

干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯对玉米幼苗根系吸水的影响

忽雪琦^{1,2,#}, 李东阳^{1,#}, 严加坤¹, 张岁岐^{1,*}

¹西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌712100

²西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌712100

摘要: 茉莉酸类化合物作为环境信号分子, 不仅参与植物生长发育的调控, 同时受到环境胁迫的诱导, 参与植物对逆境胁迫的响应和防御。本研究以北方广泛种植的玉米品种‘郑单958’为材料, 通过对根系外源施加茉莉酸甲酯的方式, 探究干旱胁迫下茉莉酸甲酯对玉米幼苗抗旱性以及根系吸水的影响。结果表明, 外源茉莉酸甲酯可提高玉米幼苗光合速率、蒸腾作用和气孔导度, 增强抗氧化酶活性, 降低H₂O₂和丙二醛的含量, 从而缓解干旱胁迫对植株造成的损伤。通过测定根系水导、氯化汞处理的蒸腾速率的变化以及水通道蛋白的表达量, 发现干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯可增强根系水通道蛋白的表达, 进而增强玉米幼苗的根系吸水能力, 从而缓解干旱胁迫造成的叶片水分含量的下降和水势的降低, 提高了玉米幼苗的抗旱性。

关键词: 玉米; 茉莉酸甲酯; 干旱胁迫; 根系吸水能力

干旱是缺水地区限制作物产量的主要因素之一, 大量研究表明, 干旱胁迫会破坏植物体内水分平衡, 造成氧化伤害以及细胞膜、蛋白质及核酸的损伤。玉米作为高耗水植物, 探索人为提高其抗旱性的机制一直是科学研究的热点。

茉莉酸类化合物(jasmonates, JAs)是一类植物体内生成的脂类衍生化合物, 作为信号分子参与调控植物的生长发育, 响应昆虫造成的损伤、病原体感染、干旱、低温与高盐等生物或非生物胁迫(Cheong和Yang 2003)。在植物中, JAs是环境胁迫下驱动植物防御响应与传递胁迫信号的重要组成部分(蔡昆争等2006), 可以通过调节气孔运动、提高抗氧化酶系统活力、调控相关基因表达等方式缓解干旱胁迫对花生(*Arachis hypogaea*)幼苗(潘瑞焱和古焕庆1995)、水稻(*Oryza sativa*) (董桃杏等2009)、大豆(*Glycine max*) (Anjum等2011b)、甘蓝(*Brassica oleracea*) (Wu等2012)、棉花(*Gossypium* spp.) (杨艺等2016)和小麦(*Triticum aestivum*) (Ma等2014)等作物造成的损伤, 维持植株水分含量, 提高抗旱性。

JAs具有信号分子功能的主要形式有茉莉酸、茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)和茉莉酸-异亮氨酸复合物(Wasternack 2014), 其缓解多种作物干旱胁迫的功能已经得到了证实(李梦莎和阎秀峰2014)。作为土壤环境变化的直接感知者, 根系吸水能力的增强是植物适应干旱胁迫的主要方式之一。在干旱胁迫下, JAs对玉米植株根系吸水能力

的影响还未见报道。本试验通过对短期干旱胁迫下的玉米幼苗根系外源施加MeJA, 探究其对干旱胁迫下玉米幼苗根系吸水能力的影响及机制。

1 材料与方法

1.1 材料种植与处理

本试验选用玉米(*Zea mays* L.) ‘郑单958’作为试验材料, 用1%次氯酸钠溶液消毒15 min, 用蒸馏水清洗, 置于30°C培养箱中催芽3 d。将大小一致的幼苗转移至1/2Hoagland营养液中。在陕西杨凌中国科学院水土保持研究所人工气候室中进行培养, 光照/黑暗为13 h/11 h, 温度为17~25°C, 湿度为55%。移栽7 d后, 在营养液中加入15%的聚乙二醇-6000 (polyethylene glycol, PEG-6000)模拟干旱。胁迫处理24 h后, 用10 μmol·L⁻¹茉莉酸甲酯处理2 h。在整个幼苗培养过程中, 每4 d更换一次营养液, 并保持通气。本试验共4个处理: 未处理植株(CK), MeJA处理的植株(CK+MeJA), PEG处理植株(PEG), PEG处理后加入MeJA处理的植株(PEG+MeJA)。

1.2 气体交换参数的测定

茉莉酸甲酯处理2 h后, 选取玉米幼苗的第2片完全展开叶中部, 使用便携式光合仪Li-6400 (LI-

收稿 2018-04-10 修定 2018-05-18
资助 国家科技支撑计划(2015BAD22B01)。
并列第一作者。
* 通讯作者(sqzhang@ms.iswc.ac.cn)。

COR Inc., Lincoln, NE, USA)进行净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的测定。叶室为6 cm², 光量子强度为800 μmol·m⁻²·s⁻¹, 气体流速为500 μmol·s⁻¹。

1.3 丙二醛(malondialdehyde, MDA)以及H₂O₂含量的测定

对第2片完全展开叶和根尖部分分别取样, 测定H₂O₂和MDA的含量。MDA含量测定参考Heath和Packer (1968)文献, H₂O₂含量测定参考Velikova等(2000)文献。

1.4 抗氧化酶活性的测定

上午10点, 取0.2 g新鲜叶片和根系, 冰上研磨匀浆, 离心, 上清液即为酶液。

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定参照Beauchamp和Fridovich (1973)文献; 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定参照Kochba等(1977)文献; 过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定参照Hamurcu等(2013)文献; 抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性测定参照Nakano和Asada (1981)文献。

1.5 叶片水分含量的测定

叶片相对含水量(leaf relative water content, RWC)的测定: 取第2片完全展开叶的中部, 参照Machado和Paulsen (2001)的方法。

剪取10 cm长的叶片, 用橡胶塞密封后放入3005型植物压力室(Soil Moisture Equipment Crop., Santa Barbara, USA)进行测定。对钢瓶缓慢加压, 记录叶片边缘刚刚渗出液体时对应的压力值, 即为叶片水势。

1.6 根系水力导度的测定

根系水导的测定参照Miyamoto等(2001)的方法。将玉米幼苗从根基部剪断, 留4 cm中胚轴。然后将整株根系用硅胶塞密封后放入3005型植物压力室(Soil Moisture Equipment Crop., Santa Barbara, USA)进行测定, 每次增加压力0.1 MPa, 直至压力为0.4 MPa为止, 测定每个压力梯度下所对应的每分钟的出水量。根系用数字化扫描仪扫描后, 使用根系图像分析系统WinRHIZO (Regent Instrument Inc., Quebec, Canada)计算表面积。各压力下根系吸水能力用单位时间内单位根表面积出水量来表示, 计算公式为:

$$L_p = V \times S^{-1} \times P^{-1} \times t^{-1}$$

式中 L_p 为根系水流导度(m·s⁻¹·MPa⁻¹); V 是(s)时间内通过测试根的水流总体积(m³); S 为测试根段的表面积(m²); P 为达到出流稳态时的平衡压(即外界所加压力, MPa)。根水导用单位面积下出水量与所对应的压力关系直线的斜率来表示。

(s)时间内通过测试根的水流总体积(m³); S 为测试根段的表面积(m²); P 为达到出流稳态时的平衡压(即外界所加压力, MPa)。根水导用单位面积下出水量与所对应的压力关系直线的斜率来表示。

1.7 HgCl₂处理及蒸腾速率测定

采用称重法测定蒸腾速率。每10 min测定一次玉米幼苗整株散失水分的重量, 测定6次。然后用50 μmol·L⁻¹的HgCl₂处理幼苗10 min, 蒸馏水清洗后迅速称重。完成上述操作后, 用数字化扫描仪扫描叶片后, 使用根系图像分析系统WinRHIZO (Regent Instrument Inc., Quebec, Canada)计算叶片表面积。公式为:

$$T_r = M \times S^{-1} \times t^{-1}$$

式中 T_r 为蒸腾速率[mmol (H₂O)·m⁻²·s⁻¹]; M 是 t (s)时间内测试植株散失的水的摩尔质量(mmol); S 为测试植株叶片的表面积(m²)。

1.8 RNA提取及实时定量检测

同一处理选取3个植株, 各取3 cm长的根尖进行混样(约0.2 g), 在液氮中研磨至粉末。每个处理做3个重复。利用RNA提取试剂盒(离心柱型, Omega)提取总RNA, 得到的总RNA经过Dnase I处理后, 用cDNA第一链合成试剂盒(Promega)进行反转录合成单链cDNA。通过NCBI搜索到玉米水通道蛋白(ZmPIP)家族基因并设计定量引物, 用GAPDH基因作为内参基因(表1)。以合成的cDNA为模板, 利用GoTaq (Promega)实时定量试剂盒, 在ABI Quant Studio7 Flex荧光定量系统进行定量检测, 所得数据采用比较C_T值法(2^{-ΔΔC_T})进行分析。

1.9 数据处理与绘图

采用SPSS 19.0整理数据及差异显著性分析, 运用SigmaPlot 12.0和Origin 8.0进行绘图。

2 实验结果

2.1 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗气体交换参数的影响

MeJA对玉米幼苗的光合作用具有促进作用。正常水分条件下, 对幼苗根系外源施加MeJA后, 植株的光合速率无明显变化, 气孔导度和蒸腾速率显著上升。在干旱胁迫下, 植株光合速率、气孔导度以及蒸腾速率均显著降低; 外源施加MeJA后, 三者均恢复到正常水平(图1)。这表明茉莉酸甲酯可以缓解干旱对光合作用的影响。

表1 实时定量引物

Table 1 Primers used in real time PCR experiments

基因	正向引物(5'→3')	反向引物(5'→3')
ZmPIP1;1	CCCCTACTATGTTACGTGGAGTTC	GCGGCATATTACACAATTGGTA
ZmPIP1;2	CTCATTTTATGCGTTGGGATGT	ACTGAAACCAAGAAAACCCTGA
ZmPIP1;3	GGTCCCCTATCCTTTTATGC	AATCCAGCTGATAGATAAACCCAC
ZmPIP1;4	GCCATCTACCACCAGGTGAT	GGGCAGACAATACATTCCCC
ZmPIP1;5	CACGTGGTCATCATCAGGG	CGTATGCTGCATGGTTGCT
ZmPIP2;1	CGGGTCGCCTTTTTTTTG	CCCTTGAGAGTACAGACATGA
ZmPIP2;2	GGCCTTCTACCACCAGTACATC	GGCCTTTCTTAGCTCTGCTC
ZmPIP2;4	TACCGGAGCAACGCCTAAG	GAAAACAGCAGCGAGCGA
ZmPIP2;5	TGTCGTCGTTGGTTGCCT	CACAACAATCACACTAGCTTGAA
ZmPIP2;6	TTAAGGTGAACGGAGAAGGAGA	GAAAGCTACTGCTGCTGTGGAT
GAPDH	AGCAGGTCGAGCATCTTCG	CTGTAGCCCCACTCGTTGTC

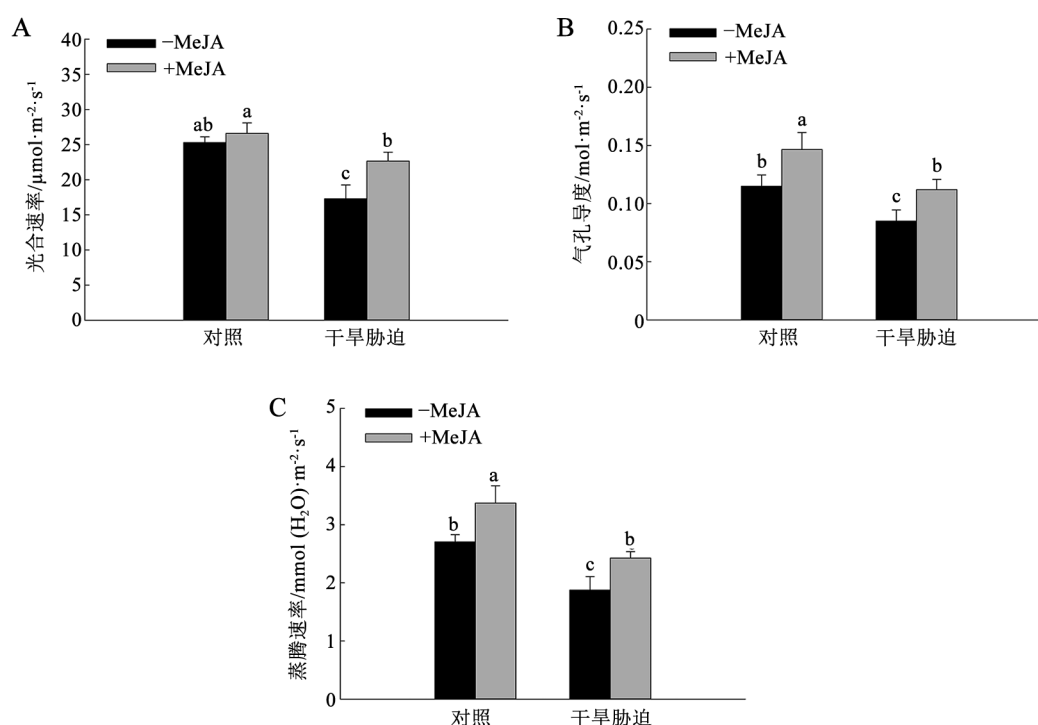


图1 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗气体交换参数的影响

Fig.1 Effects of exogenous MeJA on gas exchange parameters of maize seedling under drought stress

不同小写字母表示0.05水平上差异显著, 后图同此。

2.2 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗抗氧化酶活性及 H_2O_2 和MDA含量的影响

外源施加MeJA后, 对照组植株的根和叶片中的 H_2O_2 含量均显著下降。经干旱胁迫的植株, 其根和叶片中的 H_2O_2 含量显著高于对照组; 外源MeJA可以有效地缓解 H_2O_2 的积累, 但不能使其恢复到对照组的水平(图2)。正常水分条件下, MeJA对叶片MDA含量无影响, 使根系MDA含量下降。在干

旱胁迫下, 植株体内 H_2O_2 含量升高, 膜脂过氧化作用加强, 导致MDA含量上升; 外源施加MeJA后, 叶片和根中MDA含量均显著下降(图3)。这个结果从侧面证明了MeJA可以抑制活性氧的积累。

干旱胁迫下, 植物体内活性氧的平衡被打破, 与活性氧清除相关的抗氧化酶类活性发生变化。对照组植株在外源施加MeJA后, 其叶片和根的POD活性, CAT活性与APX活性都显著升高; 而叶

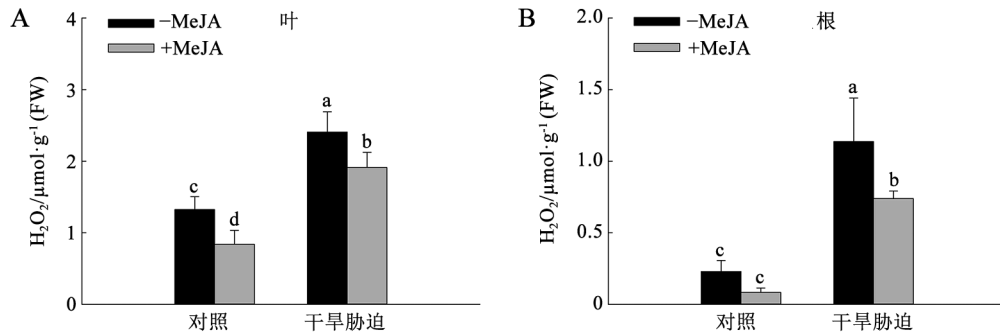
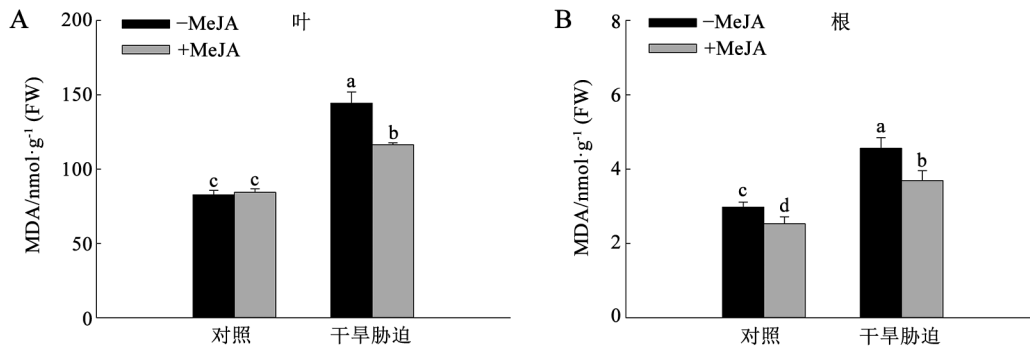
图2 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗H₂O₂含量的影响Fig.2 Effects of exogenous MeJA on H₂O₂ content of maize seedling under drought stress

图3 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗MDA含量的影响

Fig.3 Effects of exogenous MeJA on MDA content of maize seedling under drought stress

片SOD活性无明显变化,根SOD活性下降。干旱胁迫处理后,外源施加MeJA使叶片与根的SOD活性、POD活性、CAT活性与APX活性均显著升高(图4)。这表明MeJA可以提高叶片与根的抗氧化酶类活性,从而增强植株清除活性氧的能力。

2.3 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗叶片相对含水量及叶片水势的影响

植物叶片相对含水量与叶片水势是反映叶片水分状况的指标。正常水分条件下,向植株根系施加MeJA对叶片相对含水量和叶片水势没有影响,叶片相对含水量约为97.7%,叶片水势维持在-0.1 MPa左右。在干旱胁迫下,植株叶片相对含水量迅速降低至84.9%,叶片水势下降至-0.41 MPa,植株呈现出失水的状态。向根系施加MeJA后,叶片相对含水量升至95.3%,叶片水势升至-0.34 MPa,植株的失水现象得到一定程度的缓解,但未恢复到正常水平(图5)。

2.4 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗根系水力导度的影响

根系吸水能力的增强是植物适应干旱的一种

方式,植株的根系水力导度反映了根系吸水的能力。正常水分条件下,外源施加MeJA后,玉米幼苗的根系水力导度显著升高。在干旱胁迫下,植株的根系水力导度只有正常水分条件下植株的40.7%;在外源施加MeJA后,植株的根水导得到一定的恢复,为未施加MeJA的正常水分条件植株的74.2%(图6)。以上结果表明,对植株外源施加MeJA,缓解了干旱胁迫引起的根系水导的降低,增强了干旱胁迫下玉米幼苗的根系吸水能力,从而增强其抗旱性。

2.5 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗水通道蛋白活性及表达量的影响

氯化汞可以特异性地抑制植物水通道蛋白的活性,从而影响植物根系吸水 and 叶片蒸腾。在本试验中,未经HgCl₂处理时,无论是对照组植株(图7, CK和MeJA)还是干旱胁迫植株(图7, PEG和PEG+MeJA),外源施加MeJA均可使其整株水平上的蒸腾速率上升。经过HgCl₂处理后,对照组中MeJA处理植株与未施加MeJA处理植株的蒸腾速

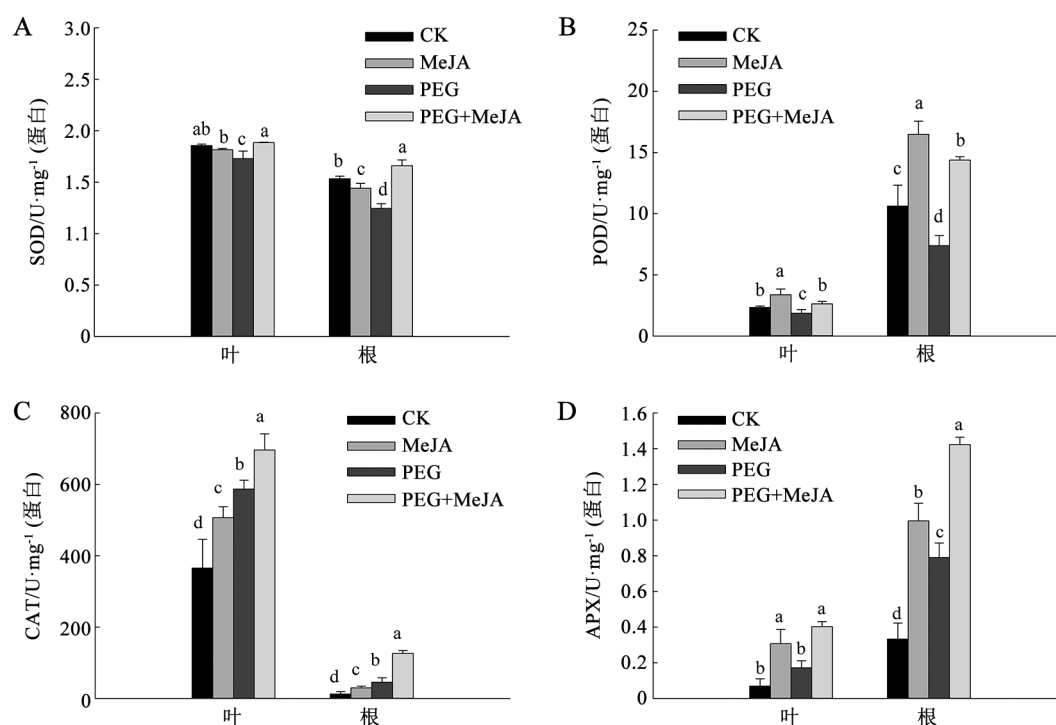


图4 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of exogenous MeJA on anti-oxidant enzyme activity of maize seedling under drought stress

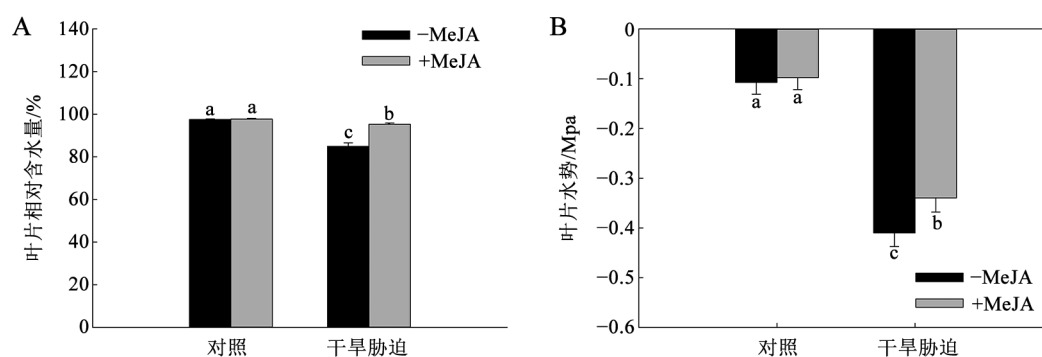


图5 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗叶片相对含水量及叶片水势的影响

Fig.5 Effects of exogenous MeJA on leaf relative water content and leaf water potential of maize seedling under drought stress

率下降到相同水平; 干旱胁迫组中二者亦表现出相同的趋势, 且显著低于对照组(图7)。以上结果表明, 外源施加MeJA可以提高水通道蛋白活性, 从而增强植株的根系吸水能力和叶片蒸腾速率。

对各个处理水通道蛋白表达量进行定量检测(图8), 发现在正常水分条件下, 多数水通道蛋白的表达水平受到外源MeJA的抑制。但是在干旱胁迫后, *ZmPIP1,1*、*ZmPIP1,4*、*ZmPIP1,5*、*ZmPIP2,1*、*ZmPIP2,2*和*ZmPIP2,6*的表达水平显著受到外源

MeJA的上调。其他*PIP*基因的表达水平未受到显著的影响。

3 讨论

干旱胁迫下植物维持一个相对高的光合速率被认为是植物抗旱性的重要指标和高产的保证。已有的研究发现, 水稻(董桃杏等2009)、小麦(Ma等2014)在干旱胁迫下, 外源MeJA处理可提高植物的光合速率。对叶片进行外源MeJA的溶液喷施处

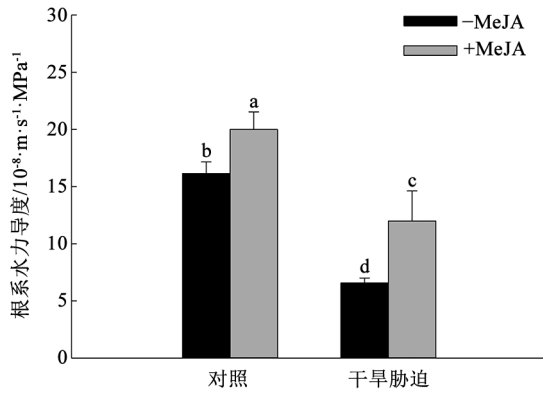


图6 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗根系水力导度的影响
Fig.6 Effects of exogenous MeJA on root hydraulic conductance of maize seedling under drought stress

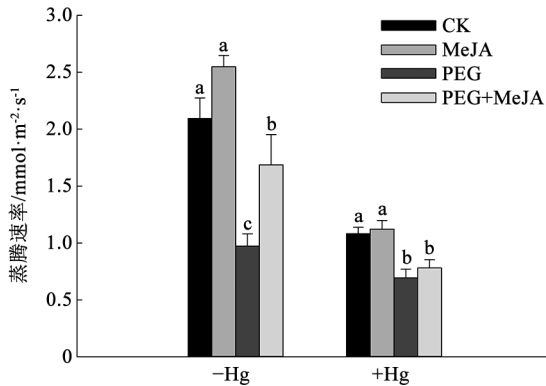


图7 干旱胁迫下外源MeJA和HgCl₂对玉米幼苗蒸腾速率的影响
Fig.7 Effects of exogenous MeJA and HgCl₂ on the transpiration rate of maize seedling under drought stress

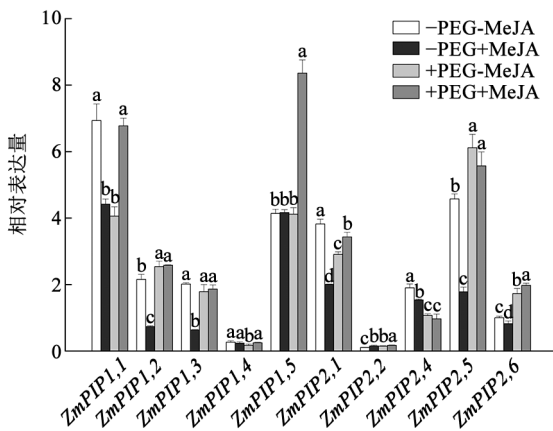


图8 干旱胁迫下外源MeJA对玉米幼苗水通道蛋白表达的影响
Fig.8 Effects of exogenous MeJA on aquaporin expression of maize seedling under drought stress

理或蒸汽处理时,会降低叶片气孔导度,削弱植物的蒸腾作用(Ma等2014)。而潘瑞炽和古焕庆(1995)利用外源MeJA处理花生幼苗根系时,发现低浓度MeJA使其蒸腾速率升高。因此,我们认为外源MeJA直接作用于植物的叶片和根系均可缓解植物的干旱胁迫,但二者的作用机理可能不相同。本试验的研究结果表明:在干旱胁迫条件下,对根系外源施加MeJA能显著提高光合速率,这可能是由于MeJA能维持叶片水分含量(叶片相对含水量和叶片水势)在相对较高的水平。植物叶片中的水分是由根系吸收的,根系水分吸收的主要驱动力是蒸腾作用所引起的木质部导管的负压。结合本试验中MeJA使蒸腾速率和气孔导度增加的结果,我们猜想,这主要可能是受到植物根系水力导度的调控。经过试验验证,对根系外源施加MeJA能显著缓解干旱胁迫所造成的根系水导降低的情况。

植物根系水力导度受到水分运输的驱动力、根系结构及面积和水通道蛋白的影响(张岁岐和山仑2001)。在短期干旱胁迫下(<3 d),植物根系的组织结构不会产生明显的变化,根系主要通过改变水通道蛋白的活性来调节植物根系的吸水能力(Javot和Maurel 2002)。刘朋(2014)发现对短期干旱胁迫下的高粱外源施加硅,可增加根系水通道蛋白的活性,增强根系水导和蒸腾速率,提高植物的水分含量,从而提高其抗旱性。我们发现外源施加MeJA可以显著提高干旱胁迫植株的蒸腾速率,通过HgCl₂处理,PEG组和PEG+MeJA组蒸腾速率差异性消失,说明水通道蛋白在外源施加MeJA缓解玉米干旱胁迫中起到重要作用。

通过测定根系中水通道蛋白的表达量,发现在正常水分条件下,多数水通道蛋白的表达水平受到外源MeJA的抑制。但是在干旱胁迫后,ZmPIP1,1、ZmPIP1,4、ZmPIP1,5、ZmPIP2,1、ZmPIP2,2和ZmPIP2,6的表达水平显著受到外源MeJA的上调。这个试验结果与上述试验结论吻合,由此我们推断,干旱胁迫下MeJA增强了水通道蛋白表达,从而提高了根系吸水能力。

此外,已有研究证实,H₂O₂能够抑制水通道蛋白的活性从而影响根系水导,部分试验采用H₂O₂作为水通道蛋白的抑制剂(Sutka 2011)。本试验中,对叶片和根系的H₂O₂和MDA含量进行测定,发现外

源施加MeJA处理后, 干旱引起的H₂O₂和MDA含量的升高得到缓解, 因此, MeJA可能通过降低H₂O₂的含量增强根系水通道蛋白活性, 从而提高根系吸水能力, 维持玉米幼苗的水分含量。

H₂O₂和MDA含量的升高得到缓解, 是由于叶片与根系的抗氧化酶活性升高, 表明MeJA能提高抗氧化酶的活性, 增强了玉米幼苗清除活性氧的能力(杜彩艳等2015), 降低了干旱引起的活性氧的积累和膜脂的过氧化(Ma等2014; 杨艺等2016), 使供试植株对活性氧的代谢能力得到了加强(Anjum等2011a), 提高了植物的抗旱能力。

慕自新等(2005)发现玉米整株根系水导与其品种的抗旱性呈正相关, 在干旱胁迫下玉米叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶片水势均随着根系水导的增强而升高。本试验以栽种面积较广的玉米品种‘郑单958’为研究材料, 证实了对根系外源施加MeJA可能通过增强抗氧化酶活性来降低H₂O₂的含量, 减少H₂O₂对根系水通道蛋白的活性的抑制, 从而增强根系吸水, 缓解干旱胁迫造成的玉米幼苗的水分亏缺, 提高玉米幼苗的抗旱性。但干旱胁迫下MeJA如何作用于植物根系, 同时将信号传递至整个玉米植株, 从而系统的增强玉米幼苗抗旱性的机理还有待进一步研究。

参考文献(References)

- Anjum SA, Wang L, Farooq M, et al (2011a). Methyl jasmonate-induced alteration in lipid peroxidation, antioxidative defence system and yield in soybean under drought. *J Agron Crop Sci*, 197: 296–301
- Anjum SA, Xie XY, Farooq M, et al (2011b). Effect of exogenous methyl jasmonate on growth, gas exchange and chlorophyll contents of soybean subjected to drought. *Afr J Biotechnol*, 10: 9640–9646
- Beauchamp CO, Fridovich I (1973). Isozymes of superoxide dismutase from wheat germ. *Biochim Biophys Acta*, 317: 50–64
- Cai KZ, Dong TX, Xu T (2006). The physiological roles and resistance control in stress environment of jasmonates. *Ecol Environ*, 15: 397–404 (in Chinese with English abstract) [蔡昆争, 董桃杏, 徐涛(2006). 茉莉酸类物质(JAs)的生理特性及其在逆境胁迫中的抗性作用. *生态环境学报*, 15: 397–404]
- Cheong JJ, Yang DC (2003). Methyl jasmonate as a vital substance in plants. *Trends Genet*, 19: 409
- Dong TX, Cai KZ, Zeng RS (2009). Effect of methyl jasmonate (MeJA) on photosynthetic traits of rice seedlings under drought stress. *Ecol Environ*, 18: 1872–1876 (in Chinese with English abstract) [董桃杏, 蔡昆争, 曾任森(2009). 茉莉酸甲酯(MeJA)对干旱胁迫下水稻幼苗光合作用特性的影响. *生态环境学报*, 18: 1872–1876]
- Du CY, Duan ZY, Pan YH, et al (2015). Effect of drought stress on growth and activities of antioxidant enzymes of maize seedling. *Agric Res Arid Area*, 33: 124–129 (in Chinese with English abstract) [杜彩艳, 段宗颜, 潘艳华等(2015). 干旱胁迫对玉米苗期植株生长和保护酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 33: 124–129]
- Hamurcu M, Sekmen AH, Turkan I, et al (2013). Induced anti-oxidant activity in soybean alleviates oxidative stress under moderate boron toxicity. *Plant Growth Regul*, 70: 217–226
- Heath RL, Packer L (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I, kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys*, 125: 189–198
- Javot H, Maurel C (2002). The role of aquaporins in root water uptake. *Ann Bot*, 90: 301–313
- Kochba J, Lavee S, Spiegel-Roy P (1977). Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic ‘Shamouti’ orange ovular callus lines. *Plant Cell Physiol*, 18: 463–467
- Li MS, Yan XF (2014). Jasmonic acid signaling in plants and its biological functions in relation to environment. *Acta Ecol Sin*, 34: 6779–6788 (in Chinese with English abstract) [李梦莎, 阎秀峰(2014). 植物的环境信号分子茉莉酸及其生物学功能. *生态学报*, 34: 6779–6788]
- Liu P (2014). The mechanism of silicon on enhancing sorghum resistance to drought, salt, cadmium, K-deficiency (dissertation). Yangling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education (in Chinese with English abstract) [刘朋(2014). 硅增强高粱抗干旱、盐和镉胁迫能力以及缓解钾缺乏的作用机制研究(学位论文). 陕西杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心]
- Ma C, Wang ZQ, Zhang LT, et al (2014). Photosynthetic responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to combined effects of drought and exogenous methyl jasmonate. *Photosynthetica*, 52: 377–385
- Machado S, Paulsen GM (2001). Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant Soil*, 233: 179–187
- Miyamoto N, Steudle E, Hirasawa T, et al (2001). Hydraulic conductivity of rice roots. *J Exp Bot*, 52: 1835–1846
- Mu ZX, Zhang SQ, Liang AH, et al (2005). Relationship between maize root hydraulic conductivity and drought resistance. *Acta Agron Sin*, 31: 203–208 (in Chinese with English abstract) [慕自新, 张岁岐, 梁爱华等(2005). 玉米整株根系水导与其表型抗旱性的关系. *作物学报*, 31: 203–208]

- Nakano Y, Asada K (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiol*, 22: 867–880
- Pan RC, Gu HQ (1995). Effect of methyl jasmonate on the growth and drought resistance in peanut seedlings. *Acta Phytophysiol Sin*, 21: 215–220 (in Chinese with English abstract) [潘瑞焱, 古焕庆(1995). 茉莉酸甲酯对花生幼苗生长和抗旱性的影响. *植物生理学报*, 21: 215–220]
- Sutka M, Li G, Boudet J, et al (2011). Natural variation of root hydraulics in arabidopsis grown in normal and salt-stressed conditions. *Plant Physiol*, 155: 1264–1276
- Velikova V, Yordanov I, Edreva A (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Sci*, 151: 59–66
- Wasternack C (2014). Action of jasmonates in plant stress responses and development-applied aspects. *Biotechnol Adv*, 32: 31–39
- Wu H, Wu X, Li Z, et al (2012). Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in cauliflower (*Brassica oleracea* L.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine. *J Plant Growth Regul*, 31: 113–123
- Yang Y, Chang D, Wang Y, et al (2016). Effect of methyl jasmonate (MeJA) on enhancing drought resistance of cotton. *Acta Agri Boreal-Occident Sin*, 25: 1333–1341 (in Chinese with English abstract) [杨艺, 常丹, 王艳等 (2016). 茉莉酸甲酯对棉花抗旱效果的影响. *西北农业学报*, 25: 1333–1341]
- Zhang SQ, Shan L (2001). Research progress on water uptake in plant roots. *Chin J Appl Environ Biol*, 7: 396–402 (in Chinese with English abstract) [张岁岐, 山仑(2001). 根系吸水机理研究进展. *应用与环境生物学报*, 7: 396–402]

Effects of exogenous methyl jasmonate on water absorption capacity of maize (*Zea mays* L.) seedling root under drought stress

HU Xue-Qi^{1,2,#}, LI Dong-Yang^{1,#}, YAN Jia-Kun¹, ZHANG Sui-Qi^{1,*}

¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

²College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: Jasmonates, an environmental signal molecule, plays an important role not only in regulation of plant growth and development but also in plant response and defense to environmental stress. To investigate the effects of methyl jasmonate on drought tolerance and water absorption capacity of maize root at seedling stage, maize (*Zea mays*, ‘Zhengdan 958’) seedlings, which are widely planted in the north China, were used as experimental material in this study. The results showed that exogenous methyl jasmonate could promote the maize seedling photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate, increase the antioxidant enzyme activity, reduce the contents of H₂O₂ and MDA, and then alleviate the damage caused by drought stress. By investigating the root hydraulic conductance, the changes of the whole plant transpiration rate caused by HgCl₂ and the expression level of aquaporin, it was supposed that exogenous methyl jasmonate could increase aquaporins expression of root under drought stress, and enhance the water absorption capacity of root, to alleviate the decrease of leaf water content and leaf water potential. These results indicated that exogenous methyl jasmonate could improve the drought tolerance of maize seedlings through enhancing the root water uptake.

Key words: maize; methyl jasmonate; drought stress; water absorption capacity of root

Received 2018-04-10 Accepted 2018-05-18

This work was supported by the National Science-Technology Support Plan of China (2015BAD22B01).

#Co-first authors.

*Corresponding author (sqzhang@ms.iswc.ac.cn).