

新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究

朱桂芬^{1,2}, 张春燕^{1,2}, 王建玲¹, 王学锋^{1,2}, 陈得军¹

(1.河南师范大学化学与环境科学学院, 河南 新乡 453007; 2.黄淮水环境与污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:通过田间采样及室内样品分析,对新乡市寺庄顶污灌区土壤和小麦子实中重金属污染特征进行了初步探讨。结果表明,土壤中Cr含量达标,Cd、Ni、Zn和Cu的含量超标,其平均含量分别为65.31、1 196.64、2 799.25和145.78 mg·kg⁻¹,是国家土壤环境二级标准的108.85、19.94、9.33和1.46倍;污染最严重的Cd主要以铁-锰氧化物结合态存在,所占比例平均为56.84%,Ni主要以铁-锰氧化物结合态和残渣态存在,所占比例平均为37.44%和39.55%,Zn主要以残渣态存在,所占比例平均为78.24%,Cu主要以有机结合态存在,所占比例平均为57.70%。小麦子实中Cd污染最严重,其平均含量为2.55 mg·kg⁻¹,是国家食品卫生标准的25.5倍,这主要是由于土壤中Cd总量严重超标且迁移能力最强的可交换态所占比例较高引起的,Ni、Cr和Zn含量分别是国家食品卫生标准的12.98、6.12和1.32倍,表明长期污水灌溉对寺庄顶灌区小麦的食品安全造成严重威胁,应引起足够的重视。

关键词:土壤;重金属;污灌;小麦子实

中图分类号:X508 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0263-06

Investigation of Heavy Metal Pollution in Soil and Wheat Grains in Sewage-irrigated Area in Sizhuangding, Xinxian City

ZHU Gui-fen^{1,2}, ZHANG Chun-yan^{1,2}, WANG Jian-ling¹, WANG Xue-feng^{1,2}, CHEN De-jun¹

(1.College of Chemistry and Environmental Sciences, Henan Normal University, Xinxian 453007, China; 2.Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Xinxian 453007, China)

Abstract: A primary study was performed to investigate heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage-irrigated area in Sizhuangding, Xinxian City. The results showed that the concentrations of Cd, Zn, Ni and Cu in soil were 65.31, 1 196.64, 2 799.25 and 145.78 mg·kg⁻¹, and they were about 108.85, 19.94, 9.33 and 1.46 times of the value for target element in the National Environmental Quality Standard for soils, respectively. The concentration of Cr in soil was less than the limited value. The chemical fractions of Cd, Zn, Ni and Cu in soil were also investigated. The results showed that Cd, Zn, Cu were dominated by iron-manganese oxides fraction, residual bound fraction and organic fraction with the percentage of 56.84%, 78.24% and 57.70%, respectively. But Ni was dominated by iron-manganese oxides fraction and residual bound fraction with the percentage of 37.44% and 39.55%. Moreover, the present study indicated that the contents of Cd, Ni, Cr and Zn in wheat grains were 25.5, 12.98, 6.12 and 1.32 times of value of the China National Hygienic Standards for Food. It showed that irrigation using wastewater resulted in the steadily increasing contents of heavy metals in soil which, in turn, contributed to elevated levels in grains.

Keywords: soil; heavy metal; sewage-irrigation; wheat grain

污水灌溉曾被认为是缓解农业水资源紧张状况的重要途径,但如果长期使用未经处理的污水进行灌溉,污水中重金属等污染物可能会在土壤中不断积累^[1-3],导致土壤污染进而影响农产品的食品安全^[4-6]。很多研

究结果表明,土壤中重金属总量并不能很好地预测重金属的生物有效性和环境效应^[7-10]。重金属的生物毒性不仅与其总量有关,更大程度上由其形态分布决定,不同形态产生不同的环境效应,直接影响到重金属的毒性、迁移及其在自然界的循环^[11-13],因此,对土壤中重金属的不同化学形态进行分析具有重要意义。

当前,人们对城市生活污水、电镀、冶炼和洗矿等工业废水灌溉造成的土壤和农作物重金属污染进行了大量的研究^[14-19],但有关电池废水灌溉对麦田土壤和小麦重金属含量影响的报道还比较少。新乡市是我

收稿日期:2008-04-03

基金项目:河南省自然科学基金项目(0611012000);新乡市科技攻关项目(06S049,08N039)

作者简介:朱桂芬(1977—),女,河南温县人,讲师,主要从事土壤生态系统重金属污染及形态分析研究。

通讯联系人:张春燕 E-mail:zhangchunyan416@yahoo.com.cn

国著名的轻工业城市,电池企业较多,约有 200 多家企业,规模较大的企业有 30 多家,企业排放的电池废水造成的土壤重金属污染问题较为突出,故本文以新乡市长期采用镍-镉、铁-镍和锌-银碱性蓄电池生产废水灌溉的寺庄顶村麦田为主要研究对象,取样分析了污灌区土壤以及小麦子实中重金属含量特征,此研究对于揭示长期电池废水灌溉对麦田土壤及小麦子实重金属含量的影响,保障污灌区人们的食品安全具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 样品

采样地点位于新乡市牧野区长期使用电池废水灌溉的寺庄顶灌区,土壤样品采集参照土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004 进行。采用网格-系统布点法,以 200 m×200 m 网格为样品单元,共采集 8 个样品,每个样品设 3 个平行,混匀后用四分法分别留取 1 kg 样品,于室温下自然风干,细磨后过 200 目筛备用。

1.2 土壤总量测定方法

土壤消解采用普通酸分解法,参照土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004 进行。

1.3 土壤的 pH 值测定

称取通过 1 mm 孔径筛的土壤样品 10 g 于烧杯中,加入无 CO₂ 蒸馏水 25 mL,轻轻摇动后用电磁搅拌器搅拌 1 min,使水和土充分混合均匀,放置 30 min,用 pH 计测量上部浑浊液的 pH 值。

1.4 小麦子实重金属含量测定方法

麦穗经过自然风干后,手工搓掉外皮得到子实部分,粉碎后称取样品 15 g,用 HNO₃:2HClO₄ 法(体积比 4:1)消煮^[20-21],消煮液定容至 50 mL,采用日立 Z-5000 原子吸收光谱测定仪进行测定。

1.5 土壤重金属形态测定方法

土壤重金属形态分析参照土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004 进行,其步骤如下。

1.5.1 可交换态

浸提方法是在 1 g 试样中加入 8 mL MgCl₂ 溶液(1 mol·L⁻¹ MgCl₂, pH=7.0),室温下振荡 1 h。

1.5.2 碳酸盐结合态

经以上的残余物在室温下用 8 mL 1 mol·L⁻¹ NaAc 浸提,在浸提前用乙酸把 pH 调至 5.0,连续振荡 8 h。

1.5.3 铁-锰氧化物结合态

在以上的残余物中,用 0.04 mol·L⁻¹ NH₂OH·HCl 在 20%(V/V)乙酸中(96℃±3℃)浸提 4 h。

1.5.4 有机结合态

将以上残余物,加入 3 mL 0.02 mol·L⁻¹ HNO₃、5 mL 30% H₂O₂,用 HNO₃ 调节 pH=2,将混合物加热至 85℃±2℃,保温 2 h,并在加热中间振荡几次,再加入 3 mL 30% H₂O₂,用 HNO₃ 调至 pH=2,将混合物在 85℃±2℃加热 3 h,并间断振荡。冷却后,加入 5 mL 3.2 mol·L⁻¹ 乙酸铵 20%(V/V) HNO₃ 溶液,振荡 30 min。

1.5.5 残余态

重金属总量减去可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态即残余态重金属含量。

上述各形态的浸提均在 50 mL 聚乙烯离心试管中进行,以减少固态物质的损失。在互相衔接的操作之间,离心处理 30 min,残留物用 8 mL 去离子水洗涤,再离心 30 min,弃去洗涤液,定容到 50 mL,采用原子吸收分光光度法进行测定。

1.6 数据处理与计算方法

本研究所有分析数据均采用 Origin 7.0 进行统计处理,相关性分析采用 SPSS13.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 新乡市寺庄顶污灌区土壤中重金属总量及化学形态分析

2.1.1 新乡市寺庄顶污灌区土壤中重金属总量分析

国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)规定作为一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤,为保障农业生产,维护人体健康,其土壤重金属含量执行二级标准。

由表 1 可知,新乡市寺庄顶污灌区土壤中 Cr 含量达标,Cd、Zn、Ni 和 Cu 含量超标,其中以 Cd 污染超标最严重。污灌区土壤 Cd 含量为 4.30~127.82 mg·kg⁻¹,平均值为 65.31 mg·kg⁻¹,是国家土壤质量二级标准的 108.85 倍。土壤 Ni 污染也比较严重,其含量为 140.11~2 195.37 mg·kg⁻¹,平均值为 1 196.64 mg·kg⁻¹,是国家土壤质量二级标准的 19.94 倍。土壤 Zn 的含量为 1 776.52~3 860.49 mg·kg⁻¹,平均值为 2 799.25 mg·kg⁻¹,是国家土壤质量二级标准的 9.33 倍。土壤中 Cu 的含量为 40.11~285.55 mg·kg⁻¹,其中取样点 1、2、3 都能达标,其他取样点平均含量为 196.67 mg·kg⁻¹,是国家土壤质量二级标准的 1.96 倍。

2.1.2 新乡市寺庄顶污灌区土壤中重金属之间的相关性

由表 2 可知,新乡市寺庄顶污灌区土壤中超标重金属 Cd、Zn、Ni、Cu 之间都呈极显著正相关($P<0.01$),这是由于该灌区灌溉污水主要来源于附近的生产镍

表 1 新乡市寺庄顶污灌区土壤中重金属总量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Total heavy metals contents of soils from Sizhuangding sewage-irrigated area in Xinxiang($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

测定元素	环境质量标准 (二级)	土壤样品								平均值	标准差
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Cd	≤ 0.6	4.30	14.25	44.39	58.72	125.95	73.26	73.78	127.82	65.31	45.56
Ni	≤ 60	140.11	310.88	905.71	1 022.72	2 195.37	1 494.60	1 379.06	2 124.68	1 196.64	708.54
Zn	≤ 300	1 888.48	1 776.52	2 906.93	2 097.65	3 745.75	3 025.51	3 092.69	3 860.49	2 799.25	736.16
Cu	≤ 100	40.11	43.82	98.91	125.16	285.55	156.48	161.26	254.92	145.78	89.43
Cr	≤ 350	89.21	76.24	128.29	111.54	286.44	149.51	163.69	212.65	152.20	69.46

表 2 土壤中 Cd、Zn、Ni、Cu 之间的相关性($n=8$)

Table 2 Correlation of Cd, Zn, Ni, Cu in soil

元素	Cd	Ni	Zn	Cu
Cd	1			
Ni	0.993**	1		
Zn	0.927**	0.942**	1	
Cu	0.992**	0.985**	0.923**	1

注:** 表示在 $P<0.01$ 显著水平。

镉、铁镍和锌银碱性蓄电池企业造成的。

2.1.3 新乡市寺庄顶污灌区土壤中 Cd、Ni、Zn、Cu 化学形态分布

由图 1~4 可看出, 污染最严重的 Cd 主要以铁-锰氧化物结合态存在, 所占比例为 31.52%~65.45%, 平均为 56.84%; 其次是可交换态, 所占比例为 17.84%~32.19%, 平均为 24.55%; 残余态含量最低为 1.31%~5.74%。Ni 的残余态和铁-锰氧化物结合态含量较高, 平均分别为 39.55% 和 37.44%; 可交换态和碳酸盐含量都比较低, 平均为 0.30% 和 0.46%。Zn 主要以残余态存在, 所占比例为 53.64%~88.40%, 平均

为 78.24%; 可交换态含量最低, 平均为 0.65%。Cu 主要以有机结合态存在, 所占比例是 33.92%~73.11%, 平均为 57.70%; 其次为残余态, Fe-Mn 氧化物结合态、可交换态和碳酸盐结合态含量都比较低, 平均为

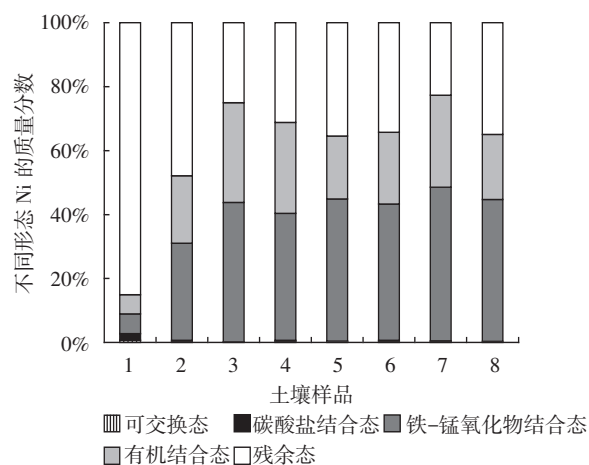


图 2 新乡市寺庄顶污灌区 Ni 的形态分布

Figure 2 Speciation patterns of Ni in the Sizhuangding irrigation area

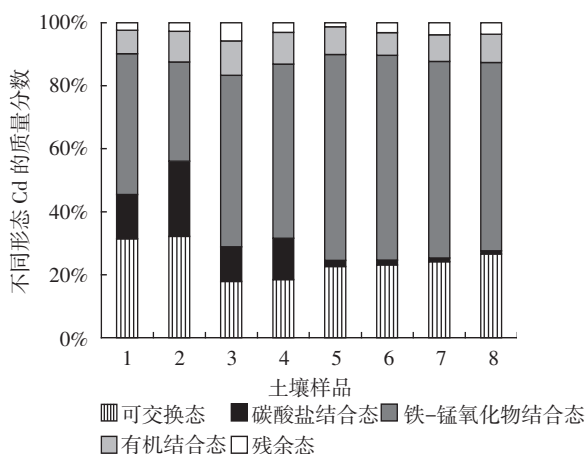


图 1 新乡市寺庄顶污灌区 Cd 的形态分布

Figure 1 Speciation patterns of cadmium in the Sizhuangding irrigation area

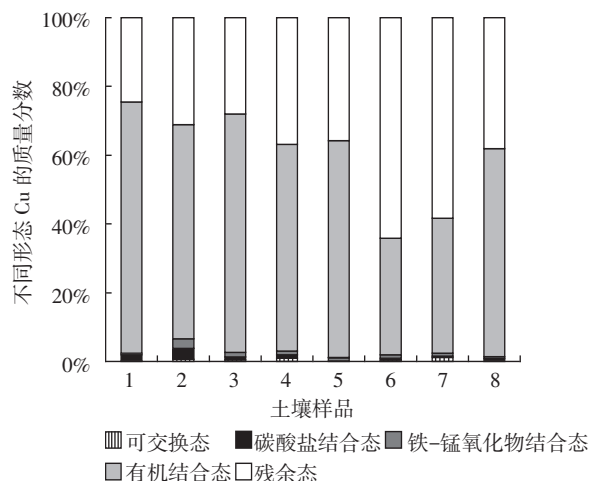


图 3 新乡市寺庄顶污灌区 Cu 的形态分布

Figure 3 Speciation patterns of copper in the Sizhuangding irrigation area

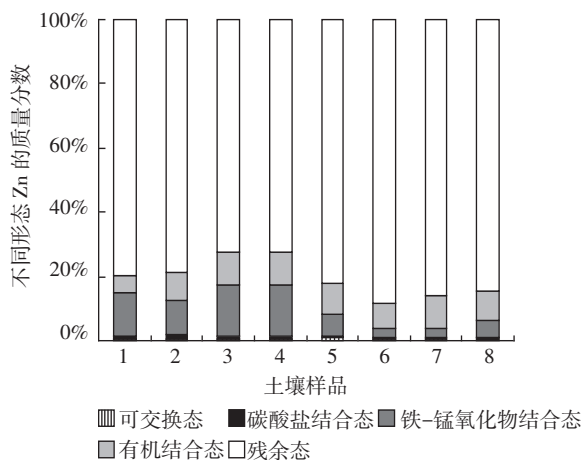


图4 新乡市寺庄顶污灌区 Zn 的形态分布

Figure 4 Speciation patterns of Zn in the Sizhuangding irrigation area

0.58%、1.11%和 1.01%。

从以上分析还可知,新乡市寺庄顶污灌区土壤中 Zn 和 Cu 的可交换态含量均很低,这可能与土壤的 pH 值有关。所调查的土壤 pH 值较高,其范围在 7.90~8.48 之间,平均值为 8.08,研究表明土壤的 pH 值与土壤 Cu、Zn 可交换态含量呈负相关^[22]。蒋定安等^[23]研究也指出,土壤 pH 降低 0.4, Cu 和 Zn 可交换态含量可提高 65%。而污灌区 Cd 的可交换态含量相对较高,所占比例为 17.84%~32.19%,平均为 24.55%,平均为 16.03 mg·kg⁻¹。高彦征等^[15]研究发现被污染的土壤中 Cd 主要以残渣态等稳定态形式存在。陈俊等^[10]研究发现北京市新河污灌区土壤中 Cd 碳酸盐结合态和可交换态的比例很高,寺庄顶污灌区 Cd 可交换态含量相对较高的原因可能是于长期的污水灌溉导致土壤 Cd 总量严重超标。由表 3 可知 Cd 可交换态与总量呈极显著相关($P<0.01$),相关系数为 0.982,相关机理有待进一步研究。

表3 新乡市寺庄顶污灌区土壤 Cd 含量与各形态相关性

Table 3 Correlation of Cd concentration and Cd speciation of Sizhuangding sewage-irrigated soils

重金属	可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态
Cd	0.982(**)	-0.149	0.996(**)	0.988(**)	0.747(*)

注:**和*表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著水平。下同。

2.2 新乡市寺庄顶污灌区小麦子实中重金属含量分析

由表 4 可知,新乡市寺庄顶污灌区小麦子实中 Cu 含量都能达到国家食品卫生标准, Cd、Ni、Cr 和 Zn 含量都超标,其中 Cd 含量超标最严重。

污灌区小麦子实中 Cd 含量为 0.38~4.30 mg·kg⁻¹, 其平均含量为 2.55 mg·kg⁻¹, 是国家食品卫生标准 (GB 2715—2005) 的 25.5 倍。Cd 是一种积累性的剧毒元素,具有致癌、致畸和致突变作用,世界卫生组织 (WHO) (2003) 和美国环保局 (USEPA) (1994) 所规定 Cd 的最大允许摄入量 (ADI 值) 均为 1 μg·kg⁻¹·d⁻¹^[24]。造成小麦子实 Cd 超标主要原因是土壤中 Cd 总量污染严重且迁移性最强的可交换态含量较高。

Ni 是一种致癌的极毒元素^[25],污灌区小麦子实中 Ni 的平均含量为 5.19 mg·kg⁻¹,污染也比较严重,是中国食品卫生标准分委会推荐内控标准的 12.98 倍。

土壤 Cr 含量虽然能达标,但小麦子实中 Cr 含量却是国家食品卫生标准分的 6.12 倍,说明小麦子实对 Cr 的吸收能力可能较强。

Zn 平均含量是国家食品卫生标准 (GB 13106—91) 1.32 倍,此外,我们还可看出,虽然土壤中 Zn 的含量污染比较严重,但小麦子实中 Zn 含量超标并不严重,这主要是由于土壤中 Zn 残渣态所占比例较高引起的。

2.3 新乡市寺庄顶污灌区小麦子实中重金属和土壤重金属总量及形态、土壤 pH 值的相关性分析

由表 5 可知道,小麦子实中 Cd 含量和土壤 Cd 总量呈极显著相关 ($P<0.01$),和可交换态含量呈显著相关 ($P<0.05$)。王祖伟研究也发现天津市污灌区小麦子实中 Cd 的含量与土壤中重金属 Cd 含量的相关性较大,相关系数是 0.446 3^[26],汤丽玲对江苏省 3 个市区 82 个小麦样品 Cd 测定后指出,土壤 Cd 含量和土壤 pH 值是影响小麦子实 Cd 含量的两个主要因子^[27]。而本研究发现小麦子实 Cd 含量与 pH 值相关系数却较低。

Zn 与土壤 Zn 总量及可交换态含量呈极显著相关 ($P<0.01$),而与 pH 值呈负相关,这与王祖伟研究的天津市污灌区小麦对 Zn 吸收规律是一致的。

Ni 含量和土壤中 Ni 总量以及可交换态含量相关系数较高,而与 pH 值相关系数较小,这与王祖伟研究天津市污灌区小麦子实 Ni 中和土壤重金属总量相关性较弱,与 pH 值相关性较强结论不同。

小麦子实 Cr 含量与土壤中 Cr 总量相关系数较低,但是与可交换态相关性较强,表明不能仅依靠土壤重金属总量预测其对小麦子实重金属含量的影响,为确保小麦的食品安全,还应对小麦样品取样分析,以实际的测定值作为评价的依据是最可靠的。

寺庄顶污灌区小麦子实中 Cu 与土壤中 Cu 的总

表 4 新乡市寺庄顶污灌区小麦子实重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 4 Contents of heavy metals in wheat grains($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

测定元素	环境质量标准(二级)	小麦子实								平均值	标准差
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Cd	<0.1	0.38	0.78	1.46	4.30	4.13	2.83	2.36	4.16	2.55	1.58
Ni	<0.4	2.21	5.20	2.93	4.07	5.18	8.82	4.03	9.10	5.19	0.52
Zn	<50	60.50	68.83	47.72	69.01	67.30	69.54	68.10	76.77	65.97	8.58
Cr	<1.0	3.70	9.58	3.08	5.36	3.32	8.73	2.87	12.37	6.12	3.62
Cu	<10	4.71	4.63	4.16	4.76	4.60	4.36	4.10	5.42	4.59	0.52

注: Cd、Cr 含量执行 GB 2715—2005, Zn 含量执行 GB 13106—91, Cu 含量执行 GB 15199—94, Ni 含量执行全国食品卫生标准分委会推荐内控标准。

表 5 新乡市污灌区小麦子实重金属和土壤重金属总量及形态、土壤 pH 值的相关性($n=8$)Figure 5 Correlations coefficients of wheat grains heavy metal and metal fractions from sewage-irrigated soils, soil pH($n=8$)

小麦中重金属	土壤重金属总量	可交换态	碳酸盐结合态	铁-锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态	土壤 pH
Cd	0.859**	0.796*	0.256	0.840**	0.872**	0.611	0.097
Ni	0.632	0.683	0.023	0.606	0.617	0.695	0.089
Zn	0.720**	0.794**	-0.515*	0.790**	0.813**	0.697**	-0.101
Cu	0.314	0.309	-0.208	-0.007	0.445	0.086	-0.575
Cr	0.132	0.614	-0.133	0.213	-0.036	-0.293	-0.295

量、可交换态及有机结合态相关性不强,而与碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态及土壤 pH 值呈现负相关。

3 结论

(1) 由于长期采用电池废水灌溉,新乡市寺庄顶污灌区土壤中 Cd、Ni 和 Zn 总量严重超标。土壤中 Cd 主要以铁-锰氧化物结合态存在, Ni 主要以的铁-锰氧化物结合态和残余态存在, Zn 主要以残余态存在, Cr 主要以铁-锰氧化物结合态和残余态存在, Cu 主要以有机结合态存在。

(2) 新乡市寺庄顶污灌区小麦子实中 Cd 和 Ni 含量严重超标,表明长期电池废水灌溉已对小麦的食品安全造成严重威胁。

(3) 新乡市寺庄顶污灌区小麦子实中重金属与土壤重金属含量的相关性分析表明,小麦中 Cd、Zn 含量与土壤中 Cd、Zn 总量、可交换态、铁-锰氧化物结合态及有机结合态相关性显著。

参考文献:

- [1] Aleem A, Isar J, Malik A. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in *Azotobacter chroococcum* isolated from rhizospheric soil[J]. *Bioresource Technology*, 2003(86): 7-13.
- [2] Bansal O P. Heavy metal pollution of soils and plants due to sewage irrigation[J]. *Indian Environmental Health*, 1998(40): 51-52.
- [3] 杨 军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉水河灌区小麦重金属含量的动

态变化及健康风险分析—兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1661-1668.

YANG Jun, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human risks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12): 1661-1668.

- [4] Adriano D C, Chlopecka A, Kaplan D I, et al. Soil contamination and remediation: philosophy, science and technology, in contaminated soil[M]. Paris: NRA, 1998: 465-504.
- [5] Cameron K C, Di J, McLaren R G. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes?[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997(35): 995-1035.
- [6] Möller A, Müller H W, Abdullah A, et al. Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta[J]. *Geoderma*, 2005, (124): 63-71.
- [7] Bermond A. Limits of sequential extraction procedures re-examined with emphasis on the role of H^+ ion reactivity[J]. *Anal Chim Acta*, 2001(445): 79-88.
- [8] Ladonin D V. Heavy metal compounds in soils: problems and methods of study[J]. *Eurasian Soil Sci*, 2002, 35(6): 605-613.
- [9] Olajire A A, E T Ayodele, G O Oyediran, et al. Levels and speciation of heavy metals in soils of industrial southern Nigeria[J]. *Envir Monit Assess*, 2003(85): 135-155.
- [10] 陈 俊, 范文宏, 孙如梦, 等. 新河污灌区土壤中重金属的形态分布和生物有效性研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(5): 831-837.
- CHEN Jun, FAN Wen-hong, SUN Ru-meng, et al. Bioavailability and species distribution of heavy metals in sewage-irrigated soil from Xinhe[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5): 831-837.
- [11] Quevauviller P. Operationally defined extraction procedures for soil

- and sediment analysis I. standardization [J]. *Trends Anal Chem*, 1998 (17):289-298.
- [12] Ahumada I, J Mendoza, E Navarrete, et al. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1999(30):1507-1519.
- [13] 钱进, 王子健, 单孝全, 等. 土壤中微量金属元素的植物可给性研究进展[J]. 环境科学, 1995, 16(6):73-75.
QIAN Jin, WANG Zi-jian, SHAN Xiao-quan, et al. Progress in the investigation on plant availability of soil trace metals [J]. *Environmental Science*, 1995, 16(6):73-75.
- [14] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 等. 贵溪市污灌水田重金属元素的化学形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):683-686.
HU Ning-jing, LI Ze-qin, HUANG Peng, et al. Chemical forms of heavy metals in swage-irrigated paddy soil in Guixi City [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):683-686.
- [15] 高彦征, 贺纪正, 凌婉婷. 湖北省几种土壤的重金属镉、铜形态[J]. 华中农业大学学报, 2001, 20(2):143-147.
GAO Yan-zheng, HE Ji-zheng, LING Wan-ting. Fractionation of heavy metal cadmium and copper in some soils in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2001, 20(2):143-147.
- [16] 刘杰, 钟雪梅, 梁延鹏, 等. 电镀废水污染水稻田土壤中重金属的形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):398-401.
LIU Jie, ZHONG Xue-mei, LIANG Yan-peng, et al. Fractionations of heavy metals in paddy soils contaminated by electroplating wastewater [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):398-401.
- [17] 李其林, 黄昀, 刘光德, 等. 小安溪河流域污水灌区重金属的污染特征[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6):14-17.
LI Qi-lin, HUANG Yun, LIU Guang-de, et al. The pollution characteristic of heavy metals of sewage irrigated region in Xiao Anqi River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6):14-17.
- [18] 王国贤, 陈宝林, 任桂萍, 等. 内蒙古东部污灌区土壤重金属迁移规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):30-32.
WANG Guo-xian, CHEN Bao-lin, REN Gui-ping, et al. Migration of heavy metals in soils receiving effluent irrigation in eastern inner-Mongolia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(supplement):30-32.
- [19] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9):1175-1180.
YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1175-1180.
- [20] Parida B K, Chhibba I M, Nayyar V K. Influence of nickel contaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition[J]. *Scientiae Horticulturae*, 2003(98):113-119.
- [21] 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, 1997: 103-113.
YANG H F, LI M Y, SHEN W. The manual of standard in food health and its physics-chemical test [M]. Beijing, China Standard Press, 1997:103-113.
- [22] 成杰民, 潘根兴, 郑金伟, 等. 模拟酸雨对太湖地区水稻土铜吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(3):333-340.
CHENG Jie-min, PAN Gen-xing, ZHENG Jin-wei, et al. Effect of simulated acid rain on adsorption and desorption of copper by paddy soils in Taihu Lake Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3):333-340.
- [23] 蒋定安, 成杰民. 近十几年来宜兴市水稻土表层土壤 pH 及 Cu、Zn、Mn 有效态含量的变化[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(4):111-113.
JIANG Ding-an, CHENG Jie-min. Change of pH and available pool of B, Cu, Zn, Mn in surface rice soils in Yixing, Jiangsu Province over the last decades[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20(4):111-113.
- [24] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8):1343-1353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8):1343-1353.
- [25] 杨国义, 罗薇, 张天彬, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. 生态环境, 2007, 16(3):818-821.
YANG Guo-yi, LUO Wei, ZHANG Tian-bin, et al. The distribution of Ni contents in agricultural soils in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecol-ogy and Environmnet*, 2007, 16(3):818-821.
- [26] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1406-1410.
WANG Zu-wei, LI Zong-mei, WANG Jing-gang, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1406-1410.
- [27] 汤丽玲. 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.
TANG Li-ling. Effects of soil properties on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):699-703.