

doi: 10.11720/wtyht.2020.1297

唐世琪, 万能, 曾明中, 等. 恩施地区土壤与农作物硒镉地球化学特征[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 607-614. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1297>

Tang S Q, Wan N, Zeng M Z, et al. Geochemical characteristics of selenium and cadmium in soil and crops in Enshi area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 607-614. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1297>

恩施地区土壤与农作物硒镉地球化学特征

唐世琪^{1,2,3}, 万能⁴, 曾明中⁴, 杨柯^{1,2,3}, 刘飞^{1,2,3},
彭敏^{1,2,3}, 李括^{1,2,3}, 杨峥^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 河北廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球表层碳—汞地球化学循环重点实验室, 河北廊坊 065000; 4. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034)

摘要: 恩施州已开展的1:25万土地地球化学调查结果显示, 恩施地区表层土壤中硒含量丰富, 但镉含量同样较高。笔者以该地区3950件表层土壤及362件作物硒、镉等含量指标为基础, 讨论了硒、镉元素地球化学特征, 共生成因以及不同种类作物对两种元素的吸收富集能力。结果表明, 土壤中硒、镉呈伴生关系, 含量分布主要受控于该地区二叠系发育的黑色岩系成土母质, 赋存状态与土壤中的有机质和硫化物密切相关。不同作物生物富集系数对比结果显示, 银杏、玉米和茶叶对硒的吸收能力高于镉, 可作为恩施地区富硒农产品开发的优选作物, 同时还应考虑土壤的pH值, 中碱性土壤农产品镉富集风险较低。此外, 硒对于镉有解毒作用, 高硒环境将会显著降低镉对人体的健康风险。

关键词: 恩施; 表层土壤; 硒; 镉; 地球化学特征; 生物富集; 健康效应

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)03-0607-08

0 引言

硒(Se)元素在增强机体免疫力、抗氧化、抗衰老、防癌和抗癌等方面有着显著作用^[1-2], 湖北恩施发育有全世界唯一探明的沉积型独立硒矿床——渔塘坝硒矿床^[3]以及丰富的富硒土地资源, 拥有发展富硒产业得天独厚的条件。

1:25万土地地球化学调查现已覆盖恩施州总面积的67.58%, 面积约16341 km²。调查结果显示, 恩施州的土壤除了硒含量丰富以外, 还富集了多种重金属元素, 其中以镉元素为首。镉属于易积蓄性元素, 引起慢性中毒的潜伏期可达10~30年之久, 镉进入人体会使骨骼中的钙大量流失, 引起骨质疏松、骨骼萎缩、关节疼痛, 镉中毒还可引起肾功能障碍、贫血、高血压、肺气肿等^[4-5]。

虽然前人在恩施地区已开展了大量的研究, 但多为小范围专题性研究^[6-14], 不能反映土壤元素的区域整体分布规律, 且关注的主要是硒元素, 镉元素鲜有关注。笔者依托恩施州1:25万土地地球化学调查数据, 探讨了表层土壤中硒、镉元素地球化学特征, 分析了不同农作物对于硒、镉的富集能力以及硒、镉共生的健康效应, 以为恩施州硒资源的开发利用提供基础数据与合理化建议。

1 研究区概况

区内以沉积岩为主, 仅在走马坪背斜核部出露小面积中元古界冷家溪群浅变质岩, 岩性主要为板岩、千枚岩等; 盖层以震旦系一中三叠统海相碳酸盐岩沉积为主, 夹碎屑岩。震旦系地层主要出露于长阳背斜和走马坪背斜核部。晚震旦世, 随着早震旦

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-12-12

基金项目: 中国地质调查局项目“粤桂湘鄂1:25万土地质量地球化学调查”(12120114062801)、“全国土地质量地球化学调查成果集成与服务应用”(DD20190518)

作者简介: 唐世琪(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境地球化学。Email: 642191779@qq.com

世冰川的消融,海侵扩展,继滨—浅海相碎屑岩沉积之后,转变为台地相碳酸盐岩沉积,其中上震旦统至奥陶系主要为浅海台地相碳酸盐岩,夹少量泥砂质碎屑岩,下寒武统下部发育牛蹄塘组黑色岩系;志留系及泥盆系主要为浅海陆棚相及滨岸相砂质、粉砂质及泥质碎屑岩;石炭系及二叠系主要为浅海台地相碳酸盐岩、浅海台盆相硅质岩与滨海(岸)相泥砂

质碎屑岩;三叠系下统及中统主要为浅海台地相及潮坪泻湖相碳酸盐岩和泥质、粉砂质碎屑岩;三叠系上统至第四系为陆相沉积,其中三叠系上统及侏罗系为一套内陆湖沼相泥砂质碎屑岩,白垩系上统为河湖相砂砾、粉砂及泥质碎屑岩,第四系为残积、坡积、冲积及冰川堆积,零星分布(图 1)。

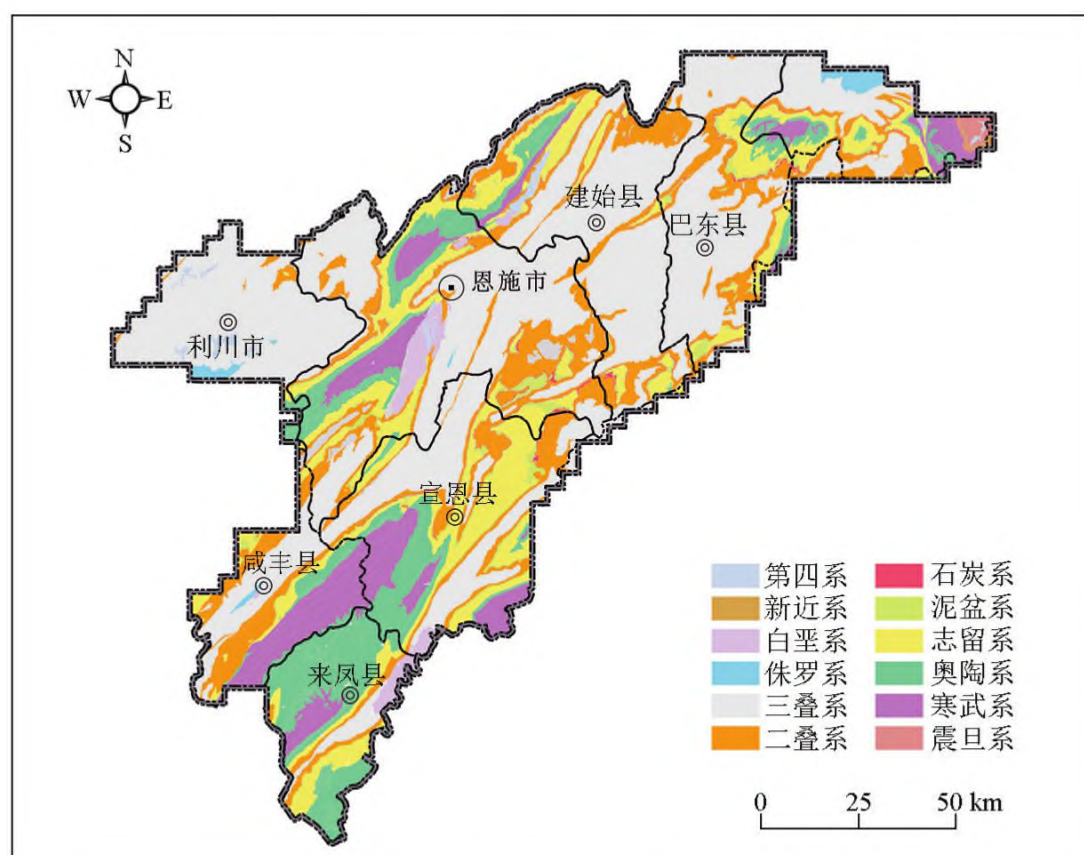


图 1 研究区地层分布

Fig. 1 Stratigraphic map of the study area

2 样品采集与分析

样品采集执行《多目标区域地球化学调查规范》(1:25 万)有关标准,以 1 个样/km² 的采样密度,1 个样/4 km² 组合分析密度,累计获得组合分析样 3 950 件,单件样品的采样深度 0~20 cm。

同时,在早稻、玉米、红薯、辣椒、土豆、大蒜、茶叶、银杏成熟季节,协同采集作物可食部分及根系土样品。累计采集各类作物样共 362 件,其中大宗农作物早稻 18 件、玉米 120 件,果蔬类作物红薯 38 件、辣椒 60 件、土豆 70 件、大蒜 20 件,经济作物茶叶 16 件、银杏 20 件。表层土壤和根系土测定 Se、Cd、pH、OrgC、S 等指标,作物样测定 Se、Cd 等。

样品由湖北省地质实验研究所(武汉综合岩矿测试中心)分析,分析质量严格按《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)(DZ/T 0258—2014)》执行,按规定程序进行的分析数据质量评估显示分析数据可靠,通过验收和数据库入库审核。

3 结果与讨论

3.1 表层土壤硒、镉地球化学特征

恩施地区表层土壤硒平均含量为 0.72×10^{-6} ,远高于全国土壤硒平均值(0.29×10^{-6})和湖北省土壤硒平均含量(0.275×10^{-6})^[15]。参照谭见安的划分标准^[16](表 1),恩施绝大部分地区属于富硒区(61.87%)和足硒区(35.11%),硒不足和潜在硒不足地区只占调查区总面积的 0.08%和 0.38%,硒中毒区面积占比为 2.56%。恩施地区表层土壤镉平均含量为 0.78×10^{-6} ,同样远高于全国土壤镉平均含量(0.097×10^{-6})和湖北省土壤镉平均含量(0.172×10^{-6})^[15]。参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值(试行)》(GB 15618-2018)中镉的风险筛选值中“其他”用地类型标准,恩施镉有风险区占比高达 79.49%,无风险区只占 20.51%。

土地地球化学调查表明(图 2),土壤硒和镉空间分布上具有高度一致性。不同地质单元统计结果

显示(图 2 和表 2), 硒、镉高值分布区与二叠系地层分布有着很好的对应关系, 二叠系地层区土壤中硒和镉含量最高, 且在不同地质单元呈现出相似的变化规律, 说明恩施地区表层土壤硒、镉含量分布主要

受控于二叠系成土母质。二叠系孤峰组、大隆组、茅口组、栖霞组等广泛发育硅质岩建造的黑色岩系, 推测硒与镉的赋存与有机碳和硫化物密切相关。

表 1 研究区土壤硒、镉判断标准及结果

Table 1 Determination criteria and results of soil selenium and cadmium in study area

Se 判断标准 ^[16]		恩施地区		Cd 判断标准 ^[17]		恩施地区		
$w(\text{Se})/10^{-6}$	效应	面积/ km^2	比例/%	$w(\text{Cd})/10^{-6}$	效应	面积/ km^2	比例/%	
≤ 0.125	硒不足	13.07	0.08	$\text{pH} \leq 7.5$	≤ 0.30	无风险	2101.58	12.86
0.125~0.175	潜在硒不足	62.10	0.38		> 0.30	有风险	12410.89	75.95
0.175~0.40	足硒	5737.33	35.11	$\text{pH} > 7.5$	≤ 0.60	无风险	1249.36	7.65
0.40~3	富硒	10110.18	61.87		> 0.60	有风险	579.17	3.54
> 3	硒中毒	418.33	2.56					

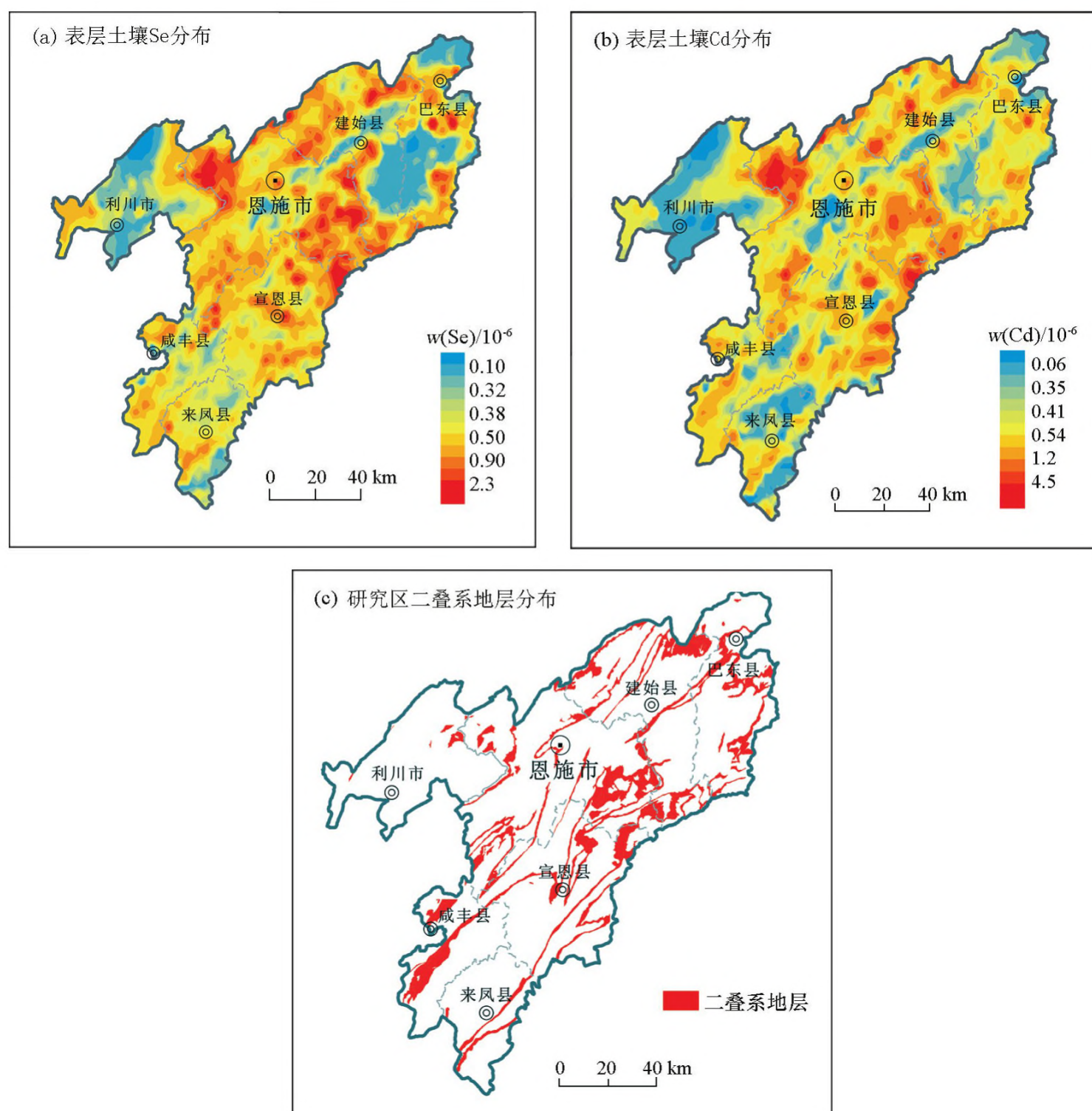


图 2 研究区表层土壤硒、镉分布及其与二叠系地层的空间关系

Fig. 2 Distribution of selenium and cadmium in surface soil of the study area and its spatial relationship with the Permian strata

表 2 研究区不同地质单元土壤硒、镉平均含量统计

10⁻⁶

Table 2 Statistical table of soil selenium and cadmium content in different geological units in the study area

10⁻⁶

地质单元	第四系	白垩系	侏罗系	三叠系	二叠系	石炭系	泥盆系	志留系	奥陶系	寒武系
样本数	24	60	12	1861	590	37	119	461	436	276
Se	0.73	0.45	0.33	0.62	1.39	0.98	0.79	0.64	0.48	0.51
Cd	0.54	0.37	0.29	0.70	1.53	1.09	0.75	0.61	0.44	0.54

以土壤有机碳含量 0.25% 为分段间隔,分段统计有机碳(OrgC)、硒(Se)、镉(Cd)、硫(S)的中位数。Se-Cd、Se-Corg、Cd-Corg、Se-S、Cd-S 散点图显示,Se 和 Cd 呈现良好的正相关关系(图 3a),说明两种元素具有同源性,这与上述地球化学图所见结果一致;Se 和 Cd 都呈现出与 OrgC 的正相关关系(图 3b、3c),且与 S 也有很好的正相关性(图 3d、3e)。朱建明、秦海波等^[18-21]对恩施渔塘坝富硒炭质岩石中硒形态分析表明,有机结合态硒和硫化物(硒化物)态硒是此类岩石中硒的主要赋存形态,这提供了土壤中硒、镉与有机碳和硫正相关性的成因机理,同时印证了上述推测。

硒和镉既是亲硫元素,也是亲生物元素,其赋存在含炭岩层中部分被腐殖质吸附^[22],部分呈硫化物矿物产出,或赋存在硫化物矿物(特别是黄铁矿)中。在后期风化成壤的表生地球化学过程中,硒和镉又经历着次生风化富集作用。韩文亮在研究渔塘坝炭质硅质岩、炭质页岩和炭质泥岩中硒的赋存形态时发现,随着岩石风化程度增强,岩石中的硫化物(硒化物)态硒逐渐减少,而有机结合态硒和元素硒增加^[23]。由此说明,在风化环境中,硫化物结合态的硒与镉会被氧化而释放,进而被有机质吸附,且这种过程一直在缓慢进行。

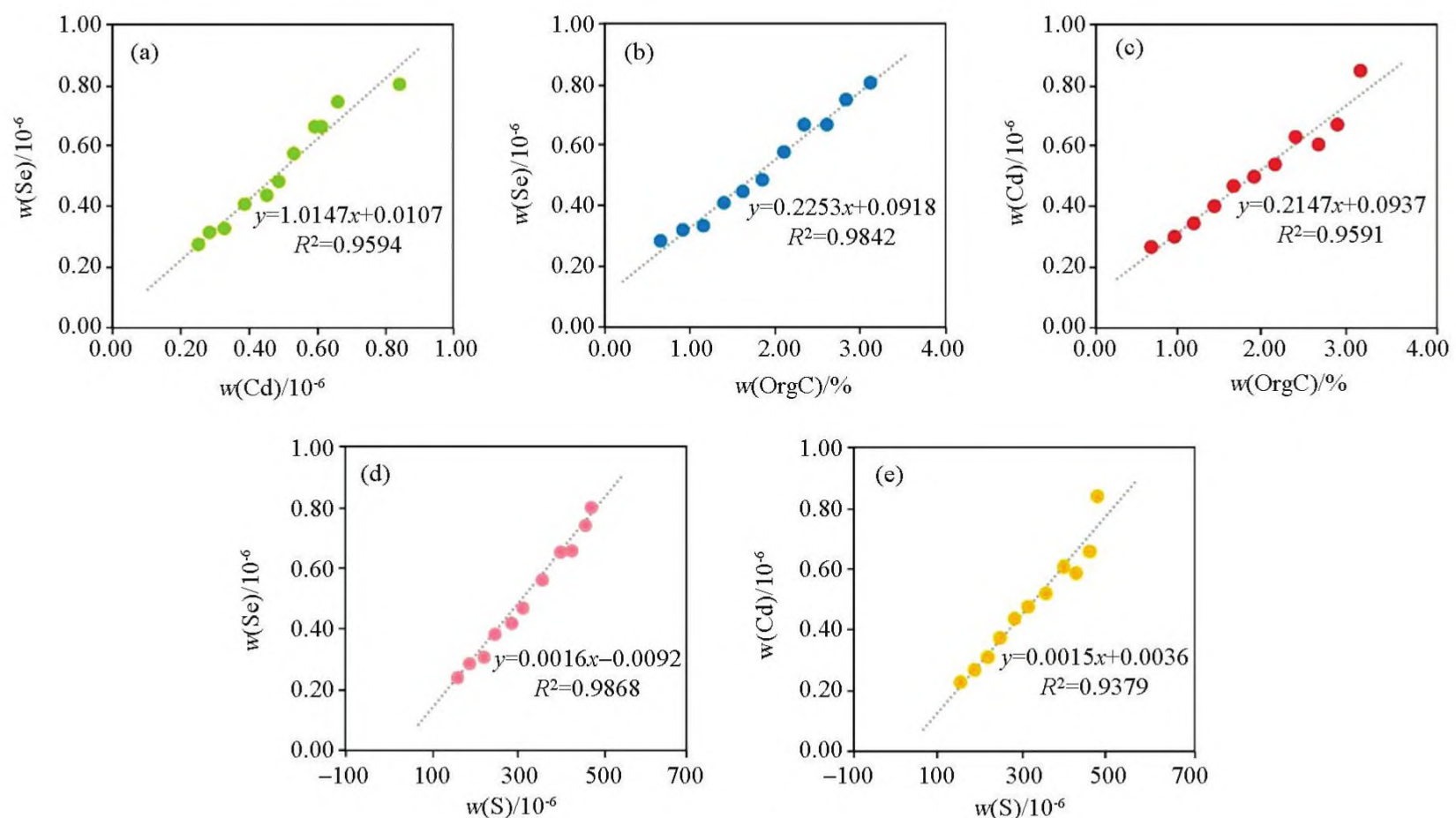


图 3 土壤中不同元素相关关系

Fig. 3 Correlation maps of different elements in soil

3.2 作物硒、镉含量特征

不同作物类型中硒、镉含量的平均值显示(表 3),银杏、辣椒、玉米中硒含量明显高于其他作物,其次为茶叶、早稻、大蒜,土豆、红薯中硒含量最低。镉含量的特征为辣椒中镉含量要显著高于其他作物,其次依次为大蒜、早稻、玉米、红薯、土豆、茶叶、银杏。作物中镉的平均含量高于硒的种类有辣椒、大蒜、早稻、红薯、土豆。

生物富集系数(BCF)反映了作物从土壤中吸收富集元素的能力,一般以作物某部位某元素含量与根系土中该元素含量的比值表示。各类作物生物富集系数对比图(图 4)显示,对硒的吸收富集能力从强到弱依次为辣椒(0.84)、玉米(0.29)、银杏(0.20)、早稻(0.15)、茶叶(0.15)、大蒜(0.13)、红薯(0.03)、土豆(0.02),其中辣椒对于硒的生物富集系数显著高于其他类作物,红薯和土豆对硒的生

表 3 不同作物中硒、镉元素含量特征

Table 3 Table of characteristics of selenium and cadmium in different crops

作物类别	样品数	平均值/ 10^{-6}			含量范围/ 10^{-6}	
		Se	Cd	$w(\text{Se})/w(\text{Cd})$	Se	Cd
早稻	18	0.078	0.236	0.331	0.028~0.156	0.005~0.826
玉米	120	0.475	0.156	3.045	0.018~7.421	0.002~2.644
红薯	38	0.020	0.056	0.357	0.002~0.084	0.002~0.645
辣椒	60	0.542	0.992	0.546	0.020~6.683	0.129~4.954
土豆	70	0.020	0.037	0.541	0.002~0.284	0.000~0.142
大蒜	20	0.066	0.449	0.147	0.034~0.272	0.059~2.501
茶叶	16	0.091	0.032	2.844	0.044~0.202	0.013~0.075
银杏	20	0.698	0.012	58.167	0.020~12.670	0.006~0.025

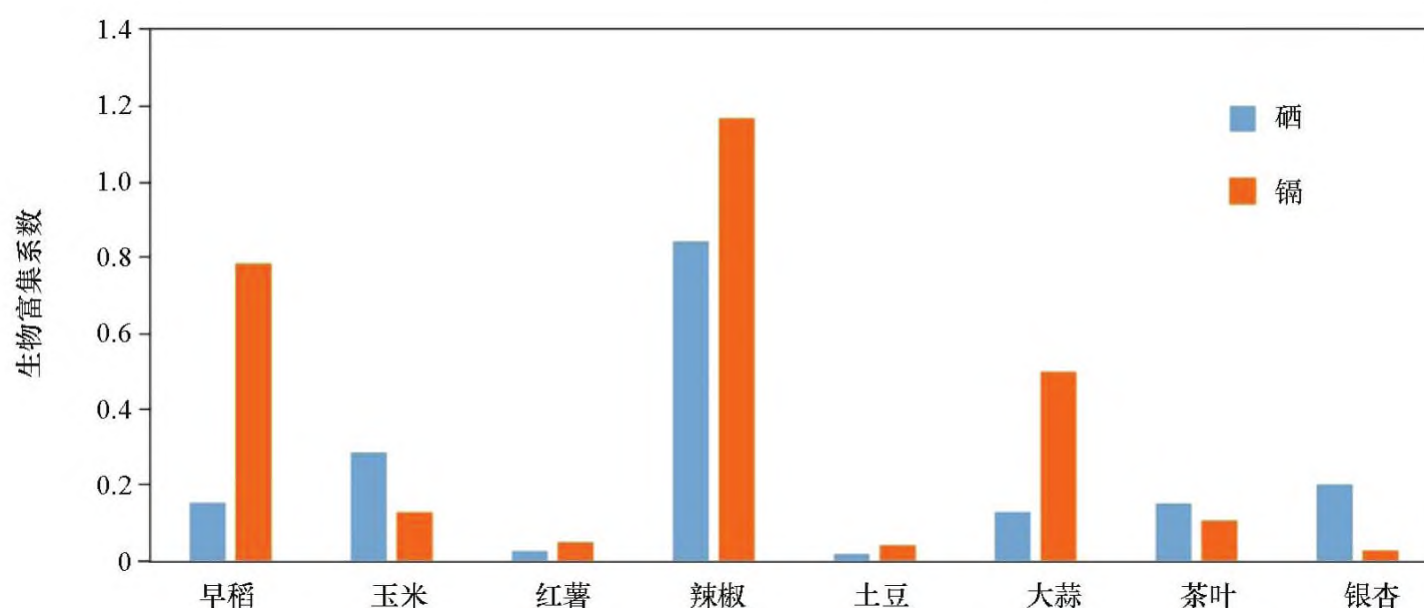


图 4 研究区不同作物硒、镉生物富集系数对比

Fig. 4 BCF comparison of selenium and cadmium of different crops in the study area

物富集系数较低。各类作物对于镉的吸收富集能力从强到弱依次为辣椒(1.17)、早稻(0.78)、大蒜(0.50)、玉米(0.13)、茶叶(0.11)、红薯(0.05)、土豆(0.04)、银杏(0.03),辣椒、早稻、大蒜对于镉的生物富集系数显著高于其他类作物,红薯、土豆、银杏对于镉的生物富集系数较低。这与上述各类作物硒和镉含量的统计结果基本一致。

不同作物中硒和镉的生物富集系数对比结果显示,银杏、玉米和茶叶对硒的吸收能力高于镉,而早稻、辣椒、大蒜对镉吸收能力更强,土豆和红薯对两种元素的吸收能力都较弱。从农产品食用安全性角度,恩施地区富硒农产品开发时应优先考虑银杏、玉米、茶叶类作物。

由于其他作物样本数相对较少,玉米样本数最多,因此以玉米根系土强酸性($\text{pH} \leq 5.5$)、弱酸性($5.5 < \text{pH} \leq 6.5$)、中性($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)、弱碱性($\text{pH} > 7.5$)区间分别统计玉米籽实中硒和镉的生物富集系数。其中,强酸性土壤玉米硒的生物富集系数平均值为0.04,弱酸性土壤为0.17,中性土壤为0.19,弱碱性土壤为0.58;强酸性土壤玉米镉的生物富集系数平均值为0.10,弱酸性土壤为0.27,中性土壤

为0.06,弱碱性土壤为0.10。图5显示,根系土pH由酸至碱,玉米籽实对于硒的吸收富集能力逐渐增强,其原因是酸性条件下,水溶硒主要以亚硒酸盐(SeO_3^{2-})形式存在,亚硒酸盐易被吸附或与铁铝氧化物形成络合物从而不易被植物吸收,而在碱性条件下,水溶态硒则主要以硒酸盐(SeO_4^{2-})形式存在,硒酸盐较易被植物吸收,生物有效性较高^[24-26]。弱酸性区间玉米对镉的吸收富集能力最强,这是因为土壤pH降低会促进镉向活性形态转化,但土壤中水溶态镉含量不仅取决于pH,还与土壤中有机质含量、盐基饱和度、阳离子交换量等多种因素有关^[27-28]。一般情况下,与富里酸结合的镉能被植物吸收,而与胡敏酸结合的镉难以被植物吸收,所以土壤有机质虽然可以增加土壤镉含量,但也会抑制植物吸收镉^[22]。研究区强酸性土壤中的高有机质含量,可能降低了镉的生物有效性,不利于镉从土壤向农作物迁移。

在强酸性和弱酸性区间内,玉米籽实对镉的吸收能力强于对硒的吸收能力,而在中性和弱碱性区间,玉米籽实对硒的吸收能力则高于对镉的吸收能

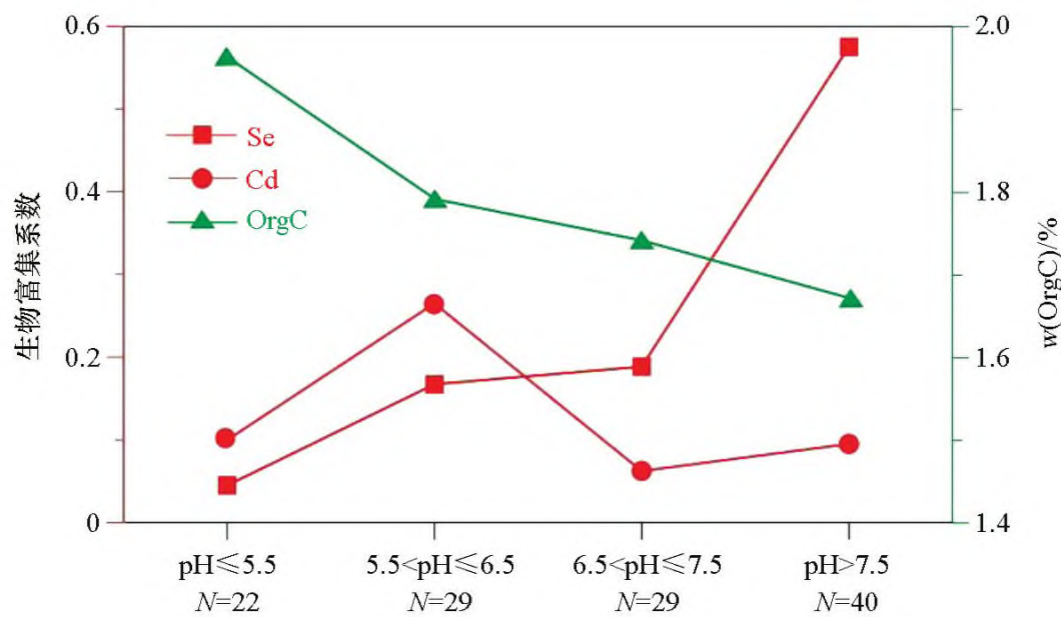


图5 不同 pH 区间玉米籽实硒、镉生物富集系数对比

Fig. 5 BCF comparison of selenium and cadmium in corn seeds in different pH ranges

力。恩施地区安全富硒农产品开发时除了考虑作物种类,还应考虑土壤的 pH 值,中碱性土壤生产的农产品镉富集的风险较低,在农业生产中可考虑采取施用石灰等措施调控土壤酸碱度。

3.3 硒、镉共生的健康效应

有研究表明,恩施地区的高硒环境大大减少了镉的毒性,且至今没有发现镉中毒的报道^[29]。牛静萍的研究报告认为,当硒与镉形成化合物时,镉对于干细胞半数中毒浓度由 49.14 mmol/L 上升为 1 406.2 mmol/L,毒性降低了 28 倍^[30]。此外,杨忠芳等在湖南湘潭高镉低硒区和湖北恩施高镉高硒区分别采集了人血、尿、发样本,测试结果显示,高镉低硒区人体尿镉水平与尿 NAG(N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶)活性具有较好的线性相关关系(正常情况下尿中 NAG 活性会随着尿 Cd 的增加而增加),而在高镉高硒区,人体尿镉与尿 NAG 活性则不存在线性相关关系,表明了人体中硒对于镉存在拮抗效应^[31]。

以上研究证实了硒对镉有解毒作用,这种解毒作用可能与硒、镉形成 Se-Cd 复合物有关。杨克敌等研究表明^[32],红细胞中的亚硒酸盐会与谷胱甘肽(GSH)发生非酶反应生成硒代三硫化物,硒代三硫化物会进一步被还原型辅酶 II(NADPH)和 GSH 还原生成硒化物(H₂Se),硒化物可以与蛋白中的巯基结合,而后与镉结合形成硒镉复合物,硒镉复合物的形成降低了游离镉的浓度,从而降低镉的毒性^[33]。

4 结论

1) 恩施地区表层土壤中硒、镉呈伴生关系,两种元素含量分布主要受控于二叠系黑色岩系成土母

质,且硒、镉的赋存状态与土壤中的有机质和硫化物密切相关。

2) 银杏、玉米和茶叶对硒的吸收能力高于镉,为降低作物镉超标风险,恩施地区富硒农产品开发时应优先考虑选择此类作物。

3) 碱性土壤中,作物对硒的吸收能力高于镉,农产品镉富集风险较低,农业生产中可考虑采取施用石灰等措施调控土壤酸碱度。

4) 硒与镉可形成 Se-Cd 复合物,硒、镉复合物的形成降低了游离镉的浓度,从而降低了镉的毒性,故高硒环境可以显著降低镉对于人体的健康风险。

参考文献(References):

- [1] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. *Lancet*, 2000, 356(9225): 233-241.
- [2] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. *Science*, 1973, 79(4073): 88-90.
- [3] 杨礼茂. 鄂西南地区硒资源及其综合开发[J]. *地域研究与开发*, 1998, 7(4): 72-76.
Yang L M. Selenium resources and its comprehensive exploitation in the southwestern Hubei[J]. *Areal Research and Development*, 1998, 7(4): 72-76.
- [4] 杜丽娜,余若祯,王海燕,等. 重金属镉污染及其毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(2): 167-173.
Du L N, Yu R Z, Wang H Y, et al. Research progress on heavy metal cadmium pollution and its toxicity[J]. *Journal of environment and health*, 2013, 30(2): 167-173.
- [5] 崔岩山,陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. *环境科学*, 2010, 32(2): 403-408.
Cui Y S, Chen X C. Bioavailability of soil cadmium and its health risk assessment[J]. *Environmental science*, 2010, 32(2): 403-408.
- [6] Zhu J M, Zheng B S. Distribution of selenium in a mini-landscape

- of Yutangba, Enshi, Hubei Province, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11-12): 1333 - 1344.
- [7] Chang C Y, Yin R S, Wang X, et al. Selenium translocation in the soil-rice system in the Enshi seleniferous area, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 83 - 90.
- [8] Zhu J M, Han W L, Lei L, et al. Selenium speciation of Se-rich rocks from Yutangba of Enshi, China[J]. *Goldschmidt Conference Abstracts*, 2006, 70(18): 754.
- [9] 杨良策, 李明龙, 杨延安, 等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(6): 825 - 829.
- Yang L C, Li M L, Yang T A, et al. Study on distribution characteristics of selenium content of surface soil and its influencing factors in Enshi city, Hubei province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(6): 825 - 829.
- [10] 郭宇, 鲍征宇, 马真真, 等. 湖北恩施地区土壤—植物系统中 Se 元素的地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(1): 151 - 155.
- Guo Y, Bao Z Y, Ma Z Z, et al. Geochemical characteristics of selenium in the soil-plants system of Enshi area, Hubei Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1): 151 - 155.
- [11] 朱建明, 左维, 秦海波, 等. 恩施硒中毒区土壤高硒的成因: 自然硒的证据[J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 397 - 400.
- Zhu J M, Zuo W, Qin H B, et al. An investigation on the source of soil Se in Yutangba Enshi: evidence from natural selenium [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(4): 397 - 400.
- [12] Zhu J M, Zuo W, Liang X B, et al. Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications [J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19: 461 - 467.
- [13] 袁知洋, 项剑桥, 吴冬妹, 等. 恩施富硒土壤区主要农作物硒镉特征以及和根系土硒镉关系研究[J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(6): 706 - 712.
- Yuan Z Y, Xiang J Q, Wu D M, et al. The characteristics of selenium and cadmium in crops and its root soil in the area of Se and Cd-enriched soil in Enshi [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2017, 31(6): 706 - 712.
- [14] 张光弟, 葛晓立, 张绮玲, 等. 湖北恩施地区硒地质地球化学环境背景[J]. *地球学报*, 1998(1): 59 - 67.
- Zhang G D, Ge X L, Zhang Q L, et al. Selenium geological and geochemical environmental background in Enshi, Hubei [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1998(1): 59 - 67.
- [15] 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- Chinese soil element background value [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [16] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- Tan J A. Atlas of local diseases and environment of China [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值(试行) [S]. 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618-2018 Soil environmental quality screening value of soil pollution risk for agricultural land (trial) [S]. 2018.
- [18] Qin H B, Zhu J M, Su H. Selenium fractions in organic matter from Se-rich soils and weathered stone coal in selenosis areas of China [J]. *Chemosphere*, 2012(86): 626 - 633.
- [19] 朱建明. 渔塘坝黑色富硒岩石中硒的赋存状态及其对局域环境的效应研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2001.
- Zhu J M. Occurrence of selenium in black selenium-enriched rock in Yutangba and its effect on local environment [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [20] 朱建明, 秦海波, 李璐, 等. 湖北恩施渔塘坝高硒土壤中硒的结合态[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 772 - 777.
- Zhu J M, Qin H B, Li L, et al. Fractionation of selenium in high-Se soils from Yutangba, Enshi, Hubei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4): 772 - 777.
- [21] 王芳, 鲁力, 康健, 等. 恩施渔塘坝硒矿床中硒的赋存状态研究[J]. *资源环境与工程*, 2016, 30(2): 244 - 247.
- Wang F, Lu L, Kang J, et al. Study on the Occurrence of Selenium in Yutangba of Enshi [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2016, 30(2): 244 - 247.
- [22] Li Z, Liang D L, Peng Q, et al. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review [J]. *Geoderma*, 2017, 295: 69 - 79.
- [23] 韩文亮, 朱建明, 秦海波, 等. 恩施渔塘坝富硒碳质岩石中硒的形态分析[J]. *矿物学报*, 2007, 27(1): 89 - 95.
- Han W L, Zhu J M, Qin H B, et al. Selenium Speciation in Se-rich Rocks at Yutangba [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(1): 89 - 95.
- [24] Cary E E, Gissel-Nielsen G. Effect of fertilizer anions on the solubility of native and applied selenium in soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(4): 187 - 190.
- [25] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 837 - 849.
- Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan island [J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 837 - 849.
- [26] 王月平, 张立, 崔玉军, 等. 宝清县东部土壤硒含量特征及其与土壤性质的关系[J]. *物探与化探*, 2019, 43(4): 904 - 911.
- Wang Y P, Zhang L, Cui Y J, et al. Characteristics of selenium content in soil of eastern Baoqing County and its relationship with soil properties [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(4): 904 - 911.
- [27] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鏞, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 252 - 260.
- Yang Z F, Chen Y L, Qian X, et al. A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 252 - 260.
- [28] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. *物探与化探*, 2019, 43(5): 1138 - 1144.
- Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(5): 1138 - 1144.
- [29] 毛大均, 郑宝山, 严文祥. 鄂西南石煤和石煤出露区土壤中硒与镉的含量[J]. *湖北预防医学杂志*, 1999, 10(2): 1 - 2.
- Mao D J, Zheng B S, Yan W X. Contents of selenium and cadmium in soils of coal in the south of Hubei Province [J]. *Hubei Journal*

- of Preventive Medicine, 1999, 10(2): 1-2.
- [30] 牛静萍. 29 对金属化合物对大白鼠游离肝细胞联合毒性的研究[J]. 环境与健康杂志, 1995, 12(2): 55-56.
- Niu L P. Study on the combined toxicity of 29 pairs of metal compounds on free hepatocytes in rats[J]. Journal of environment and health, 1995, 12(2): 55-56.
- [31] 杨忠芳. 湘鄂重金属高背景区 1:5 万土地质量地球化学调查与风险评价二级项目成果报告[R]. 中国地质大学(北京), 2019.
- Yang Z F. Achievement report of the second project of 1:50,000 land quality geochemical survey and risk assessment in the heavy metal high background area of Hunan and Hubei[R]. China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [32] 杨克敌. 微量元素与健康[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Yang K D. Trace elements and health [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [33] 宋明义, 岑静, 胡艳华, 等. 高镉地质环境富硒土壤特征及其生态效应[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 354-360.
- Study on the characteristics of selenium-rich soil geological environment with high contents of cadmium and its ecological effects [J]. Earth and environment, 2012, 40(3): 354-360.

Geochemical characteristics of selenium and cadmium in soil and crops in Enshi area

TANG Shi-Qi^{1,2,3}, WAN Neng⁴, ZENG Ming-Zhong⁴, YANG Ke^{1,2,3}, LIU Fei^{1,2,3},
PENG Min^{1,2,3}, LI Kuo^{1,2,3}, YANG Zheng^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 4. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China)

Abstract: The 1:25 million land geochemical survey conducted in Enshi area shows that the surface soil in Enshi area is rich in selenium, and the content of cadmium is also high. Based on the data of 3 950 surface soil samples and 362 crop samples in this area, the geochemical characteristics of selenium and cadmium, co-generation factors, and the capability of different types of crops for absorbing and enriching the two elements are discussed. The results show that the selenium and cadmium in the surface soil of Enshi area is associated with each other. The distribution of the two elements is mainly controlled by the Permian soil parent material, and the occurrence of selenium and cadmium is closely related to organic matter and sulfide in soil. Comparison of BCF of selenium and cadmium in different crops shows that ginkgo, corn and tea have higher absorption capacity for selenium than for cadmium, and hence these crops could be used as the preferred crops for the development of selenium-enriched agricultural products in Enshi area. At the same time, the pH of the soil should also be considered. The medium alkaline soil may be more likely to avoid the risk of cadmium enrichment in agricultural products. In addition, selenium has a detoxifying effect on cadmium. Selenium-rich environment will significantly reduce the harm of cadmium to human body.

Key words: Enshi; surface soil; selenium; cadmium; geochemical characteristics; bioaccumulation; health effect

(本文编辑: 蒋实)