

热激处理对棉花种子萌发及幼苗生长发育的影响

王小榕, 刘玉杰, 马汇然, 向蕾婷, 谢冉, 赵青豪, 屠小菊, 周仲华, 刘爱玉, 汪启明*

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要: 为了探索热激处理对棉花种子萌发及幼苗生长发育的影响, 在不同时期(种子吸胀期前、吸胀期和萌动期)、不同热激温度(39 °C、42 °C、45 °C)和不同热激时间(4 h、8 h、12 h、16 h)条件下进行试验, 测定发芽率、发芽势、发芽指数、株高、根体积、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重、地下部干重及SPAD值。结果表明, 不同时期的热激处理对种子萌发及幼苗生长发育的影响最大, 处理温度及处理时间影响较小。吸胀期前热激处理的发芽率(89.86%)显著高于吸胀期及萌动期; 吸胀期前与萌动期热激处理促进地上部生长, 抑制地下部生长; 吸胀期热激处理表现为抑制株高生长, 但促进根系发育, 同时增加生物量积累。通过主成分分析对10个测定指标进行综合评价, 其中, 萌动期、45 °C、8 h处理组合最优。

关键词: 棉花; 热激; 萌发; 生长发育; 主成分分析

中图分类号: S562

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)01-0020-09

Effects of Heat Shock Treatment on Cotton Seed Germination and Seedling Growth

WANG Xiaorong, LIU Yujie, MA Huiran, XIANG Leiting, XIE Ran, ZHAO Qinghao, TU Xiaoju, ZHOU Zhonghua, LIU Aiyu, WANG Qiming*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To investigate the effects of heat shock treatment on cotton seed germination and seedling growth and development, experiments were conducted under different treatment stages (before imbibition, during imbibition, and at the germination stage), various heat shock temperatures (39 °C, 42 °C, and 45 °C), and different heat shock durations (4 h, 8 h, 12 h, and 16 h). The measured indicators included germination rate, germination potential, germination index, plant height, root volume, aboveground fresh weight, underground fresh weight, aboveground dry weight, underground dry weight, and SPAD value. The results showed that the timing of heat shock treatment had the most significant impact on seed germination and seedling growth and development, while the effects of treatment temperature and duration were relatively minor. The germination rate (89.86%) under heat shock treatment before imbibition was significantly higher than that under treatments during imbibition and at the germination stage. Heat shock treatments before imbibition and at the germination stage promoted aboveground growth but inhibited underground growth; in contrast, heat shock treatment during imbibition suppressed plant height growth while enhancing root development and increasing biomass accumulation. Principal component analysis (PCA) was employed to comprehensively evaluate the 10 measured indicators, revealing that the optimal treatment combination was heat shock applied at the germination stage, 45 °C, and for 8 h.

Key words: Cotton; Heat shock; Seed germination; Seedling development; Principal component analysis

夏播短季栽培棉花集中开花结铃的时期为

7—8月底, 而此时非预期的极端高温频繁发生, 35 °C以上的高温持续10~15 d以上, 极端高温天气会严重影响棉花正常发育, 导致生殖过程受阻, 蕾、花、幼小棉铃极易脱落, 成铃率和皮棉产量降低^[1-3]。棉花早期的热激处理会使棉花可耐受更高的温度, 从而减少棉花的蕾铃脱落数, 提高棉花的产量^[4]。因为在遭受短时(几小时、几分钟、甚

收稿日期: 2025-03-21

基金项目: 湖南省棉花产业技术体系栽培与良种繁育岗位专家项目(湘农发[2022]31号); 湖南省农业专项(湘财建指[2023]98号)

作者简介: 王小榕(1999-), 女, 在读硕士, 主要从事棉花栽培研究。

通信作者: 汪启明, E-mail: wqmqmx21@126.com

至几秒钟)热激后,生物体内产生的一系列反应,使其具有了一定程度抵御更高温度(致死温度)的能力^[5-6]。植物热激效应可在种子、幼苗、根、茎、叶等不同部位中发生,甚至在发育的种子、吸胀种子的糊粉层和萌发的胚中都能发生^[7]。国内外关于棉花早期热激处理提高棉花抗性的研究较多,杨国正等^[6]研究表明,在鄂棉16的萌动期、鄂抗棉3号的一叶期进行热激处理,可降低高温期棉株的蕾铃脱落率达1.7%~3.0%,表明早期的热激处理效应可以延续至棉花生育中期。但处理时期集中于萌动期及子叶期、一叶期等,处理时间在4 h以内^[8-12],而对种子的吸胀期前、吸胀期及处理时间超过4 h的研究较少。因此,本研究通过对吸胀期前、吸胀期、萌动期的种子进行不同温度和时间的热激处理,探究热激处理对棉花种子萌发及幼苗生长发育的影响,利用主成分分析方法选出最佳热激处理组合,进一步完善热激处理对棉花生长发育影响的理论体系。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料LAT-69棉花种子,为2022年收获的毛籽,由湖南农业大学棉花研究所提供。育苗基质的有机质含量 $\geq 35\%$ 。塑料育苗盘规格为53 cm \times 27 cm \times 5 cm,共50孔,孔深4.5 cm。

1.2 试验设计

试验于2022年在湖南农业大学盆栽场地进行。

将干种子(吸胀期前)、浸泡水中的种子(吸胀期)和浸泡12 h后(萌动期)的种子分别用培养箱进行热激处理,3个处理时期分别记作A₁、A₂、A₃,热激温度设3个水平:39℃、42℃、45℃,分别记作B₁、B₂、B₃,热激时间设4个水平:4 h、8 h、12 h、16 h,分别记作C₁、C₂、C₃、C₄;以不进行任何处理的种子作

为对照(CK)。

育苗基质用48%的多菌灵进行消毒,每孔播1粒种子,每盘50粒,每处理播3盘,即重复3次,每天用喷壶定量浇湿。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 发芽率、发芽势、发芽指数

发芽率= $G/N \times 100\%$,发芽势= $G_0/N \times 100\%$,发芽指数= $\sum G_t \cdot D_t$

式中, G 为正常发芽种子数, N 为种子总数, G_0 为25℃第四天的发芽种子数, G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为 G_t 对应种子出苗经历的时间(d)。

1.3.2 形态指标的测定

棉花幼苗生长至三叶一心期,每盘选取生长基本一致的5株,测量株高(用刻度尺测量基质表面到幼苗生长顶端的距离)。从基质中取出棉花幼苗,避免根毛及根组织断裂,用超纯水清洗根、茎、叶,吸水纸吸干幼苗表面的水分。将幼苗分成地上部和地下部,分别用电子天平测其鲜重。根体积用排水法测量。将地上部和地下部分别装入牛皮纸袋,置于烘箱中105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重,称量地上部干重及地下部干重。

1.3.3 SPAD值的测定

SPAD值(相对叶绿素含量)利用SPAD-502 Plus型手持便携式测定仪进行测定。

1.4 数据处理与分析

运用Excel 2010进行数据整理并绘图,运用IBM SPSS Statistics 23进行方差分析、差异显著性检验、相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对棉花种子萌发的影响

由表1可知,3个处理时期中,吸胀期前处理的棉花种子发芽率为89.86%,显著高于吸胀期及

表1 不同热激处理对棉花种子发芽指标的影响

Table 1 Effects of different heat shock treatments on germination indexes of cotton seeds

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index
A ₁	89.86a	53.75a	21.90a
A ₂	49.56b	34.64b	20.13a
A ₃	51.42b	52.39a	14.03b
B ₁	66.58a	54.47a	20.50a
B ₂	69.29a	53.17a	20.55a
B ₃	54.97b	33.14b	15.01b
C ₁	65.39a	47.37a	19.42a

续表 1

Table 1 Continued

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index
C ₂	64.88a	48.63a	19.04a
C ₃	63.80a	48.26a	18.58a
C ₄	60.38a	43.44a	17.71a
变异来源 Source of variation			
A	**	**	**
B	**	**	**
C	NS	NS	NS
A×B	**	NS	**
A×C	NS	NS	NS
B×C	NS	NS	NS
A×B×C	NS	NS	NS

注:小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,“NS”表示差异未达到显著水平,下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$); * and ** indicated significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively, NS indicated that the difference is not significant, the same below.

萌动期处理;吸胀期处理的发芽势分别比吸胀期前、萌动期处理低 35.55%、33.88%,差异显著;萌动期处理的发芽指数分别比吸胀期前、吸胀期处理低 35.94%、30.30%,差异显著。3 个温度处理中,45 °C 处理的 3 个萌发指标均显著低于 39 °C、42 °C 处理;其中发芽率和发芽指数随温度升高呈先升后降趋势,而发芽势随温度升高而降低。萌发指标在时间处理中均无显著差异,且 16 h 处理的萌发指标最差;其中发芽率和发芽指数随时间的增加而降低,而发芽势随时间的增加呈先升后降趋势。

变异来源中,处理时期及温度对 3 个萌发指标均达到极显著水平,处理时期和温度的交互作用对发芽率和发芽指数表现极显著,表明处理时期、温度以及两者之间的交互作用在种子萌发指标中发挥重要作用,能有效提高种子的萌发指标。

2.2 不同处理对棉花幼苗株高及根体积的影响

由表 2 可知,吸胀期前处理和萌动期处理的株高显著高于吸胀期处理,分别比吸胀期处理高 59.19%、57.11%;随处理温度升高株高呈先升后降趋势,42 °C 处理显著高于 39 °C、45 °C 处理;时间处理中,8 h 和 16 h 处理的株高显著高于 4 h、8 h 处理。在处理时期中,吸胀期处理的根体积分别比萌动期和吸胀期前处理高 59.24%、140.38%,差异显

表 2 不同热激处理对棉花株高及根体积的影响
Table 2 Effects of different heat shock treatments on cotton plant height and root volume

处理 Treatment	株高/cm Plant height	根体积/mL Root volume
A ₁	32.92a	1.04c
A ₂	20.68b	2.50a
A ₃	32.49a	1.57b
B ₁	28.64b	1.59a
B ₂	29.32a	1.72a
B ₃	28.13c	1.78a
C ₁	28.35b	1.60b
C ₂	29.25a	1.61b
C ₃	27.87b	1.94a
C ₄	29.30a	1.63ab
变异来源 Source of variation		
A	**	**
B	**	NS
C	**	**
A×B	**	NS
A×C	**	NS
B×C	**	NS
A×B×C	**	NS

著,表明与吸胀期前和萌动期处理相比,吸胀期处理显著促进地下部生长;温度处理中,根体积随处理温度增高而增加;时间处理中,12 h处理显著高于4 h和8 h处理,根体积随时间的增加表现为先升后降的趋势,表明12 h处理能有效促进棉花根系的生长。

变异来源中,处理时期和处理时间对株高及根体积的影响均表现为极显著;处理温度对株高的影响表现为极显著。各处理因素间的交互作用:处理时期和处理温度、处理时期和处理时间、处理温度和处理时间的交互作用以及处理时期、温度、时间三者的交互作用均对株高有极显著影响。表明不同时期的热激处理能够显著促进棉花幼苗株高的生长,处理时期和处理时间的合理搭配可有效促进根系发育,增加根体积。

2.3 不同处理对棉花幼苗鲜重及干重的影响

由表3可知,在地上部鲜重中,吸胀期前处理分别比吸胀期处理和萌动期处理低17.27%、24.81%,差异显著;温度处理中,地上部鲜重随温

度增加而增大,其中39℃处理显著低于42℃、45℃处理;时间处理中,16 h>8 h>12 h>4 h,其中8 h和16 h处理显著高于4 h和12 h处理。在地下部鲜重中,吸胀期前处理分别比吸胀期、萌动期处理低48.07%、43.03%,差异显著;温度处理中,地下部鲜重随温度增加而增大,45℃处理显著高于39℃处理;时间处理中,地下部鲜重随处理时间的增加呈先升后降趋势,其中12 h处理值最大为1.54 g。在地上部干重中,萌动期处理分别比吸胀期前、吸胀期处理高29.57%、14.62%,差异显著;温度处理中,地上部干重随温度的升高而增加,45℃处理达到最大值为1.37 g;时间处理中,8 h>16 h>12 h>4 h处理,处理间均无显著性差异,8 h处理值最大为1.41 g。地下部干重中,吸胀期前处理显著低于萌动期和吸胀期处理;温度处理中,地下部干重随温度的升高而增加,39℃处理显著低于另两个处理;时间处理中,12 h>4 h>8 h=16 h,处理间均无显著差异。

表3 不同热激处理对棉花幼苗的鲜重及干重的影响

Table 3 Effects of different heat shock treatments on fresh weight and dry weight of cotton seedlings

处理 Treatment	地上部鲜重 Aboveground fresh weight	地下部鲜重 Underground fresh weight	地上部干重 Aboveground dry weight	地下部干重 Underground dry weight
A ₁	5.03c	0.94c	1.15b	0.17b
A ₂	6.08b	1.81a	1.30b	0.22a
A ₃	6.69a	1.65b	1.49a	0.22a
B ₁	5.57b	1.43b	1.23a	0.19c
B ₂	5.97a	1.46ab	1.33a	0.20ab
B ₃	6.23a	1.52a	1.37a	0.22a
C ₁	5.41b	1.38b	1.24a	0.20a
C ₂	6.36a	1.44ab	1.41a	0.19a
C ₃	5.54b	1.54a	1.27a	0.22a
C ₄	6.41a	1.52a	1.32a	0.19a
变异来源 Source of variation				
A	**	**	**	**
B	**	*	NS	**
C	**	**	NS	NS
A×B	NS	**	*	**
A×C	**	NS	NS	NS
B×C	**	**	NS	NS
A×B×C	**	**	NS	NS

变异来源分析表明,不同处理因素对棉花地上部和地下部生物量积累具有显著影响。处理时期对地上部及地下部的鲜重、干重的影响均达到

极显著水平;处理温度对地上部鲜重的影响表现为极显著,对地下部鲜重的影响表现为显著;处理时间对地上部鲜重及地下部鲜重的影响表现为

极显著。处理时期和温度的交互作用对地下部鲜重和干重的影响表现为极显著,对地上部干重的影响表现为显著;处理时期和时间的交互作用对地上部鲜重的影响表现为极显著;处理温度与时间的交互作用以及三因素交互作用对地上部和地下部鲜重均产生极显著影响。

2.4 不同处理对棉花幼苗 SPAD 值的影响

SPAD 值是指单位面积的相对叶绿素含量,对棉株光合作用与吸收营养的效率有显著影响。由表 4 可知,吸胀期处理的 SPAD 值分别比萌动期及吸胀期前处理低 10.81%、11.39%,差异显著;温度处理中,42 °C>39 °C>45 °C 处理,45 °C 处理的 SPAD 值比 42 °C 低 1.64%,差异显著;时间处理中,SPAD 值随时间的变化表现为先升后降的趋势,8 h 处理值最大为 37.11,12 h 处理次之。变异来源中,除处理时间,各处理因素及因素间的交互作用对 SPAD 值的影响均表现为极显著,表明不同时期的热激处理可以有效提高棉花叶片的 SPAD 值。

2.5 不同处理条件下棉花幼苗生长发育水平的综合评价

对不同热激处理下棉花种子萌发及幼苗生长发育的 10 个测定指标进行相关性分析,结果见表 5。相关系数绝对值越大,表示相关性越显著,经 KMO 检验和 Bartlett 检验,KMO 值为 0.662>0.6,说明本试验结果适合进行主成分分析。

根据累计贡献率>85%的原则,共提取了 3 个主成分,并将 10 个单项指标转化为 3 个主成分(表 6)。前 3 个主成分的累计贡献率高达 89.49%,具有较强的代表性,可以反映系统内的变异信息^[13-14]。

表 4 不同热激处理对棉花幼苗 SPAD 值的影响
Table 4 Effects of different heat shock treatments on SPAD values of cotton seedlings

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value
A ₁	38.11a
A ₂	33.99b
A ₃	38.36a
B ₁	36.93ab
B ₂	37.10a
B ₃	36.49b
C ₁	36.77a
C ₂	37.11a
C ₃	36.85a
C ₄	36.65a
变异来源 Source of variation	
A	**
B	**
C	NS
A×B	**
A×C	**
B×C	**
A×B×C	**

其中,第一主成分主要贡献指标为株高、地下部鲜重、根体积和 SPAD 值,第二主成分主要贡献指标为地上部鲜重、地上部干重和地下部干重,第三主成分主要贡献指标为发芽率、发芽势以及发芽指数。通过表征棉花幼苗生长状态的三个主成

表 5 不同热激处理下棉花幼苗测定指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of cotton seedling indexes under different heat shock treatments

指标 Index	株高 Plant height	地上部鲜重 Aboveground fresh weight	地下部鲜重 Underground fresh weight	根体积 Root volume	地上部干重 Aboveground dry weight	地下部干重 Underground dry weight	SPAD 值 SPAD value	发芽势 Germination potential	发芽率 Germina- tion rate
地上部鲜重	0.074								
地下部鲜重	-0.520**	0.613**							
根体积	-0.845**	0.310*	0.831**						
地上部干重	0.219	0.908**	0.482**	0.180					
地下部干重	0.447**	0.611**	0.359*	-0.077	0.723**				
SPAD 值	0.855**	<0.001	-0.475**	-0.766**	0.115	0.424**			
发芽势	0.359*	-0.421**	-0.497**	-0.467**	-0.303*	-0.168	0.339*		
发芽率	0.488**	-0.566**	-0.751**	-0.685**	-0.446**	-0.378*	0.412**	0.762**	
发芽指数	-0.045	-0.507**	-0.336*	-0.170	-0.455**	-0.543**	-0.050	0.719**	0.778**

表6 不同热激处理下棉花幼苗测定指标的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of determination indices of cotton seedlings under different heat shock treatments

指标 Index	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
株高	0.933	0.243	0.127
地上部鲜重	-0.128	0.89	-0.254
地下部鲜重	-0.697	0.584	-0.235
根体积	-0.933	0.201	-0.187
地上部干重	0.019	0.931	-0.168
地下部干重	0.331	0.799	-0.273
SPAD值	0.901	0.177	0.073
发芽势	0.498	-0.385	0.737
发芽率	0.327	-0.128	0.852
发芽指数	-0.085	-0.328	0.913
特征值	4.78	3.11	1.06
贡献率/%	47.84	31.06	10.59
累计贡献率/%	47.84	78.90	89.49

分的综合得分对棉花生长发育水平进行综合评价(表7),其中A₃B₃C₂(萌动期、45℃、8h)处理的综合得分为0.874,排名第一,A₃B₁C₄(萌动期、39℃、16

h)处理次之。

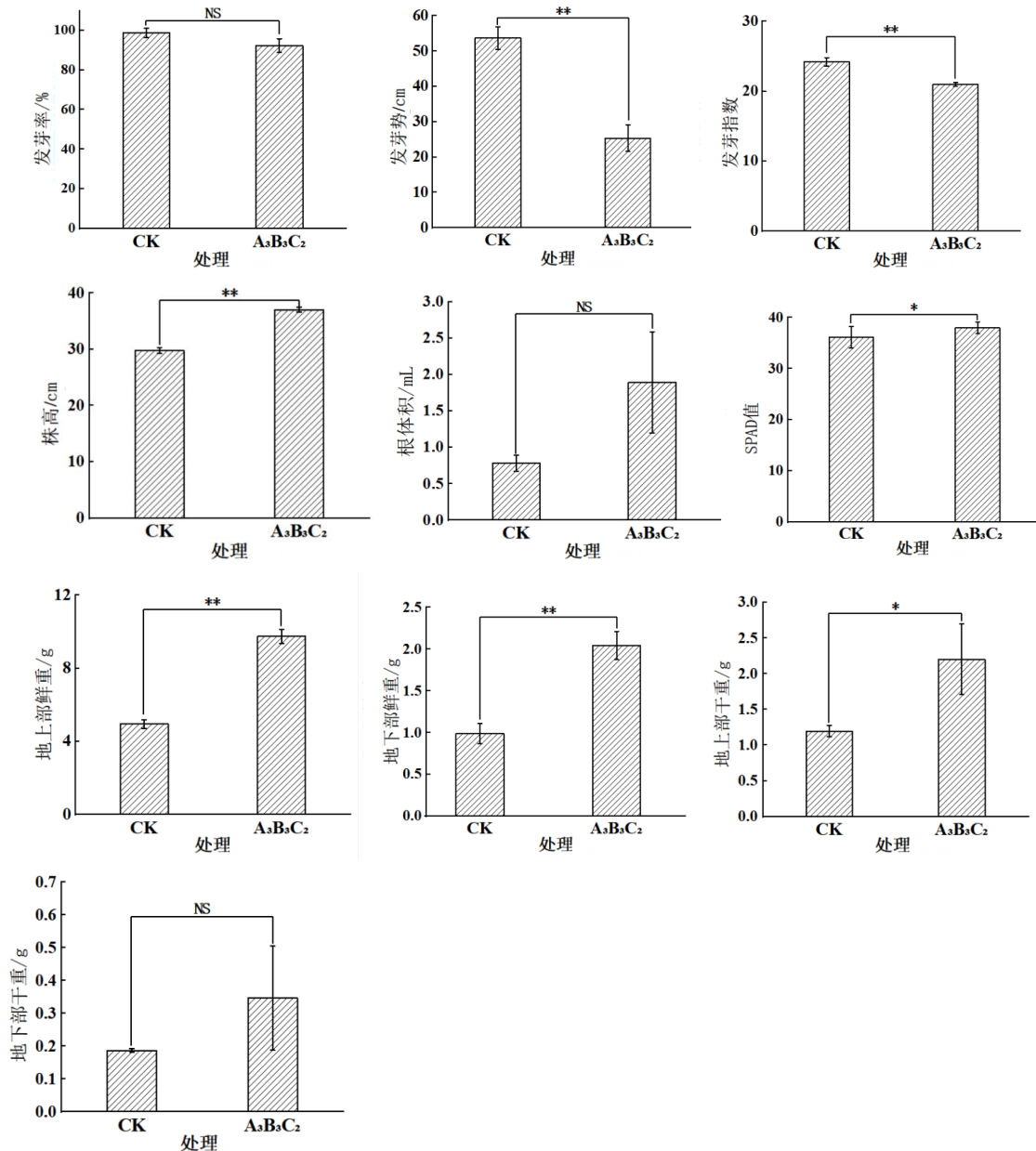
对综合得分排名第一的处理A₃B₃C₂(萌动期、45℃、8h)与对照(CK)进行了10个生长指标的对

表7 不同热激处理下棉花幼苗测定指标的综合得分及排名
Table 7 Comprehensive scores and rankings of cotton seedlings under different heat shock treatments

处理 Treatment	综合得分 Composite score	排名 Ranking	处理 Treatment	综合得分 Composite score	排名 Ranking
A ₁ B ₁ C ₁	0.314	23	A ₂ B ₂ C ₃	0.279	27
A ₁ B ₁ C ₂	0.408	18	A ₂ B ₂ C ₄	0.218	33
A ₁ B ₁ C ₃	0.425	17	A ₂ B ₃ C ₁	0.275	28
A ₁ B ₁ C ₄	0.394	20	A ₂ B ₃ C ₂	0.378	22
A ₁ B ₂ C ₁	0.302	25	A ₂ B ₃ C ₃	0.127	36
A ₁ B ₂ C ₂	0.400	19	A ₂ B ₃ C ₄	0.236	32
A ₁ B ₂ C ₃	0.494	13	A ₃ B ₁ C ₁	0.261	29
A ₁ B ₂ C ₄	0.500	12	A ₃ B ₁ C ₂	0.484	14
A ₁ B ₃ C ₁	0.386	21	A ₃ B ₁ C ₃	0.567	10
A ₁ B ₃ C ₂	0.448	16	A ₃ B ₁ C ₄	0.705	2
A ₁ B ₃ C ₃	0.453	15	A ₃ B ₂ C ₁	0.579	8
A ₁ B ₃ C ₄	0.695	3	A ₃ B ₂ C ₂	0.580	7
A ₂ B ₁ C ₁	0.239	31	A ₃ B ₂ C ₃	0.546	11
A ₂ B ₁ C ₂	0.288	26	A ₃ B ₂ C ₄	0.623	5
A ₂ B ₁ C ₃	0.207	34	A ₃ B ₃ C ₁	0.574	9
A ₂ B ₁ C ₄	0.303	24	A ₃ B ₃ C ₂	0.874	1
A ₂ B ₂ C ₁	0.252	30	A ₃ B ₃ C ₃	0.607	6
A ₂ B ₂ C ₂	0.161	35	A ₃ B ₃ C ₄	0.646	4

比分析。由图1可知, $A_3B_3C_2$ 处理在多个指标上表现出显著优势:株高、地上部鲜重和地下部鲜重均极显著高于CK;地上部干重和SPAD值均显著高于CK。尽管 $A_3B_3C_2$ 处理的发芽势和发芽指数极显著低于CK,但其发芽率仍达到92.33%,显著高于国家标准规定的棉花毛籽发芽率($\geq 70\%$)。此

外, $A_3B_3C_2$ 处理的根体积和地下部干重虽高于CK,但差异未达到显著水平。综合来看, $A_3B_3C_2$ 处理在促进棉花植株生长和生物量积累方面表现优异,尽管对发芽特性有一定抑制作用,但仍能满足生产要求,具有较高的应用潜力。



注:“*”和“**”分别表示在0.05和0.01水平上差异显著,“NS”表示差异未达到显著水平。

Note: * and ** indicated significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively, NS indicated that the difference is not significant.

图1 最佳热激处理组合与对照进行10个指标的对比分析

Fig. 1 Comparative analysis results of 10 indexes of optimal heat shock treatment combination and control

3 讨论

种子发芽过程受多种外界因素的影响。采用高温激活、干湿交替处理、化学物质处理等方法,

可有效地调节种子在萌发过程中生理生化反应的进程,有效地促进种子的萌发^[15]。热激处理中,不同处理时期对棉花种子萌发影响最大,其中吸胀期前处理的发芽率显著高于吸胀期及萌动期处

理,这可能是由于在吸胀期前,高温处理能够激活种子内部的抗氧化酶系统,增强种子抗逆性,同时促进赤霉素等相关激素的合成与释放,从而有效促进种子萌发。相比之下,吸胀期及萌动期处理的种子在热激处理过程中处于高热高湿环境,这种条件容易导致细胞膜系统损伤,造成细胞内电解质外渗,抑制种子的呼吸作用,导致吸胀期及萌动期处理的多数种子不能正常萌发^[16]。此外,热激处理的温度和时间对种子萌发具有显著影响。随着处理温度的升高和处理时间的延长,种子内部淀粉酶、蛋白酶等关键酶的活性逐渐降低,生理代谢活动受阻。当温度达到45℃且处理时间超过16h时,种子发芽率降为零,这可能是由于高温导致种子蛋白质变性、细胞膜系统破坏以及关键酶失活所致。

尽管针对热激处理对棉花生长发育的影响开展了大量研究,但由于试验材料和处理条件的差异,研究结果不尽相同。不同品种、同一品种的不同生育阶段、同一生育阶段的不同器官、同一器官的不同组织对热激处理的反应均有差异^[9,17]。本研究中吸胀期前与萌动期热激处理的结果表明,热激促进地上部生长,抑制地下部生长,这与杨国正^[8-9]等研究结论一致。而吸胀期热激处理表现出不同的效应:抑制株高生长但促进根系发育,同时增加生物量积累。根系是棉苗生长的基础,所谓“壮苗先壮根”;吸胀期热激处理的棉苗表现出生物量大而株高较矮的特征,表明棉苗健壮,这种形态特征是其增强抗逆能力的重要表现。陈于陇等^[10]研究表明,热激处理对棉花幼苗生长具有一定的抑制作用;在遭遇高温干旱条件时,各处理苗高增长速度较慢,但生物量增加速度较快。说明一定程度的逆境锻炼有助于棉花幼苗获得抵御逆境的能力。吸胀期热激处理的棉花幼苗生长规律验证了这一结论。

由于棉花种子萌发、幼苗生长、SPAD值等指标之间存在复杂的相互联系,比如吸胀期前热激处理在种子萌发指标中表现最优,但在幼苗生长指标中表现较差,因此在对10个测定指标进行评价时,需要采用更加系统、科学的方法进行综合评价。主成分分析法通过降维的方式,将多个相关指标转化为少数几个相互独立的综合指标,从而实现对复杂数据的有效综合评价,是一种科学且高效的评价方法^[18-19]。目前,主成分分析法已在多种作物的研究中得到广泛应用。在水稻^[20]、大麦^[21]、花生^[22]等作物中,主成分分析可以鉴定与评价作物种子萌发期耐冷性、抗旱性、抗倒伏性和耐盐碱能力^[23-26]。本研究在10个测定指标中提取出3个主成分进行综合评

价,萌动期、45℃、8h处理在综合评价中排名第一,通过其与对照(CK)进行对比分析,表明该处理能显著促进棉花幼苗的生长发育。

热激处理在实际农业生产中具有很大的应用潜力,特别是在应对极端高温天气时。在萌动期对种子进行热激处理,可以有效促进幼苗的生长发育,增强其对环境胁迫的耐受力,从而提升棉花的生长潜力。但其在实际应用中仍然面临一定的限制。萌动期热激处理对地下部的生长可能会产生一定的抑制作用,尤其是在长期应用时,这可能影响植株的最终产量。因此,在应用热激处理时,需要结合其他农业管理措施,如灌溉、施肥等来平衡热激对根系和地上部生长的影响,以实现最佳的效果。

4 结 论

热激处理的时期、温度和时间及其交互作用对棉花种子萌发、株高生长、根系发育、生物量积累及叶片叶绿素含量均具有显著影响。吸胀期前热激处理的发芽率(89.86%)显著高于吸胀期及萌动期处理;吸胀期前与萌动期热激处理促进地上部生长,抑制地下部生长;吸胀期热激处理表现为抑制株高生长但促进根系发育,同时增加生物量积累。通过主成分分析对10个测定指标进行综合评价,其中,萌动期、45℃、8h处理组合最优,表明该处理在促进棉花植株生长和生物量积累方面表现优异,尽管对发芽特性有一定抑制作用,但仍能满足生产要求,具有较高的应用潜力。

参考文献:

- [1] 王苗苗. 高温逆境对陆地棉雄性生殖系统的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [2] 向导, 杨明风, 张玲, 等. 高温热害对棉花蕾铃脱落的影响分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(21): 15-19.
XIANG D, YANG M F, ZHANG L, et al. Analysis of the effects of high temperature damage on cotton boll shedding[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(21): 15-19. (in Chinese)
- [3] PETTIGREW W T. The effect of higher temperatures on cotton lint yield production and fiber quality[J]. Crop Science, 2008, 48(1): 278-285.
- [4] 方丽平, 汪瑞清, 杨国正. 热激处理对棉花耐逆性的影响[J]. 棉花学报, 2009, 21(1): 46-50.
FANG L P, WANG R Q, YANG G Z. Effects of heat shock treatment on cotton stress tolerance[J]. Cotton Science, 2009, 21(1): 46-50. (in Chinese)
- [5] 杨国正. 热激蛋白研究概况[J]. 中国农学通报, 1997(5): 47-49.
YANG G Z. Research overview of heat shock proteins[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1997(5): 47-49. (in Chinese)
- [6] 杨国正, 张秀如, 孙湘宁, 等. 棉花早期热激处理与高温期蕾铃脱落关系的初步研究[J]. 棉花学报, 1997, 9(1): 36-40.

- YANG G Z, ZHANG X R, SUN X N, et al. Preliminary study on the relationship between early heat shock treatment and boll shedding during high temperature period in cotton[J]. *Cotton Science*, 1997, 9(1): 36-40. (in Chinese)
- [7] 邵玲, 陈向荣. 热激蛋白与植物的抗逆性[J]. *北方园艺*, 2005(3): 73-74.
SHAO L, CHEN X R. Heat shock proteins and plant stress resistance[J]. *Northern Horticulture*, 2005(3): 73-74. (in Chinese)
- [8] 杨国正, 展茗, 骆炳山. 热激等逆境处理对棉花幼苗根系生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 2006, 45(1): 39-43.
YANG G Z, ZHAN M, LUO B S. Effects of heat shock and other stress treatments on root growth of cotton seedlings[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006, 45(1): 39-43. (in Chinese)
- [9] 杨国正, 展茗, 骆炳山. 热激处理对棉花幼苗生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 2003, 42(5): 34-37.
YANG G Z, ZHAN M, LUO B S. Effects of heat shock treatment on cotton seedling growth[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003, 42(5): 34-37. (in Chinese)
- [10] 陈于陇, 宋学贞, 杨国正. 脱落酸和热激处理对棉花苗期生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(3): 459-461.
CHEN Y L, SONG X Z, YANG G Z. Effects of abscisic acid and heat shock treatment on cotton seedling growth[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(3): 459-461. (in Chinese)
- [11] 刘少卿. 不同棉花种质资源耐热性鉴定及热激效应分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [12] REDDY K R, HODGES H F, MCKINION J M. A comparison of scenarios for the effect of global climate change on cotton growth and yield[J]. *Plant Physiology*, 1997, 24(6): 707-713.
- [13] 王娟, 谷雪景, 赵吉. 羊草草原土壤酶活性对土壤肥力的指示作用[J]. *农业环境科学学报*, 2006(4): 934-938.
WANG J, GU X J, ZHAO J. The indicative role of soil enzyme activity on soil fertility in *leymus chinensis* grassland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(4): 934-938. (in Chinese)
- [14] 邵晶晶, 李鹏程, 郑苍松, 等. 盐胁迫对干播湿出棉花出苗率和苗期生长发育的影响[J]. *棉花学报*, 2023, 35(4): 288-301.
SHAO J J, LI P C, ZHENG C S, et al. Effects of salt stress on emergence rate and seedling growth of cotton under dry sowing and wet emergence conditions[J]. *Cotton Science*, 2023, 35(4): 288-301. (in Chinese)
- [15] 马金虎, 王宏富, 王玉国, 等. 高温老化对棉花种子发芽及生理特性影响的研究[J]. *棉花学报*, 2005, 17(1): 42-46.
MA J H, WANG H F, WANG Y G, et al. Effects of high temperature aging on cotton seed germination and physiological characteristics[J]. *Cotton Science*, 2005, 17(1): 42-46. (in Chinese)
- [16] 徐敏, 李憬霖, 叶福民, 等. 温湿度对棉花种子萌发的影响研究[J]. *农学学报*, 2022, 12(10): 10-14.
XU M, LI J L, YE F M, et al. Effects of temperature and humidity on cotton seed germination[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(10): 10-14. (in Chinese)
- [17] 李万九, 张秀如, 孙湘宁, 等. 棉花热激蛋白(HSP)的研究及其应用前景展望[J]. *棉花学报*, 1997, 9(1): 2-5.
LI W J, ZHANG X R, SUN X N, et al. Research on cotton heat shock proteins (hsp) and their application prospects[J]. *Cotton Science*, 1997, 9(1): 2-5. (in Chinese)
- [18] 张婷, 高颖, 王东, 等. 基于距离度量学习的棉花品质分类方法研究[J]. *中国棉花*, 2018, 45(8): 12-19.
ZHANG T, GAO Y, WANG D, et al. Research on cotton grade classification method based on distance metric learning[J]. *China Cotton*, 2018, 45(8): 12-19. (in Chinese)
- [19] 王洪博, 付媛媛, 杨鸿基, 等. 基于隶属函数法对不同基因型棉种萌发期抗氧化能力的综合评价[J]. *棉花学报*, 2021, 33(5): 393-403.
WANG H B, FU Y Y, YANG H J, et al. Comprehensive evaluation of antioxidant capacity of different genotype cotton seeds during germination based on membership function method[J]. *Cotton Science*, 2021, 33(5): 393-403. (in Chinese)
- [20] 游书梅, 曹应江, 郑家奎, 等. 73份亚洲水稻恢复系农艺性状的主成分与聚类分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(2): 250-256.
YOU S M, CAO Y J, ZHENG J K, et al. Principal component and cluster analysis of agronomic traits in 73 Asian rice restorer lines[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(2): 250-256. (in Chinese)
- [21] 谭琳元, 李先德. 基于主成分分析法的中国大麦产业发展影响因素实证分析[J]. *东北农业科学*, 2024, 49(3): 80-86.
TAN L Y, LI X D. Empirical analysis of influencing factors of barley industry development in china based on principal component analysis[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2024, 49(3): 80-86. (in Chinese)
- [22] 牟书靓, 李玉发, 牛海龙, 等. 基于主成分分析的花生种质资源苗期抗旱性鉴定与筛选[J]. *吉林农业科学*, 2015, 40(6): 26-30.
MOU S L, LI Y F, NIU H L, et al. Identification and screening of drought resistance in peanut germplasm resources at seedling stage based on principal component analysis[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(6): 26-30. (in Chinese)
- [23] 陈小凤, 黄如葵, 冯诚诚, 等. 苦瓜芽期耐冷性鉴定与评价[J]. *种子*, 2017, 36(1): 36-39.
CHEN X F, HUANG R K, FENG C C, et al. Identification and evaluation of cold tolerance at bud stage in bitter melon[J]. *Seed*, 2017, 36(1): 36-39. (in Chinese)
- [24] 何海旺, 武鹏, 林茜, 等. 基于主成分分析的5份香蕉种质抗旱性评价[J]. *种子*, 2017, 36(6): 67-71.
HE H W, WU P, LIN Q, et al. Drought resistance evaluation of five banana germplasm based on principal component analysis[J]. *Seed*, 2017, 36(6): 67-71. (in Chinese)
- [25] 郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 等. 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(6): 1588-1596.
ZHENG Y X, LIU W S, ZHAO Y F, et al. Evaluation of lodging resistance and screening of identification indicators in maize germplasm resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1588-1596. (in Chinese)
- [26] 李珍, 云岚, 张玉霞, 等. 10个饲用燕麦品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J]. *种子*, 2019, 38(11): 90-95.
LI Z, YUN L, ZHANG Y X, et al. Comprehensive evaluation of salt-alkali tolerance of 10 forage oat varieties at seed germination stage[J]. *Seed*, 2019, 38(11): 90-95. (in Chinese)

(责任编辑: 范杰英)