

# 复合污染条件下莴苣对 Zn、Cd 的吸收与富集

许中坚<sup>a</sup>, 邱喜阳<sup>a</sup>, 刘文华<sup>a</sup>, 向言词<sup>b</sup> (湖南科技大学 a 化学化工学院; b 生命科学学院, 湖南湘潭 411201)

**摘要:** 采集莴苣及根际土壤样品, 分析 Cu、Zn、Cd、Pb 复合污染条件下莴苣对 Zn、Cd 的吸收与富集规律。结果表明: 复合污染条件下, 莴苣不同部位对 4 种重金属元素的吸收积累表现为根 > 叶 > 茎, 莴苣中重金属含量为 Zn > Cu > Cd > Pb, 富集系数为 Cd > Zn > Cu > Pb; 不同采样区莴苣对重金属的吸收积累与富集能力存在明显差异。用于描述 Zn 和 Cd 在土壤-莴苣系统中迁移的响应模型均为非线性方程, 模型类型在 2 种元素之间以及莴苣不同部位存在一定差异, 但 2 种元素在不同部位中的响应均可用 3 次曲线方程来描述。莴苣对 Cd、Zn 的吸收除了受到元素自身性质的影响外, 还受到共存元素的影响, 这种影响与共存元素的含量有关。

**关键词:** 莴苣; 重金属; 复合污染; 响应模型; 吸收; 富集

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673 - 4831(2008)02 - 0071 - 05

**Absorption and Enrichment of Zinc and Cadmium by Lettuce in Complex Contaminated Soil** XU Zhong-jian<sup>a</sup>, QIU Xi-yang<sup>a</sup>, LU Wen-hua<sup>a</sup>, XIANG Yan-ci<sup>b</sup> (a School of Chemistry and Chemical Engineering; b School of Life Science, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** It is important for safe use of polluted soils and amendment of the soil environment quality standard to study absorption and enrichment of heavy metals by crops. Samples of lettuce (*Lactuca sativa* var *angustana* Irish) plants and their rhizospheric soils were collected for analysis of accumulation of Cu, Zn, Cd and Pb in lettuce, and absorption and enrichment of Zn and Cd by lettuce in complex contaminated soil. Results show that in terms of accumulation, contents of the four elements in lettuce was in the order of root > leaf > stem, and Zn > Cu > Cd > Pb, with the bioconcentration factors (BCF) being Cd > Zn > Cu > Pb. The ability of the lettuces of absorbing and accumulating heavy metals varied significantly with the sampling sites. The response models that may depict transfer of Zn and Cd in the soil-lettuce system are non-linear ones, and somewhat differ between the two elements and between parts of the lettuce plant. However, all the responses of the two elements in various parts of the lettuce plant can be described with a cubic curve equation. The absorption of Zn and Cd by lettuce is not only affected by elements themselves, but also by co-existent elements, and the effect of the co-existent elements depends on their concentration in the soils.

**Key words:** lettuce; heavy metal; complex contamination; response model; absorption; enrichment

土壤重金属污染是国内广泛关注的环境问题, 这是由于重金属可在植物中积累, 并通过食物链富集到人体和动物体, 给人类和动物健康带来危害<sup>[1-2]</sup>。在自然界中, 污染物很少单独存在于某一环境中, 多具伴随性和综合性, 往往是多种污染物进入环境并共存, 形成多种污染物的复合污染<sup>[3-4]</sup>。Zn 和 Cd 化学性质相似, 在自然界总是伴生、伴存, 因而容易造成复合危害。由土壤到作物, 继而经食物链进入人体是 Zn、Cd 污染危害的主要途径之一<sup>[5]</sup>。本研究对矿冶周边重金属复合污染地区 Zn、Cd 在土壤-莴苣系统中的吸收、富集及迁移进行测定和分析, 以期为指导矿冶周边地区重金属污染土壤的安全利用, 防止重金属污染通过食物链传递而

影响人类健康, 以及土壤环境质量的修订提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

湖南长株潭地区为典型的丘陵地区, 属于亚热带湿润季风气候区, 降水量丰富, 菜地土壤主要为红壤。蔬菜品种丰富, 主要蔬菜有 30 多种, 莴苣是其

基金项目: 国家自然科学基金 (20577008); 国家高技术研究发展计划 (2005AA219040); 湖南省自然科学基金 (05JJ30017, 06JJ50026); 湖南省教育厅项目 (05C171); 湖南省高校青年骨干教师培养对象资助项目

收稿日期: 2007-09-17

中一种。试验选取株州冶炼厂至湘潭锰矿一带重金属污染程度不同的茼苳及其根际土壤共 21 组样品。其中湘潭北郊 6 组,湘潭锰矿周边 6 组,株州冶炼厂附近 6 组,株州工学院附近 3 组。每组由 5~8 个单样混合而成。将土样置于塑料袋运回实验室后,去除较大的植物根系和石块等杂物,自然风干,研磨,过 0.149 mm 孔径尼龙筛,装塑料袋封口待用。植物样品取回后,反复用自来水清洗干净,然后用去离子水冲洗 3 次,80 ℃ 下烘干,用植物粉碎机粉碎,过 0.25 mm 孔径筛,装塑料袋封口待用。

1.2 主要仪器

电热恒温箱,微型植物粉碎机,中型电热式干燥箱,电子天平,等离子体原子发射光谱仪 (ICP-7510,岛津公司)。

1.3 样品消解与重金属测定

土壤样品用盐酸-硝酸-高氯酸消解,植物样品用硝酸-高氯酸消解,等离子体原子发射光谱仪测定土壤和植物样品中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属污染特征

研究区 21 个表层土壤样品重金属含量见表 1。由表 1 可知,研究区土壤重金属 Cu、Zn、Cd 和 Pb 平均含量相应为 62.34、680.12、11.13 和 252.77 mg·kg<sup>-1</sup>。污染指数 (研究区土壤中重金属平均含量与湖南省土壤背景值<sup>[6]</sup>之比)值 Cd 为 55.65,呈现出极强烈富集,明显受到强扰动;Pb 和 Zn 分别为 7.22 和 7.24,呈现出强烈富集;Cu 为 2.40,表现为较强的富集。

表 1 研究区土壤重金属含量

Table 1 Contents and background values of heavy metals in the soils

重金属元素	平均值 / (mg·kg <sup>-1</sup> )	最小值 / (mg·kg <sup>-1</sup> )	最大值 / (mg·kg <sup>-1</sup> )	背景值 <sup>1)</sup> / (mg·kg <sup>-1</sup> )	污染指数 <sup>2)</sup>
Cu	62.34	28.86	163.67	26.0	2.40
Zn	680.12	88.31	4158.64	94.0	7.24
Cd	11.13	2.50	54.29	0.20	55.65
Pb	252.77	14.16	1590.91	35.0	7.22

1)湖南省表土背景值引自文献 [6]; 2)污染指数为土壤平均值与背景值之比。

应用湖南省土壤重金属背景值计算的地积累指数 (I<sub>geo</sub>)进行统计,结果见表 2。地积累指数计算及分级方法见文献 [7]。从平均情况来看,研究区土

壤中 Cd 达到强-极严重污染,Zn 为中等污染,Cu 和 Pb 为轻度-中等污染。通过对土壤重金属含量之间的相关分析发现,Cu、Zn、Cd、Pb 4 种重金属两两之间存在极显著相关性。因此,可以认为研究区土壤污染属典型的、主要受铅锌冶炼影响的 Cd-Zn-Pb-Cu 复合污染<sup>[7]</sup>。

表 2 研究区土壤重金属元素地积累指数 (I<sub>geo</sub>)及分级  
Table 2 Geoaccumulation index and grading of heavy metals in soils

重金属元素	I <sub>geo</sub>			平均分级	平均污染程度
	平均值	最小值	最大值		
Cu	0.48	-0.43	2.07	1	轻度-中等污染
Zn	1.26	-0.68	4.88	2	中等污染
Cd	4.54	3.06	7.50	5	强-极严重污染
Pb	0.91	-1.89	4.92	1	轻度-中等污染

2.2 茼苳对重金属的吸收与富集特征

2.2.1 研究区茼苳对 Cu、Zn、Pb、Cd 的总体吸收与富集

研究区域茼苳根、茎、叶重金属积累量分布特征见表 3。

表 3 茼苳各部位重金属积累量分布特征

Table 3 Heavy metal contents in different parts of lettuce

		mg·kg <sup>-1</sup>			
部位	项目	Cu 积累量	Zn 积累量	Cd 积累量	Pb 积累量
根	平均值	1.44	25.80	0.89	0.50
	最小值	0.60	4.75	0.01	—
	最大值	3.19	92.28	6.86	3.57
茎	平均值	0.84	9.05	0.50	—
	最小值	0.40	2.54	—	—
	最大值	2.20	42.47	4.10	—
叶	平均值	1.21	22.67	0.71	0.28
	最小值	0.56	4.74	—	—
	最大值	3.08	82.13	5.19	3.98

1. 未检出,仪器检出限为 10<sup>-5</sup> mg·L<sup>-1</sup>; 2 茼苳质量以鲜重计。

从表 3 中重金属的平均积累量可以看出,茼苳不同部位对 Cu、Zn、Cd、Pb 的吸收积累为根 > 叶 > 茎;茼苳中重金属的积累量为 Zn > Cu > Cd > Pb。与 Zn 食品卫生参考标准 (GB 18406) 20.0 mg·kg<sup>-1</sup> 相比,茼苳可食部分茎中 Zn 最大积累量是标准的 2.1 倍,平均积累量未超标;叶中最大积累量是标准的 4.1 倍,平均积累量是标准的 1.1 倍。与 Cd 食品卫生标准 (GB 18406) 0.05 mg·kg<sup>-1</sup> 相

比,莴苣可食部分积累的 Cd 已严重超标,茎中 Cd 最大积累量和平均积累量分别是标准的 81.9 倍和 10.1 倍;叶中 Cd 最大积累量和平均积累量分别是标准的 103.7 倍和 14.1 倍。采样过程中发现各采样点莴苣生长良好,但可食部分有害元素积累量测定值却已超标,Cd 甚至严重超标。可见,重金属污染往往具有隐蔽性,仅从作物的长势很难判断土壤和作物是否遭受污染。因此,在衡量重金属污染程度时,除考虑产量指标外,还应分析作物体内重金属含量,并与食品卫生标准进行比较。

作物对重金属的积累量与作物的积累能力不尽相同,为了比较作物不同部位对重金属的吸收和富集能力,用重金属的富集系数(植株不同部位重金属含量与土壤重金属含量的比值)来表示。莴苣不同部位对重金属的富集系数如图 1 所示。

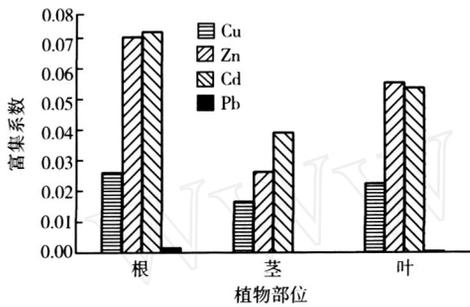


图 1 莴苣不同部位对重金属的富集系数

Fig 1 Bioconcentration factors of heavy metals in different parts of lettuce

由图 1 可以看出,土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb 4 种重金属元素在莴苣不同部位的富集系数存在较大差异。总体来说,莴苣对 Zn 和 Cd 的富集能力较强,

其次是 Cu,而对 Pb 的富集能力很弱。这可能与重金属元素在作物体内吸收和运输的机制及生物化学过程密切相关<sup>[8]</sup>。平均而言,莴苣可食部分茎对 Cu、Zn 和 Cd 的富集系数相应为 0.017,0.026 和 0.039;叶对 Cu、Zn 和 Cd 的富集系数相应为 0.023,0.055 和 0.054。莴苣不同部位对重金属的富集系数也存在一定差异,表现为根 > 叶 > 茎。

### 2.2.2 不同采样区莴苣可食部分对 Zn、Cd 的吸收与富集

不同采样地区莴苣可食部分(茎和叶)对 Zn、Cd 的积累量见表 4。由表 4 可以看出,不同采样区莴苣茎、叶中 2 种重金属的积累量都有明显差异,尤其是株州冶炼厂附近采样区与其他 3 个采样区存在极显著差异,该区莴苣对 Zn、Cd 的吸收积累量大大高出其他采样区。不同采样区莴苣可食部分对 Zn、Cd 的富集系数见图 2。可以看出不同采样区莴苣对 2 种重金属的富集系数存在明显差异。株州冶炼厂附近采样区富集系数最大,其次依次是湘潭北郊和株州工学院附近采样区,湘潭锰矿周边采样区富集系数最小。株州冶炼厂附近酸雨污染严重,酸雨引起土壤酸化(pH 5.18~5.87)导致土壤中重金属活性提高,增加了作物的可利用性;同时,冶炼厂排放的废气中也含有较多重金属<sup>[9]</sup>,大气沉降可使莴苣叶部直接吸收一部分重金属,从而使株州冶炼厂附近采样区重金属富集系数较高。而湘潭锰矿周边采样区土壤 pH 比较高(pH 6.72~7.35),重金属的活性及作物可利用性都较低,因而该区莴苣对重金属的富集系数较低。不同采样区莴苣可食部分对 Zn、Cd 吸收积累的差异表明,株州冶炼厂附近采样区已不适宜种植莴苣。

表 4 不同采样区莴苣可食部分 Zn、Cd 积累量

Table 4 Contents of Zn and Cd in the edible parts of lettuce from different sampling sites mg · kg<sup>-1</sup>

采样区	茎部 Zn 积累量			叶部 Zn 积累量			茎部 Cd 积累量			叶部 Cd 积累量		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
XIBJ	2.67	5.78	4.17 a	6.02	12.60	9.04 c	0.05	0.24	0.12 e	0.08	0.29	0.18 g
XIMK	2.54	6.39	3.86 a	4.74	7.82	6.43 c	—	0.01	0.002 e	—	0.07	0.02 g
ZZYL	9.26	42.47	20.54 b	26.00	82.13	58.80 d	0.39	4.09	1.62 f	0.85	5.19	2.26 h
ZZGY	3.44	8.92	6.22 a	8.42	13.43	10.17 c	—	0.08	0.03 e	—	0.05	0.02 g

1. XIBJ:湘潭北郊; XIMK:湘潭锰矿周边; ZZYL:株州冶炼厂附近; ZZGY:株州工学院附近。 2. —未检出,仪器检出限为 10<sup>-5</sup> mg · L<sup>-1</sup>。  
3. 同列数据中不同英文小写字母表示不同采样区差异极显著(P < 0.01, LSD 检验)。

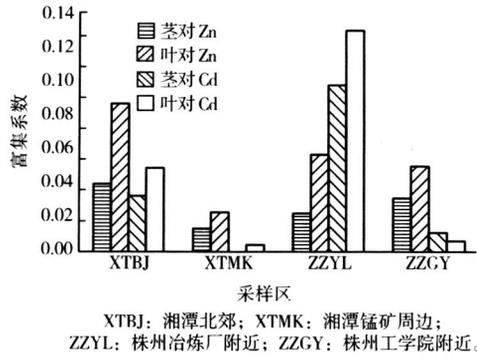


图 2 不同采样区莴苣对 Zn、Cd 的富集系数  
Fig 2 Bioconcentration factors of Zn and Cd in lettuce from different sampling sites

表 5 Zn 在土壤-莴苣系统中的响应模型

Table 5 Response models for Zn in the soil-lettuce system

部位	响应模型	r <sup>2</sup>	P
根	$Zn_{根} = 43.578 + (-3707.975/Zn_{土})$	0.344	0.005
	$Zn_{根} = -9.196 + 0.152 Zn_{土} - 9.5 \times 10^{-5} (Zn_{土})^2 + 1.45 \times 10^{-8} (Zn_{土})^3$	0.666	<0.001
	$Zn_{根} = 1.208 \times (Zn_{土})^{0.463}$	0.389	0.003
	$Zn_{根} = e^{-1.590761/Zn_{土}}$	0.549	<0.001
茎	$Zn_{茎} = -3.027 + 0.053 Zn_{土} - 3.4 \times 10^{-5} (Zn_{土})^2 + 5.32 \times 10^{-9} (Zn_{土})^3$	0.481	0.009
叶	$Zn_{叶} = -59.31 + 14.088 (\ln Zn_{土})$	0.399	0.002
	$Zn_{叶} = -9.224 + 0.119 Zn_{土} - 6.8 \times 10^{-5} (Zn_{土})^2 + 1.03 \times 10^{-8} (Zn_{土})^3$	0.548	0.003
	$Zn_{叶} = 0.745 \times (Zn_{土})^{0.5}$	0.362	0.004
	$Zn_{叶} = 40.474 + (-3713.105/Zn_{土})$	0.314	0.008

表 6 Cd 在土壤-莴苣系统中的响应模型

Table 6 Response models for Cd in the soil-lettuce system

部位	响应模型	r <sup>2</sup>	P
根	$Cd_{根} = -2.928 + 0.996 Cd_{土} - 0.047 (Cd_{土})^2 + 0.001 (Cd_{土})^3$	0.563	0.002
	$Cd_{根} = 0.025 \times (Cd_{土})^{1.108}$	0.355	0.004
	$Cd_{根} = e^{-8.108/Cd_{土}}$	0.359	0.004
茎	$Cd_{茎} = -1.837 + 0.616 Cd_{土} - 0.029 (Cd_{土})^2 + 3.450 \times 10^{-4} (Cd_{土})^3$	0.573	0.002
叶	$Cd_{叶} = -2.228 + 0.750 Cd_{土} - 0.035 (Cd_{土})^2 + 4.110 \times 10^{-4} (Cd_{土})^3$	0.578	0.002
	$Cd_{叶} = 1.798 + (-5.570/Cd_{土})$	0.300	0.010

2.4 共存重金属对 Zn、Cd 在土壤-莴苣系统中迁移的影响

重金属在土壤-植物中的迁移,除了受元素自身性质的制约外,共存元素对其也有重要影响。复合污染条件下,重金属在土壤-作物系统中的迁移分配存在交互作用。以土壤中各种污染重金属含量为自变量,莴苣中 Zn、Cd 含量为因变量,用 SPSS 13.0 软件进行多元回归分析,考察共存重金属对 Zn、Cd 在土壤-莴苣系统中迁移的影响。

2.3 Zn、Cd 在土壤-莴苣系统中的响应模型

为找出重金属在土壤-莴苣系统中的响应模型,以土壤中重金属含量为自变量,莴苣中重金属含量为因变量,用 SPSS 13.0 软件包提供的 Curve Estimatim 进行拟合,拟合结果见表 5 和表 6。由表 5 和表 6 可知,用于描述 Zn 和 Cd 在土壤-莴苣系统中的响应模型均为非线性方程,这些模型均达到极显著水平 (P < 0.01); 2 种元素在土壤-莴苣系统中的响应模型不完全一致,且同一元素在莴苣不同部位的响应模型也不尽相同;但 2 种元素在不同部位中的响应模型均可用 3 次曲线方程来表达。

(1) 莴苣中 Zn 含量与土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的回归方程:

$$Zn_{根} = -88.373 + 2.873 Cu_{土} + 0.119 Zn_{土} + 9.547 Cd_{土} - 0.252 Pb_{土} - 0.031 (Cu_{土})^2 + 3.480 \times 10^{-5} (Zn_{土})^2 - 0.288 (Cd_{土})^2 + 1.650 \times 10^{-4} (Pb_{土})^2 - 0.004 (Cd_{土} \times Pb_{土}) \quad (R = 0.959, P < 0.001)$$

$$Zn_{茎} = -44.701 + 1.467 Cu_{土} + 0.025 Zn_{土} + 5.504 Cd_{土} - 0.119 Pb_{土} - 0.015 (Cu_{土})^2 + 2.570 \times 10^{-5} (Zn_{土})^2 - 0.223 (Cd_{土})^2 + 2.180 \times 10^{-5} (Pb_{土})^2 +$$

$$0.003(Cd_{\pm} \times Pb_{\pm}) \quad (R=0.924, P=0.002)$$

$$Zn_{\pm} = -77.213 + 2.071 Cu_{\pm} + 0.073 Zn_{\pm} + 12.187 Cd_{\pm} - 0.294 Pb_{\pm} - 0.022 (Cu_{\pm})^2 + 4.630 \times 10^{-5} (Zn_{\pm})^2 - 0.496 (Cd_{\pm})^2 + 2.550 \times 10^{-5} (Pb_{\pm})^2 + 0.006(Cd_{\pm} \times Pb_{\pm}) \quad (R=0.975, P<0.001)$$

(2)莴苣中 Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的回归方程:

$$Cd_{\text{根}} = -7.939 + 0.200 Cu_{\pm} + 0.004 Zn_{\pm} + 1.154 Cd_{\pm} - 0.020 Pb_{\pm} - 0.002 (Cu_{\pm})^2 + 5.250 \times 10^{-6} (Zn_{\pm})^2 - 0.030 (Cd_{\pm})^2 + 2.120 \times 10^{-5} (Pb_{\pm})^2 - 0.001 (Cd_{\pm} \times Pb_{\pm}) \quad (R=0.967, P<0.001)$$

$$Cd_{\text{茎}} = -5.129 + 0.150 Cu_{\pm} + 0.001 Zn_{\pm} + 0.647 Cd_{\pm} - 0.010 Pb_{\pm} - 0.002 (Cu_{\pm})^2 + 3.180 \times 10^{-6} (Zn_{\pm})^2 - 0.025 (Cd_{\pm})^2 + 1.690 \times 10^{-6} (Pb_{\pm})^2 + 2.360 \times 10^{-4} (Cd_{\pm} \times Pb_{\pm}) \quad (R=0.908, P<0.001)$$

$$Cd_{\text{叶}} = -5.987 + 0.171 Cu_{\pm} + 0.001 Zn_{\pm} + 0.812 Cd_{\pm} - 0.013 Pb_{\pm} - 0.002 (Cu_{\pm})^2 + 3.840 \times 10^{-6} (Zn_{\pm})^2 - 0.033 (Cd_{\pm})^2 - 4.790 \times 10^{-7} (Pb_{\pm})^2 + 4.660 \times 10^{-4} (Cd_{\pm} \times Pb_{\pm}) \quad (R=0.915, P=0.003)$$

根据回归曲线特征可知,在样品涉及的重金属含量范围内,莴苣吸收 Zn 和 Cd 随土壤中 Zn 含量升高而增加;土壤 Cd 含量低时促进莴苣对 Zn 和 Cd 的吸收,而含量高时抑制莴苣对 Zn 和 Cd 的吸收;土壤 Cu 对莴苣吸收 Zn 和 Cd 的影响表现为低含量时起促进作用,高含量时起抑制作用;土壤 Pb 的影响一般表现为低含量时起抑制作用,高含量时起促进作用。可见,在复合污染条件下,莴苣对 Zn 和 Cd 的吸收除了明显受到土壤中元素自身的影响外,共存元素对其也有重要影响。

### 3 结论

(1)复合污染条件下,莴苣不同部位对 Cu、Zn、Cd、Pb 的吸收积累量均表现为根 > 叶 > 茎;莴苣中重金属含量为 Zn > Cu > Cd > Pb;不同采样区莴苣茎、叶中 Zn、Cd 积累量存在明显差异。

(2)莴苣对 Zn 和 Cd 的富集系数相当,对这 2 种元素的富集能力较强,其次是 Cu,对 Pb 的富集能

力很弱。研究区域中莴苣可食部分茎对 Cu、Zn 和 Cd 的平均富集系数相应为 0.017、0.026 和 0.039;叶对 Cu、Zn 和 Cd 的富集系数相应为 0.023、0.055 和 0.054。莴苣不同部位对重金属的富集系数存在一定差异,表现为根 > 叶 > 茎。

(3)能用于描述 Zn 和 Cd 在土壤-莴苣系统中迁移的响应模型均为非线性方程,2 种元素在不同部位中的响应模型均可用 3 次曲线方程来表达。

(4)莴苣对 Cd、Zn 的吸收除了受到该元素自身性质的影响外,还受到共存元素的影响,这种影响与共存元素含量有关。

### 参考文献:

- [1] FARMER A A, FARMER A M. Concentration of Cadmium, Lead and Zinc in Livestock Feed and Organs Around a Metal Production Center in Eastern Kazakhstan[J]. Science of The Total Environment, 2000, 257(1): 53 - 60.
- [2] PICHTEL J, KUROWA K, SAWYERR H T. Distribution of Pb, Cd and Ba in Soils and Plants of Two Contaminated Sites[J]. Environmental Pollution, 2000, 110(1): 171 - 178.
- [3] DAHMAN FMULLER H, OORT F V, GELIEB, *et al* Strategies of Heavy Metal Uptake by Three Plant Species Growing Near a Metal Smelter[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(2): 231 - 238.
- [4] TEUTSCH N, EREL Y, HALICZL, *et al* Distribution of Natural and Anthropogenic Lead in Mediterranean Soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(17): 2853 - 2864.
- [5] 彭莉,黄亮,李承碑,等.模拟酸雨作用下紫色土镉复合污染对莴苣的影响[J].水土保持学报,2006,20(3): 28 - 31.
- [6] 王淦.长株潭地区土壤重金属污染评价模型及分析[D].长沙:中南大学地学与环境工程学院,2005.
- [7] 许中坚,吴灿辉,刘芬,等.典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2007,22(1): 111 - 114.
- [8] 史静,李正文,李恋卿,等.外源 Cd 对小白菜吸收与分配 Cd、Zn 的影响[J].生态与农村环境学报,2007,23(4): 57 - 62.
- [9] 刘芬,刘文华,姜涛,等.土壤镉污染与冶炼烟气的相关研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2003,18(3): 88 - 91.

作者简介:许中坚(1967—),男,湖南洞口人,教授,博士,主要从事污染环境化学和生物修复研究。