

DOI: 10.5846/stxb202112113513

冯建, 刘震, 蔡齐飞, 王艳梅, 耿晓东, 薛晓焱, 周慧娜, 张涛, 孔德良, 李明婉, 李志. 不同居群山桐子果实表型性状变异及与环境因子的关系. 生态学报, 2023, 43(3): 1165-1174.

Feng J, Liu Z, Cai Q F, Wang Y M, Geng X D, Xue X Y, Zhou H N, Zhang T, Kong D L, Li M W, Li Z. Variation of fruit phenotypic traits of *Idesia polycarpa* under different populations and their correlation with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1165-1174.

不同居群山桐子果实表型性状变异及与环境因子的关系

冯 建^{1,2}, 刘 震^{1,2}, 蔡齐飞^{1,2}, 王艳梅^{1,2}, 耿晓东^{1,2}, 薛晓焱^{1,2}, 周慧娜^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 孔德良¹, 李明婉¹, 李 志^{1,2,*}

1 河南农业大学林学院, 郑州 450002

2 中原地区森林资源培育国家林业局重点实验室, 郑州 450002

摘要:以国内 14 个山桐子居群为研究对象, 采用方差分析、相关性分析、聚类分析和主成分分析等方法, 探究山桐子果实表型性状变异及其与环境因子的关系。结果表明: (1) 山桐子的 9 个果实表型性状在居群间和居群内均有广泛变异, 居群间各表型性状的变异系数为 6.47%—32.51%, 居群内各表型性状的变异系数为 4.69%—35.21%。单串果穗重和单串果实重的变异系数较大, 单果横径、单果纵径及单果重的变异系数均较小。河南农业大学林木种苗繁育工程技术中心居群表型变异最丰富, 四川省方山村居群最小。山桐子果穗表型性状与果实产量性状呈显著正相关, 通过聚类分析可将山桐子 14 个居群分为 4 个类群, 类群 IV 中山桐子果实表型性状最为优良, 果穗大、单果重, 表现出突出的育种优势。(2) 山桐子 14 个居群地土壤 pH 在 5.36—8.49 范围内, 多数居群土壤为酸性, 土壤有效氮、有效磷、有效钾含量低。(3) 环境因子中全氮对山桐子果实表型性状影响较大, 土壤 pH、有效磷含量与果实表型性状存在显著相关性。山桐子果实表型性状存在丰富变异, 果穗外形对其产量有着显著影响; 土壤 pH 及有效磷含量是影响山桐子果实表型性状的主要土壤养分因子, 在生产中或可通过调节土壤酸碱度及有效磷含量来达到增产的目的。

关键词: 山桐子; 果实表型性状; 变异系数; 环境因子

Variation of fruit phenotypic traits of *Idesia polycarpa* under different populations and their correlation with environmental factors

FENG Jian^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}, CAI Qifei^{1,2}, WANG Yanmei^{1,2}, GENG Xiaodong^{1,2}, XUE Xiaoyan^{1,2}, ZHOU Huina^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, KONG Deliang¹, LI Mingwan¹, LI Zhi^{1,2,*}

1 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Key Laboratory of State Forestry Administration for the Cultivation of Forest Resources in Central China, Zhengzhou 450002, China

Abstract: *Idesia polycarpa* is an important fruit-oil tree, with high yield, high oil content of fruit and featuring enormous development potential. Most of the published studies mainly focused on seedling propagation, growth and development and oil processing, while there were few studies of *I. polycarpa* fruit phenotype traits with environment factors, which is important for high yield, so the study with the correlation of *I. polycarpa* fruit phenotype traits and environment factors will provide scientific basis for its' high-quality development. To determine the variation of fruit phenotypic traits of *I. polycarpa*

基金项目: 河南省博士后科研项目(202002053); 国家自然科学基金项目(32000267); 河南省科技攻关计划(152102110059); 河南省科技兴林项目(30602128)

收稿日期: 2021-12-11; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhi876@163.com

and their relationship with environmental factors, fourteen populations of *I. polycarpa* were systematically analyzed by means of variance analysis, correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis. The results showed that: (1) there was great variation of the 9 fruit phenotypic traits within and among populations of *I. polycarpa*. The coefficient of variation (CV) of each phenotypic trait among populations was 6.47%—32.51%, while those within population was 4.69%—35.21%. The CV of single spike mass and fruit mass of single spike was larger, while that the single of fruit cross diameter, single fruit longitudinal and single fruit weight was all smaller. The average value of CV of the Forest Seedling Breeding Engineering Technology Center of Henan Agricultural University population was the largest and that of the Fangshan village, Sichuan Province population was the smallest. Ear phenotypic traits of *I. polycarpa* were significantly and positively correlated with fruit yield traits. Through the cluster analysis, the fourteen populations of *I. polycarpa* could be divided into four groups, among which group IV showed outstanding breeding advantages of large spike and single fruit weight. (2) Soil pH of *I. polycarpa* was 5.36—8.49, most of that were acidic. The contents of soil available nitrogen, phosphorus and potassium were low. (3) The total nitrogen among environmental factors had a greater influence on fruit phenotypic traits of *I. polycarpa*, and there were significant correlations between soil pH, content of available phosphorus and fruit phenotypic traits. There was abundant variation on fruit phenotypic traits of *I. polycarpa*. The ear shape had significant influence on its yield which could be used as an evaluation index for breeding of *I. polycarpa*. Soil pH and the content of available phosphorus can be the key factor influencing the fruit phenotypic traits of *I. polycarpa*. This suggests that increasing the yield of *I. polycarpa* may be achieved by changing soil pH and the content of available phosphorus.

Key Words: *Idesia polycarpa*; fruit phenotypic traits; coefficient of variation; environmental factor

植物表型性状是遗传因素和环境因素的综合体现^[1],是基因和所处生态环境共同作用的结果,是生物遗传变异的表征。研究表明影响西伯利亚杏(*Armeniaca sibirica*)核长、核宽和杏仁厚的主要环境因子是纬度、海拔、日照时长^[2],砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)种子的长宽积随海拔的增加而变大^[3],油用牡丹(*Paeonia suffruticosa*)种子的横径、纵径、种形指数受土壤中有有效钾、有机质含量影响较大^[4]。天然居群的表型变异具有适应和进化上的意义,是人工驯化和遗传育种研究的基础,也是揭示种群适应性的有效途径之一。近年来国内外学者对酸枣(*Ziziphus jujuba*)^[5]、刨花楠(*Machilus pauhoi*)^[6]、柑橘^[7]等多种植物展开研究,表明利用表型性状研究居群遗传多样性仍然是重要而有效的。

山桐子(*Idesia polycarpa*)为大风子科(Flacourtiaceae)山桐子属落叶乔木,在国内山桐子主要分布于四川、甘肃、陕西、山西、河南等十几个省区,在国外主要集中于日本和朝鲜半岛^[8]。山桐子树形优美,叶色浓绿,花繁果红,可用于园林绿化^[9],其果实可用来榨油,果实平均含油率达37%,油品质量高,不饱和脂肪酸含量高达90%以上,其中亚油酸含量高达73%^[10],远高于人们日常食用的菜籽油、花生油等^[11]。此外油中还富含维生素E、角鲨烯等营养物质^[12],属于高营养高价值的“双高”型植物油,可作为高档食用植物油的优良原料。采用碱催化酯交换法可将山桐子油制备成符合标准的生物柴油,有利于缓解传统矿质能源的污染问题^[13]。因此发展山桐子不仅可以增加我国食用油来源,保障油料安全,而且对于缓解能源危机,改善生态环境也有重要意义。

已有学者针对山桐子表型变异及其多样性做出研究,江锡兵等^[14]研究表明天然分布的山桐子居群内果实表型性状及产量差异较大,岁立云等^[15]通过研究发现陕西省内自然分布的山桐子在果穗长度、紧密度、果粒大小、颜色等性状上存在广泛变异。本课题组已经针对山桐子的苗木繁育、生理生化、油品加工等方面做了系统研究,如5℃的低温对山桐子种子的休眠解除效果较好^[16];在25℃/15℃变温条件下,日长越长山桐子分枝数越少,侧枝生长量越大^[17];其果实发育过程中抗氧化酶、脱落酸、生长素等含量的动态变化与果实的发育规律相吻合,并对果实的发育进程起积极的调控作用^[18]。目前关于山桐子果实表型性状与环境因子的相关性研究较少,而果实作为木本油料树种的重要利用器官,遗传变异的重要特征之一,研究其表型性状的变异及

其与环境因子之间的关系非常有必要。本研究以 14 个山桐子居群为研究对象,对山桐子果实表型性状的变异程度及与环境因子的相关性进行分析,探究山桐子果实的遗传变异规律,为山桐子的良种选育、栽培繁殖提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2020 年 10 月至 11 月(山桐子果实成熟期)在山桐子自然分布区河南省、四川省、浙江省、湖北省、江西省等地选取具有代表性的居群(表 1)。每个居群随机选取 3 株生长状况良好的样株,采集东、南、西、北 4 个朝向枝条上的完整果穗,每个居群 15 个,用于果实表型性状测定;同时在每棵采样株的树冠投影处东、南、西、北四个方向,挖取距地表 0—20 cm 土壤,将 4 个样点的土壤样品混合均匀,装袋后同果穗一起寄回实验室。

表 1 采样地基本概况
Table 1 Basic overview of sampling site

采样区 Sampling areas		编号 Serial number	经度 Longitude/E	纬度 Latitude/N	海拔 Altitude/m
省区 Provincial areas	采样点 Sampling sites				
河南省	河南农业大学林木种苗繁育工程中心	CY1	113°39'35"	34°47'5"	219.00
	蟒河林场	CY2	112°26'22"	35°13'31"	697.00
四川省	文星村	CY3	106°0'25"	32°7'13"	822.54
	天宝寨	CY4	104°43'6"	30°35'11"	393.38
	胜利村	CY5	105°17'38"	32°24'49"	756.23
	胜利村(高海拔)	CY6	105°18'4"	32°24'25"	995.02
	杜家湾村	CY7	105°47'57"	32°19'24"	637.49
	杜家湾村(高海拔)	CY8	105°47'57"	32°19'24"	810.13
	方山村	CY9	105°56'50"	32°7'37"	685.95
	马鞍村	CY10	105°19'29"	32°21'40"	641.18
	四川林科院山桐子选育基地	CY11	103°38'8"	30°38'29"	500.01
	源滢村	CY12	113°49'41"	27°26'47"	340.00
江西省					
浙江省	东村	CY13	118°67'26"	28°69'67"	80.00
湖北省	和尚堡村	CY14	108°49'53"	30°5'43"	966.25

1.2 果实表型性状的测定

将果穗垂直悬挂,使用直尺(精度 0.01 cm)测量果穗顶部到基部的直线距离即为果穗长,测量其横截面的最大直径即为果穗宽;使用电子天平(精度 0.01 g)称量单串果穗重、单串果实重、单串果柄重、单果重;人工计数每串果穗的果实个数;每个居群选取 60 粒鲜果,使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测定单果横径(即垂直于果柄方向的果实横截面的最大直径)、单果纵径(即平行于果柄方向的果实纵截面的最大直径)。

1.3 土壤养分因子的测定

土壤 pH 值采用水土比 2.5:1,电位计法测定;土壤全碳、全氮采用的全自动元素分析仪(EURO EA3000)测定;土壤有效氮采用碱解扩散法测定;土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定;土壤有效钾采用中性乙酸铵提取-火焰光度计法测定。以上具体的分析方法可见国家林业局行业标准(LY/T 1210—1275-1999)^[19]。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 统计各居群山桐子果实表型性状指标和各居群地土壤养分指标。利用 SPSS 分析软件对测定的数据进行统计分析,并应用方差分析、多重比较和变异分析等方法分析各表型性状的变异规律;利用相关性分析、聚类分析(组间连接法)对各表型性状间及表型性状与地理-土壤养分因子的相关性进行分析,并建立不同居群间的谱系图。

2 结果与分析

2.1 山桐子果实表型性状特征及变异规律

对山桐子 14 个居群的果实表型性状进行统计分析(表 2、图 1)。结果显示不同居群间山桐子果实性状差异极显著($P<0.01$),其中四川省林科院山桐子选育基地居群山桐子果穗长(36.47 cm)、果穗宽(12.33 cm)、单串果穗重(168.15 cm)、单串果实重(146.75 g)、单串果柄重(21.40 g)、果实个数(405.33)最大,显著($P<0.05$)大于其它居群,表明该居群山桐子果穗大且重;四川省方山村居群山桐子果穗长、宽较供试样本均值分别下降 38.28%、21.96%,表现为小果穗;河南省蟒河林场居群山桐子单串果穗重、单串果实重及单串果柄重均最小分别为 10.93 g、7.40 g、3.53 g,且其果穗长、宽均小于供试样本均值,表现为果穗小且轻。

表 2 山桐子果实 9 个表型性状的差异
Table 2 Differences in 9 phenotypic traits of *I. polycarpa* fruit

性状 Traits	均值 Mean	极大值 Max.	极小值 Min.	极差 Range	标准差 Standard deviation	<i>F</i>
EL/cm	21.71	53.10	10.60	42.50	6.77	16.42 **
EW/cm	7.47	14.20	2.20	12.00	2.16	13.86 **
SSM/g	42.19	270.47	4.16	266.31	37.01	16.73 **
FMS/g	37.68	236.20	2.82	233.38	33.63	17.33 **
SSW/g	4.52	34.27	0.91	33.36	3.94	13.70 **
NF/个	119.97	771.00	10.00	761.00	117.88	14.94 **
SFD/mm	8.64	11.21	4.07	7.14	1.25	13.41 **
SFL/mm	8.46	11.63	4.39	7.24	1.28	19.60 **
SFW/g	0.36	0.70	0.08	0.62	0.13	0.35 **

EL: 果穗长 Ear length; EW: 果穗宽 Ear width; SSM: 单串果穗重 Single spike mass; FMS: 单串果实重 Fruit mass of single spike; SSW: 单串果柄重 Single bunch of spike stalk weight; NF: 果实个数 Number of fruits; SFD: 单果横径 Single fruit cross diameter; SFL: 单果纵径 Single fruit longitudinal; SFW: 单果重 Single fruit weight; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$;

变异系数可以反映山桐子果实表型性状的变异程度,研究(表 3)表明山桐子果实各表型性状的变异程度存在差异,与山桐子产量相关的单串果穗重、单串果实重、单串果柄重、果实个数变异系数最大分别为 30.20%、30.21%、32.51%、30.70%,说明自然状态下山桐子果实产量不稳定;与山桐子单果外形相关的两个表型性状单果横径、单果纵径变异系数最小分别为 6.67%、6.47%,表明山桐子单果形状遗传稳定。同一性状在不同居群间存在较大差异,单串果实重的变异系数为四川省林科院山桐子选育基地居群最大,四川省方山村居群最小;单果重的变异系数为河南省河南农业大学林木种苗繁育工程中心居群最大,四川省胜利村居群最小。同一居群的不同性状也存在差异,在四川省文星村居群中变异系数最大的为单串果实重,最小的为果穗长;在四川省天宝寨居群中变异系数最大的是单串果柄重,最小的是单果纵径。山桐子果实 9 个表型性状的平均变异程度由大到小依次为:单串果柄重、果实个数、单串果实重、单串果穗重、单果重、果穗宽、果穗长、单果横径、单果纵径;在 14 个居群中,河南省河南农业大学林木种苗繁育工程中心居群山桐子果实表型性状平均变异系数最大,四川省方山村居群最小。

植物在生长过程中各个形态特征间存在一定联系,相关性分析可以反映各性状间的影响关系。山桐子 14 个居群 9 个果实表型性状相关性分析结果(表 4)表明:山桐子果穗的 6 个表型性状间均呈极显著($P<0.01$)正相关;3 个单果表型性状中,单果横径与单果纵径间呈极显著正相关,二者与单果重均无显著($P>0.05$)关系。

基于果实表型性状均值对山桐子 14 个居群进行聚类分析,结果(图 2)显示:在欧式距离 8 处,供试的 14 个居群划分为 4 个类群。从果穗性状上看,类群 I、II 中山桐子果穗长、宽与供试山桐子样本均值相比较小,而类群 III、IV 较大;类群 I 中的山桐子果实重量明显小于均值,类群 II、III 中较为接近且大于均值,而类群 IV 远大于均值;在单果性状上,类群 III 各性状明显小于均值,类群 I、IV 较为接近且大于均值,类群 II 中山桐子单果最大且最重。

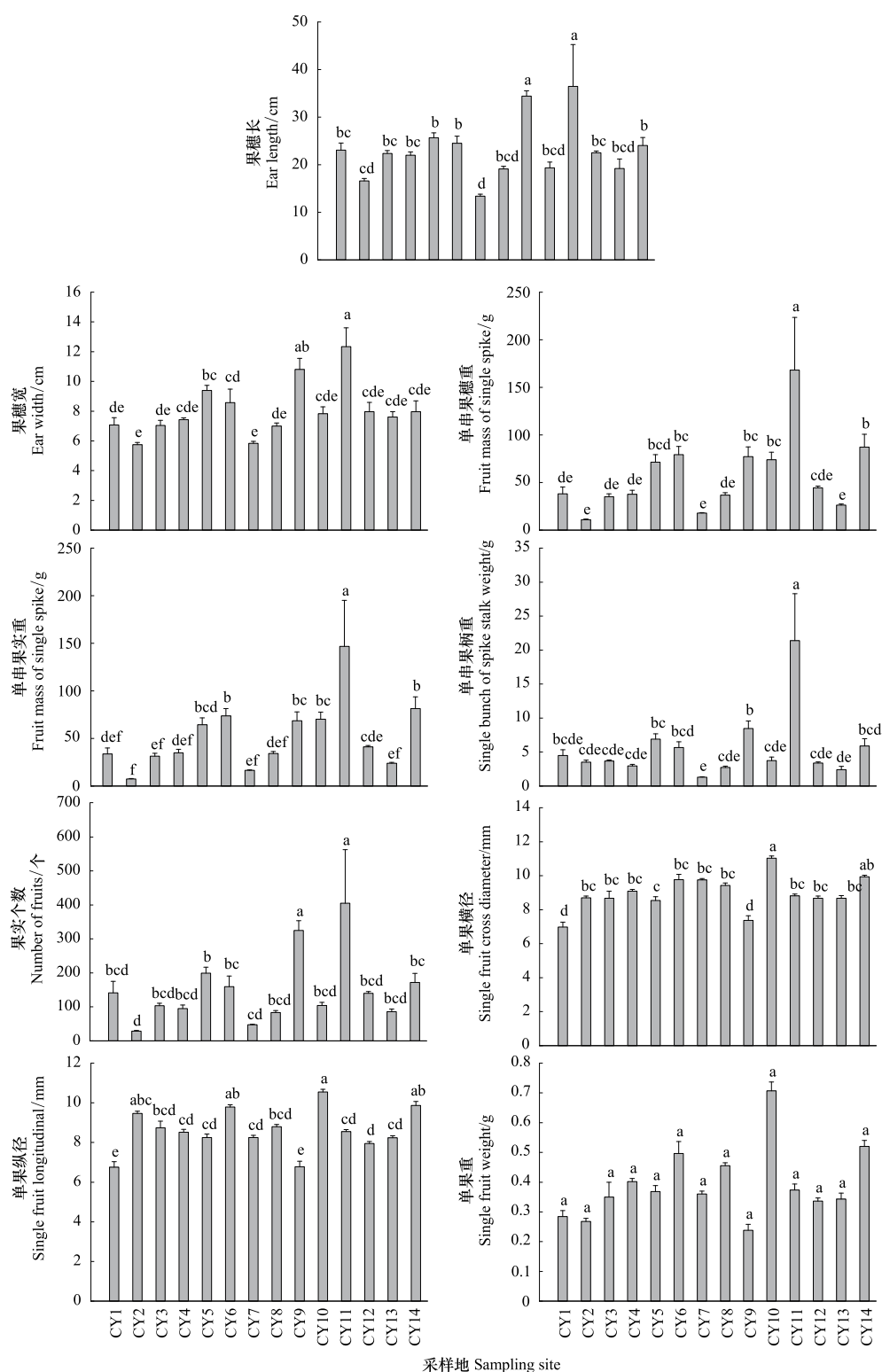


图 1 不同居群山桐子果实 9 个表型性状的比较

Fig.1 Comparison of 9 phenotypic traits in different populations of *I. polycarpa* fruit

CY1: 河南省河南农业大学林木种苗繁育工程中心 Forest Seedling Breeding Engineering Technology Center of Henan Agricultural University, Henan Province; CY2: 河南省蟒河林场 Manghe Forest Farm, Henan Province; CY3: 四川省文星村 Wenxing Village, Sichuan Province; CY4: 四川省天宝山 Tianbao Village, Sichuan Province; CY5: 四川省胜利村 Shengli Village, Sichuan Province; CY6: 四川省胜利村 (高海拔) Shengli Village (High Altitude), Sichuan Province; CY7: 四川省杜家湾村 Dujiawan Village, Sichuan Province; CY8: 四川省杜家湾村 (高海拔) Dujiawan Village (High Altitude), Sichuan Province; CY9: 四川省方山村 Fangshan Village, Sichuan Province; CY10: 四川省马鞍村 Ma'an Village, Sichuan Province; CY11: 四川省四川林科院山桐子选育基地 *I. polycarpa* Breeding Base of Sichuan Academy of Forestry, Sichuan Province; CY12: 江西省源滩村 Yuanban Village, Jiangxi Province; CY13: 浙江省东村 East Village, Zhejiang Province; CY14: 湖北省和尚堡村 Monk Castle Village, Hubei Province; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

表 3 不同居群山桐子果实 9 个表型性状的变异系数/%

Table 3 Coefficients of variation (%) of 9 phenotypic traits in different populations of *I. polycarpa* fruit

采样点 Sampling sites	EL	EW	SSM	FFMS	SSW	NF	SFD	SFL	SFW	平均值 Mean
CY1	33.24	34.91	39.36	37.93	42.60	46.00	19.42	20.46	42.95	35.21
CY2	20.26	16.30	49.98	49.98	49.98	49.81	8.35	7.13	24.41	30.69
CY3	4.70	8.69	15.17	16.20	6.98	12.21	8.33	6.83	23.39	11.39
CY4	18.26	17.31	50.44	50.78	51.08	38.94	12.77	10.24	34.57	31.60
CY5	11.84	15.69	26.84	26.49	31.64	26.53	1.61	3.71	5.09	16.61
CY6	8.49	15.01	14.95	14.47	21.21	27.36	4.43	1.75	12.30	13.33
CY7	2.89	13.54	6.65	6.48	8.95	6.10	2.70	2.37	6.18	6.21
CY8	16.94	17.55	40.03	40.57	41.88	42.30	9.60	7.95	24.05	26.76
CY9	5.38	4.31	3.91	3.95	8.10	5.32	1.40	2.50	7.35	4.69
CY10	11.10	9.92	18.71	18.50	24.57	15.47	1.99	2.22	7.12	12.18
CY11	19.00	17.88	56.95	57.14	55.70	67.10	1.90	1.93	8.61	31.80
CY12	13.32	7.67	45.16	46.78	33.27	46.30	4.74	6.80	14.38	24.27
CY13	18.02	8.22	8.16	6.44	34.50	15.73	3.06	2.24	8.90	11.70
CY14	10.88	24.25	46.49	47.27	44.64	30.66	13.10	14.52	39.39	30.13
平均值 Mean	13.88	15.09	30.20	30.21	32.51	30.70	6.67	6.47	18.48	20.46

表 4 山桐子果实 9 个表型性状之间相关性

Table 4 Correlation among 9 phenotypic traits of *I. polycarpa* fruit

性状 Traits	EL	EW	SSM	FFMS	SSW	NF	SFD	SFL	SFW
EL	1.00								
EW	0.68 **	1.00							
SSM	0.71 **	0.78 **	1.00						
FMS	0.70 **	0.77 **	0.99 **	1.00					
SSW	0.70 **	0.73 **	0.87 **	0.84 **	1.00				
NF	0.69 **	0.72 **	0.77 **	0.76 **	0.74 **	1.00			
SFD	-0.19 *	-0.01	0.18 *	0.20 **	-0.01	-0.19 *	1.00		
SFL	-0.32 **	-0.18 *	-0.01	-0.01	-0.06	-0.35 **	0.85 **	1.00	
SFW	-0.06	0.04	0.06	0.06	-0.03	0.01	0.07	0.07	1.00

2.2 山桐子居群地土壤养分概况

山桐子居群地土壤养分测定结果(表 5、图 3)表明 14 个居群地土壤养分含量差异极显著($P<0.01$)。土壤 pH 分布在 5.36—8.49 范围内,其中 11 个居群地土壤 pH 均小于 7 呈酸性。各居群地土壤中全碳含量较高,有效氮含量低;有效磷含量低于 5.00 mg/kg 的居群有 4 个,含量较低;有效钾含量高于 30.00 mg/kg 的居群有 4 个,其余居群地土壤有效钾含量均低。

2.3 山桐子果实表型性状与环境因子的关系

2.3.1 环境因子的主成分分析

对山桐子居群环境因子数据进行主成分分析,结果(表 6)表明:前 4 个主成分方差累计贡献率为 81.929%,可以代表环境因子中的大部分信息。第一主成分的方差贡献率为 37.433%,起主导作用的因子为全氮、全碳、

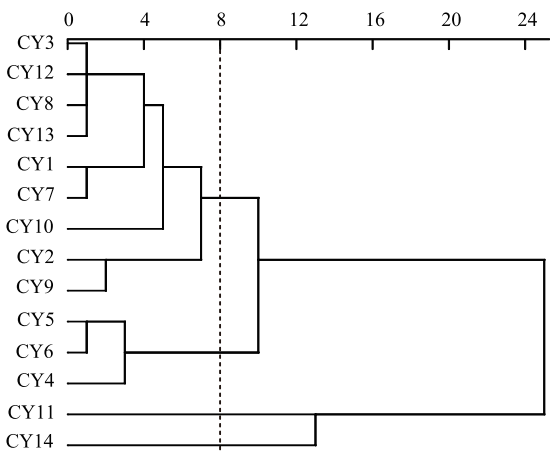


图 2 基于果实表型性状的山桐子 14 个居群聚类图
Fig.2 Clustering dendrogram of 14 populations of *I. polycarpa* based on fruit phenotypic trait

有效氮。第二主成分的方差贡献率为19.218%,起主导作用的因子为 pH。第三主成分的方差贡献率为14.134%,起主导作用的因子为经度。第四主成分的方差贡献率为 11.144%,起主导作用的因子为纬度。

表 5 山桐子居群土壤养分特征
Table 5 Characteristics of soil nutrient of *I. polycarpa* populations

指标 Indexs	均值 Mean	极大值 Max.	极小值 Min.	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of Variation / %	<i>F</i>
pH	6.57	8.49	5.36	3.13	0.81	12.27	249.45 **
全碳 Total carbon/(g/kg)	29.00	142.60	2.70	139.90	33.20	114.20	140.78 **
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	2.40	11.50	0.60	10.90	2.30	96.71	110.24 **
有效氮 Available nitrogen/(mg/kg)	2.86	7.41	0.58	6.83	2.14	74.82	4.67 **
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	9.64	23.91	1.19	26.10	6.94	72.01	63.41 **
有效钾 Available potassium/(mg/kg)	24.78	66.80	8.20	58.6	16.11	65.02	6611.73 **

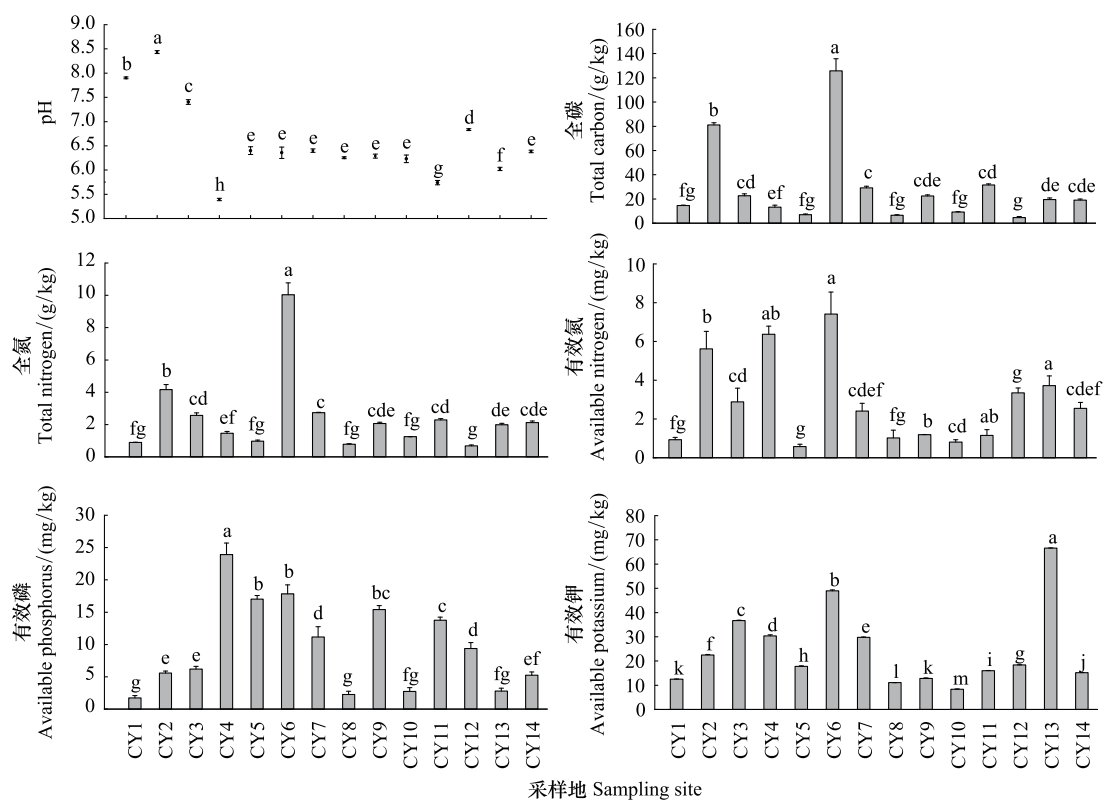


图 3 不同山桐子居群土壤养分差异
Fig.3 Differences of soil nutrient of different *I. polycarpa* populations

2.3.2 果实表型性状与环境因子的相关性

对山桐子果实表型性状与环境因子进行相关性分析,结果(表 7)表明:山桐子 9 个果实表型性状与经度呈负相关,与海拔呈正相关但均不显著($P>0.05$)。其中果穗宽与有效磷呈极显著($P<0.01$)正相关,与 pH 呈显著($P<0.05$)负相关,相关系数分别为 0.41、-0.39;单串果穗重、单串果实重及果实个数与 pH 呈极显著负相关,与有效磷呈极显著正相关,相关系数分别为-0.51、-0.53、-0.44,0.43、0.43、0.48;单串果柄重与 pH 呈显著负相关($r=-0.31$)、与有效磷呈显著正相关($r=0.38$);单果横径与 pH 呈极显著负相关($r=-0.42$),单果纵径与全碳、全氮呈显著正相关($r=0.31$; $r=0.37$),果穗长及单果重与土壤养分有一定的相关性,但均不显著($P>0.05$)。

表 6 山桐子居群环境因子的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of environmental factors in *I. polycarpa* populations

环境因子 Environmental factors	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component	第四主成分 Forth principal component
全氮 Total nitrogen	0.957	0.182	-0.073	0.014
全碳 Total carbon	0.923	0.272	0.032	0.088
有效氮 Available nitrogen	0.812	-0.162	0.465	-0.013
有效钾 Available potassium	0.604	-0.189	0.385	-0.431
pH	-0.001	0.821	0.263	-0.081
有效磷 Available phosphorus	0.431	-0.653	-0.345	-0.166
海拔 Altitude	0.372	0.577	-0.448	0.236
经度 Longitude	-0.443	0.065	0.684	0.091
纬度 Latitude	0.238	-0.350	0.211	0.843
特征值 Eigen value	3.369	1.730	1.272	1.003
贡献率 Proportion /%	37.433	19.218	14.134	11.144
累计贡献率 Cumulative /%	37.433	56.651	70.785	81.929

表 7 山桐子果实表型性状与环境因子相关性

Table 7 Correlations between phenotypic traits of *I. polycarpa* fruit and environmental factors

性状 Traits	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	pH	全碳 Total carbon	全氮 Total nitrogen	有效氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有效钾 Available potassium
EL	-0.44	-0.05	0.09	-0.09	-0.08	-0.06	-0.24	0.28	-0.25
EW	-0.48	0.09	0.07	-0.39 *	-0.08	-0.04	-0.31 *	0.41 **	-0.23
SSM	-0.52	0.24	0.11	-0.51 **	-0.02	0.04	-0.19	0.43 **	-0.26
FMS	-0.52	0.25	0.12	-0.53 **	-0.02	0.04	-0.18	0.43 **	-0.27
SSW	-0.52	0.12	0.01	-0.31 *	0.01	0.01	-0.26	0.38 *	-0.23
NF	-0.44	-0.06	0.10	-0.44 **	-0.09	-0.06	-0.21	0.48 **	-0.22
SFD	-0.03	0.51	0.25	-0.42 **	0.15	0.25	0.18	0.02	0.02
SFL	-0.16	0.64 *	0.29	-0.26	0.31 *	0.37 *	0.18	-0.05	0.03
SFW	-0.06	0.47	0.16	-0.07	-0.10	-0.10	-0.19	-0.16	-0.14

3 讨论

植物表型是植物各种形态特征的组合,受基因和环境双重作用^[20],具有稳定性和变异性。为了适应不同的环境,植物能够在形态结构及生理特性等方面发生不可逆的变化,在表型形态水平上的差异称为表型变异,居群间的变异能够反映植物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^[21]。本研究结果表明,山桐子果实表型性状的变异包括居群间变异和居群内变异,供试的 14 个居群山桐子果实表型性状在居群间存在显著差异,说明山桐子果实各表型性状均存在明显的遗传变异。与徐嘉娟等^[22]对贵州 3 个山桐子天然居群果实多样性分析结果一致,反映出长期地理隔离阻碍了山桐子之间基因交流,也是山桐子对不同环境适应的结果。居群间各果实表型性状的变异系数为 6.47%—2.51%,平均变异系数为 20.47%,与香榧(*Torreya grandis*)^[23](*CV*=20.28%)居群表型性状的变异系数相当,高于核桃(*Juglans regia*)^[24](*CV*=12.73%)、东北杏(*Armeniaca mandshurica*)^[25](*CV*=17.38%)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)^[26](*CV*=6.42%)居群表型性状的变异系数,表明山桐子果实表型性状变异丰富,较大的变异程度也体现出山桐子应对环境的生殖繁育策略。山桐子 9 个果实表型性状中与山桐子产量相关的 3 个表型性状单串果穗重、单串果实重、单串果柄重变异系数最大,其平均值分别为 30.20%、30.21%、32.51%,与张欢等^[27]研究结果一致,表明这 3 个表型性状对环境变

化的敏感性高,在居群间的稳定性低,在一定程度上说明野生山桐子的果实产量不稳定。

相关分析结果表明与山桐子产量相关的单串果穗重、单串果实重、单串果柄重与果穗长、果穗宽呈极显著正相关,与苏上等^[28]对不同地域山桐子果实表型性状的研究结果相近,说明随着果穗外形的增大,其果实质量也极显著增加,果穗外形可以作为山桐子良种选育的评价指标。聚类分析结果表明 14 个山桐子居群可初步分为 4 类,类群Ⅳ山桐子果实表现最为优良,表现出突出的育种优势。

对山桐子 14 个居群地土壤养分分析表明,大多数山桐子居群地土壤 pH 为酸性,土壤肥力较低,体现了山桐子适应性强、耐贫瘠的特性^[29]。有研究表明植物的表型性状与环境因子之间存在一定的相关性;魏丽萍等^[30]研究表明西藏光核桃(*Amygdalus mira*)果实横径、纵径、果实质量与经度呈负相关;邹金拓等^[31]研究表明构树(*Broussonetia Papyrifera*)种子长、厚、千粒重随海拔的升高均有所增大;郭孟齐等^[32]研究表明南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)株高与土壤有机质含量、全氮含量、有效钾含量、全磷含量、有效磷含量呈显著正相关。本研究发现,土壤中全碳、全氮对山桐子果实表型性状的影响较大,全碳和全氮是土壤养分的重要组成部分,其含量能够影响土壤的肥力,C/N 可以表征土壤有机质的分解程度及养分利用状况^[33],对植物生长及干物质的积累有着较大的影响;山桐子果实表型性状与经度、纬度、海拔之间存在一定的相关性,说明大尺度下的气候因素对山桐子果实生长过程有一定的影响。随经度的增加山桐子果穗及果实横纵径减小,质量减轻,经度的变化意味着降水量的改变,研究表明闽南种子的横径、种子质量与年降水呈负相关^[34],降水量可能是经度影响山桐子果实表型的因素之一。随海拔的增加果穗及果实横纵径增大,质量增加,在海拔较高的地区,山桐子为了适应恶劣环境,增大果实外形,增加果实质量,形成较为饱满的果实,既能储藏充足的营养物质,也能较好的抵抗外界压力。在本研究里山桐子 9 个果实表型性状中 6 个性状与 pH 呈极显著或显著负相关,土壤酸碱度影响着土壤中微生物活动、有机质的合成分解、氮磷钾元素的转化释放^[35],能直接影响到土壤中有效元素的供给及植物根系的生长发育,因而植物性状受其影响较大;和产量相关的单串果穗重、单串果实重、单串果柄重与土壤有效磷含量呈极显著或显著正相关,与冯嘉仪等^[36]施用磷肥可显著提高银杏单果体积及单果鲜重、提高果实产量结论相一致。磷素不仅是植物体内蛋白质、叶绿素、核酸等化合物的组成成分,而且调控植物光合作用,碳水化合物的运输,能促进山桐子的生长和干物质产量的积累。环境因子包括很多内容,例如坡位、坡向等地形因子,土壤孔隙、结构等土壤物理性质,本研究只调查了 9 个相关因子,这也是本研究的不足之处。

4 结论

山桐子果实表型性状存在丰富的变异,有较强的环境适应性;14 个山桐子居群可划分为 4 类,类群Ⅳ山桐子表现出突出的育种优势。环境因子中土壤全氮含量对果实表型影响较大,土壤 pH 及有效磷含量是影响山桐子果实表型性状的主要土壤养分因子,在生产中或可通过降低土壤 pH、增加有效磷含量来达到增产的目的。

参考文献(References):

- [1] Zhang W, Lu B Y, Meng H L, Wei X, Yang Z Q, Yang S C. Phenotypic diversity analysis of the fruit of *Amomum tsao-ko* Crevost et Lemarie, an important medicinal plant in Yunnan, China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2019, 66(5): 1145-1154.
- [2] 王少雄, 胡潇予, 范思琪, 崔艺凡, 于海燕, 王利兵. 西伯利亚杏种实性状地理变异分析. *经济林研究*, 2019, 37(1): 74-79, 86-86.
- [3] 刘莹, 麻文俊, 杨桂娟, 王俊臣, 易飞, 王玉婷, 王军辉, 王春燕. 砂生槐天然种群种实形态和萌发特征地理变异. *西北林学院学报*, 2019, 34(6): 22-29, 36-36.
- [4] 孙志鹏, 武华卫, 方颖, 赖世会, 罗建勋. 四川盆地油用牡丹种子品质地区差异及其与生态因子的关系. *西北植物学报*, 2021, 41(10): 1766-1775.
- [5] 邓荣华, 高瑞如, 刘后鑫, 赵亚锦, 朱广龙, 魏学智. 自然干旱梯度下的酸枣表型变异. *生态学报*, 2016, 36(10): 2954-2961.
- [6] 余华, 钟全林, 黄云波, 程栋梁, 裴盼, 张中瑞, 徐朝斌, 郑文婷. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 449-458.

- [7] Ashkevari A, Zadeh S H H, Miransari M. Potassium fertilization and fruit production of page *citrus* on a punsirus rootstock: quantitative and qualitative traits. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33(10): 1564-1578.
- [8] 张云超, 张志良, 王倩. 京山市山桐子产业存在问题及对策. *湖北林业科技*, 2020, 49(3): 58-59.
- [9] 王胜昔, 陈玺, 周红飞. 一个"桐子儿"值千万. *光明日报*, 2021-11-11(8) [2021-11-15]. https://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2021-11/11/nw.D110000gmrb_20211111_2-08.htm.
- [10] Li Y, Peng T, Huang L, Zhang S Y, He Y Y, Tang L. The evaluation of lipids raw material resources with the fatty acid profile and morphological characteristics of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels fruit in harvesting. *Industrial Crops and Products*, 2019, 129: 114-122.
- [11] 刘一静, 张驰松, 涂彩虹, 冯骏, 狄飞达, 郑旗. 毛叶山桐子油营养价值及精炼工艺的研究进展. *农产品加工*, 2020(7): 73-74, 78-78.
- [12] 张旋, 吕名蕊. 毛叶山桐子成分分析及开发利用. *粮食与食品工业*, 2021, 28(2): 53-57, 60.
- [13] Yang F X, Su Y Q, Li X H, Zhang Q, Sun R C. Preparation of biodiesel from *Idesia polycarpa* var. *vestita* fruit oil. *Industrial Crops and Products*, 2009, 29(2/3): 622-628.
- [14] 江锡兵, 龚榜初, 李大伟, 吴开云, 赵献民. 山桐子自然群体表型性状变异分析. *林业科学研究*, 2013, 26(1): 113-117.
- [15] 岁立云, 刘晓敏, 李周岐, 肖斌. 山桐子果实性状的变异及类型划分. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(8): 115-120.
- [16] Wang Y M, Yan H P, Ma T X, Li F, Liu Z. Study on germination and the content of proline, soluble sugar, starch, fat and soluble protein of *Idesia polycarpa* Maxim. seed at low temperature. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, 28(1): 124-130.
- [17] 陈珺肆, 吴君, 房丽莎, 王艳梅, 耿晓东, 刘震. 温度与日长对山桐子萌芽成枝的影响. *西北林学院学报*, 2019, 34(3): 111-117, 131-131.
- [18] 房丽莎, 徐自恒, 刘震, 李志, 耿晓东, 蔡齐飞, 翟雯婧, 周海清, 王艳梅. 山桐子果实发育过程中内含物、内源激素及光合特性的变化. *林业科学*, 2020, 56(11): 41-52.
- [19] 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1215-1999 森林土壤水分-物理性质的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [20] Li Y, Li S, Lu X H, Wang Q Q, Han H Y, Zhang X M, Ma Y H, Gan X H. Leaf phenotypic variation of endangered plant *Tetracentron sinense* Oliv. and influence of geographical and climatic factors. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(2): 623-636.
- [21] 冯秋红, 史作民, 徐峥静茹, 缪宁, 唐敬超, 刘兴良, 张雷. 岷江柏天然种群果实表型变异特征. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 748-756.
- [22] 徐嘉娟, 陈婷婷, 谢涛, 李芳, 耿阳阳, 朱亚艳, 许杰. 山桐子天然居群果实表型多样性分析及综合评价. *种子*, 2021, 40(9): 64-71.
- [23] 吕锋, 解孝满, 韩彪, 乔婕, 董昕, 吴丹, 陆璐, 李文清. 麻栎天然群体种子表型变异分析. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 174-179.
- [24] Zeneli G, Kola H, Dida M. Phenotypic variation in native *walnut* populations of Northern Albania. *Scientia Horticulturae*, 2004, 105(1): 91-100.
- [25] 董胜君, 王若溪, 张皓凯, 陈建华, 刘立新, 于庆福. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(6): 42-50.
- [26] 张毅, 敖妍, 刘觉非, 赵磊磊, 由海德. 不同群体文冠果果实性状变异特征. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(5): 1037-1043.
- [27] 张欢. 山桐子果实表型多样性与优树生长性状研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2021.
- [28] 苏上, 李振坚, 倪建伟, 耿涌杭, 许新桥. 山桐子果穗和果实性状多样性分析. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(2): 35-44.
- [29] 李欣. 我国油葡萄(山桐子)产业的现状与前景. *中国林业产业*, 2019(Z2): 68-73.
- [30] 魏丽萍, 韩艳英, 大布穷, 巩文峰, 邓公甫, 呼杰. 西藏光核桃果实表型性状变异分析与种质资源筛选. *北京林业大学学报*, 2020, 42(7): 48-57.
- [31] 邹金拓, 王鑫, 周玮, 林孟飞, 闫东方, 崔思明, 陈周超, 陈晓阳. 构树不同种源种子性状地理变异及其趋势分析. *种子*, 2020, 39(3): 62-67.
- [32] 郭孟齐, 肖亮, 廖剑锋, 易自力, 薛帅. 南荻野生居群的表型多样性及土壤养分对其表型的影响. *西北植物学报*, 2019, 39(10): 1868-1880.
- [33] 尹晓雷, 李先德, 林少颖, 阳祥, 王维奇, 张永勋. 不同轮作模式下土壤细菌群落特征及其对土壤全碳、全氮与温室气体释放潜力影响. *环境科学学报*, 2021, 41(12): 5161-5173.
- [34] 欧汉彪, 董利军, 李娟, 林建勇, 梁瑞龙. 闽楠种实性状表型多样性与环境地理因子的关系. *东北林业大学学报*, 2021, 49(8): 45-50.
- [35] 杜会聪, 蒋雅婷, 田敏, 张莹, 王彩霞. 浙江省野生蜡梅花部形态变异及其与环境因子的相关性. *生态学报*, 2018, 38(16): 5800-5809.
- [36] 冯嘉仪, 谢姗宴, 吴道铭, 欧阳健辉, 曾曙才. 氮磷钾配施对银杏果实和外种皮产量及品质的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1650-1659.