



贵州核桃种质资源表型性状多样性研究

卢中科¹, 曾亚军², 王 港², 侯 娜^{2*}, 陈胜群²

(1 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005; 2 贵州省核桃研究所, 贵阳 550005)

摘 要: 该研究以贵州省内的 3 个山脉(乌蒙山、苗岭山和武陵山)、19 个核桃和泡核桃实生居群、245 棵实生单株为研究材料, 对坚果表型性状 29 个指标的多样性、相关性、聚类及变异进行分析, 以揭示贵州核桃资源的表型遗传多样性水平, 为贵州核桃资源的保存与利用及核心种质构建提供依据。结果显示: (1) 核桃和泡核桃实生居群 245 份种质资源的 18 个表型质量性状 Simpson 指数为 0.26~0.82, Shannon-Wiener 指数为 0.12~1.79; 核桃小叶形状多样, 易发生顶叶退化, 坚果核壳表面特征、坚果形状及核仁皮色多样性丰富。(2) 坚果表型变异系数为 3.32%~47.67%, 平均为 21.28% 且差异显著 ($P<0.05$), 居群间变异系数为 9.42%~31.61% 且差异显著 ($P<0.05$); 居群内和居群间变异均是核桃表型多样性的来源, 但坚果性状在居群间差异显著性均高于居群内, 说明居群间变异是该区域坚果表型变异的主要来源。(3) 3 个山脉区域核桃表型均有不同程度变异, 其中, 苗岭山核桃表型变异程度低, 乌蒙山核桃表型变异程度高; UPGMA 聚类结果显示, 19 个核桃实生居群依据贵州山脉区域划分为三类, 表明贵州核桃资源的坚果表型性状平方欧氏距离表现出与地理区域或气候条件呈正相关的趋势。研究认为, 贵州具有丰富的核桃种质资源, 且核桃表型多样性高, 其表型变异主要来源于居群间变异。

关键词: 核桃; 坚果表型; 贵州; 遗传多样性

中图分类号: Q944.3; S664.1

文献标志码: A

Phenotypic Traits Diversities of Walnut Germplasm Resources in Guizhou

LU Zhongke¹, ZENG Yajun², WANG Gang², HOU Na^{2*}, CHEN Shengqun²

(1 Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China; 2 Guizhou Walnut Research Institute, Guiyang 550005, China)

Abstract: This study took 3 mountain ranges (Wumeng mountain, Miaoling mountain and Wuling mountain), 19 walnut and iron walnut populations, and 245 individual plants in Guizhou Province as the research materials, and analyzed the diversity, correlation, clustering and variation of 29 nut phenotypic traits, in order to reveal the phenotypic genetic diversity level of walnut resources in Guizhou, and provide a basis for the conservation and utilization of walnut resources in Guizhou and the construction of core germplasm. The results showed that: (1) the Simpson index of 18 phenotypic quality traits of 245 germplasm resources of walnut and iron walnut were 0.26—0.82, and the Shannon-Wiener index was 0.12—1.79. The shape of walnut leaflet was diverse, and parietal leaf degeneration was prone to occur, Nut shell surface characteristics, nut shape and Walnut skin color were rich in diversity. (2) The coefficient of variation of nut phenotype is 3.32%—47.67%, the average is 21.28% and the difference is significant ($P<0.05$), the coefficient of variation between populations is 9.42%—31.61% and the difference is significant ($P<$

收稿日期: 2022-05-24; 修改稿收到日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(31860215); 贵州省科技厅优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才[20195643]); 贵州省林业局基金(黔林科合 J 字[2022]04 号, 黔林科合 J 字[2022]05 号)

作者简介: 卢中科(1995—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事林木遗传育种与栽培研究。E-mail: 2538057145@qq.com

* 通信作者: 侯 娜, 博士, 高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: 849741705@qq.com

0.05)。Intra-population and inter-population variation is the source of walnut phenotypic diversity. However, the differences in nut traits between populations were significantly higher than those within population, indicating that inter-population variation was the main source of nut phenotypic variation in this region. (3) The phenotypes of walnuts in the three mountain regions have different degrees of variation, among which, the Miaoling Mountain had a low degree of walnut phenotype variation, while the Wumeng mountain had a high degree of walnut phenotypic variation. UPGMA clustering results showed that the 19 walnut populations were divided into three categories according to the Guizhou Mountain range, indicating that the square European distance of the nut phenotypic traits of Guizhou walnut resources showed a positive correlation with the geographical region or climatic conditions. It is believed that Guizhou is rich in walnut germplasm resources and has high phenotypic diversity, and its phenotypic variation mainly comes from inter-population variation.

Key words: walnut(*Juglans regia*); nut phenotype; Guizhou; genetic diversity

核桃(*Juglans regia* L.)与泡核桃(*J. sigillata* Dode)均为胡桃科(Juglandaceae)核桃属(*Juglans* L.)核桃组(Section *Juglans*)植物,广泛分布于中国西南地区^[1],其味极香,具有很高的经济价值,是中国重要的木本油料作物^[2]。贵州是中国核桃的主产区之一,其种植品种为核桃和泡核桃兼有,但以泡核桃为主,其独特的生境及小气候环境孕育了丰富的核桃野生资源,存在数量可观的实生居群和一定规模的天然居群,是核桃和泡核桃遗传资源的种质库^[3]。

表型特征多样性是环境多样性和遗传多样性的综合体现^[4],是研究生物多样性的方法之一。植物群体的表型特征遗传受地理环境条件的影响,因此,根据物种特征和地理分布信息可以帮助我们了解该区域的种质资源多样性状况、遗传变异信息及地域间的亲缘关系等^[5],此外,还可帮助我们区划种质资源,从而制定合理的开发利用方案和育种策略^[6-7]。

目前,核桃种质资源表型研究主要集中在新疆^[8-9]、四川^[10]、云南^[11]、甘肃^[12]、西藏^[13]等省份(自治区),以及大巴山^[14-15]和大别山^[16]等地区。贵州地区核桃种质表型研究的报道较少,只有部分以野核桃种质表型展开简单的分析^[17],并未深入挖掘该地区的核桃种质资源。因此,开展贵州地区核桃种质资源表型研究,可丰富核桃遗传资源种质库。为此,本研究以贵州地区的核桃和泡核桃种质资源为研究对象,通过对贵州乌蒙山、苗岭山和武陵山 3 个山脉 19 个天然居群 245 棵单株的 29 个核桃表型性状进行多样性指数、变异、相关性和聚类分析,初步探讨贵州核桃资源的表型多样性,明确贵州核桃实生资源的丰富程度,以期为贵州核桃的实生选育提供一定的理论依据,并为制定该地区核桃资源保存与利用策略及构建核心种质提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料采集与处理

本研究的试材采集范围是贵州省内的乌蒙山、苗岭山和武陵山 3 个山脉涉及 19 个县区(市),地区划分依据为贵州山脉区域类型,19 个核桃实生居群名称和采集地地理信息及样本数见表 1。根据当地林业部门的相关资料,在核桃资源相对集中的区域,走访当地群众获取树龄、果实特异性等相关信息,选择树龄 30 年以上的实生核桃和泡核桃树单株采集试验样品,从初步筛选的 520 份单株中,筛选具有优良农艺性状的核桃单株 245 株,每株采集大小基本一致且饱满的坚果 30 个带回实验室,晾干至恒质量后进行表型性状的测定。

1.2 测定方法

坚果表型性状测定参照《植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南——核桃属》(GB26909-2011-T)进行特征描述和赋值,调查测定了核桃和泡核桃的 29 个坚果表型性状,测试指南中未列出的特征用“其他”表示^[16](表 2)。其中,侧径、纵径、横径用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量,核仁质量、单果质量用天平(精度 0.01 g)测量,果壳厚度用螺旋测微仪(精度 0.001 mm)测量。3 个数量性状的计算公式为:

$$\text{三径均值} = (\text{纵径} + \text{侧径} + \text{横径}) / 3$$

$$\text{果形指数} = \text{纵径} / \text{横径}$$

$$\text{出仁率} = \text{核仁质量} / \text{单果质量} \times 100\%$$

1.3 数据处理

(1)非数值(质量)性状分析方法 对质量性状分别进行赋值(表 2),将质量性状数值化,利用 Excel 2007 数据处理软件计算 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数。

表 1 采样地信息及样本数

Table 1 The sampling location information and number of samples

地区 Location	居群 Population	代码 Code	采样数(份) Sample size	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	年均气温 Annual temperature/℃	年降水量 Annual precipitation/mm	年日照时数 Annual sunshine hours/h
乌蒙山区 Wumeng Mountain	威宁县 Weining	WN	38	1 770~2 308	103.4437~104.2842	26.1011~27.1456	10.0	890	1 800
	赫章县 Hezhang	HZ	18	1 669~1 885	104.2937~104.3628	27.1223~27.1434	11.8	927	1 404
	七星关区 Qixingguan	QXG	11	1 583~1 737	105.0323~105.1345	27.0619~27.1434	12.5	954	1 377
	水城县 Shuicheng	SC	12	1 647~1 869	105.0249~106.3837	26.1644~27.4252	12.4	1 100	1 430
	盘县 Panxian	PX	13	1 687~1 898	104.3012~104.4925	25.3946~26.4216	13.5	1 390	1 593
	兴义市 Xingyi	XY	12	1 585~1 820	104.3800~104.4900	24.3800~25.5100	16.1	1 531	1 647
	兴仁市 Xingren	XR	10	1 247~1 450	105.1114~105.2530	23.3708~25.4030	15.2	1 315	1 564
	普安县 Pu'an	PA	10	1 462~1 695	104.5355~105.5916	25.3525~25.4050	13.7	1 439	1 563
	望谟县 Wangmo	WM	8	1 016~1 430	106.0106~106.1016	25.1705~25.2413	19.5	1 237	1 401
	西秀区 Xixiu	XX	9	1 326~1 352	106.0016~106.0208	26.0212~26.1104	14.1	1 325	1 270
苗岭山区 Miaoling Mountain	镇宁县 Zhenning	ZN	10	1 016~1 097	105.5008~105.5898	25.1705~25.5652	16.2	1 277	1 142
	普定县 Puding	PD	9	1 350~1 480	105.4960~105.5015	26.2622~26.2651	15.1	1 378	1 165
	关岭县 Guanling	GL	10	1 572~1 580	105.2651~105.3128	25.4848~25.5824	16.3	1 342	1 385
	紫云县 Ziyun	ZY	11	1 246~1 370	106.0616~106.0640	25.7522~25.7527	15.3	1 337	1 455
	惠水县 Huishui	HS	12	1 150~1 173	106.3634~106.4721	25.5348~26.0119	15.7	1 213	1 318
	石阡县 Shiqian	SQ	24	907~1 167	108.2776~108.0810	27.2615~27.5616	17.3	1 069	1 233
武陵山区 Wuling Mountains	沿河县 Yanhe	YH	11	560~1 029	108.2538~108.4586	28.2984~28.9658	15.5	1 110	1 250
	德江县 Dejiang	DJ	8	1 138~1 177	107.9921~108.4586	28.3320~28.9658	16.0	1 237	1 082
	松桃县 Songtao	ST	9	719~927	108.7000~108.7123	28.3714~28.4205	16.5	1 378	1 228

表 2 核桃表型特征描述及赋值

Table 2 The description and assignment of the quality characters for walnut

部位 Type	代码 code	表型质量性状 Phenotypic quality trait	赋值及描述 Description and assignment
叶片 Leaf	1	小叶形状 Shape of leaflet	1. 椭圆形 Ellipse;2. 长椭圆形 Long ellipse;3. 阔椭圆形 Broad elliptic
	2	顶叶退化现象 Parietal degeneration	1. 有 Exist;2. 无 None
	3	叶尖形状 Shape of leaf tip	1. 钝形 Blunt;2. 渐尖 Tapered;3. 锐尖 Sharp
	4	叶缘形状 Shape of leaf margin	1. 全缘 Leaf margin smoothly;2. 细锯齿 Fine serration
坚果 Nut	5	坚果形状 Nut shape	1. 扁圆形 Long circular1;扁圆形 Long circular;2. 倒三角形 Upside-down triangle;3. 阔卵形 Broad ovate;4. 阔梯形 Broad trapezium;5. 圆形 Circular;6. 阔椭圆形 Broad elliptic;7. 长方形 Rectangle;8. 梯形 Trapezium;9. 卵形 Ovum;10. 三角形 Triangle;11. 椭圆形 Ellipse;12. 心形 Heart-shaped
	6	核壳表面特征 Nut surface features	1. 刻纹浅、少 Groove shallow and slightly;2. 刻纹浅、多 Groove shallow and strongly;3. 刻纹深、少 Groove deep and slightly;4. 刻纹深、多 Groove deep and strongly;5. 刻窝浅、少 Pit shallow and slightly;6. 刻窝浅、多 Pit shallow and strongly;7. 刻窝深、少 Pit deep and slightly;8. 刻窝深、多 Pit deep and strongly
	7	果顶形状 Shape of top perpendicular to suture	1. 尖 Strong pointed;2. 平 Flat;3. 稍平 Slightly flat
	8	果肩形状 Shape of apex perpendicular to suture	1. 溜 Glossy;2. 平 Truncate;3. 耸 Tower;4. 圆 Rounded
	9	果底形状 Shape of base perpendicular to suture	1. 凹 Concave;2. 平 Flat;3. 凸 Bulge;4. 稍凸 Slightly bulge
	10	缝合线特征 Suture line character	1. 凹 Concave;2. 隆起 Swelling;3. 平 Flat
	11	缝合线紧密度 Suture line tightness	1. 较弱 Rarely;2. 弱 Slightly;3. 中 Moderately;4. 强 Strongly
	12	核壳厚度类型 Type of core shell thickness	1. 薄壳 Light shell;2. 中壳 Moderate shell;3. 厚壳 Thick shell;4. 纸皮 Papery;5. 露仁 Bare kernel
	13	内褶壁 Minor septum	1. 革质 Leathery;2. 骨质 Bony;3. 退化 Degeneration
	14	横隔膜 Major septum	1. 革质 Leathery;2. 骨质 Bony;3. 膜质 Membranous
	15	核仁饱满度 Fullness of kernel	1. 不饱满 Shrivelled;2. 较饱满 Almost full;3. 饱满 Full
	16	核仁皮色 Kernel skin color	1. 褐 Brown;2. 黄 Yellow;3. 黄白 Yellow white;4. 黄褐 Yellow brown;5. 浅黄 Light yellow;6. 紫 Purple;7. 紫红 Purple red
	17	坚果均匀度 Nut evenness	1. 不均匀 Unevenly;2. 较均匀 Relative evenly;3. 均匀 evenly
	18	核仁风味 Kernel flavor	1. 好 Excellently;2. 中 Moderately

注:代码与表型质量性状相对应,下同
Note:Codes correspond to phenotypic quality traits, the same as below

Simpson 指数 $=1-\sum_{i=1}^s P_i$

Shannon-Wiener 指数 $=1-\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$

其中,S 是指核桃某一表型质量性状指标多态性的数量; P_i 是指核桃某一表型质量性状指标第*i* 种多态性种质份数占总供试种质份数的比例。

(2)数量性状分析方法 运用 Excel 2007 软件进行数据统计和分析,包括 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、平均值和变异系数等^[18-19]。运用 SPSS 26.0 软件统计核桃表型性状的平均值和标准差,用性状的变异系数(CV)表示居群表型多样性水平^[20],并对其做 Duncan 检验;对各性状观测值采用方差分析比较居群内的差异显著性^[21];用表型分化系数反映居群间表型分化程度^[22]。

(3)表型性状聚类分析方法 运用 SPSS 26.0

将表型性状数值进行标准化处理,计算欧氏距离,用类平均法(UPGMA)对距离矩阵进行聚类分析,利用 MEGA-X-10.2.6 软件作图。

2 结果与分析

2.1 核桃表型性状频率分布及多样性指数

2.1.1 核桃表型质量性状多样性分析 18 个表型质量性状的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数分别为 0.26~0.82 和 0.12~1.79(表 3)。在叶片性状中,Simpson 指数最高是顶叶退化现象,为 0.50,叶尖形状最低,为 0.37。Shannon-Wiener 指数最高是小叶形状,为 0.75,叶缘形状最低,为 0.12;在坚果性状中,Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数分别为 0.26~0.82 和 0.45~1.79,其中,核壳表面特征的 Simpson 指数和 Shannon-Wie-

表 4 核桃 11 个数量性状的多样性统计分析

Table 4 Analysis of diversity for 11 quantitative characters of walnut

性状 Character	代码 Code	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	极差 R	方差 Variance	标准差 SD	变异系数 CV/%
小叶数 Number of leaflets/slice	19	10.24	17.00	7.00	10.00	3.42	1.85	18.06
单枝结果数 Number of walnut of single branches/an	20	2.97	9.00	1.00	8.00	0.79	0.89	29.87
青皮厚度 Thickness of green husk/mm	21	6.04	10.50	1.50	9.00	2.62	1.62	26.82
纵径 Longitudinal diameter/mm	22	36.03	45.30	26.60	18.70	13.32	3.65	10.13
横径 Transverse diameter/mm	23	30.61	41.70	24.20	17.50	8.03	2.83	9.26
侧径 Side diameter/mm	24	32.96	42.80	25.10	17.70	10.74	3.28	9.94
三径均值 Geometric mean diameter/mm	25	33.20	41.70	25.80	15.90	7.60	2.76	8.30
果形指数 Nut shape index	26	1.18	1.68	0.77	0.91	0.01	0.12	10.00
核仁重 Weight of kernel/g	27	5.04	13.30	2.02	11.28	2.28	1.51	29.91
单果重 Weight of nut/g	28	10.16	34.00	4.30	29.70	8.90	2.98	29.37
出仁率 Kernel rate/%	29	50.31	75.50	31.80	43.70	53.51	7.31	14.54

注:代码与表型数量性状相对应,下同

Note:Codes correspond to phenotypic quantitative traits, the same below



图 1 核桃表型不同数量性状的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of different quantitative traits of germplasm in walnut

著正相关 19 对。11 个表型数量性状中,青皮厚度与纵径、果形指数呈显著正相关;纵径与横径、果形指数、核仁重、单果重呈显著正相关,与侧径极显著正相关;侧径与核仁重、单果重呈显著正相关;核仁重与单果重呈显著正相关;果形指数与横径和侧径呈显著负相关;单枝结果数与青皮厚度呈显著负相关;出仁率与单果重、侧径、横径、纵径呈显著负相关。该分析表明核桃三径对青皮厚度、核仁重、单果

重和出仁率的影响程度较大,即三径均值越大,质量越重,出仁率越低。

2.3 核桃表型变异与分化

通过 3 个山脉区域的核桃叶片及坚果表型变异系数分析比较可知(表 5),19 个天然居群核桃表型性状的变异系数为 3.32%~47.67%,差异显著($P < 0.05$),平均为 21.28%。在叶片性状中,变异系数最大的是顶叶退化现象(25.98%),叶缘形状(3.32%)

表 5 19 个天然居群核桃表型性状变异系数及差异显著性分析

Table 5 Analysis of coefficients variation (CV) and significant differences in phenotypic traits of walnut accessions from 19 natural populations

性状代码 Character code	居群 Population																		均值 Mean/%		
	SQ	DJ	YH	ST	XX	WM	ZN	GL	ZY	PD	SC	PX	XY	PA	XR	HS	WN	HZ	QXG		
1	37	18.54	28.46	0	0	0	0	0	0	52.22	48.07	50.08	47.14	24.85	37.42	14.24	21.4	0	19.97cdef		
2	25.28	37	20.35	0	43.3	31.43	37.42	40	37.27	0	0	36.74	0	28.75	39.12	34.02	33.92	26.76	22.25	25.98bc	
3	20.7	27.64	0	0	0	0	0	0	0	20.89	20.82	21.32	19.17	21.07	0	18.42	20.25	0	10.01efghi		
4	26.06	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.32i		
5	51.81	42.82	61.1	0	0	61.72	50.67	33.33	56.57	20.38	49.49	80.03	60.65	84.98	88.93	40.09	33.41	45.08	44.72	47.67a	
6	36.52	49.44	67.06	32.64	0	50.49	74.83	76.98	11.77	75.25	53.48	35.55	47.07	16.8	0	75.86	51.47	74.99	51.8	46.42a	
7	58.98	59.33	58.79	0	0	0	58.79	0	60.86	50	58.39	48.68	0	52.7	0	0	57.38	59.26	60.45	35.98ab	
8	54.6	61.42	52.39	20.2	57.28	21.79	52.39	70.71	34.23	33.33	62.67	49.87	45.54	41.14	39.12	21.35	43.99	54.29	39.75	45.06a	
9	46.49	22.25	44.1	47.14	15.75	34.47	47.14	29.46	37.27	43.3	49.73	43.91	31.49	41.14	24.85	49.89	39.27	32.6	40.69	37.94a	
10	10	18.54	0	0	21.65	0	21.35	0	0	0	19.93	13.35	20.1	0	22.82	0	16.58	20.79	14.42	10.5efghi	
11	25.52	24.08	31.49	0	17.32	11.31	14.85	0	0	0	0	0	0	22.22	49.79	64.55	46.18	59.23	50.81	21.97cde	
12	76.58	67.79	0	84.85	0	73.07	59.08	0	0	0	63.55	45.17	64.78	57.91	37.27	0	69.38	65.19	78.52	44.38a	
13	37.68	53.99	0	0	0	0	58.79	0	0	0	9.9	34.55	30.7	52.7	49.79	27.85	36.26	29.78	38.06	24.21cd	
14	54.05	50.81	0	0	0	0	58.79	0	0	0	0	40.29	47.53	22.59	63.89	0	27.45	38.36	44.4	23.59cd	
15	24.15	18.54	0	0	21.65	19.72	13.23	0	22.82	0	43.22	19.36	17.97	17.89	22.82	33.07	28.9	20.79	31.62	18.72cdefg	
16	50.72	31.62	17.21	15.71	34.64	74.07	43.17	50	19.44	43.3	55.59	48.62	34.56	36.66	49.79	51.87	39.72	37.72	45.51	41.05a	
17	17.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.06	0	0	0	0	30.6	7.81	19.21	21.28	5.85hi	
18	34.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36.74	0	0	37.27	37.95	29.23	36.38	36.7	13.08defefghi	
19	24.3	21.37	23.01	25.71	4.68	8.42	9.06	17.52	14.43	12.5	16.51	14.5	12.94	19.99	22.27	16.8	15.55	15.87	17.21	16.45cdefgh	
20	37.87	14.35	21.96	0	0	0	0	22.22	0	0	64.05	19.66	13.92	35.86	0	0	20.89	25.21	24.05	15.79cdefgh	
21	35.76	27.38	31.23	28.28	0	8.8	11.25	8.67	8.44	2.36	20.35	18.78	15.87	16.24	10.59	10.43	19.3	20.56	17.83	16.43cdefg	
22	7.47	6.46	8.39	5.53	11.74	6.67	8.76	4.4	8.77	19.39	12.64	11.93	9.84	6.95	5.82	8.3	10.9	11.96	7.69	9.14fghi	
23	8.23	6.28	4.4	4.93	1.62	12.77	13.29	5.21	9.38	11.39	12.54	10.23	11.38	7.33	4.57	3.41	9.37	7.84	8.8	8.05fghi	
24	9.72	7.98	10.41	6.49	2.47	6.71	13.59	4.6	2.97	10.91	14.62	8.35	12.55	7.98	3.67	4.86	10.3	9.31	9.45	8.26fghi	
25	7.44	5.12	3.8	1.86	5.12	4.1	7.56	1.85	3.34	14.13	12.79	7.76	10.25	6.71	4.04	4.51	9.08	8.77	5.67	6.52ghi	
26	7.61	8.91	11.56	10.78	11.52	15.22	19.35	9.7	13.92	8.93	6.74	12.11	7.06	4.92	5.79	7.91	9.33	9.86	12.74	10.21efghi	
27	22.34	19.71	18.47	9.18	12.02	8.87	16.78	11.33	16.17	46.77	30.71	30.35	27.69	20.15	6.11	12.56	38.8	20.51	17.2	20.3cdef	
28	52.81	13.6	13.29	8.11	7.19	12.51	21.7	1.47	13.97	33.51	36.8	19.32	33.42	19.06	12.66	10.82	31.01	19.21	13.03	19.66cdef	
29	15.48	9.51	8.21	17.86	5.37	10.64	7.76	10.32	8.77	1.55	11.26	12.59	16.79	8.39	6.66	13.76	16.73	10.83	11.48	10.73efghi	
均值 Mean/%	31.61	26.26	18.47	11.01	9.42	16.3	24.81	13.72	13.12	14.72	27.35	26.46	22.19	23.98	22.54	20.62	27.06	28.34	26.42	21.28	

注：居群代码见表 1；性状代码见表 2 及表 4；不同小写字母表示性状间在 0.05 水平上差异显著，下同

Note: Code of population see Table 1; Character code see Table 2 and Table 4; Different normal letters indicate significant differences between traits at the 0.05 level; The same as below

表 6 坚果性状在居群间及居群内的 anova 分析

Table 6 Anova analysis of nut traits between populations and within population

性状代码 Character code	显著性 Sig.		性状代码 Character code	显著性 Sig.		性状代码 Character code	显著性 Sig.	
	居群间 Among populations	居群内 Within population		居群间 Among populations	居群内 Within population		居群间 Among populations	居群内 Within population
1	0.000	1.000	11	0.000	0.003	21	0.000	0.337
2	0.000	0.034	12	0.008	0.120	22	0.221	0.075
3	0.000	0.036	13	0.000	0.261	23	0.193	0.494
4	0.000	1.000	14	0.000	0.134	24	0.225	0.210
5	0.065	0.998	15	0.000	0.042	25	0.076	0.047
6	0.000	0.555	16	0.067	0.405	26	0.573	0.810
7	0.058	0.088	17	0.000	0.999	27	0.003	0.012
8	0.001	0.719	18	0.000	0.010	28	0.584	0.278
9	0.047	0.637	19	0.003	0.752	29	0.000	0.003
10	0.000	0.196	20	0.004	0.970			

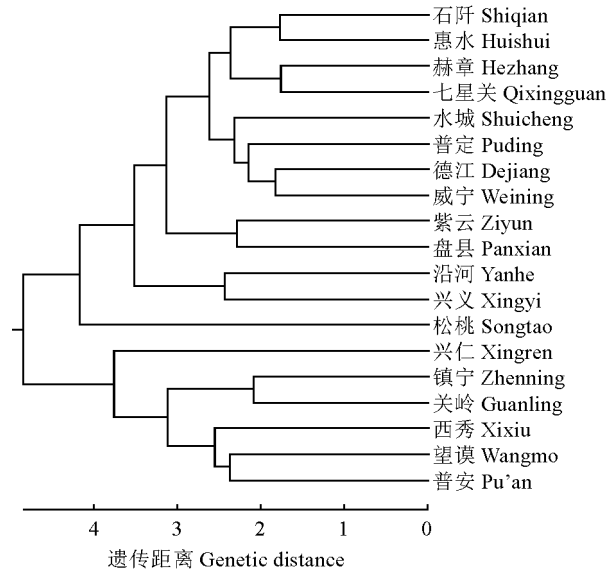


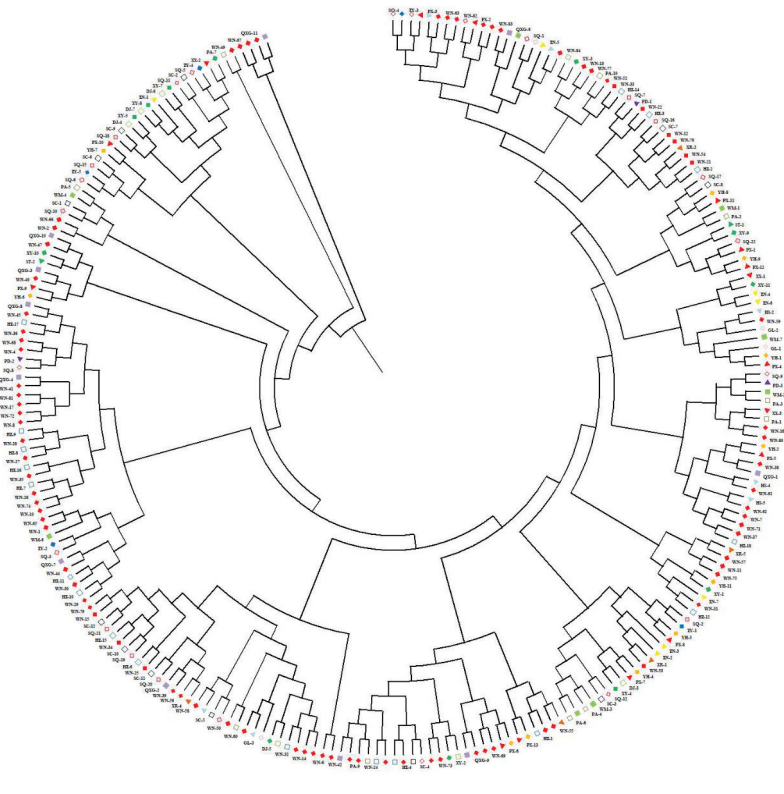
图 2 19 个天然居群基于表型性状平均欧氏距离聚类分析
Fig. 2 Cluster analyses of 19 populations based on average
Euclidean distance of phenotypic traits

最小;在坚果性状中,变异系数最大的是坚果形状(47.67%),坚果饱满度(5.85%)最小。表明贵州地区核桃叶片性状变异程度小,坚果形状变异程度较大,从坚果三径均值来看,坚果大小均匀,变异程度小;从 19 个天然居群来看,群体内 29 个表型性状的变异系数为 9.42%~31.61%,差异显著($P<0.05$),变异系数最大的地区是石阡,最小的地区是西秀。此外,乌蒙山区(水城、赫章和威宁)核桃表型性状变异程度较大,而武陵山区(松桃)和苗岭山区(关岭和紫云)部分变异程度较小。因此,居群内和居群间变异均是核桃表型多样性的来源,且变异多

集中于坚果表型。
由表 3 及表 4 分析结果可知,坚果性状中顶叶退化现象、小叶形状、核壳表面特征、核仁皮色、单枝结果数、核仁重的变异程度均较高。通过对 19 个核桃实生居群的 18 个表型性状进行居群间及居群内的 Anova 分析(表 6)可知:顶叶退化现象、小叶形状、核壳表面特征、单枝结果数、核仁重等变异程度较高的性状在居群间的差异极显著($P<0.01$),且居群间差异显著性高于居群内,此外,其余坚果性状差异显著性也呈居群间高于居群内的现象,说明居群间变异是该区域坚果表型变异的主要来源。

2.4 居群间表型性状聚类分析

2.4.1 天然居群聚类分析 对 3 个山脉 19 个实生居群 29 个核桃单株表型性状采用组间联结-平方欧氏距离法进行 UPGMA 聚类分析(图 2)。其平方欧氏距离为 12.575~200.918,平均平方欧氏距离为 67.251,其中,赫章与七星关的平方欧氏距离最小,为 12.575,沿河与关岭的平方欧氏距离最大,为 200.918。表明七星关和赫章的核桃资源关系较近,遗传变异程度小;沿河县与关岭县的亲缘关系较远,遗传变异程度大。当遗传距离为 4 时,可将 19 个核桃实生居群分为三大类,第一类为苗岭地区,主要包括普安县、望谟县、西秀区、关岭县、镇宁县和兴仁市;第二大类为武陵山区,以松桃县为主;第三大类大部分位于乌蒙山区,主要包括兴盘县、威宁县、普定县、水城县、七星关区、赫章县,其余居群在苗岭山区和武陵山区有零星分布。表明地理区域及立地条件对聚类分析结果有显著影响。



图内字母表示居群代码,具体含义同表 1,数字表示该居群内不同核桃单株

图 3 245 份核桃单株基于表型性状平均欧氏距离聚类分析

The letters in the figure represent the population code, and the specific meaning is the same as Table 1,
The numbers represent different walnut individual plants in the population

Fig. 3 Cluster analysis of 245 walnut based on the average Euclidean distance of phenotypic traits

表 7 不同地理区域下 29 个坚果性状的变异情况

Table 7 Variation of 29 nut traits in different geographical regions

性状代码 Character code	变异系数 CV/%			性状代码 Character code	变异系数 CV/%		
	乌蒙山区 Wumeng Mountain	苗岭山区 Miaoling Mountain	武陵山区 Wuling Mountains		乌蒙山区 Wumeng Mountain	苗岭山区 Miaoling Mountain	武陵山区 Wuling Mountains
1	32.25	5.35	21.00	16	43.52	45.21	28.82
2	23.44	31.92	20.66	17	7.92	4.37	4.29
3	17.74	0.00	12.09	18	22.04	5.42	8.58
4	0.00	0.00	15.77	19	16.86	11.92	23.60
5	60.91	37.54	38.93	20	25.46	3.17	18.55
6	41.40	52.17	46.42	21	17.44	7.14	30.66
7	42.11	24.24	44.28	22	9.72	9.72	6.96
8	47.05	41.58	47.15	23	9.01	8.15	5.96
9	37.96	36.75	40.00	24	9.53	6.59	8.65
10	16.00	6.14	7.14	25	8.13	5.80	4.56
11	28.53	15.43	20.27	26	8.57	12.36	9.72
12	60.22	18.88	57.31	27	23.94	17.79	17.43
13	35.22	12.38	22.92	28	23.06	14.45	21.95
14	35.56	8.40	26.22	29	11.84	8.31	12.77
15	25.32	15.78	10.67				

2.4.2 表型性状聚类分析 图3为采用组间联结-平方欧氏距离法对245份材料的29个表型性状的UPGMA聚类结果,由图3可知当遗传距离为150时,可将245份材料分为3大类,第一大类为七星关的QXG-11和威宁的WN-48、WN-67、WN-3共4份材料,第二大类为威宁的WN-49和普安的PA-7共2份材料,剩余239份材料归为第三类。大部分种质均表现为不同地区聚集为一类,少部分地区较为集中,如第一类聚集在乌蒙山区,其表型性状均表现为:小叶长椭圆形、叶渐尖全缘、单枝结果数为3、坚果圆形、缝合线弱且隆起、果形指数无显著差异、横膈膜膜质、坚果较均匀;第二类聚集在乌蒙山区及苗岭地区,表型性状表现为叶渐尖全缘、坚果圆形、果形指数无显著差异、横膈膜膜质、坚果较均匀。

2.4.3 地理区域的表型变异规律 如表7所示,通过3个地理区域实生居群29个坚果表型性状的变异情况分析可知,乌蒙山区核桃小叶形状、坚果形状、核壳厚度、内褶壁、横膈膜、单枝结果数、核仁重等坚果性状的变异系数分别为:32.25%、60.91%、60.22%、35.22%、35.56%、25.46%和23.94%,该类性状变异程度均高于苗岭山区和武陵山区;苗岭山区核桃坚果表型变异主要集中在顶叶退化现象、核壳表面特征和核仁皮色,其变异系数分别是31.92%、52.17%和45.21%;武陵山区核桃坚果表型变异集中在叶片性状中,分别是小叶数和叶缘形状,变异系数分别是23.60%和15.77%;总体来看,3个地理区域核桃坚果表型均有变异,其中,乌蒙山区核桃表型性状的变异程度要高于苗岭山区和武陵山区。

3 讨论

植物表型性状是植物遗传多样性的直观反映,能够体现遗传变异的规律^[23],其多样性受环境因素与遗传因素共同作用,因此常用表型标记来检测遗传变异,尤其在一些变异性大的树种研究中占有重要位置^[24],并对农林栽植品种的选育工作有重要意义^[25]。Simpson指数和Shannon-Wiener指数可表示植物群体物种或个体间的遗传多样性,在樱桃、杏及板栗表型标记中已有大量研究^[26-27],本研究通过对贵州3个山脉的19个天然居群245份核桃29个表型性状的多样性分析发现,245份核桃种质资源的Simpson指数和Shannon-Wiener指数分别为0.26~0.82和0.12~1.79,表明该地区核桃资源具有丰富的表型多样性,涵盖核桃属DUS测试指南中

大部分表型性状。其中,叶片易出现顶叶退化现象,此外,叶片性状多样性指数总体低于坚果表型,说明叶片的变异程度较坚果变异低,遗传稳定性较好。坚果性状中,核壳表面特征、核仁皮色、坚果形状及果底性状多样性指数较高,与刘昊^[10]研究凉山州核桃的结果相似,核壳表面特征及核仁皮色多样性指数均高于其他性状,反映这两个性状在不同地理环境下均容易发生遗传变异,表型多样性相对丰富,刘胤^[28]也认为果实形状、果皮颜色具有较高的遗传多样性。而坚果形状中,圆形及扁圆形占比较高,这一结果与肖良俊^[11]和刘昊等^[10]的研究结果一致,这表明核桃坚果形状均以圆形及扁圆形为主。此外,贵州还有部分乌仁资源,进一步验证该地区核桃种质资源丰富多样,并具有较大的挖掘利用潜力。

表型性状既有变异性也有稳定性,通过居群间数量性状的变异系数及标准差大小可以判断性状变异程度^[29],若性状平均值相差较大,是不能判定变异程度的,需结合变异系数进行分析,变异系数越大说明该性状在品种间的差异越大,遗传多样性越丰富,对优良品种的选择就越有利^[30]。反之则说明遗传稳定性较好,不易受环境调控^[29]。在坚果表型数量性状中,变异系数最大的是核仁重,其次是单果重,变异系数最小的是坚果三径,表明245份坚果的果型大小相对均匀,遗传稳定性好。本研究中核桃单果质量在4.30~34.00 g,与甘肃省核桃单果质量3.78~20.50 g^[30]、西藏核桃单果质量6.50~22.50 g^[13]、罗马尼亚西南部核桃单果质量6.80~18.40 g^[31]和大巴山区核桃单果质量4.11~22.87 g^[16]的变异范围要大许多。由此可见,贵州的核桃资源丰富,该地区拥有34.00 g大果核桃,也有4.30 g的小果核桃,根据中国《核桃坚果等级》标准,单果质量越大等级越高,因此丰富了贵州地区大果型品种选育,并且较大的坚果质量变异范围也为中、小果型品种的选育提供了丰富的种质资源。此外,单枝结果数的变异系数也较大,其结果数范围为1~9,为高产核桃品种选育提供了基础。

果实不同性状间普遍存在相关性,对它们进行相关性选择有很大意义^[32]。本研究中,核桃表型10个数量性状间存在较高的相关性,其中,单果重与纵径、横径和侧径呈显著正相关,说明长度形状与单果质量呈正相关关系,坚果三径越大,单果质量越重,这与邓凤彬^[9]研究新疆野核桃的结果一致;此外,出仁率与单果重、侧径、纵径、横径和果仁重呈显著负相关,说明坚果果型越大,出仁率越低。因此,在核

桃良种选育时需要优先考虑单果重、出仁率、坚果三径、果形指数等数量性状指标。

本研究中 245 份核桃种质资源分别按地区及表型性状进行聚类,结果显示均被划分为 3 个大类。从分类结果上看,各类群的划分基于地理区域并以种质亲缘关系较近分为一个大类,供试种质有明显的地域类型,如普安县、望谟县、西秀区、关岭县、镇宁县、兴仁市,属于苗岭山区,均在贵州西南部。第二大类是松桃县,属于武陵山区,位于贵州东北部;而部分地区距离较远却被归为一个大类,其原因可能是核桃作为贸易商品之一,受到较强的人为干扰^[33],导致地区间核桃群体分化不明显,也说明贵州核桃种质资源表型性状的变异是不连续的,这也侧面说明贵州核桃种质资源表型的多样性与变异。

从地理分布来看,贵州核桃天然种群的分布范围较广,经度差为 4°,纬度差为 3°,海拔落差 1 700 m,各种群分布于不同山地,加上贵州小气候类型多样,产生不同的小生境,导致核桃种群间有较大的变

异。从繁殖系统来看,核桃是雌雄同株异花植物,属风媒异花传粉^[1],贵州天气多阴雨,尤其在花期,花粉传播会遭受连绵阴雨的影响,导致各种群间交流较少,逐渐形成分化。

4 结 论

贵州核桃种质资源表型变异丰富,主要表现为小叶形状、坚果核壳表面特征、坚果形状及核仁皮色多样,顶叶退化现象普遍,居群间变异是贵州核桃坚果表型变异的主要来源;亲缘关系以七星关区和赫章县最近,以沿河县和关岭县最远;3 个山脉区域核桃表型均有变异,其中,苗岭山区核桃表型变异程度低,乌蒙山区核桃表型变异程度高;聚类结果显示,供试核桃依据贵州山脉区域划分为三个类群,与地理区域或气候条件呈正相关趋势。因此,贵州有丰富核桃种质资源,核桃表型多样性高,研究结果对贵州核桃种质资源的区划和资源保护利用开发策略的制定提供重要参考。

参考文献:

[1] 裴 东,鲁新政. 中国核桃种质资源[M]. 北京:中国林业出版社, 2011.

[2] 张志华,裴 东. 核桃学[M]. 北京:中国农业出版社, 2018.

[3] 曾钦滕,曾亚军,陈胜群,等. 贵州核桃核心种质筛选与构建研究[J]. 西北植物学报,2022, **42**(5): 865-873.

ZENG Q M, ZENG Y J, CHEN S Q, *et al*., Study on screening and construction of Guizhou walnut core collection[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42** (5): 865-873.

[4] 李 斌,顾万春,卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究 [J]. 生物多样性, 2002, **10**(2): 181-188.

LI B, GU W C, LU B M. A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus bungeana* [J]. *Chinese Biodiversity*, 2002, **10**(2): 181-188.

[5] 徐刚标. 植物群体遗传学[M]. 北京:科学出版社,2009: 263.

[6] 阎国荣,许正著. 中国新疆野生果树研究[M]. 北京:中国林业出版社, 2010.

[7] 廖 康. 新疆野生果树资源研究进展[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社, 2013.

[8] 李亚兰,潘存德,范江涛,等. 基于坚果表型性状的新疆核桃种质资源多样性与分类[J]. 西南农业学报, 2019, **32**(9): 1 986-1 994.

LI Y L, PAN C D, FAN J T, *et al*., Diversity and classification of common walnut(*Juglans regia* L.) germplasm in Xinjiang based on nut phenotype traits[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **32**(9): 1 986-1 994.

[9] 邓凤彬,罗立新,虎海防,等. 新疆野核桃坚果表型性状多样性分析[J]. 果树学报, 2018, **35**(3): 275-284.

DENG F B, LUO L X, HU H F, *et al*., Analysis of phenotypic diversity of nuts in wild walnut (*Juglans cathayensis* Dode) in Xinjiang[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, **35** (3): 275-284.

[10] 刘 昊,马庆国,张继勇,等. 凉山州核桃坚果表型多样性研究[J]. 林业科学研究,2017, **30**(5): 771-778.

LIU H, MA Q G, ZHANG J Y, *et al*., Phenotypic diversities of nuts of walnut populations originated from seedlings in Liangshan prefecture[J]. *Forest Research*, 2017, **30**(5): 771-778.

[11] 肖良俊,吴 涛,贺 娜,等. 怒江州核桃种质资源坚果表型特征及多样性[J]. 东北林业大学学报,2018, **46**(9): 46-49.

XIAO L J, WU T, HE N, *et al*., Phenotypic traits and diversity of nuts of walnut germplasm resource in Nujiang prefecture of Yunnan[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, **46**(9): 46-49.

[12] 雒宏佳,李建红,赵生春,等. 甘肃省核桃坚果表型特征及多样性研究[J]. 中国果树,2019,**9**(5): 87-92.

LUO H J, LI J H, ZHAO S C, *et al*., Phenotypic characteristics and diversity of walnut nuts in Gansu Province[J]. *China Fruits*, 2019,**9**(5): 87-92.

[13] 王金星. 西藏核桃实生类型叶片和坚果表型多样性及其相关关系研究[D]. 南宁:广西大学, 2011.

[14] 徐永杰,韩华柏,王 滑,等. 大巴山区核桃实生居群的坚果表型和遗传多样性[J]. 林业科学,2016, **52**(5): 111-119.

XU Y J, HAN H B, WANG H, *et al.* Phenotypic and genetic diversities of nuts of walnut (*Juglans regia*) populations originated from seedlings in Daba Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(5): 111-119.

[15] 徐永杰. 大巴山区核桃种质资源评价及其坚果特异性状发掘[D]. 北京:中国林业科学研究院,2016.

[16] 张深梅. 大别山山核桃坚果表型和营养成分多样性分析[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.

[17] 娄丽,陈骏,耿阳阳,等. 贵州野核桃种子的表型多样性分析[J]. 贵州农业科学, 2017, **45**(5): 13-15.

LOU L, CHEN J, GENG Y Y, *et al.* Phenotypic diversity analysis of *Juglans cathayensis* seeds in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2017, **45**(5): 13-15.

[18] 陈俊华,文吉富,王国良,等. Excel 在计算群落生物多样性指数中的应用[J]. 四川林业科技, 2009, **30**(3): 88-90.

CHEN J H, WEN J F, WANG G L, *et al.* On application of excel in calculating the biodiversity index of communities[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2009, **30**(3): 88-90.

[19] 刘雨芳. EXCEL 在群落生物多样性参数计算中的应用[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2003, **25**(2): 80-82.

LIU Y F. On application of calculating parameters on biodiversity in communities with EXCEL[J]. *Journal of Xiangtan Normal University* (Natural Science Edition), 2003, **25**(2): 80-82.

[20] 徐斌,彭莉霞,杨会肖,等. 杜鹃红山茶叶片主要性状的遗传多样性分析[J]. 植物研究, 2015, **35**(5): 730-734.

XU B, PENG L X, YANG H X, *et al.* Genetic diversity analysis for leaf main traits of *Camellia azalea* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, **35**(5): 730-734.

[21] 张莹,曹玉芬,霍宏亮,等. 基于花表型性状的梨种质资源多样性研究[J]. 园艺学报, 2016, **43**(7): 1 245-1 256.

ZHANG Y, CAO Y F, HUO H L, *et al.* Research on diversity of pear germplasm resources based on flowers phenotype traits[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, **43**(7): 1 245-1 256.

[22] 钱迎倩,马克平. 生物多样性研究的原理与方法:生物多样性研究系列专著 1 [M]. 北京:中国科学技术出版社,1994.

[23] 曾斌,罗淑萍,李疆,等. 新疆野巴旦杏天然居群叶片性状表型多样性研究[J]. 新疆农业科学, 2008, **45**(2): 221-224.

ZENG B, LUO S P, LI J, *et al.* Study on phenotypic diversity of morphologic characteristics of *Amygdalus ledebouriana* Schlecht. leaves in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, **45**(2): 221-224.

[24] A EBRAHIMI. Study on some morphological and physical attributes of walnut used in mass models[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, **121**(4): 490-494.

[25] SCHAAL B A, LEVERICH W J, ROGSTAD S H. A Comparison of Methods for Assessing Genetic Variation in Plant Conservation Biology [M]. New York: Oxford University Press, 1991: 1.

[26] 刘娟,廖康,曼苏尔·那斯尔,等. 新疆杏种质资源表型多样性研究[J]. 果树学报, 2014, **31**(6): 1 047-1 056.

LIU J, LIAO K, MANSUR Nasir, *et al.* Research on phenotypic diversity of apricot germplasm resources in Xinjiang [J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, **31**(6): 1 047-1 056.

[27] 江锡兵,龚榜初,刘庆忠,等. 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性[J]. 园艺学报, 2014, **41**(4): 641-652.

JIANG X B, GONG B C, LIU Q Z, *et al.* Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of Chinese chestnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, **41**(4): 641-652.

[28] 刘胤,陈涛,张静,等. 中国樱桃地方种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2016, **43**(11): 2 119-2 132.

LIU Y, CHEN T, ZHANG J, *et al.* Genetic diversity analysis of Chinese cherry landraces (*Prunus pseudocerasus*) based on phenotypic traits[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, **43**(11): 2 119-2 132.

[29] 郭传友,黄坚钦,王正加,等. 大别山山核桃天然群体种实性状表型多样性[J]. 经济林研究, 2007, **25**(3): 15-18.

GUO C Y, HUANG J Q, WANG Z J, *et al.* Phenotypic diversity of fruit characters in *Carya dabieshanensis* [J]. *Nonwood Forest Research*, 2007, **25**(3): 15-18.

[30] 李慧琴,于娅,王鹏,等. 270 份陆地棉种质资源农艺性状与品质性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2019, **20**(4): 903-910.

LI H Q, YU Y, WANG P, *et al.* Genetic diversity analysis of the main agronomic and fiber quality characteristics in 270 upland cotton germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, **20**(4): 903-910.

[31] COSMULESCU S, BOTU M. Walnut biodiversity in southwestern romania-resource for perspective cultivars[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, **44**(1): 307-311.

[32] 侯元凯,黄琳,周忠惠. 文冠果果实性状相关性研究[J]. 林业科学研究, 2011, **24**(3): 395-398.

HOU Y K, HUANG L, ZHOU Z H. Correlation between characters of *Xanthoceras sorbifolia* cone [J]. *Forest Research*, 2011, **24**(3): 395-398.

[33] WANG H, PAN G, MA Q G, *et al.* The genetic diversity and introgression of *Juglans regia*, and *Juglans sigillata* in Tibet as revealed by SSR markers[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2015, **11**(1): 1.

(编辑:潘新社)