

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220499

马尾松福建省域种源和家系 36 年生 生长性状变异与评价

汤道平*

(华安西陂国有林场, 福建 华安 363800)

摘要: [目的] 研究来自福建省 3 个地区的马尾松种源和家系生长性状的遗传变异规律, 为马尾松优良种源和家系选育提供科学依据。 [方法] 以来自福建省龙岩、泉州和南平 3 个种源地共 92 个家系为材料, 通过布置完全随机区组设计试验, 分析评价树高、胸径和单株立木材积 3 个生长性状的遗传差异规律, 选育优良种源和家系。 [结果] 龙岩地区种源平均树高、胸径和材积分别为 18.76 m、22.23 cm 和 0.36 m³, 其次是泉州地区种源分别为 17.43 m、20.77 cm 和 0.31 m³, 最后是低于对照的南平地区种源, 树高、胸径和材积平均值分别为 15.54 m、19.25 cm 和 0.25 m³。综合评价表明: 泉州和龙岩材料可作为马尾松优良种源地, 在家系水平上, 3 个生长性状的遗传力为 3.81%~16.08%, 同时利用聚类分析法将参试 92 个家系划分为优良、较优、中等和一般 4 种类型家系, 相应数量分别为 3、24、41 和 24 个。家系 77-561、79-569 和 79-568 的树高、胸径和单株立木材积平均遗传增益分别达 0.61%、4.78% 和 17.81%, 将其评选为优良家系。 [结论] 从优良家系中选择优良单株并将其分为 3 类, 优良单株 22 株, 较优单株 80 株, 一般单株 52 株。

关键词: 马尾松; 种源; 家系; 遗传力; 遗传增益

中图分类号: S722

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)03-0179-06

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是松科松属植物, 主要分布于中国华东、华南、华中和西南地区, 遍布 17 个省 (区)。作为我国南方的四大主要用材树种之一, 马尾松蓄积量位居乔木类第三, 用途广泛, 经济价值高, 其木材和松脂是木材加工、制浆造纸和林产化工等诸多森林工业的支柱性原料^[1-2]。马尾松作为我国南方重要的乡土树种, 还可以用于生态公益林建设, 其经济总值估计每年超 20 亿元^[3-4], 在保障我国生态安全上具有独特的地位^[4-5]。马尾松分布范围广, 可适应多种不同气候条件, 这也使其具备丰富的遗传多样性^[6-8]。作为在我国木材、松脂和松花粉产业中具有重要战略意义的树种, 马尾松的遗传改良是提高其经济效益的主要途径。

生长量是马尾松作为用材树种的重要评估指标

之一, 虽然一些研究表明, 马尾松的生长性状与材性呈负相关^[9], 但在马尾松的很多研究中发现, 基本密度等材性性状的变异程度较低, 而生长性状的变异程度高^[10-11], 在马尾松遗传改良中还主要以生长量为选优指标^[9,12]。树高和胸径反映了林木纵向和径向的生长维度以及固碳能力^[13], 利用这 2 个指标计算的单株立木材积可以反映单位面积上的马尾松生物量, 因此, 本研究选择树高、胸径和立木材积作为选优指标, 这也有利于发掘速生优异种质资源。

优异种质资源选育是马尾松遗传改良的重要研究内容, 丰富的遗传变异可以为马尾松种质选育及改良奠定良好的遗传基础^[14-16]。福建省是马尾松重要的优良种源区, 作为福建省的主要用材树种之一, 马尾松人工林面积占福建省马尾松总面积的

56.27%^[17]。本研究从福建南平、泉州、龙岩等地区选择的230株马尾松优树进行采种育苗,通过测定马尾松的生长性状,分析评价其在种源/家系水平上遗传变异规律,筛选优良种源/家系,为福建省马尾松良种选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地坐落于福建省漳州市华安县西陂国有林场路亭管护站008林班7大班4小班(25°6'55" N, 117°33'42" E),该县位于漳州西北部的九龙江中游,年均气温21.3℃,年均日照时数2 000 h,无霜期305 d左右,年均降水量1 620 mm,年均蒸发量1 561 mm,平均相对湿度80%。该试验点海

拔250~300 m,坡度24°,土层较厚,腐殖质层中厚,Ⅱ类立地级。试验林下植被主要有乌桕(*Triadica sebifera* (Linnaeus) Small)、野桐(*Mallotus tenuifolius* Pax)、钢竹(*Phyllostachys viridis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.)、蕨(*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn var. *latiusculum* (Desv.) Underw.ex Heller)等,造林面积共计5 hm²。

1.2 试验材料

1982年分别从福建省南平、泉州和龙岩等地区,以树高、胸径、冠幅和通直度为择优指标^[18],选择230株马尾松优树进行采种育苗,材料基本情况见表1。

表1 马尾松参试家系的基本情况

Table 1 Basic information of families of Masson pine

种源(家系) Provenances (Families)	家系号 Families
泉州(46) Quanzhou (46)	77-555, 77-559, 77-560, 77-561, 77-562, 77-563, 78-564, 78-565, 79-568, 79-569, 79-572, 79-573, 80-574, 80-575, 80-578, 80-580, 80-581, 80-582, 80-583, 82-582, 82-586, 82-588, 82-589, 82-591, 82-592, 82-593, 82-594, 82-595, 83-599, 83-600, 83-601, 103-799, 103-800, 103-804, 103-806, 103-807, 103-819, 103-821, 105-822, 105-823, 105-824, 105-827, 105-828, 105-829, 105-830, 108-806
南平(27) Nanping (27)	2-4, 2-11, 3-18, 4-20, 6-27, 7-28, 7-31, 7-34, 8-43, 8-44, 15-81, 16-89, 16-90, 20-102, 20-104, 20-105, 20-108, 21-114, 21-117, 23-121, 23-123, 23-125, 23-126, 23-127, 23-131, 26-145, 26-147
龙岩(19) Longyan (19)	56-364, 58-378, 58-381, 59-389, 60-398, 60-401, 64-435, 65-436, 65-438, 65-440, 65-442, 102-788, 102-789, 102-791, 102-794, 102-796, 104-790, 104-815, 104-895

1.3 试验方法

1984年春在福建省华安西陂国有林场营建马尾松种源/家系试验林,参试家系92个,设1个对照,采用完全随机区组设计,以家系(种源)为处理,2株小区,30次重复。为便于栽植与管理,每个处理沿等高线平行种植。每个重复设置在同一坡面上以确保立地条件(坡向、坡度、土壤肥力等)基本一致。重复之间开设林间步道形成周界,各处理之间用水泥桩做标记。2019年5月技术人员分3小组根据配置图逐区对试验林各家系生长情况进行调查,主要以围径尺、测高仪调查树高、胸径等表型性状。

1.4 数据分析

1.4.1 单株立木材积(V)

$$V = 0.000\ 070\ 598\ 5D^{1.873\ 883\ 1} \quad (1)$$

$$H^{0.910\ 361\ 3} \quad (2)$$

式中: D 为胸径/cm; H 为树高/m^[19]。

1.4.2 遗传参数估算

家系遗传力(H_f^2):

$$H_f^2 = v_f^2 / [v_f^2 + v_{fb}^2/b + v_e^2/(bn)]$$

单株遗传力(H_i^2):

$$H_i^2 = 4v_f^2 / (v_f^2 + v_{fb}^2 + v_e^2)$$

式中: v_f^2 为家系均方, v_{fb}^2 为家系与区组间均方, v_e^2 为环境误差均方, b 为区组数, n 为小区株树。

遗传增益(ΔG):

$$\Delta G = (\mu - \sigma) \times H^2 / \sigma \times 100\%$$

式中: μ 为种源/家系的某一性状平均值, σ 为群体某一性状的平均值。

1.4.3 数据分析 数据整理、方差分析、多重比较与系统聚类^[20]都用R 4.2.1软件完成。

2 结果与分析

2.1 马尾松种源/家系遗传变异分析

马尾松在种源和家系间的巢氏方差分析结果(表2)表明:树高、胸径和单株立木材积在种源

表2 不同种源/家系性状巢氏方差分析表

Table 2 A nested Variance analysis of individual traits in different provenances/families

生长性状 Growth traits		平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	显著性 Significance
树高 Tree height	种源 Provenances	1 144.31	2	572.15	31.62	0.000
	家系(种源) Families (Provenances)	1 830.30	93	19.68	1.36	0.016
胸径 DBH	种源 Provenances	941.99	2	470.99	13.34	0.000
	家系(种源) Families (Provenances)	3 669.11	93	39.45	1.53	0.001
单株立木材积 Single vertical timber volume	种源 Provenances	1.55	2	0.77	17.78	0.000
	家系(种源) Families (Provenances)	4.64	93	0.05	1.74	0.000

2.2 优良种源评价与选择

通过对马尾松种源间的多重比较分析,开展优良种源筛选,结果(表3)表明:龙岩地区种源树高的均值最大(18.76 m),其次为泉州(17.43 m),最后为南平(15.54 m)。3个种源地材料的胸径和单株立木材积均值排序一致,其中,龙岩地区种源最大,分别为22.23 cm和0.36 m³,其次是泉

水平上差异极显著($P < 0.01$)。通过系统分组的方法,将家系在种源水平下分组进行方差分析发现:胸径和单株立木材积的差异极显著($P < 0.01$),树高的差异显著($P < 0.05$)。

州地区种源分别为20.77 cm和0.37 m³,最后是南平地区种源分别为19.25 cm和0.25 cm³。对照组树高为17.05 m,胸径为20.44 cm,单株立木材积为0.30 m³。南平地区种源显著小于对照组,泉州地区种源与对照差异不显著,而龙岩地区种源显著大于对照,所以选定泉州和龙岩地区材料为优良种源。

表3 不同种源生长指标多重比较

Table 3 Multiple comparison of growth indexes of different provenances

种源 Provenance	树高/m Tree height	胸径/cm DBH	单株立木材积/m ³ Single vertical timber volume
泉州 Quanzhou	17.43 ± 0.17 b	20.77 ± 0.25 b	0.31 ± 0.01 b
南平 Nanping	15.54 ± 0.24 c	19.25 ± 0.28 c	0.25 ± 0.01 c
龙岩 Longyan	18.76 ± 0.21 a	22.23 ± 0.35 a	0.36 ± 0.01 a
对照CK	17.05 ± 0.22 b	20.60 ± 0.30 b	0.30 ± 0.01 b

注:显著性水平为0.05
Note: Significance level is 0.05

2.3 优良家系评价与选择

优良家系选择的目的是获得生长与形质等各方面均优良的家系作为高世代种子园的建园材料及为种子园的去劣疏伐提供依据。由于参试家系数量较多,系统聚类(离差平方和法)是评价马尾松优良家系的一种较优的方法。通过对树高、胸径和单株立木材积这3个指标进行聚类,可划分为4类,其中,优良家系3个,较优家系24个,中等家系41个,一般家系24个(表4)。家系77-561、79-569和79-568表现优异,其树高为18.07~21.00 m,胸径为21.52~28.00 cm,单株立木材积为0.35~

0.58 cm³,树高、胸径和单株立木材积的遗传增益分别为0.27%~0.93%、3.41%~6.60%和11.27%~26.54%(表5)。综合结果,选定77-561、79-569和79-568这3个家系为优良家系,其树高、胸径和单株立木材积的平均遗传增益分别为0.61%、4.78%和17.81%。

2.4 优良单株评价与选择

从优良家系和较优家系中选择154株单株为优良单株。利用系统聚类(离差平方和法)将其分为3类(表6),其中,第1类22株,为优良单株,树高、胸径和单株立木材积增产明显,遗传

表 4 马尾松家系聚类分析结果

Table 4 Results of family cluster analysis of Masson pine

类别 Category	家系 Families
优良 Excellent	77-561、79-569、79-568
较优 Comparatively excellent	7-31,7-34, 23-131, 58-381, 58-378, 60-398, 65-442, 65-440, 65-438, 77-560, 77-555, 78-565, 79-572, 80-581, 82-595, 82-593, 82-592, 82-588, 104-815, 104-790, 102-796, 102-791, 102-788, 102-789
中等 Medium	2-11, 7-28, 16-90, 20-105, 21-117, 23-125, 26-145, 26-147, 56-364, 59-389, 64-435, 65-436, 77-559, 77-562,77-563, 78-564, 79-573, 80-574, 80-575, 80-580, 80-582, 80-583, 82-582, 82-586, 82-589, 82-591, 82-594, 83-599, 83-600, 83-601, 102-794, 103-799, 103-804,103-806, 103-807, 103-819, 105-823, 105-824, 105-827, 105-829, 105-830
一般 General	2-4, 3-18, 4-20, 6-27, 8-43, 8-44, 15-81, 16-89, 20-102, 20-104, 20-108, 21-114, 23-127, 23-121, 23-123, 23-126, 60-401, 80-578, 103-800, 103-821, 104-895, 105-822, 105-828, 108-806

表 5 家系遗传力和优良家系遗传增益

Table 5 Family Heritability and superior family genetic gain

生长性状 Growth trait	家系遗传力/% Family heritability	优良家系遗传增益/% Superior family genetic gain		
		77-561	79-569	79-568
树高 Tree height	3.81	0.93	0.63	0.27
胸径 DBH	11.63	4.33	6.60	3.41
单株立木材积 Single vertical timber volume	16.08	15.63	26.54	11.27

表 6 优良单株平均值与遗传增益

Table 6 Average value and genetic gain of superior plant

类别 Category	树高 Tree height		胸径 DBH		单株立木材积 Single vertical timber volume	
	平均值/m Mean	遗传增益/% genetic gain	平均值/m Mean	遗传增益/% Genetic gain	平均值/m Mean	遗传增益/% Genetic gain
1	20.95	0.54	31.87	3.72	0.74	15.05
2	20.71	0.50	25.48	1.62	0.48	6.18
3	18.72	0.23	20.84	0.10	0.30	0.04

增益分别为 0.54%、3.72% 和 15.05%；第 2 类 80 株，为较优单株，生长性状遗传增益分别为 0.50%、1.62% 和 6.18%；第 3 类 52 株，为一般单株，3 个生长性状遗传增益分别为 0.23%、0.10% 和 0.04%。这 3 类树高均值最大差值为 2.23 m，遗传增益最大差值为 0.31%；胸径均值最大差值为 11.03 cm，遗传增益最大差值为 3.62%；单株立木材积均值最大差值为 0.44 m³，遗传增益最大差值为 15.01%。

3 讨论

本研究发现，36 年生马尾松在种源和家系水平下，树高、胸径和单株立木材积均存在极显著或

显著差异，表明其遗传变异较大，这为马尾松优异种质筛选提供了很好的遗传基础^[21]。家系遗传力相对较低，为 3.81%~16.08%，说明该群体在家系水平上受环境因素影响较大。优良种源选择是选育马尾松良种的第一个重要环节，在进行马尾松优良种源筛选时基于 3 个种源地平均值与对照平均值进行多重比较，泉州和龙岩 2 地可作为优良种源地。林思京对 12 年生相同种源/家系材料研究表明，这 3 个种源地的马尾松单株立木材积的大小依次为龙岩（0.028 m³）、泉州（0.025 m³）和南平（0.024 m³）^[18]，而本研究 36 年生成熟林的单株立木材积的大小依次为龙岩（0.36 m³）、泉州（0.31 m³）和南平（0.25 m³），且三者之间差异

显著。对比2个时期的结果发现，龙岩地区平均单株材积增幅最大为 0.332 m^3 ，其次是泉州地区增幅为 0.285 m^3 ，最后是南平地区为 0.226 m^3 。从平均单株材积的结果看，龙岩和泉州的群体符合在改良初期以及成熟的过程中尽快地获得高材积值的要求。

优良单株的选择为马尾松改良提供合适造林材料^[22]。本研究利用家系单株联合选择，共发现优良单株22株，较优单株80株，一般单株52株。家系选择是林木遗传改良的重要手段之一。本研究结合系统聚类分析方法对全部参试的92个家系进行分类，共划分为优良家系、较优家系、中等家系和一般家系等4个类别，其中，77-561、79-569和79-568这3个为优良家系，且都来自泉州地区种源。筛选出的3个优良家系材积的平均遗传增益（17.81%）高于18年生马尾松种子园自由授粉子代测定林21个速生优良家系的增益（11.31%）^[23]，表明这3个家系的遗传潜力大，可为马尾松种子园营建提供优质的建园材料。分析发现，优良家系与优良种源有重合现象，3个优良家系均来自泉州地区，较优家系也来源于优良种源地泉州和龙岩地区，而南平地区种源地的家系大部分在中等及以下的级别中，并且较低的家系遗传力也说明，树高胸径和单株立木材积主要受到环境即种源地的影响，因此，后期优良家系选育优先考虑主要以种源地进行选优和遗传改良。本研究对进入成熟期的生长数据进行分析，以树高、胸径和材积为指标进行优良家系选择，可为不同类型马尾松优良家系选择工作提供重要参考。

4 结论

本研究对来自福建省3个种源地的92个马尾松家系进行评测，将树高、胸径和材积作为选优指标进行种源、家系和单株水平上的选优。通过差异比较，选择泉州和龙岩作为优良种源地，其树高、胸径和立木材积分别为 17.43 m 、 20.77 cm 和 0.31 m^3 （泉州）， 18.76 m 、 22.23 cm 和 0.36 m^3 （龙岩）。利用系统聚类方法将92个家系划分为4类，其中，优良家系3个，较优家系24个，中等家系41个，一般家系24个，其中的77-561、79-569和79-568为优良家系。进而评选出第1类优

良单株22个，其树高、胸径和立木材积分别为 20.95 m 、 31.87 cm 和 0.74 m^3 ；第2类较优单株80个，其树高、胸径和立木材积分别为 20.71 m 、 25.48 cm 和 0.48 m^3 ；第3类一般单株52个，其树高、胸径和立木材积分别为 18.72 m 、 20.84 cm 和 0.30 m^3 。

参考文献：

- [1] 孟祥江, 何邦亮, 马正锐, 等. 我国马尾松林经营现状及近自然育林探索[J]. 世界林业研究, 2018, 31(3): 63-67.
- [2] 龚桂芳, 冯源恒, 罗群凤, 等. 马尾松树高生长性状显著关联基因挖掘[J]. 广西林业科学, 2022, 51(2): 180-183.
- [3] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [4] 农业农民科技教育培训中心组. 马尾松人工林培育技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [5] 季孔庶, 徐立安, 王登宝, 等. 中国马尾松遗传改良研究历程与成就[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 10-22.
- [6] 罗群凤, 杨章旗, 黄永利, 等. 马尾松1代育种群体不同种源亲本表现评价[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(2): 195-200.
- [7] 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.
- [8] 解懿妮, 刘清华, 蔡燕灵, 等. 5年生马尾松生长性状3地点家系变异及评价[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 1-12.
- [9] 谭健晖, 冯源恒, 贾婕, 等. 马尾松半同胞家系纤维形态遗传变异及纸浆材优良家系选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 8-12.
- [10] 胡兴峰, 吴帆, 孙晓波, 等. 38年生马尾松种源生长及材性联合分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 203-212.
- [11] 林思京. 25年生马尾松生长和木材基本密度家系变异与选择[J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 804-808.
- [12] 罗芊芊, 肖德卿, 徐洪辉, 等. 马尾松无性系生长和形质性状变异分析和优选[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(9): 40-44.
- [13] 赵兴堂. 水曲柳种源生长和碳性状变异规律与良种选育及高固碳分子机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- [14] 杨章旗, 覃开展. 马尾松种质基因资源选择、保存和利用研究[J]. 广西林业科学, 2001, 30(1): 19-22.
- [15] 黄楚光. 马尾松优良种质资源基因库营建策略分析[J]. 福建林业科技, 2007, 34(3): 145-149.
- [16] 苏顺德. 马尾松种质资源生长及开花特性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 62-66.
- [17] 黄以法. 马尾松优良种质资源生长与花量综合评价[J]. 福建林业科技, 2017, 44(3): 33-37.
- [18] 林思京. 福建省马尾松优树子代初步评定[J]. 福建林学院学报, 1997, 17(3): 255-258.

- [19] 施恭明, 李宝银, 洪端芳, 等. 福建省马尾松人工林二元立木材积方程检验与修订[J]. 森林与环境学报, 2015, 35 (1): 81-86.
- [20] 方碧江. 红锥种源/家系生长性状遗传变异分析及选择[J]. 亚热带农业研究, 2021, 17 (1): 22-29.
- [21] 李 鹏, 魏文初, 邱 辉, 等. 马尾松桐棉种源优树子代遗传测定与选择[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023, 41 (3): 182-190.
- [22] 顾万春. 中国林木育种学[M]北京: 中国林业出版社, 1995.
- [23] 吴清金. 18年生马尾松种子园自由授粉子代测定及选择[J]. 福建林业科技, 2011, 38 (4): 6-10+25.

Family Variation and Evaluation of Growth Traits On 36-year-old *Pinus massoniana* Lamb in Fujian Province

TANG Dao-ping

(State Xipi Forest Farm of Hua'an, Hua'an 363807, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To study the genetic variation of growth traits of *Pinus massoniana* provenances and families from three regions in Fujian Province, and provide scientific basis for the selection of fine provenances and families of *Pinus massoniana*. [Method] A total of 92 families from three provenances in Longyan, Quanzhou and Nanping in Fujian Province were selected. The genetic differences of three growth traits, tree height, DBH and tree volume were analyzed and evaluated through a completely randomized block design experiment, and excellent provenances and families were selected. [Result] The results showed that the average tree height, DBH and volume of the provenances were 18.76 m, 22.23 cm and 0.36 m³ in Longyan, followed by 17.43 m, 20.77 cm and 0.31 m³ in Quanzhou, and 15.54 m, 19.25 cm and 0.25 m³ in Nanping, which was poorer than the control. The comprehensive evaluation showed that Quanzhou and Longyan materials can be used as the source of excellent provenance of *Pinus massoniana*. The heritability of the three growth traits at the family level ranged from 3.81% to 16.08%. At the same time, the 92 families were divided into excellent, superior, medium and average families by cluster analysis, with the corresponding number of 3, 24, 41 and 24 families, respectively. The average genetic gain of tree height, DBH and tree volume per tree with 77-561, 79-569 and 79-568 reached 0.61%, 4.78% and 17.81%, respectively. [Conclusion] The excellent individuals are selected from the excellent families and divided into three categories: 22 excellent individuals, 80 superior individuals and 52 general individuals.

Keywords: *Pinus massoniana* Lamb; provenance; family; heritability; genetic gain

(责任编辑: 张 研)