

陈祥, 刘宜洋, 罗璐, 等. 基于不同评价方法对 100 份樱桃番茄种质资源的综合评价 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(1): 62-71.
CHEN Xiang, LIU Yiyang, LUO Lu, et al. Comprehensive evaluation of germplasm resources of 100 cherry tomatoes based on different evaluation methods [J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(1): 62-71.

基于不同评价方法对 100 份樱桃番茄 种质资源的综合评价

陈祥¹, 刘宜洋¹, 罗璐¹, 程国新^{1,2}, 郭猛^{1,2}, 高艳明^{1,2}, 李建设^{1,2}, 王晓敏^{1,2}

(1 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏银川 750021; 2 宁夏现代设施园艺工程技术研究中心/
宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室, 宁夏银川 750021)

摘要:【目的】探究樱桃番茄 *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme* 种质资源在银川平原地区的适应性, 评价适合银川平原地区新品种选育的优良樱桃番茄育种材料。【方法】以收集到的 100 份樱桃番茄种质资源为研究对象, 对其主要表型性状进行测定, 利用多元统计法、灰色关联度分析法和 DTOPSIS 法 3 种不同的评价方法进行适应性综合评价。基于主成分计算出综合得分, 灰色关联度法计算出加权关联度, DTOPSIS 法计算出相对贴适度。【结果】100 份樱桃番茄的主要表型性状的变异系数在 17.78%~306.46% 之间, 大部分性状间存在显著或极显著相关性。26 个表型性状综合成了 10 个主成分, 累计贡献率达 71.901%。以 3 种评价方法对各种质进行排名, 结果既有统一性, 也有差异性, 共有 4 份材料均排在前 10 名, 分别是 T55、T83、T42 和 T87, 表明 T55、T83、T42 和 T87 是表现优良的种质, 其中 T55 的表现最为优异。【结论】T55 是最适宜银川平原地区栽培的种质材料, 可作为重要的育种基础材料; 上述 3 种方法对樱桃番茄的评价结果略有不同, 但无巨大差异, 说明方法可行, 有利于种质资源评价方面的研究。

关键词: 樱桃番茄; 种质资源; 多元统计; 灰色关联度分析; DTOPSIS 法; 综合评价

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)01-0062-10

Comprehensive evaluation of germplasm resources of 100 cherry tomatoes based on different evaluation methods

CHEN Xiang¹, LIU Yiyang¹, LUO Lu¹, CHENG Guoxin^{1,2}, GUO Meng^{1,2}, GAO Yanming^{1,2}, LI Jianshe^{1,2}, WANG Xiaomin^{1,2}

(1 College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Ningxia Modern Facility Horticulture Engineering Technology Research Center/Key Laboratory of Modern Molecular Breeding for Dominant and Special Crops in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】In order to explore the adaptability of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) germplasm resources, and evaluate the excellent cherry tomato breeding materials suitable for new varieties breeding in Yinchuan Plain area. 【Method】Totally 100 cherry tomato germplasm resources were collected as research objects, and the main phenotypic traits were determined. The adaptability was

收稿日期: 2024-01-23 网络首发时间: 2024-12-17 14:30:57

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20241217.1056.002>

作者简介: 陈祥, 硕士研究生, 主要从事蔬菜生物技术与遗传育种研究, E-mail: chenxiang0137@163.com; 通信作者: 王晓敏, 教授, 博士, 主要从事蔬菜生物技术与遗传育种研究, E-mail: wangxiaomin_1981@163.com

基金项目: 宁夏回族自治区农业特色优势产业育种专项 (NXNYYZ20200104); 宁夏科技领军人才培养项目 (2023GKLRXL12)

comprehensively evaluated by three different evaluation methods, multivariate statistical method, grey correlation analysis method and DTOPSIS method. The comprehensive score was calculated based on the principal component, the weighted correlation degree was calculated by the grey correlation degree method, and the relative proximity degree was calculated by the DTOPSIS method. 【Result】 The coefficient of variation of the main phenotypic traits of 100 cherry tomatoes ranged from 17.78% to 306.46%, and there were significant or extremely significant correlations among most of the traits. The 26 phenotypic traits were integrated into 10 principal components, with a cumulative contribution rate of 71.901%. The ranking of various qualities under the three evaluation methods showed both uniformity and difference. A total of four materials were ranked in the top 10, namely, T55, T83, T42 and T87 under all three methods, indicating that T55, T83, T42 and T87 were excellent germplasms, and T55 was the best. 【Conclusion】 T55 is the most suitable germplasm material for cultivation in Yinchuan Plain, and can be used as an important basic material for breeding. The evaluation results of the above three methods are slightly different, but there is no huge difference, which shows that the methods are feasible and beneficial to the research of germplasm resource evaluation.

Key words: Cherry tomato; Germplasm resource; Multivariate statistics; Grey correlation analysis; DTOPSIS method; Comprehensive evaluation

樱桃番茄 *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme* 原产于南美洲西北部厄瓜多尔、秘鲁一带, 又名圣女果、小番茄等, 属茄科 1 年生或多年生植物, 其营养物质丰富、风味独特, 且具有抗癌、降血压等医疗保健作用, 深受消费者喜爱, 在世界范围内广泛种植^[1-3]。种质资源是育种工作的基础, 拥有表现优良的种质资源是培育新品种的关键^[4]。然而随着育种工作的持续开展, 导致种质资源遗传背景重叠严重, 亟需筛选一批适应于银川平原地区育种的樱桃番茄种质材料^[5]。表型性状是评价种质资源是否适应本地区种植的重要因素, 包括质量性状和数量性状, 可通过肉眼直观判断种质在栽培过程中反映出的变异情况, 对基因挖掘和种质创新等具有重要意义, 目前表型性状的鉴定仍然是蔬菜作物遗传育种的重要工作环节^[6-7]。

灰色关联度法和 DTOPSIS 法对作物种质优劣的评价已被育种家充分认可, 在许多农作物上得到了广泛应用^[8]。相较于遗传多样性分析, 通过多元统计分析、灰色关联度分析和 DTOPSIS 分析的综合比较, 能够筛选出综合性状更适宜本地区开展育种工作的樱桃番茄种质资源^[9]。目前, 银川平原地区多以大果番茄的遗传多样性研究为主^[10-12], 关于樱桃番茄种质资源的综合评价和筛选研究鲜有报道, 樱桃番茄的育种工作仍落后于全国其他农业发达省份。基于此, 本研究以宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室收集的 100 份樱桃番茄为材料, 测定 26 个重要的表型指标, 进行多元统计分析、灰色关联度分析和 DTOPSIS 分析, 最终筛选出

适宜银川平原地区种植的优良种质资源, 以期为银川平原的樱桃番茄新品种选育奠定基础, 促进樱桃番茄的高质高效生产。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取的 100 份樱桃番茄材料由宁夏大学瓜菜遗传育种课题组提供, 材料编号为 T1~T100。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 6 月至 2023 年 10 月在宁夏大学实验农场番茄遗传育种基地的日光温室进行。6 月 1 日于日光室内采用 98 孔穴盘育苗, 每份材料育苗 3 盘, 6 月 25 日定植。试验设 3 次重复, 小区随机区组排列, 每个小区定植 20 株, 半高垄双行栽培, 垄高 20 cm, 畦宽 70 cm, 畦沟宽 95 cm, 行距 60 cm, 株距 40 cm。播种前深翻土壤、消毒晾晒, 单秆整枝, 不打顶, 水肥管理同常规栽培管理。

1.3 测定指标

在番茄生长至第三穗果成熟期时, 对供试的所有樱桃番茄材料的 26 个表型性状进行测定, 每份种质材料随机调查 10 株。调查项目包括 11 个质量性状和 15 个数量性状。质量性状分别是生长势、叶片颜色、叶片类型、叶片着生状态、茎叶茸毛、成熟前果色、成熟果色、果肩、果顶形状、萼片形状、花序类型。数量性状分别是首花序节位、单花序果数、叶片长、叶片宽、裂果率、果梗洼大小、果梗洼处木栓化大小、果柄长度、果实纵径、果实横径、单果质量、硬度、可溶性固形物含量、心室数、果肉

厚; 其中, 硬度采用 GY-4 数字式果实硬度计测定, 可溶性固形物含量采用 TD-45 手持式数显糖度计测定, 使用数显游标卡尺分别测量叶片长、叶片宽、果梗洼大小、果梗洼处木栓化大小、果柄长度、果实

纵径、果实横径、果肉厚。质量性状进行分级处理, 描述及分级标准参照文献 [13], 并略做修改, 分级与赋值标准见表 1。

表 1 樱桃番茄质量性状赋值标准
Table 1 Evaluation criteria for cherry tomato quality traits

性状 Trait	1	2	3	4	5
生长势 Growth potential	弱 Weak	较弱 Weaker	中 Intermediate	较强 Stronger	强 Strong
叶片颜色 Leaf color	黄绿 Yellowish green	浅绿 Light green	绿 Green	深绿 Dark green	
叶片类型 Leaf type	普通叶型 Common	薯叶型 Potato leaves	复宽叶型 Compound broad	复细叶型 Compound fine	
叶片着生状态 Leaf state	直立 Erect	水平 Horizontal	下垂 Pendant		
茎叶茸毛 Stem and leaf fluf	无 Absent	短稀 Short and thin	短密 Short and dense	长稀 Long and thin	长密 Long and dense
成熟前果色 Color before ripening	绿白 Greenish white	浅绿 Light green	绿 Green	深绿 Dark green	
成熟果色 Color of mature fruit	黄 Yellow	橘黄 Orange yellow	粉 Pinkish red	红 Red	深红 Dark red
果肩 Fruit shoulder	无 Absent	有 Present			
果顶形状 Fruit top shape	深凹 Fovea	微凹 Dimple	圆平 Tactful	微凸 Micro-convex	凸尖 Convex
萼片形状 Sepal shape	平 Plane	微翘 Slight warping	微卷 Microvolume	卷曲 Crimp	
花序类型 Inflorescence type	单花 Uniflorous	单式花序 Uniparous	双歧花序 Diparous	多歧 Multiparous	

1.4 评价方法

1.4.1 多元统计法 对所有材料进行描述统计分析、相关性分析和主成分分析。统一不同性状的单位, 有助于对种质资源材料综合评价, 标准化处理是实现这一目的的关键。常用的标准化处理的方法有极值法、均值法和标准差法等, 本研究利用极值法对数据进行标准化处理。根据式 (1) 计算出标准化处理结果, 式 (2) 计算各性状的权重, 式 (3) 计算综合评价得分。

$$f'_j(x) = \frac{f_{ij}(x) - f_j(x)_{\min}}{f_j(x)_{\max} - f_j(x)_{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n,$$

式中, $f'_j(x)$ 为番茄第 i 个种质的第 j 个性状的标准化处理值, $f_{ij}(x)$ 为番茄第 i 个种质的第 j 个性状的田间观察值, $f_j(x)_{\max}$ 为番茄第 j 个性状的田间最大观察

值, $f_j(x)_{\min}$ 为番茄第 j 个性状的田间最小观察值, m 为参试材料的个数, n 为性状个数。

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

式中, W_j 表示第 j 个综合性状的权重, P_j 为第 j 个综合性状的贡献率。

$$F = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j], \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

式中, F 为种质的综合评价得分, $u(X_j)$ 为各个种质第 j 个综合性状的因子得分。

1.4.2 灰色关联度法 根据式 (1) 计算出标准化处理结果, 结合标准化结果利用式 (4) 计算关联系数。分别利用式 (5) 将标准化处理结果归一化, 式 (6) 计算出权重, 式 (7) 计算出加权关联度。

$$\xi_i(x) = \frac{\min \Delta_i(x) + \rho \max \Delta_i(x)}{\Delta_i(x) + \rho \max \Delta_i(x)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (4)$$

式中, $\xi_i(x)$ 为关联系数, $\Delta_i(x)$ 为标准化后观察值与理想值的绝对差值, $\max \Delta_i(x)$ 为标准化后观察值与理想值的最大绝对差值, $\min \Delta_i(x)$ 为标准化后观察值与理想值的最小绝对差值, 通常为 0, ρ 为分辨系数, 通常为 0.5。

$$\varepsilon_{ij}(x) = \frac{f'_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^n f'_{ij}(x)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ij}(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

$$\gamma'_i = \sum_{j=1}^n \omega \varepsilon_{ij}(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{ij}(x)$ 为番茄第 i 个种质的第 j 个性状的归一化处理值, ω 为各性状的权重, γ'_i 为加权关联度。

1.4.3 DTOPSIS 法 以标准化结果乘以灰色关联度中计算出的权重得到规范化决策矩阵 (R), R 中每个种质的最大值作为正理想解, 最小值作为负理想解。利用式 (8)、式 (9) 计算正、负理想距离, 并代入式 (10) 中计算各种质的相对贴近度。

$$S_i^+ = \left[\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^+)^2 \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (8)$$

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^-)^2 \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (9)$$

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad C \in [0, 1], \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (10)$$

式中, S_i^+ 为各种质正理想距离, S_i^- 为各种质负理想距离, R_{ij} 为决策矩阵中第 i 个种质的第 j 个性状的值, X_j^+ 为正理想解, X_j^- 为负理想解, C_i 为各种质的相对贴近度。

1.5 统计分析

根据表型性状的均值结果, 利用 Excel 2019 对数据进行整理和多元统计分析, 并进行灰色关联度分析和 DTOPSIS 分析, 使用 SPSS 25.0 进行相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 樱桃番茄重要表型性状的多元统计分析

2.1.1 质量性状的分布频率 供试材料的质量性状分布频率如表 2 所示, 11 个质量性状共表现出

41 个变异类型, 各性状的变异类型分布频率不同, 除有果肩和无果肩各占 50% 以外, 其他 10 个性状的 39 个变异类型有很大差异, 说明供试材料有丰富的遗传背景, 有利于优良种质的筛选。

表 2 100 份樱桃番茄种质资源质量性状不同赋值标准的频率分布

Table 2 Frequency distribution of quality traits in 100 cherry tomato germplasm resources with different criteria

性状 Trait	分布频率/% Distribution frequency				
	1	2	3	4	5
生长势 Growth potential		6	23	33	38
叶片颜色 Leaf color	1	2	25	72	
叶片类型 Leaf type	25		8	67	
叶片着生状态 Leaf state	9	17	74		
茎叶茸毛 Stem and leaf fluf	4	62	1	29	4
成熟前果色 Color before ripening	31	47	17	5	
成熟果色 Color of mature fruit	5	11	3	77	4
果肩 Fruit shoulder	50	50			
果顶形状 Fruit top shape		2	54	35	9
萼片形状 Sepal shape	15	42	24	19	
花序类型 Inflorescence type		64	21	15	

2.1.2 数量性状的变异分析和相关性分析 100 份樱桃番茄种质资源的 15 个数量性状变异分析结果 (表 3) 表明, 15 个数量性状的变异系数变幅为 17.78%~306.46%, 平均值为 51.13%。其中裂果率最大, 为 306.46%, 表明遗传特性很不稳定, 在选育过程中应注意去除裂果率较大的材料。其他变异较大的性状有单花序果数 (76.18%)、果梗洼处木栓化大小 (48.00%)、单果质量 (45.04%)、果梗洼大小 (43.06%) 和果柄长度 (39.33%), 较小的有果肉厚 (29.18%)、硬度 (26.56%)、叶片宽 (23.79%)、心室数 (23.68%)、果实纵径 (23.21%)、果实横径 (23.20%)、首花序节位 (21.34%)、叶片长 (20.13%) 和可溶性固形物含量 (17.78%)。

相关性分析结果表明, 各数量性状间大部分存在着显著和极显著相关关系 (表 4)。其中果肉厚与果梗洼大小、果梗洼处木栓化大小、果实纵径、果实

表 3 100 份樱桃番茄种质资源数量性状变异分析
Table 3 Variation analysis of quantitative traits in 100 cherry tomato germplasm resources

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
首花序节位 First inflorescence segment	12.00	4.00	8.00	7.70	1.64	21.34
单花序果数 Fruit number per inflorescence	68.33	3.67	64.67	11.60	8.84	76.18
叶片长/cm Leaf length	48.63	14.80	33.83	33.38	6.72	20.13
叶片宽/cm Leaf width	40.77	11.77	29.00	26.85	6.39	23.79
裂果率/% Fruit cracking rate	48.15	0.00	48.15	2.06	6.32	306.46
果梗洼大小/mm Size of corky area around pedicel scar	9.64	1.38	8.26	4.12	1.78	43.06
果梗洼处木栓化大小/mm Suberification size of pedicel scar	5.18	0.48	4.70	2.04	0.98	48.00
果柄长度/mm Pedicel length	22.38	0.66	21.72	7.55	2.97	39.33
果实纵径/mm Fruit longitudinal diameter	65.05	14.52	50.53	36.33	8.43	23.21
果实横径/mm Fruit transverse diameter	48.91	13.72	35.19	26.47	6.14	23.20
单果质量/g Weight per fruit	37.33	1.46	35.87	16.74	7.54	45.04
硬度/(kg·cm ⁻²) Hardness	4.89	1.01	3.88	3.04	0.81	26.56
可溶性固形物含量/% Soluble solids content	10.13	4.27	5.87	7.52	1.34	17.78
心室数 Number of locules	5.00	2.00	3.00	2.39	0.57	23.68
果肉厚/mm Flesh thickness	7.87	1.58	6.29	3.87	1.13	29.18

表 4 樱桃番茄种质 15 个数量性状的相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis of 15 quantitative characters in cherry tomato germplasm

性状 Trait	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.000														
2	0.377**	1.000													
3	0.130	0.251*	1.000												
4	-0.079	0.003	0.773**	1.000											
5	-0.084	-0.090	0.055	0.098	1.000										
6	-0.233	-0.222	0.101	0.247*	-0.036	1.000									
7	-0.210	-0.223	0.104	0.306*	0.025	0.935**	1.000								
8	0.026	-0.027	-0.033	0.092	-0.048	0.266*	0.206	1.000							
9	-0.108	-0.141	0.467**	0.492**	0.046	0.203	0.224	0.190	1.000						
10	-0.062	-0.270*	0.335**	0.467**	0.197	0.560**	0.652**	0.043	0.371**	1.000					
11	-0.016	-0.289*	0.394**	0.501**	0.172	0.452**	0.554**	0.101	0.496**	0.778**	1.000				
12	0.010	0.039	-0.013	-0.155	0.117	-0.067	-0.118	-0.076	0.141	0.033	-0.053	1.000			
13	0.144	0.483**	0.154	0.016	-0.076	-0.099	-0.174	0.035	-0.212	-0.288*	-0.319**	0.042	1.000		
14	0.327**	-0.163	0.127	0.075	0.015	0.041	0.026	0.042	-0.110	0.188	0.193	0.037	-0.046	1.000	
15	-0.107	-0.198	0.162	0.218	-0.003	0.326**	0.332**	0.141	0.338**	0.464**	0.603**	-0.058	-0.341**	0.014	1.000

1) 1: 首花序节位, 2: 单花序果数, 3: 叶片长, 4: 叶片宽, 5: 裂果率, 6: 果梗洼大小, 7: 果梗洼处木栓化大小, 8: 果柄长度, 9: 果实纵径, 10: 果实横径, 11: 单果质量, 12: 硬度, 13: 可溶性固形物含量, 14: 心室数, 15: 果肉厚; *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关(Pearson法)。

1) 1: First inflorescence segment, 2: Fruit number per inflorescence, 3: Leaf length, 4: Leaf width, 5: Fruit cracking rate, 6: Size of corky area around pedicel scar, 7: Suberification size of pedicel scar, 8: Pedicel length, 9: Fruit longitudinal diameter, 10: Fruit transverse diameter, 11: Weight per fruit, 12: Hardness, 13: Soluble solids content, 14: Number of locules, 15: Flesh thickness; * and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (Pearson method).

横径、单果质量呈极显著正相关, 与可溶性固形物含量呈极显著负相关; 果实横径和单果质量均与叶片长、叶片宽、果梗洼大小、果梗洼处木栓化大小、果实纵径呈极显著正相关, 与单花序果数呈显著负相关, 且果实横径与单果质量呈极显著正相关; 可溶性固形物含量与单花序果数呈极显著正相关, 与单果质量呈极显著负相关, 与果实横径呈显著负相关; 叶片长与叶片宽、果实纵径呈极显著正相关, 与单花序果数呈显著正相关; 叶片宽与果实纵径呈极

显著正相关, 与果梗洼大小、果梗洼处木栓化大小呈显著正相关; 果梗洼大小与果梗洼处木栓化大小呈极显著正相关, 与果柄长度呈显著正相关; 首花序节位与单花序果数、心室数呈极显著正相关;

2.1.3 表型性状的主成分分析和综合评价 主成分分析可以通过降维, 将多指标数据转换为综合指标, 基本保留原有数据信息。对供试材料的 26 个重要性状进行主成分分析, 结果如表 5 所示。共提取了 10 个主成分, 特征值均大于 1, 累计贡献率达

表 5 表型性状的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of phenotypic traits

性状 Trait	主成分 Principal component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
首花序节位 First inflorescence segment	-0.060	0.013	0.191	-0.099	0.799	0.256	0.041	-0.036	-0.203	-0.108
单花序果数 Fruit number per inflorescence	-0.252	0.225	0.311	-0.060	-0.019	0.551	-0.154	0.020	-0.192	-0.265
叶片长 Leaf length	0.043	0.861	0.183	-0.001	0.118	0.071	0.076	0.110	0.052	-0.115
叶片宽 Leaf width	0.225	0.901	0.051	-0.040	0.020	-0.020	-0.023	-0.019	0.024	0.078
裂果率 Fruit cracking rate	-0.052	0.126	-0.015	0.557	0.003	-0.119	-0.092	0.295	0.024	0.464
果梗洼大小 Size of corky area around pedical scar	0.923	-0.015	0.106	-0.016	-0.105	-0.029	-0.053	-0.079	0.062	0.066
果梗洼处木栓化大小 Suberification size of pedicel scar	0.938	0.019	0.026	0.035	-0.078	-0.037	-0.102	-0.065	0.048	0.109
果柄长度 Pedicel length	0.128	0.083	0.190	0.044	0.139	-0.128	0.114	-0.766	0.130	0.107
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	0.223	0.534	-0.111	0.085	-0.135	-0.168	0.494	-0.078	0.000	-0.188
果实横径 Fruit transverse diameter	0.794	0.281	-0.084	0.153	0.155	-0.117	-0.024	0.089	0.036	0.093
单果质量 Weight per fruit	0.684	0.385	-0.101	0.230	0.221	-0.194	0.099	0.055	0.145	0.059
硬度 Hardness	0.028	-0.154	0.116	-0.059	0.034	-0.540	0.414	0.419	-0.004	-0.066
可溶性固形物含量 Soluble solids content	-0.306	-0.038	0.684	-0.133	-0.270	0.167	0.026	0.006	0.042	0.037
心室数 Number of locules	0.109	0.073	-0.084	-0.022	0.660	-0.189	-0.265	0.040	0.178	0.077
果肉厚 Flesh thickness	0.495	0.137	-0.135	0.251	0.264	0.012	0.253	0.046	0.408	-0.165
生长势 Growth potential	0.118	0.232	0.746	-0.038	0.352	0.097	0.063	-0.026	0.054	0.117
叶片颜色 Leaf color	0.092	0.173	0.316	0.087	0.089	-0.038	0.022	0.134	0.734	0.138
叶片类型 Leaf type	0.202	0.097	0.642	0.231	0.059	-0.339	-0.125	0.075	-0.028	-0.225
叶片着生状态 Leaf state	-0.140	0.144	0.239	0.026	0.197	0.034	0.108	0.268	-0.546	0.125
茎叶茸毛 Stem and leaf fluf	0.065	0.137	-0.083	0.700	-0.145	0.004	-0.108	-0.158	0.292	-0.107
成熟前果色 Color before ripening	0.283	-0.254	0.063	0.717	0.015	-0.030	0.055	-0.120	-0.153	-0.028
成熟果色 Color of mature fruit	0.218	-0.088	0.003	-0.052	-0.020	0.017	0.044	-0.110	-0.003	0.829
果肩 Fruit shoulder	0.112	0.188	0.207	-0.075	0.132	0.063	0.144	0.628	0.107	0.031
果顶形状 Fruit top shape	-0.186	0.000	0.144	-0.265	-0.099	0.048	0.773	0.037	0.007	0.088
萼片形状 Sepal shape	0.039	0.157	-0.368	0.231	-0.048	-0.020	0.514	0.026	-0.044	0.024
花序类型 Inflorescence type	-0.081	-0.150	-0.015	-0.055	0.080	0.774	0.120	0.277	0.020	0.049
特征值 Eigen value	4.847	2.857	1.969	1.592	1.522	1.425	1.246	1.117	1.064	1.056
贡献率/% Contribution rate	18.641	10.987	7.572	6.123	5.854	5.480	4.791	4.296	4.094	4.062
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	18.641	29.628	37.200	43.323	49.177	54.656	59.447	63.744	67.838	71.901

71.901%。其中第 1 主成分特征值为 4.847, 贡献率为 18.641%, 特征向量绝对值最大的性状是果梗洼处木栓化大小, 为 0.938, 依次是果梗洼大小 (0.923)、果实横径 (0.794)、单果质量 (0.684) 和果肉厚 (0.495), 均在 0.49 以上, 这些指标与果实品质有关, 可归纳为果实品质因子。第 2 主成分特征值为 2.857, 贡献率为 10.987%, 其中叶片宽的特征向量绝对值最大, 为 0.901, 其次为叶片长 (0.861)、果实纵径 (0.534)。第 3 主成分特征值和贡献率分别为 1.969 和 7.572%, 各性状的特征向量绝对值较为平均, 分别是生长势 (0.746)、可溶性固形物含量 (0.684) 和叶片类型 (0.642), 因与第 2 主成分主要反映叶片相关因子, 故可与其归纳为叶片因子。第 4 主成分的特征值和贡献率分别为 1.592 和 6.123%, 特征向量绝对值较高的是成熟前果色 (0.717)、茎叶茸毛 (0.700) 和裂果率 (0.557), 与果实外观有关, 可归纳为果实外观因子。第 5 主成分的特征值和贡献率分别为 1.522 和 5.854%, 特征向量绝对值较高的是首花序节位 (0.799) 和心室数 (0.660), 均在 0.6 以上。第 6、7、8 主成分的特征值分别为 1.425、1.246 和 1.117, 贡献率分别为

5.480%、4.791% 和 4.296%, 各性状的特征向量绝对值较为平均。基于第 6 主成分, 花序类型 (0.774)、硬度 (0.540) 和单花序果数 (0.551) 为一类, 基于第 7 主成分, 果顶形状 (0.773) 和萼片形状 (0.514) 为一类, 基于第 8 主成分, 果柄长度 (0.766) 和果肩 (0.628) 为一类, 主要与果实有关, 可归纳为果实因子。第 9 主成分的特征值和贡献率分别为 1.064 和 4.094%, 2 个与叶片相关的性状特征向量绝对值分别是叶片颜色 (0.734) 和叶片着生状态 (0.546), 可与第 3 主成分一起归纳为叶片因子。第 10 主成分的特征值为 1.056, 贡献率为 4.062%, 只有成熟果色一个性状, 特征向量绝对值为 0.829。

对原始数据进行标准化处理后, 计算出前 10 个综合指标的权重, 分别是 0.259、0.153、0.105、0.085、0.081、0.076、0.067、0.060、0.057、0.057。根据各个种质的综合性状的因子得分计算得出所有供试材料的 F 值并进行排名, 因数据量太大, 只选取了前 30 名进行比较 (表 6)。其中 T18 和 T88 的得分都大于 2, 是最适宜银川平原栽培的樱桃番茄材料, 其余种质的适应性依次递减。

表 6 前 30 名的樱桃番茄种质综合评价得分
Table 6 Comprehensive evaluation scores of top 30 cherry tomato germplasms

编号 Number	F	排名 Ranking	编号 Number	F	排名 Ranking	编号 Number	F	排名 Ranking
T18	2.112	1	T100	1.697	11	T32	1.581	21
T88	2.099	2	T92	1.679	12	T47	1.575	22
T91	1.987	3	T35	1.674	13	T48	1.565	23
T83	1.962	4	T63	1.663	14	T81	1.564	24
T89	1.900	5	T86	1.653	15	T77	1.562	25
T87	1.871	6	T43	1.646	16	T54	1.557	26
T42	1.777	7	T82	1.645	17	T52	1.554	27
T55	1.763	8	T23	1.632	18	T41	1.545	28
T90	1.725	9	T66	1.624	19	T1	1.541	29
T24	1.722	10	T49	1.620	20	T11	1.527	30

2.2 基于灰色关联度法的综合评价

利用加权关联度对所有种质的各性状综合评价, 通过计算出各性状的权重, 乘以关联系数得到加权关联度。将各种质依据加权关联度的大小进行排名, 前 30 名种质及排名如表 7 所示, T1 是表现最好的种质, T55 次之。超过三分之二的种质也排在主成分分析法综合排名的前 30 名中, 其中 T1、T55、T100 的加权关联度均大于 0.7, 是非常适合银川平原地区种植的 3 个优良种质材料。

2.3 基于 DTOPSIS 法的综合评价

根据公式计算出正理想距离、负理想距离和相对贴适度, 结果如表 8 所示。由于数据量太大, 选取相对贴适度较优的前 30 个种质进行排名。相对贴适度越大, 说明该种质的综合性状表现越好, 越适应当地环境条件。由此可见, 位列前 3 名的 T55、T1 和 T42 是最适应银川平原地区种植的樱桃番茄种质, 而其他种质的适应性随 C_i 值的降低而依次递减。

表 7 前 30 名的樱桃番茄种质加权关联度排名
Table 7 Weighted correlation rankings of top 30 cherry tomato germplasm

编号 Number	γ'_i	排名 Ranking	编号 Number	γ'_i	排名 Ranking	编号 Number	γ'_i	排名 Ranking
T1	0.716	1	T47	0.671	11	T52	0.649	21
T55	0.703	2	T88	0.670	12	T54	0.648	22
T100	0.702	3	T62	0.666	13	T43	0.648	23
T83	0.699	4	T41	0.665	14	T45	0.647	24
T42	0.688	5	T23	0.662	15	T61	0.647	25
T18	0.679	6	T86	0.660	16	T97	0.644	26
T91	0.677	7	T26	0.660	17	T44	0.644	27
T49	0.676	8	T48	0.659	18	T92	0.643	28
T87	0.675	9	T53	0.659	19	T59	0.643	29
T66	0.674	10	T90	0.658	20	T46	0.642	30

表 8 基于 DTOPSIS 法的前 30 名樱桃番茄种质排名
Table 8 Top 30 cherry tomato germplasm based on DTOPSIS method

编号 Number	正理想距离 Positive ideal distance (S^+)	负理想距离 Negative ideal distance (S^-)	相对贴近度 Relative closeness (C_i)	排名 Ranking	编号 Number	正理想距离 Positive ideal distance (S^+)	负理想距离 Negative ideal distance (S^-)	相对贴近度 Relative closeness (C_i)	排名 Ranking
T55	0.078	0.174	0.692	1	T61	0.087	0.164	0.654	16
T1	0.081	0.178	0.688	2	T45	0.086	0.161	0.652	17
T42	0.081	0.172	0.680	3	T43	0.088	0.163	0.648	18
T47	0.082	0.170	0.675	4	T44	0.089	0.164	0.648	19
T66	0.082	0.170	0.675	5	T48	0.091	0.166	0.647	20
T87	0.082	0.169	0.673	6	T90	0.090	0.163	0.645	21
T88	0.080	0.163	0.672	7	T62	0.092	0.166	0.644	22
T100	0.085	0.172	0.669	8	T18	0.094	0.169	0.642	23
T83	0.087	0.170	0.662	9	T86	0.092	0.165	0.641	24
T49	0.088	0.171	0.661	10	T24	0.091	0.161	0.639	25
T53	0.086	0.167	0.661	11	T52	0.094	0.165	0.638	26
T46	0.084	0.162	0.660	12	T70	0.092	0.156	0.630	27
T54	0.082	0.160	0.660	13	T92	0.093	0.156	0.626	28
T41	0.085	0.165	0.659	14	T32	0.097	0.161	0.623	29
T91	0.088	0.168	0.658	15	T29	0.097	0.159	0.622	30

2.4 3 种方法的评价结果比较

基于多元统计法、灰色关联度法和 DTOPSIS 法 3 种原理不同的评价方法, 更能筛选出最佳的种质资源材料, 3 种评价方法的结果既有统一性, 也有差异性。在多元统计方法中, 各性状的变异类型和变异系数与综合得分息息相关, 前 30 名的种质综合得分排名是 T18>T88>T91>T83>T89>T87>T42>T55>T90>T24>T100>T92>T35>T63>T86>T43>T82>T23>T66>T49>T32>T47>T48>T81>T77>

T54>T52>T41>T1>T11。在灰色关联度法中, 加权关联度越大, 说明综合性状越好, 排名前 30 的种质是 T1>T55>T100>T83>T42>T18>T91>T49>T87>T66>T47>T88>T62>T41>T23>T86>T26>T48>T53>T90>T52>T54>T43>T45>T61>T97>T44>T92>T59>T46。在 DTOPSIS 法中, 正理想距离、负理想距离决定相对贴近度的大小, 而相对贴近度越大, 综合性状表现越好, 排名前 30 的种质是 T55>T1>T42>T47>T66>T87>T88>T100>T83>T49>T53>T46>

T54>T41>T91>T61>T45>T43>T44>T48>T90>T62>T18>T86>T24>T52>T70>T92>T32>T29。综合比较后, T55、T83、T42 和 T87 这 4 个种质资源材料在 3 种评价方法中均排在前 10 名, 其中 T55 在 DTOPSIS 法中排名第 1, 在灰色关联度法中排名第 2, 是综合表现最好的樱桃番茄种质材料, 最适宜银川平原地区栽培, 为新品种选育奠定了坚实基础。

3 讨论与结论

在番茄遗传育种中, 筛选优良的种质资源是必不可少的环节, 而应用不同的评价方法对种质资源进行筛选是重要手段^[14]。遗传多样性分析可以明确种质资源的差异性, 体现出群体内种质资源的丰度, 但不能筛选种质资源^[15-16]。多元统计分析遗传多样性分析有相似之处, 既可以对群体内的种质资源进行描述性统计, 又可以做变异分析, 反映群体的变异程度。但优于遗传多样性分析的是其可以结合主成分分析, 通过降维将许多性状指标转化成综合指标, 即通过主成分对种质资源进行综合评价, 从而筛选出综合得分高、表现优良的种质材料^[17]。但是对于仅利用多元统计而言, 通过多种方法综合评价种质资源更能体现出种质的优劣性。

目前普遍被接受的评价方法有隶属函数法^[18-19]、层次分析法、灰色关联度法^[20-24]、DTOPSIS 法^[22-25]和灰色局势决策法^[24-25]等, 这些方法已经在农作物领域被广泛应用, 对筛选优质材料提供了极大的便利。灰色关联度法和 DTOPSIS 法有着本质的区别, 在运算上存在差异, 致使最终排序结果也有一定的差异。为减少主观因素, 可以将灰色关联度法中的权重运用到 DTOPSIS 法中, 在不影响精确度的情况下, 加强二者的联系, 减少差异, 使结果更加准确可靠。陈阿敏等^[26]结合统计分析和 DTOPSIS 法对 145 份贵州地方樱桃番茄的品质性状综合分析, 筛选了 5 个排名靠前的地方樱桃番茄种质资源。二者的结合不仅可以应用于樱桃番茄的综合评价, 也适用于高粱^[27]、谷子^[24]、玉米^[25]、水稻^[28]等大田或经济作物^[29]。李国花等^[30]基于 DTOPSIS 法对 50 份粉果番茄杂交组合的两年田间表现进行综合评价, 筛选了 3 个适合于宁夏日光温室种植的杂交组合。侯晓静等^[31]利用灰色关联度分析法对 10 个加工番茄品种的 6 个性状对番茄红素含量的影响进行了研究, 结果表明可溶性固形物含量对番茄红素含量影响最大, 是重要的品质性状。本研究中, 可溶性固形物含量也是重要的性状之一, 与单花序果数、单果质量等性状都存在着极显著相关关系。

杨生保等^[32]也利用了灰色关联度分析法对引自日本的 18 份和新疆当地的 3 份加工番茄进行引种试验, 最终筛选了 2 个最适宜新疆种植的加工番茄, 均来自于日本。

为了筛选出适合于银川平原地区种植的樱桃番茄种质资源, 为遗传育种提供基础, 本研究利用多元统计法、灰色关联度法和 DTOPSIS 法相结合, 测定 26 个重要的表型性状, 综合评价了 100 份樱桃番茄种质资源。供试材料变异类型丰富, 变异系数变幅在 17.78%~306.46% 之间, 相关性分析表明大部分性状间存在着显著和极显著相关关系。通过降维将供试材料所有数据标准化处理后共划分了 10 个主成分, 累计贡献率达 71.901%, 并将第 1~10 主成分归纳为果实品质因子、叶片因子和果实外观因子等。通过 3 种不同评价方法分别计算出综合得分、加权关联度和相对贴适度并进行排名, 筛选出了 4 份在 3 种方法中均排名较高的种质, 分别是 T55、T83、T42 和 T87, 其中 T55 的加权关联度排名第 2, 相对贴适度排名第 1, 是综合表现最好的种质。综合分析结果表明这 4 份种质是非常适合银川平原种植的樱桃番茄种质资源, 其中 T55 的表现最为优异, 在遗传育种工作中可以作为重要的基础材料。

此外, 本研究利用的 3 种评价方法中, 多元统计法对供试材料的各性状间相关性、分布频率和变异程度等方面进行了具体分析, 通过主成分分析获得权重, 计算综合得分, 更加全面地评价了供试材料。灰色关联度和 DTOPSIS 法分别基于不同的算法计算出各种质的加权关联度和相对贴适度, 代表种质的优劣, 并进行排名。3 种方法原理不同, 但综合分析后, 结果科学可靠, 不仅可以用于樱桃番茄种质资源的评价, 对其他作物的研究也提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 赵宇飞, 王晓敏, 袁东升, 等. 18 个樱桃番茄自交系数量性状的配合力和遗传力分析[J]. 西北农业学报, 2019, 28(12): 2011-2018.
- [2] 黄婷, 周园园, 龚奕杰, 等. 昆山地区樱桃番茄新品种筛选试验及综合评价[J]. 中国种业, 2023(11): 77-84.
- [3] RENUKA D M, SADASHIVA A T, AMBRESH S, et al. Path coefficient analysis for yield and quality Components in cherrytomato (*Solanum lycopersicum* var. *Cerasiforme*)[J]. Plant Archives, 2017, 17(2): 1350-1352.
- [4] MACIEL G M, FINZI R R, CARVALHO F J, et al. Agronomic performance and genetic dissimilarity among cherry tomato genotypes[J]. Horticultura Brasileira, 2019, 37(1): 1-6.

- 2018, 36(2): 167-172.
- [5] VENKADESWARAN E, VETHAMONI P I, ARUMUGAM T, et al. Evaluation and selection of cherry tomato [*Solanum lycopersicum* (L.) var. *cerasiforme* Mill.] genotypes for growth and yield contributing characters[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(06): 1155-1165.
- [6] 裴芸, 徐秀红, 陆锦彪, 等. 151份贵州地方樱桃番茄资源的遗传多样性分析[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(2): 310-316.
- [7] 陈文星, 杨琳懿, 唐军荣, 等. 10个新樟属植物叶片表型性状多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(12): 83-93.
- [8] 田启建, 赵致, 叶玉龙. 14份国外番茄种质资源综合性状评价[J]. 种子, 2008, 27(3): 51-54.
- [9] 文军琴, 闫超凡, 邵登魁, 等. 50份番茄品种在青海高原地区的适应性综合评价[J]. 中国蔬菜, 2023(9): 48-57.
- [10] 芮文婧, 张倩男, 王晓敏, 等. 47份大果番茄种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 92-95.
- [11] 赵云霞, 颜秀娟, 裴红霞, 等. 基于DTOPSIS法的日光温室大果番茄组合比较分析与评价[J]. 蔬菜, 2022(2): 13-18.
- [12] 王晓敏, 刘珮君, 郑福顺, 等. 宁夏露地夏茬大果番茄杂交组合的综合评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 160-170.
- [13] 李锡香, 杜永臣. 番茄种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [14] WILLIAMS G, YESUDHAS A. Qualitative characterization and clustering in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) germplasm accessions[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2023, 15(3): 900-907.
- [15] 孙艳楠, 路耿新, 李冠义, 等. 燕麦种质资源形态学性状的遗传多样性[J]. 西北植物学报, 2023, 43(12): 1-10.
- [16] HERISON C, SUTJAHJO S H, SULASTRINI I, et al. Genetic diversity analysis in 27 tomato accessions using morphological and molecular markers[J]. AGRIVITA Journal of Agricultural Science, 2018, 40(1): 36-44.
- [17] 高艳娜, 牛华琳, 李莹, 等. 基于主成分分析和聚类分析对不同番茄品种的综合评价[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(12): 106-113.
- [18] 周艳超, 薛坤, 葛海燕, 等. 基于主成分与聚类分析的樱桃番茄品质综合评价[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(12): 2320-2329.
- [19] 王瑞, 何之龙, 张震, 等. 基于主成分分析及隶属函数法评价氮素形态对油茶苗木的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(10): 11-19.
- [20] 庞胜群, 赵飏, 李格. 灰色关联分析法综合评价不同品种加工番茄的品质[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(6): 682-684.
- [21] 潘光辉, 尹贤贵, 杨琦凤, 等. 运用灰色关联度分析法评价微型番茄品种[J]. 西南农业学报, 2009, 22(1): 133-135.
- [22] 姜永平, 刘水东, 薛晨霞, 等. DTOPSIS法和灰色关联度法在番茄品种综合评价中的应用比较[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 259-263.
- [23] 姜丽霞, 任军荣, 张智, 等. DTOPSIS法和灰色关联度法在春油菜新品种综合评价中的应用比较[J]. 北方农业学报, 2023, 51(4): 88-95.
- [24] 宋慧, 郭岩, 邢璐, 等. 基于灰色关联度、DTOPSIS与灰色局势决策法的谷子品种综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 42-56.
- [25] 姚宗泽, 伊应良, 杨肖艳, 等. 基于熵权的DTOPSIS法和灰色局势决策法对云南杂交玉米新组合的评价分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 86-93.
- [26] 陈阿敏, 裴芸, 徐秀红, 等. 贵州地方樱桃番茄资源产量品质比较分析[J]. 种子, 2021, 40(12): 75-82.
- [27] 吴国江, 周伟, 余忠浩, 等. 基于主成分、灰色关联和DTOPSIS分析的176份糯高粱种质资源综合评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5): 40-51.
- [28] 常幸运, 祁玉良, 扶定, 等. 灰色关联度分析法和DTOPSIS法在两系杂交粳稻品种综合评价中的应用研究[J]. 杂交水稻, 2023, 38(5): 26-31.
- [29] 袁莉, 姜波. 加工番茄可溶性固形物含量与相关性状的关联研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4): 504-507.
- [30] 李国花, 王晓敏, 胡新华, 等. 基于Dtopsis法综合评价宁夏日光温室50个粉果番茄杂交组合[J]. 华北农学报, 2022, 37(z1): 35-43.
- [31] 侯晓静, 姜波. 加工番茄品质性状与番茄红素的灰色关联分析[J]. 农机化研究, 2014(3): 54-57.
- [32] 杨生保, 余庆辉, 王柏柯, 等. 加工番茄引种试验的灰色关联度分析[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(4): 294-298.

【责任编辑 庄延】