



14个杉木家系主要用材性状表型多样性分析与评价

程琳, 戴俊, 罗启亮, 卢翠香, 陈琴, 王斌, 黄开勇, 李盛

引用本文:

程琳,戴俊,罗启亮,卢翠香,陈琴,王斌,黄开勇,李盛. 14个杉木家系主要用材性状表型多样性分析与评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 874–014–1.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4615>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于表型性状和SSR标记的57份辣椒种质遗传多样性分析](#)

Genetic Diversity Analysis of 57 Germplasms of *Capsicum annuum* Based on Phenotypic Traits and SSR Markers

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 356–366 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4185>

[滇南亚高山巨桉种源/家系变异及早期选择研究](#)

Variation Analysis and Early Selection for *Eucalyptus grandis* Provenances/Families in Central South Yunnan Province

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 257–263 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3692>

[杉木半同胞子代胸径变异和大径材家系选择](#)

Diameter Variation of Chinese Fir Half-sib Progenies and Selection for Large-size Timber Families

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 513–519 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4205>

[橄榄种质资源花序表型性状遗传多样性研究](#)

Studies on Genetic Diversity on Inflorescence Phenotypic Characteristics of *Canarium album* Germplasm Resource

热带亚热带植物学报. 2019, 27(1): 1–10 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3940>

[基于SSR标记的广东栽培益智群体遗传多样性分析](#)

Genetic Diversity of Cultivated Populations of *Alpinia oxyphylla* in Guangdong Based on SSR Marker

热带亚热带植物学报. 2022, 30(3): 329–335 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4433>

向下翻页，浏览PDF全文

14 个杉木家系主要用材性状表型多样性分析与评价

程琳¹, 戴俊¹, 罗启亮², 卢翠香¹, 陈琴¹, 王斌², 黄开勇^{1*}, 李盛³

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院广西优良用材林资源培育重点实验室, 南宁 530002; 2. 融安县西山林场, 广西 融安 545400; 3. 广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004)

摘要: 为了解杉木(*Cunninghamia lanceolata*)家系间用材性状的表型变异特征, 采用方差分析、聚类分析、主成分分析等方法, 对 14 个杉木家系的 10 个生长指标进行表型多样性分析和综合评价。结果表明, 杉木家系主要用材性状的表型多样性指数为 1.438~2.008, 平均为 1.735, 最大的是树高, 最小的是管胞长度。表型多样性丰富, 其中, 树高、胸径、单株材积、管胞长宽比和生材密度具有较强的遗传变异性, 且各性状间具有一定相关性。家系遗传力(H^2)为 0.012~0.934, 最大的是管胞长宽比, 最小的是生材密度。表型变异系数为 3.81%~39.90%, 平均为 15.03%, 最大的是单株材积、最小是管胞腔径比, 遗传改良潜力大。14 个杉木家系可划分为 3 大类群, 其中, 类群 III 的综合性状最优, 类群 I 的生长量最佳。综合性状排名前 3 的家系是 JX3、JX10 和 JX2。因此, 10 个主要用材性状的表型多样性丰富, 筛选出的 3 个家系可作为优良材料用于杉木种质的保存与高效利用。

关键词: 杉木; 半同胞家系; 用材性状; 表型多样性; 综合评价

doi: 10.11926/jtsb.4615

Phenotypic Diversity Analysis and Evaluation of Main Timber Traits in 14 Families of Chinese Fir

CHENG Lin¹, DAI Jun¹, LUO Qiliang², LU Cuixiang¹, CHEN Qin¹, WANG Bin², HUANG Kaiyong^{1*}, LI Sheng³

(1. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation of Forestry Research Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530002, China; 2. Xishan Forest Farm of Rong'an County, Rong'an 545400, Guangxi, China; 3. Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, Guangxi, China)

Abstract: To understand the variation characteristics of timber traits among Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) families, the phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 10 growth indexes of 14 families were studied by using methods of variance analysis, cluster analysis, principal component analysis. The results showed that the phenotypic diversity indexes of 10 main timber traits in 14 families ranged from 1.438 to 2.008 with an average of 1.735, among which the highest was height, and the smallest was tracheid length. The phenotypic diversity was rich, height, diameter at breast height, volume, length-width ratio and green density had strong genetic variability, and there was a certain correlation among traits. The family heritability (H^2) ranged from 0.012 to 0.934, the largest was length-width ratio, and the smallest was green density. The phenotypic variation coefficient varied from 3.81% to 39.90% with an average of 15.03%, the biggest and smallest were

收稿日期: 2022-01-17 接受日期: 2022-04-13

基金项目: 广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题(2020-A-01-03); 国家重点研发计划子课题(2021YFD2201301-03); 广西科技计划项目(桂科 AB22035083)资助

This work was supported by the Project of Guangxi Key Laboratory of Excellent Timber Forest Resources Cultivation (Grant No. 2020-A-01-03), the Project for National Key Research & Development Planning (Grant No. 2021YFD2201301-03), and the Project for Science and Technology Planning in Guangxi (Grant No. AB22035083).

作者简介: 程琳(1989 生), 女, 硕士, 工程师, 从事植物种质资源研究与利用研究。E-mail: 897653918@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huangky73@163.com

volume and tracheid cavity to width ratio, respectively, indicating that the genetic improvement potential was great. The 14 Chinese fir families could be divided into three major groups, group III had the best comprehensive traits, and group I had the best growth. The top 3 families for growth traits were JX3, JX10, JX2. Therefore, the phenotypic diversity of the 10 main timber traits was rich, and the top 3 families could be used as excellent materials for the conservation and efficient utilization of Chinese fir germplasm.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; Half-sib family; Timber trait; Phenotypic diversity; Comprehensive evaluation

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国特有的树种,具有生长迅速、材质优良的特性,是优质建筑、装饰和纸浆用材,具有较高的经济和生态价值^[1-2]。广西作为国内杉木中心产区,杉木蓄积量位居全区人工林第一位;“十三五规划”期间,杉木人工林面积年均增加近 5.3×10^4 hm²,为全国乃至全区林业发展做出了重要贡献^[3-4]。据第九次全国森林资源清查结果显示,广西人工林面积 7.34×10^5 hm²,森林覆盖率超60%,分别位居全国第1位和第3位。随着经济社会的日益发展和人民生活水平的不断提高,社会对木材材质的要求也在不断提高。木材品质是林木生产力的重要体现,也是提升森林质量的基础,更是缓解木材供求矛盾的有效途径,同时满足林场和社会生产需求,对森林提质增效及推动资源保护和利用具有重要意义。

表型多样性是种质评价的重要因子,对于优良种质选育、种质创新和资源的开发利用具有重要意义^[5]。目前,通过多样性研究对马尾松(*Pinus massoniana*)^[6]、杉木^[7]、桉树(*Eucalyptus robusta*)^[8]等树种进行了林木对比试验,并阐述了遗传变异规律,为种质资源的保存与利用提供理论依据。利用准确、简单的鉴定指标和合理的评定方法对林木种质综合评价具有重要意义。黄寿先等^[9]分析了12a生杉木5个生长相关性状,探讨杉木生长和材性的表型多样性规律,并通过多样性综合指数选择获得了2个速生、优质的优良纤维用材无性系。王润辉等^[10]基于杉木生长和材性因子,研究了遗传变异特性,得出指数选择是改良选择效果的理想方法,对种质筛选具有重要的意义。朱安明等^[11]研究了21a生杉木无性系的主要用材性状,认为无性系基本密度与胸径之间存在极显著负相关,并选择出1个生长和基本密度兼优的优良无性系43号。莫家兴等^[12]开展了对柳杉生长和材性的测定和分析等相关研究,并选出4个综合选择指数高的家系,为柳杉遗传改良提供科学参考。

表型多样性是基因型和环境共同作用的结果,是植物遗传多样性的直接表现,能够快速探知植物的遗传多样性水平;而生长量特性、木材解剖特性、木材物理特性是研究用材性状表型多样性重要的评定指标,但至今关于30a生杉木家系生长量特性、解剖特性、物理特性等性状的表型多样性分析及种质筛选的综合性研究鲜有报道。本研究通过对广西30a生杉木家系进行综合测定和分析,以期探索出表型多样性变异规律,探寻各指标间相关性,同时通过综合评价筛选出具有性状优势的种质,为进一步开展杉木种质资源保护利用和遗传改良工作,从而提升杉木品质遗传基础提供优良种质材料,同时也为杉木产业化进程提供科学理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验以14个广西各地杉木(*Cunninghamia lanceolata*)半同胞家系为研究对象,材料来源于广西融安县西山林场国家级杉木良种基地(21°20' N, 109°20' E),海拔210~810 m。试验地处于中亚热带气候带,年均温20℃,年均降水量1 899.6 mm,全年温差并不大,冬天少冰寒;土壤肥沃,透水性能好,pH值4.6~6.6,是杉木适生区。14个供试杉木半同胞优良家系的编号及种子园母树来源信息见表1。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,试验设5个区组,每个小区(家系)内单列栽植8株,1998年间伐后每小区保留4株。小区穴状整地,造林密度为3 000 ind./hm²,设1~2行保护行。试验地的管理措施和立地条件基本一致。不同家系来源于西山林场国家级杉木良种基地初级种子园自由授粉的种子,试验林营建于1984年,于2014年进行测定与分析。本试验中主要用材性状分为生长量特性、解剖特性和物理特

表 1 供试杉木

Table 1 Information of *Cunninghamia lanceolata*

序号 No.	家系编号 Family code	母树来源 Origin of mother tree	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	序号 No.	家系编号 Family code	母树来源 Origin of mother tree	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude
1	JX1	柳州融安	109°18'	25°12'	8	JX8	河池天峨	107°11'	24°58'
2	JX2	柳州融安	109°18'	25°12'	9	JX9	河池天峨	107°11'	24°58'
3	JX3	柳州融安	109°18'	25°12'	10	JX10	河池南丹	107°55'	24°42'
4	JX4	柳州融水	108°35'	24°49'	11	JX11	河池南丹	107°55'	24°42'
5	JX5	桂林阳朔	110°26'	24°45'	12	JX12	河池南丹	107°55'	24°42'
6	JX6	桂林平乐	110°45'	24°22'	13	JX13	河池南丹	107°55'	24°42'
7	JX7	百色德保	106°43'	23°28'	14	JX14	来宾金秀	109°55'	24°13'

性, 先对 102 个家系和 1 个融安当地普通种(对照)进行生长量分析, 每个家系每个重复测定 4 株, 共计 20 株; 筛选出 14 个具有生长优势的家系及其生长前 10 的优良单株, 再对这 14 个家系优良单株进行木芯采集和材性分析, 每个家系采集 10 株木芯, 最后通过综合评价选出兼具生长和材性优势的家系。

1.3 指标测定

生长量特性 树高(height, H , m)和胸径(diameter at breast, D , cm)分别用测高杆和胸径尺对样木进行测定; 单株材积(volume, V , m^3)依照公式^[13]计算: $V=0.65671 \times 10^{-4} \times D^{1.769412} \times H^{1.069769}$ 。

解剖特性 手持生长锥(瑞典 Haglof, 内径 5.1 mm)在每株样木南北方向 1.3 m 处采集木芯, 编号后放入胶管中, 尽快带回实验室进行材性性状检测。采用双氧水/冰醋酸离析法对木样进行离析, 通过数码显微图像电脑分析系统(日本, 尼康 Eclipse 80i)测定杉木管胞长度、管胞宽度和管胞双壁厚, 每项指标测定 60 次, 再计算出长宽比和腔径比。

物理特性 按照国标《木材密度测定方法》(GB/T 1933—2009)的方法测定各家系的木材基本密度和生材密度。

方差分析的数学模型 $X_{ij} = \bar{X} + F_j + B_j + FB_{ij} + e_{ij}$, \bar{X} 为家系均值, F_j 为家系效应, B_j 为区组效应, 为 FB_{ij} 家系与区组的互作效应, e_{ij} 为随机误差。

遗传参数的估算 测定遗传力和变异系数。

家系遗传力 $H^2 = \frac{\sigma_F^2}{(\sigma_e^2/nB) + (\sigma_{FB}^2/B) + \sigma_F^2}$; 单株遗

传力 $h^2 = \frac{4\sigma_F^2}{\sigma_e^2 + \sigma_{FB}^2 + \sigma_F^2}$, 式中, σ_F^2 为家系方差分量,

σ_e^2 为环境方差分量, σ_{FB}^2 为家系与区组互作的方差分量, n 为小区调查单株数, B 为区组数。表型变

异系数 $PCV = (\sqrt{\sigma_p^2} / \bar{X}) \times 100\%$; 遗传变异系数 $GCV = (\sqrt{\sigma_g^2} / \bar{X}) \times 100\%$, 式中, σ_p^2 为表型方差分量, σ_g^2 为遗传方差分量。遗传增益: $\Delta G = SH^2 / \bar{X}$, S 为选择差, \bar{X} 为性状群体均值。

1.4 数据的统计分析

采用 Excel 2007 对数据进行整理, 采用 SPSS 19.0 软件对各性状进行方差分析、相关性分析、聚类分析和主成分分析。先计算杉木主要用材性状的平均值 \bar{x} 和标准差 S , 将各用材性状整体分为 10 级, 从 1 级 $< (\bar{x} - 2S)$ 到 10 级 $\geq (\bar{x} + 2S)$, 每 $0.5S$ 划分为 1 级, 根据每一级的分布频率计算表型多样性指数 (H')^[5,14]。

2 结果和分析

2.1 杉木不同家系间主要用材性状差异分析

生长量试验共计 102 个家系和 1 个对照, 根据 102 个家系遗传增益选取排名前 14 的家系; 材性试验共计选出的 14 个具有生长量优势的家系, 每个家系采集 10 株木芯, 对木芯进行解剖特性和物理特性测定和分析。根据林木良种审定规范(GB/T 14071—1993), 以 30 a 生杉木家系大于或等于当地普通种对照 15% 为前提, 得出树高、胸径和材积的增益权重分别是 0.2、0.4 和 0.4, 据此选出大于对照 30% 的优良家系 14 个, 占家系总数的 13.7%, 为进一步良种选育提供优质种质材料。

2.2 杉木主要用材性状遗传变异分析

对 14 个杉木家系共 140 株参试单株的主要用材性状进行方差分析(表 2)。结果表明, 5 个解剖特性指标在家系间均存在极显著差异($P < 0.01$), 树高、

胸径、材积和基本密度在家系间存在显著差异($P < 0.05$), 生材密度在家系间差异不显著($P > 0.05$)。

对 14 个杉木家系共 140 株参试单株主要用材性状进行遗传参数估算和分析(表 3)。从结果可看出, 杉木 10 个参试性状的家系遗传力为 0.012~0.934,

最大值和最小值分别是管胞长宽比和生材密度, 解剖特性的家系遗传力高于生长量特性; 管胞长宽比的单株遗传力最高($h^2=0.848$), 生材密度最小($h^2=0.018$), 说明杉木主要用材性状的差异由遗传控制, 为良种选育提供可能。

表 2 不同家系杉木主要用材性状的方差分析

Table 2 Variation analysis of main timber traits of different *Cunninghamia lanceolata* families

	性状 Trait	均值 Mean	标准差 Standard Deviation	最大值 Maximum	最小值 Minimum	F		
						家系 (A) Family	区组 (B) Block	A × B
生长量 Growth	树高 Height (m)	26.58	5.12	30.89	22.79	2.080*	0.646	0.985
	胸径 Diameter (cm)	18.50	2.56	20.50	16.45	2.134*	4.761**	1.290
	单株材积 Volume (m ³)	0.40	0.16	0.52	0.27	1.980*	2.385	0.821
管胞 Tracheid	长度 Length (L, μm)	2 696.24	214.67	2 993.20	2 523.67	7.908**	0.338	0.872
	宽度 Width (W, μm)	32.97	3.11	36.41	27.82	7.889**	1.107	1.006
	长宽比 L/W	84.07	8.19	96.35	72.97	15.256**	1.423	1.343
	双壁厚 Double wall thickness (μm)	6.93	1.33	9.40	5.65	6.693**	1.494	1.654*
	腔径比 Cavity to width ratio	0.78	0.03	0.80	0.72	7.261**	2.082	1.880**
物理 Physic	基本密度 Basic density (g/cm ³)	0.33	0.04	0.37	0.31	1.831*	0.619	1.065
	生材密度 Green density (g/cm ³)	0.69	0.11	0.76	0.61	1.012	3.619**	0.875

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。下同

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same below

表 3 不同家系杉木主要用材性状遗传参数估计

Table 3 Genetic parameter estimation for main timber traits of different *Cunninghamia lanceolata* families

性状 Trait		表型变异系数 /%	遗传变异系数 /%	家系遗传力 (H^2)	单株遗传力 (h^2)	多样性指数 (H')
		Phenotypic variance	Genetic variance	Family heritability	Heritability per plant	Diversity index
生长量 Growth	树高 Height	19.25	19.22	0.519	0.208	2.008
	胸径 Diameter	13.82	10.30	0.531	0.151	1.909
	单株材积 Volume	39.90	40.06	0.495	0.229	1.810
均值 Meam		24.32	23.19			
管胞 Tracheid	长度 Length (L)	7.96	16.18	0.874	0.499	1.438
	宽度 Width (W)	9.43	17.81	0.873	0.484	1.668
	长宽比 L/W	9.75	21.63	0.934	0.848	1.847
	双壁厚 Double wall thickness	19.18	28.96	0.851	0.346	1.697
	腔径比 Cavity to width ratio	3.81	5.84	0.862	0.360	1.537
均值 Meam		10.03	18.08			
物理 Physic	基本密度 Basic density	11.48	9.29	0.454	0.145	1.593
	生材密度 Green density	15.70	4.57	0.012	0.018	1.847
均值 Meam		13.59	6.93			
总均值 Total mean		15.03	17.39			

杉木 10 个主要用材性状的表型变异系数为 3.81%~39.90%, 总体均值为 15.03%; 其中, 生长量特性、解剖特性、物理特性的表型变异系数均值分别为 24.32%、10.03%和 13.59%, 单株材积的表型变异系数最大, 管胞腔径比最小。单株材积的表型变异和遗传变异系数最高, 均值分别是 39.90%和 40.06%, 依次超出变异最小值 947.2%和 776.6%, 表

明材积在家系间的差异主要来自于遗传因素。参试指标变异程度越高, 说明参试家系受外部条件的影响越大, 通过对环境的改善, 可为提升林木生长质量提供可能。

2.3 杉木主要用材性状多样性分析

对杉木参试单株主要用材性状进行变异分析,

统计了 10 个参试性状分布频率,并列出了 10 个主要用材性状的表型多样性指数(H')(表 3)。10 个参试性状的 H' 为 1.438~2.008,均值为 1.735。树高的 H' 最大(2.008),管胞长度的 H' 最小(1.438)。其中,多样性指数大于 2.0 的性状占参试性状的 10%,多样性指数为 1.8~2.0 的性状占参试性状的 40%。10 个参试性状的多样性指数均大于 1.4,表明杉木家系主要用材性状具有丰富的表型多样性。

2.4 杉木主要用材性状聚类分析

采用离差平方和法,以欧氏距离为遗传距离,对杉木家系 10 个主要用材性状进行聚类,在欧式距离 5.0 处,14 个杉木优良家系被分为 3 个类群(图 1)。其中,类群 I 包括 8 个家系,占参试家系的 57.2%;总

体特征为:家系树高、胸径、单株材积均高于类群 II 和类群 III,解剖特性和物理特性变异程度最高,属于生长增长最快、各性状选择范围最广的类群;该类群以提高管胞长度等解剖特性为改良目标,以达到优质高产的目的。类群 II 包括 3 个家系(JX5、JX9 和 JX6),占参试家系的 21.4%;总体特征为:家系物理特性表现最佳,解剖特性好,生长量特性变异程度最低,属于生长量性状分化程度低、能够稳定遗传的类群;该类群应注重提高树高、胸径等生长量来争取高产。类群 III 包括 3 个家系(JX10、JX3 和 JX2),占参试家系的 21.4%,解剖特性优势明显,各参试性状变异程度高,且生长量特性变异程度高于其他 2 个类群,属于生长量特性、解剖特性和物理特性均优的类型;该类群以提高性状稳定性为育种目标。

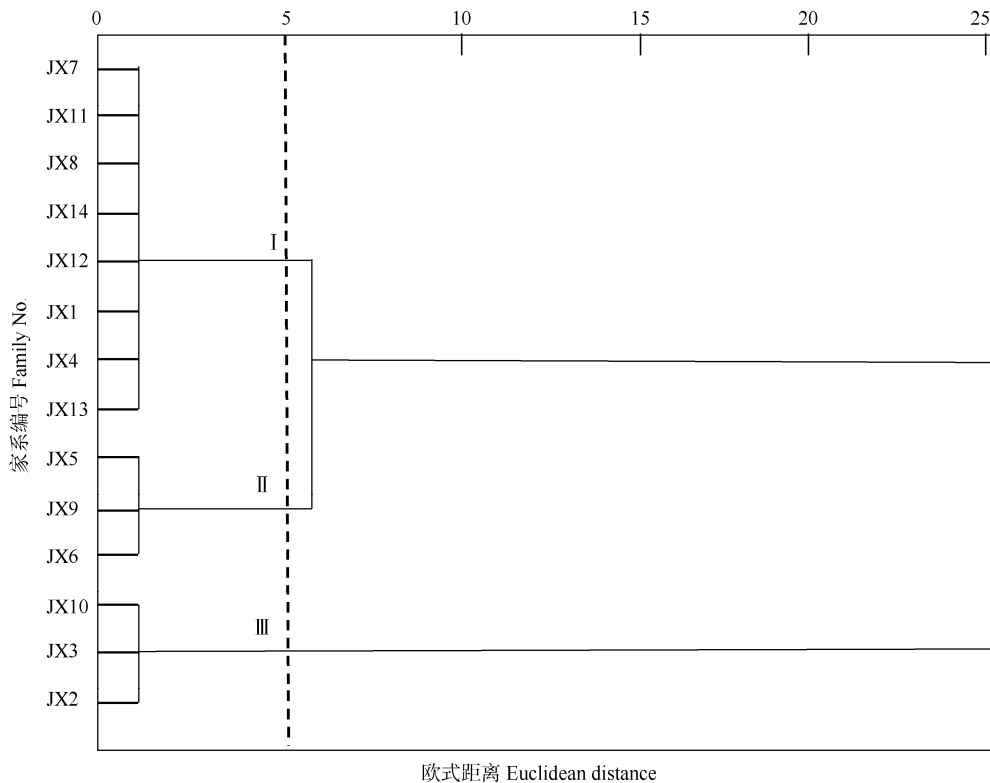


图 1 杉木不同家系主要用材性状的聚类分析。JX1~JX14 见表 1。下同

Fig. 1 Cluster analysis of main timber traits of different *Cunninghamia lanceolata* families. JX1 - JX14 see Table 1. The same below

2.5 杉木主要用材性状相关分析

树高、胸径、单株材积与管胞宽度均呈极显著正相关,与管胞长宽比均呈极显著负相关,与双壁厚均呈显著正相关。管胞长宽比与双壁厚呈极显著负相关,与基本密度呈显著正相关(表 4)。各参试指标间存在一定相关性,表明筛选出生长量特性、解

剖特性及物理特性兼优的家系是可能的。

2.6 杉木主要用材性状的综合评价

14 个杉木家系 10 个主要用材性状主成分分析结果显示,前 5 个主成分的累计贡献率达 89.569%,包含了不同家系参试性状的绝大部分信息。

表 4 杉木性状间的相关性

Table 4 Correlations among traits of *Cunninghamia lanceolata*

性状 Trait	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	0.613**	1								
3	0.873**	0.888**	1							
4	0.044	0.034	0.042	1						
5	0.261**	0.256**	0.283**	0.414**	1					
6	-0.223**	-0.234**	-0.247**	0.429**	-0.627**	1				
7	0.169*	0.172*	0.167*	0.306**	0.554**	-0.310**	1			
8	-0.034	-0.046	-0.019	-0.120	-0.022	-0.055	-0.827**	1		
9	-0.121	-0.051	-0.079	-0.109	-0.270**	0.191*	-0.043	-0.138	1	
10	-0.101	-0.003	-0.052	-0.108	-0.142	0.046	-0.167*	0.136	0.288**	1

1: 树高; 2: 胸径; 3: 单株材积; 4: 管胞长度; 5: 管胞宽度; 6: 管胞长宽比; 7: 管胞双壁厚; 8: 管胞腔径比; 9: 基本密度; 10: 生材密度。

1: Height; 2: Diameter; 3: Volume; 4: Tracheid length; 5: Tracheid width; 6: Length-width ratio; 7: Tracheid double wall thickness; 8: Tracheid cavity to width ratio; 9: Basic density; 10: Green density.

将参试家系的 10 个主要用材性状代入 5 个主成分, 可得到每个家系 5 个主成分得分。以各主成分所占总贡献率比例作为权重系数(0.353、0.220、0.166、0.148、0.113), 计算得到每个家系主要用材

性状的综合得分 F 值及排名(表 5)。14 个杉木家系的综合得分为 3.460 4~4.082 2, 均值为 3.691 9; 按 20% 的入选率选出综合排序前 3 的家系为 JX3、JX10、JX2, 筛选出的家系综合得分均值为 4.036 7。

表 5 杉木不同家系各用材性状的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of timber traits of different *Cunninghamia lanceolata* families

编号 No.	主成分 Main component					综合得分 (F) Synthesis score	排名 Ranking
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5		
JX1	2.970 8	-9.022 6	5.399 1	16.499 9	10.639 8	3.604 2	7
JX2	3.209 3	-10.087 3	6.009 5	18.386 3	11.844 9	3.970 9	3
JX3	3.316 1	-10.332 8	6.164 3	18.847 7	12.142 6	4.082 2	1
JX4	2.869 9	-8.771 2	5.233 0	16.010 4	10.328 5	3.488 8	13
JX5	3.052 0	-9.484 9	5.653 6	17.305 4	11.154 5	3.750 8	4
JX6	3.014 1	-9.395 2	5.624 8	17.151 5	11.040 9	3.716 8	6
JX7	2.939 4	-8.923 9	5.341 0	16.326 5	10.524 4	3.566 6	9
JX8	2.935 5	-8.974 8	5.368 6	16.375 4	10.555 6	3.569 3	8
JX9	3.063 7	-9.450 0	5.634 8	17.242 5	11.120 9	3.746 4	5
JX10	3.302 5	-10.226 8	6.121 8	18.685 9	12.031 2	4.057 1	2
JX11	2.959 5	-8.947 7	5.312 6	16.320 9	10.552 0	3.566 0	10
JX12	2.863 9	-8.953 0	5.422 7	16.415 7	10.525 9	3.560 4	11
JX13	2.789 9	-8.701 5	5.263 7	15.947 4	10.229 4	3.460 4	14
JX14	2.818 4	-8.947 9	5.448 6	16.416 6	10.497 4	3.546 7	12

3 结论和讨论

3.1 杉木不同家系主要用材性状的表型分析

杉木种质综合评价的最终目标是推广利用, 生长量特性是表型多样性分析最直观的指标, 其中, 树高、胸径和单株材积是众多生长因子中能较好表达生长情况的指标^[15]。解剖特性与纸张性质关系密切, 针叶树种木材管胞含量高达 90% 以上, 所

以管胞长度、管胞宽度等解剖特性是研究针叶树种木材特性的重要指标^[16]。物理特性是用材林评价的重要因子, 在实木加工和木材利用方面具有重要意义。

任素红等^[17]报道, 杉木无性系管胞形态(管胞长度、管胞长宽比)与管胞力学特性(管胞拉伸强度)呈极显著正相关。其中, 管胞长度对力学特性的影响最大, 与纸张抗撕裂程度和耐折度成正比, 可作

为木材性状表型分析、质量评价及木材加工利用的重要因子^[18]。1937 年, 国际木材解剖学协会公布: 木材管胞长度 $>1\ 600\ \mu\text{m}$, 属于优良的纤维材, 适用于造纸和工业纤维加工利用^[19]。管胞长宽比是建筑材料的重要评价指标, 一般长宽比为 60~100 时, 表明杉木管胞质量优良, 本试验杉木管胞长度、长宽比均值分别是 $2\ 696.24\ \mu\text{m}$ 和 84.07, 可作为纤维板、刨花板、纸浆生产的优质原材料^[20]。

木材密度与木料硬度和抗压强度呈显著正相关, 与木材干缩性有一定相关性, 可作为判定木材优劣的重要指标之一^[21]。本试验木材基本密度与管胞宽度、长宽比等解剖特性呈显著相关, 与生长量特性呈不显著负相关, 跟一些杉木材性遗传改良研究结论相同^[22], 这说明基本密度与其他生长因子间相互独立, 利于种质的综合选育。

胸径在家系间差异显著, 在区组间差异极显著, 家系遗传力不低, 但单株遗传力较低, 胸径也跟树高、单株材积、管胞宽度呈极显著正相关, 这与莫家兴等^[12]对柳杉的研究结果一致, 管胞宽度又与管胞长度呈极显著正相关。除胸径和生材密度外, 其他性状在区组间无显著差异($P>0.05$), 说明其他性状在区组间相对稳定, 环境因子对胸径和生材密度的影响较大。杉木管胞腔径比和双壁厚在家系×区组间差异显著($P<0.05$), 表示两者主要受遗传与环境的互作影响。因此, 通过抚育间伐等外部环境的改变, 可获得不同生长量和材性的种质, 为木材功能性筛选和改良提供基础。

3.2 杉木不同家系主要用材性状的多样性分析

遗传改良中, 遗传参数估算占有重要作用。通过对家系、单株遗传力及表型、遗传变异系数的估算, 可确定良种选育的方式和力度, 因而遗传参数估算在育种实施过程中具有重要的指导意义^[23]。本文 10 个杉木主要用材性状的遗传力、变异系数和多样性指数代表了 14 个杉木家系主要用材性状的多样性差异。10 个主要用材性状家系遗传力为 0.012~0.934, 杉木种质解剖特性的遗传力都大于生长量特性, 与相关生长与材性联合选育的研究结论相同^[12], 进一步表示相关性状具有较大的改良潜力。3 个生长量因子的家系遗传力处于中等水平, 说明参试家系亲本材料丰富, 为优良品种定向选育提供了稳定的遗传基础^[24]。生长量特性(树高、胸径、单株材积)、解剖特性(管胞长度、管胞宽度、管胞

腔径比)和物理特性(基本密度)的单株遗传力明显小于家系遗传力, 家系选择的效果好于单株选择, 说明结合家系和单株选择, 可以得到很好的改良效果^[25]。

多样性指数大于 1 表明多样性程度高^[14], 本试验杉木的表型多样性指数为 1.438~2.008, 树高、胸径、单株材积、管胞长宽比和生材密度的多样性指数高($H'>1.8$), 有 71.4% 的性状多样性指数高于 1.40, 参试指标表型变异系数为 3.81%~39.90%, 最大为单株材积, 表明种质生长量特性受环境影响大, 这与李荣丽等^[26]的研究结果一致。变异系数大于 10% 通常说明家系间差异显著, 本试验树高、胸径和单株材积表型和遗传变异系数均大于 10%, 且多样性指数高于 1.80, 说明性状存在广泛的变异性, 这可能是杉木人为培育过程中长期演化的结果。本研究表明, 参试杉木家系具有丰富的表型多样性, 可达到较好的选育效果, 为种质资源保护、开发及利用提供了广泛的选择空间。

3.3 杉木不同家系主要用材性状的综合评价

聚类分析对科学评价参试家系优劣性具有良好效果, 不仅能列出各类群之间的关系, 还能了解各家系间的亲疏; 聚类分析为亲本选择提供理论支撑, 也为精细目标选育提供种质筛选^[27]。利用聚类分析将 14 个杉木家系分为 3 个类群, 其中, 来自桂林市的 JX5 和 JX10 都在类群 II 中, 类群 I 中有 67% 的家系来自柳州市, 说明家系来源与质量既有一定相关性, 又有独立性^[28], 种质在不同原产地的长期生长和培育的演化进程中也影响了遗传多样性, 也为种质创新和资源挖掘提供科学的参考标准。

主成分分析法广泛应用于表型多样性分析, 可在保留大部分遗传信息的前提下将具有相关性的多个复杂指标转换为几个简单主成分, 易于各指标间的相关分析, 符合科学逻辑^[29]。本研究采用主成分分析法把 10 个用材性状转换为 5 个主成分, 代表了大部分指标信息; 其中, 单株材积、双壁厚、管胞长宽比、管胞长度和生材密度是主要的构成因子, 可为综合评价提供评定参考。结果显示, 综合排序前 3 的家系为 JX3、JX10、JX2, 可为进一步种质选育提供科学依据。

研究林木资源表型多样性, 探索遗传变异丰富度, 掌握其变异规律和特点, 对于杉木优良种质资

源的收集保存、挖掘利用及合理开发具有极其重要的意义。林木用材性状是有效提高林木产量和质量的前提,各相关指标间的联系则为良种选育提供可能^[30]。分子生物技术也逐渐应用于杉木种质多样性分析中,目前已有多种分子标记^[31]应用于杉木。杉木主要用材性状的表型复杂且多样性,本文补充了 30 a 生杉木大径材生长量特性、解剖特性和物理特性的表型多样性研究,今后需要对筛选的杉木家系进行多点试验,以期选出广谱型优良家系;还需要从木材化学成分(纤维素、半纤维素、木质素等化合物及单体)、加工利用(实木、纤维加工等)、分子水平(SSR、SNP 和 PAV 等标记技术)等方向对杉木种质品质进行深入分析,全面探寻遗传变异规律,利于对杉木进行系统评价。与此同时,需要针对不同需求对杉木进行扩繁和评价,选育出杉木新品种。

参考文献

- [1] CHEN D X, CHENG L, HUANG K Y, et al. Genetic characterization test and selection of superior family and individual of 30-year-old Chinese fir half-sib progeny [J]. *J S Agric*, 2018, 49(2): 307–312. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2018.02.16.
陈代喜,程琳,黄开勇,等. 30 年生杉木半同胞子代遗传特性测定及优良家系和单株选择 [J]. *南方农业学报*, 2018, 49(2): 307–312. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2018.02.16.
- [2] HU D H, LIN J, WANG R H, et al. Establishment techniques for improved second generation seed orchard of Chinese fir and its applying achievement [J]. *For Environ Sci*, 2019, 35(1): 23–28. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2019.01.005.
胡德活,林军,王润辉,等. 杉木第二代改良种子园营建技术及应用成效 [J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(1): 23–28. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2019.01.005.
- [3] CHEN D X, LI K P, HUANG K Y, et al. Study on early selection and experiment of Guangxi 20-year-old Chinese fir clone [J]. *J CS Univ For Technol*, 2017, 37(11): 9–13. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.002.
陈代喜,李魁鹏,黄开勇,等. 广西 20 年生杉木无性系测定与早期选择研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 9–13. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.002.
- [4] QIN H L, CHENG L, CHI Y Q, et al. Study on the effect of sand-bed seedling technology on seedling growth of *Cunninghamia lanceolata* seedlings [J]. *For Sci Technol*, 2020, 45(3): 1–4. doi: 10.19750/J.cnki.1001-9499.2020.03.001.
覃欢兰,程琳,池勇权,等. 沙床育苗技术对杉木苗木生长影响的研究 [J]. *林业科技*, 2020, 45(3): 1–4. doi: 10.19750/J.cnki.1001-9499.2020.03.001.
- [5] LIAO Y J, HONG W, CHEN F Q, et al. Studies on species composition and diversity of *Castanopsis hystrix-Acacia mangium* mixed forest in Guangzhou [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2021, 29(5): 494–502. doi: 10.11926/jtsb.4361.
廖宇杰,洪维,陈富强,等. 广州红锥-马占相思林物种组成与多样性研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(5): 494–502. doi: 10.11926/jtsb.4361.
- [6] FENG Y H, LI H G, YANG Z Q, et al. Analysis of genetic diversity and variation of growth traits of three superior provenances of *Pinus massoniana* (masson pine) in Guangxi [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2019, 43(6): 67–72. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201806039.
冯源恒,李火根,杨章旗,等. 广西马尾松三个优良种源的遗传多样性及生长性状变异分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(6): 67–72. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201806039.
- [7] LI X, WANG L B, WEN Y F, et al. Genetic diversity of Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) breeding populations among different generations [J]. *Sci Silv Sin*, 2020, 56(11): 53–61. doi: 10.11707/j.1001-7488.20201106.
李霞,王利宝,文亚峰,等. 杉木不同世代育种群体的遗传多样性 [J]. *林业科学*, 2020, 56(11): 53–61. doi: 10.11707/j.1001-7488.20201106.
- [8] YE S M, WEN Y G, YANG M, et al. Correlation analysis on biodiversity and soil physical & chemical properties of *Eucalyptus* spp. plantations under successive rotation [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, 24(4): 246–250, 256. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2010.04.051.
叶绍明,温远光,杨梅,等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 246–250, 256. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2010.04.051.
- [9] HUANG S X, SHI J S, LI L, et al. Selection of superior clones of Chinese fir for fibre wood [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2005, 29(5): 21–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.05.005.
黄寿先,施季森,李力,等. 杉木纤维用材优良无性系的选择 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(5): 21–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.05.005.
- [10] WANG R H, HU D H, ZHENG H Q, et al. Clonal variation in growth and wood quality and the multi-trait index selection of Chinese fir [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, 48(3): 45–50. doi: 10.11707/j.1001-7488.20120308.
王润辉,胡德活,郑会全,等. 杉木无性系生长和材性变异及多性状指数选择 [J]. *林业科学*, 2012, 48(3): 45–50. doi: 10.11707/j.1001-7488.20120308.
- [11] ZHU A M, LAI S H, DUAN A G, et al. Study on growth and material

- properties of 21-year-old Chinese fir fine clones [J]. *For Sci Technol*, 2015, 35(4): 8–12. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2015.04.003.
- 朱安明, 赖树华, 段爱国, 等. 21 年生杉木优良无性系生长与材质性状研究 [J]. *林业实用技术*, 2015, 35(4): 8–12. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2015.04.003.
- [12] MO J X, HUA H, WENG H F, et al. Growth and wood property genetic variation analysis and superior family selection of *Cryptomeria* full-sib family [J]. *J CS Univ For Technol*, 2019, 39(10): 40–47. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.10.007.
- 莫家兴, 华慧, 翁怀峰, 等. 柳杉全同胞家系生长和材性的遗传变异及优良家系选择 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 40–47. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.10.007.
- [13] HUANG K Y, CHEN D X, HAO H K, et al. Study on comparative testing and selection of *Cunninghamia lanceolata* clones [J]. *J SW For Coll*, 2008, 28(6): 25–30. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2008.06.006.
- 黄开勇, 陈代喜, 郝海坤, 等. 杉木无性系对比测定与选择 [J]. *西南林学院学报*, 2008, 28(6): 25–30. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2008.06.006.
- [14] ZHANG B B, CAI Z X, SHEN Z J, et al. Diversity analysis of phenotypic characters in germplasm resources of ornamental peaches [J]. *Sci Agric Sin*, 2021, 54(11): 2406–2418. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.11.013.
- 张斌斌, 蔡志翔, 沈志军, 等. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54(11): 2406–2418. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.11.013.
- [15] ZHENG R H, SHI J S, XIAO H, et al. Genetic variation and early selection of growth traits in 8-year-old open-pollinated progenies of the 3rd germplasm of Chinese fir [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2014, 38(6): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.06.008.
- 郑仁华, 施季森, 肖晖, 等. 杉木第 3 代种质资源自由授粉子代生长性状遗传变异及早期选择 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.06.008.
- [16] CHENG L, QIN X Y, HUANG K Y, et al. Variation pattern of wood tracheid morphology at different germplasm and stand age of Chinese fir [J]. *Guangxi For Sci*, 2017, 46(1): 47–52. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2017.01.010.
- 程琳, 覃晓颖, 黄开勇, 等. 杉木不同种质和林龄的木材管胞形态变异规律 [J]. *广西林业科学*, 2017, 46(1): 47–52. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2017.01.010.
- [17] REN S H, FENG Q M, LÜ J X, et al. Study on morphology and tensile properties of wood tracheid of Chinese fir clones [J]. *Chin J Wood Sci Technol*, 2021, 35(5): 12–17. doi: 10.12326/j.2096-9694.2021020.
- 任素红, 冯启明, 吕建雄, 等. 杉木无性系管胞形态及其拉伸性能的研究 [J]. *木材科学与技术*, 2021, 35(5): 12–17. doi: 10.12326/j.2096-9694.2021020.
- [18] LIN J G, ZHENG Y S, DONG J W, et al. Study on the relation between mechanical properties and fiber morphology of Chinese fir wood from plantations [J]. *J Biomath*, 2000, 15(3): 281–285. doi: 10.3969/j.issn.1001-9626.2000.03.006.
- 林金国, 郑郁善, 董建文, 等. 杉木人工林木材力学性质与纤维形态关系的研究 [J]. *生物数学学报*, 2000, 15(3): 281–285. doi: 10.3969/j.issn.1001-9626.2000.03.006.
- [19] REN H Q, HUANG A M, LIU J L, et al. Research on and suggestions for processing and utilization of Chinese fir [J]. *China Wood Ind*, 2006, 20(1): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1001-8654.2006.01.008.
- 任海青, 黄安民, 刘君良, 等. 杉木加工利用研究进展及建议 [J]. *木材工业*, 2006, 20(1): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1001-8654.2006.01.008.
- [20] CHEN L Y, SHI X J, FAN J F. Study on properties and fiber morphology of Qinbaiyang series varieties woods [J]. *J NW For Univ*, 2017, 32(1): 253–258. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.01.41.
- 陈柳晔, 史小娟, 樊军锋. 秦白杨系列品种木材材性及纤维形态的研究 [J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 253–258. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.01.41.
- [21] YAN Y, LI B J, HE Z M, et al. Comparative study on wood characteristics of *Cunninghamia lanceolata* from different provenances [J]. *For Res*, 2021, 34(5): 49–57. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.006.
- 颜耀, 李秉钧, 何宗明, 等. 不同种源杉木木材特性的比较研究 [J]. *林业科学研究*, 2021, 34(5): 49–57. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.006.
- [22] LI K P, WEI Z C, HUANG K Y, et al. Research on variation pattern of wood properties of red-heart Chinese fir plus trees, a featured provenance from Rongshui of Guangxi [J]. *For Res*, 2017, 30(3): 424–429. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.03.009.
- 李魁鹏, 韦正成, 黄开勇, 等. 广西融水特色红心杉木优树材质性状变异规律研究 [J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 424–429. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.03.009.
- [23] BALTONIS B S, GAPARE W J, WU H X. Genetic parameters and genotype by environment interaction in radiata pine for growth and wood quality traits in Australia [J]. *Silv Genet*, 2010, 59(1/2/3/4/5/6): 113–124. doi: 10.1515/sg-2010-0014.
- [24] DAI J, LUO Q L, LAO G J, et al. Half-sib progeny test and superior *Cunninghamia lanceolata* family selection [J]. *J SW For Univ*, 2012, 32(4): 22–25. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2012.04.005.
- 戴俊, 罗启亮, 劳广杰, 等. 杉木半同胞子代测定及优良家系选择 [J]. *西南林业大学学报*, 2012, 32(4): 22–25. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2012.04.005.

- [25] OUYANG F Q, QI S X, CAI Q S, et al. Genetic evaluation and selection on open-pollinated families of *Picea crassifolia* Kom [J]. *For Res*, 2018, 31(6): 26–32. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.06.004.
欧阳芳群, 祁生秀, 蔡启山, 等. 青海云杉自由授粉家系遗传评价与选择 [J]. *林业科学研究*, 2018, 31(6): 26–32. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.06.004.
- [26] LI R L, HUANG S X, LIANG J, et al. Genetic variation of growth traits and wood properties in Chinese fir clones [J]. *J S Agric*, 2014, 45(9): 1626–1631. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.9.1626.
李荣丽, 黄寿先, 梁机, 等. 杉木无性系生长和木材品质性状遗传变异研究 [J]. *南方农业学报*, 2014, 45(9): 1626–1631. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.9.1626.
- [27] WEI X X, LAI R L, CHEN J, et al. Studies on genetic diversity on inflorescence phenotypic characteristics of *Canarium album* germplasm resource [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(1): 1–10. doi: 10.11926/jtsb.3940.
韦晓霞, 赖瑞联, 陈瑾, 等. 橄榄种质资源花序表型性状遗传多样性研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(1): 1–10. doi: 10.11926/jtsb.3940.
- [28] NGUYEN B T. Research on early selection of good Chinese-fir provenances in Vietnam and compare with the provenances in China [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.
阮伯赵. 越南杉木优良种源早期选择与中国杉木种源比较研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [29] QI J, LU W H, LI P, et al. Genetic variation patterns in leaf morphology on eucalypts and their hybrids [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, 26(6): 589–596. doi: 10.11926/jtsb.3882.
齐杰, 卢万鸿, 李鹏, 等. 桉树及其杂交种叶片形态的遗传变异特征 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(6): 589–596. doi: 10.11926/jtsb.3882.
- [30] LAMBETH C, LEE B C, O'MALLEY D, 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): 930–943. doi: 10.1007/s001220100627.
- [31] LI K P, HUANG K Y, CHENG L, et al. Characteristic analysis of incomplete EST-SSR in *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Guangxi For Sci*, 2017, 46(4): 350–353. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2017.04.002.
李魁鹏, 黄开勇, 程琳, 等. 杉木不完整型 EST-SSR 特征分析 [J]. *广西林业科学*, 2017, 46(4): 350–353. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2017.04.002.