

# 外源 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对玉米幼苗抗冷性影响研究

杨德光, 官磊, 王迎博, 何丽, 孙慧, 任静, 郑禹琪,  
宋纯儒, 于庆江, 翟婧宜, 张倩, 谢腾龙, 李威

(东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为探究外源 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对低温胁迫下玉米幼苗生理响应的调节作用, 以德美亚 3 号为试验材料, 在人工气候箱中进行盆栽试验。设 4 个处理, 分别为 25℃ 下叶面喷施清水(CK)、25℃ 下叶面喷施 6-BA(6-BA)、5℃ 下叶面喷施清水(LT)、5℃ 下叶面喷施 6-BA(LT+6-BA)。5℃ 处理 7 d 后 25℃ 处理 3 d。结果表明, 常温(25℃)条件下外源 6-BA 对玉米幼苗的生长具有一定的促进效果, 低温(5℃)胁迫抑制玉米幼苗的生长。在低温条件下, 6-BA 处理能改善根系生长情况, 提高叶绿素含量、净光合速率、气孔导度及最大光化学效率; 同时提高抗氧化酶活性, 使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量降低, 缓解低温胁迫对玉米幼苗生长的抑制程度。综上所述, 外源 6-BA 在低温胁迫条件下能通过提高玉米幼苗的光合能力和抗氧化酶活性, 降低膜脂过氧化物含量而提高玉米幼苗对低温的抵抗能力。

**关键词:** 玉米; 6-苄氨基嘌呤; 低温胁迫; 光合特性; 抗氧化系统

**中国分类号:** S513.01

**文献标识码:** A

## Effects of Exogenous 6-benzylaminopurine(6-BA) on Cold Resistance of Maize Seedlings

YANG De-guang, GONG Lei, WANG Ying-bo, HE Li, SUN Hui, REN Jing, ZHENG Yu-qi,  
SONG Chun-ru, YU Qing-jiang, ZHAI Jing-yi, ZHANG Qian, XIE Teng-long, LI Wei  
(College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to investigate the regulation of exogenous 6-benzaminopurine(6-BA) on physiological response of maize seedlings under low temperature stress, we used "Demeiya 3" maize variety as experimental material and conduct pot experiments in an artificial climate chamber. Four treatments were set up, foliar spraying of water at 25℃(CK), foliar spraying of 6-BA at 25℃(6-BA), foliar spraying of water at 5℃(LT), foliar spraying of 6-BA at 5℃(LT+6-BA). The maize seedlings were treated at 5℃ for 7 days and 25℃ for 3 days. The results showed that, 6-BA had certain stimulative effect on the growth of maize seedlings under normal temperature(25℃). while low temperature(5℃) stress inhibited the growth of maize seedlings. 6-BA treatment under low temperature stress led to a increase in root growth, chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance and maximum photochemical efficiency. At the same time, the activity of antioxidant enzymes was increased, the contents of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA were decreased, and the inhibition degree of low temperature stress on the growth of maize seedlings was alleviated. In conclusion, exogenous 6-BA can improve the resistance of maize seedling to low temperature by improving photosynthetic capacity, antioxidant enzyme activity and reducing the content of membrane lipid peroxides of maize seedlings under low temperature stress.

**Key words:** Maize; 6-benzylaminopurine; Low temperature stress; Photosynthetic characteristic; Antioxidation system

录用日期: 2022-04-29

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2021C024)、东北农业大学“青年才俊”项目(20QC02)、农业部种子管理局“绿色品种特性鉴定评价专项”(111721301354052342)

**作者简介:** 杨德光(1967-), 湖北孝感人, 教授, 博士生导师, 研究方向为玉米栽培生理。Tel: 18946154466 E-mail: deguangyang@sina.com  
谢腾龙为本文通信作者。Tel: 18945673830 E-mail: tenglongxie@126.com

玉米(*Zea mays* L.)是重要的粮食、经济及饲料兼用作物,2021年我国玉米总产量达 $2.7 \times 10^{12}$  kg,占全国粮食总产量的39.91%<sup>[1]</sup>。玉米原产于热带、亚热带地区,是喜温作物,对低温的抵抗能力较弱<sup>[2]</sup>。早春低温冷害是东北地区玉米生产的主要农业气象灾害,其中,苗期低温冷害发生频率高,是导致玉米产量不稳、品质不高的主要原因,可造成玉米减产20%~30%<sup>[3,4]</sup>。当玉米在苗期受到低温胁迫时,抗氧化酶系统遭到破坏,导致丙二醛(MDA)和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量大量积累,增加膜脂过氧化程度,并破坏细胞膜的完整性。前人研究发现,随着低温胁迫时间的延长,玉米叶片叶绿素含量、相关光合酶活性和PSII光化学效率降低,最终导致干物质积累量减少<sup>[5~7]</sup>。

非生物逆境下利用外源调节物质调控植物生长发育的研究已成为国内外研究的热点<sup>[8]</sup>。6-苄氨基腺嘌呤(6-BA)是一种人工合成的促进细胞分裂类激素,能通过抑制和清除活性氧自由基,提高植物光合速率,延长光合作用时间,最终实现生物量的增加<sup>[9]</sup>。已有研究表明,外源6-BA可缓解盐害、重金属和淹水等多种逆境对作物生长的抑制作用<sup>[10~12]</sup>。汪强等<sup>[13]</sup>研究发现,叶面喷施6-BA可通过提高叶片净光合速率和光电子传递效率来缓解低温胁迫对小麦生长的抑制。因此,外源6-BA能减轻低温胁迫对玉米幼苗的伤害成为一种可能。本研究通过调查玉米幼苗的生长发育、光合特性及抗氧化酶活性,探究外源6-BA对玉米幼苗抗冷性生理的调控效应,为玉米丰产和稳产提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2021年5~10月在东北农业大学农学院低温人工气候箱内进行。以德美亚3号为试验材料,选取子粒饱满的种子用3%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液消毒,用蒸馏水冲洗5次之后,将种子置于垫有湿润滤纸的发芽盒内,于25℃的条件下避光待种子发芽后种于口直径为13.2 cm、高16.4 cm的塑料盆中。供试土壤为草炭土。待幼苗长至3叶1心时进行低温处理,低温处理7 d后恢复常温处理3 d。试验共设置4个处理,分别为25℃下叶面喷施清水(CK)、25℃下叶面喷施6-BA(6-BA)、5℃下叶面喷施清水(LT)、5℃下叶面喷施6-BA(LT+6-BA)。各处理植株置于型号为DRXM-808C的人工智能气候箱中培养,光照和黑暗时间均为12 h,光照强度为400  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,相对湿度控制在80%左右。分别在处理的第1、3、5、7、8

天取样后,每株均匀喷施5 mL浓度为15 mg/L的6-BA或蒸馏水,共计喷施5次。本试验中6-BA使用浓度根据预试验结果确定。分别在低温处理后的第0、1、3、5、7天及恢复常温处理的第8天和第10天进行相关指标测定。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 植株干重与鲜重

分别取幼苗地上部和地下部,用蒸馏水洗净杂物后用吸水纸擦干,用分析天平测定鲜重。随后将植株置于105℃的烘箱内杀青30 min,并调节烘箱温度为80℃直至样品恒重。每个处理随机选取5株,3次重复。

#### 1.2.2 玉米根系形态测定

每个处理随机选取5株幼苗根系,使用蒸馏水将根系冲洗干净后,采用中晶根系扫描仪I800plus对幼苗根系进行扫描,并利用LA-S根系分析系统对根系图像进行分析。

#### 1.2.3 总叶绿素含量

取长势一致的玉米幼苗叶片,剪成直径1 cm左右的碎片后混合均匀,称取0.1 g,用5 mL 96%的乙醇避光浸泡直至叶片发白,每个处理3次重复,稀释10倍,采用分光光度计法,分别于665 nm和649 nm的波长下比色,计算叶绿素a和叶绿素b总量。

#### 1.2.4 叶绿素荧光

于上午9:30~10:30,对玉米叶片进行30 min的暗适应后,使用植物效率分析仪(Handy PEA)测定荧光参数,每个处理5次重复。

#### 1.2.5 气体交换参数

于上午10:00~11:00,采用Li-6400XTR光合仪(美国Li-COR公司)测定玉米幼苗基部以上第二片叶的光合参数,每个处理5次重复。测定指标为净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )。

#### 1.2.6 膜脂过氧化产物

过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量测定:取0.5 g样品于0.1%三氯乙酸中冰浴研磨,匀浆在4℃下12 000 r/min离心15 min。取上清液与pH值为7的磷酸钾缓冲液、KI溶液混合,与室温黑暗下静置1 h后,在390 nm波长下测定样品的吸光值,绘制标准曲线并计算H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,每个处理3次重复。

丙二醛(MDA)含量测定:取样0.5 g进行研磨,加入10% TCA溶液和少量石英砂,研磨至匀浆后于4 000 r/min的条件下离心10 min,上清液即为提取液。取上清液加入0.6%TBA溶液,混合均匀后于沸水浴中加热15 min,冷却后再次离心。取上清液在

相应的波长下进行吸光值的测定,每个处理3次重复。

1.2.7 抗氧化酶活性

抗氧化酶液的制备:称取幼苗叶片0.5 g,加PBS冰浴研磨,匀浆4℃条件下离心20 min(10 000 r/min),提取上清液(酶液)置入试管中,每个处理3次重复,于4℃下保存待用。

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT还原法测定<sup>[14]</sup>。反应混合物包括pH值为7.8的磷酸缓冲溶液、甲硫氨酸、EDTA-Na<sub>2</sub>、核黄素和酶液,光照30 min,560 nm比色。

过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚测定。反应混合物包括pH值为7.0的PBS、愈创木酚、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和酶液,在470 nm下每隔60 min读数1次,共读数3次。

过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢还原法测定<sup>[15]</sup>。反应混合物包括pH值为7.0的PBS、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和酶液,25℃水浴后,加入H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>反应液,在240 nm下比色。

抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用愈创木酚法测定<sup>[16]</sup>。反应混合物包括ASA、酶液、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和pH值

为7的磷酸缓冲溶液,在290 nm下比色。

1.3 数据处理与分析

采用SPSS 20.0对数据进行差异显著性检验(LSD法, $P<0.05$ ),采用Origin 9.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗干重、鲜重的影响

由表1可知,在常温条件下,6-BA处理的幼苗生物量显著高于CK处理,均在第10天达到最大值。低温胁迫处理显著抑制玉米幼苗的生长。在处理的第10天,LT处理地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重、地下部干重分别较CK处理减少64.68%、46.61%、47.82%和36.36%;LT+6-BA处理地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重和地下部干重分别较LT处理增加43.16%、60.56%、25.00%和28.57%,差异显著( $P<0.05$ )。在常温恢复阶段,6-BA处理玉米幼苗生物量恢复更快,说明6-BA处理可有效缓解低温胁迫对玉米幼苗生长的抑制作用。

表1 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗生长的影响

Table 1 Effects of 6-BA treatment on maize seedling growth under low temperature stress g

处理时间(d) Treatment time	处 理 Treatment	地上部鲜重 Fresh weight above ground	地下部鲜重 Fresh weight of underground	地上部干重 Dry weight above ground	地下部干重 Dry weight of underground
7	CK	2.43±0.14 b	1.07±0.15 a	0.22±0.04 b	0.10±0.02 a
	6-BA	3.45±0.20 a	1.19±0.18 a	0.34±0.07 a	0.12±0.03 a
	LT	0.81±0.08 d	0.61±0.06 c	0.10±0.03 c	0.07±0.01 b
	LT+6-BA	1.27±0.11 c	0.99±0.02 b	0.13±0.09 c	0.10±0.02 a
10	CK	2.69±0.15 b	1.33±0.06 a	0.23±0.03 b	0.11±0.02 a
	6-BA	3.70±0.21 a	1.39±0.17 a	0.38±0.05 a	0.13±0.03 a
	LT	0.95±0.07 d	0.71±0.07 c	0.12±0.02 c	0.07±0.01 c
	LT+6-BA	1.36±0.10 c	1.14±0.14 b	0.15±0.02 c	0.09±0.02 b

注:同列数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ,LSD)。下表、下图同。  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences( $P<0.05$ , LSD). The same below.

2.2 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗根系形态的影响

由表2可知,在常温条件下,6-BA处理玉米幼苗根长和根表面积均显著高于CK处理,根体积差异不显著。低温胁迫下玉米幼苗根系生长受抑制,在处理的第10天,LT处理根长、根表面积和根体积分别较CK处理降低21.89%、20.00%和29.29%,LT+6-BA处理根长、根体积和根表面积较LT处理分别显著增加20.18%、12.32%和35.00%。此外,在常温恢复阶段,6-BA处理玉米幼苗根系生长恢复的更

快,说明6-BA处理能有效缓解低温胁迫对玉米幼苗根系生长的抑制作用。

2.3 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗总叶绿素含量的影响

由图1可知,在常温条件下,6-BA处理玉米幼苗叶绿素总含量高于CK处理,未达到显著水平。低温胁迫条件下,随着胁迫天数的延长,各处理叶绿素总含量呈下降趋势。低温处理第7天时,LT和LT+6-BA处理分别较CK处理显著下降58.83%和47.96%;恢复常温处理后,LT+6-BA处理叶绿素含

量较LT处理显著提高16.22%和26.80%。由此可见,低温胁迫明显加速叶绿素的分解,外源6-BA处理可显著减缓低温胁迫所造成的叶绿素含量降低。

表2 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗根系形态的影响  
Table 2 Effects of 6-BA treatment on root morphology of maize seedlings under low temperature stress

处理时间(d)	处 理	根长(cm)	根表面积(cm <sup>2</sup> )	根体积(cm <sup>3</sup> )
Treatment time	Treatment	Root length	Root surface area	Root volume
7	CK	222.26±11.64 b	56.84±4.74 ab	1.80±0.14 ab
	6-BA	287.99±13.56 a	67.76±8.94 a	1.96±0.10 a
	LT	175.40±8.17 c	46.44±3.47 c	1.17±0.23 c
	LT+6-BA	220.65±9.27 b	50.10±3.91 bc	1.64±0.17 b
10	CK	278.32±14.36 b	64.56±4.82 b	1.98±0.13 ab
	6-BA	328.49±7.22 a	73.47±5.84 a	2.24±0.27 a
	LT	220.01±17.16 c	48.96±3.94 c	1.40±0.13 c
	LT+6-BA	263.27±9.36 b	55.13±2.18 bc	1.89±0.17 b

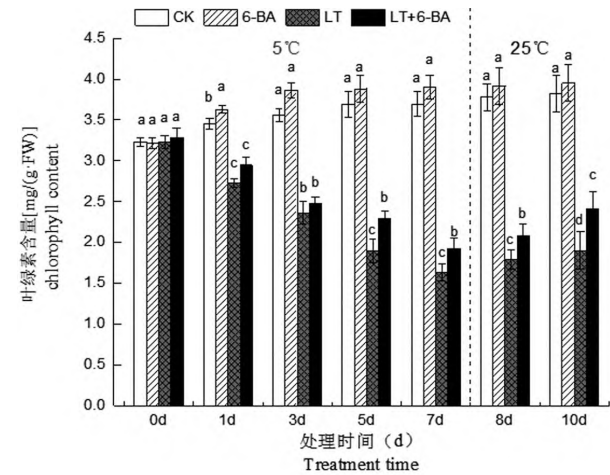


图1 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗总叶绿素含量的影响  
Fig. 1 Effects of 6-BA treatment on total chlorophyll content of maize seedlings under low temperature stress

2.4 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗叶绿素荧光参数的影响

由图2可知,在常温条件下,与CK处理相比,

6-BA处理玉米幼苗 $F_v/F_o$ 和 $F_v/F_m$ 均有所升高,但未达到显著水平。低温胁迫条件下, $F_v/F_o$ 与 $F_v/F_m$ 呈下降趋势,并且在第5~7天时下降幅度最大。低温处

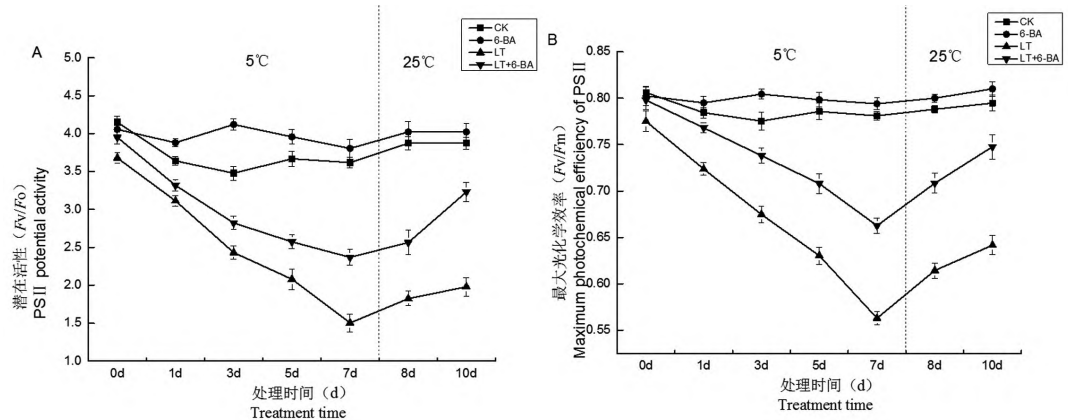


图2 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗叶绿素荧光的影响  
Fig.2 Effects of 6-BA treatment on chlorophyll fluorescence of maize seedlings under low temperature stress



理第7天时,与CK处理相比,LT和LT+6-BA处理 $F_i/F_o$ 显著降低了58.54%和34.55%, $F_v/F_m$ 显著降低了27.91%和15.11%。恢复常温处理后,LT和LT+6-BA处理 $F_i/F_o$ 上升了32.00%和36.28%; $F_v/F_m$ 上升了12.60%和14.73%。由此可见,6-BA处理能缓解低温胁迫导致的 $F_i/F_o$ 与 $F_v/F_m$ 下降,对玉米叶片PSII具有一定的保护作用。

## 2.5 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗光合参数的影响

由图3可知,在常温条件下,6-BA处理玉米叶片的 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 均显著高于CK处理,说明正常温度

下6-BA处理能维持玉米叶片较高的光合能力。低温胁迫条件下,幼苗 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 均显著降低, $C_i$ 显著升高。低温处理第7天时,LT处理 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 较CK处理分别下降48.77%、67.26%和29.77%, $C_i$ 提高58.22%;LT+6-BA处理 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 较CK处理分别下降30.22%、40.59%和22.01%, $C_i$ 提高36.70%,差异显著。恢复常温处理后,LT与LT+6-BA处理 $P_n$ 分别上升了36.94%和47.71%,未能恢复到低温胁迫处理前的水平。由此可见,低温胁迫明显抑制了幼苗光合作用,6-BA处理可缓解低温对玉米光合作用的抑制。

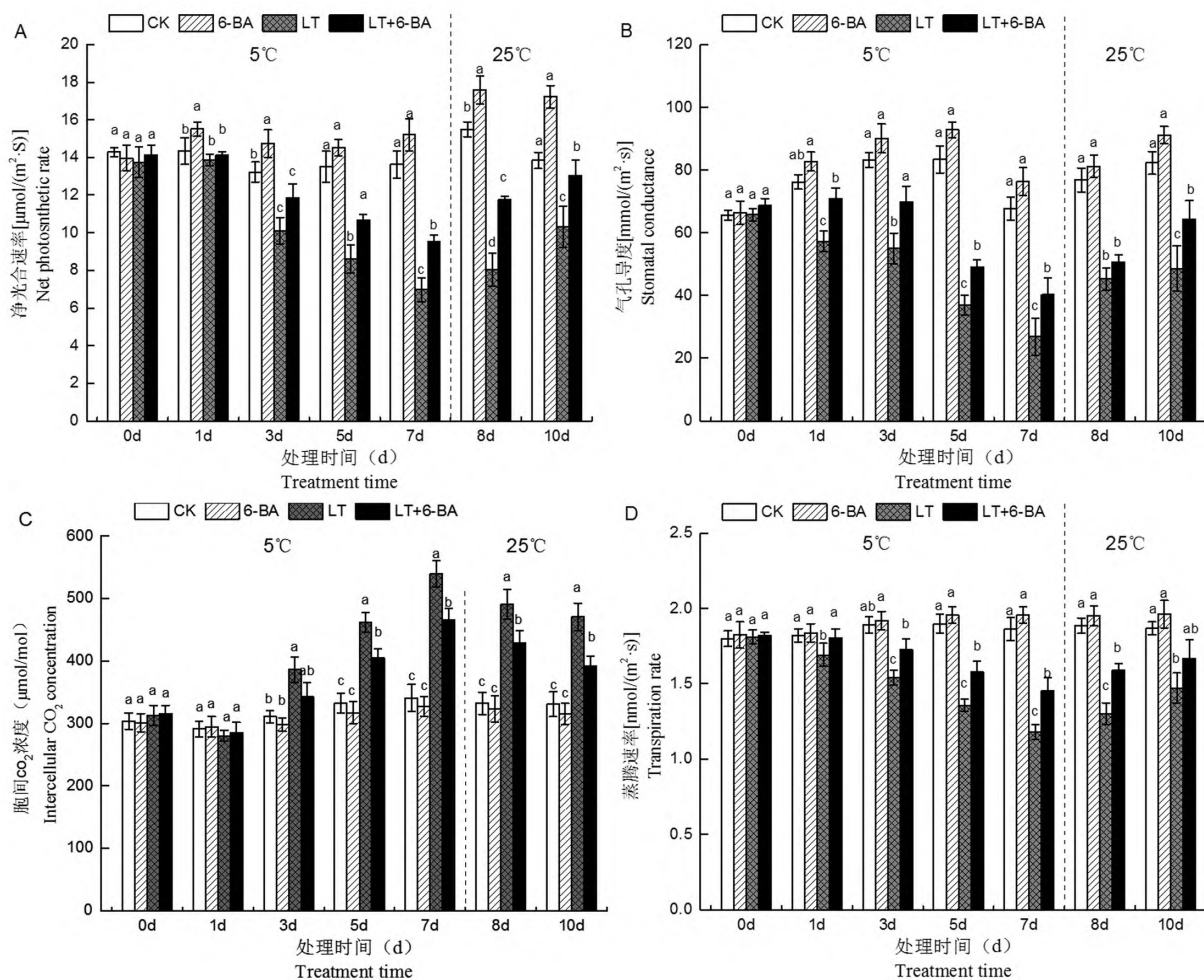


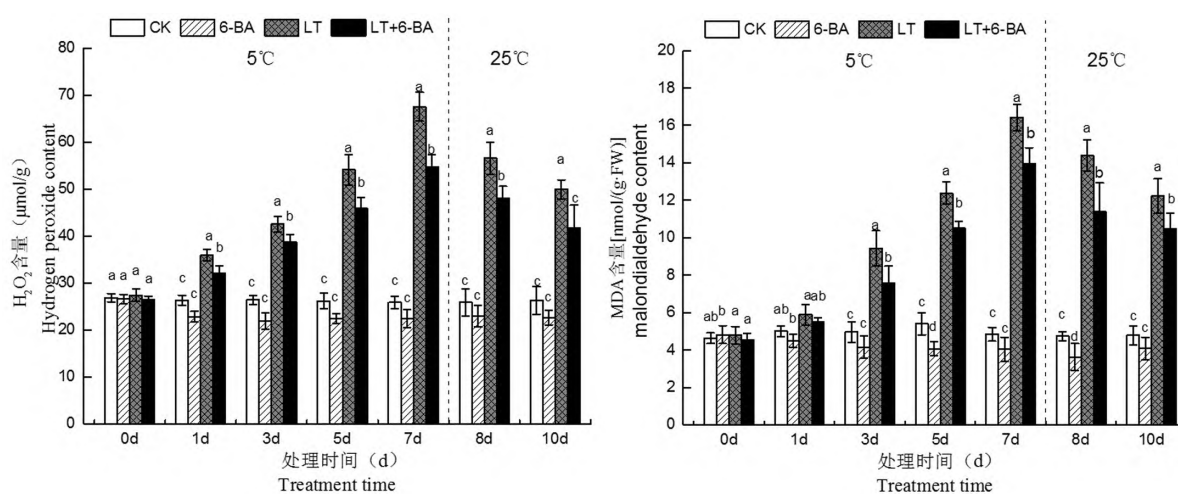
图3 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗光合参数的影响

Fig.3 Effects of 6-BA treatment on photosynthetic parameters of maize seedlings under low temperature stress

## 2.6 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗膜脂过氧化物含量的影响

由图4可知,在常温条件下,6-BA处理玉米幼苗 $H_2O_2$ 和MDA含量不同程度低于CK处理。在低温胁迫条件下,随着胁迫时间的延长, $H_2O_2$ 和MDA含量呈逐渐增加趋势,并且在第5~7天时增加幅度最大。低温处理第7天时,LT和LT+6-BA处理 $H_2O_2$

含量较CK处理显著增加161.44%和112.00%,MDA含量显著增加161.44%和90.62%。恢复常温处理后,LT和LT+6-BA处理 $H_2O_2$ 含量下降23.72%和25.99%,MDA含量下降19.80%和25.53%。由此可见,6-BA处理可有效降低低温胁迫下玉米幼苗膜脂过氧化物含量。

图4 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(A)和MDA(B)含量的影响Fig.4 Effect of 6-BA treatment on content of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(A) and MDA(B) in maize seedlings

## 2.7 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

由图5可知,在常温处理第10天,6-BA处理的

SOD、POD、CAT 和 APX 活性较CK处理增加8.76%、14.74%、13.72%和10.73%。在低温胁迫条件下,随着低温胁迫时间的延长,幼苗叶片SOD、POD、CAT

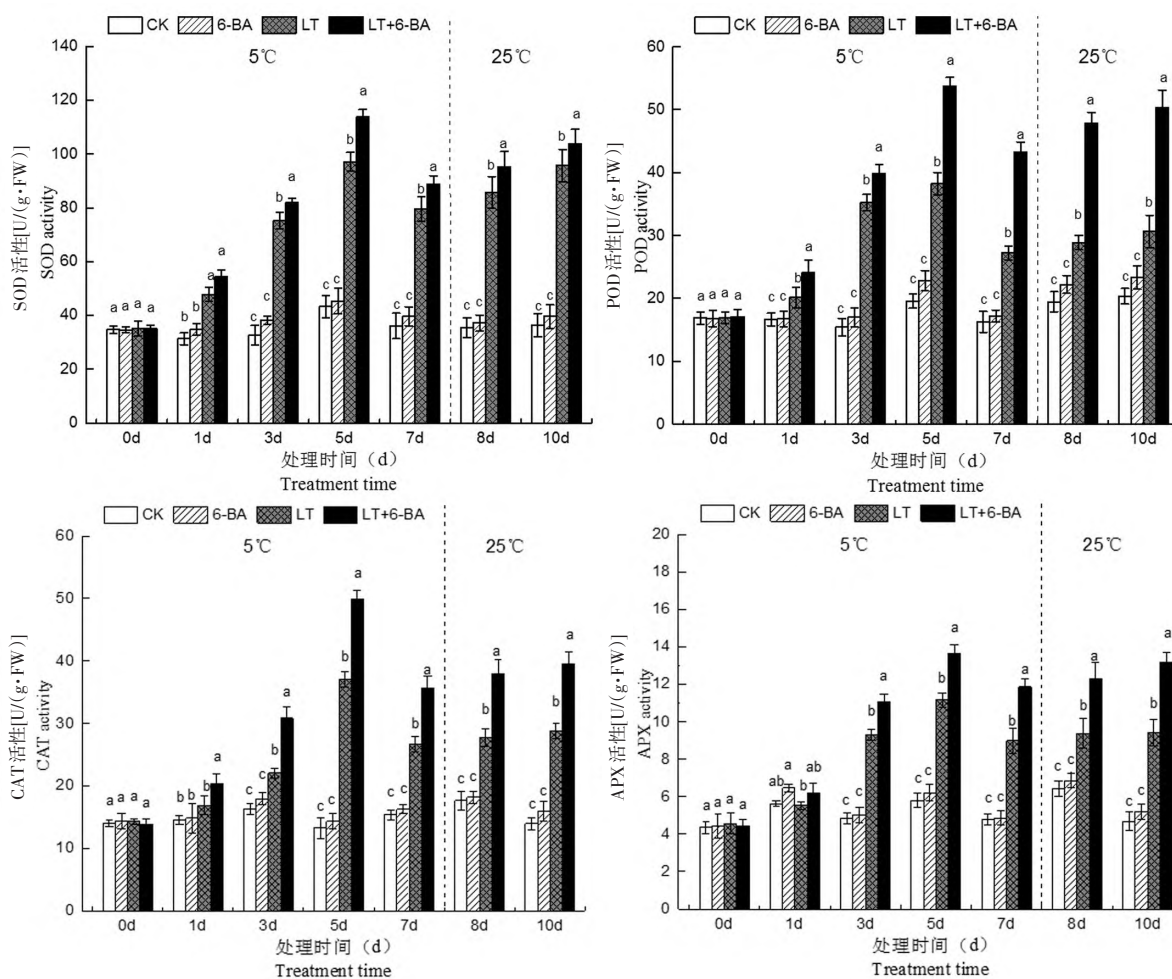


图5 低温胁迫下6-BA处理对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of 6-BA treatment on antioxidant enzyme activities of maize seedlings under low temperature stress



和APX活性均呈先增高后下降趋势,在低温处理第5天时达到峰值。低温处理第7天,与LT处理相比,LT+6-BA处理的SOD、POD、CAT和APX活性显著增加11.71%、58.89%、25.29%和32.13%;恢复常温处理后,与LT处理相比,LT+6-BA处理SOD、POD、CAT和APX活性提高8.38%、64.28%、37.45%和39.76%。由此可见,外源施加6-BA处理可提升幼苗抗氧化系统酶活性,清除产生的过多活性氧等有毒物质。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗生长发育的调控效应

生长缓慢、生物量下降是植物受到低温胁迫后最为突出的生理响应<sup>[17]</sup>。根系是玉米吸收水分和养分的重要营养器官,与植株的抗低温能力密切相关,可通过外源物质调控<sup>[18,19]</sup>。本研究表明,低温条件下玉米幼苗的生长明显受抑制,降低幼苗生物量积累、根长、根表面积和根体积。肖长新等<sup>[20]</sup>研究发现,外源施加10 mg/L的6-BA在玉米灌浆期可延缓玉米根系的衰老,使收获期单株总根长显著高于对照。在本研究中,外源施用6-BA可缓解低温胁迫对玉米幼苗生长的抑制作用,表现为地上部干重增加13.63%、根长增加25.80%。推测其主要原因是6-BA改善了玉米幼苗根系的生长情况,增强根系吸收水分及营养物质的能力,缓解功能叶片的生长受阻的情况,最终表现为生物量明显增加<sup>[21,22]</sup>。

#### 3.2 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗光合系统的调控效应

有研究发现,低温会降低玉米的光合特性,显著降低净光合速率,最终导致玉米产量下降。净光合速率下降是大多数植物受低温胁迫影响最直接的表现<sup>[23,24]</sup>。在本研究中,低温胁迫条件下玉米叶片的 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 均小于对照。张爱军等<sup>[25]</sup>研究显示,外源喷施细胞分裂素能显著提高小麦旗叶的净光合速率。本研究表明,6-BA处理提高 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ ,并缓解 $C_i$ 升高;常温恢复期 $P_n$ 恢复较快,并不能完全恢复。可能是由于6-BA处理可通过减缓叶片气孔导度的下降幅度,减少非气孔限制,提高运输光合原料和产物的能力,提升低温胁迫下玉米的净光合速率<sup>[26]</sup>。

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,也是评价光合活性的重要指标<sup>[27]</sup>。杨雪等<sup>[28]</sup>研究表明,6-BA处理可显著提高玉米生殖期穗位叶的叶绿素含量。在本研究中,苗期低温条件下叶绿素含量显

著下降,而6-BA处理缓解了低温胁迫对叶绿素含量的不利影响。随后的常温恢复期,经6-BA处理的幼苗叶片的叶绿素含量显著高于未经处理组。所以6-BA处理可显著降低低温胁迫下玉米幼苗叶片叶绿素的降解速率,促进叶绿素合成,增强光合作用,保证干物质的积累,从而缓解低温胁迫对植株的伤害<sup>[29]</sup>。植物叶片PS II对胁迫敏感且响应快速,因此对植物叶片PS II产生的叶绿素荧光进行研究,可以深入揭示低温胁迫下植物的能量产生与传递变化规律<sup>[30,31]</sup>。骆永丽等<sup>[32]</sup>对外源6-BA和不同氮肥条件下小麦的生理特性研究表明,经6-BA处理的 $F_v/F_m$ 值有所提高。在本研究中,低温条件下 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 显著下降,而6-BA处理幼苗的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 保持在较高水平。随后的常温恢复期,经6-BA处理的幼苗叶片的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 与对照差异较小。说明低温条件下喷施6-BA处理可提高PSII的电子传递效率,从而提高低温条件下玉米的光合效率。

#### 3.3 外源6-BA处理对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的调控效应

低温损伤症状的发生,在某种程度上可能是低温诱导植物体内大量如超氧自由基、过氧化氢、单线态氧和羟基自由基等活性氧物质的产生,对细胞膜结构、核酸和蛋白质造成损害<sup>[33]</sup>。许多学者研究表明,植物受到低温胁迫时,MDA含量越少,植物对低温的抵抗能力越强<sup>[34]</sup>。在本研究中,低温处理加剧MDA和 $H_2O_2$ 在玉米幼苗叶片中的过量积累,6-BA处理的幼苗叶片中MDA和 $H_2O_2$ 含量显著降低。董永华<sup>[35]</sup>等认为,外源6-BA降低水分胁迫条件下玉米幼苗体内MDA含量。低温胁迫条件下活性氧自由基代谢失调,高等植物自身拥有的抗氧化酶系统帮助清除活性氧,并保护植物细胞免受氧化损伤。杨安中等<sup>[36]</sup>研究发现,6-BA处理能够延缓离体杂交水稻叶片的衰老,增强抗氧化酶活性,减少活性氧的积累。本研究表明,低温胁迫下玉米幼苗SOD、POD、CAT和APX活性呈先增加后降低趋势,喷施6-BA后抗氧化酶活性显著增加。说明6-BA处理可有效激活低温胁迫条件下玉米幼苗的酶促防御系统,清除幼苗体内产生过量的 $H_2O_2$ 和MDA,增强玉米幼苗对低温的抵抗能力。

综上所述,低温胁迫抑制玉米幼苗根系生长,减少干物质积累。外源施用15 mg/L 6-BA可促进低温胁迫下玉米幼苗抗氧化酶(SOD、POD、CAT和APX)的活性,加快体内有害物质MDA和 $H_2O_2$ 的分解,降低低温对膜的损伤程度,对叶绿体有保护作用。同时降低叶绿素的分解速率,保护PS II反应中心活性,

提高玉米幼苗在低温条件下的光合能力,增加生物量积累。因此,苗期叶面喷施6-BA可增强玉米幼苗的抗低温能力,避免玉米幼苗受早春低温的影响。

#### 参考文献:

- [1] 2021年全国粮食产量再创新高[N]. 中国信息报, 2021.12.07(第002版).
- [2] OLÁH C, LUDMERSZKI E, RÁCZ I, et al. S-methylmethionine-salicylate pretreatment reduces low temperature stress in maize[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2018, 65(1): 63-8.
- [3] 邢则森, 姜兴印, 孙石昂, 等. 低温胁迫下S-诱抗素拌种对玉米生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(16): 1-6.  
XING Z S, JIANG X Y, SUN S A, et al. Effects of S-inducer seed dressing on physiological indexes of maize under low temperature stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(16): 1-6. (in Chinese)
- [4] 郭春明, 李 建, 任景全, 等. 低温胁迫对玉米光合特性及粒重的影响[J]. 东北农业科学, 2017, 42(4): 5-10.  
GUO C M, LI J, REN J Q, et al. Effects of low temperature stress on photosynthetic characteristics and grain weight of maize[J]. Northeast Agricultural Sciences, 2017, 42(4): 5-10. (in Chinese)
- [5] 马延华, 王庆祥, 陈绍江. 玉米耐寒性生理生化机理与分子遗传研究进展[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 76-81.  
MA Y H, WANG Q X, CHEN S J. Research progress on physiological and biochemical mechanism and molecular genetics of maize cold tolerance[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 76-81. (in Chinese)
- [6] NIE G Y, ROBERTSON E J, FRYER M J, et al. Response of the photosynthetic apparatus in maize leaves grown at low temperature on transfer to normal growth temperature[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(1): 1-12.
- [7] 李 林, 杜 卓, 侯 雯, 等. 外源谷胱甘肽对低温胁迫下玉米幼苗的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(27): 16-20.  
LI L, DU Z, HOU W, et al. Effects of exogenous glutathione on maize seedlings under low temperature stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(27): 16-20. (in Chinese)
- [8] ZHANG C, WANG Q, ZHANG B, et al. Hormonal and enzymatic responses of maize seedlings to chilling stress as affected by triazoles seed treatments[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 148: 220-7.
- [9] 陈晓璐, 李 耕, 刘 鹏, 等. 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对不同氮素水平下玉米叶片衰老过程中光系统II性能的调控效应[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1111-1118.  
CHEN X L, LI G, LIU P, et al. Effects of 6-benzaminopurine(6-BA) on photosystem II performance of maize leaves during senescence under different nitrogen levels[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(6): 1111-1118. (in Chinese)
- [10] 蔡美杰, 张恩慧, 张鑫鑫, 等. 盐胁迫甘蓝DH幼苗添加细胞分裂素效果研究[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(5): 19-25.  
CAI S M, ZHANG E H, ZHANG X X, et al. Effect of cytokinin supplementation on salt stress in Cabbage DH seedlings[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(5): 19-25. (in Chinese)
- [11] 郭 彦, 张文会, 魏秀俭, 等. 6-BA对盐胁迫下大豆幼苗生理指标的影
- 响[J]. 作物杂志, 2006(1): 14-5.  
GUO Y, ZHANG W H, WEI X J, et al. Effects of 6-BA on physiological Indexes of soybean seedlings under salt stress[J]. Crops, 2006(1): 14-5. (in Chinese)
- [12] 杜厚江, 王小燕, 赵晓宇. 6-BA对小麦开花期渍害的减缓效应[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(12): 1672-1676.  
DU H J, WANG X Y, ZHAO X Y. Reduction effect of 6-BA on waterlogging in wheat at flowering stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(12): 1672-1676. (in Chinese)
- [13] 汪 强, 黄正来, 张文静, 等. 新美洲星和6-BA对低温胁迫下稻茬小麦光合和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1269-1274.  
WANG Q, HUANG Z L, ZHANG W J, et al. Effects of New American Star and 6-BA on photosynthesis and yield of wheat under low temperature stress[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(9): 1269-1274. (in Chinese)
- [14] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 植物生理生化实验原理与技术, 2015.
- [15] 孙玉珺, 吴 玥, 马德志, 等. 外源油菜素内酯对低温胁迫下玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(3): 119-128.  
SUN Y J, WU Y, MA D Z, et al. Effects of exogenous brassinolactone on germination and physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(3): 119-128. (in Chinese)
- [16] 石如意, 王腾飞, 李 军, 等. 低温胁迫下外源ABA对玉米幼苗抗寒性的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(3): 136-143.  
SHI R Y, WANG T F, LI J, et al. Effects of exogenous ABA on the cold resistance of maize seedlings under low temperature stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(3): 136-143. (in Chinese)
- [17] SUN Y J, HE Y H, IRFAN A R, et al. Exogenous brassinolide enhances the growth and cold resistance of maize(*Zea mays L.*) seedlings under chilling stress[J]. Agronomy, 2020, 10(4): 488.
- [18] HAFIZ A H, MEN S N, SADDAM H, et al. Maize tolerance against drought and chilling stresses varied with root morphology and anti-oxidative defense system[J]. Plants, 2020, 9(6).
- [19] 刘 旋, 田礼欣, 佟昊阳, 等. 低温胁迫下玉米幼苗根系受外源海藻糖调控的生理表现[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2354-2361.  
LIU X, TIAN L X, TONG H Y, et al. Physiological expression of exogenous trehalose in maize seedling roots under low temperature Stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2354-2361. (in Chinese)
- [20] 肖长新, 陈延玲, 米国华. 灌浆后期6-BA灌根对玉米衰老和产量形成的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 103-107, 113.  
XIAO C X, CHEN Y L, MI G H. Effects of 6-BA root irrigation on maize senescence and yield formation in late grain-filling period[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(1): 103-107, 113. (in Chinese)
- [21] 姜 辉. 苗期低温胁迫对玉米根系生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(2): 15-17.  
JIANG H. Effects of low temperature stress on maize root growth at



- seedling stage[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(2): 15-17. (in Chinese)
- [22] 侯林欣, 吕强, 黄明, 等. 不同温度水杨酸引发对干旱胁迫下玉米种子发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(19): 13-21.
- HOU L X, LÜ Q, HUANG M, et al. Effects of salicylic acid initiation on seed germination and seedling physiological characteristics of maize under drought stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(19): 13-21. (in Chinese)
- [23] TURK H, ERDAL S, DÜMLÜPINAR R. Carnitine- induced physio- biochemical and molecular alterations in maize seedlings in response to cold stress[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 6(7).
- [24] 侯雯, 杜卓, 王丽, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国糖料, 2020, 42(2): 182-186.
- HOU W, DU Z, WANG L, et al. Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress[J]. Sugar Research in China, 2020, 42(2): 182-186. (in Chinese)
- [25] 张爱军, 商振清, 董永华. 6-BA和KT对干旱条件下小麦旗叶甘油醛-3-磷酸脱氢酶及光合作用的影响[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(2): 37-41.
- ZHANG A J, SHANG Z Q, DONG Z H. Effects of 6-BA and KT on glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase and photosynthesis in flag leaf of wheat under drought stress[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(2): 37-41. (in Chinese)
- [26] 张倩, 张洪生, 赵美爱, 等. 种植方式对夏玉米光合特性与产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 102-105.
- ZHANG Q, ZHANG H S, ZHAO M A, et al. Effects of planting patterns on photosynthetic characteristics and yield of summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 102-105. (in Chinese)
- [27] SCHWEITZER R H, MELKOZERNOV A N, BLANKENSHIP R E, et al. Time-resolved fluorescence measurements of photosystem II: The effect of quenching by oxidized chlorophyll Z[J]. Journal of Physical Chemistry B, 1998, 102(42).
- [28] 杨雪, 彭静, 张明明, 等. 叶面喷施6-BA对玉米生殖期碳水化合物转运和分配的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 62-70.
- YANG X, PENG J, ZHANG M M, et al. Effects of 6-BA spraying on carbohydrate transport and distribution in maize during reproductive period[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2019, 47(7): 62-70. (in Chinese)
- [29] 李瑞杰, 唐会会, 王庆燕, 等. 5-氨基乙酰丙酸和乙烯利复配剂对东北春玉米光合特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020(2): 125-133.
- LI R J, TANG H H, WANG Q Y, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid and ethrel compound on photosynthetic characteristics and yield of spring maize in northeast China[J]. Crops, 2020(2): 125-133. (in Chinese)
- [30] 李书鑫, 徐婷, 李慧, 等. 低温胁迫对玉米幼苗叶绿素荧光诱导动力学的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(3): 221-230.
- LI S X, XU T, LI H, et al. Effects of low temperature stress on chlorophyll fluorescence induction kinetics in maize seedlings[J]. Soils and Crops, 2020, 9(3): 221-230. (in Chinese)
- [31] LEANDRA, BORDIGNON, ANA, et al. Osmotic stress at membrane level and photosystem II activity in two C<sub>4</sub> plants after growth in elevated CO<sub>2</sub> and temperature[J]. Annals of Applied Biology, 2019, 174(2).
- [32] 骆永丽, 杨东清, 尹燕桦, 等. 外源6-BA和不同用量氮肥配合对小麦花后叶片功能与荧光特性的调控效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1060-1083.
- LUO Y L, YANG D Q, YIN Y P, et al. Effects of exogenous 6-BA and nitrogen fertilizer on leaf function and fluorescence characteristics of wheat after anther[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1060-1083. (in Chinese)
- [33] LI S, YANG W, GUO J, LI X, et al. Changes in photosynthesis and respiratory metabolism of maize seedlings growing under low temperature stress may be regulated by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 154.
- [34] 李丽杰, 顾万荣, 李从锋, 等. DCPTA对低温下玉米叶片抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1829-1841.
- LI L J, GU W R, LI C F, et al. Effects of DCPTA on antioxidant system and osmotic regulation substances in maize leaves under low temperature[J]. Chinese Journal of Plant Physiology, 2016, 52(12): 1829-1841. (in Chinese)
- [35] 董永华, 史吉平, 李广敏, 等. 外施6-BA和ABA提高玉米幼苗抗旱能力的作用及效果[J]. 西北植物学报, 1998(2): 51-55.
- DONG Y H, SHI J P, LI G M, et al. Effects of exogenous 6-BA and ABA on drought resistance of maize seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1998(2): 51-55. (in Chinese)
- [36] 杨安中, 黄义德. 旱作水稻喷施6-苄基腺嘌呤的防早衰及增产效应[J]. 南京农业大学学报, 2001(2): 12-15.
- YANG A Z, HUANG Y D. Effect of spraying 6-benzyladenine on preventing premature senescence and increasing yield in rice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001(2): 12-15. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)