

不同种源枫香树幼苗生长性状的地理变异

何庆海¹, 方 茹¹, 李文鑫², 谢宇凯¹, 张燕琴¹, 石从广¹, 杨少宗^{1,①}

(1. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为明确不同阶段枫香树(*Liquidambar formosana* Hance)幼苗生长性状的差异,探索其生长性状的地理变异规律,采用方差分析、相关性分析和逐步回归分析对30个枫香树种源1年生幼苗的株高、地径和叶片形状因子进行研究。结果表明:枫香树幼苗的株高和地径在2015年4月至12月增长较快,在2015年12月至2016年3月增长缓慢。2016年3月,枫香树的株高和地径在种源间存在明显差异,且株高在种源间的差异大于地径。30个种源中,云南富宁、海南霸王岭和海南黎母山种源枫香树的株高较高;陕西南强和陕西镇巴种源枫香树的株高居中,但这2个种源的耐寒性好,适于在北方地区种植。安徽霍山种源枫香树的地径最大。枫香树幼苗株高呈“西南—东北”递减的变化趋势,地径呈“南—北”递增的变化趋势,叶片形状因子呈“南—北”递减的变化趋势。30个枫香树种源幼苗株高、地径和叶片形状因子变异系数的均值分别为23.01%、19.35%和17.51%,种源内枫香树幼苗生长性状变异系数的均值为11.86%~25.43%。相关性分析结果显示:枫香树幼苗株高、地径和叶片形状因子与纬度、年均温、1月均温和无霜期呈极显著相关;株高还与经度和海拔呈极显著相关。逐步回归分析结果显示:影响枫香树幼苗株高、地径和叶片形状因子的主要地理-气候因子是1月均温、无霜期和海拔。研究结果显示:枫香树幼苗生长性状可以作为其种源地理区划和种质选择的依据。

关键词: 枫香树; 种源; 幼苗; 生长性状; 生长节律; 地理变异

中图分类号: Q944.3; S792 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)02-0088-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.02.12

Geographical variation of growth traits of *Liquidambar formosana* seedlings from different provenances HE Qinghai¹, FANG Ru¹, LI Wenxin², XIE Yukai¹, ZHANG Yanqin¹, SHI Congguang¹, YANG Shaozong^{1,①} (1. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(2): 88-95

Abstract: In order to clarify the differences in growth traits of *Liquidambar formosana* Hance seedlings at different stages and explore its geographical variation law of growth traits, plant height, ground diameter, and leaf shape factor of one-year-old seedlings of 30 provenances of *L. formosana* were studied by using variance analysis, correlation analysis, and stepwise regression analysis. The results show that plant height and ground diameter of *L. formosana* seedlings increase relatively fast from April to December in 2015, and increase slowly from December in 2015 to March in 2016. In March in 2016, there are obvious differences in plant height and ground diameter of *L. formosana* among provenances, and the difference in plant height is higher than that in ground diameter among provenances. Among 30 provenances, plant height of *L. formosana* from Funing of Yunnan, Mt. Bawangling of Hainan, and Mt. Limushan of Hainan is relatively high; that from Ningqiang and Zhenba of Shaanxi is in the middle, but these two provenances have good cold tolerance, and are suitable for planting in northern area. Ground diameter of *L. formosana* from Huoshan of Anhui provenance is the largest. Plant height of *L. formosana* seedlings shows a variation tendency of decrease from southwest to northeast, ground diameter shows a

收稿日期: 2018-08-22

基金项目: 浙江省农业(林木)新品种选育重大专项(2016C0205); 国家林业公益性行业科研专项(201404312)

作者简介: 何庆海(1994—),男,安徽肥东人,硕士研究生,主要从事林木遗传育种方面的研究。

①通信作者 E-mail: yangsz863@163.com

variation tendency of increase from south to north, and leaf shape factor shows a variation tendency of decrease from south to north. Means of coefficients of variation of plant height, ground diameter, and leaf shape factor of *L. formosana* seedlings from 30 provenances are 23.01%, 19.35%, and 17.51%, respectively, while means of coefficients of variation of growth traits of *L. formosana* seedlings within provenance are 11.86%–25.43%. The correlation analysis result shows that plant height, ground diameter, and leaf shape factor of *L. formosana* seedlings show extremely significant correlations with latitude, annual mean temperature, mean temperature in January, and frostless period; plant height also shows extremely significant correlations with longitude and altitude. The stepwise regression analysis result shows that the main geographical-climatic factors affecting plant height, ground diameter and leaf shape factor of *L. formosana* seedlings are mean temperature in January, frostless period, and altitude. It is suggested that growth traits of *L. formosana* seedlings can be used for geographical division of provenance and germplasm selection of *L. formosana*.

Key words: *Liquidambar formosana* Hance; provenance; seedling; growth traits; growth rhythm; geographical variation

种源实验是植物遗传育种的重要手段,用于研究种群遗传变异与环境因子的关系,阐明种群的变异模式^[1]。种源试验已被广泛应用于林木育种研究,在花楸树 [*Sorbus pohuashanensis* (Hance) Hedl.]^[2]、浙江楠 (*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)^[3] 和暴马丁香 [*Syringa reticulata* var. *amurensis* (Rupr.) Pringle]^[4] 等种类的研究中已取得一定成果。由于林木遗传育种周期较长,苗期试验成为林木优良种源初选的重要方法,并已在麻栎 (*Quercus acutissima* Carruth.)^[5]、欧洲花楸 (*Sorbus aucuparia* Linn.)^[6] 和红椿 (*Toona ciliata* Roem.)^[7] 等植物的研究中予以应用。

枫香树 (*Liquidambar formosana* Hance) 隶属于金缕梅科 (Hamamelidaceae) 枫香树属 (*Liquidambar* Linn.), 是第三纪孑遗植物,在第四纪冰川于东亚避难所中得以保存^[8]。枫香树在中国主要分布于秦岭—淮河以南地区,跨北热带、南亚热带、中亚热带和北亚热带 4 个气候带^[9]。在枫香树的广大分布区范围内,环境的异质性对不同种源枫香树产生的影响存在差异。表型性状变异受遗传和环境因子二者的共同作用^[10-11]。Sun 等^[12] 认为,地理隔离并不是造成枫香树遗传差异的主要原因,枫香树的遗传多样性更多存在于种群内不同个体间。已有研究通过种源试验观测 1 年生、4.5 年生、10 年生和 14 年生枫香树株高、胸径和积材等生长性状,并通过比较种源间的差异选择出优良种源和家系^[13-16],从时空角度展示了不同生长年份枫香树种源间的差异。而明确枫香树种源间生长性状差异的形成原因是选择优良种质资源的关键条件。

目前,地理-气候因子对枫香树种源的影响尚未明确,枫香树的苗期生长模型也亟需完善。地理-气候因子作为可以测量的因子,在选择优良种质上具有重要的参考价值。枫香树苗期生长模型的建立,不仅有利于了解其不同生长阶段的生长情况以及比较种源间的差异,还可为速生种质的选择提供有效的数据支撑。

本研究以 30 个种源的枫香树种子为材料,通过播种繁殖获得实生苗,并分阶段测量 1 年生幼苗的株高、地径和叶片形状因子,比较不同种源枫香树不同阶段的差异性,建立苗期生长模型;并结合种源地的地理-气候因子,分析影响不同种源枫香树生长的关键因子,探索其生长性状在地理空间上的变化规律,以为选择适生的速生种质提供苗期数据,并为探索枫香树的地理变异奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

于 2014 年 9 月至 12 月,在 15 个省(自治区),以县域范围较为集中的枫香树天然群体为种源,共收集 30 个种源,每个种源枫香树单株均在 10 株以上,株距在 100 m 以上。选择生长健壮且结实状况良好的单株,每个单株采集果实 5 kg 以上,取出的种子于 -20 °C 保存。

于 2015 年 4 月,在长乐林场(北纬 30.37°、东经 119.84°,海拔 37 m)穴盘育苗,采用随机区组实验设计,重复 3 次,每次 100 粒种子,每个种源共 300 粒种子。常规水肥管理,出苗初期遮阳。供试枫香树种源

地的地理-气候因子见表1。

1.2 方法

每个重复随机选择15株枫香树幼苗并标记,每个种源共45株。分别于2015年的8月和12月以及2016年3月测量株高和地径,其中,使用皮尺(精度0.1 cm)测量株高,使用游标卡尺(精度0.001 mm)

测量地径(距地面5 cm处)。于2015年9月下旬,每个重复随机选择15株枫香树幼苗,每个种源共45株,取从上往下第3或第4枚叶,用YMJ-D叶面积测量仪(浙江托普仪器有限公司)测量叶面积(a)和叶周长(p),并据此计算叶片形状因子(f),计算公式为 $f=4\pi a/(p^2)$ 。

表1 供试枫香树种源地的地理-气候因子

Table 1 Geographical-climatic factors of provenance locations of *Liquidambar formosana* Hance tested

编号 No.	种源 Provenance	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	年均温/℃ Annual mean temperature	1月均温/℃ Mean temperature in January	无霜期/d Frostless period	年降水量/mm Annual precipitation
P1	海南黎母山 Mt. Limushan of Hainan	N19.27°	E109.79°	209	22.0	16.0	362.0	1 951.4
P2	海南霸王岭 Mt. Bawangling of Hainan	N19.14°	E109.29°	250	24.3	18.4	365.0	1 395.0
P3	广东英德 Yingde of Guangdong	N24.45°	E113.40°	273	20.7	10.9	315.0	1 849.0
P4	广西凭祥 Pingxiang of Guangxi	N22.21°	E106.79°	178	21.3	13.2	347.0	1 376.0
P5	广西隆林 Longlin of Guangxi	N25.03°	E105.62°	1 390	19.1	10.0	331.0	1 422.8
P6	广西融水 Rongshui of Guangxi	N25.18°	E109.37°	329	19.3	7.5	320.0	1 824.8
P7	云南富宁 Funing of Yunnan	N24.13°	E105.73°	1 161	19.3	11.0	327.0	1 176.9
P8	福建长汀 Changting of Fujian	N25.83°	E116.44°	462	17.3	9.8	260.0	1 711.6
P9	福建尤溪 Youxi of Fujian	N26.34°	E118.49°	449	17.7	8.0	264.0	1 600.0
P10	福建华安 Hua'an of Fujian	N24.96°	E117.45°	140	20.9	18.5	320.0	1 598.7
P11	浙江开化 Kaihua of Zhejiang	N29.08°	E118.41°	338	16.3	4.6	250.0	1 762.1
P12	浙江丽水 Lishui of Zhejiang	N28.54°	E120.00°	259	18.0	7.3	257.0	1 399.6
P13	浙江天台 Tiantai of Zhejiang	N29.11°	E121.10°	464	16.8	5.0	234.0	1 332.0
P14	江苏苏州 Suzhou of Jiangsu	N31.48°	E120.68°	2	15.4	3.2	242.0	1 055.8
P15	江苏句容 Jurong of Jiangsu	N32.13°	E119.31°	19	15.1	2.0	229.0	1 000.0
P16	江西大余 Dayu of Jiangxi	N25.62°	E114.52°	267	18.4	7.5	301.0	1 591.5
P17	江西德兴 Dexing of Jiangxi	N28.96°	E117.59°	180	17.2	4.8	252.3	1 849.0
P18	安徽祁门 Qimen of Anhui	N29.98°	E117.72°	201	15.7	3.4	266.0	1 782.8
P19	安徽霍山 Huoshan of Anhui	N31.27°	E116.46°	391	15.3	1.8	220.0	1 391.2
P20	湖南桑植 Sangzhi of Hu'nan	N29.44°	E110.29°	390	16.5	4.8	255.0	2 029.1
P21	湖南宜章 Yizhang of Hu'nan	N25.10°	E112.89°	1 032	18.3	7.1	292.0	1 393.0
P22	湖南隆回 Longhui of Hu'nan	N27.27°	E111.12°	520	17.0	5.1	281.2	1 427.5
P23	湖北京山 Jingshan of Hubei	N31.01°	E112.90°	42	16.1	3.0	250.0	1 150.0
P24	湖北罗田 Luotian of Hubei	N30.83°	E115.43°	223	16.4	3.6	228.0	1 292.6
P25	四川万源 Wanyuan of Sichuan	N32.08°	E108.04°	844	14.7	3.0	240.0	1 169.3
P26	贵州德江 Dejiang of Guizhou	N28.29°	E108.17°	855	16.0	5.0	295.0	1 229.6
P27	河南商城 Shangcheng of He'nan	N31.75°	E115.54°	310	15.5	2.1	222.0	1 225.9
P28	陕西宁强 Ningqiang of Shaanxi	N33.05°	E106.02°	928	12.9	1.4	247.0	1 178.0
P29	陕西安康 Ankang of Shaanxi	N32.18°	E107.86°	917	15.5	3.1	253.0	799.3
P30	陕西镇巴 Zhenba of Shaanxi	N32.74°	E108.00°	688	13.7	-1.3	236.0	1 310.2

1.3 数据处理

根据最后1次测量的数据计算各种源枫香树幼苗株高、地径和叶片形状因子的变异系数。对种源间株高、地径和叶片形状因子进行方差分析,采用Duncan's新复极差法进行多重比较。对生长性状与种源地的地理-气候因子进行相关性分析。采用逐步回归法分析地理-气候因子对生长性状的影响,并建立线性回归方

程^[17]。利用EXCEL 2010和SPSS 19.0软件进行数据处理与分析,利用Origin 8.5软件绘图。

2 结果和分析

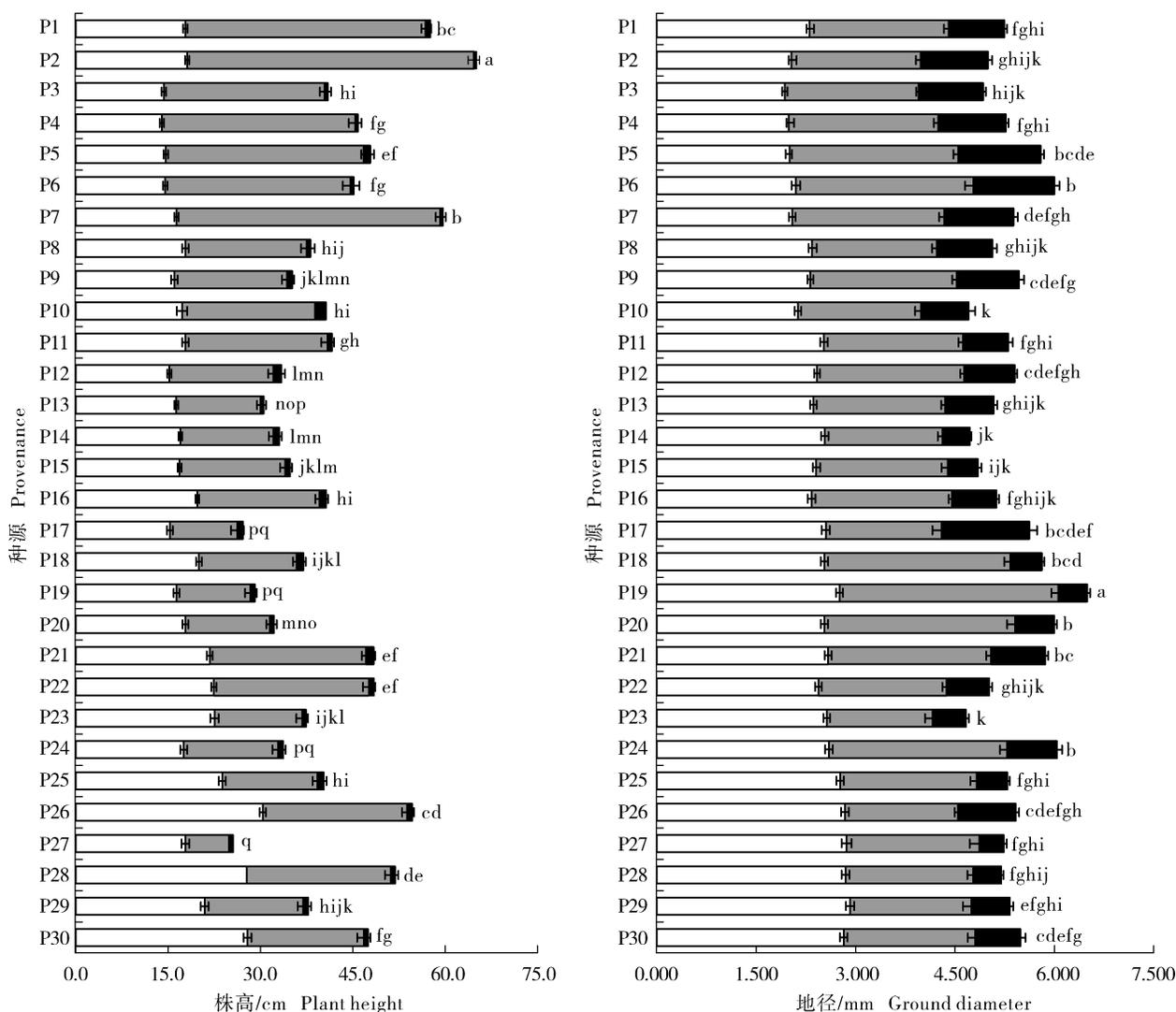
2.1 幼苗生长性状的比较

不同种源枫香树幼苗不同阶段株高和地径的比

较结果见图 1, 不同种源枫香树幼苗叶片形状因子的比较结果见图 2。

2.1.1 对株高和地径的影响 由图 1 可见: 第 1 阶段(2015 年 4 月至 8 月), 30 个枫香树种源幼苗株高

的变化幅度较小, 其中, 贵州德江(P26)、陕西宁强(P28)和陕西镇巴(P30)种源的株高较大。第 2 阶段(2015 年 8 月至 12 月), 30 个枫香树种源幼苗株高的变化幅度较大, 其中, 海南黎母山(P1)、海南霸王岭(P2)

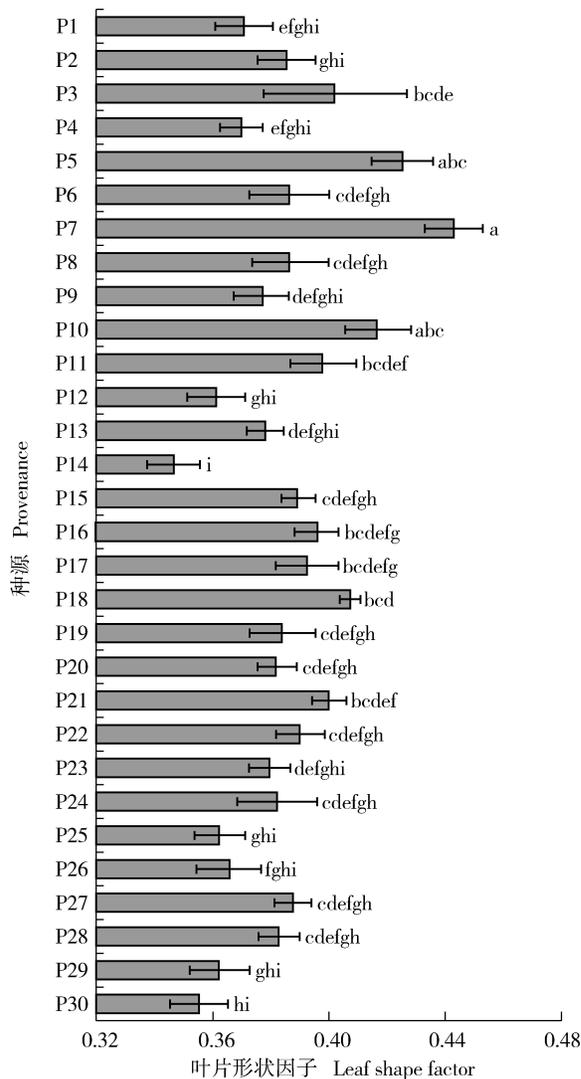


□: 第 1 阶段(2015 年 4 月至 8 月)的株高或地径 Plant height or ground diameter at the first stage (from April to August in 2015); ■: 第 2 阶段(2015 年 8 月至 12 月)株高或地径的增长量 Increment of plant height or ground diameter at the second stage (from August to December in 2015); ■: 第 3 阶段(2015 年 12 月至 2016 年 3 月)株高或地径的增长量 Increment of plant height or ground diameter at the third stage (from December in 2015 to March in 2016). 不同小写字母表示种源间差异显著($p < 0.05$) Different lowercases indicate the significant ($p < 0.05$) difference among provenances.

P1: 海南黎母山 Mt. Limushan of Hainan; P2: 海南霸王岭 Mt. Bawangling of Hainan; P3: 广东英德 Yingde of Guangdong; P4: 广西凭祥 Pingxiang of Guangxi; P5: 广西隆林 Longlin of Guangxi; P6: 广西融水 Rongshui of Guangxi; P7: 云南富宁 Funing of Yunnan; P8: 福建长汀 Changting of Fujian; P9: 福建尤溪 Youxi of Fujian; P10: 福建华安 Hua'an of Fujian; P11: 浙江开化 Kaihua of Zhejiang; P12: 浙江丽水 Lishui of Zhejiang; P13: 浙江天台 Tiantai of Zhejiang; P14: 江苏苏州 Suzhou of Jiangsu; P15: 江苏句容 Jurong of Jiangsu; P16: 江西大余 Dayu of Jiangxi; P17: 江西德兴 Dexing of Jiangxi; P18: 安徽祁门 Qimen of Anhui; P19: 安徽霍山 Huoshan of Anhui; P20: 湖南桑植 Sangzhi of Hu'nan; P21: 湖南宜章 Yizhang of Hu'nan; P22: 湖南隆回 Longhui of Hu'nan; P23: 湖北京山 Jingshan of Hubei; P24: 湖北罗田 Luotian of Hubei; P25: 四川万源 Wanyuan of Sichuan; P26: 贵州德江 Dejiang of Guizhou; P27: 河南商城 Shangcheng of He'nan; P28: 陕西宁强 Ningqiang of Shaanxi; P29: 陕西安康 Ankang of Shaanxi; P30: 陕西镇巴 Zhenba of Shaanxi.

图 1 不同种源枫香树幼苗不同阶段株高和地径的比较

Fig. 1 Comparison on plant height and ground diameter at different stages of *Liquidambar formosana* Hance seedlings from different provenances



不同小写字母表示种源间差异显著 ($p < 0.05$) Different lowercases indicate the significant ($p < 0.05$) difference among provenances.

P1: 海南黎母山 Mt. Limushan of Hainan; P2: 海南霸王岭 Mt. Bawangling of Hainan; P3: 广东英德 Yingde of Guangdong; P4: 广西凭祥 Pingxiang of Guangxi; P5: 广西隆林 Longlin of Guangxi; P6: 广西融水 Rongshui of Guangxi; P7: 云南富宁 Funing of Yunnan; P8: 福建长汀 Changting of Fujian; P9: 福建尤溪 Youxi of Fujian; P10: 福建华安 Hua'an of Fujian; P11: 浙江开化 Kaihua of Zhejiang; P12: 浙江丽水 Lishui of Zhejiang; P13: 浙江天台 Tiantai of Zhejiang; P14: 江苏苏州 Suzhou of Jiangsu; P15: 江苏句容 Jurong of Jiangsu; P16: 江西大余 Dayu of Jiangxi; P17: 江西德兴 Dexing of Jiangxi; P18: 安徽祁门 Qimen of Anhui; P19: 安徽霍山 Huoshan of Anhui; P20: 湖南桑植 Sangzhi of Hu'nan; P21: 湖南宜章 Yizhang of Hu'nan; P22: 湖南隆回 Longhui of Hu'nan; P23: 湖北京山 Jingshan of Hubei; P24: 湖北罗田 Luotian of Hubei; P25: 四川万源 Wanyuan of Sichuan; P26: 贵州德江 Dejiang of Guizhou; P27: 河南商城 Shangcheng of He'nan; P28: 陕西宁强 Ningqiang of Shaanxi; P29: 陕西安康 Ankang of Shaanxi; P30: 陕西镇巴 Zhenba of Shaanxi.

图2 不同种源枫香树幼苗叶片形状因子的比较
Fig. 2 Comparison on leaf shape factor of *Liquidambar formosana* Hance seedlings from different provenances

和云南富宁(P7)种源的株高较大。第3阶段(2015年12月至2016年3月),30个枫香树种源幼苗株高的变化幅度均较小。2016年3月,30个枫香树种源中P2种源的株高最高,为65.0 cm,河南商城(P27)种源的株高最低,为25.5 cm。

与株高相比较,不同阶段枫香树幼苗地径在种源间的变化幅度均较小。2016年3月,30个种源中安徽霍山(P19)种源的地径最大,为6.478 mm,湖北京山(P23)和福建华安(P10)种源的地径较小,分别为4.635和4.671 mm。

方差分析结果表明:枫香树幼苗株高和地径在种源间存在极显著差异。

2.1.2 对叶片形状因子的影响 由图2可见:P7种源枫香树幼苗叶片形状因子最大,为0.44,江苏苏州(P14)种源的叶片形状因子最小,为0.34。方差分析结果表明:枫香树幼苗叶片形状因子在种源间存在显著差异。

2.2 幼苗生长性状变异系数的比较

不同种源枫香树幼苗生长性状变异系数的比较结果见表2。由表2可见:30个枫香树种源幼苗生长性状变异系数的均值由高到低依次为株高(23.01%)、地径(19.35%)、叶片形状因子(17.51%)。30个枫香树种源幼苗株高的变异系数的变化幅度较大,其中,福建尤溪(P9)种源株高的变异系数最大(33.90%),海南霸王岭(P2)种源株高的变异系数最小(8.79%),前者约为后者的4倍;30个枫香树种源幼苗地径的变异系数的变化幅度较小,其中,陕西镇巴(P30)种源地径的变异系数最大(24.56%),安徽霍山(P19)种源地径的变异系数最小(15.37%);30个枫香树种源幼苗叶片形状因子的变异系数的变化幅度较大,其中,江西大余(P16)种源叶片形状因子的变异系数最大(28.01%),P2种源叶片形状因子的变异系数最小(8.90%),前者约为后者的3倍。种源内枫香树幼苗生长性状变异系数均值最大的是湖南桑植(P20)种源(25.43%),最小的是P2种源(11.86%),表明不同种源枫香树幼苗生长性状种源内的变异存在明显差异。

2.3 相关性分析

枫香树幼苗生长性状与其种源地地理-气候因子间的相关系数见表3。由表3可见:枫香树幼苗株高与纬度和经度呈极显著($p < 0.01$)负相关,与海拔、年均温、1月均温和无霜期呈极显著正相关,与年降水

表2 不同种源枫香树幼苗生长性状变异系数的比较

Table 2 Comparison on coefficients of variation of growth traits of *Liquidambar formosana* Hance seedlings from different provenances

编号 No.	种源 Provenance	变异系数/% Coefficient of variation			
		株高 Plant height	地径 Ground diameter	叶片形状因子 Leaf shape factor	均值 Mean
P1	海南黎母山 Mt. Limushan of Hainan	14.13	19.03	12.20	15.12
P2	海南霸王岭 Mt. Bawangling of Hainan	8.79	17.89	8.90	11.86
P3	广东英德 Yingde of Guangdong	24.22	16.00	20.81	20.34
P4	广西凭祥 Pingxiang of Guangxi	22.12	17.39	15.23	18.25
P5	广西隆林 Longlin of Guangxi	18.52	17.04	17.17	17.58
P6	广西融水 Rongshui of Guangxi	22.19	21.74	19.95	21.29
P7	云南富宁 Funing of Yunnan	10.86	18.97	14.18	14.67
P8	福建长汀 Changting of Fujian	21.88	16.17	18.49	18.85
P9	福建尤溪 Youxi of Fujian	33.90	19.64	12.45	22.00
P10	福建华安 Hua'an of Fujian	16.65	18.88	18.49	18.01
P11	浙江开化 Kaihua of Zhejiang	19.68	18.35	21.38	19.80
P12	浙江丽水 Lishui of Zhejiang	27.25	17.39	22.52	22.39
P13	浙江天台 Tiantai of Zhejiang	25.29	19.36	16.04	20.23
P14	江苏苏州 Suzhou of Jiangsu	27.27	22.56	16.24	22.03
P15	江苏句容 Jurong of Jiangsu	25.82	19.69	18.56	21.36
P16	江西大余 Dayu of Jiangxi	22.89	18.13	28.01	23.01
P17	江西德兴 Dexing of Jiangxi	29.78	18.41	21.81	23.33
P18	安徽祁门 Qimen of Anhui	29.40	17.42	17.47	21.43
P19	安徽霍山 Huoshan of Anhui	28.83	15.37	15.00	19.73
P20	湖南桑植 Sangzhi of Hu'nan	27.85	21.03	27.40	25.43
P21	湖南宜章 Yizhang of Hu'nan	23.70	23.29	24.07	23.69
P22	湖南隆回 Longhui of Hu'nan	19.17	19.07	22.19	20.15
P23	湖北京山 Jingshan of Hubei	28.23	23.25	15.02	22.17
P24	湖北罗田 Luotian of Hubei	28.17	19.48	11.86	19.84
P25	四川万源 Wanyuan of Sichuan	24.50	17.81	15.57	19.30
P26	贵州德江 Dejiang of Guizhou	16.58	19.61	13.90	16.70
P27	河南商城 Shangcheng of He'nan	24.65	19.46	15.63	19.92
P28	陕西安康 Ankang of Shaanxi	26.28	24.23	18.45	22.99
P29	陕西镇巴 Zhenba of Shaanxi	22.05	24.56	15.21	20.60
P30	陕西镇巴 Zhenba of Shaanxi	22.05	24.56	15.21	20.60
均值 Mean		23.01	19.35	17.51	19.96

表3 枫香树幼苗生长性状与其种源地地理-气候因子间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between growth traits of *Liquidambar formosana* Hance seedlings and geographical-climatic factors of their provenance locations

生长性状 Growth trait	相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient ¹⁾						
	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude	年均温 Annual mean temperature	1月均温 Mean temperature in January	无霜期 Frostless period	年降水量 Annual precipitation
株高 Plant height	-0.80**	-0.59**	0.61**	0.71**	0.71**	0.88**	0.13
地径 Ground diameter	0.49**	0.04	0.31	-0.51**	-0.56**	-0.47**	0.01
叶片形状因子 Leaf shape factor	-0.51**	-0.16	0.11	0.53**	0.63**	0.48**	0.06

¹⁾ **: $p < 0.01$.

量无显著相关性;地径与纬度呈极显著正相关,与年均温、1月均温和无霜期呈极显著负相关,与经度、海拔和年降水量无显著相关性;叶片形状因子与纬度呈极显著负相关,与年均温、1月均温和无霜期呈极显

著正相关,与经度、海拔和年降水量无显著相关性。

2.4 逐步回归分析

地理-气候因子对枫香树幼苗株高、地径和叶片形状因子的影响存在共线关系,剔除逐步回归过程中

存在共线关系的地理-气候因子,结果(表4)显示:株高与无霜期和海拔存在极显著的线性关系,地径和叶片形状因子与1月均温也存在极显著的线性关系,这3个地理-气候因子能解释枫香树幼苗生长性状30.8%~81.9%的变化。

表4 枫香树幼苗生长性状与地理-气候因子的逐步回归分析结果
Table 4 Result of stepwise regression analysis on growth traits of *Liquidambar formosana* Hance seedlings and geographical-climatic factors

逐步回归方程 ¹⁾ Stepwise regression equation ¹⁾	R ²	F 值 F value	p 值 p value	容忍度 Tolerance
$Y_1 = 0.177X_1 + 0.005X_2 - 25.314$	0.819	60.953	0.000	0.986
$Y_2 = -0.079X_3 + 5.731$	0.308	12.458	0.001	1.000
$Y_3 = 0.160X_3 + 9.389$	0.390	17.920	0.000	1.000

¹⁾ Y_1 : 株高 Plant height; Y_2 : 地径 Ground diameter; Y_3 : 叶片形状因子 Leaf shape factor; X_1 : 无霜期 Frostless period; X_2 : 海拔 Altitude; X_3 : 1月均温 Mean temperature in January.

3 讨论和结论

3.1 枫香树苗期性状变异分析

株高和地径是研究林木苗期生长的重要指标,在香椿[*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]^[18]、刨花楠(*Machilus pauhoi* Kanehira)^[19]和青钱柳[*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinsk.]^[20]等苗期研究中均作为生长差异的重要参考,其中,香椿苗高和地径的变异系数分别为38.58%和14.19%,刨花楠苗高和地径的变异系数分别为8.60%和5.75%,而本研究中,枫香树幼苗株高和地径的变异系数分别为23.01%和19.35%,说明株高的变异普遍较地径丰富,且枫香树幼苗株高的变异水平居中,地径的变异水平相对较高。叶片形状因子是综合描述叶面积与叶片周长的指标,也是叶片生长的重要指标。枫香树幼苗叶片形状因子的变异系数为17.51%,较株高和地径的变异系数小,但较红榉(*Zelkova schneideriana* Hand.-Mazz.)^[21]叶片形状因子种源间平均变异系数(9.34%)大。枫香树幼苗的株高、地径和叶片形状因子在种源间存在明显差异,这种差异可以作为区别不同种源的依据。本研究未对枫香树种源内家系间子代苗期生长性状的差异进行挖掘,关于其生长性状的变异主要来源于种源间还是家系间还需进一步研究。由于本实验是在同一地块的相近区域展开,且后期人工管理措施一致,因此,可初步认定这些生长差异主

要受遗传影响。

3.2 枫香树的生长节律与速生种质选择

相关研究结果表明:红椿^[7]、台湾栲木[*Alnus formosana* (Burkill) Makino]^[22]和任豆(*Zenia insignis* Chun)^[23]的生长节律均符合 Logistic 方程拟合模型($R^2 > 0.95$),红椿和任豆苗高和地径的生长均呈现“慢—快—慢”的“S”型生长曲线模式,可将苗高和地径的生长分为生长前期、速生期及生长后期3个阶段;台湾栲木年生长进程划分为渐增期、速生期和缓增期3个阶段,其中处于速生期植株的株高和地径生长量均超过全年总量的70%。南方红豆杉[*Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) Cheng et L. K. Fu]^[24]的苗高、地径和苗高生长节律具有较丰富的遗传差异,遗传改良潜力较大,早期选择有一定的可靠性。本研究中,枫香树幼苗的株高和地径存在2个快速增长阶段,且部分种源株高在4月至8月的生长速度较12月至次年3月更快。刘军等^[18]对香椿的研究结果表明:生长越快,抗冻性越差。30个种源中,云南富宁、海南霸王岭和海南黎母山种源枫香树幼苗的株高生长迅速,可作为速生种质进行进一步研究。这3个枫香树种源分布地的平均温度相对较高,其是否适应于偏北地区,还需要进行抗冻性方面的研究。相比较而言,陕西宁强和陕西镇巴种源枫香树幼苗的株高和地径生长居中,可作为耐寒速生种质进行进一步研究。

3.3 枫香树苗期性状地理变异分析

广布植物种群地理变异的形成与自然选择、基因流和基因飘动等因子有关。植物的变异形式有连续变异、区域板块变异以及随机变异等模式^[25]。核桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)^[26]果核性状变异是不连续变异;而花楸树^[2]表型性状为纬度和经度双向变异模式,其中纬度起主要作用;与枫香树分布区相似的樟树[*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl]^[27]的种子长宽比、杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]^[28]的株高和胸径以及香椿^[18]的苗高、地径和抗冻性是以纬度变异为主;红椿^[7]的苗高和地径以经度变异为主。相关性分析结果显示:枫香树幼苗的株高与种源地的纬度和经度极显著相关,而地径和叶片形状因子仅与经度极显著相关,这种影响表现在不同种源幼苗生长性状差异上,并形成了在地理空间上株高呈“西南—东北”递减、地径呈“南—北”递增和叶片形状因子呈“北—南”递

减的变化趋势。逐步回归分析结果显示:枫香树幼苗的株高主要受无霜期和海拔影响,地径和叶片形状因子主要受 1 月均温影响,集中表现为由种源地温度差异引起的种源间生长性状差异,且除株高与海拔存在线性关系,其他 2 个生长性状与海拔没有直接的线性关系。除了纬度对气温有影响外,海拔也会引起枫香树分布区内的温度差异,因此,在枫香树优树选择过程中,既要考虑种源的纬度变异模式,也要考虑海拔引起的温度变化所造成的种源差异。本文没有进一步根据苗期生长性状进行聚类分析,只进行了单个性状的地理空间变化分析。由枫香树 3 个生长性状的地理变化趋势可以发现,三者间并没有统一的变化规律。部分相邻枫香树种源幼苗的株高、地径和叶片形状因子间存在显著差异,表明在一定范围内枫香树种源间苗期生长性状的变异是随机的。在进一步讨论枫香树种源区划时,需要考虑育种目标性状的选择。综上所述,30 个枫香树种源 1 年生幼苗生长性状存在丰富变异,这对速生耐寒枫香树种质的选择具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] 王明麻. 林木遗传育种学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 136-138.
- [2] 郑健, 胡增辉, 郑勇奇, 等. 花椒树种源间表型性状的地理变异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 50-56.
- [3] 李因刚, 柳新红, 马俊伟, 等. 浙江楠种群表型变异[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1315-1324.
- [4] 杨晓霞, 冷平生, 郑健, 等. 暴马丁香不同种源种子和幼苗的表型性状变异及其与地理-气候因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(3): 80-89.
- [5] 刘志龙, 虞木奎, 马跃, 等. 不同种源麻栎种子和苗木性状地理变异趋势面分析[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6796-6804.
- [6] 李志芬, 刘玮, 周丹. 不同种源欧洲花楸苗期试验[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 106-107.
- [7] 李培, 阙青敏, 吴林瑛, 等. 红椿不同种源的苗期生长节律研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 96-102.
- [8] OZDILEK A, CENGEL B, KANDEMIR G, et al. Molecular phylogeny of relict-endemic *Liquidambar orientalis* Mill based on sequence diversity of the chloroplast-encoded *matK* gene[J]. Plant Systematics and Evolution, 2012, 298: 337-349.
- [9] 李芳芳, 杨少宗, 柳新红, 等. 枫香树 DNA 提取及 SRAP-PCR 反应体系的建立与优化[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(1): 46-51, 67.
- [10] 靳高中, 任华东, 姚小华. 滇西腾冲红花油茶天然居群种实表型性状变异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 53-58.
- [11] 刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 等. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.
- [12] SUN R, LIN F, HUANG P, et al. Moderate genetic diversity and genetic differentiation in the relict tree *Liquidambar formosana* Hance revealed by genic simple sequence repeat markers[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1411.
- [13] 杜超群, 许业洲, 胡兴宜, 等. 枫香不同种源苗期生长差异研究[J]. 湖北林业科技, 2009(5): 17-20.
- [14] 刘明宣, 辜云杰, 夏川, 等. 枫香地理种源变异与选择[J]. 四川林业科技, 2014, 35(5): 13-16.
- [15] 叶晓霞, 徐肇友, 王帮顺, 等. 不同枫香种源造林实验及优良种源选择[J]. 浙江林业科技, 2013, 33(2): 71-74.
- [16] 陈孝丑. 枫香优树 14 年生子代遗传变异及选择[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 183-187.
- [17] 王恒方, 吕光辉, 周耀治, 等. 不同水盐梯度下功能多样性和功能冗余对荒漠植物群落稳定性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7928-7937.
- [18] 刘军, 陈益泰, 姜景民, 等. 香椿种源苗期性状变异与原产地生态因子典型相关分析[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(11): 27-29.
- [19] 何贵平, 麻建强, 骆文坚, 等. 刨花楠优树子代苗期性状变异研究[J]. 福建林学院学报, 2012, 32(3): 243-245.
- [20] 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.
- [21] 王旭军, 程勇, 吴际友, 等. 红榉不同种源叶片形态性状变异[J]. 福建林学院学报, 2013, 33(3): 284-288.
- [22] 彭玉华, 黄志玲, 申文辉, 等. 台湾桫欏木引种的生长节律与生物量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6): 7-12.
- [23] 邝雷, 邓小梅, 陈思, 等. 4 个任豆种源苗期生长节律的研究[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(5): 98-101.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 高张莹, 张海峰, 陈国平, 等. 核桃楸种群果核形态及地理变异[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(4): 609-615.
- [27] 任华东, 姚小华. 樟树种子性状产地表型变异研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(3): 370-375.
- [28] 叶志宏, 施季森, 翁玉榛, 等. 杉木地理种源变异模式[J]. 南京林业大学学报, 1990, 14(4): 15-22.

(责任编辑: 张明霞)