

大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险

谢华¹, 刘晓海^{2*}, 陈同斌^{1*}, 廖晓勇¹, 阎秀兰¹, 王莉霞¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要:对云南大型古老锡矿影响区的主要种类蔬菜及其土壤取样调查, 测定分析 As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量, 通过暴露风险分析评价食用当地种植蔬菜引起重金属对人体的健康风险. 结果发现, 与非矿业影响区比较, 锡矿影响区的蔬菜地土壤重金属污染严重, 其中以 As 污染最严重, 土壤平均 As 含量为 $1\,225\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Nemerlo 指数平均为 50.1. 锡矿影响区的蔬菜食用部位的重金属含量超标严重, As 和 Pb 尤为严重, 其最高含量(以干重计)分别达 $856\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $506\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 各类蔬菜重金属含量表现出叶菜类 > 根茎类 > 果菜类的趋势; 当地居民通过食用这些蔬菜引起的 As 和 Pb 的暴露风险非常高, 暴露风险指数分别为 158 和 13.3, 对当地居民健康有极大的潜在危害. 研究结果表明, 有必要对当地的土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险进行更为详尽的调查研究.

关键词:矿区; 锡矿; 重金属; 土壤; 蔬菜; 健康风险

中图分类号: X53; X820.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)12-3503-05

Concentration and Health Risk of Heavy Metals in Vegetables and Soils in Region Affected by an Ancient Tin Ore

XIE Hua¹, LIU Xiao-hai², CHEN Tong-bin¹, LIAO Xiao-yong¹, YAN Xiu-lan¹, WANG Li-xia¹

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China)

Abstract: To investigate influences of mining activities on heavy metal contamination and health risk in vegetable of mining-affected area, the present study was undertaken as a preliminary survey of As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn concentrations of majority vegetables and soils in area affected by an ancient tin ore, Yunnan province. Based on the soil heavy metals investigated, average Nemerlo index of soil heavy metals reach 50.1, showed that vegetable fields were contaminated by heavy metals, especially As: average As concentration of soils could reach $1\,225\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Heavy metal concentrations in the edible portions of majority vegetables exceeded the national standards of China seriously, especially As and Pb, and the maximum of As and Pb concentrations (DW) could reach $856\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $506\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Heavy metal concentrations among 3 kinds of vegetables decreased in following order: leaf vegetables > fruit vegetables > rhizome vegetables. Consumption of vegetables from the mining-affected area may pose extremely high health risk of As and Pb to local residents, which the exposed risk indexes could reach 158 and 13.3, respectively.

Key words: mining area; tin ore; heavy metal; soil; vegetable; health risk

矿业活动已成为农田及农产品中重金属超标的重要原因之一. 长期金属矿业活动影响下, 会导致矿区及其周边地区的土壤和作物的砷、铅和镉等重金属污染^[1~3]. 而食用这类污染土壤上种植的蔬菜是当地居民摄取重金属的最主要途径之一, 可能由此造成当地居民的重金属健康风险^[4].

我国具有悠久的矿产资源开采历史, 尤其是锡矿资源的开采在国际上具主导地位. 我国最大的锡矿位于云南, 有 700 多年的开采历史^[5], 该矿以锡为主, 共、伴生 18 种矿产, 是锡与多金属共生的大型矿床^[6]. 长期的土法采矿炼矿使矿产资源有效利用率低^[5], 并造成该矿所在地区土壤中的砷等重金属的污染问题^[7]. 该地区为全国的肺癌高发区之一, 肺癌

占当地的癌症比例的 36.6%^[8], 含砷、铅、锌、镉、镍等重金属的矿粉和烟尘为诱导该矿矿工肺癌高发的主要原因之一^[9]. 到目前为止, 有部分对城市或金属冶炼厂周边的土壤环境及蔬菜重金属风险研究^[10,11], 但对于古老矿山采矿活动对土壤环境的影响研究较少. 本研究选择大型古老锡矿为主要调查对象, 分析了长期矿业活动对周边土壤和蔬菜重金属含量的影响, 探讨食用当地蔬菜的重金属摄入风险.

收稿日期: 2007-11-25; 修订日期: 2007-12-26

基金项目: 云南省院省校科技合作项目 (2005 YX10); 国家高新技术研究发展计划 (863) 重点项目 (2007AA061001)

作者简介: 谢华 (1978~), 女, 博士, 主要研究方向为污染土壤的植物修复, E-mail: huashiyanse @163.com

* 通讯联系人, E-mail: lxh @yies.org.cn; chentb @igsnnr.ac.cn

1 材料与方法

1.1 土壤和蔬菜样品采集

调查区主要位于云南省大型锡多金属区矿及周边. 该矿是我国最大的锡矿区, 以锡为主, 共、伴生 18 种矿产. 调查中共采取 12 个蔬菜样区; 非矿业影响样区选在远离矿区的江川、通海、建水和蒙自等地, 共采取 7 个蔬菜地样区. 采集各样区蔬菜地中种植的各种蔬菜样本(每种蔬菜采集 3~5 株混匀), 及其对应的土壤样本(0~20 cm, 重复 3 次混匀).

1.2 化学分析

风干的土壤样品挑出石块后过 0.25 mm 筛, 按 EPA Method 3050B 进行消化. 蔬菜样品分可食部、地上部和地下部用去离子水清洗, 于 65 °C 烘干至恒重, 粉碎后用 $\text{HNO}_3 \cdot \text{HClO}_4$ (5:1) 进行消化. 分析过程中所用的试剂均为优质纯. 分析过程中添加国家标准物质(土壤: GBW 07404; 植物: GBW 07603) 进行质量控制, 并对测定值超高的样品进行 2 次以上的重复分析测定.

消化样品中总 As 用氢化物-原子荧光光谱分析仪(HG-AFS)测定^[11], 总 Cd 用石墨炉-原子吸收光谱法(GF-AAS)测定, 总 Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 用原子吸收法测定^[12]. 数据处理和统计分析采用 SPSS 13.0 软件.

1.3 土壤重金属复合污染指数计算

土壤重金属评价的临界值分以我国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 的 II 级标准(适用于一般的农田和蔬菜地土壤) 中的 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 标准以及 VROM 推荐的 Cd 和 Co 标准(安全土壤参考值) 为参照(表 1), 采用 Nemerlo 综合指数法进行土壤污染综合评价^[10,13]. 其计算式为:

$$P = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n P_i^2 + (\max P_i)^2}{2}} \quad (1)$$

$$P_i = c_i / S_i \quad (2)$$

式中, P 为土壤中各种重金属的 Nemerlo 综合评价指数; P_i 为土壤中重金属 i 的环境质量指数; c_i 为重金属 i 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属 i 评价标准的临界浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\max P_i$ 为土壤中各污染指数最大值; $P \leq 1$ 为非污染; $1 < P \leq 2$ 轻度污染; $2 < P \leq 3$ 中度污染; $P > 3$ 重污染.

1.4 蔬菜重金属摄入的风险评价

蔬菜摄入引起的重金属平均日摄入量计算参照 US EPA 的 MMSOILS 模型^[14] 中的水、食物摄入和空

气吸入的暴露评价方程^[15] 进行简化后进行计算. 计算公式为:

$$\text{CDI}_{\text{蔬菜}} = \frac{C \cdot I \cdot 10^3}{\text{BW}} \quad (3)$$

$$C \cdot I = \sum c_i \cdot D_i \cdot F_d \quad (4)$$

式中, $\text{CDI}_{\text{蔬菜}}$ 为重金属污染物通过蔬菜进入人体的平均日摄入量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C 为蔬菜中重金属浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); I 为接触率(蔬菜摄入); 10^3 为将 mg 换算为 μg 的数量级比例. BW 为体重 (kg), 按成人平均体重 60 kg 计算; c_i 为某类蔬菜的重金属平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); D_i 为每日对某类蔬菜的食用量 (kg), 其中果菜类为 0.1, 叶菜类为 0.2, 根茎类为 0.04^[41]; F_d 为蔬菜鲜重折算为干重的比例, 按 0.1 计算^[41].

以 $\text{HQ}_{\text{蔬菜}}$ 表征由蔬菜摄入引起的重金属暴露风险指数^[16], 计算公式为:

$$\text{HQ}_{\text{蔬菜}} = \frac{\text{CDI}_{\text{蔬菜}}}{\text{RfD}} \quad (5)$$

式中, $\text{HQ}_{\text{蔬菜}}$ 为当地居民通过蔬菜摄入重金属的暴露风险指数; RfD 为重金属参考暴露剂量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].

2 结果与讨论

2.1 土壤的重金属含量与污染评价

在该矿业影响区蔬菜地土壤的 8 种重金属中, As 的污染程度最严重. 与《土壤环境质量标准》的 II 级标准(GB 15618-1995)^[17] 比较, 所有样区的土壤 As 含量全部超标, 平均超标 49 倍, 污染最严重的样区土壤中 As 含量超标 127 倍(表 1). 除 As 外, 在矿业影响区蔬菜土壤中, 还存在 Cd、Co、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的不同程度污染, 各采样区中这些重金属超标率分别为 100%、75%、100%、50%、66.7% 和 75%(表 1). 按照土壤环境质量 II 级标准及 Tentative Netherlands Soil Quality Criteria 的 A 标准^[18] 计算各元素的环境质量指数及 Nemerlo 指数, 该矿区及周边蔬菜地土壤均为重度复合污染, 其中表征综合污染程度的 Nemerlo 指数最高达到了 132, 对人体健康有极大的潜在风险, 矿业影响区蔬菜地土壤中, As 超标为最主要的污染类型(表 1). 由于当地的土壤 As、Co 和 Ni 背景较高, 在非矿业影响区部分土壤也存在 As、Co 和 Ni 含量超标现象.

土壤中过量的重金属可通过食物摄入、皮肤接触、呼吸等途径对人体产生健康风险, 其中, 最直接且

比重最大的途径为食物摄入^[16]。本调查分析了当地居民直接种植食用蔬菜的土壤中的重金属,矿业影响区中蔬菜地的重金属存在严重污染问题(表 1),因此应该考虑采取合适的治理措施进行污染土壤修复。

表 1 土壤重金属含量及 Nemero 指数基本统计¹⁾
Table 1 Heavy metal concentrations in soils and Nemero index statistics

地区	统计值	重金属含量/mg·kg ⁻¹								Nemero 指数(P)
		As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
矿业影响区 (n = 12)	最小值	82. 0	1. 32	12. 6	11. 5	124	34. 8	107	187	3. 63
	最大值	3 171	35. 6	53. 7	150	2 417	137	3 258	5 155	132
	平均值	1 225a	10. 5a	29. 8a	55. 4a	757a	68. 7a	970a	1 635a	50. 1
	中值	635	5. 51	26. 8	49. 1	216	50. 0	588	913	26. 0
	标准偏差	1 159	11. 8	13. 7	35. 8	876	35. 7	973	1 678	47. 8
非矿业影响 区(n = 7)	最小值	19. 3	0. 16	15. 3	55. 1	24. 3	31. 6	39. 2	39. 0	1. 14
	最大值	74. 7	0. 84	44. 8	113	76. 0	80. 7	69. 6	189	3. 46
	平均值	32. 4b	0. 53b	28. 5a	80. 0a	46. 3b	55. 2b	54. 5b	114b	2. 13
	中值	32. 0	0. 80	28. 7	67. 9	66. 2	51. 7	64. 3	148	2. 54
	标准偏差	19. 3	0. 27	11. 7	19. 8	18. 2	18. 4	10. 2	49. 2	0. 81
参考标准	土壤环境质量标准 ²⁾	25. 0	0. 60		300	100	50. 0	300	250	
	云南土壤重金属背景值 ³⁾	18. 4	0. 22		65. 2	46. 3	42. 5	40. 6	89. 7	
	全国土壤重金属背景值 ³⁾	11. 2	0. 10	12. 7	61. 0	22. 6	26. 9	26. 0	74. 2	
	Tentative Netherlands Soil Quality Criteria ⁴⁾	20. 0	1. 00	20. 0	100	50. 0	50. 0	50. 0	200	

1) 重金属含量平均值后标不同字母表示独立样本 t 检验达显著水平(α = 0. 05) ; 2) II级标准, pH 6. 5~7. 5 农用旱地(GB 15618-1995) ^[17] ; 3) 平均值, 表层土壤 0~20 cm, 云南 n = 73; 全国 n = 4 093^[19] ; 4) A 标准, 安全土壤参考值^[18]

2. 2 蔬菜的重金属含量与污染评价

从表 2 中可以看到,该矿业影响区中产出的蔬菜食用部位的重金属含量都很高,并明显高于非矿业影响区,以砷和铅的超标情况最严重,矿业影响区中的蔬菜食用部位砷和铅含量均远远超出国家食品安全标准(GB 2762-2005),其中食用部位重金属含量最高的蔬菜为矿业影响区中种植的叶菜类蔬菜鱼腥草,砷含量达到 856 mg·kg⁻¹,超出国家标准17 120 倍;铅含量达到 506 mg·kg⁻¹,超出国家标准1 687倍。

比较各蔬菜类型的食用部位重金属含量,表现出叶菜类>根茎类>果菜类的重金属含量变化总体趋势。在不同的蔬菜种类中,鱼腥草、南瓜苗、白菜和茼蒿的食用部位重金属含量都很高,食用这 4 种蔬菜可能会对人體产生较高的健康风险。相比而言,四季豆、蕹菜、豇豆和甘蓝的食用部位重金属含量则较低,在当地食用这些蔬菜相对比较安全。当地居民可通过改变种植格局及从外地区进行蔬菜调配等措施减少高重金属含量蔬菜品种的种植,尽量降低由此引起的潜在健康风险。

矿业影响区中的同一种类蔬菜食用部位中的 As 和 Pb 含量值要比非矿业影响区中高出数倍甚至数百倍(表 2),表明矿业影响区蔬菜地中 As 和 Pb 的累积会直接导致其蔬菜产品中相应重金属的严重超标现象。因此,在矿业活动影响的土壤上种植蔬菜

会对当地食用这些蔬菜的居民产生一定的健康风险。

2. 3 蔬菜重金属摄入的健康风险

与 USEPA 和 WHO 推荐的参考暴露剂量(RfD)进行比较,当人体平均日摄入量(CDI)超出 RfD,即 HQ_{蔬菜}>1 时,则表明该污染物可引起人体的健康风险,而健康风险指数越大则表明该污染物对人体健康风险越大。矿业影响区中的蔬菜食用部位重金属含量超标严重,但并非各种重金属都能引起健康风险。与 RfD 比较,通过消费食用这些蔬菜,Cd、Co、Cr、Cu、Ni 和 Zn 等 6 种重金属不会引起当地居民的健康风险,而非矿业影响区和矿业影响区居民均能引起 As 和 Pb 的健康风险(表 3),其中非矿业影响区的 As 和 Pb 的蔬菜暴露风险指数(HQ_{蔬菜})分别为 8. 25 和 1. 51,矿业影响区 As 和 Pb 的 HQ_{蔬菜}则分别高达 158 和 13. 3。

对蔬菜引起的人体重金属风险指数(HQ_{蔬菜})进行计算,发现在矿业影响区中的 As 和 Pb 的人体健康风险极高,因此,需对该区域中的居民食用的蔬菜进行关注。应在当地选择种植一些食用部位 As 和 Pb 含量较低的蔬菜,从蔬菜类型来说,叶菜类和根茎类蔬菜的重金属健康风险较高,相对而言,果菜类蔬菜重金属健康风险较低;从蔬菜种类来说,当地居

表 2 主要蔬菜食用部位重金属含量¹⁾

Table 2 Heavy metal concentrations in edible parts of major vegetables

地区	蔬菜 类型	蔬菜 种类	种植样 区数	食用部位重金属平均含量(DW)/mg·kg ⁻¹							
				As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
矿业影响区	果菜类	蚕豆	1	6.88	0.03	1.42	nd	7.97	1.66	4.64	65.3
		番茄	1	4.00	nd	2.21	3.85	12.9	0.91	8.07	33.3
		豇豆	1	1.90	nd	2.81	0.62	3.66	17.8	2.04	40.4
		四季豆	1	0.74	nd	1.03	0.20	15.4	0.98	0.49	40.4
		平均值		3.38	0.01	1.87	1.17	10.0	5.33	3.81	44.9
	叶菜类	鱼腥草	1	856	4.64	11.0	8.70	900	6.30	506	689
		南瓜苗	1	422	4.38	9.79	12.8	328	20.1	126	312
		白菜	4	156	3.41	12.0	15.8	264	20.2	210	366
		韭菜	2	63.8	2.54	2.78	5.52	81.1	17.9	139	248
		结球甘蓝	3	59.1	nd	10.4	1.48	11.2	8.35	67.5	108
		苋菜	2	46.9	3.02	9.02	2.79	64.2	10.4	27.7	188
		菜心	2	33.5	0.92	4.60	2.30	13.6	4.90	62.9	101
		牛皮菜	3	29.8	0.51	5.76	nd	12.8	2.06	27.4	123
		叶用莴苣	1	15.4	1.79	4.58	4.45	16.9	0.84	4.80	78.4
		葱	1	6.97	nd	5.47	nd	8.15	8.22	31.5	50.2
		甘蓝	1	2.03	0.17	3.53	1.11	6.40	1.84	8.58	36.2
		蕨菜	1	1.63	0.92	0.30	nd	47.6	1.70	12.1	187
		平均值		112	1.93	6.66	5.64	130	9.48	116	219
	根茎类	茼蒿	2	211	1.90	5.16	1.86	41.9	8.43	154	136
		土豆	1	2.34	nd	3.30	nd	14.0	1.75	14.8	36.4
		平均值		141	1.27	4.54	1.24	32.6	6.20	108	103
非矿业影响区	叶菜类	白菜	1	34.9	nd	13.4	1.84	10.9	8.09	42.1	125
		大蒜	1	4.73	0.04	5.11	nd	8.37	2.49	11.8	49.7
		结球甘蓝	1	1.38	0.10	3.93	0.37	11.2	5.56	5.92	55.4
		牛皮菜	3	0.78	0.26	6.37	1.06	32.7	6.25	10.8	74.6
		平均值		7.23	0.15	6.92	0.90	21.4	5.82	15.3	75.6
	根茎类	茼蒿	1	1.54	6.40	2.58	9.15	20.4	5.62	5.37	126
		萝卜	1	0.36	0.46	nd	6.80	8.03	2.67	nd	48.4
		平均值		0.95	3.43	1.29	7.97	14.2	4.15	2.69	87.0
国家食品安全标准				0.05 ²⁾	0.2 ²⁾	—	0.5 ²⁾	10 ³⁾	0.3 ⁴⁾	0.3 ²⁾	20 ⁵⁾

1) nd:含量低于仪器检测限; 2) 食品中污染物限量标准(GB 2762-2005)^[20]; 3) 食品中铜限量卫生标准(GB 15199-94)^[21]; 4) 食品卫生理化检验标准^[22]; 5) 食品中锌限量卫生标准(GB 13106-91)^[23]

表 3 食用蔬菜的重金属摄入量及其健康风险

Table 3 Intake and health risk of heavy metal by consumed vegetables

评价指标	地区	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CDI蔬菜/Mg·(kg·d) ⁻¹	矿业影响区	47.4	0.73	2.83	2.16	47.2	4.46	46.5	87.2
	非矿业影响区	2.47	0.28	2.39	0.83	8.09	2.22	5.29	31.0
RfD/Mg·(kg·d) ⁻¹		0.3 ¹⁾ 、 ²⁾	1 ¹⁾ 、 ²⁾	—	1 500 ¹⁾	500 ³⁾	20 ²⁾	3.5 ²⁾	300 ¹⁾
HQ蔬菜	矿业影响区	158	0.73	—	0.00	0.09	0.22	13.3	0.29
	非矿业影响区	8.25	0.28	—	0.00	0.02	0.11	1.51	0.10

1) USEPA^[24~28]; 2) WHO^[29]; 3) WHO^[30]

民可多食用四季豆、豇豆、蕨菜和甘蓝等重金属含量较低的蔬菜,对于食用部位重金属含量很高的蔬菜如鱼腥草、南瓜苗、白菜和茼蒿,尽量减少在矿业影响区的种植量,以减轻重金属的健康风险.非矿业影响区的蔬菜地中种植的蔬菜食用部位的 As 含量和

Pb 含量也较高,食用这些蔬菜也能引起一定的健康风险,在本调查的非矿业影响区中,主要是由于叶菜类蔬菜白菜食用部位的 As 和 Pb 含量高引起的(表 2),因此,即使在非矿业影响区中,也尽量减少这类叶菜的种植,降低居民食用蔬菜的重金属健康风险.

3 结论

对云南大型锡矿的矿业活动影响区及其对照区的调查表明,该矿区周边菜地土壤和蔬菜食用部位的重金属污染严重,其中 As 污染尤为突出;各类型蔬菜重金属含量为叶菜类 > 根茎类 > 果菜类,居民食用本地蔬菜引起重金属中 As 和 Pb 的健康暴露风险极大。

参考文献:

- [1] Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al.* Soil As contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, Southern China [J]. *Environment International*, 2005, **31**(6): 791-798.
- [2] 翟丽梅, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1206-1211.
- [3] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2005, **25**(5): 1146-1151.
- [4] 谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估——以湖南郴州邓家塘为例[J]. *地理研究*, 2005, **24**(1): 151-159.
- [5] 薛步高. 史料考证与找矿(之四): 个旧锡矿[J]. *云南地质*, 2002, **21**(4): 477-455.
- [6] 刘光亮, 秦德先, 范柱国. 云南省锡矿资源与可持续发展[J]. *矿产保护与利用*, 2005, (2): 9-13.
- [7] 张辅铭, 冷时杰. 个旧地区土壤砷含量的调查[J]. *环境污染治理技术与设备*, 1981, (9): 43-46.
- [8] 姚明鉴, 杨标, 姚树祥, 等. 云南省个旧地区 1998-2002 年恶性肿瘤死亡分析[J]. *中国肿瘤*, 2004, **13**(12): 760-762.
- [9] 黄润. 云南锡矿矿工肺癌实验病因学系列研究[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 1995, **18**(1): 34-63.
- [10] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 742-747.
- [11] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1349-1353.
- [12] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响——以北京市为例[J]. *自然资源学报*, 2005, **20**(5): 690-696.
- [13] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. *地理研究*, 2006, **25**(5): 843-852.
- [14] USEPA. MMSOILS: Multimedia Contaminant Fate, Transport, and Exposure Model, Documentation and User's Manual Version 4.0. Office of Research and Development [M]. Washington, D. C.: Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1996.
- [15] 陈华, 刘志全, 李广贺. 污染场地土壤风险基准值构建与评价方法研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, **33**(2): 84-88.
- [16] Hough R L, Breward N, Young S D, *et al.* Assessing potential risk of heavy metal exposure from consumption of home-produced vegetables by urban populations [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(2): 215-221.
- [17] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [18] VROM. Leidrand Bodemsanering Guidelines for Soil Clean Up- Netherlands Ministry of Housing, Planning and Environment, Soil, Water and Chemical Substances Department [M]. The Hague: Netherlands, 1983.
- [19] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [20] GB 2762-2005, 食品中污染物限量[S].
- [21] GB 15199-94, 食品中铜限量卫生标准[S].
- [22] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998. 175-178.
- [23] GB 13106-91, 食品中锌限量卫生标准[S].
- [24] CASRN 7440-38-2, Arsenic, inorganic. US EPA Integrated Risk Information System [S]. 1993.
- [25] CASRN 7440-43-9, Cadmium. US EPA Integrated Risk Information System[S]. 1994.
- [26] CASRN 7440-66-6, Zinc and Compounds. US EPA Integrated Risk Information System[S]. 2005.
- [27] CASRN 16065-83-1, Chromium (III), insoluble salts. US EPA Integrated Risk Information System[S]. 1998.
- [28] CASRN N. A, Nickel, soluble salts. US EPA Integrated Risk Information System[S]. 1996.
- [29] Chang A C, Pan G, Page A L, *et al.* Developing Human Health-related Chemical Guidelines for Reclaimed Water and Sewage Sludge Applications in Agriculture [R]. Geneva: Report for World Health Organization, 2002.
- [30] Goldhaber S B. Trace element risk assessment: Essentiality vs. toxicity [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2003, **38**(2): 232-242.