

不同轻型基质对杉木容器苗生长与养分积累的影响

吕宁宁^{1,2,3}, 朱 晗⁴, 杨培蓉^{1,2,3}, 许珊珊^{1,2,3}, 黄金华⁵, 曹光球^{1,2,3},
林开敏^{1,2,3}, 叶义全^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业草原杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;
3. 林木逆境生理生态及分子生物学福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 湖北省十堰市东风高级中学, 湖北 十堰 442000;
5. 福建省洋口国有林场, 福建 顺昌 353211)

摘 要:为筛选出适合杉木优良无性系洋-061 容器苗生长的轻型基质配方。采用单纯形-重心混料试验设计,以泥炭土、珍珠岩、杉木皮和稻谷壳为材料,并以黄心土为对照(CK),研究不同轻型基质配比对杉木生长、根系形态和养分积累的影响。结果表明,1)不同轻基质配方(T1—T14)和对照(CK)处理的苗高、地径和生物量均表现出相同的生长规律,即随时间增加而逐渐增大。2)当苗木培育 360 d 时,不同轻型基质处理苗高、地径和苗木质量指数均高于 CK,其中,苗高在 T6 处理最大,较 CK 增加了 54.89%,地径和苗木质量指数在 T6 和 T1 处理时达到最大,分别较 CK 提高 33.04% 和 48.65%,T14 处理下生物量最大;3)不同轻型基质处理有效促进了杉木幼苗根系的发育,而且其总根长、根表面积、根直径及根体积分别在 T2、T14、T9 和 T14 处理时达到最大;4)杉木植株养分含量对不同轻型基质响应存在差异,其中轻型基质 T5、T3 和 T12 处理显著促进植株氮的积累,轻型基质 T8、T3 和 T13 处理苗木全磷含量显著高于其他处理,而 T8、T9 和 T2 植株全钾含量显著高于其他处理;5)利用隶属函数对幼苗生长指标进行综合分析,综合评价排名前 3 的依次是 T14(20%泥炭土+27%珍珠岩+27%杉木皮+26%稻谷壳)、T5 处理(60%泥炭土+40%珍珠岩)和 T1 处理(100%泥炭土)。考虑到泥炭土成本较高,因此,T5 和 T14 处理为本研究中适合于杉木洋-061 容器苗生长的轻型基质配方。

关键词:杉木;隶属函数法;轻型基质;养分积累

中图分类号:S723.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2024)02-0060-10

Effects of Different Light Substrates on the Growth and Nutrient Accumulation of *Cunninghamia lanceolata* Container Seedlings

LÜ Ning-ning^{1,2,3}, ZHU Han⁴, YANG Pei-rong^{1,2,3}, XU Shan-shan^{1,2,3}, HUANG Jin-hua⁵,
CAO Guang-qiu^{1,2,3}, LIN Kai-min^{1,2,3}, YE Yi-quan^{1,2,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration,
Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Forest Stress Physiology, Ecology and
Molecular Biology, Fuzhou 350002, Fujian, China; 4. Dongfeng Senior High School, Shiyan 442000, Hubei, China;
5. Fujian Yangkou State-owned Forest Farm, Nanping 353211, Fujian, China)

Abstract: In order to screen out the light medium formula suitable for the growth of superior clone of Yang-061 container seedlings of *Cunninghamia lanceolata*, the effects of different light substrates, such as peat soil, perlite, *C. lanceolata* bark and rice husk and their ratios on the growth, root morphology and nutrient

收稿日期:2023-02-21 修回日期:2023-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2201302, 2016YFD0600301);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017109, CXZX201657)。

第一作者:吕宁宁。研究方向:森林培育。E-mail:2291934466@qq.com

* 通信作者:叶义全,博士,硕士生导师,讲师。研究方向:林木种苗繁育与逆境生理。E-mail:yeyiquan008@163.com

accumulation of *C. lanceolata* with yellow soil used as the control (CK) were studied by using simplex centroid mixture design. The results showed that 1) compared with CK, the seedling height, ground diameter, biomass and seedling quality index showed the same growth rhythm in different light substrate formula, namely the growth increased with time. 2) After 360 days of cultivation, the seedling height, ground diameter and seedling quality under different light substrate treatments were all higher than CK. Among them, the seedling height was the highest in T5 and T6 treatments, which increased by 54.41% and 54.89% respectively compared with CK. The ground diameter and seedling quality index reached the maximum value in T6 and T1 treatments, which were 33.04 % and 48.65 %, higher than CK, the biomass achieved its maximum in T14. 3) Different light substrate treatments effectively promoted the root development of *C. lanceolata* seedlings, and the total root length, root surface area, root diameter and root volume reached their maximum values in T2, T14, T9 and T14 treatments, respectively. 4) The response of nutrient content of *C. lanceolata* seedlings to different light substrates was different among treatments. The light substrates of T5, T3 and T12 treatments significantly promoted the accumulation of nitrogen in plant, the light substrates of T8, T3, T13 significantly increased the total phosphorus content of seedlings, while the T8, T9 and T2 treatments significantly increased the total potassium content of seedlings. (5) The comprehensive analysis results analyzed by the subordinate function value method showed the top three light substrate suitable for the growth of *C. lanceolata* were T14 (20% peat soil + 27% perlite + 27% *C. lanceolata* bark + 26% rice husk), T6 (60% peat soil + 40% perlite) and T1 (100% peat soil). Considering the high cost of peat soil, T5 and T14 treatments were selected as light substrates suitable for the growth of *C. lanceolata* Yang-061 container seedlings in this study.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; subordinate function value method; light medium; nutrient accumulation

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方最重要的速生用材树种,人工林面积和蓄积均居我国主要人工乔木林树种首位,在保障我国木材安全和生态安全等方面占据重要地位^[1-4]。近年来,随着杉木造林面积的不断增大,市场对杉木优质苗木的需求也在不断增加^[5-6]。苗木品质不仅是影响造林效果的重要因素,而且也是决定造林早期幼林生长效果的关键因素。目前杉木苗木培育仍以传统裸根苗为主,与传统裸根苗相比,容器育苗具有苗木根系发达、起苗不易伤根、延长造林季节、造林成活率高且圃地无需轮作等优点,已逐渐成为苗木繁育的一种重要补充^[7-8]。自20世纪50年代我国开始进行桉树(*Eucalyptus robusta*)容器育苗研究以来,在轻型基质种类^[9-10]、配比^[11-12]、基质苗养分管理^[13-14]和容器规格^[15-16]等方面展开大量研究,并且在许多树种中均取得了成功,如,油松(*Pinus tabulaeformis*)^[17]、卷荚相思(*Acacia cincinnata*)^[18]、落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)^[19]、湿地松(*Pinus elliottii*)^[20]、木荷(*Schima superba*)^[21]、桢楠(*Phoebe zhennan*)^[22]等。尽管目前已有少量关于杉木容器育苗的研究^[23-26],但这些研究多以本地的实生苗或无性系苗为材料。近年来,随着一些杉木优良无性系如洋-061在杉木主产区的逐步推广,显

著提升了我国杉木林的良种化水平和经济效益,然而与其相配套的育苗技术尚未得到有效解决^[27]。众所周知,同一植物种类不同品种之间由于其自身生物学特性的差异,导致其对生长基质的要求也存在较大的不同,优良无性系由于生长迅速且自身对苗木培育技术要求相对较高,因此传统杉木粗放式的苗木培育技术已不能很好适应优良材料对生长的需求,无法充分发挥其生长潜力,这在一定程度上限制了其生长。因此,在杉木优良无性系洋-061开始在全国杉木主产区逐步推广的背景下,研发与其相配套的轻型基质容器育苗技术已成为当前亟待解决的问题。鉴于此,本研究以杉木优良无性系洋-061穗条为试验材料,在比较不同轻型基质种类及配比对杉木幼苗生长、根系形态和养分积累影响的基础上,利用隶属函数法对各生长指标进行综合分析,筛选适宜洋-061生长的轻型基质配方,为实现杉木苗木优质高效培育提供理论依据。

1 试验地概况

试验地位于福建省顺昌县洋口国有林场试验大棚(26°48'N, 117°53'E),大棚用透光率为50%的遮阳网进行遮阳,棚内配有自动喷灌系统,可控制大棚内的温度和湿度。大棚内白天平均气温13~34℃,

夜晚平均气温 5~25 ℃,光照强度 170.85~520.37 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度 70%。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为福建洋口国有林场提供的洋-061 穗条。2017 年 4 月 2 日清晨在母树年龄为 4 年生的杉木采穗圃进行采穗,选择生长旺盛且长势一致、健壮、无病害的当年生半木质化穗条,贴近穗条基部用锋利的美工刀将穗条切下后,并将其修成长度为 (9 ± 0.5) cm 的插穗,每 50 根插穗为一捆竖立放置于桶内,用去离子水浸泡穗条基部保鲜备用。

2.2 试验设计

基质配方采用 {4, 3} 单形重心混料试验设计^[28],把泥炭土、珍珠岩、杉木皮和稻谷壳当作 4 个因子,分别用 Z₁、Z₂、Z₃、Z₄ 来表示。

单形重心设计编码值 X_i 与实际成分 Z_i 转换公式为

$$Z_i - a_i = (1 - \sum_{i=1}^p a_i) X_i, i=1, 2, \dots, p (p=4) \quad (1)$$

式中: a_i 为各因子成分的最小值,可以计算得出 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 百分比的最小值, $a_1=0.2$, $a_2=0.0$, $a_3=0.0$, $a_4=0.0$ 。

经转换后得出各试验基质配方的配比表(表 1),且设置黄心土为对照(T15)。2017 年 3 月 15 日根据表 1 设计的不同轻型基质配方将泥炭土、珍珠岩、杉木皮、稻谷壳(购买自南平市森科种苗有限公司)按不同体积比混合,同时在每立方米的基质中加入爱贝施缓释肥 800 g(TN 含量 180 g·kg⁻¹、TP 含量 60 g·kg⁻¹、TK 含量 120 g·kg⁻¹),加入五氯硝基苯 250 g,将上述物质充分混匀后统一分装在不织布袋中(6 cm×10 cm),并将装有轻型基质的不织布袋置于塑料托盘上,每盘 40 袋,随后将基质浇透水备用,不同基质配方的理化性质见表 2。2017 年 4 月 2 日上

午并将采回的穗条置于千分之一的多菌灵水溶液中浸泡消毒 8 min,取出沥干后,放入含有 500 mg·L⁻¹ ABT1 号生根粉的黄泥浆溶液中浸泡 20 min,随后用竹棍在基质上引洞扦插。每袋扦插 1 根插穗,每个重复 40 株,每个处理 3 个重复,共 120 株。扦插完成后浇透水,试验期间进行常规的水肥管理。

2.3 测定指标和方法

苗木生长指标测定:2017 年 4 月 12 日扦插完成后,每隔 3 个月用电子数显游标卡尺(测量精度:0.01 mm)、直尺(测量精度:0.1 cm)测量不同处理扦插苗的苗高、地径等生长指标。同时在最后一次调查时计算每个重复的平均苗高和地径,并根据计算的平均苗高和地径从每个重复中选取 3 株与该平均值最接近的植株作为标准株,每个处理共取 9 标准株,整株完整取出带回,称其鲜重然后采用 EPSON EU-88 扫描仪扫描根系,并运用 WinRHIZO 分析系统计算根长、根系直径等指标。然后分别测量根、茎、叶鲜质量,经 105 ℃杀青 2 h 后用 75 ℃烘干至恒重,测量干质量,测定生物量。由于单个形态指标反映苗木较为片面,而苗木各部分之间的协调与平衡对造林生长又具有重要意义,因而采用多指标的综合指数—苗木质量指数(QI)来反映苗木品质,并参照范辉华等^[28]的方法计算苗木质量指数。

计算公式为:苗木质量指数(QI)=苗木总干质量 g/[苗高 cm/地径 mm)+(径干质量 g/根干质量 g)]。

苗木全 P、全 K 等均采用 H₂SO₄—HClO₄ 消煮,运用 ICP 测其养分。利用隶属函数法^[29]对生长相关指标进行综合分析。

2.4 数据处理方法

本试验的数据用 Excel 2016 进行数据处理、分析,并绘制指标变化图,采用 SPSS 22.0 进行方差分析和相关性分析,采用 LSD 法进行多重比较。

表 1 不同轻型基质配方处理

Table 1 Light substrate formula for different treatment

处理	各基质体积比例(%)				处理	各基质体积比例(%)			
	泥炭土	珍珠岩	杉木皮	稻谷壳		泥炭土	珍珠岩	杉木皮	稻谷壳
T1	100	0	0	0	T8	20	40	40	0
T2	20	80	0	0	T9	20	40	0	40
T3	20	0	80	0	T10	20	0	40	40
T4	20	0	0	80	T11	46	27	27	0
T5	60	40	0	0	T12	46	27	0	27
T6	60	0	40	0	T13	46	0	27	27
T7	60	0	0	40	T14	20	27	27	26

表 2 不同轻型基质配方理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of different substrate formulas

处理	容重/(g·cm ⁻³)	营养袋重量/g	最大持水量(%)	最小持水量(%)	总孔隙度(%)	pH
T1	0.34±0.002h	134.75±0.76f	132.40±11.11b	117.60±9.44b	48.82±1.95c	5.27±0.05def
T2	0.15±0.004a	51.74±0.50a	468.69±3.06j	275.84±14.82f	71.80±1.70h	5.77±0.02jk
T3	0.22±0.005d	84.27±2.43d	288.77±5.03gh	192.05±5.79de	62.64±0.36fg	4.89±0.01b
T4	0.17±0.002ab	54.35±0.62a	285.69±1.06gh	105.46±0.99b	48.41±0.65c	6.23±0.01l
T5	0.25±0.004ef	80.71±1.82d	253.63±11.73fg	218.83±11.11e	60.61±0.89f	5.60±0.03hi
T6	0.28±0.000g	106.50±1.97e	64.24±1.75a	51.87±0.30a	17.81±0.49a	5.09±0.01c
T7	0.28±0.007g	108.53±1.43e	243.65±8.23ef	164.53±7.62cd	68.77±1.25gh	5.31±0.03ef
T8	0.19±0.004bc	65.00±0.93c	313.16±1.18h	207.50±13.82de	59.04±1.3def	5.13±0.02cd
T9	0.17±0.004ab	55.93±0.80ab	369.70±13.00i	217.90±3.32e	58.83±0.42def	5.87±0.06k
T10	0.21±0.004cd	64.76±0.98c	177.25±7.05c	105.47±9.35b	36.51±2.09b	5.47±0.01gh
T11	0.24±0.005e	78.69±1.27d	217.34±6.39de	176.06±3.86cde	52.85±1.45cd	5.34±0.03fg
T12	0.24±0.004e	78.07±0.53d	260.78±5.61fg	187.40±9.88cde	63.39±0.57fg	5.67±0.02ij
T13	0.28±0.002fg	86.38±2.09d	78.92±4.98a	57.77±3.67a	21.81±1.44a	5.29±0.03ef
T14	0.20±0.007cd	64.04±1.01bc	204.87±1.96cd	147.14±12.66bc	40.05±1.53b	5.17±0.02cde
CK	1.04±0.007i	275.67±4.27g	54.81±0.40a	38.66±0.81a	56.90±0.51de	4.14±0.01a

处理	EC 值/ (us·cm ⁻¹)	TN 含量/ (g·kg ⁻¹)	有效磷含量/ (g·kg ⁻¹)	速效钾含量/ (g·kg ⁻¹)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)
T1	468.75±28.15def	14.57±0.17g	0.21±0.02a	10.66±0.34fghi	355.09±1.35d
T2	582.00±19.76f	8.63±0.09b	0.62±0.02bc	14.58±0.55j	155.27±0.40b
T3	400.33±19.91cde	9.77±0.09bc	0.66±0.01bcd	6.57±0.13bc	469.33±7.56g
T4	469.67±22.85def	11.90±0.17de	0.93±0.04fg	4.22±0.18a	517.95±12.55h
T5	497.00±26.91ef	12.85±0.09ef	0.73±0.03cde	9.26±0.46def	290.84±0.95c
T6	571.33±36.05f	12.67±0.09ef	0.94±0.05fg	11.52±0.31hi	421.46±2.26ef
T7	536.00±29.31f	13.47±0.19fg	1.07±0.04g	8.98±0.14def	387.67±1.44de
T8	377.67±20.42bcd	9.63±0.12b	0.82±0.04ef	10.09±0.56fgh	356.52±1.92d
T9	281.67±14.81ab	9.93±0.09bc	0.64±0.02bcd	11.33±0.13ghi	295.15±8.04c
T10	292.00±17.90abc	11.10±0.12cd	0.77±0.01de	5.89±0.25ab	436.98±14.62fg
T11	349.67±23.95bc	12.65±0.78ef	0.69±0.01bcde	9.56±0.06efg	359.51±1.46d
T12	404.00±15.82cde	12.67±0.26ef	0.82±0.01ef	12.29±0.44i	350.09±13.06d
T13	298.67±3.67abc	12.63±0.20ef	0.73±0.05cde	7.58±0.55bcd	413.70±7.49ef
T14	325.67±13.84bc	9.67±0.38b	0.57±0.01b	8.06±0.29cde	411.23±7.47ef
CK	189.17±4.03a	0.97±0.07a	0.11±0.01a	6.92±0.37bc	6.55±0.60a

注:表中数据为平均值±标准误差(n=3),同列数据后附不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

3 结果与分析

3.1 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061 苗高的影响

由表 3 可知,随着培育时间的延长,不同处理杉木幼苗苗高均呈逐渐增长的趋势,而同一时期幼苗苗高对不同基质配方处理的响应存在差异。其中在培养 90、180、270、360 d 时苗高均以 T6 处理最大,分别为 18.91、30.47、34.47、44.78 cm,分别较 T15(CK)显著增加 36.24%、60.37%、71.66%和 54.89%,而且除 90 d 时 T10 处理苗高小于 CK 外,不同时期不同轻型基质配方处理苗高均大于 CK,较 CK 增幅分别为 12.82%~36.24%、30.63%~60.37%、41.48%~71.66%和 19.96%~54.89%。

3.2 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061 地径的影响

由表 4 可知,杉木地径对不同轻型基质配比的响应同样存在差异。在培育第 90 天、180 天和 270 天时,不同基质配比处理杉木幼苗地径均高于 CK(T15),增幅分别为 3.32%~25.31%、10.32%~43.65%和 11.07%~47.23%,其中各个时间点不同基质配比处理中地径均以 T6 处理最大,分别为 3.02、3.62、3.99 mm,均显著高于 CK(P<0.05)。在培育第 360 天时,不同轻型基质配比处理幼苗地径均不同程度大于 CK,增幅为 7.44%~41.67%,其中以 T1 处理地径最大,达 4.76 mm,较 CK 有显著升高(P<0.05)。

表 3 不同轻型基质配比对杉木苗高生长的影响

Table 3 Effects of different light substrate ratios on the height growth of *C. lanceolata* seedlings

处理	苗高/cm			
	90 d	180 d	270 d	360 d
T1	17.20±0.22cd	29.49±0.56ef	34.00±1.17ef	44.03±1.35ef
T2	16.03±0.35abcd	27.34±0.04bcde	30.67±0.54bcdef	37.44±0.84bcde
T3	16.18±0.38abcd	27.46±0.23bcde	30.23±0.6bcdef	35.86±1.18bc
T4	15.84±0.09abc	25.98±0.13bc	28.41±1.06bcde	41.38±1.35bcdef
T5	17.02±0.76cd	26.69±0.23bcd	31.66±1.04bcdef	44.64±0.90f
T6	18.91±0.74d	30.47±0.82f	34.47±1.57f	44.78±1.82f
T7	17.40±1.06cd	29.07±0.78def	33.61±1.35def	41.96±1.70cdef
T8	16.65±0.61bcd	27.24±0.53bcde	29.79±1.45bcde	37.12±1.46bcd
T9	17.29±0.49cd	26.99±0.57bcd	29.50±0.48bcde	35.27±0.63abc
T10	13.63±0.01a	26.57±0.66bcd	29.98±1.38bcde	34.68±2.01ab
T11	15.97±0.85abc	27.59±0.55cde	32.48±1.33bcdef	40.93±0.37bcdef
T12	17.52±0.62cd	29.72±0.45ef	32.97±1.25cdef	43.49±1.44def
T13	16.38±0.33abcd	27.87±0.03cdef	32.29±1.34bcdef	38.31±0.65bcdef
T14	15.66±0.34abc	24.82±0.40b	32.02±1.38bcdef	36.52±1.65bc
T15(CK)	13.88±0.31ab	19.00±0.88a	20.08±0.63a	28.91±0.82a

表 4 不同轻型基质配比对杉木幼苗地径生长的影响

Table 4 Effects of different light substrate ratios on ground diameter growth of *C. lanceolata* seedlings

处理	地径/mm			
	90 d	180 d	270 d	360 d
T1	2.69±0.03def	3.32±0.02d	3.67±0.10gh	4.76±0.21f
T2	2.52±0.03ab	2.80±0.06b	3.16±0.04cde	4.32±0.17cdef
T3	2.67±0.01cde	2.82±0.08b	3.19±0.08cde	3.90±0.11abcde
T4	2.55±0.02bc	2.78±0.01b	3.01±0.09abcd	3.64±0.09ab
T5	2.50±0.03ab	3.02±0.06bc	3.22±0.07cdef	4.19±0.06bcdef
T6	3.02±0.04h	3.62±0.07e	3.99±0.03h	4.47±0.05ef
T7	2.82±0.03fg	3.41±0.07de	3.62±0.12gh	4.42±0.10def
T8	2.66±0.02cde	2.95±0.04b	3.40±0.09defg	3.62±0.18ab
T9	2.77±0.04efg	2.98±0.03bc	3.29±0.04defg	3.78±0.02abcd
T10	2.59±0.01bcd	3.15±0.06cd	3.32±0.09defg	3.72±0.15abc
T11	2.60±0.01bcd	3.35±0.03d	3.56±0.03fg	3.92±0.20abcde
T12	2.88±0.01g	3.31±0.03d	3.47±0.09efg	4.22±0.17bcdef
T13	2.67±0.04cde	3.20±0.04cd	3.41±0.08defg	3.80±0.09abcde
T14	2.49±0.04ab	2.83±0.02b	3.05±0.08abcd	3.61±0.09ab
T15(CK)	2.41±0.01a	2.52±0.01a	2.71±0.04a	3.36±0.03a

3.3 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061生物量的影响

由表 5 可知,植株的根、茎、叶生物量对不同轻型基质配比的响应同样存在差异。就根生物量而言,除 T2、T3、T4 和 T11 处理中根生物量高于 T15 (CK)外,其余处理均低于 CK,而且 T3 处理根生物量最大,较 CK 显著提高 16.33%($P<0.05$)。与 CK 相比,除 T2、T10 和 T13 处理外,其余处理幼苗茎生物量均高于 CK,增幅为 3.33%~58.67%,其

中在 T11 处理时茎生物量达到最大,显著高于 CK ($P<0.05$)。就叶生物量而言,除 T2、T4、T9、T11 和 T13 处理叶生物量低于 CK 外,不同处理叶生物量均显著高于 CK,增幅为 7.93%~63.88%,其中 T1 处理叶生物量最大,较 CK 显著提升($P<0.05$)。除 T2、T9、T10 和 T13 处理外,不同处理植株生物量均高于 CK 处理,增幅分别为 1.91%~26.34%,其中 T14 处理植株生物量最大,显著高于 CK($P<0.05$)。

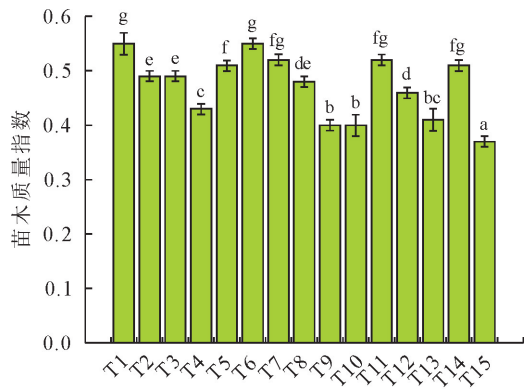
表 5 不同轻型基质配比对杉木轻型基质苗生物量的影响

Table 5 Effects of different light substrate ratios on biomass of *C. lanceolata* light substrate seedlings g

处理	根生物量	茎生物量	叶生物量	总生物量
T1	0.76±0.20a	1.86±0.05c	3.72±0.18f	6.35±0.42de
T2	1.48±0.01c	1.49±0.20a	2.14±0.12b	5.11±0.20b
T3	1.71±0.16d	1.83±0.17bc	2.71±0.09d	6.25±0.38d
T4	1.64±0.11cd	1.56±0.11ab	2.20±0.08bc	5.40±0.09b
T5	1.46±0.10c	1.94±0.06c	2.59±0.16cd	6.00±0.22d
T6	1.43±0.22c	1.70±0.11bc	2.46±0.11cd	5.59±0.22cd
T7	1.05±0.12b	1.75±0.12bc	2.57±0.17cd	5.38±0.20bc
T8	1.23±0.03bc	1.76±0.08bc	2.45±0.11c	5.44±0.04bc
T9	0.90±0.03ab	1.55±0.08a	2.09±0.05ab	4.54±0.04a
T10	0.94±0.10ab	1.48±0.05a	2.68±0.25cd	5.10±0.30b
T11	1.50±0.03c	2.38±0.02d	1.87±0.28a	5.75±0.29cd
T12	1.04±0.23b	1.67±0.15b	2.62±0.21cd	5.34±0.50bc
T13	0.82±0.01a	1.40±0.03a	1.99±0.03ab	4.21±0.05a
T14	1.08±0.12b	2.28±0.15d	3.26±0.03e	6.62±0.38e
T15(CK)	1.47±0.09c	1.50±0.11ab	2.27±0.03bc	5.24±0.13bc

3.4 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061 苗木质量指数的影响

苗木质量指数是反映苗木品质的关键指标。由图 1 可知,不同轻型基质配比处理苗木质量指数均显著高于 CK ($P < 0.05$),增幅为 8.11%~48.65%,其中 T1 和 T6 处理下苗木质量指数均达到最大值。



表中数据为平均值±标准误差($n=3$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同轻型基质配比对幼苗质量指数的影响

Fig. 1 Effects of different light substrate ratios on seedling quality index

3.5 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061 根系生长的影响

由图 2A 可知,与 T15(CK)相比,除 T1、T3、T4、T6、T9、T12、T13 处理外,其余处理均不同程度增加幼苗总根长,增幅为 2.34%~51.19%,其中在 T2 处理时总根长最大值,显著高于 CK ($P < 0.05$)。就总根表面积而言,除 T5、T14 处理外,不同轻型基质处理幼苗总根表面积均不同程低于 CK 处理,其中在 T14 处理时总根表面积达到最大(图 2B),较

CK 增加了 19.82%,差异不显著($P > 0.05$)。除 T1 和 T9 处理外,不同轻型基质处理幼苗平均根直径均小于 CK(图 2C),T1 和 T9 较 CK 均增加了 0.67%,差异不显著($P > 0.05$)。由图 2D 可知,除 T14 外,不同轻型基质处理总根体积均不同程度低于 CK, T14 处理总根体积最大,较 CK 高出 21.05% ($P > 0.05$)。

3.6 不同轻型基质配比对杉木优良无性系洋-061 各器官养分含量的影响

由图 3A、图 3B、图 3C 可知,同一处理苗木根、茎、叶中 N 含量差异较大,整体而言,根和叶中 N 含量大于茎。不同轻型基质处理根中 N 含量均不同程度高于 T15(CK),其中 T5 处理 N 含量最高,较 CK 提高了 485.06%,存在显著差异($P < 0.05$)(图 3A)。除 T6、T8、T11 和 T13 外,不同轻型基质处理茎中 N 含量均大于 CK,其中 T3 处理 N 含量最高,较 CK 显著提高 41.81% ($P < 0.05$)(图 3B)。就叶中 N 含量而言,T12 处理叶中 N 含量最高,比 CK 显著提高了 25.66% ($P < 0.05$)(图 3C)。

由图 3D、图 3E、图 3F 可知,不同器官 P 含量对不同轻型基质响应存在差异,整体而言,叶中 P 含量大于根和茎。除 T3 和 T7 外,不同轻型基质处理根中 P 含量均大于 CK,其中 T8 处理 P 含量最高,较 CK 显著提高 62.20% ($P < 0.05$)(图 3D)。不同轻型基质处理茎中 P 含量均不同程度高于 CK,其中 T3 处理 P 含量最高,较 CK 显著提高 229.33% ($P < 0.05$)(图 3E)。不同轻型基质处理叶中 P 含量,除 T9—T14 处理 P 含量高于 CK 外,其余处理均低于 CK,其中 T13 处理 P 含量最大,较 CK 显著增加 93.47% ($P < 0.05$)(图 3F)。

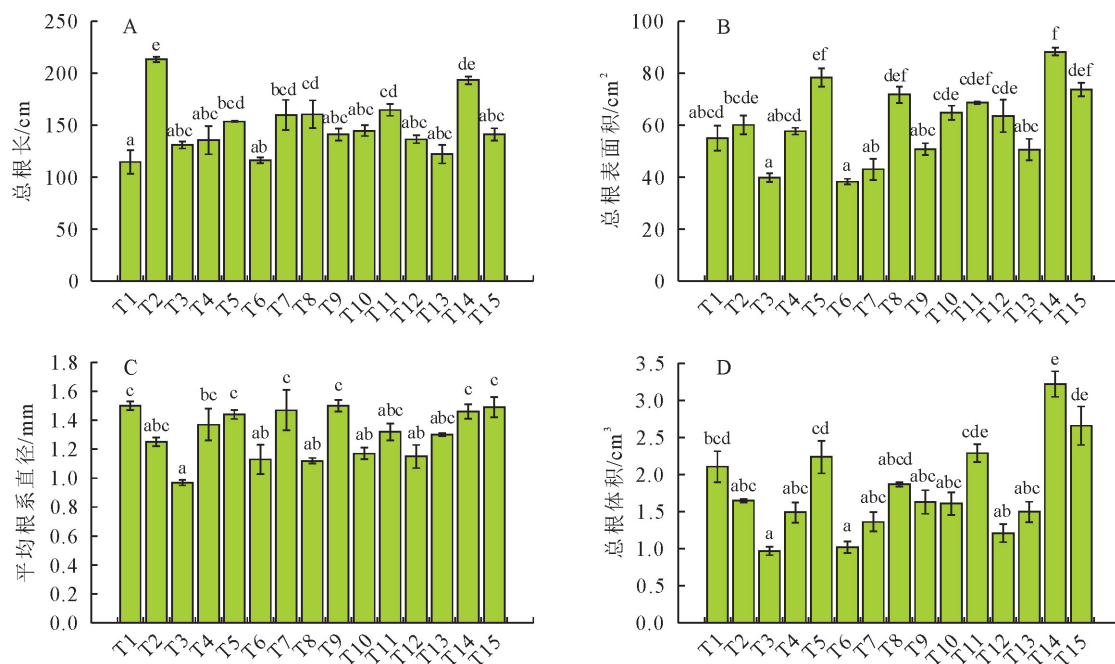


图2 不同轻型基质对比对苗木根系生长的影响

Fig. 2 Effects of different light substrates on root growth of seedlings

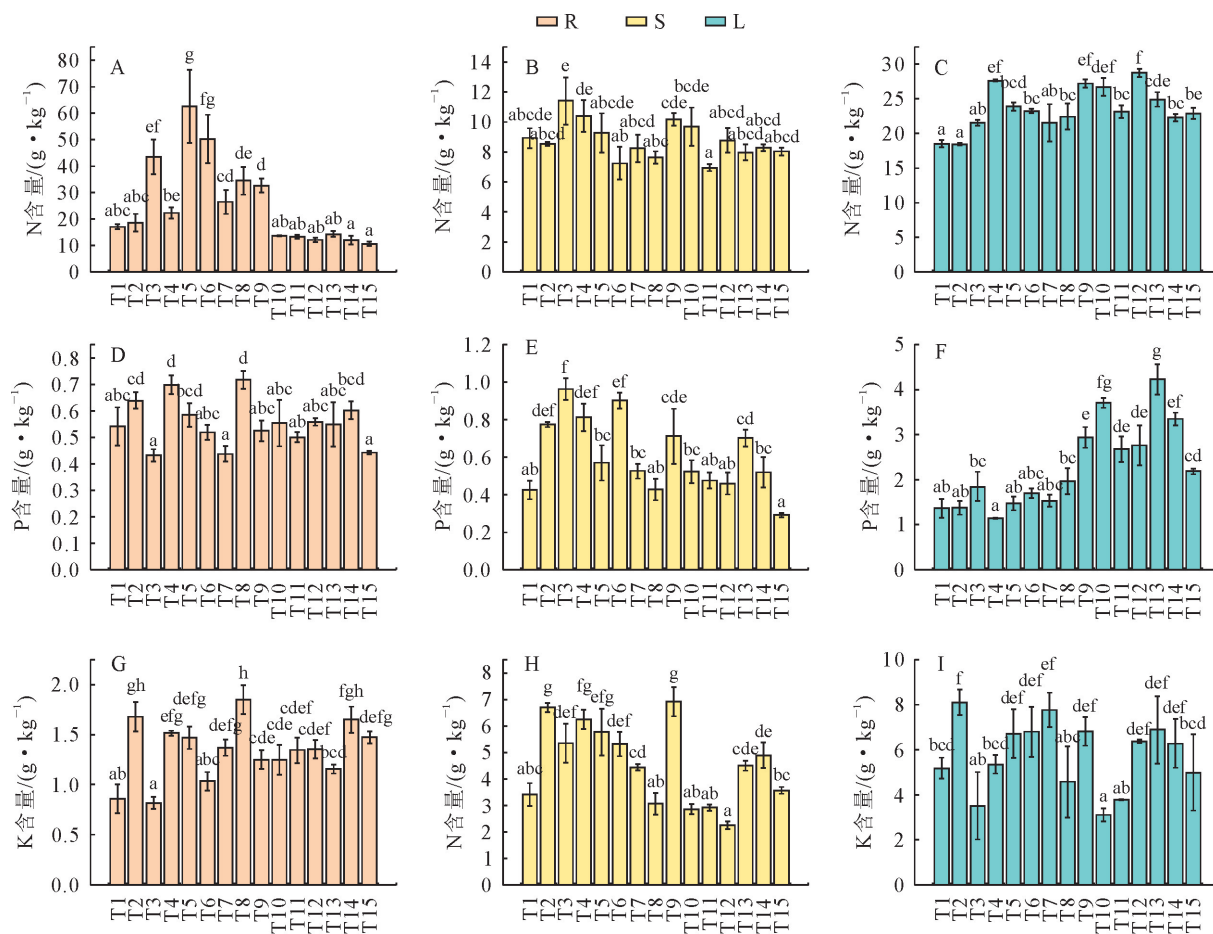


图3 不同基质对苗木根茎叶养分的影响

Fig. 3 Effects of different substrates on roots and stems and leaves nutrient contents of seedlings

由图 3G、图 3H、图 3I 可知,整体而言,不同处理幼苗茎和叶中钾含量高于根。除 T2、T4、T8 和 T14 处理根中钾含量高于 CK 外,其余处理均低于

CK,其中 T8 处理根中钾含量最高,较 CK 显著提高 25.64% ($P < 0.05$) (图 3G)。除 T1、T8、T10、T11、T12 外,其余不同轻型基质处理茎中钾含量均高于

CK,其中 T9 处理钾含量最高,较 CK 显著增加 93.92%($P<0.05$)(图 3H)。而叶中钾含量除 T3、T8、T10 和 T11 处理外,其余处理均不同程度高于 CK,且在 T2 处理时最大,较 CK 显著增加 62.39%($P<0.05$)(图 3I)。

3.7 基于隶属函数法的杉木幼苗生长综合分析

苗木生长情况反映苗木整体生长状态的好坏,单纯用某一生长进行表征苗木生长情况并不合理,采用多个指标对苗木生长情况进行综合评价,能一

定程度上反映出苗木的生长状况^[30]。本研究采用隶属函数法对不同轻型基质处理下杉木幼苗生长指标进行综合评价。由表 6 可知,杉木幼苗生长综合评价指数大小顺序为 T14>T5>T1>T11>T7=T2>T6=T8=T12>T4>T15>T9>T10>T3>T13,排在前三的轻型基质处理分别为 T14(20%泥炭土+27%珍珠岩+27%杉木皮+26%稻谷壳)、T5(60%泥炭土+40%珍珠岩)和 T1(100%泥炭土),这些基质都适合用于杉木洋-061 幼苗的培育。

表 6 基于隶属函数的杉木幼苗生长综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of *C. lanceolata* seedling growth based on membership function

处理	苗高	地径	总生物量	苗木质量指数	总根长	总根表面积	平均根系直径	总根体积	隶属值	排序
T1	0.95	1.00	0.89	1.00	0.01	0.33	1.00	0.51	0.71	3
T2	0.54	0.69	0.37	0.67	1.00	0.44	0.53	0.30	0.57	6
T3	0.44	0.39	0.85	0.67	0.17	0.03	0.01	0.01	0.32	14
T4	0.79	0.20	0.49	0.33	0.21	0.39	0.75	0.23	0.42	10
T5	0.99	0.59	0.74	0.78	0.39	0.80	0.89	0.56	0.72	2
T6	1.00	0.79	0.57	1.00	0.02	0.01	0.30	0.02	0.46	7
T7	0.82	0.76	0.49	0.83	0.46	0.09	0.94	0.17	0.57	5
T8	0.52	0.19	0.51	0.61	0.46	0.67	0.28	0.40	0.46	8
T9	0.40	0.30	0.14	0.17	0.27	0.25	1.00	0.29	0.35	12
T10	0.36	0.26	0.37	0.17	0.30	0.53	0.38	0.28	0.33	13
T11	0.76	0.40	0.64	0.83	0.51	0.61	0.66	0.59	0.62	4
T12	0.92	0.61	0.47	0.50	0.22	0.50	0.34	0.11	0.46	9
T13	0.59	0.31	0.01	0.22	0.08	0.25	0.62	0.24	0.29	15
T14	0.48	0.18	1.00	0.78	0.80	1.00	0.92	1.00	0.77	1
T15	0.01	0.01	0.43	0.01	0.27	0.71	0.98	0.75	0.39	11

4 讨论

研究表明,不同基质配比对容器苗苗高、地径、生物量以及苗木质量指数等指标具有不同的影响,这与不同植物种类自身生物学特性以及不同基质类型及其配比理化特性密切相关^[15,31]。谢静等^[32]研究表明,粗松树皮:进口泥炭土=1:3 对金线莲(*Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl.)茎和根生长的促进效果最好,细松树皮:进口泥炭土=1:1 则有利于促进根数量的增加,而细松树皮:进口泥炭土:珍珠岩=2:3:5 则有利于促进叶片的生长。郑琰琰等^[33]研究也发现,与纯土培养相比,在添加醋糟比例较高(体积比>60%)的基质处理中[分别为醋糟+土(80%+20%)、醋糟+锯末(80%+20%)、醋糟+锯末+珍珠岩(60%+20%+20%)]对红豆杉(*Taxus*)株高增长效果较好,其中,醋糟+锯末(80%+20%)也可有效促进地径增粗和总侧枝数的增加,而在以锯末为主的基质中各项生长指标均较差。本研究中也发现不同轻型基质配方下杉木幼苗的生长情况均不同程度优于黄心土 CK(T15),其中 T5、T1、T14、T14 处理分别对杉木苗

高、地径、根系以及生物量的促进效应最明显。此外,苗木质量指数是衡量苗木品质好坏的关键指标之一,苗木质量指数越大,苗木品质越好^[29]。本研究中,不同轻型基质处理苗木质量指数均显著高于 CK,这与韦如萍等^[25]关于不同轻基质对杉木无性系组培苗生长的研究结果相类似,上述结果共同表明相对于黄心土而言,轻型基质可能因其具有优良的孔隙结构,为杉木幼苗根系的生长提供了适宜的环境,提高幼苗的生长速率和养分吸收能力,从而在苗高、地径、根系等方面表现出良好的促进效应,改善幼苗生长,提高苗木品质。

基质特性是影响容器苗的生的重要因素之一,不同轻型基质配比对苗木生长的影响与基质自身的养分含量密切相关,因为基质中养分元素含量可直接影响苗木对养分的吸收。本研究发现与 CK 相比适合杉木幼苗生长轻型基质配方(T1、T5、T6 和 T14)都具有较高的全氮、有效磷、速效钾和有机质等养分含量,从而增强植物对基质中可利用态养分的吸收并将其转化为苗木自身养分的能力,增加这些处理中杉木植株体内氮磷钾等养分元素的积累,最终促进苗木的生长。邓华平等^[34]研究发现,

基质中 TN、pH、TP 和 CEC 是影响金叶榆 (*Ulmus pumila 'Jinye'*) 容器苗生长的主要因素。刘伟等^[35]研究表明,基质中 N、P、K、有机质等含量以及持水率等理化性质对木荷、紫楠 (*Phoebe sheareri*) 和黄檀 (*Dalbergia hupeana*) 苗木根茎叶的生长影响较大。由此可见,基质中养分含量的高低很大程度上决定了苗木体内养分积累的高低和生长的好坏。此外,基质物理性质是影响容器苗生长的另一重要因素。本研究中,不同配比基质的物理性质也存在较大的差异。容重反映了基质的疏松程度及对作物支撑能力的高低^[27],一般认为基质容重在 0.1~0.8 g/cm³ 范围内比较适合植物生长^[36]。与前人研究结果类似,本研究中发现生长较好的轻型基质配方 (T1、T5、T6 和 T14) 容重值为 0.20~0.34 g/cm³,而生长最差的 CK 处理,其容重高达 1.04,说明基质适宜的松紧度对于苗木生长至关重要。除容重外,基质 pH 和孔隙度同样对苗木生长具有重要影响。通常而言,容器育苗时呈微酸性和具有适宜的孔隙度的基质 (70%~90%),更有利于幼苗的生长^[37]。本研究中适宜杉木生长轻型基质配方的 pH 和总孔隙度范围分别为 5.09~5.77 和 17.81%~60.61%,这可能与不同植物种类对基质 pH 和孔隙度的要求存在较大差异有关。

5 结论

在筛选适宜杉木幼苗生长的基质时,用单独指标进行衡量具有一定的局限性。因此,本研究通过比较不同轻型基质对比对插穗的苗高、地径、生物量、苗木质量指数、根系生长和养分积累影响的基础上,结合模糊数学中的隶属函数法对苗木生长状况进行综合分析,确定 T1、T5 和 T14 适合于洋-061 生长的轻型基质配方,但考虑到生产成本,因此,选择 T5 处理 (60%泥炭土:40%杉木皮) 和 T14 处理 (20%泥炭土+27%珍珠岩+27%杉木皮+26%稻谷壳) 作为适合杉木优良无性系洋-061 生长的适宜配方。

参考文献:

- [1] 张家君,许珊珊,曹光球,等.不同氮形态对杉木叶绿素荧光参数和叶绿体超微结构的影响[J].西北林学院学报,2020,35(2):24-31.
ZHANG J J, XU S S, CAO G Q, et al. Effects of nitrogen forms on the chlorophyll fluorescence parameters and chloroplast ultra-structure of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 24-31. (in Chinese)
- [2] 李玲燕,唐银,钟明慧,等.缓释肥对杉木幼苗生长和叶绿素荧光的影响[J].福建林业科技,2022,49(2):11-17,25.
- [3] 李茂,洪凯,许珊珊,等.指数施肥对杉木优良无性系幼苗生长和养分含量的影响[J].应用与环境生物学报,2020,26(6):1490-1497.
- [4] 饶丽莎,李茂,戴明金,等.杉木 ClSAUR25 基因 5'侧翼序列的克隆与生物信息学分析[J].分子植物育种,2021,19(4):1107-1112.
RAO L S, LI M, DAI M J, et al. Cloning and bioinformatics analysis of ClSAUR25 gene 5' flanking sequence in *Cunninghamia lanceolata* [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(4): 1107-1112. (in Chinese)
- [5] 许小丽,崔朋辉,林思祖,等.铝胁迫下杉木幼苗体内几种矿质元素含量变化及其相关性[J].福建农业学报,2015,30(12):1178-1183.
- [6] 唐银,李玲燕,许珊珊,等.不同光质对杉木组培苗生根的影响及其机理初探[J].西北植物学报,2022,42(4):609-618.
TANG Y, LI L Y, XU S S, et al. Effect of different light quality on rooting of tissue cultured *Cunninghamia lanceolata* seedlings and its mechanism [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2022, 42(4): 609-618. (in Chinese)
- [7] 胡晓丽,杨小莉,吴宝山,等.蘑菇渣污泥混合基质理化性质及其对女贞容器苗生长的影响[J].西南林业大学学报,2015,35(4):1-6.
HU X L, YANG X L, WU B S, et al. The physicochemical Property of mushroom residue and sludge substrate and its effect on growth of *Ligustrum* container seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015, 35(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] Wenlong B, Yanli Q, Xiaoyi S, et al. Screening and validation of housekeeping genes of the root and cotyledon of *Cunninghamia lanceolata* under abiotic stresses by using quantitative Real-Time PCR [J]. IJMS, 2016, 17(8).
- [9] 欧建德,吴志庄.南方红豆杉盆栽轻型基质配方优化[J].东北林业大学学报,2015,43(9):52-55.
- [10] 杨贵钗,潘悦,陈婉东,等.不同基质对比对蒜头果容器育苗的影响[J].西南林业大学学报:自然科学,2022,42(6):63-70.
YANG G C, PAN Y, CHEN W D, et al. Effect of different mixed substrates on the container seedling of *Malania oleifera* [J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2022, 42(6): 63-70. (in Chinese)
- [11] 庞圣江,张培,马跃,等.白木香容器苗基质配比与缓释肥施用量的生长效应[J].东北林业大学学报,2018,46(11):12-15.
PANG S J, ZHANG P, MA Y, et al. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Aquilaria sinensis* seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11): 12-15. (in Chinese)
- [12] 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.
SUN J, LIU J, YU P Y, et al. Effects of growth physiology on *Dalbergia odorifera* seedlings by different matrixes [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2015, 35(7): 45-49. (in Chinese)
- [13] 李茂,林开敏,郑鸣鸣,等.指数施肥对杉木苗期基质中微生物功能多样性的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):

- 54-61.
- LI M, LIN K M, ZHENG M M, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on microbial functional diversity in a light-medium for *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings[J]. Journal of Application and Environmental Biology, 2021, 27(1):54-61. (in Chinese)
- [14] 黄盛怡, 杨孟晴, 王斌, 等. 缓释肥×菌根菌对赤皮青冈容器苗生长性状和养分状况的影响[J]. 林业科学研究, 2022, 35(6): 161-169.
- [15] 李晓菁, 龙字文, 余仲露, 等. 基质配比和容器规格对南京椴容器苗生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(6): 46-52.
- LI X Q, LONG Z W, SHE Z L, *et al.* Effects of substrate composition and container size on growth of container seedlings of *Tilia miqueliana* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(6): 46-52. (in Chinese)
- [16] 桂子凡, 涂毅, 肖兴翠, 等. 基质配比、缓释肥用量、容器规格对喜树容器苗生长和质量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 42-49.
- GUI Z F, LENG Y, XIAO X C, *et al.* Effects of matrix ratio, SRF and container size on the growth and quality of *Campotheca acuminata* container seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(12): 42-49. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 黄斌龙, 阮少宁, 马志慧, 等. 不同轻型基质对卷荚相思容器苗生长的影响[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(2): 153-158.
- [19] 滕飞, 刘勇, 娄军山, 等. 蘑菇渣堆肥对华北落叶松移植容器苗生长和营养积累的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3889-3894.
- TENG F, LIU Y, LOU J S, *et al.* Effects of mushroom residue compost on growth and nutrient accumulation of *Larix principis-rupprechtii* containerized transplants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 27(12): 3889-3894. (in Chinese)
- [20] 韦小丽, 朱忠荣, 尹小阳, 等. 湿地松轻基质容器苗育苗技术[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2003(5): 55-58.
- WEI X L, ZHU Z R, YIN X Y, *et al.* Studies on container seedlings cultural techniques of light media for *Pinus elliottii* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2003(5): 55-58. (in Chinese)
- [21] 袁冬明, 林磊, 严春风, 等. 木荷轻基质网袋容器育苗技术研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(6): 53-58.
- YUAN D M, LIN L, YAN C F, *et al.* Studies on light weight medium fabric container for seedling culture techniques of *Schima superba* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 35(6): 53-58. (in Chinese)
- [22] 刘闵豪, 谭斌, 杨勇智, 等. 桢楠容器育苗技术研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 120-125.
- LIU M H, TAN B, YANG Y Z, *et al.* Technologies of nursing container seedlings of *Phoebe zhennan* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 120-125. (in Chinese)
- [23] 董朝清. 杉木容器育苗技术[J]. 陕西林业科技, 2015(6): 109-110.
- [24] K. V, FRANKLIN D R. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption[J]. Water Research, 2014, 63.
- [25] 韦如萍, 胡德活, 刘星, 等. 不同轻基质对杉木无性系组培苗生长的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(6): 28-33.
- [26] 张颢, 许忠坤, 徐清乾, 等. 基质配比和容器规格对杉木容器苗生长的影响[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(4): 18-21.
- [27] 朱晗, 罗红艳, 李勇, 等. 扦插密度对杉木优良无性系扦插苗生长的影响[J]. 亚热带农业研究, 2018, 14(4): 236-241.
- ZHU H, LUO H Y, LI Y, *et al.* Effects of planting density on the growth of cutting seedlings of a superior *Cunninghamia lanceolata* clones [J]. Subtropical Agriculture Research, 2008(4): 236-241. (in Chinese)
- [28] 范辉华, 赖文胜, 黄秋良, 等. 杉木不同世代良种轻基质容器育苗对比试验[J]. 湖北林业科技, 2017, 46(6): 24-27.
- [29] 桂芳, 张朝阳, 向佐湘. 利用隶属函数法对4种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 24-26.
- XU G F, ZHANG C Y, XIANG Z X, *et al.* Comprehensive evaluation of cold resistance on four *Lysimachia* plants by subordinate function values analysis [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 24-26. (in Chinese)
- [30] 李玲燕, 唐银, 钟明慧, 等. 缓释肥对杉木容器苗生长、光合生理和养分积累的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(6): 1059-1069.
- [31] 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.
- [32] 谢静, 谭嘉娜, 杨俊贤, 等. 不同栽培基质对金线莲生长和生物产量的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(20): 33-36.
- [33] 郑琰琰, 任少秋, 高飞, 等. 不同醋糟基质配比对南方红豆杉幼苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 17-21.
- ZHENG Y Y, REN S Q, GAO F, *et al.* Effect of vinegar residue ratios on growth of *Taxus chinensis* var. *mairei* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(11): 17-21. (in Chinese)
- [34] 邓华平, 杨桂娟, 王正超, 等. 轻型基质理化性质变化对金叶榆容器苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 35-40.
- DENG H P, YANG G J, WANG Z C, *et al.* Growth effects of the variance of light media physio-chemistry properties on *Ulmus pumila* seedling in container [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(8): 35-40. (in Chinese)
- [35] 刘伟, 陈正金, 李因刚, 等. 3个阔叶树种容器育苗轻型基质配方探讨[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(5): 803-808.
- LIU W, CHEN Z J, LI Y G, *et al.* Light medium formulas for container seedlings of three broadleaf tree species [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(5): 803-808. (in Chinese)
- [36] 王鹏, 张利民, 王文静. 不同处理对树木落叶生物基质理化性质的影响[J]. 北方园艺, 2012(19): 60-62.
- [37] 李斗争. 组成成分及颗粒粒径对基质孔隙特性的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.