

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2019.01.15

# 广东省普宁市土壤硒的分布特征及影响因素研究

蒋慧豪<sup>1,2</sup>, 罗杰<sup>1</sup>, 蔡立梅<sup>1,2,3</sup>, 穆桂珍<sup>1,2</sup>, 唐翠华<sup>1</sup>,  
王秋爽<sup>1</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 孙蓉蓉<sup>1</sup>

(1. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 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; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 开展了广东省普宁市区域土壤硒调查研究, 采集了 413 个表层土壤样品(0~20 cm)和 103 个深层土壤样品(>150 cm), 测定了土壤全硒含量, 据此研究土壤硒分布特征及其影响因素。结果表明, 普宁市土壤全硒含量变化于 0.16~2.01 mg/kg, 平均值为 0.63 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。砂页岩风化形成的赤红壤全硒含量较高, 平均值达 0.86 mg/kg, 以侏罗系页岩母质发育的土壤全硒含量最高, 平均值达 0.89 mg/kg; 三角洲第四系沉积物发育形成的水稻土全硒含量最低, 平均值为 0.41 mg/kg。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。影响普宁市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。

**关键词:** 普宁市; 土壤全硒; 分布特征; 影响因素

中图分类号: P595; X142 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2019)01-0161-08

## Distribution of Selenium and Its Influencing Factors in Soils of Puning City, Guangdong Province

JIANG Huihao<sup>1,2</sup>, LUO Jie<sup>1</sup>, CAI Limei<sup>1,2,3</sup>, MU Guizhen<sup>1,2</sup>, TANG Cuihua<sup>1</sup>,  
WANG Qiushuang<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, SUN Rongrong<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;  
3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** A systematic investigation of soil selenium in the region of Puning City was carried out, and 413 samples of surface soil (0-20 cm) and 103 samples of deep soil (>150 cm) were collected systematically and analyzed for content, distribution and influencing factors of soil Se. Results showed that the content of total selenium in the surface soils ranged from 0.16 mg/kg to 2.01 mg/kg with a mean value of 0.63 mg/kg, which meant that the soils were in the category of Se sufficiency or Se abundance on the whole, with none in the category of Se deficiency or excessive Se. Among the different types of soils, total Se content was the highest in red

收稿日期: 2018-04-18; 改回日期: 2018-09-24; 责任编辑: 楼亚儿。

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); 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(OGL-201408); 长江大学大学生创新创业训练项目(2015007, 2016006)。

作者简介: 蒋慧豪, 男, 硕士研究生, 1994 年出生, 地质工程专业, 主要从事环境地球化学研究。

Email: jianghuihao324@163.com。

通信作者: 蔡立梅, 男, 副教授, 1980 年出生, 地球化学专业, 主要从事环境地球化学研究。Email: clmktz88@yangtzeu.edu.cn。

引用格式: 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 Huihao, LUO Jie, CAI Limei, et al. Distribution of Selenium and Its Influencing Factors in Soils of Puning City, Guangdong Province [J]. Geoscience, 2019, 33(1): 161-168.

soil formed by sand shale, averaging 0.86 mg/kg, and the lowest in paddy soils developed in delta sediments, averaging 0.41 mg/kg. Among the different types of parent materials, the highest content was recorded in Jurassic shale with an average Se content of 0.89 mg/kg, while the lowest in Quaternary sediment with an average of 0.41 mg/kg. Correlation and regression analysis showed that soil Se content was significantly and positively related to contents of iron and aluminum, soil total organic carbon (SOC), but negatively to soil pH. Soil parent material was the major factor influencing selenium concentration and distribution in the soil of Puning City, whereas land use, soil pH, SOC, iron and aluminum also played important roles.

**Key words:** Puning City; soil total selenium; distribution characteristic; influencing factor

## 0 引言

硒(Se)是一种稀散非金属元素,在地壳中分布极不均匀,世界上绝大多数土壤硒含量为0.01~2.00 mg/kg,平均值为0.40 mg/kg<sup>[1]</sup>。硒作为人体和动物必需的微量元素,在维持人体和动物健康方面具有十分重要的作用<sup>[2-3]</sup>。硒具有抗氧化的作用和调节蛋白质合成的能力<sup>[4-5]</sup>,对体内的汞、砷、铅、镉等重金属具有拮抗作用<sup>[6]</sup>。研究表明,缺硒是发生克山病和大骨节病的重要原因<sup>[7-9]</sup>,而硒过量又会引起中毒,表现为脱发、脱甲、皮肤损伤及神经系统异常等<sup>[10]</sup>。硒在表生地球化学循环过程中,易发生次生富集与贫化<sup>[11]</sup>。人类和动物摄入硒的最重要来源是植物硒,而植物硒又来源于土壤,因此,探究土壤硒的含量分布及其影响因素,对区域内的农产品安全以及维护人群健康具有十分重要的意义。广东省普宁市是我国特色农产品基地,素有“水果之乡”的美称,但到目前为止,有关普宁市土壤硒方面的研究还鲜有报道。本文以普宁市多目标地球化学调查结果为基础,对全市土壤硒含量、分布特征及其影响因素进行研究,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

普宁市(115°43'10"~116°21'02"E, 23°05'40"~23°31'48"N)是广东省揭阳市下辖的县级市,位于广东省东南部、潮汕平原西缘,面积1 620 km<sup>2</sup>。普宁市辖7个街道、17个镇、1个乡(鮀溪)、3个林场。普宁市受海洋暖湿气流的调节及较均匀的下垫面温湿属性作用,全年气候温和湿润,光照强,热量足,雨量充沛,属亚热带季风性湿润气候。全市诸山为莲花山脉向东南延伸的支脉。

地势自西南向东北倾斜,坡度和缓。普宁地质构造独特,处于东潮安—普宁断裂带,地质断裂主要位于普宁市的西南侧。区内出露有第四系、侏罗系、三叠系地层。第四系分布在练江平原及山间谷地,为桂洲群大湾镇组,侏罗系地层分布于南水凹—蕉园—五峰尖等地,三叠系地层分布于大坝镇—太径山等地。区内岩浆岩广泛分布,为白垩纪及侏罗纪入侵,分布于西北部及北部,南部少量分布,岩性为石英斑岩、花岗岩、闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩、辉绿玢岩等。土壤类型多为赤红壤、水稻土,局部为黄壤。普宁市是著名的水果之乡,优势农产品主要有蕉柑、青梅、青榄、荔枝等。先后被国家有关部门命名为“中国青梅之乡”、“中国蕉柑之乡”、“中国青榄之乡”和“中国青梅种植资源基地”,“普宁蕉柑”、“普宁青梅”先后获得国家地理标志产品保护<sup>[12]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

普宁市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/km<sup>2</sup>,采样深度为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 km<sup>2</sup>,低山丘陵土层覆盖较薄地区,适当放稀,但保证采样大格(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 km<sup>2</sup>大格、深层土壤样按16 km<sup>2</sup>大格,格子内样品等质量组合成1个分析样品。共采集表层土壤组合样413个,深层母质土壤组合样103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。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，按要求组合成每个样品质量为 500 g，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，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； $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  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》(DD2005—1)的要求。均采用密码插入国家一级土壤标准物质检验分析方法、监控分析质量。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。

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Excel 2007 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 10.0 等地统计软件进行半方差分析、Kriging 插值及制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 Se 含量分布特征

统计获得普宁市表层土壤硒含量平均值为 0.63 mg/kg，变幅为 0.16 ~ 2.01 mg/kg。与我国其他地区土壤全硒含量相比，研究区表层土壤硒平均值仅次于海南省<sup>[13]</sup>和香港<sup>[14]</sup>，远高于北京市<sup>[15]</sup>、黑龙江省<sup>[16]</sup>等，是我国土壤<sup>[17]</sup>平均硒含量的 2.17 倍，是世界土壤<sup>[1]</sup>平均硒含量的 1.58 倍(表 1)。以谭见安<sup>[18]</sup>提出的我国硒元素生态景观划分标准为依据，考虑到富铁铝的黏质红壤易富集硒，且硒生物有效性较低<sup>[19]</sup>，故适当提高了

富硒土壤的评价标准。且若仍以其 0.40 mg/kg 作为当地富硒土壤标准的下限，则相对偏低的富硒标准不利于识别全市更具开发价值的高硒土壤区，进而制约富硒土壤资源的开发利用<sup>[20]</sup>，故将标准中富硒一级由 0.40 mg/kg 定为 0.60 mg/kg，再根据标准将本区土壤硒含量分为缺乏、边缘、中等、高硒、过剩 5 级(表 2)。依据这种划分，普宁市表层土壤总体上属于富硒土壤。利用半方差分析和普通克里金插值对研究区 413 个表层土壤样的硒含量制作了空间分布图(图 1)。据表 1 和图 1 可以看出，区内土壤不存在硒过剩(硒毒)。表层土壤中，中等含硒面积 806.6 km<sup>2</sup>，占 49.79%，富硒土壤面积 813.4 km<sup>2</sup>，占到 50.21%；深层土壤中，中等硒和富硒范围分别达到了 61.92% 和 38.08%，深层土壤富硒意味着表层富硒不是受人为污染所致，有利于富硒土壤的长期持续开发利用。表层富硒土壤主要集中分布于测区南部花岗岩地区，包括大坪镇、梅林镇、船埔镇、云落镇等，而北部大部分为非富硒区域(图 1)。

表 1 研究区及其他地区土壤硒含量

Table 1 Soil selenium contents in the study area and other regions

地区	平均值/(mg/kg)	变幅/(mg/kg)	数据来源
普宁市(表层)	0.630	0.16 ~ 2.01	本文
普宁市(深层)	0.591	0.17 ~ 1.21	本文
海南省	0.765	0.055 ~ 2.231	[13]
香港	0.760	0.07 ~ 2.26	[14]
北京市	0.200	0.04 ~ 5.26	[15]
黑龙江省	0.147	0.008 ~ 0.660	[16]
南宁市	0.570	0.09 ~ 1.34	[21]
西藏	0.150	0.049 ~ 0.365	[22]
张家口市	0.136	0.043 ~ 0.263	[23]
中国	0.290	0.050 ~ 0.990	[17]
世界	0.400	—	[1]
地壳丰度	0.130	—	[24]

表 2 土壤硒丰缺划分界限值

Table 2 Threshold between abundance and deficiency of soil selenium

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	0	0
边缘	0.125 ~ 0.175	硒潜在不足	0	0
中等	0.175 ~ 0.60	足硒	49.79	61.92
高硒	0.60 ~ 3.0	富硒	50.21	38.08
过剩	>3.0	硒中毒	0	0

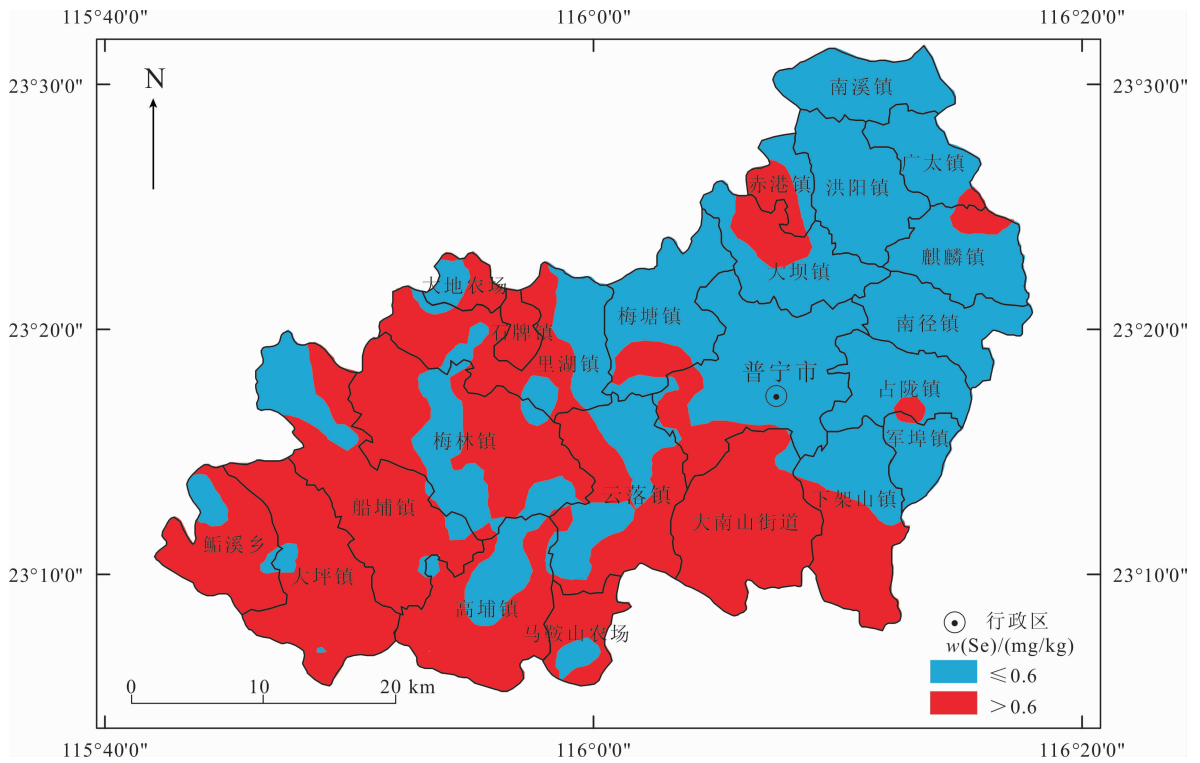


图1 普宁市表层土壤硒分布图

Fig. 1 Distribution of selenium in the surface soils of Puning City

## 2.2 不同类型土壤 Se 的含量变化

土壤中硒含量主要受成土母质、土壤质地、土壤有机质、人类活动等的影响<sup>[25]</sup>。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<sup>[26]</sup>，研究区土壤类型主要为赤红壤和水稻土。统计了不同类型土壤全硒含量(表3)，从统计结果可见，花岗岩风化形成的赤红壤硒平均值明显大于水稻土，说明富硒土壤的形成有丰富的物源支持。

表3 普宁市不同类型土壤全硒分布

Table 3 Total selenium contents in different types of soils in Puning City

土壤类型	样品数/个	硒含量/(mg/kg)			标准偏差	变异系数/%
		最大值	最小值	平均值		
赤红壤 <sup>a</sup>	258	1.34	0.19	0.79	0.29	37
赤红壤 <sup>b</sup>	62	2.01	0.40	0.86	0.28	33
水稻土	93	1.00	0.16	0.41	0.15	37
研究区	413	2.01	0.16	0.63	0.27	43

注：a表示由花岗岩风化形成的赤红壤；b表示由砂页岩风化形成的赤红壤。

变异系数可反映土壤硒含量的离散程度。硒元素在各类土壤类型中的变异系数范围为33%~37%，依据变异系数大小通常的分级标准<sup>[27]</sup>，均

属于中等变异。表3结果显示，全硒含量在水稻土和由花岗岩风化形成的赤红壤中的变异系数相当，但都大于砂页岩风化形成的赤红壤。由于水稻土的形成受人为活动影响大，土壤水耕熟化程度高，并且不同地段土壤质地因水耕分选作用而有所差异，这就造成了研究区不同地域的水稻土全硒含量存在较大差异。

## 2.3 土壤 Se 的富集特征

表层土壤相对于深层土壤硒的富集水平可用富集系数( $k$ )来表示<sup>[28]</sup>，即：

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

其中，每4 km<sup>2</sup>的表层土壤样和其所处的16 km<sup>2</sup>单元格深层母质样相对应。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、中富集和强富集的划分依据。普宁土壤硒的富集系数变化范围为0.18~5.14，平均值为1.37，标准偏差为0.72，变异系数达53%，根据前文的分级标准属于中等变异。富集系数平均值属于弱富集，表明表层土壤中硒的富集程度相对较低，中等变异反映了不同地段富集程度差异较大，大多处于弱富集状态和中富集状态。图2中 $k$  ≥ 2的区域为硒强富集区，该富集区主要位于以侏罗系碎屑

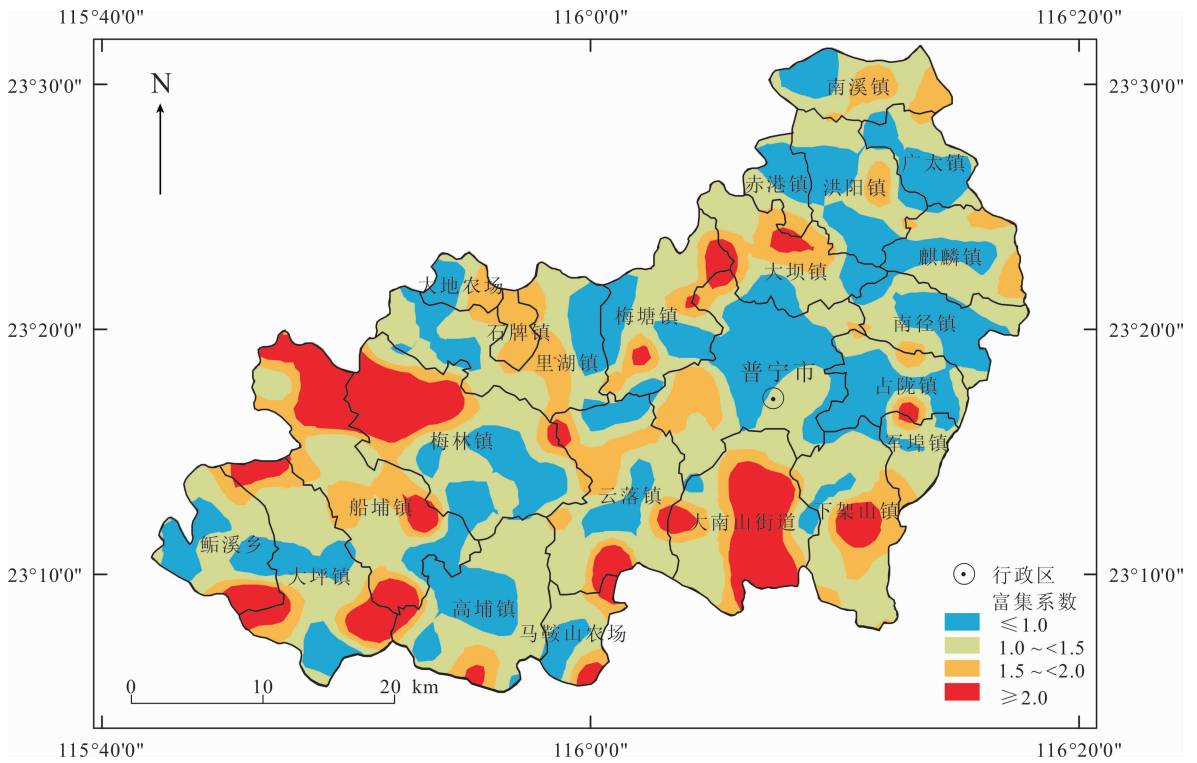


图 2 普宁市表层土壤硒富集系数

Fig. 2 Enrichment coefficient of selenium in the surface soils of Puning City

岩、侏罗系花岗岩和白垩系花岗岩为母质的土壤区。

## 2.4 土壤 Se 含量的影响因素

### 2.4.1 成土母质的影响

图 3 是研究区深层土壤全硒含量的空间分布图，对比图 1 和图 3 可以看出，表层与深层土壤全硒含量的空间分布较为吻合。Pearson 相关分析结果表明，表层与深层土壤全硒含量显著相关 ( $r=0.251, p<0.01$ )，意味着深层土壤(相当于成土母质层)对表土全硒含量有重要影响，深层土壤硒含量高的地区，其表层土壤的全硒含量也很高，这与郭莉等<sup>[15]</sup>在北京的研究一致。不同成土母质发育的表层土壤全硒含量存在较大差异(表 4)，除第四系沉积物母质发育的土壤全硒含量低于 0.60 mg/kg 外，其余成土母质发育的土壤全硒含量都高于富硒土壤临界值 0.60 mg/kg。不同母质发育的土壤全硒含量(算术平均值)由高到低的顺序为：侏罗系页岩母质(0.89 mg/kg) > 侏罗系碎屑岩母质(0.83 mg/kg) > 白垩系花岗岩母质(0.73 mg/kg) > 侏罗系花岗岩母质(0.65 mg/kg) > 第四系沉积物母质(0.41 mg/kg)。本区内出露地层复杂，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 4 普宁市不同类型成土母质发育土壤的全硒含量

Table 4 Total selenium contents in the surface soils of different parent materials in Puning City

母质	样品数 / 个	硒含量/(mg/kg)			标准偏差	变异系数/%
		最大值	最小值	平均值		
侏罗系页岩	6	1.10	0.73	0.89	0.18	20
侏罗系碎屑岩	52	2.01	0.33	0.83	0.30	36
侏罗系花岗岩	232	1.34	0.16	0.65	0.23	35
白垩系花岗岩	33	1.26	0.19	0.73	0.27	37
第四系沉积物	90	1.00	0.17	0.41	0.14	34
研究区	413	2.01	0.16	0.63	0.27	43

### 2.4.2 土壤理化性质的影响

利用回归分析对普宁市表层土壤全硒含量与 pH、土壤有机碳(SOC)、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  含量进行分析，得到图 4。如图 4(a)所示，普宁市表层土壤中全硒含量与 pH 呈较强的显著负相关性 ( $r = -0.621, p < 0.01$ )。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。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( $pH = 4 \sim 7$ )土壤中，亚硒酸盐( $SeO_3^{2-}$ )是其主要的存在形式，并且土壤对阴离子的吸附量随着 pH 的降低而

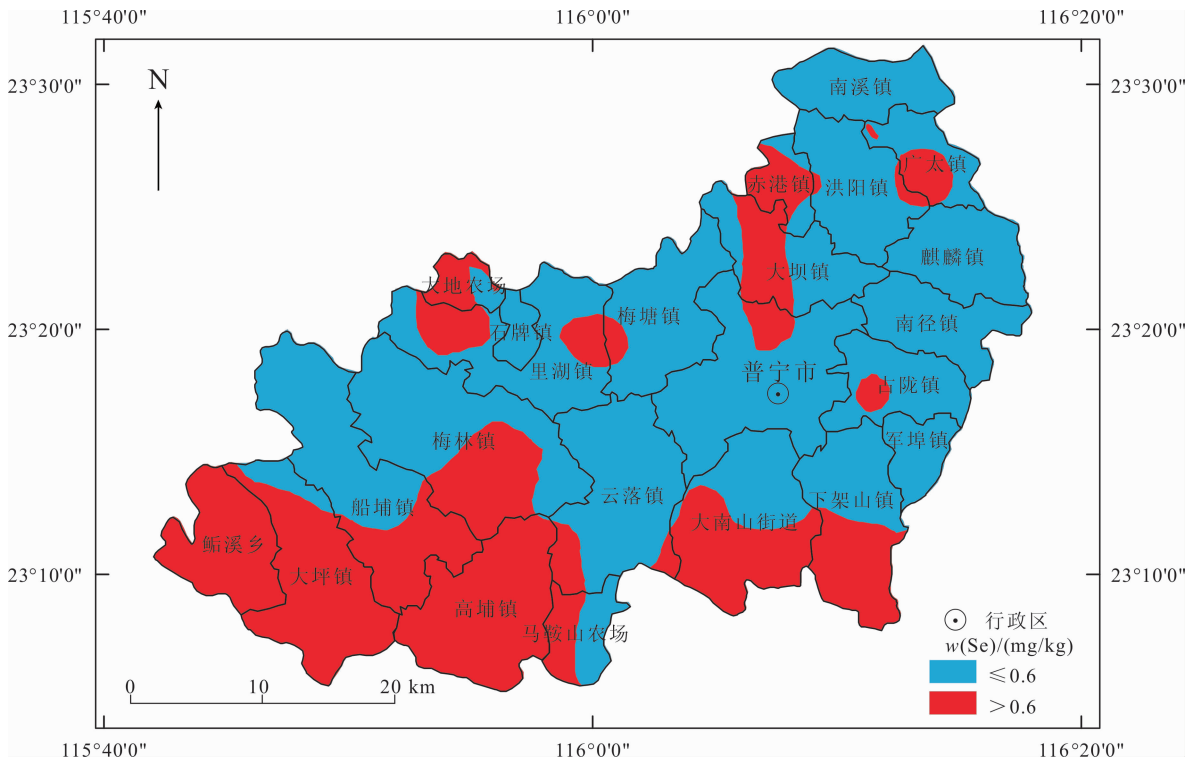
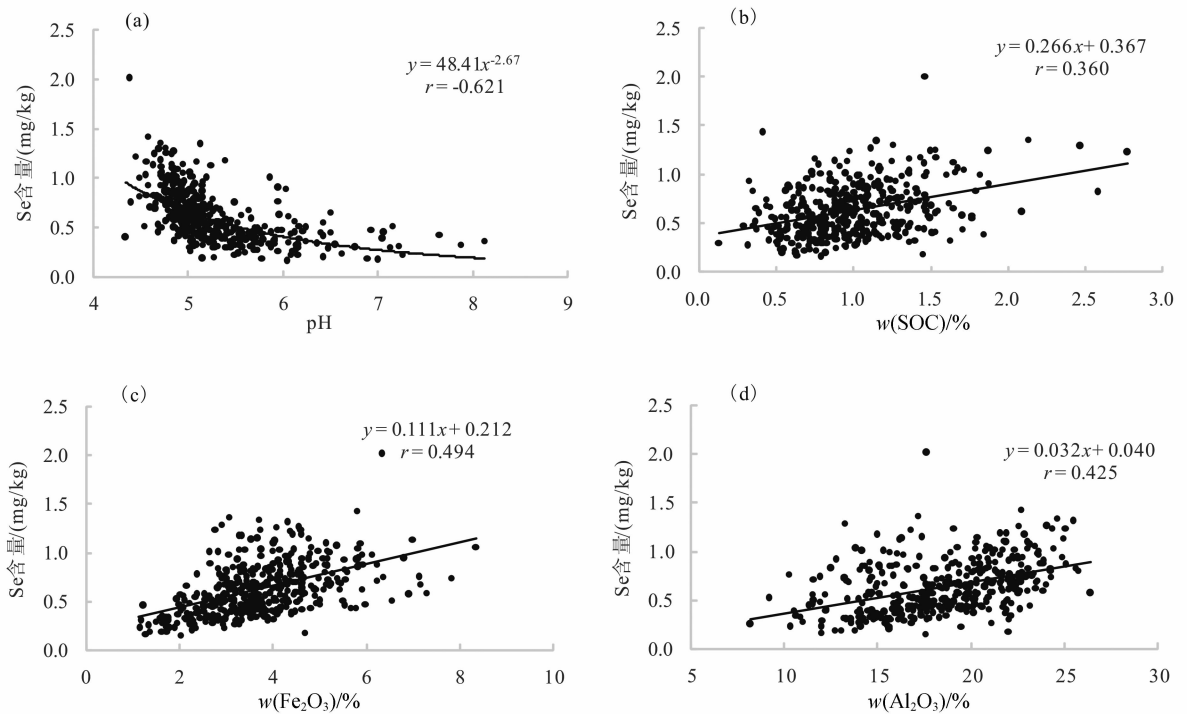


图3 普宁市深层土壤硒分布图

Fig. 3 Distribution of selenium in deep soils of Puning City

图4 普宁市表层土壤硒含量与pH(a)、SOC(b)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (c)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (d)的关系Fig. 4 Relationships of selenium content with pH(a), SOC (b),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (c),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (d) in surface soils of Puning City

增加, 因此迁移溶淋作用较弱<sup>[29-31]</sup>。

图4(b)表明, 普宁市土壤表层中硒含量与土壤有机碳呈显著正相关( $r=0.360$ ,  $p<0.01$ )。以

往研究也发现有有机碳与土壤全硒含量存在一定的相关性<sup>[14,21,32]</sup>, 主要是由于土壤有机质对硒具有强烈的吸附与固定作用, 同时土壤中部分硒以有

机物结合态存在。但相关程度有所差异,体现了不同区域的地理环境及土壤有机质导致硒含量存在差异性。

土壤中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量与 Se 全量有显著正相关性(图 4(c)、(d)), 但 Fe 与 Se 的相关性( $r=0.494$ ,  $p < 0.01$ )略强于 Al 与 Se 的相关性( $r=0.425$ ,  $p < 0.01$ ), 这可能是由于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  对硒的亲力和吸附能力存在差异引起的<sup>[33-34]</sup>。同时, 铁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<sup>[17]</sup>。另一方面, 经过盐基离子淋失后土壤 Fe、Al 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。

#### 2.4.3 土地利用方式的影响

土地利用方式对土壤硒含量的影响体现在多个方面。土地利用是人类影响土壤环境的主要途径, 土地利用方式导致土壤性质变化和土地生产力改变, 进而影响土壤质量和土壤环境变迁<sup>[35]</sup>。本文根据普宁土地利用方式的特点, 将普宁市土地利用方式划分为 3 类: 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), 其中未利用地的全硒含量最

表 5 不同土地利用方式硒含量水平

Table 5 Selenium content in soil relative to type of land use

土地利用方式	样品数/个	硒含量/(mg/kg)			标准偏差	变异系数/%
		最大值	最小值	平均值		
农耕地	118	1.43	0.2	0.61	0.25	41
建设用地	89	1.34	0.17	0.52	0.23	44
未利用地	206	2.01	0.16	0.69	0.27	39
研究区	413	2.01	0.16	0.63	0.27	43

高, 平均值为 0.69 mg/kg, 耕地硒含量平均值次之, 为 0.61 mg/kg, 建设用地硒含量平均值最低, 为 0.52 mg/kg。这表明不同土地利用方式使土地硒含量产生了分异。影响建设用地土壤硒含量的因素比较复杂, 还需要进一步的研究阐明。未利用地受人影响最弱, 其全硒含量主要受成土母质决定。耕地通过长期的耕种, 首先使土壤质地发生变化, 其次耕层土壤硒以腐殖质化为主<sup>[13]</sup>, 有利于植物吸收, 长期耕作导致土壤硒被植物收割消耗, 而施肥不足以补足消耗的硒<sup>[25,36]</sup>, 从而致使耕地硒含量的减少。

## 3 结论

普宁市土壤全硒含量变化幅度为 0.16~2.01

mg/kg, 平均值为 0.63 mg/kg, 明显高于全国土壤平均水平。普宁市土壤以中等硒和高硒为主要特征, 不存在硒缺乏和过剩现象, 总体上属于富硒土壤。表层富硒土壤主要集中分布在南部花岗岩地区, 包括大坪镇、梅林镇、船埔镇、云落镇等。不同类型土壤中以砂页岩风化形成的赤红壤硒最高(0.86 mg/kg), 三角洲沉积物发育形成的水稻土硒最低(0.41 mg/kg); 成土母质以侏罗系页岩母质发育土壤的硒含量最高(0.89 mg/kg), 第四系沉积物母质发育土壤的硒含量则最低(0.41 mg/kg)。影响普宁市土壤硒含量的主要因素是成土母质, 土壤 pH、有机碳含量、铁铝含量, 土地利用方式对土壤硒分布与富集也有一定影响。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, 建议对富硒土地进行有效保护和科学开发, 以充分发掘富硒土地的潜在价值。

## 参考文献:

- [1] FORDYCE F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment [M] //ALLOWAY B. Essentials of Medical Geology. Dordrecht: Springer, 2013: 375-416.
- [2] RAYMAN M P. The importance of selenium to human health [J]. Lancet, 2000, 356(5): 233-241.
- [3] 张联合, 郁飞燕, 苗艳芳. 硒在人和动物健康上的研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(21): 6688-6690.
- [4] TAPIERO H, TOWNSEND D M, TEW K D. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds [J]. Biomedicine and Pharmacotherapy, 2003, 57(3): 134-144.
- [5] PAPP L V, LU J, HOLMGREN A, et al. From selenium to selenoproteins: Synthesis, identity, and their role in human health [J]. Antioxidants and Redox Signaling, 2007, 9(7): 775-806.
- [6] 马秀杰, 张跃安. 硒对人体健康影响研究进展 [J]. 中国公共卫生, 2009, 25(8): 1021-1023.
- [7] 李日邦, 王立志. 提高食物链硒通量防治大骨节病和克山病示范研究 [J]. 地理学报, 1999, 54(2): 158-164.
- [8] RAYMAN M P. The argument for increasing selenium intake [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2002, 61(2): 203-215.
- [9] CHEN X, YANG G, CHEN J, et al. Studies on the relations of selenium and Keshan disease [J]. Biological Trace Element Research, 1980, 2(2): 91-107.
- [10] YANG G Q, WANG S Z, ZHOU R H, et al. Endemic selenium intoxication of humans in China [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1983, 37(5): 872-881.
- [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.
- [12] 普宁市人民政府. 普宁市概况 [EB/OL]. (2006-08-08)

[2018-04-10]. <http://www.puning.gov.cn/pngov/web/contentsShow.action?type=contents&contentsID=4040>.

- [13] 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.
- [14] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素 [J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 404-410.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 39.
- [19] JACQUELINE L S, STEVE P M, ZHAO F J. Selenium speciation in soil extracts using LC-ICP-MS [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2012, 92(2): 222-236.
- [20] 刘子宁, 窦磊, 游远航. 珠江三角洲台山地区硒的地球化学特征 [J]. 现代地质, 2014, 28(5): 928-934.
- [21] 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.
- [22] 张晓平, 张玉霞. 西藏土壤中硒的含量及分布 [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 558-562.
- [23] 李家熙. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2000: 54-57.
- [24] RUDNICK R, GAO S. Composition of the continental crust [M] // HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2013: 1-64.
- [25] 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.
- [26] 田有国, 姚艳敏, 李小林, 等. GB/T 17296—2009 中国土壤分类与代码 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 2-5.
- [27] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究 [J]. 水利学报, 1985(9): 12-23.
- [28] 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.
- [29] KAUSCH M F, PALLUD C E. Modeling the impact of soil aggregate size on selenium immobilization [J]. Biogeosciences, 2013, 10(3): 1323-1336.
- [30] 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.
- [31] 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 [J]. 环境化学, 2005, 24(3): 279-283.
- [32] 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): 1-10.
- [33] 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.
- [34] GOLDBERG S, LESCH S M, SUAREZ D L. Predicting selenite adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(23): 5750-5762.
- [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] 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.