

环境材料对铅、镉、砷胁迫下玉米种子萌发的影响

杜乔娣¹, 黄占斌^{1,2*}, 沈 忱¹, 章智明¹

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2.中国科学院水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:环境材料的应用是缓解重金属污染对植物种子萌发抑制作用的重要途径之一,采用水培试验方法,在含有重金属铅($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、镉($30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、砷($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的培养液中添加环境材料(高分子保水材料、煤基营养物质和吸附性矿物材料),探讨不同环境材料及其组合对玉米种子萌发的影响。结果表明,与对照相比,各环境材料处理对重金属抑制玉米种子萌发均有不同程度缓解作用,且对根的伸长缓解效果较芽明显。高分子保水材料及其组合对缓解铅、镉、砷毒性作用明显;高分子保水材料、煤基营养物质和吸附性矿物材料组合对重金属毒害作物的缓解效果最大:该复合材料处理可使铅对玉米种子发芽率抑制率为零,芽长较对照减小64%;可使镉对玉米种子发芽率抑制率仅5%,而芽长较对照增加65%;可使砷对玉米种子发芽率增加26%,芽长较对照增加12%。

关键词:环境材料;重金属;砷;玉米;种子萌发

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)05-0874-06

Effect of Environmental Materials on Germination of Maize Seed Under Stress of Lead, Cadmium and Arsenic

DU Qiao-di¹, HUANG Zhan-bin^{1,2*}, SHEN Chen¹, ZHANG Zhi-ming¹

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: Environmental materials were often applied in relieving stress on plants seed germination caused by heavy metal pollution. In this research, maize seed germination tests were conducted in nutrient solutions with lead of $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, cadmium of $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ or arsenic of $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, and the effects of the environmental materials: Polymer water-retaining material, coal-based nutrients, adsorption mineral material and their compounds on maize seed germination under heavy metal stress were studied. The results showed that all the three environmental materials could relieve the heavy metal stress on maize seed germination and the effect on root elongation was more significant than that on sprout. Polymer water-retaining materials and their combination could relieve heavy metal stress obviously. The combination of polymer water-retaining material, coal-based nutrients and adsorption mineral material ranked first in relieving heavy metal stress. The inhibition rate of maize seed was 5% and the sprout length increased 65% under cadmium stress compared with the treatment of no environmental materials(CK2). The inhibition rate of maize seed was zero and the sprout length decreased 64% under lead stress compared with CK2. Comparing with CK2 the germination percentage and the sprout length increased 26% and 12%, respectively.

Keywords: environmental material; heavy metal; arsenic(As); maize; germination of seed

随着矿物资源的开采、冶炼、加工以及煤的燃烧等都会产生大量的重金属“三废”,环境污染日趋严重^[1]。

收稿日期:2011-11-23

基金项目:国家十二五“863”课题(2011AA100503);国家自然科学基金(40971164);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-258)

作者简介:杜乔娣(1983—),女,硕士研究生,主要从事环境工程与环境材料方面的研究。E-mail:duqiaodi.happy@163.com

* 通讯作者:黄占斌 E-mail:zbhuang2003@163.com

铅、镉、砷作为环境中主要的重金属污染元素,广泛存在于城市垃圾、废水、汽污、化肥、有机农药及各种生产原材料中。有关Pb、Cd、As对植物的影响,国内已有一些报道,如高浓度的Pb会延缓和抑制小麦种子的萌发和幼苗的生长^[2],随Cd处理质量浓度的增加玉米根系活力会受到抑制^[3]。另有研究表明, Na_3AsO_4 作用下玉米的叶绿素、类胡萝卜素及蛋白质的含量和光合效率均减小^[4]。土壤中较高砷含量会对植物产

生毒害效应,危害其生长发育,使农作物产量和品质下降^[5]。农田土壤中的铅、镉、砷均可通过食物链进入人体,从而严重危害人类健康,因此控制农田土壤中的铅、镉、砷的生物有效性,最大程度减少其向农作物可食部分转移是一个亟待解决的问题。

环境材料是指具有较好使用性能和环境协调性的一类材料,包括有机无机改良剂和修复剂等,其对重金属污染土壤治理的作用机理主要包括沉淀固定、吸附及离子交换、离子拮抗、螯合等作用。近年来,环境材料的研究方向主要集中在净化环境、防止污染、替代有害物质、减少废弃物、材料的资源化、利用自然能等方面^[6-8]。环境材料的作用机理往往不是单一的,而是由多种机理共同起作用的。研究表明,利用环境改良材料固化稳定土壤中的铅,减少其在作物中的积累,是一种可行的土壤污染治理方法^[9-10]。在对污染农田的试验研究中,结果显示有机无机改良剂^[11]和环境矿物材料^[12]具有潜在的净化重金属污染物的功能,可成为土壤环境中吸附固定态重金属污染物的有效物质,且对消除废水的重金属污染环境材料也收到了相似的效果^[13-14]。重金属对作物发芽及幼苗生长影响的报道较多,但有关环境材料对铅、镉、砷胁迫下植物种子萌发影响的研究还不多见,且多数试验设计在处理方法上都是采用种子催芽后再用重金属进行胁迫处理^[15]。鉴于自然界中植物在种子萌发期就已受到污染胁迫,后期再进行胁迫处理会对分析结果产生影响,为进一步探讨环境材料与重金属离子的作用规律,本研究采用水培试验方法,在含有重金属铅($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、镉($30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、砷($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)培养液中添加功能材料,探讨不同环境材料及其组合对玉米种子萌发的影响,以期预防玉米重金属早期伤害及重金属污染土壤的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为市售纪元 1 号,中国种子集团爱农科技有限公司生产。试剂硝酸铅($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)、氯化镉(CdCl_2)、亚砷酸钠(NaAsO_2)均为分析纯试剂。煤基营养物物质(HA)由内蒙古霍林河煤业集团有限责任公司提供;高分子保水材料(SAP)为粒度 100 目的聚丙烯酸盐,由唐山博亚科技集团有限公司提供;吸附性矿物材料(FS)由 91%的粉砂粒和 9%的粘粒组成,表面颜色为灰色,pH 值 8.36,山西大同煤矿集团有限公司提供。

1.2 试验方法

基于突出环境材料对重金属胁迫玉米种子萌发的毒性缓解作用,本研究分为两个试验。试验一:设置铅、镉、砷多个浓度梯度,采用水培法统计分析浓度梯度下玉米种子发芽抑制率、芽根伸长抑制率,以期寻找对玉米萌发因子较明显的最低抑制浓度。 Pb^{2+} 溶液浓度为 0、10、20、50、100、200、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Cd^{2+} 溶液浓度为 0、5、10、15、30、60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, As^{3+} 溶液浓度为 0、10、20、40、60、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每个浓度处理设 3 个平行。试验二:选取重金属对玉米萌发因子作用较为明显(芽、根伸长抑制率分别在 60%和 80%左右)的最低抑制浓度,其中铅($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、镉($30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、砷($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),分别添加单一或组合环境材料,每组 8 种材料处理。试验材料处理按单材料和复合材料进行(表 1)。按照已有资料^[16]设置 HA 0.83 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,SAP 0.67 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,FS 3.33 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。设 2 组对照:去离子水中无重金属(CK1),去离子水中加重金属(CK2),每个处理设置 3 个平行。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

代号	处理 Treatment	SAP/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	FS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	HA/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
CK1	CK1			
CK2	CK2			
A	HA			0.25
B	SAP	2		
C	FS		10	
N1	HA+FS		10	0.25
N2	HA+SAP	2		0.25
N3	SAP+FS	2	10	
N	HA+SAP+FS	2	10	0.25

选择均匀饱满玉米种子,用 0.4%高锰酸钾溶液消毒 6 min,后用自来水反复冲洗,再用去离子水冲洗数次。将种子分成与处理数相应份额,每份 70 粒,装入干净的小烧杯中并标记号码,然后用相应处理重金属溶液浸种 12 h。采用水培法将种子按编号依次移入铺有两层滤纸的培养皿中,每皿 20 粒,余下种子做更换替补,于光照培养箱中培养。CK1 为未加重金属和环境材料的空白对照,CK2 为加入重金属但未加入环境材料的对照。培养温度 25 $^{\circ}\text{C}$,光控 12 h,间隔 12 h 补充等量相应材料处理的重金属溶液或去离子水。

1.3 测定指标与方法

玉米种子置床后 4 d 测定萌发的发芽势,第 8 d

统计萌发种子数,测量芽、根长度,称量芽、根鲜重和干重(75℃杀青,60℃烘至恒重称量)。所有芽、根长度的测定均采用人工测量法。所有测量数据均为代表植株取均值所得(每组处理设置3个平行,每个平行中取3株,即每组处理取9个代表植株)。各发芽因子抑制率的计算如下:

发芽抑制率=

$$\frac{\text{空白对照组种子萌发数}-\text{处理组种子萌发数}}{\text{空白对照组种子萌发数}} \times 100\%;$$

$$\text{芽伸长抑制率} = \frac{\text{空白对照组芽长}-\text{处理组芽长}}{\text{空白组芽长}} \times 100\%;$$

$$\text{根伸长抑制率} = \frac{\text{空白对照组根长}-\text{处理组根长}}{\text{空白组根长}} \times 100\%;$$

芽、根干鲜物质积累抑制率算法类推。

1.4 数据分析

所有试验数据采用 Excel 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同梯度浓度下的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{3+} 对玉米种子萌发的影响

表2表明3种重金属对玉米种子萌发率的影响相对根、芽抑制率要小。具体表现为:当 Pb^{2+} 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,重金属对玉米种子萌发抑制率和芽、根伸长抑制率分别为 10.53%、54.90%、86.70%; Cd^{2+} ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别为 15.79%、64.04%和 93.45%; As^{3+} ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理浓度时,依次为 5.26%、62.69%和 80.71%。表明铅、镉、砷对玉米种子萌发的影响较其对芽、根生长的影响不显著,这与周青^[17]研究结果一致。另一方面,重金属对根胁迫强于芽,且随离子浓度提高,芽、根伸长抑制率均呈现逐渐升高趋势。可能与种子的萌发特征和重金属的毒害机制有关。其一,种子吸胀萌动时,胚根快速吸水伸长并最先突破种皮,使根在重金属的积累量和受重金属离子胁迫的时间上大于芽;其二,重金属离子可诱导根系产生逆境乙烯,并向地上部输导,逆境乙烯对细胞有很强伤害作用,而这种伤害也首先发生在根部^[18]。

2.2 环境材料对一定浓度下 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{3+} 胁迫玉米种子萌发的影响

2.2.1 Pb^{2+} ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫的影响

添加环境材料处理对缓解 Pb^{2+} ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下玉米种子萌发有一定效果,不同材料处理对缓解 Pb 胁迫影响的能力不同(图1)。N(HA+SAP+FS)处理

表2 不同浓度的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{3+} 对玉米种子萌发的影响

Table 2 Effects of cadmium, lead and arsenic on seed germination of maize under different concentration

处理 Treatment	发芽抑制率 Germination inhibition/%	芽伸长抑制率 Inhibition of shoot elongation rate/%	根伸长抑制率 Inhibition of root elongation rate/%
CK	0	0	0
Pb10	0	-14.81	-10.51
Pb20	5.26	-1.56	56.35
Pb50	-5.26	19.71	58.07
Pb100	10.53	54.90	86.70
Pb200	21.05	77.95	89.32
Pb500	36.84	97.77	100.00
Cd1	0.00	0.67	8.56
Cd5	5.26	-26.73	13.21
Cd10	-5.26	9.69	39.75
Cd15	0.00	39.09	73.98
Cd30	15.79	64.04	93.45
As5	0.00	38.75	64.04
As10	5.26	62.69	80.70
As15	15.79	73.72	85.30
As30	-5.26	76.61	92.48
As60	26.32	82.18	97.90
As100	36.84	89.98	100.00

能较大程度地缓解 Pb 对玉米种子萌发抑制,发芽抑制率较 CK2 降低 42.1%。芽、根伸长抑制较对照分别提高 6.8%和 8.3%。在两材料复合处理中,N3(SAP+FS)处理对缓解 Pb 胁迫玉米萌发率的抑制作用较明显,抑制率较对 CK2 降低 36.8%;N1(HA+FS)处理缓解 Pb 胁迫玉米芽、根伸长较 CK2 分别降低 16.7%和 17.6%。

2.2.2 Cd^{2+} ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫的影响

从图2看出,所有处理较对照玉米种子萌发率差别不大,对玉米种子萌发敏感指标芽、根伸长和根鲜重差异较明显。N 处理对 Cd^{2+} ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有较强的吸附、中和、絮凝等作用,有效降低培养液中 Cd^{2+} ,与 CK2(未加材料 Cd^{2+} 胁迫)相比不仅能完全解除 Cd^{2+} 对玉米成苗幼芽、根的伸长和根粗壮及丰富程度的抑制,较空白对照 CK1 表现出一定的刺激生长作用;其中芽、根伸长和根鲜重的生长刺激百分率分别 65.17%、30.93%、1.67%。在两材料处理中,N1 和 N3 处理在缓解重金属 Cd^{2+} 胁迫玉米芽、根伸长和根物质积累效果较 N2 处理好。单材料 SAP 处理较其他两材料对缓解 Cd^{2+} 胁迫玉米萌发效果更好。重金属镉对玉米芽、根生长的影响存在“低促高抑”的共性,环境材

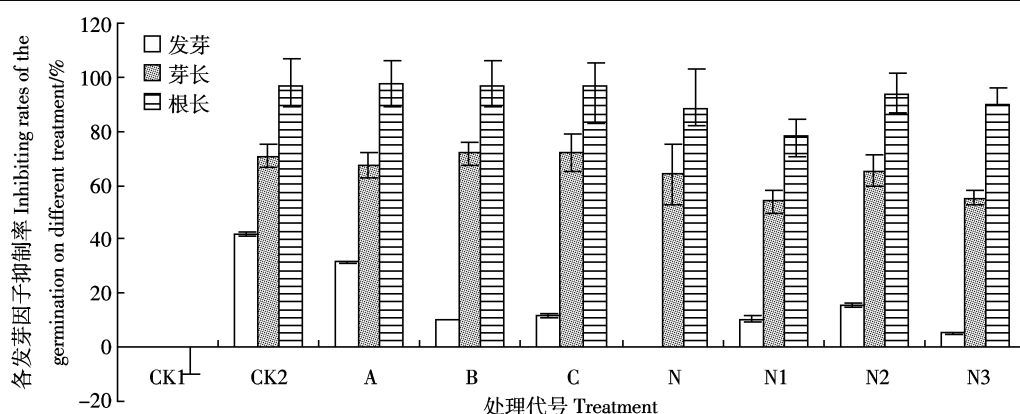
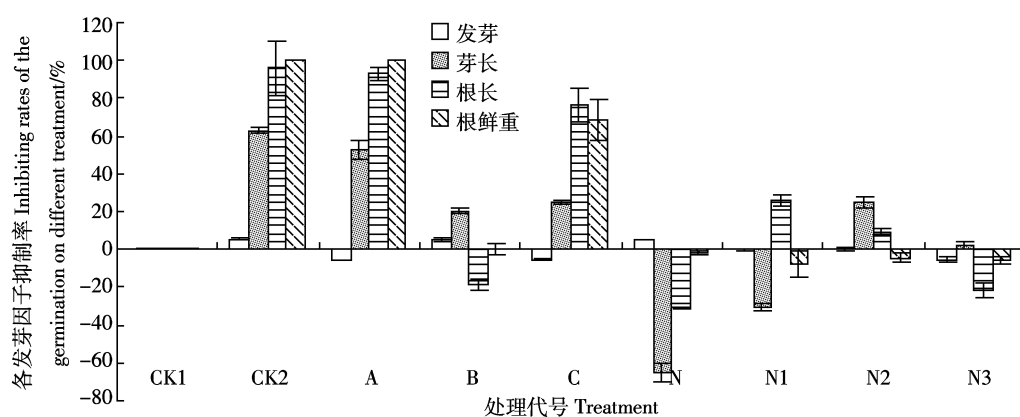
图 1 环境材料对 Pb^{2+} ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下玉米种子萌发的影响Figure 1 Effect of environmental materials on maize germination under stress of lead ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)图 2 环境材料对 Cd^{2+} ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下玉米种子萌发的影响

Figure 2 Effect of environmental materials on maize germination under stress of cadmium

料对解除镉胁迫玉米种子萌发的影响的可能原因是环境材料降低了培养液中 Cd^{2+} 浓度,使其处在较低浓度范围而促进玉米幼苗芽、根生长。

2.2.3 As^{3+} ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫的影响

图 3 显示环境材料对缓解 As 胁迫玉米种子萌发的影响与对 Pb 的效果近似。N(HA+SAP+FS)处理能完全解除 As^{3+} 对玉米种子芽、根伸长的抑制,并较 CK1 表现出一定的促进种子芽、根生长作用,促进生长率分别为 12.4% 和 85.6%。在两材料复合处理中, N1(HA+FS) 和 N3(SAP+FS) 处理较 N2 效果好,原因可能是吸附性矿物材料(FS)以其高吸附性能和较好离子交换性降低了溶液中重金属有效性^[19]。单材料处理中, SAP 对缓解 As 胁迫玉米种子萌发作用优于其他两种,原因可能与高分子保水材料三维网状交联的分子结构及其分子上羧基、羟基及酰胺基、磺酸基等强亲水基团有关^[20-21],这些基团对重金属离子均有较强的吸附和络合作用。

3 讨论

前人的研究结果表明^[22],重金属对植物种植萌发具有“低促高抑”现象,低浓度重金属可以提高种胚生理活性,促进萌发;高浓度重金属对胚、芽等产生了伤害作用,并且高浓度重金属胁迫抑制淀粉酶、蛋白酶活性,即抑制种子内贮藏淀粉和蛋白质的分解,从而影响种子萌发所需要的物质和能量,致使种子萌发受到抑制。本研究结果也表明,重金属对玉米种子萌发及幼苗生长存在较低浓度下的刺激效应和高浓度下的抑制效应,并且高浓度的抑制作用对芽、根伸长较种子萌发率更为显著,这与李国良^[23]和苗明升等^[24]研究结果一致。

4 结论

重金属铅、镉、砷对玉米种子萌发率的影响较小,对芽根伸长抑制作用更为显著,且对根伸长的抑制作

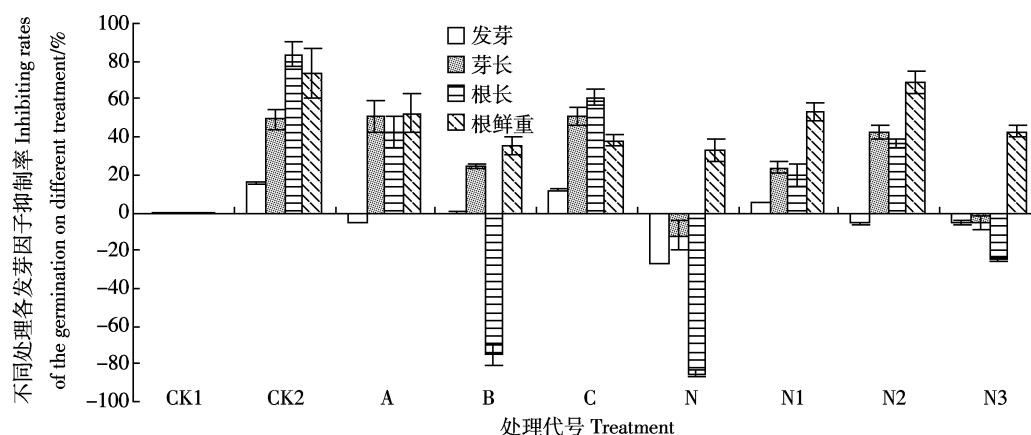
图3 环境材料对 As^{3+} ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下玉米种子萌发的影响

Figure 3 Effect of environmental materials on maize germination under stress of arsenic

用强于芽。环境材料对重金属胁迫玉米种子萌发较对照有不同程度缓解作用,其中 N(HA+SAP+FS)3 种复合材料处理对玉米芽根伸长的重金属毒性的缓解作用在所有处理中效果最优,N1(HA+FS)组合对缓解 Pb、Cd 毒性作用稍低于 N 处理,N3(SAP+FS)在缓解 As 毒性方面较其他两种复合材料处理更好,组合环境材料对缓解重金属毒性较单一材料处理表现出一定的优越性,此结果与彭丽成等^[25]、李勇等^[26]对盆栽玉米生长的研究基本一致。在本研究中,添加环境材料可起到降低 Pb、Cd、As 毒性、缓解对种子萌发后的毒害作用,利于幼苗芽和根的生长,同时促进幼苗根的生物量积累。比较而言,高分子保水材料 SAP、吸附性矿物材料 FS 及其复合处理能明显降低重金属对玉米的毒害作用,特别是 N(HA+SAP+FS)可作为重金属污染土壤治理的修复剂。利用环境材料固化稳定溶液中的重金属,可不同程度缓解重金属对作物种子萌发的毒害,此与王凯荣等^[27]的土壤重金属污染治理研究异曲同工,说明试验所选环境材料可作为一种可行的重金属污染治理方法。

参考文献:

- [1] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. *Plant Physiol*, 2002, 128(3): 1120–1128.
- [2] 杜连彩. 铅处理对小麦种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 潍坊学院学报, 2007, 7(4): 87–89.
DU Lian-cai. Effect of Pb on the germination and seedling growth of wheat seeds[J]. *Journal of WeiFang University*, 2007, 7(4): 87–89.
- [3] 薛莹琦, 温子若. 镉胁迫对玉米生理生化特性及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11482–11483, 11508.
XUE Luo-qi, WEN Zi-ruo. Effects of Cd stress on physiological and biochemical traits and quality of maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(24): 11482–11483, 11508.
- [4] Stoeva N, Berov A M, Zlatev Z. Physiological response of maize to arsenic contamination[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 47(3): 449–452.
- [5] 李圣发, 王宏镔. 土壤砷污染及其修复技术的研究进展[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 248–252.
LI Sheng-fa, WANG Hong-bin. Advances in the study of arsenic-contaminated soil and its remediation technology[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4): 248–252.
- [6] 霍宝锋, 刘伯莹. 可持续发展与环境材料[J]. 天津大学学报, 2001, 34(1): 90–95.
HUO Bao-feng, LIU Bo-ying. Sustainable development and eco-materials[J]. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2001, 34(1): 90–95.
- [7] 黄昌勇. 土壤化学研究与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 168–199.
HUANG Chang-yong. Soil chemistry research and application[M]. Beijing: China Environment-Science Press, 1997: 168–199.
- [8] 杨 尽. 利用矿物改良土地整理新增耕地贫瘠土壤研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
YANG Jin. Using minerals improving barren soil of added cultivated land in land consolidation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [9] 陈世宝, 朱永官. 不同含磷化合物对中国芥菜铅吸收特性的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 707–712.
CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan. Effects of lime complexation organic manure on uptake of Cd, Pb by crops [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 24(4): 707–712.
- [10] 李瑞美, 王 果, 方 玲, 等. 石灰与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 293–296.
LI Rui-mei, WANG Guo, FANG Ling, et al. Effects of lime complexation organic manure on uptake of Cd, Pb by crops[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2003, 22(3): 293–296.
- [11] 李 夏. 有机无机改良剂对铅污染红壤中铅形态及植物有效性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LI Xia. The effects of several amendments on forms of lead and its uptake by two cultivars of brassica chinensis in an acid red soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

- [12] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 环境与土壤, 2002, 11(1): 79-84.
ZHENG Xi-kun, LU An-huai, GAO Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environment Sciences*, 2002, 11(1): 79-84.
- [13] 张文娟, 陈桂秋, 曾光明, 等. 新型高效改性材料在重金属废水处理中的应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 23(7): 155-159.
ZHANG Wen-juan, CHEN Gui-qiu, ZENG Guang-ming, et al. Application of new and efficient modification technologies to heavy metal containing wastewater treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 23(7): 155-159.
- [14] 施尧, 曹心德, 魏晓欣, 等. 含磷材料钝化修复重金属 Pb、Cu、Zn 复合污染土壤[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2011, 29(3): 62-67.
SHI Yao, CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, et al. Immobilization of Pb, Cu, Zn in a multi-metal contaminated soil with phosphorus bearing materials[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2011, 29(3): 62-67.
- [15] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态学报, 2005, 24(4): 458-460.
ZHANG Li-hong, LI Pei-jun, LI Xue-mei, et al. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 458-460.
- [16] 黄占斌, 李茂松, 夏春良, 等. 农用保水剂应用原理与技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2005: 139-300.
HUANG Zhan-bin, LI Mao-song, XIA Chun-liang, et al. The application of principles and technology on agricultural aquasorb[M]. Beijing: The Press of Chinese Agricultural Science and Technology, 2005: 139-300.
- [17] 周青, 黄晓华, 张一. 镉对种子萌发的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 156-158.
ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua, ZHANG Yi. Effect of cadmium on seeds germination[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(3): 156-158.
- [18] 季玉鸣, 李振国, 余叔文. Cd 引起小麦苗逆境乙烯的产生及其和 Cd 的吸收分布[J]. 植物生理学报, 1998, 18(5): 495-499.
JI Yu-ming, LI Zhen-guo, YU Shu-wen. Ethylene production induced by cadmium in wheat seedlings and its relation to cadmium uptake and distribution[J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 1998, 18(5): 495-499.
- [19] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 130-135.
YANG Hai-lin. Remediation of heavy metal polluted soil[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(6): 130-135.
- [20] 黄占斌, 万会娥, 邓西平, 等. 保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 52-55.
HUANG Zhan-bin, WAN Hui-e, DENG Xi-ping, et al. Super absorbent polymer effects on soil improvement and drought resistant and water saving of crops[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(4): 52-55.
- [21] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机理[J]. 水土保持科学, 2009, 7(5): 70-75.
YANG Yong-hui, WU Ji-cheng, WU Pu-te, et al. Super absorbent polymers on the mechanism of action of the soil structure, evaporation and infiltration process[J]. *Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 70-75.
- [22] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应[J]. 山西大学学报, 2004, 7(4): 410-413.
ZHANG Yi-xian. The toxic effects of mercury, cadmium and lead to *Brassica chinensis* L.[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2004, 7(4): 410-413.
- [23] 李国良. 重金属镉污染对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2006(2): 91-96.
LI Guo-liang. Effect of cadmium on maize seeds germination and seedling growth[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2006(2): 91-96.
- [24] 苗明升, 朱圆圆, 曹明霞, 等. 重金属铅对玉米萌发和早期生长发育的影响[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2003, 3(18): 82-84.
MIAO Ming-sheng, ZHU Yuan-yuan, CAO Ming-xia, et al. The influence of lead on the bourgeon and development of *Zea Mays*[J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2003, 3(18): 82-84.
- [25] 彭丽成, 黄占斌, 石宇, 等. 环境材料对 Pb、Cd 污染土壤玉米生长及土壤改良效果的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 73-76.
PENG Li-cheng, HUANG Zhan-bin, SHI Yu, et al. Effects of environmental materials on maize's growth and rhizosphere soil contaminated by Pb and Cd[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 73-76.
- [26] 李勇, 黄占斌, 王文萍, 等. 重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2241-2245.
LI Yong, HUANG Zhan-bin, WANG Wen-ping, et al. Effects of heavy metals lead and cadmium on *Zea mays* L. growth and the soil microorganism[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2241-2245.
- [27] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476-481.
WANG Kai-rong, ZHANG Yu-zhu, HU Rong-gui. Different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 476-481.