

赵瑞宁, 李永生, 汪军成, 等. 外源甲基乙二醛对干旱胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 28-34.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.01.004

## 外源甲基乙二醛对干旱胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响

赵瑞宁<sup>1</sup>, 李永生<sup>1,2</sup>, 汪军成<sup>1</sup>, 方永丰<sup>1</sup>, 董小云<sup>2</sup>, 周文期<sup>2</sup>, 连晓荣<sup>2</sup>, 王晓娟<sup>2</sup>, 何海军<sup>2</sup>, 杨彦忠<sup>2</sup>, 刘忠祥<sup>2</sup>, 周玉乾<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院/省部共建干旱生境作物学国家重点实验室/甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院作物研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 甲基乙二醛(Methylglyoxal, MG)是一种从植物体内发现的新型信号分子,具有调控植物的生长发育、种子萌发、细胞分裂、气孔运动及非生物胁迫耐受性等功能。为明确干旱胁迫条件下施用外源 MG 对玉米种子萌发和幼苗生长的影响及机制,本研究以玉米杂交品种郑单 958 为材料,分析不同浓度外源 MG 浸种对干旱胁迫玉米种子萌发和生长的影响,并用 3 叶期玉米幼苗进行干旱胁迫和 MG 叶面喷施处理,进一步探讨外源 MG 对玉米幼苗叶片活性氧积累、膜质过氧化水平、抗氧化酶活性和抗氧化剂含量的影响。结果显示,干旱胁迫下,外源 MG 溶液浸种可提高玉米种子发芽势、发芽率及生长指标,适宜的 MG 浸种浓度为 0.10 mmol/L。干旱胁迫下对玉米幼苗进行叶面喷施 0.10 mmol/LMG 处理可显著降低叶片中丙二醛(MDA)含量和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量,增强叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶活性,并提高叶片中抗坏血酸(ASA)含量和谷胱甘肽(GSH)含量。综上,适宜浓度的外源 MG 可显著增强玉米种子的萌发能力和玉米幼苗的抗氧化能力,缓解干旱胁迫对玉米植株带来的氧化损伤,促进玉米的生长。本研究结果可为玉米的抗旱栽培和抗旱剂研发提供参考。

**关键词:** 玉米; 甲基乙二醛; 抗氧化酶; 干旱胁迫

**中图分类号:** S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)01-0028-07

## Effects of exogenous methylglyoxal on seed germination and seedling growth of maize under drought stress

ZHAO Ruining<sup>1</sup>, LI Yongsheng<sup>1,2</sup>, WANG Juncheng<sup>1</sup>, FANG Yongfeng<sup>1</sup>, DONG Xiaoyun<sup>2</sup>, ZHOU Wenqi<sup>2</sup>, LIAN Xiaorong<sup>2</sup>, WANG Xiaojuan<sup>2</sup>, HE Haijun<sup>2</sup>, YANG Yanzhong<sup>2</sup>, LIU Zhongxiang<sup>2</sup>, ZHOU Yuqian<sup>2</sup>

(1. Agronomy College, Gansu Agricultural University/State Key Laboratory of Aridland Crop Science/Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Crop Sciences, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

**收稿日期:** 2024-04-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31960406); 甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA110); 甘肃省科协青年人才托举工程项目(2019-09); 甘肃省农业科学院农业科技自主创新专项(2019GAAS31); 甘肃省科技重大专项(21ZD11NA005、21ZD10NF003)

**作者简介:** 赵瑞宁(1998-), 女, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 研究方向为玉米遗传育种。(E-mail) 19968490260@163.com

**通讯作者:** 李永生, (E-mail) lys087@163.com; 汪军成, (E-mail) wangjc@gsau.edu.cn

**Abstract:** Methylglyoxal (MG) is a new type of signal molecule found in plants, which has the functions of regulating plant growth and development, seed germination, cell division, stomatal movement and abiotic stress tolerance. In order to clarify the effect and mechanism of exogenous MG on maize seed germination and seedling growth under drought stress, the maize hybrid Zhengdan 958 was used as the material to analyze the effects of seed soaking treatment with different concentrations of exoge-

nous MG on seed germination and growth of maize under drought stress. The effects of exogenous MG on the accumulation of reactive oxygen, membrane lipid peroxidation level, antioxidant enzyme activity and antioxidant content in leaves of seedlings were further investigated by treatments of drought stress and MG foliar spraying at 3-leaf stage. The results showed that under drought stress, seed soaking with exogenous MG solution could improve the germination potential, germination rate and growth index of maize seeds, and the suitable concentration of MG soaking was 0.10 mmol/L. Spraying 0.10 mmol/L MG on maize seedlings under drought stress could significantly reduce the contents of malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) in leaves, enhance the activities of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in leaves, and increase the contents of ascorbic acid (ASA) and glutathione (GSH) in leaves. In summary, appropriate concentration of exogenous MG could significantly enhance the germination ability of maize seeds and the antioxidant capacity of maize seedlings, alleviate the oxidative damage caused by drought stress to maize plants, and promote the growth of maize. The results of this study provide a reference for the drought-resistant cultivation of maize and the development of drought-resistant agents.

**Key words:** maize; methylglyoxal; antioxidant enzyme; drought stress

玉米 (*Zea mays* L.) 不仅是中国主要的粮食作物,同时也是重要的饲料和工业原料<sup>[1]</sup>。近年来,中国玉米播种面积和总产量均呈上升趋势。2023年玉米播种面积达 $4.43 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,总产量约 $2.89 \times 10^8$  t。玉米是需水量较大的作物,充足的水分供应是玉米正常生长和发育的基本条件<sup>[2]</sup>。近年来,随着全球气候的变暖,异常气候出现频率增大,进而导致干旱对玉米产业的可持续发展造成了广泛的影响<sup>[3-4]</sup>。每年由于干旱导致的全球玉米产量降幅约为25%~30%,局部地区的极端干旱环境可能会导致玉米绝收<sup>[5]</sup>。当作物遭受干旱胁迫时,其体内的生理和生化过程会出现紊乱,活性氧积聚增多和渗透调节物质改变,进而导致植物生长受限、植株高度变矮、根长增加以及叶片叶绿素含量下降等一系列问题<sup>[6-8]</sup>。因此,研究干旱胁迫对玉米生理机制的影响对于干旱防御和作物生长调控具有重要意义。

甲基乙二醛 (MG) 是一种  $\alpha, \beta$ -酮醛类活性物质,是糖酵解、脂质过氧化、蛋白质糖基化及植物光合作用等多个代谢过程产生的副产物。MG 容易与蛋白质和核酸发生交联,形成高级糖基化的终产物,从而导致细胞功能障碍<sup>[9]</sup>。因此,长期以来 MG 一直被认为是一种生命系统中通过非酶促反应产生的细胞毒素<sup>[10]</sup>。在较高浓度条件下, MG 是一种细胞毒素;在较低浓度条件下, MG 作为一种信号传递分子,在种子萌发、植物生长、发育和繁殖等多个生理过程中发挥重要作用,使植物产生逆境耐受性<sup>[11]</sup>。在正常生长环境下,植物细胞中的 MG 水平会受到严格的调节,保持在一个相对较低的无毒生理水平<sup>[12]</sup>。在非生物胁迫条件下,植物的新陈代谢会出

现紊乱, MG 在植物的各个部位累积,这些 MG 成为植物对非生物胁迫的响应信号<sup>[13]</sup>。在逆境胁迫下,施用适宜浓度的外源 MG 可提升作物对逆境的适应能力。孙晓莉等<sup>[14]</sup>研究发现,用 MG 处理后的板栗幼苗叶片抗氧化酶活性和乙二醛酶活性得到明显提升,叶片中渗透调节物质含量和抗氧化物质含量增多,从而提高板栗树对干旱的适应能力。Li 等<sup>[15]</sup>发现, MG 可以提高小麦幼苗乙二醛酶 I (*Gly I*) 和乙二醛酶 II (*Gly II*) 的活性,增加还原型抗坏血酸 (AsA) 含量和还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量,减少细胞膜脂质的过氧化,从而提高小麦幼苗的耐盐能力。MG 还可以激发 AsA-GSH 循环及活性氧/甲基乙二醛清除系统来提高玉米幼苗耐热性<sup>[16]</sup>。

针对 MG 在玉米干旱胁迫响应和诱发胁迫耐受性机制尚不清楚的现状,本研究以玉米杂交品种郑单 958 为材料,用甘露醇模拟干旱胁迫,分析外源 MG 对玉米种子萌发、幼苗生长及生理生化指标的影响,进而揭示外源 MG 对玉米干旱胁迫的缓解机制,为玉米抗旱栽培及新型植物抗旱保水剂研发提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试材料郑单 958 玉米种子由甘肃省农业科学院作物研究所玉米研究室提供,甲基乙二醛购自西格玛奥德里奇 (Sigma-Aldrich) 上海贸易有限公司,甘露醇 (M) 购买于生工生物工程 (上海) 股份有限公司,其余试剂均为国产分析纯。

### 1.2 试验设计与取样

试验于 2023 年 6-10 月在甘肃省农业科学院进

行。挑选品质良好、大小相近的郑单 958 种子约 200 g,用 75%的乙醇消毒 5 min,再用无菌水将种子清洗 3~5 遍备用。常温下,采用清水(T0)及 0.05 mmol/L(T1)、0.10 mmol/L(T2)、0.50 mmol/L(T3)、1.00 mmol/L(T4)和 2.00 mmol/L(T5)等 5 种浓度的 MG 溶液分别浸泡清洗后的玉米种子 12 h。然后将上述种子分别均匀点播于铺有 2 层灭菌滤纸、直径 15 cm 的培养皿中,利用 200 mmol/L 甘露醇(M)湿润滤纸模拟干旱胁迫,另以清水浸泡的种子点播于蒸馏水湿润的滤纸为对照(CK)。每个处理 3 个重复。培养皿置于 GTOP-500Y 型人工气候培养箱(浙江托普云农科技股份有限公司产品)进行萌发试验,温度设置为恒温 28 ℃。每 24 d 补充甘露醇或蒸馏水保持滤纸湿润。培养 3 d 后,每天对种子萌发情况进行统计,并计算其发芽势和发芽率。培养 7 d 后每处理随机选取 10 粒发芽种子,测量芽鲜重、根鲜重、芽长和主根长等生长指标。

为明确外源施用 MG 对干旱胁迫玉米植株生长的缓解作用,将郑单 958 玉米种子消毒后播于蛭石中,定期浇 Hoagland's 营养液,在幼苗生长至 3 叶 1 心期后,转移至 15 cm × 15 cm × 17 cm 的花盆中,每盆 10 株,一共有 12 盆,采用水培的方法进行试验。试验设 3 个处理:Hoagland's 营养液灌溉(CK)、含有 200 mmol/L 甘露醇的 Hoagland's 营养液灌溉、200 mmol/L 甘露醇的 Hoagland's 营养液灌溉+叶面喷施 0.10 mmol/L MG,每处理设 3 个重复。样品放置在人工气候培养箱内进行培养,光周期为 16 h/d,光照度 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光期温度 25 ℃,暗期温度 22 ℃,相对湿度为 60%±5%,分别在处理前与处理后的第 4 h、8 h、12 h 和 24 h 进行取样,样品立即用液氮速冻,于 -80 ℃超低温冰箱保存备用,用于丙二醛(MDA)含量、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量、抗氧化酶活性、抗氧化剂含量等生理指标的测定。

### 1.3 指标测定方法

1.3.1 种子发芽势和发芽率的计算 根据 3 d 内和 7 d 内发芽种子数占供试种子数的百分比分别计算种子发芽势和发芽率。

1.3.2 生理指标的测定 采用氮蓝四唑光还原法<sup>[17]</sup>测定玉米幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用紫外线吸收法<sup>[17]</sup>测定玉米幼苗过氧化氢酶(CAT)活性,采用愈创木酚法<sup>[18]</sup>测定玉米幼苗过氧化物酶(POD)活性,采用分光光度计法<sup>[14]</sup>测定玉米

幼苗过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量<sup>[14]</sup>,采用硫代巴比妥酸显色法<sup>[18]</sup>测定玉米幼苗丙二醛(MDA)含量,参照 Hodges 等<sup>[19]</sup>的方法测定玉米幼苗抗坏血酸(ASA)含量,参照 Nakano 等<sup>[20]</sup>的方法测定玉米幼苗抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2019 和 Origin2021 软件进行数据处理和图形绘制,利用 SPSS 26.0 软件及 Duncan's 法进行处理间差异显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

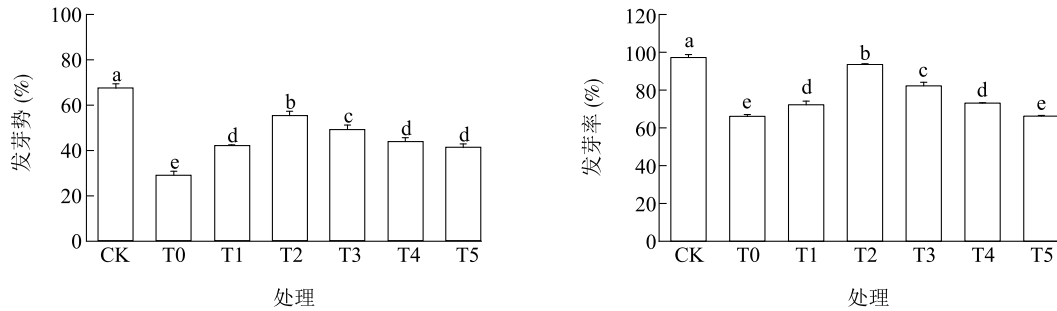
### 2.1 外源 MG 对干旱胁迫下玉米种子萌发的影响

2.1.1 MG 浸种对干旱胁迫下玉米种子发芽势和发芽率的影响 外源 MG 处理对干旱胁迫下玉米种子发芽率和发芽势的影响如图 1 所示。从图中可以看出,甘露醇胁迫(T0~T5 处理)可以明显地抑制玉米种子的萌发。在 200 mmol/L 甘露醇胁迫下,清水浸泡的玉米种子(T0 处理)发芽率和发芽势分别比 CK 下降 32.00% 和 56.72%。随浸种液 MG 浓度的增加,200 mmol/L 甘露醇胁迫下玉米种子的发芽率和发芽势均呈先增后减的趋势。其中,0.10 mmol/L MG 浸种(T2 处理)的玉米种子在 200 mmol/L 甘露醇胁迫环境下的发芽率和发芽势最高。在 200 mmol/L 甘露醇胁迫下,不同浓度 MG 浸泡(T1~T5 处理)的种子发芽势均显著高于清水浸泡(T0 处理),T1~T4 处理的种子发芽率均显著高于 T0 处理。其中,T2 处理的玉米种子发芽率和发芽势分别比清水浸泡(T0 处理)增加 41.51% 和 89.69%,差异最大。由此可见,使用适宜浓度的 MG 浸泡种子能够有效缓解干旱胁迫对玉米种子萌发的影响,0.10 mmol/L MG 溶液浸泡种子的效果最好。

2.1.2 MG 浸种对干旱胁迫下玉米幼苗生长性状的影响 外源 MG 浸种处理对干旱胁迫下玉米幼苗生长的影响如表 1 所示。从表中可以看出,干旱胁迫下玉米幼苗的芽长、主根长、芽鲜重、根鲜重(除 T2 处理)、芽干重(除 T2 处理)和根干重(除 T2 处理)均显著低于 CK。其中 T0 处理的芽长、主根长、芽鲜重、根鲜重、芽干重和根干重分别比 CK 降低 58.35%、65.22%、67.70%、48.18%、45.16% 和 42.50%,差异显著。采用不同浓度的 MG 溶液浸种后(T1~T5 处理),玉米幼苗芽长、主根长、芽鲜重、根鲜重、芽干重、根干重均比 T0 处理有所增长。其

中 0.10 mmol/L MG 溶液浸种后(T2 处理),玉米幼苗的芽长、主根长、芽鲜重、根鲜重、芽干重和根干重分别比清水浸种(T0 处理)增加 63.97%、156.67%、70.21%、67.34%、47.06% 和 65.22%, 增加显著。

上述结果表明,不同浓度的 MG 溶液浸种处理能缓解干旱胁迫对玉米幼苗生长的影响,其中,0.10 mmol/L 为适宜的浸种液浓度。



T0~T5 分别为清水及 0.05 mmol/L、0.10 mmol/L、0.50 mmol/L、1.00 mmol/L 及 2.00 mmol/L MG 浸泡的种子在 200 mmol/L 甘露醇胁迫下的处理。CK 为清水浸泡的种子在蒸馏水下的对照。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图1 外源甲基乙二醛(MG)处理对干旱胁迫下玉米种子发芽率和发芽势的影响

Fig.1 Impact of exogenous methylglyoxal (MG) treatment during drought conditions on the sprouting rate and germination capacity of maize seeds

表1 干旱胁迫下不同浓度甲基乙二醛(MG)对玉米幼苗生长的影响

Table 1 Effects of different concentrations of methylglyoxal (MG) on the growth of maize seedlings under drought stress

处理	芽长 (cm)	主根长 (cm)	芽鲜重 (g)	根鲜重 (g)	芽干重 (g)	根干重 (g)
CK	6.53±0.95a	10.35±2.54a	2.91±0.16a	3.84±0.17a	0.31±0.01a	0.80±0.09a
T0	2.72±0.88e	3.60±1.16d	0.94±0.04d	1.99±0.10e	0.17±0.01c	0.46±0.00c
T1	3.25±1.24de	6.41±1.29c	1.12±0.08cd	2.51±0.33de	0.20±0.0bc	0.58±0.01bc
T2	4.46±0.89b	9.24±2.17a	1.60±0.09b	3.33±0.19ab	0.25±0.01ab	0.76±0.03a
T3	4.19±0.94bc	7.99±2.22b	1.50±0.15bc	3.08±0.20bc	0.23±0.02bc	0.60±0.04bc
T4	3.82±0.87bcd	7.60±1.40bc	1.35±0.05bcd	2.57±0.14de	0.22±0.04bc	0.55±0.06bc
T5	3.73±0.82cd	7.82±1.34b	1.10±0.35cd	2.36±0.29de	0.19±0.04c	0.56±0.06bc

CK、T0~T5 见图 1 注。同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗丙二醛和过氧化氢含量的影响

叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗丙二醛和过氧化氢含量的影响如图 2 所示。从图中可以看出,CK 条件下,玉米幼苗叶片 MDA 含量和  $H_2O_2$  含量基本处于稳定状态,波动不大;培养液中添加 200 mmol/L 甘露醇后 4~24 h,玉米幼苗叶片中 MDA 含量和  $H_2O_2$  含量均呈持续增加趋势;在培养液中添加 200 mmol/L 甘露醇的同时,进行叶面喷施 0.10 mmol/L MG 处理,玉米幼苗叶片 MDA 含量和  $H_2O_2$  含量虽然仍高于 CK,但比培养液中添加 200 mmol/L 甘露醇的处理明显降低,胁迫处理后 4 h、8 h、12 h、24 h,叶片  $H_2O_2$  含量分别下降 19.99%、27.68%、15.88% 和 17.85%,MDA 含量分别降低 34.36%、29.12%、29.17% 和 22.07%。因此,外源

喷施 MG 可以缓解干旱胁迫导致的  $H_2O_2$  等活性氧 (ROS) 的积累,降低 MDA 含量。

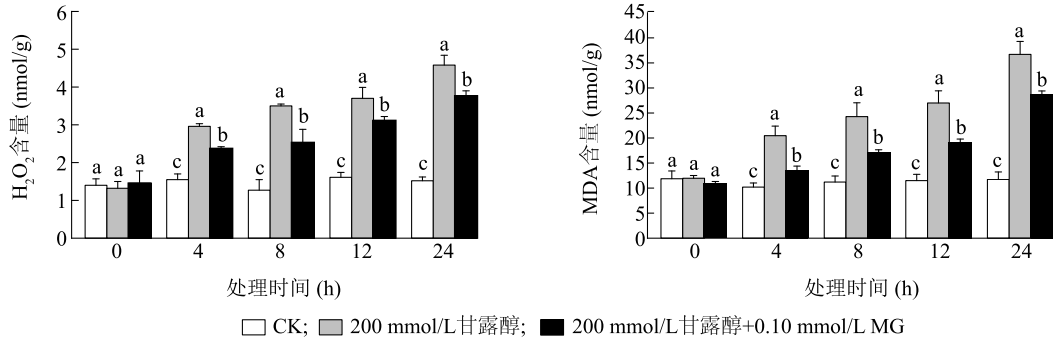
## 2.3 叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的影响如图 3 所示。从图中可以看出,CK 条件下,玉米幼苗 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性均无明显变化;培养液中添加 200 mmol/L 甘露醇后 4~24 h,SOD、POD、CAT 和 APX 的活性均比 CK 有显著增加;在培养液中添加 200 mmol/L 甘露醇的同时,进行叶面喷施 0.10 mmol/L MG 处理后 4~24 h,SOD、POD、CAT 和 APX 的活性整体上得到进一步提高。胁迫后 8 h、12 h、24 h,叶面喷施 0.10 mmol/L MG 的 200 mmol/L 甘露醇处理幼苗 SOD 活性比 200 mmol/L 甘露醇处理分别增加 26.04%、16.58% 和



20.79%, *POD* 活性分别增加 15.89%、20.04% 和 27.01%, *CAT* 活性分别增加 12.73%、21.23% 和 36.34%, *APX* 活性分别增加 14.21%、24.90% 和

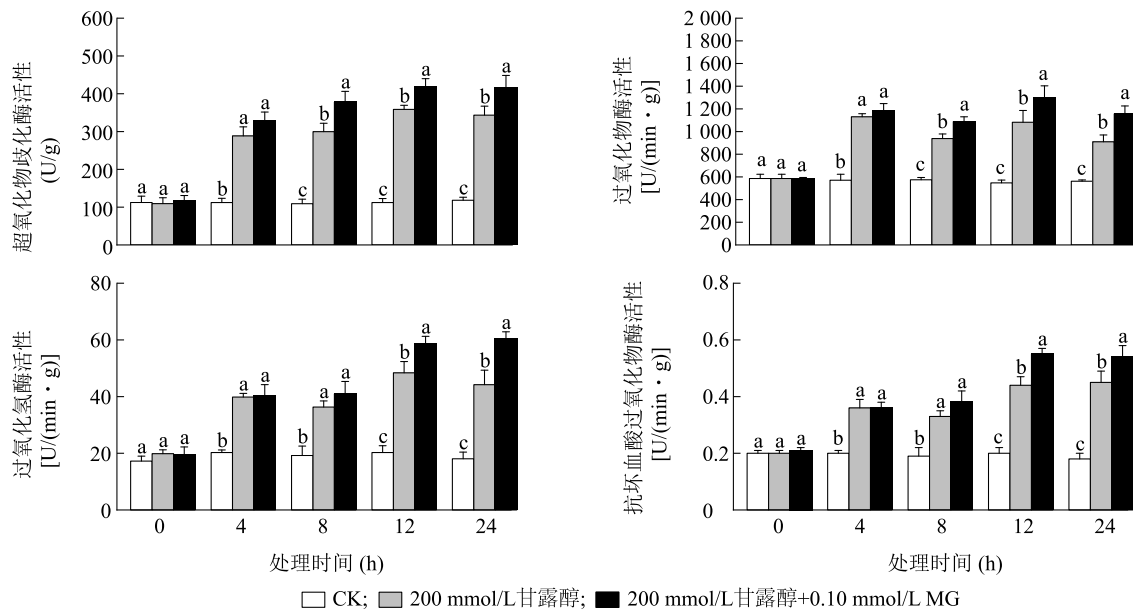
19.13%。因此,叶面喷施 0.10 mmol/LMG 能有效提高玉米叶片中 *SOD*、*POD*、*CAT*、*APX* 等抗氧化酶的活性。



相同处理时间下不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图2 外源喷施甲基乙二醛(MG)对干旱胁迫下玉米幼苗叶片  $H_2O_2$  含量和丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.2 Effects of exogenous methylglyoxal (MG) on  $H_2O_2$  and malonaldehyde (MDA) contents in maize leaves under drought stress



相同处理时间下柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 叶面喷施甲基乙二醛(MG)对干旱胁迫下玉米叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.3 Effects of exogenous methylglyoxal (MG) on antioxidant enzyme activities in maize leaves under drought stress

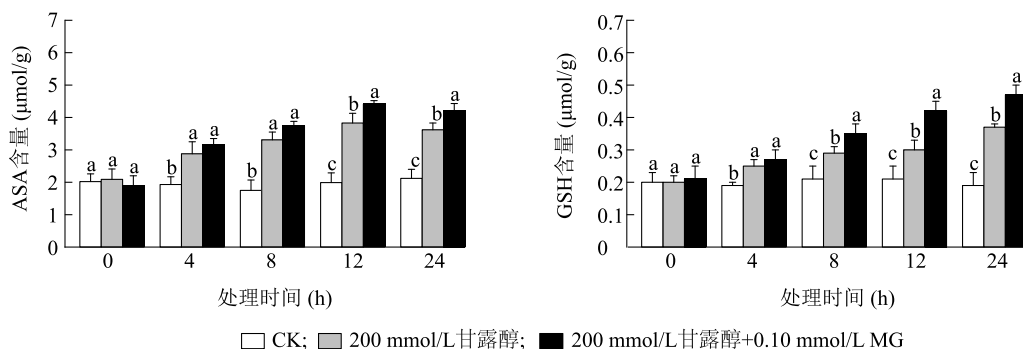
## 2.4 叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化剂含量的影响

叶面喷施 MG 对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化剂含量的影响如图 4 所示。从图中可以看出,CK 条件下,玉米幼苗 ASA 含量和 GSH 含量相对稳定,变化幅度相对较小;200 mmol/L甘露醇胁迫处理后 4~24 h,ASA 含量和 GSH 含量整体呈增加趋势。而在 200 mmol/L甘露醇胁迫和叶面喷施 0.10 mmol/L

MG 的处理后,ASA 含量和 GSH 含量有进一步提升的趋势。胁迫处理初期,200 mmol/L甘露醇胁迫+叶面喷施 0.10 mmol/L MG 处理与 200 mmol/L甘露醇胁迫处理间差异不大,而在胁迫处理后 12 h 和 24 h,200 mmol/L甘露醇胁迫+叶面喷施 0.10 mmol/L MG 处理的玉米幼苗 ASA 含量分别比 200 mmol/L甘露醇胁迫处理显著提高 14.96% 和 16.10%,GSH 含量分别显著增加 39.80% 和 25.61%。因此,外源

喷施 MG 可以增加玉米叶片 ASA 和 GSH 等抗氧化

剂含量,能够有效清除因干旱胁迫生成的 ROS。



相同处理时间下柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 叶面喷施甲基乙二醛(MG)对干旱胁迫下玉米叶片抗坏血酸(ASA)和谷胱甘肽(GSH)含量的影响

Fig.4 Effects of foliar application of methylglyoxal (MG) on ascorbic acid (ASA) and glutathione (GSH) contents in maize leaves under drought stress

### 3 讨论

干旱是作物面临的常见的胁迫之一,对作物生长各个发育阶段均有影响<sup>[21-27]</sup>,分析干旱胁迫下作物生理机制的变化及缓解措施是减轻干旱损失的重要途径之一<sup>[28]</sup>。本研究发现,利用200 mmol/L甘露醇模拟干旱胁迫时,玉米种子的发芽率、发芽势及幼苗生物量积累方面都比CK有明显下降,这与孙晓莉等<sup>[14]</sup>、耿梦瑶等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。作为剂量效应信号分子,MG能够降低多种非生物胁迫条件下植物植株活性氧的累积量,减轻胁迫给植物细胞带来的伤害,提高植物逆境适应能力。本研究结果表明,叶面喷施MG能够减少干旱胁迫下玉米幼苗MDA和 $H_2O_2$ 等物质的积累量,进而提高玉米幼苗的抗旱能力。MG溶液浸种能有效提高干旱胁迫环境下玉米种子的发芽率和发芽势,促进玉米幼苗的生长,这一结果与邹成林等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

$H_2O_2$ 是植物体内ROS的主要形态,MDA是膜脂过氧化的产物。 $H_2O_2$ 含量和MDA含量是衡量植物在逆境下所承受氧化胁迫伤害的重要指标。本研究中,利用200 mmol/L甘露醇处理后,玉米幼苗 $H_2O_2$ 含量和MDA含量均出现显著增加。而200 mmol/L甘露醇+0.10 mmol/LMG叶面喷施处理的玉米幼苗 $H_2O_2$ 含量和MDA含量较200 mmol/L甘露醇处理显著减少,说明外源施用甲基乙二醛(MG)可以减少玉米叶片中的ROS含量,降低干旱胁迫对玉米幼苗生长的危害。

正常情况下,植物体内ROS的含量基本稳定,产

生和消耗之间保持着动态平衡,但在干旱条件下,这种平衡会被打破,导致形成过量ROS并氧化成脂类和蛋白质,从而影响植物新陈代谢<sup>[31-32]</sup>。在此过程中,抗氧化酶SOD、POD、CAT和APX活性发挥关键的作用。本研究发现,200 mmol/L甘露醇处理后,玉米幼苗ROS的动态平衡被破坏,玉米叶片中的SOD、POD、CAT和APX活性显著高于CK,这有利于植株体内ROS的清除,而在200 mmol/L甘露醇+叶面喷施0.10 mmol/LMG处理12 h后,玉米叶片中的SOD、POD、CAT和APX活性比200 mmol/L甘露醇处理有显著增加,这与王芳等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

ASA、GSH是植物体内存在的主要抗氧化剂,具有清除自由基及过量ROS的功能,是增强植物抗逆性的重要物质<sup>[34]</sup>。本研究发现,200 mmol/L甘露醇模拟干旱胁迫后,玉米叶片中ASA含量和GSH含量均显著高于CK,在200 mmol/L甘露醇胁迫+0.10 mmol/LMG叶面喷施处理后,玉米叶片中ASA含量和GSH含量有进一步增加的趋势,胁迫处理12 h和24 h时,200 mmol/L甘露醇胁迫+0.10 mmol/LMG叶面喷施处理的玉米叶片中ASA含量和GSH含量显著高于200 mmol/L甘露醇胁迫处理,这与孙晓莉等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。

### 4 结论

MG溶液浸种能提高玉米种子的发芽势、发芽率,促进幼苗的生长,适宜的MG浸种浓度为0.10 mmol/L。玉米幼苗叶面喷施0.10 mmol/LMG后,叶片中MDA含量和 $H_2O_2$ 含量显著降低,而SOD、

*POD*、*CAT* 和 *APX* 等抗氧化酶的活性、抗坏血酸 (ASA) 含量和谷胱甘肽 (GSH) 含量整体上显著增加。即外源施用 MG 处理能显著增强玉米幼苗的抗氧化能力,降低干旱胁迫对叶片造成的氧化损伤,从而缓解干旱胁迫对玉米幼苗生长的影响。

## 参考文献:

- [1] 向莉,王仙,董裕生,等. 外源丁酸对干旱胁迫下大麦产量及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(9): 2173-2181.
- [2] 忽雪琦,李东阳,严加坤,等. 干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯对玉米幼苗根系吸水的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 991-998.
- [3] 李永生,方永丰,李玥,等. 外源硫化氢对 PEG 模拟干旱胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 813-821.
- [4] 张美微,乔江方,宋韶帅,等. 干旱对夏玉米籽粒充实和生理特性的影响及其外源亚精胺调控[J]. 核农学报, 2022, 36(12): 2501-2509.
- [5] BEN A T, ADRIAN J, KLEIN T, et al. Identifying indicators for extreme wheat and maize yield losses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220(15): 130-140.
- [6] 刘宪锋,傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.
- [7] 夏璐,赵蕊,王怡针,等. 干旱胁迫对夏玉米光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(3): 102-110.
- [8] 李冬,申洪涛,王艳芳,等. 干旱胁迫下外源硫化氢对烤烟幼苗光合荧光参数及抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(9): 1609-1617.
- [9] AHSINA S H, MOHAMMAD A H, MOHAMMAD G M, et al. Methylglyoxal: an emerging signaling molecule in plant abiotic stress responses and tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7(9): 1341.
- [10] RABBANI N, THORNALLEY P J. Glyoxalase in diabetes, obesity and related disorders[J]. Seminars in Cell and Developmental Biology, 2011, 22(3): 309-317.
- [11] 王月,周志豪,叶芯妤,等. 甲基乙二醛:植物中一种新的信号分子[J]. 植物生理学报, 2018, 54(1): 10-18.
- [12] 王月. 甲基乙二醛信号诱导玉米幼苗耐热性的形成及其可能的机理[D]. 昆明:云南师范大学, 2019.
- [13] LI Z G. Methylglyoxal and glyoxalase system in plants: old players, new concepts[J]. Botanical Review, 2016, 82(2): 183-203.
- [14] 孙晓莉,贾春燕,田寿乐,等. 外源甲基乙二醛对干旱胁迫下板栗幼苗的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 104-110.
- [15] LI Z G, DUAN X Q, MIN X, et al. Methylglyoxal as a novel signal molecule induces the salt tolerance of wheat by regulating the glyoxalase system, the antioxidant system, and osmolytes[J]. Protoplasma, 2017, 254(5): 1995-2006.
- [16] WANG Y, YE X Y, QIU X M, et al. Methylglyoxal triggers the heat tolerance in maize seedlings by driving AsA-GSH cycle and reactive oxygen species-/methylglyoxal-scavenging system[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 138(26): 91-99.
- [17] 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.
- [18] 张蜀秋,韩玉珍,李云. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [19] HODGES D M, ANDREW C J, JOHNSON D A, et al. Antioxidant enzyme responses to chilling stress in differentially sensitive inbred maize lines[J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(5): 1105-1113.
- [20] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant and Cell Physiology, 1980, 22(5): 867-880.
- [21] 吕婧妤,徐超,刘昱君,等. 基于模拟优化模型的干旱风沙草原区水-粮食-能源关系[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(3): 296-304.
- [22] 宋子荷,甄艳. 植物干旱和盐胁迫响应相关 miRNA 研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 1-11.
- [23] 高晨凯,刘水苗,李煜铭,等. 冬小麦不同指标的干旱响应阈值及干旱程度定量分级研究[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 119-128.
- [24] 张斌. 大豆转录因子基因 *GmbHLH130* 克隆及在干旱胁迫中的功能分析[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(7): 1441-1448.
- [25] 赵艺源,姜海玲,周星宇,等. 基于空间距离模型的综合干旱监测建模及在东北地区应用[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(7): 716-722.
- [26] 史田斌,刘震,李志涛,等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 193-202.
- [27] 张帆,刘博,石玉,等. 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 186-191.
- [28] 杨帆,苗灵凤,胥晓,等. 植物对干旱胁迫的响应研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 586-591.
- [29] 耿梦瑶,程文聪,陈丽红,等. 胆碱脂酶/氨基酸对 PEG 模拟干旱胁迫下玉米萌发的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1916-1922.
- [30] 邹成林,翟瑞宁,钦洁,等. 不同浓度 PEG 模拟干旱胁迫对玉米种子萌发特性的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 68-75.
- [31] 王芳,王铁兵,李鹏德. 外源 ABA 对干旱胁迫下玉米幼苗氧化损伤的保护作用[J]. 草业科学, 2019, 36(11): 2887-2894.
- [32] 郭艳阳,刘佳,朱亚利,等. 玉米叶片光合和抗氧化酶活性对干旱胁迫的响应[J]. 植物生理学报, 2018, 54(12): 1839-1846.
- [33] 王芳,赵有军,王汉宁. 外源 NO 对干旱胁迫下玉米幼苗膜脂过氧化物的调节效应[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 75-79.
- [34] 吴昆. 外源褪黑素缓解糯玉米苗期干旱胁迫的作用[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023.

(责任编辑:石春林)