

# 辣椒地方品种和创新种质的遗传比较分析

孟俊瑛, 郭 瑞, 陈 高, 马天天, 陈禅友

(江汉大学生命科学学院/湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心/湖北省食用豆类自然资源中心, 武汉 430056)

**摘要:** 观测了61份辣椒地方品种以及39份紫彩椒和红辣椒809的杂交后代选育的创新种质的12个性状以及基因组DNA的SSR分子标记信息,进行了遗传相关分析和多样性评价。结果表明:地方品种和创新种质两个群体间的12个性状均呈显著差异,其性状变异系数范围分别为1.15%~50.02%和3.27%~60.67%,其中地方品种的维生素C含量变异系数最大;两个群体的广义遗传力分别在79.24%~99.23%和87.73%~98.80%之间,说明性状主要由遗传决定。两群体间的性状分化系数在1.30%~48.95%之间,其中花色苷含量分化明显,株高分化不明显。相关性分析表明两两性状间有23组呈显著或极显著相关;主成分分析综合评价筛选出10份特异资源。筛选出20对SSR有效引物对,PCR扩增出68个多态性条带,多态性比例为69.39%,其中地方品种的多态性位点居多。基于12个性状和分子标记数据进行聚类分析,可将供试种质划分为3个类群,地方品种大部分聚集在类群I,创新种质大部分聚集在类群II,类群III仅含PP1122种质,该种质植株具有叶片大、长势旺、果实大、果皮紫色且营养成分含量高特点,说明创新种质与地方品种亲缘关系较远,利用不同类群的种质紫彩椒和红辣椒809的杂交可拓展辣椒种质的遗传背景。本研究为辣椒种质创新和品种遗传改良提供参考。

**关键词:** 辣椒;形态学性状;品质性状;SSR标记;遗传多样性;聚类分析

## Genetic Comparative Studies on Innovated Germplasm and Local Varieties of Chili Pepper

MENG Junying, GUO Rui, CHEN Gao, MA Tiantian, CHEN Chanyou

(School of Life Sciences, Jianghan University/Hubei Province Engineering Research Center for Legume Plants/  
Hubei Province Natural Science Resource Center of Edible Legume, Wuhan 430056)

**Abstract:** Through observing twelve phenotypic traits and SSR genotyping result, this study analyzed 61 local pepper varieties and 39 offspring lines from the hybrids of 'Purple Color Pepper' and 'Red Pepper 809'. The results showed that twelve traits in the two populations of local pepper varieties and innovated pepper germplasm were significantly different ( $P \leq 0.05$ ), with the variation coefficient of the traits ranged from 1.15%-50.02% and 3.27%-60.67%, respectively, of which in local varieties vitamin C content was detected with the highest variations. The broad-sense heritabilities arranged from 79.24%-99.23% and 87.73%-98.80%, respectively, indicating that these traits were highly inheritable. Traits differentiation coefficients between the two populations arranged from 1.30% to 48.95%, of which anthocyanin content was the trait with the most obvious differentiation, while plant height had no obvious differentiation. Correlation analysis revealed 23 pairs of traits that were significantly or extremely significantly correlated. Comprehensive evaluation through principal component analysis identified 10 specific resources. In addition, 20 SSR markers identified 68 polymorphic bands, with the polymorphism ratio of 69.39%, and the higher polymorphic loci were detected in local varieties. Based on the clustering analysis of the twelve traits and molecular markers information, these germplasms were

收稿日期: 2024-01-08 网络出版日期: 2024-08-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240108001>

第一作者研究方向为植物资源与遗传育种, E-mail: 1328832809@qq.com

通信作者: 陈禅友, 研究方向为植物资源与遗传育种, E-mail: ccy@jhun.edu.cn

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)(2017ABA147); 湖北省教育厅百校联百县项目(BXLBX0360, BXLBX0361)

**Foundation projects:** Hubei Province Technology Innovation Project (Major Program) (2017ABA147); Hubei Provincial Department of Education's Hundred Schools and Hundred Counties Project(BXLBX0360, BXLBX0361)

assigned to three groups, of which group I included most local varieties, and group II included most innovated germplasms, and group III contained 'PP1122' germplasm only. 'PP1122' showed large leaves, vigorous fruit, purple peel and high nutrient content. The hybridization of varieties between different groups, such as 'Purple colored pepper' and 'Red pepper 809', was able to enlarge the genetic basis of pepper germplasm, providing a reference for pepper germplasm innovation and variety genetic improvements.

**Key words:** chili pepper; morphological traits; quality traits; SSR marker; genetic diversity; cluster analysis

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是茄科辣椒属一年或有限多年生草本植物<sup>[1]</sup>,原产于南美洲,明末传入我国,有着广泛的用途,既可鲜食,又是重要的调料<sup>[2]</sup>。中国辣椒栽培历史悠久、品种资源丰富,种植面积居世界各国之首,在蔬菜中居第二位,产值居第一位,在保证我国蔬菜周年均衡供应中起重要作用<sup>[3]</sup>。

关于辣椒形态学、品质和分子标记的研究非常多,如Nankar等<sup>[4]</sup>、刘林娅等<sup>[5]</sup>以不同地区的辣椒种质资源为材料,对其表型性状进行评估;袁欣捷等<sup>[7]</sup>、Gu等<sup>[8]</sup>利用SSR分子标记,对辣椒资源的遗传多样性进行分析,反映了材料之间的系统发育关系。这些研究为辣椒遗传多样性的认识提供了数据和技术参考。近年来培育的创新种质含有丰富的花色苷,据研究花色苷有预防心脏病、抑制癌症、延缓衰老、抗辐射、清除自由基、抗氧化等功能<sup>[9]</sup>,存在很大的商业价值。

本研究在经过多年培育的紫皮辣椒创新种质的基础上,结合课题组收集的各类辣椒资源,通过形态、品质及分子标记分析,比较地方品种与创新种质的遗传差异,旨在深化对辣椒资源的理解,筛选优质种质,为辣椒遗传改良和品种创新提供科学依据,以丰富其遗传多样性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的100份辣椒种质材料由江汉大学湖北省食用豆类植物自然科技资源中心提供(表1)。编号1~39为紫皮辣椒,均为本课题组的创新种质;编号40~100为地方品种,主要来源于湖北、广东、黑龙江和湖南4个省份。100份辣椒材料按照类型可分为:羊角椒24份、牛角椒17份、线椒13份、灯笼椒42份和朝天椒4份。

表1 供试辣椒种质信息

Table 1 The pepper germplasm information in this study

编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin	编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin	编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin
1	PP052	自选品系	16	PP9311	自选品系	31	PP131	自选品系
2	PP132	自选品系	17	PP10211	自选品系	32	PP9411	自选品系
3	PP072	自选品系	18	PP1122	自选品系	33	PP101	自选品系
4	PP082	自选品系	19	PP91	自选品系	34	PP51	自选品系
5	PP731	自选品系	20	PP1121	自选品系	35	PP201	自选品系
6	PP015	自选品系	21	PP193	自选品系	36	PP732	自选品系
7	PP112	自选品系	22	PP811	自选品系	37	PP7311	自选品系
8	PP231	自选品系	23	PP71	自选品系	38	PP2011	自选品系
9	PP7321	自选品系	24	紫彩椒	自选品系	39	PP221	自选品系
10	PP1122	自选品系	25	PP1122	自选品系	40	阳雀湖羊角椒	湖南长沙
11	PP811	自选品系	26	PP1123	自选品系	41	新科干鲜一号	湖南长沙
12	PP71	自选品系	27	PP221	自选品系	42	线辣椒	湖南长沙
13	PP16	自选品系	28	PP113	自选品系	43	长沙辣椒	湖南长沙
14	PP42	自选品系	29	PP941	自选品系	44	杭椒王	湖南长沙
15	PP9132	自选品系	30	PP1311	自选品系	45	红辣椒809	湖南长沙

表 1 (续)

编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin	编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin	编号 No.	种质名称 Name	来源 Origin
46	朝地椒	湖南长沙	65	早辣王	湖北武汉	84	华椒 18 号	广东广州
47	黄兴光皮椒	湖南长沙	66	绿色朝天椒	湖北武汉	85	花都羊角椒	广东广州
48	短线椒	湖南长沙	67	湘早秀	湖北武汉	86	玲珑	广东广州
49	丰尔达九号	湖南长沙	68	华椒六号	湖北武汉	87	美佳	广东广州
50	利剑	湖南长沙	69	江淮二号	湖北武汉	88	皱皮辣椒	广东广州
51	改良华椒十七	湖南长沙	70	报春	湖北武汉	89	朝天辣美	广东广州
52	铁红椒	湖南长沙	71	高丰 901	湖北武汉	90	短牛角	广东广州
53	江椒一号	湖南长沙	72	黄冠	湖北武汉	91	齐美	广东广州
54	湘研三十号	湖南长沙	73	湖湘贵妃	湖北武汉	92	荔湾辣椒	广东广州
55	芙蓉线椒	湖南长沙	74	丰尔达九号	湖北武汉	93	紫皱王	广东广州
56	长牛角	湖南长沙	75	新苏椒五号	湖北武汉	94	花都牛角椒	广东广州
57	强丰 8 号	湖南长沙	76	楚龙早王	湖北武汉	95	荔湾红辣椒	广东广州
58	线椒 10 号	湖南长沙	77	蔡甸辣椒	湖北武汉	96	牛角旋	广东广州
59	川椒大脆椒	湖南长沙	78	8819 线椒	湖北武汉	97	番禺牛角椒	广东广州
60	青香	湖南长沙	79	早杂二号	湖北武汉	98	花都羊角椒	广东广州
61	傲天	湖南长沙	80	花都尖椒	广东广州	99	韶关辣椒	广东韶关
62	华美 105	湖南长沙	81	单身理想	广东广州	100	翠玉	广东韶关
63	美国大牛角	湖南长沙	82	日本天鹰椒	广东广州			
64	雨花线椒	湖南长沙	83	杭椒一号	广东广州			

## 1.2 试验方法

**1.2.1 田间种植** 2022 年 1 月 8 日在温室播种育苗,将种子均匀撒在育苗盘上,覆盖一层薄土,保持温度在 20℃~30℃,4 月 29 日定植于湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心汉南试验基地大棚内,土质为壤土,肥力中等。试验采用随机区组设计,重复 3 次,小区面积 6 m<sup>2</sup>,畦宽 1.5 m,双行种植,行距 70 cm,株距 50 cm,中耕除草,病虫害防治等田间操作方案参常规栽培方式进行。

**1.2.2 性状测定** 6 月 15 日调查辣椒株高、株幅、叶片长、叶片宽,每小区随机调查 6 株,6 月 21 日分小区随机采集紫色丰满时期的商品果样品。参照中华人民共和国农业行业标准《NY/T 2234—2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 辣椒》<sup>[10]</sup>,使用游标卡尺测定果实长度、果实横径、果肉厚度,电子天平称量辣椒样品鲜重量,武汉赛培生物公司酶联免疫分析试剂盒测定辣椒鲜果肉中维生素 C 和花色苷含量。每份材料取 3 个果,将整

个鲜果放入烘箱 105℃杀青 1 h,之后将烘箱温度调为 80℃烘干至恒重,称量烘干后的样品重,用样品鲜重减去样品烘干后的重量即为水分含量。采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量<sup>[11]</sup>,蒽酮-硫酸法测定烘干样品中可溶性糖含量<sup>[12]</sup>,各指标均 3 次生物学重复。

**1.2.3 SSR 检测** 分别采集 100 份辣椒材料的 2~3 片幼嫩叶片,采用 CTAB 法提取基因组 DNA<sup>[13]</sup>,用微量分光光度计进行质量和浓度检测,于 -20℃冰箱保存备用;选取 23 对 SSR 引物<sup>[14-16]</sup>对 100 份辣椒种质材料进行遗传多样性分析,23 对多态性引物覆盖了辣椒的 12 对染色体。PCR 反应体系:模板 DNA 1 μL,上、下游引物各 0.5 μL,2×Tap DNA 聚合酶 5 μL,ddH<sub>2</sub>O 3 μL。PCR 扩增程序:95℃预变性 2 min;95℃变性 15 s,50℃~72℃退火 15 s,72℃延伸 1 min,30 个循环;72℃延伸 7 min。扩增产物用 4% 琼脂糖凝胶电泳检测,并记录条带信息。

表 2 23 对 SSR 引物信息

Table 2 Information of 23 pairs of SSR primers

引物 Primer	上游引物序列(5'-3') Forward primer sequence(5'-3')	下游引物序列(5'-3') Reverse primer sequence(5'-3')
CAMS-378	GAAATCGACGCGTTTCTAGC	TGTGGGGAGAGAGAGGAAGA
ES105	CGCATCTACATCAAGAATCAACCA	GATGTAGAACAAGGAAGCAGGGG
ES321	ACGAGGTCCACTTCCCCATTAT	TTAGAGAAGGAATAACCGGCAGC
CAMS-020	CAGCAGTAACAGAGGCAGGTC	CACAAGTGAGTTTATTCATATCACCA
CAMS-040	TATAGCCTGTGGGTGCCTTC	TGGGGTGAACAATAGCATGT
CAMS-051	ACCCAGTTCCTTTCTTGGT	GAAGGTTAGCGGAATGAACG
CAMS-065	CCAGTCTCATCCAGCAGACA	CATATGCTGCTCCTGCATTC
CAMS-045	CGCGATTGATTGCTAAATCTC	CTAATTTCCAGTTGCGTCTGC
CAMS-063	CCAAATCATCATCAATGCGAAGA	CGGAGTAGATTGCGCGAGAAA
CAMS-022	GACTATAGCAAACATGTCCCCAG	CCAGATTTGTGGATCCTATTGA
CAMS-121	GGTGCCTAGAGATGGAGAG	TTTGAGTGTTCGGGACTGGT
CAMS-101	CCTACAAGTGAGGCTGAGGAGA	CAGCAAGTTGGAGAACTAATGC
CAMS-120	TGGGATTGCATGCATCATAG	CAGAATCCTTTCGGTCCAGA
CAMS-302	AAATGACCACACATCATTGTC	TGGCCTCTTTGTCTCTGATT
CAMS-335	TAAAATGAGGGGGTTAAGGC	CCGTA AAAACCTAACGACGA
CAMS-050	TGCGGTTCCGCACTATACTA	CAACATGGTTGCTTGAAACG
CAMS-053	GGGACGTATTTTGAAGAGG	CAATCACTTCGCCTTGTGTA
CAMS-312	CAACTGCCTAACACCACCT	CACGTGCAAAGCAAGTATCC
CAMS-124	ACCTGACATTTTGGTCTTCTAG	AAAGCTGCCCTGTCTACC
CAMS-330	GGCTACCGCCTTCTGACTTA	TTCGTATCTGGGGTGTCAAA
CAMS-044	GAGTGCCATGCTGATTAAGGA	CACGACTGTCTTGCCTGAAC
CAMS-122	CCCCACCGATGAATTTAGTAGA	TGATGATGTGTCATGGTGTATGA

### 1.3 数据分析

用 Excel 软件对试验数据进行记录和整理, 获取各性状指标均值、最大值、最小值、标准差、变异系数; 利用 SPSS 27 软件进行单因素 ANOVA 检验和主成分分析, 并用公式计算出广义遗传力  $H^2 = \frac{V_G}{V_P} = \frac{V_G}{V_G + \frac{V_e}{r}}$ , 式中  $V_G$  表示遗传方差,  $V_e$  表示

环境方差,  $V_p$  表示总表现方差,  $r$  表示样本重复数<sup>[17]</sup>; 对创新种质和地方品种的性状指标进行巢式方差分析<sup>[18]</sup>, 计算性状的表型分化系数  $V_{ST} = \frac{\sigma_{TS}^2}{(\sigma_{TS}^2 + \sigma_S^2)}$ , 式中

$\sigma_{TS}^2$  和  $\sigma_S^2$  分别表示群体间和群体内的方差分量<sup>[19]</sup>; 采用 Origin 2022 软件做统计分析, 对各个性状进行相关性分析<sup>[20]</sup>并绘制小提琴图。

根据电泳图谱人工读取并标记条带, 在相同迁移位置按条带有无分别赋值, 有带的记为 1, 无带的

记为 0, 建立 0、1 矩阵<sup>[21]</sup>, 并将矩阵输入 Popgen32, 计算 SSR 分子标记的等位基因数和 Nei's 基因多样性指数。Nei's 基因多样性指数是根据种群间不同基因所占的比例算出的遗传多样性。

12 个性状数据无量纲化处理 (z-score 变换): 先求出每个指标的样本均值  $x_0$  和标准差  $\sigma$ , 标准化评价价值  $Y_i = (x_i - x_0) / \sigma$ , 其中  $x_0$  为均值,  $\sigma$  为标准差, 根据 12 个性状数据和 0、1 矩阵通过 Origin 2022 软件按照相关性进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 辣椒种质资源形态学和品质性状数据特征及其变异分析

由表 3 可知, 参试辣椒种质资源各性状的变异系数在 2.84%~58.72% 之间, 其中创新种质各性状的变异系数范围是 1.15%~50.02%, 地方品种为 3.27%~60.67%; 创新种质和地方品种的维生素 C 含

量和花色苷含量的变异系数较大,均高于50%,而水分含量的变异系数最小,分别为1.15%和3.27%,变异程度相对较低。地方品种的果实长度、果实横径、果肉厚度、水分含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、维生素C含量、花色苷含量的变异系数均高于创新种质,其中花色苷含量的变异系数差别最大,创新种质的花色苷含量变异系数比地方品种低

16.39%,果实横径相差14.65%,差异明显。创新种质的叶片长度、叶片宽度、株高和株幅的变异系数略高于地方品种。将创新种质和地方品种的形态学性状、品质性状的分布情况绘制成小提琴图,如图1所示,可以更加直观地看出创新种质和地方品种在形态学性状、品质性状上的分布差异。

表3 形态学和品质性状数据特征

Table 3 Data characteristics of morphological traits and quality traits

性状 Traits	辣椒总群体 Chili pepper		创新种质 Innovated germplasm		地方品种 Local varieties	
	均值	变异系数(%)	均值	变异系数(%)	均值	变异系数(%)
	Mean value	CV	Mean value	CV	Mean value	CV
叶片长度(cm) BL	14.70	18.62	16.17	17.69	13.76	15.94
叶片宽度(cm) BW	6.77	21.63	7.49	21.57	6.31	18.15
株高(cm) PH	95.84	22.11	88.89	22.17	100.28	20.89
株幅(cm) PW	68.93	17.73	69.50	19.89	68.57	16.19
果实长度(cm) FL	12.19	36.52	10.07	26.10	13.54	35.72
果实横径(cm) FW	4.48	46.34	5.76	33.05	3.66	47.70
果肉厚度(cm) FT	0.34	37.20	0.43	21.52	0.28	38.81
水分含量(%) MC	91.00	2.84	92.59	1.15	90.58	3.27
可溶性蛋白含量(D.W mg/g) PL	11.66	40.03	12.20	26.42	11.31	47.48
可溶性糖含量(D.W mg/g) SC	44.74	27.74	43.88	25.97	45.28	28.75
维生素C含量(F.W mg/100g) VC	62.41	58.72	54.80	50.02	67.27	60.67
花色苷含量(F.W mg/100g) Cyanin	4.87	51.31	5.61	40.84	4.39	57.23

BL: Leaf length; BW: Leaf width; PH: Plant height; PW: Plant width; FL: Fruit length; FW: Fruit wide; FT: Fruit thickness; MC: Moisture content; PL: Soluble protein content; SC: Soluble sugar content; VC: Vitamin C content; Cyanin: Anthocyanin content; D.W: Dry weight; F.W: Fresh weight; The same as below

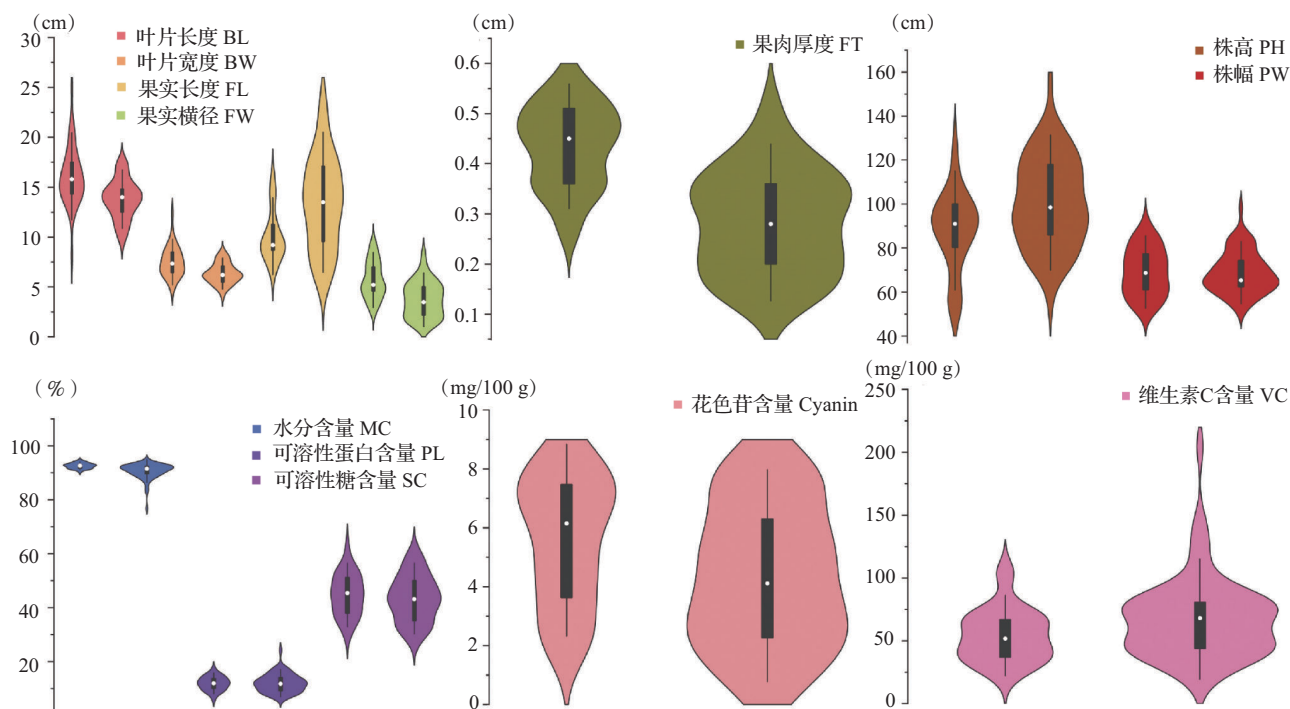
## 2.2 12个形态学和品质性状的遗传分化分析

对参试材料形态学和品质性状进行广义遗传力和表型分化系数计算,结果如表4所示,创新种质广义遗传力范围为87.73%~98.80%,地方品种为79.24%~99.23%;地方品种的株高、株幅、果实长度、果实横径、果肉厚度、水分含量、可溶性糖含量、维生素C含量和花色苷含量的遗传力均大于创新种质,与地方品种相比,创新种质受到环境的影响较大。对地方品种和创新种质的12个性状进行巢式方差分析,发现地方品种和创新种质之间差异显著,通过方差分析计算的性状分化系数在1.30%~48.95%之间,最大的是花色苷含量,其次是果肉厚度和果实长度,分别为34.71%和31.36%,说明这些性状在地方品种和创新种质间均表现出较大的差

异,最小的是株幅和可溶性糖含量,均小于2%,差异较小。

## 2.3 12个形态学和品质性状的相关性分析

对100份种质材料的7个形态学性状和5个品质性状进行相关性分析,结果表明,12个性状间有18个相关系数达到极显著水平,5个相关系数达显著水平。叶片长度和叶片宽度与果实横径、果肉厚度呈均极显著正相关;株高与株幅、果实长度均呈极显著正相关,与果实横径、果肉厚度、水分含量和花色苷含量均呈极显著负相关;果实横径与果肉厚度、水分含量均呈极显著正相关;果肉厚度与水分含量呈极显著正相关,与花色苷含量呈显著正相关(图2)。这些丰富的性状差异,为后续优质辣椒遗传改良时亲本选择选配提供依据。



同一性状左图为创新种质群体种质分布图,右图为地方品种群体品种分布图,纵坐标表示各性状数据指标

The left figure shows the germplasm distribution of the innovated germplasm population, and the right figure presents the distribution of the local varieties population for each of the same traits, the ordinate represents the data indicators of each trait

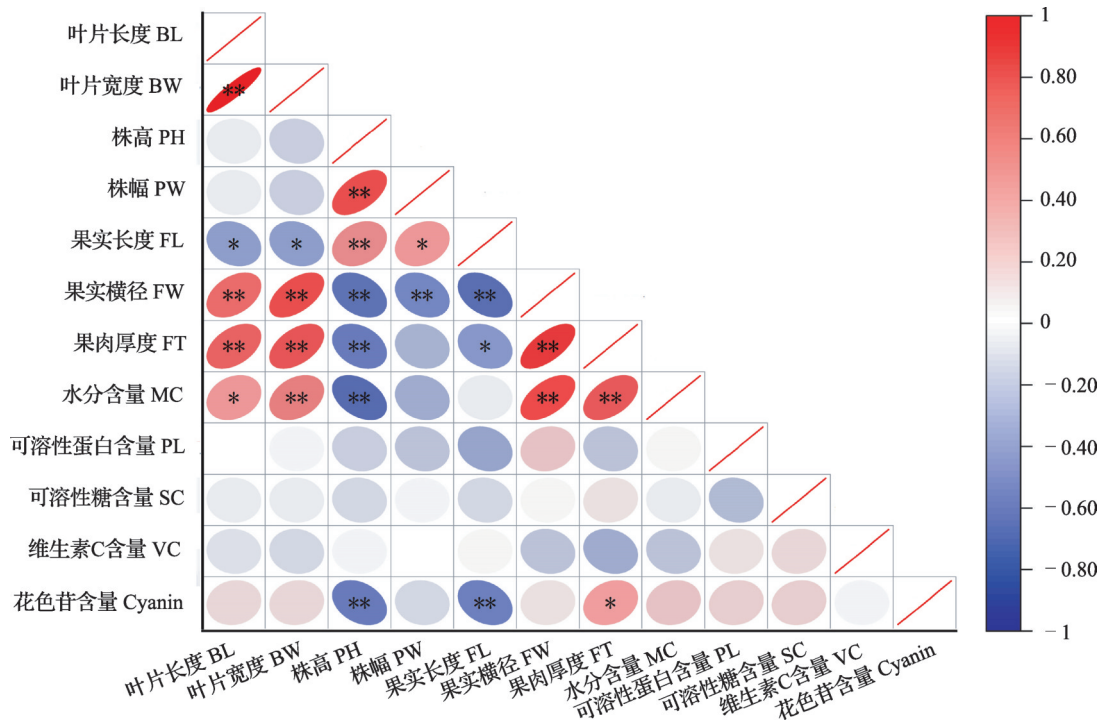
图1 12个形态学性状和品质性状的种质(品种)分布小提琴图

Fig.1 Violin plot of innovated germplasm and local varieties distribution in 12 morphological traits and quality traits

表4 辣椒种质资源形态学和品质性状遗传分析

Table 4 Genetic analysis of chili pepper morphological traits and quality traits

性状 Traits	创新种质遗传力(%) Heritability of innovated germplasm	地方品种遗传力(%) Heritability of local varieties	两群体间的分化系数(%) Differentiation coefficient between populations
叶片长度 BL	97.50	95.78	19.46
叶片宽度 BW	97.52	96.44	16.66
株高 PH	97.95	98.91	3.55
株幅 PW	91.20	93.66	1.30
果实长度 FL	98.53	98.81	31.36
果实横径 FW	98.80	99.23	29.80
果肉厚度 FT	95.45	98.02	34.71
水分含量 MC	97.49	97.75	18.49
可溶性蛋白含量 PL	92.44	79.24	4.22
可溶性糖含量 SC	87.73	89.36	1.51
维生素C含量 VC	89.82	90.79	2.61
花色苷含量 Cyanin	96.15	98.39	48.95



\*、\*\*分别表示在  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  水平上显著相关  
 \*,\*\*respectively indicated significant correlation at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels

图2 形态学性状和品质性状相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of morphological traits and quality traits

2.4 12个形态学和品质性状的主成分分析及特异种质筛选

为消除多种性状之间的互作影响,用更少的变量去解释大部分的变异,将参试的100份辣椒种质资源的形态学与品质性状数据标准化后进行主成分分析,分析结果如表5所示,根据特征值大于1的原则,选取前5个主成分,其累计贡献率达69.55%,基本反映全部特征,因此可采用5个主成分代替12个性状对辣椒资源进行评价及筛选。

第1主成分的特征值为2.70,贡献率最大,为22.53%,决定第1主成分的主要是果实横径、果实长度,这些性状均与辣椒果实形态有关,故将第1主成分称为果实形态相关因子;第2主成分的特征值为1.78,贡献率为14.86%,决定第2主成分的主要是水分含量、叶片宽度、株高,这些性状均与辣椒植株表型有关,故将第2主成分称为植株表型相关因子;第3主成分的特征值为1.41,贡献率为11.77%,决定第3主成分的主要是株幅、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量,这些性状与辣椒果实品质有关,故将第3主成分称为果实品质相关因子;第4主成分的特征值为1.27,贡献率为10.55%,决定第4主成分的主要是花色苷含量,故将第4主成分称为花色苷相关因子;第

5主成分的特征值为1.18,贡献率为9.85%,决定第5主成分的主要是可溶性糖含量,故将第5主成分称为可溶性糖相关因子。

利用主成分分析矩阵和总方差解释计算100份辣椒的主成分综合得分,综合得分越高,种质特异性状聚集程度越高。100份辣椒种质综合得分范围是0.26~12.75,根据从大到小排序,获得综合表现前10名的材料(表6),其中有8个是创新种质,2个是地方品种。

2.5 辣椒种质资源SSR分子标记多样性分析

23对SSR引物中有20对引物扩增出条带,对100份辣椒材料进行遗传多样性分析(表7)。共扩增出98个条带,各引物对扩增的条带范围在1~8个之间,其中有68个多态性条带,多态性比例为69.39%(图3)。平均每对SSR引物扩增出3.4个多态性条带,同时发现1个特异性条带,出现在创新种质PP1122中,片段大小为300 bp,该材料在形态学性状上表现为叶片大、植株高、果皮厚。Nei's基因多样性指数可以反映辣椒材料基因的多样性,数值越大表明材料的基因多样性越丰富,不同引物对的Nei's基因多样性指数为0.22~0.67,其中ES321引物的Nei's基因多样性指数最大,CAMS-051和CAMS-335引物的Nei's基因多样性指数最小。

表5 12个性状的特征向量及贡献率

Table 5 Eigenvectors and contribution rates of 12 traits

性状 Traits	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4	主成分5 PC5
叶片长度 BL	0.41	0.37	0.38	0.13	-0.08
叶片宽度 BW	-0.41	0.48	0.09	0.06	0.20
株高 PH	-0.35	0.47	-0.31	0.21	0.36
株幅 PW	-0.29	0.38	0.77	0.12	-0.27
果实长度 FL	0.82	0.01	-0.07	-0.26	0.01
果实横径 FW	0.82	0.26	-0.02	0.16	0.11
果肉厚度 FT	0.28	0.24	0.26	-0.49	0.44
水分含量 MC	0.13	0.66	-0.54	-0.78	-0.40
可溶性蛋白含量 PL	0.31	-0.90	0.62	-0.27	0.15
可溶性糖含量 SC	-0.17	-0.63	0.51	0.02	1.12
维生素C含量 VC	0.69	-0.53	-0.58	1.92	-0.43
花色苷含量 Cyanin	0.32	-0.19	-0.61	1.94	-0.13
特征值 Eigen value	2.70	1.78	1.41	1.27	1.18
贡献率 (%) Contribution rate	22.53	14.86	11.77	10.55	9.85
累计贡献率 (%) Cumulative contribution rate	22.53	37.39	49.16	59.70	69.55

表6 前10名材料的综合得分及排名

Table 6 Overall score and ranking of the top 10 varieties

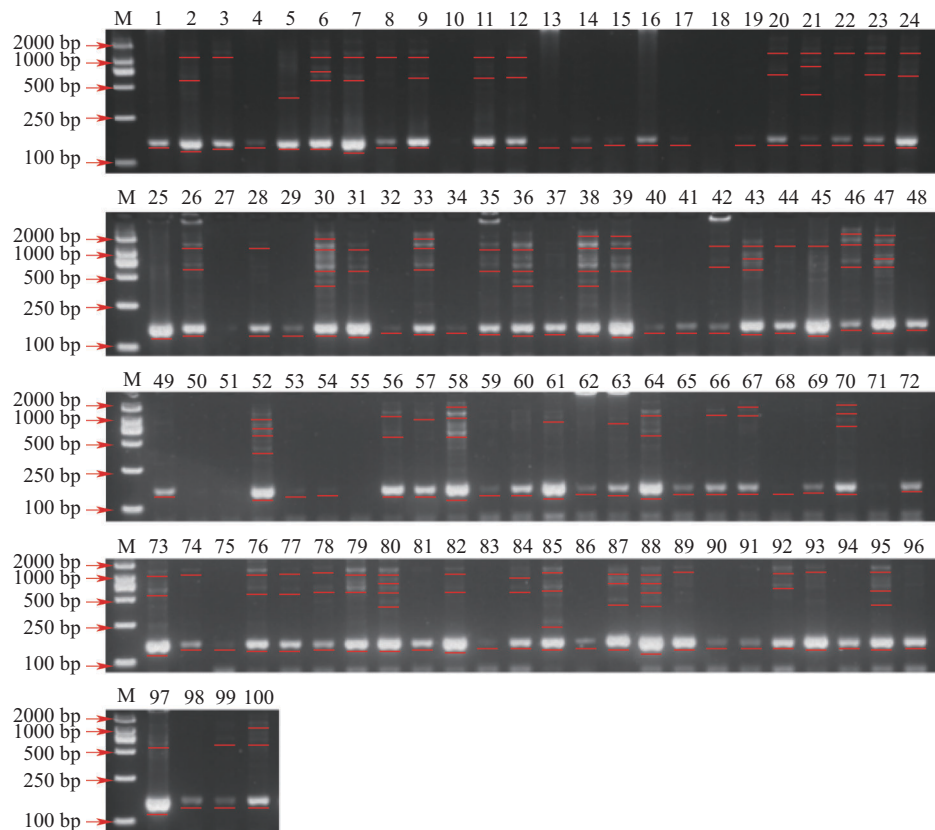
排名 Rank	编号 No.	名称 Name	综合得分 Comprehensive component	主成分 Principal components	维生素C含量 (mg/100 g) VC	花色苷含量 (mg/100 g) Cyanin	来源 Origin
1	18	PP1122	12.75	1	50.93	6.20	自选品系
2	14	PP42	8.44	1	66.15	6.71	自选品系
3	8	PP231	8.33	1	73.66	7.31	自选品系
4	19	PP91	7.94	1	106.81	4.46	自选品系
5	12	PP71	7.69	2	75.32	4.55	自选品系
6	46	朝地椒	5.71	5	204.40	3.00	湖南长沙
7	55	芙蓉线椒	5.38	3	53.11	0.74	湖南长沙
8	27	PP221	5.02	1	74.88	2.99	自选品系
9	24	紫彩椒	4.96	3	70.44	3.16	自选品系
10	32	PP9411	4.26	1	33.98	3.45	自选品系



表 7 20 对有效引物多样性分析

Table 7 20 pairs of effective primer diversity analysis

引物 Primer	条带数 Stripes number	多态性条带数 Number of polymorphic bands	多态性比例(%) Polymorphism ratio	Nei's 基因多样性指数 Nei's genetic diversity index
CAMS-378	10	8	11.76	0.36
ES105	3	2	2.94	0.53
ES321	4	3	4.41	0.67
CAMS-020	3	1	1.47	0.29
CAMS-040	3	1	1.47	0.29
CAMS-051	4	1	1.47	0.22
CAMS-065	3	1	1.47	0.38
CAMS-045	4	2	2.94	0.48
CAMS-063	3	2	2.94	0.35
CAMS-022	3	2	2.94	0.43
CAMS-121	5	3	4.41	0.40
CAMS-101	9	8	11.76	0.35
CAMS-120	6	5	7.35	0.50
CAMS-302	8	7	10.29	0.43
CAMS-335	3	2	2.94	0.22
CAMS-050	8	7	10.29	0.32
CAMS-053	5	3	4.41	0.49
CAMS-312	7	6	8.82	0.49
CAMS-124	4	2	2.94	0.45
CAMS-330	3	2	2.94	0.50



M: Marker 2000 bp; 编号同表 1, 下同; 红色表示多态性条带

Number is the same as table 1, the same as below; Red indicates polymorphic bands

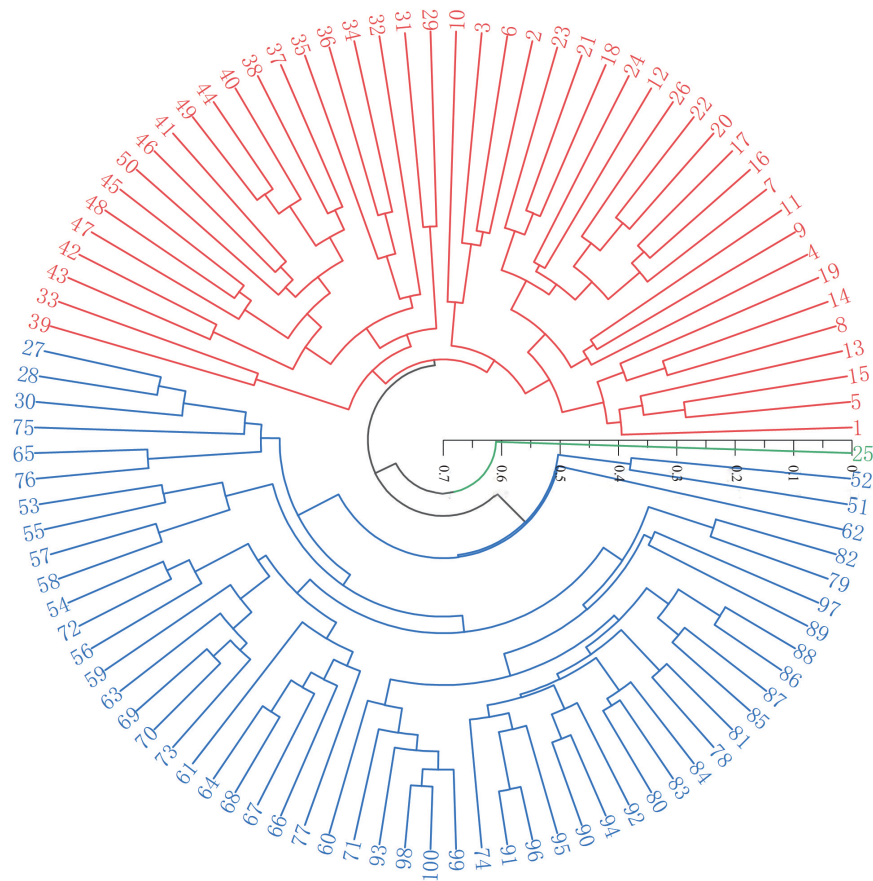
图 3 引物 ES105 多态性电泳图

Fig. 3 Polymorphism electrophoresis by primer ES105

## 2.6 基于形态学和品质性状及SSR分子标记的辣椒种质聚类分析

基于表型性状的聚类分析不能准确地反映材料之间的亲缘关系,基于SSR分子标记的聚类分析不一定在性状中有所表现,因此本研究将形态学和品质性状数据无量纲化处理后与SSR分子标记的0、1矩阵数据组建总矩阵进行聚类分析(图4),据此,可将100份辣椒材料分成3个类群。类群I包括53份材料,其中50份为地方品种,3份为创新种质,表现为果实较长、可溶性糖含量和维生素C含量较高;类群II包括46份材料,其中35份为创新种质,11份为地方品种,表现为叶片较大、果实较宽、可溶性蛋白含量较高;类群III只有1份创新种质材料,表现为叶片较长、植株长势较好、营养成分含量高。结

果表明供试材料遗传多样性较为丰富,其中创新种质绝大部分聚集在类群II,其遗传多样性相对于地方品种较窄,但是创新种质与亲本亲缘关系较近,与大多数地方品种较远,其性状表现出一定的新颖性和特异性。创新种质由编号24的选育材料和编号45的地方品种杂交获得,两亲本都在类群II,均表现为植株较高,但遗传关系相对较远。材料45为牛角椒,可溶性蛋白含量较高,材料24为灯笼椒,水分含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和花色苷含量均较高,但维生素C含量较低。经过杂交和自交选择,部分创新种质出现了性状重组甚至超亲。在未来,应多与亲缘关系较远的优异地方品种进行杂交重组,拓宽创新种质的遗传背景,对于优异的辣椒资源,可根据不同育种目标分别加以充分利用。



蓝色:类群I;红色:类群II;绿色:类群III

Blue: Group I; Red: Group II; Green: Group III

图4 基于形态学和品质性状及分子数据特征构建的100份辣椒种质聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of 100 chili pepper varieties based on morphological and quality traits and marker data

## 3 讨论

辣椒种质资源遗传多样性是解决当前国内辣椒育种中优异种质资源缺乏、遗传多样性狭窄问题的前提与基础<sup>[22]</sup>。目前研究种质资源多样性的方

法有很多种,其中,表型性状是最直观、最简便的方法,但受环境影响较大,且所需周期长,分子标记是反映物种在基因水平上多样性的最稳定、便捷的方法,但受标记类型和数量影响<sup>[23]</sup>。表型与分子标记的结果之间存在着某种程度的一致性,把二者联

系起来,互相验证,可以更加科学地分析辣椒种质资源的亲缘关系,对依靠单一性状和主观经验对辣椒种质进行分类的方法进行改进,提升对辣椒资源鉴定认识水平。

农艺性状遗传与变异结果分析显示,创新种质和地方品种的叶片长度、株幅和水分含量的变异系数均低于20%,遗传多样性较低,地方品种的果实长度、果实横径、果肉厚度、水分含量等8个性状的变异系数均大于创新种质,说明创新种质的遗传多样性低于地方品种,但是创新种质的一些新颖性状与地方品种的优势性状结合改良的空间很大,将来可以形成更多农艺性状各异的紫皮辣椒品种。

从辣椒品质性状改良来看,在相同的生育期和生长环境中,某些创新种质果实的花色苷含量明显高于多数地方品种,且花色苷含量随着紫色的加深而积累,紫色越深,花色苷含量越多,但维生素C含量略低于绿皮辣椒。创新种质的幼嫩果实为绿色,商品成熟期果实呈紫色,生理成熟期果色也与绿皮辣椒等一样会转变为红色,维生素C含量也会有一定的增加,但提高创新种质商品果实的维生素C含量依然很重要。因此,在后续的创新种质改良时,可利用高维生素C含量的辣椒材料作为亲本之一,实现精准遗传改良。

通过相关性分析和主成分分析等方法对种质性状进行遗传分析研究,已广泛运用于种质分类、育种以及多样性研究中<sup>[24]</sup>。从相关性系数可以直接看出12个性状之间有23组达显著或极显著水平,其中株高和果实长度与花色苷含量均呈极显著负相关,果肉厚度与花色苷含量呈显著正相关,这些结果为今后测定辣椒种质花色苷含量提供依据。通过计算综合得分得到排名前10的材料,分别为PP1122、PP42、PP231、PP91、PP71、朝地椒、芙蓉线椒、PP221、紫彩椒、PP9411,该排名体现的是材料特异性状的聚集程度,其中排名前5的都是创新种质,性状表现优异,但维生素C含量较低,而排名第6的朝地椒是绿皮辣椒,其维生素C含量较高(204.40 mg/100g)。据此,可根据杂交亲本选配原则,以具有较多优良性状的创新种质为母本,将朝地椒材料作为父本,进行杂交试验和品质改良。本课题组已将编号45的红辣椒809和编号71的高丰901材料作为亲本与紫皮辣椒杂交,经过后代筛选牛角椒的稳定系,并配组培育出江大紫椒1号[GPD辣椒(2023)420012]和江大紫椒2号[GPD辣椒(2023)420013]。

## 参考文献

- [1] Kaur A, Irwin R, Donis-Gonzalez I R, Clair D A S. Evaluation of a hand-held spectrophotometer as an in field phenotyping tool for tomato and pepper fruit quality. *The Plant Phenome Journal*, 2020, 3(1):e20008
- [2] 苗悦. 辣椒抗象耳豆根结线虫性状的全基因组关联分析. 海口:海南大学, 2022  
Miao Y. GWAS analysis of *Meloidogyne enterolobii* resistance trait in *Capsicum annuum*. Haikou: Hainan University, 2022
- [3] 邹学校. 辣椒遗传育种学. 1版. 北京:科学出版社, 2009  
Zou X X. Pepper genetics and Breeding. 1st edn. Beijing: Science Press, 2009
- [4] Nankar A N, Todorova V, Tringovska I, Pasev G, Radeva-Ivanova V, Ivanova V, Kostova D. A step towards Balkan *Capsicum annuum* L. core collection: Phenotypic and biochemical characterization of 180 accessions for agronomic, fruit quality, and virus resistance traits. *PLoS ONE*, 2020, 15(8), e0237741
- [5] 刘林娅, 黄亚成, 杨那. 81份辣椒种质资源表型性状的遗传多样性分析. *热带作物学报*, 2023, 44(4):706-715  
Liu L Y, Huang Y C, Yang N. Genetic diversity of phenotypic traits in 81 *Capsicum annuum* germplasm. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023, 44(4):706-715
- [6] 李平平, 张祥, 刘雨婷, 谢志和, 张芮豪, 赵凯. 辣椒63份种质果皮颜色与呈色物质的关系. *园艺学报*, 2022, 49(7):1589-1601  
Li P P, Zhang X, Liu Y T, Xie Z H, Zhang R H, Zhao K. Studies on the relationship between pigment composition and fruit coloration of 63 peppers. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(7):1589-1601
- [7] 袁欣捷, 周坤华, 吴茵. 辣椒核心种质遗传多样性及群体结构分析. *分子植物育种*, 2019, 17(9):3090-3104  
Yuan X J, Zhou K H, Wu Y. Genetic diversity and population structure analysis of pepper core collections. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(9):3090-3104
- [8] Gu X Z, Cao Y C, Zhang Z H, Zhang B X, Hong Z H, Zhang X M, Wang H P, Li X X. Genetic diversity and population structure analysis of capsicum germplasm accessions. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6):1312-1320
- [9] 何冰冰, 万何平, 欧阳静美, 郭瑞, 黄本亮, 陈禅友. '江大紫辣椒'果实品质分析. *江汉大学学报:自然科学版*, 2021, 49(3):35-40  
He B B, Wan H P, Ouyang J M, Guo R, Huang B L, Chen C Y. Analysis of fruit quality of 'Jianda Purple Chili Pepper'. *Journal of Jiangnan University: Science Edition*, 2021, 49(3):35-40
- [10] 中华人民共和国农业部. NY/T 2234-2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 辣椒. 北京:中国农业出版社, 2012  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2234-2012 Guidelines for the conduct of tests for

- distinctness, uniformity and stability. *Cucumber (Cucumis sativus L.)*. Beijing: China Agriculture Press, 2012
- [11] 徐亚, 范会芬, 赵珂玲, 苏伟华, 冯雅茗, 肖付明, 王冬梅. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化. *大豆科学*, 2022, 41(2):196-202  
Xu Y, Fan H F, Zhao D L, Su W H, Feng Y M, Xiao F M, Wang D M. Optimization of extractor method for water-soluble protein determination by coomassie bright blue method. *Soybean Science*, 2022, 41(2):196-202
- [12] 孙晓玲. 蒽酮-硫酸法测定秋葵多糖条件的优化. *中国食品添加剂*, 2019, 30(9):154-158  
Sun X L. Optimization of polysaccharide determination in okra by anthronesulfuric acid method. *China Food Additive*, 2019, 30(9):154-158
- [13] 罗阿东, 陆邹红, 蔡秋, 王艳, 曹云恒, 陈霄. 不同提取方法提取辣椒及其制品中 DNA 效果研究. *现代农业科技*, 2019 (1):212-213, 215  
Luo A D, Lu Z H, Cai Q, Wang Y, Cao Y H, Chen X. Study on the effect of different extraction methods on extracting DNA from Chili pepper and their products. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2019(1):212-213, 215
- [14] Minamiyama Y, Tsuru M, Hirai M. An SSR-based linkage map of *Capsicum annuum*. *Molecular Breeding*, 2006, 18(2): 157-169
- [15] 张强强, 梁赛, 王艳, 贾利, 方凌, 张其安, 江海坤, 隋益虎, 董言香. 基于表型性状和 SSR 标记的 57 份辣椒种质遗传多样性分析. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(4):536-566  
Zhang Q Q, Liang S, Wang Y, Jia L, Fang L, Zhang Q A, Jiang H K, Sui Y H, Dong Y X. Genetic diversity analysis of 57 germplasms of *Capsicum annuum* based on phenotypic traits and SSR markers. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2020, 28(4):536-566
- [16] Lee J M, Nahm S H, Kim Y M, Kim B D. Characterization and molecular genetic mapping of microsatellite loci in pepper. *Theoretical and Applied Genetics*, 2004, 108(4):619-627
- [17] Sun M. Genetic diversity in three colonizing orchids with contrasting mating systems. *American Journal of Botany*, 1997, 84(2):224-232
- [18] 陈存, 丁昌俊, 黄秦军, 张静, 刘宁, 李波. 美洲黑杨表型和生理性状多样性及群体结构分析. *北京林业大学学报*, 2021, 43(6):1-12  
Chen C, Ding C J, Huang Q J, Zhang J, Liu Y, Li B. Phenotypic and physiological trait diversity and population structure of *Populus deltoides*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(6):1-12
- [19] 王文晓, 程浩, 徐玉凤, 葛红, 杨树华, 赵鑫, 武荣花, 贾瑞冬. 带叶兜兰 5 个野生居群表型多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(5): 1196-1206  
Wang W X, Cheng H, Xu Y F, Ge H, Yang S H, Zhao X, Wu R H, Jia R D. Phenotypic diversity analysis of five wild *Paphiopedilum hirsutissimum* populations. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(5): 1196-1206
- [20] Baek S, Hong H, Yang I H. Classification of skeletal phenotypes of preadolescent patients with isolated cleft palate using principal component analysis and cluster analysis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2023, 34(7): 2051-2055
- [21] 张斌斌, 蔡志翔, 沈志军, 严娟, 马瑞娟, 俞明亮. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价. *中国农业科学*, 2021, 54(11): 2406-2420  
Zhang B B, Cai Z X, Shen Z J, Yan J, Ma R J, Yu M L. Diversity analysis of phenotypic characters in germplasm resources of ornamental peaches. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2406-2420
- [22] 王立浩, 张宝玺, 张正海, 曹亚从, 于海龙, 冯锡刚. “十三五”我国辣椒育种研究进展、产业现状及展望. *中国蔬菜*, 2021(2):21-29  
Wang L H, Zhang B X, Zhang Z H, Cao Y C, Yu H L, Feng X G. Status in breeding and production of *Capsicum spp* in China during ‘The thirteenth five-year plan’ period and future prospect. *China Vegetables*, 2021(2):21-29
- [23] 潘宝贵, 郭广君, 刁卫平, 刘金兵, 高长洲, 颜伟, 王述彬. 江苏省辣椒地方种质资源表型性状的遗传多样性评价. *辣椒杂志*, 2021 (3):1-7  
Pan B G, Guo G J, Diao W P, Liu J B, Gao C Z, Yan W, Wang S B. Genetic diversity evaluation of phenotypic traits in local chili germplasm resources in Jiangsu province. *Pepper Magazine*, 2021 (3):1-7
- [24] 屈雪华, 邵景杰, 严牧, 何冰冰, 潘磊, 郭瑞, 陈高, 万何平, 陈禅友. 长豇豆营养成分及其遗传和相关性分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(4):1034-1045  
Qu X H, Shao J J, Yan M, He B B, Pan L, Guo R, Chen G, Wan H P, Chen C Y. Genetic and correlation analysis of asparagus bean nutrient composition. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(4):1034-1045