

图像识别技术在杏品种资源叶片形态评估与多样性研究中的应用

王碧君, 章秋平, 刘威生, 刘硕, 刘宁, 张玉萍, 张玉君, 徐铭, 马小雪, 刘家成, 赵海娟

(辽宁省果树科学研究所, 熊岳 115009)

摘要:为了探讨杏叶片形态的遗传多样性,方便杏种质资源收集和品种识别。本研究以142份杏种质资源为材料,对杏叶片的28个表型性状进行了调查。结果表明,28个表型性状中13个分级性状和8个数量性状变异系数高于10%。表明142份杏品种资源的叶片表型存在丰富的遗传多样性。相关性分析,发现叶片面积、叶片周长、叶片长、叶片宽4个性状间存在极显著的正相关;叶基形状、叶基角度与叶片长宽比呈极显著负相关;叶片圆度与叶尖长短呈显著负相关。主成分分析,结果显示第1主成分由叶片大小相关性状组成;第2主成分为叶片颜色相关性状;第3和第4主成分分别反映了叶片形状与叶片锯齿高度。根据聚类分析将杏种质资源大致划分为小叶-深绿类、大叶-截形类、小叶-圆形类、中叶-浅绿类、大叶-长叶柄类、中叶-楔形类和中叶-圆形类等8个类群和6个亚群。本研究基于图片识别技术能够对杏品种资源叶片形态特征进行快速评价,增加叶尖长短、叶缘锯齿深浅,叶片最宽处位置3个叶片分级性状可以作为识别不同杏品种的依据,对于今后我国杏种质资源的叶片形态评价与品种识别具有一定的参考价值。

关键词:杏;叶片形态;分级形状;数量性状;多样性

Application of image recognition technology in the assessment of leaf morphology and diversity of apricot germplasm

WANG Bijun, ZHANG Qiuping, LIU Weisheng, LIU Shuo, LIU Ning, ZHANG Yuping, ZHANG Yujun, XU

Ming, MA Xiaoxue, LIU Jiacheng, ZHAO Haijuan

(Liaoning Institute of Pomology, Xiongyue 115009)

收稿日期: 2024-06-16

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为果树种质资源与遗传育种研究, E-mail: 13224123706@163.com

通信作者: 章秋平, 研究方向为果树种质资源与遗传育种研究, E-mail: lbzhangqiuping2@163.com

基金项目: 辽宁省种质创新藏粮于技专项计划(2023020527-JH1/102-02); 国家自然科学基金项目(31972365); 国家园艺作物种质资源基础平台(NICGR2021-056); 辽宁省李杏首席科技特派员(2023JH5/10400156)

Foundation projects: Liaoning Provincial Germplasm Innovation Special Program (2023020527-JH1/102-02); National Natural Science Foundation of China (31972365); National Basic Platform for Horticultural Crop Germplasm Resources (NICGR2021-056); Plum and Apricot Chief Science and Technology Special Correspondent Project of Liaoning Province (2023JH5/10400156)

Abstract: In order to explore the genetic diversity of apricot leaf morphology, and to facilitate the collection of apricot germplasm resources and variety identification. In this study, the comparative analyses were carried out by using various methods, such as descriptive statistics, principal component analysis and cluster analysis. The results showed the coefficients of variation (cv) of the 13 graded traits were all above 20%, and the three leaf traits of leaf tip length, leaf margin serration depth, and position of the widest part of the leaf blade differed greatly, which can be used as traits to distinguish leaf morphology of different apricot varieties. The magnitude of variation for the 15 quantitative traits ranged from 4.16% to 29.5%, which showed that the degree of leaf variation among apricot varieties was high, and there were a variety of types and rich genetic diversity among apricot varietal resources. Through correlation analysis, it was found that there was a highly significant positive correlation between four traits: leaf blade roundness, leaf blade rectangularity, leaf apex angle and leaf base angle; leaf base shape was highly significantly and positively correlated with leaf base angle with a correlation coefficient of 0.92, and highly significant negatively correlated with leaf length-to-width ratio; and leaf roundness was significantly negatively correlated with leaf tip length, which indicated that tip length of leaf to a certain extent could reflect the leaf shape. Through principal component analysis, the 15 quantitative traits were divided into four composite factors, and the cumulative contribution rate reached more than 85.04%. The results showed that the first principal component consisted of five traits, including leaf area, leaf circumference, leaf length, leaf width, and petiole length, which mainly reflected the traits related to the size of the leaf blade of the apricot germplasm resources; the second principal component reflected the traits related to the color of the leaf blade; and the third and the fourth principal components reflected the traits related to leaf blade shape and leaf blade serration ratio, respectively. The four dominant factors of leaf size, leaf color, leaf shape and average serration height can be used as the main phenotypic indexes for classification of apricot germplasm resources. Apricot germplasm resources were classified into 8 taxa based on cluster analysis. Taxon I consisted of only 2 germplasm, Zao Dahuang and Chaoxianxing, which were in the large-leaved-cuneate category; Taxon II and III both consisted of 1 material, which was Huanna and Zhuolumuguxing, respectively; Taxon IV consisted of 18 germplasm, which were in the small-leaved-deep-green category; Taxon V consisted of 1 Central Asian germplasm, which was in the Stella category; Taxon VI consisted of 1 material, which was in the large-leaved-cardinal category; Taxon VII consisted of 12 germplasm, which were in the large-leaved-truncate category; Taxon VIII was further classified into 6 subgroups. Taxon VII consists of 12 germplasm, which is large-leaved-truncate; Taxon VIII is further divided into six subgroups. In this study, based on the application of image recognition technology, we were able to rapidly evaluate the leaf morphology of apricot varieties and resources, and increase the length of the leaf tip, the depth of the leaf margin serration, and the

position of the widest part of the leaf . These three leaf grading traits can be used as the basis for identifying different apricot varieties, which will be of certain reference value for the future evaluation of leaf morphology of China's apricot germplasm resources and varietal identification.

Keywords: apricot; leaf morphology; graded shape; quantitative traits; diversity

叶片是植物进行呼吸、光合和蒸腾作用的重要场所，为植物生存和繁衍提供所需能量和营养物质。经过漫长的发展和进化，叶片形成了不同的形态特征进行能量物质最有效的利用，以最大程度地减少环境带来的不利影响^[1]，如叶长和叶周长小可增加抗病性^[2]；叶片长宽比大，更有利于植物获得多的光能^[3]；叶缘锯齿越深越能抵御高温，增强耐旱性^[4]；叶柄越短越不利于光能利用^[5]；叶尖细长与降雨量呈正相关^[6]。因此叶片的多样性能够帮助植物最大限度地适应野外生存环境。

叶片形态学标记是研究植物多样性的重要方法，并且已在不同种质资源的遗传多样性研究中广泛应用。郭燕等^[7]对中国 240 份板栗资源的叶片表型性状进行多样性分析，发现叶片锯齿高度等 15 个数量性状及 3 个质量性状（叶片形状、叶基形状和叶缘锯齿特征）存在显著差异，认为板栗叶片表型在群体间和群体内均存在丰富变异；唐璐等^[8]通过主成分分析在 34 份茶树中筛选出的叶面积、叶形、叶面、芽叶茸毛、叶尖、叶身 6 个表型性状，是造成茶树群体表型差异的主要因素；Cao 等^[9]548 份梨叶片形态多样性分析研究中发现 140 份砂梨，87 份秋子梨的叶形多为卵圆形且有刺芒，而 93.7% 的西洋梨叶片中没有刺芒；刘一超等^[10]将 8 个省份的 71 份欧李叶片形状被分为 5 种类型，发现窄倒卵圆形占比最大，且内蒙古和山西地区欧李叶片数量性状的变异系数均大于 10%，认为内蒙古和山西地区的欧李叶片具有丰富的遗传多样性；杨光等^[11]以无花果种质资源为材料，对 11 个性状多样性分析发现叶基夹角的变异系数最大，为 73.35%，且与周长显著负相关，并将 51 份资源分为 4 大类；万继锋等^[12]86 份澳洲坚果种质资源叶片中发现 8 个描述性状的嫩叶颜色和叶片形状的变异类型最为丰富，并通过聚类分析和主成分分析筛选出叶序、嫩叶颜色、叶尖形状、叶缘形状、叶缘刺、叶柄长度、叶形指数对澳洲坚果种质资源分类起重要作用。

目前对植物资源叶片表型多样性研究多基于性状描述进行目测，或对数值性状进行测量。两种方式都易受人为因素和环境因素影响，特别是目测法，人为主观性强，可能受到观察者经验和技能的影响，难以量化细微差异。随着计算机视觉领域的飞速发展，图像识别技术在品种识别方面有广阔的应用前景^[13]。将图像识别技术应用到植物表型识别中，可以减轻科研人员的工作强度，加快科研进展，并自动量化表型指标^[14]。智能识别技术还具有省时、易操作和低成本等优点。

杏遗传多样性水平较高，种质资源极其丰富且分布广泛^[15]。王利兵^[16]对山杏（*Prunus sibirica* L.）、东北杏（*Prunus mandshurica* Maxim）和野生普通杏的形态特征研究中发现山杏叶片尾尖较长，东北杏尾尖中等，野杏尾尖较短。东北杏属薄叶型旱生植物^[17]，以叶基形状以宽楔形为主^[18]；而 125 份来自辽宁、内蒙

古、以及俄罗斯外贝加尔地区的山杏的叶基形状多以楔形为主^[19]，但对 37 份黄土高原山杏种质资源研究发现叶基形状多为平截型^[20]。仲维平等^[21]认为内蒙古扎兰屯地区山杏群体叶柄长、叶片宽的变异系数均超过 20%，且与果重显著相关；内蒙古野生山杏的叶片尖端长短与出仁率极显著正相关^[22]；徐乐等^[23]认为新疆中亚生态群杏品种叶片叶面积、叶片长、叶片宽、叶周长小于华北生态群型品种。然而，上述研究仅对个别种或品种群进行了研究，缺少对杏种质资源叶片形态特征完整、系统的调查与研究。

与花、果实相比，杏叶片的生长周期长、在野外资源考察中易获的，对杏品种识别具有着独特的优势。目前杏种质资源评价标准中对于叶片的评价指标仅有 13 个^[24]。但是，在杏种质资源评价过程中，我们发现杏叶片存在大量的形态变异，可能需要增加较多的叶片评价指标进行调查。本研究以 142 份杏种质资源为研究对象，对其叶片形态表型的 28 性状进行描述和测量，对结果进行表型多样性分析、主成分分析、相关性分析、聚类分析及建立线性回归模型，进一步揭示杏品种叶片表型多样性特征和变异规律，为杏资源叶片形态评价和品种群识别提供科学依据，并应用杏叶片表型性状在杏模型上开展多样性研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本实验 142 份杏品种（15 份东北品种、51 份华北品种、20 份西北品种、17 份南方品种、20 份新疆品种、19 份国外品种）均来自国家果树种质熊岳李杏圃（表 1）。所有品种树龄 20 a（年），均以山杏实生苗为砧木。果园株行距为 5 m × 5 m，栽培条件及管理水平较为一致。每个品种随机选取 2~4 株树，2023 年 6 月至 8 月从树冠外围的新梢中部采集 30 片完整且无病虫害的成熟叶片，及时装入密封塑料袋并用油笔进行编号，带回实验室，进行调查测量。

表 1 142 份杏种质资源的基本信息

Table 1 Basic information of 142 accessions in apricot

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin
1	海尔考特	澳大利亚	49	早大黄	黑龙江友谊	96	白沙杏	陕西大荔
2	澳 3	澳大利亚	50	房陵大杏	湖北房陵	97	菜籽黄	陕西大荔
3	澳 5	澳大利亚	51	大白杏	吉林延边	98	胭脂红	陕西华县
4	骆驼黄	北京	52	Kecspshar	捷克	99	迟椰子	陕西华县
5	水晶杏	北京	53	Harlayne	捷克	100	大接杏	陕西华县
6	密陀罗	北京	54	Stark early orange	捷克	101	克拉拉	陕西华县
7	白玉白达	北京	55	Stella	捷克	102	二转子	陕西礼泉
8	C112-6	北京	56	Helena de rousilon	捷克	103	草坯杏	陕西礼泉
9	白玉扁	北京	57	Vynoslivyj	捷克	104	银香白	陕西临潼
10	怀来香白	北京怀来	58	辽梅	辽宁北票	105	金妈妈	陕西眉县

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin
11	黄尖嘴	北京怀柔	59	孤山杏梅	辽宁东港	106	古渡杏	四川巴塘
12	杨继元	北京延庆	60	一窝蜂	辽宁建平	107	大叶杏	四川泸定
13	山黄杏	北京延庆	61	龙王帽	辽宁建平	108	王世中杏	四川泸定
14	朝鲜白杏	朝鲜	62	野银白	辽宁锦西	109	姑咱杏	四川康定
15	惠阳白杏	朝鲜	63	露仁杏	辽宁凌源	110	蓟县香白	天津蓟平
16	朝鲜杏	朝鲜	64	丹麦银杏	辽宁普兰店	111	Kabaasi	土耳其
17	法6	法国	65	沈阳早熟	辽宁沈阳	112	Soganci	土耳其
18	Early orange	法国	66	大山杏	辽宁熊岳	113	Hacihaliloglu	土耳其
19	青皮水杏	甘肃兰州	67	张公园	辽宁熊岳	114	库尔代克	新疆
20	大接杏	甘肃东乡	68	歇马杏	辽宁庄河	115	梨杏	新疆和田
21	大红中沙杏	贵州贵阳	69	金太阳	美国	116	安佳娜	新疆和田
22	凯里大杏	贵州凯里	70	奈曼晚熟	内蒙古奈曼	117	克孜朗	新疆柯坪
23	桐梓杏	贵州桐梓	71	甜仁黄口外	宁夏	118	毛拉肖	新疆柯坪
24	沙杏1号	贵州遵义	72	新水杏	宁夏	119	库车1号	新疆库车
25	黄甜核	河北昌黎	73	山彩	日本	120	阿杨洪来克	新疆库车
26	沙金红	河北昌黎	74	斯里普斯	日本	121	佳娜丽	新疆轮台
27	昌黎水白	河北昌黎	75	信州大实	日本	122	克孜克西米西	新疆轮台
28	串枝白	河北昌黎	76	早橙	山东崂山	123	冬杏	新疆轮台
29	肉杏	河北广宗	77	亮皮红杏	山东崂山	124	克孜阿恰	新疆轮台
30	石片黄	河北怀来	78	长个红	山东崂山	125	辣椒杏	新疆轮台
31	优一	河北蔚县	79	白杏	山东曲阜	126	乔儿胖	新疆莎车
32	新4号	河北蔚县	80	白玉杏	山东曲阜	127	大胡安娜	新疆叶城
33	串枝红杏	河北邢台	81	车头一号	山东泰安	128	晚熟红毛杏	新疆叶城
34	棒槌杏	河北邢台	82	红玉杏	山东泰安	129	埃里温	新疆叶城
35	沙金红	北京延庆	83	杨继元	山东泰安	130	胡安娜	新疆叶城
36	红火梅子	北京延庆	84	崂山关爷脸	山东泰安	131	新疆野杏	新疆伊犁
37	长城1号	河北张家口	85	平渡海棠红	山东泰安	132	卡拉玉吕克	新疆伊犁
38	80A03	河北涿鹿	86	荷包榛	山东泰安	133	赛买提	新疆英吉莎
39	80B05	河北涿鹿	87	白仁	山东烟台	134	亚美尼亚1	亚美尼亚
40	80D05	河北涿鹿	88	观音脸	山东烟台	135	亚美尼亚2	亚美尼亚
41	79C13	河北涿鹿	89	烟黄1号	山东烟台	136	意大利1号	意大利
42	木瓜杏	河北涿鹿	90	白水	山西太谷	137	Pisala	意大利
43	丰仁	河北涿州	91	扁杏	山西太谷	138	晚甜杏	云南
44	串铃扁	河北涿州	92	沙金红	山西太谷	139	大海杏	云南祥云
45	早金蜜	河南郑州	93	草滩梅杏	陕西草滩	140	源东杏	浙江金华

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	来源 Origin
46	中白	黑龙江	94	马串铃	陕西大荔	141	仙居杏	浙江仙居
47	东宁2号	黑龙江	95	金丝甜仁	陕西大荔	142	张村早杏	浙江张村
48	龙垦5号	黑龙江						

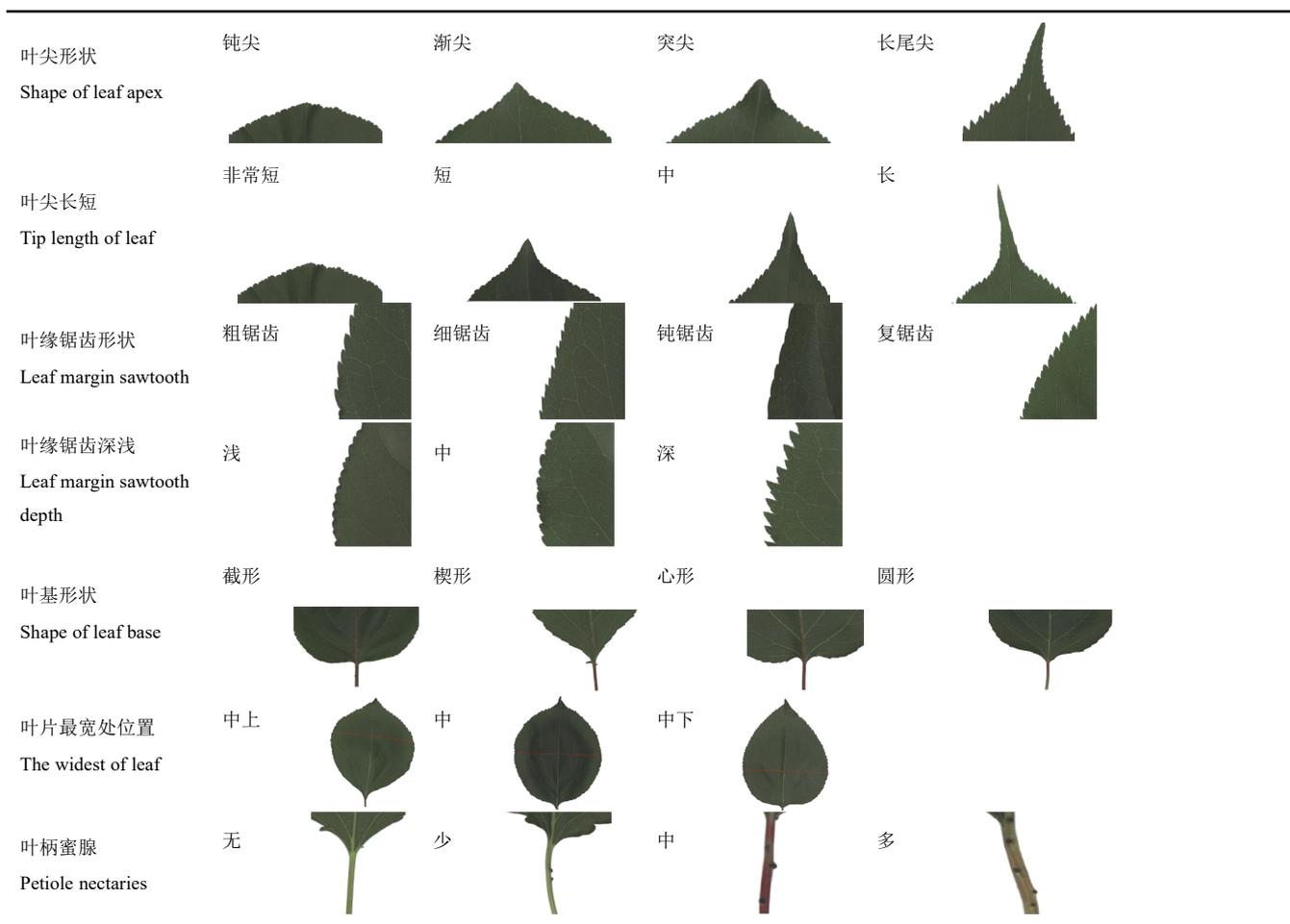
1.2 表型性状调查

每份资源选取 30 片叶，分别用于叶片外观形态的 28 个表型性状（13 个分级性状和 15 个数量性状）调查和测量，取平均值作为实测值（数量性状）。分级性状：叶片状态、叶片颜色、叶面光滑度、叶面茸毛、叶背茸毛、叶片形状、叶尖形状、叶缘锯齿形状、叶基形状、和叶柄蜜腺共 10 个分级性状的观测参照《杏种质资源描述规范和数据标准》^[24]，叶缘锯齿深浅和叶尖长短和叶片最宽处 3 个性状参照表 2 中图片记录性状特征，每个品种选择 9 次调查中频率最高形态作为该资源的分级性状描述，13 个分级性状的赋值标准参照表 2。

表 2 142 份杏资源叶片表型分级性状及其分级标准

Table 2 phenotypic classification traits and classification criteria in 142 accessions of apricot leaves

分级性状 Classification traits	分级标准 Criteria for classification				
	1	2	3	4	5
叶片状态 Leaf state	平展 	卷曲 	皱缩 		
叶片颜色 Color of leaf	浅绿 	绿 	深绿 		
叶面光滑度 Leaf smoothness	光滑 	粗糙 			
叶面茸毛 Pubescence of leaf surface	无 	有 			
叶背茸毛 Pubescence of leaf back	无 	有 			
叶片形状 Leaf shape	倒卵圆形 	卵圆形 	圆形 	阔圆形 	椭圆形 



叶片面积、叶片周长、叶片长度、叶片宽度、叶长宽比、叶柄长、叶片锯齿平均高度值、RGB 颜色成分（红色成分、绿色成分、蓝色成分）、叶绿素参考值、叶片圆度和叶片矩形度用万深 LA-S 植物图像分析仪（杭州万深科技有限公司）扫描杏叶片后对叶片图片进行测量，叶顶角度和叶基角度用万深 LA-S 叶分析软件（独立版）中的角度测量进行测量。

1.3 数据分析

利用变异系数分析杏不同表型性状的变异程度^[25]，变异系数计算公式为： $CV(\%) = s/X \times 100$ ，s 为标准差，X 为平均值。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数分析杏叶片表型性状的多样性程度^[5]，Shannon-Wiener 多样性指数计算公式为： $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ ，根据标准差（s）和平均值（X）将测量性状分为 10 个等级，1 级 $< X-2s$ ，10 级 $\geq X+2s$ ，级差为 $0.5s$ ，通过计算每一级的相对频率（ P_i ）来计算 Shannon-Wiener 多样性指数（ H' ），式中 P_i 表示第 i 级别内资源份数占总份数的百分比。

采用 Excel 2019 对各性状进行数据整理，计算各样品的平均值、变异系数、Shannon-Wiener 多样性指数，用 Origin pro 2021 软件对所有性状的数据进行基本描述统计、相关性分析以及聚类分析，SPSS 25 对所

有性状数据进行主成分分析，并用 R 语言中 factoextra 包做图。多元线性回归模型使用 python 代码中 statsmodels 函数进行回归拟合。

2 结果与分析

2.1 杏叶片表型质量性状遗传多样性

142 份杏种质资源 13 个叶片分级性状频率分布见表 2, 分析表明 13 个叶片分级性状频率分布各不相同, 叶片形状的类型最多, 有 5 种分布类型, 频率分布范围为 2.11%~70.42%, 5 种叶片形状中, 142 份资源中多为卵圆形占 71.13%; 圆形次之, 占 15.49%; 倒卵圆形、阔圆形和椭圆形占比较少, 3 种形状的种质仅占 13.38%。叶片颜色多为绿色, 占 64.79%; 其次是浅绿色, 为 18.31%; 深绿色略少于浅绿色, 为 16.20%。叶尖形状、叶缘锯齿形状和叶基形状均为 4 种类型, 叶尖形状中多为突尖, 占 56.34%; 渐尖和长尾尖次之; 钝尖最少, 142 分资源中仅有 2 份, 分别是 Stark early orange 和草滩杏梅。叶缘锯齿形状以钝锯齿居多, 分别为 68.31% 和 19.72%; 复锯齿和细锯齿较少, 细锯齿仅占 3.52%。在叶基形状中, 圆形和楔形较为普遍, 截形略少于楔形, 三者占 97.18%; 心形极少, 仅占 2.82%。叶片状态中除皱缩类型占 1.41%, 所占比例较少外, 性状多为平展, 占 76.76%; 卷曲次之, 为 21.83%。叶面茸毛和叶背茸毛多为无毛, 分别占 86.62%和 90.14%, 有毛仅为 13.38%和 9.86%。

叶尖长短、叶缘锯齿深浅、叶片最宽处位置 3 个叶片性状特征参照表 1, 在叶片调查中发现 3 个性状特征存在较大差异, 能够作为区分不同杏品种叶片形态性状, 由表 3 可知 3 个性状的变异系数均高于 20%, 多样性指数均大于 0.8, 高于平均值。这表明 142 份杏种质资源叶片间存在很大的差异, 具有丰富的遗传多样性, 因此增加 3 个性状。142 份杏资源中叶缘锯齿多为浅锯齿, 占 53.52%; 叶缘锯齿中次之, 占 31.69%; 叶缘锯齿深占比最少, 占 14.79%, 其变异系数最高为 45.43。叶尖长短可分为 4 种分布类型, 短和中较为普遍, 占 90.84%, 非常短或缺失和长较少, 仅占 9.16%。叶片最宽处位置在中上的占 5.63%, 仅有 8 份资源, 进一步分析发现, 叶片形状为倒卵圆形的 5 份资源叶片最宽处均在中上。

表 3 142 份杏资源叶片分级性状频率分布及多样性

Table 3 Frequency distribution and diversity of leaf classification trait in 142 accessions of apricot

分级性状 Classification traits	各性状分值的分布频率 Distribution frequency of each trait score / %					变异系数 CV(%)	多样性指数 (H') Shannon-Wiener
	1	2	3	4	5		
叶片状态(LS)	76.76	21.83	1.41			37.23	0.60
叶片颜色(LC)	18.31	64.79	16.90			29.98	0.89
叶面光滑度(LSS)	86.62	13.38				30.13	0.39
叶面茸毛(LSP)	86.62	13.38				30.13	0.39
叶背茸毛(LBP)	90.14	9.86				27.23	0.32
叶片形状(Ls)	3.52	71.13	15.49	7.75	2.11	33.00	0.90
叶尖形状(LAS)	1.41	37.32	56.34	4.93		22.58	0.90
叶尖长短(LTL)	4.93	61.97	28.87	4.23		27.38	0.94

叶缘锯齿形状(LMS)	19.72	3.52	68.31	8.45	33.58	0.91
叶缘锯齿深浅(LMSD)	53.52	31.69	14.79		45.43	0.98
叶基形状(LBS)	35.21	40.14	21.83	2.82	42.95	1.17
叶片最宽处位置(Lw)	5.63	65.49	28.87		24.25	0.80
叶柄蜜腺(PN)	1.41	40.14	33.80	24.65	29.18	1.14
平均 Mean					31.77	0.79

注: LS: 叶片状态, LC: 叶片颜色, LSS: 叶面光滑度, LSP: 叶面茸毛, LBP: 叶背茸毛, Ls: 叶片形状, LAS: 叶尖形状, LTL: 叶尖长短, LMS: 叶缘锯齿形状, LMSD: 叶缘锯齿深浅, LBS: 叶基形状, Lw: 叶片最宽处位置, PN: 叶柄蜜腺。以下分级性状缩写参照表 3。

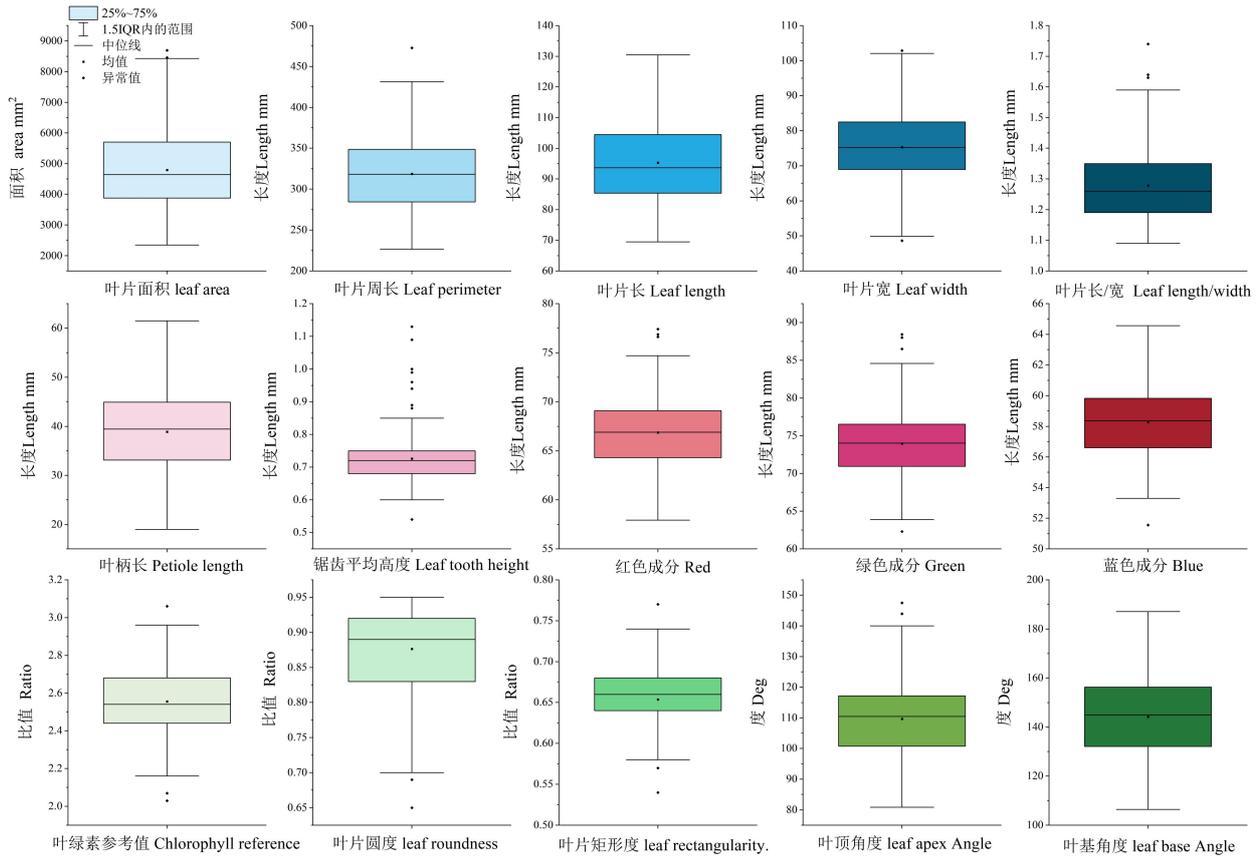
Note: LS : leaf state, LC : leaf color, LSS : leaf smoothness, LSP : Pubescence of leaf surface, LBP: Pubescence of leaf back , Ls : leaf shape, LAS : leaf apex shape, LTL : leaf tip length, LMS : leaf margin sawtooth, LMSD : leaf margin sawtooth depth, LBS : leaf base shape. Lw : widest position of the leaf, and PN : t petiole nectary. Refer to Table 3 for the following classification trait abbreviations.

2.2 杏叶片表型数量性状描述性统计

对 142 份杏种质资源的叶片数量性状进行描述性统计, 如图 1 所示。通过图 1 的箱式图可以看出, 杏叶片各性状的数据分布范围较大, 这表明本文中的杏种质资源具有广泛的遗传变异。

通过对 142 份杏种质资源的 15 个数量性状遗传多样性的分析可知, 15 个数量性状变异系数幅度在 4.16%~29.5%之间, 呈现出较大的变异幅度变。其中叶片面积的变异系数最大为 29.5%, 变异幅度为 2343.81-8690.97 mm², 其次是叶柄长的变异系数为 22.01%, 变异幅度在 19-61.52 mm 之间。另外, 叶片长/宽的变异系数小于叶片长和叶片宽, 说明叶片长/宽较单个叶片长或叶片宽性状稳定。叶片矩形度和叶片圆度的变异系数分别为 5.49%和 6.94%, 是变异幅度最小的两个性状。除叶片长宽比、叶片圆度、叶片矩形度 3 个性状的遗传变异系数小于 10%, 其余 8 个性状均大于 10%, 一般认为, 变异系数大于 10%表示样本间差异较大^[25]。

15 个数量性状的多样性指数 (H') 介于 1.82—2.11, 叶绿素参考值的多样性指数最大为 2.11; 其次是叶柄长和叶片宽, 均为 2.08; 叶缘锯齿平均高度值多样性指数为 1.82, 指数最小。叶顶角度和叶基角度变异系数相对较小, 分别为 11.13%和 11.72%, 但多样性指数均为 2.0 以上, 说明这两个性状的遗传性相对稳定, 遗传变异的均匀度较好。11 个数量性状的多样性指数均高于 1.80, 说明杏叶片的表型数量性状具有丰富的遗传多样性。142 份种质的 15 个数量性状的多样性指数的均值为 1.73, 高于分级性状的 0.79, 说明数量性状比分级性状的多样性更丰富。



注：以下图表数量性状参照此缩写；LA：叶片面积，LP：叶片周长，LL：叶片长，LW：叶片宽，PL：叶柄长，LLW：叶片长/宽，LTH：锯齿平均高度值，R：红色成分，G：绿色成分，B：蓝色成分，CRV：叶绿素参考值，LAA：叶顶角度，LAB：叶基角度，LR：叶片圆度，Lr：叶片矩形度。

Note: The following charts for quantitative traits refer to this abbreviation: LA : leaf area, LP : leaf perimeter, LL : leaf length, LW : leaf width, PL : petiole length, LLW : leaf length/width, LTH : average sawtooth height, R : red component, G : green component, B : blue component, CRV : chlorophyll reference, LAA : leaf apex Angle, LAB : leaf base Angle, and LR : leaf roundness, Lr : leaf rectangularity.

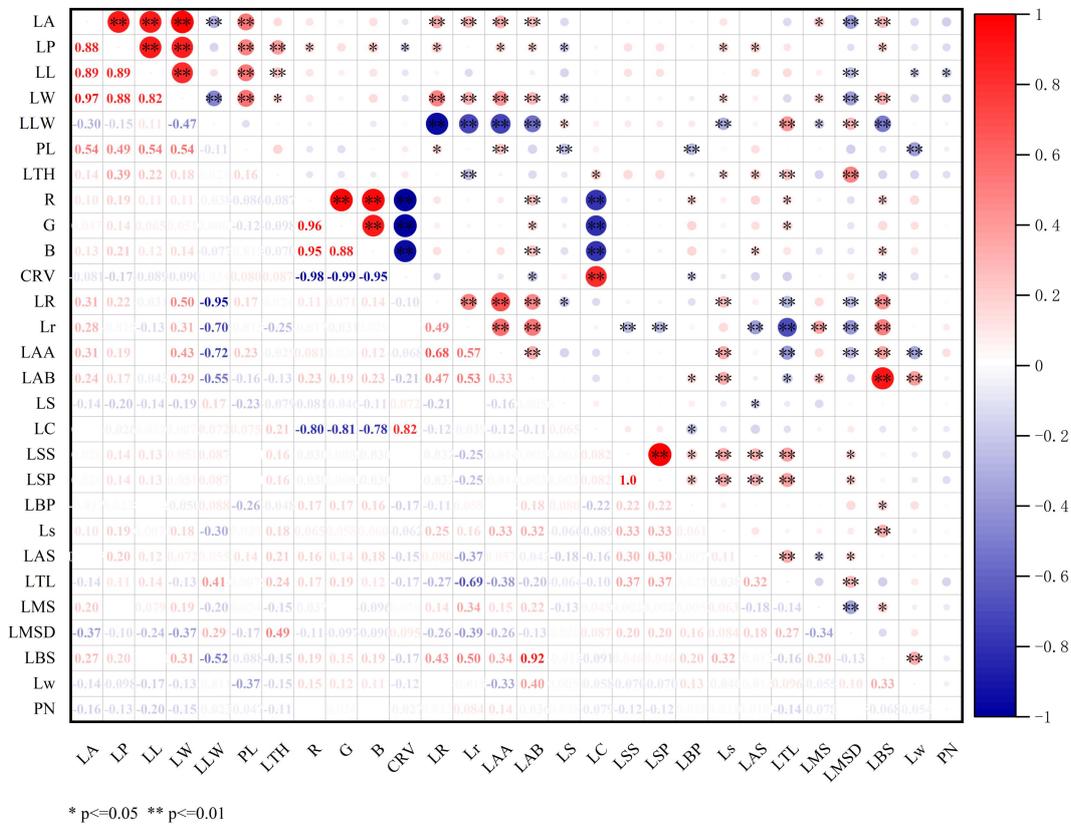
图 1 142 份杏资源叶片数量性状分布的箱式图

Figure 1 Box plot of the distribution of leaf quantitative traits in 142 accessions of apricot

2.3 性状间相关性分析

对 28 个叶片表型性状进行相关性分析，结果见图 2。在叶片数量性状中，叶片面积、周长、叶长、叶宽和叶柄长 5 个性状间呈极显著正相关，叶片长宽比与叶宽、叶片圆度、叶片矩形度、叶顶角度和叶基角度呈极显著负相关，并且叶片圆度、叶片矩形度、叶顶角度、叶基角度 4 个性状间呈极显著正相关，叶片圆度与叶顶角度相关性系数相对较高为 0.68，这说明叶顶角度可能与叶片圆度存在一定的联系。叶片颜色与叶绿素参考值呈极显著正相关，相关系数为 0.82，并且两个性状均与 RGB 的 3 个颜色成分为极显著负相关，这说明杏资源可以通过杏叶片颜色的绿色程度判断叶绿素含量的多少和叶片光合的强弱。叶基形状与

叶基角度呈极显著正相关，相关系数为 0.92，与叶片长宽比呈极显著负相关。叶片圆度与叶尖长短呈显著负相关，相关系数为 0.69。



注：LA：叶片面积，LP：叶片周长，LL：叶片长，LW：叶片宽，PL：叶柄长，LLW：叶片长/宽，LTH：锯齿平均高度值，R：红色成分，G：绿色成分，B：蓝色成分，CRV：叶绿素参考值，LAA：叶顶角度，LAB：叶基角度，LR：叶片圆度，Lr：叶片矩形度，LS：叶片状态，LC：叶片颜色，LSS：叶面光滑度，LSP：叶面茸毛，LBP：叶背茸毛，Ls：叶片形状，LAS：叶尖形状，LTL：叶尖长短，LMS：叶缘锯齿形状，LMSD：叶缘锯齿深浅，LBS：叶基形状，Lw：叶片最宽处位置，PN：叶柄蜜腺。* 和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下显著相关

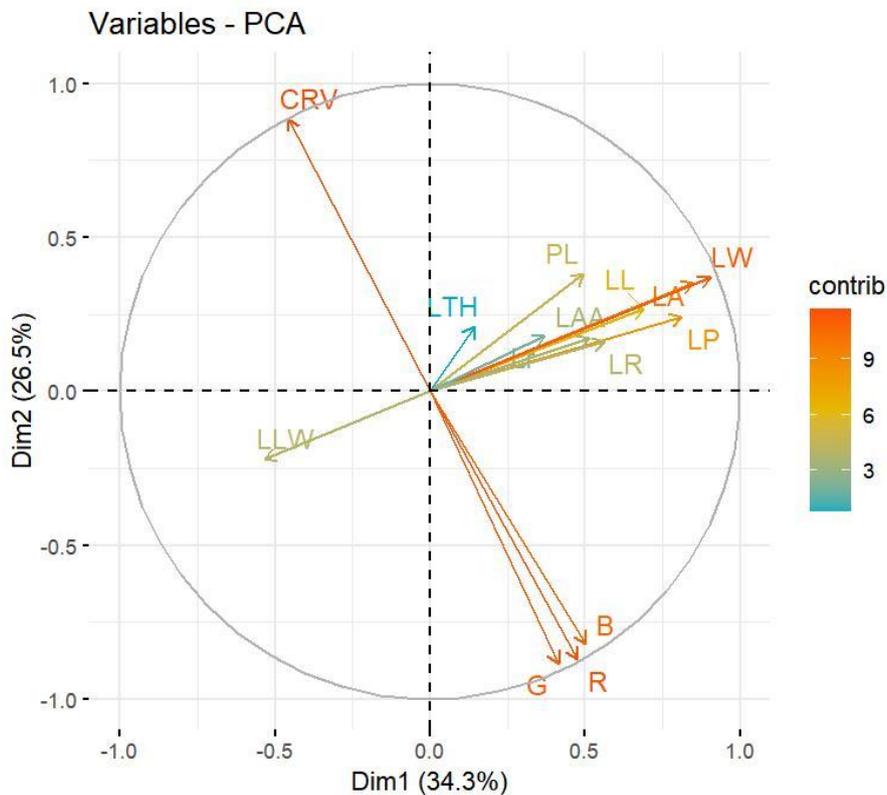
Note: LA : leaf area, LP : leaf perimeter, LL : leaf length, LW : leaf width, PL : petiole length, LLW : leaf length/width, LTH : average sawtooth height, R : red component, G : green component, B : blue component, CRV : chlorophyll reference, LAA : leaf apex Angle, LAB : leaf base Angle, and LR : leaf roundness, Lr : leaf rectangularity, LS : leaf state, LC : leaf color, LSS : leaf smoothness, LSP: Pubescence of leaf surface,, LBP: Pubescence of leaf back, Ls : leaf shape, LAS : leaf apex shape, LTL : leaf tip length, LMS : leaf margin sawtooth, LMSD : leaf margin sawtooth depth, LBS : leaf base shape. Lw : the widest position of the leaf, and PN : the petiole nectary.* and ** indicated significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively

图 2 杏种质资源叶片表型性状的相关性热图

Figure 2 Correlation heat map of leaf phenotypic characters in germplasm resources of apricot

2.4 主成分分析

对杏叶片 15 个数量性状进行主成分分析，得到 4 个特征值大于 1 的主成分，包含了杏种质资源叶表型的大部分信息，累积贡献率为 87.54%（图 3）。第 1 主成分特征值为 4.995，贡献率为 34.30%，叶面积（特征向量值为 0.871）、叶片周长（0.797）、叶片长（0.608）、叶片宽（0.871）、叶柄长（0.417）在第 1 主成分具有较大载荷，主要反映了杏种质资源叶片大小；第 2 主成分特征值为 3.75，贡献率为 26.5%，在红色成分（-0.835）、绿色成分（-0.855）、蓝色成分（-0.781）上具有较大载荷，主要反映了叶片颜色情况；第 3 主成分的特征值 2.974，贡献率为 19.82%，在叶片长宽（0.73）比上具有较大载荷，主要反映了叶形指数情况；第 4 主成分的特征值为 1.038，贡献率为 6.92%，锯齿平均高度值有较高的载荷，特征向量值为 0.749。



注：LA：叶片面积，LP：叶片周长，LL：叶片长，LW：叶片宽，PL：叶柄长，LLW：叶片长/宽，LTH：锯齿平均高度值，R：红色成分，G：

绿色成分，B：蓝色成分，CRV：叶绿素参考值，LR：叶片圆度，Lr：叶片矩形度，LAA：叶顶角度，LAB：叶基角度。

Note: LA : leaf area, LP : leaf perimeter, LL : leaf length, LW : leaf width, PL : petiole length, LLW : leaf length/width, LTH : average sawtooth height, R : red component, G : green component, B : blue component, CRV : chlorophyll reference, LAA : leaf apex Angle, LAB : leaf base Angle, and LR : leaf roundness,

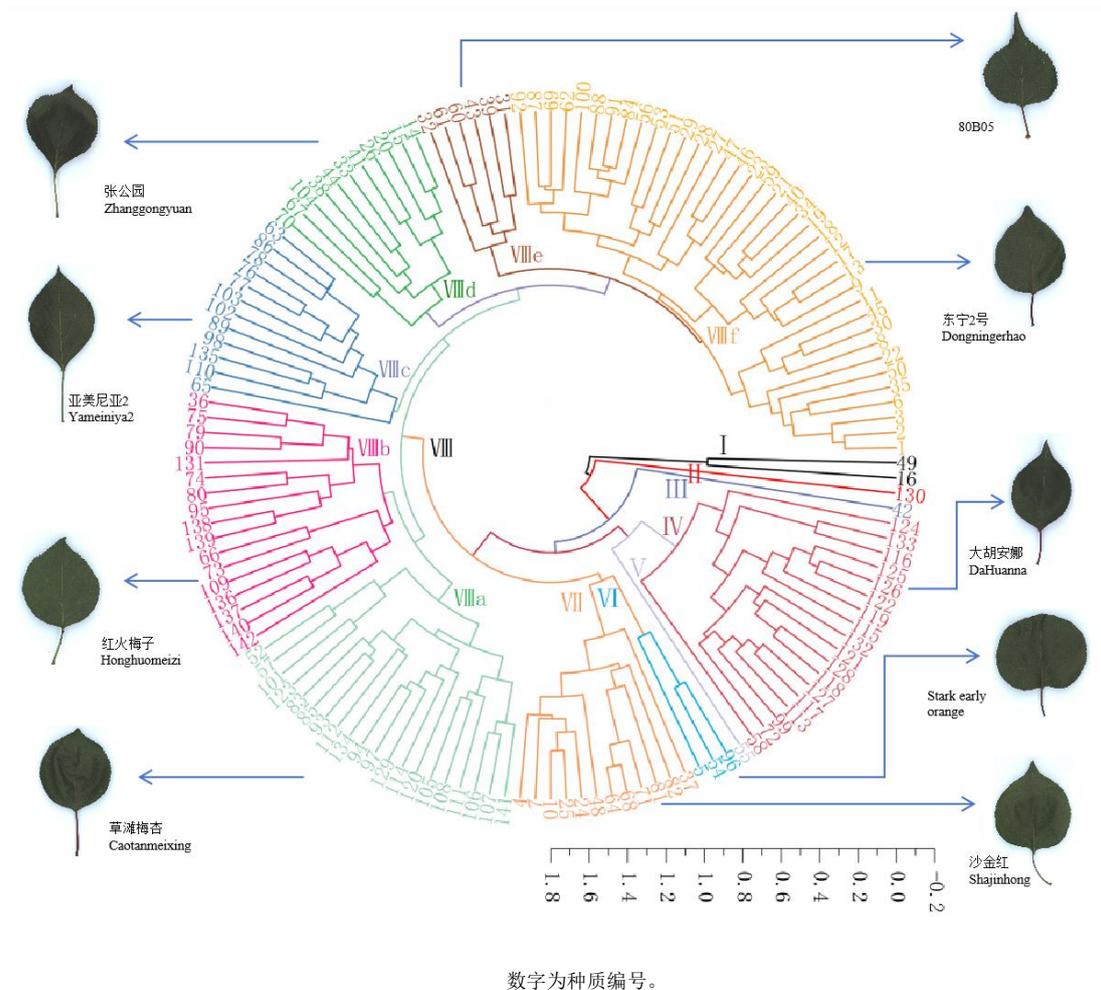
Lr : leaf rectangularity.

图 3 杏叶片相关性状的主成分分析

Figure 3 Principal component analysis of leaf related traits of apricot

2.5 聚类分析

经过标准化 0-1 转换，采用欧式距离类平均法（UPGMA）进行聚类，结果如图 4，多样性指数和变异系数描述见表 4。142 份杏种质资源可分为 8 类，第 I 类群只有 2 份种质，为早大黄和朝鲜杏，其特点为叶片周长、叶片长和叶片长/宽较大，叶顶角和叶片圆度较小，叶缘形状都为粗锯齿，叶尖较长，均为长尾尖；第 II 和第 III 类群均为 1 份材料组成，分别是胡安娜和涿鹿木瓜杏。2 份种质叶片状态为卷曲、叶基形状为截形。胡安娜，叶片叶绿素参考值小，具有颜色浅、叶片小的特点。涿鹿木瓜杏，叶绿素参考值大，叶片颜色深绿色，叶片形状为阔圆形；第 IV 类群多样性指数范围为 1.53-1.93，变异系数范围为 2.89-15.28，有 18 份种质，包含了 14 份新疆种质、2 份西北种质（华县迟槲子和新水杏）、1 份东北种质（辽梅）和 1 份中亚种质（Hacihaliloglu），共同特征为叶片面积、周长、长、宽较小，叶顶角度较小，叶片颜色为深绿或者绿色；第 V 类群仅有 1 份中亚种质，为 Stella，其特点叶片小，颜色浅绿，长宽比大，叶顶角和叶基角度小，叶基形状为楔形；第 VI 类群包含了叶顶角和叶基角度大，叶片形状均为阔圆形，叶基形状均为心形的 3 份种质（水晶杏、Stark early orange 和大荔白沙杏）；第 VII 类群包括 12 份种质，华北种质，东北和西北种质各 1 份，多样性指数范围为 1.13-1.86，变异系数范围为 1.37-19.67，共同特征为叶片面积、周长、长、宽较大、颜色均为绿色，叶缘锯齿浅且叶基形状多为截形；其余 104 份材料组成了第 VIII 类群，占总体材料 73.24% 的比例。



The number is the germplasm number.

图 4 杏种质资源表型数量性状的 UPGMA 聚类

Figure 4 UPGMA clustering based on phenotypic quantitative traits of apricot germplasm resources

表 4 杏 8 个群体的叶片表型性状遗传多样性指数

Table 4 Diversity indexes of leaf phenotypic trait of 8 apricot populations

性状 trait	变异系数 (%) / 多样性指数 (H')	第IV类群 (18)	第VII类群 (12)	VIIIa 亚群 (20)	VIIIb 亚群 (17)	VIIIc 亚群 (12)	VIII d 亚群 (11)	VIIIe 亚群 (6)	VIII f 亚群 (38)	平均 Mean
叶片面积 LA	CV (%) (H')	12.50 1.83	7.91 1.63	19.37 1.80	15.87 1.94	11.46 1.86	7.68 1.67	14.60 1.33	15.61 2.07	13.13 1.77
叶片周长 LP	CV (%) (H')	7.04 1.83	5.57 1.63	11.94 1.94	9.84 1.87	8.03 1.75	6.88 1.41	6.13 1.56	7.67 2.08	7.89 1.76
叶片长 LL	CV (%) (H')	4.47 1.71	5.55 1.55	9.89 1.74	9.54 1.87	6.04 1.47	6.58 1.85	6.43 1.56	9.14 1.96	7.20 1.71
叶片宽 LW	CV (%) (H')	7.53 1.84	4.64 1.86	10.54 1.84	8.25 1.92	6.22 1.54	3.93 1.54	8.20 1.24	8.38 2.05	7.21 1.73
叶片长/宽 LLW	CV (%) (H')	7.74 1.72	4.32 1.68	3.48 1.78	6.92 1.77	6.50 1.56	7.60 1.55	5.50 1.56	6.62 2.02	6.09 1.71

叶柄长 PL	CV (%)	15.28	19.67	23.81	21.08	13.55	13.74	13.74	17.56	17.30
	(H')	1.85	1.86	1.92	1.84	1.36	1.52	1.52	1.88	1.72
锯齿平均高度值 LTH	CV (%)	10.20	7.51	6.80	12.41	13.89	7.32	8.73	6.90	9.22
	(H')	1.83	1.63	1.80	1.53	1.63	1.54	1.24	2.01	1.65
红色成分 R	CV (%)	3.88	2.12	3.04	3.04	3.47	2.13	2.41	3.33	2.93
	(H')	1.87	1.86	1.97	1.96	1.63	1.67	1.79	1.92	1.84
绿色成分 G	CV (%)	5.18	2.89	4.53	4.07	4.15	3.20	2.43	3.81	3.78
	(H')	1.89	1.75	1.96	1.91	1.63	1.67	1.79	1.89	1.81
蓝色成分 B	CV (%)	2.89	1.37	2.72	2.88	2.72	2.37	1.81	2.80	2.44
	(H')	1.89	1.75	1.91	1.96	1.75	1.72	1.33	1.96	1.78
叶绿素参考值 CRV	CV (%)	2.98	2.95	4.63	5.01	4.36	2.96	2.91	4.50	4.04
	(H')	1.93	1.70	1.85	1.87	1.79	1.55	1.79	1.96	1.81
表示叶片圆度 LR	CV (%)	6.99	3.14	2.14	5.81	4.09	5.88	2.96	4.33	4.42
	(H')	1.88	1.70	1.86	1.65	1.79	1.55	1.24	1.93	1.70
叶片矩形度 Lr	CV (%)	5.22	3.90	3.34	3.57	4.56	4.31	5.68	3.97	4.32
	(H')	1.51	1.13	1.87	1.71	1.70	1.85	1.56	1.92	1.66
叶顶角度 LAA	CV (%)	10.26	3.17	8.11	8.19	7.61	14.31	5.66	8.50	8.23
	(H')	1.69	1.82	1.76	1.87	1.79	1.64	1.56	2.00	1.77
叶基角度 LAB	CV (%)	9.18	6.35	9.13	11.04	11.69	7.27	8.03	8.64	8.92
	(H')	1.75	1.79	1.88	1.84	1.86	1.77	1.56	2.08	1.82

注：LA：叶片面积，LP：叶片周长，LL：叶片长，LW：叶片宽，PL：叶柄长，LLW：叶片长/宽，LTH：锯齿平均高度值，R：红色成分，G：绿色成分，B：蓝色成分，CRV：叶绿素参考值，LR：叶片圆度，Lr：叶片矩形度，LAA：叶顶角度，LAB：叶基角度。

Note: LA : leaf area, LP : leaf perimeter, LL : leaf length, LW : leaf width, PL : petiole length, LLW : leaf length/width, LTH : average sawtooth height, R : red component, G : green component, B : blue component, CRV : chlorophyll reference, LAA : leaf apex Angle, LAB : leaf base Angle, and LR : leaf roundness, Lr : leaf rectangularity.

第Ⅷ类群进一步被划分为6个亚群。在Ⅷa亚群中，包含20份种质，分别为4份新疆、5份西北、5份中亚、3份四川和2份山东品种，其叶片长宽比较小、叶片圆形度大、叶柄较短且叶片锯齿形状多为钝锯齿，多样性指数范围为1.74-1.97，变异系数范围为2.14-23.81；第Ⅷb亚群多样性指数范围为1.53-1.96，变异系数范围为3.04-21.08，是由叶绿素参考值较小，叶片大小中等且颜色浅绿色的17份种质组成。其中8份来自南方种质、4份华北种质、2份西北种质、1份新疆和2份意大利种质；第Ⅷc亚群由叶片较大、颜色多为绿色和深绿色，叶柄较长，叶片圆度较小的12份种质组成，其中3份为西北种质、6份华北种质、2份东北和1份中亚种质，多样性指数范围为1.36-1.86，变异系数范围为2.72-13.89；第Ⅷd亚群由11份叶片颜色较深，叶片大小中等、叶基形状均为楔形的种质组成，包括串枝红杏、串铃扁、张公园等品种，多样性指数范围为1.41-1.85，变异系数范围为2.13-14.31；第Ⅷe亚群由2份东北种质（龙王帽、一窝蜂）和4份华北种质（丰仁、80B05、优一、新4号）共6份种质组成，多样性指数范围为1.24-1.79，变异系数范围为1.81-14.60，叶片叶缘锯齿较深、形状均为粗锯齿，叶尖形状多为长尾尖，叶片形状多为阔圆形；第Ⅷf亚群，由38份种质组成，占整体材料26.01%的比例，多样性指数范围为1.88-2.08，变异系数范围为2.80-17.56，

这些种质的叶片性状均属于中间类型，其中西北种质 5 份、国外种质 8 份、华北种质 17 份、南方和东北种质各 4 份。

2.6 线性回归分析模型

叶片大小能够反映出植物的资源获取和利用，是长期进化过程中对环境的最直接响应，与叶片不同形态性状和不同器官间的能量分配等有关^[26]。叶片大小在主成分分析中也表明为主要贡献，叶面积是表征叶片大小的重要指标^[27]，为了进一步探讨影响杏群体分类的主要因子，在相关分析和主成分分析的基础上，将上述 10 个数量性状作为自变量，叶片面积作为因变量进行逐步回归分析，得到 8 个类群杏叶片性状构成要素的最优逐步多元线性回归方程（表 5）。拟合优度 R^2 均大于 0.8， P 均小于 0.05，说明该方程具有统计学意义，可以用于杏叶片面积预测。由方程可知，叶片长（ X_2 ）、叶片宽（ X_3 ）、叶片矩形度（ X_8 ）、叶片圆度（ X_6 ）是影响叶片面积（ Y ）的主要因子。

表 5 杏 8 个群体的叶片表型性状多元线性回归方程模型

Table 5 Multivariable linear regression model of leaf phenotypic trait of 8 apricot populations

聚类群 Cluster	多元线性回归方程模型 Multivariable linear regression model	拟合优度 R^2	P
IV 类群	$Y = 52.90X_3 + 4087.31X_8 + 38.496X_2 - 5778.18$	0.996	0.000
VII 类群	$Y = 160.70X_3 + 4976.03X_8 - 10180.24X_6 - 1952.56$	0.995	0.000
VIIIa 亚群	$Y = 72.40X_3 + 5221.08X_8 - 2548.42X_5 + 35.87X_2 - 5252.66$	0.996	0.000
VIIIb 亚群	$Y = 50.82X_3 + 8269.98X_8 + 55.20X_2 - 9757.57$	0.997	0.000
VIIIc 亚群	$Y = 63.24X_3 + 10563.92X_8 + 54.33X_2 - 12109.65$	0.999	0.000
VIII d 亚群	$Y = 135.39X_3 + 3852.834X_8 - 6367.391X_6 - 2361.92$	0.987	0.000
VIIIe 亚群	$Y = 96.36X_3 - 2999.27$	0.896	0.004
VIII f 亚群	$Y = 210.42 + 109.80X_3 - 4282.84X_6$	0.822	0.000

注： X_2 ：叶片长， X_3 ：叶片宽， X_6 ：叶片圆度， X_8 ：叶片矩形度， Y ：叶片面积。

Note: X_2 : X_3 : leaf width, X_6 : leaf roundness, X_8 : leaf rectangularity, Y : leaf area.

3 讨论

形态学调查是植物分类学的基础，植物叶片是描述植物种间甚至品种间特征差异的重要依据^[28-29]。叶片表型差异不仅体现了同种植物的区别还反映了植物之间的相似性，表型多样性是一种检测植物遗传多样性最简便易行且快速的方法^[30]。本研究通过对 142 份杏资源的 28 个叶片表型分级性状和数量性状进行遗传多样性分析，其中 13 个分级性状和 8 个数量性状变异系数均高于 10%，说明不同杏种质间的差异较大。多样性指数能够反映出表型性状的分级多少和分布状况，同时反映了多样性的丰富度和均匀度，数值越大，所含的信息量越大^[31]。本研究中 15 个数量性状多样性指数均值为 2.02 高于分级性状多样性指数均值 0.79，说明杏叶片数量性状较分级性状多样性丰富，这与尹明宇等^[32]、董胜君等^[33]所得结论一致。

叶片表型是能够快速区分不同种质资源的最直观的性状，农艺性状的描述是种质资源研究最基本的方法和途径^[34]。本研究结果表明杏叶片形状多为卵圆形，叶片颜色多为绿色为主，叶表和叶背多为无毛，这一结果与董胜君等^[33]在 54 份野杏无性系表型研究一致，而在东北杏^[18]和西伯利亚杏^[19]研究中发现叶面、叶背均以有毛为主。这表明叶片分级形状能够很好的区分不同种质。142 份杏资源中叶尖短和中较为普遍，占 90.84%，且叶片长短与叶片圆度呈显著负相关，这表明叶尖长短一定程度上可以反映出叶片形状。叶缘锯齿多为浅锯齿，占 53.52%，变异系数最大为 45.43，叶片锯齿深浅与叶片锯齿高度呈显著正相关，这表明不同杏品种间叶片锯齿深浅差异较大，变异丰富。根据主成分分析结果选取了 4 个主成分，累计贡献率达到 87.54%，能反映全部指标的绝大部分信息。叶缘锯齿深浅在主成分分析中为第 4 主成分主导因子，特征值为 1.038。特征向量绝对值较大的表型性状为反映植物表型性状差异的主要因子^[35]，这也进一步表明叶缘锯齿深浅可以作为杏品种叶片形态鉴定和描述的性状。叶片最宽处位置多在中部为主，而叶片形状为倒卵圆形的 5 份资源叶片最宽处均在中上，且叶基形状均为楔形，相关性分析中也发现叶片最宽处位置与叶基形状显著相关，说明叶片最宽处位置也能够反映出叶片形状并可以作为种间区分的性状。变异系数的大小反映品种固有特征及品种间的个体差异，是性状遗传多样性的具体体现，性状变异系数越大，遗传背景越丰富，越有利于品种鉴定^[36]。叶尖长短、叶缘锯齿深浅和叶片最宽处位置 3 个分级性状变异系数均大于 20%。

聚类分析能很好地反映种质材料之间的亲缘关系，并根据性状聚类特点，将特征相似的种质资源聚在一起^[30]。通过聚类分析得到 8 个类群，其中：第 I 类为大叶-楔形类，叶尖较长，叶片长/宽较大的东北种质。第 II 类为小叶-浅绿类、第 IV 类为小叶-深绿类和 VIIIa 亚群为小叶-圆形类，这 3 类包含了大部分新疆种质，均为小叶，叶缘锯齿深浅多为中或深。VI 类均为具有特殊叶片形态的种质，为大叶-心形类，其叶尖均较短。第 VII 类为大叶-截形类，多为华北种质，总体特征为叶片较大，叶片最宽处位置多在中部或中下。第 VIIe 亚群为中叶-深锯齿类，多为华北和东北种质，类群的锯齿平均高度值多样性指数也为 8 个大类群中最小，VIIIe 亚群的种质均为仁用杏，其特征叶片锯齿较深，叶尖多为中或长，叶片颜色均为绿色，这与章秋平等^[25]在仁用杏的分类研究一致。结果进一步表明杏品种资源间变异明显，表现出丰富的多样性，其中叶尖长短、叶缘锯齿深浅、叶片最宽处位置 3 个分级性状能够区分不同杏资源群体，可作为分类的依据。

传统的鉴定方法往往依赖于专家的知识 and 经验，很难对已有杏资源品种进行分类识别。植物叶片即使不同的时期也表现出很小的差异，利用图像识别技术可以检测叶片并进行特征提取^[37]，因此图像识别可以作为植物品种识别的方法，具有快速、准确、客观的特点。Ikeda 等^[38]利用分析平台通过分析扫描形成的稻穗图片，实现对稻穗的 24 个表型数据自动测定，并通过这些数据自动绘出稻穗形态。马国江等^[39]使用图像分析仪自动测定籽粒的长、宽、长宽比、周长、面积。毛罕平等^[40]通过图像提取缺素番茄叶片图像的有效特征，准确率高达 95%。在果树种质资源评价研究中，表型性状的鉴定仍存在图像采集环境难于统一、人工测定误差难于控制等问题。本文利用 2D 图像处理技术自动提取杏叶片多个表型数据（叶片面积、叶片

周长、叶片长度、叶片宽度、叶长宽比、叶柄长、叶片锯齿高度、RGB 颜色成分、叶绿素参考值、叶片圆度和叶片矩形成度)从而实现标准化、快速、准确地获取叶片表型信息,通过 142 份资源多次图像采集,识别杏叶片形态特征,进行多样性分析,为杏资源品种识别和资源分类提供参考。

参考文献

- [1] 孙梅,田昆,张贇,王行,管东旭,岳海涛.植物叶片功能性状及其环境适应研究.植物科学学报,2017,35(06):940-949.
Sun M, Tian K, Zhang R, Wang X, Guan D X, Yue H T. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation. Plant Science Journal, 2017, 35 (06): 940-949.
- [2] 王文峰,乔新派,胡孝明,陈圆圆,卜付军,张党权,杨超臣.油茶叶片形态结构及内含物与炭疽病抗性的相关性.经济林研究,2024,(02):103-111+121.
Wang W F, Qiao X P, Hu X M, Chen Y Y, Pu F J, Zhang D Q, Yang C C. Relationship between leaf structure and inclusions of *Camellia oleifera* and anthracnose resistance. Non-wood Forest Research, 2024, (02): 103-111+121.
- [3] 尚帅斌,郭俊杰,王春胜,赵志刚,曾杰.海南岛青梅天然居群表型变异.林业科学,2015,51(2):154-162.
Shang S B, Guo J J, Wang C S, Zhao Z G, Zeng J. Phenotypic variations in natural populations of *Vatica mangachapoi* in Hainan, China. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51 (2): 154-162.
- [4] Vogel Steven. Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape. The New phytologist, 2009, 183 (1): 13-26.
- [5] Bacilieri R, Ducouso A, Kremer A. Genetic, morphological, ecological and phenological differentiation between *Quercus petraea* (MATT.) LIEBL. and *Quercus robur* L. in a mixed stand of Northwest of France. Silvae Genetica, 1995, 44 (1): 1-10.
- [6] Malhado A C M, Malhi Y, Whittaker R J, Ladle R J, Steege H, Fabre N N, Phillips O, Laurance W F, Aragao L E O C, Pitman N C A. Drip-tips are associated with intensity of precipitation in the Amazon rain forest. Biotropica, 44 (2012) 728 - 737.
- [7] 郭燕,张树航,李颖,张馨方,王广鹏.中国板栗 36 个叶片表型性状的多样性.中国农业科学,2022,55(05):991-1009.
Guo Y, Zhang S H, Li Y, Zhang X F, Wang G P. Diversity analysis of 36 leaf phenotypic traits of Chinese Chestnut. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55 (05): 991-1009.
- [8] 唐璐,李长乐,葛悦,王璞,赵华,王明乐,王郁,郭飞,倪德江.茶树地方群体种资源叶片表型及生化组分多样性分析.茶叶科学,2023,43(04):473-488.
Tang L, Li C, Ge Y, Wang P, Zhao H, Wang M, Wang Y, Guo F, Ni D J. Diversity Analysis of Leaf Phenotype and Biochemical Components in Tea Local Population Resources. Journal of Tea Science, 2023, 43 (04): 473-488.
- [9] Cao Y F, Zhang Y, Huo H L, Tian L M, Dong X G, Qi D, Xu J Y, Zhang S M. Analysis of leaf morphological diversity of pear (*Pyrus* L.) preserved in China. Acta Horticulturae, 2021, 1303 55-61.
- [10] 刘一超,王淋,包福海,陈俊兴,蔺悦,包文泉,敖敦.欧李优良单株叶片表型性状的遗传多样性.经济林研究,2023,41(04):183-190.
Liu Y C, Wang L, Bao F H, Chen J X, Lin Y, Bao W Q, Ao D. Genetic diversity of leaf phenotypic traits of *Prunus humilis* superior individuals, Non-wood Forest Research, 2023, 41 (04): 183-190.

- [11] 杨光, 阳桂芳, 张金云, 宋杰, 张方秋, 陈倩倩. 51 份无花果种质资源叶片表型性状的遗传多样性分析. 分子植物育种, (2022-11-25)[2024-06-02].
http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221123.1811.018.html.
Yang G, Yang G F, Zhang J Y, Song J, Zhang F Q, Chen Q Q. Genetic Diversity Analysis on the Leaf Traits of 51 Accession Germplasm Resources of *Ficus carica*. Molecular Plant Breeding, (2022-11-25)[2024-06-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221123.1811.018.html.
- [12] 万继锋, 杨为海, 曾辉, 邹明宏, 张汉周, 陆超忠. 澳洲坚果种质资源叶片表型多样性分析及其数量分类研究. 热带作物学报, 2017, 38 (06): 990-997.
Wan J F, Yang W H, Zeng H, Zou M H, Zhang H Z, Lu C Z. Leaf Character Diversity Analysis and Numerical Classification of *Macadamia* spp. Germplasm Resources. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38 (06): 990-997.
- [13] Diego I P, Rafael R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153 69-81.
- [14] Li Z B, Guo R H, Li M, Chen Y R, Li G Y. A review of computer vision technologies for plant phenotyping. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 1-21.
- [15] 赵海娟, 刘威生, 刘宁, 张玉萍, 章秋平, 刘硕. 普通杏(*Prunus armeniaca*)种质资源数量性状的遗传多样性分析. 果树学报, 2014, 31 (1): 20-29.
Zhao H J, Liu W S, Liu N, Zhang Y P, Zhang Q P, Liu S. Genetic diversity analysis for the quantitative traits of common apricot (*Prunus armeniaca*) germplasm. Journal of Fruit Science, 2014, 31 (1): 20-29.
- [16] 王利兵. 我国 3 种杏的地理分布及其植物学性状. 林业科学研究, 2010, 23 (03): 435-439.
Wang L B. Geographic distribution and botanical characters of 3 *Armeniaca* plant in China. Forest Research, 2010, 23 (03): 435-439.
- [17] 吴秀菊, 李桂琴, 袁强. 杏营养器官解剖结构及抗旱性机理研究. 东北农业大学学报, 2005, (02): 186-190.
Wu X J, Li G Q, Yuan Q. Anatomical structure of vegetative organs and drought-resistant mechanism in *Armeniaca mandshurica*. Journal of Northeast Agricultural University, 2005 (02): 186-190.
- [18] 徐豪, 刘明国, 董胜君, 吴月亮, 张皓凯. 东北杏种质资源多样性及其地理变化. 植物生态学报, 2019, 43 (07): 585-600.
Xu H, Liu M G, Dong S J, Wu Y L, Zhang H K. Diversity and geographical variations of germplasm resources of *Armeniaca mandshurica*. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43 (07): 585-600.
- [19] 董胜君, 陈建华, 刘立新, 刘明国, 吴月亮, 夏泽臻. 不同种源西伯利亚杏表型性状多样性研究. 沈阳农业大学学报, 2018, 49 (06): 686-696.
Dong S J, Chen J H, Liu L X, Liu M G, Wu Y L, Xia Z Z. Research on phenotypic trait diversity of *Armeniaca sibirica* from different provenances. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49 (06): 686-696.
- [20] 李明, 赵忠, 杨吉安, 卢斌, 苗兴军. 黄土高原山杏种质资源分类研究. 西北林学院学报, 2011, 26 (1): 8-12.
Li M, Zhao Z, Yang J A, Lu B, Miao X J. Classification on germplasm resources of *Armeniaca sibirica* in the Loess Plateau. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26 (1): 8-12.
- [21] 仲维平, 董胜君, 刘明国, 吴月亮, 于庆福, 尹健. 内蒙古扎兰屯地区山杏群体性状研究. 北方园艺, 2015, (11): 34-36.

- Zhong W P, Dong S J, Liu M G, Wu Y L, Yu Q F, Yin J. Study on the population traits of *Armeniaca sibirica* in Zhalantun county of Inner Mongolia. Northern Horticulture, 2015, (11): 34-36.
- [22] 包文泉, 乌云塔娜, 朱绪春. 内蒙古野生山杏优良单株叶片性状的遗传变异分析. 经济林研究, 2014, 32 (4): 23-27.
Bao W Q, Wu Yun T N, Zhu X C. Genetic variation of fine individual plants' leaf characteristics of wild apricot in Inner Mongolia. Non-wood Forest Research, 2014, 32 (4): 23-27.
- [23] 徐乐, 冯建荣, 章世奎. 新疆中亚生态群杏品种果实与叶片形态特征相关性. 新疆农业科学, 2020, 57 (01): 120-126.
Xu L, Feng J, Zhang S K. Correlation analysis between shape characteristic parameters of apricot fruit and leaf from central Asia Sinusia in Xinjiang. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57 (01): 120-126.
- [24] 刘宁, 刘威生. 杏种质资源描述规范和数据标准.1版. 北京: 中国农业出版社, 2006: 9-26.
Liu N, Liu W S. Discriptors and Data Standard for Apricot (*Armeniaca* Mill.). 1st edn. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 9-26.
- [25] 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, 2023, 40 (02): 193-205.
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, 2023, 40 (02): 193-205.
- [26] 李耀琪, 王志恒. 植物叶片形态的生态功能、地理分布与成因. 植物生态学报, 2021, 45 (10): 1154-1172.
Li Y Q, Wang Z H. Leaf morphological traits: ecological function, geographic distribution and drivers. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45 (10): 1154-1172.
- [27] 王雪艳. 坡向及坡度对山杏叶片功能性状的影响. 兰州: 西北师范大学, 2021.
Wang X Y. Effects of slope aspects and slope gradients on apricot leaf functional traits —a case study in Huining County. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [28] Egerer M, Lin B B, Kendal D. Towards better species identification processes between scientists and community participants. Science of the Total Environment, 2019, 694.
- [29] 顾建成, 聂兴华, 曹小艳, 张煜, 张伟伟, 杜兵帅, 郑瑞杰, 房克凤, 秦岭, 邢宇. 栗属植物叶片形态特征在种间识别的研究. 电子显微学报, 2021, 40 (04): 432-440.
Gu J C, Nie X H, Cao X Y, Zhang Y, Zhang W W, Du B S, Zheng R J, Fang K F, Qin L, Xing Y. Study on leaf morphological characteristics of *castanea* in interspecies identification. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2021, 40 (04): 432-440.
- [30] 王雪洁, 周鹏, 侯思璇, 方炎明, 张敏. 冬青种质资源叶表型多样性分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, (2024-01-03)[2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.s.20231229.1037.004.html>.
Wang X J, Zhou P, Hou S X, Fang Y M, Zhang M. Leaf phenotypic diversity analysis of holly germplasm resources. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, (2024-01-03)[2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.s.20231229.1037.004.html>.
- [31] 洪伟, 吴承祯. Shannon-Wiener 指数的改进. 热带亚热带植物学报, 1999, (02): 120-124.
Hong W, Wu C Z. Modification of Shannon-Wiener index. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1999, (02): 120-124.

- [32] 尹明宇, 姜仲茂, 朱绪春, 包文泉, 赵罕, 乌云塔娜. 内蒙古山杏种群表型变异. 植物生态学报, 2016, 40 (10): 1090-1099.
Yin M Y, Jiang Z M, Zhu X C, Bao W Q, Zhao H, Wuyun T N. High-level phenotypic variations in populations of *Armeniaca sibirica* in Nei Mongol China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40 (10): 1090-1099.
- [33] 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 (05): 1156-1166.
Dong S J, Sun Y Q, Chen J H, Lu C Y, Liu Q G, Liu L X. Phenotypic traits diversity analysis and comprehensive evaluation of *Armeniaca vulgaris* var. *ansu* Clones. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21 (05): 1156-1166.
- [34] 刘金, 关建平, 徐东旭, 张晓艳, 顾竟, 宗绪晓. 小扁豆种质资源形态标记遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2008, (02): 173-179.
Liu J, Guan J P, Xu D X, Zhang X Y, Gu J, Zong X X. Phenotypic diversity of lentil (*Lens culinaris* Medik.) Germplasm Resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, (02): 173-179.
- [35] 穆怀志, 王清玉, 张玥, 吕松瞳, 靳旭红, 张骁, 夏富才. 基于叶片和果实性状的糠椴天然居群表型变异及多样性分析. 植物研究, 2023, 43 (06): 826-834.
Mu H Z, Wang Q Y, Zhang Y, Lu S T, Jin X H, Zhang X, Xia F C. Phenotypic variation and diversity analysis of *Tilia mandshurica* natural populations based on leaf and fruit traits. Bulletin of Botanical Research, 2023, 43 (06): 826-834.
- [36] Alizadeh K, Fatholahi S, Teixeira D S J A. Variation in the fruit characteristics of local pear (*Pyrus* spp.) in the Northwest of Iran. Genetic Resources and Crop Evolution, 2015, 62 (5): 635-641.
- [37] Chen Y, Huang Y Q, Zhang Z Z, Wang Z, Liu B, Liu C, Hu C, Dong S Y, Pu X J, Wan F H, Qiao X, Qian W Q. Plant image recognition with deep learning: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 1-17
- [38] Ikeda M, Hirose Y, Takashi T, Shibata Y, Yamamura T, Komura T, Doi K, Ashikari M, Matsuoka M, Kitano H. 2010. Analysis of rice panicle traits and detection of QTLs using an image analyzing method. Breeding Science, 60 (1): 55 - 64.
- [39] 马国江, 马靖福, 张沛沛, 刘媛, 陈涛, 杨德龙. 128 份抗旱冬小麦新品系农艺性状遗传多样性分析. 甘肃农业大学学报, 2021, 56 (03): 37-44.
Ma G J, Ma J F, Zhang P P, Liu Y, Chen T, Yang D L. Genetic diversity analysis of agronomic characters of 128 new drought-resistant winter wheat strains. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56 (03): 37-44.
- [40] 毛罕平, 徐贵力, 李萍萍. 番茄缺素叶片的图像特征提取和优化选择研究. 农业工程学报, 2003 (02): 133-136.
Mao H P, Xu G L, Li P P. Extracting and selecting features of leaf images for diagnosing nutrient deficiency diseases in tomatoes. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003 (02): 133-136.