

不同钾水平对苗期玉米铬的吸收和生理特性的影响

李国军, 李 华, 狄贞珍, 刘 蕾

(山西大学环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘 要:采用溶液培养的方法,研究了不同钾素水平对苗期玉米地上、地下部铬的吸收、转运及其生理特性的影响。结果显示,在六价铬作用下,玉米幼苗的各项生理指标均受到一定的影响,生物量随着铬浓度的升高而呈现降低趋势。在铬浓度 $0\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,植株地上、地下部六价铬的含量随外界铬处理浓度的增加而增加,在 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,铬含量达到最大;叶绿素含量、根系活力随六价铬浓度的增加而降低,在 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶绿素、根系活力最小;丙二醛(MDA)含量呈先降低后上升趋势,在 $40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,丙二醛含量最小。钾素可缓解重金属铬对玉米幼苗的毒害作用,在 $400\sim 1\ 600\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,不同钾水平处理均可显著减少玉米幼苗地下部对铬的吸收,钾浓度为 $1\ 600\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,铬含量最小。随着钾浓度的提高,叶绿素含量、根系活力都增加,但丙二醛(MDA)含量变化没有呈现明显的规律。值得注意的是,当溶液中铬浓度在 $0\sim 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时,地上部铬含量随着钾浓度的增大而逐渐减小,当铬浓度为 $40\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随着钾浓度的增大而呈增加趋势,说明高浓度铬处理时,钾可不同程度地促进铬由地下向地上部的转运。

关键词:玉米苗期;钾;铬

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2246-05

Effects of Different Potassium Levels on Cr Absorbed and Physiological Characteristics of the Maize Seedlings

LI Guo-jun, LI Hua, DI Zhen-zhen, LIU Lei

(Environment and Resource College, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Cr is known as a toxic agent that is accumulated in the crops over a life time. Solution culture was used to study the effects of different concentration potassium on chromium absorption, transport and physiological characteristics of maize seedlings. The results showed that the physiological indicators of maize seedlings were affected to a certain extent when they were subjected to the applied concentration of the hexavalent chromium. The biomass decreased with the chromium concentration increasing. The amounts of hexavalent chromium absorbed by maize shoot and root system increased with the concentration in solution. Chlorophyll contents and root activity decreased with the concentration of hexavalent chromium increasing. Malondialdehyde content decreased at first and then rising with the chromium increasing, and malondialdehyde content were the minimum at $40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of chromium. Application of potassium could alleviate chromium poisoning effects. Absorption of chromium in maize seedlings root system could be significantly reduced at different concentration of potassium. With application of potassium increasing, the chlorophyll content and root activity increased, but the malondialdehyde content changed irregularly. The shoot system was worth to be noticed, when chromium concentration were between $0\sim 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the amount of chromium decreased gradually with the potassium concentration increasing, when chromium concentration were between $40\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the amount of chromium increased with the potassium concentration increasing. This illuminated that different potassium concentration could promote the chromium transiting from the root system to the shoot at high chromium concentration.

Keywords: maize seedling; K; Cr

随着工业的发展,越来越多的土壤受到重金属污染,六价铬是环境中重要的重金属污染物,对植物具

有明显的毒害作用,而且会通过食物链危及人体健康。铬盐和金属铬的大量生产和使用,使水体及农田的铬污染日趋严重^[1]。

在重金属污染的众多治理措施中,农业措施以其投资小、成本低、基本无环境副作用以及能实现修复和利用相结合等而受到人们的普遍关注^[2],施肥作为最常规的措施^[3],被应用到重金属治理当中。不同的肥料由于元素不同、元素和土壤的相互作用不同,对重

收稿日期:2009-04-24

基金项目:山西省自然科学基金(20051034);环境修复与生态健康教育部重点实验室开放基金(050203);山西省科技攻关项目(20090311072)

作者简介:李国军(1982—),男,山西左云人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染治理。E-mail:liguojun_01@yahoo.com.cn

通讯作者:李 华 E-mail:lihua@sxu.edu.cn

金属污染土壤的修复效果也不同。因此,选择适宜的肥料种类,成为农业措施中特别重视的重金属污染治理措施^[4-5]。有研究表明施用氮肥一般能提高重金属的植物有效性^[6-7],磷对植物吸收重金属影响的研究结果很不一致,而关于钾素与重金属之间相互作用的研究相对较少^[8-9]。

本文以玉米为材料,通过溶液培养法,研究了不同钾素水平对生长于铬污染环境中玉米幼苗体内铬含量及生理特性的影响,钾素与金属铬之间的相互作用,为减少或降低环境中铬对植物的毒害作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

以玉米(*Zea mays* L.)为实验材料,品种为玉糯二号,将均匀一致的玉米种子用10% H_2O_2 消毒10 min后用去离子水冲洗3~5次,置25~30℃培养箱中催芽,待胚根长至3~4 cm时移至装有1/2 Hogland 营养液的塑料桶中。培养1周当真叶长出后移入装有Hogland 完全营养液桶中培养。营养液组成(单位均为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$,2 000; MgSO_4 ,1 000; K_2HPO_4 ,100; KCl ,200; H_3BO_3 ,20; MnSO_4 ,3.6; Na_2MoO_4 ,0.4; CuSO_4 ,0.62; NiSO_4 ,1.0; ZnSO_4 ,10; Fe-EDTA ,100。植物培养环境条件为25℃/12 h光照、20℃/12 h黑暗,相对湿度60%~70%、光照强度不小于10 000 lx的培养室。试验采用容积为3 L的塑料桶,每桶定植3株,营养液的pH调至6~6.5,营养液每3 d更换1次,完全营养液中设置不同浓度的钾、铬处理。钾处理浓度设400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (完全营养液本底浓度)和800、1 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,3个水平;铬处理浓度设0,20,40,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 4个水平。共12个处理组合,各处理均设3次重复。培养30 d后收获并处理,收获前取玉米幼苗顶叶测定叶绿素和丙二醛,取部分根测定根系活力,进行根系活力的测定。收获时分地上、地下两部分,洗涤后105℃烘干,分别测定植物干重、Cr含量。

1.2 测定方法

Cr含量测定采用二苯基碳酰二肼光度法^[10];叶绿素含量测定采用乙醇丙酮混合液法测定^[11];根系活力的测定采用TTC法^[12];丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[13]。

1.3 数据统计

采用Microsoft Excel 和SPSS12.0进行有关数据的计算、统计与处理。

2 结果与分析

2.1 不同钾、铬处理对玉米苗期生物量的影响

不同钾、铬处理对玉米苗期生物量的影响见图1。由图1可知,低钾浓度(400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理,玉米苗期的生物量随铬处理浓度的增大逐渐降低,铬浓度为100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生物量最小。中钾浓度(800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)及高钾浓度(1 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理时,玉米苗期生物量呈现先增大后降低的趋势。当铬处理浓度为20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生物量达到最大。可以看出,钾、铬之间存在一定的拮抗作用。

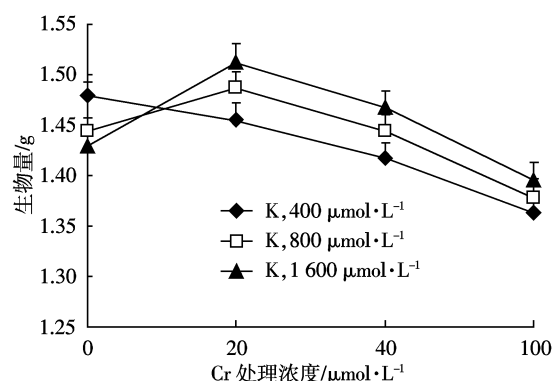


图1 不同钾、铬处理对玉米苗期生物量的影响

Figure 1 Effects of different potassium, chromium treatments on the biomass of maize

2.2 钾素水平对玉米幼苗根系、地上部铬含量的影响

由图2、图3可知,重金属铬被玉米吸收后,大部分停留在根部,少量向地上部分迁移,铬在玉米幼苗不同部位的浓度顺序为根>茎、叶,即重金属在植物体内新陈代谢旺盛的器官中蓄积量较大^[14]。

钾的施用对玉米不同部位(地下、地上部)的铬含

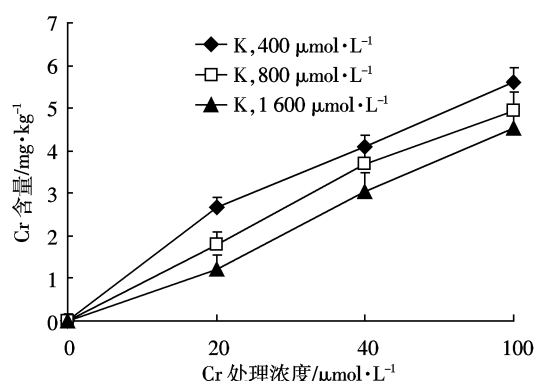


图2 不同钾素水平对玉米苗期根系铬含量的影响

Figure 2 Effects of different levels of potassium on chromium contents in maize seedling roots

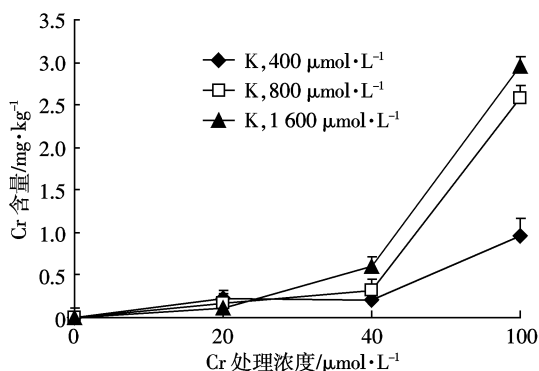


图 3 不同钾素水平对玉米苗期地上部铬含量的影响

Figure 3 Effects of different levels of potassium on chromium contents in maize seedling shoots

量产生一定影响。在铬污染处理组中,地下部铬含量随着溶液中铬的浓度增加而增加,而地上部在低浓度铬处理时增加不显著,高浓度铬处理下,铬含量显著增加,说明地上部组织细胞对铬的吸收有一定的抑制作用,但当铬浓度较高时,这种抑制作用受到破坏。比较各钾处理之间,则玉米不同部位(地下、地上部)表现不同的变化趋势:玉米地下部铬的吸收量随着钾处理浓度的增大而减小;而地上部,当溶液中铬浓度在 $0\sim 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时铬含量随着钾处理浓度增加而减小,当溶液中铬浓度在 $40\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,铬含量随着钾浓度增大而呈增加趋势,说明施钾肥可抑制玉米根部对铬的吸收。但对于玉米茎叶,低浓度钾抑制铬从根向茎叶中转移,高浓度钾则促进铬从根向茎叶转移。各部位的变化规律不一致。

2.3 不同钾、铬处理对玉米叶绿素含量的影响

叶绿素是光合作用中最重要色素,其含量高低与光合作用密切相关。由测定结果(图 4)可见,在低钾水平处理组中,叶片中的叶绿素随着溶液中铬浓

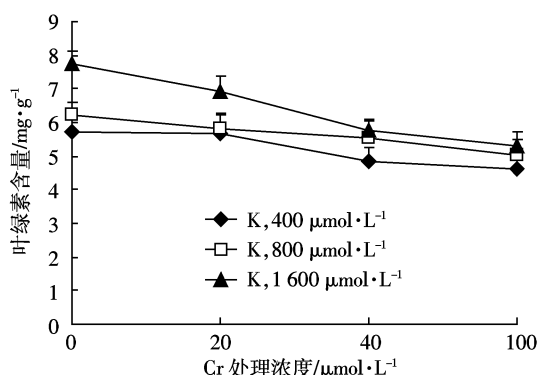


图 4 不同钾、铬处理对玉米叶绿素含量的影响

Figure 4 Effects of different potassium, chromium treatments on the chlorophyll contents of maize

度的增加而逐渐减小,说明铬对叶绿素的合成有一定的抑制作用;随着钾元素的加入,中、高钾水平处理组中叶绿素含量呈现同低钾水平处理组相同趋势,比较不同钾处理组,叶片中叶绿素的含量随着钾浓度的增大而增大,说明钾对叶绿素的形成有一定的有利影响^[15],并且缓解铬对叶绿素的破坏作用。

2.4 不同钾、铬处理对玉米丙二醛含量的影响

玉米根系是植株最先接触到重金属铬的部位。由图 5 可见,在单一铬作用下,玉米中的丙二醛的含量随着溶液中铬的浓度的增大出现先减小后增加的趋势,在不同的钾处理组中也呈现同样的趋势:在钾处理浓度为 400 及 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铬处理浓度为 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,以及在钾处理浓度为 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铬处理浓度为 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,丙二醛含量出现最低点,之后随着铬处理浓度增大而增大,说明玉米幼苗体内存在一定的抵抗重金属毒害的机制。比较不同钾处理组,当铬浓度为 $0\sim 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA 的含量与钾处理浓度没有一定的规律性,当铬浓度为 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA 的含量随着钾处理浓度的增大而减小,当铬浓度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA 的含量随着钾处理浓度的增大而增大,不同钾浓度处理之间并没有表现出明显的规律性。

2.5 不同钾、铬处理对玉米根系活力的影响

重金属离子对植物生长、生理代谢等造成危害,达到一定浓度时影响显著^[16]。由图 6 可见,重金属铬对玉米根系活力有一定的不利影响,不论钾的处理浓度高或低,在铬作用下,玉米根系活力都随着铬处理浓度的增大而逐渐减小。比较不同钾处理组,当铬处理浓度为 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根系活力随钾处理浓度的增大而减小,说明过量的钾对根系活力存在一定的负面

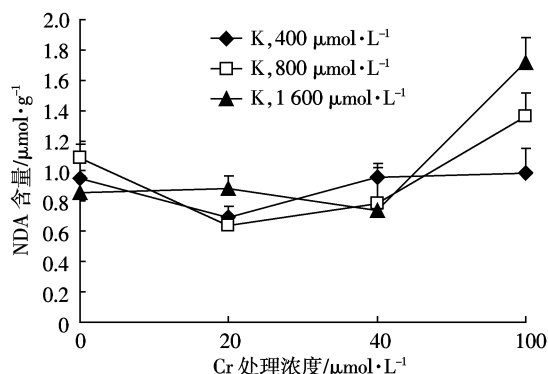


图 5 不同钾、铬处理对玉米丙二醛含量的影响

Figure 5 Effects of different potassium, chromium treatments on the MDA contents of maize

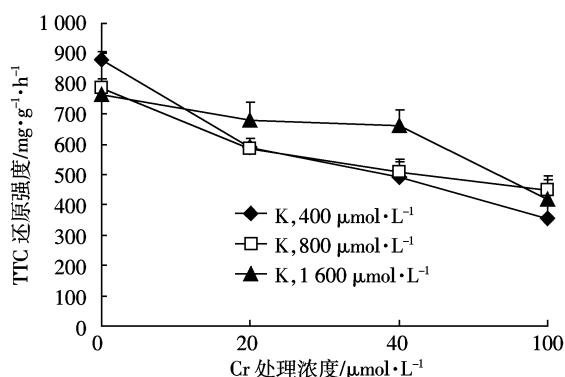


图 6 不同钾、铬处理对玉米根系活力的影响

Figure 6 Effects of different potassium, chromium treatments on the root activity of maize

影响；当铬处理浓度不为 $0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 且逐渐增大时，根系活力随着钾处理浓度增大而增大，说明钾对铬的毒害有一定的抑制作用。

3 讨论

低铬浓度下 ($20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)，生物量随钾浓度的增大而增大，当铬浓度大于 $40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，生物量都呈下降趋势，钾可以促进生物量的积累。可能是由于铬作用，植物体内部发生了不同程度氧化，体内抗氧化酶类含量增加，以此提高代谢能力来应对外界的破坏^[17-18]，当胁迫浓度超过其调节能力时，对自身生理系统造成了不可逆伤害，而钾可以抑制铬的胁迫。

测定植物体内的铬含量能够说明植物对重金属铬的吸收能力，玉米幼苗通过根系代谢作用吸收营养液中的铬，进入根细胞内的铬一部分滞留在根中，一部分随原生质流动运移至临近细胞，并通过细胞之间的运输，输送到导管中，随作物蒸腾作用向地上部移动，并积累在茎叶中。溶液培养条件下，随着溶液中铬浓度的增加，玉米地下部铬吸收量呈增加趋势；而地上部，当溶液中铬浓度为 $0\sim 40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，铬含量的变化较小，当铬浓度为 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，铬含量迅速增大。地下部铬吸收量随着钾浓度的增大而减小，而地上部，当溶液中铬浓度为 $0\sim 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，随着钾浓度的增大铬含量逐渐减小，当铬浓度为 $40\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，随着钾浓度的增大铬含量呈增加趋势。

叶绿素含量是表示植物光合器官生理状况的重要指标。叶绿素含量随着铬浓度的增大而减小。铬对叶绿素合成有一定的抑制作用，这种抑制作用原因可能主要的是由于重金属毒害引起的细胞内膜结构的

破坏^[19]，也可能由于在逆境条件下，活性氧在细胞中增加，必然使更多的 O_2 和 H_2O_2 等扩散到叶绿体内，从而参与了对叶绿素的降解^[20]。随着钾浓度的增大叶片中叶绿素含量增大，说明钾能够促进叶绿素的合成，且一定程度缓解铬对叶绿素的破坏。

MDA 作为膜脂质过氧化的产物，其在机体内的积累会对细胞产生毒害作用，可作为膜脂质过氧化程度的指标之一。在铬胁迫下，玉米中丙二醛的含量随着铬处理浓度的增大而出现先减小后增加的趋势。不同钾处理浓度与玉米中 MDA 的含量之间并没有表现出明显的规律性。原因可能是在重金属胁迫下，植物体内产生大量的活性氧自由基，破坏了活性氧代谢平衡，使膜脂过氧化，从而使植物受到伤害^[21]。低浓度的铬胁迫时，植物在逆境因子作用下通过自身防御机制对毒物做出的保护性反应；而随着铬浓度的增大，玉米叶片的保护酶活性下降过氧化程度加剧，膜脂过氧化作用的加剧会导致膜损伤，最终表现出膜透性增加，抑制玉米幼苗的生长发育^[22]。

根系活力与根系生命活动的强弱有直接的关系，它指示着根的生长和代谢的旺盛程度，尤其是细胞吸收和逆浓度梯度保持营养离子的能力。玉米的根系活力随着铬浓度的增大而降低，而且降低趋势不可逆转；这可能是因为根部的细胞膜在受到伤害后，细胞内的离子和有机物大量外渗，外界的 Cr^{6+} 趁机进入细胞，结果导致根系的生理代谢失调^[23]。对比不同钾处理浓度组，根系活力随钾浓度增大而减小，单独钾作用下，高浓度钾对根系活力具有一定抑制作用；加入铬后，根系活力随着钾处理浓度增大而增大，说明钾可以缓解铬对根系的毒害作用。

4 结论

(1) 铬对生物量的增加有抑制现象，钾可以缓解这种抑制现象；低铬浓度时 ($20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)，钾对玉米体内铬的积累有抑制作用，高铬浓度下作用不明显。

(2) 钾对玉米地下部对铬吸收有一定抑制作用；而对铬由地下向地上部转移则有一定促进作用。

(3) 钾能够促进叶绿素的合成，一定程度缓解铬对叶绿素的破坏作用。

(4) 不同钾处理浓度与玉米中 MDA 的含量之间并没有表现出明显的规律性。

(5) 重金属铬对根系活力有毒害作用，随着铬浓度的增大而降低，而且降低趋势不可逆转；钾可以缓解铬对根系的毒害作用。

参考文献:

- [1] 胡 健, 康贻军, 等. 水稻不同生育期土壤微生物生物量及生物活性对模拟 Cr(VI) 污水灌溉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2308-2314.
HU Jian, KANG Yi-jun, et al. Response of soil microbial and biomass and bioactivities to stimulated irrigation of Cr(VI) sewage in different growth stage of rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2308-2314.
- [2] 刘 平, 徐明岗, 李菊梅, 等. 不同钾肥对土壤铅植物有效性的影响及其机制[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 202-206.
LIU Ping, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Effects of different potassium fertilizers on the phytoavailability of Pb in soil and its mechanisms [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 202-206.
- [3] Lavedol R S, Porceli C A, Alvares R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in coin, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 62: 55-60.
- [4] 王慎强, 陈怀满, 司友斌. 我国土壤环境保护研究的回顾与展望[J]. 土壤, 1999(5): 255-260.
WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man, SI You-bin. Retrospect and prospect on the research of soil environmental protection of China[J]. *Soil*, 1999(5): 255-260.
- [5] 李永涛, 吴启堂. 土壤重金属污染治理措施综述[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(2): 134-139.
LI Yong-tao, WU Qi-tang. Review of remediation methods for heavy metal contamination of soil[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6(2): 134-139.
- [6] Erika Klang-Westin, Perttu K. Effects of nutrient supply and soil cadmium concentration on cadmium removal by willow[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 23: 415-426.
- [7] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. 营养元素 N、P、K 对 Pb 超富集植物吸收能力的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 262-265.
NIE Jun-hua, LIU Xiu-mei, WANG Qing-ren. Influence of nutrient elements N, P, K on the Pb hyperaccumulator of absorptive capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 262-265.
- [8] 陈 苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 182-188.
CHEN Su, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 182-188.
- [9] Haghiri F. Release of cadmium from clays and plant uptake of cadmium from soil as affected by potassium and cadmium amendments[J]. *J Environ Qual*, 1976, 5: 395-399.
- [10] 张志良. 植物生物化学技术和方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 245-247.
ZHANG Zhi-liang. Techniques and methods of plant biochemistry[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 245-247.
- [11] 华东师范大学生物系植物生理教研组. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 47-48.
Plant Physiology Research Group of Biology Department of East China Normal University. The guidance of plant physiology experiments[M]. Beijing: People's Education Press, 1980: 47-48.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-185, 119-120.
LI He-sheng. Experiments principles and technology of plant physiology and biological[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184-185, 119-120.
- [13] 刘祖祺, 张石诚. 植物抗性生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 370-372.
LIU Zu-qi, ZHANG Shi-cheng. Biological resistance of plant[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1990: 370-372.
- [14] 莫 争, 王春霞, 陈 琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 110-116.
MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Enrichment and distribution of heavy metal Cu, Pb, Zn, Cr, Cd in the rice plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 110-116.
- [15] 雷泽湘, 许智墙, 费永俊. 钾对水培观音莲生长的影响[J]. 长江大学学报(自科版)农学卷, 2007, 4(4): 16-19.
LEI Ze-xiang, XU Zhi-qiang, FEI Yong-jun. Effect of potassium on hydroponic growth of *Alocasia amazonica*[J]. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit) Agri Sci V Dec*, 2007, 4(4): 16-19.
- [16] 姜虎生, 薛 阳, 李 晶. EDTA 作用下 Cr⁶⁺ 对玉米生理指标的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(2): 99-102.
JIANG Hu-sheng, XUE Yang, LI Jing. Effect of Cr⁶⁺ on physiological index of corn at the presence of EDTA[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2008, 44(2): 99-102.
- [17] 游植麟. 土壤受镉铬铅复合污染的生物效应研究[J]. 农业环境保护, 1997, 16(3): 31-132, 137.
YOU Zhi-lin. Biological effects of soil polluted by cadmium chromium and lead[J]. *Agro-environmental Protection*, 1997, 16(3): 31-132, 137.
- [18] 马成仓, 李清芳, 等. 汞对玉米幼苗膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. 西北植物学报, 1997, 17(2): 217-220.
MA Cheng-cang, LI Qing-fang, et al. The effect of mercury on membrane-lipid peroxidation and endogenous protective system in maize seedling[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1997, 17(2): 217-220.
- [19] 杨顶田, 蕉旦壹, 文 鹏, 等. Cr⁶⁺ 污染对莼菜冬芽茎尖细胞超微结构的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2000, 23(3): 91-95.
YANG Ding-he, JIAO Dan-yi, WEN Peng, et al. Influence of Cr⁶⁺ pollution on the ultrastructure of *Brasenia schreberi* winter buds stem cell[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2000, 23(3): 91-95.
- [20] Huff A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogenperoxide[J]. *Phytochemistry*, 1982, (21): 261-265.
- [21] 张义贤, 张丽萍. Cd²⁺ Pb²⁺ Hg²⁺ Ni²⁺ 胁迫对大麦抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 217-221.
ZHANG Yi-xian, ZHANG Li-ping. Effects of antioxidant enzymes activities in hordeum vulgare seedling under Cd, Pb, Hg, Ni stresses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 217-221.
- [22] 孔祥生, 等. 镉胁迫对玉米苗生长及生理化的影响[J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(2): 111-113.
KONG Xiang-sheng, et al. Effects of cadmium stress on maize seedling growth and physiological and biochemical[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1999, 18(2): 111-113.
- [23] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 91-99.
JIANG Xing-yu, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plant[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 91-99.