

夏瑾华,刘佳凝. 外源甜菜碱对干旱胁迫下金花菜种子萌发和实生苗生长发育的缓解效应[J]. 山西农业科学, 2025, 53(5): 101-111.

XIA J H, LIU J N. Alleviating effect of exogenous glycine betaine on seed germination and plantlet growth and development of *Medicago polymorpha* under drought stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(5): 101-111.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.05.12

## 外源甜菜碱对干旱胁迫下金花菜种子萌发和实生苗生长发育的缓解效应

夏瑾华, 刘佳凝

(上饶师范学院 生命科学院, 江西 上饶 334001)

**摘要:**为明确甜菜碱缓解金花菜种子萌发和实生苗生长发育干旱伤害的作用机理,以上海金花菜种子为试验材料,采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫,利用植物组织培养技术研究金花菜种子和实生苗在干旱胁迫下生长发育过程中生长指标、生理生化指标和相关基因表达的变化以及外源甜菜碱对其的缓解效应。结果表明,金花菜种子萌发和实生苗生长发育可耐受的PEG-6000浓度阈值为5%。在5% PEG-6000模拟干旱胁迫下,0.4%~0.8%甜菜碱处理可显著提高金花菜种子的萌发率和成苗率,显著增加金花菜种子萌发苗和实生苗的株高、主根长、根数、叶片数、CAT活性、SOD活性、POD活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量,显著促进其WRKY转录因子、蛋白TIFY8、转录因子MYB13、NAC转录因子47、ABC转运A家族成员7、晚期胚胎发生丰富蛋白2和乙烯反应转录因子ERF110等基因的表达,显著降低其MDA含量。整体来看,施用适宜浓度的外源甜菜碱可以显著缓解干旱胁迫对金花菜种子萌发和实生苗生长发育的伤害。

**关键词:**金花菜;干旱胁迫;甜菜碱;种子萌发;实生苗生长发育;缓解效应

中图分类号:S542.9

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2025)05-0101-11

## Alleviating Effect of Exogenous Glycine Betaine on Seed Germination and Plantlet Growth and Development of *Medicago polymorpha* under Drought Stress

XIA Jinhua, LIU Jianing

(College of Life Sciences, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

**Abstract:** To clarify the mechanism of glycine betaine(GB) in alleviating drought damage during seed germination and growth and development of plantlets of *Medicago polymorpha* L., in this study, seeds of *Medicago polymorpha* L. from Shanghai were used as experimental materials, polyethylene glycol(PEG-6000) was used to simulate drought stress, and plant tissue culture techniques were used to study changes in growth indicators, physiological and biochemical indicators, and related gene expression of the *Medicago polymorpha* L. seeds and plantlets during the growth and development process under drought stress, as well as the alleviating effect of exogenous betaine on them. The results showed that the threshold concentration of PEG-6000 that could be tolerated for seed germination and plantlet growth and development of *Medicago polymorpha* L. was 5%. Under simulated drought stress with 5% PEG-6000, treatment with 0.4% to 0.8% GB significantly increased the germination and seedling rates of *Medicago polymorpha* L. seeds, as well as the plant height, main root length, root number, leaf number, CAT activity, SOD activity, POD activity, soluble sugar content, soluble protein content, and proline content of *Medicago polymorpha* L. seed germination seedlings and plantlets. It also significantly promoted the expression of WRKY transcription factor, protein TIFY8, transcription factor MYB13, NAC transcription factor 47, ABC transporter A family member 7, late embryogenesis rich protein 2, and ethylene responsive transcription factor ERF110, while significantly reduced their MDA content. Overall, the application of exogenous GB at an appropriate concentration could significantly alleviate the damage caused by drought stress to the seed germination and plantlet growth and development of *Medicago polymorpha* L..

收稿日期:2025-03-25

基金项目:国家自然科学基金(31960079,32060092);江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-13-赣东站)

作者简介:夏瑾华,副教授,硕士,主要从事植物生物技术研究,E-mail:273340257@qq.com

**Keywords:** *Medicago polymorpha* L.; drought stress; glycine betaine; seed germination; plantlet growth and development; alleviating effect

金花菜(*Medicago polymorpha* L.)也称为南苜蓿、花苜蓿、黄花苜蓿、刺苜蓿、草头,为豆科苜蓿属 1 年或 2 年生牧草,纤维素低,蛋白质高,适口性好,在食用、饲用、药用和绿肥等方面具有较高的价值<sup>[1]</sup>。金花菜主要分布在长江中下游的江苏、浙江、上海一带。近年来,沙尘暴、强暴雨、强对流、高温、干旱、强台风等极端天气频发,部分地区时常遭受高温少雨的气候影响,导致夏季出现严重干旱,金花菜的正常生长受到极大影响,不仅对金花菜种子的萌发具有一定的影响,对金花菜幼苗的生长发育也会产生影响,严重降低了金花菜的产量<sup>[2]</sup>。研究表明,外源物质干预可以通过提高作物幼苗的保水能力,改善叶片的水分调节,从而可以减轻干旱胁迫对作物的影响<sup>[3]</sup>。甜菜碱(Glycine betaine, GB)是一种普遍存在于植物体内的水溶性生物碱,学名为三甲基甘氨酸,是植物代谢的中间产物和重要的渗透调节物质,主要分布在植物细胞的叶绿体和细胞质中,在植物受到逆境胁迫时,可以作为渗透调节物质,维持植物细胞的渗透平衡,增强植物抗质膜损伤的能力,提高植物细胞的抗逆性<sup>[4]</sup>。当植物受到盐碱胁迫、低温胁迫、高温胁迫和干旱胁迫等逆境胁迫时,其体内会产生一定量的甜菜碱来缓解逆境胁迫给自身带来的影响,但植物体内产生的内源甜菜碱含量一般较低<sup>[5]</sup>,因此,在逆境胁迫下,一般考虑对植物施加一定浓度的外源甜菜碱以提高其对逆境胁迫的适应能力,以提高植物的抗逆性,减少逆境胁迫对其造成的伤害<sup>[6]</sup>。聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)是一种分子质量较大、无毒、无刺激性的有机物,无法进入植物细胞内,具有良好的亲水性以及较好的与许多有机物组分的相溶性<sup>[7-8]</sup>。利用 PEG 模拟干旱胁迫,与直接控水相比,具有条件可控、简单易行、容易操作、周期较短、重复性好、效果显著等优点<sup>[9]</sup>。王永吉等<sup>[10]</sup>采用 20% PEG-6000 模拟干旱胁迫,结果发现,10~50 mmol/L GB 可以通过提高过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性以及降低其丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量缓解干旱胁迫造成的伤害,从而促进了紫花苜蓿种子的发芽和幼苗的生长。魏晓凯等<sup>[4]</sup>采用 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫,

发现 45 mmol/L GB 可以通过提高脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性、POD 活性和 CAT 活性以及降低超氧阴离子产生速率和 MDA 含量缓解了干旱胁迫对烤烟幼苗的伤害。张二芳等<sup>[6]</sup>采用 9% PEG-6000 模拟干旱胁迫,结果发现,20 mg/L GB 可以通过提高芫荽叶绿素含量、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸(Proline, Pro)含量和可溶性蛋白含量以及降低 MDA 含量缓解干旱胁迫造成的伤害,从而促进了芫荽种子的发芽和幼苗的生长。柴文臣等<sup>[11]</sup>采用自然条件进行干旱胁迫,发现 40 mg/L GB 可以通过降低其 MDA 含量,缓解干旱胁迫对茄子幼苗的影响。马明臻<sup>[12]</sup>也采用自然条件进行干旱胁迫,发现 200 mmol/L GB 可以通过提高苹果叶片的可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、SOD 活性、CAT 活性、抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)活性以及降低 MDA 含量和过氧化氢含量缓解了干旱胁迫对细胞结构的伤害,提高了叶片的叶绿素含量和光合能力。目前,关于金花菜的研究主要集中于种子萌发<sup>[13]</sup>、愈伤组织诱导<sup>[14]</sup>、高温胁迫<sup>[2]</sup>、叶绿体基因组<sup>[15]</sup>、基因组 SSR 分布<sup>[1]</sup>等方面,而关于干旱胁迫下外源 GB 对金花菜种子和幼苗的处理效果尚未见报道。

本研究以上海金花菜为材料,采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫,分析外源 GB 对金花菜种子萌发和实生苗生长发育的影响,进而揭示外源 GB 在金花菜抗干旱胁迫过程中的生理和分子机制,旨在为 GB 在金花菜生产上的应用提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试上海金花菜种子购于浙江温岭市神农种子有限公司。PEG-6000 购于山东科源生化有限公司,甜菜碱(GB)购于上海麦克林生化科技股份有限公司。

### 1.2 试验设计

试验均在上饶师范学院生命科学院植物组织培养室进行。

1.2.1 PEG-6000 阈值浓度的筛选 选取发育成熟、大小一致、颗粒饱满的金花菜种子,在超净工作

台上,用75%酒精和0.1%氯化汞各消毒1、20 min后,用无菌水浸洗2~3 min,然后将消毒后的种子接种到添加了不同浓度(0、5%、10%、20%、40%)PEG-6000的MS固体培养基上。种子培养25~28 d后,将获得的实生苗全株接种到添加了不同浓度(0、5%、10%、20%、40%)PEG-6000的MS固体培养基上。培养条件为光照强度1 000~1 500 lx,光照时间14 h/d,温度(25±1)℃,湿度80%。

1.2.2 PEG-6000胁迫下的GB处理 选取发育成熟、大小一致、颗粒饱满的金花菜种子,在超净工作台上,用75%酒精和0.1%氯化汞各消毒1、20 min后,用无菌水浸洗2~3 min,然后将消毒后的种子接种到添加了浓度阈值PEG-6000和不同浓度(0、0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.0%)GB的固体培养基上。培养25~28 d后,将获得的实生苗全株接种到添加了浓度阈值PEG-6000和不同浓度(0、0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.0%)GB的固体培养基上。培养条件同1.2.1。种子和实生苗培养20 d后,分别统计其萌发率、成苗率、株高、主根长、根数和叶片数,并对其生理生化指标和基因表达进行检测。试验重复3次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标 种子萌发是以露白为标准,种子成苗是以长出真叶为标准,计算发芽率和成苗率。分别采用直尺法和目测法对株高、主根长、叶片数和根数(主根上的须根数)进行测量和计数。

发芽率=露白的种子数/接种的总种子数×100% (1)

成苗率=长出真叶的种子数/接种的总种子

数×100% (2)

1.3.2 生理生化指标 取实生苗的全株进行生理生化指标的测定。CAT活性采用植物过氧化氢酶测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)进行测定,SOD活性采用植物超氧化物歧化酶测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)进行测定,POD活性采用植物过氧化物酶测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)进行测定。MDA含量采用植物MDA含量测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)进行测定。可溶性糖(SS)含量采用蒽酮法<sup>[16]</sup>进行测定,可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝G-250染色法<sup>[16]</sup>进行测定,脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法<sup>[16]</sup>进行测定。

1.3.3 基因表达的RT-qPCR检测 与逆境胁迫相关的基因(WRKY转录因子、蛋白TIFY8、转录因子MYB13、NAC转录因子47、ABC转运A家族成员7、晚期胚胎发生丰富蛋白2、乙烯反应转录因子ERF110)的表达采用文献[17]的方法进行RT-qPCR分析。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2021和SPSS 26.0软件进行计算和分析。采用SPSS 26.0的LSD法进行多重比较,并采用SPSS 26.0的Duncan's法进行差异显著性检验和Pearson相关性分析。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子的萌发情况 PEG-6000干旱胁迫对金花菜种子萌发生长的影响如表1所示。

表1 PEG-6000干旱胁迫对金花菜种子萌发生长的影响  
Tab.1 Effects of PEG-6000 drought stress on seed germination and growth of *Medicago polymorpha* L.

| PEG-6000浓度/%<br>PEG-6000 concentration | 萌发率/%<br>Germination rate | 成苗率/%<br>Seedling rate | 株高/cm<br>Plant height | 主根长/cm<br>Main root length | 根数/条<br>Root number | 叶片数<br>Leaf number |
|----------------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| 0                                      | 55.66±4.73Aa              | 49.78±1.02Aa           | 0.69±0.07Aa           | 0.91±0.09Aa                | 1.17±0.05Aa         | 1.25±0.43Aa        |
| 5                                      | 49.63±2.21Bb              | 35.84±2.55Bb           | 0.51±0.08Ab           | 0.72±0.07Ab                | 0.74±0.02Ab         | 0.94±0.03Ab        |
| 10                                     | 23.11±1.52Cc              | 20.70±1.36Cc           | 0.13±0.01Bc           | 0.27±0.06Bc                | 0.21±0.07Bc         | 0.38±0.06Bc        |
| 20                                     | 4.74±0.74Dd               | 0.83±0.03Dd            | 0.00±0.00Bd           | 0.05±0.05Bd                | 0.05±0.01Bc         | 0.02±0.01Bd        |
| 40                                     | 0.00±0.00Dd               | 0.00±0.00Dd            | 0.00±0.00Bd           | 0.00±0.00Bd                | 0.00±0.00Bc         | 0.00±0.00Bd        |

注:不同大、小写字母分别表示处理间在0.01和0.05水平上的极显著差异和显著差异。表2—8同。

Note: The uppercase and lowercase letters represented extremely significant and significant differences among the treatments at the 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same as Tab.2-8.

从表1可以看出,PEG-6000干旱胁迫对金花菜种子的萌发具有显著的影响。在5%~40%

PEG-6000的干旱胁迫下,金花菜种子的萌发受到明显的抑制,萌发率和成苗率显著下降( $P<$

0.05),金花菜种子萌发苗的株高、主根长、根数和叶片数均显著下降( $P<0.05$ )。当 PEG-6000 浓度为 40% 时,金花菜种子萌发的各项生长指标均为 0。因此,金花菜种子萌发可耐受的 PEG-6000 浓度阈值可设为 5%。

## 2.2 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗的生长发育变化

PEG-6000 干旱胁迫对金花菜实生苗生长的影响如表 2 所示。

表 2 PEG-6000 干旱胁迫对金花菜实生苗生长的影响

Tab.2 Effects of PEG-6000 drought stress on plantlet growth of *Medicago polymorpha* L.

| PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | 株高/cm<br>Plant height | 主根长/cm<br>Main root length | 根数/条<br>Root number | 叶片数<br>Leaf number |
|-----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| 0                                       | 9.83±1.62Aa           | 9.73±2.32Aa                | 11.33±1.02Aa        | 50.00±2.06Aa       |
| 5                                       | 2.67±0.67Bb           | 2.45±0.45Bb                | 1.50±0.50Bb         | 7.00±0.97Bb        |
| 10                                      | 0.63±0.03Cc           | 0.46±0.06Cc                | 0.67±0.07Bb         | 1.50±0.50Bb        |
| 20                                      | 0.00±0.00Cc           | 0.00±0.00Cc                | 0.00±0.00Bb         | 0.00±0.00Bb        |
| 40                                      | 0.00±0.00Cc           | 0.00±0.00Cc                | 0.00±0.00Bb         | 0.00±0.00Bb        |

由表 2 可知,在 5%~40% PEG-6000 的干旱胁迫下,金花菜实生苗的生长发育受到明显的抑制,金花菜实生苗的株高、主根长、根数和叶片数均显著下降( $P<0.05$ )。当 PEG-6000 浓度为 20% 和 40% 时,金花菜种子萌发的主根长、根数和叶片数均为 0。因此,金花菜实生苗生长发育可耐受的 PEG-6000 浓度阈值可设为 5%。

## 2.3 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜种子萌发的缓解效应分析

从表 3 可以看出,GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜种子萌发具有显著的缓解效应。在 0.2%~0.8% GB 处理下,金花菜种子在 5% PEG-

6000 干旱胁迫下的萌发得到明显的缓解。与 5% PEG-6000 相比,5% PEG-6000+0.2%~0.8% GB 处理中金花菜种子的萌发率和成苗率显著提高( $P<0.05$ ),金花菜种子萌发苗的株高、主根长、根数和叶片数也显著增加( $P<0.05$ )。当 GB 为 0.8% 时,金花菜种子在 5% PEG-6000 干旱胁迫下萌发的各项生长指标均为最高值。当 GB 为 1.0% 时,金花菜种子在 5% PEG-6000 干旱胁迫下萌发的各项生长指标显著下降。因此,0.8% GB 可以显著促进金花菜种子在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的萌发。

表 3 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜种子萌发生长的影响

Tab.3 Effects of GB on the growth of *Medicago polymorpha* L. seed germination under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | 萌发率/%<br>Germination rate | 成苗率/%<br>Seedling rate | 株高/cm<br>Plant height | 主根长/cm<br>Main root length | 根数/条<br>Root number | 叶片数<br>Leaf number |
|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| 0                           | 0                                       | 43.59±3.58Aa              | 41.06±6.03Aa           | 5.36±0.26Aa           | 3.85±0.26Aa                | 5.69±0.13Aa         | 5.48±0.86Aa        |
| 0                           | 5                                       | 13.32±1.22Ee              | 11.03±0.59Ee           | 0.69±0.05Dd           | 0.32±0.09Dd                | 1.32±0.12Cc         | 1.03±0.09Dd        |
| 0.1                         | 5                                       | 15.26±1.09Ee              | 11.65±0.84Ee           | 0.75±0.08Dd           | 0.42±0.04Dd                | 1.46±0.45Cc         | 1.14±0.08Dd        |
| 0.2                         | 5                                       | 23.16±3.05Dd              | 18.45±1.62Dd           | 2.36±0.21Cc           | 1.63±0.25Cc                | 1.66±0.61Cc         | 2.03±0.12Cc        |
| 0.4                         | 5                                       | 29.31±5.02Cc              | 24.16±4.02Cc           | 4.19±0.46Bb           | 2.52±0.52Bb                | 3.18±0.24Bb         | 3.46±0.11Bb        |
| 0.8                         | 5                                       | 35.48±4.81Bb              | 31.27±5.01Bb           | 4.25±0.29Bb           | 2.68±0.16Bb                | 3.62±0.82Bb         | 3.82±0.56Bb        |
| 1.0                         | 5                                       | 16.44±2.04Ee              | 10.36±0.94Ee           | 0.82±0.08Dd           | 0.46±0.08Dd                | 1.51±0.19Cc         | 1.09±0.87Dd        |

## 2.4 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜种子萌发过程中生理生化指标的影响

从表 4 可以看出,GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜种子萌发过程中生理生化指标具有显著的影响。在 0.1%~1.0% GB 处理下,金花菜种子

萌发苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的生理生化指标得到明显的提高( $P<0.05$ )。与 5% PEG-6000 相比,5% PEG-6000+0.1%~1.0% GB 处理中金花菜种子萌发苗的大部分生理生化指标显著增加( $P<0.05$ ),只有 MDA 含量显著下降( $P<$

0.05)。当GB为0.8%时,金花菜种子萌发苗在5% PEG-6000干旱胁迫下的生理生化指标为最高值,只有MDA含量为最低值。当GB为1.0%时,金花菜种子萌发苗在5% PEG-6000干旱胁迫下的生理生化指标显著下降,只有MDA含量无显著性变化。因此,0.8% GB可以显

著提高5% PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子萌发苗的CAT活性、SOD活性、POD活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量,显著降低5% PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子萌发苗的MDA含量。

表4 GB对PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子生理生化指标的影响  
Tab.4 Effects of GB on physiological and biochemical indicators of *Medicago polymorpha* L. seeds under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | CAT 活性/<br>(U/(min·g))<br>CAT activity | SOD 活性/<br>(U/(min·g))<br>SOD activity | POD 活性/<br>(U/(min·g))<br>POD activity | MDA 含量/<br>(μmol/g)<br>MDA content | 可溶性糖含量/<br>(mg/g)<br>Soluble sugar content | 可溶性蛋白含量/(mg/g)<br>Soluble protein content | 脯氨酸含量/<br>(μg/g)<br>Proline content |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0                           | 0                                       | 12.69±1.03Ee                           | 24.59±3.02Ff                           | 8.91±0.98Ee                            | 3.54±0.65Dd                        | 16.29±1.05Ee                               | 14.07±1.24Ee                              | 6.95±0.65Ee                         |
| 0                           | 5                                       | 23.18±2.36Dd                           | 35.84±3.16Ee                           | 11.84±1.05Dd                           | 27.11±0.84Aa                       | 20.45±3.02Dd                               | 19.63±2.44Dd                              | 9.48±0.85Dd                         |
| 0.1                         | 5                                       | 34.46±5.02Cc                           | 52.38±4.29Dd                           | 15.26±1.35Cc                           | 11.68±0.94Cc                       | 34.22±1.58Cc                               | 23.47±3.26Cc                              | 13.35±1.29Cc                        |
| 0.2                         | 5                                       | 36.28±2.48Cc                           | 69.55±6.23Cc                           | 23.19±2.46Bb                           | 12.44±1.09Cc                       | 52.64±6.02Bb                               | 31.06±2.95Bb                              | 18.84±1.84Bb                        |
| 0.4                         | 5                                       | 57.22±6.32Bb                           | 71.12±3.23Bb                           | 21.45±2.95Bb                           | 19.08±1.35Bb                       | 51.72±4.12Bb                               | 54.81±1.49Aa                              | 17.62±2.04Bb                        |
| 0.8                         | 5                                       | 63.29±4.28Aa                           | 82.05±4.12Aa                           | 35.19±2.47Aa                           | 11.29±2.04Cc                       | 62.48±2.85Aa                               | 58.24±5.32Aa                              | 24.05±3.75Aa                        |
| 1.0                         | 5                                       | 35.88±2.69Cc                           | 54.69±2.06Dd                           | 24.08±3.02Bb                           | 11.65±0.97Cc                       | 36.44±3.96Cc                               | 22.52±4.06Cc                              | 18.49±1.94Bb                        |

2.5 GB对PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子基因表达的影响

由表5可知,GB对PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子萌发过程中基因的表达具有显著的影响。在0.1%~1.0% GB处理下,金花菜种子萌发苗在5% PEG-6000干旱胁迫下的基因表达RQ值得到明显的提高( $P<0.05$ )。当GB为0.8%时,金花菜种子萌发苗在5% PEG-6000干旱胁迫下的

基因表达RQ值为最高值。当GB为1.0%时,金花菜种子萌发苗在5% PEG-6000干旱胁迫下的基因表达RQ值显著下降( $P<0.05$ )。因此,0.8% GB可以显著上调5% PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子萌发苗WRKY转录因子、蛋白TIFY8、转录因子MYB13、NAC转录因子47、ABC转运A家族成员7、晚期胚胎发生丰富蛋白2、乙烯反应转录因子ERF110等基因的表达。

表5 GB对PEG-6000干旱胁迫下金花菜种子基因表达的影响  
Tab.5 Effects of GB on gene expression of *Medicago polymorpha* L. seeds under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | RQ 值 RQ value                          |                            |                                          |                                            |                                                      |                                                             |                                                                    |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                             |                                         | WRKY 转录因子<br>WRKY transcription factor | 蛋白 TIFY8<br>Protein TIFY 4 | 转录因子 MYB13<br>Transcription factor MYB13 | NAC 转录因子 47<br>NAC transcription factor 47 | ABC 转运 A 家族成员 7<br>ABC transports A family members 7 | 晚期胚胎发生丰富蛋白 2<br>Late stage embryogenesis abundant protein 2 | 乙烯反应转录因子 ERF110<br>Ethylene responsive transcription factor ERF110 |
| 0                           | 0                                       | 1.00±0.00Ff                            | 1.00±0.00Ee                | 1.00±0.00Ee                              | 1.00±0.00Ee                                | 1.00±0.00Ee                                          | 1.00±0.00Ee                                                 | 1.00±0.00Ee                                                        |
| 0                           | 5                                       | 5.94±0.68Ee                            | 11.28±1.06Dd               | 24.11±3.55Dd                             | 13.47±1.35Dd                               | 5.94±0.94Dd                                          | 4.82±0.64Dd                                                 | 12.42±1.54Dd                                                       |
| 0.1                         | 5                                       | 13.95±1.05Dd                           | 33.59±6.03Bb               | 51.28±6.79Cc                             | 21.64±3.69Cc                               | 14.27±1.49Cc                                         | 9.68±0.85Cc                                                 | 31.08±3.65Cc                                                       |
| 0.2                         | 5                                       | 28.19±3.26Cc                           | 31.04±3.18Bb               | 69.83±5.89Bb                             | 34.31±5.02Bb                               | 21.84±3.65Bb                                         | 14.24±1.23Bb                                                | 43.94±4.25Bb                                                       |
| 0.4                         | 5                                       | 26.15±4.25Bb                           | 46.92±5.02Aa               | 71.06±7.02Bb                             | 32.84±4.15Bb                               | 30.29±5.29Aa                                         | 13.85±2.02Bb                                                | 60.27±5.08Aa                                                       |
| 0.8                         | 5                                       | 36.96±1.09Aa                           | 45.28±4.48Aa               | 86.39±6.98Aa                             | 42.82±2.06Aa                               | 29.65±2.15Aa                                         | 19.86±1.54Aa                                                | 58.15±3.28Aa                                                       |
| 1.0                         | 5                                       | 27.88±2.83Cc                           | 19.49±2.09Cc               | 53.02±3.14Cc                             | 44.02±3.54Aa                               | 23.15±4.09Bb                                         | 15.06±0.98Bb                                                | 62.01±2.49Aa                                                       |

## 2.6 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生长发育抑制的缓解效应

从表 6 可以看出,GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生长发育具有显著的缓解效应。在 0.2%~1.0% GB 处理下,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的生长发育得到明显的缓解。与 5% PEG-6000 相比,5% PEG-6000+

0.2%~1.0% GB 处理中金花菜实生苗的株高、主根长、根数和叶片数显著增加( $P<0.05$ )。当 GB 为 0.4% 时,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的各项生长指标均为最高值。因此,0.4% GB 可以显著促进金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的生长发育。

表 6 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生长的影响

Tab.6 Effects of GB on plantlet growth of *Medicago polymorpha* L. under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | 株高/cm<br>Plant height | 主根长/cm<br>Main root length | 根数/条<br>Root number | 叶片数<br>Leaf number |
|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| 0                           | 0                                       | 8.69±0.23Aa           | 8.39±0.66Aa                | 6.98±0.85Aa         | 12.36±1.03Aa       |
| 0                           | 5                                       | 3.26±0.12Dd           | 2.16±0.51Dd                | 1.28±0.24Dd         | 3.65±0.16Dd        |
| 0.1                         | 5                                       | 3.12±0.24Dd           | 2.35±0.82Dd                | 1.34±0.15Dd         | 3.12±0.38Dd        |
| 0.2                         | 5                                       | 5.39±0.58Cc           | 4.12±0.42Cc                | 3.69±0.26Cc         | 6.52±0.34Cc        |
| 0.4                         | 5                                       | 7.13±0.64Bb           | 6.54±0.34Bb                | 5.12±0.34Bb         | 8.42±0.18Bb        |
| 0.8                         | 5                                       | 5.42±0.72Cc           | 4.52±0.55Cc                | 5.72±0.91Bb         | 8.23±0.25Bb        |
| 1.0                         | 5                                       | 5.51±0.25Cc           | 4.38±0.19Cc                | 3.64±0.28Cc         | 6.91±0.16Cc        |

## 2.7 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生理生化指标的影响

GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生长发育过程中生理生化指标具有显著的影响(表 7)。在 0.1%~1.0% GB 处理下,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的生理生化指标得到明显的提高( $P<0.05$ ),只有 MDA 含量显著下降。当 GB 为 0.4% 时,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的大部分生理生化指标为最高值,只

有 MDA 含量为最低值。当 GB 为 0.8%~1.0% 时,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的大部分生理生化指标显著下降( $P<0.05$ ),只有 MDA 含量显著提高。因此,0.4% GB 可以显著提高 5% PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗的 CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量,显著降低 5% PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗的 MDA 含量。

表 7 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生理生化指标的影响

Tab.7 Effects of GB on physiological and biochemical indicators of *Medicago polymorpha* L. plantlets under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | CAT 活性/<br>(U/(min·g))<br>CAT activity | SOD 活性/<br>(U/(min·g))<br>SOD activity | POD 活性/<br>(U/(min·g))<br>POD activity | MDA 含量/<br>(μmol/g)<br>MDA content | 可溶性糖含量/<br>(mg/g)<br>Soluble sugar content | 可溶性蛋白含<br>量/(mg/g)<br>Soluble protein content | 脯氨酸含量/<br>(μg/g)<br>Proline content |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0                           | 0                                       | 23.65±2.36Ee                           | 12.84±1.22Ee                           | 19.14±1.25Ee                           | 5.96±0.68Ee                        | 23.51±2.69Ee                               | 15.28±1.36Dd                                  | 13.68±1.03Ee                        |
| 0                           | 5                                       | 36.95±5.23Dd                           | 17.68±2.58Dd                           | 25.44±2.65Dd                           | 33.95±3.02Aa                       | 36.24±1.58Dd                               | 21.89±1.20Cc                                  | 18.87±1.26Dd                        |
| 0.1                         | 5                                       | 52.42±6.01Cc                           | 22.45±2.45Cc                           | 41.18±4.22Cc                           | 26.12±1.55Bb                       | 46.29±1.29Cc                               | 32.51±2.06Bb                                  | 25.36±3.02Cc                        |
| 0.2                         | 5                                       | 71.69±8.02Aa                           | 31.49±5.02Bb                           | 52.39±6.32Bb                           | 18.47±3.06Cc                       | 59.18±3.16Bb                               | 33.19±1.59Bb                                  | 26.95±2.58Cc                        |
| 0.4                         | 5                                       | 69.53±4.19Aa                           | 45.28±2.18Aa                           | 65.48±1.56Aa                           | 12.36±1.43Dd                       | 75.29±4.75Aa                               | 42.98±1.24Aa                                  | 43.18±2.54Aa                        |
| 0.8                         | 5                                       | 62.03±5.08Bb                           | 33.14±3.06Bb                           | 67.12±4.19Aa                           | 17.29±1.08Cc                       | 61.03±2.28Bb                               | 44.15±5.02Aa                                  | 33.02±1.69Bb                        |
| 1.0                         | 5                                       | 59.44±2.69Bb                           | 34.67±4.12Bb                           | 51.94±7.02Bb                           | 19.28±2.49Cc                       | 59.48±5.02Bb                               | 34.27±3.07 Bb                                 | 26.14±2.48Cc                        |

## 2.8 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗基因表达的影响

GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗生

长发育过程中基因的表达具有显著的影响(表 8)。在 0.1%~1.0% GB 处理下,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的基因表达 RQ 值得到明显

的提高( $P<0.05$ )。与 5% PEG-6000 相比,5% PEG-6000+0.1%~1.0% GB 处理中金花菜实生苗的基因表达 RQ 值显著增加( $P<0.05$ )。当 GB 为 0.4% 时,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫下的基因表达 RQ 值为最高。当 GB 为 0.8~1.0% 时,金花菜实生苗在 5% PEG-6000 干旱胁迫

下的基因表达 RQ 值显著下降( $P<0.05$ )。因此,0.4% GB 可以显著上调 5% PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗 WRKY 转录因子、蛋白 TIFY8、转录因子 MYB13、NAC 转录因子 47、ABC 转运 A 家族成员 7、晚期胚胎发生丰富蛋白 2、乙烯反应转录因子 ERF110 等基因的表达。

表 8 GB 对 PEG-6000 干旱胁迫下金花菜实生苗基因表达的影响

Tab.8 Effects of GB on gene expression of *Medicago polymorpha* L. plantlets under PEG-6000 drought stress

| GB 浓度/%<br>GB concentration | PEG-6000 浓度/%<br>PEG-6000 concentration | RQ 值 RQ value                          |                             |                                          |                                            |                                                      |                                                             |                                                                    |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                             |                                         | WRKY 转录因子<br>WRKY transcription factor | 蛋白 TIFY8<br>Protein TIFY 48 | 转录因子 MYB13<br>Transcription factor MYB13 | NAC 转录因子 47<br>NAC transcription factor 47 | ABC 转运 A 家族成员 7<br>ABC transports A family members 7 | 晚期胚胎发生丰富蛋白 2<br>Late stage embryogenesis abundant protein 2 | 乙烯反应转录因子 ERF110<br>Ethylene responsive transcription factor ERF110 |
| 0                           | 0                                       | 1.00±0.00Ee                            | 1.00±0.00Ee                 | 1.00±0.00Ff                              | 1.00±0.00Dd                                | 1.00±0.00Dd                                          | 1.00±0.00Ee                                                 | 1.00±0.00Ff                                                        |
| 0                           | 5                                       | 12.36±1.25Dd                           | 9.65±0.98Dd                 | 12.36±1.49Ee                             | 20.48±2.13Cc                               | 16.93±1.36Cc                                         | 8.22±0.72Dd                                                 | 16.24±2.05Ee                                                       |
| 0.1                         | 5                                       | 19.65±1.69Cc                           | 13.64±1.84Cc                | 19.68±2.57Dd                             | 32.69±4.26Bb                               | 23.69±2.59Bb                                         | 16.39±1.29Cc                                                | 26.95±4.16Dd                                                       |
| 0.2                         | 5                                       | 24.12±3.02Bb                           | 19.22±2.69Bb                | 34.24±1.65Cc                             | 34.15±1.54Bb                               | 54.81±3.64Aa                                         | 23.48±3.15Bb                                                | 34.18±1.85Cc                                                       |
| 0.4                         | 5                                       | 36.29±5.19Aa                           | 25.18±1.54Aa                | 56.29±3.64Aa                             | 41.17±3.02Aa                               | 56.98±2.85Aa                                         | 32.16±4.02Aa                                                | 54.37±3.64Aa                                                       |
| 0.8                         | 5                                       | 38.16±1.56Aa                           | 20.54±3.04Bb                | 43.19±2.78Bb                             | 42.84±2.55Aa                               | 58.19±6.02Aa                                         | 34.82±1.43Aa                                                | 43.55±5.02Bb                                                       |
| 1.0                         | 5                                       | 26.23±2.84Bb                           | 19.85±2.87Bb                | 33.72±1.25Cc                             | 33.46±1.89Bb                               | 26.15±1.27Bb                                         | 24.87±3.70Bb                                                | 32.74±1.75Cc                                                       |

2.9 干旱胁迫下 GB 处理后种子萌发生长指标与生理指标、基因表达的相关性分析

从表 9 可以看出,在 5% PEG-6000 和 GB 处理下,金花菜种子萌发的萌发率、成苗率及其种子萌发苗的株高、主根长、根数、叶片数与 CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、WRKY 转录因子、蛋白

TIFY8、转录因子 MYB13、NAC 转录因子 47、ABC 转运 A 家族成员 7、晚期胚胎发生丰富蛋白 2 和乙烯反应转录因子 ERF110 具有显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )的正相关关系,而与 MDA 含量具有显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )的负相关关系。

表 9 干旱胁迫下 GB 处理后种子萌发生长指标与生理指标、基因表达的相关性分析

Tab.9 Correlation analysis between growth indicators of seed germination and physiological indicators and gene expression after GB treatments under drought stress

| 指标 Index | G       | H       | I       | J        | K      | L       | M       | N       | O       | P       | Q       | R       | S       | T       |
|----------|---------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| A        | 0.988** | 0.808*  | 0.999** | -0.809*  | 0.817* | 0.992** | 0.802*  | 0.809*  | 0.925** | 0.805*  | 0.922** | 0.819*  | 0.983** | 0.938** |
| B        | 0.817*  | 0.970** | 0.820*  | -0.980** | 0.839* | 0.834*  | 0.989** | 0.803*  | 0.988** | 0.983** | 0.818*  | 0.815*  | 0.971** | 0.942** |
| C        | 0.999** | 0.803*  | 0.825*  | -0.976** | 0.805* | 0.819*  | 0.946** | 0.947** | 0.800*  | 0.814*  | 0.975** | 0.987** | 0.929** | 0.956** |
| D        | 0.995** | 0.821*  | 0.958** | -0.843*  | 0.830* | 0.816*  | 0.823*  | 0.922** | 0.804*  | 0.996** | 0.942** | 0.803*  | 0.803*  | 0.937** |
| E        | 0.982** | 0.816*  | 0.810*  | -0.984** | 0.817* | 0.825*  | 0.819*  | 0.926** | 0.997** | 0.921** | 0.805*  | 0.807*  | 0.988** | 0.802*  |
| F        | 0.839*  | 0.969** | 0.804*  | -0.949** | 0.836* | 0.958** | 0.801*  | 0.806*  | 0.964** | 0.982** | 0.813*  | 0.983** | 0.977** | 0.807*  |

注:\*\*表示在 0.01 水平上显著相关,\*表示在 0.05 水平上显著相关。A~T 依次分别代表萌发率、成苗率、株高、主根长、根数、叶片数、CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、MDA 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、WRKY 转录因子、蛋白 TIFY8、转录因子 MYB13、NAC 转录因子 47、ABC 转运 A 家族成员 7、晚期胚胎发生丰富蛋白 2 和乙烯反应转录因子 ERF110。表 10 同。

Note: \*\* represented significant correlation at the 0.01 level, \* represented significant correlation at the 0.05 level. A~T represented germination rate, seedling rate, plant height, main root length, root number, leaf number, CAT activity, SOD activity, POD activity, MDA content, soluble sugar content, soluble protein content, proline content, WRKY transcription factor, protein TIFY8, transcription factor MYB13, NAC transcription factor 47, ABC transporter A family member 7, late embryogenesis enriched protein 2, and ethylene responsive transcription factor ERF110, respectively. The same as Tab.10.

## 2.10 干旱胁迫下 GB 处理后实生苗生长指标与生理指标、基因表达的相关性分析

从表 10 可以看出,在 5% PEG-6000 和 GB 处理条件下,金花菜实生苗的株高、主根长、根数、叶片数与 CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、WRKY 转

录因子、蛋白 TIFY8、转录因子 MYB13、NAC 转录因子 47、ABC 转运 A 家族成员 7、晚期胚胎发生丰富蛋白 2 和乙烯反应转录因子 ERF110 具有显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )的正相关关系,而与 MDA 含量具有显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )的负相关关系。

表 10 干旱胁迫下 GB 处理后实生苗生长指标与生理指标、基因表达的相关性分析  
Tab.10 Correlation analysis between plantlet growth indicators and physiological and gene expression after GB treatments under drought stress

| 指标<br>Index | G       | H       | I       | J        | K       | L       | M       | N       | O       | P       | Q       | R       | S       | T       |
|-------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C           | 0.953** | 0.816*  | 0.806*  | -0.954** | 0.826*  | 0.821*  | 0.949** | 0.816*  | 0.941** | 0.958** | 0.954** | 0.835*  | 0.950** | 0.978** |
| D           | 0.814*  | 0.968** | 0.837*  | -0.952** | 0.974** | 0.948** | 0.833*  | 0.952** | 0.993** | 0.815   | 0.989** | 0.986** | 0.995** | 0.811*  |
| E           | 0.971** | 0.955** | 0.978** | -0.931** | 0.943** | 0.962** | 0.826*  | 0.969** | 0.953** | 0.956** | 0.991** | 0.834*  | 0.834*  | 0.833*  |
| F           | 0.831*  | 0.816*  | 0.818*  | -0.935** | 0.815*  | 0.942** | 0.941** | 0.832*  | 0.816*  | 0.814*  | 0.985** | 0.962** | 0.965** | 0.947** |

## 3 结论与讨论

### 3.1 GB 对干旱胁迫下种子萌发和实生苗生长发育的影响

目前,利用外源物质(如甜菜碱等)促进作物种子萌发及其实生苗生长发育并提高其抗逆性已成为热点<sup>[18-20]</sup>。外源 GB 处理可显著提高苕蓝<sup>[20]</sup>、芫荽<sup>[6]</sup>、紫花苜蓿<sup>[10]</sup>、麻黄<sup>[21]</sup>、白三叶<sup>[22]</sup>种子在干旱胁迫下的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,可显著提高这些作物的实生苗在干旱胁迫下的主根长、胚根长度、下胚轴长度、株高、单株鲜质量和单株干质量。本试验结果与上述研究结果较为一致。在本试验中,0.2%~0.8% GB 处理可显著提高金花菜种子在干旱胁迫下的萌发率和成苗率,显著增加金花菜种子和实生苗在干旱胁迫下的株高、主根长、根数和叶片数,说明外源 GB 在一定范围内对干旱胁迫下金花菜种子萌发及其实生苗生长发育抑制有一定的缓解作用。

### 3.2 GB 对干旱胁迫下实生苗抗氧化酶活性的影响

在干旱胁迫下,植物可通过激活抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT 等)的活性,积累非酶抗氧化剂(ASA 和 GSH 等),消除过量 ROS,保护细胞免受氧化应激伤害<sup>[23-24]</sup>。研究表明,GB 处理可显著增加苕蓝<sup>[20]</sup>、芫荽<sup>[6]</sup>、麻黄<sup>[21]</sup>、紫花苜蓿<sup>[10]</sup>实生苗的 SOD、POD 和 CAT 的活性。在本试验中,0.2%~0.8% GB 处理可显著提高金花菜种子和实生苗在干旱胁迫下的 CAT 活性、SOD 活性和 POD 活性,

增强金花菜种子萌发和实生苗的抗氧化能力,降低干旱胁迫对其造成的伤害。究其原因,可能是由于甜菜碱可以和抗氧化酶的酶蛋白结合,对酶蛋白进行了激活,从而促进了抗氧化酶活性的提高,将脂质过氧化的伤害降至较低的水平。

### 3.3 GB 对干旱胁迫下实生苗渗透调节物质含量的影响

在遭受逆境胁迫时,植物体内的渗透调节能力会发生变化,以削减或抵抗恶劣环境所带来的影响<sup>[25]</sup>。植物的渗透调节能力与渗透调节物质积累量密切相关,可溶性糖、脯氨酸和可溶性蛋白是植物体内常见的渗透调节物质<sup>[26]</sup>。研究表明,GB 处理可显著提高苕蓝<sup>[20]</sup>、芫荽<sup>[6]</sup>、紫花苜蓿<sup>[10]</sup>、麻黄<sup>[21]</sup>实生苗的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸的含量,显著降低实生苗在干旱胁迫下的 MDA 含量。本试验结果与上述研究结果较为一致。在本试验中,0.2%~0.8% GB 处理可显著提高金花菜种子萌发和实生苗在干旱胁迫下的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量,显著降低金花菜种子萌发和实生苗在干旱胁迫下的 MDA 含量,提高其干旱胁迫下的渗透调节能力,降低干旱胁迫对细胞膜透性造成的伤害。究其原因,可能是由于甜菜碱可以通过积累金花菜实生苗内渗透调节物质的含量,降低其细胞的渗透势,维持其细胞的膨压,保护其细胞膜结构和功能的稳定,促进其对水分的吸收能力,提高其抗旱性,从而可以促进金花菜种子的萌发及其实生苗的生长发育。

### 3.4 GB对干旱胁迫下实生苗基因表达的影响

作物的抗旱性是一种复杂的适应环境胁迫且由多基因控制数量性状的生物学过程<sup>[27]</sup>。MYB转录因子家族可以通过调控根系结构和ROS代谢、调节ABA依赖的气孔等多种机制<sup>[28]</sup>参与拟南芥<sup>[29]</sup>、玉米<sup>[30]</sup>、小麦<sup>[31]</sup>的干旱胁迫响应。WRKY转录因子可以通过清除ROS,减少气孔开放,调控胁迫相关基因的表达,提高番茄、苜蓿和小麦对干旱和渗透胁迫的耐受性,调控和增强植物的抗旱性<sup>[32-34]</sup>。TIFY家族可以被茉莉酸和脱落酸诱导,积极响应干旱等非生物胁迫<sup>[35]</sup>。NAC对干旱胁迫具有明显响应,在豌豆干旱胁迫后的地上部或根系中的响应水平较高<sup>[36]</sup>。三磷酸腺苷结合盒(ATP-binding cassette, ABC)跨膜转运蛋白和晚期胚胎发生丰富蛋白(Late Embryogenesis Abundant Protein, LEA)基因可在作物受到干旱胁迫时诱导,可以调节蛋白参与作物渗透调节,保护作物细胞免受干旱胁迫的伤害<sup>[37-38]</sup>。AP2/ERF(APETALA2/ethylene-responsive element binding factor)基因家族可以调控木薯的SOD和WRKY31基因,提高木薯的抗旱性<sup>[39]</sup>。本试验结果表明,在0.1%~1.0% GB处理下,干旱胁迫下的金花菜种子萌发苗和实生苗的WRKY转录因子、蛋白TIFY8、转录因子MYB13、NAC转录因子47、ABC转运A家族成员7、晚期胚胎发生丰富蛋白2、乙烯反应转录因子ERF110等基因表达显著上调。

综上所述,干旱胁迫会抑制金花菜种子的萌发及其实生苗的生长发育,GB可显著增强金花菜种子萌发苗和实生苗在干旱胁迫下的抗氧化能力,提高其渗透调节能力,上调其WRKY转录因子、蛋白TIFY8、转录因子MYB13、NAC转录因子47、ABC转运A家族成员7、晚期胚胎发生丰富蛋白2和乙烯反应转录因子ERF110等基因表达,从而缓解了干旱胁迫对金花菜种子萌发及其实生苗生长发育的抑制。

本试验仅在实验室开展,今后应进一步探讨GB对干旱胁迫下金花菜种子在大田萌发及其大田实生苗生长指标、生理特性和基因表达的影响,为GB在金花菜耐旱大田栽培中的合理使用提供一定的参考。

#### 参考文献:

[1] 周勃,任海龙,张龔,等.金花菜与苜蓿属主要物种基因组

SSR分布特征的比较分析[J].新疆农业科学,2022,59(9):2217-2223.

ZHOU B, REN H L, ZHANG Y, et al. Characteristics and analysis of simple sequence repeats (SSR) in *Medicago polymorpha* and main *Medicago* species genome[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(9): 2217-2223.

[2] 董磊,王栋麟,王琳,等.外源水杨酸缓解金花菜高温胁迫的生理响应[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2022,43(4):129-136.

DONG L, WANG D L, WANG L, et al. Physiological effects of exogenous salicylic acid on relative high temperature stress in *Medicago polymorpha*[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2022, 43(4): 129-136.

[3] 王文霞,刘宇琪,夏清,等.外源硒对干旱胁迫下胡麻生理特性的影响[J].河南农业科学,2025,54(7):55-63.

WEN W X, LIU Y Q, XIA Q, et al. The impact of exogenous selenium on the physiological characteristics of flax under drought stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(7): 55-63.

[4] 魏晓凯,罗小兵,赵杰,等.外源甜菜碱对烤烟幼苗干旱胁迫的缓解效应[J].山西农业科学,2024,52(1):79-85.

WEI X K, LUO X B, ZHAO J, et al. Alleviating effect of exogenous betaine on drought stress in flue-cured tobacco seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 79-85.

[5] 李硕,李培英,李雯,等.干旱胁迫下不同抗性狗牙根脯氨酸和甜菜碱代谢变化[J].中国草地学报,2024,46(8):45-52.

LI S, LI P Y, LI W, et al. Effect of drought stress on proline and betaine metabolic pathway in *Cynodon dactylon*[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(8): 45-52.

[6] 张二芳,李元圆,郝旺林.外源甜菜碱对干旱胁迫下芫荽种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].种子,2022,41(12):93-97.

ZHANG E F, LI Y Y, HAO W L. Effects of exogenous Glycine betaine on seed germination and physiological characteristics of *Coriandrum sativum* seedlings under drought stress[J]. Seed, 2022, 41(12): 93-97.

[7] 陈默,陈璐,黄晓雅,等.PEG模拟干旱胁迫下苗期木薯的生长生理响应[J].云南农业大学学报(自然科学),2024,39(4):15-22.

CHEN M, CHEN L, HUANG X Y, et al. Growth and physiological response of seedling cassava under drought stress simulated by PEG[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2024, 39(4): 15-22.

[8] 高霞,石凤翎,王涛,等.PEG-6000模拟干旱胁迫对黄芪属种子萌发的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2024(7):97-104.

GAO X, SHI F L, WANG T, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on seed germination of *Astragalus*[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2024(7): 97-104.

[9] 丁锦平,周毅,刘冬梅,等.PEG模拟干旱胁迫对辣椒种子萌发的影响[J].商丘师范学院学报,2023,39(12):49-52.

DING J P, ZHOU Y, LIU D M, et al. Analysis on PEG drought tolerance of different pepper types during seed germination[J]. Journal of Shangqiu Normal University, 2023, 39(12): 49-52.

- [10] 王永吉,郝小玲,周佳佳,等. 外源甜菜碱对于旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2022(15): 51-57.  
WANG Y J, HAO X L, ZHOU J J, et al. Effects of exogenous *Glycine* betaine on seed germination and seedling growth of alfalfa under drought stress[J]. Northern Horticulture, 2022(15): 51-57.
- [11] 柴文臣,阎世江. 甜菜碱对于旱胁迫下茄子幼苗生长及生理指标的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(8): 78-83.  
CHAI W C, YAN S J. Effect of betaine on the growth and physiological indexes of eggplant seedlings under drought stress[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(8): 78-83.
- [12] 马明臻. 干旱胁迫下外源甜菜碱对苹果叶片光合及相关特性的影响[J]. 中国南方果树, 2016, 45(5): 113-116.  
MA M Z. Effect of exogenous betaine on photosynthesis and related characteristics of apple leaves under drought stress[J]. South China Fruits, 2016, 45(5): 113-116.
- [13] 任海龙,魏臻武,乔志宏,等. 温度和硬实对金花菜种子萌发的影响[J]. 中国野生植物资源, 2019, 38(6): 49-52.  
REN H L, WEI Z W, QIAO Z H, et al. Effects of temperature and hardseededness on seed germination of *Medicago polymorpha*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(6): 49-52.
- [14] 张艺欣,汪艺,柯子研,等. 金花菜愈伤组织诱导及其试管苗生长发育研究[J]. 种子, 2024, 43(12): 67-77.  
ZHANG Y X, WANG Y, KE Z Y, et al. Study on callus induction and its growth and development of *in vitro* plantlets of *Medicago polymorpha* L.[J]. Seed, 2024, 43(12): 67-77.
- [15] 尹明华,胡佳欣,李瑶瑶,等. 金花菜叶绿体基因组特征及密码子偏好性分析[J]. 草业科学, 2024, 41(4): 884-902.  
YIN M H, HU J X, LI Y Y, et al. Sequence characteristic analyses of the *Medicago polymorpha* complete chloroplast genome and its *Codon* usage bias[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 884-902.
- [16] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州:华南理工大学出版社, 2006.  
CHEN J X, WANG X F. Guidelines for plant physiology experiments[M]. 2nd edition. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [17] 洪森荣,朱盈盈,李紫莹,等. 盐胁迫下金花菜和紫花苜蓿试管苗的转录组分析及其耐盐基因筛选[J]. 中国农学通报, 2023, 39(3): 111-118.  
HONG S R, ZHU Y Y, LI Z Y, et al. The plantlets of *Medicago polymorpha* L. and *Medicago sativa* L. under salt stress: transcriptome analysis and salt tolerance gene screening[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(3): 111-118.
- [18] 王星宇,王霞,程静,等. 冀北不同裸燕麦品种萌芽期抗旱性评价[J]. 山西农业科学, 2023, 51(2): 133-142.  
WANG X Y, WANG X, CHENG J, et al. Evaluation on drought resistance of different naked oat varieties from northern Hebei province in germination stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 133-142.
- [19] 陈卫国,张政,史雨刚,等. 211份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. 作物杂志, 2020(4): 53-63.  
CHEN W G, ZHANG Z, SHI Y G, et al. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources[J]. Crops, 2020(4): 53-63.
- [20] 韩多红,王恩军,张勇,等. 干旱胁迫下外源亚精胺、甜菜碱对苤蓝种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2021(1): 118-123.  
HAN D H, WANG E J, ZHANG Y, et al. Effects of exogenous spermidine and *Glycine* betaine on seed germination and physiological characteristics of *Isatis indigotica* Fort. seedlings under drought stress[J]. Crops, 2021(1): 118-123.
- [21] 张丽,贾志国,刘雪霞,等. 外源物质对于旱胁迫下麻黄种子萌发及生理特性的影响[J]. 中药材, 2016, 39(11): 2450-2455.  
ZHANG L, JIA Z G, LIU X X, et al. Effects of exogenous substances on the germination and physiological characteristics of ephedra seeds under drought stress[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(11): 2450-2455.
- [22] 张艳,彭燕,何小双. 甜菜碱浸种对于旱胁迫下白三叶种子萌发特性的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 31-37.  
ZHANG Y, PENG Y, HE X S. Effect of soaking seeds with betaine on seed germination characteristics of white clover (*Trifolium repens* L.) under the simulated drought stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(4): 31-37.
- [23] 刘晓晨,王树凤,寿松涛,等. 复合型抗盐剂对NaCl胁迫下小麦种子萌发和生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 199-209.  
LIU X C, WANG S F, SHOU S T, et al. Effects of compound anti-salt agent on seed germination and growth of wheat under NaCl stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(2): 199-209.
- [24] 魏军亚,杨萍,刘涛,等. PEG模拟干旱胁迫对香蕉幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中国果树, 2025(2): 69-75.  
WEI J Y, YANG P, LIU T, et al. Effects of PEG simulation of drought stress on the growth and physiological characteristics of banana seedlings[J]. China Fruits, 2025(2): 69-75.
- [25] 王文富. 干旱胁迫对樟子松幼苗生长、土壤养分及渗透调节物质的影响[J]. 林业科技情报, 2025, 57(1): 7-9.  
WANG W F. The effects of drought stress on the growth of *Pinus sylvestris* seedlings and soil nutrients[J]. Forestry Science and Technology Information, 2025, 57(1): 7-9.
- [26] 郝瑜,张茜,马赵群,等. 干旱胁迫对胡杨、沙枣幼苗的生理影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2): 43-51.  
HAO Y, ZHANG X, MA Z Q, et al. Effects of drought stress on physiological *Populus euphratica* and *Elaeagnus angustifolia* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2): 43-51.
- [27] 杨斌,陈德来,刘自成,等. 干旱胁迫对旱地冬小麦产量及其抗旱相关基因表达的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 69-75.  
YANG X, CHEN D L, LIU Z C, et al. Effects of drought stress on yield and expression of drought-resistant genes in dryland winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(1): 69-75.
- [28] 关范圆,郑语嫣,米芯雨,等. R2R3型MYB转录因子调控植物胁迫应答的研究进展[J]. 植物医学, 2024, 3(3): 1-9.  
GUAN F Y, ZHENG Y Y, MI X Y, et al. Research advance

- of the functions of R2R3-MYB transcription factors in plant response to biotic and abiotic stresses[J]. *Plant Health and Medicine*, 2024, 3(3):1-9.
- [29] ABE H, URAO T, ITO T, et al. *Arabidopsis AtMYC<sub>2</sub>* (bHLH) and *AtMYB2*(MYB) function as transcriptional activators in abscisic acid signaling[J]. *The Plant Cell*, 2003, 15(1):63-78.
- [30] 王丽平, 王晓钰, 傅竞也, 等. 玉米转录因子 ZmMYB12 提高植物抗旱性和低磷耐受性的功能鉴定[J]. *作物学报*, 2024, 50(1):76-88.
- WANG L P, WANG X Y, FU J Y, et al. Functional identification of maize transcription factor ZmMYB12 to enhance drought resistance and low phosphorus tolerance in plants[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(1):76-88.
- [31] RAHAIE M, XUE G P, NAGHAVI M R, et al. A MYB gene from wheat (*Triticum aestivum* L.) is up-regulated during salt and drought stresses and differentially regulated between salt-tolerant and sensitive genotypes[J]. *Plant Cell Reports*, 2010, 29(8):835-844.
- [32] 董舒超, 洪骏, 凌嘉怡, 等. 番茄抗旱性的全基因组关联分析[J]. *园艺学报*, 2024, 51(2):229-238.
- DONG S C, HONG J, LING J Y, et al. Genome-wide association studies of drought tolerance in tomato[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2024, 51(2):229-238.
- [33] WEN W W, WANG R Y, SU L T, et al. *MsWRKY11*, activated by *MsWRKY22*, functions in drought tolerance and modulates lignin biosynthesis in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 184:104373.
- [34] GE M M, TANG Y, GUAN Y J, et al. *TaWRKY31*, a novel WRKY transcription factor in wheat, participates in regulation of plant drought stress tolerance[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1):27.
- [35] YE H Y, DU H, TANG N, et al. Identification and expression profiling analysis of *TIFY* family genes involved in stress and phytohormone responses in rice[J]. *Plant Molecular Biology*, 2009, 71(3):291-305.
- [36] 刘飞, 杨亲康, 何德钊, 等. 豌豆 NAC 基因家族鉴定及其在干旱胁迫下的响应分析[J]. *农业生物技术学报*, 2024, 32(7):1504-1517.
- LIU F, YANG Q K, HE D C, et al. Identification of NAC gene family and its response analysis under drought stress in *Pisum sativum*[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2024, 32(7):1504-1517.
- [37] 张小芳, 乔亚科, 王冰冰, 等. 干旱胁迫下野生大豆 ABC 转运蛋白转录组测序分析[J]. *核农学报*, 2019, 33(8):1474-1482.
- ZHANG X F, QIAO Y K, WANG B B, et al. Sequence analysis of ABC transporter transcriptome in wild soybean under the drought stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(8):1474-1482.
- [38] 裴金玲, 杨红兰, 李春平, 等. 转晚期胚胎发生丰富蛋白 (LEA) 基因棉花及抗旱性分析[J]. *分子植物育种*, 2012, 10(3):331-337.
- PEI J L, YANG H L, LI C P, et al. Transgenic cotton with late embryogenesis abundant protein (LEA) gene and its drought tolerance[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2012, 10(3):331-337.
- [39] 张兴龙, 张亚文, 王晓彤, 等. 基因编辑 MeERF127 提高木薯抗旱和耐盐性[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(9):1780-1790.
- ZHANG X L, ZHANG Y W, WANG X T, et al. Gene editing *MeERF127* enhances drought and salt tolerance in cassava [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(9):1780-1790.

## 著作权使用说明

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。

《山西农业科学》编辑部