

# 填料对绿色屋顶设施出流中营养物质淋失的影响

钟 兴<sup>1,2</sup>, 张 伟<sup>1,2,3</sup>, 邢 成<sup>2</sup>, 车 伍<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

**摘 要:** 为研究填料类型与组成对绿色屋顶设施出流中营养物质淋失的影响, 构建了5种粗放式绿色屋顶装置, 在模拟降雨条件下监测设施出流的水量和水质变化。结果表明, 在绿色屋顶的填料中增加有机质(泥炭), 可有效保障设施中植物的正常生长; 出流中的TN和浊度均随降雨量的增加而减少, 当累计进水量达到0.75倍空床体积(约75 mm降雨量)后趋于稳定; 累计进水量至3倍空床体积(约300 mm降雨量)时, 出流中COD、TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均呈现明显波动, 无明显变化规律, 且出流浓度均高于地表水V类标准; 从长期运行效果看, 填料深度对装置出流污染物无显著影响; 采用泥炭土作为有机质改良填料的绿色屋顶设施出流TN累计淋出量小于传统屋面径流污染物累计排放量, 但其出流中COD和TP累计淋出量远高于传统屋面径流污染物累计排放量和仅采用田园土的绿色屋顶装置累计淋出量。总体来看, 粗放式绿色屋顶装置能够在一定程度上滞留氮, 但表现为磷的释放源。

**关键词:** 绿色屋顶; 填料; 营养物质; 淋失

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0128-05

## Influence of Substrate on Nutrients Leaching of Green Roof

ZHONG Xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, XING Cheng<sup>2</sup>, CHE Wu<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center of Urban Design for Future Cities, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of substrate type and composition on nutrients leaching from green roof, five extensive green roofs were constructed to monitor the effluent quantity and quality during artificial rainfall. Results indicated that adding organic matter (peat) to extensive green roof substrate could ensure plants' growth. The concentrations of TN and turbidity decreased with the increase of cumulative rainfall volume, and tended to be stable when the cumulative rainfall reached 75 mm. But the concentrations of COD, TP and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  didn't show an obvious trend when the cumulative rainfall

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51608026); 北京市科技计划课题(D161100005916004); 高精尖创新中心科研项目(UDC2016040100); 北京建筑大学科研基金资助项目(00331616049); 北京建筑大学金字塔人才培养工程项目

**通信作者:** 张伟 E-mail: zhangwei@bucea.edu.cn

reached 300 mm, and COD, TP and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentrations were much higher than class V standards of surface water. Considering the operation effect in the long-term, substrate depths had no significant influence on TN and TP concentrations. The cumulative TN leaching mass of green roofs adding organic matter (peat) was lower than conventional roof runoff pollution discharge, but COD and TP were much higher than conventional roof runoff pollution discharge and green roofs with only pastoral soil. Extensive green roofs in this study had an ability to retain nitrogen, but could be regarded as a source of phosphorus discharge.

**Key words:** green roof; substrate; nutrient; leaching

绿色屋顶作为海绵城市建设的一项重要的雨水管理技术,具有削减径流总量、延迟径流峰值、缓解热岛效应、保护生物多样性等多重功能<sup>[1]</sup>。其中,粗放式绿色屋顶因其运行维护要求低、易于实施等优点,具有广泛的应用前景。对于粗放式绿色屋顶在径流量控制方面的效果,国内外学者研究结论较为一致,但在径流污染控制方面的效果,现有研究存在一定差异,这主要与绿色屋顶运行初期出流中污染物淋失有关<sup>[1~3]</sup>。Oberndorfer 等人<sup>[4]</sup>研究认为绿色屋顶表现为一种径流污染源;Berndtsson 等人<sup>[5]</sup>对两处密集型绿色屋顶和粗放型绿色屋顶的研究发现,两种类型绿色屋顶出流中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均低于天然降雨;Gregoire 等人<sup>[6]</sup>对某新建粗放型绿色屋顶的监测研究发现,绿色屋顶出流中 TP 浓度明显高于天然降雨。除气候等条件差异外,绿色屋顶采用的填料类型、组成等可能是影响其污染物淋失的主要因素。为此,笔者在参考国内现行绿色屋顶设计标准的基础上,构建不同填料组成的粗放式绿色屋顶小试装置,研究设施出流中营养物质淋失过程,量化评估设施出流中污染物淋出累积负荷,以期为粗放式绿色屋顶设施的工程应用提供参考和依据。

1 材料和方法

1.1 试验装置和填料组成

粗放式绿色屋顶小试装置设于北京建筑大学某

建筑屋顶,包括 6 个 42 cm × 12 cm × 13 cm 的 PVC 装置及相应支架,装置纵向坡度为 5%,较低的一端设置管径为 10 mm 的出流管。装置底部的排水层为凹凸型塑料排水板,并选用无纺土工布作为过滤材料,以防止填料中的颗粒物随水流流出,排水层厚度为 3 cm。种植植物选用佛甲草,种植密度为 240 株/m<sup>2</sup>。小试装置基本符合《种植屋面工程技术规程》(JGJ 155—2013)和《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的要求。

根据绿色屋顶设施生长基质的要求,结合本研究目标,考虑北京本地田园土有机质含量较低,选用富含有机质的泥炭土作为有机质组分,并选用蛭石和珍珠岩等无机轻质材料,以提高填料的有机质含量,保障植物生长需要,同时降低填料比重和设施荷载,保证其蓄水能力。本研究所用填料的理化性质如下:田园土的堆积密度为 1.22 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 0.3%,有效 P 和碱解 N 的含量分别为 1.79、7.35 mg/kg;泥炭土的堆积密度为 0.59 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 17.7%,有效 P 和碱解 N 的含量分别为 59.85、9.80 mg/kg;蛭石的堆积密度为 0.14 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 0.5%;珍珠岩的堆积密度为 0.08 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 0.2%。

根据研究目标,结合相关规范要求,确定小试装置填料的组成和深度,如表 1 所示。另外,设 B 装置不装填料作为空白以模拟传统屋面。

表 1 绿色屋顶模拟装置的填料组成

Tab.1 Composition of simulated green roof substrates

装置编号	填料深度/cm	填料组成(体积比)	有机质含量/%	有效 P/(mg · kg <sup>-1</sup> )	碱解 N/(mg · kg <sup>-1</sup> )	堆积密度/(kg · m <sup>-3</sup> )
C	10	田园土	0.3	1.79	7.35	1 220
V1	10	田园土 40% + 泥炭土 30% + 蛭石 30%	3.98	61.27	382.2	774
P1	10	田园土 40% + 泥炭土 30% + 珍珠岩 30%	2.85	56.86	394.6	711
V2	5	田园土 40% + 泥炭土 30% + 蛭石 30%	3.98	61.27	382.2	774
P2	5	田园土 40% + 泥炭土 30% + 珍珠岩 30%	2.85	56.86	394.6	711

## 1.2 模拟降雨试验方法

本研究以自来水模拟降雨考察填料类型和组成对设施出流水质的影响。采用人工降雨喷淋形式进水,每次的降雨量为 25 mm,降雨强度为 12.5 mm/h,模拟降雨周期为 7 d,共进行 12 个周期。按固定时间间隔收集出流并记录出流量。

试验用自来水水质如下:TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度分别为 2.78、0.04 mg/L,TP 浓度为 0.01 mg/L,COD 浓度为 6.0 mg/L,浊度为 0.23 NTU。与北京市天然降雨水质的监测结果相比,试验用自来水中的氨氮浓度较低<sup>[7]</sup>。

## 1.3 检测项目与方法

小试装置出流采集后保存在 4℃ 冰箱中,在 24 h 内完成所有水质指标的检测。TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP:过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ :纳氏试剂分光光度法;COD:比色法;浊度:浊度仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氮的流出过程

各装置 12 次出流含氮污染物的平均浓度及淋失过程如图 1 所示。

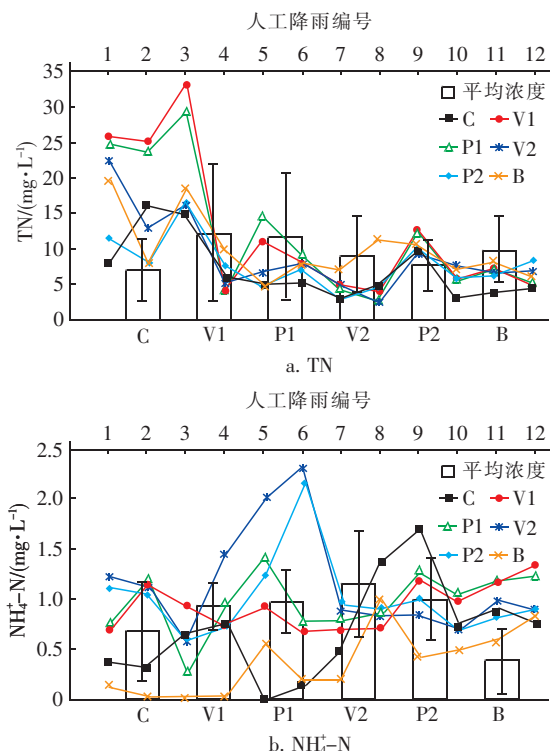


图1 各装置出流含氮污染物平均浓度及淋失过程

Fig.1 Average concentration and leaching process of nitrogenous compounds in 12 artificial rain events

在第3次人工降雨的出流中,V1和P1装置的TN浓度呈现一个峰值,此后随着进水次数的增加,6个模拟装置的出流TN浓度均呈先降低后趋于稳定的趋势;V1、P1、V2和P2装置12次人工降雨出流的TN浓度均高于对照组C装置,这是由于这4个装置中填料的碱解N含量远高于田园土,填料中N的淋失导致设施出流TN浓度较高,超过了地表水V类标准。各装置中均有明显的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋出,在12次人工降雨过程中,出流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度无明显的变化规律。

对比V1、P1、V2和P2装置,在前3次人工降雨出流中,填料深度较大的V1和P1装置中的出流TN浓度均高于填料组成相同但深度较浅的V2和P2装置,由此可知,装置中填料深度越大,设施运行初期淋出的污染物的量也越大,这与Seidl等的研究结果基本一致<sup>[8]</sup>。从第4次人工降雨开始,V1、P1、V2和P2装置出流中TN浓度相差不大( $t$ 检验结果显示不存在显著性差异)。

综上,尽管在设施运行初期(累计进水量为1倍空床体积),填料深度越大则氮淋出量越多,但从长期运行效果来看,绿色屋顶模拟装置的填料深度对出流TN浓度影响不大。

### 2.2 磷的流出过程

在12次模拟降雨试验中,各模拟装置出流中的TP浓度如图2所示。

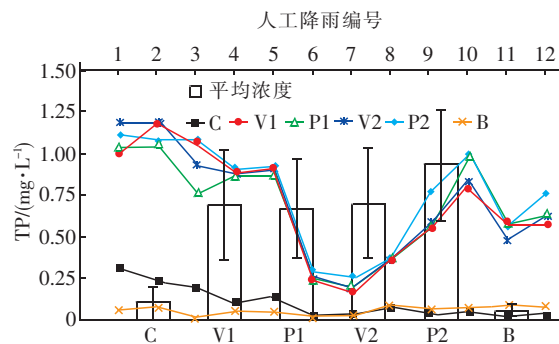


图2 各装置出流中的磷平均浓度及淋失过程

Fig.2 Average concentration and leaching process of phosphorus substances in 12 artificial rain events

根据表1,V1、P1、V2和P2装置中填料的有效P含量远高于C装置中田园土的,在模拟降雨试验中,泥炭土中的P随水流出,在前5次人工降雨过程中,出流中的TP浓度保持在较高的水平,在第6、7次人工降雨过程中显著降低,但在第8~12次模

拟降雨过程中,V1、P1、V2 和 P2 装置出流中的磷浓度呈现先上升后下降的变化趋势。在全部 12 次人工降雨过程中,V1、P1、V2 和 P2 装置出流中的磷平均浓度均明显高于对照组 C 装置,表明填料中添加泥炭土会导致大量的磷淋出,且当进水量达到 3 倍空床体积(累计降雨量为 300 mm)时,装置出流中的 TP 浓度未呈现趋于稳定的趋势。此外,除了 C 装置在进水量达到 3 倍空床体积时出流水质优于地表水 V 类标准,V1、P1、V2 和 P2 装置的出流水质均远达不到此标准。

对比 V1、P1、V2 和 P2 装置在后 4 次人工降雨出流中的磷浓度,填料组成相同但填料深度不同的装置,其出流中的磷浓度相差不大( $t$  检验结果显示不存在显著性差异)。从长期运行效果看,填料深度对出流中的磷浓度无显著影响。

### 2.3 COD 及浊度的出流过程

各装置出流中 COD 浓度和浊度的变化及淋失过程见图 3。

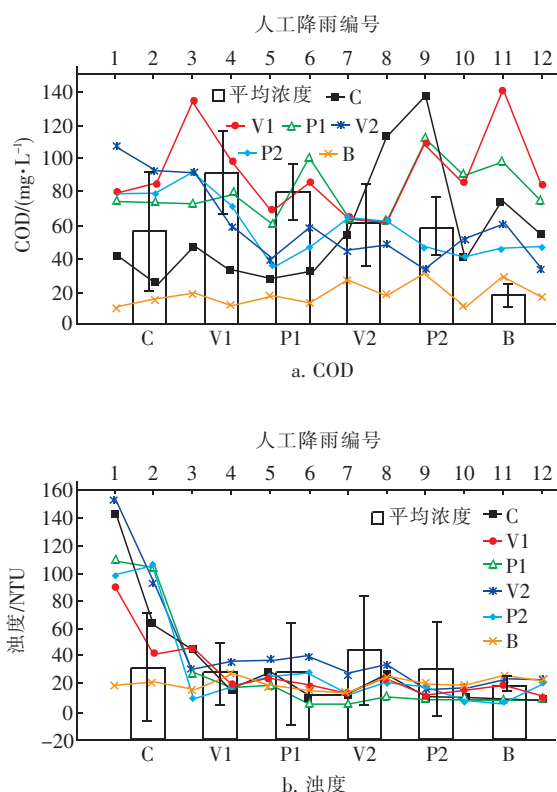


图 3 各装置出流中 COD 浓度和浊度的变化及淋失过程

Fig. 3 Average concentration and leaching process of COD and turbidity in 12 artificial rain events

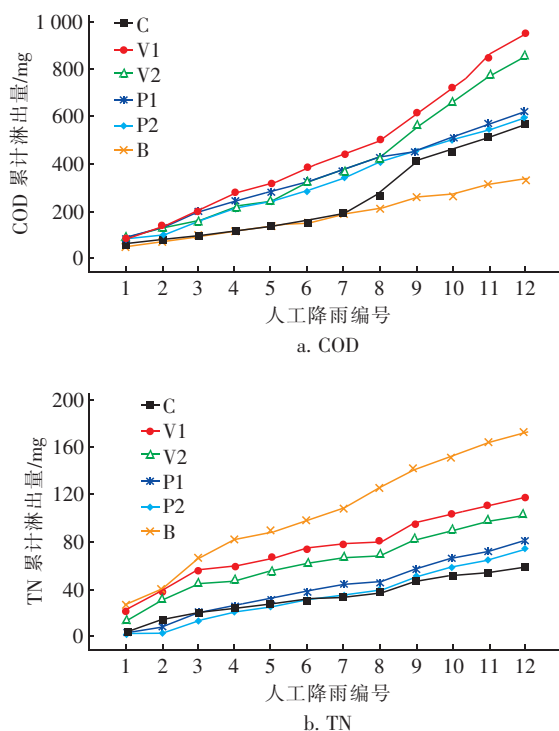
由图 3 可知,V1、P1、V2 和 P2 装置出流中 COD

浓度在 12 次模拟降雨过程中呈现波动变化状态,这 4 个装置中填料的有机质含量高于田园土,在前 6 次人工降雨中,这 4 个装置出流中的 COD 浓度均高于对照组 C 装置;随着人工降雨次数的增加,这 4 个装置出流 COD 浓度波动较大,可能与泥炭土中有机质的降解和释过程有关。对照组 C 装置在第 6~9 次降雨出流中的 COD 浓度甚至表现出明显上升的趋势。C 装置全部由田园土填装,结合其氮和磷的出流过程(见图 1 和图 2),其出流中氮和磷浓度均不高,田园土可为植物提供的营养物质不足。在人工降雨试验过程中,C 装置中植物长势较差,随着环境温度的降低,部分茎叶逐渐枯萎和腐化,可能是导致其出流中 COD 浓度升高的主要原因。总体来看,粗放式绿色屋顶装置经过 12 个试验周期后,其出流 COD 浓度仍超过了地表水 V 类标准。

除空白组 B 装置外,各装置出流的浊度变化趋势明显。经过 3 次进水(0.75 倍空床体积)过程后,各装置出流的浊度显著下降,此后虽略有波动,但总体趋于稳定。随着进水次数的增加,装置中的填料逐步稳定,颗粒物的流失减少。

### 2.4 污染物累计淋出量

根据绿色屋顶模拟装置出流量和污染物浓度,计算得出 12 次进水过程中 COD、TN、TP 的累计淋出量,如图 4 所示。





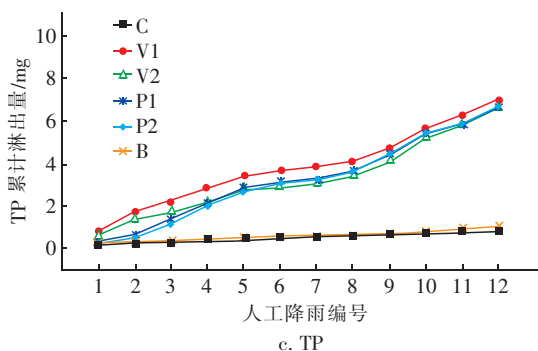


图4 各装置出流中COD、TN和TP的累计淋出量

Fig.4 Cumulative leaching mass of COD, TN and TP

由图4可知,V1、P1、V2和P2装置出流中的TN累计淋出量小于传统屋面径流污染物累计排放量,但COD和TP累计淋出量远高于传统屋面径流污染物累计排放量和仅采用田园土的绿色屋顶装置的累计淋出量。从污染淋出负荷量看,粗放式绿色屋顶装置能够在一定程度上滞留氮,但表现为磷的释放源,这与 Berndtsson 等人的研究结果基本一致<sup>[5]</sup>。为保障绿色屋顶中植物的正常生长,适当添加有机质的粗放式绿色屋顶可在一定程度上滞留氮,但设施出流中磷的淋失仍是值得重视的问题。

### 3 结论

① 粗放式绿色屋顶填料中增加有机质(泥炭土),可有效保障植物的正常生长;设施出流中的TN和浊度均随人工降雨量的增加而呈下降趋势,累计进水量至0.75倍空床体积(约75mm降雨量)后,呈现趋于稳定的趋势;累计进水量至3倍空床体积(约300mm降雨量)时,COD、TP和氨氮均呈现明显波动,无明显变化规律。

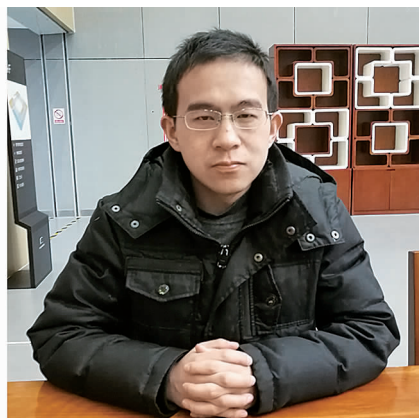
② 经过300mm(3倍空床体积)模拟降雨运行后,粗放式绿色屋顶填料出流中的TN、TP、COD等主要常规指标仍高于地表水V类标准;以泥炭土作为有机质改良填料,存在较高的磷淋出风险。

③ 从长期运行效果看,绿色屋顶模拟装置的填料深度对出流污染物浓度无显著影响。

④ 采用泥炭土作为有机质改良填料的绿色屋顶的出流TN累计淋出量小于传统屋面径流排放量,但出流COD和TP累计淋出量远高于传统屋面径流污染物累计排放量和仅采用田园土的绿色屋顶装置的累计淋出量;从污染物累计淋出量看,粗放式绿色屋顶装置能够在一定程度上滞留氮,但表现为磷的释放源。

### 参考文献:

- [1] Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 57: 740-752.
- [2] Malcolm E G, Reese M L, Schaus M H, et al. Measurements of nutrients and mercury in green roof and gravel roof runoff [J]. *Ecol Eng*, 2014, 73: 705-712.
- [3] Harper G E, Limmer M A, Showalter W E, et al. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA [J]. *Ecol Eng*, 2015, 78: 127-133.
- [4] Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, et al. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services [J]. *Bioscience*, 2007, 57(10): 823-833.
- [5] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecol Eng*, 2009, 35(3): 369-380.
- [6] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(6): 963-969.
- [7] 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).
- [8] Seidl M, Gromaire M C, Saad M, et al. Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs [J]. *Environ Pollut*, 2013, 183: 195-203.



作者简介:钟兴(1992-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail: zxing05@163.com

收稿日期:2017-09-04