

基于体外消化实验评估辣椒中常见金属元素的膳食健康风险

姚杰^a, 王泽兰^a, 杨婷^a, 黄彤彤^a, 王建莹^a, 刘霞^a, 林昌虎^a, 涂成龙^{a,b}

贵州医科大学 a. 公共卫生与健康学院, 环境污染与疾病监控教育部重点实验室 b. 毒性检测中心, 贵阳 550025

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21202

摘要:

[背景] 有害金属对农产品的污染及产生的健康风险已成为社会关注的热点, 辣椒作为我国主要的经济农产品, 对其进行健康风险评估必不可少。

[目的] 通过探讨我国辣椒主产区不同品种辣椒中常见金属元素的富集情况, 基于金属的生物可给性评估其对不同特征人群的膳食健康风险。

[方法] 通过随机采样法, 从市场上采购我国辣椒主产区的干辣椒样品, 将采集样品按辣椒形态结构将辣椒品种分为小辣椒、大板椒、二荆条、子弹头和灯笼椒, 共采集辣椒样品 667 份。检测其中常见 6 种金属元素 [砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)、镍(Ni)、铜(Cu)和锌(Zn)] 含量, 使用统计学方法进行差异性比较; 采用体外胃肠模拟消化实验, 计算辣椒中金属元素生物可给性并对其健康风险进行评估。

[结果] 辣椒中重金属 Cd 和 Ni 含量超过我国限值标准, 超标率分别为 6.1%和 22.7%, 其余金属含量处于安全范围; 不同辣椒品种间 As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量存在差异($P < 0.05$); 辣椒中 6 种金属元素生物可给性依次为 As(57.9%) > Cd(43.07%) > Zn(42.74%) > Pb(38.04%) > Ni(31.97%) > Cu(31.4%); 基于生物可给性, 采集辣椒中 6 种金属元素含量在 P_{50} 时, 辣椒中金属的危险系数依次为 Cu > Cd > As > Ni > Zn > Pb; 在 P_{90} 时, 危险系数依次为 Cd > As > Cu > Ni > Zn > Pb; 单一金属元素的危险系数及复合金属元素的总目标危险系数均小于 1, 且成人高于儿童。

[结论] 在所采集的辣椒样品中, 单一金属元素及多种金属元素非致癌性健康风险均处于安全范围, 基于胃肠阶段的生物可给性, 健康风险进一步降低。

关键词: 辣椒; 有害金属; 体外消化实验; 生物可给性; 健康风险

Evaluation of dietary health risks of metals in peppers based on physiologically based extraction test YAO Jie^a, WANG Zelan^a, YANG Ting^a, HUANG Tongtong^a, WANG Jianying^a, LIU Xia^a, Lin Changhu^a, TU Chenglong^{a,b} (a. School of Public Health, Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education b. Toxicity Testing Center, Guizhou Medical University, Guizhou, Guiyang 550025, China)

Abstract:

[Background] The pollution of agricultural products and the health risks caused by metals have become a hot spot of social concern. As China's main economic agricultural products, peppers are essential for health risk assessment.

[Objective] By exploring the enrichment of common metals in different varieties of peppers in major growing areas of China, a bioavailability-based approach is used to assess dietary health risks of common metals in groups with different characteristics.

[Methods] Through random sampling method, dried pepper samples from major pepper growing areas of China were purchased from the market, and were divided into *Hippophae*, *Capsicum annuum*, *Magnoliopsida*, *Capsicum frutescens* var, and *Capsicum* by morphological taxonomy, and a total of 667 batches of peppers were collected. Six common metals arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), nickel (Ni), copper (Cu), and zinc (Zn) were evaluated; physiologically based extraction test was designed to estimate the bioavailability of the metals in peppers and their associated dietary health risks were assessed.

基金项目

国家自然科学基金(31960507); 贵州省区域内一流学科建设项目(黔教科研发 2017[85]号)

作者简介

姚杰(1995—), 男, 硕士生;
E-mail: 328193200@qq.com

通信作者

涂成龙, E-mail: chenglongtu@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-05-10

录用日期 2021-10-29

文章编号 2095-9982(2021)12-1363-07

中图分类号 R155.3+3

文献标志码 A

引用

姚杰, 王泽兰, 杨婷, 等. 基于体外消化实验评估辣椒中常见金属元素的膳食健康风险[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(12): 1363-1369.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21202

Funding

This study was funded.

Correspondence to

TU Chenglong, E-mail: chenglongtu@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-05-10

Accepted 2021-10-29

To cite

YAO Jie, WANG Zelan, YANG Ting, et al. Evaluation of dietary health risks of metals in peppers based on physiologically based extraction test[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(12): 1363-1369.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21202

[Results] The concentrations of metals Cd and Ni in pepper exceeded the limits of China, and the disqualification rates were 6.1% and 22.7% respectively. The other metals were within the safe range; there were differences in the concentrations of As, Cd, Pb, Cu, and Zn among different pepper varieties ($P < 0.05$). The order of bioavailability of the six metals in pepper from high to low was As (57.9%) > Cd (43.07%) > Zn (42.74%) > Pb (38.04%) > Ni (31.97%) > Cu (31.4%). Based on bioavailability, when the metal concentration in pepper was at the median level, the order of hazard quotient of metals in pepper was Cu > Cd > As > Ni > Zn > Pb, and at the 90th quantile level, the order was Cd > As > Cu > Ni > Zn > Pb; the hazard quotient of single metal element and the total target hazard quotient of combined metal elements were both less than 1, and these indicators of adults were higher than those of children.

[Conclusion] In the collected pepper samples, the non-carcinogenic health risks of single metal elements and multiple metal elements are in the safe range. Based on gastrointestinal bioavailability, the dietary health risk of pepper is further reduced.

Keywords: pepper; hazardous metal; physiologically based extraction test; bioavailability; health risk

随着我国经济的高速发展,环境有害金属污染问题日趋严重,因自然和人为因素释放到环境中的有害金属易通过食物链在植物、动物和人体内累积,从而对生态环境和健康产生严重损害^[1]。环境中的有害金属可以经过各种途径进入机体,如经呼吸道、消化道和皮肤,从而危害人体健康,其中经消化道是金属吸收的主要途径^[2]。长期摄入过量砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)等有害金属会造成人体机能的功能性障碍和不可逆性损伤,国际癌症研究所(International Agency for Research on Cancer, IARC)将Cd和As定为第一类致癌物^[3]。当摄入过量铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)等微量元素也会对机体健康造成损害^[4]。

辣椒是我国主要经济农作物之一,2019年全国辣椒产地面积达2000万亩,年产量超过1800万t,居我国蔬菜作物第二位^[5]。辣椒是我国主要的辛辣调味品,根据我国平均食物消费结构和饮食习惯,喜好辣椒人群每日消费辣椒达50g^[6]。然而研究发现,辣椒对环境多种金属富集能力较强,其中辣椒果实对Cd的富集能力最强^[7]。

目前,人群有害金属的暴露研究方法是通过美国环保署提出的危险指数法,该方法可初步判断有害金属的非致癌性、致癌性暴露风险,主要以调查污染地区人群的血液、尿液和头发等生物样品的金属元素水平,采用剂量-效应关系确定金属对敏感人群的健康效应^[8]。但大量关于食品中金属污染物健康风险评价的研究中,均以食物中金属的摄入量来计算产生的健康风险^[9-10],并未结合食物中金属真正能达到机体血液循环的部分,从而往往高估了食物中金属产生的健康危害。近年来,因为体外实验法操作简单、费用低和重复性好等特点受到国内外研究者的广泛关注^[11],所以体外消化实验主要用来研究食品中金属的生物可给性^[12]。生物可给性在体外消化实验中的概念是指污染物进入人体消化系统并可被人体胃肠道溶解吸收的

量占污染物总量的比例,反映的是人体对污染物可能的最大吸收量^[13]。运用体外消化实验得出金属的生物可给性结果可在一定程度上评价生物体对污染物的吸收情况^[14]。因此,本研究广泛采集了我国辣椒主要产地的不同品种干辣椒样品,基于体外消化实验探讨辣椒中几种金属的生物可给性,并结合所得出的生物可给性结果评价辣椒中几种金属对人体产生的健康风险。研究结果将丰富和发展辣椒中金属生物可给性的理论和方法,有助于进一步评估我国辣椒中金属对人体的健康风险,为我国制定辣椒中金属的相关限值标准提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

随机通过市场及现场采购供试辣椒样品,产地来源为贵州256份(遵义、毕节、安顺,贵阳、铜仁、黔南及黔东南等地)、河南92份(柘城、商丘、漯河等)、四川60份(攀枝花、广安、成都、德阳等)、云南46份(昆明、文山、丘北等)、山东50份(枣庄、烟台、菏泽、济宁等)、新疆37份及陕西、安徽、湖南、重庆和江西等地(126份)。共采集干辣椒样品667份,其中,采集的辣椒品种按辣椒形状分为小辣椒(包括朝天椒、红太阳和小米辣等品种)(387份)、大板椒(52份)、灯笼椒(70份)、二荆条(115份)和子弹头(45份)。采集样品时,取辣椒可食部分带回实验室后,用去离子水冲洗3遍,烘干,磨碎后过100目(孔径=0.150mm),装于密封袋保存。

1.2 体外胃肠模拟实验

在总的667份辣椒样品中随机抽取41个样品,其中小辣椒11份、大板椒6份、灯笼椒8份、二荆条10份及子弹头6份。用于模拟体外胃肠消化实验(physiologically based extraction test, PBET),具体操作步骤如下。

胃阶段:称取 0.5 g 辣椒样品于 50 mL 离心管中,加入 5 mL 模拟胃液(1.25 g·L⁻¹胃蛋白酶、0.5 g·L⁻¹苹果酸钠、0.5 g·L⁻¹柠檬酸钠、420 μL·L⁻¹乳酸、500 μL·L⁻¹醋酸,20%盐酸调 pH 至 1.5),将该混合液置于 37 °C 恒温水浴箱中震荡 2 h(100 r·min⁻¹,离心半径 13 cm)。每个样品设置一个平行,每次试验添加两个空白组。

肠阶段:待胃阶段消化结束后,向离心管中加入 5 mL 模拟肠液(0.5 g·L⁻¹胰酶、1.75 g·L⁻¹胆盐),混合后用饱和 NaHCO₃ 调节 pH 至 7.0,将该混合液置于 37 °C 恒温水浴箱中震荡 4 h(100 r·min⁻¹,离心半径 13 cm),用 20%盐酸或饱和 NaHCO₃ 调节 pH,使其保持 7.0 不变。最后将离心管取出以 4500 r·min⁻¹(离心半径 13 cm)离心 15 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜,取滤液于 4 °C 低温保存待测。肠阶段消化后生物可给性由下式计算^[8]:

$$V_{BA} = \frac{C_{IV} \times V_{IV}}{C_s \times M_s} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: V_{BA} 为辣椒中金属在肠阶段的生物可给性; C_{IV} 为 PBET 实验肠消化液中所测的金属质量浓度(mg·L⁻¹); V_{IV} 为消化液的体积(L); C_s 为辣椒样品金属的总量(mg·kg⁻¹); M_s 为辣椒样品的质量(kg)。

1.3 样品中金属含量的测定

每个样品使用万分之一天平称量精确到 0.3000 g,置于洁净聚四氟乙烯消解内罐,加入 5.0 mL 浓硝酸放置过夜,盖紧消解外罐置于烘箱内 160 °C,6 h 后自然冷却。将消解液置于微控数显电热板(100 °C)赶酸至 1 mL,转移至 50 mL 容量瓶,用少量水洗涤内罐和内盖 2~3 次,合并洗涤液于容量瓶中,并用超纯水定容至刻度,混匀过 0.45 μm 滤头,于 4 °C 冰箱低温保存,待测。样品中金属含量采用电感耦合等离子体质谱仪(PerkinElmer 公司,美国)进行检测,同时为控制检测结果质量,每 100 个消解样中包括试剂空白数(4%)、代表性参考标准数(2%)及重复样品数(10%),以评估分析的准确性及精密度。As、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 的最低检出限分别为 0.002、0.002、0.02、0.05、0.2 和 0.5 mg·kg⁻¹,低于检出限的按最低检出限计算。采用北京化工大学(北京坛墨质检科技有限公司)生物成分分析标准物质(TMQC0006 辣椒)对方法准确性进行验证,所得标准物质回收率为 90%~110%。分析过程中所用试剂均为优级纯。本研究将辣椒干重折算成鲜重的比例为 1:10^[15]。

1.4 健康风险评估

1.4.1 单一金属健康风险评估 目标危险系数(target hazard quotient, THQ)以测定的人体摄入剂量与参考

剂量的比值为评价标准,如果该值大于 1,说明暴露人群存在非致癌风险,小于 1 则不存在健康风险,具体计算公式如下:

$$V_{THQ} = \frac{E_f \times E_D \times F_{IR} \times C}{V_{RFD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式(2)中, E_f 为人群暴露频率参数(365 d·年⁻¹); E_D 为暴露时间参数(70 年),通常等于人的平均寿命^[16]; F_{IR} 为辣椒的日均摄入量(g·d⁻¹),其中儿童的日均摄入量为 4.98 g·d⁻¹,成人的日均摄入量为 9.19 g·d⁻¹^[17]; C 为干重辣椒中各金属的含量(mg·kg⁻¹); V_{RFD} 为金属的参考剂量(mg·kg⁻¹·d⁻¹); W_{AB} 为人的平均体重,其中,成人的平均体重为 55.9 kg,儿童平均体重为 32.7 kg^[18]; T_A 为非致癌性暴露的平均时间(365 d·年⁻¹ × 暴露年数)。As、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 的参考剂量分别为 0.3、1、3.5、42、20 和 300 μg·kg⁻¹·d⁻¹^[19]。基于辣椒中各金属的生物可给性计算单一金属危险系数公式如下:

$$V_{THQ_{校}} = \frac{E_f \times E_D \times F_{IR} \times C}{V_{RFD} \times W_{AB} \times T_A} \times V_{BA} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式(3)中, $V_{THQ_{校}}$ 为基于辣椒中金属的生物可给性计算得出的非致癌性健康风险, V_{BA} 为辣椒中金属的生物可给性,其他参数同公式 2。

1.4.2 多种有害金属的联合健康风险 辣椒中 6 种金属的联合风险值通过计算总目标危险系数(total target hazard quotient, TTHQ)来表征,当 TTHQ 值超过 1,说明存在非致癌性风险,小于 1 则反之,TTHQ 的计算公式为:

$$V_{TTHQ} = \sum V_{THQ_i} \quad (4)$$

式(4)中: $\sum V_{THQ_i}$ 表示 i 种金属危险系数的总和。

1.5 统计学分析

采用 Excel 2010 对数据进行整理统计;使用 SPSS 22.0 软件对数据进行描述性统计分析和差异性检验(非参数法),对存在差异的元素进行两两比较;使用 Origin 2018 软件对数据作图分析。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 样品辣椒中金属的含量

按《食品安全国家标准 食品中污染物限量》GB 2762—2017、《食品中锌限量卫生标准》GB 13106—91 和《食品中铜限量卫生标准》GB 15199—94,采集的辣椒样品中,辣椒中金属 Cd 和 Ni 超标率分别为 6.1%和 22.5%,其余均未超标。辣椒中 As、Cd、Pb 和 Ni 的中位数分别为 0.020、0.131、0.040 及 1.423 mg·kg⁻¹, Cu 和 Zn 的均值分别为 8.597 和 17.662 mg·kg⁻¹, Zn 在 6 种金属中含量最高,见表 1 所示。

表 1 辣椒中常见金属富集特征描述

Table 1 Enrichment characteristics of common metals in pepper

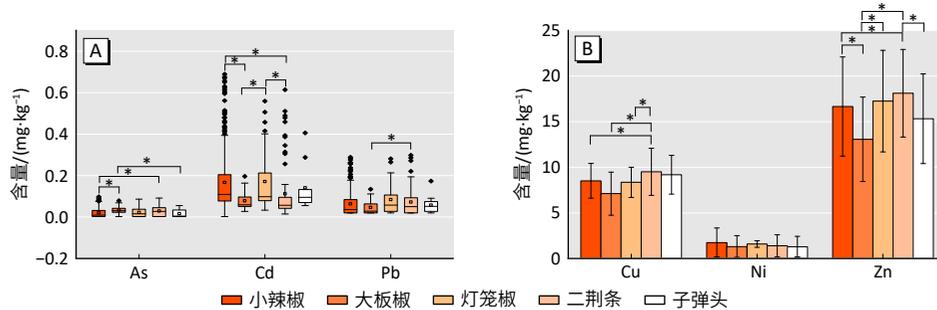
金属元素	限量值/(mg·kg ⁻¹)	检出数/份	超标数	超标率/%	$\bar{x}\pm s$	P_{10}	P_{50}	P_{90}
As	5.0	454	0	0	0.042±0.080	0.002	0.020	0.088
Cd	0.5	664	41	6.1	0.222±0.231	0.045	0.131	0.509
Pb	1.0	433	0	0	0.082±0.106	0.020	0.040	0.196
Cu	100.0	666	0	0	8.597±2.419	5.786	8.361	11.769
Ni	3.0	349	100	22.5	1.964±2.046	0.200	1.423	4.707
Zn	500.0	663	0	0	17.662±8.465	10.030	16.113	26.920

[注] 限量值参考 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》; Zn 和 Cu 限量值分别参考 GB 13106—91 和 GB 15199—94, 此限量值通过折算率折算为干重值。

2.2 不同品种辣椒中金属富集特征

由图 1 可发现, 不同辣椒品种对同种元素的富集存在差异, 采用非参数法对不同品种辣椒中 As、Cd 和 Pb 富集情况进行差异性检验(如图 1A), 对存在差异的元素进行两两比较, 小辣椒与大板椒、二荆条, 大板椒和子弹头中的 As 含量存在统计学差异($P < 0.05$), 但总体 As 含量处于安全范围; 重金属 Cd 的富集表现为灯笼椒 > 小辣椒 > 子弹头 > 大板椒 > 二荆条, 且

3 种元素中辣椒中 Cd 富集程度最为突出; 大板椒和二荆条中的 Pb 含量差异有统计学意义($P < 0.05$), 大板椒对 Pb 的富集最低。从图 1B 可以发现, 金属 Cu 的富集表现为二荆条 > 子弹头 > 小辣椒 > 灯笼椒 > 大板椒; 不同品种辣椒中的 Ni 富集程度差异无统计学意义; 辣椒中 Zn 的富集表现为二荆条 > 灯笼椒 > 小辣椒 > 子弹头 > 大板椒, Zn 在 6 种元素中富集程度最高。



[注] *表示 $P < 0.05$, 即非参数检验的两两比较后, 两辣椒品种间差异有统计学意义。图 A 表示辣椒中微量重金属元素, 图 B 表示辣椒中常量元素。小辣椒 387 份、大板椒 52 份、灯笼椒 70 份、二荆条 115 份及子弹头辣椒 45 份。

图 1 不同品种辣椒中金属富集特征

Figure 1 Enrichment characteristics of metals in different varieties of pepper

2.3 生物可给性及健康风险

2.3.1 辣椒中金属元素生物可给性

通过模拟体外胃肠消化后, 模拟消化液中不同金属的溶出率(即生物可给性)存在差异, 辣椒中各金属生物可给性平均值依次为: As(57.9%) > Cd(43.07%) > Zn(42.74%) > Pb(38.04%) > Ni(31.97%) > Cu(31.4%)。

2.3.2 辣椒中 6 种金属元素的健康风险评价

根据成人和儿童的辣椒(干重)日均摄入量, 可计算出其在 P_{50} 时, 成人摄入辣椒中 As、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 的日均摄入量分别为 0.15、0.88、0.38、78.48、18.01 和 149.34 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 儿童为 0.08、0.48、0.20、42.53、9.76 和 80.93 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$; 在 P_{90} 时, 成人摄入辣椒中 As、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 的日均摄入量分别为 0.81、4.68、1.80、108.16、43.26、247.39 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 儿童为 0.44、2.53、0.98、58.61、

23.44、134.06 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 见表 2。在非致癌性健康风险评价中, 在 P_{50} 时, Cu 的 THQ 最高, 成人和儿童分别为 0.033 和 0.031, 其对 TTHQ 的贡献率达 40.7%和 41.3%; Pb 的 THQ 最低, 其对 TTHQ 的贡献率仅为 2.6%; 在 P_{90} 时, Cd 的 THQ 最高, 成人和儿童分别为 0.084 和 0.078, 其对 TTHQ 的贡献率达 34.8%和 34.7%, 见表 3。从表 4 可看出, 暴露人群摄入大板椒中 6 种金属元素的联合风险系数在 6 个辣椒品种中最低, 在 P_{50} 时, 成人和儿童摄入大板椒的 TTHQ 分别为 0.067 和 0.062, 在 P_{90} 时, 成人和儿童摄入大板椒的 TTHQ 分别为 0.133 和 0.123; 在 P_{50} 时, 摄入灯笼椒和二荆条中 6 种金属元素对成人和儿童的 TTHQ 最高, 而在 P_{90} 时, 摄入子弹头中 6 种金属元素对成人和儿童的 TTHQ 最高。6 种金属元素的联合健康风险值 < 1。

表 2 暴露人群 6 种金属元素的日均摄入量
Table 2 Daily average intake of six metal elements in exposed populations

人群	P_{50} 时日均摄入量/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)						P_{90} 时日均摄入量/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)					
	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn
成人	0.15	0.88	0.38	78.48	18.01	149.34	0.81	4.68	1.80	108.16	43.26	247.39
儿童	0.08	0.48	0.20	42.53	9.76	80.93	0.44	2.53	0.98	58.61	23.44	134.06

[注] P_{50} 表示辣椒中金属元素含量的中位数值; P_{90} 表示辣椒中金属元素含量的第 90 分位数值。

表 3 暴露人群 6 种金属元素的非致癌性健康风险
Table 3 Non-carcinogenic health risks of six metal elements in exposed populations

人群	THQ(P_{50})						TTHQ(P_{50})	THQ(P_{90})						TTHQ(P_{90})
	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn		As	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn	
成人	0.009	0.020	0.002	0.033	0.012	0.009	0.081	0.048	0.084	0.009	0.046	0.039	0.015	0.241
儿童	0.008	0.020	0.002	0.031	0.011	0.008	0.075	0.045	0.078	0.009	0.043	0.036	0.014	0.225

[注] P_{50} 表示辣椒中金属元素含量的中位数值; P_{90} 表示辣椒中金属元素含量的第 90 分位数值。

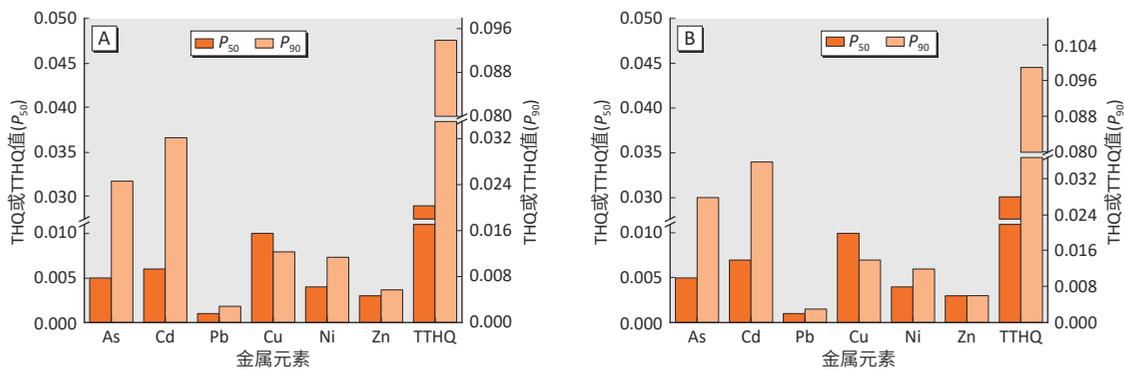
表 4 不同辣椒品种中 6 种金属元素的联合健康风险
Table 4 Combined health risks of six metal elements in different pepper varieties

品种	TTHQ(成人)		TTHQ(儿童)	
	P_{50}	P_{90}	P_{50}	P_{90}
大板椒	0.067	0.133	0.062	0.123
灯笼椒	0.082	0.203	0.076	0.188
二荆条	0.082	0.158	0.076	0.147
小辣椒	0.078	0.199	0.072	0.184
子弹头	0.076	0.263	0.070	0.244

[注] P_{50} 表示辣椒中金属元素含量的中位数值; P_{90} 表示辣椒中金属元素含量的第 90 分位数值。

2.3.3 基于生物可给性的辣椒中金属元素健康风险

从表 3 和图 2 可以计算得出, 在采集辣椒样品中, 样品金属元素含量在 P_{50} 水平时, 儿童(图 2A)和成人(图 2B)的 TTHQ 均降低 38%, 辣椒中各金属的非致癌性健康风险表现为 $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb}$; 金属含量在 P_{90} 水平时, 儿童(图 2A)和成人(图 2B)的 TTHQ 均降低 41%, 辣椒中各金属元素的非致癌性健康风险表现为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb}$, 且成人非致癌性健康风险高于儿童, 但均在安全范围内。



[注] 图 A 和图 B 分别为儿童及成人摄入辣椒中 6 种金属元素的 THQ 或 TTHQ。

图 2 基于生物可给性的辣椒中金属元素的健康风险评价

Figure 2 Health risk assessment of metal elements in pepper based on bioavailability

3 讨论

在本研究采集的辣椒样品中, 重金属 Cd 和 Ni 含量超我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的限量值。童磊等^[20]对重庆市市售辣椒健康风险研究显示, 辣椒中 Cd 平均含量为(0.094±0.042) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值为 0.195 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超标率为 85%, 与本研究辣椒 Cd 超标率(6.1%)差异较大, 原因可能是其未进行辣椒

的干、鲜重折算。侯胜男等^[8]对锌冶金区蔬菜中有害金属研究发现, 辣椒中 Cu、Pb 和 Cd 平均含量分别为(0.634±0.216)、(0.232±0.108)、(0.195±0.079) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本研究 Pb 和 Cd 含量中位数分别为 0.040、0.131 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较其富集程度低, 而 Cu 的平均含量差异较大; 李玉梅等^[21]测定不同品种辣椒中 Cu 的平均含量为 8.05~13.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 且不同品种中富集存在差异, 本研

究有相似发现。不同辣椒品种对金属的富集也存在差异,大板椒对 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的富集较低,适合种植在低污染地区,而二荆条对金属富集程度较高,选择栽种区域应尽量选在无污染地区。李欣忱等^[22]对不同品种辣椒 Cd 的迁移情况研究,结果显示辣椒品种不同,其易富集部位存在差异,金属元素在生长过程中迁移能力也不相同;崔正旭^[23] 研究结果显示,在种植土壤 Pb、Cd 污染程度不同的环境下,不同品种辣椒对 Pb、Cd 富集情况也不相同。受环境气候的影响,不同种植区域和不同品种的辣椒生长周期不一,这可能是影响辣椒中金属富集程度的原因之一。除此之外,人类活动也对其影响较大,主要表现为在施肥及农药等过程中对土壤有害金属造成大量蓄积,从而有害金属易迁徙到植物体内产生蓄积^[24]。

虽然部分有害金属存在超标现象,但当食物进入人体消化系统后,在消化液的作用下,只有一部分可以通过小肠壁到达机体内循环,另一部分则随着肠道排出体外。本研究采取体外模拟消化实验,结果显示 6 种金属生物可给性最高不超过 60%,Cu 的仅为 31.4%,所以在使用总量进行健康风险评估时,往往会高估有害元素带来的危害^[25]。侯胜男等^[8] 对冶金区蔬菜中金属生物可给性研究,结果显示在肠阶段辣椒中 Cu、Pb 和 Cd 的生物可给性分别为 25%~40%、70%和 50%; Zhuang 等^[26] 对蔬菜中 Cd 和 Pb 的生物可给性进行研究发现,6 种蔬菜中 Cd 和 Pb 的生物可给性在 20%~46%和 25%~45%之间变化,本研究有相似发现。Lv 等^[27] 对大米中 Cd 生物可给性研究发现,煮熟大米中 Cd 在胃肠阶段的生物可给性为 37.14%~52.93%; Xiong 等^[28] 对蔬菜中金属生物可给性研究发现,蔬菜中 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的生物可给性依次为 79%、76%、71%和 60%。在文献报道中,金属间的生物可给性存在较大差异,原因可能是食品中污染物的生物可给性不仅与污染物和食品的种类有关,与食品烹饪方式也存在较大关系。本研究观察到 As 和 Cd 较高的生物可给性,可能是由于除被辣椒细胞壁吸附外,大量 As 和 Cd 积累在植物细胞的液泡中,因此,在体外消化过程中,As 和 Cd 很容易从植物组织中释放出来^[29-30]。

通过计算发现,采集样品中有害金属含量在中位数水平时,6 种金属元素的非致癌风险为 Cu > Cd > As > Ni > Zn > Pb,而金属含量在第 90 分位数水平时,金属的危险系数为 Cd > As > Cu > Ni > Zn > Pb,说明辣椒中 Cd 可能存在潜在健康风险,应引起重视。侯胜男等^[8] 研究中,发现蔬菜中 Cd 的 THQ 对成人和儿童

TTHQ 贡献率(73.4%)最高,最大值均超过 1,且成人健康风险大于儿童,本研究发现与其存在差异,可能是因为其研究区域为污染区。在结合胃肠阶段生物可给性对辣椒中各金属元素的健康风险进行校正以后,各单一元素的 THQ 值明显降低,成人和儿童的 TTHQ 平均下降到约 40%,且远小于 1。因此,在广泛采集的辣椒样品中,虽然 Cd 和 Ni 存在超标现象,但真正到达机体并可能对人体产生危害的只有一部分,其中有害金属产生的非致癌风险处于安全范围。在下一步研究中,将结合生物有效性更确切地评估辣椒中有害金属对人体产生的健康风险。

参考文献

- [1] HUANG Y, WANG L, WANG W, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 651: 3034-3042.
- [2] LU Y, YIN W, HUANG L, et al. Assessment of bioaccessibility and exposure risk of arsenic and lead in urban soils of Guangzhou City, China[J]. *Environ Geochem Health*, 2011, 33(2): 93-102.
- [3] JERRETT M, BUZZELLI M, BURNETT RT, et al. Particulate air pollution, social confounders, and mortality in small areas of an industrial city[J]. *Soc Sci Med*, 2005, 60(12): 2845-2863.
- [4] 兰砥中. 湖南某典型铅锌矿区农业土壤及农作物中重金属的风险评价[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
LAN D Z. Risk assessment of heavy metals in soils and crops from a Pb/Zn mine area in Hunan Province[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [5] WANG Y, SU Y, LU S. Cd accumulation and transfer in pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in typical soils of China: pot experiments[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2019, 26(36): 36558-36567.
- [6] 王大霞, 宋影, 黄英, 等. 遵义县辣椒中镉的食用健康风险评估[J]. 贵州科学, 2014, 32(1): 88-90.
WANG DX, SONG Y, HUANG Y, et al. Edible health risk assessment of cadmium in pepper from Zunyi County[J]. *Guizhou Sci*, 2014, 32(1): 88-90.
- [7] ANTONIOUS GF. Distribution of seven heavy metals among hot pepper plant parts[J]. *J Environ Sci Health B*, 2016, 51(5): 309-315.
- [8] 侯胜男, 汤琳, 郑娜, 等. 典型锌冶金区蔬菜重金属的生物可给性及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 343-349.
HOU SN, TANG L, ZHENG N, et al. Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in vegetables of typical mining area[J]. *Acta Sci Circumst*, 2018, 38(1): 343-349.
- [9] GEBEYEHU HR, BAYISSA LD. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227883.
- [10] ZHONG T, XUE D, ZHAO L, et al. Concentration of heavy metals in vegetables and potential health risk assessment in China[J]. *Environ Geochem Health*, 2018, 40(1): 313-322.

- [11] 尹乃毅, 罗飞, 张震南, 等. 土壤中铜的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 670-677.
YIN NY, LUO F, ZHANG ZN, et al. Bioaccessibility of soil copper and its health risk assessment[J]. Asian J Ecotoxicol, 2014, 9(4): 670-677.
- [12] SUN GX, VAN DE WIELE T, ALAVA P, et al. Arsenic in cooked rice: effect of chemical, enzymatic and microbial processes on bioaccessibility and speciation in the human gastrointestinal tract[J]. Environ Pollut, 2012, 162: 241-246.
- [13] 徐笠, 陆安祥, 王纪华, 等. 食物中重金属的生物可给性和生物有效性的研究方法和应用进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 89-97.
XU L, LU AX, WANG JH, et al. Research methods and applications of bioaccessibility and bioavailability of heavy metals in food[J]. Asian J Ecotoxicol, 2017, 12(1): 89-97.
- [14] 付瑾, 崔岩山. *In vitro*系统评价胃肠液pH及土液比对铅、镉、砷生物可给性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 245-251.
FU J, CUI YS. *In vitro* model system to evaluate the influence of pH and soil-gastric/intestinal juices ratio on bioaccessibility of Pb, Cd and As in two typical contaminated soils[J]. J Agro-Environ Sci, 2012, 31(2): 245-251.
- [15] 吴燕明, 吕高明, 周航, 等. 湘南某矿区蔬菜中Pb、Cd污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2146-2154.
WU YM, LV GM, ZHOU H, et al. Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan[J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(8): 2146-2154.
- [16] JIANG Y, MA J, RUAN X, et al. Compound health risk assessment of cumulative heavy metal exposure: a case study of a village near a battery factory in Henan Province, China[J]. Environ Sci Process Impacts, 2020, 22(6): 1408-1422.
- [17] 程琪琪, 葛蔚, 李敬锁, 等. 辣椒中多环芳烃的累积特征及健康风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(2): 229-238.
CHENG QQ, GE W, LI JS, et al. Accumulation and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in pepper[J]. Environ Chem, 2018, 37(2): 229-238.
- [18] ZHENG N, WANG Q, ZHANG X, et al. Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao City, China[J]. Sci Total Environ, 2007, 387(1/2/3): 96-104.
- [19] 李有文, 王晶, 巨天珍, 等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评估[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1408-1418.
LI YW, WANG J, JU TZ, et al. Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China[J]. Chin J Ecol, 2017, 36(5): 1408-1418.
- [20] 童磊, 范明月, 程永红, 等. 重庆市万州区市售鲜辣椒中镉和铬污染现状评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6398-6401.
TONG L, FAN MY, CHENG YH, et al. Evaluation of cadmium and chromium pollution in fresh peppers from Wanzhou district of Chongqing[J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(18): 6398-6401.
- [21] 李玉梅, 李海鹏, 张连科, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 88-96.
LI YM, LI HP, ZHANG LK, et al. Contamination and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding an aluminum factory in Baotou, China[J]. Environ Monit China, 2017, 33(1): 88-96.
- [22] 李欣忱, 李桃, 徐卫红, 等. 不同辣椒品种镉吸收与转运的差异[J]. 中国蔬菜, 2017(9): 32-36.
LI XC, LI T, XU WH, et al. Differences between cadmium uptake and translocation among different pepper varieties[J]. China Veget, 2017(9): 32-36.
- [23] 崔正旭. Pb、Cd低积累萝卜和辣椒品种的筛选[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
CUI Z X. Screening of lead and cadmium low accumulation radish and pepper varieties[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [24] 杨敏, 何璐璐, 饶中秀, 等. 长期施肥对稻田土壤镉铜积累及其有效性的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 302-310.
YANG M, HE LL, RAO ZX, et al. Effects of long-term fertilization on accumulation and availability of Cd, Zn and Cu in paddy soil[J]. Res Agric Mod, 2021, 42(2): 302-310.
- [25] HORIGUCHI H, OGUMA E, SASAKI S, et al. Dietary exposure to cadmium at close to the current provisional tolerable weekly intake does not affect renal function among female Japanese farmers[J]. Environ Res, 2004, 95(1): 20-31.
- [26] ZHUANG P, LI Y, ZOU B, et al. Oral bioaccessibility and human exposure assessment of cadmium and lead in market vegetables in the Pearl River Delta, South China[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2016, 23(23): 24402-24410.
- [27] LV Q, HE Q, WU Y, et al. Investigating the bioaccessibility and bioavailability of cadmium in a cooked rice food matrix by using an 11-day rapid Caco-2/HT-29 co-culture cell model combined with an *in vitro* digestion model[J]. Biol Trace Elem Res, 2019, 190(2): 336-348.
- [28] XIONG T, DUMAT C, PIERART A, et al. Measurement of metal bioaccessibility in vegetables to improve human exposure assessments: field study of soil-plant-atmosphere transfers in urban areas, South China[J]. Environ Geochem Health, 2016, 38(6): 1283-1301.
- [29] FU J, CUI Y. *In vitro* digestion/Caco-2 cell model to estimate cadmium and lead bioaccessibility/bioavailability in two vegetables: the influence of cooking and additives[J]. Food Chem Toxicol, 2013, 59: 215-221.
- [30] PELFRÉNE A, WATERLOT C, GUERIN A, et al. Use of an *in vitro* digestion method to estimate human bioaccessibility of Cd in vegetables grown in smelter-impacted soils: the influence of cooking[J]. Environ Geochem Health, 2015, 37(4): 767-778.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)