

武陟县农田土壤重金属污染评价

麻冰涓¹,高彩玲¹,王海邻^{1*},李小超²,张永慧²,刘 军²

(1. 河南理工大学 资源环境学院,河南 焦作 454000;
2. 焦作市环境信息中心,河南 焦作 454002)

摘要:对武陟县农田表层土壤中的 Cr、Ni、Cu、As、Pb 含量进行分析,采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法对该区域农田土壤重金属污染进行评价。结果表明,武陟县农田土壤 Cr、Ni、Cu、As、Pb 含量分别为 70.53、33.65、31.95、16.74、22.04 mg/kg,Cr、Ni、Cu、Pb 的单因子污染指数均小于 1,只有 As 在部分土样中存在超标现象,但单因子污染指数均小于 2,超标样品比率达到 21.28%。重金属内梅罗综合污染指数为 0.65,土壤处于安全水平;旱地土壤重金属内梅罗综合污染指数小于水田,说明旱地土壤污染程度轻于水田。5 种重金属元素的潜在生态危害指数均值为 36.97,处于轻微风险等级。在这 5 种重金属元素中,As 对潜在生态风险的贡献率为 39.8%,是最主要的生态风险因子。土壤重金属的相关性分析表明,Cr 含量与 Ni、Cu、As 含量及 Ni 含量与 Cu 含量、Cu 含量与 As 含量存在显著或极显著正相关性,说明这 5 种重金属存在不同程度的复合污染或具有相同的污染来源。

关键词:农田土壤;重金属;污染;生态风险

中图分类号: X53 X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)03-0071-06

Pollution Assessment of Heavy Metal Elements in
Farmland Soil in Wuzhi County

MA Bingjuan¹,GAO Cailing,WANG Hailin^{1*},LI Xiaochao²,ZHANG Yonghui²,LIU Jun²
(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University,Jiaozuo 454000,China;
2. Jiaozuo Environmental Information Center,Jiaozuo 454002,China)

Abstract: Surface soil samples collected from farmland in Wuzhi county were used to analyze the contents of Cr,Ni,Cu,As and Pb,and the quality of soil was assessed by single factor pollution index method,comprehensive pollution index method and the potential ecological risk index method. The results showed that the contents of Cr,Ni,Cu,As and Pb in the soil were 70.53,33.65,31.95,16.74,22.04 mg/kg,respectively. Single factor pollution index of Cr,Ni,Cu and Pb were smaller than one, only 21.28% of the soil samples could not meet the requirement of national standard in terms of As content,and the single factor pollution index was less than two. However,single factor pollution index of As was smaller than 2. The comprehensive pollution index was 0.65,indicating that the soils had not been polluted, was safe. Comprehensive pollution index of dry land was smaller than that of paddy field,showing that the pollution status of paddy field was more serious than that of dry land. The comprehensive potential ecological risk index was 36.97,which showed potential ecological risk induced by these heavy metal elements to the soil system was low. The most significant contributor was identified to be As, the contribution rate of As was 39.8% to the potential ecological risk. There were significantly positive relations between Cr content and

收稿日期:2014-09-15
基金项目:国家自然科学基金项目(21177035,21377035);河南理工大学青年基金项目(Q2013-05A)
作者简介:麻冰涓(1978-),女,河南焦作人,讲师,硕士,主要从事土壤生态环境研究。E-mail:mbj@hpu.edu.cn
* 通讯作者:王海邻(1971-),女,河南焦作人,副教授,硕士,主要从事环境科学与工程研究。E-mail:whl@hpu.edu.cn

Ni,Cu,As content,between Ni content and Cu content,between Cu content and As content,indicating there was combined pollution or same pollution source among the five metal elements.

Key words: farmland soil; heavy metal element; pollution; ecological risk

土壤作为构成生态系统的基本要素之一,其质量直接影响玉米、水稻等农作物的品质,继而影响农业的可持续发展以及人类的身体健康。重金属污染是土壤污染的重要类型之一,一直受到人们的广泛关注。研究农田土壤重金属含量并进行污染评价具有十分重要的意义。农田土壤重金属污染的评价方法主要有单因子污染指数法、综合污染指数法及潜在生态危害指数法。单因子污染指数法和综合污染指数法是国内外普遍采用的方法之一,其中,单因子污染指数法是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价,而综合污染指数法则较全面地反映土壤环境质量。潜在生态危害指数法是近几年出现的评价土壤环境质量的一种方法,国内外学者从不同的角度提出了多种潜在生态风险评价方法^[1-2],目前最为常用的是瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法,我国许多学者使用该方法进行了土壤重金属潜在生态风险评价^[3-10]。

焦作市是传统的矿业城市,煤炭资源的大规模开采带来的废物——煤矸石的堆放引起的土壤污染问题引起人们的重视。众多学者对焦作地区的土壤环境质量进行了研究,但主要集中在矿区周围^[11-13],针对焦作市非矿区土壤重金属污染的研究很少^[14-16]。武陟县是河南省焦作市重要的粮食大县和农产品生产基地之一,研究该区域土壤的环境质量对保障农产品安全具有非常重要的意义。为此,本研究分析了武陟县农田土壤重金属(Cr、Ni、Cu、As、Pb)含量,并对土壤重金属污染状况进行评价,旨在为防治农田土壤重金属污染,保障人类健康提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

武陟县位于河南省西北部,黄河北岸,地处 34°56′~35°10′N、113°11′~113°39′E,全县总面积 860 km²,属于暖温带大陆性季风型气候。武陟县年平均气温 14.4℃,年平均降水量 575.1 mm,历史年平均无霜期 212 d。全县土壤主要为潮土类,占全县面积的 84.1%。

1.2 土壤采集和处理

采样点的布设按照避开污染源的原则,选择远离县城工业区和生活聚居区的大块农田,按旱地和

水田 2 种耕地类型,于 2012 年 9—10 月采集 47 个农田表层(0~20 cm)土壤样品,其中旱地(种植玉米和花生)样品 20 个、水田(种植水稻)样品 27 个。每个采样点均采用蛇形采样方法采集土壤,现场混合均匀后按四分法取 1 kg 左右装入聚乙烯自封袋。采样点分布如图 1 所示。

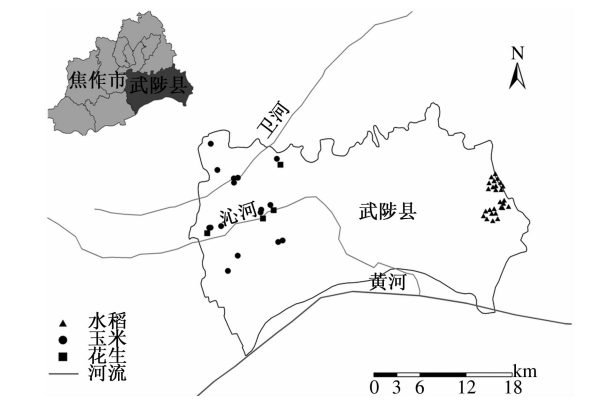


图 1 武陟县采样点分布

1.3 测定项目及方法

土壤样品带回实验室后室温风干,磨碎,过孔径为 0.840 mm 的筛,用 pH 计测定土壤 pH 值(水:土=2.5:1)^[17];经四分法取部分土壤研磨并过孔径为 0.149 mm 的筛,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国瓦里安)测定土壤重金属(Cr、Ni、Cu、As、Pb)含量^[18]。

1.4 重金属污染评价

1.4.1 单因子污染指数法 以国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)^[19]中的限量值作为污染评价参考值。单因子污染指数计算公式^[7]如下。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为重金属*i*的单项污染指数, C_i 为重金属*i*的实测值, S_i 为重金属*i*的评价标准值。单因子污染指数污染评价等级划分标准见表 1^[7], P_i 值越大,说明土壤污染越严重。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法 内梅罗综合污染指数计算公式^[7]如下。

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{imax}^2 + P_{iave}^2}{2}}$$

式中, $P_{综}$ 为重金属的综合污染指数, P_{imax} 为重金属*i*的最大污染指数, P_{iave} 为所有重金属单项污染指数平均值。综合污染指数污染评价等级划分标准

见表 1^[7]。

表 1 土壤重金属污染评价分级标准

等级	单因子污染指数		综合污染指数	
	取值范围	等级描述	取值范围	等级描述
I	$P_i \leq 1$	清洁	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全
II	$1 < P_i \leq 2$	轻污染	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒级
III	$2 < P_i \leq 3$	中污染	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻污染
IV	$P_i > 3$	重污染	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中污染
V			$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染

1.4.3 潜在生态危害指数法 该方法是瑞典学者 Hakanson 根据重金属的性质及环境行为特点,从沉积学角度提出的一种对土壤中重金属污染进行评价的方法^[1]。其计算公式^[3]如下。

$$C_f^i = C_n^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_n^i / C_n^i$$

式中, C_f^i 为某一重金属的污染系数; C_n^i 为重金属的实测含量; C_n^i 为计算中所需的参比值,本研究以河南省土壤背景值^[20]为参比值(表 2); E_r^i 为单个重金属*i*的潜在生态危害系数; T_r^i 为单个重金属*i*的毒性响应系数,Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数见表 2; RI 为土壤重金属的综合潜在生态危害指数。重金属潜在生态危害分级标准^[3]见表 3。

表 2 重金属的毒性响应系数和评价参比值

项目	Cr	Cu	Ni	As	Pb
$C_n^i/(mg/kg)$	63.8	19.7	26.7	11.4	19.6
T_r^i	2	5	5	10	5

表 3 土壤重金属潜在生态危害分级标准

单因子潜在生态危害系数		潜在生态危害指数	
取值范围	风险程度	取值范围	风险程度
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强		

1.4.4 单个重金属元素的潜在生态危害贡献率 生态风险贡献率反映了各重金属元素对潜在生态危害指数的贡献比率,其计算公式如下。

$$K_i = E_r^i / RI$$

式中, K_i 为重金属*i*的潜在生态危害贡献率。

2 结果与分析

2.1 武陟县农田土壤重金属含量

从表 4 可以看出,武陟县农田土壤 Cr、Ni、Cu、As、Pb 含量均高于河南省土壤背景值,分别是河南省土壤背景值的 1.11、1.26、1.62、1.47、1.12 倍,说明在武陟县农田土壤中 Cr、Ni、Cu、As、Pb 均有一定程度的积累。其中,旱地土壤 Cr 和 Ni 含量非常接近河南省土壤背景值,分别是河南省土壤背景值的 1.07、0.82 倍,而 Cu、As、Pb 含量分别达到了河南省土壤背景值的 1.41、1.59、1.23 倍,表明旱地土壤 Cu 和 As 的积累较为严重,Pb 略有积累;水田土壤 Cr、Ni、Cu、As 含量明显高于河南省土壤背景值,分别是河南省土壤背景值的 1.13、1.60、1.79、1.38 倍,其中 Cu 和 Ni 的积累最为明显,Pb 含量非常接近河南省土壤背景值。

表 4 武陟县不同耕地类型土壤重金属元素含量

耕地类型	统计值	Cr	Ni	Cu	As	Pb
旱地	最小值/(mg/kg)	55.21	12.67	21.07	10.22	19.75
	最大值/(mg/kg)	88.84	32.45	36.15	27.23	29.73
	均值/(mg/kg)	68.41	21.98	27.72	18.08	24.01
	标准差	7.75	4.07	3.30	5.41	2.82
	变异系数	0.11	0.19	0.12	0.30	0.12
水田	最小值/(mg/kg)	56.76	28.19	27.08	1.46	16.99
	最大值/(mg/kg)	84.08	53.41	46.35	34.93	25.22
	均值/(mg/kg)	72.17	42.62	35.20	15.74	20.58
	标准差	7.75	7.03	5.27	8.44	2.35
	变异系数	0.11	0.16	0.15	0.54	0.11
总体	最小值/(mg/kg)	55.21	12.67	21.07	1.46	16.99
	最大值/(mg/kg)	88.84	53.41	46.35	34.93	29.73
	均值/(mg/kg)	70.53	33.65	31.95	16.74	22.04
	标准差	7.89	11.89	5.84	7.33	3.06
	变异系数	0.11	0.35	0.18	0.44	0.14
河南省土壤背景值	均值/(mg/kg)	63.80	26.70	19.70	11.40	19.60

旱地土壤重金属含量与水田有一定差异,其中差别最大的是 Ni,水田土壤中 Ni 含量远大于旱地,是旱地的 1.94 倍。郑袁明等^[21]的研究结果也发现,水稻田土壤中 Ni 含量要大于麦地,与本研究结果一致。其次是 Cu,水田土壤中 Cu 含量是旱地的 1.27 倍,在一项针对北京市不同土地利用方式下土壤 Cu 积累的研究中也观察到了类似现象^[22]。Cr、As 和 Pb 3 种元素在水田和旱地土壤中的差异不是很明显,其中,旱地土壤中 As 含量略高于水田,此结果与杨刚等^[23]、吕文英等^[24]的研究结果一致,分析其原因,可能是由于当土壤电子活度负对数(pE)降低、pH 值升高时,As 的可溶性会显著增大,常常以 AsO_3^{3-} 、 HAsO_4^{2-} 、 H_2AsO_4^- 和 AsO_4^{3-} 等离子形式存在,易随水移动,因此,相比旱地土壤,As 在水田中易移动流失,故污染程度降低^[21]。旱地和水田土壤中 Pb 平均含量分别为 24.01 mg/kg 和 20.58 mg/kg,略高于河南省土壤背景值,低于北京市农业土壤平均

含量(稻田 27.3 mg/kg、麦地 25.6 mg/kg)^[25]。

2.2 武陟县农田土壤重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数法 经测定武陟县农田表层土壤 pH 值为 7.95~8.50,均为碱性土壤。因此计算过程中 S_i 采用土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中的二级限量值($\text{pH} > 7.5$)^[19]。从表 5 可以看出,从总体平均值来看,武陟县农田表层土壤 Cr、Ni、Cu、As、Pb 的单因子污染指数均小于 1,土壤总体处于清洁水平;仅部分土样 As 存在超标现象,总体超标比率达到 21.28%,但其单因子污染指数均小于 2,土壤处于轻污染水平,且水田土壤 As 超标样品比率(29.63%)高于旱地(10.00%)。总体来看,单因子污染指数均值大小顺序为 $\text{As} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb}$ 。从耕地类型来看,旱地土壤 Ni、Cu 和 As 的单因子污染指数均值小于水田,Cr 和 Pb 的单因子污染指数均值大于水田。

表 5 武陟县不同耕地类型土壤重金属单因子污染指数和综合污染指数

耕地类型	统计值	P_i					$P_{\text{综}}$
		Cr	Ni	Cu	As	Pb	
旱地	最小值	0.22	0.21	0.21	0.41	0.06	0.33
	最大值	0.36	0.54	0.36	1.09	0.08	0.82
	均值	0.27	0.37	0.28	0.72	0.07	0.57
	超标样品比率/%	0	0	0	10	0	0.49
水田	最小值	0.16	0.47	0.27	0.07	0.05	1.32
	最大值	0.24	0.89	0.46	1.75	0.07	0.72
	均值	0.21	0.71	0.35	0.79	0.06	0.33
	超标样品比率/%	0	0	0	29.63	0	1.32
总体	最小值	0.16	0.21	0.21	0.07	0.05	0.65
	最大值	0.36	0.89	0.46	1.75	0.08	
	均值	0.24	0.56	0.32	0.76	0.06	
	超标样品比率/%	0	0	0	21.28	0	

2.2.2 内梅罗综合污染指数法 从表 5 可以看出,总体上,武陟县农田表层土壤重金属平均内梅罗综合污染指数为 0.65,土壤整体上处于安全等级。旱地土壤重金属平均内梅罗综合污染指数及其变化幅度均小于水田,说明从重金属污染的角度来看,旱地土壤质量高于水田。总体来看,66.0% 的土壤处于安全等级,25.5% 的土壤处于警戒级水平,轻污染土壤占 8.5%,无中污染土壤和重污染土壤(图 2)。从耕地类型来看,旱地土壤均处于警戒级水平之内,而水田土壤有 14.8% 处于轻污染(图 2)。

2.2.3 潜在生态危害指数法 从表 6 可以看出,总体上,武陟县农田表层土壤 5 种重金属元素的单项潜在生态危害系数均小于 40,潜在生态危害指数均值为 36.97,重金属给土壤带来的潜在生态风险程度为轻微。各重金属元素生态风险程度表现为 $\text{As} >$

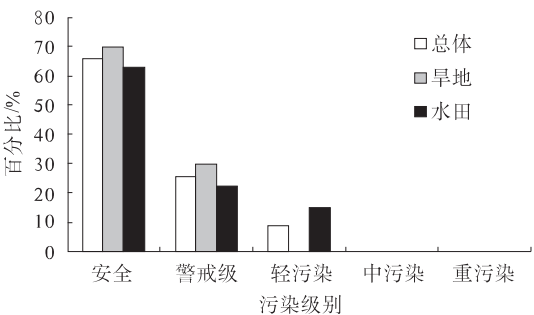


图 2 不同重金属污染等级土壤所占比例

$\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$ 。As 的潜在生态危害指数为 14.71,对土壤潜在生态风险的贡献率为 39.8%,是最主要的生态风险重金属。从耕地类型来看,旱地土壤各重金属元素的潜在生态风险程度表现为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr}$;水田土壤各重金属元素的潜在生态风险程度表现为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$ 。旱

地中各重金属的单项潜在生态危害系数及潜在生态危害指数与水田差别不大,说明 2 种耕地类型土壤重金属的潜在生态风险相近。

综上所述,武陟县农田表层土壤重金属污染处

于安全水平,重金属潜在生态风险程度为轻微。单因子污染指数法和潜在生态危害指数法评价结果均表明,研究区域土壤重金属元素中,As 对于土壤污染和生态风险的贡献最大,是主要污染因子。

表 6 武陟县不同耕地类型土壤重金属潜在生态危害指数

耕地类型	统计值	E_r^i					RI
		Cr	Ni	Cu	As	Pb	
旱地	最小值	1.73	2.37	5.35	8.96	5.04	24.12
	最大值	2.78	6.08	9.18	23.89	7.58	45.95
	均值	2.14	4.12	7.04	15.86	6.12	35.28
水田	最小值	1.78	5.28	6.87	1.28	4.33	25.24
	最大值	2.64	10.00	11.76	30.64	6.43	60.63
	均值	2.26	7.98	8.93	13.82	5.27	38.28
总体	最小值	1.73	2.37	5.35	1.28	4.33	24.12
	最大值	2.78	10.00	11.76	30.64	7.58	60.63
	均值	2.21	6.30	8.11	14.71	5.64	36.97

2.3 武陟县农田土壤重金属元素间的相关性分析

由表 7 可以看出,武陟县农田表层土壤中 Cr 含量与 Ni、Cu、As 含量及 Ni 含量与 Cu 含量存在极显著正相关性,Cu 含量与 As 含量存在显著正相关性,说明研究区土壤中这 5 种重金属存在不同程度的复合污染或具有相同的污染来源。pH 值仅与 As 含量存在显著正相关性,而 Ni 含量与 Pb 含量存在极显著负相关性。

表 7 武陟县不同耕地类型土壤不同重金属之间的相关系数

项目	pH	Cr	Ni	Cu	As	Pb
pH	1					
Cr	0.124	1				
Ni	-0.256	0.451 **	1			
Cu	-0.071	0.572 **	0.869 **	1		
As	0.302 *	0.530 **	0.013	0.322 *	1	
Pb	0.149	0.018	-0.442 **	-0.133	0.149	1

注:** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$), * 表示相关性显著 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

本研究结果表明,武陟县农田土壤 5 种土壤重金属中,Cr、Ni、Cu 和 Pb 的单因子污染指数均小于 1,土壤总体处于清洁水平;只有 As 存在超标现象,超标样品比率达到 21.28%,且水田土壤 As 超标样品比率高于旱地。土壤重金属的内梅罗综合污染指数为 0.65,总体上处于安全水平,且旱地土壤污染程度轻于水田,旱地土壤均处于警戒级水平之内,而水田土壤有 14.8% 处于轻污染。5 种重金属元素的单项潜在生态风险程度均为轻微,潜在生态危害指数为 36.97,处于轻微风险等级;As 对重金属综合潜在生态风险的贡献率为 39.8%,是生态风险最主要

的贡献者;2 种耕地类型土壤的潜在生态风险程度相近。另外,土壤重金属的相关性分析表明,武陟县农田表层土壤中 Cr 含量与 Ni、Cu、As 含量及 Ni 含量与 Cu 含量存在极显著正相关性,Cu 含量与 As 含量存在显著正相关性,说明研究区土壤中这 5 种重金属存在不同程度的复合污染或具有相同的污染来源。吕建树等^[26]的研究结果表明,日照市东港区和岚山区土壤中 Cr 含量与 Ni 含量、Cr 含量与 Cu 含量、Ni 含量与 Cu 含量、Cu 含量与 As 含量呈极显著正相关;王俊涛等^[27]的研究结果也表明,合肥市大兴镇水稻土中 Cr 含量与 Cu 含量、Cr 含量与 As 含量、Cu 含量与 As 含量呈极显著正相关,Ni 含量与 Cu 含量、Cr 含量与 Ni 含量呈显著正相关。在对某农药工业园区周边土壤重金属的研究中也发现,Cr 含量与 Ni 含量、Cr 含量与 As 含量呈极显著正相关,Cr 含量与 Cu 含量呈显著正相关^[28];其他许多研究^[29-31]也都表明,土壤中 Cr 含量与 Ni 含量存在极显著正相关性,这些与本研究结果基本一致。

参考文献:

[1] 刘晶,滕彦国,崔艳芳,等. 土壤重金属污染生态风险评估方法综述[J]. 环境监测管理与技术,2007,19(3):6-11.

[2] 崔艳芳,滕彦国,刘晶,等. 土壤 P 沉积物生态风险评估方法技术研究进展[J]. 干旱环境监测,2007,21(1):36-41.

[3] 尹仁湛,罗亚平,李金城,等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报,2008,27(6):2158-2165.

[4] 李名升,佟连军. 辽宁省污灌区土壤重金属污染特征

- 与生态风险评价[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1517-1522.
- [5] 董苗, 高燕, 张永清. 汾河临汾段污灌区土壤重金属污染评价[J]. 河南农业科学, 2014, 43(9): 72-78.
- [6] 徐欣, 马建华. 陇海铁路圃田段路旁土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 29-32.
- [7] 杨胜香, 袁志忠, 李朝阳, 等. 湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1718-1724.
- [8] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1285-1293.
- [9] 高军侠, 姜灵彦, 党宏斌, 等. 郑东新区不同利用类型土壤重金属污染评价[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5): 76-81.
- [10] 任华丽, 崔保山, 白军红, 等. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [11] 王心义, 杨建, 郭慧霞. 矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 808-812.
- [12] 杨建, 陈家军, 王心义. 煤矸石堆周围土壤重金属污染空间分布及评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 873-878.
- [13] 王娟, 胡斌, 李东艳, 等. 焦作市中马村矿土壤重金属污染调查评价[J]. 环境监测管理与技术, 2005, 17(2): 24-27.
- [14] 康亚莉, 齐永安, 官楠. 焦作市土壤重金属污染状况分析[J]. 能源环境保护, 2006, 20(2): 60-62.
- [15] 付巧玲. 河南省几个重点城市蔬菜基地的土壤重金属状况调查[J]. 河南农业科学, 2008(4): 64-66.
- [16] 黄风云, 胡斌, 成芬, 等. 焦作温县怀山药土壤重金属污染分析[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 123-126.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121. 2—2006 土壤检测 第2部分: 土壤 pH 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [19] 国家环境保护局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [20] 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.
- [21] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累[J]. 资源科学, 2005, 27(6): 162-166.
- [22] 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.
- [23] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014-2021.
- [24] 吕文英, 汪玉娟, 汤洁婷. 广州农田土壤重金属生物有效性研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(33): 14725-14726, 14824.
- [25] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 791-797.
- [26] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984.
- [27] 王俊涛, 周涛发, 李湘凌, 等. 合肥市大兴镇水稻根际土重金属积累[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 499-506.
- [28] 石宁宁, 丁艳锋, 赵秀峰, 等. 某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1835-1843.
- [29] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1946-1954.
- [30] 王志楼, 谢学辉, 王慧萍, 等. 典型铜尾矿库周边土壤重金属复合污染特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 113-117.
- [31] 周玲莉, 薛南冬, 杨兵, 等. 黄淮平原农田土壤中重金属的分布和来源[J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1706-1713.