

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.021

基于土柱实验的绿色屋顶种植基质氮、磷淋溶特征

何松¹, 宫永伟¹, 谢鹏¹, 陈博², 王文海¹

(1. 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; 2. 北京市通州区水务局, 北京 101199)

摘要: 基于土柱实验,采用间歇淋溶方法研究了7种不同配比的绿色屋顶种植基质的氮、磷淋溶情况,以探究绿色屋顶种植基质配比对雨水径流水质的影响。结果表明,基质淋溶液的氮、磷浓度随淋溶次数的增加而降低,并逐渐趋于稳定,前3次氮、磷淋溶量占总淋溶量的62.8%~79.9%。基质的TP淋溶量低于TN淋溶量, NO_3^- -N是TN淋溶的主要形态,其淋溶量远大于 NH_4^+ -N。未添加营养土的基质氮、磷淋溶量最低;轻沙壤土会增加基质的TP淋溶量;当腐叶土或腐殖土占比较大时,氮、磷淋溶量较大,因此不宜将其作为基质中占比较大的材料。在保证植物正常生长的前提下,为减少基质的氮、磷淋溶量,推荐使用田园土作为基质的主要材料,配以适量草炭或松针作为营养物质,并添加少量可以改良土壤结构的蛭石或珍珠岩。

关键词: 绿色屋顶; 种植基质; 淋溶; 氮; 磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0125-06

Leaching Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Green Roof Growing Media Based on Soil Column Experiments

HE Song¹, GONG Yong-wei¹, XIE Peng¹, CHEN Bo², WANG Wen-hai¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Tongzhou Water Authority, Beijing 101199, China)

Abstract: The leaching characteristics of nitrogen and phosphorus from seven soil columns packing with different proportions of green roof growing media were investigated by intermittent leaching method, so as to explore the influence of the proportion of green roof growing media on the stormwater runoff quality. The nitrogen and phosphorus concentrations in the leachate decreased with the increase of leaching time, and gradually tended to be stable. The leaching amounts of nitrogen and phosphorus in the first three experiments accounted for 62.8%~79.9% of the total leaching amounts. The leaching amount of TP was lower than that of TN. NO_3^- -N was the main form of TN in the leachate, and its leaching amount was much higher than that of NH_4^+ -N. The leaching amount of nitrogen and phosphorus from the growing media without nutrient addition were the lowest. Fine sandy loam increased the leaching amount of TP from the growing media. When the proportion of leaf rot mould or humus soil in growing media was large,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879004); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20145、X20160)

通信作者: 宫永伟 E-mail: gongyongwei@163.com

the leaching amounts of nitrogen and phosphorus were high. Therefore, they were not suitable to be used as the main components of the media. On the premise of ensuring the normal growth of plants, it was recommended to use pastoral soil as the main component of the media together with appropriate amount of peat or pine needles as nutrients, and add a small amount of vermiculite or perlite that can improve the soil structure, so as to reduce the leaching amounts of nitrogen and phosphorus from growing media.

Key words: green roof; growing medium; leaching; nitrogen; phosphorus

绿色屋顶作为一种低影响开发雨水设施,是一种以自然为基础来应对“城市病”的技术方法^[1],具有调节室内外温度、净化空气、蓄渗雨水、增加动物栖息地等优点^[2-3]。同时,绿色屋顶无需额外占用城市用地^[4],因此在海绵城市建设中被广泛应用。但是,绿色屋顶对雨水径流水质的调控效果仍存有争议,有学者认为绿色屋顶能通过基质过滤吸附、植物吸收转化、微生物降解等改善径流水质^[5];也有研究认为植物腐败、微生物分泌物以及基质所含物质的淋溶可导致径流水质较普通屋面更差^[6]。在选择绿色屋顶种植基质时需要考虑滞蓄雨水、植物生存、外排水质等综合目标。相比其他的结构层,种植基质对降雨径流水质发挥了更为重要的作用^[7-8]。纯田园土容易板结,可添加沙土以提高基质渗透能力;营养元素含量较低的清洁基质,可能导致植物生长状况不佳;而添加过多营养物质会使得基质内的可溶性物质随着雨水的渗透作用向下迁移和外排,进而导致基质营养元素的流失和径流水质的恶化,给城市水环境带来负面影响。

土柱淋溶实验已应用在耕地养分流失^[9]、矿区土壤金属迁移^[10]以及特殊条件下种植基质的优化选择研究中^[11]。土柱淋溶法虽然未考虑空气沉降、植物以及微生物对外排水质的影响,但该方法能精确控制实验条件,缩短实验周期,因此可作为分析基质内物质随降雨迁移规律的高效方法。鉴于北京市地方标准《屋顶绿化规范》(DB 11/T 281—2015)和行业标准《种植屋面工程技术规程》(JGJ 155—2013)中推荐的基质配比未考虑氮、磷的淋溶情况,笔者采用土柱淋溶法研究采用不同材料配制的绿色屋顶基质的氮、磷淋溶规律,以期更好地指导绿色屋顶的基质配制。

1 实验材料与方法

1.1 实验基质

选用10种原料:田园土、轻质骨料、腐叶土、蛭

石、沙土、草炭、松针土、珍珠岩、轻沙壤土、腐殖土,按照体积比配制7种植植基质。基质A:田园土:轻质骨料=1:1;基质B:腐叶土:蛭石:沙土=7:2:1;基质C:田园土:草炭:蛭石=4:3:1;基质D:田园土:草炭:松针土:珍珠岩=1:1:1:1;基质E:田园土:草炭:松针土=3:4:3;基质F:轻沙壤土:腐殖土:珍珠岩:蛭石=2.5:5:2:0.5;基质G:轻沙壤土:腐殖土:蛭石=5:3:2。

1.2 实验装置

实验装置如图1所示。实验柱由内径6 cm、高15 cm的PVC圆管制作,底部设置出水管。在柱内底部放置2 cm厚的多孔板,并使用250 g/m²的土工布作为过滤层材料,防止基质颗粒流失。在正式装填前,管内壁涂抹一层凡士林,避免基质层与管壁之间产生间隙效应,防止贴壁优先流的发生。采用分层装填的方法,每层装填时将土柱压实,最终形成10 cm厚的模拟基质土柱。为了均匀布水和减少进水对基质土柱的干扰,填充完毕后再填充一层直径为3 mm的干净玻璃珠,基质和玻璃珠接触面布置一层150目的尼龙纱布。为了保证进水流速均匀,防止水压变化对进水流速的影响,基于马氏瓶原理在柱子上方固定了进水装置。底部使用玻璃瓶收集淋溶液。

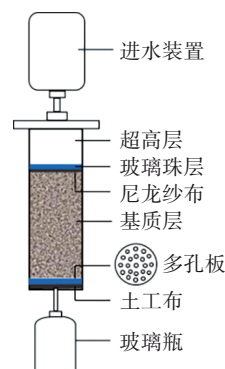


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.3 实验方法

根据统计,北京市1985年—2019年的平均降雨量为538 mm。本实验的汇水面为绿色屋顶本身,因此实验柱每年的进水量即为土柱内截面积与年均降雨量的乘积,即1 521 mL。研究采用自来水代替天然降雨^[12],实验过程采用间歇淋溶的方式,每次淋溶水量为507 mL(相当于4个月的降雨当量),共进行9次淋溶实验,进水总量为4 563 mL(相当于3年降雨当量)^[10]。单次进水实验的淋溶周期为8 h,每隔2 d进行一次实验,及时收集淋溶液并测定污染物浓度。

1.4 检测项目与方法

淋溶液检测项目包括TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TP,分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 淋溶液中氮、磷浓度的变化

7种绿色屋顶种植基质的淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和TP浓度随淋溶次数的变化如图2所示。

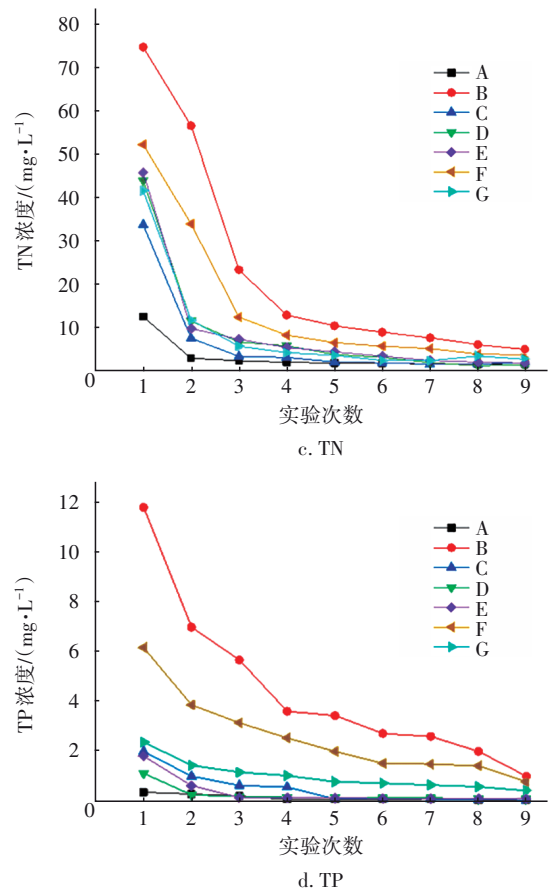
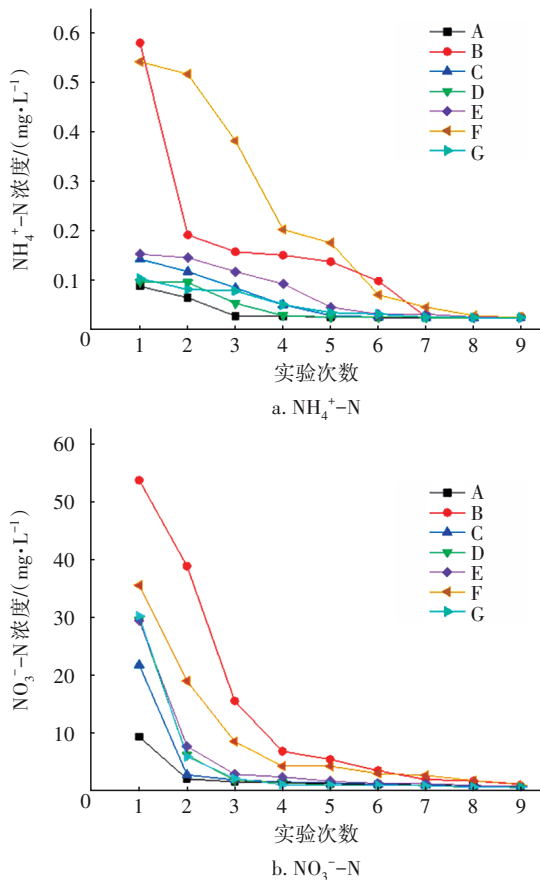


图2 基质淋溶液中的氮、磷浓度变化

Fig.2 Change of nitrogen and phosphorus concentrations in leaching solutions

淋溶液中氮素在第1次淋溶实验出现最大浓度,其中B和F基质淋溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最高(0.5~0.6 mg/L),其余5种基质淋溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低(0.09~0.15 mg/L)。随着实验次数的增加,A、C、D、E、G基质淋溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈平缓下降趋势,并在第5次实验后保持稳定。在首次实验后B基质淋溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度出现急剧下降情况,在第2次实验后F基质淋溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度出现急剧下降情况,这两种基质的淋溶液在第7次实验后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度达到稳定。基质淋溶液的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN浓度变化趋势相似,前3次实验中浓度下降趋势明显。基质中的氮素主要以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形态存在, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 带正电荷更易被土壤中的胶体吸附^[9],所以淋溶液的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

由图2(d)可知,TP浓度的变化趋势和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN浓度的变化趋势相似,随着模拟降雨量的增多,TP浓度逐渐降低并趋于稳定,其中B和F基质淋溶液的TP浓度降低趋势尤为明显。实验末期各基质

淋溶液的TP浓度较为接近,而在第1次实验中各基质淋溶液的TP浓度差异较大,B基质的最高(11.80 mg/L)、A基质的最低(0.34 mg/L),这说明TP的初期淋溶与基质本身含磷量的差异有很大关系。

在实验开始时,基质内的水分含量较低,模拟的降雨径流通过基质内的缝隙向下迁移排出,所以淋溶初期氮、磷浓度较大。随着模拟降雨径流的增加,淋溶液中的氮、磷浓度逐渐降低,这表明降雨量是影响氮、磷淋溶的重要因素,李卓瑞等人^[13]的研究也得到了相似结论。这是因为在降雨使土壤水分饱和的过程中,养分随雨水下渗而向下转移,大部分可溶解养分在径流产生时流失。每次实验A基质淋溶液的氮、磷浓度均最低,B和F基质淋溶液中的氮、磷浓度均为最高,说明不同配比的基质本身营养元素含量的差异会导致淋溶液中氮、磷浓度的不同。

2.2 氮、磷元素的淋溶量

7种植植基质在各次实验中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN和TP的累积淋溶量如图3所示。

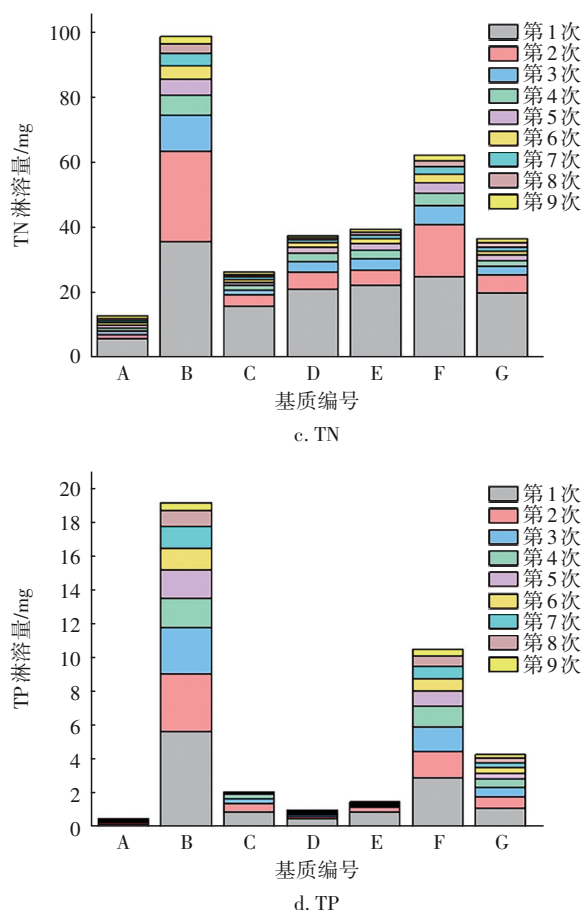
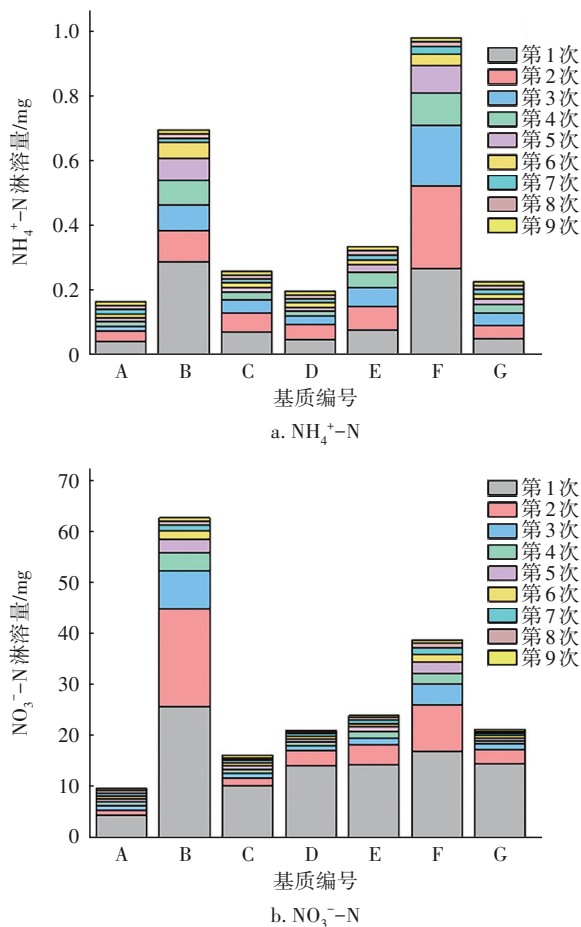


图3 不同基质的氮、磷淋溶量

Fig.3 Nitrogen and phosphorus leaching amount of different growing media

由图3可知,A基质的氮、磷淋溶量最小,远低于其他基质,A基质中的氮、磷主要来源于田园土。B和F基质的氮、磷淋溶量最大,这是因为B和F基质分别以腐叶土和腐殖土为主,含量均超过50%,其中富含的氮、磷元素随雨水下渗淋溶流失。C、D、E和G基质的氮、磷淋溶量低于B和F基质,这是因为G基质中的营养物质腐殖土仅占30%,C、D和E基质中的营养物质草炭或松针的腐殖化程度低。

土壤中的氮素淋溶形态包括 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 和其他形态的氮(有机态氮和亚硝态氮),本研究中 NO_3^--N 的淋溶量远大于 NH_4^+-N ,是TN淋溶的主要形态。TP淋溶量远低于TN淋溶量,这与土壤理化性质有密切关系,而且水溶性磷肥在土壤中有固化作用并容易转化为难溶性磷^[14]。

随着实验次数的增加,每次实验的氮、磷淋溶量占9次实验总淋溶量的比例逐渐减小,前3次实验各基质的氮、磷淋溶量占总淋溶量的比例如图4

所示。7种基质前3次实验的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN和TP累积淋溶量占总淋溶量的比例平均值分别为62.8%、79.9%、75.3%和69.1%,说明前期的降雨对基质中氮、磷的淋溶具有较大的作用。

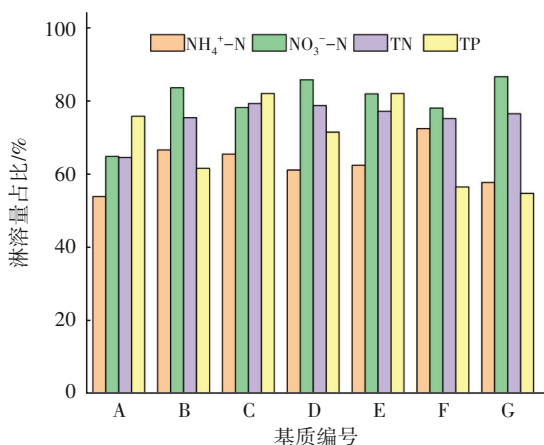


图4 前3次实验的氮、磷淋溶量占比

Fig.4 Proportion of nitrogen and phosphorus leached in the first three experiments

2.3 基质淋溶差异讨论

B和F基质中的腐叶(殖)土占比分别为70%和50%,其富含有机质、腐殖酸等营养物质,结合这两种基质的氮、磷淋溶结果可知,基质中所含营养物质越高,淋溶液中氮、磷浓度越高。

C、D、E基质以田园土和草炭为主要材料,草炭和松针的腐殖化程度不高,所以尽管二者含量之和较高,氮、磷淋溶量仍小于B和F基质。但是在绿色屋顶的长期运行条件下,需考虑草炭、松针等腐殖为可溶解态营养物质,并在降雨冲刷作用下流失的情况。C和G基质中主要材料和营养土的比例相近,但基质G的TP淋溶量大于基质C,这是因为基质G的主要材料为轻沙壤土,其比基质C中的田园土沙粒含量更高。徐梦等人^[15]的研究也表明土壤中沙粒含量较高会导致磷素淋溶量增加。

A基质的氮、磷淋溶量最低,其中的轻质骨料是一种以粉煤灰为主要原料的人造轻骨料,李江丽^[16]的研究表明,使用粉煤灰制成的沸石具有良好的吸附性能和离子交换能力,能够吸附氮、磷等营养物。但是,A基质中未添加营养物质,在实际应用中需综合考虑对植物生长的影响。

当种植基质内所含营养物质超过植物的吸收量时,降雨极容易导致氮、磷元素淋溶,从而使得径流水质变差;而当种植基质所含营养物质不足以提

供植物正常生长所需的养分时,绿色屋顶植被的存活率较低。通过淋溶实验结果可以看出,绿色屋顶种植基质配比不推荐将腐叶土、腐殖土作为基质的主要材料(即占比>50%)。轻沙壤土比田园土的沙粒含量高,易增加基质的TP淋溶量。因此在配制绿色屋顶种植基质时,可使用田园土作为主要材料,配以适量草炭或松针作为营养物质,添加少量蛭石、珍珠岩起到改良土壤结构的作用。

3 结论

① 基质淋溶液中的氮、磷浓度随淋溶次数的增加而降低,并逐渐趋于稳定,降雨对氮、磷淋溶具有较大的促进作用。TP淋溶量小于TN淋溶量, NO_3^--N 淋溶量远大于 NH_4^+-N 淋溶量。

② 当基质中的腐叶土或者腐殖土占比较大(超过50%)时,氮、磷淋溶量较高,不推荐将其作为基质主要材料。以轻沙壤土为主要材料的基质磷淋溶量高于以田园土为主要材料的基质。

③ 配制绿色屋顶种植基质时,可以田园土为主要材料,配以适量草炭或松针作为营养物质,并添加少量蛭石、珍珠岩以改良土壤结构。

参考文献:

- [1] TEOTÓNIO I, SILVA C M, CRUZ C O. Economics of green roofs and green walls: a literature review [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102781.
- [2] 郑馨竺,周嘉欣,王灿. 绿色屋顶的城市降温与建筑节能效果研究[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 222-229.
ZHENG Xinzhu, ZHOU Jiaxin, WANG Can. Research on the urban cooling and energy saving effect of green roofs [J]. Ecological Economy, 2021, 37(2): 222-229 (in Chinese).
- [3] GONG Y W, YIN D K, LI J Q, et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 505-515.
- [4] 宫永伟,杨一帆,李俊奇,等. 屋顶绿化的效益及成本分析[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(3): 133-137.
GONG Yongwei, YANG Yifan, LI Junqi, et al. The analysis of the effect and cost of green roofs [J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(3): 133-137 (in Chinese).

- [5] 刘芳. 土壤渗滤介质系统去除雨水径流污染物的机理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012.
LIU Fang. The Mechanism Research of Pollutants Removal from Rainwater Runoff through the Soil Infiltration System [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012 (in Chinese).
- [6] ZHANG Q Q, MIAO L P, WANG X K, *et al.* The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 144: 142-150.
- [7] 章茹, 侯元元, 刘志超, 等. 绿色屋顶基质层截流减污效应分析[J]. *环境工程*, 2017, 35(11): 42-46.
ZHANG Ru, HOU Yuanyuan, LIU Zhichao, *et al.* Effect analysis of runoff intercepting and pollution reducing capacity of green roof substrates [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(11): 42-46 (in Chinese).
- [8] GONG Y W, ZHANG X W, LI J Q, *et al.* Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139248.
- [9] 欧阳祥, 莫明浩, 计勇, 等. 基于室内土柱模拟的坡耕地红壤氮磷淋溶特征[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 40-46.
OUYANG Xiang, MO Minghao, JI Yong, *et al.* Study on characteristics of nitrogen and phosphorus leaching of red soil in sloping cropland by laboratory simulation tests with soil column [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(11): 40-46 (in Chinese).
- [10] 王哲, 骆逸飞, 郑春丽, 等. 淋溶条件下生物炭对矿区土壤中重金属迁移的影响[J]. *化工进展*, 2020, 39(2): 738-746.
WANG Zhe, LUO Yifei, ZHENG Chunli, *et al.* Effect of biochar on migration of heavy metals in mining soil under leaching conditions [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(2): 738-746 (in Chinese).
- [11] VIJAYARAGHAVAN K, RAJA F D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption [J]. *Water Research*, 2014, 63: 94-101.
- [12] 桑敏, 张伟, 钟兴, 等. 常用基质对粗放型绿色屋顶雨水滞蓄和出流水质特征的影响[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(8): 163-170.
SANG Min, ZHANG Wei, ZHONG Xing, *et al.* Influence from conventional substrate on rainwater retention and outflow water quality characteristics of extensive green roof facility [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(8): 163-170 (in Chinese).
- [13] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 333-338.
LI Zhuorui, WEI Gaoling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 333-338 (in Chinese).
- [14] 沈筱染, 李绍才, 孙海龙. 氮磷钾在两种基质中的淋溶研究[J]. *北方园艺*, 2016(17): 179-183.
SHEN Xiaoran, LI Shaocai, SUN Hailong. Study on nutrient leaching loss in two growth substrates [J]. *Northern Horticulture*, 2016(17): 179-183 (in Chinese).
- [15] 徐梦, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 黔中水利枢纽不同土地利用类型土壤养分淋溶特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 25-30, 35.
XU Meng, LIU Hongyan, WU Pan, *et al.* Characteristics of soil nutrient leaching in different land use types of hydro-junction in Central Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 25-30, 35 (in Chinese).
- [16] 李江丽. 粉煤灰合成沸石优化设计及其废水同步脱氮除磷研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LI Jiangli. Optimize Synthesis of Zeolite from Fly Ash and Its Application in the Simultaneous Removal of Ammonium and Phosphate in Wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese).

作者简介: 何松(1995-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail: 1143636422@qq.com

收稿日期: 2021-05-10

修回日期: 2021-06-07

(编辑: 刘贵春)