

# 枫香树种群种子与果实表型性状变异分析

何庆海 杨少宗 李因刚 沈鑫 柳新红\*

浙江省林业科学研究院, 杭州 310023

**摘要** 为了明确我国枫香树(*Liquidambar formosana*)种子与果实表型变异程度和变异规律, 采用方差分析、相关分析和回归分析等方法对36个天然种群枫香树的10个种子与果实的表型性状在种群间和种群内表型变异和地理变异模式进行探讨。研究表明, 枫香树平均表型分化系数为57.55%, 种群间的变异是其表型变异的主要来源; 种子和果实表型性状的变异丰富, 变异幅度为10.05%–24.31%, 平均变异系数为15.83%; 不同种群间变异差别明显, 安福种群平均变异系数最大(16.73%), 建阳种群平均变异系数最小(11.48%)。枫香树多数种子与果实表型性状在地理变化上是随机的, 地理相近种群在表型上没有显著相关性。地理气候因子中1月平均气温、海拔和纬度对种子与果实性状起主要的影响。种子与果实性状与海拔相关分析表明, 枫香树种子长宽比随海拔的升高而减小, 种子长宽比可以推测种群所在的海拔高度。探讨枫香树种群表型多样性, 可为野生优良种质的收集、多目标品种选育等工作提供依据。

**关键词** 枫香树; 种子性状; 果实特性; 表型变异; 天然种群

何庆海, 杨少宗, 李因刚, 沈鑫, 柳新红 (2018). 枫香树种群种子与果实表型性状变异分析. 植物生态学报, 42, 752–763. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0229

## Phenotypic variations in seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* populations

HE Qing-Hai, YANG Shao-Zong, LI Yin-Gang, SHEN Xin, and LIU Xin-Hong\*

Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China

### Abstract

**Aims** *Liquidambar formosana* is a fast-growing and multipurpose native tree species in China. Our aim is to determine the phenotypic variations, adaption and distribution patterns of seed and fruit characteristics of *L. formosana* populations.

**Methods** Data for 10 phenotypic traits of seeds and fruits including fruit diameter, peduncle length, thousand kernel weight, seed length, seed width, seed wing length, seed wing width, seed width ratio, seed wing width ratio, ratio of seed length and seed wing length, were sampled from 36 natural *L. formosana* populations across China. Analysis of variance (ANOVA), correlation analysis, and regression analysis were used to analyze the phenotypic variations among and within populations.

**Important findings** Results showed that the mean phenotypic differentiation coefficient was 57.55%, which indicated that the phenotypic variation among populations was the main source of the phenotypic variation in *L. formosana*. The mean coefficient of variation was 15.83%, ranging from 10.05% to 24.31%, suggesting that the phenotypic variation of seeds and fruits was very plentiful. The coefficient of variation was different among populations. The mean coefficient of variation in Anfu was the highest (16.73%), while that of Jianyang was the lowest (11.48%). The pattern of geographic variation of most seed and fruit phenotypic traits was random. There was no significant correlation between the adjacent populations in phenotypic traits. The mean temperature in January, altitude and latitude played important roles in affecting the phenotypic traits. The length-width ratio of seeds decreased with the increase of altitude, which can be used to infer the altitude of the distribution of a population. Our results provide useful information for the collection of wild resources and the breeding of this economically important species.

**Key words** *Liquidambar formosana*; seed traits; fruit characteristics; phenotypic variations; nature populations

收稿日期Received: 2017-09-06 接受日期Accepted: 2018-06-03

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201404312)、浙江省农业(林木)新品种选育重大专项(2016C02056-10)。Supported by the Special Scientific Research of Forestry Public Welfare Profession of China (201404312), and the Major Project of Agricultural (Forestry) Breeding of Zhejiang Province (2016C02056-10).

\* 通信作者Corresponding author (lsliuxh@163.com)

He QH, Yang SZ, Li YG, Shen X, Liu XH (2018). Phenotypic variations in seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* populations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 752–763. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0229

植物表型多样性是遗传多样性的重要组成部分, 其形成的原因普遍认为是基因和环境共同作用的结果(靳高中等, 2013; 刁松锋等, 2014)。遗传多样性研究可以通过表型测定、细胞学、生化和分子标记等多种手段来进行, 其中表型测定是最现实和最直接的方法(厉月桥等, 2013; 苏世平等, 2013)。通过对表型变异程度和变化规律的研究, 可以揭示生物对不同环境的适应性(姬明飞等, 2013)。其中, 植物叶片等营养器官受外界环境影响较大, 表型变异的稳定性相对较低; 而作为生殖器官的果实和种子的表型变异则具有较高的稳定性, 二者是林木长期种群遗传和环境自然选择的综合体现(赵曦阳等, 2008; 王洁等, 2012; 徐杨等, 2015)。国内学者对松属(*Pinus*)等针叶树种和部分阔叶树种进行了大量表型变异研究, 为相关树种的资源保护和遗传改良奠定了基础(姬明飞等, 2013; 李因刚等, 2014)。

枫香树(*Liquidambar formosana*)为金缕梅科枫香树属落叶树种, 是我国重要的乡土多用树种。我国秦岭及淮河以南各省均有天然分布, 越南、老挝北部及朝鲜南部也有分布; 主要分布于海拔1 500 m以下地区, 果实10月下旬成熟(孟现东, 2003)。尽管近些年关于枫香树叶色变化机理研究(胡敬志等, 2007; Wang, 2010; 李效文等, 2011; Wen *et al.*, 2015; Wen & Chu, 2017), 药用成分研究(阎聪等, 2013; 纪雨薇等, 2015; 谢琼珺等, 2015)及其作为生态树种(冷华妮等, 2009; Zhang *et al.*, 2011; 孙海菁等, 2012)等方面皆有大量报道。由于枫香树各分布区的气候、土壤及温度等自然环境存在较大差异, 在经过长期的地理隔离和自然选择, 其形成了丰富的表型变异。然而, 目前有关枫香树种子与果实表型的研究却未见报道, 本研究以36个种群490个单株的枫香树种子与果实为试验材料, 通过直观测定种子与果实的10个表型性状数据, 揭示其种子与果实各性状的变异系数、表型分化系数, 探索种子与果实表型性状与地理因子间的关系, 探明枫香树种子与果实的地理变异规律。通过主成分分析, 研究36个种群间起重要作用的某一个或几个性状, 并研究其在种群间的差异性, 揭示该性状对种群分类的重要价值及自身变异的规律。以期为枫香树种质资源开发利用、遗传育种与改良提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

2013–2015年, 我们采集了枫香树天然分布区15个省(区、市)的36个种群490个单株(表1)的枫香树果实。选择生长健壮, 结实良好的单株为采集母树, 每两株母树间距100 m以上。果实由绿变黄时, 研究人员分单株采果, 每个单株采果5 kg以上。果实采集后带回实验室, 阴干后敲出种子, 并进行表型数据测定。参试枫香树属天然野生种群, 由于其种群规模大小不一, 能够同时满足单株距离100 m和单株采果5 kg的种群有限。因此, 在规模较小种群采集的植株数量相应较少, 平均每个种群采集13.6株(表1)。

### 1.2 测量方法

每个单株随机选择30个球果用游标卡尺进行果径(*FD*)和果柄长(*PL*)的测量, 果径为垂直于果柄方向的果实宽度。千粒重(*TKW*)测量时随机取1 000粒种子测其质量, 重复3次。每个单株选择30粒枫香树种子放在方格纸上, 拍照后使用Image J软件(白光红等, 2009)测量种子长(*SL*)、种子宽(*SW*)和种翅长(*SWL*)、种翅宽(*SWW*), 计算种子长宽比(*SWR*) =  $SL/SW$ , 种翅长宽比(*SWWR*) =  $SWL/SWW$ , 种长翅长比(*SLSWLR*) =  $SL/SWL$ 。

### 1.3 数据处理与统计分析

采用巢式方差分析(李斌等, 2002; 刁松锋等, 2014)研究枫香树种子与果实性状变异, 线性模型为 $Y_{ijk} = u + P_i + T_{i(j)} + e(ij)k$ , 其中 $Y_{ijk}$ 为第*i*种群第*j*个个体第*k*个观测值,  $u$ 为总平均值,  $P_i$ 为第*i*个种群的效应值,  $T_{i(j)}$ 为第*i*个种群内的第*j*个个体的效应值,  $e(ij)k$ 为随机误差。计算枫香树种子与果实性状的平均值、标准偏差、变异系数(*CV*)和表型分化系数( $V_{ST}$ ),  $CV$  = 标准偏差/平均值,  $V_{ST} = \delta_{US}^2 / (\delta_{US}^2 + \delta_S^2)$ ,  $\delta_{US}^2$ 、 $\delta_S^2$ 分别为种群间和种群内的方差值。根据各种群性状的观测值的均值与种群所在地的地理因子间的相关系数, 分析各性状与种群的地理因子间的相关性。对性状进行主成分分析(周兰英等, 2009; 宋军生等, 2015; 崔翠等, 2016), 按照累计贡献率大于85%或特征值大于1提取主成分, 对第1、2主成分特征值表现为正值的种子与果实性状进行种群间方差分析。

DOI: 10.17521/cjpe.2017.0229

表1 枫香树种群取样点的地理位置及主要气候因子

Table 1 Geographic locations and main climatic factors for sampling sites of *Liquidambar formosana* populations

取样地点 Sampling site	取样株数 No. of individuals sampled	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	年平均气温 AMAT (°C)	1月平均气温 MAT in Jan (°C)	7月平均气温 MAT in July (°C)	无霜期 Frost-free season (d)	年降水量 AP (mm)
海南黎母山 Mt. Limu, Hainan	20	109.16°	18.89°	309	24.7	19.5	28.2	365	1 400.0
海南佳西 Jiayi, Hainan	12	109.79°	19.27°	209	22.0	16.0	26.0	362	1 951.4
海南霸王岭 Mt. Bawangling, Hainan	9	109.28°	19.14°	250	24.3	18.4	28.8	365	1 395.0
广东紫金 Zijin, Guangdong	6	115.00°	23.59°	388	20.6	11.8	27.2	357	1 761.1
广东英德 Yingde, Guangdong	7	113.40°	24.45°	273	20.7	10.9	28.9	315	1 849.0
广西凭祥 Pingxiang, Guangxi <sup>1)</sup>	15	106.79°	22.21°	178	21.3	13.2	27.6	347	1 376.0
广西隆林 Longlin, Guangxi <sup>1)</sup>	13	105.62°	25.03°	1 390	19.1	10.0	25.5	331	1 422.8
广西融水 Rongshui, Guangxi <sup>1)</sup>	12	109.37°	25.18°	329	19.3	7.5	26.5	320	1 824.8
云南富宁 Funing, Yunnan <sup>1)</sup>	15	105.73°	24.13°	1 161	19.3	11.0	25.4	327	1 176.9
福建建阳 Jianyang, Fujian	17	117.93°	27.45°	288	17.7	8.9	37.5	255	1 742.0
福建长汀 Changting, Fujian	8	116.44°	25.83°	462	17.3	9.8	27.2	260	1 711.6
福建尤溪 Youxi, Fujian	17	112.89°	25.10°	1 032	17.7	8.0	26.6	264	1 600.0
福建华安 Hua'an, Fujian	8	117.45°	24.96°	140	20.9	18.5	33.9	320	1 598.7
浙江淳安 Chun'an, Zhejiang <sup>2)</sup>	10	118.77°	29.58°	146	17.0	5.0	28.9	263	1 450.0
浙江泰顺 Taishun, Zhejiang <sup>2)</sup>	8	119.70°	27.66°	489	16.1	5.7	27.5	242	1 980.6
浙江开化 Kaihua, Zhejiang <sup>2)</sup>	9	118.41°	29.08°	338	16.3	4.6	27.8	250	1 762.1
浙江丽水 Lishui, Zhejiang <sup>2)</sup>	15	119.99°	28.54°	259	18.0	7.3	22.9	257	1 399.6
浙江文成 Wencheng, Zhejiang <sup>2)</sup>	14	120.11°	27.88°	227	18.0	7.3	28.3	286	307.0
浙江桐庐 Tonglu, Zhejiang <sup>2)</sup>	20	119.67°	29.91°	77	16.5	4.1	28.8	253	1 462.0
浙江天台 Tiantai, Zhejiang <sup>2)</sup>	18	121.10°	29.11°	464	16.8	5.0	28.3	234	1 332.0
浙江舟山 Zhoushan, Zhejiang <sup>2)</sup>	18	122.24°	30.27°	0	16.2	5.4	28.4	305	927.3
江苏句容 Jurong, Jiangsu	16	119.31°	32.13°	19	15.1	2.0	27.8	229	1 000.0
江西安福 Anfu, Jiangxi	20	114.70°	27.62°	133	17.9	6.0	28.9	282	1 516.8
江西大余 Dayu, Jiangxi	22	114.52°	25.62°	267	18.4	7.5	27.6	301	1 591.5
湖南桑植 Sangzhi, Hunan	20	110.29°	29.44°	390	16.5	4.8	28.2	255	2 029.1
湖南隆回 Longhui, Hunan	14	111.12°	27.27°	520	17.0	5.1	28.1	281	1 427.5
湖北恩施 Enshi, Hubei	13	110.21°	30.68°	958	16.3	4.9	27.1	292	1 440.0
湖北罗田 Luotian, Hubei	11	115.43°	30.83°	223	16.4	3.6	28.5	228	1 292.6
四川广元 Guangyuan, Sichuan <sup>3)</sup>	8	105.64°	32.31°	977	16.2	5.2	26.2	270	1 186.0
贵州德江 Dejiang, Guizhou	21	108.17°	28.29°	855	16.0	5.0	26.3	295	1 229.6
贵州罗甸 Luodian, Guizhou <sup>1)</sup>	21	106.59°	25.32°	916	15.2	10.0	27.0	330	1 200.0
河南西峡 Xixia, Henan <sup>3)</sup>	6	111.75°	33.65°	940	15.1	1.5	27.1	236	881.0
陕西宁强 Ningqiang, Shaanxi <sup>3)</sup>	12	106.02°	33.05°	928	12.9	1.4	23.6	247	1 178.0
陕西安康 Ankang, Shaanxi <sup>3)</sup>	11	107.86°	32.18°	917	15.5	3.1	27.6	253	799.3
陕西镇巴 Zhenba, Shaanxi <sup>3)</sup>	13	108.00°	32.74°	688	13.7	-1.3	30.6	236	1 310.2
甘肃文县 Wenxian, Gansu <sup>3)</sup>	11	105.17°	32.77°	1 450	14.4	3.6	24.8	224	574.7

1)表示西南枫香树种群; 2)表示东南枫香树种群; 3)表示西北枫香树种群。

1), southwest *L. formosana* populations; 2), southeast *L. formosana* populations; 3), northwest *L. formosana* populations. AMAT, annual mean air temperature; MAT, mean air temperature; AP, annual precipitation.

采用逐步回归法分析地理气候因子对种实性状的影响, 建立主要气候因子与种实性状的线性回归方程(王恒方等, 2017)。利用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行数据处理与分析, 图形可视化利用Origin 8.5实现。

## 2 结果和分析

### 2.1 枫香树种子与果实性状的变异分析

由表2可以看出, 除种子千粒重在种群内的差

异不显著,其他种子与果实表型性状均在种群内和种群间存在极显著差异。果径、种翅长、种翅宽、种翅长宽比和种长翅长比的种群间方差分量百分比在60%以上,其表型分化系数也在60%以上,表明这5个种实种性状在种群间变异较大,其余5个性状的变异主要在种群内。枫香树种子与果实性状表型分化系数在8.09%–89.62%,其中表型分化系数最高为种翅长,最低为种子宽。表明枫香树种翅长在种群间分化较大,种子宽在种群间相对稳定,但在种群内保持较大的变异。

由表3可以看出,枫香树种子与果实的各性状存在明显的变异,观测性状的变异系数均>10%。果柄长度和种翅长宽比的变异系数超过20%,种子长

的变异系数最小为10.05%。枫香树果径最大值为36.30 mm,最小值为14.25 mm,极差为22.05 mm,果柄长的极差则达到87.86 mm,果实性状变异明显。不同单株种子的千粒重最小值为3.00 g,最大值为6.31 g。种子长宽比的变异系数为13.31%,种子长宽比最小值为2.19,表明种子长度基本在宽度的2倍以上,种子平均长度是种子平均宽度的4倍。种翅长宽比的变异系数为20.19%,种翅长宽比的平均值为1.47,最大值为3.63。种长翅长比的变异系数为16.88%,种子长度平均值是种翅长度平均值的2.53倍。所有性状中种子长和种子宽度的变异系数相对最小,表明这两个性状较稳定。

表4中具体展示了枫香树种子与果实表型性状

表2 枫香树种子与果实表型性状的方差分量及种群间表型分化系数  
Table 2 The variance components of the seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* and the phenotype differential coefficients of different groups

种子与果实性状 Seed and fruit trait	方差分量 Variance component			方差分量百分比 Variance component percentage (%)			表型分化系数 Phenotype differentiation coefficient (%)	F值 F value	
	种群间 Among populations	种群内 Within populations	随机误差 Random error	种群间 Among populations	种群内 Within populations	随机误差 Random error		种群间 Among populations	种群内 Within populations
果径 <i>FD</i> (mm)	2.948	0.771	0.001	79.25	20.71	0.04	79.28	38.93**	5.77**
果柄长 <i>PL</i> (mm)	28.770	31.515	0.033	47.70	52.25	0.06	47.72	27.37**	10.23**
种子千粒重 <i>TKW</i> (g)	0.011	0.043	0.001	20.32	78.29	1.39	20.61	6.92**	1.76
种子长 <i>SL</i> (mm)	0.160	0.218	0.000	42.33	57.66	0.01	42.33	63.48**	20.93**
种子宽 <i>SW</i> (mm)	0.001	0.014	0.000	8.09	91.87	0.05	8.09	18.33**	9.64**
种翅长 <i>SWL</i> (mm)	0.444	0.051	0.000	89.62	10.38	0.01	89.62	143.76**	8.53**
种翅宽 <i>SWW</i> (mm)	0.039	0.015	0.000	71.44	28.54	0.02	71.45	48.99**	8.00**
种子长宽比 <i>SWR</i>	0.057	0.060	0.000	48.66	51.30	0.04	48.68	22.36**	6.56**
种翅长宽比 <i>SWWR</i>	0.068	0.016	0.000	80.73	19.26	0.01	80.74	73.01**	8.03**
种长翅长比 <i>SLSWLR</i>	0.206	0.031	0.000	86.98	13.01	0.01	86.99	112.84**	8.39**

*FD*, fruit diameter; *PL*, peduncle length; *TKW*, thousand kernel weight; *SL*, seed length; *SW*, seed width; *SWL*, seed wing length; *SWW*, seed wing width; *SWR*, seed width ratio; *SWWR*, seed wing width ratio; *SLSWLR*, seed length and seed wing length ratio. \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ .

表3 枫香树种子与果实性状的变异系数  
Table 3 Statistics and coefficients of variation of the seed and fruit traits of *Liquidambar formosana*

种子与果实性状 Seed and fruit trait	平均值 Average	标准偏差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum	极差 Range	变异系数 Coefficient of variation (%)
果径 <i>FD</i> (mm)	24.41	2.91	14.25	36.30	22.05	11.94
果柄长 <i>PL</i> (mm)	55.58	13.51	21.22	109.08	87.86	24.31
种子千粒重 <i>TKW</i> (g)	3.86	0.64	3.00	6.31	3.31	16.50
种子长 <i>SL</i> (mm)	7.49	0.75	4.91	10.23	5.32	10.05
种子宽 <i>SW</i> (mm)	1.87	0.22	1.06	2.77	1.71	11.89
种翅长 <i>SWL</i> (mm)	3.04	0.60	1.53	5.92	4.39	19.80
种翅宽 <i>SWW</i> (mm)	2.09	0.28	1.01	3.14	2.13	13.43
种子长宽比 <i>SWR</i>	4.04	0.54	2.19	7.31	5.12	13.31
种翅长宽比 <i>SWWR</i>	1.47	0.30	0.72	3.63	2.91	20.19
种长翅长比 <i>SLSWLR</i>	2.53	0.43	1.49	4.84	3.35	16.88

*FD*, fruit diameter; *PL*, peduncle long; *TKW*, thousand kernel weight; *SL*, seed length; *SW*, seed width; *SWL*, seed wing length; *SWW*, seed wing width; *SWR*, seed width ratio; *SWWR*, seed wing width ratio; *SLSWLR*, seed length and seed wing length ratio.

表4 枫香树种子与果实性状在种群内的变异系数

Table 4 Coefficients of variation of the seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* within population

变异系数 <i>CV</i> %	果径 <i>FD</i>	果柄长 <i>PL</i>	种子千 粒重 <i>TKW</i>	种子长 <i>SL</i>	种子宽 <i>SW</i>	种翅长 <i>SWL</i>	种翅宽 <i>SWW</i>	种子长 宽比 <i>SWR</i>	种翅长 宽比 <i>SWWR</i>	种长翅 长比 <i>SLSWLR</i>	平均变 异系数 Average <i>CV</i> (%)
海南黎母山 Mt. Limu Hainan	9.87	19.06	14.47	8.22	11.26	14.63	12.57	12.34	18.72	12.24	13.34
海南佳西 Jiaxi, Hainan	13.90	22.05	14.13	9.40	11.50	16.76	11.49	10.99	16.00	13.86	14.01
海南霸王岭 Mt. Bawangling, Hainan	7.18	24.65	13.15	9.44	14.05	18.00	13.86	14.91	17.32	14.99	14.76
广东紫金 Zijin, Guangdong	11.33	13.92	11.08	6.44	12.10	11.39	13.01	13.31	13.60	11.27	11.75
广东英德 Yingde, Guangdong	8.51	17.46	7.57	9.67	11.18	15.80	12.31	13.80	18.63	13.55	12.85
广西凭祥 Pingxiang, Guangxi	10.86	23.24	7.87	8.51	12.38	14.49	12.41	14.20	15.83	11.73	13.15
广西隆林 Longlin, Guangxi	9.44	19.74	9.15	11.96	12.29	16.88	11.10	13.94	18.16	13.93	13.66
广西融水 Rongshui, Guangxi	10.06	24.95	13.55	9.68	12.13	16.34	12.24	14.37	17.31	15.23	14.59
云南富宁 Funing, Yunnan	12.00	19.68	16.89	7.77	12.22	14.78	10.46	13.14	17.54	12.10	13.66
福建建阳 Jianyang, Fujian	8.94	20.49	8.51	6.99	10.04	12.05	11.65	10.15	15.63	10.31	11.48
福建长汀 Changting, Fujian	11.19	25.64	13.78	9.57	12.64	15.84	14.20	14.73	15.30	12.58	14.55
福建尤溪 Youxi, Fujian	8.93	16.15	14.40	7.81	10.32	16.49	12.96	11.27	19.72	13.05	13.11
福建华安 Hua'an, Fujian	14.34	23.63	22.17	9.20	10.27	14.52	11.15	10.77	14.35	10.23	14.06
浙江淳安 Chun'an, Zhejiang	12.96	20.34	22.44	10.77	10.98	16.39	11.16	13.80	18.22	12.39	14.95
浙江泰顺 Taishun, Zhejiang	10.63	17.59	10.97	9.19	11.26	18.75	11.65	12.63	16.49	14.46	13.36
浙江开化 Kaihua, Zhejiang	13.74	20.13	18.90	9.28	14.69	13.65	11.91	12.10	11.99	11.09	13.75
浙江丽水 Lishui, Zhejiang	13.18	21.77	11.97	9.21	12.24	13.73	10.42	12.65	14.94	11.62	13.17
浙江文成 Wencheng, Zhejiang	10.42	21.71	15.92	8.90	8.97	13.73	10.36	12.27	15.90	12.80	13.10
浙江桐庐 Tonglu, Zhejiang	8.42	20.17	12.97	9.12	10.55	14.62	12.93	11.18	14.54	12.71	12.72
浙江天台 Tiantai, Zhejiang	11.93	19.16	10.19	11.47	11.89	17.97	12.54	13.97	19.21	12.37	14.07
浙江舟山 Zhoushan, Zhejiang	12.85	18.51	16.70	10.00	10.91	14.04	11.32	13.26	17.31	12.50	13.74
江苏句容 Jurong, Jiangsu	10.00	22.44	20.21	7.54	10.85	13.86	11.01	11.71	15.09	13.05	13.58
江西安福 Anfu, Jiangxi	9.48	21.94	8.40	9.09	14.83	19.90	16.02	16.83	30.84	20.00	16.73
江西大余 Dayu, Jiangxi	11.28	33.26	15.66	9.32	10.18	17.29	13.45	12.52	16.75	14.98	15.47
湖南桑植 Sangzhi, Hunan	8.73	23.03	12.38	7.86	10.00	17.41	11.44	9.18	18.04	19.61	13.77
湖南隆回 Longhui, Hunan	11.70	25.58	12.41	10.10	11.63	18.18	13.74	11.19	14.12	12.86	14.15
湖北恩施 Enshi, Hubei	10.40	18.58	20.32	7.11	11.23	14.12	12.49	12.11	17.23	13.15	13.67
湖北罗田 Luotian, Hubei	9.76	21.13	8.43	9.29	11.52	19.45	13.32	12.23	16.80	14.85	13.68
四川广元 Guangyuan, Sichuan	10.16	31.02	15.95	11.60	12.97	13.96	13.88	13.68	16.20	12.52	15.19
贵州德江 Dejiang, Guizhou	12.54	24.13	16.34	10.78	12.56	17.52	12.33	13.09	19.72	14.66	15.37
贵州罗甸 Luodian, Guizhou	10.63	24.14	8.54	9.31	10.90	15.57	10.23	12.17	14.78	13.42	12.97
河南西峡 Xixia, Henan	9.04	29.28	13.93	9.06	7.73	12.33	13.11	13.66	15.38	10.48	13.40
陕西宁强 Ningqiang, Shaanxi	10.43	21.47	17.96	8.78	10.53	14.34	12.54	11.36	15.23	11.56	13.42
陕西安康 Ankang, Shaanxi	8.05	19.95	7.91	7.08	9.00	14.78	12.01	10.86	16.20	12.05	11.79
陕西镇巴 Zhenba, Shaanxi	10.72	20.61	15.15	7.12	11.78	14.16	11.99	12.04	17.69	13.11	13.44
甘肃文县 Wenxian, Gansu	9.19	30.25	14.94	10.22	11.45	17.83	11.00	11.30	17.07	13.78	14.70

*FD*, fruit diameter; *PL*, peduncle length; *TKW*, thousand kernel weight; *SL*, seed length; *SW*, seed width; *SWL*, seed wing length; *SWW*, seed wing width; *SWR*, seed width ratio; *SWWR*, seed wing width ratio; *SLSWLR*, seed length and seed wing length ratio.

在种群内的变异系数。其中单个性状在各种群内的平均变异系数与种群间的类似，果柄长的平均变异最大，种子长的平均变异最小。单个性状在各种群内的变异小于种群间的变异。不同种群的平均变异

系数存在差别，其中江西安福种群内种子与果实性状平均变异系数最高为16.73%，福建建阳平均变异系数最小11.48%。建阳种群每个种子与果实性状的变异系数均小于安福种群。这表明安福种群的种实

表型性状变异最为丰富,而建阳种群的变异则最小。

2.2 枫香树种子与果实性状间及其与地理因子和气候因子间的相关分析

表5中可以看出,枫香树果柄与种子千粒重、种子长、种子宽和种翅宽呈极显著正相关,枫香树果柄越大,所含的种子千粒重、种子长、种子宽和种翅宽都随着增大。果柄和种子的性状关联性较强,可以作为种子部分性状筛选的参考条件。果径长与种子长和种子长宽比呈显著正相关,果柄、种子长和种子长宽比三者的表型分化系数<50%,三者变异以种群内为主,其中果柄长的变异系数最大。种子千粒重与种子宽和种翅宽呈极显著正相关,与种子长呈显著正相关。种子长与其他种子与果实性状均存在显著或极显著相关性,其中与种长翅长比呈显著的负相关,说明种子越长,种翅的占比越大。种子宽与种翅宽呈极显著的正相关,与种子长宽比和种翅长宽比呈极显著负相关。种翅长与种长翅长比

呈极显著负相关,相关系数为-0.94。种翅宽与种长翅长比有显著的负相关。种子与果实性状间存在丰富的相关性,种子长可以作为预测其他种子与果实性状的重要参考。

枫香树种群采集点位置为105.17°–122.24° E、18.89°–33.65° N,海拔0–1 450 m,跨越范围较广,各种群所在分布区的气候条件差别明显,如表1所示。种群的地理位置与种子与果实性状相关分析可以发现,经度与种实性状没有显著相关性;纬度与果柄长、种子千粒重和种翅宽呈显著正相关;海拔与种子宽和种翅宽呈显著正相关,与种子长宽比和种翅长宽比呈显著负相关。种子与果实性状在经度这一地理因子上没有明显的变异趋势。结合我国的地理特征,纬度越高种翅宽度越大,说明南方种群的枫香树种翅相对小于北方种群的种翅宽度。果柄长、种子千粒重和种翅宽呈现南-北变异的模式。我国海拔的特点是东低西高,随着经度的减小地势增高。枫香树种子与果实性状与经度没有显著

表5 枫香树种子与果实性状及地理因子的相关分析  
Table 5 Correlation coefficients between the seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* and geographical and environmental variables

相关系数 Correlation coefficients	果柄长 PL (mm)	果径 FD (mm)	千粒重 TKW (g)	种子长 SL (mm)	种子宽 SW (mm)	种翅长 SWL (mm)	种翅宽 SWW (mm)	种子长宽比 SWR	种翅长宽比 SWWR	种长翅长比 SLSWLR
果柄长 PL	1.00	0.12	0.44**	0.46**	0.46**	0.22	0.48**	0.01	-0.04	-0.06
果径 FD		1.00	0.15	0.32*	-0.08	0.15	0.01	0.36*	0.19	-0.02
种子千粒重 TKW			1.00	0.37*	0.51**	0.04	0.48**	-0.13	-0.22	0.10
种子长 SL				1.00	0.34*	0.57**	0.49**	0.57**	0.33*	-0.28*
种子宽 SW					1.00	0.02	0.73**	-0.58**	-0.42**	0.09
种翅长 SWL						1.00	0.43**	0.49**	0.83**	-0.94**
种翅宽 SWW							1.00	-0.21	-0.15	-0.30*
种子长宽比 SWR								1.00	0.66**	-0.30*
种翅长宽比 SWWR									1.00	-0.84**
种长翅长比 SLSWLR										1.00
经度 Longitude (°N)	-0.20	0.09	-0.12	0.02	-0.23	-0.01	-0.17	0.19	0.08	0.03
纬度 Latitude (°E)	0.30*	0.12	0.29*	0.10	0.24	-0.05	0.36*	-0.15	-0.27	0.13
海拔 Altitude (m)	0.23	-0.09	0.24	-0.13	0.33*	-0.08	0.36*	-0.40**	-0.30*	0.05
年平均气温 AMAT (°C)	-0.26	-0.16	-0.25	-0.04	-0.22	0.11	-0.35*	0.19	0.34*	-0.18
1月平均气温 MAT in Jan. (°C)	-0.37*	-0.08	-0.23	-0.05	-0.16	0.16	-0.27	0.11	0.33*	-0.24
7月平均气温 MAT in July (°C)	-0.18	-0.01	-0.11	0.15	-0.19	0.18	-0.11	0.27	0.27	-0.13
无霜期 frost-free season (d)	-0.30*	-0.20	-0.21	-0.18	-0.13	0.04	-0.24	-0.02	0.20	-0.16
年降水量 AP (mm)	-0.21	0.10	-0.17	0.07	-0.25	0.05	-0.23	0.28*	0.20	-0.05

FD, fruit diameter; PL, peduncle long; TKW, thousand kernel weight; SL, seed length; SW, seed width; SWL, seed wing length; SWW, seed wing width; SWR, seed width ratio; SWWR, seed wing width ratio; SLSWLR, seed length and seed wing length ratio; AMAT, annual mean air temperature; MAT in Jan., mean air temperature in January; MAT in July, mean air temperature in July; AP, annual precipitation. \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ .

关系,却与海拔存在关系。表明枫香树在地理分布上,海拔的影响要大于经度的影响。可能是因为枫香树主要分布在海拔1 500 m以下的地方,在经度变异的高海拔地区不存在分布区。在东部经度较高的地区存在海拔1 000 m左右的枫香树分布区,在西部经度较低的地区存在海拔在500 m以下的枫香树分布区。在枫香树变异模式中海拔具有更高的参考价值。可以发现,海拔越高种子宽度、种翅宽度越大,种子长宽比越小,种翅长宽比越小。由相关性分析可以发现,枫香树种子表型在海拔高度上存在渐变趋势。

枫香树种群采集点气候因子与种子与果实性状的相关分析发现,年平均气温与种翅宽显著负相关,与种翅长宽比显著正相关;1月平均气温与果柄显著负相关,与种翅长宽比显著正相关;无霜期与果柄长显著负相关;年降水量与种子长宽比显著正相关。果柄长与1月平均气温和无霜期的相关性表明,无霜期越长和1月平均气温越高,果柄长越短。年平均气温越高,种翅宽越小。年降水量越多,种子长宽比越大。1月平均气温和年平均气温越高,种翅长宽比越大。

2.3 地理气候因子对种子与果实性状影响的逐步回归分析

经过逐步回归分析发现,地理气候因子对部分种子与果实性状的影响不显著,两者间不存在线性关系。去除与地理气候因子不存在线性关系的种子与果实性状,剔除回归过程中存在共线关系的地理气候因子。结果显示(表6),果径和种翅长宽比主要

表6 地理气候因子对种子与果实性状影响的逐步回归分析  
Table 6 Best model for the effects of geographic and climatic factors on seed and fruit traits evaluated by stepwise regressions

种子与果实性状 Seed and fruit trait	回归方程 Regression equations	$R^2$	$F$	$p$	容忍度 Tolerance
果径 $FD (Y_1)$	$Y_1 = -0.101 X_1 + 25.022$	0.135 3	5.322	0.027	1
种子宽 $SW (Y_2)$	$Y_2 = 0.00006 X_2 + 1.8379$	0.111 7	4.274	0.046	1
种翅宽 $SWW (Y_3)$	$Y_3 = 0.0123 X_3 + 1.7559$	0.129 5	5.058	0.031	1
种子长宽比 $SWR (Y_4)$	$Y_4 = -0.0002 X_2 + 4.1477$	0.155 8	6.275	0.017	1
种翅长宽比 $SWWR (Y_5)$	$Y_5 = 0.0203 X_1 + 1.1182$	0.118 6	4.282	0.046	1

$X_1$ , 1月平均气温;  $X_2$ , 海拔;  $X_3$ , 纬度。  
 $X_1$ , mean annual temperature in January;  $X_2$ , altitude;  $X_3$ , latitude.  $FD$ , fruit diameter;  $SW$ , seed width;  $SWW$ , seed wing width;  $SWR$ , seed width ratio;  $SWWR$ , seed wing width ratio.

受1月平均气温影响,种子宽和种子长宽比主要受海拔影响,种翅宽主要受纬度影响。5组回归方程的决定系数 $R^2$ 的大小表明地理气候因子只能解释种实性状11.17%–15.58%的变化。表明种群的地理气候因子对种子与果实性状的影响较小,相关分析结果(表5)显示,在地理空间和气候变化上相关系数较小。因此,可以认为地理气候因子不是枫香树种子与果实变异的主要原因,但对种子与果实性状有一定的影响,并且形成一定的地理变异规律。这在枫香树育种过程中,对种群种子性状的筛选具有一定的指导意义。

2.4 枫香树种子与果实性状的主成分分析

根据各种群枫香树种子与果实性状的平均值,在种群间进行主成分分析。主成分分析中前3个主成分的特征值 $>1$ ,第4个主成分值小于1,提取前三个主成分进行分析(表7)。前3个主成分的累计贡献率为80.22%,第1主成分的贡献率为35.98%,第2主成分的贡献率为30.35%,第3主成分的贡献率为13.89%。果柄长、千粒重、种子长、种翅长和种翅宽的特征向量在第1、2主成分中特征向量均为正值,表明在第1、2主成分中起正向作用。

根据主成分分析结果,在前2个主成分中起正向作用的果径、千粒重、种子长、种翅长和种翅宽的变异系数进行分析。如表1所示,将枫香树采样的种群根据不同区域划分成四类,分别为西南部5个种群、西北部6个种群、东南部8个种群和其他17个种群。如图1所示,对4个部分种群起正向作用地性状变异系数进行分析。可以发现除果柄外,其余4个种子性状的变异系数在四部分中没有差异,说明不同

表7 各主成分的特征值及方差贡献率  
Table 7 The eigenvalues and cumulative variance of different principal components

成分 Com- ponents	初始特征值 Initial eigenvalue			主成分特征值 Principal component eigenvalue		
	特征值 Eigen- values	方差贡 献率 Variance contribution rate (%)	累积方差 贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	特征值 Eigen- values	方差贡 献率 Variance contribution rate (%)	累积方差 贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)
1	3.598	35.980	35.980	3.598	35.980	35.980
2	3.035	30.349	66.330	3.035	30.349	66.330
3	1.389	13.888	80.217	1.389	13.888	80.217
4	0.659	6.593	86.810			
5	0.536	5.362	92.173			

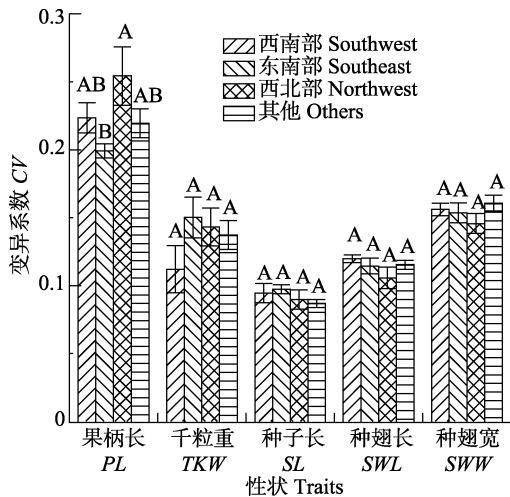


图1 不同分布区枫香种群性状变异系数(平均值±标准误差)。不同字母表示在0.05 水平差异显著。  
Fig. 1 The coefficients of variation (CV) of the seed and fruit traits of different *Liquidambar formosana* populations in different regions (mean ± SE). PL, peduncle long; TKW, thousand kernel weight; SL, seed length; SWL, seed wing length; SWW, seed wing width. Different letters indicated that the differences were significant at the level of  $p = 0.05$ .

方向的种群间种子性状的变异是相似的, 不存在明显的差异。果柄的变异系数在西南部种群和东南部全体间存在显著差异, 西南部种群的变异系数明显小于东南部种群。说明东南部种群枫香树果柄变异更加丰富。东南部种群位于浙江省内。浙江省地理条件复杂, 浙南为山区丘陵地带, 浙北为平原, 南北气候差别明显。果柄与经纬度、1月平均气温和7月平均气温存在显著的相关关系。气候条件和纬度范围会对果柄产生影响。

由相关分析可以发现, 种子长与其他种子与果实性状存在显著的相关关系, 可以以种子长作为代表来分析种实性状在种群间的变化。对种子长在种群间作方差分析, 结果如图2所示。东南部枫香树种群都在浙江省内, 淳安和桐庐种群枫香树种子平均长度最长, 两者间没有显著差异。种群舟山和天台的种子平均长度最短, 两者间也没有显著的差异

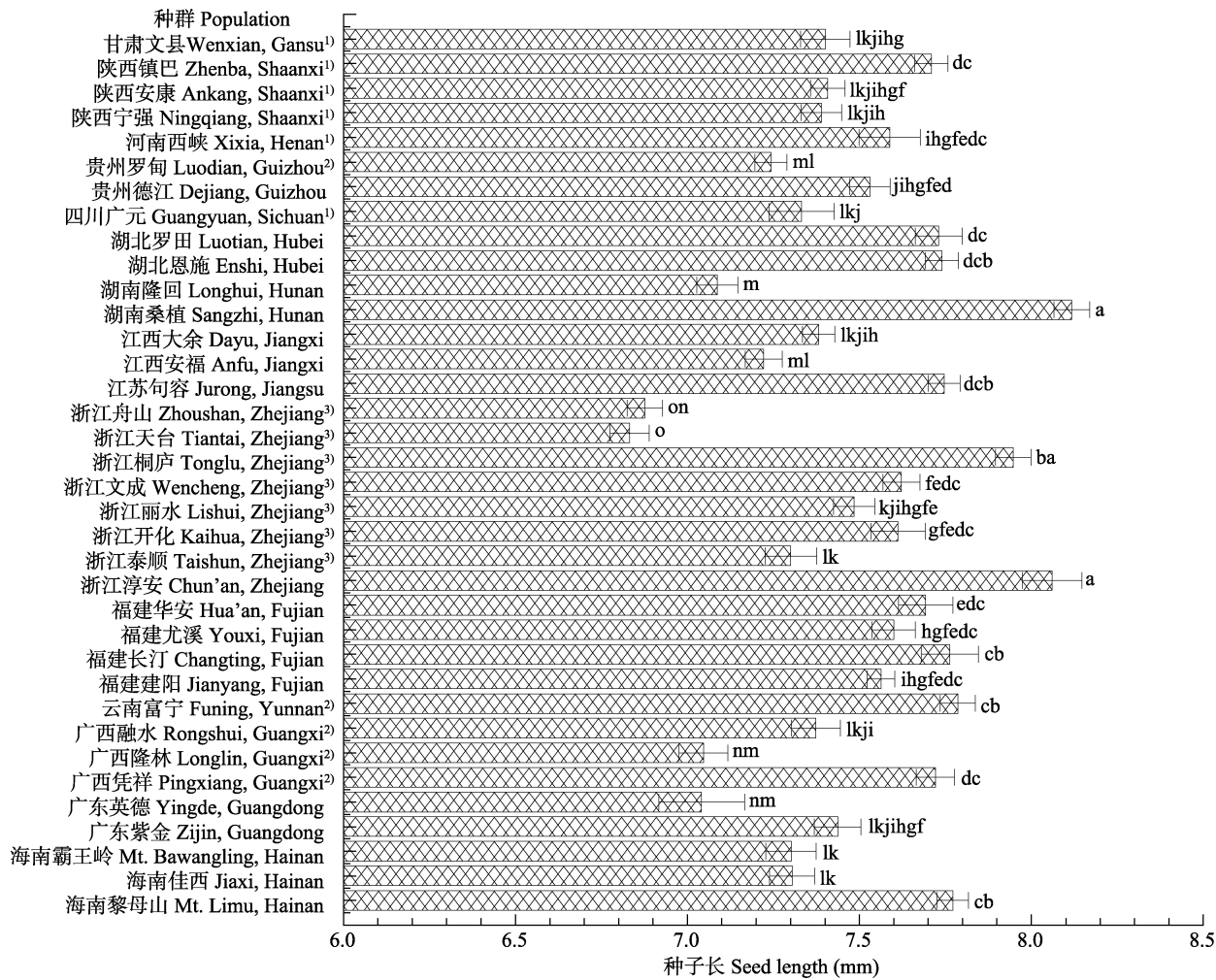


图2 不同种群枫香树种子长(平均值±标准误差)。1)为西北部种群; 2)为西南部种群; 3)为东南部种群。不同小写字母表示在0.05水平差异显著。  
Fig. 2 The seed length of *Liquidambar formosana* from different populations (mean ± SE). 1), southwest *L. formosana* populations; 2), southeast *L. formosana* populations; 3), northwest *L. formosana* populations. Different lowercase letters indicate significant differences at the level of  $p = 0.05$ .



性。文成、丽水、开化、泰顺种群的种子平均长度处于中等,与最长和最短的4个种群存在显著的差异。这表明在浙江省内的枫香树种群,枫香树种子长的变异是复杂多样的,包含了种子最长、中等和最短的三大类种群,可以作为全分布区内的样本进行深入研究。西北部种群,镇巴种群种子长相对较长,与文县、安康、宁强和广元的种群存在显著差异,与西峡种群没有显著差异。西南部种群中,富宁、凭祥种子较长,融水、罗甸中等,隆林种子长最短,三者间均存在显著的差异性。相较于东南部种群来说,西北部种群种子长的变异范围相对较小,但变异仍然很丰富,相近种源间存在显著的差异。因此在种质资源收集上要尽可能地全面,这样才能保证遗传的多样性和丰富性。

### 3 结论和讨论

通过对枫香树36个天然种群种子与果实表型多样性的研究表明,枫香树种子与果实表型性状存在丰富的变异,种群间的变异高于种群内的变异。不同地理气候因子对部分种子与果实性状变异有一定影响,但影响有限。种群间和种群内的丰富变异为枫香树种质资源保育和开发提供了良好的物质基础。

#### 3.1 枫香树种子与果实性状的表型变异

表型变异的多样性是遗传变异和环境共同作用的结果。枫香树种子与果实性状的平均变异系数15.83%,明显高于槐(*Sophora japonica*)(孙荣喜等, 2011)的9.40%、红砂(*Reaumuria songarica*)(苏世平等, 2013)的1.94%、无患子(*Sapindus mukurossi*)(刁松锋等, 2014)的7.34%、火麻树(*Dendrocnide urentissima*)(管俊娇等, 2011)的13.14%。这表明枫香树的种子与果实性状相对具有较为广泛的变异。也可能是由于上述几个种的种群较少,没有完全展示变异范围。本研究采集的枫香树种群基本涵盖了枫香树在我国的主要分布区。由于种群分布地的环境差别较大,加上长期的地理隔离,促进了枫香树种子与果实的丰富变异。植物种群间的变异程度能反映其对不同环境的适应程度,变异系数越大,适应的环境条件越广(辜云杰等, 2009)。枫香树种子与果实的变异系数较高,表明其适应性较强,可适应分布区范围内复杂多变的环境条件。枫香树种子与果实性状的平均表型分化系数为57.55%,高于槐的53.11%、

花楸树(*Sorbus pohuashanensis*)(杨玲等, 2009)的24.08%、皂荚(*Gleditsia sinensis*)(李伟等, 2013)的20.42%,低于火麻树的62.21%、夏蜡梅(*Calycanthus chinensis*)的89.30%。表明枫香树在自然界中种子与果实表型分化处于中等水平,其种群间的分化相对种群内略高,但部分种子性状,如种子宽、种子千粒重等以种群内的变异为主。利用SSR分子标记技术对我国25个枫香树种群进行研究,发现地理隔离并不是形成枫香树遗传差异的基本原因,枫香树遗传多样性更多地存在于种群内的不同个体间(Sun et al., 2016)。对越南安息香(*Styrax tonkinensis*)分子水平(李楠等, 2012)和宏观表型(柳新红, 2011)的研究发现,在分子水平上认为69.60%变异来源于种群内,宏观表型研究则发现59.08%的表型变异来源于种群间。分子和宏观两个水平上存在差异的原因在于表型性状受控于环境因子,种群间环境的异质性会增加表型的变异。因此,在枫香树种子与果实性状变异研究过程中,要充分考虑种群间和种群内两个变异的来源,把握变异的主要来源,有效地筛选适合育种目标的种群单株。

#### 3.2 枫香树种子与果实性状的地理变异

植物种子与果实表型的地理变异通常比较复杂,每个物种都存在不同的变异模式,如红砂种子各表型性状均呈现出以经度、纬度和海拔为主的梯度变异规律(苏世平等, 2013);川西云杉(*Picea likiangensis*)种子与果实性状存在经度和纬度并存的变异模式(辜云杰等, 2009);无患子种子与果实表型性状则不同程度地表现出边缘种群易于分化的特点,多数性状的地理变化规律不连续(刁松锋等, 2014)。根据枫香树种子与果实性状与地理因子相关分析发现,经度与各性状间没有显著的相关关系,纬度与果柄长、种子千粒重和种翅宽在0.05水平上存在显著的正相关关系。这表明枫香树多数种子与果实性状的变异在地理上是不连续的,符合随机变异的模式。种群间变异在较大程度上取决于地理分布区的环境变化(杨继, 1991),形成变异的重要原因可能是由于环境的异质性。逐步线性回归分析发现果径和种翅长宽比主要受1月平均气温影响,种子宽和种子长宽比主要受海拔影响,种翅宽主要受纬度影响。由主成分分析我们可以发现前3个主成分的累计贡献率为80.22% 一般按照特征值>1,累计贡献率大于85%提取主成分。前3个主成分涵盖了10个种子与果

实性状中80.22%的信息,剩下的19.78%没有体现出来,说明枫香树种子与果实表型变异的多方向性和复杂性,并不能用前3个主成分简单地描述,需要对种群间各性状进行进一步的研究。如图2所示,对种子长进行种群间方差分析,Duncan检测结果显示,种子长被分为15组,按照平均值大小用字母a到o表示。分析结果发现在相近种群上,种子长存在差异,进一步表明枫香树种子与果实性状变异的不连续性。

### 3.3 枫香树垂直分布上表型渐变的可能性

种子形态的比值一直被认为是受环境影响较小,且相对较为稳定的一类指标。在对无患子(刁松锋等,2014)研究中,作者使用种子形态指数代替种子长宽比,并且发现种子形态指数的平均变异系数为1.02%,表型分化系数为86.48%,表明主要变异在种群间,但变异范围较小。河西走廊红砂种子长宽比的变异系数只有0.31% (苏世平等,2013),槐种子长宽比变异系数为6.72% (孙荣喜等,2011)。枫香树的种子宽、种翅宽、种子长宽比和种翅长宽比的变异系数分别为11.89%、13.43%、13.31%和20.19%。相比较而言,枫香树这4个表型性状在广大分布区内变异非常丰富。这4个性状与种群的海拔存在显著的相关关系。海拔越高种翅宽度越大,种子长宽比越小,种翅长宽比越小。在不同海拔高度上,种子的大小和种翅的大小都存在一定差异。种子宽和种子长宽比的表型分化系数为8.09%和48.68%,表明枫香树种子宽和种子长宽比的变异主要来源于种群内,种群间相对较小。这一研究证实了枫香树种群内变异的丰富性,这种变异广泛存在于种群内。结合相关分析及回归分析的结果,可以初步认为枫香树在垂直分布上种实表型渐变是可能的。

### 3.4 枫香树种质资源的保育与利用

枫香树是我国亚热带地区重要的乡土树种,集用材、观赏、药用和生态防护多种功能于一身。在多年的经营研究中,已经选育出多个观赏新品种,在其药用开发研究上也取得一定进展。孙海菁等(2012)研究发现,枫香树环境适应的能力较强,为其作为生态恢复树种奠定了坚实的物质基础。本研究发现,枫香树种子与果实的变异较为广泛,变异来源丰富。因此,在枫香树遗传改良过程中,要充分考虑种群间和种群内的变异分布,根据不同的育种目标进行具体分析研究,选择合适的种群单株。鉴

于目前枫香树产业发展以无性系新品种为主,尚未能充分利用自然变异中的有效价值,需要进一步保护枫香树的自然变异源,为枫香树以后的资源评价、良种选育等做好准备。本研究结果对枫香树种质资源收集、遗传多样性保护以及遗传改良工作具有一定的指导意义。

**致谢** 感谢浙江农林大学的樊菲菲和宋斯妤同学在实验数据收集及处理工作中给予的帮助。

### 参考文献

- Bai GH, Zhang YR, Liu YJ, Xin HY, Yan JB, Peng HR, Zhang JX, Li JS (2009). Application of ImageJ analysis software in measuring kernel size of maize seeds. *Journal of Maize Sciences*, 17(1), 147–151. [白光红, 张义荣, 刘弋菊, 邢鸿雁, 严建兵, 彭惠茹, 章建新, 李建生 (2009). ImageJ 图象处理软件在测量玉米籽粒大小中的应用. *玉米科学*, 17(1), 147–151.]
- Cui C, Zhou QY, Wang LJ, Tan ZF, Gong J, Xie XR (2016). Main composition analysis and comprehensive evaluation of the main agronomic traits of *Flax germplasm*. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 38(12), 10–18. [崔翠, 周清元, 王利鹏, 谭尊飞, 龚静, 谢旭容 (2016). 亚麻种质主要农艺性状主成分分析与综合评价. *西南大学学报(自然科学版)*, 38(12), 10–18.]
- Diao SF, Shao WH, Jiang JM, Dong RX, Sun HG (2014). Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1451–1460. [刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 孙洪刚 (2014). 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究. *生态学报*, 34, 1451–1460.]
- Gu YJ, Luo JX, Wu YW, Cao XJ (2009). Phenotypic diversity in natural populations of *Picea balfouriana* in Sichuan, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 33, 291–301. [辜云杰, 罗建勋, 吴远伟, 曹小军 (2009). 川西云杉天然种群表型多样性. *植物生态学报*, 33, 291–301.]
- Guan JJ, Yu H, He L, He YF, Zhang SG, Peng SB, Fan YH (2011). Study on seed phenotype variation of *Dendrocnide urentissima* group. *Journal of Southwest Agriculture*, 24, 1086–1094. [管俊娇, 虞泓, 何露, 和云峰, 张时刚, 彭少波, 范源洪 (2011). 小桐子居群种子表型变异研究. *西南农业学报*, 24, 1086–1094.]
- Hu JZ, Tian Q, Lu XA (2007). Relationship between changes of the pigments content and leaf color changing in *Liquidambar formosana*. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 35(10), 219–223. [胡敬志, 田旗, 鲁心安 (2007). 枫香叶片色素含量变化及其与叶色变化的关系. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 35(10), 219–223.]
- Ji MF, Zhang XW, Han J, Ding DL (2013). Phenotypic diversity

DOI: 10.17521/cjpe.2017.0229

- of cone and seed in natural *Pinus tabulaeformis* populations in China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33, 1898–1905. [姬明飞, 张晓玮, 韩瑾, 丁东粮 (2013). 油松天然群体的种实性状表型多样性研究. 西北植物学报, 33, 1898–1905.]
- Ji YW, Liu YM, Liu YM, Yan C, Liu HD (2015). Antioxidant activity of *Liquidambar formosana* leaves and its storage and freshness of loquat. *Food Science*, 36(4), 226–231. [纪雨薇, 刘亚敏, 刘玉民, 阎聪, 刘宏丁 (2015). 枫香叶分离物抗氧化活性及对枇杷的贮藏保鲜效果. 食品科学, 36(4), 226–231.]
- Jing GZ, Ren HD, Yao XH, Wang KL, Yang SP (2013). Study on phenotypic diversity of seed and fruit in natural populations of *Camellia reticulata*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 37(6), 53–58. [靳高中, 任华东, 姚小华, 王开良, 杨水平 (2013). 滇西腾冲红花油茶天然居群种实表型性状变异分析. 南京林业大学学报(自然科学版), 37(6), 53–58.]
- Leng HN, Chen YT, Rao LB, Duan HP, Shi X, Huang XF (2009). Response difference of NRA, shoot/root ratio and biomass of *Liquidambar formosana* provenances to different nitrogen supplies. *Forest Research*, 22, 190–195. [冷华妮, 陈益泰, 饶龙兵, 段红平, 施翔, 黄秀凤 (2009). 枫香种源生物量和NRA对供氮水平的响应差异. 林业科学研究, 22, 190–195.]
- Li B, Gu WC, Lu BM (2002). A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristic in *Pinus bungeana*. *Biodiversity Science*, 10, 181–188. [李斌, 顾万春, 卢宝明 (2002). 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究. 生物多样性, 10, 181–188.]
- Li N, Liu XH, Li YG, Li HB, Sheng WT, Hui GY, Zheng YQ (2012). Genetic diversity in natural populations of *Styrax tonkinensis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(11), 49–56. [李楠, 柳新红, 李因刚, 李海波, 盛炜彤, 惠刚盈, 郑勇奇 (2012). 白花树天然群体的遗传多样性. 林业科学, 48(11), 49–56.]
- Li W, Lin FR, Zheng YQ, Li B (2013). Phenotypic diversity of pods and seeds in natural populations of *Gleditsia sinensis* in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 61–69. [李伟, 林富荣, 郑勇奇, 李斌 (2013). 皂荚南方天然群体种实表型多样性. 植物生态学报, 37, 61–69.]
- Li XW, Chen QX, Zheng J (2011). *Liquidambar formosana* leaf color change and the relationship between the environmental factors. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, (2), 279–282. [李效文, 陈秋夏, 郑坚 (2011). 枫香秋叶色变化及环境因子的关系. 浙江农业科学, (2), 279–282.]
- Li YG, Liu XH, Ma JW, Shi CG, Zhu GQ (2014). Phenotypic variations in populations of *Phoebe chekiangensis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 1315–1324. [李因刚, 柳新红, 马俊伟, 石从广, 朱光权 (2014). 浙江楠种群表型变异. 植物生态学报, 38, 1315–1324.]
- Li YQ, Li YC, Wu ZZ (2013). Variation in phenotype characters and starch content of *Quercus mongolica* Fisch seed from different provenances. *Forest Research*, 26, 528–532. [厉月桥, 李迎超, 吴志庄 (2013). 不同种源蒙古栎种子表型性状与淀粉含量的变异分析. 林业科学研究, 26, 528–532.]
- Liu XH, Li YG, Zhao X, Shi CG, Sheng WT (2011). Natural group phenotype diversity of *Styrax tonkinensis*. *Forestry Science Research*, 24, 694–700. [柳新红, 李因刚, 赵勋, 石从广, 盛炜彤 (2011). 白花树天然群体表型多样性研究. 林业科学研究, 24, 694–700.]
- Meng XD (2003). *Geographic Variation in Seedling Stage and Genetic Polymorphism of Liquidambar formosana*. Master degree dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. [孟现东 (2003). 枫香苗期地理变异及遗传多态性研究. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.]
- Song JS, Dang ZH, Zhang JP, Wang LM, Li WJ, Zhang Y, Chen F, Zhang Q (2015). Oil *Linum usitatissimum* variety resources agronomic traits of principal components and cluster analysis. *Journal of Southwest Agricultural*, 28, 492–492. [宋军生, 党占海, 张建平, 王利民, 李闻娟, 张瑜, 陈芳, 张琼 (2015). 油用亚麻品种资源农艺性状的主成分及聚类分析. 西南农业学报, 28, 492–497.]
- Su SP, Li Y, Chong PF, Gao Q (2013). Correlation analysis of phenotypic traits of *Reaumuria soongorica* seed in different natural populations in the Gansu Corridor. *Acta Prataculturae Sinica*, 22(1), 87–94. [苏世平, 李毅, 种培芳, 高茜 (2013). 河西走廊不同红砂天然群体种子表型性状相关性研究. 草业学报, 22(1), 87–94.]
- Sun HJ, Wang SH, Chen YT (2012). Response to water logging stress of different five *Liquidambar formosana* provenances. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 36(3), 43–48. [孙海菁, 王树凤, 陈益泰 (2012). 不同枫香种源对淹水胁迫的响应. 南京林业大学学报(自然科学版), 36(3), 43–48.]
- Sun RX, Lin FR, Huang P, Zheng YQ (2016). Moderate genetic diversity and genetic differentiation in the relict tree *Liquidambar formosana* Hance revealed by genetic simple sequence repeat markers. *Front Plant Science*, 7, 1411. DOI: 10.3389/fpls.2016.01411.
- Sun RX, Zheng YQ, Zhang CH, He Y, Zong YC, Yu XD (2011). The study on phenotype variation of seed phenotypes in different groups of *Sophora japonica*. *Journal of Hebei Agricultural University*, 34(3), 65–70. [孙荣喜, 郑勇奇, 张川红, 何燕, 宗亦臣, 于雪丹 (2011). 不同群体国槐种子表型变异研究. 河北农业大学学报, 34(3), 65–70.]
- Wang F (2010). Persistent and advanced reddening of sweet gum leaves after major veins severing. *Journal of Forestry Research*, 21, 465–468.
- Wang HF, Lü GH, Zhou YZ, Cao J (2017). Effects of functional diversity and functional redundancy on the stability

- of desert plant communities under different water and salt gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 7928–7937. [王恒方, 吕光辉, 周耀治, 曹靖 (2017). 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. 生态学报, 37, 7928–7937.]
- Wang J, Yang ZL, Yang X, He ZS (2012). Effects of orientation and canopy oil deformation of fruits and seeds of *Magnolia officinalis*. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28, 385–388. [王洁, 杨志玲, 杨旭, 何正松 (2012). 方位及冠层对厚朴果实和种子形态变异的影响. 生态与农村环境学报, 28, 385–388.]
- Wen CH, Chu FH (2017). A R2R3-MYB gene LfMYB113 is responsible for autumn leaf coloration in Formosan sweet gum (*Liquidambar formosana* Hance). *Plant & Cell Physiology*, 58, 508–521.
- Wen CH, Lin SS, Shih-Shun, Chu FH (2015). Transcriptome analysis of a subtropical deciduous tree: Autumn leaf senescence gene expression profile of Formosan gum. *Plant & Cell Physiology*, 56, 163–174.
- Xie QJ, Xu XY, Zheng JR, Zhong YT (2015). Study on the effect of *Liquidambar formosana* leaf extract on K562 cells. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 38, 1493–1495. [谢琼琚, 徐仙赞, 郑金荣, 钟有添 (2015). 枫香树叶提取物对K562细胞作用的研究. 中药材, 38, 1493–1495.]
- Xu Y, Deng LL, Zhou L, Cai NH, Luo YR, Li DL, Duan AA, Xu YL (2015). Seeds and cones phenotypic variation among populations of *Pinus yunnanensis* at different altitudes. *Seed*, 34(11), 70–79. [徐杨, 邓丽丽, 周丽, 蔡年辉, 罗一然, 李德龙, 段安安, 许玉兰 (2015). 云南松不同海拔天然群体种实性状表型多样性研究. 种子, 34(11), 70–79.]
- Yan C, Liu YM, Liu YM, Xu NT, Zhou AJ (2013). Effects of treatment with secondary metabolic compounds of *Liquidambar formosana* leaves on post-harvest physiological and biochemical characteristics of plum fruits (*Prunus salicina*). *Food Science*, 34(24), 268–272. [阎聪, 刘玉民, 刘亚敏, 徐娜婷, 周安静 (2013). 枫香叶次生代谢物对李采后品质及生理特性的影响. 食品科学, 34(24), 268–272.]
- Yang J (1991). Intraspecific variation in plant and the exploring methods. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 9, 185–195. [杨继 (1991). 植物种内形态变异的机制及其研究方法. 武汉植物学研究, 9, 185–195.]
- Yang L, Shen HL, Liang LD, Cui XT, Wang AZ (2009). Phenotypic diversity of the fruit and seed of wild *Sorbus pohuashanensis* in different growing areas. *Journal of Northeast Forestry University*, 37(2), 8–10. [杨玲, 沈海龙, 梁立东, 崔晓涛, 王爱芝 (2009). 不同产区野生花楸果实和种子的表型多样性. 东北林业大学学报, 37(2), 8–10.]
- Zhang Q, Xue JH, Liu CG (2011). Effects of complex pollution of CTAB and Cd<sup>2+</sup> on the growth of Chinese sweetgum seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 5824–5831.
- Zhao XY, Wang JH, Zhang JF, Zhang SG, Zhang JG, Ma JW (2008). Study on phenotypic traits and germination characters of four taxons of *Catalpa ovata* genus seed. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 36(12), 149–154. [赵曦阳, 王军辉, 张金凤, 张守攻, 张建国, 马建伟 (2008). 梓树属4个种种子表型性状和发芽特性的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36(12), 149–154.]
- Zhou LY, Wang YQ, Zhang L, Hu ZM (2009). Quantitative classification of phenotypic characters of 46 species in *Rhododendron*. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(8), 67–75. [周兰英, 王永清, 张丽, 胡泽明 (2009). 46种杜鹃花属植物表型性状的数量分类. 林业科学, 45(8), 67–75.]

责任编辑: 何维明 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈  
听语音, 看问答