

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.022

污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价*

庞妍¹ 同延安^{1,2} 梁连友² 吉普辉¹ 唐希望¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 对陕西省西安市污灌区农田土壤、小麦和蔬菜等农作物样品的 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 含量进行了测定。结果表明, 研究区土壤 Cd、Pb 平均值高于西安市和陕西省土壤背景值, Cu、Zn 平均值高于陕西省土壤背景值。相关性分析结果显示, 土壤 Cd 和 Pb 呈显著正相关关系, Zn 与 Cr、Cu 分别呈显著和极显著正相关关系。结合主成分分析可知, 土壤 Cd 和 Pb 主要受人为因素影响, Cr、Cu、Zn 主要受成土母质影响。潜在生态危害指数法和内梅罗污染指数法的结果均表明污灌区农田土壤 Cd 已达到最强污染级别。污灌区小麦样品中 Cr、Pb 超标率分别到达 70.00% 和 80.00%, 茄果类蔬菜 Cd、Cr 和 Pb 超标率分别为 66.67%、100% 和 66.67%, 花菜类和叶菜类中 Cd、Cr 和 Pb 超标率均为 100%。建议污灌区尽量避免种植重金属转移系数高的花菜类和叶菜类蔬菜, 并对含 Cd 污水经过严格处理后再用于灌溉。

关键词: 污灌农田土壤 作物 重金属 潜在生态危害指数法 内梅罗污染指数法

中图分类号: X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0148-07

Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil – Crop System on Sewage Irrigated Farmland

Pang Yan¹ Tong Yan'an^{1,2} Liang Lianyou² Ji Puhui¹ Tang Xiwang¹

(1. College of Nature Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, MOA, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The concentrations of Cd, Cr, Cu, Pb, Zn in soil, wheat and vegetable samples from sewage irrigated farmland in Xi'an, Shaanxi Province, were determined. Results indicated that average contents of Cd and Pb in the research area were higher than soil background values in Xi'an and Shaanxi Province, respectively, and the average contents of Cu and Zn were higher than soil background values in Shaanxi Province, respectively. Significantly positive correlation was found between Cd and Pb in soils, while highly significant positive correlation was found among Cr, Cu and Zn, respectively. The principal component analysis showed Cd and Pb in soils were associated with anthropogenic activities, whereas Cr, Cu and Zn were predominantly controlled by parent material. The quality of soils were evaluated with potential ecological risk index and Nemerow pollution index, however, both of the results showed that Cd was the major pollution element in soil. In the study areas, exceeding rates of Cr and Pb in wheat samples were up to 70.00% and 80.00%, respectively; exceeding rates of Cd, Cr, Pb in fruit vegetable samples were 66.67%, 100% and 66.67%, respectively; and exceeding rates of Cd, Cr, Pb in flower and leaf vegetables samples were 100%. Therefore, it was suggested that farmers should avoid cultivating high transfer factor plants, such as flower and leaf vegetables, meanwhile, sewage with Cd must be purified strictly before irrigation.

Key words: Sewage irrigated farmland Crop Heavy metal Potential ecological risk index Nemerow pollution index

收稿日期: 2014-09-09 修回日期: 2014-10-13

* 公益性行业(农业)专项资金资助项目(201203045)

作者简介: 庞妍, 博士生, 主要从事土壤重金属修复、施肥与环境研究, E-mail: py1986-11-10@163.com

通讯作者: 同延安, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤化学、施肥与环境、农业生态研究, E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

引言

在水资源紧缺情况下,城市污水已经成为我国水量稳定、供给可靠的一种潜在水资源。合理灌溉不但为污水处置提供了途径,缓解了水资源供需之间的矛盾,还可提高土壤肥力,改善土壤理化性状,增加作物产量^[1-2]。然而,由于我国城市污水处理系统普遍不完善,生活污水常常与工业污水混合排放,长期采用不符合灌溉标准的污水灌溉,农田土壤中的有机污染物、重金属及固体悬浮物含量超过了土壤吸持和作物吸收能力必然造成土壤污染^[3-4]。当污灌区有毒有害物质积累量超过土壤的环境容量时,会通过食物链进入人体,对人类健康造成潜在威胁^[5]。

西安污灌区以沣惠灌区为主,主要集中于地势较低的西安市北郊和西北郊地区,行政范围大部分位于未央区境内,是我国污灌较早、规模较大的灌区之一,当地农民充分利用废水资源发展种植业,至今已有近 60 年的历史^[6]。灌区多于 1957—1962 年开灌,到 20 世纪 80 年代污灌面积发展到 1.2 万 hm^2 。1995 年以来由于城市的发展占用了部分土地,灌溉渠道遭到破坏,菜田改用井灌等原因,全区污水灌溉面积有所减少^[7]。目前,西安污灌区生态环境和农业生产结构产生了变化,因此,需要对其生态环境进行监测和评价。本研究以西安污灌区为例,通过对污灌区农田土壤重金属含量进行测定,以西安土壤背景值作为参比值,分别运用潜在生态危害指数法和内梅罗污染指数法对土壤重金属污染水平进行综合评价。同时,对污灌区小麦、蔬菜等农作物中重金属含量进行测定,评价其污染状况,通过作物的重金属转移系数分析污灌对作物的影响,形成一套较为可行的污灌区环境监测评价方法,为我国其他污灌区环境监测和评价提供参考。

1 材料与方 法

1.1 采样区域概况

采样区位于陕西省西安市,地处黄河流域中部的关中平原,南依秦岭,北临渭河,地势东南高,西北低,平均海拔高度 410 m 左右,属于暖温带半湿润的季风气候区,土壤以黑垆土和塬土为主,土壤 pH 值在 7.82 ~ 8.81 之间,肥力较高,易于耕作,灌区主要作物以粮、菜为主。

1.2 样品采集及处理

在西安市主要的污灌区确定了 70 个采样地块,每个地块内在 0 ~ 20 cm 土层采集 3 ~ 5 个土样形成一个混合样,经除杂、风干,准确称取 0.250 0 g (精

确到 0.000 1 g) 过 100 目筛的土样。采用 $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4 + \text{HF}$ 混合酸消解法,并增加标准样和空白样与土样进行相同操作以保证测定结果的可靠性,所用酸均为优级纯,消解后用高纯水定容,再用 ICP - AES 测定 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 全量。同时采集混合作物样品,其中小麦样品 24 个,茄果类样品包括西红柿、黄瓜、西葫芦,共 18 个;花菜类样品包括西兰花、花菜,共 12 个;叶菜类样品包括油麦菜、小白菜、茼蒿、香菜,共 16 个。小麦样品经风干、脱粒后粉碎,蔬菜样品按照自来水、0.1 mol/L 盐酸和蒸馏水顺序洗涤,室内通风处阴干,取可食部分在 100 ~ 105℃ 下杀酶 15 min,然后在 70 ~ 80℃ 下干燥至恒质量,准确称取粉碎后的植物样品 0.300 0 g (精确到 0.000 1 g),并增加植物标准样品进行质量控制,采用 $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ 混合酸消解,用 ICP - AES 测定 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 全量。

1.3 数据处理与图形制作

土壤重金属含量分析与评价采用 Excel 2007 软件处理,重金属相关性分析和主成分分析采用 SPSS 16.0 软件处理。

2 结果与分析

2.1 污灌区农田土壤重金属含量

研究区域土壤重金属含量见表 1。平均值反映元素含量的集中趋势,变异系数则反映元素的离散程度^[8]。研究区域土壤重金属平均质量比从大到小为 Zn、Cr、Pb、Cu、Cd、Cd、Pb 质量比分别高于西安市土壤背景值 299.33% 和 8.63%,其他元素质量比低于该背景值;Cd、Cu、Pb 和 Zn 质量比分别高于陕西省土壤背景值 536.79%、21.05%、49.73% 和 18.42%,而 Cr 平均质量比低于该背景值;除 Cd 平均质量比接近国家土壤环境质量二级标准限值(pH 值大于 7.5)以外,其他元素平均质量比均远低于此标准。总体来看,污灌区土壤中 Cd、Pb 含量较高,相比 1982 年的 Cd(0.38 mg/kg) 和 Pb (26.9 mg/kg) 均有增加^[7],这可能是由于灌溉水中重金属含量增加引起,有数据显示^[9],2010 年陕西省工业废水中 Cd 排放量接近 2003 年的 2 倍,Pb 排放量也大幅增加。另外,土壤 Cd 变异系数较大,说明 Cd 离散程度较高,这可能是采样点间污灌年限、污灌类型、灌水量等差异造成。

2.2 研究区域土壤重金属相关性 及主成分分析

由于地球化学条件的相似性,以及造成土壤污染的重金属元素共存于土壤中,导致重金属元素在总量上存在相关性^[8],相关性分析结果显著或极显著说明重金属间存在同源或伴生关系^[13-15]。由土

表1 土壤重金属背景值与测定值比较

Tab.1 Background and soil sample values of heavy metal contents

参数	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
范围/(mg·kg ⁻¹)	0.05 ~ 1.14	30.40 ~ 76.20	14.46 ~ 45.42	24.45 ~ 37.55	40.08 ~ 114.05
平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.60 ± 0.29	51.97 ± 10.57	25.91 ± 7.80	32.04 ± 3.11	82.18 ± 22.25
变异系数/%	49.12	20.33	30.10	9.69	27.08
陕西背景值 ^[10] /(mg·kg ⁻¹)	0.094	62.5	21.4	21.4	69.4
西安背景值 ^[6,11] /(mg·kg ⁻¹)	0.15	62.8	32	29.5	87
二级标准限值 ^[12] /(mg·kg ⁻¹)	0.6	250	200	350	300

壤重金属相关性分析结果(表2)可以看出,Cd和Pb呈显著正相关关系,说明Cd和Pb具有伴生或同源关系。Zn与Cr、Cu分别呈显著和极显著正相关关系,因此,三者存在同源关系或受相同因素影响。

通过对5种元素进行主成分分析(表3),提取出特征值较大的2个因子,第1主成分和第2主成分累积方差达到75.585%,可反映5种重金属的主要来源,其中第1主成分贡献率为53.505%,说明该因子对研究区域重金属来源具有决定性作用。利用方差最大正交旋转法对因子载荷矩阵进行正交旋转变换得到图1和图2,可以看出,Cr、Cu和Zn均在

表2 土壤重金属相关系数

Tab.2 Correlation coefficients of heavy metal contents in soils

重金属元素	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Cd	1.000 0				
Cr	0.334 3	1.000 0			
Cu	0.349 2	0.432 8	1.000 0		
Pb	0.517 9*	0.346 1	0.175 0	1.000 0	
Zn	0.339 4	0.525 1*	0.833 1**	0.258 1	1.000 0

注: * 表示 $p < 0.05$, 元素间为显著相关关系; ** 表示 $p < 0.01$, 元素间为极显著相关关系。

表3 主成分特征值分析

Tab.3 Eigenvalues of factors for study region

因子	初始特征值			提取后特征值			交换后特征值		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	2.675	53.505	53.505	2.675	53.505	53.505	2.160	43.201	43.201
2	1.104	22.080	75.585	1.104	22.080	75.585	1.619	32.384	75.585
3	0.617	12.344	87.929						
4	0.449	8.983	96.912						
5	0.154	3.088	100						

第1主成分中占有绝对高负荷,分别达到0.727、0.809和0.853,Cd和Pb在第1主成分和第2主成分中所占负荷较接近,而旋转后Cd和Pb在第2主成分中占高负荷,分别为0.796和0.891,Cr、Cu和Zn仍在第1主成分中占高负荷。结合表2各重金属相关性分析结果可知,Cr、Cu和Zn有相同来源,而且Cr、Cu和Zn变异系数均小于31%,这种区域

性分布和在大范围内的变异主要受成土母质控制^[16-17]。因此,推测第1主成分为成土母质的作用。而Cd和Pb主要受第2主成分影响,考虑到Cd的变异系数接近50%,说明各采样点Cd含量差异较大,这种差异性很可能来自人为活动。西安污灌区灌水资源比较复杂,水质参差不齐,所以各个农田污灌水的来源和灌水量的不同会造成土壤重金属含

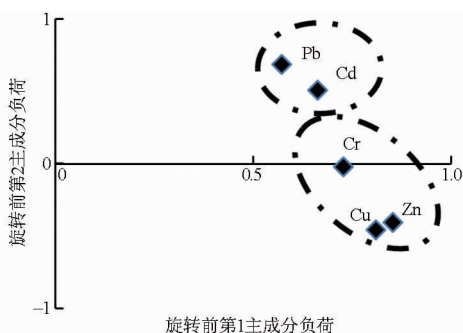


图1 旋转前主成分负荷

Fig.1 Component matrixes before rotated

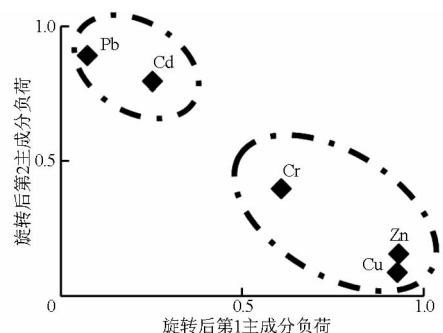


图2 旋转后主成分负荷

Fig.2 Component matrixes after rotated

量的不同。有研究表明,为保证蔬菜产量,蔬菜地会大量使用畜禽粪便作为有机肥,而 Cd 和 Pb 经常作为饲料添加剂使用,饲料中的重金属会在畜禽粪便中累积^[18],这就增加了土壤 Cd 和 Pb 含量;另外,磷肥中也含有较高的 Cd、Pb^[19],因此,农田有机肥与磷肥施用量的不同可能导致土壤重金属含量的差异;污灌区农田大多分布在公路旁边,而汽车尾气正是 Pb 等重金属的主要来源之一^[20-21],可见,不同区域农田周围车流量的不同也可能导致土壤重金属含量的差异。综上可知,第 2 主成分应为污水灌溉、施肥、交通运输等人为活动的影响。

2.3 研究区域土壤重金属污染风险评价

考虑到研究区域土壤中 5 种重金属富集程度差异较大,因此,选择能够综合考虑多元素的浓度、毒性水平、生态敏感性以及协同作用的潜在生态危害指数法(Potential ecological risk index)^[22-25]和能够反映各污染物对土壤环境的综合污染程度,并突出高浓度污染物影响的内梅罗污染指数法(Nemerow pollution index)^[26-27]分别对土壤污染情况进行评价,目的是突出主要的污染物。同时,采用西安市土壤重金属背景值作为参比值,它能较陕西省土壤重金属背景值和国家土壤环境质量二级标准更加真实地反映长期污灌对当地土壤重金属富集的影响。

潜在生态危害指数计算式为

$$E_{ri} = T_{ri} \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (1)$$

$$R = \sum E_{ri} \quad (2)$$

式中 E_{ri} ——土壤中某种重金属元素的潜在生态危害系数

T_{ri} ——某种重金属元素的毒性响应系数,具体 Cd 为 30、Cu 和 Pb 为 5、Cr 为 2、Zn 为 1^[28]

C_i ——某种重金属元素的测定值

C_{0i} ——某种重金属元素的参比值

R ——土壤中多种重金属潜在生态危害指数

E_{ri} 和 R 的评价标准: $E_{ri} < 40$ 或 $R < 150$ 为轻微污染; $40 \leq E_{ri} < 80$ 或 $150 \leq R < 300$ 为中等污染; $80 \leq E_{ri} < 160$ 或 $300 \leq R < 600$ 为强污染; $160 \leq E_{ri} < 320$ 或 $R \geq 600$ 为较强污染; $E_{ri} \geq 320$ 为极强污染。

内梅罗污染指数法计算式为

$$P_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (3)$$

$$P = \sqrt{\frac{P_n^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (4)$$

式中 P_i ——污染物 i 的单因子污染系数

P ——土壤综合污染指数

P_n ——土壤各单因子污染系数的平均值

P_{\max} ——土壤各单因子污染系数中最大值

若 $P \leq 0.7$, 土壤处于清洁状态; $0.7 < P \leq 1.0$, 土壤基本清洁; $1.0 < P \leq 2.0$, 土壤轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$, 土壤中度污染; $P \geq 3.0$ 为重度污染。

根据潜在生态危害指数法进行评价,结果表明(图 3),研究区域除 Cd 外,其他重金属元素的生态危害系数均远低于 40,但是由于 Cd 生态危害系数过高(最高为 226.96),属于较强污染,导致该区平均生态危害指数 R 达到 131.80,虽然属轻微污染,但最高值为 237.86,表明部分地区土壤达中度污染水平。

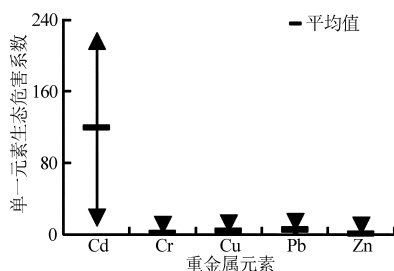


图 3 潜在生态危害指数法评价结果

Fig. 3 Potential ecological risk index of study area

内梅罗污染指数法评价结果如图 4 所示,Cd 污染最为严重,平均单一污染系数为 3.99,呈重度污染,Cr、Cu 和 Zn 平均单一污染系数分别为 0.83、0.81 和 0.94,属基本清洁;而 Pb 污染系数为 1.09,达到轻度污染水平;但是由于 Cd 污染系数过高,导致综合污染指数达到 3.06,为重度污染。

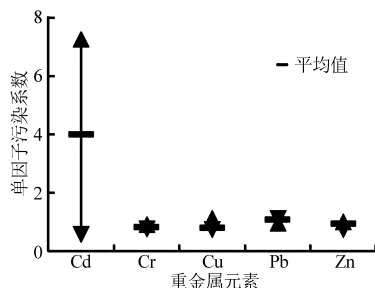


图 4 内梅罗污染指数法评价结果

Fig. 4 Nemerow pollution index of study area

比较 2 种评价方法和评价结果可知,潜在生态危害指数法能很好地突出各重金属的毒性水平和生态敏感性,并反映多种元素的协同影响,但评价标准较为宽松,因此,得到评价结果为轻微污染。内梅罗污染指数法主要突出高浓度污染物的贡献,不考虑作物对重金属的吸收特性等问题,在测定含量超过土壤背景值的情况下得到的污染指数必然较高,因此,评价结果为重度污染。

2.4 研究区域作物重金属污染评价

分别对污灌区的小麦、蔬菜样品中重金属含量

进行测定(表4),结果显示,研究区域小麦中重金属质量比由大到小依次为:Zn、Cr、Pb、Cu、Cd,部分样品Pb和Cr超标,超标率分别为80.00%和70.00%,其他重金属均低于限值;蔬菜中重金属质量比由大到小依次为:Cr、Zn、Cu、Pb、Cd,其中茄果类样品Cd、Cr、Pb均有不同程度的超标,花菜类和叶菜类的Cd、Cr和Pb含量全部超标。虽然农田土壤中Cr平均值未超出西安市土壤背景值,但有研究表明,在碱性条件下,有利于六价铬的形成,且当土壤中总铬的质量比在75~100 mg/kg以上时,即可对植物造成毒害^[29-30],研究区域土壤pH值大于

7.5,因此,土壤中铬元素易形成 Cr^{6+} 进入植物体内造成污染。赵锁劳等^[31]2002年的研究显示,西安地区包括茄果类、花菜类和叶菜类在内的10个不同品种蔬菜Pb含量100%超标,Cr污染仅出现在茼蒿、生菜等叶菜类蔬菜中,未检出Cd超标。可见,蔬菜Cd、Cr污染现象趋于严重。目前我国暂无蔬菜Cu和Zn的标准限值,在已废止的GB 15199—1994《食品中铜限量卫生标准》和GB 13106—1991《食品中锌限量卫生标准》中Cu、Zn限值分别为10 mg/kg和20 mg/kg,据此推断,研究区域蔬菜中Cu、Zn含量均在允许范围内。

表4 小麦和蔬菜重金属污染评价

Tab.4 Evaluation results of heavy metal pollution in wheat and vegetables

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
小麦测定值/(mg·kg ⁻¹)	0.04 ± 0.01	1.95 ± 1.34	0.56 ± 0.29	0.56 ± 0.21	2.77 ± 0.76
超标率/%	0	70.00	0	80.00	0
小麦标准限值 ^[32] /(mg·kg ⁻¹)	0.1	1.0	10	0.4	50
茄果类测定值/(mg·kg ⁻¹)	0.08 ± 0.06	4.81 ± 2.78	1.84 ± 0.28	0.62 ± 0.37	3.85 ± 1.99
超标率/%	66.67	100		66.67	
花菜类测定值/(mg·kg ⁻¹)	0.12 ± 0.01	3.98 ± 0.27	1.23 ± 0.07	0.69 ± 0.18	2.42 ± 2.92
超标率/%	100	100		100	
叶菜类测定值/(mg·kg ⁻¹)	0.16 ± 0.01	5.21 ± 0.92	1.36 ± 0.01	0.98 ± 0.13	2.39 ± 0.29
超标率/%	100	100		100	
蔬菜标准限值 ^[33] /(mg·kg ⁻¹)	0.05	0.5		0.2	

重金属转移系数(Transfer factor, TF)是指作物中重金属含量(干质量)与所在农田土壤对应重金属含量(干质量)的比值,可反映作物对重金属的富集程度^[34-35]。由图5可知,不同作物的5种重金属转移系数各不相同。除Zn以外,其他元素在小麦中的转移系数均低于蔬菜,叶菜类Cd、Cr、Pb的转移系数最高,茄果类和花菜类Cr、Cu、Pb和Zn的转移系数相近;不同元素在小麦和蔬菜中的转移系数也不同,Cd在小麦和蔬菜中转移系数最高,说明Cd易被植物从根部吸收,进而转移到可食部分^[36],其次是Cr,而Cu、Zn转移系数居中,Pb转移系数相对较低。

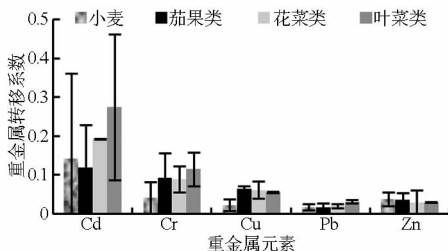


图5 小麦和蔬菜重金属转移系数

Fig.5 Transfer factor of heavy metals in wheat and vegetables

蔬菜中的重金属主要来源于整个生命周期中土壤、水和大气环境中的重金属,任何一个环节中长期

存在的重金属污染都会增加其对蔬菜品质的健康风险性^[37]。外源重金属进入土壤中经过长期累积达到一定浓度就会被植物吸收^[38],而土壤重金属污染不一定能够从作物的生长状态或产量表现出来,种植者不容易从植物生长的表观察觉土壤的受污染情况,从而增加了农作物受土壤重金属污染的风险^[39]。

因此,要确定某地区是否存在土壤-作物体系重金属污染情况,应首先测定土壤重金属全量。选择当地土壤重金属背景值作为参比值,运用适合的评价指标进行评价,当土壤中存在多种元素复合污染时应综合考虑多种元素的浓度、协同作用、生物敏感性等问题。同时,测定农作物重金属含量,并根据相关标准判断作物是否受到重金属污染,然后根据作物的重金属含量和转移系数来选择性地种植不易累积重金属的作物,以保证农产品安全。

3 结论

(1) 污灌区土壤Cd和Pb含量分别高于西安市土壤背景值299.33%和8.63%;Cd、Cu、Pb和Zn含量分别高于陕西省土壤背景值536.79%、21.05%、49.73%和18.42%。除Cd含量接近国家土壤环境质量二级标准限值以外,其他元素含量均

远低于该标准限制。

(2) 污灌区土壤 Cd 和 Pb 含量呈显著正相关关系,Zn 与 Cr 和 Cu 含量分别呈显著和极显著正相关关系,说明 Cd 和 Pb 具有伴生或同源关系,而 Cr、Cu 和 Zn 存在同源关系或受相同因素影响。结合主成分分析可知,Cr、Cu 和 Zn 含量主要受成土母质控制,而 Cd 和 Pb 主要受污水灌溉、施肥、交通运输等人为活动的影响。

(3) 潜在生态危害指数法评价结果表明,研究区域 Cd 生态危害系数最高为 226.96,属于较强污染,其他重金属元素的生态危害系数均低于 40,该区平均生态危害指数 R 达到 131.80,接近中度污染。内梅罗污染指数法评价结果显示,Cd 污染最为严重,平均单一污染系数为 3.99,呈重度污染水平,

Pb 污染系数为 1.09,达到轻度污染,该区综合污染指数达到 3.06,为重度污染。

(4) 研究区域小麦中重金属质量比由大到小依次为:Zn、Cr、Pb、Cu、Cd、Pb 和 Cr 超标率分别达到 80.00% 和 70.00%。蔬菜中重金属质量比由大到小依次为:Cr、Zn、Cu、Pb、Cd,其中花菜类和叶菜类样品中的 Cd、Cr 和 Pb 含量全部超标,茄果类样品 Cd、Cr、Pb 均有不同程度的超标。除 Zn 以外,其他元素在小麦中的转移系数均低于蔬菜,叶菜类 Cd、Cr、Pb 的转移系数最高。Cd 在小麦和蔬菜中的转移系数均最高,因此,应对 Cd 含量较高的污水进行严格处理后才可用于灌溉,并且在污灌区应选择性地种植转移系数较小的小麦或茄果类蔬菜,避免种植易富集重金属的花菜类和叶菜类蔬菜。

参 考 文 献

- 张增强. 污水处理厂污泥堆肥化处理研究[J]. 农业机械学报,2011,42(7):148-154.
Zhang Zengqiang. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(7):148-154. (in Chinese)
- Lado M, Hur B M. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: a review[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106(1):152-163.
- Zhang Y L, Dai J L, Wang R Q, et al. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characterizations in Shandong, China[J]. European Journal of Soil Biology,2008,44(1):84-91.
- Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 109(3-4):310-322.
- Yang Y, Zhang F S, Li H F, et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2):1117-1122.
- 顾静. 西安北郊污灌区土壤重金属时空分布特征及影响因素研究[D]. 西安:陕西师范大学,2007.
- 易秀. 西安市污灌区土壤中重金属潜在生态危害评价[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(3):118-120.
Yi Xiu. Evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of Xi'an sewage irrigation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,21(3):118-120. (in Chinese)
- 刘丽琼,魏世强,江韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 中国环境科学,2011,31(7):1204-1211.
Liu Liqiong, Wei Shiqiang, Jiang Tao. Distribution of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone in Three-Gorge Reservoir Area and their evaluation of potential ecological risk[J]. China Environmental Science, 2011,31(7):1204-1211. (in Chinese)
- 范小杉,罗宏. 工业废水重金属排放区域及行业分布格局[J]. 中国环境科学,2013,33(4):655-662.
Fan Xiaoshan, Luo Hong. Spatial and industrial distribution pattern of heavy metals emission in industrial waste water[J]. China Environmental Science, 2013,33(4):655-662. (in Chinese)
- 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- 庞奖励,黄春长,孙根年. 西安污灌区土壤重金属含量及对西红柿影响研究[J]. 土壤与环境,2001,10(2):94-97.
Pang Jiangli, Huang Chunchang, Sun Gennian. Heavy metal content of sewage irrigated soil in Xi'an and its influence to tomato[J]. Soil and Environmental Science, 2001,10(2):94-97. (in Chinese)
- GB 15618—2009 土壤环境质量标准[S]. 2009.
- 庞夙,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤铜、锌、铬含量空间变异特征及其影响因子分析[J]. 中国农业科学,2010,43(4):737-743.
Pang Su, Li Tingxuan, Wang Yongdong, et al. Spatial variability and influencing factors of the concentrations of Cu,Zn and Cr in cropland soil on country scale[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2010,43(4):737-743. (in Chinese)
- 孙华,毛小军. 诸暨暨浦铜矿区土壤重金属空间变异分析[J]. 农业环境科学学报,2008,2(6):2178-2182.
Sun Hua, Mao Xiaojun. The heavy metal's spatial variation of Zhuji Lipu copper mining area[J]. Journal of Agro-Environmental Science,2008,2(6):2178-2182. (in Chinese)
- Memet V. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,195:355-364.
- Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J].

- Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313 - 324.
- 17 蔡立梅, 黄兰椿, 周永章, 等. 珠江三角洲典型区农业土壤铬的空间结构及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 60 - 65.
Cai Limei, Huang Lanchun, Zhou Yongzhang, et al. The spatial structure and distribution of Cr contents in agricultural soils in a typical area of the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2009, 28(1): 60 - 65. (in Chinese)
- 18 彭来真. 畜禽粪便中铜、锌、砷在土壤-蔬菜系统的迁移和富集[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- 19 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 128 - 135.
Wang Shengwei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 128 - 135. (in Chinese)
- 20 Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, González-Hernández G, et al. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101(3): 218 - 224.
- 21 Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, et al. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 108(1): 27 - 38.
- 22 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 330 - 337.
Jiang Feifei, Sun Danfeng, Li Hong, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 330 - 337. (in Chinese)
- 23 Guo W H, Liu X B, Liu Z G, et al. Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 729 - 736.
- 24 Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975 - 1001.
- 25 Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2575 - 2585.
- 26 Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agriculture soils of Zhejiang Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(1): 50 - 54.
- 27 王凤春. 土壤终极三年和养分的空间变异分析及其评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- 28 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3144 - 3153.
Zhang Ju, Chen Shiyue, Deng Huanguang, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3144 - 3153. (in Chinese)
- 29 戴宇, 杨重法, 郑袁明. 土壤-植物系统中铬的环境行为及其毒性评价[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3432 - 3440.
Dai Yu, Yang Zhongfa, Zheng Yuanming. A review on the environmental behaviors and toxicity assessment of chromium in soil-plant systems[J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3432 - 3440. (in Chinese)
- 30 Huang S H, Peng B, Yang Z H, et al. Chromium accumulation, microorganism population and enzyme activities in soils around chromium-containing slag heap of steel alloy factory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 241 - 248.
- 31 赵锁劳, 段敏, 马往校, 等. 西安市蔬菜中重金属污染调查研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 112 - 115, 162.
Zhao Suolao, Duan Min, Ma Wangxiao, et al. Investigation and study of heavy metal pollution in vegetables in Xi'an City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 112 - 115, 162. (in Chinese)
- 32 NY 861—2004 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量[S]. 2005.
- 33 GB 18406.1—2001 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S]. 2001.
- 34 Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. Environment International, 2005, 31(6): 805 - 812.
- 35 Ouafae E H, Hicham E K, Khalifa L, et al. Toxicity assessment of garden soils in the vicinity of mining areas in Southern Morocco[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1 - 3): 755 - 761.
- 36 Wang G, Su M Y, Chen Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1): 127 - 135.
- 37 朱雪超, 刘淑芳, 侯冬利, 等. 保定市郊灌溉水质分析及灌区蔬菜质量评价[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(5): 72 - 76.
Zhu Xuechao, Liu Shufang, Hou Dongli, et al. Irrigation water quality analysis and quality evaluation of the irrigated vegetables in Baoding suburb[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(5): 72 - 76. (in Chinese)
- 38 Liu Z R, Zhou L M, Wei P, et al. Competitive adsorption of heavy metal ions on peat[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(2): 255 - 260.
- 39 朱云, 杨中艺. 生长在铅锌矿废水灌区的长豇豆组织中 Pb、Zn、Cd 含量的品种间差异[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1376 - 1385.
Zhu Yun, Yang Zhongyi. Differences in lead(Pb), zinc(Zn), and cadmium(Cd) concentrations in plant tissues of 24 asparagus bean cultivars grown on lead/zinc(Pb/Zn) mining wastewater irrigation farmland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1376 - 1385. (in Chinese)