

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

孙志鹏, 武华卫, 方颖, 赖世会, 罗建勋*

(四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要:以四川盆地 12 个引种地的油用牡丹‘凤丹’种子为研究对象,对其表型性状及营养成分进行测定分析,并结合气象、土壤养分和海拔等生态因子,探讨各性状与生态因子的相关性,揭示影响种子品质的关键生态因子,以期为‘凤丹’科学引种、高效栽培提供理论支撑。结果显示:(1)各采样地‘凤丹’种子表型性状横径、纵径、种形指数以及千粒重均具有极显著差异($P < 0.01$),其变幅分别为 7.98~10.63 mm、7.75~10.86 mm、0.80~1.32 以及 311.23~393.15 g,且种子纵径和千粒重均以巴中市南江县最大(10.86 mm, 393.15 g),横径和种形指数分别以乐山市峨边县、南充市西充县最大(10.63 mm, 1.32)。(2)各采样地‘凤丹’种子营养成分中含油率、蛋白质、 α -亚麻酸及亚油酸存在极显著差异($P < 0.01$),其变化幅度分别为 20.5%~26.9%、15.6%~19.6%、42.8~47.1% 和 15.7%~19.6%,且均以巴中市南江县较高(26%、18.3%、47.1% 和 18.3%)。(3)‘凤丹’种子千粒重与 α -亚麻酸、亚油酸含量($r = 0.760$ 和 -0.701),蛋白质与亚油酸、油酸含量($r = -0.686$ 和 0.665), α -亚麻酸与亚油酸含量($r = -0.904$),以及棕榈酸与硬脂酸含量($r = -0.792$)均呈极显著相关关系。(4)立地条件对‘凤丹’种子表型性状和营养成分贡献率大小为速效钾 > 有机质 > 海拔 > 碱解氮 > 有效磷 > pH,气候条件贡献率大小为全年日照 > 1 月均温 > 7 月均温 > 年降雨量 > 年均温,其中海拔对种子表型性状的影响较大,速效钾对种形指数和油酸的影响较大,有机质和碱解氮对蛋白质和含油率的影响较大;海拔、速效钾、有效磷、碱解氮和温度与种子表型性状、含油率、 α -亚麻酸、蛋白质和棕榈酸呈正相关程度大,与硬脂酸和亚油酸呈负相关关系。研究发现,四川盆地不同区域引种栽培的‘凤丹’种子表型性状及主要营养成分含量具有显著差异,气象、土壤养分和海拔等生态因子对‘凤丹’种子品质具有重要影响,在选择‘凤丹’种植基地时应选择海拔、温度较高,土壤养分(有机质、速效钾、有效磷、碱解氮)充沛的地区。

关键词:四川盆地;油用牡丹;表型性状;营养性状;生态因子

中图分类号: Q948.11; S685.11; S794.9 **文献标志码:** A

Regional Difference of Seed Quality and Its Relationship with Ecological Factors of Oil Peony in Sichuan Basin

SUN Zhipeng, WU Huawei, FANG Ying, LAI Shihui, LUO Jianxun*

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: We determined and analyzed the phenotypic characteristics and nutritional components of *Paeonia suffruticosa* Andr ‘Fengdan’ seeds from 12 introduced areas in Sichuan basin, and combined with ecological factors such as meteorology, soil nutrients and altitude, in order to provide theoretical support for

收稿日期: 2021-06-23; 修改稿收到日期: 2021-09-05

基金项目: 四川省育种攻关项目——突破性林木育种材料和方法创新及新品种选育(2021YFYZ0032)

作者简介: 孙志鹏(1990-), 博士, 助理研究员, 主要从事林木新品种选育、良种繁育研究。E-mail: 1057151347@qq.com

* 通信作者: 罗建勋, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事林木种质资源研究。E-mail: jianxunl@163.com

scientific introduction and high-efficiency cultivation of 'Fengdan'. The correlation between seed characters and ecological factors was studied and key ecological factors affecting seed quality were revealed. The results showed that: (1) the transverse diameter, longitudinal diameter, seed shape index and 1 000 grain weight of phenotypic characters of 'Fengdan' seeds in each sampling area had extremely significant differences ($P < 0.01$), and their variation ranges were 7.98–10.63 mm, 7.75–10.86 mm, 0.80–1.32 and 311.23–393.15 g, respectively. The longitudinal diameter and 1 000 grain weight of seeds in Nanjiang County of Bazhong City were the largest (10.86 mm, 393.15 g), and the transverse diameter and seed shape index were the largest in Ebian County of Leshan City and Xichong County of Nanchong City (10.63 mm, 1.32). (2) There were significant differences in oil, protein, α -linolenic acid and linoleic acid contents ($P < 0.01$) in the seeds of 'Fengdan' from different sampling sites, and the ranges of their changes were 20.5%–26.9%, 15.6%–19.6%, 42.8%–47.1% and 15.7%–19.6%, respectively, which were higher in Nanjiang County of Bazhong City (26%, 18.3%, 47.1% and 18.3%). (3) The 1000-grain weight of 'Fengdan' seeds was significantly correlated with the content of α -linolenic acid and linoleic acid ($r = 0.760$ and -0.701), and the contents of linoleic acid and oleic acid were significantly correlated with the contents of protein ($r = -0.686$ and 0.665), while α -linolenic acid was negatively correlated with linoleic acid ($r = -0.904$), and palmitic acid was negatively correlated with stearic acid ($r = -0.792$). (4) The contribution of site conditions to the phenotypic characters and nutrient components of 'Fengdan' seeds were as follows: available potassium > organic matter > altitude > available nitrogen > available phosphorus > pH, the contribution rates of climatic conditions are annual sunshine > average temperature of January > average temperature of July > annual rainfall > annual average temperature, among which altitude has a greater effect on seed phenotypic characters, and available potassium has a greater effect on seed shape index and oleic acid. The effects of organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen on protein and oil contents were significant, and there were positive correlations between altitude, available potassium, available phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen and temperature with seed phenotypic traits, oil, α -linolenic acid, protein and palmitic acid contents, negative correlation with stearic acid and linoleic acid contents. The study found that there were significant differences in the phenotypic characters and the contents of main nutrient components of 'Fengdan' seeds introduced from different regions in Sichuan basin, ecological factors such as weather, soil nutrients and altitude have important effects on seed quality of 'Fengdan'. We suggest to plant 'Fengdan' at areas with higher altitude and higher temperature, and rich in soil nutrients (organic matter, available potassium, available phosphorus, and alkaline-hydrolyzed nitrogen).

Key words: Sichuan basin; *Paeonia suffruticosa* Andr 'Fengdan'; phenotypic characteristics; nutritional components; ecological factors

油用牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)是中国独有的原生多年生小灌木,是芍药科(Paeoniaceae)芍药属(*Paeonia* L.)牡丹组中结实能力强并能用来生产种籽、加工食用牡丹籽油的牡丹类型^[1-3]。作为中国新兴的油料作物,油用牡丹籽含油率在20%以上,不饱和脂肪酸含量高达92%以上(其中 α -亚麻酸占42%),多项指标超过被称为“液体黄金”的橄榄油,经济价值极高^[4-5]。目前,油用牡丹主要以‘凤丹’(*Paeonia ostii*)和‘紫斑牡丹’(*P. rockii*)两大品种群为栽培材料^[6],其中‘凤丹’是由杨山牡丹(*Paeonia ostia* T. Hong et J. X. Zhang)经栽培演化形成的品种亚群,具耐湿热、适生性强和结实率高等特点,兼具观赏、药用和油用价值^[7-8]。近年来,因其含油量高、油质好等特点,全国范围内‘凤丹’被越来越多省份引种栽植。四川省自2011年开始引种,

现主要分布于成都、绵阳、乐山、巴中、达州、遂宁、南充、巴中、凉山州布拖、盐源以及阿坝州金川县等地。

目前,四川‘凤丹’产业发展还处于起步阶段,理论及实践经验不足,尚未形成适宜四川地区气候条件的系统栽培繁育技术体系;同时,受各种植区气候和土壤环境等自然因素影响,‘凤丹’种子营养成分含量差异较大。已有研究表明,环境生态因子对种子中营养成分的累积具有重要影响,适宜的生态环境条件有利于种子优良品质的形成^[9-11]。目前,对于油用牡丹的研究多集中于育种栽培^[12-13]、牡丹籽油的成分分析^[14-15]及牡丹籽油的提取方法^[16-17]等方面,关于不同生态环境下‘凤丹’种子营养成分含量差异及其与生态因子的耦合关系尚缺乏深入系统探讨。因此,研究‘凤丹’种子中营养成分的累积与生态因子的关系对生产实践具有重要指导意义。本

研究以四川盆地引种的‘凤丹’种子为试验材料,进行表型性状和营养成分对比分析,并基于气象、土壤养分和海拔等生态因子,探讨各营养成分与生态因子的相关性,揭示影响种子主要营养成分的关键因子,以期为四川‘凤丹’科学栽培、高效生产和产业健康发展提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 采样地概况

本次试验种子采集于四川盆地内的 12 个‘凤

丹’种植基地,包括巴中地区(南江县和恩阳区)、绵阳地区(梓潼县和游仙区)、成都地区(大邑县和崇州市)、乐山地区(峨边县和沐川县)、达州地区(达川区和宣汉县)以及遂宁地区(蓬溪县)。用手持 GPS 测定样地的经纬度和海拔,登录中国气象科学数据共享服务网查询系统(<http://data.cma.cn>),获取平均降水量、日照时数、年均温、1 月均温、7 月均温和年均相对湿度。各采样地环境生态因子见表 1。

1.2 试验材料

2020 年 8 月,分别在 12 个‘凤丹’种植基地采集

表 1 采样地的立地气候和土壤条件

Table 1 The climate and soil conditions of the sampling sites

采样地 Sampling site	海拔 Altitude /m	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	年均温 Annual average temperature/°C	1 月均温 Average temperature of January/°C	7 月均温 Average temperature of July/°C	年降雨量 Annual precipitation /mm
1	1080	32°13'24"	106°54'14"	16.1	6.0	28.0	1 491.0
2	420	31°41'31"	106°32'26"	16.3	6.1	27.3	1 358.6
3	410	31°4'10"	105°59'56"	17.2	6.3	27.5	970.0
4	520	31°27'22"	105°3'24"	16.7	5.4	26.2	902.4
5	510	31°29'10"	104°48'1"	16.5	5.2	26.0	990.0
6	600	30°37'32"	103°25'11"	16.1	5.5	26.1	1 095.5
7	542	30°40'41"	103°43'52"	15.9	5.4	25	1 012.4
8	1090	29°16'52"	103°26'24"	16.6	6.5	25.3	887.7
9	521	28°54'12"	103°54'34"	17.3	6.9	26.2	1 332.0
10	480	31°7'6"	107°13'33"	18.6	6.1	27.2	1 086.2
11	660	31°28'57"	107°33'29"	16.8	5.6	27.6	1 230.0
12	390	30°49'14"	105°38'49"	17.0	6.5	27.2	929.5

采样地 Sampling site	全年日照时数 Annual sunshine duration/h	pH	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen /(mg · kg ⁻¹)
1	1 138.2	6.32	27.53	142.26	7.14	111.70
2	1 089.0	6.14	13.77	42.16	4.93	74.65
3	1 445.0	5.93	15.05	59.42	6.25	87.00
4	1 043.6	6.38	14.30	41.67	10.24	81.10
5	1 298.0	6.75	12.21	113.66	8.31	65.52
6	1 076.5	6.90	12.30	87.03	6.72	85.39
7	1 161.5	5.19	11.09	95.91	4.47	63.91
8	1 049.3	5.39	12.08	34.77	9.34	77.34
9	968.0	5.50	6.23	19.97	5.40	47.26
10	1 146.5	5.24	23.13	131.41	11.46	134.26
11	1 488.0	4.85	23.57	163.96	8.55	97.21
12	1 471.7	5.97	11.93	75.20	6.39	70.89

注:1. 巴中市南江县;2. 巴中市恩阳区;3. 南充市西充县;4. 绵阳市梓潼县;5. 绵阳市游仙区;6. 成都市大邑县;7. 成都市崇州市;8. 乐山市峨边县;9. 乐山市沐川县;10. 达州市达川区;11. 达州市宣汉县;12. 遂宁市蓬溪县。下同

Note: 1. Nanjiang, Bazhong; 2. Enyang, Bazhong; 3. Xichong, Nanchong; 4. Zitong, Mianyang; 5. Youxian, Mianyang; 6. Dayi, Chengdu; 7. Chongzhou, Chengdu; 8. Ebian, Leshan; 9. Muchuan, Leshan; 10. Dachuan, Dazhou; 11. Xuanhan, Dazhou; 12. Pengxi, Suining. The same as below

样品。每个采样地选择生长良好、果实发育正常的植株,采用对角线法选取 20 株进行球果采集,球果取回后,在实验室自然晾干,剥取种子,备用。采集‘凤丹’球果的同时采集土壤样品,在每个采样地的东、西、南、北 4 个方位分别采集 0~20 cm 土层的土壤,用四分法缩分,去除杂质后,装于自封袋中,带回实验室自然风干,备用。

1.3 观测指标及方法

1.3.1 种子表型性状 千粒重采用四分法,随机选取 100 粒种子,用测量精度为 0.01 g 的电子天平称量;种子横径为与种柄延伸方向垂直的最大测量值,种子纵径为与种柄延伸方向一致的种子大小测量值,用测量精度均为 0.01 mm 的游标卡尺测定,并据此计算种形指数(种形指数=种子纵径/种子横径)。

1.3.2 种子营养成分 ①采用索氏抽提法测定种仁中的含油量,按照 GB/T 14488.1-2008^[18] 进行测定。

②采用半微量凯氏定氮法测定种仁中的蛋白质含量,按照 GB/T 5009.5-2010 进行测定^[19]。

③采用 GC-MS 测定牡丹籽油中 5 种主要的脂肪酸(亚麻酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸)^[20] 相对含量,按照 GB/T 17376-2008^[21] 和 GB/T 17377-2008^[22] 测定。

1.3.3 土壤养分含量 土壤 pH 用酸度计直接测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾法-外加热法测定;土壤碱解氮含量用碱解扩散法测定;土壤有效磷含量用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量用中性乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法测定^[23-26]。

1.4 数据分析

采用 SPSS19.0 和 Excel 2013 软件对数据进行统计分析,用单因素方差分析法检测不同性状在各引种地间的差异显著性,采用 Canoco5.0 软件中的冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)方法分析‘凤丹’种子营养成分含量与生态因子之间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 各样地‘凤丹’种子表型性状分析

表型性状是评价种子的重要组成部分,对衡量种子品质的优劣具有重要指导意义^[27]。表 2 显示,4 个‘凤丹’种子表型性状横径、纵径、种形指数和千粒重在 12 个采样地间差异均达到极显著水平($P <$

0.01)。其中,12 个‘凤丹’采样地种子平均横径为 9.05 mm,变幅为 7.98~10.63 mm,其中乐山市峨边县、绵阳市游仙区、成都市崇州市均大于 10 mm,绵阳市梓潼县、达州市达川区均小于 8.0 mm;各采样地种子平均纵径为 9.32 mm,变幅为 7.75~10.86 mm,巴中市南江县、达州市宣汉县及南充市西充县均大于 10 mm,仅成都市大邑县小于 8 mm;各采样地种子平均种形指数为 1.06,变幅为 0.80~1.32,南充市西充县、达州市宣汉县、巴中市恩阳区和达州市达川区均大于 1.20,绵阳市游仙区、成都市大邑县、成都市崇州市和乐山市峨边县均小于 0.90;各采样地种子平均千粒重为 348.85 g,变幅为 311.23~393.15 g,其中巴中市南江县、成都市崇州市、乐山市峨边县及绵阳市游仙区均超过 370 g,分别是最小的巴中市恩阳区的 1.26、1.19、1.23 和 1.23 倍。另外,多重比较结果显示:4 个种子表型性状均在 3 个或 3 个以上的引种地存在显著差异和极显著差异,说明这些性状在不同采样地间的多样性较高;不同采样地的种子横径、纵径大小变化没有明显的规律性,但种形指数却表现出明显的随着经度的增加呈逐步增大的趋势。通过对‘凤丹’各表型性状的变异系数分析可知(表 2),在‘凤丹’4 个表型性状中,平均变异系数最大的为种形指数(17.50%),其次为横径(11.39%)和纵径(9.06%),变异系数最小的为千粒重(8.08%),表明千粒重的变异程度最小,而种形指数的变异程度最大。

2.2 各样地‘凤丹’种子营养成分分析

2.2.1 含油率和蛋白质含量 由图 1 可以看出,各采样地‘凤丹’种子含油率的平均值为 24.07%,变化幅度为 20.5%~26.9%,超过平均值的采样地有巴中、达州和南充地区以及乐山市沐川县,并以乐山市沐川县、达州市宣汉县和巴中市南江县的含油率最高,处于 26.0%~26.9%之间,而遂宁市蓬溪县的含油率最低,仅为 20.5%。各采样地‘凤丹’种子蛋白质含量的平均值为 17.1%,变化幅度为 15.6%~19.6%,其中绵阳市游仙区、巴中市南江县和巴中市恩阳区的最高且均超过 18%,分别为 19.6%、18.3%和 18.1%,而成都市大邑县和遂宁市蓬溪县的蛋白质含量最低,均小于 16%;巴中、南充地区‘凤丹’种子的蛋白质含量高低与其含油率表现相似,也均超过平均值,而成都地区种子蛋白质含量高低同其含油率具有相同的规律,也均低于平均值。

2.2.2 脂肪酸含量 图 2 显示,‘凤丹’种子中 5 种主要脂肪酸(α -亚麻酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸)

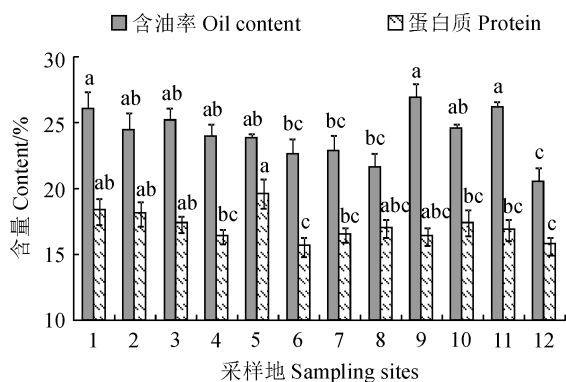
表 2 12 个‘凤丹’采样地种子表型性状

Table 2 Phenotypic characters of seeds from 12 ‘Fengdan’ seed sampling sites

采样地 Sampling site	横径 Transverse diameter/mm	纵径 Longitudinal diameter/mm	种形指数 Seed shape index	千粒重 Thousand-grain weight/g
1	9.91±1.03a	10.86±1.38a	1.10±0.18	393.15±33.52
2	8.06±0.73b	9.76±0.81ab	1.21±0.14	311.23±29.81
3	8.88±0.84ab	10.01±1.00a	1.32±0.13	355.87±23.54
4	7.99±0.67b	9.14±0.78ab	1.15±0.14	327.89±22.18
5	10.48±1.23a	8.69±0.77ab	0.84±0.11	371.61±27.33
6	9.72±0.76a	7.75±1.00b	0.80±0.11	324.02±18.19
7	10.01±0.94	8.47±0.97	0.84±0.10	383.46±19.93
8	10.63±0.81a	8.70±0.80ab	0.82±0.09	381.57±25.59
9	8.46±0.64ab	9.84±0.91ab	1.17±0.11	352.26±30.19
10	7.98±0.86b	9.47±0.87ab	1.20±0.16	333.82±21.08
11	8.32±0.89ab	10.06±0.72a	1.22±0.16	334.17±18.55
12	8.12±0.85ab	9.43±0.92ab	1.06±0.16	317.09±25.01
平均值 Mean	9.05	9.35	1.06	348.85
变异系数 CV/%	11.39	9.06	17.50	8.08
F 值	29.774**	11.834**	25.872**	7.457**

注:同列不同字母表示不同引种地间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$). The same as below



不同小写字母表示样地间在 0.05 水平存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 1 12 个引种地‘凤丹’种子含油率和蛋白质含量

The different normal letters indicate the significant difference among sampling sites at 0.05 level ($P < 0.05$)

Fig. 1 Oil content and protein content of seeds from 12 ‘Fengdan’ sampling sites

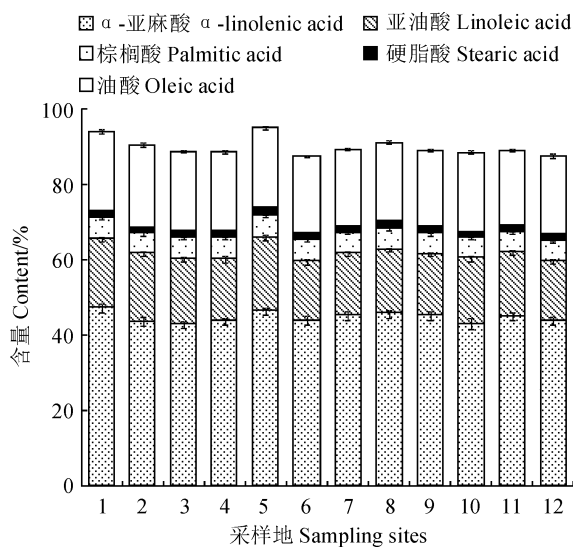


图 2 不同采样地‘凤丹’种子中主要脂肪酸成分含量

Fig. 2 Main fatty acid contents of ‘Fengdan’ seeds from different sampling sites

含量以 α -亚麻酸较高,远高于其他成分,也远高于在橄榄油中含量,因此, α -亚麻酸含量在一定程度上也决定了‘凤丹’籽油的品质^[28]。其中,不同采样地‘凤丹’籽油中 α -亚麻酸含量存在显著差异 ($P < 0.05$),含量处于 42.8%~47.1%之间,并以巴中市南江县、绵阳市游仙区‘凤丹’ α -亚麻酸含量较高 (>46%),而以南充市西充县、达州市达川区较低 (<43%);不同采样地‘凤丹’籽油中亚油酸含量也存在

显著差异 ($P < 0.05$),含量处于 15.7%~19.6%之间;不同采样地‘凤丹’籽油中棕榈酸、硬脂酸、油酸含量差异均不显著 ($P > 0.05$),3 种脂肪酸含量依次为 5.23%~5.76%,1.66%~2.03%,19.8%~21.6%,均以绵阳市游仙区较高,分别达到 5.76%、2.03%和 21.3%。

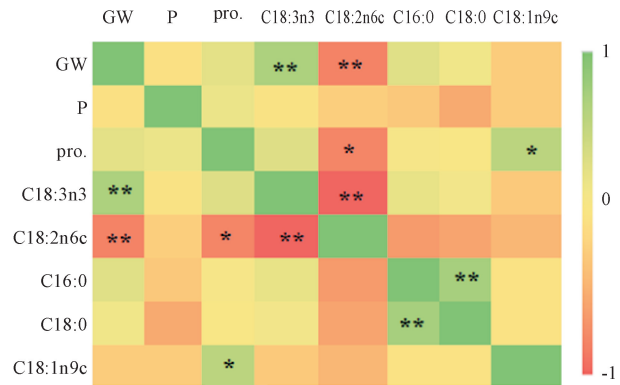
2.3 ‘凤丹’种子各性状相关性分析

‘凤丹’种子性状间的相关性分析结果(图 3)表明:千粒重与 α -亚麻酸、亚油酸含量均具有极显著相关关系,其中与 α -亚麻酸呈极显著正相关(0.760),与亚油酸呈极显著负相关(-0.701);蛋白质与亚油酸、油酸含量具有极显著相关关系,其中与亚油酸呈极显著负相关(-0.686),与油酸呈极显著正相关(0.665); α -亚麻酸与亚油酸含量呈极显著负相关(-0.904);棕榈酸与硬脂酸含量呈极显著负相关(-0.792)。

进一步对呈显著相关的因子进行线性回归分析,得到‘凤丹’种子中 α -亚麻酸含量与千粒重,亚油酸含量与千粒重、蛋白质含量和 α -亚麻酸含量,油酸含量与蛋白质含量,以及硬脂酸含量与棕榈酸含量的回归方程(图 4)。这为通过千粒重直接估算 α -亚麻酸和亚油酸的质量分数以及各脂肪酸间的质量分数估算提供便利。

2.4 不同引种地‘凤丹’种子品质与生态因子的关系

由表 3 可知,前两个排序轴的累计解释量达 80.61%,说明排序结果可信,能较好地解释 2 组变量的关系。由图 5 可知,立地气候对‘凤丹’种子表型性状和营养性状具有重要影响,其中立地条件对其影响最大,贡献率大小为速效钾>有机质>海拔>碱解氮>有效磷>pH;气候条件对其的贡献率大小为全年日照>1 月均温>7 月均温>年降雨量>年均温。速效钾对种形指数和油酸的影响较大,有机质和碱解氮对蛋白质和含油率的影响较大,海拔对



*、** 分别表示差异显著水平为 0.05 和 0.01。GW. 千粒重; P. 含油率; pro. 蛋白质; C18:3n3. α -亚麻酸; C18:2n6c. 亚油酸; C16:0. 棕榈酸; C18:0. 硬脂酸; C18:1n9c. 油酸

图 3 ‘凤丹’种子各性状间相关性分析

* and ** mean significant correlation between variables at 0.05 and 0.01 level. GW. 1 000-grain weight; P. Oil content; pro. Protein content; C18:3n3. α -Linolenic acid; C18:2n6c. Linoleic acid; C16:0. Palmitic acid; C18:0. Stearic acid; C18:1n9c. Oleic acid

Fig. 3 Correlation coefficients among indexes of ‘Fengdan’ seeds

表 3 种子性状与地理气候因子的 RDA 分析

Table 3 Analysis of seed traits and geographical and climatic factors based on RDA

统计参数 Statistic parameter	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 3 Axis3	轴 4 Axis4
特征值 Eigen values	0.647 3	0.158 8	0.089 5	0.056 7
累计解释变量 Explained variation(cumulative)	64.73	80.61	89.56	95.23

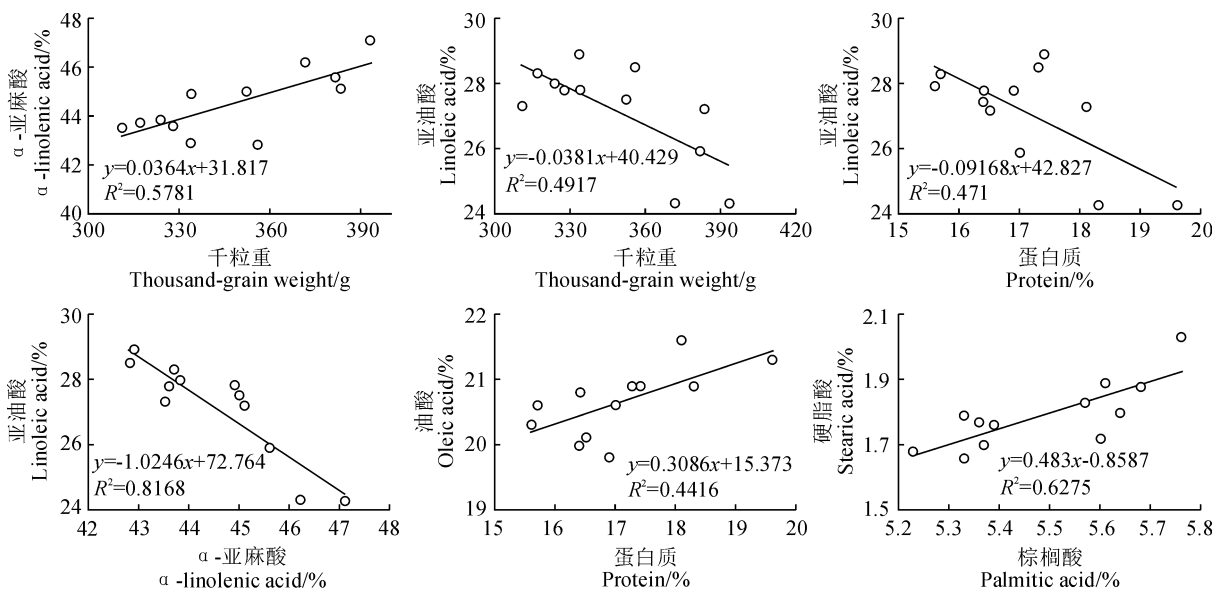
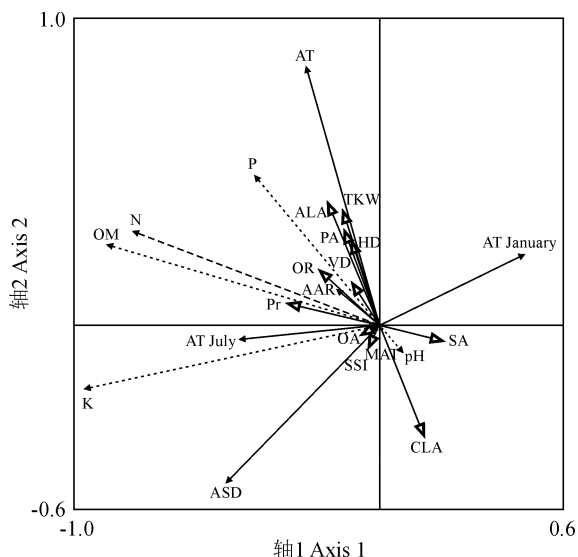


图 4 ‘凤丹’种子中显著相关性状间的回归分析

Fig. 4 Regression analysis of significant correlation factors of ‘Fengdan’ seeds



Alt. 海拔; MAT. 年均温; AT January. 1月均温; AT July. 7月均温;
AAR. 年降雨量; ASD. 全年日照时数; PH. pH值; OM. 有机质;
K. 速效钾; P. 有效磷; N. 碱解氮; HD. 横径; VD. 纵径;
SSI. 种形指数; TKW. 千粒重; OR. 含油率; Pr. 蛋白质;
ALA. α -亚麻酸; CLA. 亚油酸; PA. 棕榈酸; SA. 硬脂酸; OA. 油酸
图5 ‘凤丹’种子性状与其立地地理气候因子的典型相关性
Alt. altitude; MAT. Annual average temperature; AT January.
Average temperature of January; AT July. Average temperature
of July; AAR. Annual precipitation; ASD. Annual sunshine
duration; pH. pH; OM. Organic matter; K. Available K;
P. Available phosphorous; N. Alkali-hydrolyzable nitrogen;
HD. Transverse diameter; VD. Longitudinal diameter; SSI. Seed
shape index; TKW. Thousand-grain weight; OR. Oil content;
Pr. Protein; ALA. α -Linolenic acid; CLA. Linoleic acid;
PA. Palmitic acid; SA. Stearic acid; OA. Oleic acid

Fig. 5 Canonical correlation analysis between ‘Fengdan’
seed traits and geo-meteorological factors

种子表型性状的影响较大;同时海拔、速效钾、有效磷、碱解氮和温度等立地气候因子与种子表型性状、蛋白质、含油率、棕榈酸和 α -亚麻酸正相关程度大,与硬脂酸和亚油酸呈负相关。

3 讨论

表型多样性是遗传多样性和环境多样性的综合表现,对种子性状进行差异比较和多样性研究,可一定程度上反映该物种的遗传变异大小,同时还能反映出形态变异对环境的适应关系^[29-30]。本研究发现,不同采样地‘凤丹’种子各表型性状均存在极显著差异($P < 0.01$),表明引种到四川盆地的‘凤丹’会对不同生境做出差异响应,表型性状变化就是其形式之一^[31-32]。变异系数的差异反映了不同表型性状对环境的不同适应能力^[33],变异系数越大,表

型性状差异越明显,遗传变异可能性越大。本研究中测定的表型性状变异系数为8.08%~17.50%,说明这12个采样地‘凤丹’种子表现出较为丰富的遗传多样性,这与孙佳婷等^[34]在台湾栲树(*Koeleria elegans* subsp. *formosana*)的表型遗传多样性评价的研究结果一致。可见,这些性状在后期对育种材料进行选择时具有较高参考价值,可作为目标评价体系中的重要指标进行观测。其中,种形指数变异系数最大达到17.5%,而千粒重变异系数最小仅为8.08%,表明种形指数的变异水平高于千粒重性状,千粒重受到环境的影响相对较小,更趋于稳定。此外,本研究测定的籽油中 α -亚麻酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸和油酸含量变异幅度均较小(2.57%~6.07%),远低于表型性状变异系数(8.08%~17.50%),表明表型变异强度变异明显高于营养性状变异。‘凤丹’自四川引种以来,长期适应不同的环境,可能导致相同的功能性状在不同引种地间存在显著差异。在不同的环境中,‘凤丹’通过形态变化和表型性状分化调整自身的生长发育及其与环境之间的关系,从而适应环境的变化,不同采样地种子横径、纵径大小没有明显的规律性,说明种子大小受地理因素的影响较小;种形指数表现出明显的随经度的增加逐步增大的规律。说明高经度地区‘凤丹’种子则较窄长,而低经度地区的‘凤丹’种子形态较宽短,可能与采样地的经度跨度大且涉及到的种子表型性状数量多有关。

在选择相关性极强的性状组时,其中一个性状改良可同时影响其他性状改变,可在性状选择上提供不同的改良方向 and 选择标准^[35-36]。本研究通过比较‘凤丹’种子各性状间的相关性,发现‘凤丹’种子含油率和蛋白质含量与表型性状间无显著相关关系,证明在所选表型性状中不能对油用优良单株进行间接选择;同时,本研究发现‘凤丹’种子含油率和脂肪酸组分间也无显著相关关系,而脂肪酸组分间具有不同的相关性, α -亚麻酸含量与亚油酸含量呈极显著负相关,硬脂酸含量与棕榈酸含量呈极显著正相关,该结果与向婷婷等对野生油茶种子中含油率和脂肪酸组分正相关的研究结果不一致^[37],可能是由于研究区域范围和树种差异造成的,但要提高‘凤丹’籽油的综合食用价值,不能仅将含油率作为唯一参照,还要兼顾其脂肪酸组分,特别是 α -亚麻酸含量等。另外,本研究中千粒重与 α -亚麻酸极显著正相关,与亚油酸呈极显著负相关,千粒重是油用牡丹产量性状和品质指标的主要构成因素^[38],通过

线性回归分析以及建立回归方程,可以为通过千粒重直接估算 α -亚麻酸和亚油酸的质量分数以及各脂肪酸间的质量分数估算提供便利。

种子表型性状受外界多种因子的影响,如海拔、年平均气温和经纬度等^[39-40]。本研究发现土壤速效钾、有机质含量和海拔等立地条件因子,以及全年日照、1月均温和7月均温等气候条件因子对‘凤丹’种子表型的贡献率较大,这是因为土壤中速效钾和有机质含量会影响植物种子中营养化学成分的积累^[39],海拔会影响不同采样地的热、水和土等条件的空间差异,形成复杂的生境,在经过长期的地理隔离和自然选择间接影响种实的表型变异幅度^[41]。同时,本研究还发现速效钾对种形指数和油酸的影响较大,有机质对蛋白质和含油率的影响较大,该结果与潘苗等^[42]和罗芊芊等^[43]对南方红豆杉的研究结果相近,这是因为钾元素参与植物体内的某些代谢反应,具有提高含油量的作用,有机质含量对种子中营养化学成分影响显著,从而促进植物体内有机物质合成和积累。另外,‘凤丹’种子绝大部分性状

与地理气象因子的相关性表现出一致的趋势,主要表现为与经纬度、年平均气温呈正相关关系。这是因为经纬度和海拔的梯度变化能够综合反映气温、降水和植被等环境因子的作用^[44]。本研究中采样地海拔、土壤养分和温度等因子与‘凤丹’表型性状、蛋白质、含油率、棕榈酸和 α -亚麻酸正相关程度较大,该结果与刘从等研究结果一致,认为植物体能够通过形态变化和养分形成来适应环境的改变,即形态可塑性^[45]。出现这种情况一方面是受长期自然选择影响造成的自身遗传变异特性,另一方面是由各环境因子综合作用造成的主要营养成分含量变异^[46]。

综上所述,四川盆地不同区域引种栽培的‘凤丹’种子表型性状及主要营养成分含量具有显著差异,气象、土壤养分和海拔等生态因子对‘凤丹’种子品质具有重要影响,在选择‘凤丹’种植基地时应充分考虑各地生态因子的差异,应选择海拔、温度较高,土壤养分(有机质、速效钾、有效磷、碱解氮)丰富的地区。

参考文献:

- [1] 周琳,王雁. 我国油用牡丹开发利用现状及产业化发展对策[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 68-71.
ZHOU L, WANG Y. Development and utilization of oilseed peony and its industrial development strategy in China[J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(1): 68-71.
- [2] 修宇,吴国栋,陈德忠,等. 牡丹绿化油用品种繁殖栽培技术[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 112-118.
XIU Y, WU G D, CHEN D Z, et al. Propagation and afforestation techniques of tree peonies for greening and seed oil production[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 112-118.
- [3] 史国安,焦封喜,焦元鹏,等. 中国油用牡丹的发展前景及对策[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 124-128.
SHI G A, JIAO F X, JIAO Y P, et al. Development prospects and strategies of oil tree peony industry in China[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(9): 124-128.
- [4] 尹丹丹,李珊珊,吴倩,等. 我国6种主要木本油料作物的研究进展[J]. 植物学报, 2018, 53(1): 110-125.
YI D D, LI S S, WU Q, et al. Advances in research of six woody oil crops in China[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2018, 53(1): 110-125.
- [5] 李凯,周宁,李赫宇. 牡丹花、牡丹籽成分与功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(3): 228-230.
LI K, ZHOU N, LI H Y. Composition and function research of peony flowers and peony seeds[J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(3): 228-230.
- [6] 韩继刚,李晓青,刘焯,等. 牡丹油用价值及其应用前景[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(5): 21-25.
HAN J G, LI X Q, LIU Z, et al. Potential applications of tree peony as an oil plant[J]. *Cereals & Oils*, 2014, 27(5): 21-25.
- [7] 高洁,罗建勋,许戈,等. 四川高含油量牡丹品种“丹凤1号”良种选育[J]. 西部林业科学, 2016, 45(4): 114-118.
GAO J, LUO J X, XU G, et al. Selection of improved ‘Dan Feng 1’ variety with high oil content peony in Sichuan Province[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2016, 45(4): 114-118.
- [8] 王怡晨,孙海燕,李永荣,等. 油用牡丹‘凤丹’单株结实量及产油品质分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 155-160.
WANG Y C, SUN H Y, LI Y R, et al. Analysis of the variation in yield and oil quality traits of selected *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ individuals[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(4): 155-160.
- [9] 沈奇,赵继献,邱雪柏,等. 环境因子对紫苏籽粒产量及品质性状影响研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(20): 4 033-4 043.
SHEN Q, ZHAO J X, QIU X B, et al. Effects of environmental factors on grain yield and quality traits of *Perilla frutescens*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(20): 4 033-4 043.

- [10] 孙小红, 周 瑾, 胡春霞, 等. 不同海拔对香榧种子外观性状及营养品质的影响[J]. 果树学报, 2019, **36**(4): 476-485. SUN X H, ZHOU J, HU C X, *et al.* Effects of different altitudes on seed morphology and nutritional composition of *Torreya grandis* 'Merrilli' [J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, **36**(4): 476-485.
- [11] 李会珍, 孙子文, 李晓君, 等. 紫苏种子性状与主要营养成分相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2013, **28**(10): 55-59. LI H Z, SUN Z W, LI X J, *et al.* Correlation analysis of seed traits and nutritional components in perilla [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2013, **28**(10): 55-59.
- [12] 许文营, 智利红. 豫西丘陵地区油用牡丹套作朝天椒技术[J]. 北方园艺, 2020, (5): 172-175. XU W Y, ZHI L H. Technique of oil-peony intercropping with pepper in hilly area of western Henan Province [J]. *Northern Horticulture*, 2020, (5): 172-175.
- [13] 谢 虹, 马 骏, 尹 江, 等. 昆明地区油用牡丹'凤丹'引种适应性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, **39**(5): 182-188. XIE H, MA J, YIN J, *et al.* Adaptability study on the introduction of *Paeonia suffruticosa* cv. 'Fengdan' in Kunming [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, **39**(5): 182-188.
- [14] 聂 莹, 朱大洲, 孙君茂, 等. 牡丹籽油成分研究及基于营养视角下的产业对策[J]. 食品科技, 2020, **45**(11): 192-196. NIE Y, ZHU D Z, SUN J M, *et al.* Study on the components from peony seeds oil and its strategy in nutritional view [J]. *Food Science and Technology*, 2020, **45**(11): 192-196.
- [15] 管丽霞, 陈君红, 霍科科, 等. 牡丹籽脂肪酸成分分析及微胶囊化工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2018, **31**(11): 32-35. ZAN L X, CHEN J H, HUO K K, *et al.* Analysis of fatty acid composition from peony seed oil and optimization of microcapsules processing [J]. *Cereals & Oils*, 2018, **31**(11): 32-35.
- [16] 彭常梅, 方锐琳, 赖 敏, 等. 不同提取方法对牡丹籽油品质的影响[J]. 食品科学, 2021, **42**(3): 104-111. PENG C M, FANG R L, LAI M, *et al.* Effects of different extraction methods on the quality of peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) seed oil [J]. *Food Science*, 2021, **42**(3): 104-111.
- [17] 孙田娇, 吕长平, 陈梦洁, 等. 牡丹籽油提取技术及功效研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, **32**(9): 5-6. SUN T J, LÜ C P, CHEN M J, *et al.* Research progress on extraction technology and efficacy of peony seed oil [J]. *Cereals & Oils*, 2019, **32**(9): 5-6.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 植物油料含油量测定 GB/T 14488.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] 中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国国家标准: 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定 GB 5009.5—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [20] 张姗姗, 赵 凡, 魏小豹, 等. '凤丹'和紫斑牡丹6个产地种子脂肪酸组分的比较[J]. 中国粮油学报, 2021, **36**(3): 84-90. ZHANG S S, ZHAO F, WEI X B, *et al.* Comparison of seed oil fatty acids between *Paeonia ostii* 'Feng dan' and *P. rockii* from 6 regions [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, **36**(3): 84-90.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 粮油检验 粮食、油料脂肪酸值测定 GB/T 5510—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 动植物油脂 脂肪酸甲酯的气相色谱分析 GB/T 17377—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [24] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Soil Physical and Chemical Analysis[S]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [25] State Forestry Administration of People's Republic of China. The Analysis Method of Forest Soil (LY/T 1220-1275-1999). Beijing: State Forestry Administration, 1999.
- [26] BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [27] 王怡晨, 孙海燕, 陈 丽, 等. 不同产地乌柏种子含油率差异的研究[J]. 种子, 2018, **37**(6): 53-55. WANG Y C, SUN H Y, CHEN L, *et al.* Study on the difference of oil content of *Sapium sebiferum* seeds in difference producing areas [J]. *Seed*, 2018, **37**(6): 53-55.
- [28] 谭真真. 芍药油用品种筛选及与油用牡丹'凤丹'对比研究[D]. 中国林业科学研究院, 2014. TAN Z Z. Research on the screening oil cultivars of herbaceous peony and comparison with oil cultivars of tree peony 'Feng Dan' [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [29] PINSKY M L, PALUMBI S R. Meta-analysis reveals lower genetic diversity in overfished populations [J]. *Molecular Ecology*, 2014, **23**(1): 29-39.
- [30] SOARES M P, WEISS G. The Iron age of host-microbe interactions [J]. *EMBO Reports*, 2015, **16**(11): 1 482-1 500.
- [31] 安海龙, 谢乾瑾, 刘 超, 等. 水分胁迫和种源对黄柳叶功能性状的影响[J]. 林业科学, 2015, **51**(10): 75-84. AN H L, XIE Q J, LIU C, *et al.* Effects of water stress and provenance on leaf functional traits of *Salix gordejewii* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(10): 75-84.
- [32] 苏文华, 施 展, 杨 波, 等. 滇石栎沿纬度梯度叶片功能性状的种内变化[J]. 植物分类与资源学报, 2015, **37**(3): 309-317. SU W H, SHI Z, YANG B, *et al.* Intraspecific functional trait variation in a tree species (*Lithocarpus dealbatus*) along latitude [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2015, **37**(3): 309-317.
- [33] 苏泽春, 赵 菊, 李兆光, 等. 滇西北野生牡丹天然居群的表型多样性[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(7): 65-71.

- SU Z C, ZHAO J, LI Z G, *et al.* Phenotypic diversity of wild peony natural population in northwest Yunnan[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(7): 65-71.
- [34] 孙佳婷,刘舒雅,陈云,等.台湾栾树实生后代代表性状遗传多样性分析[J/OL]. *分子植物育种*:1-16[2021-06-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20210609.0959.007.html>.
- SUN J T, LIU S Y, CHEN Y, *et al.* Genetic diversity analysis of phenotypic traits in offspring of *Koelreuteria elegans* subsp. *formosana*[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-16 [2021-06-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20210609.0959.007.html>.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 向婷婷,郑倩,汪秋风,等.四川雅安野生油茶经济性状及脂肪酸组成分析[J/OL]. *中国油脂*:1-11[2021-06-14]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.05.106>.
- XIANG T T, ZHENG Q, WANG Q F, *et al.* Analysis of economic characters and fatty acid composition of wild *Camellia oleifera* in Yaan Sichuan [J/OL]. *China Oils and Fats*:1-11[2021-06-14]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.05.106>.
- [38] 丁熙柠,史田,杨林菲,等.不同海拔高度油用牡丹凤丹籽粒品质与气象因子的相关性研究[J]. *河南农业科学*, 2019, **48**(11): 120-126.
- DING X N, SHI T, YANG L F, *et al.* Correlation between seed quality and meteorological factors of oil tree peony Fengdan at different altitudes[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, **48**(11): 120-126.
- [39] SHEN L, XU R, LIU S, *et al.* Phenotypic variation of seed traits of *Haloxyylon ammodendron* and its affecting factors [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, **60**: 81-87.
- [40] 何庆海,杨少宗,李因刚,等.枫香树种群种子与果实表型性状变异分析[J]. *植物生态学报*, 2018, **42**(7): 752-763.
- HE Q H, YANG S Z, LI Y G, *et al.* Phenotypic variations in seed and fruit traits of *Liquidambar formosana* populations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(7): 752-763.
- [41] 杨树华,郭宁,葛维亚,等.新疆东天山地区宽刺蔷薇居群表型多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2013, **14**(3): 455-461.
- YANG S H, GUO N, GE W Y, *et al.* Phenotypic diversity of *Rosa platyacantha* populations in eastern Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, **14**(3): 455-461.
- [42] 武杰,李宝珍,谌利,等.不同施肥水平对甘蓝型黄籽油菜含油量的效应研究[J]. *中国油料作物学报*, 2004, **26**(4): 61-64.
- WU J, LI B Z, CHEN L, *et al.* Effects of different fertilizer levels on oil content of yellow-coated rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2004, **26**(4): 61-64.
- [43] 潘苗,左菲菲,盛继露,等.南方红豆杉不同种源种子千粒重、生活力、营养化学成分含量的比较及其与生态因子的关系[J]. *植物研究*, 2016, **36**(3): 360-367.
- PAN M, ZUO F F, SHENG J L, *et al.* Comparison of 1000-seed weight, viability and chemical content in the seed of *Taxus chinensis* var. *mairiei* from different areas and its relationship with ecological factors[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2016, **36**(3): 360-367.
- [44] 罗芊芊,周志春,邓宗付,等.南方红豆杉天然居群叶片的表型性状和氮磷化学计量特征的变异规律[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, **30**(1): 27-35.
- LUO Q Q, ZHOU Z C, DENG Z F, *et al.* Variation law of phenotypic traits and nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of leaf of natural populations of *Taxus wallischiana* var. *mairiei*[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2021, **30**(1): 27-35.
- [45] 刘从,田甜,李珊,等.中国木本植物幼苗生长对光照强度的响应[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 518-527.
- LIU C, TIAN T, LI S, *et al.* Growth response of Chinese woody plant seedlings to different light intensities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 518-527.
- [46] 李娟,林建勇,姜英,等.不同种源闽楠种子形态特征和主要营养成分分析[J]. *广西林业科学*, 2019, **48**(3): 307-312.
- LI J, LIN J Y, JIANG Y, *et al.* Analysis on morphological traits and main nutrients of *Phoebe bournei* seeds from different provenances[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2019, **48**(3): 307-312.

(编辑:裴阿卫)