

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200631

· 资源利用 ·

广东省惠来县土壤硒的分布特征 及影响因素研究*

王涵植^{1,2}, 罗杰^{1,2}, 蔡立梅^{1,2,3*}, 穆桂珍^{1,2}, 王秋爽^{1,2},

蒋慧豪^{1,2}, 王硕^{1,2}, 何明皇^{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, 广州 510640)

摘要 [目的] 开展对广东省惠来县土壤硒的调查研究, 系统采集了表层土壤组合样 321 个, 深层母质土壤组合样 79 个, 测定土壤全硒含量, 并据此研究土壤硒分布特征及主要影响因素。[方法] 利用 Pearson 相关分析法与一元线性回归方法计算出土壤全硒含量与土壤理化性质和组分之间的相关性, GIS 空间分析技术等方法对土壤硒的含量分布、富集特征及影响因素进行了系统的分析。[结果] 惠来县土壤总体属于富硒水平。硒含量变化于 0.02 ~ 1.41 mg/kg, 平均值为 0.50 mg/kg, 明显高于全国土壤硒平均值 0.29 mg/kg。表层土壤富硒面积为 60.75%, 足硒面积为 28.35%; 深层土壤中, 富硒和足硒面积分别达到了 72.15% 和 20.25%。回归分析表明, 土壤全硒含量与铁铝含量、有机碳含量具有极显著正相关, 与 pH 呈极显著负相关。[结论] 影响惠来县土壤硒含量的主要因素是成土母质, 土壤 pH、有机碳和铁铝含量及土地利用方式对土壤全硒含量分布与富集也有一定的影响。整体来看土壤硒含量水平较高, 应针对富硒、足硒土地制定合理保护、开发和永续利用的方法与政策。

关键词 土壤 硒 分布特征 影响因素 惠来县

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 1005-9121 [2020]06262-08

0 引言

硒 (Se) 是人体和动物所必须的 14 种微量元素之一, 在增强抗氧化、提高免疫力和预防癌症等方面有重要功效, 同时也是硫族非金属元素, 稀少而分散于地壳之中^[1]。全球地壳中硒平均丰度为 0.13 mg/kg^[2]。环境硒水平与人和动物的健康密切相关, 硒摄入量不足或者过量都会引起多种疾病, 如缺硒会导致人类和动物生长迟缓和骨骼代谢损伤, 引发克山病, 大骨节病等^[3], 硒过量则会导致人头发和指甲脆弱、皮肤粗糙和精神紊乱, 家畜患“碱性病”与“盲跚症”等慢性中毒症^[4]。食物是人类和动物获取硒的主要途径^[5], 而土壤是食物硒最终来源, 基于此, 探究土壤硒的含量分布以及影响因素, 对维护人体健康以及农产品安全有着十分重要的意义。近年来, 已有研究表明土壤硒含量受多方面因素的影响, 曾庆良^[6]等对湖北恩施沙地土壤研究发现, 土壤有机碳含量及海拔高度是影响土壤硒含量的主要因素。郭莉^[7]等对北京平原区土壤硒的研究结果表明, 土壤硒与有机质呈正相关性, 有机质对表层土壤硒具有强烈的吸附与固定作用。广东省惠来县十五届人大一次会议和政协惠来县十届一次会议中指出需加快发展现代农业, 扎实推进新农村建设, 同时惠来县作为国家商品粮生产基地县, 探究其土壤硒的含量分布状况及

收稿日期: 2018-11-14

作者简介: 王涵植 (1995—), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生。研究方向: 环境地球化学

*通讯作者: 蔡立梅 (1980—), 男, 湖北荆州人, 博士、副教授。研究方向: 环境地球化学。Email: clmktz88@yangtzeu.edu.cn

*资助项目: 省部级公益性项目“广东省韩江三角洲农业地质与生态地球化学调查项目”([2007] 137); 中国地质调查局项目“全国土地质量地球化学调查成果集成与服务应用”(DD20190518)

影响因素对当地农业发展具有重要意义,但是到目前为止,有关惠来县土壤全硒情况鲜有报道。文章以惠来县地球化学调查结果为基础,对研究区土壤硒含量、分布特征以及影响因素进行研究,结果可为该地区富硒资源的合理开发与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

惠来县(22°53'E~23°11'E, 115°54'N~116°34'N)位于广东省东南部,东连汕头市潮南区,西接汕尾市,北邻普宁市,南濒南海,面积为1253km²。惠来县辖13镇、1个国营农林场、1个市直工业区、1个华侨管理区。年均温22.1°C,属亚热带季风气候,年均降水量1745mm。该县地处大南山南麓,北部为山区,东南部和西南部为丘陵地带,中南部多为平原台地,中部至东部沿海多为沙滩地,西南部沿海多为海、河塍地。区间出露有第四系、白垩系、侏罗系、三叠系四大地层。第四系主要分布在西北部的葵潭镇附近以及南部地区的隆江镇等地,岩性为砂岩、粉砂岩;白垩系主要分布在西南地区的鳌江镇、岐石镇地区,中部以及东南部有少量分布,区内凝灰质砾岩、砂岩、凝灰岩分布广泛;罗系主要分布在中部的惠城镇和华湖镇地区,岩性主要为凝灰质页岩、泥岩、砾岩和少量侵入岩;三叠系主要分布在西南部东港镇地区,岩性主要为砂岩。土壤类型多为赤红壤跟水稻土,及少部分风沙土壤,惠来县农业用地占全县土地总面积80.35%,盛产荔枝、龙眼、菠萝、油甘、杨桃、柑橘、芒果、青梅等特色农产品。

1.2 样品采集与分析

惠来县农业地质与生态地球化学调查采集了表层土壤样和深层母质样。表层土壤样的采样密度为1个/km²,采样深度为0~20cm,1个样品由主采样点周围100m范围内3~5处多点采集组合。深层土壤样采样密度为1个/4km²,低山丘陵土层覆盖较薄地区,适当放稀,但是保证采样大格(4km×4km)有样点分布,采样深度达到150cm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4km²大格、深层土壤样按16km²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321个,深层母质土壤组合样79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(187个),在城镇区,采样位置选择在公园、林地以及其他空旷地带等堆积历史较长的土壤。避开明显点状污染地段、垃圾堆及新近堆积土、田埂等(134个)。表层土壤采样位置离开主干公路、铁路100m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500g,送样测试分析。

土壤样品分析严格按照《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-1)进行,经氢氟酸、硝酸、高氯酸电沙浴消煮,盐酸溶解并入铁盐,硼氢化钾还原,AFS原子荧光光谱法测定土壤全硒,检出限为0.004mg/kg;土壤有机碳(SOC)经硫酸、重铬酸钾氧化分解,硫酸亚铁铵滴定后测得,检出限为0.09%(质量分数);氧化铝(Al₂O₃)、三氧化二铁(Fe₂O₃)和钛(Ti)的含量经粉末压片后,通过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10mg/kg;土壤pH用离子选择电极测定,检出限为0.10。每500件样品中密码插入12个国家一级土壤标准物质进行分析,每种元素的每次分析结果单独计算测定值与标准值对数差(ΔlgC);按每小批约50件样品中密码插入不同含量的4个国家一级土壤标准物质,计算4个监控样单个测定值与标准值之间对数差(ΔlgC),用于衡量样品分析的精密度。实验过程中的重复率为20%,元素分析方法实际检出限、准确度、精密度等分析方法各项质量指标达到或优于《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-1)的要求。

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 2016和SPSS 20.0完成;半方差分析、空间分布图分别运用GS⁺、ArcGIS 10.3软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤硒含量特征

统计获得惠来县土壤硒含量范围为 0.02 ~ 1.42mg/kg，平均含量为 0.51mg/kg（表 1），根据谭见安^[8]对我国硒元素生态景观安全阈值的划分可知，研究区表层土壤大部分属于富硒土壤范畴，不存在硒过剩土壤。土壤表层和深层硒含量统计结果显示：表层土壤富硒面积为 60.75%，足硒面积为 28.35%，硒反应不足和潜在不足土壤面积分别为 7.16% 和 3.14%；深层土壤中，富硒和足硒面积分别达到了 72.15% 和 20.25%，硒不足面积仅为 7.60%。深层土壤富硒意味着表层富硒不是来自人为输入，有利于富硒土壤的持续开发与利用。

研究区由北到南为富硒—足硒—硒反应不足的分布趋势（图 1）。与我国其他地区相比，表层土壤全硒含量平均值与章丘地区^[9]富硒土壤研究结果较为接近，高于三峡库区克山病区^[10]和西藏大骨节病区^[11]，低于恩施市^[12]、紫阳县^[13]硒毒区，与全国^[16]和全球^[17]的土壤硒含量均值相比，是我国土壤硒的 1.73 倍，是全球土壤硒的 1.25 倍（表 2）。

表 1 表层土壤硒丰缺划分界限值

含量分级	全量硒 (mg/kg)	硒效应	面积比例 (%)	
			表层土壤	深层土壤
缺乏	<0.125	硒反应不足	7.160	7.600
边缘	0.125~0.175	硒潜在不足	3.140	0
中等	0.175~0.60	足硒	28.350	20.250
高硒	0.600~3.00	富硒	60.750	72.150
过剩	>3.0	硒中毒	0	0

表 2 惠来县及其他地区土壤硒含量

地区	平均值 (mg/kg)	数据来源
惠来县 (表层)	0.50	该文
惠来县 (深层)	0.54	该文
河北省, 张家口市	0.14	[14]
山东省, 章丘市	0.55	[9]
浙江省, 嘉善市	0.33	[5]
重庆市, 三峡库区	0.16	[10]
湖北省, 恩施市	9.36	[12]
陕西省, 紫阳县	0.94	[13]
南宁	0.57	[15]
西藏	0.15	[11]
全国	0.29	[16]
全球	0.40	[17]

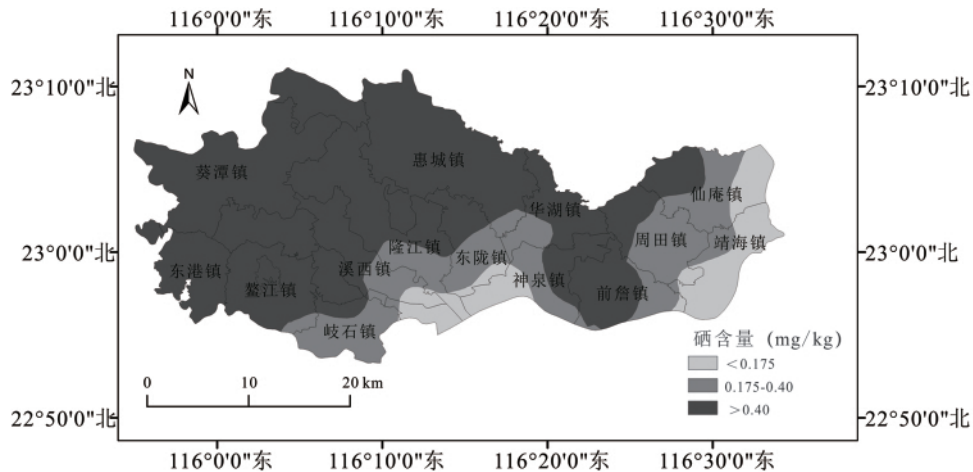


图 1 惠来县表层土壤全硒分布

2.2 土壤硒的富集特征

富集系数是评价人类活动对土壤中元素富集程度影响的重要参数^[18]，以参比元素为参考标准，对测试样品进行归一化处理。其中参比元素通常选用在地壳中稳定存在且含量相对较高的元素^[19]，本文采用钛 (Ti) 作为参比元素。表层土壤硒的富集程度用富集系数 (k) 来表示，计算公式如下：

$$k = \frac{\text{表层土壤硒含量} / \text{表层土壤钛含量}}{\text{深层土壤硒含量} / \text{深层土壤钛含量}}$$

其中, 每 4km² 的表层土壤样和其所处的 16km² 单元格深层土壤样相对应。分别以 $k < 1.0$ 、 $1.0 \leq k < 1.5$ 、 $1.5 \leq k < 2.0$ 和 $k \geq 2.0$ 作为土壤硒无富集、弱富集、中富集和强富集 4 个标准的划分依据^[20]。惠来县表层土壤硒的富集系数平均值为 1.03, 变化范围为 0.27 ~ 3.04, 标准偏差为 0.45。由标准偏差和平均值可得 k 的变异系数, 变异系数反映 k 在空间上的离散程度, 计算得变异系数为 43.17%, 属中等程度变异^[21-22]。富集系数均值属弱富集, 表明惠来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惠来县总面积的 28%、11%、2%。图 2 中强富集区 ($k \geq 2$) 主要位于惠城镇北部的第四纪砂岩母质的土壤区。

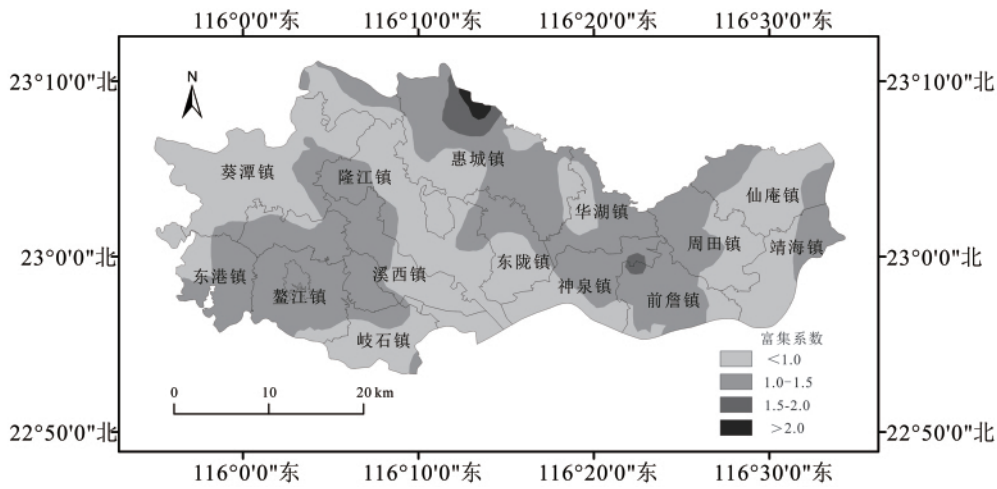


图 2 惠来县表层土壤全硒富集系数分布

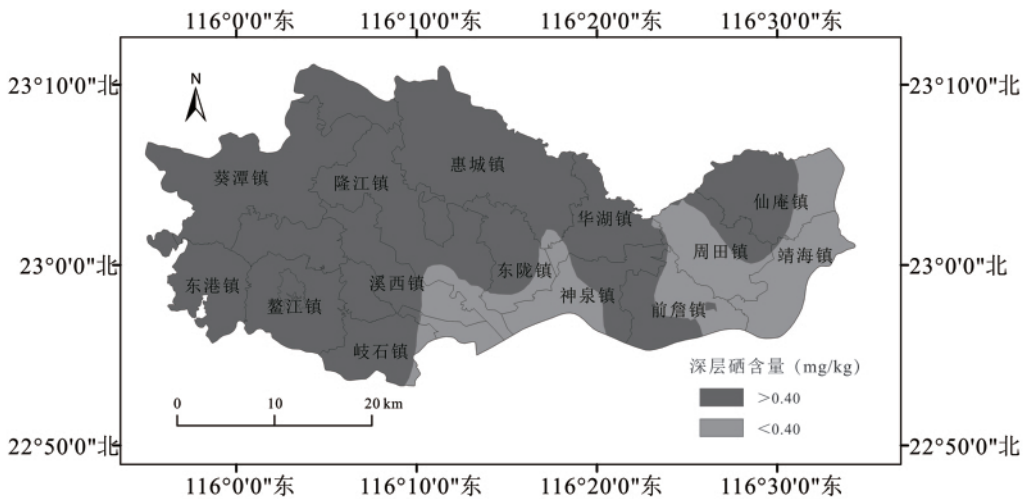


图 3 惠来县深层土壤硒分布

2.3 土壤硒含量的影响因素

研究表明, 土壤硒富集现象主要受到成土母质、土壤质地、有机质及人为干扰等因素影响^[23-24]。

2.3.1 成土母质

图 3 为惠来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，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（ $r=0.638$ ， $P<0.01$ ），表明成土母质对表层土壤硒含量影响较大。不同母质发育的土壤全硒含量由高到低的顺序为：三叠系砂岩（ 0.72 mg/kg ）>侏罗系页岩（ 0.65 mg/kg ）>侏罗系碎屑岩（ 0.60 mg/kg ）>侏罗系花岗岩（ 0.55 mg/kg ）>白垩系花岗岩（ 0.53 mg/kg ）>第四系沉积物（ 0.22 mg/kg ）。土壤硒主要来自成土母质，表层土壤硒主要来源于土壤母质风化作用^[20]，在深层土壤硒含量高的地区，其表层土壤的全硒含量也会很高。不同成土母质发育的表层土壤硒含量具有差异性（表3），与刘晓波等^[21]在四川省屏山县关于土壤硒含量影响因素的研究一致。除第四系沉积物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。研究区出露地层较为复杂，由于不同地层年代气候、地形、构造运动以及古地理条件等的差异，使得研究区表层土壤全硒含量在不同成土母质区出现较大差异。

表3 惠来县不同类型成土母质发育土壤全硒含量

母质	样品数	硒含量 (mg/kg)			标准偏差	变异系数 (%)
		最小值	最大值	平均值		
第四系沉积物	69	0.02	0.64	0.22	0.12	55
三叠系砂岩	36	0.30	1.11	0.72	0.17	24
白垩系花岗岩	105	0.10	1.42	0.53	0.25	47
侏罗系花岗岩	64	0.06	1.34	0.55	0.30	55
侏罗系碎屑岩	24	0.23	1.39	0.60	0.25	42
侏罗系页岩	23	0.36	1.12	0.65	0.19	30
研究区	321	0.02	1.42	0.50	0.28	56

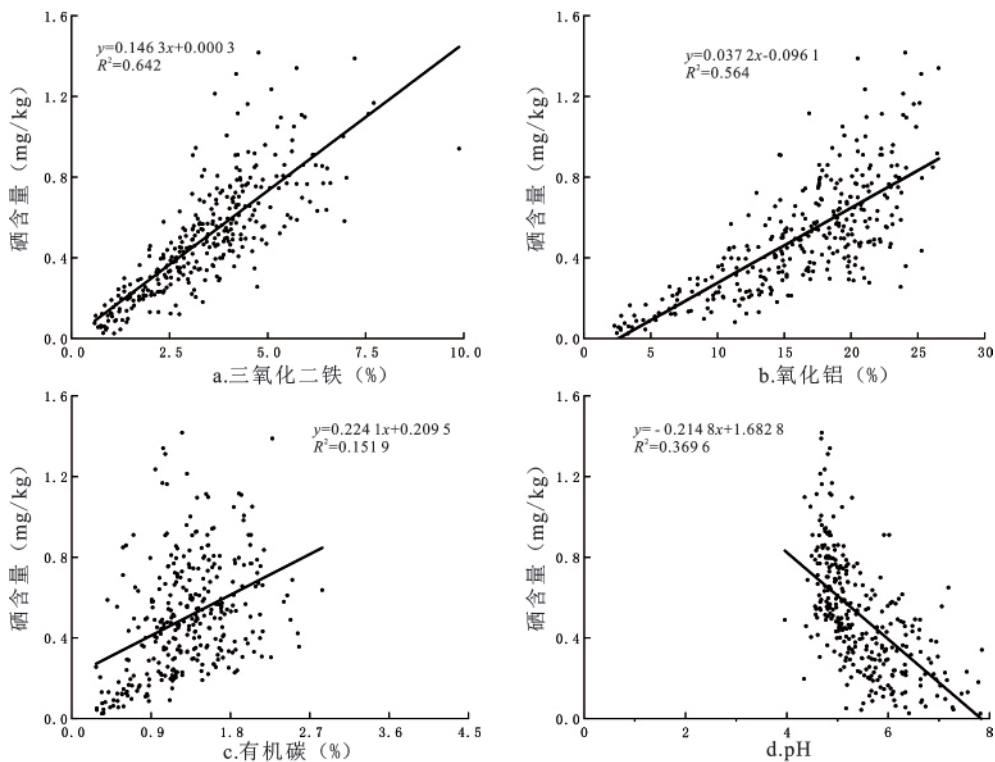


图4 表层土壤硒含量与三氧化二铁 (a)、氧化铝 (b)、SOC (c)、pH (d) 的关系

2.3.2 土壤理化性质的影响

土壤硒含量的影响因素已有诸多研究,在较大程度上取决土壤的理化性质,对表层土壤全硒含量与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、SOC、pH进行回归分析,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。如图4所示,土壤中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、SOC含量与硒全量有显著正相关性,与pH呈较强的负相关性($r = -0.61$, $P < 0.01$)。土壤pH是土壤的基本性质之一,变化可以影响硒在土壤中的价态、形态和吸附固定作用,一般来说,在碱性土壤中,难溶性的亚硒酸盐(SeO_3^{2-})易被氧化为易溶性的硒酸盐(SeO_4^{2-}),易发生迁移且易被植物吸收利用^[25]。此外,土壤pH越高,硒的甲基化越强,从而加快土壤中硒的溢出;而在酸性和中性($\text{pH} = 4 \sim 7$)土壤中, SeO_3^{2-} 是其主要的存在形式,并且土壤对 SeO_3^{2-} 的吸附量随着pH的降低而增加,迁移溶淋作用较弱^[28-30],因此,惠来县大面积酸性土壤是硒累积的重要因素之一;SOC也是影响土壤硒含量的重要因素,土壤有机组分中的硒多与土壤有机化合物结合,而有机碳具有较强的吸附作用^[31]。铁与硒的相关性($r = 0.80$, $P < 0.01$)略强于铝与硒的相关性($r = 0.75$, $P < 0.01$),这可能是由于 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 对硒的亲力和吸附能力存在差异引起的^[32-33],铝氧化物对硒的吸附受到土壤pH的影响较为强烈,其最大吸附量出现在pH为4~6之间^[34]另一方面,经过盐基离子淋失后土壤铁、铝相对富集,这些因素共同构成了有利于土壤硒富集的地球化学环境。

2.3.3 不同类型土壤的影响

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^[35],研究区土壤类型主要为赤红壤和水稻土,部分地区土壤为风沙土,从统计结果(表4)可见,硒含量在不同类型土壤中有着显著的区别,赤红壤硒含量平均值明显大于水稻土和风沙土,赤红壤较肥沃,物理性能好,有团粒结构,有机质含量较高,说明富硒土壤的形成有丰富的物源支持。硒元素在各类土壤类型中的变异系数范围为49%~76%,依据变异系数大小通常的分级标准^[21-22],属于中等程度变异,其中风沙土的变异系数最高,这是由于砂性母质的流动性导致;其次水稻土的变异程度较为偏高,是因为水稻土的形成受人为活动影响较大,土壤水耕熟化程度较高,并且不同地段土壤质地因水耕分选作用而有所差异,造成了研究区不同地域的水稻土全硒含量存在较大差异。

表4 惠来县不同类型土壤全硒分布

土壤类型	样品数(个)	硒含量(mg/kg)			标准偏差	变异系数(%)
		最小值	最大值	平均值		
水稻土	78	0.08	1.34	0.42	0.24	57
风沙土	25	0.02	0.46	0.13	0.10	76
赤红壤	218	0.04	1.42	0.58	0.26	45
研究区	321	0.02	1.42	0.50	0.28	56

2.3.4 土地利用方式的影响

人类主要通过土地利用影响土壤环境,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^[36-39]。惠来县土地利用方式主要为农耕地、建设用地、未利用地。按土地利用方式分别统计了其表层土壤全硒含量(表5),其中农耕地和未利用地全硒含量相当,平均值为0.61mg/kg,建设用地硒含量平均值最低,为0.35mg/kg,说明人类活动的强弱或利用方式的不同对硒含量的影响程度不同。

表5 不同土地利用方式硒含量水平

土地利用方式	样品数(个)	硒含量(mg/kg)			标准偏差	变异系数(%)
		最小值	最大值	平均值		
建筑用地	134	0.02	1.16	0.35	0.23	65
农耕地	144	0.13	1.42	0.61	0.25	41
未利用地	43	0.06	1.17	0.61	0.29	48
研究区	321	0.02	1.42	0.50	0.28	56

3 结论

惠来县土壤表层硒平均含量高于全国大多数地区土壤,研究区大部分土壤属于富硒范畴,由北到南呈现为富硒—足硒—硒反应不足的分布趋势。全硒含量变幅为 0.02 ~ 1.41 mg/kg,平均含量为 0.50 mg/kg,不同成土母质、土壤类型对土壤全硒有着不同程度的影响,成土母质以三叠系砂岩母质发育土壤硒含量最高(0.72 mg/kg),第四系沉积物母质发育的土壤硒含量最低(0.22 mg/kg);不同类型土壤中以赤红壤硒最高(0.58 mg/kg),风沙土硒最低(0.13 mg/kg)。有机碳、三氧化二铁、氧化铝对硒具有吸附作用,在酸性和中性环境下硒的迁移溶淋作用较弱。不同土地利用方式中表层土壤硒含量差异明显,表明人类活动对土壤的改造程度也是影响硒含量的主要因素之一。综合研究区土壤硒分布情况以及其他地球化学信息,认为研究区大部分地区为富硒土壤区,结合富硒地质调查研究成果与农产品环境研究,合理调整城乡发展空间布局及土地利用方式,保护优质的富硒土地资源,并进行合理开发与可持续性利用。在富硒土地资源丰富的重点区域,围绕富硒产业的发展,大力发展特色优势农业,重点培育蔬菜瓜果、特色水果等富硒特色农产品,更好地将富硒土地资源的优势转化为产业和经济优势。

参考文献

- [1] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究 [硕士论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [2] 张红雨, 翟德高. 某些矿床中硫化物的硒硫比值及其地质意义探讨. 矿床地质, 2010, 29 (S1): 545-546.
- [3] 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. 农业工程学报, 2019, 35 (10): 83-90.
- [4] 孙维侠, 赵永存, 黄标, 等. 长三角典型地区土壤环境中 Se 的空间变异特征及其与人类健康的关系. 长江流域资源与环境, 2008, 17 (1): 113-113.
- [5] 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. 地质科技情报, 2010, 29 (6): 84-88.
- [6] 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. 现代地质, 2018, 32 (1): 105-112.
- [7] 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. 现代地质, 2012, 26 (5): 859-864.
- [8] 谭见安. 环境生命元素与克山病. 北京: 中国医药科技出版社, 1996.
- [9] 赵西强, 张贵丽. 章丘地区土壤硒的含量分布及影响因素. 山东国土资源, 2015, 31 (3): 46-49.
- [10] 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. 土壤, 2018, 50 (1): 131-138.
- [11] 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. 中国农业科学, 2015, 48 (18): 3645-3653.
- [12] Qin H B, Zhu J M, Liang L. The availability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China. Environment International, 2013, 52 (1): 66-74.
- [13] 张建东, 王丽, 王浩东. 紫阳县土壤硒的分布特征研究. 土壤通报, 2016, 48 (6): 1404-1408.
- [14] 李家熙. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测. 土壤学报, 2000, 37 (4): 558-562.
- [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. 土壤学报, 2012, 49 (5): 1012-1020.
- [16] 刘铮. 中国土壤微量元素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996.
- [17] 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. Applied Geochemistry, 2000, 15 (1): 117-132.
- [18] Wang S, Cai L M, Wen H H, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China. Science of the Total Environment, 2019, 655, 92-101.
- [19] Li H, Wang J, Wang Q G, et al. Chemical fractionation of arsenic and heavy metals in fine particle matter and its implications for risk assessment: A case study in Nanjing, China. Atmospheric Environment, 2015, 103, 339-346.
- [20] 郦逸根, 董岩翔, 郑洁, 等. 浙江富硒土壤资源调查与评价. 第四纪研究, 2005, 25 (3): 323-330.
- [21] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究. 水利学报, 1985, (9): 10-21.
- [22] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析. 中国农业资源与区划, 2019, 40 (10): 208-215.
- [23] 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. 生态学杂志, 2005, 24 (10): 1197-1203.
- [24] 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. 环境科学, 2013, 34 (11): 4405-4410.
- [25] 张东威. 中国土壤中硒及其土壤环境质量标准研究. 水土保持研究, 1994, 1 (5): 112-112.
- [26] 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. 环境化学, 2017, 36 (10): 2246-2252.

- [27] Gunnar G N. Influence of pH and texture of the soil on I plant uptake of added selenium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1971, 19 (6): 1165 - 1167.
- [28] Kausch M F, Pallud C E. Modeling the impact of soil aggregate size on selenium immobilization. *Bio - geosciences*, 2013, 10 (3): 1323 - 1336.
- [29] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22 (1): 75 - 81.
- [30] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 陕南土壤中水溶态硒、氟的含量及其在生态环境的表征. *环境化学*, 2005, 24 (3): 279 - 283.
- [31] Wang S S, Liang D L, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn under field conditions in Shaanxi Province, China. *Science of the Total Environment*, 2012, 428 (12): 159 - 164.
- [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. *中国农业科学*, 2007, 40 (8): 1697 - 1702.
- [33] 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. *水土保持学报*, 2014, 28 (2): 123 - 126.
- [34] 张建东, 王丽, 王浩东. 紫阳县土壤硒的分布特征研究. *土壤通报*, 2016, 48 (6): 1404 - 1408.
- [35] GB/T 17296 - 2009 中国土壤分类与代码. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [36] 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. *中国农业科学*, 2007, 40 (8): 1697 - 1702.
- [37] 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. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1356 - 1364.
- [38] 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. *生态学杂志*, 2005, 24 (10): 1197 - 1203.
- [39] 朱海娣, 毛雪, 吴承龙, 等. 石台县土壤硒资源分布特征及其利用. *中国农业资源与区划*, 2017, 38 (9): 130 - 134.

DISTRIBUTION OF SELENIUM AND ITS INFLUENCING FACTORS IN SOILS OF HUILAI COUNTY, GUANGDONG PROVINCE*

Wang Hanzhi^{1,2}, Luo Jie^{1,2}, Cai Limei^{1,2,3*}, Mu Guizhen^{1,2}, Wang Qiushuang^{1,2},
Jiang Huihao^{1,2}, Wang Shuo^{1,2}, He Minghuang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

3. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract A systematic investigation of soil selenium in the region of Huilai county, Guangdong province was carried out. A total of 321 surface soil samples and 79 deep soil samples were collected to determine the total selenium content in the soil, and the distribution characteristics and main influencing factors of soil selenium were studied accordingly. The correlation between soil total selenium content and soil physical and chemical properties and components was calculated by Pearson correlation analysis method and the unary linear regression method. The GIS spatial analysis technology and other methods were used to systematically analyze the distribution, enrichment characteristics and influencing factors of soil selenium content. Results showed that the soil in Huilai county was generally rich in selenium. The content of total selenium in the surface soils varied from 0.02 to 1.41 mg/kg with a mean value of 0.50 mg/kg, which was evidently higher than the national average selenium content of 0.40 mg/kg, the area of selenium abundance and selenium sufficiency in the surface soils was 60.75% and 28.35%, respectively. In the deep soils, the area of selenium abundance and selenium sufficiency reached 72.15% and 20.25%, respectively. Regression analysis showed that the total selenium content of the soil had a very significant positive correlation with the content of iron, aluminum and total organic carbon (SOC), and a very significant negative correlation with the pH value. Soil parent material is the major factor that influences selenium concentration and distribution in the soils in Huilai county, different land-use modes, soil pH, SOC, iron and aluminum also play important roles. Overall, the soil selenium content in the study area is relatively high, and methods and policies for reasonable protection, development and sustainable use of selenium-rich and sufficient selenium land should be formulated.

Keywords soil; selenium; distribution characteristic; influencing factors; Huilai county