

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.029

多孔纤维棉在绿色屋顶中的适配性试验研究

谢鹏¹, 宫永伟¹, 仇志铭², 孙建², 薛重华¹, 李霞¹, 成宇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. 北京金隅节能保温科技(大厂)有限公司, 河北廊坊 065300)

摘要: 为了解多孔纤维棉在绿色屋顶排(蓄)水层的适配性, 分别采用塑料凹凸排水板和多孔纤维棉作为绿色屋顶试验装置的排(蓄)水层, 通过模拟降雨试验对外排径流量、水质和植物生长进行监测, 探究多孔纤维棉与传统排(蓄)水层材料的差异。结果表明: 相较于塑料凹凸排水板, 2~8 cm厚的多孔纤维棉更适合作为绿色屋顶的排(蓄)水层, 在干旱期可维持植物生长, 在降雨期可提高雨水滞留效果和对悬浮物的削减效果, 减少TP和COD_{Cr}的淋出, 但会加剧TN的淋出。

关键词: 绿色屋顶; 排(蓄)水层; 多孔纤维棉; 雨水滞留效果; 径流量; 水质

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)03-0237-09

Experimental study on suitability of porous fiber cotton in green roofs // XIE Peng¹, GONG Yongwei¹, QIU Zhiming², SUN Jian², XUE Chonghua¹, LI Xia¹, CHENG Yu¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Jinyu Energy Saving and Thermal Insulation Technology (Dachang) Co., Ltd., Langfang 065300, China)

Abstract: In order to understand the adaptability of porous fiber cotton in the drainage (storage) layer of a green roof, plastic concave-convex drainage plates and porous fiber cotton were respectively used as drainage (storage) layers of green roof test device, and the differences between porous fiber cotton and traditional drainage (storage) layer materials were explored through monitoring runoff, water quality, and plant growth in rainfall simulation test. The results show that, compared with plastic concave-convex drainage plate, porous fiber cotton with a thickness of 2 to 8 cm is more suitable for the drainage (storage) layer of green roof, which can sustain plant growth during dry periods, improve stormwater retention effect and suspended solid reduction effect during rainfall periods, and reduce the leaching of TP and COD_{Cr}, but it will aggravate the leaching of TN.

Key words: green roof; drainage (storage) layer; porous fiber cotton; stormwater retention effect; runoff; water quality

随着我国城市化快速发展,许多城市面临着内涝频发、面源污染严重等问题^[1],在全国范围内推行海绵城市建设是解决各种城市雨水问题的有效手段^[2]。海绵城市设施主要包括雨水花园、透水铺装、绿色屋顶等^[3],其中,绿色屋顶作为一种不占用地表空间的海绵设施,近年来在海绵城市建设中受到许多城市的青睐。绿色屋顶具有多项功能,不仅可以节能减排、降声减噪、缓解热岛效应、改善城市生态环境^[4],而且对雨水径流量、水质具有调控作用。绿色屋顶一般由植被层、基质层、过滤层、排(蓄)水层和防渗层组成,各结构层的参数会对绿色

屋顶生态功能产生不同的影响^[5-6]。

绿色屋顶的排(蓄)水层位于过滤层和防渗层之间,可排除基质无法保留的多余水分,具有一定的蓄水能力,以防止在屋顶上产生局部积水。排(蓄)水层结构参数会影响绿色屋顶的径流量、水质和植物生长。常用的排(蓄)水层材料一般有塑料凹凸排水板、陶粒和砾石,结构粗糙的材料可以提高过滤效能,降低积水风险^[7]。部分研究使用了多孔石材作为绿色屋顶排水层,如火山灰砾石^[8]、珍珠岩^[9]。一些回收利用的材料(竹茎、竹节、聚酯瓶盖和聚酯瓶底)作为绿色屋顶的排水层,同样可以保证排水

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

作者简介: 谢鹏(2000—),男,硕士研究生,主要从事城市雨洪控制与利用研究。E-mail:18810310108@163.com

通信作者: 宫永伟(1982—),男,教授,博士,主要从事城市雨洪控制与利用研究。E-mail:gongyongwei@163.com

顺畅和植物生长^[10]。秦华鹏等^[11]发现增加蓄水层厚度可提高储水能力,进而增加绿色屋顶对雨水径流的削减量。Wang 等^[12]认为排水层是影响绿色屋顶径流污染物源和汇的重要内部因素之一。目前,有关不同基质材料及其厚度、不同植被对绿色屋顶功能影响的研究较多,但鲜有系统地针对绿色屋顶中排(蓄)水层功能及其影响因素的研究。

在绿色屋顶中使用保水性材料,如聚合物和再生纺织纤维、岩棉、膨胀珍珠岩、聚乙烯和聚氯乙烯,可以向基质和植被提供水分,并提高径流控制效果^[13-14]。多孔纤维棉作为一种耐久性好、吸水率高、孔隙率大且较易施工的材料,在绿色屋顶中极具应用潜力。因此,本文基于对不同类型和厚度的排(蓄)水层绿色屋顶径流量、水质以及植物生长的监测,综合分析不同厚的多孔纤维棉作为绿色屋顶排(蓄)水层的优势与劣势,结合各因素研究其最佳厚度范围,为多孔纤维棉在绿色屋顶中的适配性应用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

1.1.1 试验装置

试验装置位于北京建筑大学大兴校区雨水实验室屋顶。在试验平台上搭建了6个绿色屋顶装置(DB1、FC1~FC5),并设置了1个对照装置,在其内部铺设混凝土面层模拟普通屋面(normal roof, NR)进行对比分析。绿色屋顶试验装置见图1,从上至下的结构依次为植被层、基质层、过滤层、排(蓄)水层和防渗层。装置的外观尺寸为0.5 m×0.5 m,高度根据所填充的材料厚度调整。在装置一侧下方设置了两个排水口,通过PVC管与雨量监测装置连接,上方设置一个溢流管用于溢出过量雨水。

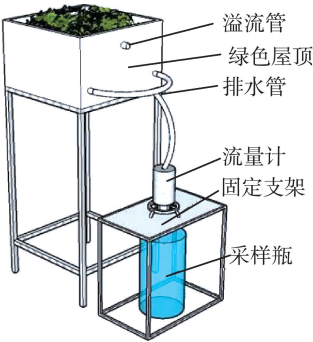


图1 绿色屋顶试验装置

Fig.1 Green roof experimental device

1.1.2 结构层材料

6个绿色屋顶装置的植被层均选用佛甲草(*Sedum lineare Thunb*),基质层为10 cm厚的改良土

(田园土、草炭、松针土按3:4:3的体积比配制),过滤层采用密度为250 g/m²的透水土工布,防渗层为沥青防水卷材。装置的结构变量为排(蓄)水层的类型和厚度,包括2 cm厚的塑料凹凸排水板、2~10 cm厚的多孔纤维棉,各绿色屋顶试验装置的排(蓄)水层设计见表1。

表1 绿色屋顶试验装置的排(蓄)水层设计

Table 1 Design of drainage (storage) layer of green roof experimental devices

绿色屋顶装置	排(蓄)水层类型	厚度/cm
DB1	塑料凹凸排水板	2
FC1	多孔纤维棉	2
FC2	多孔纤维棉	4
FC3	多孔纤维棉	6
FC4	多孔纤维棉	8
FC5	多孔纤维棉	10

在绿色屋顶试验装置搭建前,首先进行多孔纤维棉的性质分析。裁取50 mm×50 mm×40 mm的多孔纤维棉试样进行吸水性能和保水性能试验^[15],吸水 and 保水性能由体积吸水率表征。多孔纤维棉试样的吸水和释水过程曲线见图2。可以看出,多孔纤维棉不仅吸水能力强,保水能力同样优异。在吸水1 min后,体积吸水率达到90.0%,饱和吸水率达94.0%。在释水50 h后,体积吸水率依旧大于50.0%,至200 h后,体积吸水率减小至0。由此说明,本研究所采用的多孔纤维棉是一种亲水性的透水性纤维棉,快速吸水能力强,内部储水空间大,并且在吸水饱和后,束缚水分子能力强,能够长时间维持较高的含水量。

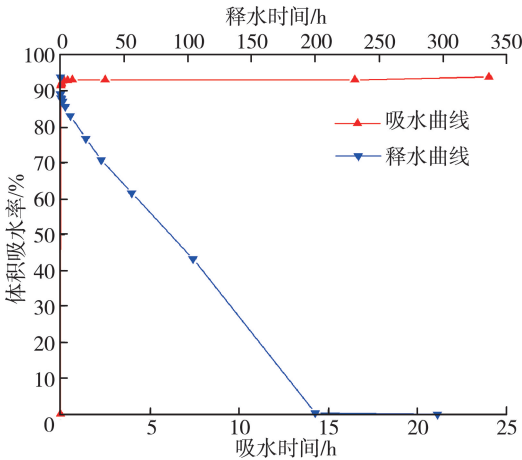


图2 多孔纤维棉吸水和释水过程曲线

Fig.2 Water absorption and release process curves of porous fiber cotton

1.2 试验方法

1.2.1 模拟降雨

试验过程的水量、水质监测均基于模拟降雨试

验,试验时间为2021年8月22日—2021年9月15日。在此期间依次进行了4次同雨量、不同雨前干期的模拟降雨,记为模拟降雨1~4,雨前干期依据北京市雨季(7—9月)常见的几种降雨间隔情况^[16]设置,分别为2 d、4 d、7 d、11 d,以探究雨前干期对绿色屋顶装置径流滞留效果的影响和模拟降雨期间绿色屋顶径流水质的变化情况。以北京市年径流总量控制率80%为目标,日设计降水量为27.3 mm。考虑到降雨的随机性,选用芝加哥雨型,降雨历时为1 h,降雨过程线见图3。每次模拟降雨后,用雨量计记录产流量与产流时间,并采集水样进行径流滞留率、污染物质量浓度和负荷削减率分析。

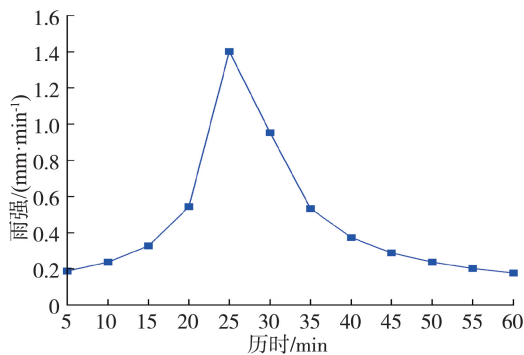


图3 模拟降雨过程线

Fig.3 Simulated rainfall process

1.2.2 植物生长监测

设置持续时间为10 d的干旱期,在第1天、第3天、第5天、第7天、第10天时对土壤水分、叶片叶绿素含量、叶片相对含水量和环境温度进行监测,分析不同厚度的多孔纤维棉对绿色屋顶植物在干旱期生长特征的影响。

1.3 分析方法

以径流滞留率表征绿色屋顶的雨水滞留效果,利用悬浮物(SS)、化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、总磷(TP)、颗粒态磷(PP)和溶解态总磷(DTP)表征绿色屋顶径流中的污染物情况,以污染物质量浓度和负荷削减率作为评价绿色屋顶对径流水质影响效果的指标^[17]。测定土壤水分和植物生长指标时,均采用五点采样法进行取样。土壤水分采用SMT系列土壤墒情速测仪进行测定。植物叶绿素采用SPAD-502叶绿素含量测定仪测定,以SPAD(soil and plant analyzer development)值表征植物叶绿素含量,叶片相对含水量采用公式(1)^[18]计算。利用Pearson相关性分析法分析叶片SPAD值、叶片相对含水量、土壤水分和环境温度之间的关系。

$$C_R = \frac{W_F - W_D}{W_T - W_D} \times 100\% \quad (1)$$

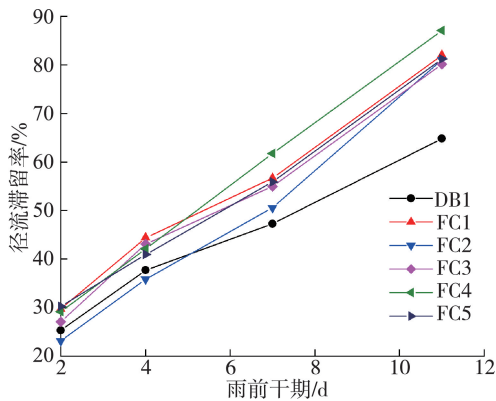
式中: C_R 为叶片相对含水量; W_F 为新鲜叶片质量,

g ; W_D 为烘干叶片质量, g ; W_T 为饱和叶片质量, g 。

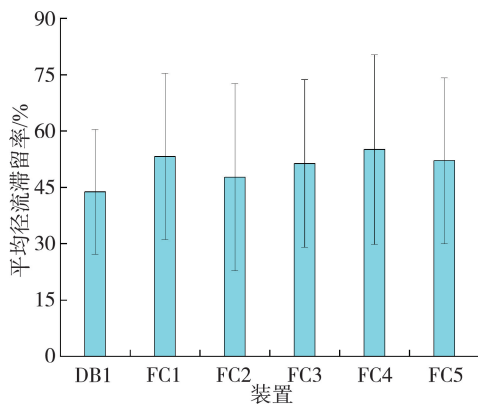
2 结果与分析

2.1 水量滞留能力分析

模拟降雨条件下各装置的单场次径流滞留率、平均径流滞留率结果见图4。由不同雨前干期的径流滞留率结果可以看出,随着雨前干期的增加,绿色屋顶的径流滞留效果明显提高。当雨前干期由2 d增加至11 d时,各装置平均径流滞留率由27.5%提高至79.4%。这是由于当雨前干期增加时,绿色屋顶基质土壤水分降低,土壤的容水空间增大,从而可以滞留更多的雨水。以往的研究结果也表明绿色屋顶的雨水滞留效果受雨前干期的影响较大。Zhang等^[19]研究发现当雨前干期较短时,绿色屋顶的蒸散量减少,导致基质的储水能力无法在降雨前恢复,使得绿色屋顶的雨水滞留能力被削弱。胡尹超等^[20]对绿色屋顶进行连续的水文监测后发现,雨水滞留率与雨前干期呈显著正相关关系。



(a) 单场次径流滞留率



(b) 平均径流滞留率

图4 绿色屋顶试验装置的径流滞留率

Fig.4 Runoff retention rate of green roof experimental devices

装置FC1~FC5的平均径流滞留率范围为47.7%~57.0%,均高于装置DB1;当雨前干期增加至11 d时,装置FC1~FC5的径流滞留率均增加至

80%以上,明显高于装置 DB1。由此说明,相较于塑料凹凸排水板,多孔纤维棉提升了绿色屋顶的径流滞留效果,且雨前干期越长,多孔纤维棉绿色屋顶的径流滞留优势越明显。这是因为降雨入渗通过基质后,未达到饱和的多孔纤维棉会吸收水分,从而减少绿色屋顶径流量;且当雨前干期增加时,多孔纤维棉的蒸散发时间长,水分蒸发多,蓄水能力得到恢复,因此绿色屋顶的径流滞留效果明显提升。结合图 2 中多孔纤维棉的释水过程可知,多孔纤维棉释水 100 h(约 4 d),含水率大于 40%,蓄水能力未完全恢复;释水 200 h(约 8 d)后,含水率减小至 0,蓄水能力得到充分恢复,因此多孔纤维棉装置在雨前干期为 7 d 和 11 d 时的径流滞留效果更好。Li 等^[21]建立的绿色屋顶径流-蒸散水文模型证明,蓄水层可以减少径流和增加蒸散发,降雨时可以将多余水分存储在蓄水层中,干旱 V 期水分蒸发到基质层,且降水量越大、气温越高、雨前干期越长时,这种影响更为显著。

通过进一步分析各装置的径流滞留率发现,绿色屋顶的径流滞留效果并不与多孔纤维棉厚度呈恒定的线性关系,并且各装置 4 次降雨的平均径流滞留率相差较小,说明多孔纤维棉绿色屋顶的径流滞留效果受多方面因素的影响。多孔纤维棉中的水分变化受其本身厚度与雨前干期的影响。较厚的多孔纤维棉在降雨后长时间处于湿润状态,在装置各结构层之间水分的传递效应影响下,基质的湿度增大导致雨水滞留效果降低。部分研究表明基质层和排(蓄)水层的前期水分会对绿色屋顶的水文性能造成影响^[22-24]。秦华鹏等^[11]通过试验和模拟证明蓄水层水分蒸发会对基质层产生补水效应,同一雨前干期下蓄水层越厚,绿色屋顶径流削减能力恢复越慢,从而使得径流削减率越低。

在模拟降雨试验后,对绿色屋顶装置进行天然降雨情景下的滞留效果监测。选取 2021 年 9 月 24 日的降雨事件进行产流过程分析,降雨事件中降水量为 114 mm。由图 5 可见,绿色屋顶可以延缓产流时间,减少产流量,并且不同厚度多孔纤维棉对产流时间的影响不同。装置 FC1、FC3 的产流时间早于装置 DB1,其他装置晚于装置 DB1。说明不同厚度多孔纤维棉装置产流时间存在差异,这与上一次降雨后(9 月 20 日)不同厚度多孔纤维棉内的水分含量不同有关。上一场降雨的降水量较小导致多孔纤维棉吸水后未达到饱和,因此在本场降雨时厚度大的多孔纤维棉相较于厚度小的多孔纤维棉可吸收蓄存的水分更多。Stovin 等^[25]通过对多场降雨-径流事件的监测后同样发现,绿色屋顶的产流延缓效果

受天然降雨的不规则性影响较大。降水量、降雨历时和雨前干期等降雨特征也会影响绿色屋顶的径流削减效果,并且会进一步影响其对污染物负荷的削减效果。

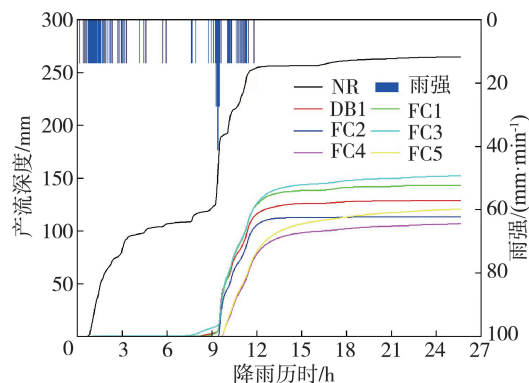


图 5 2021 年 9 月 24 日降雨事件绿色屋顶试验装置产流过程线

Fig. 5 Runoff hydrograph of green roof experimental devices during rainfall event on September 24, 2021

2.2 水质影响分析

2.2.1 SS 和 COD

对所有试验装置各进行 4 次不同雨前干期的模拟降雨试验,各装置径流中 SS 质量浓度和负荷削减率见图 6 (a)(b)。装置 DB1 的平均负荷削减率为 83.8%,装置 FC1 ~ FC5 的平均负荷削减率范围为 90.3% ~ 96.4%,说明绿色屋顶可以有效削减径流中的 SS,且使用多孔纤维棉的绿色屋顶对 SS 负荷的削减效果优于塑料凹凸排水板。多孔纤维棉厚度在 4 ~ 10 cm 时,绿色屋顶对 SS 的削减效果与多孔纤维棉的厚度呈正相关关系。这是由于多孔纤维棉可通过内部空隙有效截留 SS,且当厚度增加时,多孔纤维棉有更多的空隙截留 SS,雨水流经多孔纤维棉的时间越长,截留的 SS 也越多。随着模拟降雨次数增加,各装置径流中 SS 质量浓度逐渐降低并趋于稳定,负荷削减率逐渐提高,这与以往的研究结果类似。罗婷等^[26]研究表明,绿色屋顶径流中 SS 存在初期冲刷效应,随降雨次数的增加,出流中 SS 迅速减少并达到稳定。赵瑞华^[27]使用一种岩棉材料对水中 SS 进行动态吸附试验时发现,利用岩棉纤维之间的空隙在第一阶段对 SS 的去除率高达 60%。赵坤^[28]利用一种自制的多孔纤维棉装置处理道路径流时,发现其能够高效截留 SS。Morgan 等^[29]的研究表明,绿色屋顶的排(蓄)水层会通过拦截和淋出作用影响径流中 SS 质量浓度,越厚的排(蓄)水层拦截 SS 的能力越强。

各装置径流中 COD_{Cr} 质量浓度和负荷削减率见图 6 (c)(d)。绿色屋顶装置径流中 COD_{Cr} 质量浓

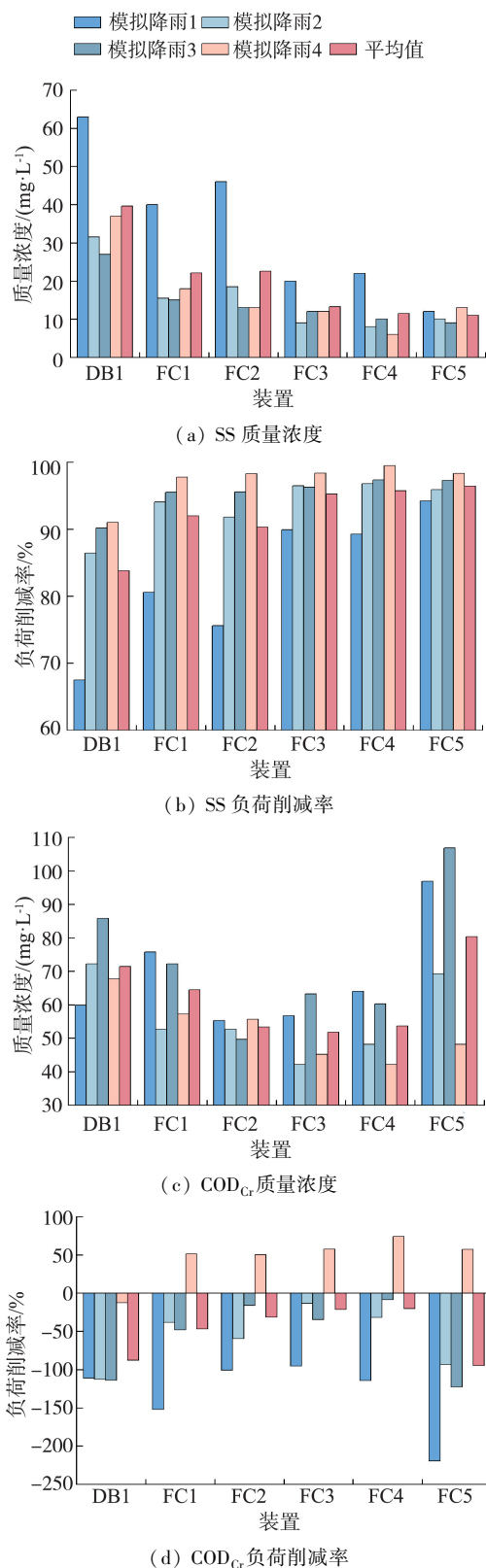


图6 绿色屋顶试验装置径流中SS和COD_{Cr}质量浓度及负荷削减率

Fig.6 Mass concentrations and load reduction rates of SS and COD_{Cr} in runoff from green roof experimental devices

度均高于装置 NR (22.23 mg/L), 平均负荷削减率均小于0, 说明本研究中绿色屋顶是 COD_{Cr} 的源。相较于塑料凹凸排水板, 2~8 cm 厚的多孔纤维棉可

以降低径流中 COD_{Cr} 质量浓度, 提高绿色屋顶对 COD_{Cr} 的负荷削减率, 且效果随厚度的增加明显提升, 说明多孔纤维棉的使用可以减少绿色屋顶径流中 COD_{Cr} 的淋出。赵瑞华^[27] 研究发现, 岩棉内部的纤维结构可以有效降低径流中 COD_{Cr} 质量浓度。刘宸旭等^[30] 发现改性的废旧岩棉能有效去除水中的 COD_{Cr}。钟兴等^[31] 研究发现, 添加泥炭土装置的径流中 COD_{Cr} 质量浓度表现出明显的波动趋势, 这与基质中有机物的含量有关^[32-33]。在本研究中, 改良土基质内有机质的降解和释放是径流中 COD_{Cr} 质量浓度波动较大的原因。

装置 FC5 径流中 COD_{Cr} 平均质量浓度大于 DB1, 平均负荷削减率小于 DB1, 说明 10 cm 厚的多孔纤维棉会加剧 COD_{Cr} 的淋出。这是由于雨水径流中 COD_{Cr} 大部分附着在悬浮物上, 会随其被多孔纤维棉截留, 而 10 cm 厚的多孔纤维棉中前期水分较多, 在降雨时吸附的 COD_{Cr} 可能更容易随径流淋出。随着模拟降雨次数的增加, 多孔纤维棉装置的 COD_{Cr} 负荷削减率逐渐提高, 并体现出对 COD_{Cr} 的削减效果。随雨前干期的增加, 各装置的径流滞留率提高, 且基质中的有机质含量随降雨次数的增加而降低, 从而使 COD_{Cr} 负荷削减率随降雨次数的增加而明显提升。

2.2.2 TN 和 TP

各装置径流中 TN 质量浓度和负荷削减率见图 7(a) (b)。各绿色屋顶装置径流中 TN 质量浓度明显高于装置 NR (4.58 mg/L), 负荷削减率均小于0, 说明本研究中绿色屋顶是 TN 的源。装置 FC1 ~ FC5 径流中 TN 平均质量浓度显著高于装置 DB1, TN 平均负荷削减率略低于装置 DB1, 说明使用多孔纤维棉在一定程度上会加剧 TN 的淋出。这可能是由于多孔纤维棉的制备材料成分中含有氨氮 (NH₄⁺-N), 从而使得径流中 TN 质量浓度增大。各装置 4 次降雨径流中 TN 质量浓度波动较大, 但负荷削减率逐渐提高, 且相比于模拟降雨 3, 在模拟降雨 4 的条件下, 各装置平均负荷削减率提高了 5 倍以上。本研究中模拟降雨 1~4 的雨前干期逐渐增加, 从水量滞留能力分析结果可知, 各装置径流滞留率随雨前干期的增加而增大, 因此 TN 负荷削减率也随之提高。段丙政等^[34] 通过分析多种屋面径流数据发现, 草坪屋顶基质中的 TN、硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量较高, 且易随径流流失造成水质恶化。Gong 等^[35] 研究选用多孔纤维棉和塑料凹凸排水板作为排水层材料时发现, 绿色屋顶在养分的负荷去除方面没有显著差异。Kuoppamäki 等^[36] 研究发现, 虽然绿色屋顶的径流相对于普通屋面会携带更多的营

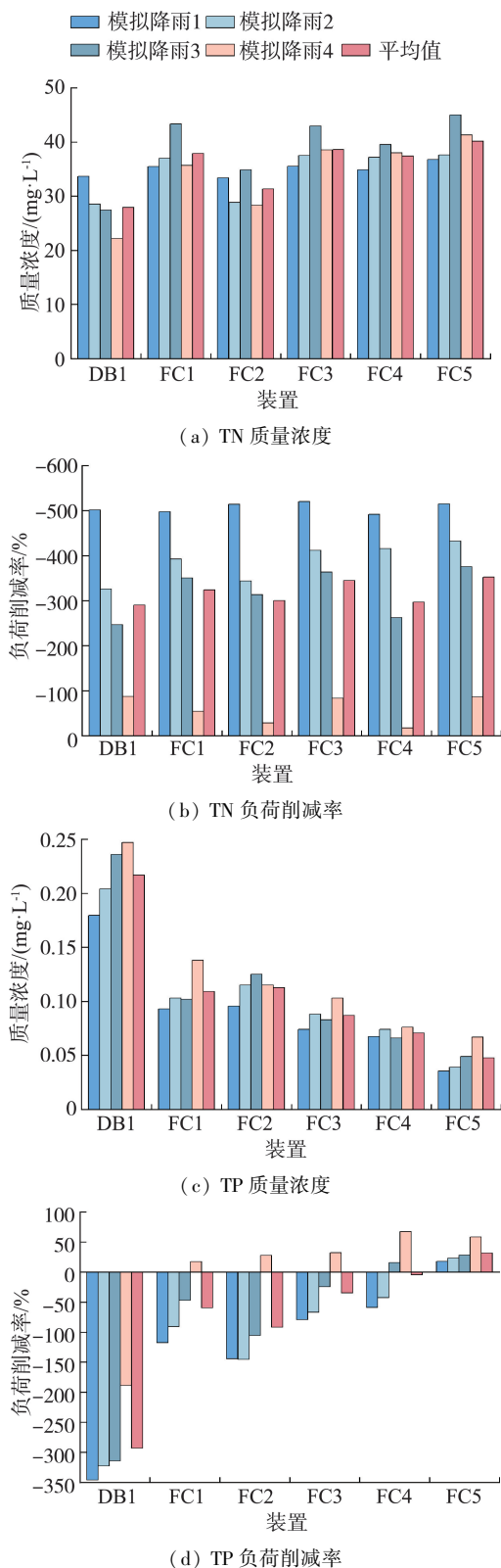


图7 绿色屋顶试验装置径流中 TN 和 TP 质量浓度及负荷削减率

Fig.7 Mass concentrations and load reduction rates of TN and TP in runoff from green roof experimental devices

营养物质,但营养物质的淋失水平会随时间的推移逐渐降低。由此可知,绿色屋顶对径流中 TN 的控制效果与基质中的营养物质含量密切相关,随着降雨的增加,基质的营养水平逐渐降低,TN 的淋出效应逐渐减弱。

各装置径流中 TP 质量浓度和负荷削减率见图 7 (c)(d)。绿色屋顶装置径流中 TP 质量浓度均高于装置 NR(0.033 mg/L),且除装置 FC5 外,各装置 TP 平均负荷削减率均小于 0,说明绿色屋顶存在 TP 的淋出效应。装置 FC1 ~ FC5 径流中 TP 质量浓度显著低于装置 DB1,TP 负荷削减率显著高于装置 DB1,说明多孔纤维棉可以明显降低绿色屋顶 TP 的淋出量。多孔纤维棉厚度在 4 ~ 10 cm 时,绿色屋顶对 TP 的削减效果与多孔纤维棉的厚度呈正相关关系,这是由于多孔纤维棉的多孔结构可以截留和吸附磷,且多孔纤维棉越厚,雨水通过的速率越慢、时间越长,可以截留和吸附的磷更多。随着降雨次数的增加,各装置 TP 负荷削减率逐渐提高,说明绿色屋顶淋出的 TP 会随运行时间而减少。以往研究也得出类似的结果。Liu 等^[37]研究表明,绿色屋顶基质存在 TP 的淋出效应,且淋出过程与湿沉降输入、外部施肥和生长基质有关。Jauni 等^[38]研究发现绿色屋顶建造初期,施肥和有机物的分解会导致运行初始阶段营养物质大量淋出。张筱^[39]发现岩棉基质可通过吸附作用提升对水体中 TP 的去除效果,且效果与岩棉的尺寸有关。赵坤^[28]研究表明,多孔纤维棉主要通过材料上异种电荷的基团间吸附作用去除磷,并且去除效率主要取决于过滤滤速。

各装置径流中 PP 和 DTP 在 TP 中的质量分数见图 8。装置 NR 径流中 PP 在 TP 中的质量分数为 94.0%,装置 DB1 径流中 PP 在 TP 中的质量分数为 52.2%,而装置 FC1 ~ FC5 径流中 PP 在 TP 中的质量分数分别为 34.2%、33.5%、20.2%、25.3%、43.3%。相较于普通屋面和塑料凹凸排水板绿色屋顶,多孔纤维棉绿色屋顶径流中 PP 在 TP 中的质量分数明显降低。这是由于多孔纤维棉中的空隙可以有效截留颗粒,减少 PP 的淋出量。部分研究表明,传统绿色屋顶径流中磷主要以颗粒态为主^[26, 34],由此可知,多孔纤维棉绿色屋顶可通过增加对 PP 的

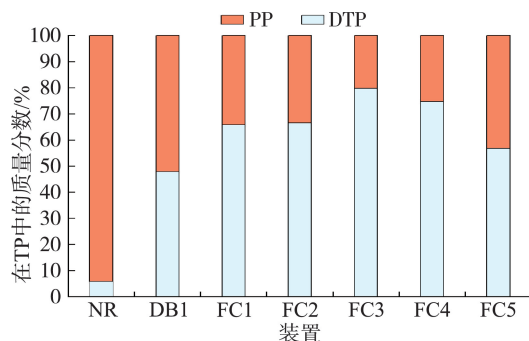


图8 各试验装置径流中 PP 和 DTP 在 TP 中的质量分数

Fig.8 Mass fractions of PP and DTP in TP in runoff from different experimental devices

截留提高对径流中 TP 的控制效果。

2.3 植物抗旱性分析

对干早期绿色屋顶植物叶片 SPAD 值、叶片相对含水量、土壤水分和环境温度进行了相关性分析,结果见表 2。可见植物叶片 SPAD 值和相对含水量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),且两者均与土壤水分呈显著负相关关系($P < 0.05$)。这是因为植物叶片 SPAD 值和相对含水量均是表示其生长生理活性的指标,当植物吸收土壤水分以维持生长时,会导致土壤水分减少。此外,环境温度与叶片 SPAD 值和相对含水量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与土壤水分呈显著负相关关系($P < 0.05$)。Poë 等^[40]也发现,干早期气温会对绿色屋顶的蒸散发产生影响,进而影响水分的转移。

表 2 绿色屋顶植物干旱特征相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis results of drought characteristics of green roof plants

特征指标	叶片 SPAD 值	叶片相对含水量	土壤水分	环境温度
叶片 SPAD 值	1	0.541 **	-0.339 *	0.534 **
叶片相对含水量		1	-0.342 *	0.727 **
土壤水分			1	-0.348 *
环境温度				1

注: ** 表示 $P < 0.01$, 极显著相关; * 表示 $P < 0.05$, 显著相关。

对绿色屋顶装置中的植物进行了连续 10 d 的抗旱性监测,植物叶片 SPAD 值、叶片相对含水量和土壤水分变化过程见图 9。干早期各装置叶片的叶绿素变化较为稳定,干旱时间大于 3 d 后,装置 FC1 ~ FC5 叶片的相对含水量均大于装置 DB1,说明多孔纤维棉可以提高绿色屋顶中植物的抗旱性。这是因为在干早期,多孔纤维棉中蓄存的水分可以传递至植物根系,以维持植物生长。刘佳亲等^[41]研究也证明了相似的结果,蓄水层通过维持基质更高含水量,从而保持植物更高的蒸腾速率。

干早期所有装置的基质土壤水分均呈下降趋势,但多孔纤维棉装置的下降速率远低于塑料凹凸排水板装置。干旱至第 10 天时,装置 DB1 基质土壤水分减少了 25.3%,装置 FC1 ~ FC5 分别减少了 12.3%、6.30%、6.80%、16.7%、15.9%,说明在干早期多孔纤维棉可以补充基质水分。这可能是由于当基质干涸时毛细力增大,可以吸收多孔纤维棉内的水分。但当多孔纤维棉过厚时,水的重力作用对毛细力产生影响,进而影响水分的转移。这与彭跃暖等^[42]的研究结果类似,蓄水层的水分蒸发对其上层土壤水分有显著的补给效应。赵坤^[28]研究也发现,雨停时土壤中的水分会随蒸散发和植物利用而减少,此时土壤的毛细力远高于生态多孔纤维棉模块,从而会吸收生态多孔纤维棉模块中的水分。

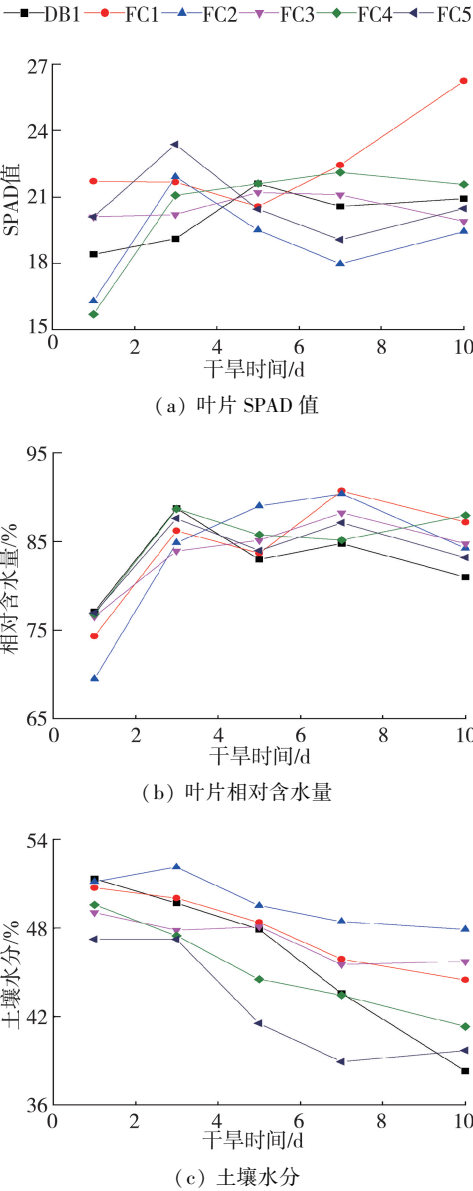


图 9 抗旱性监测结果

Fig. 9 Drought resistance monitoring results

3 结 论

- a. 使用多孔纤维棉作为绿色屋顶排(蓄)水层可提高对雨水的滞留效果,且滞留效果会受多孔纤维棉厚度和雨前干期的共同影响。
- b. 多孔纤维棉可以提高绿色屋顶的 SS 和 TP 负荷削减率,但会加剧 TN 的淋出,厚度不超过 8 cm 的多孔纤维棉可以减少 COD_{Cr} 的淋出量。多孔纤维棉对绿色屋顶径流水质的改善效果与多孔纤维棉厚度呈正相关关系。
- c. 使用多孔纤维棉作为绿色屋顶排(蓄)水层可以减缓干早期基质土壤水分的下降,维持植物生长。
- d. 2 ~ 8 cm 厚度的多孔纤维棉适合作为绿色屋顶的排(蓄)水层,可以提高雨水滞留效果和改善径

流水质,并在干旱期维持植物生长。

参考文献:

- [1] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等.城市洪涝试验研究进展[J].水利水电科技进展,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1):80-86. (in Chinese))
- [2] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等.基于Infoworks ICM模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 398-405. (in Chinese))
- [3] 周昕,高玉琴,吴迪.不同LID设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J].水资源保护,2021,37(3):26-31. (ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 26-31. (in Chinese))
- [4] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等.城市雨水资源化利用研究进展[J].水资源保护,2021,37(6):80-87. (LU Qier, LUO Pingping, YU Wangqi, et al. Research progresses of urban rainwater resources utilization[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 80-87. (in Chinese))
- [5] LIU Wen, FENG Qi, CHEN Weiping, et al. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments[J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 230-238.
- [6] DUSZA Y, BAROT S, KRAEPIEL Y, et al. Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(7): 2357-2369.
- [7] LADANI H J, PARK J R, JANG Y S, et al. Hydrological performance assessment for green roof with various substrate depths and compositions[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1860-1871.
- [8] RINCÓN L, COMA J, PÉREZ G, et al. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs: a comparative life cycle assessment[J]. Building and Environment, 2014, 74: 22-30.
- [9] PUSHKAR S. Modeling the substitution of natural materials with industrial byproducts in green roofs using life cycle assessments[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 652-661.
- [10] NAGASE A. Novel application and reused materials for extensive green roof substrates and drainage layers in Japan: plant growth and moisture uptake implementation[J]. Ecological Engineering, 2020, 153: 105898.
- [11] 秦华鹏,唐女,唐巧玲.蓄水层对绿色屋顶径流削减能力的影响分析[J].中国给水排水,2016,32(13):132-135. (QIN Huapeng, TANG Nyu, TANG Qiaoling. Impact of water storage layer on runoff reduction of green roofs[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(13): 132-135. (in Chinese))
- [12] WANG Hongbing, QIN Jun, HU Yonghong. Are green roofs a source or sink of runoff pollutants? [J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 65-70.
- [13] BIANCHINI F, HEWAGE K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials [J]. Building and Environment, 2012, 48: 57-65.
- [14] SCOLARO T P, GHISI E. Life cycle assessment of green roofs: a literature review of layers materials and purposes [J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154650.
- [15] 张标富.透水型岩棉制品透水及保水性能研究[J].砖瓦,2018(8):23-26. (ZHANG Biaofu. Study on water permeability and retention performance of permeable rock wool products [J]. Brick-Tile, 2018(8): 23-26. (in Chinese))
- [16] GONG Yongwei, HAO Yan, LI Junqi, et al. The effects of rainfall runoff pollutants on plant physiology in a bioretention system based on pilot experiments [J]. Sustainability, 2019, 11(22): 6402.
- [17] GONG Yongwei, YIN Dingkun, LI Junqi, 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.
- [18] MEETAM M, SRIPINTUSORN N, SONGNUAN W, et al. Assessment of physiological parameters to determine drought tolerance of plants for extensive green roof architecture in tropical areas[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 56: 126874.
- [19] ZHANG Zheng, SZOTA C, FLETCHER T D, et al. Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention [J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 775-781.
- [20] 胡尹超,秦华鹏,林子璇.深圳绿色屋顶雨水滞留效应变化及其影响因素[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(4):347-354. (HU Yinchao, QIN Huapeng, LIN Zixuan. Variation and influencing factors of rainwater retention of green roofs in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(4): 347-354. (in Chinese))
- [21] LI Shuxiao, QIN Huapeng, PENG Yuenuan, et al. Modelling the combined effects of runoff reduction and

- increase in evapotranspiration for green roofs with a storage layer [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 302-311.
- [22] AKTHER M, HE Jianxun, CHU A, et al. Response of green roof performance to multiple hydrologic and design variables; a laboratory investigation [J]. Water Science and Technology, 2018, 77 (12) : 2834-2840.
- [23] VILLARREAL E L, BENGTTSSON L. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events [J]. Ecological Engineering, 2005, 25 (1) : 1-7.
- [24] SIMS A W, ROBINSON C E, SMART C C, et al. Retention performance of green roofs in three different climate regions [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 115-124.
- [25] STOVIN V, VESUVIANO G, KASMIN H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions [J]. Journal of Hydrology, 2012, 414-415: 148-161.
- [26] 罗婷, 许文年, 程虎, 等. 粗放型绿色屋顶基层对降雨出流水质影响 [J]. 环境工程, 2020, 38 (4) : 39-45. (LUO Ting, XU Wennian, CHENG Hu, et al. Effect of substrate composition of extensive green roof on water quality of rainfall outflow [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (4) : 39-45. (in Chinese))
- [27] 赵瑞华. 城市雨水蓄积净化材料 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [28] 赵坤. 典型城市道路雨水径流污染特征研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [29] MORGAN S, ALYASERI I, RETZLAFF W. Suspended solids in and turbidity of runoff from green roofs [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13 (Sup1) : 179-193.
- [30] 刘宸旭, 颜鲁婷, 李静. 改性废旧岩棉处理污水的应用研究 [J]. 环境污染与防治, 2014, 36 (2) : 15-18. (LIU Chenxu, YAN Luting, LI Jing. Applied research of modified waste rock wool in sewage treatment [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36 (2) : 15-18. (in Chinese))
- [31] 钟兴, 张伟, 邢成, 等. 填料对绿色屋顶设施出流中营养物质淋失的影响 [J]. 中国给水排水, 2018, 34 (7) : 128-132. (ZHONG Xing, ZHANG Wei, XING Cheng, et al. Influence of substrate on nutrients leaching of green roof [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (7) : 128-132. (in Chinese))
- [32] GNECCO I, PALLA A, LANZA L G, et al. The role of green roofs as a source/sink of pollutants in storm water outflows [J]. Water Resources Management, 2013, 27 (14) : 4715-4730.
- [33] 印定坤, 宫永伟, 王文海, 等. 简单式绿色屋顶对径流水量水质调控能力研究 [J]. 环境工程, 2019, 37 (7) : 64-69. (YIN Dingkun, GONG Yongwei, WANG Wenhai, et al. Study of extensive green roof on its control capacity of runoff quantity and quality [J]. Environmental Engineering, 2019, 37 (7) : 64-69. (in Chinese))
- [34] 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))
- [35] GONG Yongwei, ZHANG Xianwei, LI Junqi, 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.
- [36] KUOPPAMÄKI K, SETÄLÄ H, HAGNER M. Nutrient dynamics and development of soil fauna in vegetated roofs with the focus on biochar amendment [J]. Nature-Based Solutions, 2021, 1: 100001.
- [37] LIU Wen, WEI Wei, CHEN Weiping, et al. The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 575-582.
- [38] JAUNI M, KUOPPAMÄKI K, HAGNER M, et al. Alkaline habitat for vegetated roofs? Ecosystem dynamics in a vegetated roof with crushed concrete-based substrate [J]. Ecological Engineering, 2020, 157: 105970.
- [39] 张筱. 人工湿地植物协同岩棉基质对养殖水体中磷的去除效果研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [40] POË S, STOVIN V, BERRETTA C. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 356-367.
- [41] 刘佳亲, 黄山, 王俊, 等. 植被类型和蓄水层对绿色屋顶蒸散发的影响 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (6) : 2437-2444. (LIU Jiaqin, HUANG Shan, WANG Jun, et al. Effects of plant types and water retention layer on evapotranspiration of green roofs [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (6) : 2437-2444. (in Chinese))
- [42] 彭跃暖, 秦华鹏, 王传胜, 等. 蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 53 (4) : 758-764. (PENG Yuenuan, QIN Huapeng, WANG Chuansheng, et al. Effects of storage layer and plant selection on the evapotranspiration of green roofs [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53 (4) : 758-764. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-05-11 编辑: 施业)