

# 生物质炭改良生物滞留系统去除氮素的试验研究

赵倩<sup>1,2</sup>, 许仕荣<sup>1</sup>, 周永潮<sup>2</sup>, 张仪萍<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 浙江大学建筑工程学院 市政工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 雨水生物滞留系统是路面雨水径流净化的主要技术措施之一。利用土柱模拟试验, 通过向人工配制的砂壤土中添加不同含量的生物质炭(0%、2%、4%、6%), 并模拟路面雨水径流淋滤, 分析去除氮素污染物的效果及影响因素。结果表明, 生物质炭的添加量达到2%以上时, 可显著增大对路面降雨径流中TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率。生物质炭添加量对TN的去除效果影响不大, 但是对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果明显优于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。同时发现, 路面雨水径流污染负荷、落干期、植物均会不同程度影响生物滞留系统对氮素污染物的去除效果。

**关键词:** 生物滞留系统; 生物质炭; 氮素; 雨水径流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0096-06

## Nitrogen Removal by Bioretention System Modified with Biochar

ZHAO Qian<sup>1,2</sup>, XU Shi-rong<sup>1</sup>, ZHOU Yong-chao<sup>2</sup>, ZHANG Yi-ping<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute of Municipal Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Stormwater bioretention system is one of the main technical measures to purify road runoff. Simulated experiment was carried out in soil columns by adding different amounts of biochar (0, 2%, 4% and 6%). Leaching of road runoff was simulated, and effects of nitrogen removal and influencing factors were investigated. The results showed that the removal rates of TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  could be significantly increased when the dosage of biochar was more than 2%. Moreover, the dosage of biochar had little effect on TN removal, but it had significantly better removal efficiency of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  than that of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ . It was also found that concentration of pollutants, dry period and plants all affected the removal efficiency of nitrogen pollutants by stormwater bioretention system to some extent.

**Key words:** bioretention system; biochar; nitrogen; stormwater runoff

近年来,水体富营养化已严重危害了我国的水环境系统,而氮是水体富营养化的主要驱动元素之一。很多国家和地区50%以上受纳水体的氮素污染主要来自城市降雨径流<sup>[1]</sup>。生物滞留系统作为一种低影响开发技术,具有高效的径流滞留能力、水

质净化能力和污染负荷削减能力,是控制降雨径流面源污染的重要手段之一<sup>[2]</sup>。大量研究表明,生物滞留系统对氮素污染物的去除效果很不稳定,其中对氨氮的去除效果最好,去除率大多可达70%以上,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果最不稳定,去除率在

-650%~90%范围内波动,对总氮的去除率大多为30%~70%<sup>[3-4]</sup>。Li等<sup>[5]</sup>分析了16场降雨事件中传统生物滞留系统对径流雨水中不同形态氮素的去除效果,表明生物滞留系统能有效去除颗粒态有机氮(PON)、氨氮和亚硝态氮,出水中的硝态氮和溶解态有机氮(DON)浓度一直高于进水。生物质炭是以农作物秸秆、畜禽粪便等生物质在完全或部分缺氧条件下通过低温热解(<700℃)形成的一种含碳量极其丰富、性质稳定的产物<sup>[6]</sup>,具有比表面积大、阳离子交换能力强、孔隙丰富等特点。目前,生物质炭用作土壤改良剂以减少农田养分淋失的研究较多且效果良好,但将生物质炭用在生物滞留系统填料改良上的研究较少。

笔者采用不同类型的土柱模拟生物滞留系统,进行模拟路面降雨径流净化试验,分析了填料、植物、生物质炭的添加对降雨径流中氮素运移的影响,研究了出水中总氮、氨氮和硝态氮的变化,旨在为合理利用生物质炭、优化设计生物滞留系统、提升生物滞留系统对路面雨水径流中氮素污染物的净化功能提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

生物滞留系统模拟装置的土壤为浙江平原地区常见土,类型为黄壤,质地以壤质黏土为主。采集土样后自然风干,挑去明显杂物,粉碎,过2 mm筛以备用。供试土壤pH值(水土比为2.5:1)为8.36,全氮为1.88 g/kg,全磷为0.31 g/kg,总碳为8.30 g/kg。试验所用生物质炭来源于浙江省农业科学院(以竹子、谷糠和猪粪为原料),生物质炭性质:pH值为8.06,碳含量为42.22%,氢含量为2.61%,氮含量为1.58%,硫含量为0.73%,全磷为2.9 g/kg。参考海绵城市标准图集,按照目前施工中常见做法,采用添加中砂的方式进行土壤改良,以强化土壤的渗水性。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验装置

生物滞留试验装置中,土壤渗滤介质由土壤、中砂按照质量比为3:7均匀混合而成,试验装置如图1所示。装置由直径为15 cm、高为68 cm的有机玻璃柱制成,以底座平台为基准平面,由上至下依次为12 cm进水(蓄水)空间、50 cm土壤渗滤介质、土工布、多孔板、6 cm渗水空间。



1.溢流管 2.渗滤介质 3.土工布 4.多孔板 5.软管

图1 生物滞留装置示意

Fig.1 Schematic diagram of bioretention apparatus

#### 1.2.2 试验设计

试验采用半人工配制雨水来模拟路面降雨径流。从雨水井中取出沉积物,自然风干,剔除植物残渣等杂质,过100目筛,配水时取干燥沉积物加入自来水中,根据国内城市路面雨水径流污染较严重的情况浮动配制试验用水<sup>[7-8]</sup>。具体水质指标:TN为3.28~40.31 mg/L,硝态氮为0.10~25.78 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为0.10~3.30 mg/L,SS为300~2 000 mg/L。试验共设6个处理装置,各装置渗滤介质组成见表1。

表1 生物滞留系统渗滤介质的组成

Tab.1 Composition of leachate media for bioretention system

项 目	土壤/%	中砂/%	生物质炭/%	植物
BC0	30.0	70.0	0	美人蕉
BC2	29.4	68.6	2	美人蕉
BC4	28.8	67.2	4	美人蕉
BC6	28.2	65.8	6	美人蕉
S	0	100.0	0	无
Sp	0	100.0	0	美人蕉

生物滞留设施面积与汇水面积之比选取1:10,试验装置面积为 $1.77 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。模拟降雨径流场次共11场,1~11场降雨的落干期分别为0、14、5、12、8、23、13、9、7、5和29 d,进水量分别为2.0、1.5、1.5、2.0、2.0、3.0、1.5、2.0、2.0、2.0和3.0 L。采集水样后在6 h内测定相关指标。

#### 1.2.3 检测方法

pH值采用pH计测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法测定,TN和溶解态总氮(TDN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟降雨下生物滞留系统的净化效果

模拟降雨历时4个月,进水总污染负荷:TN为251.8 mg、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为132.1 mg、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为35.4 mg,各装置总进水量为22.5 L,出水情况见表2。可

以看出, BC2、BC4、BC6 的平均径流体积削减率均超过 50%, 但差别不大。总体上看, 添加生物质炭装置的径流削减效果均优于不添加生物质炭的。同时, 添加生物质炭的装置对  $\text{TN}$ 、 $\text{TDN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的削减率均高于纯土砂装置, 但对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效

果稍差于纯土砂装置, 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的淋出量随生物质炭添加量的增加而增大。砂柱对径流体积无明显削弱效果, 对  $\text{TN}$ 、 $\text{TDN}$  的去除效果不明显, 且  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  淋出量大于进水量, 但对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的削减率高达 93.6%。

表 2 不同处理方式下的净化效果

Tab. 2 Purification effect under different treatment methods

项 目	累计污染负荷/mg				平均径流体积 削减率/%	削减率/%			
	TN	TDN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$		TN	TDN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
BC0	124.5	86.0	45.1	1.4	48.5	50.6	42.3	65.8	96.0
BC2	95.0	70.7	31.8	3.7	59.9	62.3	52.6	75.9	89.6
BC4	97.2	73.1	31.1	5.3	56.6	61.4	50.9	76.4	84.9
BC6	100.1	71.6	27.3	7.1	56.4	60.2	52.0	79.3	79.9
S	252.1	171.2	177.0	3.9	6.1	-0.1	-14.8	-34.3	89.0
Sp	230.2	154.0	154.8	2.3	12.4	8.6	-3.3	-17.5	93.6

注: 累计污染负荷为模拟降雨完成后累计淋失的污染物质量。

### 2.1.1 对 TN 的去除

生物滞留系统对 TN 的去除效果如图 2 所示。

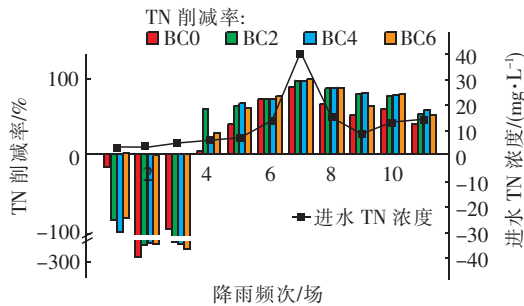


图 2 生物滞留系统对 TN 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of TN by bioretention system

从图 2 可以看出, 在整个运行过程中, 系统对 TN 的去除效果波动较大, 削减率最高为 95%, 最低为 -272.8%。当进水 TN 浓度较低时, 出水 TN 浓度高于进水, 第 4 次进水后系统开始发挥对氮素污染物的去除作用, 第 7 次进水时削减率达到最大值, 而后逐渐下降。由于前 4 次降雨试验填料的渗透能力较好, 水力停留时间较短, 加之土壤和生物质炭本身的氮素含量本底值较高, 所以当水力负荷和污染负荷较低时, 填料中氮素污染物解吸并随径流淋出, 使得出水 TN 浓度不降反升。而当填料中的氮素含量被淋洗到低值时, 随着污染负荷的增大, 土砂填料开始吸附, 系统对污染物的吸附达到饱和后, 对污染物的削减率开始降低。第 5 次淋滤后, 对 TN 的削减率均达到 50% 以上, 且添加生物质炭填料对 TN 的去除效果明显优于纯土砂填料。对 TDN 的去除

效果与 TN 类似。

### 2.1.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

生物滞留系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果如图 3 所示。

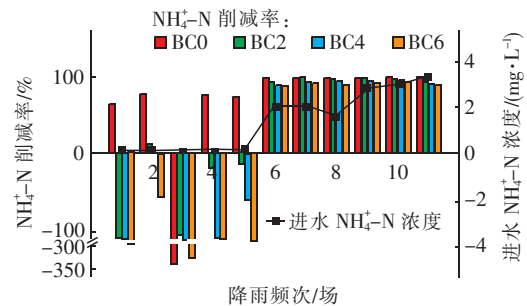


图 3 生物滞留系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

Fig. 3 Removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by bioretention system

由图 3 可知, 当进水氨氮浓度较低时, 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度高于进水, 且生物质炭含量越高系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的削减率越低, 说明  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  从装置中被淋洗出, 且淋溶量随着生物质炭含量的增加而增多。第 6 次进水时氨氮污染负荷增高, 但对氨氮的去除效果提高, 削减率约为 90%。由于土壤颗粒和生物质炭均有一定的表面电荷密度和阳离子交换量,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  通过化学吸附/离子交换固定在填料表面后,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  移动性变差, 落干期系统内部的有氧环境促使氨氮转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ <sup>[9]</sup>, 使出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度降低, 这与 Hatt 等人<sup>[10]</sup>得到的结果一致。也有研究发现, 生物质炭添加量过多对土

壤的硝化过程存在抑制作用,该抑制作用主要集中在硝化过程的加速阶段,减少了微生物对无机氮的同化,延缓了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除速率<sup>[11]</sup>,使得添加生物质炭的系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的削减率稍低于纯土砂装置。

### 2.1.3 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除

当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度极低时,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于进水,削减率最低达到-614% (见图4)。第6次进水时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度升高,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果开始变好且削减率保持在50%以上。由于硝态氮是阴离子,不易被土壤与生物质炭颗粒吸附保留,导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在填料介质与水之间有很强的迁移性。落干期时,填料的孔隙度得以恢复,系统的通透性变好,土层疏松且含氧充足,氨氮经硝化后生成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,并随下场降雨径流淋出,导致对硝态氮的去除效果较差。降雨期间,填料渗透性变差,水力停留时间变长,系统存在缺氧环境, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 通过反硝化反应生成 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{N}_2$ ,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低,此外植物根系可吸收少量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除主要依靠系统对降雨径流量的削减作用<sup>[5]</sup>。

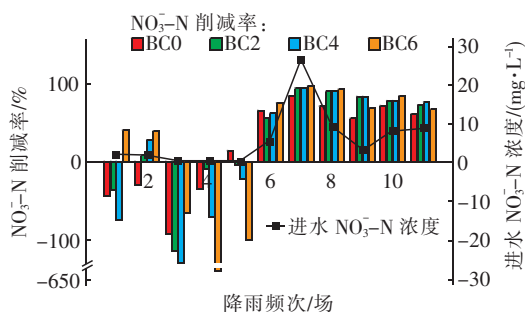


图4 生物滞留系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果

Fig.4 Removal effect of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  by bioretention system

## 2.2 净化效果的影响因素

### 2.2.1 生物质炭对污染物去除效果的影响

综上所述,在进水总污染负荷相同的情况下,生物质炭的添加明显提高了系统对TN的削减率,但BC2、BC4、BC6各装置对TN的削减率差异不大。生物质炭的加入使系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率升高,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的削减率降低,但对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果总体优于对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果。由于生物质炭表面具有高电荷密度和阳离子交换量的特性,能通过化学吸附和离子交换作用吸附 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。并且生物质炭是多孔性物质,比表面积大,可吸附较多的

水分,提高了填料的持水能力<sup>[12]</sup>,延缓了土壤淋洗液的产生,削减了雨水的径流量,从而间接减少了土壤中氮素的淋失。

### 2.2.2 径流污染负荷对污染物去除效果的影响

选取BC4装置落干期为9~14 d,且进水污染负荷不同的4场降雨径流进行对比分析。结果表明,当进水硝态氮浓度为0.17、1.73、9.08和25.78 mg/L时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 削减率分别为-70.2%、30.1%、91.3%和94.0%;当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为0.15、0.20、1.63、2.00 mg/L时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 削减率分别为-107.9%、3.2%、90.8%和94.1%;当进水TN浓度分别为3.27、5.64、14.86和40.31 mg/L时,TN削减率分别为-182.1%、20.9%、89.0%和95.5%。可以看出,在落干期基本相同的情况下,系统对TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率均随进水污染负荷的增大而升高。进水污染负荷较低时,系统中氮素以解吸淋出为主,当进水污染负荷超过一定值后,系统开始吸附,TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率也随进水污染负荷的增大而升高,在装置稳定运行的情况下,系统对水质波动较大的进水有一定的抗冲击负荷能力<sup>[13]</sup>,在系统达到吸附饱和之前,去除效果保持稳定,进水负荷很高时,容易导致出水污染物浓度偏高,而使去除效果降低。

### 2.2.3 落干期对污染物去除效果的影响

选取BC4装置进水污染负荷相差不大的4场降雨径流进行对比分析,结果如图5所示。

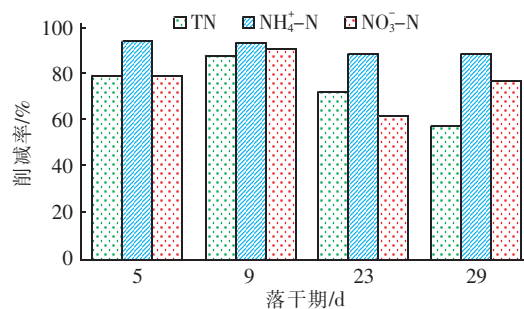


图5 落干期对氮素污染物去除效果的影响

Fig.5 Effect of dry period on nitrogen pollutants removal

由图5可知,随着落干期的延长,系统对TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率基本呈先升高后降低的趋势,且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 削减率的变化最小。落干期在9 d左右时,系统对下场降雨径流中TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果最好。据此推测,受填料润胀和收缩的影响,系统的渗透能力在降雨期间下降,

而在落干期得到一定的恢复。较长的落干期可为系统提供充分的需氧环境,有机氮经氨化作用转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,同时干旱使得菌类细胞死亡,且释放 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在有氧环境下经硝化反应转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,下场降雨时,累积的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随径流排出<sup>[14]</sup>。所以落干期对氨氮的去除影响较小,对TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除影响较大,即9 d左右的落干期后下场降雨径流中氮素污染物的削减效果较好。

#### 2.2.4 植物对污染物去除效果的影响

植物对氮素污染物去除效果的影响见图6。可以看出,在进水污染总负荷相同的情况下,有植物系统对TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的削减率均高于无植物系统。由于无机氮主要是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,都是水溶性的,能直接被植物吸收利用。并且植物能够将氧气输送到根系,还可以为微生物提供附着点,使植物根系与填料的交界面形成好氧微生物的活跃区,有利于硝化反应的进行。无植物系统在落干期可溶性氮聚集在填料中,下一场降雨时,填料中的氮容易随着降雨径流被淋洗出来<sup>[15]</sup>。目前已经有研究证明,植物通过根系吸收可有效促进对氮素污染物的去除,但这种作用是短暂有效的,当植物衰亡后可能会将氮素污染物重新释放回环境中,除非将植物从系统中移除,否则被吸收的氮素污染物终将回到土壤或水体中<sup>[16-17]</sup>。所以种植植物能够有限促进生物滞留系统对氮素污染物的去除。

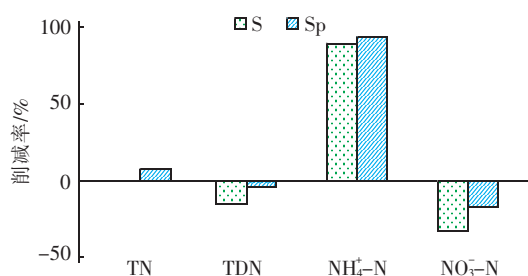


图6 植物对氮素污染物去除效果的影响

Fig.6 Effect of plants on nitrogen pollutants removal

#### 2.2.5 污染物类型对去除效果的影响

各装置出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总淋溶量占TN淋溶量的百分数如图7所示。可知,各装置中氮素损失形态均以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 所占比例极少,S和Sp出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所占百分数分别高达70.20%和67.26%。对TN的去除效果与氮

素污染物的种类有关,氮进入系统以后经氨化、吸附、微生物同化、硝化和反硝化作用等,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果优于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,这与Li等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。

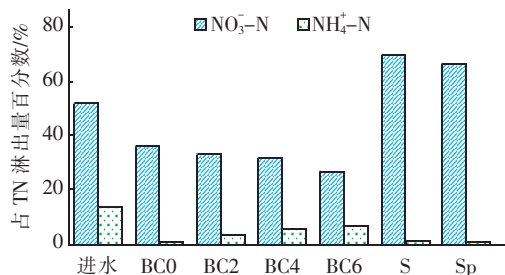


图7 污染物类型对氮素污染物去除效果的影响

Fig.7 Effect of nitrogen pollutant types on their removal

### 3 结论

将生物质炭加入传统生物滞留系统后,明显提高了生物滞留系统对氮素污染物的去除效果和径流量削减能力,且去除效果随着生物质炭用量的增加而提高,但差异性不显著,且生物质炭的最优添加量为2%。系统在中、高污染负荷下的氮素污染物削减率高于低污染负荷,9 d左右的落干期可使相同降雨污染负荷条件下的下场降雨的氮素削减率达到最高值。种植植物对去除氮素污染物有促进作用。整个降雨过程中,氮素污染物主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式淋出,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果最好。因此,将生物质炭添加到生物滞留系统能够进一步提高系统的水文削减作用及对氮素的去除效果。

### 参考文献:

- [1] Davidson E A, Savage K E, Bettez N D, et al. Nitrogen in runoff from residential roads in a coastal area [J]. Water Air and Soil Pollution, 2010, 210(1): 3-13.
- [2] 李家科, 刘增超, 黄宁俊, 等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 431-439.  
Li Jiake, Liu Zengchao, Huang Ningjun, et al. Advance in the study on bioretention technology for low-impact development [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 431-439 (in Chinese).
- [3] Davis A P, Hunt W F, Traver R, et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs [J]. J Environ Eng, 2009, 135(3): 109-117.
- [4] 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.
- [5] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(6):3403–3410.
- [6] 宋延静, 龚骏. 施用生物质炭对土壤生态系统功能的影响[J]. *鲁东大学学报:自然科学版*, 2010, 26(4):361–365.
- Song Yanjing, Gong Jun. Effects of biochar application on soil ecosystem functions [J]. *Ludong University Journal: Natural Science Edition*, 2010, 26(4):361–365 (in Chinese).
- [7] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2):352–358.
- Zhang Qianqian, Li Xiangquan, Wang Xiaoke, *et al.* Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(2):352–358 (in Chinese).
- [8] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(1):71–75.
- Hou Peiqiang, Ren Yufen, Wang Xiaoke, *et al.* Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1):71–75 (in Chinese).
- [9] 刘芳, 侯立柱. 土壤渗滤介质系统去除雨水径流污染物[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12):4294–4298.
- Liu Fang, Hou Lizhu. Removal of stormwater runoff pollutants by medium soil infiltration system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(12):4294–4298 (in Chinese).
- [10] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4):310–321.
- [11] 朱继荣, 韦绪好, 祝鹏飞, 等. 施用生物炭抑制塌陷区复垦土壤硝化作用[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7):264–271.
- Zhu Jirong, Wei Xuhao, Zhu Pengfei, *et al.* Biochar addition inhibiting nitrification of reclaimed soils in coal-mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7):264–271 (in Chinese).
- [12] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E, *et al.* Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, 73(4):1173–1181.
- [13] 罗艳红. 雨水生物滞留设施对道路径流中氮磷的控制效果研究及应用[D]. 北京:北京建筑大学, 2013.
- Luo Yanhong. The Study of Removal Nutrient in Road Runoff and Application Research of Engineering Bioretention [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).
- [14] 张建强, 许萍, 何俊超. 生物滞留池去除道路径流雨水中氮磷的原理及研究现状[J]. *市政技术*, 2015, 33(3):128–132.
- Zhang Jianqiang, Xu Ping, He Junchao. Principle and research status of nitrogen and phosphorus removal from rainwater with bioretention cell[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2015, 33(3):128–132 (in Chinese).
- [15] Lucas W C, Margaret G. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5):613–623.
- [16] Read J, Fletcher 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.
- [17] 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.



作者简介:赵倩(1992–),女,四川绵竹人,硕士研究生,主要研究方向为水质净化与水污染控制。

E-mail:805567903@qq.com

收稿日期:2018–06–12