

安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37-44.

AN Jing, GONG Xiao-shuang, CHEN Hong-wei, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 37-44.

沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价

安婧¹, 宫晓双^{1,2}, 陈宏伟^{3*}, 魏树和¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 沈阳大学生命科学与工程学院, 沈阳 110044)

摘要:以东北典型污灌区——沈抚灌区农田土壤为研究对象,在收集整理沈抚灌区自20世纪末停灌后不同时期土壤重金属污染情况的相关文献报道后,沿灌渠主干以行政村为单位布设取样点28个,利用原子吸收分光光度法、数理统计法、空间插值法等研究了重金属元素Cd、Pb、Cu、Zn在灌区农田土壤和农作物中的污染现状及时空分布特征,并利用内梅罗污染指数法、EPA人体暴露风险评价法及潜在生态危害指数法对污灌区重金属污染土壤及农产品的潜在健康风险进行评价。结果表明:灌区土壤重金属的平均浓度为: Cd 0.60 mg·kg⁻¹、Pb 38.76 mg·kg⁻¹、Cu 22.39 mg·kg⁻¹、Zn 57.64 mg·kg⁻¹,其中Cd含量超过了国家土壤环境质量二级标准;与文献报道该灌区近15年来土壤重金属污染情况相比,土壤中Cu、Zn含量明显降低,而Cd、Pb含量并无显著变化;土壤中4种重金属元素的空间分布特征各异,灌区土壤重金属综合污染水平属于轻微污染;Cd、Pb在玉米中残留浓度超过国家食品安全限值,对人摄食途径存在健康风险,尤其是Cd具有较强的潜在生态危害性。

关键词:沈抚污灌区;土壤重金属;时空分布;健康风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)01-0037-08 doi:10.11654/jaes.2016.01.005

Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area

AN Jing¹, GONG Xiao-shuang^{1,2}, CHEN Hong-wei^{3*}, WEI Shu-he¹

(1. Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Life Science and Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Shenfu irrigation area, a typical sewage irrigation area in Northeast China, was selected to study temporal and spatial characteristics of heavy metal (Cd, Pb, Cu, and Zn) pollution in soils and crops. Potential health risks of heavy metals in crops were also assessed. A total of 28 soil samples were collected along the main irrigation ditches according to village boundaries. Mathematical statistic method and spatial interpolation technology were used to study the spatial characteristics of heavy metals in the soils and crops. Nemero pollution index and EPA human exposure potential health risk and potential ecological risk index were used to evaluate the potential health risks of heavy metals in soils and agricultural products. Results showed that the mean concentrations of Cd, Pb, Cu, and Zn in the soil samples were 0.60, 38.76, 22.39 mg·kg⁻¹, and 57.64 mg·kg⁻¹, respectively. The concentrations of Cd exceeded the secondary grade of national soil environmental quality standard. Compared with the heavy metal concentrations in previous studies, the concentrations of Cu and Zn decreased significantly, while those of Cd and Pb had no significant changes. The spatial distribution characteristics of the heavy metals were different among Cu, Zn, Cd, and Pb. The soils in the Shenfu irrigation area was slightly polluted by heavy metals. The concentrations of Cd and Pb in corns exceeded the limits of the national food safety, indicating heavy metal risks to the human's health, especially Cd.

Keywords: Shenfu sewage irrigation area; soil heavy metal; spatial and temporal distribution; health risk

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 沈阳市科技专项(F13-146-3-00); 国家自然科学基金(21277150, 31370523, 41201185); 中国科学院沈阳应用生态研究所青年创新群体项目

作者简介: 安婧(1982—), 女, 副研究员, 主要从事环境化学及污染生态学方面的研究。E-mail: anjing@iae.ac.cn

* 通信作者: 陈宏伟 E-mail: chwssss@163.com

我国是一个水资源相对缺乏的国家,人均水资源量仅占世界人均量的 1/4,被联合国列为 13 个贫水国之一。同时,作为世界农业大国,我国对灌溉用水的需求量巨大,以灌溉为主的农业需水量占全国总用水量的 70%以上。然而,随着经济发展和人们生活水平的提高,工业和生活用水越来越多地占去了灌溉水的份额,再加上水体污染和农业用水利用率低等问题交互存在,严重影响和限制了农业发展和人们生活水平的提升^[1-2]。为了解决农业灌溉用水问题,我国从 20 世纪 50 年代开始向西方发达国家学习,在北京、天津、西安、抚顺等城市先后开辟了大型污水灌溉试验区,虽然污水灌溉缓解了当地农业水资源紧缺的矛盾,也为作物生长提供了丰富的氮、磷、钾等营养元素和有机质^[3],但由于当时我国污水灌溉管理体系尚未健全,大量的污水不加控制的盲目灌溉,使得农田土壤受到重金属、石油烃等严重污染。农业部进行的全国污灌区调查结果显示,截至 2000 年我国约 140 万 hm^2 的污灌区土壤中有 64.8% 受到不同程度的重金属污染^[4]。污灌区农田土壤的重金属污染,会直接或间接影响区域内土壤的理化性质、地下水水质、农作物品质等,进而危害区域生态环境和人体健康^[5]。

沈抚灌区始建于 20 世纪 60 年代,起点位于抚顺市东部的抚顺锦纶化工厂,流经李石寨、深井子等村镇后进入沈阳市东陵区,干渠全长约 70 km,灌溉面积约为 $1.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是我国污灌历史较长、面积最大的石化工业废水灌区。自 1965 年至 1998 年,沈抚灌区承担着沈抚两市生产、生活污水排放,兼顾沿线广大区域内水田灌溉任务,据统计共有 $1.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 稻田在这 33 年间经历过污水灌溉,大量未经无害化处理的污水被直接用于农田灌溉,使污水中的 Cd、Cu、Zn、Pb 等重金属进入农田土壤。多年的污水灌溉造成了该地区农田土壤环境恶化、水稻秧苗生长慢、根部腐烂、粒瘪和大米品质下降等一系列后果,使当地的生态环境受到严重破坏,同时污灌地区的肝肿大、胃癌等病的发病率较高,对人体健康产生了一定程度的危害^[6]。随着政府对污水灌溉后果重视程度不断提高且人们对其危害的认识逐渐加强,1995 年沈阳市政府开始投资兴建以浑河水为水源的清水灌渠并于 1999 年建成,沈抚灌区污水灌溉的历史至此彻底结束。

尽管该区域已经过近 15 年的清水灌溉,并且通过农田水改旱、土地农转非等措施改善土壤环境质量,但由于多年污灌的积累,该灌区土壤仍存在一定

程度的污染。张勇等^[7]在停灌初期对灌区土壤及农产品的重金属污染状况进行了评价,结果表明:研究区域土壤中 Cd 的污染情况较重,农产品则是 Pb 超标显著。李名升等^[8]对 2001—2005 年辽宁省环境监测总站对沈抚灌区土壤的监测结果进行分析后认为,沈抚灌区具有潜在的多金属高生态风险,尤其是 Cd 污染较为严重。车飞等^[9]对 2009 年沈抚灌区土壤重金属污染状况进行了环境质量评价,结果表明停灌 10 年后灌区土壤重金属污染仍然处于轻微污染水平。随着停灌时间的延长,关于沈抚灌区重金属含量及分布特征变化情况的报道,尤其是区域农作物中重金属残留情况的报道相对匮乏。由于重金属一旦进入环境中较难被降解和去除,其对土壤和农作物具有持续性的生态效应和潜在的生态风险。基于此,本文选取沈阳市境内的污灌区作为研究对象,在收集整理历史资料的基础上,通过野外调查结合实验室分析,对研究区域内土壤和农作物中重金属的残留状况进行测定,并与历史资料数据进行对比分析;采用 GIS 技术建立研究区域内土壤重金属的空间数据库,了解区域土壤环境质量空间分布现状;利用单项污染指数法、内梅罗污染指数法、潜在危害生态指数法等对污灌区重金属污染土壤及农产品的潜在健康风险进行评价,并以此为依据,对该区域的农业种植方式以及土地利用方式提出了空间布局调整建议,旨在提高农村的生态环境质量,加速沈阳生态农村建设之路,为改善沈阳农村生态环境和建设和谐社会新农村提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据研究区域的实际情况,并参照 2000—2014 年历史资料中的布点位置,于 2014 年 9 月在古城子、深井子、孙家寨、营城子、桃仙、班家寨等村镇采集了曾经长期污灌的农田土壤样品以及采样点区域种植的玉米样品 28 个。研究区处于农业种植区,工业生产产值较少,汽车尾气导致的重金属污染可以忽略,因此研究区的土壤重金属主要来源于污灌区的污水灌溉。设定样方大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,采用对角线法采取地块表层 0~20 cm 的土壤,将土样混匀后按四分法取 1 kg 装入样品袋备用。采样时用 GPS 定位样点坐标,采样点分布如图 1 所示。对应 28 个土壤样品采样点,同时采用多点混合法采集植物样品,然后混合使用四分法分取 3 kg 左右装入样品袋备用。

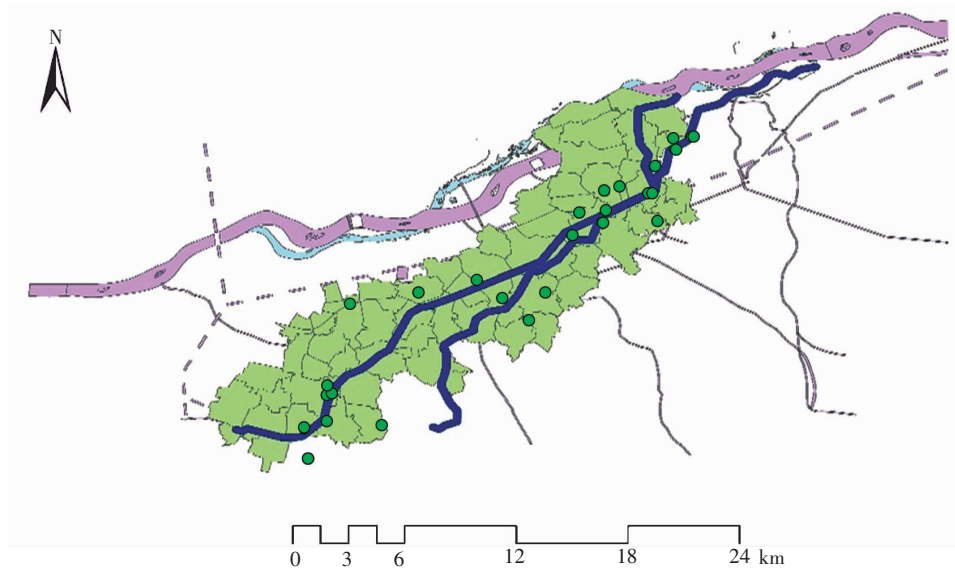


图 1 沈抚灌区土壤样品采集点示意图

Figure 1 Distribution of sampling points in Shenfu irrigation area

1.2 样品预处理及分析测定方法

土壤样品经自然风干、研磨过 100 目尼龙筛后,一部分土壤样品进行理化性质分析(表 1),另一部分 4℃冷藏保存待用。植物样品晒干后,将样品籽粒粉碎,过 60 目尼龙筛后待用。土壤重金属与农产品重金属含量的分析测定方法如表 2 所示。

表 1 土壤样品理化性质分析

Table 1 Physical and chemical properties of soils

项目 Item	pH	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/g·kg ⁻¹
最大值 Maximum	6.79	15.91	1.44	0.81
最小值 Minimum	5.89	8.45	0.88	0.45
平均值 Mean	6.40	10.83	1.08	0.64

表 2 土壤和农产品重金属总量分析方法采用标准

Table 2 Analysis methods for total heavy metals in soils and agricultural products

重金属元素 Heavy metal	土壤 Soils	农产品 Agriculture products
Cd	GB/T 17141—1997 ^[10]	GB/T 5009.15—2003 ^[12]
Pb	GB/T 17141—1997 ^[10]	GB/T 5009.12—2010 ^[12]
Cu	GB/T 17138—1997 ^[11]	GB/T 5009.13—2003 ^[12]
Zn	GB/T 17138—1997 ^[11]	GB/T 5009.14—2003 ^[12]

在每批次分析样品中,添加试剂空白,并将 10% 的样品进行重复测定,以保证分析的精度和准确度,重复样的精密度 RSD 为 1.73%。实验所用仪器为

WFX-120 原子吸收分光光度计(北京瑞利分析仪器公司),分析结果用 Excel 进行数据处理,用 SPSS19.0 统计软件进行统计分析。

1.3 土壤重金属空间分布特征

由于采样点的数量有限,同时只能代表样点上的土壤污染状况,我们在 Arcgis 10.2 中采用地统计分析中的克里金插值法(Kriging)进行空间插值。作为现代地统计学中应用较广泛的最优内插方法之一,它以变异函数为基础,利用区域化变量,对未采样区域化变量的取值进行线性无偏最优估计,据待估样点有限邻域内若干已测定的样点数据,在认真考虑样点的形状、大小和空间相互位置关系及半方差函数提供的结构信息和采样表面的总趋势变化、表面特征的相关变化和随机变化后,对该待估样点进行一种线性无偏最优估计,进而完成由样点数据向空间数据的转换。

1.4 土壤重金属污染评价

我国土壤重金属污染评价方法的选取中,一般采用单项污染指数和综合污染指数两种方法。在获得单项污染指数的基础上,常以内梅罗污染指数式计算土壤综合污染指数。

单项污染指数法(单因子指数法):即对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i$$

综合污染指数法(内梅罗综合污染指数法):能同时兼顾单因子污染指数的最高值和平均值,且能较具

体地反映出环境的质量,并可以突出表现污染较重的污染物的作用。适用于某一区域土壤被几种污染物同时污染的现象,计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \{[(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2}$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为污染物 i 的评价标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 采用国家土壤环境质量二级标准(GB 15618—2008); $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤污染中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染中污染指数的平均值。

土壤污染分级标准如下:

(1) 单项评价分级标准: $P_i > 1$, 污染; $P_i \leq 1$, 未污染。

(2) 综合污染评价分级标准: $P_{\text{综}} \leq 0.7$, 安全; $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$, 警戒线; $1 < P_{\text{综}} \leq 2$, 轻度污染; $2 < P_{\text{综}} \leq 3$, 中度污染; $P_{\text{综}} > 3$, 重度污染。

1.5 农产品健康风险评价

(1) 潜在生态风险评价采用潜在生态危害指数法^[13], 是目前最为常见且应用最广的评价重金属污染程度的方法之一。与其他的方法相比较, 该法考虑了多种重金属元素的协同作用、重金属的毒性水平、污染物浓度以及生态对重金属的敏感性等指标, 具有一定的生态合理性, 计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i}$$

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

$$RI = \sum_{i=1}^m E_i^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i}$$

式中: C_f^i 为第 i 种重金属的污染系数; C_i 为样品中第 i 种重金属含量的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n^i 为土壤中第 i 种重金属的背景值 ($\text{Cd}=0.05$ 、 $\text{Pb}=10.22$ 、 $\text{Cu}=9.87$ 、 $\text{Zn}=28.18$ ^[14]), $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_i^i 为土壤中第 i 种重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为土壤中第 i 种重金属的毒性系数 ($\text{Cd}=10$ 、 $\text{Pb}=\text{Cu}=5$ 、 $\text{Zn}=1$ ^[15]); RI 为多种重金属元素的潜在生态危害指数。 E_i^i 和 RI 可分别评价某种污染物和多种污染物的潜在生态风险程度。各项指标的等级划分标准见表 3。

表 3 潜在生态风险评价指标与分级标准

Table 3 Potential ecological risk assessment index and grades

风险级别 Risk grade	E_i^i	RI	生态危害程度 Degree of ecological risk
A 级	$E_i^i < 40$	$RI < 150$	轻微
B 级	$40 \leq E_i^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等
C 级	$80 \leq E_i^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强
D 级	$160 \leq E_i^i < 320$	$RI \geq 600$	极强

(2) 单一重金属潜在的非致癌风险评价参数为风险系数 (HQ)^[16], 计算公式如下:

$$HQ = CDI / RfDo$$

$$CDI = (CF \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT)$$

式中: CDI (慢性日均暴露量) 表示单位体重单位时间 (每日) 的污染物 (重金属) 摄入量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $RfDo$ 表示重金属经口毒性参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; CF 表示作物中重金属均值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; IR 表示每人每日粮食摄入量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 表示暴露频率, $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 表示平均暴露的持续时间; BW 表示平均体重, kg ; AT 表示平均暴露时间 ($AT=365 \times ED$)。

如果 CDI 值超过限值 (即 $HQ > 1$), 则存在潜在的非致癌影响, 且 HQ 值越大, 潜在的致癌可能性越大。根据相关文献报道^[17-21], 本研究中参数选择如下: IR (城郊) 成人 $345.2 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, IR (农村) 成人 $543.1 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 儿童为成人摄食量的 $1/3$; ED 成人 70 a , 儿童 6 a ; BW 成人 61.6 kg , 儿童 18.6 kg ; $RfDo$ 值, Cd 为 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 为 $0.004 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 多种重金属潜在的非致癌风险评价参数为风险指数 (HI)^[16], 计算公式如下:

$$HI = \sum HQ = CDI_1 / RfDo_1 + CDI_2 / RfDo_2 + \dots + CDI_i / RfDo_i$$

可见, 风险指数等于风险系数之和, 当 $HI > 1$ 时, 表明有潜在健康风险。

2 结果与讨论

2.1 沈抚灌区农田土壤重金属的污染水平

28 个采样点土壤中重金属 Cd 、 Pb 、 Cu 、 Zn 的污染水平如表 4 所示。沈抚灌区 4 种重金属的浓度均显著高于辽宁省土壤环境背景值, 但与我国土壤环境质量二级标准相比, 只有 Cd 的浓度高于国家二级标准, 其余 3 种重金属元素的浓度均低于二级标准。由变异系数 (C_v) 可知, 在 28 个土壤样品中 Cu 浓度变异程度最大, Zn 浓度变异程度最小。通常, 变异程度可分为弱变异性 ($C_v < 10\%$)、中等变异性 ($10\% \leq C_v < 100\%$) 和强变异性 ($C_v > 100\%$)^[22]。沈抚灌区土壤 Cd 、 Pb 、 Cu 、 Zn 含量的空间变异性处于 $15.23\% \sim 28.69\%$, 属于中等变异性。重金属元素 Cd 、 Pb 和 Cu 的变异系数偏度均大于 0, 表现为正偏离, 说明样品中 3 种重金属元素的浓度比均值小得较多, 仅有少数样品浓度大于均值; 而 Zn 则表现为负偏离, 即 Zn 浓度大于均值的样品个数较多。与近 15 年来已有报道相比, 沈抚灌区土壤中 Cu 、 Zn 浓度呈显著下降趋势,

表 4 沈抚灌区土壤重金属元素含量
Table 4 Content of heavy metals in Shenfu irrigation area

项目 Item	Cd	Pb	Cu	Zn
平均值 Mean/mg·kg ⁻¹	0.60	38.76	22.39	57.64
最大值 Maximum/mg·kg ⁻¹	0.84	54.03	37.42	70.54
最小值 Minimum/mg·kg ⁻¹	0.38	24.91	13.34	19.49
标准差 Standard deviation/mg·kg ⁻¹	0.13	7.98	6.42	8.78
相对标准偏差 Relative standard deviation/%	21.26	20.59	28.67	15.23
变异系数 Coefficient of variation/%	20.82	20.59	28.69	15.23
偏度 Skewness/mg·kg ⁻¹	0.11	0.07	1.01	-3.07
峰度 Kurtosis/mg·kg ⁻¹	-0.55	-0.82	0.80	13.54
背景值 ^[4] Background value/mg·kg ⁻¹	0.05	10.22	9.87	28.18
二级标准 Secondary standard/mg·kg ⁻¹	0.30	80	50	200
2001—2005 ^[7] 年/mg·kg ⁻¹	0.21~0.41	49.7~135	18.1~83.9	54.8~114
2006—2010 ^[23] 年/mg·kg ⁻¹	0.081~0.956	31.1~86.9	22.1~40.8	—
2011—2014 ^[24] 年/mg·kg ⁻¹	0.005~0.88	4.13~49.25	17.14~49.89	32.93~197.85

而Cd、Pb 浓度则未出现随着停灌时间延长而下降的情况。

近年来, 灌区土地利用方式发生了很大变化, 一些污染较重的区域已经由农业用地转变成工业用地或是居住用地, 这些区域已经无法采集到农田土壤样品, 重金属在该区域农田土壤中的整体污染水平也会随之变化。此外, 灌区农田土壤的农业种植方式也发生了巨大转变, 污灌时期该区域主要是以种植水稻为主, 由于政府强制停止污灌, 该区域现在以旱地为主, 主要种植玉米。水田改旱田后, 土壤理化性质会发生变化, 对重金属的吸附解吸、迁移及生物有效性等均具有一定的影响, 导致土壤中重金属的残留浓度也随之发生变化。

2.2 沈抚灌区农田土壤重金属的空间分布特征

土壤中重金属的含量除了与人类活动(种植模式、灌溉方式、耕种措施等)有关, 还与其所在的土壤质地、物化性质和结构条件有关, 因此土壤重金属含量会在空间分布上呈现一定的规律性。选最优指数模型对污灌区重金属含量空间分布进行插值, 图 2 为 Cd、Pb、Cu、Zn 的空间分布图。Cd 含量总体污染程度不高, 主要集中在 0.52~0.67 mg·kg⁻¹ 之间, 呈现从灌区上游至下游逐渐升高的趋势, 浓度高点值主要集中在少量水田种植区, 旱田种植区重金属 Cd 的浓度相对偏低; Pb 的浓度集中在上游和下游相对较高, 灌区中部地区相对较低; Cu 的含量呈现条带状分布, 高值点主要集中在下游地区; 整个灌区土壤 Zn 含量大部分集中在 50~60 mg·kg⁻¹, 高浓度的点主要出现在上游和下游, 且呈点状分布。

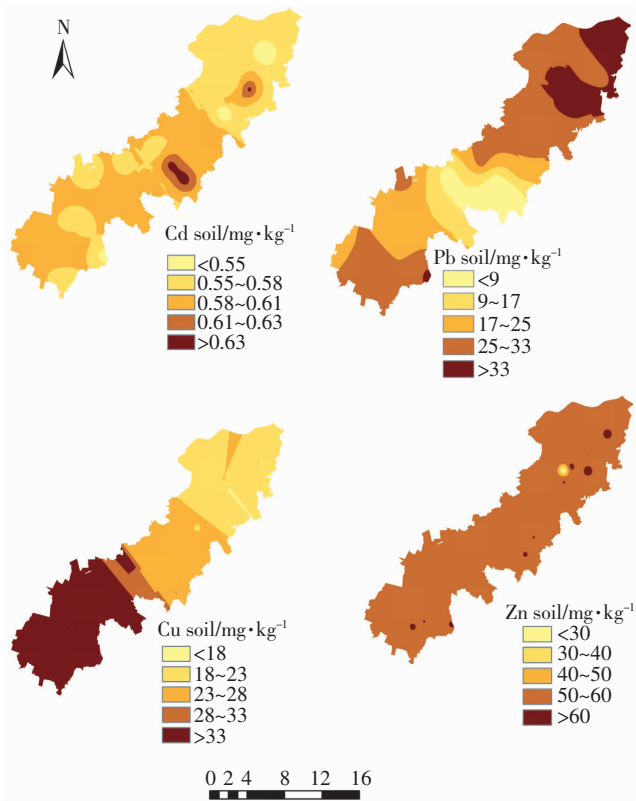


图 2 沈抚灌区土壤重金属元素含量空间分布
Figure 2 Spatial distributions of heavy metals in soils in Shenfu irrigation area

2.3 沈抚灌区土壤重金属污染健康风险评价

2.3.1 土壤重金属环境质量评价

由于单因子污染指数法只能指出土壤中污染最大的因素, 无法判定出不同元素对土壤的影响差别。本文选取综合污染指数法对土壤重金属环境质量进

行评价,该法能比较全面地反映多种污染物的整体污染水平。以国家土壤环境质量二级标准为评价标准,计算出沈抚灌区土壤重金属综合污染指数如表5所示。从评价结果可以看出,灌区土壤中 Pb、Cu、Zn 含量均未超标,而所有样点的 Cd 浓度均超过了国家土壤环境质量二级标准,说明研究区域土壤受到了普遍的 Cd 污染。从综合污染指数看, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$, 说明灌区土壤重金属处于轻度污染水平。

表 5 污灌区土壤重金属的环境质量评价

Table 5 Indexes of environmental quality of heavy metals in soils in Shenfu irrigation area

项目 Item	单项污染指数 Single pollution index				综合污染指数 Comprehensive pollution index
	Cd	Pb	Cu	Zn	
范围值 Range	1.28~2.80	0.31~0.68	0.26~0.75	0.10~0.35	0.96~2.11
平均值 Mean	2.01	0.09	0.45	0.29	1.53

2.3.2 潜在生态风险评价

与综合污染指数法主要反映的多种污染物整体污染水平不同,潜在生态危害指数法更侧重于对多种重金属协同作用的评价。污灌区土壤重金属污染的潜在生态危害指数如表6所示。结果表明:Cd的潜在生态危害程度最为严重,均值已达到C级强度污染;Pb、Cu、Zn的潜在生态危害程度均为A级,为轻微污染。就单一重金属而言,其潜在的危害程度顺序为Cd>Pb>Cu>Zn。如果从整个区域来看,多种重金属元素的潜在生态危害指数RI值为127.69,说明研究区土壤的重金属潜在危害程度为轻微污染。

表 6 沈抚污灌区土壤中重金属的潜在生态危害指数

Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in soil of Shenfu irrigation area

项目	Cd	Pb	Cu	Zn
范围值 Range	60.39~132.43	12.19~26.43	6.76~18.95	0.69~2.50
均值 Mean	95.34	18.96	11.34	2.05
危害等级 Hazard grade	C	A	A	A

2.3.3 农产品食用途径的健康风险评价

土壤重金属污染直接影响到农产品安全以及人们的身体健康,因此除了评价重金属在土壤中的风险之外,对农产品食用途径的健康风险的研究也不可忽视。因为沈抚灌区停灌后,大范围的水田已经改为旱田生产,且主要种植玉米,所以本研究对污灌区丰收

季玉米籽粒中重金属含量进行了分析,结果如表7所示。污灌区玉米籽粒中Cd、Pb的超标现象较为严重,超标率分别达89.5%和100%;Cu的超标率为21.1%;Zn的含量均未超过国家标准规定的限值。作物中重金属的含量与土壤物化性质、植物对重金属的富集和转运系数等密切相关^[25]。

表 7 玉米籽粒中重金属含量

Table 7 Concentrations of heavy metals in corn seeds

项目 Item	Cd	Pb	Cu	Zn
范围值 Range/mg·kg ⁻¹	0.07~1.09	0.31~4.48	0.82~15.32	16.54~45.24
平均值 Mean/mg·kg ⁻¹	0.20	2.42	4.01	25.31
国标限值/mg·kg ⁻¹ National limit	0.1	0.2	10	50
超标率 Rate of exceeding standard/%	89.5	100	21.1	0

采用美国EPA创建的非致癌评价方法对污灌区食用玉米健康风险及种植适宜性进行了评价,结果如表8所示。该结果显示,无论成人还是儿童,Cd、Cu、Zn的HQ值均小于1,而Pb的HQ值大于1,说明居民摄食污灌区玉米会存在某种重金属带来的健康风险。值得注意的是,儿童通过摄食玉米引发的重金属潜在健康风险均大于成人,与其他学者关于农产品摄入健康风险的研究结果一致^[26-27]。这与儿童的生理特征和生活习性有关^[9]。由于本实验的采样范围涉及到城郊与农村,分别对其进行分析,4种重金属对生活在城郊的成人和儿童的HI值分别为4.79和5.29,对于生活在农村的成人和儿童的HI值分别为7.54和8.33。以上结果均说明污灌区土壤存在由多种重金属引发的农产品健康风险。

表 8 不同暴露人群重金属风险系数(HQ)值

Table 8 HQ values of heavy metals for different human groups

项目 Item	Cd	Pb	Cu	Zn
成年人(城郊)Adult(Suburb)	0.37	3.39	0.56	0.47
成年人(农村)Adult(Village)	0.59	5.33	0.88	0.74
儿童(城郊)Children(Suburb)	0.41	3.74	0.62	0.52
儿童(农村)Children(Village)	0.64	5.89	0.98	0.82

3 结论

(1)沈抚灌区土壤中Cd、Pb、Cu、Zn含量均高于沈阳市土壤环境背景值。Cd平均含量超过了国家土壤环境质量二级标准,其余3种重金属元素的浓度未超标。与以往文献报道的停灌近15年来灌区土壤重

金属污染情况相比,土壤中Cu、Zn浓度呈显著下降趋势,而Cd、Pb浓度则未出现随着停灌时间延长而下降的情况。4种重金属元素的空间分布特征各异,无显著相关性。

(2)以国家土壤环境质量二级标准为评价标准,沈抚灌区土壤重金属处于轻微污染水平。灌区土壤中Cd含量具有较强的潜在生态危害性,Pb、Cu、Zn的含量则呈现轻微的潜在生态危害性。污灌区土壤种植的玉米中Cd、Pb含量超标显著,且农作物中重金属残留对儿童的健康风险大于成人,污灌区土壤存在由多种重金属引发的农产品健康风险。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2008年中国水资源公报[G]. 2011.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin in 2008[G]. 2011.
- [2] 方玉东. 我国农田污水灌溉现状、危害及防治对策研究[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(5): 1-5.
FANG Yu-dong. Study on farmland sewage irrigation harmfulness and countermeasures in China[J]. *Agricultural Environment and Discovery*, 2011, 28(5): 1-5.
- [3] 冯绍元, 齐志明, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对冬小麦生长发育影响的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 11-14.
FENG Shao-yuan, QI Zhi-ming, HUANG Guan-hua, et al. Clearly, the sewage irrigation on the growth of winter wheat field experiment was conducted to study the developmental impact[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(3): 11-14.
- [4] 陈志良, 仇荣亮, 张景书, 等. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护, 2002, 29(6): 21-23.
CHEN Zhi-liang, QIU Rong-liang, ZHANG Jing-shu, et al. Removed technology of heavy metal pollution in soil[J]. *Environmental Protection*, 2002, 29(6): 21-23.
- [5] 陈卫平, 吕斯丹, 张炜铃, 等. 再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 163-172.
CHEN Wei-ping, LÜ Si-dan, ZHANG Wei-ling, et al. Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 163-172.
- [6] 姜 勇, 梁文举, 张玉革, 等. 污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 124-127.
JIANG Yong, LIANG Wen-ju, ZHANG Yu-ge, et al. Influence of wastewater irrigation on environmental capacity of soil heavy metals and rice growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 124-127.
- [7] 张 勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 182-186.
ZHANG Yong. Assessment of heavy metal pollution in soils and agricultural products in Shenyang suburb[J]. *Soil Bulletin*, 2001, 32(4): 182-186.
- [8] 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.
LI Ming-sheng, TONG Lian-jun. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil of sewage irrigation area in Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of ecological agriculture*, 2008, 16(6): 1517-1522.
- [9] 车 飞, 于云江, 胡 成, 等. 沈抚灌区土壤重金属污染健康风险初步评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1439-1443.
CHE Fei, YU Yun-jiang, HU Cheng, et al. A preliminary assessment of heavy metals in soil health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1439-1443.
- [10] 国家环境保护总局. GB/T 17141—1997 土壤铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
State Environmental Protection Administration. GB/T 17141—1997 Determination of lead and cadmium in soil by Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry[S]. Beijing: China Standard Press, 1997.
- [11] 国家环境保护总局. GB/T 17138—1997 土壤铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
State Environmental Protection Administration. GB/T 17138—1997 Determination of copper and zinc in soil by Flame Atomic Absorption Spectrophotometry[S]. Beijing: China Standard Press, 1997.
- [12] 王竹天, 兰 真, 鲁 杰, 等. GB/T 5009—2003《食品卫生检验方法》理化部分简介[J]. 中国食品卫生杂志, 2005, 17(3): 193-211.
WANG Zhu-tian, LAN Zhen, LU Jie, et al. GB/T 5009—2003 "food hygiene inspection method" physical and chemical part introduction[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2005, 17(3): 193-211.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 吴燕玉. 辽宁省土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
WU Yan-yu. The value of soil element background of Liaoning Province[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1994.
- [15] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. The potential ecological risk index method in the evaluation of heavy metal toxicity coefficient calculation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [16] US EPA (United States Environmental Protection Agency), EPA/540/1-89/002. Risk assessment guidance for superfund. Human Health Evaluation Manual (Part A). Interim Final, vol. I. Washington (DC) [S]: United States Environmental Protection Agency, 1989.
- [17] Bennett D H, Kastenber W E, McKone T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1999, 63(2): 185-198.
- [18] 杨晓光, 李艳平, 马冠生, 等. 中国 2002 年居民身高和体重水平及近 10 年变化趋势分析[J]. 中华流行病学杂志, 2005, 26(7): 489-493.
YANG Xiao-guang, LI Yan-ping, MA Guan-sheng, et al. Study on weight and height of the Chinese people and the differences between

- 1992 and 2002[J]. *National Institute for Nutrition and Food Safety*, 2005, 26(7):489-493.
- [19] US EPA(United States Environmental Protection Agency). Handbook for non-cancer health effects evaluation[S]. Washington(DC):US Environmental Protection Agency, 2000.
- [20] WHO/FAO. List of contaminants and their maximum levels in foods[S]. 1984.
- [21] 李 欣, 李绥晶, 李 辉, 等. 1989—2006 年辽宁省成年居民膳食结构变化趋势[J]. 中华预防医学杂志, 2010, 44(12):1115-1119.
LI Xin, LI Sui-jing, LI Hui, et al. Dietary changes of adult residents in Liaoning Province during 1989—2006[J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2010, 44(12):1115-1119.
- [22] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2):161-167.
WANG Shao-qiang, ZHU Song-li, ZHOU Cheng-hu. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2):161-167.
- [23] 林海鹏, 于云江, 李定龙, 等. 沈抚污灌区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(4):320-323.
LING Hai-peng, YU Yun-jiang, LI Ding-long, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil in Shen-Fu Irrigation District[J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(4):320-323.
- [24] 綦 巍, 王思德, 曾 婧. 辽宁沈抚灌区土壤重金属环境质量评价[J]. 地质与资源, 2012, 21(4):410-413.
QI Wei, WANG Si-de, ZENG Jing. Environmental quality assessment of heavy metals in the soil of Shen-Fu Irrigation District in Liaoning[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(4):410-413.
- [25] 许毅涛, 方其仙, 王吉秀, 等. 三种植物对铅锌尾矿土壤 Pb、Zn 和 Cd 的吸收特性[J]. 环境科学与技术, 2014, 37:189-193.
XU Yi-tao, FANG Qi-xian, WANG Ji-xiu, et al. Heavy metal uptake characteristics of three plants grown in lead/zinc mine tailings[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37:189-193.
- [26] 朱宇恩, 赵 焱, 李 强, 等. 北京城郊污灌土壤-小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):263-270.
ZHU Yu-en, ZHAO Ye, LI Qiang, et al. In the suburbs of Beijing sewage irrigation soil wheat(*Triticum aestivum*) system of heavy metal potential health risk assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):263-270.
- [27] Huang M L, Zhou S L, Sun B, et al. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1-3):54-61.