

张晓慧,温汉辉,蔡立梅,等.广东揭东土壤硒的分布特征及影响因素研究[J].环境科学与技术,2019,42(7):189-196. Zhang Xiaohui, Wen Hanhui, Cai Limei, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Jiedong area, Guangdong Province[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(7): 189-196.

广东揭东土壤硒的分布特征及影响因素研究

张晓慧^{1,2}, 温汉辉⁴, 蔡立梅^{1,2,3*}, 罗杰¹, 穆桂珍¹,
王秋爽^{1,2}, 蒋慧豪^{1,2}, 王硕^{1,2}

- (1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;
2. 长江大学资源与环境学院,湖北 武汉 430100;
3. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室,广东 广州 510640;
4. 广东省有色金属地质局940队,广东 清远 511500)

摘要:以揭东区为调查研究对象,采集211个表层土壤样品(0~20 cm)和52个深层土壤样品(>150 cm),测定了区域土壤全硒含量,结合相关性分析、回归分析、地统计分析研究土壤硒的分布特征及其影响因素。结果表明,揭东区土壤全硒含量变化于0.112~1.315 mg/kg,平均值为0.496 mg/kg,总体上处于中硒及高硒水平,不存在缺硒和硒过剩土壤。区域富集面积达63%,强富集区域主要分布在以花岗岩为母质的侏罗系和白垩系地层区。不同成土母质中,硒富集区域主要分布在以花岗岩为母质的侏罗系和白垩系地层区;不同土壤类型中,花岗岩风化形成的黄壤硒含量最高,平均值为0.729 mg/kg,以花岗岩为母质发育的赤红壤硒含量次之,平均值达0.563 mg/kg;第四系沉积物发育形成的水稻土硒含量最低,平均值为0.408 mg/kg。回归分析表明,土壤全硒含量与铁铝含量、pH具有极显著正相关。影响揭东土壤硒含量的主要因素是成土母质,土壤pH、铁铝含量、土地利用方式及海拔高度对土壤全硒含量分布与富集也有一定的影响。

关键词:揭东区; 土壤硒; 分布特征; 影响因素

中图分类号:X142 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.07.030 **文章编号:**1003-6504(2019)07-0189-08

Distribution of Selenium and Its Influencing Factors in Soils of Jiedong Area, Guangdong Province

ZHANG Xiaohui^{1,2}, WEN Hanhui⁴, CAI Limei^{1,2,3*}, LUO Jie¹, MU Guizhen¹,
WANG Qiushuang^{1,2}, JIANG Huihao^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
4. No. 940 Branch of Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Qingyuan 511500, China)

Abstract: Taking Jiedong area as the research object, 211 top soil samples (0~20 cm) and 52 deep soil samples (>150 cm) were collected, and the total selenium content of the soil was determined. The correlation analysis, regression analysis and geo-statistics were combined to analyze the distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors. The results showed that the total selenium content in the soil of Jiedong varied from 0.112 mg/kg to 1.315 mg/kg, with an average of 0.496 mg/kg. It was generally in the middle selenium and high selenium levels, and there was no selenium and selenium excess soil. The enriched area is 63%, and the strongly enriched area is mainly distributed in the Jurassic and Cretaceous stratigraphic zones with granite as the parent material. Among the different soil parent materials, the selenium enrichment area is mainly distributed in the Jurassic and Cretaceous stratigraphic zones with granite as the parent material. Among different soil types, the yellow soil formed by granite weathering has the highest selenium content, with an average value of 0.729 mg/kg. The selenium content of red soil in granite was followed, with an average of 0.563 mg/kg. The sediment content of the Quater-

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2019-03-01;修回2019-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41203061);教育部油气资源勘探技术重点实验室开放基金(K2018-19);有机地球化学国家重点实验室开放基金(UGL-201408);湖北省自然科学基金项目(2015CFB603);湖北省教育厅科学技术研究重点项目(D20161301)

作者简介:张晓慧(1997-),女,硕士研究生,主要从事环境地球化学研究,(电子信箱)18235708321@163.com;*通讯作者,男,副教授,博士,主要从事环境地球化学研究,(电子信箱)clmktz88@yangtzeu.edu.cn。

nary sediments was the lowest, with an average of 0.408 mg/kg. Regression analysis showed that the soil total selenium content was significantly positively correlated with iron and aluminum content and pH. The main factor affecting the selenium content in Jiedong soil is the parent material. Soil pH, iron and aluminum content, land use and altitude also have certain effects on the distribution and enrichment level of soil selenium content.

Key word: Jiedong area, soil selenium; distribution characteristics; influencing factors

硒(selenium, Se)是人类和动物所必需的微量元素之一^[1],在地壳中分布稀少且极不均匀,世界土壤硒含量范围为0.03~2.00 mg/kg,我国土壤硒元素背景值为0.29 mg/kg,72%的地区处于缺硒和低硒状态^[1-3]。研究表明,硒可有效拮抗重金属、抗癌、防癌和防治肝和心血管病,在抗衰老、增强免疫力等方面也发挥重要作用^[4-6]。食物是人体及动物获取硒的主要途径,当其摄入量低于最适量时,可损害机体免疫系统的发育和功能,高于最适量时则会导致急性或慢性中毒^[7-9]。土壤是食物硒的来源库,硒是亲硫元素也是亲生物元素,在表生地球化学循环过程中其次生富集贫化作用对土壤硒含量也有影响,而环境硒水平与人体健康息息相关,因此研究区域硒生物地球化学特性及影响因素具有极为重要的意义^[10-12]。揭阳市揭东区正处于传统农业向现代农业转型期,区域自然资源丰富,立足此优势大力发展特色农产品基地,如龙眼、茶叶、竹笋等,现享有“中国竹笋之乡”、“鱼米之乡”的美誉,但目前对揭东区土壤硒的研究未见报道。本文基于揭阳市揭东区农业地质与生态地球化学调查结果,探究区域土壤硒含量、分布特征及其影响因素,结果可为该地区富硒资源合理开发及保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

揭阳市揭东区(116°07'16"~116°37'39"E,23°23'40"~23°46'27"N)位于广东省东部,面积共684 km²,辖管1个街道,14个镇。区域属亚热带季风性海洋气候,年均气温21.5°,年均降雨量1722.6 mm。揭东地处粤东榕江中游,潮汕平原中部;地质构造复杂,低山高丘与谷地平原交错相间分布不均。区域主要有第四系、白垩系、侏罗系、三叠系四大地层,第四系大片式分布于东南部和中南部的榕江和滨海冲积平原,岩性主要为砂岩、粉砂岩;白垩系主要分布于中部和西南部丘陵附近,岩性有花岗岩、灰岩及砾岩,伴有大量侵入岩;侏罗系集中分布于北部山地,西南和东南有少量分布,花岗岩资源丰富,并出露有少量侵入岩;三叠系分布于东部蛇地山、磨山岭、大脊岭和宅下南山附近,岩性为泥岩和砂

岩。研究区土壤类型主要为黄壤、赤红壤和水稻土,水稻为主要经济作物。

1.2 样品采集与处理

研究区样品均来自揭阳市农业地质与生态地球化学调查,采取采样单元中主要土壤类型的耕层土。表层土壤样的采样密度为1个/km²(0~20 cm),1个样品由主采样点周围100 m范围内3~5处多点采集组合。深层土壤样采样密度为1个/4 km²,低山丘陵土层覆盖较薄地区,适当放稀,但保证每一采样大格(4 km×4 km)有样点分布,采样深度达到150 cm以下,人工填土地区加大采样深度或移动点位。

表层土壤样按4 km²格、深层土壤样按16 km²大格,格子内样品等重量组合成1个分析样品。共采集表层土壤组合样211个,深层母质土壤组合样52个。在农业区,采样点布置在农田、菜地、林(果)地、草地及山地丘陵土层较厚地带等;在城镇区,采样位置选择在公园、林地以及其它空旷地带等堆积历史较长的土壤。避开明显点状污染地段、垃圾堆及新近堆积土、田埂、水体等。表层土壤采样位置离开主干公路、铁路100 m以外,采样避开施肥期,深层土壤采样位置偶尔布置在人工揭露剖面上,采样时去除剖面表土。样品经充分晾干后过20目尼龙筛,按要求组合成每个500 g,送样测试分析。

1.3 样品分析与数据处理

该研究区土壤样品分析严格按照《多目标区域地球化学调查规范》(DD 2005-1)进行,土壤全硒含量经氢氟酸-硝酸分解样品,高氯酸冒烟,盐酸溶解并加入铁盐,硼氢化钾还原,原子荧光光谱法(AFS)测定,检出限为0.004 mg/kg;Al₂O₃、Fe₂O₃和Ti的含量经粉末压片(称样量4 g、硼酸镶边垫底),X射线荧光光谱仪直接测定,对应检出限分别为0.05%(质量分数)、0.02%(质量分数)和10 mg/kg;经硫酸、重铬酸钾氧化分解,硫酸亚铁铵滴定测得土壤有机碳含量,检出限为0.09%(质量分数);称取10 g样,加25 mL蒸馏水,搅拌1 min,静置30 min,离子选择电极测定pH值,检出限为0.10。上述各种分析方法各元素检出限、准确度、精密度等均满足或优于《多目标区域地球化学调查规范》(DD 2005-1)的要求。对选用的国家一级标准物质(从16个土壤国家一级标准物质中选择12个

标准物质),用被选定分析方法对每一个标准物质进行12次分析,并分别计算每个样品平均值与标准值之间对数偏差($\Delta \lg C$);或平均值和标准值之间平均相对误差(RE)。标准物质平均对数偏差($\Delta \lg C$)及准确度满足规范要求,分析数据可靠准确。

对所获得数据采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Excel 2016 等软件完成描述性统计分析、相关分析及方差分析;运用 GS+和 ArcGIS 10.3 等地统计软件进行半方差分析、Kriging 插值及制图分析。

2 结论与分析

2.1 土壤硒含量的分布特征

对采集到的211个表层土壤样品的硒含量进行统计分析表明:表层土壤硒含量几何平均值为0.496 mg/kg,变幅为0.112~1.315 mg/kg,中位数为0.428 mg/kg。与我国其他地区全硒含量(表1)相比,研究区域表层土壤硒平均值与黄春雷等关于浙中典型富硒地区中金华市土壤硒含量研究结果相近^[13],略低于其他富硒地区丰城市^[14]与南宁市^[15],远低于湖北恩施州硒毒地区^[16],高于黑龙江省^[17]和贵州省^[18],是我国土壤平均硒含量的1.25倍^[19]。

表1 研究区及其他地区土壤硒含量

地区	平均值/(mg·kg ⁻¹)	变幅/(mg·kg ⁻¹)	数据来源
揭东(表层)	0.496	0.112~1.315	本文
揭东(深层)	0.498	0.160~1.130	本文
金华市	0.480	0.200~1.010	[13]
丰城市	0.538	0.400~0.990	[14]
南宁市	0.570	0.090~1.340	[15]
恩施州	9.360	2.700~87.30	[16]
黑龙江省	0.147	0.008~0.660	[17]
贵州	0.370	0.060~1.330	[18]
中国	0.290	0.050~0.990	[19]

依据谭建安对我国硒元素生态景观安全阈值的划分^[20],同时考虑到硒的次生富集贫化作用,作如下调整:缺硒土壤(≤ 0.125 mg/kg)、边缘硒土壤(0.125~0.175 mg/kg)、中等硒土壤(0.175~0.60 mg/kg)、高硒土壤(0.60~3.00 mg/kg)、过量硒土壤(≥ 3.00 mg/kg),以0.60 mg/kg作为富硒土壤标准阈值的下限,有助于更好地识别和开发研究区内更具有开发价值的富硒土壤资源区,依据这种划分,揭东区表层土壤整体上属于中等硒土壤和高硒土壤范畴。利用半方差分析和地统计分析克里金插值法绘制出揭东区表层土壤全硒含量分布图(图1),结合表2可知揭东区表层69.67%的土壤属于足硒土壤,中部大面积地区及东南部都属足硒土壤范畴,富硒土壤占揭东地区总面积的29.39%,集中分布在山地丘陵区,主要覆盖研究区西

南地区的龙尾镇及与白塔镇的交界区,和玉湖镇、新亨镇、埔田镇的东北部及云路镇的西北部。研究区域表层和深层土壤均不存在硒过剩(硒中毒)土壤,中等硒土壤和高硒土壤分别占深层土壤65.39%和32.69%,深层土壤不受人活动影响,硒元素分布反映了成土的原始母岩特征。对表层土壤全量硒与深层土壤全量硒进行线性回归分析,得到 $X_{表}=0.5099X_{深}+0.2479$ ($r=0.35, n=211, p<0.01$)的线性方程, $X_{表}$ 和 $X_{深}$ 分别是表层土壤和深层土壤硒含量,说明表层土壤硒含量受控于深层土壤硒含量较强,即继承成土母岩的程度较强。

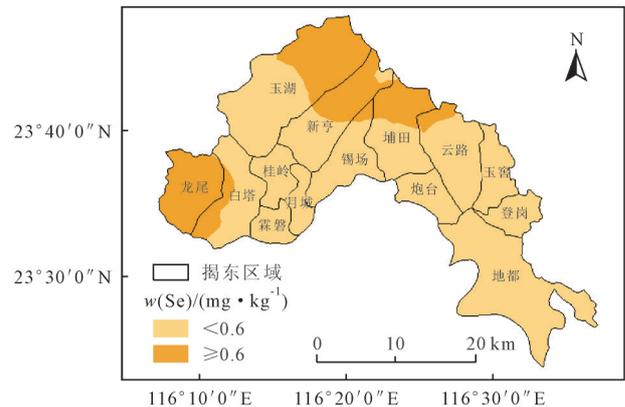


图1 揭东区表层土壤全硒分布图

Fig.1 Distribution of selenium in the surface soils of Jiedong area

表2 研究区土壤硒安全阈值划分

土壤分级	硒含量阈值/(mg·kg ⁻¹)	硒效应	面积比例/%	
			表层	深层
缺硒土壤	≤ 0.125	硒反应不足	0.47	0
边缘硒土壤	0.125~0.175	硒潜在不足	0.47	1.92
中等硒土壤	0.175~0.60	足硒	69.67	65.39
高硒土壤	0.60~3.00	富硒	29.39	32.69
过量硒土壤	≥ 3.00	硒中毒	0	0

根据1991年广东省第二次土壤普查结果及我国土壤分类标准^[21],研究区主要的土壤类型为花岗岩风化而成的黄壤、赤红壤和水稻土,统计不同土壤类型全硒含量对比显示(表3),硒含量在不同的土壤类型中表现出一定的差异性,黄壤硒含量最高,赤红壤其次,水稻土最低。硒元素在各类土壤类型中的变异系数范围为35.12%~44.76%,变异系数反映土壤硒元素含量的离散程度,根据变异系数通常的分级标准,属于中等变异^[22]。黄壤和赤红壤硒含量高可能是受地形因素影响,地势高母质风化较弱,土壤质地黏重,对硒的吸附作用大于淋溶作用而导致;水稻土由于受人为活动影响大,土壤有机质被消耗,经过土壤水耕熟化和氧化还原过程,母质组分和理化性质差异明显,造成不同地域全硒含量差异显著^[23-25]。

2.2 土壤硒的富集特征

表层土壤为土壤农作物系统的第一环境,人为因

表3 揭东区不同土壤类型硒含量特征
Table 3 Total selenium contents in different types of soil in Jiedong area

土壤类型	样品点数	硒含量/(mg·kg ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%
		最小值	最大值	平均值		
赤红壤	109	0.135	1.315	0.563	0.224	43.87
水稻土	97	0.112	1.168	0.408	0.179	39.79
黄壤	5	0.451	1.212	0.729	0.256	35.12
研究区	211	0.112	1.315	0.496	0.223	44.76

素作用于自然环境反映的土壤状态,采用同一空间同一片土壤中表层土壤相对于深层土壤硒的富集水平来反映自然及人为要素对表层土壤硒的作用结果。富集水平可用富集系数(K)来表示:

$$K = \frac{X_{i表} / T_{i表}}{X_{i深} / T_{i深}} \quad (1)$$

式(1)中,每4 km²的表层土壤样和其所处的1 km²单元格的深层母质样相对应,X_{i表}和X_{i深}分别是i点表层土壤和深层土壤中的Se含量,T_{i表}和T_{i深}分别对应i点表层土壤和深层土壤中的T_i含量。

将得到的富集系数分为4个等级,K≤1.0为贫化,1.0≤K<1.5为弱富集,1.5≤K<2.0为中富集和K≥2.0为强富集^[26]。研究区土壤硒的富集系数变化为0.42~7.98,几何平均值为1.47,标准偏差为1,变异系数达68%,属中等变异,表明揭东区不同区域富集程度差异较大。区域富集面积达63%,属弱富集和中富集范畴,整个区域的富集系数平均值属弱富集,37%的贫化区集中分布于研究区东部平原地带,与第四纪地质密切相关^[27]。结合图2可以看出揭东区表层土壤的富

集程度相对较低,强富集面积为17%,强富集区域主要分布在以花岗岩为母质的侏罗系和白垩系地层区。

2.3 土壤硒的影响因素

2.3.1 成土母质

成土母质是土壤硒含量的主要决定因素^[28]。图3是研究区深层土壤全硒含量的空间分布图。根据前文所作相关分析表明,表层与深层全硒含量显著相关,深层母质对表层土壤全硒含量的高低有重要影响,结合图3与图1可以看出,深层土壤硒含量高的地区,表层土壤硒含量也很高,体现表层土壤硒对深层的继承性,这与戴慧敏等在东北平原研究的结果相一致^[29]。成土地质背景对硒含量水平有很强的控制作用(表4),不同母质发育的土壤全硒含量由高到低的顺序为:白垩系砾岩(0.708 mg/kg)>侏罗系花岗岩(0.598 mg/kg)>白垩系花岗岩(0.552 mg/kg)>三叠系砂岩(0.472 mg/kg)>第四系沉积物(0.390 mg/kg)。研究区出露地层复杂,不同地层年代气候、生物、地形、构造运动及古地理条件的不同,使得全硒含量在不同成土母质中表现有较大差异性。

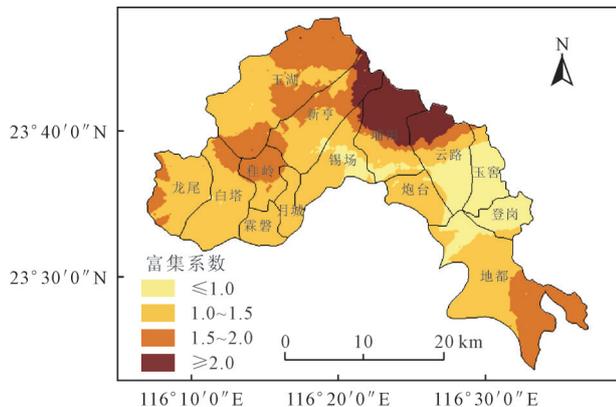


图2 揭东区表层土壤硒富集系数
Fig.2 Enrichment coefficient of selenium in the surface soil of Jiedong area

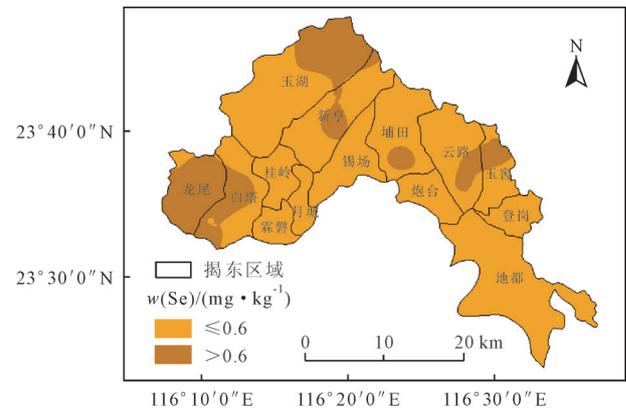


图3 揭东区深层土壤硒分布图
Fig.3 Distribution of selenium in deep soils of Jiedong area

表4 揭东区不同类型成土母质发育土壤硒含量特征
Table 4 Total selenium contents in the surface soil of different parent materials in Jiedong area

成土母质	样品点数	硒含量/(mg·kg ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%
		最小值	最大值	平均值		
白垩系花岗岩	73	0.219	1.168	0.552	0.225	40.76
白垩系砾岩	8	0.536	0.849	0.708	0.096	13.56
侏罗纪花岗岩	33	0.112	1.315	0.598	0.275	45.99
三叠系砂岩	7	0.264	0.843	0.472	0.188	39.83
第四系沉积物	90	0.135	1.009	0.396	0.151	38.13

2.3.2 土壤理化性质

对揭东区表层土壤全硒含量以pH、土壤有机碳、Fe₂O₃和Al₂O₃含量为指标作回归分析(图4),结果表明,揭东区表层土壤硒含量与Fe₂O₃(图4(a))、Al₂O₃(图4(b))呈显著性正相关关系。分析可能是因为铁铝氧化物对硒有吸附作用^[30],但全硒含量与Al的相关性高于与Fe的相关性,说明铁铝氧化物对硒的亲合力和吸附能力不同可能引起差异。图4(c)显示土壤全硒含量与pH呈负相关,最大吸附量在pH=4~6之间,在酸性和中性土壤中,亚硒酸盐(SeO₃²⁻)是其主要

的存在形式,土壤对阴离子的吸附量随着pH的降低而增加,迁移淋溶作用较弱;在碱性土壤中,以硒酸盐的形式存在,与吸附质的亲和力较弱,容易迁移被植物吸收利用;这对土壤中铁铝的相对富集也有影响^[31],共同促成土壤富硒环境的形成。图4(d)中有机碳与硒表现出弱的负相关,相关系数为-0.038,体现有机质的积累过程对研究区土壤硒的吸附与固定作用不明显,可能是区域不同的地理环境导致^[13,31]。因此成土过程中的铁铝氧化物对硒的富集作用是揭东区土壤中硒累积的重要因素。

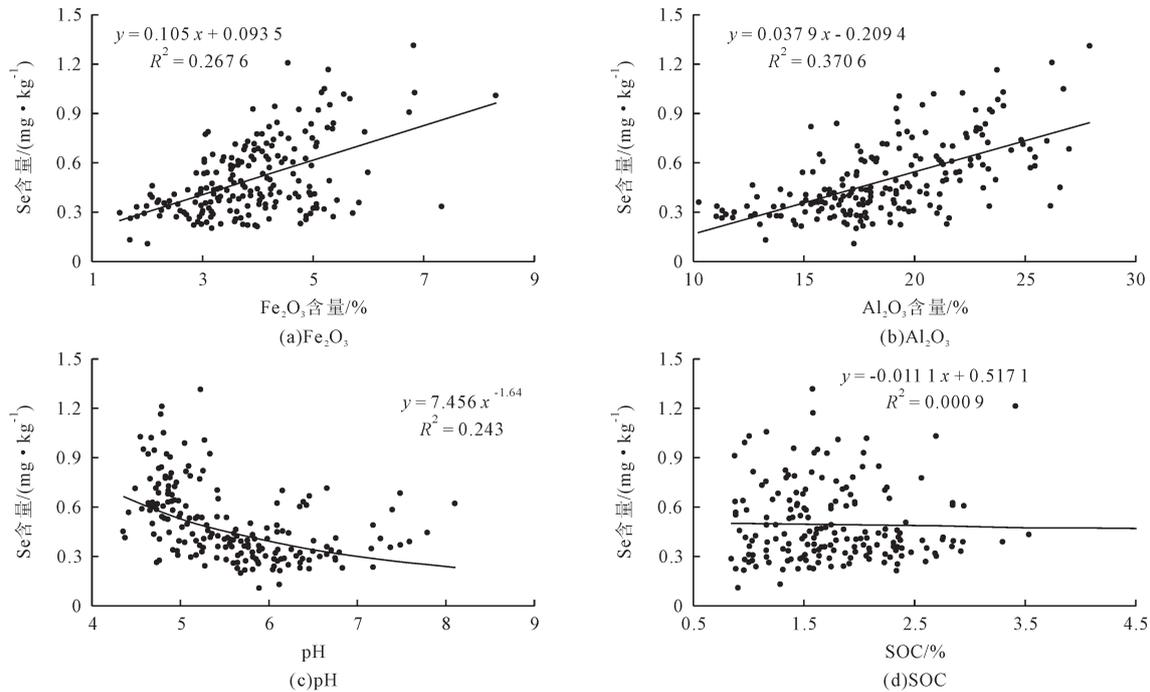


图4 揭东区表层土壤全硒含量与Fe₂O₃、Al₂O₃、pH、SOC的关系
Fig.4 Relationships of selenium content with pH, SOC, Fe₂O₃, Al₂O₃ in surface soils of Jiedong area

2.3.3 土地利用方式

土地利用方式是改变土壤性质和土壤生产力,进而影响土壤质量和土壤环境变迁的主要因素,人类活动对土壤

环境的影响通过土地利用来体现^[32,33]。根据研究区土地利用方式特点,将对土壤的利用分为农耕地、建设用地及未利用地3类,并统计3种方式的全硒含量特征(表5)。

表5 揭东区不同土地利用类型土壤硒含量
Table 5 Selenium content in soil relative to type of land use

土壤利用方式	样品点数	硒含量/(mg·kg ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%
		最小值	最大值	平均值		
农耕地	17	0.294	1.168	0.614	0.253	41.21
建设用地	40	0.135	1.315	0.435	0.211	48.51
未利用地	154	0.112	1.212	0.499	0.215	43.09

其中农耕地全硒含量平均值最高,为0.614 mg/kg,高于富硒土壤的临界值0.60 mg/kg;未利用地次之,为0.499 mg/kg,与研究区全硒含量平均值相当,受人类活动影响较弱;建设用地最低,为0.435 mg/kg。影响土壤硒含量人为因素在建设用地区域较复杂,亟待进一步研究。农耕地因土壤质地发生变化,黏粒增加

或减少带来土壤结构的变化,影响土壤硒含量的高低,耕种方式也会使土壤酸碱度发生变化,土壤酸化使得硒含量增加,耕种过程中施肥也能导致硒元素富集而令土壤硒含量增加。

2.3.4 海拔高度

地形对土壤形成的影响主要是通过引起物质、能

量的再分配而间接地作用于土壤的。皮尔逊相关分析表明,海拔高度与表层土壤全硒含量呈极显著正相关关系($r=0.410, p<0.01$),海拔高度的变化影响表层土壤全硒含量,这与以往关于土壤硒与海拔高度的研究成果相一致^[31,34]。表6为揭东区不同海拔高度的土壤全硒含量对比情况,可以看出海拔升高,土壤全硒

含量也会随之升高。海拔高度增加,气温变冷湿,影响土壤的水热条件进而影响土壤硒含量。不同于低海拔地区,坡地与山区因土壤质地较粗,有机质分解速率比较慢,在土壤中有有机复合态硒逐渐积累,且pH随海拔升高而降低,迁移淋溶作用较弱,进而导致土壤中硒元素富集。

表6 揭东区不同海拔高度发育的土壤硒含量
Table 6 Selenium content in soil relative to type of altitude

海拔高度/m	样品点数	硒含量/(mg·kg ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%
		最小值	最大值	平均值		
0~200	169	0.135	1.168	0.450	0.196	43.56
200~400	20	0.112	1.030	0.675	0.218	32.30
400~600	9	0.545	1.051	0.691	0.163	23.59
600~800	9	0.341	1.315	0.661	0.257	38.88
800~1 000	4	0.450	1.212	0.735	0.288	39.18

3 结论

揭东区土壤全硒含量变幅在0.112~1.315 mg/kg,平均值为0.496 mg/kg,整体属于足硒与富硒土壤范畴。区域表层土壤以足硒与富硒土壤为主要分布特征,不存在硒过剩现象,表层与深层土壤在空间分布上较为一致,土壤硒富集分布在以花岗岩为母质发育的龙尾镇,白塔镇西北边缘,以及新亨镇和玉湖镇的东北地区。不同母质、土壤类型、土地利用类型间表层土壤Se含量存在显著差异。具体表现为:不同母质间Se平均含量由高到低依次排序为:砾岩>花岗岩>砂岩>第四系沉积物;各土壤类型中,黄壤的Se含量最高,依次为赤红壤、水稻土;各土壤利用方式中,农耕地硒含量显著高于建筑用地和未利用地。不同母质、土壤及土地利用类型中,深层与表层土壤Se含量特征表现一致。揭东区土壤Se含量空间上存在含量及富集的差异,还与土壤理化性质(pH、Fe₂O₃、Al₂O₃等)以及海拔高度有关。因此在揭东区农业的进一步发展下,综合区域土壤硒地球化学特征,建议发掘富硒土地的潜在价值实现对富硒土地科学开发保护,对于硒含量低的地区,通过补充外源硒或者调整土壤结构和理化性质的方式,因地制宜地改善现状。

[参考文献]

[1] 周墨,陈国光,张明,等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究:以青塘—梅窖地区为例[J]. 现代地质, 2018(6):1292-1301.
Zhou Mo, Chen Guoguang, Zhang Ming, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of south Jiangxi Province: a typical area of Qingtang—Meijiao [J]. Geoscience, 2018(6):1292-1301.

[2] Yu Tao, Yang Zhongfang, Lyu Yaoyao, 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.
[3] 王锐,余涛,曾庆良,等. 我国主要农耕区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.
Wang Rui, Yu Tao, Zeng Qingliang, et al. Distribution characteristics, origin and influencing factors of soil selenium concentration of main farming areas in China[J]. Current Biotechnology, 2017,7(5):359-366.
[4] Fiona M Fordyce. Selenium deficiency and toxicity in the environment[J]. Essentials of Medical Geology, 2013:375-416.
[5] Tapiero H, Townsend Danyelle M, Tew K D. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds[J]. Biomedicine and Pharmacotherapy, 2003,57(3):134-144.
[6] Laura Vanda Papp, Lu Jun, Arne Holmgren, et al. From selenium to selenoproteins: synthesis, identity, and their role in human health [J]. Antioxidants and Redox Signaling, 2007,9 (7):775-806.
[7] Tan Jian'an, Zhu Wenyu, Wang Wuyi, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. The Science of the Total Environment, 2002,284(1):227-235.
[8] 葛晓立,李家熙,万国江,等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. 岩矿测试, 2000,19(4):254-258.
Ge Xiaoli, Li Jiayi, Wan Guojiang, et al. Study on characteristics of selenium geochemical speciation in soil in Zhangjiakou Keshan disease area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2000,19(4):254-258.
[9] 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 Jianming, Zuo Wei, Qin Haibo, et al. An investigation

- on the source of soil Se in Yutanba, Enshi: evidence from native selenium[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(4): 397-400.
- [10] Margaret P Rayman. Food-chain selenium and human health emphasis on intake[J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100(2): 254-268.
- [11] 姚林波,高振敏,龙洪波. 分散元素硒的地球化学循环及其富集作用[J]. *地球与环境*, 1999, 27(3): 62-67.
Yao Linbo, Gao Zhenmin, Long Hongbo. Dispersed element selenium: its geochemical cycle and enrichment[J]. *Geology & Geochemistry*, 1999, 27(3): 62-67.
- [12] 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(3): 294-300.
Wu Yongyao, Peng Zhenkun, Luo Zemin, et al. Multi-biological functions of selenium to the health of human beings and animals[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1997(3): 294-300.
- [13] 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.
Huang Chunlei, Song Mingyi, Wei Yingchun. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11): 4405-4410.
- [14] 吴文良,张征,卢勇,等. 江西省丰城市“中国生态硒谷”创意产业的发展战略[J]. *农产品加工:创新版*, 2010(3): 72-75.
Wu Wenliang, Zhang Zheng, Lu Yong, et al. The development strategy of "China Eco Selenium Valley" creative industry in Fengcheng City, Jiangxi Province[J]. *Agricultural Product Processing: Innovative Version*, 2010(3): 72-75.
- [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.
Li Jie, Yang Zhiqiang, Liu Zhigang, et al. Distribution of selenium in soils of Nanning City and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 1012-1020.
- [16] 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.
Zeng Qingliang, Yu Tao, Wang Rui. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei[J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 105-112.
- [17] 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.
Chi Fengqin, Xu Qiang, Kuang Enjun, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Heilongjiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1262-1274.
- [18] 何亚琳. 贵州省土壤含硒量及其分布[J]. *土壤学报*, 1996(4): 391-397.
He Yalin. Se contents and distribution in soils of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996(4): 391-397.
- [19] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1996:330-332.
Liu Zheng. Trace Element in Chinese Soil[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996:330-332.
- [20] 谭见安. 环境生命元素与克山病[M]. 北京:中国医药科技出版社, 1996.
Tan Jian'an. Environmental Life Elements and Keshan Disease[M]. Beijing: China Medical Science Press, 1996.
- [21] GB/T 17296-2009, 中国土壤分类与代码[S].
GB/T 17296-2009, China Soil Classification and Code[S].
- [22] 雷志栋,杨诗秀,许志,等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985(9): 12-23.
Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhi, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(9): 12-23.
- [23] 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 Heyang, Li Yuefen, Tang Jie, 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.
- [24] 罗杰,王佳媛,游远航,等. 硒在土壤-水稻系统中的迁移转化规律[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2012, 37(3): 60-66.
Luo Jie, Wang Jiayuan, You Yuanhang, et al. Migration and transformation of Se in the soil-rice system[J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 37(3): 60-66.
- [25] 胡婷,李文芳,聂亚文,等. 张家界市土壤硒分布规律和富硒作物研究[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(6): 821-824.
Hu Ting, Li Wenfang, Nie Yawen, et al. Spatial distribution of selenium and selenium-rich crop in Zhangjiajie[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(6): 821-824.
- [26] 郦逸根,董岩翔,郑洁,等. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 323-330.
Li Yigen, Dong Yanxiang, Zheng Jie, et al. Selenium abundant soil survey and assessment in Zhejiang[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 323-330.
- [27] 戴慧敏,刘驰,宫传东,等. 东北平原土壤碳库构成及其与土壤性质的关系[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(5): 986-994.
Dai Huimin, Liu Chi, Gong Chuandong, et al. Soil carbon pool in northeast plain of China and its relations between the soil properties[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(5): 986-994.
- [28] 席冬梅,邓卫东,毛华明. 云南省主要反刍家畜饲养基地土壤硒含量、分布及其影响因素研究[J]. *云南农业大学学报*, 2007(4): 531-536.
Xi Dongmei, Deng Weidong, Mao Huaming. Study on the contents and distribution of selenium and its influencing fac-

- tors in soils from main livestock feeding bases of Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007(4):531-536.
- [29] 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 Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. Distribution of soil selenium in the northeast plain and its influencing factors[J]. Journal of Soil, 2015, 52(6): 1356-1364.
- [30] 刘永红, 倪中应, 谢国雄, 等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1710-1718.
- Liu Yonghong, Ni Zhongying, Xie Guoxiong, et al. Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1710-1718.
- [31] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 301-308.
- Shang Jingmin, Luo Wei, Wu Guanghong, et al. Spatial distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe Watershed, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 301-308.
- [32] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1697-1702.
- Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun, et al. Regional variability of effects of land use system on soil properties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1697-1702.
- [33] Ademola K Braimoh, Paul L G Vlek. The impact of land-cover change on soil property in Northern Ghana[J]. Land Degradation and Development, 2004, 15(1): 65-74.
- [34] 王晓杰, 孟凡乔, 吴文良. 内蒙古武川县土壤硒分布特性研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 624-629.
- Wang Xiaojie, Meng Fanqiao, Wu Wenliang. Distribution patterns of soil Se in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 624-629.