.1 改性活性炭的理化性质

XRF分析结果表明,不同活性炭的主要成分包括 SiO_2 、CaO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、ZnO、MgO、Cl元素等,其中ZAC中ZnO和Cl的含量相比GAC分别从0.705%和0.018%升至1.758%和0.793%,表明 ZnCl_2 在浸渍过程中成功负载到活性炭表面。与GAC相比,WAC中 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的含量分别从1.02%和1.01%升至1.47%和1.98%,并且Ca、Mg等金属元素的含量也有显著提升,这表明通过WTR浸出液改性活性炭能够在其表面负载更多的金属离子。

BET分析结果显示,GAC、ZAC、WAC的比表面积分别为899.904、844.816、854.347 m^2/g 。ZAC和

WAC的比表面积较GAC均有所下降,这可能是改性活性炭的部分孔容积和表面积被金属离子占据所致。WAC的比表面积略高于ZAC,这可能是由于盐酸与碳表面材料之间反应产生气体,重新打开了部分封闭孔隙^[5]。

在 NO_3^- -N的静态吸附试验中,GAC对 NO_3^- -N的最终吸附容量为0.616 mg/g,去除率仅为30.80%,而ZAC和WAC对 NO_3^- -N的吸附容量为1.468和1.521 mg/g,去除率分别为73.39%和76.20%,是GAC的2.38和2.47倍。与GAC相比,ZAC和WAC对 NO_3^- -N的吸附性能显著提升。

2.2 改良系统对氮和磷的去除效果

2.2.1 对 NH_4^+ -N的去除效果

各滞留柱对 NH_4^+ -N的去除情况如图2所示。

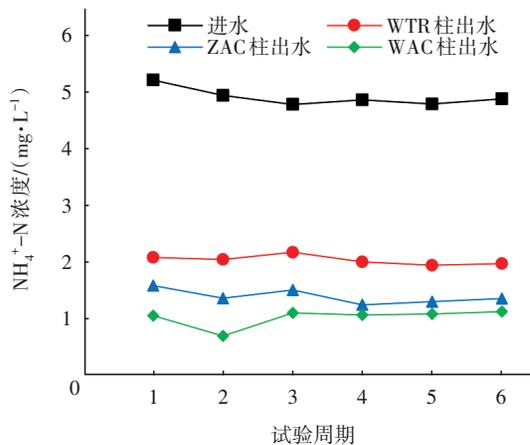


图2 不同生物滞留柱对氨氮的去除效果

Fig.2 Ammonia nitrogen removal by different bioretention columns

ZAC、WAC柱对 NH_4^+ -N的去除效果均优于WTR柱,平均去除率分别为71.65%和79.13%,表明添加改性活性炭能够有效提升滞留柱对 NH_4^+ -N的去除效果。生物滞留系统中的 NH_4^+ -N主要通过基质吸附、硝化和生物同化等过程去除。带负电的土壤基质能够吸附雨水中的部分 NH_4^+ -N,而活性炭较大的比表面积和发达的孔隙结构能够进一步提高其吸附容量。此外,改性后的活性炭由于金属离子的负载使其表面带有微弱的正电,这有利于微生物的附着,从而提高系统中微生物的数量、丰度和活性,进而提高其硝化潜力^[6]。WAC柱的 NH_4^+ -N去除效果优于ZAC柱,这可能归因于WAC负载了更多的金属离子,使系统内的微生物更多、活性更高,从而提高了对 NH_4^+ -N的硝化能力。此外,WAC

柱中游离的铁元素作为细胞内氧化还原的载体及脱羧酶辅助因子也能够促进硝化反应的进行^[7]。

2.2.2 对 NO_3^- -N的去除效果

各滞留柱对 NO_3^- -N的去除情况如图3所示。ZAC、WAC柱对 NO_3^- -N的去除效果均显著优于WTR柱,平均去除率分别为90.98%和81.24%。Xiong等^[8]利用生物炭改良基质并结合饱和区的设置来提高滞留系统对 NO_3^- -N的去除效果,去除率能够达到90%;Lopez-Ponnada等^[9]通过长期现场试验发现,内部储水区(300 mm)能够改善传统生物滞留系统对 NO_3^- -N的去除效果,去除率可达到90%以上。相比其他研究,本研究通过在下层基质中添加改性活性炭能够在不设淹没区的条件下达到相同的 NO_3^- -N去除效果。ZAC和WAC优异的 NO_3^- -N吸附性能和较大的吸附容量使得滞留介质能够有效吸附雨水中的 NO_3^- -N。此外,活性炭良好的保水性能适当增加土壤基质的含水量并延长氧气扩散路径^[10],从而减少底部土壤基质中的含氧量,为 NO_3^- -N的反硝化创造有利条件。ZAC柱对 NO_3^- -N的去除性能优于WAC柱,可能是因为WAC中游离铁离子对硝化过程的促进作用,增加了 NO_3^- -N的来源;另一方面,ZAC改性过程中形成的氧化锌覆盖孔表面会导致其微孔率增加^[11],从而使 NO_3^- -N能够更好地进行内部反硝化,提高去除率。

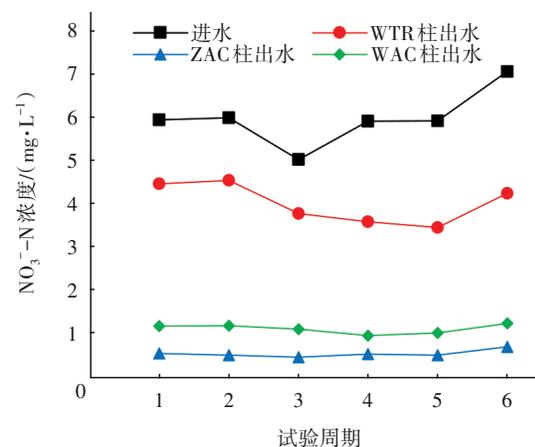


图3 不同生物滞留柱对硝态氮的去除效果

Fig.3 Nitrate nitrogen removal by different bioretention columns

2.2.3 对TN的去除效果

各滞留柱对TN的去除情况见图4。ZAC、WAC柱对TN的去除效果显著优于WTR柱,平均去除率分别为72.65%和71.75%,这一结果和Qiu等^[12]通

过添加 WTR 并结合内部淹没区提高生物滞留系统对 TN 的去除率(75%)相当,表明改性活性炭的添加能有效提高生物滞留系统对 TN 的去除性能,使其在无内部淹没区时仍能保持较好的脱氮效果。

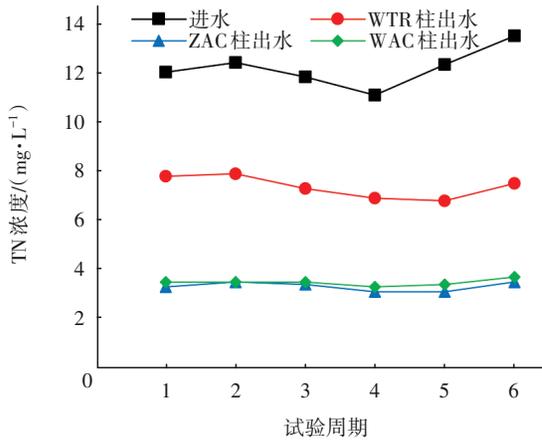


图 4 不同生物滞留柱对总氮的去除效果

Fig.4 Total nitrogen removal by different bioretention columns

2.2.4 淹没区出水氮浓度分析

每一运行周期结束后淹没区中最后 1 L 存水在下一周期开始时排出,排出水中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度如图 5 所示。

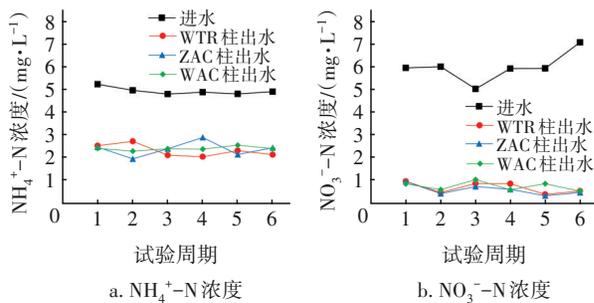


图 5 不同生物滞留柱淹没区出水的氮浓度

Fig.5 Nitrogen concentration of effluent from submerged area of different bioretention columns

排出水中的 NH₄⁺-N 浓度略高于上一周期运行结束时出水中的 NH₄⁺-N 浓度,一方面,由于淹没饱和区的存在,导致 NH₄⁺-N 的硝化作用受到抑制,同时吸附在基质中的 NH₄⁺-N 有部分解吸到孔隙水中,使淹没区存水中的 NH₄⁺-N 浓度有所升高;另一方面,淹没区的硝酸盐异化还原为氨(DNRA)作用也可能导致其出水 NH₄⁺-N 浓度升高。较高的进水有机负荷和厌氧环境使得部分 NO₃⁻-N 能在硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶的作用下充当电子受体,通过 DNRA 还原为 NH₄⁺-N^[13],从而导致出水 NH₄⁺-N

浓度增加。在 6 个试验周期中,ZAC 和 WAC 柱在间隔 24 h 后其淹没区出水中的 NO₃⁻-N 浓度均较低(低于 1 mg/L),并且二者在下一场降雨事件中仍能发挥较好的 NO₃⁻-N 去除性能,这表明改性活性炭能够稳定吸附雨水中的 NO₃⁻-N,在间隔期设置淹没饱和区时使积累的 NO₃⁻-N 通过反硝化作用去除,未发生 NO₃⁻-N 解吸,从而为下次吸附空出吸附点位。

2.2.5 对 TP 的去除效果

WTR、ZAC 和 WAC 柱对 TP 均有稳定且较高的去除效果,出水浓度均低于 0.13 mg/L,平均去除率分别为 97.02%、95.31% 和 95.85%。生物滞留系统中磷的去除主要依靠土壤基质中铝、铁等金属氧化物的吸附和化学沉淀作用。改良土壤基质中添加的 WTR 和改性活性炭均能够通过表面携带的大量金属离子与径流中的磷酸盐进行配体交换,形成金属络合物吸附到基质材料上^[14]。

2.3 较长 ADT 下对氮和磷的去除效果

2.3.1 对 NH₄⁺-N 的去除效果

各滞留柱在较长 ADT 下对 NH₄⁺-N 的去除情况如图 6 所示。

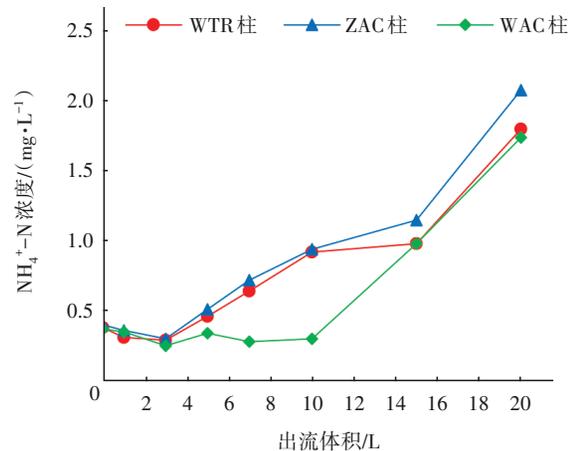


图 6 不同生物滞留柱在较长 ADT 下对氨氮的去除效果

Fig.6 Ammonia nitrogen removal by different bioretention columns at long ADT

从图 6 可以看出,在经过 30 d 的干燥期后,各滞留柱仍能保持较好的 NH₄⁺-N 去除效果,其中 WAC 柱的去除效果最佳,平均去除率为 88.66%。在干燥期内,土壤水分的蒸发导致其通气量增加,促进了 NH₄⁺-N 的硝化作用,使基质中空出大量的吸附点位,因此在进水初期,各滞留柱的出水 NH₄⁺-N 浓度均较低。随着进水量的增加,土壤基质的吸附容量逐渐饱和,出水 NH₄⁺-N 浓度增加。此外,恢复进水

后,土壤基质含氧量的降低和有机负荷的增加使得可同化降解有机物的异养菌处于快速增长阶段,从而使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化过程受到影响^[15]。WAC柱的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在前期增长较慢,这表明WAC能够更好地提高滞留基质对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量。同时,WAC中的游离铁离子能促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化,进一步提高对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效能。

2.3.2 对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果

各滞留柱在较长ADT下对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除情况如图7所示。

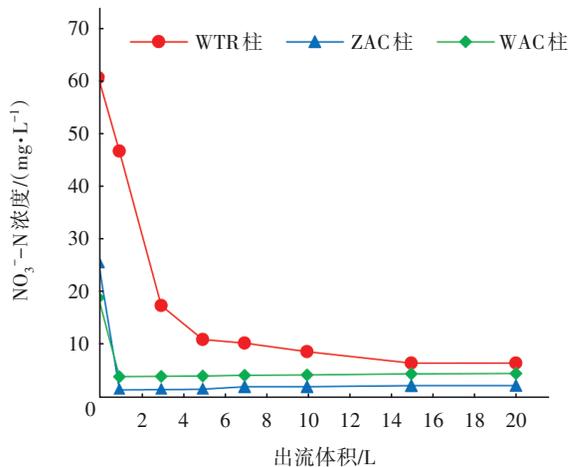


图7 不同生物滞留柱在较长ADT下对硝态氮的去除效果
Fig.7 Nitrate nitrogen removal by different bioretention columns at long ADT

在长达30 d的干燥期后,各滞留柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 初始出水浓度均远高于进水浓度,WTR柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 初始出水浓度更是达到了进水浓度的10倍左右。随出流体积的增加,各滞留柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 出水浓度迅速下降并逐渐稳定。其中WTR柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 出水浓度始终高于进水浓度,而ZAC和WAC柱在经过短暂的初期淋失后迅速恢复对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除。较长的ADT会促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化,增加系统内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累,从而造成下一场降雨事件中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失。活性炭较好的保水性使ZAC和WAC柱能够在干燥初期通过反硝化作用去除更多的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累,从而使得初期出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度远低于WTR柱。此外,ZAC和WAC对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 具有较好的吸附性能和较大的吸附容量,使得ZAC和WAC柱对较长ADT带来的影响具有较强的抵抗能力,能够快速恢复对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的有效去除。受初期淋失的影响,WTR、ZAC、WAC柱对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率均较

低,平均去除率分别为-237.52%、24.72%和4.78%。ZAC柱对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果优于WAC柱,这可能是由于WAC柱中存在的游离铁离子能够促进硝化作用,增加了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的来源,从而使其去除率降低。上述试验结果表明,改性活性炭的添加能够有效减少生物滞留系统在较长ADT下初期降雨中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失,提高对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果。

2.3.3 对TN的去除效果

各滞留柱对TN的去除情况如图8所示。各滞留柱对TN的去除效果和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 具有类似的变化趋势,这表明滞留柱中TN的去除很大程度上依赖于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除。受 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失的影响,各滞留柱对TN的去除率较低,WTR柱对TN的平均去除率甚至低至-87.77%,而ZAC和WAC柱受长期干燥的影响相对较小,平均去除率分别为44.28%和37.52%。上述结果表明,改性活性炭能够显著提高生物滞留系统在较长ADT下对TN的去除效果,减少氮的淋失。

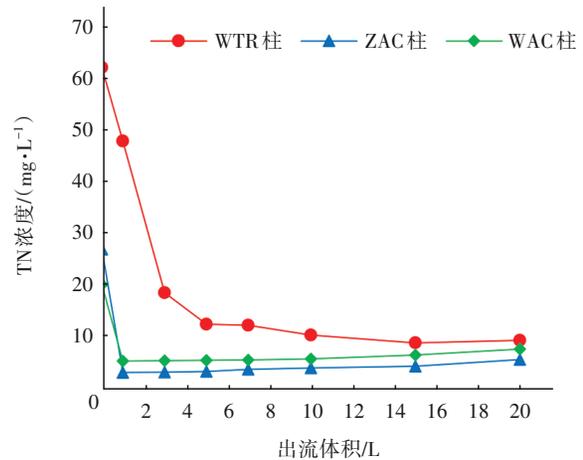


图8 不同生物滞留柱在较长ADT下对总氮的去除效果
Fig.8 Total nitrogen removal by different bioretention columns at long ADT

2.3.4 对TP的去除效果

不同滞留柱在较长ADT下对TP均具有突出的去除效果,WTR、ZAC、WAC柱对TP的平均去除率分别为97.73%、97.52%和97.63%,较长ADT对各滞留柱的TP去除并没有显著影响。WTR和改性活性炭表面含有丰富的金属元素,能够与磷酸盐形成络合物,从而实现稳定吸附。

3 结论

① 利用 ZnCl_2 溶液和给水厂污泥盐酸浸出液

对活性炭进行改性处理能够有效提高其对 NO_3^- -N的吸附性能,吸附量分别为1.468和1.521 mg/g,是原始活性炭的2.38和2.47倍。

② 在添加WTR的基础上利用改性活性炭改良生物滞留基质能够有效提高生物滞留系统在无内部淹没区时对 NO_3^- -N、TN和TP的去除效果,平均去除率分别可达到90.98%、72.65%和95.85%。

③ 利用改性活性炭作为改良剂能够显著减少生物滞留系统在较长ADT下的 NO_3^- -N淋失,对 NO_3^- -N和TN的平均去除率分别可达到24.72%和44.28%。各滞留柱在较长ADT下对TP的去除效果均较好,平均去除率均在97%以上。

参考文献:

- [1] GREGORY H, LEFEVRE S M A, PAUS K H, *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): 876.
- [2] SØBERG L C, VIKLANDER M, BLECKEN G. Nitrogen removal in stormwater bioretention facilities: effects of drying, temperature and a submerged zone [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 169: 106302.
- [3] MANGANGKA I R, LIU A, EGODAWATTA P, *et al.* Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 150: 173-178.
- [4] FAN G, NING R, HUANG K, *et al.* Hydrologic characteristics and nitrogen removal performance by different formulated soil medium of bioretention system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125873.
- [5] PAK S, JEON M, JEON Y. Study of sulfuric acid treatment of activated carbon used to enhance mixed VOC removal [J]. *International biodeterioration & biodegradation*, 2016, 113: 195-200.
- [6] HUANG X, YANG X, ZHU J, *et al.* Microbial interspecific interaction and nitrogen metabolism pathway for the treatment of municipal wastewater by iron carbon based constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315: 123814.
- [7] OBBARD J, SHAN H. Ammonia removal from prawn aquaculture water using immobilized nitrifying bacteria [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 57(5/6): 791-798.
- [8] XIONG J, REN S, HE Y, *et al.* Bioretention cell incorporating Fe-biochar and saturated zones for enhanced stormwater runoff treatment [J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124424.
- [9] LOPEZ-PONNADA E V, LYNN T J, ERGAS S J, *et al.* Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115336.
- [10] ZHANG W, SANG M, SUN H, *et al.* Influence of rainfall on the performance of bioretention systems modified with activated carbon and biochar [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2021, 38: 63-71.
- [11] BHATNAGAR A, JI M, CHOI Y, *et al.* Removal of nitrate from water by adsorption onto zinc chloride treated activated carbon [J]. *Separation Science and Technology*, 2008, 43(4): 886-907.
- [12] QIU F G, ZHAO S G, ZHAO D Y, *et al.* Enhanced nutrient removal in bioretention systems modified with water treatment residuals and internal water storage zone [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5: 993.
- [13] XIONG J, ZHOU J, LI J, *et al.* Removal of nitrogen from rainwater runoff by bioretention cells filled with modified collapsible loess [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106065.
- [14] LIU J, DAVIS A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(1): 607-614.
- [15] 仇付国,王珂,李林彬,等. 滞留时间和进水有机物对生物滞留系统除氮的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 197-202.
- QIU Fuguo, WANG Ke, LI Linbin, *et al.* Effect of retention time and organic matter on the nitrogen removal by bioretention [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(4): 197-202 (in Chinese).

作者简介:仇付国(1974-),男,山东平邑人,工学博士,教授,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: qiufuguo@bucea.edu.cn

收稿日期:2022-09-18

修回日期:2022-11-08

(编辑:刘贵春)