

不同粒径园林废弃物堆肥对天桥三角梅种植基质的影响分析

Analysis of the Effect of Garden Waste Compost with Different Particle Sizes on the Planting Substrate for Overpass *Bougainvillea*

张丽华 杜学林 王方

ZHANG Lihua, DU Xuelin, WANG Fang

摘要

为推动园林废弃物资源化利用并优化三角梅 *Bougainvillea* 栽培基质, 以不同粒径的园林废弃物堆肥产物为原料, 与田园土、蚯蚓粪按不同体积比复配成 T1、T2、T3 三种基质, 并以常规园艺基质为对照, 通过测定基质理化性质, 观察 ‘水红’ 三角梅 *Bougainvillea glabra* ‘Rosa’ 的新枝生长、开花数量及根系发育情况, 探究不同粒径堆肥产物对基质性能及植株生长的影响。结果表明, 与对照组相比, 各处理基质的容重显著降低, 有机质含量显著提高。其中, T2 处理的总孔隙度与持水孔隙度最高, 保水性最好; T3 处理容重最低, 通气性最佳。在促进植株生长方面, T2 处理表现最优, 其新枝长度、开花数量及控水 40 d 后的根系干重和长度均显著优于其他处理。综上, 以粒径 5~20 mm 堆肥产物为主的 T2 配方能最佳协调基质水、气、肥关系, 有效促进三角梅生长与开花, 可作为优化基质加以推广应用。

Abstract

To promote the use of garden waste and optimize the cultivation substrate for *Bougainvillea*, this study investigated the feasibility of using garden waste compost products of different particle sizes to replace traditional high-cost or non-renewable substrate materials. Three substrate treatments, T1, T2, and T3, were established by blending field soil, vermicompost, and compost products of three particle size fractions in different volume ratios, with a conventional horticultural substrate serving as the control. The physicochemical properties of the substrates and the new shoot growth, flower number, and root system development of *Bougainvillea glabra* ‘Rosa’ were measured. The results showed that compared to the control, all treatments significantly reduced substrate bulk density and increased organic matter content. Among them, the T2 treatment exhibited the highest total porosity and water-holding porosity, indicating the best water retention capacity. The T3 treatment had the lowest bulk density, suggesting optimal aeration. Regarding plant growth promotion, the T2 treatment performed best, with new shoot length, flower number, and root dry weight and length after 40 days of controlled watering being significantly superior to those of other treatments. In conclusion, the T2 formulation, primarily composed of a 5~20 mm particle size compost product, best balances the water, air, and nutrient relations of the substrate, effectively promoting the growth and flowering of *Bougainvillea*. It represents a valuable optimized substrate formula worthy of promotion.

文章亮点

1) 创新性采用粒径分级法, 系统研究园林废弃物堆肥对基质孔隙结构的调控机制, 突破了传统基质配比研究的常规思路。2) 发现以粒径 5~20 mm 的堆肥产物为主的 T2 基质最优, 可协调基质水气平衡, 使三角梅开花数增加 29.7%、根系干重增加 89.4%, 为优化栽培提供精准配比方案。3) 将园林废弃物资源化与植物生长需求深度融合, 推动环保型基质在天桥绿化中的应用, 为城市生态建设提供循环经济路径。

关键词

园林废弃物; 堆肥; 粒径; 基质; 三角梅

Keywords

Garden waste; Compost; Particle size; Substrate; *Bougainvillea*

收稿日期: 2025-07-22

修回日期: 2025-12-08

随着生态文明建设与美丽中国战略深入推进,我国城镇绿化面积持续扩张,随之产生的园林废弃物总量逐年攀升^[1]。这些废弃物主要来源于城市园林日常养护管理产生的枯枝落叶、草坪修剪物等植物残体,部分则由台风等自然灾害导致的植物损伤形成^[2-3]。若处置不当,不仅占用土地资源,还可能对环境造成污染。然而,当前园林废弃物处理方式单一、资源化利用技术滞后,加剧了资源浪费与环境压力。堆肥是一种通过微生物作用将有机废弃物转化为稳定腐殖质的传统资源化技术^[4]。而园林废弃物堆肥是一种环保且可持续的产物,其木质素含量高,碳氮比较大,属于含碳量较高的生物质原料^[5-6]。其富含有机质和纤维成分,不仅能提升基质的疏松性和透气性,为植物根系创造良好环境^[7],还能改善土壤结构,减少对传统泥炭等不可再生资源的依赖,兼具环保与经济效益^[8]。因此,推动园林废弃物的堆肥与资源化利用,是解决其污染问题、发展循环经济的有效途径^[9-13]。

在城市立体绿化中,天桥绿化是提升景观与生态效益的重要形式。三角梅 *Bougainvillea* 因其花期长、花色艳、耐修剪等特点,成为我国华南地区天桥绿化的骨干植物。然而,三角梅的生长质量高度依赖种植基质的性能。传统天桥三角梅种植基质多依赖泥炭、珍珠岩等材料,这些资源不可再生、成本较高,长期使用可能导致基质板结、养分供应不稳定等问题^[14-15],制约了三角梅景观效果的可持续发展。因此,开发一种兼具优良理化性质、环境友好且成本适宜的替代基质,对天桥三角梅养护和城市生态建设具有重要意义。

基于此,研究聚焦园林废弃物堆肥产物在天桥三角梅种植基质中的应用,旨在通过科学配比实现资源循环与植物生长需求的协同。研究以园林废弃物堆肥为核心原料,通过精细筛选不同粒径的堆肥产物,结合自然土壤和蚯蚓粪等天然材料,系统探究不同粒径堆肥产物对基质孔隙度、透气性、持水量、pH 值、有机质含量等理化性质的影响;通过优化原料配比与 pH 调控技术,解决堆肥产物 pH 偏高的问题,最终制备出适配三角梅生长的高效环保基质。

1 材料与方法

1.1 试验材料

园林废弃物堆肥产物来源于城市绿化修剪的树枝、树叶等,经分拣去除不可降解垃圾后,将粒径大于 50 mm 的废弃物粉碎备用。其他试验材料包括田园土(粒径≤10 mm)和蚯蚓粪(粒径≤10 mm),pH 调节剂采用工业级的过磷酸钙。

1.2 园林废弃物堆肥制备方法

首先对园林废弃物进行预处理,通过分拣去除塑料、玻璃等杂质,并按干湿程度初步分类。随后使用专业粉碎机将粒径大于 50 mm 的废弃物粉碎。在起堆前的预处理阶段,向每立方米粉碎后的废弃物中添加 0.5~1.5 kg 的化学腐熟剂和 1.5~2.5 kg 复合 EM 菌剂,并将其碳氮比调节至 25~30、含水量调节至 55%~65%、pH 值调节至 5.5~8.0。

接着将混合料堆成宽 2~8 m、高 2~3 m 的条垛状堆体进行发酵,堆肥周期为 60~75 d。其中初期(5—7 d)每 2~3 d 翻堆一次,中期(21—30 d)每 5~7 d 翻堆一次,后期(30—45 d)每 10~15 d 翻堆一次。整个发酵期间需保持含水量为 55%~65%。当堆肥产物满足含水量不大于 38%、有机质不小于 35%、pH 值为 7.0~8.5、T 值(堆肥化过程中物料终点碳氮比与起点碳氮比的比值,常用来表示堆肥腐熟度)小于 0.6、种子发芽指数不小于 80% 时判定为完全腐熟。最后利用筛分生产线将腐熟堆肥按粒径大小进行分级,粒径不小于 35 mm 的部分经粉碎后返回进行二次发酵(图 1)。

1.3 种植基质配置与试验设计

研究以普通种植基质为对照组(CK),依据表 1 配制 T1、T2、T3 三个试验组的种植基质,开展天桥绿化三角梅种植试验。普通基质由田园土:泥炭:椰糠按照 70:15:15 体积比混合而成;试验基质则将不同粒径堆肥产物、田园土和蚯蚓粪按体积比混合后,向每立方米混合物中加入过磷酸钙 1~3 kg,调节 pH 值至 5.5~6.5。

种植试验于 2022 年 4 月在广州市林业和园林科学研究院白云苗圃进行。试验使用 60 cm×30 cm×31 cm 花箱,每箱种植 2 株‘水红’三角梅 *Bougainvillea glabra* ‘Rosa’,

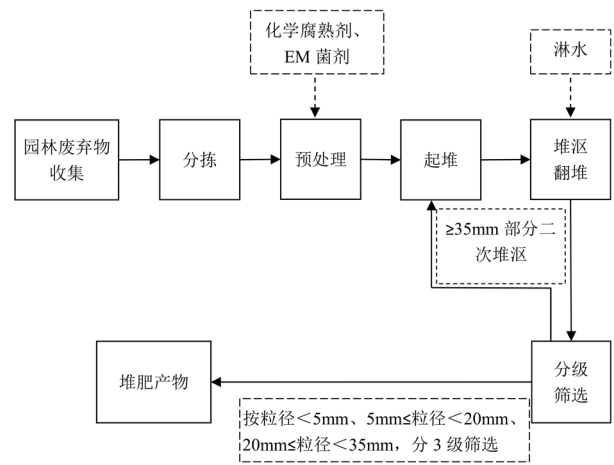


图 1 园林废弃物堆肥制备流程

Fig.1 Preparation process of garden waste composting

表 1 基质配置比例
Tab.1 Proportions of the growing medium

组别	田 园 土	蚯 蚓 粪	园林废弃物		
			粒径<5 mm	5mm≤粒径<20 mm	20mm≤粒径<35 mm
T1	25	5	25	35	10
T2	30	15	15	30	10
T3	20	10	30	25	15
CK	田园土:椰糠:泥炭=70:15:15				

每组 50 株，并参照广州市《人行天桥、立交桥绿化种植养护技术规范》（DB 4401/T 169—2022）进行养护管理。研究于种植后 10、20、30 d 记录新枝长度和开花数，控水 40 d 后测定根系干重和长度，并采用《绿化用有机基质》（GB/T 33891—2017）中的方法测量基质的电导率（EC）、pH 值、容重、有机质、总孔隙度、透气孔隙度、持水孔隙度等指标^[16]。最后使用 EXCEL 2021 和 SPSS 25.0 统计分析软件进行数据处理和分析，采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较（ $P < 0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 园林废弃物堆肥产物的理化特性

研究通过对园林废弃物堆肥产物进行系统筛分，获得了 3 种不同粒径等级的堆肥材料，其理化性质测试数据显示（表 2），粒径小于 5 mm 的细颗粒堆肥有机质含量为 35%，孔隙度为 70%，持水量为 40%，其较大的比表面积特性有利于微生物活动；粒径 5~20 mm（不包含 20 mm）的中等颗粒堆肥有机质含量为 32%，孔隙度为 65%，其在保持较高养分水平的同时提供了良好的结构稳定性；而粒径 20~35 mm（不包含 35 mm）的粗颗粒堆肥有机质含量为 28%，孔隙度为 60%，能有效改善基质的通气性能；电导率为 2.0 mS/cm，相对较高，表明其含有一定的盐分。同时，3 种堆肥产物的 pH 值分布在 6.5~7.1，整体呈中性至微碱性，该特性为后续配制种植基质时的酸碱调节提供了便利。所有堆肥产物在完全腐熟后各项指标稳定，试验的种子发芽指数均超过 80%，这表明产品已完全腐熟且对植物生长无抑制作用。

2.2 不同三角梅种植基质的理化特性

不同配方基质（T1、T2、T3）与对照组（CK）在各项理化指标上均存在显著差异（ $P < 0.05$ ），表明不同粒径园林废弃物的配比对栽培介质的物理和化学性质产生了显著影响（表 3）。在化学性质方面，各处理基质的 pH 值均呈弱酸性，范围在 6.14~6.35，且三者之间差异显著，按 pH 值排序从高到低依次为 T3、T2、T1。而 CK 的 pH 值为 7.15，显著高于各处理组，呈中性。在电导率方面，T2 处理的 EC 值最高，且显著高于其他组，表明其可溶性盐含量较高；T1、T3 和 CK 之间的 EC 值无显著差异。在物理结构方面，各处理基质的容重均显著低于 CK。其中，T3 处理的容重最低，其次为 T1 和 T2。这表明所有处理基质的疏松程度均优于对照组，其中 T3 基质最为疏松。与此相对应，基质的孔隙度特性也表现出显著差异。T2 处理的总孔隙度最高，显著优于其他组，其持水孔隙度也最高，说明 T2 具有良好的保水能力。T3 和 CK 的总孔隙度与持水孔隙度相近，但 T3 的通气孔隙度显著高于 CK，表明 T3 在保持相似持水能力的同时，透气性更好。T1 处理则在总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度上均相对较低。在养分供给潜力方面，各处理基质的有机质含量均极显著高于 CK。其中，T1 和 T3 处理的有机质含量最高，分别为 32.3% 和 30.9%，且二者无显著差异。

总的来说，与对照组 CK 相比，3 种配方基质均表现出质地疏松、有机质含量丰富的共同优点。但三者之间特性各异：T1 基质有机质含量高，但孔隙度较低，可能更为紧实；T2 基质在孔隙结构上表现最优，特别是保水能力突出，但 EC 值偏高需加注意；T3 基质则在容重、通气性和有机质含量之间取得了较好的平衡，整体结构较为理想。这些理化性质的差异将对三角梅的生长发育产生不同影响。

2.3 不同基质对新枝长度和开花数的影响

基质配方显著影响了三角梅的新枝生长和开花数量，且这种影响随着三角梅的生长（10—30 d）愈发明显（表 4）。总体而言，添加园林废弃物堆肥的基质的生长与开花表现

表 2 不同粒径堆肥的物理化学性质

Tab.2 Physicochemical properties of compost with different particle sizes

参数	粒径 <5 mm	5mm ≤粒径 < 20 mm	20mm ≤粒径 < 35 mm
有机质 /%	35	32	28
pH 值	6.5	6.8	7.1
孔隙度 /%	70	65	60
持水量 /%	40	35	30
电导率 / (mS/cm)	1.5	1.8	2.0

表 3 不同种植基质的理化性质

Tab.3 Physicochemical properties of different planting substrates

参数	T1	T2	T3	CK
pH 值	6.14±0.04c	6.23±0.05c	6.35±0.03b	7.15±0.06a
EC/ (mS/cm)	0.44±0.01b	0.66±0.05a	0.45±0.01b	0.48±0.03b
容重 / (g/cm ³)	0.72±0.00c	0.85±0.02b	0.65±0.05d	1.10±0.02a
有机质 /%	32.3±0.2a	27.4±0.9b	30.9±1.6a	18.7±1.1c
总孔隙度 /%	47.7±0.8d	67.5±0.6a	59.3±2.5b	55.5±2.6c
通气孔隙度 /%	19.8±0.3bc	22.4±1.9a	21.6±0.2ab	17.7±1.3c
持水孔隙度 /%	27.9±0.5c	45.1±2.2a	37.7±1.5b	37.8±2.2b

表 4 不同基质对新枝长度和开花数的影响

Tab.4 Effects of different substrate treatments on new shoot length and flower number

组别	新枝长度 /cm			开花数 / 朵		
	10d	20d	30d	10d	20d	30d
T1	6.4±0.1c	16.9±0.1b	26.9±0.3a	10.8±0.1b	20.3±0.3c	27.4±0.3c
T2	8.5±0.2a	19.5±1.3a	28.7±1.2a	14.3±0.2a	26.7±0.3a	34.5±2.8a
T3	6.8±0.1b	18.4±0.7a	27.6±1.3a	11.4±0.3b	21.9±0.5b	30.8±0.2b
CK	4.2±0.1d	15.3±0.3c	24.6±1.1b	11.2±0.7b	15.3±0.3d	26.6±0.6c

均优于对照组，且 T2 处理的效果最为突出。

在新枝长度方面，整个观测期内，T2 处理的新枝长度始终大于其他组。10 d 时，T2 处理的新枝长度显著高于 T3、T1 和 CK。试验 30 d 时，T2 处理的新枝长度达到 28.7 cm，与 T3 和 T1 无显著差异，但比 CK 显著增加了 16.7%。

在开花数量方面，不同处理间的差异更为显著，且随时间推移差距变大。试验 10 d 时，仅 T2 处理的开花数显著高于其他处理，T1、T3 与 CK 之间无显著差异。至 20 d 时，按开花数量排序从多到少依次为 T2、T3、T1、CK，且不同处理间均存在显著差异。试验 30 d 时，这一趋势得以保持并强化，T2 处理的开花数量比 CK 增加了 29.7%。

2.4 不同基质对根系生长的影响

经过 40 d 的控水处理后，不同基质配方对三角梅的根系生长产生了显著影响（表 5）。在根系干重和根系长度这 2 个关键指标上，试验处理组与对照组之间以及处理组内部均表现出显著差异（ $P<0.05$ ），进一步验证了基质理化性质对植株地下部分生长的重要作用。

T2 处理的根系生长表现最为优异，其根系干重和根系长度均显著高于其他处理。与 CK 相比，T2 的根系干重增加了约 89.4%，根系长度增加了约 43.4%，优势极其明显。T1 与 T3 处理在根系干重上无显著差异，但二者均显著高于 CK。在根系长度方面，T1 和 T3 也显著优于 CK，但二者之间无显著差异，且均显著低于 T2。

表 5 不同基质对根系生长的影响
Tab.5 Effects of different substrate treatments on root growth

组别	根系干重 /g	根系长度 /cm
T1	0.67±0.02b	133.3±4.2b
T2	0.89±0.04a	155.4±12.6a
T3	0.62±0.02b	128.7±2.5b
CK	0.47±0.04c	108.4±5.3c

3 讨论

本研究以不同粒径的园林废弃物堆肥产物为改性材料，与田园土、蚯蚓粪复配成三角梅栽培基质。结果发现，以粒径 5~20 mm 堆肥产物为主的 T2 配方综合表现最佳，能最优协调基质的水、气关系，显著促进三角梅的新枝生长、开花数量及根系发育。这一结果可能与堆肥粒径分级产生的协同效应有关。园林绿化废弃物堆肥过程中的主要影响因素为有机质、pH 值、孔隙度、含水量、电导率等^[17]。粒径是决定堆肥产物物理化学性质的关键因素，通过粒径分级可有效调控产物的相关性质。研究表明，细颗粒堆肥（粒径 <5 mm）有机质含量高、孔隙度大，有利于保水和微生物活动；而粗颗粒堆肥（20 mm ≤ 粒径 < 35 mm）能显著改善通气性^[17-18]。T2 配方中，中等颗粒堆肥（5 mm ≤ 粒径 < 20 mm）占据了核心比例（30%），该粒径范围的物料可能在基质中起到了“结构骨架”与“水分、养分库”的双重作用：它既能形成稳定的孔隙结构，避免如细颗粒般过度致密，又比粗颗粒具有更好的持水保肥能力。这使得 T2 基质在总孔隙度、持水孔隙度和通气孔隙度之间达到了最佳平衡，从而为根系创造了水气协调的理想环境。这与赵松婷等^[19]关于颗粒级配影响介质结构的观点相一致，本研究进一步证实，通过科学的粒径配比可以定向调控园林废弃物质基的孔隙结构。

相较于依赖泥炭、珍珠岩等不可再生资源的传统园艺基质^[14]，本研究开发的优化基质展现出显著优势。所有含园林废弃物堆肥的处理，其容重均显著低于对照组，有机质含量显著提高（表 3）。这不仅有效解决了传统基质可能存在的板结、养分供应不稳定等问题^[17]，更实现了园林废弃物的资源化循环利用。T3 基质容重最低、通气性佳，可作为特定场景（如对轻质性要求极高）下的备选方案，但其在促进植物整体生长方面不及 T2，这可能是因为其过高的粗颗粒占比牺牲了部分持水能力和养分缓释效能。

成功的 pH 调控是保障优化基质

发挥效用的关键环节^[20]。三角梅适宜在弱酸性环境（pH 5.5~6.5）中生长。尽管所用园林废弃物堆肥原料的 pH 值呈中性至微碱性（6.5~7.1），但本研究通过添加过磷酸钙进行复配调节，使所有处理基质的 pH 值均稳定在此适宜范围内。这一结果与周晓飞^[21]关于合理调配可有效调节废弃物基质 pH 值的结论相符。适宜的 pH 环境不仅直接促进了三角梅对养分元素的吸收^[18]，还能通过增强有益微生物活性、抑制根腐病等土传病害的途径^[21-22]，间接改善根基健康，这与 T2 处理植株生长健壮的表现相吻合。在实践中，为维持基质的长期效能，需建立定期监测与动态调控机制，根据 pH 值检测结果进行必要调整^[23]。未来推广应用时，可进一步考虑根据三角梅的不同生长阶段，系统优化从堆肥制备、粒径配比到养护管理的全过程，以实现精准调控。

此外，基质的电导率（EC 值）也是影响植物生长的重要因素^[24]。尽管粗颗粒堆肥原料的 EC 值相对较高（2.0 mS/cm），但在与田园土、蚯蚓粪复配并调节 pH 后，所得试验基质的 EC 值均处于较低的安全范围（0.44~0.66 mS/cm）。其中，T2 处理的 EC 值（0.66 mS/cm）显著高于其他处理组，这可能与其特定的粒径配比和组分有关。适度的盐分可能提供了更充足的初始矿质养分，但过高的 EC 值也可能对植物根系产生渗透胁迫。研究发现，T2 处理在 EC 值相对较高的同时，取得了最优的植株生长表现，这表明其最终的 EC 水平处于‘水红’三角梅的适宜耐受范围内，且其中等粒径堆肥主导的配方更好地协调了水、气、肥关系，抵消了盐分可能带来的轻微负面影响。

4 结语

本研究将园林废弃物堆肥产物按粒径分级，并与田园土、蚯蚓粪复配，系统评估了其作为三角梅栽培基质的可行性。结果表明，园林废弃物堆肥可有效替代传统泥炭基质，显著改善基质的物理结构与养分状况。其中，

以中等颗粒堆肥（5 mm ≤ 粒径 < 20 mm）为主的 T2 配方综合表现最佳。该配方在孔隙结构、水气平衡方面达到最优，能最有效地促进三角梅的新梢生长、开花与根系发育。此外，将基质 pH 调控在 5.5~6.5 的弱酸性范围，是保障其肥效与根系健康的关键。本研究为园林废弃物的资源化、高值化利用提供了具体方案，也为城市立体绿化中三角梅的可持续栽培提供了理论依据与技术支持。同时，研究成果也将为理解堆肥粒径与植物生长的关联、完善种植基质优化理论提供科学依据，有助于城市绿化事业向生态化、循环化转型。

研究仍存在以下局限性：一是地点与品种代表性有限。试验仅在单一地点、单一年度与生长季节内进行，未涵盖不同地域气候与长期应用效果；试验仅使用“水红”三角梅 1 个品种，结论对其他品种的适用性有待验证。二是研究在控制条件下进行，未能充分模拟实际天桥环境中的复杂因子，如尾气、温变、风力等，仅关注理化与生长指标，对微生物群落、养分动态及基质老化等深层机制暂未系统探讨。三是试验规模尚不充分，尽管进行了重复试验，但仍属于中小规模，缺乏在不同区域、不同天桥环境下的验证。

园林废弃物堆肥的利用，是推动资源循环利用、支持城市绿色转型、实施碳达峰碳中和战略的有效途径^[23]。未来研究可进一步开展长期定位观测与多区域验证，系统探讨基质微生物群落结构与养分循环机制，形成可复制、可推广的标准化应用模式，从而提升技术效能与可靠性。

注：图片由作者自绘。

参考文献：

[1] 刘学磊，任学勇，宋曙光，等. 双碳背景下园林绿化废弃物资源化利用研究进展 [J]. 安徽农业科学，2024，52（9）：1-4，24.
[2] 戚智勇，赵佳颖，张冬冬，等. 我国的城市园林废弃物及其资源化利用现状 [C]// 中国环境科学学会，同济大学，清华大学，等. 2020 年全国有机固废处理与资源化利用高峰论坛集. 长沙：中国环境科学学会，2020.
[3] 周志强，董靓. 强台风后厦门园林乔木损失与恢复情况调查研究——以华侨大学厦门校区为例 [J]. 风景园林，2018，25（6）：41-46.
[4] 李金业，程昊，徐青云，等. 柑橘废弃物堆肥中高效木质素降解菌的筛选及其降解效果 [J]. 微生物学通报，2025，52（1）：230-248.
[5] 唐忠平. 园林废弃物资源化利用方式及策略 [J]. 乡村科技，2021，12（10）：99-100.
[6] 郑乐怡，刘浩然，李毛毛，等. 园林废弃物资源化利用现状 [J]. 绿色科技，2021，23（14）：126-129.
[7] 姜懿珊. 园林绿化废弃物的经济用途及其再生利用经营管理研究 [J]. 中国林业经济，2021（3）：70-72.
[8] 邵锋. 园林树木对 PM2.5 等大气颗粒物浓度和成分的影响及滞尘效应研究 [D]. 北京：北京林业大学，2020.
[9] 张卓斌，涂超峰，向国红，等. 腐熟化园林废弃物对南瓜种子萌发及幼苗生长影响初探 [J]. 现代园艺，2021，44（5）：13-14.
[10] 史正军，潘松，冯世秀，等. 园林废弃物地表覆盖处理对植物生长及土壤细菌群落的影响 [J]. 草业学报，2023，32（4）：153-160.

[11] 车飞伟，李素艳，孙向阳，等. 不同有机材料覆盖对土壤保水效果的影响 [J]. 水土保持通报，2020，40（2）：182-187.
[12] 李梦秋，李宇，刘世林，等. 基于大球盖菇种植的园林废弃物资源化利用研究 [J]. 天津农业科学，2023，29（3）：85-90.
[13] 单兴宇. 园林废弃物生态处理与资源化利用探讨 [J]. 产业与科技论坛，2021，20（4）：220-221.
[14] 陈自亮. 人行天桥高架桥三角梅绿化技术初探 [J]. 四川林业科技，2020，41（2）：64-68.
[15] 陈风华. 沿海地区立交桥箱植三角梅管养存在问题及改进措施初探 [J]. 中华建设，2024（4）：157-159.
[16] 绿化用有机基质：GB/T 33891—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
[17] 陈乔宇，杨丽军，吴松成，等. 园林绿化废弃物堆肥工艺研究进展 [J]. 农业与技术，2021，41（15）：139-142.
[18] 彭德元，袁谋志，付品山，等. 张家界植烟土壤酸碱度分布及影响因素研究 [J]. 作物研究，2021，35（6）：581-584.
[19] 赵松婷，李新宇，李延明. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律 [J]. 生态环境学报，2014，23（2）：271-276.
[20] 吴光辉，王绥干，张冬明. 海口市耕地土壤有机质及 pH 与微量元素的相关性 [J]. 贵州农业科学，2023，51（8）：46-53.
[21] 周晓飞. 园林废弃物发酵基质对土壤 pH 值及含盐量的影响研究 [J]. 绿色科技，2013（11）：207-209.
[22] 谭艳霞，李柏村，李冬丽，等. 园林绿化废弃物复合污泥堆制有机肥的试验研究 [J]. 中国资源综合利用，2021，39（5）：1-4.
[23] 焦冉，周志强. 基于生物炭技术的园林废弃物处理途径研究 [J]. 山东林业科技，2024，54（2）：22-29.
[24] 郭瑞，李峰，周际，等. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征 [J]. 植物生态学报，2016，40（1）：69-79.

作者简介：

张丽华/1981 年生 / 女 / 甘肃徽县人 / 本科 / 广州市林业和园林科学研究院，广州市生态园林科技协同创新中心（广州 510405）/ 园林高级工程师 / 专业方向为园林道路与桥梁绿化

杜学林/1996 年生 / 男 / 贵州遵义人 / 硕士 / 广州市林业和园林科学研究院，广州市生态园林科技协同创新中心（广州 510405）/ 专业方向为观赏园艺

王方/1984 年生 / 女 / 四川成都人 / 本科 / 广州市林业和园林科学研究院，广州市生态园林科技协同创新中心（广州 510405）/ 风景园林施工工程师 / 专业方向为风景园林绿化