

燕山板栗 15 个花序相关表型性状遗传多样性研究

杨振立¹,王广鹏²,张树航²,郭 燕²,张馨方²,李 颖²

(1. 河北省农林科学院,河北 石家庄 050000;2. 河北省农林科学院 昌黎果树研究所,河北 昌黎 066600)

摘要:对燕山板栗分布地区的 11 个县/区(群体)的 127 份资源花序相关表型性状进行了遗传变异研究,为中国板栗资源描述的规范化和标准化,板栗资源的保存、核心种质的构建和农艺学性状基因定位提供数据基础和理论依据。对相关的 15 个性状系统调查后进行了遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析。结果表明:燕山板栗资源花序相关性状具有丰富的表型多样性,平均变异系数和平均多样性指数分别为 27.55% 和 1.99,其中两性花序数/总花序数的变异系数最大为 64.80,雄花序数/总花序数变异系数最小为 7.52,雄蕊长度的多样性指数最高为 2.08,两性花序数/总花序数多样性指数最低为 1.89;15 个板栗花序表型性状中有 9 个性状在群体间的差异均达到显著以上水平;相关性分析表明:花序形态表型性状内部间的相关性较明显,花序数量表型性状内部间的相关性较明显,但花序形态和花序数量表型性状间相关性略低。主成分分析表明:前 5 个主成分反映了总信息量的 85.35%,两性花序数/果枝、花序长粗比、花序粗度、花序长度、两性花序数/总花序数、雄花序数/总花序数、雌花数/果枝、雄蕊长、轴序粗度比 9 个性状是造成燕山板栗花序性状变异的主要因素,以第一主成分和第二主成分为标准,将 127 份资源分为 5 类群,并筛选出 3 份高雌花量的板栗资源;聚类分析将 127 份资源分为 8 个类群,花序相关表型性状变异相同的材料大多聚在一起,聚类结果和主成分划分群基本一致。

关键词:燕山板栗;种质资源;花序;表型性状;遗传多样性

中图分类号:S664.2 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)增刊-0093-09

doi:10.7668/hbxb.20191320



Genetic Diversity Analysis of 15 Phenotypic Traits Related to Catkin in Yanshan Chestnut

YANG Zhenli¹, WANG Guangpeng², ZHANG Shuhang², GUO Yan², ZHANG Xinfang², LI Ying²

(1. Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050000, China;

2. Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract: Genetic variations analysis of 127 Yanshan chestnut germplasms from 11 populations 15 phenotypic traits related catkin of Yanshan chestnut were designed with genetic diversity analysis, correlation analysis and principal component analysis, in order to provide valuable basic data and theory foundation for normalization, standardization, preservation and construction of chestnut core collections, provides the basis for the gene localization of agronomic traits. The results showed that: phenotypic traits related catkin of Yanshan chestnut were rich in phenotypic diversity, with mean variation coefficient (CV) of 27.55% and Shannon's diversity index (H') of 1.99. The mean variation coefficient (CV = 64.80) of bisexual catkin numbers/catkin numbers was the largest, the mean variation coefficient (CV = 7.52) of male catkin numbers/catkin numbers was the smallest. The Shannon's diversity index ($H' = 2.08$) of stamen length was the highest, the Shannon's diversity index ($H' = 1.89$) of bisexual catkin numbers/catkin numbers were the lowest. 9 phenotypic traits related to catkin were highly significant which indicated that a wide range of variation existed in these two levels. Correlation analysis showed that: More flower traits were highly significantly and extreme significantly related. Principal component analysis showed that floral traits in the first 5 principal components reflect the total information content 85.35%, bisexual catkin numbers/bearing shoot,

收稿日期:2020-02-13

基金项目:河北省农林科学院创新工程项目(2019-3-4-2);河北省科技计划项目(16226312D);河北省农林科学院创新团队项目(F20E06001)

作者简介:杨振立(1972-),男,河北石家庄人,副研究员,硕士,主要从事农业科研管理研究。

通讯作者:李 颖(1985-),女,河北秦皇岛人,副研究员,硕士,主要从事果树育种研究。

catkin length/catkin width, catkin width, catkin length, bisexual catkin numbers/catkin numbers, male catkin numbers/catkin numbers, female flower numbers/bearing shoot, stamen length, floral axis length/floral axis width, 9 characters was the main factor causing variation in traits of Yanshan chestnut. The 127 materials were divided into 8 kinds of cluster analysis. Flower character same source with similar material part can get together, the results were similar to principal component analysis.

Key words: Yanshan chestnut; Germplasm; Catkin; Phenotypic traits; Genetic diversity

燕山地域是我国板栗传统主产区,该地区出产的板栗统称为燕山板栗,独特的生境条件,使得燕山板栗与我国南方毛栗、山东菜栗、四川油栗等相比,具有口感甜糯,营养美味,涩皮更易剥离,耐储性强,易于运输,炒食风味更佳,更适合处理加工等优势,在国际市场上享有极高的声誉。燕山山脉的大部分地区由花岗岩和片麻岩组成,其风化形成的土壤呈微酸性,微酸性的土壤环境是燕山板栗名扬国内外的关键所在^[1]。燕山地域独特的生境条件和长久的栽培历史使得燕山板栗拥有丰富独特的表型性状,为板栗遗传特点的研究和种质的改良提供了材料和基因来源。

在植物漫长的进化过程中,遗传因素和环境因素共同影响其表型特征,所以表型特征也是物种适应性进化的外在表现形式^[2-3],表型性状是结构基因的功能表现,是功能基因的产物,是长期自然和人工选择的结果,易受时间、环境因素影响,但表型性状是种质资源收集、保存、鉴定和利用的基础,其观察结果是直观的,利用表型性状进行多样性分析是最直接的^[4]。对种质的性状表型值进行科学统计分析,不但能揭示植物与其生境间的关系,而且在物种保护、资源评价与鉴定及人工栽培等方面均具有重要意义^[5]。目前,板栗表型多样性领域的研究,涉及坚果、叶片、品质、枝条等性状^[6-13],结果表明,上述表型性状在群体内外均存在丰富的变异。对燕山板栗遗传多样性的研究表明,燕山板栗具有丰富的遗传多样性,且同外地板栗存在明显差异^[14]。板栗是雌雄异花同株果树,雌花少,雄花多,花序长短、数量会依据品种或枝条类型的不同而不同。雌花量少,雌雄花比例相差过大是制约板栗产量的关键因子,雄花量极大,消耗树木营养的20%~40%^[15]。所以雌花数量和雌雄比例,对板栗的产量有直接影响。针对板栗花序相关表型多样性的研究,将为今后板栗产量提高,开发利用多元化,提供参考和依据。

本研究以燕山地区的127份板栗资源为材料,对其花序相关表型性状进行了表型多样性、遗传变异、相关性和聚类分析,为解析燕山地区板栗花序多样性水平,揭示燕山不同群体板栗间的亲缘关系,为

燕山板栗核心种质的保护和更加合理的利用板栗资源打下基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

以源自11个燕山板栗主产区县(群体)的127份实生良种、地方品种和古树资源为试验材料(表1)。试材保存于河北省昌黎果树研究所板栗种质资源圃,东经119°15',北纬39°72',属温带半湿润大陆性气候区,年平均气温11℃,无霜期186d,年平均降水量638mm。所有供试板栗种质均是在2004年统一嫁接于3a生燕山早丰实生砧木上,每份种质嫁接5株,株行距4m×4m,常年树体整形修剪均采用轮替更新修剪法^[16],每平方米留枝量保持在6~9条,其他管理措施一致。2017-2019年,连续3a选取每份种质生长状况基本一致的健康树体3株,分别测量各单株花序相关表型性状。

1.2 花相关表型测定

花序长度、花序粗度和花序小花簇密度按照刘庆忠等^[17]方法测定。

花轴粗度:在雄花盛花期,随机选取树冠外围1年生结果新枝中部的花序20条,采用游标卡尺测量花序中间花轴的直径,求其平均值。单位为mm,精确到0.1mm;雄蕊长度=(花序粗度-花轴粗度)/2。单位为mm,精确到0.1mm;花序长粗比=(花序长度/花序粗度)×100%;花轴长粗比:花轴长度同花序长度。花轴长粗比=(花序长度/花轴粗度)×100%;轴序粗度比=(花轴粗度/花序粗度)×100%。

每果枝雄花序个数:在雄花盛花期,随机选取树冠外围1年生结果新枝20条,调查其上雄花序数量,求其平均值,单位为个,精确到0.1个。

每果枝两性花序个数:在雄花盛花期,随机选取树冠外围1年生结果新枝20条,调查其上两性花序数量,求其平均值,单位为个,精确到0.1个。

每果枝雌花个数:在雄花盛花期,随机选取树冠外围1年生结果新枝20条,调查其上雌花数量,求其平均值,单位为个,精确到0.1个。

每果枝总花序个数:在雄花盛花期,随机选取树

冠外围 1 年生结果新枝 20 条, 调查其上花序数量, 求其平均值, 单位为个, 精确到 0.1 个。

每两性花序上雌花个数: 在雄花盛花期, 随机选取树冠外围 1 年生结果新枝 20 条, 调查其上两性花序数量及两性花序上着生雌花个数。每两性花序上雌花数 = 雌花总数/两性花序总数, 单位为个, 精确到 0.1 个; 雄花序比例 = (每果枝雄花序个数/每果枝总花序个数) × 100%; 两性花序比例 = (每果枝两性花序个数/每果枝总花序个数) × 100%。

1.3 数据分析

对性状均进行赋值标准化处理以便于统计分析, Shannon's 多样性指数 (H') 的计算公式 $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 参考 Shannon 等方法^[18-21]。使用 Excel 软件统计试验数据并计算各性状的均值、标差和变异系数等。使用 IBM SPSS statistics 20 软件对表型数据进行相关性分析和主成分分析。使用 MEGA 7.0 软件进行聚类分析。

表 1 127 份燕山板栗资源编号、来源及名称

Tab. 1 Name, source and number of 127 resources in Yanshan chestnut

序号 Number	来源 Source	资源名称 Name									
1	昌黎	燕宝	33	青龙	去暑红-2	65	迁西	杨家峪 5 号	97	兴隆	迁李 1 号
2	昌黎	早 2	34	青龙	去暑红-1	66	迁西	杨家峪 13	98	遵化	遵化短刺
3	昌黎	早 3	35	青龙	青龙白	67	迁西	迁西牛 1	99	遵化	遵玉
4	昌黎	84--2	36	宽城	宽城榆树沟	68	迁西	杨家峪 1 号	100	遵化	小官 10
5	昌黎	H7-5	37	宽城	大桑园 1 号	69	迁西	早丰	101	遵化	大官 10
6	昌黎	园门实生	38	宽城	东冰窖 1 号	70	迁西	迁西署红	102	遵化	北峪 2 号
7	昌黎	何家坟 5	39	宽城	屈家早	71	迁西	周家峪 6 号	103	遵化	东陵明珠
8	昌黎	28-11	40	宽城	艾峪口	72	迁西	长南庄 2 号	104	遵化	达 1-3
9	昌黎	早 1	41	宽城	熊 84	73	迁西	杨家峪 1-6	105	遵化	塔 14
10	昌黎	X19-94	42	宽城	塌山 1 号	74	迁西	干 2-2	106	遵化	东沟峪 39
11	昌黎	84--3	43	宽城	大板红	75	迁西	大 3113	107	遵化	塔 54
12	昌黎	X12-55	44	宽城	岔 3	76	迁西	贾庄 1 号	108	遵化	西沟 7 号
13	昌黎	M17-21	45	宽城	关堂 64	77	迁西	燕栗 2 号	109	遵化	燕晶
14	昌黎	M18-16	46	宽城	淳 1	78	兴隆	桥 7	110	迁安	桑 6
15	昌黎	1209	47	宽城	燕金	79	兴隆	兴隆短刺	111	迁安	迁早 1
16	昌黎	冀栗 1 号	48	宽城	宽城下六	80	兴隆	陈中熟	112	迁安	桑 1
17	昌黎	D5-71	49	宽城	宽城大屯	81	兴隆	xl-001	113	平泉	金杖子 1 号
18	昌黎	H8-1	50	宽城	崔 1	82	兴隆	xl-002	114	平泉	金杖子 2 号
19	昌黎	波叶树	51	迁西	早 3113	83	兴隆	燕兴	115	平泉	平泉葛
20	抚宁	燕明	52	迁西	迁西壮栗	84	兴隆	沙坡峪 3 号	116	怀柔	京暑红
21	抚宁	替码燕明	53	迁西	迁西早红	85	兴隆	南天门乡	117	怀柔	怀九
22	抚宁	变异燕明	54	迁西	石场子 1-1	86	兴隆	沙坡峪 1 号	118	怀柔	BJHH1
23	抚宁	抚宁薄皮	55	迁西	替码珍珠	87	兴隆	龙湾 1 号	119	怀柔	北京 8 号
24	青龙	燕秋	56	迁西	燕奎	88	兴隆	龙湾 5 号	120	怀柔	黑 8
25	青龙	燕丽	57	迁西	西寨 2 号	89	兴隆	赵杖子 1-1	121	怀柔	燕丰
26	青龙	燕紫	58	迁西	燕山短枝	90	兴隆	大录洞	122	怀柔	怀丰
27	青龙	白露	59	迁西	燕光	91	兴隆	兴陆 1 号	123	怀柔	良乡 1 号
28	青龙	大青裂	60	迁西	侯庄 2 号	92	兴隆	牛圈子	124	怀柔	BJHW
29	青龙	去暑红	61	迁西	东荒峪早	93	兴隆	兴隆早栗子	125	昌平	燕昌
30	青龙	凤 2	62	迁西	青刘 1 号	94	兴隆	大兰口	126	昌平	燕红
31	青龙	下庄 4 号	63	迁西	西寨 1 号	95	兴隆	昌徐 1 号	127	昌平	燕平
32	青龙	上庄 52 号	64	迁西	石场子 2-2	96	兴隆	昌左 1 号			

2 结果与分析

2.1 板栗种质资源多样性分析

参试板栗材料的 15 个花序相关表型性状测量值进行分析。由表 2 可知, 127 份燕山板栗花序相关的 15 个表型性状呈现出较大的变异和丰富的多样性, 其中雄花序数/总花序数的变异系数最小为 7.52%, 极差为 0.40, 是所有性状中唯一变异系数低于 10%, 极差低于

均值 50% 的性状, 性状整体离散程度低, 遗传稳定度高, 其余 14 个性状的变异系数均高于 10%, 变异较大。进一步研究发现花序形态表型性状中, 变异系数为 13.58%~25.81%, 范围较小, 花序数量表型中变异系数为 7.52%~64.80%, 范围较大。15 个性状多样性指数中花序长度的指数最大为 2.08, 两性花序数/总花序数的指数最小为 1.89。均值为 1.99。花序形态表型性状中多样性指数为 1.96~2.08, 均值为

2.03;花序数量表型中多样性指数范围是 1.89 ~ 2.03,均值1.95。由此可知花序形态表型性状离散

程度低变异较小,花序数量表型性状离散程度较高,变异范围更大,两类性状的多样性程度都很高。

表 2 燕山板栗花相关性状基本参数及多样性

Tab.2 Basic parameter value and diversity of traits related flower for Yanshan chestnut

表型性状 Morphological character	样本数 Sample size	均值 ± 标准差 Mean ± s	中位数 Median	众数 Mode	极差 Rang	变异系数% CV	多样性指数 H'
花序长度/cm Catkin length, Cl	211	18.46 ± 2.51	18.15	16.63	13.17	13.58	2.05
花序粗度/mm Catkin width, Cw	211	11.38 ± 1.71	11.31	12.44	9.52	15.03	2.05
花序小花簇密度 Density of catkin, Dc	211	16.47 ± 2.45	16.29	17.30	20.18	14.86	1.98
花轴粗度/mm Floral axis width, Faw	211	3.30 ± 0.75	3.34	3.55	3.19	22.81	2.06
雄蕊长度/mm Stamen length, Sl	211	4.06 ± 0.76	4.06	3.98	4.16	18.78	2.08
花序长粗比 Catkin length/Catkin width, Cl/Cw	211	16.78 ± 3.20	16.19	15.50	16.05	19.08	1.98
花轴长粗比 Floral axis length/Floral axis width, Fal/Faw	211	60.39 ± 15.59	56.56	52.09	76.52	25.81	1.96
轴序粗度比 Floral axis width/Catkin width, Faw/Cw	211	0.29 ± 0.06	0.29	0.30	0.36	21.71	2.04
花序形态表型均值 Catkin types of phenotype mean						18.96	2.03
雄花序个数/果枝/个 Male catkin numbers/Bearing shoot, Mcn/Bs	211	7.13 ± 2.03	6.82	7.00	10.50	28.48	2.03
两性花序个数/果枝/个 Bisexual catkin numbers/Bearing shoot, Bcn/Bs	211	0.90 ± 0.58	0.88	1.00	3.51	63.89	1.91
雌花个数/果枝/个 Female flower numbers/Bearing shoot, Ffn/Bs	211	1.23 ± 0.69	1.16	0.81	5.07	56.38	1.93
总花序个数/果枝/个 Catkin numbers/Bearing shoot, Cn/ Bs	211	8.03 ± 2.22	7.84	6.50	11.75	27.64	2.00
雌花个数/混合花序/个 Female flower numbers/Bisexual catkin, Ffn/Bc	211	1.17 ± 0.15	1.14	1.00	0.76	12.87	1.97
雄花序个数/总花序个数 Male catkin numbers/Catkin numbers, Mcn/Cn	211	0.90 ± 0.07	0.91	0.92	0.40	7.52	1.94
两性花序个数/总花序个数 Bisexual catkin numbers/Catkin numbers, Bcn/Cn	211	0.10 ± 0.07	0.09	0.08	0.40	64.80	1.89
花序数量表型均值 Catkin quantitative phenotype Mean						37.37	1.95
均值 Mean						27.55	1.99

2.2 板栗不同群体间的变异特征

由表 3-4 可知,板栗花相关的 15 个表型性状中,6 个性状群体间无显著差异,其余的 9 个性状差异均达到了显著水平。板栗同一表型性状在不同群体间变化明显,从花序形态上看北部地区平泉的花序细小,轴粗蕊短与其余群体相比,花序形态较独特;从花序量的性状上看,怀柔的两性花序量最高,平泉的数量最低。兴隆和平泉雄花量高,怀柔和抚宁雄花量低。怀柔的雌花数明显高于其他群体。由此可以看出平泉和怀柔的花相关性状与其他群体差异较大。

2.3 板栗花序相关表型性状相关性分析

由表 5 可知,相关性分析表明,花序形态性状内部间的相关性较明显,花序数量性状内部间的相关性较明显,花序形态和花序数量间相关性略低。花序长度与花轴粗度、花序粗度、花轴长粗比极显著正相关,花序粗度与花轴粗度、雄蕊长度极显著正相关,花序小花簇密度和花序长粗比、雌花数/两性花序、两性花序比例显著负相关,花序长度与两性花序数/果枝和雌花数/果枝显著正相关,花轴粗度与雌花数/果枝极显著正相关,花轴粗度/花序粗度与雌花数/果枝显著正相关,雌花数/两性花序与雌花数/果枝极显著正相关。雌花数/果枝与花序数量中除雄花序数/果枝外的其他性状全部极显著相关,与总花序个数/果枝、两性花序数/果枝和两性花序数占

比成极显著正相关,与雄花序占比极显著负相关。综上所述,花序越长,花轴和花序越粗,轴序比越大;花序越细长,两性花序的雌花越多,花序小花簇越稀疏;两性花序上的雌花数越多,则果枝中的两性花序数越大;果枝上的总雌花数越大,花序、两性花序的数量都随之增大,但两性花序比例升高,雄花序比例降低。

2.4 板栗花序相关表型性状主成分分析

由表 6 可知:花序相关表型性状中前 5 个主成分的特征值都大于 1,说明这 5 个主成分在板栗种质资源花性状变异性构成中的作用较大,前 5 个主成分反映了总信息量的 85.35%,其中第 1 主成分占 25.323%,对它作用最大的性状包括两性花序个数/果枝(0.913)、两性花序个数占比(0.877)、雄花序个数占比(-0.876)、雌花个数/果枝(0.863),由此可知第一主成分主要是和雌花数量或两性花序数量相关的性状;第 2 主成分占 19.638%,对它作用最大的性状依次为花序长粗比(0.905)、花序粗度(-0.897)、雄蕊长度(0.834)这说明第二主成分主要是和花序形态相关的性状;第 3 主成分占 17.650%,对它作用最大的性状轴序粗度比(0.802);第 4 主成分占 13.222%;第五主成分占 9.514%,对它作用最大的性状花序长度(0.881)。两性花序个数/果枝(0.913)、花序长粗比(0.905)、花序粗度(-0.897)、花序长度(0.881)、两性花序个数占比(0.877)、雄花序数占比

(-0.876)、雌花数/果枝(0.863)、雄蕊长(0.834)、轴序粗度比(0.802),这9个性状的相关系数都在0.8以上是造成板栗花性状变异的主要因素。

以第一主成分为横坐标(雌花量),第二主成分为纵坐标(花序形态)做成散点图(图1),将127份板栗资源划分为5大类群。类群I有4份资源,来源兴隆、昌黎、迁西和遵化,花序细长,雌花量较少;类群II包括了大部分的燕山板栗资源,性状表现比较集中;类群III共有2份资源,来源迁西,花序短粗,雌花量较低;类群VI包含2份资源,来源迁西、兴隆,花序邢台适中,雌花量高;类群V共只有1份资源,来源怀柔,雌花量远高于其他资源。

2.5 板栗花序相关表型性状聚类分析

由图2可知,通过聚类分析,在遗传距离为18处将127份板栗资源聚为8大类群。第1类群包含1份资源,来源为宽城,特征为花序形态适中,花簇紧密,雄蕊长度适中,总花序量中等,混合花序占比较低,雌花数量少等;第2类群包含2份资源,来源

怀柔,特征为花序形态适中,花簇较紧密,花轴较粗,雄蕊较短,雄花序量较大,混合花序数量较大;第3类群包含1份资源,来源迁西,特征为花轴粗壮,雄蕊较长,花序量较少,混合花序占比较低;第4类群包含6份资源,来源为昌黎、宽城、迁西、兴隆、怀柔地区,特征以花序形态适中、花簇密度中等,总花序量中等,混合花序量高,混合花序占比高的资源为主;第5类群包含1份资源,来源昌黎,特征为花序细长,花轴纤细,花簇稀疏,雄蕊长度适中,总花序量大,混合花序和雄花序量都比较高,雌花数高;第6大类群包含106份资源。来源涵盖了11个群体,花序形态适中,花簇密度中等,整体形态表型中庸,混合花序占比较低;第7大类群包含9份资源,来源昌黎、宽城、迁西、兴隆、遵化、平泉,特征为花序、花轴纤细,花簇密度中等,总花序量大,混合花序占比较低,雌花数少;第8类群包含1份资源,来源怀柔,特征为花序形态适中,花轴粗度中等,花簇密度中等,混合花序占比高,雌花量多。

表3 不同群体间燕山板栗花序形态比较

Tab.3 Comparison of catkin types for Yanshan chestnut in different populations

群体 Population	花序长度/cm Cl	花轴粗度/mm Faw	花序粗度/mm Cw	花序小花簇密度 /(个/cm) Dc	雄蕊长度/mm Sl	花序长粗比 Cl/Cw	花轴长粗比 Fal/Faw	序轴粗度比 Faw/Cw
昌黎 Changli	19.42 ± 3.27b	3.29 ± 0.80a	11.47 ± 1.69b	16.88 ± 2.25a	4.09 ± 0.77b	17.52 ± 3.30a	62.22 ± 13.99a	0.29 ± 0.07a
抚宁 Funing	17.31 ± 2.33ab	3.23 ± 0.76a	11.44 ± 0.87b	16.17 ± 1.83a	4.11 ± 0.36b	15.31 ± 2.07a	57.58 ± 16.53a	0.28 ± 0.05a
青龙 Qinglong	18.27 ± 1.90ab	3.49 ± 0.67a	11.09 ± 1.54b	15.26 ± 1.78a	3.80 ± 0.72ab	17.02 ± 3.19a	55.64 ± 13.89a	0.32 ± 0.06a
宽城 Kuancheng	18.40 ± 2.65ab	3.09 ± 0.47a	11.78 ± 1.36b	16.89 ± 4.46a	4.35 ± 0.57b	16.01 ± 3.08a	62.99 ± 11.73a	0.26 ± 0.03a
迁西 Qianxi	18.50 ± 2.60ab	3.33 ± 0.76a	11.53 ± 1.87b	16.29 ± 2.24a	4.10 ± 0.81b	16.70 ± 3.58a	59.57 ± 15.67a	0.29 ± 0.06a
兴隆 Xinglong	18.05 ± 2.30ab	13.19 ± 0.91a	11.26 ± 2.28b	16.60 ± 2.06a	4.04 ± 0.98b	16.78 ± 3.48a	63.46 ± 20.17a	0.29 ± 0.08a
遵化 Zunhua	18.78 ± 2.22ab	3.18 ± 0.72a	10.96 ± 1.48b	15.72 ± 1.76a	3.96 ± 0.59ab	17.71 ± 3.28a	63.90 ± 17.55a	0.29 ± 0.05a
迁安 Qianan	18.97 ± 3.69ab	3.20 ± 0.94a	12.77 ± 1.81b	16.96 ± 2.29a	4.79 ± 0.61b	15.10 ± 0.57a	62.96 ± 14.47a	0.25 ± 0.05a
平泉 Pingquan	15.82 ± 1.83a	3.64 ± 1.14a	8.99 ± 1.13a	17.32 ± 1.78a	3.07 ± 0.81a	17.87 ± 4.32a	52.76 ± 21.63a	0.40 ± 0.09b
怀柔 Huairou	18.68 ± 1.73ab	3.67 ± 0.73a	11.68 ± 0.96b	16.80 ± 1.65a	4.01 ± 0.61b	16.27 ± 2.40a	54.43 ± 12.54a	0.32 ± 0.07a
昌平 Changping	17.50 ± 1.41ab	3.50 ± 0.93a	11.22 ± 1.11b	18.44 ± 2.13a	3.86 ± 0.72ab	15.87 ± 2.79a	54.42 ± 18.24a	0.31 ± 0.09a

注:不同小写字母分别表示不同群体间5%水平差异显著。表4同。

Note: The lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level probability. The same as Tab. 4.

表4 不同群体间燕山板栗花序数量比较

Tab.4 Comparison of catkin numbers for Yanshan chestnut in different populations

群体 Population	雄花序个数/果枝 /个 Mcn/Bs	两性花序个数/果枝 /个 Bcn/Bs	雌花个数/果枝 /个 Ffn/Bs	总花序个数/果枝 /个 Cn/Bs	雌花个数/两性花序 /个 Ffn/Bc	雄花序比例 Mcn/Cn	两性花序比例 Bcn/Cn
昌黎 Changli	7.24 ± 1.87a	0.85 ± 0.59abcd	1.12 ± 0.62a	8.10 ± 2.15a	1.24 ± 0.17b	0.91 ± 0.07ab	0.09 ± 0.07ab
抚宁 Funing	7.78 ± 2.11a	1.39 ± 0.36cd	1.64 ± 0.42a	9.16 ± 2.46a	1.16 ± 0.12ab	0.84 ± 0.02a	0.16 ± 0.02b
青龙 Qinglong	7.05 ± 1.17a	0.97 ± 0.33bed	1.31 ± 0.40a	6.77 ± 1.20a	1.26 ± 0.15b	0.89 ± 0.04ab	0.11 ± 0.04ab
宽城 Kuancheng	6.35 ± 1.99a	0.77 ± 0.37abc	1.03 ± 0.44a	7.13 ± 2.02a	1.14 ± 0.11ab	0.89 ± 0.08ab	0.11 ± 0.08ab
迁 Qianxi	6.65 ± 1.56a	0.92 ± 0.62abcd	1.19 ± 0.67a	7.58 ± 1.70a	1.15 ± 0.17ab	0.90 ± 0.07ab	0.10 ± 0.07ab
兴隆 Xinglong	7.57 ± 2.10a	0.67 ± 0.48ab	0.88 ± 0.50a	8.21 ± 2.11a	1.14 ± 0.13ab	0.93 ± 0.05b	0.07 ± 0.05ab
遵化 Zunhua	7.42 ± 2.54a	1.05 ± 0.46bcd	1.23 ± 0.46a	8.47 ± 2.62a	1.14 ± 0.14ab	0.88 ± 0.05ab	0.11 ± 0.05ab
迁安 Qianan	8.21 ± 4.41a	0.90 ± 0.58abcd	0.97 ± 0.66a	9.11 ± 4.78a	1.04 ± 0.04a	0.90 ± 0.08ab	0.10 ± 0.08ab
平泉 Pingquan	6.31 ± 0.71a	0.23 ± 0.06a	1.05 ± 0.55a	6.83 ± 0.15a	1.12 ± 0.17ab	0.97 ± 0.02b	0.03 ± 0.02a
怀柔 Huairou	7.70 ± 3.14a	1.48 ± 0.95d	2.44 ± 1.14b	9.25 ± 3.74a	1.25 ± 0.16b	0.84 ± 0.10a	0.16 ± 0.10b
昌平 Changping	7.69 ± 1.36a	0.71 ± 0.25abc	1.56 ± 0.11a	8.40 ± 1.59a	1.08 ± 0.07ab	0.92 ± 0.02ab	0.08 ± 0.02ab

表 5 燕山板栗花相关表型性状相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of phenotypic traits related flower for Yanshan chestnut

性状 Trait	花序长度 Cl	花序粗度 Cw	花序小花 簇密度 De	花轴粗度 Faw	雄蕊长度 Sl	花序长粗比 Cl/Cw	花轴长 粗比 Fal/Faw	轴序 粗度比 Faw/Cw	雄花序 个数/果枝 Mcn/Bs	两性花序 个数/果枝 Bcn/Bs	雌花个数 /果枝 Ffn/Bs	总花序个数 /果枝 Cn/Bs	雌花个数 /两性花序 Ffn/Bc	雄花序 比例 Mcn/Cn	两性花序 比例 Bcn/Cn
花序长度 Cl	1														
花序粗度 Cw	0.246 **	1													
花序小花簇密度 De	-0.178 *	0.097	1												
花轴粗度 Faw	0.241 **	0.431 **	0.072	1											
雄蕊长度 Sl	0.164	0.897 **	0.130	0.014	1										
花序长粗比 Cl/Cw	0.470 **	-0.712 **	-0.213 *	-0.241 **	-0.672 **	1									
花轴长粗比 Fal/Faw	0.288 **	-0.364 **	-0.053	-0.822 **	-0.013	0.548 **	1								
轴序粗度比 Faw/Cw	0.057	-0.249 **	-0.132	0.757 **	-0.617 **	0.239 **	-0.635 **	1							
雄花序个数/果枝 Mcn/Bs	-0.012	-0.062	0.173	0.089	-0.128	0.027	-0.103	0.135	1						
两性花序个数/果枝 Bcn/Bs	0.182 *	0.063	-0.145	0.150	-0.013	0.063	-0.064	0.102	0.205 *	1					
雌花数/果枝 Ffn/Bs	0.194 *	0.112	-0.079	0.257 **	0.006	0.014	-0.160	0.185 *	0.136	0.784 **	1				
总花序个数/果枝 Cn/Bs	0.041	-0.051	0.120	0.090	0.111	-0.057	-0.080	0.132	0.941 **	0.417 **	0.309 **	1			
雌花个数/两性花序 Ffn/Bc	0.140	0.014	-0.188 *	-0.013	0.032	0.054	0.103	-0.039	-0.122	0.066	0.232 **	-0.115	1		
雄花序比例 Mcn/Cn	-0.147	-0.107	0.195 *	-0.083	0.080	-0.010	0.034	-0.009	0.172	-0.863 **	-0.710 **	-0.056	-0.133	1	
两性花序比例 Bcn/Cn	0.149	0.118	-0.186 *	0.102	0.083	0.003	-0.046	0.019	-0.189 *	0.864 **	-0.705 **	0.040	0.119	-0.992 **	1

注：* 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下显著差异。

Note: * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

表 6 燕山板栗花相关表型性状的主成分矩阵、特征向量和贡献率

Tab. 6 The eigenvalue and contributive percentage of principal components and component scores coefficient matrix of t phenotypic traits related flower for Yanshan chestnut

性状编号 Character code	主成分 Principal component				
	1 主成分 First principal component	2 主成分 Second principal component	3 主成分 Third principal component	4 主成分 Fourth principal component	5 主成分 Fifth principal component
花序长度 Cl	0.266	0.143	-0.186	-0.089	0.881
花序粗度 Cw	0.259	-0.897	-0.091	-0.052	0.326
花序小花簇密度 De	-0.199	-0.246	-0.127	-0.411	-0.212
花轴粗度 Faw	0.436	-0.340	0.679	-0.372	0.280
雄蕊长度 Sl	0.080	0.834	-0.424	0.213	0.237
花序长粗比 Cl/Cw	-0.060	0.905	-0.075	-0.110	0.321
花轴长粗比 Fal/Faw	-0.307	0.483	-0.729	0.269	0.202
轴序粗度比 Faw/Cw	0.273	0.265	0.802	-0.435	0.045
雄花序个数/果枝 Mcn/Bs	0.109	0.153	0.516	0.784	0.174
两性花序个数/果枝 Bcn/Bs	0.913	0.184	-0.120	0.214	-0.115
雌花个数/果枝 Ffn/Bs	0.863	0.102	-0.040	0.094	-0.033
总花序个数/果枝 Cn/Bs	0.313	0.197	0.423	0.787	0.136
雌花个数/两性花 Ffn/Bc	0.165	0.070	-0.244	-0.213	0.230
雄花序比例 Mcn/Cn	-0.876	-0.089	0.354	0.072	0.226
两性花序比例 Bcn/Cn	0.877	0.077	-0.348	-0.088	-0.228
特征值 Eigenvalue	3.798	2.946	2.647	1.983	1.427
贡献率/% Contributive percentage	25.323	19.638	17.650	13.222	9.514
累计贡献率/% Cumulative contributive percentage	25.323	44.961	62.611	75.833	85.347

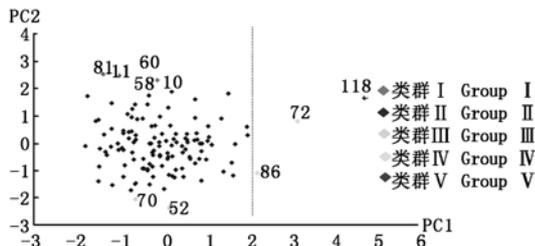


图 1 127 份燕山板栗资源花表型性状的主成分分析

Fig. 1 The principal component analysis of 127 Yanshan chestnut germplasm

3 结论与讨论

本研究采用的 127 份试验材料涵盖了燕山板栗的几乎所有产区,在相同的种植和管理条件下,在整体水平上进行多样性评价、研究,为后期的深入利用奠定了基础。对板栗种质资源的花序性状进行多样性分析,是开展育种的基础工作,也是一种简便有效的筛选特异种质的方法。板栗花序相关性状是一

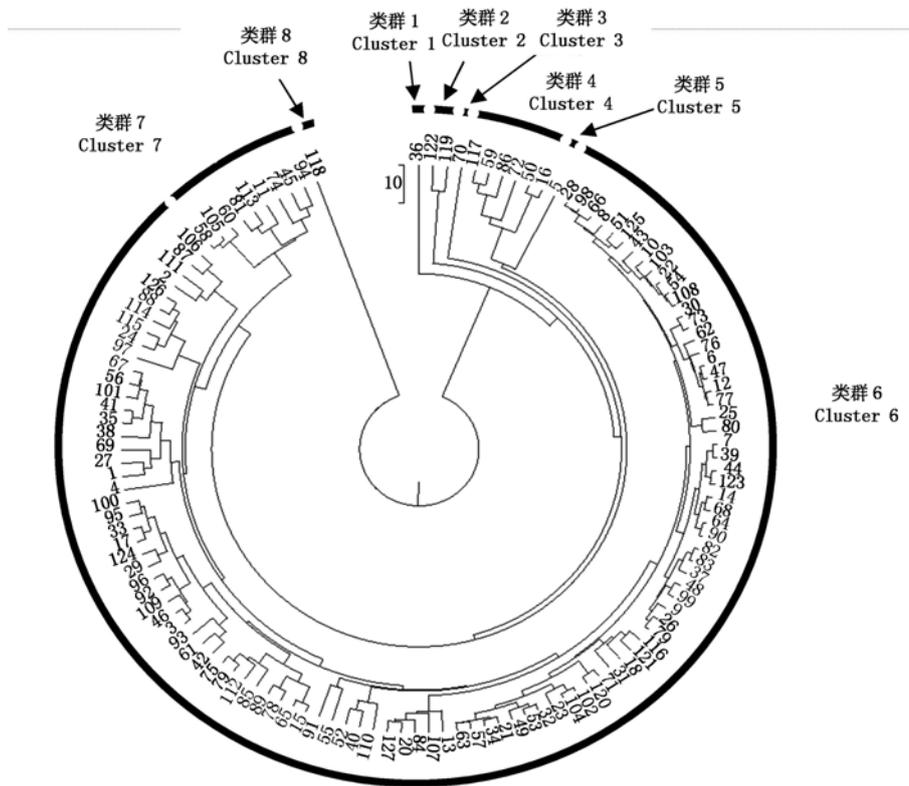


图2 燕山板栗资源聚类

Fig. 2 Cluster dendrogram of Yanshan chestnut

类重要的表型性状,在遗传、环境和人工等因素的影响下,花序相关性状表现出数量性状的遗传特点。由于数量性状表现出的特点比较复杂,所以对花序相关性状在个体或微观水平上进行研究,较难获得更准确客观的结果或取得重要进展^[22],本研究从燕山地区 11 个群体水平上对这性状进行研究,从宏观水平对整体趋势分析与探讨,更容易了解性状的遗传变异规律。由研究结果可知,燕山板栗资源花序相关性状具有丰富的变异和表型多样性。花序形态表型性状离散程度低但分布频率均匀,所以变异相对较小但多样性程度高,花序数量表型性状离散程度较高但分布频率相均匀,所以变异范围更大且多样性程度高。变异系数和多样性指数是反映物种多样性最基本的 2 个指标,但其代表的遗传特点并不相同。变异系数越高表明性状的离散程度越大,变异幅度越大;而多样性指数越高表明性状多样性程度越丰富,种类越多^[23]。这种情况说明,在板栗的进化过程中,相较于板栗花序的形态,花序数量的变化更大,与长久以来人们的育种目的趋于一致。说明板栗整体资源的遗传变异,一直在受人为选择的影响。

平泉、怀柔 2 个群体的表型性状与其他群体有较大差异。平泉群体的花序细小且雌花量低;怀柔群体的花序粗长,雌花数量多。平泉处于所有群体的最北部,是燕山板栗资源生长的北部边界,气候较

寒冷,怀柔位于燕山山脉西南端,位于除昌平外其他群体的西南部,气候相对温暖,地域和环境的特殊性是导致平泉和怀柔群体资源性状差异大的重要原因。位于最西端的昌平,可能是样本量分布不均匀或种质间的流动,分析结果并未与其他群体有太大差异。本研究中,群体间各性状表型值、变异系数和多样性程度有一定差异,同一群体不同性状间的差异程度亦有所不同,说明不同的群体其基因型和环境异质导致群体表型变异的差异,体现了群体间种质在育种上的不等值性。此现象与笔者之前的研究结果一致^[13]。结合本研究结果认为,在育种工作中可以根据不同群体间的特点进行亲本的选配,打破地理隔离,更易选育出杂合性更高、适应性更强、超亲更明显的品种。比如选取北部平泉群体和南部的怀柔群体资源进行杂交,有可能选出能够适应北部环境但雌花数超越现有资源的高产品种。

板栗的相关性分析可以看出,多数板栗花序形态和花序数量间的联系不紧密,但花序上的小花簇密度会影响雌花的多少,花轴的粗度与雌花数量极显著正相关,花轴越粗,雌花量越大,由此推测,花轴粗度可以作为判断板栗雌花量多少的一个佐证。本研究还发现两性花序量与雄花序数量和总花序数量正相关,但与雄花序占比为负相关,所以在育种过程中,不能因为雄花序养分消耗较大^[15],一味选择雄

花序数量少或总花序数量少的资源,而更应该关注雌雄比例适当的资源。

对于多个变量,且不同变量间还存在一定的相关性,对其进行多元分析,过程较为复杂,不易操作。主成分分析是分析多个变量间相关性的一种多元统计方法,可降维变量减少指标,从而简化分析过程,更有效地描述总变异构成特征^[24-25]。此研究中,第一主成分的相关性状与雌花数量有关,第二主成分的相关性状与花序形态有关,这些性状是本次研究中分析和聚类的主要依据。由第一、二主成分为坐标做出的散点图,将所有资源分为 5 类,类群 I 中的 5 份资源全分布在聚类分析类群 7 中,类群 II 与聚类分析类群 6 中的大部分资源相同,类群 VI 的 2 份资源全分布在聚类分析类群 4 中,类群 V 与聚类分析类群 8 完全一致,由此可知,主成分分析所分类群与聚类分析结果相似,主成分分析中贡献率较高性状的分析结果确实反映了资源变异的主要特点,这些筛选出的性状可作为今后板栗资源利用和分析的综合评价指标^[26]。通过主成分分析筛选出了 3 份雌花量较高的资源 BJHH1、长南庄 2 号、沙坡峪 1 号,这 3 份特异资源可以在今后的育种工作中作为性别调控,改善产量的亲本材料。

通过对表型数据的聚类分析,127 份种质材料被分为 8 大类群,由聚类结果可知,地域相同或相近的资源并没有完全聚在一起,分析原因,由于所有种质材料都是同一地点进行观测、记录并进行分析的,数据更能消除环境差异的影响,真正体现基因遗传上的差异,所以有些材料与原产地的性状表现可能有所差异,这些聚为一类的种质资源,有些地理位置相同或相近,相似的生境条件和栽培耕种史、品种间的频繁交换,都有可能造成这些区域的资源在遗传组成上趋同^[27]。有些材料由于长期引种驯化、变异或自身本来就与其他种质存在极大差别,或有些材料为遗传变异较大的野生种质,与其他材料有较远的遗传关系,还有板栗异交结实的特性,这些都有可能是导致聚类结果与地理分布有所不同的原因^[13]。

描述和分析植物表型性状在种质资源研究的过程中是最基本的方法和不可替代的途径,根据目前的研究结果,在作物种质研究中,已有许多通过利用综合评价种质资源来构建核心种质资源库的成功案例,并成功地提高了育种效率^[28],表型性状已成为生物学研究的重要命题,基因组和转录组等生信学数据只有和植物表型性状互相结合,共同分析才能解析遗传的特点和机理。由此可知,充分挖掘表型数据并整理分析将有助于推动育种学跨越式的发展^[29]。而本研究为以后燕山板栗资源重要园艺学性状的基因定位提供了大量的表型数据。

参考文献:

- [1] 王静慧,吴文良. 我国燕山板栗生产带的优势、问题与对策研究[J]. 中国农业资源与区划,2003,24(4):24-28. doi:10.3969/j.issn.1005-9121.2003.04.006.
Wang J H, Wu W L. Studies on priorities, problems and counter measures of chestnut production belt in Yan mountain of China[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2003, 24(4): 24-28.
- [2] 宋杰,李世峰,刘丽娜,李树发,解玮佳,关文灵. 云南含笑天然居群的表型多样性分析[J]. 西北植物学报,2013,33(2):272-279. doi:10.3969/j.issn.1000-4025.2013.02.010.
Song J, Li S F, Liu L N, Li S F, Xie W J, Guan W L. Phenotypic diversity of natural populations of *Michelia yunnanensis* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 272-279.
- [3] 董文婧,申仕康,王跃华. 都市园林植物云南樱花的表型多样性研究[J]. 广西植物,2016,36(3):349-354. doi:10.11931/guihaia.gxzw201506021.
Dong W J, Shen S K, Wang Y H. Phenotypic diversity of urban landscape plant [J]. *Guihaia*, 2016, 36(3): 349-354.
- [4] 代攀虹,孙君灵,何守朴,王立如,贾银华,潘兆娥,庞保印,杜雄明,王溢. 陆地棉核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2016,49(19):3694-3708. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.19.003.
Dai P H, Sun J L, He S P, Wang L R, Jia Y H, Pan Z E, Pang B Y, Du X M, Wang M. Comprehensive evaluation and genetic diversity analysis of phenotypic traits of core collection in upland cotton [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(19): 3694-3708.
- [5] 丹曲,张艳福,方江平,郭其强,李慧娥. 西藏林芝不同居群桃儿七表型多样性分析[J]. 南方农业学报,2017,48(3):386-392. doi:10.3969/j.issn.2095-1191.2017.03.002.
Dan Q, Zhang Y F, Fang J P, Guo Q Q, Li H E. Phenotypic diversity of *Sinopodophyllum hexandrum* from different populations in Nyingchi Tibet [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(3): 386-392.
- [6] 马玉敏,陈学森,何天明,吴传金,王娜. 中国板栗 3 个野生居群部分表型性状的遗传多样性[J]. 园艺学报,2008,35(12):1717-1726.
Ma Y M, Chen X S, He T M, Wu C J, Wang N. Genetic diversity of morphological traits in wild populations of *Castanea mollissima* blume [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(12): 1717-1726.
- [7] 王广鹏,孔德军,刘庆香. 板栗杂交后代 3 个重要经济性状的遗传特点[J]. 华北农学报,2009,24(S2):102-104. doi:10.7668/hbxb.2009.S2.022.
Wang G P, Kong D J, Liu Q X. Inheritance characters of three economic characteristics of crossed chestnut progeny [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(S2): 102-104.
- [8] 周连第. 板栗种质资源遗传多样性研究[D]. 北京: 中国农业大学,2005.
Zhou L D. Study on genetic diversity of germplasm resources in *Castanea mollissima* [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [9] 兰彦平,周连第,周家华,姚砚武,王尚德. 中国板栗北方种群表型变异频率研究[J]. 华北农学报,2007,22(5):106-109. doi:10.7668/hbxb.2007.05.026.
Lan Y P, Zhou L D, Zhou J H, Yao Y W, Wang S D. Researches on characteristics frequency of northern population in *Castanea mollissima* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(5): 106-109.
- [10] 刘国彬,兰彦平,姚研武,兰卫宗,王金宝,刘建玲. 板栗杂交后代坚果表型性状的遗传变异[J]. 华北农学

- 报, 2011, 26 (5): 117 - 121. doi: 10. 7668/hbxb. 2011. 05. 024.
- Liu G B, Lan Y P, Yao Y W, Lan W Z, Wang J B, Liu J L. Genetic variation of nut morphological traits in crossed chestnut progenies [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26 (5): 117 - 121.
- [11] 刘国彬, 兰彦平, 兰卫宗, 曹均. 板栗农家品种资源坚果表型性状分析 [J]. 江西农业大学学报, 2013, 35 (5): 977 - 981, 987.
- Liu G B, Lan Y P, Lan W Z, Cao J. An analysis of phenotypic traits of native chestnut varieties [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35 (5): 977 - 981, 987.
- [12] 江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹. 地方品种重要农艺性状的表型多样性 [J]. 园艺学报, 2014, 41 (4): 641 - 652. doi: 10. 16420/j. issn. 0513-353x. 2014. 04. 008.
- 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 [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41 (4): 641 - 652.
- [13] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 闫希光, 王广鹏. 中国板栗 9 个结果母枝相关表型性状的遗传多样性研究 [J]. 园艺学报, 2019, 46 (3): 453 - 463. doi: 10. 16420/j. issn. 0513-353x. 2018-0432.
- Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Yan X G, Wang G P. Genetic diversity analysis of several phenotypic traits related to biennial bearing branch in Chinese chestnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46 (3): 453 - 463.
- [14] 王同坤, 柏素花, 董超华, 胡彦江, 齐永顺, 张京政. 燕山板栗种质资源 AFLP 遗传多样性分析 [J]. 分子植物育种, 2007 (1): 121 - 127.
- Wang T K, Bai S H, Dong C H, Hu Y J, Qi Y S, Zhang J Z. Genetic diversity of chestnut germplasm in Yanshan region revealed by AFLP [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2007 (1): 121 - 127.
- [15] Liu K, Zhao Z, Li C. Effect of thinning catkingson nutrition in Chinese chestnut tree [J]. *Aeta Horticulture*, 1999, 494: 191 - 194.
- [16] 王广鹏, 陆凤勤, 孔德军. 板栗高效栽培技术与主要病虫害防治 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 81 - 84.
- Wang G P, Lu F Q, Kong D J. Highly effective cultivation and control technique of main pests and diseases of chestnut [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 81 - 84.
- [17] 刘庆忠. 板栗种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- Liu Q Z. Descriptors and data standard for chestnut (*Castanea mollissima* Blume) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [18] 王业社, 侯伯鑫, 索志立. 紫薇品种表型多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16 (1): 71 - 79. doi: 10. 13430/j. cnki. pgr. 201. 01. 011.
- Wang Y S, Hou B X, Suo Z L. Phenotypic diversity of *Lagerstroemia indica* cultivars [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16 (1): 71 - 79.
- [19] 贺晨帮, 宗绪晓. 豌豆种质资源形态标记遗传多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12 (1): 42 - 48.
- He C B, Zong X X. Genetic diversity of pea (*Pisum sativum* L.) germplasm resources revealed by morphological traits [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2011, 12 (1): 42 - 48.
- [20] 赵香娜, 李桂英, 刘洋. 国内外甜高粱种质资源主要性状遗传多样性及相关性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9 (3): 302 - 307.
- Zhao X N, Li G Y, Liu Y. Genetic diversity and correlation analysis of main agronomic characters in domestic and foreign sweet *Sorghum* germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2008, 9 (3): 302 - 307.
- [21] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 3 - 14.
- [22] 刘志斋, 郭荣华, 石云素, 蔡一林, 曹墨菊, 宋燕春, 王天宇, 黎裕. 中国玉米地方品种核心种质花期相关性状的表型多样性研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (6): 1591 - 1602. doi: 10. 3864/j. issn. 0578-1752. 2008. 06. 004.
- Liu Z Z, Guo R H, Shi Y S, Cai Y L, Cao M J, Song Y C, Wang T Y, Li Y. Phenotypic diversity of flowering-related traits of maize landraces from the core collection preserved in China National Genebank [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (6): 1591 - 1602.
- [23] 冯章丽, 于文全, 顾广军, 刘畅, 卜海东, 程显敏, 刘延杰, 董雪梅, 邢星. 东北部分地区山荆子种质资源表型多样性及聚类分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17 (6): 984 - 992. doi: 10. 13430/j. cnki. jppgr. 2016. 06. 004.
- Feng L Z, Yu W Q, Gu G J, Liu C, Bu H D, Cheng X M, Liu Y J, Dong X M, Xing X. Phenotypic diversity and clustering analysis of *Malus baccata* (L.) Borkh. in some areas of Northeast China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17 (6): 984 - 992.
- [24] 韩海波, 师文贵, 王晓娜. 内蒙古扁蓿豆野生资源形态特征研究 [J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12 (5): 721 - 726.
- Han H B, Shi W G, Wang X N. Analysis of flower character variation of *Medicago ruthenica* in Inner Mongolia [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2011, 12 (5): 721 - 726.
- [25] 张莹, 曹玉芬, 霍宏亮, 徐家玉, 田路明, 董星光, 齐丹, 张小双, 刘超, 王立东. 基于枝条和叶片表型性状的梨种质资源多样性 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (17): 3353 - 3369. doi: 10. 3864/j. issn. 0578-1752. 2018. 17. 010.
- Zhang Y, Cao Y F, Huo H L, Xu J Y, Tian L M, Dong X G, Qi D, Zhang X S, Liu C, Wang L D. Diversity of pear germplasm resources based on twig and leaf phenotypic traits [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (17): 3353 - 3369.
- [26] 李鸿雁, 李志勇, 黄帆, 师文贵, 李俊, 刘磊, 解永凤. 内蒙古扁蓿豆种质资源花性状的变异分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16 (6): 1223 - 1228. doi: 10. 13430/j. cnki. jppgr. 2015. 06. 012.
- Li H Y, Li Z Y, Huang F, Shi W G, Li J, Liu L, Xie Y F. Analysis of flower character variation of *Medicago ruthenica* in Inner Mongolia [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16 (6): 1223 - 1228.
- [27] 兰彦平, 周连第, 姚研武, 王尚德, 刘国彬. 中国板栗种质资源的 AFLP 分析 [J]. 园艺学报, 2010, 37 (9): 1499 - 1506.
- Lan Y P, Zhou L D, Yao Y W, Wang S D, Liu G B. Analysis of *Castanea mollissima* germplasm resources by AFLP [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37 (9): 1499 - 1506.
- [28] Liu L, Kakiyama F, Kato M. Characterization of six varieties of *Cucumis melo* L. based on morphological and physiological characters, including shelf-life of fruit [J]. *Euphytica*, 2004, 135: 305 - 313.
- [29] 潘映红. 论植物表型组和植物表型组学的概念与范畴 [J]. 作物学报, 2015, 41 (2): 175 - 186. doi: 10. 3724/SP. J. 1006. 2015. 00175.
- Pan Y H. Analysis of concepts and categories of plant phenotype and phenomics [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41 (2): 175 - 186.
- [30] 穆金虎, 陈玉泽, 冯慧, 李文建, 周利斌. 作物育种学领域新的革命: 高通量的表型组学时代 [J]. 植物科学学报, 2016, 34 (6): 962 - 971. doi: 10. 11913/PSJ. 2095 - 0837. 2016. 60962.
- Mu J H, Chen Y Z, Feng H, Li W J, Zhou L B. A new revolution in crop breeding: The era of high-throughput phenomics [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34 (6): 962 - 971.