

## 70 份鲜食番茄种质资源农艺性状多样性调查与相关性分析

美开热帮·吐尔逊<sup>1,2</sup>, 王志泽<sup>1,2\*</sup>, 党雨乐<sup>1,2</sup>, 聂蔚丹<sup>1,2</sup>, 杜崇<sup>1,2\*\*</sup>

1. 新疆农业大学园艺学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 国家瓜果改良中心新疆分中心, 新疆乌鲁木齐 830052

**摘要:** 本研究通过对 70 份鲜食番茄种质资源农艺性状进行综合评价。运用方差分析、主成分分析、聚类分析、计算综合评价得分等方法对供试番茄材料 28 个形态学性状的遗传多样性进行分析。13 个数量性状的遗传变异性分析结果表明, 供试材料的变异程度较高, 且变异丰富, 变异范围为 21.68%~99.08%, 遗传多样性指数较高, 表明番茄种质资源的表型多样性较为丰富, 且性状间存在较大程度的变异, 具有优良的选择潜力。其中, 单果质量、心室数、糖酸比、横径等性状表现出较高的遗传变异; 相关性分析结果显示, 与果实硬度相关性显著的性状最多, 其与果面棱沟、肉质、单果质量、心室数、果肉厚度、酸度等呈极显著正相关。糖度与成熟前果色呈显著负相关, 与果面棱沟、单果质量、心室数和果肉厚度呈极显著负相关, 与株高呈显著正相关, 与果形指数、可溶性固形物含量呈极显著正相关。单果质量与叶片类型呈显著正相关, 与果皮色呈显著负相关, 与花序类型和果面棱沟呈极显著正相关, 与果顶形状和果形呈极显著负相关; 主成分分析结果表明, 28 个表型性状可划归为 9 个因子, 特征值均在 1.0 以上, 累计贡献率达 78.143%, 能够反映全部指标的大部分信息, 突出供试番茄资源的基本特征。聚类分析进一步将供试材料分成了 5 组, 第 1 和第 4 组番茄果实较小、食用性较强, 可作为培育口感型、品质高的樱桃番茄品种的重要材料; 第 5 组材料的硬度较高, 果实较大, 可培育适合长途运输的经济型番茄品种。综合评价结果表明, 得分排名前 5 的种质资源分别为 XH20-48、XH20-35、XH20-37、XH20-34 和 XH20-30。综上, 本研究成果致力于发现并挖掘优良番茄种质, 为下一步创制骨干亲本、选育符合新疆特色的高品质番茄新品种奠定基础。

**关键词:** 番茄; 农艺性状; 综合评价; 主成分分析; 相关性分析

中图分类号: S641.2 文献标志码: A

## Investigation and Correlation Analysis of Agronomic Traits Diversity of 70 Fresh Food Tomato Germplasm Resources

MEIKAIREBANG·Tuerxun<sup>1,2</sup>, WANG Zhize<sup>1,2\*</sup>, DANG Yule<sup>1,2</sup>, NIE Weidan<sup>1,2</sup>, DU Chong<sup>1,2\*\*</sup>

1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Branch Center, National Center for Improvement of Fruit and Vegetable Cultivation, Urumqi, Xinjiang 830052, China

**Abstract:** A comprehensive evaluation of agronomic traits of 70 varieties of fresh food tomato germplasms was conducted. Genetic diversity analysis of 28 morphological traits of the germplasms was carried out using methods such as variance analysis, principal component analysis, cluster analysis and calculation of comprehensive evaluation scores. The analysis results of genetic variability of 13 quantitative traits indicated that the variation degree of the germplasms was relatively high and the variation was rich. The variation range was 21.68%–99.08%, and the genetic diversity index was relatively high, suggesting that the phenotypic diversity of germplasms was relatively rich and there was a significant degree of variation among the traits, indicating excellent selection potential. Among these, the traits such as single fruit weight, number of chambers, sugar-acid ratio, and transverse diameter exhibit relatively high genetic variation. The

收稿日期 2025-04-13; 接受日期 2025-05-24

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32302652); 新疆农业大学园艺学院育种专项基金; 大学生创新创业项目 (No. dxscx2024183)。

作者简介 美开热帮·吐尔逊 (2001—), 女, 本科生, 研究方向: 蔬菜栽培与育种; \*同等贡献作者: 王志泽 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 番茄分子遗传育种。\*\*通信作者 (Corresponding author): 杜崇 (DU Chong), E-mail: godv2018@163.com。

correlation analysis results showed that the traits significantly correlated with fruit firmness were the greatest in number, and fruit firmness were extremely significantly positively correlated with fruit surface ridges, fleshiness, single fruit weight, number of chambers, flesh thickness, and acidity. Sugar content was significantly negatively correlated with fruit color before maturity, and it was extremely significantly negatively correlated with fruit surface ridges, single fruit weight, number of chambers, and flesh thickness, and significantly positively correlated with plant height, and extremely significantly positively correlated with fruit shape index and soluble solids content. Single fruit weight was significantly positively correlated with leaf type, significantly negatively correlated with fruit peel color, extremely significantly positively correlated with flower sequence type and fruit surface ridges, and extremely significantly negatively correlated with fruit top shape and fruit shape. The principal component analysis results indicated that the 28 phenotypic traits could be classified into nine factors. The eigenvalues were all above 1.0, and the cumulative contribution rate reached 78.143%, which could reflect most of the information of all indicators and highlight the basic characteristics of the germplasms. Cluster analysis further divided the germplasms into five groups. The first and fourth groups had smaller tomato fruits and stronger edible properties, which could be important materials for cultivating cherry tomato varieties with good taste and high quality. The fifth group had higher hardness and larger fruits, and could be used to cultivate economic tomato varieties suitable for long-distance transportation. The comprehensive evaluation results showed that the top five germplasms were XH20-48, XH20-35, XH20-37, XH20-34 and XH20-30. In conclusion, this research achievement is dedicated to discovering and exploring the excellent tomato germplasm resources retained by the research group, laying a foundation for the next step of creating core parents and breeding new high-quality tomato varieties with characteristics unique to Xinjiang.

**Keywords:** tomato; agronomic traits; comprehensive evaluation; principal component analysis; correlation analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.09.008

番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 是茄科茄属一年或多年生草本植物, 在世界范围内广泛种植, 具有栽培适应性广、产量高、经济效益高等优点<sup>[1]</sup>。我国作为全球最大番茄生产国, 2022 年统计数据显示栽培面积超 160 万  $\text{hm}^2$ , 总产量持续位居全球首位<sup>[2]</sup>。新疆独特的地理环境及生态气候对番茄的种植提供有利条件<sup>[3]</sup>, 所生产的番茄制品在国内外均具有较强的竞争力<sup>[4]</sup>。然而近年来, 欧美国通过增加新疆以外的番茄采购来源地, 以达到全球供应链布局的“去中国化”, 这对新疆番茄市场带来了巨大的冲击<sup>[5]</sup>。因此, 研究不同番茄种质资源的外观性状和果实品质, 收集并筛选出优良的番茄种质资源, 对番茄资源进行遗传改良及新品种选育, 提升番茄果实营养品质和感官品质, 加强新疆番茄在“一带一路”沿线市场贸易的潜力, 对提高本区番茄产业的国际竞争力和促进我国番茄产业高质量发展具有重要意义。

番茄品质性状体系由营养组分、感官特性和商品属性三大类群构成, 每个类群包含若干具有独立生理功能的表型参数。又由于所分析的材料数目通常较多, 且各性状指标间存在表型互作以及遗传力差异。因此, 运用多元统计分析方法对所有性状信息进行综合性归纳尤为必要。相关性分析、聚类分析、主成分分析等均可应用于番茄

品质性状的综合评估, 目前此方法及策略已在农作物种质资源评价中被广泛应用<sup>[6]</sup>。

研究人员通过不同类型番茄品种的比较研究揭示了品质的遗传调控规律。冀胜鑫等<sup>[7]</sup>采用完全随机区组设计对 5 个大、中果型番茄品种 (单果质量 180~220 g) 和 3 个樱桃番茄品种 (单果质量 15~20 g) 进行表型分析, 量化了果形指数 (0.67~1.14)、果实硬度 (8.69~12.66  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 及可溶性固形物含量 (5.47%~9.23%) 等参数, 进一步分析显示品种间差异贡献率达 67%~89%, 证实基因型效应对品质性状的主导作用; 李丽梅等<sup>[8]</sup>建立包含 7 份樱桃番茄和 2 份中果型番茄种质的评价体系, 通过特征值大于 1 的原则, 共提取到 3 个公因子, 累积方差贡献率达 89.19%。最终, 依据主成分得分综合筛选出樱桃 25 号、樱桃 55 号 483-11-8 和樱桃 55 号 483-16-15 显著优于群体均值, 入选为优质杂交亲本; 赵建涛等<sup>[9]</sup>运用 GC-MS 技术对 8 份材料的营养代谢谱进行解析, 发现樱桃番茄组的抗坏血酸含量 (>55.7  $\text{mg}/100 \text{g}$ ) 较普通大果型高 41.3%, 而大果型品种的番茄红素积累量 (>13.58  $\text{mg}/100 \text{g}$ ) 具有显著优势 ( $P < 0.05$ )。主成分分析结果显示, 前 3 个主成分累计贡献率达 82.293%, 代表了番茄主要品质相关性状的特性。张向梅等<sup>[10]</sup>通过 Duncan 多重比较发现,

京番 308 的可溶性固形物含量 (7.9%) 与京番 301 的糖酸比 (13.35) 分别较大果番茄提高 23.4% 和 18.9%。虽然樱桃番茄香妃 3 号在感官评价中获得最高分 (4.36), 但黄色果肉种质 Y17-A11 的可溶性固形物、有机酸、糖酸比和维生素 C 均高于香妃 3 号, 展现出特殊的育种价值。

种质资源作为蔬菜产业的“芯片”, 通过不断挖掘国内外优良种质并进行系统性评估, 鉴定并筛选有价值的育种资源将有利于本区的优质新品种选育, 从而丰富市场中品种的多样性。因此, 本研究以多年收集、保存的 70 份鲜食番茄种质资源为研究对象, 通过系统解析营养组分、感官特性及商品属性的遗传变异规律, 结合 Pearson 相关性矩阵分析来揭示性状间的关联特性; 采用欧氏距离-ward 算法进行品质类别聚类, 构建遗传

相似性矩阵, 实现种质资源科学分组, 最终筛选出具有协同改良潜力的核心种质, 以期为新疆番茄品质育种提供理论参考依据及优质育种材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料的 70 份鲜食番茄种质由新疆农业科学院作物研究所经多年收集所得并提供, 具体的供试材料编号、生长习性及其来源描述见表 1。

### 1.2 方法

2024 年 3—10 月于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区安宁渠综合实验站进行试验。在番茄生长发育期对 28 个相关农艺性状指标 (13 个数量性状和 15 个质量性状) 进行测定。

具体指标包括叶片类型、叶片形状、叶片颜

表 1 70 份供试材料名称及生长习性描述

Tab. 1 Descriptions of names and growth habits of 70 test materials

编号 No.	生长习性 Growth habit	来源 Origin	编号 No.	生长习性 Growth habit	来源 Origin	编号 No.	生长习性 Growth habit	来源 Origin
XH20-1	无限生长	美国	XH20-25	无限生长	西班牙	XH20-48	无限生长	法国
XH20-2	无限生长	中国	XH20-26	无限生长	法国	XH20-49	无限生长	法国
XH20-3	无限生长	美国	XH20-27	有限生长	法国	XH20-50	无限生长	中国
XH20-4	无限生长	美国	XH20-28	无限生长	美国	XH20-51	无限生长	意大利
XH20-5	无限生长	美国	XH20-29	无限生长	西班牙	XH20-52	无限生长	俄罗斯
XH20-6	无限生长	意大利	XH20-30	无限生长	美国	XH20-53	无限生长	英国
XH20-7	无限生长	美国	XH20-31	无限生长	美国	XH20-54	无限生长	俄罗斯
XH20-8	无限生长	波兰	XH20-32	有限生长	美国	XH20-55	有限生长	美国
XH20-9	无限生长	美国	XH20-33	无限生长	美国	XH20-56	无限生长	美国
XH20-10	有限生长	法国	XH20-34	无限生长	美国	XH20-57	无限生长	美国
XH20-11	无限生长	美国	XH20-35	无限生长	美国	XH20-58	无限生长	美国
XH20-12	无限生长	乌克兰	XH20-36	无限生长	法国	XH20-59	无限生长	美国
XH20-13	无限生长	美国	XH20-37	无限生长	法国	XH20-60	无限生长	德国
XH20-14	无限生长	中国	XH20-38	无限生长	意大利	XH20-61	无限生长	美国
XH20-15	无限生长	中国	XH20-39	有限生长	意大利	XH20-62	无限生长	俄罗斯
XH20-16	无限生长	中国	XH20-40	有限生长	英国	XH20-63	无限生长	日本
XH20-17	无限生长	美国	XH20-41	无限生长	英国	XH20-64	无限生长	中国
XH20-18	无限生长	美国	XH20-42	无限生长	美国	XH20-65	无限生长	美国
XH20-19	无限生长	美国	XH20-43	无限生长	美国	XH20-66	无限生长	德国
XH20-20	无限生长	美国	XH20-44	无限生长	美国	XH20-67	无限生长	日本
XH20-21	无限生长	中国	XH20-45	无限生长	美国	XH20-68	无限生长	美国
XH20-22	无限生长	俄罗斯	XH20-46	无限生长	美国	XH20-69	无限生长	美国
XH20-23	无限生长	俄罗斯	XH20-47	无限生长	美国	XH20-70	无限生长	中国
XH20-24	无限生长	日本						

色、果皮色、果肉颜色、成熟前果色、成熟果色、花序类型、果实横切面形状、胶状物颜色、果顶形状、果形、果面棱沟、首花序节位、单花序果数、心室数、肉质和风味等。采用直接观察法并参考国家作物科学数据中心提供的《番茄种质资源描述规范和数据标准》进行统计、分级和赋值；株高使用塔尺测定；果实纵径、果实横径、肉厚利用游标卡尺进行测定；单果质量利用电子天平称重；可溶性固形物含量用手持折射仪 Brix 测定；总糖、酸含量及糖酸比用番茄糖酸度计 (PAL-BX/ACID 3) 测定；调查标准见附表 1。

### 1.3 数据处理

使用 Excel 2020 软件统计并整理数据，计算表型性状的分布频率、最小值、最大值、平均值、标准差、变异系数和遗传多样性指数 ( $H'$ )。利用 SPSS 27.0 软件对表型性状进行相关性分析、主成分分析和聚类分析；采用 Origin 2024 软件作图。根据平均值和标准差对 70 份番茄材料的不同性状进行 10 个等级的划分，每  $1\sigma$  为一级， $\sigma$  为标准差，计算遗传多样性指数 Shannon-Wiener ( $H'$ ) 参考易腾飞等<sup>[11]</sup>的计算方法。相关指标计算方法如下：

遗传多样性指数  $H' = -\sum(P_i)(\ln P_i)$ ，式中， $P_i$  为某性状第  $i$  级别的材料份数占总份数的百分比， $\ln$  为自然对数。

隶属函数值  $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,  $j = 1, 2, 3 \cdots n$ 。式中， $\mu(X_j)$  为第  $j$  个指标的隶属函数值， $X_j$  为第  $j$  个口感指标， $X_{\min}$  为第  $j$  个指标的最小值， $X_{\max}$  为第  $j$  个指标的最大值。

权重 ( $W$ )： $W_j = R_j / \sum R_j$ ,  $j = 1, 2, 3 \cdots n$ 。式中， $W_j$  为第  $j$  个主成分因子在所有综合指标中的重要程度即权重； $R_j$  为各材料第  $j$  个主成分因子的贡献率。

综合评价价值 ( $D$ ):  $D = \sum(\mu(X_j) \times W_j)$ ,  $j = 1, 2, 3 \cdots n$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 数量性状遗传变异性分析

对 70 份番茄资源的 13 个数量性状进行遗传变异性分析。结果表明 (表 2)，数量性状的遗传多样性指数 ( $H'$ ) 在 0.87~1.39 的区间分布，除了糖酸比的  $H'$  较低以外，其他性状的  $H'$  均  $\geq 1$ ，其中纵径、横径、糖度、可溶性固形物含量、株高、果肉厚度以及硬度表现出高度差异性，说明这 70 份番茄材料在果实形态建成方面存在显著多态性，构成了后续品质性状定向改良的遗传基础；数量性状表型整体变异系数分布区间为 21.43%~99.08%，其中变异系数最大的是单果质量 (99.08%)，心室数和糖酸比次之，分别为 73.26% 和 56.25%，可溶性固形物含量和糖度的表型稳定性较高，变异系数分别为 21.68% 和 21.43%。

表 2 70 份种质数量性状遗传变异性统计

Tab. 2 Statistical analysis of genetic variability of quantitative traits in 70 germplasms

性状 Trait	遗传多样性指数 $H'$	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	极差 Range	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
首花序节位	1.14	13.00	3.00	10.00	6.66	1.58	23.66
单果质量/g	1.00	556.19	4.93	551.26	123.61	122.46	99.08
株高/cm	1.30	292.00	55.00	237.00	182.84	41.64	22.78
纵径/mm	1.39	112.04	21.73	90.31	55.84	18.44	33.01
横径/mm	1.36	130.54	5.23	125.31	55.40	25.65	46.29
果形指数	1.10	2.34	0.49	1.85	1.12	0.40	35.83
心室数	1.02	18.00	2.00	16.00	5.43	3.98	73.26
果肉厚度/cm	1.29	1.00	0.10	0.90	0.50	0.15	29.54
可溶性固形物含量/%	1.32	11.20	3.20	8.00	6.00	1.30	21.68
酸度	1.20	2.95	0.18	2.77	1.06	0.39	36.27
糖度	1.33	11.50	2.60	8.90	5.94	1.27	21.43
糖酸比	0.87	41.05	1.89	39.16	6.47	3.64	56.25
硬度/(kg·cm <sup>-2</sup> )	1.25	21.76	3.00	18.76	11.37	3.14	27.59

单果质量、酸度和糖酸比等果实品质性状在不同材料间的显著表型分化,进一步说明这些材料的改良潜力较大。

## 2.2 质量性状频率分布

本研究对 70 份番茄资源的 15 个质量性状进行遗传多样性指数 ( $H'$ ) 和特征分析 (表 3)。

表 3 70 份种质质量性状频率分布  
Tab. 3 Frequency distribution of quality traits of 70 germplasms

性状 Trait	特征 (比例) Characteristics (Proportion/%)	遗传多样性指数 $H'$
叶片类型	复宽叶型 (24.29)、复细叶型 (45.71)、普通叶型 (17.14)、薯叶型 (12.86)	1.27
叶片形状	二回羽状复叶 (72.86)、羽状复叶 (27.14)	0.58
叶色	绿 (72.86)、浅绿 (2.86)、深绿 (24.28)	0.68
花序类型	单式花序 (64.29)、多歧花序 (2.86)、双歧花序 (32.85)	0.75
成熟前果色	黄白 (1.43)、绿 (2.86)、绿白 (65.71)、浅绿 (8.57)、绿 (1.43)、紫绿 (20.00)	1.03
成熟果色	橘红 (1.43)、黄绿 (4.29)、黄白 (2.86)、浅黄 (5.71)、黄 (7.14)、橘黄 (10.00)、绿 (2.86)、粉红 (24.29)、红 (7.14)、深红 (10.00)、粉底黄条纹 (4.29)、粉底绿条纹 (1.43)、红底黄条纹 (4.29)、红底绿条纹 (4.29)、红黄 (1.43)、红黄绿 (1.43)、黄底绿条纹 (4.29)、黄红 (1.43)、黄绿底绿条纹 (1.40)	2.59
果面棱沟	无 (48.57)、轻 (31.43)、中 (10.00)、重 (10.00)	1.18
果顶形状	深凹 (4.29)、微凹 (22.86)、圆平 (37.14)、微凸 (15.71)、凸尖 (17.14)、凹凸不平 (2.86)	1.53
果形	扁平 (7.14)、扁圆 (18.57)、圆形 (20.00)、高圆 (14.29)、长圆 (17.14)、桃形 (7.14)、梨形 (11.43)、长梨形 (4.29)	1.97
横切面形状	圆形 (35.71)、不规则性状 (64.29)	0.48
果肉色	黄白 (1.43)、浅黄 (8.57)、黄 (18.57)、粉红 (28.57)、橘红 (1.43)、红 (25.71)、绿 (15.72)	1.64
胶状物颜色	黄白 (1.43)、黄 (37.14)、黄绿 (11.43)、绿 (24.29)、粉红 (22.86)、红 (2.85)	1.46
果皮色	无色 (透明) (58.57)、黄 (10.00)、红 (2.86)、橘红 (17.14)、红底绿条纹 (1.43)、黄底红条纹 (1.43)、黄底绿条纹 (4.29)、绿底红条纹 (1.43)、透明底绿条纹 (1.43)、紫色 (1.42)	1.39
肉质	软 (47.14)、沙 (40.00)、硬 (12.86)	0.98
风味	甜 (10.00)、甜酸 (45.71)、酸甜 (28.57)、酸 (15.72)	1.24

结果表明, 15 个质量性状的  $H'$  在 0.48~2.59 之间分布,  $H' > 1$  的质量性状主要有: 叶片类型、成熟前果色、成熟果色、果面棱沟、果顶形状、果形、果肉色、胶状物颜色、果皮色和风味。供试材料中叶片形态学特征呈显著偏态分布: 复细叶型占群体 45.71%, 二回羽状复叶占比 72.86%; 叶色绿型 (72.86%) 与单式花序 (64.29%) 构成主导表型; 成熟前果色以绿白为主, 占比 65.71%; 成熟果色的  $H'$  最高, 果实颜色最丰富, 按照实际果色进行描述性分级后有 19 种颜色分类, 其中以粉红色为主, 占比 24.29%; 果面以无棱沟为主, 占比 48.57%; 果实结构特征: 圆平果顶和圆形果分别占比 37.14% 和 20.00%; 粉红果肉 (28.57%) 与黄色胶质 (37.14%) 构成主要剖面特征, 果皮透明型 (58.57%) 与软质果肉 (47.14%) 则反映

质地选择方向; 而风味以甜酸为主, 占比 45.71%。

## 2.3 相关性分析

由表 4 可知, 对 70 份番茄资源的 28 个表型特征性状进行相关性分析。其中, 与果实硬度显著相关的性状最多, 达到 15 个, 其与叶片类型、叶色、果实横切面形状呈显著正相关, 与果面棱沟、肉质、单果质量、纵径、横径、心室数、果肉厚度、酸度呈极显著正相关, 与果顶形状呈显著负相关, 与可溶性固形物含量、糖度、糖酸比呈极显著负相关。

糖度与株高呈显著正相关, 与果形指数、可溶性固形物含量呈极显著正相关, 与成熟前果色呈显著负相关, 与果实横切面形状、果面棱沟、单果质量、纵径、横径、心室数、果肉厚度呈极显著负相关。

表 4 番茄主要形态学性状相关性分析  
Tab. 4 Correlation analysis of main morphological characteristics of tomatoes

性状 Trait	叶片类型 Leaf type	叶片形状 Leaf shape	叶色 Leaf color	果皮色 Fruit peel color	果肉色 Flesh color	成熟前果色 Color of the fruit before ripening	成熟果色 Mature fruit color	花序类型 Inflorescence type	横切面形状 Transverse section shape	胶状物颜色 The color of the gelatinous substance	果顶形状 Shape of the fruit top	果形 Shape of fruit	果面棱沟 Fruit surface longitudinal grooves	肉质 Meat-like texture
叶片类型	1.000													
叶片形状	0.192	1.000												
叶色	0.006	0.005	1.000											
果皮色	-0.039	0.009	0.125	1.000										
果肉色	-0.097	0.027	0.019	0.367**	1.000									
成熟前果色	-0.282*	-0.320**	0.110	0.100	-0.084	1.000								
成熟果色	0.025	0.022	0.122	0.348**	0.492**	-0.226	1.000							
花序类型	0.079	-0.040	0.123	-0.301*	-0.078	-0.049	-0.183	1.000						
横切面形状	0.136	-0.122	0.094	-0.241*	-0.109	0.018	0.050	0.338**	1.000					
胶状物颜色	-0.045	-0.017	0.005	0.097	0.527**	-0.224	0.290*	0.052	0.056	1.000				
果顶形状	-0.177	-0.076	-0.002	0.251*	-0.019	0.199	0.103	-0.051	0.015	0.034	1.000			
果形	0.162	-0.040	-0.040	0.059	-0.074	-0.109	-0.049	-0.015	-0.185	0.037	0.428**	1.000		
果面棱沟	0.127	-0.05	-0.007	-0.289*	0.112	-0.029	-0.013	0.460**	0.618**	0.113	-0.386**	-0.452**	1.000	
肉质	-0.042	-0.206	0.031	0.282*	0.002	0.170	0.093	-0.182	0.050	-0.066	-0.005	0.051	-0.058	1.000
风味	0.022	-0.129	-0.155	0.098	-0.019	-0.018	0.072	-0.136	0.021	-0.182	-0.130	-0.318**	0.059	0.077
首花序节位	0.062	0.136	0.223	0.154	-0.088	0.008	-0.016	-0.022	0.002	-0.198	-0.151	-0.136	0.007	0.052
单果质量	0.261*	-0.042	0.025	-0.273*	0.074	-0.118	0.036	0.525**	0.595**	0.159	-0.379**	-0.322**	0.812**	-0.103
株高	-0.022	0.118	0.042	0.195	0.021	-0.399**	0.250*	-0.209	-0.215	0.037	-0.041	0.023	-0.272*	0.006
纵径	0.331**	0.022	0.145	0.012	0.111	-0.135	0.172	0.366**	0.416**	0.263*	-0.058	0.093	0.474**	-0.009
横径	0.221	-0.012	0.050	-0.248*	0.08	-0.092	0.043	0.480**	0.607**	0.093	-0.420**	-0.396**	0.834**	-0.111
果形指数	0.078	-0.001	0.013	0.294*	-0.023	0.062	0.093	-0.272*	-0.365**	0.083	0.566**	0.645**	-0.614**	0.159
心室数	0.282*	-0.107	-0.007	-0.343**	0.016	-0.093	-0.048	0.525**	0.608**	0.046	-0.390**	-0.340**	0.794**	-0.151
果肉厚度	0.194	0.163	0.245*	0.230	0.116	-0.071	0.161	-0.046	0.104	0.085	-0.291*	-0.201	0.267*	0.100
可溶性固形物含量	-0.072	0.055	-0.18	-0.032	0.036	-0.294*	0.039	-0.162	-0.399**	-0.034	0.176	0.162	-0.466**	-0.009
酸度	-0.085	0.067	0.019	0.001	0.026	-0.077	0.078	0.071	0.003	-0.073	-0.337**	-0.445**	0.247*	0.118
糖度	-0.146	0.062	-0.207	0.007	0.078	-0.283*	0.014	-0.229	-0.456**	0.046	0.199	0.131	-0.483**	0.018
糖酸比	0.037	0.017	-0.205	0.032	-0.006	-0.024	-0.110	-0.163	-0.275*	0.005	0.354**	0.481**	-0.439**	-0.036
硬度	0.244*	-0.085	0.263*	0.194	0.146	0.042	0.227	0.181	0.236*	0.105	-0.243*	-0.176	0.385**	0.360**

续表 4 番茄主要形态学性状相关性分析  
Tab. 4 Correlation analysis of main morphological characteristics of tomatoes (continued)

性状 Trait	风味 Flavor	首花序节位 The position of the first inflo- rescence node	单果质量 Single fruit weight	株高 Plant height	纵径 Girth	横径 Diameter	果形指数 Grape shape index	心室数 Number of ventricles	果肉厚度 Pulp thick- ness	可溶性固形 物含量 Soluble sol- ids content	酸度 Acidity	糖度 Specific gravity	糖酸比 Sug- ars-to-acids ratio	硬度 Hardness
叶片类型														
叶片形状														
叶色														
果皮色														
果肉色														
成熟前果色														
成熟果色														
花序类型														
横切面形状														
胶状物颜色														
果顶形状														
果形														
果面棱沟														
肉质														
风味	1.000													
首花序节位	0.185	1.000												
单果质量	-0.024	0.138	1.000											
株高	0.071	0.234	-0.170	1.000										
纵径	-0.178	0.193	0.735**	-0.031	1.000									
横径	0.021	0.143	0.962**	-0.162	0.704**	1.000								
果形指数	-0.235	-0.047	-0.543**	0.105	0.022	-0.651**	1.000							
心室数	0.067	0.007	0.910**	-0.180	0.590**	0.907**	-0.590**	1.000						
果肉厚度	-0.084	0.337**	0.413**	0.238*	0.563**	0.471**	-0.185	0.246*	1.000					
可溶性固形物含量	-0.072	-0.097	-0.502**	0.298*	-0.487**	-0.596**	0.334**	-0.447**	-0.434**	1.000				
酸度	0.218	0.034	0.271*	0.237*	0.110	0.336**	-0.432**	0.261*	0.356**	-0.087	1.000			
糖度	-0.046	-0.088	-0.546**	0.261*	-0.511**	-0.630**	0.349**	-0.485**	-0.445**	0.950**	-0.067	1.000		
糖酸比	-0.265*	-0.058	-0.501**	-0.102	-0.398**	-0.605**	0.523**	-0.454**	-0.547**	0.543**	-0.762**	0.551**	1.000	
硬度	-0.071	0.225	0.502**	0.067	0.588**	0.530**	-0.168	0.429**	0.621**	-0.341**	0.430**	-0.355**	-0.519**	1.000

注：\*表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。  
Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

酸度与单果质量、株高、心室数呈显著正相关,与横径、果肉厚度呈极显著正相关,与果顶形状、果形呈极显著负相关。

糖酸比与果顶形状、果形、可溶性固形物含量、糖度呈极显著正相关,与果实横切面形状、风味呈显著负相关,与果面棱沟、单果质量、纵径、横径、心室数、果肉厚度、酸度呈极显著负相关。

可溶性固形物含量与株高呈显著正相关,与果形指数呈极显著正相关,与成熟前果色呈显著负相关,与果实横切面形状、果面棱沟、单果质

量、纵径、横径、心室数、果肉厚度呈极显著负相关。

单果质量与叶片类型呈显著正相关,与花序类型、果实横切面形状、果面棱沟呈极显著正相关,与果皮色呈显著负相关,与果顶形状、果形呈极显著负相关。

## 2.4 主成分分析

对70份番茄种质的28个性状进行主成分分析,进一步筛选出各性状中起主导作用的因子。由表5可知,9个主成分的累计贡献率达78.143%,能反映出全部指标的大部分信息。

表5 主成分载荷矩阵  
Tab. 5 Principal component loading matrix

性状 Character	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
叶片类型	0.185	0.051	0.041	-0.087	-0.076	0.800	0.011	0.036	-0.023
叶片形状	-0.222	0.026	-0.182	0.095	0.033	0.390	0.151	-0.536	0.172
叶色	0.071	0.146	0.093	0.112	0.047	-0.248	0.663	-0.010	0.270
果皮色	-0.424	0.205	0.169	0.072	0.477	0.040	0.288	0.282	-0.159
果肉色	-0.032	-0.018	-0.179	-0.081	0.874	-0.056	-0.019	0.030	0.061
成熟前果色	-0.132	0.474	-0.016	-0.284	-0.207	-0.507	0.077	0.363	0.060
成熟果色	0.006	-0.044	0.176	0.213	0.716	0.050	0.110	0.040	-0.247
花序类型	0.713	-0.091	0.051	-0.014	-0.147	-0.125	0.061	-0.106	0.261
横切面形状	0.759	0.197	0.102	-0.065	-0.015	-0.038	0.030	0.058	-0.193
胶状物颜色	0.143	-0.044	0.056	-0.013	0.723	-0.010	-0.181	-0.091	0.266
果顶形状	-0.141	-0.016	0.790	-0.150	0.080	-0.273	-0.012	-0.019	-0.049
果形	-0.186	-0.064	0.713	-0.181	-0.075	0.282	-0.126	0.034	0.280
果面棱沟	0.779	0.213	-0.401	0.005	0.095	0.029	-0.052	0.034	-0.026
肉质	-0.139	-0.008	0.007	0.078	0.015	0.054	0.037	0.844	-0.035
风味	-0.027	0.031	-0.174	0.094	-0.043	-0.012	-0.010	0.062	-0.859
首花序节位	0.010	-0.001	-0.140	-0.007	-0.108	0.205	0.821	0.030	-0.201
单果质量	0.857	0.235	-0.256	0.132	0.094	0.208	0.043	0.012	0.054
株高	-0.207	-0.365	0.150	0.599	0.113	0.162	0.264	-0.134	-0.160
纵径	0.606	0.349	0.215	0.224	0.220	0.391	0.168	0.084	0.217
横径	0.817	0.336	-0.324	0.196	0.080	0.166	0.055	-0.019	0.006
果形指数	-0.455	-0.119	0.693	-0.169	0.070	0.180	0.038	0.162	0.197
心室数	0.867	0.166	-0.274	0.091	-0.014	0.154	-0.064	0.007	-0.038
果肉厚度	0.089	0.438	-0.185	0.494	0.182	0.335	0.358	0.096	0.179
可溶性固形物含量	-0.327	-0.892	0.071	-0.053	0.004	-0.012	-0.055	0.004	0.043
酸度	0.101	0.011	-0.383	0.805	-0.034	-0.113	-0.072	0.131	-0.051
糖度	-0.389	-0.866	0.034	-0.067	0.055	-0.050	-0.080	0.015	0.044
糖酸比	-0.318	-0.440	0.280	-0.724	-0.009	0.120	-0.019	-0.036	0.113
硬度	0.344	0.226	-0.133	0.419	0.191	0.224	0.270	0.525	0.207
特征值	7.646	2.958	2.564	2.257	1.855	1.303	1.218	1.069	1.009
贡献率/%	19.064	10.137	9.183	8.367	8.184	6.549	5.784	5.717	5.157
累计贡献率/%	19.064	29.202	38.385	46.752	54.936	61.485	67.269	72.986	78.143

第 1 主成分特征值为 7.646，贡献率为 19.064%，载荷较高的包括果心室数 (0.867)、单果质量 (0.857)、横径 (0.817)、果面棱沟 (0.779)、横切面形状 (0.759)、花序类型 (0.713) 和纵径 (0.606) 等与果实大小相关的性状。负向较高的有果皮色 (-0.424)；第 2 主成分特征值为 2.958，累计贡献率为 29.202%，载荷负向较高的为可溶性固形物含量 (-0.892)、糖度 (-0.866) 等与口感相关的指标；第 3 主成分特征值为 2.564，累计贡献率为 38.385%，载荷较高的有果顶形状 (0.790) 和果形 (0.713)；第 4 主成分特征值为 2.257，累积贡献率为 46.752%，载荷较高的为酸度 (0.805)、株高 (0.599) 和果肉厚度 (0.494) 等，负向较高的为糖酸比 (-0.724)；第 5 主成分特征值为 1.855，累积贡献率为 54.936%，载荷较高的包括果肉色 (0.874)、胶状物颜色 (0.723) 以及成熟果色 (0.716) 等与果色颜色有关的性状；第 6 主成分特征值为 1.303，累积贡献率为 61.485%，载荷较高的为叶片类型 (0.800)，负向较高的为成熟前果色 (-0.507)；第 7 主成分特征值为 1.218，累积贡献率为

67.269%，载荷较高的是首花序节位 (0.821) 和叶色 (0.663)；第 8 主成分特征值为 1.069，累积贡献率为 72.986%，载荷较高的为肉质 (0.844) 和硬度 (0.525)，负向较高的为叶片形状 (-0.536)；第 9 主成分特征值为 1.009，累积贡献率为 78.143%，载荷负向较高的为风味 (-0.859)。

### 2.5 聚类分析

将上述 28 个表型性状进行聚类分析。结果表明 (图 1)，在欧氏距离为 5 处，将 70 份试材分为 5 个组群。第 1 组群包括 38 份材料，大多为各地优良番茄种质资源，其主要特征是横切面形状为圆形，叶片形状为二回羽状复叶，果肉色多为红色，果皮大多为无色，单果质量约 44.45 g，可溶性固形物含量为 6.69%，糖度含量为 7.02，酸度含量为 1.00，心室数为 2.50；第 2 组群包括 2 份材料，主要特征是复细叶型，花序类型为双歧花序，单果质量为 403.15 g，横径 97.71 mm，纵径 87.13 mm，果实较大；第 3 组包括 18 份材料，其主要特征是叶片类型为复细叶型，果形多为扁圆形，单果质量为 277.34 g，可溶性固形物含量为 5.27%；第 4 组包括 4 份材料，其主要特征是

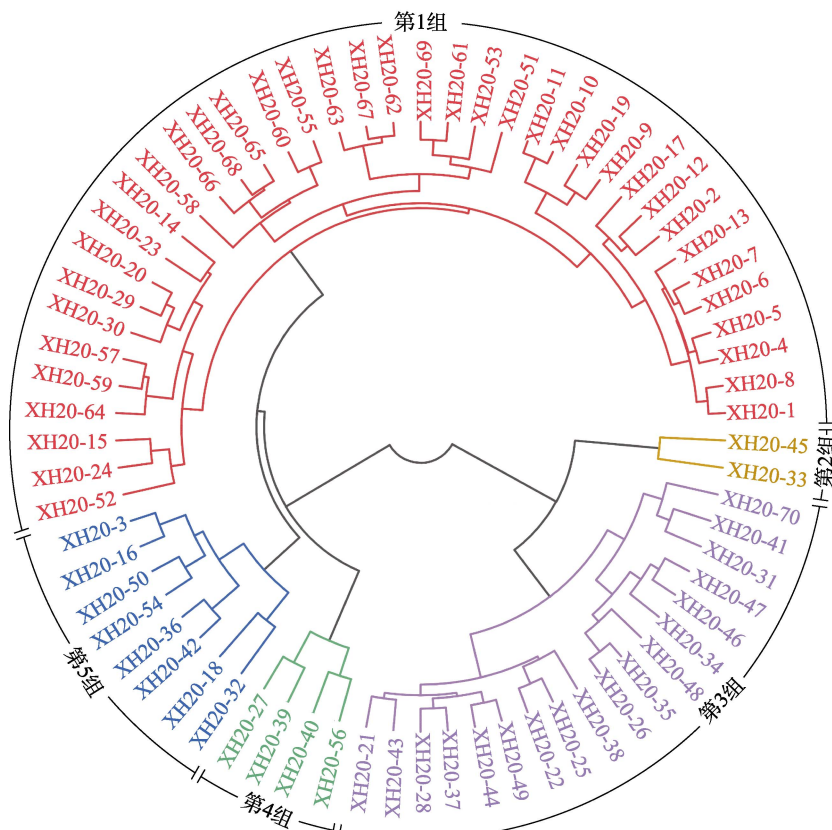


图 1 28 个表型性状的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of 28 phenotypic traits

横切面为圆形, 带有酸甜的风味, 单果质量为 47.20 g, 可溶性固形物含量在 4.88%, 糖酸比为 8.21; 第 5 组包括 8 份材料, 其主要特征是横切面为圆形, 单果质量 147.53 g, 可溶性固形物含量 5.73%, 糖酸比 4.87, 硬度 12.37。综上, 第 1 和第 4 组番茄果实较小、食用性较强, 可作为培育口感型、品质高的樱桃番茄品种的重要亲本材料。第 5 组资源的硬度较高, 果实较大, 可作为选育长途运输的经济型番茄品种的育种材料。

## 2.6 形态学性状综合评价

利用主成分分析的方法计算 70 份试材的综合得分 ( $D$ ), 并进行资源的综合评价。结果表明 (表 6),  $D$  值的变化范围为 -0.81~1.03。排名前 5 的番茄种质资源分别为 XH20-48、XH20-35、XH20-37、XH20-34 和 XH20-30, 其  $D$  值依次为 1.03、0.68、0.67、0.60、0.57。进一步分析  $D$  值与 28 个表型性状的相关性, 结果表明 (表 7),  $D$  值与 13 个性状数据达极显著相关水平, 其中与成熟果色、花序类型、果实横切面形状、果面棱沟、单果质量、纵径、横径、心室数、果肉厚度

和硬度等反映果实大小的性状呈极显著正相关, 而与可溶性固形物、糖度、糖酸比等与果实风味有关的性状指标呈极显著负相关。

## 3 讨论

番茄的品种改良是依托不同种质资源的高效性利用, 通过进行番茄种质资源遗传多样性的研究, 对于鉴别核心种质和加快遗传育种研究进程具有重要的作用。本研究系统性评估 70 份番茄种质在 28 个表型性状中的多态性特征, 通过遗传多样性指数与性状变异系数的联合解析, 对保存的种质资源进行综合筛选, 为后续定向选育具备特异性状的番茄亲本材料提供数据支撑。数量性状变异特征和遗传多样性指数用来衡量种质资源的离散程度和遗传多样性, 数量性状变异特征越大, 其离散程度也越大, 而遗传多样性指数越高, 则种质资源的遗传多样性也更加丰富<sup>[12]</sup>。数量性状变异特征解析表明, 在 70 份番茄种质中单果质量呈最高离散程度, 其次为心室数与糖酸比, 而可溶性固形物与总糖含量则表现出相对稳定的遗

表 6 70 份种质的综合得分  
Tab. 6 Comprehensive scores of 70 germplasms

编号 No.	综合得分 $D$	排名 Ranking	编号 No.	综合得分 $D$	排名 Ranking	编号 No.	综合得分 $D$	排名 Ranking
XH20-1	-0.05	36	XH20-25	0.05	30	XH20-48	1.03	1
XH20-2	-0.03	34	XH20-26	0.45	10	XH20-49	0.11	23
XH20-3	-0.08	37	XH20-27	-0.10	42	XH20-50	0.07	28
XH20-4	-0.23	52	XH20-28	0.48	9	XH20-51	-0.40	61
XH20-5	-0.17	48	XH20-29	0.14	21	XH20-52	-0.09	40
XH20-6	-0.34	54	XH20-30	0.57	5	XH20-53	-0.35	57
XH20-7	-0.09	39	XH20-31	0.35	15	XH20-54	0.10	26
XH20-8	0.07	29	XH20-32	-0.25	53	XH20-55	-0.04	35
XH20-9	-0.39	60	XH20-33	0.56	7	XH20-56	-0.49	66
XH20-10	-0.36	58	XH20-34	0.60	4	XH20-57	-0.18	50
XH20-11	-0.42	62	XH20-35	0.68	2	XH20-58	0.19	19
XH20-12	-0.34	55	XH20-36	0.03	31	XH20-59	0.56	6
XH20-13	-0.46	63	XH20-37	0.67	3	XH20-60	-0.08	38
XH20-14	0.10	25	XH20-38	0.19	18	XH20-61	-0.20	51
XH20-15	-0.11	43	XH20-39	-0.17	47	XH20-62	-0.48	65
XH20-16	-0.15	45	XH20-40	-0.16	46	XH20-63	-0.54	68
XH20-17	0.17	20	XH20-41	0.36	14	XH20-64	0.43	12
XH20-18	0.44	11	XH20-42	-0.11	44	XH20-65	-0.48	64
XH20-19	-0.36	59	XH20-43	-0.09	41	XH20-66	-0.81	70
XH20-20	0.12	22	XH20-44	0.09	27	XH20-67	-0.63	69
XH20-21	0.26	17	XH20-45	0.42	13	XH20-68	-0.50	67
XH20-22	0.51	8	XH20-46	0.11	24	XH20-69	-0.18	49
XH20-23	0.00	33	XH20-47	0.33	16	XH20-70	0.01	32

表 7 综合得分与表型性状的相关系数

Tab. 7 Correlation coefficient between comprehensive score and phenotypic traits

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient
叶片类型	0.293*	风味	-0.194
叶片形状	-0.116	首花序节位	0.110
叶色	0.299*	单果质量	0.705**
果皮色	0.097	株高	0.022
果肉色	0.142	纵径	0.901**
成熟前果色	-0.083	横径	0.685**
成熟果色	0.308**	果形指数	-0.038
花序类型	0.422**	心室数	0.587**
横切面形状	0.558**	果肉厚度	0.551**
胶状物颜色	0.292*	可溶性固形物含量	-0.531**
果顶形状	0.055	酸度	0.151
果形	0.102	糖度	-0.574**
果面棱沟	0.492**	糖酸比	-0.455**
肉质	0.116	硬度	0.690**

注: \*表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ )

传特性。此变异模式与前人关于茄科作物表型多样性的研究结论具有一致性<sup>[13-14]</sup>, 为番茄品质性状的遗传调控研究提供关键参数依据。对 15 个质量性状的遗传多样性指数分析显示, 变异范围为 0.48~2.59, 其中成熟果色、果形和果肉色性状表现出显著多态性, 与袁东升等<sup>[15]</sup>和许向阳等<sup>[16]</sup>研究结果一致。13 个数量性状多样性指数 (0.87~1.39) 主要集中于果实物理特性 (如硬度和纵横径等) 及风味物质 (如糖度和酸度等), 这与张钟炎等<sup>[17]</sup>研究结果较为一致, 该差异特征与质量性状多由主效基因调控的遗传规律相符, 验证了数量性状多基因调控背景下具有更广泛的选择潜力<sup>[18]</sup>, 表明了本研究的 70 份番茄种质资源具有广泛的遗传多样性。

果实硬度是番茄重要的商品性状之一, 与耐储运性密切相关。可溶性固形物主要包括可溶性糖和有机酸等物质, 是番茄品质性状的主要决定因素<sup>[19]</sup>。表型性状相关性分析表明, 果实硬度呈最广泛的多维关联网络, 其与糖度、未熟果色、心室数及果肉厚度存在显著负向关联, 但与果形指数和可溶性固形物呈显著正向关联, 这与李景富等<sup>[20]</sup>研究结果相同, 然而罗静等<sup>[21]</sup>却发现可溶

性固形物与果实硬度之间呈显著正相关, 与本研究结果相反, 这可能缘于不同地区种植不同的番茄品种以及性状指标测定方法不同所导致。可溶性固形物对未熟果色呈现显著负向响应, 而与果形指数呈现协同变异趋势; 单果质量与叶片类型, 花序类型和果面棱沟呈正相关关系, 与果顶形状和果形呈极显著负相关。番茄果实在成熟的过程中, 番茄红素、叶黄素、 $\beta$ -胡萝卜素等类胡萝卜素物质逐渐积累, 改变了番茄果实的颜色<sup>[22]</sup>, 与此同时, 果实的硬度逐渐下降, 可溶性糖和有机酸等物质逐渐积累进而影响了番茄的品质。孙亚东等<sup>[23]</sup>发现, 番茄红素的含量与果实硬度呈显著负相关, 这与本研究发现可溶性固形物对未熟果色呈现显著负相关的结果较为相似。这些结果表明, 除了可溶性固形物和糖度等常规指标, 果实颜色、心室数、果肉厚度和果形指数等商品性状可能协同参与番茄果实品质的调控形成。通过上述性状的关联性鉴定分析, 不但可以提高课题后期优质番茄品种定向选育的效率, 同时以此为契机, 也为分子育种中, 如多组学联合分析目标性状调控关联性上提供更广阔的筛选方向。

聚类分析是将材料的特异性相似程度进行优先聚合, 再将多个材料按照样品类别的综合性质进行汇总, 能够将多种材料的共有特征进行合理分类<sup>[24]</sup>。通过遗传距离矩阵计算, 本研究的 70 份番茄种质被分成 5 个表型特征群组, 其中第 1 和第 4 组材料为小果番茄, 口感佳、品质好, 第 5 组材料为大果红番茄, 硬度大, 较耐储运。因此, 上述材料的鉴定和筛选不但可以为传统杂交育种提供口感丰富、高糖、耐储运和多果形等性状兼顾的优质育种材料, 同时, 在从分子层面为关键性状基因的挖掘及深入的机理研究提供更多的可能。

主成分分析是目前使用最为成熟的综合评价方法之一, 对研究指标进行简化, 采用降维的方法达到简化的目的来进行统计学分析。韩泽群等<sup>[25]</sup>通过主成分分析和聚类分析对 22 个加工番茄品种的 17 项农艺性状进行综合评价, 建立了有效的评价体系, 为加工番茄优良品种的选育提供科学依据。张静等<sup>[26]</sup>通过对 60 份樱桃番茄品种的 12 个主要品质性状进行主成分分析和聚类分析, 提取了 5 个主成分因子并划分了 8 个类群用于后续的综合评价与育种材料评估。本研究基于表型数据矩阵的主成分分析显示, 提取出的 9

个主成分的累计贡献率达到 78.143%, 第 1 主成分主要反映番茄果实性状, 第 2 主成分集中体现营养品质特征, 第 3 主成分主要与果形参数高度相关, 这一结果与李凯等<sup>[27]</sup>研究结果相吻合。主成分综合得分的高低对不同种质资源的性状优劣有着较为直观的判断, 可以衡量某个性状在某个品种中的位置与分量, 对后续育种工作提供参考依据<sup>[28]</sup>。而主成分分析结合隶属函数计算, 已在多种作物研究中广泛使用<sup>[29-30]</sup>。本研究利用该方法得出的综合得分  $D$ , 由高到低共筛选出 5 份优质番茄材料 (XH20-48、XH20-35、XH20-37、XH20-34 和 XH20-30), 而上述材料在后续定向育种中可能作为骨干轮回亲本而使用。综上, 本研究为新疆后续番茄种质资源农艺性状的综合评价提供重要指导参考, 也为番茄定向新品种选育和遗传改良提供重要的理论依据和育种材料。

## 参考文献

- [1] 孙永珍, 贺靖, 魏芳, 杨伟健. “十三五”我国番茄产业发展及其国际竞争力评价[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(1): 112-116.  
SUN Y Z, HE J, WEI F, YANG W J. Evaluation on the development and international competitiveness of China's tomato industry during the 13<sup>th</sup> Five-Year Plan period[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(1): 112-116. (in Chinese)
- [2] 李君明, 项朝阳, 王孝宣, 国艳梅, 黄泽军, 刘磊, 李鑫, 杜永臣. “十三五”我国番茄产业现状及展望[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 13-20.  
LI J M, XIANG C Y, WANG X X, GUO Y M, HUANG Z J, LIU L, LI X, DU Y C. Current situation of tomato industry in China during the Thirteenth Five-year Plan Period and future prospect[J]. China Vegetables, 2021(2): 13-20. (in Chinese)
- [3] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 杨青, 黄玉英. 近 50a 新疆气候变化对环境影响评估[J]. 干旱区地理, 2001(2): 97-103.  
HU R J, FAN Z L, WANG Y J, YANG Q, HUANG Y Y. Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years[J]. Arid Land Geography, 2001(2): 97-103. (in Chinese)
- [4] 李凯, 谭丹. 新疆番茄产业国际竞争力分析[J]. 现代商业, 2018(35): 65-68.  
LI K, TAN D. Analysis of the international competitiveness of Xinjiang tomato industry[J]. Modern Business, 2018(35): 65-68. (in Chinese)
- [5] 杨继军, 金梦圆, 张晓磊. 全球供应链安全的战略考量与中国应对[J]. 国际贸易, 2022(1): 51-57.  
YANG J J, JIN M Y, ZHANG X L. The strategic considerations and China's response on the background of global supply chain security[J]. Intertrade, 2022(1): 51-57. (in Chinese)
- [6] 卢琦. 番茄品质性状多样性分析与农艺性状鉴定[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.  
LU Q. Tomato quality traits diversity analysis and agronomic characters identification[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021 (in Chinese)
- [7] 冀胜鑫, 李敬蕊, 张斌, 宫彬彬, 吴晓蕾, 高洪波. 不同番茄品种果实品质差异初步分析[J]. 北方园艺, 2021, 1(8): 15-22.  
JI S X, LI J R, ZHANG B, GONG B B, WU X L, GAO H B. Preliminary analysis on difference of fruit quality of different tomato varieties[J]. Northern Horticulture, 2021, 1(8): 15-22. (in Chinese)
- [8] 李丽梅, 杨超沙, 张立永, 尹庆珍, 毛向宏. 优质番茄种质资源品质分析及综合评价[J]. 华北农学报, 2020, 35(增刊 1): 85-92.  
LI L M, YANG C S, ZHANG L Y, YIN Q Z, MAO X H. Quality analysis and comprehensive evaluation of high quality tomato germplasm resources[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(Suppl. 1): 85-92. (in Chinese)
- [9] 赵建涛, 张静, 张雅婷, 邹志荣. 红色和粉色樱桃番茄与大果番茄果实品质特性分析[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 135-141.  
ZHAO J T, ZHANG J, ZHANG Y T, ZOU Z R. Analysis of fruit quality traits and volatiles in red and pink cherry and large-fruited tomato accessions[J]. Food Science, 2016, 37(16): 135-141. (in Chinese)
- [10] 张向梅, 乔凯, 高艳明, 李建设. 7 种鲜食高品质番茄果实发育与产量品质比较[J]. 西北农业学报, 2019, 28(3): 433-439.  
ZHANG X M, QIAO K, GAO Y M, LI J S. Comparison of fruit development, yield and quality of seven fresh and high-quality tomato varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(3): 433-439. (in Chinese)
- [11] 易腾飞, 李珊珊, 李嘉豪, 白云飞, 赵勇, 张树华, 杨学举. 261 份小麦品种基于农艺性状的遗传多样性分析[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(2): 7-13.  
YI T F, LI S S, LI J H, BAI Y F, ZHAO Y, ZHANG S H, YANG X J. Genetic diversity analysis of 261 bread wheat cultivars base on agronomic traits[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2018, 41(2): 7-13. (in Chinese)
- [12] 葛礼姣, 仇亮, 王小秋, 翟彩娇, 程玉静, 刘水东, 宋益民. 番茄种质资源重要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 中国农学通报, 2025, 41(12): 34-45.  
GE L J, QIU L, WANG X Q, ZHAI C J, CHENG Y J, LIU

- S D, SONG Y M. Genetic diversity of important agronomic traits in tomato germplasms[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(12): 34-45. (in Chinese)
- [13] 芮文婧, 王晓敏, 张倩男, 胡学义, 胡新华, 付金军, 高艳明, 李建设. 番茄 353 份种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2018, 45(3): 561-570.  
RUI W J, WANG X M, ZHANG Q N, HU X Y, HU X H, FU J J, GAO Y M, LI J S. Genetic diversity analysis of 353 tomato germplasm resources by phenotypic traits[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(3): 561-570. (in Chinese)
- [14] 赵云霞, 颜秀娟, 王学梅, 杨冬艳, 苏慧. 246 份番茄种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(17): 134-140.  
ZHAO Y X, YAN X J, WANG X M, YANG D Y, SU H. Genetic diversity of phenotypic characters of 246 tomato germplasm resources[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(17): 134-140. (in Chinese)
- [15] 袁东升. 266 份番茄种质资源遗传多样性分析及番茄杂交组合的评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.  
YUAN D S. Analysis of genetic diversity of 266 tomato germplasm resources and evaluation of tomato hybrid combinations[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019. (in Chinese)
- [16] 许向阳, 赵爽, 何梦曦, 闫成革, 王凯慧, 赵婷婷, 李景富, 杨欢欢, 姜景彬, 张贺. 128 份番茄种质资源主要农艺性状鉴定及抗病性评价[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(5): 32-41.  
XU X Y, ZHAO S, HE M X, YAN C G, WANG K H, ZHAO T T, LI J F, YANG H H, JIANG J B, ZHANG H. Identification of main agronomic characters and disease resistance evaluation of 128 tomato germplasm resources[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(5): 32-41. (in Chinese)
- [17] 张钟炎, 胡鲁巍, 陈加威, 朱祝军, 祝彪. 矮生观赏番茄种质资源农艺性状鉴定及观赏性评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(2): 158-170.  
ZHANG Z Y, HU L W, CHEN J W, ZHU Z J, ZHU B. Agronomic character identification and ornamental value evaluation of dwarf ornamental tomato germplasm resources[J]. Journal of Zhejiang University (Agricultural and Life Sciences), 2021, 47(2): 158-170. (in Chinese)
- [18] 张倩男, 王晓敏, 芮文婧, 胡学义, 胡新华, 付金军, 高艳明, 李建设, 张亚红. 基于表型性状及抗病标记的番茄种质资源遗传多样性分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 14-21.  
ZHANG Q N, WANG X M, RUI W J, HU X Y, HU X H, FU J J, GAO Y M, LI J S, ZHANG Y H. Genetic diversity analysis of tomato germplasm resources based on phenotypic traits and disease resistance markers[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(1): 14-21. (in Chinese)
- [19] 张斌浩, 李方曼, 葛平飞, 张星雨, 陶金宝, 熊春晖, 张余洋. 番茄可溶性固形物遗传基础与改良[J]. 中国蔬菜, 2025(2): 25-33.  
ZHANG B H, LI F M, GE P F, ZHANG X Y, TAO J B, XIONG C H, ZHANG Y Y. Genetic basis and improvement of soluble solids in tomato[J]. China Vegetables, 2025(2): 25-33. (in Chinese)
- [20] 李景富, 何艳龙, 尚娜, 郭盼盼, 许向阳, 吴明臣, 汪强. 番茄果实硬度与多个性状间相关分析及通径分析[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 1-8  
LI J F, HE Y L, SHANG N, GUO P P, XU X Y, WU M C, WANG Q. Correlation analysis and path analysis between fruit firmness and multiple traits in tomato[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(5): 1-8. (in Chinese)
- [21] 罗静, 田丽萍, 张超, 薛琳. 加工番茄果实硬度与相关性状间的分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 217-220.  
LUO J, TIAN L P, ZHANG C, XUE L. Analysis of firmness and related characters of processing tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 217-220. (in Chinese)
- [22] 于菁文, 张奕, 胡鑫, 潘阳露, 潘宇, 张兴国, 苏承刚. 番茄果实中类胡萝卜素合成与调控的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 23-35.  
YU Q W, ZHANG Y, HU X, PAN Y L, PAN Y, ZHANG X G, SU C G. Research progress on synthesis and regulation of carotenoids in tomato fruits[J]. China Vegetables, 2019(7): 23-35. (in Chinese)
- [23] 孙亚东, 梁燕, 吴江敏, 罗雷, 王晓静. 番茄数量性状与番茄红素相关性分析[J]. 中国蔬菜, 2010(6): 74-76.  
SUN Y D, LIANG Y, WU J M, LUO L, WANG X J. Correlation analysis on quantitative traits of tomato germplasm resources[J]. China Vegetables, 2010(6): 74-76. (in Chinese)
- [24] 谭贤杰, 覃兰秋, 廖金秀, 周锦国, 江禹奉, 谢和霞, 程伟东, 吴子恺. 应用多元统计分析玉米农艺性状[J]. 种子, 2011, 30(5): 32-36.  
TAN X J, QIN L Q, LIAO J X, ZHOU J G, JIANG Y F, XIE H X, CHENG W D, WU Z K. Analysis on maize agronomic traits by multivariate statistical method[J]. Seed, 2011, 30(5): 32-36. (in Chinese)
- [25] 韩泽群, 姜波. 加工番茄品种多性状综合评价方法研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 357-365.  
HAN Z Q, JIANG B. A Study on comprehensive evaluation of the processing tomato varieties multiple traits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 357-365. (in Chinese)

- [26] 张静, 常培培, 梁燕, 梁静, 赵建涛, 邹志荣, 黄薪历, 胡晓辉. 樱桃番茄主要品质性状的主成分分析与综合评价[J]. 北方园艺, 2014(21): 1-7.  
ZHANG J, CHANG P P, LIANG Y, LIANG J, ZHAO J T, ZOU Z R, HUANG X L, HU X H. Principal component analysis and comprehensive evaluation of quality traits in cherry tomato[J]. Northern Horticulture, 2014(21): 1-7. (in Chinese)
- [27] 李凯, 郑于莉, 刘燕, 王亮明, 韩兰兰, 郭凯, 袁鹤, 周刚. 74份番茄种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(14): 28-33.  
LI K, ZHENG Y L, LIU Y, WANG L M, HAN L L, GUO K, YUAN H, ZHOU G. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits of 74 tomato germplasm resources[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(14): 28-33. (in Chinese)
- [28] 徐澜, 秦秀娟, 安伟, 高志强. 基于主成分分析的南引小麦品种综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(3): 32-41.  
XU L, QIN X J, AN W, GAO Z Q. Comprehensive evaluation of wheat cultivars introduced from south China based on principal component analysis[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(3): 32-41. (in Chinese)
- [29] 邹成林, 黄开健, 翟瑞宁, 黄爱花, 莫润秀, 韦新兴, 杨萌, 黄艳芬, 王吟燕, 卢红雨. 基于隶属函数法和主成分分析评价玉米萌发期抗旱性[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 7-13.  
ZOU C L, HUANG K J, ZHAI R N, HUANG A H, MO R X, WEI X X, YANG M, HUANG Y F, WANG Y Y, LU H Y. Evaluation of drought resistance of maize during germination stage based on membership function method and principal components analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(13): 7-13. (in Chinese)
- [30] 金杭霞, 郭丹丹, 杨清华, 郁晓敏, 傅旭军, 袁凤杰. 利用模糊隶属函数法综合评价大豆萌发期耐盐性[J]. 分子植物育种, 2021, 19(24): 8265-8271.  
JIN H X, GUO D D, YANG Q H, YU X M, FU X J, YUAN F J. Comprehensive evaluation of salt tolerance in soybean germination period by fuzzy subordinate function method[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(24): 8265-8271. (in Chinese)