

灌浆期高温胁迫下褪黑素对玉米产量及淀粉粒分布的调控作用

张瑞连, 余梦奇, 程嘉慧, 董开林, 杨婷婷, 李婧,
刘阳, 王长进, 余海兵, 李文阳*

(安徽科技工程大学 农学院, 安徽省玉米种质资源库, 安徽 凤阳 233100)

摘要:为明确灌浆期高温胁迫下褪黑素对玉米产量及淀粉粒分布的调控作用, 2022年6至9月以玉米杂交种安科985为材料, 在灌浆期高温胁迫下, 设置不同浓度褪黑素, 研究灌浆期高温胁迫下褪黑素对玉米产量、淀粉粒度分布、淀粉黏度参数和相关酶活性的影响。结果表明: 在灌浆期高温胁迫下, 褪黑素显著提高玉米行粒数、粒重和产量, 随着褪黑素浓度的增加, 行粒数、粒重和产量呈先升后降的趋势; 与对照相比, 褪黑素处理显著降低籽粒蛋白质含量, 显著提高籽粒淀粉、脂肪含量; 与对照相比, 褪黑素显著降低中型淀粉粒体积、表面积占比, 增加大型淀粉粒体积、表面积占比, 而对中型、大型数目占比无显著影响。不同处理间比较, 随着褪黑素浓度的增加, 玉米淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值、回升值呈先升后降的趋势。褪黑素显著提高籽粒AG-Pase和SS酶活性, 其中MT200处理最高。在灌浆期高温胁迫下, 褪黑素处理可提高大型淀粉粒体积和表面积占比, 进而提高了籽粒淀粉含量, 有利于粒重和产量的提高, 其中褪黑素浓度为200 $\mu\text{mol/L}$ 时效果最佳。

关键词:玉米; 褪黑素; 灌浆期; 高温胁迫; 淀粉粒分布

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1673-0143(2026)02-0038-10

DOI: 10.16389/j.cnki.cn42-1737/n.2026.02.004

Regulatory Effects of Melatonin on Maize Yield and Starch Granule Distribution under High-Temperature Stress during the Grain Filling Stage

ZHANG Ruilian, YU Mengqi, CHENG Jiahui, DONG Kailin, YANG Tingting, LI Jing,
LIU Yang, WANG Changjin, YU Haibing, LI Wenyang*

(College of Agriculture, Anhui Provincial Maize Germplasm Resource Bank, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China)

Abstract: In order to clarify the regulatory effects of melatonin on maize yield and starch granule distribution under high-temperature stress during the grain filling stage, the maize

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2020ZD010); 安徽省财政农业科技成果转化项目(2022ZH015)

作者简介: 张瑞连(2001—), 女, 硕士生, 研究方向: 作物高产栽培生理生态。

*通信作者: 李文阳(1981—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 作物高产栽培生理与技术。E-mail: liwy@ahstu.edu.cn

hybrid AK985 was used in a field experiment conducted from June to September 2022. Under natural high-temperature stress during the grain filling stage, different concentrations of melatonin were applied. The effects of melatonin on maize yield, starch particle size distribution, starch viscosity parameters, and related enzyme activities under high-temperature stress during the grain the filling stage were studied. The results showed that melatonin significantly increased grain weight and grain yield of maize under natural high-temperature stress during the filling stage. With increasing melatonin concentration, both grain weight and yield increased first and then decreased. Compared with the control, melatonin treatment reduced corn kernel protein content while significantly increased grain starch and fat content. Additionally, melatonin significantly decreased the volume and surface area proportions of medium-sized starch granules, increased those of large-sized starch granules, with no significant effect on the number proportions of medium-sized and large-sized starch granules. Among the treatments, peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, breakdown value, and setback value of maize starch first increased and then decreased with increasing melatonin concentration. Melatonin significantly enhanced grain AGPase and SS enzyme activity, with the MT200 treatment showing the highest values. Under natural high-temperature stress during the grain filling stage, melatonin treatment elevated the volume and surface area proportions of large starch granules, and subsequently increased kernel starch content, contributing to higher kernel weight and yield. The optimal effect was observed at a melatonin concentration of 200 $\mu\text{mol/L}$.

Key words: maize; melatonin; grain filling stage; high-temperature stress; starch granule distribution

0 引言

近年来,极端高温天气频发给农业生产带来不利影响。2022年6—8月,我国东部出现自1961年以来综合强度最高的高温过程,高温周期长^[1]。适宜的温度是玉米产量和品质形成的关键因素之一,当温度高于35℃时会对玉米生长造成伤害,使之产量大幅降低、品质变劣^[2-3]。高温胁迫已成为夏玉米产量和品质形成的主要非生物胁迫之一,因此,提高夏玉米抗高温的能力是当前玉米生产上亟待解决的问题。

玉米(*Zea mays* L.)作为全球重要的粮食、饲料作物,其产量和品质对于保障农业经济发展至关重要,高温发生时间正处于玉米生长发育与产量形成的关键阶段,不利于玉米高产稳产^[4-6]。玉米籽粒的主要成分是淀粉,在胚乳中以颗粒态形式存在,重量占成熟玉米干重的70%左右,玉米产量和品质受淀粉积累量的影响^[7-8]。淀粉含量的多少直接影响作物的产量和品质,淀粉粒度分布和黏度参数是其重要的理化指标,是淀粉进一步加工利用的选择依据^[9-10]。灌浆期是一个极为关键的阶段,此阶段高温易导致灌浆期缩短、灌浆不充分等问题,进而造成玉米籽粒瘪小、玉米籽粒淀粉合成酶的活性降低,从而导致玉米淀粉含量低,不利于玉米高产^[11]。有研究^[12-14]表明,高温胁迫会增加蛋白含量和抑制淀粉积累,腺苷葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)和蔗糖合成酶(SS)在淀粉合成中起重要作用,高温胁迫会导致参与淀粉合成的AGPase和SS活性降低,从而抑制了淀粉积累。对于玉米而言,籽粒灌浆过程中遭受高温胁迫,一方面会降低穗粒数和粒重,使产量降低;另一方面会影响淀粉理化性质,显著增加中小型淀粉粒体积、表面积和数量

百分比,大型淀粉粒与之相反^[15]。

生产上,选用耐热品种^[16]、施肥^[17]、化学调控^[18]、降低种植密度^[19]可有效降低高温热害对夏玉米产生的影响。在植物全生育期,植物激素对植物的生长发育有重要的调控作用,可有效提高产量和改善品质^[20]。褪黑素在作物应对逆境胁迫方面表现出显著的调节作用,不同浓度的褪黑素对植物会产生不同的调控效果,即适宜的褪黑素浓度有利于作物产量和品质的形成^[21-22]。葛子菲等^[23]研究表明,喷施不同浓度褪黑素均能显著改善软质小麦籽粒灌浆特性和淀粉理化特性,且褪黑素浓度为100 $\mu\text{mol/L}$ 时增产显著。有研究^[24]表明,干旱胁迫下褪黑素处理可增加大豆产量,其中根施优于喷施。余梦奇等^[25]研究在高温胁迫下褪黑素处理能延缓玉米叶片衰老,降低高温损伤,从而提高产量。褪黑素通过调节脱落酸(ABA)和赤霉素(GA)相关基因来增强棉花种子的耐盐性,从而减少高温胁迫对棉花种子的损害并促进种子发芽^[26]。目前,关于褪黑素抗逆的研究主要集中于光合特性及产量的研究,而关于褪黑素对灌浆期高温胁迫下玉米产量与淀粉粒分布调节的研究较少。结合试验当年实际气候条件,本试验以安科985为材料,采用盆栽种植,在籽粒灌浆阶段自然高温胁迫下,灌施不同浓度的褪黑素处理,研究自然高温胁迫($\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$)下褪黑素对玉米产量及淀粉粒分布的调控作用,为玉米抗高温栽培提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与 设计

试验于2022年6月14日在安徽科技工程大学凤阳校区种植园(东经117.56°,北纬32.88°)进行,收获期为2022年9月19日。供试材料选用玉米杂交种安科985,盆栽种植保证灌施褪黑素溶液不会大范围流失,尽可能被玉米吸收,盆直径30 cm、高23 cm,种植80盆,每盆留苗1株,摆盆密度3株/ m^2 。肥料用量参照当地常规大田水平确定,播种前每盆施复合肥(N 15%、 P_2O_5 15%、 K_2O 15%)6 g,拔节期每盆追施尿素(含N 46%)2.5 g。试验设置3个褪黑素(美国Natrol)浓度,即:100、200、300 $\mu\text{mol/L}$ (分别用MT100、MT200、MT300表示),以自然高温处理为对照(CK)。每个处理20株,于灌浆期8月7日—8月9日连续灌施3 d,每株每天灌施200 mL褪黑素。

有研究^[23]表明,日最高气温 $\geq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在一定程度上会影响玉米的各项生理指标和产量构成;日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会造成作物产量和品质下降,形成高温逆境。安徽省凤阳县2022年8月5日至9月19日气象温度数据见图1(a),其中日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数为18 d左右。8月7日进入灌浆期,田间实测温度见图1(b),从8:00—18:00,约有8 h左右温度 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

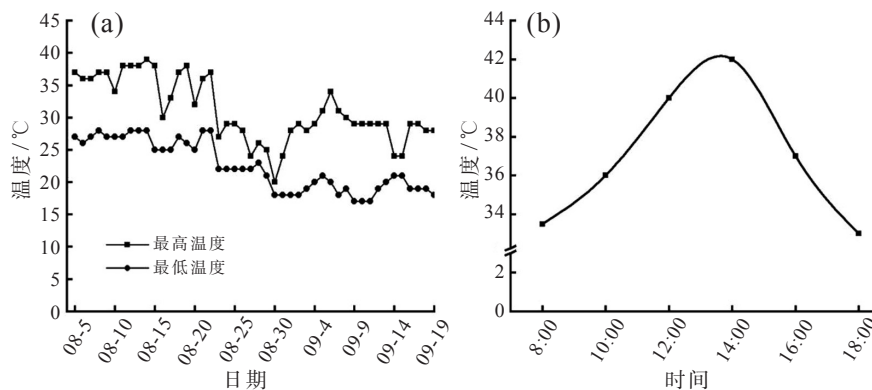


图1 (a)玉米籽粒灌浆阶段日最高、最低温度变化;(b)日温度变化(8月7日)

Fig. 1 (a) Daily maximum and minimum temperature variations during the grain filling stage of maize;
(b) Daily temperature variation (August 7th)

1.2 测定项目及方法

1.2.1 玉米产量及其构成因素 于成熟期每个处理取10盆用于考种,测定其行粒数、穗行数及百粒重,并计算单株产量。

1.2.2 籽粒品质 使用DA7200近红外品质分析仪(瑞典Perten公司)测定籽粒淀粉、蛋白质和脂肪含量。

1.2.3 粒度分布 参考文献[21]的操作方法提取淀粉,采用LS13320衍射粒度分析仪(美国贝克曼库尔特公司)进行淀粉粒粒度分析。

1.2.4 淀粉糊化特性 采用Supper 3快速黏度分析仪(瑞典Perten公司)对玉米淀粉峰值黏度等黏度参数进行测定。

1.2.5 淀粉合成相关酶活性 褪黑素灌施后10 d,每个处理取3株,液氮中保存,用于测定籽粒中AGPase和SS酶活性。采用试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)检测玉米籽粒AGPase和SS的酶活性。操作时严格按照试剂盒说明进行AGPase酶活性的测定,处理好样品后在紫外分光光度计340 nm波长下,记录初始吸光度以及2 min后的吸光度,依据试剂盒所提供的公式来计算AGPase酶活性。SS酶活性的测定按试剂盒说明操作步骤处理好样品后,在紫外分光光度计480 nm下测定吸光值,再根据试剂盒中所提供的公式计算SS酶活性。

1.3 数据处理与分析

Excel 2016和DPS 7.05用于数据的整理与分析,origin 2018制图,并采用LSD法进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 单株产量及其构成因素

由表1可知,在自然高温胁迫下,褪黑素处理可显著增加玉米产量。与对照相比,MT100、MT200、MT300处理下单株产量增幅分别为92.53%、134.81%、111.84%,百粒重增幅分别为9.88%、17.54%、9.65%,行粒数增幅分别为41.49%、54.26%、36.17%,褪黑素处理对该品种穗行数影响不显著。说明褪黑素主要通过提高玉米行粒数和粒重,进而使产量增加,其中以MT200处理下的玉米产量最高。

表1 褪黑素对单株产量及构成因素的影响

Tab. 1 Effects of melatonin on yield and component factors

处理	穗行数	行粒数	百粒重/g	单株产量/g
CK	13.50 ± 1.00 a	23.50 ± 2.52 b	30.05 ± 0.83 c	74.57 ± 23.74 b
MT100	14.00 ± 1.63 a	33.25 ± 1.89 a	33.02 ± 2.39 b	143.57 ± 28.20 a
MT200	14.00 ± 1.00 a	36.25 ± 2.63 a	35.32 ± 0.56 a	175.10 ± 16.59 a
MT300	13.50 ± 1.00 a	32.00 ± 2.16 a	32.95 ± 1.27 b	157.97 ± 19.90 a
F值	0.23	13.12**	9.63**	8.14**

注:数据为平均值 ± 标准差,同列不同小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$);**, $P < 0.01$ 。下表同。

2.2 籽粒品质性状

由表2可见,自然高温胁迫下,褪黑素处理增加了籽粒淀粉和脂肪含量,降低了籽粒蛋白质含量。与对照相比,MT100、MT200处理下籽粒蛋白质含量分别降低11.88%、13.13%,MT300处理下籽粒脂肪含量增加了21.10%,3个处理下籽粒淀粉含量分别增加了5.86%、10.14%、5.0%。说明自然高温胁迫下,褪黑素处理显著增加了籽粒中淀粉和脂肪含量,其中MT200处理下籽粒淀粉含量最高,MT300处理下籽粒脂肪含量最高。

表2 褪黑素对玉米籽粒蛋白质、淀粉、脂肪含量的影响

处理	蛋白质含量	脂肪含量	淀粉含量
CK	11.20 ± 0.50 a	3.27 ± 0.35 b	70.00 ± 1.82 c
MT100	9.87 ± 1.20 b	3.70 ± 0.17 a	74.10 ± 1.51 b
MT200	9.73 ± 1.10 bc	3.65 ± 0.43 ab	77.10 ± 1.54 a
MT300	10.50 ± 0.30 b	3.96 ± 0.14 a	73.50 ± 1.13 b
F值	13.28**	5.45*	26.34**

注:*, $P < 0.05$ 。下表同。

2.3 淀粉粒粒度分布

2.3.1 淀粉粒体积分布 由表3可知,褪黑素处理对玉米籽粒体积分布有显著影响。在玉米淀粉粒体积占比中,小型淀粉粒占7.28%~7.62%,中型淀粉粒占52.01%~59.73%,大型淀粉粒占32.80%~40.71%,可见在玉米淀粉粒体积中,中型淀粉粒是主要组成部分,大型淀粉粒次之,小型淀粉粒占比最少。自然高温胁迫下,3个褪黑素浓度处理对小型淀粉粒的体积占比无显著影响,但显著降低中型淀粉粒的体积分布,增加大型淀粉粒的体积分布。与对照相比,MT100、MT200和MT300处理后中型淀粉粒体积占比分别降低了10.58%、10.36%、12.92%,大型淀粉粒体积占比分别增加了18.84%、18.87%、24.12%。可见褪黑素处理通过增加玉米大型淀粉粒体积占比,进而增加淀粉粒体积平均径($D[4,3]$),说明褪黑素处理有利于淀粉粒体积的增大。

表3 褪黑素对淀粉粒体积分布的影响

处理	淀粉粒粒径			$D[4,3]/\mu\text{m}$
	小型($< 3 \mu\text{m}$)/%	中型($3 \sim 18 \mu\text{m}$)/%	大型($> 18 \mu\text{m}$)/%	
CK	7.48 ± 0.22a	59.73 ± 2.31a	32.80 ± 3.23a	14.29 ± 0.91b
MT100	7.62 ± 0.13a	53.41 ± 2.82b	38.98 ± 4.91a	15.78 ± 1.26ab
MT200	7.47 ± 0.25a	53.54 ± 2.51b	38.99 ± 4.07a	16.10 ± 0.78a
MT300	7.28 ± 0.23a	52.01 ± 3.99b	40.71 ± 4.73a	16.70 ± 0.55a
F值	1.3	4.00*	1.97	3.79*

2.3.2 淀粉粒表面积分布 由表4可知,褪黑素处理会影响玉米籽粒表面积分布。在玉米淀粉粒的表面积占比当中,小型淀粉粒的占比为43.91%~45.57%,中型淀粉粒占比为40.39%~44.86%,而大型淀粉粒占比为11.23%~14.04%,表明在淀粉粒的表面积分布中,中、小型淀粉粒是主要组成部分。自然高温胁迫下,不同浓度褪黑素处理对小型淀粉粒表面积占比无显著变化,但显著降低了中型淀粉粒的表面积占比,增加了大型淀粉粒的表面积占比,进而淀粉粒表面积的平均粒径有所增大。与对照相比,经MT100、MT200和MT300处理后,中型淀粉粒表面积占比分别降低了9.14%、9.96%、8.31%,大型淀粉粒表面积占比分别增加了23.24%、25.02%、24.31%。这说明褪黑素处理后淀粉粒表面积平均径($D[3,2]$)的增加是因为大型淀粉粒表面积占比增加造成的。

2.3.3 淀粉粒数量分布 由表5可知,在玉米淀粉粒数量分布中,小型淀粉粒占比97.78%~98.08%,中型淀粉粒占比1.86%~2.15%,大型淀粉粒占比0.06%~0.07%,说明小型淀粉粒组在淀粉粒数量分布中占主要部分。在自然高温胁迫下,褪黑素处理对玉米淀粉粒数量分布无显著影响。

表4 褪黑素对淀粉粒表面积分布的影响

Tab. 4 The effect of melatonin on the surface area distribution of starch granules

处理	淀粉粒粒径			D[3,2]/ μm
	小型(< 3 μm)/%	中型(3~18 μm)/%	大型(> 18 μm)/%	
CK	43.91 \pm 0.51a	44.86 \pm 0.64a	11.23 \pm 0.24b	7.69 \pm 0.20c
MT100	45.40 \pm 0.99a	40.76 \pm 2.26b	13.84 \pm 1.19a	7.83 \pm 0.10bc
MT200	45.57 \pm 1.70a	40.39 \pm 2.70b	14.04 \pm 1.01a	8.21 \pm 0.19a
MT300	44.92 \pm 0.52a	41.13 \pm 2.74b	13.96 \pm 1.70a	8.10 \pm 0.21ab
F 值	1.52	13.21**	4.13*	5.28*

表5 褪黑素对玉米淀粉粒数量分布的影响

Tab. 5 The effect of melatonin on the quantity distribution of maize starch grains

处理	淀粉粒粒径			/%
	小型(< 3 μm)	中型(3~18 μm)	大型(> 18 μm)	
CK	97.78 \pm 0.10a	2.15 \pm 0.09a	0.070 \pm 0.008a	
MT100	98.06 \pm 0.48a	1.88 \pm 0.47a	0.063 \pm 0.010a	
MT200	98.08 \pm 0.56a	1.86 \pm 0.55a	0.060 \pm 0.010a	
MT300	98.08 \pm 0.52a	1.86 \pm 0.50a	0.060 \pm 0.017a	
F 值	0.31	0.31	0.48	

2.4 淀粉黏度参数

由表6可见,自然高温胁迫下,褪黑素处理后玉米黏度参数显著增加,且随着褪黑素浓度的增加,黏度参数呈先升后降的趋势。与对照相比,MT100、MT200和MT300处理后玉米峰值黏度较对照增加了36.00%、40.46%、17.25%,低谷黏度较对照增加了34.58%、34.82%、16.18%,最终黏度较对照增加了29.72%、33.96%、7.93%。说明自然高温胁迫下,褪黑素处理显著提高了淀粉峰值黏度等黏度参数,在MT200处理下,玉米黏度参数达到最大值。

表6 褪黑素对玉米淀粉黏度参数的影响

Tab. 6 The effect of melatonin on viscosity parameters of maize starch

处理	峰值黏度	低谷黏度	最终黏度	稀懈值	回升值
CK	629.0 \pm 18.38c	627.5 \pm 19.09c	1 865.5 \pm 108.19b	1.5 \pm 0.50c	1 238.0 \pm 127.27b
MT100	855.5 \pm 16.26a	844.5 \pm 21.92a	2 420.0 \pm 161.22a	11.0 \pm 1.0b	1 575.5 \pm 139.30a
MT200	883.5 \pm 50.20a	846.0 \pm 25.46a	2 499.0 \pm 66.47a	37.5 \pm 2.5a	1 653.0 \pm 41.01a
MT300	737.5 \pm 31.81b	729.0 \pm 21.21b	2 013.5 \pm 47.38b	8.5 \pm 1.5b	1 284.5 \pm 26.16b
F 值	39.64**	68.02**	25.65**	306.13**	13.56**

2.5 籽粒 AGPase 和 SS 的酶活性

由图2(a)可见,自然高温胁迫下,褪黑素处理后玉米籽粒 AGPase 酶活性呈上升趋势,且随着褪黑素浓度的增加呈先升后降的趋势,其中MT100和MT200与对照差异显著,MT300处理无显著差异。MT100和MT200处理较对照分别增加了47.63%和56.47%。MT100处理与MT200处理无显著差异。说明褪黑素处理可增加籽粒中AGPase酶活性,以MT200处理较好。由图2(b)可见,自然高温胁迫下,MT100和MT300处理后玉米籽粒SS酶活性较对照无显著差异,MT200处理后籽粒SS酶活性增加了31.27%,较对照差异显著,可见自然高温胁迫下,MT200处理有利于玉米籽粒SS酶活性的提升。

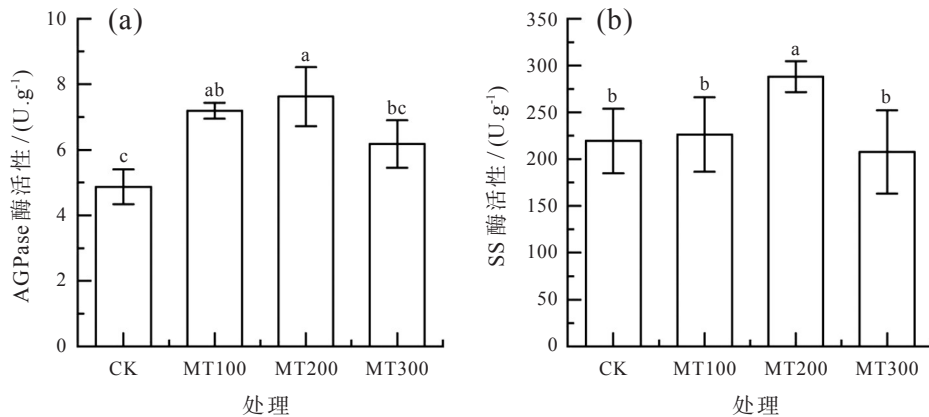


图2 褪黑素对玉米籽粒AGPase(a)和SS(b)酶活性的影响

Fig. 2 The effect of melatonin on the enzyme activity of AGPase (a) and SS (b) in maize kernels

3 结论与讨论

本研究结果表明,玉米灌浆期高温胁迫下,褪黑素处理显著提升了籽粒淀粉合成相关酶AGPase和SS的酶活性,提高了大型淀粉粒的体积占比和表面积占比,进而使籽粒淀粉含量增加,有利于提高粒重和产量。本研究中采用200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素对缓解玉米植株高温胁迫效果最佳。

玉米属C₄植物,适当的高温有利于玉米的生长发育,但当日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续3 d及以上,会对作物的生长发育造成损伤,形成高温逆境^[27]。高温会降低玉米干物质的积累与转运,致使雌穗生长受限,败育率增加,从而导致产量降低^[28-29]。褪黑素可能通过提高籽粒灌浆活跃期来延长营养物质的积累时长,增加粒重^[25]。在小麦的穗花分化发育关键阶段喷施外源物质可以有效促进大田环境下小麦增产,主要是通过增加穗粒数来实现,对穗数影响较小,对红小豆的产量亦有促进作用^[30-32]。有研究^[33]表明,高温胁迫下喷施浓度为100 $\mu\text{mol/L}$ 的外源褪黑素溶液能显著增强黄瓜抗高温的能力,且能增强厚皮甜瓜幼苗抵抗力,以浓度为200 $\mu\text{mol/L}$ 时效果最佳^[34]。本研究结果表明,褪黑素在100~300 $\mu\text{mol/L}$ 内,能显著增加玉米行粒数、百粒重和单株产量,穗行数无显著变化,说明褪黑素处理主要通过增加粒重,进而使产量增加,其中MT200处理后玉米产量达到最高,MT300次之,MT100最小。综上表明,褪黑素处理可增强玉米植株对高温胁迫的抗性,超过一定浓度范围反而对植株生长有一定的抑制作用。褪黑素缓解高温胁迫的较优浓度在不同品种和作物中存在差异,200 $\mu\text{mol/L}$ 是增强本玉米品种抗高温、缓解高温胁迫的较优褪黑素浓度。

作物在灌浆过程中,光合同化物逐渐向籽粒转移,形成淀粉、蛋白质、脂肪和糖类等营养贮藏物质,这些组分的变化会影响籽粒产量和品质^[35]。有研究^[36]发现,高温环境下糯玉米淀粉含量显著降低,但是在开花期喷施调节剂处理时,淀粉含量显著增加。李政^[37]的研究表明,褪黑素处理使小麦品种西农538籽粒硬度、淀粉含量和粗蛋白含量等品质指标显著提高,从而改良籽粒及面粉品质。本研究表明,自然高温胁迫下,褪黑素在100~300 $\mu\text{mol/L}$ 内对玉米籽粒品质有显著影响,增加了淀粉和脂肪含量,降低蛋白质含量,其中MT300处理籽粒脂肪含量最高,MT200处理籽粒淀粉含量最高。可能是褪黑素处理后玉米籽粒中AGPase和SS酶活性增加所致,表明褪黑素处理有利于玉米的碳代谢,从而使淀粉和干物质积累速率上升,玉米籽粒淀粉含量和粒重增加。

玉米理化性质受淀粉结构和组分含量影响显著^[38]。贺江等^[39]研究表明,施磷60~120 kg/hm^2 处理下,有利于增加玉米籽粒淀粉粒的平均粒径,即有利于淀粉粒体积的增大。本研究发现,褪

黑素处理显著提高了大型淀粉粒体积和表面积占比,中型淀粉粒趋势相反,同时淀粉粒体积和表面积平均粒径也显著增加。玉米淀粉粒形成,前期是数量的增加,后期是体积的增大,但由于持续的高温胁迫阻碍了淀粉粒的生长,褪黑素灌施起到抵御高温伤害的效果^[12],进而导致高温胁迫下对照组淀粉粒的粒径小于褪黑素处理组。

糊化特性对玉米面粉的加工品质和蒸煮品质有一定的影响,峰值黏度等黏度参数较高,表明其食味品质较好^[40]。本研究在自然高温胁迫下,褪黑素处理对玉米淀粉糊化特性有显著影响,增加了玉米淀粉峰值黏度等黏度参数,其中MT200处理后淀粉黏度参数的值最大。相关研究^[41]结果表明,较高的蛋白质含量不利于淀粉粒的膨胀,进而降低黏度参数。本研究中,褪黑素处理增加了玉米籽粒淀粉含量和淀粉粒的粒径,降低了蛋白质含量,这可能是淀粉黏度参数增加的原因。

玉米籽粒灌浆过程受一系列淀粉合成相关酶的调控^[42]。灌浆期高温胁迫下,籽粒淀粉含量降低,主要是由于蔗糖提供量降低造成糖原不够或因淀粉形成相关酶活性下降导致^[43]。李永庚等^[44]研究小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态时,发现淀粉积累速度与SS酶、AGPase酶活性呈显著正相关,是调控籽粒淀粉合成必不可少的酶。本研究表明,自然高温胁迫下,MT100和MT200处理显著增加了籽粒中AGPase酶活性,其中MT200处理后酶活性较强。本研究还发现,自然高温胁迫下,MT200处理后籽粒SS酶活性显著高于对照。可见,适宜浓度的褪黑素处理对玉米籽粒AGPase和SS酶活性具有调控作用,褪黑素浓度过高和过低都不利于AGPase和SS酶活性的增强。高温胁迫降低玉米粒重主要是因为高温降低了籽粒中AGPase酶和SS酶活性,使糖分向淀粉的转化受阻^[45],淀粉含量下降。这也进一步说明了经褪黑素处理后籽粒淀粉含量和产量增加的原因。

参考文献 (References)

- [1] 林纾,李红英,黄鹏程,等. 2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析[J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 748—763.
- [2] MITCHELL J C, PETOLINO J F. Heat stress effects on isolated reproductive organs of maize [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1988, 133(5): 625—628.
- [3] 和骅芸,胡琦,潘学标,等. 气候变化背景下华北平原夏玉米花期高温热害特征及适宜播期分析[J]. 中国农业气象, 2020, 41(1): 1—15.
- [4] 任寒,刘鹏,董树亭,等. 高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 109—115.
- [5] 王群,赵向阳,刘东尧,等. 淹水弱光复合胁迫对夏玉米根形态结构、生理特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3479—3495.
- [6] 乔江方,李萍,张美微,等. 花期高温对不同夏玉米品种产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(7): 11—18.
- [7] 陆大雷,郭换粉,董策,等. 生长季节对糯玉米淀粉粒分布和热力学特性的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1998—2003.
- [8] AO Z H, JAN J L. Characterization and modeling of the A— and B— granule starches of wheat, triticale, and barley [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67(1): 46—55.
- [9] 许海涛,王斌功,刘海潮,等. 高温对夏玉米种子萌发、生理特性及籽粒品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2019(1): 15—18.
- [10] 余梦奇,陈志英,胡健,等. 灌浆期高温胁迫对玉米籽粒淀粉粒度分布及黏度参数的影响[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2022, 35(6): 104—110.

- [11] 张萍, 陈冠英, 耿鹏, 等. 籽粒灌浆期高温对不同耐热型玉米品种强弱势粒发育的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2061—2070.
- [12] 杨欢, 沈鑫, 陆大雷, 等. 籽粒建成期高温胁迫持续时间对糯玉米籽粒产量和淀粉品质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2071—2082.
- [13] 赵步洪, 张文杰, 常二华, 等. 水稻灌浆期籽粒中淀粉合成关键酶的活性变化及其与灌浆速率和蒸煮品质的关系[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1123—1129.
- [14] 杨建昌, 彭少兵, 顾世梁, 等. 水稻灌浆期籽粒中3个与淀粉合成有关的酶活性变化[J]. 作物学报, 2001, 27(2): 157—164.
- [15] 沈泓, 姚栋萍, 吴俊, 等. 灌浆期不同时段高温对稻米淀粉理化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(4): 377—387.
- [16] 朱亚迪, 王慧琴, 王洪章, 等. 不同夏玉米品种大喇叭口期耐热性评价和鉴定指标筛选[J]. 作物学报, 2022, 48(12): 3130—3143.
- [17] YAN P, CHEN Y Q, DADOUMA A, et al. Effect of nitrogen regimes on narrowing the magnitude of maize yield penalty caused by high temperature stress in North China Plain [J]. *Plant Soil Environ*, 2017, 63(3): 131—138.
- [18] ZHANG H, ZHAO D, TANG Z Y, et al. Exogenous brassinosteroids promotes root growth, enhances stress tolerance, and increases yield in maize [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2022, 17(1): 1—14.
- [19] 刘兴舟, 李猛, 陈瑞佳, 等. 夏玉米穗部性状对种植密度的响应研究[J]. 农学学报, 2020, 10(10): 12—18.
- [20] SAIDI I, YOUSFI N, BORGI M A. Salicylic acid improves the antioxidant ability against arsenic-induced oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedling [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(16): 2326—2335.
- [21] GAMBIN B L, BORRAS L, OTEGUI M E. Source—sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids [J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2/3): 316—326.
- [22] KOLAR J, JOHNSON C H, MACHACKOVA I. Exogenously applied melatonin (N—acetyl—5—methoxytryptamine) affects flowering of the short—day plant *Chenopodium rubrum* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 118(4): 605—612.
- [23] 葛子菲, 毕新铜, 杨洋, 等. 外源褪黑素对软质小麦籽粒灌浆特性及淀粉品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(11): 1448—1455.
- [24] 张明聪, 何松榆, 秦彬, 等. 褪黑素对于旱胁迫下春大豆品种绥农26形态、光合生理及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(9): 1791—1805.
- [25] 余梦奇, 路梦莉, 张雅婷, 等. 褪黑素对高温胁迫玉米叶片光合特性与抗氧化酶活性的调控[J]. 玉米科学, 2024, 32(1): 90—99.
- [26] 王蕊, 杨小龙, 须晖, 等. 高等植物褪黑素的合成和代谢研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 615—627.
- [27] 王海梅. 高温胁迫对河套灌区玉米生理指标及产量构成要素的影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 59—62.
- [28] 邵靖宜, 李小凡, 于维祯, 等. 高温干旱复合胁迫对夏玉米产量和茎秆显微结构的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3623—3631.
- [29] ZHAO C, LIU B, PIAO S, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates [J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2017, 114(35): 9326—9331.
- [30] 田尧甫, 陈慧民, 黄雅凤, 等. 低氮胁迫下油菜素内酯对小麦穗发育和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(13): 41—44.
- [31] 陈静, 任佰朝, 赵斌, 等. 叶面喷施甜菜碱对不同播期夏玉米产量形成及抗氧化能力的调控[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1502—1515.

- [32] 陈忠诚,金喜军,李贺,等. 外源褪黑素对红小豆生长、光合荧光特性及产量构成因素的影响[J]. 作物杂志, 2021, 205(6): 88—94.
- [33] 刘松虎,王贺贺,张州,等. 外源褪黑素对高温胁迫下黄瓜幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(1): 109—114.
- [34] 陈倩云,刘海河,张彦萍,等. 外源褪黑素对高温胁迫下厚皮甜瓜幼苗光合及抗氧化特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(1): 33—37.
- [35] CHEN Y, BURRIS J S. Role of carbohydrates in desiccation tolerance and membrane behavior in maturing maize seed [J]. *Crop Science*, 1990, 30(5): 971—975.
- [36] 梁毓文,王龙飞,朱维佳,等. 吐丝期喷施外源调节剂对高温环境下鲜食糯玉米产量和品质的影响[J]. 上海农业学报, 2023, 39(5): 125—133.
- [37] 李政. 锌肥和褪黑素花后叶面喷施对西农 538 小麦灌浆特性及籽粒品质的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2020.
- [38] LU D, CAI X, YAN F, et al. Effects of high temperature after pollination on physicochemical properties of waxy maize flour during grain development [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(7): 1416—1421.
- [39] 贺江,付立冬,李文阳. 磷肥对玉米子粒淀粉粒度分布特性与黏度参数的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 153—159.
- [40] 韩晴,沈渊,孙小淋,等. 品种及地理位置对糯玉米糊化特性和食味品质影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 65—71.
- [41] 田益华,张传辉,蔡剑,等. 小麦籽粒 A 型和 B 型淀粉粒的理化特性[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1755—1758.
- [42] 张吉旺,董树亭,刘鹏,等. 大田增温对夏玉米产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 52—56.
- [43] 李晓彤,杨婉莹,孙莎莎,等. 外源褪黑素对番茄缺钙胁迫的缓解效应[J]. 植物生理学报, 2019, 55(2): 169—176.
- [44] 李永庚,于振文,姜东,等. 冬小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态及与其有关的酶活性的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(5): 658—664.
- [45] WILHELM E P, MULLEN R E, KEELING P L, et al. Heat stress during grain filling in maize: effects on kernel growth and metabolism [J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1733—1740.

(责任编辑:占怡玉)