

水杨酸浸种对铝胁迫下多年生黑麦草种子萌发的影响

陈谦伟, 宋鑫*

(江西省作物生长发育调控重点实验室, 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西 宜春 336000)

摘要:【目的】探讨水杨酸浸种对不同浓度铝胁迫处理下多年生黑麦草种子萌发的影响。【方法】以多年生黑麦草(*Lolium perenne*)品种冬牧70(*Secale Cerales*)种子为试验材料, 并将材料分为2组, 一组为无水杨酸浸种组, 另一组用0.5 mmol/L水杨酸(salicylic acid, SA)浸种。用7个AlCl₃浓度(0、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mmol/L)处理液对2组黑麦草种子进行处理。【结果】1)无水杨酸浸种组种子发芽势、发芽率并未受到各浓度铝胁迫显著影响。当AlCl₃处理浓度达到10.0 mmol/L时, 0.5 mmol/L水杨酸浸种组种子发芽势及发芽率显著被抑制。2)2组种子的芽长和根长均随着AlCl₃处理浓度的升高而显著降低; 3)随着铝胁迫浓度的增加, 无水杨酸浸种组多年生黑麦草种子SOD、CAT、POD活性均受到抑制; 0.5 mmol/L水杨酸浸种多年生黑麦草种子在铝胁迫下的POD活性增强, 但SOD和CAT活性未增强。【结论】水杨酸能够增强铝胁迫下多年生黑麦草抗氧化系统POD活性, 但对促进种子萌发不明显。

关键词: 铝胁迫; 多年生黑麦草; 水杨酸; 发芽; 酶活性

中图分类号: S543 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2023)05-0137-07

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2023.05.018



土壤酸铝毒害是影响植物生长的非生物胁迫因素之一。铝(Al)元素是地壳中含量最高的金属元素, 常以硅酸盐或氧化铝等难溶的固态存在于地壳中^[1]。我国酸性土壤主要分布在长江以南的南方地区, 总面积超过203万km², 约占耕地面积的21%^[2]。当土壤pH值低于5.0时, 土壤中的Al被活化并对植物造成严重的毒害^[3]。李淮源等^[4]研究发现铝胁迫下烤烟(*Nicotiana tabacum*)根系活力明显降低, 并且显著抑制了其根系生长。崔雪梅等^[5]发现铝对油菜(*Brassica na-*

pus)根系会产生毒害作用, 当铝毒害达到一定浓度时会影响叶片中有机物的运输, 对油菜幼苗叶片产生毒害。铝毒害也会影响水稻(*Oryza sativa*)根中的脂质含量和组成, 降低脂肪酸的不饱和度, 破坏膜的流动性, 增大膜的渗透性, 从而破坏膜的结构和功能, 阻碍水稻的生长发育^[6]。

水杨酸(salicylic acid, SA)又称邻羟基苯甲酸, 是一种普遍存在于生物体内的酚类化合物, 它参与调节植物的生长发育, 对植物生理活动具有重要作用, 因此也被认为是一种新型植物激素^[7]。施加一定浓度的水杨酸可以不同程度提高植物的抗病性、抗盐性、抗热性、抗寒性等抗逆能力^[8]。刘杰等^[9]发现水杨酸浸种处理可以有效提高黑麦草幼苗抗旱性, 其中以0.5 mmol/L水杨酸处理促进发芽的效果最为显著。另外, 水杨酸也可以促进百日草(*Zinnia elegans*)叶绿素合成和光合作用; 同时也通过调节百日草抗氧化酶系统活性, 增强其抗盐胁迫能力, 有效提高其耐盐性^[10]。外源添加水杨酸也可以降低草地早熟禾(*Poa pratensis*)

收稿日期: 2022-04-18; **修回日期:** 2022-06-16

基金项目: 江西省作物生长发育调控重点实验室开放基金课题基金项目(JXJJ202104); 宜春学院博士科研启动项目(2103360119048); 宜春学院大学生创新创业训练项目(S202210417013)

作者简介: 陈谦伟(2001-), 男, 福建宁德人。

E-mail: 2823050934@qq.com

*通信作者。E-mail: songx@jxycu.edu.cn

sis)褐斑病的发病率和病情指数,增强抗病性^[11]。

多年生黑麦草(*Lolium perenne*)是禾本科黑麦草属的多年生疏丛型草本植物,在世界范围内广泛应用,引入我国后,多年生黑麦草主要在华东、华中和西南等地应用^{[广泛^{12]}}。主要因多年生黑麦草具有外形美观、生长迅速、再生能力强、营养丰富、适口性好、产草量高等优点^[1]。近年来对多年生黑麦草抗逆生理特性的研究日渐丰富,主要集中在非生物胁迫因素、非生物胁迫因素与植物激素的相互作用方面。目前,有关多年生黑麦草抗逆性、水杨酸对植物的调节相关研究主要集中在高温胁迫^[13-14]、盐胁迫^[15-16]、重金属胁迫^[17-18]等方面。然而,将水杨酸作为缓解多年生黑麦草种子铝胁迫的研究报道较少。本研究以多年生黑麦草品种冬牧70(*Secale Cerales*)种子为实验材料,研究不同浓度 AlCl_3 处理下0.5 mmol/L水杨酸浸种后对其种子发芽特性的影响,为今后培育多年生黑麦草耐铝新品种,进一步向南方酸铝土壤区域引种栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验种子于2021年购自宿迁春之奇迹园艺有限公司,将种子置于 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 冷库中进行闭光干燥保存。

1.2 试验设计

试验设置7个 AlCl_3 浓度(0、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mmol/L)对多年生黑麦草种子进行处理第一组。将饱满一致的种子用75%酒精消毒后用7个处理浓度的 AlCl_3 溶液分别浸种2 h,浸种完成后将种子均匀摆在用5 mL相同浓度 AlCl_3 溶液浸湿的两层滤纸的培养皿中,每个培养皿放置50粒种子,每个处理浓度设置4次重复,置于 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 生化培养箱中进行发芽。另一组种子先用75%酒精消毒后再用0.5 mmol/L水杨酸浸种12 h,然后再用7个处理浓度的 AlCl_3 溶液分别浸种2 h后将种子均匀摆在用5 mL相同浓度 AlCl_3 溶液浸湿的两层滤纸的培养皿中,每个培养皿放置50粒种子,每个处理浓度设置4次重复,置于 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 生化培养箱中进行发芽。

1.3 种子萌发后的生长指标测定

1.3.1 发芽指标测定 以胚根突破种皮视为种子萌发,在实验第5天统计萌发数量计算发芽势,试验第7

天再次统计萌发数量,计算发芽率,公式如下:

$$\text{发芽势} = (\text{第5天发芽粒数} / \text{供试种子总粒数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = (\text{第7天发芽粒数} / \text{供试种子总粒数}) \times 100\%$$

1.3.2 幼苗生长指标 发芽试验(第7天)结束后,从每个培养皿中随机取出均匀一致的3~5株幼苗,用直尺(0.1 cm)测量幼苗的根长和芽长。

1.3.3 抗氧化酶活性的测定 称取0.1 g幼芽组织于预先冰冻过的研钵中,加适量液氮进行研磨,并加入900 μL 磷酸缓冲液(0.1 mol/L, pH值7.4)制成粗酶液,置于2 mL离心管中,并置于冰盒中保存待用。分别采用南京建成生物研究所氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性试剂盒(南京建成)测定以上3种酶活性,具体测定方法参照试剂盒说明书。

1.3.4 数据分析 试验数据使用SPSS统计软件进行方差分析和多重比较,用Excel制作图表。

2 结果与分析

2.1 铝胁迫对黑麦草种子发芽势与发芽率的影响

随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐升高,无水杨酸浸种(-SA)的多年生黑麦草种子的发芽势和发芽率均显现出先升高后降低的变化趋势,但变化不明显(表1)。水杨酸浸种(+SA),多年生黑麦草发芽势和发芽率在 AlCl_3 处理浓度在0~5.0 mmol/L时均变化不大,且无显著差异;当 AlCl_3 浓度达到10.0 mmol/L时,发芽势和发芽率均显著降低($P < 0.05$)(表1)。与-SA相比,+SA处理后在10 mmol/L AlCl_3 处理时发芽率和发芽势均显著下降(表1)。

2.2 铝胁迫对黑麦草种子芽长和根长的影响

未使用水杨酸浸种时,随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐升高,种子芽长整体呈现下降趋势,当 AlCl_3 处理浓度达到1.0~10.0 mmol/L时,与对照(0 mmol/L)相比各处理下种子芽长显著下降(图1)。使用0.5 mmol/L水杨酸浸种后再用不同浓度 AlCl_3 处理,与未浸组相比,种子芽长均显著降低(图1);并同时随着 AlCl_3 处理浓度的升高也呈现下降趋势(图1)。

随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐升高,无水杨酸浸种组和0.5 mmol/L水杨酸浸种组种子根长均呈现出逐

表 1 不同浓度 AlCl_3 及水杨酸 (SA) 浸种处理下对多年生黑麦草种子发芽势和发芽率的影响Table 1 Effects of different concentrations of AlCl_3 treatment on the Germination vigor and Germination percentage of perennial ryegrass seeds with or without Salicylic acid (SA)

AlCl_3 浓度/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	-SA ($0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)		+SA ($0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	发芽势/%	发芽率/%	发芽势/%	发芽率/%
0	97.00±0.02 ^{ab}	97.00±0.02 ^a	98.00±0.01 ^a	98.00±0.01 ^a
0.2	97.50±0.01 ^{ab}	97.50±0.01 ^a	96.50±0.02 ^a	96.50±0.01 ^a
0.5	98.00±0.01 ^{ab}	98.00±0.02 ^a	98.00±0.01 ^a	98.00±0.01 ^a
1.0	99.00±0.02 ^a	99.50±0.02 ^a	95.50±0.02 ^a	96.00±0.02 ^a
2.0	96.00±0.02 ^{ab}	96.50±0.02 ^a	97.50±0.04 ^a	98.50±0.04 ^a
5.0	97.00±0.02 ^{ab}	97.50±0.02 ^a	92.50±0.01 ^a	94.50±0.01 ^a
10.0	93.50±0.01 ^b	95.50±0.01 ^a	64.00±0.01 ^b	78.00±0.01 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

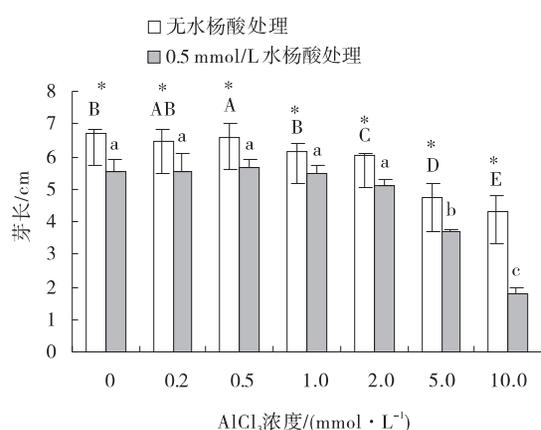


图 1 不同浓度 AlCl_3 浸种及 SA 处理下对多年生黑麦草种子芽长的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of AlCl_3 treatment on the bud length of perennial ryegrass seeds with or without SA

注: *表示同一 AlCl_3 处理浓度下差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一指标不同 AlCl_3 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一指标不同 AlCl_3 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

渐下降的趋势 (图 2)。随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐增加, 无水杨酸浸种组根长呈逐渐下降趋势 (图 2); 0.5 mmol/L 水杨酸浸种组根长也呈现出逐渐下降的趋势, 当 AlCl_3 浓度达到 2.0 mmol/L 时根长与浸种组对照相比大幅下约 60%, 当 AlCl_3 浓度达到 5.0 和 10.0 mmol/L 时, 根长下降幅度更为剧烈, 甚至出现无根现象 (图 2)。

2.3 铝胁迫对黑麦草根系 POD 活性的影响

随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐升高, 无水杨酸浸种组种子 POD 活性整体呈先保持相对稳定再逐渐下降的趋势 (图 3); 0.5 mmol/L 水杨酸浸种组种子 POD 活性则呈现出先保持稳定, 再上升再逐渐下降, 后又有

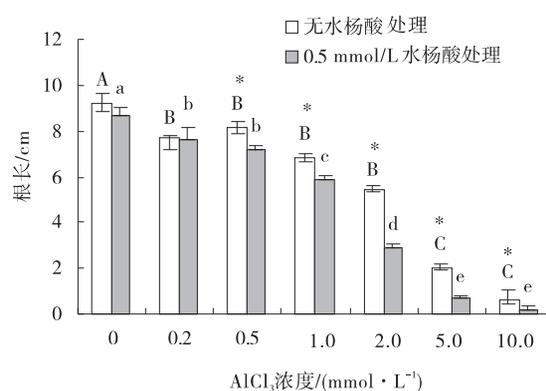


图 2 不同浓度 AlCl_3 浸种及 SA 处理下对多年生黑麦草种子根长的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of AlCl_3 treatment on the root length of perennial ryegrass seeds with or without SA

所上升的趋势, 且经过水杨酸浸种后, 在不同浓度 AlCl_3 处理下, 种子 POD 活性均显著高于无水杨酸浸种组 (图 3)。

2.4 铝胁迫对黑麦草根系 CAT 活性的影响

随着 AlCl_3 处理浓度的逐渐升高, 无水杨酸浸种和 0.5 mmol/L 水杨酸浸种组种子 CAT 活性均基本呈现出先上升再逐渐下降的趋势 (图 4)。当 AlCl_3 浓度达到 0.2 mmol/L 时, 无水杨酸浸种组种子 CAT 活性与对照相比显著上升, 随后随 AlCl_3 浓度的增加而呈现出缓慢下降趋势 (图 4)。0.5 mmol/L 水杨酸浸种组种子 CAT 活性在 0.2 mmol/L AlCl_3 浓度处理下达到最高, 但与对照相比并不显著, 随后随 AlCl_3 浓度的增加而呈现出显著下降趋势, 并且在 AlCl_3 浓度达到 0.5 mmol/L 以上时, 水杨酸浸种组 CAT 活性均低于无水杨酸浸种组 (图 4)。

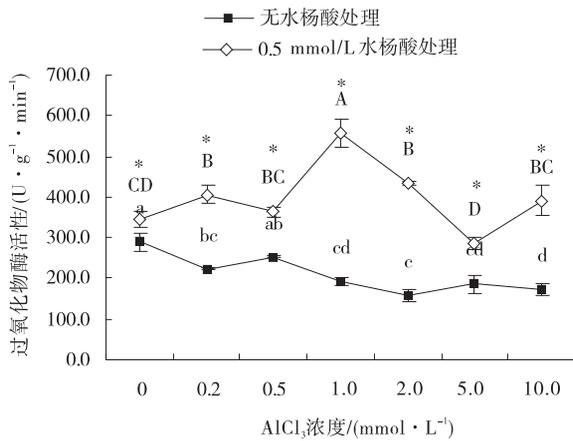


图3 不同浓度 AlCl₃ 浸种及 SA 处理下对多年生黑麦草种子过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of AlCl₃ treatment on the peroxidase (POD) activity of perennial ryegrass seeds with or without SA

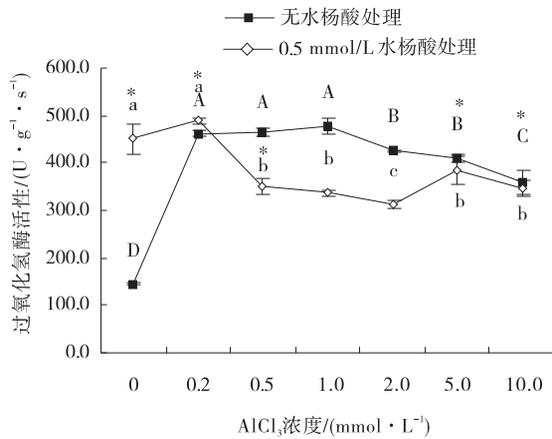


图4 不同浓度 AlCl₃ 浸种及 SA 处理下对多年生黑麦草种子过氧化氢酶(CAT)活性的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of AlCl₃ treatment on the catalase (CAT) activity of perennial ryegrass seeds with or without SA

2.5 铝胁迫对黑麦草根 SOD 活性的影响

随着 AlCl₃ 处理浓度的逐渐升高,无水杨酸浸种和 0.5 mmol/L 水杨酸浸种组种子 SOD 活性均基本呈现逐渐下降的趋势(图 5)。且无水杨酸浸种组 SOD 活性在各 AlCl₃ 处理浓度下均高于 0.5 mmol/L 水杨酸浸种组(图 5)。

2.6 相关性分析

相关性分析表明(表 2),在不同浓度 AlCl₃ 浸种下,过氧化氢酶的活性与过氧化物酶和芽长都具有极显著的负相关关系($P < 0.01$);超氧化物歧化酶活性与过氧化物酶活性、根长和芽长都具有极显著的正相关关系($P < 0.01$);根长还与过氧化物酶活性和芽长

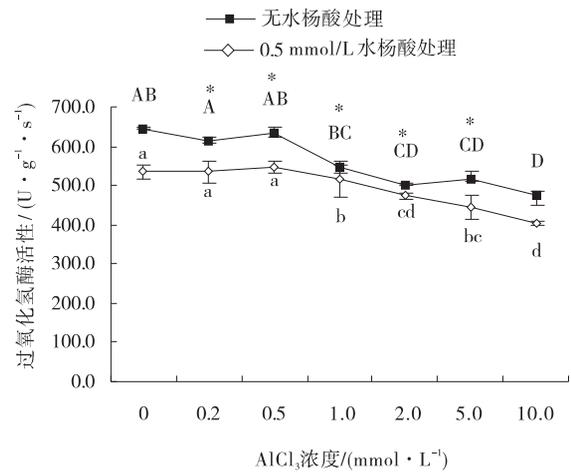


图5 不同浓度 AlCl₃ 浸种及 SA 处理下对多年生黑麦草种子超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of AlCl₃ treatment on the superoxide dismutase (SOD) activity of perennial ryegrass seeds with or without SA

具有极显著的正相关关系($P < 0.01$),与发芽势有显著正相关关系($P < 0.05$);芽长则还与过氧化物酶活性有着极显著的正相关关系($P < 0.01$)。在增加了水杨酸浸种处理后,超氧化物歧化酶活性与发芽势、根长和芽长均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$);发芽势与根长和芽长呈极显著的正相关关系($P < 0.01$);根长与过氧化氢酶活性有显著正相关关系($P < 0.05$),与芽长也呈极显著的正相关关系($P < 0.01$)。

3 讨论

铝胁迫作为我国南方地区土壤最常见的金属离子毒害之一深受关注^[1]。在本研究中发现,不同浓度的氯化铝处理对多年生黑麦草种子的发芽势和发芽率的影响都不显著,与初晓辉等^[19]对 5 种多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)种子铝胁迫下发芽率的研究结果基本一致,表明黑麦草种子对铝胁迫有很强的抗性;在添加水杨酸浸种处理后,高浓度(10.0 mmol/L)铝胁迫处理下黑麦草种子的发芽势和发芽率显著降低,表明在高浓度(10.0 mmol/L)铝胁迫和水杨酸的共同作用下黑麦草的耐铝性明显减弱。大量研究表明,铝毒害对植物的抑制作用最先是对根的抑制^[20-22]。本研究表明,黑麦草种子萌发后芽长和根长均随铝浓度的升高而逐渐下降(图 1-2),特别是根,在高浓度(10.0 mmol/L)下,还出现部分无根现象,与前人研究相佐证^[2]。主要原因可能是 Al³⁺ 最先进入种

表 2 不同浓度 AlCl_3 浸种及 SA 处理下多年生黑麦草种子各指标之间的相关系数
 Table 2 Effects of different concentrations of AlCl_3 SA treatment and on the correlation coefficient
 matrix of perennial ryegrass seeds

水杨酸处理	指标	过氧化物酶活性	过氧化氢酶活性	超氧化物歧化酶活性	发芽势	根长	芽长
-SA	过氧化物酶活性	1					
	过氧化氢酶活性	-0.505**	1				
	超氧化物歧化酶活性	0.723**	-0.241	1			
	发芽势	0.079	0.173	0.311	1		
	根长	0.520**	0.114	0.734**	0.386*	1	
	芽长	0.647**	-0.547**	0.746**	0.268	0.672**	1
+SA	过氧化物酶活性	1					
	过氧化氢酶活性	-0.285	1				
	超氧化物歧化酶活性	0.212	0.368	1			
	发芽势	0.116	0.156	0.544**	1		
	根长	0.212	0.468*	0.772**	0.648**	1	
	芽长	0.304	0.187	0.702**	0.847**	0.821**	1

注:*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平显著相关

子胚根并在根中累积,同时向胚芽转运造成根和芽生长受到明显抑制,进而影响了根和芽的生长^[24]。水杨酸作为一种重要的信号分子在植物抗逆中具有重要的调节作用^[23]。对其他植物在逆境胁迫下的研究发现,添加水杨酸能够显著增强植物的光合作用,促进可溶性糖的积累并且提高抗氧化酶活性^[23]。但也有学者研究发现,对盐胁迫下拟南芥施加水杨酸反而抑制了拟南芥的生长^[25]。本试验中添加 0.5 mmol/L 水杨酸后,黑麦草种子萌发受到了抑制,可能是由于该浓度水杨酸不能缓解铝胁迫对黑麦草种子的抑制效应,同时水杨酸也可能对黑麦草种子的效应较差,因此反而抑制了其萌发,具体原因仍需进一步研究。

SOD、POD、CAT 是植物细胞中清除活性氧的重要保护性酶,其活性是反映植物逆境生理的常用指标^[28]。研究发现,不同浓度 AlCl_3 处理下,黑麦草种子 POD 活性先降后升再降,推测是由于起初 0.2 mmol/L AlCl_3 的处理对种子产生了抑制作用使其 POD 活性下降,而后 0.5 mmol/L AlCl_3 下 POD 活性最强,之后随 AlCl_3 浓度进一步升高,细胞结构受到更严重破坏,酶活性也随之进一步下降;这一现象基本也与陈志刚等的研究一致^[1]。可能是由于种子在适应铝胁迫能够诱导黑麦草产生大量活性氧,因此为适应铝胁迫环境

提高了其体内抗氧化酶活性,激活了抗氧化系统,然而随着 AlCl_3 浓度的进一步上升,黑麦草种子逐渐丧失了对外界铝胁迫环境的调节作用,膜透性增加,造成氧化酶活性逐渐下降。本研究还发现,0.5 mmol/L 水杨酸浸种再用不同浓度 AlCl_3 处理后,POD 的活性整体较无水杨酸时显著提升,活性趋势表现为先缓慢升高再快速达到峰值再迅速下降,基本与无水杨酸处理时趋势一致,可能是由于水杨酸提高了黑麦草种子酶的活性,使种子萌发过程中对活性氧的耐受性更强(图 3)。SOD 的表现与 POD 基本一致,也是活性先降后升到 0.5 mmol/L AlCl_3 处理浓度时达到峰值再下降;而在 0.5 mmol/L 水杨酸浸种后,在不同浓度 AlCl_3 处理下,其 SOD 的活性整体高于未浸种 AlCl_3 处理(图 5)。以上结果也可看出,虽然水杨酸对黑麦草种子萌发并未显示出促进效应,但水杨酸浸种却能够提高黑麦草种子 SOD 活性,这与前人相关研究基本一致^[26-27]。CAT 活性则是在受到铝胁迫后大幅提高,但随着铝浓度的提高逐渐下降,推测是由于 CAT 对铝胁迫的反应更强烈,低浓度 Al^{3+} 就能够显著诱导其活性上升,而后随着铝浓度进一步升高,活性氧破坏加强,酶活性也随之下降;0.5 mmol/L 水杨酸浸种后再用不同浓度 AlCl_3 处理后,CAT 活性总体依然呈现

缓慢下降的趋势,在 AlCl_3 浓度低于 0.2 mmol/L 时其活性高于无水杨酸浸种组,当 AlCl_3 浓度逐渐上升,其活性却低于无水杨酸浸种组(图4)。以上结果说明在较低 AlCl_3 浓度处理下, 0.5 mmol/L 水杨酸浸种能够提高多年生黑麦草种子CAT活性,但随着 AlCl_3 处理浓度的上升,种子内部CAT合成路径可能遭到破坏,因此水杨酸浸种并不能有效提高CAT活性,造成活性逐渐下降。

4 结论

铝胁迫会抑制多年生黑麦草种子根长和芽长的增长,并且 0.5 mmol/L 水杨酸浸种后并不能有效缓解铝胁迫对种子的影响。随着铝胁迫浓度的增加,无水杨酸浸种组多年生黑麦草种子SOD、CAT、POD活性均受到抑制; 0.5 mmol/L 水杨酸浸种增强了多年生黑麦草种子在铝胁迫下的POD活性,但并未增强SOD和CAT活性。

参考文献:

- [1] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等. 铝胁迫对黑麦草根系抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J]. 土壤通报, 2012,43(2):391-395.
- [2] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等. 铝胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 207-210.
- [3] 王艳君,姜彤,许崇育,等. 长江流域1961-2000年蒸发量变化趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2005(3): 99-105.
- [4] 李淮源,刘柏林,邓世媛,等. 铝胁迫对烤烟生长和光合特性的影响[J]. 烟草科技, 2015,48(9):9-13+26.
- [5] 崔雪梅,简君萌,李春生. 铝胁迫对油菜根系及叶片生理生化指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 107-109.
- [6] 王鑫月,张梅娟,熊炳霖,等. 铝胁迫对水稻膜脂组分和含量的影响[J]. 植物生理学报, 2016,52(4):461-470.
- [7] Wang Y P, Dong W, Zhang X, *et al.* Effects of salicylic acid on seed germination and physiological character of cauliflower seedling under stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012,21(1):213-219.
- [8] 孟雪娇,邸昆,丁国华. 水杨酸在植物体内的生理作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010,26(15):207-214.
- [9] 刘杰,杨絮茹,周蕴薇. 水杨酸浸种处理对黑麦草种子萌发及幼苗抗旱性的影响[J]. 草业科学, 2011,28(4): 582-585.
- [10] 黄玉梅,张杨雪,刘庆林,等. 水杨酸对盐胁迫下百日草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(7):97-105.
- [11] 尉春雪,苏浩天,张晓宇,等. 外源水杨酸对草地早熟禾抗褐斑病的诱导与抗病基因PR1和NPR1的表达的影响[J]. 草业科学, 2019,36(5):1249-1254.
- [12] Ma B Y. Research advances in stress physiological adaptation of perennial ryegrass[J]. Journal of Biology, 2010(2):58-61.
- [13] 万里强,石永红,李向林,等. 高温干旱胁迫下三个多年生黑麦草品种叶绿体和线粒体超微结构的变化[J]. 草业学报, 2009,18(1):25-31.
- [14] 王日明,熊兴耀. 高温胁迫对黑麦草生长及生理代谢的影响[J]. 草业学报, 2016,25(8): 81-90.
- [15] 宋鑫. 多年生黑麦草耐盐关键基因的挖掘与关联分析[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- [16] 李惠英,陈良. 盐胁迫对草坪草萌发生长及代谢的影响[J]. 草业科学, 2018,35(11):2584-2592.
- [17] 冯鹏,孙力,申晓慧,等. 多年生黑麦草对Pb、Cd胁迫的响应及富集能力研究[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 153-162.
- [18] 徐卫红,王宏信,刘怀,等. Zn、Cd单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际Zn、Cd形态的影响[J]. 环境科学, 2007(9):2089-2095.
- [19] 初晓辉,张艾青,段新慧,等. 铝胁迫对多花黑麦草生长和生理的影响[J]. 草原与草坪, 2017,37(6):48-56.
- [20] Foy C D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soil[J]. Communications in Soil science and Plant Analysis, 1988,19:957-987.
- [21] Horst W J. The role of the apoplast in aluminum toxicity and resistance of higher plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1995,158:419-428.
- [22] Kochian L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants[J]. Annual Review of Plant Physiol, 1995,46:237-260.
- [23] 邵长安. 外源水杨酸对盐碱胁迫下燕麦生理的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2019.
- [24] 王栋麟,王琳,吴亚,等. 铝胁迫下添加水杨酸对黑麦草生理及叶绿素荧光参数的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(6):88-97.
- [25] Borsanio, Valpuest V, Botella M A. Evidence for a role

- of Salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in *Arabidopsis* seedlings [J]. *Plant Physiology*, 2001, 126(3):1024–1030.
- [26] 李妍. 铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(3): 514–517.
- [27] 张争艳. 大豆对铝胁迫响应的研究[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2008.
- [26] 李妍. 铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量

Effects of salicylic acid seed soaking on seed germination of *Lolium perenne* under different aluminum stress

CHEN Qian-wei, SONG Xin*

(Key Laboratory of Regulation of Crop Growth and Development in Jiangxi Province / College of Life Science and Resources and Environment, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: [Objective] The study is carried out to investigate the effects of salicylic acid seed soaking on seed germination of *Lolium perenne* under different aluminum stress. [Method] The seeds of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) 'Secale Cereale 70' were used as experimental materials and were divided into two groups. One group was soaked without salicylic acid, and the other group was soaked with 0.5 mmol/L salicylic acid (SA). Seven AlCl₃ solutions with different concentrations (0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 mmol/L) were used to treat the seeds of the two groups of ryegrass. [Result] The results showed as follows: 1) Germination potential and germination rate of seeds in salicylic acid-free soaking group were not significantly affected by various concentrations of aluminum stress. When AlCl₃ concentration reached 10.0 mmol/L, seed germination and germination rate were significantly inhibited in 0.5 mmol/L salicylic acid soaking group. 2) The seed bud length and root length of both groups decreased significantly with the increase of AlCl₃ treatment concentration; 3) With the increase of Al stress concentration, the activities of SOD, CAT and POD of perennial ryegrass seeds in salicylic acid free soaking group were inhibited. 0.5 mmol/L salicylic acid soaking increased POD activity of perennial ryegrass seeds under Al stress, but did not increase SOD and CAT activities. [Conclusion] Salicylic acid seed soaking could enhance POD activity of the antioxidant system of perennial wild ryegrass under aluminum stress, but the promotion effect on seed germination was not significant.

Key words: aluminum stress; *Lolium perenne*; salicylic acid; seed germination; enzymatic activity