

# 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, 基于图片识别技术对杏品种资源叶片形态特征进行快速评价。表型性状多样性分析结果表明, 28 个表型性状中 13 个质量性状和 8 个数量性状的变异系数均高于 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、叶片长度、叶片宽度 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大叶-楔形类、小叶-浅绿类、大叶-深绿类、小叶-深绿类、小叶-圆形类、大叶-心形类、大叶-截形类和混杂类群等 8 个类群, 第 VIII 类群被分为 6 个亚群。本研究增加叶尖长短、叶缘锯齿深浅、叶片最宽处位置 3 个叶片质量性状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)

**Abstract:** To explore the genetic diversity of apricot leaf morphology and facilitate the collection of apricot germplasm resources and variety identification, this study investigated 28 leaf phenotypic traits across 142 germplasm resources. Leaf morphological characteristics were rapidly evaluated using picture recognition technology. The results of phenotypic trait diversity analysis showed the coefficients of variation (*CV*) of the 13 qualitative and 8 quantitative traits were higher than 10%, indicating rich genetic diversity on leaf morphology in the collection. Correlation analysis revealed highly significant positive correlations among leaf area, leaf perimeter, leaf length, and leaf width; highly significant negative correlations between leaf base shape, leaf base angle, and leaf length/width; and significant negative correlations between leaf roundness and leaf tip length. Principal

收稿日期: 2024-06-16 网络出版日期: 2024-11-26

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240616001>

第一作者研究方向为果树种质资源与遗传育种, 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, E-mail: lbzhangqiuping2@163.com

**基金项目:** 辽宁省种质创新藏粮于技专项计划(2023JH1/10200005); 国家自然科学基金(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 Hidden Grain in Technology Special Program(2023JH1/10200005); National Natural Science Foundation of China(31972365); National Basic Platform for Horticultural Crop Germplasm Resources(NICGR2021-056); Chief Science and Technology Specialist of Plum and Apricot in Liaoning Province(2023JH5/10400156)

component analysis indicated that the first principal component, consisting of leaf area, leaf circumference, leaf length, leaf width, and petiole length, mainly reflected traits related to leaf blade size. The second principal component reflected traits related to leaf blade color, while the third and fourth principal components reflected traits related to leaf blade shape and blade sawtooth height, respectively. Cluster analysis broadly classified these samples into eight taxa, including large-leafed-cuneate, small-leafed-light green, large-leafed-dark green, small-leafed-dark green, small-leafed-rounded, large-leafed-cordate, large-leafed-truncate, and mixed taxa, and the VIII taxon was divided into six subgroups. Collectively, this study suggested three qualitative traits, leaf tip length, leaf margin sawtooth depth, and widest position of the leaf, to identify different apricot varieties, thus providing a reference for future evaluations of leaf morphology and variety recognition of apricot germplasm resources in China.

**Key words:** 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对能量物质进行最有效的利用,最大程度地减少环境带来的不利影响<sup>[1]</sup>,如叶长和叶周长小可增加抗病性<sup>[2]</sup>;叶片长宽比大,更有利于植物获得多的光能<sup>[3]</sup>;叶缘锯齿越深越能抵御高温,增强耐旱性<sup>[4]</sup>;叶柄越短越不利于光能利用<sup>[5]</sup>;叶尖细长程度与降雨量呈正相关<sup>[6]</sup>。因此叶片的多样性能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<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>对548份梨叶片形态多样性分析发现,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<sup>[10]</sup>将8个省份的71份欧李叶片形状分为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。万继锋等<sup>[11]</sup>发现在86份澳洲坚果种质资源叶片8个描述性状中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大多基于对质量性状的目测和对数值性状的测量。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<sup>[12]</sup>。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<sup>[13]</sup>。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<sup>[14]</sup>。王利兵<sup>[15]</sup>在对山杏(*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<sup>[16]</sup>,叶基形状以宽楔形为主<sup>[17]</sup>;而125份来自中国辽宁、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<sup>[18]</sup>,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<sup>[19]</sup>。仲维平等<sup>[20]</sup>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<sup>[21]</sup>。徐乐等<sup>[22]</sup>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品种。然而,上述研究仅对个别种或种群进行了研究,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得,且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<sup>[23]</sup>。但是,在杏种质资源评价过程中,发现杏叶片存在大量的形态变异,可能需要增加更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个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。

表1 142份杏种质资源的基本信息

Table 1 Basic information of 142 apricot accessions

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	31	优一	中国河北	61	龙王帽	中国辽宁
2	澳3	澳大利亚	32	新4号	中国河北	62	野银白	中国辽宁
3	澳5	澳大利亚	33	串枝红杏	中国河北	63	露仁杏	中国辽宁
4	骆驼黄	中国北京	34	棒槌杏	中国河北	64	丹麦银杏	中国辽宁
5	水晶杏	中国北京	35	沙金红	中国北京	65	沈阳早熟	中国辽宁
6	密陀罗	中国北京	36	红火梅子	中国北京	66	大山杏	中国辽宁
7	白玉白达	中国北京	37	长城1号	中国河北	67	张公园	中国辽宁
8	C112-6	中国北京	38	80A03	中国河北	68	歇马杏	中国辽宁
9	白玉扁	中国北京	39	80B05	中国河北	69	金太阳	美国
10	怀来香白	中国北京	40	80D05	中国河北	70	奈曼晚熟	中国内蒙古
11	黄尖嘴	中国北京	41	79C13	中国河北	71	甜仁黄口外	中国宁夏
12	杨继元	中国北京	42	木瓜杏	中国河北	72	新水杏	中国宁夏
13	山黄杏	中国北京	43	丰仁	中国河北	73	山彩	日本
14	朝鲜白杏	朝鲜	44	串铃扁	中国河北	74	斯里普斯	日本
15	惠阳白杏	朝鲜	45	早金蜜	中国河南	75	信州大实	日本
16	朝鲜杏	朝鲜	46	中白	中国黑龙江	76	早橙	中国山东
17	法6	法国	47	东宁2号	中国黑龙江	77	亮皮红杏	中国山东
18	Early orange	法国	48	龙垦5号	中国黑龙江	78	长个红	中国山东
19	青皮水杏	中国甘肃	49	早大黄	中国黑龙江	79	白杏	中国山东
20	大接杏	中国甘肃	50	房陵大杏	中国湖北	80	白玉杏	中国山东
21	大红中沙杏	中国贵州	51	大白杏	中国吉林	81	车头一号	中国山东
22	凯里大杏	中国贵州	52	Kecspshar	捷克	82	红玉杏	中国山东
23	桐梓杏	中国贵州	53	Harlayne	捷克	83	杨继元	中国山东
24	沙杏1号	中国贵州	54	Stark early orange	捷克	84	崂山关爷脸	中国山东
25	黄甜核	中国河北	55	Stella	捷克	85	平渡海棠红	中国山东
26	沙金红	中国河北	56	Helena de rousilon	捷克	86	荷包榛	中国山东
27	昌黎水白	中国河北	57	Vynoslivyj	捷克	87	白仁	中国山东
28	串枝白	中国河北	58	辽梅	中国辽宁	88	观音脸	中国山东
29	肉杏	中国河北	59	孤山杏梅	中国辽宁	89	烟黄1号	中国山东
30	石片黄	中国河北	60	一窝蜂	中国辽宁	90	白水	中国山西

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

142份杏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编号,带回实验室进行调查测量。

表1(续)

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
91	扁杏	中国山西	109	姑咱杏	中国四川	127	大胡安娜	中国新疆
92	沙金红	中国山西	110	蓟县香白	中国天津	128	晚熟红毛杏	中国新疆
93	草滩梅杏	中国陕西	111	Kabaasi	土耳其	129	埃里温	中国新疆
94	马串铃	中国陕西	112	Soganci	土耳其	130	胡安娜	中国新疆
95	金丝甜仁	中国陕西	113	Hacihaliloglu	土耳其	131	新疆野杏	中国新疆
96	白沙杏	中国陕西	114	库尔代克	中国新疆	132	卡拉玉吕克	中国新疆
97	菜籽黄	中国陕西	115	梨杏	中国新疆	133	赛买提	中国新疆
98	胭脂红	中国陕西	116	安佳娜	中国新疆	134	亚美尼亚1	亚美尼亚
99	迟梆子	中国陕西	117	克孜朗	中国新疆	135	亚美尼亚2	亚美尼亚
100	大接杏	中国陕西	118	毛拉肖	中国新疆	136	意大利1号	意大利
101	克拉拉	中国陕西	119	库车1号	中国新疆	137	Pisala	意大利
102	二转子	中国陕西	120	阿杨洪来克	中国新疆	138	晚甜杏	中国云南
103	草坯杏	中国陕西	121	佳娜丽	中国新疆	139	大海杏	中国云南
104	银香白	中国陕西	122	克孜克西米西	中国新疆	140	源东杏	中国浙江
105	金妈妈	中国陕西	123	冬杏	中国新疆	141	仙居杏	中国浙江
106	古渡杏	中国四川	124	克孜阿恰	中国新疆	142	张村早杏	中国浙江
107	大叶杏	中国四川	125	辣椒杏	中国新疆			
108	王世中杏	中国四川	126	乔儿胖	中国新疆			

## 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个质量性状和15个数量性状)调查和测量,取平均值作为实测值(数量性状)。质量性状: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个性状的分级标准参照《杏种质资源描述规范和数据标准》<sup>[23]</sup>,叶缘锯齿深浅、叶尖长短和叶片最宽处位置3个性状参照表2中图片记录性状特征,每个品种选择9次调查中频率最高的形态作为该资源的分级性状描述,以上13个质量性状的赋值标准参照表2。

表2 杏资源叶片表型质量性状及其分级标准

Table 2 Phenotypic quality traits and classification criteria of apricot leaves

性状 Traits	分级标准 Criteria for classification				
	1	2	3	4	5
叶片状态 LS	平展 	卷曲 	皱缩 		
叶片颜色 LC	浅绿色 	绿色 	深绿色 		
叶面光滑度 LSS	光滑 	粗糙 			

表 2 (续)

性状 Traits	分级标准 Criteria for classification				
	1	2	3	4	5
叶面茸毛 LSP	无 	有 			
叶背茸毛 LBP	无 	有 			
叶片形状 Ls	倒卵圆形 	卵圆形 	圆形 	阔圆形 	椭圆形 
叶尖形状 LAS	钝尖 	渐尖 	突尖 	长尾尖 	
叶尖长短 LTL	非常短 	短 	中 	长 	
叶缘锯齿形状 LMS	粗锯齿 	细锯齿 	钝锯齿 	复锯齿 	
叶缘锯齿深浅 LMSD	浅 	中 	深 		
叶基形状 LBS	楔形 	圆形 	截形 	心形 	
叶片最宽处位置 Lw	中上 	中 	中下 		
叶柄蜜腺 PN	无 	少 	中 	多 	

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; PN: Petiole nectary; The same as below

叶片面积、叶片周长、叶片长度、叶片宽度、叶片长/宽、叶柄长度、叶片锯齿平均高度、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13个数量性状用万深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2个数量性状用万深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<sup>[24]</sup>。采用Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )分析杏叶片表型性状的多样性程度<sup>[5]</sup>,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,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,计算平均值、变异系数、Shannon-Wiener多样性指数,用Origin pro 2021软件进行基本描述统计、相关性分析以及聚类分析,SPSS 25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份杏种质资源叶片13个质量性状频率分布见表3,结果表明13个质量性状频率分布各不相同,叶片形状的类型最多,有5种,频率分布范围为

2.11%~71.13%,其中卵圆形最多,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16.90%。叶尖形状、叶缘锯齿形状和叶基形状均为4种类型,叶尖形状中突尖最多,占56.34%,渐尖和长尾尖次之,钝尖最少,仅有2份资源,分别是Stark early orange和草滩杏梅。叶缘锯齿形状以钝锯齿和粗锯齿居多,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%。叶片状态多为平展,占76.76%;卷曲次之,为21.83%;皱缩类型占1.41%。叶面茸毛和叶背茸毛多为无毛,分别占86.62%和90.14%,有毛分别占13.38%和9.86%。

叶尖长短、叶缘锯齿深浅、叶片最宽处位置3个叶片性状特征存在较大差异,能够作为区分不同杏品种的叶片形态性状。由表3可知,以上3个性状的变异系数均高于20%,Shannon-Wiener多样性指数均大于等于0.79(高于平均值)。叶缘锯齿深浅多为浅,占53.52%;叶缘锯齿深浅中次之,占31.69%;叶缘锯齿深浅深占比最少,占14.79%,其变异系数最高,为45.43%。叶尖长短有4种分布类型,短和中较为普遍,共占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。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。

表3 叶片质量性状频率分布及多样性

Table 3 Frequency distribution and diversity indices of leaf quality traits

质量性状 Quality traits	各性状分值的分布频率(%) Distribution frequency of each trait score					变异系数 (%) CV	Shannon-Wiener 多样性指数 H'
	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

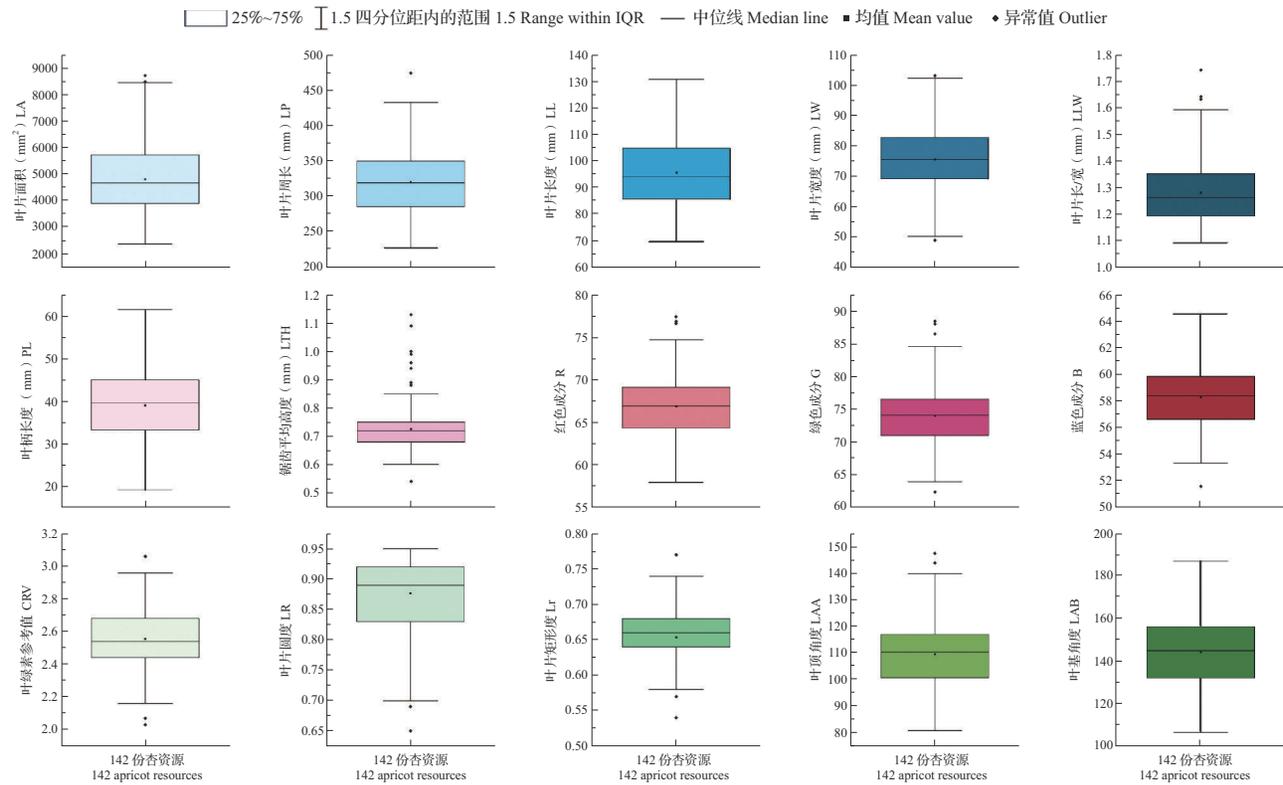
表3 (续)

质量性状 Quality traits	各性状分值的分布频率(%) Distribution frequency of each trait score					变异系数 (%) CV	Shannon-Wiener 多样性指数 H'
	1	2	3	4	5		
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

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的数量性状进行描述

性统计,如图1所示,杏叶片各性状的数据分布范围较大,这表明本研究的杏种质资源具有广泛的遗传变异。



LA: Leaf area; LP: Leaf perimeter; LL: Leaf length; LW: Leaf width; LLW: Leaf length/width; PL: Spetiole length; LTH: Average sawtooth height; R: Red component; G: Green component; B: Blue component; CRV: Chlorophyll reference; LR: Leaf roundness; Lr: Leaf rectangularity; LAA: Leaf apex angle; LAB: Leaf base angle; The same as below

图1 叶片数量性状分布的箱式图

Fig. 1 Boxplot of the distribution of leaf quantitative traits

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%~29.50%之间,呈现出较大的变异幅度(表4)。其中叶片面积的变异系数最大,为29.50%,变异幅度为2343.81~8690.97 mm<sup>2</sup>,其次是叶柄长度的变异系数,为22.01%,变异幅度在19.00~61.52 mm之间。叶片长/宽的变异系数小于叶片长度和叶片宽度,说明叶片长/宽较叶片长度或叶片宽度稳定。叶片矩形度和

叶片圆度的变异系数分别为5.49%和6.94%,是变异幅度较小的两个性状。除叶片长/宽、叶片圆度、叶片矩形度、红色成分、绿色成分、蓝色成分和叶绿素参考值7个性状的遗传变异系数小于10%外,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<sup>[24]</sup>,表明142份杏资源在叶片面积、叶片周长、叶片长度、叶片宽度、叶柄长度、锯齿平均高度、叶顶角度和叶基角度8个性状上具有丰富的遗传变异。

表4 叶片资源数量性状多样性分析

Table 4 Analysis of variation coefficient of leaf quantitative traits

性状 Traits	均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD	变异系数(%) CV	Shannon-Wiener 多样性指数 H'
叶片面积(mm <sup>2</sup> ) LA	4793.76	2343.81	8690.97	1414.37	29.50	2.04
叶片周长(mm) LP	318.68	226.61	472.75	46.17	14.49	2.03
叶片长度(mm) LL	95.32	69.44	130.47	13.64	14.31	2.04
叶片宽度(mm) LW	75.33	48.61	102.86	11.77	15.63	2.08
叶片长/宽(mm) LLW	1.28	1.09	1.74	0.12	9.56	1.95
叶柄长度(mm) PL	38.90	19.00	61.52	8.56	22.01	2.08
锯齿平均高度(mm) LTH	0.73	0.54	1.13	0.09	11.99	1.82
红色成分 R	66.88	57.93	77.40	3.55	5.31	2.04
绿色成分 G	73.94	62.30	88.43	4.81	6.51	2.05
蓝色成分 B	58.27	51.57	64.57	2.43	4.16	2.08
叶绿素参考值 CRV	2.56	2.03	3.06	0.19	7.32	2.11
叶片圆度 LAA	0.88	0.65	0.95	0.06	6.94	1.89
叶片矩形度 LAB	0.65	0.54	0.77	0.04	5.49	1.96
叶顶角度 LR	109.67	80.83	147.52	12.20	11.13	2.07
叶基角度 Lr	144.19	106.46	187.11	16.91	11.72	2.05
平均 Mean					11.73	2.01

15个数量性状的Shannon-Wiener多样性指数介于1.82~2.11,叶绿素参考值的Shannon-Wiener多样性指数最大;其次是叶柄长度、叶片宽度和蓝色成分,均为2.08;锯齿平均高度Shannon-Wiener多样性指数最小。叶顶角度和叶基角度的Shannon-Wiener多样性指数均为2.0以上,但是变异系数相对较小,分别为11.13%和11.72%,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。15个数量性状的Shannon-Wiener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Shannon-Wiener多样性指数的均值为2.01,高于质量性状的0.79,说明数量性状比质量性状的多样性更丰富。

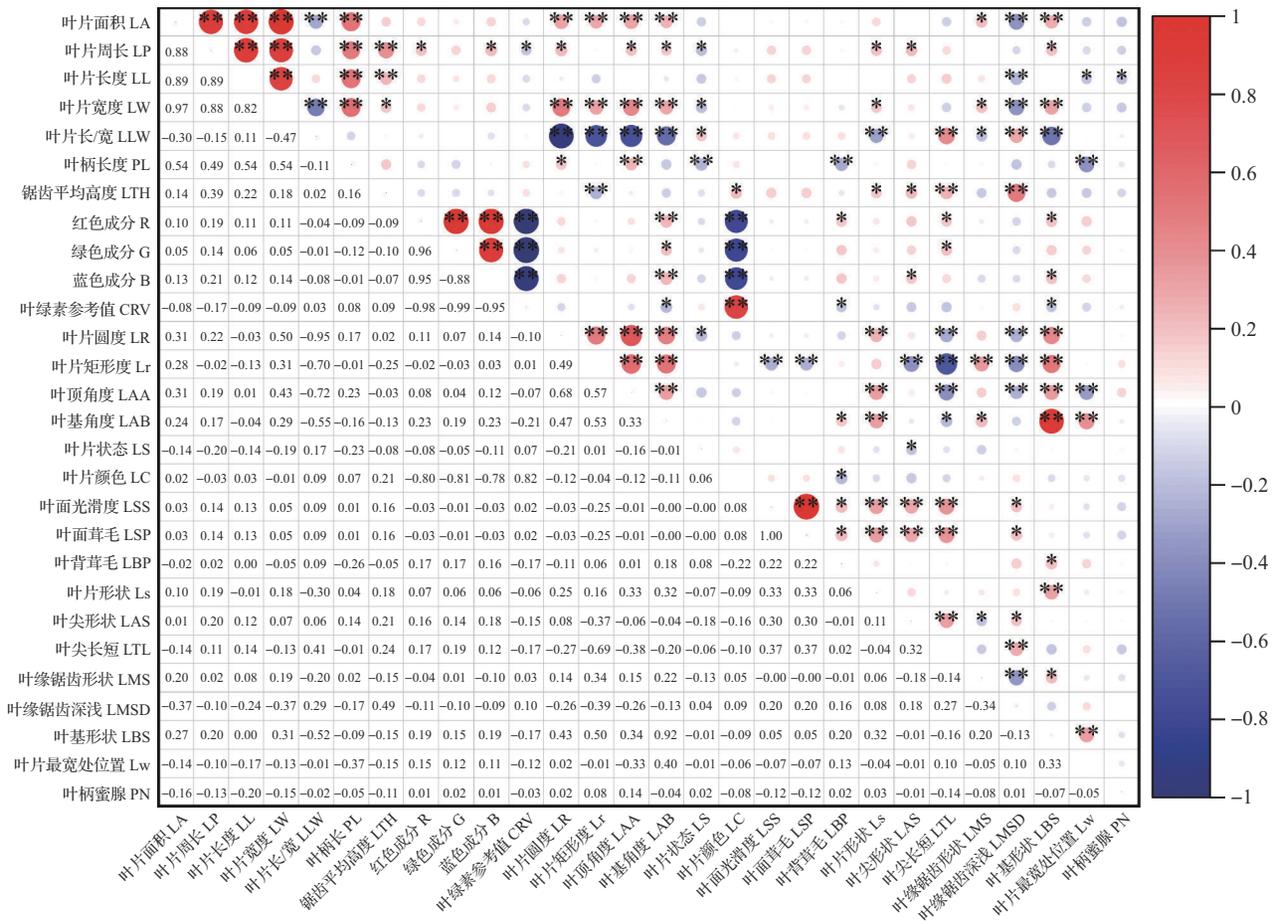
### 2.3 性状间相关性分析

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、叶片周长、叶片长度、叶片宽度和叶柄长5个性状间相互呈极显著正相关;叶片长/宽与叶片宽度、叶片圆度、叶片矩形度、叶顶角度、叶基角度均呈极显著负相关;叶片圆度、叶片矩形度、叶顶角度、叶基角度4个性状间相互呈极显著正相关,叶片圆度与叶顶角度相关性系数相对较高,为0.68,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个颜色成分均呈极显著负相关,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/宽呈极显著负相关。叶片矩形度与叶尖长短呈极显著负相关,相关系数为-0.69。

### 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86.540%(表5)。第1主成分特征值为4.995,贡献率为33.297%,叶面积(特征向量值为0.871)、叶片周长(0.797)、叶片长度(0.608)、叶片宽度(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3.750,贡献率为26.501%,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19.824%,在叶片长/宽(0.730)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6.922%,锯齿平均高度有较高的载荷,特征向量值为0.749。



\* 和\*\*分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平下显著相关  
 \* 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分析

Fig. 2 Correlation analysis of leaf phenotypic characters in germplasm resources of apricot

表5 杏叶片相关性状的成分分析

Table 5 Principal component analysis of leaf related traits of apricot

性状 Traits	主成分 Principal components			
	PC1	PC2	PC3	PC4
叶片面积 LA	0.871	0.439	0.293	-0.241
叶片周长 LP	0.797	0.325	0.493	0.026
叶片长度 LL	0.608	0.358	0.663	-0.200
叶片宽度 LW	0.871	0.425	0.178	-0.096
叶片长/宽 LLW	-0.594	-0.186	0.730	-0.173
叶柄长度 PL	0.417	0.406	0.322	0.137
锯齿平均高度 LTH	0.083	0.269	0.332	0.749
红色成分 R	0.512	-0.835	0.159	0.034
绿色成分 G	0.448	-0.855	0.157	0.039
蓝色成分 B	0.539	-0.781	0.145	0.054
叶绿素参考值 CRV	-0.494	0.848	-0.158	-0.048
叶片圆度 LR	0.622	0.132	-0.609	0.305
叶片矩形成度 Lr	0.424	0.155	-0.670	-0.315

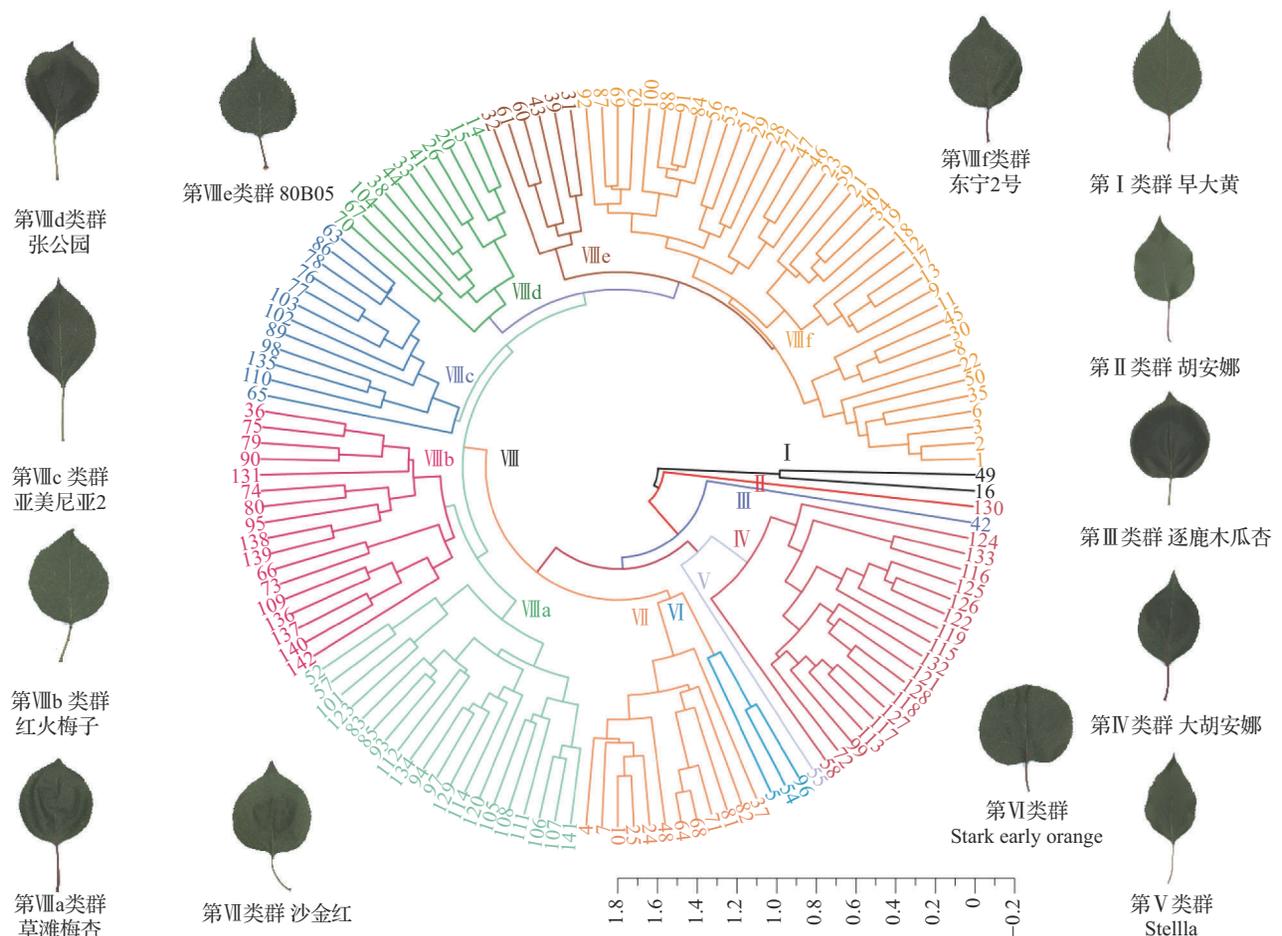
表5 (续)

性状 Traits	主成分 Principal components			
	PC1	PC2	PC3	PC4
叶顶角度 LAA	0.557	0.133	-0.531	0.244
叶基角度 LAB	0.504	-0.145	-0.479	-0.249
特征值 Eigenvalue	4.995	3.750	2.974	1.038
贡献率 (%) Variance contributionrate	33.297	26.501	19.824	6.922
累计贡献率 (%) Cumulative contributionrate	33.297	59.798	79.622	86.540

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进行聚类,结果如图3,142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、叶片长度和叶片长/宽较大,叶顶角度和叶片圆度较小,叶缘形状都为粗锯齿,叶尖较长,均为长尾尖。第II和第III类群均由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1.51~1.93,变异系数范围为2.89%~15.28%(表6),有18份种质,包含了14份中国新疆种质、1份中国陕西种质(迟椰子)和1份中国宁夏种质(新水杏)、1份中国辽宁种质(辽梅)和1份土耳其种质(Hacihaliloglu),共同特征为叶片面积、



编号同表1;图中的叶片为类群中的代表性品种叶片

The numbers are the same as those in table 1; The leaves in the figure are representative varieties leaves for group

图3 杏种质资源表型数量性状的UPGMA聚类

Fig. 3 UPGMA clustering based on phenotypic quantitative traits of apricot germplasm resources

叶片周长、叶片长度、叶片宽度较小,叶顶角度较小,叶片颜色为深绿或者绿色。第V类群仅有1份捷克种质,为Stella,其特点叶片小,颜色浅绿,叶片长/宽大,叶顶角度和叶基角度小,叶基形状为楔形。第VI类群包含了叶顶角度和叶基角度大、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和白沙杏)。第VII类群包括12

份中国种质,其中3份河北种质、2份山东种质、2份辽宁种质、1份黑龙江种质、3份北京种质和1份宁夏种质,Shannon-Wiener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、长度、宽度较大,叶片颜色均为绿色,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,占总体材料的73.24%。

表6 杏8个群体的叶片表型性状Shannon-Wiener多样性指数

Table 6 Shannon-Wiener diversity indices of leaf phenotypic traits of 8 apricot populations

性状 Traits	参数 parameters	IV (18)	VII (12)	VIIIa (20)	VIIIb (17)	VIIIc (12)	VIII d (11)	VIII e (6)	VIII f (38)
叶片面积 LA	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	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
叶片周长 LP	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	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
叶片长度 LL	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	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
叶片宽度 LW	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	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
叶片长/宽 LLW	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	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
叶柄长度 PL	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	15.28 1.85	19.67 1.86	23.81 1.92	21.08 1.84	13.55 1.36	13.74 1.52	13.74 1.52	17.56 1.88
锯齿平均高度值 LTH	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	10.20 1.83	7.51 1.63	6.80 1.80	12.41 1.53	13.89 1.63	7.32 1.54	8.73 1.24	6.90 2.01
红色成分 R	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	3.88 1.87	2.12 1.86	3.04 1.97	3.04 1.96	3.47 1.63	2.13 1.67	2.41 1.79	3.33 1.92
绿色成分 G	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	5.18 1.89	2.89 1.75	4.53 1.96	4.07 1.91	4.15 1.63	3.20 1.67	2.43 1.79	3.81 1.89
蓝色成分 B	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	2.89 1.89	1.37 1.75	2.72 1.91	2.88 1.96	2.72 1.75	2.37 1.72	1.81 1.33	2.80 1.96
叶绿素参考值 CRV	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	2.98 1.93	2.95 1.70	4.63 1.85	5.01 1.87	4.36 1.79	2.96 1.55	2.91 1.79	4.50 1.96
叶片圆度 LR	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	6.99 1.88	3.14 1.70	2.14 1.86	5.81 1.65	4.09 1.79	5.88 1.55	2.96 1.24	4.33 1.93
叶片矩形度 Lr	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	5.22 1.51	3.90 1.13	3.34 1.87	3.57 1.71	4.56 1.70	4.31 1.85	5.68 1.56	3.97 1.92
叶顶角度 LAA	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	10.26 1.69	3.17 1.82	8.11 1.76	8.19 1.87	7.61 1.79	14.31 1.64	5.66 1.56	8.50 2.00
叶基角度 LAB	变异系数(%) Shannon-Wiener多样性指数	9.18 1.75	6.35 1.79	9.13 1.88	11.04 1.84	11.69 1.86	7.27 1.77	8.03 1.56	8.64 2.08

括号内数据代表每个类群的资源份数

The bracketed data represents the resources number of each group

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2份捷克种质、2份土耳其种质、1份亚美尼亚种质、4份中国新疆种质、5份中国陕西种质、1份中国浙江种质、3份中国四川种质和2份山东种质,其叶片长/宽较小、叶片圆度大、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;其中包含中国四川、辽宁、河北、陕西、山西、新疆种质各1份,2份中国浙江种质、2份中国云南种质、2份中国山东种质、3份日本种质和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,包括3份中国陕西种质、5份中国山东种质、2份中国辽宁种质、1份中国天津种质和1份亚美尼亚种质,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份中国辽宁种质(龙王帽、一窝蜂)和4份中国河北种质(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%,叶缘锯齿较深,叶缘锯齿形状均为粗锯齿,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%,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,包括3份澳大利亚种质、2份捷克种质、2份法国种质、1份美国种质,其余均为中国种质(3份山东、2份山西、1份陕西、1份河南、7份河北、2份黑龙江、2份辽宁、6份北京、1份湖北、3份贵州、1份吉林、1份甘肃)。

## 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<sup>[25]</sup>。叶片大小在主成分分析中也为主要贡献因素,叶面积是表征叶片大小的重要指标<sup>[26]</sup>,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,将叶片周长、叶片长度、叶片宽度、叶片长/宽、叶柄长度、叶片圆度、叶片矩形度、叶顶角度和叶基角度作为自变量,叶片面积作为因变量进行逐步回归分析,得到8个类群(IV类群、VII类群、VIIIa亚群、VIIIb亚群、VIIIc亚群、VIIId亚群、VIIIe亚群和VIIIf亚群)杏叶片性状构成要素的最优逐步多元线性回归方程(表7)。拟合优度 $R^2$ 均大于0.8, $P$ 值均小于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,叶片长度(X2)、叶片宽度(X3)、叶片矩形度(X8)、叶片圆度(X6)是影响叶片面积(Y)的主要因子。

表7 杏8个群体的叶片表型性状多元线性回归方程模型

Table 7 Multivariable linear regression model of leaf phenotypic trait of 8 apricot populations

类群 Cluster	多元线性回归方程模型 Multivariable linear regression model	拟合优度 $R^2$	$P$ 值 $P$ value
IV	$Y = 52.90X_3 + 4087.31X_8 + 38.496X_2 - 5778.18$	0.996	0
VII	$Y = 160.70X_3 + 4976.03X_8 - 10180.24X_6 - 1952.56$	0.995	0
VIIIa	$Y = 72.40X_3 + 5221.08X_8 - 2548.42X_5 + 35.87X_2 - 5252.66$	0.996	0
VIIIb	$Y = 50.82X_3 + 8269.98X_8 + 55.20X_2 - 9757.57$	0.997	0
VIIIc	$Y = 63.24X_3 + 10563.92X_8 + 54.33X_2 - 12109.65$	0.999	0
VIIId	$Y = 135.39X_3 + 3852.834X_8 - 6367.391X_6 - 2361.92$	0.987	0
VIIIe	$Y = 96.36X_3 - 2999.27$	0.896	0.004
VIIIf	$Y = 210.42 + 109.80X_3 - 4282.84X_6$	0.822	0

X2: 叶片长度; X3: 叶片宽度; X6: 叶片圆度; X8: 叶片矩形度; Y: 叶片面积

X2: Leaf length; X3: Leaf width; X6: Leaf roundness; X8: 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<sup>[27-28]</sup>。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<sup>[29]</sup>。本研究通过对 142 份杏资源的 28 个叶片表型质量性状和数量性状进行遗传多样性分析, 其中 13 个质量性状和 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情况和分布状况, 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<sup>[30]</sup>。本研究中 15 个数量性状多样性指数均值为 2.01, 高于质量性状多样性指数均值 0.79, 说明杏叶片数量性状较质量性状多样性丰富, 这与尹明宇等<sup>[31]</sup>、董胜君等<sup>[32]</sup>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<sup>[33]</sup>。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<sup>[32]</sup>的 54 份野杏无性系表型研究一致, 而在东北杏<sup>[17]</sup>和西伯利亚杏<sup>[18]</sup>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%, 且叶尖长短与叶片矩形成度呈极显著负相关, 这表明叶尖长短一定程度上可以反映出叶片形状。叶缘锯齿深浅多为浅锯齿, 占 53.52%, 变异系数最大, 为 45.43%, 叶片锯齿深浅与叶片锯齿平均高度呈显著正相关, 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 86.540%, 能反映全部指标的绝大部分信息。锯齿平均高度在主成分分析中为第 4 主成分主导因子, 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, 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<sup>[34]</sup>。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, 并根据性状特点聚类, 将特征相似的种质资源聚在一起<sup>[29]</sup>。通过聚类分析得到 8 个类群, 其中第 I 类为大叶-楔形类, 包括叶尖较长、叶片长/宽较大的中国黑龙江种质和朝鲜种质。第 II 类为小叶-浅

绿类, 第 IV 类为小叶-深绿类, 第 VIIIa 亚群为小叶-圆形类, 这 3 类包含了大部分中国新疆种质, 均为小叶, 叶缘锯齿深浅多为中或深。第 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, 多为中国北京、河北和山东种质, 总体特征为叶片较大, 叶片最宽处位置多在中部或中下。第 VIIIe 亚群为中叶-深锯齿类, 包括 2 份中国辽宁种质和 4 份中国河北种质, 类群的锯齿平均高度多样性指数在 8 个类群中最小, 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<sup>[24]</sup>在仁用杏的分类研究中一致。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 个质量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。植物叶片即使在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<sup>[35]</sup>, 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<sup>[36]</sup>利用分析平台通过分析扫描形成稻穗图片, 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<sup>[37]</sup>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<sup>[38]</sup>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。本研究利用 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、叶片长/宽、叶柄长度、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 (6): 940-949  
Sun M, Tian K, Zhang Y, Wang X, Guan D X, Yue H T. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation. Plant Science Journal, 2017, 35 (6): 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, (2): 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, (2): 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 S. Leaves in the lowest and highest winds: Temperature, force and shape. The New Phytologist, 2009, 183 (1): 13-26
- [5] Bacilieri R, Ducousso 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, 2012, 44 (6): 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 (5): 991-1000
- 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 (5): 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 (4): 473-488
- Tang L, Li C L, Ge Y, Wang P, Zhao H, Wang M L, 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 (4): 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 (4): 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 (4): 183-190
- [11] 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 (6): 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 (6): 990-997
- [12] 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
- [13] 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: 105672
- [14] 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
- [15] 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 (3): 435-439
- Wang L B. Geographic distribution and botanical characters of 3 *Armeniaca* plant in China. Forest Research, 2010, 23 (3): 435-439
- [16] 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(2): 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 (2): 186-190
- [17] 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 (7): 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 (7): 585-600
- [18] 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 (6): 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 (6): 686-696
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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, Wuyun 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
- [22] 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 (1): 120-126
- Xu L, Feng J R, 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 (1): 120-126
- [23] 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. Descriptors and data standard for apricot (*Armeniaca* Mill.). 1st edn. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 9-26
- [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, 2023, 40 (2): 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 (2): 193-205
- [25] 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
- [26] 王雪艳. 坡向及坡度对山杏叶片功能性状的影响—以甘肃会宁南部为例. 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
- [27] Egerer M, Lin B B, Kendal D. Towards better species identification processes between scientists and community participants. Science of the Total Environment, 2019, 694 (1): 133738
- [28] 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 (4): 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 (4): 432-440
- [29] 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, 48(5): 90-96
- 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, 48(5): 90-96
- [30] 洪伟, 吴承祯. Shannon-Wiener 指数的改进. 热带亚热带植物学报, 1999(2): 120-124
- Hong W, Wu C Z. Modification of Shannon-Wiener index. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1999 (2): 120-124
- [31] 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
- [32] 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. Phenotypic traits diversity analysis and comprehensive evaluation of *Armeniaca vulgaris* var. *ansu* clones. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21 (5): 1156-1166
- [33] 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, 9 (2): 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, 9(2): 173-179
- [34] 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
- [35] 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
- [36] Ikeda M, Hirose Y, Takashi T, Shibata Y, Yamamura T, Komura T, Doi K, Ashikari M, Matsuoka M, Kitano H. Analysis of rice panicle traits and detection of QTLs using an image analyzing method. Breeding Science, 2010, 60 (1): 55-64
- [37] 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 (3): 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 (3): 37-44
- [38] 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 (2): 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 (2): 133-136