

不同种源香椿无性系苗期表型性状变异及其与地理-气候因子的相关性

余青富^{1a,1b,2}, 王正德^{1a,1b,2}, 葛婉婷³, 王军辉², 麻文俊², 辛培尧^{1a,1b,①}

(1. 西南林业大学: a. 国家林业和草原局西南风景园林工程技术研究中心,

b. 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南 昆明 650224;

2. 中国林业科学研究院林业研究所 林木遗传育种全国重点实验室, 北京 100091; 3. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 以香椿(*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.) 12个种源 142个无性系为研究对象, 研究了不同种源香椿无性系苗期的表型性状变异, 探究其表型性状间及表型性状与地理-气候因子间的相关性。结果表明: 香椿无性系苗期表型性状在种源间和种源内差异极显著($P<0.01$), 且种源内的变异大于种源间的变异。12个种源香椿无性系苗期表型性状的平均变异系数变幅为 18.17%~26.34%, 变异系数较大。聚类分析结果表明: 在欧氏距离 17 处, 供试的 12 个香椿种源被分成 3 类, 3 个类群之间具有明显的表型分化, 但聚类结果与地理分布无明显相关性。相关性分析结果表明: 香椿无性系苗期的树皮颜色与苗高、地径分别呈显著($P<0.05$)和极显著负相关, 与叶痕长和叶痕宽的相关性不显著; 苗高与经度呈显著负相关, 与海拔呈显著正相关; 地径与平均气温日较差呈显著负相关, 与等温性呈极显著负相关。综上所述, 不同种源香椿无性系苗期表型性状变异丰富, 表型性状变异主要来源于种源内, 具有优良种质资源的选择潜力, 且在所收集的种源范围内, 苗高的地理变异模式以经度和海拔变异为主。

关键词: 香椿; 表型性状; 表型变异; 地理-气候因子

中图分类号: Q944; Q948.11; S644.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)05-0013-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.05.02

Phenotypic trait variations of *Toona sinensis* clones from different provenances at seedling stage and their correlations with geographical-climatic factors

YU Qingfu^{1a,1b,2}, WANG Zhengde^{1a,1b,2}, GE Wanting³, WANG Junhui², MA Wenjun², XIN Peiyao^{1a,1b,①} (1. Southwest Forestry University: a. Southwest Landscape Architecture Engineering Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, b. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Kunming 650224, China; 2. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(5): 13-21

Abstract: Taking 142 clones from 12 provenances of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. as research objects, the phenotypic trait variations of *T. sinensis* clones from different provenances at seedling stage were investigated, and the correlations between their phenotypic traits and between phenotypic traits and geographical-climatic factors were explored. The results show that there are extremely significant differences ($P<0.01$) in phenotypic traits of *T. sinensis* clones at seedling stage both among provenances and within provenance, and the variation within provenance is greater than that among provenances. The

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2200305-3)

作者简介: 余青富(1999—), 男, 云南会泽人, 硕士研究生, 主要从事香椿氮高效型优良无性系选育方面的研究。

①通信作者 E-mail: xpytgx@163.com

引用格式: 余青富, 王正德, 葛婉婷, 等. 不同种源香椿无性系苗期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, 2024, 33(5): 13-21.

range of average coefficients of variation of phenotypic traits of *T. sinensis* clones from 12 provenances at seedling stage is 18.17%–26.34%, and the coefficients of variation are relatively large. The cluster analysis result shows that at the Euclidean distance of 17, 12 test provenances of *T. sinensis* are divided into three groups, and there are evident phenotypic differentiations among the three groups, but there is no obvious correlation between the clustering results and the geographical distribution. The correlation analysis result shows that bark color of *T. sinensis* clones at seedling stage shows significant ($P < 0.05$) and extremely significant negative correlations with seedling height and ground diameter, respectively, but has no significant correlations with leaf scar length and leaf scar width; seedling height shows a significant negative correlation with longitude, and a significant positive correlation with elevation; ground diameter shows a significant negative correlation with mean temperature diurnal range, and an extremely significant negative correlation with isothermality. In conclusion, the phenotypic trait variations of *T. sinensis* clones from different provenances at seedling stage are rich and mainly originate within provenance, which indicates the potential for selection of superior germplasm resources. Within the range of provenances collected, the geographical variation pattern of seedling height is dominated by variations in longitude and elevation.

Key words: *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.; phenotypic trait; phenotypic variation; geographical-climatic factor

香椿[*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]又名香桩头、大红椿树等,为楝科(Meliaceae)香椿属[*Toona* (Endl.) M. Roem.]植物^[1],是目前世行造林、储备林建设的主要造林树种之一^[2]。香椿在中国分布于东经 $100^{\circ} \sim 122^{\circ}$ 、北纬 $25^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 之间^[3],据今已有2 000多年的栽培历史^[4]。香椿因其心材为红色,被誉为“中国桃花心木”。香椿材质优良、纹理美观、耐腐蚀且具有特殊的香味,广泛用于家具制造、船舶建造和房屋建筑。国内有关香椿的研究多集中在药用^[5-6]、食用^[7-8]和遗传改良^[9-10]等方面。孙鸿有等^[11]最早在国内开展香椿遗传改良研究,认为香椿种源的地理变异基本上是与纬度相平行的南北倾斜的连续变异。刘军等^[12]和张海燕^[3]开展了香椿种源实验,揭示了香椿生长性状与原种源地生态因子的相关性,认为苗期性状的地理变异模式以纬度变异为主。已有的针对香椿种质资源表型性状变异的研究,多集中于苗期叶片和种实以及天然林根系性状多样性^[13-15]等方面,而关于叶痕和树皮颜色等表型性状的地理变异规律方面的研究较少。树皮是木本植物根、茎和枝的保护组织及营养器官^[16],根据树皮颜色可以较好地预测木材色泽、密度大小和径生长情况^[17]。负慧玲等^[18]对楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey.)无性系表型识别特征和遗传变异的研究结果表明:楸树无性系的树高和胸径与叶痕密度呈极显著负相关,利用皮孔、叶痕和树皮3种表型性状能够简单地识别楸树优良无性系。探究叶痕和树皮颜色等表型性状在空间地理分布上的遗传变异模式及变异规律能更全面地反

映香椿的遗传特性,对香椿的遗传改良、多样性保护和资源管理具有重要意义。

表型性状变异是生物遗传变异最直接的表现,是基因型与环境因子共同作用的结果,当生长环境随地理分布发生改变,植物表型性状和基因频率等也会发生变化,进而适应或应对环境变化^[19],并为自然选择和进化提供基础^[20]。将表型性状与苗期性状相结合,评估表型性状的变异以及表型性状变异对地理-气候因子的响应可以系统地揭示群落间的遗传变异规律和植物对不同环境的适应水平^[21]。徐肇友等^[22]以17个产地170个木荷(*Schima superba* Gardner et Champ.)优树无性系为研究对象,探讨其生长性状、形质性状和叶片性状的变异规律及各表型性状与地理-气候因子之间的相关性,认为木荷优树无性系各表型性状在产地间和产地内均具有极显著差异,生长性状与纬度存在负相关关系,形质性状和叶片性状与经度存在负相关关系。孙安然等^[23]研究了4个产地三花槭(*Acer triflorum* Komarov)繁殖体表型性状的变异规律,认为三花槭繁殖体表型性状存在丰富的变异,且主要受海拔和年平均气温2个环境因子的影响。Gong等^[24]的研究结果表明:影响杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)叶片、果实和种子表型的主要环境因子是年平均气温和年平均降水量。因此,在广泛的生态和气候梯度上研究表型变异规律是理解表型表达和变异模式的有力依据^[25],有利于物种遗传工作的进一步开展。

鉴于此,本研究通过比较12个种源142个香椿

无性系幼苗的表型性状差异,分析苗期表型性状间以及表型性状与地理-气候因子间的相关性,并进行了巢式方差分析、变异分析和聚类分析,以期揭示香椿表型性状多样性及变异来源,探究香椿无性系表型的地理变异规律,为香椿优异种质资源的保存、收集和引种利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地位于河南省南阳市卧龙区潦河镇农业示范园,东经 112° 33'、北纬 33° 01',年降水量 805.8

mm,无霜期 232 d,年蒸发量 1 523.3 mm,年平均气温 14.9 °C,年日照时数 2 216 h,沙壤土,肥力中等。

1.2 材料

供试香椿 12 个种源 142 个优树无性系产自河南、甘肃、陕西、山东、湖南和江西,于 2011 年至 2013 年期间收集。用枝剪取植株中上部当年生枝条为接穗,砧木为株龄 1 a 的香椿实生苗,嫁接前将砧木统一平茬至 20 cm,采用芽接的方式嫁接于实生苗干上。采用随机区组设计,每小区 9 株,每个无性系 4 个小区,即为 4 次重复。香椿 12 个种源 142 个无性系的编号见表 1。

使用 GPS 仪测定香椿 12 个种源地的地理坐标

表 1 香椿 12 个种源 142 个无性系的编号
Table 1 Codes of 142 clones from 12 provenances of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.

种源 ¹⁾ Provenance ¹⁾	无性系编号 Clone code
WC	LS1-1, LS1-2, LS1-3, LS1-4, LS1-6, LS1-7, LS1-8, LS1-9, LS2-1, LS2-2, LS2-3, LS2-4, LS3-1, LS3-2, LS3-3, LS3-4
NZ	NZ1-4, NZ3-2
XC1	XC1-3, XC2-1, XC2-2, XC2-3, XC2-4, XC3-1, XC3-2, XC3-4, XC5-1, XC5-2, XC5-3, XC5-4, XC5-5, XC5-6, XC5-7, XC5-10, XC6-1, XC9-1, XC11-1, XC14-1, XC15-1, XC18-2, XC19-2, XC20-1, XC21-1, XC23-2, XC24-1, XC24-2, XC24-3, XC24-4, XC24-5, XC24-6, XC24-7, XC24-8, XC24-10, XC25-2, XC26-1, XC26-2, XC27-1, XC27-2, XC28-1, XC28-2, XC28-4, XC28-5, XC28-6, XC28-7, XC28-8, XC28-9, XC28-10, XC29-1, XC29-2, XC29-3, XC29-4, XC29-6, XC29-7, XC29-8, XC29-9, XC29-10, XC30-2, XC31-1, XC31-2, XC33-1, XC34-1, XC34-2
XX	XX1-2, XX2-2, XX13-1, XX13-3
LS	ZJ26-1, ZJ26-2, ZJ26-3, ZJ26-4, ZJ26-5, ZJ26-6, ZJ26-7, ZJ26-8, ZJ26-10
QZ	ZJ5-1, ZJ5-2, ZJ5-4, ZJ5-6, ZJ5-7
XC2	ZJ16-1, ZJ16-2, ZJ16-3, ZJ16-4, ZJ16-5, ZJ16-6, ZJ16-7, ZJ16-8, ZJ16-9, ZJ16-10, ZJ17-1, ZJ17-2, ZJ18-1, ZJ18-3, ZJ18-4, ZJ18-5, ZJ18-6, ZJ18-7, ZJ18-8, ZJ18-9, ZJ18-10
LX	ZJ19-1, ZJ19-2, ZJ19-3, ZJ19-4, ZJ19-6, ZJ19-8, ZJ19-9, ZJ19-10
XN	ZJ30-2, ZJ30-4
HS	ZJ33-1, ZJ33-2, ZJ33-4
SZ	ZJ35-1, ZJ35-2, ZJ35-3, ZJ35-4
YZ	ZJ32-1, ZJ32-2, ZJ32-3, ZJ32-4

¹⁾ WC: 河南宛城 Wancheng of Henan; NZ: 河南南召 Nanzhao of Henan; XC1: 河南浙川 Xichuan of Henan; XX: 河南西峡 Xixia of Henan; LS: 河南卢氏 Lushi of Henan; QZ: 甘肃秦州 Qinzhou of Gansu; XC2: 陕西新城 Xincheng of Shaanxi; LX: 山东历下 Lixia of Shandong; XN: 湖南新宁 Xinning of Hunan; HS: 湖南衡山 Hengshan of Hunan; SZ: 湖南桑植 Sangzhi of Hunan; YZ: 江西袁州 Yuanzhou of Jiangxi.

信息(经度、纬度和海拔)。香椿 12 个种源地的地理-气候因子从 WorldClim 下载中心 (<http://www.worldclim.org>) 获取(表 2)。

1.3 方法

每个无性系每个小区随机选择 5 株进行表型性状测定。使用测高杆(精度 0.01 m)测量苗高。使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量地径。在植株距离地面 1.0 m 处随机选择 4 个叶痕,使用游标卡尺测量叶痕长和叶痕宽。使用劳尔比色卡对树皮颜色进行比色,共有灰绿色、灰褐色、褐绿色、褐色、褐红色和红色

6 种颜色,分别赋值 1、2、3、4、5、6,经 \sqrt{x} 转换后进行统计分析,其中, x 为树皮颜色赋值^[26]。

1.4 数据统计分析

利用 EXCEL 2010 软件进行数据统计和图表制作;利用 SPSS 22.0 统计分析软件进行巢式方差分析、多重比较(Duncan's 新复极差法)、变异分析、Pearson 相关性分析和聚类分析(系统聚类法),其中,参照解孝满等^[27]的方法计算表型变异系数,参照许玉兰等^[28]的方法将数据进行标准化转换后再进行聚类分析。

表2 香椿12个种源地的地理-气候因子

Table 2 Geographical-climatic factors of 12 provenances of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.

种源 ¹⁾ Provenance ¹⁾	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	年降水量/mm Annual precipitation	无霜期/d Frost-free period	年平均气温/℃ Annual mean temperature	平均气温日较差/℃ Mean temperature diurnal range	气温年较差/℃ Temperature annual range	等温性 Isothermality
WC	E112°33'00"	N33°01'12"	127	904	227	15.88	9.73	34.1	28.54
NZ	E112°25'48"	N33°30'00"	204	807	219	15.21	10.65	34.8	30.60
XC1	E111°28'48"	N33°07'48"	177	879	228	16.10	10.61	34.7	30.57
XX	E111°28'48"	N33°16'48"	223	832	236	15.77	10.83	34.8	31.13
LS	E111°03'00"	N34°03'00"	556	665	255	13.51	11.63	36.5	31.87
QZ	E105°43'12"	N34°34'48"	1 167	612	185	11.30	10.26	34.4	29.82
XC2	E110°21'00"	N33°42'36"	723	743	218	13.66	10.23	33.7	30.34
LX	E116°58'48"	N36°40'12"	31	752	235	14.11	9.07	37.0	24.53
XN	E110°51'00"	N26°25'48"	304	1 431	291	17.35	7.44	29.6	25.14
HS	E112°52'12"	N27°13'48"	51	1 441	286	18.06	7.82	31.0	25.24
SZ	E110°09'00"	N29°24'00"	294	1 400	240	16.82	7.97	30.3	26.32
YZ	E114°22'48"	N27°48'00"	108	1 482	272	17.69	8.23	31.2	26.36

¹⁾ WC: 河南宛城 Wancheng of Henan; NZ: 河南南召 Nanzhao of Henan; XC1: 河南浙川 Xichuan of Henan; XX: 河南西峡 Xixia of Henan; LS: 河南卢氏 Lushi of Henan; QZ: 甘肃秦州 Qinzhou of Gansu; XC2: 陕西新城 Xincheng of Shaanxi; LX: 山东历下 Lixia of Shandong; XN: 湖南新宁 Xinning of Hunan; HS: 湖南衡山 Hengshan of Hunan; SZ: 湖南桑植 Sangzhi of Hunan; YZ: 江西袁州 Yuanzhou of Jiangxi.

2 结果和分析

2.1 香椿无性系苗期表型性状的巢式方差分析

香椿无性系苗期表型性状的巢式方差分析结果见表3。结果显示:在种源间和种源内,香椿无性系苗期的苗高、地径、叶痕长、叶痕宽、叶痕长宽比和树皮颜色存在极显著差异($P<0.01$)。香椿无性系苗期表型性状在种源内的方差分量百分比大于种源间,说明香椿无性系苗期表型性状的变异主要来源于种源内,且种源内各表型性状的方差分量百分比均超过60%,说明这6个表型性状在种源内变异较大,易受环境因子的影响。

2.2 香椿无性系苗期表型性状比较和变异系数分析

2.2.1 表型性状比较 不同种源香椿无性系苗期的表型性状见表4。结果表明:不同种源间香椿无性系苗期的苗高和地径变幅较大,分别为1.43~2.26 m和19.51~26.77 mm,其中,产自湖南新宁的无性系苗高最高,产自山东历下的无性系地径最大。产自湖南新宁的无性系叶痕长和叶痕宽最大,分别为19.75 mm和15.93 mm。产自河南南召的无性系苗高(1.43 m)、地径(19.51 mm)、叶痕长(13.68 mm)和叶痕宽(12.13 mm)最小,但是树皮颜色值最大(2.09),其树皮颜色偏褐色,且以上性状与其余11个种源的无性系间总体存在显著差异($P<0.05$)。产自河南西峡的无性系叶痕长宽比最大(1.35),产自湖南桑植的无性

表3 香椿无性系苗期表型性状的巢式方差分析

Table 3 Nested variance analysis on phenotypic traits of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones at seedling stage

表型性状 ¹⁾ Phenotypic trait ¹⁾	种源间 ²⁾ Among provenances ²⁾					种源内 ²⁾ Within provenance ²⁾				
	SS	df	MS	PVC/%	F值 F value	SS	df	MS	PVC/%	F值 F value
<i>h</i>	23.032	11	2.094	25.12	11.550 **	295.686	141	2.097	74.88	11.567 **
<i>d</i>	2 804.828	11	254.984	33.88	6.469 **	18 020.996	141	127.808	66.12	3.242 **
<i>l</i>	2 239.905	11	203.628	34.27	30.876 **	13 165.902	141	93.375	65.73	14.159 **
<i>b</i>	1 093.321	11	99.393	39.86	17.434 **	5 774.299	141	40.952	60.14	7.183 **
<i>l/b</i>	5.069	11	0.461	32.83	7.668 **	80.353	141	0.570	67.17	9.482 **
C	29.242	11	2.658	18.72	47.918 **	230.041	141	1.631	81.28	29.408 **

¹⁾ *h*: 苗高 Seedling height; *d*: 地径 Ground diameter; *l*: 叶痕长 Leaf scar length; *b*: 叶痕宽 Leaf scar width; *l/b*: 叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width; C: 树皮颜色 Bark color.

²⁾ SS: 平方和 Sum of square; *df*: 自由度 Degree of freedom; MS: 均方 Mean square; PVC: 方差分量百分比 Percentage of variance component. **: $P<0.01$.

表 4 不同种源香椿无性系苗期的表型性状 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
 Table 4 Phenotypic traits of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones from different provenances at seedling stage ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

种源 ²⁾ Provenance ²⁾	苗高/m Seedling height	地径/mm Ground diameter	叶痕长/mm Leaf scar length	叶痕宽/mm Leaf scar width	叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width	树皮颜色 Bark color
WC	1.98±0.51bcd	25.92±5.97ab	17.90±3.44b	14.23±2.41de	1.28±0.26abc	1.73±0.46def
NZ	1.43±0.36e	19.51±4.88d	13.68±2.34e	12.13±1.91h	1.15±0.23de	2.09±0.34a
XC1	2.02±0.55bcd	24.40±6.42bc	16.08±3.34c	13.84±2.50ef	1.19±0.29cde	1.90±0.37b
XX	1.87±0.49d	23.06±5.42c	16.65±3.10c	13.08±3.24fg	1.35±0.44a	1.80±0.50bcde
LS	2.12±0.47ab	24.50±6.88bc	16.77±3.09c	14.33±2.94cde	1.21±0.27cde	1.72±0.22ef
QZ	2.10±0.40bc	25.32±6.03ab	18.08±3.33b	15.25±2.04ab	1.20±0.27cde	1.82±0.13bcde
XC2	2.03±0.52bcd	25.18±7.24abc	16.32±2.89c	14.04±2.89de	1.20±0.27cde	1.79±0.21bcde
LX	1.93±0.47cd	26.77±7.11a	15.03±2.39d	12.49±2.41gh	1.23±0.21bcd	1.55±0.45g
XN	2.26±0.40a	25.88±6.94ab	19.75±2.57a	15.93±3.26a	1.30±0.36ab	1.63±0.47fg
HS	1.93±0.49cd	24.59±6.87abc	16.75±3.90c	13.78±3.91ef	1.28±0.38abc	1.88±0.21bcde
SZ	1.98±0.46bcd	24.80±7.00abc	16.06±3.18c	14.84±3.45bed	1.13±0.30e	1.84±0.26bcde
YZ	1.96±0.53bcd	25.59±7.15ab	16.94±2.67c	15.08±2.84bc	1.17±0.31de	1.78±0.42cde

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同种源间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different provenances.

²⁾ WC: 河南宛城 Wancheng of Henan; NZ: 河南南召 Nanzhao of Henan; XC1: 河南淅川 Xichuan of Henan; XX: 河南西峡 Xixia of Henan; LS: 河南卢氏 Lushi of Henan; QZ: 甘肃秦州 Qinzhou of Gansu; XC2: 陕西新城 Xincheng of Shaanxi; LX: 山东历下 Lixia of Shandong; XN: 湖南新宁 Xinning of Hunan; HS: 湖南衡山 Hengshan of Hunan; SZ: 湖南桑植 Sangzhi of Hunan; YZ: 江西袁州 Yuanzhou of Jiangxi.

系叶痕长宽比最小 (1.13), 说明产自河南西峡的无性系叶痕较狭长, 而产自湖南桑植的无性系叶痕较宽。

2.2.2 变异系数分析 不同种源香椿无性系苗期表型性状的变异系数见表 5。结果表明: 12 个种源香椿无性系苗期的 6 个表型性状的平均变异系数变幅为 18.17%~26.34%, 其中, 地径的平均变异系数最大, 其次为叶痕长宽比, 叶痕长和树皮颜色的平均变异系数较小。不同种源香椿无性系苗高的变异系数变幅为 17.62%~27.31%, 其中, 产自河南淅川的无性系苗高变异系数最大, 且除产自湖南新宁和甘肃秦州的无性系外, 其余 10 个种源无性系苗高的变异系数均超过 20%。不同种源香椿无性系地径的变异系数变幅为 23.05%~28.74%, 其中, 产自陕西新城的无性系地径变异系数最大, 产自河南宛城的无性系地径变异系数最小。不同种源香椿无性系叶痕长和叶痕宽的变异系数变幅分别为 13.01%~23.26% 和 13.36%~28.40%, 其中, 产自湖南衡山的无性系叶痕长和叶痕宽的变异系数最大, 产自湖南新宁的无性系叶痕长和产自甘肃秦州的无性系叶痕宽的变异系数最小。不同种源香椿无性系叶痕长宽比的变异系数变幅为 17.46%~32.51%, 其中, 产自河南西峡和湖南衡山的无性系叶痕长宽比变异系数较大 (大于或等于 30%), 且除产自山东历下和河南南召的无性系外, 其余 10 个种源无性系叶痕长宽比的变异系数均超过 20%。不同种源香椿无性系树

皮颜色的变异系数差异较大, 变幅为 6.91%~28.76%, 其中, 产自山东历下和湖南新宁的无性系树皮颜色变

表 5 不同种源香椿无性系苗期表型性状的变异系数
 Table 5 Coefficient of variation of phenotypic traits of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones from different provenances at seedling stage

种源 ¹⁾ Provenance ¹⁾	各表型性状的变异系数/% ²⁾ Coefficient of variation of each phenotypic trait ²⁾					
	<i>h</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>l/b</i>	<i>C</i>
WC	25.87	23.05	19.20	16.91	20.51	26.24
NZ	25.45	24.99	17.08	15.76	19.90	16.08
XC1	27.31	26.31	20.78	18.08	24.74	19.21
XX	26.10	23.52	18.63	24.75	32.51	27.59
LS	22.23	28.10	18.45	20.55	22.17	13.02
QZ	19.06	23.82	18.43	13.36	22.45	6.91
XC2	25.74	28.74	17.73	20.56	22.65	11.90
LX	24.04	26.57	15.92	19.25	17.46	28.76
XN	17.62	26.80	13.01	20.48	27.94	28.75
HS	25.47	27.94	23.26	28.40	30.00	10.96
SZ	23.40	28.24	19.77	23.23	26.61	14.01
YZ	26.91	27.94	15.78	18.84	26.44	23.62
平均值 Average	24.10	26.34	18.17	20.01	24.45	18.92

¹⁾ WC: 河南宛城 Wancheng of Henan; NZ: 河南南召 Nanzhao of Henan; XC1: 河南淅川 Xichuan of Henan; XX: 河南西峡 Xixia of Henan; LS: 河南卢氏 Lushi of Henan; QZ: 甘肃秦州 Qinzhou of Gansu; XC2: 陕西新城 Xincheng of Shaanxi; LX: 山东历下 Lixia of Shandong; XN: 湖南新宁 Xinning of Hunan; HS: 湖南衡山 Hengshan of Hunan; SZ: 湖南桑植 Sangzhi of Hunan; YZ: 江西袁州 Yuanzhou of Jiangxi.

²⁾ *h*: 苗高 Seedling height; *d*: 地径 Ground diameter; *l*: 叶痕长 Leaf scar length; *b*: 叶痕宽 Leaf scar width; *l/b*: 叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width; *C*: 树皮颜色 Bark color.

异系数较大(大于 28%),产自甘肃秦州的无性系树皮颜色变异系数最小,其余 9 个种源无性系树皮颜色的变异系数均超过 10%。

2.3 香椿无性系苗期表型性状间的相关性分析

香椿无性系苗期表型性状间的相关系数见表 6。结果表明:香椿无性系苗期的苗高与地径呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与叶痕宽呈显著 ($P<0.05$) 正相关,与树皮颜色呈显著负相关;地径与树皮颜色呈极显著负相关;叶痕长与叶痕宽呈极显著正相关,与叶痕长宽比呈显著正相关。树皮颜色与叶痕间存在一定的负相关关系,但相关性未达到显著水平。

表 6 香椿无性系苗期表型性状间的相关系数¹⁾
Table 6 Correlation coefficient between phenotypic traits of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones at seedling stage¹⁾

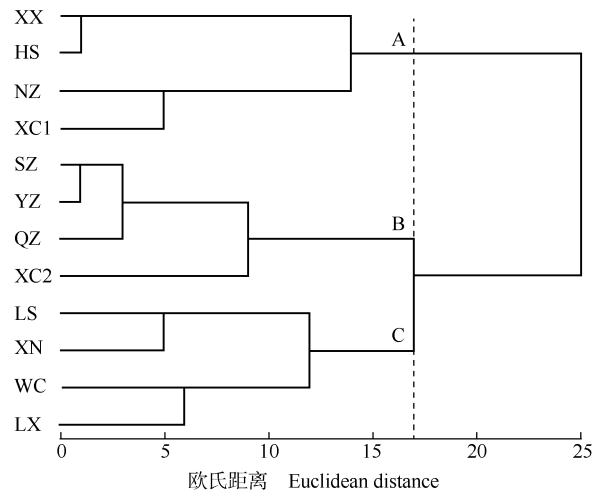
表型性状 Phenotypic trait	相关系数 Correlation coefficient					
	<i>h</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>l/b</i>	<i>C</i>
<i>h</i>	1.000					
<i>d</i>	0.806 **	1.000				
<i>l</i>	0.444	0.312	1.000			
<i>b</i>	0.629 *	0.395	0.844 **	1.000		
<i>l/b</i>	0.049	0.033	0.629 *	0.177	1.000	
<i>C</i>	-0.595 *	-0.790 **	-0.304	-0.234	-0.238	1.000

¹⁾ *h*: 苗高 Seedling height; *d*: 地径 Ground diameter; *l*: 叶痕长 Leaf scar length; *b*: 叶痕宽 Leaf scar width; *l/b*: 叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width; *C*: 树皮颜色 Bark color. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

2.4 基于苗期表型性状不同种源香椿无性系的聚类分析

基于苗期表型性状不同种源香椿无性系的聚类图见图 1。结果表明:在欧氏距离 17 处,供试 12 个香椿种源分成 A、B 和 C 3 类,其中,A 类包括河南西峡、湖南衡山、河南南召和河南浙川 4 个种源,B 类包括湖南桑植、江西袁州、甘肃秦州和陕西新城 4 个种源,C 类包括河南卢氏、湖南新宁、河南宛城和山东历下 4 个种源。

基于上述聚类结果,各类群香椿无性系苗期表型性状的均值见表 7。结果表明:A 类香椿无性系苗期苗高、地径、叶痕长和叶痕宽的均值较小(分别为 1.81 m、22.89 mm、15.79 mm 和 13.21 mm),但叶痕长宽比和树皮颜色的均值较大(分别为 1.24 和 1.92),说明该类香椿无性系生长较缓慢,叶痕较狭长,树皮颜色偏褐色。B 类香椿无性系苗期叶痕宽的均值最大(14.80 mm),叶痕长宽比的均值最小(1.18),说明



WC: 河南宛城 Wancheng of Henan; NZ: 河南南召 Nanzhao of Henan; XC1: 河南浙川 Xichuan of Henan; XX: 河南西峡 Xixia of Henan; LS: 河南卢氏 Lushi of Henan; QZ: 甘肃秦州 Qinzhou of Gansu; XC2: 陕西新城 Xincheng of Shaanxi; LX: 山东历下 Lixia of Shandong; XN: 湖南新宁 Xinning of Hunan; HS: 湖南衡山 Hengshan of Hunan; SZ: 湖南桑植 Sangzhi of Hunan; YZ: 江西袁州 Yuanzhou of Jiangxi.

图 1 基于苗期表型性状不同种源香椿无性系的聚类图
Fig. 1 Cluster diagram of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones from different provenances based on phenotypic traits at seedling stage

表 7 不同类群香椿无性系苗期表型性状的均值
Table 7 Averages of phenotypic traits of different groups of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones at seedling stage

类群 Group	各表型性状的均值 ¹⁾ Average of each phenotypic trait ¹⁾					
	<i>h/m</i>	<i>d/mm</i>	<i>l/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>l/b</i>	<i>C</i>
A	1.81	22.89	15.79	13.21	1.24	1.92
B	2.02	25.22	16.85	14.80	1.18	1.81
C	2.08	25.77	17.36	14.24	1.25	1.66

¹⁾ *h*: 苗高 Seedling height; *d*: 地径 Ground diameter; *l*: 叶痕长 Leaf scar length; *b*: 叶痕宽 Leaf scar width; *l/b*: 叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width; *C*: 树皮颜色 Bark color.

该类香椿无性系叶痕较宽。C 类香椿无性系苗期苗高、地径、叶痕长和叶痕长宽比的均值最大(分别为 2.08 m、25.77 mm、17.36 mm 和 1.25),但树皮颜色的均值最小(1.66),说明该类香椿无性系幼苗生长较迅速,叶痕较狭长,树皮颜色偏褐绿色。

2.5 香椿无性系苗期表型性状与种源地地理-气候因子间的相关性分析

香椿无性系苗期表型性状与种源地地理-气候因子间的相关系数见表 8。结果表明:香椿无性系苗期的苗高与种源地的经度呈显著 ($P<0.05$) 负相关,与海拔呈显著正相关,说明在供试香椿种源地范围

内,随着经度增加香椿的高生长速度变缓,但随着海拔的升高香椿的高生长速度加快。地径与等温性呈极显著($P<0.01$)负相关,与平均气温日较差呈显著负相关,说明香椿地径受温度变化的影响较大,在温度变化大的种源地,地径生长缓慢。叶痕宽除与气温

年较差呈显著负相关外,与其他地理-气候因子的相关性均不显著。叶痕长和叶痕长宽比与地理-气候因子间的相关性均不显著。此外,树皮颜色与平均气温日较差和等温性存在一定的正相关,说明温度变化越大,树皮颜色越偏红色。

表8 香椿无性系苗期表型性状与种源地地理-气候因子间的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between phenotypic traits of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. clones at seedling stage and geographical-climatic factors of provenances

表型性状 ¹⁾ Phenotypic trait ¹⁾	相关系数 ²⁾ Correlation coefficient ²⁾								
	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Elevation	年降水量 Annual precipitation	无霜期 Frost-free period	年平均气温 Annual mean temperature	平均气温日较差 Mean temperature diurnal range	气温年较差 Temperature annual range	等温性 Isothermality
<i>h</i>	0.011	-0.649 *	0.578 *	-0.284	0.011	-0.284	-0.081	-0.239	-0.018
<i>d</i>	-0.025	0.218	-0.228	0.123	0.081	0.018	-0.613 *	-0.253	-0.746 **
<i>l</i>	-0.280	-0.407	0.420	0.091	0.175	-0.007	-0.231	-0.432	-0.112
<i>b</i>	-0.347	-0.361	0.347	0.172	0.277	0.109	-0.396	-0.586 *	-0.242
<i>l/b</i>	-0.074	-0.158	0.109	-0.053	0.235	-0.053	-0.053	0.018	-0.109
C	-0.158	-0.046	-0.018	0.123	-0.228	0.235	0.207	-0.098	0.347

¹⁾ *h*: 苗高 Seedling height; *d*: 地径 Ground diameter; *l*: 叶痕长 Leaf scar length; *b*: 叶痕宽 Leaf scar width; *l/b*: 叶痕长宽比 Ratio of leaf scar length to leaf scar width; C: 树皮颜色 Bark color.

²⁾ *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

3 讨 论

3.1 不同种源香椿无性系表型性状变异

变异是物种多样性产生的原因,也是遗传改良的基础。林木在长期进化过程中,为适应不同的环境,其形态特征和生理结构等方面会发生不可逆转的变化,一般认为,表型变异系数高于10%,则表示植物性状差异较大,表型变异系数越大,则林木良种选择的范围越大^[29]、适应的环境条件越广^[30]。本研究中,香椿无性系在种源间和种源内苗期表型性状差异极显著($P<0.01$),表明香椿无性系各性状在种源间和种源内均存在广泛变异,具有优异种质资源的选择潜力。种源内方差分量百分比大于种源间,说明香椿无性系苗期表型性状的变异主要来源于种源内。但是,种源间变异是物种变异的重要组成部分,在反映种质资源地理隔离和生殖隔离等方面具有更重要意义^[31],因为种源间不同个体所受的遗传控制和环境压力存在差异,进而呈现出不同的表型变异^[32]。在12个种源间,香椿无性系苗期表型性状的平均变异系数变幅为18.17%~26.34%,与4年生香椿半同胞家系树高和胸径的变异系数均值相近(分别为18.26%和21.97%)^[2],表型变异系数较大,有利于开

展优良种质资源的选育。香椿无性系苗期表型性状间的相关性分析结果表明:树皮颜色与苗高和地径分别呈显著($P<0.05$)和极显著负相关,这一结果与木荷^[17]和楸树^[18]等的研究结果一致,说明树皮颜色对苗木生长具有一定的指示作用,后续应进一步探究树皮颜色与树木生长的相关关系。香椿无性系苗期叶痕宽与苗高呈显著正相关,说明树木高生长越快,其叶痕越宽。香椿无性系苗期树皮颜色与叶痕大小间存在一定的负相关关系,但是相关性不显著,说明叶痕和树皮颜色可能是2个相互独立的性状,在进行种质资源选育时应充分考虑种质资源的异质性,进而保护植物种质资源多样性。

3.2 不同种源香椿无性系地理分布规律

通过种源试验,可以科学地揭示植物的地理变异规律。本研究基于苗期表型性状对12个种源香椿无性系进行聚类分析,在欧氏距离17处,供试12个种源香椿无性系被分成A、B、C3类,不同类群间具有明显的群体特征,但是香椿无性系苗期各表型性状间不是简单的线性关系。例如在A类中,产自河南浙川的香椿无性系树皮颜色偏褐色,但是其生长较快,而产自河南西峡的香椿无性系叶痕较狭长,但是其生长较缓。姚程程等^[13]对84个香椿无性系生长和叶部表型性状的遗传变异研究中也得到相似结果,即叶

部性状表现好的无性系不一定生长性状较优。滇楸 [*Catalpa fargesii* f. *duclouxii* (Dode) Gilmour] 中, 叶部性状及皮孔性状较大的类群生长不一定较优^[33]。因此在优良无性系选育和推广中应注重遗传多样性的保护。此外, 香椿 12 个种源并未完全按地理分布进行聚类。许玉兰等^[28] 对云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 天然群体针叶性状变异规律的研究结果显示: 云南松针叶性状地理变异趋势不明显, 可能与其连续分布有关, 地理-气候因子的综合作用影响了云南松表型多样性。不同种源厚朴 [*Houpoa officinalis* (Rehder et E. H. Wilson) N. H. Xia et C. Y. Wu] 的遗传变异存在随机变异、区域板块变异及连续变异 3 个模式^[34]。而不同种源红楠 (*Machilus thunbergii* Siebold et Zucc.) 叶片表型性状的变异具有地理连续性^[21]。说明不同树种的地理变异规律十分复杂, 随地理分布具有不同的变异模式, 后期开展种质资源创新与利用研究时应充分考虑地理因子与气候因子间的相互作用。

3.3 香椿无性系表型性状与地理-气候因子变异规律

表型性状和地理-气候因子之间有着密切的联系, 其间的相关性可以揭示物种变异规律。本研究中, 香椿 12 个种源的经度在东经 105° 43' 12" ~ 116° 58' 48" 之间, 经度跨度较大, 随着经度增加和海拔逐渐降低, 苗高生长变缓, 说明苗高受经度和海拔的影响显著, 但对温度和湿度变化的响应还有待进一步研究。孙鸿有等^[11] 认为, 香椿种源的地理变异是与纬度相平行的南北连续变异。刘军等^[12] 研究了不同种源香椿苗期性状变异与原产地生态因子的相关关系, 结果显示: 香椿苗期生长性状与海拔、年平均气温呈正相关, 与经度、纬度呈负相关, 由于纬度的载荷最大, 苗期性状的地理变异模式以纬度变异为主。曹德美等^[35] 对不同种群青杨 (*Populus cathayana* Rehder) 叶片表型性状进行了研究, 认为青杨叶片表型性状呈现以海拔为主的地理变异模式。姜荣波等^[21] 认为, 影响红楠种源苗期叶片表型性状的主要因素是纬度、年平均气温和年均无霜期, 其生长性状与经度和纬度无明显的相关性。在暴马丁香 [*Syringa reticulata* subsp. *amurensis* (Rupr.) P. S. Green et M. C. Chang]^[36] 和山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim.)^[37] 等植物中, 表型性状变异并无明显的经纬度地理变异模式。上述研究结果说明不同植物物种

对环境的敏感度和适应性不同, 土壤环境和生态群落也可能导致表型性状产生差异^[38-39]。香椿无性系苗期的地径与平均气温日较差和等温性呈显著或极显著负相关, 说明地径受温度变化影响较大, 后期在进行大径材培育时应充分考虑气温变化的影响。因此, 在香椿优异种质资源产地选取和引种时, 既要考虑经纬度等地理因子, 还要考虑温度等气候因子。

4 结 论

香椿无性系苗期表型性状在种源间和种源内存在丰富的变异, 物种遗传多样性丰富, 变异的主要来源为种源内, 优异种质资源的选择潜力较大。香椿无性系苗期的苗高受经度和海拔影响显著, 且相关系数较大, 因此在所收集的种源范围内, 苗高的地理变异模式以经度和海拔变异为主, 而地径受平均气温日较差和等温性的影响显著, 因此, 在后续开展香椿种质资源收集和引种时, 应充分考虑地理因子与气候因子间的相互作用。

参考文献:

- [1] 何润华. 香椿幼苗对水氮交互作用的响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019: 6.
- [2] 肖兴翠, 王树山, 杨勇智, 等. 香椿半同胞家系在川中丘陵区生长变异及早期选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 9-19.
- [3] 张海燕. 香椿种源生长差异性分析及早期评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 38-42.
- [4] 李晓晶, 李德生, 李海茹, 等. 香椿设施化栽培技术[J]. 北方园艺, 2012(2): 43-44.
- [5] WANG Y X, GU D Y, LIU C, et al. Enrichment, analysis, identification and mechanism of antioxidant components in *Toona sinensis* [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2023, 51(9): 100198.
- [6] ZHAO J F, WANG R S, LU S Z, et al. Identification of the novel natural product inhibitors of SHP2 from the plant *Toona sinensis*: *in vitro* and *in silico* study [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 221: 679-690.
- [7] 赵倩, 朱顺华, 蔡霞, 等. 红和绿香椿芽贮藏过程中花青素和木质素含量及相关基因表达分析[J]. 西北植物学报, 2023, 43(8): 1304-1313.
- [8] 姜宗庆. 不同 LED 光质对香椿芽苗菜生长和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(11): 52-55.
- [9] 刘闵豪, 肖兴翠, 张春花, 等. 基于 SSR 的四川主要香椿种源遗传多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 60-67.

- [10] 胡继文,麻文俊,沈元勤,等.香椿无性系苗期生长及早期选择研究[J].林业科学研究,2019,32(4):165-170.
- [11] 孙鸿有,王鹏飞,方炳法,等.香椿地理变异与种源选择[J].浙江林学院学报,1992,9(3):237-245.
- [12] 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.
- [13] 姚程程,王俊臣,胡继文,等.香椿种质生长及叶部表型性状的遗传变异分析[J].植物科学学报,2020,38(1):112-122.
- [14] 吴军,钟志真,楼君,等.香椿天然群体种实性状表型多样性研究[J].江西农业大学学报,2018,40(2):248-256.
- [15] CHENG Q, MA J, GUO C, et al. Insights into the root sprouts of *Toona fargesii* in a natural forest: from the morphology, physiology, and transcriptome levels [J]. Forests, 2024, 15(2): 335.
- [16] 谭灿灿,聂稳,刘逸夫,等.树皮表形与生理生化地理学研究进展[J].林产工业,2022,59(11):32-36.
- [17] 王秀花,马雪红,金国庆,等.木荷天然林分个体类型及材性性状变异[J].林业科学,2011,47(3):133-139.
- [18] 负慧玲,王军辉,张宋智,等.楸树无性系表型识别特征与遗传变异[J].东北林业大学学报,2012,40(2):34-38,46.
- [19] POUPON V, GEZAN S A, SCHUELER S, et al. Genotype × environment interaction and climate sensitivity in growth and wood density of European larch [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 545: 121259.
- [20] WU H, MENG H, WANG S, et al. Geographic patterns and environmental drivers of seed traits of a relict tree species [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 59-68.
- [21] 姜荣波,刘军,姜景民,等.红楠主要表型和苗期性状地理种源变异[J].东北林业大学学报,2011,39(5):9-11,23.
- [22] 徐肇友,王云鹏,肖纪军,等.不同产地木荷优树无性系表型多样性[J].东北林业大学学报,2021,49(2):5-10,17.
- [23] 孙安然,张明,庞忠义,等.不同产地三花槭繁殖体表型变异及选择研究[J].林业科学研究,2022,35(4):112-122.
- [24] GONG H M, YANG M, WANG C C, et al. Leaf phenotypic variation and its response to environmental factors in natural populations of *Eucommia ulmoides* [J]. BMC Plant Biology, 2023, 23: 562.
- [25] WYSE S V, HULME P E. Limited evidence for a consistent seed mass-dispersal trade-off in wind-dispersed pines [J]. Journal of Ecology, 2021, 109(1): 284-293.
- [26] 王秀花.木荷生长和材性变异及种源试验研究[D].北京:中国林业科学研究院,2010:12.
- [27] 解孝满,李景涛,赵合娥,等.柳树无性系苗期遗传测定与选择[J].江苏林业科技,2008,35(3):6-9.
- [28] 许玉兰,蔡年辉,陈诗,等.基于针叶性状云南松天然群体表型分化研究[J].西南林业大学学报,2016,36(5):1-9.
- [29] 董博文,李继东,郑先波,等.山茱萸种质资源表型性状多样性及相关性分析[J].经济林研究,2014,32(2):163-166.
- [30] 冯秋红,史作民,徐峥静茹,等.岷江柏天然种群种实表型变异特征[J].应用生态学报,2017,28(3):748-756.
- [31] 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.
- [32] 覃敏,尹光天,杨锦昌,等.米老排不同种源的表型性状变异分析[J].浙江农林大学学报,2017,34(1):112-119.
- [33] 肖遥,麻文俊,易飞,等.滇楸种质生长性状遗传变异及表型性状遗传多样性分析[J].植物研究,2018,38(6):843-851.
- [34] 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.
- [35] 曹德美,张亚红,成星奇,等.青杨不同种群叶片表型性状的遗传变异[J].林业科学,2021,57(8):56-67.
- [36] 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.
- [37] 冯建,刘震,蔡齐飞,等.不同居群山桐子果实表型性状变异及与环境因子的关系[J].生态学报,2023,43(3):1165-1174.
- [38] 苑海静,成向荣,虞木奎,等.不同种源麻栎生长性状的地理变异[J].应用生态学报,2021,32(8):2791-2799.
- [39] FENG Y, ZHENG K, LIN X, et al. Plant growth, physiological variation and homological relationship of *Cyclocarya* species in *ex situ* conservation [J]. Conservation physiology, 2022, 10(1): coac016.

(责任编辑:张明霞)