

设置饱和带对生物滞留去除地表径流中 N、P 的影响

颜子钦, 李立青, 刘雨情, 涂声亮

(中国地质大学 环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 生物滞留设施被广泛应用于城市地表径流污染的控制,其中基质组成、植物和饱和带是影响其去除 N、P 的关键。通过构建以河砂与紫色土为混合基质的生物滞留系统,种植根系发达的草本植物紫穗狼尾草,研究设置饱和带与否对去除城市地表径流中溶解性 N、P 的影响。结果表明,生物滞留以 80% 河砂与 20% 紫色土为混合过滤基质,在进水 PO_4^{3-} -P 平均浓度为 (0.33 ± 0.04) mg/L 时,出水 PO_4^{3-} -P 平均浓度可达到 (0.03 ± 0.01) mg/L,平均去除率为 91.5%;进水 NH_4^+ -N 平均浓度为 (3.00 ± 0.37) mg/L,出水 NH_4^+ -N 平均浓度为 (1.15 ± 0.19) mg/L,平均去除率为 61.3%。基质吸附与离子交换是去除城市地表径流中 PO_4^{3-} -P 和 NH_4^+ -N 的主要途径,生物滞留设置饱和带与否,不影响对 PO_4^{3-} -P 和 NH_4^+ -N 的去除。但设置饱和带可显著提高对 NO_3^- -N 的去除率。不设置饱和带时进水 NO_3^- -N 平均浓度为 (3.89 ± 0.19) mg/L,出水平均浓度为 (3.76 ± 0.52) mg/L,平均去除率为 3.4%;设置饱和带时进水 NO_3^- -N 浓度为 (3.69 ± 0.16) mg/L,出水平均浓度为 (0.75 ± 0.04) mg/L,平均去除率为 79.8%。停留时间是影响 NO_3^- -N 去除的重要因素。对于种植紫穗狼尾草、设置饱和带且不加碳源的生物滞留系统,通过延长停留时间可以有效去除城市地表径流中的 NO_3^- -N。

关键词: 城市地表径流; 生物滞留; 氮; 磷; 饱和带

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)11-0033-06

Removal of Dissolved Nitrogen and Phosphorus in Urban Stormwater by Bioretention Cell Incorporated a Submerged Zone

YAN Zi-qin, LI Li-qing, LIU Yu-qing, TU Sheng-liang

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Urban runoff is an increasingly important source of excess nitrogen (N) and phosphorus (P) to local receiving waters. Bioretention has become one of the most frequently used facility to control urban stormwater pollution. Its design variables including filter medias, plant species and saturated zone have large impacts on nitrogen and phosphorus removal. This study investigates the role of filter media, vegetation and saturated zone (SZ) in achieving dissolved nitrogen and phosphorus removal in bioretention systems. A large bioretention cell (4.5 m long by 1.8 m wide, with a depth to hold 75 cm filter media, plus a 25 cm freeboard) was constructed and created a submerged zone in the lower half of the bioretention cell. The bioretention cell was filled with the mixture of 80% river sand and 20% purple soil (400 mm), coarse washed sand (200 mm), pea gravel (50 mm) and gravel (100 mm). The native

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307001)

通信作者: 李立青 E-mail: li-liqing@163.com

species *P. alopecuroides* was selected and planted because of its high biomass and strong roots. The results demonstrated that the bioretention system could effectively remove $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ from urban runoff. When the influent concentrations of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were (0.33 ± 0.04) mg/L and (3.00 ± 0.37) mg/L, the effluent concentrations of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were (0.03 ± 0.01) mg/L and (1.15 ± 0.19) mg/L, with removal rates of 91.5% and 61.3%, respectively. Adsorption and ion exchange are the major removal mechanisms for $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the bioretention filter media. The use of a saturated zone could not influence $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal efficiencies. The saturated zone could significantly enhance the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ removal. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration only decreased from (3.89 ± 0.19) mg/L to (3.76 ± 0.52) mg/L with the removal efficiency of 3.4% when the saturated zone was not used. However, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration decreased from (3.69 ± 0.16) mg/L to (0.75 ± 0.04) mg/L with the removal rate of 79.8% when the saturated zone was used. The general trend in these data also confirmed that longer retention time allowed for greater nitrate removal. These results suggested that the combination of vegetation and saturated zone without additional carbon source could facilitate anoxic microbial denitrification to achieve significant nitrate removal of bioretention systems through increasing retention time.

Key words: urban stormwater; bioretention systems; nitrogen; phosphorus; saturated zone

生物滞留系统作为低影响开发的主要措施,被广泛应用于城市地表径流的水量、水质控制。生物滞留系统利用生态与环境工程原理,通过耦合过滤基质、植物和微生物的作用,在模拟或恢复自然水文循环的同时,滞留与去除地表径流中的污染物^[1]。近年来生物滞留系统在国内得到了高度关注,并开始推广应用。如何构建生物滞留系统对其发挥作用非常关键。

生物滞留系统能够有效去除城市地表径流中的重金属、颗粒物和有机污染物,但是对 N、P 的去除率变化范围较大,在某些情况下甚至会释放或输出营养盐^[1,2]。生物滞留系统通过沉淀与过滤可以有效截留城市地表径流中的颗粒物与颗粒态磷和氮^[3,4],而溶解性磷主要通过吸附作用去除^[5,6],故多数研究通过在基质中添加高 Fe、Al 或 Ca 的材料强化除磷^[7,8]。在生物滞留系统中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 易迁移、淋溶,这是其对氮的去除率变化范围较大的主要原因^[4]。根系发达与生长速率快的植物可以增加对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除作用^[9,10]。另外将生物滞留系统底部设置为饱和带,并添加一定的碳源,延长停留时间,形成缺氧或厌氧环境,从而促进反硝化作用的发生,可提高对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果^[11,12]。因此,对生物滞留系统的优化设计目标应该是强化去除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

笔者拟通过优化生物滞留系统基质、植物、饱和

带配置与设计来提高对城市地表径流中溶解性 N、P 的去除。生物滞留系统的基质组成通过在河砂中添加黏粒含量高、富含 Fe/Al 的紫色土^[8],以强化对磷的吸附去除;通过种植根系发达与生长速率快的紫穗狼尾草^[13],提高对溶解性氮的吸收作用;同时在生物滞留系统底部设置饱和带(不添加碳源,通过紫穗狼尾草的发达根系为饱和带提供部分碳源),从而协同提高对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化作用。

1 材料和方法

1.1 生物滞留系统构建

生物滞留系统于 2014 年 10 月建于重庆市园博园内,采用不锈钢材质,尺寸为 $4.5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,见图 1。

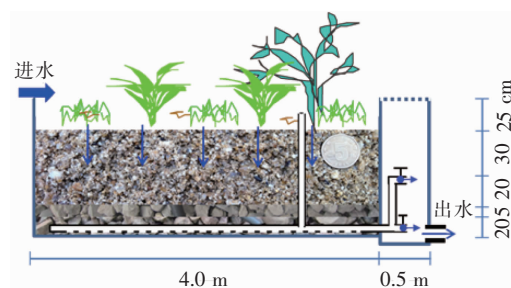


图1 生物滞留装置结构与组成

Fig. 1 Diagram of bioretention cell

生物滞留系统分两段,前端为生物滞留过滤区,后端为排水室。生物滞留过滤材料自下而上分

别为碎石集排水层、砾石过渡层、河砂过滤层、混合种植基质层,顶部滞水高度取 25 cm,见表 1。其中,混合种植基质由 80% 河砂与 20% 当地紫色土组成。进水采用水平布置的开孔 PVC 管,通过对混合种植基质 2.5% 坡度的设置,保证进水能够在整个混合种植基质表面均匀分布并垂直下渗。下渗的地表径流经过滤、滞留后,通过底部碎石层中开孔集排水管收集,可升高排水管高度(高为 45 cm),创造生物滞留下部 45 cm 饱和带。

表 1 生物滞留系统填料配置

Tab. 1 Filter medias of bioretention cell

填料	粒径/mm	填深/cm	填方/m ³
基质	d_{30} :0.3 d_{50} :1.0 d_{90} :2.0	30	2.4
河砂	d_{30} :1.0 d_{90} :2.0	20	2
砾石	10~20	5	0.4
碎石	20~40	20	1.2

生物滞留装置共种植了 150 株紫穗狼尾草,其秆直立,丛生,高为 30~120 cm,根系发达,能够适应频繁的淹水和干旱,并具有较高的观赏价值。

1.2 模拟城市地表径流量及水质

生物滞留系统的功能之一是处理城市地表径流污染,本研究仅针对城市地表径流中溶解态 N、P 的去除。根据重庆地表径流污染监测结果^[14]配制模拟城市地表径流,其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均为 3.0 mg/L, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 0.3 mg/L,分别由 NH_4Cl 、 KNO_3 、 KH_2PO_4 提供。

根据 2009 年—2010 年降雨事件的平均降雨强度、最大降雨强度、降雨量以及降雨持续时间分布特征^[14],设计模拟降雨强度为 15 mm/h。以降雨持续时间为 1.5 h 计,生物滞留系统与不透水地表面积比为 1:10,水力负荷为 150 mm/h,生物滞留系统面积约为 8 m²,因此进水流量为 1.2 m³/h,进水总量为 1.8 m³。

1.3 试验运行、水样采集与分析测定

生物滞留系统在 2014 年 11 月建成,经过试运行、过冬后,于 2015 年 4 月植物返青后开始正式运行。2015 年 4 月—8 月共运行 11 次,间隔时间在 4~7 d。进水流量设计为 1.2 m³/h,进水历时为 1.5 h。其中前 8 次运行从生物滞留系统底部出水,考察无饱和带时对城市地表径流污染的控制效果;后 3

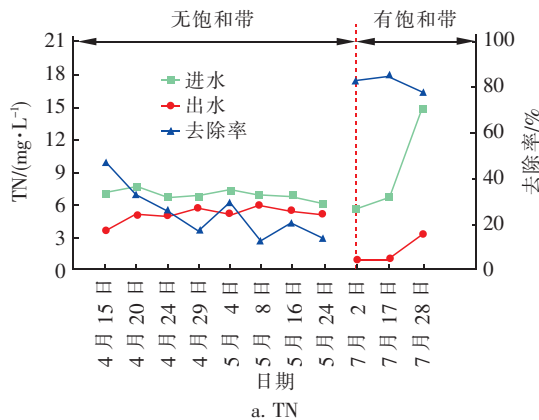
次运行通过提高出水高度至 45 cm 处,考察具有饱和带时对城市地表径流污染的控制效果,从而分析设置饱和带的作用。同时,考察了停留时间对去除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响。每次试验时进水采集 4 个样品,出水采集 6 个样品。

采集的水样运回实验室,原样与过滤水样(0.45 μm)采用过硫酸钾氧化法分别测定 TN 和 TP,过滤水样采用纳氏试剂法测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,采用紫外分光光度法测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,采用钼锑抗分光光度法测定 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$;pH 值、DO 和 ORP 在现场采用 YSI 便携式多参数水质分析仪测定。

2 结果与分析

2.1 设置饱和带对去除 N、P 的影响

2015 年 4 月—5 月生物滞留装置在未设饱和带的条件下运行共 8 次,水力负荷为 150 mm/h,持续 1.5 h,进、出水 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度的变化见图 2。进水 TN 平均为 (6.93 ± 0.50) mg/L,出水 TN 平均浓度为 (5.18 ± 0.66) mg/L,对其平均去除率为 24.8%。进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 (3.00 ± 0.37) mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 (1.15 ± 0.19) mg/L,平均去除率为 61.3%。进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度为 (3.89 ± 0.19) mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均为 (3.76 ± 0.52) mg/L,平均去除率为 3.4%。进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均浓度为 (0.33 ± 0.04) mg/L,出水平均浓度为 (0.03 ± 0.01) mg/L,平均去除率为 91.5%。生物滞留装置在未设置饱和带的情况下,采用河砂与紫色土为混合过滤基质可有效去除进水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,基质吸附、离子交换和植物吸收是去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的主要机制。但是不能有效去除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。生物滞留对磷的有效去除与混合过滤基质的吸附作用有关。



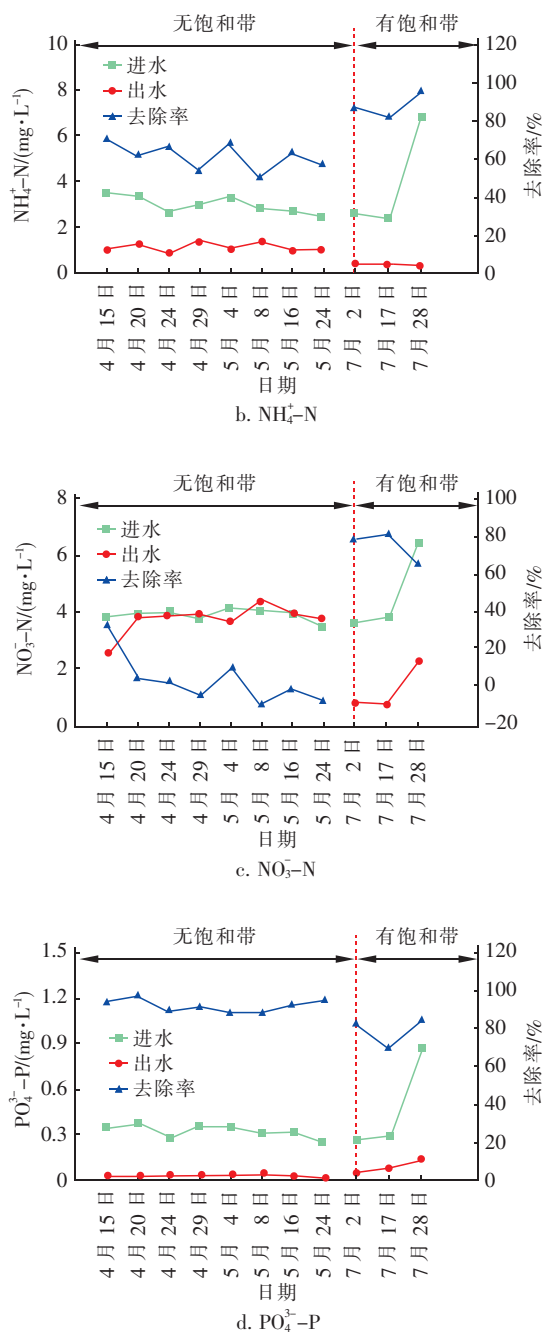


图2 生物滞留装置设置饱和带前后的进、出水水质与去除率比较

Fig. 2 Comparison of influent and effluent concentrations of bioretention with or without a saturated zone

2015年7月—8月生物滞留装置在设置饱和带下运行了3次,水力负荷同样为150 mm/h,持续1.5 h。其中7月2日和7月17日两次试验进水TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度与前8次的基本相同,分别为 (6.24 ± 0.71) 、 (2.52 ± 0.14) 、 (3.69 ± 0.16) 和 (0.27 ± 0.01) mg/L,出水平均浓

度分别为 (1.00 ± 0.02) 、 (0.40 ± 0.05) 、 (0.75 ± 0.04) 和 (0.07 ± 0.03) mg/L,平均去除率分别为83.9%、84.1%、79.8%和75.7%。可见生物滞留装置在设置饱和带的情况下,可有效去除TN,特别是显著提高了对 NO_3^--N 的去除效果,饱和带的设置在增加停留时间的同时,还促进了反硝化作用的发生。但饱和带的设置降低了对 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除效果,可能同饱和带中氧化还原电位降低,所吸附的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 重新释放有关。7月28日的试验是在提高进水N、P负荷情况下进行的,对TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率分别为77.4%、96.1%、64.7%和84.0%。基质吸附和离子交换是 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的主要去除机制,提升进水浓度不影响对其去除。生物滞留系统对 NO_3^--N 的去除途径主要包括植物吸收与微生物反硝化,提高进水 NO_3^--N 浓度后去除能力降低,说明植物吸收和反硝化能力有限。

2.2 停留时间对 NO_3^--N 去除率的影响

饱和带停留时间对去除 NO_3^--N 的影响见图3。

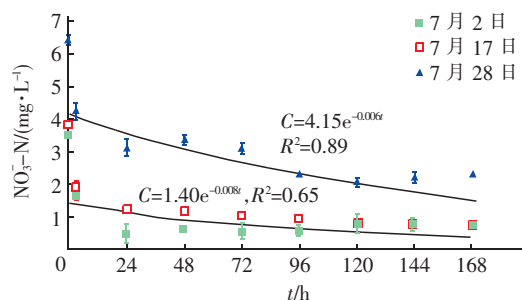


图3 生物滞留设置饱和带时出水 NO_3^--N 浓度随停留时间的变化

Fig. 3 Variation of effluent NO_3^--N concentrations from saturated zone with retention times

随着停留时间的增加,出水 NO_3^--N 浓度持续降低。 NO_3^--N 的去除分2个阶段,第一阶段是 NO_3^--N 在饱和带中的快速去除过程,第二阶段是 NO_3^--N 在饱和带中的慢速去除过程,随停留时间的延长, NO_3^--N 浓度逐渐降低。在进水 NO_3^--N 为3.69 mg/L的条件下,停留时间为3 h时,出水浓度降至1.79 mg/L,停留时间为24 h时,出水浓度降至0.86 mg/L。在进水 NO_3^--N 为6.43 mg/L的条件下,停留时间为3 h时,出水浓度降至6.24 mg/L,停留时间为24 h时,出水浓度降至3.10 mg/L。设

置饱和带后对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果的提高主要通过延长停留时间,促进了微生物反硝化作用的发挥。在饱和带中地表径流 DO、ORP 随停留时间的增加逐渐降低,是一个逐渐变为缺氧的过程(如图4所示),ORP 在 24 h 后基本下降到 250 mV 以下,并持续降低,为微生物反硝化作用提供了条件。当 ORP 在 100 ~ 300 mV 范围时, NO_3^- 可作为电子受体^[14],所以城市地表径流在饱和带的停留时间是决定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除的关键因素。虽然微生物的反硝化作用会使 pH 值升高,但是紫穗狼尾草的根系分泌的有机酸可以抵消反硝化过程的产碱效应,故 pH 值基本保持不变。

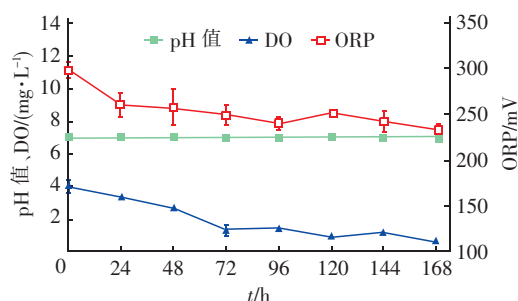


图4 7月17日生物滞留饱和带中 pH 值、DO 和 ORP 的变化过程

Fig.4 Temporal variation of pH, DO and ORP in saturated zone on July 17

对 2 种不同进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度下的反应过程,以准一级反应动力学方程进行拟合,反硝化速率常数 k 基本相当,与进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度无关。尽管种植植物可为反硝化提供碳源,但是可能不足,半衰期长,需要延长停留时间才能显著降低出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。在进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 3.69 和 6.43 mg/L 的情况下,经过 7 d 滞留,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别降至 0.76、2.27 mg/L。由此可以说明,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较高的地表径流,可能需要更长的停留时间。根据生物滞留饱和带反硝化动力学过程特点,如仅通过种植植物提供碳源,即使延长停留时间,也仅可以去除低浓度的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

3 讨论

生物滞留系统对溶解性氮、磷的去除与转化涉及到吸附、化学沉淀、离子交换与生物过程^[15]。生物滞留系统基质、植物和饱和带是影响 N、P 去除的关键因素。生物滞留系统对城市地表径流中溶解性磷的去除机制主要是基质吸附。本研究通过在河砂

中添加 20% 紫色土可达到有效去除溶解性磷的目的,紫色土黏粒含量高、富含 Fe/Al 的特点是其有效吸附除磷的主要原因^[8]。

生物滞留系统通过基质吸附或离子交换去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,添加紫色土的河砂可有效去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,另外植物吸收可能也是去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的一个重要途径。生物滞留系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除途径包括生物同化与反硝化^[16]。根系发达与生长速率快的植物可以增加对氮的吸收作用^[9,10]。生物滞留系统地表径流的快速渗滤,易于形成好氧条件,有利于硝化作用,但会抑制反硝化作用的发生,因而不利于输入系统的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和系统中硝化产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的还原去除。由于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的高迁移性,其易于从基质或土壤中淋溶输出,从而降低了生物滞留系统对城市地表径流中氮的去除作用。因此为了提高对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果,将生物滞留系统过滤基质的下部设置为饱和带,并添加一定的碳源,延长水力停留时间,形成缺氧或厌氧环境,从而促进反硝化作用的发生,可提高对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果^[11,12]。本研究通过种植根系发达的紫穗狼尾草和设置饱和带使 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 得到了有效去除,发挥了植物吸收与反硝化的协同作用。

另外本研究没有向饱和带中添加碳源,紫穗狼尾草通过根系分泌物可为反硝化提供碳源。但是饱和带中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低缓慢,可能与饱和带中碳源不足有关。在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低的情况下,通过延长停留时间,系统内部提供的碳源基本满足反硝化的需要;但是在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高的情况下,系统内部提供的碳源明显不能满足微生物反硝化作用的需求,所以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低程度有限。本试验设置的低进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度水平,与通常的城市地表径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相近^[14]。因此种植紫穗狼尾草、设置饱和带、不加碳源的生物滞留系统,通过延长停留时间可以有效对其去除。

4 结论

① 生物滞留系统以 80% 河砂与 20% 紫色土为混合过滤基质,当进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均为 (0.33 ± 0.04) mg/L 时,出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均为 (0.03 ± 0.01) mg/L,平均去除率为 91.5%;进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均为 (3.00 ± 0.37) mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均为 (1.15 ± 0.19) mg/L,平均去除率为 61.3%。基质

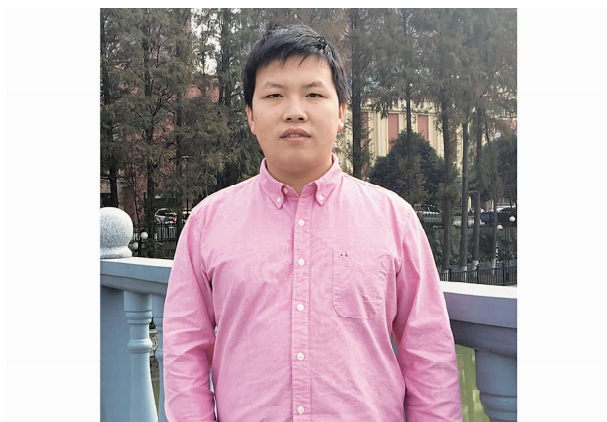
吸附与离子交换是去除 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的主要途径。

② 设置饱和带可显著提高对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率。当不设置饱和带时,在进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均为 $(3.89 \pm 0.19) \text{ mg/L}$ 的条件下,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均为 $(3.76 \pm 0.52) \text{ mg/L}$,平均去除率为 3.4%;当设置饱和带、进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $(3.69 \pm 0.16) \text{ mg/L}$ 时,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均为 $(0.75 \pm 0.04) \text{ mg/L}$,平均去除率为 79.8%。

③ 种植紫穗狼尾草与设置饱和带、不加碳源的生物滞留系统,通过延长停留时间可以有效去除城市地表径流中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

参考文献:

- [1] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, *et al.* Bioretention technology: overview of current practice and future needs [J]. J Environ Eng, 2009, 135(3): 109 – 117.
- [2] Collins K A, Lawrence T J, Stander E K, *et al.* Opportunities and challenges for managing nitrogen in urban stormwater: A review and synthesis [J]. Ecol Eng, 2010, 36(11): 1507 – 1519.
- [3] Liu J Y, Davis A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. Environ Sci Technol, 2014, 48(1): 607 – 614.
- [4] Li L Q, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. Environ Sci Technol, 2014, 48(6): 3403 – 3410.
- [5] Roy-Poirier A, Champagne P, Filion Y. Bioretention processes for phosphorus pollution control [J]. Environ Rev, 2010, 18: 159 – 173.
- [6] Li J K, Davis A P. A unified look at phosphorus treatment using bioretention [J]. Water Res, 2016, 90: 141 – 155.
- [7] 王建军, 李田, 张颖. 给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4642 – 4647.
- [8] 李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 等. 生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2511 – 2517.
- [9] Barrett M E, Limouzin M, Lawler D F. Effects of media and plant selection on biofiltration performance [J]. J Environ Eng, 2013, 139(4): 462 – 470.
- [10] Read J, Flether T D, Wevill T, *et al.* Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. Int J Phytorem, 2010, 12(1): 34 – 53.
- [11] Zinger Y, Blecken G T, Fletcher T D, *et al.* Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: Benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone [J]. Ecol Eng, 2013, 51: 75 – 82.
- [12] Peterson I J, Igielski S, Davis A P. Enhanced denitrification in bioretention using woodchips as an organic carbon source [J]. J Sustainable Water Built Environ, 2015, 1(4): 4015 – 4019.
- [13] 代会平, 向佐湘, 郭君, 等. 紫穗狼尾草和狗牙根茎叶水文生态效应比较 [J]. 草业科学, 2009, 26(2): 107 – 113.
- [14] 李立青, 单保庆, 赵建伟, 等. 山地城市地表径流源区水质特征监测研究 [J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3397 – 3403.
- [15] 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]. J Environ Eng, 2015, 141(1): 401 – 405.
- [16] Payne E G, Fletcher T D, Russell D G, *et al.* Temporary storage or permanent removal? The division of nitrogen between biotic assimilation and denitrification in stormwater biofiltration systems [J]. Plos One, 2014, 9(3): e90890.



作者简介: 颜子钦 (1991 –), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 研究方向为城市地表径流污染控制。

E-mail: cugyanzq@163.com

收稿日期: 2016 – 12 – 08