

水肥胁迫对尾叶桉无性系生长及叶片变异的影响研究

杨会肖^{1,2}, 曹彦斌³, 廖焕琴^{1,2}, 潘文^{1,2}, 徐斌^{1,2*}

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广州 510520; 2. 广东省林业科学研究院, 广州 510520; 3. 仲恺农业工程学院, 广州 510225)

摘要: 为选择尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)优良无性系, 以 20 个尾叶桉无性系为材料, 采用 2 因素(水分、养分) 3 水平完全随机区组设计, 对水肥胁迫半年后尾叶桉苗木生长和叶片性状变异进行分析和评估。结果表明, 尾叶桉的叶尖角、叶长、叶宽、叶周长和叶面积在不同水肥处理下差异显著, 表明水分和养分会影响叶片的大小。苗木生长和叶片性状间大多数呈显著或极显著正相关, 少数呈显著负相关或一定的负相关性。13 种性状可综合为 4 个主成分, 其累计贡献率达 98%, 说明这些性状具有极强的代表性。除地径的水分×养分互作不显著外, 生长性状在水分、养分及水分×养分互作上达显著和极显著的水平。无性系在树高、地径和冠幅上的方差分量为 2.19~149.59, 重复力为 0.16~0.45。以 20%入选率, 采用基因型值筛选出 4 个优良无性系: LDUA10、ZQUA9、ZQUA8 和 LDUA24, 他们的树高、地径和冠幅比对照分别高出 5.0%、12.8%和 14.5%, 为后续骨干亲本选择及优良无性系推广提供依据。

关键词: 尾叶桉; 无性系; 生长; 水肥; 叶片性状; 重复力

doi: 10.11926/jtsb.3666

Effects of Water and Nutrient Stresses on Growth and Leaf Variation of *Eucalyptus urophylla* Clones

YANG Hui-xiao^{1,2}, CAO Yan-bin³, LIAO Huan-qin^{1,2}, PAN Wen^{1,2}, XU Bin^{1,2*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou 510520, China; 2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 3. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510520, China)

Abstract: In order to select excellent clones of *Eucalyptus urophylla*, the growth and leaf characters of 20 clones in half-year-old under water and nutrient stresses were analyzed and evaluated by using a randomized complete block design according two factors and three levels. The results showed that leaf apex angle (LBA), leaf length (LL), leaf width (LW), leaf perimeter (LP) and leaf area (LA) had significant differences among water and nutrient treatments, indicated that water and nutrient had influence on the leaf size. There were significant positive correlations between most of growth and leaf characters, and a few showed significantly negative correlations. The principal components analysis showed that the cumulative contribution rate of the first four principal components accounted for 98%, indicating that they had strong representativeness. Growth traits under water, nutrient, water×nutrient interaction reached a significant level except for ground diameter (GD) under water×nutrient interaction. The component variance for H, GD and CW ranged from 2.19 to 149.59, and repeatability ranged from 0.16 to 0.45. The four excellent clones, such as LDUA10, ZQUA9, ZQUA8 and LDUA24, were

收稿日期: 2016-08-22 接受日期: 2016-12-23

基金项目: 广东省科技计划项目(2015B070701009, 2016B070701008), 广东省林业科技创新项目(2016KJCX002)资助

This work was supported by the Planning Projects for Science and Technology in Guangdong (Grant No. 2015B070701009, 2016B070701008), and the Innovation Project for Forestry Science and Technology in Guangdong (2016KJCX002).

作者简介: 杨会肖(1981~), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事木本花卉遗传育种方面的研究。E-mail: hxyang@sinogaf.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xubin@sinogaf.cn

selected according to 20% selected ratio and genotypic value, and the H, GD and CW of four clones was 5.0%, 12.8% and 14.5% higher than control, which would provide basis for further selection and extension of superior clones.

Key words: *Eucalyptus urophylla*; Clone; Growth; Water and Nutrient; Leaf trait; Repeatability

尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 为桃金娘科 (Myrtaceae) 桉属植物, 是华南地区最重要的产业化树种, 人工林面积超过 $4.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 具有适应性强、培育周期短, 用途广, 经济价值高等优点。自 20 世纪 70 年代开始, 我国较重视桉树无性系育种研究, 同时桉树无性系人工林也进入一个高速发展的时期, 并开展无性系选育的研究^[1]。然而随着全球气候变暖, 天气变化无常, 严重旱灾时常发生^[2], 水分和养分已成为直接影响尾叶桉生存乃至生长发育的重要环境因素^[3-4]。叶片是植物进行光合、蒸腾和呼吸作用的重要器官, 许多研究已经证实叶片的形态、大小和结构对林木生长量有重要的影响^[5], 且这些叶片性状受较强的遗传控制。目前国内外有关桉树研究多集中在对叶片形状、叶面积大小、叶脉分布等性状的遗传改良和早期选择上^[6-7], 鲜见尾叶桉在水分及养分胁迫下生长和叶片变异的相关报道。本研究以 20 个尾叶桉无性系为材料, 分析不同梯度的水分及养分胁迫对尾叶桉的生长及叶片的影响, 旨在探索尾叶桉无性系最适生长的水肥配比, 对桉树无性系品质进行综合评价, 以期筛选出高产、优质的桉树无性系, 为桉树的良种选育提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于 2015 年 4 月在广东省林业科学研究院苗圃内进行, 选取生长一致的尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 无性系幼苗 (平均苗高为 70 cm) 移栽到圆形控根器容器中 (规格为 55 cm × 80 cm), 每个控根器容器下面垫水泥和空心砖, 以防水分流失。待缓苗期结束后进行水分养分控制 (表 1)。其中, 土壤为当地黄心土, 土壤田间持水量 (FC) 为 23.01%, 土壤容重为 1.558 g cm^{-3} , 每盆土壤重量约为 296 kg, pH 7.92。土壤中 N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Zn 含量分别为 0.206 g kg^{-1} 、 0.176 g kg^{-1} 、 21.1 g kg^{-1} 、 8.51 g kg^{-1} 、 0.761 g kg^{-1} 、 0.139 g kg^{-1} 、 13.3 g kg^{-1} 、 0.296 g kg^{-1} 、 7.92 g kg^{-1} 、 3.13 mg kg^{-1} 、 35.7 mg kg^{-1} 。

1.2 方法

试验采用 2 因素 (水分、养分) 3 水平完全随机区组设计, 试验处理和水平见表 1。利用土壤水分测定仪 TDR300 测定土壤含水率, 根据土壤含水量上限设为田间持水量, 如果测得土壤含水量低于下限则灌水。共 3 个区组, 每个区组 9 个处理, 每个处理 20 个无性系, 每个无性系 27 株, 共 540 盆, 其中尾巨桉 (*E. urophylla* × *E. grandis*) 3229 和广林 9 为对照无性系。

表 1 试验设计

Table 1 Experiment design

编号 No.	土壤相对含水量 Soil relative water content (%)	基肥 N : P : K N : P : K in base fertilizer	追肥 N : P : K N : P : K in additional fertilizer
1	60~80	0 : 12 : 2	0
2	60~80	0 : 12 : 2	7.5 : 1.5 : 6.5
3	60~80	4.5 : 12.9 : 5.9	12.5 : 1.5 : 6.5
4	40~60	0 : 12 : 2	0
5	40~60	0 : 12 : 2	7.5 : 1.5 : 6.5
6	40~60	4.5 : 12.9 : 5.9	12.5 : 1.5 : 6.5
7	20~40	0 : 12 : 2	0
8	20~40	0 : 12 : 2	7.5 : 1.5 : 6.5
9	20~40	4.5 : 12.9 : 5.9	12.5 : 1.5 : 6.5

1.3 性状测定及测量方法

水分养分处理半年后, 测定每盆植株的树高、地径和冠幅, 并从东、南、西、北 4 个方位选取植株中部外侧成熟叶片 8 枚, 测定叶片性状, 取平均值。利用万深 LA-S 系列植物图像分析仪测定叶片的长度、宽度、叶周长和叶面积, 计算长/宽。3 个生长性状和 10 个叶片性状的测定方法见表 2。

1.4 数据分析

利用 Excel 对原始数据进行整理, 数据的基本统计分析则采用 R 软件^[8]。用“psych”包进行主成分分析; 用 ASReml 软件进行尾叶桉不同性状的遗传参数估算和育种值预测。利用无性系模型估计生长性状遗传参数和预测基因型值的模型为: $Y_{ijklm} = u + \text{Water}_i + \text{Nutrient}_j + \text{Block}_k + \text{Clone}_l + \text{Water} \times \text{Clone}_{il} + \text{Nutrient} \times \text{Clone}_{jl} + e_{ijklm}$, 其中, Y_{ijklm} 表示性状观测值; u 为总体平均值, Water_i 表示第 i 个水分处理的

表 2 尾叶桉叶片性状的测量标准

Table 2 Determination standard of leaf traits in *Eucalyptus urophylla*

编号 Code	性状 Trait	单位 Unit	标准 Standard
H	树高 Height	cm	土壤面到树顶的距离
GD	地径 Ground diameter	mm	树干距离土壤面 10 cm 处的直径
CW	冠幅 Crown width	cm	树冠在南北和东西方向上的宽度
X1	叶鲜重 Leaf fresh weight	g	新鲜叶片重量
X2	叶干重 Leaf dry weight	g	干叶重量
X3	叶片厚 Leaf thickness	mm	8 片为一组, 层叠, 用游标卡尺测量后取平均值
X4	叶尖角 Leaf apex angle	°	用量角器测量叶尖处叶片边缘与主脉夹角
X5	叶柄长 Petiole length	cm	连接枝条与叶片的叶柄长度
X6	叶长 Leaf length	cm	包含叶柄在内的叶片全长
X7	叶片长/宽 Leaf length/width		叶长与叶宽的比值
X8	叶宽 Leaf width	cm	
X9	叶周长 Leaf perimeter	cm	
X10	叶面积 Leaf area	cm ²	

固定效应, $Nutrient_j$ 表示第 j 个养分处理的固定效应; $Block_k$ 表示第 k 个区组的随机效应, $Clone_l$ 表示第 l 个无性系随机效应, $Water \times Clone_{il}$ 表示第 i 个水分处理与第 l 个无性系的交互效应, $Nutrient \times Clone_{jl}$ 表示第 j 个养分处理与第 l 个无性系的交互效应, e_{ijklm} 为第 m 个体上的剩余误差。对每个性状进行分析, 即单类群单变量分析, 并估算每个性状的遗传方差组分、重复力、遗传值及遗传相关^[9-10]。

2 结果和分析

2.1 不同水肥梯度对生长和叶片性状的影响

方差分析结果表明, 除叶鲜重(X1)、叶干重(X2)、叶片厚(X3)、叶柄长(X5)和叶片长/宽(X7)外, 其他性状在不同处理间的差异均达到显著或极显著水平(表 3)。不同水肥梯度对尾叶桉的生长和叶片性状有显著的影响(表 4)。叶尖角在处理 7 下达到最大, 地径和冠幅在处理 6 下均达到最大, 叶长、叶宽、周长和叶面积在处理 8 下均达到最大, 树高在处理 9 下达到最大。因此, 在不同水肥梯度下尾叶桉苗木的树高、地径、冠幅、叶尖角、叶长、叶片宽、叶周长和叶面积总体上差异显著。

2.2 相关性分析

对尾叶桉生长和叶片性状进行相关性分析(表 5)。树高、地径和冠幅两两性状间呈极显著正相关, 相关系数大于 0.80; 叶尖角与其他性状间

均呈负相关, 相关系数为-0.41~-0.12。除叶尖角和叶片长/宽外, 叶鲜重和干重与其他叶片性状间都达到了极显著正相关, 相关系数为 0.64~0.97。叶柄长和叶长分别与叶宽、叶周长、叶面积之间呈极显著正相关, 相关系数大于 0.80。叶宽与叶周长、叶面积间以及叶周长与叶面积间呈极显著正相关, 相关系数大于 0.90, 其余叶片性状间的相关性不显著。可见, 尾叶桉无性系在生长过程中各指标间均相互关联, 且大多数呈较强的正相关关系。

2.3 性状主成分分析

对 540 株尾叶桉不同无性系的 3 个生长性状和 10 个叶片性状进行主成分分析(表 6)。在第 1 主成分中, 叶长、叶周长和叶面积占有较高系数, 方差贡献率为 62%, 说明第 1 主成分表示叶片长、叶周长和叶面积性状的综合指标, 可作为评价尾叶桉叶片大小指标的参考。在第 2 主成分中, 树高、地径和冠幅同时占有最高系数, 方差贡献率达 24%, 说明第 2 主成分主要以树高、地径以及冠幅这些生长性状为主, 可作为尾叶桉生长指标的参考。在第 3 主成分中, 叶片长/宽占有最高系数(呈异号), 方差贡献率达 10%, 说明第 3 主成分主要以叶片长/宽为主, 可作为尾叶桉叶片形状指标的参考。在第 4 主成分中, 叶尖角占有最高系数, 方差贡献率分别达 4%, 说明第 4 主成分均是表示叶尖角性状的综合指标。

表 3 尾叶桉无性系苗期生长和叶片性状的方差分析

Table 3 Variance analysis of seedling growth and leaf traits of *Eucalyptus urophylla*

性状 Trait	变异来源 Variation source	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F	P
H	水分 Water (W)	2	156814	78407	72.23ns	
	养分 Nutrient (N)	2	924965	462482	426.06	<2e-16***
	无性系 Clone	19	130127	6849	6.31	<6.91e-14***
	W × N	4	32611	8153	7.51	<8.40e-06***
	误差 Error	332	360379	1085		
GD	水分 Water (W)	2	3668	1834	58.93ns	
	养分 Nutrient (N)	2	20323	10162	326.54	<2e-16***
	无性系 Clone	19	1145	60	1.94	0.01*
	W × N	4	600	150	4.82	0.00***
	误差 Error	332	360	298		
CW	水分 Water (W)	2	34255	17127	29.70ns	
	养分 Nutrient (N)	2	496856	248428	430.85	<2e-16***
	无性系 Clone	19	71576	3767	6.53	<0.00***
	W × N	4	5809	1452	2.52	0.04*
	误差 Error	332	191430	577		
X4	水分 Water (W)	2	0.17	0.08	20.84ns	
	养分 Nutrient (N)	2	0.04	0.02	5.21	0.005**
	无性系 Clone	19	1.64	0.09	21.29	<2e-16***
	W × N	4	0.01	0	0.75	0.56
	误差 Error	332	1.33	0		
X6	水分 Water (W)	2	1279774	639887	17.24ns	
	养分 Nutrient (N)	2	4611693	2305846	62.13	<2e-16***
	无性系 Clone	19	15494897	815521	21.97	<2e-16***
	W × N	4	672621	168155	4.53	0.001**
	误差 Error	332	11543131	37116		
X8	水分 Water (W)	2	0.03	0.02	0.48ns	
	养分 Nutrient (N)	2	0.73	0.36	8.78	0.00***
	无性系 Clone	19	18.03	0.95	22.91	<2e-16***
	W × N	4	0.19	0.05	1.13	0.34
	误差 Error	332	12.88	0.04		
X9	水分 Water (W)	2	3.04	1.52	13.84ns	
	养分 Nutrient (N)	2	9.3	4.65	42.35	<2e-16***
	无性系 Clone	19	37.8	1.99	18.10	<2e-16***
	W × N	4	1.54	0.38	3.50	0.00**
	误差 Error	332	34.1	0.11		
X10	水分 Water (W)	2	7638775	3819388	17.26ns	
	养分 Nutrient (N)	2	28485022	14242511	64.39	<2e-16***
	无性系 Clone	19	88683930	4667575	21.10	<2e-16***
	W × N	4	3752368	938092	4.24	0.00**
	误差 Error	332	68789760	221189		

表 4 尾叶桉的生长和叶片性状

Table 4 Growth and leaf traits of *Eucalyptus urophylla* seedlings

处理 Treatment	H (cm)	GD (mm)	CW (cm)	X4 (°)	X6 (cm)	X8 (cm)	X9 (cm)	X10 (cm ²)
1	99 ± 19h	12 ± 1.5g	71 ± 15i	33 ± 10.0a	7.97 ± 205i	3.27 ± 102i	19.45i	18.00i
2	166 ± 32e	23 ± 4.1e	124 ± 22f	27 ± 8.9c	10.47 ± 258e	4.24 ± 94d	25.66e	28.02e
3	179 ± 38d	24 ± 5.1d	130 ± 31e	25 ± 9.5d	9.82 ± 253f	3.93 ± 99g	23.96f	24.32g
4	131 ± 44f	18 ± 8.1f	93 ± 31g	30 ± 9.6b	9.75 ± 257g	3.96 ± 109f	23.81g	25.46f
5	219 ± 38b	29 ± 3.3b	148 ± 23c	25 ± 7.1d	10.92 ± 294b	4.55 ± 112b	26.88b	31.31b
6	220 ± 54b	31 ± 7.1a	158 ± 27a	25 ± 8.9d	10.79 ± 268c	4.27 ± 103c	26.38c	28.92c
7	104 ± 24g	13 ± 2.1g	74 ± 16h	33 ± 9.7a	8.88 ± 215h	3.66 ± 103h	2170h	22.02h
8	191 ± 40c	26 ± 6.3c	133 ± 28d	26 ± 8.6d	12.17 ± 343a	4.90 ± 119a	2976a	37.72a
9	224 ± 56a	31 ± 8.1a	157 ± 29b	27 ± 7.7c	10.69 ± 253d	4.21 ± 92e	2607d	28.07d

1~9 见表 1; H、GD、CW、X4、X6、X8、X9、X10 见表 2; 同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)(邓肯氏检验)。

1-9 see Table 1. H, GD, CW, X4, X6, X8, X9 and X10 see Table 2. Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level by Duncan's test.

表 5 尾叶桉性状间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient among traits of *Eucalyptus urophylla*

	H	GD	CW	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
H	1.00												
GD	0.86***	1.00											
CW	0.85***	0.83***	1.00										
X1	0.11**	0.09*	0.13**	1.00									
X2	0.14	0.15**	0.17	0.97***	1.00								
X3	0.02***	0.05	0.03	0.65***	0.64**	1.00							
X4	-0.28	-0.27	-0.33	-0.22	-0.22	-0.12	1.00						
X5	0.37***	0.36**	0.42***	0.77***	0.76***	0.46*	-0.4	1.00					
X6	0.30***	0.29**	0.35**	0.88***	0.86***	0.49**	-0.41**	0.90***	1.00				
X7	0.01	0.07**	0.01	0.01	0.02	-0.10	-0.4*	0.19*	0.19**	1.00			
X8	0.29***	0.25***	0.34***	0.86***	0.85***	0.54**	-0.24	0.80***	0.90***	-0.23*	1.00		
X9	0.23***	0.20***	0.27*	0.92**	0.90***	0.53*	-0.31	0.85***	0.96***	0.01	0.95***	1.00	
X10	0.31***	0.28***	0.35**	0.89***	0.87***	0.50**	-0.38	0.89***	0.99***	0.10*	0.94***	0.97***	1.00

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

表 6 尾叶桉叶片性状间的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of different traits in *Eucalyptus urophylla*

	主成分 Principal component				方差解释度 h^2	方差未解释度 u^2
	PC1	PC2	PC3	PC4		
特征向量 Eigenvectors						
H	0.38	0.85	0.15	-0.08	0.89	0.110
GD	0.36	0.85	0.08	0.03	0.85	0.140
CW	0.42	0.85	0.11	0.03	0.91	0.080
X1	0.93	-0.30	0.03	0.01	0.96	0.039
X2	0.93	-0.26	0.04	0.01	0.94	0.064
X3	0.60	-0.35	0.14	-0.61	0.88	0.119
X4	-0.38	-0.30	0.63	0.39	0.78	0.217
X5	0.89	0.09	-0.15	0.09	0.84	0.161
X6	0.96	-0.03	-0.15	0.14	0.97	0.028
X7	0.05	0.09	-0.91	0.13	0.86	0.139
X8	0.93	-0.07	0.24	0.07	0.93	0.067
X9	0.96	-0.14	0.01	0.13	0.96	0.041
X10	0.97	-0.04	-0.08	0.13	0.97	0.031
特征值 Eigenvalue						
	9.06	3.47	1.42	0.62	-	-
方差贡献率 Proportion variation						
	0.62	0.24	0.10	0.04	-	-
累积贡献率 Cumulative contribution rate						
	0.62	0.86	0.96	0.98	-	-

2.4 性状遗传参数估算

方差分析结果表明(表 7), 除地径的水分 × 养分互作不显著外, 其他性状在水分、养分及水分 × 养分互作上达到了显著和极显著的水平。方差分量结果显示, 除地径性状外, 其它性状的无性系

方差分量达到了极显著水平。不同性状在水分 × 无性系互作效应极小且不显著, 而只有树高性状在养分 × 无性系互作水平上达到显著水平。树高、地径和冠幅性状间的重复力分别为 0.25、0.16 和 0.45。

表 7 尾叶桉树高、地径及冠幅的方差分析

Table 7 Variance analysis of H, GD and CW in *Eucalyptus urophylla*

	方差分析 Variance analysis			方差分量 Variance component				重复力 Repeatability	
	水分 Water	养分 Nutrient	水分 × 养分 Water × Nutrient	区组 Block	无性系 Clone	水分 × 无性系 Water × Clone	养分 × 无性系 Nutrient × Clone		环境方差 Error
H	50.54***	202.9**	3.47**	125.87	149.59**	NA	83.13*	1041.25**	0.25
GD	40.57***	258.07***	1.94	0.84	2.19	0.04	NA	24.83**	0.16
CW	27.79***	317.9***	5.11***	36.25	148.69**	NA	6.59	502.44**	0.45

2.5 优良无性系选择

优良无性系评选按照生长性状基因型值大小,并结合叶片性状表现值进行综合评定。无性系生长性状基因型值,皆大于尾巨桉 3229 和广林 9 的基因型值可选择出 LDUA10、ZQUA9、ZQUA8 和 LDUA24。评选的优良无性系 LDUA10、ZQUA9、ZQUA8 和 LDUA24 与尾巨桉 3229 相比,平均树高分别提高 12.5%、13.9%、11.2%和 2.4%,平均地径分别提高 12.1%、17.0%、16.0%和 19.7%,平均冠幅分别提高 10.8%、24.1%、10.9%和 10.7%。

表 8 优良无性系生长性状的基因型值及叶片性状的表型值

Table 8 Phenotype value for leaf traits and genotypic values for growth traits of excellent clones

无性系 Clone	基因型值 Genotypic value			叶片表型值 Phenotype value of leaf									
	H	GD	CW	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
LDUA10	16.15	0.167	10.02	0.76	0.36	0.54	20.32	1.46	12.95	2.42	5.43	31.94	41.56
ZQUA9	13.92	0.169	20.84	0.35	0.16	0.36	22.03	0.97	9.82	2.54	3.89	23.84	23.57
ZQUA8	8.89	0.233	8.471	0.36	0.16	0.38	26.97	0.93	9.45	2.42	3.98	23.24	23.91
LDUA24	7.607	0.146	7.186	0.60	0.28	0.45	36.82	0.96	10.02	2.09	4.86	25.41	31.02
尾巨桉 3229 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i> 3229	1.139	0.078	0.321	0.38	0.17	0.41	30.11	0.89	9.55	2.59	3.73	23.06	22.50
广林 9 Guanglin 9	1.822	0.099	0.637	0.28	0.13	0.39	30.67	0.81	8.38	2.74	3.11	20.02	16.80

3 结论和讨论

根据邓肯试验分析可得,当水分或养分任一者或两者处于短缺状态时均不利于尾叶桉生长,植株难以通过加强一种营养成分的供给来弥补另一种营养成分的短缺。林国祚等^[1]的研究表明,土壤含水量及施肥量的下降会制约尾巨桉幼苗的形态生长,但李亚林等^[11]的干旱胁迫试验却表明接种菌剂后,干旱胁迫能促进尾叶桉的生长。通过对比处理 5、处理 6、处理 8 和处理 9,当水分或养分任一者或两者处于正常状态下(即为 2)时,另一种营养成分的供给增加能促进尾叶桉的生长,而当水分或养分任一者或两者处于较高状态(即为 3)时,另一种营养成分的过度增加反而会对尾叶桉的生长起抑制作用;对比处理 6 和处理 8,适中的水分搭配高养分有利于尾叶桉的生长,高水分搭配适中的养分更适合叶片的生长。另外,树高、地径、冠幅、叶长、叶宽、叶周长、叶面积在不同处理下差异显著,而叶鲜重、叶干重、叶片厚、叶柄长、叶片长/宽则差异不显著,说明水分和养分对尾叶桉的生长及叶片大小的影响较大,而对其他性状影响较小。

根据相关性分析可得,叶片长与叶面积的相关系数最高,达 0.99,表明叶面积具有随叶片长度变

化而变化的趋势。舒泉等^[12]对厚朴(*Magnolia officinalis*)的研究表明,叶片宽与叶面积的相关系数最大,达 0.86。树高与叶尖角的相关系数呈显著负相关,相关系数为-0.288,说明树高随着叶尖角的增大而减小,反之亦然。张元燕等^[13]对麻栎(*Quercus acutissima*)表型性状变异的分析则表明叶片性状与生长性状间均呈负相关,部分结果与本研究的一致。莫晓勇等^[14]报道干形指标与其产量存在极显著的负相关,而树高、胸径之间存在显著的正相关。尾叶桉大多数性状间的相关系数呈显著或极显著正相关,说明尾叶桉在生长过程中各性状基本相互关联。可见,通过人为干预改良尾叶桉的一个或多个性状可使与其呈较强正相关性的另外一些性状一并得以改良。因此,在对多个性状进行改良时,须留意性状间的相关性以提高育种效率。

根据主成分分析,前 4 个主成分的累积方差贡献率为 98% (理论上 80%~85%以上的累积贡献率即可认为具有较强的代表性),说明这 4 个主成分能代表 13 个性状的大部分信息,因此可选取这 4 个主成分作为尾叶桉 13 个性状选择的综合指标。尾叶桉间的差异主要体现在叶面积、树高、地径、冠幅以及叶尖角的不同,而徐斌等^[15]的研究表明,杜鹃红山茶(*Camellia azalea*)的主成分差异主要体现

化而变化的趋势。舒泉等^[12]对厚朴(*Magnolia officinalis*)的研究表明,叶片宽与叶面积的相关系数最大,达 0.86。树高与叶尖角的相关系数呈显著负相关,相关系数为-0.288,说明树高随着叶尖角的增大而减小,反之亦然。张元燕等^[13]对麻栎(*Quercus acutissima*)表型性状变异的分析则表明叶片性状与生长性状间均呈负相关,部分结果与本研究的一致。莫晓勇等^[14]报道干形指标与其产量存在极显著的负相关,而树高、胸径之间存在显著的正相关。尾叶桉大多数性状间的相关系数呈显著或极显著正相关,说明尾叶桉在生长过程中各性状基本相互关联。可见,通过人为干预改良尾叶桉的一个或多个性状可使与其呈较强正相关性的另外一些性状一并得以改良。因此,在对多个性状进行改良时,须留意性状间的相关性以提高育种效率。

在叶面积、叶长、叶宽、宽基距和脉左宽上,说明主成分分析结果与参试资源有较大的关系。

桉树是华南地区最重要的产业化树种。利用多性状对尾叶桉无性系进行综合评价,以 20% 的入选率对无性系进行选择,无性系 LDUA10、ZQUA9、ZQUA8 和 LDUA24 入选,入选无性系树高、地径和冠幅较对照尾巨桉 3229 的遗传增益分别为 5.0%、12.8% 和 14.5%。表明对无性系的选择具有较大的遗传增益,选择效果较好。本研究中,树高最高的无性系 LDUA10,其 X1(叶鲜重)、X3(叶片厚)、X5(叶柄长)、X6(叶长)、X8(叶宽)、X9(叶周长)、X10(叶面积)也最大;地径较大的无性系 ZQUA9,其冠幅也相对较大,说明桉树无性系树高、地径存在显著正相关。因此,可根据性状间的相关性,实现从单一性状到多个性状的遗传改良。

参考文献

- [1] LIN G Z. Effect of water and fertilizer Regulation on growth and physiological characteristics of *Eucalyptus* seedlings [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012: 1–10.
林国祚. 水肥调控对桉树苗木生长及生理特性的影响 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012: 1–10.
- [2] WANG W X, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance [J]. *Planta*, 2003, 218(1): 1–14. doi: 10.1007/s00425-003-1105-5.
- [3] GOWER S T, VOGT K A, GRIER C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: Influence of water and nutrient availability [J]. *Ecol Monogr*, 1992, 62(1): 43–65. doi: 10.2307/2937170.
- [4] BECKER M, NIEMINEN T M, GÉRÉMIA F. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France: The role of climate and atmospheric CO₂ [J]. *Ann Sci For*, 1994, 51(5): 477–492. doi: 10.1051/forest:19940504.
- [5] WRIGHT I J, WESTOBY M. Understanding seedling growth relationships through specific leaf area and leaf nitrogen concentration: Generalisations across growth forms and growth irradiance [J]. *Oecologia*, 2001, 127(1): 21–29. doi: 10.1007/s004420000554.
- [6] SCARPELLA E, MARCOS D, FRIML J, et al. Control of leaf vascular patterning by polar auxin transport [J]. *Genes Dev*, 2006, 20(8): 1015–1027. doi: 10.1101/gad.1402406.
- [7] WENZEL C L, SCHUETZ M, YU Q, et al. Dynamics of *MONOPTEROS* and *PIN-FORMED1* expression during leaf vein pattern formation in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant J*, 2007, 49(3): 387–398. doi: 10.1111/j.1365-313X.2006.02977.x.
- [8] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [2.15.1.]. The R Foundation for Statistical Computing [M]. Vienna, Austria: R Development Core Team, 2012: 144–185.
- [9] MA Y H. *Statistic Analysis of Experiment* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1982: 260–271.
马育华. 试验统计 [M]. 北京: 农业出版社, 1982: 260–271.
- [10] WANG M X. *Outline of Tree Breeding* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989: 109–115.
王明麻. 林木育种学概论 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989: 109–115.
- [11] LI Y L, LI L, LI F X. Impacts of Pt agents on *Eucalyptus urophylla* seedling growth and nutrient accumulation [J]. *Guangdong Agri Sci*, 2015(2): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2015.02.009.
李亚林, 李磊, 李福秀. Pt 菌剂处理对尾叶桉苗木生长及营养物质积累的影响 [J]. 广东农业科学, 2015(2): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2015.02.009.
- [12] SHU X, YANG Z L, YANG X, et al. Variation of leaf characters and seedling growth of *Magnolia officinalis* with different provenances [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2009, 25(4): 19–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2009.04.004.
舒泉, 杨志玲, 杨旭, 等. 不同种源厚朴叶片性状变异及幼苗生长量研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 19–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2009.04.004.
- [13] ZHANG Y Y, YU M K, FANG Y M. Analysis on phenotypic trait variation of different provenances of *Quercus acutissima* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2014, 23(3): 36–44. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.05.
张元燕, 虞木奎, 方炎明. 麻栎不同种源的表型性状变异分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 36–44. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.05.
- [14] MO X Y, PENG S Y, LONG T, et al. The variation of main properties of different *Eucalyptus* clones and the synthetical evaluation [J]. *For Res*, 2003, 16(3): 293–298. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2003.03.008.
莫晓勇, 彭仕尧, 龙腾, 等. 雷州半岛桉树无性系选择及其早期综合评价 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 293–298. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2003.03.008.
- [15] XU B, PENG L X, YANG H X, et al. Genetic diversity analysis for leaf main traits of *Camellia azalea* [J]. *Bull Bot Res*, 2015, 35(5): 730–734. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2015.05.015.
徐斌, 彭莉霞, 杨会肖, 等. 杜鹃红山茶叶片主要性状的遗传多样性分析 [J]. 植物研究, 2015, 35(5): 730–734. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2015.05.015.