

广东省揭西县土壤硒的分布特征及影响因素研究^①

王秋爽^{1,2}, 罗杰¹, 蔡立梅^{1,2,3*}, 穆桂珍¹, 王涵植^{1,2}, 蒋慧豪^{1,2}, 王硕^{1,2}, 何明皇¹

(1 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100; 2 长江大学国际水生态研究院, 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, 广州 510640)

摘要:以揭西县土壤为研究对象,系统采集了332个表层土壤样品(0~20 cm)和86个深层土壤样品(>150 cm)。运用Pearson相关分析、回归分析、地统计分析和GIS技术相结合的方法研究了揭西县土壤中全硒的分布特征和影响因素。结果表明,揭西县土壤全硒含量变幅为0.16~1.61 mg/kg,平均值为0.53 mg/kg,总体上以富硒土壤为主,不存在硒不足和硒过剩土壤。不同成土母质中,凝灰岩、花岗岩和页岩发育的土壤全硒含量较高,砂岩发育的土壤全硒含量较低。不同土地利用方式中,未利用地土壤全硒含量最高,其次是农用耕地,建设用地土壤全硒含量最低。Pearson相关分析和回归分析表明,土壤全硒含量与pH呈极显著负相关关系,与铁铝氧化物含量、有机碳含量及海拔高度呈极显著正相关关系。影响揭西县土壤全硒含量的主要因素是成土母质、土壤pH、有机碳、铁铝含量、海拔以及土地利用方式。

关键词:揭西县;土壤全硒;分布特征;影响因素

中图分类号:S159.2; S153.6 **文献标识码:**A

硒(Se)是人体和动物必需的营养元素之一^[1-3]。硒元素主要存在于土壤中,植物吸收以后,以食物的形式进入人体,对人体产生作用。适量的硒元素能够提高人体免疫机能,防治心血管疾病、胃病,具有分解酒精、抗氧化延缓衰老、提高视力等功能,并且享有“天然解毒剂”的美名^[4-6]。有研究表明硒元素过多和过少都会引发疾病^[7]。低硒容易引起地球化学疾病,如低硒是诱发白肌病、克山病、大骨节病等多发病的基本因素^[7-9]。硒元素又具有毒性,摄入过多或者摄入时间过长,会导致急性或慢性中毒^[10-11]。近年来,随着居民生活质量提高,硒元素的营养保健作用逐渐受到人们的重视,并且天然富硒农产品具有安全、科学、有效的特性,因此富硒农产品开发具有较好的前景和重要的经济意义^[12-13]。揭西县是广东省唯一的小麦生产基地、国家商品粮建设县和特色农产品生产基地。《揭西县国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(草案)》指出发展特色农业,全力打造生态揭西的新布局^[14]。因此探究揭西县土壤全硒含量的分布状况及影响因素对当地居民健康以及农业发

展具有重要意义。然而至今,有关揭西县土壤中硒含量的分布状况及影响因素鲜见报道。因此本文借助揭西县农业地质与生态地球化学调查结果,对揭西县土壤中全硒的含量、分布特征及其影响因素进行系统研究,结果可为该地区富硒资源的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

揭西县(115°36'~116°11'E, 23°18'~23°41'N)位于广东省揭阳市西北部,面积为1365 km²,辖1个街道办事处、15个镇、6个林场,属亚热带季风气候,年均温21.1℃,年均降水量1708.1 mm。该县地处莲花山支脉大北山南麓,主要有第四系、白垩系、侏罗系、三叠系四大地层。第四系主要分布在东南部的榕江南河附近,主要为桂洲群大湾镇组地层,岩性为砂岩、粉砂岩;白垩系主要分布在北部山地(李望嶂附近),西部和南部有少量分布,区内凝灰质砾岩、砂岩、凝灰岩分布广泛,有少量侵入岩出露;侏罗系

基金项目:国家自然科学基金项目(41203061)、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)、有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(OGL-201408)和长江大学大学生创新创业训练项目(2016006, 2017223)资助。

* 通讯作者(cimktz88@yangtzeu.edu.cn)

作者简介:王秋爽(1992—),女,山东阳信人,硕士研究生,主要从事环境地球化学研究。E-mail: cjdqxsw@163.com

主要分布在北部的李望嶂、笨箕石、北山嶂附近，西部的峰仔岩凸、癞疔凸附近，南部的大庙山、牛头马面凸附近，中部的龙湖山附近，岩性主要为凝灰质页岩、泥岩、砾岩和少量侵入岩；三叠系主要分布在乌鹰寨附近，岩性主要为砂岩。研究区地貌类型主要有平原、丘陵和山地，土壤以水稻土、赤红壤、黄壤为主。揭西县农用地面积占土地总面积的 84.07%，主要种植水稻、小麦，盛产乒乓果、橄榄、荔枝、龙眼、弥胡桃、擂茶、冬瓜等特色农产品。

1.2 样品采集与分析

根据中国地质调查局《土地质量地球化学评估技术要求(试行)》(DD2008-06)的相关要求，结合揭西县的地形地貌、土壤类型、土地利用方式等因素采集了表层土壤样和深层土壤样。表层土壤样品采样密度为每 km^2 一个点，采样深度为 0 ~ 20 cm，在采样方格中，一个样品由主采样点周围 100 m 范围内 3 ~ 5 处多点采集组合，每 4 km^2 一个点组合分析；深层土壤样品采样密度为每 4 km^2 一个点，采样深度达到 150 cm 以下，每 16 km^2 一个点组合分析。共采集 332 个表层组合样、86 个深层组合样。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，采样点布置在公园、林地以及其他空旷地带等堆积历史较长的土壤，避开近期搬运的堆积土和垃圾土。表层土样采样点位置离开主干公路、铁路 100 m 以外，避开施肥期。深层土样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。弃去动、植物残留体、砾石、肥料团块等杂物后，混匀收集约 1 000 g 土样。样品带回实验室，风干，磨碎，过 20 目尼龙筛，按要求将 500 g 分析样装瓶备用。

该研究区土壤样品分析由广东省物料实验检测中心承担，并严格按照《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-01)进行。氢氟酸-硝酸分解样品，高氯酸冒烟，盐酸溶解并入铁盐，硼氢化钾还原，原子荧光光谱法测定硒元素的含量，方法检出限为 0.004 mg/kg；粉末压片(称样量 4 g、硼酸镶边垫底)，X 射线荧光光谱法(XRF)直接测定 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 Mn 的含量，方法检出限分别为 0.02%(质量分数)、0.05%(质量分数)、4 mg/kg；硫酸、重铬酸钾氧化分解，硫酸亚铁铵滴定测定土样的有机碳含量，方法检出限为 0.09%(质量分数)；称取 10 g 土样，加 25 ml 蒸馏水，搅拌 1 min，静置 30 min，离子选择电极测定土壤 pH，方法检出限为 0.1。以国家一级土壤标准物质控制精密度和准确度，以空白样和重复样分析实验误差。经检验，所

有样品报出率为 100%，精密度和准确度合格率均为 100%，重复性检验合格率为 100%，符合《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-01)要求，分析数据可靠准确。

1.3 数据处理

描述性统计、Pearson 相关分析和回归分析等借助 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 20.0 完成；半方差分析、空间分布图分别运用 GS⁺、ArcGIS 10.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤硒含量特征

揭西县表层土壤中全硒含量的变化范围为 0.16 ~ 1.61 mg/kg，平均含量为 0.53 mg/kg。与我国其他地区表层土壤全硒含量(表 1)相比，该县表层土壤全硒含量平均值与章丘地区^[15]富硒土壤研究结果较为接近，高于三峡库区克山病区^[16]和西藏大骨节病区^[17]，低于恩施市^[18]、紫阳县^[19]硒毒区，与全国^[20]和全球^[21]土壤硒含量均值相比，分别是我国和全球土壤硒的 1.8 倍和 1.3 倍。根据谭见安^[8]对我国硒元素生态景观安全阈值的划分(表 2)可知，研究区表层土壤大部分属于富硒土壤范畴，不存在硒不足和硒过剩土壤，其中，富硒土壤占 82%，足硒土壤占 18%。借助半方差分析和普通克里金插值得到揭西县表层土壤全硒空间分布图(图 1)，由图 1 可以看出，表层富硒土壤主要集中在揭西地区中部和北部(良田乡、大洋乡、五经富镇等)，而在南部部分地区(上砂镇、河婆街道办事处、揭西县城、灰寨镇、塔头镇、凤江镇、棉湖镇等)土壤硒含量在 0.4 mg/kg 以下，可以考虑适当给当地农作物补充外源硒，以提高当地居民身体健康质量。

表 1 揭西县及其他地区土壤硒含量
Table 1 Soil selenium contents in Jiexi County and other regions

| 地区 | 平均值(mg/kg) | 变幅(mg/kg) | 数据来源 |
|---------|------------|--------------------|------|
| 揭西县(表层) | 0.53 | 0.16 ~ 1.61 | 本文 |
| 揭西县(深层) | 0.54 | 0.10 ~ 1.04 | 本文 |
| 山东省章丘市 | 0.55 | 0.1 ~ 0.8 | [15] |
| 重庆市三峡库区 | 0.16 | 0.006 ~ 5.790 | [16] |
| 西藏 | 0.15 | 0.01 ~ 2.00 | [17] |
| 湖北省恩施市 | 9.36 | 2.7 ~ 87.3 | [18] |
| 陕西省紫阳县 | 0.94 | 0.001 5 ~ 36.685 4 | [19] |
| 全国 | 0.29 | 0.05 ~ 0.99 | [20] |
| 全球 | 0.40 | 0.01 ~ 2.00 | [21] |

表 2 表层土壤硒丰缺划分限值

Table 2 Thresholds of abundance and deficiency of soil selenium

| 含量分级 | 全量硒(mg/kg) | 硒效应 | 面积比例(%) |
|------|---------------|-------|---------|
| 缺乏 | < 0.125 | 硒反应不足 | 0 |
| 边缘 | 0.125 ~ 0.175 | 硒潜在不足 | 0 |
| 中等 | 0.175 ~ 0.400 | 足硒 | 18 |
| 高硒 | 0.400 ~ 3.000 | 富硒 | 82 |
| 过剩 | > 3.000 | 硒中毒 | 0 |

2.2 土壤硒的富集特征

表层土壤硒的富集程度可用富集系数(k)来表示,即:

$$k = \frac{\text{表层土壤 Se 含量} / \text{表层土壤 Mn 含量}}{\text{深层土壤 Se 含量} / \text{深层土壤 Mn 含量}}$$

其中,每 4 km²的表层土壤样和其所处的 16 km² 单元格深层土壤样相对应。分别以 1.0 ≤ k < 1.5、1.5 ≤ k < 2.0 和 k ≥ 2.0 作为土壤硒弱富集、中富集和强富集 3 个标准的划分依据^[22]。揭西县表层土壤硒的富集系数平均值为 1.46,变化范围为 0.09 ~ 10.06,标准离差为 1.25,变异系数达 86%,属于中等变异。富集系数均值属于弱富集,表明揭西县表层土壤硒的富集程度相对较低,中等变异反映了不同区域富集程度差异较大。其中弱富集、中等富集和强富集区面积分别占揭西县总面积的 24%、11%、22%。图 2 中强富集区(k ≥ 2.0)主要分布在侏罗系凝灰岩、花岗岩、页岩和白垩系凝灰岩、花岗岩为母质的土壤区。

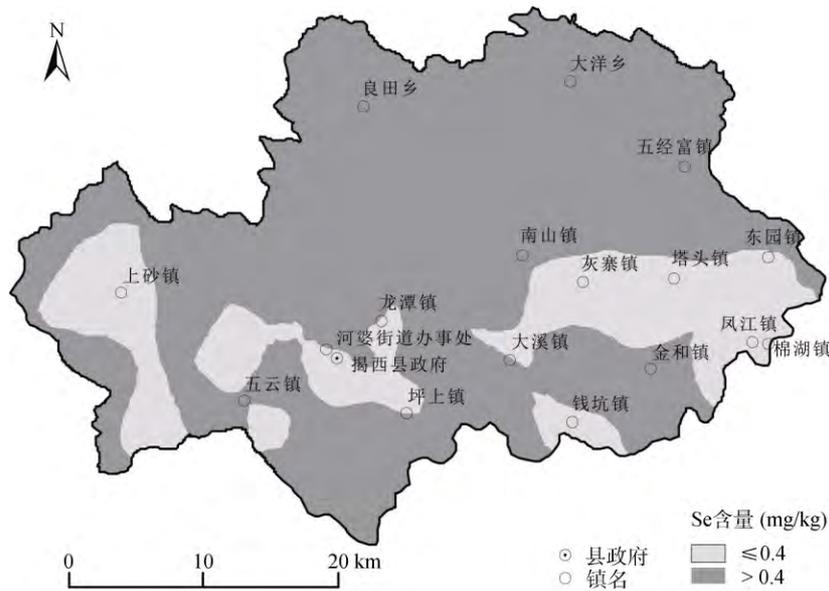


图 1 揭西县表层土壤全硒分布图

Fig. 1 Spatial distribution of total selenium content in topsoil in Jiexi County

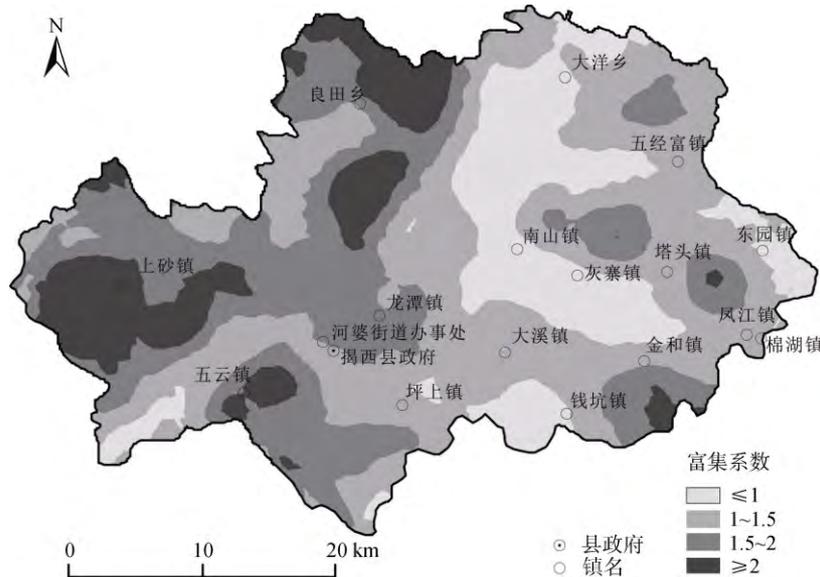


图 2 揭西县表层土壤全硒富集系数分布图

Fig. 2 Spatial distribution of enrichment coefficients of total selenium in topsoil in Jiexi County

2.3 土壤硒含量的影响因素

2.3.1 成土母质 土壤中的硒主要受成土母质的影响^[23]。图 3 为揭西县深层土壤全硒的空间分布图，从图 1 和图 3 可以看出，表层土壤和深层土壤中全硒的空间分布较为吻合，而且表层土壤全硒含量与深层土壤（相当于成土母质层）全硒含量呈极显著的正相关关系($r = 0.603, P < 0.01$)，表明成土母质对表层土壤硒含量影响较大。不同成土母质发育的表层土壤硒含量具有差异性(表 3)，这与刘晓波等^[24]在四川省屏山县关于土壤硒含量影响因素的研究一致。除第四系砂岩发育的土壤全硒含量低于 0.40 mg/kg 外，其余母质发育的土壤全硒含量都高于富硒土壤临界值 0.40 mg/kg。不同母质发育的土壤全硒含量由高到低的顺序为：侏罗系凝灰岩(0.73 mg/kg) > 白垩系花岗岩

(0.65 mg/kg) > 白垩系凝灰岩(0.63 mg/kg) > 侏罗系页岩(0.53 mg/kg) > 侏罗系花岗岩(0.50 mg/kg) > 三叠系砂岩(0.46 mg/kg) > 第四系砂岩(0.36 mg/kg)，可见凝灰岩、花岗岩和页岩发育的土壤硒含量较高。其原因可能是在火山岩区(凝灰岩和花岗岩为主)，各类金属硫化物和金属矿床分布广泛，而硒和硫有相似的地球化学性质，两者易形成类质同像存在于硫化物矿物中，使得火山岩区硒的含量较高^[25]。在侏罗系黑色页岩分布区由于富含泥质、碳质和有机质，会增强对硒的吸附作用从而使硒含量增加。第四系和三叠系砂岩发育的土壤硒含量较低，可能是因为砂岩的结构和孔隙都不利于富硒环境的形成。本研究区域地质背景复杂，使得研究区不同成土母质发育的土壤中硒含量具有差异性。

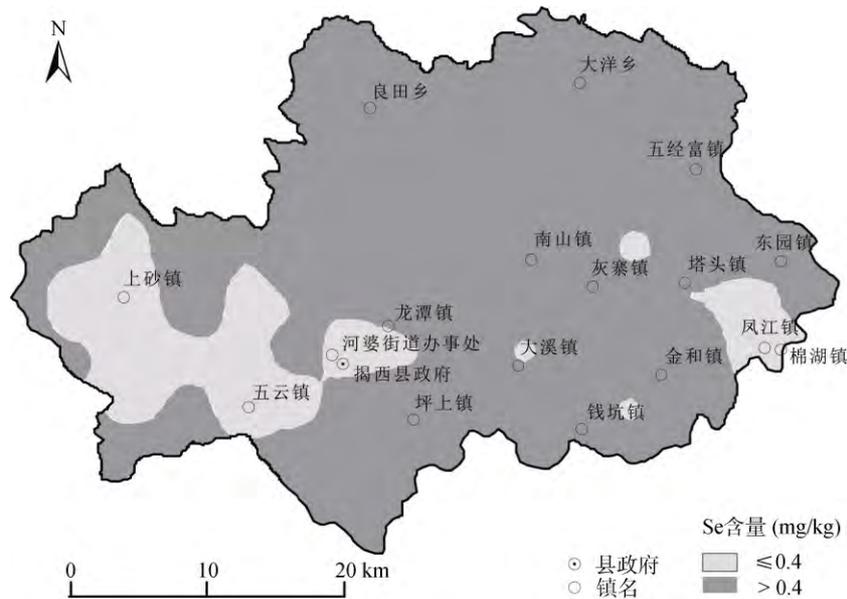


图 3 揭西县深层土壤全硒空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of total selenium in deep-soil in Jiexi County

表 3 揭西县不同类型成土母质发育土壤全硒含量

Table 3 Total selenium contents in topsoils with different parent materials in Jiexi County

| 母质 | 样品数 | 硒含量(mg/kg) | | | 标准偏差 (mg/kg) | 变异系数 (%) |
|--------|-----|------------|------|------|-----------------|-------------|
| | | 最大值 | 最小值 | 平均值 | | |
| 第四系砂岩 | 58 | 1.01 | 0.17 | 0.36 | 0.14 | 40 |
| 白垩系花岗岩 | 25 | 1.61 | 0.26 | 0.65 | 0.31 | 48 |
| 白垩系凝灰岩 | 35 | 1.11 | 0.30 | 0.63 | 0.18 | 29 |
| 侏罗系花岗岩 | 141 | 1.31 | 0.16 | 0.50 | 0.22 | 43 |
| 侏罗系页岩 | 3 | 0.74 | 0.25 | 0.53 | 0.25 | 48 |
| 侏罗系凝灰岩 | 43 | 1.26 | 0.21 | 0.73 | 0.28 | 38 |
| 三叠系砂岩 | 27 | 1.29 | 0.18 | 0.46 | 0.24 | 51 |
| 研究区 | 332 | 0.16 | 1.61 | 0.53 | 0.25 | 47 |

2.3.2 土壤理化性质 通过对表层土壤全硒含量与 Fe₂O₃、Al₂O₃、pH、SOC 进行回归分析,得到图 4,并且运用 Pearson 相关分析得出土壤全硒含量与土壤理化性质和组分之间的相关性。结果表明,揭西县表层土壤全硒含量与 Fe₂O₃(图 4A)、Al₂O₃(图 4B)有极显著正相关关系,相关系数分别为 $r = 0.468 (P < 0.01)$ 和 $r = 0.360 (P < 0.01)$,可能由于铁铝氧化物对硒具有吸附作用,但是 Fe₂O₃与硒的相关性高于 Al₂O₃,这是由于铁铝氧化物对硒的亲力和吸附能力不同引起。同时,pH 会影响铁铝氧化物对硒的吸附,最大吸附量在 pH = 4 ~ 6 之间^[20]。另一方面,经过盐基离子淋失后的 Fe 和 Al 会相对富集^[24],这些因素促使该区域形成了富硒的环境。

图 4C 表明有机碳与硒存在极显著正相关性,相关系数为 $r = 0.456 (P < 0.01)$ 。以往的研究也发现有机碳与土壤全硒含量存在相关性^[26],主要是因为土壤有机质对硒有强烈的吸附和固定作用。图 4D 表明揭

西县表层土壤酸碱度与全硒含量存在极显著负相关,相关系数为 $r = -0.593 (P < 0.01)$ 。土壤中 Se 的主要存在形式有元素硒、有机硒、硒化物、亚硒酸盐和硒酸盐等,pH 是控制亚硒酸盐和硒酸盐转化的主要因素^[27],硒在酸性和中性(pH = 4 ~ 8)条件下主要以亚硒酸盐的形式存在,迁移淋溶作用较弱;在碱性条件下主要以硒酸盐形式存在,容易迁移,且被植物吸收利用^[26, 28-30]。因此有机碳对硒的吸附作用和大面积酸性土壤是揭西县土壤中硒累积的重要因素。

2.3.3 海拔 海拔是影响土壤中硒含量的重要因素^[31]。Pearson 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($r = 0.505, P < 0.01$),海拔高度的变化对表层土壤全硒含量的影响较大。这与罗友进等^[16]、商靖敏等^[32]、Yu 等^[33]关于土壤硒与海拔关系的研究结果一致。表 4 为不同海拔高度(0 ~ 200、200 ~ 400、400 ~ 600、600 ~ 800、800 ~ 1 000 m)全硒含量的变化情况,可以看出随着海拔升高土壤硒

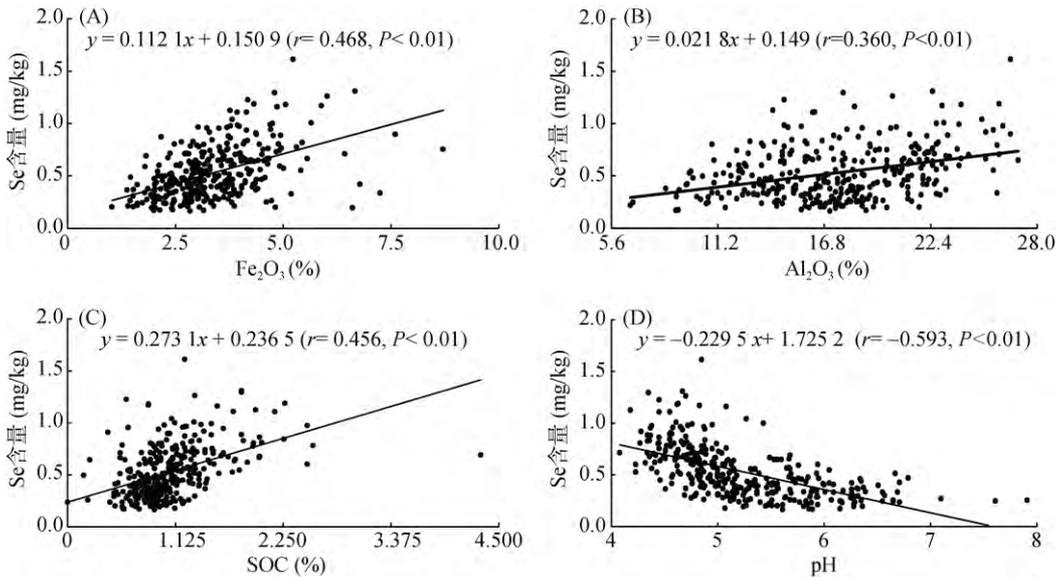


图 4 揭西地区表层土壤硒含量与 Fe₂O₃ (A)、Al₂O₃ (B)、SOC (C)、pH (D) 的相关性
Fig. 4 Correlation of topsoil selenium with Fe₂O₃ (A)、Al₂O₃ (B)、SOC (C) and pH (D) in Jiexi County

表 4 揭西县不同海拔高度发育土壤的全硒含量
Table 4 Soil total selenium contents under different altitudes in Jiexi County

| 海拔高度(m) | 样品数 | 硒含量 (mg/kg) | | | 标准偏差(mg/kg) | 变异系数(%) |
|-------------|-----|-------------|------|------|-------------|---------|
| | | 最大值 | 最小值 | 平均值 | | |
| 0 ~ 200 | 175 | 1.01 | 0.17 | 0.43 | 0.18 | 42 |
| 200 ~ 400 | 53 | 1.31 | 0.16 | 0.54 | 0.25 | 47 |
| 400 ~ 600 | 47 | 1.29 | 0.23 | 0.62 | 0.27 | 44 |
| 600 ~ 800 | 43 | 1.26 | 0.30 | 0.70 | 0.21 | 30 |
| 800 ~ 1 000 | 14 | 1.61 | 0.36 | 0.85 | 0.31 | 36 |
| 全区 | 332 | 0.16 | 1.61 | 0.53 | 0.25 | 47 |

含量逐渐增大。其原因是海拔主要通过气温对有机质产生作用,从而影响土壤全硒含量。在低海拔区,气温较高,加快了有机质的分解速率,在分解过程中会将自身固定和吸附的部分硒释放出来,同时分解产生的中间产物也可能促进硒的活化,使得表层土壤中硒淋溶和植物吸收速率增加^[34],进而导致土壤中全硒含量较低。

2.3.4 土地利用方式 土地利用方式对土壤中全硒含量的影响是综合作用的结果^[32, 35-37],主要是改变土壤性质和土地生产力,进而影响土壤中全硒的含量。本研究根据揭西县土地利用方式的特点,将揭西县土地利用方式分为三类:未利用地、农耕地、建

设用地。并且分别统计了3种土地利用方式中全硒的含量(表5),其中未利用地土壤全硒含量平均值最高,为0.56 mg/kg;农耕地土壤全硒含量均值次之;建设用地的全硒含量平均值最低,为0.46 mg/kg。这可能是因为未利用地中,硒被土壤有机质吸附,不断在土壤表层累积,输入量大于输出量,导致硒含量较高。在农耕地中,农作物持续从土壤吸收硒元素,如果常规的施肥不能充分地补充硒元素,会使土壤中硒含量减少,而且长期的耕作改变了土壤的质地和结构,降低了土壤保肥、供肥能力,也会使土壤中部分硒元素流失。对于建设用地,土壤中硒含量大小的影响因素较为复杂,有待进一步研究。

表5 揭西县不同土地利用类型土壤硒含量
Table 5 Soil total selenium contents under different land use types in Jiexi County

| 土地利用方式 | 样品数 | 硒含量(mg/kg) | | | 标准偏差(mg/kg) | 变异系数(%) |
|--------|-----|------------|------|------|-------------|---------|
| | | 最大值 | 最小值 | 平均值 | | |
| 农耕地 | 57 | 1.31 | 0.17 | 0.46 | 0.23 | 50 |
| 建设用地 | 158 | 1.26 | 0.16 | 0.53 | 0.25 | 47 |
| 未利用地 | 117 | 1.61 | 0.21 | 0.56 | 0.26 | 46 |
| 全区 | 332 | 0.16 | 1.61 | 0.53 | 0.25 | 47 |

3 结论

研究结果表明揭西县土壤总体上属于富硒土壤。不同成土母质中,白垩系凝灰岩、花岗岩和侏罗系凝灰岩、花岗岩、页岩为母质发育的土壤中全硒含量较高,第四系砂岩和三叠系砂岩为母质发育的土壤中全硒含量较低。不同土地利用方式中,未利用地土壤全硒含量最高,其次是农耕地,建设用地土壤全硒含量最低。揭西县土壤全硒含量在区域分布上具有差异性,主要与成土母质、土壤pH、有机碳含量、铁铝氧化物含量、海拔以及土地利用方式等因素有关。因此在揭西县农业发展的过程中,建议依据因地制宜的原则,在富硒地区,合理利用富硒土壤,种植富硒农产品,发展富硒农业,促进该地区农业经济的发展;在硒含量较少地区,适当补充外源硒或者通过调节土壤的理化性质、人类活动来改善土壤硒含量。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 周俊, 刘兆云, 孟立丰, 等. 土壤性质对土壤-水稻系统中硒迁移的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 734-741

- [4] Thomson C D. Assessment of requirements for selenium and adequacy of selenium status: A review[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2004, 58(3): 391-402
- [5] Daniel M L. Distribution, mineralogy and geochemistry of selenium in felsic volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Finlayson Lake District, Yukon Territory, Canada[J]. Society of Economic Geologists, 2008, 103: 61-68
- [6] Milner J A. Diet and cancer: Facts and controversies[J]. Nutrition and Cancer, 2006, 56(2): 216-224
- [7] Wang J, Li H R, Yang L S, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, 39(1): 221-229
- [8] 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
- [9] 张丽珊, 朱岩, 可夫, 等. 东北大骨节病区主要土壤腐殖酸硒与大骨节病关系的研究[J]. 应用生态学报, 1990, 1(4): 333-337
- [10] Wang J, Li H R, Li Y H, et al. Speciation, distribution, and bioavailability of soil selenium in the Tibetan Plateau Kashin-beck disease area-a case study in Songpan County, Sichuan Province, China[J]. Biological Trace Element Research, 2013, 156(1/2/3): 367-375
- [11] 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

- [12] 严明书, 张茂忠, 唐将, 等. 重庆渝北地区表层土壤硒含量分布与农业经济意义[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 589-594
- [13] 郑涛, 吴承龙, 马友华, 等. 石台县天然富硒大米产业现状与发展[J]. 中国稻米, 2017, 23(5): 114-117
- [14] 揭西县人民政府. 《揭西县国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(草案)》[EB/OL]. <http://www.ahmhxc.com/gongzuobaogao/3015-2.html>, 2016-04-01/2018-06-07
- [15] 赵西强, 张贵丽. 章丘地区土壤硒的含量分布及影响因素[J]. 山东国土资源, 2015, 31(3): 46-49
- [16] 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
- [17] 曲航, 尼玛扎西, 韦泽秀, 等. 西藏土壤硒状况与富硒青稞生产路径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3645-3653
- [18] Qin H B, Zhu J M, Liang L. The availability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China[J]. Environment International, 2013, 52(1): 66-74
- [19] 张建东, 王丽, 王浩东. 紫阳县土壤硒的分布特征研究[J]. 土壤通报, 2016, 48(6): 1404-1408
- [20] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1996
- [21] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(1): 117-132
- [22] 酃逸根, 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
- [23] 王美珠, 章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1996, 22(1): 89-93
- [24] 刘晓波, 张华, 金立新, 等. 四川省屏山县土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. 环境化学, 2017, 36(10): 2246-2252
- [25] 贾十军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. 华东地质, 2013, 34(2): 133-137
- [26] 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
- [27] 胡艳华, 王加恩, 蔡子华, 等. 浙北嘉善地区土壤硒的含量、分布及其影响因素初探[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 84-88
- [28] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 75-81
- [29] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731-736
- [30] Zhang L H, Shi W M, Wang X C. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars[J]. Pedosphere, 2006, 16(5): 646-653
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Yu T, Yang Z F, Lv Y 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(1): 97-108
- [34] 侯少范, 李德珠. 暖温带地理景观中土壤硒的分异特征[J]. 地理学报, 1992, 47(1): 31-39
- [35] 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
- [36] 任婷婷, 王瑄, 孙雪彤, 等. 不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 123-126
- [37] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 119-128

Distribution of Soil Selenium and Its Influential Factors in Jiexi County, Guangdong Province

WANG Qiushuang^{1,2}, LUO Jie¹, CAI Limei^{1,2,3*}, MU Guizhen¹, WANG Hanzhi^{1,2}, JIANG Huihao^{1,2},
WANG Shuo^{1,2}, HE Minghuang¹

(1 College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2 International Institute of Aquatic Ecology, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3 Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A total of 332 topsoil samples (0 – 20 cm) and 86 deep soil samples (> 150 cm) were collected in Jiexi County, Guangdong Province to study the characteristics of total selenium contents, spatial distribution and its influential factors by Pearson correlation analysis, regression analysis, geostatistical analysis and GIS technology. The results showed that the concentration of total selenium ranged from 0.16 to 1.61 mg/kg with a mean value of 0.53 mg/kg. The whole region was concentrated in the category of abundance of selenium content. Among the different types of parent materials, selenium contents were higher in soils developed from tuff, granite, and shale, while selenium concentrations were lower in soils developed from sandstone. Among the different land use types, the highest Se content was found in unused land, followed by agricultural arable land, and total selenium content was the lowest in construction land. Regression analysis and Pearson correlation analysis showed that soil total selenium content was significantly negatively correlated with pH, but significantly positively correlated with iron-aluminum oxide content, organic carbon content, and altitude. The parent material was the main influential factor of soil total selenium content in Jiexi County, while soil pH, organic carbon, iron and aluminum content, altitude, and land use type also had certain effects on the distribution and enrichment of soil total selenium content.

Key words: Jiexi County; Soil total selenium; Distribution characteristic; Influential factors