

# 楸树无性系早期生长变异和优选

韩东花<sup>1,2</sup>, 杨桂娟<sup>2</sup>, 肖 遥<sup>2</sup>, 王秋霞<sup>3</sup>, 翟文继<sup>3</sup>,  
麻文俊<sup>2</sup>, 王军辉<sup>2</sup>, 王良桂<sup>1\*</sup>

(1. 南京林业大学风景园林学院, 江苏 南京 210037; 2. 林木遗传育种国家重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 3. 河南省南阳市林业科学研究院, 河南 南阳 473000)

**摘要:** [目的] 为评价和选育优良楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Mey) 无性系。 [方法] 本研究利用 32 个楸树无性系 7 年的生长测定数据, 以分析其生长规律及早期生长过程。对各无性系的单株材积生长进行 Logistic 拟合回归分析。在此基础上, 分析不同指标间的相关性并对 32 个无性系进行聚类分析。 [结果] 楸树无性系在不同年份 (1 a 除外) 胸径、树高、单株材积差异极显著, 说明楸树无性系间变异丰富。楸树单株材积变异系数最大 (7.84%~35.56%), 胸径次之 (11.89%~17.29%), 树高最低 (6.91%~10.87%), 无性系单株材积改良潜力较大。同时生长后期单株材积 (0.75) 和胸径 (0.82) 保持较高的重复力, 意味楸树单株材积受遗传控制较强。利用无性系单株材积生长平均值, 拟合了楸树无性系单株材积生长曲线的 Logistic 模型, 估算的生长参数在无性系间具有较大差异。楸树无性系 7 年生单株材积平均年生长量呈“S”型曲线生长趋势, 而连年生长量先上升后下降, 在第 5 年达到高峰, 截止到本次调查时还未达到数量成熟。相关性分析显示: 楸树无性系单株材积生长量与最大生长速率 (MGR)、线性生长速率 (LGR)、线性生长量 (LGI) 极显著正相关。聚类分析结果表明: 供试的 32 个楸树无性系分为 4 大类, 其中第 1 类的楸树单株材积生长总量较大, 且具有较强的后期生长潜力。 [结论] 不同楸树无性系的遗传变异丰富, 1-1、22-07、19-01、16-05、16-01、16-07 等 6 个无性系生长潜力较高, 可作为楸树的优良无性系进行推广。

**关键词:** 楸树; 单株材积; 生长节律; Logistic 拟合回归分析; 相关性分析; 聚类分析

**中图分类号:** S718.46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)04-0096-09

楸树 (*Catalpa bungei* C.) 属紫葳科 (Bignoniaceae) 梓属 (*Catalpa*) 落叶大乔木, 是我国独有的珍贵用材树种, 古有“木王”美称。楸树材性优良, 干形端直, 节间较少, 出材率高; 木材纹理通直, 木质结构紧密; 木材物理性能好, 抗弯、抗压性能高; 化学性质稳定, 耐腐蚀耐水湿。不仅如此, 楸树适应性强, 在我国分布广泛, 但由于人们长期滥砍滥伐, 导致楸树数量急剧下降。楸树用材缺口巨大, 价格颇高, 因此亟待选育出速生优良品种以满足楸树珍贵木材供应<sup>[1-2]</sup>。

研究表明, 林木生长动态存在一定的规律, 依据林木生长状况采用有效的数学模型对其生长过程进行探索, 可以更深入地了解林木种间和种内竞争关

系以及其对有机物的累积和消耗规律。以此为基础, 可对现行经营模式、经营密度下林分单株树木的生长潜力和生长状况进行科学评价与判断, 并制定培育措施和管理方案<sup>[3]</sup>。如曹健康等<sup>[4]</sup>通过对光皮桦 (*Betula aluminifera* H. Winkl.) 人工幼林的物候期和生长节律的研究, 采取了相应的抚育管理及施肥措施以提高光皮桦全年生长量。此外, 林木生长过程还可为确定以经济效益为主的速生用材林的合理收获年限, 以降低因过早或过迟砍伐造成的经济损失。如木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* Forst.) 无性系轮伐期为造林后 6~9 年, 相比较于福建实生苗人工林 25 年数量成熟龄早许多, 为海南地区木麻黄无性系最佳轮伐期提供了参考依据<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2018-06-25 修回日期: 2019-04-27

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题“楸树良种选育与高效培育技术研究”(2017YFD0600604)

\* 通讯作者: 王良桂, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 为植物栽培与应用和园林工程管理。E-mail: wlg@njfu.com.cn

另一方面,对林木生长过程的研究可剖析其生长特性,对林木遗传改良有指导作用<sup>[6-8]</sup>。如青钱柳(*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinsk.)种源<sup>[9]</sup>、南方红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemee et Levl.) Cheng et L. K. Fu)家系<sup>[10]</sup>和杨树(*Populus L.*)无性系<sup>[6]</sup>等林木不同水平上均存在显著的生长节律变异,主要体现在如生长速率、快速生长持续的时期长短等方面,而这种差异正好也为人工选育提供了新的思路。以往的遗传改良研究大多只是评价不同基因型目标性状的优劣<sup>[11]</sup>,忽视了其性状优良的内在原因。鉴于此,本研究以32个楸树无性系为试验材料,从楸树无性系单株材积的早期生长过程出发,探究其单株材积变化的规律,提高楸树优良无性系选择的准确性,同时为楸树早期管理提供更加科学的理论指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与试验地概况

试验地位于河南省南阳市潦河镇潦东村(32° 93' N, 112° 41' E),属季风大陆湿润半湿润气候,四季分明。海拔145 m,土壤类型为黄棕壤土,自然肥力较高。年平均气温14.4~15.7℃,7月平均气温26.9~28.0℃,1月平均气温0.5~2.4℃。年降水量703.6~1 173.4 mm,年日照时数1 897.9~2 120.9 h,年无霜期220~245 d。于2009年春季营建楸树杂种无性系试验林,试验采用完全随机区组设计,每小区2株,5个区组。株行距2.5 m×4 m。

### 1.2 生长性状测定

2009—2015年每年末在树木生长停滞期时,对全林进行每木检尺,测定其树高( $H$ )和胸径( $DBH$ ),并据此估算单株材积。连年生长量为当年性状测定值减去上一年性状值,平均生长量为当年性状大小除以树龄。

单株材积估算公式<sup>[12]</sup>:

$$V = \frac{0.7854 \times H \times (DBH + 0.45 \times H + 0.2)^2}{10\,000}$$

### 1.3 生长曲线拟合

采用Logistic模型对楸树无性系进行生长曲线拟合,通过SPSS 22.0的非线性回归方法求出模型各参数值和决定系数 $R^2$ ,然后运用模型计算楸树无性系的单株材积生长特征值。生长曲线的Logistic模型拟合详细方法见参考文献[13-14]。

## 1.4 数据处理

使用SPSS 22.0以小区均值为单位进行性状的方差分析,以检验楸树无性系各性状是否具有显著差异,并分析树高和胸径遗传参数的树龄变化规律。

聚类分析、Pearson相关分析均通过R语言软件的“ape”和“psych”程序包完成,聚类分析采用层次聚类法,以欧氏距离为划分标准。

方差分析线性模型为:

$$y_{ijk} = \mu + C_i + B_j + e_{ijk}$$

式中: $y_{ijk}$ 为第*i*无性系第*j*区组第*k*小区观察值的平均值; $\mu$ 为群体平均效应; $C_i$ 为第*i*无性系效应; $B_j$ 为第*j*区组效应; $e_{ijk}$ 为机误。

重复力公式<sup>[15]</sup>:

$$R = 1 - 1/F$$

式中: $R$ 为重复力, $F$ 为方差分析 $F$ 检验值。

变异系数( $cv$ )公式<sup>[16]</sup>:

$$CV = \sigma/\bar{X} \times 100\%$$

式中: $\sigma$ 为标准差, $\bar{X}$ 为性状均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 楸树无性系生长性状方差分析

楸树无性系生长性状方差分析结果(表1)表明:无性系间1 a树高、胸径和单株材积差异不显著( $P>0.05$ ),其余年份各生长性状皆存在极显著差异,这表明造林2 a后楸树无性系生长性状表现出显著差异,遗传变异丰富,具有较好的遗传改良基础。不同区组中,楸树无性系生长性状在第1年差异不显著,7 a树高的区组效应亦不显著,其余年份不同生长性状存在极显著的区组效应( $P<0.01$ ),说明包括试验地土壤肥力、土壤含水量等方面的环境效应对无性系生长具有显著影响,因此,不能忽视对楸树生长环境优化的人工管理。

### 2.2 楸树无性系生长性状遗传参数估算

从图1可看出:树高、胸径和单株材积的无性系重复力随林龄的变化趋势大致相同,第1年的重复力均较小,随着年龄的增加,重复力逐渐增大,在第3年达到一个高峰,随后又略有回落。自第5年起,胸径和单株材积的无性系重复力呈上升趋势而树高的无性系重复力呈下降趋势。1 a三种性状的无性系重复力均较低,这与苗木栽植对土壤等环境还未完全适应有较大关系,此阶段苗木生长受环境主导,而这种状况也大大降低了重复力的估算精度。自第2年始至第7年,性状重复力较高,变幅减小,遗传

效应对生长调控占据了主要作用。在3个生长性状中,胸径的重复力最高(除第1年外),稳定性最强。

6 a和7 a单株材积的重复力保持较高值且相对稳定,这意味着楸树单株材积受遗传控制较强。

表1 楸树生长性状方差分析

Table 1 The variance analysis of growth characters of *C. bungei*

性状 Traits	树龄/a Tree ages	无性系 Clone			区组 Block		
		均方 MS	F 值 F value	P 值 P value	均方 MS	F 值 F value	P 值 P value
树高 Height	1	0.15	1.39	0.11	0.04	0.37	0.83
	2	0.42	2.37	0.00	0.58	3.28	0.01
	3	0.55	4.46	0.00	0.82	6.70	0.00
	4	0.71	3.37	0.00	1.35	6.40	0.00
	5	0.74	3.75	0.00	0.96	4.85	0.00
	6	0.56	2.93	0.00	1.59	8.33	0.00
	7	0.49	2.15	0.00	0.15	0.68	0.61
胸径 DBH	1	0.20	1.29	0.17	0.11	0.68	0.60
	2	0.56	3.90	0.00	1.22	8.47	0.00
	3	1.42	5.29	0.00	5.59	20.77	0.00
	4	3.33	4.64	0.00	20.63	28.79	0.00
	5	4.22	3.96	0.00	18.79	17.63	0.00
	6	5.85	5.27	0.00	15.42	13.87	0.00
	7	7.63	5.41	0.00	6.15	4.37	0.00
单株材积 Individual volume	1	0.000 0	1.20	0.24	0.000 0	0.69	0.60
	2	0.000 0	3.38	0.00	0.000 1	6.39	0.00
	3	0.000 1	5.22	0.00	0.000 5	18.65	0.00
	4	0.000 7	4.17	0.00	0.003 6	21.96	0.00
	5	0.001 7	2.80	0.00	0.006 6	10.59	0.00
	6	0.002 7	4.03	0.00	0.008 5	12.59	0.00
	7	0.003 7	3.99	0.00	0.002 6	2.79	0.03

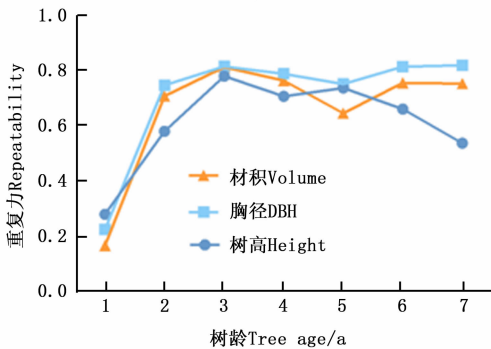


图1 楸树生长性状无性系重复力

Fig. 1 Repeatabilities of tree height and DBH at different age stages in *C. bungei*

变异系数可作为衡量观测值变异程度的指标,反映无性系该性状可利用的改良潜力。由图2可以看出:楸树无性系单株材积、胸径和树高变异系数在不同年份存在一定差异,其中,单株材积的变异系数最大,胸径、树高次之。单株材积与胸径的变异系数有着相似的变化趋势,在1~2 a,变异系数呈较为稳定趋势,变化不大;在2~7 a,有先升高后降低的

过程,均在4 a达到变异最大值。树高的变异系数较小且变化范围也较小。说明楸树无性系的单株材积具有丰富的遗传变异,遗传改良潜力大。相对的,树高改良价值较小。

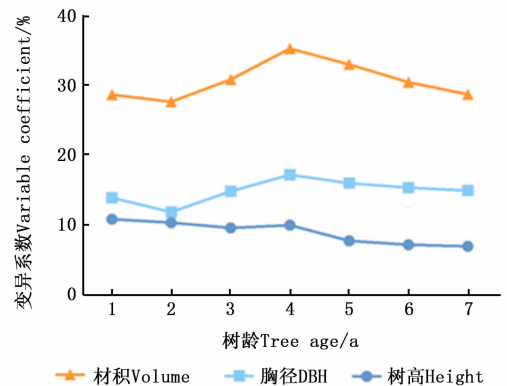


图2 楸树无性系生长性状变异系数

Fig. 2 Variation parameters of different traits at different age stages in *C. bungei* clones

### 2.3 楸树无性系连年生长曲线分析

对楸树无性系早期生长过程进行分析,树高和

胸径有着相似的生长规律,1 a 平均年生长量和连年生长量达到最大,生长速度最快(图3 A、B)。树高和胸径平均年生长量自1 a 始逐年降低。1~3 a 连年生长量逐年下降,3~6 a 进入先增加后降低的过程,分别在5、4 a 达到高峰,6~7 a 树高连年生长量继续下降,而胸径有所回升。由图3可知:单株材积平均年生长量在不断增加,1~3 a 增加缓慢,3~

5 a 增加迅速,自第5 a 年后始终保持较高增长水平(图3 C)。单株材积连年生长量1~5 a 持续增加,在5 a 达到巅峰,随后下降,在6~7 a 保持稳定增长速度,说明楸树单株材积生长主要集中在后期。单株材积的平均年生长量与连年生长量并未相交,说明楸树单株材积生长未达到数量成熟龄。

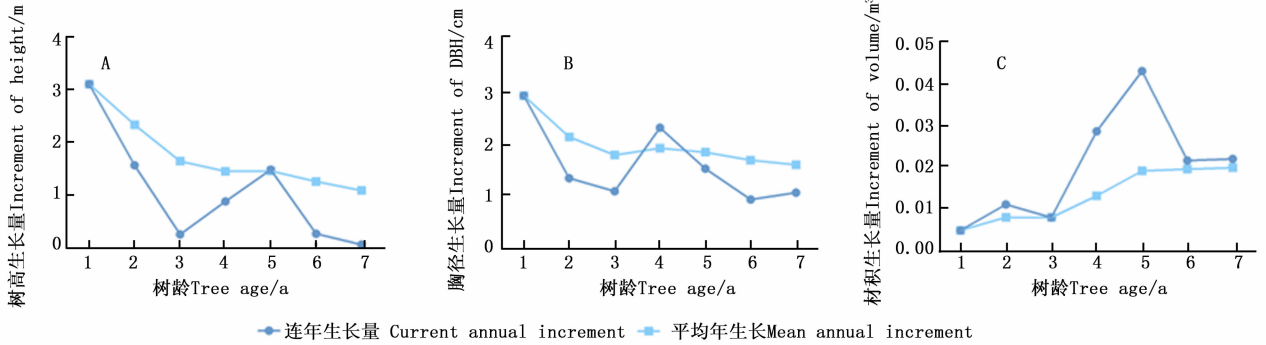


图3 楸树无性系不同生长性状生长量曲线

Fig. 3 Different growth traits curve of *C. bungei* clones

## 2.4 楸树无性系单株材积生长曲线拟合及生长特征值相关分析

为剖析楸树的早期生长过程,对楸树32个无性系单株材积生长量指标早期生长过程采取 Logistic 拟合。拟合结果(表2)表明:Logistic 曲线线性回归相关系数均达到99%,达到极显著相关,楸树无性系拟合曲线拟合度很高,说明 Logistic 可以较好地说明楸树无性系单株材积的早期生长过程。由图4可知:楸树7年生无性系单株材积生长呈现出“S”型曲线趋势,实际值与预测值比较接近,不同林龄时的单株材积残差值均较小,拟合的生长预估模型较科学,预测值能够较好地反应林分生长情况。

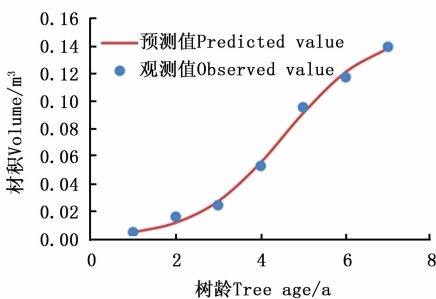


图4 楸树无性系单株材积 Logistic 生长曲线

Fig. 4 Individual volume Logistic fitting curve of *C. bungei* clones

生长参数  $K$  值是反应模型拟合条件下无性系单

株材积生长理论能达到的最大值,楸树无性系间  $K$  值差异较大,无性系 19-01 的  $K$  值最大(0.22),而 7-01 的  $K$  值最小(0.08),前者为后者的 2.75 倍(表2)。楸树无性系约从 3 a 开始进入单株材积快速生长期,持续 2~4 a 左右,约在 4.64 a 时连年生长量达到最大值,并在 5~7 a 结束快速生长,只有无性系 20-02 和 13-05 的快速生长持续时间超过了 7 a。无性系 20-06 的  $t_1$  和  $t_m$  值最小,最快开始单株材积线性生长,也最早达到连年生长量最大值,但是线性阶段生长量并不高(0.084 8 m³)。20-02 的  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_m$ 、 $LGT$  值最大,整个线性生长期较其他无性系均晚,无性系 20-06 和 20-02  $LGR$  和  $MGR$  值差异不大,但 20-20 的线性阶段生长量较 20-06 高(45.40%),说明线性生长过早并不有利于线性生长期单株材积的累积。无性系 22-03 的  $LGR$  和  $MGR$  值在所有试验的无性系中最大(0.05 m³·a⁻¹、0.041 6 m³·a⁻¹),反之无性系 7-01 的最小(0.019 1 m³·a⁻¹、0.015 9 m³·a⁻¹),二者的线性生长时期时间点参数差异不大,但前者线性阶段生长量为后者的 2.6 倍,说明线性阶段生长速率对单株材积的生长量影响巨大。19-01 线性阶段持续时间较长(3.02 a),线性阶段生长速率也比较高( $LGR = 0.039 5 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $MGR = 0.047 4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ),故而线性阶段生长量最大(0.125 3 m³),说明  $LGR$ 、 $MGR$ 、 $LGI$



较高均有利于楸树无性系单株材积的增长。7年生楸树无性系单株材积与生长节律参数相关性分析结果(图5)发现:7 a单株材积生长量与最大生长速率(MGR)、线性生长速率(LGR)、线性生长量(LGI)呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),7 a单株材积生长量与

$t_m$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 呈现低度正相关。与上文无性系的结果一致,这表明单株材积生长量受线性生长时间参数影响较小,而无性系的生长速率才是决定其单株材积增长的决定性因素,速生期的生长速率越大其最终单株材积量也越大。

表2 楸树无性系单株材积生长 Logistic 曲线拟合参数及单株材积生长特征值

Table 2 Parameters of volume Logistic fitting curve and Characteristic value of individual volume of *C. bungei* clones

无性系 Clones	模型拟合参数 Model parameters			$R^2$	单株材积生长特征值 Characteristic value of individual volume						
	$K/m^3$	$a$	$b$		$t_m/a$	$t_1/a$	$t_2/a$	$LGT/a$	$MGR/(m^3 \cdot a^{-1})$	$LGR/(m^3 \cdot a^{-1})$	$LGI/m^3$
1-1	0.21	66.28	0.79	0.994	5.31	3.64	6.98	3.34	0.041 9	0.034 9	0.122 6
12-09	0.14	155.09	1.06	0.997	4.76	3.52	6.00	2.49	0.036 9	0.030 8	0.080 5
12-13	0.11	121.29	1.07	0.993	4.47	3.24	5.69	2.45	0.028 3	0.023 6	0.060 8
13-05	0.21	60.86	0.76	0.991	5.40	3.67	7.13	3.46	0.039 9	0.033 3	0.121 1
13-06	0.18	93.64	0.95	0.995	4.79	3.40	6.18	2.78	0.042 0	0.035 0	0.102 4
16-01	0.16	54.95	0.86	0.995	4.68	3.14	6.22	3.08	0.035 2	0.029 3	0.094 8
16-04	0.16	80.75	0.99	0.996	4.46	3.12	5.79	2.67	0.038 6	0.032 1	0.090 4
16-05	0.15	104.92	1.13	0.994	4.10	2.94	5.26	2.32	0.041 7	0.034 7	0.084 8
16-07	0.16	53.89	0.89	0.996	4.48	3.00	5.96	2.96	0.036 2	0.030 1	0.093 8
16-10	0.19	51.15	0.75	0.989	5.22	3.47	6.96	3.49	0.036 2	0.030 2	0.110 9
17-05	0.09	117.03	1.03	0.988	4.62	3.34	5.89	2.55	0.024 4	0.020 3	0.054 7
17-06	0.11	73.06	0.99	0.994	4.32	2.99	5.64	2.65	0.028 0	0.023 3	0.065 1
18-09	0.13	72.32	0.91	0.997	4.71	3.26	6.16	2.90	0.030 2	0.025 2	0.076 7
19-01	0.22	69.35	0.87	0.991	4.86	3.35	6.36	3.02	0.047 4	0.039 5	0.125 3
19-12	0.13	98.03	1.05	0.993	4.36	3.11	5.62	2.51	0.034 4	0.028 7	0.075 6
19-27	0.19	105.26	1.01	0.996	4.60	3.30	5.90	2.60	0.048 1	0.040 1	0.109 7
20-01	0.16	179.84	1.25	0.987	4.16	3.10	5.21	2.11	0.049 0	0.040 8	0.090 6
20-02	0.21	62.95	0.73	0.991	5.66	3.86	7.46	3.60	0.039 1	0.032 6	0.123 3
20-06	0.15	105.08	1.14	0.994	4.09	2.93	5.25	2.31	0.041 8	0.034 8	0.084 8
21-02	0.11	119.26	1.12	0.990	4.27	3.10	5.45	2.35	0.031 8	0.026 5	0.065 6
21-03	0.13	66.59	0.86	0.997	4.91	3.37	6.45	3.08	0.027 5	0.022 9	0.074 2
22-01	0.18	87.36	0.95	0.991	4.68	3.30	6.06	2.76	0.042 7	0.035 6	0.103 3
22-03	0.20	88.02	1.00	0.998	4.47	3.15	5.78	2.63	0.050 0	0.041 6	0.115 0
22-05	0.17	76.57	0.90	0.994	4.81	3.35	6.26	2.92	0.037 9	0.031 6	0.097 0
22-07	0.19	75.16	0.90	0.997	4.81	3.34	6.28	2.93	0.042 9	0.035 7	0.110 3
22-08	0.16	149.59	1.18	0.993	4.23	3.12	5.35	2.23	0.045 9	0.038 2	0.089 6
22-10	0.14	43.46	0.79	0.988	4.75	3.09	6.40	3.31	0.027 3	0.022 8	0.079 4
23-05	0.10	111.92	1.14	0.983	4.14	2.98	5.29	2.31	0.029 3	0.024 4	0.059 4
6-05	0.17	152.16	1.13	0.992	4.44	3.28	5.61	2.33	0.048 2	0.040 1	0.098 3
7-01	0.08	86.02	0.99	0.988	4.52	3.18	5.85	2.67	0.019 1	0.015 9	0.044 7
9-05	0.14	138.93	1.12	0.994	4.39	3.22	5.57	2.35	0.039 6	0.033 0	0.081 4
9-1	0.16	47.54	0.79	0.992	4.88	3.22	6.55	3.33	0.031 5	0.026 3	0.092 1
均值 Mean	0.16	92.76	0.97	0.993	4.64	3.25	6.02	2.76	0.037 3	0.031 1	0.089 9

注: $t_1$ :单株材积快速增长长期起始时间; $t_2$ :单株材积快速增长长期终止时间; $t_m$ :单株材积最大相对生长速率出现时间;MGR:最大生长速率;LGR:线性生长速率;LGI:线性生长量;LGT:线性生长持续时间。

Note: $t_1$ :The initial time of rapid growth of individual volume; $t_2$ :The end of rapid growth of individual volume; $t_m$ :The occurrence time of Maximum relative growth rate of individual volume;MGR: The maximum growth rate;LGR: Linear growth rate;LGI: Linear growth increment;LGT: Linear growth time.

## 2.5 楸树无性系的聚类分析及优良无性系评价

采用层次聚类法对32个楸树无性系进行类群的划分,由图6可以看出:32个楸树无性系可分为4大类,其中,第I类型包括1-1、22-07、19-01、16

-05、16-01和16-07共6个无性系;第II个类型包括22-08、22-01、19-27、6-05、20-06、20-01和22-03共7个无性系;第III类型包括9-05、16-04、19-12、9-1、16-10、13-05、22-05、13-06和

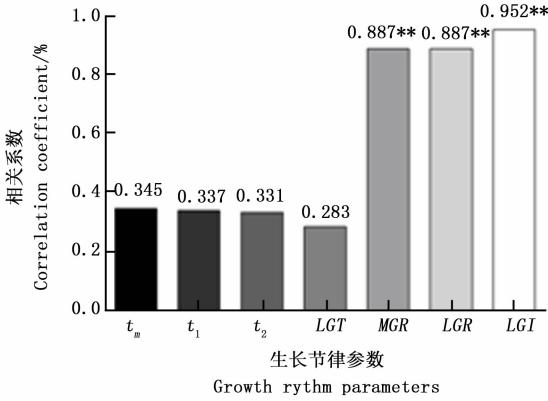


图5 7年生楸树无性系单株材积与生长特征参数间的 Pearson 相关分析

Fig.5 Pearson correlation analysis of individual volume and growth parameters of 7-year-old *C. bungei* clones

20-02 共9个无性系;第IV类型包括17-06、21-03、23-05、17-05、12-13、18-09、22-10、21-02、12-09和7-01共10个无性系。对上述4大类楸树无性系的MGR、LGR、LGI、不同年份的单株材积进行比较(表3)可知:第I类无性系线性阶段生长量(LGI值)最大,第II和III类型次之,第IV类无性系最小,第I类是第IV类的1.86倍。第I类无性系1~3a单株材积生长量高于其他类型单株材积生长

量。第II类的最大生长速率(MGR)和线性生长速率(LGR)最大,4~7a单株材积生长量最大。第II类7a的单株材积生长量与第I和II类型差异不显著,比第IV类7a单株材积生长量高80.7%。综上所述,第I和II类型生长表现较类似,生长速度较快,7a时单株材积累积都达到较高水平。第III类无性系生长表现总体低于第I和II类型;第IV类型的线性生长阶段生长量参数和不同年份单株材积均最低,生长表现最差。

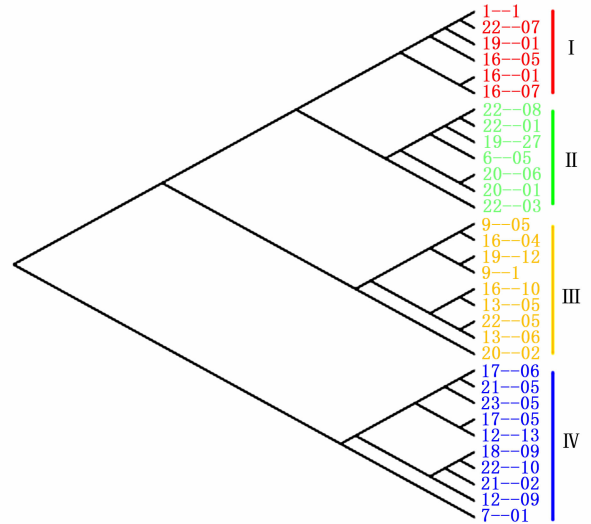


图6 楸树无性系聚类分析

Fig.6 Cluster Analysis of *C. bungei* clones

表3 不同类群楸树无性系单株材积及部分生长节律参数比较

Table 3 Comparison on individual volume and part growth rhythm parameters of four groups of *C. bungei* clones

类群 Goups	MGR/ ( $m^3 \cdot a^{-1}$ )	LGR/ ( $m^3 \cdot a^{-1}$ )	LGI/ $m^3$	单株材积 Individual volume / $m^3$						
				1 a	2 a	3 a	4 a	5 a	6 a	7 a
I	0.040 9	0.034 0	0.105 3	0.006 0	0.019 1	0.029 6	0.061 8	0.105 9	0.134 0	0.160 1
II	0.046 5	0.038 8	0.098 8	0.005 4	0.018 6	0.028 6	0.064 2	0.118 2	0.142 6	0.160 6
III	0.037 7	0.031 4	0.099 3	0.005 1	0.016 1	0.024 4	0.053 4	0.096 0	0.117 2	0.147 6
IV	0.024 2	0.020 2	0.056 6	0.004 4	0.011 9	0.016 4	0.033 0	0.063 1	0.078 7	0.088 9

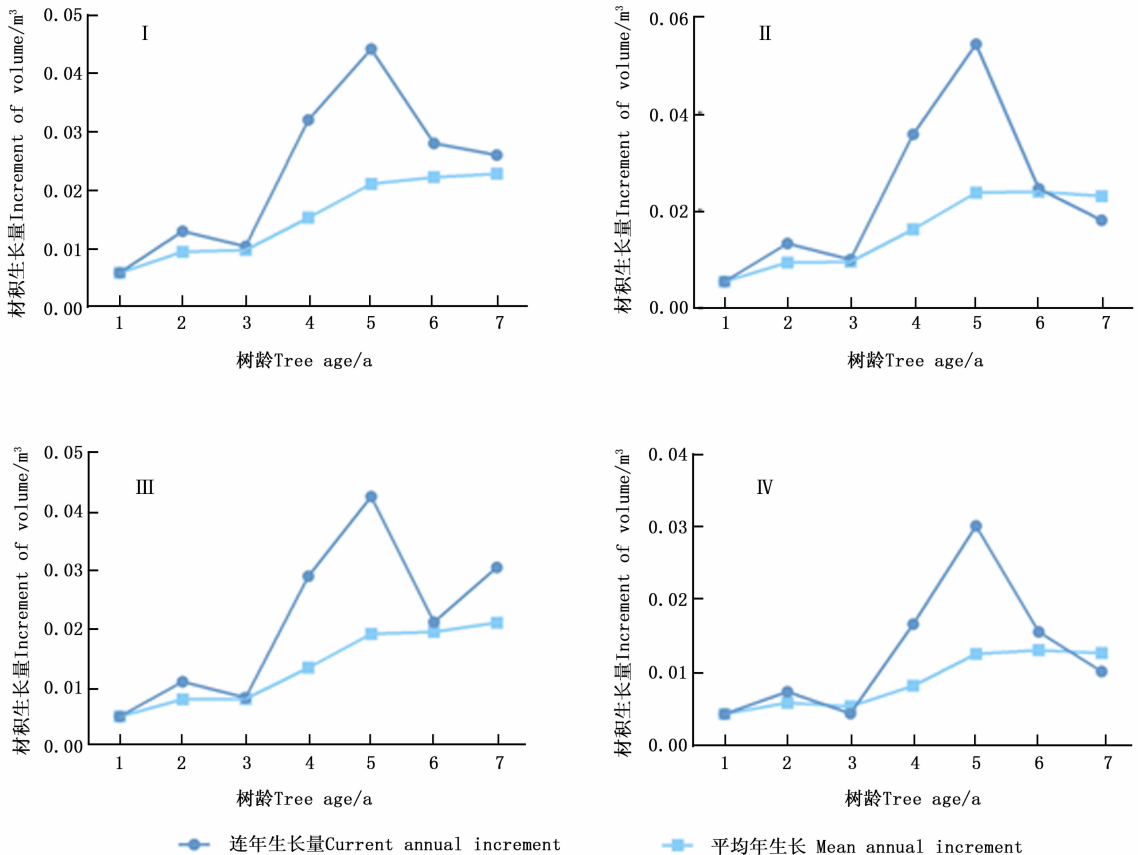
为了解不同类型无性系的单株材积生长规律,分析了其多年的单株材积平均生长量和连年生长量(图7)。4类无性系单株材积平均年生长量近似“S”型持续增加,3~5a增长速度近似线性,5~7a增长速度放缓。4类无性系单株材积连年生长量1~5a单株材积连年生长量整体增加,在3a时均有小幅度下降,在5a达到最大值,其中,第II类型连年生长量最大值高于其他类型。特别的是,第I和第III类无性系在测定的年份中连年单株材积生长量与平均单株材积生长量未有交叉点,而第II和IV类无性系两指标具有交叉点。这表明I和III类

型成熟龄较晚,II和IV类型在第6~7a左右达到数量成熟龄阶段。

### 3 讨论

#### 3.1 楸树无性系生长性状遗传参数估算

遗传与变异是林木遗传改良的基础,高变异和高重复力有利于无性系的选择<sup>[17-18]</sup>。本研究方差分析结果显示,楸树无性系在不同年份生长量差异显著,说明以无性系水平对楸树生长进行遗传改良具有可行性。楸树胸径和单株材积重复力在6a之后保持较高值且趋于稳定,赵曦阳等也发现,包括生



注:I、II、III、IV 分别为楸树无性系聚类分析的 4 个类群

Notes:I、II、III、IV are Four clusters by Cluster Analysis of *C. bungei* clones

图7 不同类群楸树无性系连年生长量曲线和平均年生长量曲线

Fig.7 Mean annual increment and current annual increment curves of individual volume of different types of *C. bungei* clones

长性状在内的 10 个楸树无性系性状重复力超过 0.80<sup>[19]</sup>。与此同时,楸树单株材积变异系数始终保持较高水平(27.84%~35.56%)。

### 3.2 楸树无性系单株材积早期生长过程分析

本研究通过 Logistic 曲线对楸树无性系早期单株材积生长进行了拟合,解析了其生长节律参数,结果表明,无性系间生长节律参数存在较大差异。相关分析表明,楸树无性系单株材积生长量与最大生长速率(MGR)、线性生长速率(LGR)、线性生长量(LGI)皆呈极显著的正相关( $P < 0.01$ )。同时,聚类分析结果也显示了 MGR、LGR 和 LGI 较大的第 I 类、第 II 类无性系 7 a 单株材积生长量较其他两类无性系单株材积生长量高。这与南方红豆杉<sup>[10]</sup>、木荷<sup>[20]</sup>的研究结果类似,揭示了苗木高生长量与线性生长持续时间无关,主要取决于生长速率。而张宋智等<sup>[21]</sup>对幼龄楸树生长规律进行研究,发现速生期

持续时间长短与生物量形成有密切关系。类似的结果还在浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)<sup>[22]</sup>、香椿(*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.)<sup>[23]</sup>生长节律报道中出现。

数量成熟龄指的是林木在生长过程中,单株材积平均生长量达到最大状态的年龄。一般来讲,在正常的林木生长过程中,单株材积平均生长量与连年生长量都是先上升,达到数量成熟后,缓慢下降<sup>[24-25]</sup>。楸树单株材积平均年生长量呈“S”型曲线趋势,连年生长量先上升后下降,在 5 a 达到高峰,截止到本次调查时还未达到数量成熟。在此期间可以加强抚育管理,尽量缩短数量成熟龄到来时间,从而缩短轮伐期,获得较高的经济效益<sup>[26]</sup>。本研究供试的 32 个楸树无性系可分为 4 大类,第 II 类(22-08、22-01、19-27、6-05、20-06、20-01 和 22-03)和 IV 类(17-06、21-03、23-05、17-05、

12-13、18-09、22-10、21-02、12-09 和 7-01) 生长较快,依据早期生长数据进行预测,发现在第 6~7 年达到数量成熟龄,适合于速生用材。第 I 和 III 类在本次研究结束时,单株材积连年生长量和平均生长量尚未出现交点,且在 6~7 a 生长趋势较高,在未来可能还会出现生长高峰。但考虑到此次分析为楸树无性系早期单株材积生长节律,预测拟合的效果不具较强实际生产指导意义,长周期的生长节律变化有待后期进一步观察研究。

## 4 结论

楸树无性系存在丰富的表型变异,具有较高的选择潜力,而此变异受较强的遗传因素控制,受环境因素影响较小,有利于遗传改良。

楸树无性系间生长节律参数存在较大差异。不同物种、基因型及环境条件是影响林木生长节律的关键因子。因此,揭示林木生长节律,做好速生期间的抚育管理和水肥管理,促进其快速生长尤为重要。

综合各项生长参数,第 II 类楸树虽单株材积生长总量、MGR、LGR、4~7 a 单株材积生长量均最大,但早期生长过程分析发现,其单株材积增量呈现出下降趋势,可能后期单株材积累可能并不理想,不能作为优良的用材无性系;而第 I 类的无性系单株材积总量较大,具有较强的后期生长潜力。由此筛选出 6 个无性系包括 1-1、22-07、19-01、16-05、16-01 和 16-07。

## 参考文献:

- [1] 张瑞波,张本强,赵金娟,等. 几个楸树无性系引种造林试验[J]. 山东林业科技, 2011, 41(4):67-69.
- [2] 郭从俭,张新胜,王华荣,等. 楸树无性系造林试验[J]. 河南林业科技, 1994(4):18-19.
- [3] 高波. 落叶松人工林材积-年龄 Logistic 曲线方程的拟合与分析[J]. 林业勘查设计, 2017(2):96-97.
- [4] 曹健康,方乐金. 光皮桦幼林生长节律的观察研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(3):404-407.
- [5] 张勇,仲崇禄,陈羽,等. 海南木麻黄无性系生长过程研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(4):588-594.
- [6] 万志兵,冯刚,朱成磊,等. 不同柳树无性系一年生生长差异分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(7):2358-2363.
- [7] 唐建维,邹寿青. 望天树人工林林木个体前期生长节律的研究[J]. 西部林业科学, 2008, 37(4):45-48.
- [8] Notivol E N, Garcíagil M R G, Alfa R A, et al. Genetic variation of growth rhythm traits in the limits of a latitudinal cline in Scots pine [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(3):540-551.
- [9] 余诚棋,杨万霞,方升佐,等. 青钱柳种源间苗期性状变异分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2010, 34(1):34-38.
- [10] 肖遥,楚秀丽,徐肇友,等. 南方红豆杉 2 年生容器苗多点试验的生长节律家系变异[J]. 林业科学研究, 2016, 29(2):238-244.
- [11] 梅芳,王军辉,贾继文,等. 楸树种质生长和叶部性状的遗传多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1):206-214.
- [12] 全国木材标准化技术委员会, GB/T 4814-2013 原木材积表[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [13] 朱仁海,杨琪瑜,沈文瑛. 统计分析方法[M]. 北京:中国林业出版社, 1990.
- [14] Han Y, Li Z, Tao J, et al. Pattern formation for a volume-filling chemotaxis model with logistic growth [J]. Journal of Mathematical Analysis & Applications, 2017, 448(2):885-907.
- [15] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [16] 陈晓阳,沈熙环. 林木育种学[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- [17] 赵曦阳,李颖,赵丽,等. 不同地点白杨杂种无性系生长和适应性表现分析和评价[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6):7-14.
- [18] Maniee M, Kahrizi D, Mohammadi R. Genetic variability of some morpho-physiological traits in durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum)[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(7):1383-1387.
- [19] 赵曦阳,王军辉,张金凤,等. 楸树无性系叶绿素荧光及生长特性变异研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3):41-47.
- [20] 张萍,周志春,金国庆,等. 木荷种源苗高生长参数变异研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1):61-65.
- [21] 张宋智,王军辉,负慧玲,等. 幼龄楸树生长、生理和形态性状的遗传变异[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10):4-8.
- [22] 李冬林,金雅琴,向其柏. 浙江楠苗期生长节律[J]. 浙江农林大学学报, 2004, 21(3):349-352.
- [23] 周祥斌,周玮,林玮,等. 14 个香椿种源生长节律的观测与分析[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5):84-90.
- [24] 林树梅. 杨树优良无性系生长规律及合理轮伐期的确定[D]. 泰安:山东农业大学, 2007.
- [25] Gao Z B, Weizhong L I, Zhengbing H E, et al. Growth and Quantity Mature Age of Pinushenryi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2):131-135.
- [26] 刘广路,范少辉,张群,等. 长江滩地 I-72 杨人工林生长特性研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2):243-247.



## Study on Early Growth Variation of *Catalpa bungei* Clones and Optimization

HAN Dong-hua<sup>1,2</sup>, YANG Gui-juan<sup>2</sup>, XIAO Yao<sup>2</sup>, WANG Qiu-xia<sup>3</sup>, ZHAI Wen-ji<sup>3</sup>, MA Wen-jun<sup>2</sup>,  
WANG Jun-hui<sup>2</sup>, WANG Liang-gui<sup>1</sup>

(1. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Nanyang Forestry Research Institute, Nanyang 473000, He'nan, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] To evaluate and select *Catalpa bungei* superior clones. [ **Method** ] The field test data of seven years' growth were collected to analyze the early growth processes and tendencies of different *C. bungei* clones. Logistic fitting regression analysis method was used on individual volume growth of each clone. In addition, the correlation among different indexes were analyzed and a cluster analysis of 32 clones was carried out. [ **Result** ] The differences in DBH, tree height and individual volume among *C. bungei* clones in different ages (except 1 year old) were extremely significant, indicating that there was a high variation among the clones. The coefficient of variation of individual volume showed the highest (7.84 – 35.56), followed by DBH (11.89 – 17.29) and tree height (6.91 – 10.87), suggesting a greater potential for improvement in the individual volume of clones. At the same time, in the later growth period, the individual volume (0.75) and DBH (0.82) maintained high repeatability, implying that individual volume was strongly controlled by heritability. Using the mean annual increment of individual volume growth in clones, a logistic model of the individual volume growth curve of the *C. bungei* clones was fitted. The estimated growth parameters were quite different among clones. The mean annual individual volume growth of 7-year-old *C. bungei* presented a S-shaped growth curve; the annual individual volume growth increased at first and then decreased, and reaching a peak at the 5th year, however, the clones observed did not reach quantitative maturity according to the curves. The correlation analysis showed that the individual volume increment was significantly positively correlated with the maximum growth rate, linear growth rate, and linear growth increment of *C. bungei* clones. The results of cluster analysis showed that the 32 *C. bungei* clones could be divided into 4 categories, the total individual volume of category I was larger and with stronger potential for growth in the later period than the others. [ **Conclusion** ] The genetic variation of *C. bungei* clones is rich. The growth potential of 6 clones among the 32 clones is higher, so they can be used as superior clones for expanding.

**Keywords:** *Catalpa bungei* clone; individual volume ; growth rhythm; logistic fitting regression analysis; correlation analysis; cluster analysis

(责任编辑:张 研)