

恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析^①

余涛^{1,3}, 杨忠芳^{2,3*}, 王锐², 曾庆良², 侯宛苓²

(1 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3 自然资源部生态地球化学重点实验室, 北京 100037)

摘要: 硒是重要的人体和动物必需微量元素之一, 在功能农业发展中起着重要的作用。为了研究高硒土壤中硒与其他元素组合特征及来源, 从而支撑富硒资源的安全有效利用, 本研究在恩施市沙地乡系统采集并分析了 200 个表层土壤样和 2 组土壤垂直剖面样品, 运用统计学工具进行了聚类分析和因子分析。结果表明: 研究区表层土壤硒含量平均值为 $1.88 \text{ mg/kg} \pm 2.51 \text{ mg/kg}$, 明显高于全国表层土壤硒含量平均值。研究区土壤元素组合特征可分为三类, 第一类中硒与钼、钒、铬、镉和镍等元素具有较强的伴生关系, 与黑色岩系分布密切相关; 第二类为三氧化二铝、铅和砷等元素/氧化物, 与土壤中黏土矿物有关; 第三类为钙和锶等元素, 表明该同族元素的地球化学性质具有相似性。因子分析结果进一步证实了土壤硒和镉伴生主要发生在黑色岩系, 不同成土母质硒等元素差异较大。

关键词: 硒; 元素组合; 来源; 因子分析

中图分类号: P595; X142 文献标识码: A

硒(Se)是重要的人体和动物必需微量元素之一, 在功能农业发展中起着重要的作用^[1-3]。Se 在地球表层的分布异质性高, 很大程度上决定了其在自然界中的分布、迁移和转化以及生物有效性明显受制于其环境地球化学性质和行为。Se 是亲硫元素, 与硫可以形成广泛的类质同象, 绝大部分 Se 被分散到硫化物矿物的晶格中, 只有硫浓度明显降低时, 才较稀少地形成自己的独立矿物^[4]。除亲硫外, Se 还具有亲生物性, 从而在富含有机质的地质体中富集^[5-6], 如煤、碳质泥页岩和黑色岩系等。成土母质 Se 含量是决定土壤 Se 含量水平的主要控制因素, 而成土过程、土壤有机质、人类活动、气候条件等因素也是重要影响因素^[7-11]。Se 通过植物体进入食物链, 但受一系列地质、地理因素控制。前人从土壤理化性质、土地利用方式、地质背景及人类活动等角度进行了较多的影响因素研究^[12-21], 但对其影响机制和生物有效性的影响因素仍然存在较大争议^[22-24], 尤其是对土壤 Se 与其他元素的组合特征及影响因素等研究较少。

本研究以湖北恩施典型高 Se 区土地质量地球化学调查数据为基础, 结合区域地质背景选择典型土壤垂直剖面数据, 分析其土壤 Se 来源及与其他元素组

合特征, 以期对富 Se 土壤分布区 Se 的安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

恩施市沙地乡地处湖北省恩施市东北部, 位于清江中游北岸。沙地乡境内呈“一面坡”状, 三面环水, 一面环山。该区属亚热带季风型湿润气候, 年平均日照为 $1\,350 \sim 1\,860 \text{ h}$, 降水量为 $1\,100 \sim 1\,400 \text{ mm}$, 多年平均气温为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。沙地乡境内海拔落差较大, 最高海拔 $1\,680 \text{ m}$, 最低海拔 270 m , 平均海拔为 950 m 。本次研究区紧邻清江, 面积为 50 km^2 , 主要岩石类型为灰岩、炭质板岩, 主要发育土壤为黄棕壤和黄壤, 大宗农作物主要种植玉米。

1.2 样品采集和前处理

样品采集: 本研究主要涉及两种类型的土壤样品, 分别为 1 5 万土地质量地球化学调查采集的表层土壤样品 200 件(以下简称表层样)和垂直剖面样品 2 组。表层样按照 $4 \text{ 个样点}/\text{km}^2$ 密度采集, 样品采集空间上均匀分布, 兼顾土地利用类型。样品主要位于耕地, 采样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$, 每个样点由 $4 \sim 5$

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800304)和中国地质调查局项目(DD20160323)资助。

* 通讯作者(zfyang01@126.com)

作者简介: 余涛(1979—), 男, 湖北大冶人, 博士, 副研究员, 主要从事生态地球化学研究。E-mail: yutao@cugb.edu.cn

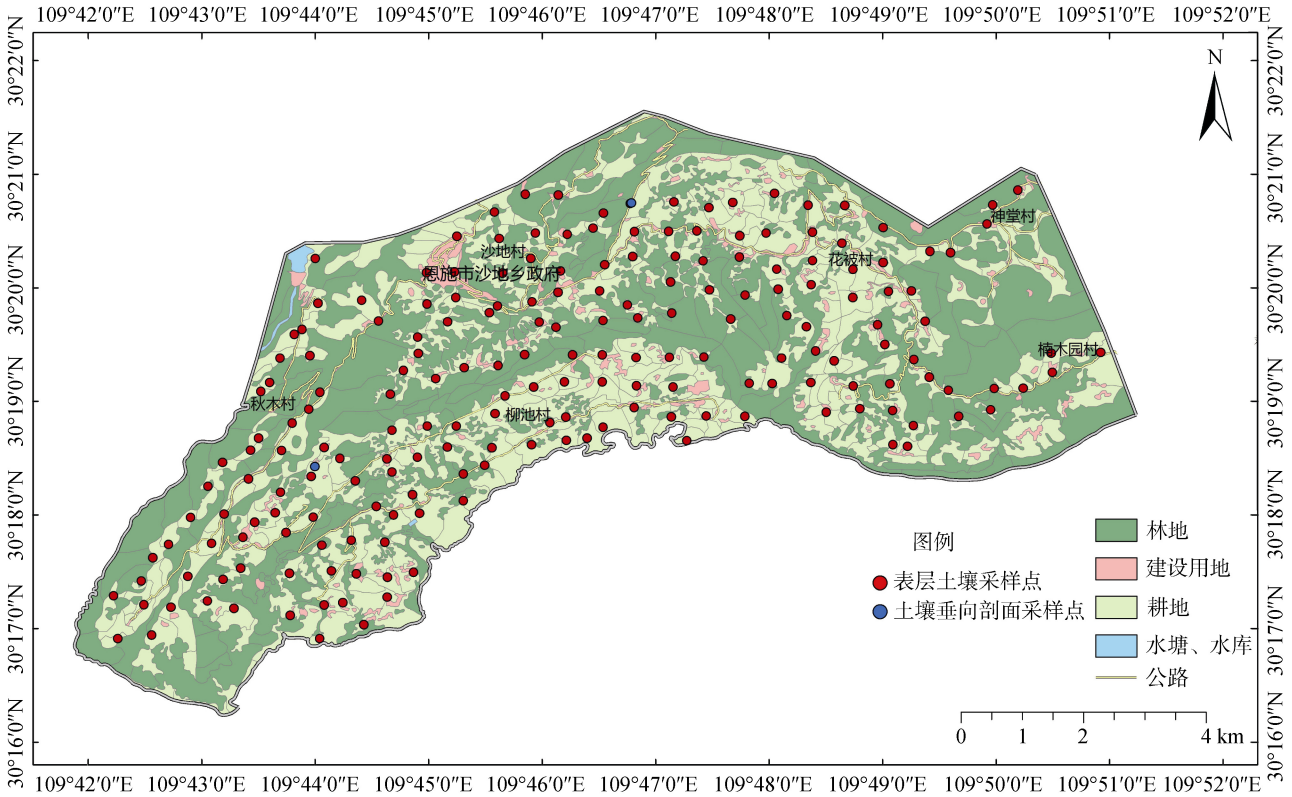


图 1 研究区土地利用类型及采样点分布图
 Fig. 1 Land use types and sampling points

个子样点组成,子样点要求种植农作物类型一致,土壤类型一致,且均在中心样点 20~50 m 内。各子样等份均匀混合后用四分法取 1~2 kg 装干净样品袋。所有样点避开沟渠、林带、田埂、路边、旧房基、粪堆及微地形高低不平无代表性地段。垂向土壤剖面为选择有代表性的自然荒地,本次研究采集的两组垂向土壤剖面,分别位于三叠系大冶组和二叠系茅口组,土壤类型分别为黄棕壤和黄壤。剖面为垂向挖掘深度为 1.5~2.2 m 的土坑,按照一定间距(10 cm)采集相应位置的土柱。每层样品重量大于 2 kg,并进行详细的野外记录,描述土壤特征。所有野外采样点位用全球定位仪(GPS)记录坐标和海拔信息。

样品前处理:从野外采回的土壤样品要及时放在样品盘上,摊成薄薄一层,置于干净整洁的室内通风处自然风干,严禁暴晒,并注意防止酸、碱等气体及灰尘污染。在风干过程中,适时翻动,并将大土块捏碎以加速干燥,同时剔除土壤以外的杂物。风干后的土壤样品,平铺在制样板上,用木棍碾压,并将植物残体、石块等侵入体和新生体剔除干净。压碎的土样要全部通过孔径为 2 mm 的尼龙筛。未过筛的土粒必须重新碾压过筛,直至全部样品通过 2 mm 孔径筛为止。取过筛后土壤样品 100 g,装入干净牛皮纸袋送

实验室做进一步处理和化学分析。

1.3 样品分析

土样在实验室用无污染球磨机制备成至所需的试样粒度(200 目)。称取 5.0 g 试料,采用粉末压饼制样,采用 X 射线荧光光谱仪(ZSX100e 型,日本)测定氯(Cl)、磷(P)、氧化钙(CaO)、铬(Cr)、铅(Pb)、锌(Zn)含量。称取 0.200 0 g 试料,采用四酸溶样,定容后取 25 ml 溶液用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(iCAP-6300 型,美国)测定锰(Mn)、铜(Cu)、钒(V)、锶(Sr)含量,同时取清液稀释用等离子体质谱仪(X Series 2 型,美国)测定钴(Co)、镍(Ni)、钼(Mo)、镉(Cd)含量。称取 0.500 g 试料,采用王水溶样,经 KBH_4 还原、氢化采用原子荧光光谱仪(6500 型,中国)测定砷(As)、汞(Hg)含量。称取 0.100 0 g 试料,按照 1:1 比例加缓冲剂采用发射光谱(WP1 型,中国)测定硼(B)含量。称取 0.500 g 试料,经碱熔及水浸取加缓冲剂采用离子选择性电极测定氟(F)含量。称取 1.00 g 试料,经艾斯卡半熔及水浸取、酸化采用原子荧光光谱仪(6500 型,中国)测定硒(Se)含量,同时取部分试样经氯胺 T-四碱体系采用催化比色法(Lambda35 型,美国)测定碘(I)含量。称取 0.500 g 试料,经硫酸溶样及重铬酸钾氧化,采用容量法测定有机碳(SOC)含

量。称取 1.000 g 试料,经硫酸-高氯酸溶样,加浓碱蒸馏,经硼酸吸收采用容量法测定氮(N)含量。称取 10.0 g 试料,经无 CO₂ 水浸取采用离子选择性电极测定酸碱度(pH)。上述分析测试方法参照《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》^[25]要求。

样品分析测试过程中采用国家一级标准物质(GSS-17、GSS-22、GSS-25、GSS-27)的测试结果进行准确度(相对误差,RE)检验。土壤样品按 10% 的比例随机抽取 20 个土壤样品进行重复检测(精密度检验)。样品分析测试结果符合《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》^[25]要求,数据质量可靠。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 24(美国国际商业机器公司)和 EXCEL 2010(美国微软公司)进行数据的处理和描述性统计。

聚类分析是根据事物本身的特性研究个体分类的方法,原则是同一类中的个体有较大的相似性,不同类中的个体差异很大^[26]。本文以表层样 22 种元素/氧化物含量为变量,采用系统聚类分析(皮尔逊相关性结合组间平均联接法),对研究区 200 件土壤样品进行了聚类分析。

因子分析的基本目的就是用少数几个因子去描述许多指标或因素之间的联系,即将相关比较密切的几个变量归在同一类中^[26]。本次研究中,首先将各元素(氧化物)含量按照 Z-score 标准化进行无量纲化处理,然后采用主成分法进行因子分析。

2 结果与讨论

2.1 研究区表层土壤硒及其他元素分布特征

本文统计了研究区表层土壤 Se 及相关元素含量平均值、最大值、最小值,并与多目标区域地球化学数据进行了对比(表 1),结果表明研究区表层土壤 Se 含量平均值为 1.88 mg/kg,是全国土壤 Se 含量均值的 7.12 倍,明显高于 0.4 mg/kg 的富 Se 土壤标准,表明研究区存在丰富的富 Se 土壤资源。研究区表层土壤 Se 含量有较大变化,最大值达 15.17 mg/kg,最小值为 0.19 mg/kg,相差近百倍,分布极不均匀,变异系数为 133.5%,这与研究区地处鄂西山区自然地理条件密切相关。本次研究表层土壤 Se 的含量范围与杨良策等^[20]在恩施新塘乡的结果接近,表层土壤 Se 含量均值略高于恩施新塘乡的结果。

研究区因地处中高山区,土壤有机碳(SOC)含量较丰富,为 13.7 g/kg,是全国均值的 1.19 倍。同时由于研究区降雨量大,海拔落差大,土壤 CaO、Sr

淋失严重,仅为全国平均含量的 0.36 倍、0.55 倍。研究区的土壤 pH 变化范围较大,最低值为 4.18,最高值为 8.46,部分样点土壤酸化较严重。

表 1 研究区表层土壤 Se 及其他元素/氧化物统计值
Table 1 Statistics of selenium and other elements or oxides in the topsoil of study area

元素/氧化物	平均值	最大值	最小值	标准差	K
Se (mg/kg)	1.88	15.17	0.19	2.51	7.12
SOC (g/kg)	13.7	32.2	3.2	4.9	1.19
CaO (g/kg)	10.2	135.0	1.6	15.9	0.36
pH (无量纲)	-	8.46	4.18	-	-
Sr (mg/kg)	85.2	308.8	40.8	42.3	0.55

注: K 为元素含量平均值与全国表层土壤元素含量平均值之比(全国表层土壤元素含量来源于全国多目标区域地球化学调查数据)。

2.2 研究区表层土壤硒元素组合特征

土壤中元素含量及其组合特征既与元素的地球化学性质有关,又受表生地球化学条件和人类活动的影响。本文通过聚类分析、因子分析等数学统计的方法解释土壤 Se 元素组合特征。

2.2.1 聚类分析 图 2 为 SPSS 软件系统聚类分析所得的谱系图,可见在类间距离 15 处,可将元素分为 3 大类。第一类 V、Cr、Cd、Ni、Zn、Cu、Hg、Mo、Se 等元素,说明这些元素有着较强的伴生关系,而 V、Mo、Ni、Cd 等重金属元素一定程度上指示了黑色岩系的特征。黑色岩系是含有机碳(接近或大于 10 g/kg)及硫化物(铁硫化物为主)较多的深灰-黑色的硅岩、碳酸盐岩、泥质岩(含层凝灰岩)及其变质岩石的组合体系,前人已对高 Se 黑色岩系中层状硅质岩中地球化学特征进行了研究^[27]。第二类为 Pb、Co、As、Mn、Al、B 几种元素,可能与土壤中黏土矿物有关(图 2)。成土过程中的黏粒和铁铝氧化物,对元素积累和淋溶具有重要影响,土壤中黏土矿物对 Pb、Co 及铁锰氧化物具有较强的吸附作用。第三类为 Ca、Sr、F、I、Cl,其中 Ca、Sr 为同族元素,F、I、Cl 为卤族元素,这一类别表明了相同族元素间的地球化学行为相似性。

聚类分析的结果显示出,研究区内表层土壤元素的共生组合特征主要受控于黑色岩系、黏土矿物及元素的地球化学性质。

2.2.2 因子分析 对同组数据进行 R 型因子分析,结果见表 2。由表 2 可知,相关系数矩阵的前 3 个特征值累积贡献率达到了 66.4%。这 3 个因子中(表 3),主因子 F1 以 Ni、Zn、Cu、V、Mo、Cd、Se 为主,构成一个主因子解,但重要性依次降低。这一

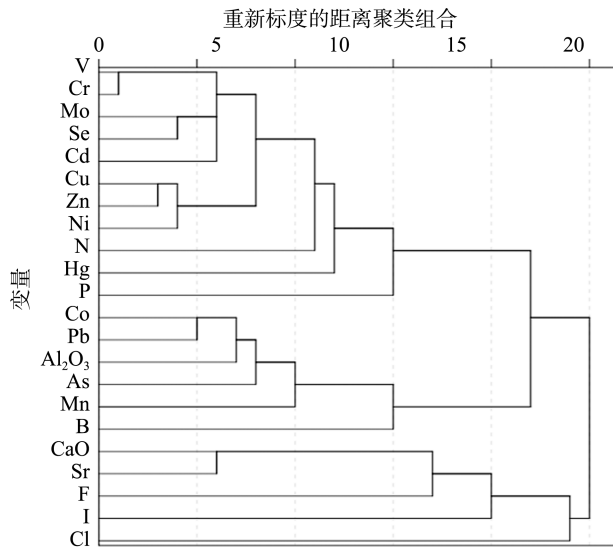


图 2 研究区土壤元素系统聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis chart of soil elements in study area

主要成分和土壤来源有关，Ni、Zn、Cu、V 等元素高度正相关证实了黑色岩系是研究区土壤 Cd、Se 伴生的主要原因和重要来源。因此可以认为主因子 F1 反映了成土母质在土壤元素含量来源中占有主导地位，它和前面聚类分析中第一类基本吻合。

主因子 F2 中以 Al₂O₃、B、Co、Pb、K₂O、Mn 为主。这一主因子包含了表生作用的影响，与聚类分析中的第二类组合一致。受研究区降雨多、环境较潮湿、山区土壤富含有机质等诸多因素影响，土壤中元素地球化学行为受到了基岩、铁锰氧化物、有机质、酸性地表水等表生地球化学作用控制。

主因子 F3 只有元素 Ca、Sr 的特征系数大于 0.7，其构成一个因子解，土壤中 Ca 的含量有时可以作为土壤酸化的临界警示指标，也对研究区元素淋溶具有重要的指示意义。

表 2 研究区土壤元素/氧化物主成分特征值与贡献率

Table 2 Values of principal component characteristics and contribution rates of soil elements/oxides in study area

成分	初始特征值			成分	初始特征值		
	总特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)		总特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率 (%)
1	8.04	34.94	34.94	13	0.28	1.23	95.26
2	4.89	21.26	56.21	14	0.24	1.06	96.32
3	2.34	10.16	66.37	15	0.21	0.89	97.21
4	1.28	5.56	71.93	16	0.18	0.78	97.99
5	1.17	5.09	77.01	17	0.15	0.64	98.63
6	0.88	3.84	80.85	18	0.09	0.37	99.01
7	0.76	3.31	84.16	19	0.07	0.32	99.33
8	0.63	2.75	86.91	20	0.07	0.29	99.62
9	0.49	2.13	89.04	21	0.05	0.21	99.82
10	0.42	1.83	90.87	22	0.03	0.14	99.96
11	0.39	1.68	92.56	23	0.01	0.04	100.00
12	0.34	1.47	94.03				

表 3 研究区土壤元素/氧化物在主因子上的载荷

Table 3 Loads of soil elements/oxides on principal factors in study area

元素/氧化物	成分			元素/氧化物	成分		
	F1	F2	F3		F1	F2	F3
Al ₂ O ₃	0.44	0.74	0.32	K ₂ O	0.41	0.79	0.29
As	0.49	0.59	0.06	Mn	0.37	0.66	0.19
B	0.05	0.69	-0.41	Mo	0.80	-0.36	-0.23
CaO	-0.05	-0.37	0.70	N	0.66	-0.27	0.20
Cd	0.77	-0.42	-0.07	Ni	0.92	-0.20	-0.01
Cl	0.03	0.05	0.18	P	0.53	-0.10	0.24
Co	0.59	0.68	-0.02	Pb	0.55	0.71	0.09
Cr	0.75	-0.40	-0.19	Se	0.77	-0.38	-0.24
Cu	0.90	0.08	0.00	Sr	0.09	-0.20	0.80
F	-0.16	-0.48	0.50	V	0.82	-0.38	-0.19
Hg	0.55	-0.37	-0.19	Zn	0.92	0.00	0.20
I	0.13	-0.23	0.39				

2.3 成土母质与硒等元素的关系

岩石中 Se 的含量及土壤对 Se 的高度富集作用是土壤和植物 Se 的主要来源。李家熙等^[28]、张光弟等^[29]认为高 Se 土壤主要继承富 Se 岩石和煤层,页岩的 Se 含量通常较高,是高 Se 土壤形成的重要条件。恩施地区 Se 的富集与广泛发育的黑色岩系有关,是原始还原沉积条件下有机质携带大量 Se 沉积所致。研究区高 Se 土壤则主要继承了黑色岩系的富 Se 特征。Se 属于一种非金属元素,其化学性质与硫、磷相似,在岩石中通常与重金属元素相结合形成化合物。而在岩石风化形成土壤过程中,Se 与重金属一同释放,从空间分布上,两者具有密切的联系。无论是聚类分析还是因子分析上都确定了重金属与 Se 的关系,因此可以从一定程度上判别研究区表层土壤 Se 来源于成土母质。

研究区基本以中高山地为主,母质风化物搬运距离较近,坡积和残坡积土壤分布广泛,更多地继承了母岩的元素地球化学特征。前人研究将 Se 的土壤剖

面变化趋势划分为三类：上高下低,即土壤中 Se 含量随深度的增加而降低；上下相近,即各个深度 Se 含量变化差异不大；上低下高,土壤中 Se 含量随深度的增加而增加^[30]。研究典型成土剖面土壤 Se 等元素变化趋势(图 3),表明不同成土母质,土壤中 Se 含量均随深度的增加而降低。造成表层土壤 Se 含量的富集原因很多,可能与黏土矿物、有机质吸附及人为活动影响等有关。Cd 元素在不同成土剖面的变化趋势类似,但是 Cd 含量在二叠系茅口组剖面 0~50 cm 变化较大,表层富集明显,Se、Cd、SOC 含量在 0~50 cm 变化趋势基本一致。不同成土母质剖面中 CaO、SOC 含量变化趋势差异较大,且在 0~60 cm 深度含量变化趋势相反,这可能受风化和雨水淋溶的影响。同时两条剖面土壤 pH 在表层均有酸化的趋势。当然,Se 元素在土壤剖面中分布情况可能会受到土地利用方式、土壤理化性质、土壤母质中 Se 含量和土壤微生物群落作用等多方面的影响。

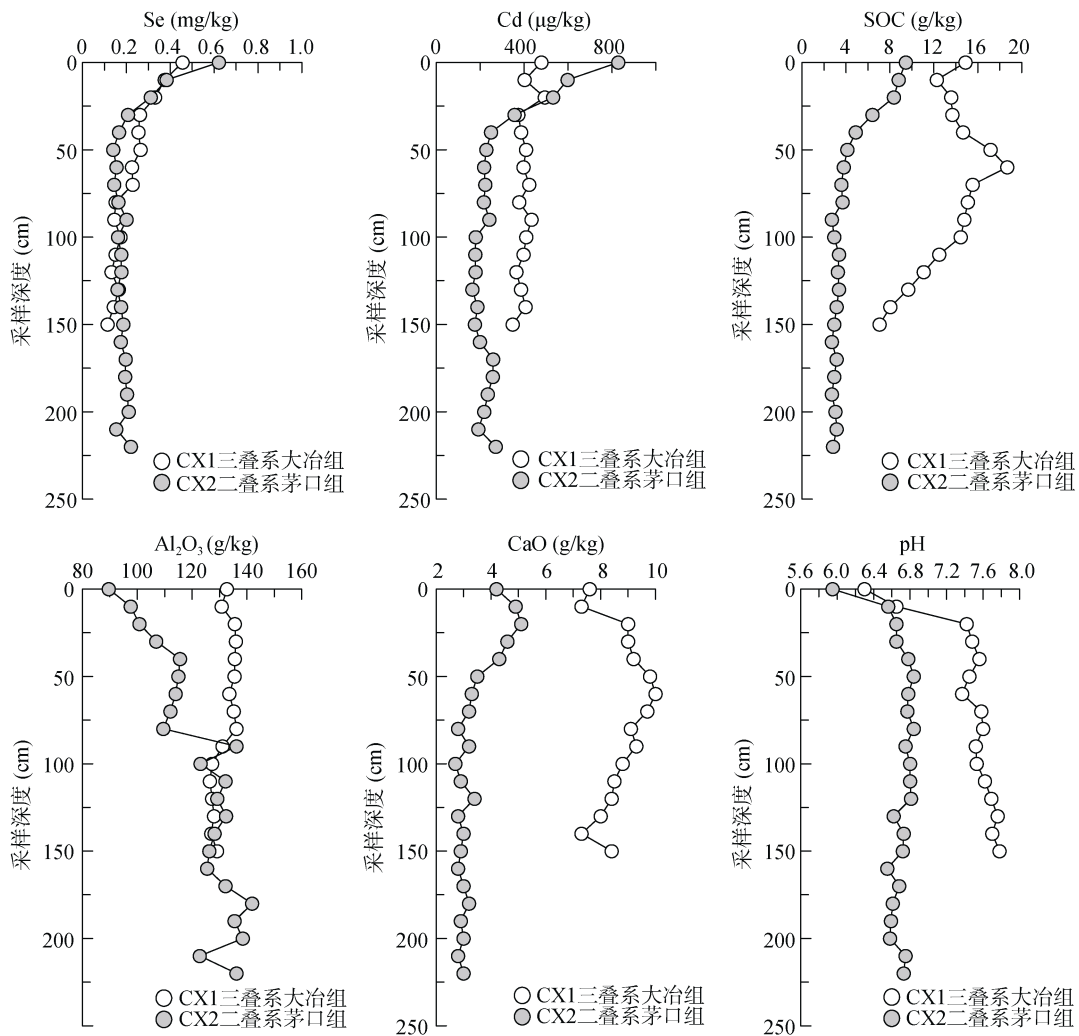


图 3 土壤垂向剖面 Se 等元素变化趋势
 Fig. 3 Changes of soil selenium and other elements in soil profiles

本文探讨了土壤 Se 与其他元素组合特征及来源,揭示了土壤 Se、Cd 伴生的成因,为土壤高 Se 地区如何安全利用富 Se 土壤资源奠定了基础。后续的研究中,有待进一步建立主要农作物籽实吸收 Se 等元素的预测模型,筛选富 Se 农作物种类,结合土壤 Cd 等重金属环境质量评价结果,提出富 Se 农产品开发和富 Se 土地资源规划利用建议。

3 结论

1) 研究区存在丰富的富 Se 土壤资源,研究区表层土壤 Se 含量平均值 1.88 mg/kg,是全国土壤 Se 含量均值的 7.12 倍。表层土壤 CaO、Sr 淋失严重,同时研究区的土壤 pH 变化范围较大(4.18~8.46)。

2) 研究区内土壤元素的共生组合特征分为 3 类,分别为受黑色岩系、黏土矿物及同族元素相似性等影响;因子分析结果进一步证实了黑色岩系是研究区土壤 Cd、Se 伴生的主要原因和重要来源。

3) 典型成土剖面土壤 Se 等元素变化趋势表明不同成土母质元素含量差异较大。

致谢:感谢安徽地质实验研究所提供的样品分析测试工作。

参考文献:

- [1] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. *The Lancet*, 2000, 356: 233-241
- [2] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *The Lancet*, 2012, 379 (9822): 1256-1268
- [3] 赵其国,尹雪斌. 我们的未来农业——功能农业[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(7): 457-468, 486
- [4] 冯彩霞,刘家军,刘燊,等. 硒资源及其开发利用概况[J]. *地质与资源*, 2002, 11(3): 152-156
- [5] Riley K W, French D H, Lambropoulos N A, et al. Origin and occurrence of selenium in some Australian coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 72 (2): 72-80
- [6] Wang L, Ju Y, Liu G, et al. Selenium in Chinese coals: distribution, occurrence, and health impact[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60 (8): 1641-1651
- [7] Wang Z, Gao Y. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16 (11-12): 1345-1351
- [8] Winkel L, Vriens B, Jones G, et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review[J]. *Nutrients*, 2015, 7 (6): 4199-4239
- [9] Sun G, Meharg A, Li G, et al. Distribution of soil selenium in China is potentially controlled by deposition and volatilization? [R]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20953
- [10] 王锐,余涛,曾庆良,等. 我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 359-366
- [11] Lv Y, Yu T, Yang Z, et al. Constraint on selenium bioavailability caused by its geochemical behavior in typical Kaschin-Beck disease areas in Aba, Sichuan Province of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 737-749
- [12] 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
- [13] 罗友进,韩国辉,孙协平,等. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 131-138
- [14] 张宝军,钟松臻,龚如雨,等. 赣南低丘红壤水稻土硒及其生物有效形态的组成与分布[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 150-154
- [15] 李杰,杨志强,刘枝刚,等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5): 1012-1020
- [16] 迟凤琴,徐强,匡恩俊,等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1262-1274
- [17] 黄春雷,宋明义,魏迎春. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4405-4410
- [18] 陈显著,李就好. 广州市土壤硒含量的分布及其影响因素研究[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(4): 401-407
- [19] 曹容浩. 福建省龙海市表层土壤硒含量及影响因素研究[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(3): 282-288
- [20] 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
- [21] Yu T, Yang Z, Lv Y, et al. The origin and geochemical cycle of soil selenium in a Se-rich area of China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 97-108
- [22] 周越,吴文良,孟凡乔,等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(6): 527-532
- [23] 王勤锋,解启来,杨彬,等. 硒的土壤化学特性及有效性研究进展[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(2): 220-224
- [24] 梁东丽,彭琴,崔泽玮,等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 374-380
- [25] 杨忠芳,余涛,李敏,等. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295-2016[S]. 北京:地质出版社,2016: 1-52
- [26] 张文彤,董伟. SPSS 统计分析高级教程(第 3 版)[M]. 北京:高等教育出版社,2018: 1-525
- [27] 温汉捷,裘愉卓,凌宏文,等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义[J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 619-626
- [28] 李家熙,张光弟,葛晓立,等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京:地质出版社,2000: 1-204
- [29] 张光弟,葛晓立,张绮玲,等. 湖北恩施硒中毒区土壤硒的分布及其控制因素[J]. *中国地质*, 2001, 28(9): 37-41
- [30] 梁若玉,和娇,史雅娟,等. 典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1588-1595

Characteristics and Sources of Soil Selenium and Other Elements in Typical High Selenium Soil Area of Enshi

YU Tao^{1,3}, YANG Zhongfang^{2,3*}, WANG Rui², ZENG Qingliang², HOU Wanling²

(1 *School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2 *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3 *Key Laboratory of Ecological Geochemistry, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China*)

Abstract: Selenium is one of the important trace elements in humans and animals and plays an important role in the development of functional agriculture. In order to study the combination characteristics and sources of selenium and other elements in high selenium soils to support the safe and effective utilization of selenium-enriched land resources, two hundred topsoil samples and two sets of vertical soil profile samples were collected and analyzed in Shadi Town, Enshi. The topsoil data were interpreted by cluster analysis and factor analysis using statistical tools. The results showed that the arithmetic mean value of selenium content in the topsoil of the study area was $1.88 \text{ mg/kg} \pm 2.51 \text{ mg/kg}$, which was significantly higher than that in the topsoil of the country. Soil element combinations in the study area can be divided into three categories, in the first type, selenium, molybdenum, vanadium, chromium, cadmium, nickel and other elements had strong relationships, and are closely related to the distribution of black rock series; the second type included aluminum oxide, lead and arsenic, which were related to clay minerals in the soil; the third type included calcium and strontium, indicating that the geochemical properties of the same group elements were close to each other. The results of factor analysis further confirmed that the black rock series were the main source of selenium and cadmium in the soil. The differences of element concentrations in various soil parent materials were significant.

Key words: Selenium; Element combination; Source; Factor analysis