

高婕妤,周小娟,万翔,等.湖北省建始县土壤硒分布特征及影响因素分析[J].华中农业大学学报,2023,42(1):212-218.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.026

湖北省建始县土壤硒分布特征及影响因素分析

高婕妤,周小娟,万翔,胡尚军,田野,胡江龙

湖北省地质调查院,武汉 430000

摘要 为探讨湖北省建始县土壤硒分布特征、硒的有效性及其影响因素,本研究基于2015—2020年建始县土地质量地球化学评价调查结果,以建始县全域土壤及典型剖面为研究对象,分析不同土壤类型硒含量特征、土壤垂直剖面硒含量分布、土壤硒与理化性质的相关性。建始县土壤硒含量介于0.08~64.20 mg/kg,平均值为0.94 mg/kg,总体上属于足硒及富硒范畴。在建始县主要的土壤类型中,红壤、棕壤、黄壤中硒含量较高,紫色土中硒含量较低。土壤中硒含量在垂向剖面上变化明显,随着土壤剖面深度的增加,土壤硒含量逐渐降低,与土壤有机质的变化趋势一致。土壤中SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃和CaO等含量与硒含量呈现显著正相关,土壤硒与铬、镉、镍、钼等元素相关性较强,存在伴生关系。同时土壤有效硒含量与土壤pH和阳离子交换量存在显著的正相关。结果表明,土壤中硒的来源与土壤有机质密切相关,土壤硒与重金属伴生问题是富硒土壤开发利用的重要限制条件,提高土壤pH是增强硒生物有效性的有效技术途径。

关键词 硒资源利用;土壤剖面;地球化学特征;硒生物有效性;重金属伴生

中图分类号 X37; S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0212-07

硒是人体必需的微量营养元素,其作为谷胱甘肽过氧化物酶系统的重要组成部分而参与人体抗氧化系统的运作^[1],因此,加强人体硒营养十分重要。植物性膳食硒是人体硒营养的重要来源^[2],而土壤硒则是影响食物链中硒含量的关键因素。

全球土壤的硒含量均值为0.4 mg/kg,中国有51%国土面积土壤硒含量缺乏,其中有1/3的地带极度缺硒^[3]。虽然我国土壤硒资源整体较为缺乏,但也存在多个富硒区,其中湖北恩施因丰富的硒资源而被喻为“世界硒都”,是生产富硒农产品的宝贵资源。合理高效地利用富硒土壤资源具有重要的现实意义,探明富硒土壤的分布及特征则是前提条件。

土壤理化性质对土壤硒生物有效性具有重要影响。硒在土壤中受到“吸附-解吸”、“沉淀-溶解”和“氧化-还原”等过程的影响^[4]，“吸附-解吸”和“沉淀-溶解”过程主要影响硒在土壤中的迁移和存在形态，“氧化-还原”过程主要影响硒的赋存价态,这些物理化学及生物过程最终影响硒在土壤中的迁移转化和生物有效性^[5-6]。土壤有效硒是评价土壤中硒生物有效性的决定因素,pH、有机质和阳离子交换量等理化性质都会影响硒在土壤固液相之间迁移转化,从

而影响硒的生物有效性^[5-6]。

前人对恩施土壤硒资源的调查研究多集中于土壤硒的水平分布或仅关注高硒或硒中毒区域硒的赋存特征和健康风险^[7-10],对土壤硒的剖面垂直分布、理化性质之间的关系研究较少。本研究以湖北省恩施土家族苗族自治州建始县全域土壤为研究对象,基于土地质量地球化学调查和土壤剖面分析,对土壤硒分布特征、硒的有效性及其影响因素等进行研究,以为土壤硒资源的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为湖北省恩施土家族苗族自治州建始县,位于湖北西南武陵山腹地,亚热带季风湿润型山地气候,地理坐标为北纬30°06′~30°54′,东经109°32′~110°12′,生态优良,资源富集,素有“金建始”美誉。地处云贵高原的东延部分,县境地貌形态主要有岩溶地貌和构造地貌2种。土壤类型以黄棕壤、棕壤、黄壤为主。

1.2 样品采集与处理

根据DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评

收稿日期:2022-11-07

基金项目:湖北省地质调查院科技项目(KJ2022-56)

高婕妤,E-mail:gaojieyu1995@126.com

价规范》等相关要求,对建始县进行土壤硒资源详查。本研究数据包含《1:25万湖北省长阳-恩施多目标区域地球化学调查》《湖北省建始县土地质量地球化学评价(一期)》《建始县土地质量地球化学评价暨土壤硒资源普查(内部资料)》项目样本数据,本次调查以耕、园、草地及药材基地为主,其中表层土壤平均采样密度为17个/km²,分析样共计10 678件,样品采集深度为0~20 cm;有效态样品样点布设密度为1个/4 km²,分析样共计147件,样品采集深度为0~20 cm;土壤垂直剖面测量点41个,分别在0~20、20~70、70~120、120~150和150~200 cm分层取样,共采集土壤垂直剖面样205个。

样品采集方法及精度按照DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》要求进行。

样品制备、样品分析等方法及质量要求参照中国地质调查局DZ/T 0285—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》、DD 2005—03《生态地球化学评价样品分析技术要求》、DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》等相关技术标准执行。土壤样品元素分析方法见表1。

表1 土壤样品元素分析方法

Table 1 Methods for elemental analysis of soil samples

分析方法 Analysis method	简称 Abbreviation	测定元素或指标 Index
电感耦合等离子体原子发射光谱法 Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry	ICP-OES	Mn、Ni、CaO、MgO
电感耦合等离子体质谱法 Inductively coupled plasma mass spectrometry	ICP-MS	Co、Cd、Pb、Cu、Zn、Mo
X射线荧光光谱法 X-ray fluorescence spectrometry	XRF	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、TFe ₂ O ₃ 、Cr、P、S
原子荧光光谱法 Atomic fluorescence spectrometry	AFS	As、Hg、Se
离子选择性电极法 Ion-selective electrode method	ISE	F
容量法 Volumetric method	VOL	有机碳 Organic carbon
电极法(水土质量比2.5:1) Ion-selective electrode method (water/soil of 2.5:1(w/w))	ISE	pH

1.3 数据处理

原始数据通过Excel整理汇总,利用SPSS 20.0进行数据分析,用Origin 2018作图。

2 结果与分析

2.1 建始县土壤硒含量分布特征

参考谭见安^[11]划定的富硒土壤标准,调查发现研究区内0.07%的土壤硒含量缺乏(低于0.125 mg/kg);0.62%的土壤硒含量相对较低(0.125~0.175 mg/kg);26.31%的土壤硒含量处于中等水平(0.175~0.4 mg/kg);66.58%的土壤硒含量较为充足(0.4~3.0 mg/kg);6.42%的土壤硒含量过量(高于3 mg/kg),有潜在的硒中毒风险。总的来说,建始县土壤硒资源较为丰富,有73%的土壤硒含量超过了富硒土壤标准(0.4 mg/kg),具有富硒土壤开发潜力。

2.2 调查区不同土壤类型的硒含量

如表2所示,所采集土壤样品总硒含量范围介于0.08~64.20 mg/kg,平均值为0.94 mg/kg,高于恩施土壤硒含量均值(0.72 mg/kg^[12])和中国土壤(A层)的硒含量均值(0.29 mg/kg),调查区土壤硒含量变异系数较高,为191.3%,表明研究区内土壤硒含量分布不够均匀。在所有的土壤类型中,红壤的硒含量明显高于其他类型土壤,硒含量在0.15~12.60 mg/kg,均值为2.11 mg/kg。其次为棕壤,硒含量在0.16~26.00 mg/kg,均值为1.21 mg/kg。紫色土和石灰土的硒含量相对较低,平均硒含量分别为0.34和0.56 mg/kg。总之,土壤硒含量高低呈现红壤>棕壤>黄壤>草甸土>水稻土>黄棕壤>潮土>石灰土>紫色土的趋势。在调查区的土壤中,除紫色土硒含量处于中等水平外,其余8种类型土壤硒含量均处于充足水平。

2.3 土壤剖面的硒分布特征

本研究中,根据剖面深度将土壤剖面分为0~20、20~70、70~120、120~150和150~200 cm,不同深度土壤的总硒和有机质含量差异较大,供试土壤剖面逐一对应不同深度的土壤硒含量分别为1.61、0.78、0.47、0.45、0.38 mg/kg。随着剖面深度的增加,土壤中的硒含量逐渐降低,可能是受到淋溶作用或生物累积作用导致土壤浅层富集(图1A)。供试土壤剖面逐一对应不同深度的土壤有机质含量分别为24.62、16.50、12.17、10.42、8.92 g/kg。可以看出,随着剖面深度的增加,土壤有机质含量变化趋势与土壤硒含量变化趋势相同(图1B),表明有机质在一定程度上影响硒的固定,进而影响硒的含量。

2.4 土壤氧化物对土壤硒含量的影响

由表3可知,调查区土壤硒含量受到Al₂O₃、

表2 不同土壤类型的硒含量

Table 2 Characteristics of selenium content in different soil types

土壤类型 Soil type	样本数 Numbers	硒含量/(mg/kg) Se contents	最小值/(mg/kg) Minimum value	最大值/(mg/kg) Maximum value	标准差/(mg/kg) Standard deviation	变异系数/% Variation coefficient
水稻土 Paddy soil	577	0.90	0.08	13.54	1.44	160.3
潮土 Moisture soil	60	0.72	0.21	1.53	0.36	49.9
黄棕壤 Yellow brown soil	5 606	0.85	0.13	64.20	1.73	204.2
棕壤 Brown soil	1 550	1.21	0.16	26.00	1.61	132.4
石灰土 Lime soil	403	0.56	0.12	7.16	0.82	146.7
黄壤 Yellow soil	2 056	1.14	0.08	38.43	2.33	205.0
红壤 Red soil	48	2.11	0.15	12.60	3.10	147.0
紫色土 Purple soil	284	0.34	0.08	2.78	0.26	76.4
草甸土 Meadow soil	94	1.09	0.30	19.90	2.02	185.2
全部样品 Total	10 678	0.94	0.08	64.20	1.81	191.3

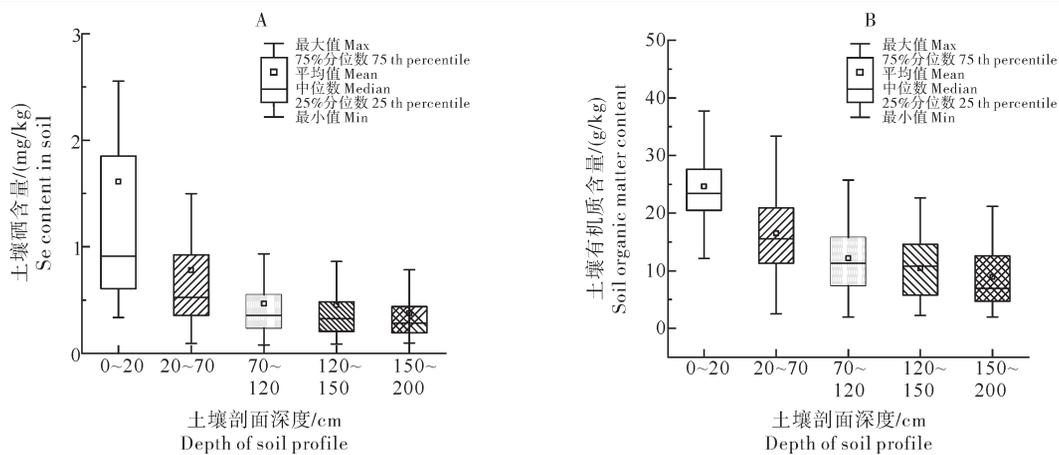


图1 不同土壤剖面采样深度的土壤硒含量(A)和有机质含量(B)

Fig.1 Soil selenium(A) and organic matter(B) in different profile sampling depth

TF₂O₃、SiO₂等氧化物的影响,建始县土壤中氧化物主要以SiO₂形式存在,含量在41.44%~88.42%,远高于Al₂O₃(4.22%~21.23%)、TF₂O₃(0.79%~19.26%)、MgO(0.24%~17.11%)、CaO(0.07%~18.02%)含量。对土壤中硒与氧化物含量进行相关

性分析(表4)发现,硒与SiO₂、Al₂O₃、TF₂O₃和CaO含量呈现显著正相关,相关系数分别为0.151、0.201、0.045和0.087($P < 0.001$)。表明土壤中石英矿物、铁氧化物及黏土矿物等对硒具有一定的固持能力,进而影响土壤硒含量。

表3 建始县土壤中不同氧化物含量

Table 3 The soil oxides content in Jianshi County

氧化物 Oxide	平均值/% Average	最小值/% Minimum	最大值/% Maximum	标准差/% Standard deviation	变异系数/% Variation coefficient
SiO ₂	68.39	41.44	88.42	4.62	6.70
Al ₂ O ₃	13.08	4.22	21.23	2.07	15.80
TF ₂ O ₃	5.68	0.79	19.26	1.16	20.40
MgO	1.76	0.24	17.11	1.49	84.70
CaO	0.59	0.07	18.02	0.93	156.90

2.5 硒与其他元素的相关性分析

图2为土壤中硒与其他元素之间的相关性分析结果。可见土壤中硒与铬、镉、镍和钼元素的相关性较高,相关系数分别为0.77、0.73、0.67和0.61,均为

极显著($P < 0.01$)。此外硒与锌元素($r = 0.39, P < 0.01$)、铜元素($r = 0.35, P < 0.01$)、汞元素($r = 0.23, P < 0.01$)和硫元素($r = 0.21, P < 0.01$)也呈现显著正相关。土壤中硒与砷、钴、氟、锰、磷、铅等元素之间

表 4 土壤氧化物与硒(Se)含量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil oxides and soil selenium content

项目 Item	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO
皮尔逊相关性 Pearson correlation	0.151***	0.201***	0.045***	0.003	0.087***
显著性(双侧) Significance(Two-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.805	0.000

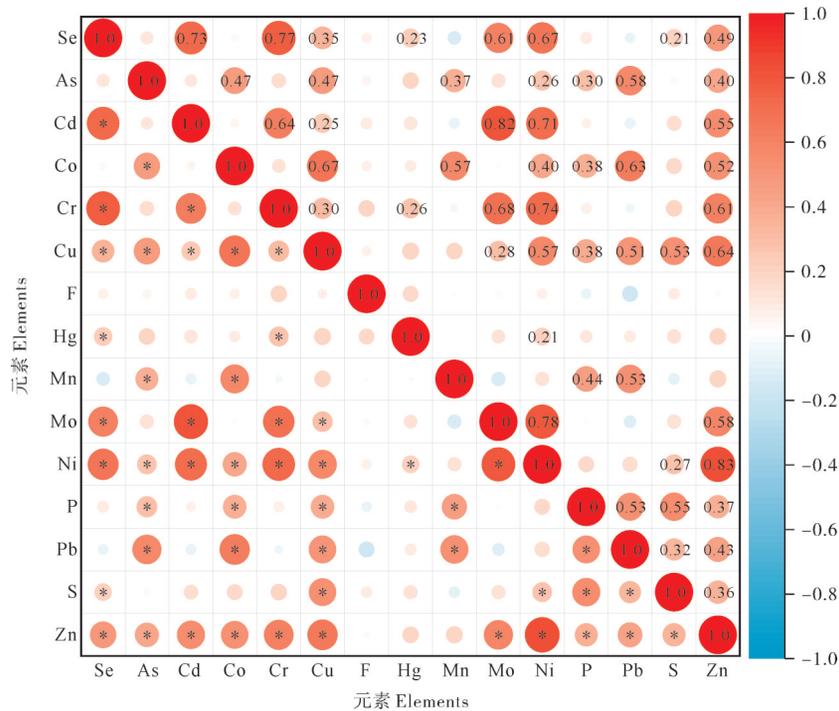
注：“***”表示极显著差异($P < 0.001$)。Note: *** indicates significant difference($P < 0.001$).

无显著相关性。表明硒元素与铬、镉、镍、铜等重金属常呈现伴生关系,因此,高效利用建始县天然富硒土壤的关键是处理好硒与重金属之间的关系。

2.6 土壤有效硒与理化性质的关系

土壤pH是影响土壤硒有效性的重要因素,能够影响硒的形态和有效性,如图3A所示,土壤有效硒含量与土壤pH呈现显著的正相关关系,相关性系数为0.44($n=147, P < 0.01$),表明碱性条件下的富硒土壤有利于可利用硒含量的增加,进而有利于植物的吸收,主要是因为土壤在碱性状态下,土壤中的氢氧化物会与硒竞争吸附位点,进而造成有效态硒的释放。

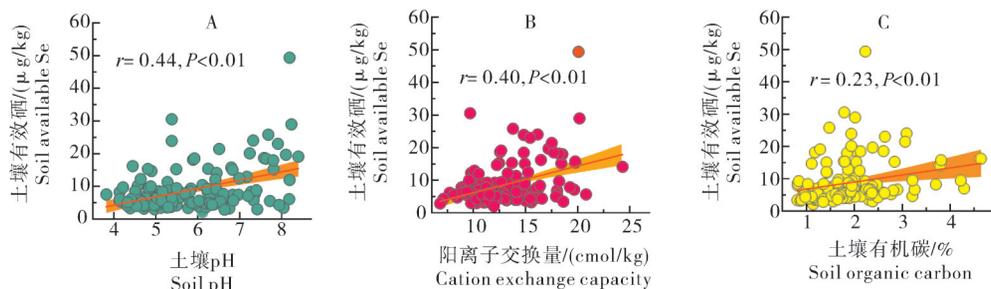
土壤有效硒含量与土壤阳离子交换量也存在显著的正相关关系,相关性系数为0.40($n=147, P < 0.01$) (图3B),随着阳离子交换量的增加,土壤有效态硒含



“*”代表差异极显著($P < 0.01$)。* indicates the significant difference ($P < 0.01$).

图 2 土壤硒与其他元素之间的相关性

Fig.2 Correlation between soil selenium and other elements



“r”值代表 Pearson 相关系数。“r” values mean Pearson’s correlation coefficients.

图 3 土壤有效硒与土壤 pH(A)、阳离子交换量(B)以及土壤有机碳(C)的关系

Fig.3 The relationship between soil available selenium and soil pH(A), cation exchange capacity(B) and soil organic carbon(C)

量呈现增加的趋势。土壤有效硒含量与有机碳含量同样存在显著正相关关系,相关系数为0.23($n=147, P<0.01$),表明土壤中有机的丰缺程度能够影响硒的生物有效性,但这种关系也可能受土壤总硒含量的影响较大。

3 讨论

3.1 土壤类型和有机质决定土壤硒含量

在调查区的土壤中,红壤硒含量(2.11 mg/kg)显著高于其他土壤类型,依次为棕壤(1.21 mg/kg)>黄壤(1.14 mg/kg)>草甸土(1.09 mg/kg)>水稻土(0.90 mg/kg)>黄棕壤(0.85 mg/kg)、潮土(0.72 mg/kg)>石灰土(0.56 mg/kg)>紫色土(0.34 mg/kg)。紫色土主要发育于三叠系巴东组紫红色粉砂质页岩,其抗蚀力弱,物理风化作用强烈,常处于幼年发育阶段,导致硒含量低于其他类型土壤。红壤和黄壤成土母质多为石灰岩和泥质页岩等,其质地黏重且盐基饱和度低,因此有利于硒的富集,故而硒含量相对较高。此外,棕壤主要分布于海拔800~1500 m以上地区,气温较低,土壤有机质分解速度较慢,从而有利于硒的积累。土壤金属氧化物含量主要取决于成土母质类型、风化和淋溶迁移作用等,不同土壤类型的金属氧化物组成差异巨大。在本研究中土壤 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和CaO等含量与Se呈现显著正相关,同时覃建勋等^[13]对广西武鸣岩溶区土壤硒与金属氧化物含量分析后发现,硒与土壤中 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 以及 SiO_2 含量呈现较高相关性。因此,我们认为风化作用对土壤中硒的富集起到重要作用,石英矿物、含Fe矿物以及黏土矿物主导了土壤中硒元素富集。此外,土壤中的游离氧化铁、氧化铝、氧化锰及其氢氧化物可以与硒形成难溶的复合物,从而将硒固定在土壤中^[14]。

此外,本研究中土壤有机质和硒含量随着土壤剖面深度的增加而逐渐降低,呈现相同的变化趋势,这从侧面证实了土壤有机质对土壤硒含量的潜在影响。Lü等^[4]对取自恩施的92个富硒土壤分析后发现,土壤硒含量和土壤有机质含量呈显著的正相关性,相关系数达到0.539($P<0.01$)。前人研究表明恩施土壤中的硒主要来源于碳含量较高的碳质页岩和富硒石煤等,因而土壤有机碳含量与土壤硒含量关系密切^[4,15-16]。这些裸露在外的黑色岩石风化后在表层土壤聚集,因此,随着土壤深度增加,硒含量也逐渐下降。综上,土壤类型和土壤有机质显著影响

土壤硒含量。

3.2 土壤硒与重金属存在伴生关系

本研究中土壤硒与镉、铬、汞和镍等重金属存在伴生关系。耿建梅等^[17]对海南稻田土壤中元素分布特征的研究也发现了类似的结果。富硒土壤中硒与铬、镉、镍和钼等重金属的伴生关系与建始县的主要富硒地层-二叠系地层岩石中的元素含量关系密切,也限制了富硒土壤的利用。前人对恩施高硒区生长的主要农作物进行硒和镉含量分析后发现,虽然作物硒含量达到了富硒水平,但也存在一定程度的重金属超标问题^[12]。因此,土壤重金属含量较高是富硒土壤开发利用的重要制约因素。此外,在我国浙江金华、海南、广西和安徽石台等地的富硒土壤也都存在不同程度的土壤镉超标问题^[17-18]。因此,硒与重金属伴生是制约富硒土壤开发利用的重要问题,降低重金属的移动性和生物有效性是利用富硒土壤生产富硒农产品的前提^[19]。

3.3 土壤pH能够调控土壤硒有效性

土壤有效硒含量与土壤pH和阳离子交换量呈现显著正相关性,因此,土壤有效硒含量可能受到土壤pH和阳离子交换量的调控。Lü等^[4]对取自恩施的土壤样品进行分析后发现,土壤水溶态硒和交换态硒与土壤pH呈现显著正相关性,本研究的结果也与此相符。此外,有研究人员发现在pH较高的土壤中,硒的生物有效性也相对较高^[20-21]。张艳玲等^[22]发现提高土壤pH可以显著提高土壤水溶态硒的含量,从而提高土壤中硒的生物有效性。土壤pH可能主要通过影响土壤中硒的吸附解吸过程从而影响有效态硒含量^[20,23],当土壤pH较高时,土壤固相表面的负电荷量较多,因而促进硒从土壤固相表面的解吸过程。而当土壤pH下降时,其负电荷量降低,正电荷量则相对增强,因而对土壤中硒的吸附作用增强^[20]。此外,龚河阳等^[24]和赵妍等^[25]均发现土壤有效硒随着土壤阳离子交换量的增强而升高,这与土壤阳离子交换量受到土壤pH的影响有关。总的来说,提高土壤pH是提高富硒土壤硒生物有效性的有效途径。

综上所述,建始县土壤硒含量均值显著高于中国土壤(A层)的硒含量均值,土壤硒资源极为丰富。受土壤母质和成土过程的影响,不同土壤类型硒含量表现为红壤>棕壤>黄壤>草甸土>水稻土>黄棕壤>潮土>石灰土。土壤中硒的来源与土壤有机质密切相关,土壤硒与重金属伴生问题是富硒土壤

开发利用的重要限制条件,同时提高土壤pH是增强硒有效性的有效途径。本研究探究了建始县土壤硒分布特征以及土壤理化性质等对土壤有效硒的影响,下一步将针对硒与重金属伴生问题,基于土壤硒与重金属含量对耕地土壤进行详细的划分,同时对富硒土壤中硒的赋存形态进行更深入的研究,以期作为土壤硒资源的安全利用提供依据。

参考文献References

- [1] RAYMAN M P, RAYMAN M P. The argument for increasing selenium intake [J]. The proceedings of the nutrition society, 2002, 61(2): 203-215.
- [2] RAYMAN M P. Selenium and human health [J]. The lancet, 2012, 379(9822): 1256-1268.
- [3] DINH Q T, CUI Z W, HUANG J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review [J]. Environment international, 2018, 112: 294-309.
- [4] LÜ C H, QIN Y J, ZHAO Z Q, et al. Characteristics of selenium enrichment and assessment of selenium bioavailability using the diffusive gradients in thin-films technique in seleniferous soils in Enshi, Central China [J/OL]. Environmental pollution, 2021, 273: 116507 [2022-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116507>.
- [5] 李永华, 王五一. 硒的土壤环境化学研究进展 [J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 230-233. LI Y H, WANG W Y. Process on the study soil environmental chemistry of selenium [J]. Chinese journal of soil science, 2002, 33(3): 230-233 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系 [J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823-830. WANG S S, LIANG D L, WEI W, et al. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis [J]. Acta pedologica sinica, 2011, 48(4): 823-830 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 (in Chinese with English abstract).
- [8] QIN H B, ZHU J M, LIANG L, et al. The bioavailability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China [J]. Environment international, 2013, 52: 66-74.
- [9] LONG Z D, XIANG J Q, SONG J P, et al. Soil Selenium concentration and residents daily dietary intake in a selenosis area: a preliminary study in Yutangba Village, Enshi City, China [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2020, 105: 798-805.
- [10] LYU C H, CHEN J W, LI L, et al. Characteristics of Se in water-soil-plant system and threshold of soil Se in seleniferous areas in Enshi, China [J/OL]. Science of the total environment, 2022, 827: 154372 [2022-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154372>.
- [11] 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: 83-118. TAN J A. The atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 83-118 (in Chinese).
- [12] 唐世琪, 万能, 曾明中, 等. 恩施地区土壤与农作物硒地球化学特征 [J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 607-614. 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 (in Chinese with English abstract).
- [13] 覃建勋, 付伟, 郑国东, 等. 广西岩溶区表层土壤硒元素分布特征与影响因素探究——以武鸣县为例 [J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1299-1310. QIN J X, FU W, ZHENG G D, et al. Selenium distribution in surface soil layer of Karst area of Guangxi and its affecting factors: a case study of Wuming County [J]. Acta pedologica sinica, 2020, 57(5): 1299-1310 (in Chinese with English abstract).
- [14] 袁知洋, 郑金龙, 戴光忠, 等. 恩施富硒土壤区土壤硒与其理化性质关系研究 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1852-1859, 1967. YUAN Z Y, ZHENG J L, DAI G Z, et al. Relationship between selenium and cadmium and physicochemical properties of soil in Se rich soil area of Enshi Hubei [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2019, 32(8): 1852-1859, 1967.
- [15] 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.
- [16] YUDOVICH Y E, KETRIS M P. Selenium in coal: a review [J]. International journal of coal geology, 2006, 67(1/2): 112-126.
- [17] 耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等. 海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3477-3486. GENG J M, WANG W B, WEN C P, et al. Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security [J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(11): 3477-3486 (in Chinese with English abstract).
- [18] YANG B B, YANG C, SHAO Z Y, et al. Selenium (Se) does not reduce cadmium (Cd) uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) in naturally occurred Se-rich paddy fields with a high geological background of Cd [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2019, 103(1): 127-132.
- [19] LYU C H, QIN Y J, CHEN T, et al. Microbial induced carbonate precipitation contributes to the fates of Cd and Se in Cd-contaminated seleniferous soils [J/OL]. Journal of hazardous materials, 2022, 423: 126977 [2022-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126977>.
- [20] LI J, PENG Q, LIANG D L, et al. Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils [J]. Chemosphere, 2016, 144: 2351-2359.
- [21] WANG D, ZHOU F, YANG W X, et al. Selenate redistribution during aging in different Chinese soils and the dominant influential factors [J]. Chemosphere, 2017, 182: 284-292.

- [22] 张艳玲,潘根兴,胡秋辉,等.江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性[J].植物营养与肥料学报,2002,8(3):355-359.ZHANG Y L,PAN G X,HU Q H, et al.Selenium fractionation and bio-availability in some low-Se soils of central Jiangsu Province[J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2002,8(3):355-359 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王锐,余涛,杨忠芳,等.富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.WANG R,YU T,YANG Z F, et al.Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil [J].Resources and environment in the Yangtze Basin,2018,27(7):1647-1654 (in Chinese with English abstract).
- [24] 龚河阳,李月芬,汤洁,等.吉林省西部土壤硒含量、形态分布及影响因素[J].吉林农业大学学报,2015,37(2):177-184,190.GONG H Y,LI Y F,TANG J, et al.Content, form distribution and influencing factors of soil selenium in western Jilin Province [J].Journal of Jilin Agricultural University,2015,37(2):177-184,190 (in Chinese with English abstract).
- [25] 赵妍,宗良纲,曹丹,等.江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2467-2474.ZHAO Y,ZONG L G,CAO D, et al.Distribution and availability of selenium in typical tea garden of Jiangsu Province, China [J].Journal of agro-environment science,2011,30(12):2467-2474 (in Chinese with English abstract).

Characteristics and influencing factors of selenium distribution in soil in Jianshi County, Hubei Province

GAO Jieyu,ZHOU Xiaojuan,WAN Xiang,HU Shangjun,TIAN Ye,HU Jianglong

Hubei Geological Survey, Wuhan 430000, China

Abstract The whole area of soil and typical profiles in Jianshi County were used to analyze the characteristics of the content of selenium in different soil types, the distribution of the content of selenium in vertical soil profiles, and the correlation between the content of in soil and the physical and chemical properties based on the survey results of geochemical evaluation of land quality in Jianshi County, Hubei Province from 2015 to 2020 to study the characteristics and influencing factors of selenium enrichment in the soil in Jianshi County. Results showed that the content of Se in the soil in Jianshi ranged from 0.08 mg/kg to 64.20 mg/kg, with a mean of 0.94 mg/kg. In general, the content of Se in the soil in Jianshi reached the level of seleniferous soils. Among the main types of soil in Jianshi County, the content of selenium in red soil, brown soil and yellow soil was relatively higher than that in other soil types, and the content of selenium in purple soil was the lowest. The depth of soil profile had a significant effect on the content of selenium in soil. The content of selenium in soil was gradually decreased with the increase of the depth of soil profile, consistent with the change trend of organic matter in soil. The content of SiO_2 , Al_2O_3 , TFe_2O_3 and CaO in the soil was significantly positively correlated with the content of selenium in the soil. In addition, the content of selenium in the soil was strongly correlated with the content of Cr, Cd, Ni, and Mo in the soil, indicating that the source of Se in the soil is closely related to organic matter in the soil. At the same time, the content of available Se in soil was significantly positively correlated with the pH in soil, indicating that increasing the pH in soil is an effective approach for improving the bioavailability of Se in soil.

Keywords Se resource utilization; soil profile; geochemical characteristics; selenium bioavailability; heavy metal associated

(责任编辑:赵琳琳)