

宋旭东,章慧敏,张振良,等. 外源水杨酸和氯化钙对糯玉米花期高温胁迫下光合特性及产量的调控效应[J]. 江苏农业科学,2022,50(7):87-94. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.07.013

# 外源水杨酸和氯化钙对糯玉米花期高温胁迫下光合特性及产量的调控效应

宋旭东<sup>1</sup>, 章慧敏<sup>1</sup>, 张振良<sup>1</sup>, 周广飞<sup>1</sup>, 冒宇翔<sup>1</sup>, 陆虎华<sup>1</sup>, 陈国清<sup>1,2</sup>, 石明亮<sup>1</sup>, 黄小兰<sup>1</sup>, 薛林<sup>1,2</sup>, 郝德荣<sup>1</sup>

(1. 江苏沿江地区农业科学研究所,江苏如皋 226541; 2. 江苏省现代作物生产协同创新中心,江苏南京 210014)

**摘要:**研究外源调节剂调控高温胁迫对糯玉米生长发育的影响,可为未来全球气候变暖背景下糯玉米丰产稳产提供理论依据。选取 2 个耐热性不同的糯玉米品种苏玉糯 2 号(耐热能力较强)和苏玉糯 11(高温敏感)为试验材料,于花期喷施外源调节剂水杨酸(SA)、氯化钙(CaCl<sub>2</sub>),研究不同外源调节剂对花期高温胁迫下糯玉米光合荧光指数、光合同化物积累、产量和产量构成因素的调控效应。结果表明,高温胁迫下,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均提高了叶片的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II 潜在活性( $F_v/F_o$ )、光合性能指数( $PI_{abs}$ )、电子传递的量子产额( $\phi Eo$ )和电子受体的量子产额( $\phi Ro$ );喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 显著提高叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量;2 种外源调节剂不同程度地提高了高温胁迫下糯玉米干物质积累量及产量。比较 2 种调节剂发现,SA、CaCl<sub>2</sub> 均能缓解高温胁迫对糯玉米生长发育造成的影响,而 CaCl<sub>2</sub> 处理对缓解高温胁迫的效果更佳。本研究结果可为缓解糯玉米高温热害损伤和抗逆栽培提供理论基础与技术支持。

**关键词:**高温胁迫;糯玉米;外源调节剂;光合特性;产量

**中图分类号:** S513.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)07-0087-07

糯玉米(*Zea mays* L. *certain* Kulesh)籽粒富含丰富的蛋白质、氨基酸、维生素、膳食纤维等营养物质,且胚乳中所含的淀粉几乎全部为支链淀粉,蒸煮后黏软清香、营养丰富、适口性好,具有独特的风味和极高的食用价值<sup>[1]</sup>。近年来,随着人们生活水平的提高,大众的膳食保健意识逐渐增强,糯玉米因其独特的风味和食用价值,已逐渐成为一种广受欢迎的保健休闲食品。在我国及东南亚地区,糯玉米主要用作鲜食,即摘取乳熟期的新鲜果穗或鲜嫩籽粒食用,因此鲜果穗产量和籽粒发育的好坏直接决定糯玉米的商品价值<sup>[2]</sup>。

糯玉米最早起源于我国广西壮族自治区、云南

省等热带和亚热带地区,全生育期均需要较高的温度,但温度过高( $\geq 35\text{ }^\circ\text{C}$ )则不利于其生长,甚至造成高温热害<sup>[2-3]</sup>。在全球气候变暖的大背景下,长江中下游地区变暖趋势显著<sup>[4]</sup>。长江中下游地区是我国重要的糯玉米主产区之一,该地区 7、8 月高温等极端天气频发重发,此期正处于玉米开花期或籽粒灌浆期,是决定果穗籽粒发育和品质形成的关键时期,也是对外界环境最敏感的时期之一,因而该地区高温天气易对糯玉米生产造成严重的热害,导致果穗和籽粒发育异常,是限制该地区糯玉米丰产稳产的重要因素<sup>[3-8]</sup>。相关研究表明,高温导致产量降低主要是改变了植株的形态、生理以及生化指标,高温胁迫已成为影响糯玉米产量和品质下降的主要非生物胁迫之一<sup>[9-12]</sup>。为应对高温胁迫对糯玉米生长发育的不利影响,相关研究提出了多种缓解高温热害的调控措施。如在育种过程中,选育结实性好、叶绿素含量高、光合能力较强的品种以适应高温天气对玉米生长发育造成的不可逆伤害<sup>[13-15]</sup>。通过调整种植方式、优化灌溉、肥料运筹等农艺措施调控群体冠层结构,降低冠层温度,提高植株的长势长相,最终提高群体的抗高温逆境能力<sup>[16-17]</sup>。

收稿日期:2021-11-09

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(20)3147];江苏省重点研发计划(现代农业)项目(编号: BE2021317);江苏现代农业产业技术体系建设专项资金[编号: JATS(2021)146];江苏省南通市科技计划(编号: MS22020034、MS12021080、JC2021153);江苏省南通市第五批 226 人才项目。

作者简介:宋旭东(1992—),男,山东淄博人,硕士,助理研究员,研究方向为玉米育种与栽培技术。E-mail: xudong\_song@foxmail.com。

通信作者:郝德荣,博士,研究员,研究方向为玉米遗传育种。

E-mail: deronghao@jaas.ac.cn。

植物生长调节剂在缓解高温热害对植株生长发育方面发挥了重要作用。研究表明,通过化控缓解高温热害是一种经济、简易、高效的方法<sup>[18-19]</sup>。在众多的植物生长调节剂中,水杨酸(SA)、氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )是提高作物抗逆效果较好的调控剂<sup>[19-23]</sup>。相关研究显示,喷施  $\text{CaCl}_2$  能增强抗氧化酶活性,清除更多的活性氧,保护植株光合系统,维持高温下叶片较高的叶绿素含量,减轻高温胁迫对植物光合产生的不利影响<sup>[19]</sup>。此外,外源  $\text{Ca}^{2+}$  提高植株耐高温能力,可能与较高的抗氧化酶活性和较低的细胞壁膜脂过氧化有关<sup>[21]</sup>。同样,在盆栽和大田试验中,种子处理和叶面喷施外源调节剂 SA 均可以提高叶片叶绿素含量、可溶性蛋白和可溶性糖的积累,提高最终产量<sup>[24]</sup>。

目前,关于高温胁迫下外源调节剂对糯玉米光合特性、同化物积累以及穗部性状调控方面的报道相对较少,本研究主要目的是探索大田生长条件下,喷施 SA、 $\text{CaCl}_2$  对糯玉米植株形态、光合荧光指标及生理特性的影响。本研究通过花期田间覆膜增温方式,于苏玉糯 2 号(耐高温能力较强)、苏玉糯 11 号(高温敏感)开花期叶面喷施 SA、 $\text{CaCl}_2$ , 研究 2 种调节剂对高温胁迫下糯玉米光合特性、干物质积累以及果穗发育性状的影响,以期为缓解糯玉米高温热害损伤和抗逆栽培提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验在江苏沿江地区农业科学研究所试验田进行。供试材料为前期鲜食玉米品种耐高温鉴定试验中筛选出的耐热性差异较大的 2 个品种,分别为苏玉糯 2 号(耐高温)、苏玉糯 11 号(高温敏感),均由江苏沿江地区农业科学研究所提供。苏玉糯 2 号生育期短于苏玉糯 11 号,为保证花期一致,苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号分别于 2021 年 4 月 20、15 日错期播种,种植密度为 52 500 株/hm<sup>2</sup>,行距 60 cm。水肥运筹和病虫害防治参照当地常规大田管理。

### 1.2 高温处理

高温处理设置采用搭建钢架大棚、透明塑料薄膜(透光率 95% 以上)覆盖升温的方式,于花期进行高温处理,高温处理 15 d 后拆除薄膜,结束高温处理。大棚底部 4 周各留出 0.2 m 高度空隙,用于气体交换;同时,为保证植株生长所需含水量,在大棚顶部均匀刺洞,保证降水可以均匀洒落到植株上,

避免干旱胁迫影响试验结果<sup>[11]</sup>。高温处理期间放置全自动温度湿度记录仪于玉米穗部位置记录每天的温度,记录间隔为 60 min,同时在田间自然状态也放置全自动温度湿度记录仪,作为对照,用于检测大棚增温的效果(图 1)。

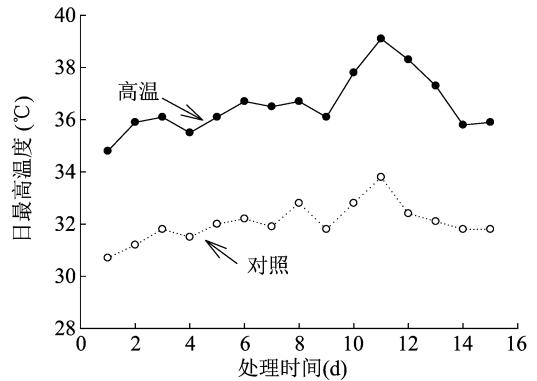


图1 糯玉米高温处理期间的日最高温度

### 1.3 试验设计

试验为 2 因素随机区组设计,分别为 2 个品种、3 种外源调节物质。品种为苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号。在糯玉米花期,分别喷施清水(对照)、水杨酸(SA)、氯化钙( $\text{CaCl}_2$ ), SA、 $\text{CaCl}_2$  喷施浓度分别为 1、20 mmol/L, 2 种试剂的溶解和喷施浓度均借鉴前人研究<sup>[19,25]</sup>,在高温处理前 6 d,每天 16:00 左右叶面喷施,隔天喷施,连续喷施 3 次,喷施标准为液滴均匀分布在玉米大部分叶片表面。试验小区面积为 9 m<sup>2</sup> (3 m × 3 m),每处理 3 次重复。

### 1.4 性状测定

1.4.1 叶片荧光参数 在高温处理后 5 d,采用 Handy PEA(Hansatech,简称 UK)测定穗位叶叶绿素荧光参数。每个处理选取 5 株生长基本一致的植株,从中选取 5 张穗位叶,每张叶片进行 3 次测量。首先用叶片夹将叶片暗适应 30 min(为了使反应中心完全变成氧化态),用 3 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的脉冲光诱导,测定穗位叶荧光参数:光系统 II (PS II) 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、PS II 潜在活性 ( $F_v/F_o$ )、光合性能指数 ( $PI_{\text{abs}}$ )、用于电子传递的量子产额 ( $\phi\text{Eo}$ ) 和用于还原 PS I 受体侧末端电子受体的量子产额 ( $\phi\text{Ro}$ )。

1.4.2 叶绿素含量 选取每个处理 5 张穗位叶相同部位进行取样,称取 0.1 g 样品,用 95% 乙醇 20 mL 提取至叶片完全失绿,采用紫外分光光度计 UV-2450 (Shimadzu, Japan) 测定 663、645 nm 波长下的吸光度,应用以下公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量<sup>[26]</sup>。

叶绿素 a 含量 (mg/g) = (12.7 $D_{663\text{ nm}}$  - 2.69 $D_{645\text{ nm}}$ )  $\times V / (1\ 000 \times m)$ ;

叶绿素 b 含量 (mg/g) = (22.7 $D_{645\text{ nm}}$  - 4.68 $D_{663\text{ nm}}$ )  $\times V / (1\ 000 \times m)$ ;

叶绿素 a + b 含量 (mg/g) = (20.2 $D_{645\text{ nm}}$  + 8.02 $D_{663\text{ nm}}$ )  $\times V / (1\ 000 \times m)$ 。

式中: $D_{663\text{ nm}}$ 和 $D_{645\text{ nm}}$ 为测定波长的吸光度; $V$ 为提取液的体积,mL; $m$ 为取样叶片的鲜质量,g。

1.4.3 叶面积指数 在高温处理后 5、15 d,各处理随机选取 5 株长势一致、具有代表性的植株,量取单株所有绿叶长度和宽度,计算全株绿叶面积。叶面积指数按照以下公式进行计算<sup>[27]</sup>。

叶面积指数 (LAI) = [( $L \times W \times K$ )  $\times$  小区株数] / 各小区面积。

式中: $L$ 为叶片长度,cm; $W$ 为叶片宽度,cm;玉米叶面积的校正系数 $K$ 为 0.75。

1.4.4 干物质积累量 于高温处理后 5、15 d,随机取样 5 株,茎秆和籽粒分开,称取鲜质量,并于 105 ℃ 杀青 30 min 后 80 ℃ 烘干,至恒重时测量干质量。

1.4.5 产量及产量相关性状 在乳熟期每个小区选出其中有代表性的 5 穗考种,室内测定单株穗质

量、穗长、穗粗、秃尖、穗行数、行粒数、百粒质量、单株籽粒鲜质量和干质量。

## 1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理, Simplot 14.0 绘制相关图表, SPSS 17.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米叶绿素荧光参数的影响

从表 1 可以看出,与对照相比,花期高温胁迫下,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均提高了叶片 PS II  $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、 $PI_{\text{abs}}$ 、 $\varphi\text{Eo}$ 、 $\varphi\text{Ro}$ ,但增幅因喷施的外源调节剂而异。与对照相比,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均显著提高了  $F_v/F_m$ ,苏玉糯 2 号分别提高 1.4% (SA)、2.8% (CaCl<sub>2</sub>),苏玉糯 11 号分别提高 4.3% (SA)、8.7% (CaCl<sub>2</sub>)。此外,对于  $F_v/F_o$ 、 $PI_{\text{abs}}$ ,喷施外源调节剂提高的幅度均未达到显著水平。与对照相比,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 后,苏玉糯 2 号  $\varphi\text{Eo}$  分别增加了 15.6% (SA)、6.7% (CaCl<sub>2</sub>),苏玉糯 11 号分别增加了 11.9% (SA)、16.7% (CaCl<sub>2</sub>)。喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均提高了  $\varphi\text{Ro}$  值,而喷施 CaCl<sub>2</sub> 后,增加的幅度更大。

表 1 高温胁迫下喷施外源调节剂对糯玉米穗位叶叶绿素荧光参数的影响

品种	调节剂种类	$F_v/F_m$	$F_v/F_o$	$PI_{\text{abs}}$	$\varphi\text{Eo}$	$\varphi\text{Ro}$
苏玉糯 2 号	CK	0.72 $\pm$ 0.08c	3.07 $\pm$ 0.10ab	4.12 $\pm$ 0.38ab	0.45 $\pm$ 0.02cd	0.22 $\pm$ 0.02bc
	SA	0.73 $\pm$ 0.08b	3.03 $\pm$ 0.30b	4.27 $\pm$ 0.14a	0.52 $\pm$ 0.02a	0.23 $\pm$ 0.01b
	CaCl <sub>2</sub>	0.74 $\pm$ 0.01ab	3.24 $\pm$ 0.13a	4.22 $\pm$ 0.18a	0.48 $\pm$ 0.03b	0.26 $\pm$ 0.01a
苏玉糯 11 号	CK	0.69 $\pm$ 0.05d	2.77 $\pm$ 0.14c	3.79 $\pm$ 0.22b	0.42 $\pm$ 0.01d	0.20 $\pm$ 0.01c
	SA	0.72 $\pm$ 0.04c	2.93 $\pm$ 0.17bc	3.95 $\pm$ 0.15ab	0.47 $\pm$ 0.01bc	0.23 $\pm$ 0.01b
	CaCl <sub>2</sub>	0.75 $\pm$ 0.07a	3.11 $\pm$ 0.18ab	3.92 $\pm$ 0.15ab	0.49 $\pm$ 0.01ab	0.25 $\pm$ 0.02ab
方差分析						
品种		*	**	**	**	ns
调节剂		**	ns	ns	**	**
品种 $\times$ 调节剂		*	ns	ns	*	ns

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著。\*、\*\* 分别表示 5%、1% 水平上的差异显著。表 2 至表 4 同。

### 2.2 外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米叶绿素含量的影响

从图 2 可以看出,SA、CaCl<sub>2</sub> 处理后,显著提高了高温胁迫下叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量,且增幅因喷施的外源调节剂而异。对苏玉糯 2 号,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 后叶绿素 a 含量较对照处理分别提高了 5.2%、5.5%;苏玉糯 11 号分别提高了 5.5% (SA)、7.5% (CaCl<sub>2</sub>)。2 种外源调节剂处

理下,苏玉糯 2 号的叶绿素 b 含量分别提高了 9.1% (SA)、11.8% (CaCl<sub>2</sub>),而苏玉糯 11 号的叶绿素 b 含量分别提高了 15.9% (SA)、25.4% (CaCl<sub>2</sub>)。喷施外源调节剂后,叶绿素 a + b 含量增加趋势与叶绿素 a 和叶绿素 b 含量基本相同,说明喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 能提高糯玉米在高温胁迫条件下的叶绿素含量,且 CaCl<sub>2</sub> 的效果优于 SA。

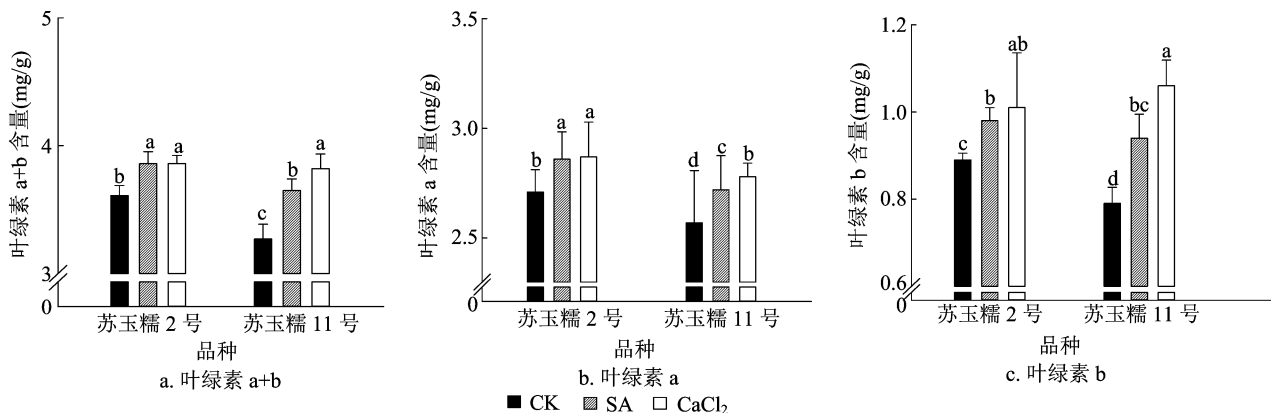


图2 高温胁迫下喷施外源调节剂对糯玉米穗位叶叶绿素含量的影响

### 2.3 外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米光合产物积累的影响

方差分析的结果(表2)显示,高温胁迫5 d后,品种、调节剂、品种和调节剂互作均显著影响单株鲜质量。与对照相比,SA处理下,苏玉糯2号、苏玉糯11号单株鲜质量分别增加了1.9%、4.4%;CaCl<sub>2</sub>处理下,苏玉糯2号、苏玉糯11号单株鲜质量分别增加了3.3%、5.9%。喷施SA后,苏玉糯2号、苏玉糯11号的单株总干质量未显著增加,而CaCl<sub>2</sub>处

理显著增加了苏玉糯11号单株干质量。方差分析结果,高温胁迫15 d后,单株鲜质量在品种间差异不显著,而调节剂处理、调节剂和品种互作显著影响植株鲜质量。比较2种调节剂处理效果发现,喷施CaCl<sub>2</sub>显著增加了2个参试品种的单株鲜质量,而SA处理下苏玉糯2号单株鲜质量增加不显著。与对照相比,CaCl<sub>2</sub>、SA对苏玉糯2号单株干质量影响不显著;而CaCl<sub>2</sub>、SA显著增加了苏玉糯11号的单株干质量。

表2 高温胁迫下喷施外源调节剂对糯玉米单株干物质积累的影响

品种	调节剂种类	高温处理 5 d		高温处理 15 d	
		鲜质量(g)	干质量(g)	鲜质量(g)	干质量(g)
苏玉糯 2 号	CK	790.3 ± 1.07d	129.4 ± 4.47b	950.7 ± 10.10bc	149.0 ± 2.23cd
	SA	805.4 ± 3.53cd	132.1 ± 3.82b	972.3 ± 3.55ab	156.4 ± 5.90c
	CaCl <sub>2</sub>	816.1 ± 5.06bc	137.1 ± 4.69bc	988.5 ± 7.98a	158.6 ± 5.07bc
苏玉糯 11 号	CK	795.6 ± 7.47d	129.1 ± 2.59b	937.0 ± 5.09c	144.5 ± 3.76d
	SA	830.3 ± 6.16ab	141.3 ± 2.92ab	994.3 ± 8.24a	167.8 ± 4.68ab
	CaCl <sub>2</sub>	842.5 ± 8.77a	147.1 ± 4.92a	990.4 ± 18.30a	170.6 ± 3.48a
方差分析					
品种		**	**	ns	**
调节剂		**	**	**	**
品种 × 调节剂		*	ns	*	**

### 2.4 外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米叶面积指数的影响

从图3可以看出,喷施2种调节剂均不同程度地提高了2个品种的叶面积指数(LAI)。与对照相比,喷施SA、CaCl<sub>2</sub>显著提高了高温胁迫下苏玉糯11号的LAI。高温处理后5 d,喷施SA、CaCl<sub>2</sub>后苏玉糯11号的LAI较对照处理分别提高了6.5%(SA)、8.2%(CaCl<sub>2</sub>);而高温处理后15 d,喷施SA、CaCl<sub>2</sub>后苏玉糯11号的LAI较对照处理分别提高了

13.4%(SA)、16.9%(CaCl<sub>2</sub>)。表明高温处理条件下,相较于SA处理,CaCl<sub>2</sub>处理能维持较高的叶面积指数。喷施SA、CaCl<sub>2</sub>也增加了苏玉糯2号的LAI,但差异不显著。

### 2.5 外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米单株籽粒产量和产量构成的影响

从表3、表4可以看出,开花期喷施SA、CaCl<sub>2</sub>处理均提高了高温胁迫下2个品种的单株籽粒产量及其构成因子,且喷施外源调节剂对不同性状的影

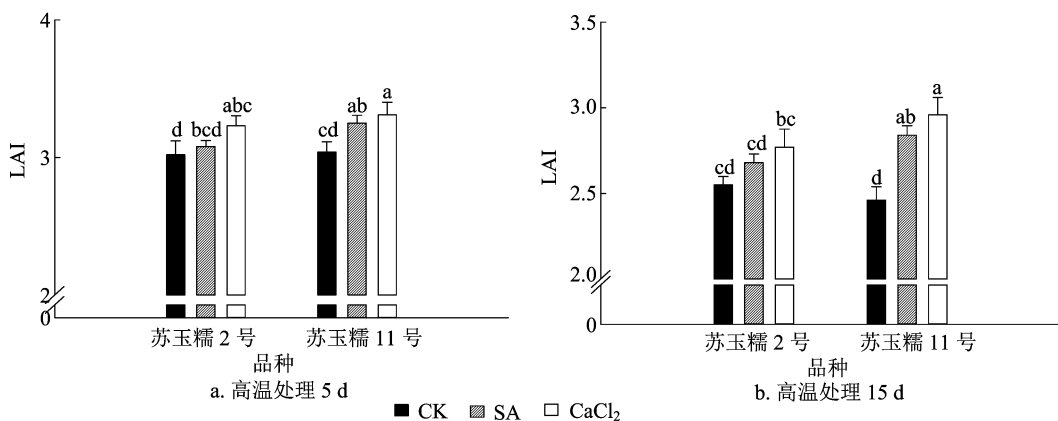


图3 喷施调节剂对糯玉米高温处理 5、15 d 单株 LAI 的影响

表 3 高温胁迫下喷施外源调节剂对产量构成因素的影响

品种	调节剂	穗长 (cm)	穗宽 (mm)	秃尖 (cm)	穗行数 (行/穗)	行粒数 (粒/行)	百粒质量 (g)	单株穗质量 (g)
苏玉糯 2 号	CK	15.9 ± 0.32c	47.6 ± 0.48ab	3.1 ± 0.06b	12.7 ± 1.15a	24.8 ± 0.57c	34.9 ± 1.01b	171.2 ± 2.86a
	SA	16.3 ± 0.21bc	47.6 ± 0.48ab	2.4 ± 0.26c	13.1 ± 1.01a	27.3 ± 1.15b	37.0 ± 0.71a	180.8 ± 2.06b
	CaCl <sub>2</sub>	16.0 ± 0.46c	47.9 ± 0.58a	2.4 ± 0.17c	13.2 ± 1.15a	27.7 ± 0.57b	36.7 ± 0.64a	182.3 ± 3.81c
苏玉糯 11 号	CK	17.6 ± 0.17ab	45.9 ± 0.54ab	4.7 ± 0.57a	13.7 ± 0.58a	25.3 ± 0.57c	31.9 ± 0.83c	198.7 ± 4.91c
	SA	17.3 ± 0.23bc	45.8 ± 0.69b	3.4 ± 0.35b	13.7 ± 0.58a	28.0 ± 1.03b	35.9 ± 0.5ab	210.6 ± 2.45a
	CaCl <sub>2</sub>	18.1 ± 0.61a	46.3 ± 1.16ab	3.1 ± 0.21b	14.3 ± 0.58a	29.7 ± 1.15a	35.9 ± 0.75ab	211.7 ± 3.44a
方差分析								
品种		**	**	ns	**	**	**	**
调节剂		ns	ns	*	ns	**	**	**
品种 × 调节剂		ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

响不同。其中,与对照相比,糯玉米果穗穗长、穗宽和穗行数在喷施 2 种外源调控剂后未显著增加。方差分析结果表明,不同调节剂对穗长、穗宽和穗行数无显著影响。对于秃尖性状,2 个品种在喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 后均显著降低了果穗的秃尖长度。经 SA、CaCl<sub>2</sub> 处理后,苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号行粒数均显著增加,SA 处理下苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号行粒数分别增加了 10.1%、10.7%,而 CaCl<sub>2</sub> 处理下苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号行粒数分别增加了 11.7%、17.4%。品种和调节剂处理显著影响果穗的百粒质量,二者组合对百粒质量却无显著影响。同样,高温条件下,2 种外源调节剂显著增加了百粒质量和单株穗质量,且 CaCl<sub>2</sub> 的效果要优于 SA。

方差分析(表 4)可知,喷施调节剂显著影响新鲜籽粒产量和干籽粒产量。喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 显著提高了籽粒鲜质量,SA 处理后苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号新鲜籽粒产量分别增加 6.2%、12.9%,CaCl<sub>2</sub> 处理后苏玉糯 2 号、苏玉糯 11 号新鲜籽粒产量分别增加 7.4%、12.8%。与对照相比,SA、CaCl<sub>2</sub> 处理后

表 4 高温胁迫下喷施调节剂对产量的影响

品种	处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	
		新鲜籽粒	干籽粒
苏玉糯 2 号	CK	5 913.6d	2 942.4b
	SA	6 283.2bc	3 177.6a
	CaCl <sub>2</sub>	6 379.2b	3 254.4a
苏玉糯 11 号	CK	6 014.4c	2 870.4b
	SA	6 753.6a	3 240.3a
	CaCl <sub>2</sub>	6 787.2a	3 278.4a
方差分析			
品种		**	ns
调节剂		**	**
品种 × 调节剂		ns	ns

均显著提高干籽粒产量。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米叶绿素含量和荧光特性的影响

高温胁迫主要影响植物叶片的光合作用、叶绿

素含量与荧光特性。在光合系统中,相对于 PS I, PS II 对高温胁迫的响应更迅速<sup>[19-20]</sup>。相关研究发现,外源调节剂可提高 PS II 反应中心的光能转换效率,潜在活性和开放比例,改善植株 PS II 性能,提高植株的光能利用率和碳同化能力<sup>[27]</sup>。本研究结果表明,外源调节剂 SA、CaCl<sub>2</sub> 均可缓解高温胁迫对糯玉米的 PS II 损伤, $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、 $PI_{abs}$ 、 $\phi Eo$  和  $\phi Ro$  等荧光参数均有不同程度的增加,表明植物喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 可修复因高温胁迫导致的放氧复合体损失,提高 PS II 反应中心电子传递的能量<sup>[20-21]</sup>。此外,荧光参数的增加可能与外源调节物质增加植株抗氧化酶活性,降低高温热害导致的氧化胁迫对植株造成的伤害有关<sup>[19]</sup>。本研究发现,喷施 CaCl<sub>2</sub> 对荧光参数的增幅要大于 SA 处理,表明 CaCl<sub>2</sub> 对缓解高温胁迫下糯玉米 PS II 损伤的效果更佳。本研究中,高温胁迫条件下,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 对 PS II 的  $F_v/F_o$  和  $PI_{abs}$  无显著影响, $F_v/F_o$  和  $PI_{abs}$  主要由品种决定,对外界栽培措施的反应不敏感。

光合色素是植物体光合器官的重要组成部分,参与光合作用过程中光能的吸收、传递和转运<sup>[27]</sup>。高温胁迫往往导致光合色素的退化,外源激素预处理后,叶绿素含量的增加被认为是植株耐高温能力提高的迹象<sup>[28-29]</sup>。在本研究中,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均显著提高叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量,这可能与 SA、CaCl<sub>2</sub> 能促进叶绿素生物合成酶活性相关,相同的结果在不同作物和非生物胁迫条件下均有众多报道<sup>[20,24,27,29-30]</sup>。

### 3.2 喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米叶面积指数和干物质积累的影响

适宜的叶面积指数有利于群体光合作用的高效进行,合成更多的光合产物<sup>[31-32]</sup>。调节剂在提高作物耐热性方面发挥重要作用,相关研究认为,高温胁迫下玉米喷施外源调节剂,可以提高叶面积指数,增强群体光合性能,减缓叶片衰老<sup>[33]</sup>。本研究发现,在喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 后,高温胁迫下糯玉米的叶面积指数均有不同程度的提高,其中喷施 CaCl<sub>2</sub> 效果更佳,显著提高了高温处理后不同时期的叶面积指数。本结论与相关结果一致,这可能是因为喷施外源调节剂后,延缓了叶片衰老,维持较高的叶面积指数来提高“源”的供应,促进植株叶片的生长发育,提高群体光合性能,最终增加干物质积累量和籽粒产量<sup>[21,27]</sup>。

干物质积累是作物生长发育的重要指标,在一

定范围内干物质积累量和产量呈正相关<sup>[32,34]</sup>。高温胁迫后,玉米生长发育受阻,植株的光合性能下降,引起光合同化能力降低,使光合产物的积累和分配紊乱,降低光合产物积累<sup>[35]</sup>。喷施外源调节剂可降低玉米株高和穗位高,节间缩短,提高干物质积累量,提高植株的耐热能力<sup>[36]</sup>。本研究结果表明,花期喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 均可提高植株干物质积累量,在高温胁迫后 5、15 d 植株鲜质量和干质量均有不同程度的提高,特别是在 CaCl<sub>2</sub> 处理下,同化物积累显著提高,与前人的研究结果<sup>[19-21]</sup>一致。本研究结果表明,SA、CaCl<sub>2</sub> 均可提高植株光合产物积累,且 CaCl<sub>2</sub> 调控效果更好。

### 3.3 喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 对糯玉米产量及其构成因子的影响

高温胁迫严重影响玉米果穗发育和籽粒产量。花后高温胁迫显著降低糯玉米籽粒产量,主要是降低粒质量和穗粒数造成的<sup>[37-38]</sup>。吐丝期高温胁迫降低了穗长、穗粗、穗行数、行粒数,增加了秃尖长度,最终导致产量降低<sup>[4,8]</sup>。本研究发现,与对照相比,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 增加了果穗穗长、穗宽、穗行数、行粒数,显著提高了单株穗质量、行粒数、百粒质量、新鲜籽粒产量和干籽粒产量,显著降低了秃尖长度。本研究结果说明,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 增加单株果穗质量和产量主要与行粒数和百粒质量增加有关,与前人研究结果<sup>[39]</sup>一致。本研究中,喷施 SA、CaCl<sub>2</sub> 显著降低了果穗秃尖长度,这在一定程度上增加了每穗粒数,间接增加了新鲜籽粒产量和干籽粒产量。此外,百粒质量的增加可能与喷施调节剂后提高了叶片叶绿素含量、荧光特性,延迟叶片衰老,光合同化物积累较多,籽粒灌浆相对较充分有关。本研究发现,SA、CaCl<sub>2</sub> 缓解高温胁迫对糯玉米的负面影响可能与外源调节剂提高植株荧光参数和叶绿素含量,增加光合同化物质积累有关,为籽粒灌浆提供了充足的“源”的供应,减少空瘪粒数,增加结实率,最终提高鲜果穗产量和籽粒产量。

#### 参考文献:

- [1] 张欣,张喜华,江丹,等. 我国玉米品质育种研究进展[J]. 杂粮作物,2000,20(5):13-17.
- [2] Fan L J, Quan L Y, Leng X D, et al. Molecular evidence for post-domestication selection in the *Waxy* gene of Chinese waxy maize[J]. Molecular Breeding,2008,22(3):329-338.
- [3] 穆心愿,马智艳,张兰薰,等. 不同耐/感玉米品种的叶片光合荧光特性、授粉结实和产量构成因素对花期高温的反应[J]. 中国

- 生态农业学报,2022,30(1):57-71.
- [4]文廷刚,杜小凤,刘京宝,等. 玉米花期耐热性评价指标及防御技术研究[J]. 南京农业大学学报,2021,44(2):232-240.
- [5]施龙建,文章荣,张世博,等. 开花期干旱胁迫对鲜食糯玉米产量和品质的影响[J]. 作物学报,2018,44(8):1205-1211.
- [6]闫振华,刘东尧,贾绪存,等. 花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J]. 中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
- [7]贾良良,黄少辉,刘学彤,等. 花期高温对不同夏玉米品种花粉活力和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(18):92-95.
- [8]文廷刚,杜小凤,刘京宝,等. 花期高温胁迫下调剂“热害清”预处理对玉米产量性状及生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(9):107-113.
- [9]Wang J E, Mao Y X, Huang T Q, et al. Water and heat stresses during grain formation affect the physicochemical properties of waxy maize starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021,101(4):1331-1339.
- [10]Wu C, Cui K H, Tang S, et al. Intensified pollination and fertilization ameliorate heat injury in rice (*Oryza sativa* L.) during the flowering stage [J]. Field Crops Research, 2020, 252: 107795.
- [11]Ordóñez R A, Savin R, Cossani C M, et al. Yield response to heat stress as affected by nitrogen availability in maize[J]. Field Crops Research, 2015, 183:184-203.
- [12]Bergkamp B, Impa S M, Asebedo A R, et al. Prominent winter wheat varieties response to post-flowering heat stress under controlled Chambers and field based heat tents[J]. Field Crops Research, 2018, 222:143-152.
- [13]Xiao D P, Qi Y Q, Shen Y J, et al. Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3/4):653-661.
- [14]Liu Z J, Hubbard K G, Lin X M, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J]. Global Change Biology, 2013, 19(11):3481-3492.
- [15]芮鹏环, 韩坤龙, 王长进, 等. 灌浆期高温对玉米叶片抗氧化酶活性及渗透调节物质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24):82-84.
- [16]袁金华, 俄胜哲, 黄涛, 等. 水肥管理对带田土壤肥力和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(2):433-440.
- [17]Cairns J E, Sonder K, Zaidi P H, et al. Maize production in a changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies[J]. Advances in Agronomy, 2012, 79(17):5167-5178.
- [18]Yan Y N, Wang L F, Lu D L. Effects of spraying exogenous cytokinin or spermine on the starch physicochemical properties of waxy maize exposed to post-silking high temperature[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95:103040.
- [19]Tan W, Meng Q W, Brestic M, et al. Photosynthesis is improved by exogenous calcium in heat-stressed tobacco plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(17):2063-2071.
- [20]Wassie M, Zhang W H, Zhang Q A, et al. Exogenous salicylic acid ameliorates heat stress-induced damages and improves growth and photosynthetic efficiency in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 191:110206.
- [21]Naeem M, Traub J R, Athar H U R, et al. Exogenous calcium mitigates heat stress effects in common bean: a coordinated impact of photoprotection of PS II, up-regulating antioxidants, and carbohydrate metabolism [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(12):1-13.
- [22]Mohammed A R, Tarpley L. High nighttime temperatures affect rice productivity through altered pollen germination and spikelet fertility [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7):999-1008.
- [23]江晓东, 姜琳琳, 华梦飞, 等. 喷施不同化学制剂对水稻叶片抗高温胁迫的效果分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2):92-99.
- [24]Kousar R, Qureshi R, Jalal-Ad-Din D. Salicylic acid mediated heat stress tolerance in selected bread wheat genotypes of Pakistan [J]. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50(6):2141-2146.
- [25]Zamaninejad M, Khorasani S K, Moeini M J, et al. Effect of salicylic acid on morphological characteristics, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.) under drought condition [J]. European Journal of Experimental Biology, 2013, 3(2):153-161.
- [26]Song X D, Zhou G S, Shi L, et al. Comparative effects of salinity and drought on seed germination, seedling growth, photosynthetic productivity, pigments content and antioxidant enzymes of *Castor* bean (*Ricinus communis*) [J]. Crop and Pasture Science, 2021, 72(7):541.
- [27]韩学涛. 喷施水杨酸和 6-苄氨基腺嘌呤对夏玉米高温胁迫的缓解作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [28]Ahmad W, Noor M, Afzal I, et al. Improvement of *Sorghum* crop through exogenous application of natural growth-promoting substances under a changing climate [J]. Sustainability, 2016, 8(12):1330.
- [29]El-Esawi M A, Elansary H O, El-Shanhorey N A, et al. Salicylic acid-regulated antioxidant mechanisms and gene expression enhance rosemary performance under saline conditions [J]. Frontiers in Physiology, 2017, 8:716.
- [30]李同根, 王康才, 罗春红, 等. 水杨酸对高温胁迫下皖贝母生理生化特性的影响及其时效性研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(6):1179-1184.
- [31]任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4):1022-1028.
- [32]冯尚宗, 王世伟, 彭美祥, 等. 不同种植密度对夏玉米产量、叶面积指数和干物质积累的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(3):1-5, 22.
- [33]王广明, 冯乃杰, 刘忠福, 等. 生长调节剂与密度对玉米光合性能及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29(1):1-5, 21.
- [34]史建国, 宋昆仑, 曹慧英, 等. 花粒期光照对夏玉米干物质积累和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):46-52.

魏晓凯,何佶弦,俞世康,等. 外源亚精胺对低温胁迫下烟草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(7):94-99.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.07.014

# 外源亚精胺对低温胁迫下烟草种子萌发 及幼苗生理特性的影响

魏晓凯<sup>1</sup>, 何佶弦<sup>2</sup>, 俞世康<sup>2</sup>, 张启莉<sup>2</sup>, 顾会战<sup>2</sup>, 雷强<sup>3</sup>, 喻保华<sup>4</sup>, 李俊举<sup>2</sup>, 景延秋<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院,河南郑州 450002; 2. 四川省烟草公司广元市公司,四川广元 628017;

3. 中国烟草总公司四川省公司,四川成都 610041; 4. 河南农业大学经济与管理学院,河南郑州 450002)

**摘要:**为揭示外源亚精胺对低温胁迫下烟草种子萌发率及幼苗生长发育的调控机制,以云烟 87 为供试品种,设置不同浓度(200、400、600、800 μmol/L)亚精胺对烟草种子进行浸泡处理,探究低温胁迫下外源亚精胺浸种对烟草种子萌发率、幼苗抗氧化酶活性、渗透调节物质及膜质过氧化物含量的影响。结果表明,低温胁迫下烟草种子萌发率降低,幼苗的生长发育受到抑制,200、400 μmol/L 亚精胺处理对低温胁迫的缓解作用有限,而 600 μmol/L 亚精胺处理能够有效提高烟草种子萌发率,增强烟草幼苗抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性和净光合速率,增加渗透调节物质含量,降低活性氧自由基积累和丙二醛(MDA)含量,从而缓解低温胁迫对烟草幼苗造成的损害。

**关键词:**亚精胺;低温胁迫;烟草幼苗;缓解;种子萌发率

**中图分类号:**S572.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)07-0094-06

烟草作为一种喜温经济作物,原产于热带和亚热带,对温度变化较为敏感<sup>[1-2]</sup>。烟草生长发育最适温度为 25~28℃,当温度低于 12℃时,叶片光合速率会受到抑制,生长发育变缓,甚至停止生长,当温度高于 35℃时,烟苗徒长,壮苗率低,也可能造成烧苗现象<sup>[3]</sup>。张嘉雯等研究发现,低温胁迫时烟草幼苗的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量均显著升高,并产生大量的活性氧,造成植株生理代谢紊乱,生长受到抑制<sup>[4]</sup>。我国南方地区普遍存在因气

温波动较大而出现“倒春寒”等低温伤害,不利于壮苗培育,导致幼苗成活率降低,缓苗期延长,烟叶产量和质量受到影响。如何缓解低温胁迫对烟株的危害已成为人们亟待解决的问题。

多胺是一种广泛存在于植物体内并具有逆境胁迫响应的低分子脂肪族含氮碱,主要包含腐胺、精胺和亚精胺,对植物生长发育及分化具有重要调节作用,其中亚精胺因其多聚阳离子特性调节作用效果尤为显著,它可以与质膜上的蛋白质等大分子结合,降低膜的流动性,维持植物体内酸碱平衡,同时亚精胺也可以作为信号分子参与激素的代谢<sup>[5-7]</sup>。近年来,越来越多研究表明,亚精胺对于缓解植物逆境胁迫具有显著的作用,如高温胁迫、硝酸钙胁迫、盐胁迫、干旱胁迫以及重金属胁迫等<sup>[8]</sup>。李书涵等研究发现,外源亚精胺能够显著增加生菜叶绿素含量,增强光合能力和抗氧化酶活性<sup>[9]</sup>。周晨楠等研究表明,外源亚精胺能够显著降低硝酸钙胁迫下番茄幼苗的丙二醛(MDA)含量和超氧阴离

收稿日期:2021-07-10

基金项目:中国烟草总公司四川省公司项目(编号:2019410102000453);

四川省烟草公司广元市公司科技攻关项目(编号:202051080024063)。

作者简介:魏晓凯(1994—),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为烟草栽培,E-mail:1351262779@qq.com;共同第一作者:何佶弦(1988—),男,四川广元人,硕士研究生,研究方向为烟草栽培,E-mail:w1351262779@163.com。

通信作者:景延秋,博士,教授,研究方向为烟草化学。E-mail:jinglaoshi202105@163.com。

[35] 赵龙飞,李潮海,刘天学,等. 花期前后高温对不同基因型玉米光合特性及产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(23):4947-4958.

[36] 翟大帅. 高温胁迫下化控剂对夏玉米生理特性及产量的影响[D]. 保定:河北农业大学,2019.

[37] Boehlein S K, Liu P, Webster A, et al. Effects of long-term exposure to elevated temperature on *Zea mays* endosperm

development during grain fill[J]. The Plant Journal,2019,99(1):23-40.

[38] 高英波,张慧,单晶,等. 吐丝前高温胁迫对不同耐热型夏玉米产量及穗发育特征的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(19):3954-3963.

[39] 严漪旒. 吐丝期喷施外源激素对花后高温下糯玉米产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2021.