

陈丹, 周于杰, 章佳文, 等. 基于什邡市农田土壤中Pb、Zn的人体健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2687-2693.
CHEN Dan, ZHOU Yu-jie, ZHANG Jia-wen, et al. Human health risk assessment owing to Pb and Zn of farmland soils in Shifang City, southwest China[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2687-2693

基于什邡市农田土壤中Pb、Zn的人体健康风险评估

陈丹, 周于杰, 章佳文, 罗学儒, 杨金燕*

(四川大学建筑与环境学院环境科学与工程系, 成都 610207)

摘要:为研究西南地区典型磷矿区土壤中的重金属对人体健康的影响, 采集四川省什邡市工业区(穿心店、宏达、双盛)和非工业区(马井)4个采样区的农田土壤, 测定了Pb、Zn的全量, 研究了Zn的分布特征。采用改进BCR法研究Pb、Zn的形态, 采用体外仿生实验研究Pb、Zn的生物可给性, 并对土壤中的Pb、Zn进行人体健康风险评估。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)中的筛选值, Pb在整体水平上未引起污染, Zn在工业区引起了轻度污染, 且工业区Pb、Zn全量较非工业区高。距磷肥厂烟囱排污口下风向距离的分布特征表明, Zn全量在300~400 m达到最大。马井、穿心店、宏达和双盛采样区Pb的生物可给性分别为8.9%、28.8%、18.0%、77.3%, Zn的生物可给性分别为5.1%、7.1%、6.7%、24.5%, 工业区Pb、Zn的生物可给性高于非工业区。Pb、Zn均以残渣态为主, Pb的生物可给性与各形态含量无定量相关, 但Zn的生物可给性与其酸提取态含量呈显著正相关。采用Pb、Zn全量和生物可给性分析, 成人和儿童的健康风险均在可接受范围内, 但儿童潜在的健康风险不容忽视。基于重金属全量和生物可给性, 工业区土壤中Pb、Zn对成人和儿童潜在的健康风险均高于非工业区, 并且Pb对总非致癌风险的贡献分别为96.5%和98.6%, Zn分别为3.5%和1.4%。与用全量相比, 用生物可给性修正的模型评估Pb、Zn潜在的健康风险大幅度降低。

关键词:农田土壤; 重金属; 生物可给性; USEPA模型; 健康风险评估

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)12-2687-07 **doi:** 10.11654/jaes.2018-0108

Human health risk assessment owing to Pb and Zn of farmland soils in Shifang City, southwest China

CHEN Dan, ZHOU Yu-jie, ZHANG Jia-wen, LUO Xue-ru, YANG Jin-yan*

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract: The possible health risk owing to soil contamination with Pb and Zn for the local populations by the oral intake of the contaminants in Shifang City, Sichuan Province, southwest China was investigated. Farmlands around phosphate fertilizer plants in Chuanxindian and Hongda, and around the industrial park in Shuangsheng were selected as sampling areas. A farmland in Majing was selected as the control area. Total concentrations of Pb and Zn, and the distribution of Zn were determined. The fractions and bioaccessibility of Pb and Zn were studied by the modified method proposed by the Community Bureau of Reference (BCR) and the simple bioavailability extraction test (SBET), respectively. Additionally, the health risk models recommended by United States Environmental Protection Agency (USEPA) were used to assess the health risk owing to Pb and Zn exposure. According to the screening values of Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land in Soil Environment Quality (GB15618-2018), Pb did not cause pollution in the study area, whereas Zn caused slight pollution. The total concentrations of Pb and Zn in the industrial areas were higher than those in the non-industrial area. The highest concentration of Zn was observed at a distance of 300~400 m from the chimney in the direction of the flow of effluents from the chimney outlet. In Majing, Chuanxindian, Hongda, and Shuangsheng, the bioaccessibility of Pb was 8.9%, 28.8%, 18.0%, and 77.3%, respective-

收稿日期: 2018-01-18 录用日期: 2018-05-09

作者简介: 陈丹(1996—), 女, 四川眉山人, 本科生, 环境工程专业。E-mail: 380971431@qq.com

*通信作者: 杨金燕 E-mail: yanyang@scu.edu.cn

基金项目: 四川省科技厅国际合作项目(2015HH0023); 成都市科技局惠民项目(2015-HM01-00180-SF)

Project supported: The International Cooperation Project of Sichuan Province (2015HH0023); Huimin Project of the Science and Technology Bureau in Chengdu (2015-HM01-00180-SF)

ly, and the corresponding values for Zn were 5.1%, 7.1%, 6.7%, and 24.5%, respectively. The bioaccessibility of Pb and Zn in the industrial areas was higher than that in the non-industrial area. Pb and Zn existed mainly in the residual fraction in the sampling areas. There was a significant positive correlation ($R^2=0.999\ 3$) between the bioaccessible and the acid-extractable fractions of Zn. However, no such correlation was noted for Pb. Based on both the total concentrations and the bioaccessibility, the health risks of Pb and Zn for both adults and children were within the tolerable limit, but the potential health risk for children could not be overlooked. Moreover, based on the total concentrations and the bioaccessibility, the contributions of Pb for the total non-carcinogenic risk (*HI*) were 96.5% and 98.6%, respectively. Through the modified models by the bioaccessibility replacing the total concentrations of Pb and Zn, the potential health risks were significantly reduced.

Keywords: farmland soil; heavy metal; bioaccessibility; USEPA model; health risk assessment

随着人口数量的快速增长、农业生产现代化的不断推进和现代化工业的高速发展,越来越多的重金属进入土壤,使得土壤重金属污染愈发严重。土壤重金属污染问题已经成为我国污染面积最广、危害最大的环境问题之一^[1]。2014年4月公布的《全国土壤污染状况调查公报》^[2]数据显示,我国土壤环境总体不乐观,污染类型以重金属污染为主。全国土壤总的超标率为16.1%,耕地点位超标率达19.4%,无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%。《全国土壤污染状况调查公报》同时指出我国西南、中南地区土壤重金属超标范围较大。

一些重金属元素毒性大、稳定性强,不能被降解,对人体的潜在危害极大。土壤中的重金属主要通过食物链、经口摄入(手-口的直接接触活动,特别是儿童)以及呼吸和皮肤接触进入人体^[3-4],其中经口摄入在很多情况下成为主要途径^[5]。通过对土壤中的重金属进行人体健康风险评估,可了解研究地区重金属对人体健康的危害水平,进而采取适当的预防和补救措施。

美国环保署(USEPA)推荐的健康风险模型中关于重金属对人体健康的风险评估是基于某一重金属的全量数据,但经口摄入的重金属并不能100%被吸收^[6],由此引入生物可给性这一概念。尽管目前对土壤中重金属的生物可给性的定义并不完全统一,但一般而言,土壤重金属的生物可给性是指土壤重金属直接进入人体消化系统并可在胃肠道溶解出的部分^[1,7],表明了重金属被胃肠道消化液吸收的潜力^[8]。目前关于生物可给性的研究存在多种方法并存的局面。模拟肠胃液提取法,包括SBET(Simple bioavailability extraction test)、PBET(Physiologically based extraction test)法等,比较接近动物或人体对土壤重金属污染的真实吸收状态,在环境健康风险评价中发挥着重要作用^[9]。Brattin和Drexler等^[10-11]利用体外仿生实验研究了Pb的生物可给性,研究结果与美国环保署对猪的体内实验研究结果呈很好的相关性。Poggio等^[12]采用

修正PBET法进行了体外提取实验,研究了意大利北部某城市地表土壤中Pb、Cu、Zn、Ni、Cr的生物可给性,结果表明Pb和Zn在胃液中的生物可给性大于在肠液中的生物可给性。国内也有一些学者对农田、矿区、城市功能区等土壤重金属的生物可给性进行了研究,并针对重金属进行了人体健康风险评估^[1,13-14]。

四川省什邡市的经济结构以第二产业为主,磷矿资源丰富,分布着大量的磷肥厂。磷矿在开采及生产过程中会带来重金属Pb、Zn等的污染,位于什邡市的亭江村就是全国公布的癌症村之一^[15]。为研究什邡市土壤中的重金属对人体健康的影响,本文对成人和儿童进行了土壤中Pb、Zn的非致癌风险研究。国内学者多采用USEPA推荐的模型来进行健康风险分析,但目前USEPA推荐的健康风险模型中的很多参数是针对欧美人群设定,其所有参数并非完全适用于亚洲人群。本研究运用USEPA推荐的健康风险模型,并根据中国人的体质特征对部分参数进行修正,判断土壤中的重金属对人体健康造成的危害。这对修复被重金属污染的土壤、保障农产品安全和人体健康具有重要的现实意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

什邡市位于成都平原,是四川省德阳市的县级市。什邡市面积864 km²,人口43.6万人(2016年)。地形以山地为主(约占60%),此外还有平原和丘陵。该地属于亚热带湿润气候区,特点为夏雨冬阴,云雾多,日照少,年温差不大,年平均气温在13~17℃之间。什邡市磷矿资源丰富,是我国六大磷矿基地之一。

1.2 样品采集与制备

试样所用土壤于2017年4月采自四川省什邡市,选取马井镇金牛村、穿心店磷肥厂、宏达磷肥厂和双盛工业区厂区附近农田(以下简称马井、穿心店、宏达

和双盛)共4个采样区,马井镇采样区为非工业区,其余为工业区。工业区的每个采样区在距烟筒下风向每隔100 m设置1个采样单元,在距烟筒100~1000 m共设置10个采样单元。由于双盛为工业园区,所选烟筒位于密集区域的中部位置处。每个采样单元采集2个表层土壤样品(0~20 cm),每个采样区共采集样品20份。因马井为非工业区,随机采取土样20份。4个采样区土壤样品共80份,所有采样点为农业用地。采样方法参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[16]以及《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2012)^[17]。土壤样品带回实验室后,自然风干,剔除砂砾、动植物残体等杂质,压碎后进行研磨,分别过10(2 mm)、60(0.25 mm)、100(0.15 mm)目尼龙筛。其中过10目筛的土样用于测定土壤pH,过60目筛的土样用于测定Pb和Zn的生物可给性,过100目筛的土样用于测定土壤有机质以及Pb、Zn的全量^[7,18]。土壤过筛后,分装于聚四氟乙烯塑料袋备用。

1.3 样品分析及质量保证

1.3.1 土壤的基本理化性质

采用电极法测量土壤pH(水土比为1:5);采用重铬酸钾氧化法测量土壤有机质含量^[18]。每个土样进行两次平行测定。结果见表1。

表1 采样区土壤的基本理化性质

Table 1 The basic physicochemical properties of the soils in sampling areas

采样区	项目	最小值	最大值	平均值	标准偏差
马井	pH	5.06	6.17	5.69	0.46
	有机质/%	2.50	4.19	3.40	0.61
穿心店	pH	3.41	7.97	6.44	1.49
	有机质/%	2.35	6.79	4.24	1.39
宏达	pH	4.80	7.39	6.17	0.73
	有机质/%	3.14	7.41	5.62	1.60
双盛	pH	4.76	7.50	5.93	0.97
	有机质/%	2.85	4.76	3.79	0.62

1.3.2 土壤中Pb、Zn全量的测定

采用四酸消解法^[18]对土壤进行消解,利用原子吸收光谱仪(AANALYST 800, PerkinElmer, USA)对Pb和Zn的全量进行测定。每批样品测试进行空白样和标样(GBW07428四川盆地GSS-14)质量控制。标样中Pb、Zn的加标回收率分别为(110.0±19.8)%和(95.4±17.1)%。

1.3.3 土壤中Pb、Zn形态的测定

利用改进BCR法^[19]对所有土壤样品中Pb和Zn的

酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态的含量进行测定。每批样品以10%的比例进行平行测定。

1.3.4 土壤中Pb、Zn生物可给性的测定

采用SBET法^[1]对所有土壤样品中Pb和Zn的生物可给性进行测定,每个土样进行3次平行测定,每批样品测试进行空白样质量控制。

1.4 健康风险评估模型

1.4.1 暴露剂量模型

假设土壤中重金属的暴露途径为经口摄入。参照USEPA推荐的人体健康风险评估模型^[1,14,20-22]计算日均暴露剂量(CDI_m),其公式如下:

$$CDI_m = \frac{C_s \times I_m R \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中: CDI_m 为经口摄入的日均暴露剂量, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$; C_s 为土壤中重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$; $I_m R$ 为每日土壤摄入量,儿童取 $200 mg \cdot d^{-1}$,成人取 $100 mg \cdot d^{-1}$; CF 为单位转换因子, 10^{-6} ; EF 为暴露频率,取 $350 d \cdot a^{-1}$; ED 为暴露持续时间,儿童取6 a,成人取30 a; BW 为体重,儿童取16.2 kg,成人取61.8 kg; AT 为平均暴露时间,致癌作用取 $72 \times 365 d$,非致癌作用取 $ED \times 365 d$ 。其中 BW 和 AT 参数值为基于中国人的体质特征对USEPA推荐的模型中相应参数的修正值^[23]。

1.4.2 健康风险表征

USEPA推荐的健康风险模型将评价指标分为致癌风险和非致癌风险,对致癌物采用致癌风险评价,非致癌物采用非致癌风险评价。由于Pb、Zn均为非致癌物质,因此健康风险只为非致癌风险。其计算公式^[1,20,22]为:

$$HQ_i = CDI_{mi} / R_i D \quad (2)$$

式中: HQ_i 为不同重金属的非致癌风险; CDI_{mi} 为不同重金属经口摄入的日均剂量, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$; $R_i D$ 为经口摄入的参考剂量,Pb为 $3.57 \times 10^{-3} mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$,Zn为 $0.3 mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

对于多种重金属的总非致癌风险,计算公式如下:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (3)$$

1.4.3 利用重金属生物可给性对模型的修正

模拟人体消化系统中重金属的生物可给性(OB)用下式^[1,22]计算:

$$OB = \frac{C \times V}{C_s \times M_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中: OB 为重金属在人体消化系统中的生物可给性,%; C 为体外实验模拟胃阶段反应液中的重金属浓度, $mg \cdot L^{-1}$; V 为反应器中反应液体积,mL; C_s 为土样中

重金属总量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; M_i 为加入反应器中的土样质量, mg 。

基于重金属生物可给性数据的修正公式如下:

$$HQ_{\text{amendi}} = CDI_{m_i} \times OB/R_p D \quad (5)$$

式中: HQ_{amendi} 为修正后的不同重金属的非致癌风险。

对于修正后的多种重金属经口摄入的总非致癌风险, 仍旧按照公式(3)计算。

1.5 统计分析

采用 Excel 2010 及 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析, 采用 Origin 8.0 进行图形制作。采用 SPSS 22.0 软件进行显著性分析, 定义 P 值大于 0.05 时, 为无统计学差异; P 值小于 0.05 时, 为有统计学差异; P 值小于 0.01 时, 为有显著差异; P 值小于 0.001 时, 为有极显著差异。

2 结果和讨论

2.1 土壤中 Pb、Zn 的全量

马井、穿心店、宏达和双盛采样区农田土壤中 Pb 的全量平均值分别为 64.63、83.17、72.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 85.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 中的筛选值 (90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 表明研究区域土壤中的 Pb 在整体水平上未引起污染。穿心店和双盛采样区 Pb 的全量临近筛选值, 需引起一定的重视。土壤样品中 Pb 全量在工业区及非工业区无统计学差异 ($P > 0.05$)。由于非工业区无磷肥厂, 表明研究区域土壤中的 Pb 全量受磷肥厂影响较小, 可能主要来源于成土母质或者农田耕作施用的化肥。

马井 Zn 全量平均值为 87.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 穿心店、宏达和双盛 Zn 全量平均值分别为 235.97、222.54 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 394.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 中筛选值 (200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.18、1.11 和 1.97 倍, 是对照区马井 Zn 全量平均值的 2.70、2.54 倍和 4.52 倍, 表明 3 个地区的土壤均在不同程度上受到 Zn 的轻度污染。工业区及非工业区土壤中 Zn 全量差异极显著 ($P < 0.001$), 工业区磷肥厂的生产活动已显著影响研究区域土壤中 Zn 的全量。

2.2 土壤中 Zn 全量随距烟筒下风向距离由近及远的分布规律

Zn 全量在双盛第一个采样单元数值异常高, 此采样点靠近路边污水渠, 地下水的渗透和污水的浇灌可能导致此采样单元污染严重。因此, 进行分布规律

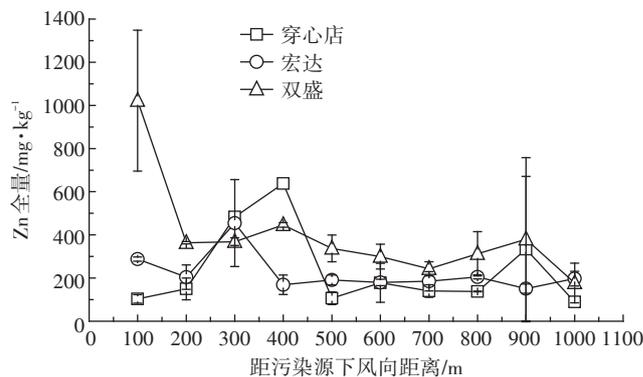


图1 土壤中 Zn 全量随距烟筒下风向距离的变化

Figure 1 The total concentrations of Zn with the distance at the downwind direction to the chimney effluent outlet

分析时舍弃此单元。穿心店、宏达和双盛的 Zn 全量峰值分别位于距烟筒下风向 400、300 m 和 400 m (图 1)。Zn 全量在距烟筒下风向 300~400 m 处达到最大, 此规律可能与工厂排放的烟气通过气流的高空传输和沉降有关^[25]。

项萌等^[26]采集了广西某铅锑矿冶炼区周围的荒地土壤, 研究污染源只来自烟气的 Pb、Sb、As 的空间分布规律, 发现 3 种重金属全量在 0~400 m 范围内急剧衰减, 在 400~2400 m 范围内缓慢衰减。徐玉霞等^[27]采集了关中西部某铅锌冶炼区周围的荒地土壤, 研究污染源只来自烟气的 Pb、Hg、Cr 的空间分布规律, 得出这 3 种重金属在 0~200 m 范围内急剧衰减, 在 200~1200 m 范围内缓慢衰减。

本研究中, 除得出 Zn 全量在距烟筒下风向 300~400 m 处达到最大值的规律外, Zn 全量在各采样区并未得出明显的规律。这与项萌等^[26]和徐玉霞等^[27]的研究结果不同, 说明不同污染源矿区的重金属分布规律不同。这可能是因为土壤利用方式不同, 也可能是因为采样区土壤中 Zn 的污染源不仅来自于烟气, 还来自于矿区废水和农田中的化肥。此外, 重金属在烟气中的扩散与其赋存状态和理化性质有关^[26-27], 这在一定程度上引起分布特征的差异。采样区 Zn 的空间分布规律可能同时受这三方面的影响。

2.3 土壤中 Pb、Zn 的形态

改进 BCR 法将重金属的形态分为酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。酸提取态主要是碳酸盐结合态, 该形态迁移性强, 容易被生物直接利用。可还原态主要是铁锰氧化物结合态, 可氧化态主要是有机物和硫化物结合态, 这两部分形态的重金属迁移性较弱, 可被生物间接吸收。残渣态主要是硅酸盐矿物结合态, 迁移性很小并且很难被生物所利用^[28-29]。基

于改进BCR法,Pb、Zn在不同采样区各形态的百分比如表2所示。Pb的形态以残渣态为主,其次分别是可氧化态、可还原态和酸提取态。Zn的形态以残渣态为主,其次是可还原态、酸提取态和可氧化态。Pb和Zn各形态所占的比例顺序不尽相同,但均以残渣态为主。双盛Zn的酸提取态和可还原态所占比例显著高于其他3个采样区,而残渣态所占比例显著低于其他3个采样区,表明双盛工业区土壤中Zn的迁移性更强。

2.4 土壤中Pb、Zn的生物可给性

马井、穿心店、宏达和双盛Pb、Zn的生物可给性分别为8.9%、28.8%、18.0%、77.3%和5.1%、7.1%、6.7%、24.5%。依据采样区重金属的生物可给性数值由小到大排序分别为马井、宏达、穿心店和双盛。工业采样区与非工业采样区马井相比,Pb、Zn的生物可给性较高,3个工业采样区属磷肥厂生产区,说明人为活动是造成Pb、Zn生物可给性较高的主要原因。Pb生物可给性在工业区及非工业区呈极显著差异($P < 0.001$),而Zn无统计学差异($P > 0.05$)。

由于残渣态的重金属迁移性很小并且很难被生物利用^[27-28],Pb、Zn残渣态在双盛采样区最低,是Pb、Zn生物可给性在双盛采样区最高的主要原因。研究Pb、Zn的生物可给性与各形态含量的关系,发现Pb的生物可给性与各形态含量无定量相关,Zn的生物可给性约为Zn的酸提取态含量的0.955倍,并且两者呈显著正相关($R^2=0.9993$),其对应关系见表3。Zn的酸提取态易溶于模拟胃液中,推测Zn的生物可给性主要来源于酸提取态。

2.5 非致癌风险

基于Pb、Zn全量对成人和儿童的总非致癌风险的分析表明(表4),成人和儿童的总非致癌风险(HI)分别为 3.44×10^{-2} 和 2.63×10^{-1} ,HI的安全限值为1^[22]。基于Pb、Zn生物可给性对成人和儿童的总非致癌风险的分析表明,成人和儿童的总非致癌风险分别为

表3 土壤中Zn的生物可给性与酸提取态含量的对应关系(%)
Table 3 The correlation of the bioaccessibility and the content of acid extractable fraction of Zn in soils (%)

采样区	生物可给性	标准偏差	酸提取态含量	标准偏差
马井	5.1	4.2	6.0	3.2
穿心店	7.1	3.1	8.4	2.6
宏达	6.7	3.4	8.0	2.5
双盛	24.5	8.9	24.7	4.9

1.20×10^{-2} 和 9.14×10^{-2} 。儿童的非致癌风险是成人的7.63倍,儿童相对成人潜在的重金属暴露风险更大,需引起一定的重视。

工业区土壤Pb、Zn对成人和儿童的总非致癌风险均高于非工业区,位于工业区的居民具有更高的潜在暴露风险。基于Pb、Zn生物可给性的总非致癌风险是基于全量总非致癌风险的0.36倍。基于Pb、Zn生物可给性对全量进行修正,Pb、Zn的非致癌风险均大幅度降低,分别降低了66.8%和89.1%。由于Pb、Zn生物可给性数据更能真实地反映人体对重金属的吸收,若基于全量进行评估,将高估Pb、Zn对人体的实际危害。基于全量和基于生物可给性,Pb对总非致癌风险的贡献分别是96.5%和98.6%,Zn分别是3.5%和1.4%。表明Pb对研究区域人体的潜在健康危害远超过Zn。

2.6 不确定性分析

本研究对采样区域的人体健康风险评估存在一定的不确定性。首先,只研究了来自土壤中Pb、Zn的非致癌风险,未研究其他重金属的健康风险。并且重金属不仅存在于土壤中,还存在于水、大气以及农作物中。研究只考虑了重金属经口摄入,未考虑通过食物链、呼吸和皮肤的直接接触进入人体。因此,当地居民的实际健康风险可能高于研究水平。再者,基于中国人的体质特征,研究虽对风险评估模型中的部分参数进行了修正,但仍有一些参数引自国外。并且中国人的体质特征随着时间变化而变化,但参数值却来

表2 基于改进BCR法的土壤中Pb、Zn形态(%)

Table 2 The fractions of Pb,Zn in soils based on the improved BCR method (%)

采样区	酸提取态		可还原态		可氧化态		残渣态	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
马井	3.3	6.0	20.9	13.7	17.8	13.1	58.0	67.2
穿心店	10.3	8.4	5.5	8.6	19.0	6.3	65.2	76.7
宏达	8.0	8.0	4.6	10.2	19.8	6.7	67.6	75.1
双盛	6.0	24.7	18.2	20.8	19.7	9.6	56.1	44.9
平均值	6.9	11.8	12.3	13.3	19.1	9.0	61.7	66.0
标准偏差	3.0	8.7	8.5	5.4	0.9	3.2	5.5	14.7

表4 基于Pb、Zn全量和生物可给性的非致癌风险

Table 4 The total non-carcinogenic risk (HI) based on the total concentrations and bioaccessibility of Pb, Zn

采样区	基于Pb、Zn全量				基于Pb、Zn生物可给性			
	成人		儿童		成人		儿童	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
马井	2.81E-02	4.52E-04	2.14E-01	3.45E-03	2.50E-03	2.31E-05	1.91E-02	1.77E-04
穿心店	3.60E-02	1.22E-03	2.75E-01	9.31E-03	1.04E-02	8.70E-05	7.93E-02	6.64E-04
宏达	3.16E-02	1.15E-03	2.41E-01	8.78E-03	5.68E-03	7.72E-05	4.33E-02	5.89E-04
双盛	3.71E-02	2.04E-03	2.83E-01	1.56E-02	2.86E-02	5.00E-04	2.18E-01	3.81E-03
总非致癌风险(HI)	3.44E-02		2.63E-01		1.20E-02		9.14E-02	
标准偏差	4.74E-03		3.64E-02		1.19E-02		9.05E-02	

源于以往研究或公报中的数据,存在参数值的获取滞后于实际情况的现象,这可能对健康风险结果造成影响。另外,本研究未讨论多种重金属的复合效应(拮抗作用、协同作用和相加作用)^[30],只是将Pb、Zn的非致癌风险相加。综上,对什邡市的人体健康风险评估还有待进一步的深入和完善。

3 结论与展望

(1)研究区域农田土壤中的Pb在整体水平上未引起污染,Zn在整体水平上引起了轻度污染。距磷肥厂烟筒下风向300~400 m,Zn全量达到最大。

(2)采用改进BCR法对Pb、Zn的形态进行研究,结果表明土壤中Pb、Zn的形态均以残渣态为主。双盛采样区土壤中Zn的酸提取态和可还原态含量显著高于其他3个采样区,表明双盛工业区土壤中Zn的迁移性更强。

(3)采用SBET法对Pb、Zn的生物可给性进行研究,结果表明工业区重金属的生物可给性高于非工业区。Pb的生物可给性与各形态含量无显著相关。Zn的生物可给性与其酸提取态含量呈显著正相关,Zn的生物可给性可能主要来源于酸提取态。

(4)成人和儿童的总非致癌风险均位于可接受范围内。儿童的总非致癌风险是成人的7.63倍,潜在的健康风险不容忽视。工业区土壤Pb、Zn对人体的潜在健康风险高于非工业区,Pb对人体潜在的健康风险远高于Zn。基于重金属生物可给性对全量进行修正,Pb、Zn潜在的健康风险大幅度降低。

本研究结果表明Zn的生物可给性约为其酸提取态含量的0.955倍,并且两者呈显著正相关($R^2=0.9993$)。在不同污染强度及不同污染条件下,若经过多次实验的研究和验证,能够建立此线性模型,将为研究性质相近或相同土壤中Zn的生物可给性提供新的研究思

路和方法。但对其适用条件、可操作性和重复性还需进行更加深入的研究和分析。

参考文献:

- [1] 尹娟,邓超冰,王晓飞,等.基于农田土壤重金属生物可给性的人体健康风险评估[J].江西农业学报,2016,28(12):110-114.
YIN Juan, DENG Chao-bing, WANG Xiao-fei, et al. Assessment of human health risk from heavy metals in farmland soil based on their bioaccessibility[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(12):110-114.
- [2] 中华人民共和国国土资源部,中华人民共和国国家环境保护部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:中华人民共和国国土资源部,中华人民共和国国家环境保护部,2014:10-11.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination[R]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2014:10-11.
- [3] Abrahams P W. Soils: Their implications to human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 291(1/2/3):1-32.
- [4] 陈晓晨,牛佳,崔岩山.城市表层土壤中铅的生物可给性及其对人体的健康风险评估:以首钢厂区附近小区域为例[J].环境科学,2010,31(12):3028-3035.
CHEN Xiao-chen, NIU Jia, CUI Yan-shan. Bioaccessibility of lead in urban topsoil and its health risk assessment: A case study of a small area near Shougang group[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12):3028-3035.
- [5] Luo X S, Yu S, Li X D. The mobility, bioavailability and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(5):995-1004.
- [6] 郑顺安,王飞,李晓华,等.应用*in vitro*法评估土壤性质对土壤中Pb的生物可给性的影响[J].环境科学研究,2013,26(8):851-857.
ZHENG Shun-an, WANG Fei, LI Xiao-hua, et al. Application of *in vitro* digestion approach for estimating lead bioaccessibility in contaminated soils: Influence of soil properties[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(8):851-857.
- [7] 李继宁,侯红,魏源,等.株洲市农田土壤重金属生物可给性及其人体健康风险评估[J].环境科学研究,2013,26(10):1139-1146.
LI Ji-ning, HOU Hong, WEI Yuan, et al. Bioaccessibility and human health risk assessment of heavy metals in agricultural soil from Zhuzhou, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(10):

- 1139-1146.
- [8] 吴小飞. 基于体外提取方法对土壤重金属生物可给性的研究与评价[D]. 扬州:扬州大学, 2015.
WU Xiao-fei. Bioaccessibility and health risk of heavy metals in soils based on *in-vitro* extraction methods[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [9] 孙 歆, 韦朝阳, 王五一. 土壤中砷的形态分析和生物有效性研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6):625-632.
SUN Xin, WEI Chao-yang, WANG Wu-yi. Progress in the study of arsenic species and bioavailability in soils: A review[J]. *Advances on Earth Science*, 2006, 21(6):625-632.
- [10] USEPA. Estimation of relative bioavailability of lead in soil and soil-like materials using *in vivo* and *in vitro* methods, OSWER, 9285, 7-77 [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2007.
- [11] Drexler J W, Brattin W J. An *in vitro* procedure for estimation of lead relative bioavailability: With validation[J]. *Human & Ecological Risk Assessment*, 2007, 13(2):383-401.
- [12] Poggio L, Vrščaj B, Schulin R, et al. Metals pollution and human bioaccessibility of top soils in Grugliasco (Italy)[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2):680-689.
- [13] 陈海珍, 龚春生, 李文立. 广州市不同功能区土壤铅的健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2012, 29(10):624-628.
CHEN Hai-zhen, GONG Chun-sheng, LI Wen-li. Health risk assessment of lead in soils in different functional areas of Guangzhou[J]. *Journal of Environment and Occupational Medicine*, 2012, 29(10):624-628.
- [14] 杨 杰, 鲁 荔, 杨金燕, 等. 攀枝花地区土壤及矿物中3种重金属形态及健康风险[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1):242-247.
YANG Jie, LU Li, YANG Jin-yan, et al. Bioaccessibility of heavy metals in soils and minerals in Panzhihua City, Sichuan, south-western China[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(1):242-247.
- [15] 刘同山. 经济发展、环境污染与居民健康——基于媒体分析法的“癌症村”研究[J]. 生态经济, 2016, 32(7):14-19.
LIU Tong-shan. Economic development, environmental pollution and the health of the residents: The research of cancer villages based on media analysis[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(7):14-19.
- [16] 中华人民共和国国家环境保护局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
National Environmental Protection Agency of the People's Republic of China. HJ/T 166—2004 Technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY/T 395—2012 农田土壤环境质量监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 395—2012 Technical rules for monitoring of environmental quality of farmland soil[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Methods of soil's agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] 王其枫. 广东省主要菜地土壤重金属形态分级研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
WANG Qi-feng. Fractionation of heavy metals in the main vegetable soils in Guangdong Province[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2012.
- [20] USEPA. Guidance for evaluating the oral bioavailability of metals in soils for use in human health risk assessment[R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2007.
- [21] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: Volume 1, human health evaluation manual, supplemental guidance: Standard default exposure factors (interim final)[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency, 1991.
- [22] Hu X, Zhang Y, Luo J, et al. Bioaccessibility and health risks of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5):1215.
- [23] Luo X S, Ding J, Xu B, et al. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 424(4):88-96.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018. Risk control standard for soil contamination of agricultural land in soil environment quality[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [25] 楚纯洁, 周金凤, 吴楠楠. 平顶山矿区丘陵坡地土壤重金属健康风险评估[J]. 中国煤炭, 2017, 43(8):153-157.
CHU Chun-jie, ZHOU Jin-feng, WU Nan-nan. Health risk assessment of soil heavy metals in hilly sloping fields of Pingdingshan mining area[J]. *China Coal*, 2017, 43(8):153-157.
- [26] 项 萌, 张国平, 李 玲, 等. 广西铅锡矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J]. 矿物学报, 2011, 31(2):250-255.
XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, et al. The characteristics of heavy metals in soil around the Hechi antimony-lead smelter, Guangxi, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(2):250-255.
- [27] 徐玉霞, 汪庆华, 薛 雷, 等. 关中西部某铅锌冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J]. 土壤通报, 2013, 44(5):1240-1244.
XU Yu-xia, WANG Qing-hua, XUE Lei, et al. The characteristics of heavy metals in soil around the lead and zinc smelter in western Guanzhong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(5):1240-1244.
- [28] 胡德新, 武素茹, 刘跃勇, 等. 改进BCR法-电感耦合等离子体发射光谱法测定矿产品堆场土壤中镉砷铅的化学形态[J]. 岩矿测试, 2014, 33(3):369-373.
HU De-xin, WU Su-ru, LIU Yue-yong, et al. Determination of chemical species of cadmium, arsenic and lead in mineral yard soil by modified BCR and ICP-AES method[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(3):369-373.
- [29] 刘甜田, 何 滨, 王亚韩, 等. 改进BCR法在活性污泥样品重金属形态分析中的应用[J]. 分析实验室, 2007, 26(增刊):17-20.
LIU Tian-tian, HE Bin, WANG Ya-han, et al. The application of improved BCR method in the analysis of heavy metals in activated sludge samples[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2007, 26(Suppl):17-20.
- [30] 张丽娥, 莫招育, 覃 健, 等. 广西大厂矿区下游农村土壤重金属污染及儿童健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(6):512-516.
ZHANG Li-e, MO Zhao-yu, QIN Jian, et al. Contamination of heavy metals in soils and health risk assessment in children in a downstream village of Dachang mining area in Guangxi[J]. *Journal of Environmental and Health*, 2014, 31(6):512-516.