王延宏,吴慧琴,阳宜,等.215份甜椒资源表型性状遗传多样性分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):29-40.
Wang Y H, Wu H Q, Yang Y, et al.Analysis of genetic diversity in phenotypic traits of 215 sweet pepper resources[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(1):29-40.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202407023

215份甜椒资源表型性状遗传多样性分析

王延宏,吴慧琴,阳宜,王静,刘雪晴,王麓尧,成妍*

(山西农业大学 园艺学院,山西 晋中 030801)

摘　要:[目的]本文旨在探明山西省蔬菜资源共享服务平台保存的甜椒种质资源的遗传多样性。[方法]利用主成分分析、相关性分析和聚类分析方法,对来自国内外215份甜椒资源的33个表型性状(13个数量性状和20个质量性状)进行遗传多样性分析。[结果]215份甜椒资源的遗传多样性丰富,其中数量性状的遗传变异系数范围在12.22%～30.32%,变异系数最大的是商品果纵径,最小的是心室数,变异范围最大的数量性状是商品果纵径为15.79%～110.57%,变异范围最小的是主茎粗为7.53%～24.07%;质量性状的遗传多样性指数范围在5.177～5.368,分枝类型的遗传多样性指数最大,花冠色遗传多样性指数最小,各甜椒材料间遗传变异突出。采用主成分分析将33个表型性状分为8个主成分,这8个主成分贡献率为3.131%～14.812%,累积贡献率为14.812%～65.421%,所有成分均代表了甜椒表型性状的主要信息;在528对相关性状中有186对达到显著水平,因此在选择材料时不能只考虑单一性状,应同时考虑相关性状遗传变异;215份甜椒资源在遗传距离为0.73时聚为5类,每一类材料的表型性状均有其特点。[结论]由结果可知,花柱长度、叶色、叶面特征、青熟果色、果实横切面形状和果形等20个性状是引起甜椒表型差异的主要因素,所选甜椒资源遗传差异大,变异丰富。本研究可为今后甜椒资源筛选和杂交育种提供理论依据。

关键词:甜椒; 表型性状; 遗传多样性; 主成分分析; 相关性分析; 聚类分析
中图分类号:S641.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)01-0029-12

Analysis of genetic diversity in phenotypic traits of 215 sweet pepper resources

Wang Yanhong, Wu Huiqin, Yang Yi, Wang Jing, Liu Xueqing, Wang Luyao, Chang Yan*

(*College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the genetic diversity of sweet pepper germplasm resources preserved in the Shanxi Province Vegetable Resource Sharing Service Platform. [Methods] The genetic diversity of 33 phenotypic traits (13 quantitative traits and 20 qualitative traits) from 215 sweet pepper resources, originating both domestically and internationally, was analyzed using principal component analysis, correlation analysis, and cluster analysis. [Results] The genetic diversity among the 215 sweet pepper resources was found to be rich, with the genetic variation coefficient for quantitative traits ranging from 12.22% to 30.32%. The longitudinal diameter of commercial fruit exhibited the highest variation coefficient, whereas the number of locules showed the lowest. The longitudinal diameter of commercial fruit also displayed the largest variation range (15.79% to 110.57%), while the main stem thickness exhibited the smallest range (7.53% to 24.07%). For qualitative traits, the genetic diversity indices ranged from 5.177 and 5.368, with branching type demonstrating the highest index and corolla color the lowest, indicating significant genetic variation among the sweet pepper materials. Principal component analysis grouped the 33 phenotypic traits into eight principal components. These components had contribution rates ranging from 3.131% to 14.812%, with a cumulative contribution rate of 65.421%, representing the main phenotypic information of the

收稿日期:2024-07-07　　**修回日期**:2024-09-12
基金项目:山西省重点研发计划项目(202102140601014;202202140601006);山西省科技创新人才团队专项(20230451001018)
作者简介:王延宏(ORCID:0009-0008-2672-0897),硕士研究生,研究方向:辣椒栽培育种,E-mail:1293157903@qq.com
*通信作者:成妍(ORCID:0000-0002-3500-1738),博士,副研究员,硕士生导师,研究方向:园艺植物种质创新与利用,E-mail:chengyan820620@163.com

sweet peppers. Among the 528 pairs of traits analyzed, 186 pairs exhibited significant correlations, emphasizing the importance of considering genetic variation in related traits when selecting materials. Cluster analysis, performed at a genetic distance of 0.73, categorized the sweet pepper resources into five categories, each with distinct phenotypic characteristics. The results show that 20 traits, including style length, leaf color, leaf surface characteristics, immature fruit color, fruit cross-sectional shape, and fruit shape, were identified as the main contributors to phenotypic differences in sweet peppers. [Conclusion] The selected sweet pepper resources exhibited significant genetic differences and abundant variations. These findings provided a theoretical basis for the screening of sweet pepper resources and hybrid breeding programs.

Keywords: Sweet pepper, Phenotypic traits, Genetic diversity, Principal component analysis, Correlation analysis, Cluster analysis

甜椒(*Capsicum annuum* L.)别名青椒、菜椒,属一年生草本植物,起源于南美,作为蔬菜和调味品分布在世界各地[1]。随着自然培育和人工选择,甜椒果肉厚,果实体积增大,微甜无辣味,以其独特的色泽和营养成分成为全球共享的蔬菜作物[2],传入我国后成为重要的蔬菜,可加工、可鲜食,具有重要的经济价值,不仅在我国贵州、云南、甘肃、山西等地广泛种植,在世界其它地方也广泛种植[3],是人类饮食中重要的抗坏血酸和类胡萝卜素以及酚类化合物的最佳来源之一[4]。近年来,由于我国不同地区气候和环境差异大,甜椒种质资源相对有限,导致优质品种滞后,高品高产的优良品种不多,限制了甜椒产业的发展,因此引进和培育出优良甜椒品种是至关重要的。

表型性状是植物重要表现形式,由环境和基因决定,表型性状的研究不仅操作简单、价格低廉,且结果简洁明了,是研究遗传变异最基础、最直接的方法[5]。表型性状的研究在国内外受众多学者的关注,如张国儒等[6]对272份辣椒的表型性状遗传多样性分析,结果表明,22个性状的平均变异系数为47.59%,变异系数越高,遗传越稳定。任丽等[7]对457份辣椒的47个基本性状作为形态学标记进行多层次综合分析,结果显示品种间年度表现稳定,相关系数平均88.0%,个体测量性状稳定于群体目测性状,群体测量性状稳定性最低。Moon等[8]对2种辣椒513个材料的农业形态特征和植物化学成分进行表征,并确定成熟果实的朝向和颜色与植物化学物质之间的关系。Rajametov等[9]以39份辣椒为材料,在不同温度条件下对其表型性状进行研究,结果表明,不同基因型在低温下的茎粗和主轴长度存在差异,且39个处理的辣椒材料通过聚类分析聚为7类。表型性状的研究是通过采用遗传上较为稳定且不易受环境影响的性状,来揭示群体的遗传规律及变异大小,最终为种群的保护提供理论支持[10]。

遗传多样性是生物在不断演变和进化过程中积累和变化的结果,且对生物的生存与演化起着至关重要的作用[11]。植物遗传多样性的研究有形态学[12]、生物化学[13]和分子[14]等方法,前人已在水稻(*Oryza sativa* L.)[15]、扁豆(*Lablab purpureus* L.)[16]、番茄(*Solanum lycopersicom* L.)[17]等作物上都进行了相关研究。当前关于辣椒遗传多样性的研究较多,Guo等[18]对179个辣椒野生品种和现有品种的22个定性性状、13个数量性状和27个分子标记进行遗传多样性分析,结果表明现有品种的数量性状多样性高于地方品种,而分子标记遗传多样性低于地方品种。袁娟伟等[19]以275份辣椒为研究材料,对42个表型性状进行遗传多样性分析,结果表明275份辣椒材料展现出丰富的遗传多样性,共17个表型性状是引起辣椒材料表型不同的主要因素。谭放军等[20]对98份辣椒的表型性状和叶绿体trnH-psbA序列进行分析,将所有材料分为3大类,筛选出了31份核心材料。在全国范围内,关于辣椒遗传多样性报道较多,但关于甜椒遗传多样性报道较少。

本研究通过对来自国内外的215份甜椒资源为试验材料,对33个表型性状进行遗传多样性分析、主成分分析、相关性分析和聚类分析,旨在为今后甜椒特异资源的筛选提供科学方法。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试的215份甜椒为山西省蔬菜资源共享服务平台保存的甜椒纯合资源,其中117份来自国外,98份来自国内(附表1)。2023年3月1日在山西省晋中市榆次区东阳镇山西农业大学试验基地(37.82° N,112.87° E)温室播种育苗,穴盘规格72穴,每穴1粒。当幼苗长至六叶一心时(2023年5月

初)定植于塑料大棚中,定植前施足底肥,每份资源每小区定植10株,株行距为40 cm×60 cm,随机区组排列,设3次重复。采用地膜覆盖和膜下滴灌的栽培模式,肥水、病虫害防治等田间管理基本一致。

1.2　试验方法

表型性状调查方法参照《辣椒材料资源描述规范和数据标准》进行[21]。各小区材料随机选取5株调查观测,各个性状的记载标准参照(表1、表2)进行,其中首花节位、主茎粗、主茎长度、叶片长度、叶片宽度、叶柄长度、株高、株幅、商品果纵径、商品果横径、果梗长度、果肉厚和心室数共13个性状采用实际测量数值。

1.3　统计分析

应用SPSS 26.0软件分析数量性状的变异系数、平均值、标准差、最大值和最小值,完成质量性状频率分布分析、多样性分析、主成分分析、相关性分析和聚类分析;应用Origin 2021软件绘制相关性分析及聚类分析热图。

2　结果与分析

2.1　数量性状多样性分析

由表3可见,215份甜椒数量性状的变异范围最大的是商品果纵径,15.79%～110.57%,变异范围最小的是主茎粗,7.59%～24.07%。变异系数范围在12.22%～30.32%之间,商品果纵径变异系数最大,30.32%,心室数的变异系数最小,12.22%。商品果横径、果肉厚、果梗长度、主茎长和叶柄长度的变异范围和变异系数均较高,说明在筛选甜椒材料时可以着重考虑。

2.2　质量性状多样性分析

由表4可见,215份甜椒20个质量性状的遗传多样性指数范围在5.177～5.368,其中分枝类型遗传多样性指数最高,为5.368,叶片颜色多样性指数次之,为5.352,花柱颜色及青熟果色遗传多样性指数相同,为5.346,遗传多样性指数偏小的是果面光泽和果形,为5.273和5.205;遗传多样性指数最小是花冠色,为5.177。由性状频率分布可知,花冠颜色以白色为主,花药的颜色以浅蓝色为主,花柱长度以长于雄蕊为主,花梗着生状态以直立为主,花柱颜色以白色为主,叶片的形状以长卵形为主,叶片的颜色以绿色为主,叶面特征以平滑为主,株型以直立为主,分枝类型以无限分枝为主,果面光泽以有光泽为主,青熟果色以绿色为主,果实表面棱沟以深为主,果实着生方向以向下为主,果实的果肩形状以凸为主,果实的果顶形状以凹为主,果实的形状以方灯笼形为主,果实的横切面形状以近三角形为主,胎座大小以中为主,老熟果实以鲜红色为主。上述结果表明20个质量性状具有丰富的遗传多样性。

2.3　主成分分析

由表5可见,8个主成分贡献率为3.131%～14.812%,累计贡献率为14.812%～65.421%。第1主成分的特征值为4.888,贡献率为14.812%,叶片长度、叶片宽度和商品果纵径为主要性状。第2主成分特征值为3.680,贡献率为11.151%,果形、株高、商品果纵径为主要性状。第3主成分特征值为1.853,贡献率为5.614%,花柱长度、果面棱沟、果实横切面形状为主要性状。第4主成分特征值为1.501,贡献率为4.548%,叶色、叶面特征和青熟果色为主要性状。第5主成分特征值为1.278,贡献率分别为3.874%,果实横切面形状、老熟果色和心室数为主要性状。第6主成分特征值为1.116,贡献率为3.381%,果梗长度、主茎粗和株型为主要性状。第7主成分特征值为1.105,贡献率为3.349%,花柱长度、叶面特征和分枝类型为主要特征。第8主成分特征值为1.033,贡献率分别为3.131%,果肉厚、叶色和花柱颜色为主要特征。所有成分均代表了甜椒表型性状的主要信息量,其中花柱长度、叶色、叶面特征和果实横切面形状等20个性状是引起甜椒表型差异的主要因素。

2.4　相关性分析

由图1可见,528对性状中,有186对性状显著相关。花梗着生状态与叶片形状、叶片长度、叶片宽度和果面特征等性状有显著的正相关性,与株高和株型有显著的负相关性,有12个性状与花梗着生状态显著相关。青熟果色与花梗着生状态、叶片长度、叶片宽度、叶色、株高和株幅等性状有显著的正相关性,而与花药和果实形状有显著的负相关性,共有13个性状与青熟果色显著相关。果肉厚度与花梗着生状态、叶片长度、叶片宽度和分枝类型等性状有显著的正相关性,与花药颜色和叶片形状等有显著的负相关性,共13个性状与果肉厚度显著相关。株高与首花节位、叶片颜色、叶片长度和叶片宽度等多个性状有显著的正相关

表1 甜椒质量性状记载标准

Table 1 Recording standard for recording quality traits of sweet pepper

质量性状 Qualitative traits	记载标准 Record standard
花冠色 Corolla color	对椒始花期,1=白;2=浅绿;3=紫
花药颜色 Anther color	门椒始花期,1=白;2=浅黄;3=黄;4=浅蓝;5=蓝;6=紫
花柱长度 Style length	对椒始花期,1=短于雄蕊;2=与雄蕊近等长;3=长于雄蕊
花梗着生状态 Pedicle growth statu	对椒始花期,1=下垂;2=侧生;3=直立
花柱颜色 Style color	对椒始花期1=白;2=蓝;3=紫
叶形 Leaf shape	四门斗始花期,1=卵圆;2=长卵形;3=披针形
叶色 Leaf color	四门斗始花期,1=黄绿;2=浅绿;3=绿;4=深绿
叶面特征 Leaf surface characteristic	四门斗始花期,1=平滑;2=微皱;3=皱
株型 Plant type	四门斗始花期,1=展开;2=半直立;3=直立
分枝类型 Branching type	门椒成熟期,1=有限分枝;2=无限分枝
青熟果色 Unripe fruit color	对椒商品成熟期,1=黄白;2=乳黄;3=黄绿;4=浅绿;5=绿;6=深绿;7=墨绿;8=紫;9=紫黑
果面棱沟 Fruit surface ridge	对椒商品成熟期,0=无;1=浅;2=中;3=深
果肩形状 Fruit shoulder shape	对椒商品成熟期,0=无果肩;1=凸;2=微凹近平;3=凹陷
果顶形状 Fruit tip shape	对椒商品成熟期,1=细尖;2=钝圆;3=凹;4=凹陷带尖
果面光泽 Fruit surface glossiness	对椒商品成熟期,0=无;1=有
果形 Fruit shape	对椒商品成熟期,1=扁灯笼形;2=方灯笼形;3=长灯笼形;4=短锥形;5=长锥形;6=短牛角椒;7=长牛角形;8=短羊角形;9=长羊角形;10=短指形;11=长指形;12=线性;13=近球形
果实着生方向 Fruit implantation direction	达到商品成熟度时甜椒果实尖端的朝向,1=向上;2=向下
果实横切面形状 Fruit cross section shape	对椒商品成熟期,1=近圆形;2=近三角形;3=近四边形;4=不规则形状
胎座大小 Placenta siza	胎座剖面横径与果实横径之比,1=小;2=中;3=大
老熟果色 Ripe fruit color	对椒果实红熟期,1=橙红;2=橘红;3=鲜红;4=暗红;5=紫红

性,与花梗着生状态和胎座大小有显著的负相关性,共17个性状与株高度显著相关。果肩形状与叶片颜色、叶片长度和叶片宽度等性状有显著的正相关性,而与花药颜色和叶片形状有显著的负相关性,共17个性状与果肩形状显著相关。叶片长度与花梗着生状态、叶色和株幅等性状有显著的正相关性,与花药颜色和叶片形状有显著的负相关性,共19个性状与叶片长度显著相关。商品

表2　甜椒数量性状记载标准

Table 3　Recording standards for quantitative traits of sweet pepper

数量性状 Quantitative traits	记载标准 Record standard
首花节位 First flower node	在门椒始花期,调查主茎第一片真叶到第一朵花的叶片数
主茎粗/cm Main stem diameter	在门椒成熟期,测量门椒假二杈下0.5 cm处直径
主茎长度/cm Main stem length	在四门斗始花期,辣椒基部到主茎第一分杈点的距离
叶片长度/cm Leaf length	在四门斗始花期,测量植株中部完整且生长正常的最大叶片的长度
叶片宽度/cm Leaf width	在四门斗始花期,测量植株中部完整且生长正常的最大叶片的宽度
叶柄长度/cm Petiole length	在四门斗始花期,测量植株中部完整且生长正常的最大叶片叶柄的长度
株高/cm Plant height	在门椒成熟期,测量地面至植株最高处
株幅/cm Plant width	在门椒成熟期,测量叶幕最大直径的垂直投影距离
商品果纵径/cm Commercial fruit longitudinal diameter	对达到商品成熟度的对椒,测量果蒂至果基部的垂直长度
商品果横径/cm Commercial fruit transverse diameter	对达到商品成熟度的对椒,测量与纵径垂直的商品果最大横切面的直径
果梗长度/cm Fruit pedicel length	对达到商品成熟度的对椒,测量甜椒果梗与果实连接处到果梗末端的曲线长度
果肉厚/cm Fruit flesh thick	对达到商品成熟度的对椒,测量辣椒果肉的厚度
心室数/个 Carpel number	发育正常,达到商品成熟度对椒果实心室的个数

果横径与花梗着生状态、叶片颜色、叶片长度和叶片宽度等性状有显著的正相关性,与花药颜色和株型有显著的负相关性,共22个性状与商品果横径显著相关。上述结果表明,植株的叶片特征、果实性状和形态特征之间存在一定的相关性。

2.5　聚类分析

基于33个表型性状对215份甜椒资源进行聚类分析(图2),215份甜椒资源在遗传距离0.73时聚为5大类(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ)。第Ⅰ类共有64份资源,其主要特征包括:白色花冠、黄色或蓝色花药、白色花柱、卵圆形或长卵圆形叶形、绿色或深绿色叶片、半直立或直立株型、向下着生的果实、浅绿色、绿色或深绿色的青熟果、果面有光泽、钝圆或凹顶的果顶,以及鲜红色的老熟果。果实形状多样,包括方灯笼形、长灯笼形、短锥形和长锥形。这一类群可以根据育种时对果形的要求,有针对性地筛选甜椒材料。第Ⅱ类共有51份资源,其主要特征包括:白色花冠、黄色或浅蓝色花药、白色花柱、长卵圆形叶片、绿色叶片、直立株型、向上生长的果实、绿色或深绿色的青熟果、果面有光泽、凹顶的果顶、扁灯笼形或方灯笼形的果形,以及橙红色或鲜红色的成熟果实。该类群在商品果纵横径、果形、株高、株幅等性状上表现较为突出,通过适当的改良和优化,可以在未来的育种工作中培育出优质高产的甜椒。Ⅲ类共有44份资源,其主要特征包括:白色或浅绿色的花冠,黄色或浅蓝色的花药,白色的花柱,长卵圆形的叶子,绿色的叶片,半直立或直立的株型,向上生长的果实,绿色或深绿色的青熟果,有光泽或无光泽的果面,凹顶的果顶,扁灯笼形或方灯笼形的果形,以及鲜红色的成熟果实。这一类群的植株株高较高,代表性的甜椒有16号资源和62号资源,主要来源于

表3 甜椒13个数量性状多样性分析

Table 3 Diversity analysis of 13 quantitative characters of sweet peppers

数量性状 Quantitative traits	变异范围/% Range of variation	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
首花节位 First flower node	9.85～25.33	11.94	18.00	7.00	1.77	14.85
主茎粗/cm Main stem diameter	7.53～24.07	1.30	2.91	0.91	0.22	16.85
主茎长度/cm Main stem length	11.76～42.82	16.28	31.08	8.54	3.66	22.46
叶片长度/cm Leaf length	9.21～24.27	14.56	23.26	8.83	2.14	14.72
叶片宽度/cm Leaf width	9.94～27.53	7.17	11.30	4.08	1.12	15.67
叶柄长度/cm Petiole length	8.76～43.91	6.34	15.78	3.15	1.38	21.82
株高/cm Plant height	12.70～38.65	51.90	79.72	26.20	10.13	19.52
株幅/cm Plant width	9.91～21.29	46.18	59.64	27.78	5.92	12.81
商品果纵径/cm Commercial fruit longitudinal diameter	15.79～110.57	6.93	13.30	1.90	2.10	30.32
商品果横径/cm Commercial fruit transverse diameter	14.81～69.28	5.96	8.70	1.86	1.29	21.62
果梗长度/cm Fruit pedicel length	13.92～64.96	3.51	5.88	1.26	0.82	23.32
果肉厚/cm Fruit flesh thick	10.32～70.68	0.39	0.89	0.13	0.09	23.56
心室数/个 Carpel number	9.13～22.84	3.74	5.00	2.00	0.46	12.22

原始种,属于未改良的品种。第Ⅳ类共有40份资源,其主要特征包括白色花冠、黄色或浅蓝色花药、白色花柱、卵圆形或长卵圆形叶片、绿色叶片、直立株型、果实向下或向上生长、浅绿色、绿色或深绿色的青熟果、果面光滑、有凹顶、果形为扁灯笼形或方灯笼形,以及鲜红色的成熟果实。这一类群的商品果实纵径和横径平均较大,果实偏大,适合作为当前市场上主要推广的品种。第Ⅴ类以白色花冠、黄色或浅蓝色花药、白色花柱、卵圆形或长卵圆形叶形、绿色叶片、半直立或直立株型、向下或向上着生的果实、深绿色青熟果、果面有光泽、凹顶的果顶、扁灯笼形或方灯笼形果形,以及橙红色的老熟果为特征,共有16份资源。这一类群的甜椒虽然因成熟果实的颜色而具有观赏价值,但产量较低。

3 讨论

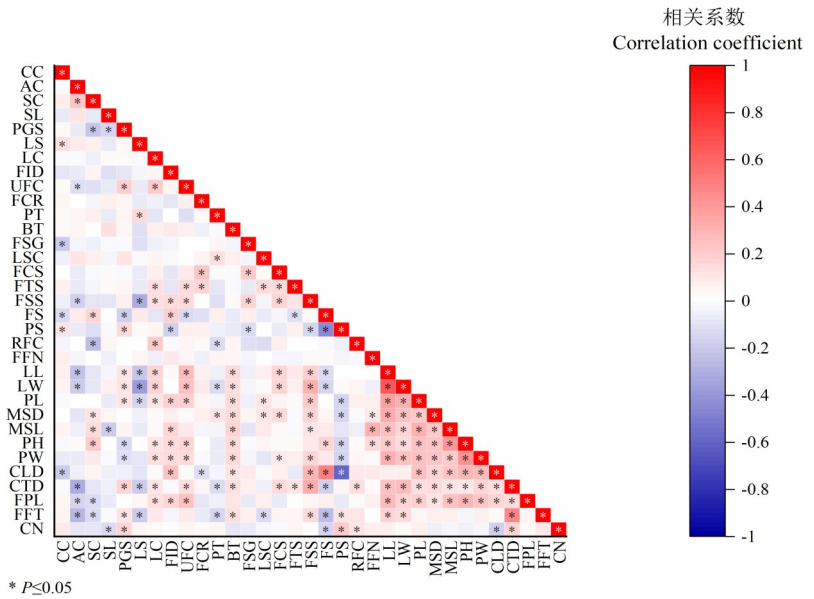
表型性状鉴定是对甜椒最基础和最直观的评价方法。在多样性分析中,裴红霞等[22]在研究中提到,当变异系数低于10%时,表示变异程度较弱,若变异系数介于10%至100%之间,则表示变异程度为中等,若变异系数超过100%,则表示变异程度较强。本研究对215份甜椒材料的13个数量性状进行遗传多样性分析,其变异系数为12.22%～30.32%,属于中等变异。李宁等[23]研究表明,商品果横径、果形指数与果实相关性状间存在丰富变异。本研究分析发现,果实指标(商品果纵径、商品果横径、果肉厚和果梗长度)在数量性

表4　甜椒20个质量性状的频率分布和多样性分析

Table 4　Frequency distribution and diversity analysis of 20 qualitative traits in sweet peppers

质量性状 Qualitative traits	遗传多样性指数 GDI	频率/% Frequency												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
花冠色 Corolla color	5.177		91.62	8.37										
花药颜色 Anther color	5.342		2.79	1.39	24.65	60.93	5.58	4.65						
花柱长度 Style length	5.304		21.86	32.55	45.58									
花梗着生状态 Pedicle growth statu	5.324		14.88	16.27	68.83									
花柱颜色 Style color	5.346		97.67	0.46	1.86									
叶形 Leaf shape	5.318		31.62	62.79	5.58									
叶色 Leaf color	5.352		3.72	7.90	82.79	5.58								
叶面特征 Leaf surface characteristic	5.316		78.13	20.00	1.86									
株型 Plant type	5.351		0.46	39.53	60.00									
分枝类型 Branching type	5.368		1.39	98.60										
青熟果色 Unripe fruit color	5.346		0.46	2.79	6.51	12.55	45.11	32.09			0.46			
果面棱沟 Fruit surface ridge	5.305	0.46	21.39	39.06	39.06									
果肩形状 Fruit shoulder shape	5.283	0.46	35.34	42.72	21.39									
果顶形状 Fruit tip shape	5.330		3.25	19.06	84.18	6.04								
果面光泽 Fruit surface glossiness	5.273	10.23	89.76											
果形 Fruit shape	5.205		37.67	32.09	18.60	7.44	1.86	0.93	0.93				0.46	
果实着生方向 Fruit implantation direction	5.332		30.23	69.76										
果实横切面形状 Fruit cross－section shape	5.310		17.20	35.81	34.88	12.09								
胎座大小 Placenta siza	5.321		22.32	40.46	37.20									
老熟果色 Ripe fruit color	5.325		14.41	4.18	80.46	0.93								

状中变异系数较高,变异突出,与前人研究结果一致。在本研究中,商品果纵径(30.32%)、商品果横径(21.62%)、果梗长度(23.32%)和果肉厚(23.56%)的变异系数均大于首花节位(14.85%)、叶宽(15.67%)和株幅(12.81%)的变异系数,表明在选择甜椒材料时果实形态指标应



CC:花冠色,AC:花药颜色,SC:花柱颜色,SL:花柱长度,PGS:花梗着生状态,LS:叶形,LC:叶色,FID:果实着生方向,UFC:青熟果色,FCR:果面棱沟,PT:株型,BT:分枝类型,FSG:果面光泽,LSC:叶面特征,FCS:果实横切面形状,FTS:果顶形状,FSS:果肩形状,FS:果形,PS:胎座大小,RFC:老熟果色,FFN:首花节位,LL:叶片长,LW:叶片宽,PL:叶柄长,MSD:主茎粗,MSL:主茎长,PH:株高,PW:株幅,CLD:商品果纵径,CTD:商品果横径,FPL:果梗长度,FFT:果肉厚,CN:心室数

CC: Corolla color; AC: Anther color; SC: Style color; SL: Style length; PGS: Pedicle growth statu; LS: Leaf shape; LC: Leaf color; FID: Fruit implantation direction; UFC: Unripe fruit color; FCR: Fruit surface ridges; PT: Plant type; BT: Branching type; FSG: Fruit surface glossiness; LSC: Leaf surface characteristic; FCS: Fruit cross—section shape; FTS: Fruit tip shape; FSS: Fruit shoulder shape; FS: Fruit shape; FS: Placenta size; RFC: Ripe fruit color; FFN: First flower node; LL: Leaf length; LW Leaf width; PL: Petiole length; MSD: Main stem thickness; MSL: Main stem length; PH: Plant height; PW: Plant width; CLD: Commercial fruit longitudinal diameter; CTD: Commercial fruit transverse diameter; FPL: Fruit pedicel length; FFT: Fruit flesh thickness; CN: Carpel number

图1 甜椒33个表型性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of 33 phenotypic characters of sweet peppers

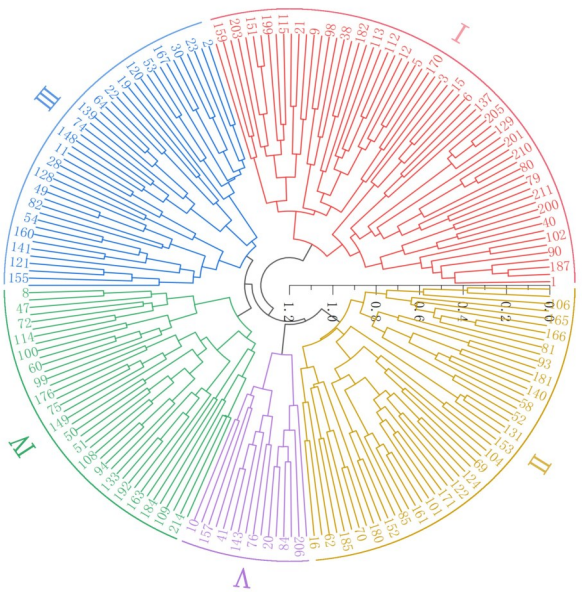


图2 215份甜椒资源聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of 215 sweet pepper resources

着重考虑,在Kim等[24]研究中也提出相似的结论。徐睿等[25]在研究中对22个表型性状进行遗传多样性分析表明,质量性状中最丰富的表型是果实形状。本研究中质量性状遗传多样性指数偏小的是果形(5.205),遗传指数表现型弱,与前人研究结果不同,可能是因为果形指数的不同。

主成分分析是将几种主要的表型性状转化为较少的主成分,这种分析方法简单且比较综合、全面,能够较为直观地显示出甜椒各性状的重要程度[26]。本研究从33个表型性状中选取8个主成分,贡献率为(14.812%),累计贡献率为(65.421%),果形、商品果纵径、老熟果色、果实横切面形状、果梗长度等果实指标占据主要优势。这8个主成分基本能够说明原始指标的大部分信息,可作为甜椒表型性状的综合指标。在相关性分析中,王丹丹等[27]研究表明,单果质量与商品果

纵径、商品果横径和果形呈显著正相关。彭泽等[28]研究表明,果实纵径和果梗长度呈显著正相关,叶宽与茎粗、叶柄长度以及青熟果色呈显著正相关,果面棱沟与果实横径和果肉厚呈极显著正相关。本研究中,商品果横径与商品果纵径和青熟果色呈显著正相关,果肉厚与果形呈显著正相关,叶片宽度与主茎粗、叶柄长度和青熟果色呈显著正相关,与前人研究结果一致,但果面棱沟与果肉厚呈显著负相关,与商品果横径无相关性,与彭泽研究结果有差异,可能是研究材料的不同。相关性说明,每个性状指标在某种程度上都反应了甜椒生育期的一些信息,大部分性状间都存在着一定的相关性。

表5　甜椒33个表型性状主成分分析

Table 5　Principal component analysis of 33 phenotypic characters of sweet peppers

项目 Items	成分 Factor							
	1	2	3	4	5	6	7	8
花冠色 Corolla color	−0.042	−0.164	−0.124	−0.147	0.281	0.104	−0.204	−0.229
花药颜色 Anther color	−0.264	0.283	0.301	−0.008	−0.012	−0.409	−0.035	0.212
花柱长度 Style length	−0.056	0.010	0.360	−0.023	0.098	0.019	0.335	−0.253
花梗着生状态 Pedicle growth statu	0.204	−0.475	−0.182	0.238	−0.024	−0.163	0.121	0.148
花柱颜色 Style color	−0.085	0.423	0.279	−0.356	−0.032	−0.049	−0.199	0.265
叶形 Leaf shape	−0.420	0.198	−0.274	0.331	0.289	0.263	0.099	0.173
叶色 Leaf color	0.325	−0.086	−0.111	0.343	0.027	0.076	−0.036	0.436
叶面特征 Leaf surface characteristic	0.035	0.027	0.215	0.340	−0.358	−0.096	0.379	0.152
株型 Plant type	−0.174	0.139	0.061	0.158	0.077	0.274	−0.073	0.207
分枝类型 Branching type	0.332	0.125	0.021	−0.213	−0.032	−0.129	0.354	0.201
青熟果色 Unripe fruit color	0.388	−0.260	−0.103	0.434	−0.116	0.062	−0.029	−0.109
果面棱沟 Fruit surface ridge	0.055	−0.237	0.467	0.260	0.295	−0.135	−0.069	−0.341
果肩形状 Fruit shoulder shape	0.543	−0.088	0.129	−0.045	−0.078	−0.133	−0.058	−0.028
果顶形状 Fruit tip shape	0.128	−0.381	0.273	0.034	0.015	−0.155	0.303	−0.032
果面光泽 Fruit surface glossiness	0.040	0.049	0.337	−0.001	−0.046	0.265	0.123	0.086
果形 Fruit shape	0.287	0.330	−0.327	0.008	−0.165	−0.178	−0.091	−0.034
果实着生方向 Fruit implantation direction	0.289	−0.152	0.537	0.199	0.338	0.105	0.000	0.053
果实横切面形状 Fruit cross−section shape	−0.184	0.731	−0.070	0.115	0.109	0.046	−0.098	−0.073

续表

项目 Items	成分 Factor							
	1	2	3	4	5	6	7	8
胎座大小 Placenta siza	−0.193	−0.669	−0.119	−0.179	−0.088	0.185	−0.039	0.058
老熟果色 Ripe fruit color	0.142	−0.113	−0.244	0.217	0.561	−0.229	0.034	0.159
首花节位 First flower node	0.174	0.184	−0.239	−0.184	0.304	−0.021	0.334	−0.327
主茎粗 Main stem diameter	0.437	0.234	0.323	−0.017	0.192	0.281	0.037	0.154
主茎长度 Main stem length	0.477	0.379	−0.139	−0.237	0.016	−0.052	0.074	−0.063
叶片长度 Leaf length	0.749	−0.172	0.038	0.085	−0.123	0.212	−0.250	−0.083
叶片宽度 Leaf width	0.732	−0.249	0.176	0.003	−0.182	0.051	−0.314	−0.120
叶柄长度 Petiole length	0.609	0.148	−0.049	0.206	−0.053	−0.391	−0.151	−0.049
株高 Plant height	0.534	0.553	0.041	−0.095	0.166	0.130	0.050	−0.005
株幅 Plant width	0.634	0.330	0.053	−0.021	0.099	0.133	−0.111	0.117
商品果纵径 Commercial fruit longitudinal diameter	0.474	0.622	−0.085	0.116	0.038	−0.152	0.069	−0.009
商品果横径 Commercial fruit transverse diameter	0.647	−0.405	−0.045	−0.241	0.096	0.008	0.183	0.110
果梗长度 Fruit pedicel length	0.418	0.138	−0.394	0.219	−0.179	0.281	0.276	−0.181
果肉厚 Fruit flesh thick	0.436	−0.422	−0.134	−0.472	0.094	0.065	0.129	0.215
心室数 Carpel number	0.076	−0.414	−0.244	−0.015	0.338	−0.209	−0.161	0.119
特征值 Eigen value	4.888	3.680	1.853	1.501	1.278	1.116	1.105	1.033
贡献率/% Contributing rate	14.812	11.151	5.614	4.548	3.874	3.381	3.349	3.131
累计贡献率/% Cumulative contributing rate	14.812	25.963	38.230	47.523	55.559	58.940	62.289	65.421

Bijalwan 等[29]以辣椒 13 个基因型为研究对象,通过 6 个产量性状了解其遗传多样性,采用非分层聚类法将基因型分为 5 个不同的聚类。本研究在遗传距离 0.73 时将 215 份甜椒材料划分为 5 类。从聚类结果来看,尽管根据不同性状将 215 份甜椒资源分为 5 个主要类群,但每类的性状之间都有交叉且交叉的性状较多。这表明,不同引种来源的甜椒在遗传上高度相似,且 80% 的表型性状在各类群中均有交叉出现,这与表型性状调查结果一致。此外不同地理位置的甜椒也可以归为一类,这说明地理环境的差异并不是造成甜椒表型差异的因素。目前,随着设施农业的发展和市场

的扩大,甜椒的种植已不再局限于传统的露地栽培,而是转向使用大棚和温室等现代化设施,种苗的供应也不再受地理位置的限制。因此,种植地点已不再是材料分类的主要依据,不同材料之间的遗传差异和亲缘关系仍然是选择育种的关键。基于表型性状对育种材料进行科学的聚类分析显得尤为重要,这有助于更有效地利用甜椒资源,推动育种工作的进展。

4　结论

通过变异系数、遗传多样性指数、主成分、相关性和聚类对215份甜椒资源表型性状进行遗传多样性分析,由结果可知,所选甜椒材料遗传差异大,变异丰富。由于甜椒的表型性状容易受到土壤、环境和气候等因素的影响,因此后续可通过多年种植以及形态与分子标记结合的方法进行分析。综上所述,215份甜椒资源的育种选择潜力大,可为选育优良甜椒提供科学依据。

附加材料:附表1见中国知网增强出版内容。

参　考　文　献

[1]Gupta R, Kapoor B, Gulati M, et al. Sweet pepper and its principle constituent *capsiate*: functional properties and health benefits[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022,62(26):7370-7394.

[2]Du H S, Yang J J, Chen B, et al. Target sequencing reveals genetic diversity, population structure, core-SNP markers, and fruit shape-associated loci in pepper varieties[J]. BMC Plant Biology,2019,19(1):578.

[3]孔子雯,田如霞,苗如意,等. 60份螺丝椒种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J]. 中国农业科技导报,2024,26(3):40-47.
Kong Z W, Tian R X, Miao R Y, et al. Analysis of agronomic traits and genetic diversity of 60 screw pepper germplasm resources[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024,26(3):40-47.

[4]Hallmann E, Rembiałkowska E. Characterisation of antioxidant compounds in sweet bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under organic and conventional growing systems[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2012,92(12):2409-2415.

[5]饶庆琳,姜敏,刘选轶,等. 贵州296份花生种质资源遗传多样性及综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2024,25(3):373-385.
Rao Q L, Jiang M, Liu X Y, et al. Genetic diversity and comprehensive evaluation of 296 peanuts germplasm resources in Guizhou[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2024,25(3):373-385.

[6]张国儒,唐亚萍,杨涛,等. 272份辣椒资源的农艺性状分析[J]. 新疆农业科学,2021,58(12):2300-2311.
Zhang G R, Tang Y P, Yang T, et al. Agronomic character analysis of 272 *Capsicum* resources[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2021,58(12):2300-2311.

[7]任丽,张余,邓姗,等. 基于形态标记的新育成辣椒品种特性分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(6):1676-1689.
Ren L, Zhang Y, Deng S, et al. Characterization of new *Capsicum* spp. varieties based on morphological markers[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(6):1676-1689.

[8]Moon S, Ro N, Kim J, et al. Characterization of diverse pepper (*Capsicum* spp.) germplasms based on agro-morphological traits and phytochemical contents[J]. Agronomy,2023,13(10):2665.

[9]Rajametov S N, Lee K, Jeong H B, et al. The effect of night low temperature on agronomical traits of thirty-nine pepper accessions (*Capsicum annuum* L.)[J]. Agronomy, 2021, 11(10):1986.

[10]孟珊,徐婷婷,朱小品,等. 江苏大豆地方种质资源表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(2):419-436.
Meng S, Xu T T, Zhu X P, et al. Diversity analysis of soybean landraces collected from Jiangsu Province using phenotypic traits[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(2): 419-436.

[11]袁欣捷,周坤华,吴茵,等. 辣椒核心种质遗传多样性及群体结构分析[J]. 分子植物育种,2019,17(9):3090-3104.
Yuan X J, Zhou K H, Wu Y, et al. Genetic diversity and population structure analysis of pepper core collections[J]. Molecular Plant Breeding,2019,17(9):3090-3104.

[12]Sran T S, Jindal S K. Genetic diversity analysis of chilli genotypes based on qualitative morphological traits[J]. Agricultural Research Journal,2021,58(4):603-610.

[13]隋益虎,李敏,胡能兵,等. 32份辣椒种质遗传多样性的同工酶分析[J]. 西北植物学报,2014,34(5):908-914.
Sui Y H, Li M, Hu N B, et al. Genetic Diversity among 32 germplasms of the genus *Capsicum* by isozyme analysis[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(5): 908-914.

[14]Farsangi F J, Thorat A S, Devarumath R M. Assessment of the utility of TRAP and EST-SSRs markers for genetic diversity analysis of sugarcane genotypes[J]. Cytology and Genetics,2018,52(6):467-477.

[15]邓伟,吕莹,董阳均,等. 云南水稻种质资源的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(3):624-635.
Deng W, Lü Y, Dong Y J, et al. The genetic diversity analysis of rice germplasm resources in Yunnan Province of China[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(3):624-635.

[16]Joshi M, Verma S K, Singh J P. Genetic variability, path coefficient and genetic diversity analysis in lentil (*Lens culinaris* medikus) genotypes[J]. Invertis Journal of Science & Technology,2019,12(1):1-7.

[17]宋丽娜,王晓敏,刘文娟,等. 基于SNP标记的504份番茄种质资源遗传多样性分析[J]. 核农学报,2022,36(12):2366-2387.
Song L N, Wang X M, Liu W J, et al. Genetic diversity analysis of 504 tomato germplasm resources based on SNP markers[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2022,36

(12):2366-2387.

[18]Guo G J, Pan B G, Yi X X, et al. Genetic diversity between local landraces and current breeding lines of pepper in China [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):4058.

[19]袁娟伟,贾利,唐菁,等. 275份辣椒种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 安徽农业大学学报,2024,51(2):244-255.
Yuan J W, Jia L, Tang J, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic characters in 275 pepper germplasm resources[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2024, 51(2): 244-255.

[20]谭放军,汤冰倩,吴永红,等. 基于主要农艺性状和trnH-psbA序列的辣椒聚类分析[J]. 中国农学通报,2019,35(27):72-78.
Tan F J, Tang B Q, Wu Y H, et al. Cluster analysis of pepper based on main agronomic traits and trnH-psbA sequences[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(27):72-78.

[21]李锡香,张宝玺. 辣椒种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006:1-98.
Li X X, Zhang B X. Descriptive specification and data standard of pepper germplasm resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:1-98.

[22]裴红霞,王学梅,高晶霞,等. 宁夏自育辣椒品种(系)表型遗传多样性分析[J]. 东北农业大学学报,2018,49(10):26-33.
Pei H X, Wang X M, Gao J X, et al. Phenotypic genetic diversity analysis on pepper cultivars (strains) in Ningxia[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(10): 26-33.

[23]李宁,王飞,姚明华,等. 国内外辣椒种质资源表型性状多样性及相关性分析[J]. 辣椒杂志,2015,13(1):8-13.
Li N, Wang F, Yao M H, et al. Genetic diversity and correlation analysis of phenotype traits in *Capsicum* spp. germplasms from China and abroad [J]. Journal of China Capsicum, 2015, 13(1):8-13.

[24]Kim E H, Lee S Y, Baek D Y, et al. A comparison of the nutrient composition and statistical profile in red pepper fruits (*Capsicums annuum* L.) based on genetic and environmental factors[J]. Applied Biological Chemistry, 2019, 62(1):48.

[25]徐睿,张雅楠,林子翔,等. 观赏辣椒种质资源农艺性状遗传多样性关联分析[J]. 浙江农业学报,2018,30(11):1886-1892.
Xu R, Zhang Y N, Lin Z X, et al. Analysis in agronomic characters of ornamental pepper germplasm resources[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(11):1886-1892.

[26]裴红霞,高晶霞,王学梅. 220份辣椒种质形态学性状的遗传多样性分析[J]. 分子植物育种,2022,20(4):1331-1347.
Pei H X, Gao J X, Wang X M. Genetic diversity analysis of morphological traits in 220 pepper germplasm accessions[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(4):1331-1347.

[27]王丹丹,师建华,李燕,等. 基于主成分与聚类分析的辣椒主要农艺性状评价[J]. 中国瓜菜,2021,34(2):47-53.
Wang D D, Shi J H, Li Y, et al. Evaluation of main agronomic traits of pepper based on principal component and cluster analysis[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(2): 47-53.

[28]彭泽,胡明文,白立伟,等. 不同辣椒品种的农艺性状与品质指标综合评价[J]. 北方园艺,2023(1):1-10.
Peng Z, Hu M W, Bai L W, et al. Comprehensive evaluation of agronomic characters and quality indexes of different pepper varieties[J]. Northern Horticulture, 2023(1):1-10.

[29]Bijalwan P, Singh M, Madhavi N. Assessment of genetic divergence in chilli (*Capsicum* annuum L.) genotypes [J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(3):1585-1590.

(编辑:吕俊俐)