

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.018

简单式绿色屋顶对雨水径流营养盐的调控效果研究

张贤巍¹, 宫永伟¹, 印定坤¹, 王文亮², 李海燕¹, 邱荣庭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. 北京未来
城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 基于天然降雨长期监测和人工模拟降雨实验,研究了3个简单式绿色屋顶实验装置雨水径流营养盐浓度、总量及削减能力的差异,分析了基质层和排水层材料选型及降雨量等对绿色屋顶径流营养盐调控效果的影响。结果表明:绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 浓度高于普通混凝土屋面;选用不同排水层材料的绿色屋顶出水营养盐浓度差异不明显;而选用超轻量基质作为基质层材料时,绿色屋顶出水 TP 浓度较高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低。绿色屋顶能削减部分径流中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 总量,不同基质层材料和排水层材料的绿色屋顶对不同营养盐总量削减效果无明显差异。除绿色屋顶自身不同结构层选型带来的差异外,降雨量和雨前干期是影响绿色屋顶出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 浓度、营养盐总量及总量削减率的重要因素。

关键词: 绿色屋顶; 结构层材料; 营养盐浓度; 营养盐总量削减率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0106-07

Effect of Extensive Green Roof on Regulation of Nutrients in Rainfall Runoff

ZHANG Xian-wei¹, GONG Yong-wei¹, YIN Ding-kun¹, WANG Wen-liang²,
LI Hai-yan¹, QIU Rong-ting¹

(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 Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: The differences of nutrient concentration, nutrient total amount and reducing capacity of rainfall runoff in three extensive green roof experiments were explored by long-term monitoring of natural rainfall and artificial rainfall experiments, and the effect of substrate layer, drainage layer selection and precipitation on regulation of runoff nutrients of green roof were analyzed. The concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP in the green roof runoff was higher than that of the concrete roof. There was no significant difference in nutrient concentration of green roof effluent when different drainage layers were adopted. When ultra-light substrate was used as the substrate layer, the TP concentration of the green roof runoff was higher, but the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration was lower. Green roof could reduce part of the total amount of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP in the runoff. Green roofs with different substrate layer and the drainage layer had no significant difference on different nutrient total amount reduction. In addition to the difference caused by the selection of different structural layers of the green roof, precipitation and

prior dry period were important factors affecting $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP concentration, total nutrient amount and total reduction rate of green roof effluent.

Key words: green roof; structural layer material; nutrient concentration; total nutrient reduction rate

目前国内低影响开发实践中,使用了绿色屋顶这种非常有效的雨洪管理技术,它们可以滞留雨水、削减和延缓峰值流量、净化水质^[1-2]。由于中国同许多其他国家一样,城市土地资源十分有限,因此绿色屋顶越来越受欢迎。

已有研究表明,结构层材料的选择会影响绿色屋顶对雨水径流中不同营养盐的调控效果,段丙政等^[3]发现,基质层采用4种材料(泥炭土、蛭石、珍珠岩和锯末)配成的混合基质时,径流中总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)浓度普遍较高,氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度较低。Aitkenhead-Peterson等^[4]发现,选用屋顶绿化专用基质作为基质层材料时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP浓度低于普通屋面,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于普通屋面。Liu等^[5]采用田园土、草炭、松针、珍珠岩、蛭石等基质相互组合,配成3种不同的混合基质,发现绿色屋顶出水TN和TP均高于普通屋面。

绿色屋顶结构层材料的不同对径流营养盐控制效果影响较大,笔者拟在团队的先前研究基础上,以营养盐浓度、总量以及总量削减率为出发点,深入探究两种基质层材料以及排水层材料对绿色屋顶径流不同营养盐的作用效果,为实际工程中绿色屋顶结构层材料选择提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 装置设计

本研究的实验场地位于北京建筑大学大兴校区雨水实验室屋顶,构建3个简单式绿色屋顶实验装置(以下简称EGR),另设一个对照装置,内铺混凝土面层。EGR装置平面大小为0.5 m×0.5 m。

根据前期研究结果,佛甲草适合北京市气候特征,因此本研究中绿色屋顶植被层材料选用佛甲草^[6],为探讨不同结构层材料对绿色屋顶径流水质调控能力的影响效果,3个实验装置分别设置了不同的排水层材料和基质材料,基质厚度均为100 mm。排水层分别选用20 mm厚的凹凸排水板和陶粒,基质层分别选用超轻量基质和改良土(由田园土、草炭和松针按3:4:3质量比配成),由于基质营养物质含量较高,EGR建成后不对其施肥。实验

装置各结构层材料选型见表1。

表1 实验装置各结构层材料选型

Tab.1 Structural layers of experimental equipment

装置编号	TID	TIC	TUD	NR
植被层	佛甲草	佛甲草	佛甲草	—
基质层	改良土	改良土	超轻量基质	—
排水层	凹凸塑料排水板	陶粒	凹凸塑料排水板	—
过滤层	土工布	土工布	土工布	—

注: 用于表征绿色屋顶装置的缩写字母T为佛甲草;I为改良土;U为超轻量基质;D为凹凸塑料排水板;C为陶粒;NR为混凝土对照装置。

1.2 天然降雨监测与模拟降雨

实验采用天然降雨监测和模拟降雨的方式进行。人工模拟降雨实验于2018年8月—10月进行,降雨实验共计6次,在同一露天环境进行,选取北京市重现期为3年和5年的1 h降雨事件。天然降雨监测从2019年3月—10月,降雨数据由安装在雨水实验室屋顶上的HOBO U30气象站进行监测,将RG3-M雨量计改为流量计功能,监测EGR实验装置的径流量,将容量为10 L的玻璃瓶置于雨量计下方,接绿色屋顶径流水样(见图1)。实验期间共监测到35场天然降雨,其中有效出流降雨18场(通常降雨量大于6 mm,出流量大于100 mL)。

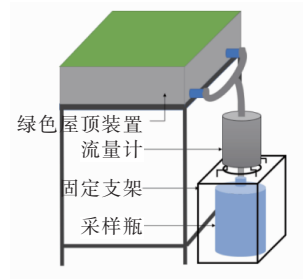


图1 绿色屋顶流量监测和水样收集

Fig.1 Rainfall runoff monitoring and water sample collection of green roof

1.3 分析方法

通过 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP表征绿色屋顶径流中营养盐的情况,用场次出流水质平均浓度以及总量削减率作为评价绿色屋顶水质调控规律的指标,计算方法如下:

$$EMC = \frac{M}{R_g} = \frac{\int_0^t C_i \times Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

式中:EMC 为场降雨径流污染物平均浓度, mg/L; M 为径流过程中污染物的量, g; R_g 为径流总量, m^3 ; t 为时间, min; C_i 为 i 时刻污染物的浓度, mg/L; Q_i 为 i 时刻径流量, L/min。

$$P_{irr} = \frac{\sum_{i=0}^t C_{0i} \times R_{0i} - \sum_{i=0}^t C_i \times R_{gi}}{\sum_{i=0}^t C_i \times R_{0i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_{irr} 为污染物总量削减率, %; C_{0i} 为空白对照屋面 i 时刻的污染物浓度, mg/L; R_{0i} 为空白对照屋面 i 时刻的径流量, L/min。

2 结果与讨论

2.1 模拟降雨实验调控效果分析

2.1.1 营养盐浓度分析

6 场人工模拟降雨事件下, 各装置的出水 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 和 TP 浓度见表 2。其中进水为自来水, $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 和 TP 平均浓度分别为 1.36、8.72 和 0.13 mg/L。3 个绿色屋顶装置出水 $NH_4^+ - N$ 和 TP 平均浓度均大于对照屋面, $NO_3^- - N$ 平均浓度接近对照屋面, 但从各单场降雨事件看, 第一场模拟降雨对照屋面 $NO_3^- - N$ 浓度较高, 后续场次的降雨, 绿色屋顶出流 $NO_3^- - N$ 浓度高的场次占大多数, 而且各装置 $NO_3^- - N$ 浓度在不同降雨事件下差异较大。Zhang 等^[7]认为, 绿色屋顶出水中较高浓度的 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 可能是从种植基质中释放出来的。郑美芳等^[8]同样发现绿色屋顶出水 TP 浓度远高于普通屋面, 而出水 TP 浓度增加可能是源于植物分解释放。Teemusk 等^[9]发现, 大暴雨事件下绿色屋顶会释放出更多的 $NH_4^+ - N$, 绿色屋顶径流中的 $NO_3^- - N$ 浓度比中小降雨事件高, 这可能是受植被层和基质层的共同影响。

表 2 绿色屋顶及对照屋面径流营养盐浓度

Tab. 2 Runoff nutrient concentration of green roof and non green roof $mg \cdot L^{-1}$

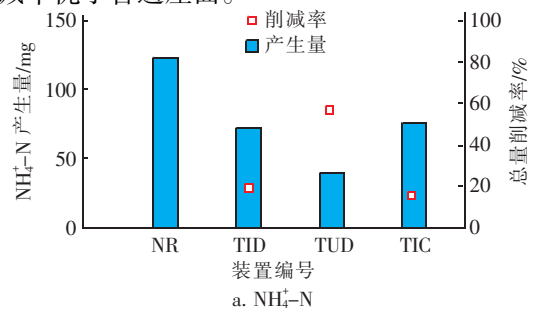
装置编号	$NH_4^+ - N$	$NO_3^- - N$	TP
TID	0.94 ± 0.50	10.53 ± 7.96	0.35 ± 0.40
TIC	0.93 ± 0.86	12.77 ± 12.21	0.40 ± 0.26
TUD	0.68 ± 0.55	12.70 ± 6.84	0.41 ± 0.17
NR	0.54 ± 0.56	12.81 ± 18.25	0.27 ± 0.28

对各 EGR 装置而言, TID 与 TIC 装置 $NH_4^+ - N$

平均浓度基本相同, 而 TUD 装置 $NH_4^+ - N$ 平均浓度较低, TIC 与 TUD 装置 $NO_3^- - N$ 平均浓度基本相同, TID 装置的 $NO_3^- - N$ 平均浓度较低, 3 个绿色屋顶装置 TP 平均浓度基本相同。从 TID 和 TUD 装置出流水质结果可以看出, 基质的不同会使绿色屋顶出流 $NH_4^+ - N$ 和 TP 浓度产生差异, 选用超轻量基质时出水 $NH_4^+ - N$ 浓度较低, 而选用改良土时, 出水 $NH_4^+ - N$ 浓度较高。TID 和 TIC 出水 $NH_4^+ - N$ 和 TP 浓度较为接近, 不同排水层材料的绿色屋顶对出水营养盐浓度影响差异不明显。TID 和 TIC 装置基质中所含草炭具有很高的有机物质, 这可能导致这两个装置出流中具有比使用超轻量基质的 TUD 装置更高浓度的 $NH_4^+ - N$, 这与 Liu 等^[5]研究结果相似, Monteiro 等^[10]也发现绿色屋顶的种植基质中具有较少有机物质时, 出水水质较好。

2.1.2 营养盐总量分析

6 场人工模拟降雨事件下, 各装置的出流 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 和 TP 营养盐总量及平均削减情况见图 2。可以看出, 尽管绿色屋顶径流中 3 种营养盐浓度均大于对照屋面, 但受其自身流量削减效果的影响, 其营养盐累积量均小于对照屋面, 3 个装置对 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 、TP 的平均削减率分别为 30.50%、35.14%、39.94%。结合 6 场人工模拟降雨事件的降雨特征, 在降雨量大、持续时间短、降雨强度高的降雨事件下, 绿色屋顶水量滞留效果较差, 出水流量大, 但 3 个绿色屋顶装置仍能削减 30% ~ 40% 的氮磷营养盐总量。通常情况下, 降雨量越小, 削减率越高, 在中雨及以下的降雨事件下绿色屋顶几乎不发生出流, 即不会出现营养盐的释放情况, 因此绿色屋顶实际状态下营养盐总量削减效果应更大。Carpenter 等^[11]研究同样发现, 在场降雨量差异较大的天然降雨中, 尽管绿色屋顶出水中营养物质浓度通常较大, 但由于其较强的雨水滞留能力, 因此削减率优于普通屋面。



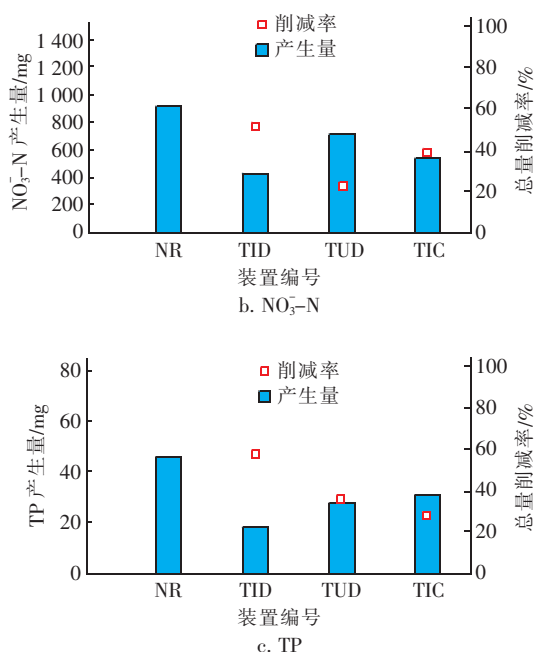


图2 人工模拟降雨下径流中的营养盐总量及削减率

Fig. 2 Nutrient production and the reduction rate in artificial rainfall runoff

由图2可见,TID对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP去除效果较好,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果一般;TUD对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果较好,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP去除效果一般;TIC对3种营养盐总量的去除效果较平均。3个装置对3种营养盐去除效果较为相近,TID和TIC装置径流各营养盐浓度本身与TUD绿色屋顶装置差异不大,但综合考虑其较高的雨水滞留能力,因此对3种营养盐综合去除效果较好,而TUD装置由于雨水滞留能力较差,因此对3种营养盐去除效果略差。

2.2 天然降雨出流营养盐浓度分析

将各装置在18场实测出流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP营养盐浓度整理并绘成箱线图,如图3所示(TR为天然降雨)。天然降雨中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP浓度较高, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较低,而对照屋面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP浓度与3个EGR装置差异不大。TID与TIC装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度水平差异不大,平均浓度分别为2.64、2.33 mg/L,TUD装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度水平较低,平均浓度为1.94 mg/L。TUD装置TP浓度高于TID和TIC,平均浓度为0.31 mg/L,而TID与TIC装置的TP平均浓度分别是0.19、0.20 mg/L,两者差异也不大。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP状态比较稳定,所以各EGR装置平均浓度值与中位数相近,

而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 状态不太稳定,各装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值与中位数差异很大。分析发现,在2019年7月29日的暴雨事件(降雨量为52.8 mm)后半场,各EGR的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 都非常高,这是因为:在降雨前半场与后半场有5 h的降雨间隔,经过前半场36.2 mm的降雨后,各EGR装置土壤基质湿度快速升高,土壤含水量维持在较高水平,大量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在後半场降雨中随绿色屋顶径流水体排出,导致后半场降雨EGR装置出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度非常高。

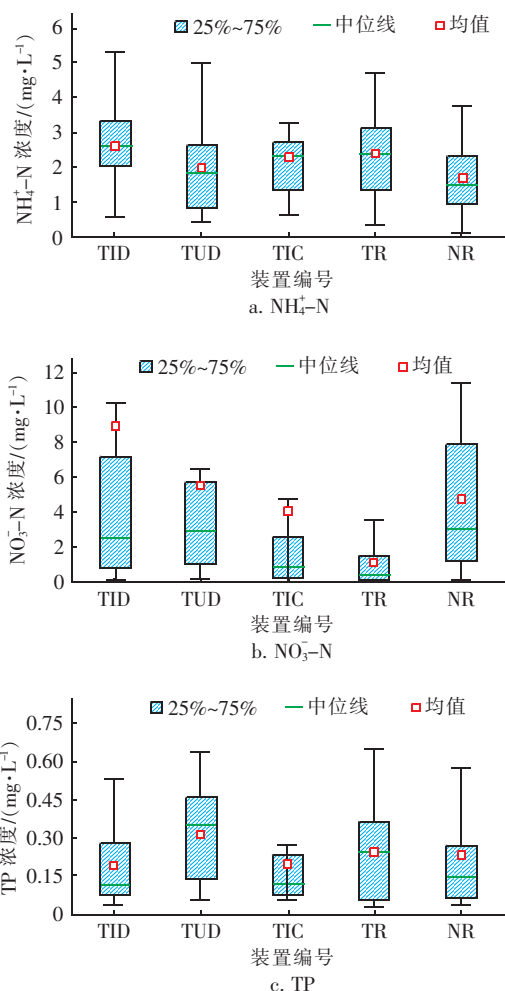


图3 天然降雨事件下径流中各营养盐浓度

Fig. 3 Concentration of nutrients in runoff of natural rainfall events

就3个EGR装置而言, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度表现情况与模拟降雨实验结果类似,均表现为TID > TIC > TUD,采用超轻量基质作为基质层材料时,绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低,而采用凹凸排水板作为排水层材料时,绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度略高于陶粒为排水层材料的装置,但差异不大。天然降雨和

模拟降雨两种出流类型的监测数据相互佐证,也间接体现了实验数据的合理性。在天然降雨中,各EGR装置的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度在 2.00 mg/L 左右,模拟降雨实验平均为 1.00 mg/L 左右,浓度平均值差异较大,团队先前研究中也出现模拟降雨实验EGR装置的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度低于天然降雨实验的情况,结合实验整体情况分析,这说明除绿色屋顶结构层材料的不同会对出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度产生影响外,诸如降雨量、降雨历时等特征因素也会对绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的高低产生影响。

对各装置TP浓度分析,天然降雨和模拟降雨实验结果同样类似,天然降雨下EGR装置出流TP浓度值略小于模拟降雨,但均表现为 $\text{TUD} > \text{TIC} > \text{TID}$ 。选用超轻量基质比选用改良土作为EGR装置基质类型的出水TP浓度高,无论采用凹凸排水板或是陶粒作为排水层材料EGR装置出水TP浓度差异都不大。天然降雨下各装置TP平均浓度普遍比模拟降雨TP平均浓度值小 $0.10 \sim 0.15 \text{ mg/L}$,这可能是由于在短历时高降雨量的事件下,EGR装置中可能有更多的TP被冲刷出来,导致出水TP偏高。

对各装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分析,受其状态较不稳定的影响,各EGR装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度差异很大,且天然降雨和模拟降雨实验中,无论是单个装置内部或是3个装置间 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对比,结果都有较大差异。模拟降雨实验中各EGR的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著大于天然降雨事件,而中、小雨事件下,土壤基质与水分的接触并不充分,因此出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度通常低于 1 mg/L ,部分场次浓度值甚至低于检出限,这表明绿色屋顶径流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度大小可能与降雨量有关。

2.3 天然降雨出流营养盐总量及其削减效果分析

2.3.1 营养盐总量分析

将各装置监测到的水质数据结合雨量计进行整理,在进行营养盐总量分析时将5场小雨事件省略(部分EGR装置出流量小于 50 mL ,不够测定所有的水质指标),选择3个EGR装置和对照装置水质数据均完整的降雨场次进行分析,以确保讨论分析的准确性及可靠性。3个EGR装置和对照屋面在天然降雨下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP总量随降雨量变化情况见图4。由图4(a)可知,在每场降雨中,绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量均维持较低水平,普通屋面径流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷显著大于绿色屋顶。3个

EGR装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量总体表现为 $\text{TID} > \text{TIC} > \text{TUD}$,其中,TID与TIC装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量差异不大,TUD的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量比较小,3个装置出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量大小顺序与其浓度高低顺序一致。同时,线性拟合结果显示,EGR装置和普通屋面径流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量与降雨量呈正相关,各装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量和降雨量的相关系数 R^2 值大于 0.8 ,这表明随着降雨量的增大,绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 外排量增大。

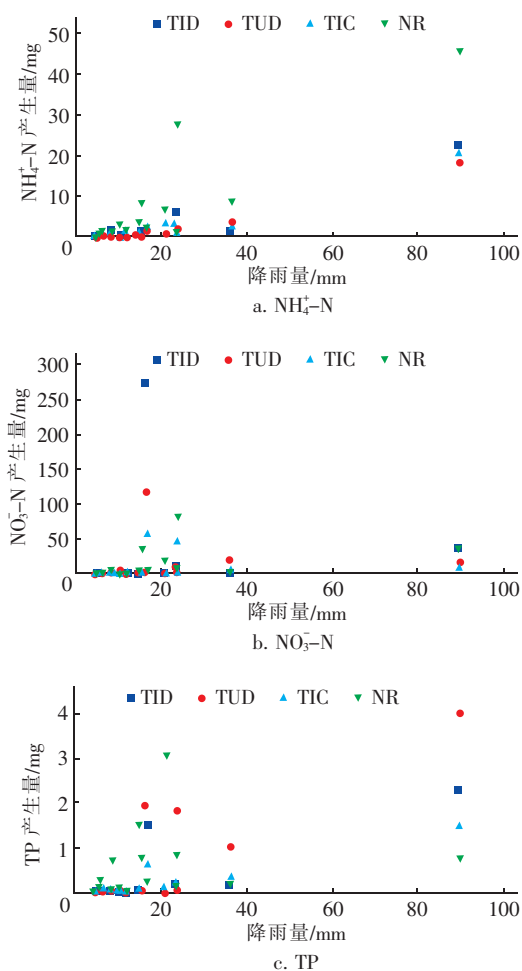


图4 天然降雨事件下营养盐总量随降雨量分布情况

Fig. 4 Distribution of nutrient production in natural rainfall events

由图4(b)可知,3个EGR装置和对照屋面在各降雨事件下产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量不稳定,一部分降雨下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷可能为0,而部分雨前干期较短的降雨事件中,各EGR装置外排 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 量很高,在2019年7月29日降雨事件下TID装置的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 产量高达 275 mg ,可以看出EGR装置和对

照屋面在天然降雨下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量上下限很高,各装置间 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量在各降雨事件下无明显规律,且随场降雨量大小也无明显变化。

由图4(c)可知,大多数天然降雨下,普通屋面径流 TP 总量大于绿色屋顶,3个 EGR 装置中,TUD 装置出水 TP 总量最大,平均产量接近普通屋面,TID 与 TIC 装置出水 TP 总量表现较好,两个装置 TP 平均总量仅分别为普通屋面的 1/2 和 1/3。分析各装置与降雨量的线性拟合曲线可发现,普通屋面的 TP 总量与降雨量大小无明显关系,而 3 个 EGR 装置 TP 总量大小与降雨量大小均为正相关, R^2 均在 0.8 以上。

2.3.2 营养盐总量削减率

各绿色屋顶装置在监测期内在各场降雨下对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 营养盐总量削减情况如图5所示(削减率为负值时未显示)。3个 EGR 装置在大多数降雨事件下均能削减一部分出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 外排量,其中对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的削减效果最好且最稳定,除 2019 年 9 月 13 日事件外,其余降雨事件 3 个装置对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均表现为削减,TID、TUD 和 TIC 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均削减率分别为 55.25%、78.47%、63.61%,削减效果很好,3 个装置对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 削减效果表现为:TUD > TIC > TID,装置间削减效果的差异与 6 场模拟降雨实验结果表现一致,天然降雨下各 EGR 装置对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均削减率高于模拟降雨。

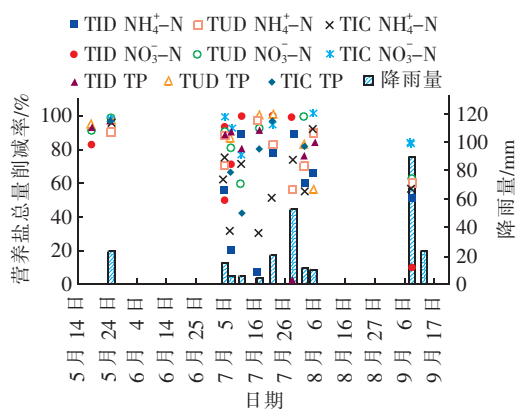


图5 各绿色屋顶装置在各降雨事件下营养盐总量去除率情况

Fig. 5 Nutrient reduction rate of each green roof module for natural rainfall events

3 个绿色屋顶装置对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 削减效果在不同降雨场次下表现不一致,在 13 场降雨事件中,有 8

场降雨事件绿色屋顶装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 表现为削减,有 4 场降雨下 3 个 EGR 装置的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果有增有减,2019 年 9 月 13 日事件下 3 个 EGR 装置的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均表现为增加。8 场 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 表现为削减的事件中,各装置平均削减率表现为 $\text{TID} < \text{TUD} < \text{TIC}$ 。由图 5 可知,表现为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量增加的事件发生在 2019 年 7 月 29 日和 2019 年 9 月 9 日的暴雨事件,以及 7 月和 9 月 3 场雨前干期较短的降雨事件,由此可知,降雨量的增加导致绿色屋顶出水水量增大,进而导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 排出量增多,此外,雨前干期较短会使土壤基质与植物的接触效果较好,这也是导致出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外排量较大的重要原因。

在 13 场降雨事件中,有 10 场降雨下 3 个绿色屋顶装置表现为对 TP 外排量削减,其中 TID 对 TP 平均削减率为 88.99%,TUD 为 86.18%,TIC 为 82.15%,3 个 EGR 对 TP 削减效果相近。对 TP 外排量表现为增加的降雨场次与对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外排量表现为增加的降雨场次类似,这表明强降雨是造成绿色屋顶出水 TP 总量较高的最主要原因,其次是较短的雨前干期,而造成 TP 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外排量增加的原因主要是高湿度土壤基质环境下,植物根部对水分吸收生长造成的氮磷物质大量外排。此外,绿色屋顶基质厚度也会对出水总量产生影响,团队先前研究发现,基质厚度为 5 cm 的绿色屋顶出水 TP 浓度高于普通屋面,与本研究一致,但 TP 总量表现为负削减,与本研究结果不一致,这是由于 5 cm 基质厚度的绿色屋顶滞留能力有限,尽管出流 TP 浓度相近,但受径流外排量较大的影响,TP 外排量也比较大,因此实验结果与本研究略有差异。

综合来看,在天然降雨事件下,TID 对 TP 削减效果最好,TIC 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 削减效果最好,TUD 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 削减效果较好,这也与 6 场模拟降雨实验的监测结果相似。3 个装置对 3 种营养盐的去除效果略有差异。此外,结合团队先前的研究成果,从径流量滞留、径流峰值削减、污染物总量削减以及实际工程中绿色屋顶植物生长存活、运行维护等方面统筹考虑,绿色屋顶各结构层选材时,“佛甲草 + 改良土 + 凹凸塑料排水板”是较为理想的选择。

3 结论

① 绿色屋顶出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 浓度高于普通屋面,选用不同排水层材料的绿色屋顶对出水中 3 种营养盐浓度影响差异不明显,选用超

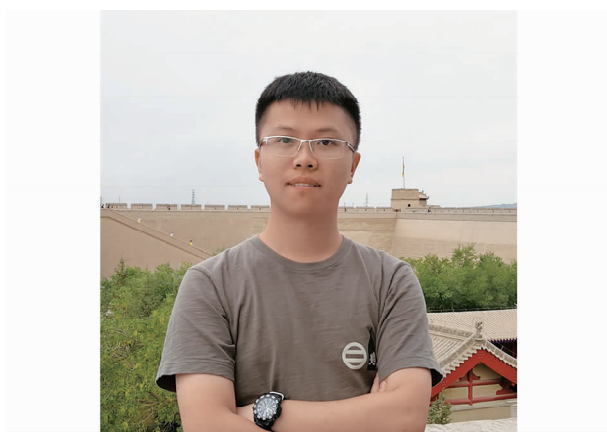
轻量基质作为基质层材料时,绿色屋顶出水 TP 浓度较高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低。

② 绿色屋顶能削减部分径流的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 总外排量,不同基质层材料和排水层材料的绿色屋顶对不同营养盐削减效果略有差异,但总体差异不大。

③ 除绿色屋顶本身不同结构层材料选型带来的差异外,降雨量和雨前干期是影响绿色屋顶出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 浓度、总量及削减率的重要因素。

参考文献:

- [1] Lee J Y, Moon H J, Kim T I, *et al.* Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system[J]. *Environ Pollut*, 2013, 181:257–261.
- [2] Chen X, Shuai C, Chen Z, *et al.* What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 654:742–750.
- [3] 段丙政,赵建伟,高勇,等. 绿色屋顶对屋面径流污染的控制效应[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(9):57–59.
- Duan Bingzheng, Zhao Jianwei, Gao Yong, *et al.* Control effect of green roofs on roof runoff pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(9):57–59 (in Chinese).
- [4] Aitkenhead-Peterson J A, Dvorak B D, Volder A, *et al.* Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas[J]. *Urban Ecosyst*, 2011, 14(1):17–33.
- [5] Liu W, Wei W, Chen W, *et al.* The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs[J]. *J Hydrol*, 2019, 576:575–582.
- [6] Gong Y, Yin D, Fang X, *et al.* Rainwater retention effect of extensive green roofs monitored under natural rainfall events—A case study in Beijing[J]. *Hydrol Res*, 2018, 49(6):1773–1787.
- [7] Zhang Q, Miao L, Wang X, *et al.* The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution [J]. *Landsc Urban Plan*, 2015, 144:142–150.
- [8] 郑美芳,邓云,刘瑞芬,等. 绿色屋顶屋面径流水量水质影响实验研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2013, 47(10):1846–1851.
- Zheng Meifang, Deng Yun, Liu Ruifen, *et al.* Influence of two green roofs on runoff quantity and quality [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(10):1846–1851 (in Chinese).
- [9] Teemusk A, Mander Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events [J]. *Ecol Eng*, 2007, 30(3):271–277.
- [10] Monteiro C M, Calheiros C S C, Martins J P, *et al.* Substrate influence on aromatic plant growth in extensive green roofs in a Mediterranean climate [J]. *Urban Ecosyst*, 2017, 20(6):1347–1357.
- [11] Carpenter C M G, Todorov D, Driscoll C T, *et al.* Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations [J]. *Environ Pollut*, 2016, 218:664–672.



作者简介:张贤巍(1995–),男,云南玉溪人,硕士研究生,主要研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail:405963249@qq.com

收稿日期:2019–11–26