

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.002

杜仲种质资源果实性状变异及综合评价

杜庆鑫, 庆军, 刘攀峰, 王璐, 杜兰英, 何凤, 杜红岩*

(国家林业和草原局泡桐研究开发中心, 中国林业科学研究院经济林研究开发中心, 经济林种质创新与
利用国家林业和草原局重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 分析杜仲种质资源果实性状变异规律并进行综合评价, 为杜仲良种选育和开发利用提供理论依据和遗传材料。[方法] 基于我国 18 个省(市、区) 331 份杜仲种质资源, 针对杜仲果实 19 个主要性状, 采用相关性分析、聚类分析和主成分分析等方法, 分析果实性状变异状况, 评价并筛选优良种质。[结果] 杜仲果实性状变异系数为 4.64%~25.79%, 平均变异系数为 12.65%, 变异系数较高的为包裹种仁果皮百粒质量(25.79%)、种仁百粒质量(22.32%)、种仁体积指数(22.02%)、果实体积指数(19.53%), 变异系数较小的为亚麻酸(4.64%)、油酸(5.78%)、果型指数(8.04%)。果实性状遗传多样性指数介于 1.6572~2.0947, 平均为 2.0234。果实百粒质量与果实体积指数、种仁百粒质量等性状呈极显著正相关, 杜仲橡胶含量与包裹种仁果皮百粒质量、果实侧径均呈极显著正相关, 与种仁粗脂肪含量呈显著负相关。聚类分析将杜仲种质资源划分为 3 个类群, 类群 I 为小果型类群, 类群 II 为中型果类群, 类群 III 为大果型类群, 初步明确杜仲种质果实不同类型。通过主成分分析, 前 7 个主成分累积贡献率达 85.169%, 表明这 7 个主成分代表了杜仲果实性状的大部分信息, 针对油用、橡胶用和综合利用等不同用途进行评价, 分别筛选出 10 份最优种质。[结论] 杜仲种质资源果实性状表现出丰富的变异, 以包裹种仁果皮百粒质量、种仁百粒质量等产量指标变异最大, 为杜仲优良种质选育提供了可能, 针对不同用途筛选的杜仲最优种质, 为我国杜仲良种选育及综合利用提供了优良的种质基础。

关键词: 杜仲; 种质资源; 果实性状; 变异; 综合评价

中图分类号: S794.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0013-11

杜仲 (*Eucommia ulmoides* Oliv.) 为杜仲科 (*Eucommiaceae*) 杜仲属 (*Eucommia*) 植物^[1], 雌雄异株, 是我国特有的名贵药材和木本油料树种, 广泛分布于我国亚热带到温带的 28 个省(市、区)。杜仲果、叶、皮中均含有丰富的杜仲橡胶, 其中, 果皮中含量最高。杜仲橡胶有独特的“橡(塑)二重性”; 可开发出具有热塑性、热弹性和橡胶弹性等不同用途的功能材料, 广泛应用于航空航天、国防、电力、医疗、运动竞技等领域, 是世界上具有巨大开发前景的优质天然橡胶资源^[2-3]。杜仲果实不仅橡胶含量高, 而且富含油脂。杜仲籽油不饱和脂肪酸含量达 90% 以上, 其中, α -亚麻

酸含量高达 67.6%, 杜仲籽油已被列为新食品原料目录, 是开发保健品、功能食品、高档食用油的优质原料^[4-5]。

植物种质资源是遗传改良的基因来源和物质基础, 开展种质资源遗传多样性研究对资源保护和利用具有重要意义。表型性状变异具有相对稳定的遗传特征, 已成为研究遗传多样性的重要内容, 国内外已先后对大别山山核桃 (*Carya dabieshanensis* M. C. Liu et Z. J. Li)^[6]、白栎 (*Quercus fabri* Hance)^[7]、柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco)^[8-9]、无患子 (*Sapindus mukorossi* Gaertn)^[10-11] 等林木表型性状变异进行了分析和评价。有关杜仲种质资源

收稿日期: 2020-10-20 修回日期: 2021-05-14

基金项目: 山东省重大科技创新工程 (2019JZZY020223); “十三五”国家重点研发计划“杜仲良种高效栽培与全质化利用示范” (2017YFD0601302)

* 通讯作者: 杜红岩。E-mail: dhy515@126.com

遗传变异和评价已开展了较多研究,杜红岩等^[12]对 16 个产地杜仲果实形态及含胶量差异进行了分析;杜庆鑫等^[13]对杜仲种质资源雄花形态性状变异进行了深入研究;庆军等^[14]发现,杜仲种质资源叶片活性成分表现出丰富的多样性,并筛选出叶用杜仲优良种质;于靖^[15]分析评价了不同产地、不同基因型杜仲种仁脂肪酸及果皮杜仲胶含量差异。此外,分子标记技术也广泛应用于杜仲种质资源遗传多样性研究,Wu 等^[16]、Yu 等^[17]利用 ISSR 标记对杜仲种质资源遗传多样性和群体遗传结构进行了研究,发现杜仲居群内具有丰富的遗传多样性,而不同群体间的遗传多样性低。利用分子标记技术可以准确了解植物遗传多样性,但最终仍要结

合表型性状进行分析^[18]。目前,对大样本杜仲种质资源果实表型性状变异研究和综合评价鲜有报道。本研究对 331 份不同来源杜仲种质资源果实表型性状进行多样性分析,以期揭示杜仲资源表型变异规律并进行综合评价,定向筛选优良种质,为选育适合杜仲产业化开发的优良品种提供理论和材料基础。

1 试验材料

试验材料均来自中国林业科学研究院经济林研究开发中心杜仲种质资源库。基因库采用 6 株小区,定植株行距为 3 m × 3 m。2018 年秋季果实成熟期完成采样,采后低温保存至实验室充分阴干。种质来源见表 1。

表 1 杜仲种质资源信息

Table 1 Information of *Eucommia ulmoides* germplasm resources

来源 Origin	样本数 Sample numbers	来源 Origin	样本数 Sample numbers
安徽亳州 Bozhou, Anhui	4	河南新乡 Xinxiang, He'nan	6
北京万泉河路 Wanquanhe road, Beijing	37	河南郑州 Zhengzhou, He'nan	4
北京杜仲公园 Duzhong park, Beijing	111	河南三门峡 Sanmenxia, He'nan	3
北京清华大学 Tsinghua university, Beijing	8	湖北武汉 Wuhan, Hubei	3
重庆沙坪坝 Shapingba, Chongqing	4	湖南慈利 Cili, Hu'nan	17
福建建阳 Jianyang, Fujian	3	湖南株洲 Zhuzhou, Hu'nan	4
广西桂林 Guilin, Guangxi	7	吉林集安 Ji'an, Jilin	3
贵州遵义 Zunyi, Guizhou	7	江苏响水 Xiangshui, Jiangsu	7
河北安国 Anguo, Hebei	12	江西南昌 Nanchang, Jiangxi	4
河南鹤壁 Hebi, He'nan	4	山西运城 Yuncheng, Shanxi	4
河南延津 Yanjin, He'nan	4	陕西略阳 Lueyang, Shaanxi	3
河南洛阳 Luoyang, He'nan	44	陕西杨陵 Yangling, Shaanxi	3
河南汝阳 Ruyang, He'nan	9	四川广元 Guangyuan, Sichuan	3
河南南阳 Nanyang, He'nan	4	云南盐津 Yanjin, Yunnan	3
河南商丘 Shangqiu, He'nan	3	浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	3

2 研究方法

2.1 果实形态性状测定

四分法随机抽取果实 20 粒,重复 3 次。使用电子游标卡尺(精度 0.01 mm)分别测量果实和种仁的纵径、横径、侧径,使用千分之一电子天平测定果实、种仁及包裹种仁果皮百粒质量,计算出仁率(出仁率=种仁百粒质量/果实百粒质量 × 100%)、果型指数(果型指数=果实纵径/果实横径)、果实体积指数(果实体积指数=果实纵径 × 果实横径 ×

果实侧径)、种型指数(种型指数=种仁纵径/种仁横径)、种仁体积指数(种仁体积指数=种仁纵径 × 种仁横径 × 种仁侧径)等指标。

2.2 果皮杜仲橡胶含量测定

称量 100 mg 干燥样品粉末至离心管中,加入 1.5 mL 50% 无水乙醇,涡旋振荡 1 min,离心 2 min,重复 3 次;加入 1.5 mL 丙酮,涡旋振荡 1 min,离心 2 min,重复 3 次;加入 1.5 mL 丙酮,超声分离(40 kHz, 40℃) 40 min,涡旋振荡

1 min, 离心 2 min, 重复 2 次; 50℃ 烘箱中烘干; 加入 1.2 mL 甲苯, 涡旋振荡 1 min, 超声提取 10 min, 离心 2 min, 收上清液于容量瓶中, 加甲苯定容至 5 mL, 重复提取 4 次; 采用 FTIR 进行检测, 计算 1380 cm⁻¹ 和 699 cm⁻¹ 处的峰面积。

2.3 种仁粗脂肪及脂肪酸含量测定

种仁粗脂肪采用索氏提取原理, 质量法测定, 参照 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》。种仁粗脂肪中亚麻酸、油酸、亚油酸检测采用《食品中脂肪酸的测定》(GB 5009.168—2016)。

2.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理统计数据, 运用 SPSS 24.0 软件进行数据分析。统计各性状的平均值、最大值、最小值和标准差, 计算各性状变异系数 (CV) 和遗传多样性指数 (H)。根据平均值 (μ) 和标准差 (σ) 将各性状划分为 10 级, 从第 1 级 $X_i < (\mu - 2\sigma)$ 到第 10 级 $X_i \geq (\mu + 2\sigma)$, 每 0.5σ 为 1 级, 统计各级的分布频率。遗传多样性指数计算公式为: $H = -\sum p_i \ln p_i$, 其中, p_i 为某一性状第

i 级别试验材料份数占总份数的百分比。

聚类分析采用欧式平方距离 ward 法。以累积贡献率 $\geq 85\%$ 、特征值 > 1 为提取主成分的标准。综合评价方法为: 以各主成分对应的相对贡献率作为权重, 各主成分得分与相应权重进行线性加权求和得到综合评价函数^[9], 主要公式如下:

$$Z = \sum Z_i \times \beta_i$$

式中: Z 为杜仲果实综合评价得分, Z_i 为各主成分得分值, β_i 为各主成分对应的相对方差贡献率, i 为主成分数。

3 结果与分析

3.1 果实性状变异及多样性分析

331 份杜仲种质资源果实性状变异情况见表 2。19 个性状变异系数 (CV) 介于 4.64%~25.79%, 平均为 12.65%, 其中, 变异系数较高的为包裹种仁果皮百粒质量 (25.79%)、种仁百粒质量 (22.32%)、种仁体积指数 (22.02%)、果实体积指数 (19.53%),

表 2 杜仲果实主要性状统计分析

Table 2 Statistical analysis of fruit traits of *Eucommia ulmoides* germplasms

性状 Traits	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%	遗传多样性指数 Diversity index (H)
果实纵径 Fruit vertical diameter (FVD) /mm	24.14	39.22	31.14	2.539	8.15	2.0616
果实横径 Fruit horizontal diameter (FHD) /mm	8.65	13.14	10.72	0.849	7.92	2.0749
果实侧径 Fruit lateral diameter (FLD) /mm	1.21	2.36	1.90	0.183	9.63	2.0672
果型指数 Fruit shape index (FSI)	2.37	3.73	2.91	0.234	8.04	2.0680
果实体积指数 Fruit volume index (FVI)	368.68	1045.11	640.46	125.062	19.53	2.0613
果实百粒质量 100-fruit weight (FrW) /g	4.32	12.81	8.14	1.237	15.20	2.0577
种仁纵径 Seed vertical diameter (SVD) /mm	9.88	17.38	13.04	1.154	8.85	2.0765
种仁横径 Seed horizontal diameter (SHD) /mm	2.23	4.89	2.97	0.333	11.21	1.8426
种仁侧径 Seed lateral diameter (SLD) /mm	0.75	1.89	1.37	0.124	9.05	2.0460
种型指数 Seed shape index (SSI)	2.71	5.58	4.42	0.447	10.11	2.0526
种仁体积指数 Seed volume index (SVI)	20.14	119.03	53.85	11.86	22.02	1.9531
种仁百粒质量 100-seed kernel weight (SKW) /g	1.00	4.96	3.10	0.692	22.32	2.0518
出仁率 Seed kernel content (SKC) /%	15.34	50.00	37.98	6.303	16.60	1.6572
包裹种仁果皮百粒质量 100-fruit pericarp wrapping seed kernel weight (FPW) /g	1.17	3.53	2.14	0.552	25.79	2.0181
杜仲橡胶 EU rubber (EUR) /%	11.73	20.67	15.90	1.811	11.39	2.0947
粗脂肪 Crude fat (CF) /%	24.06	35.16	30.15	2.618	8.68	2.0896
亚麻酸 Linolenic acid (C18:3) /%	48.14	65.05	59.24	2.749	4.64	2.0762
油酸 Oleic acid (C18:1) /%	14.17	20.42	17.09	0.987	5.78	2.0707
亚油酸 Linoleic acid (C18:2) /%	8.47	19.06	12.12	1.877	15.49	2.0256
平均值 Mean	—	—	—	—	12.65	2.0234

变异系数较低的为亚麻酸(4.64%)、油酸(5.78%)、果实横径(7.92%)、纵径(8.15%)、果型指数(8.04%)。包裹种仁果皮百粒质量及种仁百粒质量变异较大表明与产量相关性状变异丰富, 亚麻酸、油酸和果型指数变异系数较小表明遗传特性较稳定。

19个性状表现出丰富的遗传多样性, 遗传多样性指数(H)介于1.6572~2.0947, 平均值为2.0234, 其中, 杜仲橡胶(2.0947)、粗脂肪(2.0896)、种仁纵径(2.0765)、亚麻酸(2.0762)、果实横径(2.0749)、油酸(2.0707)等性状遗传多样性指数较大, 表明这些性状在每一级中的分布比较均匀, 出仁率(1.6572)、种仁横径(1.8426)、种仁体积指数(1.9531)遗传多样性指数较小, 表明这几个性状在表现型上分布不均匀。

3.2 不同来源杜仲种质果实性状分析

不同来源杜仲果实19个性状平均值、标准差和多重比较结果(表3)表明: 除果实纵径、种仁横径、种仁体积指数外, 其它性状在不同来源间均存在差异。福建杜仲资源果实纵径、横径、侧径、

果实体积指数、果实百粒质量、种仁横径、种仁体积指数、包裹种仁果皮百粒质量最大, 杜仲橡胶含量最高, 但出仁率最低; 陕西杜仲资源的果型指数、种仁纵径、种型指数最大, 杜仲橡胶含量和油酸含量最低; 吉林杜仲资源种仁百粒质量最大, 出仁率最高; 安徽杜仲资源果实百粒质量、种仁百粒质量最小; 粗脂肪含量云南资源最低, 吉林资源最高; 亚麻酸含量安徽资源最高, 四川资源最低, 油酸含量四川资源最高, 亚油酸含量湖北资源最高。

3.3 果实性状间相关性分析

对19个果实性状进行相关性分析, 表4表明: 19个性状间存在不同程度的相关性, 且多数性状间表现为显著或极显著相关。果实百粒质量与果实纵径(0.611)、横径(0.694)、侧径(0.423)、果实体积指数(0.750)、种仁体积指数(0.599)、种仁百粒质量(0.701)等性状呈极显著正相关, 说明果实体积指数和种仁百粒质量对杜仲果实质量的贡献率最大。果型指数与种型指数呈极显著正相关(0.463), 果实体积指数与种仁体积指数呈极显著正相关(0.591), 说明果实与种仁大小表现

表3 不同来源地杜仲果实性状比较(均值±标准差)

Table 3 Comparison of fruit traits from different origin among *Eucommia ulmoides* germplasms (Mean ± SD)

性状 Traits	安徽 Anhui	北京 Beijing	重庆 Chongqing	福建 Fujian	广西 Guangxi	贵州 Guizhou
FVD/mm	31.05 ± 2.70 a	31.01 ± 2.61 a	29.51 ± 3.74 a	33.22 ± 2.69 a	30.49 ± 2.47 a	31.45 ± 1.92 a
FHD/mm	11.08 ± 1.24 ab	10.86 ± 0.83 ab	10.35 ± 0.53 ab	11.57 ± 1.01 b	10.42 ± 0.81 ab	10.44 ± 0.77 ab
FLD/mm	1.92 ± 0.29 ab	1.88 ± 0.18 ab	2.05 ± 0.15 b	2.12 ± 0.08 b	1.98 ± 0.26 ab	1.96 ± 0.12 ab
FSI	2.81 ± 0.15 a	2.86 ± 0.23 a	2.84 ± 0.24 a	2.87 ± 0.09 a	2.93 ± 0.21 ab	3.03 ± 0.30 ab
FVI	674.54 ± 203.00 ab	637.35 ± 124.90 ab	632.31 ± 137.34 ab	814.47 ± 152.85 b	637.24 ± 161.92 ab	642.57 ± 76.85 ab
FrW/g	7.03 ± 1.37 a	8.27 ± 1.24 ab	7.65 ± 1.41 ab	9.58 ± 1.22 b	8.14 ± 1.52 ab	8.57 ± 1.09 ab
SVD/mm	12.64 ± 0.75 ab	13.08 ± 1.19 ab	12.49 ± 0.70 ab	13.57 ± 0.92 ab	12.29 ± 1.02 a	13.10 ± 0.86 ab
SHD/mm	2.85 ± 0.28 a	3.04 ± 0.34 a	2.69 ± 0.08 a	3.15 ± 0.13 a	2.83 ± 0.23 a	2.89 ± 0.21 a
SLD/mm	1.26 ± 0.18 a	1.37 ± 0.13 ab	1.41 ± 0.05 ab	1.42 ± 0.07 ab	1.38 ± 0.12 ab	1.37 ± 0.10 ab
SSI	4.45 ± 0.26 a	4.33 ± 0.46 a	4.66 ± 0.35 ab	4.30 ± 0.12 a	4.37 ± 0.52 a	4.55 ± 0.37 a
SVI	46.32 ± 13.81 a	54.98 ± 11.63 a	47.22 ± 2.79 a	60.79 ± 8.04 a	48.27 ± 8.29 a	52.19 ± 8.62 a
SKW/g	2.51 ± 0.90 a	3.15 ± 0.71 abc	2.75 ± 0.45 ab	3.12 ± 0.48 abc	2.99 ± 0.41 abc	3.20 ± 0.53 abc
SKC/%	35.31 ± 8.99 ab	38.10 ± 6.36 ab	36.25 ± 3.63 ab	33.34 ± 9.20 a	37.14 ± 3.68 ab	37.31 ± 3.84 ab
FPW/g	1.86 ± 0.43 ab	2.11 ± 0.53 abc	2.19 ± 0.35 abc	2.77 ± 0.11 c	2.27 ± 0.49 abc	2.13 ± 0.43 abc
EUR/%	16.57 ± 1.23 ab	15.75 ± 1.78 ab	16.45 ± 0.58 ab	18.34 ± 0.68 b	15.71 ± 2.00 ab	16.63 ± 1.33 ab
CF/%	28.18 ± 2.82 abc	30.64 ± 2.03 bc	30.26 ± 1.60 abc	29.36 ± 0.70 abc	27.71 ± 1.44 ab	28.50 ± 2.64 abc
C18:3/%	60.16 ± 0.33 b	59.39 ± 2.60 ab	58.15 ± 2.34 ab	57.48 ± 1.66 ab	56.20 ± 3.80 ab	58.84 ± 0.99 ab
C18:1/%	17.16 ± 0.51 ab	16.95 ± 0.90 ab	17.40 ± 0.74 ab	18.05 ± 0.84 b	17.52 ± 1.07 ab	17.53 ± 0.54 ab
C18:2/%	11.92 ± 1.05 ab	12.14 ± 1.84 ab	12.42 ± 1.56 ab	12.89 ± 0.96 ab	13.89 ± 2.52 ab	12.02 ± 1.30 ab

续表 3

性状 Traits	河北 Hebei	河南 He'nan	湖北 Hubei	湖南 Hu'nan	吉林 Jilin	江苏 Jiangsu
FVD/mm	31.68 ± 2.58 a	31.04 ± 2.63 a	31.09 ± 2.44 a	31.30 ± 2.18 a	30.31 ± 0.82 a	31.85 ± 2.82 a
FHD/mm	10.83 ± 0.65 ab	10.59 ± 0.84 ab	10.57 ± 1.21 ab	10.57 ± 0.84 ab	10.58 ± 1.04 ab	10.23 ± 0.79 a
FLD/mm	1.90 ± 0.10 ab	1.91 ± 0.18 ab	2.06 ± 0.04 b	1.89 ± 0.14 ab	1.97 ± 0.13 ab	2.00 ± 0.17 ab
FSI	2.93 ± 0.24 ab	2.94 ± 0.23 ab	2.95 ± 0.22 ab	2.97 ± 0.23 ab	2.89 ± 0.35 a	3.11 ± 0.17 ab
FVI	650.86 ± 70.70 ab	632.59 ± 130.96 ab	681.40 ± 137.25 ab	628.70 ± 105.87 ab	629.98 ± 55.29 ab	650.58 ± 97.81 ab
FrW/g	8.28 ± 1.14 ab	7.87 ± 1.23 ab	8.21 ± 0.83 ab	8.17 ± 1.43 ab	8.64 ± 0.65 ab	7.99 ± 0.83 ab
SVD/mm	12.89 ± 1.02 ab	12.98 ± 1.18 ab	12.74 ± 0.51 ab	12.99 ± 1.35 ab	13.51 ± 1.00 ab	13.61 ± 0.87 ab
SHD/mm	3.01 ± 0.19 a	2.91 ± 0.35 a	2.87 ± 0.11 a	2.97 ± 0.46 a	2.99 ± 0.34 a	2.92 ± 0.11 a
SLD/mm	1.41 ± 0.07 ab	1.36 ± 0.13 ab	1.48 ± 0.13 b	1.35 ± 0.10 ab	1.47 ± 0.08 b	1.48 ± 0.10 b
SSI	4.30 ± 0.36 a	4.48 ± 0.40 a	4.45 ± 0.18 a	4.41 ± 0.47 a	4.55 ± 0.59 a	4.67 ± 0.37 ab
SVI	54.51 ± 6.57 a	52.18 ± 13.84 a	53.93 ± 4.06 a	52.98 ± 15.51 a	59.08 ± 6.59 a	58.71 ± 5.81 a
SKW/g	3.30 ± 0.65 abc	2.90 ± 0.72 abc	3.50 ± 0.23 abc	3.08 ± 0.73 abc	3.85 ± 0.44 c	3.25 ± 0.31 abc
SKC/%	39.87 ± 4.79 ab	36.75 ± 7.35 ab	42.83 ± 2.36 ab	37.38 ± 4.78 ab	44.58 ± 4.40 b	40.79 ± 2.92 ab
FPW/g	2.24 ± 0.72 abc	2.02 ± 0.55 abc	2.37 ± 0.86 abc	2.48 ± 0.67 abc	2.36 ± 0.56 abc	2.14 ± 0.46 abc
EUR/%	16.09 ± 2.36 ab	15.93 ± 1.78 ab	17.43 ± 2.70 ab	15.50 ± 1.83 a	15.96 ± 3.01 ab	16.04 ± 1.70 ab
CF/%	30.42 ± 2.18 bc	29.97 ± 2.23 abc	30.50 ± 2.02 bc	30.34 ± 1.75 bc	31.16 ± 1.20 c	29.66 ± 1.41 abc
C18:3/%	59.88 ± 2.47 ab	60.09 ± 2.71 b	56.54 ± 3.16 ab	57.30 ± 2.02 ab	58.37 ± 4.50 ab	59.28 ± 1.77 ab
C18:1/%	16.97 ± 1.01 ab	16.94 ± 1.02 ab	17.98 ± 0.96 ab	17.88 ± 0.96 ab	17.26 ± 1.27 ab	17.63 ± 0.88 ab
C18:2/%	11.76 ± 1.89 ab	11.73 ± 1.83 ab	14.23 ± 2.21 b	12.21 ± 1.58 ab	13.12 ± 2.85 ab	11.97 ± 1.50 ab
性状 Traits	江西 Jiangxi	山西 Shanxi	陕西 Shanxi	四川 Sichuan	云南 Yunnan	浙江 Zhejiang
FVD/mm	29.95 ± 0.75 a	32.59 ± 2.70 a	32.90 ± 1.74 a	33.15 ± 1.88 a	31.40 ± 2.12 a	31.11 ± 2.64 a
FHD/mm	10.45 ± 0.21 ab	10.63 ± 1.24 ab	10.17 ± 0.45 a	11.46 ± 1.21 ab	10.20 ± 0.84 a	10.53 ± 1.63 ab
FLD/mm	2.01 ± 0.17 b	1.95 ± 0.14 ab	1.73 ± 0.26 a	2.04 ± 0.02 b	2.11 ± 0.17 b	2.05 ± 0.23 b
FSI	2.87 ± 0.13 a	3.08 ± 0.17 ab	3.24 ± 0.27 b	2.91 ± 0.15 ab	3.08 ± 0.12 ab	2.98 ± 0.20 ab
FVI	627.10 ± 50.43 ab	686.36 ± 180.19 ab	578.38 ± 96.13 a	779.88 ± 126.22 b	687.01 ± 150.37 ab	690.52 ± 247.63 ab
FrW/g	7.81 ± 0.51 ab	7.70 ± 1.54 ab	8.00 ± 0.74 ab	9.03 ± 0.44 b	7.99 ± 0.61 ab	8.30 ± 2.25 ab
SVD/mm	12.48 ± 0.41 ab	13.39 ± 1.55 ab	14.24 ± 0.91 b	13.53 ± 0.52 ab	12.45 ± 0.46 ab	12.80 ± 1.09 ab
SHD/mm	2.97 ± 0.28 a	2.75 ± 0.21 a	2.75 ± 0.18 a	3.07 ± 0.12 a	2.83 ± 0.07 a	2.91 ± 0.21 a
SLD/mm	1.44 ± 0.12 ab	1.43 ± 0.06 ab	1.34 ± 0.11 ab	1.45 ± 0.09 ab	1.51 ± 0.06 b	1.44 ± 0.15 ab
SSI	4.23 ± 0.45 a	4.88 ± 0.52 ab	5.19 ± 0.23 b	4.41 ± 0.11 a	4.40 ± 0.07 a	4.39 ± 0.25 a
SVI	53.43 ± 8.71 a	52.66 ± 9.53 a	52.82 ± 9.25 a	60.10 ± 5.69 a	53.18 ± 5.42 a	54.33 ± 11.92 a
SKW/g	3.07 ± 0.43 abc	3.09 ± 0.85 abc	3.40 ± 0.13 abc	3.77 ± 0.19 bc	3.09 ± 0.59 abc	3.18 ± 0.72 abc
SKC/%	39.47 ± 6.08 ab	39.66 ± 4.01 ab	42.77 ± 2.98 ab	41.86 ± 4.10 ab	38.63 ± 6.26 ab	38.62 ± 3.56 ab
FPW/g	2.62 ± 0.59 bc	2.25 ± 0.39 abc	1.95 ± 0.42 abc	1.64 ± 0.33 a	2.17 ± 0.51 abc	2.59 ± 0.35 bc
EUR/%	16.44 ± 1.70 ab	16.69 ± 1.18 ab	15.17 ± 1.86 a	15.50 ± 3.42 a	16.47 ± 0.62 ab	17.36 ± 1.78 ab
CF/%	29.01 ± 2.87 abc	30.25 ± 2.10 abc	29.33 ± 2.67 abc	28.50 ± 0.56 abc	27.10 ± 0.94 a	27.85 ± 3.57 ab
C18:3/%	56.54 ± 2.21 ab	59.85 ± 1.55 ab	59.63 ± 1.87 ab	55.89 ± 7.77 a	58.25 ± 0.94 ab	59.16 ± 4.06 ab
C18:1/%	17.76 ± 0.17 ab	16.89 ± 0.73 ab	16.53 ± 0.61 a	18.12 ± 2.34 b	17.82 ± 1.63 ab	16.86 ± 1.25 ab
C18:2/%	13.32 ± 1.75 ab	12.21 ± 1.64 ab	12.10 ± 1.96 ab	14.23 ± 4.83 b	12.19 ± 2.52 ab	11.23 ± 1.70 a

注: 性状全称见表2。下同。同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: Traits details see table 2. Different letters in the same row indicate significant difference at $P < 0.05$.

出一致性。杜仲橡胶含量与包裹种仁果皮百粒质量（0.822）、果实侧径（0.154）均呈极显著正相关，推测与杜仲胶丝大量存在于果皮中包裹种仁部分有关，杜仲橡胶含量与种仁粗脂肪含量呈显著负相关（-0.116），推测杜仲橡胶与粗脂肪合成存在

一定程度的竞争关系。此外，亚麻酸含量与油酸（-0.730）、亚油酸（-0.871）呈极显著负相关，推测亚麻酸与油酸、亚油酸合成过程中有一定程度的竞争关系。

表 4 杜仲果实主要性状相关性分析

Table 4 Correlation analysis of fruit traits of *Eucommia ulmoides* germplasms

性状 Traits	FVD	FHD	FLD	FSI	FVI	FrW	SVD	SHD	SLD	SSI	SVI	SKW	SKC	FPW	EUR	CF	C18:3	C18:1	C18:2
FVD	1																		
FHD	0.516**	1																	
FLD	0.225**	0.344**	1																
FSI	0.507**	-0.473**	-0.122*	1															
FVI	0.742**	0.794**	0.724**	-0.040	1														
FrW	0.611**	0.694**	0.423**	-0.070	0.750**	1													
SVD	0.673**	0.442**	0.162**	0.245**	0.535**	0.621**	1												
SHD	0.225**	0.456**	0.229**	-0.227**	0.383**	0.390**	0.403**	1											
SLD	0.199**	0.244**	0.626**	-0.040	0.486**	0.397**	0.311**	0.331**	1										
SSI	0.345**	-0.108*	-0.123*	0.463**	0.043	0.117*	0.457**	-0.613**	-0.090	1									
SVI	0.452**	0.499**	0.415**	-0.038	0.591**	0.599**	0.728**	0.821**	0.680**	-0.179**	1								
SKW	0.406**	0.412**	0.283**	0.006	0.466**	0.701**	0.536**	0.293**	0.353**	0.145**	0.495**	1							
SKC	0.015	-0.060	0.031	0.080	-0.020	0.065	0.177**	0.054	0.139*	0.091	0.144**	0.748**	1						
FPW	0.060	0.068	0.158**	-0.009	0.120*	0.134*	0.040	0.050	0.082	-0.012	0.071	0.072	-0.009	1					
EUR	0.057	0.017	0.154**	0.038	0.096	0.048	0.028	-0.028	0.061	0.060	0.015	0.015	-0.007	0.822**	1				
CF	-0.146**	-0.046	-0.257**	-0.100	-0.205**	-0.115*	0.018	0.098	-0.028	-0.079	0.038	-0.030	0.051	-0.101	-0.116*	1			
C18:3	0.026	0.066	-0.093	-0.043	-0.001	0.000	0.080	0.161**	-0.052	-0.108	0.093	0.021	0.017	-0.098	-0.058	0.228**	1		
C18:1	-0.028	-0.040	0.022	0.016	-0.023	0.014	-0.039	-0.054	0.011	0.020	-0.030	0.024	0.026	0.070	0.028	-0.119*	-0.730**	1	
C18:2	-0.009	-0.068	0.137*	0.058	0.025	-0.007	-0.074	-0.168**	0.096	0.123*	-0.083	-0.012	0.002	0.065	0.075	-0.250**	-0.871**	0.433**	1

注Note: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$ 。

3.4 基于果实性状的聚类分析

采用欧式平方距离 ward 法对 19 个性状进行聚类分析，在欧氏距离为 5 时，331 份杜仲种质可分为 3 个类群，所划分类群与地理来源关系较小，各类群性状特征见表 5。第 I 类群有 97 份种质，其果实纵径和横径均最小，归为小果型类群，果实百粒质量平均仅 7.05 g；第 II 类群有 182 份种质，其果实纵径和横径介于第 I 类群和第 III 类群之间，为中型果类群，果实百粒质量平均 8.32 g；第 III 类群有 52 份种质，其果实纵径和横径最大，为大果型类群，果实百粒质量平均达 9.59 g。各性状在 3 个类群中均表现出不同程度的变异，第 I 类群的变异

系数为 4.50%~26.62%，第 II 类群的变异系数为 4.87%~25.34%，第 III 类群的变异系数为 4.08~25.93%；亚麻酸含量在 3 个类群中变异系数最小，包裹种仁果皮百粒质量和种仁百粒质量在 3 个类群中变异系数较大。3 个类群间果型指数、种型指数、出仁率、杜仲橡胶含量、亚麻酸、油酸、亚油酸差异不显著，其它性状中，第 III 类群果实纵径、横径、侧径、果实体积指数、果实百粒质量、种仁纵径、侧径、种仁体积指数、种仁百粒质量均极显著高于第 I 和第 II 类群，种仁横径、包裹种仁果皮质量、粗脂肪含量在第 II 和第 III 类群间差异不显著，但均极显著高于第 I 类群。

表5 不同类群主要性状比较

Table 5 Comparison of main traits among three groups

性状 Traits	类群 I Group I		类群 II Group II		类群 III Group III	
	均值±标准差 (Mean ± SD)	变异系数 CV/%	均值±标准差 (Mean ± SD)	变异系数 CV/%	均值±标准差 (Mean ± SD)	变异系数 CV/%
FVD/mm	29.00 ± 2.13 A	7.34	31.34 ± 1.61 B	5.14	34.44 ± 2.01 C	5.84
FHD/mm	9.92 ± 0.58 A	5.85	10.83 ± 0.60 B	5.54	11.80 ± 0.56 C	4.75
FLD/mm	1.75 ± 0.16 A	9.14	1.93 ± 0.13 B	6.74	2.11 ± 0.13 C	6.16
FSI	2.93 ± 0.28 A	9.56	2.90 ± 0.22 A	7.59	2.92 ± 0.21 A	7.19
FVI	501.67 ± 50.78 A	10.12	653.26 ± 48.65 B	7.45	854.59 ± 63.09 C	7.38
FrW/g	7.05 ± 0.86 A	12.20	8.32 ± 0.90 B	10.82	9.59 ± 1.05 C	10.95
SVD/mm	12.20 ± 0.93 A	7.62	13.25 ± 0.99 B	7.47	13.89 ± 1.12 C	8.06
SHD/mm	2.78 ± 0.22 A	7.91	3.05 ± 0.36 B	11.80	3.08 ± 0.23 B	7.47
SLD/mm	1.29 ± 0.12 A	9.30	1.39 ± 0.11 B	7.91	1.46 ± 0.09 C	6.16
SSI	4.42 ± 0.42 A	9.50	4.39 ± 0.47 A	10.71	4.52 ± 0.40 A	8.85
SVI	44.09 ± 7.78 A	17.65	56.52 ± 11.02 B	19.50	62.69 ± 8.90 C	14.20
SKW/g	2.63 ± 0.70 A	26.62	3.22 ± 0.55 B	17.08	3.55 ± 0.66 C	18.59
SKC/%	37.08 ± 8.05 A	21.71	38.69 ± 5.14 A	13.29	37.15 ± 6.11 A	16.45
FPW/g	1.99 ± 0.51 A	25.63	2.21 ± 0.56 B	25.34	2.16 ± 0.56 B	25.93
EUR/%	15.60 ± 1.75 A	11.22	16.01 ± 1.79 A	11.18	16.09 ± 1.96 A	12.18
CF/%	30.65 ± 2.35 A	7.67	30.13 ± 1.99 B	6.60	29.34 ± 2.18 B	7.43
C18:3/%	59.35 ± 2.67 A	4.50	59.09 ± 2.88 A	4.87	59.51 ± 2.43 A	4.08
C18:1/%	17.07 ± 1.01 A	5.92	17.15 ± 1.00 A	5.83	16.96 ± 0.92 A	5.42
C18:2/%	11.93 ± 1.87 A	15.67	12.26 ± 1.95 A	15.91	11.99 ± 1.61 A	13.43

注: 同行不同字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different letters in the same row indicate significant difference at $P < 0.01$.

3.5 果用杜仲优良种质筛选

3.5.1 杜仲果实性状主成分分析 对 19 个杜仲果实性状进行主成分分析, 结果 (表 6) 显示: 前 7 个主成分累积贡献率达 85.169%, 表明前 7 个主成分代表了杜仲果实性状的大部分信息, 因此, 选取前 7 个主成分对果用杜仲种质进行评价。第 1 主成分贡献率最大, 为 24.334%, 决定第 1 主成分的为果实百粒质量 (FrW)、果实体积指数 (FVI)、果实纵径 (FVD)、果实横径 (FHD) 及种仁纵径 (SVD), 说明第 1 主成分主要与果实产量相关; 第 2 主成分贡献率为 12.671%, 决定第 2 主成分的为亚麻酸 (C18:3)、亚油酸 (C18:2) 及油酸 (C18:

1) 含量, 说明第 2 主成分主要与亚麻酸油为主的脂肪酸含量相关; 第 3 主成分贡献率为 10.917%, 决定第 3 主成分的为种仁横径 (SHD)、种仁体积指数 (SVI) 及种型指数 (SSI), 说明第 3 主成分主要与种仁大小和形态有关; 第 4 主成分贡献率为 9.677%, 果型指数 (FSI) 的特征向量值最高, 主要与果实形态相关; 第 5 主成分贡献率为 9.604%, 特征向量值最大的为包裹种仁果皮百粒质量 (FPW) 和杜仲橡胶含量 (EUR), 表明第 5 主成分重点表征了杜仲橡胶产出能力; 第 6 主成分贡献率为 9.018%, 出仁率 (SKC)、种仁百粒质量 (SKW) 的特征向量值较大, 表明第 6 主成分重

表 6 19 个性状前 7 个主成分的特征向量、特征值、贡献率及累积贡献率

Table 6 Power vector(PV), eigenvalues(E), contribution rate(CR) and cumulative contribution rate(CCR) of first seven principal components(PC) based on 19 traits

性状 Traits	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
FrW	0.403	0.014	0.038	-0.086	0.033	0.121	0.109
FVI	0.394	-0.010	0.044	-0.068	0.031	-0.048	0.340
FVD	0.385	-0.013	-0.051	0.305	0.011	-0.067	0.032
FHD	0.383	-0.026	0.039	-0.374	0.001	-0.059	0.031
SVD	0.370	-0.024	0.114	0.280	0.003	0.134	-0.101
C18:3	0.014	-0.626	0.049	-0.012	-0.024	0.013	-0.068
C18:2	-0.019	0.544	-0.072	0.036	0.013	-0.002	0.161
C18:1	0.001	0.534	0.036	-0.017	0.021	0.020	-0.080
SHD	0.188	-0.053	0.578	-0.133	0.005	-0.002	-0.037
SVI	0.292	-0.024	0.490	0.079	0.004	0.107	0.120
SSI	0.122	0.043	-0.455	0.396	0.004	0.106	-0.075
FSI	0.010	0.015	-0.091	0.689	0.008	-0.006	-0.004
FPW	0.033	0.041	0.021	-0.019	0.703	0.006	0.036
EUR	0.011	0.014	-0.025	0.029	0.703	-0.006	0.064
SKC	0.004	0.001	0.013	0.040	-0.006	0.733	-0.006
SKW	0.267	0.006	0.033	-0.030	0.011	0.603	0.055
FLD	0.154	0.025	0.114	-0.086	0.069	0.033	0.634
SLD	0.129	0.024	0.339	0.088	0.006	0.157	0.478
CF	-0.044	-0.131	0.225	-0.013	-0.055	0.084	-0.404
特征值(E)	4.623	2.408	2.074	1.839	1.825	1.713	1.700
贡献率(CR)/%	24.334	12.671	10.917	9.677	9.604	9.018	8.949
累积贡献率(CCR)/%	24.334	37.005	47.922	57.599	67.203	76.221	85.169

点表征种仁油脂产出能力；第 7 主成分贡献率为 8.949%，决定第 7 主成分的为果实侧径（FLD）、种仁侧径（SLD）及粗脂肪含量（CF）。

3.5.2 杜仲果实性状综合评价 经主成分分析提取了 7 个主成分，计算 331 份杜仲种质在各主成分的得分及综合得分，筛选出前 10 名表现最优种质（表 7）。第 1 主成分排名前 10 的种质编号为 10129C、10269C、10588C、10531C、10221C、10599C、11065C、10596C、10159C、10095C，这些种质来自北京、河南和福建，果实产量性状较优；第 2 主

成分表征亚麻酸为主的脂肪酸性状，排名前 10 的种质编号为 11028C、10183C、10034C、10233C、10467C、10504C、10037C、10171C、10150C、10043C，这些种质来自四川、北京、广西、河南、湖南；第 5 主成分排名前 10 的种质为 10513C、10229C、10166C、10209C、10504C、10049C、10508C、14001C、10526C、10029C，这些种质来自河南、北京、河北、江西，杜仲橡胶产出能力表现较好；第 6 主成分排名前 10 的种质为 10055C、11044C、10246C、10129C、10124C、10143C、10588C、10508C、10133C、

表7 杜仲种质主成分得分和综合得分

Table 7 Principal component scores and overall scores of *Eucommia ulmoides* germplasms

项目 Items		排名 Ranking									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PC1	编号No.	10129C	10269C	10588C	10531C	10221C	10599C	11065C	10596C	10159C	10095C
	Z ₁	7.842	5.519	5.357	5.319	5.047	5.023	4.770	4.672	4.625	4.488
PC2	编号No.	11028C	10183C	10034C	10233C	10467C	10504C	10037C	10171C	10150C	10043C
	Z ₂	6.427	4.701	4.423	4.022	3.773	3.543	3.487	3.442	3.401	3.251
PC3	编号No.	10580C	10005C	10252C	10247C	10508C	10207C	10236C	10271C	10159C	10129C
	Z ₃	8.221	6.827	6.752	5.908	5.187	5.185	3.975	3.765	3.596	3.538
PC4	编号No.	11081C	10399C	10508C	10172C	10050C	10250C	11083C	10596C	10192C	11044C
	Z ₄	5.737	4.579	4.158	3.913	3.385	3.254	3.143	3.083	3.026	2.782
PC5	编号No.	10513C	10229C	10166C	10209C	10504C	10049C	10508C	14001C	10526C	10029C
	Z ₅	3.023	2.864	2.818	2.773	2.762	2.733	2.706	2.639	2.613	2.526
PC6	编号No.	10055C	11044C	10246C	10129C	10124C	10143C	10588C	10508C	10133C	11049C
	Z ₆	3.022	3.004	2.772	2.547	2.452	2.428	2.406	2.335	2.334	2.173
PC7	编号No.	10095C	10508C	10035C	10223C	11016C	10599C	10034C	10152C	10220C	11101C
	Z ₇	1.701	1.131	3.908	3.842	3.813	3.494	3.443	3.414	3.131	3.111
综合得分	编号No.	10129C	10508C	10588C	10580C	10043C	10531C	10035C	10152C	11065C	10596C
Overall score	Z	3.122	2.359	2.305	2.287	2.247	2.186	2.159	2.113	2.073	2.056

11049C, 这些种质来自河北、吉林、北京、河南、山西, 种仁油脂产出能力较高; 综合评价前10的种质编号为10129C、10508C、10588C、10580C、10043C、10531C、10035C、10152C、11065C、10596C, 最优的种质来自北京万泉河路, 其次是河南洛阳, 河南洛阳有3份种质入选。部分优异种质照片见图1。

4 讨论

表型变异是遗传变异最直接的表现, 是遗传和环境相互作用的结果。杜仲为第四纪冰川侵袭后仅留存于我国的孑遗树种, 在长期进化过程中, 产生了丰富的变异。选用果实进行表型性状遗传变异研究, 可以在一定程度上反映不同来源种质的变异大小和遗传多样性水平^[20]。周强等^[5]研究发现, 湘西地区杜仲翅果性状存在较大变异, 果实形态性状变异系数为5.9%~22.6%, 遗传变异较大; 魏艳秀^[21]通过对杜仲果实形态性状的测定, 发现不同种质遗传多样性指数为2.04~2.09, 表现出丰富的多样性。本研究通过对331份杜仲种质资源果实19个性状测定分析, 发现杜仲种质资源果实性状表现出



图1 杜仲优异种质

Fig. 1 Excellent germplasms of *Eucommia ulmoides*

丰富的多样性, 19个性状遗传多样性指数平均值为2.0234, 杜仲橡胶含量遗传多样性指数最大(2.0947), 其次是粗脂肪(2.0896); 变异系数平均值为12.65%, 以果实百粒质量、包裹种仁果皮百粒质量和种仁百粒质量为代表的经济性状表现出15.20%~25.79%的变异幅度, 而亚麻酸、油酸、果型指数等性状的变异系数较小, 可能是这些性状表现较稳定。杜仲果实丰富的表型变异为优良资源选育提供了可能。对不同来源杜仲果实性状分

析发现,除果实纵径、种仁横径、种仁体积指数外,其它性状在不同来源间均存在差异。

通过对杜仲果实性状相关性分析发现,杜仲果实重要经济性状杜仲橡胶含量与包裹种仁果皮百粒质量、果实侧径呈极显著正相关,魏艳秀^[21]也得到了类似的结论,表明果实侧径可以作为筛选优异种质的重要参考指标;而杜仲橡胶含量与种仁粗脂肪含量呈显著负相关,表明杜仲橡胶含量与油脂的积累存在一定程度的竞争关系,这与周强等^[5]研究结果相异,可能由于材料来源及样本数不同。亚麻酸含量与亚油酸呈极显著负相关,因此,在评价杜仲籽油品质时,应综合考虑亚麻酸与亚油酸的总和。

聚类分析可将性状相似的种质聚为一类,更好地分析各种质特点,对优良种质筛选和资源利用有较好指导作用。本研究将331份杜仲种质划分为3个类群,3个类群不同性状表现出明显差异,第Ⅲ类群果实最大,平均果实百粒质量达9.59 g,杜仲橡胶含量和亚麻酸含量分别为16.09%和59.51%,均为3个类群中最高,具有筛选高产、高质量优良品种的潜力;同时,发现不同种质在地理分布上呈现混杂分布,表明我国杜仲种质资源分布无明显地理变异趋势,可能与杜仲较强的适应性和长期的引种栽培活动有关。

国内关于杜仲优良种质评价筛选工作开展较早,张博勇等^[22]结合有效成分、生长量等指标筛选出了药用杜仲优良无性系;杜红岩等^[23]、杜庆鑫等^[24]、庆军等^[14]先后筛选出橡胶用、雄花用、叶用杜仲优良无性系;周强等^[5]针对湘西地区杜仲种质资源果实性状进行了评价,筛选了杜仲胶和油脂含量高的资源;于靖^[15]对不同产地、不同基因型杜仲种仁脂肪酸及果皮杜仲胶含量进行了分析评价。但针对果用杜仲优良种质筛选存在样本量少、评价性状不全面等问题。本研究收集我国18个省(市)共331份杜仲种质资源,涵盖了我国杜仲种质资源大部分类型,包含种质资源信息十分丰富。本研究基于杜仲果实表型性状,采用主成分分析法,提取了7个主成分,并对杜仲种质进行评价。针对油用、橡胶用和综合利用等不同用途分别筛选出10份最优种质。经综合评价筛选的前10份最优种质为10129C、10508C、10588C、10580C、10043C、10531C、10035C、10152C、11065C、10596C,且有7份属于第Ⅲ类群大果型群体,与聚类分析结果相近,在今后育种及开发利用时可作为优选材料着重考虑。

5 结论

杜仲种质资源果实性状存在不同程度的变异和丰富的多样性,以包裹种仁果皮百粒质量和种仁百粒质量为代表的产量指标变异最大,为杜仲良种选育提供了充足的资源。亚麻酸、油酸、果型指数等性状变异系数较小,果实形态较稳定。杜仲橡胶含量与种仁粗脂肪含量呈显著负相关,表明对杜仲橡胶合成过程投入的增加要以减少对种仁油脂积累的投入为代价。聚类分析将杜仲种质划分为3个类群,类群间不同性状差异明显,但不同种质无明显地理变异趋势。针对不同用途分别筛选出10份最优种质,为我国杜仲良种选育及综合利用提供了优异的种质基础。

参考文献:

- [1] Tokumoto Y, Kajiura H, Takeno S *et al.* Induction of tetraploid hardy rubber tree, *Eucommia ulmoides*, and phenotypic differences from diploid[J]. *Plant Biotechnology*, 2016, 33(1): 1-7.
- [2] 杜红岩. 中国杜仲图志[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 11-13.
- [3] 李明华, 刘力, 兰婷, 等. 天然高分子材料杜仲胶的特性及研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(5): 1026-1029.
- [4] 杜红岩, 杜庆鑫. 我国杜仲产业高质量发展的基础、问题与对策[J]. *经济林研究*, 2020, 38(1): 1-10.
- [5] 周强, 陈功锡, 熊利芝, 等. 湘西地区杜仲翅果性状多样性的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(4): 14-19.
- [6] 张深梅, 奚建伟, 洪俊彦, 等. 大别山山核桃果实与叶片性状的表型多样性研究[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(1): 152-161.
- [7] 熊仕发, 吴立文, 陈益存, 等. 不同种源百栎果实形态特征和营养成分含量变异分析[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(2): 93-102.
- [8] Li Y Z, Cheng Y J, Yi H L, *et al.* 2006. Genetic diversity in mandarin landraces and wild mandarins from China base on nuclear and chloroplast simple sequence repeat makers[J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2006, 81(3): 371-378.
- [9] Garcia-Lor A, Luro F, Ollitrault P. Genetic diversity and population structure analysis of mandarin germplasm by nuclear, chloroplastic and mitochondrial markers[J]. *Tree Genetics&Genomes*, 2015, 11(6): 1-15.
- [10] Sun C W, Wang L C, Liu J M, *et al.* Genetic structure and biogeographic divergence among *Sapindus* species: An inter-simple sequence repeat-based study of germplasm in China[J]. *Industrial Crops & Products*, 2018, 118: 1-10.
- [11] 刘济铭, 陈仲, 孙操稳, 等. 无患子属种质资源种实性状变异及综合评价[J]. *林业科学*, 2019, 55(6): 44-54.
- [12] 杜红岩, 李芳东, 杜兰英, 等. 不同产地杜仲果实形态特征及含胶量的差异性研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(3): 35-39.
- [13] 杜庆鑫, 刘攀峰, 庆军, 等. 杜仲雄花形态性状的遗传多样性分析[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(5): 670-675.

- [14] 庆 军, 魏艳秀, 王鼎涵, 等. 杜仲叶片6种主要活性成分的遗传变异研究[J]. 西北植物学报, 2018, 38 (3): 316-323.
- [15] 于 靖. 杜仲种质资源及其果实质量评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [16] Wu M Q, Chen S L, Wang M X, *et al.* An analysis of the genetic diversity and genetic structure of *Eucommia ulmoides* using inter-simple sequence repeat (ISSR) markers[J]. African journal of Biotechnology, 2011, 10(84): 19505-19513.
- [17] Yu J, Wang Y, Peng L, *et al.* Genetic diversity and population structure of *Eucommia ulmoides* Oliver, an endangered medicinal plant in China[J]. Genetics and Molecular Research, 2015, 14(1): 2471-2483.
- [18] 潘存祥, 许 勇, 纪海波. 西瓜种质资源表型多样性及聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16 (1): 59-63.
- [19] 宋江峰, 刘春泉, 姜晓清, 等. 基于主成分与聚类分析的菜用大豆品质综合评价[J]. 食品科学, 2015, 36 (13): 12-17.
- [20] 乔 谦, 丰 震, 任红剑, 等. 元宝枫天然种群种实表型多样性[J]. 生态学杂志, 2017, 36 (10): 2707-2715.
- [21] 魏艳秀. 杜仲主要活性成分和杜仲橡胶的遗传变异研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [22] 张博勇, 张康健, 张 檀, 等. 秦仲1-4号优良品种选育研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19 (3): 18-20.
- [23] 杜红岩, 乌云塔娜, 杜兰英. 杜仲高产胶优良无性系的选育[J]. 中南林学院学报, 2006, 26 (1): 6-11.
- [24] 杜庆鑫, 刘攀峰, 魏艳秀, 等. 基于主成分与聚类分析的杜仲雄花品质综合评价[J]. 植物研究, 2016, 36 (6): 846-852.

Variation in Fruit Traits of *Eucommia ulmoides* Germplasm Resources and Their Comprehensive Evaluation

DU Qing-xin, QING Jun, LIU Pan-feng, WANG Lu, DU Lan-ying, HE Feng, DU Hong-yan

(Paulownia R & D Center of National Forestry and Grassland Administration, Non-timber Forest Research and Development Center, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Non-timber Forest Germplasm Enhancement & Utilization of National Forestry and Grassland Administration, Zhengzhou 450003, He'nan, China)

Abstract: [Objective] To provide theoretical basis and genetic materials for breeding and utilization of *Eucommia ulmoides*. [Method] Based on 331 *E. ulmoides* germplasm resources from 18 provinces of China, correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis were conducted for evaluating and selecting superior germplasms with 19 fruit traits. [Result] The coefficient of variation of fruit traits was 4.64%-25.79% and the average coefficient of variation was 12.65%. Large variations were found in 100-fruit pericarp wrapping seed kernel weight (25.79%), 100-seed kernel weight (22.32%) and seed volume index (19.53%), while the linolenic acid (4.64%), oleic acid (5.78%) and fruit type index (8.04%) kept relatively stable. The diversity index ranged from 1.6572 to 2.0947, with an average of 2.0234. The 100-fruit weight showed a significant positive correlation with fruit volume index and 100-seed kernel weight, *E. ulmoides* rubber content significantly and positively correlated to 100-fruit pericarp wrapping seed kernel weight and fruit lateral diameter, while significantly and negatively correlated with crude fat content. Cluster analysis divided the germplasm resources into three groups: small (I), medium (II), and large (III), different types of germplasms were preliminarily defined. Based on principal component analysis, the cumulative contribution rate of the first seven principal components were accounted for 85.169%, ten superior germplasms were selected for evaluation of oil, rubber *E.* and comprehensive utilization. [Conclusion] *E. ulmoides* germplasm shows high variation. The yield index has the largest variation, represented by 100-fruit pericarp wrapping seed kernel weight and 100-seed kernel weight, which provides possibility for the selection of superior germplasms. The optimal germplasms selected for different purpose provides an excellent germplasm basis for the breeding and comprehensive utilization of *E. ulmoides*.

Keywords: *Eucommia ulmoides*; germplasm resources; fruit traits; variation; comprehensive evaluation