

1.5代杉木种子园不同无性系生长和结实性状的评价

陈苏英^{1,2}, 马祥庆^{1,2*}, 吴鹏飞^{1,2}, 林文奖³, 陈友力³, 邹显花^{1,2}, 陈奶莲^{1,2}

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 国家林业局杉木工程技术研究中心, 福州 350002; 3. 福建漳平五一国有林场, 福建漳平 364400)

摘要: 为进一步优化 1.5 代杉木种子园的质量, 通过对福建漳平杉木种子园内 21 个杉木无性系生长和球果特征的调查, 分析不同无性系生长和结实性状的差异及其相互关系, 采用层次分析法对不同无性系的生长性状和结实性状进行综合评价。结果表明: 1.5 代杉木种子园不同无性系之间的生长和结实性状存在明显差异; 不同无性系的结实量、球果体积、球果鲜重与其种子产量显著相关, 生长性状与结实量、结实量与种子发芽率的相关性不显著。根据不同无性系生长性状和结实性状的综合评价结果, 有 6 个无性系具有生长快且结实量高的特性, 可作为重建 1.5 代杉木种子园的材料。

关键词: 杉木; 无性系; 生长性状; 结实性状; 综合评价

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.03.010

Evaluation on Growth and Seed Characters of Different Clones in 1.5-generation Seed Orchard of Chinese Fir

CHEN Su-ying^{1,2}, MA Xiang-qing^{1,2*}, WU Peng-fei^{1,2}, LIN Wen-jiang³, CHEN You-li³, ZHOU Xian-hua^{1,2}, CHEN Nai-lian^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Chinese Fir Engineering Research Center of State Forestry Bureau, Fuzhou 350002, China; 3. Wuyi State-owned Forest Farm, Zhangping 364400, China)

Abstract: In order to further optimize the quality of 1.5-generation seed orchard, the growth and setting characteristic of 21 Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) clones in 1.5-generation of seed orchard at Wuyi State-owned Forest Farm, Zhangping, Fujian Province, were investigated, and the difference and relationship of growth and setting characters among clones were analyzed. The characters of growth and setting of 21 clones was comprehensively evaluated by the analytic hierarchy process (AHP). The results showed that there were significant differences in growth and setting characters among different clones in 1.5-generation seed orchard. There was significant correlation between seed yield and setting amount, volume, fresh weight of cone, but no significant correlation between growth characters and cone setting amount, seed germination rate, respectively. According to the comprehensive evaluation on growth and setting characters of different clones, 6 clones of Chinese fir were selected owing to fast-growing and high seed yield. It was suggested that they could be used as materials for reconstruction 1.5-generation seed orchard of Chinese fir.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; Clone; Growth character; Setting character; Comprehensive evaluation

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook] 是我国南方重要的速生用材树种, 具有生长快、材性

好、单产高、分布广等特点, 在我国南方林木业生产中占有重要的地位^[1-2]。为提高杉木人工林的产量,

收稿日期: 2013-08-21

接受日期: 2013-10-22

基金项目: 福建省科技重大专项(2012NZ0001-1); 国家自然科学基金项目(31100472); 教育部高校博士学科专项基金(20103515120004; 20113515110009) 资助

作者简介: 陈苏英(1987~), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。E-mail: chensuying1987@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxymxq@126.com

人们在大量杉木种源试验、优树选择及优良基因收集的基础上建立了杉木种子园,为杉木人工造林提供优质种子,取得了极为显著的增产效益^[3]。但由于传统杉木种子园建设过程中在建园材料的选择上往往只注重杉木的速生性,较少考虑杉木的结实特性,导致大量已建种子园出现杉木生长快、但结实量低、种子产量不稳定的现象,无法为生产上提供足够的杉木良种^[4-7]。因此如何选择适宜的杉木建园材料,保证新建杉木种子园种子的高产稳产是当今杉木种子园建设中亟待解决的重大课题。

长期以来,国内学者在杉木种子园建园无性系的筛选、建园技术和种子园管理等方面进行了大量研究^[8-10]。刘斯通等^[11]对杉木初级种子园 20 年生子代林进行了生长性状遗传增益的分析,筛选出 18 个优势单株,为下一代种子园的建设提供了优良材料。许鲁平^[12]对杉木种子园在建园材料和园址选择、种子园营建技术、种子园管理及遗传增益等方面进行了调查和分析,为下一代种子园的营建提出了建议。袁亚夫等^[13]以四川洪雅林场杉木种子园为研究对象,对种子园的无性系配置、种子园管理、土壤及花粉管理进行了调查,认为只对 1.5 代种子园不同无性系进行子代生长性状测定,而没有对其开花结实特性进行观测,会导致种子园的产量偏低。一些学者对通过松土、施肥、生长素的施用以及辅助授粉等措施以提高种子园种子产量进行了研究^[14-17],但由于杉木的结实性状受杉木遗传特性的影响,增产效果不明显。因此,在建园之初选择生长和结实性状兼优的杉木优良无性系,可很好地解决杉木种子园种子产量低的问题。

鉴于此,本文以福建漳平五一国有林场 1.5 代杉木种子园为研究对象,对种子园内的 21 个杉木无性系的生长性状(树高、胸径、材积、冠幅)、种实性状(果长、果宽、果高径比、果体积、果鲜重、结实量、千粒重、种子发芽率)进行调查,比较不同杉木无性系生长和结实性状的差异性及其相关性,采用层次分析法对不同无性系的生长性状和结实性状进行综合评价,筛选出生长和结实性状兼优的杉木无性系,为重建 1.5 代杉木种子园提供材料。

1 试验地概况

杉木种子园位于福建省漳平市五一国有林场(东经 117°29'、北纬 25°02'),属亚热带海洋性季风气

候,年平均气温为 20.3℃,年均降水量为 1508.8 mm,年均蒸发量达 1169 mm,相对湿度 80%,年无霜期有 300 d,年日照时数达 1878 h 以上。种子园海拔为 400~500 m,土壤为山地红壤。

该园建于 1985 年,当时共有 50 个杉木无性系,大部分来源于福建省内各地的优良家系,小部分来源于贵州、浙江、安徽、四川及广东等地的优良杉木家系。种子园按照坡位、坡向和坡度进行小区划分,共划分为 8 个小区(图 1)。每个小区随机配置 25 个无性系,按 4 m×5 m 进行种植。1990 年种子园开始结果,2001 年在对杉木子代测定的基础上对初级种子园进行去劣疏伐,最后保留了 37 个无性系,建立了 1.5 代杉木种子园。

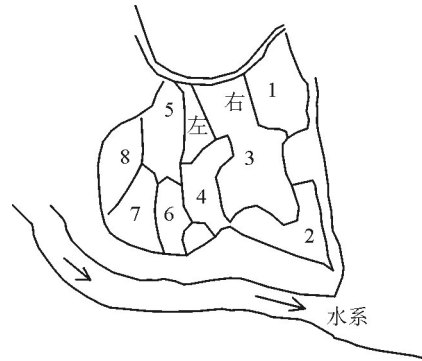


图 1 种子园小区示意图

Fig. 1 Map of seed orchard

2 研究方法

2.1 无性系生长性状的测定

1.5 代杉木种子园中有不同杉木无性系 37 个,根据坡位、坡向、当年生长和结实情况,选取具有代表性的 21 个杉木无性系进行生长性状的测定,所选无性系在种子园中的位置见图 2。

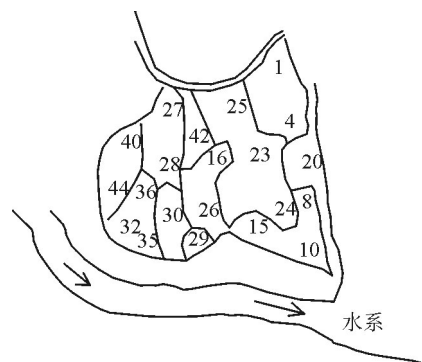


图 2 杉木种子园不同无性系的分布图

Fig. 2 Distribution map of different clones in seed orchard

2012年10月对杉木种子园中21个无性系的生长状况进行调查,每个杉木无性系随机选取3株标准木,调查树高、胸径、冠幅、冠形。采用红外测高仪(瑞典VIRTIX IV)测定杉木树高,用围径尺测量胸径,用皮尺测定冠幅。采用福建省杉木二元立木材积公式^[1]计算材积: $V = 0.0000827 \times D^{1.785388607} \times H^{0.9313923697}$ (式中, V 为材积; D 为胸径; H 为树高)。

2.2 无性系种实性状的测定

2012年10月在进行生长调查后对21个杉木无性系进行单株采种,由工人分别爬树采集不同无性系杉木的所有球果,随后进行称重,计算不同无性系杉木的结实量。从采集的每个无性系球果中随机选取种鳞尚未脱落的球果10个,带回室内进行球果特性指标的测定。用电子天平和游标卡尺在室内测定采集球果的鲜重、球果长度(最长处)、球果宽(最宽处),计算球果体积^[21],球果体积 = $1/3\pi(\text{果宽}/2)^2 \times \text{果高}$ 。将球果按无性系分开晾干,

待球果完全干裂后,取出杉木种子,用百粒法测定不同无性系种子的千粒重。在人工培养箱中进行萌发试验,统计不同无性系种子的发芽率^[18-20]。

2.3 生长和种实性状的变异系数分析

用Excel 2010和SPSS 19.0进行变异系数分析。变异系数 $V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{X}_i}$ (式中: σ_i 表示标准差; \bar{X}_i 表示平均值)。

2.4 生长和种实性状的综合评价

利用层次分析法^[22-24]对不同无性系杉木的生长性状和种实性状进行综合评价。

评价指标体系建立 目标层为筛选生长量和结实量兼优的杉木无性系;准则层由生长性状、球果性状、种子性状3个评价因子组成;子准则层由树高、胸径、材积、结实量、果体积、果鲜重、千粒重、发芽率组成(图3)。

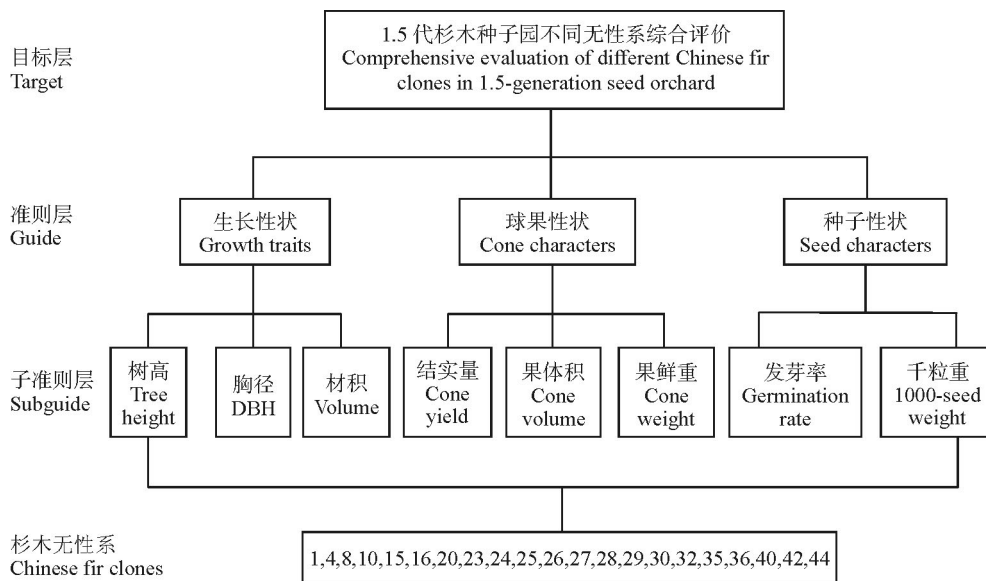


图3 多性状综合评价层次结构

Fig. 3 Construction of hierarchy process on multicharacter and polystage

综合评价指数计算 根据评价体系和层次分析法的1~9级尺度法^[23],构建判断矩阵(表1)。

表中, b_{ij} 表示第*i*个元素与第*j*个元素对上一层某个因素的重要性。矩阵要进行一次性检验,检验结果CR必须小于等于0.1,否则就要重新构造矩阵;用特征根法计算判断矩阵各元素在各准则层下的权重 $AW = \lambda_{\max} W$;用和积法求最大特征根及向

量,对判断矩阵进行正规化: $W_i = \frac{u_i}{\sum_{i=0}^n u_i}$ 。计算判断

矩阵最大特征根 $\lambda_{\max} = \sum_{i=0}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$;判断矩阵一致性

检验: $CR = CI/RI$,式中, CI 为一致性指标, RI 为平均随机指标。当 $CR \leq 0.1$ 时认为判断矩阵具有满意的一致性,决策通过一次性检验。

表1 层次分析法判断矩阵

Table 1 Judgment matrix of AHP

A	B_1	B_2	...	B_j	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1j}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2j}	...	b_{2n}
...
B_i	b_{i1}	b_{i2}	...	b_{ij}	...	b_{in}
...
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nj}	...	b_{nn}

评价结果由综合评价结果(CEI)反映,根据各个评价指标的实际测定值,将每个评价指标分为4个等级,赋值1~4分^[23-24],得到各项指标分数平均,然后根据CEI计算各个无性系的综合评价排序。 $CEI = 1/4 \sum(I_i W_i)$,式中, W_i 为评价指标的权重, I_i 为单项指标评价价值。

表2 不同杉木无性系生长性状的方差分析

Table 2 Variance analysis of growth characters of Chinese fir clones

性状 Trait	变异来源 Source	离差平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
树高 Height	无性系间 Among clones	287.812	36	7.995	1.761*	0.02
	误差 Error	266.164	35	7.605		
胸径 DBH	无性系间 Among clones	0.246	36	0.007	1.728*	0.024
	误差 Error	0.237	35	0.007		
材积 Volume	无性系间 Among clones	0	36	0	1.774*	0.019
	误差 Error	0	35	0		
冠幅 Crown width	无性系间 Among clones	54.614	36	1.517	1.246	0.211
	误差 Error	54.613	35	1.56		

*: $P < 0.05$

度均大于14%,说明杉木无性系的各生长性状存在着不稳定性,因此在建立杉木高世代种子园时对种子园建园材料的再选择是必要的和有潜力的。

3.2 球果形态特征的比较

对21个杉木无性系球果的形态特征指标进行单因素方差分析(表5),结果表明不同杉木无性系间的结实量、果长、果宽、果高径比、果体积、果鲜重等性状的差异均达极显著水平($P < 0.01$)。从表6可见,20号、28号和30号无性系的球果综合性状指标较好,28号无性系的结实量和果体积优势明显,结实量是最低(16号无性系)的17.5倍,果体

3 结果和分析

3.1 生长性状的比较

对1.5代杉木种子园21个无性系生长性状进行方差分析(表2)。除冠幅外,参试无性系之间的树高、胸径、材积的差异均达显著水平($P < 0.05$)。从表3可见,40号、30号、32号、15号、29号、26号和25号无性系的生长性状表现较优,树高在17.33~20.20 m之间,胸径在34.67~43.00 cm之间,材积在0.71~1.18 m³之间,均高出了总体平均值。从总体上看,随着树高的增加,胸径生长加快,其中40号无性系的材积最大,是最小(1号无性系)的3.69倍,树高比1号无性系高43.26%。可见不同杉木无性系间的生长存在较大差异,进行杉木无性系的选择具有较大的潜力。

从表4可知,杉木不同无性系生长性状变异程

积是最小(42号无性系)的8.67倍;且它们的结实量为5.00~19.31 kg ind.⁻¹,均大于平均值。可见,由于遗传和自然环境的差异,不同杉木无性系的球果形态特征存在明显不同。

由表7可知,杉木无性系的结实量及球果各生长性状不稳定,变异系数的大小顺序为:球果体积(变异系数78%)>结实量>果高径比>果宽>果鲜重>果长,除果长外,其他各性状的均大于18%。这些性状间的变异较大,因此在建立杉木高世代种子园时对种子园建园材料的再选择潜力巨大。

对不同杉木无性系的球果和种子性状进行相

表3 不同杉木无性系生长性状的比较

Table 3 Comparison of growth characters of Chinese fir clones

无性系 Clone	材积 (m ³) Volume	树高 (m) Height	胸径 (cm) DHB	冠幅 (m) Crown width
1	0.43 ± 0.14de	14.10 ± 1.74h	29.33 ± 6.66bc	4.83 ± 0.29ef
4	0.58 ± 0.21cde	15.50 ± 1.45fgh	32.67 ± 5.86abc	6.17 ± 0.58abcd
8	0.64 ± 0.38bcde	15.23 ± 2.08fgh	34.00 ± 9.54abc	5.83 ± 1.04abcde
10	0.32 ± 0.03e	14.53 ± 0.55gh	24.67 ± 1.16c	5.00 ± 0.50def
15	0.91 ± 0.27abc	18.07 ± 0.76abcdef	39.00 ± 6.00ab	5.83 ± 0.29abcde
16	0.66 ± 0.22bcde	18.33 ± 0.95abcdef	32.33 ± 4.93abc	5.50 ± 0.50bcde
20	0.57 ± 0.39cde	18.80 ± 0.50abcdef	28.00 ± 13.08bc	5.17 ± 1.04cdef
23	0.68 ± 0.02bcde	17.53 ± 0.40abcdefg	34.00 ± 1.00abc	5.67 ± 0.58bcde
24	0.42 ± 0.26de	17.90 ± 0.69abcdef	24.67 ± 9.71c	6.00 ± 1.32abcde
25	0.71 ± 0.20abcde	17.33 ± 1.85abcdefg	34.67 ± 3.51abc	6.50 ± 0.00ab
26	0.80 ± 0.02abcd	19.13 ± 0.64abcd	35.67 ± 1.16abc	5.50 ± 1.73bcde
27	0.74 ± 0.50abcde	19.03 ± 4.00abcde	32.33 ± 8.74abc	5.87 ± 1.01abcde
28	0.45 ± 0.15cde	14.67 ± 1.46gh	29.33 ± 4.73bc	4.23 ± 0.46f
29	0.85 ± 0.04abcd	18.07 ± 1.19abcdef	38.00 ± 2.00ab	6.00 ± 0.50abcde
30	1.15 ± 0.20a	19.63 ± 0.55abc	43.00 ± 4.00a	7.00 ± 0.50a
32	1.06 ± 0.11ab	19.83 ± 3.06ab	41.00 ± 2.65a	6.33 ± 0.29abc
35	0.46 ± 0.13cde	15.83 ± 2.30efgh	28.33 ± 3.06bc	5.50 ± 0.00bcde
36	0.78 ± 0.80abcde	16.03 ± 3.53defgh	34.33 ± 16.20abc	5.00 ± 0.50def
40	1.18 ± 0.12a	20.20 ± 0.10a	43.00 ± 0.15a	7.00 ± 0.00a
42	0.61 ± 0.09bcde	16.43 ± 1.89cdefgh	33.00 ± 1.00abc	5.93 ± 0.12abcde
44	0.80 ± 0.39abcd	16.80 ± 2.43bcdefgh	36.67 ± 7.57ab	6.17 ± 1.04abcd
平均 Mean	0.71 ± 0.33	17.29 ± 2.43	33.71 ± 7.62	5.76 ± 0.91

同列数据后不同字母表示无性系间差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level.

表4 不同杉木无性系生长性状的变异分析

Table 4 Variation analysis of growth characters of Chinese fir clones

	树高 Height	胸径 DBH	材积 Volume	冠幅 Crown width
平均 Average	17.29	33.71	0.71	5.76
标准差 Standard error	2.43	7.62	0.33	0.91
变异系数 Coefficient of variation	0.14	0.23	0.46	0.16

关性分析(表8)。不同杉木无性系结实量与种子重之间存在显著相关($P < 0.05$);球果果长、果宽、果体积与果鲜重之间存在极显著相关性($P < 0.01$);果宽、果体积、果鲜重与种子重存在明显的相关性。可见结实量、果宽、果体积和果鲜重对种子产量的影响较大,且随着球果果宽、果体积、果鲜重的增大,杉木球果的种子产量增加,但球果形态指标对

种子质量的影响不明显,即种子产量高,种子质量不一定优。

3.3 生长性状与球果产量性状的相关性分析

为探讨不同杉木无性系生长性状与球果产量的相关性,对不同杉木无性系的生长性状和球果产量性状进行相关性分析(表9)。不同杉木无性系

表5 不同杉木无性系球果结实性状的方差分析

Table 5 Variance analysis of cone setting character of Chinese fir clones

性状 Trait	变异来源 Source	离差平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
结实量 Yield	无性系间 Among clones	457.381	20	22.869	2.608**	0.004
	误差 Error	433.761	19	22.830		
长 Length	无性系间 Among clones	57.551	20	2.878	12.760**	0
	误差 Error	54.221	19	2.854		
宽 Width	无性系间 Among clones	110.776	20	5.539	111.317**	0
	误差 Error	102.908	19	5.416		
高径比 Ratio of height to diameter	无性系间 Among clones	111.888	20	5.594	122.502**	0
	误差 Error	104.491	19	5.500		
体积 Volume	无性系间 Among clones	41517.063	20	2075.853	36.978**	0
	误差 Error	39768.362	19	2093.072		
鲜重 Weight	无性系间 Among clones	1354.862	20	67.743	141.665**	0
	误差 Error	1354.590	19	71.294		

**: $P < 0.01$

表6 不同杉木无性系球果性状的比较

Table 6 Comparison of cone character among the different clones of Chinese fir

无性系 Clone	结实量 Yield (kg ind. ⁻¹)	体积 (cm ³) Volume	长度 (cm) Length	宽度 (cm) Width	高径比 Ratio of height to diameter	鲜重 (g) Weight
1	1.67 ± 0.76de	29.60 ± 7.96c	4.65 ± 0.49ab	2.44 ± 0.21efg	1.91 ± 0.16e	10.01 ± 1.46e
4	1.67 ± 1.15de	21.68 ± 6.79d	3.39 ± 0.51hi	2.44 ± 0.21efg	1.39 ± 0.14ghij	7.34 ± 1.06jk
8	4.12 ± 2.84cde	7.88 ± 2.13ef	3.89 ± 0.46def	1.38 ± 0.14hi	2.84 ± 0.27bc	9.22 ± 0.92fg
10	1.83 ± 1.15de	25.28 ± 9.60cd	3.39 ± 0.40hij	2.63 ± 0.43cde	1.31 ± 0.22ijk	5.56 ± 0.66m
15	4.50 ± 1.80cde	29.76 ± 12.89c	4.21 ± 0.96cde	2.52 ± 0.35def	1.66 ± 0.24f	10.62 ± 0.73d
16	0.67 ± 0.29e	20.03 ± 5.52d	3.43 ± 0.36ghi	2.34 ± 0.23fg	1.47 ± 0.13ghij	7.86 ± 0.69ij
20	7.50 ± 2.50abc	19.84 ± 3.45d	3.57 ± 0.31fgh	2.29 ± 0.12g	1.56 ± 0.09fgh	7.05 ± 0.32k
23	5.33 ± 2.57bcde	28.96 ± 5.87c	3.84 ± 0.41efg	2.67 ± 0.20cd	1.44 ± 0.15ghij	6.42 ± 0.60l
24	2.17 ± 1.61de	7.41 ± 1.71ef	4.27 ± 0.57bcd	1.28 ± 0.09ij	3.35 ± 0.45a	10.22 ± 0.52de
25	4.00 ± 3.04cde	62.59 ± 20.23a	4.38 ± 0.63bc	3.65 ± 0.34a	1.20 ± 0.11k	14.27 ± 0.59b
26	1.50 ± 0.87de	5.49 ± 1.65f	3.12 ± 0.41ij	1.28 ± 0.13ij	2.44 ± 0.31d	8.73 ± 0.49gh
27	5.00 ± 2.50bcde	5.07 ± 1.18f	3.14 ± 0.30ij	1.23 ± 0.09ij	2.54 ± 0.17d	7.12 ± 0.52k
28	11.67 ± 7.64a	29.01 ± 12.66c	3.51 ± 0.44fghi	2.73 ± 0.43c	1.29 ± 0.05jk	8.91 ± 0.77g
29	3.17 ± 3.75cde	24.71 ± 5.66cd	3.60 ± 0.47fgh	2.55 ± 0.17cde	1.42 ± 0.17ghij	9.79 ± 0.53ef
30	9.50 ± 3.28ab	23.47 ± 4.37cd	3.66 ± 0.24fgh	2.47 ± 0.19efg	1.49 ± 0.12fghi	8.23 ± 0.74hi
32	5.83 ± 4.07bcd	12.19 ± 4.04e	5.00 ± 0.70a	1.50 ± 0.15h	3.32 ± 0.20a	15.61 ± 0.63a
35	5.50 ± 3.46bcde	4.15 ± 0.84f	3.27 ± 0.45hij	1.10 ± 0.07jk	2.98 ± 0.42b	6.78 ± 0.58kl
36	4.50 ± 1.80cde	39.04 ± 6.51b	4.11 ± 0.30cde	3.00 ± 0.17b	1.37 ± 0.07hijk	11.67 ± 0.53c
40	2.50 ± 1.01de	4.74 ± 0.67f	3.27 ± 0.24hij	1.17 ± 0.04jk	2.78 ± 0.13c	7.38 ± 0.46jk
42	3.00 ± 2.65cde	3.34 ± 0.70fg	2.97 ± 0.33j	1.03 ± 0.06k	2.88 ± 0.24bc	5.53 ± 0.43m
44	2.33 ± 2.31de	20.99 ± 6.47d	3.64 ± 0.38fgh	2.32 ± 0.25g	1.57 ± 0.10fg	7.88 ± 0.31ij
平均 Mean	4.05 ± 2.27	20.25 ± 15.79	3.73 ± 0.69	2.10 ± 0.76	2.01 ± 0.76	8.87 ± 2.63

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level.

表 7 不同杉木无性系果实性状的变异分析

Table 7 Variation analysis of cone character of Chinese fir clones

	结实量 Yield	体积 Volume	果长 Length	果宽 Width	高径比 Ratio of height to diameter	鲜重 Weight
平均 Mean	4.05	20.25	3.73	2.1	2.01	8.87
标准差 Standard error	2.27	15.79	0.69	0.76	0.76	2.63
变异系数 Coefficient of variation	0.56	0.78	0.18	0.36	0.38	0.30

表 8 不同杉木无性系果实性状间的相关性

Table 8 Correlation coefficient among cone characters of Chinese fir clones

	结实量 Yield	果长 Length	果宽 Width	高径比 Ratio of height to diameter	体积 Volume	鲜重 Weight	千粒重 1000-seed weight	种子重 Seed weight	发芽率 Germination rate
结实量 Yield	1	-0.023	0.155	-0.178	0.12	0.088	0.323	0.436*	0.108
果长 Length		1	0.521*	0.674**	0.445*	0.737**	0.083	0.278	0.09
果宽 Width			1	-0.272	0.677**	0.744**	0.115	0.433*	0.271
高径比 Ratio of height to diameter				1	-0.027	0.176	0.006	-0.035	-0.173
体积 Volume					1	0.436*	0.079	0.453*	-0.176
鲜重 Weight						1	0.094	0.490*	0.387
千粒重 1000-seed weight							1	0.374	0.346
种子重 Seed weight								1	0.22
发芽率 Germination rate									1

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 9 不同杉木无性系生长性状与球果产量的相关性

Table 9 Correlation among growth characters and cone yield of Chinese fir clones

	材积 Volume	树高 Height	胸径 DBH	冠幅 Crown width	结实量 Cone yield
材积 Volume	1	0.823**	0.972**	0.818**	0.098
树高 Height		1	0.747**	0.809**	0.076
胸径 DBH			1	0.802**	0.110
冠幅 Crown width				1	0.049
结实量 Cone yield					1

** : $P < 0.01$

的材积、树高、胸径和冠幅之间存在极显著相关性 ($P < 0.01$), 但与结实量性状之间的相关性不明显。可见, 不同杉木无性系的材积、树高、胸径和冠幅对球果产量的影响不大, 生长快的无性系其种子产量不一定高, 这也证实只注重选择生长性状优良的无性系建立杉木种子园会出现产量不稳定现象。

3.4 生长和结实性状的综合评价

3.4.1 判断矩阵的构造及一致性检验

根据图 3 及 1~9 级尺度法, 对总目标层 A 和综合评价层 B (B_1, B_2, B_3) 构建判断矩阵(表 10)。

然后依次计算矩阵的最大特征值 λ_{max} 和一致性指标 CI , 然后确定平均一致性指标 RI , 最后计算出随机一致性比值: $CR = 0.001 \leq 0.1$, 可见矩阵满足一致性。同样构建评价层 B 对 C 层的判断矩阵, 依次计算 λ_{max} 、 CI 、 RI 、 CR , 结果见表 11。

3.4.2 各评价因子排序

根据以上各个判断矩阵, 计算出各评价因子对总目标层的权重值, 并进行排序(表 12), 材积 C_3 、结实量 C_4 和发芽率 C_7 的权重分别排在第一、第二和第三位, 这与种子园经营中既需要林木生长快又需要种子产量高的目的相符。

表 10 A-B 判断矩阵

Table 10 A-B judgment matrix

A	B ₁	B ₂	B ₃	权重 Weight
B ₁	1	1	3	0.429
B ₂	1	1	3	0.429
B ₃	1/3	1/3	1	0.143

$\lambda_{\max} = 3.001$ $CI = 0.0005$ $RI = 0.58$ $CR = 0.001 \leq 0.1$

表 11 各准则层对于相应子准则层的特征向量及一致性检验

Table 11 Eigenvector and consistency check for guide layer to corresponding subguide layer

矩阵 Matrix	特征向量 Eigenvector	λ_{\max}	CI	RI	CR
B ₁ -C	(0.167, 0.167, 0.667) ^T	3.001	0	0.58	0.000 ≤ 0.1
B ₂ -C	(0.665, 0.104, 0.231) ^T	3.087	0.043	0.58	0.075 ≤ 0.1
B ₃ -C	(0.750, 0.250) ^T	1.333	-0.667	0	0.000 ≤ 0.1

表 12 各评价因子的权重和排序

Table 12 Weight and order of evaluation factors

因子 Factor	B ₁	B ₂	B ₃	权重 Weight	排序 Order
	0.429	0.429	0.143		
C ₁	0.167			0.071643	5
C ₂	0.167			0.071643	5
C ₃	0.667			0.286143	1
C ₄		0.665		0.285285	2
C ₅		0.104		0.044616	7
C ₆		0.231		0.099099	4
C ₇			0.75	0.10725	3
C ₈			0.25	0.03575	8

C₁: 树高; C₂: 胸径; C₃: 材积; C₄: 结实量; C₅: 果体积; C₆: 果鲜重; C₇: 发芽率; C₈: 千粒重; B₁: 生长性状; B₂: 球果性状; B₃: 种子性状。

C₁: Height; C₂: DBH; C₃: Volume; C₄: Cone yield; C₅: Cone volume; C₆: Cone weight; C₇: Germination rate; C₈: 1000-seed weight; B₁: Growth trait; B₂: Cone character; B₃: Seed character.

3.4.3 综合评价

采用综合评价指数法 *CEI* 来反映综合评价结果。由表 13 可知, 32 号无性系综合分位居第一位, 可见在 21 个无性系中 32 号无性系的生长快而且种子产量高; 8 号无性系的综合排序位于末位。将综合评分结果与平均值比较, 按 30% 的入选率, 从参试的 21 个无性系选出 32、30、25、15、29、27 号生长快、结实量高的 6 个优良杉木无性系, 可考虑作为 1.5 代种子园重建材料。

4 结论和讨论

1.5 代杉木种子园不同无性系的生长性状(树高、胸径、单株材积)间存在显著差异, 生长性状较优的 40 号、30 号和 32 号无性系的平均材积达 1.13 m³, 是参试无性系平均值的 1.6 倍; 不同无性系的结实量及种实性状存在极显著差异, 其中产量最高的 28 号无性系是最低的 17.4 倍; 且杉木各生长性状以及结实性状等除果长外, 均存在较大的不稳定性, 说明对杉木种子园建园材料的再选择是必

表 13 不同杉木无性系的综合评价结果

Table 13 Comprehensive evaluation of Chinese fir clones

无性系 Clone	CEI	排序 Order	无性系 Clone	CEI	排序 Order
32	0.962	1	28	0.621	12
30	0.863	2	26	0.616	13
25	0.788	3	35	0.545	14
15	0.718	4	16	0.531	15
29	0.707	5	44	0.513	16
27	0.704	6	4	0.470	17
36	0.698	7	42	0.456	18
40	0.696	8	24	0.443	19
23	0.650	9	1	0.405	20
8	0.648	10	10	0.329	21
20	0.637	11	平均 Mean	0.619	

要和有潜力的。

大量研究表明:针叶树种子园不同无性系间的生长性状和结实性状存在显著差异,且生长性状和结实性状在优树间也存在变异^[25-26]。刘斯通等^[27]的研究表明:杉木种子园 20 年生子代林各优树树高、胸径和单株材积间的差异性达极显著水平,且各生长性状间存在极显著的相关性。孙文生^[28]的研究表明:红松(*Pinus koraiensis*)种子园各无性系间的结实量存在极显著差异,不同立地条件、管理方式、树龄及遗传因子对种子园结实量具有显著影响。本研究也得到相似结果,即种子园中不同杉木无性系之间的生长性状和结实量存在显著差异,各性状受坡位、坡度及管理因素的影响会出现一定程度的变异。

40 号、32 号、15 号和 29 号杉木无性系的生长性状较优,但其产量较低,最优的 40 号无性系的产量为 2.5 kg,低于总体平均值;而结实量较大的 28 号、20 号和 23 号无性系结实量均高于平均值的 1.3 倍以上,然而 28 号的材积仅为 40 号的 38%,即生长性状较优的无性系结实量不一定高。丘进清^[29]的研究表明:种子园不同杉木无性系间结实量存在较大的遗传差异,在结实性状稳定且高产的无性系中,存在着生长性状一般或者不良的无性系。洪永辉等^[30]对马尾松(*Pinus massoniana*)种子园无性系的产量和生长性状进行相关分析表明:两者不相关,基本属于独立遗传关系,因此可对两性状进行同时改良和选择。本研究表明:杉木生长性状与结实量相关性不显著,有些生长较优的无性系产量反而偏低,因此要保证杉木种子园的高产,要选择

遗传品质好、产量高的优良无性系作为建园材料。白天道^[31]研究表明:母树的结实量与单果出种量相关性不显著,但与家系产量极显著相关。本研究表明:不同杉木无性系的结实量、球果体积、球果鲜重与其种子产量显著相关,即结实量大的种子产量也较高,本文研究结果与前人研究基本一致。因此对 1.5 代种子园重建材料的选取除需要考虑生长性状外,还需考虑结实性状,尽可能利用生长和结实兼优的材料作为建园材料。

采用层次分析法对杉木种子园 21 个不同无性系的生长和结实性状进行综合评价,筛选出生长较快且结实量高的 6 个无性系,占参评无性系的 28.6%,可为改良 1.5 代杉木种子园提供科学依据。在今后杉木种子园建设中必须改变传统只筛选速生杉木无性系,较少考虑其结实性及种子质量等倾向,应综合考虑建园材料的速生性和结实性,才能实现杉木种子园的高产稳产。

致谢 福建农林大学林学院黄淞宇、高峰林和高子健等同学在外业调查和室内分析提供帮助和支持,在此表示感谢!

参考文献

- [1] Wu P F, Ma X Q, Jiang J, et al. Comparison of growth among progeny test young plantations of Chinese fir clones in western Fujian [J]. J Fujian Agri Univ (Nat Sci), 2009, 38(4): 371-375.
吴鹏飞, 马祥庆, 蒋建, 等. 闽西不同杉木无性系子代测定林幼林生长的比较 [J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(4): 371-375.
- [2] Yu X T. A summary of the studies on Chinese fir in 1990's: I. The distinguishing features of Chinese fir research and research

- development on basic research [J]. *J Fujian For Coll*, 2000, 20(1): 86–95.
- 俞新妥. 中国杉木90年代的研究进展: I. 杉木研究的特点及有关基础研究的综述 [J]. *福建林学院学报*, 2000, 20(1): 86–95.
- [3] Sun H Y, Zheng Y P, Weng C M, et al. Seed quality character variation and seed genetic parameters of *Cunninghamia lanceolata* in seed orchard [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, 22(1): 61–65.
- 孙鸿有, 郑勇平, 翁春媚, 等. 杉木种子园种子品质性状变异及遗传参数 [J]. *浙江林学院学报*, 2005, 22(1): 61–65.
- [4] Lai X E, Wang R H, Hu D Q, et al. Growth analyses of half-sib families from 2th generation seed orchard of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Guangdong For Sci Techn*, 2013, 29(1): 47–50.
- 赖旭恩, 王润辉, 胡德洽, 等. 杉木2代种子园半同胞子代测定林生长分析 [J]. *广东林业科技*, 2013, 29(1): 47–50.
- [5] He G P, Luo W J, Jin Q X, et al. Genetic difference and clone selection of main traits of growth and wood quality of Chinese fir clone [J]. *Acta Agri Univ Jiangxi*, 2009, 31(1): 91–93.
- 何贵平, 骆文坚, 金其祥, 等. 杉木无性系主要生长、材质性状遗传差异及无性系选择 [J]. *江西农业大学学报*, 2009, 31(1): 91–93.
- [6] Wang Z R. Techniques on establishment and management of advanced-generation seed orchard [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2012, 36(1): 8–10.
- 王章荣. 高世代种子园营建的一些技术问题 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(1): 8–10.
- [7] van Buijtenen J P, Lowe W J. The use of breeding groups in advanced generation breeding [R]. *Conf Miss Stata: Proceedings of the 15th South Forest Tree Improve*, 1979: 59–65.
- [8] Weng Y Z. Genetic variations of open-pollinated progenies from the second seed orchard and selection of superior families of Chinese fir [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2008, 32(1): 15–18.
- 翁玉榛. 杉木第二代种子园自由授粉子代遗传变异及优良家系选择 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(1): 15–18.
- [9] Zhang G Y, Chen R S, Shi Y W, et al. Study on establishing third generation seed orchard and clones selecting for *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. in Guizhou Province [J]. *Seed*, 2010, 29(3): 75–77.
- 张贵云, 陈瑞生, 石杨文, 等. 贵州杉木第3代种子园建立及优良繁殖材料选择技术研究 [J]. *种子*, 2010, 29(3): 75–77.
- [10] Fang L J, Shi J S. A study on relationship between the seed crop in the Chinese fir orchards and meteorological factors [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(2): 235–239.
- 方乐金, 施季森. 杉木种子园种子产量及其主导影响因子的分析 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 235–239.
- [11] Liu S T, Zheng H Q, Liang R Y, et al. Preliminary evaluation of 20-year-old superior progenies from *Cunninghamia lanceolata* seed orchard [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(9): 20–23.
- 刘斯通, 郑会全, 梁瑞友, 等. 杉木种子园20年生子代林优树的初评 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(9): 20–23.
- [12] Xu L P. Overview of high and stable yield about Chinese fir seed orchard [J]. *J Nanchang Inst Techn*, 2011, 30(6): 49–53, 61.
- 许鲁平. 杉木种子园高产、稳产研究概述 [J]. *南昌工程学院学报*, 2011, 30(6): 49–53, 61.
- [13] Yuan Y F, Yang C T, Zhang X Q, et al. Good quality and high yield Chinese fir seed orchard is established and management technology [J]. *J Sichuan For Sci Techn*, 2012, 33(3): 103–106.
- 袁亚夫, 杨昌通, 张学强, 等. 优质高产杉木种子园建园与管理技术探讨 [J]. *四川林业科技*, 2012, 33(3): 103–106.
- [14] Lambeth C, Lee B C, O'Malley, et al. Polymix breeding with parental analysis of progeny: An alternative to full-sib breeding and testing [J]. *Theor Appl Genet*, 2001, 103(6/7): 903–943.
- [15] Klein E I. A plan for advanced-generation breeding of Jack pine [J]. *For Gen*, 1998, 5(2): 73–93.
- [16] Yang P H, Fan J F, Liu Y H, et al. Studies on establishing techniques for the advanced generation seed orchards of *Pinus tabulaeformis* Carr. [J]. *J CS For Univ*, 2005, 25(6): 65–69.
- 杨培华, 樊军锋, 刘永红, 等. 油松高世代种子园营建技术 [J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(6): 65–69.
- [17] Fang L J, Shi J S. A study on relationship between the seed crop in the Chinese fir orchards and meteorological factors [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(2): 235–239.
- 方乐金, 施季森. 杉木种子园种子产量及其主导影响因子的分析 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 235–239.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. *Inspection of Tree Seeds GB2772–1999* [S]. Beijing: China Standard Press, 2000.
- 国家质量技术监督局. GB2772–1999林木种子检验规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [19] Han C Y, Sun W B, Dong Q S, et al. Study on seed quality grading standard of *Abrus canthoniensis* Hance [J]. *Seed*, 2011, 30(4): 120–122.
- 韩春艳, 孙卫邦, 董青松, 等. 广州相思子种子质量分级标准研究 [J]. *种子*, 2011, 30(4): 120–122.
- [20] Mao P L, Hang G X, Zhang Z D, et al. Relationship between distribution of diameter size classes and characteristics of cones and seeds of *Pinus thunbergii* in a coastal protection forest [J]. *J NE For Univ*, 2010, 38(11): 21–23.
- 毛培利, 韩广轩, 张志东, 等. 黑松海岸防护林径级分布及其与球果和种子特性的关系 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 21–23.
- [21] Miu S Y, Lin M S, Chen J H, et al. Morphologic and anatomic indexes of *Pinus kwangtungensis* cone and seed [J]. *J Anhui Agri Sci*, 2010, 38(13): 7046–7048, 7063.
- 缪绅裕, 林慕珊, 陈健辉, 等. 广东松球果与种子形态解剖特征 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(13): 7046–7048, 7063.
- [22] Fan H B, Liu W F, Li Y Y, et al. Application of analytic hierarchy

- process to assessing the integrated values of mixed masson pine-hardwood forests in northwestern Fujian mountain [J]. *J Mountain Sci*, 2009, 27(3): 257–264.
- 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 等. 应用层次分析法评价闽西北山地马尾松-阔叶树混交林的综合效益 [J]. *山地学报*, 2009, 27(3): 257–264.
- [23] Wang Y H, Sun Y H, Lian J, et al. Study on wetland ecological assessment of Honghe Nature Reserve [J]. *J Cap Norm Univ (Nat Sci)*, 2011, 32(3): 73–77.
- 王一涵, 孙永化, 连健, 等. 洪河自然保护区湿地生态评价 [J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(3): 73–77.
- [24] Liu X Z, Lu Y C, Liu G, et al. Multi-index species dominance based on analytic hierarchy process [J]. *J NE For Univ*, 2009, 37(7): 39–41.
- 刘宪钊, 陆元昌, 刘刚, 等. 基于层次分析法的多指标树种优势度的比较分析 [J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(7): 39–41.
- [25] Cui B L, Yang J M, Zheng H, et al. Advances on the yield in seed orchard of Chinese conifers [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 2005, 20(2): 120–137.
- 崔宝禄, 杨俊明, 郑辉, 等. 我国针叶树种子园结实量的研究进展 [J]. *河北林果研究*, 2005, 20(2): 120–137.
- [26] Cao H Y. Half-sid progeny test and early selection of the 2nd generation seed orchard for *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2011, 35(1): 19–23.
- 曹汉洋. 杉木第2代种子园半同胞子代测定及早期选择 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(1): 19–23.
- [27] Zheng R H. Genetic variations of seed orchard open-pollinated progenies and selection of superior genotypes of Chinese fir [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2006, 30(1): 7–12.
- 郑仁华. 杉木种子园自由授粉子代遗传变异及优良遗传型选择 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(1): 7–12.
- [28] Sun W H. High quality and high yield of Korean pine seed orchard management technology research [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 1–100.
- 孙文生. 红松种子园优质高产经营技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006: 1–100.
- [29] Qiu J Q. Advance on seed orchard technique of Chinese fir [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2006, 30(5): 103–106.
- 丘进清. 杉木种子园技术综述 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(5): 103–106.
- [30] Hong Y H. Multi-traits selection of clonal parents for seed orchards of *Pinus massoniana* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2011, 35(6): 23–28.
- 洪永辉. 马尾松种子园无性系亲本多性状联合选择 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(6): 23–28.
- [31] Bai T D. Analysis of characters and genetic evaluation of family in seedling seed orchard of *Pinus massoniana* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011: 1–54.
- 白天道. 马尾松实生种子园家系特征分析及遗传评价 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011: 1–54.