

3 种固化无土基质的水肥保持效果及对立体绿化植物扦插和生长的影响

龙欣^{1,2}, 范楚琪^{1,2}, 房林², 吴坤林², 李琳², 王田意³, 曹琪聪³,
黄玉源¹, 曾宋君^{2,4*}

1. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州 510225; 2. 中国科学院华南植物园华南农业植物分子分析与遗传改良重点实验室, 广东广州 510650; 3. 广东伟晟生态环境建设有限公司, 广东广州 511404; 4. 中国科学院华南植物园广东省应用植物学重点实验室, 广东广州 510650

摘要: 立体绿化是一种利用新型基质在构筑物立面和垂直面上种植植物的技术, 现已广泛应用于城市多种场景中。立体绿化基质性能对立体绿化栽培具有基础性研究意义, 基质的水肥保持效应是决定立体绿化种植植物能否成活及生长发育是否良好的关键因素。固化无土基质是人工利用废弃物加工生产的栽培材料, 具有干净卫生、性质稳定、栽培性能好等优点, 是立体绿化栽培的理想材料。以目前常应用于立体绿化的垒土、保浮科乐、国产炭棉 3 种固化无土基质为材料, 选择泥炭土作为对照, 比较它们的理化性质、保水性、保肥性等, 研究其作盆栽基质时对植物扦插和生长的影响, 进一步筛选出更适合立体绿化应用的固化无土基质。研究表明: (1) 垒土的容重小, 持水和保水能力较强, 相比其他 2 种基质在立体绿化上有优势, 但 3 种基质的透气性均较差, 需要在种植过程中保持植株间空隙以弥补不足; (2) 垒土和保浮科乐 pH 更适合植物生长, 3 种基质有机质含量、含氮量均高于自然土壤, 但磷、钾含量较低, 需要在种植过程中施磷、钾肥以保持水肥平衡; (3) 3 种基质在淋溶实验中氮磷淋失率低, 几乎不会对水体造成富营养化而影响环境, 其中垒土淋失量最少, 国产炭棉相对较高; (4) 3 种基质对植株的固化定型结果均达到实验预期, 比传统基质泥炭土有显著优势。扦插实验结果表明, 胭脂云锦竹草在垒土中扦插的枝条根系发育良好、植株茂密、不徒长, 是最为理想的立体绿化基质材料。

关键词: 立体绿化; 种植基质; 保水性; 保肥性

中图分类号: S688 文献标识码: A

Water and Fertilizer Retention Effect of Three Solidified Soilless Substrates to Vertical Greening Cultivation

LONG Xin^{1,2}, FAN Chuqi^{1,2}, FANG Lin², WU Kunlin², LI Lin², WANG Tianyi³, CAO Qicong³,
HUANG Yuyuan¹, ZENG Songjun^{2,4*}

1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China; 2. Key Laboratory of South China Agricultural Plant Molecular Analysis and Gene Improvement, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China; 3. Guangdong Weisheng Ecological Environment Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511404, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China

Abstract: Vertical greening is a technology that uses a new substrate to plant plants on the structure facade and vertical surface, which has been widely used in various urban scenarios. The performance of vertical greening substrate has fundamental research significance for three-dimensional greening cultivation. The effect of water and fertilizer maintenance

收稿日期 2022-07-12; 修回日期 2022-08-31

基金项目 广东省科技计划项目 (No. 2022B1111040003)。

作者简介 龙欣 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 立体绿化基质与植物筛选。*通信作者 (Corresponding author): 曾宋君 (ZENG Songjun), E-mail: zengsongjun@scib.ac.cn。

nance effect of the substrate is the key factor to determine whether the vertical greening planting plants can survive and grow well. Curing soilless matrix is a cultivation material processed by artificial waste. It has the advantages of clean hygiene, stable nature and good cultivation performance. It is an ideal material for vertical greening cultivation. Retention effect of water and fertilizer is the key factor to determine whether survival and growth of plants in vertical greening, this study was based on the three types of solidified soil-free substrates, which are currently commonly used in vertical greening, including the soilless substrate 'Lei Tu', the Japan solid soilless substrate 'Pafcal' and the domestic solid soilless substrate 'Tan Mian'. Peat soil was selected as the control. The physical and chemical properties, retention of water and fertility were compared, and the potted experiment was executed to verify the effect on cuttage and growth of plants. The 'Lei Tu' bulk density was small and the water holding capacity was strong, which had advantages over the other two substrates, but the air permeability of the three substrates was poor, so it needed to keep the plant gap in the planting process. The pH value of the 'Lei Tu' and the 'Pafcal' was more suitable for plant growth. The organic matter content and nitrogen content of the three substrates were higher than the natural soil. The concentration of nitrogen and phosphate loss of the three substrates in soluble experiments was extremely low, which would hardly cause the water body to be nutritious and affect the environment. The results of the three types of matrix solidification had reached experimental expectations, which had a significant advantage over peat, the traditional substrates. The effects of cuttings and growth of *Callisia repens* 'Pink Lady' of the 'Lei Tu' were the best and were the most ideal vertical greening substrate among the three tested substrates. The results would provide the theory of the cultivation of vertical greening.

Keywords: vertical greening; planting substrate; water retention; fertilization retention

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.011

城市扩张与发展为城市人居环境和自然生态都带来了许多危机与挑战。早在第二次工业革命时期, 西方各国在诸多环境破坏的压力下, 人们开始寻求在城市创造适宜的人居环境, 并开启了“城市公园运动”, 在较长一段时间内有效地缓解了工业化需求与自然生态的矛盾^[1]。但随着城市化进程不断推进, 城市用地空间紧张与自然生态的矛盾再次引起人们的注意, 以柯布西耶、霍华德等为代表的建筑规划师开始设想一种能与建筑、城市、生态有机结合的绿化模式, 经过多年的探索与实践, 最终发展出立体绿化这一新型领域^[2]。立体绿化实现在有限空间内“见缝插绿”满足绿化、生态需求, 随着立体绿化技术的更新迭代, 越来越多的立体绿化种植模式可以满足不同的绿化需求。根据调查, 目前立体绿化多依附建筑物而构建, 多采取模块种植式的手段^[3], 在标准化的模块中填充特定基质并栽培植物, 植物成活后将模块固定在构筑物垂直面上或特定平面上。这种立体绿化种植模式对基质的各方面性质要求更高, 而植物成活与生长发育则直接取决于水肥供给和保持, 因此研究基质的水肥保持效应对立体绿化有重要意义。

传统种植所采取的森林土壤、泥炭土、椰糠等基质, 具有容重大、易松散难定型、依赖容器、保水能力和保肥能力较差等缺点^[4], 并不适用于模块式立体绿化的推广, 在此背景下, 国内外科

研人员不断寻求更加适宜立体绿化种植应用的新型人工基质。固化无土基质是通过废物利用、工业残料再加工等手段, 模拟传统土壤基质理化性质使之更适宜植物生长发育^[5], 利用不同材料的物理特性进行不同配比研发的轻型基质材料, 多以海绵、棉花、生物炭、聚酯纤维等为原料。通过前期调研, 本研究选取 3 种具有发展前景的固化无土基质垒土、保浮科乐、国产炭棉为主要研究对象进行比较分析, 测定其基本理化性质, 着重分析其容重、持水能力、孔隙度等以及氮磷钾含量等指标; 设计基质风干实验和淋溶实验, 进一步分析 3 种基质在保水能力和保肥能力上的差异, 通过综合评价, 筛选出最适合立体绿化模块种植的新型基质, 并探讨无土固化基质对立体绿化发展及城市园林建设的价值和意义。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

试验以传统栽培基质泥炭土作为对照, 选择 3 种新型固化无土基质(垒土、保浮科乐、国产炭棉)作为立体绿化基质筛选材料。其中对照为德国大汉贝斯莎柏翠泥炭土, 品目编号 7-03, 基质 A 为垒土, 是日本国立冈山大学环境学博士威智勇研发的高分子材料与其他基质有机结合的新型基质, 规格为 45 cm×45 cm^[6], 由广东伟晟生态环境建设有限公司提供; 基质 B 为进口的日本三

得利公司生产的海绵状固化无土轻基质“保浮科乐”(pafcall),从上海丰田三得利美都园艺有限公司购得;基质 C 为国产生物炭棉基质,购自广东佛山太农园艺有限公司,主要原料为聚醚-聚酯多元醇、竹质生物炭、异氰酸酯等^[7],以下简称“国产炭棉”,为上端面 6 cm×6 cm 方形,下端面 4.5 cm×4.5 cm 方形,高度 5 cm 的规格,从中间划开一字型深 2.5 cm 的开口以便种植植株。

扦插和生长试验中,选取鸭跖草科锦竹草属洋竹草的商业品种胭脂云锦竹草(*Callisia repens* ‘Pink Lady’)为实验材料,该品种从美国引进,已在华南、香港地区归化栽培。胭脂云锦竹草为多年生草本植物,茎匍匐,叶片呈垫状,多分枝,节生根。叶片卵形,小圆蜡状,光滑无毛,基部抱茎,近心形或钝,先端渐尖。叶面呈绿色至奶油色、粉红色过渡的斑纹,叶背面为粉紫色,极具观赏价值。喜温暖、湿润环境,对土壤要求不高,耐贫瘠、耐旱、耐高温,是一种适用于大湾区立体绿化的种植材料^[8]。该植物易获取、扦插易活、生根迅速,是检验 3 种固化无土基质种植性能的理论试验材料。试验时,剪取长势健壮、无病虫害的胭脂云枝条约 3.5 cm,5 枝一簇分别扦插在预先设置不同基质的花盆中。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验地位于广东省广州市华南植物园科研区(23°10′46.4″N,113°21′9.1″E)。该地区由于季风气候的影响,年均温约 21.5 °C,年降水量约 1900 mm,其中 4—9 月的降水量占全年的 80%左右,平均相对湿度 77%^[9]。基质理化性质实验在科研区实验室进行,参照土壤国标设计试验,于 2021 年 10 月首先进行 2 种传统基质与 3 种固化物图基质的基本物理性质测定,2021 年 11 月在专业实验室开展 3 种固化无土基质的养分含量测定实验,主要测定指标为有机质含量、全氮、全磷、全钾含量,同时设计 3 种固化无土基质控水 30 d 内的保水性实验,记录 0~30 d 的基质相对含水率(RWC)。2022 年 12 月在实验室进行淋溶实验,研究 3 种固化无土基质的保肥性。每个实验测定指标设置平行重复 3 次。

2022 年 1 月在玻璃温室进行 3 种固化无土基质的盆栽实验,分为测定基质固化性能和种植性能 2 个实验目的,基质的固化定型检验标准为:扦插的植物枝条在基质中生根后脱盆,手提起植物上部分而基质不散脱落、不与植物分离则视

为完成固化定型^[10]。各设计 3 种基质,每种基质设置 10 个重复,每个处理选取 5 枝扦插苗,即设计 30 个重复的单因素完全随机实验。

1.2.2 指标测定 (1) 基质基本物理性质测定。参照《中华人民共和国林业行业标准》(LY/T 1215—1999)的实验规范,以环刀法测算基质容重、通气孔隙度、总孔隙度、持水孔隙度等基质物理性质;烘干法测含水率。

(2) 3 种基质的化学性质测定。参照国标及林业行业标准结合基质实际情况采取常规方法对 3 种固化无土基质的养分含量进行测定。其中 pH 采用电位测定法(NY/T 1121.2—2006),1:5 的基质水比,利用酸度计完成。根据预实验结果分析,3 种固化无土基质的有机质以及氮磷含量高于一般森林土壤,选择减少样本质量,并用重铬酸钾-硫酸加热氧化法测定无土基质的有机质含量;分光光度法-靛酚蓝比色法测全氮含量;采用分光光度法-碱熔-钼锑抗比色法测全磷含量。通过硝酸-高氯酸消煮法消煮样品后,由于 3 种基质全钾含量趋于一般森林土壤,选择土壤指标测定方法,用原子吸收分光光度计法测定全钾含量(乙炔空气火焰)^[11]。于 2022 年 1 月在广州市中国科学院华南植物园科研区实验室内完成实验指标的测定工作。

(3) 基质保水性测定。试验场地设计在中国科学院华南植物园玻璃温室中,取相等体积为 200 mL 的 3 种固化无土基质装入等容量约为 250 mL 规格的塑料育苗杯盛满各 10 杯,并分别称重并记为 a,2021 年 11 月 8 日起记为 d₁,使基质浸泡吸水至饱和状态,分别称重记录,从 11 月 8 日起至 12 月 3 日止,共计 25 d 均在固定时间上午 10:00 对每杯基质进行称重并记录。有 3 种基质,设置 25 个处理各 10 个重复,共计 750 个样本数。

统计分析基质保水性样本数据,计算从 0~25 d 基质控水的相对含水率(RWC)。

(4) 基质保肥性测定。设计如图 1 的淋溶模拟装置,采用聚氯乙烯瓶底部钻 5 个孔自制简易的淋溶过滤器,过滤器内径为 50 mm,高 100 mm,下方放置 200 mL 的烧杯,用于收集淋溶液。过滤器内依次铺垫滤纸、纱布、石英砂 50 mL、待测土柱 300 mL、滤纸、纱布、石英砂 50 mL,以获得较为清澈的淋溶液样品,并通过 0.7 mm×24 mm 规格的输液器控制去离子水流速,每种基质各设计 3 个以上淋溶装置,分别收集垒土、保

浮科乐、国产炭棉的淋溶液, 从 2022 年 4 月 3 日起每 5 d 收集 1 次, 共收集 8 次, 每种基质 3 个重复, 共计 72 个样品。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测各样品淋溶液的氮含量, 采用碱溶-钼锑抗比色法测磷含量^[12]。

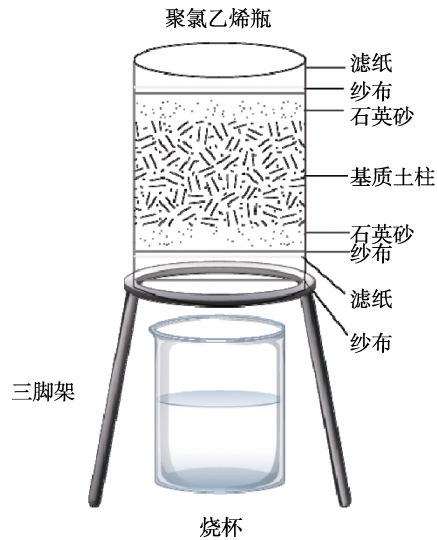


图 1 淋溶装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lymphatic dissolution device

(5) 在不同基质上的盆栽扦插实验。在中国科学院华南植物园玻璃温室内苗床上布置 250 mL 规格的塑料育苗杯, 分别装入垒土、保浮科乐、国产炭棉 3 种基质, 每种基质各 10 杯, 并剪取相同长度、部位的长势健壮、无病虫害的长约 3.5 cm 的胭脂云锦竹草枝条, 每 5 枝为一簇分别扦插在预先设置不同基质处理组的育苗杯中。适当浇水, 定期观察, 并监测温室实时温度、湿度等气候条件, 记录每盆扦插苗生根、生长发育状态。从 2022 年 1 月 10 日起, 待胭脂云锦竹草扦插苗完全生根发育并与基质结合后, 从育苗杯中脱盆, 用手提着植物上部, 如果基质与植株不松散分离则视为完成脱盆固化, 记录每盆所需的基质固化时间。2022 年 3 月取出扦插苗, 测量扦插植株的根长、根数、质量等指标。

本研究中, 采用市场上常用的 3 种固化无土基质的商品, 即保浮科乐和国产炭棉都是已经完成塑形的海绵状结构直接装入育苗杯中种植植物, 而垒土则是从大块状基质上取下碎絮状装入育苗杯中, 原始状态较为松散, 以植物根系与基质结合, 手提植物上部基质不与植株分离且不松散视为完成固化, 并记录每种基质完成固化所需天数。所采用的插条的大小、数量、生长状况一

致, 记录扦插生根发育后的枝条根数、根长、株高及鲜重等指标。观察 3 种固化无土基质扦插的胭脂云枝条生根及发育情况并记录拍照, 定期观测基质的固化表现。

1.3 数据处理

用 Excel 软件统计实验数据并进行处理分析, 通过 SPSS Statistics 26 软件对实验数据进行方差分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较分析各项指标的差异显著性, 并用 Duncan 法 (新复极差法) 多重比较分析各处理间的差异显著性; 相关分析采用皮尔斯双侧检验法 (Person)。

2 结果与分析

2.1 3 种固化无土基质的物理性质比较

立体绿化的特色种植需求对基质有不同的物理性质需求, 受限于构筑物承重能力要求立体绿化基质有更小的容重; 为便于长期养护管理, 立体绿化基质需要更好透气性和保水性。通过实验测定 4 种固化无土基质的容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度、气水孔隙比、持水能力等指标如表 1, 可反映基质保水性、透气性和疏松程度、支撑能力。

2.1.1 容重 植物根系生长及植株的固定依赖于固体基质的固定作用, 常用容重反映固体基质质量要求, 一般植株种植基质的干容重范围为 0.1~0.8 g/cm³, 且应用于屋顶绿化的基质干容重应 < 0.5 (LY/T 1970—2011), 基质容重越小则说明该种基质材料越轻质。由表 1 可知, 垒土的容重最小约为 0.14 g/cm³, 对比保浮科乐、国产炭棉有显著差异, 保浮科乐次之, 而国产炭棉容重在三者比较中最大, 作为对照的传统基质泥炭土的容重很大, 难以满足立体绿化对承重的需求。垒土作为轻质固化无土栽培基质, 可应用于对构筑物承重有较高要求的垂直绿化及屋顶绿化有一定优势。

2.1.2 持水能力 通过含水率、持水孔隙度、总孔隙度等指标可以反映基质的持水能力。垒土的含水率显著高于保浮科乐和国产炭棉, 而 3 种基质的持水孔隙度差异不大。综合表 1 来看, 3 种固化无土基质的持水能力都显著优于对照泥炭土, 其中垒土的持水能力最好, 其次为国产炭棉, 保浮科乐较差。应用于立体绿化的基质总孔隙度应在 55%~96% 之间, 70%~90% 则更为理想^[13], 3 种固化无土基质均介于理想范围之间, 其中垒土的

总孔隙度最大,其次是国产炭棉,保浮科乐较小。
2.1.3 透气性 基质保障植物生长一方面需要有足够的水肥供给,另一方面也需要有较好的透气性以供植物根系生长及植株生长发育。通过通气孔隙度和气水孔隙比能反映植物的通气性能和持水能力的关系。一般改良基质的通气孔隙度要求为 $\geq 15\%$ (LY/T 1970—2011),3种基质的通气孔隙度差异不大,其中垒土为14.87%较接近这个目

标。通气孔隙与持水孔隙比例在1:1.5~1:4之间时视为较好的性质^[14],垒土和保浮科乐的气水孔隙比为0.21较接近目标,而国产炭棉和泥炭土接近为0.14在3种基质中透气性较差。总体而言,3种固化无土基质和泥炭土在透气性方面均不太理想,垒土和保浮科乐较好,但一般立体绿化种植技术上可以通过保留植株空隙弥补这一缺陷。

表 1 4种固化无土基质的基本物理性质
Tab. 1 Basic physical properties of four solidified soilless substrates

基质 Substrate	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	保水率 Water retention/%	总孔隙度 General porosity/%	通气孔隙度 Aeration porosity/%	持水孔隙度 Water-holding porosity/%	气水孔隙比 Gas and water pore ratio
泥炭土 (CK)	1.25 \pm 0.01 ^d	93.91 \pm 13.25 ^d	66.37 \pm 0.23 ^b	50.95 \pm 1.14 ^b	58.42 \pm 3.16 ^b	0.14
垒土	0.14 \pm 0.01 ^a	249.00 \pm 14.97 ^a	86.55 \pm 0.29 ^a	14.87 \pm 2.35 ^a	71.69 \pm 2.64 ^a	0.21
保浮科乐	0.22 \pm 0.01 ^b	128.6 \pm 10.44 ^b	77.13 \pm 6.15 ^a	13.50 \pm 1.34 ^a	63.63 \pm 7.19 ^a	0.21
国产炭棉	0.28 \pm 0.01 ^c	171.70 \pm 11.14 ^c	84.10 \pm 0.96 ^a	10.07 \pm 0.58 ^a	74.03 \pm 1.24 ^a	0.14

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 3种固化无土基质的化学性质分析比较

基质的化学性质分析一般包括 pH 的比较及缓冲性能分析、养分供给能力分析包括有机质含量测定、氮磷钾含量的测定。通过测定得到3种固化无土基质的养分含量指标如表2。

2.2.1 酸碱度及缓冲性能 土壤溶液酸碱度体现了土壤胶体保持质子平衡的能力,一般植物在土壤基质 pH 为 4.5~8.2 的范围内生长良好 (LY/T 1970—2015), pH 也影响到土壤养分的形态和有效含量,多数元素有效率在基质 pH 为 5.0~8.0 范围时更高^[15],垒土、国产炭棉接近对照泥炭土的 pH,4种基质都处于大多数植物生长的土壤 pH 范围 (5.5~7.5)。

2.2.2 有机质含量 有机质是土壤多种养分元素的来源和存在形式,还包含刺激植物生长的胡敏酸,对基质的保肥性和缓冲性有很大影响,是碳源和重要能源^[16]。由于3种固化无土基质是人工合成物质且多数含有生物炭材料,含碳量总体高于一般的自然土壤。通过重铬酸钾容量法-外加加热法测定得出有机质含量,根据结果3种固化无土基质的有机质含量均远超过一级土壤有机质 40 g/kg 的标准。据相关研究表明,高产水稻土的有机质含量一般在 25~50 g/kg 范围^[17],其中泥炭土由于沉积大量植物残体累积,其有机质含

量较高,3种固化无土基质的有机质含量也远远高于自然土壤的有机质含量,完全能够满足植物生长需求,尤其是国产炭棉的有机质含量十分丰富。

2.2.3 氮、磷、钾含量 氮、磷、钾是植物生长必须的三大营养元素,也是研究立体绿化基质水肥保持的关键内容,氮是植物细胞内蛋白质、核酸和叶绿素的组成成分,磷参与了植物呼吸作用、光合作用及能量转换过程,而钾与植物的新陈代谢、生长发育、抗逆性息息相关^[18]。据鲁如坤研究,我国土壤氮含量范围为 0.04%~0.38%,磷含量是 0.017%~0.11%,钾含量是 0.05%~2.5%,并认为低于 0.2%的氮含量土壤为缺氮,磷含量低于 10 mg/kg 则视为缺磷^[13]。本研究所测定的基质氮、磷、钾均为全氮、全磷、全钾含量。由表2可知,即使是含氮量相对较低的垒土全氮含量 (5.97 g/kg) 也达到了一级土壤含氮量标准,其氮含量接近自然界中营养物质丰富的东北黑土,而保浮科乐和国产炭棉接近泥炭土的含氮量,显著偏高。但3种固化无土基质的含磷量和含钾量均低于六级基质要求,处于比较低的水平^[19],3种固化无土基质含磷量、含钾量较高于泥炭土,但在使用这3种基质过程中仍需要适当增施磷钾肥以保证水肥平衡。

表 2 4 种固化无土基质的化学性质
Tab. 2 Chemical nutrient results of four solidified soilless substrates

基质 Substrate	pH	有机质含量 Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen content/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus content/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium content/ (g·kg ⁻¹)
泥炭土 (CK)	6.00±0.01 ^a	814.77±50.10 ^a	13.40±0.67 ^c	0.05±0.01 ^b	0.16±0.02 ^b
垒土	5.49±0.12 ^b	475.44±125.80 ^b	5.97±0.32 ^d	0.06±0.01 ^b	1.14±0.69 ^a
保浮科乐	5.25±0.04 ^b	445.73±97.14 ^b	17.74±0.25 ^a	0.12±0.00 ^a	1.30±0.22 ^a
国产炭棉	6.31±0.02 ^a	662.62±107.09 ^b	15.65±0.43 ^b	0.10±0.11 ^a	1.94±0.01 ^a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 3 种固化无土基质和泥炭土保水性比较分析

水分的供给和保持是决定植物能否在基质中存活直接因素, 基质保水性主要包括基质的吸水能力和持水能力两方面^[20]。本研究以时间变化为变量, 记录各种基质从吸饱水的相对含水率到逐渐风干的变化, 记录持续 25 d, 如图 2 所示, 起始吸水饱和状态时, 垒土的相对含水率 (RWC) 为 251%, 显著高于其他 2 种基质, 控水 3 种基质 RWC 均逐渐降低, 12 d 前垒土的 RWC 均高于保浮科乐和国产炭棉, 12 d 后国产炭棉和垒土持水能力相对一致, 对照泥炭土在 17 d 的 RWC 为 1.40% 已近乎干燥, 保浮科乐 RWC 在 23 d 时近乎为 0, 这 2 种基质的保水性能较差。而国产炭棉和垒土直到 25 d 仍未完全失水, 尤其是垒土在 25 d 时 RWC 仍能保持 7.3%, 与其他 3 种基质的保水性相比有显著优势。3 种固化无土基质在保水性方面都优于对照泥炭土, 在立体绿化的实际应用中, 受限于灌溉难度大, 后期维护成本高、建筑物不能长期受到水流冲蚀等因素, 基质具有更好的保水性有利于立体绿化种植应用的推广。

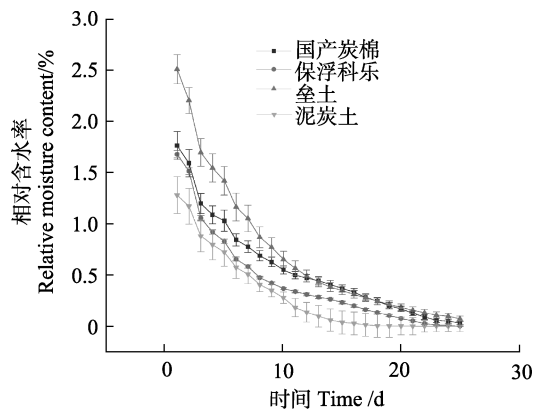


图 2 4 种基质控水 0~25 d 的相对含水率动态变化

Fig. 2 Relative water content of four substrates controlled water species changed dynamically for 25 days

2.4 3 种固化无土基质保肥性分析

传统土壤淋溶作用是雨水透过土壤水平向下渗透, 将土壤内容物从上层运输到更低层^[21]。无论是屋顶绿化还是垂直绿化基质在降雨中都会因淋溶作用产生一定程度的氮磷流失, 一方面对基质的肥力保持造成一定影响, 一方面淋溶液所带出的氮磷等元素可能造成水体富营养化对环境产生污染^[22], 研究基质的淋溶作用正是为了探究其肥力保持能力和对环境负面影响的可能性。

以不同淋溶次数收集到溶液中的氮、磷浓度为指标研究基质保肥性。整体而言, 3 种固化无土基质淋溶结果的淋出氮、磷含量都极低 (图 3, 图 4), 基本不会因此造成水体富营养化对环境产生影响。从图 3 的氮素淋失表现来看, 对照泥炭土的氮淋出总量显著超过其他 3 种固化无土基质, 对照单次淋失量也在其余 3 种基质水平之上, 其原因可能是泥炭土的结构松散, 其通气孔隙度较大, 土壤基质的胶体吸附性较差, 较容易发生氮素淋失现象, 泥炭土中含大量腐殖质对氮淋出量影响较大^[4]。3 种固化无土基质整体上氮淋出总

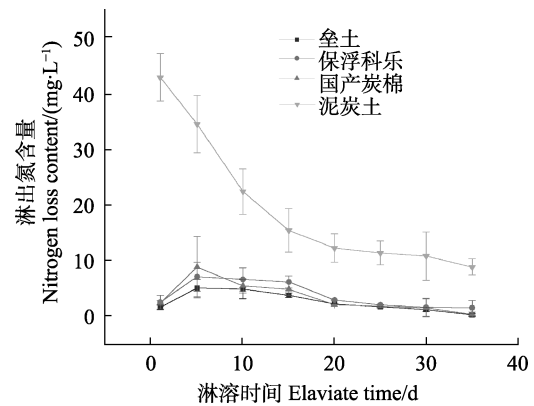


图 3 3 种基质淋溶后氮素流失量

Fig. 3 Nitrogen loss after eluviating of three kinds substrates

量较少且峰值均出现在第二次淋溶结果上，尤其是垒土的氮淋失总量最少。其中国产炭棉的氮素淋失结果在第二次淋溶峰值显著高于其他 2 种基质。但对比 8 次累计淋溶结果则是保浮科乐的淋失氮含量最高为 30.29 mg/L，其次为国产炭棉 27.01 mg/L，垒土相对较低为 20.47 mg/L。

图 4 为淋溶后磷素流失结果，垒土和保浮科乐的 8 次淋溶结果磷素淋失极低，显著区别于对照泥炭土，尤其是垒土磷素结果近乎为零。将 3 种固化无土基质的磷素流失结果作一张小尺度的图 5，可以更显著地发现国产炭棉磷素淋失高于其他 2 种基质，3 种基质的磷素淋失和氮素淋失结果一样峰值出现在第二次淋溶，猜测可能和各种基质内部毛管持水以及胶体性质有关。8 次累计淋溶结果的磷素淋失量最高的是国产炭棉为 2.59 mg/L，其次是保浮科乐 0.23 mg/L，垒土最低，为 0.18 mg/L。综上所述，3 种固化无土基质都在水肥保持上有突出表现，且不会对环境造成不良影响，其中垒土在 3 种基质中具有更显著的优势。

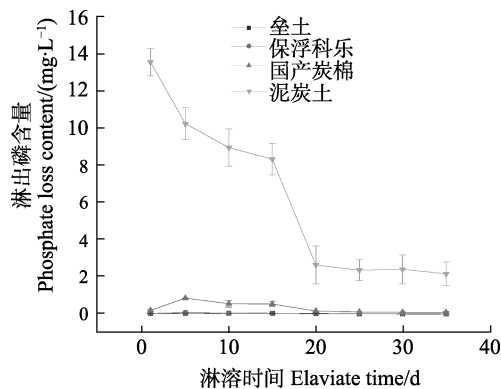


图 4 4 种基质淋溶后磷素流失量

Fig. 4 Phosphorus loss after eluviating of four kinds substrates

2.5 盆栽扦插和种植效果分析

2.5.1 基质固化性能分析 以泥炭土为对照组 (CK), A 垒土、B 保浮科乐、C 国产炭棉完成固化所需平均时间分别为对照 15 d, A 组 9 d, B 组 7 d, C 组 6 d。在第 20 天将育苗杯中的盆栽植株脱盆进行固化检测试验发现，如图 6 所示，对照泥炭土还是容易出现松散、基质与植株分离的情况，而垒土、保浮科乐和国产炭棉均与植物根系结合密切，保持不松散、不脱离状态。基质的固化效果有助于立体绿化植物应对极端天气，以上 3 种基质相较于传统基质应用于立体绿化有明显优势，而垒土同时兼具传统基质的松散、易塑形的优点，又能在短期内与植物根系之间实现固化效果，是立体绿化的理想材料。

2.5.2 不同基质对扦插植物生根和生长的影响 胭脂云枝条在 4 种基质中扦插易生根成活，除了国产炭棉生根率较差约为 88.89%外，其余基质扦插生根率均为 100%。从生根数量来看，使用垒土作为基质的扦插苗能迅速生根并在基质中多方向

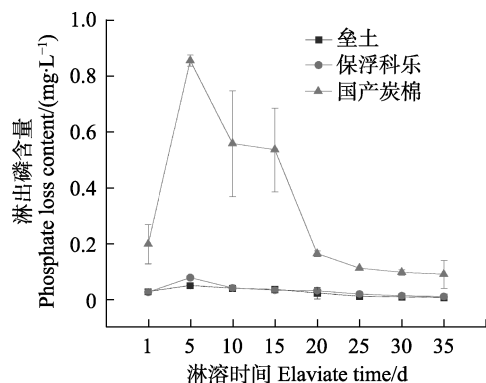
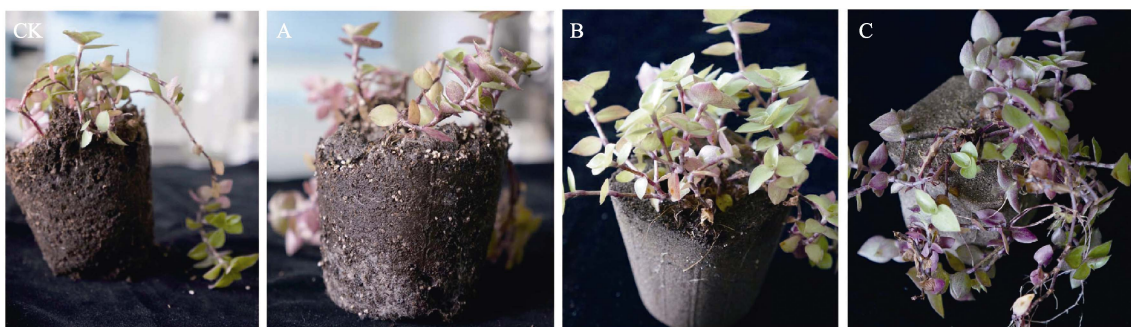


图 5 3 种基质淋溶后磷素流失量

Fig. 5 Phosphorus loss after eluviating of three kinds substrates



CK: 泥炭土; A: 垒土; B: 保浮科乐; C: 国产炭棉。

CK: Peat soil; A: Lei Tu; B: Pafcal; C: Tan Mian.

图 6 胭脂云锦竹草在不同基质中的扦插固化脱盆试验

Fig. 6 Cuttage solidification and depot experiment of *C. repens* 'Pink Lady' on different substrates

扎根且生根数量显著多于其他3种基质,其次为泥炭土,保浮科乐略少,国产炭棉则出现部分扦插苗生根少甚至不生根的表现。从主根长来看,以垒土、泥炭土和国产炭棉为基质的扦插苗主根长均显著长于以保浮科乐为基质的扦插苗主根长(表3)。3.5 cm的扦插枝条25 d后均有明显生长变化,其中垒土扦插苗的平均株高最高,保浮科乐扦插苗最矮,泥炭土、垒土和保浮科乐扦插苗鲜重均显著高于国产炭棉,其中垒土和泥炭土

扦插苗表现苗壮,叶片茂盛,保浮科乐和国产炭棉相对叶片较少,长势一般。总体来说垒土扦插苗株高最高,泥炭土、国产炭棉次之,植株鲜重垒土、国产炭棉与泥炭土扦插苗差别不大,保浮科乐扦插苗鲜重较轻。

综上所述,应用于立体绿化的植物要求根系发育良好、植株茂密、不徒长,有利于便于后期养护管理,垒土的扦插苗生根数最多、主根长较长,且植物生长茂密,不徒长,具有显著优势(图7)。

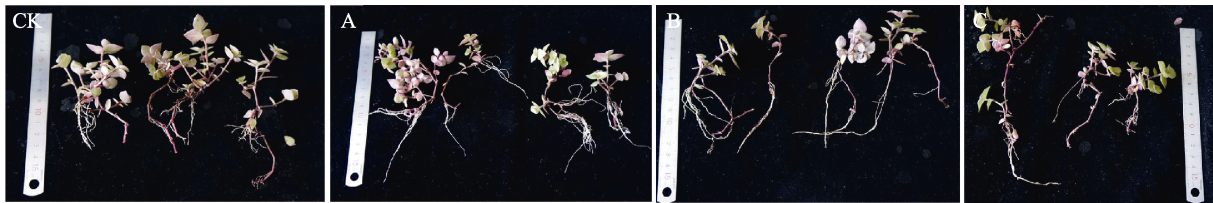
表3 4种基质对插层脂云锦竹草穗的生根和生长的影响

Tab. 3 Effect of four kinds of substrates on rooting and growth of cuttings branches of *C. repens* 'Pink Lady'

基质种类 Substrates	平均根数 Average root number	主根长 Main root length/cm	株高 Plant height/cm	鲜重 Fresh weight/g
泥炭土(CK)	13.80±1.45 ^b	8.25±0.29 ^a	7.35±0.33 ^a	3.02±0.37 ^a
垒土	27.40±1.04 ^a	8.62±0.18 ^a	7.89±0.25 ^a	3.33±0.17 ^a
保浮科乐	5.60±0.40 ^c	4.96±0.14 ^b	5.58±0.23 ^a	3.56±0.28 ^a
国产炭棉	2.20±0.51 ^d	7.13±1.37 ^a	7.14±0.66 ^a	2.46±0.33 ^b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column indicate significant difference ($P<0.05$).



CK: 泥炭土; A: 垒土; B: 保浮科乐; C: 国产炭棉。

CK: Peat soil; A: Lei Tu; B: Pafcal; C: Tan Mian.

图7 扦插在4种基质上的生根和生长情况

Fig. 7 Rooting and growth of cuttings branches on four kinds of substrates

3 讨论

立体绿化作为改善建筑物和城市可持续性发展的工具,其基质的水肥保持性能将限制植被生长状况,决定后期养护管理成本^[24]。从功能性角度建立量化比较立体绿化基质指标标准,有利于推动立体绿化产业发展与研究^[25]。本研究通过对基质物理化学性质、水肥保持性能、扦插栽培试验分析,基于立体绿化栽培基质理化指标标准,讨论3种应用于立体绿化栽培的固化无土基质的性能差异,综合结果表明垒土在容重、保水性、保肥性、栽培性能方面均优于保浮科乐和国产炭棉。

本研究从立体绿化基质实际应用的功能角度出发,设计了控水、淋溶及扦插栽培试验,着重考虑到基质本身水肥保持性能、实际应用需求及其可能对周边环境生态产生的影响,综合评价3种固化无土基质的性能。由于立体绿化受限于特

殊的种植方式,对基质的要求也区别于传统基质,无论是屋顶绿化还是垂直绿化,在保障支撑植物的基础条件下追求更轻的容重,垒土以 0.14 g/cm^3 的容重对比其他固化无土基质和传统基质有显著优越性,可以满足更多构筑物承载绿植的需求,使之既不破坏原有建筑物的承重结构,也能出色完成绿化建设。立体绿化植物的生长需要基本的水肥供给则依靠基质的理化性质,基质应从透气性好、pH适宜、保水保肥能力强几个角度筛选,以上研究结果表明,3种基质均能基本满足植物种植需求,且pH都在适宜植物生长良好范围内,透气性方面,垒土和保浮科乐优于国产炭棉,且垒土持水能力最佳,这一点在保水性实验中得到进一步证实。3种固化无土基质肥力均可满足植物正常生长发育的基本需求,尤其是有机质含量、含氮量均处于较高的一级土壤水平,但含磷量、

含钾量较低,需要在种植及养护管理过程中注意追施磷、钾肥,有利于立体绿化植物水肥平衡。通过扦插栽培试验结果可知,垒土基质可塑性极强,既具备传统基质的松散结构,可以被装入到任何容器中使用,也能脱离容器实现基质固化,可轻易通过铁丝、布毡、钢架、网膜等材料使用千变万化的结构塑形。同时,由于垒土具有柔软、韧性强的优点,可以用来解决立体绿化中曲面构架难题,是十分理想的铺贴式立体绿化材料,早在 2013 年著名建筑师安藤忠雄就曾利用垒土为基质完成了大阪新梅田城“希望之墙”的大型立体绿化建设。除此之外,通过实验也验证了垒土栽培的植物具有根系发育良好、植株茂密、不徒长的优点,也是 3 种固化无土基质中表现最好的。

参考文献

- [1] 田佳. 城市空间立体绿化模式的发展路径探析[J]. 南方农业, 2020, 14(33): 60-61.
TIAN J. Analysis of the development path of vertical greening mode in urban space[J]. South China Agriculture, 2020, 14(33): 60-61. (in Chinese)
- [2] GUERRA A. “At the Threshold of Silence”: Le Corbusier, “Le Parthénon,” and the Vision of Antiquity[J]. The Art Bulletin, 2021, 103(4): 23-31.
- [3] 李沫萱, 王云才. 我国立体绿化与西方的差距及发展趋势与优化方式[J]. 建筑与文化, 2018(5): 103-106.
LI M X, WANG Y C. The distance and development trends for vertical greening in China comparing to the western developed countries and optimizing methods[J]. Architecture and Culture, 2018(5): 103-106. (in Chinese)
- [4] 李铭怡, 邵艳艳, 彭逗逗, 徐文年, 夏振尧, 肖海. 屋顶绿化轻型种植基质的水肥保持效应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 95-101.
LI M Y, SHAO Y Y, PENG D D, XU W N, XIAO H. Study of water and fertilizer retention effect of light planting matrix for roof greening[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(4): 95-101. (in Chinese)
- [5] 刘陆涵, 马妍, 刘振海, 彭菲, 黄占斌. 三种环境材料对土壤水肥保持效应的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1811-1819.
LIU L H, MA Y, LIU Z H, PENG F, HUANG Z B. Effect of three kinds of environmental materials on soil moisture and fertility conservation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1811-1819. (in Chinese)
- [6] 韩晓丽. 垒土技术在立体绿化中的应用——以虹口港泵站立体绿化为例[J]. 现代园艺, 2019(24): 166-167.
HAN X L. Application of Lei Tu in vertical greening——an example in Hongkou Port Pump Station[J]. Xiandai Horticulture, 2019(24): 166-167. (in Chinese)
- [7] 张觉, 吴初平, 江波, 沈柏春, 焦洁洁, 魏建芬. 3 种立体绿化基质中 5 种藤灌园林植物扦插苗生长及干旱适应性研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 153-161.
ZHANG J, WU C P, JIANG B, SHEN B C, JIAO J J, WEI J F. Drought adaptability and growth of vine shrubs landscape plants in 3 vertical greening substrates[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 153-161. (in Chinese)
- [8] 徐剑琼, 曾琼, 陈军, 李超. 华南地区 2 种鸭跖草科植物轻型植被毯种植技术研究[J]. 热带农业科学, 2021, 41(3): 59-67.
XU J Q, ZENG Q, CHEN J, LI C. Establishment of light-weight vegetation blanket for two species of commelinaceae in Southern China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(3): 59-67. (in Chinese)
- [9] 郑秋露, 廖景平. 基于层次分析法的园林景观评价——以华南植物园龙洞琪林为例[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 210-216.
ZHENG Q L, LIAO J P. Landscape evaluation based on AHP: a case study of Longdongqilin at South China Botanical Garden[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(6): 210-216. (in Chinese)
- [10] 牛鹏辉. 宜昌地区模块式垂直绿化基质及垂直绿化生态效应研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2016.
NIU P H. Research on planting substance of modular vertical greening in Yichang and ecological effect of modular vertical greening[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016. (in Chinese)
- [11] JAISWAL B, SINGH S, AGRAWAL S B, LOKUPITIYA E, AGRAWAL M. Improvements in soil physical, chemical and biological properties at natural saline and non-saline sites under different management practices[J]. Environmental Management, 2022, 69(5): 1005-1019.
- [12] ERKOSSA T, ERKOSSA T, STAHR K, GAISER T. Effect of different methods of land preparation on runoff, soil and nutrient losses from a vertisol in the Ethiopian highlands[J]. Soil Use and Management, 2005, 21(2): 253-259.
- [13] 沈兵, 李红霞, 李天林. 无土栽培中基质培选料的参考因素与发展趋势(综述)[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1999, 9(3): 250-258.
SHEN B, LI H X, LI T L. Reference factors and development trends of substrate culture selection in soilless cultivation (review)[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1999, 9(3): 250-258. (in Chinese)
- [14] KONNERUP D, MALIK A, ISLAM A, COLMER T D. Evaluation of root porosity and radial oxygen loss of disomic

- addition lines of *Hordeum marinum* in wheat[J]. *Functional Plant Biology*, 2017, 44(4): 400-409.
- [15] UDDIN M, ROBINSON R W. Responses of plant species diversity and soil physical-chemical-microbial properties to *Phragmites australis* invasion along a density gradient[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11007.
- [16] 孔颖, 左翔之, 易鹏, 陈全, 梁妮. 天然有机质的性质分析及其与土壤矿物和外源污染物相互作用研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(9): 2715-2726.
KONG Y, ZUO X Z, YI P, CHEN Q, LIANG N. Research progress on analysis of the properties of natural organic matter and its interaction with soil minerals and exogenous pollutants[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(9): 2715-2726. (in Chinese)
- [17] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费[J]. *土壤*, 2004, 4(1): 1-4.
LU R K. Phosphorus resource of China and phosphate fertilizer production and consumption[J]. *Soil*, 2004, 4(1): 1-4. (in Chinese)
- [18] 龙丹, 潘宏. 2000—2004年我国土壤氮素研究文献计量分析[J]. *沈阳农业大学学报(社会科学版)*, 2006, 6(1): 135-137.
LONG D, PAN H. Biometric analysis of soil nitrogen research in China from 2000 to 2004[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2006, 6(1): 135-137. (in Chinese)
- [19] 尹春梅, 施建平, 潘恺, 魏文学. 广东土种志——基于全国第二次土壤普查数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2018, 3(1): 61-74.
YIN C M, SHI J P, PAN K, WEI W X. A database of soil species in Guangdong: Based on the Second National Soil Survey[J]. *Chinese Science Data (Chinese and English Online Edition)*, 2018, 3(1): 61-74. (in Chinese)
- [20] MIKA T, JARI H, JAAKKO H, JAAKKO H, RIIKKA K, JANNE K, MAEKUS H, KIMMO R. Quantifying the pore structure of different biochars and their impacts on the water retention properties of Sphagnum moss growing media[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 191: 96-106.
- [21] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. *世界科技研究与发展*, 2001(2): 7-12.
SHAO M A, ZHANG X C. The interacting models and mechanisms of soil nutrient with rainfall and runoff[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2001(2): 7-12. (in Chinese)
- [22] 张认连. 模拟降雨研究水网地区农田氮磷的流失[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
ZHANG R L. Study on nitrogen and phosphorus losses in riverine area by simulated rainfall method[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004. (in Chinese)
- [23] OLUWAFEYIKEMI H A, CLARICE B D S, LUIGI M D L, JULIE G. Building community-driven vertical greening systems for people living on less than £1 a day: a case study in Nigeria[J]. *Building and Environment*, 2018, 131: 277-287.
- [24] BASTIDA F, ZSOLNAY A, HERNÁNDEZ T, GARCÍA C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective[J]. *Geoderma*, 2008, 147(3/4): 159-171.