

# 不同林业废弃物配方基质的理化性质及其对西桦幼苗生长效应的综合评价

艾娟娟<sup>1</sup>, 厚凌宇<sup>1</sup>, 邵国栋<sup>1</sup>, 李智超<sup>1</sup>, 蒙彩兰<sup>2</sup>, 卢立华<sup>2</sup>, 孙启武<sup>1,①</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 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:** 以林业废弃物木纤维、沤制树皮、椰糠和锯末为基质主料, 分别与辅料草炭、黄心土、珍珠岩、蛭石、火烧土和碳化树皮以不同体积比配制 16 种配方基质, 研究了 16 种配方基质的理化性质及其对西桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don) 幼苗的生长和叶片部分生理指标的影响, 综合评价各配方基质对西桦幼苗的育苗效果, 并筛选出适宜西桦幼苗生长的最佳配方基质。结果表明: 16 种配方基质的容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度、电导率和 pH 值分别为 0.21~0.81 g·cm<sup>-3</sup>、35.87%~63.35%、2.00%~21.74%、24.78%~53.03%、0.04~0.15 mS·cm<sup>-1</sup> 和 pH 5.29~pH 7.43, 碱解氮、有效磷、速效钾和有机质的含量分别为 94.50~652.75 mg·kg<sup>-1</sup>、3.37~72.67 mg·kg<sup>-1</sup>、49.50~227.75 mg·kg<sup>-1</sup> 和 5.45~43.80 g·kg<sup>-1</sup>。其中, 以林业废弃物为主料的 T5[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)]=6:3:1 至 T16[V(锯末):V(椰糠):V(火烧土):V(珍珠岩)]=3:3:2:2 配方基质的电导率、持水孔隙度、碱解氮含量、速效钾含量和有机质含量总体上显著高于 T1[V(黄心土):V(锯末):V(火烧土)]=6:3:1 配方基质(对照), 容重显著低于对照。不同配方基质中西桦幼苗的根冠比、单株根干质量和叶片叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值的差异较小, 其他生长指标和生理指标均存在明显差异, 其中, T11[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)]=4:3:3 和 T12[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)]=3:4:3 配方基质中西桦幼苗的单株茎叶干质量、单株根干质量、单株总干质量、株高增长量、地径增长量、高径比、苗木质量指数和叶片总叶绿素含量均高于或显著高于对照, 表现出明显的生长优势。综合评价结果显示: T11 和 T12 配方基质中西桦幼苗的综合评价指数较高, 分别为 0.444 和 0.440, 西桦幼苗实际生长效果也较佳。为了减少草炭使用量, 建议将 T11 配方基质作为西桦幼苗育苗的最佳配方基质。

**关键词:** 林业废弃物; 西桦; 配方基质; 理化性质; 主成分分析; 隶属函数值法

中图分类号: Q948.113; S792.159 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)02-0066-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.09

## Physicochemical property of different forestry waste formula substrates and comprehensive evaluation of their effects on growth of *Betula alnoides* seedlings

AI Juanjuan<sup>1</sup>, HOU Lingyu<sup>1</sup>, SHAO Guodong<sup>1</sup>, LI Zhichao<sup>1</sup>, MENG Cailan<sup>2</sup>, LU Lihua<sup>2</sup>, SUN Qiwu<sup>1,①</sup> (1. Key Laboratory of Forestry Cultivation, 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, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(2): 66-76

**Abstract:** Taking forestry wastes of wood fiber, retted bark, coir dust, and sawdust as main materials of substrates, 16 kinds of formula substrates were prepared in different volume ratios with auxiliary materials such as peat, yellow soil, perlite, vermiculite, burned soil, and carbonized bark, physicochemical property of 16 kinds of formula substrates and their effects on growth and some physiological indexes of leaves of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings were studied, the seedling raising effect of

收稿日期: 2017-08-27

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504205)

作者简介: 艾娟娟(1993—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与植物营养方面的研究。

①通信作者 E-mail: sqw@caf.ac.cn

each formula substrate on *B. alnoides* seedlings was comprehensively evaluated, and the best formula substrate for the growth of *B. alnoides* seedlings was screened out. The results show that bulk density, total porosity, aeration porosity, water-holding porosity, electric conductivity, and pH value of 16 kinds of formula substrates are  $0.21 - 0.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $35.87\% - 63.35\%$ ,  $2.00\% - 21.74\%$ ,  $24.78\% - 53.03\%$ ,  $0.04 - 0.15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ , and pH 5.29 - pH 7.43, respectively, and contents of available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and organic matter are  $94.50 - 652.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $3.37 - 72.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $49.50 - 227.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and  $5.45 - 43.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. In which, electric conductivity, water-holding porosity, available nitrogen content, available potassium content, and organic matter content in T5 [  $V(\text{retted bark}) : V(\text{sawdust}) : V(\text{carbonized bark}) = 6 : 3 : 1$  ] to T16 [  $V(\text{sawdust}) : V(\text{coir dust}) : V(\text{burned soil}) : V(\text{perlite}) = 3 : 3 : 2 : 2$  ] formula substrates taking forestry waste as main materials are generally significantly higher than those in T1 [  $V(\text{yellow soil}) : V(\text{sawdust}) : V(\text{burned soil}) = 6 : 3 : 1$  ] formula substrate (the control), and their bulk density is significantly lower than that in the control. There are small differences in root/shoot ratio, dry weight of root per plant, and ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content in leaves of *B. alnoides* seedlings among different formula substrates, and obvious differences in other growth and physiological indexes. In which, dry weight of shoot per plant, dry weight of root per plant, total dry weight per plant, increment of height, increment of ground diameter, height/ground diameter ratio, seedling quality index, and total chlorophyll content in leaves of *B. alnoides* seedlings in T11 [  $V(\text{wood fiber}) : V(\text{peat}) : V(\text{coir dust}) = 4 : 3 : 3$  ] and T12 [  $V(\text{wood fiber}) : V(\text{peat}) : V(\text{coir dust}) = 3 : 4 : 3$  ] formula substrates are higher or significantly higher than those in the control, showing obvious growth advantages. The comprehensive evaluation result shows that comprehensive evaluation index of T11 and T12 formula substrates is higher, which is 0.444 and 0.440, respectively, and the actual growth effects of *B. alnoides* seedlings in these two substrates are also better. In order to reduce the usage amount of peat, T11 formula substrate is recommended as the best for seedling raising of *B. alnoides* seedlings.

**Key words:** forestry waste; *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don; formula substrate; physicochemical property; principal component analysis; subordinate 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”。林业废弃物具有数量大、易获取、可再生、可生物降解且含有一定养分等优点。长期以来,林业废弃物的处理方式多为丢弃或焚烧,不仅造成资源浪费,而且严重污染环境<sup>[1-3]</sup>。目前,使用广泛且育苗效果较好的基质是草炭,但草炭不可再生且开采受限制,因此,就地取材、开发利用当地可改造再利用的废弃资源,如林业废弃物替代草炭势在必行,这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,并且起到保护环境的作用<sup>[4]</sup>。利用玉米 (*Zea mays* Linn.) 秸秆、甘蔗 (*Saccharum officinarum* Linn.) 渣、木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 皮和花生 (*Arachis hypogaea* Linn.) 壳等农业废弃物作为育苗基质,在园艺、蔬菜、园林花卉和林木等植物培育中已有应用<sup>[5-7]</sup>。目前利用农业废弃物作为育苗基质的研究众多,而将林业废弃物作为林木育苗基质的研究却较少。已有研究表明:大部分类型林业废弃物可通过基质化开发技术实现资源的循环再利用<sup>[8-9]</sup>。合理利用不同林业废弃物的特性并按照不同比例混

配,可为苗木生长提供优良的环境<sup>[3]</sup>。张梅坤<sup>[10]</sup>认为,在  $V(\text{木屑}) : V(\text{椰糠}) : V(\text{泥炭土}) : V(\text{珍珠岩}) = 5 : 2 : 3 : 2$  的配方基质中尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* W. Hill) 移植成活率、株高、地径及根系长度均显著提高。

西桦 (*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don) 隶属于桦木科 (Betulaceae) 桦木属 (*Betula* Linn.), 为高大乔木,具有速生、树体高大、干形通直和材质优良的优点,是中国热带、亚热带地区的优良珍贵乡土用材树种,具有重要的经济和生态价值<sup>[11-12]</sup>。西桦不仅适应性强、耐旱瘠生境,而且其林分具有涵养水源和保持地力等优良特性<sup>[13-14]</sup>,是一种值得推广种植的珍贵树种。目前,西桦常规育苗基质以黄心土(黄壤心土)为主,但其育苗效果及环保性有待进一步改善<sup>[15]</sup>。

鉴于此,本研究以木纤维、沤制树皮、椰糠和锯末等林业废弃物作为西桦幼苗育苗基质主料,分析研究不同配方基质的特性及其对西桦幼苗生长和叶片部分生理指标的影响,通过对不同基质育苗效果的综合评价筛选出育苗效果较好的基质配方,以期最大限度地利用林业废弃物,降低育苗成本,并为南方地区用林

业废弃物替代草炭和黄心土作为西桦的优质育苗基质提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验地概况

实验地位于广西省凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心苗圃(地理坐标为北纬 $21^{\circ}57'$ 、东经 $106^{\circ}47'$ ),地处南亚热带,海拔250 m,属于季风气候,终年温暖湿润。年均气温 $21.5^{\circ}\text{C}$ ;年日照时数 $1\ 218\sim 1\ 620\text{ h}$ ;年降水量 $1\ 200\sim 1\ 400\text{ mm}$ ,降水集中在4月至9月;空气相对湿度80%。

### 1.2 材料

1.2.1 基质配制 以林业废弃物木纤维(WF)、沤制树皮(RB)、椰糠(CD)和锯末(SD)为基质主料。其中,木纤维为进口压缩木纤维,使用前经松散均一化处理;沤制树皮为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)树皮,购自木材加工厂,经粉碎并充分腐熟处理;椰糠购自市场;锯末购自当地木材加工厂,经暴晒干燥处理。以碳化树皮(CB)、草炭(PT)、黄心土(YS)、火烧土(BS)、珍珠岩(PL)和蛭石(VC)为基质辅料。其中,碳化树皮为马尾松树皮,购自木材加工厂,经碳化处理;草炭购自山东商道生物科技股份有限公司广西分公司;黄心土为中国林业科学研究院热带林业实验中心苗圃20~40 cm土层的土壤;火烧土为干枯杂草与土壤经过反复煨烧后打散形成的细小颗粒;珍珠岩和蛭石购自市场。

实验共设置16种配方基质,分别为T1[V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1](对照,CK)、T2[V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1]、T3[V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1]、T4[V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1]、T5[V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1]、T6[V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2]、T7[V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2]、T8[V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2]、T9[V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1]、T10[V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1]、T11[V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3]、T12[V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3]、T13[V(SD):V(CD)=6:4]、T14[V(SD):V(CD)=5:5]、T15[V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1]和T16[V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2]。

1.2.2 供试植物材料 于2016年12月25日选择生长健壮且长势基本一致、株高为 $(4\pm 1)\text{ cm}$ 的西桦组育苗,将幼苗根系附着基质(黄心土)洗净后,分别栽植于装有上述16种配方基质的上、下口径均为20 cm,高25 cm黑色塑料盆中。每盆1株,每种配方基质10盆,3次重复。实验期间采用遮阳网遮光,不进行任何施肥处理,仅定期喷水。

### 1.3 方法

1.3.1 基质理化性质的测定 对上述16种配方基质的理化性质进行测定,参照Tian等<sup>[16]</sup>的方法测定基质的容重、总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度;参照程斐等<sup>[17]</sup>的方法测定基质的电导率和pH值;采用LY/T 1229—1999中的碱解-扩散法<sup>[18]79-80</sup>测定基质的碱解氮含量;采用LY/T 1233—1999中的盐酸-硫酸浸提法<sup>[18]92-93</sup>测定基质的有效磷含量;采用LY/T 1236—1999中的乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[18]103-104</sup>测定基质的速效钾含量;采用LY/T 1237—1999中的重铬酸钾氧化-外加加热法<sup>[18]106-107</sup>测定基质的有机质含量。各指标均重复测定3次。

1.3.2 幼苗生长指标的测定 在2016年12月25日至2017年3月25日期间,每30 d对所有植株调查1次,共调查4次。使用直尺(精度1 mm)测量株高(基质表面到顶芽底部的距离),使用游标卡尺(精度0.1 mm)测量地径(于基质表面处测量)。株高和地径增长量为最后一次测量值与初次测量值的差值。于2017年3月25日,每种基质抽取6株标准植株幼苗(株高和地径接近于平均株高和平均地径的幼苗)分成茎叶和根2部分,使用电子天平(精度0.000 1 g)分别称量单株的茎叶鲜质量和根鲜质量。然后分别装入信封,于 $105^{\circ}\text{C}$ 杀青15 min,再于 $80^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,分别称量单株的茎叶干质量和根干质量。单株总干质量、根冠比、高径比和苗木质量指数(SQI)的计算公式分别为:单株总干质量=单株茎叶干质量+单株根干质量;根冠比=单株根干质量/单株茎叶干质量;高径比=株高/地径;苗木质量指数=单株总干质量/[ (株高/地径)+(单株茎叶干质量/单株根干质量) ]<sup>[19]</sup>。

1.3.3 幼苗叶片部分生理指标的测定 每处理抽取3株标准植株,采集植株自上而下的第3和第4枚叶片混合后进行部分生理指标的测定。叶绿素含量采用无水乙醇法<sup>[20]</sup>进行测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法<sup>[21]</sup>进行测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝G-250比色法<sup>[22]</sup>进行测定。各指标均重复测

定 3 次。

1.3.4 苗木质量评价方法 利用主成分分析法<sup>[23]</sup>对选取的生长指标和部分生理指标进行降维处理, 采用模糊数学中隶属函数值法<sup>[24]</sup>对不同基质中西桦幼苗的生长状况进行综合评价。综合评价指数 (CEI) 的计算公式为:  $CEI = \sum_{i=1}^n W_i Z_i$ 。式中,  $n$  为指标数量,  $W_i$  和  $Z_i$  分别为第  $i$  个指标的权重和隶属函数值。其中,  $W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$ , 式中,  $C_i$  为第  $i$  个苗木质量评价指标载荷;  $Z_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ , 式中,  $X_i$  为  $i$  配方某一指标的测定值,  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为该指标的最小值和最大值。

### 1.4 数据处理与分析

使用 EXCEL 2007 和 SPSS 20.0 统计分析软件进行数据处理和分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验 ( $P < 0.05$ ), 采用 Pearson 法进行相关性分析, 采用隶属函数值法计算不同配方基质中幼苗的综合评价指数。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同林业废弃物配方基质理化性质的分析

不同林业废弃物配方基质的理化指标见表 1。由表 1 可以看出: 16 种配方基质的容重为  $0.21 \sim 0.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 其中, T9 [V(木纤维):V(草炭):V(珍

珠岩):V(蛭石) = 6:2:1:1]、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] 和 T12 [V(木纤维):V(草炭):V(椰糠) = 3:4:3] 配方基质的容重较小, 显著小于 T1 [V(黄心土):V(锯末):V(火烧土) = 6:3:1] 配方基质 (对照, CK), 且 T10 配方基质的容重最小。除 T10、T11、T13 [V(锯末):V(椰糠) = 6:4] 和 T14 [V(锯末):V(椰糠) = 5:5] 配方基质的总孔隙度低于对照或与对照差异不显著外, 其他配方基质的总孔隙度均显著高于对照, 其中, T9 配方基质的总孔隙度最高, T14 配方基质的总孔隙度最低。T6 [V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮) = 5:3:2]、T9 和 T11 配方基质的通气孔隙度较高, 显著高于对照及其他配方基质。T3 [V(黄心土):V(锯末):V(椰糠):V(火烧土) = 4:3:2:1]、T5 [V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮) = 6:3:1]、T8 [V(沤制树皮):V(锯末):V(椰糠):V(碳化树皮) = 3:3:2:2] 和 T12 配方基质的持水孔隙度较高, 均显著高于对照, 且除 T10、T11、T13 和 T14 配方基质的持水孔隙度低于对照或与对照差异不显著外, 其他配方基质的持水孔隙度均显著高于对照。16 种配方基质的电导率为  $0.04 \sim 0.15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ , T2 [V(黄心土):V(锯末):V(椰糠):V(火烧土) = 5:3:1:1] 至 T16 [V(锯末):V(椰糠):V(火烧土):V(珍珠岩) = 3:3:2:2] 配方基质的电导率总体上显著高于对照。除含木纤维的配方基质 (T9 至 T12

表 1 不同林业废弃物配方基质理化性质的比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison on physicochemical property of different forestry waste formula substrates ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

编号 No.	配方 <sup>2)</sup> Formula <sup>2)</sup>	基质 Substrate	BD/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	TP/%	AP/%	WHP/%	EC/ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$
T1 (CK)	V(YS):V(SD):V(BS) = 6:3:1		0.80±0.07a	41.34±0.66f	8.02±0.05d	33.32±0.63f	0.04±0.02g
T2	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS) = 5:3:1:1		0.81±0.03a	52.53±0.33e	10.52±0.23c	42.01±0.53e	0.06±0.00ef
T3	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS) = 4:3:2:1		0.59±0.06b	61.38±3.31ab	8.35±0.08d	53.03±3.35a	0.07±0.01def
T4	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS) = 3:3:3:1		0.56±0.06bc	56.02±2.92cde	12.34±0.23c	43.68±3.09de	0.11±0.01c
T5	V(RB):V(SD):V(CB) = 6:3:1		0.52±0.06bc	60.25±2.05abc	7.71±1.77de	52.55±0.48a	0.13±0.01ab
T6	V(RB):V(SD):V(CB) = 5:3:2		0.48±0.03bcd	59.54±0.95abc	15.55±1.78b	43.99±2.73de	0.13±0.00abc
T7	V(RB):V(SD):V(CB) = 4:4:2		0.50±0.06bcd	53.27±0.70de	6.29±0.04de	46.98±0.66cd	0.13±0.01abc
T8	V(RB):V(SD):V(CD):V(CB) = 3:3:2:2		0.47±0.05bcd	57.22±2.36bcd	6.36±0.25de	50.86±2.56abc	0.14±0.02a
T9	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC) = 6:2:1:1		0.26±0.07f	63.35±1.20a	21.74±0.44a	41.61±1.36e	0.05±0.01fg
T10	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC) = 5:3:1:1		0.21±0.04f	44.66±2.86f	10.84±0.44c	33.83±2.62f	0.08±0.01d
T11	V(WF):V(PT):V(CD) = 4:3:3		0.39±0.10e	40.34±3.86f	15.56±2.25b	24.78±1.61g	0.05±0.01fg
T12	V(WF):V(PT):V(CD) = 3:4:3		0.26±0.08f	58.82±4.58bc	6.62±3.07de	52.20±7.62ab	0.07±0.01de
T13	V(SD):V(CD) = 6:4		0.49±0.10bcd	38.85±2.33fg	2.00±0.20f	36.86±2.53f	0.12±0.01bc
T14	V(SD):V(CD) = 5:5		0.45±0.07cd	35.87±2.30g	3.57±0.68f	32.30±1.62f	0.13±0.01abc
T15	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL) = 4:4:1:1		0.46±0.07cd	53.15±0.83de	5.55±0.33e	47.60±0.94bcd	0.15±0.01a
T16	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL) = 3:3:2:2		0.56±0.08bc	52.26±0.58e	10.49±0.24c	41.78±0.68e	0.14±0.01a

续表1 Table 1 (Continued)

编号 No.	配方 <sup>2)</sup> Formula <sup>2)</sup>	基质 Substrate	pH	C <sub>AN</sub> /mg · kg <sup>-1</sup>	C <sub>AP</sub> /mg · kg <sup>-1</sup>	C <sub>AK</sub> /mg · kg <sup>-1</sup>	C <sub>OM</sub> /g · kg <sup>-1</sup>
T1(CK)	V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1		7.08±0.06cd	94.50±0.00j	36.53±0.37d	50.62±3.83j	7.26±1.45f
T2	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1		7.05±0.02cde	117.83±41.02ij	26.96±0.59e	49.50±1.46j	5.45±0.08f
T3	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1		7.02±0.08de	120.75±1.75hi	34.93±1.04d	84.61±2.53g	7.02±0.28f
T4	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1		7.12±0.05bc	112.00±3.50ij	41.80±2.08bcd	119.08±3.14e	12.68±1.85e
T5	V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1		7.00±0.05e	309.75±1.75d	46.55±2.37bc	94.03±1.11f	29.97±2.16bcd
T6	V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2		6.85±0.02f	297.50±7.00de	32.70±2.79de	118.12±0.48e	33.58±1.69b
T7	V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2		6.82±0.03f	280.00±10.50ef	34.53±1.48d	123.23±5.71e	32.16±6.08bc
T8	V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2		6.72±0.07g	266.00±7.00f	75.78±5.35a	136.31±1.73d	31.09±3.15bc
T9	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1		5.46±0.07j	490.00±7.00c	12.02±0.67ef	81.50±2.63h	29.26±0.63bcd
T10	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1		5.29±0.07k	542.50±7.00b	19.54±0.63ef	63.87±3.53i	25.67±0.56d
T11	V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3		5.73±0.07i	545.77±23.01b	72.67±3.01a	156.26±2.26c	40.82±1.94a
T12	V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3		5.51±0.03j	652.75±19.25a	25.72±0.37f	92.59±6.64f	32.58±3.94bc
T13	V(SD):V(CD)=6:4		6.36±0.01h	147.00±7.00g	42.17±4.23bc	227.59±1.20a	43.80±3.94a
T14	V(SD):V(CD)=5:5		6.39±0.02h	144.67±10.69gh	51.52±1.41b	227.75±2.87a	43.51±2.11a
T15	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1		7.16±0.04b	143.50±10.50gh	8.63±1.16g	193.12±6.32b	27.54±3.72cd
T16	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2		7.43±0.05a	126.00±6.06ghi	3.37±0.44h	197.43±1.54b	12.99±1.85e

<sup>1)</sup>BD: 容重 Bulk density; TP: 总孔隙度 Total porosity; AP: 通气孔隙度 Aeration porosity; WHP: 持水孔隙度 Water-holding porosity; EC: 电导率 Electric conductivity; pH: pH 值 pH value; C<sub>AN</sub>: 碱解氮含量 Available nitrogen content; C<sub>AP</sub>: 有效磷含量 Available phosphorus content; C<sub>AK</sub>: 速效钾含量 Available potassium content; C<sub>OM</sub>: 有机质含量 Organic matter content. 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup>YS: 黄心土 Yellow soil; SD: 锯末 Sawdust; BS: 火烧土 Burned soil; CD: 椰糠 Coir dust; RB: 沤制树皮 Retted bark; CB: 碳化树皮 Carbonized bark; WF: 木纤维 Wood fiber; PT: 草炭 Peat; PL: 珍珠岩 Perlite; VC: 蛭石 Vermiculite.

配方基质)偏酸性(pH 5.29~pH 5.73)外,其他配方基质均近中性(pH 6.36~pH 7.43)。T2至T16配方基质的碱解氮、速效钾和有机质含量总体上显著高于对照;除T5、T8、T11、T13和T14配方基质的有效磷含量显著高于对照外,其他配方基质的有效磷含量低于对照或与对照差异不显著。其中,T9至T12配方基质的碱解氮和有机质含量总体上较高,而速效钾和有效磷含量相对较低。

## 2.2 不同林业废弃物配方基质对西桦幼苗生长和叶片部分生理指标的影响

### 2.2.1 对幼苗生长指标的影响

不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗生长指标的测定结果见表2。由表2可以看出:不同配方基质中西桦幼苗的单株茎叶干质量、单株总干质量、株高增长量、地径增长量、高径比和苗木质量指数均存在一定的差异,但单株根干质量和根冠比总体上无显著差异。T11[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=4:3:3]和T12[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=3:4:3]配方基质中幼苗的单株茎叶干质量和单株总干质量较高,T6[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)=5:3:2]和T12配方基质中幼苗的单株根干质量和苗木质量指数较高,明显高于T1[V(黄心土):V(锯末):V(火烧土)=6:3:1]配方

基质(对照,CK)及其他配方基质,其中T12配方基质中幼苗的单株茎叶干质量和单株总干质量显著高于对照。

除T13[V(锯末):V(椰糠)=6:4]配方基质外,其他配方基质中西桦幼苗的株高增长量均高于对照,其中,T10[V(木纤维):V(草炭):V(珍珠岩):V(蛭石)=5:3:1:1]、T11和T12配方基质中幼苗的株高增长量分别为3.79、3.66和3.34 cm,均显著高于对照。除T16[V(锯末):V(椰糠):V(火烧土):V(珍珠岩)=3:3:2:2]配方基质外,其他配方基质中幼苗的地径增长量均高于对照,其中,T7[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)=4:4:2]、T11和T12配方基质中幼苗的地径增长量较高,分别为0.56、0.56和0.69 cm,均显著高于对照。除T3[V(黄心土):V(锯末):V(椰糠):V(火烧土)=4:3:2:1]、T5[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)=6:3:1]、T6和T14[V(锯末):V(椰糠)=5:5]配方基质外,其他配方基质中幼苗的高径比均大于对照,其中T11配方基质中幼苗的高径比最大,且与对照间差异显著。

总体来看,T6、T7、T10、T11和T12配方基质对西桦幼苗生长的促进作用显著高于其他配方基质,育苗效果较好。

表 2 不同林业废弃物配方基质对西桦幼苗生长指标的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>Table 2 Effects of different forestry waste formula substrates on growth indexes of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

编号 No.	配方 <sup>2)</sup> Formula <sup>2)</sup>	基质 Substrate	单株茎叶干质量/g Dry weight of shoot per plant	单株根干质量/g Dry weight of root per plant	单株总干质量/g Total dry weight per plant	根冠比 Root/shoot ratio
T1 (CK)	$V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1$		0.20±0.06bc	0.10±0.01ab	0.30±0.07bcd	0.52±0.15a
T2	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1$		0.22±0.04bc	0.10±0.04ab	0.32±0.07bcd	0.48±0.18a
T3	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1$		0.16±0.02c	0.08±0.01ab	0.24±0.02cd	0.52±0.12a
T4	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1$		0.18±0.10c	0.10±0.03ab	0.28±0.13cd	0.60±0.16a
T5	$V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1$		0.16±0.04c	0.11±0.02ab	0.27±0.05cd	0.72±0.19a
T6	$V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2$		0.24±0.04abc	0.16±0.06a	0.40±0.10abc	0.64±0.16a
T7	$V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2$		0.21±0.05bc	0.11±0.04ab	0.32±0.09bcd	0.52±0.06a
T8	$V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2$		0.22±0.08bc	0.12±0.04ab	0.34±0.12bcd	0.58±0.06a
T9	$V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1$		0.24±0.08abc	0.08±0.03ab	0.32±0.07bcd	0.38±0.23a
T10	$V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1$		0.21±0.11bc	0.10±0.07ab	0.31±0.12bcd	0.57±0.49a
T11	$V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3$		0.31±0.02ab	0.15±0.06ab	0.46±0.08ab	0.46±0.16a
T12	$V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3$		0.35±0.06a	0.16±0.01a	0.50±0.06a	0.46±0.06a
T13	$V(SD):V(CD)=6:4$		0.15±0.04c	0.08±0.01ab	0.23±0.05d	0.55±0.09a
T14	$V(SD):V(CD)=5:5$		0.19±0.06bc	0.12±0.08ab	0.31±0.13bcd	0.58±0.22a
T15	$V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1$		0.14±0.08c	0.09±0.04ab	0.23±0.10cd	0.67±0.28a
T16	$V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2$		0.16±0.04c	0.07±0.01b	0.23±0.05d	0.47±0.15a

  

编号 No.	配方 <sup>2)</sup> Formula <sup>2)</sup>	基质 Substrate	株高增长量/cm Increment of height	地径增长量/cm Increment of ground diameter	高径比 Height/ground diameter ratio	苗木质量指数 Seedling quality index
T1 (CK)	$V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1$		2.02±0.08d	0.35±0.08cd	6.05±0.90bc	0.036±0.003ab
T2	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1$		2.06±0.46d	0.52±0.10abc	6.16±0.87bc	0.039±0.013ab
T3	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1$		2.14±0.21d	0.50±0.03abc	5.87±1.31bc	0.032±0.002b
T4	$V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1$		2.23±0.19d	0.52±0.10abc	6.28±0.73bc	0.034±0.014ab
T5	$V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1$		2.59±0.54cd	0.46±0.13bcd	5.03±0.42c	0.041±0.005ab
T6	$V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2$		2.50±0.40cd	0.47±0.09bcd	5.56±0.60c	0.058±0.020a
T7	$V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2$		2.85±0.75bcd	0.56±0.02ab	6.42±0.80bc	0.038±0.009ab
T8	$V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2$		2.75±0.74cd	0.44±0.15bcd	6.06±0.97bc	0.043±0.011ab
T9	$V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1$		2.88±0.29bcd	0.53±0.10abc	7.94±1.89ab	0.029±0.008b
T10	$V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1$		3.79±0.71a	0.44±0.08bcd	7.88±1.51ab	0.031±0.016b
T11	$V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3$		3.66±0.74ab	0.56±0.05ab	9.39±1.96a	0.041±0.013ab
T12	$V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3$		3.34±0.59abc	0.69±0.10a	8.03±1.35ab	0.050±0.007ab
T13	$V(SD):V(CD)=6:4$		1.99±0.38d	0.54±0.08abc	6.83±0.78bc	0.026±0.003b
T14	$V(SD):V(CD)=5:5$		2.21±0.34d	0.44±0.14bcd	5.59±0.98c	0.046±0.029ab
T15	$V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1$		2.40±0.20d	0.51±0.06bcd	6.54±0.53bc	0.029±0.014b
T16	$V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2$		2.06±0.29d	0.29±0.13d	6.28±0.56bc	0.027±0.006b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> YS: 黄心土 Yellow soil; SD: 锯末 Sawdust; BS: 火烧土 Burned soil; CD: 椰糠 Coir dust; RB: 沤制树皮 Retted bark; CB: 碳化树皮 Carbonized bark; WF: 木纤维 Wood fiber; PT: 草炭 Peat; PL: 珍珠岩 Perlite; VC: 蛭石 Vermiculite.

2.2.2 对幼苗叶片部分生理指标的影响 不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗叶片部分生理指标的测定结果见表 3。由表 3 可以看出: T10 配方基质中西桦幼苗叶片总叶绿素含量最高, 达  $1.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 为对照的 1.70 倍; T4 [ $V(\text{黄心土}):V(\text{锯末}):V(\text{椰糠}):V(\text{火烧土})=3:3:3:1$ ] 配方基质中幼苗叶片总叶绿素含量也较高, 为  $1.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 二者均显著高于对照。除 T10、T11 和 T16 配方基质中幼苗叶片叶绿素

*a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值 ( $\text{Chla}/\text{Chlb}$ ) 显著高于对照外, 其他配方基质中幼苗叶片  $\text{Chla}/\text{Chlb}$  值均与对照差异不显著或低于对照。T2 [ $V(\text{黄心土}):V(\text{锯末}):V(\text{椰糠}):V(\text{火烧土})=5:3:1:1$ ] 配方基质中幼苗叶片可溶性糖含量最高, 为  $4.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 显著高于对照; T13、T14 和 T16 配方基质中幼苗叶片可溶性糖含量较高, 显著高于对照; T9 [ $V(\text{木纤维}):V(\text{草炭}):V(\text{珍珠岩}):V(\text{蛭石})=6:2:1:1$ ]、T10、T11 和

T12 配方基质中幼苗叶片可溶性糖含量较低,显著低于对照。16 种配方基质中,T13 配方基质中幼苗叶片可溶性蛋白质含量最高,为  $3.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,显著高于对照;T3 和 T15 [V(锯末):V(椰糠):V(火烧土):V(珍珠岩)=4:4:1:1] 配方基质中幼苗叶片可溶性蛋白质含量较高,显著高于对照;T9 配方基质中幼苗叶

片可溶性蛋白质含量最低,但与对照差异不显著。

上述分析结果显示:不同配方基质对西桦幼苗叶片的总叶绿素含量和可溶性糖含量的影响较大,而对 Chla/Chlb 值的影响却较小。其中,T2、T4、T10、T12、T13 和 T15 配方基质中西桦幼苗叶片部分生理指标较优。

表 3 不同林业废弃物配方基质对西桦幼苗叶片部分生理指标的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of different forestry waste formula substrates on some physiological indexes of leaves of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

基质 Substrate		叶片部分生理指标 Some physiological indexes of leaves			
编号 No.	配方 <sup>2)</sup> Formula <sup>2)</sup>	总叶绿素	Chla/Chlb <sup>3)</sup>	可溶性糖	可溶性蛋白质
		含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$		含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
		Total chlorophyll content		Soluble sugar content	Soluble protein content
T1 (CK)	V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1	0.67±0.06e	3.31±0.06b	2.68±0.32d	2.33±0.13de
T2	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1	0.87±0.05bcde	3.32±0.13b	4.24±1.00a	2.82±0.55cde
T3	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1	0.84±0.12bcde	2.83±0.88c	3.29±0.60bed	3.65±0.24ab
T4	V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1	1.12±0.06a	3.50±0.04ab	3.70±0.23abc	3.19±0.17abc
T5	V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1	0.81±0.08cde	3.72±0.01ab	2.73±0.53d	3.30±0.23abc
T6	V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2	0.76±0.06de	3.68±0.18ab	2.64±0.03d	3.49±0.14abc
T7	V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2	0.79±0.18cde	3.77±0.15ab	2.81±0.20d	2.99±0.18bde
T8	V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2	0.83±0.20cde	3.74±0.24ab	3.10±0.77cd	3.18±0.36abc
T9	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1	1.05±0.01abc	3.81±0.03ab	1.21±0.23e	1.92±0.12e
T10	V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1	1.14±0.14a	3.86±0.03a	1.56±0.63e	2.71±1.12cde
T11	V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3	0.98±0.03abcd	3.87±0.19a	1.12±0.05e	2.44±0.30cde
T12	V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3	1.10±0.26ab	3.77±0.28ab	1.88±0.30e	2.66±0.23cde
T13	V(SD):V(CD)=6:4	1.03±0.20abc	3.72±0.18ab	3.96±0.12ab	3.98±0.33a
T14	V(SD):V(CD)=5:5	0.89±0.19abcde	3.76±0.08ab	3.91±0.15ab	3.23±0.87abc
T15	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1	0.85±0.16bcde	3.56±0.21ab	3.74±0.02abc	3.34±1.80ab
T16	V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2	0.74±0.10de	3.85±0.04a	4.02±0.11ab	2.91±0.43bcde

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> YS: 黄心土 Yellow soil; SD: 锯末 Sawdust; BS: 火烧土 Burned soil; CD: 椰糠 Coir dust; RB: 沤制树皮 Retted bark; CB: 碳化树皮 Carbonized bark; WF: 木纤维 Wood fiber; PT: 草炭 Peat; PL: 珍珠岩 Perlite; VC: 蛭石 Vermiculite.

<sup>3)</sup> Chla/Chlb: 叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content.

### 2.3 不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗苗木质量综合评价

不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗的生长指标和叶片部分生理指标的主成分分析和相关性分析结果分别见表 4 和表 5。

结果显示:特征值大于 1 的主成分有 4 个,这 4 个主成分的累计贡献率达 80.910%,说明这 4 个主成分能够基本概括不同林业废弃物配方基质对西桦幼苗生长的影响。本研究中,将各主成分中载荷大于等于 0.500 的指标筛选出来,其中,第 1 主成分中单株茎叶干质量、单株根干质量、单株总干质量和苗木质量指数的正载荷较高,且这 4 个指标间极显著相关,因此将载荷较大的苗木质量指数纳入最小数据

集;第 2 主成分中株高增长量、地径增长量、高径比和叶片总叶绿素含量的正载荷较高,由于地径增长量与株高增长量和高径比不显著相关,而高径比、株高增长量和叶片总叶绿素含量间极显著相关,因此将地径增长量和高径比纳入最小数据集;第 3 主成分中叶片可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量的载荷较高,且二者极显著相关,因此将载荷较高的叶片可溶性糖含量纳入最小数据集;第 4 主成分中根冠比的载荷较高,因此将根冠比纳入最小数据集。综上所述,选取根冠比、地径增长量、高径比、苗木质量指数以及叶片可溶性糖含量纳入最终的最小数据集作为苗木质量综合评价指标,这些指标能够反映绝大部分西桦幼苗的生长信息。

运用隶属函数值和权重计算函数确定最小数据集集中各指标的隶属函数值和权重, 然后计算不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗的综合评价指数。综合评价结果(表 6)显示: T11[ $V(\text{木纤维}) : V(\text{草炭}) : V(\text{椰糠}) = 4 : 3 : 3$ ] 配方基质中西桦幼苗的综合评价指数最大(0.444), 育苗效果最好; T12[ $V(\text{木纤维}) :$

$V(\text{草炭}) : V(\text{椰糠}) = 3 : 4 : 3$ ] 配方基质中西桦幼苗的综合评价指数次之(0.440); T1[ $V(\text{黄心土}) : V(\text{锯末}) : V(\text{火烧土}) = 6 : 3 : 1$ ] 配方基质(对照, CK)中西桦幼苗的综合评价指数最小(0.287), 育苗效果最差; 其他配方基质的育苗效果一般, 西桦幼苗的综合评价指数为 0.319~0.439, 但均高于对照。

表 4 不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗生长指标和叶片部分生理指标的主成分分析<sup>1)</sup>

Table 4 Principal component analysis on growth indexes and some physiological indexes of leaves of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings in different forestry waste formula substrates<sup>1)</sup>

主成分 Principal component	载荷 Loading							
	DWS	DWR	TDW	R/T	IH	IGD	H/GD	SQI
1	0.730	0.878	0.875	0.117	0.011	0.207	-0.096	0.955
2	0.287	0.214	0.294	-0.045	0.617	0.743	0.621	-0.054
3	0.240	0.146	0.233	-0.041	0.603	-0.151	0.276	0.055
4	-0.547	0.326	-0.280	0.938	0.043	0.078	-0.514	0.215

  

主成分 Principal component	载荷 Loading				特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	TCC	Chla/Chlb	SSC	SPC			
1	0.317	0.159	0.037	-0.135	4.935	41.122	41.122
2	0.767	0.464	-0.327	0.196	2.099	17.489	58.611
3	-0.121	-0.235	-0.866	-0.835	1.597	13.311	71.922
4	-0.146	0.212	0.005	0.241	1.079	8.988	80.910

<sup>1)</sup> DWS: 单株茎叶干质量 Dry weight of shoot per plant; DWR: 单株根干质量 Dry weight of root per plant; TDW: 单株总干质量 Total dry weight per plant; R/T: 根冠比 Root/shoot ratio; IH: 株高增长量 Increment of height; IGD: 地径增长量 Increment of ground diameter; H/GD: 高径比 Height/ground diameter ratio; SQI: 苗木质量指数 Seedling quality index; TCC: 叶片总叶绿素含量 Total chlorophyll content in leaf; Chla/Chlb: 叶片叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content in leaf; SSC: 叶片可溶性糖含量 Soluble sugar content in leaf; SPC: 叶片可溶性蛋白质含量 Soluble protein content in leaf.

表 5 不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗生长指标和叶片部分生理指标的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis on growth indexes and some physiological indexes of leaves of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings in different forestry waste formula substrates<sup>1)</sup>

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient												
	DWS	DWR	TDW	R/T	IH	IGD	H/GD	SQI	TCC	Chla/Chlb	SSC	SPC	
DWS	1.000												
DWR	0.546**	1.000											
TDW	0.947**	0.785**	1.000										
R/T	-0.461**	0.427**	-0.178	1.000									
IH	0.338*	0.242	0.342*	-0.062	1.000								
IGD	0.287*	0.268	0.314*	-0.028	0.249	1.000							
H/GD	0.444**	0.023	0.337*	-0.420**	0.475**	0.219	1.000						
SQI	0.582**	0.888**	0.770**	0.271	0.057	0.170	-0.259	1.000					
TCC	0.550**	0.327*	0.532**	-0.179	0.589**	0.504**	0.599**	0.134	1.000				
Chla/Chlb	0.275	0.145	0.259	-0.132	0.315*	0.143	0.123	0.141	0.025	1.000			
SSC	-0.401**	-0.262	-0.396**	0.091	-0.681**	-0.235	-0.475**	-0.125	-0.531**	-0.440**	1.000		
SPC	-0.415**	-0.251	-0.402**	0.113	-0.216	0.050	-0.210	-0.212	-0.367*	-0.155	0.465**	1.000	

<sup>1)</sup> DWS: 单株茎叶干质量 Dry weight of shoot per plant; DWR: 单株根干质量 Dry weight of root per plant; TDW: 单株总干质量 Total dry weight per plant; R/T: 根冠比 Root/shoot ratio; IH: 株高增长量 Increment of height; IGD: 地径增长量 Increment of ground diameter; H/GD: 高径比 Height/ground diameter ratio; SQI: 苗木质量指数 Seedling quality index; TCC: 叶片总叶绿素含量 Total chlorophyll content in leaf; Chla/Chlb: 叶片叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content in leaf; SSC: 叶片可溶性糖含量 Soluble sugar content in leaf; SPC: 叶片可溶性蛋白质含量 Soluble protein content in leaf. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .



表6 不同林业废弃物配方基质中西桦幼苗育苗效果的综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation on seedling raising effect of *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don seedlings in different forestry waste formula substrates

基质编号 <sup>1)</sup> No. of substrate <sup>1)</sup>	隶属函数值 Subordinate function value					综合评价指数 Comprehensive evaluation index	排序 Order
	根冠比 Root/shoot ratio	地径增长量 Increment of ground diameter	高径比 Height/ground diameter ratio	苗木质量指数 Seedling quality index	叶片可溶性糖含量 Soluble sugar content in leaf		
T1 (CK)	0.192	0.575	0.488	0.210	0.055	0.287	16
T2	0.342	0.313	0.204	0.328	0.402	0.319	15
T3	0.340	0.543	0.220	0.253	0.544	0.371	12
T4	0.431	0.557	0.199	0.290	0.640	0.417	6
T5	0.563	0.474	0.084	0.409	0.413	0.389	10
T6	0.274	0.819	0.434	0.543	0.212	0.439	3
T7	0.343	0.621	0.222	0.360	0.432	0.385	11
T8	0.402	0.452	0.223	0.430	0.499	0.401	8
T9	0.509	0.551	0.275	0.210	0.649	0.432	4
T10	0.296	0.563	0.188	0.376	0.767	0.432	4
T11	0.406	0.451	0.178	0.484	0.691	0.444	1
T12	0.475	0.486	0.152	0.672	0.392	0.440	2
T13	0.398	0.439	0.515	0.247	0.139	0.341	13
T14	0.279	0.623	0.699	0.403	0.033	0.394	9
T15	0.287	0.231	0.253	0.172	0.717	0.334	14
T16	0.374	0.595	0.248	0.167	0.703	0.406	7
权重 Weight	0.192	0.575	0.488	0.210	0.055		

<sup>1)</sup> T1: V(YS):V(SD):V(BS)=6:3:1; T2: V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=5:3:1:1; T3: V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=4:3:2:1; T4: V(YS):V(SD):V(CD):V(BS)=3:3:3:1; T5: V(RB):V(SD):V(CB)=6:3:1; T6: V(RB):V(SD):V(CB)=5:3:2; T7: V(RB):V(SD):V(CB)=4:4:2; T8: V(RB):V(SD):V(CD):V(CB)=3:3:2:2; T9: V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=6:2:1:1; T10: V(WF):V(PT):V(PL):V(VC)=5:3:1:1; T11: V(WF):V(PT):V(CD)=4:3:3; T12: V(WF):V(PT):V(CD)=3:4:3; T13: V(SD):V(CD)=6:4; T14: V(SD):V(CD)=5:5; T15: V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=4:4:1:1; T16: V(SD):V(CD):V(BS):V(PL)=3:3:2:2. YS: 黄心土 Yellow soil; SD: 锯末 Sawdust; BS: 火烧土 Burned soil; CD: 椰糠 Coir dust; RB: 沤制树皮 Retted bark; CB: 碳化树皮 Carbonized bark; WF: 木纤维 Wood fiber; PT: 草炭 Peat; PL: 珍珠岩 Perlite; VC: 蛭石 Vermiculite.

### 3 讨论和结论

基质是培育幼苗的基础条件,也是决定幼苗质量的关键因子,其特性决定了幼苗水分和养分的供给状况以及生长发育情况<sup>[25-26]</sup>。基质的容重、通气性能、电导率以及 pH 值是影响苗木生长的主要因子<sup>[27]</sup>。理想基质的容重为 0.1~0.8 g·cm<sup>-3</sup><sup>[28]</sup>,总孔隙度为 60%~95%<sup>[29]</sup>,通气孔隙度为 15%~30%<sup>[30]</sup>,电导率应小于 2.5 mS·cm<sup>-1</sup><sup>[31]</sup>,酸碱性接近中性<sup>[28]</sup>。本研究中,16 种配方基质的容重为 0.21~0.81 g·cm<sup>-3</sup>,基本上符合理想基质容重范围,且随着黄心土的减少,基质容重逐渐减小。16 种配方基质的总孔隙度为 35.87%~63.35%,仅 T3[V(黄心土):V(锯末):V(椰糠):V(火烧土)=4:3:2:1]、T5[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)=6:3:1]和 T9[V(木纤维):V(草炭):V(珍珠岩):V(蛭石)=6:2:1:1]配方基质的总孔隙度在理想基质总孔隙度范围内,其他配方基

质的总孔隙度均低于 60%。16 种配方基质的电导率为 0.04~0.15 mS·cm<sup>-1</sup>,符合理想基质电导率范围。16 种配方基质的通气孔隙度总体上较低,仅 T6[V(沤制树皮):V(锯末):V(碳化树皮)=5:3:2]、T9 和 T11[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=4:3:3]配方基质的通气孔隙度在理想基质通气孔隙度范围内,其他配方基质通气性能较差,不利于根系通气。16 种配方基质的酸碱度为 pH 5.29~pH 7.43,其中以木纤维为主料的 T9、T10[V(木纤维):V(草炭):V(珍珠岩):V(蛭石)=5:3:1:1]、T11 和 T12[V(木纤维):V(草炭):V(椰糠)=3:4:3]配方基质均为酸性,其他配方基质均接近中性。由实验结果可见:这 4 种以木纤维为主料的配方基质的酸碱度虽然不在理想范围内,但其幼苗的株高增长量和地径增长量均较高,具有较好的育苗效果,推测原因包括 2 个方面:一方面可能是西桦为南方树种,酸性环境更利于其生长,另一方面可能是这 4 种配方基质中碱解氮和有机质含量较高,而较高的有机质含量利于根系发育和苗

木生长<sup>[32]</sup>。由实验结果还可见:T9、T10、T11和T12配方基质的碱解氮含量显著高于其他配方基质,这4种配方基质中幼苗叶片总叶绿素含量也较高,推测原因为氮素是叶绿素的组成成分,当基质中氮含量供应充分时,植物叶片大而鲜绿,叶绿素含量也相对较高<sup>[33]</sup>,这与陈红琳等<sup>[34]</sup>的研究结果一致;还可能是较高的碱解氮含量能促进西桦幼苗生长,这与林韧安等<sup>[35]</sup>的相关研究结论一致。T8[V(沤制树皮):V(锯末):V(椰糠):V(碳化树皮)=3:3:2:2)、T13[V(锯末):V(椰糠)=6:4]和T14[V(锯末):V(椰糠)=5:5]配方基质的有效磷和速效钾含量均较高,但实际育苗效果并不理想,一方面可能是当磷含量达到一定程度后,磷含量的增加对苗木生长的促进作用并不显著,另一方面可能是较高的钾含量不利于西桦幼苗的生长,破坏了其体内原有的养分平衡,具体原因有待后续研究。

植株生长指标反映植株长势强弱,可直观判断基质对植物生长影响的差异,而植株的生理生化指标可间接反映不同配方基质对植物生长的影响<sup>[36]</sup>。叶绿素作为光合作用的载体,其含量是衡量植物叶片光合能力和各生长阶段状况的重要指标之一<sup>[37]</sup>。本研究中,以林业废弃物为主料的T2[V(黄心土):V(锯末):V(椰糠):V(火烧土)=5:3:1:1]至T16[V(锯末):V(椰糠):V(火烧土):V(珍珠岩)=3:3:2:2]配方基质中西桦幼苗叶片总叶绿素含量明显高于T1[V(黄心土):V(锯末):V(火烧土)=6:3:1]配方基质(对照)。可溶性糖是多种植物的主要渗透调节物质,可以通过其含量变化来判断植物的生长状态和植物生理活性,从而间接反映苗木的生长情况<sup>[38-39]</sup>。研究结果表明:T9、T10、T11和T12配方基质中西桦幼苗叶片可溶性糖含量较低,而其他配方基质中幼苗叶片可溶性糖含量较高,且这4种配方基质中西桦幼苗生长状况较好,这与已有研究结果<sup>[28,40]</sup>不一致。究其原因可能是:一方面T9、T10、T11和T12配方基质的持水孔隙度相对较小,其他配方基质的水分积累相对较多,而西桦不耐水浸,可能在一定程度上对幼苗造成了淹涝胁迫的影响,而受到淹涝胁迫时,植物根、茎、叶的可溶性糖含量会显著升高<sup>[41]</sup>;另一方面可能为虽然这4种配方基质中幼苗叶片可溶性糖含量较低,但并不能代表叶片可溶性糖总量,观察结果显示,由于这4种配方基质中幼苗的叶面积大于其他配方基质,因此这4种配方基质的叶片可溶性糖总量

应该会更高。可溶性蛋白质可以通过调节渗透势减轻植物受到的逆境伤害,其含量可以反映植株总代谢水平,可溶性蛋白质含量越高,植株生理活性越强<sup>[42]</sup>。16种配方基质中,以林业废弃物为主料的配方基质中西桦幼苗叶片可溶性蛋白质含量总体上高于对照。

本研究分别以木纤维、沤制树皮、椰糠和锯末等林业废弃物为配方基质的主料培育西桦幼苗,其各项生长指标均显著优于以黄心土为主料的T1配方基质。综合西桦苗木生长状况认为,采用质量较轻、易获取、成本较低的林业废弃物配方基质替代草炭和黄心土作为西桦育苗基质具有一定的可行性。T11和T12配方基质西桦幼苗的综合评价指数较大,育苗效果较好,但由于T12配方基质中草炭含量过高,而草炭资源不可再生且开采受限制,因此,以木纤维为主料的T11配方基质最为适宜,建议在今后的育苗基质研究中继续研发此类基质。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 田赞,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.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 高晋东.油松移植容器苗轻型基质研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(2):102-106.
- [6] 余文娟,田雪梅,夏文通,等.农业废弃物作为番茄穴盘育苗基质配方的筛选[J].山东农业科学,2011(4):33-35,38.
- [7] 钟军弟,蔡进改,张涛,等.复羽叶栎树育苗基质配方的筛选[J].北方园艺,2017(4):83-89.
- [8] SHAO L, FU Y, FU W, 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 Astronautica, 2014, 96: 83-88.
- [9] 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.
- [10] 张梅坤.不同基质配比对尾巨桉组培苗成活率和生长的影响[J].福建热作科技,2016,41(2):34-37.
- [11] 杨海娇,王智斌,庞岳燕,等.基质施肥对西南桉苗木生长的影响[J].安徽农学通报,2013,19(11):85-86,129.
- [12] 王卫斌,杨德军,曹建新.西南桉人工林植物多样性与相似性比较[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(5):

- 32-36.
- [13] 贾宏炎, 曾杰, 黎明, 等. 西南桦组培苗培育的轻基质筛选[J]. 林业科学研究, 2012, 25(2): 241-245.
- [14] 郭文福, 曾杰, 黎明, 等. 西南桦轻基质网袋容器苗基质选择试验[J]. 种子, 2010, 29(10): 62-64.
- [15] 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.
- [16] TIAN Y, SUN X, LI S, et al. Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Calathea rotundifolia* cv. Fasciata[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 143: 15-18.
- [17] 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.
- [18] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210~1275—1999 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [19] 胡勤鸿, 欧阳芳群, 贾子瑞, 等. 不同穗条类型、长度的欧洲云杉扦插苗质量评价[J]. 林业科学研究, 2016, 29(6): 919-925.
- [20] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 110-111.
- [21] 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: 55-56.
- [22] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72: 248-254.
- [23] 杨梅花, 赵小敏, 王芳东, 等. 基于主成分分析的最小数据集的肥力指数构建[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(6): 1188-1195.
- [24] 魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 等. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 33-36.
- [25] 吴君, 吴冬, 楼雄珍. 不同基质配比及复合肥处理对3年生楠木容器苗生长的影响[J]. 西部林业科学, 2015, 44(1): 109-113, 120.
- [26] 秦爱丽, 郭泉水, 简尊吉, 等. 不同育苗基质对圃地崖柏出苗率和苗木生长的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(9): 9-17.
- [27] 余萍, 丁志彬, 程龙霞, 等. 不同基质对欧洲鹅耳枥1年生播种苗生长及生理特性影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 44-50.
- [28] 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: 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 2012: 21-22.
- [29] 北京市质量技术监督局. 北京市地方标准 DB11/T 770—2010 花卉栽培基质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-16.
- [30] 李谦盛. 芦苇末基质的应用基础研究及园艺基质质量标准的探讨[D]. 南京: 南京农业大学园艺学院, 2003: 91.
- [31] 宋晓晓, 邹志荣, 曹凯, 等. 不同有机基质对生菜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 153-160.
- [32] 秦国峰, 吴天林, 金国庆, 等. 马尾松舒根型容器苗培育技术研究[J]. 浙江林业科技, 2000, 20(1): 68-73.
- [33] 潘瑞焱. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 30-31.
- [34] 陈红琳, 陈尚洪, 郑盛华, 等. 增施氮素对苗期渍水胁迫冬油菜生理特性及产量的调控效应[J]. 土壤, 2017, 49(3): 519-526.
- [35] 林韧安, 陈秋夏, 郑坚, 等. 不同基质配方对枫香容器苗质量的影响[J]. 西南林业大学学报, 2012, 32(1): 11-16.
- [36] 孙洁, 刘俊, 郁培义, 等. 不同基质配方对降香黄檀幼苗生长生理的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(7): 45-49.
- [37] 杜佩剑, 徐迎春, 李永荣. 浙江楠容器育苗基质的比较和筛选[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(2): 71-76.
- [38] 李倩, 王月异, 王玉祥. 低温处理对白三叶叶绿素、可溶性糖和丙二醛等的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(19): 83-86.
- [39] 莫开敏, 甘艳. 不同浓度植物生长调节剂对杉木苗木生理指标的影响[J]. 绿色科技, 2017(9): 89-91.
- [40] 祝有为, 言燕华, 韦武青, 等. 不同栽培措施对凤丹容器苗生长及生理的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(4): 68-75.
- [41] 周自强, 王福友, 陈建飞, 等. 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米糖、氮代谢底物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 715-719.
- [42] HUA S, ZHANG Y, YU H, et al. Paclobutrazol application effects on plant height, seed yield and carbohydrate metabolism in canola[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2014, 16: 471-479.

(责任编辑: 张明霞)