

doi: 10.11720/wtyht.2021.1598
张春来,杨慧,黄芬,等.广西马山县岩溶区土壤硒含量分布及影响因素研究[J].物探与化探,2021,45(6):1497-1503.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1598
Zhang C L, Yang H, Huang F, et al. Distribution and influencing factors of selenium content in soil in karst areas in Mashan County, Guangxi, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1497-1503. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1598

广西马山县岩溶区土壤硒含量分布及影响因素研究

张春来¹, 杨慧¹, 黄芬¹, 曹建华^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所 自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 联合国科教文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为调查广西马山县岩溶区土壤全硒含量分布特征, 探讨不同成土母质、土地利用方式和土壤类型对土壤硒含量的影响, 采集马山县北部表层土壤(0~20 cm)样品 492 个, 采用统计学方法对土壤硒含量进行空间分布特征研究。结果表明: 土壤硒含量变幅为 $(0.20\sim3.54)\times10^{-6}$, 平均值为 0.76×10^{-6} , 富硒面积占到 98.29%, 变异系数为 34.49%。研究区含有黑色页岩和煤系地层的二叠系合山组发育的土壤硒含量最高, 平均为 1.17×10^{-6} ; 石炭系马平组最低, 平均为 0.64×10^{-6} 。赤红壤硒含量最高, 平均值为 1.04×10^{-6} ; 而潮土硒含量最低, 平均值为 0.56×10^{-6} 。不同土地利用方式间以林地与果园表层土壤中硒含量相对较高, 水田、草地和旱地土壤硒含量低。影响土壤硒含量的主要因素是成土母质, 有机质含量对土壤硒富集也有一定影响。

关键词: 硒; 土壤; 岩溶; 成土母质; 土地利用

中图分类号: P595; X142; P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)06-1497-07

0 引言

硒元素通过食物链进入人体, 发挥抗氧化、增强免疫和重金属解毒等多种生物学作用, 是生物体必需的微量元素之一^[1]。我国有 28 个省(直辖市、自治区)约 72% 县的饲料和牧草中硒含量处于缺乏或严重缺乏状态^[2], 存在由东北到西南以棕褐土系为中心的低硒生态景观带, 土壤中硒的平均含量小于 0.17×10^{-6} ^[3], 土壤中生物学驱动的硒挥发速率抵消了东亚季风有关的硒沉降速率, 被认为是中国中部表层土壤硒贫化的主要原因^[4]。但低硒带的有机质较高、淋滤较强和碳酸盐母质地区也存在富硒土壤^[5], 土壤硒含量在区域上的空间差异主要受成土母质影响^[6-8]。硒能够以有机结合态、螯合态、吸附态富集存在于煤层和一些富含有机质的地层中^[9], 由此硅质岩、磷块岩、炭质页岩和碳酸盐岩及其变质

岩也具有较高的硒含量。碳酸盐岩风化过程中, 碱土元素被强烈淋溶, 而粘土矿物及含铁矿物高度富集, 增强了对硒的吸附作用, 导致岩溶区土壤硒表现出高度富集特征^[10]。

广西是全国连片富硒土壤面积最大、中国长寿之乡最多的区域, 也是西南地区碳酸盐岩集中分布的省份之一。多位学者从土地利用、成土母质、土壤理化性质或流域尺度等方面对广西土壤硒含量空间分布特征及相关性进行了研究^[10-16]。土壤硒继承了成土母岩的特点^[11], 以酸态硒为主, 其次是亚硒酸态和腐殖酸结合态硒^[13]。土壤硒含量与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、有机碳和 pH 值等有关^[12], 且不同成土母岩下土壤理化性质等影响因素也不同^[8, 10, 13, 17]。不同成土母质土壤中硒含量、形态及有效性存在差异, 开展土地利用和土壤类型对土壤全硒空间分布特征研究, 可以为富硒土壤资源的有效利用提供支撑。本研究选取广西马山县北部岩溶区, 对比分析不同成

土母质、土壤类型和土地利用方式下土壤硒地球化学特征,为富硒农业发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于广西马山县北部(图 1),地处东经 108.09°~108.2°,北纬 23.73°~23.85°,属于亚热带季风气候,年平均气温为 21.3℃,年降雨量 1480~1667 mm。

研究区出露地层有二叠系、三叠系以及石炭系,主要包括石炭系上统马平组(C_2mp),二叠系上统合山组(P_3h)、下统茅口组(P_1m)和栖霞组(P_1q),三叠系下统罗楼组(T_1l)等。土地利用方式多样,水田多位于岩溶谷地,主要土壤类型为水稻土;旱地分布在谷地两侧山坡或岩溶洼地底部,土壤类型为红壤、赤红壤或棕色石灰土;灌木林地分布在岩溶区山体,草地分布在石漠化区域,土壤类型均为棕色石灰土。

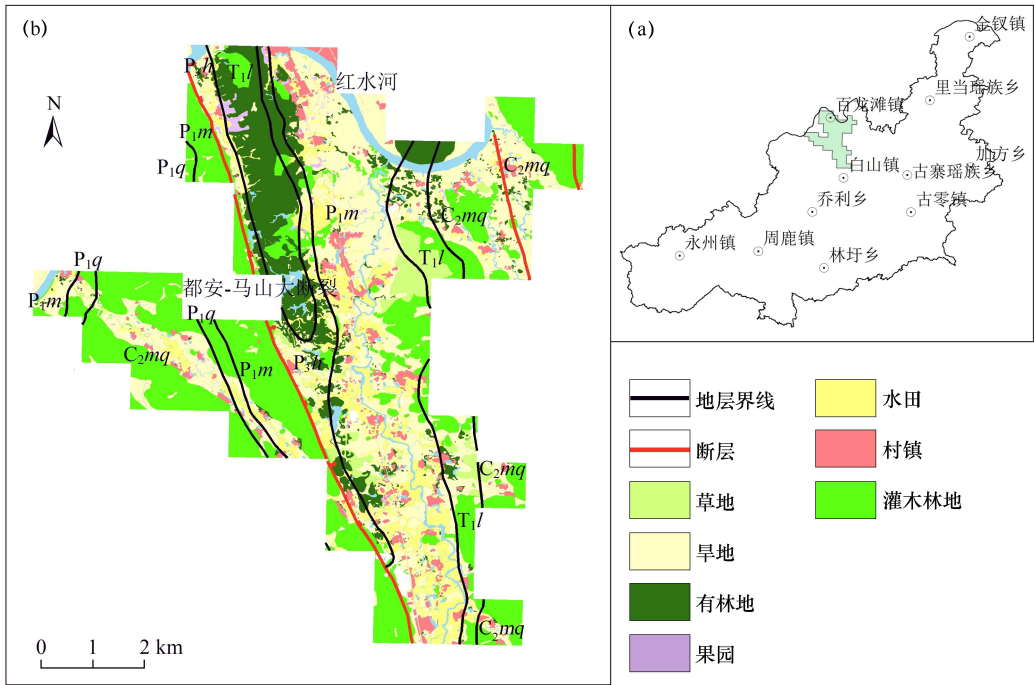


图 1 工作区位置示意 (a) 及主要土地利用方式 (b)
Fig.1 The study location (a) and the main land use types (b)

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

土壤样品采集和加工按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)于 2017 年 6 月进行。在叠加了等高线的 1:5 万土地利用现状图上,兼顾地层及土壤类型,按 4~12 个点/ km^2 采样。样品布设在土壤易于汇集的平缓坡地、山间平坝、低洼地带等部位,采样深度为 20 cm,在同一类土地利用方式中采用“S”形、“X”形或棋盘形向四周辐射 20~50 m 采集 3~5 等份子样组合成一个混合样,剔除落叶、石块、根系等杂物。农田样品避开施肥期,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,最大程度地反映区域内土壤环境状况。

采回的土壤样品自然风干,用木棍碾压,采用静电吸附法清除细小已断的植物须根,土样全部通过 2 mm 的孔径尼龙筛。

2.2 样品分析与数据处理

土壤 pH (土水比 1:2.5) 采用离子选择电极法测试,有机质采用重铬酸钾氧化—硫酸亚铁铵法滴定。XRF 法测定土壤样中的 K_2O 、Mn 等指标,原子荧光法 (AFS) 测定 Se、Hg。分析测试质量控制遵循行业标准 (DZ/T 0258—2014) 的有关要求, K_2O 、Mn、Se、Hg 的检出限分别为 0.01×10^{-2} 、 9.8×10^{-6} 、 0.01×10^{-6} 和 0.0005×10^{-6} ,准确度、精密度报出率和监控样合格率、重复样合格率均达到或优于《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016) 的要求,数据可靠。

采用 Excel 2010 进行数据处理及作图,SPSS 18.0 进行描述性统计分析、正态分布检验 (K-S 检

验),Arcgis10.2 进行空间插值,运用 GS+7.0 进行半方差分析及理论模型的建立。

3 结果与讨论

3.1 土壤硒含量特征及空间结构特征

本次研究共采集表层土壤样品 492 件,土壤硒含量最大值为 3.54×10^{-6} ,最小值为 0.20×10^{-6} ,中值为 0.74×10^{-6} ,剔除异常值($X\pm3S$) 后的算术平均值为 0.76×10^{-6} ,标准差为 0.26×10^{-6} ,变异系数为 34.49%,各级含量水平的分布频率符合正态分布。硒含量平均值高于世界表层土壤平均值 (0.40×10^{-6})^[18] 和全国土壤 A 层平均值(0.29×10^{-6})^[19]。

从半方差函数拟合结果可以看出(表 1),土壤硒空间分布的最优模型为球状模型,决定系数 R^2 为 0.981,残差 RSS 为 4.63×10^{-5} ,趋近于 0,表明其拟合精度较高,能够较好地反映土壤硒的空间结构特征。

表 1 土壤硒的半方差函数模型及相应参数

模型	块金值	基台值	块金效应	变程/km	拟合系数	残差
球状模型	0.0188	0.0727	74.10%	2.37	0.981	4.63×10^{-5}
高斯模型	0.0264	0.0726	63.60%	1.96	0.98	4.89×10^{-5}
指数模型	0.0087	0.0733	88.10%	2.46	0.968	7.81×10^{-5}
线性模型	0.0515	0.0800	35.60%	6.82	0.447	1.32×10^{-3}

Table 1 Semi-variogram function model for soil selenium and its corresponding parameters

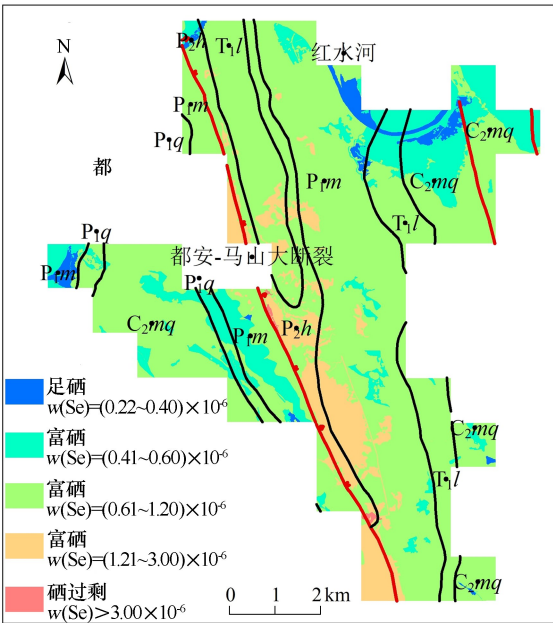


图 2 研究区土壤硒分级评价

Fig.2 Gradingchart of soil Se in study area

3.2 不同成土母质土壤硒含量与影响因素

不同成土母质土壤中硒含量存在着显著性差异,碎屑岩($(0.96\pm0.45)\times10^{-6}$,平均值 \pm 标准差,下

硒的块金效应为 74.10%,属于中等空间变异性,表明硒具有较强空间相关性,主要受结构性因素影响。土壤硒变程为 2.37 km,说明硒的空间自相关范围较大。

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)制定的土壤硒分级标准:缺硒($<0.125\times10^{-6}$)、低硒($0.125\times10^{-6}\sim0.175\times10^{-6}$)、足硒($0.175\times10^{-6}\sim0.40\times10^{-6}$)、富硒($0.40\times10^{-6}\sim3.0\times10^{-6}$)和硒过剩($\geq3.0\times10^{-6}$),编制了研究区表层土壤硒地球化学分级图。研究区土壤硒含量总体较高(图 2),富硒土壤面积为 61.12 km^2 ,占研究区的 98.29%,足硒和硒过剩面积分别为 0.95 km^2 和 0.11 km^2 ,分别占 1.53%和 0.18%。从图 2 可以看出,研究区表层土壤硒含量空间分布存在明显差异,总体上呈条带状结合斑块状分布,在都安—马山大断裂北段东分支两侧的合山组、罗楼组和茅口阶区域相对较高,在红水河沿岸相对较低。

同) $>$ 碳酸盐岩($(0.75\pm0.34)\times10^{-6}$) $>$ 冲积物($(0.64\pm0.34)\times10^{-6}$),碳酸盐岩母质土壤硒含量和研究区平均值相当,碎屑岩和冲积物土壤中硒含量分别高于或低于平均值。不同地层上覆土壤中硒含量存在着较大差异,合山组($(1.17\pm0.47)\times10^{-6}$) $>$ 罗楼组($(0.91\pm0.17)\times10^{-6}$) $>$ 茅口组($(0.89\pm0.47)\times10^{-6}$) $>$ 栖霞组($(0.65\pm0.18)\times10^{-6}$) $>$ 马平组($(0.64\pm0.18)\times10^{-6}$),罗楼组和茅口组之间差异不显著,栖霞组和马平组之间差异不显著。

成土母质是土壤形成的物质基础,土壤硒含量主要受成土母质控制^[8,13,15]。研究区二叠系合山组黑色岩系发育的土壤中硒含量要明显高于其他地层发育的土壤(图 3),该地层中、下部为黑色炭质页岩、含燧石灰岩夹煤层,上部为灰黑色泥岩夹少量煤层。西南地区上二叠统陆生环境中硒含量较高,陆生植物中砷、硒含量也随之增加,其生成的煤中硒含量也较高^[20],从而导致二叠系含煤地层的合山组发育的土壤硒含量较高^[21-23]。研究区马平组为灰白色中厚层泥晶灰岩、微晶灰岩、生物屑灰岩和白云质灰岩,有机质含量较低,不利于硒富集,而罗楼组分布有铝土矿,有利于硒富集。

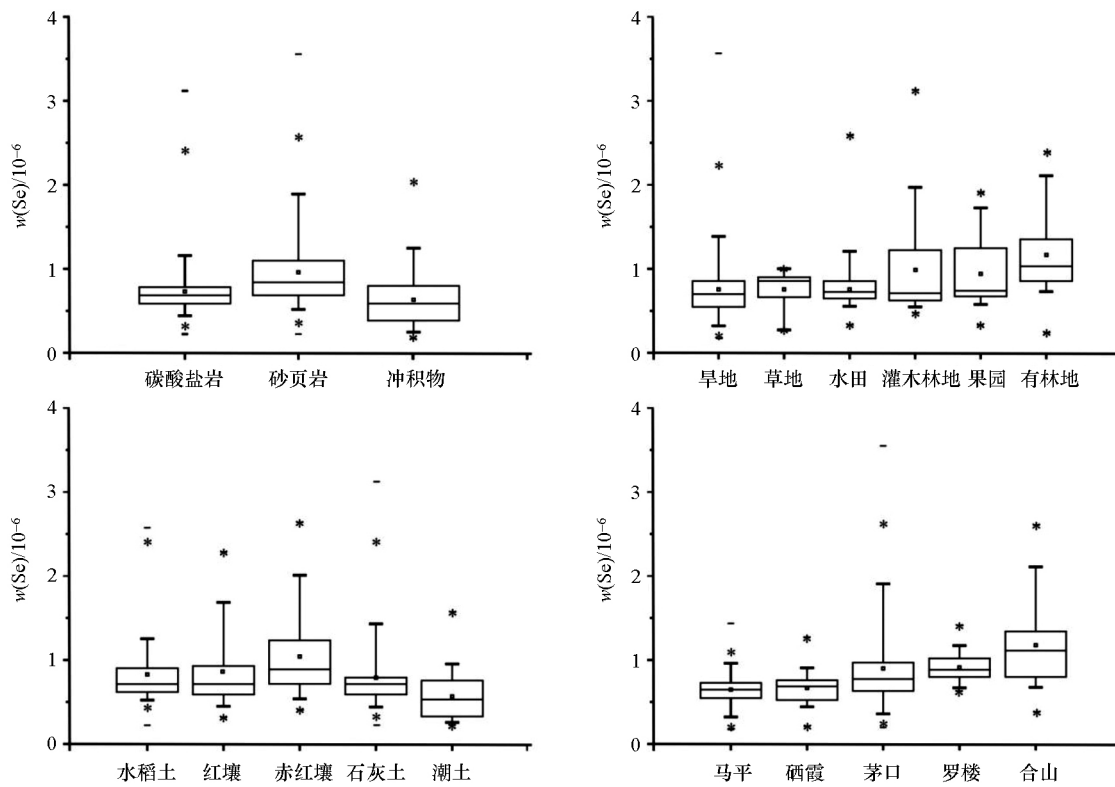


图 3 不同类型样品土壤硒含量箱型图

Fig.3 Box diagram of soil selenium content in different types of samples

3.3 不同土壤类型硒含量与影响因素

根据全国第二次土壤普查资料,研究区土壤类型主要为水稻土、红壤、赤红壤、石灰土和潮土。统计分析显示,研究区不同土壤类型的硒含量存在较大差异(图 3),表现为赤红壤($(1.04\pm0.48)\times10^{-6}$)>红壤($(0.85\pm0.41)\times10^{-6}$)>水稻土($(0.83\pm0.34)\times10^{-6}$)>石灰土($(0.77\pm0.38)\times10^{-6}$)>潮土($(0.56\pm0.27)\times10^{-6}$),其中红壤和水稻土及石灰土间差异不显著,潮土显著低于其他类型土壤硒含量,且低于研究区平均值。

研究区不同类型土壤的硒含量均属于富硒范围。砂页岩风化形成的酸性土壤铁铝含量、泥质、炭质和有机质含量较高,有利于对硒的吸附作用^[24-25]。潮土主要由第四纪沉积物发育而成,其黏粒及有机质含量都较低^[26],对硒的吸附能力低,硒的迁移能力相对较强,故硒含量低。

3.4 不同土地利用类型土壤硒含量与影响因素

不同土地利用方式土壤中硒含量存在着较大差异,有林地($(1.16\pm0.44)\times10^{-6}$)>灌木林地($(0.98\pm0.57)\times10^{-6}$)>果园($(0.95\pm0.42)\times10^{-6}$)>水田($(0.80\pm0.31)\times10^{-6}$)>草地($(0.79\pm0.24)\times10^{-6}$)>旱地($(0.75\pm0.38)\times10^{-6}$),除有林地土壤硒含量显著高于旱地、草地、水田外,其他土地利用方式土壤硒含

量差异不显著,仅旱地土壤硒含量低于研究区平均值。

在有林地、灌木林地、园地等人为活动影响较小的土地利用类型土壤中硒能够快速转化到有机物中,造成土壤硒的富集^[27],而水田、旱地等受到人类活动影响强烈的耕地,土壤中的硒以腐殖质化为主,有利于植物吸收消耗,而常规施肥不能补足损失的硒,土壤硒含量总体偏低^[28-29]。人类活动造成土壤硒含量在土地利用方式上的差异在北部湾钦江流域和雷波县等地也得到证实^[14,22],但东北耕地土壤硒含量高于其他土地利用方式,被认为是土壤粘粒、有机质和 pH 的变化造成耕地土壤硒的富集^[30]。

3.5 土壤理化性质对土壤硒含量的影响

土壤 pH、有机质、氧化物等指标与硒相关分析结果见表 2。土壤硒含量与有机质、Hg 总体上呈正相关关系,与 Mn、K₂O 呈负相关关系,而与 pH 相关性不明显。

土壤物理化学条件(如 pH 和有机物等)同样影响着硒的分布,土壤有机质、pH、金属氧化物和粘土矿物对硒的吸附影响了其迁移过程^[15,17,31]。硒是亲生物元素,在生物地球化学循环过程中发生次生富集或贫化作用。无论以成土母质或土壤类型作为统计单元,表层土壤中硒含量与有机质均具有显著正

表 2 不同样品类型土壤硒与其他指标相关系数统计

Table 2 Pearson correlation coefficient analysis of soil Se and other elements under different soil types

样品类型	样品数量	Hg	Mn	K ₂ O	有机质	pH
整体	492	0.102 *	-0.246 **	-0.191 **	0.216 **	0.003
水田	98	-0.043	-0.206 *	-0.192	0.307 **	-0.022
旱地	255	0.162 **	-0.219 **	-0.334 **	0.505 **	0.038
果园	26	0.25	-0.386	-0.602 **	0.097	-0.245
有林地	62	0.325 *	-0.237	-0.389 **	0.054	0.075
灌木林地	43	-0.045	-0.466 **	-0.320 *	-0.017	0.07
草地	8	0.051	-0.175	-0.509	0.598	0.074
碳酸盐岩	151	0.192 *	-0.184 *	-0.182 *	0.213 **	0.238 **
砂页岩	264	0.140 *	-0.270 **	-0.160 **	0.138 *	-0.07
冲积物	77	0.603 **	-0.135	-0.369 **	0.417 **	0.311 **
水稻土	118	-0.127	-0.286 **	-0.166	0.185 *	-0.163
红壤	65	0.257 *	-0.106	0.140	0.298 *	0.296 *
赤红壤	138	0.051	-0.411 **	-0.212 *	0.351 **	-0.077
石灰土	111	0.216 *	-0.182	-0.252 **	0.240 *	0.224 *
潮土	60	0.533 **	-0.371 **	-0.212	0.387 **	-0.229

注:“**”和“*”分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关。

相关关系,这和人研究结果一致^[5];硒和有机质的相关性被认为是硒能够与腐殖质结合固定在土壤中^[32]。而以不同土地利用方式作为统计单元时,林地和果园土壤中 Se 含量和有机质相关性不明显,可能是在土壤—植物体系有机质积累和硒的循环出现解耦,如植物对不同有机结合态硒的吸收能力不同^[33]。本研究区土壤硒与 Mn、Corg 的偏相关系数分别为-0.246和0.216,而与pH相关系数仅为0.003,说明硒的富集主要受有机质和锰结核吸附影响。冲积物和潮土的有机质与 Se 含量的相关系数在相应统计单元中较高,说明有机质的侵蚀流失是硒流失的关键。

土壤 pH 值影响硒的溶解度和有效性,湿润和酸性土壤中硒主要以亚硒酸盐形式存在,硒溶解度最低,倾向于和 Fe、Mn、Al 的半氧化物形成比较难溶的配合物和化合物或被金属氢氧化物捕获,在富铁、锰和富铝环境中,硒容易富集^[32],而在碱性土壤中,硒以易于作物吸收的可溶性硒酸盐形式存在,有效性较高^[34]。本研究发现仅碳酸盐岩和冲积物成土母质发育的土壤硒和 pH 显著正相关,对应的石灰土和红壤中两者也存在正相关外,其他类型样品及总体样本土壤硒含量和 pH 相关性不明显。时章亮等^[22]在四川雷波县发现酸性和碱性土壤中硒与 pH 负相关,在中性土壤中相关性不明显。

研究区土壤硒总体上和 Hg 正相关,和 K₂O 负相关。有林地和红壤中硒高含量区域受煤矿影响,和 Hg 显著正相关,Se、Hg 可通过大气沉降及地表水在煤—大气—土壤—水体系迁移^[35]。K 属于碱金属,沙化和盐碱化对硒具有贫化作用^[30],还可能与

风化成土过程中含钾矿物水化淋失,而残留的金属氧化物和粘土矿物对硒的吸附富集有关。

4 结论

1) 研究区土壤全硒含量范围为 $0.20\times10^{-6}\sim3.54\times10^{-6}$,平均值为 0.76×10^{-6} ,表层土壤硒的平均含量高于世界表层土壤和全国 A 层土壤平均值,富硒土地资源丰富,足硒和富硒土壤面积占总面积的 99.26%。

2) 表层土壤硒分布主要受控于成土母质,二叠系黑色炭质岩系硒高背景值与富硒土壤的形成存在密切联系。红壤、石灰(岩)土等黏粒多的土壤类型有利于硒的吸附富集,而砂粒多、淋滤强的潮土等易使硒流失。

3) 土壤硒含量和有机质呈正相关,林地等受人类活动影响较小的土地利用类型土壤硒含量较高,表层有机质的积累有助于土壤硒富集;研究区耕地中有机质含量较低,应加强有机质补给以减缓土壤硒的流失。

参考文献(References):

[1] 吴永尧,彭振坤,罗泽民.硒的多重生物学功能及对人和动物健康的影响[J].湖南农业大学学报,1997,23(3):294-300.
Wu Y Y, Peng Z K, Luo Z M. Multi-biological functions of selenium to the health of human beings and animals [J]. Journal of Hunan Agricultural University, 1997, 23(3): 294-300.

[2] 刘金旭,陆肇海,苏琪.家畜家禽的硒营养缺乏的调查研究——I.我国饲料牧草含硒量的分布(初报)[J].中国农业科学,1985,18(4):76-81.
Liu J X, Lu Z H, Su Q. Regional selenium deficiency of feedstuffs

- in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1985, 17(4): 76–79.
- [3] 中国科学院地理研究所化学地理研究室环境与地方病组. 我国克山病分布和以粮食低硒为表征的地理环境的关系[J]. *地理学报*, 1981, 36(4): 369–376.
- The Group of Environment and Endemic Disease. The relationship between the distribution of ke-shan disease and the selenium content of foodgrains as a factor of chemical geogra-phical environment [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(4): 369–376.
- [4] Sun G X, Meharg A A, Li G, et al. Distribution of soil selenium in China is potentially controlled by deposition and volatilization? [J]. *Nature*, 2016, 6: 20953.
- [5] Liu Y, Tian X, Liu R, et al. Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: A case study in Red Beds of Sichuan Basin, China [J]. *Catena*, 2021, 196: 104926.
- [6] Pan Z, He S, Li C, et al. Geochemical characteristics of soil selenium and evaluation of Se-rich land resources in the central area of Guiyang City, China [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(2): 240–249.
- [7] Zhu J, Zuo W, Liang X, et al. Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications [J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(3): 461–467.
- [8] 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.
- Li J, Yang Z Q, Liu Z G, et al. Distribution of selenium in soils of nanning city and its influencing factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 1012–1020.
- [9] 朱建明, 秦海波, 罗泰义, 等. 西南寒武、二叠系富硒碳质岩中硒结合态的比较研究[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1): 69–74.
- Zhu J M, Qin H B, Luo T Y, et al. A comparative study of selenium fractionation in se-rich carbonaceous rocks of lower cambrian and permian in southwest China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 69–74.
- [10] 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.
- [11] 黄子龙, 林清梅, 范汝海. 广西全州县富硒土壤地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2018, 42(2): 381–385.
- Huang Z L, Lin Q M, Fan R H. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Quanzhou county of Guangxi [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(2): 381–385.
- [12] 柴龙飞, 李杰, 钟晓宇, 等. 广西桂中南部地区富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 149–153.
- Chai L F, Li J, Zhong X Y, et al. Selenium contents and their relationship with main soil properties in farmland soils of southern Guizhong, Guanxi [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 899–903.
- [13] 杨琼, 侯青叶, 顾秋蓓, 等. 广西武鸣县典型土壤剖面 Se 的地球化学特征及其影响因素研究[J]. *现代地质*, 2016, 30(2): 455–462.
- Yang Q, Hou Q Y, Gu Q B, et al. Study of geochemical characteristics and influencing factors of soil selenium in the typical soil profiles in Wuming County of Guangxi [J]. *Geoscience*, 2016, 30(2): 455–462.
- [14] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 257–273.
- Tian Y C, Huang Y L, Zhang Q, et al. Soil erosion and Selenium loss in Qinjiang River Basin in Beibu Gulf coastal zone [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 257–273.
- [15] Shao Y, Cai C, Zhang H, et al. Controlling factors of soil selenium distribution in a watershed in Se-enriched and longevity region of South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 20048–20056.
- [16] 杨志强, 李杰, 郑国东, 等. 广西北部湾沿海经济区富硒土壤地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2014, 38(6): 1260–1264, 1269.
- Yang Z Q, Li J, Zheng G D, et al. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(6): 1260–1264, 1269.
- [17] 蒋惠俏, 陆国斌, 赵震云, 等. 广西钟山县主要农用地土壤硒的地球化学特征[J]. *矿产与地质*, 2020, 34(2): 339–346.
- Jiang H Q, Lu G B, Zhao Z Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in main agricultural land in Zhongshan County, Guangxi [J]. *Minerals and Geology*, 2020, 34(2): 339–346.
- [18] Fordyce F M. Selenium Deficiency and Toxicity in the Environment [M]//Selinus O, Alloway B J, Centeno J A, et al. *Essentials of Medical Geology: Revised Edition*. Dordrecht: Springer Netherlands. 2013: 375–416.
- [19] 刘铮. 中国土壤微量元素 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996.
- Liu Z. Trace element in Chinese soil [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996.
- [20] 雒昆利, 李会杰, 牛彩香, 等. 中国西南地区二叠纪乐平世陆生生物大灭绝期煤中砷和硒的演化及古环境意义 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(4): 385–394.
- Luo K L, Li H J, Niu C X, et al. Evolution of arsenic and selenium of coals during mass extinction of land species in the Permian in southwestern China and its palaeoenvironmental significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(4): 385–394.
- [21] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1119–1125.
- Yu T, Yang Z F, Wang R, et al. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi [J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1119–1125.
- [22] 时章亮, 金立新, 廖超, 等. 四川雷波县重点耕地地区土壤硒含量特征及其成因分析[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1253–1260.
- Shi Z L, Jin L X, Liao C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1253–1260.
- [23] 余飞, 张风雷, 张永文, 等. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. *物探与化探*, 2020, 44(4): 830–838.
- Yu F, Zhang F L, Zhang Y W, et al. Geochemical characteristics and influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(4): 830–838.
- [24] 蒋慧豪, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东省普宁市土壤硒的分布特征及影响因素研究[J]. *现代地质*, 2019, 33(1): 161–168.
- Jiang H H, Luo J, Cai L M, et al. Distribution of selenium and its

influencing factors in soils of Puning City, Guangdong Province [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 161–168.

[25] 郭莉,杨忠芳,阮起和,等.北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J].*现代地质*,2012,26(5):859–864.

Guo L, Yang Z F, Ruan Q H, et al. Content and distribution of selenium in soil of Beijing Plain [J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 859–864.

[26] 班玲,丁永福.广西土壤中硒的分布特征[J].*中国环境监测*, 1992,8(3):100–103.

Ban L, Ding Y F. Distribution characteristics of selenium in Guangxi soil [J]. *China Environmental Monitoring*, 1992, 8(3): 100–103.

[27] 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(1): 66–74.

[28] 徐文,唐文浩,邝春兰,等.海南省土壤中硒含量及影响因素分析[J].*安徽农业科学*,2010,38(6):3026–3027.

Xu W, Tang W H, Kuang C L, et al. Analysis on content of Se in soil of Hainan Province and its influencing factors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 3026–3027.

[29] 赵少华,宇万太,张璐,等.环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J].*生态学杂志*,2005,24(10):1197–1203.

Zhao S H, Yu W T, Zhang L, et al. Biogeochemical cycling of selenium, nutrition adjustment and differentiation cause in environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1197–1203.

[30] 戴慧敏,宫传东,董北,等.东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J].*土壤学报*,2015,52(6):1356–1364.

Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the northeast china plain and its influencing factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1356–1364.

[31] 蔡立梅,王硕,温汉辉,等.土壤硒富集空间分布特征及影响因素研究[J].*农业工程学报*,2019,35(10):83–90.

Cai L M, Wang S, Wen H H, et al. Enrichment spatial distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 83–90.

[32] 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.

[33] 王子健.中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展[J].*环境化学*,1993,12(3):237–243.

Wang Z J. Some biogeochemical aspects of selenium in chinese low-selenium belt [J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12(3): 237–243.

[34] 张驰,吴永尧,彭振坤.植物硒的研究进展[J].*湖北民族学院学报:自然科学版*,2002,20(3):58–62.

Zhang C, Wu Y Y, Peng Z K. Progress in the research of selenium in plants [J]. *Journal of Hubei Institute for Nationalities: Natural Sciences*, 2002, 20(3): 58–62.

[35] 张秀芝,马忠社,王志军,等.唐山开滦煤矿区 Se、Hg 元素地球化学特征及其迁移循环规律研究[J].*地质科学*,2012,47(3):908–920.

Zhang X Z, Ma Z S, Wang Z J, et al. Study of geochemistry character and transportation pattern of selenium and mercury in Kailuan coal field of Tangshan [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(3): 908–920.

Distribution and influencing factors of selenium content in soil in karst areas in Mashan County, Guangxi, China

ZHANG Chun-Lai¹, YANG Hui¹, Huang Fen¹, CAO Jian-Hua^{1,2}

(1.Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Nature Resources and Science and Guangxi, Guilin 541004, China; 2.International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China)

Abstract: This study aims to investigate the distribution characteristics of the total selenium content in soil in karst areas in Mashan County, Guangxi and to explore the effects of different soil parent materials, land uses, and soil types on the selenium content in soil. To this end, 492 samples of surface soil (0~20 cm) were collected from the northern part of Mashan County and the distribution of the total selenium content in the samples were studied by statistical methods. The results are as follows. The total selenium content in the soil varies from 0.20×10^{-6} to 3.54×10^{-6} , with an average value of 0.76×10^{-6} . Meanwhile, the selenium-rich area accounts for 98.29% and the coefficient of variation is 34.49%. The soil in the Permian Heshan formation bearing black shales and coal-measure strata has the highest selenium content, with an average of 1.17×10^{-6} , while the Carboniferous Maping formation has the lowest selenium content, with an average of 0.64×10^{-6} . In terms of different soil types, the lateritic red soil has the highest selenium content, with an average value of 1.04×10^{-6} , while the fluvo-aquic soil has the lowest selenium content, with an average value of 0.56×10^{-6} . In terms of land use types, the forestland and orchard have a high selenium content in soil, while the paddy field, grassland, and arid land have a low selenium content. Therefore, the selenium content in soil in the study area is mainly affected by soil parent materials, with the selenium enrichment in soil being affected by the organic matter content to a certain extent.

Key words: selenium; soil; karst; soil parent material; land use

(本文编辑:蒋实)