

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0003

# 表油菜素内酯对干旱胁迫条件下黄瓜幼苗的影响

张国恒, 李荣峰, 田玲

(大同市植物保护植物检疫中心 山西大同 037000)

**摘要:** 干旱是影响植物生长发育的主要非生物胁迫之一。本研究旨在探讨外源 2,4-表油菜素内酯(EBR)对干旱胁迫下黄瓜幼苗生长、生理特性、抗氧化防御系统、MAPK(mitogen-activated protein kinase, 丝裂原活化蛋白激酶)级联反应关键基因的影响。以黄瓜品种津优 186 为试验材料, 设置 4 种处理: 喷施蒸馏水(CK)、50 mmol·L<sup>-1</sup> 聚乙二醇 PEG(PEG)、50 mmol·L<sup>-1</sup> PEG+喷施 0.02 mmol·L<sup>-1</sup> EBR(EBR+PEG) 和 50 mmol·L<sup>-1</sup> PEG+喷施 24 mmol·L<sup>-1</sup> 油菜素内酯生物合成抑制剂 BRZ(BRZ+PEG)。结果表明, 与 PEG 处理相比, EBR+PEG 处理 48 h 显著提高了黄瓜幼苗株高、地上部鲜质量、地下部鲜质量、根系总长、总根表面积和总叶绿素含量。在处理 24 h, 与 PEG 处理相比, EBR+PEG 处理的过氧化氢酶活性显著提高 27.86%, 而过氧化物酶活性显著降低 41.58%, 可溶性糖和脯氨酸含量分别显著提高 51.47% 和 30.69%, 相对电导率显著降低 22.22%。此外, EBR 诱导 MAPK 级联信号途径中 *CsMAPK6* 和 *CsMAPK9* 基因表达上调, 增强了黄瓜的耐旱性。综上, 外源喷施 EBR 可通过提高抗氧化能力和激活耐干旱相关信号途径的关键基因, 有效减轻干旱胁迫对黄瓜幼苗的损害, 促进黄瓜幼苗生长和根系形态的建立。本研究结果为外源 EBR 提高黄瓜幼苗耐旱性提供了理论依据。

**关键词:** 黄瓜; 干旱胁迫; 表油菜素内酯; 抗氧化; MAPK

中图分类号: S642.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2025)11-077-08

## Effects of epibrassinolide on cucumber seedlings under drought stress

ZHANG Guoheng, LI Rongfeng, TIAN Ling

(Datong Plant Protection and Quarantine Center, Datong 037000, Shanxi, China)

**Abstract:** Drought is one of the major abiotic stresses affecting plant growth and development. This study aims to investigate the effects of exogenous 2,4-epibrassinolide (EBR) on the growth, physiological characteristics, antioxidant defense system, and key genes in the MAPK cascade response of cucumber seedlings under drought stress. The cucumber variety Jinyou 186 was used as the experimental material, and four treatments were set up: Distilled water spraying (CK), 50 mmol·L<sup>-1</sup> PEG (PEG), 50 mmol·L<sup>-1</sup> PEG + 0.02 mmol·L<sup>-1</sup> EBR spraying (PEG+EBR), and 50 mmol·L<sup>-1</sup> PEG + 24 mmol·L<sup>-1</sup> brassinosteroid biosynthesis inhibitor spraying (PEG+BRZ). The results showed that compared with the PEG treatment, the PEG+EBR treatment significantly increased the plant height, fresh mass of the aboveground part, fresh mass of the underground part, total root length, total root surface area, and total chlorophyll content of cucumber seedlings after 48 h of treatment. At 24 h of treatment, compared with the PEG treatment, the PEG+EBR treatment significantly increased the activity of catalase by 27.86% and decreased the activity of peroxidase by 41.58%, while the content of soluble sugar and proline were significantly increased by 51.47% and 30.69%, respectively, and the relative conductivity was significantly decreased by 22.22%. In addition, EBR induced the up-regulation of the expression of *CsMAPK6* and *CsMAPK9* genes in the MAPK cascade signaling pathway, thereby enhancing the drought tolerance of cucumber. In summary, exogenous EBR application can effectively alleviate the damage of drought stress to cucumber seedlings by enhancing antioxidant capacity and activating drought-related signaling pathways, and promote the growth and root system development of cucumber seedlings. The results of this study provide a theoretical basis for the use of exogenous EBR to improve the drought tolerance of cucumber seedlings.

**Key words:** Cucumber; Drought Stress; Epibrassinolide; Antioxidant; MAPK

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)作为一种经济价值高且营养丰富的蔬菜, 在世界各地广泛种植。然而, 由于其生长和发育过程中对水分的高需求, 导致其

对干旱胁迫表现出较高的敏感性。在全球气候变暖的背景下, 干旱问题变得日益严重, 已成为制约全球作物产量的主要非生物因素之一<sup>[1]</sup>。干旱胁迫

收稿日期: 2025-01-01; 修回日期: 2025-06-30

基金项目: 山西省重点研发计划(农业领域)项目(201803D221004-3)

作者简介: 张国恒, 男, 高级农艺师, 主要从事农业栽培技术指导与推广应用研究。E-mail: guohengzhang70@126.com

对植物生长和发育的影响主要体现在细胞对水分利用的减少,直接影响了细胞分裂和扩张,进而限制了植物根、茎和叶的生长<sup>[2]</sup>,最终导致作物产量降低。因此,提高作物抗旱性的研究尤为关键,以确保在不断变化的气候条件下保持稳定的农业生产<sup>[3]</sup>。

聚乙二醇(PEG)是一种惰性的非离子型药剂,其中具有高分子量的PEG-6000能够诱导渗透胁迫但不能通过细胞壁,常用于模拟干旱胁迫试验<sup>[4]</sup>。前人通过研究阐明了不同植物在干旱胁迫下的生理变化,如干旱胁迫后植物的光合作用效率降低,叶绿素含量下降,叶绿素作为光合作用的关键色素,其含量的减少对光系统(FPSI 和 FPSII)的效能、光化学淬灭、非光化学淬灭参数以及电子传递速率产生重要影响<sup>[5-7]</sup>。在干旱胁迫下,植物会产生活性氧(ROS)作为次生胁迫,引起细胞膜脂过氧化。为了保护细胞膜的完整性,植物会积累一定量的抗氧化酶来抵抗ROS的伤害,这些抗氧化酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)<sup>[8]</sup>。植物对干旱胁迫的耐受程度与清除ROS的能力相关,在严重干旱条件下,小麦叶片CAT和APX活性分别提高了1.5倍和2.9倍<sup>[9]</sup>。此外,ROS的积累还能激活丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)级联反应途径,这一途径在植物响应干旱或渗透胁迫的信号转导中起核心作用<sup>[10]</sup>。MAPK级联通过H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的积累激活MAPK激酶蛋白,进而促进特定的磷酸化级联反应,如在拟南芥中AtMPK3和AtMPK6蛋白的激活<sup>[11]</sup>。

油菜素内酯(BR)是一种重要的植物激素,被称为第六种植物生长激素,在提高植物对各种生物和非生物胁迫的耐受性方面具有重要作用<sup>[12]</sup>。外源2,4-表油菜素内酯(EBR)作为BR的一种高活性类似物,在试验研究和农业生产中被广泛应用<sup>[13]</sup>。利用适宜浓度( $\rho$ ,后同)(0.001~0.100 mg·L<sup>-1</sup>)的EBR可以显著提高黄瓜种子的发芽势、发芽率及胚轴长度,且对冷敏感品种W-108的缓解效应更显著;而高浓度(1.000 mg·L<sup>-1</sup>)EBR抑制黄瓜幼苗生长,胚根长度随EBR浓度升高而缩短<sup>[14]</sup>。EBR可以缓解盐胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制,进而使根系干质量显著增大<sup>[15]</sup>。外源EBR通过提高植物的光合色素含量、光合效率和抗氧化酶活性,显著促进了植株生长,抗旱性也得到增强<sup>[16]</sup>。近期的研究表明,EBR通过在转录水平上激活生物合成基因,调节内源激素水平,从而提高抗氧化酶活性,减少ROS和丙二醛(MDA)的积累,改善植株在胁迫条件下的生长情

况<sup>[17]</sup>。然而,外源EBR对干旱胁迫下黄瓜幼苗生长的影响缺少系统性研究。鉴于此,笔者以黄瓜品种津优186为材料,通过外源喷施EBR处理,探讨其对干旱胁迫下黄瓜幼苗生长、光合色素、抗氧化防御系统、MAPK级联关键基因的影响,以期为利用EBR提高黄瓜幼苗抗旱性提供理论依据,并为农业生产中的实际应用提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

选择黄瓜品种津优186作为试验材料,种子采购于大同农贸市场。2,4-表油菜素内酯(EBR)购自北京索来宝科技有限公司。油菜素内酯生物合成抑制剂(BRZ)购自上海元业生物科技有限公司。干旱胁迫采用50 mmol·L<sup>-1</sup>的PEG-6000溶液进行处理。试验于2023年在山西省大同市植物保护植物检疫中心的室内进行。

### 1.2 幼苗培养和试验设计

挑选大小一致并且籽粒饱满的黄瓜种子,首先用15%次氯酸钠溶液消毒15 min,然后用蒸馏水冲洗4~5次,最后在蒸馏水中浸泡4 h。将种子均匀放置在覆盖滤纸的育苗盘上,在恒温箱中于28 °C黑暗条件下进行催芽。当2/3以上种子发芽后,重新设置恒温箱参数:白天25 °C/夜晚15 °C,14 h光照/10 h黑暗,相对湿度保持不变。当子叶完全展开且真叶开始生长时,将幼苗移植至水培盆中,每盆种植4株,作为1个重复。培养液使用霍格兰营养液。

当黄瓜幼苗长至2叶1心期,选择生长一致的幼苗进行处理,每个处理重复3次。试验共设置4种处理:喷施蒸馏水的对照组(CK)、50 mmol·L<sup>-1</sup>PEG模拟干旱胁迫组(PEG)、50 mmol·L<sup>-1</sup>PEG+喷施0.02 mmol·L<sup>-1</sup>EBR的EBR+PEG处理组(EBR+PEG),以及50 mmol·L<sup>-1</sup>PEG+喷施24 mmol·L<sup>-1</sup>BRZ的BRZ处理组(BRZ+PEG)。通过喷施PEG溶液进行干旱胁迫,EBR和BRZ在PEG处理后2 h喷施,然后将植株置于暗处培养。喷施时确保所有叶片的正反面均被细小水珠湿润而不滴落。处理24 h和48 h分别进行取样并测定相关指标。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标的测定 使用直尺测量幼苗的植株高度(从茎基部到生长点),使用游标卡尺测量茎粗(子叶节位置)。使用分析天平称量地上部和地下部的鲜质量。使用根系扫描仪(LA-S型)测定根系总长、总根表面积和平均根径。

**1.3.2 光合色素含量的测定** 根据胡文海等<sup>[18]</sup>的方法,提取并检测黄瓜叶片中的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量。

**1.3.3 抗氧化酶活性、膜脂过氧化产物和渗透调节物质含量的测定** 抗氧化酶活性的测定:利用北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒分别测定SOD、POD和CAT活性。

膜脂过氧化产物的测定:采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量。

渗透调节物质的测定:采用硫酸水合茚三酮比色法测定可溶性糖含量,采用碘基水杨酸法测定脯氨酸含量。以上指标测定方法均参考《植物生理生化实验原理和技术》<sup>[19]</sup>。采用DDS-307A电导率仪测定相对电导率。

**1.3.4 基因表达量的测定** 使用植物RNA提取试剂盒(天根)提取总RNA。按照FastKing RT试剂盒的说明书进行逆转录,合成cDNA。设计用于荧光定量PCR引物(CsMAPK6:正向-CCGTGCAC-CAGAGCTTTACT;反向-CAAGGGCTTCCGATC-CATTA;CsMAPK9:正向-CGTGCTCCGAACCTT-GTG;反向-TTCCAGTAAGCATTCCGCA)。使用SYBR Green试剂盒(天根)进行荧光定量,反应体系体积为20 μL,包括2 μL cDNA溶液、10 μL 2×SuperReal PreMix Plus、10 mmol·L<sup>-1</sup>正向和反向引物各0.6 μL、0.4 μL 50×ROX Reference DyeD和6.4 μL蒸馏水。使用LightCycler®480 II实时荧光定量PCR仪进行qRT-PCR分析。扩增程序:95 °C 15 min, 95 °C 10 s, 60 °C 30 s,共40个循环。每个处理3次生物学重复。

#### 1.4 统计分析

采用Microsoft Excel 2020进行数据统计和整理,采用SPSS 22.0进行差异显著性分析,使用Duncan's方法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 表油菜素内酯对黄瓜幼苗生长的影响

由图1可知,在模拟干旱胁迫条件下,黄瓜幼苗的生长受到明显抑制。与CK相比,PEG处理后24 h,黄瓜株高较CK显著降低27.96%,茎粗、地上部鲜质量和地下部鲜质量分别较CK显著降低17.46%、41.20%和63.02%。根系作为植物吸收水分和养分的重要器官,在干旱胁迫下也表现出了明显的响应。PEG处理24 h后,根系总长较CK显著降低13.41%,总根表面积减小13.78%。

与PEG处理相比,EBR+PEG处理可以显著提高PEG处理后黄瓜幼苗的生长指标。在处理后24 h,EBR+PEG处理的株高和地上部鲜质量较PEG处理分别显著提高17.57%和32.76%,茎粗和地下部鲜质量分别增加2.97%和30.84%。此外,EBR+PEG处理还显著改善黄瓜根系的生长状况,总根表面积和根系总长在处理24 h后比PEG处理分别显著提高35.57%和13.44%,平均根径增加8.25%;处理48 h后,EBR+PEG处理的效果更加显著,株高、地上部鲜质量和地下部鲜质量与PEG相比分别显著增加了14.62%、30.70%和60.45%,根系总长和总根表面积分别显著提高了28.67%和23.53%。

相比之下,BRZ+PEG处理则进一步抑制了黄瓜幼苗的生长。与PEG处理相比,BRZ+PEG处理的株高、地上部鲜质量、根系总长和总根表面积在处理48 h后均显著减小。以上结果表明,抑制EBR的生物合成会降低黄瓜幼苗的抗旱能力。

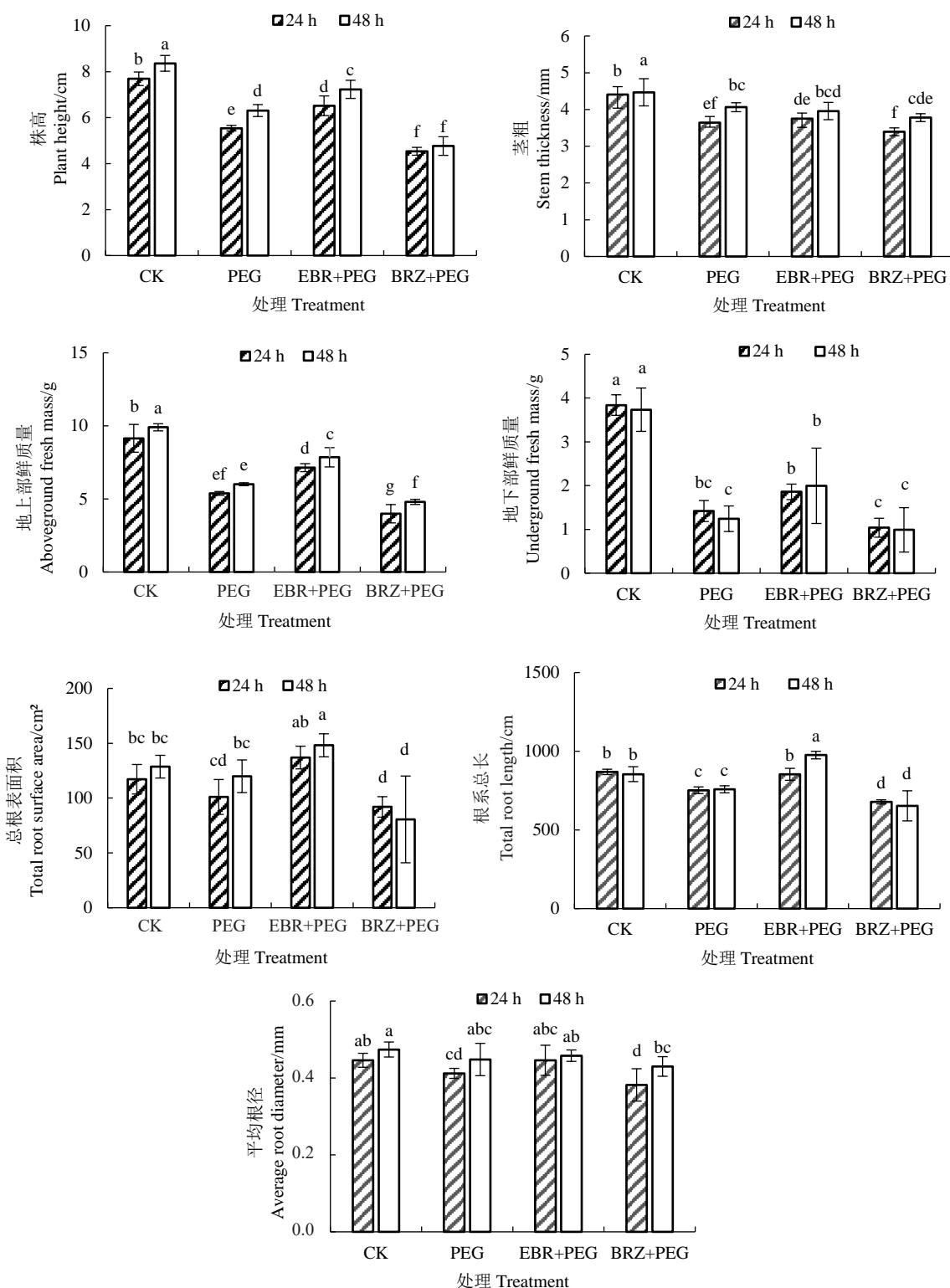
### 2.2 表油菜素内酯对黄瓜幼苗光合色素含量的影响

由图2-A可以看出,PEG处理24 h后,叶绿素a含量相比CK显著降低39.15%。EBR+PEG处理有效缓解了这一下降趋势,与PEG处理相比,叶绿素a含量提高25.50%,而BRZ+PEG处理则进一步降低了叶绿素a含量,与PEG处理相比降低21.51%。处理48 h后,PEG、EBR+PEG和BRZ+PEG处理的叶绿素a含量无显著差异。

由图2-B可以看出,PEG处理24 h后,叶绿素b含量与CK相比显著降低64.76%;而EBR+PEG处理和BRZ+PEG处理后,与PEG处理相比,叶绿素b含量差异不显著。处理48 h后,与PEG处理相比,EBR+PEG处理的叶绿素b含量显著提高127.68%,而BRZ+PEG处理的叶绿素b含量则进一步降低。

由图2-C可以看出,处理24 h后,与CK相比,PEG处理的总叶绿素含量显著降低49.13%;与PEG处理相比,EBR+PEG处理的总叶绿素含量显著提高了40.03%;BRZ+PEG处理则降低了总叶绿素含量,与PEG处理相比降低6.30%。处理48 h后,EBR+PEG处理的总叶绿素含量持续增加,与PEG处理相比显著提高21.63%,而BRZ+PEG处理的总叶绿素含量与PEG处理相比则略有下降,但差异不显著。

由图2-D可以看出,处理24 h后,PEG处理的类胡萝卜素含量相比CK显著降低23.48%;EBR+PEG处理相比PEG处理提高了类胡萝卜素含量,但差异



注:不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at  $P<0.05$ . The same below.

图1 不同处理对黄瓜幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on the growth of cucumber seedlings

不显著;BRZ+PEG 处理则降低了类胡萝卜素含量,与 PEG 相比显著降低 10.38%。处理 48 h 后,EBR+PEG 处理的类胡萝卜素含量有所增加,但

与 PEG 处理相比差异不显著,而 BRZ+PEG 处理的类胡萝卜素含量较 PEG 处理显著降低 19.30%。

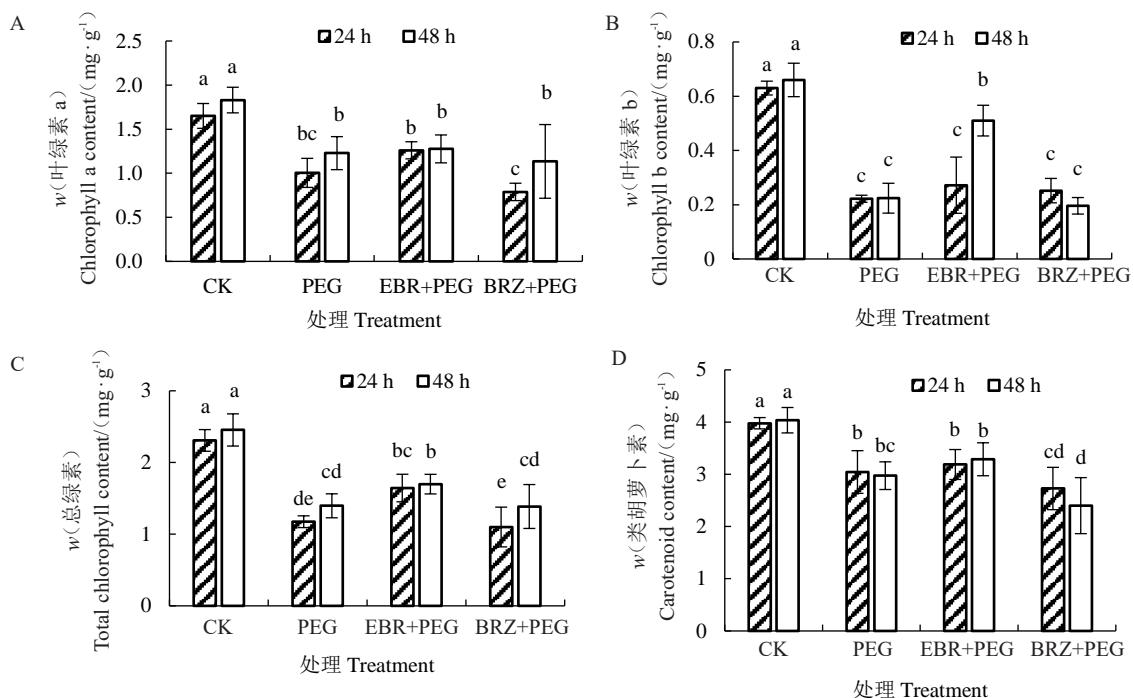


图 2 不同处理对黄瓜幼苗光合色素含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on the content of photosynthetic pigments of cucumber seedlings

### 2.3 表油菜素内酯对黄瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

由图3-A可以看出,在处理24 h后,与CK相比,PEG处理的黄瓜幼苗CAT活性略有下降,但差异不显著;而EBR+PEG处理较PEG处理显著提高27.86%;BRZ+PEG处理与PEG处理相比有所提高,

但差异不显著。处理48 h后,PEG、EBR+PEG和BRZ+PEG处理的CAT活性无显著差异。

由图3-B可以看出,在处理24 h后,与CK相比,PEG处理的黄瓜幼苗POD活性显著提高112.48%;EBR+PEG处理相比PEG处理显著降低了41.58%,但与CK相比仍显著提高24.12%;BRZ+PEG处理的

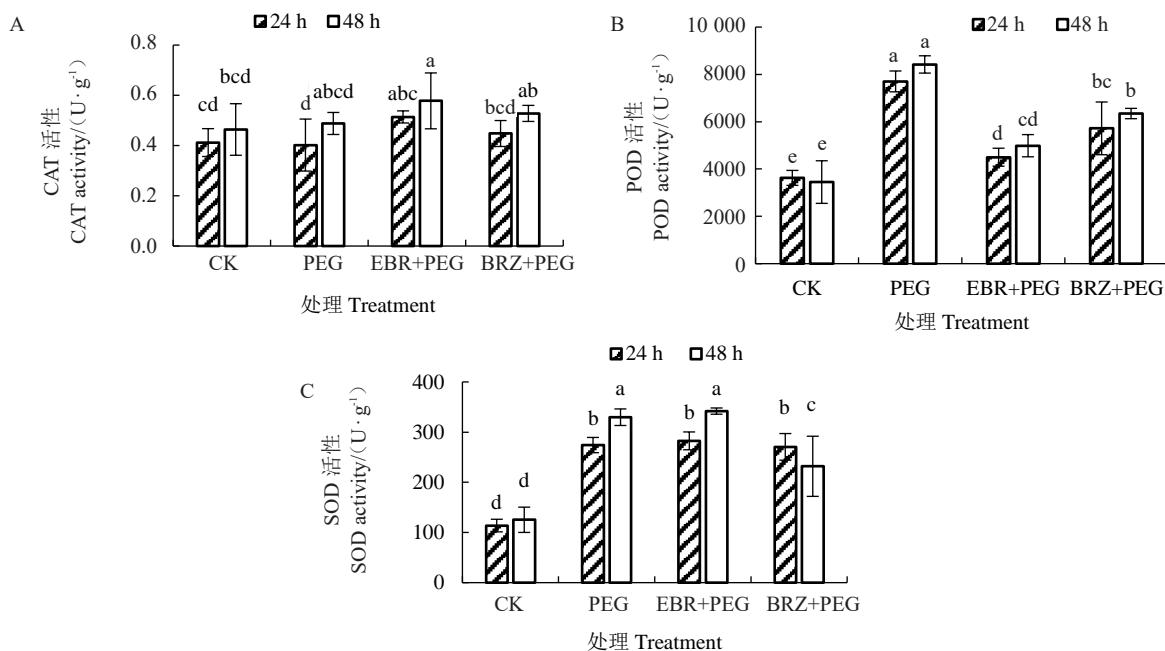


图 3 不同处理对黄瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the antioxidant enzyme activity of cucumber seedlings

黄瓜幼苗 POD 活性相比 PEG 处理显著降低 25.76%。处理 48 h 后, EBR+PEG 处理的黄瓜幼苗 POD 活性相比 PEG 处理显著降低 40.79%, 而 BRZ+PEG 处理相比 PEG 处理显著降低了 24.65%。

由图 3-C 可以看出, 处理 24 h 后, 与 CK 相比, PEG 处理的黄瓜幼苗 SOD 活性显著升高 141.05%; EBR+PEG 和 BRZ+PEG 处理相比 PEG 处理没有显著差异。处理 48 h 后, EBR+PEG 处理的黄瓜幼苗 SOD 活性相比 PEG 处理差异不显著, 而 BRZ+PEG 处理的黄瓜幼苗 SOD 活性与 PEG 处理相比显著降低 29.68%。

#### 2.4 表油菜素内酯对黄瓜幼苗膜脂过氧化产物和渗透调节物质含量的影响

由图 4-A 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗 MDA 含量相比 CK 显著升高 41.86%; 而 EBR+PEG 处理的 MDA 含量较 PEG 处理降低 15.50%; BRZ+PEG 处理对 MDA 的积累影响较小, 与 PEG 处理差异不显著。处理 48 h 后, EBR+PEG 和 BRZ+PEG 处理的 MDA 含量相比 PEG 差异不显著。

由图 4-B 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗脯氨酸含量相比 CK 提高 10.54%, 但差异不显著; EBR+PEG 处理与 PEG 处理相比显著提高 30.69%; BRZ+PEG 处理与 PEG 处理相比显著提高

18.42%, 较 EBR+PEG 处理显著降低 9.39%。处理 48 h 后, EBR+PEG 和 BRZ+PEG 处理的黄瓜幼苗脯氨酸含量相比 PEG 处理变化不显著。

由图 4-C 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗可溶性糖含量相比 CK 显著升高 305.97%; EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著提高 51.47%; BRZ+PEG 处理的可溶性糖含量相比 PEG 处理略有增加, 但差异不显著。处理 48 h 后, EBR+PEG 处理的黄瓜幼苗的可溶性糖含量较 PEG 处理显著提高 55.77%, 而 BRZ+PEG 处理的可溶性糖含量与 EBR+PEG 处理相比则有所下降, 但差异不显著。

由图 4-D 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗相对电导率相比 CK 显著升高 85.71%; EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著降低 22.22%; BRZ+PEG 处理较 PEG 处理显著升高 23.93%。处理 48 h 后, EBR+PEG 处理的相对电导率较 PEG 处理显著降低 35.34%, 而 BRZ+PEG 处理的相对电导率则较 PEG 处理显著升高 24.14%。

#### 2.5 表油菜素内酯对黄瓜幼苗抗旱相关基因表达的影响

由图 5-A 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗的 *CsMAPK6* 相对表达量相比 CK 下降 17.12%, 而 EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著提高 142.69%; BRZ+PEG 处理与 PEG 处理差异不显著。

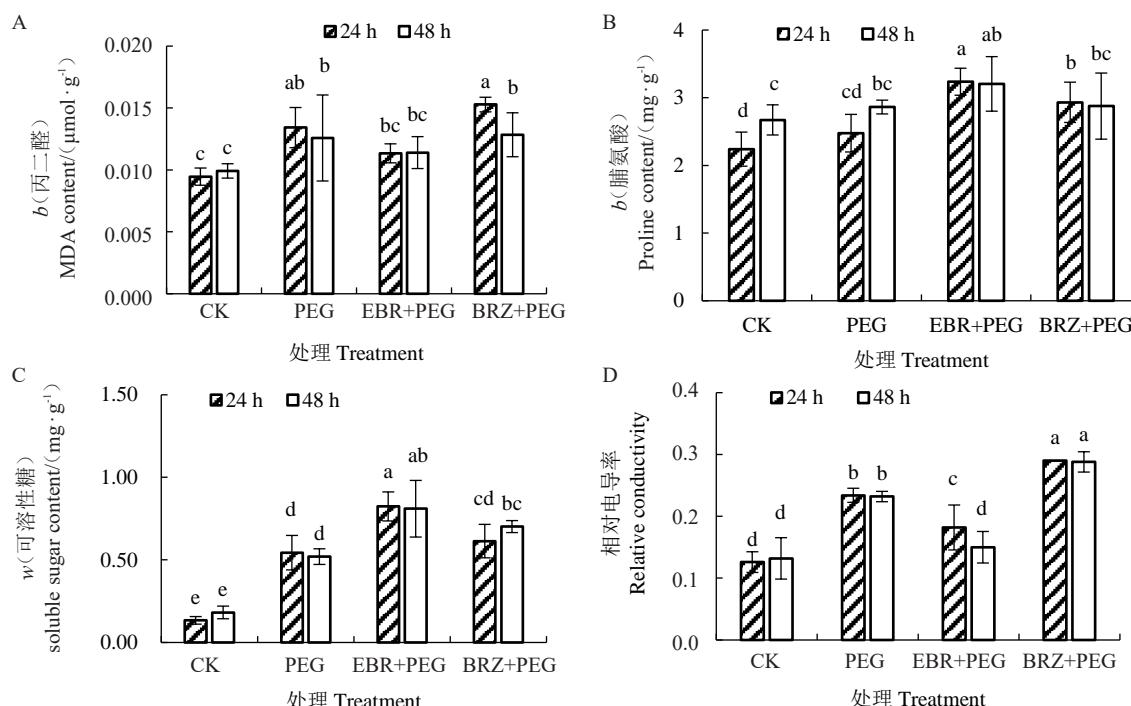


图 4 不同处理对黄瓜幼苗膜脂过氧化产物和渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on lipid peroxidation products and osmotic adjustment substances content of cucumber seedlings

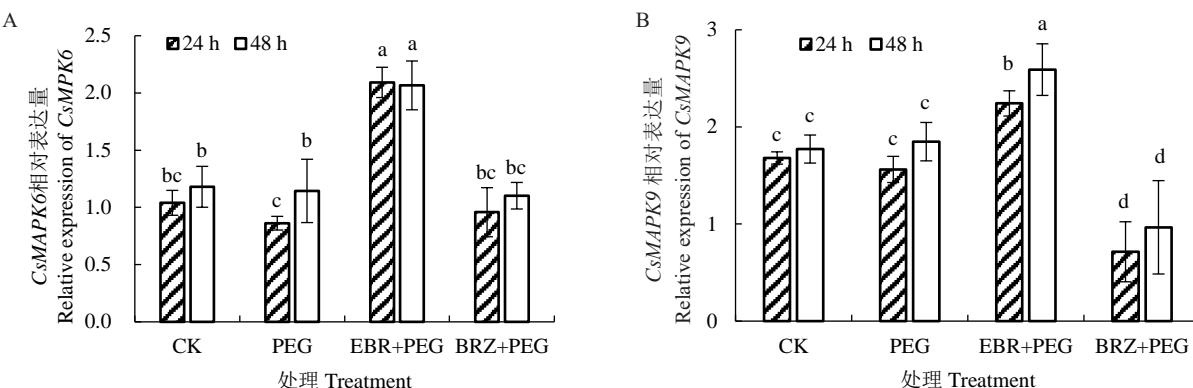


图 5 不同处理对黄瓜幼苗抗旱相关基因表达量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on the expression of drought resistance-related genes of cucumber seedlings

处理 48 h 后, EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著提高 80.59%, 而 BRZ+PEG 处理较 PEG 处理略有下降, 但差异不显著。

由图 5-B 可以看出, 处理 24 h 后, PEG 处理的黄瓜幼苗的 *CsMAPK9* 的相对表达量相比 CK 略有下降, 但差异不显著; EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著提高 43.53%; BRZ+PEG 处理较 PEG 处理显著降低 54.29%。处理 48 h 后, EBR+PEG 处理较 PEG 处理显著提高 40.15%, 而 BRZ+PEG 处理较 PEG 处理显著降低 47.73%。

### 3 讨论与结论

植物生长指标如株高、茎粗、鲜质量和根系发育, 是评估植物对胁迫响应的直观和关键参数, 能够直接反映植物在面对干旱胁迫时的生长状况<sup>[20]</sup>。在本研究中, 与 CK 相比, 干旱胁迫显著抑制了黄瓜幼苗的生长, 但外源 EBR 的应用有效地缓解了这种抑制作用, 与李冬等<sup>[21]</sup>、赵小强等<sup>[22]</sup>的研究结果一致, 表明 EBR 作为一种植物生长调节剂, 能够增强根系发育, 从而提高植物对水分和养分的吸收能力。根系作为植物的主要吸收和合成器官, 对非生物胁迫的响应直接影响幼苗的生长和健康状况<sup>[23]</sup>。在干旱条件下, 根系的形态和结构调整是植物适应性策略的重要组成部分<sup>[24]</sup>。本研究表明, EBR 处理提高或显著提高了黄瓜幼苗的根系总长、总根表面积和平均根径, 与 Silva 等<sup>[25]</sup>的研究结果相似, 即 EBR 能够调控植物根系的细胞分裂和伸长, 以及侧根和根毛的形成。

光合色素, 尤其是叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素, 对植物的光合作用至关重要<sup>[26]</sup>。在干旱胁迫下, 这些色素的含量通常会下降, 影响植物的光能捕获效率和净光合速率<sup>[27]</sup>。然而, 在本研究中, 与 PEG

处理相比, EBR 的施用提高了黄瓜幼苗在干旱胁迫下的光合色素含量。这可能是因为外源 EBR 增强了 EBR 合成途径中相关基因的表达, 提高了卡尔文循环中酶的活性, 从而促进了光合作用<sup>[28]</sup>。

植物对干旱胁迫的耐受和适应性是一个复杂的生理生化过程, 涉及多种代谢途径和信号转导网络<sup>[29]</sup>。这些途径包括酶和非酶抗氧化剂, 它们通过提高相关酶活性清除活性氧(ROS), 保护细胞免受氧化损伤<sup>[30]</sup>。在本研究中, 与 CK 相比, 干旱胁迫显著提高了黄瓜幼苗的 SOD 和 POD 活性, 表明植物在应对干旱胁迫时会激活其内在的抗氧化系统<sup>[31-32]</sup>。

外源 EBR 在应对干旱胁迫时的作用与其在调节渗透调节物质含量方面的功能密切相关<sup>[17]</sup>。笔者在本研究中发现, 与 PEG 处理相比, 施用 EBR 提高了脯氨酸和可溶性糖含量, 这些物质在植物应对渗透胁迫和维持细胞内环境稳定中起着至关重要的作用。脯氨酸作为一种有效的抗氧化剂, 能够中和自由基, 减轻氧化应激, 而可溶性糖则参与 ROS 的代谢和 NADPH 的产生, 有助于 ROS 的消除<sup>[33]</sup>。

EBR 对 MAPK 信号级联的调控作用进一步揭示了其在植物抗旱性中的分子机制。MAPK 信号转导途径在植物生长发育和应对生物/非生物胁迫中起着关键作用<sup>[34]</sup>。本研究结果表明, 外源 EBR 通过上调 *CsMAPK6* 和 *CsMAPK9* 基因的表达, 激活了植物的信号转导网络, 进而可能通过调节下游基因的表达和酶活性来增强植物的抗旱性。这一点在 Majeed 等<sup>[35]</sup>的研究中得到了进一步的证实, 他们发现过表达 MAPK 基因的马铃薯植株在干旱胁迫下表现出更强的耐受性。

综上所述, 笔者探讨了外源 EBR 对干旱胁迫下黄瓜幼苗的积极影响, 通过生理和分子层面的分析, 证实了 EBR 作为一种有效的植物生长调节剂,

能够提高黄瓜幼苗的抗旱性。研究结果表明,与PEG处理相比,EBR+PEG处理能够有效改善黄瓜幼苗的生长状况,增强其抗氧化防御系统功能,并激活MAPK信号途径,从而提高植株对干旱环境的适应能力。这些发现不仅丰富了对EBR在植物抗旱机制作用中的认识,而且为农业生产中通过植物生长调节剂改善作物抗旱性提供了科学依据和应用空间。

### 参考文献

- [1] 郑绍傑,张梅,董琼,等.外源钙缓解干旱胁迫对白枪杆幼苗的伤害机制[J].植物生理学报,2024,60(6):1035-1045.
- [2] 古丽斯坦·赛米,刘隋赟昊,郑蓓,等.棉花 *Gols* 基因家族的鉴定及其在干旱胁迫应答中的功能研究[J].农业生物技术学报,2023,31(4):704-717.
- [3] 柴文臣,阎世江.干旱胁迫对嫁接黄瓜幼苗生长发育及生理指标的影响[J].北方园艺,2024(7):10-17.
- [4] 作建芬,林益超,刘维维,等.聚乙二醇-6000 模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J].生态学报,2025,45(13):6414-6426.
- [5] 沈少炎,吴玉香,郑郁善.植物干旱胁迫响应机制研究进展:从表型到分子[J].生物技术进展,2017,7(3):169-176.
- [6] 王硕,贾潇倩,何璐,等.作物对干旱胁迫的响应机制及提高作物抗旱能力的调控措施研究进展[J].中国农学通报,2022,38(29):31-44.
- [7] REN J H, YANG X X, MA C Y, et al. Meta-analysis of the effect of the overexpression of aquaporin family genes on the drought stress response[J]. Plant Biotechnology Reports, 2021, 15(2):139-150.
- [8] MA Y C, CHENG Q K, CHENG Z M, et al. Identification of important physiological traits and moderators that are associated with improved salt tolerance in *CBL* and *CIPK* overexpressors through a meta-analysis[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 856.
- [9] YAN X, ZHANG M, ZHONG Y, et al. CHH demethylation in the *ZmGST2* promoter enhances maize drought tolerance by regulating ROS scavenging and root growth[J]. BMC Plant Biol, 2025, 25, 1083.
- [10] GOHARRIZI J K, BAGHZADEH A, KARAMI S, et al. Expression of the *W36*, *P5CS*, *P5CR*, *MAPK3*, and *MAPK6* genes and proline content in bread wheat genotypes under drought stress[J]. Cereal Research Communications, 2023, 51 (3) : 545-556.
- [11] PARK H C, NGUYEN X C, BAHK S, et al. Novel MAP kinase substrates identified by solid-phase phosphorylation screening in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant Biotechnology Reports, 2016, 10(6):415-423.
- [12] 赵杨,杨永青,丁杨林,等.植物非生物逆境学科发展综述[J].植物生理学报,2024,60(2):248-270.
- [13] 马媛媛,王智,曹金萍,等.2,4-表油菜素内酯对盐碱胁迫下芸豆幼苗生长及生理特性的影响[J].西北植物学报,2024,44(8):1181-1189.
- [14] 张爱敏,周国顺,付丽军,等.低温胁迫下油菜素内酯对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国瓜菜,2019,32(12):31-36.
- [15] 沈兰兴,张小村,孔凡美,等.耐盐黄瓜品种鉴定及萌芽期盐胁迫对黄瓜苗期耐盐性的影响[J].肥料与健康,2024,51(4):33-40.
- [16] 张伟,杨国慧,于辉.2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下西瓜幼苗生长及相关基因表达的影响[J].新疆农业科学,2024,61(3):615-622.
- [17] ANWAR A, BAI L Q, MIAO L, et al. 2,4-epibrassinolide ameliorates endogenous hormone levels to enhance low-temperature stress tolerance in cucumber seedlings[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(9):2479.
- [18] 胡文海,闫小红,李晓红,等.2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响[J].植物研究,2021,41(1):53-59.
- [19] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [20] 缪旭林,张德,张仲兴,等.2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下垂丝海棠生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(3):37-45.
- [21] 李冬,王艳芳,申洪涛,等.外源 MT 和 EBR 对干旱胁迫下烤烟幼苗的缓解效应[J].中国烟草学报,2019,25(5):77-85.
- [22] 赵小强,任续伟,张金乾,等.外源 2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下青贮玉米幼苗生长和光合特性的影响[J].分子植物育种,2023,21(10):3371-3382.
- [23] 董亚茹,孙景诗,王照红,等.外源 2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下桑树根系生长的影响[J].蚕业科学,2023,49(2):97-104.
- [24] 李铭怡,王冉,贾濠基,等.干旱胁迫下油菜素内酯对植物-土壤化学计量特征及内稳定性的影响[J].草地学报,2024,32(4):1068-1077.
- [25] SILVA A L J, FERREIRA V M, SANTOS C M D, et al. 2,4-epibrassinolide promotes activation of physiological compensation mechanisms in response to drought stress and rehydration and improves yield in soybean[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2023, 209(3):355-370.
- [26] 李凤,孙娅楠,刘富华,等.不同光质对皂莢幼苗生长及皂莢刺相关生理指标的影响[J].植物生理学报,2024,60(4):653-662.
- [27] 王丽君,李冬,申洪涛,等.油菜素内酯对干旱胁迫下烤烟幼苗生长生理及光合特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):33-41.
- [28] SAHNI S, PRASAD B D, LIU Q, et al. Overexpression of the brassinosteroid biosynthetic Gene *Dwf4* in *Brassica napus* simultaneously increases seed yield and stress tolerance[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):28298.
- [29] ALAM P, KAUR K S, BALAWI T A, et al. Foliar application of 2, 4-epibrassinolide improves growth, ascorbate-glutathione cycle, and glyoxalase system in brown mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern.] under cadmium toxicity[J]. Plants, 2020, 9 (11) : 1487.
- [30] 洪越,周贵兰,刘瑞,等.外源褪黑素对干旱胁迫下不同抗旱型玉米幼苗生理特性的影响[J].北京农学院学报,2024,39(3):39-46.
- [31] 杜杰,冯宇,夏清,等.外源油菜素内酯缓解谷子穗分化期干旱胁迫的机理研究[J].作物杂志,2024,(4):144-151.
- [32] 王雨婷,王智真,赵婷,等.2,4-表油菜素内酯预处理对干旱胁迫下葡萄幼苗抗氧化系统和渗透调节物质的影响[J].西北植物学报,2019,39(3):489-497.
- [33] LI Y T, MA J Z, GAO X Q, et al. Exogenous brassinosteroids alleviate calcium deficiency-induced tip-burn by maintaining cell wall structural stability and higher photosynthesis in mini Chinese cabbage[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:999051.
- [34] LI H Y, SONG S L, WANG C X, et al. Comparative transcriptome analysis reveals the molecular mechanism underlying lily double flowering[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 303:111221.
- [35] MAJEED Y, ZHANG N, ZHU X, et al. *STMAPK10* gene functional identification and analysis in drought resistance of potato crop (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(3):e14362.