

新疆帕米尔高原杏资源果实特征研究

丁 杰, 李佳龙, 罗晓雨, 郭 玲

(塔里木大学园艺与林学院/新疆设施农业兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 通过分析新疆帕米尔高原杏资源的果肉、种核及其种仁甜苦性状, 解析人类驯化栽培杏果实特性的同时筛选出优异寒地杏种质。以塔什库尔干县6个乡的60份实生杏树的果实为研究对象, 对其果实、种核的15个质量性状和20个数量性状及苦杏仁苷含量进行测定, 并通过相关性分析、主成分分析及综合评价等方法对其特性进行鉴定。结果表明, 60份杏种质分布海拔在2329.5~2730.0 m。80.00%的杏果实风味为甜, 96.67%的果实有茸毛; 果实的可溶性固形物的平均值为16.07%, 61.67%的果实可溶性固形物大于15.00%。杏仁以甜为主, 果肉大部分为离核; 种核的13个数量性状变异系数在8.66%~22.00%之间。杏仁苦杏仁苷含量在0.41~14.59 mg/g之间, 其中78.33%的种仁为甜仁, 苦杏仁苷含量在0.41~2.24 mg/g之间; 21.67%的种仁为苦仁, 苦杏仁苷含量在2.76~14.59 mg/g之间。相关性分析发现单果重与果实纵径等10个性状呈极显著正相关, 与出核率呈极显著负相关。主成分分析表明前5个主成分的累计贡献率为83.255%, 单果重、果实纵径、果实横径、单核重、核形指数、果形指数、出仁率、出核率、杏核侧径等性状可反映20个数量性状的基本信息。综合评价表明, 库科9、库科11、其如16、库科13是较优异的寒地资源, 其中较高的果实可溶性固形物和甜仁是人类驯化引种的重要目标性状。

关键词: 帕米尔高原; 杏; 果实性状; 苦杏仁苷

Study on Fruit Characteristics of Apricot Germplasm Resources in Pamir Plateau of Xinjiang

DING Jie, LI Jialong, LUO Xiaoyu, GUO Ling

(College of Horticulture and Forestry, Tarim University/Xinjiang Production & Construction Corps Key Laboratory of Facility Agriculture, Alar 843300, Xinjiang)

Abstract: By analyzing the pulp, kernel and sweet/bitter characters of apricot in the Pamir Plateau of Xinjiang, the fruit characteristics of apricot in human domestication and cultivation were analyzed, and elite germplasm in cold region was identified. In this study, 15 qualitative traits, 20 quantitative traits and amygdalin content of 60 apricots from six townships in Tashkurgan County were measured, and identified by the correlation analysis, principal component analysis and comprehensive evaluation. The results showed that the altitude distribution of 60 apricot germplasm ranged from 2329.5 to 2730.0 m. 80.00% of the apricot fruits are sweet, and 96.67% have fuzz. The average soluble solid content of 60 germplasm resources was 16.07%, and 61.67% of germplasm resources showed soluble solid content over 15.00%. The taste of almonds is mainly sweet, and the flesh is mostly nucleated. The variation coefficients of 13 quantitative traits of stone ranged from 8.66% to 22.00%. The content of amygdalin ranged from 0.41 to 14.59 mg/g. 78.33% of germplasm resources were sweet kernel with the amygdalin content from 0.41 to 2.24 mg/g, while 21.67% of germplasm resources were bitter kernel with the amygdalin content from 2.76 to 14.59 mg/g. The correlation analysis showed that single fruit

收稿日期: 2023-11-06 网络出版日期: 2024-01-15

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20231106002>

第一作者研究方向为园艺植物种质资源, E-mail: 1309278710@qq.com

通信作者: 郭 玲, 研究方向为园艺植物种质资源, E-mail: glzky@163.com

基金项目: 国家重点研发项目(2019YFD1000600); 国家自然科学基金项目(32160694, 31760560); 新疆园艺研究中心科研条件项目(TDZKKY202204)

Foundation projects: National Key Research and Development Program of China(2019YFD1000600); National Natural Science Foundation of China(32160694, 31760560); Southern Xinjiang Horticultural Research Center Research Conditions Project(TDZKKY202204)

weight was positively correlated with 10 traits such as fruit length, and negatively correlated with stone rate. Principal component analysis showed that the cumulative variance contribution rate of the first five principal components was 83.255%. The traits such as single fruit weight, fruit length, fruit width, single stone weight, stone-form index, fruit-form index, kernel rate, stone rate and stone thickness might represent the basic information of these 20 quantitative traits. Kuke 9, Kuer 11, Qiru 16 and Kuke 13 were excellent resources in cold areas through comprehensive evaluation. The high soluble solid and sweet kernel of fruit were important target traits for human domestication and introduction in apricot.

Key words: Pamir Plateau; apricot; fruit character; amygdalin

杏 (*Prunus armeniaca* L.) 起源于中国, 具有 3000 多年的栽培历史, 通过古丝绸之路传至世界各地^[1-2]。新疆是世界杏重要的起源中心之一^[3], 南疆地方杏种质经历了长期的实生繁殖、自然选择和人工选择, 具有丰富的多样性。然而其果实相关性状的驯化过程并不清楚, 这极大的限制了人们对南疆栽培杏驯化的研究。帕米尔高原昆仑山腹地是杏分布区中海拔最高、温度最低的地区。《西疆杂述诗》^[4]中记载: “江南多杏, 不及西域, 巴达克山所产, 固为中外极品”。对尚存的、历史悠久的实生杏资源的果实和种核进行系统调查研究有助于解析人类野生杏驯化历程和筛选寒地优异杏种质资源。

杏种质资源的鉴定、利用和保护是保持物种多样性的重要策略。任婷婷等^[5]采用相关性分析、主成分分析等对 69 个东北杏无性系的 45 个果实表型性状进行研究, 综合评价出 10 个表现优异的东北杏无性系, 为东北杏的资源保护提供了依据。陈蕾等^[6]对 29 份寒地杏种质资源进行研究, 综合评价出 6 份优异鲜食杏资源, 为寒地杏资源保护利用及种质创新提供了参考。由于气候变化及人类活动影响, 古树的数量在全球范围内逐渐减少, 因此有效

地保护和利用现有的古树是一个全球性的问题^[7]。有学者认为野生杏在被驯化的过程中, 其果实风味、大小、颜色和对李苦豆病的抗性发生了变化^[8]。本研究以高寒地区的 6 个乡的 60 份实生杏种质资源为研究对象, 根据树体树龄对果实和种核表型性状进行多样性分析、相关性分析、主成分分析、综合评价等, 为解析人类将野生杏驯化引种为栽培杏的重要相关性状提供理论依据, 旨在探索野生杏资源驯化特点、筛选耐寒优质的杏种质, 为保护和利用寒地杏资源奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2022 年 7 月至 8 月在塔吉克自治县的科恰特、吉勒给提牧场、库克西鲁克乡、库科西鲁格乡、库尔尕斯阿个泽乡、其如克同村 6 个样点采集试验材料, 共计 60 个样本, 树干无嫁接接口, 均处于野生状态。样本大多分布在沟壑两旁、房前屋后, 周围偶有桑树、杨树、红柳、榆树等伴生。采样时用 GPS 定位, 对样本的树高、冠幅、干周、主干长进行测量, 各样本详细信息见表 1, 其表型性状丰富, 具体见图 1。

表 1 60 份杏种质信息

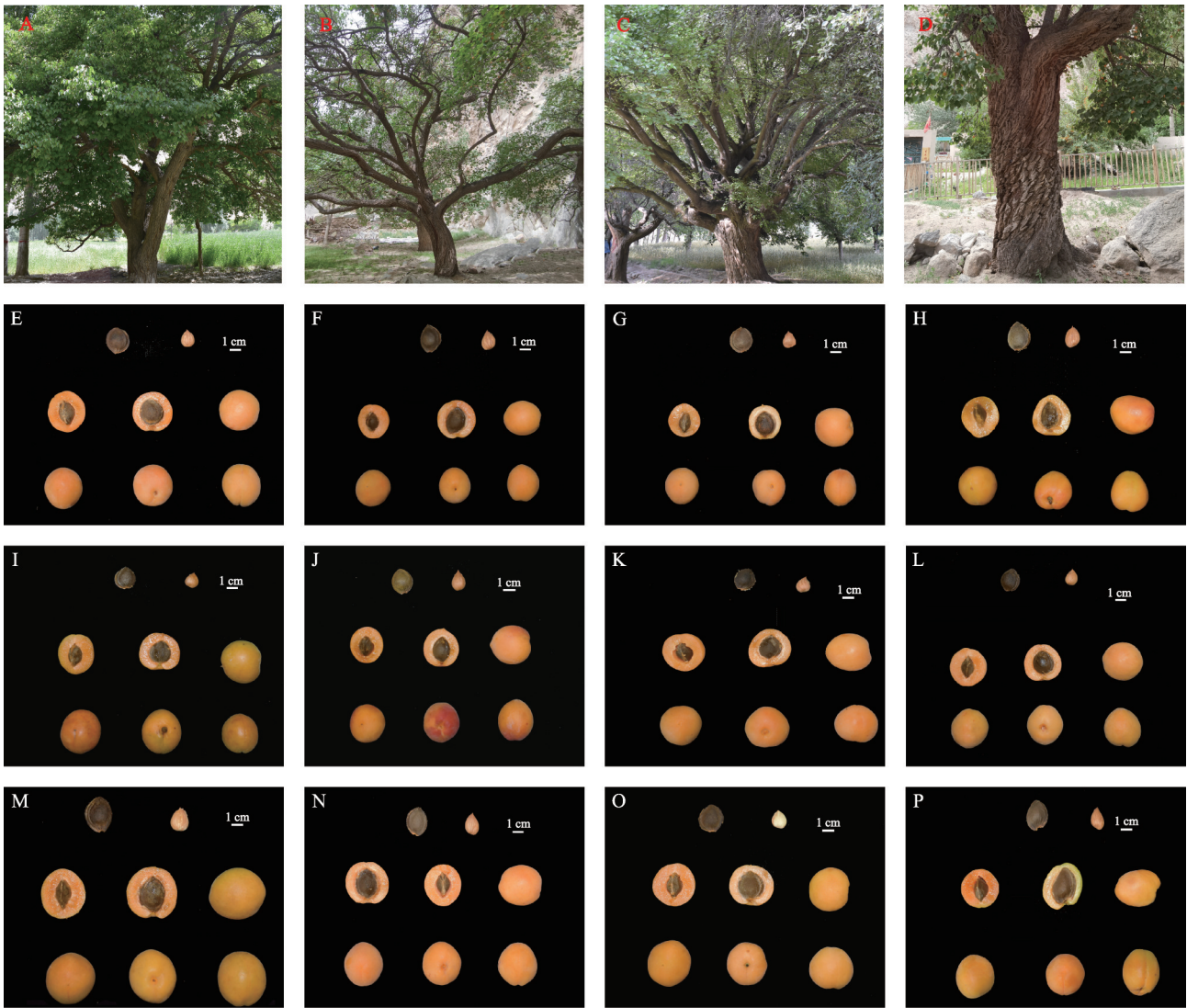
Table 1 Information of 60 apricot germplasm resources

种质编号 Germplasm number	树高(m) Tree height	冠幅(m) Crown width	干周(m) Trunk girth	主干长(m) Trunk length	海拔(m) Altitude
科恰 1 Keqia 1	8.70	10.67	1.36	0.83	2648.1
科恰 2 Keqia 2	9.70	10.62	1.34	1.51	2648.4
科恰 3 Keqia 3	10.10	15.96	1.71	0.95	2643.9
科恰 4 Keqia 4	9.20	14.26	0.94	0.74	2643.9
科恰 5 Keqia 5	7.60	12.28	1.11	1.15	2643.5
吉勒 1 Jile 1	10.80	14.60	1.74	1.59	2344.4
吉勒 2 Jile 2	11.80	14.92	1.41	1.69	2337.9
吉勒 4 Jile 4	9.50	13.50	1.62	1.55	2366.1
库克 1 KUke 1	10.50	12.24	1.40	1.53	2350.9
库克 2 KUke 2	10.50	12.88	1.25	1.89	2345.9

表 1 (续)

种质编号 Germplasm number	树高(m) Tree height	冠幅(m) Crown width	干周(m) Trunk girth	主干长(m) Trunk length	海拔(m) Altitude
库克 3 KUke 3	13.10	6.28	1.08	1.37	2334.5
库克 4 KUke 4	11.40	12.24	1.17	1.63	2329.5
库克 5 KUke 5	9.20	10.32	1.76	1.81	2336.5
库克 6 KUke 6	14.30	21.12	1.99	1.52	2340.6
库科 1 Kuke 1	10.70	14.70	2.48	1.54	2730.0
库科 2 Kuke 2	10.20	17.12	1.95	1.32	2709.1
库科 3 Kuke 3	9.30	9.93	1.33	1.45	2706.2
库科 4 Kuke 3	13.50	14.80	1.98	1.75	2706.2
库科 5 Kuke 5	10.20	11.78	1.02	1.55	2696.9
库科 6 Kuke 6	4.20	7.10	0.61	1.28	2694.2
库科 7 Kuke 7	9.70	10.74	1.02	1.43	2696.8
库科 8 Kuke 8	13.80	11.86	1.53	1.48	2701.3
库科 9 Kuke 9	13.20	10.32	1.25	1.52	2702.0
库科 10 Kuke 10	10.50	10.25	0.88	1.37	2692.5
库科 11 Kuke 11	9.20	10.12	1.03	1.05	2674.0
库科 13 Kuke 13	13.40	11.72	1.54	1.22	2339.4
库尔 1 Kuer 1	10.80	12.50	2.30	1.16	2395.8
库尔 2 Kuer 2	12.80	16.24	2.43	1.71	2357.1
库尔 3 Kuer 3	13.50	11.36	2.46	1.52	2396.7
库尔 4 Kuer 4	11.70	13.14	2.04	1.94	2395.2
库尔 5 Kuer 5	13.20	10.26	1.41	1.26	2402.7
库尔 6 Kuer 6	9.20	10.48	1.42	1.29	2403.8
库尔 7 Kuer 7	9.80	10.12	1.14	1.20	2388.6
库尔 8 Kuer 8	11.00	9.86	0.75	1.14	2393.8
库尔 9 Kuer 9	9.60	8.40	0.93	1.35	2393.6
库尔 10 Kuer 10	11.20	14.30	1.34	1.24	2396.5
库尔 11 Kuer 11	8.80	12.62	1.30	1.39	2395.6
库尔 12 Kuer 12	9.70	9.32	1.23	1.44	2390.1
库尔 13 Kuer 13	8.60	10.48	1.02	2.22	2400.7
库尔 14 Kuer 14	7.80	11.84	1.18	1.72	2401.2
库尔 15 Kuer 15	9.90	10.36	1.66	1.07	2366.1
库尔 16 Kuer 16	8.70	13.14	1.54	0.88	2367.3
库尔 17 Kuer 17	16.80	14.26	2.08	0.85	2356.3
库尔 18 Kuer 18	13.20	13.34	1.38	1.35	2360.4
库尔 19 Kuer 19	6.30	7.68	2.07	1.17	2361.1
其如 1 Qiru 1	9.30	14.04	3.41	1.40	2638.7
其如 2 Qiru 2	15.70	19.08	2.73	1.16	2639.7
其如 3 Qiru 3	8.60	7.32	1.89	1.52	2638.6
其如 4 Qiru 4	9.70	10.60	2.04	1.50	2635.2
其如 5 Qiru 5	12.30	14.60	1.83	1.49	2647.4
其如 6 Qiru 6	11.80	11.48	1.54	2.30	2644.6

表 1 (续)					
种质编号 Germplasm number	树高(m) Tree height	冠幅(m) Crown width	干周(m) Trunk girth	主干长(m) Trunk length	海拔(m) Altitude
其如 7 Qiru 7	8.70	12.94	1.86	0.50	2648.0
其如 9 Qiru 9	9.70	12.16	2.22	1.52	2635.8
其如 10 Qiru 10	6.80	9.20	2.30	0.64	2661.4
其如 11 Qiru 11	11.00	11.88	1.55	1.62	2669.5
其如 12 Qiru 12	10.20	11.86	1.73	0.51	2656.6
其如 13 Qiru 13	8.30	10.54	1.65	2.04	2656.1
其如 14 Qiru 14	9.90	8.76	2.20	1.78	2639.4
其如 15 Qiru 15	9.80	10.14	2.71	2.43	2650.9
其如 16 Qiru 16	13.70	12.36	1.59	1.68	2627.4



A: 杏树全貌;B-C: 杏树生境;D: 树的主干;E: 科恰 1;F: 科恰 3;G: 科恰 5;H: 吉勒 2;I: 库克 2;J: 库克 4;K: 库尔 4;L: 库尔 7;M: 库科 9;N: 库尔 11;O: 其如 16;P: 库科 13

A: The general view of the apricot tree; B-C: Habitat of apricot trees; D: The trunk of a tree; E: Keqia 1; F: Keqia 3; G: Keqia 5; H: Jile 2; I: KUke 2; J: KUke 4; K: Kuer 4; L: Kuer 7; M: Kuke 9; N: Kuer 11; O: Qiru 16; P: Kuke 13

图 1 部分杏种质树体、果实表型性状特征

Fig. 1 Phenotypic characters of tree body and fruit in some germplasm resources of apricot

1.2 试验方法

1.2.1 果实表型测定 在果实成熟期进行采样,每份资源分别在树冠外围东、西、南、北4个方向各采10个成熟度一致的果实,共计40个果实。根据《中国果树志杏卷》^[9]对15个质量性状进行记载和编码(表2)。用游标卡尺(精度为0.01 mm)测量果实纵

径、果实横径、果实侧径、杏核纵径、杏核横径、杏核侧径、杏仁纵径、杏仁横径、杏仁侧径、壳厚,计算果形指数、核形指数、仁形指数;用电子天平(精度为0.01g)测定果实的单果重、单核重、单仁重,计算出核率、出仁率;采用手持测糖仪测定果实可溶性固形物含量,GY-4型果实硬度计测定果实硬度。

表2 质量性状及其编码

Table 2 Quality characters and their coding

序号 No.	性状 Characters	编码 Code	类型 Type
1	果形	1:圆形;2:扁圆形;3:椭圆形;4:卵圆形;5:长圆形;6:心脏形	多态性状
2	果顶形状	1:凹入;2:平;3:圆凸;4:尖圆	多态性状
3	缝合线深浅	1:平;2:浅;3:中;4:深	多态性状
4	果实对称性	1:不对称;2:较对称;3:对称	多态性状
5	果皮颜色	1:绿白;2:白;3:淡黄;4:黄;5:橙黄	多态性状
6	果皮茸毛	1:有;2:无	二元性状
7	果实肉质	1:沙面;2:松软;3:松脆;4:硬脆;5:硬;6:硬韧	多态性状
8	离核程度	1:黏;2:半离;3:离	多态性状
9	仁味	1:甜;2:苦	二元性状
10	香气	1:无;2:微;3:中;4:浓	多态性状
11	纤维	1:少;2:中;3:多	多态性状
12	汁液	1:少;2:中;3:多	多态性状
13	核形	1:圆形;2:扁圆形;3:椭圆形;4:卵圆形;5:长圆形;6:倒卵圆形	多态性状
14	核面	1:平滑;2:中;3:粗糙	多态性状
15	风味	1:酸;2:酸甜;3:甜;4:苦	多态性状

其中,果形指数=果实纵径/果实横径;核形指数=杏核纵径/杏核横径;仁形指数=杏仁纵径/杏仁横径;出核率(%)=(单核重/单果重)×100%;出仁率(%)=(单仁重/单核重)×100%。

1.2.2 HPLC 法测定苦杏仁苷含量 制备苦杏仁苷测试溶液:每份种质随机取10粒种仁,用液氮磨碎种仁。采用四分法精确称取粉末0.3 g,溶解于3 mL的纯甲醇中,涡旋混匀,超声提取30 min,过夜浸提。取上清液1 mL,在30 ℃的温度条件下进行4 h的真空浓缩干燥处理,再加入80%的乙腈溶液(体积比为乙腈:水=80:20)1 mL,以13000 r/min的转速离心15 min,取上清液(供试品溶液)进行测定。

采用高效液相色谱法测定苦杏仁苷的含量。色谱柱:Hypersil C18柱(150.0 mm×4.6 mm,5 μm);流动相为乙腈:水=80:20(V:V);检测波长210 nm;柱温为30 ℃;流速1.0 mL/min;进样量10 μL;检测

时长6 min。

苦杏仁苷标准溶液制备:以浓度分别为6.25、12.50、25.00、50.00、100.00、200.00和400.00 μg/mL苦杏仁苷标准溶液制作标准曲线,在该浓度范围内进样量与峰面积呈现出良好的线性关系:Y=6.830X-22.400,R²=0.9998。

1.3 数据分析

将20个数量性状数据标准化处理,根据各主成分的贡献率,确定权重系数,计算各种质的综合得分。主成分分析综合得分(D)=w₁×主成分1得分(F₁)+w₂×主成分2得分(F₂)+w₃×主成分3得分(F₃)+…+w_n×主成分n得分(F_n),其中w₁、w₂、w₃…w_n表示各主成分的权重。应用Excel 2021、DPS 7.05、SPSS23.0、OriginPro 2023软件对所得数据进行整理分析及作图。

2 结果与分析

2.1 60份杏种质树体表型性状特征分析

对60份杏树的树高、冠幅、干周、主干长进行测量,其特征见表1。60份杏种质分布的海拔高度为2329.5~2730.0 m。样本群体树体高大,长势较为旺盛,其中51.67%的杏种质树高高于10 m;83.33%的杏种质冠幅大于10 m,最大的是库克6,为21.12 m;干周在1.5 m以上的杏种质有33个,占55.00%,其中其如1最大,为3.41 m;主干高度在1.5 m以上的杏种质有27个,占45.00%,最高的是其如15,为2.43 m。

2.2 帕米尔高原杏果实性状分析

2.2.1 果实质量性状频率分布及多样性指数 由图2可知,杏果实风味以甜为主,占比80.00%;96.67%的果实有茸毛;果皮底色主要为橙黄色,占53.33%,其次为黄色,占45.00%;果实形状以圆形为主,占56.67%,其次为卵圆形,占18.33%;果顶形状以圆凸和凹入为主,分别占36.67%、28.33%;缝合线深浅以浅为主,占58.33%,其次为平,占30.00%;果实对称性多数为对称,占58.33%;果实肉质以松软为主,占55%,硬脆占比最少,为10.00%;香气大多数是微和中,分别占38.33%、31.67%,香气浓的果实只有5%;68.33%的果实含有少量纤维;68.33%的果实汁液含量少。Shannon-Weaver多样性指数表明,不同性状之间多样性差异显著,范围在0.15~1.33之间。果实形状(1.22)、果顶形状(1.33)、果实肉质(1.17)、香气(1.23)4个果实性状的多样性指数大于1,有着较高的多样性。杏果实11个质量性状Shannon-weaver的平均值为0.89。

2.2.2 果实数量性状特性分析 由表3可知,60份帕米尔高原杏果实的7个数量性状的变异系数在

7.08%~32.57%之间,平均变异系数为17.09%,其中单果重的变异系数最高,果形指数的变异系数最低。果实硬度的平均值为4.35 kg/cm²,最大的是库尔12,为10.18 kg/cm²,最小的是库克1,为3.29 kg/cm²;可溶性固形物含量的平均值为16.07%,最大的是其如15,为24.98%,最小的是库科3,为11.27%;单果重、果实横径、果实侧径的均值分别为14.46 g、29.36 mm、27.48 mm,最大的均是其如11,分别为29.39 g、39.85 mm、36.14 mm,最小的均是其如1,分别为5.89 g、21.24 mm、20.55 mm;果实纵径最大的是库科9,为37.42 mm,最小的是库尔10,为22.58 mm;果形指数的均值为1.01,最大的是库科13,为1.19,最小的是其如11,为0.88。

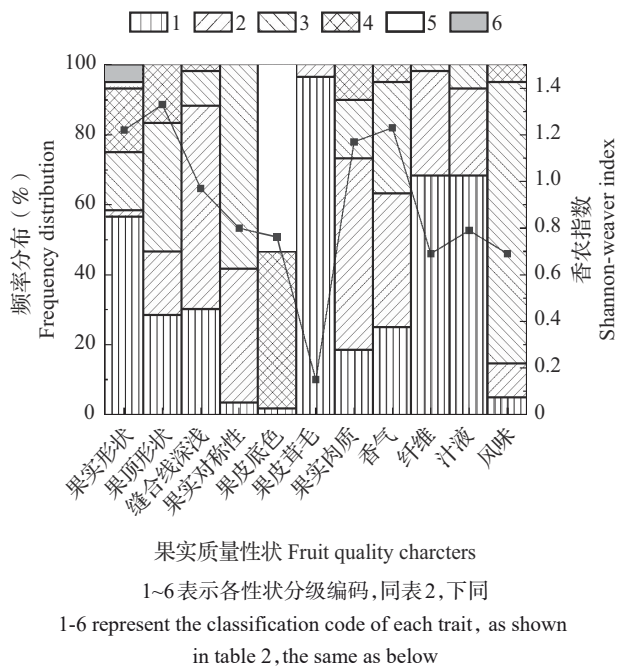


图2 60份杏种质果实质量性状频率分布及多样性指数
Fig. 2 Frequency distribution and diversity index of fruit quality characters of 60 apricot germplasm resources

表3 60份杏种质果实数量性状特性分析

Table 3 Quantitative characters analysis of fruit of 60 apricot germplasm resources

性状 Characters	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Standard different	变异系数(%) CV
果实硬度(kg/cm ²)FF	3.29	10.18	4.35	1.27	29.08
可溶性固形物含量(%)TSS	11.27	24.98	16.07	2.86	17.81
单果重(g)SFW	5.89	29.39	14.46	4.71	32.57
果实纵径(mm)FL	22.58	37.42	29.60	3.03	10.23
果实横径(mm)FW	21.24	39.85	29.36	3.33	11.34
果实侧径(mm)FT	20.55	36.14	27.48	3.17	11.53
果形指数FFI	0.88	1.19	1.01	0.07	7.08

FF: Flesh firmness; TSS: Total soluble solids; SFW: Single fruit weight; FL: Fruit length; FW: Fruit width; FT: Fruit thickness; FFI: Fruit-form index; The same as below

2.3 帕米尔高原杏核、仁性状分析

2.3.1 核、仁质量性状频率分布及多样性指数 由图3可知,杏仁(仁味)以甜为主,占78.33%,苦味占21.67%;果肉大部分为离核,占73.33%,其次为半离核,占25.00%,黏核的只有1.67%;核形以椭圆形为主,占51.67%,其次为圆形和卵圆形,分别占23.33%、16.67%,另有2份种质核形为扁圆形、3份种质核形为长圆形,分别占3.33%、5.00%;核面光滑度以较粗糙为主,占55.00%,其次为光滑,占41.67%,粗糙的核面占3.33%。Shannon-Weaver多样性指数在0.52~1.24之间。核形的多样性指数大于1,有着较高的遗传多样性。

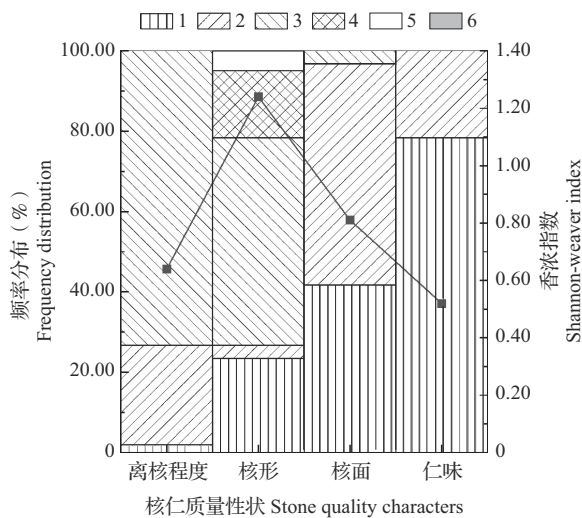


图3 60份杏种质核、仁质量性状频率分布及多样性指数
Fig. 3 Frequency distribution and diversity index of stone and kernel quality characters of 60 apricot germplasm resources

表4 60份杏种质核、仁数量性状特性分析

Table 4 Quantitative characters analysis of stone and kernel of 60 apricot germplasm resources

性状 Characters	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Standard different	变异系数(%) CV
单核重(g)SSW	0.95	2.93	1.75	0.38	22.00
杏核纵径(mm)SL	16.27	27.86	21.46	2.53	11.77
杏核横径(mm)SW	12.58	20.88	17.20	1.67	9.70
杏核侧径(mm)ST	8.66	17.94	10.95	1.44	13.15
壳厚度(mm)St	1.09	2.50	1.62	0.29	17.85
核形指数 SFI	1.04	1.50	1.25	0.11	8.66
单仁重(g)SKW	0.34	0.84	0.60	0.12	19.79
杏仁纵径(mm)KL	12.14	19.77	15.47	1.62	10.45
杏仁横径(mm)KW	9.18	13.52	11.13	1.04	9.31
杏仁侧径(mm)KT	5.81	8.69	7.34	0.68	9.24
仁形指数 KFI	1.13	1.80	1.40	0.13	9.65
出核率(%)SR	7.08	18.83	12.61	2.32	18.40
出仁率(%)KR	27.07	43.85	34.66	4.30	12.40

SSW: Single stone weight; SL: Stone length; SW: Stone width; ST: Stone thickness; St: Shell thickness; SFI: Stone-form index; SKW: Single kernel weight; KL: Kernel length; KW: Kernel width; KT: Kernel thickness; KFI: Kernel-forme index; SR: Stone rate; KR: Kernel rate; The same as below

2.3.2 核、仁数量性状特性分析 由表4可知,60份帕米尔高原杏核、仁的13个数量性状的变异系数在8.66%~22.00%之间,平均变异系数为13.26%,其中单核重的变异系数最高,核形指数的变异系数最低。

单核重的均值为1.75g,最大的是其如16,为2.93g,最小的是其如1,为0.95g;杏核纵径最大的是库科9,为27.86mm,最小的是库尔10,为16.27mm;杏核横径最大的是其如16,为20.88mm,最小的是库科2,为12.58mm;杏核侧径最大的是科恰3,为17.94mm,最小的是库科4,为8.66mm;壳厚度最大的是库尔11,为2.50mm,最小的是库尔9,为1.09mm;核形指数最大的是库科4,为1.50,最小的是库尔3,为1.04;出核率最大的是库尔10,为18.83%,最小的是吉勒1,为7.08%。

单仁重均值为0.60g,最大的是其如16,为0.84g,最小的是其如2,为0.34g;杏仁纵径最大的是库科13,为19.77mm,最小的是其如1,为12.14mm;杏仁横径最大的是其如16,为13.52mm,最小的是库科12,为9.18mm,杏仁侧径最大的是库克5,为8.69mm,最小的是库科1,为5.81mm;仁形指数最大的是库科4,为1.80,最小的是库尔18,为1.13;出仁率最大的是库科3,为43.85%,最小的是其如4,为27.07%。

2.3.3 杏仁中苦杏仁苷的含量分析 由图4可知,60份杏种质杏仁的苦杏仁苷含量分布在0.41~14.59mg/g,平均含量为3.16mg/g,其中苦杏仁苷含量最高的是其如13,为14.59mg/g,最低的是库科8,

为 0.41 mg/g。47 份甜仁的苦杏仁苷含量在 0.41~2.24 mg/g 之间,平均含量为 0.96 mg/g; 13 份苦仁的苦杏仁苷含量在 2.76~14.59 mg/g 之间,平均含量为 11.09 mg/g。

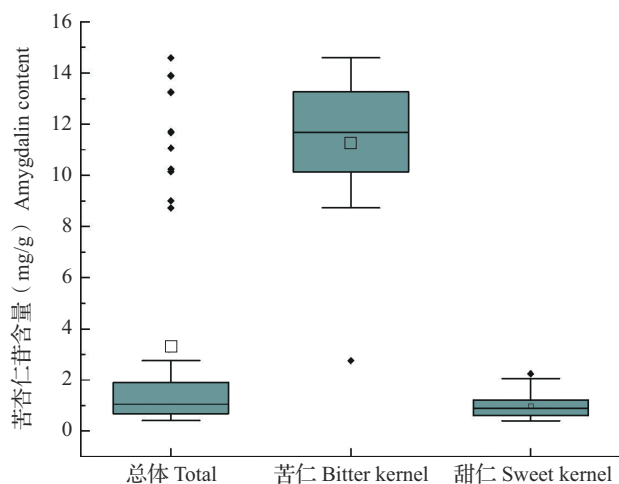
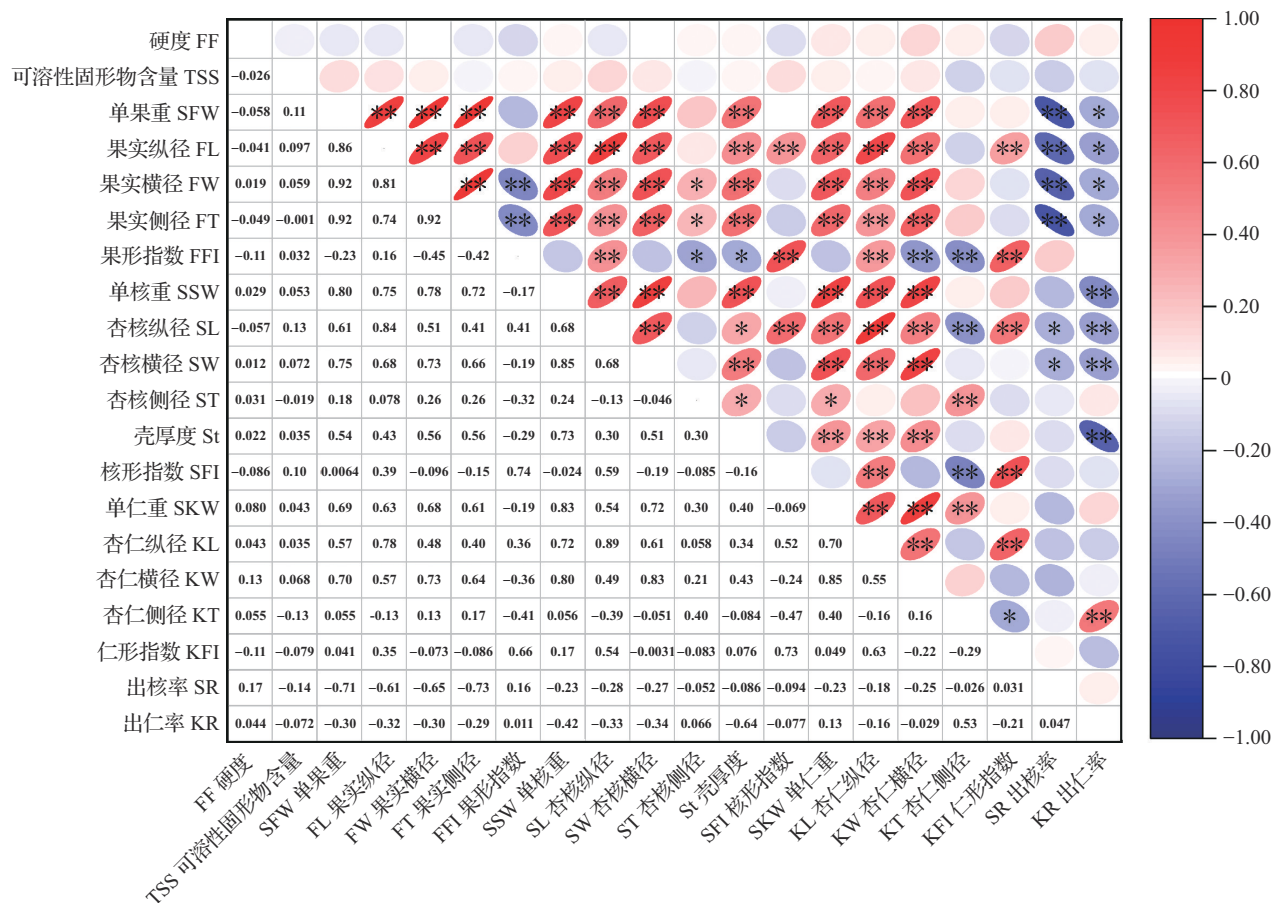


图 4 60 份杏种质苦杏仁苷含量

Fig. 4 Amygdalin content of 60 apricot germplasm resources

2.4 数量性状的相关性分析

杏的 20 个数量性状之间有较程度的相关性 (图 5)。单果重与果实纵径等 10 个性状呈极显著正相关,与果实纵径、果实横径、果实侧径、单核重的相关系数较大,分别为 0.86、0.92、0.92、0.80,与出核率呈极显著负相关,相关系数为 -0.71。单核重与杏核横径等 10 个性状呈极显著正相关,与单果重、杏核横径、单仁重、杏仁横径的相关系数较大,分别为 0.80、0.85、0.83、0.80,与出仁率呈极显著负相关,相关系数为 -0.42。单仁重与杏仁纵径等 11 个性状呈极显著正相关,与单核重、杏仁横径的相关系数较大,分别为 0.83、0.85。出核率与单果重、果实纵径、果实横径、果实侧径呈极显著负相关,与杏核纵径、杏核横径呈显著负相关。出仁率与杏仁侧径呈显著正相关,与单核重、杏核纵径、杏核横径、壳厚度呈极显著负相关,与单果重、果实纵径、果实横径、果实侧径呈显著负相关。果实硬度和可溶性固形物含量与其他性状之间相关性不显著。



*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关

*: Correlation significant at $P<0.05$, **: Correlation significant at $P<0.01$

图 5 60 份杏种质数量性状的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of quantitative characters of 60 apricot germplasm resources

2.5 数量性状的主成分分析

对帕米尔高原杏 20 个数量性状进行主成分分析,各主成分对应的特征向量值见表 5。按照特征值大于 1 提取主成分,前 5 个主成分的累计贡献率为 83.255%,可以反映这 20 个数量性状的基本信息。第 1 主成分的特征值为 8.171,贡献率为 40.854%,单果重、果实纵径、果实横径、单核重的特征向量绝对值较大,其中单果重与单核重特征向量绝对值最大,为 0.327;第 2 主成分的特征值为 3.875,贡献率为 19.374%,核形指数的特征向量绝

对值最大,为 0.447,其次是果形指数,为 0.446;第 3 主成分的特征值为 1.812,贡献率为 9.059%,其中出仁率的特征向量绝对值最大,为 0.605;第 4 主成分的特征值为 1.566,贡献率为 7.829%,其中出核率的特征向量绝对值最大,为 0.636;第 5 主成分的特征值为 1.228,贡献率为 6.139%,其中杏核侧径的特征向量绝对值最大,为 0.622。结果表明单果重、果实纵径、果实横径、单核重、核形指数、果形指数、出仁率、出核率、杏核侧径等性状是造成帕米尔高原杏种质资源表型差异的主要因素。

表 5 60 份杏种质数量性状的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of quantitative characters of 60 apricot germplasm resources

性状 Characters	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4	主成分 5 PC5
果实硬度 FF	0.001	-0.066	0.097	0.338	-0.198
可溶性固形物含量 TSS	0.033	0.038	-0.104	-0.155	-0.321
单果重 SFW	0.327	-0.049	-0.045	-0.204	0.003
果实纵径 FL	0.313	0.155	0.033	-0.167	0.017
果实横径 FW	0.318	-0.128	-0.065	-0.151	0.038
果实侧径 FT	0.300	-0.146	-0.093	-0.234	0.108
果形指数 FFI	-0.060	0.446	0.159	-0.003	-0.026
单核重 SSW	0.327	-0.014	-0.010	0.237	0.052
杏核纵径 SL	0.261	0.309	0.055	0.036	-0.144
杏核横径 SW	0.301	-0.034	-0.055	0.170	-0.294
杏核侧径 ST	0.072	-0.183	0.174	0.058	0.622
壳厚度 St	0.222	-0.062	-0.330	0.294	0.305
核形指数 SFI	0.024	0.447	0.132	-0.150	0.150
单仁重 SKW	0.283	-0.092	0.360	0.146	-0.055
杏仁纵径 KL	0.260	0.263	0.241	0.152	0.004
杏仁横径 KW	0.282	-0.154	0.142	0.171	-0.255
杏仁侧径 KT	0.004	-0.328	0.430	-0.036	0.199
仁形指数 KFI	0.054	0.414	0.117	0.065	0.313
出核率 SR	-0.182	0.040	0.057	0.636	-0.001
出仁率 KR	-0.123	-0.123	0.605	-0.180	-0.165
特征值 Eigen value	8.171	3.875	1.812	1.566	1.228
贡献率(%)Variance contribution rate	40.854	19.374	9.059	7.829	6.139
累积贡献率(%) Cumulative variance contribution rate	40.854	60.227	69.286	77.115	83.255

2.6 帕米尔高原杏种质资源综合评价

通过主成分分析法计算 60 份杏种质的主成分得分,并根据各主成分贡献率,将 F1~F5 代入综合得分公式 $D=0.491F1+0.233F2+0.101F3+0.094F4+$

0.074F5。由表 6 可知,60 份资源的综合得分范围在 -1.14~1.31 之间,其中综合得分大于 1 的 4 份种质为库科 9、库尔 11、其如 16、库科 13,综合得分分别为 1.31、1.26、1.24、1.23。库科 9 的可溶性固形物含量

(16.78%)、单果重(26.67 g)、果形指数(1.08)、单仁重(0.83 g)均较高,果实纵径(37.42 mm)、杏核纵径(27.86 mm)均最高。库尔 11 的可溶性固形物含量(15.66%)、单果重(20.69 g)、果形指数(1.03)、单仁重(0.80 g)均较高。其如 16 的可溶性固形物含量(14.34%)、单果重(23.44 g)均较高,单核重(2.93 g)、

杏核横径(20.88 mm)、单仁重(0.84 g)、杏仁横径(20.88 mm)均最高。库科 13 的单果重(14.61 g)、单核重(2.16 g)、单仁重(0.78 g)、仁形指数(1.79)、出仁率(36.23%)均较高,果形指数(1.19)、杏仁纵径(19.77 mm)均最高。综上所述,这 4 个种质综合评价高于其他种质,可直接进行利用。

表 6 60 份杏种质综合得分
Table 6 Comprehensive scores of 60 apricot germplasm resources

排名 Ranking	综合得分 Score	种质编号 Germplasm number	排名 Ranking	综合得分 Score	种质编号 Germplasm number	排名 Ranking	综合得分 Score	种质编号 Germplasm number
1	1.31	库科 9	21	0.18	其如 4	41	-0.25	库科 8
2	1.26	库尔 11	22	0.15	其如 7	42	-0.27	库科 2
3	1.24	其如 16	23	0.14	库尔 15	43	-0.29	库尔 18
4	1.23	库科 13	24	0.11	库克 5	44	-0.32	库尔 6
5	0.95	库科 7	25	0.06	其如 5	45	-0.34	科恰 4
6	0.93	库科 11	26	0.03	库克 1	46	-0.34	其如 13
7	0.65	吉勒 2	27	0.02	库尔 17	47	-0.36	库科 6
8	0.64	其如 11	28	0	其如 9	48	-0.42	科恰 5
9	0.60	库科 4	29	0	库尔 14	49	-0.44	其如 15
10	0.60	库尔 1	30	-0.03	其如 3	50	-0.45	库科 3
11	0.55	库科 1	31	-0.04	库尔 13	51	-0.47	库尔 2
12	0.40	科恰 1	32	-0.05	其如 14	52	-0.59	其如 12
13	0.32	其如 6	33	-0.07	库尔 7	53	-0.60	库尔 9
14	0.32	库科 10	34	-0.07	库尔 19	54	-0.66	库尔 16
15	0.25	科恰 3	35	-0.19	库尔 8	55	-0.72	科恰 2
16	0.25	吉勒 4	36	-0.20	库克 2	56	-0.74	库尔 3
17	0.24	库尔 12	37	-0.20	库克 6	57	-1.00	其如 10
18	0.24	库尔 5	38	-0.21	库科 5	58	-1.05	其如 2
19	0.21	库克 3	39	-0.22	库尔 4	59	-1.09	库尔 10
20	0.19	吉勒 1	40	-0.24	库克 4	60	-1.14	其如 1

3 讨论

对表型性状进行研究分析有助于了解植物驯化过程^[10],表型性状受自身遗传特性和外界环境的影响,既具有稳定性又具有变异性,是生物适应生态环境的表现形式^[11]。帕米尔高原杏利用种子繁殖,这可能是其分化和遗传多样性丰富的主要原因。本研究测定的 11 个杏果实质量性状的 Shannon-weaver 多样性指数差异显著,在 0.15~1.33 之间。果实形状(1.22)、果顶形状(1.33)、果实肉质(1.17)、香气(1.23)4 个果实性状的多样性指数大于 1,

表明具有较高的遗传多样性。杏果实风味(80.00%)以甜为主,这与董胜君等^[12]研究的 54 个野杏无性系果实仁味结果一致。96.67% 的果实有茸毛,这与曹倩等^[13]研究的新疆伊犁霍城大西沟 66 份野杏果实茸毛占 100% 这一结果相近,而何天明^[14]研究表明南疆栽培杏以无毛为主,这可能是帕米尔高原杏与南疆栽培杏的来源不同所致。可溶性固形物含量的平均值为 16.07%,变异系数为 17.81%,有着较高的遗传多样性。刘娟等^[15]认为,变异系数在 10% 以上,表型性状的变异分化较为明显,果实硬度、单果重变异系数均在 25% 以上,说明它们遗

传多样性比较丰富,这与前人研究结论一致^[16-17]。

杏种核表型特性也是驯化过程的重要表现。杏仁甜苦与苦杏仁苷含量密切相关,测定的60份杏仁的苦杏仁苷含量在0.41~14.59 mg/g之间,平均含量为3.16 mg/g,其中47份种仁的苦杏仁苷含量在0.41~2.24 mg/g之间,平均含量为0.96 mg/g,均表现为甜仁,与图尔荪古丽·吾拉伊木^[18]测定的新疆南疆88份杏仁中甜仁占优势的结果一致,说明杏仁甜苦是一个重要的选择性状。单核重的变异系数最高(22.00%),核形指数的变异系数最低(8.66%),单核重、单仁重及出仁率变异系数较大,与黄雪等^[19]研究的南疆地区70份地方杏品种核重、仁重、出仁率变异系数较大这一结果一致;其中核形指数、杏核横径、杏仁横径、杏仁侧径、仁形指数的变异系数较小,均低于10%,说明他们的遗传稳定性较好,不易受到环境等外界因素的影响,与李玄等^[20]、董胜君等^[21]的结果相似。由此表明野生杏资源驯化的过程中,苦杏仁苷含量是一个重要性状。

通过对20个数量性状之间相关性分析表明,果实硬度、可溶性固形物含量与其他性状间相关性不显著,而其余各性状间存在显著或极显著相关性,这与Khadivi-Khub等^[22]研究结果基本一致。单果重与果实纵径等10个性状呈极显著正相关,与果实纵径、果实横径、果实侧径、单核重的相关系数系数较大,这与陈玲等^[23]得出的结论相似。单核重与杏核横径等10个性状呈极显著正相关,与单果重、杏核横径、单仁重、杏仁横径的相关系数较大,与出仁率呈极显著负相关,这与章秋平等^[24]研究结果基本一致。通过对20个数量性状的主成分分析发现,前5个主成分的特征值大于1,累计贡献率为83.255%,可以反映数量性状的基本特征,这与曹倩等^[13]研究结果基本一致。

帕米尔高原杏种质主要分布在海拔2329.5~2730.0 m的昆仑山腹地,与塔什库尔干河、叶尔羌河流域的人类迁徙活动有着紧密联系。得天独厚的气候条件孕育了大量的古杏树资源,需要深入研究和保护利用。其中库科9、库科11、其如16、库科13综合得分较高,有潜在的利用价值。

参考文献

- [1] Faust M, Surányi D, Nyujó F. Origin and dissemination of apricot. *Horticultural Reviews*, 1998, 22: 225-266
- [2] Li W W, Liu L Q, Wang Y N, Zhang Q P, Fan G Q, Zhang S K, Wang Y T, Liao K. Genetic diversity, population structure, and relationships of apricot (*Prunus*) based on restriction site-associated DNA sequencing. *Horticulture Research*, 2020, 7(1): 69
- [3] 苑兆和. 杏属植物(*Armeniaca* Mill.)种质资源分子系统学研究. 泰安: 山东农业大学, 2007
- [4] Yuan Z H. Studies on molecular systematics of apricot genus (*Armeniaca* Mill.) germplasm. Taian: Shandong Agricultural University, 2007
- [5] 萧雄. 新疆杂述诗. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2017: 504-505
- [6] Xiao X. Western Xinjiang miscellaneous poems. Urumqi: Xinjiang University Press, 2017: 504-505
- [7] 任婷婷, 张云程, 陈建华, 曲凯伦, 孙永强, 董胜君. 69个东北杏(*Prunus mandshurica*)无性系果实表型多样性及优良无性系筛选. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(1): 1-13
- [8] Ren T T, Zhang Y C, Chen J H, Qu K L, Sun Y Q, Dong S J. Phenotypic traits diversity analysis and selection of superior clones of 69 apricot (*Prunus mandshurica*) clones. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(1): 1-13
- [9] 陈蕾, 赵慧, 刘禹夫, 张瀚竹, 张艳波, 侯佳贤. 寒地杏种质资源果实性状评价及优异鲜食资源筛选. 北方园艺, 2024(8): 20-26
- [10] Chen L, Zhao H, Liu Y F, Zhang H Z, Zhang Y B, Hou J X. Evaluation of fruit traits and selection of excellent fresh food resources for apricot germplasm resources in cold region. *Northern Horticulture*, 2024(8): 20-26
- [11] Huang L, Jin C, Pan Y J, Zhou L H, Hu S W, Guo Y P, Meng Y Y, Song K, Pang M Y, Li H, Lin D M, Xu X T, Minor J, Coggins C, Jim C Y, Yan E R, Yang Y C, Tang Z Y, Lindenmayer D B. Human activities and species biological traits drive the long-term persistence of old trees in human-dominated landscapes. *Nature Plants*, 2023, 9(6): 898-907
- [12] Groppi A, Liu S, Cornille A, Decroocq S, Bui Q T, Tricon D, Cruaud C, Arribat S, Belser C, Marande W, Salse J, Huneau C, Rodde N, Rhalloussi W, Cauet S, Istace B, Denis E, Carrère S, Audergon J M, Roch G, Lambert P, Zhebentyayeva T, Liu W S, Bouchez Q, Lopez-Roques C, Serre R F, Debuchy R, Tran J, Wincker P, Chen X L, Pétriacy P, Barre A, Nikolski M, Aury J M, Abbott A G, Giraud T, Decroocq V. Population genomics of apricots unravels domestication history and adaptive events. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3956
- [13] 张加延, 张钊. 中国果树志·杏卷. 北京: 中国林业出版社, 2003: 592-605
- [14] Zhang J Y, Zhang Z. Chinese fruit trees: Apricot. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003: 592-605
- [15] 苏世平, 李毅, 种培芳, 高茜. 河西走廊不同红砂天然群体种子表型性状相关性研究. 草业学报, 2013, 22(1): 87-94
- [16] Su S P, Li Y, Chong P F, Gao Q. Correlation analysis of phenotypic traits of *Reaumuria soongorica* seed in different natural populations in the Gansu Corridor. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 87-94

- [11] 江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹. 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性. 园艺学报, 2014, 41(4): 641-652
Jiang X B, Gong B C, Liu Q Z, Chen X, Wu K Y, Deng Q E, Tang D. Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of Chinese chestnut. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(4): 641-652
- [12] 董胜君, 孙永强, 陈建华, 卢彩云, 刘权钢, 刘立新. 野杏无性系表型性状多样性分析及综合评价. 植物遗传资源学报, 2020, 21(5): 1156-1166
Dong S J, Sun Y Q, Chen J H, Lu C Y, Liu Q G, Liu L X. Analysis and comprehensive evaluation of phenotypic character diversity of clonal wild apricot. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(5): 1156-1166
- [13] 曹倩, 廖康, 刘娟, 徐桂香, 孙琪, 司洪章, 杨新峰. 新疆霍城县大西沟野杏果实表型多样性研究. 新疆农业科学, 2016, 53(5): 791-798
Cao Q, Liao K, Liu J, Xu G X, Sun Q, Si H Z, Yang X F. Study on the Daxigou wild apricot fruit phenotypic diversity in Huocheng county, Xinjiang. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(5): 791-798
- [14] 何天明. 中国普通杏(*Prunus Armeniaca*)种质资源遗传多样性及紫杏(*P. dasycarpa*)起源研究. 泰安: 山东农业大学, 2006
He T M. Study on genetic diversity of Chinese common apricot (*Prunus armeniaca*) germplasm and origin of purple apricot (*Prunus dasycarpa*). Taian: Shandong Agricultural University, 2006
- [15] 刘娟, 廖康, 曼苏尔·那斯尔, 赵世荣, 刘欢, 贾杨. 新疆杏种质资源表型多样性研究. 果树学报, 2014, 31(6): 1047-1056
Liu J, Liao K, Mansur N, Zhao S R, Liu H, Jia Y. Research on phenotypic diversity of apricot germplasm resources in Xinjiang. Journal of Fruit Science, 2014, 31(6): 1047-1056
- [16] 尹明宇, 高福玲, 乌云塔娜. 内蒙古西伯利亚杏种质资源表型多样性研究. 植物遗传资源学报, 2017, 18(2): 242-252
Yin M Y, Gao F L, Wu-Yun T N. High-level genetic diversity of Siberian apricot (*Armeniaca sibirica*) in Inner Mongolia revealed by phenotyping. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(2): 242-252
- [17] 董胜君, 王若溪, 张皓凯, 陈建华, 刘立新, 于庆福. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析. 植物资源与环境学报, 2020, 29(6): 42-50
Dong S J, Wang R X, Zhang H K, Chen J H, Liu L X, Yu Q F. Analysis on diversity of fruit phenotypic characters of *Armeniaca mandshurica* from different provenances. Journal of Plant Resources and Environment, 2020, 29(6): 42-50
- [18] 图尔荪古丽·吾拉伊木. 新疆南疆杏种质花粉特征及种仁品质研究. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021
Tu'ersunguli W L Y M. Study on palynology characteristics and kernel quality of apricot germplasm in Southern Xinjiang. Alar: Tarim University, 2021
- [19] 黄雪, 图尔荪古丽·吾拉伊木, 郭玲. 新疆南部杏种核表型性状与苦杏仁苷含量分析. 经济林研究, 2020, 238(4): 143-151
Huang X, Tu'ersunguli W L Y M, Guo L. Phenotypic traits and amygdalin content of apricot seed kernels in south Xinjiang. Non-wood Forest Research, 2020, 38(4): 143-151
- [20] 李玄, 刘玉林, 刘永红, 王媛. 杏核仁主要性状变异及概率分级. 北方园艺, 2017(24): 33-38
Li X, Liu Y L, Liu Y H, Wang Y. Variation and probability grading of main traits of *Armeniaca vulgaris* Lam. Northern Horticulture, 2017(24): 33-38
- [21] 董胜君, 常鸿韬, 颜君, 张皓凯, 陈建华, 夏泽臻. 新疆野杏果实表型性状多样性研究. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 513-521
Dong S J, Chang H T, Yan J, Zhang H K, Chen J H, Xia Z Z. Study on the diversity of *Armeniaca vulgaris* var. *ansu* fruits phenotypic traits. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(5): 513-521
- [22] Khadivi-Khub A, Khalili Z. A breeding project: The selection of promising apricot (*Prunus armeniaca* L.) genotypes with late blooming time and high fruit quality. Scientia Horticulturae, 2017, 216: 93-10
- [23] 陈玲, 王鹏, 樊丁宇, 周晓明, 廖康. 35份新疆杏品质指标相关性分析及类型评价. 新疆农业科学, 2016, 53(2): 214-219
Chen L, Wang P, Fan D Y, Zhou X M, Liao K. Correlation analysis of quality indexes and the type evaluation for 35 apricot germplasms in Xinjiang. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(2): 214-219
- [24] 章秋平, 张玉萍, 马小雪, 刘威生, 刘宁, 徐铭, 刘硕, 张玉君. 杏果核与种仁数量性状的遗传多样性分析. 果树学报, 2022, 40(2): 1-14
Zhang Q P, Zhang Y P, Ma X X, Liu W S, Liu N, Xu M, Liu S, Zhang Y J. Genetic diversity analysis of quantitative traits of fruit stone and kernel in apricot. Journal of Fruit Science, 2022, 40(2): 1-14