

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0613

# 加工番茄种子萌发期耐热性综合评价

杨 岚<sup>1</sup>, 庞胜群<sup>1</sup>, 黄海伦<sup>1</sup>, 刘玉东<sup>1</sup>, 杨忠旺<sup>2</sup>, 苏 新<sup>2</sup>

(1. 特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室·石河子大学农学院 新疆石河子 832003;  
2. 民丰县胡杨投资开发建设有限公司 新疆民丰 848500)

**摘要:**为筛选出耐热加工番茄种质资源,以54份加工番茄种质资源为材料,通过测定28℃(CK)和高温(37℃)胁迫下的发芽势、发芽率、根长等6项指标,结合主成分分析和隶属函数法综合评价其耐热性。结果表明,54份加工番茄材料各指标的变异系数范围为30.03%~125.31%,相对活力指数变异系数最大;相关性分析结果显示,相对活力指数和相对胚根长度呈极显著正相关;主成分分析结果显示,前2个主成分累计方差贡献率为89.35%;聚类分析显示,54份种质资源可分为3个类群:热敏感材料、中度耐热材料和耐热材料;隶属函数法分析结果显示,材料T4483(C48)和SF1006(C3)的综合排名靠前。综上所述,筛选出耐热性较强的材料为T4483和SF1006。本研究结果为加工番茄耐高温品种的选育提供了理论依据。

**关键词:**加工番茄;种子萌发期;耐热性;综合评价

**中图分类号:**S641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)05-178-08

## Comprehensive evaluation of heat tolerance in processing tomato seeds during the germination stage

YANG Lan<sup>1</sup>, PANG Shengqun<sup>1</sup>, HUANG Hailun<sup>1</sup>, LIU Yudong<sup>1</sup>, YANG Zhongwang<sup>2</sup>, SU Xin<sup>2</sup>

(1. XPCC Key Laboratory of Characteristic Physiology and Germplasm Resources of Fruits and Vegetables/College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China; 2. Minfeng County Huyang Investment Development and Construction Co., Ltd., Minfeng 848500, Xinjiang, China)

**Abstract:** To screen out heat-tolerant processing tomato germplasm resources, 54 processing tomato germplasm materials were used. Six indicators, namely germination potential, germination rate, root length, etc., were measured under normal temperature conditions of 28 °C (control, CK) and high-temperature stress of 37 °C. The heat tolerance of the materials was comprehensively evaluated using principal component analysis and the membership function method. The results showed that the coefficient of variation among the 54 processed tomato materials ranged from 30.03 % to 125.31%, with the relative vitality index exhibiting the largest coefficient of variation. Correlation analysis revealed an extremely significant positive relationship between the relative vitality index and relative radicle length. Principal component analysis showed that the first two principal components had a cumulative variance contribution rate of 89.35%. Cluster analysis classified the 54 germplasm resources into three distinct groups. The membership function analysis indicated that materials T4483 (C48) and SF1006 (C3) ranked highest in comprehensive evaluation. In conclusion, the identification of heat-tolerant materials T4483 and SF1006 provides a theoretical foundation for the development of high-temperature tolerant processed tomato varieties.

**Key words:** Processed tomato; Seed germination stage; Heat tolerance; Comprehensive evaluation

加工番茄是新疆特色园艺作物,经济效益良好,对促进农业增效、保障农民增收及驱动区域经济发展具有重要作用。近年来,伴随消费结构升级与食品加工业的蓬勃发展,以番茄酱、番茄汁为代表的加工制品市场需求持续扩张,进而有力推动了我国加工番茄产业在种植规模扩张、产品质量优化

以及市场竞争力提升等方面的显著进步<sup>[1-2]</sup>。

复种通过优化耕地时空资源配置,可以显著提高单位面积年产量<sup>[3]</sup>,是保障粮食安全、应对人口增长的重要农艺策略,其气候适应性机制与可持续增效潜力正成为农业系统韧性研究的前沿热点<sup>[4]</sup>。新疆加工番茄种植多采用早春温室育苗,4叶1心期

收稿日期:2025-08-26;修回日期:2025-11-06

基金项目:国家自然科学基金(RCZK202012);石河子大学创新合作项目(QS2023007)

作者简介:杨 岚,女,在读硕士研究生,研究方向为蔬菜遗传育种。E-mail:1505897645@qq.com

通信作者:庞胜群,女,副教授,主要研究方向为蔬菜遗传育种。E-mail:pangshqok@shzu.edu.cn

移栽到露地,大约 120 d 采用机械一次性收获。而新疆南疆地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 4000~4500 $^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 200~240 d,该区域春季气温回升早且速率快、稳定性高,冬小麦收获后仍存在 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温余量 1800~2400 $^{\circ}\text{C}$ ,可提供 100~120 d 的有效生长期<sup>[5-8]</sup>,为加工番茄的麦后复种奠定了坚实基础。目前,南疆地区麦后复种加工番茄正处于积极探索与推广阶段<sup>[9]</sup>。但用于麦后复种的加工番茄育苗期恰逢高温季节,最高可达 45 $^{\circ}\text{C}$ ,造成育苗品质不高,移栽后缓苗时间长。种子萌发期是植物生长发育的起始阶段,是对环境因子响应最敏感的时期,其进程直接受温度调控<sup>[10-11]</sup>。在适宜温度下,种子吸胀速率和萌发进程较快,而温度过高则会导致种子吸胀速率减慢,萌发进程受阻。发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等指标可以反映种子的发芽速率、出芽整齐度以及品种优良度<sup>[12]</sup>。番茄种子萌发的适宜温度为 20~30 $^{\circ}\text{C}$ ,虽然 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下番茄种子萌发速率较快,但幼苗健壮度显著低于 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的幼苗;当温度升至 35 $^{\circ}\text{C}$ 时,种子发芽率仅为 28%,较 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件降低了 70%,且发芽势、发芽指数和活力指数等指标均显著下降<sup>[13]</sup>。这表明 35 $^{\circ}\text{C}$ 高温会显著抑制番茄种子的萌发和幼苗生长。南疆夏季育苗期(6月下旬至7月中旬)正值全年最热时段,在此期间苗床日间实测温度普遍为 32~38 $^{\circ}\text{C}$ ,极端温度可在 45 $^{\circ}\text{C}$ 以上,且高温( $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ )常持续 7~10 d,个别年份可在 15 d 以上,远超番茄种子萌发期耐受阈值,高温已成为制约麦后复种加工番茄育苗成功的首要障碍。为缓解育苗期的高温胁迫,现有技术多集中于遮阳网物理降温与高架穴盘育苗,可分别降低苗床气温 3~5 $^{\circ}\text{C}$ 和基质温度 2~3 $^{\circ}\text{C}$ 。然而,遮阳网存在风损、成本高及光照不足导致的徒长问题;高架育苗则受限于南疆水资源紧张及滴灌配套设施不足,难以大面积推广。因此,选育耐热性强的品种是经济有效的解决途径。目前,已报道的耐热性加工番茄品种有适于机械采收的特早熟品种新番 36 号、晚熟品种新番 40 号<sup>[14]</sup>等,但这些品种远不能满足生产上对耐热性强的加工番茄品种的需求。

由于种子萌发期对温度胁迫的响应受多种因素影响,单一指标难以真实地反映种子的耐高温萌发能力<sup>[15]</sup>,需采用多元评价方法进行综合分析以提高结果的准确性<sup>[16]</sup>。在前人研究中,主成分分析和隶属函数分析法常结合使用,以更全面地评估种质资源的抗逆性<sup>[17]</sup>。基于此,笔者以 54 份加工番茄种

质资源为试验材料,通过测定高温胁迫下的相对发芽势、相对发芽率、相对胚根长等 6 项萌发指标,探究加工番茄种子在热胁迫下的萌发特性,并采用上述多元统计方法综合评价不同材料的耐热性,旨在筛选与鉴定不同加工番茄种质资源的耐热性,为培育耐高温加工番茄新品种提供理论参考和优良种质资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及材料

试验于 2025 年 3—4 月在石河子大学农学院特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室进行。54 份供试材料均为加工番茄类型,株高在 60~90 cm,主茎 3~4 穗果封顶,果实卵圆形至长圆形,单果质量在 50~100 g,成熟果均为大红色,其中 C1~C5 由石河子开发区新番种业有限公司育成,C6 由石河子蔬菜研究所育成,其余 48 份供试材料均为石河子大学农学院加工番茄课题组利用多亲杂交而系统选育出的高代自交系(表 1)。

### 1.2 方法

每份材料挑选大小均匀一致、籽粒饱满的 50 粒种子经 55 $^{\circ}\text{C}$ 温汤浸种 15 min,室温清水浸种 5 h 后,均匀摆放在垫有 2 张滤纸的直径为 11 cm 的培养皿上,加入蒸馏水润湿滤纸,将加盖的培养皿放入培养箱内进行萌发培养,处理 12 d,其间保持湿润,每个处理 3 次重复。其中,对照组设置恒温 28 $^{\circ}\text{C}$ ,高温处理组设置昼夜温度 37 $^{\circ}\text{C}/28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光周期均为光照/黑暗=12 h/12 h。

试验从第 3 天开始每天统计发芽情况(以胚根长为种子直径的 1/2 作为萌芽标志),第 6 天开始统计发芽势,第 12 天开始统计发芽率,每个重复随机选取 10 粒种子测量胚根长、下胚轴长,用以计算相关热胁迫指数<sup>[18]</sup>。

### 1.3 统计指标

发芽势(GP)/%=第 6 天发芽种子数/供试种子总数 $\times 100$ ;

发芽率(GR)/%=第 12 天发芽种子数/供试种子总数 $\times 100$ ;

发芽指数(GI)= $\sum Gt/Dt$ (Dt 指相应的发芽天数,Gt 指第 t 日的发芽数);

活力指数(VI)=GI $\times \overline{RL}$ ( $\overline{RL}$  指胚根平均长度);

下胚轴长度( $\bar{X}_{\text{芽}}$ )=( $X_1+X_2+X_3+\dots+X_{10}$ )/10;

胚根长度( $\bar{Y}_{\text{根}}$ )=( $Y_1+Y_2+Y_3+\dots+Y_{10}$ )/10;

热胁迫相对指数(DRI)/%= $T/CK \times 100$ ;

T 为热处理下的测定值,DRI 包括相对发芽势

表1 54份供试加工番茄材料及其编号

Table 1 54 tested processed tomato varieties and their numbers

编号 Number	名称 Name	来源 Source	编号 Number	名称 Name	来源 Source
C1	石番43号 Shifan 43	石河子新番种业有限公司 Shihezi Xinfan Seed Industry Co., Ltd.	C28	T5901	石河子大学 Shihezi University
C2	石番45号 Shifan 45	石河子新番种业有限公司 Shihezi Xinfan Seed Industry Co., Ltd.	C29	T3124	石河子大学 Shihezi University
C3	SF1006	石河子新番种业有限公司 Shihezi Xinfan Seed Industry Co., Ltd.	C30	T0093	石河子大学 Shihezi University
C4	SF1043	石河子新番种业有限公司 Shihezi Xinfan Seed Industry Co., Ltd.	C31	T3122	石河子大学 Shihezi University
C5	石番42号 Shifan 42	石河子新番种业有限公司 Shihezi Xinfan Seed Industry Co., Ltd.	C32	TZL	石河子大学 Shihezi University
C6	里格尔87-5 Ligeer 87-5	石河子蔬菜研究所 Shihezi Vegetable Research Institute	C33	NY-9W	石河子大学 Shihezi University
C7	FM007	石河子大学 Shihezi University	C34	NY-7W	石河子大学
C8	Vc-82	石河子大学 Shihezi University	C35	TW0005	Shihezi University
C9	JW910	石河子大学 Shihezi University	C36	T1442	石河子大学
C10	JW920	石河子大学 Shihezi University	C37	T148	Shihezi University
C11	JW591	石河子大学 Shihezi University	C38	T163	石河子大学
C12	JW20	石河子大学 Shihezi University	C39	T183	Shihezi University
C13	D-51	石河子大学 Shihezi University	C40	T154	石河子大学
C14	D-38	石河子大学 Shihezi University	C41	T1541	Shihezi University
C15	HZ-38	石河子大学 Shihezi University	C42	T1543	石河子大学
C16	HZ-39	石河子大学 Shihezi University	C43	T1544	Shihezi University
C17	T59	石河子大学 Shihezi University	C44	T3821	石河子大学
C18	JW930	石河子大学 Shihezi University	C45	T1332	Shihezi University
C19	T84	石河子大学 Shihezi University	C46	T1334	石河子大学
C20	HZ-40	石河子大学 Shihezi University	C47	T1336	Shihezi University
C21	HZ-41	石河子大学 Shihezi University	C48	T4483	石河子大学
C22	T82	石河子大学 Shihezi University	C49	T7911	Shihezi University
C23	T123	石河子大学 Shihezi University	C50	T1832	石河子大学
C24	T124	石河子大学 Shihezi University	C51	T461	Shihezi University
C25	T83	石河子大学 Shihezi University	C52	T1073	石河子大学
C26	T0092	石河子大学 Shihezi University	C53	T8022	Shihezi University
C27	T8401	石河子大学 Shihezi University	C54	T5431	石河子大学

(RGP)、相对发芽率(RGR)、相对发芽指数(RGI)、相对活力指数(RVI)、相对胚根长(RRL)和相对下胚轴长(RHL)。

#### 1.4 数据处理分析

利用 Microsoft Excel 2003 对数据进行记录和处理,采用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2021 进行主成分分析、相关性分析、隶属函数分析和系统聚类分析<sup>[19-23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 热胁迫下不同加工番茄种子萌发指标差异分析

热胁迫下各参试材料种子萌发都受到一定程度

的影响(表2),其中 RGI 的变异系数最小,为 30.03%,RVI 的变异系数最大,为 125.31%,说明各项指标中 RVI 对热胁迫的响应程度最大。同时,RVI 的均值最小,为 15.66%,表明热胁迫对 RVI 的影响最大;RGP 的均值最大,为 71.89%,表明热胁迫对 RGP 的影响最小。54 份加工番茄材料的萌发指标在材料间的变化范围较大,其中 RRL、RHL、RGR 和 RVI 的变异系数较大,说明这些评价指标对热胁迫敏感。

54 份加工番茄材料中,24 份材料的 RGP 值超过 90.00%,其中 C54 的 RGP 值达到了 98.00%,其余 30 份材料的 RGP 值在 53.33%~89.33%;11 份材料的 RGR 值超过 90.00%,其中 C3 的 RGR 值为

表2 热胁迫下54份加工番茄种子萌发期各指标相对指数  
Table 2 Relative index of various indicators during the germination period of 54 processed tomato seeds under heat stress

编号 Number	RGP	RGR	RGI	RVI	RRL	RHL	%
C1	92.00±5.29 abcde	75.47±7.67 cdefgh	96.96±7.04 bcdefg	8.22±0.58 opqr	8.31±0.68 ae	78.13±8.21 ef	
C2	84.00±2.00 efghi	93.01±8.35 abc	96.34±11.46 bcdef	66.83±7.48 b	65.27±6.82 c	98.69±12.1 ab	
C3	81.33±6.11 ghijk	99.68±2.17 ab	99.97±8.30 a	81.14±5.76 a	69.39±4.56 b	98.96±6.25 ab	
C4	84.00±8.00 efghi	87.97±5.04 bcd	97.73±4.37 abc	31.34±1.19 fg	27.33±1.12 p	98.52±3.36 ab	
C5	82.67±3.05 fghij	73.34±6.18 cdefghi	83.42±8.35 fghijklmn	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C6	83.33±4.61 fghij	0.00±0.00 x	69.87±6.95 lmnopqr	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C7	74.67±3.05 kl	21.87±3.45 stuvw	80.88±34.72 fghijklmno	3.98±1.70 qrs	4.92±1.45 ak	23.53±1.52 p	
C8	90.01±4.00 abcdef	4.35±7.53 wx	72.90±10.64 ijklmnop	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C9	73.33±6.11 l	0.74±1.28 x	99.81±6.95 ab	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C10	76.67±4.16 ijkl	0.69±1.20 x	93.56±6.51 defghij	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C11	74.00±2.00 kl	83.87±6.93 bcdef	93.52±4.08 defghij	13.82±0.60 lmn	14.77±0.75 z	88.72±1.75 d	
C12	77.33±4.16 hijkl	82.28±7.89 bcdefg	91.23±3.66 defghijkl	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C13	92.00±2.00 abcde	97.97±4.12 ab	78.72±20.57 ghijklmnop	35.97±9.40 def	45.72±9.65 f	93.17±5.65 c	
C14	84.00±2.00 efghi	85.81±5.33 bcde	99.60±3.66 ab	40.74±1.48 cd	40.53±1.52 k	95.55±4.07 bc	
C15	53.33±1.15 m	54.15±8.46 ijklmno	62.28±4.06 nopqr	36.59±2.38 de	58.77±2.45 d	99.61±6.59 ab	
C16	73.33±5.77 l	10.89±9.95 vwxyz	72.16±8.93 ijklmnopq	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C17	84.00±2.00 efghi	57.34±15.78 hijklmn	26.54±11.86 s	11.00±4.91 no	41.47±5.01 j	95.30±4.68 bc	
C18	96.00±0.00 abcd	14.46±12.95 uvwx	73.76±6.99 hijklmnop	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C19	88.67±7.02 cdefg	92.83±8.54 abc	90.44±8.05 defghijkl	33.57±2.99 ef	37.13±2.85 m	87.36±1.97 d	
C20	77.33±11.37 hijkl	43.65±13.32 lmnopqr	97.69±11.75 abcd	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C21	93.33±3.05 abcd	32.14±34.59 pqrstu	85.49±14.00 fghijkl	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C22	88.00±4.00 defg	36.6±33.30 opqrst	63.42±6.80 mnopqr	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C23	92.67±3.05 abcd	42.51±4.92 mnopqr	77.53±7.44 ghijklmnop	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C24	90.67±3.05 abcdef	91.43±5.55 abc	96.21±1.60 bcdefg	34.53±0.55 ef	34.80±0.65 n	99.19±0.99 ab	
C25	84.67±6.42 efgh	34.84±10.49 opqrst	92.47±5.51 defghij	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C26	89.33±1.15 bcdef	54.82±3.28 hijklmno	91.98±9.63 defghij	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C27	54.67±1.15 m	50.28±9.99 jklmnop	96.75±24.72 bcdefg	7.39±1.88 opqr	7.65±2.01 ag	31.75±1.82 o	
C28	95.33±1.15 abcd	64.07±3.90 ighjkl	32.72±3.33 s	5.75±0.58 pqr	17.58±0.45 y	53.54±0.69 l	
C29	97.33±1.15 ab	68.71±7.16 defghij	94.50±3.59 cdefghi	20.00±0.76 ijk	21.15±0.76 w	45.16±0.84 m	
C30	97.33±2.30 ab	92.42±7.92 abc	89.58±7.18 defghijkl	22.02±1.76 ij	24.59±1.66 t	69.43±2.21 h	
C31	94.00±2.00 abcd	59.65±6.56 hijklmn	86.74±13.74 efghijkl	5.45±0.86 pqrs	6.28±0.91 ai	28.88±1.02 o	
C32	84.67±3.05 efgh	59.88±3.91 hijklmn	96.43±1.27 bcdef	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C33	93.33±1.15 abcd	47.56±1.58 klmnopq	91.91±1.06 defghijk	7.04±0.08 opqr	7.66±0.08 af	15.87±0.06 q	
C34	94.00±4.00 abcd	45.85±3.75 klmnopqr	70.16±3.82 klmnopqr	4.27±0.23 qrs	6.08±0.19 aj	12.40±0.32 q	
C35	88.67±8.32 cdefg	26.08±3.77 rstuv	59.03±14.60 pqr	8.53±2.11 opq	14.45±2.01 aa	40.78±1.96 n	
C36	78.00±3.46 hijkl	62.20±5.06 ghijklm	88.61±10.37 efghijkl	21.79±2.55 ij	24.60±3.01 s	49.25±4.06 m	
C37	97.33±1.15 ab	75.51±11.36 cdefgh	85.58±2.44 fghijkl	11.39±0.32 no	13.32±0.42 ac	71.07±0.55 gh	
C38	90.67±1.15 abcdef	91.27±4.30 abc	84.00±3.75 fghijklm	33.43±1.49 ef	39.81±1.51 l	86.18±1.63 d	
C39	89.33±1.15 bcdef	27.70±5.25 rstuv	62.76±3.43 nopqr	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
C40	73.33±1.15 l	82.17±3.88 bcdefg	91.79±9.13 defghijk	24.03±2.39 hi	26.16±2.42 r	74.71±2.54 fg	
C41	80.00±4.00 hijkl	98.60±13.15 a	96.70±17.20 abcde	35.89±5.73 def	33.33±6.01 o	62.43±5.76 jk	
C42	60.00±3.46 m	97.94±14.59 ab	80.77±13.01 fghijklmno	10.52±1.69 nop	13.02±2.01 ad	48.91±2.24 m	
C43	90.67±5.03 abcdef	88.97±11.98 abcd	89.26±10.45 defghijkl	37.44±4.38 de	41.96±5.62 i	67.11±5.82 hi	
C44	76.00±2.00 jkl	60.10±16.33 hijklmn	61.80±10.81 opqr	26.99±4.72 gh	43.65±4.77 h	99.90±5.17 a	

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

表2 (续)  
Table 2 (Continued)

编号 Number	RGP	RGR	RGI	RVI	RRL	RHL	%
C45	94.67±3.05 abcd	41.32±4.10 nopqrs	85.86±2.84 fghijkl	16.27±0.53 klm	18.94±0.40 x	58.69±0.64 k	
C46	94.00±3.46 abcd	65.38±9.31 efghijk	82.46±12.95 fghijklmno	19.06±2.99 ijk	23.10±3.11 u	47.25±3.32 m	
C47	90.67±5.03 abcdef	87.88±10.33 bcd	90.77±11.02 defghijkl	12.18±1.47 mno	13.41±1.52 ab	61.61±2.51 jk	
C48	97.33±1.15 ab	99.31±1.20 ab	98.32±4.93 bcdefg	70.24±3.52 b	71.45±3.52 a	64.44±1.45 ij	
C49	96.00±2.00 abcd	93.88±5.39 abc	95.38±5.14 cdefgh	43.68±2.35 c	45.8±2.57 e	81.18±3.65 e	
C50	89.33±4.61 bcdef	89.93±5.45 abc	87.42±16.64 efghijkl	22.97±4.37 hi	26.29±4.21 q	69.79±4.52 h	
C51	88.00±3.46 defg	81.96±7.68 bcdefg	77.80±9.41 ghijklmnop	17.91±2.16 jkl	23.09±1.11 v	39.74±1.09 n	
C52	96.67±3.05 abc	27.35±24.69 qrstuv	50.66±13.22 r	3.27±0.85 rs	6.46±0.75 ah	12.78±1.62 q	
C53	94.00±2.00 abcd	73.34±9.53 cdefghi	52.12±11.27 qr	23.07±4.99 hi	44.27±5.01 g	86.10±4.26 d	
C54	98.00±2.00 a	19.05±1.23 tuvwx	77.97±3.12 ghijklmnop	0.00±0.00 s	0.00±0.00 al	0.00±0.00 r	
均值 Mean value/%	85.81	36.01	65.86	15.66	19.95	43.38	
标准差 SD	10.85	40.8	19.78	19.99	22.24	38.26	
变异系数 CV/%	12.65	113.3	30.03	125.31	110.05	88.21	

99.68%，4份材料RGR值低于5.00%，其中C6的RGR值为0；23份材料RGI值超过90.00%，其中C3的RGI值为99.97%，5份材料RGI值低于60.00%；2份材料的RVI值超过70.00%，其中C3的RVI值为81.14%，17份材料的RVI值为0；3份材料的RRL值超过60.00%，其中C48的RRL值为71.45%；9份材料的RHL值超过90.00%，其中C44的RHL值为99.90%。综合来看，C3、C48在6个萌发指标中均表现较好，而C6在RGR、RVI、RRL、RHL中表现较差。综上所述，在热胁迫下，C3、C48表现出较好的耐热性，C6对热胁迫比较敏感，种子萌发受到较大影响。

### 2.2 热胁迫下不同加工番茄种子萌发指标相关性分析

由表3可知，除RHL和RGP之外，任意2个指标间均呈极显著正相关。其中，RVI和RRL之间的相关性最强，相关系数为0.956；RHL和RGP之间的相关性最弱，相关系数仅为0.299。在植物的耐热机制中，各项指标作用不同，但又存在显著相关性，表明它们在反映信息时存在一定的重叠，这会导致在评估加工番茄的耐热性时出现冗余。因此，通过主成分分析剔除多余变量，可在保持原始信息的同时，更客观全面地评估加工番茄种子萌发期的耐热性。

### 2.3 主成分分析

为确定加工番茄种子萌发期耐热性评价的主要指标，对54份材料的6项指标进行主成分分析。根据主成分分析研究理论，累计贡献率达到或超过85%时，原始数据的大部分信息即可被主成分

表3 热胁迫下加工番茄种子萌发指标相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of germination indicators of processed tomato seeds under heat stress

指标 Index	RRL	RVI	RHL	RGP	RGR	RGI
RRL	1					
RVI	0.956**	1				
RHL	0.837**	0.745**	1			
RGP	0.389**	0.495**	0.299*	1		
RGR	0.818**	0.829**	0.803**	0.533**	1	
RGI	0.532**	0.682**	0.474**	0.757**	0.748**	1

注：\*\*在0.01水平极显著相关；\*在0.05水平显著相关。

Note: \*\* means the correlation is extremely significant at 0.01 level, \* means the correlation is significant at 0.05 level.

替代。由表4可知，前2个主成分的累计贡献率为89.35%，其中第一个主成分的特征值为4.350，方差贡献率达到72.49%；第二主成分的特征值为1.011，方差贡献率为16.85%。前2个主成分累计贡献率超过85.00%，说明6个萌发指标的大部分信息被有效表征，能够全面反映加工番茄在热胁迫下萌发期的特性，因此可作为加工番茄耐热种质评价的综合指标。

由表5可知，在第一主成分中，各项指标均呈正向影响，其中RVI和RGR的载荷绝对值较高，均为0.937，属于生物量因子。在第二主成分中，RGP和RGI代表的萌发活力因子发挥了主要的正向作用，特别是RGP，其载荷绝对值达到0.689，而RRL、RVI、RHL、RGR均呈负向影响。

### 2.4 加工番茄种质资源种子萌发期耐热性的综合评价

以供试材料各测定值为依据，结合主成分分析

**表 4 热胁迫下加工番茄主成分特征值及方差贡献率**  
**Table 4 Eigenvalue of principal component and variance contribution rate of processed tomato under heat stress**

成分 Component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	4.350	72.490	72.49
2	1.011	16.850	89.35
3	0.277	4.618	93.96
4	0.240	3.998	97.96
5	0.109	1.817	99.78
6	0.013	0.217	100.00

**表 5 热胁迫下加工番茄萌发指标的主成分载荷矩阵**  
**Table 5 The principal component loading matrix of germination indicators of processed tomato under heat stress**

指标 Index	主成分 Principal component	
	PC1	PC2
RRL	0.908	-0.338
RVI	0.937	-0.150
RHL	0.832	-0.406
RGP	0.650	0.689
RGR	0.937	-0.054
RGI	0.809	0.481

的结果计算各材料测定指标的隶属函数值,得到相应的耐热性综合评价值( $D$ 值),并将其进行排序,以比较 54 份加工番茄材料种子萌发期的耐热性差异。结果如表 6 所示,54 份加工番茄材料的  $D$  值范围为 0.074~0.937。根据  $D$  值大小,将 54 份加工番茄材料分为 3 类: $0 < D \leq 0.4$  为热敏感材料,共 30 份,占总数的 55.6%; $0.4 < D \leq 0.9$  为中度耐热材料,共 22 份,占总数的 40.7%; $0.9 < D \leq 1$  为耐热材料,共 2 份,占总数的 3.7%。其中,C48 的  $D$  值最高,表明其耐热性最强;而 C5、C6 等 30 份材料  $D$  值较小,表明其对热胁迫较敏感。

对  $D$  值进行系统聚类分析,结果如图 1 所示,54 份加工番茄材料可分为 3 大类群。第 I 类为耐热材料,共 2 份;第 II 类为中度耐热材料,共 22 份;第 III 类主要为热敏感材料,共 30 份。与隶属函数分析结果一致。图 2-A 为加工番茄不同耐热性等级种子在第 12 天的萌发情况差异,从上至下依次为耐热材料 C48、中度耐热材料 C35、热敏感材料 C6,与对照相比,高温处理组材料整体长势较弱,胚根相对较短,部分略显纤细;下胚轴略显柔弱;子叶展开不完全,部分颜色稍浅(淡绿),偶

**表 6 不同加工番茄材料耐热性隶属函数值、 $D$  值及耐热性排序**

**Table 6 The membership function value,  $D$  value and rank of heat tolerance of different processed tomato varieties**

编号 Number	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$D$ 值 $D$ value	排序 Rank	分类 Classification	编号 Number	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$D$ 值 $D$ value	排序 Rank	分类 Classification
C48	1.000	0.664	0.937	1	I	C45	0.308	0.632	0.369	28	III
C3	0.994	0.635	0.927	2	I	C33	0.248	0.854	0.363	29	III
C2	0.851	0.554	0.795	3	II	C21	0.202	0.972	0.347	30	III
C49	0.789	0.750	0.781	4	II	C23	0.198	0.982	0.346	31	III
C13	0.819	0.566	0.771	5	II	C11	0.301	0.495	0.337	32	III
C14	0.744	0.671	0.730	6	II	C32	0.185	0.911	0.322	33	III
C24	0.721	0.740	0.724	7	II	C20	0.183	0.860	0.311	34	III
C43	0.711	0.762	0.721	8	II	C36	0.170	0.861	0.301	35	III
C38	0.719	0.722	0.719	9	II	C10	0.172	0.851	0.300	36	III
C4	0.697	0.798	0.716	10	II	C28	0.245	0.539	0.300	37	III
C41	0.683	0.828	0.711	11	II	C26	0.157	0.856	0.289	38	III
C19	0.656	0.757	0.675	12	II	C25	0.159	0.845	0.288	39	III
C40	0.629	0.863	0.673	13	II	C27	0.197	0.647	0.282	40	III
C50	0.628	0.862	0.672	14	II	C54	0.152	0.823	0.279	41	III
C47	0.567	0.935	0.636	15	II	C39	0.145	0.841	0.276	42	III
C30	0.612	0.739	0.636	16	II	C17	0.330	0.000	0.268	43	III
C46	0.532	0.875	0.597	17	II	C22	0.129	0.821	0.260	44	III
C37	0.536	0.851	0.595	18	II	C7	0.168	0.627	0.255	45	III
C15	0.559	0.439	0.536	19	II	C12	0.128	0.778	0.250	46	III
C53	0.552	0.402	0.524	20	II	C8	0.110	0.693	0.220	47	III
C44	0.533	0.419	0.511	21	II	C18	0.097	0.667	0.204	48	III
C42	0.402	0.732	0.464	22	II	C1	0.175	0.299	0.199	49	III
C51	0.380	0.819	0.463	23	II	C16	0.089	0.655	0.196	50	III
C35	0.375	0.839	0.462	24	II	C52	0.079	0.673	0.191	51	III
C29	0.316	0.690	0.386	25	III	C34	0.069	0.465	0.144	52	III
C31	0.279	0.849	0.386	26	III	C5	0.004	0.428	0.084	53	III
C9	0.230	1.000	0.375	27	III	C6	0.000	0.393	0.074	54	III

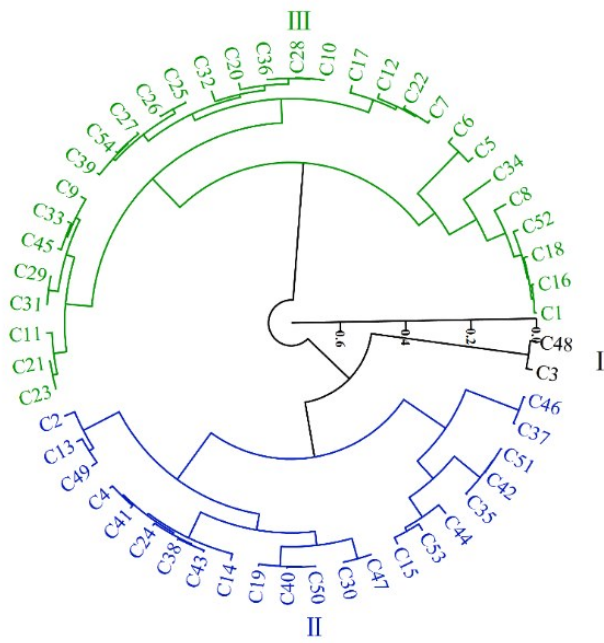
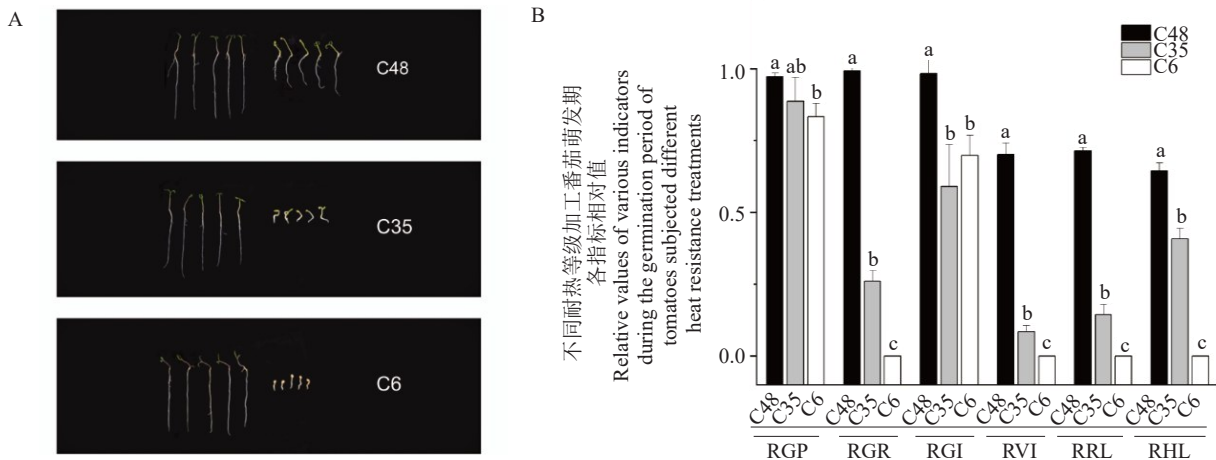


图1 54份加工番茄材料耐热性的聚类分析  
Fig. 1 Cluster analysis of heat tolerance of 54 processed tomato germplasm

见轻微卷曲。随着耐热性等级降低,种子在第12天的萌发进程受阻加剧,生长受到严重抑制,表现为生长严重滞后且部分子叶畸形,胚根极短、细弱扭曲,下胚轴几乎不伸长或极短,生长量明显减小。图2-B为不同耐热性等级加工番茄种子的萌发指标差异,C48与C35的RGR、RGI、RVI、RRL、RHL值表现出显著差异,而C48与C6的6个萌发指标均表现出极显著差异。

### 3 讨论与结论

笔者对54份加工番茄材料进行了37℃热胁迫,结果显示,与CK相比,相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数等6个指标在热胁迫下均有所下降,且在不同材料间的差异较大,这与宋敏丽等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。在本研究中,不同材料间相对活力指数(RVI)变异系数最大(125.31%),这可能是由于高温破坏线粒体功能,降低ATP合成效率<sup>[25]</sup>,导致种子生理代谢活动受到抑制<sup>[26]</sup>,正常幼苗形态建成受阻,表明种子维持代谢活力的能力对热胁迫最敏感,不同材料间



注:图A中每个品种左边5株为对照,右边5株为高温处理。图B中不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: In fig. A, for each variety, the 5 plants on the left are for control and the 5 plants on the right are for high-temperature treatment; in fig. B, different lowercase indicate significant difference at 0.05 level.

图2 不同耐热等级加工番茄第12天萌发差异  
Fig. 2 Difference in germination of processed tomato with different heat tolerance grades on 12th day

相对发芽势、相对发芽指数变化相对较小,说明热胁迫对不同材料种子萌发相关指标的抑制效果存在差异。热胁迫下细胞内活性氧积累,引发膜脂过氧化<sup>[26]</sup>,在本研究中表现为胚根缩短、下胚轴畸形,且相对胚根长(RRL)与相对活力指数(RVI)呈极显著正相关( $r = 0.956, P < 0.01$ )。此外,种子发芽势的高低表征了种子萌发过程中的整齐度。结果表明,热胁迫导致不同加工番茄材料种子的相对发芽势明显降低,可能

是由于热胁迫抑制了赤霉素信号通路<sup>[25]</sup>,延迟发芽启动,表明种子发芽整齐度随温度升高而降低。种子萌发只是植物生长的开始,需进一步对种质资源在苗期及开花坐果期的耐热性进行综合评价,并挖掘耐高温关键候选基因,为加工番茄种质遗传改良与耐高温新品种培育提供理论基础和遗传材料。

综上所述,笔者利用主成分分析、聚类分析和隶属函数分析法对54份加工番茄材料种子萌发期

的耐高温性进行综合评价,初步筛选出耐热性较强的材料 T4483(C48)和 SF1006(C3),可为加工番茄耐高温品种的选育提供亲本资源。

### 参考文献

- [1] 甘中祥,刘磊,李鑫,等.我国加工番茄产业现状与发展分析[J].中国蔬菜,2025(6):9-13.
- [2] 李春雨,谭占明,程云霞,等.不同加工番茄品种的农艺性状比较分析[J].新疆农业科学,2024,61(11):2676-2683.
- [3] 吉泽男.新疆耕地系统韧性时空演变及影响因素分析[D].新疆阿拉尔:塔里木大学,2025.
- [4] ALESSANDRO G, KUIPER M J, VAN M H. Economic, social and environmental spillovers decrease the benefits of a global dietary shift[J]. Nature Food, 2023, 4(6):496-507.
- [5] 倪明霞,段峥嵘,夏建新.气候变化下南疆主要河流径流变化及水资源风险[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(4):834-845.
- [6] 倪明霞,普拉提·莫合塔尔,孙婷宇,等.基于气候变化与人类活动双重作用的南疆水资源供需关系分析[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(2):331-348.
- [7] 程丹妮,王颖琪,程勇翔,等.新疆典型沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性分析[J].干旱区地理,2022,45(2):456-466.
- [8] 张加敏,徐华君,边英英,等.新疆南疆地区降水量的时空变化特征[J].湖北农业科学,2016,55(21):5496-5499.
- [9] 刘佳慧.新疆番茄制品出口贸易高质量发展评价研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2024.
- [10] 郇述涛,景新明.吸湿-回干处理对提高番茄种子萌发期间高温耐性的作用及其生理效应[J].种子,2009,28(2):34-38.
- [11] 罗绍薇,吴佳海,钟理.温度对水城高羊茅种子萌发特性的影响[J].农业与技术,2020,40(2):14-15.
- [12] 李静,李雨欣,赵洁,等.水稻穗发芽抗性鉴定方法优化及批量筛选[J].江西农业大学学报,2025,47(3):569-586.
- [13] LYU JAE I, PARK J H, KIM J K, et al. Enhanced tolerance to heat stress in transgenic tomato seeds and seedlings overexpressing a trehalose-6-phosphate synthase/phosphatase fusion gene[J]. Plant Biotechnology Reports, 2018, 12(6):399-408.
- [14] 杨生保,王柏柯,帕提古丽,等.机械采收加工番茄新品种新番40号[J].中国蔬菜,2010(23):32.
- [15] 姜睿,刘文瑜,王旺田,等.50份藜麦种质材料萌发期耐低温综合评价[J].草业科学,1-17(2025-06-20).<https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250619.1703.002>.
- [16] 张昭,金琪凡,史彦欣,等.不同品种紫花苜蓿种子萌发期耐低温性综合评价[J].草地学报,2023,31(10):3050-3057.
- [17] 张东超,申奥,雷永琦,等.15份大豆品种耐盐性筛选及鉴定[J].河南科技学院学报(自然科学版),2025,53(3):9-16.
- [18] 周超凡,宋炳怡,颜宏金,等.荞麦种子萌发期耐旱和耐盐碱性综合评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(8):45-54.
- [19] 赵少迪,胡传伟,张玉莲,等.苦荞种质资源萌发期抗旱性综合评价[J].干旱地区农业研究,2024,42(3):13-21.
- [20] 张莹莹,赵明辉,孟祥海,等.55份衡麦系列种质资源萌发期耐盐性筛选与鉴定[J].山西农业科学,2025,53(2):92-100.
- [21] 焦茹玉,朱羿霖,谢其均,等.186份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性鉴定[J].植物遗传资源学报,2024,25(12):2081-2093.
- [22] 姜春姣,刘文强,孙昊杰,等.90份花生种子萌发期抗逆性鉴定与遗传多样性分析[J].种子,2025,44(2):116-123.
- [23] 杜孝敬,侯天钰,李冬,等.水稻种子萌发期耐旱性鉴定及优异品种筛选[J].新疆农业科学,2025,62(1):95-102.
- [24] 宋敏丽,温祥珍,李亚灵,等.六个番茄品种的耐热性鉴定[J].北方园艺,2012(21):5-7.
- [25] LI P, ZHANG Q L, HE D N, et al. AGAMOUS-LIKE67 cooperates with the histone mark reader EBS to modulate seed germination under high temperature[J]. Plant Physiology, 2020, 184(1):529-545.
- [26] 杨昭,李思远,王娟,等.高温干燥对白菜种子生命物质破坏机理的研究[J].华北农学报,2007,22(5):67-70.