

江欣蔚, 黄佳玉, 徐玉, 等. 紫薇和福建紫薇杂交群体株型性状遗传分析[J]. 福建农业学报, 2025, 40 (2): 123–131.

JIANG X W, HUANG J Y, XU Y, et al. Genetics of *Lagerstroemia indica* × *L. limii* Phenotype[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 40 (2): 123–131.



紫薇和福建紫薇杂交群体株型性状遗传分析

江欣蔚, 黄佳玉, 徐玉, 申梦娇, 蔡明, 潘会堂*

(北京林业大学园林学院/林木资源高效生产全国重点实验室/花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室/国家花卉工程技术研究中心/城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

摘要: 【目的】探讨福建紫薇 (*Lagerstroemia limii*) 改良紫薇乔木性状的潜力。【方法】以福建紫薇与灌木型紫薇品种‘千层绯雪’为亲本构建正、反交群体, 采用相关性分析、主基因+多基因混合遗传模型对一年生杂交后代的株高、地径、一级分枝点高度、一级分枝数等 7 个性状进行分析。【结果】(1) 杂交后代的株高在 1.50~24.5 cm, 地径 0.30~4.44 mm, 一级分枝点高度 0.50~6.20 cm, 一级分枝数 0~4 个, 多数性状基本呈正态分布, 后代中存在潜在的乔木型种质。(2) 7 个性状的变异系数范围在 31.72%~240.42%, 变异程度最大的是千层绯雪×福建紫薇群体的一级分枝数, 最小的是该群体的一级分枝点高度。福建紫薇×‘千层绯雪’群体的一级分枝点高度、开张角度、侧枝 GSA 的变异系数比‘千层绯雪’×福建紫薇群体更大, 且福建紫薇×‘千层绯雪’群体更倾向表现出植株高、地径粗、分枝数量多, 说明福建紫薇作为母本时杂交后代有更丰富的株型变异。(3) 相关性分析表明, 株高与地径、一级分枝数与开张角度、开张角度与侧枝 GSA 呈极显著正相关。(4) 株高、地径、开张角的最适模型为 2MG-AD, 侧枝 GSA、一级分枝点高度的最适模型为 2MG-EA。【结论】福建紫薇是培育生长量大、基部不分枝、主干明显的紫薇品种的优良材料, 为乔木型紫薇的培育提供依据。

关键词: 紫薇; 远缘杂交; 株型; 遗传分析

中图分类号: Q321

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2025) 02-0123-09

Genetics of *Lagerstroemia indica* × *L. limii* Phenotype

JIANG Xinwei, HUANG Jiayu, XU Yu, SHEN Mengjiao, CAI Ming, PAN Huitang*

(College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University/State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources/Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding/National Engineering Research Center for Floriculture/Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】Genetics on the phenotype of *Lagerstroemia limii* was studied to breed improved hybrids with 'Qianceng Feixue'. 【Method】Populations of hybrids between the tree-type *L. limii* (FJ) and the shrub-type 'Qianceng Feixue'(QC) were generated for the study. Seven phenotype traits including the height, diameter, and length of 1st branch of one-year-old plants were measured for correlation analysis among them. Major gene+polygene inheritance models were tested for best fitting in predicting hybrid phenotype. 【Result】(1) The plant height of the hybrid progenies ranged 1.50–24.5 cm, the trunk diameter 0.30–4.44 mm, the 1st branch length 0.50–6.20 cm, and the branch number 0–4. These traits were basically in a normal distribution pattern among the hybrids with potential arborescent germplasms. (2) The coefficients of variation on the 7 traits were 31.72%–240.42% with the greatest on the number of branches and the least on the height of the first branch in the QC×FJ population. The coefficients of variation of primary branching point height, opening angle, and lateral branching GSA were larger in the FJ×QC population than in the QC×FJ population, and the FJ×QC group tended to show higher plant height, thicker ground diameter, and more branches, indicating that the hybrid progeny of *L. limii* as the mother plant had richer strain variation. (3) The plant height significantly correlated with the trunk diameter, the number with the angle of the branches,

收稿日期: 2024-08-28 修回日期: 2024-12-22

作者简介: 江欣蔚 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事花卉遗传育种研究, E-mail: 2581939331@qq.com

* 通信作者: 潘会堂 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事花卉遗传育种研究, E-mail: htpan@bjfu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1001004)

and the angle with the GSA of the branches. (4) The best fit model for the plant height, trunk diameter, and branching angle was 2MG-AD, and that for the branch GSA and 1st branch length 2MG-EA. 【Conclusion】 *L. limii* (FJ) appeared to be a plausible candidate for breeding hybrids with *L. indica* (QC) that could inherit the desirable phenotypes of growing vigorously, being free of branches on base of trunk, and showing the main trunk prominently.

Key words: *Lagerstroemia*; distant hybridization; phenotype traits; genetic analysis

0 引言

【研究意义】紫薇 (*L. indica*) 为千屈菜科 (*Lythraceae*) 紫薇属 (*Lagerstroemia*) 灌木或小乔木, 大多为灌木, 花量大, 花色艳丽, 花期长, 在园林中常作夏季观花树种应用。全世界紫薇属植物约有 55 种, 主要分布在亚洲东部、东南部、南部和澳大利亚的北部^[1], 中国是紫薇属植物的世界分布中心和起源中心^[2], 共有 24 种^[3], 其中福建紫薇 (*L. limii*) 是我国特有植物, 常为小乔木, 基部少分枝, 是改良紫薇株型的优异种质^[4], 但与紫薇相比, 其花色仅有粉色和紫色, 花期短 (单株花期一般 20 余天), 利用福建紫薇和紫薇杂交, 以期获得花色美丽、花期长、植株体量大的乔木型紫薇新品种。

【前人研究进展】株型是农作物、园艺作物和观赏植物最重要的性状之一。一方面, 它限定了植物本身各器官的空间排列, 与产量、品质及植株外观有着紧密联系^[5-7]; 另一方面, 株型显著地影响群体结构、田间小气候及群落结构, 进而影响光能利用率、作物产量及景观效果^[8,9]。株型主要由株高、分枝等性状共同决定。紫薇株型有低矮紧凑型、匍匐型 (垂枝型)、普通灌木型、小乔木型等类型^[10]。课题组前期用紫薇与乔木株型的紫薇属野生种大花紫薇 (*L. speciosa*) 杂交获得种间杂交品种‘风华绝代’^[11], 从紫薇品种‘Pocomoke’开放授粉群体中筛选出垂枝品种‘玲珑’; 用屋久岛紫薇 (*L. fauriei*) 和‘Pocomoke’杂交培育出地被型品种‘绿地毯’; 用屋久岛紫薇和‘Pocomoke’杂交后回交得到低矮紧凑型品种‘粉精灵’^[12], 这些品种极大丰富了紫薇的株型。株型性状包括株高、节间长度、节间数量、分枝数量、分枝角度等, 研究株型性状的遗传规律及形成机制, 对定向培育株型各异的植物 (尤其是木本植物) 新品种具有重要的指导意义^[13]。刘阳^[14]以屋久岛紫薇为母本, ‘Pocomoke’为父本构建了杂交群体, 后代的株型性状有明显的分离, 推断株高性状可能由主效基因控制, 微效基因修饰。石俊等^[15]在屋久岛紫薇×‘Creole’杂交群体中发现直立型:中间型:匍匐型符合 1:2:1 分离比, 推测紫薇匍匐性状受一对

不完全显性的主效基因控制, 受微效基因修饰。焦垚^[16]用大花紫薇与‘Dynamite’的正、反交群体发现株高、冠幅、当年生枝条长度、当年生枝条粗度等 8 个性状出现广泛分离, 各性状之间呈极显著正相关。【本研究切入点】目前, 园林中栽植的小乔木型或乔木型紫薇多是紫薇古树或大树, 其乔木型主要依靠持续的修剪维持, 仍带有较强的灌木生长性性状。园林中的单干紫薇高度通常仅约 1 m, 尚未达到小乔木高度的标准要求^[17]。观赏性状好的乔木型紫薇品种比较缺乏。培育花色多样、乔木型的紫薇品种成为紫薇育种的一个重要方向。【拟解决的关键问题】以福建紫薇和开花繁密、花期长的紫薇品种‘千层绯雪’为亲本进行正反交, 利用主基因+多基因混合遗传模型^[18-20]对一年生杂交后代的株型性状进行分析, 以期对乔木型紫薇品种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以小乔木型的福建紫薇 (FJ) 和花量大的灌木型紫薇品种‘千层绯雪’ (QC) 为亲本进行杂交, 杂交试验在北京林业大学国家花卉工程技术研究中心小汤山基地进行。

1.2 方法

2021 年 6 月参考刘阳^[14]的方法进行杂交, 以‘千层绯雪’为母本的组合作为正交。10 月底至 11 月初采收果实, 翌年 3 月种子播种于 72 孔穴盘 (泥炭:蛭石=1:1) 中, 待幼苗长出第二对真叶后移栽至口径 12 cm 的花盆 (泥炭:蛭石=3:1) 中; 5 月将杂交后代带花盆移至室外 (昼温 18~38 ℃; 夜温 12~28 ℃); 11 月再移回温室 (5~20 ℃), 期间正常水肥管理。2022 年 12 月测定正、反交群体的株高 (基质表面到植株顶端的距离)、地径 (仅有 1 个主枝的后代, 测量基质表面处直径; 基部有多个分枝的, 选最粗的枝条测量基部直径)、一级分枝点高度 (主枝第一次分枝处距基质表面的高度)、一级分枝数 (主枝上的分枝数量)、植株开张角度 (测量侧枝与主枝之间两个垂直方向的角度, 取平均值)、侧枝 GSA (侧枝与垂直方向的夹

角)^[15]、节间长度(第 3~5 叶位相邻两个芽点之间的距离)。

1.3 数据分析

用 Excel 软件整理数据,参考焦垚^[16]的方法,对杂交后代性状进行描述性统计、计算变异系数(coefficient of variation, *CV*)、绘制频率分布直方图;对 7 个株型性状进行主成分分析与相关性分析;根据双假测交策略,将正、反交 *F*₁ 群体视为用于遗传分析的假 *F*₂ 群体,用主基因+多基因模型分析 *F*₁ 群体基本呈正态分布的株型性状,探究其遗传规律,用 R 语言 SEA2.0 (segregation analysis) 计算每个性状 A (一对主基因)、B (两对主基因) 两类共 11 种遗传模型的 *AIC* (Akaike's information criterion) 值。然后通过 5 个统计参数的拟合优度测试来评估所选模型,分别是均匀性检验 *U*₁²、*U*₂²、*U*₃², Smirnov 检验 (*nW*²) 和 Kolmogorov 检验 (*Dn*),根据 *AIC* 值最小原则和适合性检验的结果选出最优模型^[21]。

2 结果与分析

2.1 杂交座果率

福建紫薇与‘千层绯雪’之间杂交亲和性好,座果率高(75.5%以上),果实可自然发育成熟,种子播种后正常发芽(表 1)。

2.2 正、反交群体的株型性状

QC×FJ 杂交组合共获得 963 株后代(表 1),一年生株高 1.5~24.5 cm,其中 1.5~<5 cm 的后代占 32.37%,5~<15 cm 的占 64.69%,≥15 cm 的占 3.84%;地径 0.30~4.44 mm,其中 0.3~<0.8 mm 的占 14.12%,0.8~<2.2 cm 的占 75.50%,≥2.2 cm 的占 10.38%;两参数的变异系数分别为 51.97%、43.57%,变异丰富(图 1)。具有分枝的后代有 171

表 1 福建紫薇与‘千层绯雪’的杂交结实率
Table 1 Seed setting rates of *L. limii* × ‘Qianceng Feixue’ hybrids

母本×父本 Maternal× Paternal	杂交数量 Flower number of crosses	结实数 Fruit number	结实率 Fruiting rate/%	出苗数 Seedling number
‘千层绯雪’×福建紫薇 ‘Qianceng Feixue’× <i>L.limii</i>	371	280	75.5	963
福建紫薇×‘千层绯雪’ <i>L.limii</i> ×‘Qianceng Feixue’	17	17	100.0	66
合计 Total	388	297	76.5	1 029

株,占 17.76%,一级分枝点高度 0.8~6.2 cm,分枝数量在 0~4 个,变异系数为 240.42%。963 株后代中,株高在 15 cm 以上、地径 2.2 mm 以上、没有分枝的后代有 23 株,占比 2.39%(表 2)。

株高、地径、开张角度、侧枝 GSA 基本呈正态分布(图 2),偏度均为正值,分别为 1.32、1.09、1.89、0.71(表 2),表示直方图向正态分布区域的左侧倾斜,4 个性状的峰度分别为 2.16、1.55、6.43、0.05,表示正态分布陡峭。

FJ×QC 组合共获得 66 株杂交后代(表 1),该群体一年生株高 2.0~22.0 cm,其中株高 2~<5 cm 的后代占 30.30%,5~<15 cm 的占 62.12%,15 cm 以上的占 7.58%;地径为 0.44~2.98 mm,其中 0.44~<0.8 mm 的后代占 13.64%,0.8~<2.2 cm 的占 72.72%,≥2.2 cm 的占 13.64%。两者的变异系数分别为 54.11%、42.86%,变异丰富(图 1)。66 株后代中,具有分枝的后代有 15 株,占 22.73%,一级分枝点高度 0.5~5.8 cm,分枝数量在 0~2 个,变异系数为 196.15%。该群体中,株高 15 cm 以上、地径 2.2 mm 以上、没有分枝的后代有 1 株,占 1.52%(表 3)。

7 个性状的频率分布直方图见图 3,地径、开张



图 1 杂种群体中的代表性株型
Fig. 1 Phenotypes of hybrid populations

表 2 QC×FJ 群体的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of QC×FJ population

性状 Traits	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Average	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%
株高 Plant height/cm	24.50	1.50	6.87	3.57	1.32	2.16	51.97
地径 Diameter/mm	4.44	0.30	1.40	0.61	1.09	1.55	43.57
一级分枝点高度 Height at first branching point/cm	6.20	0.80	3.31	1.05	0.11	0.19	31.72
一级分枝数 Number of first-order branches	4.00	0.00	0.24	0.58	2.59	6.84	240.42
开张角度 Opening angle/(°)	87.56	8.20	27.90	11.35	1.89	6.43	40.68
侧枝GSA Lateral branch GSA/(°)	72.25	15.35	35.26	12.42	0.71	0.05	35.22
节间长度 Internode length/cm	2.0	0.40	0.73	0.26	1.58	3.23	35.62

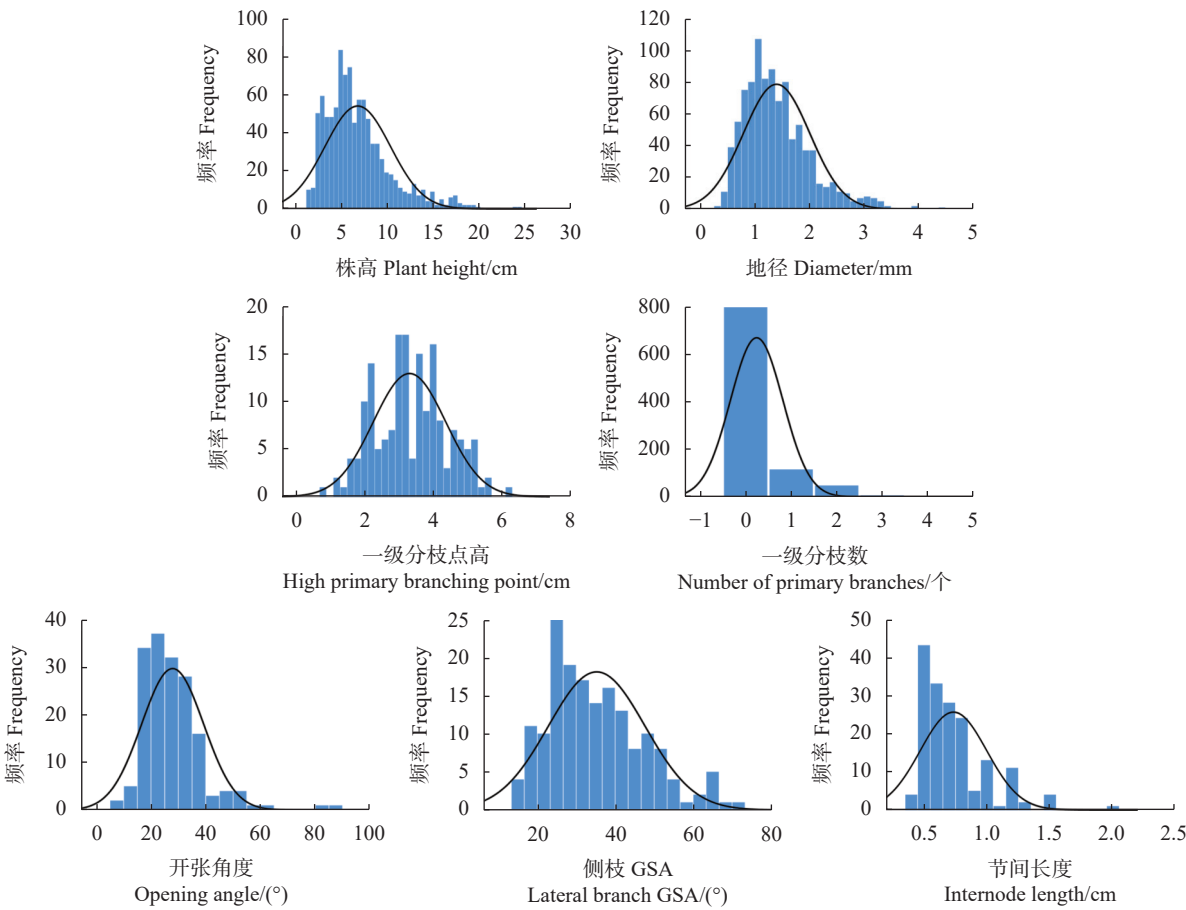


图 2 QC×FJ 群体杂交后代株型性状的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of phenotype traits in QC×FJ population

角度基本呈正态分布，偏度均为正值，分别为 0.91、0.99（表 3），表示直方图向正态分布区域的左侧倾斜；这 2 个性状的峰度分别为 0.15、0.97，表示正态分布陡峭。

2.3 主成分分析与性状相关性

分别对 QC×FJ 与 FJ×QC 杂交后代的株型性状进行相关性分析（表 4、表 5），相同点是两个群体株高与地径、地径与节间长度、一级分枝数与开张

表 3 FJ×QC 群体的描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of FJ×QC population

性状 Traits	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Average	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%
株高 Plant height/cm	22.0	2.0	7.54	4.08	1.06	2.19	54.11
地径 Diameter/mm	2.98	0.44	1.40	0.60	0.91	0.15	42.86
一级分枝点高度 Height at first branching point/cm	5.8	0.5	2.41	1.39	0.99	0.97	57.68
一级分枝数 Number of first-order branches/each	2	0	0.26	0.51	1.84	2.69	196.15
开张角度 Opening angle/(°)	59.69	3.03	27.34	19.70	-1.38	1.121	72.06
侧枝GSA Lateral branch GSA/°	48.35	10.9	24.65	11.33	0.83	-0.10	45.96
节间长度 Internode length/cm	54.8	17.3	33.40	13.39	0.38	-1.05	40.08

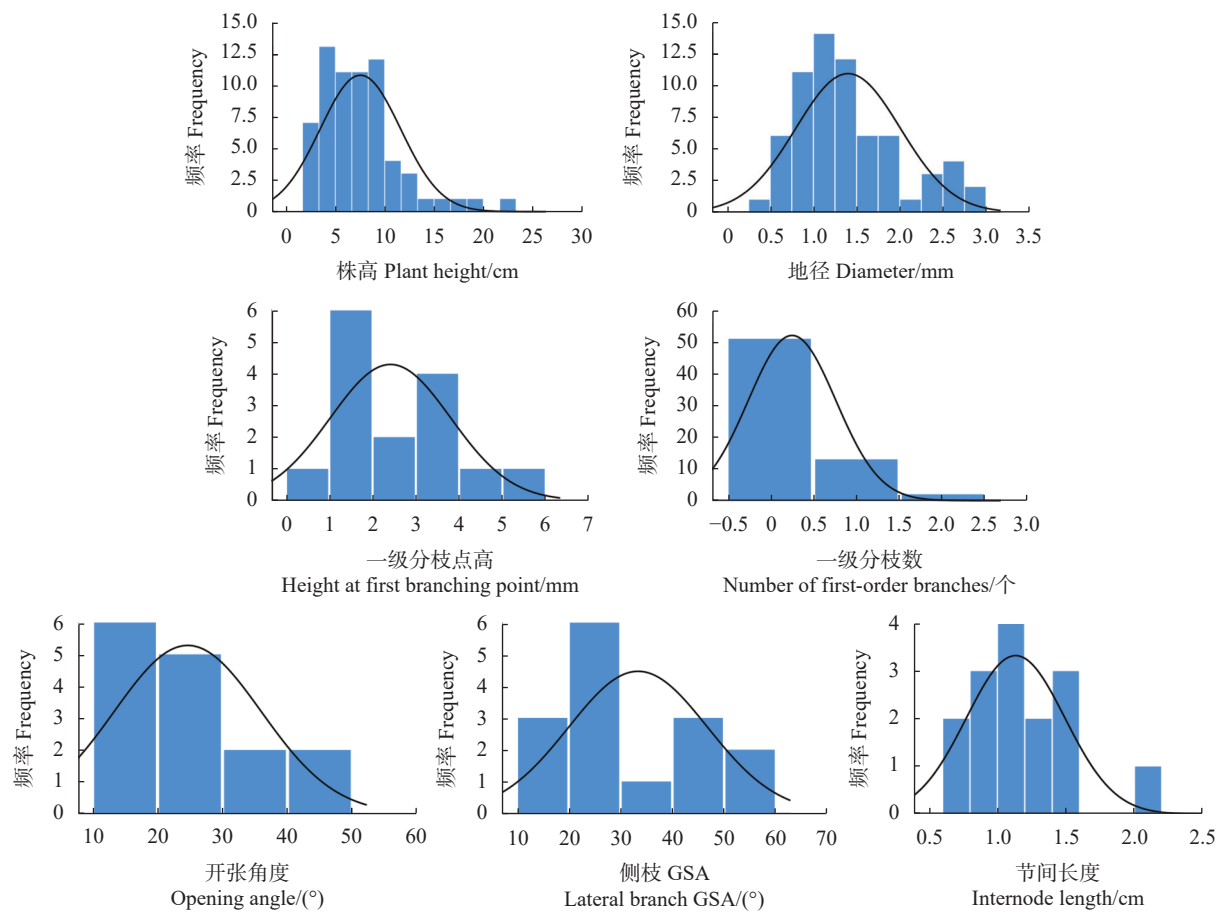


图 3 FJ×QC 群体杂交后代株型性状的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of phenotype traits in FJ×QC population

角度、开张角度与侧枝 GSA 均呈极显著正相关，株高与节间长度极显著或显著正相关。说明植株越高，地径越粗，节间越长，生长越快；开张角度越大，一级分枝数越多，侧枝 GSA 越大。

不同的地方是 QC×FJ 群体株高与一级分枝点高度、开张角度、侧枝 GSA 存在极显著正相关性，说明植株越高，一级分枝点越高、开张角度与侧枝 GSA 也越大，这些参数在 FJ×QC 中无显著相关性。

表 4 株型性状的相关性分析 (QC×FJ)
Table 4 Correlation between phenotype traits (QC×FJ)

	株高 Plant height	地径 Diameter	一级分枝点高度 Height at first branching point	一级分枝数 Number of first-order branches	开张角度 Opening angle	侧枝GSA Lateral branch GSA
地径 Diameter	0.821**					
一级分枝点高度 Height at first branching point	0.317**	0.254**				
一级分枝数 Number of first-order branches	0.100	0.169*	-0.019			
开张角度 Opening angle	0.456**	0.441**	0.207**	0.400**		
侧枝GSA Lateral branch GSA	0.524**	0.480**	0.244**	0.027	0.578**	
节间长度 Internode length	0.743**	0.701**	0.195*	0.036	0.377**	0.534**

*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。表5同。
* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$). Same for Table 5.

表 5 株型性状的相关性分析 (FJ×QC)
Table 5 Correlation between phenotypic traits (FJ×QC)

	株高 Plant height	地径 Diameter	一级分枝点高度 Height at first branching point	一级分枝数 Number of first-order branches	开张角度 Opening angle	侧枝GSA Lateral branch GSA
地径 Diameter	0.791**					
一级分枝点高度 Height at first branching point	-0.169	-0.107				
一级分枝数 Number of first-order branches	-0.141	0.076	0.725**			
开张角度 Opening angle	0.192	0.367	0.398	0.585*		
侧枝GSA Lateral branch GSA	0.413	0.475	0.177	0.170	0.718**	
节间长度 Internode length	0.639*	0.819**	-0.118	-0.038	0.476	0.427

FJ×QC 群体一级分枝点高度与一级分枝数呈极显著正相关, 而在 QC×FJ 中呈不显著的负相关。

2.4 混合遗传模型分析

QC×FJ 群体中株高、地径、开张角、侧枝 GSA、一级分枝点高度 5 个性状基本呈正态分布, 我们对这些性状进行了混合遗传分析。一级分枝数、节间长度两个性状不符合正态分布, 无法进行分析。FJ×QC 群体可用于分析的株型性状有地径、开张角度。

不同遗传模型的 AIC 值见表 6、7, 从中选择 AIC 值最小或相对较小的模型作为备选最适模型再进行适合性检验 (表 8)。结果表明, 正、反交群体的株高、地径、开张角的最适模型是 2MG-AD, 由 2 对加性-显性主基因控制; 侧枝 GSA、一级分枝点高度的最适模型是 2MG-EA, 由 2 对等加性主基因控制 (表 9)。QC×FJ 群体株高、地径、开张角的

d_a 均大于 d_b , 说明第一对主基因的加性效应更显著, 3 个性状的显性效应 h_a 、 h_b 均为负值, 起减效作用。FJ×QC 群体地径与开张角两个性状的 $|da|$ 均大于 $|db|$, 说明第一对主基因的加性效应更显著, ha 、 hb 均为负值, 起减效作用。

3 讨论

乔木一般具有明显的主干, 株型高大, 生长量大, 植株基部无萌蘖枝或者较少。福建紫薇具有明显的乔木性状, 与紫薇杂交亲和性高, 是培育乔木型紫薇品种的优良亲本。株型性状变异的多样性是株型育种的基础, 了解杂种后代性状的变异程度, 对种质创新具有重要意义^[22]。本研究获得的杂交群体的株高、地径、一级分枝点高度、一级分枝数等性状均存在不同程度的分离, 结合两个群体的变异系数, 两群体的一级分枝数均存在显著变异。

表 6 不同遗传模型下 QC×FJ 群体的 *AIC* 值
Table 6 *AIC* of QC×FJ population by different genetic models

模型 Model	株高 Plant height	地径 Diameter	开张角度 Opening angle	侧枝GSA Lateral branch GSA	一级分枝点高度 Height at first branching point
0MG	5 188.884	391.072	1 303.792	1 334.032	506.3505
1MG-AD	4 899.472	300.2864	1 250.446	1 313.571	503.0956
1MG-A	4 942.795	306.6786	1 248.605	1 312.763	501.3233
1MG-EAD	5 032.944	335.7514	1 282.295	1 318.325	506.3529
1MG-NCD	4 993.272	331.1677	1 287.728	1 321.534	509.4304
2MG-ADI	4 950.868	325.7444	1 278.015	1 314.864	515.8107
2MG-AD	4 871.614	294.8911	1 245.498	1 305.003	497.1486
2MG-A	4 910.321	302.0399	1 249.31	1 314.201	510.264
2MG-EA	4 888.363	295.9231	1 246.738	1 303.926	491.0738
2MG-CD	5 192.889	395.0742	1 307.791	1 338.033	510.3601
2MG-EAD	5 190.889	393.0743	1 305.791	1 336.033	508.3601

加粗值代表最小 *AIC* 值；MG 代表主基因模型；A 代表加性效应；D 代表显性效应；I 代表上位性效应；E 代表相等；N 代表负向；C 代表完全。表 7 同。
Data in bold: minimum *AIC*; MG: major gene model; A: additive effect; D: dominant effect; I: epistatic interaction; E: equal; N: negative; C: complete. Same for Table 7.

表 7 不同遗传模型下 FJ×QC 群体的 *AIC* 值
Table 7 *AIC* of FJ×QC population under different genetic models

模型 Model	地径 Diameter	开张角度 Opening angle
0MG	123.9251	118.3907
1MG-AD	109.1332	118.0483
1MG-A	114.9762	118.7385
1MG-EAD	115.9589	119.0364
1MG-NCD	110.7568	119.0415
2MG-ADI	110.3914	122.8118
2MG-AD	100.7582	106.6611
2MG-A	111.5877	118.2622
2MG-EA	107.1847	112.1628
2MG-CD	127.9204	122.358
2MG-EAD	125.9204	120.358

FJ×QC 群体的一级分枝点高度、开张角度、侧枝 GSA 的变异系数比 QC×FJ 群体更大，说明福建紫薇作为母本时杂交后代有更丰富的株型变异。FJ×QC 群体比 QC×FJ 群体杂交后代更倾向表现出植株高、地径粗、分枝数量多。因此，福建紫薇是培育生长量大、主干明显的紫薇品种的优良材料，与紫薇正反交后代均具选出生长迅速、株型高大的乔木型紫薇品种的可能。

幼苗期对株型提前进行选择，能缩短育种时间，加快育种进程^[23]。焦垚^[16]发现大花紫薇与紫薇的杂交后代中，花序的大小、花量、株型相关性状可以在早期通过叶片大小与植株体量进行选择。说

明幼苗期对性状进行预选具有一定的可靠性。本研究对 QC×FJ 与 FJ×QC 正反交群体进行了相关性分析，发现两个群体均表现为，植株越高，地径越粗，节间越长，FJ×QC 还表现为植株越高，一级分枝点越高。因此，为选育乔木型紫薇品种，可将植株高、地径粗、节间长、一级分枝点高度作为评价指标。在木本植物中，开花的起始是划分幼年期和成年期的标准^[24]。乔木的幼年期与成年期会有形态、内源激素、分子调控上的差异^[25]。因此，在幼年期筛选乔木性状仍存在一定的不确定性，需要后续进一步评估。

植物大多数表型性状都是由微效多基因控制的数量性状，在同一杂交后代群体的不同个体中往往表现出连续的数量差异，易受环境影响，需要应用统计学方法对整个群体进行测定和分析^[26]。主基因+多基因遗传模型可以根据杂交后代的某个性状的表型观测值，推测出该性状的基因组分^[27]。张琳等^[28]利用主基因+多基因混合遗传模型对牡丹杂交后代 20 个表型性状进行分析，发现株高、冠幅等 8 个性状由微效多基因控制，新枝长度、花朵数等 12 个性状受一对或两对主基因控制。本研究对福建紫薇与‘千层绯雪’正、反交群体的株型性状进行最适遗传模型分析，发现紫薇株高、地径的最适遗传模型为 2MG-AD，开张角度、主枝 GSA、一级分枝数、一级分枝点高度均受两对主基因控制，主基因间加性效应较稳定，对培育乔木型紫薇新品种具有重要的指导意义。但单世代的分离群体分析不能检测到多

表 8 QC×FJ、FJ×QC 群体入选模型的适合性检验
Table 8 Fitting of QC×FJ and FJ×QC population inclusion models

群体 Group	性状 Traits	模型 Model	U_1^2	U_2^2	U_3^2	${}_nW^2$	D_n
QC×FJ	株高 Plant height	2MG-AD	0.025 1 (0.874 1)	0.045 3 (0.831 4)	0.056 5 (0.812 1)	0.039 3 (0.936 9)	0.020 6 (0.799 6)
	地径 Diameter	2MG-AD	0.000 4 (0.985 1)	0.000 5 (0.982 2)	0.000 3 (0.986 6)	0.012 (1)	0.010 7 (0.999 8)
	开张角度 Opening angle	2MG-AD	0.001 5 (0.969 2)	0.000 4 (0.992 7)	0.012 7 (0.910 3)	0.007 7 (1.000 8)	0.018 4 (1)
	侧枝GSA Lateral branch GSA	2MG-EA	0.000 8 (0.977 6)	0.001 3 (0.971)	0.064 7 (0.799 2)	0.020 6 (0.996 4)	0.032 (0.993)
	一级分枝点高度 Height at first branching point	2MG-EA	0.001 4 (0.970 4)	0.001 (0.974 8)	0.000 3 (0.986)	0.064 (0.792 9)	0.062 1 (0.505 5)
FJ×QC	地径 Diameter	2MG-AD	0.001 3 (0.970 8)	0.001 7 (0.967 4)	0.000 5 (0.982 8)	0.006 3 (1.004 6)	0.026 7 (1)
	开张角度 Opening angle	2MG-AD	0.021 7 (0.883)	0.014 2 (0.905 1)	0.008 7 (0.925 7)	0.015 2 (0.999 6)	0.107 8 (0.987 1)

U_1^2 、 U_2^2 和 U_3^2 为均匀性检验, ${}_nW^2$ 为 Smirnov 检验, D_n 为 Kolmogorov 检验, 括号内为概率值。
 U_1^2 , U_2^2 and U_3^2 : Uniformity tests; ${}_nW^2$: Smirnov test; D_n : Kolmogorov test; data in brackets are probability.

表 9 QC×FJ、FJ×QC (一年生) 群体各性状在最适模型下的遗传参数
Table 9 Genetic parameters of traits in QC×FJ and FJ×QC population under best fit models

群体 Group	性状 Traits	d_a	d_b	h_a	h_b	i	j_{ab}	j_{ba}	l	$h_{mg}^2/\%$
QC×FJ	株高 Plant height	3.566 2	1.517 3	-1.452	-0.782					0
	地径 Diameter	0.396 5	0.139 9	-0.226	-0.29					0
	开张角度 Opening angle	8.404 6	6.820 4	-3.912	-3.831					0
	侧枝GSA Lateral branch GSA	8.854 3								23.802
	一级分枝点高度 Height at first branching point	0.637 3								63.933
FJ×QC	地径 Diameter	0.600 5	0.340 1	-0.238	-0.257					91.164 3
	开张角度 Opening angle	10.415	7.135	-1.855	-3.439					95.696 4

d_a : 第 1 对主基因加性效应; d_b : 第 2 对主基因加性效应; h_a : 第 1 对主基因显性效应; h_b : 第 2 对主基因显性效应; i : 加×加效应; j_{ab} : 加×显应; j_{ba} : 显×加效应; l : 显×显效应; h_{mg}^2 : 主基因遗传率。
 d_a : 1st major-gene additive effect; d_b : 2nd major-gene additive effect; h_a : 1st major-gene dominant effect; h_b : 2nd major-gene dominant effect; i : additivity × additivity effect; j_{ab} : additivity × dominance effect; j_{ba} : dominance × additivity effect; l : dominance × dominance effect; h_{mg}^2 : major gene heritability.

基因的存在, 最适遗传模型尚有待进一步研究。后续可以构建多世代群体, 来分析各株型性状的微效基因效应。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第七十三卷, 第二分册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[2] EGOLF D R, ANDRICK A O. The Lagerstroemia handbook/checklist: A guide to crapemyrtle cultivars[J]. USA: American Association of Botanical Gardens and Arboreta, 1978.

[3] 王金凤, 柳新红, 陈卓梅. 紫薇属植物育种研究进展[J]. 园艺学报, 2013, 40(9): 1795-1804.

WANG J F, LIU X H, CHEN Z M. Research progress in breeding of Lagerstroemia plant[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(9): 1795-1804. (in Chinese)

- [4] 王甜. 紫薇和川黔紫薇远缘杂交亲和性及种子萌发特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- WANG T. Studies on Compatibility and Seed Germination Characteristics of the Distant Hybridization of *Lagerstroemia indica* and *Lagerstroemia excelsa* (Dode) Chun[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022. (in Chinese)
- [5] SEGURA V, CILAS C, COSTES E. Dissecting apple tree architecture into genetic, ontogenetic and environmental effects; Mixed linear modelling of repeated spatial and temporal measures[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(2): 302–314.
- [6] SOCQUET-JUGLARD D, CHRISTEN D, DEVÈNES G, et al. Mapping architectural, phenological, and fruit quality QTLs in apricot[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2013, 31(2): 387–397.
- [7] LIU R Z, AI N J, ZHU X X, et al. Genetic analysis of plant height using two immortalized populations of “CRI12 × J8891” in *Gossypium hirsutum* L[J]. *Euphytica*, 2014, 196(1): 51–61.
- [8] ZHANG Y G, ZHU J, DAI H Y. Characterization of transcriptional differences between columnar and standard apple trees using RNA-seq[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2012, 30(4): 957–965.
- [9] PETERSEN R, KROST C. Tracing a key player in the regulation of plant architecture: The columnar growth habit of apple trees (*Malus × domestica*) [J]. *Planta*, 2013, 238(1): 1–22.
- [10] 陈卓梅, 沈鸿明, 张冬林, 等. 从美国专利品种看中国紫薇育种发展趋势[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(1): 49–61.
- CHEN Z M, SHEN H M, ZHANG D L, et al. Patented cultivars of *Lagerstroemia* in the US and trends of breeding in China[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2018, 38(1): 49–61. (in Chinese)
- [11] 国家林业局科技发展中心(国家林业局植物新品种保护办公室). 中国林业植物授权新品种-2016[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
- [12] 胡琦, 何金儒, 潘会堂. 紫薇新品种[J]. *中国花卉园艺*, 2022(6): 32–33.
- HU Q, HE J R, PAN H T. New Cultivar of *Lagerstroemia indica*[J]. *China Flowers & Horticulture*, 2022(6): 32–33. (in Chinese)
- [13] 赵静媛, 陈发棣, 滕年军, 等. 地被菊匍匐性的遗传分析与 RAPD 标记研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 734–741.
- ZHAO J Y, CHEN F D, TENG N J, et al. Genetic analysis and RAPD marker of creeping habits in ground-cover *Chrysanthemum*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 734–741. (in Chinese)
- [14] 刘阳. 紫薇微卫星标记开发及矮化性状的分子标记[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- LIU Y. Development of Microsatellite of *Lagerstroemia* and Molecular Markers of Dwarf Trait[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [15] 石俊, 陈之琳, 秦波, 等. 紫薇匍匐平展性状相关表型遗传分析[C]// 张启翔. 中国观赏园艺研究进展 2016. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [16] 焦焱. 大花紫薇与紫薇杂交后代重要观赏性状遗传分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- JIAO Y. Phenotypic and Genetic Analysis of Ornamental Traits in Hybrids of *Lagerstroemia indica* and *L. speciosa*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [17] 黄冬贤, 黎可华, 黎明星, 等. 紫薇的整形修剪及其园林应用[J]. *广东园林*, 2010, 32(4): 65–67.
- HUANG D X, LI K H, LI M X, et al. Pruning technology and landscape application of *Lagerstroemia indica*[J]. *Guangdong Landscape Architecture*, 2010, 32(4): 65–67. (in Chinese)
- [18] YE Y J, WU J Y, FENG L, et al. Heritability and gene effects for plant architecture traits of crape myrtle using major gene plus polygene inheritance analysis[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225: 335–342.
- [19] 姜珊, 易星湾, 徐庭亮, 等. 月季花瓣数量遗传分析[J]. *植物科学学报*, 2021, 39(2): 142–151.
- JIANG S, YI X W, XU T L, et al. Genetic analysis of petal number in *Rosa*[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(2): 142–151. (in Chinese)
- [20] 吴元奇, 唐兰, 邱贵兰, 等. 一份矮生玉米株高主基因+多基因遗传模式分析[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(3): 353–361.
- WU Y Q, TANG L, QIU G L, et al. Genetic pattern analysis of the height main gene and multigene of A dwarf maize[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(3): 353–361. (in Chinese)
- [21] 王靖天, 张亚雯, 杜应雯, 等. 数量性状主基因+多基因混合遗传分析 R 软件包 SEA v2.0[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1416–1424.
- WANG J T, ZHANG Y W, DU Y W, et al. SEA v2.0: An R software package for mixed major genes plus polygenes inheritance analysis of quantitative traits[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1416–1424. (in Chinese)
- [22] 张向前, 刘景辉, 齐冰洁, 等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(2): 168–174.
- ZHANG X Q, LIU J H, QI B J, et al. Cluster diversity analysis of the main agronomic traits in oat germplasm[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(2): 168–174. (in Chinese)
- [23] 秦波, 李素珍, 胡玲, 等. 基于转录组的紫薇 SSR 分子标记开发[C]//中国观赏园艺研究进展 2018. 哈尔滨, 2018: 526–532.
- [24] 郭长花, 康向阳. 树木发育中的阶段转变研究进展[J]. 生物技术通讯, 2008, 19(5): 784–786.
- GUO C H, KANG X Y. Progress in phase change during tree development[J]. *Letters in Biotechnology*, 2008, 19(5): 784–786. (in Chinese)
- [25] GREENWOOD M S. Phase change in loblolly pine: Shoot development as a function of age[J]. *Physiologia Plantarum*, 1984, 61(3): 518–522.
- [26] 戴思兰. 园林植物育种学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [27] 叶福民, 马策, 张晓波, 等. 多头切花秋菊杂交 F₁ 群体观赏性状主基因+多基因混合遗传分析[J]. 辽宁农业科学, 2022(6): 7–12.
- YE F M, MA C, ZHANG X B, et al. Heterosis of ornamental characters and mixed inheritance of major gene and polygene in hybrid progenies of cut *Chrysanthemum*[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2022(6): 7–12. (in Chinese)
- [28] 张琳, 郭丽丽, 郭大龙, 等. 牡丹杂交 F₁ 代性状分离规律及混合遗传分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 51–60.
- ZHANG L, GUO L L, GUO D L, et al. Separation analysis and mixed genetic analysis of phenotypic traits in F₁ progenies of tree peony[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(6): 51–60. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)