

## 芸苔素内酯可提高玉米幼苗的抗旱性

孙石昂<sup>1,2</sup>, 何发林<sup>1,2</sup>, 姚向峰<sup>1,2</sup>, 乔治华<sup>1,2</sup>, 于灏泳<sup>1,2</sup>, 李向东<sup>1</sup>, 张吉旺<sup>3</sup>, 姜兴印<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>山东农业大学植物保护学院, 山东泰安271018

<sup>2</sup>山东农业大学农药毒理与应用技术省级重点实验室, 山东泰安271018

<sup>3</sup>山东农业大学农学院, 山东泰安271018

**摘要:** 本文研究了24-表芸苔素内酯、28-高芸苔素内酯、28-表高芸苔素内酯对干旱胁迫下玉米幼苗抗旱性的调控作用。通过3种芸苔素内酯处理喷雾, 可以明显缓解干旱胁迫对玉米幼苗的影响, 其中28-高芸苔素内酯在0.03 mg·kg<sup>-1</sup>处理时调节效果最明显。研究表明, 外施芸苔素内酯可以促进干旱胁迫下玉米幼苗生物量的增长, 增强玉米幼苗的根系活力, 提高光合色素含量和光合性能, 提高抗氧化酶活性和脯氨酸含量, 降低MDA含量, 从而提高玉米幼苗的抗旱性。

**关键词:** 玉米; 芸苔素内酯; 光合性能; 酶活性; 抗旱性

干旱是当前全球农业发展和粮食安全所面临的一个很严峻的生态问题, 近年来由于全球气候变化的影响, 干旱胁迫给作物带来的损害越来越严重, 成为造成作物减产的主要因素(山仑2011)。干旱胁迫主要影响作物的生理代谢和光合作用, 导致植株光合能力减弱, 细胞内产生的过量活性氧打破了氧化代谢的平衡, 膜脂过氧化产生的丙二醛进一步加剧膜的损伤, 最终导致植株死亡(张仁和等2011)。作为我国第二大粮食作物, 玉米(*Zea mays*)是我国种植面积最大的粮饲兼用作物, 其产量对保障粮食安全具有重要意义(刘京宝等2012)。外源施加植物生长调节剂和渗透调节物质可显著缓解干旱胁迫对植株的影响, 因此通过外施诱导物质提高植物的抗旱性机制是科学研究的一个热点。

油菜素内酯(brassinolide)又名芸苔素内酯, 是一种天然的植物甾醇类生长激素, 广泛存在于植物界, 被国际上誉为第六大植物激素(朱早兵等2015)。目前合成的活性较高的芸苔素内酯有: 24-表芸苔素内酯(24-epibrassinolide)、28-表高芸苔素内酯(28-epihomobrassinolide)和28-高芸苔素内酯(28-homobrassinolide)等(Mcmorris等1994)。芸苔素内酯促进细胞伸长和分裂为基础, 调节植物的形态建成、维管束分化、生殖发育、开花和衰老及响应环境信号(周晓艺和薛红卫2013), 并且可以改善逆境下植物体内的渗透调节, 提高植物抗氧化酶活性(Anjum等2011)。研究表明外施芸苔素内

酯能解除植物的光抑制现象, 提高作物的净光合速率, 促进作物的生长和有机物的积累, 从而提高油料作物的产量(肖瑞雪等2018)。本试验研究了在干旱胁迫下施用3种结构的芸苔素内酯对玉米幼苗生理生化效应的影响, 比较了3种芸苔素内酯的活性差异并筛选出适宜浓度, 为干旱胁迫下芸苔素内酯在玉米上的应用提供了科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

供试玉米(*Zea mays* L.)品种为‘郑单958’(河南金博士种业股份有限公司), 试验药剂为85.8% 24-表芸苔素内酯原药, 河北兰生生物科技有限公司生产; 92.1% 28-高芸苔素内酯原药, 郑州郑氏化工产品有限公司生产; 92% 28-表高芸苔素内酯原药, 张掖大弓农化有限公司生产。

#### 1.2 试验设计

试验于山东农业大学日光温室进行。试验设3种结构芸苔素内酯喷雾处理, 每种结构芸苔素内酯设3个浓度, 分别为0.01、0.03、0.05 mg·kg<sup>-1</sup>。挑选大小一致, 籽粒饱满的玉米种子播种于直径15 cm、高21 cm的塑料盆中, 每盆播种4粒, 每个处理20盆, 设4个重复, 播种深度3 cm。试验设置正常

收稿 2019-02-25 修定 2019-06-06

资助 国家重点研发计划(2018YFD0200604)和山东“双一流”奖补项目(SYL2017-XTTD11)。

\* 通讯作者(xyjiang@sdau.edu.cn)。

供水对照(土壤最大持水量的75%)和干旱处理对照(土壤最大持水量的35%),通过称重定量控制土壤水分。玉米出苗期正常管理,保持土壤水分一致,待玉米长至三叶期时进行间苗,选择无病、健壮、生长势均一植株,按照设计浓度进行喷雾处理。喷雾处理后按照预设土壤含水量每天傍晚称重浇水,干旱胁迫7 d后取幼苗完全展开第3片叶于液氮中保存,选取叶片中部,除去叶脉,进行生理生化指标测定。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 光合气体交换参数的测定

利用CIRAS-3光合仪,设定温度为25°C,大气CO<sub>2</sub>浓度为390 μmol·mol<sup>-1</sup>,光照强度为1 150 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。测定完全展开的第3片叶的净光合速率( $P_n$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ )等光合参数。水分利用效率(WUE)根据公式 $WUE=P_n/T_r \times 100\%$ 计算。

#### 1.3.2 生理生化指标的测定

测定叶绿素含量采用混合浸取法(明华等2007)。脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定(李忠光和龚明2014)。过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性以及丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量均参照高俊凤(2006)所述方法测定。根系活力采用氯化三苯四唑(triphenyl tetrazolium chloride, TTC)法测定(王学奎和黄见良2015)。

### 1.4 数据分析

数据分析采用Microsoft Excel 2010,使用IBM SPSS Statistics 20.0软件,采用Duncan's新复极差法( $P<0.05$ )进行方差分析及最小显著差异性检验,使用Origin 2018进行绘图。

## 2 实验结果

### 2.1 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗生长的影响

由表1可以看出,干旱胁迫下,玉米幼苗的株高、主根长、地上和地下鲜重显著降低,经过3种芸苔素内酯的不同浓度处理,玉米幼苗的株高和主根长与干旱处理对照相比均有不同程度的增加。相比干旱处理对照,24-表芸苔素内酯浓度在0.05 mg·kg<sup>-1</sup>处理时效果明显,株高增加了20.12%,根长增加了12.69%;28-高芸苔素内酯浓度在0.03 mg·kg<sup>-1</sup>处理时效果明显,株高增加了25.62%,根长增加了20.70%;28-表高芸苔素内酯浓度在0.03 mg·kg<sup>-1</sup>处理时效果明显,株高和根长分别增加了22.35%和19.88%。其中,以0.03 mg·kg<sup>-1</sup>28-高芸苔素内酯处理效果最明显,地上和地下鲜重与株高呈现较为一致的变化趋势,均在0.03 mg·kg<sup>-1</sup>处理时达到最大值。

### 2.2 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片光合作用的影响

干旱胁迫下,玉米幼苗叶片的 $P_n$ 、 $C_i$ 、 $G_s$ 和 $T_r$

表1干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗生长的影响

Table 1 Effects of brassinolide spray on growth of maize seedlings under drought stress

处理	芸苔素内酯浓度/mg·kg <sup>-1</sup>	株高/cm	主根长/cm	地上鲜重/g	地下鲜重/g
24-表芸苔素内酯	0.01	36.21±0.51 <sup>c</sup>	25.53±0.37 <sup>bc</sup>	1.55±0.06 <sup>c</sup>	0.80±0.08 <sup>c</sup>
	0.03	38.84±0.37 <sup>b</sup>	27.21±0.36 <sup>b</sup>	1.75±0.07 <sup>b</sup>	0.92±0.08 <sup>b</sup>
	0.05	38.92±0.36 <sup>b</sup>	26.19±0.29 <sup>c</sup>	1.68±0.08 <sup>b</sup>	0.85±0.11 <sup>bc</sup>
28-高芸苔素内酯	0.01	37.96±0.41 <sup>c</sup>	27.03±0.33 <sup>c</sup>	1.75±0.06 <sup>b</sup>	0.91±0.11 <sup>c</sup>
	0.03	40.70±0.35 <sup>b</sup>	28.05±0.26 <sup>b</sup>	1.82±0.06 <sup>b</sup>	1.04±0.09 <sup>b</sup>
	0.05	36.15±0.34 <sup>c</sup>	26.62±0.30 <sup>c</sup>	1.63±0.07 <sup>c</sup>	0.88±0.09 <sup>c</sup>
28-表高芸苔素内酯	0.01	38.05±0.29 <sup>bc</sup>	26.88±0.24 <sup>bc</sup>	1.74±0.10 <sup>bc</sup>	0.90±0.11 <sup>c</sup>
	0.03	39.64±0.31 <sup>b</sup>	27.86±0.27 <sup>b</sup>	1.79±0.08 <sup>b</sup>	0.96±0.08 <sup>b</sup>
	0.05	36.80±0.39 <sup>c</sup>	26.21±0.23 <sup>c</sup>	1.65±0.06 <sup>c</sup>	0.86±0.10 <sup>c</sup>
干旱处理对照	—	32.40±0.49 <sup>d</sup>	23.24±0.57 <sup>d</sup>	1.31±0.11 <sup>d</sup>	0.70±0.10 <sup>d</sup>
正常供水对照	—	44.03±0.55 <sup>a</sup>	31.19±0.30 <sup>a</sup>	2.06±0.13 <sup>c</sup>	1.20±0.09 <sup>a</sup>

同列不同小写字母表示处理间有显著差异( $P<0.05$ )。“—”表示不含有芸苔素内酯。

均显著降低, 3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以改善干旱胁迫下玉米幼苗叶片的 $P_n$ , 且均在 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时效果明显, 与干旱处理对照相比, 分别提高了46.11%、55.99%、50.06% (图1-A)。与干旱处理对照相比, 外施芸苔素内酯处理提高了

玉米幼苗叶片的 $G_s$ 和 $T_r$ , 与 $P_n$ 变化趋势基本一致, 3种芸苔素内酯均以 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时效果最明显 (图1-B和D)。与干旱处理对照相比, 外施芸苔素内酯处理降低了玉米幼苗叶片 $C_i$  (图1-C), 增强了光合作用, 显著促进了水分利用率(WUE)的提高(图

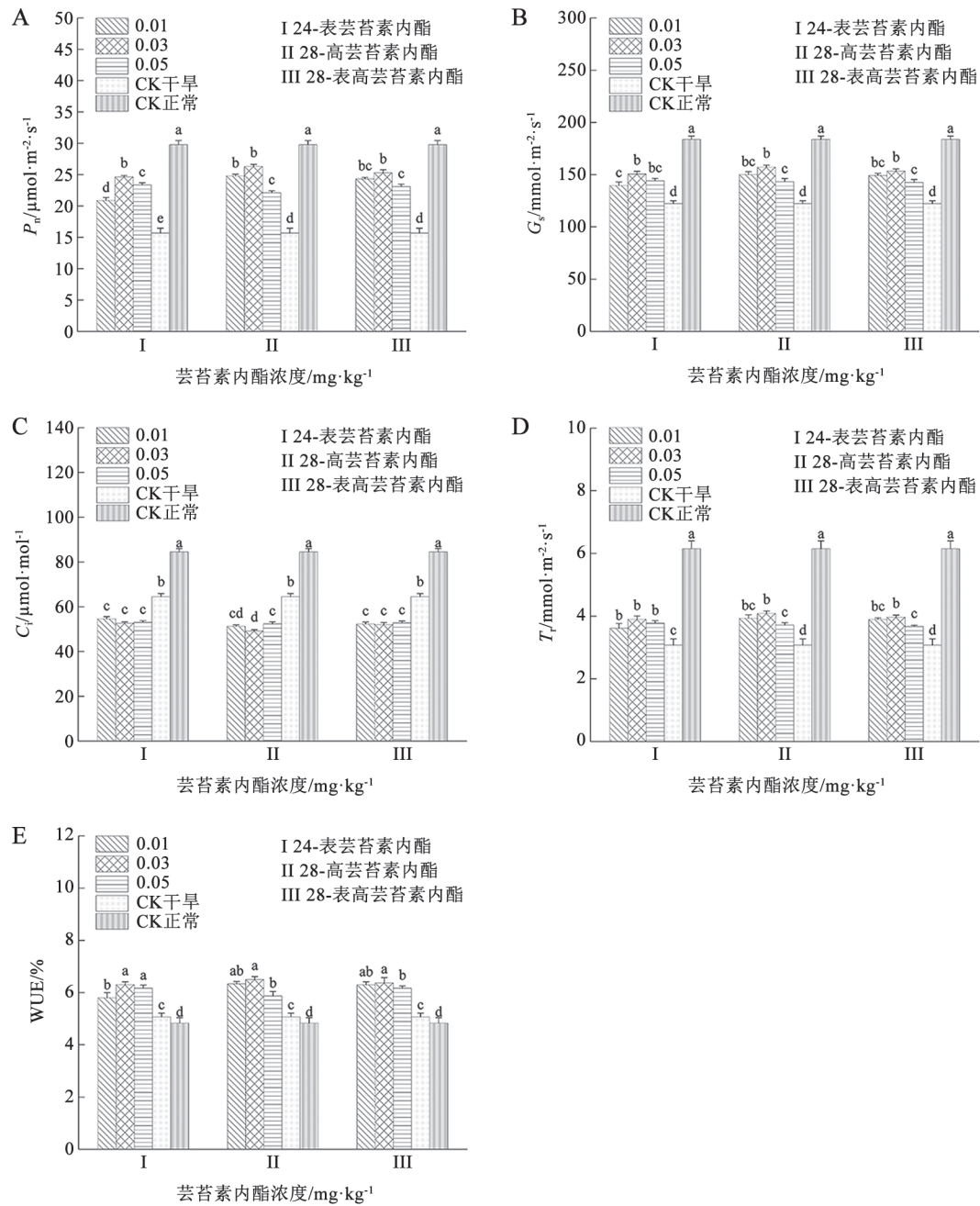


图1 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片光合作用的影响

Fig.1 Effects of brassinolide spray on photosynthesis of maize seedling leaves under drought stress

图中不同的小写字母表示同种芸苔素内酯不同处理浓度间有显著性差异( $P<0.05$ ), 下同此。

1-E), 增强了抗旱性, 其中 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  28-高芸苔素内酯效果最为明显, 与干旱处理对照相比, 提高了27.82%。

### 2.3 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

外施3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以提高干旱胁迫下玉米幼苗叶片中SOD、POD和CAT保护酶的活性(图2), 且均以 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理最佳。在该浓度处理下, 相比干旱对照, 24-表芸苔素内酯处理的保护酶活性分别提高了31.95%、33.13%、20.05%; 28-高芸苔素内酯处理的保护酶活性分别提高了37.42%、43.34%、24.48%; 28-表高芸苔素内酯处理的保护酶活性分别提高了33.26%、35.79%、21.91%。表明芸苔素内酯可以提高叶片抗氧化酶活性, 从而增强植株清除活性氧的能力, 提高植物的抗逆性。

### 2.4 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片脯氨酸和丙二醛的影响

外施3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以增加干旱胁迫下玉米幼苗叶片中脯氨酸的含量(图3-A)。其中以28-高芸苔素内酯效果最明显。干旱胁迫下, 植株体内活性氧水平的升高和大量的积累, 增加了膜脂过氧化程度, 导致MDA含量上升。由图3-B可以看出, 干旱处理可以明显增加植物叶片中丙二醛的含量, 外施3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以减少干旱胁迫下玉米幼苗叶片中丙二醛的含量。其中外施28-高芸苔素内酯效果最明显, 与干旱处理对照相比, 玉米幼苗叶片丙二醛分别减少了30.29%、36.07%、24.74%。

### 2.5 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

外施3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以增加

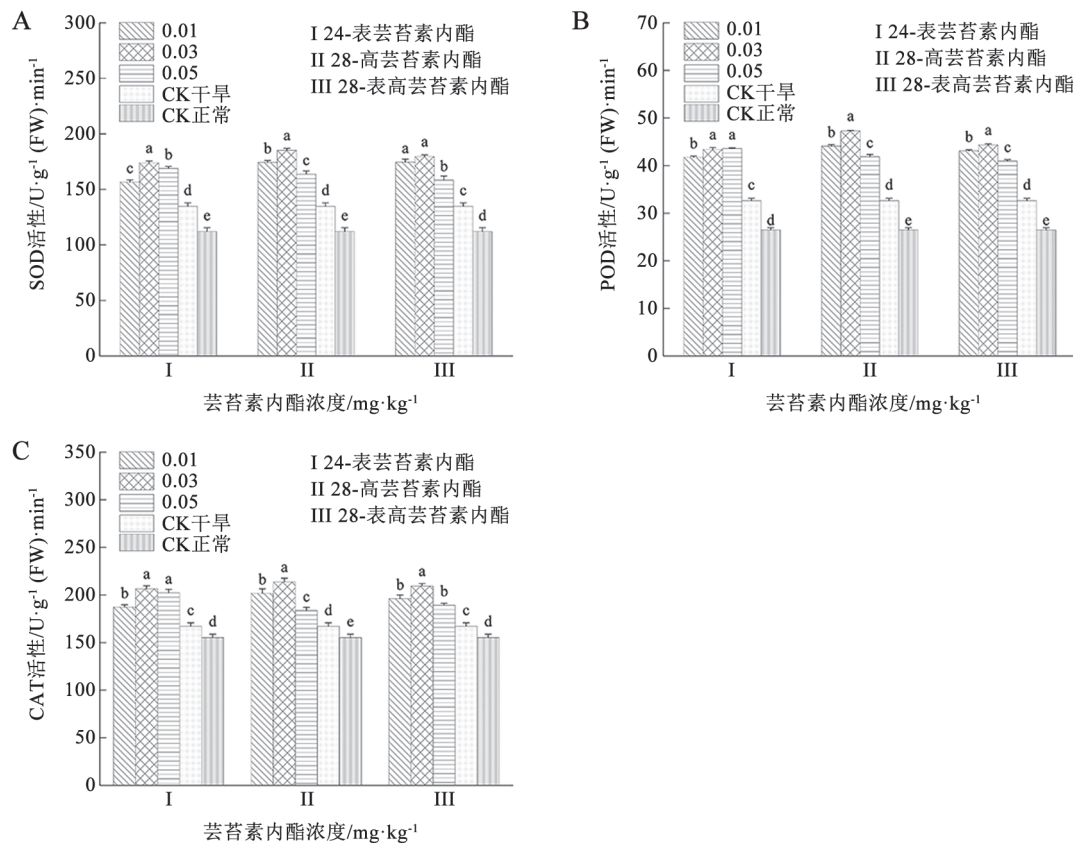


图2 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of brassinolide spray on antioxidant enzyme activities in leaves of maize seedlings under drought stress

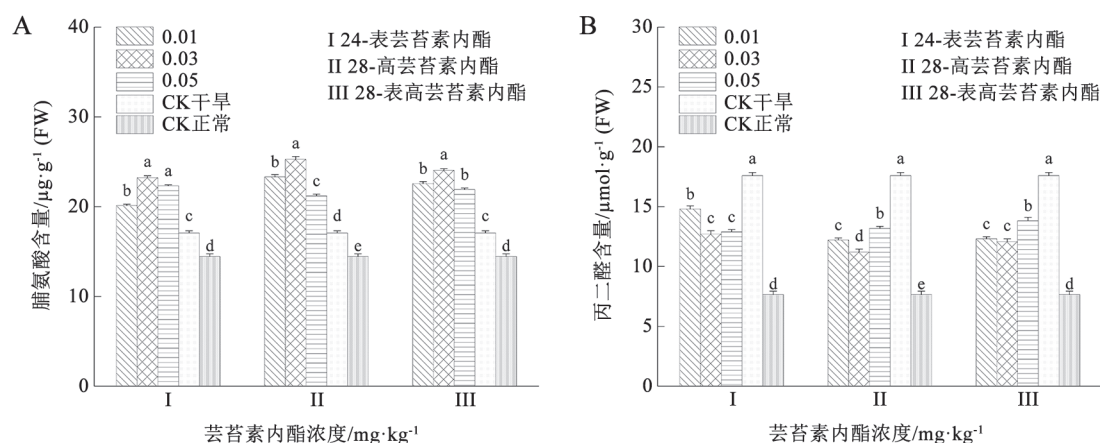


图3 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶片脯氨酸和丙二醛的影响

Fig.3 Effects of brassinolide spray on proline and malondialdehyde in leaves of maize seedlings under drought stress

干旱胁迫下玉米幼苗叶片中叶绿素的含量(图4-A)。各种芸苔素内酯均在0.03 mg·kg<sup>-1</sup>处理时效果最明显,与干旱处理对照相比,玉米幼苗叶片的叶绿素的含量分别增加了16.26%、21.27%、17.21%。植物根系的生长情况和代谢水平即根系活力直接影响植物地上部的生长和营养状况以及最终产量。由图4-B可以看出,外施3种芸苔素内酯均可以增加干旱胁迫下玉米幼苗根系活力,增加根系的吸水能力,其中外施28-高芸苔素内酯根系活力增加的最明显,与干旱处理对照相比,玉米幼苗根系活力分别增加了27.76%、36.54%、18.41%。

### 3 讨论

干旱胁迫最直观的影响就是植株生物量减少,生物量也是评估干旱胁迫程度和植物抗旱能力的可靠指标(郑清岭等2017)。本研究表明,经过外施芸苔素内酯处理后能够缓解干旱胁迫对玉米幼苗生物量的抑制作用,显著提高干旱胁迫下玉米幼苗的株高、根长和地上下鲜重,增加干物质的积累。

光合作用是植物生长发育的重要生理基础,也是对于干旱胁迫最为敏感的生理过程(郭艳阳等2013)。干旱胁迫下作物高的光合速率是作物抗旱

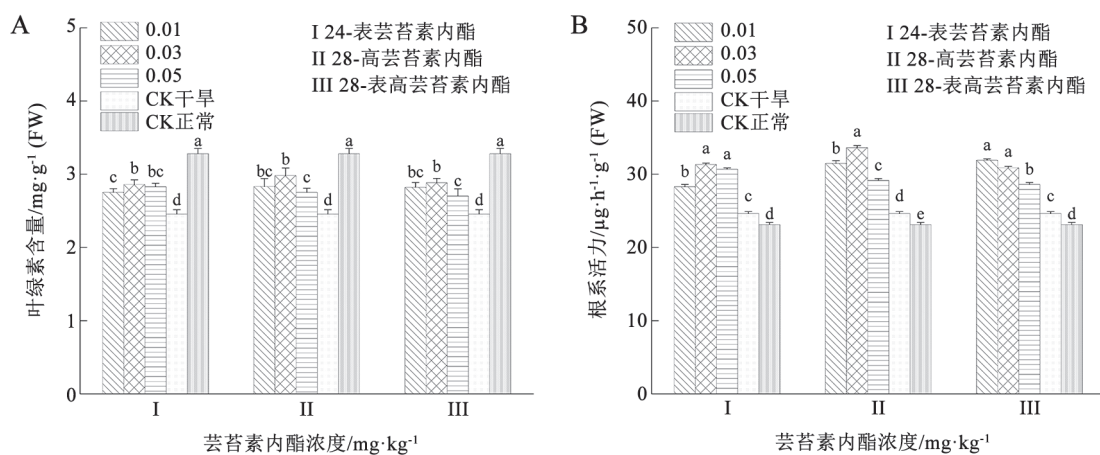


图4 干旱胁迫下芸苔素内酯喷雾对玉米幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

Fig.4 Effects of brassinolide spray on chlorophyll content and root activity of maize seedlings under drought stress

性的重要指标和高产的保证(忽雪琦等2018)。Xia等(2014)在番茄(*Solanum lycopersicum*)中的研究发现油菜素内酯对气孔运动的效应依赖于其浓度,低浓度促进气孔张开,高浓度诱导气孔关闭。本试验中干旱胁迫时玉米幼苗的 $C_i$ 和 $G_s$ 都明显下降,则说明气孔因素限制是 $P_n$ 降低主要原因。外施芸苔素内酯能提高干旱胁迫下玉米叶片的 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ ,并降低 $C_i$ 。研究表明3种结构芸苔素内酯中28-高芸苔素内酯在 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时缓解干旱胁迫的效果最明显。通过外施芸苔素内酯处理,减轻由于气孔限制而引起的光合速率的降低,但对影响光合作用光合酶的影响,需进一步研究。

阮英慧等(2011)研究表明在大豆花期进行叶面喷施油菜素内酯,增加了叶片中抗氧化酶的活性、有机渗透调节物质含量,使其体内丙二醛的含量维持在正常的水平。本试验研究表明,干旱胁迫下,3种芸苔素内酯在不同浓度下均可以提高3种保护酶的活性,增加脯氨酸含量,并降低MDA含量,其中28-高芸苔素内酯的调节效果最明显。3种抗氧化酶相互协同发生作用,清除干旱胁迫产生的ROS,降低MDA含量和细胞膜透性,增强玉米幼苗的抗旱性。这与Fariduddin等(2014)报道外源施加BR显著促进了干旱胁迫下玉米的生长和抗氧化酶活性的研究结果一致。

张林青(2013)研究表明在盐胁迫下,喷施芸苔素内酯能缓解叶绿素含量的降低。通过测定叶绿素含量表明,外施3种芸苔素内酯均能不同程度提高干旱胁迫下玉米叶片中叶绿素含量,表明芸苔素内酯可作为一种光合色素的调节剂,缓解逆境下光合色素的降低,提高玉米幼苗的光合效率和耐旱性(宋吉轩2017),其中28-高芸苔素内酯和28-表高芸苔素内酯效果明显。

已有研究表明,叶面喷施2,4-表油菜素内酯能够促进干旱胁迫下烟草根系的形态发育,缓解逆境胁迫的抑制作用(丁丹阳等2018)。本试验研究发现喷施芸苔素内酯能够促进玉米幼苗根系的形态发育,提高根系活力,增强根系在土壤干旱胁迫时的吸水能力。3种芸苔素内酯中28-高芸苔素内酯的调节效果最好,能够明显提高玉米幼苗的根系活力。

综上所述,受干旱胁迫影响,玉米幼苗的生长受到抑制,叶绿素含量及光合性能降低,虽然保护酶和脯氨酸的含量有所提高,但不足以消除干旱胁迫对植株的损害。3种芸苔素内酯喷雾处理均可增加干旱胁迫下玉米幼苗的生物量,增强玉米幼苗的根系活力,保证根系功能,提高光合色素含量和光合性能,提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,清除活性氧,降低MDA含量,从而提高玉米幼苗的抗旱性。其中28-高芸苔素内酯在 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时对干旱胁迫下玉米幼苗的调节效果最明显。通过本试验,系统的比较了3种芸苔素内酯的活性差异以及在干旱胁迫下玉米上的应用,为干旱胁迫下芸苔素内酯提高玉米的抗旱性提供了科学依据。

#### 参考文献(References)

- Anjum SA, Wang LC, Farooq M, et al (2011). Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. *J Agron Crop Sci*, 197: 177–185
- Ding DY, Zhang LX, Zhu ZW, et al (2018). Effect of leaf spray 2,4-epibrassinolide on drought resistance of tobacco. *Chin Tob Sci*, 39: 50–57 (in Chinese with English abstract) [丁丹阳, 张璐翔, 朱智威等(2018). 叶面喷施2,4-表油菜素内酯对烟草抗旱性的影响. *中国烟草科学*, 39: 50–57]
- Fariduddin Q, Yusuf M, Ahmad I, et al (2014). Brassinosteroids and their role in response of plants to abiotic stresses. *Biol Plantarum*, 58: 9–17
- Gao JF (2006). *Experimental Guide of Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 210–217 (in Chinese) [高俊凤(2006). *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 210–217]
- Guo YY, Liu J, Zhu YL, et al (2018). Responses of photosynthetic and antioxidant enzyme activities in maize leaves to drought stress. *Plant Physiol J*, 54: 1839–1846 (in Chinese with English abstract) [郭艳阳, 刘佳, 朱亚利等(2018). 玉米叶片光合和抗氧化酶活性对干旱胁迫的响应. *植物生理学报*, 54: 1839–1846]
- Hu XQ, LI DY, Yan JK, et al (2018). Effects of exogenous methyl jasmonate on water absorption capacity of maize (*Zea mays* L.) seedling root under drought stress. *Plant Physiol J*, 54: 991–998 (in Chinese with English abstract) [忽雪琦, 李东阳, 严加坤等(2018). 干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯对玉米幼苗根系吸水的影响. *植物生理学报*, 54: 991–998]

- Li ZG, Gong M (2014). Plant Physiology Comprehensive and Design Experimental Tutorial. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press (in Chinese) [李忠光, 龚明(2014). 植物生理学综合性和设计性实验教程. 武汉: 华中科技大学出版社]
- Liu JB, Yang KJ, Shi SB, et al (2012). Maize Cultivation in Northern China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 21–22 (in Chinese with English abstract) [刘京宝, 杨克军, 石书兵等(2012). 中国北方玉米栽培. 北京: 中国农业科学技术出版社, 21–22]
- Mcmorris TC, Patil PA, Chavez RG, et al (1994). Synthesis and biological activity of 28-homobrassinolide and analogues. *Phytochemistry*, 36: 585–589
- Ming H, Hu CS, Zhang YM, et al (2007). Improved extraction methods of chlorophyll from maize. *J Maize Sci*, 15: 93–95, 99 (in Chinese with English abstract) [明华, 胡春胜, 张玉铭等(2007). 浸提法测定玉米叶绿素含量的改进. *玉米科学*, 15: 93–95, 99]
- Ruan YH, Dong SK, Liu LJ, et al (2011). Effects of brassinosteroid on physiological characteristics at flowering stage of soybean under drought stress. *Crops*, 6: 33–37 (in Chinese with English abstract) [阮英慧, 董守坤, 刘丽君等(2011). 干旱胁迫下油菜素内酯对大豆花期生理特性的影响. *作物杂志*, 6: 33–37]
- Shan L (2011). To cope rationally with agricultural drought. *Agric Res Arid Areas*, 29: 1–5 (in Chinese with English abstract) [山仑(2011). 科学应对农业干旱. *干旱地区农业研究*, 29: 1–5]
- Song JX (2017). Effects of plant growth regulators on growth and physiological characteristics of *Leymus chinensis* under drought stress and transcriptome analysis (dissertation). Chongqing: Southwest University (in Chinese with English abstract) [宋吉轩(2017). 干旱胁迫下植物生长调节剂对羊草生长及生理特性的影响与转录组分析(学位论文). 重庆: 西南大学]
- Wang XK, Huang JL (2015). Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [王学奎, 黄见良(2015). 植物生理生化实验原理与技术. 北京: 高等教育出版社]
- Xia XJ, Gao CJ, Song LX, et al (2014). Role of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dynamics in brassinosteroid-induced stomatal closure and opening in *Solanum lycopersicum*. *Plant Cell Environ*, 37: 2036–2050
- Xiao RX, Lü JX, Jia CS, et al (2018). Effect of exogenous brassinosteroid on physiological characteristics of *Paeonia ostii* ‘Fengdan’. *Plant Physiol J*, 54: 1417–1425 (in Chinese with English abstract) [肖瑞雪, 吕静霞, 贾长松等(2018). 外源油菜素内酯对油用牡丹‘凤丹’生理特性的影响. *植物生理学报*, 54: 1417–1425]
- Zhang LQ (2013). The affection of brassinolide on the physiological indexes of tomato seedlings. *Nor Hortic*, (1): 1–3 (in Chinese with English abstract) [张林青(2013). 油菜素内酯对盐胁迫下番茄幼苗生理指标的影响. *北方园艺*, (1): 1–3]
- Zhang RH, Zheng YJ, Ma GS, et al (2011). Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seeding. *Acta Ecol Sin*, 31: 1303–1311 (in Chinese with English abstract) [张仁和, 郑友军, 马国胜等(2011). 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响. *生态学报*, 31: 1303–1311]
- Zheng QL, Yang DY, Liu JW, et al (2017). Effects of drought stress on growth and antioxidant system of *Pugionium cornutum* and *P. dolabratum* seedlings. *Plant Physiol J*, 53: 600–608 (in Chinese with English abstract) [郑清岭, 杨冬艳, 刘建文等(2017). 干旱胁迫对沙芥和斧形沙芥幼苗生长及抗氧化系统的影响. *植物生理学报*, 53: 600–608]
- Zhou XY, Xue HW (2013). Mechanism of cross-talk between auxin and BR. *Sci Sin Vitae*, 43: 1047–1053 (in Chinese with English abstract) [周晓艺, 薛红卫(2013). 生长素与油菜素甾醇相互作用机制的研究进展. *中国科学: 生命科学*, 43: 1047–1053]
- Zhu ZB, Lai CY, Zou KX, et al (2015). Research progress of brassinolide and its physiological effects during seed germination. *Chin J Trop Agric*, 35: 13–18 (in Chinese with English abstract) [朱早兵, 赖彩余, 邹凯茜等(2015). 油菜素内酯及其在种子萌发过程中的生理效应研究进展. *热带农业科学*, 35: 13–18]

## Brassinolide improves the drought resistance of maize seedlings

SUN Shi-Ang<sup>1,2</sup>, HE Fa-Lin<sup>1,2</sup>, YAO Xiang-Feng<sup>1,2</sup>, QIAO Zhi-Hua<sup>1,2</sup>, YU Hao-Yong<sup>1,2</sup>,  
LI Xiang-Dong<sup>1</sup>, ZHANG Ji-Wang<sup>3</sup>, JIANG Xing-Yin<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

<sup>2</sup>Provincial Key Laboratory of Pesticide Toxicology and Applied Technology, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

<sup>3</sup>College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

**Abstract:** In this paper, we studied the regulation of 24-epibrassinolide, 28-homobrassinolide and 28-epihomobrassinolide on drought resistance of maize seedlings under drought stress. The effects of drought stress on maize seedlings could be alleviated by three kinds of brassinolide treatment sprays. Among them, 28-homobrassinolide was most effective in the treatment of 0.03 mg·kg<sup>-1</sup>. The research showed that exogenous brassinolide could promote the growth of maize seedling biomass under drought stress, enhance the root activity of maize seedlings, increase photosynthetic pigment content and photosynthetic performance, and increase antioxidant enzyme activity. The content of proline reduced the content of MDA, thereby increasing the drought resistance of maize seedlings.

**Key words:** maize; brassinolide; photosynthetic performance; enzyme activity; drought resistance

---

Received 2019-02-25 Accepted 2019-06-06

This work was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0200604) and the Shandong "Double First-class" Award (SYL2017-XTTD11).

\*Corresponding author (xyjiang@sdau.edu.cn).