

典型黑土区农田土壤与玉米中重金属含量研究

张继舟¹, 栾志慧², 张弘强¹, 曹宏杰¹, 王宏韬^{1*}

(1. 黑龙江省科学院自然与生态研究所、湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 通化师范学院生命科学学院, 吉林通化 134002)

摘要 [目的]为了弄清黑土区农田土壤与玉米中重金属含量及其二者之间的相关性。[方法]通过对黑龙江省双城市公路周边土壤及主要农作物玉米进行同步调查取样, 分析土壤重金属全量 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg、As 含量和玉米各器官中这 8 种重金属的含量, 并得出土壤中 8 种重金属之间的相关性及玉米各器官的重金属含量与土壤重金属含量的关联性。[结果]除 Ni 以外, 调查区域土壤中其他 7 种重金属含量均存在一定程度的富集, 其中 Cd、Pb、Hg 的富集程度较高, 但均未超过 GB 15618-1995 国家土壤环境质量二级标准, 土壤质量尚好。比较得出, 土壤重金属含量高于玉米各器官的重金属含量。玉米的不同器官对重金属的富集能力不同, 表现出根 > 叶 > 茎 > 籽粒。玉米籽粒中的 8 种重金属含量均远低于国家粮食标准, 玉米品质良好。土壤中除 Cr 与 Ni 之间为负相关外, 其余各种金属之间均为正相关, 其中 Cd 与 Hg 之间、Cu 与 Zn 之间呈现 0.01 水平显著正相关; Cd 与 Cr、Cu、Zn 之间, Cr 与 Cu、Zn 之间, Pb 与 Cu、Zn 之间, Zn 与 Hg 之间呈现 0.05 水平显著正相关。分析玉米不同器官的重金属含量与土壤重金属含量的相关性得出, 土壤重金属含量与玉米各器官重金属含量均呈正相关, 但相关性不佳, 只有 Cd、Cu、Zn 在玉米根系与土壤中呈 0.05 水平显著正相关。[结论]黑土区土壤质量尚好, 玉米品质良好。土壤中各种重金属的相关性好, 土壤重金属含量与玉米各器官重金属含量相关性不佳。人类活动是造成重金属同源性的主导因素。

关键词 典型黑土区; 农田土壤; 玉米; 重金属; 相关性

中图分类号 S155.2⁺7 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)27-10980-04

Contents of Heavy Metals in Agricultural Soil and Corn in Typical Black Soil Region

ZHANG Ji-zhou et al (Institute of Natural Resources and Ecology Heilongjiang Academy of Sciences, National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract [Objective] The research aimed to figure out the contents of heavy metals in agricultural soil and corn in typical black soil region and their relationship. [Method] Through the synchronous sampling to soil and crop corn in road surrounding of the Shuangcheng City of Heilongjiang Province, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Ni, Hg and As of total content in soil and the content in the various organs of corn were analyzed. The results were presented by the correlation of the eight kinds of heavy metals in soil and the relationship of heavy metal content in different organs of corn and the content of heavy metals in soil. [Result] Seven kinds of heavy metal content in soil had certain enrichment except Ni in the survey area. There was higher enrichment in Cd, Pb, and Hg, but the content of all of them weren't more than the content of GB 15618 - 1995 state soil environment quality standard level two. Quality of soil was still good. The content of heavy metals in soil was higher than the content of heavy metals in corn compared with them. The enrichment ability of different organs of corn of heavy metals was different, which indicated root > leaf > stalk > grain. Eight kinds of heavy metal content in grain of corn were lower than the national food standards, and the quality of corn was good. There was a positive correlation between each heavy metal contents in soil expect Cr and Ni. There was a very significantly positive correlation between Cd and Hg, Cu and Zn. There was a significantly positive correlation between Cd and Cr, Cu, Zn, Cr and Cu, Zn, Pb and Cu, Zn, Zn and Hg. Through the correlation analysis of heavy metal content of different organs of corn and heavy metal total content in soil, there was a positive correlation. However, the correlation was poor, only Cd, Cu, Zn in roots of corn and soil had significantly positive correlation. [Conclusion] Quality of soil was still good, and quality of corn was good. The correlation between soil heavy metals content was good, and correlation of heavy metal content of different organs of corn and heavy metal total content in soil was poor. The main reason of heavy metals homology was human activities.

Key words Typical black soil region; Agricultural soil; Corn; Heavy metal; Correlation

东北平原黑土带位于松嫩平原中部, 黑土耕地约 $8.15 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占东北地区耕地总面积的 32.5%。黑龙江省黑土带是东北玉米带的核心, 玉米产量和出口量分别占全国的 1/3 和 1/2。2013 年黑龙江省玉米播种面积达到 $7.19 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省粮食播种面积的 60%, 产量居全国之首。黑龙江省黑土区作为重要的玉米生产基地, 对玉米加工品的安全具有举足轻重的作用。然而, 近年来工业排放、化肥及农药长期大量的施用等人类活动导致外源重金属进入土壤中且不断累积^[1], 给黑土环境质量带来不可忽视的影响。黑土的土壤质量直接关系到玉米的安全质量, 因黑土重金属污染所带来的粮食安全问题已渐渐引起人们的关注。最近几年对我国黑

土区重金属空间分布、污染评价的研究逐渐增多^[1-3], 但对黑土区农田土壤与作物之间的关联性研究报道甚少。以黑龙江省双城市为研究对象, 通过系统采样调查, 笔者对典型黑土区农田土壤及相关作物玉米中重金属含量进行了分析, 得出土壤与玉米不同器官重金属含量及其之间的相关性, 为黑土区土壤与玉米的重金属污染程度提供基础数据, 为黑土区土壤重金属的污染评价、治理及玉米的安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况 研究选择黑龙江省双城市, 位于 $125^{\circ}41' \sim 126^{\circ}42' \text{ E}$, $45^{\circ}8' \sim 45^{\circ}43' \text{ N}$, 松嫩平原中部, 地势平坦, 东高西低, 属温带大陆性季风气候, 春秋短, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥。年降雨量 500 ~ 650 mm, 主要集中在 4 ~ 9 月, 约占全年降水量的 90%。年均温 0 ~ 6.7 °C, 为我国黄金玉米带之核心部位, 主要土壤为典型黑土。

1.2 样品的采集、处理与分析方法 2012 年 9 月 25 ~ 30 日在双城境内公路沿线旁采集 65 个土壤与相对应的玉米样

基金项目 黑龙江省科技攻关引导项目 (GC12C205); 黑龙江省财政基本科研业务专项。

作者简介 张继舟 (1980 -), 男, 吉林吉林人, 助理研究员, 硕士, 从事土壤与植物互作方面的研究。* 通讯作者, 研究员, 从事土壤生态与土壤改良等方面的研究, E-mail: wanght1234@sohu.com。

收稿日期 2013-08-18

品。采样点均距离公路边缘 30 m 之内,土壤用竹铲采集 0 ~ 20 cm 表层,玉米连根整株采集,具体采样点见图 1。将采集的土壤样品去除石头和植物的根、叶等杂物后放在通风处,采用自然方式风干,先过 20 目尼龙筛,部分储存于磨口玻璃瓶,再过 100 目尼龙筛,保存于 4 号塑封袋中待测。玉米样品用自来水清洗干净,再用去离子水冲洗,分离根、茎、叶、籽粒,并放入鼓风干燥箱中 105 °C 杀青 30 min,然后 80 °C 烘干至恒重,分别记录各个部分干重。用不锈钢植物粉碎机粉碎,装入封袋保存,待测。

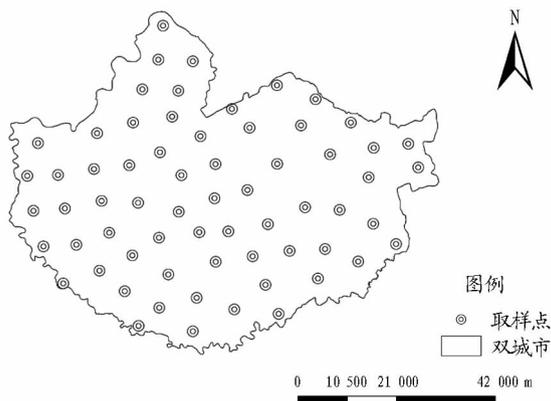


图 1 重金属取样点分布

土壤重金属全量 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr、As、Hg 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸混合消解,植物样品重金属含量采用硝酸-高氯酸混合消解。Hg 采用原子荧光光谱法测定,Cd 采用石墨炉原子吸收法测定,其他元素采用 ICP-AES 法测定。土壤样品分析中进行平行测定,并选用 GSS-1、GSS-2、GSS-3 国家标准样品进行质量控制。这些试剂均采用优级纯,溶液配制使用去离子水。

1.3 数据计算与分析 采用 Arc GIS9.3 和 Excel 2003 进行绘图和数据处理。

2 结果与分析

2.1 采样区域土壤重金属的含量特征 由表 1 可知,采样区土壤中重金属含量平均值的大小顺序依次为 Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg,符合土壤背景值大小顺序规律。与黑龙江省 8 种重金属的元素背景值^[4]相比,除 Ni 含量低于土壤背景值外,其他 7 种重金属元素均有一定程度的积累,Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Hg、As 分别是各自元素背景值的 326%、157%、370%、137%、137%、378%、251%,其中 Cd、Pb、Hg 积累量较大,但是各元素的平均值与最大值均未超过 GB 15618-1995 国家土壤环境质量二级标准,表明双城市黑土区农田土壤中重金属的累积较少,未对农业生产和人体健康造成危害,土壤质量尚好。

土壤重金属在自然状况下主要来源于母质和生物残落物,各元素含量波动相对较小,分布均匀。但是,在人为作用下会产生新污染源,对土壤某些元素状况产生影响。各污染源地域差异造成污染程度的差异。变异系数反映总体样本中各采样点的平均变异程度,一般来说两者呈正相关。8 种重金属含量变异系数大小的顺序依次为 Cd(46.42%) > Pb(36.95%) > Hg(32.14%) > Zn(23.73%) > Cu(21.75%) > As(21.41%) > Cr(14.79%) > Ni(7.1%)。除 Ni 的变异系数小于 10% 以外,属于空间弱变异,其他元素的变异系数都处在 10% ~ 100%,属于空间中强度变异。变异系数前三的 Cd、Pb、Hg 均大于 30%,与元素含量和背景值相比的结果基本一致,表明 Cd、Pb、Hg 分布不太均匀,外来污染影响较大。多年来大量施用化肥、农药以及汽车尾气排放等应该是重金属积累的重要原因。

表 1 土壤中重金属含量 (n=65)

元素	含量范围 mg/kg	平均值 mg/kg	变异系数 %	黑龙江省重金属元素 背景值//mg/kg	GB 15618-1995 二级 (6.5 < pH < 7.5) //mg/kg
Cd	0.08 ~ 0.50	0.28 ± 0.13	46.42	0.08	0.6
Cr	75.67 ~ 130.95	91.98 ± 13.60	14.79	58.60	200.0
Pb	43.45 ~ 142.17	89.52 ± 33.08	36.95	24.20	300.0
Cu	15.14 ~ 42.11	27.46 ± 5.97	21.75	20.00	100.0
Zn	65.17 ~ 112.85	96.95 ± 23.01	23.73	70.70	250.0
Ni	13.61 ~ 35.11	21.84 ± 1.55	7.10	22.80	50.0
Hg	0.04 ~ 0.25	0.14 ± 0.045	32.14	0.04	0.5
As	12.72 ~ 25.63	18.29 ± 3.92	21.41	7.30	30.0

通过土壤不同重金属含量的相关性,可推测它们的来源是否相同。通常,若各元素间显著相关,则同源性较大。由表 2 可知,土壤中除 Cr-Ni 之间呈负相关外,其余金属之间均为正相关,其中 Cd 与 Hg 之间、Cu 与 Zn 之间呈现 0.01 水平显著正相关;Cd 与 Cr、Cu、Zn 之间,Cr 与 Cu、Zn 之间,Pb 与 Cu、Zn 之间,Zn 与 Hg 之间呈现 0.05 水平显著正相关。这表明 Cu-Zn 之间、Cd-Hg 之间同源性很高,Cd 与 Cr、Cu、Zn 之间,Cr 与 Cu、Zn 之间,Pb 与 Cu、Zn 之间,Zn 与 Hg 之间同源性高。As 与其他重金属的相关性低,表明它的积累独特。Ni 无外源积累,与其他元素的相关性也低。

2.2 玉米不同器官中重金属分布特征 由表 1、3 可知,土壤中的重金属含量高于作物各器官。玉米的不同器官对重金属的富集能力不同,对 8 种重金属的积累趋势均表现出根 > 叶 > 茎 > 籽粒。其中,玉米根、叶、茎对 Cd 的积累量分别为 0.13、0.11、0.12 mg/kg,几乎相等,是籽粒积累量的 6 倍左右;根系中 Cr 的含量是茎的 296%、叶的 269%、籽粒的 1172%; Pb 的含量是茎的 519%、叶的 505%、籽粒的 10930%; Cu 的含量是茎的 193%、叶的 155%、籽粒的 293%; Zn 的含量是茎的 144%、叶的 136%、籽粒的 165%; Ni 的含量是茎的 305%、叶的 275%、籽粒的 806%; Hg 的含量是茎的

345%、叶的 294%、籽粒的 909%；As 的含量是茎的 376%、叶的 303%、籽粒的 1 817%。

表 2 土壤中 8 种重金属的相关系数($n=65$)

元素	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg	As
Cd	1.000							
Cr	0.264 3*	1.000						
Pb	0.062 5	0.224 6	1.000					
Cu	0.254 7*	0.251 6*	0.262 8*	1.000				
Zn	0.293 1*	0.248 1*	0.283 1*	0.443 8**	1.000			
Ni	0.221 3	-0.092 1	0.126 6	0.237 6	0.213 5	1.000		
Hg	0.328 3**	0.194 9	0.206 2	0.099 5	0.245 4*	0.023 2	1.000	
As	0.014 2	0.123 2	0.098 7	0.185 5	0.186 2	0.185 2	0.096 3	1.000

注：*，** 分别表示 0.05、0.01 显著水平。 $R_{0.05}=0.240 5$ ， $R_{0.01}=0.312 6$ 。

叶和茎对 8 种重金属的积累量相差不大，叶略大于茎。籽粒对重金属的积累量最低，其中 Zn 含量接近茎、叶，籽粒中 Cu 的含量与茎、叶中 Cu 的含量相差不超过 1 倍，其他重金属在籽粒中的含量与在茎、叶中的含量相差较大，尤其

是 Pb 籽粒中的含量与茎、叶相差 20 倍左右，而与根系中的含量相差 109 倍。

与表 4 相比，可以看出玉米籽粒中的 8 种重金属含量均远低于国家粮食标准，全部合格，表明该地区玉米品质良好。

表 3 玉米不同器官的重金属含量($n=65$)

部位	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg	As
根	0.13 ± 0.05	2.93 ± 0.33	25.17 ± 7.29	20.59 ± 5.92	48.45 ± 6.13	2.50 ± 0.51	0.10 ± 0.04	1.09 ± 0.21
茎	0.11 ± 0.04	0.99 ± 0.13	4.84 ± 1.00	10.68 ± 1.73	33.72 ± 4.79	0.82 ± 0.18	0.03 ± 0.01	0.29 ± 0.04
叶	0.12 ± 0.04	1.09 ± 0.12	4.98 ± 1.04	13.24 ± 1.87	35.74 ± 4.82	0.91 ± 0.24	0.03 ± 0.01	0.36 ± 0.05
籽粒	0.02 ± 0.01	0.25 ± 0.07	0.23 ± 0.07	7.03 ± 0.67	27.55 ± 4.08	0.31 ± 0.05	0.01	0.06 ± 0.02

表 4 粮食中重金属含量标准

元素	粮食指标/mg/kg	标准号
Cd	0.05	GB15201-94
Cr	1.00	GB14961-94
Pb	0.40	GB14935-94
Cu	10.00	GB15199-94
Zn	50.00	GB13106-91
Ni	0.40	全国食品卫生标准分委会 1994 年评审通过
Hg	0.02	GB2762-94
As	0.70	GB4810-94

2.3 玉米不同器官重金属含量与土壤中重金属含量的相关分析 由表 5 可知，土壤重金属含量与玉米各器官重金属含量相关性不佳，只有 Cd、Cu、Zn 在玉米根系与土壤中呈 0.01 水平显著正相关，但是相关系数也不高，只有 0.262 4、0.295 4 和 0.278 5，玉米茎、叶、籽粒中重金属含量与土壤重金属含量之间基本没有相关关系，特别是籽粒中的重金属含量与土壤重金属含量之间相关系数极低，只有 Cu、Zn 和 Cd 超过 0.1。这与众多前人研究结果^[5-7] 基本一致，表明土壤重金属含量不能较好地反映重金属对玉米的生物有效性。

表 5 玉米不同器官中重金属含量与土壤中重金属含量的相关系数($n=65$)

部位	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg	As
根	0.262 4*	0.144 3	0.262 2	0.295 4*	0.278 5*	0.157 5	0.175 1	0.217 6
茎	0.155 2	0.196 6	0.158 0	0.190 5	0.155 1	0.147 5	0.186 9	0.168 1
叶	0.132 6	0.154 5	0.154 7	0.174 5	0.155 7	0.140 1	0.162 3	0.131 7
籽粒	0.129 8	0.021 2	0.091 1	0.130 9	0.117 7	0.013 2	0.059 3	0.043 7

注：*，** 分别表示 0.05、0.01 显著水平。 $R_{0.05}=0.240 5$ ， $R_{0.01}=0.312 6$ 。

3 结论与讨论

该研究得出除 Ni 以外，调查区域土壤中其他 7 种重金属均存在一定程度的富集，其中 Pb、Cd、Hg 的富集较高，但均未超过 GB15618-1995 国家土壤环境质量二级标准，表明土壤质量尚好。重金属含量主要由自然和人为 2 个方面因素决定。在自然因素中，黑土的成土母质以黄土状沉积物为主，黄土状沉积物中重金属含量的本底值低。这是土壤质量尚好的一个最关键原因。该研究的一些数据与前人的研究存在差异^[8]，其中 Pb、Cd、Zn、Cu 含量的平均值至少高出前人研究的 2 倍。笔者认为造成这样的结果，一方面可能与取

土位置有关，该研究取土点均选择公路两侧，且距离公路边 30 m 的范围之内，导致汽车尾气排放和汽车轮胎的磨损，使得土壤中 Pb、Cd 含量增加；另一方面，多年来大量施用化肥、农药，特别是 2012 年黑龙江省多地爆发严重的玉米粘虫害，双城也在其中，大量喷施农药也应是 Cd、Hg、Cu、Zn、As 积累的重要原因。

土壤中重金属的存在形态、pH、有机质含量等直接影响作物对重金属的吸收。双城地区以典型黑土为主，典型黑土 pH 6.5 左右，属中性，各种重金属在中性时以残渣态存在^[9]，因此有效性低。另一方面，黑土有机质含量高，有机质中的

腐殖质可以螯合土壤重金属,使其失去活性。这也使得作物吸收重金属大大减少。这就说明研究中玉米重金属含量低于土壤中重金属含量的原因。研究表明,植物体内的新陈代谢旺盛器官(根、茎、叶)的重金属蓄积量较大,而营养储存器官—果实蓄积量较少^[10-11]。该研究指出玉米的不同器官对重金属的富集能力不同,表现出根>叶>茎>籽粒,与上述结果一致。当根在低浓度重金属中存在时,重金属只深入根管、根表皮、皮层,并不产生传导,极少向地上部转移^[12]。这证明该研究中根的重金属含量高的原因。研究中玉米籽粒中 Cu、Zn 含量接近茎叶。这可能是因为 Cu、Zn 是作物生长的必需元素,较易被作物吸收,易于通过茎叶向籽粒传输^[11]。有研究表明,Pb 的存在可能增加 Cd 的有效性,增加根系中 Cd 的活性,使 Cd 向作物地上部转移^[13]。这正好证明研究中玉米根、叶、茎对 Cd 的积累量几乎相等的原因。该研究还显示,当 Pb、Cd 复合积累时,Cd 易向籽粒转移,而 Pb 很难向籽粒转移。研究还表明,Pb 在玉米籽粒中的含量极低,也许正基于此。

8 种重金属之间除 Cr-Ni 之间为负相关外,其余各种金属之间均为正相关,并且 Cu 和 Zn 之间、Cd 与 Hg 之间达到 0.01 显著正相关。它们之间的来源既可能是地球化学的天然来源,又可能是人类活动所引起的污染,即相关性由自然和人为 2 个方面因素决定。自然因素包括土壤类型、理化性状、降水条件等;人为因素包括汽车尾气排放、轮胎摩擦、工业三废、生活垃圾、化肥农药的大量施用。首先,从自然条件分析,黑土的黄土状沉积物母质中重金属含量的本底值均匀,使得重金属之间趋于同源;加之黑土有机质含量丰富,黏粒含量高,适合固定土壤中的各种重金属,pH 为中性,重金属主要以残渣态存在,使得它们的成分分布均匀,也应该是相关性高的一个原因;双城面积小,全市范围内降雨均匀,使得重金属的淋溶迁移程度相当,进而造成同源的重金属较多。从人为因素分析,目前的农药中多含 Cu、Zn、Cd、Hg 元素,大量的喷施导致重金属同源,汽车轮胎的摩擦产生 Cd,汽油中含有 Pb。这是 Cd 和 Pb 同源的原因之一。加之含 Cd 肥料的大量施用、工业三废的排放、居民的生活垃圾随意堆放的影响,都可导致重金属同源。但是,具体是自然因素起主导作用还是人为因素起主导作用呢?笔者从含量和相关性的一个特殊例子发现,Ni 的平均含量低于土壤背景值,表明它无外源积累,并且它与其他元素的相关性低。这一事实显示自然因素在这里起次要的作用,也正好说明人类活动是造成重金属同源性的主导因素。所以,若不加以高度重视,加以控制,那么在不久的将来黑土很有可能被重金属污染。

虽然该研究表明土壤重金属含量与玉米各器官重金属含量均呈现正相关但相关性不佳,只有 Cd、Cu、Zn 在玉米根系与土壤中呈显著正相关,但是并不能说明土壤重金属的全量对作物不重要,它的作用依然是不可替代的。得出该研究

结果可能是因为土壤中重金属含量较低,并且土壤中的 pH 为中性,重金属在土壤中大多以残渣态存在^[9],而残渣态对作物的生物有效性低^[14]。其实,土壤重金属全量与各种形态之间存在较好的相关性^[15],尤其是随着土壤重金属污染的加重,土壤非残渣态重金属的比例将不断提高^[16-18],从而土壤重金属的有效性增大。

参考文献

- [1] 郭观林,周启星.中国东北北部黑土重金属污染趋势分析[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(3):386-392.
- [2] 赵永存,汪景宽,王铁宇,等.吉林公主岭土壤中砷、铬和锌含量的空间变异性及分布规律研究[J].土壤通报,2002,33(5):372-376.
- [3] 汪景宽,赵永存,张旭东,等.海伦县土壤重金属含量的空间变异性研究[J].土壤通报,2003,34(5):398-403.
- [4] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境出版社,1990.
- [5] 张永春,孙丽,苏国峰,等.公路两侧农田土壤及作物中重金属的累积[J].江苏农业学报,2005,21(4):336-340.
- [6] 汤雨玲.作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J].农业环境科学学报,2007,26(2):699-703.
- [7] SIMS J T, KLINE J S. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composed sewage sludge[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20:387-395.
- [8] 史文娇,魏丹,汪景宽,等.双城城市土壤重金属空间分异及影响因子分析[J].水土保持学报,2007,21(1):59-64.
- [9] LI P J, WANG X, ALLINSON G, et al. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161:516-521.
- [10] 纪玉琨,李广贺.作物对重金属吸收能力的研究[J].农业环境科学学报,2006,25(S1):104-108.
- [11] 刘志彦,田耀武,陈桂珠,等.复合污染重金属在水稻不同部位的积累转运[J].中山大学学报:自然科学版,2010,49(2):138-144.
- [12] 刘敏.玉米对重金属铅镉的抗性及其积累性研究[D].南宁:广西大学,2010:4-5.
- [13] 吴燕玉,王新,梁仁禄,等.重金属复合污染对土壤植物系统的生态效应.对作物、微生物、苜蓿、树木的影响[J].应用生态学报,1997,8(2):207-212.
- [14] 赵科理.土壤水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D].杭州:浙江大学,2010:38-41.
- [15] MC BRIDE M, SAUVE S, HENDERSHOT W. Solubility control of Cu, Zn, Cd, and Pb in contaminated soils[J]. European Journal of Soils Science, 1997, 48:337-346.
- [16] 张鑫,周涛发,袁峰,等.铜陵矿区土壤中锡存在形态及生物有效性[J].生态环境,2004,13(4):572-574.
- [17] HU N J, LI Z Q, HUANG P, et al. Distribution and mobility of metals in agricultural soils near a copper smelter in south China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28:19-26.
- [18] BRAZAUSKIENE D M, PAULAUŠKAS V, SABIENE N. Speciation of Zn, Cu and Pb in the soil depending on Soil texture and fertilization with sewage sludge compost[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8:184-192.
- [19] YAN H J, FANG Z J. Accumulation and transport of *Solanum torvum* Swartz. to heavy metals from soil[J]. Medicinal Plant, 2011, 2(2):6-9.
- [20] 刘育红,郑伟.西宁市不同功能城区土壤重金属镉含量及形态研究[J].宁夏农林科技,2011,52(5):47-48,50.
- [21] YU X F, CHEN J, PENG R Z, et al. Study on influencing factors of farmland soil heavy metals in central yunnan province[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(4):645-650.
- [22] 李静,常勇,潘淑颖.土壤重金属污染评价方法的研究[J].农业灾害研究,2012,2(4):50-52,72.
- [23] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等.重金属胁迫后效对玉米产量的影响[J].华北农学报,2013(4):123-129.