

盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的影响

唐希望, 周 阳, 王龙雪, 岳 玥, 张俊安*

(河北环境工程学院环境科学系, 河北 秦皇岛 066100)

摘 要: 本试验采用水培法探究了盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的影响。镉浓度分别为 0、5、10、20、40 mg/L 时, 当盐分矿化度从 0 g/L 增加到 5 g/L 时, 发芽势分别下降了 13%、17.8%、19.0%、6.0%、-5.1%; 发芽率分别下降了 14.8%、15.6%、18.8%、7.5%、2.0%。在镉浓度为 0 时, 当盐分矿化度从 0 g/L 增加到 5 g/L 时, 根鲜重从 0.275 g/株降到 0.058 g/株, 显著降低 78.9%, 芽重从 0.30 g/株下降至 0.12 g/株, 显著下降 60.0%, 根冠比从 0.94 下降到 0.31, 显著下降 67.0%; 而当镉浓度为 40 mg/L 时, 单株根鲜重、芽重和根冠比均无显著变化($\alpha=0.05$)。可以得出结论, 盐和镉对玉米种子萌发和幼苗生长的胁迫表现出加成作用, 随着镉浓度的升高, 盐分胁迫的加成效应在降低, 在镉浓度达到 40 mg/L 时完全消失。因此建议在安全利用中低镉浓度污染农田时, 必须考虑灌溉水源的矿化度对镉危害的加成作用。

关键词: 微咸水灌溉; 土壤镉污染; 盐镉耦合胁迫; 耕地安全利用

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0025-05

Effects of Salt-Cadmium Coupling Stress on Seed Germination and Seedling Growth of Maize

TANG Xiwang, ZHOU Yang, WANG Longxue, YUE Yue, ZHANG Jun'an*

(Department of Environmental Science, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao, 066100 China)

Abstract: In order to study the effects of salt-cadmium coupling stress on seed germination and seedling growth of maize, a hydroponic experiment was applied. The results showed for the cadmium concentration treatments 0, 5, 10, 20 and 40 mg/L, when the salinity increased from 0 g/L to 5 g/L, the germination potential decreased by 13%, 17.8%, 19.0%, 6.0% and -5.1%, respectively; the germination rate decreased by 14.8%, 15.6%, 18.8%, 7.5% and 2.0%, respectively. When the cadmium concentration was 0, and the salinity increased from 0 g/L to 5 g/L, root fresh weight decreased from 0.275 g/plant to 0.058 g/plant, decreased significantly by 78.9%; shoot fresh weight decreased from 0.30 g/plant to 0.12 g/plant, decreased significantly by 60.0%; root/shoot ratio decreased from 0.94 to 0.31, decreased significantly by 67.0%. However, when cadmium concentration was 40 mg/L, there was no significant change in root fresh weight, shoot fresh weight and root/shoot ratio ($\alpha=0.05$). It can be concluded that salt and cadmium have an additive effect on maize seed germination and seedling growth. However, with the increase of cadmium concentration, the addition effect of salt stress decreased, and finally disappeared completely when cadmium concentration reached 40 mg/L. Therefore, it is suggested that the addition effect of the salinity of irrigation water source on the harm of cadmium must be considered in the safe use of moderate and low Cd polluted farmland.

Key words: Brackish water irrigation; Soil cadmium pollution; Salt Cadmium coupling stress; Farmland safety utilization

收稿日期: 2019-12-07

基金项目: 河北省科技厅自然科学基金项目(D2019415034); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2021049); 河北环境工程学院博士基金(BJ201801)

作者简介: 唐希望(1991-), 男, 讲师, 博士, 从事环境土壤学研究。

通讯作者: 张俊安, 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: zhangjunan@he-buee.edu.cn

我国水资源总量丰富, 但淡水资源匮乏, 且随着国民经济的发展, 用水需求日益增大, 淡水资源供给不足的矛盾越来越突出, 这种现象在西北、华北和部分沿海地区尤甚^[1]。为缓解农业用水紧张, 采用微咸水灌溉是一种有效节约淡水资源的方式, 在河北邯郸等地已经进行了有效的应用^[2]。微咸水是指矿化度(每升水含有的矿物质

含量)在2~5 g/L的水^[3]。我国有着丰富的微咸水资源,在华北、西北以及部分沿海地带均有广泛分布^[4]。根据《全国土壤污染状况公报》,镉是我国土壤中富集最多的重金属元素^[5],土壤中的镉容易被作物吸收富集,不仅严重影响作物的产量和品质,而且可以通过食物链危害人体健康^[6-8]。根据《土壤污染防治行动计划》的要求,到2020年和2030年,受污染耕地安全利用率要分别达到90%左右和95%以上^[9]。种子萌发和幼苗的生长阶段是植物生命的起点,对植物后期的生长发育有着关键性的影响^[10]。在微咸水灌溉地区可能会出现盐镉胁迫叠加情况,影响污染耕地的安全利用,而目前对于盐镉耦合胁迫对玉米籽粒萌发和幼苗生长影响的研究尚少。基于此,本研究探究微咸水和镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长影响,阐明盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发的作用机制,有利于指导微咸水灌溉地区镉污染土壤的玉米种植,对镉污染土壤的安全利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试玉米品种为葫新698,购于北戴河盛宏农资经销处。微咸水盐浓度梯度采用NaCl(分析纯)配制,镉浓度梯度采用(CH₃COO)₂Cd·3H₂O(分析纯)试剂配制。15 cm直径塑料培养皿。人工气候箱(QHX-250,中国常州)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理

试验地点位于河北省秦皇岛市河北环境工程学院实验中心。试验设置5个矿化度水平(0、2、3、4、5 g/L;记为K₀、K₂、K₃、K₄、K₅),5个镉浓度水平(0、5、10、20、40 mg/L;记为Cd₀、Cd₅、Cd₁₀、Cd₂₀、Cd₄₀),盐镉耦合一共设置25个试验处理,每个处理4次重复。试验处理如表1所示。

表1 试验处理

矿化度(g/L)	镉浓度(mg/L)				
	0	5	10	20	40
0	K ₀ Cd ₀	K ₀ Cd ₅	K ₀ Cd ₁₀	K ₀ Cd ₂₀	K ₀ Cd ₄₀
2	K ₂ Cd ₀	K ₂ Cd ₅	K ₂ Cd ₁₀	K ₂ Cd ₂₀	K ₂ Cd ₄₀
3	K ₃ Cd ₀	K ₃ Cd ₅	K ₃ Cd ₁₀	K ₃ Cd ₂₀	K ₃ Cd ₄₀
4	K ₄ Cd ₀	K ₄ Cd ₅	K ₄ Cd ₁₀	K ₄ Cd ₂₀	K ₄ Cd ₄₀
5	K ₅ Cd ₀	K ₅ Cd ₅	K ₅ Cd ₁₀	K ₅ Cd ₂₀	K ₅ Cd ₄₀

1.2.2 试验方法

选取籽粒饱满,大小均匀的玉米种子,用质量

分数为10%的次氯酸钠溶液消毒浸泡10 min后,再用去离子水洗涤干净,然后将玉米种子置于干净的滤纸上晾干待用。用不同浓度的盐镉溶液在室温下浸泡玉米种子12 h。取出浸泡过的种子,按每皿30粒的标准,将玉米种子均匀放置于铺有双层滤纸的培养皿内,向培养皿中加入适量相应浓度的盐镉溶液,放入阴暗条件下的人工气候箱进行萌发试验,设定温度为25℃、湿度为75%。每天用相应浓度的盐镉溶液补充蒸发的水分,记录发芽的种子数。

1.2.3 测定指标

玉米种子培养12 h后,每天定时观察,并连续7 d观察和记录其发芽情况、幼苗生长状况和生理指标。根据国家种子质量检验标准GB/T3543.4-1995,玉米种子萌发的发芽势为处理后4 d测定,发芽率为处理后7 d测定。试验主要测定玉米每天的发芽数,通过计算发芽势、发芽率,萌发玉米幼苗的单株根重、苗重以及根冠比等指标来评价其发芽情况,各指标计算公式如下:

发芽势=4 d发芽种子粒数/供试种子总数×100%

发芽率=7 d内发芽种子粒数/供试种子总数×100%

单株根重(g/株)=7 d内发芽种子的总根重/发芽种子总数

单株芽重(g/株)=7 d内发芽种子的总芽重/发芽种子总数

根冠比=萌发玉米幼苗的单株根重/单株芽重×100%

发芽势与发芽率以每皿30粒玉米种子计算平均值。萌发玉米幼苗根重和芽重以单株鲜重计。

1.3 试验数据统计分析

数据均采用Microsoft Excel 2010和Sigma Plot 12.5软件进行分析,采用单因素方差分析,Duncan's Multiple range检验,α=0.05。

2 结果与分析

2.1 盐镉耦合胁迫下玉米种子发芽势和发芽率

为探究盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发的影响,试验测定了不同浓度盐镉胁迫下玉米种子的发芽势和发芽率,结果见表2。在盐分浓度为0的条件下,镉浓度为0、5、10、20、40 mg/L时,发芽势分别为90.0%、93.3%、93.3%、91.1%、85.6%,发芽率分别为90.0%、92.2%、94.4%、88.9%、86.7%,随着镉浓度的增加,发芽势和发芽率均有不同程度的先增加后降低趋势,表明低浓度镉胁迫对玉米种子萌发有促进作用,高浓度镉胁迫对玉米种子萌发有抑制作用。

在镉浓度为0 mg/L,溶液中盐浓度分别为0、

2、3、4、5 g/L 时,发芽势分别为 90.0%、87.8%、87.8%、85.0%、78.3%,发芽率分别为 90.0%、88.9%、86.7%、80.0%、76.7%,发芽势从 90.0%下降至 78.3%,下降了 11.7%;发芽率从 90.0%下降至 76.7%,下降了 13.3%。随着盐浓度的增加,发芽势和发芽率均有不同程度的降低趋势,表明单独盐分胁迫时,随着盐分浓度的增加,玉米种子萌

发受到的抑制作用越来越强。
而镉浓度为 5、10、20、40 mg/L,当盐分浓度从 0 g/L 增加到 5 g/L 时,随着盐分浓度的增加,发芽势分别下降了 17.8%、19.0%、6.0%、-5.1%,发芽率分别下降了 15.6%、18.8%、7.5%、2.0%。当镉浓度较低时,盐分的增加对玉米种子萌发影响较为显著;当镉浓度较高时,盐分的变化对玉米种子萌发

表2 盐镉耦合胁迫对玉米种子发芽势和发芽率的影响

镉浓度(mg/L)	指标(Mean±SD)	盐浓度(g/L)				
		0	2	3	4	5
0	发芽势	(90.0±3.3)%	(87.8±6.9)%	(87.8±6.9)%	(85.0±4.3)%	(78.3±1.9)%
	发芽率	(90.0±3.3)%	(88.9±5.1)%	(86.7±5.8)%	(80.0±4.7)%	(76.7±7.7)%
5	发芽势	(93.3±1.9)%	(85.8±5.7)%	(81.1±3.8)%	(81.1±7.7)%	(76.7±0.0)%
	发芽率	(92.2±1.9)%	(85.8±5.7)%	(77.8±3.85)%	(81.7±2.30)%	(77.8±1.9)%
10	发芽势	(93.3±6.9)%	(86.7±0.0)%	(88.9±1.9)%	(82.2±1.9)%	(75.6±1.9)%
	发芽率	(94.4±6.9)%	(84.4±1.9)%	(86.7±3.3)%	(82.2±5.1)%	(76.7±3.3)%
20	发芽势	(91.1±1.9)%	(91.1±6.9)%	(81.1±1.9)%	(93.3±0.0)%	(85.6±1.9)%
	发芽率	(88.9±1.9)%	(92.2±8.4)%	(83.3±5.8)%	(91.1±1.9)%	(82.2±1.9)%
40	发芽势	(85.6±3.3)%	(88.3±4.3)%	(93.3±0.0)%	(87.8±1.9)%	(90.0±0.0)%
	发芽率	(86.7±3.3)%	(85.8±7.4)%	(88.9±5.1)%	(85.6±1.9)%	(85.0±1.9)%

的影响较小。表明盐镉耦合胁迫下,随着镉浓度的增加,盐分胁迫对镉胁迫的加成越来越弱。

2.2 盐镉耦合胁迫处理下玉米萌发幼苗生长指标

为探究盐镉耦合胁迫对玉米萌发幼苗生长的影响,试验测定了萌发玉米种子单株根鲜重、芽鲜重作为生长指标,并由此计算出根冠比。玉米幼苗的单株根重和芽重可以反映盐镉耦合胁迫下玉米萌发幼苗的生长状况,而根冠比则可以反映盐镉耦合胁迫对根和芽胁迫的差异。

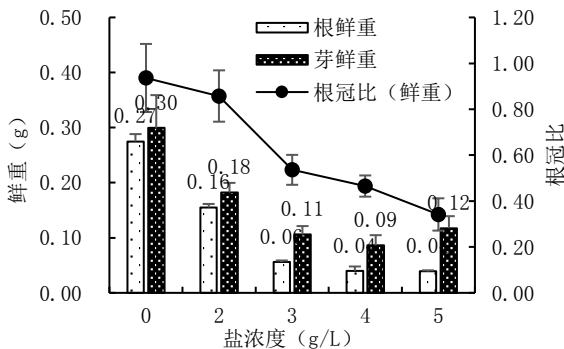
2.2.1 盐分胁迫

由图 1 可知,单独盐分胁迫时,随着盐浓度从 0 g/L 上升到 5 g/L,萌发玉米种子的单株根重从 0.27 g/株下降至 0.04 g/株,下降了 85.2%;单株芽

重从 0.30 g/株下降至 0.12 g/株,下降 60.0%;根冠比从 0.94 下降至 0.34,下降了 63.8%。这表明随着盐分浓度的增加,盐分对玉米萌发幼苗的根和芽胁迫在逐渐加深,对根的胁迫大于对芽的胁迫。

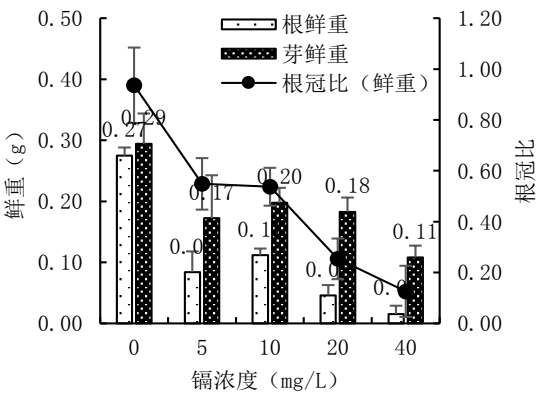
2.2.2 镉胁迫

由图 2 可知,单独镉胁迫时,随着镉浓度从 0 mg/L 增加至 40 mg/L,萌发玉米种子的单株根重从 0.27 g/株下降至 0.02 g/株,下降 92.6%;单株芽重从 0.29 g/株下降至 0.11 g/株,下降 62.1%;根冠比从 0.90 下降至 0.12,下降 86.7%。这表明随着镉浓度的增加,镉对玉米萌发幼苗根和芽的胁迫逐渐加深,且对根的胁迫大于对芽的胁迫。



注:显著性水平 $\alpha=0.05$

图1 盐分胁迫下萌发种子幼苗根重、芽重和根冠比



注:显著性水平 $\alpha=0.05$

图2 镉胁迫下萌发种子幼苗根重、芽重和根冠比

2.2.3 盐镉耦合胁迫

由图3-a可知,在镉浓度为0 mg/L,随着盐浓度从0 g/L上升到5 g/L时,根鲜重从0.275 g/株降到0.058 g/株,降低了78.9%,且除盐浓度为4 g/L和5 g/L外,其余各处理之间差异均达到显著水平($\alpha=0.05$)。在镉浓度为40 mg/L条件下,盐浓度为0、2、3、4、5 g/L时,各组根鲜重分别为0.014、0.009、0.011、0.011、0.008 g/株,且各处理之间均无显著差异($\alpha=0.05$)。结果表明在盐镉耦合胁迫下,随着镉浓度的增加,盐分对玉米萌发幼苗根鲜重的胁迫在降低。

由图3-b可知,在镉浓度为0 mg/L,随着盐浓度从0 g/L上升到5 g/L,单株芽重从0.30 g/株下降至0.12 g/株,下降60.0%,并且盐浓度为0 g/L时,单株芽重显著高于5 g/L($\alpha=0.05$)。在镉浓度为

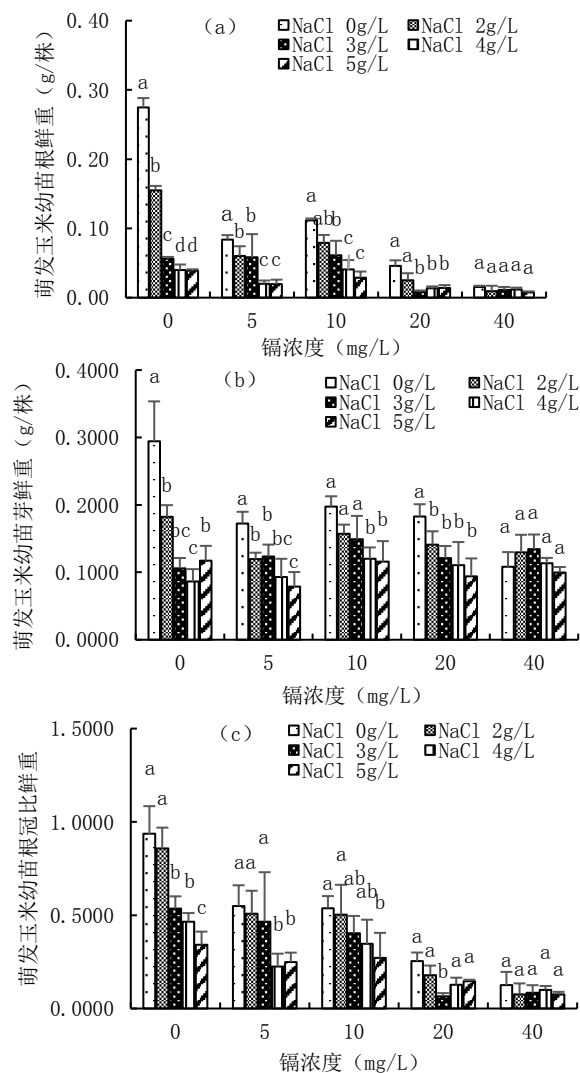
40 mg/L,盐浓度为0、2、3、4、5 g/L时,芽鲜重分别为0.11、0.13、0.13、0.11、0.10 g/株,5个处理之间均无显著差异($\alpha=0.05$)。试验表明在盐镉耦合胁迫下,随着镉浓度的增加,不同盐分浓度对玉米萌发幼苗芽鲜重的胁迫作用在降低。

由图3-c可知,在镉浓度为0 mg/L,随着盐浓度从0 g/L上升到5 g/L时,根冠比从0.94下降到0.31,下降了67.0%,下降显著($\alpha=0.05$)。在镉浓度为40 mg/L时,盐浓度为0~5 g/L各组根冠比分别为0.13、0.08、0.08、0.10、0.08,各个处理之间均无显著性差异($\alpha=0.05$)。结果表明,随着镉浓度的增加,盐分对根冠比的影响逐渐降低。

3 讨论与结论

盐分抑制玉米种子的萌发和生长,主要原因有:(1)盐分浓度过高,种子萌发过程中对水分的吸收受到抑制,导致代谢受阻^[11];(2)在玉米种子萌发过程中,过高的盐分浓度会导致细胞膜结构和功能破坏、酶活性受到抑制,致使部分种子不能萌发或者萌发迟缓^[3,12];(3)玉米是盐敏感型作物,较高的盐浓度会导致干细胞内的离子紊乱,致使细胞功能异常,玉米生长发育受抑,最终整株植物受到严重影响^[13]。相关研究均得出和本研究类似的结果^[14-18]。本研究中同时观察到随着盐浓度从2 g/L增加至5 g/L,玉米幼苗根冠比一直在减小,盐分对根的胁迫大于对芽的胁迫。这可能是因为在本试验中萌发种子的根部一直接触盐溶液,直接受到盐分的胁迫,而幼苗萌发后芽不再直接接触盐溶液。也有部分研究结果表明低浓度盐胁迫(NaCl浓度小于30 mmol/L)对玉米种子萌发具有一定的促进作用^[18-19]。在本研究中,主要讨论微咸水浓度(2~5 g/L)范围内对玉米种子萌发的影响,因此,没有观察到盐胁迫对玉米种子萌发有促进作用的现象。

本研究中观察到低浓度(5、10 mg/L)镉胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长表现出促进作用,高浓度(20、40 mg/L)镉胁迫对玉米种子萌发和生长表现出抑制作用。这是由于在低浓度镉胁迫下,镉对玉米种子的萌发主要表现出刺激作用,只有在高浓度情况下才表现出胁迫作用。王文光等^[20]研究发现,镉浓度1 $\mu\text{g/L}$ 时促进番茄种子的萌发,镉浓度15 $\mu\text{g/L}$ 时抑制种子的萌发,这与本研究结果类似。其他研究者也得到了相同的结论^[21-23]。与盐分胁迫类似,本研究也观察到随着镉浓度的增加,镉对玉米幼苗根的胁迫大于对芽的胁迫。



注:多重比较只在同一镉处理浓度下进行

图3 盐镉胁迫下萌发种子幼苗根鲜重(a)、芽鲜重(b)和根冠比(c)

这是因为植物对镉的吸收主要集中在根部^[24],而高浓度镉胁迫能够影响植物的呼吸作用和细胞内保护性酶的活性^[25],并且能抑制植物根部对水分的吸收和运输^[26]。王昱卜等^[27]研究发现,镉浓度大于10 mg/L时,随着镉浓度的增加,镉对芹菜根的抑制大于芽,该结果与本文结果相似。

盐分胁迫和镉胁迫均会抑制种子的萌发和幼苗的生长。本研究中观察到盐分胁迫和镉胁迫对玉米种子萌发抑制效果具有加成效应,耦合胁迫效果大于单独盐胁迫或单独镉胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的影响。但是,本试验也观察到随着镉浓度的增加,盐分胁迫对镉胁迫的加成越来越弱,在镉浓度为40 mg/L时,试验观察不到盐分的变化对玉米种子萌发和幼苗生长的显著影响。目前关于盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长影响的研究较少,盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的互作机制仍不明确,仍然需要后续的相关研究对此进行探讨。

综上可以得出以下结论:(1)在盐浓度2~5 g/L范围内,玉米种子萌发和幼苗生长均受到抑制,且对根的抑制大于对芽的抑制;(2)在镉浓度低于10 mg/kg时,玉米种子萌发和生长均受到促进,镉浓度高于10 mg/kg时,玉米种子萌发和生长受到抑制,且对根的抑制大于对芽的抑制;(3)盐镉耦合胁迫下,盐分和镉对玉米种子萌发和幼苗生长的胁迫具有加成作用,随镉浓度的增加,盐分胁迫加成作用逐渐减弱,在镉浓度达到40 mg/L时,盐分胁迫加成作用完全消失。因此建议在采用微咸水灌溉中低镉浓度污染玉米农田时,为了农业安全生产和保证玉米品质,必须考虑灌溉所用水的矿化度。

参考文献:

- [1] 王克六.我国淡水资源的利用现状及对策[J].南方农业, 2015, 9(27): 39, 242.
- [2] 龙秋波,袁刚,王立志,等.邯郸市东部平原区微咸水现状及开发利用研究[J].水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 126-129.
- [3] 马中昇,谭军利,魏童.中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J].灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70-75.
- [4] 刘友兆,付光辉.中国微咸水资源化若干问题研究[J].地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 57-60.
- [5] 生态环境部和自然资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2019-9-25]http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/120140417_270670.htm.
- [6] 曾咏梅,毛昆明,李永梅.土壤中镉污染的危害及其防治对策[J].云南农业大学学报, 2005(3): 360-365.
- [7] Tang X, Song Y, He X, et al. Enhancing Phytoremediation Efficiency Using Regulated Deficit Irrigation[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(4): 2399-2405.
- [8] Tang X, Pang Y, Ji P, et al. Cadmium uptake in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 125: 102-106.
- [9] 国务院.《土壤污染防治行动计划》国发[2016]31号[EB/OL]. (2016-05-31) [2019-9-25]http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [10] 闫晶,姬文秀,石贤吉,等.镉胁迫对烟草种子萌发和幼苗生长发育的影响[J].作物杂志, 2019(2): 142-149.
- [11] 刘春晓,董瑞,刘强,等.盐胁迫对不同玉米种质资源种子萌发特性的影响[J].山东农业科学, 2017, 49(10): 27-30, 35.
- [12] 单长卷,付远志,彭贝贝.盐胁迫下谷胱甘肽对玉米幼苗根系抗氧化能力的影响[J].灌溉排水学报, 2015, 34(10): 56-59.
- [13] 张红,董树亭.玉米对盐胁迫的生理响应及抗盐策略研究进展[J].玉米科学, 2011, 19(1): 64-69.
- [14] 金正律,周秋艳.盐胁迫对不同玉米品种种子发芽及幼苗生长的影响[J].湖北农业科学, 2014, 53(13): 2989-2991.
- [15] 胡燕梅,郭云贵,姚艳,等.盐胁迫对玉米种子萌发及其幼苗生长的影响[J].江汉大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 137-143.
- [16] 郭园,张玉霞,杜晓艳,等.盐碱胁迫对油用向日葵幼苗生长及含水量的影响[J].东北农业科学, 2016, 41(2): 20-24.
- [17] 张磊,侯云鹏,王立春.盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J].东北农业科学, 2018, 43(4): 11-16.
- [18] 高英,同延安,赵营,等.盐胁迫对玉米发芽和苗期生长的影响[J].中国土壤与肥料, 2007(2): 30-34.
- [19] 陈丽珍,张振文,宋付平. NaCl胁迫对不同玉米品种种子萌发特性的影响[J].安徽农业科学, 2009, 37(25): 11917-11919.
- [20] 王文光,范学科,马文哲,等.重金属Cd对番茄种子萌发的影响[J].陕西农业科学, 2019, 65(3): 44-46.
- [21] 吴鹏,周青.大豆种子萌发对镉胁迫响应的观察[J].大豆科学, 2009, 28(5): 853-855.
- [22] 马贵,邹蕊.镉胁迫对玉米萌发的影响[J].宁夏师范学院学报, 2013, 34(6): 59-61.
- [23] 张媛华. Cd胁迫对绿豆幼苗生长、光合作用及微量元素代谢的影响[J].东北农业科学, 2016, 41(1): 35-37.
- [24] 孙向平,严理,曾粮斌.不同镉污染水平下氮肥对稻田土壤中镉迁移转化的影响[J].江苏农业科学, 2018, 46(23): 318-320, 328.
- [25] 王新新,吴亮,朱生凤,等.镉胁迫对碱蓬种子萌发及幼苗生长的影响[J].农业环境科学学报, 2013, 32(2): 238-243.
- [26] Liu C F, Guo J L, Cui Y L, et al. Effects of cadmium and salicylic acid on growth, spectral reflectance and photosynthesis of castor bean seedlings[J]. Plant and Soil, 2011, 344(12): 131-141.
- [27] 王昱卜,汪天宇,韩莹琰,等.不同浓度镉对芹菜幼苗生长及生理特性的影响[J].北京农学院学报, 2019, 34(2): 41-45.

(责任编辑:刘洪霞)