

王志君, 仲勇, 刘红娟, 等. 分层土绿色屋顶雨水滞留能力试验和数值模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 61-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.005

WANG Zhijun, ZHONG Yong, LIU Hongjuan, et al. Experiment and numerical simulation of rainwater retention capacity of layered-soil green roofs[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 61-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.005

分层土绿色屋顶雨水滞留能力试验和数值模拟研究

王志君¹, 仲勇², 刘红娟², 王伟³, 徐洪涛², 肖良⁴,
蒋明杰⁴, 吴杰⁴, 梅国雄⁵

(1. 同创工程设计有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 华蓝设计(集团)有限公司, 广西南宁 530000;
3. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000; 4. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004;
5. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要:【目的】提高绿色屋顶的雨水滞留能力(RRC)已被认为是城市雨水管理的一个重要组成部分, 基质层作为绿色屋顶的重要结构, 研究分层土基质对绿色屋顶 RRC 的影响机制, 能对绿色屋顶的设计产生积极影响。【方法】建立分层土和两个材料配合比不同的单一土壤的绿色屋顶模型, 利用 HYDRUS-1D 软件反解模块得到分层土的水力参数。通过四个月的干湿循环, 研究三种模型的 RRC、通过模拟来研究初始含水量、饱和含水量等因素对分层土绿色屋顶 RRC 的影响并对这些参数进行敏感性分析、通过模拟研究不同暴雨重现期下分层土绿色屋顶的 RRC。【结果】结果显示, 分层土的 RRC 分别比单一土壤高了 5% 和 1%; 分层土具有更高的峰值排水减少和更长的峰值排水延迟; 土的初始含水量、饱和含水量、渗透性、上下两层土的深度比会对分层土绿色屋顶的 RRC 产生一定影响, 饱和含水量的影响最大; 土壤表面最大蓄水深度为 10 mm 时, 不同暴雨重现期下绿色屋顶表面径流峰值分别削减了 22%、15%、14% 和 12%。【结论】研究结果表明, 分层土的 RRC 比单一土壤高, 有较好的水文性能。为了使分层土绿色屋顶有更好的水文性能, 其基质层应采用高渗透性的上层土和低渗透性的下层土, 同时两层土的深度比要在一个合理的范围内。暴雨条件下允许土壤表面积水入渗可以有效削减峰值径流, 推迟表面径流时间。

关键词: 绿色屋顶; 分层土; 雨水滞留; HYDRUS-1D 软件; 水文性能; 径流削减; 低影响开发; 暴雨重现期

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0061-17



收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-06-24; 网络出版日期: 2024-08-22

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB24010052); 南宁市科学研究与技术开发计划项目“绿色屋顶一体化设计及雨水收集利用关键技术研发与应用”(ZC20223239); 国家自然科学基金“竖向荷载及强降雨耦合作用下粗粒土填料挡墙病害形成机理与防治研究”(52108309)

作者简介: 王志君(1971—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事建筑给排水研究。E-mail: 376084516@qq.com

通信作者: 徐洪涛(1974—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事建筑设计、传统村落数字化保护及利用、绿色低碳工程技术研究。E-mail: 51832337@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Experiment and numerical simulation of rainwater retention capacity of layered-soil green roofs

WANG Zhijun¹, ZHONG Yong², LIU Hongjuan², WANG Wei³, XU Hongtao², XIAO Liang⁴,
JIANG Mingjie⁴, WU Jie⁴, MEI Guoxiong⁵

(1. Tongchuang Engineering Design Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 2. Hualan Design (Group) Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China; 3. Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 5. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Improving the rainwater retention capacity (RRC) of green roofs has been recognized as an important part of urban stormwater management. As the substrate layer is a key structural element of green roofs, investigating the influence mechanism of layered soil substrates on the RRC of green roofs has a positive impact on green roof design. [Methods] Green roof models were established using layered soil and two single-soil configurations with different material mix ratios. Hydraulic parameters of the layered soil were obtained using the inverse solution module of the HYDRUS-1D software. Through four months of dry-wet cycles, the RRC of the three models was studied. Simulations were performed to examine the effects of initial water content, saturated water content, and other factors on the RRC of layered-soil green roofs, followed by the sensitivity analysis of these parameters. Additionally, simulations were conducted to examine the RRC of layered-soil green roofs under different rainstorm return periods. [Results] The result showed that the RRC of layered soil was 5% and 1% higher, respectively, than that of the single-soil configurations. The layered soil showed greater reduction in peak drainage and longer peak drainage delay. Initial water content, saturated water content, permeability, and depth ratio of upper to lower layers all have certain effects on the RRC of layered-soil green roofs, with saturated water content having the strongest effect. When the maximum surface water storage depth was 10 mm, peak surface runoff of the green roofs was reduced by 22%, 15%, 14%, and 12% under different rainstorm return periods, respectively. [Conclusion] The findings show that layered soil exhibits higher RRC than single-soil configurations, demonstrating better hydrological performance. To achieve better hydrological performance of layered-soil green roofs, the substrate layer should comprise a high-permeability upper soil layer and a low-permeability lower soil layer, with the depth ratio of the two layers maintained within a reasonable range. Allowing surface ponding infiltration during rainstorms can effectively reduce peak runoff and delay the onset of surface runoff.

Keywords: green roofs; layered soil; rainwater retention; HYDRUS-1D software; hydrological performance; runoff reduction; low impact development; rainstorm return period

0 引言

随着城镇化的快速发展,越来越多的自然渗透表面被城市建筑物、道路、广场等不透水表面所替代,破坏了原有地表的水、热平衡,从而引发城市内涝、“热岛效应”、空气污染等一系列生态环境问题^[1-4]。相比未开发的自然区域,城市地表自然渗透率下降了约 70%^[5-6]。因此,人们开始关注城市生态环境系统的可持续发展。例如,美国、英国、澳大利亚、德国等提出的“低影响开发”(Low Impact Development, LID)、“可持续城市排水系统”(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)、“水敏性城市”(Water Sensitive Urban Design, WSUD)和“洼地—渗渠系统”(Mulden Rigolen System, MRS)等^[7-9]。而我国在 2013 年 12 月召开的中央城镇化工作会议提出了建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市^[10-13]。绿色屋顶技术作为海绵城市建设的重要措施之一,能

够有效滞留雨水,过滤和处理雨水,被认为是推动城市可持续发展的有效实践,已在一些发达国家广泛应用。

绿色屋顶主要依赖于当地的气候条件(即降雨和蒸散量)以及绿色屋顶的结构配置(即基质材料、基质深度、排水层和植被类型)^[14-16]。目前,国内外对绿色屋顶展开了大量的研究。LI 等^[17]指出,在不同的渗透率下,降雨强度对土壤入渗量有主要影响。VOLDER 等^[18]指出,雨水滞留能力(RRC)与累积降雨量呈负相关。RRC 会随着场次降雨条件改变而发生变化,随着降水量的增加,RRC 会降低;绿色屋顶的 RRC 还随雨前干旱期(Antecedent Dry Period, ADP)延长而增强,且 ADP 的影响在小降雨事件中表现的更为明显^[19-20]。还有研究关注绿色屋顶 RRC 的季节性变化,发现在降雨事件密集的时期,RRC 会下降^[21]。在夏季,由于太阳辐射较强,蒸散发量大,使绿色屋顶滞留能力得到较好的恢复,从而有更好的

滞留效果^[22-24]。LIU 等^[25]研究了绿色屋顶结构配置对 RRC 的影响,结果表明,基质材料和基质深度是影响绿色屋顶 RRC 的主要原因。增加基质深度和土壤改良这两种改善绿色屋顶 RRC 的方法已经得到了广泛的讨论, SCHULTZ 等^[26]指出绿色屋顶的深度增加 50 mm,可使绿色屋顶的 RRC 增加 10%。然而,由于屋顶荷载的大大增加,增加绿色屋顶的基质深度并没有被广泛接受^[27]。有研究对土壤改良材料类型(包括陶粒、浮石、珍珠岩、蛭石、椰糠、泥炭、生物炭等)及其混合配比开展了大量研究来探讨它们的轻质性、持水性、渗透性等,以获得绿色屋顶最佳的性能^[28-31]。然而,增加土壤持水能力通常会导致渗透性降低^[32]。因此,要实现绿色屋顶的所有最优特性(高持水性,高渗透性,峰值径流减少),前人研究仅考虑了改良土壤,而本文通过对土壤分层来实现绿色屋顶的最优特性,从而改善绿色屋顶的水文性能。

分层土水文性能在岩土、农业和环境领域已得到广泛研究。HUANG 等^[33]指出,与单一土壤相比,土壤质地的垂直变化能够有效改善土壤持水能力。ZETTL 等^[34]研究表明,土壤的持水能力随着土壤质地不同而改变。HUANG 等^[35]研究发现,与单一土壤相比,分层土可显著增加土壤的田间持水量,并延缓植被遭受水分胁迫时间。KHIRE 等^[36]指出,分层土界面处存在毛细屏障减少了土壤水分入渗,从而增加了上层土壤的含水量。张军等^[37]研究发现在选定的暴雨情况下,有 3 cm 天然土壤和 12 cm 生物炭处理土壤的双层基质结构有更好的雨水管理能力。目前关于分层土在绿色屋顶中的研究尚未深入,其分层土的水力参数对绿色屋顶 RRC 的影响以及分层土绿色屋顶的水文过程尚不明确。

本研究在中国南方现有的一个屋顶上建立了三种绿色屋顶模型,包括分层土模型、土壤 S1 模型(耕植土、泥炭和细砂组成,体积比为 1:1:1)、土壤 S2 模型(耕植土和泥炭组成,体积比为 4:1)。本试验的目的是为了分析与单一土壤绿色屋顶相比下,分层土提高绿色屋顶的 RRC 的因素。本研究通过数值模拟结果与实测结果的比较来验证 HYDRUS-1D 软件反解模块得到的土壤水力参数是否可靠,从

而研究不同关键水力参数下改善 RRC 的影响因素、分层土绿色屋顶水文过程的影响因素以及通过模拟研究不同暴雨重现期下分层土绿色屋顶的 RRC。本研究旨在提供一个用于分层土绿色屋顶理论发展的经验数据库。

1 材料和方法

1.1 试验装置

本研究用到的 3 个绿色屋顶模型位于广西大学的一个现有建筑的屋顶上,该地区属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季干旱少雨,年平均气温和降雨量分别为 21.6 ℃ 和 1 300 mm。降雨集中在每年的 5—9 月(月均降雨量大于 100 mm),冬季月均降雨量小于 50 mm。本研究的降雨和排水数据收集于 2020 年 6 月 22 日—10 月 21 日,收集的时间主要在雨季内。绿色屋顶模型设置如图 1 所示。通过安装 ATMOS41 微型气象站(Meter Devices, USA)来监测降雨、温度、蒸气压、风速和太阳辐射等气象数据,并采用 ZL6(Meter Devices, USA)数据采集器每隔五分钟记录一次数据。5TE(Meter Devices, USA)含水量传感器埋设在绿色屋顶模型的土壤层中部,用来监测土壤层含水量随时间的变化,并采用 EM50(Decagon Devices, USA)数据记录器每 5 min 采集一次数据。绿色屋顶底部的排水量通过量筒进行收集,并采用带有数据存储功能的高清摄像机进行实时监测排水量的变化。

研究用到的绿色屋顶模型是尺寸为 300 mm ×

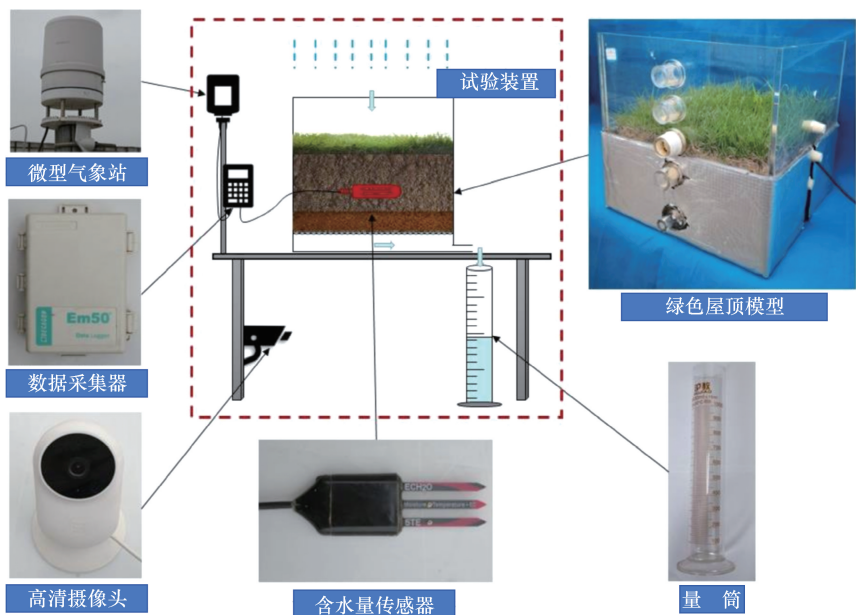


图 1 绿色屋顶模型设置示意

Fig. 1 Schematic diagram of green roof model setup

300 mm×250 mm 的亚克力(厚度为 5 mm)方形土柱容器, 该模型类似于绿色屋顶常用的模块化种植托盘^[38]。通过孔状亚克力板将试验模型划分为底部排水层和土壤层两部分, 并在填土前设置过滤土工布以防止土壤流失。为了缓解模型箱壁对降雨入渗的影响, 减少优先流动, 在模型箱的内壁上涂抹薄层凡士林。此外, 在模型箱外壁包裹一层锡箔绝缘棉(5 mm 厚)来降低外部环境对绿色屋顶蒸散发的影响。

为了进一步验证分层土壤模型数值模拟的可靠性, 在室外试验监测结束后, 对分层土壤模型进行了人工模拟降雨试验。绿色屋顶模拟降雨装置如图 2 所示。在一个人工降雨模拟装置中, 使用一个喷嘴来模拟雨滴, 而降雨强度由玻璃转子流量计进行控制^[39]。采用 100 L 水箱作为供水设备, 供水压力水头由水泵提供。试验开始前对模拟降雨均匀性进行分析, 测得模拟降雨均匀系数为 0.9。在每次模拟降雨事件前对流量计进行校准, 不同模拟降雨强度下控制流量误差小于 0.4%。

1.2 基质特性和结构配置

为了评价分层土改善 RRC 的性能, 建立了 3 种不同类型的绿色屋顶: (a) 基质 S1、(b) 基质 S2、(c) 分层土。考虑绿色屋顶基质土壤的经济性, 绿色屋顶建设通常采用当地耕植土作为土壤层。在华南地区, 由于耕植土较高的可塑性和较低的渗透性, 在实际应用中通常添加土改良材料(如: 细砂、泥炭、煤渣等)以获得更好的持水性、渗透性和养分含量。如图 3 所示, 本研究采用绿色屋顶常用的两种改良材料(泥炭和细砂), 与当地耕植土按

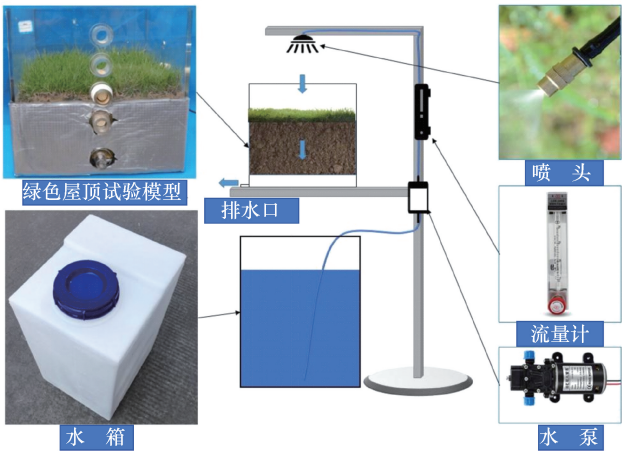


图 2 模拟降雨试验装置

Fig. 2 Simulated rainfall experimental setup

照一定比例混合, 可以提高土壤的持水性和渗透性。基质 S1 由耕植土、泥炭和细砂组成, 体积比为 1 : 1 : 1, 基质 S2 由耕植土和泥炭组成, 体积比为 4 : 1, 分层土是上基质 S1 和下基质 S2 的组合, 深度比为 4 : 1。前人研究发现 20% 泥炭掺量的改性土, 有较好的物理性质和有机物含量, 其利于植被的生长^[40-41]。土壤的基本水文参数(饱和含水量、 θ_s 、饱和导水系数 K_s), 采用室内土柱试验测得。3 种基质类型的材料和混合深度比、饱和含水量、饱和导水系数等如表 1 所列。此外, 所有模型的基质深度都是 100 mm, 共填充 5 层, 每层厚度为 20 mm。每一层的表面都很粗糙, 以最大限度地增加各层之间的接触。最后, 在所有模型中均种植马尼拉草, 2 个月后开始监测。

表 1 三种绿色屋顶模型的结构配置及土柱试验中测量的基本参数

Table 1 Structural configurations of three green roof models and basic parameters measured in soil column experiments

基质类型	材料和混合深度比	$\theta_s/\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$	$K_s/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	深度/mm	植 被
土壤 S1	耕植土/泥炭/细砂(1 : 1 : 1)	0.55	0.45	100	马尼拉草
土壤 S2	耕植土/泥炭(4 : 1)	0.52	0.42	100	马尼拉草
分层土	S1 : S2 (4 : 1)	—	—	100	马尼拉草



(a) 耕植土



(b) 泥 炭



(c) 细 砂

图 3 绿色屋顶土壤改良材料

Fig. 3 Soil amendment materials for green roofs

1.3 数据分析

绿色屋顶的水文性能主要包括雨水滞留率(D_r)、洪峰削减率(D_{pr})、排水延迟时间(ΔT_r)和峰值延迟时间(ΔT_{pr})^[42]。其中绿色屋顶的雨水滞留率(D_r)可通过以下公式进行计算

$$D_r = \frac{P - R}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D_r 为绿色屋顶的雨水滞留率(%); P 为降雨量(mm); R 为绿色屋顶的排水量(mm)。

洪峰削减率(D_{pr})可通过以下公式进行计算

$$D_{pr} = \frac{I_{\max} - D_p}{I_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, D_{pr} 为绿色屋顶的洪峰削减率(%); $I_{\max}$ 为场降雨的最大降雨强度($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); D_p 为绿色屋顶洪峰流量($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

排水延迟时间(ΔT_r)可通过以下公式进行计算

$$\Delta T_r = T_{rR} - T_{rP} \quad (3)$$

式中, ΔT_r 为排水延迟时间(min); T_{rR} 为绿色屋顶产流开始时间(min); T_{rP} 为降雨开始时间(min)。

峰值延迟时间(ΔT_{pr})可通过以下公式进行计算

$$\Delta T_{pr} = T_{pR} - T_{pP} \quad (4)$$

式中, ΔT_{pr} 为峰值延迟时间(min); T_{pR} 为绿色屋顶产流峰值出现时间(min); T_{pP} 为最大降雨强度出现时间(min)。

1.4 仿真方法

HYDRUS-1D 软件主要用于一维饱和—非饱和多孔介质中水、热和溶质运移的数值模拟^[43]。该软件可以设置分层土壤的不同水力参数属性, 设置大气边界条件(降雨和蒸散发)和自由排水边界条件, 已广泛应用于降雨条件下绿色屋顶水文性能的数值模拟^[44-46]。HYDRUS-1D 软件采用 Richards 方程模拟土壤中的一维垂直水分运移, 其基本控制方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中, θ 为体积含水量(mm^3/mm^3); t 为时间(min); h 为压力水头(mm); z 为土壤深度(mm); $K(h)$ 为非饱和导水率(mm/min)。

土壤非饱和和水力特性参数由 van Genuchten-mualem 方程给出^[47]

$$\begin{cases} S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^m, & h < 0 \\ S_e = 1, & h \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

式中, S_e 为土壤饱和度; θ_s 为饱和含水量(mm^3/mm^3); θ_r 为残余含水量(mm^3/mm^3); K_s 为饱和导水率(mm/min); α , m 和 n 为经验参数, 其中假设 $m=1-1/n$, l 通常取 0.5。

本研究采用纳什效率系数(NSE)指标来评价数值模拟结果与试验结果的可靠性^[48]。其计算公式为

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{ot} - Q_{st})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{ot} - Q_o)^2} \quad (8)$$

式中, Q_{ot} 为时间 t 的试验结果; Q_{st} 为时间 t 的模拟结果; Q_o 为试验结果的平均值。

若 NSE 值接近 1, 表明该模型具有较高的可靠性; 若 NSE 小于 0, 则模型拟合质量较差。

2 结果与分析

2.1 模型验证及参数反解

本研究利用 2020 年 10 月 2 日的降雨数据作为 HYDRUS-1D 反解模块的上边界条件, 通过单一土壤和分层土模型试验校准参数, 并用模拟降雨试验(0.5 mm/min, 60 min, 总量 30 mm)验证结果。模型假设土壤均质, 深度 100 mm, 上边界为降雨, 下边界自由排水, 忽略蒸散发。初始土壤含水量和室内试验确定的参数范围作为反解模块输入, 最终估算的土壤水力参数如表 2 所列。

底部排水量模拟结果与实测结果的比较结果如图 4 所示。由图 4(a)可知, 土壤 S1 和 S2 的模拟结果与测量结果吻合程度较高, NSE 为 0.99。由图 4(b)可知, 利用单一土壤 S1 和 S2 的水力特性参数对分层土壤进行底部排水量的模拟, 其排水量的模拟结果会高于试验结果。这一结果可能与下层土 S2 较低的饱和导

表 2 HYDRUS-1D 软件反解模块估算的土壤水力特性参数

Table 2 Soil hydraulic parameters estimated by inverse solution module of HYDRUS-1D software

土壤材料	$\theta_s/\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$	$\theta_r/\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$	$\alpha/10^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$	n	$K_s/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	l
土壤 S1	0.34	0.03	0.24	1.19	0.45	0.5
土壤 S2	0.38	0.08	0.93	1.23	0.35	0.5
分层土 LS1	0.39	0.03	0.24	1.19	0.45	0.5

水率提高了上层土 S1 的持水能力有关。软件求解得到分层土上层土壤的最大含水量为 $0.39\text{ mm}^3/\text{mm}^3$ ，其模拟结果与试验结果相吻合，NSE 为 0.99。

为进一步验证模型模拟结果的可靠性，又进行了一次降雨模拟试验（降雨强度 0.5 mm/min ，降雨时间 60 min ），结果如图 5 所示。模拟结果与试验结果吻合程度较好。因此用软件反解模块得到的分层土水力参数来模拟分层土的水文性能是可靠。

2.2 分层土壤与单一土壤的比较

首先，以降雨事件间隔超过 6 h 作为阈值对所观测到的降雨事件进行划分^[49]，本研究中，在 4 个月的监测期间，共得到 45 起独立降雨事件。不同基质在 594 mm 降雨量下的排水、滞留及径流响应对比如表 3 所列。这 45 次降雨事件的累计降雨量为 594 mm 。对

于分层土，累计排水量为 273 mm ，与单一土壤 S1 和 S2 相比，排水量较少。单一土壤 S1 的累计雨水滞留量为 288 mm ，滞留率为 49% 。单一土壤 S2 的累计雨水滞留量为 315 mm ，滞留率为 53% 。分层土具有较高的 RRC，其累计雨水滞留量达到了 321 mm ，滞留率为 54% 。在这 45 起降雨事件中，土壤 S1 共有 49% 的降雨事件产生径流。同样的，土壤 S2 和分层土共有 36% 的降雨事件产生径流。本文的研究结果与前人的研究一致，但累计雨水滞留量与之前的研究略有差异，这可能与研究区不同的气候条件有关^[50]。结果表明，在长期干湿循环下，分层土的 RRC 高于单一土壤。

一个典型降雨事件（2020 年 10 月 2 日）下不同基质类型的累计排水量和底部排水率如图 6 所示。由图 6(a) 可知，土壤 S1 在降雨开始的 116 min 后开始排

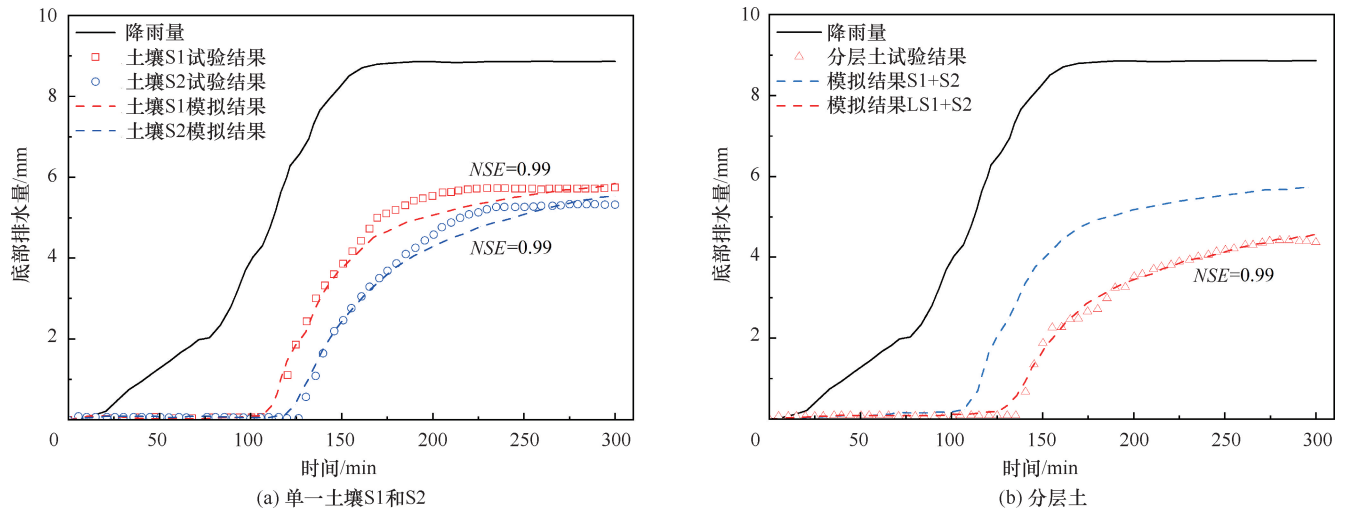


图 4 底部排水量试验结果与模拟结果的比较

Fig. 4 Comparison of bottom drainage between experimental and simulated results

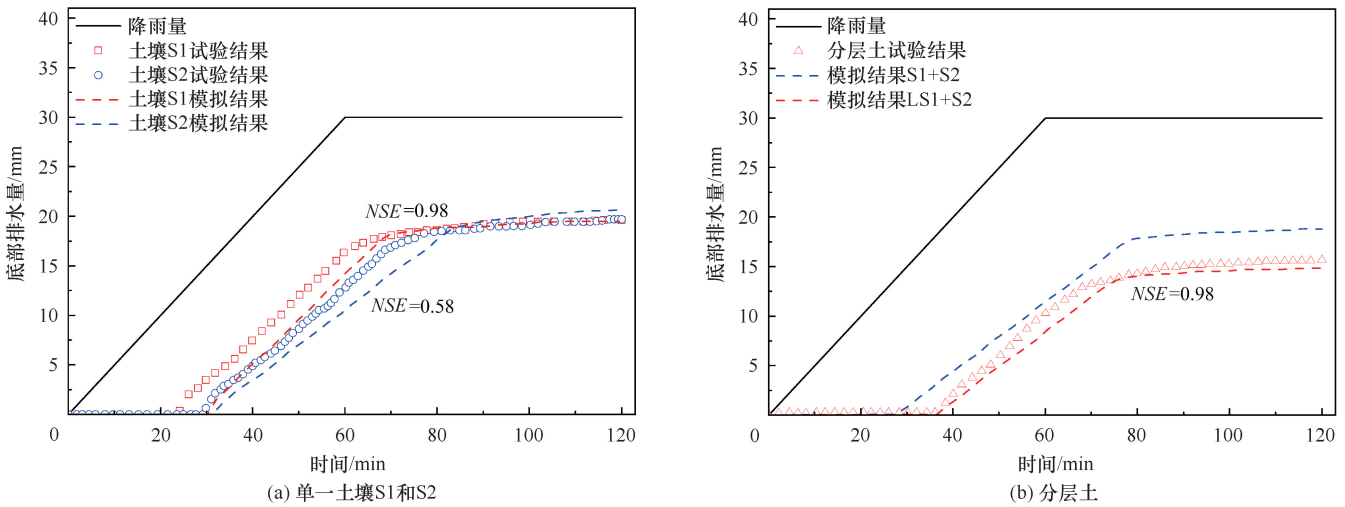


图 5 模拟降雨条件下底部排水量模拟结果与试验结果的比较

Fig. 5 Comparison of bottom discharge between simulated and experimental results under simulated rainfall conditions

表 3 不同基质在 594 mm 降雨量下的排水、滞留及径流响应对比

Table 3 Comparison of drainage, retention, and runoff responses of different substrates under 594 mm rainfall

基质类型	降雨量/mm	排水量/mm	滞留量/mm	滞留率/%	径流事件/%
土壤 S1	594	306	288	49	49
土壤 S2	594	279	315	53	36
分层土	594	273	321	54	36

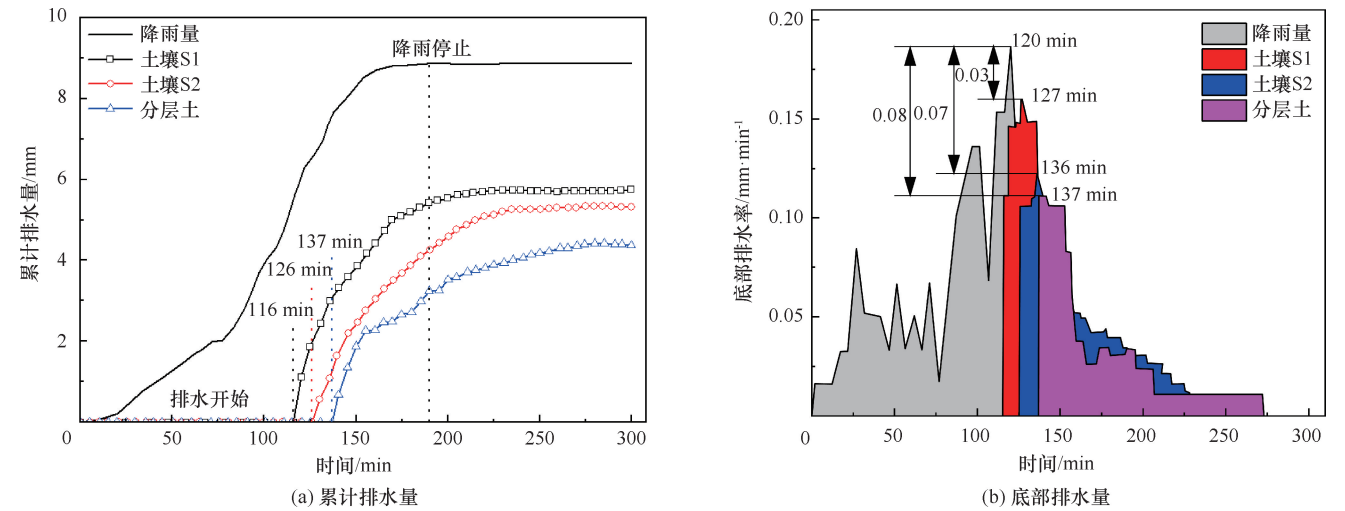


图 6 2020 年 10 月 2 日实测降雨量与底部排水量的关系

Fig. 6 Relationship between measured rainfall and bottom drainage on October 2, 2020

水, 而土壤 S2 在 126 min 后开始排水。分层土延迟排水程度更好, 排水时间延迟至 137 min, 这主要与分层土较高的持水能力和分层土下土壤层 S2 较低的渗透性有关。三种类型基质的绿色屋顶雨水滞留率分别为 35%、39% 和 50%, 其中分层土的雨水滞留率最高, 分别比土壤 S1 和 S2 高 15%、11%。分层土下层 S2 的低渗透性延缓了雨水入渗, 增加了上层持水能力, 从而推迟了排水时间并延迟达到最大饱和含水量。由图 6(b) 可知, 土壤 S1、S2 和分层土的峰值延迟时间分别约为 7 min、16 min 和 18 min, 洪峰削减率分别为 16%、37% 和 42%。这些结果表明, 分层土对洪峰削减和峰值延迟有显著影响。和排水延迟一样, 峰值延迟主要也受土壤渗透性的影响, 分层土上层土壤较高的持水能力也是提高峰值延迟的原因。分层土和土壤 S2 的洪峰削减率分别为 42% 和 37%, 两者之间相差不大, 对于分层土, 它的洪峰削减率主要取决于渗透性较低的那一层土壤。

2.3 分层土绿色屋顶水文过程数值模拟

基于表 2, 采用 HYDRUS-1 软件对分层土绿色屋顶的降雨入渗特性进行模拟 (见图 7)。设置土壤 S1 和土壤 S2 以及分层土的初始含水量 θ_0 均为 $0.2 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 。上边界设为降雨 ($0.35 \text{ mm}/\text{min}$, 90 min), 下边界为自由排水。由图 7(a) 可知, 土壤

层蓄水量随着降雨的进行而迅速增加, 并在土壤层达到最大含水量后趋于稳定, 当降雨停止后土壤层蓄水量缓慢下降至稳定值, 该值为土壤层的持水量。单一土壤 S1、S2 和分层土的最大蓄水量分别为 14 mm、18 mm 和 18.8 mm。和单一土壤 S1 和 S2 相比, 分层土的最大蓄水量分别提高了 34% 和 4%。单一土壤 S1、S2 和分层土的径流削减率分别为 35%、46% 和 53%。降雨停止后, 分层土绿色屋顶的底部排水量最小, 其次是 S1、S2 最大。这表明分层土能减少排水量, 增强持水能力。如图 7(b) 可知, 绿色屋顶土壤层的底部排水速率随着降雨的进行迅速增长到最大值, 之后排水速率保持稳定。当降雨停止后, 绿色屋顶的底部排水速率迅速下降, 并逐渐趋于零。土壤 S1 的排水峰值最高, 速率为 $0.45 \text{ mm}/\text{min}$, 其次是土壤 S2 和分层土, 两者的排水峰值速率处在同一水平, 都为 $0.35 \text{ mm}/\text{min}$ 。此外, 与土壤 S1 相比, 土壤 S2 的排水时间推迟了 11 min, 分层土的排水时间推迟了 16 min。类似地, 与土壤 S1 相比, 土壤 S2 的峰值排水时间推迟了 9 min, 分层土的峰值排水时间推迟了 16 min。结果表明, 分层土比单一土壤相比, 排水时间延迟和峰值排水时间延迟更长。

绿色屋顶土壤含水量随深度的变化规律如图 8 所示。在降雨过程中, 湿润峰持续向下推进, 其中高渗透

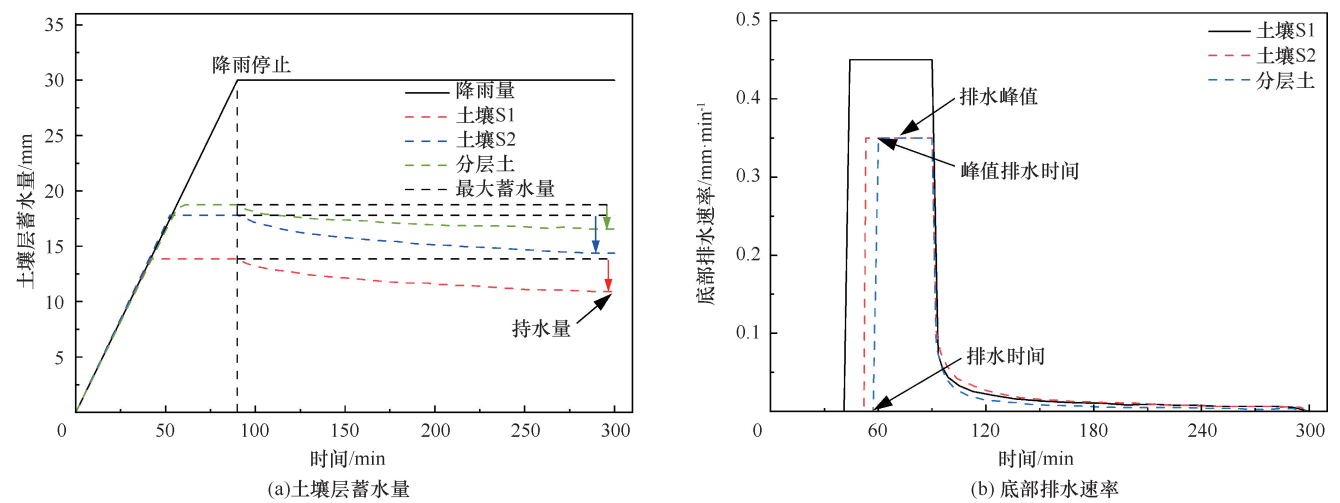


图 7 土壤 S1、S2 和分层土绿色屋顶的降雨入渗过程模拟

Fig. 7 Simulation of rainfall infiltration in soil S1, S2, and layered-soil green roofs

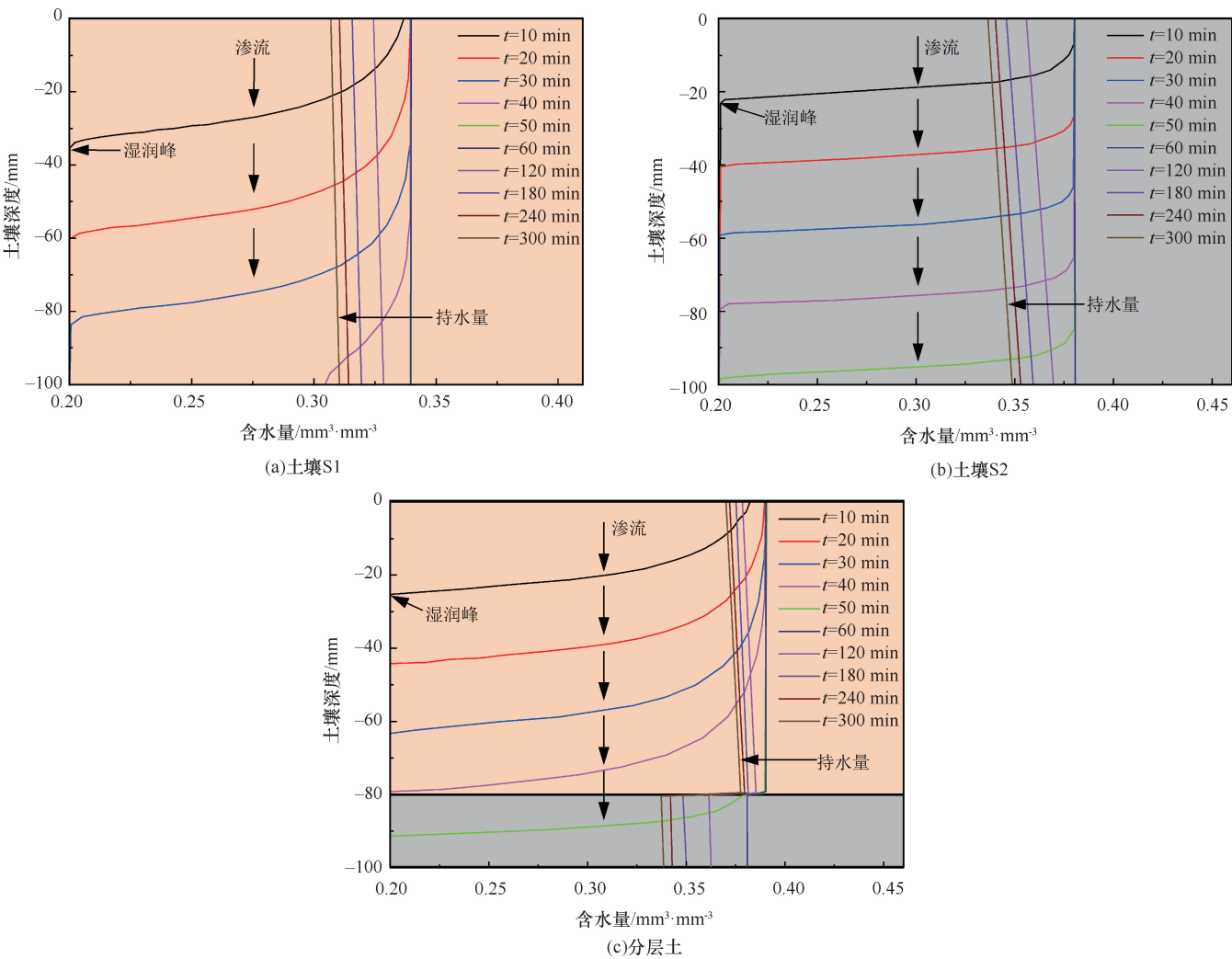


图 8 绿色屋顶土壤层含水量随深度变化剖面

Fig. 8 Profiles of soil water content variation with depth in green roof soil layer

性的 S1 土壤湿润峰移动最快[见图 8(a)], 低渗透性的 S2 土壤移动最慢[见图 8(b)]。分层土的表现与 S2 类似, 其上层的 LS1 土壤含水量分布较为平缓[见图 8(c)]。降雨结束后, 分层土上层保持了较高的含水量, 水分渗漏明显少于单一土壤, 且渗漏主要集中在下层。这些结果表明, 分层结构能有效延缓湿润峰下移, 减少水分流失, 并通过促进上层水分重分布来提升持水能力。

2.4 分层土提高土壤 RRC 的影响因素分析

2.4.1 土壤初始含水量及饱和含水量

为不同初始含水量及饱和含水量下土壤 S1、土壤 S2 和分层土绿色屋顶雨水滞留能力的模拟结果如图 9 所示。降雨前, 若绿色屋顶的初始含水量较低, 经过一场降雨后, 绿色屋顶通常有较高的雨水滞留量以及更长的排水时间延迟, 因为土壤层较低的初始含

水量意味着绿色屋顶降雨前有较高的有效蓄水空间。如图 9(a) 所示, 在相同土壤初始含水量下, 分层土的平均雨水滞留率分别比单一土壤 S1 和土壤 S2 绿色屋顶高 18% 和 7%。如图 9(b) 所示, 雨水滞留量随着土壤饱和含水量的增加而增加, 且底部排水时间延迟也随着土壤饱和含水量的增加而增加。在相同饱和含水量下, 土壤 S1 和土壤 S2 的雨水滞留率没有显著差异, 而分层土的雨水滞留率比单一土壤绿色屋顶的雨水滞留率提高了 4% 左右。

2.4.2 分层土壤的渗透性

为探讨土壤不同饱和导水率对雨水滞留能力的影响, 分别对分层土上层土壤 LS1 ($K_{s,LS1}$) 和下层土壤 LS2 ($K_{s,LS2}$) 不同饱和导水率下的绿色屋顶水文过程进行模拟。如图 10(a) 所示, 当 $K_{s,LS1}$ 高于降雨强度(即

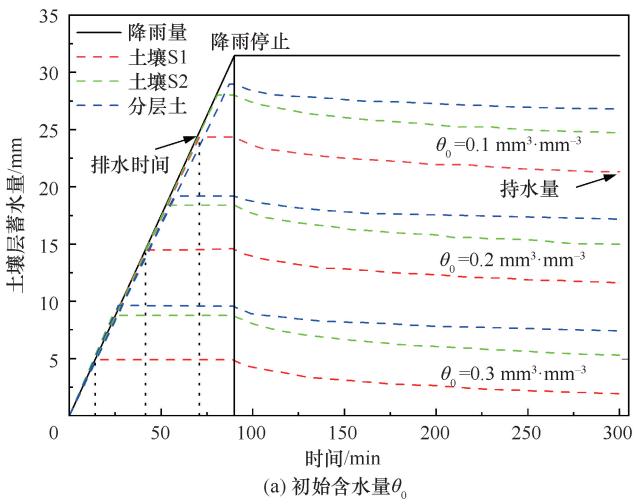
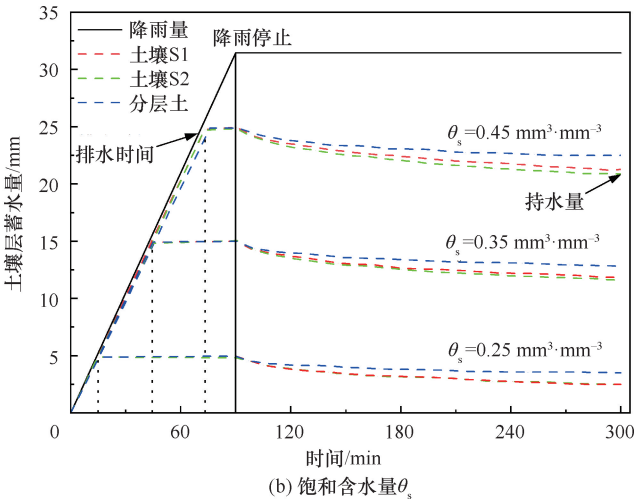


图 9 土壤初始含水量及饱和含水量对绿色屋顶雨水滞留能力的影响

Fig. 9 Effects of initial and saturated soil water content on rainwater retention capacity of green roofs

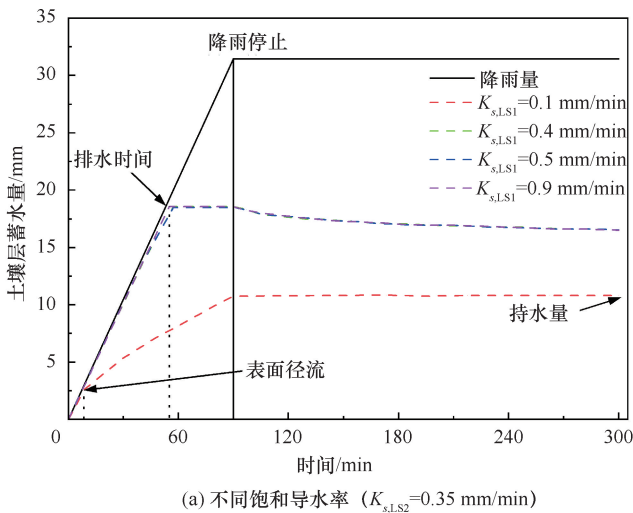
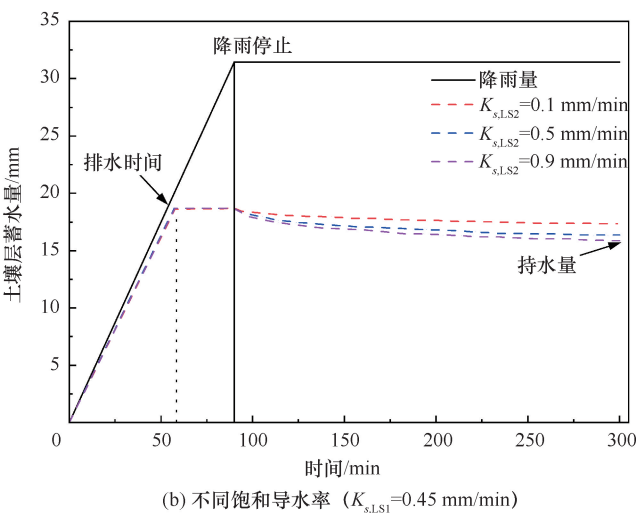


图 10 分层土饱和导水率对绿色屋顶雨水滞留能力的影响

Fig. 10 Effect of saturated hydraulic conductivity of layered soil on rainwater retention capacity of green roofs

0.35 mm/min), 分层土上层土壤的饱和导水率 $K_{s,LS1}$ 对土壤持水能力没有影响, 当 $K_{s,LS1}$ 较小时(小于降雨强度), 绿色屋顶的持水能力较低。如图 10b 所示, 对于分层土下层土壤 LS2, 饱和导水率 $K_{s,LS2}$ 越大, 分层土的持水量越小, 但最大蓄水量相差不大, 同时下层土壤 $K_{s,LS2}$ 对开始排水时间没有显著影响。这表明上层土壤较高的渗透性有助于提高雨水的入渗能力, 而下层土壤较低的渗透性有助于提高分层土的持水能力。

2.4.3 分层土土壤层深度比

根据上述研究结果, 分层土的土壤饱和含水量的增加能够有效提高土壤的持水能力, 即饱和含水量高的土壤层深度比例越大, 分层土绿色屋顶的雨水滞留能力越高。然而, 本研究主要关注不同饱和导水率 K_s 下分层土深度比对雨水滞留能力的影响。分层土土壤层饱和含水量均设置为 $0.38 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$, $K_{s,LS1}$ 取 $0.45 \text{ mm}/\text{min}$ 。在相同的初始含水量和饱和含水量下, 较低 $K_{s,LS2}$ 的分层土具有较高的持水量(见图 11)。无论下层土壤的饱和导水率 $K_{s,LS2}$ 的值高于或低于上层土壤 $K_{s,LS1}$, LS1:LS2 深度比为 8:2 的分层土绿色屋顶总是具有最高的持水能力, 而 LS1:LS2 深度比为 2:8 的分层土总是具有最低的持水能力。分层土下层土壤的含水量较低, 这意味着水分渗漏主要发生在分层土的下层土壤, 上层土壤仍保持相对较高的持水量(见图 12)。所以, 对于分层土, 上层土的比例较高时, 分层土的持水能力较强。

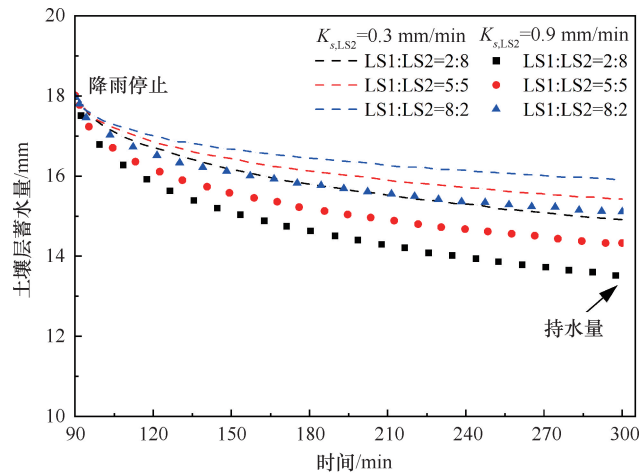


图 11 降雨停止后分层土比例和下层土壤渗透性对雨水滞留能力的影响(土壤 LS1 和 LS2 饱和含水量取 $0.38 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$)

Fig. 11 Effects of layered soil ratio and permeability of lower soil layer on rainwater retention capacity after rainfall ($\theta_{s,LS1}$ and $\theta_{s,LS2}$ are $0.38 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$)

2.5 参数敏感性分析

以深度比为 8:2 分层土绿色屋顶为例, 对主要参数(初始含水量 θ_0 、饱和含水量 θ_s 、饱和导水率 K_s 、土壤深度 S_d 、和降雨强度)进行敏感性分析, 其中假设其中一个参数增加 50%, 而其他参数保持不变。如图 13 所示, 在模拟降雨条件下(降雨强度 $30 \text{ mm}/\text{h}$, 历时 100 min), 绿色屋顶($\theta_0=0.2 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$, $\theta_s=0.45 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$, $K_s=0.5 \text{ mm}/\text{min}$, $S_d=100 \text{ mm}$)开始产生排水时间为 77 min , 雨水滞留率为 72%。在参数敏感性分析中, 土壤饱和含水量对绿色屋顶雨水滞留率的影响最大, 绿色屋顶雨水滞留的增长率超过 40%, 并在降雨过程中没有产生底部排水。此外, 初始含水量和土壤深度对绿色屋顶雨水滞留率的影响分别为降低 28% 和增加 17%, 而降雨强度和饱和导水率对绿色屋顶雨水滞留影响几乎没有, 初始含水量和土壤深度分别使绿色屋顶开始产生排水时间提前 26% 和推迟 14%。因此, 土壤饱和含水量变化对绿色屋顶雨水滞留和产生排水时间影响最大。除了提高土壤饱和含水量外, 增加土壤深度也能有效地提高绿色屋顶雨水滞留率和延迟排水时间。

2.6 暴雨条件下分层土绿色屋顶水文性能数值模拟分析

2.6.1 暴雨设计

为模拟不同暴雨条件下分层土绿色屋顶水文性能, 设计华南地区 1 a、5 a、10 a 和 20 a 暴雨重现期的降雨类型作为模型的上边界条件输入。暴雨强度设计采用以下公式计算

$$I = \frac{32.287 + 18.194 \lg P}{(t + 18.880)^{0.851}} \quad (9)$$

式中, I 为降雨强度(mm/min); P 为暴雨重现期(a)年; t 为降雨持续时间(min)。

此外, 为模拟绿色屋顶对雨水的峰值削减作用, 本研究采用芝加哥雨型确定设计暴雨事件的降雨强度—时间曲线, 峰值比 r 取 $0.4^{[51-52]}$ 。最后, 用于 Hydrus-1D 软件上边界条件输入的暴雨强度—时间曲线如图 14 所示。

2.6.2 暴雨重现期对分层土绿色屋顶 RRC 的影响

采用芝加哥暴雨公式设计了华南地区不同重现期的暴雨作为数值模型上边界输入, 设计暴雨持续时间为 60 min 。设计暴雨重现期 1 a、5 a、10 a 和 20 a 的累积降雨量分别为 47 mm 、 66 mm 、 74 mm 和 82 mm 。不同暴雨重现期下分层土绿色屋顶的水文过程如图 15 所示。通常, 在绿色屋顶开始产生排水后, 绿色屋顶底部累计排水呈线性增加(见图 15)。降雨

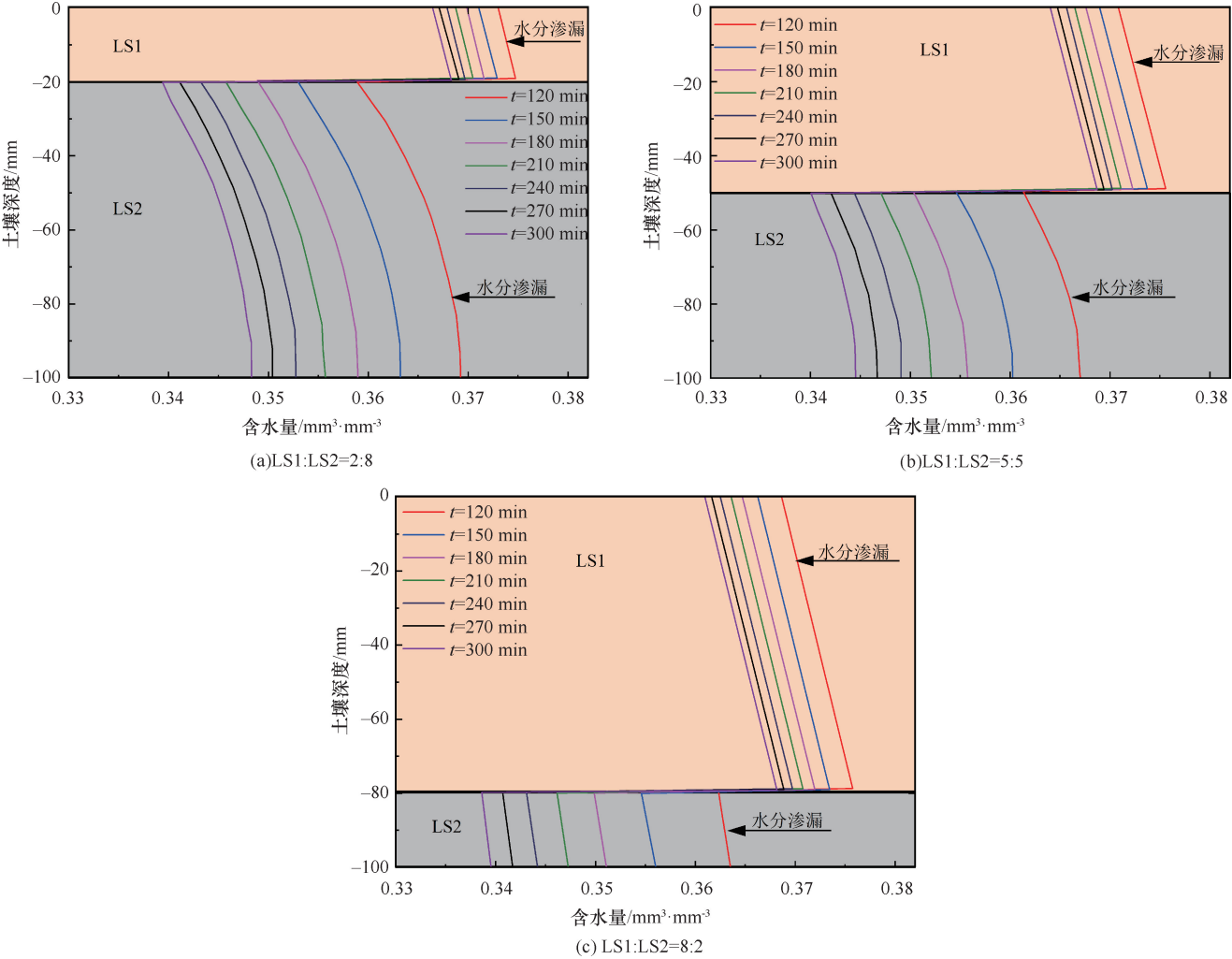


图 12 降雨停止后分层土不同深度比的土壤含水量剖面图, $K_{s,LS1}$ 和 $K_{s,LS2}$ 分别取 0.45 mm/min 和 0.3 mm/min

Fig. 12 Profiles of soil water content of layered soil at different depth ratios after rainfall

$K_{s,LS1}$ and $K_{s,LS2}$ are 0.45 mm/min and 0.3 mm/min, respectively

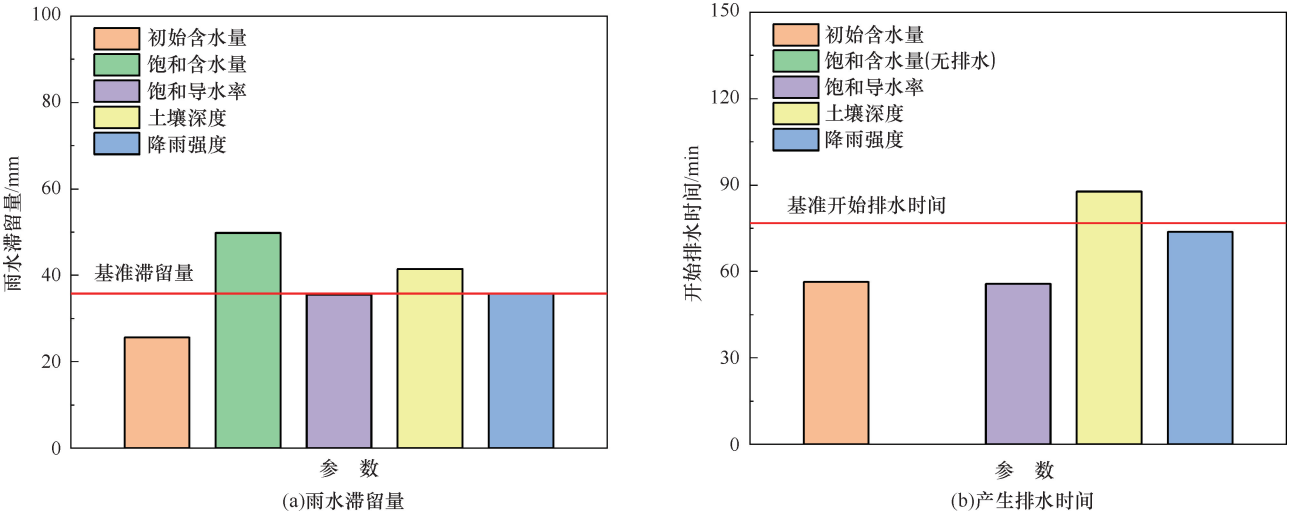


图 13 参数敏感性分析

Fig. 13 Parameter sensitivity analysis

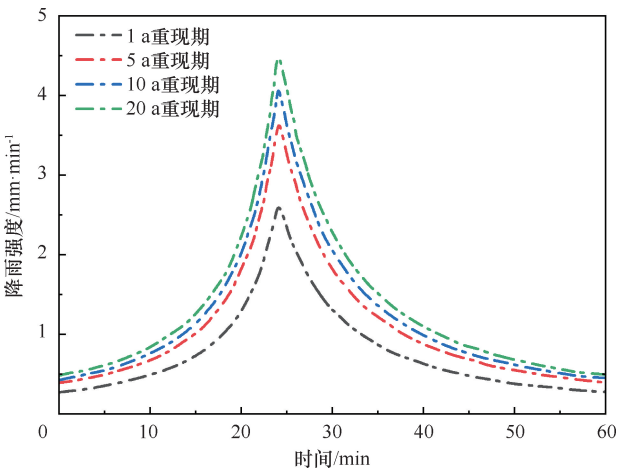
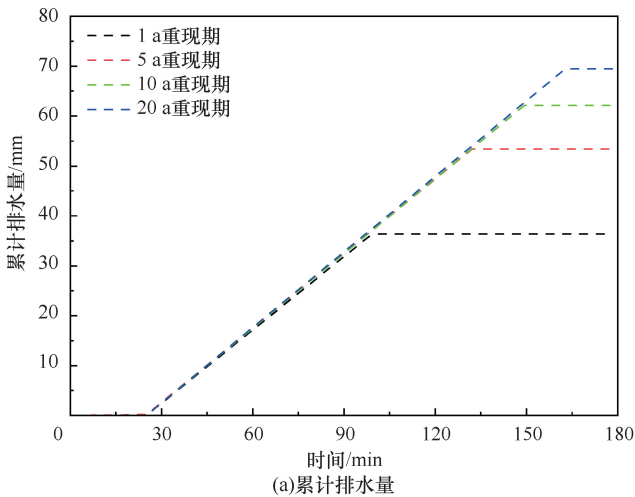


图 14 不同暴雨重现期的设计暴雨强度-时间曲线

Fig. 14 Design rainstorm intensity-duration curves under different rainstorm return periods

停止后,绿色屋顶底部累计排水持续增加,达到最大累计排水量后趋于稳定。累计排水量随着累积降雨量的增加而递增,即随着暴雨重现期的增加而增加[见图 15(a)]。绿色屋顶在 1 a、5 a、10 a 和 20 a 暴雨重现期下的雨水滞留率分别为 19%、17%、15% 和 14%。由于设计暴雨强度高于土壤饱和导水率,在数值模型中允许土壤表面积水入渗并不直接产生表面径流(即设置土壤表面最大积水深度为 50 mm)。因此,绿色屋顶底部排水速率取决于不同重现期暴雨下土壤的饱和导水率[见图 15(b)]。这也表明了在不同暴雨重现期下绿色屋顶开始产生排水时间是一致的(即 25 min)。降雨停止后,随着暴雨重现期的增加,绿色屋顶底部排水峰值时间分别推迟了 39 min、70 min、87 min 和 101 min,这表明绿色屋顶允许表面积水入渗可以有效削减排水峰值和推迟排水峰值时间。



2.6.3 土壤表面最大积水深度对雨水滞留的影响

土壤表面最大积水深度对分层土绿色屋顶水文过程的影响如图 16 所示。绿色屋顶的累积排水量和地表径流量随着降雨逐渐增加并在降雨停止后逐渐趋于稳定。在暴雨条件下绿色屋顶底部累计排水上升阶段的曲线远低于累计表面径流曲线,这主要与表面径流速率远高于底层排水速率有关。此外,表面径流量随着暴雨重现期的增加而显著提高,而累计排水量没有显著差异(变化量小于 5 mm)。由图 16(a)可知,不同暴雨重现期的累计表面径流量分别比底部排水量高 10 mm、22 mm、29 mm 和 35 mm。随着土壤表面最大蓄水深度增加到 10 mm 和 20 mm,绿色屋顶底部平均排水量分别增加了 28 mm 和 38 mm[见图 16(c)和(e)]。随着土壤表面最大蓄水深度的增加,绿色屋顶表面径流量逐渐减少,甚至低于底层排水量。结果表明,在暴雨条件下,绿色屋顶土壤表面径流量可能远高于底部排水量。在土壤表面设置为表面径流条件下,不同暴雨重现期的绿色屋顶开始产生表面径流时间早于底部排水时间,表面径流时间比底部排水时间分别提前了约 5 min 和 30 min[见图 16(a)]。不同暴雨重现期的表面径流峰值分别减少了 19%、13%、12% 和 6%,而底部排水峰值处于恒定的较低水平,排水峰值分别降低了 81%、86%、88% 和 89%。当允许土壤表面最大蓄水深度为 10 mm 时,绿色屋顶表面径流峰值分别减少了 22%、15%、14% 和 12%[见图 16(c)],表面径流时间推迟了约 22 min。随着土壤表面最大蓄水深度增加到 20 mm,绿色屋顶表面径流峰值显著降低,表面径流开始时间平均推迟 27 min。

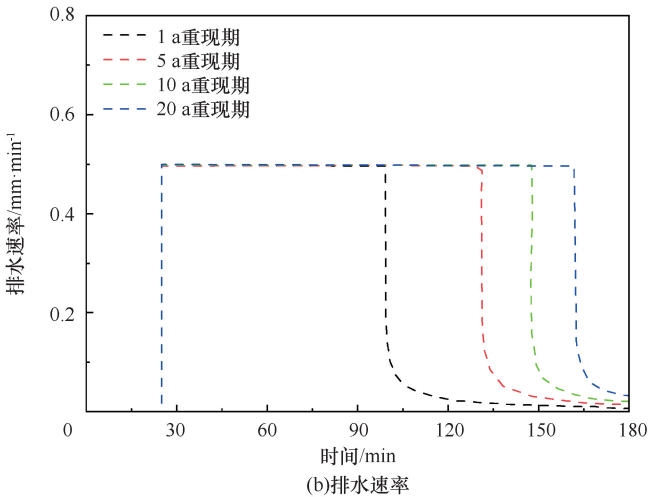


图 15 不同暴雨重现期下分层土绿色屋顶的水文过程

Fig. 15 Hydrological processes of layered-soil green roofs under different rainstorm return periods

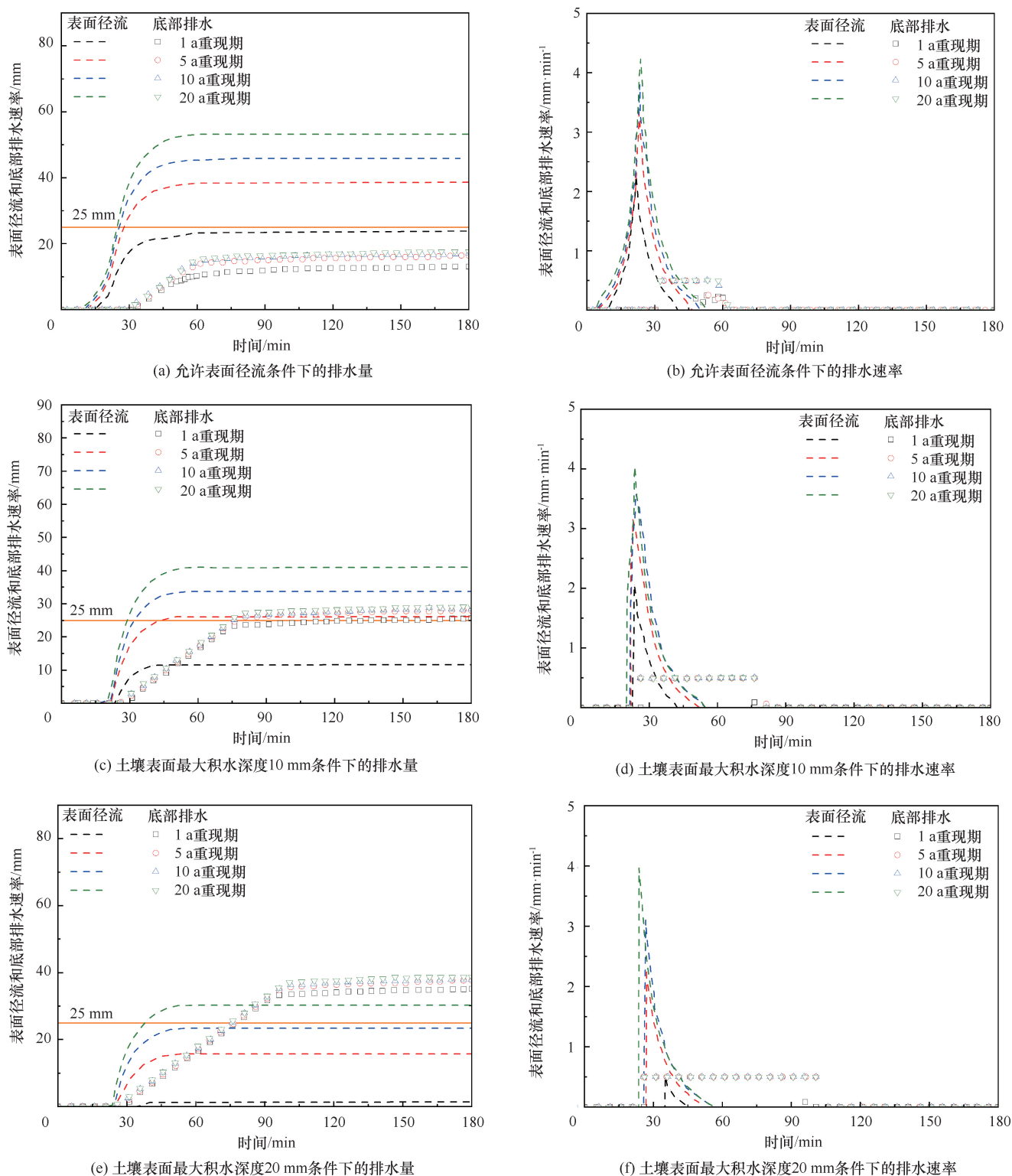


图 16 土壤表面最大积水深度对分层土绿色屋顶水文过程的影响

Fig. 16 Effect of maximum surface ponding depth on hydrological processes of layered-soil green roofs

3 结果讨论

本研究通过试验监测和数值模拟, 系统分析了分层土绿色屋顶的雨水滞留能力 (RRC) 及其影响因素。本节结合试验数据、模拟结果和已有研究, 深入

探讨分层土的水文性能优化机制, 并对比单一土壤的局限性, 进一步明确分层结构在绿色屋顶中的应用潜力。

3.1 分层土与单一土壤的 RRC 对比

结果显示, 在长期干湿循环下, 分层土的累计雨

水滞留量(321 mm)高于单一土壤 S1(288 mm)和 S2(315 mm), 滞留率分别提高 5%和 1%。这一差异主要源于分层土的双重机制: 上层高渗透性土壤: 促进雨水快速入渗, 减少地表径流; 下层低渗透性土壤: 形成毛细屏障, 延缓水分下渗, 增加上层持水时间。此外, 分层土在峰值排水延迟和洪峰削减率方面表现更优。这与 KHIRE 等^[36]的研究一致, 即分层界面处的渗透性差异能有效阻滞水分运移, 从而延长排水时间并降低峰值流量。

3.2 分层土的水文过程机制

通过 HYDRUS-1D 模拟发现, 分层土的水分动态呈现阶段性特征。降雨初期: 水分迅速入渗至高渗透性上层, 湿润锋向下推进较快。降雨中后期: 湿润锋到达低渗透性下层时, 运移速度显著降低, 导致上层土壤含水量持续增加。降雨停止后: 下层渗漏量减少, 上层通过毛细作用重新分布水分, 延长持水时间。这一过程与 HUANG 等^[33]提出的“分层持水效应”相符, 即质地差异形成的界面能提升田间持水量。本研究中, 分层土上层最大蓄水量(18.8 mm)比单一土壤 S1(14 mm)高 34%, 进一步验证了该机制的有效性。

3.3 关键参数对 RRC 的影响

3.3.1 初始含水量 θ_0 与饱和含水量 θ_s

初始含水量: θ_0 越低, 土壤有效蓄水空间越大。当 $\theta_0 = 0.2 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 时, 分层土 RRC 比单一土壤高 18%。这与 VOLDER 等^[18]的结论一致, 即干早期较长的绿色屋顶在后续降雨中表现更优。饱和含水量: θ_s 越高, 持水能力越强。分层土在 $\theta_s = 0.45 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 时, RRC 比单一土壤高 4%, 但差异较小, 说明分层结构本身对持水的贡献大于单纯增加 θ_s 。

3.3.2 渗透性 K_s 与深度比

上层渗透性: 当 $K_{s,LS1} >$ 降雨强度(0.35 mm/min)时, RRC 不受影响; 反之则入渗受限。因此, 上层应选择高渗透性材料。这与 LIU 等^[53]基于概念水文过程开发一个简单的水平衡模型对绿色屋顶的水文过程进行模拟得到的结论一致。下层渗透性: $K_{s,LS2}$ 越低, 持水能力越强。深度比: LS1 : LS2 = 8 : 2 时持水能力最佳, 因上层占比高可最大化蓄水空间, 而下层仅需少量低渗透性土壤即可形成毛细屏障, 这与张军等^[37]的双层基质研究结论一致。

3.4 暴雨条件下的适应性

在暴雨重现期 1~20 a 的模拟中, 分层土的 RRC 随降雨强度增加而降低(19%→14%), 但峰值延迟时间显著延长(39 min→101 min)。这表明: 极端降雨

下, 分层土虽无法完全滞留雨水, 但能有效延缓径流峰值, 减轻城市排水系统压力。本研究对不同暴雨重现期下土壤表面最大积水深度对雨水滞留的影响进行了模拟, 研究发现增加土壤表面最大蓄水深度能够有效减少土壤表面径流量, 从而有利于削减径流峰值、推迟峰值排水时间。在暴雨条件下, 土壤表面径流速率远大于土壤入渗速率, 若在绿色屋顶增加额外的蓄水层, 此蓄水层可能会不起作用。SHAFIQUE 等^[32]表明绿色屋顶土壤层达到饱和后将直接产生表面径流, 这取决于降雨强度和历时。ZHAO 等^[54]指出, 在 120 mm/h 的降雨强度下, 土壤表面径流量占总降雨量的 79%。因此对于分层土绿色屋顶, 上层土的渗透性要较大, 便于雨水的入渗, 这样在暴雨情况下, 可以减少表面径流量, 从而有较好的雨水滞留能力。

3.5 与已有研究的对比与讨论

本研究证实分层土的 RRC 优于单一土壤, 与 LIU 等^[25]的结论(基质深度和材料配比是关键)互补, 但提出了分层优化这一新方向。KHIRE 等^[36]指出分层界面能阻滞水分下渗, 本研究进一步量化了其对绿色屋顶水文性能的提升(如峰值延迟时间增加 16 min)。但试验仅针对特定土壤(耕植土+泥炭/细砂)和气候(亚热带), 未来需验证不同基质(如轻质陶粒)和干旱区的适用性。

3.6 实际应用建议

基于结果, 分层土绿色屋顶的设计应遵循: 材料选择: 上层采用高渗透性土, 下层采用低渗透性土。深度比: 推荐 LS1 : LS2 = 8 : 2, 在 100 mm 总深度中, 上层 80 mm、下层 20 mm。暴雨管理: 结合表面蓄水措施(如浅洼地)以增强极端降雨下的调控能力。

4 结 论

本研究通过建立不同结构配置绿色屋顶模型试验和数值计算模型, 对分层土绿色屋顶的雨水滞留能力和水文过程的影响机理进行分析。本文主要结论为。

(1) 较低的初始含水量和较高的饱和含水量能提高绿色屋顶的雨水滞留能力, 在相同的初始含水量下, 分层土的平均雨水滞留率比单一土壤分别高 18%、7%, 在相同的饱和含水量下, 比两个单一土壤高 4%。分层土具有更高的峰值排水量减少、更长的排水延迟和峰值排水延迟。

(2) 对分层土持水能力影响显著的因素依次为初始含水率和饱和含水率, 其次为土层渗透率, 最后为土层深度比。对于分层土, 上层土的渗透性决定了降雨的入渗, 底层土的渗透性决定雨水的渗漏量。当上

层土饱和导水率高于降雨强度时,其对土壤持水能力没有影响;下层土的饱和导水率越大,分层土的持水量越小。分层土结构能够减缓土壤湿润峰的移动,并减少降雨后土壤层的水分渗漏,引起水分重分布,提高上层土的持水量。

(3)为了使分层土绿色屋顶具有良好的水文性能,如雨水截留、排水峰值减少、排水峰值延迟和排水延迟,上层应采用高渗透性土,下层应采用低渗透性土。此外,上层的深度比应增加到一定程度。分层土中上层土的比例较高时,分层土的持水能力较强,这是由于水分渗漏主要发生在下层土壤。在土壤总深度为 10 cm 的情况下,无论下层土壤的饱和导水率 $K_{s,LS2}$ 的值高于或低于上层土壤 $K_{s,LS1}$, LS1 : LS2 深度比为 8 : 2 的分层土绿色屋顶具有较高的持水能力。

(4)参数敏感性分析表明,土壤饱和含水量变化对绿色屋顶雨水滞留和产生排水时间影响最大。

(5)在暴雨条件下,绿色屋顶土壤表面径流量远高于底部排水量。暴雨条件下允许土壤表面积水入渗可以有效削减峰值径流,推迟表面径流时间。当土壤表面最大蓄水深度为 10 mm 时,不同暴雨重现期下绿化屋顶表面径流峰值分别削减了 22%、15%、14% 和 12%,表面径流时间推迟了约 22 min。

然而,这项研究的结论是基于特定的土壤和有限的气候条件。此外,后续研究需要考虑不同的土壤类型和土壤深度,在长期监测下研究分层土绿色屋顶的水文性能。

参考文献 (References):

- [1] YI Y, SHEN G R, ZHANG C, et al. Quantitative analysis and prediction of urban heat island intensity on urban-rural gradient: A case study of Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154264.
- [2] LIANG Z, WU S Y, WANG Y Y, et al. The relationship between urban form and heat island intensity along the urban development gradients[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135011.
- [3] 王俊,梅国雄,黄山,等. 海绵城市建设的绿化屋顶技术及其水文与环境效应研究进展[J]. 水文, 2021, 41(1): 42-48.
WANG J, MEI G X, HUANG S, et al. Review of hydrology and environmental benefits of green roof technology based on sponge city construction[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1): 42-48.
- [4] JIA S Q, WENG Q H, YOO C, et al. Global investigation of pedestrian-level cooling and energy-saving potentials of green and cool roofs in 43 megacities[J]. Energy and Buildings, 2025, 337: 115671.

- [5] LAI L, WANG J, LI F, et al. Thermal performance prediction of rainwater-Vented composite green roofs using the VMD-TCN-GRU model[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 103: 112152.
- [6] FANG X N, LI J W, MA Q, et al. A quantitative review of nature-based solutions for urban sustainability (2016—2022): From science to implementation[J]. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172219.
- [7] HUANG J, KONG F H, YIN H W, et al. Green roof effects on urban building surface processes and energy budgets[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 117100.
- [8] MIHALAKAKOU G, SOULIOTIS M, PAPADAKI M, et al. Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 180: 113306.
- [9] DONG J, LI C L, GUO R N, et al. Assessing the potential for green roof retrofitting: A systematic review of methods, indicators and data sources[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 123: 106261.
- [10] SOMMESE F, DIANA L. A holistic framework for the implementation of green roofs on existing buildings: A case study in the Mediterranean climate of Naples[J]. Building and Environment, 2025, 274: 112811.
- [11] 王选懿,饶良懿. 绿色屋顶适建潜力评估:以天津市南开区为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 378-386.
WANG X Y, RAO L Y. Assessment of green roof potential: A case study in Nankai District, Tianjin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 378-386.
- [12] 李奥,向代勤,董研,等. 综合考虑经济和人文效益的海绵小区灰-绿结合设施布局优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 130-140.
LI A, XIANG D Q, DONG Y, et al. Layout optimization of gray-green combined facilities in sponge community considering economic and hydrological benefits[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 130-140.
- [13] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 典型 LID 设施降雨径流调控效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 61-75.
LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Study on the regulation effect of rainfall runoff in typical LID facilities[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 61-75.
- [14] 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 T, XU W N, CHENG H, et al. Effect of substrate composition of extensive green roof on water quality of rainfall outflow[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 39-45.
- [15] LU H Y, FENG Y Y, GAO Q, et al. Surface soil mixing is more beneficial than the plough layer mixing mode of biochar application for nitrogen retention in a paddy system[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137399.
- [16] TODOROV D, DRISCOLL C T, TODOROVA S. Long-term and

- seasonal hydrologic performance of an extensive green roof [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(16): 2471-2482.
- [17] LI Y, REN X, HILL R, et al. Characteristics of water infiltration in layered water-repellent soils [J]. *Pedosphere*, 2018, 28(5): 775-792.
- [18] VOLDER A, DVORAK B. Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2014, 10: 59-64.
- [19] 何瑛瑛, 张守红, 闫婧, 等. 极端降雨条件下绿色屋顶径流调控效益研究 [J]. *环境科学学报*, 2023, 43(11): 134-143.
- HE Y Y, ZHANG S H, YAN J, et al. Stormwater retention performance of green roofs under extreme rainfall conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(11): 134-143.
- [20] 闫婧, 张守红, 章孙逊, 等. 不同气候区绿色屋顶蒸散发模拟研究 [J]. *生态学报*, 2023, 43(10): 3936-3945.
- YAN J, ZHANG S H, ZHANG S X, et al. Simulation of evapotranspiration from green roofs in different climatic zones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(10): 3936-3945.
- [21] 张成玉, 张守红, 章孙逊, 等. 基于 SWMM 不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益研究 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 422-430.
- ZHANG C Y, ZHANG S H, ZHANG S X, et al. Study on stormwater control performance of green roofs in different climatic zones based on SWMM simulations [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 422-430.
- [22] LÖNNQVIST J, BROEKHUIZEN I, VIKLANDER M, et al. Green roof runoff reduction of 84 rain events; Comparing *Sedum*, life strategy-based vegetation, unvegetated and conventional roofs [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 646: 132325.
- [23] CUI E H, FU X, YANG X J, et al. How vertical drainage positions of extensive green roofs affect the runoff control performance [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131855.
- [24] SONI L, SZOTA C, FLETCHER T D, et al. Influence of green roof plant density and redirecting rainfall *via* runoff zones on rainfall retention and plant drought stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164043.
- [25] LIU W, FENG Q, CHEN W P, 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.
- [26] SCHULTZ I, SAILOR D J, STARRY O. Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 18: 110-118.
- [27] TALEBI A, BAGG S, SLEEP B E, et al. Water retention performance of green roof technology: A comparison of Canadian climates [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 126: 1-15.
- [28] 薛岳, 陈垚, 甘春娟, 等. 生物炭对生物滞留设施运行性能的影响研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 51(1): 206-211.
- XUE Y, CHEN Y, GAN C J, et al. Advances in impact of biochar on the operational performance of bioretention facilities [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(1): 206-211.
- [29] STOVIN V, POË S, DE-VILLE S, et al. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 159-172.
- [30] HUANG S, GARG A, MEI G X, et al. Experimental study on the hydrological performance of green roofs in the application of novel biochar [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(23): 4512-4525.
- [31] GRACESON A, HARE M, MONAGHAN J, et al. The water retention capabilities of growing media for green roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 328-334.
- [32] SHAFIQUE M, KIM R, RAFIQ M. Green roof benefits, opportunities and challenges-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 757-773.
- [33] HUANG M B, SPIES J, BARBOUR S L, et al. Impact of textural layering on water retention within drained sand profiles [J]. *Soil Science*, 2013, 178(9): 496-504.
- [34] ZETTL J, LEE BARBOUR S, HUANG M B, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 133-147.
- [35] HUANG M B, LEE BARBOUR S, ELSHORBAGY A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 169-183.
- [36] KHIREE M V, BENSON C H, BOSSCHER P J. Capillary barriers: Design variables and water balance [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(8): 695-708.
- [37] 张军, 钱丰峰, 晁建兵, 等. 生物炭改性双层基质绿色屋顶水力特性研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(7): 67-71.
- ZHANG J, QIAN F F, CHAO J B, et al. Study on the hydraulic characters of biochar retrofit dual-layer green roofs [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(7): 67-71.
- [38] 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.
- [39] 王俊, 黄润秋, 聂闻, 等. 基于无限边坡算法的降雨型滑坡预警系统的模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3503-3510.
- WANG J, HUANG R Q, NIE W, et al. Experimental study of early warning system model of landslide induced by rainfall based on infinite slope method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3503-3510.
- [40] ZHOU J, DENG Q L, CHEN Q Y, et al. Waste-green infrastructure nexus: Green roof promotion by digestate and digestate biochar from food waste [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 402: 130845.
- [41] LIAO W X, SIDHU V, SIFTON M A, et al. Biochar and vegetation effects on discharge water quality from organic-substrate green roofs

- [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 922: 171302.
- [42] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5015-5023.
- GE D, ZHANG S H. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall conditions [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5015-5023.
- [43] PALLA A, GNECCO I, LANZA L G. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(1): 73-84.
- [44] QIN H P, PENG Y N, TANG Q L, et al. A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 399-408.
- [45] ZHANG S H, LIN Z X, ZHANG S X, et al. Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 291: 112682.
- [46] HILTEN R N, LAWRENCE T M, TOLLNER E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(3/4): 288-293.
- [47] HAYEK M. Analytical solution for steady vertical flux through unsaturated soils based on van Genuchten-Mualem model[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: 131066.
- [48] GAN L, GARG A, WANG H, et al. Influence of biochar amendment on stormwater management in green roofs: Experiment with numerical investigation[J]. *Acta Geophysica*, 2021, 69(6): 2417-2426.
- [49] CIPOLLA S S, MAGLIONICO M, STOJKOV I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 876-887.
- [50] 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.
- [51] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. *Journal of the Hydraulics Division*. 1957, 83(4): 1321-1332.
- [52] PENG Z J, STOVIN V. Independent validation of the SWMM green roof module[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22(9): 04017037.
- [53] LIU W, ENGEL B A, FENG Q. Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126786.
- [54] ZHAO L S, HOU R, WU F Q, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179: 47-53.

(责任编辑 王璐)