

孙玉珺, 秦东玲, 伊凡, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 726-734.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.002

外源水杨酸对低温胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响

孙玉珺, 秦东玲, 伊凡, 宫磊, 刘哲, 吕金莹, 杨慧, 张平, 徐密林, 张倩, 杨德光

(东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究外源水杨酸(SA)对低温胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响,以抗冷玉米自交系 Kr701 和冷敏感玉米自交系黑 8834 为材料,采用外源叶面喷施 5 个不同质量浓度(0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L 和 150 mg/L)SA 的方法,分析了低温胁迫下玉米幼苗的农艺性状(株高、根长、地上部干质量及地下部干质量)和生理生化指标(相对含水量、相对电导率、净光合速率、丙二醛含量、超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性)的变化。结果表明,喷施低浓度 SA 能有效减轻低温对玉米幼苗生长的抑制程度。在 50 mg/L 处理时效果最显著,主要表现在幼苗地上部干质量、地下部干质量、相对含水量、净光合速率、超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的增加;相对电导率、MDA 含量的降低;在低温胁迫下,与低温对照比较,50 mg/L 水杨酸处理的玉米自交系 Kr701 和黑 8834 株高分别增加 17.3%、18.3%,相对含水量分别提高 58.1%、66.3%,过氧化物酶活性分别增加 35.7%、54.4%,相对电导率分别下降 51.2%、58.6%。

关键词: 玉米; 低温胁迫; 水杨酸; 生长; 生理特性

中图分类号: S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)04-0726-09

Effects of salicylic acid on growth and physiological property of maize seedling under low temperature stress

SUN Yu-jun, QIN Dong-ling, YI Fan, GONG Lei, LIU Zhe, LYU Jin-ying, YANG Hui, ZHANG Ping, XU Mi-lin, ZHANG Qian, YANG De-guang

(College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: An experiment was conducted to explore the effects of exogenous salicylic acid(SA) on the growth and physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress. In this test, cold resistant maize inbred line Kr701 and cold sensitive maize inbred line Hei8834 were used as test materials. SA solutions were sprayed on the leaf surface at five different concentrations (0 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L and 150 mg/L), and the changes of agronomic characters (plant height, root length, aboveground biomass and underground biomass) and physiological and biochemical indices [relative water content, relative electric conductivity, net photosynthetic rate (P_n), malondialdehyde

(MDA) content, superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activity] of maize seedlings under low temperature stress were analyzed. The results showed that low concentration of SA could effectively slow down the inhibition of the growth of maize seedlings. The optimum treatment was 50 mg/L SA, which increased the root dry weight, relative water content, P_n , the activity of POD

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 农业部种业攻关项目(29-1-1); 中国博士后科学基金项目(2015M571383); 黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z14028)

作者简介: 孙玉珺(1992-), 男, 黑龙江鸡西人, 硕士研究生, 研究方向为玉米逆境生理。(E-mail) sunyujunneau@163.com

通讯作者: 杨德光, (E-mail) deguangyang@sina.com

and *SOD* of the maize seedlings, and decreased relative electric conductivity and MDA content of the maize seedlings. Under low temperature conditions, compared with the control, the plant height of Kr701 and Hei8834 increased by 17.3% and 18.3%, the relative water content increased by 58.1% and 66.3%, the *POD* activity increased by 35.7% and 54.4%, and the relative electric conductivity reduced by 51.2% and 58.6% under the treatment of 50 mg/L exogenous SA.

Key words: maize; low temperature stress; salicylic acid; growth; physiological property

水杨酸(SA)是一种广泛存在于植物体内的酚类化合物。它在植物整个生命周期中,可以调节植物的生长发育、矿物质吸收和运输、光合作用、氮代谢、脯氨酸代谢、糖苷的产生、抗氧化防御系统以及在胁迫条件下的植物与水分的关系,从而为植物抵抗非生物胁迫提供保护^[1-12]。有研究表明,外源水杨酸在调节植物响应干旱、盐、热、紫外线、渗透、重金属和病虫害等生物和非生物胁迫中有重要作用^[13-14]。外源水杨酸可以通过浸种、营养液喷施的方法改善植物对非生物胁迫的耐受性。

玉米是世界上种植最广泛的谷类作物,起源于热带地区,属于喜温作物,对低温较为敏感。在黑龙江省,春播玉米苗期常遭受 10℃以下、0℃以上的低温冷害,表现为植株矮小、萎蔫和黄化,严重情况下甚至会死亡,这些现象反映了植株生理和生化功能的失调^[15-16]。本试验以抗冷性玉米自交系 Kr701 和冷敏感玉米自交系黑 8834 为试验材料,研究冷胁迫下水杨酸对玉米幼苗抗冷性调控的生理效应,为春玉米的低温抗逆栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

抗冷玉米自交系 Kr701 和冷敏感玉米自交系黑 8834,由黑龙江省农业科学院玉米研究所提供。水杨酸由天津市永大化学试剂有限公司提供,分析纯。

1.2 试验方法

2016年6月于东北农业大学农学院进行盆栽试验。

种子预处理:选择大小一致、子粒饱满的种子,先用 0.5%次氯酸钠溶液消毒 5 min,然后用蒸馏水清洗干净,置于 25℃恒温培养箱中用蒸馏水浸种 24 h,再在 33℃恒温培养箱中催芽 24 h。

播种育苗:采用盆栽种植(花盆规格为直径 20 cm、高 25 cm),装入相同体积的土,每盆点播 6 粒,保苗 4 株。每处理 5 盆,重复 3 次,苗期正常管理。

低温胁迫及不同浓度水杨酸处理:当玉米幼苗

长到 3 叶 1 心时,上午同一时间用不同浓度水杨酸进行叶面喷施处理 1 次,水杨酸质量浓度分别为 0 mg/L(对照)、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L 和 150 mg/L。每株喷施量相同,约为 10 ml。叶面喷施后 24 h 放入美国 Percival I-36VL 光照生物培养箱中低温光照培养。温度为 4℃,白天光照度为 100~560 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照时数 12 h,相对湿度 80% 条件下处理 2 d。以 25℃ 培养箱正常生长的幼苗为对照,其他设置与低温处理组相同。

1.3 测定指标与方法

农艺性状的测定:低温处理结束后立即取样进行相关指标测定。其中叶片选择玉米幼苗完全展开同位叶,株高是指从根基部到生长点之间的高度,根长是指从根基部到根尖生长点之间的长度。随机选取 5 株测量株高和根长,取平均值;用精度为 0.001 g 的 JA2603B 型电子天平(上海精密科学仪器有限公司产品)测定植株地上部和地下部干质量,105℃ 下杀青 15 min 后于 80℃ 下烘至恒质量测定干质量。

生理指标的测定:根据文献[2]的方法测定相对含水量,相对含水量 = (鲜质量 - 干质量) / (饱和质量 - 干质量) × 100%。相对电导率采用 DDS-IIA-GA 型电导仪测定,叶绿素含量采用丙酮-乙醇提取法^[17]测定。光合速率的测定:选取顶部第 2 片完全展开叶,用 LI-6400 便携式光合仪于 9:00-12:00 测定叶片净光合速率(P_n),二氧化碳体积比为 380 ml/m^3 ,叶室温度同处理温度,光照度同处理光照度,每处理重复 3 次。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[18]。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定^[19]。过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[20]。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2013 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析,用最小显著差数法(LSD)检验平均数,采用 Duncan's 多重比较法进行方差分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗农艺性状的影响

由表1可知,2个玉米自交系品种在常温(25℃)和低温胁迫(4℃)下,经5种不同质量浓度(0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L)水杨酸处理后,苗期农艺性状变化明显。随水杨酸质量浓度的增加,幼苗株高、地上部干质量、地下部干质量以及根长整体呈现先升高再降低的趋势,其中,50 mg/L水杨酸处理效果最显著。低温胁迫条件下,2个自交系株高、地上部干质量、地下部干质量及根长均低于常温对照。当在低温胁迫条件下用50 mg/L水杨酸处理时,与低温对照相比,抗冷性自交系 Kr701 和冷敏感自交系黑 8834 的株高分别增加 17.3% 和 18.3%,根长分别增加 23.6% 和 26.0%,地上部干质量分别增加

24.7% 和 8.0%,地下部干质量分别增加 30.4% 和 40.0%。并且低温胁迫下 50 mg/L水杨酸处理后根长增加的幅度大于株高增加的幅度,地下部干质量增加的幅度大于地上部干质量增加的幅度。低温胁迫下 50 mg/L水杨酸处理可以明显减少低温对幼苗生长的抑制作用,其他质量浓度(25 mg/L、100 mg/L、150 mg/L)水杨酸处理对幼苗的株高、地上部干质量、地下部干质量以及根长的影响较小。与常温对照相比,常温条件下用 50 mg/L水杨酸处理时抗冷性自交系 Kr701 和冷敏感自交系黑 8834 的株高分别增加 13.4% 和 13.3%,根长分别增加 20.9% 和 26.0%,地上部干质量分别增加 25.3% 和 11.1%,地下部干质量分别增加 32.6% 和 12.2%。在常温和低温条件下,25 mg/L、100 mg/L水杨酸叶面喷施均增加了株高、地上部干质量、地下部干质量及根长,而 150 mg/L水杨酸处理反而使株高和根长降低。

表1 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗农艺性状的影响

Table 1 The effects of different concentrations of salicylic acid on agronomic characters of maize seedlings

玉米自交系	水杨酸质量浓度 (mg/L)	株高 (cm)		地上部干质量 (mg)		地下部干质量 (mg)		根长 (cm)	
		25℃	4℃	25℃	4℃	25℃	4℃	25℃	4℃
Kr701	0	24.67±0.91b	19.63±1.55b	134.60±8.95c	118.47±8.95d	77.50±2.25d	71.33±2.70c	22.70±0.20b	20.40±0.95c
	25	26.97±0.61a	22.27±0.81a	162.33±6.40b	141.73±6.40b	85.23±0.45b	79.53±3.11d	24.23±4.32ab	23.07±0.80b
	50	28.30±1.15a	23.67±1.31a	180.13±7.30a	157.43±7.30a	115.03±4.71a	102.53±2.48a	28.73±3.72a	26.73±0.65a
	100	25.07±0.25b	21.83±0.35a	157.73±2.24b	145.37±2.24b	82.50±0.40bc	75.60±4.20bc	23.80±0.36ab	22.13±1.36bc
	150	22.60±0.98c	18.33±1.29b	129.77±0.25c	129.73±0.25c	80.73±2.60cd	75.00±3.36bc	22.53±0.25b	21.13±0.40bc
黑 8834	0	17.57±0.47c	16.50±1.08c	71.40±5.90a	64.67±4.55a	49.53±2.48b	30.30±0.60c	21.07±1.00c	16.47±1.21d
	25	18.70±0.10b	17.33±0.32b	78.10±5.40a	69.80±4.10a	55.20±1.31a	48.40±5.70a	23.33±1.20b	19.60±0.62c
	50	20.30±0.85a	20.20±0.56a	80.33±4.45a	70.30±5.10a	56.37±2.30a	50.47±2.20a	28.50±0.70a	27.73±0.55a
	100	17.97±0.15bc	17.73±0.21b	77.17±0.42a	65.13±0.40a	54.60±0.40a	43.47±4.15ab	24.50±0.44b	21.23±0.45b
	150	17.37±0.70c	15.13±0.85c	73.40±0.30a	65.13±0.40a	50.80±0.96b	37.20±1.25bc	15.73±0.85d	18.37±0.31c

同一品种、同一列中不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.2 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗相对含水量的影响

常温和低温条件下分别用 0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L水杨酸处理 2 个自交系幼苗后,幼苗的相对含水量随水杨酸质量浓度的增加均呈现先升高再降低的趋势,且不同质量浓度水杨酸处理的差异较明显,其中在 50 mg/L水杨酸处理幼苗的相对含水量最高(图1)。2个自交系的幼苗相对含水量在低温胁迫下均低于常温对照,低温胁迫下 Kr701 和黑 8834 玉米幼苗相对含水量分别

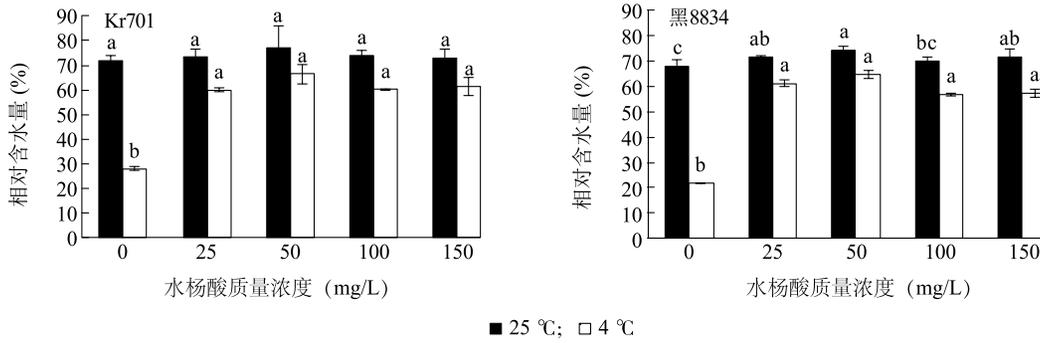
比常温对照降低 61.2% 和 67.7%,降低幅度黑 8834 大于 Kr701。低温胁迫下,与低温对照相比较,50 mg/L水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 幼苗的相对含水量分别增加 58.1% 和 66.3%。在常温条件下,各质量浓度水杨酸处理与常温对照差异不显著。可见,喷施水杨酸能够缓解低温胁迫下玉米幼苗相对含水量的降低,50 mg/L水杨酸处理的效果最好。

2.3 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗相对电导率的影响

由图2可知,常温和低温条件下分别用不同质

量浓度水杨酸处理 2 个自交系玉米幼苗后,幼苗的相对电导率随水杨酸质量浓度的增加均呈现先下降再上升的趋势,在 50 mg/L 水杨酸处理时相对电导率最低。2 个玉米自交系的幼苗相对含水量在低温胁迫下均高于常温对照,低温胁迫下 Kr701 和黑 8834 玉米幼苗的相对电导率分别比常温对照增加 23.79% 和 26.01%。在低温胁迫下,与低温对照相比较,50 mg/L 水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 幼苗的

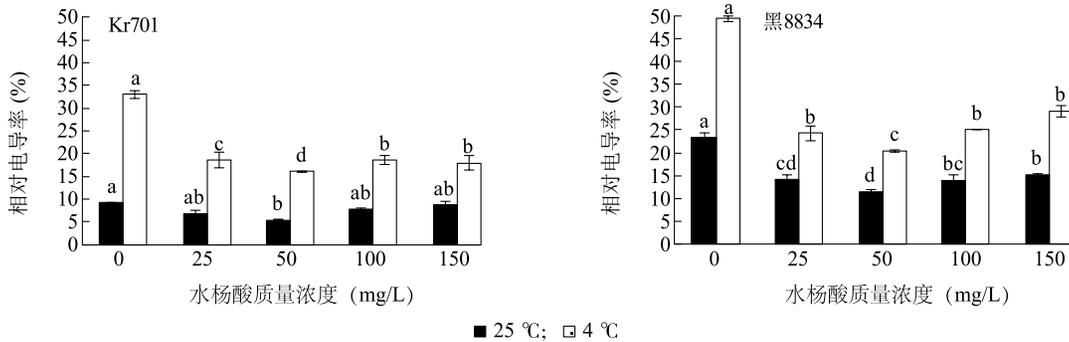
相对电导率分别降低 51.2% 和 58.6%,且与其他质量浓度水杨酸处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。在常温条件下,与常温对照相比,50 mg/L 水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 幼苗的相对电导率分别降低 40.7% 和 44.2%。说明喷施水杨酸能够明显降低玉米幼苗相对电导率,且低温胁迫下喷施效果更明显,50 mg/L 水杨酸处理效果最显著。



同一温度下,不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 1 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗相对含水量的影响

Fig.1 The effects of different concentrations of salicylic acid on relative water content of maize seedlings



同一温度下,不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗相对电导率的影响

Fig.2 The effects of different concentrations of salicylic acid on relative conductivity of maize seedlings

2.4 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗叶绿素含量的影响

常温和低温条件下分别用 0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L 水杨酸喷施 2 个自交系玉米幼苗后,幼苗的叶绿素含量均随水杨酸质量浓度的增加呈先升高后下降的趋势,50 mg/L 水杨酸处理的叶绿素含量最高(图 3)。低温胁迫下 Kr701 和黑 8834 玉米幼苗的叶绿素含量分别比常温对照降低 29.5% 和 47.0%。在低温胁迫下,与低温对照相比较,50 mg/L 水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 玉米幼

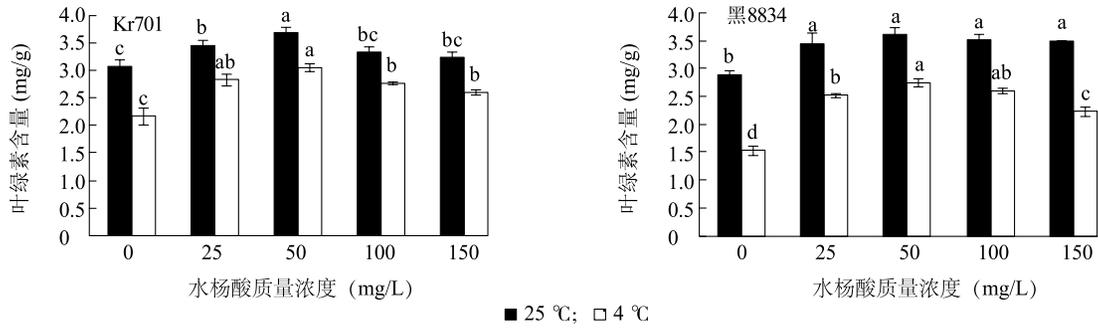
苗的叶绿素含量分别增加 40.6% 和 79.7%。常温条件下,水杨酸处理后玉米幼苗叶绿素含量的变化幅度没有低温胁迫下明显。说明水杨酸能够缓解低温胁迫对 2 个玉米品种幼苗叶绿素含量的降低,水杨酸质量浓度为 50 mg/L 时处理效果最好。

2.5 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗净光合速率的影响

由图 4 可知,常温和低温条件下分别用不同质量浓度水杨酸处理 2 个自交系玉米幼苗后,幼苗的净光合速率(P_n)均随水杨酸质量浓度的增加呈先升高后

下降的趋势,50 mg/L水杨酸处理下幼苗的 P_n 最高。2个玉米自交系幼苗的 P_n 在低温胁迫下均低于常温对照,在低温胁迫下 Kr701、黑 8834 幼苗的 P_n 分别比常温对照降低 30.3%和 48.0%。在低温胁迫下,与低温对照相比,50 mg/L水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 幼苗的 P_n 分别升高 23.9%和 41.5%,且均与其他水杨

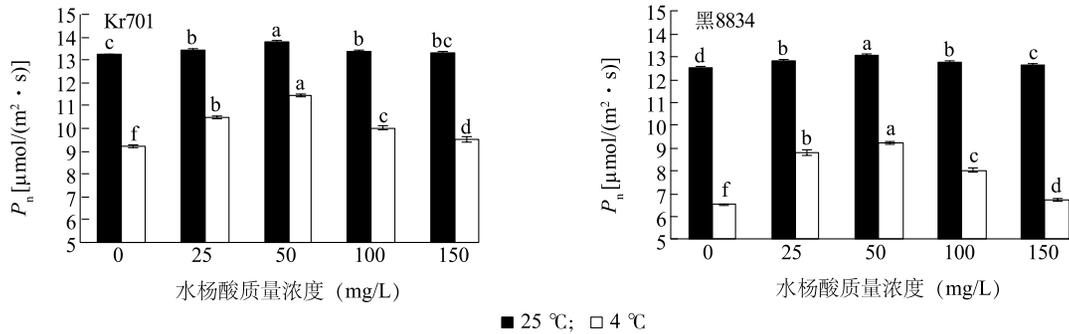
酸质量浓度处理之间差异显著($P<0.05$)。常温条件下,与常温对照相比,50 mg/L水杨酸处理下 Kr701 和黑 8834 玉米幼苗的 P_n 分别增加 4.2%和 4.4%。说明喷施水杨酸可以明显增加玉米幼苗的净光合速率,喷施质量浓度为 50 mg/L时效果最明显,且低温胁迫时处理效果优于常温。



同一温度下,不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图3 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Fig.3 The effects of different concentrations of salicylic acid on chlorophyll content of maize seedlings



同一温度下,不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图4 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗叶片净光合速率(P_n)的影响

Fig.4 The effects of different concentrations of salicylic acid on net photosynthetic rate (P_n) of maize seedlings

2.6 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗丙二醛含量的影响

常温和低温条件下分别用 0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L水杨酸处理 2 个自交系玉米幼苗后,幼苗的 MDA 含量均随水杨酸质量浓度的增加呈先下降后上升的趋势,水杨酸质量浓度为 50 mg/L时 MDA 含量最低(图 5)。不同质量浓度水杨酸处理均降低了常温和低温条件下 2 个玉米自交系的 MDA 含量。在低温胁迫下 Kr701、黑 8834 玉米幼苗的 MDA 含量分别比常温对照升高 88.8%和 75.6%。在低温胁迫下,与低温对照相比,50 mg/L水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 玉米幼苗的

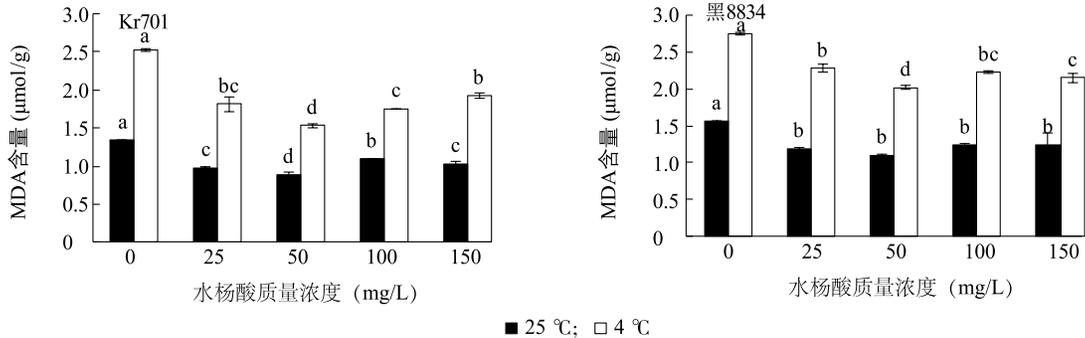
MDA 含量分别下降 39.5%和 27.3%,且与其他水杨酸质量浓度处理之间差异显著($P<0.05$)。常温条件下,与常温对照相比,50 mg/L水杨酸处理下 Kr701 和黑 8834 玉米幼苗的 MDA 含量分别降低 33.6%和 26.5%,且差异达显著水平($P<0.05$)。说明在低温胁迫下喷施水杨酸处理对玉米幼苗 MDA 含量的影响更大。

2.7 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗超氧化物歧化酶活性的影响

由图 6 可知,常温和低温条件下 0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L水杨酸处理均显著提高了 2 个自交系玉米幼苗的超氧化物歧化酶

(SOD) 活性。低温胁迫下, 2 个品种玉米幼苗的 SOD 活性均随水杨酸质量浓度的增加呈先上升后下降的趋势, 50 mg/L 水杨酸处理时 SOD 活性最高, 且 2 个品种玉米幼苗 SOD 活性均显著高于常温对照, Kr701 品种的 SOD 活性大于黑 8834。在低温胁迫下, 与低温对照相比, 50 mg/L 水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 玉米幼苗的 SOD 活性分别升高

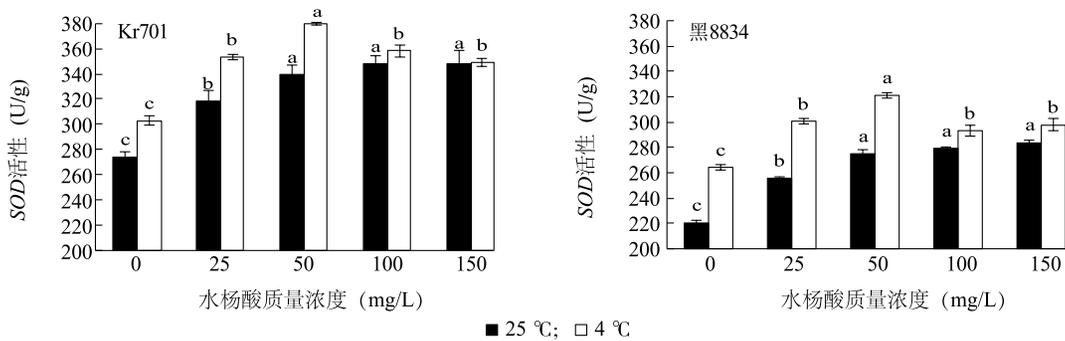
25.5% 和 21.7%, 且均与其他质量浓度水杨酸处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。常温条件下, 2 个品种的 SOD 活性随着水杨酸喷施质量浓度的增加而不断增加, 且在整个质量浓度处理范围内, SOD 活性始终表现为 Kr701 大于黑 8834。说明低温胁迫下通过水杨酸处理可以明显提高玉米幼苗的 SOD 活性, 50 mg/L 水杨酸的效果最显著。



同一温度下, 不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 5 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗丙二醛含量的影响

Fig.5 The effects of different concentrations of salicylic acid on malondialdehyde content of maize seedlings



同一温度下, 不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 6 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗 SOD 活性的影响

Fig.6 The effects of different concentrations of salicylic acid on superoxide dismutase activity of maize seedlings

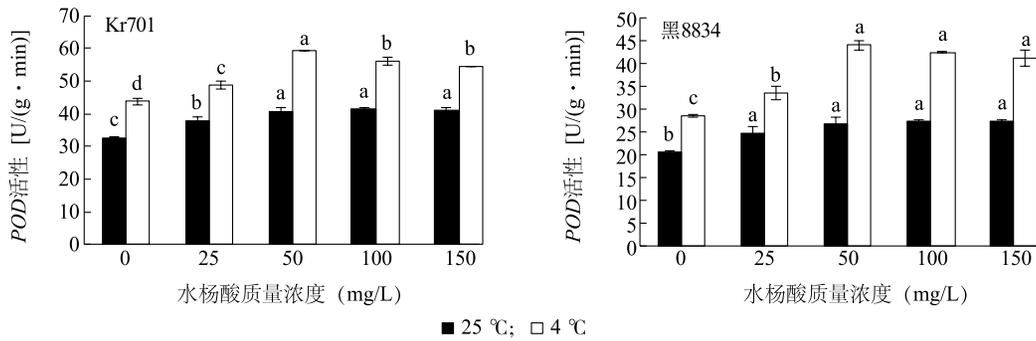
2.8 不同质量浓度水杨酸处理对玉米幼苗过氧化物酶活性的影响

常温和低温条件下 0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L 水杨酸处理均显著提高了 2 个品种玉米幼苗的过氧化物酶 (POD) 活性 (图 7)。低温胁迫下, 2 个品种玉米幼苗的 POD 活性均随水杨酸质量浓度的增加呈先上升后下降的趋势, 50 mg/L 水杨酸处理时 POD 活性最高, 且 2 个品种玉米幼苗 POD 活性均显著高于常温对照, 品种 Kr701 的 POD 活性大于黑 8834。在低温胁迫下, 与低温对照相比, 50 mg/L 水杨酸处理下 Kr701、黑 8834 幼苗的

POD 活性分别升高 35.7% 和 54.4%。在常温条件下, 2 个玉米品种的 POD 活性随着水杨酸喷施质量浓度的增加而不断增加, 且在整个处理质量浓度范围内, POD 活性始终表现为 Kr701 > 黑 8834。说明水杨酸可以明显提高低温胁迫下玉米幼苗的 POD 活性, 50 mg/L 水杨酸处理效果最显著。

3 讨论

水杨酸涉及植物的生长和发育及其对生物和非生物胁迫的反应^[21]。Vanacker 等^[22] 研究结果表明, 水杨酸可以调节细胞的生长, 特别是影响细胞的



同一温度下,不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图7 不同质量浓度水杨酸对玉米幼苗 *POD* 活性的影响

Fig.7 The effects of different concentrations of salicylic acid on peroxidase activity of maize seedlings

扩大、复制和分裂。Elmer 等^[23] 也通过试验证明,较高的水杨酸质量浓度对细胞有毒害作用,可减少细胞的分裂,并对光合作用产生负面影响。作为植物的主要器官,根系不仅能吸收水分和营养物质,还能运输植物体内的水分和营养物质。同时,根的生长受到土壤温度的影响,如果土壤温度过低或过高,可能会抑制根系生长。低温胁迫也会改变根的代谢、植物的形态^[24-25]。本试验中发现,低温胁迫下,玉米幼苗的生长受到抑制,而 25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L 水杨酸处理均能缓解这种抑制作用,且 50 mg/L 水杨酸处理对玉米幼苗的株高、根长和地上、地下部干质量的增加效果最显著,说明适宜质量浓度的外源水杨酸能够促进低温胁迫下玉米幼苗的生长,过高的水杨酸质量浓度处理则有抑制作用。本试验中还发现 50 mg/L 水杨酸处理时,根长增加的幅度大于株高增加的幅度,地下部干质量增加的幅度大于地上部干质量增加的幅度,说明该质量浓度水杨酸处理对根系的促进效果更好。

低温胁迫是影响植物生产力和分布的主要环境因素之一,低温会导致植株细胞脂质过氧化,从而使膜的完整性遭到破坏,MDA 是脂质过氧化的普通产物,因而能够直观地反映氧化损害的程度^[26-27]。有研究结果^[28-29] 表明,低温胁迫可以明显增加玉米植株的 MDA 含量,且低温胁迫下外源施用水杨酸可以减少 MDA 含量的增加。同样的结果也在棉花^[30] 和水稻^[31] 上得到了证实。本研究结果表明,水杨酸喷施处理降低了低温胁迫对玉米幼苗细胞膜的伤害,同时缓解了 MDA 含量的增加,这也与前人的研究结果吻合。

低温胁迫总是伴随着活性氧 (ROS) 物质的形

成,它会破坏膜和大分子的结构。植物能够合成许多 ROS 的清除物质,包括超氧化物歧化酶 (*SOD*)、过氧化物酶 (*POD*)、过氧化氢酶 (*CAT*)、抗坏血酸过氧化物酶 (*APX*) 和谷胱甘肽还原酶 (*GR*) 以及抗坏血酸和谷胱甘肽这类的非酶分子。这些物质能够增强植物的抗氧化防御能力,提高植物的耐寒性^[32]。抗氧化酶是最有效的抗氧化损伤的物质,其中 *SOD* 和 *CAT* 是最重要的酶^[33]。如果 ROS 不清除,那么积累的活性氧物质可能会改变蛋白质的结构,使蛋白质更容易受到分解^[34]。王小媚等^[35] 在 4 °C 低温胁迫下对番木瓜幼苗喷施不同质量浓度的水杨酸,发现番木瓜幼苗叶片的 *SOD*、*POD* 活性均高于对照,且呈先上升后下降的变化趋势。侯丽霞等^[36] 也发现玉米幼苗经过水杨酸处理后 *SOD* 酶活性呈升高趋势。其他研究结果也表明,在低温胁迫下水杨酸处理增加了西瓜^[37]、茄子^[38] 和大麦^[39-40] 中的抗氧化酶活性。本试验中发现,在低温胁迫下,喷施不同质量浓度的水杨酸均提高了 2 个玉米品种的 *POD* 和 *SOD* 的活性,其中 50 mg/L 水杨酸处理的 *SOD* 和 *POD* 活性最高。

在低温胁迫下,暴露在寒冷条件下的玉米植株经常表现出水分胁迫。水杨酸可以通过渗透调节或改变细胞壁的弹性来改善组织水的状态^[41]。最近的研究结果证明水杨酸在调节玉米、水稻和小麦耐寒性上具有潜在的价值,外源性水杨酸的应用可减少热或冷胁迫下电解质的泄漏。李可凡等^[42] 的研究结果表明,低温胁迫下对玉米幼苗喷施外源水杨酸预处理,可以明显减少电解质的渗出。吴海宁等^[43] 研究发现,在 4 °C、8 °C、12 °C、25 °C 温度条件下,随着胁迫温度的下降与胁迫时间的延长,木薯幼苗叶

片的相对电导率和相对含水量不断下降。代其林^[44]发现外源水杨酸喷施可以明显提高低温下水稻幼苗含水量,降低低温胁迫下水稻幼苗的电解质渗透率。本研究结果表明,水杨酸处理降低了低温条件下玉米幼苗的相对电导率,提高了低温条件下玉米幼苗的相对含水量,常温条件下效果不明显。这可能是由于低温胁迫对植株的细胞膜造成伤害引起了膜透性的增加,所以喷施水杨酸对低温下细胞膜的保护作用更明显。

玉米起源于热带并且对温度高度敏感,低温胁迫不仅会对其生长、生理和生化过程产生不利影响^[45],还会对光合色素造成损害。在严重的低温胁迫下,叶绿素酶活性增加,叶绿素含量降低,在类囊体膜上产生较多的 ROS,这些自由基可以破坏光合蛋白和色素,最终导致光合作用受到抑制^[46]。有研究表明,低温胁迫下喷施水杨酸可以明显提高玉米幼苗的叶绿素含量、净光合速率,施用水杨酸有利于增强玉米幼苗抵御低温冷害的能力^[42,47-49]。本试验中低温胁迫下,低质量浓度水杨酸处理能够维持较高的叶绿素含量和 P_n 水平。Orabi 等^[50]研究发现,外源水杨酸能够增强黄瓜植株的光合速率,维持细胞膜的稳定性,从而促进低温胁迫下黄瓜植株的生长。由于低温导致叶绿体的 ROS 增加,使叶绿素分子遭到破坏,进而破坏叶绿体膜系统和光合反应中心。推测水杨酸可以作为 ROS 的解毒剂而阻止自由基的破坏作用,提高叶片叶绿素的含量。

综上所述,在低温胁迫下叶面喷施水杨酸处理,可以有效缓解玉米幼苗在低温胁迫下受到的伤害。不同质量浓度的水杨酸处理对玉米幼苗生长、抗氧化酶系统、渗透系统、光合系统均有影响,其中 50 mg/L 水杨酸处理的效果最显著。

参考文献:

- [1] 杨文飞,杜永林,顾大路,等. 4种调节物质对水稻耐低温能力的影响[J]. 江苏农业学报,2017,33(4):739-746.
- [2] 张帆,李景富,姜景彬,等. 外源水杨酸诱导对番茄幼苗抗冷性的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(3):91-94.
- [3] KENJI M, YASUOMI T. Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5(4):1-12.
- [4] FAROOQ M, AZIZ T, BASRA S M A, et al. Chilling tolerance in hybrid maize induced by seed priming with salicylic acid[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2008, 194(2):161-168.
- [5] 周丽霞,曹红星,肖勇. 外源水杨酸对低温胁迫椰子幼苗生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2017,48(11):2039-2045.
- [6] NAZAR R, IQBAL N, SYEED S, et al. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(8):7-15.
- [7] 董静,邢锦城,王茂文,等. 3种外源物质浸种对 NaCl 胁迫下马齿苋种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):103-106.
- [8] NAFEES K, SHABINA S, ASIM M, et al. Application of salicylic acid increases contents of nutrients and antioxidative metabolism in mungbean and alleviates adverse effects of salinity stress[J]. *International Journal of Plant Biology*, 2010, 1(1):1.
- [9] 赵艳侠,亓桂梅,王咏梅. 水杨酸对葡萄抗逆性调控的研究进展[J]. 山东农业科学,2017,49(11):146-150.
- [10] KHAN M I, IQBAL N, MASOOD A, et al. Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2013, 8(11):1-9.
- [11] KHAN M I R, ASGHER M, KHAN N A. Alleviation of salt-induced photosynthesis and growth inhibition by salicylic acid involves glycinebetaine and ethylene in mungbean (*Vigna radiata*, L.)[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2014, 80(1):67-74.
- [12] 江敏,郑舒文,宁慧宇,等. 外源水杨酸对涝渍胁迫下小麦产量及相关生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):55-57.
- [13] MUTLU S, ÖKKEK A, NALBANTOGLU B, et al. Exogenous salicylic acid alleviates cold damage by regulating antioxidative system in two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars[J]. *Frontiers in Life Science*, 2016, 9(2):99-109.
- [14] MAHDAVIAN K, GHORBANLI M, KALANTARI K M. Role of salicylic acid in regulating ultraviolet radiation-induced oxidative stress in pepper leaves[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55(4):560-563.
- [15] LYONS J M. Chilling injury in plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 2003, 24(24):445-466.
- [16] JANOWIAK F, MAAS B, DÖRFFLING K. Importance of abscisic acid for chilling tolerance of maize seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(6):635-643.
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [19] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59(2):309-314.
- [20] KOCHBA J, LAVEE S, SPIEGELROY P. Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic 'Shamouti' orange ovular callus lines[J]. *Plant & Cell Physiology*, 1977, 18(2):463-467.

- [21] MIURA K, TADA Y. Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5(4):1-12.
- [22] VANACKER H, LU H, RATE D N, et al. A role for salicylic acid and NPR1 in regulating cell growth in *Arabidopsis*[J]. *Plant Journal*, 2001, 28(2):209-216.
- [23] ELMER W H. Management of fusarium wilt of cyclamen with biologicals and induced resistance[R]. New Haven:CT, 2005.
- [24] LI Y R, YANG L T. Sugarcane agriculture and sugar industry in China[J]. *Sugar Tech*, 2015, 17(1):1-8.
- [25] PINTON R, VARANINI Z, NANNIPIERI P, et al. The rhizosphere biochemistry and organic substances at the soil-plant interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 72(6):339-353.
- [26] THEOCHARIS A, CLÉMENT C, BARKA E A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures[J]. *Planta*, 2012, 235(6):1091-1105.
- [27] KUK Y I, SHIN J S, BURGOS N R, et al. Antioxidative enzymes offer protection from chilling damage in rice plants[J]. *Crop Science*, 2003, 43(6):2109-2117.
- [28] 张富平,张蕊. 低温下外源水杨酸对玉米幼苗保护酶活性的影响[J]. *玉米科学*, 2007, 15(4):83-85.
- [29] 杨小环,赵维峰,孙娜娜,等. 外源水杨酸缓解低温胁迫对玉米种子萌发和早期幼苗生长伤害的生理机制[J]. *核农学报*, 2017, 31(9):1811-1817.
- [30] 蔡肖,江振兴,甄军波,等. 水杨酸对低温胁迫下棉花种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(7):39-43.
- [31] 张蕊,吕俊,米青山,等. 低温下外源水杨酸对水稻幼苗抗氧化酶系的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(1):29-32.
- [32] WANG W, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1):1-14.
- [33] FOYER C H, DESCOURVIERES P, KUNERT K J. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants[J]. *Plant Cell & Environment*, 1994, 17(5):507-523.
- [34] ALSCHER R, MOONEY H A, WINNER W E, et al. Response of plants to multiple stresses[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1991, 43(3):275-277.
- [35] 王小媚,唐文忠,任惠,等. 水杨酸对低温胁迫番木瓜幼苗生理指标及叶片组织结构的影响[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(8):1290-1296.
- [36] 侯丽霞. 水杨酸对低温胁迫下玉米幼苗某些生理指标的影响[J]. *吉林农业科学*, 2013, 38(5):4-6.
- [37] YANG J H, YUAN G, LI Y M, et al. Salicylic acid-induced enhancement of cold tolerance through activation of antioxidative capacity in watermelon[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 118(3):200-205.
- [38] CHEN S, LIU Z, CUI J, et al. Alleviation of chilling-induced oxidative damage by salicylic acid pretreatment and related gene expression in eggplant seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, 65(1):101-108.
- [39] MUTLU S, KARADAGOGLU Ö, ATICI Ö, et al. Protective role of salicylic acid applied before cold stress on antioxidative system and protein patterns in barley apoplast[J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57(57):507-513.
- [40] MUTLU S. Time-dependent effect of salicylic acid on alleviating cold damage in two barley cultivars differing in cold tolerance[J]. *Doga Turkish Journal of Botany*, 2013, 37(2):343-349.
- [41] BANDURSKA H, SKI A S. The effect of salicylic acid on barley response to water deficit[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2005, 27(3):379-386.
- [42] 李可凡,张蕊. 外源水杨酸对玉米幼苗抗低温胁迫能力的影响[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(6):789-791.
- [43] 吴海宁,罗兴录,樊吴静. 低温胁迫对不同木薯品种幼苗生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2013, 44(11):1791-1799.
- [44] 代其林. 水杨酸对低温下水稻幼苗生理生化特性的影响[D]. 成都:四川大学, 2004.
- [45] ALI F, KANWAL N, AHSAN M, et al. Crop improvement through conventional and non-conventional breeding approaches for grain yield and quality traits in *Zea mays*[J]. 2015, 12(4):38-50.
- [46] ARIVALAGAN M, SOMASUNDARAM R. Effect of propiconazole and salicylic acid on the growth and photosynthetic pigments variations in *Sorghum bicolor* L. [J]. *Under Drought Condition*, 2015, 7:17-23.
- [47] 常云霞,徐克东,陈璨,等. 水杨酸对低温胁迫下大豆幼苗生长抑制的缓解效应[J]. *大豆科学*, 2012, 31(6):927-931.
- [48] 朱玉龙,王玺. 水杨酸包衣对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *玉米科学*, 2013, 21(4):68-71.
- [49] 杨德光,秦东玲,李钊,等. 低温胁迫下外源水杨酸对玉米幼苗生理特性的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(4):122-129.
- [50] ORABI S A, SALMAN S R, SHALABY M A F. Increasing resistance to oxidative damage in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants by exogenous application of salicylic acid and paclobutrazol[J]. *World Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 6(3):252-259.

(责任编辑:张震林)