

# 番茄砧木耐热性评价及热胁迫生理响应研究

田茂燕 向婷颖 钟 川 王 鹏 阳燕娟 于文进\*

(广西大学农学院, 广西南宁 530004)

**摘 要:** 南方地区番茄在春延后栽培和秋提前栽培中易受异常高温的影响, 采用耐热砧木进行嫁接栽培可以提高番茄的耐热性。为筛选耐热性强的番茄砧木种质资源, 本试验对 20 份番茄砧木种质的种子和幼苗进行热胁迫处理, 根据热害表型和幼苗生长生理指标评价砧木种质的耐热性。结果表明, 热胁迫抑制番茄砧木种子萌发, 随着温度升高, 种子发芽率明显降低。34 ℃时, 除 N3 外的砧木种质种子发芽率降至 50% 以下; 37 ℃时种子发芽率均降至 24% 以下, 40 ℃时种子发芽率均为 0。亚高温 (34 ℃/28 ℃) 和高温 (37 ℃/28 ℃) 胁迫下, G3、N3、Q2 均表现强耐高温 (HR), A1、Q3、Q4、Q5、Y4 表现中耐高温 (MR) 或耐高温 (R)。幼苗热害指数与株高、叶片丙二醛 (MDA) 含量呈极显著正相关, 与叶片 SPAD 值、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、叶片游离脯氨酸含量呈显著或极显著负相关。利用以上 7 项生长生理指标, 采用隶属函数法对供试种质的耐热性进行综合评价, 种质 G3、N3、Q2 的耐热性居前 3 位, 与亚高温胁迫的幼苗热害指数排序一致。综上, 种质 G3、N3、Q2 强耐高温, 可作为选育耐热番茄砧木的骨干材料。

**关键词:** 番茄; 砧木; 耐热性; 生理响应

番茄 (*Solanum lycopersicum*) 是世界上重要的经济作物, 在我国蔬菜产业中占有重要地位, 是我国主要的大宗蔬菜之一 (毛胜利 等, 2001; 王冬梅, 2003)。番茄原产地位于赤道附近的南美西部高原地带, 比较适应高地干燥冷凉的环境条件, 是对温度较为敏感的喜温植物, 适宜的生长温度为 15~32 ℃, 过高或过低的温度均会影响其正常的生长发育 (安凤霞 等, 2005; 张富存 等, 2011; Wang et al., 2020)。近年来, 随着全球温室效应的加剧, 气温升高, 我国番茄生产面临热胁迫的严峻挑战, 特别是南方地区露地番茄主栽季节, 春延后栽培和秋提前栽培的番茄易受异常高温的影响, 成为限制番茄生产的主要原因之一。研究表明, 高温不仅降低番茄种子活力, 抑制种子萌发 (钱春梅 等, 2002), 而且导致植株体内抗氧化系统失衡,

破坏叶绿体膜结构, 通过非气孔因素影响光合作用 (魏爽 等, 2019)。不耐热的番茄幼苗受到 35 ℃ 以上高温热胁迫后, 呼吸作用会发生紊乱, 且随着胁迫时间的延长, 植株茎叶与花器的发育受到严重影响, 导致茎叶萎焉与畸形果实的产生, 甚至植株茎叶停止伸长直至枯萎, 严重影响番茄的营养生长, 降低产量和品质; 耐热的番茄品种则受热胁迫影响较小, 且幼苗的耐热性与采收期的耐热性呈显著正相关 (刘祖祺, 1994; Li et al., 2011; 彭勇政 等, 2019)。采用耐热砧木进行嫁接栽培是提高番茄高温耐受性的重要方法。嫁接栽培可以增强番茄的抗逆性和生长势, 提高坐果率, 提早收获, 提高产量与改善品质 (范双喜和王绍辉, 2005)。利用耐热性较强的砧木嫁接番茄, 嫁接苗即使处于高温环境下, 植株叶片叶绿素含量、净光合速率都显著高于自根苗, 说明嫁接栽培可以显著提高番茄的耐热性 (董灵迪 等, 2010)。因此, 鉴定和筛选耐热番茄砧木种质具有重要的现实意义。本试验通过比较热胁迫对不同番茄砧木种子萌发和幼苗生长的影响, 评价番茄砧木种质的耐热性, 研究砧木幼苗对热胁迫的生理响应, 以为番茄耐热砧木种质的鉴定和应用提供参考。

田茂燕, 女, 硕士研究生, 主要从事蔬菜抗逆生理研究, E-mail: 910882995@qq.com

\* 通信作者 (Corresponding author): 于文进, 男, 博士, 教授, 主要从事蔬菜抗性遗传育种与栽培生理研究, E-mail: yuwjin@gxu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-18; 接受日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660568), 广西科技重大专项 (桂科 AA17204039-2, AA17204026-1)

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

试验于 2018 年 11 月至 2019 年 7 月在广西大学农学院蔬菜基地进行。供试材料为广西大学农学院蔬菜育种课题组保存的 20 份番茄砧木种质，其中 9 份种质来源于中国，11 份种质来源于日本，均为多代纯合自交系（表 1）。

表 1 供试番茄砧木种质来源和类型

砧木编号	来源	类型
A1	中国	中果型番茄一代杂种番砧 1 号自交分离后代
A2	中国	中果型番茄一代杂种番砧 2 号自交分离后代
N3	中国	中果型番茄一代杂种番砧 3 号自交分离后代
Q1	日本	中果型番茄一代杂种 Ganbarukon 自交分离后代
Q2	日本	小果型番茄一代杂种 Subaryo 自交分离后代
Q3	日本	小果型番茄一代杂种 Resibu 自交分离后代
Q4	日本	小果型番茄一代杂种 Bbaria 自交分离后代
Q5	日本	小果型番茄一代杂种 Gringado 自交分离后代
Q6	日本	大果型番茄一代杂种 Kagurut 自交分离后代
Q7	日本	小果型番茄一代杂种 Taihonmei 自交分离后代
Q8	日本	小果型番茄一代杂种 Kyadei 自交分离后代
C1	中国	小果型番茄地方品种自交后代
C4	日本	中果型番茄一代杂种 Deyueto 自交分离后代
C7	日本	中果型番茄一代杂种 NihontaoA 自交分离后代
C8	日本	中果型番茄一代杂种 NihontaoB 自交分离后代
Y2	中国	小果型野生番茄自交后代
Y3	中国	小果型野生番茄自交后代
Y4	中国	小果型野生番茄自交后代
G2	中国	大果型番茄一代杂种福砧自交分离后代
G3	中国	大果型番茄一代杂种亲家自交分离后代

## 1.2 番茄砧木种子耐热性鉴定

设置 28、31、34、37、40 °C 共 5 个温度处理，其中 28 °C 为常温对照（CK），进行种子发芽试验，评价砧木种质的耐热性。在直径 11 cm 的干净培养皿中垫 2 张 9 cm 的滤纸，用无菌水润湿后，将 20 份供试砧木种子（2018 年 12 月采种，种子干燥后贮藏于 4 °C 冷藏箱内）分别播到滤纸上，每只培养皿均匀播种 100 粒，加无菌水保持润湿，种子吸水 2 h 后，将加盖的培养皿放入以上 5 个不同温度的恒温培养箱内，处理 14 d（金春燕 等，2011），期间保持湿润。每份种质、每个温度处理设 3 次重复。种子开始发芽后，每天同一时间统计发芽数。

## 1.3 番茄砧木幼苗耐热性鉴定

将供试砧木种子分别播种到 50 孔穴盘内育苗，育苗基质按泥炭：椰糠：珍珠岩 = 2 V：1 V：1 V

的比例配制。当幼苗长至 4 片真叶时，转入人工气候箱中，在 28 °C / 20 °C（16 h/8 h）、相对湿度 70%~75%、每天光照 16 h、光照强度 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  条件下预培养 2 d。第 3 天进行热胁迫处理，设置常温对照（28 °C/20 °C）、亚高温（34 °C/28 °C）、高温（37 °C/28 °C）3 个温度处理，每份砧木、每个温度处理幼苗 30 株，3 次重复。相对湿度和光照条件同预培养，其他管理条件相同。处理 7 d 后调查幼苗热害级数，计算热害指数。采用便携式叶绿素测定仪（SPAD 502）测定植株最上部完全展开叶片的叶绿素 SPAD 值。

参考宋敏丽等（2012）的方法，根据幼苗叶片失水萎蔫程度和颜色变化表型，将热害级数分为 5 级（图 1）：植株没有明显高温伤害症状为 0 级；植株轻度失水，下部老叶边缘发黄为 1 级；植株中度失水，中下部叶片卷曲为 2 级；植株严重失水，上部叶片卷曲为 3 级；植株多数叶片枯萎死亡为 4 级。热害指数 =  $\Sigma$ （各级株数 × 相应级数）/（最高级数 × 总株数）。参考马宝鹏（2013）的方法，根据热害指数将苗期耐热性（CI）分为 5 级：强耐高温（HR）， $0 \leq \text{CI} \leq 0.2$ ；中耐高温（MR）， $0.2 < \text{CI} \leq 0.4$ ；耐高温（R）， $0.4 < \text{CI} \leq 0.6$ ；高温敏感（S）， $0.6 < \text{CI} \leq 0.8$ ；高温高敏感（HS）， $0.8 < \text{CI} \leq 1.0$ 。

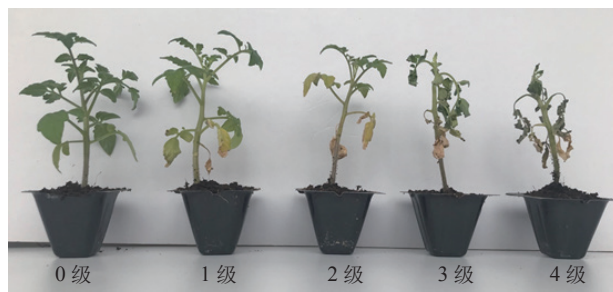


图 1 番茄砧木幼苗热害分级

## 1.4 热胁迫对番茄砧木幼苗生长及生理响应研究

根据幼苗耐热性鉴定结果，选取强耐高温种质 G3、Q2、N3 和高温高敏感种质 G2、Y3 进行热胁迫生理响应研究。育苗和热胁迫处理方法同 1.3。处理 7 d 后，进行植株生长指标和叶片丙二醛（MDA）、脯氨酸含量的测定。用直尺测量植株株高，用游标卡尺测量植株第 1 节茎粗（横径），用天平测量地上部、地下部鲜质量和干质量。将植株

用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗3遍,吸水纸吸干表面水分后测定鲜质量;然后置于烘箱105℃杀青15 min,75℃恒温烘至恒重后测定干质量。

取植株最上部完全展开叶片,参考李合生等(2000)的方法,采用硫代巴比妥酸法测定叶片MDA含量,采用水合茚三酮法测定叶片脯氨酸含量。

### 1.5 番茄砧木种质耐热性综合评价

参考但忠等(2013)的方法,运用SPSS 19.0软件对20份番茄砧木种质进行隶属函数值法分析,综合评价其耐热性。隶属函数值计算公式为 $R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,  $X_i$ 为某一指标测定值,  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为所有参试材料某一指标的最小值和最大值;如果为负相关,则用反隶属函数进行转换,计算公式为: $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

### 1.6 统计分析

各指标数据应用Microsoft Excel 2010软件进行处理和作图,应用SPSS 19.0统计软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 热胁迫对番茄砧木种子萌发的影响

从表2可以看出,常温(28℃,CK)条件下,所有参试种质的种子发芽率均在92%以上。31℃条件下,有15份种质发芽率降至80%~88%,5份种质发芽率降至80%以下,其中Q3降至69.00%。34℃条件下,除N3的发芽率为64.33%之外,其余种质的发芽率均在50%以下,其中Q3、Q4的发芽率降至27%左右。37℃条件下,除N3、Y2、G3的发芽率为20%~23%外,其余种质的发芽率均降至20%以下,9份种质的发芽率为0。40℃条件下,所有参试种质的种子发芽率均为0,丧失萌发能力。以上说明,高温对番茄砧木种子萌发具有抑制作用,随着温度升高,种子发芽率明显降低,不同砧木种子萌发受热胁迫的影响不同。

### 2.2 热胁迫对番茄砧木幼苗耐热性的影响

从表3可以看出,亚高温(34℃/28℃)条件下,有9份种质的幼苗热害发生率为80%~89%,其余11份种质的热害发生率为90%~99%;G3、Q2、N3的热害指数为0.12~0.16,表现强耐高温(HR),Q3、Q5的热害指数分别为0.39、0.40,表现中耐

表2 不同温度处理对番茄砧木种子发芽率的影响

砧木种 质编号	种子发芽率/%				
	28℃(CK)	31℃	34℃	37℃	40℃
A1	95.67 ab	87.67 ab	39.33 d	18.33 bc	0
A2	92.67 ab	85.33 abcd	37.00 de	17.00 c	0
N3	96.67 ab	84.33 abcde	64.33 a	23.33 a	0
Q1	93.67 ab	88.33 a	46.00 b	19.00 bc	0
Q2	93.00 ab	84.00 abcde	44.00 bc	18.33 bc	0
Q3	94.67 ab	69.00 g	27.33 f	0 g	0
Q4	93.33 ab	73.67 f	27.67 f	0 g	0
Q5	94.67 ab	80.33 e	46.00 b	0 g	0
Q6	95.00 ab	82.33 cde	38.00 de	11.33 ef	0
Q7	93.33 ab	72.67 fg	46.00 b	0 g	0
Q8	94.67 ab	83.33 bcde	46.00 b	10.67 f	0
C1	92.33 b	81.33 de	46.00 b	0 g	0
C4	94.33 ab	84.33 abcde	45.33 b	13.67 de	0
C7	94.67 ab	80.67 e	45.00 b	0 g	0
C8	93.00 ab	87.00 ab	43.33 bc	16.33 cd	0
Y2	97.00 a	81.33 de	45.00 b	20.67 ab	0
Y3	92.33 b	84.00 abcde	44.00 bc	0 g	0
Y4	94.33 ab	74.33 f	40.67 cd	0 g	0
G2	92.67 ab	74.67 f	44.00 bc	0 g	0
G3	92.67 ab	86.00 abc	34.67 e	20.33 b	0

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

高温(MR),A1、Q4、Q7、C1、C7、Y4等6份种质的热害指数为0.51~0.60,表现耐高温(R),其余9份种质的热害指数为0.64~0.80,表现高温敏感(S)。高温(37℃/28℃)条件下,所有参试种质的幼苗热害发生率均为100.00%;G3、Q2、N3的热害指数为0.16~0.19,仍然表现强耐高温(HR),A1、Q3、Q4、Q5、Y4等5份种质的热害指数为0.55~0.60,表现耐高温(R),其余12份种质的热害指数为0.71~0.95,表现高温敏感(S)或高温高敏感(HS)。以上说明,番茄砧木幼苗对热胁迫的表型差异明显,种质G3、Q2、N3较耐高温。

### 2.3 热胁迫对番茄砧木幼苗叶片叶绿素含量的影响

从表4可以看出,常温(28℃/20℃,CK)条件下,参试种质的幼苗叶片SPAD值为42.05~46.57。亚高温(34℃/28℃)胁迫下,N3、Q2、Q3、Q5、G3等5份种质的幼苗叶片SPAD值比对照降低20%~30%,其余15份种质的幼苗叶片SPAD值比对照降低31.13%~36.51%。高温(37℃/28℃)胁迫下,Q2、Q3、Q5、G3等4份种质的幼苗叶片SPAD值比对照降低

表 3 热胁迫对番茄砧木幼苗耐热性的影响

砧木种质编号	34 °C/28 °C			37 °C/28 °C		
	热害发生率/%	热害指数	耐热性分级	热害发生率/%	热害指数	耐热性分级
A1	90.00 e	0.59 ghi	R	100.00	0.60 def	R
A2	94.44 bcd	0.71 cde	S	100.00	0.80 bc	S
N3	82.22 g	0.16 jklmn	HR	100.00	0.19 fgh	HR
Q1	93.78 ab	0.77 abc	S	100.00	0.91 a	HS
Q2	81.11 g	0.15 klmn	HR	100.00	0.17 gh	HR
Q3	80.00 g	0.39 ln	MR	100.00	0.60 h	R
Q4	90.00 de	0.60 fgh	R	100.00	0.60 cde	R
Q5	84.44 fg	0.40 jkl	MR	100.00	0.55 fgh	R
Q6	95.78 ab	0.73 cde	S	100.00	0.80 a	S
Q7	91.11 de	0.60 efgh	R	100.00	0.76 cde	S
Q8	88.89 cde	0.68 def	S	100.00	0.78 bcd	S
C1	88.89 e	0.56 ghij	R	100.00	0.79 ef	S
C4	92.22 de	0.64 efg	S	100.00	0.78 cde	S
C7	87.78 ef	0.54 hijk	R	100.00	0.71 ef	S
C8	95.56 abc	0.75 abcd	S	100.00	0.80 bc	S
Y2	94.89 a	0.76 bcd	S	100.00	0.91 a	HS
Y3	98.44 bcd	0.80 abc	S	100.00	0.95 bc	HS
Y4	83.33 g	0.51 ijkl	R	100.00	0.60 efg	R
G2	97.78 ab	0.78 abcd	S	100.00	0.93 ab	HS
G3	82.22 g	0.12 n	HR	100.00	0.16 h	HR

注：HR，强耐高温；MR，中耐高温；R，耐高温；S，高温敏感；HS，高温高敏感。

表 4 热胁迫对番茄砧木幼苗叶片叶绿素含量（SPAD 值）的影响

砧木种质编号	28 °C/20 °C (CK)	34 °C/28 °C		37 °C/28 °C	
	SPAD 值	SPAD 值	比 CK±%	SPAD 值	比 CK±%
A1	45.27 cd	30.62 f	-32.35 def	13.73 e	-69.66 f
A2	46.09 b	30.67 f	-33.47 c	13.08 f	-71.62 e
N3	42.40 g	29.87 g	-29.56 i	14.36 d	-66.14 g
Q1	44.95 cde	30.94 e	-31.17 h	11.00 i	-75.53 b
Q2	45.30 cd	33.53 c	-25.97 j	19.23 b	-57.54 i
Q3	46.57 a	36.10 a	-22.47 k	21.01 a	-54.89 j
Q4	43.66 f	29.99 g	-31.30 gh	11.98 h	-72.56 d
Q5	46.57 a	34.07 b	-26.84 j	19.12 b	-58.94 h
Q6	46.11 b	31.55 d	-31.58 fgh	11.08 gi	-75.98 ab
Q7	45.11 cde	30.58 f	-32.20 defg	13.04 f	-71.09 e
Q8	44.95 cde	29.23 h	-34.97 b	12.00 h	-73.31 c
C1	45.26 cd	30.47 f	-32.67 cde	13.89 e	-69.32 f
C4	44.76 e	30.41 f	-32.06 defgh	11.99 h	-73.22 c
C7	42.05 h	28.19 i	-32.97 cd	11.32 i	-73.07 cd
C8	46.50 a	31.64 d	-31.95 efgh	13.21 f	-71.60 e
Y2	46.27 ab	29.38 h	-36.51 a	10.92 j	-76.40 a
Y3	45.16 cd	30.47 f	-32.52 cdef	11.89 h	-73.68 c
Y4	44.90 de	30.92 e	-31.13 h	15.13 c	-66.30 g
G2	46.27 ab	31.62 d	-31.65 fgh	12.73 g	-72.48 d
G3	45.33 c	35.97 a	-20.66 l	21.22 a	-53.20 k

53.20%~58.94%，A1、N3、C1、Y4 等 4 份种质的幼苗叶片 SPAD 值比对照降低 66.14%~69.66%，其余 12 份种质的幼苗叶片 SPAD 值比对照降低

71.09%~76.40%。以上说明，热胁迫影响番茄砧木幼苗叶片叶绿素合成而使其含量降低，高温比亚高温处理下降幅度大。



## 2.4 热胁迫对番茄砧木幼苗生长的影响

### 2.4.1 热胁迫对番茄砧木幼苗株高和茎粗的影响

由表 5 可知, 亚高温 (34 °C/28 °C) 胁迫下, 强耐高温种质 G3、Q2、N3 的株高比对照 (28 °C/20 °C) 增加 12.64%~15.49%, 高温高敏感种质 G2、Y3 的株高分别比对照增加 23.43%、24.20%; 高温 (37 °C/28 °C) 胁迫下, G3、Q2、N3 的株高比对照增加 4.32%~8.09%, G2、Y3 的株高分别比对照增加

17.42%、19.44%。亚高温胁迫下, G3、Q2、N3 的茎粗分别比对照减小 8.05%~9.58%, G2、Y3 的茎粗分别比对照减小 27.51%、23.17%; 高温胁迫下, G3、Q2、N3 的茎粗比对照减小 26.04%~30.13%, G2、Y3 的茎粗分别比对照减小 50.74%、53.13%。以上说明, 热胁迫导致番茄砧木幼苗株高增加而茎粗降低, 幼苗表现徒长, 强耐高温种质 G3、Q2、N3 的株高增幅和茎粗降幅比高温高敏感种质 G2、

表 5 不同温度处理对番茄砧木幼苗株高与茎粗的影响

砧木种 质编号	28 °C/20 °C (CK)		34 °C/28 °C				37 °C/28 °C			
	株高/cm	茎粗/cm	株高/cm	比 CK±%	茎粗/cm	比 CK±%	株高/cm	比 CK±%	茎粗/cm	比 CK±%
G3	12.910	0.304	14.540	12.64 b	0.275	-9.47 a	13.467	4.32 c	0.220	-27.48 ab
Q2	13.500	0.334	15.407	14.14 b	0.302	-9.58 a	14.403	6.71 bc	0.247	-26.04 a
N3	13.840	0.375	15.983	15.49 b	0.345	-8.05 a	14.960	8.09 b	0.262	-30.13 b
G2	14.047	0.339	17.337	23.43 a	0.246	-27.51 b	16.493	17.42 a	0.167	-50.74 c
Y3	13.943	0.335	17.317	24.20 a	0.257	-23.17 b	16.653	19.44 a	0.157	-53.13 c

Y3 小, 幼苗徒长程度相对较小。

2.4.2 热胁迫对番茄砧木幼苗鲜质量和干质量的影响 从表 6、7 可以看出, 亚高温 (34 °C/28 °C) 胁迫下, G3、Q2、N3 的地上部鲜质量比对照 (28 °C/20 °C) 降低 16.10%~18.40%, 地下部鲜质量比对照降低 23.79%~30.00%; G2、Y3 的地上部鲜

质量分别比对照降低 38.38%、41.80%, 地下部鲜质量分别比对照降低 52.08%、56.51%。高温 (37 °C/28 °C) 胁迫下, G3、Q2、N3 的地上部鲜质量比对照降低 30.57%~38.56%, 地下部鲜质量比对照降低 34.43%~60.74%; G2、Y3 的地上部鲜质量分别比对照降低 58.41%、58.86%, 地下部鲜质

表 6 不同温度处理对番茄砧木幼苗地上部鲜质量与干质量的影响

砧木种 质编号	28 °C/20 °C (CK)		34 °C/28 °C				37 °C/28 °C			
	鲜质量	干质量	鲜质量	比 CK±%	干质量	比 CK±%	鲜质量	比 CK±%	干质量	比 CK±%
G3	2.833	0.290	2.377	-16.10 a	0.248	-14.48 a	1.967	-30.57 a	0.195	-32.75 a
Q2	2.430	0.243	1.983	-18.40 a	0.188	-22.63 b	1.493	-38.56 b	0.143	-41.28 b
N3	3.127	0.313	2.613	-16.44 a	0.251	-19.81 b	2.130	-31.88 a	0.216	-30.83 a
G2	2.710	0.281	1.670	-38.38 b	0.157	-44.13 c	1.127	-58.41 c	0.113	-59.92 c
Y3	2.617	0.260	1.523	-41.80 b	0.148	-43.08 c	1.077	-58.86 c	0.108	-58.62 c

表 7 不同温度处理对番茄砧木幼苗地下部鲜质量与干质量的影响

砧木种 质编号	28 °C/20 °C (CK)		34 °C/28 °C				37 °C/28 °C			
	鲜质量	干质量	鲜质量	比 CK±%	干质量	比 CK±%	鲜质量	比 CK±%	干质量	比 CK±%
G3	0.507	0.057	0.377	-25.64 a	0.038	-32.43 a	0.310	-38.86 a	0.023	-59.56 b
Q2	0.433	0.046	0.330	-23.79 a	0.026	-42.87 ab	0.170	-60.74 b	0.024	-48.10 a
N3	0.610	0.064	0.427	-30.00 a	0.041	-35.38 a	0.400	-34.43 a	0.028	-55.81 ab
G2	0.480	0.052	0.230	-52.08 b	0.023	-56.01 c	0.117	-75.63 c	0.014	-73.11 c
Y3	0.430	0.049	0.187	-56.51 b	0.019	-60.52 c	0.083	-80.70 c	0.011	-77.05 c

量分别比对照降低 75.63%、80.70%。干质量的降幅与鲜质量类似。以上表明, 热胁迫导致番茄砧木幼苗的鲜质量和干质量降低, 强耐高温种质 G3、Q2、N3 的降幅比高温高敏感种质 G2、Y3 小, 生

物量增长受抑制程度相对较小。

## 2.5 热胁迫对番茄砧木幼苗叶片 MDA 和游离脯氨酸含量的影响

从图 2、3 可以看出, 热胁迫导致番茄砧

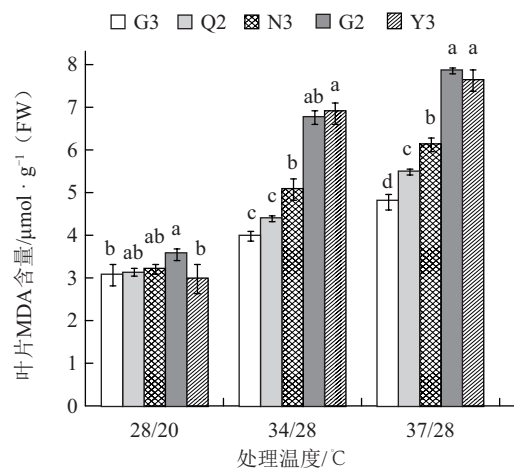


图2 不同温度处理对番茄砧木幼苗叶片MDA含量的影响  
同一温度处理图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下图同。

木幼苗叶片的MDA含量和游离脯氨酸含量增加。亚高温(34℃/28℃)胁迫下,G3、Q2、N3的叶片MDA含量比对照(28℃/20℃)升高29.60%~50.10%,G2、Y3分别比对照升高89.99%、129.84%。高温(37℃/28℃)胁迫下,G3、Q2、N3的叶片MDA含量比对照升高55.41%~89.14%,G2、Y3分别比对照升高120.76%、154.75%。亚高温胁迫下,G3、Q2、N3的叶片游离脯氨酸含量比对照升高84.34%~125.58%,G2、Y3分别比对照升高8.75%、24.73%。高温胁迫下,G3、Q2、N3的叶片游离脯氨酸含量比对照升高226.40%~248.70%,G2、Y3

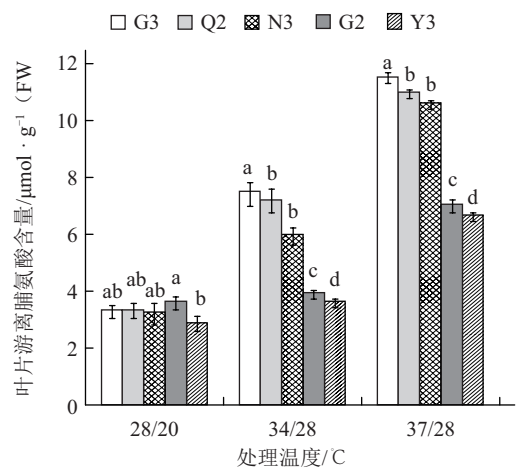


图3 不同温度处理对番茄砧木幼苗叶片游离脯氨酸含量的影响

比对照分别升高94.83%、130.74%。综合以上结果,强耐高温种质G3、Q2、N3叶片MDA含量的增幅比高温高敏感种质G2、Y3小,说明其因细胞膜脂过氧化引起伤害相对较轻;叶片游离脯氨酸含量增幅大,说明其细胞调节渗透能力相对较强。

2.6 番茄砧木幼苗热害指数与生长生理指标的相关性

分别对亚高温(34℃/28℃)、高温(37℃/28℃)胁迫下番茄砧木幼苗的热害指数及生长生理指标的测定值进行相关性分析。结果显示(表8、9),热害指数分别与株高、叶片MDA含量呈极显著正相关,与叶片SPAD值、茎粗、全株鲜质

表8 亚高温(34℃/28℃)胁迫下番茄砧木幼苗的热害指数与生长生理指标的相关性

指标	热害指数	叶片SPAD值	株高	茎粗	全株鲜质量	全株干质量	叶片MDA含量	叶片游离脯氨酸含量
热害指数	1.000							
叶片SPAD值	-0.566*	1.000						
株高	0.956**	-0.772*	1.000					
茎粗	-0.677*	-0.213*	-0.442*	1.000				
全株鲜质量	-0.832*	0.222	-0.741*	0.813*	1.000			
全株干质量	-0.825*	0.316	-0.778*	0.711*	0.983**	1.000		
叶片MDA含量	0.983**	-0.698*	0.985**	-0.550	-0.771	-0.778	1.000	
叶片游离脯氨酸含量	-0.974**	0.709*	-0.976**	0.534	0.741	0.741	-0.997**	1.000

注: \*表示在0.05水平上显著相关, \*\*表示在0.01水平上极显著相关, 下表同。

量、全株干质量呈显著负相关,与叶片游离脯氨酸含量呈极显著负相关。以上说明,可用以上7项生长生理指标对番茄砧木幼苗的耐热性进行综合评价。

2.7 番茄砧木种质耐热性综合评价

用与热害指数显著相关的7项生长生理指标进行隶属函数分析,根据隶属函数值的平均值大小对供试种质的耐热性进行排序。结果显示,供试种

表9 高温 (37 °C/28 °C) 胁迫下番茄砧木幼苗的热害指数与生长生理指标的相关性

指标	热害指数	叶片 SPAD 值	株高	茎粗	全株鲜质量	全株干质量	叶片 MDA 含量	叶片游离脯氨酸含量
热害指数	1.000							
叶片 SPAD 值	-0.904*	1.000						
株高	0.977**	-0.951**	1.000					
茎粗	-0.838*	0.575*	-0.747*	1.000				
全株鲜质量	-0.778*	0.524	-0.760*	0.832*	1.000			
全株干质量	-0.781*	0.521	-0.758*	0.846*	1.000**	1.000		
叶片 MDA 含量	0.991**	-0.941**	0.993**	-0.764	-0.749	-0.748	1.000	
叶片游离脯氨酸含量	-0.988**	0.870*	-0.968**	0.890	0.834	0.838	-0.970**	1.000

表10 亚高温 (34 °C/28 °C) 胁迫下番茄砧木种质耐热性隶属函数分析

砧木种质编号	隶属函数值								耐热性排序
	叶片 SPAD 值	株高	茎粗	全株鲜质量	全株干质量	叶片 MDA 含量	叶片游离脯氨酸含量	平均值	
G3	1.000	1.000	0.293	0.785	0.952	1.000	1.000	0.861	1
N3	0.000	0.484	1.000	1.000	1.000	0.621	0.614	0.674	2
Q2	0.600	0.690	0.566	0.453	0.376	0.863	0.932	0.640	3
G2	0.287	0.000	0.000	0.143	0.104	0.039	0.081	0.093	4
Y3	0.098	0.007	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	5

表11 高温 (37 °C/28 °C) 胁迫下番茄砧木种质耐热性隶属函数分析

砧木种质编号	隶属函数值								耐热性排序
	叶片 SPAD 值	株高	茎粗	全株鲜质量	全株干质量	叶片 MDA 含量	叶片游离脯氨酸含量	平均值	
G3	1.000	1.000	0.600	0.815	0.792	1.000	1.000	0.887	1
N3	0.265	0.531	1.000	1.000	1.000	0.566	0.803	0.738	2
Q2	0.787	0.706	0.857	0.367	0.384	0.772	0.884	0.680	3
G2	0.090	0.050	0.095	0.061	0.064	0.000	0.072	0.062	4
Y3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.011	5

质在亚高温 (34 °C/28 °C) 和高温 (37 °C/28 °C) 胁迫下的耐热性排序相同 (表 10、11), 强耐高温 (HR) 种质 G3、N3、Q2 排序第 1~3 位, 与亚高温胁迫的热害指数排序结果一致。以上说明, 可以通过幼苗生长生理指标隶属函数分析, 对番茄砧木种质的耐热性进行评价。

### 3 讨论与结论

番茄种子萌发的适宜温度为 25~30 °C, 超过 30 °C 会抑制番茄种子的萌发, 降低种子活力 (钱春梅等, 2002)。付丽军等 (2017) 认为耐热性强的黄瓜种子在高温下仍能保持较高的种子活力和发芽率, 出苗更整齐, 幼苗健壮。本试验结果表明, 番茄砧木种质的种子发芽率随着温度升高而明显降低, 34 °C 条件下, 大部分种质发芽率降至 50% 以下, 37 °C 条件下的发芽率降至 24% 以下, 40 °C 条

件下的发芽率降至 0, 部分砧木种质对 34~37 °C 高温有一定程度的耐受力。

作物在热胁迫下, 耐热品种能保持较高的叶绿素含量, 不耐热品种的叶绿素合成受阻或降解, 叶绿素含量降低, 光合作用下降, 影响植株正常生长 (马晓娣等, 2004; 张冉, 2017)。植株热害指数是衡量作物受热害程度的常用表观指标, 热害指数越大, 作物越不耐热 (宋敏丽等, 2012; 但忠等, 2016)。本试验根据幼苗热害指数, 筛选出强耐高温的番茄砧木种质 3 份, 中耐高温或耐高温的种质 5 份。试验结果表明, 热胁迫使番茄砧木幼苗叶片叶绿素含量降低, 高温比亚高温处理的下降幅度大, 强耐高温种质的株高增幅、茎粗降幅和鲜干质量降幅比高温敏感种质小, 幼苗徒长和生物量增长受抑制程度相对较小。

植物细胞膜系统对逆境响应敏感, 温度过高使

细胞膜透性增大,造成超氧自由基等活性氧大量积累(张佳平等,2016;胡能兵等,2018;Ozturk et al.,2020),氧化胁迫会引起膜脂发生过氧化和脱脂化作用,膜结构被破坏,使膜脂过氧化产物MDA含量增加,从而导致植株代谢紊乱(聂庆娟等,2007;崔萌等,2016;Balyan et al.,2020)。植物在逆境条件下,游离脯氨酸积累,提高了植物对逆境的抗性及其适应性,抗逆性强的游离脯氨酸积累量大(欧阳敦君和张鸽香,2016;周桂英等,2016)。叶片MDA和游离脯氨酸含量可作为番茄、豇豆的耐热性判定指标(尹贤贵等,2001)。本试验结果显示,热胁迫导致番茄砧木幼苗叶片的MDA含量和游离脯氨酸含量增加,强耐高温种质的MDA含量增幅比高温高敏感种质小,游离脯氨酸含量增幅则比高温高敏感种质大,说明强耐高温种质因细胞膜脂过氧化引起伤害相对较轻,细胞调节渗透能力相对较强。

胡能兵等(2018)在辣椒耐热性上的研究显示,热害指数与植株生长、MDA含量等指标具有相关性。本试验结果表明,番茄砧木幼苗的热害指数与株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量和叶片SPAD值、MDA含量、游离脯氨酸含量等生长生理指标具有显著相关性,可通过隶属函数分析对种质的耐热性强弱进行评价。

综合本试验结果,热胁迫抑制番茄砧木种子萌发,随着温度升高种子发芽率明显降低。34℃条件下,除N3外其余种质的种子发芽率均降至50%以下;37℃条件下的种子发芽率均降至24%以下,40℃条件下的种子发芽率均为0。亚高温(34℃/28℃)和高温(37℃/28℃)胁迫下,种质G3、N3、Q2均表现强耐高温(HR),种质A1、Q3、Q4、Q5、Y4表现中耐高温(MR)或耐高温(R)。幼苗热害指数与株高、叶片MDA含量呈极显著正相关,与叶片SPAD值、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、叶片游离脯氨酸含量呈显著或极显著负相关。利用以上7项生长生理指标,通过隶属函数分析对供试种质的耐热性进行综合评价,种质G3、N3、Q2的耐热性排序居前3位,与亚高温胁迫下幼苗热害指数排序结果一致。种质G3、N3、Q2强耐高温,可作为选育耐热番茄砧木的骨干材料。

## 参考文献

- 安凤霞,李景富,许向阳.2005.番茄耐热性研究现状.东北农业大学学报,23(4):507-511.
- 崔萌,魏娟娟,苏晓星,邓子贤,潘宇,李金华,苏承刚,张兴国.2016.高温对豇豆叶片细胞膜脂过氧化和蛋白质表达的影响.西南大学学报(自然科学版),38(4):21-27.
- 但忠,苏银玲,木万福,袁建民,杨龙,李易蓉.2013.欧洲型黄瓜耐热性综合评价及耐热种质的筛选.北方园艺,23(22):49-52.
- 但忠,木万福,龙洪进,苏银玲,杨长楷,杨龙,麻继仙,李易蓉.2016.不同欧洲型黄瓜苗期耐热性综合评价.热带作物学报,37(12):2312-2318.
- 董灵迪,石琳琪,郭敬华.2010.高温逆境下嫁接番茄生长发育及耐热性研究.河北农业大学学报,33(1):27-29.
- 范双喜,王绍辉.2005.高温逆境下嫁接番茄耐热特性研究.农业工程学报,21(增刊):60-63.
- 付丽军,李玉华,李聪晓,苏胜宇,岳瑾.2017.高温对唐山秋瓜种子萌发的影响及耐热性鉴定指标初探.种子,36(10):87-90.
- 胡能兵,庞丹丹,隋益虎,舒英杰,何克勤,朱小妹.2018.14种辣椒对高温胁迫的生理响应及抗热性评价.浙江农业学报,30(7):1168-1174.
- 金春燕,郭世荣,朱龙英,朱为民.2011.高温对番茄种子萌发及早期幼苗生长和抗氧化系统的影响.上海农业学报,27(2):92-95.
- 李合生,孙群,赵世杰.2000.植物生理生化实验原理和技术.北京:高等教育出版社.
- 刘祖祺.1994.植物抗性生理学.北京:中国农业出版社.
- 马宝鹏.2013.辣椒耐热性鉴定体系的建立及高温胁迫下花药基因表达差异的研究(硕士论文).杨凌:西北农林科技大学.
- 马晓娣,彭惠茹,汪矛,王丽,孙其信.2004.作物耐热性的评价.植物学通报,56(4):411-418.
- 毛胜利,杜永臣,王孝宣.2001.番茄耐热育种研究进展.园艺学报,45(51):655-660.
- 聂庆娟,孟朝,梁海永,孟庆瑞,李彦慧.2007.低温胁迫对4种常绿阔叶植物膜脂过氧化及保护酶活性的影响.植物研究,34(5):578-581.
- 欧阳敦君,张鸽香.2016.不同种源流苏幼苗的耐热性评价.东北林业大学学报,44(10):17-21.
- 彭勇政,刘智媛,朱晓非,杜习武,叶康,陆燕青,秦俊,曾丽.2019.5个月季品种高温处理后生理指标变化及其耐热性评价.上海交通大学学报(农业科学版),37(5):53-58.
- 钱春梅,伍贤进,陈玲,蒋昌华.2002.高温胁迫对番茄种子萌发的影响.种子,67(5):20,89.
- 宋敏丽,温祥珍,李亚灵,张刘英,韩亚平,王光.2012.六个番茄品种的耐热性鉴定.北方园艺,12(21):5-7.
- 王冬梅.2003.番茄耐热性鉴定方法的研究及其种质资源的筛选鉴定(硕士论文).哈尔滨:东北农业大学.
- 魏爽,张松,薄凯亮,王伟平,苗晗,董邵云,顾兴芳,张圣平.



2019. 黄瓜核心种质幼苗耐热性评价及 GWAS 分析. 植物遗传资源学报, 20 (5): 1223-1231.
- 尹贤贵, 罗庆熙, 王文强, 张赞, 潘光辉, 杨琦凤, 尹诗麟. 2001. 番茄耐热性鉴定方法研究. 西南农业学报, 45 (2): 62-65.
- 张富存, 张波, 王琴, 杨再强, 张静. 2011. 高温胁迫对设施番茄光合作用特性的影响. 中国农学通报, 27 (28): 211-216.
- 张佳平, 李丹青, 聂晶晶, 夏宜平. 2016. 高温胁迫下芍药的生理生化响应和耐热性评价. 核农学报, 30 (9): 1848-1856.
- 张冉. 2017. 茄子耐热性苗期指标的筛选及耐热种质鉴定 (硕士论文). 合肥: 安徽农业大学.
- 周桂英, 王四清, 许建新, 陈卿然, 马川. 2016. 8 种大花蕙兰耐热性指标筛选及其评价. 安徽农业科学, 44 (16): 20-22, 34.
- Balyan S, Rao S, Jha S, Bansal C, Das J R, Mathur S. 2020. Characterization of novel regulators for heat stress tolerance in tomato from indian sub-continent. Plant Biotechnology Journal, 24 (3): 902-917.
- Li S J, Fu Q T, Chen L G, Huang W D, Yu D Q. 2011. *Arabidopsis thaliana* WRKY25, WRKY26, and WRKY33 coordinate induction of plant thermotolerance. Planta, 233: 1237-1252.
- Ozturk K, Saglam A, Kadioglu A. 2020. Heliotropium thermophilum, an extreme heat tolerant species, promises plants about adaptation to high soil temperature conditions. Physiology and Molecular Biology of Plants: an International Journal of Functional Plant Biology, 26 (3): 525-535.
- Wang B, Zhong Z, Wang X, Han X, Yu D, Wang C, Song W, Zheng X, Chen C, Zhang Y. 2020. Knockout of the *Osnac006* transcription factor causes drought and heat sensitivity in rice. International Journal of Molecular Sciences, 21 (7): 2288.

## Evaluation of Tomato Rootstock Heat Resistance and Studies on Its Physiological Response to Heat Stress

TIAN Maoyan, XIANG Tingying, ZHONG Chuan, WANG Peng, YANG Yanjuan, YU Wenjing\*

(College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** In southern China, tomato is susceptible to abnormal high temperature in late spring cultivation and early autumn cultivation. Tomato heat resistance can be improved by grafting cultivation with heat-resistant rootstock. In order to screen the germplasm resources of tomato rootstock with strong heat resistance, this study conducted heat stress treatment on 20 tomato rootstock seeds and seedlings, and evaluated the heat resistance of these rootstock germplasm according to the heat damage phenotype and physiological indexes of seedling growth. The results showed that heat damage had restrained the seed germination of tomato rootstock. Along with the temperature rising, germination rate was significantly reduced. The germination rate of rootstock seeds mostly dropped to below 50% at 34 °C, below 23% at 37 °C, and to 0 at 40 °C. 'G3', 'N3' and 'Q2' showed strong high temperature resistance (HR) under subhigh temperature (34 °C/28 °C) and high temperature (37 °C/28 °C) stress, while 'A1', 'Q3', 'Q4', 'Q5' and 'Y4' showed moderate high temperature resistance (MR) or high temperature resistance (R). The seedling heat damage index was extremely positively correlated with plant height and MDA content in leaves, and significantly or extreme significantly negatively correlated with SPAD value, stem diameter, fresh weight and dry weight of the whole plant, and free proline contents of leaves. According to the above 7 growth physiological indexes, the heat resistance of these tested germplasm was comprehensively evaluated by subordinate function value method. And the heat resistance of 'G3', 'N3' and 'Q2' was ranked from 1-3, Which was consistent with the heat damage indexes of seedlings under sub-high temperature stress. In summary, 'G3', 'N3' and 'Q2' were strong heat tolerant germplasm resources, and could be used as backbone material for selective breeding of heat-resistant tomato rootstocks.

**Keywords:** tomato; rootstock; heat resistance; physiological response