

大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价

曹春, 张松, 张鹏, 刘雨晨, 陈勋文, 王俊坚

引用本文:

曹春, 张松, 张鹏, 等. 大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1521-1531.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究

周旭, 周安琪, 曹红斌, 刘建伟, 陈艳姣, 张爱琛

农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1213-1220 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1367>

宜昌近郊污水灌溉区水芹重金属污染状况及健康风险评价

张海锋, 李晓玲, 罗玉红, 戴泽龙, 胥焘, 黄应平

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1470-1477 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.006>

天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价

孙亚芳, 王祖伟, 孟伟庆, 胡蓓蓓, 侯迎迎, 王子璐, 张辉

农业环境科学学报. 2015(4): 679-685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.011>

某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价

梁雅雅, 易筱筠, 党志, 王琴, 高双全, 唐婕, 张政芳

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 103-110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0252>

福建省某矿区周边土壤-农作物重金属空间变异特征与健康风险评价

谢团辉, 郭京霞, 陈炎辉, 李云云, 王果

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 544-554 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1315>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹春, 张松, 张鹏, 等. 大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1521–1531.

CAO Chun, ZHANG Song, ZHANG Peng, et al. Heavy metal contamination in soil-vegetable systems and its health risks in an area irrigated with acid mine drainage in Dabaoshan, Guangdong, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1521–1531.



开放科学 OSID

大宝山污灌区土壤-蔬菜系统 重金属污染现状及其风险评价

曹春¹, 张松^{1*}, 张鹏¹, 刘雨晨², 陈勋文², 王俊坚²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730000; 2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518000)

摘要:为研究酸性矿山废水浇灌对土壤-蔬菜体系中重金属的分布特征及迁移特征的影响,进而评估蔬菜摄入带来的健康风险,选取广东省大宝山农田8种蔬菜及其生长土壤作为研究对象,运用植物地下部富集系数(BBCF)和转运系数(TF)分析蔬菜不同部位对Cu、Zn、Cr、As、Pb和Cd的吸收转运能力,使用重金属每日摄入量(EDI)和目标危险系数(THQ)方法进行健康风险评价。结果表明:依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),6种重金属超标占比分别为Cu 94.9%、Cd 89.5%、Pb 84.6%、As 69.2%、Cr 10.5%、Zn 10.3%。蔬菜地上部的6种元素含量都超过《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106—1991)、《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199—1994)和《食品中污染物限量》(GB 2762—2017),其中Cr、Pb、Cd超标严重,莴菜、小白菜、茄子积累重金属超标最严重。蔬菜的地下部对Cr和Cd有较强的富集能力,存在Cd、Cr的复合污染风险,其中Cd较其他金属元素更容易从蔬菜地下部转运到地上部。健康风险评价结果显示,食用蔬菜造成的平均目标危险系数按大小为 $THQ_{As} > THQ_{Cr} > THQ_{Cd} > THQ_{Pb} > THQ_{Cu} > THQ_{Zn}$, As、Cr、Cd总贡献超过87%;儿童摄食蔬菜的重金属健康风险高于成人。研究表明,当地污灌区农田重金属仍超标严重,莴菜、茄子、小白菜是造成人体健康风险的主要蔬菜品种,建议食用其他低富集蔬菜以降低健康风险。

关键词:蔬菜;重金属;生物富集;迁移特征;风险评价

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)07-1521-11 doi:10.11654/jaes.2020-0001

Heavy metal contamination in soil-vegetable systems and its health risks in an area irrigated with acid mine drainage in Dabaoshan, Guangdong, China

CAO Chun¹, ZHANG Song^{1*}, ZHANG Peng¹, LIU Yu-chen², CHEN Xun-wen², WANG Jun-jian²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China)

Abstract: To study the effects of heavy metals in soil-vegetable systems and their health risks via the consumption of contaminated vegetables in an area irrigated with acid mine wastewater, the study sampled eight vegetables and their rhizosphere soils in polluted farmlands in Dabaoshan, Guangdong Province. Belowground bioconcentration factor and translocation factor were calculated to analyze the absorption and translocation of Cu, Zn, Cr, As, Pb, and Cd in vegetables. Estimated daily intake of heavy metals via vegetable consumption and target hazard quotient (THQ) were used for health risk assessment. The results showed that 94.9% of the soil samples exceeded the *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land* (GB 15618—2018) for Cu, 89.5% for Cd, 84.6% for Pb,

收稿日期:2020-01-01 录用日期:2020-03-10

作者简介:曹春(1978—),女,甘肃会宁人,博士,副教授,主要研究方向为土壤污染与修复、环境风险评估。E-mail:caochun1978@163.com

*通信作者:张松 E-mail:13527333153@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41807360);国家自然科学基金地区项目(41761074);广东省普通高校自然科学研究特色创新项目(2018KTSCX199)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China Youth Program (41807360); The National Natural Science Foundation of Regional Project(41761074); The Characteristic Innovation Project of Natural Science Research in Universities of Guangdong Province(2018KTSCX199)

69.2% for As, 10.5% for Cr, and 10.3% for Zn. The concentrations of the six metals in the aboveground tissues exceeded *Health Standard for Zinc in Food* (GB 13106—1991), *Health Standard for Copper in Food* (GB 15199—1994) and *Maximum Allowable Concentration in Food* (GB 2762—2017) for vegetables, among them Cr, Pb, and Cd exceeded the standards significantly. Furthermore, the accumulation of heavy metals was the highest in *Ipomoea aquatica* Forssk, *Brassica chinensis* L., and *Solanum melongena* L. among all the studied vegetables. The results showed that the belowground part of vegetables had a relatively strong ability to enrich Cr and Cd. Although the soil Cr pollution was not serious, there was a risk of co-pollution of Cd and Cr in vegetables. Cd exhibited a stronger migration ability from the belowground part to aboveground part of vegetables than the other metals. The health-risk assessment showed that the average THQ decreased in the following order: $THQ_{As} > THQ_{Cr} > THQ_{Cd} > THQ_{Pb} > THQ_{Cu} > THQ_{Zn}$; As, Cr, and Cd contributed more than 87% to the total THQ. Moreover, the health risks of consuming heavy metal-contaminated vegetables were higher in children than in adults. Our results suggest that there is serious heavy metal pollution in local farmlands irrigated with wastewater, and that *I. aquatica*, *Brassica campestris*, and *S. melongena* can cause the highest human health risk among the vegetables. Thus, the consumption of alternative vegetables with lower metal accumulation is recommended.

Keywords: vegetable; heavy metal; bioaccumulation; translocation; health risk assessment

蔬菜作为人们日常膳食生活中重要组成部分,提供了人体所需的维生素、矿物质、膳食纤维等营养物质^[1-2]。近几年,我国农田土壤环境受到矿区开采^[3]、污水灌溉^[4]、大气沉降^[1]等诸多外界因素影响,引起区域性重金属污染,并可能在蔬菜等可食用作物中大量积累^[2]。食物链是人类接触重金属暴露的重要途径之一。重金属通过蔬菜食用进入人体后可能会累积在骨骼和脂肪组织,引起急性和慢性损伤,甚至存在致癌、致畸、致突变等潜在危害^[5-6]。国内学者对蔬菜中的重金属含量及食用带来的居民健康风险早有关关注^[7-9]。曾希柏等^[10]研究了我国菜地土壤的重金属污染情况,发现我国中部和西部的As、Cd污染问题突出,东部地区Cd污染问题较为严重,污染最严重的蔬菜农田主要来自采矿或废水灌溉地区。例如,Cao等^[11]通过对甘肃白银有着近60 a污水灌溉历史的农田土壤和蔬菜重金属污染情况调查,发现工业废水浇灌区蔬菜As、Cd浓度超标严重,造成的风险和毒性危险不容忽视。余志等^[12]对黔西北地区典型Zn冶炼区菜地土壤和主要蔬菜进行调查,发现该区域菜地土壤已受到重金属的重度污染且以Cd污染最为严重,食用研究区域蔬菜可对当地成人和青少年儿童健康产生不良影响。因此,通过食用蔬菜摄入重金属导致的人体健康风险应引起高度重视^[3,12]。

广东省大宝山是典型的多金属硫化物矿区,自1970年开始矿业活动,频繁的矿产开采和私人采矿^[13]导致尾矿等固体废弃物的堆积和淋滤,酸性矿山废水流入横石河^[14]。虽然自2011年政府禁止矿业开采,然而以往数十年尾矿堆积和采矿矿坑,对周边生态环境已造成长期重金属污染^[15]。研究区内重金属污染

涉及到83个村庄,影响到 $5.85 \times 10^6 \text{ m}^2$ 的稻田和 $2.1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的池塘,重金属暴露可能是该地区成为疾病和癌症高发区域的诱因之一^[14,16]。近几年,政府致力于推行土壤修复和河流拦泥库等措施,恢复当地土壤生态环境和水质环境质量^[17]。

目前,学者对大宝山区域的大米、蔬菜、土壤、饮用井水重金属污染及其环境影响、人体健康风险评估等开展了大量研究工作^[8,18-19]。以往研究发现当地土壤中Cd、Cu、As重金属污染严重,特别是Cd,通过大米和蔬菜的摄入途径给当地居民带来极大潜在健康风险^[15]。当地居民长期采用横石河河水浇灌土壤和蔬菜,可能造成土壤环境质量和蔬菜品质下降,但目前已有研究所涉及的蔬菜种类有限,关于重金属在土壤-植物体系中的迁移和食用所种植蔬菜带来的潜在风险研究较少。因此,本研究考虑当地土壤重金属污染以及若干种典型蔬菜重金属暴露对人体的健康风险,提出以下研究目的:调查当地横石河灌溉农田土壤和蔬菜的重金属含量;讨论土壤-蔬菜体系中重金属迁移特征;评价当地居民通过蔬菜食用途径产生的人体健康风险。本研究将为该区域种植蔬菜品种的选择和饮食健康安全提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于广东省韶关市大宝山矿区,地处亚热带季风气候,年平均气温为19.3~20.6℃,年平均降水量为1350~1750 mm,土壤类型为红壤,土壤质地类型为粉壤土(砂粒47.7%、粉粒28.8%、黏粒24.5%)^[20-23]。大宝山矿区为硫化物多金属矿床,主要由黄铜矿、褐

铁矿和铅锌矿组成。自20世纪70年代开始矿业活动,矿山开采、选矿产生的尾砂和废水,沿河谷排入两个大型尾矿库(铁龙尾和槽对坑尾矿库)^[23]。多金属硫化物与空气接触后氧化成酸性废水,并释放出大量毒性金属离子。而未经处理的酸性矿山废水由尾矿库排入横石河,其中下游与成公湾河混合,最终流入翁江。另外,横石河常作为沿岸附近村庄的农业灌溉用水,酸性矿山废水导致重金属通过土壤-植物-人体途径迁移,食用蔬菜是当地居民摄入重金属并产生人体健康风险的途径之一^[18]。

1.2 样品采集

样品采集区域(图1)位于上坝村附近农田,该农田长期使用横石河作为灌溉水源,农田有7 a的河水灌溉历史,这也是以往文献报道中污染严重区域之一^[18]。对当地农作物蔬菜进行问卷调查,2018年8月采集8种具有代表性的横石河水灌溉农田蔬菜,包括番薯叶(*Ipomoea batatas*)、蕹菜(*Ipomoea aquatica*)、芥菜(*Brassica juncea*)、小白菜(*Brassica chinensis*)、茄子(*Solanum melongena*)、辣椒(*Capsicum annuum*)、大豆(*Glycine max*)、四季豆(*Phaseolus vulgaris*)。采集整株蔬菜和根际土壤,同种蔬菜在不同点共采集5个重复样(除了辣椒采集4个重复样),每个重复样由1~8

株组成。

1.3 样品处理

采集蔬菜根部黏附土壤,毛刷刷落,剔除砾石和植物根茎等杂物,在50℃烘箱干燥48 h。土壤先通过10目筛,用于检测pH、电导率、阳离子交换量等土壤参数;然后取部分过筛土壤进一步研磨,再过100目筛后,用于土壤的重金属检测。

蔬菜样品用自来水洗涤数次,直到根和叶无土壤残留,再用Milli-Q超纯水清洗3次,将其放入通风处阴干。每种植物分成地下部和地上部(包括蔬菜的茎和叶)样品,烘箱50℃干燥48 h。干燥后的蔬菜样品粉碎并过10目筛,存入自封袋中待下一步处理。

1.4 化学分析

土壤pH和电导率(EC)采用哈希HQ440D多参数分析仪进行测量(配备TM PHC 201和CDC 401探头),土水质量比分别为1:2.5和1:5。土壤阳离子交换量(CEC)采用《土壤阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法》(HJ 889—2017)测定。土壤样品消解通过准确称量0.2 g土壤,采用硝酸-氢氟酸消解体系(3:2, V/V),微波消解后为透明、无色液体,定容体积50 mL。植物样品消解通过准确称取0.2 g植物样品,采用过氧化氢-硝酸体系(1:8, V/V)进

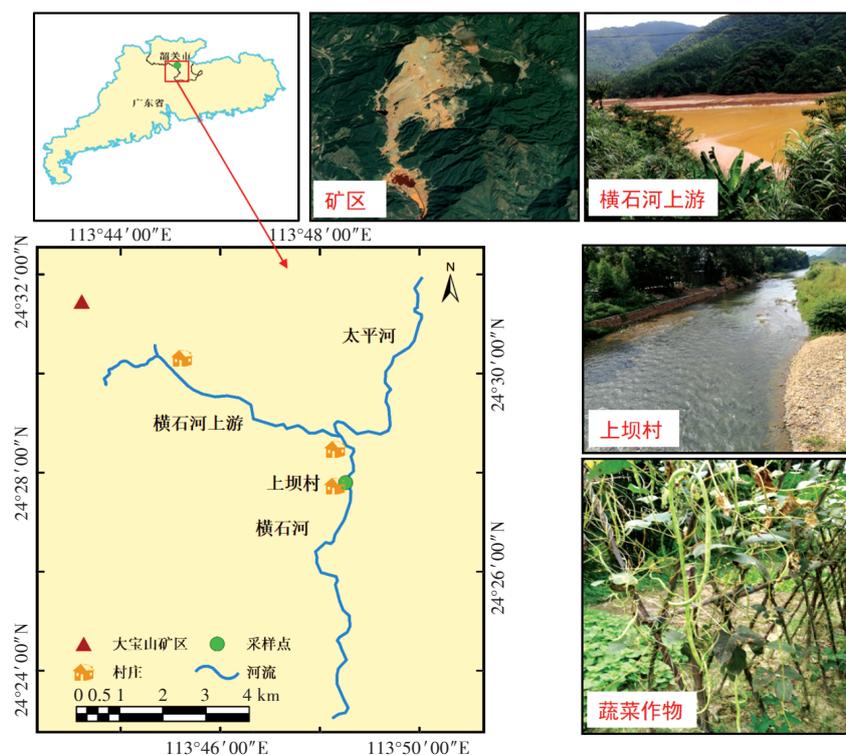


图1 酸性矿山废水污灌区农田蔬菜和土壤采样点

Figure 1 Sampling of farmland vegetables and soils in acid mine wastewater irrigation area

行微波消解后定容。土壤有效态金属用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液提取测定。所有待测样品经过滤,稀释后检测重金属Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb全量和有效态含量。样品重金属含量检测利用电感耦合等离子质谱(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific, 美国)。试验分析过程中,全程保持试验空白和标准样重复作为质量控制,试验用水为Milli-Q水,重金属含量检测过程加标回收率在78.0%~99.9%。

1.5 数据处理

植物地下部富集系数(Belowground bioconcentration factor, *BBCF*)是植物某种元素在植物地下部的含量与该植物所生长的土壤中该元素含量的比值,可反映植物对某种元素的富集能力^[24]。计算公式如下:

$$BBCF = \frac{C_{\text{Belowground}}}{C_{\text{Soil}}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{Belowground}}$ 为植物地下部中的重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{soil} 为植物生长土壤中重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。*BBCF*大于1,表明植物体内重金属含量高于土壤中,对某重金属元素具有一定的富集能力。

转运系数(Translocation factor, *TF*)是植物地上部某金属元素与植物地下部金属元素的比值,比值大小反映的是植物对该金属元素的迁移能力^[25]。计算公式如下:

$$TF = \frac{C_{\text{Aboveground}}}{C_{\text{Belowground}}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{Aboveground}}$ 为蔬菜地上部的重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。*TF*值大于1时,可认为蔬菜对地下部富集的重金属元素容易迁移到地上部,造成潜在毒性危害。

通过当地居民每日蔬菜摄入量(Estimated daily intake, *EDI*, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)来评估对人体造成的潜在风险。计算公式如下:

$$EDI = \frac{C_{\text{crop}} \times CI}{BW} \quad (3)$$

通过目标危险系数方法(Target hazard quotient, *THQ*, 美国国家环保署)进行健康风险评估,以污染物暴露剂量与参考剂量的比值来表征非致癌风险水平^[7, 15]。比值大于1,则表明该污染物对人体具有潜在健康风险。计算公式如下:

$$THQ = \frac{C_{\text{crop}} \times CI \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD} \quad (4)$$

式中: C_{crop} 为植物可食用部污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; *CI*为蔬菜每人每日摄入量, $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; *EF*为每日暴露频率, $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; *ED*为平均暴露持续时间, a; *AT*为平均暴露时间, $365 \times ED, \text{d}$; *BW*为人体参考体质量, kg; *RfD*

为毒性重金属暴露参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 本次研究相应污染物口服剂量参考EPA 2010环境标准^[26],分别为Cu $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、Zn $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、Cr $0.003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、As $0.0003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、Pb $0.0035 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、Cd $0.001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

参照以往研究,上坝村居民成人参考体质量为60.5 kg,儿童参考体质量为29.3 kg^[16],成人和儿童暴露持续时间分别为70 a和12 a。

用目标危险总系数(Total THQ, *TTHQ*)评估多种重金属造成的复合风险,计算公式如下:

$$TTHQ = \sum_{i=1}^n THQ \quad (5)$$

式中:*TTHQ*小于1表示没有健康风险;大于1表示存在潜在的健康风险,需要采取相应防护措施;大于10表示存在慢性毒性效应。

2 结果和讨论

2.1 污灌区菜地土壤中重金属污染状况

上坝村污灌区蔬菜根区土壤pH为4.8,属于酸性土壤,EC为 $175 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,CEC为 $3.78 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤全量重金属含量具体见表1,均值按大小依次为Zn>Pb>Cu>Cr>As>Cd。根据我国《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018, pH≤5.5),研究区域农田污染土壤的超筛选值占比分别为Cu 94.9%、Zn 10.3%、Cr 10.5%、As 69.2%、Pb 84.6%、Cd 89.5%,6种重金属只有Cd超管控值,超管控值占比为4.2%。结果表明上坝村农田土壤大部分重金属含量(Cu、Cd、Pb、As)都超过了农用地土壤污染筛选值,且部分点位超过Cd的管控值,因此该区域的农作物生长环境及生态环境可能存在风险,对于Cd的超标污染应当采取严格管控措施。

土壤的有效态重金属更容易被植物吸收,因此定量土壤中有效态重金属含量比全量重金属含量更重要。有研究指出,盐酸提取态的土壤重金属能较好地反映植物对酸性土壤中重金属的吸收,与植物体内的重金属相关性较好^[27]。表1所示,土壤重金属有效态浸提率最高是Cd 61.2%,其次是Cu 22.2%、Zn 20.8%和Pb 15.9%。重金属Cr和As的土壤有效态浸提率低于4%,该浸提方法不能有效浸提出土壤中的Cr和As。这与前人研究结果相似,盐酸提取率远高于其他提取剂,能将铁锰氧化物或碳酸盐等难溶物质固定的重金属释放出来^[28]。同时,较高的有效态Cd、Cu、Zn和Pb能较好反映出上坝村周边污染土壤中重金属

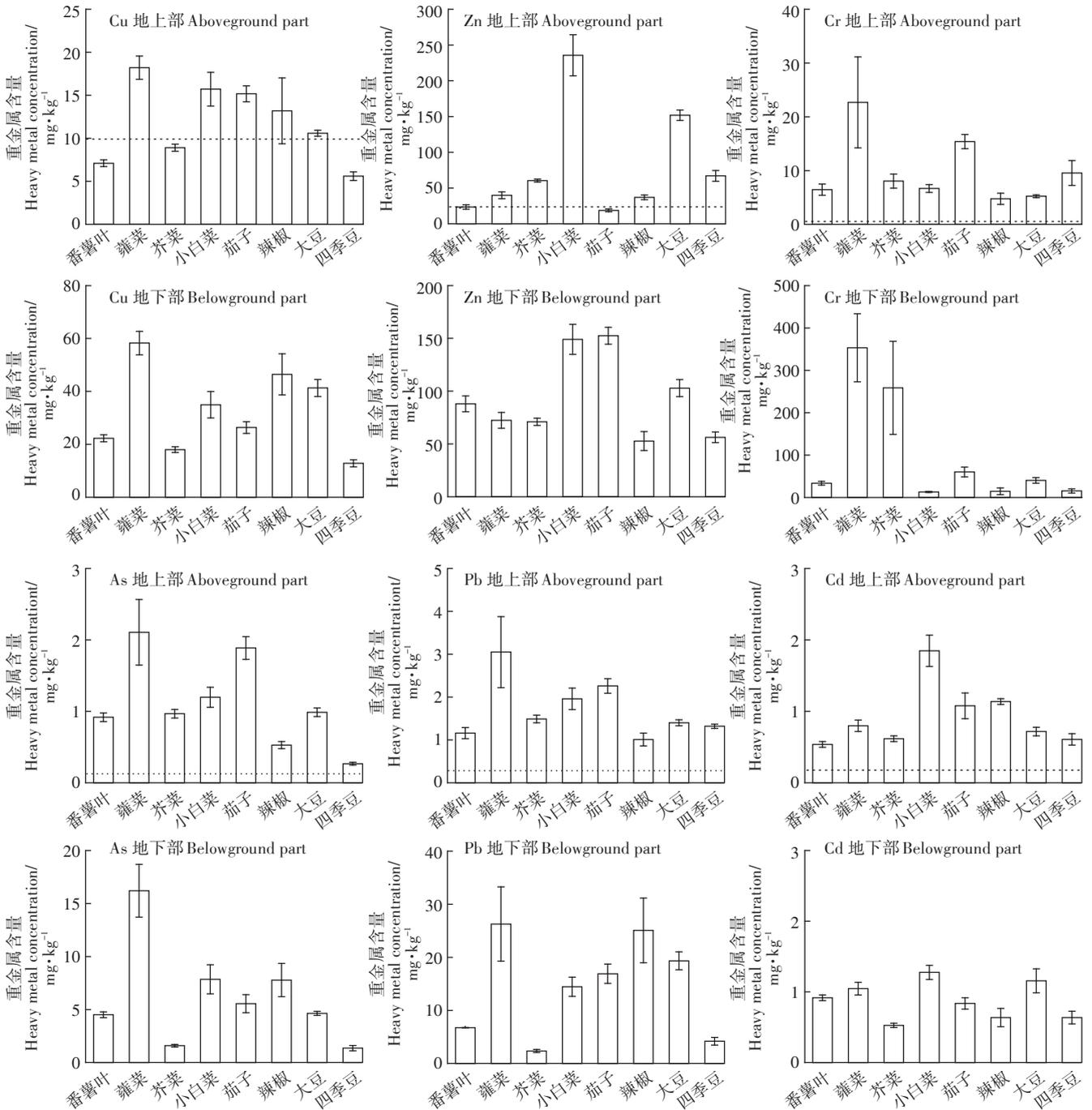
生物可利用性。

以往研究发现,该区域普遍存在着多种重金属的复合污染,尤其是以Cd污染比较突出^[19,29]。本研究发现菜地土壤重金属Cu、Cd、Pb和As超过筛选值标准,其中土壤Cd污染更为严重。另外Cd、Cu、Zn、Pb盐酸提

取率较高,显示出对植物有着更高的生物可利用性。

2.2 蔬菜地下部和地上部重金属含量

蔬菜中地下部各重金属含量如图2所示,其平均值大小排序为Cr>Zn>Cu>Pb>As>Cd(图3)。该排序与土壤重金属全量和有效态含量存在差异。Cr、Zn



虚线根据蔬菜卫生标准(GB 13106—1994)和《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)参考值作为标准

The dash lines indicate the reference values of the vegetable hygiene standard(GB 13106—1994) and Maximum Allowable Concentration of Food(GB 2762—2017)

图2 蔬菜地上部及地下部各重金属含量

Figure 2 The heavy metal concentrations in the aboveground and belowground parts of vegetables

表1 农田蔬菜根区土壤重金属含量与标准和过往研究对比($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Physicochemical properties and heavy metal content of vegetable rhizosphere soil in farmland($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

种类 Category	Cu	Zn	Cr	As	Pb	Cd
全量含量	93.4±6.8	121.6±8.7	73.5±20.8	52.4±3.9	116.2±8.5	0.72±0.09
有效态含量	18.4±1.1	22.8±1.8	0.4±0.0	1.4±0.1	16.1±0.4	0.34±0.03
有效态占全量百分比 ^a	22.2%	20.8%	1.3%	3.1%	15.9%	61.2%
农用地土壤污染筛选值 ^b	50	200	150	40	70	0.3
超筛选值样品数占比 ^c	94.9%	10.3%	10.5%	69.2%	84.6%	89.5%
农田土壤污染管控值 ^b	—	—	800	200	400	1.5
超管控值样品数占比 ^d	—	—	0%	0%	0%	4.2%
农田土壤全量含量 ^[4]	224	256	—	48.6	149	—
菜地土壤全量含量 ^[15]	346.9	288.5	—	177.0	193.2	2.11

注：“—”无数据；^a该百分比值为样品中金属有效态含量与全量含量的比值；^b《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)；^c该百分比为金属浓度超过土壤污染筛选值的样品数与总样品数的比值；^d该百分比为金属浓度超过土壤污染管控值的样品数与总样品数的比值。

Note: “—” no data; ^a Ratio of the available metal content to the total metal content; ^b *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land* (GB 15618—2018); ^c The percentage of samples with a metal concentration exceeding the screening value in all samples; ^d The percentage of samples with a metal concentration exceeding the control value in all samples.

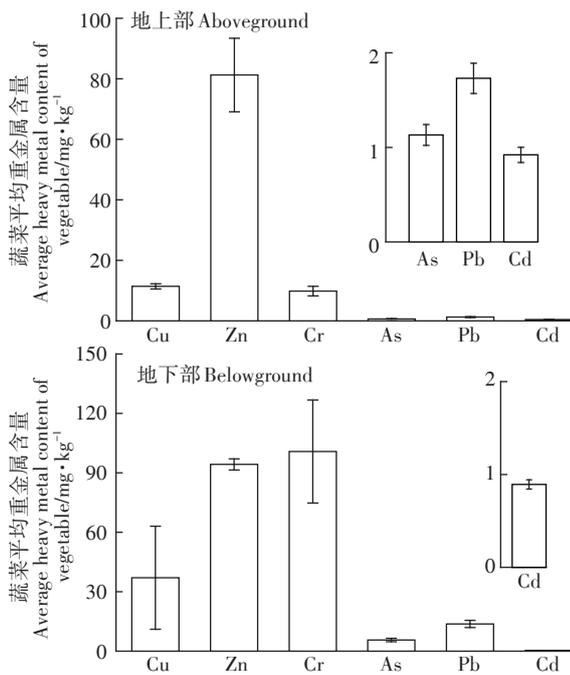


图3 蔬菜地上部及地下部平均重金属含量

Figure 3 Average heavy metal concentrations in aboveground and belowground parts of vegetable

及Pb的富集差异可能与重金属在不同蔬菜作物体系的迁移特征和土壤重金属的赋存形态有关^[12]。与地下部重金属含量较为相似,蔬菜地上部各重金属含量的平均值大小顺序为 $\text{Zn}>\text{Cu}>\text{Cr}>\text{Pb}>\text{As}>\text{Cd}$ 。图3中《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106—1991)、《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199—1994)和《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)标准值为 $\text{Cu } 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、

$\text{Zn } 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cr } 0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{As } 0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb } 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cd } 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。依据标准,蔬菜地上部各元素含量平均超标倍数分别为Cu 1.2、Zn 4.1、Cr 20.6、As 2.3、Pb 5.8、Cd 4.6倍。其中蔬菜地上部超标率分别为Cu 51.3%、Zn 84.6%、Cr 100.0%、As 87.2%、Pb 100.0%、Cd 100.0%。结果表明,当地种植蔬菜中6种重金属都超过了蔬菜限制标准,其中Cr、Pb、Cd超标严重。另外,蕹菜、小白菜、茄子是8种蔬菜中重金属超标严重蔬菜,其地下部和地上部重金属含量远高于其他蔬菜。

研究区以往研究结果中蔬菜的叶菜部位重金属含量分别为Cd $0.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cu $1.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn $12.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、As $1.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Pb $2.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15]。本次研究如图3所示,蔬菜地上部平均重金属含量Cu、Zn、Cd污染高于以往研究结果,但As、Pb低于以往研究。以往研究中高含量的As、Pb是由于大宝山矿区大气沉降的影响^[15],叶片同样作为植物吸收重金属的途径之一,导致叶菜部位积累重金属^[1]。本研究中,重金属的地上部平均含量值小于地下部(除Cu外),表明大部分蔬菜根部是吸收和积累重金属的主要途径。

2.3 土壤-蔬菜体系中重金属迁移特征

植物地下部富集系数,是蔬菜地下部重金属含量与土壤中重金属含量比值,反映了不同种类蔬菜在相同土壤条件下对重金属的吸收和富集能力^[13]。植物地下部富集系数越大,表明从土壤中富集重金属能力越强,带来的危害也越大。由图4可知,所有蔬菜平

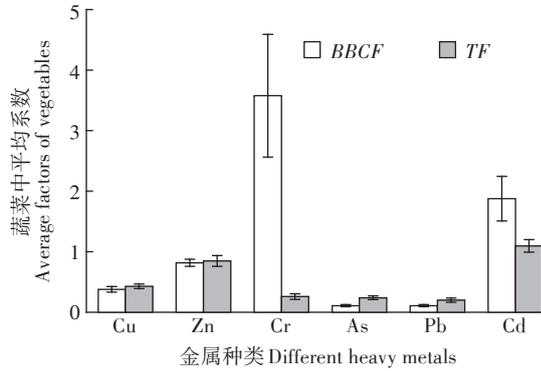


图4 各重金属在蔬菜中平均地下部富集系数和转运系数

Figure 4 The average belowground bioconcentration factors and translocation factors of each heavy metal in vegetables

均地下部富集系数大小的顺序为 $Cr > Cd > Zn > Cu > As \approx Pb$ 。如图5所示,番薯叶、蕹菜、芥菜地下部对Cr有显著的富集能力, $BBCF$ 都大于2,且对Cd也有强的富集能力, $BBCF$ 大于1。茄子和辣椒地下部对Cr有强富集能力, $BBCF$ 大于1。辣椒、大豆、四季豆地下部对Cd有强的富集能力, $BBCF$ 大于1。所有蔬菜地下部对Zn表现出中等的富集能力, $BBCF$ 大于0.6。Cu、As、Pb的 $BBCF$ 值在蔬菜中普遍小于1,表明富集能力弱。本次研究探讨的6种重金属,Cr和Cd容易富集在所研究蔬菜地下部中,As和Pb不容易富集于蔬菜地下部,Cu和Zn作为植物营养元素也较容易富集

于大部分蔬菜地下部中。

以往研究发现Cd作为当地土壤中主要的污染物之一,叶菜类蔬菜的 $BBCF$ 明显高于非叶菜类^[8]。原因可能是叶菜类蔬菜与其他类蔬菜相比,有着较高的转运速率和生长速度^[9]。本次研究中,选取的研究蔬菜地下部都存在较强的Cd、Cr富集能力,表明当地种植蔬菜存在Cd、Cr的复合污染风险。值得注意的是,Cr在研究区域污染并不严重(超标率10.5%),但在地下部富集的能力明显高于其他重金属。

TF 常用于评估植物对重金属的迁移能力^[30]。本次研究各蔬菜对重金属的转运系数排序比较相似(图5),蔬菜的平均转运系数按大小排序为 $Cd > Zn > Cu > Cr > As > Pb$ (图4)。由图4可知,芥菜、小白菜、茄子、辣椒、四季豆对Cd都表现出较强的迁移能力, TF 接近于1或者大于1。因此,Cd作为6种重金属中迁移能力最强的元素,由地下部迁移到地上部,造成地上部Cd污染严重。绝大多数蔬菜中As和Pb的 TF 值均小于0.5(除芥菜外),表明对该类型重金属迁移能力弱,不构成潜在危害。Cu、Zn作为植物所需的营养元素,在蔬菜中迁移能力一般(除小白菜、大豆外)。

总之,当地土壤污染区域种植蔬菜的地下部Cd和Cr的富集系数高,应该考虑Cd和Cr复合风险。叶菜类蔬菜(番薯叶、蕹菜、芥菜)的Cr地下部富集系数

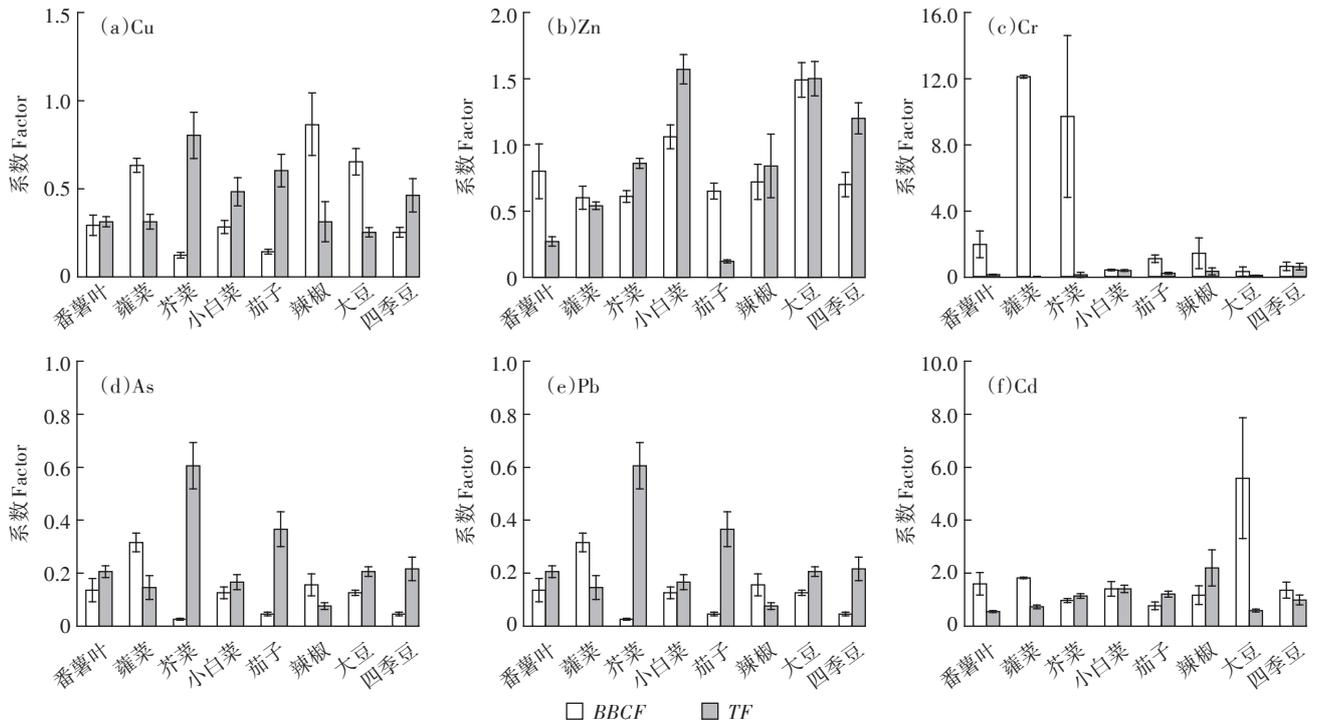


图5 6种金属在不同蔬菜中地下部富集系数和转运系数

Figure 5 Belowground bioconcentration factors($BBCF$) and translocation factor(TF) of six metals in different vegetables

较其他种类蔬菜更高。Cd在大多数蔬菜中迁移能力强,容易造成更多潜在危害。

2.4 居民蔬菜摄入重金属的健康风险评价

随着社会发展和经济收入的增加,居民对蔬菜消费量有着明显增加的趋势^[6]。当蔬菜可食用部位积累大量重金属,会通过食物链对人类健康造成潜在风险^[8]。通过公式(3)与当地居民(儿童和成人)蔬菜日常食用途径,计算得出重金属每日摄入量(EDI)。由表2可知,儿童每日通过蔬菜食用途径摄入($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)Cu 93、Zn 639、Cr 81、As 9、Pb 14和Cd 7。当地成人通过每日蔬菜食用途径摄入($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)Cu 70、Zn 482、Cr 611、As 7、Pb 10和Cd 5。结果可知,一些毒性金属如Cr、As、Pb、Cd的儿童EDI大于成人EDI,意味着会对儿童造成更多的潜在危害。参照以往研究,Cu、Zn、Cr、As、Pb、Cd等重金属每日推荐摄入量为50、1 000、50、3、1.5、0.83 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[21,31]。除了每日蔬菜饮食摄入的Zn在推荐值范围内,其余重金属都超过了每日允许摄入量,超标了几倍到十几倍。由图6可知,Cu、Zn、Cr在成人和儿童每日重金属摄入量占比高达97%,是日常摄入主要微量元素。因此,考虑到Cr、As、Pb、Cd的暴露影响和每日摄入量,长期食用可能对身体健康产生不利影响。

目标危险系数(THQ)目前已广泛应用于评估食

用受污染粮食作物的健康风险^[8]。表3为目标危险系数评估研究区域蔬菜消费的人体健康风险。上坝村当地居民(成人和儿童)蔬菜食用消费途径的平均THQ值按大小为 $THQ_{As}>THQ_{Cr}>THQ_{Cd}>THQ_{Pb}>THQ_{Cu}>THQ_{Zn}$ 。单种金属的THQ值小于1,表明对人体不构成潜在危险。在研究的8种蔬菜中,单种重金属的THQ值都大于1(除了部分Cu和Zn),表明在上坝村农田蔬菜已经构成人体潜在的危害,应该减少摄入该区域的蔬菜。8种蔬菜中TTHQ按大小排序为蕹菜>茄子>小白菜>芥菜>大豆>番薯叶>四季豆>辣椒,这结果在儿童和成人中表现较为一致。因此蕹菜、茄

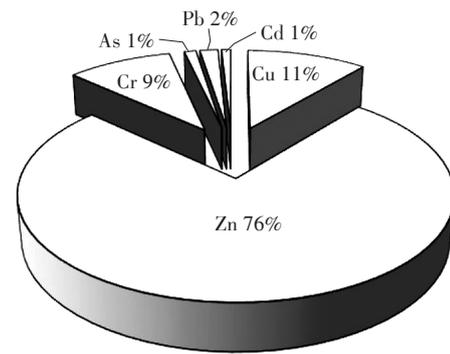


图6 各重金属对儿童和成人每日摄入贡献占比率

Figure 6 The contribution of each heavy metal to the daily intake of children and adults

表2 评估蔬菜食用途径的每日重金属摄入量($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 2 Assessment of estimated daily intake(EDI) of heavy metals through vegetable consumption($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)

人群 Resident group	每日摄入量 Daily dietary intake/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	蔬菜种类 Vegetable species	Cu	Zn	Cr	As	Pb	Cd
儿童	0.229	番薯叶	56	194	52	7	4	9
		蕹菜	143	322	179	17	6	24
		芥菜	70	483	64	8	12	5
		小白菜	124	1 853	54	9	15	15
		茄子	119	158	122	15	8	18
		辣椒	104	300	39	4	8	9
		大豆	84	1 198	42	8	11	6
		四季豆	45	535	76	2	10	5
平均	93	639	81	9	14	7		
成人	0.357	番薯叶	43	147	39	6	7	3
		蕹菜	108	243	135	13	18	5
		芥菜	53	365	48	6	9	4
		小白菜	93	1 399	40	7	12	11
		茄子	90	119	92	11	13	6
		辣椒	79	226	29	3	6	7
		大豆	63	904	32	6	8	4
		四季豆	34	404	57	2	8	4
平均	70	482	61	7	10	5		

表3 蔬菜地上部重金属的健康风险评估

Table 3 Health risk assessment of heavy metals in aboveground part of vegetables

人群 Resident group	蔬菜种类 Vegetable species	THQ_{Cu}	THQ_{Zn}	THQ_{Cr}	THQ_{As}	THQ_{Pb}	THQ_{Cd}	$TTHQ$
儿童	番薯叶	1.41	0.65	17.33	24.34	2.64	4.29	50.66
	蕹菜	3.58	1.07	59.59	55.3	6.85	6.35	132.7
	芥菜	1.76	1.61	21.44	25.46	3.37	4.95	58.59
	小白菜	3.09	6.18	17.87	31.64	4.42	14.57	77.77
	茄子	2.99	0.53	40.62	49.4	5.10	8.49	107.1
	辣椒	2.60	1.00	12.86	14.19	2.31	9.01	41.97
	大豆	2.09	3.99	14.1	26.03	3.16	5.71	55.08
	四季豆	1.12	1.78	25.37	7.36	2.99	4.83	43.45
	平均	2.32	2.13	16.9	29.6	3.8	7.23	61.98
成人	番薯叶	1.06	0.49	13.08	18.37	1.99	3.24	38.23
	蕹菜	2.70	0.81	44.99	41.75	5.17	4.79	100.2
	芥菜	1.33	1.22	16.18	19.23	2.54	3.73	28.05
	小白菜	2.34	4.66	13.49	23.89	3.33	11.00	58.71
	茄子	2.25	0.4	30.67	37.3	3.85	6.41	80.88
	辣椒	1.96	0.75	9.71	10.71	1.74	6.8	31.67
	大豆	1.58	3.01	10.65	19.66	2.39	4.31	41.6
	四季豆	0.84	1.35	19.15	5.55	2.26	3.65	32.8
	平均	1.75	1.61	20.30	22.35	2.94	5.46	54.11

子、小白菜作为对人体健康风险影响严重的蔬菜,应该适当减少对这几种蔬菜的饮食摄入。

由表3可知,儿童蔬菜消费的目标危险总系数大于成人,表明在当地蔬菜食用途径中,重金属健康风险高于成人。这与以往研究结果一致^[6],Pb、Cd和Zn通过食用途径的摄入是造成当地居民健康风险的主要原因,重金属暴露接触对儿童的健康风险高于成年人。即使儿童每日摄入蔬菜低于成人,但由于身体各组织器官尚未发育完全,尤其是代谢器官的功能性较弱,这是造成儿童因摄食蔬菜导致更高健康风险的重要原因^[2,7]。

图7为各重金属元素对目标危险总系数($TTHQ$)

的贡献比例。As、Cr、Cd在儿童和成人总贡献都超过87%,可认为在蔬菜重金属复合污染情况下,当地As、Cr、Cd造成的人体潜在风险大于其他3种重金属元素。以往研究发现,大宝山地区Cd、Zn、Pb为主要人体接触暴露的重金属^[8]。本次研究发现蔬菜的复合风险由As、Cr占据主导,另外Cd占比少于这两种重金属,但Cd更容易在蔬菜中富集和迁移,同样需要引起重视。

3 结论

(1)研究区农田土壤呈酸性,土壤重金属含量按大小排序为Zn>Pb>Cu>Cr>As>Cd,根据土壤环境筛

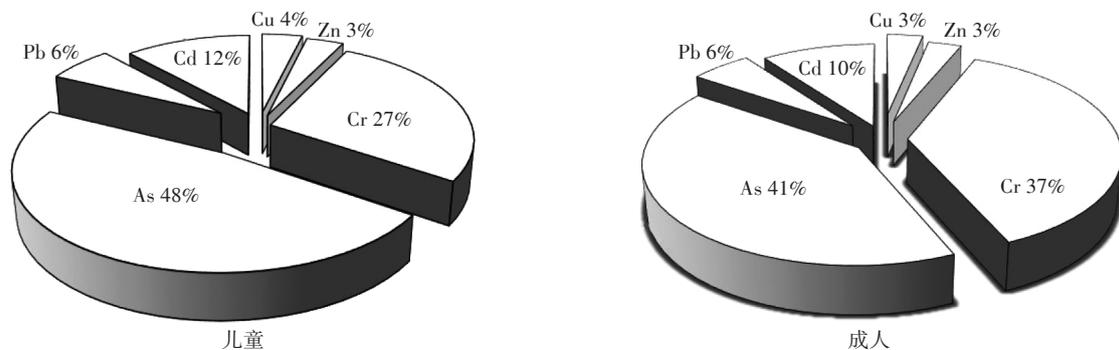


图7 各重金属对 $TTHQ$ 的贡献占比

Figure 7 The contribution of each heavy metal to $TTHQ$

选值,39个土壤样中土壤重金属超标占比分别为Cu 94.9%、Cd 89.5%、Pb 84.6%、As 69.2%、Cr 10.5%、Zn 10.3%。基于盐酸提取方法,土壤有效态重金属Cd、Cu、Zn和Pb能较好反映出上坝村周边污染土壤中重金属生物可利用性。

(2)当地8种蔬菜地上部中6种重金属元素都超过了蔬菜卫生标准(GB 13106—1994)和《食品中污染物限量》(GB 2762—2017),其中Cr、Pb、Cd超标严重,地上部的重金属含量平均值小于地下部(除Cu外)。蔬菜地下部对Cr和Cd有较强的富集能力,存在Cd、Cr的复合污染风险,其中Cd较其他重金属元素更容易从蔬菜地下部转运到地上部。

(3)蔬菜食用途径摄入的重金属超过了每日摄入允许标准的几倍到十几倍(除Zn外),并且Zn、Cu、Cr贡献每日总摄入量97%,是成人和儿童每日摄入的主要元素。食用蔬菜造成的平均目标危险系数按大小为 $THQ_{As}>THQ_{Cr}>THQ_{Cu}>THQ_{Pb}>THQ_{Cd}>THQ_{Zn}$ 。莼菜、茄子、小白菜作为造成人体健康风险的主要蔬菜品种,且地上部和地下部积累重金属超标严重,应避免选种,并减少对该蔬菜的饮食摄入。儿童每日重金属摄入量和目标危险系数均高于成人,因此摄食蔬菜的重金属健康风险高于成人,须保持关注。

参考文献:

- [1] 周泉潇,毕春娟,汪 萌,等.大气沉降对叶菜重金属的污染效应及其健康风险[J].华东师范大学学报(自然科学版),2018(2):141-150.
ZHOU Xiao-xiao, BI Chun-juan, WANG Meng, et al. Pollution effects of atmosphere deposition on heavy metals in leafy vegetables and its health risks[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2018(2):141-150.
- [2] 赵 慧,何 博,孟 晶,等.典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(12):1-13.
ZHAO Hui, HE Bo, MENG Jing, et al. Accumulation characteristics and health risks of heavy metals in vegetables of typical urbanized areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(12):1-13.
- [3] Zhou J, Liang J N, Hu Y M, et al. Exposure risk of local residents to copper near the largest flash copper smelter in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:453-461.
- [4] 王国保,鲁 荔,韦高玲,等.大宝山污灌区水体与土壤重金属污染分析与评价[J].环境科学与技术,2016,39(增刊2):444-448.
WANG Guo-bao, LU Li, WEI Gao-ling, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution for water and soils in Dabaoshan sewage irrigation area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(Suppl 2):444-448.
- [5] 王 佳,刘 斌,肖柏林,等.重庆城区市售蔬菜重金属污染评价与健康风险评估[J].生态环境学报,2018,27(5):942-949.
WANG Jia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, et al. Evaluation and health risk assessment of heavy metals pollution in vegetables sold in markets in Chongqing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5):942-949.
- [6] 秦友燕,方 芳,邓吉圣,等.2007—2011年桂林市食品中铅镉汞监测情况分析[J].中国卫生检验杂志,2013,23(16):3284-3287.
QIN You-yan, FANG Fang, DENG Ji-sheng, et al. Analysis of monitoring status of lead, cadmium and mercury in food in Guilin from 2007 to 2011[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2013, 23(16):3284-3287.
- [7] 王北洪,马智宏,冯晓元,等.北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J].食品安全质量检测学报,2015,6(7):2736-2745.
WANG Bei-hong, MA Zhi-hong, FENG Xiao-yuan, et al. Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015, 6(7):2736-2745.
- [8] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. *Science of the Total Environment*. 2009, 407(5):1551-1561.
- [9] Muchuweti A, Birkett J W, Chinyanga E, et al. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 112(1):41-48.
- [10] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517.
ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in china and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507-2517.
- [11] Cao C, Zhang Q, Ma Z B, et al. Fractionation and mobility risks of heavy metals and metalloids in wastewater-irrigated agricultural soils from greenhouses and fields in Gansu, China[J]. *Geoderma*, 2018, 328:1-9.
- [12] 余 志,陈 凤,张军方,等.锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J].中国环境科学,2019,39(5):2086-2094.
YU Zhi, CHEN Feng, ZHANG Jun-fang, et al. Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5):2086-2094.
- [13] 陈洁宜,刘广波,崔金立,等.广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J].环境科学,2019,40(12):5629-5639.
CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, et al. Mobilization of heavy metals in soil-plant system and risk assessment in Dabaoshan mine area, Guangdong Province[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12):5629-5639.
- [14] 周建民,党 志,司徒粤,等.大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1172-1176.
ZHOU Jian-min, DANG Zhi, SITU Yue, et al. Distribution and characteristics of heavy metals contaminations in soils from Dabaoshan mine area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1172-1176.
- [15] Liao J B, Wen Z W, Ru X, et al. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health

- implications in Guangdong Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 124:460-469.
- [16] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(7):1406-1412.
ZOU Xiao-jin, QIU Rong-liang, ZHOU Xiao-yong, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment in Dabaoshan mountain, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7):1406-1412.
- [17] 陈惠陆. 大宝山绿色在回归[J]. *环境*, 2018, 2:42-44.
CHEN Hui-lu. Green is back in Dabaoshan[J]. *Environment*, 2018, 2:42-44.
- [18] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 蔬菜重金属暴露接触对大宝山矿区及周边居民的健康风险[J]. *地理研究*, 2008, 27(4):855-862.
ZOU Xiao-jin, QIU Rong-liang, ZHOU Xiao-yong, et al. Exposure to heavy metals in vegetables contact with the health risks of the mining area and the surrounding Dabaoshan residents[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(4):855-862.
- [19] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(11):137-139, 145.
ZHENG Jia-jia, JIANG Xiao, ZHANG Xiao-jun. Pollution assessment of heavy metals in soil around Dabaoshan polymetallic ore deposit[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(11):137-139, 145.
- [20] Zhao H R, Xia B C, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417:45-54.
- [21] Chen A, Lin C, Lu W, et al. Well water contaminated by acidic mine water from the Dabaoshan Mine, South China: Chemistry and toxicity[J]. *Chemosphere*, 2007, 70(2):248-255.
- [22] 张晗, 靳青文, 黄仁龙, 等. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J]. *土壤*, 2017, 49(1):141-149.
ZHANG Han, JIN Qin-wen, HUANG Ren-long, et al. Characteristics of heavy metal pollution in agricultural soils and bioaccumulation in plants of Dabaoshan Mine[J]. *Soils*, 2017, 49(1):141-149.
- [23] 陶诗阳. 大宝山矿区附近流域重金属污染研究综述[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学·医学版)*, 2015, 36(1):1-9.
TAO Shi-yang. Review of heavy metal pollution in watersheds near Dabaoshan mining area[J]. *Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University(Natural Sciences, Medicine)*, 2015, 36(1):1-9.
- [24] Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, et al. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3):456-464.
- [25] Leung H M, Ye Z H, Wong M H. Survival strategies of plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi on toxic mine tailings[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(5):905-915.
- [26] US EPA. Risk-based concentration table[DB/OL]. [2019-12-10]. <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index.htm>.
- [27] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤盐酸可提取态重金属含量的空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10):71-78.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Spatial variability of soil hydrochloric acid extractable heavy metals in the Yangtze River Delta[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(10):71-78.
- [28] 黄穗虹, 田甜, 邹晓锦, 等. 大宝山矿周边污染土壤重金属生物有效性评估[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(4):125-129, 136.
HUANG Sui-hong, TIAN Tian, ZOU Xiao-jin, et al. Bioavailability assessment of heavy metals in the vicinity of Dabaoshan mine[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(4):125-129, 136.
- [29] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 大宝山矿区某农田蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(6):568-575.
ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Heavy metals pollution in vegetables grown on some farmlands around Dabaoshan mine and its healthy risk evaluation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(6):568-575.
- [30] 任艳军, 任学军, 马建军, 等. Cd/Cr复合胁迫下不同品种蔬菜对Cd和Cr积累与转运的差异研究[J]. *核农学报*, 2018, 32(5):993-1002.
REN Yan-jun, REN Xue-jun, MA Jian-jun, et al. Effects of Cd/Cr on Cd and Cr in different vegetables study on the difference between accumulation and transport[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(5):993-1002.
- [31] Guo G H, Zhang D G, Wang Y T. Probabilistic human health risk assessment of heavy metal intake via vegetable consumption around Pb/Zn smelters in Southwest China[J]. *Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(18):1-17.