

N、P、K 肥对玉米幼苗吸收和积累重金属的影响

焦 鹏, 高建培*, 王宏宾, 熊国焕, 易 锋

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 采用室内盆栽试验, 研究复合污染土壤中施加氮肥(NH_4Cl)、磷肥(Na_2HPO_4)和钾肥(KCl)对高生物量经济作物玉米(*Zea mays* L.)幼苗生长以及吸收和积累重金属的影响。结果表明, 不同施肥方式和浓度处理对玉米生物量变化以及吸收重金属有不同影响, NH_4Cl 能显著提高玉米地上部生物量、土壤 Pb、Cd 有效态含量, 增加玉米对重金属 Pb、Cd、As 的提取量, 最大分别可提高 1.7、2.0 倍和 1.2 倍。不同施肥方式和处理浓度均显著影响土壤有效态 Pb 含量, Na_2HPO_4 在中浓度处理时显著降低土壤 Pb 的有效性, 高浓度时则显著增加土壤有效态 As 含量, 使玉米地上部对 As 的积累量有明显提高。在不同的浓度水平下, 钾肥处理使玉米提取 Pb 含量显著高于氮肥和磷肥, 其中低浓度 KCl 处理使玉米提取 Pb 量比对照增加 2.4 倍。对 Pb-Cd-As 复合污染农田土壤来说, 施用氮肥(NH_4Cl)处理对强化玉米的修复效果最好。

关键词: 玉米; 肥料; 重金属; 吸收; 积累

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)06-1094-09

Effects of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizers on Heavy Metal Uptake and Accumulation by Maize Seedlings

JIAO Peng, GAO Jian-pei*, WANG Hong-bin, XIONG Guo-huan, YI Feng

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract Lead(Pb), cadmium(Cd) and arsenic(As) are heavy metals with wide research attention. A pot-trial test was carried out under Pb-Cd-As compounded pollution conditions to study the effects of nitrogen(NH_4Cl), phosphorus(Na_2HPO_4) and potassium(KCl) fertilizers on seedling growth, heavy metal uptake and accumulation of maize (*Zea mays*), which is a high-biomass plant. The results indicated that a significant change was observed in biomass(shoot and root) and heavy metal uptake of maize under different fertilizations and fertilizer concentrations. NH_4Cl could significantly increase the aboveground biomass of maize and the accumulated Pb and Cd concentrations in plants. The extractability of Pb, Cd and As increased 1.7, 2.0 folds and 1.2 folds, respectively, with the application of NH_4Cl . Both fertilizations and their concentrations could significantly affect the accumulation of Pb in plant. However, Na_2HPO_4 significantly reduced Pb bioavailability in soil at medium concentration($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), but significantly increased bioavailable As concentration in soil, which in turn significantly increased As accumulation in the shoots of maize at high Na_2HPO_4 concentration($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Under different levels of fertilizer concentrations, Pb extraction by potassium was significantly higher than that by nitrogen and phosphorus. Compared with the control, KCl could increase Pb extraction for 2.4 folds in aboveground tissues of maize at low concentration($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). NH_4Cl was the most effective fertilizer in enhancing phytoremediation of Pb-Cd-As contaminated soil by maize.

Keywords maize(*Zea mays* L.); fertilizer; heavy metals; uptake; accumulation

近年来随着经济日趋发展, 城市化和工业化的加速, 我国土地资源锐减, 环境污染在不断恶化^[1]。由于

工业废物排放、不合理的农业管理措施以及开发矿产资源, 导致农田土壤中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)等重金属污染日趋严重。重金属污染物可影响土壤质量及作物的生长, 通过食物链危害人体健康, 重金属污染对环境和人类健康巨大的潜在危害已引起国内外广泛关注。

国内外先后运用不同重金属富集能力的植物开展室内盆栽和田间试验, 为利用植物修复重金属污染

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 国家环境保护科技项目(E-2007-06), 云南省环境保护专项资金项目(2007[262]), 云南省教育厅科学研究基金重点项目(09Z0019)

作者简介: 焦 鹏(1985—), 女, 河南郑州人, 在读硕士, 主要从事污染生态学。E-mail: tianyahaijiao510@163.com

* 通讯作者: 高建培 E-mail: gaojp99@yahoo.com.cn

土壤提供更广泛的依据,但大多研究主要是针对单一重金属污染,对农田复合污染的研究较少。近年来,开始有人采用高生物量的农作物来实现土壤重金属污染的修复^[2-3]。目前发现的具有高生物量的经济作物如玉米(*Zea mays* L.)^[4-5]逐渐成为具有修复重金属污染土壤潜力的植物,玉米根系、秸秆对土壤中多种重金属具有较高的富集作用^[6],它具有生物量大、栽种面积广等优点。我们前期的田间种植试验结果表明,在土壤重金属含量为 Pb 572.17 mg·kg⁻¹、Cd 2.52 mg·kg⁻¹、As 285.86 mg·kg⁻¹ 的情况下,玉米籽粒中 Pb、Cd、As 含量不高,分别为 Pb 0.42 mg·kg⁻¹、Cd 0.07 mg·kg⁻¹、As 0.092 mg·kg⁻¹(未发表资料),Cd、As 含量低于 GB 2715—2005 国家粮食卫生标准(0.1、0.2 mg·kg⁻¹),而 Pb 含量略高于国家粮食卫生标准(0.2 mg·kg⁻¹),但均明显低于 GB 13078—2001 国家饲料卫生标准,收获的玉米籽粒用作动物饲料是安全的。因此,用玉米这种高生物量的经济作物修复重金属复合污染农田具有一定可行性。此外,不少提高大生物量植物对重金属吸收率的研究集中于 EDTA、DTPA 等合成螯合剂^[7-8]。

然而,受污染有待修复的农田土壤往往养分不足,由于重金属污染土壤本身的性质,在施加肥料时,应考虑肥料的元素种类及其与重金属的关系对植物修复效果的影响,如:聂俊华等^[9]研究表明 N 和 K 会促进绿叶苋菜和羽叶鬼针草对重金属 Pb 的吸收,楼玉兰等^[10]研究表明铵态氮肥能促进玉米对重金属吸收。施肥是农作物种植过程中的重要措施之一,本文旨在探讨施加不同肥料于 Pb—Cd—As 复合污染土壤上,比较其对玉米吸收重金属效果的影响,探讨玉米在重金属复合污染土壤上的生长状况及重金属在体内的残留特征,以期有针对性地找出何种处理最优,为合理利用并修复重金属复合污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:采自云南省个旧市乍甸某重金属复合污染农田棕壤土,土壤采回后风干、磨碎、过 5 mm 筛,用于作物室内培养。土壤的基本理化性质为 pH 7.37,有机质 36.39 g·kg⁻¹,全氮 1.39 g·kg⁻¹,全磷 1.85 g·kg⁻¹,阳离子代换量(CEC)9.52 cmol·kg⁻¹,Pb 572.17 mg·kg⁻¹,Cd 2.52 mg·kg⁻¹,As 285.86 mg·kg⁻¹。

供试作物:玉米种子由云南省农业科学研究院研

发,购自昆明春喜农业科技开发有限公司,品种为云试 5 号,种子经催芽后直接播种于土壤中。

试剂:氮肥为 NH₄Cl,磷肥为 Na₂HPO₄,钾肥为 KCl,所用试剂均为分析纯。

1.2 试验方法

NH₄Cl 处理施 N 水平为 100、300、500 mg·kg⁻¹,分别记作 N1、N2、N3;Na₂HPO₄ 处理施 P 水平为 100、200、400 mg·kg⁻¹,分别记作 P1、P2、P3;KCl 处理施 K 水平为 100、300、600 mg·kg⁻¹,分别记作 K1、K2、K3。另设对照 CK(不施肥料),共 10 个处理,每个处理 3 个重复。

室内盆栽的试验采用白色塑料花盆(内径 20 cm,高 18 cm),每盆复合污染农田土(过 5 mm 筛)的用量为 1.2 kg。基肥采用化肥 NH₄Cl、KH₂PO₄、KCl(均为分析纯),用量分别为 200 mg N·kg⁻¹土、120 mg P₂O₅·kg⁻¹土、200 mg K₂O·kg⁻¹土,按设定浓度拌入污染土壤后陈化平衡两周。陈化期满将催芽后的玉米种子移入盆中,每盆移栽 6 株,1 周后间苗,留长势均匀的 4 株,统一在 20~30 ℃条件下培养,生长期间浇水并经常捉虫,防止虫害(不喷洒农药以减少试验误差)。植物生长期从 2010 年 4 月 15 日至 2010 年 6 月 15 日,生长期满分别收获玉米的地上部分和地下部分。

1.3 项目测定

植物样品用自来水洗干净后用去离子水清洗 2~3 次,在 105 ℃杀青 30 min,70 ℃下烘干至恒重,分别称量其地上部和地下部干重。土壤基本理化性质参照鲍士旦的《土壤农化分析》(第三版)^[11]。土壤中 Pb、Cd、As 的全量采用硝酸-硫酸-高氯酸消煮,原子吸收分光光度法和氢化物发生原子吸收光谱法测定;有效态 Pb、Cd 采用二乙三胺五醋酸-三乙醇胺法提取^[11],有效态 As 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaH₂PO₄ 法提取^[12]。玉米植株中 Pb、Cd、As 含量测定用硝酸-高氯酸消煮,原子吸收分光光度法和氢化物发生原子吸收光谱法测定。

空白样品、茶叶标准样品(GBW-08505)、土壤标准样品(GBW-08303)以及 As 和 Pb、Cd 标准溶液购自国家标准物质研究中心。各元素的加标回收率在 92%~99%之间,符合元素质量分数分析质量控制要求。

1.4 统计分析方法

采用 Microsoft Excel 进行平均值和标准差的运算,通过 SAS 9.0 软件进行双因素方差分析,并采用 Turkey's HSD 法进行多重比较。显著性差异水平 *P* 取

0.05 极显著差异水平 P 取 0.01。

2 结果与分析

2.1 不同肥料处理对玉米生物量的影响

不同肥料和浓度处理对玉米幼苗各部位生物量影响如图 1 所示。生长期为 2 个月的玉米地上部生物量基本是根部的 8 倍左右。对根部生物量进行方差分析,结果表明不同的肥料处理、浓度处理以及肥料处理和浓度处理的交互作用对根部生物量均无显著影响。不同肥料处理($P=0.0277<0.05$)、浓度处理($P=0.0212<0.05$)对玉米地上部生物量的影响达到显著

水平,在相同的浓度处理下玉米地上部生物量的变化趋势由大到小均为氮肥处理>钾肥处理>磷肥处理,其中在中浓度处理下氮肥显著促进了玉米的生长,比对照增加 39.1%。而不同肥料处理和浓度处理的交互作用($P=0.0978$)对地上部生物量变化影响不大。

2.2 肥料施用对玉米吸收 Pb、Cd、As 的影响

2.2.1 施加不同肥料对玉米吸收 Pb 的影响

不同肥料和浓度处理下玉米各部位对重金属 Pb 的吸收情况如图 2 所示。不同肥料处理对玉米地上部 Pb 含量的影响达到极显著水平($P<0.01$)。在不同的浓度水平下,玉米地上部 Pb 含量均是钾肥和氮肥处

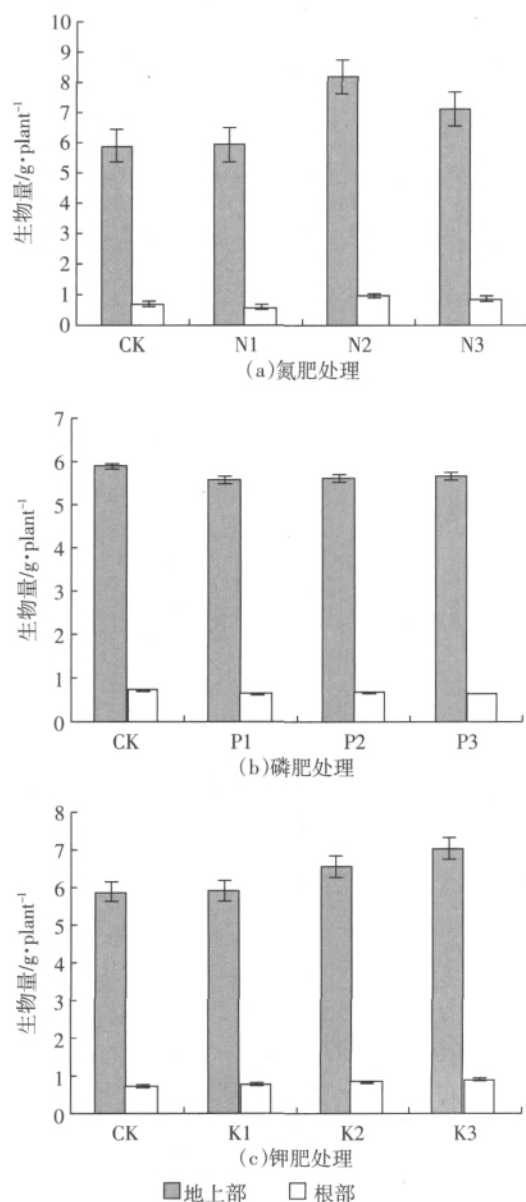


图 1 不同肥料处理对玉米根部和地上部生物量的影响

Figure 1 Effects of different fertilization on the dry biomass of roots and shoots of corn

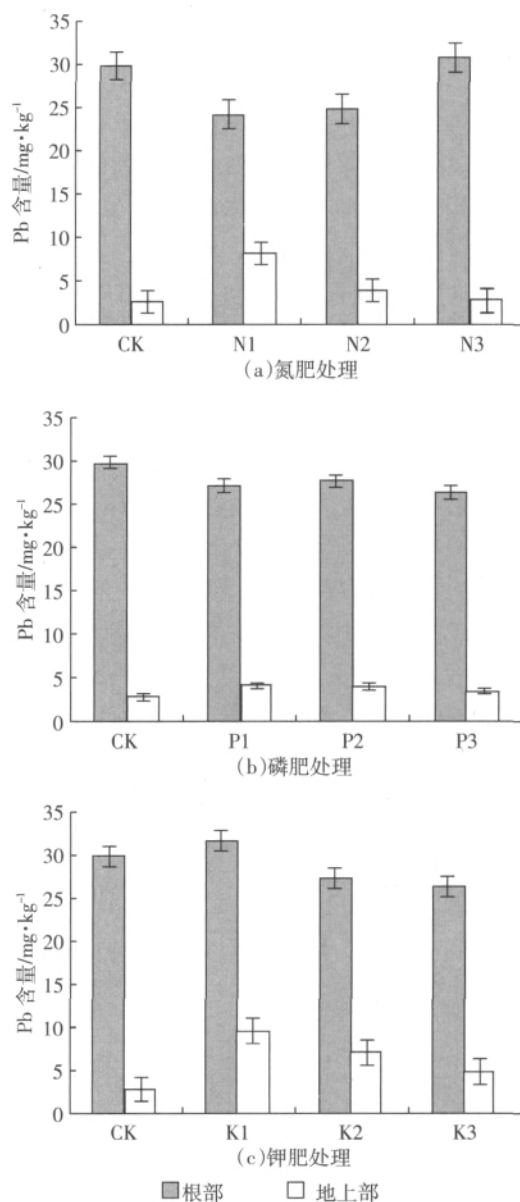


图 2 不同肥料处理对玉米根部和地上部 Pb 含量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization on the concentration of Pb in roots and shoots of corn

理大于磷肥处理。低浓度水平下,钾肥和氮肥处理的 Pb 含量显著高于磷肥处理,分别比磷肥处理增加 1.3 倍和 1 倍;中浓度水平下,氮肥和磷肥处理的 Pb 含量差异不显著,但均显著低于钾肥处理的 Pb 含量,分别比钾肥处理时下降 43.3%和 43.2%;高浓度水平下,钾肥处理的玉米地上部 Pb 含量比氮肥处理增加 69.8%。不同浓度处理对玉米地上部 Pb 含量影响也达到了极显著水平($P<0.01$),在不同施肥方式下,各浓度处理的 Pb 含量均显著高于对照,低浓度处理的 Pb 含量大于中、高浓度处理。如施用氮肥时,中、高浓度处理的 Pb 含量显著低于低浓度处理,分别仅为低浓度处理的 48.8%和 34.8%。

不同肥料和浓度的交互作用对玉米地上部、根部 Pb 含量的影响分别达到极显著水平($P<0.01$)和显著水平($P=0.02<0.05$),而不同的施肥方式和浓度处理对玉米根部 Pb 含量的影响不大。

2.2.2 施加不同肥料对玉米吸收 Cd 的影响

不同肥料、浓度处理对玉米地上部 Cd 含量影响均达到极显著水平($P<0.01$,图 3)。低浓度水平下,各肥料处理之间的 Cd 含量差异不显著;中浓度水平下,氮肥处理的玉米地上部 Cd 含量比磷肥处理增加 32.5%;高浓度水平下,磷、钾肥处理的 Cd 含量差异不显著,但均显著低于氮肥处理的 Cd 含量,分别下降 37.2%和 52.6%。在不同施肥方式下,均是高浓度处理的 Cd 含量大于其他浓度处理。其中施用氮肥时,低、中浓度处理的 Cd 含量显著低于高浓度处理,分别降低 57.7%和 39.4%。

不同肥料和浓度的交互作用对玉米地上部、根部 Cd 含量的影响分别达到极显著水平($P<0.01$)和显著水平($P=0.0218<0.05$),而不同的施肥方式对玉米根部 Cd 含量无显著影响。不同浓度处理对根部 Cd 含量影响达到了极显著水平($P<0.01$),在各施肥方式下,同样是高浓度处理的 Cd 含量显著高于对照及低、中浓度处理。

2.2.3 施加不同肥料对玉米吸收 As 的影响

不同肥料处理对玉米地上部 As 含量的影响达到极显著水平($P<0.01$,图 4)。在不同的浓度水平下,磷肥处理的 As 含量显著大于氮肥和钾肥处理,氮肥和钾肥处理的 As 含量差异不显著,但均显著低于磷肥处理的 As 含量,分别下降 43.9%和 60.2%。不同浓度处理对玉米地上部 As 含量影响也达到了极显著水平($P<0.01$),在不同施肥方式下,均是高浓度处理的 As 含量大于对照及低、中浓度处理,高浓度磷肥

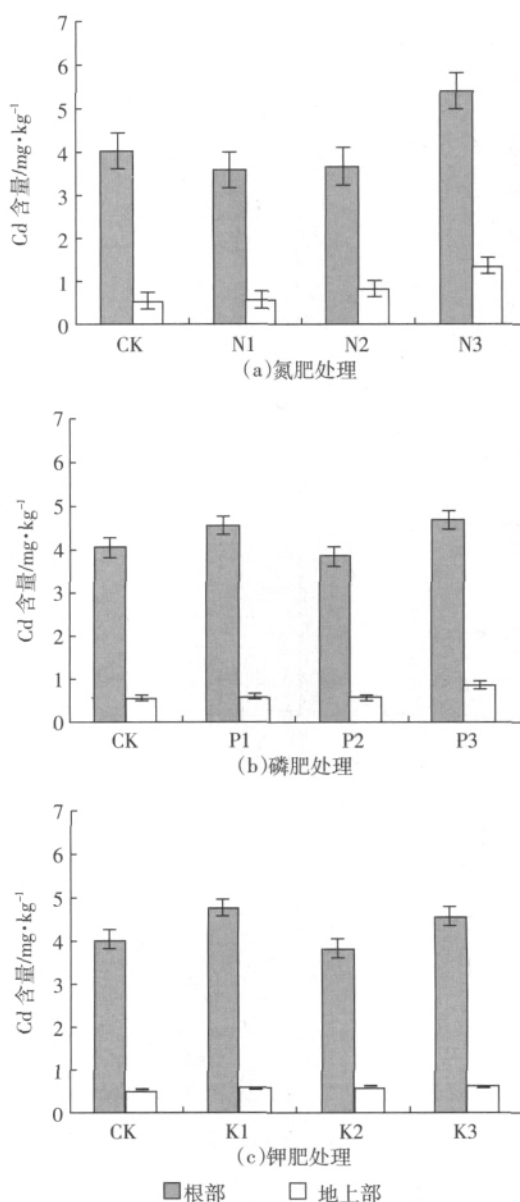


图3 不同肥料处理对玉米根部和地上部 Cd 含量的影响

Figure 3 Effects of different fertilization on the concentration of Cd in roots and shoots of corn

处理的 As 含量比低、中浓度处理分别提高 43.9%和 31.6%。

不同肥料和浓度的交互作用对玉米地上部、根部 As 含量的影响均达到极显著水平($P<0.01$),而不同的处理浓度对玉米根部 As 含量无显著影响。不同的施肥方式对玉米根部 As 含量影响达到了极显著水平($P=0.003<0.01$),中浓度处理下,磷肥处理的 As 含量显著高于氮肥和钾肥,其中比钾肥增加了 1.2 倍。

2.2.4 不同肥料对玉米地上部提取 Pb、Cd、As 的影响

不同肥料、浓度处理下玉米地上部提取重金属的情况如表 1 所示。不同肥料、浓度处理对玉米地上部

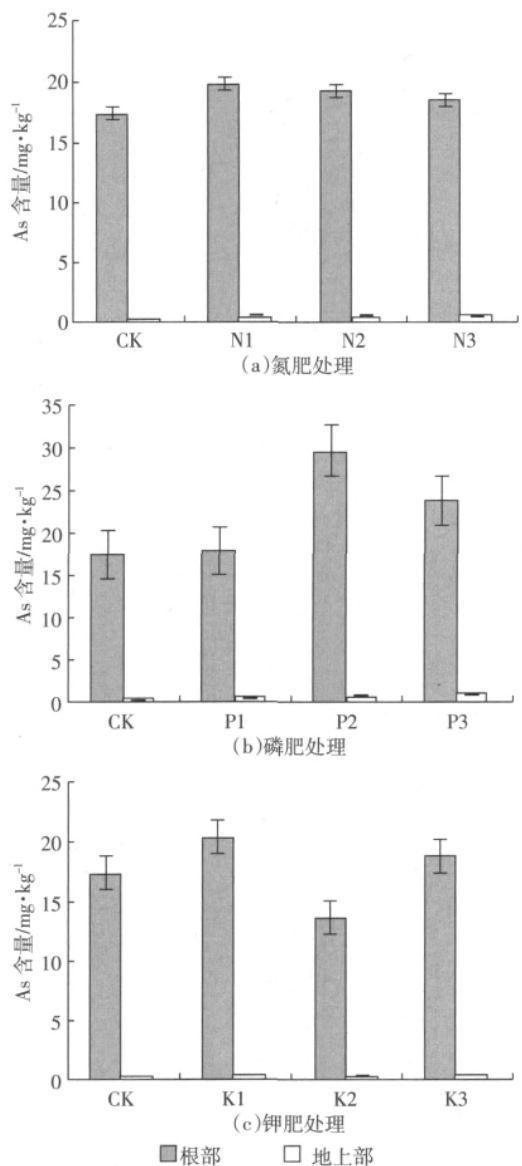


图 4 不同肥料处理对玉米根部和地上部 As 含量的影响
Figure 4 Effects of different fertilization on the concentration of As in roots and shoots of corn

提取重金属 Pb、Cd、As 的影响均达极显著水平 ($P<0.01$)。在不同的浓度水平下,氮肥处理对玉米提取 Cd 含量显著高于磷、钾肥处理,氮肥和磷肥处理对玉米提取 As 含量显著高于钾肥,钾肥处理对玉米提取 Pb 含量显著高于氮、磷肥。不同施肥方式下,低浓度处理对玉米提取 Pb 含量的效果大于其他浓度处理;而中、高浓度处理对玉米提取 Cd、As 的效果最显著。如高浓度氮肥处理下玉米提取 Cd 量比对照增加 2.0 倍,低浓度钾肥处理下提取 Pb 量比对照增加了 2.4 倍。从表 1 还可以发现,不同肥料和浓度的交互作用对玉米地上部提取 Pb、As 的影响均达显著水平 ($P<0.05$),对提取 Cd 的影响则达到极显著水平 ($P<0.01$)。

从总体来看,施加氮、磷、钾肥并未改变重金属在玉米各部位的分配状况(根系>茎叶),其中根系的吸收量是茎叶的几倍至几十倍。

2.3 肥料对土壤重金属有效态的影响

不同氮、磷、钾肥浓度处理下复合污染土壤有效态 Pb 的变化情况如表 2 所示。不同的施肥方式使土壤有效态 Pb 含量达到极显著水平 ($P<0.01$),在低浓度肥料处理时,钾肥处理的土壤有效态 Pb 含量显著高于氮肥和磷肥;而在中、高浓度处理下,氮肥处理的土壤有效态 Pb 含量均显著高于磷肥和钾肥,分别比对照增加了 48.8%和 20.9%。肥料的不同处理浓度以及施肥和肥料浓度的交互作用对土壤有效态 Pb 含量的影响分别达到显著水平 ($P<0.05$)和极显著水平 ($P<0.01$)。

与土壤有效态 Pb 含量不一样,不同的施肥方式和肥料的不同处理浓度对土壤 Cd 的有效性影响不大,虽然表 2 方差分析结果表明差异不显著,但是其交互作用对土壤有效态 Cd 含量的影响达到显著水

表 1 不同肥料对玉米提取重金属的影响

浓度处理	提取 Pb 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$			提取 Cd 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$			提取 As 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$		
	N 肥	P 肥	K 肥	N 肥	P 肥	K 肥	N 肥	P 肥	K 肥
CK	16.46(1.99)	16.46(1.99)	16.46(1.99)	3.25(0.75)	3.25(0.75)	3.25(0.75)	1.81(0.28)	1.81(0.28)	1.81(0.28)
低浓度	43.99(2.72)	23.10(2.46)	56.27(8.29)	3.14(0.61)	3.38(0.93)	3.53(0.86)	2.56(0.53)	3.04(0.15)	2.23(0.38)
中浓度	33.01(8.55)	22.31(1.44)	45.52(7.42)	6.55(0.59)	3.10(0.27)	4.11(1.16)	3.80(1.11)	3.66(0.27)	2.19(0.60)
高浓度	20.04(3.81)	19.56(0.83)	34.34(8.86)	9.70(0.51)	4.87(0.81)	4.55(0.78)	3.91(0.11)	5.48(0.49)	2.73(0.36)
方差分析									
施肥方式(F)	$P<0.01$			$P<0.01$			$P<0.01$		
处理浓度(C)	$P<0.01$			$P<0.01$			$P<0.01$		
F×C	$P=0.004<0.05$			$P<0.01$			$P=0.001\ 1<0.01$		

注 括号内数据表示标准偏差。

表 2 不同肥料对土壤有效态 Pb、Cd、As 的影响

Table 2 Effects of different fertilization on bioavailable Pb, Cd and As in soils

浓度处理	有效态 Pb/mg·kg ⁻¹			有效态 Cd/mg·kg ⁻¹			有效态 As/mg·kg ⁻¹		
	N 肥	P 肥	K 肥	N 肥	P 肥	K 肥	N 肥	P 肥	K 肥
CK	103.97(8.98)	103.97(8.98)	103.97(8.98)	1.15(0.04)	1.15(0.04)	1.15(0.04)	26.40(2.40)	26.40(2.40)	26.40(2.40)
低浓度	105.97(0.85)	103.75(4.98)	127.58(3.96)	1.36(0.02)	1.23(0.11)	1.18(0.13)	28.31(2.17)	27.90(0.35)	31.13(1.55)
中浓度	154.68(2.98)	60.43(7.28)	112.98(8.97)	1.05(0.02)	1.23(0.07)	1.35(0.21)	28.44(1.88)	30.04(0.35)	26.53(0.64)
高浓度	125.68(3.80)	102.73(7.83)	88.53(1.09)	1.18(0.05)	1.04(0.01)	1.24(0.09)	29.33(1.05)	31.53(0.09)	32.31(2.43)
方差分析									
施肥方式(F)	P<0.01			NS			NS		
处理浓度(C)	P=0.004 6<0.05			NS			P<0.01		
F×C	P<0.01			P=0.002 1<0.05			NS		

注 括号内数据表示标准偏差, NS 表示差异不显著。

平($P<0.05$)。说明肥料和浓度处理的共同作用可影响土壤中 Cd 的有效性。

对于土壤有效态 As 的影响,不同的施肥方式以及施肥和肥料浓度的交互作用均未达到显著水平(表 2),但是肥料的不同处理浓度对土壤有效态 As 含量的影响达到极显著水平($P<0.01$)。在不同施肥方式中,高浓度处理下土壤有效态 As 含量显著高于低、中浓度处理。

3 讨论

3.1 不同处理对玉米生物量的影响

施肥是保障农业增产、增收的重要农业措施之一,同时也影响土壤中重金属的吸附—解吸、根际土壤的理化性质及作物对重金属的吸收^[10]。施加氮肥(NH_4Cl)和钾肥(KCl)均能增加玉米的生物量,以中浓度的 NH_4Cl 处理(N_2)效果最为显著。这与聂俊华等^[9]研究的营养元素 N、P、K 对 3 种 Pb 超富集植物绿叶苋菜、紫穗槐和羽叶鬼针草生长发育的报道一致,结果表明少量的 N 和 K 会促进植物叶片叶绿素值和干重的增加。钾肥主要用于提高农作物的品质,对植物的增产效果不如氮肥明显^[13]。磷肥的施加却降低了玉米各部位的干重,前人也有研究发现,磷酸盐对于污染土壤上植物的生长影响并不确定,或者增加生物量,或者无影响,或者减少生物量^[14]。

3.2 施肥对玉米吸收和积累重金属的影响

重金属复合污染比单一重金属元素胁迫的情况更复杂,作用机理也非常复杂,但更符合实际情况。本研究发现在复合污染土壤中,施用肥料对玉米根部吸收积累重金属的促进作用并不明显,低、中浓度 NH_4Cl 处理反而使玉米根部 Pb、Cd 含量略有降低,只有高浓度处理(N_3)显著增加了根部对 Cd 的吸收,

低浓度 Na_2HPO_4 处理(P1)和中浓度 KCl 处理(K2)显著提高了根部对 As 的吸收。这可能与氮肥施加浓度大小、土壤重金属有效态含量以及农田长时间被重金属污染有关,与人工添加重金属土壤的试验不同,长期受重金属复合污染的土壤中重金属有效态含量较低^[15]。然而无论在施加何种肥料的环境下,玉米对土壤中重金属的吸收具有分异特征,重金属主要集中在根部,Pb、Cd、As 在玉米体内的含量分布规律为根>茎叶,这一点与很多研究相吻合^[16-19],表明玉米根系是富集重金属的主要器官,是秸秆甚至籽实进一步吸收重金属的良好屏障。

Salt 等^[20]研究表明植物提取依靠的是其地上部分积累大量重金属。综合分析, NH_4Cl 处理能显著增加玉米地上部重金属 Pb、Cd、As 含量,产生此结果的原因有以下几个方面:一是作为一种氮肥, NH_4Cl 显著提高玉米地上部生物量从而增加其对重金属的积累量;二是 NH_4Cl 的施用增加了土壤中重金属有效态的含量,部分浓度处理还产生显著影响,从而促进玉米对 Pb、Cd、As 的吸收富集, NH_4Cl 作为铵态氮肥施入土壤后,经硝化作用可以导致根际土壤 pH 值下降,硝化作用所生成的硝酸根离子通过淋溶作用带走盐基离子,可进一步酸化土壤^[21];三是 Cl^- 能和重金属离子形成较稳定的络合物,促进重金属的溶出,从而使氮肥 NH_4Cl 的施加提高了土壤重金属的植物可利用性以及玉米地上部重金属的含量。曾清如^[22]研究报道指出, NH_4Cl 对 Cd 的溶出具有明显的促进作用,这主要与 Cl^- 能和 Cd 形成络合物有关,其络合稳定常数要远大于 Zn、Ni、Cu 等重金属离子。孙羲^[23]在植物营养原理中的报道认为生理酸性和生理碱性能引起 pH 变化,当以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为氮源时,植物吸收阳离子总量多于阴离子,从而使介质 pH 下降。楼玉兰等^[24]采用根箱试

验发现,铵态氮肥能降低根际土壤的 pH 值、提高根际土壤中的重金属活性、促进玉米对重金属的吸收。Eriksson^[25]也发现氮肥能促进植物吸收 Cd,增加土壤中 Cd 的活性。

重金属在土壤中的存在形态较多,有效态重金属对作物吸收最为重要。与氮肥不同,磷肥(Na_2HPO_4)的施用普遍降低了土壤中有效态 Pb 的含量,这可能是导致玉米根系吸收 Pb 略有减少的原因之一,Chen 等^[26]的研究也证明了磷可降低土壤中 Pb 的生物有效性。由于污染土壤中 Pb 的有效性主要取决于其化学形态,水溶性磷加入土壤后,土壤溶液中 Pb^{2+} 与磷肥、土壤中的其他化学成分(如 OH^- 、 HPO_4^{2-} 等)发生化学反应形成沉淀而被土壤固相固定,导致 P 对 Pb 的吸收在土壤和植株体内形成难溶的磷酸铅类化合物,从而降低土壤 Pb 的有效性^[27]。另外,土壤中 Pb 的溶解-沉淀反应也受土壤 pH 值的控制,在中碱性土壤条件下,矿物态铅及磷酸盐的溶解性都较低,限制了土壤中磷酸盐的溶解及铅的固定作用^[28-29]。与 Pb 不同的是玉米根系对 Cd 的吸收较多。另外,本研究 Na_2HPO_4 对土壤 As 的有效性以及玉米各部位对 As 的吸收都有明显的促进作用,可能是由于施加磷肥增加了土壤中 As 的释放。Peryea 等^[30]发现在 As 污染果园土壤上,施加磷肥可提高 As 的生物有效性,促进其对 As 的吸收。Jankong 等^[31]通过在土壤中加入 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Na_2HPO_4 和磷肥,发现三角羽旱蕨体内 As 含量增加。Cao 等^[32]也表明在 As 污染土壤上,磷酸盐岩可以增强植物对 As 的吸收。Meharg 等^[33]认为,在植物中磷酸盐和砷酸盐采用相同吸收系统,因此提高磷酸盐含量可减少植物对 As 的吸收。本研究磷肥的施入显著提高了玉米地上部对 As 的吸收,可能由于在本试验条件下,土壤释放出的 As 有效态含量占总 As 含量的百分比较小,整体上较低的生物有效性降低了 As 对玉米的毒害作用,在植株生长所受影响不大的情况下地上部 As 积累量有所增加。

钾肥(KCl)虽不能显著提高玉米地上部生物量,但它能显著提高地上部 Pb 含量,最终达到显著增加玉米地上部 Pb 积累量的目的,其中低浓度处理(K1)效果最好。随着施加浓度的升高,玉米各部位对 Pb 的吸收能力呈先增后减的趋势,而磷肥则降低玉米根系对 Pb 的吸收,这与聂俊华等^[9]研究的少量 KCl 会促进 Pb 超富集植物对 Pb 的吸收,吸收能力随着 N 和 K 水平的增加而降低,土壤供 P 会降低植物吸收 P 的结论相吻合。施加 KCl 可使玉米对 Cd 的积累量略有

增加,可能是 KCl 改变 Cd 在土壤中的存在形态,使有效态含量略有提高,从一定程度上增加了玉米各部位对 Cd 的吸收。相关研究报道^[34]指出 K^+ 的交换作用和 Cl 的络合作用可使施加 KCl 处理提高土壤中可交换态 Cd 的含量。本研究证实了这一结论,但对玉米吸收 Cd 的影响并未达到显著水平,部分处理反而减少了根部的吸收,而王林等^[35]的研究结果表明施用 KCl 在高浓度处理($600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时可显著提高龙葵地上部 Cd 含量。这可能是因为王林等人是在土壤投加单一重金属元素下的影响,而本研究是复合污染的农田土,重金属之间的相互作用影响了玉米对 Cd 的累积过程。刘家女等^[36]发现, Pb 对金盏菊根部积累 Cd 有抑制作用。低浓度 KCl 处理(K1)显著提高了玉米根部对 As 的吸收,玉米地上部 As 含量也有所增加,这可能是由于低浓度 KCl 的施用显著提高了土壤有效态 As 含量,导致根部对 As 的吸收量较高,向地上部转移系数低,对玉米地上部吸收 As 效果不显著。Gulz 等^[37]对玉米、黑麦、油菜、向日葵研究也发现,除玉米外,其他植物中 As 由根部向茎叶转移都十分明显,并且超出限制标准。

4 结论

(1)不同的施肥方式、处理浓度对玉米地上部生物量影响达到显著水平($P < 0.05$),而对玉米根部无显著影响。

(2)不同施肥方式、处理浓度以及两者的交互作用均极显著影响玉米地上部对重金属的吸收,其中施加 NH_4Cl 对 Pb、Cd、As 的吸收量相比对照均有显著增加,最大分别可提高 1.7、2.0 倍和 1.1 倍;但是不同的施肥方式对玉米根部吸收 Pb、Cd 的影响不大,不同的浓度处理只对 Cd 的吸收产生极显著影响。

(3)不同施肥方式和处理浓度对土壤有效态 Pb 含量的影响分别达到极显著水平($P < 0.01$)和显著水平($P < 0.05$);不同浓度处理对土壤有效态 Cd、As 含量均无显著影响,但是不同施肥方式对其影响达到显著水平。

(4)在重金属复合污染农田土壤上, Pb、Cd、As 在玉米各部位的分配状况均为根系 > 茎叶,施用氮肥(NH_4Cl)处理效果较好,可用于强化高生物量经济作物玉米对重金属的吸收积累,通过自然作物栽培,在收获符合一定卫生标准的农产品的同时将作物从土壤中清除,降低社会经济成本逐渐达到修复复合污染

农田土壤的目的。

参考文献：

- [1] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 188.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 188.
- [2] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1262.
WEI Ze-bin, WU Qi-tang, LONG Xin-xian. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil with mixed chelators in co-crop system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1262.
- [3] 黄益宗, 朱永官, 胡莹, 等. 玉米和羽扇豆、鹰嘴豆间作对作物吸收积累 Pb、Cd 的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1478-1485.
HUANG Yi-zong, ZHU Yong-guan, HU Ying, et al. Absorption and accumulation of Pb, Cd by corn, lupin and chickpea in intercropping systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1478-1485.
- [4] Wang M, Zou J H, Duan X C, et al. Cadmium accumulation and its effects on metal up take in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Biore Source Technology*, 2007, 98(1): 82-88.
- [5] Liphadzi M S, Kirkham M B, Mankin K R, et al. EDTA-assisted heavy-metal up take by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm[J]. *Plant and Soil*, 2003, 257(1): 171-182.
- [6] 陈燕, 刘晚苟, 郑小林, 等. 玉米植株对重金属的富集与分布[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 93-95.
CHEN Yan, LIU Wan-gou, ZHENG Xiao-lin, et al. Metallic accumulation and distribution in maize plant[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 93-95.
- [7] Turgut C, Pepe M K, Cutright T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(1): 147-154.
- [8] 杨晓英, 杨劲松, 黄铮, 等. 螯合剂对铅污染土壤上玉米幼苗生长及铅积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 482-486.
YANG Xiao-ying, YANG Jin-song, HUANG Zheng, et al. Influence of chelators application on the growth and lead accumulation of maize seedlings in Pb-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 482-486.
- [9] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb 超富集植物对营养元素 N、P、K 的响应[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 306-309.
NIE Jun-hua, LIU Xiu-mei, WANG Qing-ren. Effects of nutrient elements on the lead uptake by hyperaccumulators[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 306-309.
- [10] 楼玉兰, 章永松, 林咸永. 氮肥对污泥农用后土壤中重金属活性的影响[J]. 上海环境科学, 2004, 23(1): 32-35.
LOU Yu-lan, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong. An effect of nitrogenous fertilizers on activity of heavy metals in sludge applied soil[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2004, 23(1): 32-35.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis(3rd ed)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [12] Huang R Q, Gao S F, Wang W L, et al. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2-3): 531-541.
- [13] 周启星, 唐世荣, 王校常, 等. 健康土壤学-土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHOU Qi-xing, TANG Shi-rong, WANG Xiao-chang, et al. Soil Health-Quality of soil health and safety of agricultural products[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [14] Peryea F J. Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55: 1301-1306.
- [15] Vig K, Megharaj M, Sethunathan N, et al. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: A review[J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 8(1): 121-135.
- [16] Guo Y T, Marschner H. Uptake, distribution and binding of cadmium and nickel in different plant species[J]. *Plant Nutrition*, 1995, 18(12): 2691-2706.
- [17] 熊礼明. 施肥与植物的重金属吸收[J]. 农业环境保护, 1993, 12(5): 217-222.
XIONG Li-ming. Fertilization and heavy metal absorption by plant[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(5): 217-222.
- [18] 刘俊华, 薛澄泽. 土壤中镉对玉米和小麦的影响[J]. 环境杂志, 1993, 9(3): 31-33.
LIU Jun-hua, XUE Cheng-ze. Effects of cadmium in the soil on maize and wheat[J]. *Environmental Journal*, 1993, 9(3): 31-33.
- [19] 孙贤斌, 李玉成, 王宁. 铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 666-669.
SUN Xian-bin, LI Yu-cheng, WANG Ning. Comparisons on active chemical form and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 666-669.
- [20] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 643-668.
- [21] Eriksson J E. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, 49(3-4): 355-368.
- [22] 曾清如, 周细红, 毛小云. 不同氮肥对铅锌矿尾矿污染土壤中重金属溶出及水稻苗吸收的影响[J]. 土壤肥料, 1997(3): 7-11.
ZENG Qing-ru, ZHOU Xi-hong, MAO Xiao-yun. Effects of different nitrogen fertilizers on leaching of heavy metals in Pb-Zn ore tailings polluted soil and their uptake by rice seedlings[J]. *Soils and Fertilizers*, 1997(3): 7-11.
- [23] 孙羲. 植物营养原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
SUN Xi. Principles of plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995.
- [24] 楼玉兰, 章永松, 林咸永. 氮肥形态对污泥农用土壤中重金属活性及玉米对其吸收的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 392-398.
LOU Yu-lan, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong. Effects of forms of nitrogen fertilizer on the bioavailability of heavy metals in the soils amended with biosolids and their uptake by corn plant[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University (Agric and Life Sci)*, 2005, 31(4): 392-398.

- [25] Eriksson J E. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1990, 49 : 355–368.
- [26] Chen S B, Zhu Y G, Yang J H. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil–plant systems[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(8) :1–7.
- [27] 岳 平. 添加化学改良剂对海南岛砖红壤中铅的化学形态与转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5) :1791–1795.
YUE Ping. Chemical forms and transformations of Pb in granitic latosol on Hainan island through adding chemical amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5) :1791–1795.
- [28] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, et al. Mechanisms of lead, copper and zinc retention by phosphate rock[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131 : 435–444.
- [29] 陈世宝, 朱永官, 马义兵. 不同磷处理对污染土壤中有效态铅及磷迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7) :1140–1144.
CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan, MA Yi-bing. Effects of phosphate amendments on Pb extractability and movement of phosphorus in contaminated soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7) :1140–1144.
- [30] Peryea F J. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions[J]. *Hort Science*, 1998, 33(5) :826–829.
- [31] Jankong P, Visoottiviseth P, Khokiattiwong S. Enhanced phytoremediation of arsenic contaminated land[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(10) : 1906–1912.
- [32] Cao X, Ma L Q, Shiralipour A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 126 : 157–167.
- [33] Meharg A A, Macnair M R. An altered phosphate uptake system in arsenate-tolerant *Holcus lanatus* L.[J]. *New Phytologist*, 1990, 116 : 29–35.
- [34] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1–2) :133–138.
- [35] 王 林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10) :915–920.
WANG Lin, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing. Intensification of *Solanum nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(10) : 915–920.
- [36] 刘家女, 周启星, 孙 挺. Cd–Pb 复合污染条件下 3 种花卉植物的生长反应及超积累特性研究[J]. 环境科学, 2006, 26(12) :2039–2044.
LIU Jia-nv, ZHOU Qi-xing, SUN Ting. Growing responses and hyperaccumulating characteristics of three ornamental plants to Cd–Pb combined pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12) :2039–2044.
- [37] Gulz P A, Gupta S K, Schulin R. Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1–2) :337–347.