

山桐子果穗和果实性状多样性分析

苏 上, 李振坚, 倪建伟, 耿涌杭, 许新桥^①

(中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 在山桐子(*Idesia polycarpa* Maxim.)自然分布区南界(广东省乳源县)、北界(河北省易县)及主要集中分布区(四川省的芦山县和夹江县以及贵州省道真县)选择16个山桐子样本,对其完整果穗和成熟果实的性状(包括14个表型性状和果实含油率)进行变异分析、遗传多样性分析和相关性分析,并基于表型性状的主成分分析结果对供试样本进行聚类分析。结果表明:不同山桐子样本间果穗和果实性状差异极显著($P<0.001$),各性状的变异系数为2.75%~58.23%,Simpson指数为0.75~0.88,Shannon-Weaver指数为2.30~3.13。相关性分析结果表明:果穗长、果穗宽、单果穗质量、单果穗果实质量和果穗小枝长间基本呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关,果实占比、单果质量、果实纵径、果实横径、单果种子质量和单果果肉质量间均呈极显著正相关,但果穗和果实表型性状与果实含油率的相关性均不显著。主成分分析结果表明:前4个主成分的累计贡献率为92.281%,能够反映山桐子果穗和果实表型性状的大部分信息;第1、第2、第3和第4主成分的贡献率分别为40.863%、31.979%、10.477%和8.962%,分别主要反映山桐子的果实大小、果穗长度和疏密度、果实形状及果柄长特征。聚类分析结果表明:供试样本可分为中果中疏穗中柄型(I)、小果中疏穗长柄型(II)、大果长疏穗中柄型(III)及中果短密穗中柄型(IV)4个类群。其中,III类群的果实含油率最高(31.07%),IV类群的果实含油率最低(21.28%)。研究结果显示:山桐子果穗和果实性状变异丰富,遗传多样性较高;果实大小和形状、果穗长度和疏密度以及果柄长度是影响山桐子果穗和果实表型多样性的关键性状;大果型和(或)长穗型山桐子具有一定的油用开发优势。

关键词: 山桐子; 果穗; 果实; 表型性状; 含油率; 多样性

中图分类号: Q944; S792.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)02-0035-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.02.05

Diversity analysis on characters of spikes and fruits of *Idesia polycarpa* SU Shang, LI Zhenjian, NI Jianwei, GENG Yonghang, XU Xinqiao^① (Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(2): 35-44

Abstract: Sixteen samples of *Idesia polycarpa* Maxim. were selected from the southern boundary (Ruyuan County of Guangdong Province), northern boundary (Yixian County of Hebei Province), and main concentrated distribution area (Lushan County and Jiajiang County of Sichuan Province, and Daozhen County of Guizhou Province) of its natural distribution areas. The variation analysis, genetic diversity analysis, and correlation analysis were conducted on characters (containing fourteen phenotypic characters and fruit oil rate) of their full spikes and ripe fruits, meanwhile, basing on the result of principal component analysis on phenotypic characters, the cluster analysis on test samples was performed. The results show that there are extremely significant ($P<0.001$) differences in characters of spikes and fruits of different samples of *I. polycarpa*, and the coefficient of variation of each trait is 2.75%~58.23%, the Simpson index is 0.75~0.88, and the Shannon-Weaver index is 2.30~3.13. The result of correlation analysis shows that there are generally significant ($P<0.05$) or extremely significant

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 河北省院企合作专项(C100)

作者简介: 苏 上(1988—),女,新疆乌苏人,博士,助理研究员,主要从事木本油料种质资源的开发与利用相关研究。

^①通信作者 E-mail: xqxforest@126.com

引用格式: 苏 上, 李振坚, 倪建伟, 等. 山桐子果穗和果实性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 35-44.

($P < 0.01$) positive correlations among spike length, spike width, single spike mass, fruit mass of single spike, and offshoot length of spike, and there are extremely significant positive correlations among fruit proportion, single fruit mass, fruit vertical diameter, fruit horizontal diameter, seed mass of single fruit, and flesh mass of single fruit, but the correlations of phenotypic characters of spikes and fruits with fruit oil rate are all not significant. The result of principal component analysis shows that the cumulative contribution rate of the first four principal components is 92.281%, which can reflect most information of phenotypic characters of spikes and fruits of *I. polycarpa*; the contribution rates of the first, second, third, and fourth principal components are 40.863%, 31.979%, 10.477%, and 8.962%, respectively, which mainly represent the characteristics of fruit size, spike length and density, fruit shape, and petiole length of *I. polycarpa*. The result of cluster analysis shows that the test samples can be divided into four groups, including middle fruit-middle and sparse spike-middle petiole type (I), small fruit-middle and sparse spike-long petiole type (II), big fruit-long and sparse spike-middle petiole type (III), and middle fruit-short and dense spike-middle petiole type (IV). Among them, the fruit oil rate of group III is the highest (31.07%), and that of group IV is the lowest (21.28%). It is suggested that the variations of characters of spikes and fruits of *I. polycarpa* are abundant, and their genetic diversity is relatively high; fruit size and shape, spike length and density, and petiole length are the key characters affecting the phenotypic diversity of spikes and fruits of *I. polycarpa*; *I. polycarpa* with big fruits and (or) long spikes has certain oil development advantages.

Key words: *Idesia polycarpa* Maxim.; spike; fruit; phenotypic characters; oil content; diversity

山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim.), 又称水冬瓜、水冬桐、椅树、椅桐、斗霜红, 主要分布在东亚及俄罗斯远东地区, 在国内主要分布于陕西、云南、四川、贵州、广西、广东、湖南、江西、福建、浙江、湖北、安徽、河南和台湾^{[1-2], [3]1-2}。该种树形优美, 果色艳丽, 可作为观果植物用于园林绿化^[4]。山桐子耐旱、耐贫瘠, 全果含油且含油率较高^{[3]16-25, [5], [6]32, [7]14-20, [8]26}, 单株产油量可达 4~19 kg^{[7]14}, 是一种极具开发潜力的木本油料树种。相关研究表明: 四川省广元县部分山桐子集中分布区内居民年人均山桐子油摄入量为 1~8 kg, 且该区域居民的健康状况与食用菜籽油和混合油的人群无显著差异^[9]。GC-MS 分析结果^{[3]25-38, [5], [6]35-36, [8]32-35}表明: 山桐子油包含 5~17 种脂肪酸成分, 以亚油酸、棕榈酸、棕榈烯酸、油酸和硬脂酸为主。并且, 山桐子油最主要的油脂特征是亚油酸含量极高^[2]。适当增加亚油酸的日常摄入量, 可有效降低心血管疾病 (特别是冠状动脉病变) 及二型糖尿病等疾病的发生率^[10]。然而, 山桐子油脂加工产业目前仍处于初级阶段, 油用良种缺乏、油脂加工原料不足、油脂品质差异悬殊等问题严重制约了山桐子油脂加工产业的发展。

植物种子表型性状 (如种子大小、质量及颜色等) 与其含油率及脂肪酸组成显著相关^[11-13], 因此, 可基于种子表型性状筛选潜在的油用优势群体, 加速山桐子油用良种的选育进程。目前对山桐子的研究

多集中在长江流域红果山桐子的栽培繁育技术^[14-16]以及脂肪酸组成和油脂性能^{[3]25-38, [5], [9]}方面, 而关于山桐子表型性状的研究较少^{[6]27-31, [7]12-20, [8]15-19}, 且涉及的产区、类型及表型性状均较为局限, 不利于对山桐子种质资源进行全面的开发利用。前人的相关研究结果^{[7]12-20, [8]17}表明: 山桐子果实大小及果穗长短存在丰富变异, 果穗长度不一 (14~46 cm), 果穗宽度不齐 (6~9 cm), 单果质量各异 (0.2~0.5 g), 且不同山桐子资源的果穗紧密度、果色及果柄长度也存在一定差异。究竟哪些指标能够准确地量化山桐子果穗及果实的表型性状? 这些指标对山桐子良种选育又有何参考价值? 这些问题均亟待解答。

基于对国内山桐子种质资源的全面踏查, 作者发现国内山桐子自然分布区的北界可扩展至河北省易县南部 (北京有极少量人工栽培), 南界可延伸到广东省乳源县北部, 且山桐子野生资源存在丰富的果色变异^{[7]12-19}。参考国际植物新品种保护联盟关于植物颜色的界定标准^[17]和英国皇家园艺学会 (RHS) 比色卡, 可将山桐子果实颜色分为 4 种, 分别为黄色 (RHS 色号为 12A)、橙红色 (RHS 色号为 32A)、红色 (RHS 色号为 43A) 和深红色 (RHS 色号为 46B)。为了明确影响山桐子油用育种的主要表型性状, 作者对国内山桐子自然分布区南界 (广东省乳源县)、北界 (河北省易县) 及主要集中分布区 (四川省东部的芦山县和夹江县以及贵州省北部的道真县) 的代表性

种质资源进行了调查和取样,共选择 16 个具有代表性表型特征(包括上述 4 种颜色)的山桐子样本,对其完整果穗和成熟果实的 15 个性状(包括 14 个相对稳定且便于量化统计的表型性状及果实含油率)进行了变异分析、遗传多样性分析和相关性分析,对 14 个表型性状进行了主成分分析,并对 16 个样本进行了聚类分析,以期筛选出山桐子果穗和果实表型性状的标准化计量分析指标,为山桐子种质资源的挖掘及良种选育提供参考。

表 1 供试山桐子样本的基本信息

Table 1 Basic information of test samples of *Idesia polycarpa* Maxim.

采样地 Sampling site	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	样本编号 Sample No.	果色 Fruit color	RHS 色号 ¹⁾ RHS color No. ¹⁾
贵州省道真县阳溪镇 Yangxi Town in Daozhen County of Guizhou Province	E107°35'06"	N29°05'17"	1 052	S1-S4	橙红 Orange-red	32A
贵州省道真县大塘村 Datang Village in Daozhen County of Guizhou Province	E107°43'06"	N29°08'41"	1 313	S5-S6	红 Red	43A
贵州省道真县大塘村 Datang Village in Daozhen County of Guizhou Province	E107°44'02"	N29°06'41"	1 194	S7	红 Red	43A
四川省芦山县火炬村 Huoju Village in Lushan County of Sichuan Province	E102°57'39"	N30°09'24"	857	S8-S9	黄 Yellow	12A
				S10	红 Red	43A
四川省夹江县东风村 Dongfeng Village in Jiajiang County of Sichuan Province	E103°32'19"	N29°44'19"	540	S11-S13	红 Red	43A
广东省乳源县大桥镇 Daqiao Town in Ruyuan County of Guangdong Province	E113°02'03"	N24°55'02"	811	S14	红 Red	43A
				S15	深红 Dark-red	46B
河北省易县西陵镇 Xiling Town in Yixian County of Hebei Province	E115°20'30"	N39°21'30"	102	S16	红 Red	43A

¹⁾ RHS: 英国皇家园艺学会 Royal Horticultural Society.

1.2 方法

1.2.1 采样方法 各样本随机选 2~3 株树龄 10~20 a、树高 10~15 m 且生长良好的样株,采集不同朝向果枝上的完整果穗,每个样本 30 个,用于果穗表型性状测定;随后,将同一样本的果实混匀,各样本随机选完整的成熟果实 30 粒,用于果实表型性状测定。每个样本称取 20.00 g 成熟果实,50 °C 烘干至恒质量,粉碎后过 50 目筛,用于果实含油率测定。

1.2.2 表型性状测定 使用直尺(精度 0.1 cm)测量果穗长(即果穗垂直悬挂时其顶部到基部的直线距离);使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测量果穗宽(即果穗垂直悬挂时其横截面的最大直径)、果穗小枝长(即果穗顶部向下第 4 个侧枝从分枝处到其最底层果柄顶部的直线距离)、果柄长、果实纵径(即平行于果柄方向的果实纵截面的最大直径)和果实横径(即垂直于果柄方向的果实横截面的最大直径);使用电子天平(精度 0.01 g)称量单果穗质量、单果穗果实质量、单果质量和单果种子质量。同时,计算果实占比(即单果穗果实质量与单果穗质量的比值)、单果果肉质量(即单果质量与单果种子质量之差)、果形指数(即果实纵径与果实横径的比值)和肉籽比

1 材料和方法

1.1 材料

于 2017 年 10 月至 11 月(即果实成熟期),在中国山桐子自然分布区的南界(广东省乳源县)、北界(河北省易县)及主要集中分布区(四川省的芦山县和夹江县以及贵州省道真县)选择 16 个具有代表性表型特征的样本,各样本的基本信息见表 1。

(即单果果肉质量与单果种子质量的比值)。

1.2.3 果实含油率测定 取干燥果实粉末 2.0 g,采用索氏提取法^[18]测定果实含油率,每个样本重复取样测定 3 次,结果取平均值。

1.3 数据统计及分析

利用 EXCEL 2010 软件进行数据统计,对各性状进行分类,共分成 10 级,1 级为小于等于 $M-2SD$,每级相差 $0.5SD$ 。其中, M 为性状的平均值, SD 为标准差。参照吕伟等^[19]和顾云娇等^[20]的方法计算各性状的变异系数及 Simpson 指数 (D) 和 Shannon-Weaver 指数 (H)。利用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析、主成分分析和 Ward 法聚类分析。参考相关文献^{[7]13, [8]55},以供试样本各性状均值上下浮动 20% 为中界,对聚类分析的各类群性状进行分类。但是,由于果实占比数值较集中,因此,未对果实占比进行三级分类。

2 结果和分析

2.1 山桐子果穗和果实性状的变异分析

山桐子 16 个样本的果穗和果实性状的比较和变

异分析结果见表2。由表2可以看出:不同样本间的果穗表型性状差异极显著 ($P < 0.001$), 果穗长为 10.05~34.13 cm (均值 21.60 cm), 果穗宽为 62.55~115.18 mm (均值 85.19 mm), 单果穗质量为 20.64~113.79 g (均值 52.72 g), 单果穗果实质量为 18.73~106.41 g (均值 48.18 g), 果穗小枝长为 34.65~114.38 mm (均值 75.66 mm), 果柄长为 9.84~23.08 mm (均值 16.17 mm), 果实占比为 87.00%~94.97% (均值 91.03%)。值得注意的是, 除果实占比外, S16 样本(采自河北省易县西陵镇)的其余果穗表型性状均为最低, 其果穗长、果穗小枝长和果柄长明显缩短, 较供试样本均值下降约 50%, 果穗宽较供试样本均值下降约 27%, 表现为果穗短小、紧凑, 属于山桐子种质资源中的罕见类型。

由表2还可以看出:不同样本间的果实表型性状差异也极显著, 单果质量为 0.19~0.70 g (均值 0.33 g), 果实纵径为 6.81~10.65 mm (均值 8.08 mm), 果实横径为 7.41~11.97 mm (均值 8.55 mm), 单果种子质量为 0.06~0.24 g (均值 0.12 g), 单果果肉质量为 0.13~0.49 g (均值 0.21 g), 果形指数为 0.82~1.25

(均值 0.95, 近圆球形), 肉籽比为 1.10~2.82 (均值 1.91)。值得注意的是, S14 样本(采自广东省乳源县大桥镇)的果实纵径和果形指数均最大, 果实呈非常规的圆柱状; 同样采自广东省乳源县大桥镇的 S15 样本的单果质量和果实横径均最大, 但果形指数最小, 整体呈扁圆形, 该样本的单果质量是供试样本均值的 2 倍, 表现出突出的育种优势。

果实含油率测定结果(表2)表明:不同样本间的果实含油率差异极显著, 供试样本的均值为 26.66%, 其中, S9 样本(采自四川省芦山县火炬村)的果实含油率最高(35.74%), S12 样本(采自四川省夹江县东风村)的果实含油率最低(11.12%)。

变异分析结果(表2)表明:山桐子果穗和果实存在丰富的表型变异, 15 个性状在供试样本间的变异系数为 2.75%~58.23%, 各性状的变异系数由大到小依次为单果穗果实质量、单果穗质量、单果种子质量、单果果肉质量、单果质量、肉籽比、果穗长、果穗小枝长、果实含油率、果柄长、果穗宽、果实横径、果实纵径、果形指数、果实占比。值得注意的是, 与果实产量相关性状的变异系数均较大, 尤其是单果穗质量、单

表2 山桐子果穗和果实性状的比较和变异分析 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Comparison and variation analysis on characters of spikes and fruits of *Idesia polycarpa* Maxim. ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

样本 Sample	果穗长/cm Spike length	果穗宽/mm Spike width	单果穗质量/g Single spike mass	单果穗果实质量/g Fruit mass of single spike	果穗小枝长/mm Offshoot length of spike	果柄长/mm Petiole length	果实占比/% Fruit proportion	单果质量/g Single fruit mass
S1	20.04±0.43	74.80±1.91	41.84±1.73	37.88±1.54	76.72±1.46	14.71±0.29	90.64±0.18	0.31±0.01
S2	18.75±0.44	76.58±2.29	41.62±1.85	37.93±1.68	76.50±1.59	13.95±0.32	91.17±0.27	0.29±0.01
S3	22.57±0.41	88.38±2.09	42.94±1.60	38.27±1.38	90.98±2.59	14.84±0.32	89.23±0.25	0.22±0.01
S4	22.35±0.49	82.91±1.94	41.30±1.13	36.83±0.99	97.52±3.58	14.20±0.24	89.26±0.35	0.21±0.01
S5	16.63±0.77	91.08±2.87	27.74±2.57	24.41±2.17	60.92±4.13	18.66±0.32	88.31±0.38	0.27±0.01
S6	20.63±0.47	96.42±1.78	44.46±2.57	39.02±2.21	68.46±1.88	19.03±0.29	87.90±0.21	0.23±0.01
S7	23.81±0.56	103.68±1.74	56.09±1.32	50.31±1.15	72.93±1.53	23.08±0.30	89.73±0.14	0.30±0.01
S8	21.90±0.44	82.58±1.29	43.58±1.23	39.97±1.12	79.69±2.16	16.59±0.29	91.74±0.08	0.36±0.01
S9	31.73±0.55	93.03±2.25	109.78±4.55	102.27±4.24	93.81±2.57	16.53±0.25	93.16±0.11	0.49±0.01
S10	32.74±0.77	96.20±2.77	113.79±5.02	106.41±4.69	99.49±2.62	18.74±0.35	93.52±0.11	0.53±0.01
S11	30.33±0.97	94.71±4.02	47.49±6.19	41.24±5.32	97.95±4.91	12.82±0.41	87.00±0.52	0.19±0.00
S12	28.95±4.72	115.18±8.57	66.78±7.64	59.85±6.66	96.06±7.77	12.73±0.54	89.81±0.72	0.31±0.01
S13	34.13±0.63	104.20±4.30	69.84±5.12	61.44±4.22	114.38±4.39	11.89±0.32	88.13±0.63	0.26±0.01
S14	14.32±0.38	75.41±1.90	43.37±1.66	40.77±1.53	51.16±1.72	18.20±0.42	94.06±0.16	0.40±0.01
S15	14.48±0.34	70.60±1.81	38.28±1.09	36.34±1.02	52.94±1.67	15.36±0.26	94.97±0.13	0.70±0.01
S16	10.05±0.19	62.55±1.51	20.64±0.85	18.73±0.76	34.65±1.18	9.84±0.22	90.84±0.17	0.23±0.01
M	21.60±0.36	85.19±0.83	52.72±1.52	48.18±1.42	75.66±1.18	16.17±0.18	91.03±0.13	0.33±0.01
F	132.196**	32.603**	101.264**	109.069**	68.920**	103.506**	108.812**	262.256**
Max.	48.90	141.78	179.65	167.24	141.23	27.09	96.45	0.85
Min.	7.80	48.10	14.49	12.93	24.07	7.37	82.80	0.12
R	41.10	93.68	165.16	154.31	117.16	19.72	13.65	0.73
CV/%	33.30	19.17	56.78	58.23	30.81	22.02	2.75	43.11

续表2 Table 2 (Continued)

样本 Sample	果实纵径/mm Fruit vertical diameter	果实横径/mm Fruit horizontal diameter	单果种子质量/g Seed mass of single fruit	单果果肉质量/g Flesh mass of single fruit	果形指数 Fruit shape index	肉籽比 Ratio of flesh mass to seed mass	果实含油率/% Fruit oil rate
S1	7.34±0.07	8.23±0.06	0.12±0.00	0.18±0.00	0.89±0.01	1.54±0.07	27.86±0.07
S2	7.54±0.11	8.35±0.14	0.11±0.01	0.18±0.01	0.90±0.01	1.83±0.07	—
S3	6.81±0.07	7.62±0.08	0.09±0.00	0.13±0.00	0.89±0.01	1.57±0.05	34.31±0.27
S4	6.99±0.07	7.74±0.07	0.07±0.00	0.15±0.00	0.90±0.01	2.44±0.14	34.37±0.16
S5	7.56±0.06	7.74±0.06	0.10±0.01	0.16±0.00	0.98±0.01	1.67±0.08	30.25±0.13
S6	7.34±0.06	7.53±0.08	0.07±0.00	0.16±0.00	0.98±0.00	2.42±0.10	26.45±0.51
S7	8.45±0.10	8.41±0.12	0.08±0.00	0.22±0.01	1.01±0.01	2.82±0.17	19.48±0.15
S8	8.14±0.06	9.15±0.08	0.14±0.00	0.22±0.00	0.89±0.01	1.64±0.06	33.69±0.19
S9	9.42±0.08	9.59±0.08	0.24±0.01	0.25±0.01	0.98±0.01	1.10±0.06	35.74±0.00
S10	9.02±0.06	10.54±0.07	0.23±0.01	0.30±0.01	0.86±0.00	1.41±0.08	33.56±0.00
S11	6.93±0.05	7.45±0.06	0.06±0.00	0.13±0.00	0.93±0.01	2.30±0.09	18.16±0.18
S12	7.73±0.06	8.59±0.06	0.14±0.00	0.17±0.00	0.90±0.01	1.28±0.03	11.12±0.41
S13	7.80±0.06	7.80±0.08	0.11±0.00	0.16±0.00	1.00±0.01	1.54±0.06	—
S14	10.65±0.08	8.55±0.09	0.13±0.01	0.27±0.01	1.25±0.01	2.29±0.11	22.72±0.20
S15	9.80±0.08	11.97±0.10	0.22±0.01	0.49±0.01	0.82±0.01	2.28±0.05	23.90±0.08
S16	7.94±0.09	7.41±0.08	0.06±0.00	0.16±0.00	1.07±0.01	2.65±0.10	19.85±0.27
M	8.08±0.05	8.55±0.06	0.12±0.00	0.21±0.00	0.95±0.00	1.91±0.03	26.66±1.30
F	225.022**	238.276**	106.587**	255.767**	243.683**	36.604**	50.404**
Max.	11.52	13.09	0.36	0.60	1.38	5.45	35.74
Min.	5.53	5.84	0.03	0.08	0.75	0.45	10.72
R	5.99	7.25	0.33	0.52	0.63	5.00	25.02
CV/%	14.28	15.25	52.44	44.08	11.04	35.42	26.63

¹⁾ S1-S4: 采自贵州省道真县阳溪镇的样本 Samples collected from Yangxi Town in Daozhen County of Guizhou Province; S5-S7: 采自贵州省道真县大塘村的样本 Samples collected from Datang Village in Daozhen County of Guizhou Province; S8-S10: 采自四川省芦山县火炬村的样本 Samples collected from Huoju Village in Lushan County of Sichuan Province; S11-S13: 采自四川省夹江县东风村的样本 Samples collected from Dongfeng Village in Jiajiang County of Sichuan Province; S14-S15: 采自广东省乳源县大桥镇的样本 Samples collected from Daqiao Town in Ruyuan County of Guangdong Province; S16: 采自河北省易县西陵镇的样本 Sample collected from Xiling Town in Yixian County of Hebei Province. M: 均值 Mean; F: F 值 F value; Max.: 极大值 Maximum; Min.: 极小值 Minimum; R: 极差 Range; CV: 变异系数 Coefficient of variation. **: $P < 0.001$. —: 样品缺失, 未测定 Sample missing, undetected.

果穗果实质量、单果质量、单果种子质量和单果果肉质量的变异系数, 均高于 40%。

2.2 山桐子果穗和果实性状的遗传多样性分析

山桐子果穗和果实性状的 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数见表 3。由表 3 可以看出: 各性状的 Simpson 指数为 0.75~0.88, Shannon-Weaver 指数为 2.30~3.13, 说明供试的山桐子样本果穗和果实各性状均具有较高的遗传多样性。值得注意的是, 与果穗长短及果实疏密度相关的性状, 即果实占比、果穗宽、果穗小枝长、果柄长及果穗长的 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数均较高, 其 Simpson 指数分别为 0.88、0.86、0.86、0.85 和 0.85, Shannon-Weaver 指数分别为 3.13、3.02、3.02、2.97 和 2.94; 而与果实产量相关的性状, 即单果穗质量、单果穗果实质量及单果果肉质量的 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数均较低, 其 Simpson 指数分别为 0.76、0.75 和 0.75,

Shannon-Weaver 指数分别为 2.45、2.42 和 2.30。

2.3 山桐子果穗和果实性状间的相关性分析

相关性分析结果(表 4)表明: 果穗长和果穗小枝长是山桐子果穗表型特征的核心参数, 二者间呈极显著正相关(相关系数为 0.922), 并且, 二者与果穗宽(相关系数分别为 0.778 和 0.679)、单果穗质量(相关系数分别为 0.799 和 0.614)和单果穗果实质量(相关系数分别为 0.770 和 0.583)均呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关; 单果质量和单果果肉质量是山桐子果实表型特征的核心参数, 二者间呈极显著正相关(相关系数为 0.960), 并且, 二者与果实纵径(相关系数分别为 0.792 和 0.786)、果实横径(相关系数分别为 0.978 和 0.943)和单果种子质量(相关系数分别为 0.906 和 0.752)均呈极显著正相关。果实占比和肉籽比是联系果穗和果实性状的中间参数, 其中, 果实占比与单果质量、果实纵径、果实横径、单果种子

质量和单果果肉质量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.868、0.850、0.820、0.786和0.834;而肉籽比与果穗长、单果穗质量、单果穗果实质量和果穗小枝长均呈显著负相关,相关系数分别为-0.533、-0.571、-0.569和-0.538。此外,单果穗质量与果穗宽和单果穗果实质量分别呈显著和极显著正相关,相关系数分别为0.529和0.999;果实纵径与果实横径呈极显著正相关,相关系数为0.690;单果种子质量与单果穗质量、单果穗果实质量、果实纵径和果实横径均呈极显著正相关,相关系数分别为0.684、0.712、0.680和0.882。值得注意的是,山桐子果穗和果实表型性状与果实含油率的相关性均未达到显著水平,但与单果种子质量、单果穗果实质量、果穗小枝长、单果穗质量和果柄长呈现一定水平的正相关关系。

2.4 山桐子果穗和果实表型性状的主成分分析

对山桐子果穗和果实表型性状进行主成分分析,结果见表5。由表5可知:前4个主成分的特征值均大于1,累计贡献率达92.281%,说明这4个主成分能够代表山桐子果穗和果实表型性状的大部分信息。第1主成分的贡献率为40.863%,其中,果实占比、单果质量、果实纵径、果实横径、单果种子质量和单果果肉质量的特征向量的绝对值较大(均在0.820以上),

表3 山桐子果穗和果实性状的遗传多样性指数分析
Table 3 Analysis on genetic diversity indexes of characters of spikes and fruits of *Idesia polycarpa* Maxim.

性状 ¹⁾ Character ¹⁾	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Weaver 指数 Shannon-Weaver index
SL	0.85	2.94
SW	0.86	3.02
SSM	0.76	2.45
FMSS	0.75	2.42
OLS	0.86	3.02
PL	0.85	2.97
FP	0.88	3.13
SFM	0.80	2.64
FVD	0.83	2.82
FHD	0.81	2.69
SMSF	0.83	2.71
FMSF	0.75	2.30
FSI	0.83	2.74
RFMSM	0.84	2.87
FOR	0.84	2.70

¹⁾ SL: 果穗长 Spike length; SW: 果穗宽 Spike width; SSM: 单果穗质量 Single spike mass; FMSS: 单果穗果实质量 Fruit mass of single spike; OLS: 果穗小枝长 Offshoot length of spike; PL: 果柄长 Petiole length; FP: 果实占比 Fruit proportion; SFM: 单果质量 Single fruit mass; FVD: 果实纵径 Fruit vertical diameter; FHD: 果实横径 Fruit horizontal diameter; SMSF: 单果种子质量 Seed mass of single fruit; FMSF: 单果果肉质量 Flesh mass of single fruit; FSI: 果形指数 Fruit shape index; RFMSM: 肉籽比 Ratio of flesh mass to seed mass; FOR: 果实含油率 Fruit oil rate.

表4 山桐子果穗和果实性状的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis on characters of spikes and fruits of *Idesia polycarpa* Maxim.¹⁾

性状 Character	性状间的相关系数 Correlation coefficient among characters													
	SL	SW	SSM	FMSS	OLS	PL	FP	SFM	FVD	FHD	SMSF	FMSF	FSI	RFMSM
SW	0.778**													
SSM	0.799**	0.529*												
FMSS	0.770**	0.493	0.999**											
OLS	0.922**	0.679**	0.614*	0.583*										
PL	0.008	0.258	0.219	0.228	-0.122									
FP	-0.236	-0.452	0.298	0.343	-0.337	0.168								
SFM	-0.005	-0.182	0.425	0.460	-0.155	0.250	0.868**							
FVD	-0.141	-0.204	0.335	0.370	-0.354	0.349	0.850**	0.792**						
FHD	0.054	-0.128	0.427	0.459	-0.068	0.236	0.820**	0.978**	0.690**					
SMSF	0.268	0.012	0.684**	0.712**	0.108	0.194	0.786**	0.906**	0.680**	0.882**				
FMSF	-0.183	-0.290	0.212	0.248	-0.312	0.264	0.834**	0.960**	0.786**	0.943**	0.752**			
FSI	-0.296	-0.133	-0.160	-0.157	-0.415	0.120	0.042	-0.225	0.402	-0.383	-0.272	-0.170		
RFMSM	-0.533*	-0.329	-0.571*	-0.569*	-0.538*	0.151	-0.140	-0.222	0.008	-0.221	-0.568*	0.029	0.342	
FOR	0.130	-0.218	0.264	0.276	0.268	0.227	0.187	0.150	-0.026	0.146	0.299	0.035	-0.251	-0.367

¹⁾ SL: 果穗长 Spike length; SW: 果穗宽 Spike width; SSM: 单果穗质量 Single spike mass; FMSS: 单果穗果实质量 Fruit mass of single spike; OLS: 果穗小枝长 Offshoot length of spike; PL: 果柄长 Petiole length; FP: 果实占比 Fruit proportion; SFM: 单果质量 Single fruit mass; FVD: 果实纵径 Fruit vertical diameter; FHD: 果实横径 Fruit horizontal diameter; SMSF: 单果种子质量 Seed mass of single fruit; FMSF: 单果果肉质量 Flesh mass of single fruit; FSI: 果形指数 Fruit shape index; RFMSM: 肉籽比 Ratio of flesh mass to seed mass; FOR: 果实含油率 Fruit oil rate. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 5 山桐子果穗和果实表型性状的主成分分析
Table 5 Principal component analysis on phenotypic characters of spike and fruit of *Idesia polycarpa* Maxim.

主成分 Principal component	特征向量 ¹⁾ Eigenvector ¹⁾									
	SL	SW	SSM	FMSS	OLS	PL	FP	SFM	FVD	
1	-0.111	-0.312	0.377	0.418	-0.251	0.221	0.942	0.982	0.829	
2	0.953	0.761	0.891	0.870	0.851	0.080	-0.089	0.079	-0.006	
3	-0.147	-0.098	0.086	0.095	-0.305	0.103	0.192	-0.096	0.502	
4	0.037	0.395	0.070	0.065	-0.092	0.886	-0.096	0.074	0.176	

主成分 Principal component	特征向量 ¹⁾ Eigenvector ¹⁾					特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	FHD	SMSF	FMSF	FSI	RFMSM			
1	0.948	0.892	0.942	-0.142	-0.202	5.721	40.863	40.863
2	0.103	0.408	-0.145	-0.196	-0.678	4.477	31.979	72.842
3	-0.258	-0.056	-0.113	0.956	0.143	1.467	10.477	83.319
4	0.095	-0.080	0.168	0.100	0.442	1.255	8.962	92.281

¹⁾ SL: 果穗长 Spike length; SW: 果穗宽 Spike width; SSM: 单果穗质量 Single spike mass; FMSS: 单果穗果实质量 Fruit mass of single spike; OLS: 果穗小枝长 Offshoot length of spike; PL: 果柄长 Petiole length; FP: 果实占比 Fruit proportion; SFM: 单果质量 Single fruit mass; FVD: 果实纵径 Fruit vertical diameter; FHD: 果实横径 Fruit horizontal diameter; SMSF: 单果种子质量 Seed mass of single fruit; FMSF: 单果果肉质量 Flesh mass of single fruit; FSI: 果形指数 Fruit shape index; RFMSM: 肉籽比 Ratio of flesh mass to seed mass.

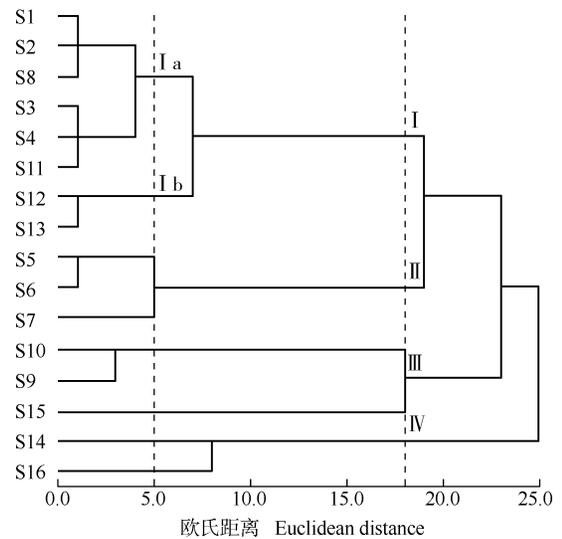
说明该主成分主要反映山桐子果实的表型性状,尤其是果实大小特征。第 2 主成分的贡献率为 31.979%,其中,果穗长、果穗宽、单果穗质量、单果穗果实质量和果穗小枝长的特征向量的绝对值较大(均在 0.760 以上),说明该主成分主要反映山桐子果穗的表型性状,特别是果穗长度和疏密度特征。第 3 主成分的贡献率为 10.477%,其中,仅果形指数的特征向量的绝对值较大(0.956),说明该主成分主要反映山桐子果实形状特征。第 4 主成分的贡献率为 8.962%,其中,仅果柄长的特征向量的绝对值较大(0.886),说明该主成分主要反映山桐子果柄长度特征。

2.5 山桐子样本的聚类分析

基于前述的主成分分析结果,采用 Ward 法对供试的 16 个山桐子样本进行聚类分析。结果(图 1)表明:在欧氏距离 18.0 处,供试山桐子样本可分为 I、II、III 和 IV 4 个类群,分别包含 8、3、3 和 2 个样本,其中,属于 I 类群的有采自贵州省道真县阳溪镇的 S1、S2、S3 和 S4 样本,采自四川省芦山县火炬村的 S8 样本,以及采自四川省夹江县东风村的 S11、S12 和 S13 样本;属于 II 类群的有采自贵州省道真县大塘村的 S5、S6 和 S7 样本;属于 III 类群的有采自四川省芦山县火炬村的 S9 和 S10 样本,以及采自广东省乳源县大桥镇的 S15 样本;属于 IV 类群的有采自广东省乳源县大桥镇的 S14 样本以及采自河北省易县西陵镇的 S16 样本。在欧氏距离 5.0 处, I 类群又细分为 I a 和 I b 2 个亚类群,其中, I a 亚类群包括 6 个样本,

编号分别为 S1、S2、S3、S4、S8 和 S11,而 I b 亚类群包括 2 个样本,编号分别为 S12 和 S13。

对各类群山桐子的果穗和果实表型性状及果实



S1-S4: 采自贵州省道真县阳溪镇的样本 Samples collected from Yangxi Town in Daozhen County of Guizhou Province; S5-S7: 采自贵州省道真县大塘村的样本 Samples collected from Datang Village in Daozhen County of Guizhou Province; S8-S10: 采自四川省芦山县火炬村的样本 Samples collected from Huoju Village in Lushan County of Sichuan Province; S11-S13: 采自四川省夹江县东风村的样本 Samples collected from Dongfeng Village in Jiajiang County of Sichuan Province; S14-S15: 采自广东省乳源县大桥镇的样本 Samples collected from Daqiao Town in Ruyuan County of Guangdong Province; S16: 采自河北省易县西陵镇的样本 Sample collected from Xiling Town in Yixian County of Hebei Province.

图 1 供试山桐子样本的聚类结果
Fig. 1 Cluster result of test samples of *Idesia polycarpa* Maxim.

含油率进行统计分析,结果见表6。由表6可知: I a 亚类群的单果质量(0.26 g)略低于该性状均值下浮20%的数值,其余果穗和果实性状则介于相应性状均值上下浮动20%范围内,据此判断该亚类群属于常见的小果中疏穗中柄型; I b 亚类群的果穗长(31.54 cm)、果穗宽(109.69 mm)和果穗小枝长(105.22 mm)高于相应性状均值上浮20%的数值,果柄长(12.31 mm)低于该性状均值下浮20%的数值,而单果质量(0.29 g)、果实纵径(7.76 mm)和果实横径(8.20 mm)则介于相应性状均值上下浮动20%范围内,据此判断该亚类群属于中果长疏穗短柄型。整体来看, I 类群样本属于中果中疏穗中柄型。II 类群的果柄长(20.26 mm)高于该性状均值上浮20%的数值,但单果质量(0.26 g)低于该性状均值下浮20%的

数值,属于小果中疏穗长柄型。III 类群的果穗长(26.32 cm)、单果穗质量(87.28 g)、单果穗果实质量(81.67 g)、果实占比(93.90%)、单果质量(0.57 g)、果实纵径(9.41 mm)、果实横径(10.70 mm)、单果种子质量(0.23 g)和单果果肉质量(0.35 g)在4个类群中均最高,且普遍高于相应性状均值上浮20%的数值,据此判断该类群属于大果长疏穗中柄型,具有突出的高产优势。IV 类群的果穗长(12.19 cm)、果穗宽(68.98 cm)、单果穗质量(32.01 g)、单果穗果实质量(29.75 g)和果穗小枝长(42.90 cm)在4个类群中均最低,且普遍低于相应性状均值下浮20%的数值,果实纵径(9.29 mm)、果实横径(7.98 mm)和单果质量(0.31 g)均介于相应性状均值上下浮动20%范围内,据此判断该类群属于中果短密穗中柄型。

表6 不同类群山桐子果穗和果实性状分析

Table 6 Analysis on characters of spikes and fruits of different groups of *Idesia polycarpa* Maxim.

类群 Group	果穗长/cm Spike length	果穗宽/mm Spike width	单果穗质量/g Single spike mass	单果穗 果实质量/g Fruit mass of single spike	果穗小枝长/mm Offshoot length of spike	果柄长/mm Petiole length	果实占比/% Fruit proportion	单果质量/g Single fruit mass
类群 Group								
I	24.88	89.92	49.42	44.18	91.22	13.97	89.61	0.27
II	20.36	97.06	42.77	37.91	67.44	20.26	88.63	0.26
III	26.32	86.61	87.28	81.67	82.08	16.87	93.90	0.57
IV	12.19	68.98	32.01	29.75	42.90	14.02	92.45	0.31
亚类群 Subgroup								
I a	22.66	83.33	43.13	38.69	86.56	14.52	89.83	0.26
I b	31.54	109.69	68.31	60.64	105.22	12.31	88.95	0.29
类群 Group	果实纵径/mm Fruit vertical diameter	果实横径/mm Fruit horizontal diameter	单果 种子质量/g Seed mass of single fruit	单果 果肉质量/g Flesh mass of single fruit	果形指数 Fruit shape index	肉籽比 Ratio of flesh mass to seed mass	果实含油率/% Fruit oil rate	
类群 Group								
I	7.41	8.12	0.10	0.17	0.91	1.77	26.59	
II	7.78	7.89	0.08	0.18	0.99	2.31	25.39	
III	9.41	10.70	0.23	0.35	0.89	1.60	31.07	
IV	9.29	7.98	0.10	0.22	1.16	2.47	21.28	
亚类群 Subgroup								
I a	7.29	8.09	0.10	0.17	0.90	1.89	29.68	
I b	7.76	8.20	0.12	0.17	0.95	1.41	11.12	

由表6还可见:大果型山桐子(III类群)的果实含油率为31.07%,明显高于中果型和小果型山桐子(I、II和IV类群的果实含油率分别为26.59%、25.39%和21.28%);并且,短穗型山桐子(IV类群)的果实含油率低于长穗型和中穗型山桐子(I、II和III类群)。由此判断大果型和(或)长穗型山桐子具有一定的油用开发优势。

3 讨论

3.1 山桐子果穗和果实的性状多样性

表型性状的变异性和稳定性是植物基因型和环境因子相互作用的结果^[21]。植物的表型变异反映了其对环境的适应能力,通常表型变异越丰度,表示其

环境适应性越强^{[8]22-23,[22]}。变异系数大于10%,说明样本间差异较大^[19,23]。性状的 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数越大,表明该性状的遗传多样性越丰富^[20]。本研究结果表明:山桐子果实颜色多样,果穗和果实性状的遗传多样性丰富(Simpson 指数为 0.75~0.88, Shannon-Weaver 指数为 2.30~3.13),变异系数变化幅度较大(2.75%~58.23%),这与山桐子在国内由南到北广阔分布的状况相符。其中,与山桐子果实产量相关的性状(如单果穗质量、单果穗果实质量、单果质量、单果种子质量和单果果肉质量)的变异系数较大,均高于40%;而果穗宽、果实占比、果实纵径、果实横径和果形指数的变异系数较小,均低于20%,在一定程度上表明野生山桐子的果实产量不稳定,因此,若对野生山桐子进行产业化开发,亟需开展山桐子高产型优良种质的无性系繁育及人工栽培研究。

3.2 影响山桐子果穗和果实性状多样性的关键性状

岁立云^{[7]12-15}对陕西分布的山桐子果实和果穗表型性状的分析结果表明:果实大小和果穗长度对供试山桐子的表型分类影响最大。主成分分析结果表明:前4个主成分能够反映92.281%的山桐子果穗和果实的表型特征,其中前2个主成分的贡献率较高(分别为40.863%和31.979%),分别反映了山桐子果实大小以及果穗长度和疏密度特征。此外,第3和第4主成分的贡献率分别为10.477%和8.962%,且这2个主成分中果形指数和果柄长的特征向量的绝对值较大(分别为0.956和0.886),说明果实形状和果柄长度也是判别山桐子果穗和果实表型类型的重要指标。综上所述,果实的大小和形状、果穗的长度和疏密度以及果柄长度均是影响山桐子果穗和果实表型多样性的关键性状。

聚类分析结果表明:供试的16个山桐子样本可分为4个类群,且各类群间的果穗和果实的表型性状差异较大,其中,Ⅲ类群属于大果长疏穗中柄型,高产优势突出,具有选育良种的潜力。值得注意的是,供试的16个山桐子样本的果实占比为87.00%~94.97%,据此推算,果穗侧枝和果柄质量占果穗质量的5.03%~13.00%,该指标不但影响山桐子的果实产量,而且对山桐子果实油脂加工生产有一定影响^[24-25]。由于油脂加工生产需要纯果,在油料脱粒清选时需要震动机械将果穗的小枝分离除去,但常规的清选设备(冲孔筛或风筛)难以实现果柄和果实的

完全分离,导致含杂率高,而高含杂率必然影响得油率和油脂品质。基于此,若从果实产量和油脂加工性能方面考虑,短果柄类型是值得开发的山桐子良种类型之一。本研究中,I b 亚类群(果柄长12.31 mm)和Ⅳ类群(果柄长14.02 mm)山桐子的果柄长相对较小,具有选育短果柄良种的潜力,特别是S16样本(采自河北省易县西陵镇),具有突出的短小紧凑型果穗,其果柄长(9.84 mm)在已有的报道中最小^{[7]12-19},值得关注。

本研究还发现,供试的山桐子存在丰富的果实颜色变异,包含黄、橙红、红和深红4种颜色,其中,黄色及深红色山桐子果实极为少见。岁立云^{[7]13}是调查到黄色山桐子果实的少数研究者之一,其发现的黄果山桐子果穗长22.63 cm,属于中穗类型,但果实较小(果实纵径和果实横径分别为0.74和0.77 cm)。比较而言,本研究涉及的2个黄色果实样本中,S8样本(采自四川省芦山县火炬村)的果穗长和果实大小更接近上述性状数值。但是,同样为黄色果实的S9样本(采自四川省芦山县火炬村)的果穗长31.73 cm,果穗宽93.03 mm,单果穗果实质量102.27 g,单果质量0.49 g,果实纵径9.42 mm,果实横径9.59 mm,聚属于Ⅲ类群中,属于长穗大果型,且该样本果实产量高、挂果观赏性极佳,极具开发潜力。S15样本(采自广东省乳源县大桥镇)的果实呈深红色,其单果质量(0.70 g)和果实横径(11.97 mm)在供试样本中最大,果实纵径(9.80 mm)也较高,且这3个性状均高于供试样本相应性状均值上浮20%的数值,是目前已报道的果实最大的山桐子^{[6]27-32,[7]12-19,[8]15-19},具有突出的育种价值,但其果穗长仅14.48 cm,需进一步进行丰产性改良。

3.3 山桐子果穗和果实表型性状与果实含油率的关系

分析结果表明:不同山桐子样本间的果实含油率差异极显著($P<0.001$),果实含油率均值11.12%~35.74%。相关资料^{[3]25,[5],[6]32,[7]14-20,[8]26}显示:黄河及长江流域共53处山桐子的果实含油率为11.34%~49.03%,均值31.92%。上述结果表明:山桐子果实含油率的自然变异较大,应开展个体选优和良种无性系繁育工作。Li等^[12]的研究结果表明:山桐子果实干质量、果实横径和果实纵径与果实含油率均呈正相关,相关系数分别为0.761、0.498和0.469,但仅果实干质量与果实含油率的相关性达到极显著($P<0.01$)

水平。本研究中,山桐子果穗和果实表型性状与果实含油率的相关性均未达到显著水平,但其果实大小和果穗长短与果实含油率呈一定的正相关关系,整体表现为大果型山桐子(Ⅲ类群)的果实含油率(31.07%)最高,短穗型山桐子(Ⅳ类群)的果实含油率(21.28%)最低。岁立云^[7]¹⁴⁻²⁰对山桐子的研究结果同样显示:大果型山桐子的果实含油率(44.96%)高于小果型山桐子(37.38%),且长穗型山桐子的果实含油率(42.57%)高于短穗型山桐子(39.17%),但多数红果山桐子的果实含油率(40.94%)高于黄果山桐子(37.38%)。本研究中,黄色和橙红色果实样本的果实含油率(分别为34.72%和32.18%)则高于红色和深红色果实样本(果实含油率分别为22.70%和23.90%)。然而,黄果山桐子极为少见,因此,受样本量限制,山桐子果实的颜色与含油率之间是否普遍存在上述关系,还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第五十二卷 第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 56.
- [2] FAN R S, LI L, CAI G, et al. Molecular cloning and function analysis of *FAD2* gene in *Idesia polycarpa* [J]. *Phytochemistry*, 2019, 168: 112114.
- [3] 陈福民. 山桐子脂肪酸提取与成分分析[D]. 西安: 陕西师范大学生命科学院, 2009.
- [4] 孙利强, 袁德强, 刘子茵, 等. 郑州市35种冬季观果植物的综合评价[J]. *江苏林业科技*, 2020, 47(1): 1-5.
- [5] 王艳梅, 王东洪, 刘震, 等. 不同种源山桐子种子含油率和脂肪酸GC/MS分析[J]. *经济林研究*, 2011, 29(2): 14-21.
- [6] 代莉. 山桐子种实地理变异研究[D]. 郑州: 河南农业大学林学院, 2014.
- [7] 岁立云. 山桐子果实性状自然变异及生殖生物学研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学林学院, 2009.
- [8] 李大伟. 山桐子主要性状变异及优株选择研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [9] 李蕴涛, 何立莹. 毛叶山桐子生物学特性及油脂食用卫生安全性研究[J]. *四川林业科技*, 1986, 7(2): 32-37.
- [10] MARANGONI F, AGOSTONI C, BORGHI C, et al. Dietary linoleic acid and human health: focus on cardiovascular and cardiometabolic effects[J]. *Atherosclerosis*, 2020, 292: 90-98.
- [11] SU S, WANG L J, NI J W, et al. Differences and correlations of morphological characteristics and fatty acid profiles of seeds of *Toona sinensis* [J]. *Chemistry and Biodiversity*, 2020, 17: e2000553.
- [12] LI Y, PENG T, HUANG L, et al. 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 [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 129: 114-122.
- [13] 赵利, 王斌, 苗红梅, 等. 胡麻种质资源籽粒表型与品质性状评价及其相关性研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(1): 243-251.
- [14] 祝志勇. 山桐子生态学特性及繁殖技术研究[D]. 南京: 南京林业大学林学院, 2004: 8-28.
- [15] 杨恩让, 刘晓敏, 解庆. 山桐子离体培养植株再生[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(6): 95-98.
- [16] 陈耀兵, 刘汉葵, 郑小江, 等. 山桐子嫁接方法研究[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(12): 97-98, 106.
- [17] 张川红, 郑勇奇, 黄平. 国际植物新品种保护联盟文件术语汇编[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 67-80.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准: 食品中脂肪的测定 GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- [19] 吕伟, 韩俊梅, 文飞, 等. 不同来源芝麻种质资源的表型多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(1): 234-242, 251.
- [20] 顾云娇, 赵晨辉, 宋宏伟, 等. 穗醋栗种质资源表型多样性分析及鲜食资源评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 912-918.
- [21] 杨旭, 杨志玲, 程小燕, 等. 不同种源三叶崖爬藤表型多样性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(3): 78-83.
- [22] 于忠亮, 苑景淇, 李成宏, 等. 吉林东部不同野生居群兴安杜鹃种实表型性状变异研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(3): 26-33.
- [23] 董胜君, 王若溪, 张皓凯, 等. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(6): 42-50.
- [24] 沈宇峰, 吴明亮, 官春云, 等. 脱粒机清选装置的现状与展望[J]. *农业工程*, 2014, 4(2): 1-4.
- [25] 金青哲, 齐策, 谢丹, 等. 国内外食用油脂加工技术发展[J]. *粮食与油脂*, 2011(6): 1-4.

(责任编辑: 佟金凤)