

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.024

姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 鲁中碳酸盐岩区土壤硒来源、有效性及影响因素. 土壤, 2022, 54(4): 841–846.

## 鲁中碳酸盐岩区土壤硒来源、有效性及影响因素<sup>①</sup>

姜冰<sup>1,2</sup>, 王松涛<sup>1,2</sup>, 孙增兵<sup>1\*</sup>, 张海瑞<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1</sup>

(1 山东省第四地质矿产勘查院, 山东潍坊 261021; 2 山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室, 山东潍坊 261021)

**摘要:** 碳酸盐岩在山东省青州市西南部大面积发育, 是土壤母质的重要物源, 以该地区土壤作为中心环节, 分析了岩石、大气、土壤中的硒及土壤性质, 研究了土壤硒的来源、有效性及影响因素。结果表明, 土壤全硒含量均值为 0.28 mg/kg, 以足硒土壤为主, 土壤有效硒含量均值为 15.03  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 有效度均值为 5.70%, 有效硒含量与全硒含量呈显著正相关。岩石硒含量均值为 0.035 5 mg/kg, 与对应的土壤硒含量呈显著正相关。土壤全硒、有效硒含量与土壤 pH 均呈显著负相关, 与有机质含量均呈显著正相关; 有效硒含量与土壤黏粒含量呈显著负相关。大气降尘的硒含量均值为 1.77 mg/kg, 年沉降通量为 0.28 mg/m<sup>2</sup>, 表层土壤硒的年增量为 0.000 9 mg/kg, 年增长速率为 0.33%。鲁中碳酸盐岩区土壤硒含量水平主要受控于母岩, 同时大气降尘对土壤硒也有所贡献, 土壤理化性质对硒及其有效性影响显著。

**关键词:** 硒; 土壤; 碳酸盐岩; 大气

中图分类号: X142 文献标志码: A

### Sources, Availability and Influencing Factors of Soil Selenium in Carbonate Rock Area of Central Shandong

JIANG Bing<sup>1,2</sup>, WANG Songtao<sup>1,2</sup>, SUN Zengbing<sup>1\*</sup>, ZHANG Hairui<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>

(1 Shandong Provincial No.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang, Shandong 261021, China; 2 Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection, Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Weifang, Shandong 261021, China)

**Abstract:** Carbonate rocks are widely distributed in the southwest of Qingzhou City, Shandong Province, which are an important source of soil parent material. Taking the soil in this area as the study target, selenium (Se) in rock, atmosphere and soil as well as soil properties were analyzed. The source, availability and influencing factors of soil Se were studied. The results showed that the mean content of soil total Se was 0.28 mg/kg, and most soils were sufficient in Se. The mean content of soil available Se was 15.03  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . The mean effective degree of Se was 5.70%. Available Se was significant positively correlated with the total Se. The mean content of rock Se was 0.035 5 mg/kg, which was significant positively correlated with the corresponding soil Se. The contents of soil total and available Se were significant negatively correlated with soil pH, and significant positively correlated with organic matter. Soil available Se was significant negatively correlated with clay content. The mean content of Se in atmospheric dustfall was 1.77 mg/kg, the annual settlement flux was 0.28 mg/m<sup>2</sup>, the annual increment of Se in the surface soil was 0.000 9 mg/kg with an annual growth rate of 0.33%. The content of soil Se in the carbonate rock area of central Shandong is mainly controlled by the parent rock, followed by atmospheric dust. Soil physicochemical properties also have significant impacts on Se and its availability.

**Key words:** Selenium; Soil; Carbonate rock; Atmosphere

硒具有抗癌、防肿瘤、抗氧化、抗衰老、提高免疫力、解毒、降低心脑血管疾病的发病率等作用<sup>[1-2]</sup>。人体通过食物链摄取作物中的硒, 而作物中的硒大多

数来自土壤<sup>[3]</sup>。近年来, 许多学者对土壤硒的背景值<sup>[4]</sup>、地球化学特征<sup>[5-6]</sup>、形态及其转化<sup>[7-8]</sup>进行了研究, 认为土壤硒主要来源于成土母岩, 地质背景是硒

①基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查引领示范和科技创新项目(KC201903、202005、KC202207)资助。

\* 通讯作者(sunzb0721@163.com)

作者简介: 姜冰(1984—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境地球化学研究。E-mail: jbing08@163.com

含量差异的主控因素<sup>[9]</sup>,同时大气降尘也是土壤硒的重要来源<sup>[10]</sup>。土壤是物质循环的中枢,硒元素在地球表生系统的不同介质中存在着地球化学循环,前人对这种循环机制进行了一些研究<sup>[11-12]</sup>,不同地区土壤硒的循环影响因素有所差异,而在鲁中地区有待对其深入研究,该区大面积发育古生界寒武系、奥陶系碳酸盐岩,本文以该区岩石、大气、土壤中的硒为研究对象,以土壤中的硒作为核心要素,通过相关分析和模拟计算研究土壤理化性质、岩石和大气中硒对土壤硒含量及土壤硒有效性的影响,以期对硒的循环机制研究和开发利用提供基础依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省青州市西南部中低山及丘陵区,是鲁中隆起的一部分,山地隆起,岗谷连绵。属北温带亚湿润大陆性季风气候,冬冷夏热、四季分明,年平均降水量 697 mm,年平均蒸发量 1 535 mm,年平均气温 12.7℃。植被发育,局部低山丘陵区缓坡处有梯田,坡陡土薄,耕地土壤贫瘠,水资源缺乏,农业生产条件较差,受污染程度低。成土母岩为古生界寒武系、奥陶系的石灰岩、白云岩、泥灰岩等碳酸盐岩类,岩石主要矿物为方解石、白云石等,风化以化学溶蚀为主,物理风化较弱,风化物中 CaO 的含量显著高于 SiO<sub>2</sub> 的含量, CaO 主要以碳酸盐的形式存在,呈碱性反应,是典型的碳酸盐岩区,土壤的成土母质、成土过程差异不大。山体的中上部成土母质为风化形成的残-坡积物,受冲刷影响,更新堆积频繁,砾石含量较高,土壤类型为粗骨土。山麓缓坡地段、洪积扇上部及沟谷高阶地,成土母质为坡-洪积物,直接受山体岩性影响,含较多游离石灰,质地多为中壤土,而山前洪积扇中下部的成土母质为山洪搬运、河流沉积迭次形成的洪-冲积物,质地多为轻壤-中壤土,土壤类型均属于褐土。

### 1.2 样品采集

本次研究共采集土壤样品 100 件,岩石样品 55 件,大气降尘样品 17 件(图 1)。土壤样品采集时,每个采样点向四周辐射 30~50 m 确定 3~5 个分样点,采样深度 0~20 cm,各分样点挑出根系、腐叶、虫体等杂物,等量组成一个混合样,充分混匀,四分法留 1 kg 装入干净棉布袋。若土壤采集点位沿坡面向上 50 m 范围内基岩露头较好,则采用多点采样法对

应采集新鲜岩石样品,样品为主要成土母岩且各采样点岩性一致,总重量大于 1 kg。大气降尘采样点均匀布设,接尘缸的放置、回收与处理按照 DZ/T 0289—2015《区域生态地球化学评价规范》<sup>[13]</sup>执行,接收周期为 1 a。

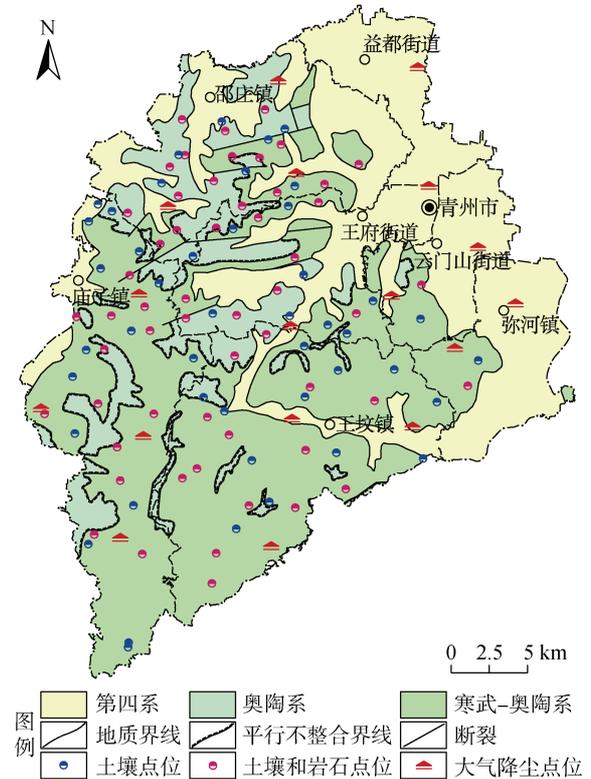


图 1 地质简图及采样点位

Fig. 1 Geologic sketch map and sampling sites

### 1.3 样品测试

样品处理与测试工作由山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室完成。土壤样品测试项目包括全硒和有效硒含量、阳离子交换量(CEC)、有机质、黏粒(< 0.002 mm)、pH,岩石、大气降尘样品测试全硒含量,按照 DD2005-3《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》<sup>[14]</sup>进行样品处理与测试。不同介质的硒均采用原子荧光光谱法测定,土壤有效硒用 0.1 mol/L 磷酸二氢钾浸提,采用氢化物发生原子荧光光谱法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定;有机质采用油浴加热-重铬酸钾容量法测定;<0.002 mm 土壤黏粒采用比重法测定;pH 采用玻璃电极法测定。

样品检出率均为 100%。使用国家标准物质(GBW 系列)控制岩石、降尘、土壤样品的准确度和精密性,对选用的国家标准物质进行 12 次分析,计算平均值与标准值的对数偏差  $\Delta \lg c$  均小于 0.05,计

算每一个标准物质的相对标准偏差RSD均小于0.08,每件样品进行100%重复分析计算相对偏差RE均小于30%。本次样品分析满足相关规范质量要求。

#### 1.4 分析方法与数据处理

**1.4.1 大气降尘硒的沉降通量计算** 研究区内蒸发量明显大于降水量,17个点位大气降尘样品均为干沉降,大气降尘硒的沉降通量计算公式为

$$M_{\text{fall}} = \frac{C_{\text{fall}} \times W_{\text{fall}}}{S} \quad (1)$$

式中:  $M_{\text{fall}}$  为硒的年沉降通量( $\text{mg}/\text{m}^2$ );  $C_{\text{fall}}$  为降尘中硒的含量( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $W_{\text{fall}}$  为接尘缸中降尘的总质量( $\text{g}$ );  $C_{\text{fall}} \times W_{\text{fall}}$  所得值为降尘中硒的年沉降量( $\text{mg}$ );  $S$  为接尘缸的底面积( $\text{m}^2$ )。

**1.4.2 降尘导致的表层土壤硒的年增量计算** 为研究大气降尘对表层土壤硒元素含量的影响,假设大气降尘全部落在0~20 cm表层土壤中,且暂不考虑硒元素的输出效应,则大气降尘导致的表层土壤硒的

年增量计算公式为

$$\Delta C_{\text{Se}} = \frac{M_{\text{fall}}}{\rho b \times h} \quad (2)$$

式中:  $\Delta C_{\text{Se}}$  为单位质量中硒的年增量( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $M_{\text{fall}}$  为硒元素的年沉降通量( $\text{mg}/\text{m}^2$ );  $\rho b$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),研究区内取  $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ [15];  $h$  为0~20 cm表层土壤的厚度,取20 cm。

**1.4.3 数据处理** 采用IBM SPSS Statistics 22.0软件处理原始数据,包括单变量的描述性统计和双变量之间的Pearson相关性分析。采用Microsoft Excel 2010制作双变量的相关性散点图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤、岩石、大气降尘等不同介质中的硒含量特征

研究区土壤全硒、土壤有效硒、岩石硒、降尘硒含量及土壤理化指标统计参数如表1所示。

表1 硒含量及土壤理化指标描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of Se contents and soil physiochemical indexes

指标	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
土壤全硒( $\text{mg}/\text{kg}$ )	100	0.65	0.04	0.28	0.12	0.41
土壤有效硒( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	100	40.00	0.90	15.03	6.88	0.46
岩石硒( $\text{mg}/\text{kg}$ )	55	0.12	0.005	0.035 5	0.023 5	0.66
降尘硒( $\text{mg}/\text{kg}$ )	17	2.53	0.65	1.77	0.53	0.30
pH	100	8.47	7.19	8.13	0.19	0.02
有机质( $\text{g}/\text{kg}$ )	100	59.20	3.40	20.36	8.86	0.44
黏粒(%)	100	24.35	0.71	4.69	3.74	0.80
CEC( $\text{cmol}/\text{kg}$ )	100	29.69	7.76	17.58	3.80	0.22

**2.1.1 土壤全硒含量特征** 土壤全硒含量最小值为0.04  $\text{mg}/\text{kg}$ ,最大值为0.65  $\text{mg}/\text{kg}$ ,标准差为0.12  $\text{mg}/\text{kg}$ ,变异系数为0.41(表1),属于高度变异,空间分布不均匀。全硒含量平均值为0.28  $\text{mg}/\text{kg}$ ,接近于全国土壤A层平均值0.29  $\text{mg}/\text{kg}$ [16],显著高于山东省表层土壤背景值0.18  $\text{mg}/\text{kg}$ [17]。根据DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》[18]中的土壤硒分级标准,统计硒含量等级划分情况如表2,其中足硒的样本数最多,为68个,而富硒、边缘、缺乏的样本数分别为13个、10个、9个,可见研究区以足硒土壤为主,具有开发富硒土壤的潜力。

**2.1.2 土壤有效硒含量特征** 硒元素在土壤中有多种赋存形态,土壤硒总体含量称为全硒,可供植物吸收利用的部分称为有效硒[19]。以往研究表明,土壤硒形态大致可分为水溶态、离子交换态、碳酸盐态、腐植酸态、铁锰氧化态、有机结合态及残渣态等[8]。

土壤有效硒包括水溶态和可交换态硒酸根离子、亚硒酸根离子及有机硒小分子物质。研究区土壤有效硒含量最小值为0.90  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,最大值为40.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ (表1);有效硒含量平均值为15.03  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,标准差为6.88  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,变异系数为0.46,属于高度变异,空间分布不均匀。硒的平均有效度(有效硒与全硒比值)为5.70%,低于河北省麦田土壤的9.69%[20]和山东省淄博市博山区富硒农业基地土壤的10.16%[21],略高于天津市蓟州

表2 土壤硒等级划分  
Table 2 Classification of soil Se

硒等级	硒含量( $\text{mg}/\text{kg}$ )	样本数(个)
过剩	> 3.0	0
富硒	0.40 ~ 3.0	13
足硒	0.175 ~ 0.40	68
边缘	0.125 ~ 0.175	10
缺乏	$\leq$ 0.125	9

富硒区土壤的 5.63%<sup>[22]</sup>, 显著高于黑龙江省讷河市土壤的 1.66%<sup>[23]</sup>。

**2.1.3 岩石和大气降尘硒含量特征** 岩石硒含量为 0.005 ~ 0.12 mg/kg, 平均值为 0.035 5 mg/kg(表 1), 显著低于土壤全硒含量, 土壤全硒含量为岩石硒含量的 7.89 倍。岩石硒含量高于北京大清河流域寒武-奥陶系岩石的 0.016 mg/kg, 低于其石炭-二叠系、侏罗系岩石的 0.07、0.057 mg/kg<sup>[24]</sup>, 与山东省莱泰盆地灰岩的 0.06 ~ 0.18 mg/kg、花岗岩的 0.04 ~ 0.06 mg/kg<sup>[25]</sup>差别不大。大气降尘硒含量为 0.65 ~ 2.53 mg/kg, 平均值 1.77 mg/kg(表 1), 远高于土壤全硒含量平均值 0.28 mg/kg, 达 6.33 倍; 显著低于天津市西郊大气降尘的 4.95 mg/kg<sup>[10]</sup>和石家庄市藁城区大气降尘的 5.09 mg/kg<sup>[26]</sup>。

## 2.2 土壤硒的来源分析

**2.2.1 成土母岩** 土壤硒含量与对应的岩石硒含量呈显著正相关(图 2), 相关系数  $r = 0.492(n = 55, P < 0.01)$ , 表明土壤硒含量水平受控于成土母岩。岩石中硒含量均值远低于土壤中硒含量均值, 相差约 1 个数量级(表 1), 在岩石风化、土壤熟化过程中, 碳酸盐的淋失, 导致风化形成的土壤体积、质量与原岩差别很大<sup>[27]</sup>, 质量损失最多可达 90% 以上<sup>[11]</sup>, 即亦相差 1 个数量级。母岩的风化程度影响形成的土壤总量, 可以理解为母岩风化越强, 则从母岩中析出的硒元素总量就越多。而后土壤中的有机质和腐殖质将母岩因风化成土而释放的硒吸附固化<sup>[28]</sup>, 导致了土壤中硒的相对富集。因此土壤中的硒主要继承了风化母岩中的硒, 母岩是土壤硒的最终来源, 是土壤硒含量

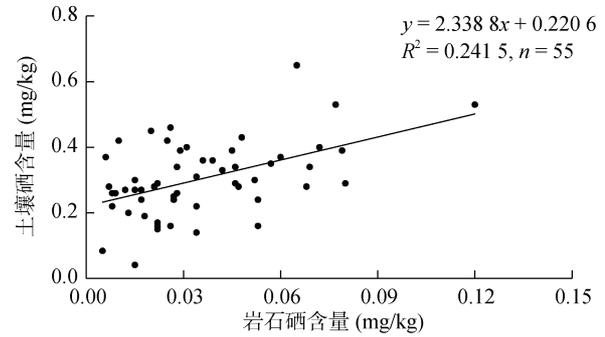


图 2 岩石与土壤中的硒含量相关性散点图

Fig. 2 Correlation scatter plot between Se contents in rock and soil

变化的关键自然因素。

**2.2.2 大气降尘** 研究区东西紧邻潍坊市、淄博市两个工业城市, 煤炭、石油燃烧产生氧化硒, 以及工业生产产生的硒粉尘均会进入大气中, 因此大气降尘无疑是不可忽略的研究对象。为研究大气降尘对表层土壤硒含量的影响, 计算硒年沉降通量和降尘导致的表层土壤硒的年增量, 结果如表 3 所示。降尘硒含量虽然显著高于土壤全硒含量水平, 但受限于沉降总量, 硒年沉降通量为 0.14 ~ 0.40 mg/m<sup>2</sup>, 平均为 0.28 mg/m<sup>2</sup>。夏学齐等<sup>[12]</sup>研究得出黑龙江省松嫩平原南部降尘占土壤硒输入比例最高可达 90%, 是土壤硒的主要输入来源, 硒的年沉降通量为 0.238 mg/m<sup>2</sup>, 略低于研究区。研究区降尘导致的表层土壤硒的年增量平均值为 0.000 9 mg/kg, 年增长速率较小, 占当前表层土壤硒含量平均值的 0.33%, 而在土壤日积月累的形成发育过程中, 由大气降尘导致的土壤硒的年增量不可忽视。综上, 大气降尘是土壤硒的重要输入端元。

表 3 大气降尘硒元素特征参数

Table 3 Characteristic parameters of Se in atmospheric dustfall

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
硒含量(mg/kg)	2.53	0.65	1.77	0.53
降尘总质量(g)	5.65	1.34	3.12	1.33
年沉降总量(g/m <sup>2</sup> )	319.89	75.69	176.75	75.00
硒的年沉降通量(mg/m <sup>2</sup> )	0.40	0.14	0.28	0.07
降尘导致的表土硒的年增量(mg/kg)	0.001 3	0.000 5	0.000 9	0.000 2

## 2.3 土壤硒的影响因素

由于研究区成土母岩中碳酸盐含量很高, 对风化作用和成土过程有显著的影响, 其风化物形成的成土母质, 在当地的生物气候条件下发育为土壤, 而土壤中碳酸钙的地球化学作用明显, 常见碳酸盐新生体, 盐基饱和, 因此其具有独特的理化性质。由土壤全硒、有效硒含量与土壤理化性质的相关分析(表 4)表明,

土壤 pH 与全硒( $r = -0.218, P < 0.05$ )、有效硒( $r = -0.270, P < 0.01$ )含量呈显著负相关, 有机质含量与全硒( $r = 0.501, P < 0.01$ )、有效硒( $r = 0.510, P < 0.01$ )含量呈显著正相关, 土壤黏粒含量与有效硒含量( $r = -0.259, P < 0.01$ )呈显著负相关, 全硒、有效硒含量与阳离子交换量(CEC)的相关性不显著。另外全硒与有效硒呈显著正相关( $r = 0.588, P < 0.01$ ), 表明土壤中的

有效硒含量随全硒含量的增加而增加,显著受控于全硒含量。

表4 硒与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation between Se and soil physicochemical properties

	全硒	有效硒
pH	-0.218*	-0.270**
有机质	0.501**	0.510**
黏粒	0.017	-0.259**
CEC	0.171	-0.007
全硒	1	0.588**
有效硒	0.588**	1

注：\*、\*\*分别表示相关性达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平。

碳酸盐岩的主要化学成分是 CaO、MgO 及 CO<sub>2</sub>, 在酸性条件下更有利于母岩的化学风化,更多母岩中的硒在低 pH 环境的成土过程中转移至土壤,所以全硒和有效硒含量均与土壤 pH 呈显著负相关。六价态的硒酸盐不易被黏土矿物吸附固定<sup>[29]</sup>,所以有效硒含量与黏粒含量呈显著负相关。有机质中含有有机硒,同时有机质含量与其对硒的吸附固定作用成正比<sup>[30]</sup>,导致有效硒含量随有机质吸附固定全硒含量的增加而增加,同时表明硒以有机结合态为主,所以全硒、有效硒含量与有机质含量呈显著正相关。

### 3 结论

1)研究区以足硒土壤为主,土壤有效硒含量显著受控于全硒含量,土壤 pH、有机质、黏粒等理化性质对硒及其有效性影响显著。

2)研究区碳酸盐岩硒含量是土壤硒含量的基础,风化过程中碳酸盐岩体积、质量损失巨大,析出的硒元素经有机质和腐殖质吸附,在成土过程中,土壤中的硒主要继承了母岩中的硒,是土壤硒相对富集的主要原因。

3)研究区大气降尘引起的土壤硒的年增长速率为 0.33%,在土壤日积月累的形成发育过程中,大气降尘是土壤硒的重要输入端元。

### 参考文献:

[1] Dos Santos M, Veneziani Y, Muccillo-Baisch A L, et al. Global survey of urinary selenium in children: A systematic review[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, 56: 1–5.

[2] Smits J E, Krohn R M, Akhtar E, et al. Food as medicine: Selenium enriched lentils offer relief against chronic arsenic poisoning in Bangladesh[J]. *Environmental Research*, 2019, 176: 108561.

[3] 杨泽, 刘国栋, 戴慧敏, 等. 黑龙江兴凯湖平原土壤硒地球化学特征及富硒土地开发潜力[J]. *地质通报*, 2021,

40(10): 1773–1782.

[4] 张丽, 张乃明, 张玉娟, 等. 云南耕地土壤硒含量空间分布及其影响因素研究[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 578–584.

[5] 夏飞强, 张祥, 杨艳, 等. 安徽省宁国市土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 585–593.

[6] 朱青, 郭熙, 韩逸, 等. 南方丘陵区土壤硒空间分异特征及其影响因素——以丰城市为例[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 834–843.

[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] 安永龙, 黄勇, 张艳玲, 等. 北京房山南部地区富硒土壤生物有效性特征及来源[J]. *地质通报*, 2020, 39(S1): 387–399.

[9] 汤奇峰, 徐春丽, 刘斯文, 等. 江西赣州市瑞金盆地天然富硒土地资源特征与保护利用[J]. *地质通报*, 2020, 39(12): 1932–1943.

[10] 侯佳渝, 杨耀栋, 谢薇, 等. 天津市西郊富硒土壤地球化学特征和成因分析[J]. *现代地质*, 2020, 34(3): 618–625.

[11] 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.

[12] 夏学齐, 杨忠芳, 薛圆, 等. 黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素循环特征[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 850–858, 864.

[13] 中华人民共和国国土资源部. 区域生态地球化学评价规范: DZ/T 0289—2015[S]. 北京: 地质出版社, 2015.

[14] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD2005-03[S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.

[15] 成兆金, 李斌. 山东省土壤水分自动站土壤水分常数评估[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(18): 3468–3471, 3483.

[16] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. *中国环境监测*, 1991, 7(1): 1–6.

[17] 庞绪贵, 代杰瑞, 胡雪平, 等. 山东省土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(1): 39–43.

[18] 中华人民共和国国土资源部. 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.

[19] 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.

[20] 唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 等. 河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(S1): 194–197.

[21] 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.

[22] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及其影响因素[J]. *环境化学*, 2019, 38(10): 2306–2316.

[23] 张哲寰, 赵君, 戴慧敏, 等. 黑龙江省讷河市土壤-作物系统 Se 元素地球化学特征[J]. *地质与资源*, 2020, 29(1): 38–43.

- [24] 冯辉, 张学君, 张群, 等. 北京大清河流域生态涵养区富硒土壤资源分布特征和来源解析[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 693-704.
- [25] 高宗军, 崔浩浩, 庞绪贵, 等. 山东省泰莱盆地及章丘市土壤中硒的成因[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(31): 19133-19135, 19138.
- [26] 赵燕, 栾文楼, 郭海全, 等. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 764-776.
- [27] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化土作用的初步研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1999, 29(5): 441-449.
- [28] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 105-112.
- [29] 韩笑, 周越, 吴文良, 等. 富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系——以江西丰城为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1177-1183.
- [30] 程丹, 张红, 郭子雨, 等. 硒处理对土壤理化性质及杭白菊品质的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1449-1457.