第 11 卷第 5 期
2021 年 10 月

中国无机分析化学
Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry

Vol. 11, No. 5
22～30

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2021.05.004

西南山地煤矿区耕地土壤-农作物重金属富集及健康风险评价

李武江[1,2] 朱四喜[1,2*] 王 众[3] 赵 斌[4]

(1. 贵州民族大学 生态环境工程学院,贵阳 550025;
2. 贵州民族大学 喀斯特湿地生态研究中心,贵阳 550025;
3. 国家海洋局 秦皇岛海洋环境监测中心站,河北 秦皇岛 066000;
4. 贵州民族大学 人文科技学院,贵阳 550025)

摘 要 为了解西南某典型山地煤矿区周边农田土壤、农作物重金属的富集情况及对当地人群健康的影响程度,采集矿区周边农田土壤样品和对应的农作物样品,测定重金属 Cr、Mn、Zn、As、Pb 的含量。运用 Nemero 指数法、潜在风险指数法对土壤重金属的污染程度进行评价;采用靶标危害系数法(THQ)评价农作物重金属对人体的健康风险。结果显示,Cr、Mn、Zn、As、Pb 分别是背景值的 1.81、1.90、2.89、1.30、0.86 倍,处于轻度污染级别,轻微危害程度。农作物重金属 Cr、Pb 和 As 含量的超标情况较严重,Zn 的含量超标相对较小。各农作物富集的重金属对人体的健康风险大小为:高粱＞玉米＞白菜＞葱＞辣椒。农作物重金属对儿童健康的危害均达到了慢性中毒;对成人健康的影响,高粱处于慢性中毒,其他农作物重金属处于产生较大影响的危害程度。农作物重金属与土壤重金属的相关性分析表明,农作物重金属的含量与土壤重金属全量并无线性关系;各重金属在农作物中的转移能力不同;Pb、As 在农作物中的转移能力较强,而 Cr 相对较弱。鉴于矿区重金属的富集情况,应尽快采取修复治理措施,为保证当地人群健康,建议当地居民不再食用和种植富集重金属严重的高粱、玉米农作物。

关键词 煤矿区;重金属;土壤污染;农作物;健康风险

中图分类号:O657.31;TH744.11 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1035(2021)05-0022-09

Heavy Metals Enrichment and Health Risk Assessment of Cultivated Soil-crops in Mountainous Coal Mining Areas of Southwest China

LI Wujiang[1,2], ZHU Sixi[1,2*], WANG Zhong[3], ZHAO Bin[4]

(*1. College of Eco-environment Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China;*
2. Institute of Karst Wetland Ecology, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China;
3. Qinhuangdao Marine Environmental Monitoring Center Station of The State Oceanic Administration, Qinhuangdao, Hebei 066000, China;
4. The College of Humanities and Science of Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract To understand the accumulation of heavy metals in soils and crops around a typical mountainous

收稿日期:2021-04-14 **修回日期**:2021-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(31560107);贵州省大学生创新创业训练计划项目(20195200760);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2018]2807)

作者简介:李武江,男,硕士研究生,主要从事矿山生态修复研究。

* **通信作者**:朱四喜,男,博士,教授,主要从事湿地生态学方面研究。E-mail:zhusixi2011@163.com

引用格式:李武江,朱四喜,王众,等.西南山地煤矿区耕地土壤-农作物重金属富集及健康风险评价[J].中国无机分析化学,2021,11(5):22-30.

LI Wujiang, ZHU Sixi, WANG Zhong, et al. Heavy Metals Enrichment and Health Risk Assessment of Cultivated Soil-crops in Mountainous Coal Mining Areas of Southwest China[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 22-30.

coal mining area in Southwest China and its influence on the health of local population, soil samples and corresponding crop samples were collected around the mining area, and the contents of Cr, Mn, Zn, As and Pb were determined. Nemero comprehensive pollution index and potential ecological risk index were used to evaluate the pollution degree of soil. Health risk assessment of heavy metal enrichment in crops was carried out by using target hazard quotient methods. Results showed that the contents of the five heavy metal elements measured were all higher than the background value of heavy metal elements in the soil of Guizhou, Cr, Mn, Zn, As and Pb were 1.81, 1.90, 2.89, 1.30 and 0.86 times of the background value respectively. The heavy metal elements in the soil were at the level of slight pollution with mild harm. In crops, the content of heavy metals Cr, Pb and As exceeds the standard value, while Zn exceeds is relatively light. The evaluation results of heavy metals in crops show that the health risks of heavy metals enriched by various crops are as follows in turn: sorghum＞corn＞cabbage＞onion＞pepper. Among the impacts of crops on adults, sorghum is at the level of chronic poisoning, while other crops are at the level of have a great impact on health. The heavy metals of all crops are at the level of chronic poisoning for children. The correlation analysis between heavy metals in crops and soil shows that the content of heavy metals in crops is not related to the total amount of heavy metals in soil. The transfer ability of heavy metals in crops is different, Pb and As have a large transfer capacity in crops, while Cr is relatively weak. For this situation of the accumulation of heavy metals in the mining area, remedial measures should be taken as soon as possible. To ensure the health of the local population, it is suggested that local residents no longer eat and plant sorghum and corn which are seriously enriched with heavy metals.

Keywords　coal mining area; heavy metals; soil pollution; crops; health risk

前言

矿产资源的开采能满足人类的工业生产需求，促进经济快速发展，但在矿产资源开采过程中会产生大量废气、废水、废渣等，如果处理不当会污染矿区周边环境，导致重金属在矿区周边的耕地土壤和农作物富集[1-2]，危害当地人群健康。重金属具有难降解的特点，会通过食物链在人体累积，体内重金属含量超标会导致身体病变，慢性中毒，严重的会使身体致癌等[3-4]。在我国就有严重的重金属污染事件，如在广东省的大宝山矿区，由于采矿活动引起土壤和农作物受到重金属的严重污染，导致矿区周边很多居民患食道癌、肝病、皮肤病等重大疾病[5]。因此，对典型煤矿区周边耕地土壤和农作物重金属的富集情况调查和对其进行健康风险评价，研究结果对矿区耕地土壤安全和当地居健康具有重要意义。

近年来，国内外学者对矿区土壤、农作物重金属污染的研究较多。赵振等[6]对某冶炼厂周边土壤重金属的研究表明，Cu、Pb、Cd 等重金属超标严重。陈凤等[7]对贵州省某锌冶炼区的耕地土壤、农作物重金属的研究结果显示，玉米地受重金属污染最为严重，水稻田次之，小麦地相对较小；小麦受重金属污染较严重，而稻米和玉米污染相对较小，矿区农作物对儿童成人都存在健康风险。蒋宗宏等[8]对贵州铜仁锰矿区土壤、蔬菜重金属的研究结果表明，矿区土壤 Mn、Hg 等均超过贵州土壤背景值，存在不同程度的污染，人群食用矿区蔬菜的健康风险程度处于可接受范围内。张迪等[9]对贵州遵义多金属矿区土壤和农作物的研究结果显示，矿区耕地土壤均受到 Ni 的污染，农作物中 Ni 对成人和儿童都存在健康风险。杨刚等[10]对四川某铅锌矿区周边的耕地土壤和农作物重金属的研究结果表明，As、Cd 对旱地、水田土壤污染较为严重，农作物对儿童造成的健康风险远高于成人。HALIM 等[11]对孟加拉国阿普卢利亚煤矿区水稻土壤和天然土壤重金属的研究表明，As、Cr 等的含量严重超标。

煤矿资源是我国较为丰富的矿产资源之一，西南地区就蕴藏有大量的煤矿资源。其中贵州六盘水地区煤炭资源丰富，开采历史悠久，素有“西南煤都”的美誉。目前，有关六盘水煤矿区周边耕地土壤、农作物重金属污染现状的研究和评价报道较少。本研究分析煤矿区周边耕地土壤（旱地）和种植较多的农作物（玉米，高粱，辣椒、白菜、葱）的 Cr、Mn、Zn、As、Pb 重金属富集情况，明确矿区周边耕地土壤的污染程度和农作物重金属对人体的健康危害程度，以期为该矿区的耕地土壤治理修复和粮食安全提供

理论依据。

1 实验部分

1.1 研究区概况

研究区位于六盘水市西北部，距市中心区约20 km。矿井开采年限已有50余年，矿区储煤极其丰富，可开采的煤炭储量一亿余吨。2005年其生产能力已达270万t/a[12]，近几年最高的原煤生产能力超过了300万t/a，属于特大型矿井，是西南地区极具代表性的大型煤矿之一。研究区海拔在1 650～2 200 m，年平均气温12.5～13.1 ℃，全年降雨量1 092.3～1 251.7 mm，四季凉爽，雨量集中，干湿季节明显属北亚热带湿润气候区，土壤类型以黄壤为主。

1.2 样品采集与测定

对研究区进行实地考察后按照采样标准[13]于2018年10月采集表层(0～20 cm)土壤样品，同时采集对应的农作物，采取蛇形布点法进行采样，每个样品按照3个平行样进行采集。采集的土样剔除土壤样品中大粒径石砾、杂草、植物根系等杂物后放入已编号的自封袋密封，采集的农作物装入已编号的大型塑料袋。样品封袋带回实验室，土样自然风干，农作物样品用清水洗去表面粘附的杂质，再用纯净水清洗3～5遍，用滤纸吸掉表面水分后放入烘箱高温烘干至恒重，风干后的样品研磨过100 μm尼龙筛，以备测试分析。采用HF-HNO_3-$HClO_4$法消解采集的样品[14-15]，采用了原子吸收分光光度计测定Cr、Mn、Zn和Pb,，原子荧光光谱测定仪测定As[15-16]。每个样重复测试3次，使用国家标准土样(GBW07401)控制测定精度，所测结果误差范围控制在±5%以内。

1.3 污染评价

1.3.1 耕地土壤重金属污染评价

土壤污染评价主要采用单因子指数法、Nemerow index指数法和潜在生态风险指数法(Potential ecological risk index)[17-19]。

1)单因子指数法，公式为

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中参数与刘巍等[18]和湛天丽等[19]使用的一致，评价结果分级标准见表1。

2)内梅罗综合污染指数，公式为，

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(c_i/s_i)^2_{\max} + (c_i/s_i)^2_{\text{ave}}}{2}} \tag{2}$$

式中参数与李俊凯等[20]使用的一致，评价结果分级标准见表1。

3)潜在生态风险评价法，公式为

E_r^i(单项重金属潜在生态危害系数)：

$$E_r^i = T_r^i \frac{C_i}{S_i} \tag{3}$$

RI(潜在生态风险指数)：

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \tag{4}$$

式中参数与刘巍和湛天丽等使用的一致[18-19]。经查阅文献可知 Zn＝Mn＝1＜Cr＝2＜ Pb＝5＜As＝10[21-23]，评价结果的分级标准见表1。

表1 E_r^i 和 RI 分级标准

Table 1 Classification standard of E_r^i and RI

P_i	内梅罗指数			E_r^i	潜在生态危害指数		
	污染等级	$P_{综}$	污染等级		单污染物环境风险程度	RI	潜在生态危害程度
≤1	无污染	≤0.7	清洁	＜40	生态危害轻微	＜150	生态危害轻微
1～2	轻微污染	0.7～1	警戒线	40～80	生态危害中等	150～300	生态危害中等
2～3	轻度污染	1～2	轻度污染	80～160	生态危害高	300～600	生态危害高
3～5	重度污染	2～3	中度污染	160～320	生态危害较高	≥600	生态危害较高
＞5	极强污染	＞3	重度污染	≥320	生态危害极高		

1.3.2 农作物重金属健康风险评价

农作物重金属评价用目标危险系数法(THQ)评价污染物对人体造成的健康风险程度，其结果Q_{HI}＜1对人体健康无影响，Q_{HI}＞1对人体健康产生影响的可能性大；Q_{HI}＞10存在慢性中毒[24]。

$$C_{DI} = \frac{C \times I \times E_D \times E_F}{W_{AB} \times T_A} \tag{5}$$

$$Q_{TH} = \frac{C_{DI}}{R_{fD}} \tag{6}$$

$$Q_{HI} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{DI}^i}{R_{fD}^i} \tag{7}$$

式中参数见表2。

表 2　目标危险系数评价法参数

Table 2　Parameters of target risk coefficient evaluation method

参数	含义	单位	取值	数据来源
C_{DI}	人体对重金属平均日摄取量	mg/(kg·d)	-	
C	农作物中重金属含量	mg/kg	-	
I	接触频率	kg/d	I_{adult}=0.15 mg/kg, I_{child}=0.1 mg/kg	[10]
E_F	暴露频率	d/a	E_F=365 d/a	[10,25]
E_D	暴露时间	E_D=70 a		[26]
W_{AB}	受体体重	kg	成年 W_{AB}= 70 kg 儿童 W_{AB}= 16 kg	[10]
T_A	平均接触时间	a	T_A= E_D×365	[25]
R_{fD}	重金属暴露参考剂量	mg/(kg·d)	Cr、Mn、Zn、As、Pb 值分别为 1.5、0.046、0.3、0.05、0.004	[27]
Q_{TH}	单个重金属的健康风险指数			
Q_{HI}	多个重金属的健康风险指数			

2　结果与分析

2.1　土壤重金属含量特征

土壤 Cr、Mn、Zn、As、Pb 的含量均值分别为 153、1126、251、20.9、26.9 mg/kg(表 3)，均高于贵州省土壤重金属背景值，5 种重金属元素的含量分别是背景值的 1.81、1.90、2.89、1.30、0.86 倍，超标倍数情况表现为 Zn＞Mn＞Cr＞As＞Pb，其中 Zn、Mn 和 Cr 的超标比较严重。所测重金属变异系数较小，表明矿区周边耕地土壤重金属空间分布较均匀。采样区域均为采矿活动区周边的耕地，由此可以判断出耕地土壤重金属的富集可能是源于采矿活动产生的粉煤灰，矸石淋溶液等废弃物中有害物质重金属的迁移沉降。矿区耕地土壤重金属富集情况不容乐观，应予以重视。

表 3　土壤重金属描述统计表

Table 3　Statistical table of soil heavy metals description

重金属	最小值/(mg·kg^{-1})	最大值/(mg·kg^{-1})	均值/(mg·kg^{-1})	标准差 SD	变异系数 CV/%	偏度	峰度	允许最大值/(mg·kg^{-1})	背景值/(mg·kg^{-1})	富集因子
Cr	86	287	153	39.09	0.26	0.93	1.52	200	84.4	1.81
Mn	616	2179	1 126	412.97	0.37	1.04	0.19		591	1.90
Zn	119	1451	251	180.49	0.72	5.28	33.9	250	86.9	2.89
As	6.4	89	20.9	13.23	0.63	2.62	10.8	25	16	1.30
Pb	7.5	135	26.9	29.1	1.08	1.86	3.25	80	31.3	0.86

2.2　土壤重金属单因子、综合污染指数及潜在生态风

由图 1a 可知，矿区周边农田土壤各重金属元素的单项污染指数依次是 Zn(2.89)＞Mn(1.9)＞Cr(1.81)＞As(1.3)＞Pb(0.86)，Zn 达到了轻度污染，Mn、Cr、As 表现为轻微污染，Pb 显示尚未污染级别。土壤重金属 Nemero 综合污染指数为 2.39，处于轻度污染程度。整体而言，矿区周边农田土壤重金属污染问题突出，应重点关注。

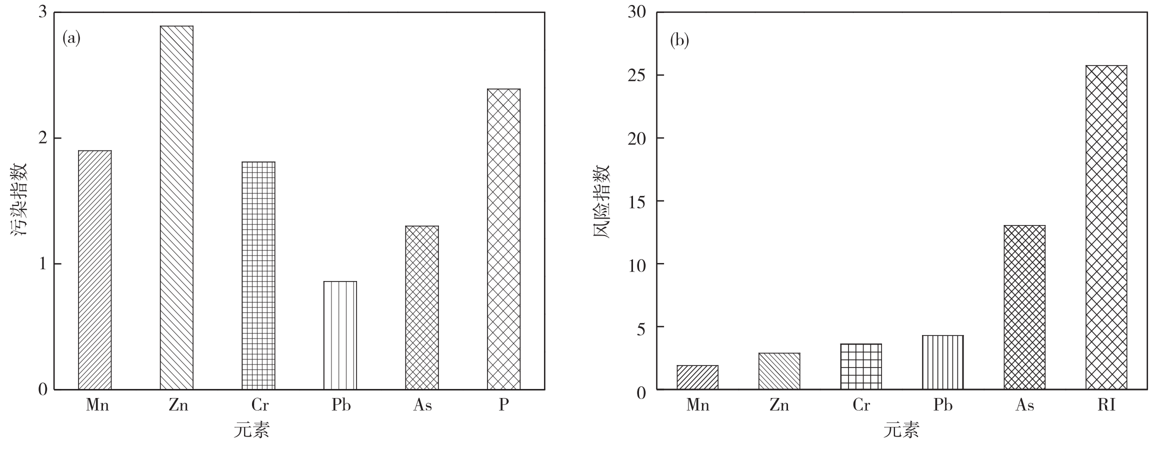

图 1　土壤内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数

Figure 1　Soil nemero composite pollution index and potential ecological risk index.

由图 1b 可知，矿区周边农田土壤各重金属的单项潜在生态风险依次是：As(13.04)＞Pb(4.29)＞Cr(3.62)＞Zn(2.89)＞Mn(1.90)，综合潜在生态风险指数 RI 为 25.75，处于轻微危害程度。因此，该矿区农田土壤重金属污染可能会对人体健康造成危害，相关部门应该重视，并实施相应的修复措施。

2.3 农作物重金属含量特征

本矿区所测的农作物重金属 Cr、Mn、Zn、As、Pb 的含量均超过了《食品安全国家标准食品中污染物限量》的标准值。玉米，高粱，辣椒、白菜、葱中重金属 Cr 含量分别是标准值的 43.18、45.26、14、20.58、16.06 倍；各农作物重金属 Zn 的含量分别是标准值的 3.6、5.0、3.42、4.1、3.0 倍；各农作物重金属 As 的含量分别是标准值的 16.06、19.34、521.02、21.02、17.86 倍；各农作物重金属 Pb 的含量分别是标准值的 61.4、41.6、17、30.85、18.2 倍。农作物中重金属的超标情况表现为 Pb 最为严重，Cr 次之，Zn 最小。

由表 4 可以看出，玉米、高粱、辣椒植株地下部分的重金属含量均远高于地上部分。重金属 Cr 在玉米、高粱、辣椒植株中的转移系数分别为 0.68，0.44，0.36，Mn 的转移系数分别为 0.37、0.40、0.37，Zn 的转移系数分别为 0.92、0.94、0.87，As 的转移系数分别为 0.60、0.87、0.82，Pb 的转移系数分别为 0.77、0.46、0.50。可以看出重金属在农作物的转移系数中 Zn 较大，As 次之，Mn 最小，表明重金属 Zn 易于从农作物的地下部分转移到地上部分，而农作物对重金属 Mn 却可能有一定的钝化作用。

表 4 农作物中重金属的含量

Table 4 Contents of heavy metals in crops

/($mg \cdot kg^{-1}$)

农作物	部位	Cr	Mn	Zn	As	Pb
玉米	地上部	21.59	133.8	71.90	8.03	12.28
	地下部	31.55	356.8	77.83	13.44	15.84
高粱	地上部	22.63	312.7	100.3	9.67	8.32
	地下部	51.33	777.0	106.4	11.12	18.02
辣椒	地上部	7.00	116.8	68.43	10.51	3.4
	地下部	19.39	311.7	78.27	12.84	6.74
白菜		10.29	148.2	81.55	10.75	6.17
葱		8.03	137.2	60.61	8.93	3.64
标准值		0.50		20[5]	0.50	0.2[5]

2.4 农作物目标危险系数法评价

从表 5 中可知，研究区农作物重金属对儿童的健康风险较高，各农作物重金属健康风险最明显的是高粱，其富集的重金属对儿童的危害指数高达 29.43，已达到了慢性中毒的程度；其次是玉米、白菜、葱和辣椒，其危害指数分别是 20.04，16.43、13.37 和 11.97，均处于慢性中毒的危害程度。同时，农作物重金属对成人人体健康危害的情况也不乐观，各农作物富集的重金属对人体健康风险大小依次为：高粱＞玉米＞白菜＞葱＞辣椒，高粱已经处于慢性中毒的危害程度，其它农作物处于对人体健康水平产生较大影响的危害程度。因此，为保证当地人群健康，应减少种植富集重金属严重的农作物。

表 5 农作物重金属摄入量和健康风险

Table 5 Crop heavy metal intake and health risks

类型	农作物	Q_{TH}					Q_{HI}
		Cr	Mn	Zn	As	Pb	
成人	玉米	0.030 8	6.231 8	0.556 0	0.344 3	6.575 9	6.869 4
	高粱	0.032 3	14.565 2	0.716 7	0.414 3	4.455 4	10.091 9
	辣椒	0.010 0	5.439 4	0.488 8	0.450 5	1.821 4	4.105 1
	白菜	0.014 7	6.902 0	0.582 5	0.460 9	3.305 8	5.633 0
	葱	0.011 5	6.391 3	0.432 9	0.382 9	1.952 4	4.585 5
儿童	玉米	0.090 0	18.176 0	1.621 5	1.004 2	19.179 7	20.035 6
	高粱	0.094 3	42.481 9	2.090 3	1.208 3	12.994 8	29.434 8
	辣椒	0.029 2	15.865 0	1.425 7	1.313 9	5.312 5	11.973 1
	白菜	0.042 9	20.130 8	1.699 0	1.344 3	9.641 9	16.429 4
	葱	0.033 5	18.641 3	1.262 7	1.116 7	5.694 4	13.374 3

2.5 土壤和农作物重金属相关性分析

表 6 中农作物重金属含量与土壤重金属含量的相关性分析显示，玉米中 Mn 与土壤中 Zn、As、Pb 表现为极显著正相关，葱的 Pb 与 Cr 的相关性显著，其它农作物中的重金属含量与对应的土壤重金属含量无明显的相关性，表明农作物的重金属含量与土壤的重金属全量无线性关系，而可能与土壤重金属的有效态相关[28]。因此，今后对土壤、农作物重金属的研究，分析重金属总量的同时还要分析重金属不同的赋存形态，农作物对不同形态的吸收程

度，方可确定其生物有效性的大小，更精确地评价重金属的污染状况。

表 6　土壤重金属与农作物重金属的相关性分析

Table 6　Correlation analysis of heavy metals in soil and crops

土壤重金属		Cr	Mn	Zn	As	Pb
玉米重金属	Cr	−0.047	−0.142	0.512	0.573	0.36
	Mn	0.055	−0.102	0.761**	0.779**	0.811**
	Zn	−0.233	−0.273	−0.371	0.082	−0.379
	As	0.441	0.007	−0.503	−0.678*	−0.638*
	Pb	−0.314	−0.194	0.216	0.382	0.221
高粱重金属	Cr	−0.501	−0.519	−0.547	−0.582	−0.355
	Mn	−0.709	0.164	−0.161	−0.275	−0.138
	Zn	−0.471	0.273	0.791	0.786	0.57
	As	−0.148	−0.401	0.057	0.133	−0.068
	Pb	−0.881*	0.004	0.547	0.521	0.489
辣椒重金属	Cr	−0.443	0.248	−0.535	0.627	−0.102
	Mn	−0.099	0.252	0.604	−0.565	−0.656
	Zn	−0.273	0.405	0.355	0.149	−0.734*
	As	−0.137	0.28	−0.124	0.158	−0.473
	Pb	0.049	0.197	−0.465	0.495	0.156
白菜重金属	Cr	0.021	−0.042	−0.106	−0.117	−0.236
	Mn	0.089	0.265	−0.231	−0.374	0.089
	Zn	0.108	0.276	−0.187	−0.345	0.133
	As	0.161	−0.081	−0.19	−0.181	−0.490*
	Pb	0.043	0.077	−0.051	−0.189	0.213
葱重金属	Cr	−0.019	−0.228	0.161	0.271	−0.242
	Mn	0.251	0.291	−0.55	−0.183	−0.159
	Zn	−0.325	−0.195	−0.746*	−0.252	−0.564
	As	−0.015	0.574	−0.243	0.256	0.162
	Pb	0.701*	0.411	0.608	0.346	0.65

注：* 表示在 0.05 级别（双尾），相关性显著；** 表示在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

2.6　重金属在土壤-农作物系统中转移因子

从重金属土壤-农作物的转移因子可看出各重金属从土壤向农作物体内转运迁移的能力[29]，图 2 中可以看出各重金属在不同农作物转移能力的大小，玉米中重金属的转移能力大小依次为 Pb＞As＞Zn＞Cr＞Mn，高粱为 Pb＞Zn＞Mn＞Cr＞As，辣椒为 As＞Zn＞Mn＞Pb＞Cr，白菜为 As＞Zn＞Pb＞Mn＞Cr，葱 As＞Pb＞Zn＞Mn＞Cr。整体而言，Pb、As 在各农作物中的转移能力较强；高粱、玉米中重金属的转移能力较强。

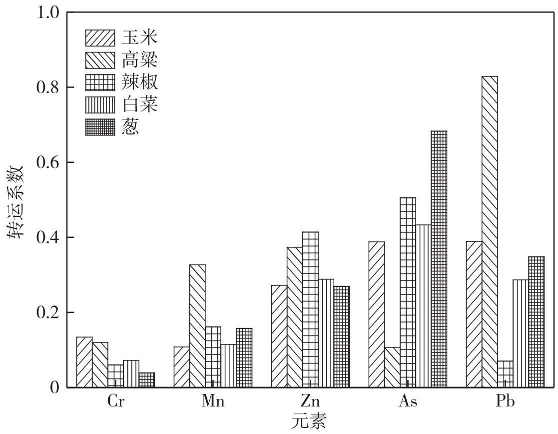

图 2　农作物重金属元素含量的转运系数

Figure 2　Tansfer coefficient of heavy metal element content of crops.

3　讨论

研究区耕地土壤重金属含量均高于贵州耕地土壤背景值，其中 Zn、Mn 和 Cr 的超标情况较严重。内梅罗污染指数和潜在生态风险指数对矿区土壤重金属的评价结果显示土壤重金属处轻度污染，轻微危害程度。煤矿区耕地土壤重金属的富集很可能是长期堆放的矸石被雨水冲刷，淋溶液流到耕地，重金属元素在土壤里迁移沉降才导致其重金属含量的升高；洗选厂在运行的过程也会产生较多的煤泥水、粉煤灰，周边耕地土壤重金属含量的严重富集很可能是早期部分煤泥水渗到其中以及矿区机械损耗与粉煤灰的长期沉降所导致[10,13,30]，研究区农作物重金属的含量均超过了食品安全标准值，农作物中 Cr、Pb 和 As 的超标情况比较严重，与耿丹等[31]对织金县煤矿区农作物重金属的研究显示 Cr 是农作物富集较严重的重金属的结果相一致。农作物重金属富集的原因可能是转移自土壤的重金属，也可能是来自矿区煤粉尘的沉降累积[5]。

重金属对人体影响最直接、显著的途径是通过食物摄入体内[32]，各作物品种对重金属的富集能力不同[33]。研究区农作物重金属对儿童的危害均处于慢性中毒的危害程度，农作物对成人健康的影响

中，高粱达到了慢性中毒的危害程度，其他农作物处于对人体健康水平产生较大影响的危害程度。针对富集重金属较为严重的高粱，玉米等农作物，矿区周边的居民应该少种或者不种，换种其他对重金属具有较强耐性、抗性的农作物以减小农作物重金属对人体健康的危害。

土壤重金属含量与农作物重金属含量的相关显著性表明，农作物的重金属含量与土壤的重金属全量的直接关系不明显[34]，可能与土壤重金属的化学形态和生物有效性有关[35]。重金属Pb、As在农作物中的转移能力较大，而Cr相对较小。因此，针对不同的重金属元素，要考虑影响其转运能力的各种因素，如土壤的各种形态及土壤pH值、土壤酶活性等。针对在农作物中转移能力较强的重金属Pb、As，应作为优先考虑修复的重金属元素。所研究的农作物中，高粱对人体的危害较为严重，辣椒对人体的危害相对较小。农作物富集重金属对人体健康的危害较大，应对矿区耕地土壤重金属进行生态治理修复，如加入钝化剂，改良剂等减少重金属进入农作物的能力。

4 结论

矿区周边耕地土壤重金属Cr、Mn、Zn、As、Pb的富集问题较为突出，含量均超出贵州耕地土壤背景值；农作物重金属的含量均超过了食品安全标准值。耕地土壤污染处于轻度污染，轻微危害程度；农作物重金属对儿童的健康危害均已达到慢性中毒的程度，高粱重金属对成人的健康危害处于慢性中毒，其他农作物重金属对成人的健康危害处于产生较大影响的危害程度，农作物对儿童的健康危害远高于对成年人的健康危害。建议矿区周边的居民不要再食用和种植富集重金属严重的高粱、玉米农作物；相关部门尽快对土壤重金属采取修复治理措施以减少土壤、农作物重金属富集对人体的危害。

参考文献

[1] LÜ J, JIAO W B, QIU H Y, et al. Origin and spatial distribution of heavy metals and carcinogenic risk assessment in mining areas at You'xi County southeast China[J]. Geoderma, 2018, 310: 99-106.

[2] 李静，俞天明，周洁，等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学，2008，29(8)：2327-2330.
LI Jing, YU Tianming, ZHOU Jie, et al. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29(8): 2327-2330.

[3] 丛鑫，雷旭涛，付玲，等. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地球与环境，2017，45(3)：329-335.
CONG Xin, LEI Xutao, FU Ling, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou[J]. Earth and Environment, 2017, 45(3): 329-335.

[4] REYNDERS H, BERVOETS L, GELDERS M, et al. Accumulation and effects of metals in caged carp and resident roach along a metal pollution gradient[J]. Science of the Total Environment, 2008, 391(1): 82-95.

[5] 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 Xiaojin, QIU Rongliang, ZHOU Xiaoyong, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment in Dabao mountain, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7): 1406-1412.

[6] 赵振，史烨弘，毛小晶，等. 某冶炼厂周边土壤重金属污染评价分析及源解析研究[J]. 中国无机分析化学，2020，10(4)：22-27.
ZHAO Zhen, SHI Yehong, MAO Xiaojing, et al. Characteristics assessment and source analysis of heavy metal pollution in soil surrounding a smelter[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(4): 22-27.

[7] 陈凤，董泽琴，王程程，等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学，2017，38(10)：4360-4369.
CHEN Feng, DONG Zeqin, WANG Chengcheng, et al. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4360-4369.

[8] 蒋宗宏，陆凤，马先杰，等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报，2020，37(2)：293-300.
JIANG Zonghong, LU Feng, MA Xianjie, et al. Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren county, Guizhou province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(2): 293-300.

[9] 张迪，周明忠，熊康宁，等. 贵州遵义松林Ni-Mo多金属矿区土壤Ni污染及农作物健康风险评价[J]. 农业环境科学学报，2019，38(2)：356-365.

ZHANG Di, ZHOU Mingzhong, XIONG Kangning et al. Risk assessment of nickel in soils and crops around the Ni-Mo polymetallic mining area in Songlin, Zunyi, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(2): 356-365.

[10] 杨刚，沈飞，钟贵江，等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报，2011. 31(9)：2014-2021.
YANG Gang, SHEN Fei, ZHONG Guijiang, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2014-2021.

[11] HALIM M A, MAJUMDE R R I, ZAMAN M N. Paddy soil heavy metal contamination and uptake in rice plants from the adjacent area of Barapukuria coal mine, northwest Bangladesh[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015(8): 3391-3401.

[12] 毛海涛. 贵州典型矿区煤矸石自然风化过程中汞的环境效应初步分析[D]. 贵阳：贵州大学，2009.
MAO Haitao. Preliminary analysis of environmental effects of mercury in natural weathering of coal gangue in typical mining areas of Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.

[13] 杨艳，吴攀，李学先，等. 贵州织金县贯城河上游煤矿区富硒高镉土壤重金属的分布特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志，2018，37(6)：1797-1806.
YANG Yan, WU Pan, LI Xuexian, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in selenium-rich soil with high cadmium content of coal mining area in upper reaches of Guancheng river in Zhijin county, Guizhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1797-1806.

[14] 姜玉玲，阮心玲，杨玲，等. 开封市城市土壤剖面 Hg、As 和 Sb 分布特征分析[J]. 环境化学，2017，36(05)：1036-1046.
JIANG Yuling, RUAN Xinling, YANG Ling, et al. Distribution of Hg, As and Sb concentrations in urban soil profiles of Kaifeng city, Henan province[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(05): 1036-1046.

[15] 赵斌，朱四喜，李相兴，等. 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染现状评估[J]. 环境化学，2018，37(10)：2219-2229.
ZHAO Bin, ZHU Sixi, LI Xiangxing, et al. Assessment of heavy metal pollution in the surface soils of different land use patterns in Caohai, Guizhou[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(10): 2219-2229.

[16] 石奥. 测定土壤中重金属元素时前处理方法的改进[J]. 中国无机分析化学，2016，6(4)：4-7.
SHI Ao. Improvement in the pretreatment method for the determination of heavy metal elements in soil[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2016, 6(4): 4-7.

[17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[18] 刘巍，杨建军，汪君，等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. 环境科学，2016，37(5)：1938-1945.
LIU Wei, YANG Jianjun, WANG Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in open cast mine of east Junggar Basin in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1938-1945.

[19] 湛天丽，黄阳，滕应，等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报，2017，48(02)：474-480.
ZHAN Tianli, HUANG Yang, TENG Ying, et al. Pollutioncharacteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 474-480.

[20] 李俊凯，张丹，周培，等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学，2018，39(8)：3845-3853.
LI Junkai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3845-3853.

[21] 徐争启，倪师军，庹先国，等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，2008(2)：112-115.
XU Zhenqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation ofheavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008(2): 112-115.

[22] 赵小健. 基于 Hakanson 潜在生态风险指数的某垃圾填埋场土壤重金属污染评价[J]. 环境监控与预警，2013，5(4)：43-44，49.
ZHAO Xiaojian. Pollution evaluation of heavy metals in soil of landfill site based on the potential ecological risk index proposed by Hakanson[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2013, 5(4): 43-44, 49.

[23] 郑娜，王起超，郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报，2007，27(4)：672-678.

ZHENG Na, WANG Qichao, ZHENG Dongmei. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(4): 672-678.

[24] 纪小凤,郑娜,王洋,等.有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险[J].环境科学,2015,36(10):3845-3851.

JI Xiaofeng, ZHENG Na, WANG Yang, et al. Accumulation of mercury in soil-maize system of non-ferrous metals smelting area and its related risk assessment[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3845-3851.

[25] US EPA. Superfund public health evaluation manual: EPA/540/1-86/060[R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1986, 1-52.

[26] 李一蒙,马建华,刘德新,等.开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(3):1037-1044.

LI Yimeng, MA Jianhua, LIU Dexin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1037-1044.

[27] 谢团辉,郭京霞,陈炎辉,等.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[J].农业环境科学学报,2019,38(3):544-554.

XIE Tuanhui, GUO Jingxia, CHEN Yanhui, et al. Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining area in Fujian province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3): 544-554.

[28] 邹鲤岭,程先锋,齐武福.云南个旧锡矿区农田土壤和农作物重金属污染研究[J].西南农业学报,2017,30(2):409-416.

ZOU Liling, CHENG Xianfeng, QI Wufu. Investigation of heavy metals of farmland soil and crops in stannary of Gejiu in Yunnan[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(2): 409-416.

[29] HARRISON R M, CHIRGAWI M B. The assessment of air and soil as contributors of some trace metals to vegetable plants Ⅲ: Experiments with field-grown plants[J]. Science of the Total Environment, 1989, 83(1): 47-62.

[30] 徐昌,李钟玮.大庆地区城市污泥中重金属元素含量水平调查与分析[J].中国无机分析化学,2013,3(3):33-36.

XU Chang, LI Zhongwei. Survey andanalysis of heavy metal element level of the sludge in Daqing municipal area[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2013, 3(3): 33-36.

[31] 耿丹.织金县煤矿区土壤-农作物重金属污染特征及农作物食用风险评价研究[D].贵阳:贵州师范大学,2015.

GEN Dan. Characteristics of heavy metals pollution on soil-crop system and assessment of health risks for crops in coal mining area of Zhijin country[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2015.

[32] HOUGH R L. Assessing potential risk of heavy metal exposure from consumption of home-produced vegetables by urban populations[J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112(2): 215-221.

[33] 谢正苗,李静,陈建军,等.中国蔬菜地土壤重金属健康风险基准的研究[J].生态毒理学报,2006,1(2):172-179.

XIE Zhengmiao, LI Jing, CHEN Jianjun, et al. Study on guidelines for health risk to heavy metals in vegetable plantation soils in China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2006, 1(2): 172-179.

[34] 刘意章,肖唐付,熊燕,等.西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J].环境科学,2019,40(6):2877-2884.

LIU Yizhang, XIAO Tangfu, XIONG Yan, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2877-2884.

[35] FAIRBROTHER A, WENSTEL R, SAPPINGTON K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 68(2): 145-227.