

王丹丹, 李娟. 锑胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 823-830.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.002

锑胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发的影响

王丹丹^{1,2}, 李娟^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验培育基地, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 通过种子萌发试验, 探究了锑(Sb)胁迫下不同浓度硅酸钠(1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L)和氯化钙(5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L)对水稻种子萌发的影响。结果表明: 在Sb(5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L)胁迫下, 水稻种子发芽势、发芽率、活力指数及根、芽干质量均受到抑制。2 mmol/L硅酸钠单独处理使水稻种子发芽势、发芽率、活力指数、根、芽长及根、芽干质量均显著高于空白对照。氯化钙单独处理时, 水稻种子发芽势、发芽率、活力指数随着氯化钙浓度的增加逐渐降低, 20 mmol/L氯化钙单独处理对水稻种子发芽势、发芽率、活力指数、根长及根、芽干质量均产生显著抑制作用。Sb质量浓度为5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L时, 1 mmol/L硅酸钠使水稻种子发芽势、发芽率、活力指数、根、芽长及根、芽干质量显著增加。添加5 mmol/L氯化钙能显著减轻Sb对水稻种子发芽势、发芽率、活力指数及根、芽干质量的抑制, 20 mmol/L氯化钙对水稻种子发芽势、发芽率和活力指数及根、芽干质量的影响随Sb质量浓度增加呈先增后减的趋势, 且并未缓解5 mg/L Sb对水稻种子萌发的毒害作用。因此, Sb胁迫对水稻种子萌发产生严重抑制。Sb胁迫下, 添加1 mmol/L硅酸钠和5 mmol/L氯化钙可显著增加水稻种子发芽势、发芽率、活力指数及根、芽干质量, 有效缓解Sb对水稻的毒害作用。

关键词: 锑; 水稻; 种子萌发; 改良剂

中图分类号: S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-0823-08

Effects of different modifiers on the germination of rice seeds under antimony stress

WANG Dan-dan^{1,2}, LI Juan^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. National Key Experimental and Cultivation Base of Karst Mountain Ecological Environment in Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

收稿日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州喀斯特科学研究中心项目(U1612442); 贵州省科技计划项目[黔科合基础(2019)1238号]; 贵州省普通高校科技拔尖人才支撑计划项目[黔教合KY字(2018)040]; 贵州省科技厅科技平台及人才团队计划项目[黔科合平台人才(2018)5609]; 贵州省百层次创新人才计划项目[黔科合平台人才(2020)6010]; 贵州师范大学2017年度学术新苗培养及创新探索专项[黔科合平台人才(2017)5726-55]

作者简介: 王丹丹(1996-), 女, 贵州凤冈人, 硕士研究生, 研究方向为重金属污染修复。(E-mail)1160661597@qq.com

通讯作者: 李娟, (E-mail)626901561@qq.com

Abstract: The effects of different concentrations of sodium silicate (1 mmol/L, 2 mmol/L, 4 mmol/L) and calcium chloride (5 mmol/L, 10 mmol/L, 20 mmol/L) on rice seed germination under antimony (Sb) stress were studied by seed germination experiment. The results showed that the germination potential, germination rate, vigor index and dry weight of root and bud of rice seeds were inhibited under the stress of Sb (5 mg/L, 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L). The germination potential, germination rate, vigor index, root and bud length and dry weight of root and bud of rice seeds in the treatment of 2 mmol/L sodium silicate were significantly higher than those in con-

trol. The germination potential, germination rate and vigor index of rice seeds gradually decreased with the increase of calcium chloride concentration. The germination potential, germination rate, vigor index, root length and dry weight of root and bud were significantly inhibited in the treatment of 20 mmol/L calcium chloride. When the concentration of Sb was 5 mg/L, 10 mg/L, 20 mg/L and 30 mg/L, 1 mmol/L sodium silicate significantly increased the germination potential, germination rate, vigor index, root and bud length and dry weight of root and bud. The addition of 5 mmol/L calcium chloride could significantly reduce the inhibition of Sb on the germination potential, germination rate, vigor index and dry weight of root and bud of rice seeds. The effects of 20 mmol/L calcium chloride on the germination potential, germination rate, vigor index and dry weight of root and bud of rice seeds increased first and then decreased with the increase of Sb concentration, and the toxic effect of 5 mg/L Sb on the germination of rice seeds was not alleviated. Therefore, the germination of rice seeds was seriously inhibited by Sb stress. Under Sb stress, the addition of 1 mmol/L sodium silicate and 5 mmol/L calcium chloride can significantly increase the germination potential, germination rate, vigor index and dry weight of roots and buds, and effectively alleviate the toxic effect of Sb on rice.

Key words: antimony; rice; seed germination; improver

锑(Sb)被欧盟列为高危害有毒物质和可致癌物质,中国将 Sb 定义为第一类污染物。2014 年全国土壤污染调查公报显示,全国土壤总点位超标率为 16.1%,从土地利用类型看,耕地、林地、草地土壤点位超标率分别为 19.4%、10.0%、10.4%^[1],耕地重金属污染问题日益严重。中国是全球 Sb 生产大国,长期以来的 Sb 矿开采导致中国土壤 Sb 污染加剧^[2-4]。中国 Sb 矿主要分布于湖南省、广西壮族自治区、贵州省等南方地区,锑矿区周围土壤中 Sb 含量高达 17.23~1 438.00 mg/kg,远高于湖南省(2.98 mg/kg)和贵州省(2.24 mg/kg)背景值^[5]。刘灵飞等^[6]对贵州省晴隆县锑矿区周围农田土壤中 Sb 含量测定结果显示,该地区土壤中 Sb 含量(13.65~410.91 mg/kg)远高于贵州省背景值(2.24 mg/kg)。李航彬等^[7]调查发现湖南冷水江锡矿山及其他矿区周边土壤中 Sb 含量高达 2 158 mg/kg,是湖南省土壤背景值的 722 倍。Sb 的用途十分广泛,它是一种具有慢性毒性的有毒类金属,也是一种人体和植物的非必需元素,植物体内高浓度的 Sb 会毒害植物细胞。朱婷婷等^[8]通过水培试验探究了 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)对水稻根伸长抑制的毒性,发现 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)对水稻根伸长均有抑制作用。黄艳超等^[9]研究发现,苗期水稻根表铁膜、根、茎叶中 Sb 含量随 Sb(V)浓度增加而升高,但 Sb 从根向上部的转运及 Sb 在各部位的积累仅与水稻品种有关。植物吸收富集 Sb 后通过食物链进入人体,人体内 Sb 超过一定量后会导致人体患上癌症和急性肾功能衰竭等疾病^[10-12]。

硅是植物生长营养元素和植物细胞壁的组成成

分之一,土壤中硅含量占土壤元素总量 26%左右。水稻(*Oryza sativa* L.)是一种典型的喜硅植物,施硅能促进水稻植株根系活性及对营养的吸收^[13]。外源施加含硅物质可以提高水稻生物量和产量,促进水稻生长,还可以有效抑制水稻对重金属的吸收^[14]。张志雯等^[15]研究发现,适当浓度的硅可以在一定程度上缓解铬、铜胁迫对小麦幼苗造成的伤害。张敏等^[16]研究结果表明,砷胁迫下水稻种子萌发时添加外源硅或采用硅处理液浸种均可促进水稻种子萌发和幼苗生长,并降低幼苗砷累积和缓解砷对水稻幼苗的毒性。氯化钙是常见的钙肥原料之一,能为植物生长提供必需的钙营养元素^[17],对植物细胞膜的稳定性、完整性以及植物光合作用都有重要影响^[18]。外源施加钙能促进植物生长,增加植物对重金属的抗性,降低重金属对苕麻[*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich.]、玉米(*Zea mays* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)等的毒害作用^[19-21]。贾倩等^[22]研究发现,在铅(Pb)、镉(Cd)污染地区,可以通过施用硅钙肥降低稻谷中 Pb、Cd 的浓度从而降低铅镉污染的风险。稻米是当今世界 50%以上人口的主食和中国主要粮食之一,在中国水稻种植面积约 3×10^7 hm²,约占全国粮食作物种植面积 27.2%^[23]。因此,研究重金属对水稻生长状况的影响及缓解重金属的毒害十分必要。

目前,有关硅酸钠和氯化钙对重金属胁迫的缓解作用已有相关研究,但关于 Sb 胁迫对水稻萌发的影响以及不同浓度硅酸钠和氯化钙缓解 Sb 对水稻萌发毒性的研究相对较少。本研究以水稻种子为研究对象,分析 Sb 胁迫下不同浓度硅酸钠和氯化钙对

水稻种子萌发和幼苗生长的影响,为进一步探明硅酸钠和氯化钙缓解 Sb 胁迫提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 水稻品种 水稻品种选用南粳 2728, 粳型常规水稻, 属中熟中粳稻品种。

1.1.2 化学试剂 试验所用试剂酒石酸锑钾($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2$)、氯化钙($CaCl_2$)和硅酸钠(Na_2SiO_3)均为分析纯。

1.2 试验方法

设 5 个 Sb 处理质量浓度, 分别为 0 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L, 每个 Sb 质量浓度中均设不加改良剂和加改良剂 2 种处理。改良剂浓度为: 氯化钙浓度 5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L, 硅酸钠浓度 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L。共计 35 处理, 每个处理 3 个重复。选取大小均匀、颗粒饱满的水稻种子浸泡于装有 15% 过氧化氢(H_2O_2) 的烧杯中搅拌消毒 20 min 后, 去离子水浸泡并冲洗 6~8 次, 再用去离子水浸泡 24 h, 沥干水分后于 28 °C 的智能光照培养箱中避光催芽 24 h。随后挑选长势一致的种子均匀平铺在有 2 层滤纸的培养皿(每个培养皿 30 粒)中, 放置培养箱中进行萌发(25 °C/12 h 黑暗、28 °C/12 h 光照), 同时用去离子水进行空白对照试验。以后每 24 h 向培养皿中加入 5 ml 处理液, 保证水稻种子在湿润条件下生长。试验期间定期观察记录种子萌发情况。

1.3 水稻种子萌发参数测定

胚根长与种子长相等, 胚芽长为种子长一半时记为有效萌发。发芽势 = 3 d 内有效发芽的种子数/种子总数 $\times 100\%$; 发芽率 = 7 d 内有效发芽的种子数/种子总数 $\times 100\%$; 活力指数 = 发芽率 \times 平均幼苗长度(根长 + 芽长)。

1.4 水稻幼苗生物量测定

待各处理的水稻幼苗生长 7 d 后, 将幼苗用蒸馏水冲洗干净, 用滤纸吸干表面水分, 每个处理随机取 5 株, 用精确到 0.1 cm 的直尺测定水稻幼苗的根长、芽长(最长根长、芽长)。将水稻幼苗分为根和芽两部分称量鲜质量, 然后将根和芽剪下装入信封袋中, 在 105 °C 杀青 15 min 后, 70 °C 干燥 48 h, 称量根、芽的干质量。

1.5 数据处理

所有试验数据均采用 SPSS 23 和 Microsoft Excel 2007 软件以及 Origin 2017 进行分析和图、表绘制, 并对不同处理间的试验数据用单因素方差分析(ANOVA)比较各处理间的差异显著性。若没有另外说明, 数据均为 3 次重复试验的平均值。

2 结果与分析

2.1 Sb 胁迫下硅酸钠和氯化钙对水稻种子萌发发芽势、发芽率、活力指数的影响

硅酸钠对 Sb 胁迫下水稻种子萌发发芽势、发芽率、活力指数的影响见表 1。Sb 质量浓度为 0 mg/L 时, 2 mmol/L 硅酸钠处理的发芽势显著高于 0 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠处理, 1 mmol/L、2 mmol/L 硅酸钠处理的发芽率和活力指数均显著高于 0 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠处理。Sb 质量浓度为 5 mg/L 时, 1 mmol/L、2 mmol/L 硅酸钠处理的发芽势均显著高于 0 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠处理, 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠处理的发芽率和活力指数均显著高于不加改良剂处理, 但 1 mmol/L 处理和 2 mmol/L 处理间差异不显著。Sb 质量浓度为 10 mg/L 时, 水稻发芽势和活力指数均为施加 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠显著高于不加改良剂处理, 但 1 mmol/L 处理和 2 mmol/L 处理间差异不显著; 发芽率与 Sb 质量浓度为 0 mg/L 时变化一致。Sb 质量浓度为 20 mg/L 时, 水稻种子的发芽势与 Sb 质量浓度为 5 mg/L 时变化一致, 水稻种子的发芽率亦与 Sb 质量浓度为 0 mg/L 时变化一致; 活力指数在硅酸钠浓度为 1 mmol/L 时最大, 显著高于其他处理, 且各处理间差异显著。Sb 质量浓度为 30 mg/L 时, 发芽势和发芽率在 1 mmol/L 硅酸钠处理时最大, 显著高于其他处理; 发芽势各处理间差异显著, 但发芽率在 0 mmol/L 处理和 4 mmol/L 硅酸钠处理间无明显差异; 活力指数在硅酸钠浓度为 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 时均显著高于 0 mmol/L, 但三者间差异不显著。

氯化钙对 Sb 胁迫下水稻种子萌发发芽势、发芽率、活力指数的影响见表 2。Sb 质量浓度为 0 mg/L 时, 施加 5 mmol/L 氯化钙处理的发芽势和发芽率显著高于施加 0 mmol/L、20 mmol/L 氯化钙处理, 其他处理间差异不显著; 施加 5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L 氯化钙的活力指数与不加改良剂处理存在显

著差异。Sb 质量浓度为 5 mg/L 时,施加 5 mmol/L 氯化钙的发芽势显著高于其他处理,但 0 mmol/L 氯化钙处理和 20 mmol/L 氯化钙处理间无明显差异;发芽率和活力指数变化一致,均为施加 5 mmol/L、10 mmol/L 氯化钙处理显著高于 0 mmol/L、20 mmol/L 氯化钙处理。Sb 质量浓度为 10 mg/L 时,发芽势在 5 mmol/L 氯化钙处理时达到最大,显著高于其他处理,且各处理间差异显著;发芽势和活力指数与锑质量浓度为 5 mg/L 时变化一致。Sb 质量浓度为 20 mg/L 时,5 mmol/L 氯化钙处理使水稻种子发芽势和活力指数达到最大,且显著高于其他处理。发芽势、发芽率和活力指数在 Sb 质量浓度为 30 mg/L 时的变化趋势一致,均为施加 5 mmol/L 氯化钙处理的发芽势、发芽率和活力指数显著高于其他处理。

表 1 硅酸钠对 Sb 胁迫下水稻种子萌发发芽势、发芽率、活力指数的影响

Table 1 Effects of sodium silicate on germination potential, germination rate and vigor index of rice seeds under antimony (Sb) stress

Sb 质量浓度 (mg/L)	硅酸钠浓度 (mmol/L)	发芽势 (%)	发芽率 (%)	活力指数
0	0	0.60±0.08b	0.71±0.05b	7.67±1.54b
	1	0.80±0.10ab	0.93±0.04a	14.46±1.69a
	2	0.89±0.05a	0.96±0.02a	15.71±0.88a
	4	0.63±0.17b	0.74±0.10b	9.44±1.30b
5	0	0.58±0.07b	0.61±0.02c	5.42±0.32c
	1	0.90±0.07a	0.95±0.04a	15.53±0.85a
	2	0.80±0.07a	0.92±0.02a	15.31±0.21a
	4	0.59±0.05b	0.72±0.05b	10.64±0.34b
10	0	0.29±0.05c	0.58±0.05b	3.93±0.31c
	1	0.81±0.04a	0.87±0.04a	12.73±1.13a
	2	0.79±0.09a	0.86±0.08a	12.14±0.67a
	4	0.48±0.09b	0.54±0.08b	7.94±1.23b
20	0	0.22±0.17b	0.52±0.11b	2.36±0.70d
	1	0.81±0.04a	0.84±0.05a	8.70±0.42a
	2	0.79±0.09a	0.73±0.04a	7.46±0.48b
	4	0.48±0.09b	0.51±0.08b	4.87±0.75c
30	0	0.13±0.04d	0.43±0.07c	1.69±0.20b
	1	0.69±0.05a	0.81±0.05a	4.10±0.31a
	2	0.51±0.02b	0.69±0.03b	3.89±0.11a
	4	0.33±0.09c	0.49±0.03c	3.70±0.75a

同一 Sb 质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 氯化钙对 Sb 胁迫下水稻种子萌发发芽势、发芽率、活力指数的影响

Table 2 Effects of calcium chloride on germination potential, germination rate and vigor index of rice seeds under Sb stress

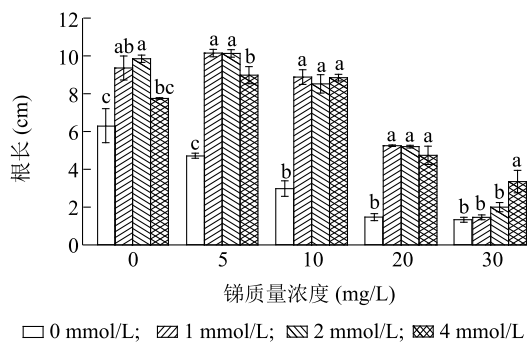
Sb 质量浓度 (mg/L)	氯化钙浓度 (mmol/L)	发芽势 (%)	发芽率 (%)	活力指数
0	0	0.60±0.08b	0.71±0.05bc	7.67±1.54c
	5	0.90±0.03a	0.93±0.04a	11.90±1.61a
	10	0.80±0.07a	0.89±0.02ab	10.87±0.51a
	20	0.53±0.15b	0.59±0.19c	4.80±1.09b
5	0	0.58±0.07bc	0.61±0.02b	5.42±0.32b
	5	0.87±0.04a	0.92±0.08a	10.89±1.04a
	10	0.73±0.10ab	0.87±0.04a	10.77±0.69a
	20	0.39±0.18c	0.49±0.22b	4.53±2.29b
10	0	0.29±0.05d	0.58±0.05b	3.93±0.31b
	5	0.86±0.02a	0.91±0.05a	10.74±1.19a
	10	0.68±0.09b	0.86±0.05a	10.08±1.72a
	20	0.48±0.10c	0.56±0.08b	5.32±0.87b
20	0	0.22±0.17c	0.52±0.11c	2.36±0.70c
	5	0.84±0.02a	0.93±0.02a	8.41±0.66a
	10	0.61±0.08b	0.89±0.12ab	8.02±1.80a
	20	0.63±0.09b	0.59±0.10b	5.99±0.56b
30	0	0.13±0.04c	0.43±0.07c	1.69±0.20c
	5	0.82±0.02a	0.90±0.03a	5.98±1.08a
	10	0.65±0.04b	0.75±0.04b	4.06±0.98b
	20	0.61±0.12b	0.68±0.13b	3.62±0.66b

同一 Sb 质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 Sb 胁迫下硅酸钠和氯化钙对水稻种子萌发根长、芽长的影响

由图 1 可知, Sb 质量浓度越高对根长抑制越强。与空白对照相比, 1 mmol/L 和 2 mmol/L 硅酸钠单独处理显著促进根的生长。当 Sb 质量浓度为 5 mg/L、10 mg/L 和 20 mg/L 时, 与空白对照相比添加 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠均能使水稻根长显著增加; 当 Sb 质量浓度为 30 mg/L 时, 随着硅酸钠浓度的增加对根长的促进效果越好, 4 mmol/L 硅酸钠处理显著高于其他各处理, 与空白对照相比使根长显著提高 2.02 cm。由图 2 所示, 添加 5 mmol/L 和 10 mmol/L 氯化钙与不添加改良剂处理间无明显差异, 20 mmol/L 的氯化钙使根长与对照相比显著减少 34.39%。在 5 mg/L Sb 胁迫下, 根长在 5 mmol/L 和 10 mmol/L 氯化钙处理下显著高于 0

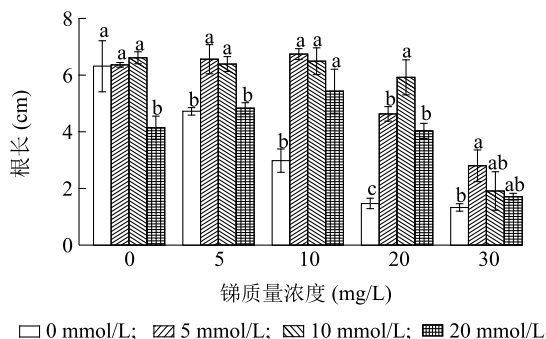
mmol/L和20 mmol/L氯化钙处理。添加5 mmol/L、10 mmol/L和20 mmol/L氯化钙处理在Sb质量浓度为10 mg/L和20 mg/L时,根长均显著高于未添加氯化钙的处理。当Sb质量浓度为30 mg/L时,添加5 mmol/L氯化钙使根长显著增加。



同一Sb质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 Sb胁迫下硅酸钠对水稻种子萌发根长的影响

Fig.1 Effects of sodium silicate on root length of rice under Sb stress



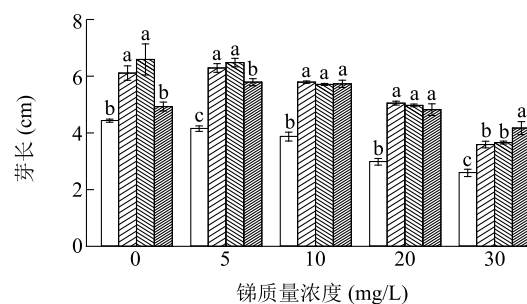
同一Sb质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 Sb胁迫下氯化钙对水稻种子萌发根长的影响

Fig.2 Effects of calcium chloride on root length of rice under Sb stress

Sb胁迫下硅酸钠对水稻芽长的影响如图3所示,水稻芽长随Sb质量浓度增加而减小。在硅酸钠单独处理下,外源添加1 mmol/L、2 mmol/L的硅酸钠单独处理均能使水稻芽长显著提高,比空白对照分别高出37.92%、48.76%,4 mmol/L的硅酸钠对水稻芽长的促进作用并未达到显著水平。在5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb胁迫下,添加1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L硅酸钠均能显著增加水稻芽长,其中,Sb质量浓度为30 mg/L时,4 mmol/L硅酸钠处理水稻芽长显著高于其他各处理。图4为Sb胁迫下氯

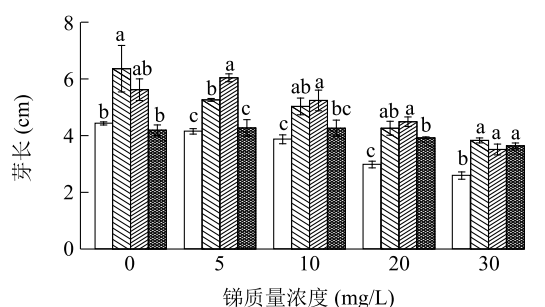
化钙对水稻芽长的影响,可以看出,氯化钙单独处理下,除氯化钙浓度为20 mmol/L时的水稻芽长比空白对照减少0.24 cm外,其他处理均高于对照。当Sb质量浓度为5 mg/L时,添加5 mmol/L和10 mmol/L氯化钙均显著促进水稻芽的生长,10 mmol/L氯化钙使水稻芽长显著增加45.54%;当Sb质量浓度为10 mg/L时,添加10 mmol/L氯化钙使水稻芽长显著增加35.40%;当Sb质量浓度为20 mg/L时,添加5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L氯化钙使水稻芽长显著高于未添加氯化钙处理;当Sb质量浓度为30 mg/L时,添加5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L氯化钙使水稻芽长显著高于未添加氯化钙处理,但添加氯化钙各处理间差异并不显著。



同一Sb质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 Sb胁迫下硅酸钠对水稻种子萌发芽长的影响

Fig.3 Effects of sodium silicate on bud length of rice under Sb stress



同一Sb质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

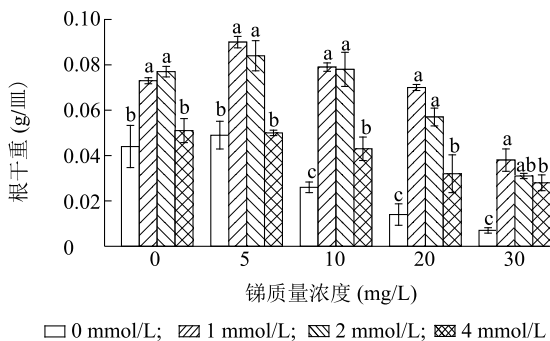
图4 Sb胁迫下氯化钙对水稻种子萌发芽长的影响

Fig.4 Effects of calcium chloride on bud length of rice under Sb stress

2.3 Sb胁迫下硅酸钠和氯化钙对水稻种子萌发根、芽干质量的影响

由图5可以看出,1 mmol/L、2 mmol/L硅酸钠单

独处理使根干质量分别比空白对照显著增加 65.91%、75.00%, Sb 质量浓度为 5 mg/L 时外源添加硅酸钠处理与硅酸钠单独处理时变化一致。当 Sb 质量浓度为 10 mg/L 和 20 mg/L 时, 根干质量变化趋势一致, 均为施加 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠显著促进根干质量的增加。当 Sb 质量浓度为 30 mg/L 时, 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠均显著增加根干质量。图 6 为 Sb 胁迫下氯化钙对根干质量的影响, 单独添加 5 mmol/L、10 mmol/L 氯化钙使根干质量比空白对照显著提高, 20 mmol/L 氯化钙对水稻根干质量有显著抑制作用。Sb 质量浓度为 5 mg/L 时, 施加 5 mmol/L 氯化钙处理根干质量达到最大值, 且显著高于未添加氯化钙处理。在 10 mg/L Sb 胁迫下, 施加 5 mmol/L、10 mmol/L 氯化钙处理根干质量显著高于 0 mmol/L、20 mmol/L 氯化钙处理。Sb 质量浓度为 20 mg/L 和 30 mg/L 时, 外源加入 5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L 氯化钙均能显著促进根干质量的增加。

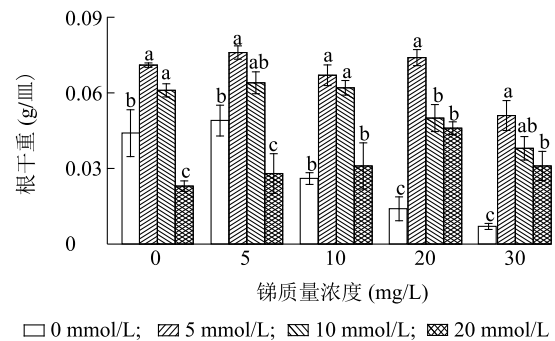


同一 Sb 质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 Sb 胁迫下硅酸钠对水稻种子萌发根干质量的影响

Fig.5 Effects of sodium silicate on dry weight of rice roots under Sb stress

与空白对照相比, 当 Sb 质量浓度为 5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L 时, 芽干质量随 Sb 质量浓度的增加而降低 (图 7)。1 mmol/L、2 mmol/L 硅酸钠单独处理芽干质量显著高于 0 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠处理。在 10 mg/L、30 mg/L Sb 胁迫下, 添加 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L 硅酸钠均能显著促进芽干质量的增加, 且在硅酸钠浓度为 1 mmol/L 时达到最大值。图 8 为 Sb 胁迫下氯化钙对芽干质量影响, 在氯化钙单独处理下, 5 mmol/L 和 10 mmol/L 氯

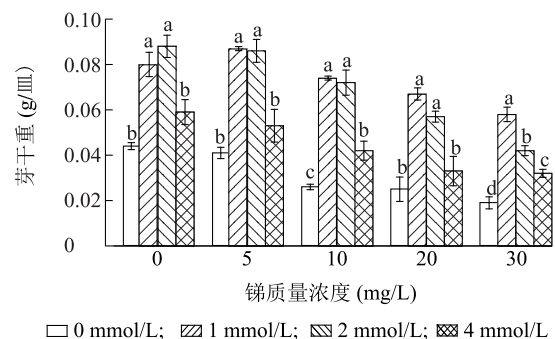


同一 Sb 质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 Sb 胁迫下氯化钙对水稻种子萌发根干质量的影响

Fig.6 Effects of calcium chloride on dry weight of rice roots under Sb stress

化钙明显增加芽干质量, 20 mmol/L 氯化钙抑制了芽的生长, 使芽干质量与空白对照相比降低 29.55%。在 5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb 胁迫下, 5 mmol/L 氯化钙使芽干质量与未添加氯化钙处理相比显著提高。Sb 质量浓度为 10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L, 当氯化钙浓度为 20 mmol/L 时显著促进芽的生长。



同一 Sb 质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 Sb 胁迫下硅酸钠对水稻种子萌发芽干质量的影响

Fig.7 Effects of sodium silicate on dry weight of rice bud under Sb stress

3 讨论

水稻一旦受到重金属污染, 就会对水稻的正常生长以及生理特性产生影响。萌发是水稻生命周期中的关键一环, 对水稻整个生长发育过程具有重要影响。种子的发芽能力通过萌发时的发芽势、发芽率和活力指数等指标体现, 根、芽长及根、芽干质量

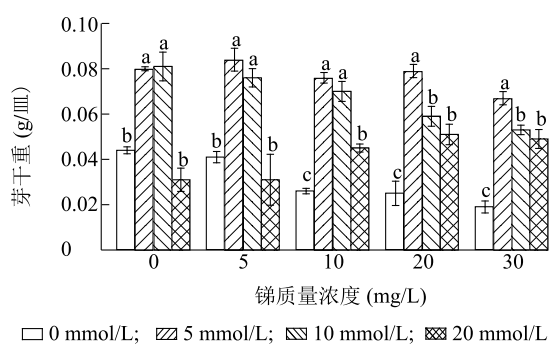


图8 Sb胁迫下氯化钙对水稻种子萌发芽干质量的影响
同一Sb质量浓度处理下添加不同浓度改良剂处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图8 Sb胁迫下氯化钙对水稻种子萌发芽干质量的影响

Fig.8 Effects of calcium chloride on dry weight of rice bud under Sb stress

对水稻产量和品质有重要影响^[24-25],因此减缓重金属对水稻种子萌发的毒害作用有利于水稻后期产量的提高。Sb是砷(As)的同族元素,具有相似的化学性质。黄益宗等^[26]、刘书锦等^[27]研究发现,As胁迫对水稻种子萌发的发芽势、发芽率等表现出严重抑制作用。本研究结果显示,在5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb胁迫下水稻种子发芽势、发芽率、活力指数均受到抑制,分别比对照降低3.33%~78.33%、14.08%~39.44%、29.34%~69.23%。硅酸钠单独处理时,2 mmol/L硅酸钠能显著促进水稻种子发芽势、发芽率和活力指数的增加,4 mmol/L硅酸钠处理与空白对照相比并未达到显著水平,这与赵红等^[28]、张敏等^[29]的研究结果一致。在5~30 mg/L Sb胁迫下,加入1 mmol/L、2 mmol/L硅酸钠均能在一定程度上显著促进水稻种子发芽势、发芽率和活力指数的提升,尤以1 mmol/L硅酸钠效果最佳。本研究结果表明,氯化钙单独处理时水稻种子发芽势、发芽率和活力指数与氯化钙浓度呈反比,且20 mmol/L氯化钙单独处理对水稻种子发芽势、发芽率及活力指数均产生抑制作用,这与吕朝燕等^[30]研究结果一致。在5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb胁迫下,添加5 mmol/L氯化钙能显著减轻Sb的毒害作用,促进水稻种子发芽势、发芽率和活力指数的提高。20 mmol/L氯化钙对20 mg/L和30 mg/L Sb胁迫的水稻种子发芽势和发芽率有显著促进作用。

根系是植物吸收积累生长所需养分和水分的主要器官^[31-33],且根、芽生长对外界环境十分敏感^[34],

根长和芽长是判断萌发后期水稻幼苗对重金属抗性大小的重要指标。本研究发现,随着Sb质量浓度的增加根长、芽长比对照分别降低25.20%~78.92%、6.32%~41.53,这可能是因为根最先与生长环境中的物质接触,从而吸收、积累了重金属Sb对水稻根系细胞组织产生破坏,随着根系中Sb向地上部分运输,对芽的生长也产生抑制作用。除4 mmol/L硅酸钠单独处理外,其他硅酸钠单独处理与空白对照相比均能显著提高根长、芽长。镉质量浓度为5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L时1 mmol/L、2 mmol/L和4 mmol/L硅酸钠处理与未添加硅酸钠处理相比,均显著促进根、芽的生长,以1 mmol/L硅酸钠对根生长促进效果最优。Sb质量浓度为30 mg/L时,随着硅酸钠浓度的增加对根、芽生长的促进效果越好,以4 mmol/L硅酸钠作用最显著。外源单独添加5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L氯化钙对根长、芽长的影响存在差异。其中,5 mmol/L和10 mmol/L氯化钙单独处理与空白对照相比,虽然对根长、芽长有一定促进作用,但是未达到显著水平;20 mmol/L氯化钙显著抑制根、芽的生长。在5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb胁迫下,5 mmol/L氯化钙对根、芽的生长具有显著促进作用。

单独添加1 mmol/L、2 mmol/L硅酸钠均能显著促进水稻的生长,尤以2 mmol/L硅酸钠效果最佳,分别使根干质量、芽干质量增加75%、100%,4 mmol/L硅酸钠对根、芽干质量促进作用并不显著。在5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L Sb胁迫下,添加1 mmol/L和2 mmol/L硅酸钠对根、芽干质量的影响均达到显著水平,尤以1 mmol/L硅酸钠效果最佳,使根干质量分别增加83.67%、203.85%、400.00%、442.86%,芽干质量分别增加112.20%、184.62%、168.00%、205.26%,这与向猛等的研究结果一致^[35]。随着氯化钙浓度的增加根、芽干质量呈先增加后降低的趋势,20 mmol/L氯化钙对根、芽干质量均表现出抑制作用。向猛等研究发现,添加20 mmol/L氯化钙可显著提高水稻茎叶和根系的干质量^[36]。与本研究结果存在差异,可能是由于研究的水稻品种不同。当溶液中Sb质量浓度为5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L时,加入5 mmol/L氯化钙显著促进根、芽干质量的增加。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中

- 国环保产业,2014(5):10-11.
- [2] 何孟常,万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J].化学进展,2004(1):131-135.
- [3] 龙健,张菊梅,李娟,等. 锑矿区土壤锑和砷的污染状况及其修复植物的筛选——以贵州独山东峰锑矿区为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(2):1-9.
- [4] 刘灵飞,李娟,龙健,等. 喀斯特山区晴隆锑矿不同介质锑砷污染特征研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2014,32(4):83-87.
- [5] 殷志遥,和君强,刘代欢,等. 我国土壤锑污染特征研究进展及其富集植物的应用前景初探[J].农业资源与环境学报,2018,35(3):199-207.
- [6] 刘灵飞,龙健,万洪富,等. 贵州喀斯特山区锑冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J].土壤,2013,45(6):1036-1047.
- [7] 李航彬,杨志辉,袁平夫,等. 湘中锑矿区土壤重金属锑的污染特征[J].环境科学与技术,2011,34(1):70-74,127.
- [8] 朱婷婷,王玉军,周东美,等. Sb(Ⅲ)和Sb(Ⅴ)对水稻根伸长抑制的生态毒性研究[J].农业环境科学学报,2018,37(9):1811-1817.
- [9] 黄艳超,胡莹,刘云霞,等. 苗期水稻吸收、转运Sb(Ⅴ)的研究[J].江苏农业科学,2015,43(10):68-70.
- [10] PAN X, ZHANG D, CHEN X, et al. Antimony accumulation, growth performance, antioxidant defense system and photosynthesis of *Zea mays* in response to antimony pollution in soil[J].Water, Air and Soil Pollution, 2011, 215:517-523.
- [11] MAITY J P, NATH B, KAR S, et al. Arsenic-induced health crisis in periurban Moyna and Ardebok villages, West bengal, India: an exposure assessment study[J].Environmental Geochemistry and Health, 2012, 34:563-574.
- [12] 熊佳,韩志伟,吴攀,等. 独山锑冶炼厂周边土壤锑砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J].环境科学学报,2020,40(2):655-664.
- [13] 张万洋,李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J].中国土壤与肥料,2020(4):231-239.
- [14] 张佳,李军,董善辉,等. 硅对外源镉在水稻籽实中积累及水稻产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2009,40(2):224-226.
- [15] 张志雯,秦素平,陈于和,等. 硅对铬、铜胁迫下小麦幼苗生理生化指标的影响[J].华北农学报,2014,29(S1):229-233.
- [16] 张敏,孙宇,冯宇佳,等. 硅促进水稻种子萌发及缓解幼苗砷毒性的效应研究[J].生态毒理学报,2017,12(1):243-250.
- [17] 滕浪,何腾兵,付天岭,等. 镉离子胁迫下钙镁离子对水稻种子萌发期耐镉性的影响[J].种子,2020,39(1):18-25.
- [18] 叶文玲,吴凡,方清,等. 外源钙对镉胁迫下植物生长及耐镉机制研究[J].安徽农业大学学报,2020,47(2):237-242.
- [19] 龚小敏,刘云国,黄丹莲,等. 外源钙对镉胁迫下苎麻生长及生理代谢的影响[J].环境工程学报,2016,10(7):3866-3870.
- [20] 王芳,李永生,王汉宁,等. 钙对铅胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):202-207.
- [21] 赵腾飞,刘颖,王尔美,等. 外源钙离子对铅胁迫下小麦膜脂过氧化和根系活力的影响[J].安徽农业大学学报,2017,44(3):508-512.
- [22] 贾倩,胡敏,张洋洋,等. 硅钙肥对水稻吸收铅、镉的影响研究[J].环境科学与技术,2017,40(6):24-30.
- [23] 黄莹泽,邱炳文,何玉花,等. 东北地区水稻扩张的海拔优势区间分析[J].地理科学进展,2020,39(9):1557-1564.
- [24] 刘玉玲,彭鸥,铁柏清,等. *Delftia* sp. b9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1855-1863.
- [25] 王泽正,杨亮,李婕,等. 微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(1):44-53.
- [26] 黄益宗,蒋航,王农,等. 外源褪黑素对不同价态砷胁迫下水稻种子萌发和生理指标的影响[J].生态学报,2018,37(6):1730-1737.
- [27] 刘书锦,黄益宗,李颜,等. 外源亚精胺对水稻吸收积累砷的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2172-2180.
- [28] 赵红,罗朝晖,夏瑾华,等. 硅、铜对水稻种子萌发及幼苗生长发育的影响[J].湖南农业科学,2010(21):48-49,52.
- [29] 张敏,孙宇,冯宇佳,等. 硅促进水稻种子萌发及缓解幼苗砷毒性的效应研究[J].生态毒理学报,2017,12(1):243-250.
- [30] 吕朝燕,田维怡. 钙离子胁迫对3种牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(4):56-61.
- [31] 李春华,汪吉东,张辉,等. 磷缺乏对不同甘薯品种根系生长及磷素吸收的影响[J].江苏农业学报,2019,35(1):91-95.
- [32] 马存金,陈剑秋,李日鹏,等. 水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响[J].江苏农业科学,2019,47(13):179-182.
- [33] 朱忠锐,范永申,段福义,等. 喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):174-178.
- [34] 李海燕,丁雪梅,周婵,等. 盐胁迫对三种盐生禾草种子萌发及其胚生长的影响[J].草地学报,2004,12(1):45-50.
- [35] 向猛,黄益宗,蔡立群,等. 水稻吸收积累硅和砷的相互影响水培试验研究[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2090-2097.
- [36] 向猛,黄益宗,蔡立群,等. 外源钙对两种价态砷胁迫下水稻幼苗吸收积累砷和钙的影响[J].生态毒理学报,2015,10(3):153-160.

(责任编辑:张震林)