

# 158份栽培草莓种质资源在弱碱土壤条件下的综合评价

宋艳红<sup>1,2</sup>, 胡盼盼<sup>1</sup>, 郑文婷<sup>1</sup>, 刘丽锋<sup>1</sup>, 赵霞<sup>1</sup>,  
李刚<sup>1,2</sup>, 郭心洁<sup>3</sup>, 竟益嘉<sup>3</sup>, 周厚成<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院郑州果树研究所, 郑州 450009; <sup>2</sup>中国农业科学院中原研究中心, 河南新乡 453003; <sup>3</sup>河南农业大学, 郑州 450046)

**摘要:**【目的】探究资源圃弱碱性土壤对栽培草莓生长和果实发育的影响, 综合评价158份草莓种质资源的弱碱适应性。【方法】分别调查158份草莓种质资源的21个质量性状和11个数量性状, 通过变异性分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法, 对草莓资源11个数量性状进行综合评价。【结果】21个质量性状的遗传多样性指数范围为0.2185~1.4180, 11个数量性状变异系数范围为12.84%~54.35%。株高与果实大小、果实质量呈极显著正相关。K-means聚类分析将158份草莓种质资源划分为3个类群, 其中类群2在弱碱性土壤条件下的综合性状优良, 表现为植株高大, 果个大和匍匐茎强壮等。158份草莓种质资源中共有11份种质均位于排名前15名, 其中国内育成种质6份。艳丽和冬香等品种适合在碱性土壤中种植, 自主培育的优系C4和中莓5号, 可作为耐碱新品种选育的中间材料。【结论】初步评价了158份草莓种质的弱碱适应性, 为栽培草莓种质资源利用和育种提供了重要的理论基础和种质资源。

关键词: 栽培草莓; 耐碱; 种质资源; 综合评价

中图分类号: S668.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2026)05-1132-11

## Comprehensive evaluation of 158 strawberry germplasm resources cultivated in weakly alkaline soil

SONG Yanhong<sup>1,2</sup>, HU Panpan<sup>1</sup>, ZHENG Wenting<sup>1</sup>, LIU Lifeng<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, GUO Xinjie<sup>3</sup>, JING Yijia<sup>3</sup>, ZHOU Houcheng<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, Henan, China; <sup>2</sup>Zhongyuan Research Center Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, Henan, China; <sup>3</sup>Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China)

**Abstract:** 【Objective】 In order to investigate the impact of weakly alkaline condition on cultivated strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) germplasm resources, the present experiment was carried out. The shallow root system of cultivated strawberry makes it particularly susceptible to abiotic stresses such as drought and saline-alkali conditions. The aim of this research is to identify promising strawberry genotypes suitable for cultivation in weakly alkaline soils. 【Methods】 A total of 158 strawberry resources served as the experimental materials. Twenty-one descriptive traits and 11 quantitative traits were evaluated, including plant height, fruit size, as well as leaf and petiole characteristics. For fruit size measurement, 5–6 strawberry fruits were cut longitudinally, and the cross-section area and length were analyzed by a scanner. The 21 descriptive traits were classified according to the *Descriptors and Data Standard for Strawberry* (*Fragaria* spp.). The Shannon's diversity index ( $H'$ ) was calculated for each descriptive trait. Statistical analysis, including mean, standard deviation, minimum, maximum and

收稿日期: 2025-09-03 接受日期: 2025-10-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600702); 河南省大宗水果产业技术体系(HARS-22-09-G2); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2024-ZFRI); 河南省国际科技合作项目(252102520030); 国家园艺种质资源库运行服务(NHGRC2025-NH00-8)

作者简介: 宋艳红, 女, 助理研究员, 从事草莓抗逆资源筛选和机制研究。Tel: 0371-65330972, E-mail: songyanhong@caas.cn

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 0371-65330972, E-mail: zhouhoucheng@caas.cn

coefficient of variation, were conducted for the 11 quantitative traits. Person correlation analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis were performed by using R package PerformanceAnalytics, FactoMineR and cluster, respectively. Comprehensive scores were based on principal components, and relative proximity degree was evaluated using the TOPSIS method. **【Results】** The Shannon's diversity index ( $H'$ ) for the 21 descriptive traits of cultivated strawberries ranged from 0.218 5 to 1.418 0. The highest diversity was observed in seed-bearing condition, followed by fruit texture ( $H' = 1.294 5$ ), while the lowest diversity was found in calyx color. The  $H'$  value for seed color was 0.760 1, with 76.58% of the resources exhibiting both yellow and red seed colors. Descriptive statistics of 11 quantitative traits, including plant height, fruit size and quality, and other agronomic characteristics, revealed substantial phenotypic variation among the accessions, with coefficients of variation ( $CV$ ) ranging from 12.84% to 54.35%. The highest  $CV$  was observed in fruit weight, while the fruit length-to-diameter ratio ( $L/D$ ) showed the lowest variability. Fruit weight ranged from 2.58 g to 27.20 g, and the  $L/D$  ratio varied between 1.03 and 1.72. The average fruit diameter and length were 30.82 mm and 37.85 mm, respectively. Fruit hardness ranged from 0.41 to 3.11  $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , with a coefficient of variation of 44.36%. The number of branch crowns ranged from no branching ( $n = 1$ ) to multiple branching ( $n = 4.60$ ), with a coefficient of variation of 28.36%. The stolon thickness exhibited considerable variation, ranging from 0.36 mm to 2.59 mm. Correlation analysis revealed a significant positive association between plant height (PH) and fruit-related traits such as fruit size and weight. In contrast, soluble solids content (SSC) showed no significant correlation with the other eight quantitative traits, including fruit diameter (D), length (L),  $L/D$ , area (A), perimeter (P), weight (W), hardness (H) and crown number (C). A weak association was observed between SSC and the width of runners (WR). To effectively preserve the information from 11 traits while reducing data redundancy, PCA was performed. The contribution rates of PC 1, PC 2, PC 3 and PC 4 were 51.78%, 12.09%, 10.65% and 9.44%, respectively, with a cumulative contribution rate being 83.97%, which could explain most of the information of the 11 trait indicators. PC 1, with an eigenvalue of 5.70, primarily represented factors related to fruit yield. PC 2 was closely associated with plant height,  $L/D$  ratio, and soluble solid content. Cluster analysis classified the germplasms into three distinct groups, each showing distinct differences in quantitative traits. Group 1 comprised 57 germplasms, accounting for 36.08% of the total resources. Group 2 included 34 resources, which exhibited superior performance, characterized by taller plants, larger fruits, and robust stolons. Group 3 contained 67 resources that were identified as alkali-sensitive. While there was little difference in SSC among the three groups, major differences were observed in fruit size, fruit weight, and plant height, which were basically consistent with the results of principal component analysis. Based on the principal component, a comprehensive score was derived for each germplasm, with a higher ranking indicating better overall performance under alkaline soil conditions. Among the top 15 germplasms, six were of foreign origin and nine were Chinese varieties, all demonstrating strong adaptability to alkaline soils. The relative proximity of each resource was further evaluated using the TOPSIS method. Among the top 15 strawberry germplasms identified by TOPSIS, four varieties, Charlotte, Jiatianbao, Kinuama, and Jijiu, were newly introduced resources that ranked highly using this approach. **【Conclusion】** A total of 11 germplasms were ranked within the top 15 by both evaluation methods, among which six were Chinese varieties. Yanli and Dongxiang were identified as particularly suitable for cultivation in alkaline soil, while C4 and Zhongmei No. 5 demonstrated strong potential as bridging parents for breeding alkaline-tolerant strawberry varieties. These findings establish a solid germplasm resource foundation for the targeted introduction and breeding of *Fragaria* varieties, as well as for uncovering the molecular

regulatory mechanisms underlying alkaline tolerance in cultivated strawberry.

**Key words:** *Fragaria × ananassa*; Alkaline tolerance; Germplasm resources; Comprehensive evaluation

栽培草莓是一种营养价值和经济价值较高的果实,深受消费者喜欢<sup>[1]</sup>。2023年,全国草莓种植面积达15.58万hm<sup>2</sup>,总产量超过420万t,总产值超过1000亿元(数据来源:FAO)。栽培草莓适合生长在pH值=5.5~6.5的酸性土壤,草莓根系浅,易受到干旱、盐碱胁迫等影响。盐碱胁迫会导致草莓叶缘烧伤、坏死,引发营养失衡或特定离子毒性,进而降低光合作用并影响果实质量和产量。若胁迫持续加剧,则可能导致植株死亡<sup>[2-5]</sup>,制约草莓产业的健康可持续发展。

中国是盐碱地大国,不同于盐胁迫的离子毒害,碱胁迫严重影响根部离子吸收能力和根基微生物菌群,碱胁迫对植物生长影响更加严重。但以往研究更加侧重植物的耐盐性,而耐碱性的研究相对薄弱<sup>[6]</sup>。碱性土壤可能成为限制植物发育和产量的关键因素。系统开展耐碱种质资源适应性评价,培育和种植耐盐碱作物是提高作物产量、确保全球果品生产安全的关键战略。

种质资源是培育新品种的物质基础,表型性状是评价种质资源适应性的重要因素<sup>[7-8]</sup>。基于主成分的贡献率权重和TOPSIS法,综合评价种质资源的方法已广泛利用<sup>[9-10]</sup>。综合评价冬枣和雨虹枣实生后代群体果实成熟期表型,经灰色关联度筛选出13份优异鲜食枣种质<sup>[11]</sup>。基于主成分分析烟台地区27个西洋梨品种的8项果实品质指标,筛选出4个综合品质优良的西洋梨品种<sup>[12]</sup>。多种评价分析方法综合比较,能够更加准确地筛选出综合性状优良的种质。陈祥等<sup>[13]</sup>通过多元统计法、灰色关联度分析法和DTOPSIS法对100份樱桃番茄种质资源在银川平原地区的适应性进行综合评价,筛选出在3种评价方法中均排名前10的4份种质。

栽培草莓种质资源缺乏碱性土壤生长表型综合评价体系,为后续遗传机制解析和育种工作带来挑战。肖桂林等<sup>[14]</sup>对73份草莓种质资源进行遗传多样性分析以及在湖北省的综合评价,通过D值鉴定出7份优等种质。在温室水培条件下,对7个草莓品种进行盐处理,通过测定幼苗干重、离子含量和果实产量,综合评价筛选出Albion(阿尔宾),Camarosa(卡姆罗莎)和San Andreas(圣安德瑞斯)3个耐盐品

种<sup>[15]</sup>。通过设置不同盐碱土配比梯度的土壤基质栽培试验,研究不同梯度盐碱胁迫对3个草莓品种叶绿素含量和相关酶活性的影响,揭示耐盐碱能力为丰香>甜查理>宝交早生<sup>[16]</sup>。综上所述,在碱性土壤条件下,根据草莓植株的生长状态和果实综合表现,可有效评价资源圃弱碱条件下草莓资源的生长适应性。

本研究基于资源圃弱碱性土壤中种植的158份栽培草莓种质资源表型多样性,通过对21个质量性状和11个数量性状进行统计分析,结合相关性分析、主成分分析和聚类分析,基于主成分权重综合得分和TOPSIS相对贴度两种评价方法,鉴定优异草莓资源的弱碱适应性,为草莓育种工作提供了重要材料资源和理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

158份栽培草莓种质资源保存在国家园艺种质资源库郑州草莓分库,优系和中莓系列品种草莓苗由中国农业科学院郑州果树研究所育成。

### 1.2 试验设计

2024年9月,栽培草莓种质资源为设施栽培。幼苗定植于中国农业科学院郑州果树研究所新乡种质资源圃草莓大棚,垄高40cm,底宽60cm,面宽40cm,沟深30cm。每份资源定植10株,株距为15~20cm。整个草莓生长季节灌溉水EC值为0.63mS·cm<sup>-1</sup>,pH值为7.24;土壤EC值0.29mS·cm<sup>-1</sup>,pH值为7.43,属于弱碱性土壤。

### 1.3 性状调查

2025年4—7月对158份资源的11个数量性状和21个质量性状进行性状调查。选取长势均匀的植株,株高使用米尺测量;利用扫描仪对采集的果实样品进行拍照扫描,并由图像分析软件导出果实大小性状(果实纵径、果实横径、纵横比、果实面积和果实周长)的相关数据;可溶性固形物含量采用固形物测定仪测定;果实硬度使用GY-4数显果实硬度计(带支架)测量,顶端钻头直径7.9mm;匍匐茎粗细使用游标卡尺测量;21个质量性状调查方法和分级标准参照《草莓种质资源描述规范和数据标准》<sup>[17]</sup>和

表1;叶绿素含量使用SPAD-502叶绿素仪测定。

聚类分析等。

#### 1.4 数据分析

利用Excel软件进行Shannon's diversity index (遗传多样性指数 $H'$ )计算, $H'=-\sum P_i \ln P_i$ ,其中 $P_i$ 为性状分布频率。使用Excel软件进行平均数、标准差等描述性指标计算;PerformanceAnalytics、FactoMineR和cluster进行相关性分析、主成分分析和

## 2 结果与分析

### 2.1 栽培草莓质量性状频率分布多样性分析

栽培草莓21个质量性状的遗传多样性指数范围为0.218 5~1.418 0,种子着生状态最高( $H'=1.418 0$ ),果肉质地( $H'=1.294 5$ )次之,宿萼颜色( $H'=0.218 5$ )

表1 栽培草莓21个质量性状分级赋值  
Table 1 Twenty-one descriptive traits classification

性状 Trait	频率分布 Frequency distribution				
	1	2	3	4	5
植株姿态 Plant architecture	直立 Erect	中间 Semi erect	张开 Patulous		
叶片形状 Leaf shape	圆形 Round	椭圆形 Ellipse	菱形 Rhombus	卵圆形 Oval	倒卵圆形 Obovate
叶片边缘锯齿 Shape of incisions of leaf margin	尖 Sharp	钝 Blunt			
叶片质地 Leaf texture	柔软 Soft	革质粗糙 Leathery and coarse	革质平滑 Leathery and smooth		
叶正面茸毛密度 Trichome density of the upper leaf surface	密 Dense	中 Medium	疏 Sparse		
叶背面茸毛密度 Trichome density of the lower leaf surface	密 Dense	中 Medium	疏 Sparse		
叶柄颜色 Petiole color	黄绿 Olivine	紫红 Magenta			
叶柄茸毛着生状态 Petiole hair condition	直立 Erect	斜生 Slanting	紧贴 Level-stick		
花瓣相对位置 Relative position of petals	相离 Separate	相接 Adjacent	重叠 Overlapped		
雄蕊位置 Position of stamen	低于雌蕊 Lower than the pistil	平于雌蕊 Level the pistil	高于雌蕊 Higher than the pistil		
花梗茸毛着生状态 Pedicel hair condition	直立 Vertical	斜生 Plagiotropic	紧贴 Level-stick		
果梗脆性 Pedicel fragility	脆 Crisp	中 Medium	韧 Tougher		
果尖着色 Fruit tip coloring	易 Easy	中 Medium	难 Difficult		
萼下着色 Subcalyx coloration	易 Easy	中 Medium	难 Difficult		
宿萼着生状态 Persistent calyx condition	平贴 Appressed	平离 Flat	主萼平离、副萼反卷 Main calyx flat-away, auxiliary calyx rollback	反卷 Rolling	
宿萼颜色 Calyx color	绿 Green	枯黄 Dry yellow			
除萼难易 Difficulty of wiping off calyx	易 Easy	难 Difficult			
种子颜色 Seed color	黄 Yellow	黄绿 Olivine	红 Red	兼有 Both	
种子密度 Seed density	稀 Sparse	中 Medium	密 Dense		
种子着生状态 Seed-bearing condition	凹 Concave	微凹 Little concave	平 Flat	微凸 Little convex	凸 Convex
果肉质地 Fruit texture	绵 Mellowest	松 Spongy	韧 Tougher	脆 Crisp	

最低(表2)。158份种质资源中,植株姿态以中间型为主(55.70%)。在叶片性状方面,叶片形状以椭圆形为主(49.37%),其次是圆形(22.15%)和倒卵圆形(20.25%),菱形叶片最少(1.27%);叶片边缘锯齿以尖为主(74.68%);绝大多数叶片质地为革质粗糙(67.09%);叶正面茸毛密度绝大部分种质表现为中等茸毛密度(67.09%);叶柄颜色以黄绿色为主(73.42%);叶柄茸毛着生状态多数为直立

(81.01%)。在萼片性状方面,92.40%种质表现为萼下易着色,3.16%表现为难着色;73份种质宿萼相对果实平离着生,44份平贴,13份反卷;绝大多数种质宿萼绿色(94.30%);去除果实萼片的难易程度基本相等,分别为53.16%和46.84%。种子颜色和密度的遗传多样性指数为0.760 1和0.702 4;76.58%种质的种子颜色表现为黄色和红色兼有;72.15%种质的种子着生密;57份种质的种子微凸于果面,48份种子

表2 质量性状频率分布多样性分析

Table 2 Frequency distribution and diversity index of descriptive traits of strawberry

性状 Trait	频率分布 Frequency distribution					遗传多样性指数 Genetic diversity index, $H'$
	1	2	3	4	5	
植株姿态 Plant architecture	39	88	31			0.990 8
叶片形状 Leaf shape	35	78	2	11	32	1.246 6
叶片边缘锯齿 Shape of incisions of leaf margin	118	40				0.565 8
叶片质地 Leaf texture	11	106	41			0.803 4
叶正面茸毛密度 Trichome density of the upper leaf surface	28	109	21			0.831 0
叶背面茸毛密度 Trichome density of the lower leaf surface	2	80	76			0.399 9
叶柄颜色 Petiole color	116	42				0.579 1
叶柄茸毛着生状态 Petiole hair condition	128	30				0.486 0
花瓣相对位置 Relative position of petals	54	35	69			1.062 6
雄蕊位置 Position of stamen	33	23	102			0.890 1
花梗茸毛着生状态 Pedicel hair condition	36	78	44			1.041 5
果梗脆性 Pedicel fragility	84	39	35			1.015 1
果尖着色 Fruit tip coloring	104	15	39			0.844 1
萼下着色 Subcalyx coloration	146	7	5			0.320 3
宿萼着生状态 Persistent calyx condition	44	73	28	13		1.224 9
宿萼颜色 Calyx color	149	9				0.218 5
除萼难易 Difficulty of wiping off calyx	84	74				0.691 1
种子颜色 Seed color	8	6	23	121		0.760 1
种子密度 Seed density	6	38	114			0.702 4
种子着生状态 Seed-bearing condition	9	31	48	57	13	1.418 0
果肉质地 Fruit texture	18	35	40	65		1.294 5

平于果面,仅有9份种子凹于果面。

## 2.2 弱碱性土壤条件下158份草莓种质资源数量性状统计分析

对生长在弱碱性土壤的158份栽培草莓种质资源的株高、果实大小和品质、匍匐茎等农艺性状进行描述性统计。种质表型变异丰富,变异系数范围为12.84%~54.35%,变异系数极值出现在草莓果实相关性状,变异系数最小的是果实纵横比,最大的是果实质量。株高最小值是13.50 cm,最大值是31.00 cm,变异较丰富。新茎分枝数从无分枝株系( $n=1$ )到多分枝( $n=4.60$ ),变异系数为28.36%。匍匐茎粗细变化范围为0.36~2.59 mm,

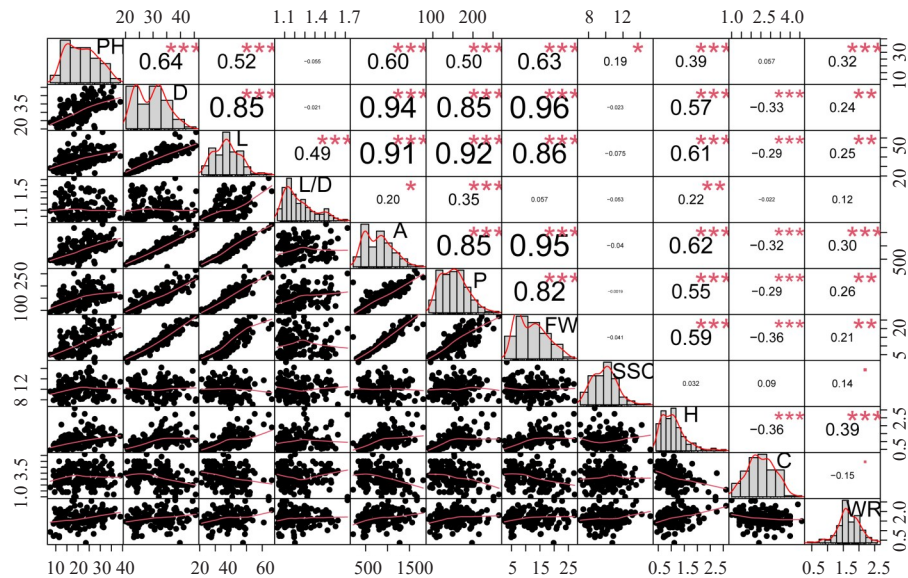
变异较丰富(表3)。

在11个数量性状中,果实横径和果实面积呈现双峰分布,果实纵径和植株新茎分枝数呈正态分布,在2.5~3.0区间分布频次最高,均值为2.68;匍匐茎粗细呈左偏分布,均值为1.62 mm,在1.50~1.67 mm区间分布频次最高;剩余6个性状均为右偏分布。农艺性状之间相关性分析发现,株高与果实横径、果实纵径、果实面积、果实周长、果实质量、可溶性固形物含量、果实硬度和匍匐茎粗细等8个性状呈显著或极显著正相关,果实大小和果实质量之间呈极显著正相关。可溶性固形物含量与其余8个性状无相关性(图1)。

表3 弱碱性土壤条件下158份草莓种质资源数量性状统计分析

Table 3 Statistical analysis of quantitative traits of 158 *Fragaria* resources under weakly alkaline soil

性状 Traits	平均数 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系数 Coefficient of variation, CV/%
株高 Plant height/cm	22.68	5.67	13.50	31.00	25.02
果实横径 Fruit diameter/mm	30.82	6.28	20.13	45.67	20.37
果实纵径 Fruit length/mm	37.85	8.87	21.28	66.15	23.42
果实纵横比 Fruit length-diameter ratio	1.23	0.16	1.03	1.72	12.84
果实面积 Area of fruit longitudinal section/mm <sup>2</sup>	839.42	339.50	214.76	1813.77	40.44
果实周长 Perimeter of fruit longitudinal section/mm	151.26	36.67	89.99	264.63	24.25
果实质量 Fruit mass/g	11.55	6.28	2.58	27.20	54.35
w(可溶性固形物) Soluble solids content/°Bx	10.09	1.50	7.05	15.17	14.91
果实硬度 Fruit hardness/(kg·cm <sup>-2</sup> )	1.08	0.48	0.41	3.11	44.36
新茎分枝数 Number of new crowns	2.68	0.76	1.00	4.60	28.36
匍匐茎粗 Width of runners/mm	1.62	0.38	0.36	2.59	23.15



PH. 株高; D. 果实横径; L. 果实纵径; L/D. 果实纵横比; A. 果实面积; P. 果实周长; FW. 果实质量; SSC. 可溶性固形物含量; H. 果实硬度; C. 新茎分枝数; WR. 匍匐茎粗。\*, \*\*, \*\*\*代表  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$  水平显著相关。下同。

PH. Plant height; D. Fruit diameter; L. Fruit length; L/D. Fruit length-diameter ratio; A. Area of fruit longitudinal section; P. Perimeter of fruit longitudinal section; FW. Fruit mass; SSC. Soluble solids content; H. Fruit hardness; C. Number of new crowns; WR. Width of runners. \*, \*\*, \*\*\* indicated significant correlation at  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$  levels, respectively. The same below.

图1 158份草莓种质资源农艺性状频率分布直方图和相关性分析

Fig. 1 Frequency distribution histogram and correlation analysis of agronomic traits in 158 *Fragaria* resources

### 2.3 158份草莓种质资源主成分分析

为保留11个数量性状的有效信息,降低数据冗余,对11个数量性状进行主成分分析,提取特征值大于1的前4个主成分。PC1、PC2、PC3和PC4贡献率分别是51.78%、12.09%、10.65%和9.44%,累计贡献率达83.97%,能够解释11个性状指标的绝大部分信息(表4)。主成分1的特征值是5.70,其中果实横径、果实纵径、果实质量、果实面积和周长载荷较大,

为果实产量构成因子;株度、果实纵横比和可溶性固形物含量与第二主成分密切相关(图2)。综上所述,主成分分析从碱性土壤条件下栽培草莓的11个数量性状中提取出4个主成分,其中第一主成分与果实大小和果实质量密切相关。

### 2.4 158份栽培草莓种质资源聚类分析

采用K-means聚类算法将158份种质资源划分为3个类群,类群1包含57份种质(36.08%);类群2

表 4 11 个数量性状的主成分特征值和特征向量

Table 4 Eigenvalue and eigenvectors of principle components of the 11 quantitative traits

性状 Traits	主成分 Principle component			
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
株高 Plant height	0.65	0.55	0.01	0.21
果实横径 Fruit diameter	0.94	0.13	-0.26	0.04
果实纵径 Fruit length	0.94	-0.22	0.10	0.19
果实纵横比 Fruit Length-diameter Ratio	0.25	-0.61	0.68	0.27
果实面积 Area of fruit longitudinal section	0.96	0.00	-0.09	0.07
果实周长 Perimeter of fruit longitudinal section	0.91	-0.12	0.05	0.15
果实质量 Fruit mass	0.94	0.07	-0.24	0.05
可溶性固形物含量 Soluble solids content	-0.00	0.63	0.46	-0.10
果实硬度 Fruit hardness	0.71	-0.05	0.19	-0.32
新茎分枝数 Number of new crowns	-0.38	0.35	0.22	0.73
匍匐茎粗 Width of runners	0.38	0.24	0.52	-0.46
特征值 Eigenvalue	5.70	1.33	1.17	1.04
贡献率 Contribution rate/%	51.78	12.09	10.65	9.44
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	51.78	63.88	74.53	83.97

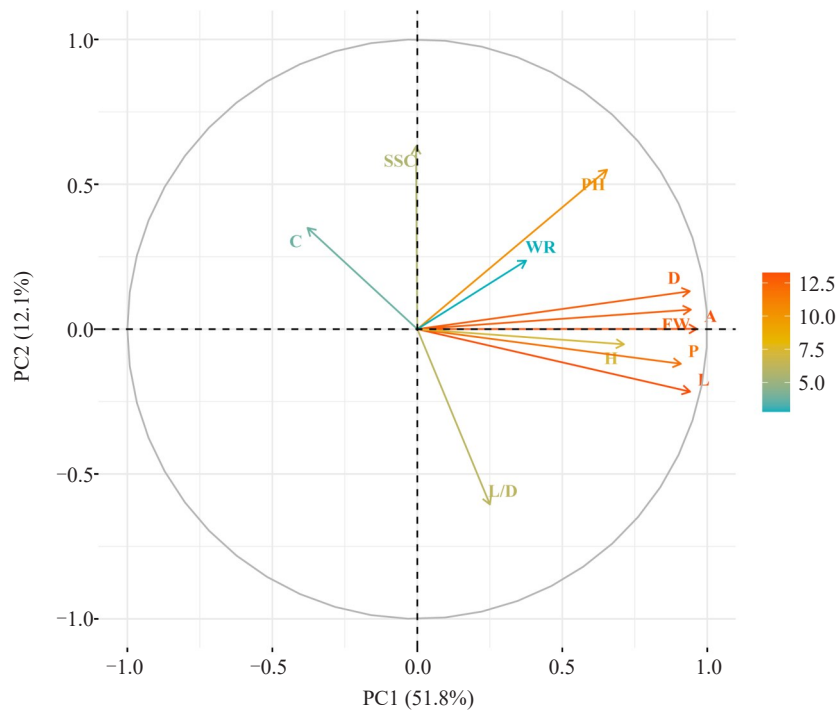


图 2 11 个性状指标与主成分相关性

Fig. 2 Correlation between the 11 quantitative traits and PC1 and PC2

包含 34 份资源(21.52%),为适宜弱碱性土壤种植的优异种质类群,表现为植株高大、果个大、新茎分枝少、匍匐茎强壮;类群 3 包含 67 份资源,属于不耐碱胁迫类型,表现为植株矮小、果个小、果实平均质量 5.55 g(表 5,图 3)。3 个类群间果实可溶性固形物含量无明显差异,主要差异体现在果实大小、果实质量以及株高等指标,这与主成分分析的结果基本一

致。

## 2.5 基于权重和 TOPSIS 综合评价草莓种质资源

采用主成分贡献率权重和 TOPSIS 两种方法综合评价 158 份种质资源耐碱性。基于标准化后的各性状指标,计算前 4 个综合指标的各主成分得分,并根据权重计算综合得分。综合得分越高,表明该种质在碱性土壤条件下的综合品质越好。综合得分前

表5 各类群主要数量性状平均值

Table 5 Means of quantitative traits of three clusters

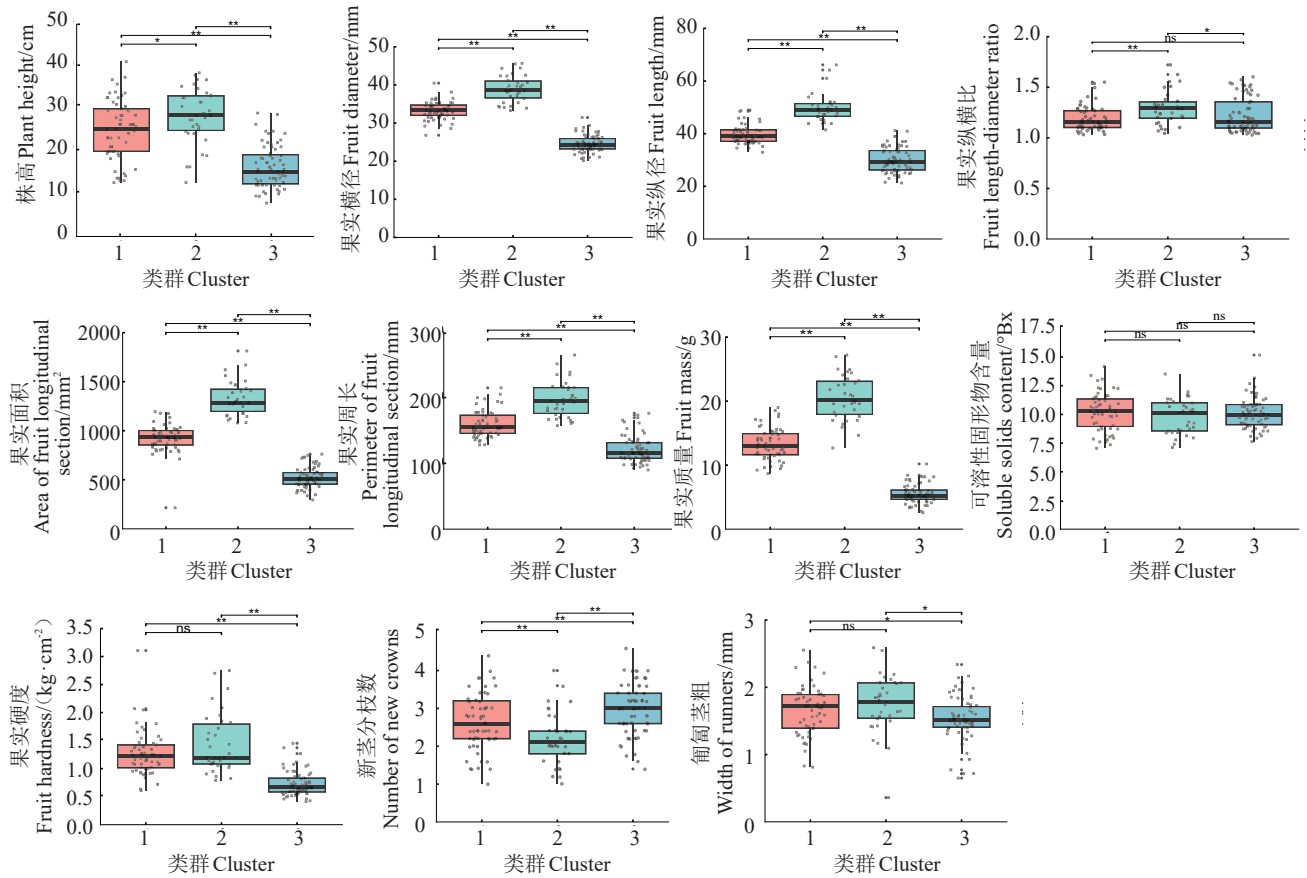
性状 Traits	类群1 Cluster1	类群2 Cluster 2	类群3 Cluster 3
株高 Plant height/cm	23.72	27.04	15.60
果实横径 Fruit diameter/mm	33.30	39.11	24.65
果实纵径 Fruit length/mm	39.85	49.72	30.16
果实纵横比 Fruit length-diameter ratio	1.19	1.29	1.22
果实面积 Area of fruit longitudinal section/mm <sup>2</sup>	921.63	1 334.55	522.88
果实周长 Perimeter of fruit longitudinal section/mm	159.76	196.74	121.20
果实质量 Fruit mass/g	13.29	20.69	5.55
w(可溶性固形物) Soluble solids content/%Bx	10.22	9.82	10.12
果实硬度 Fruit hardness/(kg·cm <sup>-2</sup> )	1.27	1.43	0.73
新茎分枝数 Number of new crowns	2.62	2.21	2.99
匍匐茎粗 Width of runners/mm	1.66	1.75	1.53

15的种质中(表6),常德乐2(美国,1983年育成)、卡

诺加(美国,1979年育成)、坎东嘎(意大利,育成时间未知)、高斯克(加拿大,1985年育成)、圣安德列斯(美国,2001年育成)是早期国外育成品种,目前在生产上种植面积较少。近年来,国内育成品种燕香(中国北京,2008年审定)、冬星(中国河北,2014年审定)、艳丽(中国沈阳,2014年审定)、黔莓1号(中国贵州,2022年审定)、中莓5号和C4(中国河南,优系)、书香(中国北京,2009年审定)等适宜在碱性土壤中种植。

基于TOPSIS法计算相对贴合度,数值越大,表明该种质的综合性状越好。在排名前15的种质资源中(表7),11份种质资源与基于PCA贡献率计算得到的前15的种质一致,夏洛特(未知)、假甜宝(未知)、鬼怒甘(日本,1992年育成)和冀九(中国河北,2023年审定)是TOPSIS结果中新增加的种质资源,在碱性土壤条件下的综合性状优良。

在两种评价方法排名前15的优异种质资源中,11份资源为二者共有,包括5份国外育成品种,6份



对每个性状进行单因素方差分析,星号表示组间差异显著性(\*.  $P < 0.05$ , \*\*.  $P < 0.01$ , ns.  $P \geq 0.05$  )。

One-way ANOVA was performed for each trait, asterisks indicate significant differences among groups (\*.  $P < 0.05$ , \*\*.  $P < 0.01$ , ns.  $P \geq 0.05$  )。

图3 158份栽培草莓种质资源数量性状聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of quantitative traits of 158 *Fragaria* resources

表 6 前 15 名草莓种质资源综合评价得分

Table 6 Comprehensive evaluation scores of top 15 strawberry germplasms

编号 Number	种质名称 Germplasm name	综合得分 Comprehensive scores	排名 Ranking
2024-XX-118	常德乐 2 Chandler 2	4.010	1
2024-XX-3	卡诺加 Canoga	3.361	2
2024-XX-63	坎东嘎 Kandongga	2.805	3
2024-XX-62	高斯克 Governor Simcoe	2.790	4
2024-XX-6	燕香 Yanxiang	2.719	5
2024-XX-7	冬星 Dongxing	2.312	6
2024-XX-34	艳丽 Yanli	2.026	7
2024-XX-5	黔莓 1 号 Qianmei No.1	1.981	8
2024-XX-35	圣安德瑞斯 San Andreas	1.952	9
2024-XX-55	中莓 5 号 Zhongmei NO.5	1.920	10
2024-XX-16	书香 1 Shuxiang 1	1.901	11
2024-XX-2	常德乐 1 Chandler 1	1.867	12
2024-XX-149	书香 2 Shuxiang 2	1.821	13
2024-XX-12	骏河 Junhe	1.773	14
2024-XX-138	C4	1.690	15

注:常德乐 1、常德乐 2 为不同引种单位提供的同一品种资源;书香同。

Note: Chandler 1 and Chandler 2 are the same cultivar provided by different sources of introduction; Shuxiang is the same.

表 7 基于 TOPSIS 法排名前 15 的草莓种质资源

Table 7 Top 15 *Fragaria* resources based on TOPSIS analysis

编号 Number	种质名称 Germplasm name	相对贴合度 Relative closeness	排名 Ranking
2024-XX-63	坎东嘎 Kandongga	0.680	1
2024-XX-62	高斯克 Governor Simcoe	0.651	2
2024-XX-3	卡诺加 Canoga	0.651	2
2024-XX-118	常德乐 2 Chandler 2	0.647	3
2024-XX-34	艳丽 Yanli	0.599	4
2024-XX-138	C4	0.594	5
2024-XX-7	冬星 Dongxing	0.580	6
2024-XX-55	中莓 5 号 Zhongmei No.5	0.580	6
2024-XX-152	夏洛特 Xialuote	0.564	7
2024-XX-12	骏河 Junhe	0.563	8
2024-XX-2	常德乐 1 Chandler 1	0.562	9
2024-XX-137	假甜宝 Jiatianbao	0.561	10
2024-XX-153	鬼怒甘 Kinuama	0.552	11
2024-XX-148	冀九 Jijiu	0.546	12
2024-XX-6	燕香 Yanxiang	0.545	13

国内育成品种。其中,冬星、艳丽等品种已在生产上推广种植。中国农业科学院郑州果树研究所选育的优系 C4 和中莓 5 号,其排名相对靠前,可以进行推广种植,也可作为耐碱新品种培育的中间材料。上述 11 份种质资源在碱性土壤条件下表现优良,将作为后期研究的材料基础,用于深度挖掘调控草莓耐盐碱的关键基因。

### 3 讨 论

土壤盐碱化是限制草莓品种植株生长和产量的重要因素之一。栽培草莓为须根系,在约 10 cm 土壤中根系分布最为密集,易遭受干旱、盐碱等非生物胁迫。栽培草莓种植方式多样,无土栽培虽然可以解决盐碱胁迫问题,但栽培草莓以设施地栽为主,盐分积累导致土壤盐碱化严重。另外,在生产苗繁育阶段,盐碱地和碱性灌溉水的使用严重影响生产苗的质量和产量。通过对广西不同地区 142 份赤苍藤种质表型多样性进行分析,鉴定出在高海拔地区抗寒性和产量表现均较好的类群,为赤苍藤新品种选育提供优良资源<sup>[18]</sup>。为了评价弱碱土壤条件对栽培草莓植株生长和果实发育的影响,对弱碱土壤中种植的 158 份栽培草莓种质资源的 21 个质量性状和 11 个数量性状进行统计分析。主成分分析结果表明,果实纵横比和果实质量可作为栽培草莓弱碱生长适应性的主要鉴定评价指标;株高等指标与第二主成分密切相关。同时,相关性分析结果表明株高与果实大小相关性状、果实质量呈极显著正相关,表明株高对草莓果实产量影响较大。

传统的单一指标评价种质资源存在局限性,多个指标综合评价方法更具科学性和严谨性,而综合 2 种及以上方法的组合评价法,则能使结果更加客观、全面<sup>[19]</sup>。基于主成分分析的多元统计分析方法是利用降维思想提取主要的综合指标,消除各指标间的相互影响,已应用到苹果果实品质指标评价<sup>[20]</sup>、棉花品种农艺性状分析<sup>[21-22]</sup>等。TOPSIS 是逼近理想解法,通过评价指标与正负理想值间的距离,求出相对贴合度,作为评价种质优劣的标准。该方法科学可靠,结果合理。使用 TOPSIS 法对 2 个小麦新品系的 12 个农艺性状指标的综合评价结果,与聚类结果基本一致<sup>[23]</sup>。孙志超等<sup>[24]</sup>采用 TOPSIS 对 21 个玉米品种产量等性状进行综合评价。组合分析消除了单一评价方法的片面性,结果更具参考价值。如

李春燕等<sup>[25]</sup>结合 TOPSIS 和层次分析法,综合评价了 5 个团枣品种;张波等<sup>[26]</sup>通过模糊数学隶属函数和聚类分析准确可靠地综合评价了 93 份叶用枸杞种质资源。本研究通过基于主成分贡献率的多元评价方法和 TOPSIS 法对胁迫下 158 份草莓种质资源进行综合评价。两种评价结果既有一致性,也存在差异性,11 份种质资源均位于两种评价方法排名前 15 的种质中。多元分析方法鉴定的其他 4 个种质为黔莓 1 号、圣安德瑞斯、书香 1 和书香 2,而 TOPSIS 法综合评价排名前 15 的种质中,特异的是夏洛特、假甜宝、鬼怒甘和冀九。进一步分析发现,两种评价方法对排名前 15 位的种质资源鉴定结果高度一致,但排名后 10 位的种质资源中,仅有 3 份种质一致,分别是昌黎草莓、艾科和曲阳圆球,且这些种质资源多数为地方品种和农家种。

## 4 结 论

本研究综合评价了弱碱性条件下 158 份栽培草莓种质资源的 21 个质量性状和 11 个数量性状。质量性状的遗传多样性指数范围是 0.218 5~1.418 0,种子着生状态的遗传多样性指数最大;11 个数量性状的变异系数范围是 12.84%~54.35%,果实质量的变异系数最大,果实硬度次之;从 11 个数量性状中提取 4 个主成分因子,果实大小、果实质量与第一主成分密切相关,代表果实产量构成因子;株高、果实纵横比和可溶性固形物含量与第二主成分密切相关。基于主成分权重综合得分和 TOPSIS 两种评价方法,筛选出 11 份在碱性土壤条件下农艺性状优良的种质;自主培育的优系 C4 和中莓 5 号,可作为耐碱新种质,为栽培草莓耐碱新品种选育提供中间材料。

## 参考文献 References:

- [1] GIAMPIERI F, FORBES-HERNANDEZ T Y, GASPARRINI M, ALVAREZ-SUAREZ J M, AFRIN S, BOMPADRE S, QUILES J L, MEZZETTI B, BATTINO M. Strawberry as a health promoter: An evidence based review[J]. *Food & Function*, 2015, 6(5):1386-1398.
- [2] AMIRINEJAD A A, SAYYARI M, GHANBARI F, KORDI S. Salicylic acid improves salinity-alkalinity tolerance in pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Advances in Horticultural Science*, 2017, 31(3):157-164.
- [3] AGATHOKLEOUS E, FENG Z Z, PEÑUELAS J. Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants?[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726:138637.
- [4] WANG J, ZHANG Y X, YAN X R, GUO J P. Physiological and transcriptomic analyses of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia*) provide important insights into salt and saline-alkali stress tolerance[J]. *PLoS One*, 2020, 15(12):e0244365.
- [5] MASARMI A G, SOLOUKI M, FAKHERI B, KALAJI H M, MAHGADINGAD N, GOLKARI S, TELESINIŃSKI A, LAMLLOM S F, KOCIEL H, YOUSEF A F. Comparing the salinity tolerance of twenty different wheat genotypes on the basis of their physiological and biochemical parameters under NaCl stress[J]. *PLoS One*, 2023, 18(3):e0282606.
- [6] ZHANG H L, YU F F, XIE P, SUN S Y, QIAO X H, TANG S Y, CHEN C X, YANG S, MEI C, YANG D K, WU Y R, XIA R, LI X, LU J, LIU Y X, XIE X W, MA D M, XU X, LIANG Z W, FENG Z H, HUANG X H, YU H, LIU G F, WANG Y C, LI J Y, ZHANG Q F, CHEN C, OUYANG Y D, XIE Q. A  $\gamma$  protein regulates alkaline sensitivity in crops[J]. *Science*, 2023, 379(6638):eade8416.
- [7] 王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,任贵兴,李英慧,李春辉,秦培友,谷勇哲,李龙.作物种质资源表型性状鉴定评价:现状与趋势[J].*植物遗传资源学报*, 2022, 23(1):12-20.  
WANG Xiaoming, QIU Lijuan, JING Ruilian, REN Guixing, LI Yinghui, LI Chunhui, QIN Peiyu, GU Yongzhe, LI Long. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1):12-20.
- [8] 李嘉伟,苏江硕,张飞,房伟民,管志勇,陈素梅,陈发棣.基于表型性状构建传统菊花核心种质[J].*中国农业科学*, 2021, 54(16):3514-3526.  
LI Jiawei, SU Jiangshuo, ZHANG Fei, FANG Weimin, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, CHEN Fadi. Construction of core collection of traditional *Chrysanthemum morifolium* based on phenotypic traits[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(16):3514-3526.
- [9] 饶庆琳,姜敏,吕建伟,胡廷会,成良强,王金花,王军.花生种质资源品质性状分析及综合评价[J].*植物遗传资源学报*, 2024, 25(9):1454-1467.  
RAO Qinglin, JIANG Min, LÜ Jianwei, HU Tinghui, CHENG Liangqiang, WANG Jinhua, WANG Jun. Analysis and comprehensive evaluation of quality characters of peanuts germplasm resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(9):1454-1467.
- [10] 李丹,白丽霞,唐卓越,杨康慧,杨璐,程平.新疆 105 份桃种质资源果实性状多样性分析[J].*果树学报*, 2025, 42(7):1377-1388.  
LI Dan, BAI Lixia, TANG Zhuoyue, YANG Kanghui, YANG Lu, CHENG Ping. Diversity analysis of fruit traits of 105 peach germplasm resources in Xinjiang[J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, 42(7):1377-1388.
- [11] 吉银中,陈有福,闫芬芬,王玖瑞,刘孟军.枣实生后代果实性状变异分析及优异种质筛选[J].*果树学报*, 2025, 42(7):1407-1421.

- Ji Yinzong, CHEN Youfu, YAN Fenfen, WANG Jiurui, LIU Mengjun. Variation analysis of fruit traits of jujube seedlings and screening of excellent germplasm[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(7): 1407-1421.
- [12] 牟红梅, 于强, 李庆余, 王义菊, 姜福东, 李元军, 薛敏, 王兆龙. 基于主成分分析的烟台地区西洋梨果实品质综合评价[J]. 果树学报, 2019, 36(8): 1084-1092.
- MU Hongmei, YU Qiang, LI Qingyu, WANG Yiju, JIANG Fudong, LI Yuanjun, XUE Min, WANG Zhaolong. Synthetic evaluation of fruit quality of common pears (*Pyrus communis* L.) based on principal component analysis in Yantai areas[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(8): 1084-1092.
- [13] 陈祥, 刘宜洋, 罗璐, 程国新, 郭猛, 高艳明, 李建设, 王晓敏. 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, CHENG Guoxin, GUO Meng, GAO Yanming, LI Jianshe, WANG Xiaomin. 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.
- [14] 肖桂林, 管自豪, 张思思, 温昕, 陈锡洋, 曾祥国, 张庆华, 刘爽, 刘思佳, 王涌, 邓江丽, 韩永超. 73 份草莓种质资源表型性状的遗传多样性分析及在湖北省的综合评价[J]. 果树学报, 2023, 40(8): 1546-1558.
- XIAO Guilin, GUAN Zihao, ZHANG Sisi, WEN Xin, CHEN Xiyang, ZENG Xiangguo, ZHANG Qinghua, LIU Shuang, LIU Sijia, WANG Yong, DENG Jiangli, HAN Yongchao. Genetic diversity and comprehensive evaluation of phenotypic traits in 73 germplasm resources of cultivated strawberries grown in Hubei Province[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(8): 1546-1558.
- [15] SUN Y P, NIU G H, WALLACE R, MASABNI J, GU M M. Relative salt tolerance of seven strawberry cultivars[J]. Horticulturae, 2015, 1(1): 27-43.
- [16] 刘阳. 草莓耐盐碱性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- LIU Yang. Study on salt tolerance of strawberry[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.
- [17] 赵密珍. 草莓种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 13-29.
- ZHAO Mizhen. Descriptors and data standard for strawberry (*Fragaria* spp.)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 13-29.
- [18] 黄诗宇, 张向军, 杨天为, 田姗姗, 张尚文. 广西赤苍藤种质资源调查与表型多样性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(4): 747-760.
- HUANG Shiyu, ZHANG Xiangjun, YANG Tianwei, TIAN Shanshan, ZHANG Shangwen. Germplasm resources investigation and phenotypic diversity evaluation of *Erythralum scandens* in Guangxi[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(4): 747-760.
- [19] 李建波, 邓珂. 作物种质资源常用综合评价方法[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(3): 40-46.
- LI Jianbo, DENG Ke. Commonly used comprehensive evaluation method of crop germplasm resources[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(3): 40-46.
- [20] 张腊腊, 韩明虎, 胡浩斌, 武芸, 王丽朋. 基于主成分分析的苹果品质综合评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 209-213.
- ZHANG Lala, HAN Minghu, HU Haobin, WU Yun, WANG Lipeng. Comprehensive evaluation of apple quality based on principal component analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 209-213.
- [21] 李进, 梁晶, 翟梦华, 王莉, 金蝶, 张军高, 周小云, 雷斌. 基于主成分分析的不同棉花品种低温萌发关键期研究[J]. 种子, 2021, 40(1): 28-33.
- LI Jin, LIANG Jing, ZHAI Menghua, WANG Li, JIN Rong, ZHANG Jungao, ZHOU Xiaoyun, LEI Bin. Study on the key period of germination of different cotton varieties at low temperature based on principal component analysis[J]. Seed, 2021, 40(1): 28-33.
- [22] 李武, 谢德意, 赵付安, 杨晓杰, 赵远明, 吕淑萍, 聂利红, 房卫平. 黄河流域棉花品种农艺性状的主成分及聚类分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 82-85.
- LI Wu, XIE Deyi, ZHAO Fuan, YANG Xiaojie, ZHAO Yuanming, LÜ Shuping, NIE Lihong, FANG Weiping. Principal component and clustering analysis of agronomic traits of cotton varieties in Yellow River Valley[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 82-85.
- [23] 张伟, 王春平, 罗坤, 张万松. 不同密度下小麦新品系主要性状的综合分析[J]. 种子, 2010, 29(6): 29-32.
- ZHANG Wei, WANG Chunping, LUO Kun, ZHANG Wansong. Comprehensive analysis on main characters of new wheat strains under different density[J]. Seed, 2010, 29(6): 29-32.
- [24] 孙志超, 荆绍凌, 刘文国. TOPSIS 分析法在玉米杂交种综合评价中的应用[J]. 玉米科学, 2006, 14(5): 49-51.
- SUN Zhichao, JING Shaoling, LIU Wenguo. The comprehensive evaluation of hybrid corn based on TOPSIS[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(5): 49-51.
- [25] 李春燕, 卢桂宾, 刘和, 郭晓东, 刘英翠. 用层次分析法和 DTOPSIS 法综合评价团枣品种[J]. 山西农业科学, 2019, 47(12): 2057-2061.
- LI Chunyan, LU Guibin, LIU He, GUO Xiaodong, LIU Yingcui. Comprehensive evaluation of Tuanzao by AHP and DTOPSIS method[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 2057-2061.
- [26] 张波, 段淋渊, 秦垦, 戴国礼, 田武学, 何昕孺, 黄婷. 93 份叶用枸杞农艺性状分析及综合评价[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(4): 55-62.
- ZHANG Bo, DUAN Linyuan, QIN Ken, DAI Guoli, TIAN Wuxue, HE Xinru, HUANG Ting. Analysis and comprehensive evaluation of agronomic characters of 93 varieties of *Lycium* L.[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2024, 70(4): 55-62.