

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201602009

引文格式: 郭楠楠, 陈学林, 张继, 等. 复合外源物质对玉米幼苗抗寒性的影响 [J]. 广西植物, 2017, 37(4):504-510

GUO NN, CHEN XL, ZHANG J, et al. Effects of different exogenous compounds on cold resistance of maize seedlings [J]. *Guihaia*, 2017, 37(4):504-510

复合外源物质对玉米幼苗抗寒性的影响

郭楠楠, 陈学林*, 张继, 陈金元

(西北师范大学 生命科学学院, 兰州 730070)

摘要: 该研究采用不同浓度的水杨酸(SA)、脱落酸(ABA)、磷酸二氢钾(KH_2PO_4)以及抗坏血酸(V_c)进行正交组合获得不同浓度组合的复合外源物质,同时以蒸馏水处理作为对照,将其喷施于玉米幼苗后进行低温胁迫处理,在胁迫结束后使幼苗恢复生长,并测定叶片相关生长指标及生理生化指标的变化。结果表明:(1)与对照组相比,9种复合外源物质处理均可显著提高玉米幼苗的相对生长速率、干物质积累速率及脯氨酸含量,降低相对电导率,总体上提高了玉米幼苗的素质。(2)在4℃低温胁迫下,9种复合外源物质处理下幼苗相对生长速率、干物质积累速率、根系活力、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量及可溶性糖含量,均显著高于对照,并减缓了丙二醛的积累和相应的膜脂过氧化,降低了相对电导率,提高了玉米幼苗的耐冷性。低温胁迫条件下,水杨酸、脱落酸、磷酸二氢钾和抗坏血酸四种物质组成的复合物可以提高玉米幼苗的耐冷性,其中以SA 0.14 g·L⁻¹+ ABA 0.015 g·L⁻¹+ KH_2PO_4 3.0 g·L⁻¹+ V_c 3.0 g·L⁻¹的复合物效果最好。该研究结果为新型复合抗寒剂的应用推广提供了技术支持。

关键词: 复合外源物质, 玉米幼苗, 抗寒效果, 低温胁迫, 抗寒性

中图分类号: Q495.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)04-0504-08

Effects of different exogenous compounds on cold resistance of maize seedlings

GUO Nan-Nan, CHEN Xue-Lin*, ZHANG Ji, CHEN Jin-Yuan

(College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: We studied the effects of different combinations of exogenous compounds on cold tolerance of maize seedlings to improve their cold resistance in order to provide technology support for the application and popularization of new composite cold resistant agent. Different exogenous compounds were obtained by orthogonal experiment with different concentrations of Salicylic acid (SA), Abscisic acid (ABA), Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) and Vitamin C (V_c). We tested these compounds against control by spraying distilled water on the seedlings, growth indice and physiological and biochemical indices of leaves of maize seedlings. The main results are as follows: (1) Compared to control, the pretreated maize seedlings with nine exogenous compounds had higher relative growth rate, dry weight accumulation rate and free proline content but the seedlings had lower relative electrical conductivity under different treatments. (2) When transferred to chilling stress at 4℃, as compared to control of water treatment, the pretreated seedlings with nine exogenous compounds cold resistant agent could maintain higher relative growth rate, dry weight accumulation rate, root

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(31200255);西南突发性灾害应急与防控技术集成与示范项目(2012BAD20B06) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31200255); Integration and Demonstration of Emergency Prevention and Control Technology Response to Unexpected Disasters in Southwest Region(2012BAD20B06)]。

作者简介: 郭楠楠(1987-),女,甘肃渭源人,硕士研究生,主要从事系统与进化植物学研究,(E-mail) guonannan2014@163.com。

*通信作者: 陈学林,博士,教授,硕士生导师,主要从事系统与进化植物学和种子生态学研究,(E-mail) chenxuelin63@163.com。

vigor, proline content and soluble protein content of the maize seedlings, the soluble sugar content as well. At the same time, the pretreated reduced MDA content and lipid peroxidation, which finally enhanced chilling tolerance of the maize seedlings. The study confirmed that under the circumstance of chilling stress, the pretreatments with nine exogenous compounds which be composed of SA, ABA, KH_2PO_4 and V_c all could increase chilling tolerance of maize seedlings to different contents. Comprehensive analysis of various growth and physiological indices showed that different exogenous compounds had different effects. Of all treatments, the compound of SA $0.14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + ABA $0.015 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + KH_2PO_4 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + V_c $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ pretreatment produced the best effect.

Key words: exogenous compound, maize seedlings, effects of cold resistance, chilling stress, chilling tolerance

水杨酸(Salicylic acid, SA)是一种植物内源信号物质和植物激素。近年来发现 SA 在植物种子萌发、幼苗形成、细胞生长、呼吸作用、气孔关闭、开花及衰老等相关基因的表达方面起重要的调节作用(李才生等, 2010)。SA 处理可有效提高黄瓜的耐冷性, 减少低温对细胞膜系统的伤害, 提高抗氧化酶活性(王磊等, 2010)。SA 对低温胁迫下玉米(常云霞等, 2013)、辣椒(张素勤等, 2008)、草莓(樊国华等, 2008)、番茄(张阳等, 2012)、萝卜(初敏等, 2012)抗寒性的影响均有相关报道。低温胁迫时, 脱落酸(ABA)可以诱导植物渗透调节物质脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量提高以增加细胞膜的稳定性, 提高植物体内保护酶的活性, 降低膜脂过氧化程度, 保护膜结构的完整性(刘海卿等, 2015; 汤日圣等, 2002)。刘德兵等(2007)用不同浓度的 ABA 溶液喷洒冷胁迫处理的香蕉幼苗后, 发现不同浓度的 ABA 均能缓解低温对香蕉幼苗的冷伤害程度。张琳等(2012)的结果表明在一定范围内, ABA 浓度越大植物受伤害程度越小, 抗逆性越强。磷酸二氢钾(KH_2PO_4)是作物生产最常用的叶面喷施肥之一。在低温胁迫下, 香蕉幼苗叶面喷施不同浓度的 KH_2PO_4 能够显著提高香蕉幼苗的抗低温胁迫能力(李效超等, 2009)。 KH_2PO_4 能提高蔓花生植物保护酶系统的活性, 降低细胞质膜透性, 提高蔓花生植株的抗寒能力(周立等, 2008)。抗坏血酸(V_c)在植物细胞中具有抗逆和抗病等重要的生物学功能(何文亮等, 2004)。 V_c 对低温胁迫下的香蕉具有一定的保护作用, 能够有效地提高香蕉的抗寒能力(周歧伟等, 1998)。

玉米是我国重要的农作物, 而低温是影响其生长和产量的一个重要胁迫因素, 提高玉米的耐寒性是其抗逆研究的一个重要方面(陈银萍等, 2012; 孟英等, 2009)。有关 SA, ABA, KH_2PO_4 及 V_c 四种物质抗寒作用的报道较多, 但其复合物对植物的抗寒

作用还未见报道。因此, 研究抗低温胁迫的复合外源物质对提高玉米的产量具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 材料

研究材料为“豫玉-22 号”, 挑选颗粒饱满、大小一致的供试种子种植于口径 10 cm, 高 15 cm 塑料杯, 杯中种植基质为腐殖质营养土, 每杯种植 5 粒, 均匀种植, 置于培养箱中进行育苗处理获得玉米幼苗, 培养昼夜温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (14 h)/ $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (10 h)。

1.2 实验设计

将 SA、ABA、 KH_2PO_4 和 V_c 溶于蒸馏水配成溶液, 其中 SA 剂量水平为 0.07 、 0.14 、 $0.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ABA 剂量水平为 0.015 、 0.020 、 $0.025 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 剂量水平为 1.0 、 3.0 、 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, V_c 剂量水平为 1.0 、 2.0 、 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 四种物质按不同剂量进行正交试验设计, 以蒸馏水处理作为对照(CK), 共组成 10 个处理组, 依次用 CK、D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 表示, 每个处理均重复 3 次。正交试验因素水平见表 1, 正交试验设计见表 2。

1.3 方法

1.3.1 材料处理 待玉米长至两叶一心期时, 选取生长良好、长势一致的玉米幼苗分别用不同的复合物进行叶面喷施处理, 每天 8:00 喷施一次, 连续喷施 3 d, 喷施时以全株淋湿, 叶面药液欲滴下为止, 同时, 以蒸馏水喷施处理作为对照。最后一次喷施完毕后转入人工气候培养箱进行 $10 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ }^\circ\text{C}$ (昼/夜) 低温胁迫处理, 光周期为 14 h/10 h (昼/夜), 胁迫第 6 天调温至 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 恢复生长 3 d (即处理第 9 天), 进行生理生化指标的测定。试验进行时所有植株均浇足水以保证植株正常生长的需水量。

1.3.2 指标测定与方法

1.3.2.1 植株生长指标 在低温处理的 0、3、6 d, 每个

表 1 因素水平
Table 1 Factors and levels

水平 Level	因素 Factor			
	水杨酸 SA (g · L ⁻¹)	脱落酸 ABA (g · L ⁻¹)	磷酸二氢钾 KH ₂ PO ₄ (g · L ⁻¹)	抗坏血酸 V _c (g · L ⁻¹)
1	0.07	0.015	1.0	1.0
2	0.14	0.020	3.0	2.0
3	0.21	0.025	5.0	3.0

表 2 正交试验设计
Table 2 Orthogonal experimental design

试验号 Test number	因素 Factor			
	水杨酸 SA	脱落酸 ABA	磷酸二氢钾 KH ₂ PO ₄	抗坏血酸 V _c
D1	1	1	1	1
D2	1	2	2	2
D3	1	3	3	3
D4	2	1	2	3
D5	2	2	3	1
D6	2	3	1	2
D7	3	1	3	2
D8	3	2	1	3
D9	3	3	2	1

处理选择长势均匀并随机选取 10 株玉米幼苗,平均分为 3 组,洗净自然晾干,于烘箱内杀青后烘至恒重,分别称干重,再计算相关生长指标。

$$\text{相对生长速率}(RCR) = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

式中, W_1 、 W_2 分别表示在时间 t_1 和 t_2 时的干重。

干物质积累速率 = $(t_2$ d 后的干物质量 - t_1 d 后的干物质量) / $(t_2 - t_1)$ 。

1.3.2.2 生理生化指标 根系活力(TTC 法)和脯氨酸含量(酸性茚三酮比色法)测定参照王学奎(2006)的方法;可溶性糖含量测定按照蒽酮比色法(2003);可溶性蛋白含量测定按照考马斯亮蓝 G-250 染色法(2002);丙二醛含量测定按照硫代巴比妥酸比色法(Sergiev et al, 1997; Nakano et al, 1981);用电导率法测定相对电导率(罗广华等, 1987)。

1.3.3 数据统计分析 利用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS Statistics 17.0 软件进行数据统计分析,用 Origin Pro 8.5 软件进行绘图,单因素方差分析进行处理组与对照组间的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米幼苗相对生长速率及干物质积累速率的影响

图 1 显示,在 4 °C 低温下处理 6 d 后,不同复合外源物质处理都能显著提高玉米幼苗在低温下的相对生长速率, D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理分别比对照增加了 131.64%、141.68%、134.08%、161.91%、158.29%、155.25%、146.51%、147.86%、148.93%。表明这 9 组复合外源物质处理都能促进玉米幼苗在低温胁迫下的生长和发育,增强其抵抗低温的能力,并以 D4 组处理效果最好。同时,各组复合外源物质处理都能显著提高玉米幼苗在 4 °C 低温下的干物质积累速率,各处理的干物质积累速率分别为 0.96%、0.77%、1.01%、3.24%、3.02%、2.91%、1.17%、1.21%、1.25%。表明这 9 种复合外源物质都能有效提高玉米幼苗在低温胁迫下各种有机物质的积累速率,其中 D4 组处理效果明显。

2.2 不同处理对玉米幼苗根系活力的影响

从图 2 可以看出,玉米幼苗经过不同复合外源物质的处理后,在进入低温处理前,处理玉米幼苗均比对照具有相对较高的根系活力, D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理分别比对照增加了 1.14%、7.61%、10.12%、60.99%、58.22%、52.99%、36.66%、49.47%、40.34%。但 D1 处理组与对照相比差异不显著。当玉米幼苗转入 4 °C 低温处理过程时,根系活力总体而言显著下降,并随着低温处理时间的延续而持续下降。但各处理组根系活力始终高于对照。其中,低温 6 d 时, D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理根系活力与照相比,分别显著增加了 17.40%、17.45%、26.97%、95.70%、78.30%、62.64%、43.50%、52.20%、34.80%。当玉米转入 20 °C 生长第 9 天时,根系活力总体上升, D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理与对照相比,分别显著增加了 4.06%、12.19%、16.25%、81.27%、69.08%、81.27%、36.57%、44.69%、32.50%。表明这些复合外源物质处理能有效提高低温胁迫下玉米幼苗的根系活力。且以 D4 处理组最好。

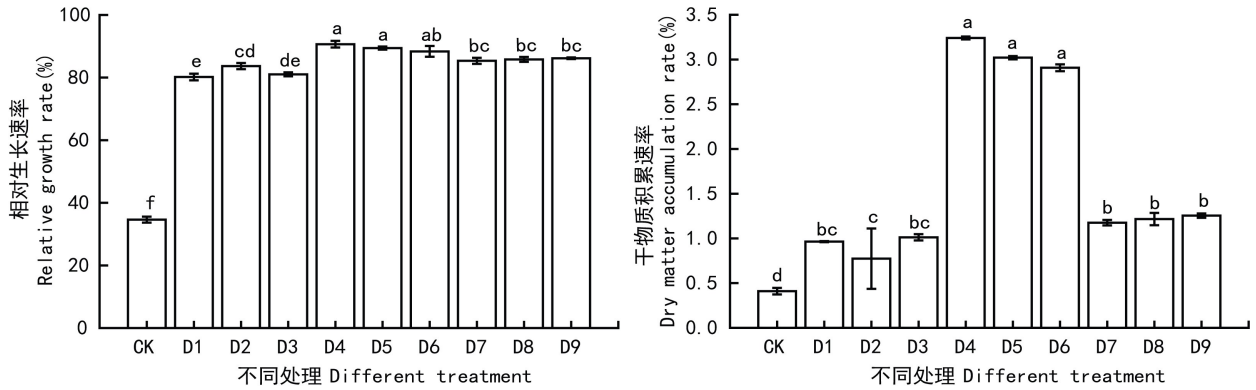


图 1 复合外源物质对 4 °C 低温下 6 d 内玉米幼苗相对生长速率和干物质积累速率的影响
不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Fig. 1 Effects of pretreatment with different exogenous compounds on relative growth rate and dry matter accumulation rate of maize seedlings at 4 °C for 6 d Different small letters indicated significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

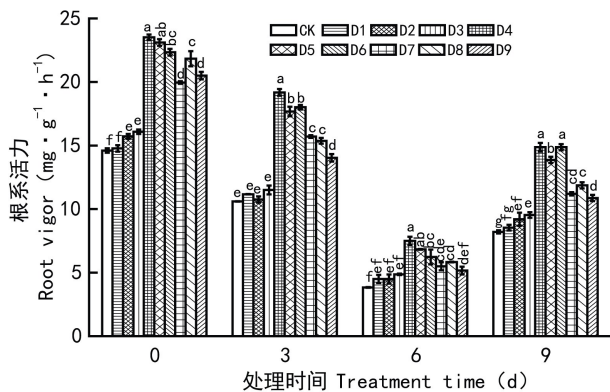


图 2 复合外源物质处理对 4 °C 低温下玉米幼苗根系活力的影响

Fig. 2 Effects of pretreatment with different exogenous compounds on root vigor of maize seedlings at 4 °C

2.3 不同处理对玉米幼苗丙二醛含量及相对电导率的影响

图 3 显示,玉米幼苗经过不同复合外源物质的处理后,在进入低温处理前,处理过的玉米幼苗与同期 CK 相比 MDA 含量变化不明显。当玉米幼苗转入 4 °C 的低温处理后,MDA 含量总体上升,但处理玉米幼苗含量始终显著低于未处理的对照,这种差异在低温胁迫 5 d 后表现最为显著,此时 D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理 MDA 含量分别比同期对照显著降低 27.39%、41.69%、36.55%、109.92%、97.07%、90.01%、51.03%、58.66%、

59.31%;当玉米转入 20 °C 生长第 9 天时,对照组 MDA 含量持续增加,同时处理组 MDA 含量总体下降,D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理与对照相比分别显著降低了 36.45%、41.01%、39.23%、61.97%、61.01%、59.13%、46.44%、47.33%、45.56%。同时,在低温条件下处理 6 d 时,D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 处理与对照相比,相对电导率分别降低 39.49%、42.37%、40.42%、63.29%、62.44%、60.31%、52.33%、55.53%、56.73%;转入 20 °C 生长第 9 天时,各组处理与对照相比,相对电导率显著降低了 52.17%、54.34%、52.92%、74.62%、72.54%、70.01%、62.98%、62.11%、62.69%。可见,复合外源物质处理能显著降低 MDA 含量及相对电导率,从而增强幼苗低温抗性。

2.4 不同处理对玉米幼苗渗透调节物质的影响

图 4 显示,经过不同复合外源物质的处理后,在进入低温处理前,处理过的玉米幼苗与同期 CK 相比,D4 处理组脯氨酸显著增加 7.11%。D1、D2、D3、D4、D5、D6、D8、D9 组与对照相比,可溶性蛋白显著增加 12.55%、4.44%、9.84%、42.28%、36.87%、9.84%、12.55%、7.14%。D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7 与同期 CK 相比,可溶性糖含量显著提高 9.55%、18.12%、9.55%、6.69%、6.69%、0.98%、0.98%。当玉米幼苗转入 4 °C 的低温处理后,各渗透调节物质总体而言显著上升,并随着低温处理时间的延续持续上升,低温处理 6 d 时,玉米幼苗渗透调节物质脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量均显著高于对照组,

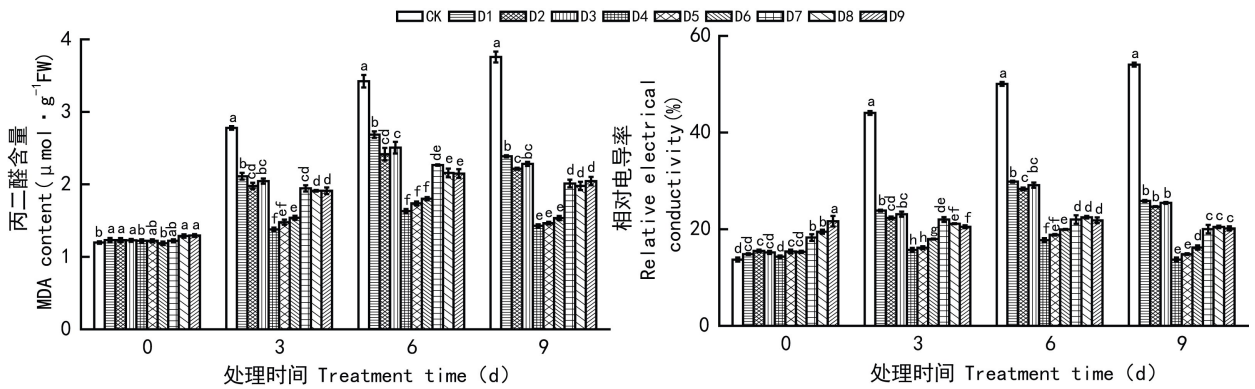


图3 复合外源物质处理对4℃低温下玉米幼苗丙二醛含量和相对电导率的影响
Fig. 3 Effects of pretreatment with different exogenous compounds on MDA contents and relative electrical conductivity of maize seedlings at 4 °C

D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9 与对照组相比,脯氨酸含量显著增加 23.68%、34.06%、31.93%、114.96%、111.01%、84.95%、63.01%、65.55%、68.35%;可溶性蛋白含量分别显著增加 93.60%、98.83%、94.06%、238.18%、198.45%、192.01%、148.32%、153.67%、160.18%;而可溶性糖含量则显著增加 89.02%、117.64%、98.49%、535.52%、492.27%、470.19%、130.51%、138.49%、141.40%。转入 20℃ 生长第 9 天时,各组处理与对照相比脯氨酸含量显著增加 21.55%、28.73%、21.57%、102.32%、87.96%、75.40%、37.70%、48.47%、44.88%。可溶性蛋白含量分别增加 116.45%、143.26%、162.18%、388.22%、307.14%、302.93%、248.88%、275.91%、248.88%。可溶性糖含量显著增加 53.55%、80.61%、65.18%、334.77%、316.35%、305.81%、94.86%、88.09%、86.74%。说明各组处理均能通过增加可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量来加强玉米幼苗的渗透调节能力,并以可溶性糖为主。其中,均以 D4 处理组最好。

3 讨论与结论

低温胁迫下,细胞膜系统最先受到影响(李琼等,2005)。膜透性的大小反映了细胞膜受损的程度,相对电导率与膜受伤害程度呈正相关,电导率越高说明细胞膜受到的伤害越大(雷红灵等,2010)。膜脂过氧化作用发生伴随着 MDA 含量的增加,MDA 含量也是确定低温胁迫对生物膜危害程度的

重要指标之一(刘锦川等,2010)。本研究表明,低温处理下相对电导率和 MDA 含量随着低温胁迫时间的延续持续增长,说明在低温条件下,玉米幼苗体内的毒害物质积累速率超过了抗氧化酶系清除能力,对植物产生了一定伤害。在整个低温胁迫及恢复生长过程中,与对照组相比,用复合抗寒剂处理过的玉米幼苗,相对电导率和 MDA 含量显著低于对照处理的幼苗,表明复合抗寒剂处理有助于提高玉米体内抗氧化酶的活性,使它们清除自由基的能力增强,降低了玉米幼苗膜脂过氧化的程度,减小了玉米在低温胁迫下细胞膜的受伤害程度,增强了玉米幼苗的抗寒能力。这与王小媚等(2016)研究低温条件下杨桃品种抗寒生理指标的变化一致。

相对生长速率体现了植物在单位时间内的生长状况(秦海波等,2012),干物质积累速率体现了植物在特定环境条件下有机物积累的快慢程度(张仁和等,2012),根系活力直接影响植物对水分和养分的吸收,进而影响物质转化与合成,也影响植物对低温的耐受性(王志斌等,2010)。在本研究中,相比于对照组,9 种复合外源物质处理能显著提高玉米相对生长速率、干物质积累速率和根系活力。说明复合外源物质预处理可以提高玉米幼苗在低温胁迫条件下玉米幼苗的生长能力,减缓低温胁迫对幼苗的伤害程度,使玉米幼苗保持较高的生长速率及有机物的积累速率以维持正常的生命活动。

植物细胞遭受到伤害时,必须通过渗透调节保证一定的膨压来维持正常的生理功能(闫洪奎等,2012)。大多作物遭受环境低温胁迫时均在体内积

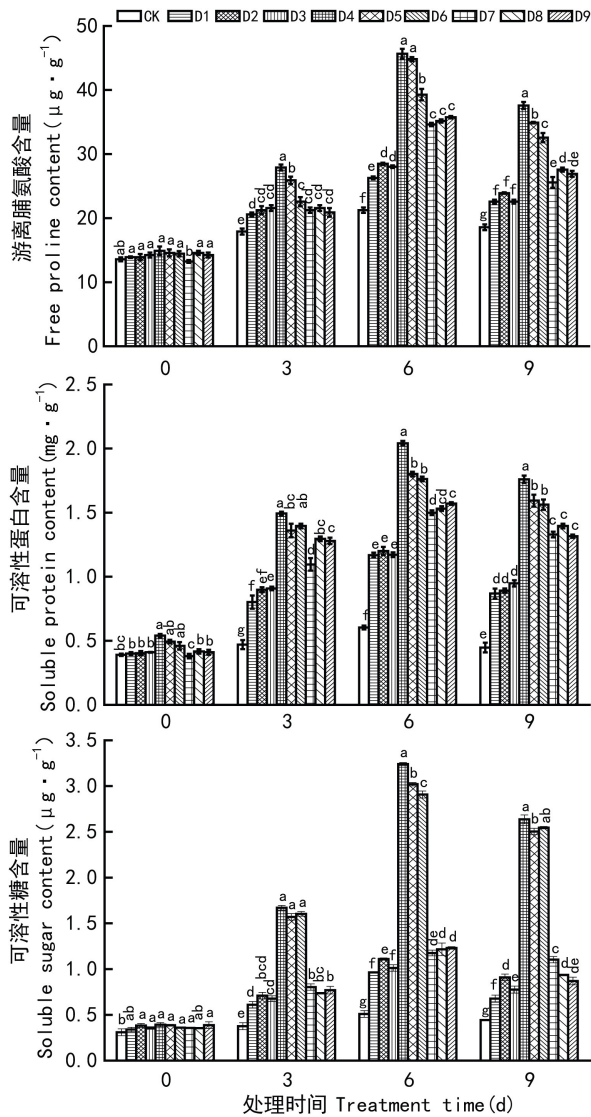


图4 复合外源物质对4 °C低温下玉米幼苗脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effects of pretreatment with different exogenous compounds on proline, soluble protein and soluble sugar contents of seedlings at 4 °C

累脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖等物质,这对其调节细胞的渗透势具有重要的作用(朱金方等,2013)。低温胁迫下植物体内的脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖含量的升高能有效降低细胞液的渗透势,防止细胞过度失水,有利于提高植物抗寒性(闫世江等,2011)。本研究表明,低温条件下,相比于对照组,复合外源物质极显著地增加可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸在玉米幼苗叶片中的含量。这说明复合外源物质预处理可通过增加可溶性蛋白、脯氨

酸和可溶性糖含量来加强玉米幼苗的渗透调节能力,维持细胞内外物质平衡,提高细胞膜的稳定性,进而增强玉米幼苗的抗低温能力,并以可溶性糖为主。同时可溶性糖含量的增加可以说明复合外源物质可以通过碳水化合物的分解,使得原生质浓度上升,冰点下降,减少低温条件下细胞内失水和结冰,在一定程度上提高了植物的抗寒性(王连荣等,2016)。可见,渗透调节物质的积累是玉米幼苗应对低温胁迫的另一主要对策。

综上所述,外施不同浓度的SA、ABA、 KH_2PO_4 和 V_c 的复合外源物质能够显著改变玉米幼苗的各种生理生化指标,进而提高幼苗的抗寒能力。但各物质不同浓度组成的物质影响玉米幼苗抗寒能力不同,其中提高玉米抗寒性的最佳浓度组合为SA $0.14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + ABA $0.015 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + KH_2PO_4 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + V_c $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- CHANG YX, YU ZY, CHEN C, et al, 2013. The effect of different concentrations of salicylic acid on cold resistance of maize seeding [J]. *J. Zhoukou Norm Univ*, 30(5): 92-94. [常云霞,于祖义,陈璨,等,2013.不同浓度水杨酸处理对玉米抗寒性的影响[J].*周口师范学院学报*, 30(5):92-94.]
- CHEN JX, WANG XF, 2002. *Plant physiology experiment instruction* [M]. 2nd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press: 24-25, 64-74. [陈建勋,王晓峰,2002.植物生理学实验指导[M].2版.广州:华南理工大学出版社:24-25,64-74.]
- CHEN YP, WANG XM, YANG ZJ, et al, 2012. Effect of nitric oxide on seed germination and physiological reaction of maize seedlings under low temperature stress [J]. *J. Agro-Environ Sci*, 31(2): 270-277. [陈银萍,王晓梅,杨宗娟,等,2012.NO对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].*农业环境科学学报*, 31(2): 270-277.]
- CHU M, WANG XF, WANG SF, et al, 2012. Physiological effects of exogenous salicylic acid on radish seedlings under low temperature stress [J]. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 21(2): 142-145, 183. [初敏,王秀峰,王淑芬,等,2012.外源SA处理对低温胁迫下萝卜幼苗的生理效应[J].*西北农业学报*, 21(2): 142-145, 183.]
- FAN GH, JIN F, 2008. Effect of chitosan and salicylic acid on cold resistance of strawberry under low temperature [J]. *J. Gansu Agric Univ*, 43(2): 83-86. [樊国华,金芳,2008.壳聚糖和水杨酸对低温胁迫下草莓抗寒性的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 43(2): 83-86.]
- HE WL, HUANG CH, YANG YL, et al, 2004. Protective of ascorbic acid against salt stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 24(12): 2196-2201. [何文亮,黄承红,杨颖丽,等,2004.盐胁迫过程中抗坏血酸对植物的保护功能[J].*西北植物学报*, 24(12): 2196-2201.]
- LEI HL, HU XL, WU YY, 2010. Effect of selenium on the antioxidant enzyme activity of *cardamine ensiensis* leaves [J]. *J. Hua-*

- zhong Univ Technol, 3(38):78-85. [雷红灵,胡雪雷,吴永尧, 2010. 硒对恩施碎米芥叶片抗氧化酶活性的影响 [J]. 华中科技大学学报, 3(38):78-85.]
- LI CS, QIN Y, ZONG P, 2010. The effect of exogenous salicylic acid on physiological characteristics of maize seedling [J]. J Maize Sci, 18(3):98-100, 104. [李才生, 秦燕, 宗盼, 2010. 外源水杨酸对玉米幼苗生理特性的影响 [J]. 玉米科学, 18(3):98-100, 104.]
- LI HS, 2003. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press: 112-116. [李合生, 2003. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社: 112-116.]
- LI Q, LIU GD, XUN SQ, 2005. The activities of protective enzymes of grass seedlings to long salinity and their relationship to salinity tolerance [J]. Acta Ecol Anim Dom, 26(5):63-67. [李琼, 刘国道, 郇树乾, 2005. 盐胁迫下六种禾本科牧草幼苗叶片膜脂过氧化作用及其与耐盐性的关系 [J]. 家畜生态学报, 26(5):63-67.]
- LI XC, LI MF, LI SP, et al, 2009. Effects of KH_2PO_4 on the cold resistance of banana seedlings [J]. Guangdong Agric Sci, (9): 61-64. [李效超, 李茂富, 李绍鹏, 等, 2009. 磷酸二氢钾对香蕉幼苗抗冷性的影响 [J]. 广东农业科学, (9):61-64.]
- LIU DB, WEI JY, CUI BM, et al, 2007. Effects of ABA on cold resistance of banana seedlings [J]. Chin J Trop Crops, 2007, 28(2):1-4. [刘德兵, 魏军亚, 崔百明, 等, 2007. 脱落酸对香蕉幼苗抗寒性的影响 [J]. 热带作物学报, 28(2):1-4.]
- LIU HQ, WU JY, SUN WC, et al, 2015. Effect of exogenous abscisic acid on the cold resistance of *Brassicarapa* cv. *Longyou* (winter rape) cultivated at different foliar in northern China [J]. Acta Pratac Sin, 24(9):173-180. [刘海卿, 武军艳, 孙万仓, 等, 2015. 不同叶龄期叶面喷施 ABA 对北方白菜型冬油菜抗寒性的影响 [J]. 草业学报, 24(9):173-180.]
- LIU JC, YUN JF, ZHANG L, 2010. Physiological characteristics of three elymus grass under NaCl stress [J]. Acta Agrectir Sin, 18(5):694-697. [刘锦川, 云锦凤, 张磊, 2010. 氯化钠胁迫下 3 种披碱草属牧草生理特性的研究 [J]. 草地学报, 18(5):694-697.]
- LUO GH, WANG AG, SHAO CB, et al, 1987. The injury of high oxygen concentration to seeds germination and seedlings growth [J]. Acta Phytophysiol Sin, 13(2):161-167. [罗广华, 王爱国, 邵从本, 等, 1987. 高浓度氧对种子萌发和幼苗生长的伤害 [J]. 植物生理学报, 13(2):161-167.]
- MENG Y, LI M, WANG LM, et al, 2009. Effects of chilling injury on maize and correlative research [J]. Heilongjiang Agric Sci, (4): 150-153. [孟英, 李明, 王连敏, 等, 2009. 低温冷害对玉米生长影响及相关研究 [J]. 黑龙江农业科学, (4):150-153.]
- NAKANO Y, ASADA K, 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. Plant Cell Physiol, 22:867-880.
- QIN HB, ZHENG XJ, LI Y, et al, 2012. The uncertainty of response of relative growth rate of *H. Ammodendron* assimilation twigs to temperature increment [J]. J Desert Res, (5):1335-1341. [秦海波, 郑新军, 李彦, 等, 2012. 荒漠灌木梭梭同化枝相对生长速率对温度升高响应的不确定性 [J]. 中国沙漠, (5):1335-1341.]
- SERGIEV I, ALEXIEVAV, KARANOV E, 1997. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants [J]. Compt Rendus Del Acad Bulg Sci, 51:121-124.
- TANG RS, HANG YH, TANG XH, 2002. Effect of microorganism-sourced ABA on chilling resistance of pepper seedling [J]. Jiangsu J Agric Sci, 24(4):467-470. [汤日圣, 黄益洪, 唐现洪, 2002. 微生物源脱落酸 (ABA) 对辣椒苗耐冷性的影响 [J]. 江苏农业学报, 24(4):467-470.]
- WANG L, LIU XW, JIN BY, et al, 2010. Chilling tolerance physiological and CAT gene response mechanism induced by salicylic acid in cucumber seedling [J]. Acta Agric Boreal-Sin, 25(3):92-96. [王磊, 刘兴旺, 金宝燕, 等, 2010. 水杨酸提高黄瓜低温耐受性的生理及 CATmRAN 基因响应机制 [J]. 华北农学报, 25(3):92-96.]
- WANG LR, XUE YZ, CHANG MH, et al, 2016. Effects of exogenous hormones on cold resistant physiological index of kernel apricot [J]. Acta Agric Nucl Sin, 30(2):396-403. [王连荣, 薛拥志, 常美花, 等, 2016. 外源激素对杏扁抗寒生理指标的影响 [J]. 核农学报, (02):396-403.]
- WANG XK, 2006. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press: 45-51. [王学奎, 2006. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社: 45-51.]
- WANG XM, REN H, LIU YQ, et al, 2016. Effects of low temperature stress on physiological and biochemical indexes of cold resistance in *Averrhoa carambola* [J]. SW Chin J Agric Sci, 29(2):270-275. [王小媚, 任惠, 刘业强, 等, 2016. 低温胁迫对杨桃品种抗寒生理生化指标的影响 [J]. 西南农业学报, 29(2):270-275.]
- WANG ZB, GE YX, WANG JM, et al, 2010. Effect of SGM on photosynthetic characteristics of maize plant in chilling stress [J]. J Maize Sci, 18(6):43-45. [王志斌, 葛云侠, 王建民, 等, 2010. 水杨酸和赤霉素复配剂对低温下玉米光合特性的影响 [J]. 玉米科学, 18(6):43-45.]
- YAN HK, LIU X, WANG GD, et al, 2012. Changes and relation of soluble protein, soluble sugar and potassium in low-potassium tolerant maize under low-potassium condition [J]. J Maize Sci, 20(6):81-84. [闫洪奎, 刘祥, 王广东, 等, 2012. 低钾胁迫下耐低钾玉米可溶性蛋白、可溶性糖和钾含量的变化及其关系 [J]. 玉米科学, 20(6):81-84.]
- YAN SJ, ZHANG JN, LIU J, et al, 2011. Physiological mechanism of chilling tolerance in eggplant seedling [J]. Acta Bot Boreal-Occid Sin, 31(12):2498-2502. [闫世江, 张继宁, 刘洁, 等, 2011. 茄子幼苗耐低温性生理机制研究 [J]. 西北植物学报, 31(12):2498-2502.]
- ZHANG L, ZHAO XM, REN J, et al, 2012. Effects of exogenous abscisic acid on growth and several physiological characteristics of *Broccoli* under cold stress [J]. Jiangsu J Agric Sci, 27(3):267-272. [张琳, 赵晓嫒, 任君, 等, 2012. 外源 ABA 对低温胁迫下青花菜植株生长及若干生理特性的影响 [J]. 江苏农业学报, 27(3):267-272.]
- ZHANG RH, GUO DW, ZHANG XH, et al, 2012. Effect of nitrogen on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of maize leaf under drought stress [J]. J Maize Sci, 20(6):118-122. [张仁和, 郭东伟, 张兴华, 等, 2012. 干旱胁迫下氮肥对玉米叶片生理特性的影响 [J]. 玉米科学, 20(6):118-122.]
- ZHANG SQ, GENG GD, TAN YL, 2008. Effect of salicylic acid on chilling resistance of hot-peper [J]. Acta Agric Boreal-Sin, 23