

林业废弃物基质配方特性及其对柚木生长的影响

艾娟娟¹, 厚凌宇¹, 邵国栋¹, 李智超¹, 卢立华², 李朝英², 孙启武¹

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所 国家林业局森林培育重点实验室, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

摘要:为促进林业废弃物资源化利用,减少草炭的开采,以林业废弃物为育苗基质主要原料,对柚木 *Tectona grandis* 进行育苗试验,探讨林业废弃物替代草炭作为柚木育苗基质的可行性。试验以木纤维、锯末、椰糠和沤制树皮为主要基质原料,分别与辅料草炭、黄心土、珍珠岩、蛭石(VC)和火烧土(BS)以不同的体积比混合配制成16种不同配方基质,并以柚木常用基质黄心土为主要基质原料的配方 $T_1[V(\text{黄心土}):V(\text{锯末}):V(\text{火烧土})=6:3:1]$ 作为对照,分别研究了不同基质的特性及其对柚木幼苗生长和生理状况的影响,采用隶属函数值法对各基质的育苗效果进行综合评价,筛选出适宜柚木幼苗生长的最佳基质配方。结果表明:16种林业废弃物基质的各项指标间均有差异,其中部分指标间差异显著($P<0.05$)。16种林业废弃物配方基质的容重、总孔隙度和毛管孔隙度分别为 $0.1\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $35.87\%\sim 63.35\%$ 和 $24.78\%\sim 53.05\%$, pH 值为 $5.29\sim 7.43$ 。其中以林业废弃物为主料配方基质的碱解氮、有效磷、速效钾质量分数和电导率通气孔隙度均高于或显著($P<0.05$)高于对照(T_1),容重显著($P<0.05$)低于 T_1 。在不同基质中,柚木幼苗的各指标均存在一定差异,其中 $T_{10}[V(\text{木纤维}):V(\text{草炭}):V(\text{珍珠岩}):V(\text{蛭石})=5:3:1:1]$, $T_{11}[V(\text{椰糠}):V(\text{木纤维}):V(\text{草炭})=3:4:3]$, $T_{12}[V(\text{椰糠}):V(\text{木纤维}):V(\text{草炭})=3:3:4]$ 配方基质中柚木幼苗的苗高增长量、地径增长量、主根长、单株侧根数、单株叶面积、单株茎叶干质量、单株根干质量、苗木品质指数、总叶绿素质量分数均较高,显著($P<0.05$)高于对照组的对应指标,表现出明显的生长优势。综合评价结果显示:柚木在 T_{10} , T_{11} , T_{12} 配方基质中的生长品质综合评价指数分别为 0.42, 0.42, 0.56, 均显著($P<0.05$)高于对照组的 0.22。为减少草炭使用量,建议将 T_{11} 和 T_{10} 作为柚木最佳育苗基质配方。图 1 表 7 参 35

关键词:森林培育学;林业废弃物;柚木;苗木品质指数;隶属函数值法

中图分类号: S723.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)06-1027-11

Matrix formula with forest waste and their effects on *Tectona grandis* growth

AI Juanjuan¹, HOU Lingyu¹, SHAO Guodong¹, LI Zhichao¹, LU Lihua², LI Zhaoying², SUN Qiwu¹

(1. Key Laboratory of Forestry Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: To promote the utilization of forest wastes and reduce the exploitation of peat, a seedling test on *Tectona grandis* was conducted with the main raw materials of forest wastes as the seedling substrate. Taking wood fiber (WB), sawdust (SD), coir dust (CD), and retted bark (RB) as main raw materials and peat (PT), yellow soil (YS), perlite (PL), vermiculite (VC), and burned soil (BS) as auxiliary materials, 16 different matrix formulations were mixed with different volume ratios. The control (T_1) formula was $YS:SD:BS = 6:3:1$. Physicochemical properties of the substrates and their effects on the growth and physiological status of *T. grandis* seedlings were studied using the subjection function method to evaluate the effect of each substrate on

收稿日期: 2017-11-05; 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 国家林业局公益性行业科研专项(201504205)

作者简介: 艾娟娟, 从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail: aijuan2021@163.com。通信作者: 孙启武, 副研究员, 博士, 从事土壤肥力与植物营养相关研究。E-mail: sqw@caf.ac.cn

seedling growth. Then, the best suitable matrix formulation for seedling growth was screened out. Results showed significant differences ($P<0.05$) between indicators of different substrates. Of the sixteen kinds of forestry waste formulation substrates, bulk density was $0.1\text{--}0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, total porosity was $35.87\%\text{--}63.35\%$, and capillary porosity was $24.78\%\text{--}53.05\%$; pH was $5.29\text{--}7.43$. Compared to the control, available N, available P, available K, EC, and aeration porosity were higher or significantly higher ($P<0.05$); bulk density was significantly lower ($P<0.05$). Differences among the indexes included T_{10} , T_{11} and T_{12} . For height growth and increment of soil diameter in the formulation matrix, main root length, the number of lateral roots per plant, the leaf area per plant, leaf stem and leaf dry weight, root dry weight, seedling quality index, and total chlorophyll were significantly higher ($P<0.05$) than the control group. The comprehensive evaluation results showed that the comprehensive evaluation indexes of T_{10} , T_{11} and T_{12} are 0.42, 0.42, and 0.56 were significantly ($P<0.05$) higher than those of the control group (0.22). Thus, to reduce the use of peat, T_{10} and T_{11} were recommended as the best seedling substrates for *T. grandis*. [Ch, 1 fig. 7 tab. 35 ref.]

Key words: silviculture; forest waste; *Tectona grandis*; seedling quality index; membership function value method

林业废弃物亦称林业剩余物, 包括森林采伐剩余物、木材加工剩余物及育林剪枝剩余物, 统称林业“三剩物”, 具有种类多、易获取、可再生、可生物降解并且含有一定养分等优点。长期以来, 对于林业废弃物的处理方式多为丢弃或焚烧, 这不仅造成了资源的浪费而且造成了环境的严重污染^[1-3]。草炭因具有持水保水力强、通气性良好、保肥力高等优点, 是育苗常规基质的主要原料。草炭是一种不可再生资源。开采草炭对环境破坏很大, 并且现阶段由于草炭资源大量减少, 中国已逐步禁止开采草炭^[4-5]。因此开发利用当地成本低、容易获得的林业废弃物替代草炭作为育苗基质, 既可以促进林业废弃物资源的循环再利用, 又降低了育苗基质成本, 并且还起到保护环境的作用^[6]。研究表明, 大部分林业废弃物类型均可通过基质化开发技术实现资源的循环再利用^[7-8]。柚木 *Tectona grandis* 属马鞭草科 Verbenaceae 落叶或半落叶大乔木, 是著名的热带地区珍贵阔叶用材树种, 素有“万木之王”的美誉, 原产于缅甸、泰国、老挝等东南亚地区^[9-11], 其材质坚硬、纹理美观、加工性能好, 是高级家具、贴面板、装饰、雕刻、乐器、军需、桥梁、建筑、船舶等珍贵优良用材树种之一^[12]。柚木具有生长快, 材质优良, 用途广和投资回报率高等特点, 在热带、南亚热带地区广为种植^[13]。育苗基质的选择是否恰当关系到育苗效果的好坏。目前, 柚木传统育苗常以黄心土为主要基质, 依靠手工装袋其育苗效果好, 运输成本高, 但环保性有待进一步改善^[14], 而将林业废弃物用于柚木育苗栽培的研究, 目前尚未见报道。鉴于此, 本研究以木纤维、椰糠、锯末、树皮等林业废弃物替代草炭作为柚木育苗基质主料, 进行不同基质配方试验研究, 分析各基质配方特性及其对柚木幼苗生长和生理特性的影响, 通过对不同基质的育苗效果进行综合评价, 以期筛选出育苗效果较好、易获取、可持续再生的经济环保型基质, 为培育柚木优质容器苗提供技术保障及理论依据, 也为林业废弃物资源化探索新途径。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地点位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心苗圃, 地处中国南亚热带($21^{\circ}57'N$, $106^{\circ}47'E$), 海拔为 250 m, 属于季风气候, 终年温暖湿润, 年降水量为 1 200~1 400 mm, 集中在 4~9 月, 空气相对湿度 80%, 年平均气温为 $21.5^{\circ}C$, 全年日照时数为 1 218~1 620 h, 气候适宜柚木生长。

1.2 试验材料

1.2.1 试验苗木 选择生长健壮且长势一致, 苗高为 (3 ± 1) cm 的柚木种苗。育苗容器采用直径 20 cm × 高 25 cm 黑色营养袋。

1.2.2 基质组成 以林业废弃物木纤维、椰糠、锯末、树皮为主要基础基质, 其中木纤维为进口压缩木纤维, 使用前用专用机器进行松散均一化处理; 树皮为马尾松 *Pinus massoniana* 树皮, 经粉碎并充分腐

熟处理；椰糠为市场购买成品；锯末为当地木材加工厂购买后进行碳化处理。以上林业废弃物与珍珠岩、蛭石以不同的体积比混合而成，其中以当地常用黄心土为主料的基质配方(T₁)作为对照，16 种基质组成配方见表 1。

1.3 试验方法

1.3.1 基质理化性质测定 栽培试验开始前，对上述 16 种基质的理化性质进行测定，参照 TIAN 等^[15]的方法测定总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度和容重；参照程斐等^[16]的方法测定 pH 值和电导率；有机质质量分数测定采用重铬酸钾氧化外加热法；碱解氮测定采用 LY/T 1229-1999《森林土壤水解性氮的测定》碱解扩散法；有效磷测定采用盐酸-硫酸浸提法；速效钾采用 LY/T 1236-1999《森林土壤速效钾的测定》乙酸铵浸提-火焰光度法测定。各指标均重复测定 3 次。

表 1 基质配方表
Table 1 Treatments of matrix formula

基质配方	基质组成									
	沤制树皮	锯末	椰糠	木纤维	黄心土	火烧土	草炭	珍珠岩	炭化树皮	蛭石
T ₁		3			6	1				
T ₂		3	1		5	1				
T ₃		3	2		4	1				
T ₄		3	3		3	1				
T ₅	6	3							1	
T ₆	5	3							2	
T ₇	4	4							2	
T ₈	3	3	2						2	
T ₉				6			2	1		1
T ₁₀				5			3	1		1
T ₁₁			3	4			3			
T ₁₂			3	3			4			
T ₁₃		6	4							
T ₁₄		5	5							
T ₁₅		4	4			1		1		
T ₁₆		3	3			2		2		

说明：基质配方均为体积比

1.3.2 苗期栽培管理 于 2016 年 12 月 25 日将供试柚木幼苗根系附着基质洗净后，分别栽入配置好的 16 种基质中，各处理重复 3 个，各重复 10 盆，1 株·盆⁻¹，即每个处理共计 30 株幼苗。试验期间进行遮阳处理，遮阳率为 80%，不做任何施肥处理，仅做定期喷水维护。

1.3.3 生长指标的测定 从 2016 年 12 月 25 日至 2017 年 3 月 25 日期间，隔 30 d 调查 1 次，用直尺(精度 1 mm)测株高(基质表面到顶芽底部的高度)，用游标卡尺(精度 0.1 mm)测地径(贴于基质表面)，及植株生长状况，共测 4 次。于 2017 年 3 月 25 日，每处理抽取 3 株完整标准植株(株高、地径接近于平均株高、地径的苗木)，测量每株的苗高、地径，并计算高径比。每个单株分成地上部分和地下部分，用电子天平测定各处理的地上鲜质量和根部鲜质量，分别装入信封中，置于烘箱内经 105 ℃杀青 15 min，再在 80 ℃烘至恒量，称取单株各部分的干质量，并计算根冠比单株总生物量和苗木品质指数，计算公式为：单株总生物量=茎叶干质量+根干质量；根冠比=根干质量/茎叶干质量；高径比=株高/地径；苗木品质指数(I_0)=苗木总干质量(g)/{[苗高(cm)/地径(mm)]+[茎叶干质量(g)/根干质量(g)]}^[17]。

1.3.4 生理指标的测定 每处理抽取 3 株平均株，采集植株自上而下的第 3 片和第 4 片叶进行相关生理指标的测定。用无水乙醇法^[18]测定叶绿素质量分数；用蒽酮比色法^[19]测定可溶性糖质量分数；用考马斯亮蓝 G-250 比色法^[20]测定可溶性蛋白质质量分数。每个指标均重复 3 次，结果取平均值。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行相关实验数据的整理和统计分析，包括对基质理化性质及幼

苗生长指标的 Duncan 多重比较进行显著性检验。单一指标比较并不能准确地反映各处理苗木的综合性状差异,因此,采用模糊数学中隶属函数值法^[21]对各处理植株幼苗的生长发育状况做出较为准确的综合评价,通过综合评价指数筛选出最佳配方基质。采用以下公式求各个指标的隶属函数值: $R(x_i)=(x_i-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ 。其中: R 为所选取的苗木质量评价指标的隶属度值, x_i 为某一指标测定值, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 为该指标的最小值和最大值,将植株不同指标的隶属函数值进行累加后求其平均值。植株综合评价指数值越大,说明植株生长越好。

2 结果与讨论

2.1 不同配方基质的理化特性分析

2.1.1 不同配方基质的物理特性 基质的理化性质是衡量基质特性的重要指标,直接影响植物的生长发育^[22]。由表 2 可看出:16 种不同基质的容重差异显著($P<0.05$),其中 T_1 和 T_2 容重最大,为 $0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右; T_9 , T_{10} , T_{11} , T_{12} 容重较小,均为 $0.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下。李婧等^[23]研究表明:植物适宜生长的基质容重应在 $0.1\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。因此,除 T_1 和 T_2 配方基质外,其他所有配方基质的容重均处于理想范围。理想基质总孔隙度应为 $54\%\sim 96\%$ ^[24],16 种基质中除对照 T_1 和 T_2 , T_{10} , T_{11} , T_{13} , T_{14} , T_{15} , T_{16} 外,其余均在在此范围内,其中 T_9 总孔隙度最高,显著高于其他 15 种基质,且与对照 T_1 差异显著。基质的通气孔隙影响着植物根系的呼吸作用。由表 2 可看出:16 种基质中 T_9 和 T_{12} 的通气孔隙度较高,显著高于 T_1 配方基质。李婧等^[23]认为:理想基质通气孔隙度应为 $15\%\sim 30\%$ 。因此,仅 T_6 , T_9 和 T_{11} 的通气孔隙度处于理想通气孔隙度范围内,其余都低于理想范围,其中 T_1 的总孔隙度和通气孔隙度明显低于理想基质栽培要求,而通气孔隙过低可能在栽培过程不利植物根系生长和根际微生物活动^[25]。 T_{14} 的总孔隙度和通气孔隙度较低的原因可能是椰糠未完全打碎形成较多细小团聚颗粒。持水孔隙的大小可以反映基质保水能力的强弱,对栽培过程植物是否受干旱有影响。16 种基质的持水孔隙度为 T_3 最高,明显高于对照组 T_1 ,持水孔隙度的大小顺序: $T_3>T_5>T_{12}>T_8>T_{15}>T_7>T_6>T_4>T_2>T_{16}>T_9>T_{13}>T_{10}>T_1>T_{14}>T_{11}$, T_{11} 的持水孔隙度最低,但其总孔隙度和通气孔隙度均较高。可能木纤维未经过发酵处理,导致其吸水性和保水性相对较差,而 T_8 保水性强的原因可能是其沤制过的松树皮内含有的大量腐殖质物质作用引起^[26]。

表 2 不同配方基质的物理性质比较

Table 2 Physical property of different treatments

编号	$\rho_{\text{基质}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	总孔隙度/%	通气孔隙/%	持水孔隙/%	编号	$\rho_{\text{基质}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	总孔隙度/%	通气孔隙/%	持水孔隙/%
T_1	$0.80\pm 0.07\text{ a}$	$41.34\pm 0.66\text{ f}$	$8.02\pm 0.05\text{ d}$	$33.32\pm 0.63\text{ f}$	T_9	$0.26\pm 0.07\text{ f}$	$63.35\pm 1.20\text{ a}$	$21.74\pm 0.44\text{ a}$	$41.61\pm 1.36\text{ e}$
T_2	$0.81\pm 0.03\text{ a}$	$52.53\pm 0.33\text{ e}$	$10.52\pm 0.23\text{ c}$	$42.01\pm 0.53\text{ e}$	T_{10}	$0.21\pm 0.04\text{ f}$	$44.66\pm 2.86\text{ f}$	$10.84\pm 0.44\text{ c}$	$33.83\pm 2.62\text{ f}$
T_3	$0.59\pm 0.06\text{ b}$	$61.38\pm 3.31\text{ ab}$	$8.35\pm 0.08\text{ d}$	$53.03\pm 3.35\text{ a}$	T_{11}	$0.39\pm 0.10\text{ e}$	$40.34\pm 3.86\text{ f}$	$15.56\pm 2.25\text{ b}$	$24.78\pm 1.61\text{ g}$
T_4	$0.56\pm 0.06\text{ bc}$	$56.02\pm 2.92\text{ cde}$	$12.34\pm 0.23\text{ c}$	$43.68\pm 3.09\text{ de}$	T_{12}	$0.26\pm 0.08\text{ f}$	$58.82\pm 4.58\text{ bc}$	$6.62\pm 3.07\text{ de}$	$52.20\pm 7.62\text{ ab}$
T_5	$0.52\pm 0.06\text{ bc}$	$60.25\pm 2.05\text{ abc}$	$7.71\pm 1.77\text{ de}$	$52.55\pm 0.48\text{ a}$	T_{13}	$0.49\pm 0.10\text{ bed}$	$38.85\pm 2.33\text{ fg}$	$2.00\pm 0.2\text{ f}$	$36.86\pm 2.53\text{ f}$
T_6	$0.48\pm 0.03\text{ bcd}$	$59.54\pm 0.95\text{ abc}$	$15.55\pm 1.78\text{ b}$	$43.99\pm 2.73\text{ de}$	T_{14}	$0.45\pm 0.07\text{ cd}$	$35.87\pm 2.30\text{ g}$	$3.57\pm 0.68\text{ f}$	$32.30\pm 1.62\text{ f}$
T_7	$0.50\pm 0.06\text{ bcd}$	$53.27\pm 0.70\text{ de}$	$6.29\pm 0.04\text{ de}$	$46.98\pm 0.66\text{ cd}$	T_{15}	$0.46\pm 0.07\text{ cd}$	$53.15\pm 0.83\text{ de}$	$5.55\pm 0.33\text{ e}$	$47.60\pm 0.94\text{ bcd}$
T_8	$0.47\pm 0.05\text{ bcd}$	$57.22\pm 2.36\text{ bcd}$	$6.36\pm 0.25\text{ de}$	$50.86\pm 2.56\text{ abc}$	T_{16}	$0.56\pm 0.08\text{ bc}$	$52.26\pm 0.58\text{ e}$	$10.49\pm 0.24\text{ c}$	$41.78\pm 0.68\text{ e}$

说明:同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

2.1.2 不同配方基质的化学特性 不同基质配方对基质的化学性质影响显著。表 3 所示:不同处理基质的 pH 值差异明显,16 种基质的 pH 值范围为 $5.29\sim 7.43$ 。除以木纤维为主料的配方基质(T_9 , T_{10} , T_{11} , T_{12})为偏酸性, pH $5.29\sim 5.73$ 外,其余均近中性, pH $6.72\sim 7.43$ 。不同习性植物对 pH 值要求不同。理想基质的 pH 值应控制在 pH $6.0\sim 7.5$ 范围内为宜^[27],否则不利于根系生长发育,并且会影响根系对营养元素的吸收。而这些以木纤维为主料的配方基质的 pH 值较低但仍具有较好的育苗效果,主要原因可分为 2 个方面:一方面可能柚木是南方树种,适宜在酸性环境下生长,另一方面也可能是此配方其碱解氮和有机质较高。

电导率(EC)是基质水溶液中离子总浓度的指标,可以反映基质当中可溶性养分总量,电导率过高

会造成盐害和烧根,电导率过低,则植物矿质营养不足^[28], $T_2\sim T_{16}$ 配方基质的电导率均显著高于 T_1 (对照),以 T_8 , T_{15} 和 T_{16} 最高,其他配方基质次之。理想基质的电导率应小于 $0.25\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[29]。本试验中 16 种基质的电导率均在理想范围内,其中以林业废弃物为基料的配方基质电导率显著高于对照(T_1)。可能的原因是相比黄心土,林业废弃物中存在有机物质在微生物作用下降解释放出大量的可溶性矿质营养。

基质中较高的碱解氮、有效磷、速效钾及有机质质量分数有利于根系发育和苗木生长。配方基质 $T_2\sim T_{16}$ 的有机质质量分数显著高于对照组(T_1),其中以林业废弃物为主要基质原料的基质配方($T_5\sim T_{16}$)有机质质量分数均较为丰富,其中 T_{11} , T_{13} 和 T_{14} 有机质质量分数最高,显著高于其他配方基质。16 种基质中除 T_2 和 T_4 碱解氮质量分数和 T_1 差异不显著外,其他配方基质均显著高于对照组(T_1),其中以木纤维和沤制树皮为基料的基质碱解氮质量分数较高。16 种基质中有效磷质量分数除 T_4 , T_5 , T_8 , T_{11} , T_{13} 和 T_{14} 高于对照组 T_1 外,其他均低于对照组(T_1),其中 T_8 和 T_{11} 有效磷质量分数最高。 $T_3\sim T_{16}$ 速效钾质量分数均显著高于 T_1 。 T_2 和 T_1 处于同一水平,其中以林业废弃物为主要基质原料的配方基质速效钾较高。有研究表明,在选择栽培基质时,碳氮比(C/N)应低于 50:1 或更少,否则在有机体分解过程与植株生长相互竞争氮源,往往会导致植株缺氮,生长失调。本试验中 16 种基质中 T_{13} , T_{14} 和 T_{15} 的 C/N 最高,且随着锯末成分的增加 C/N 也增加,可能的原因是基质配方中锯末中的质量分数较高。有研究数据显示,锯末的 C/N 达 160.00:1.00。 T_9 , T_{10} , T_{11} 和 T_{12} 最低,均小于 50,显著低于对照组 T_1 (60.14:1.00)和其他配方基质。

16 种配方基质中以黄心土为主料的配方基质($T_1\sim T_4$)的理化性质除 pH 值和持水孔隙适宜外,其他理化性质指标均表现较差,可能是黄心土浇水时间久后易板结,使基质的通气孔隙的降低,导致根系长势不良^[30]。

表 3 不同配方基质的化学性质比较

Table 3 Chemical property of different treatments

编号	pH 值	$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	$w_{\text{碱解氮}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有效磷}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{速效钾}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有机质}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	碳/氮(C/N)
T_1	7.08 ± 0.06 cd	0.004 ± 0.002 g	94.50 ± 0.00 j	36.53 ± 0.37 d	50.62 ± 3.83 j	7.26 ± 1.45 f	60.14 ± 3.84 gh
T_2	7.05 ± 0.02 cde	0.006 ± 0.000 ef	117.83 ± 41.02 ij	26.96 ± 0.59 e	49.50 ± 1.46 j	5.45 ± 0.08 f	35.72 ± 1.03 ij
T_3	7.02 ± 0.08 de	0.007 ± 0.001 def	120.75 ± 1.75 hi	34.93 ± 1.04 d	84.61 ± 2.53 g	7.02 ± 0.28 f	53.93 ± 2.13 h
T_4	7.12 ± 0.05 bc	0.011 ± 0.001 c	112.00 ± 3.50 ij	41.80 ± 2.08 bcd	119.08 ± 3.14 e	12.68 ± 1.85 e	68.46 ± 5.02 fg
T_5	7.00 ± 0.05 e	0.013 ± 0.001 ab	309.75 ± 1.75 d	46.55 ± 2.37 bc	94.03 ± 1.11 f	29.97 ± 2.16 bcd	86.75 ± 1.04 cd
T_6	6.85 ± 0.02 f	0.013 ± 0.000 abc	297.50 ± 7.00 de	32.70 ± 2.79 de	118.12 ± 0.48 e	33.58 ± 1.69 b	78.71 ± 3.58 de
T_7	6.82 ± 0.03 f	0.013 ± 0.001 abc	280.00 ± 10.50 ef	34.53 ± 1.48 d	123.23 ± 5.71 e	32.16 ± 6.08 bc	88.91 ± 8.54 c
T_8	6.72 ± 0.07 g	0.014 ± 0.002 a	266.00 ± 7.00 f	75.78 ± 5.35 a	136.31 ± 1.73 d	31.09 ± 3.15 bc	89.10 ± 3.02 c
T_9	5.46 ± 0.07 j	0.005 ± 0.001 fg	490.00 ± 7.00 c	12.02 ± 0.67 ef	81.50 ± 2.63 h	29.26 ± 0.63 bcd	38.56 ± 2.32 i
T_{10}	5.29 ± 0.07 k	0.008 ± 0.001 d	542.50 ± 7.00 b	19.54 ± 0.63 ef	63.87 ± 3.53 i	25.67 ± 0.56 d	28.05 ± 2.17 j
T_{11}	5.73 ± 0.07 i	0.005 ± 0.001 fg	545.77 ± 23.01 b	72.67 ± 3.01 a	156.26 ± 2.26 c	40.82 ± 1.94 a	32.76 ± 0.89 ij
T_{12}	5.51 ± 0.03 j	0.007 ± 0.001 de	652.75 ± 19.25 a	25.72 ± 0.37 f	92.59 ± 6.64 f	32.58 ± 3.94 bc	27.02 ± 1.04 j
T_{13}	6.36 ± 0.01 h	0.012 ± 0.001 bc	147.00 ± 7.00 g	42.17 ± 4.23 bc	227.59 ± 1.20 a	43.80 ± 3.94 a	176.06 ± 8.75 a
T_{14}	6.39 ± 0.02 h	0.013 ± 0.001 abc	144.67 ± 10.69 gh	51.52 ± 1.41 b	227.75 ± 2.87 a	43.51 ± 2.11 a	168.83 ± 13.30 a
T_{15}	7.16 ± 0.04 b	0.015 ± 0.001 a	143.50 ± 10.50 gh	8.63 ± 1.16 g	193.12 ± 6.32 b	27.54 ± 3.72 cd	121.08 ± 4.95 b
T_{16}	7.43 ± 0.05 a	0.014 ± 0.001 a	126.00 ± 6.06 ghi	3.37 ± 0.44 h	197.43 ± 1.54 b	12.99 ± 1.85 e	70.88 ± 2.57 ef

说明: 同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

综上所述,物理性质方面, T_6 , T_8 , T_9 , T_{10} , T_{11} , T_{12} , T_{15} 和 T_{16} 各项指标都比较好。化学性质方面, T_{19} , T_{10} , T_{11} 和 T_{12} 的 pH 值偏低, T_9 的有效磷较低, T_{10} 的速效钾较低,其余各处理的各项指标都表现良好。综合各配方基质的理化性质,考虑到基质中的磷元素和钾元素可以通过后期施肥加以补充,初选出 T_8 , T_9 , T_{10} , T_{11} , T_{12} , T_{15} 和 T_{16} 配方基质作为栽培柚木的试验基质。

2.2 不同配方基质对柚木幼苗生长的影响

2.2.1 对柚木幼苗形态指标的影响

植株生长指标是能够反映植株长势强弱的重要指标,在一定程度上可反映植株的健壮程度,可直观判断不同配方基质对植物的效果差异,其中苗高、地径是评价容器育苗

的主要形态指标^[31]。由图 1 可知：不同基质中柚木幼苗的株高增长量、地径增长量均存在一定的差异，其中以木纤维为基料的配方基质(T₉~T₁₂)苗高和地径增长量均显著($P<0.05$)高于对照组(T₁)和其他配方基质，表现出明显的生长优势。除 T₂ 的苗高和地径外，其他配方基质均高于对照组(T₁)，可能的原因是林业废弃物中存在适宜柚木生长所需的营养元素，能促进柚木生长。高径比可以反映苗木地上部伸长生长与加粗生长之间的协调关系以及地上部生长的健壮程度。由表 3 可见：16 种基质中栽培中的柚木幼苗的高径比除 T₁₁ 显著大于 T₈ 外，其他无显著差异。

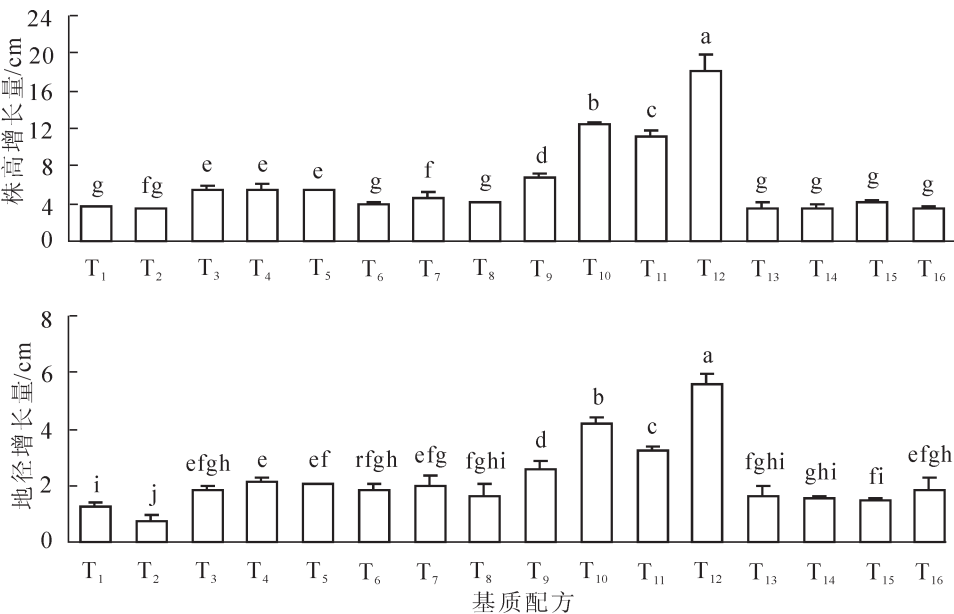


图 1 不同基质栽培下柚木幼苗的苗高和地径增长量状况

Figure 1 Height and stem diamete increment of *Tectona grandis* seedlings under different substrate cultivation

表 4 表明：不同基质中柚木幼苗的单株茎叶面积、主根长、侧根数、单株叶片数、高径比均存在一定的差异。T₁₀、T₁₁ 和 T₁₂ 柚木幼苗的单株叶面积均显著高于 T₁ 配方基质，而 T₂ 和 T₃ 配方基质与 T₁ 差异不显著，T₉、T₁₁ 和 T₁₂ 柚木幼苗的叶片数高于 T₁，但差异不显著。主要原因可能是因为基质中含有较高的氮素等叶生长所需营养，且营养元素有效性高，从而更有利于幼苗叶片的生长。

T₂~T₁₆ 基质中柚木的主根长均大于对照组(T₁)，其中 T₇、T₈、T₁₀、T₁₁ 和 T₁₂ 柚木幼苗的主根长显著大于对照组(T₁)。T₆、T₇、T₉、T₁₀、T₁₁ 和 T₁₂ 的侧根数显著大于对照组(T₁)，可能的原因是以木纤维为主料的配方基质(T₉~T₁₂)的孔隙度和保水性等物理性质适宜，其自身的养分供应能满足柚木幼苗根系的发育所需，因此可以促进根系的生长。

总体来看，不同配方基质对柚木幼苗株高、地径、主根长、单株侧根数和单株叶面积的影响均较大，且主要影响株高、单株叶面积和侧根数，而对高径比的影响却较小，其中以木纤维为基料的配方基质(T₉~T₁₂)的单株叶面积、主根长、侧根数、单株叶片数均高于以其他林业废弃物为基料的配方基质，且显著高于对照组(T₁)表现出良好的生长状况。因此，再次选出 T₉、T₁₀、T₁₁ 和 T₁₂ 配方基质作为栽培柚木的试验基质。

2.2.2 对柚木幼苗生物量及苗木品质的影响 表 5 表明：不同基质中柚木幼苗的单株茎叶干质量、单株根干质量、总生物量、根冠比、苗木品质指数存在一定差异。T₁₂ 配方基质的单株茎叶干质量和单株根干质量最高，显著高于其他配方基质，其次是 T₁₀ 和 T₁₁，显著高于对照组 T₁。干物质质量是衡量植物营养和生长状况的重要指标^[32]。苗木的生物量是反映物质积累状况的主要指标^[33]。由表 5 可见：T₄~T₁₆ 基质的生物量均显著高于对照组(T₁)，其中 T₉、T₁₀、T₁₁ 和 T₁₂ 的生物量显著高于其他配方基质。可能的原因是这 4 种配方基质的养分含量较高，促进了植株叶片和根系的生长。根冠比反映植物的生长状况，以及环境条件对地上部与地下部生长的影响。表 5 可看出：除 T₁₂ 的根冠比最高外，其他配方基质的根冠比差异不显著，表明本研究中柚木生长环境对柚木的地上部与地下部生长的影响较小。

表 4 不同配方基质中对柚木形态指标的影响

Table 4 Effects on morphological index of seedling of <i>Tectona grandis</i> in different treatments					
编号	单株叶面积/cm ²	单株叶片数/片	主根长/cm	侧根数/条	高径比
T ₁	5.74 ± 0.72 g	7.33 ± 1.53 abc	12.67 ± 2.52 f	4.33 ± 2.52 f	3.40 ± 0.31 ab
T ₂	10.77 ± 0.91 fg	6.67 ± 1.15 bc	21.00 ± 3.61 bcde	16.33 ± 4.73 def	2.95 ± 0.03 ab
T ₃	8.86 ± 0.79 fg	6.33 ± 2.89 c	16.33 ± 2.08 ef	12.00 ± 4.36 ef	3.37 ± 0.25 ab
T ₄	17.73 ± 2.80 def	8.67 ± 1.15 abc	20.33 ± 4.16 bcdef	15.00 ± 9.64 def	2.96 ± 0.22 ab
T ₅	29.35 ± 4.01 d	8.67 ± 1.15 abc	14.67 ± 2.52 ef	16.00 ± 6.08 def	3.14 ± 0.89 ab
T ₆	25.98 ± 3.90 d	9.67 ± 3.21 ab	15.67 ± 2.52 ef	18.67 ± 9.61 cde	2.95 ± 0.38 ab
T ₇	18.99 ± 1.19 de	8.33 ± 0.58 abc	22.00 ± 3.00 bcde	14.00 ± 4.00 def	2.84 ± 0.63 ab
T ₈	24.08 ± 2.25 d	9.00 ± 1.00 abc	26.50 ± 6.50 bc	22.00 ± 5.57 cde	2.65 ± 0.18 b
T ₉	44.91 ± 4.12 c	10.33 ± 1.53 a	26.67 ± 5.51 bc	29.33 ± 4.73 bc	3.23 ± 0.39 ab
T ₁₀	65.59 ± 23.03 b	8.67 ± 1.53 abc	25.13 ± 8.02 bcd	29.00 ± 13.08 bc	2.94 ± 0.13 ab
T ₁₁	63.61 ± 8.22 b	10.33 ± 2.08 a	27.33 ± 1.53 b	38.67 ± 2.52 b	3.69 ± 0.10 a
T ₁₂	124.95 ± 7.62 a	10.00 ± 2.00 a	40.47 ± 4.62 a	77.67 ± 10.26 a	3.07 ± 0.78 ab
T ₁₃	19.09 ± 6.00d e	9.33 ± 1.15 abc	19.20 ± 5.37 cdef	24.67 ± 0.58 cde	2.81 ± 0.49 ab
T ₁₄	17.12 ± 0.49 def	9.33 ± 1.15 abc	20.43 ± 4.14b cdef	26.00 ± 7.81 cd	2.63 ± 0.75 b
T ₁₅	21.88 ± 3.61 de	7.67 ± 0.5 abc	21.03 ± 1.45 bcde	16.00 ± 1.00 def	3.39 ± 0.11 ab
T ₁₆	25.18 ± 3.47 d	9.33 ± 1.53 abc	17.27 ± 0.74 def	22.33 ± 2.52 cde	2.73 ± 0.39 b

说明：同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

表 5 不同配方基质中对柚木生物量和苗木品质的影响

Table 5 Effects on biomass and seedling quality of seedling of <i>Tectona grandis</i> in different treatments					
编号	单株茎叶干质量/g	单株根干质量/g	总生物量/g	根冠比	苗木品质指数
T ₁	4.17 ± 0.04 d	4.20 ± 0.09 e	8.36 ± 0.13 e	1.01 ± 0.02 b	2.28 ± 0.20 d
T ₂	4.34 ± 0.08 d	4.22 ± 0.04 e	8.56 ± 0.11 e	0.97 ± 0.01 b	2.52 ± 0.17 d
T ₃	4.21 ± 0.06 d	4.13 ± 0.06 e	8.34 ± 0.01 e	0.98 ± 0.03 b	2.47 ± 0.36 d
T ₄	4.71 ± 0.04 d	4.52 ± 0.38 de	9.23 ± 0.38 de	0.91 ± 0.01 bc	2.88 ± 0.09 cd
T ₅	5.15 ± 0.10 d	4.54 ± 0.41 de	9.69 ± 0.48 de	0.91 ± 0.04 bc	2.86 ± 0.75 cd
T ₆	5.49 ± 0.07 cd	4.57 ± 0.33 de	10.06 ± 0.35 de	0.90 ± 0.05 bc	2.99 ± 0.57 bcd
T ₇	4.75 ± 0.11 d	4.64 ± 0.17 de	9.39 ± 0.26 de	0.98 ± 0.03 b	3.00 ± 0.63 bcd
T ₈	4.81 ± 0.36 d	4.52 ± 0.11 de	9.33 ± 0.46 de	0.95 ± 0.05 b	3.10 ± 0.32 bcd
T ₉	7.23 ± 0.90 bcd	6.17 ± 0.89 bc	13.40 ± 1.72 bc	0.85 ± 0.06 bc	4.31 ± 0.57 b
T ₁₀	9.36 ± 0.26 b	6.83 ± 1.87 b	16.19 ± 1.72 b	0.64 ± 0.14 d	3.98 ± 1.20 bc
T ₁₁	8.36 ± 2.47 bc	6.04 ± 1.14 bcd	14.40 ± 3.60 b	0.74 ± 0.07 cd	3.31 ± 1.26 bcd
T ₁₂	18.51 ± 6.14 a	23.59 ± 4.54 a	42.10 ± 4.23 a	1.34 ± 0.37 a	5.61 ± 0.62 a
T ₁₃	5.09 ± 0.32 d	4.87 ± 0.55 cde	9.96 ± 0.85 de	0.95 ± 0.06 b	3.20 ± 0.74 bcd
T ₁₄	5.12 ± 0.48 d	5.05 ± 0.41 cde	10.16 ± 0.89 de	0.99 ± 0.02 b	3.47 ± 0.84 bcd
T ₁₅	4.97 ± 0.48 d	5.07 ± 0.11 cde	10.04 ± 0.54 de	1.02 ± 0.09 b	3.12 ± 0.75 bcd
T ₁₆	4.84 ± 0.49 d	4.80 ± 0.32 cde	9.64 ± 0.77 de	0.99 ± 0.06 b	3.15 ± 0.58 bcd

说明：同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

苗木品质指数是综合分析了数个指标计算得出的，能更加全面地反映被测苗木的品质优劣，其他指标，如高径比和冠根比等越小，总干质量数值越大，品质指数就会越高，苗木的品质也就越好。由表 5 可见：不同基质的柚木幼苗的品质指数差异显著。其中 T₉、T₁₀ 和 T₁₂ 配方基质苗木品质指数较大，显著大于对照组(T₁)，而其他配方与 T₁ 差异不显著。

综上所述，不同基质中柚木幼苗的单株茎叶干质量、单株根干质量、总生物量、根冠比、苗木品质指数影响较大，其中苗木品质指数、总生物量、单株茎叶干质量、单株根干质量对柚木幼苗生长影响最大，而对根冠比影响较小，但这些以林业废弃物为基料的配方基质的生物量和苗木品质指数均高于对照组，总体来说对柚木的生长具有很明显的促进作用。

2.3 不同配方基质对柚木幼苗生理的影响

植株生理指标是反映苗木长势强弱的重要指标，可间接反映不同基质配方对柚木幼苗的促进作用。表 6 表明：不同基质中柚木幼苗的总叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白质质量分数和叶绿素 a/b 均存在一定差异，但叶绿素 a/b 差异不明显。可溶性糖是很多植物的主要渗透调节剂，其益于维持植物生长代谢的正常进行，可以用它的质量分数变化来判断植物的生长状态和植物生理，从而间接反映出苗木的生长情况^[34]。T₃，T₁₀，T₁₄ 和 T₁₅ 配方基质可溶性糖质量分数与对照组处于同一水平，T₆ 显著低于对照组，其他均高于对照组，且 T₁₂ 配方基质可溶性糖质量分数最高。T₁₆ 配方基质的可溶性蛋白最高，显著高于对照组，其次是 T₅，T₈，T₉，T₁₀，T₁₁ 和 T₁₅，均高于对照组配方基质。叶绿素作为光合作用的载体，其质量分数的多少是衡量植物叶片光合能力和生长各阶段良好的重要指标之一，而叶绿素 a/b 能够反映植物叶片的光合作用强度^[35]。由表 6 可见：T₁₁ 和 T₁₂ 配方基质的叶绿素质量分数最高，显著高于其他配方基质，其中以黄心土为基料(T₂~T₄)和以沤制松树皮为基料(T₅~T₈)的配方基质的与对照组处于同一水平，而以锯末为基料的配方基质(T₁₃~T₁₆)的总叶绿素质量分数最低，可能的原因是锯末中所含的养分不足以供应植物叶片生长，导致其光合作用能力下降，叶绿素减少。

表 6 不同配方基质中对柚木生理指标的影响

Table 6 Effects on physiological index of seedling of *Tectona grandis* in different treatments

编 号	<i>w</i> _{总叶绿素} / (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b	<i>w</i> _{可溶性糖} / (mg·g ⁻¹)	<i>w</i> _{可溶性蛋白质} / (mg·g ⁻¹)	编 号	<i>w</i> _{总叶绿素} / (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b	<i>w</i> _{可溶性糖} / (mg·g ⁻¹)	<i>w</i> _{可溶性蛋白质} / (mg·g ⁻¹)
T ₁	0.37 ± 0.02 bcde	0.10 ± 0.02 a	0.34 ± 0.04 b	3.00 ± 0.93 c	T ₉	0.50 ± 0.08 ab	0.06 ± 0.01 b	0.26 ± 0.03 ab	4.32 ± 1.22 abc
T ₂	0.35 ± 0.04 cde	0.11 ± 0.01 a	0.27 ± 0.05 ab	3.79 ± 0.20 bc	T ₁₀	0.49 ± 0.12 abcd	0.08 ± 0.02 b	0.32 ± 0.12 b	3.99 ± 1.23 abc
T ₃	0.34 ± 0.04 cde	0.11 ± 0.01 a	0.33 ± 0.02 b	4.51 ± 0.46 abc	T ₁₁	0.54 ± 0.18 a	0.08 ± 0.02 b	0.25 ± 0.06 ab	4.05 ± 0.37 abc
T ₄	0.49 ± 0.11 abc	0.08 ± 0.04 b	0.32 ± 0.07 ab	3.61 ± 0.17 bc	T ₁₂	0.53 ± 0.11 a	0.07 ± 0.02 b	0.51 ± 0.04 a	3.61 ± 1.23 bc
T ₅	0.37 ± 0.07 bcde	0.08 ± 0.04 b	0.24 ± 0.02 ab	4.53 ± 1.07 ab	T ₁₃	0.27 ± 0.02 de	0.11 ± 0.01 a	0.29 ± 0.03 ab	4.09 ± 0.37 abc
T ₆	0.35 ± 0.05 de	0.10 ± 0.02 a	0.21 ± 0.03 c	3.87 ± 0.32 abc	T ₁₄	0.30 ± 0.01 de	0.10 ± 0.02 a	0.32 ± 0.03 b	3.79 ± 0.27 bc
T ₇	0.36 ± 0.02 bcde	0.10 ± 0.00 a	0.29 ± 0.06 ab	3.22 ± 0.33 bc	T ₁₅	0.23 ± 0.01 de	0.10 ± 0.02 a	0.34 ± 0.10 b	4.39 ± 0.50 abc
T ₈	0.37 ± 0.08 bcde	0.09 ± 0.02 b	0.31 ± 0.03 ab	4.23 ± 0.63 abc	T ₁₆	0.28 ± 0.02 de	0.10 ± 0.01 a	0.31 ± 0.06 ab	5.29 ± 1.16 a

说明：同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

综合不同基质对柚木幼苗生理指标的影响，可看出 T₁₀，T₁₁，T₁₂ 和 T₁₅ 表现较好，T₃，T₅，T₈ 和 T₉ 次之。通过对不同基质的柚木形态和生理指标的分析可以看出，与对照相比，T₁₀，T₁₁ 和 T₁₂ 配方基质在整体上表现突出，可以初步确定这 3 种基质配方作为柚木幼苗育苗基质较为适宜。为了进一步确定最佳选择，下面将通过对基质各指标的综合评价进行分析，做出进一步筛选。

在对苗木生长效果评价时，虽然苗木质量指数是较常用的评价育苗效果的参考指标，但仅通过单一指标比较并不能准确地反映各处理苗木的综合性状差异，需要由几个参数共同来确定^[39]。本研究采用模糊数学中隶属函数的方法，求出 15 个主要指标(株高、地径、单株茎叶面积、主根长、侧根数、单株叶片数、高径比、单株茎叶干质量、单株根干质量、总生物量、根冠比、总叶绿素、叶绿素 a/b、可溶性糖、可溶性蛋白质)的隶属函数值平均值，进行综合评价。结果表明(表 7)：T₁₂ 配方基质的育苗效果最佳，综合得分最高，为 0.68；T₁₀ 和 T₁₁ 育苗效果次之，均为 0.42。其中对照组 T₁ 的综合得分最低，其育苗效果最差，而除 T₉ 和 T₁₆ 外，其他林业废弃物为基料的基质的育苗效果一般，因此，可选木纤维为基料的配方基质作为柚木幼苗育苗的最佳基质配方。

3 结论

试验表明：以林业废弃物为基料的配方基质大部分均适宜作为柚木育苗基质，其中以 T₁₀[V(木纤维):V(草炭):V(珍珠岩):V(蛭石)=5:3:1:1]，T₁₁[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=4:3:3]，T₁₂[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=3:4:3]配方基质最佳。这 3 种配方基质均具有利于柚木生长适宜的理化性状，基质质量较轻，易运输，且容重小，基质原料方便易得。T₁₁ 具有较高的有效磷、速效钾和有机质，容重较低，有利于根系的生长和固定。T₁₂ 具有良好的总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度，利于基质对植物固持

表 7 不同基质对柚木的生长发育综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation on growth and development of <i>Tectona grandis</i> in different substrates																
编号	苗高/ cm	地径/ cm	总生物量/ g	地上干质量/ g	地下干质量/ g	主根长/cm	侧根数/条	根冠比	苗高/ 地径	$w_{\text{叶绿素}}$ / (mg·kg ⁻¹)	叶绿素 a/b	$w_{\text{可溶性糖}}$ / (g·kg ⁻¹)	$\rho_{\text{可溶性蛋白质}}$ / (μg·L ⁻¹)	叶面积/ cm ²	叶片数/片	综合评价指数
T ₁	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.08	0.03	0.40	0.62	0.33	0.77	3.6	0.24	0.01	0.48	0.22
T ₂	0.06	0.08	0.01	0.01	0.01	0.31	0.16	0.37	0.41	0.28	0.83	1.6	0.42	0.05	0.41	0.24
T ₃	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.18	0.11	0.38	0.61	0.26	0.87	3.5	0.58	0.03	0.37	0.26
T ₄	0.13	0.12	0.02	0.03	0.02	0.29	0.15	0.33	0.41	0.59	0.38	3.2	0.38	0.10	0.63	0.26
T ₅	0.14	0.17	0.03	0.05	0.02	0.13	0.16	0.33	0.50	0.32	0.46	1.0	0.58	0.19	0.63	0.25
T ₆	0.14	0.22	0.04	0.07	0.02	0.16	0.19	0.31	0.40	0.28	0.78	0.0	0.43	0.16	0.74	0.26
T ₇	0.12	0.17	0.03	0.03	0.02	0.34	0.14	0.38	0.35	0.31	0.68	2.3	0.29	0.11	0.59	0.25
T ₈	0.09	0.16	0.02	0.03	0.02	0.47	0.23	0.35	0.26	0.33	0.59	2.8	0.51	0.15	0.67	0.28
T ₉	0.36	0.38	0.11	0.15	0.09	0.47	0.31	0.28	0.55	0.61	0.09	1.4	0.53	0.31	0.81	0.35
T ₁₀	0.46	0.53	0.18	0.25	0.11	0.43	0.31	0.11	0.40	0.59	0.45	8.6	0.46	0.47	0.63	0.42
T ₁₁	0.63	0.46	0.14	0.21	0.08	0.49	0.42	0.19	0.82	0.70	0.36	1.3	0.47	0.46	0.81	0.42
T ₁₂	0.83	0.82	0.75	0.70	0.79	0.86	0.87	0.67	0.46	0.68	0.35	3.2	0.38	0.94	0.78	0.68
T ₁₃	0.11	0.14	0.04	0.05	0.03	0.26	0.26	0.36	0.34	0.12	0.81	2.4	0.48	0.11	0.70	0.27
T ₁₄	0.11	0.14	0.04	0.05	0.04	0.30	0.28	0.39	0.25	0.18	0.64	3.3	0.42	0.09	0.70	0.26
T ₁₅	0.11	0.15	0.04	0.04	0.04	0.31	0.16	0.42	0.62	0.02	0.82	3.8	0.55	0.13	0.52	0.29
T ₁₆	0.08	0.14	0.03	0.03	0.03	0.21	0.23	0.39	0.30	0.14	0.77	2.8	0.75	0.20	1.04	0.31

能力和保水能力。

T₁₀ 和 T₁₂ 的柚木幼苗生长指标方面优于 T₁₁。在生理指标上，T₁₁ 和 T₁₂ 配方基质优于 T₁₀，理化性质三者相当。由于 T₁₂ 配方基质中草炭质量分数过高，成本高，其实用性和环保性有待改善。因此，根据上述研究结果，T₁₀ 和 T₁₁ 配方基质均可作为柚木幼苗的育苗基质。由该基质培育的柚木幼苗的株高、地径、主根长侧根数、单株叶面积、叶片数、地上部分干质量、地下部分干质量、总生物量以及叶片的可溶性糖、可溶性蛋白质和叶绿素质量分数等均显著优于对照组。

T₁₀ 和 T₁₁ 配方基质的综合评价指数高于对照组和其他配方基质，以 T₁₀ 和 T₁₁ 配方基质替代草炭应用于柚木栽培育苗基质配方具有良好的育苗效果，建议在柚木育苗生产上应用。但研究结果只反映柚木的栽培配方筛选方面上，是否适用于其他植物的配方栽培有待进一步研究。

4 参考文献

[1] 卫星, 李贵雨, 吕琳. 农林废弃物育苗基质的保水保肥效应[J]. 林业科学, 2015, **51**(12): 26 – 34.
WEI Xing, LI Guiyu, LÜ Lin. Water and nutrient preservation of agri-forest residues used as nursery matrix [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(12): 26 – 34.

[2] 戴小红, 孙伟生, 樊权, 等. 农林废弃物混配基质的理化性质及其对油茶幼苗生长效应的综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2016, **25**(1): 54 – 61.
DAI Xiaohong, SUN Weisheng, FAN Quan, *et al.* Physicochemical property of mixed substrates with agricultural and forestry wastes and comprehensive evaluation of their effect on growth of *Camellia oleifera* seedlings [J]. *J Plant Resource Environ*, 2016, **25**(1): 54 – 61.

[3] 田赟, 王海燕, 孙向阳, 等. 农林废弃物环保型基质再利用研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 497 – 502.
TIAN Yun, WANG Haiyan, SUN Xiangyang, *et al.* The progress and prospects of agricultural and forest residue substrate [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42**(2): 497 – 502.

[4] 王旭艳, 林夏珍, 李琳, 等. 几种农林废弃物复合基质的理化特性及对浙江楠容器育苗的效果[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(5): 674 – 680.
WANG Xuyan, LIN Xiazhen, LI Lin, *et al.* Physical and chemical properties of several kinds of agriculture and

- forestry waste composite matrix and their effect on container seedling of *Phoebe chekiangensis* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(5): 674 – 680.
- [5] 李燕, 孙向阳, 龚小强, 等. 蚯蚓堆肥替代草炭作为甘蓝和西葫芦育苗基质研究[J]. 吉林农业大学学报, 2015, **37**(5): 549 – 554.
- LI Yan, SUN Xiangyang, GONG Xiaoqiang, *et al.* Substitution of vermicompost for peat as *Brassica oleracea* L. and *Cucurbita pepo* L. seedling substrates [J]. *J Jilin Agric Univ*, 2015, **37**(5): 549 – 554.
- [6] 曹静, 朱传军, 周岚, 等. 牛粪和绿化废弃物堆肥替代泥炭作为栽培基质对刺槐生长的影响[J]. 河南农业科学, 2017, **46**(2): 100 – 104.
- CAO Jing, ZHU Chuanjun, ZHOU Lan, *et al.* Effects of cow dung and green waste composts used as substitutes of peat matrix on growth of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. *J Henan Agric Sci*, 2017, **46**(2): 100 – 104.
- [7] SHAO Lingzhi, FU Yuming, FU Wenting, *et al.* Effects of aqueous extract of soil like substrate made from three different materials on seed germination and seedling growth of rice [J]. *Acta Astronaut*, 2014, **96**(4): 83 – 88.
- [8] 李萍萍, 朱咏莉. 基于农林废弃物的植物培育基质开发及应用技术研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, **39**(5): 161 – 168.
- LI Pingping, ZHU Yongli. Development and application of plant growing substrates made of agricultural and forestry wastes: a review [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **39**(5): 161 – 168.
- [9] DOTANIYA M L, MEENA V D, MANJU L, *et al.* Teak plantation-a potential source of income generation [J]. *Pop Govern*, 2013, **1**(3): 61 – 63.
- [10] 中国树木志编委会. 中国主要树种造林技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1981.
- [11] 马华明, 梁坤南, 周再知. 我国柚木的研究与发展[J]. 林业科学研究, 2003, **16**(6): 768 – 773.
- MA Huaming, LIANG Kunnan, ZHOU Zaizhi. Research and development of teak in China [J]. *For Res*, 2003, **16**(6): 768 – 773.
- [12] 白灵海, 莫慧华, 梁坤南, 等. 柚木组培瓶苗移植育苗基质筛选试验与分析[J]. 种子, 2013, **32**(9): 10 – 12.
- BAI Linghai, MO Huihua, LIANG Kunnan, *et al.* Selection experiment and analysis of nursery substrate in transplanting the tissue culture seedlings of *Tectona grandis* [J]. *Seed*, 2013, **32**(9): 10 – 12.
- [13] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 等. 柚木无性系苗期抗寒生理评价与选择[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(9): 12 – 17.
- HUANG Guihua, LIANG Kunnan, ZHOU Zaizhi, *et al.* Chilling physiological estimate and early selection of *Tectona grandis* L. f. clones at seedling stage [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(9): 12 – 17.
- [14] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 等. 不同基质配方对柚木组培苗移植效果的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(1): 32 – 36.
- HUANG Guihua, LIANG Kunnan, ZHOU Zaizhi, *et al.* Transplanting effect of *Tectona grandis* tube seedling with light media [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(1): 32 – 36.
- [15] TIAN Yun, SUN Xiangyang, Li Suyan, *et al.* Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Calathea rotundifolia* cv. Fasciata [J]. *Sci Hortic*, 2012, **143**: 15 – 18.
- [16] 程斐, 孙朝晖, 赵玉国, 等. 芦苇末有机栽培基质的基本理化性能分析[J]. 南京农业大学学报, 2001, **24**(3): 19 – 22.
- CHENG Fei, SUN Zhaohui, ZHAO Yuguo, *et al.* Analysis of physical and chemical properties of reed residue substrate [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2001, **24**(3): 19 – 22.
- [17] 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [18] 樊金娟, 阮燕晔. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015.
- [19] 路文静, 李奕松. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [20] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Anal Biochem*, 1976, **72**: 248 – 254.
- [21] 张强, 孙向阳, 任忠秀, 等. 园林绿化废弃物堆肥用作花卉栽培基质的效果评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, **31**(9): 7 – 13.
- ZHANG Qiang, SUN Xiangyang, REN Zhongxiu, *et al.* Effect evaluation of garden waste compost used as floriculture substrate [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2011, **31**(9): 7 – 13.

- [22] 王素娟. 基质、施肥对青冈栎和赤皮青冈容器苗生长的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
WANG Sujuan. *The Effect of Substrate and Fertilization on the Growth of Cyclobalanopsis glauca and Cyclobalanopsis gliva Container Seedlings* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2012.
- [23] 李婧, 郁继华, 颀建明, 等. 育苗基质中腐熟牛粪用量对辣椒穴盘苗质量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, **47**(4): 38 – 42.
LI Jing, YU Jihua, XIE Jianming, *et al.* Effects of decomposed cow dung content in seedling substrates on quality of pepper plug seedling [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2012, **47**(4): 38 – 42.
- [24] 游幕贤. 茶花[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 50 – 51.
- [25] 黄松殿, 梁机, 梁小春, 等. 不同育苗基质对擎天树容器苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(4): 28 – 31.
HUANG Songdian, LIANG Ji, LIANG Xiaochun, *et al.* Effect of different nursery substrates on container seedlings growth of *Parashorea chinensis* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, **28**(4): 28 – 31.
- [26] 李扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 等. 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (增刊): 250 – 255.
LI Yang, QIAO Yuhui, MO Xiaohui, *et al.* Analysis for earthworm feces as one of potential repair agents of heavy metal contamination in soil [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, **29**(suppl): 250 – 255.
- [27] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 117 – 119.
- [28] 朱晓婷, 董立军, 林夏珍. 几种农林废弃物发酵基质与常用轻型基质的理化性质比较[J]. 浙江林业科技, 2011, **31**(2): 57 – 60.
ZHU Xiaoting, DONG Lijun, LIN Xiazhen, *et al.* Comparison on physicochemical properties of common light with that made by agricultural and forestry waste [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2011, **31**(2): 57 – 60.
- [29] 康红梅, 张启翔, 唐菁. 栽培基质的研究进展[J]. 土壤通报, 2005, **36**(1): 124 – 127.
KANG Hongmei, ZHANG Qixiang, TANG Jing. Reserch advances on growth media [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, **36** (1): 124 – 127.
- [30] 杨南, 杨德军, 邱琼, 等. 西南桦穴盘育苗基质配比试验[J]. 四川林业科技, 2017, **38**(1): 65 – 68.
YANG Lan, YANG Dejun, QIU Qiong, *et al.* Substrate composition experiments on *Betula alnoides* seedlings [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2017, **38**(1): 65 – 68.
- [31] 武亚敬, 毕君, 李秋艳, 等. 油松容器育苗香菇渣基质粒径配方筛选[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(3): 483 – 487.
WU Yajing, BI Jun, LI Qiuyan, *et al.* Selection of shiitake residue substrate size formula screening for *Pinus tabuli-formis* container seedlings [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(3): 483 – 487.
- [32] 鲁敏, 姜凤岐, 宋轩. 容器苗质量评定指标的研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(6): 763 – 765.
LU Min, JIANG Fengqi, SONG Xuan. Assessing indices of container seedling quality [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13**(6): 763 – 765.
- [33] 孙燕, 杨秀珍, 钱璐, 等. 花生壳栽培基质对大花蕙兰‘世界和平’生长及生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(4): 566 – 571.
SUN Yan, YANG Xiuzhen, QIAN Lu, *et al.* Growth and physiological characteristics of *Cymbidium hybridum* ‘Shi-jieheping’ in peanut hull media [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(4): 566 – 571.
- [34] 李迎春, 郭子武, 陈双林, 等. 不同淹水条件下河竹叶片光合生理特性的变化[J]. 植物资源与环境学报, 2016, **25**(4): 42 – 52.
LI Yingchun, GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, *et al.* Changes in photosynthetic and physiological characteristics of leaf of *Phyllostachys rivalis* under different flooding conditions [J]. *J Plant Resour Environ*, 2016, **25**(4): 42 – 52.
- [35] 龚小强, 李素艳, 李燕, 等. 绿化废弃物好氧堆肥和蚯蚓堆肥作为蔬菜育苗基质研究[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(2): 280 – 287.
GONG Xiaoqiang, LI Suyan, LI Yan, *et al.* Compost and vermicompost from green wastes as substrates for vegetable seedlings cultivation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(2): 280 – 287.