北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

植物根系对绿色屋顶基质物理特性与水分变化特征影响

王任重远 章孙逊 张帆 闫婧 张文龙 王博 何瑛瑛 张守红

Effects of plant roots on physical property and moisture changing characteristics of green roof substrate

Wang Renzhongyuan, Zhang Sunxun, Zhang Fan, Yan Jing, Zhang Wenlong, Wang Bo, He Yingying, Zhang Shouhong

引用本文:
王任重远, 章孙逊, 张帆, 闫婧, 张文龙, 王博, 何瑛瑛, 张守红. 植物根系对绿色屋顶基质物理特性与水分变化特征影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):55–62. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240308
Wang Renzhongyuan, Zhang Sunxun, Zhang Fan, Yan Jing, Zhang Wenlong, Wang Bo, He Yingying, Zhang Shouhong. Effects of plant roots on physical property and moisture changing characteristics of green roof substrate[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):55–62. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240308

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240308

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京山区侧柏林生长旺季蒸散组分δ ^{18}O日变化及其定量区分

Daily variations of δ ^{18}O and its quantitative distinction in evapotranspiration components of *Platycladus orientalis* plantation during the rapid growth season in the mountainous area of Beijing

北京林业大学学报, 2017, 39(12): 61–70. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170172

重庆主城区屋顶绿化乡土植物资源调查及其应用分析

Resource investigation of roof greening native plant of Chongqing main city and its landscape application analysis

北京林业大学学报, 2017, 39(11): 92–97. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170281

生态系统尺度水汽通量分配——以寒温带兴安落叶松林为例

Partitioning of water vapor flux on the ecosystem scale: a case study on larch boreal forests

北京林业大学学报, 2018, 40(1): 46–56. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170202

叶面滞尘量对大叶黄杨光谱特征影响研究

Effects of leaf dust retention on spectral characteristics of *Euonymus japonicus*

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 40–49. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200213

多枝柽柳改变胡杨幼苗根系对土壤水盐的响应

Tamarix ramosissima changes the responses of root morphology of *Populus euphratica* seedlings to various soil water and salinity conditions

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 89–97. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190441

毛乌素沙地油蒿灌丛Priestley–Taylor模型系数研究

Priestley–Taylor model coefficient in a typical *Artemisia ordosica* shrubland in Mu Us Sandy Land of northwestern China

北京林业大学学报, 2018, 40(12): 1–8. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180145

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240308

植物根系对绿色屋顶基质物理特性与水分变化特征影响

王任重远[1,2,3]　章孙逊[4]　张　帆[1]　闫　婧[1]　张文龙[1]
王　博[2,3]　何瑛瑛[1]　张守红[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心，陕西 西安 710100；3. 秦岭−黄土高原过渡带水土要素耦合与生物资源保育野外观测研究站，陕西 西安 710100；4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048）

摘要:【目的】探究植物根系对绿色屋顶基质物理特性与水分变化特征的影响。**【方法】**在北京市搭建不同配置绿色屋顶，以无植被作为对照组，设置 3 种不同种植密度的八宝景天绿色屋顶和毛马齿苋绿色屋顶。监测各绿色屋顶在自然降雨条件和人工降雨−刈割试验下的降雨−径流、蒸散发和基质含水量动态变化过程，测定植物根系特征、基质物理特性和水分特征参数，定量分析植物根系对绿色屋顶基质物理特性和水分变化特征的影响。**【结果】**(1)绿色屋顶基质的总孔隙度和毛管孔隙度均随根长密度增加而增加，基质饱和导水率与根长密度呈极显著正相关($P < 0.01$)。(2)随种植密度增加，绿色屋顶基质雨水滞留能力明显增加。(3)毛马齿苋的根系较粗，其绿色屋顶基质的最终雨水滞蓄量(24.4 mm)高于八宝景天绿色屋顶(19.9 mm)。(4)植物根长密度越大，基质的蒸发能力越强，毛马齿苋绿色屋顶基质的蒸发速率大于八宝景天。**【结论】**植物根系的根长密度和根径均会影响绿色屋顶基质的物理特性和水分变化特征，进而影响绿色屋顶基质的滞蓄和蒸发能力。研究为绿色屋顶植物和基质配置以及管理提供科学支撑。

关键词：绿色屋顶；根系特征；基质；水分特征；滞蓄能力；蒸散发
中图分类号：S718；S731　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)06−0055−08
引文格式：王任重远，章孙逊，张帆，等. 植物根系对绿色屋顶基质物理特性与水分变化特征影响 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(6)：55−62. Wang Renzhongyuan, Zhang Sunxun, Zhang Fan, et al. Effects of plant roots on physical property and moisture changing characteristics of green roof substrate[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 55−62.

Effects of plant roots on physical property and moisture changing characteristics of green roof substrate

Wang Renzhongyuan[1,2,3]　Zhang Sunxun[4]　Zhang Fan[1]　Yan Jing[1]　Zhang Wenlong[1]　Wang Bo[2,3]
He Yingying[1]　Zhang Shouhong[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Xi'an Mineral Resources Research Center of China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;
3. Field Observational Stations of the Natural Resource Coupling Process and Biological Resources Conservation Across Transitional Zone from the Qinling Mountains to Loess Plateau in China, Xi'an, 710100, Shaanxi, China;
4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: [**Objective**] The objective of this study was to indicate the impact of plant roots on physical property and moisture changing characteristics of green roofs. [**Method**] The dynamic changes of rainfall,

收稿日期: 2024−09−14　**修回日期:** 2025−04−07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51609004)，北京市自然科学基金项目(8242015)，中国地质调查项目(DD20220882)，陕西省自然基金项目(2024JC-YBQN-0306)。
第一作者: 王任重远，助理工程师。主要研究方向：城市雨水控制与利用。Email: wangrenzhongyuan@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 张守红，教授。主要研究方向：流域综合治理和城市雨水控制与利用。Email: zhangs@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

evapotranspiration, and substrate water content of green roofs with different vegetation covers (3 different planting density levels of *Sedum spectabile*, *Portulaca pilosa* and a non-vegetated substrate) were monitored under natural rainfall and artificial rainfall conditions. Combined with the characteristics of root system, substrate physical property and water content, the effects of plant roots on dynamic hydrological performance of green roof were quantitatively analyzed. [**Result**] (1) The total porosity and capillary porosity of the green roof substrate increased with root length density, and the saturated water conductivity of substrate was positively correlated with root length density ($P < 0.01$). (2) The stormwater retention capacity of green roof increased with planting density. (3) The green roofs with *P. pilosa* had thicker root system than those with *S. spectabile*, and their stormwater retention capacities (24.4 mm) were greater than those of green roof with *S. spectabile* (19.9 mm). (4) The plant root system also affected the evapotranspiration of green roofs. Higher root length density promoted evaporation of the green roof substrate. Because of thicker root system, the evaporation rate of green roof substrate with *P. pilosa* was higher than those with *S. spectabile*. [**Conclusion**] The root length density and root diameter of plant root systems can affect the physical property and moisture changing characteristics of green roof substrates, thereby impacting the substrate's stormwater retention capacity and evaporation capabilities. The results are expected to provide scientific support for green roof plant/substrate configuration and management.

Key words: green roof; root characteristics; substrate; moisture characteristics; retention capacity; evapotranspiration

绿色屋顶作为海绵城市和低影响开发的重要措施之一，近年来在国内外受到广泛关注[1−2]。它不仅可以通过遮蔽隔热和蒸散发降温有效缓解城市热岛效应[3−4]，还能在蒸散发过程中恢复雨水滞蓄能力，实现径流调控功能[5−6]。相较植被截留，基质是绿色屋顶雨水滞留能力动态变化的主要载体[7−8]。因此，研究基质层的物理特征和水分变化过程，对揭示绿色屋顶径流调控功能具有重要意义。

植被是影响绿色屋顶径流调控功能的关键因素[9−10]。然而，以往研究多集中在植被类型和种植密度对绿色屋顶径流调控的影响上[10−11]，而植物根系对绿色屋顶基质物理性质和水分动态变化特征影响的研究相对较少。植物根系可通过改变基质孔隙结构影响基质的水分运移和蒸发过程[12−14]。首先，植物根系的生长和死亡过程会在基质中产生裂隙和通道，这些结构变化不仅会改变绿色屋顶基质的物理结构，进而影响基质的水分运输和蒸发能力[15−17]，还可能提高基质的孔隙度[18−19]，从而增强基质的雨水滞蓄能力[20]。然而，这些裂隙和通道也可能导致优先流的产生，增加基质的入渗速率[21−23]，使得绿色屋顶的产流和峰现时间提前。综上，植物根系通过多方面影响绿色屋顶基质的水分动态变化特征，这给绿色屋顶的降雨入渗、径流产生和基质水分蒸发等水文过程的刻画与模拟带来了很大的不确定性。因此，开展基于植物根系对绿色屋顶基质物理性质和水分变化特征影响的研究具有重要意义[24−25]。

本研究通过对不同配置的绿色屋顶在自然降雨条件和人工降雨−刈割试验下的径流和蒸散发过程进行监测，分析植物根系对绿色屋顶基质物理特性和水分变化特征的影响机理。旨在从植物根系特征的角度，为绿色屋顶设计以及植物和基质筛选提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2021 年，在北京市海淀区北京林业大学林业楼楼顶搭建绿色屋顶。研究区气候类型为北温带半湿润大陆性季风气候，1989—2018 年历史年均降水量为 532 mm，全年约 90% 的降水集中在 5—10 月。

使用钢化玻璃共搭建 15 个 0.5 m × 0.5 m 的绿色屋顶实验槽，从上到下依次为植被层、基质层、过滤层和排水层（图 1）。其中，植被层配置包括 3 种不同种植密度的八宝景天（*Sedum spectabile*），分别为 80 株/m^2（80-SGR）、160 株/m^2（160-SGR）和 320 株/m^2（320-SGR），以及 160 株/m^2 的毛马齿苋（*Portulaca pilosa*，160-PGR）和无植被对照组（CK）。每个处理设置 3 个重复，试验期内植物生长状况良好。根据《种植屋面工程技术规程》（JGJ 155—2013），基质层厚度配置为 10 cm，基质由腐殖土、砂壤土、珍珠岩和蛭石组成，其体积比为 10∶5∶4∶1。此外，选用 300 g/m^2 的聚酯无纺布作为过滤层，HDPE 排水板作为排水层。

1.2 试验数据监测与获取

1.2.1 自然降雨监测

本研究设置 HOBO U30 自动小型气象站对降雨过程连续监测。在各个植被覆盖绿色屋顶下方，各

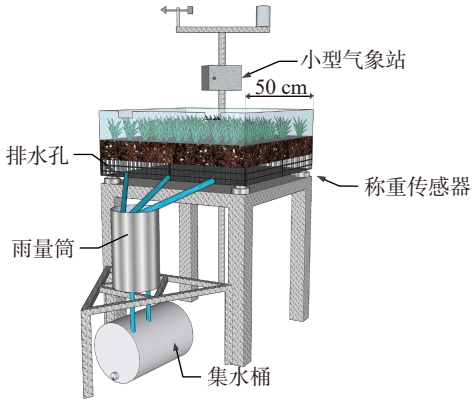


图 1　绿色屋顶试验装置

Fig. 1　Experimental apparatus of green roof

配置 1 个自记式称重传感器(数据记录间隔为 1 min，精度为 0.1 kg)，记录绿色屋顶装置的质量变化过程。通过监测质量变化，推算绿色屋顶水分变化和蒸散发特征。采用分辨率为 1 mm 的自记式翻斗雨量计监测绿色屋顶的径流过程，并在雨量计下方放置 HDPE 集水桶，用于收集总径流量数据。

在 2021 年雨季，共监测了 36 场降雨事件。对其中 13 场所有绿色屋顶均产流的降雨进行分析(表 1)，包括 6 场中雨(降雨量 10 ~ 24.9 mm)，4 场大雨(25 ~ 49.9 mm)和 3 场暴雨(> 50 mm)。

1.2.2　人工降雨−刈割试验

在自然降雨观测基础上，本研究额外设置人工降雨−刈割试验，以排除植物截留和蒸腾作用的影响，定量探究植物根系对绿色屋顶基质物理性质和蒸散发过程的影响。以北京市一年一遇的暴雨标准(半小时 36 mm)设置降雨量，从 10 月 13 日开始(雨季结束后)，开展 3 次人工降雨试验。在每场人工降雨结束且产流完全停止后，对 3 组重复绿色屋顶中的 1 组植物进行刈割，仅保留植物地下部分的根系。由于本试验共配置 5 套称重传感器，为尽可能对比更多条件下植物根系对绿色屋顶的影响，在第 1 场人工降雨结束且刈割后，将称重传感器配置于 CK、160-SGR(刈割前)、160-SGR(刈割后)、160-PGR(刈割前)和 160-PGR(刈割后)绿色屋顶装置下方。此时，第 2 场人工降雨试验可对比刈割前后同一绿色屋顶的蒸散发过程和基质水分变化特征的差异。在第 2 场人工降雨结束且刈割后，将称重传感器配置于 CK、80-SGR(刈割后)、160-SGR(刈割后)、320-SGR(刈割前)和 160-PGR(刈割后)装置下方。当 CK 的基质蒸发情况与第 2 场人工降雨前相近时，进行第 3 场人工降雨。此时，第 3 场人工降雨试验可探究刈割后不同绿色屋顶的蒸散发过程和基质水分变化特征的差异。

表 1　降雨特征

Tab. 1　Rainfall characteristics

降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/min	最大雨强/(mm·min^{-1})
07−11	125.5	28.8	2.05
07−17	126.7	30.8	1.81
07−20	20.4	2.0	1.24
07−26	25.8	8.9	0.62
07−29	12.8	30.4	0.10
08−15	22.2	9.1	0.48
08−16	44.8	1.0	1.95
08−19	24.2	11.4	0.14
08−23	21.8	4.1	0.38
09−04	78.2	18.8	2.00
09−05	31.6	11.9	0.33
09−13	19.6	1.4	0.67
09−19	48.4	27.3	0.14

1.2.3　植物根系与基质特征检测

自然降雨监测和人工降雨−刈割试验结束后，从每个试验绿色屋顶装置中取 3 个 10 cm × 10 cm × 10 cm 的基质样方，对植物地下部分取样。将样方中的根系清洗并晾干后，使用 Win RHIZO 植物根系分析系统以 300 dpi 的扫描分辨率对根系进行扫描检测。通过该系统，测定并计算各绿色屋顶中植物根系的根长密度、根体积密度、根表面积密度和平均根径。此外，按直径 0 ~ 1 mm、1 ~ 2 mm 和 2 ~ 5 mm 的径级对根系进行分级，分别测定并计算各绿色屋顶中这 3 个径级根系的根长密度。将根系烘干至恒质量，测量并计算植物根质量密度。使用环刀对每个绿色屋顶的基质进行取样[26]，测定不同植被覆盖绿色屋顶基质的物理性质指标，包括容重(g/cm^3)、总孔隙度(%)、毛管孔隙度(%)、饱和导水率(mm/min)、最大持水量(%)和田间持水量(%)。

1.3　数据分析

使用称重传感器的实时监测数据，计算绿色屋顶基质最大雨水滞蓄量(mm)、基质最终雨水滞蓄量(mm)、基质的初损量(mm)和初损占比，各指标计算方法参考前期研究[27]。使用称重法计算绿色屋顶蒸散速率 ET(mm/h)，为避免风速较大导致设备晃动影响监测结果，剔除风速 > 5 m/s 时的称量数据[28]。

$$\mathrm{ET}=\frac{M_1-M_2}{S\,\Delta t} \tag{1}$$

式中：M_1 为产流停止时刻绿色屋顶的质量(kg)，M_2 为蒸散发达到相对稳定时刻绿色屋顶的质量(kg)，Δt 为蒸散发达到相对稳定所用时间(h)，S 为绿色屋顶面积(m^2)。

以绿色屋顶产流时间与普通屋顶产流时间的差值作为产流延迟时间，用以衡量绿色屋顶对产流时间的延迟效益。

使用 Origin 软件进行回归分析和图表绘制，使用 SPSS 软件进行单因素方差分析、相关性分析和差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 植物根系特征

八宝景天绿色屋顶的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根质量密度均随种植密度的增加而增加(表 2)。总体来看，不同种植密度八宝景天的平均根径较为相近。160 株/m^2 的种植密度下，毛马齿苋的平均根径(1.06 mm)大于八宝景天(0.68 mm)。3 种不同种植密度八宝景天根径分布的比例较为接近，八宝景天 0 ~ 1 mm 根系占比在 83.0% ~ 84.8% 之间，明显高于毛马齿苋(74.3%)，而毛马齿苋 > 1 mm 根系占比为 25.7%，高于八宝景天(15.2%)(图 2)。

2.2 植物根系对绿色屋顶基质雨水滞蓄能力影响

图 3 对比了不同绿色屋顶基质和原状基质的物理性质。对照基质的总孔隙度(60.6%)和毛管孔隙度(36.3%)明显小于原状基质(72.3% 和 39.1%)，与周晓蓉等[29]、Yang 等[30]和张晓茹等[31]结果一致，降雨的雨滴击溅和雨水入渗过程可导致基质整体向下沉积，孔隙度降低。绿色屋顶基质在长期雨水冲刷下同样会逐渐紧实。这种紧实化现象会导致基质的孔隙度显著降低，进而使基质的容重增大、持水能力减弱以及饱和导水率降低。

有植被覆盖的绿色屋顶基质总孔隙度均高于对照，且基质的总孔隙度和毛管孔隙度随着八宝景天种植密度的增加而增加。研究发现(表 3)，基质容重与根长密度呈显著负相关($P < 0.05$)，而基质的最大持水量与根长密度呈显著正相关($P < 0.05$)。同时，基质的饱和导水率与根长密度呈极显著正相关($P < 0.01$)。以上结果表明，植物根系可以有效缓解基质因雨水冲刷而导致变紧实的现象。植物根系的生长和死亡使基质变得松散，促进基质孔隙形成发育可能是造成该结果的主要原因[17−18]。基质的导水率与根长密度呈正相关的结果在前人的研究[32−33]中也得到了类似验证。

160-SGR 的总孔隙度(64.7%)小于 160-PGR(66.1%)，但毛管孔隙度(39.0%)高于 160-PGR(35.0%)。这是由于毛马齿苋的根茎较八宝景天粗，具有更高的应力和转移基质颗粒的能力[22]，可以促进大孔隙的形成[34]。相较 > 1 mm 径级的根系，0 ~ 1 mm 径级的根系寿命短且木质化程度低，这些细根的增生或死亡都会促进基质中产生大量连续的细小孔隙，从而形成优先流通道[35−37]。八宝景天 0 ~ 1 mm 径级的根系较毛马齿苋多，这可能是 160-SGR 基质的饱和导水率(6.2 mm/min)大于 160-PGR(5.5 mm/min)的主要原因(图 3)。

对照基质的最大雨水滞蓄量低于种植植被的绿色屋顶，表明植物可有效增加绿色屋顶的滞蓄能力(表 4)。八宝景天绿色屋顶的最大雨水滞蓄量随着种植密度的增加而增加。然而，随着植物种植密度的增加，绿色屋顶的初损量和初损占比有所下降。植物根系生长产生的优先流通道可能是造成该现象的主要原因。已有研究[22, 24−25, 38]表明，植物根系越多，优先流通道也越多，更易产生优先流。因此，种植密度最大、根长密度最大的 320-SGR 初损量最低。此外，由于 320-SGR 基质的最终滞蓄量最大，初损占比为初损量占最终雨水滞蓄量的比例，其初损占比最低。

第 1 场人工降雨时，植被尚未被刈割，不同密度八宝景天覆盖的绿色屋顶雨水滞蓄能力和初损情况与自然降雨条件下规律相同(图 4a)。在刈割植物地上部分后，CK、80-SGR、160-SGR 和 320-SGR 基质的最大雨水滞蓄量分别为 20.4、20.8、21.2 和 23.2 mm，基质最终雨水滞蓄量分别为 14.8、14.8、15.2 和 16.8 mm，与自然降雨条件下结果相近(图 4b)。刈割试验排除了植物地上部分的影响，试验结果证实了植物根系可改变绿色屋顶基质的滞蓄能力。随着植物种植密度增大，基质的滞蓄能力随之增强。图 4c 和 4d 表明，受植物根系作用，毛马齿苋绿色屋顶的最

表 2 植物根系特征

Tab. 2 Characteristics of plant roots

植被覆盖类型	根长密度/(cm·cm^{-3})	根表面积密度/(cm^2·cm^{-3})	根体积密度/(cm^3·cm^{-3})	根质量密度/(mg·cm^{-3})	平均根径/mm
80-SGR	0.65 ± 0.14	0.14 ± 0.04	0.002 ± 0.001	0.51 ± 0.15	0.67 ± 0.06
160-SGR	0.92 ± 0.33	0.20 ± 0.07	0.004 ± 0.001	0.77 ± 0.27	0.68 ± 0.03
320-SGR	1.42 ± 0.39	0.33 ± 0.03	0.007 ± 0.001	1.33 ± 0.31	0.70 ± 0.14
160-PGR	0.75 ± 0.18	0.24 ± 0.03	0.006 ± 0.001	0.34 ± 0.02	1.06 ± 0.16

注：80-SGR、160-SGR、320-SGR 和 160-PGR 分别表示 80 株/m^2 八宝景天、160 株/m^2 八宝景天、320 株/m^2 八宝景天和 160 株/m^2 毛马齿苋。

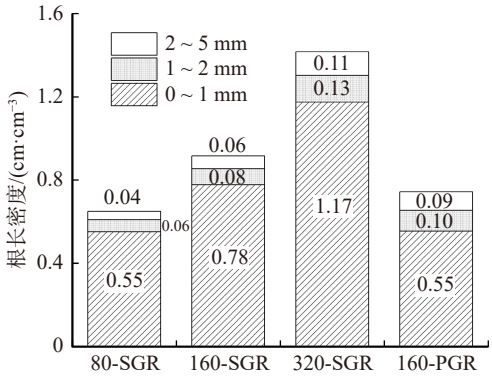


图 2　不同绿色屋顶植物根长密度特征

Fig. 2　Characteristics of plant root length density of different green roofs

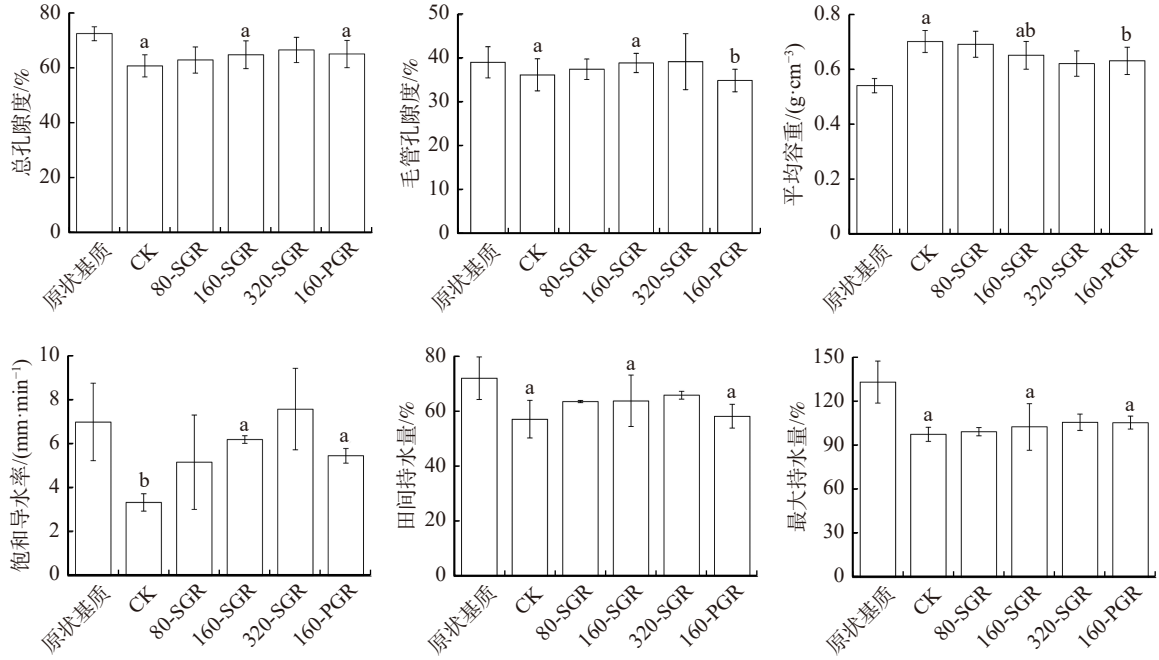
大雨水滞蓄量(24.6 mm)和最终雨水滞蓄量(20.5 mm)均大于八宝景天绿色屋顶的最大雨水滞蓄量(24.4 mm)和最终雨水滞蓄量(19.9 mm)。

总体来看，刈割前后种植植被的绿色屋顶产流延迟时间均短于对照组(图 5)。这表明植物根系是主导绿色屋顶产流延迟时间的主要因素。随种植密度增加，绿色屋顶的产流延迟时间逐渐缩短，主要原因是植物根系引发的优先流现象。当降雨强度较大时，基质表面在较短时间积累雨水后，在重力作用下迅速形成径流[39]。相较于通过基质均匀下渗，径流更易通过优先流通道排出。种植密度越大，根长密度越大，基质中产生的优先流通道越多，优先流现象越容易发生。相同种植密度下八宝景天绿色屋顶的产流延迟时间略短于毛马齿苋。八宝景天 0 ~ 1 mm 径级的根系较毛马齿苋多，因此 160-SGR 的优先

表 3　植物根长密度与土壤参数相关性

Tab. 3　Correlations between plant root length density and soil parameters

指标	皮尔逊相关系数(r)	P值	结论
容重	−0.98	< 0.05	显著负相关
最大持水量	0.98	< 0.05	显著正相关
饱和导水率	1.00	< 0.001	极显著正相关



不同小写字母表示不同种植类型绿色屋顶间差异显著($P < 0.05$)，下同。

图 3　不同绿色屋顶基质物理性质差异对比

Fig. 3　Comparison of differences in physical properties of varied green roof substrates

表 4　自然降雨条件下不同绿色屋顶的基质雨水滞蓄能力

Tab. 4　Rainwater retention capacity of substrates of different green roofs under natural rainfall

植被覆盖类型	最大雨水滞蓄量/mm	最终雨水滞蓄量/mm	初损量/mm	初损占比/%
CK	23.30 ± 4.32	18.67 ± 2.86	17.87 ± 2.45	95.72 ± 3.86
80-SGR	23.66 ± 4.60	19.13 ± 3.22	18.36 ± 2.12	95.97 ± 3.22
160-SGR	24.40 ± 3.12	19.97 ± 3.65	18.13 ± 3.95	90.79 ± 5.65
320-SGR	26.94 ± 4.09	22.14 ± 2.09	17.88 ± 2.35	80.76 ± 5.09
160-PGR	24.60 ± 3.32	20.50 ± 2.88	18.20 ± 3.25	88.78 ± 4.23

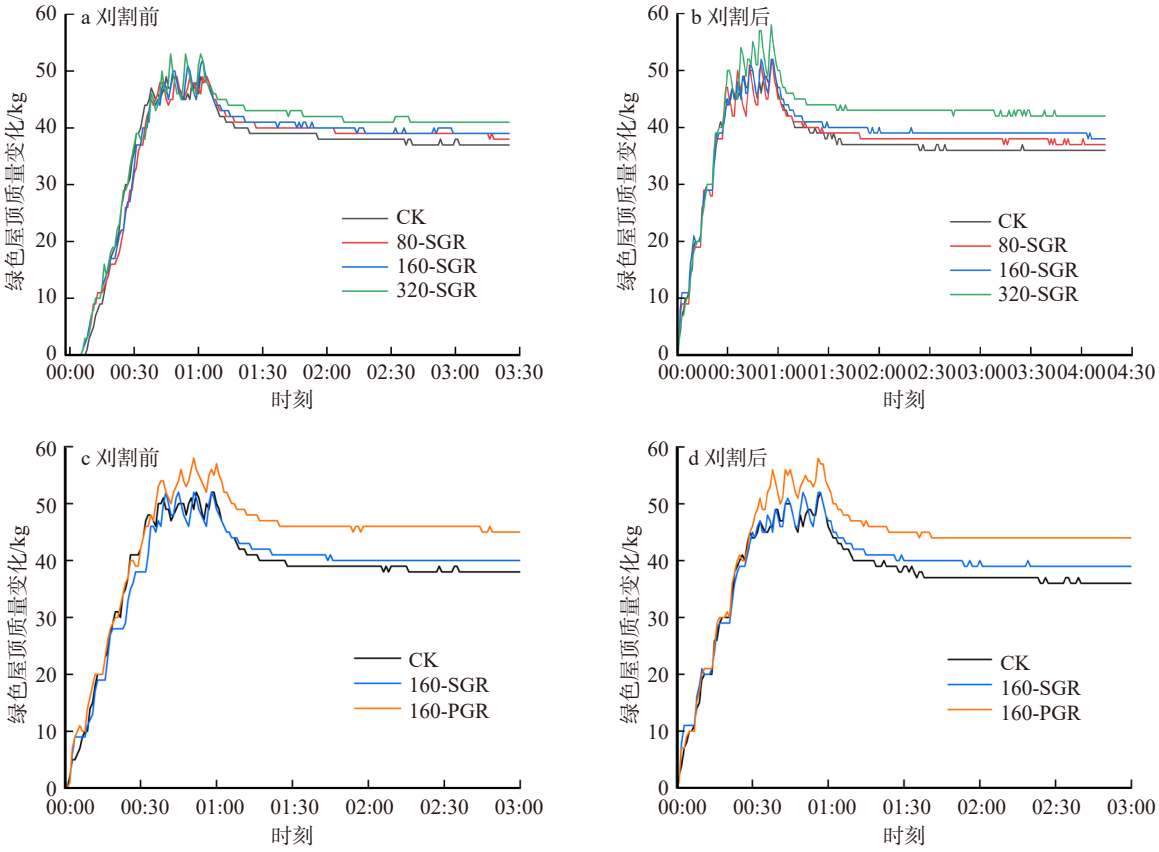


图 4 刈割前后不同绿色屋顶质量变化过程

Fig. 4 Mass variation process of green roofs before and after mowing

流通道更多、饱和导水率更大[35, 37]。这可能是导致 160-SGR 产流延迟效益较 160-PGR 差的主要原因。

2.3 植物根系对绿色屋顶基质蒸发能力影响

受植物蒸腾作用的影响，有植被覆盖绿色屋顶的蒸散发速率均大于对照基质（图 6a），160-SGR 的蒸散发速率显著大于 CK（$P < 0.05$）。在刈割后（即排除了植物蒸腾作用的影响），CK、80-SGR、160-SGR 和 320-SGR 基质的日蒸发速率分别为 4.4、4.6、4.8 和 5.1 mm/d（图 6b）。以上结果表明，植物根系可通过改变绿色屋顶基质孔隙结构影响基质的蒸发能力，且植物根系生物量越大的绿色屋顶，其基质的蒸发能力越强。

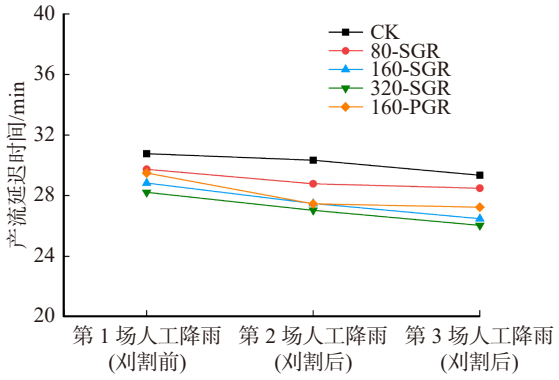


图 5 刈割前后不同绿色屋顶的产流延迟时间

Fig. 5 Runoff production delay time of different green roofs before and after mowing

在自然降雨条件下，相同种植密度的八宝景天绿色屋顶的蒸散发速率（5.8 mm/d）高于毛马齿苋绿色屋顶（5.3 mm/d）。但当刈割植物地上部分后，八宝景天绿色屋顶基质的日蒸发速率（4.8 mm/d）小于毛马齿苋绿色屋顶（5.0 mm/d）。这种差异可能源于两种植物根系结构的不同。尽管八宝景天的蒸腾作用较强，但毛马齿苋的根系更为粗壮，这可能导致其基质具有更大的孔隙结构，从而使基质更加松散，增强了蒸发能力。因此，毛马齿苋绿色屋顶在刈割后展现出更强的基质蒸发潜力。该结果表明，植物的地上地下部分对于绿色屋顶蒸散发的影响并不相同，以往仅针对植物种类以及蒸腾作用对绿色屋顶雨水滞留能力影响的研究视角具有局限性[10−11, 40]。

蒸散发有助于绿色屋顶雨水滞留能力恢复，实现径流调控功能[5]。本研究结果表明，增加植物的种植密度可有效增加绿色屋顶基质的蒸发速率。此外，尽管八宝景天的蒸散能力强于毛马齿苋，但毛马齿苋绿色屋顶基质的滞蓄能力却强于八宝景天绿色屋顶基质。因此，建议在选择植物时，不能仅通过选择蒸腾能力来提高绿色屋顶的径流调控能力，还需考虑植物根系对绿色屋顶基质滞蓄能力的影响。

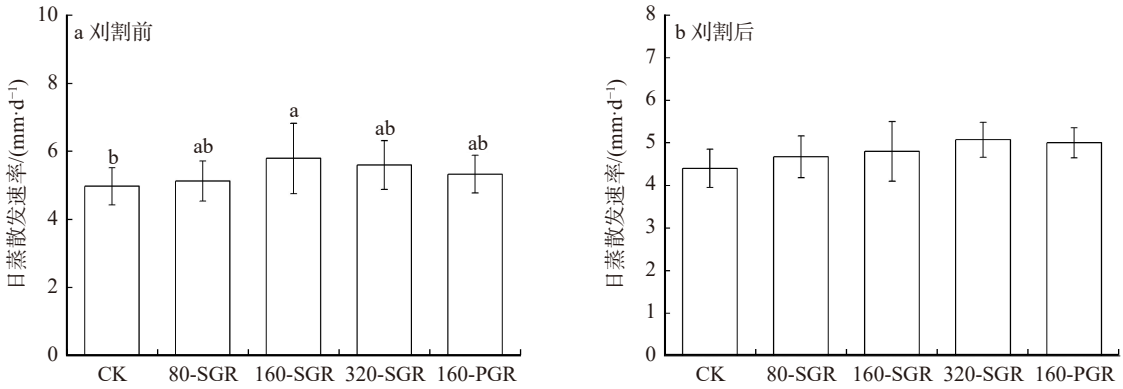


图 6　刈割前后不同绿色屋顶的日蒸散发速率

Fig. 6　Daily evapotranspiration rates of green roofs before and after mowing

3　结　　论

绿色屋顶的径流调控能力不仅受植物蒸腾能力的影响，还与植物根系对基质滞蓄能力和蒸发能力的改变密切相关。植物根系能够有效缓解基质紧实化现象，随着根长密度的增加，基质的总孔隙度、毛管孔隙度以及饱和导水率均得到显著提升（$P<0.01$），从而增强了基质的雨水滞蓄能力。具有较粗根系的毛马齿苋绿色屋顶基质总孔隙度较大，但八宝景天绿色屋顶基质的毛管孔隙度和饱和导水率更高，且其基质滞蓄能力也优于毛马齿苋绿色屋顶。人工降雨−刈割试验表明，虽然八宝景天的蒸散能力强于毛马齿苋的蒸散能力，但毛马齿苋绿色屋顶基质的蒸发速率大于八宝景天绿色屋顶。因此，在选择绿色屋顶植物时，不能仅依据植物的蒸腾能力，还需综合考虑植物根系对基质滞蓄能力和蒸发能力的影响，以实现绿色屋顶更优的径流调控效果。

参　考　文　献

[1] Aboelata A. Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities[J]. Energy, 2021, 219: 119514.

[2] 章孙逊, 张守红, 闫婧, 等. 不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4587−4596.
Zhang S X, Zhang S H, Yan J, et al. Integrated assessment of runoff quality from green roofs with different configurations[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4587−4596.

[3] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 740−752.

[4] 李鹏程, 赵建利, 王钰, 等. 绿色屋顶降雨径流特性及其结构参数优选试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 43−49.
Li P C, Zhao J L, Wang Y, et al. Experimental study on rainfall runoff characteristics and structural parameter optimization of green roofs[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(4): 43−49.

[5] Zhang S H, Guo Y P. Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs[J]. Journal of hydrologic engineering, 2013, 18(1): 19−28.

[6] Yan J, Zhang S, Zhang J, et al. Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115447.

[7] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(3): 217−226.

[8] Lee J Y, Lee M J, Han M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 152: 171−176.

[9] Gong Y, Zhang X, Li H, et al. A comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 278: 111451.

[10] Ashitey P, Benjankar R, Morgan S, et al. Analyses of the effectiveness of different mdedia depths and plant treatments on green roof rainfall retention capability under various rainfall patterns[J]. Hydrology, 2023, 10(7): 149.

[11] Whittinghill L J, Rowe D B, Andresen J A, et al. Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs[J]. Urban ecosystems, 2015, 18(1): 13−29.

[12] Scholl P, Leitner D, Kammerer G, et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column[J]. Plant and Soil, 2014, 381(1): 193−213.

[13] Wang X, Tian Y, Zhao X, et al. Hydrological performance of dual-substrate-layer green roofs using porous inert substrates with high sorption capacities[J]. Water Science & Technology, 2017, 75(12): 2829−2840.

[14] Zhu H, Zhang L M, Garg A. Investigating plant transpiration-induced soil suction affected by root morphology and root depth[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103: 26−31.

[15] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究 [J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1−5.
Wu Q X, Han B, Li Y Y. Characteristics of soil infiltration in watersheds in loess hilly region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 1−5.

[16] 郑力文. 林木根系对土壤性质的影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Zheng L W. Effect of root system on soil properties[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[17] 郭梦. 不同含砂量土壤蒸发机理及水盐运移数值模拟 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
Guo M. Evaporation mechanism of soil with different sand content and numerical simulation of water-salt transport[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
[18] Armson D, Stringer P, Ennos A R. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(3): 282−286.
[19] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils[J]. Irrigation Science, 2011, 29(5): 379−389.
[20] 鲁建荣, 李云良, 谭志强, 等. 植物根系对土壤水力参数影响的定量研究综述 [J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 939−952.
Lu J R, Li Y L, Tan Z Q, et al. Review on quantification of root-induced change of soil hydraulic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 939−952.
[21] Novák V, Šimůnek J, van Genuchten M T. Infiltration of water into soil with cracks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(1): 41−47.
[22] 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]. Environmental Pollution, 2016, 218: 664−672.
[23] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展 [J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 477−488.
Zhang Z B, Peng X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477−488.
[24] 吴宏伟. 大气–植被–土体相互作用: 理论与机理 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1−47.
Wu H W. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1−47.
[25] Marcacci K M, Warren J M, Perfect E, et al. Influence of living grass roots and endophytic fungal hyphae on soil hydraulic properties[J]. Rhizosphere, 2022, 22: 100510.
[26] 薛艳春, 杨光, 陆乃静, 等. 林分密度对柠条人工林林下物种多样性及土壤物理性质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52(10): 1−10.
Xue Y C, Yang G, Lu N J, et al. Effects of afforestation density on species diversity and soil physical properties under *Caragana korshinskii* plantations[J]. Journal of Northwest A& F University (Nat. Sci. Ed.), 2024, 52(10): 1−10.
[27] 王任重远, 张守红, 章孙逊, 等. 植物根系对绿色屋顶径流调控功能影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 108−116.
Wang R Z Y, Zhang S H, Zhang S X, et al. Effects of plant roots on the regulating function of green roof runoff[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 108−116.
[28] Vaughan P J, Ayars J E. Noise reduction methods for weighing lysimeters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(2): 235−240.
[29] 周晓蓉, 张云, 黄佳栋. 强降雨入渗作用下土质边坡失稳灾变研究 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2018, 31(1): 62−67, 73.
Zhou X R, Zhang Y, Huang J D. Study on catastrophe of soil slopes under rainfall infiltration[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2018, 31(1): 62−67, 73.
[30] Yang M, Fu Y, Li G, et al. Microcharacteristics of soil pores after raindrop action[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(5): 1693−1704.
[31] 张晓茹, 刘志强, 焦钒栩, 等. 雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响 [J]. 土壤, 2024, 56(3): 601−609.
Zhang X R, Liu Z Q, Jiao F X, et al. Topsoil pore change under raindrop splashing and its effect on soil infiltration[J]. Soils, 2024, 56(3): 601−609.
[32] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1535−1547.
Li J X, He B H, Chen Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1535−1547.
[33] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 等. 根系构型对土壤渗透性能的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73−82.
Wang X H, Wang Y Q, Ma C, et al. Effect of root architecture on soil permeability[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 73−82.
[34] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. BioScience, 2011, 61(11): 869−879.
[35] 董宾芳. 黄土丘陵区林地植物根系与土壤优势流关系研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
Dong B F. The relationship of root system and preferential flow in forestlands on loess hilly region[D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
[36] Zhang Y H, Niu J Z, Zhu W L, et al. Effects of plant roots on soil preferential pathways and soil matrix in forest ecosystems[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(2): 397−404.
[37] 卢华兴, 段旭, 赵洋毅, 等. 滇南地区普洱茶树根系对土壤优先路径形成的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 80−87.
Lu H X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Effect of root of Pu'er tea on the formation of soil priority path in southern Yunnan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 80−87.
[38] Johnson M S, Lehmann J. Double-funneling of trees: stemflow and root-induced preferential flow[J]. Ecoscience, 2006, 13(3): 324−333.
[39] 徐田婧. 基于海绵城市理念的屋顶绿化径流调控效应研究: 以南京为例 [D]. 南京: 南京工业大学, 2020.
Xu T J. Exploring the runoff regulation effects of roof greening under the sponge city concept: the case of Nanjing City[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2020.
[40] 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 J Q, Huang S, Wang J, 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.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 赵秀海）