

# 鄂西北稀土矿区粮食与蔬菜中重金属污染 风险评价

鲍丽萍<sup>1</sup>, 陈芸<sup>1</sup>, 杨海博<sup>1</sup>, 董学林<sup>2</sup>, 孙勇<sup>1</sup>, 周佳<sup>1</sup>, 周新<sup>1\*</sup>

(1. 汉江师范学院化学与环境工程学院, 十堰 442000; 2. 自然资源部稀土稀有稀散矿产重点实验室, 湖北省地质实验测试中心, 武汉 430034)

**摘要:** **目的** 调查鄂西北稀土矿区粮食作物与蔬菜中重金属污染情况及其健康风险。**方法** 对当地居民日常食用、本地种植的6种粮食及20种蔬菜进行采样, 用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对样本中具有代表性的重金属铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)及类金属砷(As)的含量进行了测定, 选用靶标危害系数法、内梅罗污染指数法、单因子污染指数法综合评价了不同作物的重金属污染风险。

**结果** 研究区粮食中大米、小麦、花生以及蔬菜中菠菜、苋菜、红薯叶等叶菜类蔬菜及茄子、小葱均受到了不同程度的重金属污染。其中粮食作物的重金属污染多为单一Cr污染, 蔬菜的污染类型多为复合型重金属污染。**结论** 健康风险评价表明食用该地区种植的大米、苋菜、红薯叶对健康产生影响的可能性极大; 食用该地区种植的小麦、油菜菜、菠菜产生重金属危害的可能性较大; 过量食用当地种植的花生、茄子、小葱也存在一定的风险。

**关键词:** 鄂西北; 稀土矿区; 重金属污染; 农作物; 风险评价

## Risk assessment of heavy metal pollution in grains and vegetables in rare earth mining areas in Northwestern Hubei

BAO Li-Ping<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>1</sup>, YANG Hai-Bo<sup>1</sup>, DONG Xue-Lin<sup>2</sup>, SUN Yong<sup>1</sup>,  
ZHOU Jia<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemistry and Environmental Engineering, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, China;  
2. Hubei Province Geological Experimental Testing Center, Key Laboratory of Rare Mineral, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430034, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the heavy metal pollution and health risks in grain crops and vegetables in rare earth mining areas in Northwestern Hubei. **Methods** Samples were collected from 6 kinds of food crops and 20 kinds of vegetables that local residents eat and grow locally. The content of representative heavy metals chromium (Cr), lead (Pb), mercury (Hg), cadmium (Cd) and metalloids arsenic (As) in the samples was determined by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the pollution risks of heavy metals in

**基金项目:** 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2021285)、十堰市引导性科研项目(109)、汉江师范学院重点科研项目(XJ2021701)、湖北省大学生创新创业训练项目(S202110518005、S202110518016)

**Fund:** Supported by the Guiding Project of Scientific Research Plan of Hubei Provincial Department of Education (B2021285), the Shiyan Guiding Scientific Research Project (109), the Key Scientific Research Project of Hanjiang Normal University (XJ2021701), and the Hubei Provincial College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Project (S202110518005, S202110518016)

\***通信作者:** 周新, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无机元素化学。E-mail: zxx8229@sohu.com

\***Corresponding author:** ZHOU Xin, Master, Associate Professor, Hanjiang Normal University, No.501 Tonghua Garden, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, China. E-mail: zxx8229@sohu.com

different crops were comprehensively evaluated by target hazard coefficient method, Nemero pollution index method and single factor pollution index method. **Results** Rice, wheat, peanut, spinach, amaranth, sweet potato leaves and other leafy vegetables, eggplant and shallot in the food crops in the study area had been polluted by heavy metals to varying degrees. Most of the heavy metal pollution of food crops was single Cr pollution, and most of the pollution types of vegetables were compound heavy metal pollution. **Conclusion** The health risk assessment shows that eating rice, amaranth and sweet potato leaves planted in this area is very likely to have an impact on health; it is more likely that eating wheat, lettuce and spinach planted in this area will cause heavy metal harm; excessive consumption of locally grown peanuts, eggplant and shallots also has certain risks.

**KEY WORDS:** Northwestern Hubei; rare earth mining areas; heavy metal pollution; crops; risk assessment

## 0 引言

在环境污染评价中, 重金属主要指铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)及类金属砷(As)等生物毒性显著的元素<sup>[1-2]</sup>, 近些年, 农作物中的重金属污染引发人们的普遍关注<sup>[3-5]</sup>, 国内外众多学者针对农产品中重金属污染的来源、类型、健康风险展开了研究, 如王小骥等<sup>[6]</sup>发现土壤重金属污染是蔬菜重金属污染的主要来源; 涂春艳等<sup>[7]</sup>发现广西南丹矿区农田的蔬菜存在不同程度的重金属污染, 以叶菜类尤其; 杨富华等<sup>[8]</sup>发现内蒙古多地区谷物与蔬菜中存在 Pb、Hg、Cd、As 的污染; 孙帅等<sup>[9]</sup>发现食用菌比蔬菜更易富集重金属, 其他针对典型矿区周边农田及市售农产品开展的重金属污染评价<sup>[10-13]</sup>还有很多。已有研究表明, 采矿区、冶炼区及矿物储藏地往往是重金属污染的高发区域<sup>[10-15]</sup>。

鄂西北稀土储量位居全国第三, 矿源位于浅层地表, 矿区有大量农业用地, 稀土元素在农作物、蔬菜、动物体内的富集较多, 前期的研究发现当地居民饮食摄入稀土元素构成健康风险<sup>[16-17]</sup>。而稀土矿藏常常伴生其他重金属矿物<sup>[10-11]</sup>, 全面评价鄂西北稀土矿区的农作物是否存在 Cr、Pb、Hg、Cd、As 等的重金属污染、是否构成居民饮食的健康风险, 对矿区当地居民有着重要的现实意义。在当地粮食成熟与蔬菜生长旺盛季节, 采集本地种植、居民日常食用的 6 种粮食及 20 种蔬菜样本, 通过电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对各类样本中的重金属元素进行检测<sup>[18]</sup>, 用靶标危害系数法(target hazard quotients, THQ)<sup>[19-20]</sup>、单因子污染指数法<sup>[12-13]</sup>、内梅罗污染指数法<sup>[12-13, 21]</sup>等方法评价这些农作物是否存在重金属污染以及带来的人体健康风险。

本研究以鄂西北稀土矿区的农作物为研究对象, 对该区域的土壤及农作物重金属污染及潜在的健康危害展开评价, 为当地的农业种植及居民的饮食健康提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本来源

采样地位于鄂西北十堰市某稀土矿区, 选取当地村

民饮食来源中常见的粮食和蔬菜, 在 12 个采样单元内随机采集具有代表性的每种农作物及其生长的土壤, 至少从 3 个不同采样单元采样, 农作物采样部位均为可食用部分。共采集土壤样本 80 件, 粮食样本包括主粮大米、小麦、玉米、红薯和杂粮黄豆、花生共 6 种, 每种 5 个样本, 共采样 30 件; 蔬菜 20 种, 每种 5 个样本, 共采样 100 件。

### 1.2 仪器与试剂

X-SeriesII型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); MWD-750 密闭式智能微波消解仪(上海元析仪器有限公司); DZF-6052 真空干燥箱(上海启前电子科技有限公司); XS104 分析天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司), Milli-Q-IQ 7000 超纯水机(美国 Millipore 公司)。

硝酸、氢氟酸、过氧化氢、盐酸(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 4 种重金属以及 1 种类金属元素的单元元素标准溶液(1000  $\mu\text{g/mL}$ , 国家有色金属及电子材料分析测试中心), 根据各元素含量特点, 逐级稀释并配制标准浓度系列。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品前处理

精确称取试样 200 mg(精确至 0.1 mg)到 50 mL 聚四氟乙烯消解罐, 尽量避免样本挂壁。分别加入优级纯过氧化氢 1 mL 和亚沸硝酸 6 mL, 盖上盖子, 放入微波消解仪中, 在 180°C 的温度下消解 45 min。然后将试样转移至 15 mL 聚四氟乙烯的消解罐中, 在电热板上将消解罐加热到 150°C, 当溶液的体积较小时加入 5 mL 硝酸, 盖好盖子, 持续加热 4 h。结束后待其冷却, 转移至 100 mL 聚四氟乙烯容量瓶中, 盖子和消解罐均用水冲洗 3~5 次, 合并于容量瓶中, 定容后摇匀待测。

#### 1.3.2 检测方法

本研究中粮食及蔬菜样本的重金属检测方法参照国家食品药品监督管理局发布的 GB 5009—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》, 选用 ICP-MS 对各样本中的 Cr、Pb、As、Hg、Cd 含量进行检测, 并以 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》为标准展开评价。通过空白溶液连续进样, 测得 Pb、Cd、Hg、

As、Cr 的检出限均为 0.020 ng/mL, 满足本研究检测的要求。

### 1.3.3 评价方法

单因子污染指数法, 计算公式为式(1):

$$P_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (1)$$

式(1)中,  $P_i$  是作物中元素  $i$  的污染指数;  $C_i$  是作物中元素  $i$  的实测浓度;  $C_0$  是作物中元素  $i$  的限量标准值, 以国家相关标准为依据, 污染评价级别见表 1。

表 1 单因子污染指数级别  
Table 1 Single factor pollution index level

级别	单因子污染指数	污染程度
1	$P_i \leq 1$	清洁
2	$1 < P_i \leq 2$	轻污染
3	$2 < P_i \leq 3$	中污染
4	$P_i > 3$	重污染

内梅罗综合污染指数法, 计算公式为式(2):

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{iave}^2 + P_{imax}^2}{2}} \quad (2)$$

式(2)中,  $P_{综}$  为内梅罗指数,  $P_{iave}$  是单项污染指数的平均值,  $P_{imax}$  是计算出的最大的单项污染指数, 见表 2。

表 2 内梅罗综合污染指数级别  
Table 2 Nemerom comprehensive pollution index level

综合污染等级	综合污染指数	污染程度
1	$P_{综} \leq 0.7$	安全
2	$0.7 < P_{综} \leq 1$	警戒线
3	$1 < P_{综} \leq 2$	轻污染
4	$2 < P_{综} \leq 3$	中污染
5	$P_{综} > 3$	重污染

危险商法, 危险商(hazard quotient, HQ)即单一重金属健康风险指数, 计算公式为式(3):

$$HQ = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD} \quad (3)$$

式(3)中,  $C$  为各重金属的含量(mg/kg);  $IR$  为农产品人均消耗量(kg/d);  $EF$  为重金属年暴露天数(d/a);  $ED$  为重金属暴露年限(70a);  $BW$  为人的平均体重(60 kg);  $AT$  为暴露总时间(365×70 d);  $RfD$  为非致癌口服参考剂量。根据当地饮食习惯及中国居民膳食指南<sup>[22]</sup>: 成人大米摄入量为 0.42 kg/d, 小麦摄入量为 0.10 kg/d, 花生、玉米、红薯、黄豆摄入量分别为 0.02、0.20、0.15、0.04 kg/d, 叶菜类、豆类蔬菜的摄入量分别为 0.3、0.05 kg/d, 茄果类及瓜果类蔬菜摄入量为 0.1 kg/d, 葱蒜类蔬菜摄入量为 0.05 kg/d。

$HQ < 1$  表明该重金属不会引起人体的健康风险,  $HQ > 1$  表明会有健康风险, 且指数越大表示该重金属对人体健康风险越大。

THQ 是美国环境保护署(2000)提出的用于评估人体通过食物摄取重金属风险的一种方法, 该系数反映了污染物对暴露人群健康的危害程度和潜在健康风险<sup>[23]</sup>。计算公式如式(4):

$$THQ = \sum HQ \quad (4)$$

式(4)中,  $THQ \leq 1$  表示重金属通过农产品途径产生的健康风险不明显,  $THQ > 1$  则表示有风险,  $THQ > 10$  表示存在慢性中毒<sup>[24]</sup>。

## 1.4 数据处理

数据分析与制表采用 IBM SPSS 25.0、Microsoft Excel 2016 等软件, 分析统计方法为方差分析和相关性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 粮食作物中重金属污染状况

粮食作物中 Cr、Pb、As、Hg、Cd 的含量情况见表 3。由结果可知: 在大米、小麦、花生、黄豆这 4 种粮食作物中, 不同元素的含量大小呈现一致趋势, 均为  $Cr > Cd > Pb > As > Hg$ , Cr 在大米、小麦和花生中的含量高于其他粮食作物, 其中大米 > 小麦 > 花生, 由国家相关标准可知此 3 种粮食作物的 Cr 含量已超国家标准的限量值(1 μg/g)。

表 3 粮食作物中重金属含量( $n \geq 3$ )  
Table 3 Content of heavy metals in grain crops ( $n \geq 3$ )

样本	重金属含量				
	Cr/(μg/g)	Pb/(μg/g)	As/(μg/g)	Hg/(ng/g)	Cd/(μg/g)
玉米	0.016±0.005	0.007±0.002	0.002±0.001	0.110±0.019	0.031±0.012
黄豆	0.036±0.001	0.020±0.008	0.003±0.001	0.350±0.057	0.022±0.011
花生	1.158±0.360	0.054±0.012	0.014±0.002	0.799±0.259	0.478±0.137
红薯	0.019±0.004	0.004±0.001	0.007±0.002	0.494±0.124	0.010±0.005
大米	1.930±0.532	0.083±0.022	0.015±0.003	8.370±2.461	0.196±0.096
小麦	1.280±0.431	0.062±0.026	0.018±0.003	6.250±1.863	0.187±0.084

## 2.2 粮食作物中重金属污染风险评价

以上述作物中 5 种污染元素含量计算它们的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数, 结果如表 4 所示。

表 4 粮食作物中重金属污染指数  
Table 4 Heavy metal pollution index in grain crops

样本	重金属单因子污染指数					$P_{综}$
	$P_{Cr}$	$P_{Pb}$	$P_{As}$	$P_{Hg}$	$P_{Cd}$	
玉米	0.02	0.04	0.00	0.01	0.03	0.03
黄豆	0.04	0.10	0.01	0.02	0.01	0.08
花生	1.16	0.27	0.03	0.04	0.10	0.85
红薯	0.04	0.02	0.01	0.05	0.01	0.04
大米	1.93	0.42	0.08	0.42	0.10	1.43
小麦	1.28	0.31	0.04	0.31	0.19	0.95

参考表 1, 样本中的大米、小麦及花生的 Cr 污染水平均属于轻污染; 参考表 2, 花生及小麦的重金属综合污染

水平达到警戒线, 大米的重金属综合污染水平为轻污染。由表 4 可知, 鄂西北稀土矿区粮食作物重金属污染程度属大米最重, 小麦和花生也存在污染, 且污染元素都为 Cr, 在其他重金属元素污染水平不高的情况下表明该地区可能存在 Cr 污染。但除了大米、小麦和花生, 其他的粮食作物却未见 Cr 超标。温国灿<sup>[25]</sup>的研究表明在红薯中 Cr 的富集主要集中在根部, 薯肉对 Cr 的富集能力最低, 本研究选取的均是可食用部位, 这也解释了红薯中 Cr 污染程度较低的原因。程蓓蓓<sup>[26]</sup>的研究表明, 玉米可食用部分 Cr 富集系数随土壤中 Cr 污染加重而减少, 本研究结果显示, 6 种粮食作物中 Cr 污染程度最低的是玉米。综合分析相关结果, 考虑本研究区土壤 Cr 污染的可能性较大, 针对矿区土壤中 5 种元素的检测证实了这一点(见表 5), 该土壤中 Cr 的含量较高, 超过了湖北省土壤 Cr 含量背景值(86  $\mu\text{g/g}$ )<sup>[27]</sup>。

## 2.3 蔬菜中重金属污染状况

在鄂西北稀土矿区采集的 20 种蔬菜中平均重金属含量如表 6 所示。

表 5 土壤中重金属含量( $\mu\text{g/g}$ ,  $n \geq 3$ )  
Table 5 Content of heavy metals in soil ( $\mu\text{g/g}$ ,  $n \geq 3$ )

重金属	Cr	Pb	As	Hg	Cd
含量	101.81±41.66	70.86±47.65	22.16±10.99	0.11±0.064	3.02±2.05

表 6 蔬菜中重金属含量( $n \geq 3$ )  
Table 6 Content of heavy metals in vegetables ( $n \geq 3$ )

样本	重金属含量				
	Cr/ $(\mu\text{g/g})$	Pb/ $(\mu\text{g/g})$	As/ $(\mu\text{g/g})$	Hg/ $(\text{ng/g})$	Cd/ $(\text{ng/g})$
白菜苔	0.049±0.013	0.016±0.006	0.004±0.001	0.666±0.368	52.743±31.026
油麦菜	0.063±0.022	0.050±0.017	0.011±0.005	0.899±0.413	168.940±96.335
芥菜	0.042±0.021	0.020±0.009	0.004±0.002	0.544±0.272	60.526±38.137
蒜苗	0.038±0.015	0.027±0.011	0.004±0.002	0.917±0.539	21.957±11.289
萝卜叶	0.094±0.042	0.038±0.017	0.017±0.005	1.038±0.612	78.263±40.157
小葱	0.044±0.020	0.022±0.013	0.006±0.002	0.876±0.532	88.437±46.029
菠菜	0.048±0.021	0.034±0.016	0.004±0.001	1.207±0.631	396.192±186.558
韭菜	0.102±0.065	0.059±0.019	0.019±0.006	1.060±0.604	29.024±13.348
毛白菜	0.051±0.027	0.020±0.008	0.003±0.001	0.516±0.272	49.692±24.536
辣椒	0.025±0.011	0.006±0.002	0.001±0.000	0.231±0.127	24.321±13.621
豇豆	0.015±0.006	0.005±0.002	0.004±0.001	0.285±0.102	16.614±7.863
四季豆	0.015±0.007	0.010±0.003	0.001±0.000	0.245±0.126	10.006±4.521
南瓜	0.012±0.006	0.008±0.003	0.000±0.000	0.278±0.137	3.118±1.375
黄瓜	0.006±0.003	0.004±0.002	0.001±0.000	0.152±0.091	3.649±1.769
茄子	0.016±0.009	0.017±0.005	0.000±0.000	0.197±0.103	282.476±136.312
丝瓜	0.012±0.005	0.008±0.003	0.000±0.000	0.215±0.117	15.872±7.926
苦瓜	0.022±0.010	0.008±0.005	0.000±0.000	1.455±0.726	6.681±3.986
西红柿	0.015±0.007	0.006±0.003	0.000±0.000	0.336±0.189	29.629±13.781
苋菜	1.989±0.952	0.230±0.105	0.139±0.109	4.448±2.151	372.600±196.173
红薯叶	1.062±0.437	0.282±0.153	0.259±0.157	9.036±5.125	203.136±113.267

根据 GB 2762—2017, 叶菜类蔬菜中的 Cr、Pb、As、Hg、Cd 限量值分别为 0.50、0.30、0.50、0.01、0.20  $\mu\text{g/g}$ , 由表 6 可知, 苋菜和红薯叶中 Cr 与 Cd 的含量分别高于国家标准限量值; 叶菜类中菠菜、茄果类中茄子(限量值 0.05  $\mu\text{g/g}$ )和鳞茎类小葱(限量值 0.05  $\mu\text{g/g}$ )的 Cd 含量也超过了国家标准(GB 2762—2017); 另外, 红薯叶中 Pb、Hg 接近国家标准(GB 2762—2017)。

## 2.4 蔬菜中重金属污染风险评价

计算各蔬菜的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数, 结果如表 7 所示。

分析表 7 数据, 在单因子污染方面, 苋菜的 Cr 污染程度属于重污染, 红薯叶的 Cr 污染程度属于中污染, 菠菜、苋菜、红薯叶及小葱的 Cd 属于轻污染, 茄子的 Cd 属于重

污染。综合污染方面, 菠菜、红薯叶、小葱的重金属综合污染水平为轻污染, 苋菜为中污染, 茄子为重污染。

众多研究表明不同蔬菜对重金属的富集能力是有差异的, 宋波等<sup>[28]</sup>发现叶菜类富集 Cd 的能力显著高于瓜果类, 王治宇等<sup>[29]</sup>的研究表明茄子对 Cd 积累量大于其他类蔬菜, 这与本研究基本一致。封保根<sup>[30]</sup>在对修复 Cr 污染土壤的植物的筛选中发现, 苋菜对 Cr 的富集能力很强, 在本研究中, 苋菜中 Cr 污染水平为重污染, 明显高于其他作物, 其原因可能就是富集系数导致的差异。

## 2.5 粮食和蔬菜摄入的健康风险

### 2.5.1 粮食作物的健康风险评价

按公式(3)~(4)计算不同粮食作物的 HQ 及 THQ, 结果如表 8 所示。

表 7 蔬菜中重金属污染指数  
Table 7 Heavy metal pollution index in vegetables

样本	重金属单因子污染指数					$P_{\text{综}}$
	$P_{\text{Cr}}$	$P_{\text{Pb}}$	$P_{\text{As}}$	$P_{\text{Hg}}$	$P_{\text{Cd}}$	
白菜苔	0.10	0.05	0.01	0.07	0.26	0.20
油麦菜	0.13	0.17	0.02	0.09	0.84	0.62
芥菜	0.08	0.07	0.01	0.05	0.30	0.23
萝卜叶	0.19	0.13	0.04	0.10	0.39	0.30
菠菜	0.10	0.11	0.01	0.12	1.98	1.44
韭菜	0.20	0.20	0.04	0.11	0.15	0.17
毛白菜	0.10	0.07	0.01	0.05	0.25	0.19
苋菜	3.98	0.77	0.28	0.44	1.86	3.00
红薯叶	2.12	0.94	0.52	0.90	1.02	1.69
豇豆	0.03	0.03	0.01	0.03	0.17	0.12
四季豆	0.03	0.05	0.00	0.02	0.10	0.08
南瓜	0.02	0.08	0.00	0.03	0.06	0.06
黄瓜	0.01	0.04	0.00	0.02	0.07	0.06
茄子	0.03	0.17	0.00	0.02	5.65	4.08
丝瓜	0.02	0.08	0.00	0.02	0.32	0.23
苦瓜	0.04	0.08	0.00	0.15	0.13	0.12
西红柿	0.03	0.06	0.00	0.03	0.59	0.43
辣椒	0.05	0.06	0.00	0.02	0.49	0.36
蒜苗	0.08	0.27	0.01	0.09	0.22	0.21
小葱	0.09	0.22	0.01	0.09	1.77	1.29

表 8 粮食作物食用健康风险指数  
Table 8 Food crop health risk index

样本	单一重金属健康风险指数					THQ
	HQ <sub>Cr</sub>	HQ <sub>Pb</sub>	HQ <sub>As</sub>	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	
玉米	0.02	0.01	0.02	0.00	0.10	0.15
黄豆	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03
花生	0.13	0.01	0.02	0.00	0.16	0.31
红薯	0.02	0.00	0.06	0.00	0.03	0.11
大米	4.50	0.17	0.35	0.20	1.37	6.59
小麦	0.71	0.03	0.10	0.03	0.31	1.19

大米中 Cr、Cd 的 HQ 分别为 4.50、1.37, 可引起较大的人体健康风险, 它的 THQ 为 6.59, 说明食用该地区生产的大米产生的健康风险极高。小麦的各项 HQ 值均未超出界限值, 但其 THQ 指数为 1.19, 表明食用该地区的小麦可能会产生综合的人体健康风险。其他粮食作物的 HQ 及 THQ 均未超标。大米中 Cd 未超标(限量值 0.2  $\mu\text{g/g}$ ), 但其 Cd 的危险商超过限量值; 小麦中 Cr 超标(限量值 1.0  $\mu\text{g/g}$ ), 但其 Cr 的危险商却未超标准值, 究其原因当地居民日常膳食以大米为主, 小麦制品的摄入量相比大米较少所致。

### 2.5.2 蔬菜摄入的健康风险评价

计算蔬菜的 HQ 及 THQ, 结果如表 9 所示。

苋菜中 Cr、As、Cd 的 HQ 分别为 3.32、2.32、1.86, 均可引起人体的健康风险, 且风险较大; 菠菜中 Cd 的 HQ 为 1.98, 红薯叶中 Cr、Cd 的 HQ 分别为 1.77、1.02, 均会引起较大的人体健康风险; 另外红薯叶中 As 的 HQ 为 4.32, 引起人体健康风险的可能性极大。油麦菜、菠菜、苋菜及红薯叶的 THQ 分别为 1.22、2.20、7.90、7.66, 食用这几种蔬菜影响人体健康的可能性很大。其中, 苋菜及红薯叶的 THQ 指数较高, 考虑到居民对于重金属的摄入还有其他途径, 比如饮用水<sup>[31]</sup>、皮肤吸收等<sup>[32]</sup>, 当 THQ 累积到

10, 即会导致重金属慢性中毒, 这一趋势值得关注。

参照表 9, 油麦菜的单一重金属健康风险指数并未超过界限值, 其他指数也无异常, 但其综合健康风险指数超过了界限值, 其健康风险应是由多种元素复合污染导致。在表 7 中, 茄子的 Cd 超标且重度污染, 小葱的 Cd 也超标, 但它们的 HQ 及 THQ 值均未超出界限值, 表明食用该地区的茄子和小葱引起健康风险的可能性较小, 这主要是日食用量不大的原因, 但它们某些指数较高, 也应注意其大量摄入的健康风险。

## 3 结 论

该矿区粮食中的大米、小麦及花生均受到了轻度的 Cr 污染。大多数叶菜类蔬菜相较于其他种类蔬菜受到的重金属污染更大, 其中菠菜、小葱、苋菜及红薯叶都受到了轻度的 Cd 污染, 茄子受到重度 Cd 污染, 苋菜及红薯叶还受到了不同程度的 Cr 污染。

食用该地区种植的大米、苋菜、红薯叶对健康产生影响的可能性极大; 食用小麦、油麦菜及菠菜产生重金属危害的可能性较大; 过量食用当地种植的花生、茄子、小葱, 也存在一定的风险。

表 9 蔬菜食用健康风险指数  
Table 9 Health risk index of vegetable consumption

样本	单一重金属健康风险指数					THQ
	HQ <sub>Cr</sub>	HQ <sub>Pb</sub>	HQ <sub>As</sub>	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	
白菜苔	0.08	0.02	0.07	0.01	0.26	0.45
油麦菜	0.10	0.07	0.19	0.01	0.84	1.22
芥菜	0.07	0.03	0.07	0.01	0.30	0.48
萝卜叶	0.16	0.05	0.33	0.02	0.39	0.95
菠菜	0.08	0.05	0.07	0.02	1.98	2.20
韭菜	0.17	0.08	0.31	0.02	0.15	0.73
毛白菜	0.09	0.03	0.05	0.01	0.25	0.42
苋菜	3.32	0.33	2.32	0.07	1.86	7.90
红薯叶	1.77	0.40	4.32	0.15	1.02	7.66
豇豆	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03
四季豆	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
南瓜	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
黄瓜	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
茄子	0.01	0.01	0.00	0.00	0.47	0.49
丝瓜	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04
苦瓜	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04
西红柿	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06
辣椒	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.07
蒜苗	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.05
小葱	0.01	0.01	0.02	0.00	0.07	0.11

建议调整该地区农产品种植结构,不宜继续种植大米、小麦及花生;不宜种植除毛白菜、白菜苔、芥菜以外的绝大部分叶菜类蔬菜,可多种植除茄子以外的瓜果类、豆类蔬菜。基于不同物种对金属富集能力的差异,可在高污染土壤种植富集能力强的作物,用于土壤修复;在低污染土壤种植积累量低的作物,降低人体摄入重金属的健康风险。

作为鄂西北较为大型的稀土矿区,稀土元素的饮食摄入已经构成了当地居民的健康风险,重金属在部分粮食与蔬菜中也呈现超标的态势,要全面评价当地居民的饮食风险,需要进一步考察本地肉类食物中的重金属含量,而由稀土及重金属构成的全膳食污染对当地居民的健康威胁更是值得持续关注的。

### 参考文献

- VARDHAN KH, KUMAR PS, PANDA RC. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives [J]. *J Mol Liq*, 2019, 290: 1111-1197.
- 于旦洋, 王颜红, 丁茯, 等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 1000-1008.  
YU DY, WANG YH, DING F, *et al.* Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in china in last ten years [J]. *Chin J Soi Sci*, 2021, 52(4): 1000-1008.
- JIANG YF, CHEN SC, HU BF, *et al.* A comprehensive framework for assessing the impact of potential agricultural pollution on grain security and human health in economically developed areas [J]. *Environ Pollut*, 2020. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114653
- 黄国鑫, 刘瑞平, 杨瑞杰, 等. 我国农用地土壤重金属污染风险管控研究进展与实践要求[J]. *环境工程*, 2022, 40(1): 216-223.  
HUANG GX, LIU RP, YANG RJ, *et al.* Research progress of risk management and control and their application requirements for farmland soil heavy metal contamination in China [J]. *Environ Eng*, 2022, 40(1): 216-223.
- 任超, 杜倩倩, 夏炎, 等. 典型矿区农用地土壤重金属污染评价分区探讨[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(12): 1562-1567, 1595.  
REN C, DU QQ, XIA Y, *et al.* Discussion on soil heavy metal pollution and quality grading of agricultural land in typical mining areas [J]. *Environ Poll Contr*, 2021, 43(12): 1562-1567, 1595.
- 王小骊, 张永志, 王钢军, 等. 蔬菜中有害重金属元素污染研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2004, 16(5): 259-262.  
WANG XL, ZHANG YZ, WANG GJ, *et al.* Advance of study on harmful heavy metal pollution on vegetables [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2004, 16(5): 259-262.
- 涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1713-1722.  
TU CY, CHAN TT, LIAO CJ, *et al.* Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in farmland vegetables near a mining area [J]. *J Environ Sci*, 2020, 39(8): 1713-1722.
- 杨富华, 杨乐, 徐晓枫, 等. 2017—2019年内蒙古地区地产谷物与蔬菜中铅、镉、总汞和总砷污染状况[J]. *卫生研究*, 2021, 50(5): 846-848.  
YANG FH, YANG L, XU XF, *et al.* Pollution status of lead, cadmium, total mercury and total arsenic in local cereals and vegetables in Inner Mongolia from 2017—2019 [J]. *J Hyg Res*, 2021, 50(5): 846-848.
- 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 等. 我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5519-5525.  
SUN S, GENG NB, GUO CC, *et al.* Accumulation characteristics and dietary exposure estimation of heavy metals in vegetables from the eastern coastal region of China [J]. *Environ Sci*, 2021, 42(11): 5519-5525.
- 张寒, 于扬, 王登红, 等. 赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5): 726-738.  
ZHANG S, YU Y, WANG DH, *et al.* Forms distribution of heavy metals and their ecological risk evaluation in soils of ion adsorption type in the rare earth mining area of Southern Jiangxi, China [J]. *Rock Mineral Anal*, 2020, 39(5): 726-738.
- 谢金亮, 张建锋, 刘永兵, 等. 白云鄂博稀土伴生矿区土壤重金属污染及其环境评价[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 92-101.  
XIE JL, ZHANG JF, LIU YB, *et al.* Heavy metal pollution and environmental assessment in the soil of the rare earth associated mining area in Bayan Obo [J]. *Sci Soil Water Conservat*, 2020, 18(2): 92-101.
- 黄钟莹, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 975-984.  
HUANG ZT, YI SW, CHEN BB, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area [J]. *Environ Sci*, 2022, 43(2): 975-984.
- 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 805-812.  
ZHANG CL, ZHANG WP, CHENG HD, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou City [J]. *Environ Chem*, 2019, 38(4): 805-812.
- LIU RP, XU YN, ZHANG JH, *et al.* Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaqingling Gold Belt, China [J]. *China Geol*, 2020, 3(3): 402-410.
- 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评估[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1127-1137.  
DENG H, WANG R, YAN MS, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil around mining area [J]. *Environ Chem*, 2021, 40(4): 1127-1137.
- 周新, 董学林, 孙勇, 等. 鄂西北某稀土矿区果蔬和肉类中稀土元素含量及健康风险评估[J]. *现代预防医学*, 2020, 47(19): 3500-3504.  
ZHOU X, DONG XL, SUN Y, *et al.* Rare earth element content and health risk assessment of fruits, vegetables and meat in a rare earth mining area in Northwestern Hubei Province [J]. *Mod Prev Med*, 2020, 47(19): 3500-3504.
- 周新, 张莹莹, 孙勇, 等. 湖北某稀土矿区农作物和饮水稀土元素含量及摄入健康风险[J]. *环境与健康杂志*, 2020, 37(7): 639-642.  
ZHOU X, ZHANG YY, SUN Y, *et al.* Contents of rare earth elements in grains and vegetables and health risk of dietary intake in a rare earth mining area in Hubei Province [J]. *J Environ Health*, 2020, 37(7): 639-642.
- 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 460-476.  
YU T, JIANG TY, LIU X, *et al.* Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology [J]. *Geol China*, 2021, 48(2): 460-476.

- [19] LIM HS, LEE JS, CHON HT. Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea [J]. *J Geochem Exp*, 2008, 96(2): 223–230.
- [20] ABBASI AM, IQBAL J, KHAN MA, *et al.* Health risk assessment and multivariate apportionment of trace metals in wild leafy vegetables from Lesser Himalayas, Pakistan [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2013, 92: 237–244.
- [21] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娟, 等. 2016-2018 年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 10(2): 648–654.  
HUANG FF, ZHANG N, ZHAO MX, *et al.* Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou from 2016 to 2018 [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 10(2): 648–654.
- [22] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 2016[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.  
Chinese Nutrition Society. *Dietary guidelines for Chinese Residents 2016* [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2016.
- [23] 刘玉莹, 屈嘉怡, 曹嘉硕, 等. 蔬菜中重金属风险评估的研究进展[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(2): 207–215.  
LIU YY, QU JY, CAO JS, *et al.* Research progress on risk assessment of heavy metals in vegetables [J]. *J Shanghai Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 50(2): 207–215.
- [24] 蔚青, 李巧玲, 李冰茹, 等. 北京市典型有机设施蔬菜基地重金属污染特征及风险评估[J]. *生态毒理学*, 2019, 14(3): 258–271.  
YU Q, LI QL, LI BR, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of typical organic facility vegetable bases in Beijing [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2019, 14(3): 258–271.
- [25] 温国灿. 不同品种甘薯对土壤重金属铬富集能力的差异[J]. *农业科技与信息*, 2021, (4): 59–61.  
WEN GC. Differences in the ability of different sweet potato varieties to accumulate heavy metal chromium in soil [J]. *Agric Sci Technol Inform*, 2021, (4): 59–61.
- [26] 程蓓蓓. 大田环境下铬(III)在壤土中的形态转化及对玉米生产的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.  
CHENG BB. Chromium fraction transformation in loess soil field and effects on maize production [D]. Xianyang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2014.
- [27] 金焰, 陈锋, 李立忠, 等. 黄石市某地区土壤重金属污染状况研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S1): 107–113.  
JIN Y, CHEN F, LI LZ, *et al.* Research on soil heavy metal pollution in a certain area of Huangshi City [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 44(S1): 107–113.
- [28] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2006, (8): 1343–1353.  
SONG B, CHEN TB, ZHENG YM, *et al.* Cadmium content and health risk analysis of vegetable soil and vegetables in Beijing [J]. *Acta Sci Circum*, 2006, (8): 1343–1353.
- [29] 王治宇, 周义之, 刘明月. 不同种类蔬菜与品种镉积累差异研究[J]. *长江蔬菜*, 2018, (8): 40–43.  
WANG ZY, ZHOU YZ, LIU MY. Research on difference of cadmium accumulation between different kinds of vegetables and vegetable cultivars [J]. *J Changjiang Veget*, 2018, (8): 40–43.
- [30] 封保根. 用于植物修复典型铬污染场地的富集植物筛选研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
FENG BG. Screening of enrichment plants for phytoremediation of typical chromium contaminated sites [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [31] 王甜甜, 靳德武, 杨建. 内蒙古某煤矿井水重金属污染特征及来源分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 45–51.  
WANG TT, JIN DW, YANG J. Heavy metal pollution characteristics and source analysis of water drainage from a mine in Inner Mongolia [J]. *Coal Geol Exp*, 2021, 49(5): 45–51.
- [32] HUANG GZ, XIE JY, LI T, *et al.* Worker health risk of heavy metals in pellets of recycled plastic: A skin exposure model [J]. *Int Arch Occ Env Health*, 2021, 94(7): 1–9.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

## 作者简介



鲍丽萍, 主要研究方向为环境工程。  
E-mail: 1597297326@qq.com



周新, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无机元素化学。  
E-mail: zxx8229@sohu.com