

doi: 10.12029/gc20180607

吴俊. 2018. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 45(6): 1167-1176.

Wu Jun. 2018. The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing factors[J]. Geology in China, 45(6): 1167-1176(in Chinese with English abstract).

福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素

吴俊

(福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘要:通过福建省寿宁县多目标区域地球化学调查,查明了土壤硒分布和富集特征,研究了土壤硒与 pH 值及其他元素的相关关系。结果表明,表层土壤硒含量为 0.13~0.92 mg/kg,平均值为 0.35 mg/kg,深层土壤硒含量为 0.14~0.54 mg/kg,平均值为 0.29 mg/kg,燕山晚期正常花岗岩($\xi\gamma K_1$)发育的土壤中硒含量最高,平均值为 0.39 mg/kg,其次为南园组四段(J_3n^4)和小溪组上段(K_1x^2)发育的土壤,不同土壤类型硒平均含量呈现出黄壤 > 红壤 > 水稻土的特点。表层土壤总体上属于富硒、足硒土壤,富硒土壤面积为 405.04 km²,占 28.24%,表层土壤硒含量相对于深层土壤表现出明显的富集特征,强烈富集区域与富硒土壤区域基本吻合,具有开发富硒农产品的潜力。相关分析表明,土壤硒含量与 TOC、Al₂O₃、TFe₂O₃、Mn 等呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关,说明土壤理化性质、铁锰氧化物等对硒的表生地球化学行为有重要影响。

关键词:寿宁县;土壤硒含量;分布特征;富集特征

中图分类号:P632 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)06-1167-10

The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing factors

WU Jun

(Fujian Institute of Geological Survey and Research, Fuzhou 350013, Fujian, China)

Abstract: Based on multi-purpose regional geochemical survey in Shouning County of Fujian Province, the authors found the characteristics of selenium distribution and enrichment and the correlation between selenium and pH as well as other elements. The results show that the selenium content in surface soil is from 0.13 mg/kg to 0.92 mg/kg, with the average value of 0.35 mg/kg. The total selenium content in deep soil is from 0.14 mg/kg to 0.54 mg/kg, with the average value of 0.29 mg/kg. The selenium content in the soil developed in late Yanshanian normal granite is the highest, with an average value of 0.39 mg/kg, followed by the soil developed in 4th member of the Nanyuan Formation and the upper part of the Xiaoxi Formation. The selenium content of different soil types shows that the content of yellow soil is higher than that of red soil, and that of red soil is higher than that of paddy soil. The surface soil generally belongs to selenium-rich and selenium-sufficient soil, the area of selenium-rich soil contains

收稿日期:2016-09-18;改回日期:2018-05-17

基金项目:中国地质调查项目“福建三明地区多目标区域地球化学调查”(1212011220057)资助。

作者简介:吴俊,男,1985年生,硕士,工程师,主要从事生态地球化学调查和研究工作;E-mail:hrs-123@qq.com。

405.04km², accounting for 28.24%. The selenium content in the surface soil demonstrates an apparent feature of enrichment relative to the content in the deep soil, with the strong enrichment area basically consistent with the area of selenium-rich soil with the potential of developing selenium-rich agricultural products. The correlation analysis indicates that the selenium content in soil has a significant positive correlation with organic carbon, aluminum oxide, total iron oxide and manganese, and has a negative correlation significantly with pH, indicating that soil physical and chemical properties, iron and manganese oxides in the soil play important roles in the geochemical behaviors of selenium.

Key words: Shouning County; soil selenium content; distribution characteristics; enrichment characteristics

About the author: WU jun, male, born in 1985, master, engineer, mainly engages in ecological geochemical survey and research; E-mail: hrs-123@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011220057).

1 引 言

硒是人和动物所必须的一种重要微量元素,具有保护心肌健康、抗氧化、抗衰老、增强人体免疫力、重金属解毒以及防癌、抗癌、治癌等功能的作用(Rayman, 2000; Daniel, 2008)。20世纪70年代,我国科学家发现克山病与人体缺硒有关(谭见安, 1996; 王延亮等, 2010; 安永会等, 2010)。近年来,随着硒的毒性生理学和营养学功能研究的逐渐深入,硒的医疗和保健作用也得以认识,并经得到广泛的实践验证。土壤硒水平低下或者其有效性低均可导致植物硒含量偏低,而植物硒被认为是人体摄入硒的主要来源。硒在世界土壤分布中具有明显的地带性差异,绝大多数的土壤硒含量为0.01~2.0 mg/kg,平均值约为0.40 mg/kg(Zhu, et al., 2009),我国从东北的黑龙江省到云南省的西南部存在一条明显的缺硒地带,约占全国总面积72%的地区处于不同程度缺硒状态,其中约有30%缺硒较为严重(侯少范, 2000),因此,土壤硒含量、迁移转化、存在形态及其影响因素一直都是国内外学者研究的热点,Gunnar (1971)研究认为土壤结构和pH值对植物提高硒含量具有重要影响;宋明义等(2011)、郭莉(2012)、李杰等(2012)、杨志强等(2014)、文帮勇等(2014)研究发现影响土壤硒含量的主要因素是成土母质,土壤pH、有机碳及铁和铝的含量对土壤全硒含量的富集与分布也有一定影响;王世纪等(2004)、廖启林等(2007)、黄淇等(2013)、陶春军等(2014)系统研究了土壤及其植物中硒含量,为富硒产品开发的定位提供了一定的理论依据。还有很多学者对硒在土壤中的迁移转化因素做过研究,魏然等(2012)对江西省鄱阳湖流域根系土中硒的进行形态分析发

现,根系土中硒的强有机态、腐植酸结合态和残渣态均与根系土硒含量呈极显著的线性正相关;孙朝等(2010)以四川省成都经济区为例,通过研究土壤中全量硒、有效硒的含量,摸清该地区硒元素的分布规律,通过土壤溶液实验得到了土壤中硒的迁移转化规律,并探讨土壤中可能影响硒元素迁移转化规律的因素。2012年,在寿宁县全境范围内开展了1:25万多目标区域地球化学调查工作,系统采集了表层和深层土壤样品,本文以该数据对寿宁县土壤硒的含量进行统计分析,探讨寿宁县土壤硒分布特征及影响因素,为寿宁县提升土地利用价值和开发富硒产品提供依据。

2 研究区概况

寿宁县位于福建省宁德市北部,面积为1424.4 km²,介于东经119°14'~119°44'、北纬27°11'~27°41',北部与浙江省接壤,南部连福安市、周宁县,西傍南平市的政和县。该县素有“八山一水一分田”之称,有林地面积880 km²,森林覆盖率达74.8%,水田215.605 km²,占全区面积的15.14%,茶园132.614 km²,占全区面积的9.3%。其地貌类型以中山、中低山和丘陵为主,整体地势从西北向东南倾斜。该县主要粮食作物有水稻、甘薯及马铃薯等,主要经济作物有茶叶、太子参等,主要特色农产品为茶叶如福鼎大白毫、福鼎大毫茶、福云品系等品种。全区土壤类型以红壤为主,其次为黄壤和水稻土。地质构造上属于寿宁—屏南—永定—抚市华夏系隆起带,中生代以来,岩浆活动频繁、强烈,尤以火山活动更为突出,形成了分布广泛、厚度巨大的一套陆相沉积—火山岩系,出露的主要地层和岩体有侏罗系南园组第四段(流纹质火山碎屑岩、凝灰熔岩、碎

斑熔岩、流纹岩,夹凝灰质粉砂岩)、南园组第三段(英安质火山碎屑岩、英安岩、中酸性碎斑熔岩、凝灰熔岩,夹流纹质火山碎屑岩)、晚侏罗世酸性粒状碎斑熔岩,以及白垩系寨下组下段(紫灰、灰绿色流纹岩、流纹质凝灰熔岩、石泡流纹岩、石英粗面岩,底部偶见玄武岩)、黄坑组上段(紫灰、紫红色英安岩、英安质熔结凝灰岩,偶夹流纹岩,底部见安山玄武岩)、小溪组上段(灰、紫灰色流纹质晶屑凝灰岩、熔结凝灰岩、流纹岩,夹凝灰质砂岩)、燕山晚期的正长花岗岩。区内晚侏罗世南园组中性、中酸性、酸性火山碎屑岩、火山碎屑熔岩夹火山碎屑岩分布广泛,约占全县三分之二面积,其次为白垩世陆相杂色、红色沉积-火山岩系。矿产资源储量丰富,已发现银、金、铜、铅、锌、钨、钼、铁、锰等金属矿产9种,主要分布大安、南阳一带。分布于大安东北方向的银矿在明清时期已有开采记录,其他矿种均为矿(化)点。

3 样品采集与分析

3.1 样品采集

按照中国地质调查局《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-01)的要求,福建省地质调查研究院于2012年对寿宁县进行表层和深层土壤样品采集。表层土壤采样密度为1个点/km²,采样深度为0~20 cm,1个/4 km²组合分析;深层土壤采样密度为1个点/4 km²,采样深度为150~200 cm,1个/16 km²组合分析。共采集表层土壤组合样品413件,深层土壤组合样品114件。

3.2 分析测试

土壤样品分析由福建省地质测试研究中心承担,测试过程严格执行中国地质调查局颁布的《多

目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DD2005-01),采用原子荧光分光光度法(AFS)测定Se、Hg、As,X-荧光光谱法(XRF)测定S、Mn、TFe₂O₃、Al₂O₃、Zn、Pb、Cr、Ni,封闭熔矿电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定Cd,化学容量法(VOL)测定TOC,离子选择性电极法(ISE)测定pH值。测试过程严格执行中国地质调查局地质调查技术标准《DD2005-01多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》中“土壤地球化学分析测试质量要求及质量控制”和《DD2005-03生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》的有关规定,测试结果表明,土壤样品各分析项目的方法检出限均达到或优于规范要求,报出率都在99.43%以上,总平均报出率为99.75%,内部准确度监控各参数、内部精密监控各参数、内检分析质量参数和异常抽查分析质量参数完全满足规范要求。各元素具体分析方法及检出限见表1。

3.3 数据处理

剔除异常值后统计地球化学特征参数,采用MapGIS软件中Kring泛克里格法网格化模型绘制表层土壤全硒含量和深层土壤全硒含量分布图。数据统计分析采用SPSS19.0和Excel 2007软件处理。

4 结果与分析

4.1 土壤硒含量特征

分别对寿宁县表层土壤413件样品和深层土壤114件样品的全量硒含量按平均值加(减)3倍标准离差剔除异常值,统计了404件表层土壤样品和114件深层土壤样品的地球化学参数(表2)。表层土壤Se含量最小值为0.13 mg/kg,最大值为0.92 mg/kg,

表1 样品分析及检出限

Table 1 Analytical methods and detection limits of the samples

序号	元素	选择方法	方法检出限	序号	元素	选择方法	方法检出限
1	N	凯氏瓶 vol	20	9	Zn	XRF	4
2	S	XRF	15	10	Hg	AFS	0.0005
3	Mn	XRF	10	11	Cd	ICP-MS	0.01
4	TFe ₂ O ₃	XRF	0.05	12	Pb	XRF	2
5	Al ₂ O ₃	XRF	0.05	13	As	AFS	0.5
6	Se	AFS	0.01	14	Cr	XRF	5
7	TOC	VOL	0.1	15	Ni	XRF	2
8	pH	ISE	0.1				

注:氧化物及TOC表示单位为10²,pH为无量纲单位,其余元素的表示单位均为10⁶。VOL为化学容量法,XRF为X-荧光光谱法,AFS为原子荧光分光光度法,ISE为离子选择性电极法,ICP-MS为电感耦合等离子体质谱法。

表2 寿宁县表层土壤和深层土壤硒元素(mg/kg)地球化学参数
Table 2 Geochemical parameter of selenium(mg/kg) in surface soil and deep soil, Shouning

类别	样本数	平均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数%
表层土壤	404	0.35	0.92	0.13	0.32	0.13	38.02
深层土壤	114	0.29	0.54	0.14	0.27	0.09	31.29

算术平均值为0.35 mg/kg,中值0.32 mg/kg,标准差为0.13 mg/kg,空间分布相对不均匀,变异系数为38.02%,各级含量水平的分布频率基本符合正态分布(图1)。深层土壤Se含量最小值为0.14 mg/kg,最大值为0.54 mg/kg,算术平均值为0.29 mg/kg,中值0.27 mg/kg,标准差为0.09 mg/kg,空间分布也相对不均匀,变异系数为31.29%,各级含量水平的分布频率基本符合正态分布(图2)。表层土壤Se含量平均值略低于世界土壤表层平均值0.40 mg/kg(Fiona M. Fordyce,2013),高于全国土壤A层平均含量0.29 mg/kg(刘铮,1996)。

统计了研究区主要地质背景下发育土壤的硒含量水平,统计情况见表3,按平均值含量统计,燕山晚期正长花岗岩和侏罗系南园组四段发育的土壤中硒含量最高,平均值分别为0.39 mg/kg和0.38 mg/kg;其次为白垩系小溪组上段和侏罗系南园组三段发育的土壤,平均值分别为0.37 mg/kg和0.35

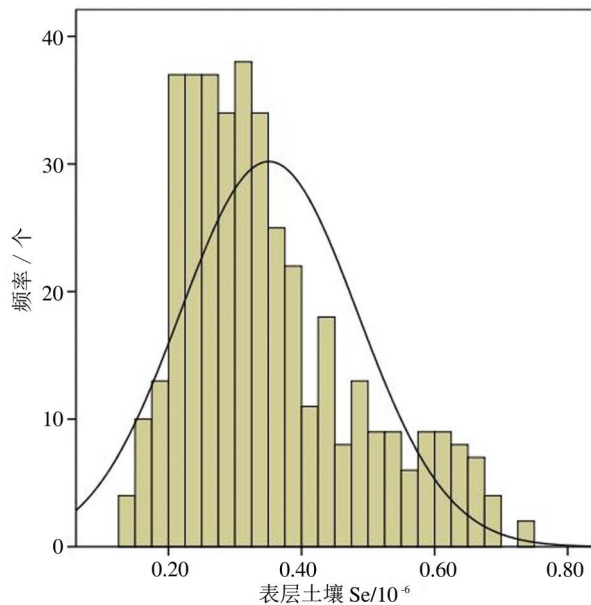


图1 寿宁县表层土壤硒含量频数分布图
Fig.1 Frequency distribution of selenium content in surface soil, Shouning

mg/kg;晚侏罗世酸性粒状碎斑熔岩发育的土壤中硒含量最低,平均值为0.27 mg/kg。统计了研究区不同土壤类型硒含量水平,统计情况见表4,结果表明,研究区不同土壤类型硒含量呈现出黄壤 > 红壤 > 水稻土的特点,黄壤的硒含量最高,平均值为0.48 mg/kg,红壤次之,平均值为0.33 mg/kg,水稻土含量最低,平均值为0.29 mg/kg。

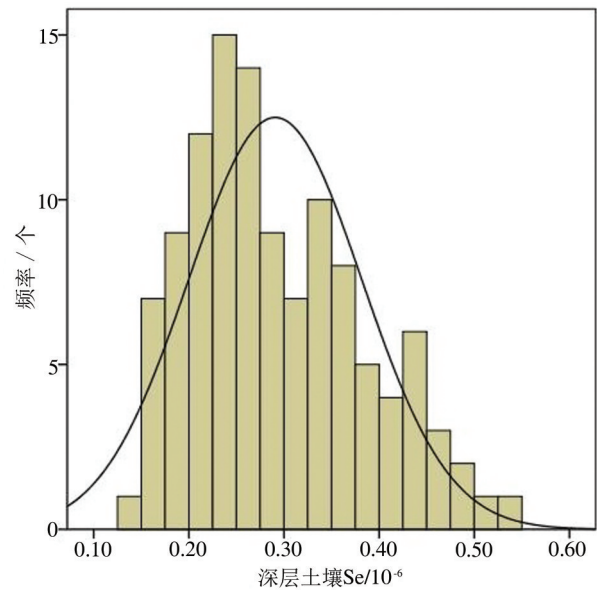


图2 寿宁县深层土壤硒含量频数分布图
Fig.2 Frequency distribution of selenium content in deep soil, Shouning

表3 不同地质背景下表层土壤硒含量(mg/kg)特征
Table 3 Selenium content (mg/kg) in different geological backgrounds

地质背景	样本数	平均值	最大值	最小值
寨下组下段(K ₁ z ¹)	38	0.31	0.69	0.17
黄坑组上段(K ₁ h ²)	23	0.33	0.91	0.14
小溪组上段(K ₁ x ²)	24	0.37	0.58	0.14
南园组四段(J ₃ n ⁴)	116	0.38	0.92	0.13
南园组三段(J ₃ n ³)	64	0.35	0.67	0.15
正常花岗岩(ξγK ₁)	42	0.39	0.83	0.18
碎斑熔岩(mlv)	22	0.27	0.67	0.16

表4 不同土壤类型中表层土壤硒含量(mg/kg)特征
Table 4 Selenium content (mg/kg) in different types of soils

土壤类型	样本数	平均值	最大值	最小值
红壤	237	0.33	0.83	0.13
黄壤	54	0.48	0.91	0.21
水稻土	51	0.29	0.56	0.14

4.2 土壤硒的空间分布特征

谭见安(1990)根据我国克山病带和低硒环境的研究结果,划分出我国硒元素生态景观的界限值:硒不足(<0.125 mg/kg)、潜在硒不足(0.125~0.175 mg/kg)、足硒(0.175~0.40 mg/kg)、富硒(0.4~3.0 mg/kg)、硒中毒(≥ 3.0 mg/kg)。依据这种划分,分别编制表层和深层土壤硒元素含量分布图(图3,图4)。可以看

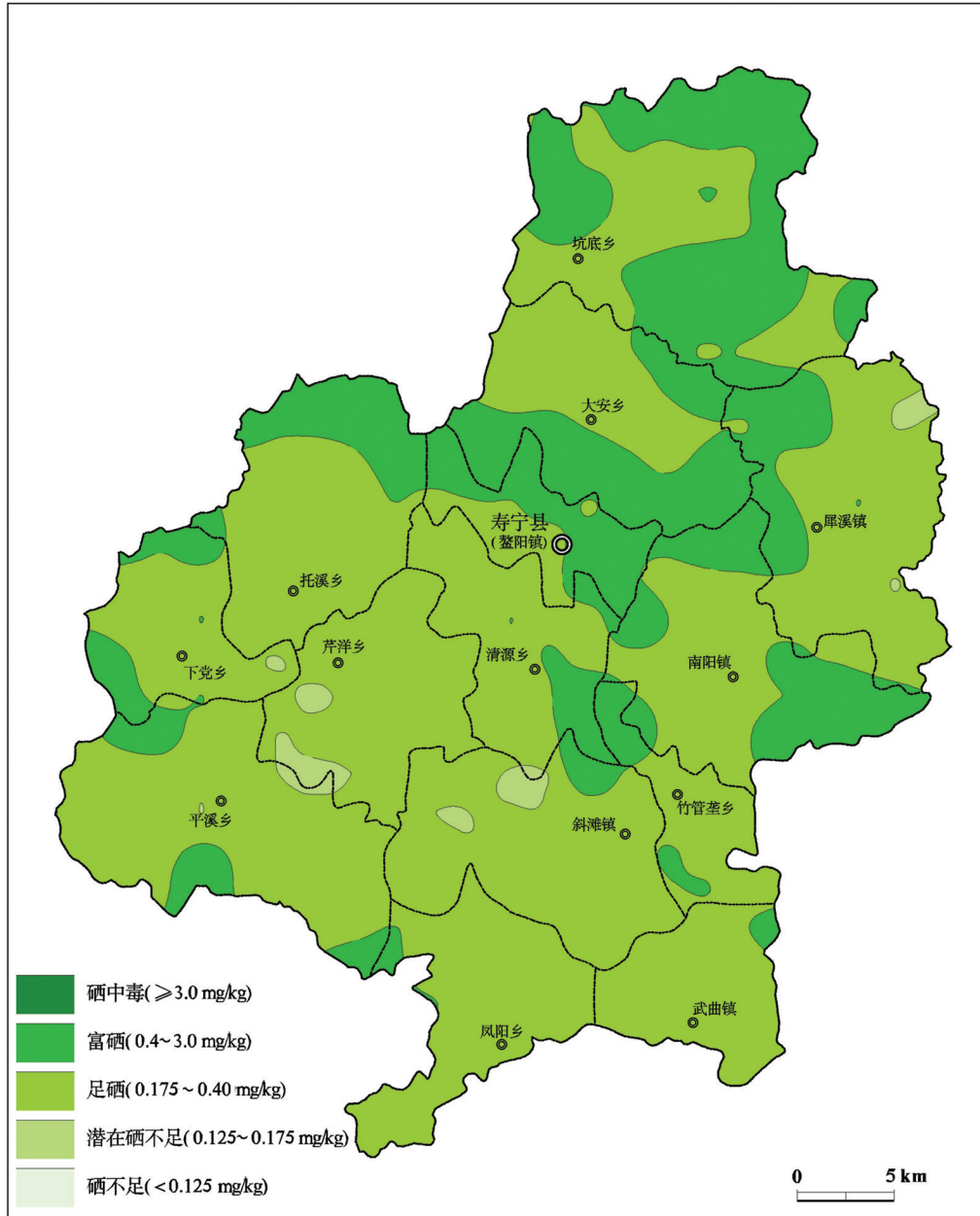


图3 寿宁县表层土壤硒含量分布特征
Fig.3 Distribution of selenium content in surface soil in Shouning

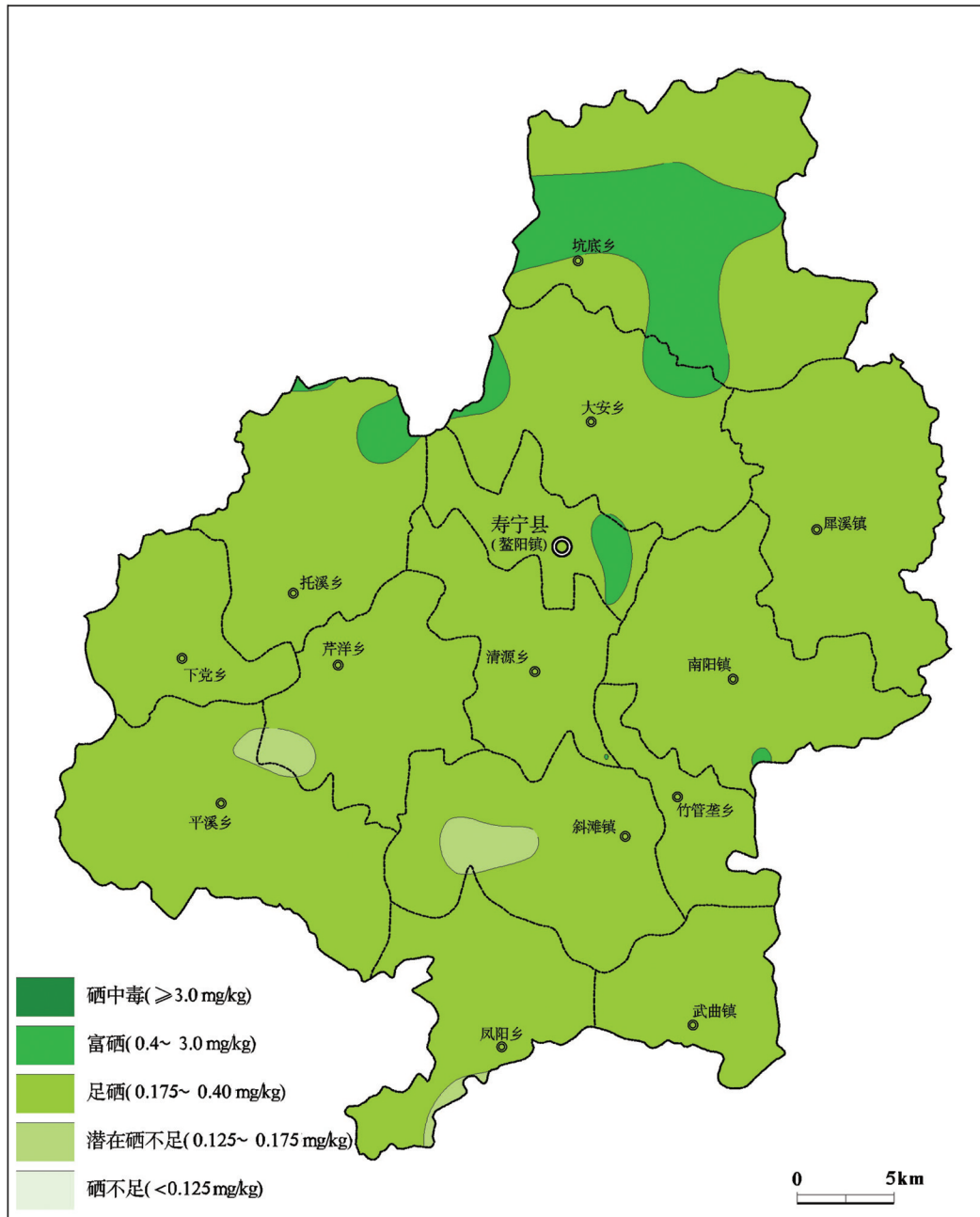


图4 寿宁县深土壤硒含量分布特征

Fig.4 Distribution of selenium content in deep soil in Shouning

出,寿宁县表层土壤总体上属于富硒、足硒土壤,足硒以上级别占98.63%,其中富硒土壤面积为405.04 km²,占28.24%,主要分布于寿宁县北部的坑底乡,大安乡与屏溪镇、鳌阳镇、南阳镇接壤地带以及清源乡与竹管垄乡接壤地带,潜在硒不足土壤面积占1.37%,无硒不足和硒中毒土壤;深层土壤对应的富硒、足硒和潜在硒不足土壤面积分别占7.05%、91.44%和1.05%,无硒反应不足和硒中毒土壤(表

5)。从空间分布上看,表层土壤和深层土壤总硒含量在空间上吻合,这表明表层土壤的硒对深层土壤硒存在一定继承性,并且在表层土壤富集。总体上,研究区土壤面积基本属于富硒和足硒土壤,具有开发富硒农产品的潜力。

4.3 土壤中硒的富集特征

表层土壤易受人类活动的影响,而深层土壤则不受人类活动的影响,其元素分布反映了土壤硒元

表5 表层土壤和深层土壤硒丰缺划分结果

Table 5 Abundance and deficiency of selenium in surface soil and deep soil

全量硒/(mg/kg)	硒效应	表层土壤		深层土壤	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
<0.125	硒不足	0	0	0	0
0.125~0.175	潜在硒不足	19.53	1.37	21.42	1.50
0.175~0.40	足硒	1002.55	70.38	1302.53	91.44
0.4~3.0	富硒	402.32	28.24	100.46	7.05
≥3.0	硒中毒	0	0	0	0

素原始特征,故采用富集系数(K)(廖启林等, 2005)来反映表层土壤硒的富集程度以及自然和人为因素对表层土壤硒的作用结果。

$$K = \frac{\text{表层土壤硒含量}}{\text{深层土壤硒含量}}$$

其中,深层数据按表层数据网格精度采用克里格内插网格化方法,得到与表层采样点对应的深层每4 km²1个点的的结果。将富集系数分为6个区间:极强富集(>4.0)、强烈富集(1.5~4.0)、弱富集(1.15~1.5)、背景(0.85~1.15)、弱贫化(0.6~0.85)、强烈贫化(<0.6)。

寿宁县土壤中硒的富集系数平均值为1.26,属于弱富集,变化范围为0.51~3.73,标准离差为0.46,变异系数达36.89%,空间变异程度较强,反映了不同地段富集程度差异较大。总体上,表层土壤硒含量相对于深层土壤表现出明显的富集特征,弱贫化及强烈贫化区呈星点状分布于研究区,富集面积达到了52.64%,其中强烈富集面积达到了16.65%,强烈富集区域与富硒土壤区域基本吻合(图5,表6)。硒富集区主要位于以晚侏罗世南园组三段、四段流纹质、英安质火山碎屑岩、凝灰熔岩、碎斑熔岩和燕山晚期正长花岗岩为母质的土壤区。

4.4 土壤硒含量的影响因素

表7为表层土壤硒与pH值及其他元素的相关系数。寿宁县表层土壤硒与pH($p < 0.01$)呈显著负相关,这主要因为酸性和中性条件下硒主要以亚硒酸盐形式存在,迁移淋溶较弱,生物有效性低,而在碱性条件下主要以硒酸盐形式存在,容易迁移且易被植物吸收利用。以往研究也表明土壤硒含量与pH呈负相关关系,但相关程度有所差异,体现了不同区域的地理环境导致硒在土壤中赋存状态的差异(章海波等,2005; 胡艳华等,2010)。硒与TOC具有显著的正相关关系($p < 0.01$),表明有机质对硒具

表6 土壤硒表层生富集系数分类及富集面积

Table 6 Classification of supergene concentration coefficients of soil selenium and area of each grade

富集系数分级	分布特征	比例/%	面积/km ²
<0.6	强烈贫化	0.16	2.21
0.6~0.85	弱贫化	7.61	108.33
0.85~1.15	背景(基本自然状态)	39.60	564.09
1.15~1.5	弱富集	35.98	512.56
1.5~4.0	强烈富集	16.65	237.21
>4.0	极强富集	0.00	0.00

有一定的吸附和固定作用,硒能够以腐殖质缔合的形态存在并在土壤中固定下来,硒与N呈也显著正相关关系($p < 0.01$),说明N对硒也具有一定的吸附和固定作用,土壤中大量N的存在不利于土壤硒向植物迁移转化。

硒与Al₂O₃、TFe₂O₃和Mn呈显著正相关关系($p < 0.01$),表明土壤中铁、锰氧化物及黏土矿物对硒具有吸附作用。土壤Fe、Mn与Se的相关性要略强于Al与Se的相关性,这可能是由于铁铝氧化物对硒的亲力和吸附能力不同引起的。研究表明,在湿润和酸性土壤中,硒主要以亚硒酸盐形式存在,且倾向于与铁、锰、铝的半倍氧化物形成较难溶的配合物和化合物,或被金属氢氧化物捕获(杨忠芳等,2012)。

硒与S、As、Cd、Hg、Pb和Zn呈显著正相关($p < 0.01$),这与它们属于亲硫元素,在原生矿物中它们存在着一定的伴生关系,虽在演变形成土壤中发生了一系列的崩解和分解作用,但由于成土母质的继承性,土壤中硒仍与S、As、Cd、Hg、Pb和Zn等表现出一定的正相关关系。硒与Cr和Ni呈显著正相关($p < 0.01$),表明硒主要来源于成土母质,这是由于Cr和Ni属于亲铁元素。

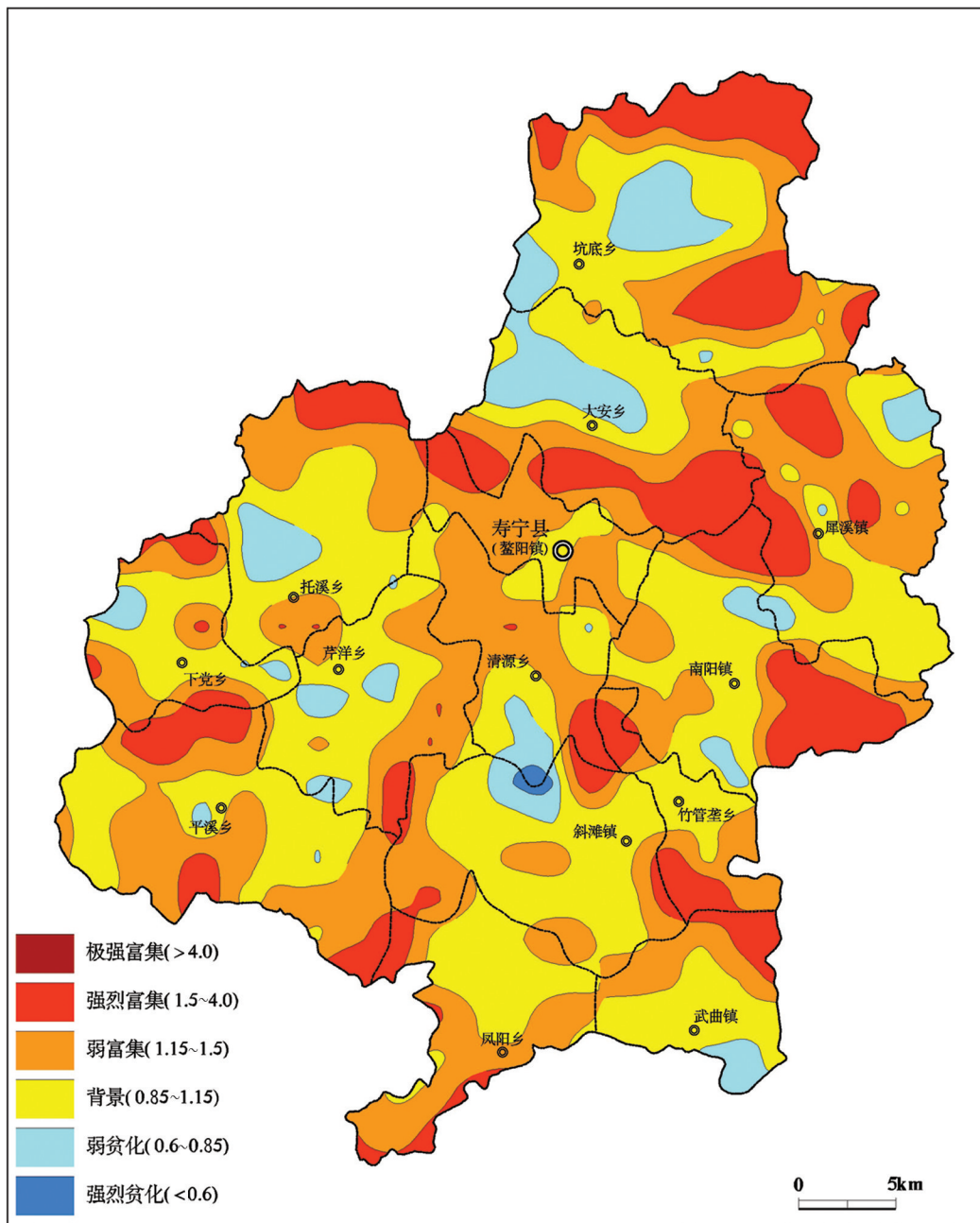


图5 寿宁县土壤硒富集系数分布

Fig.5 Distribution of supergene concentration coefficients of soil selenium in Shouning

表7 寿宁县表层土壤中全硒含量与其他元素含量的相关性

Table 7 Correlation coefficients between selenium and other indicators in the surface soils of Shouning

元素	pH	TOC	N	S	Mn	TFe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
相关系数	-0.130**	0.692**	0.680**	0.493**	0.356**	0.324**	0.284**
元素	Hg	Cd	Pb	As	Cr	Ni	Zn
相关系数	0.489**	0.238**	0.200**	0.321**	0.480**	0.506**	0.293**

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

5 结 论

(1)寿宁县表层土壤硒含量平均值高于世界土壤表层平均值0.20 mg/kg和全国土壤A层平均含量0.29 mg/kg,总体上属于富硒、足硒土壤,富硒土壤面积为405.04 km²(28.24%),足硒土壤面积为1002.55 km²(70.38%),极具开发价值。

(2)寿宁县燕山晚期正常花岗岩($\xi\gamma K_1$)发育的土壤中硒含量最高,平均值为0.39 mg/kg,其次为南园组四段(J_3n^4)和小溪组上段(K_1x^2)发育的土壤;不同土壤类型硒平均含量呈现出黄壤 > 红壤 > 水稻土的特点。

(3)表层土壤硒含量相对于深层土壤表现出明显的富集特征,富集面积达到了52.64%,其中强烈富集面积达到16.65%,强烈富集区域与富硒土壤区域基本吻合。

(4)硒与铁锰氧化物、有机质等理化性指标具有显著的正相关关系,表明对土壤硒具有一定的吸附和固定作用,是硒表生富集的主要因素之一,而硒与pH呈显著负相关,说明对硒具有贫化作用。

References

- AnYonghui, Li Xufeng, He Jin, JiaXiaofeng, Li Liang. 2010. Distribution characteristics of Kaschin-Beck disease in relation to geological environment of Zoige County[J]. *Geology in China*, 37(3): 587-593(in Chinese with English abstract).
- Daniel L M. 2008. Distribution, mineralogy and geochemistry of selenium in felsic volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Finlayson Lake District, Yukon Territory, Canada[C]. *Society of Economic Geologists, Inc*, 103(1):61-68.
- Fiona M Fordyce.2013. Selenium Deficiency and Toxicity in the Environment[M].Berlin: Springer.
- Gunnar G N. 1971. Influence of pH and texture of the soil on I plant uptake of added selenium[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 19(6):1165-1167.
- Guo Li, Yang Zhongfang, Ruan Qihe, Hu Shengying, Zhou Yanan, FengHui. 2012.Content and distribution of Selenium in Soil of Beijing Plain[J]. *Geoscience*, 26(5):859- 864(in Chinese with English abstract).
- Hou Shaofan. 2000. Change trend and factors of residential selenium nutrition status in low selenium belt in China[J].*Geographical Research*, 19(2):134-140(in Chinese with English abstract).
- Hu Yanhua, Wang Jiaen, CaiZihua, Song Mingyi, Kang Zhanjun, Yan Tiezeng.2010. Content, dtribution and influencing factors of selenium in soil of Jiashan area, northern Zhejiang Province[J]. *Geological science and technology information*,29(6):84- 88(in Chinese with English abstract).
- Huang Qi, Cheng Hangxin, Chen Chuxin,Wang Haibo, Guo Li, Zhao Dongdong, Wang Pan. 2013. The investigation and evaluation of selenium-rich soil in Fangshan district of Beijing city[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(5):889- 894(in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Hua Ming, FengJinshun, Jin Yang, Wu Xinmin, Yan Zhaoyang, Zhu Bowan. 2007. Natural Se-rich tea in local Se-rich soils in southern Jiangsu[J]. *Geology in China*, 34(2): 347-353(in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Jin Yang, Wu Xinmin,BiKuisen, Fan Difu, Hua Ming. 2005. Artificial environmental concentration coefficients of elements in soils in the Nanjing area[J]. *Geology in China*, 32(1): 141-147(in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Yang Zhiqiang, Liu Zhigang,ZhengGuodong, Wang Yinghui, Chen Biao. 2012. Distribution of selenium in soils of Nanning City and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 49(5):1012-1020(in Chinese with English abstract).
- Liu Zheng.1996. Trace Element in Chinese Soil[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press (in Chinese).
- Rayman M P. 2000. The importance of selenium to human health[J]. *The Lancet*, 356(9225): 233-241.
- Song Mingyi, Cai Zihua, Huang Chunlei, Hu Yanhua, Wang Jiaen. 2011.The characteristics and genetic analysis of selenium-rich soil in Hangjiahu plain of northern Zhejiang[J]. *Guangdong Trace Elements Science*,18(8):20-26(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhao, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yang Xiaoyan, Huang Yong, Chen Enke. 2010. Factors controlling the transport and transformation of selenium in typical soil environments: A case study of the Chengdu economic zone in Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 37(6): 1760- 1768(in Chinese with English abstract).
- Tao Chunjun, Jia Shijun, Liang Hongxia,Xing Runhua, Chen Yongning, Chen Furong. 2014. Research on availability and development of selenium-rich soil in Qingxi area, Anhui Province[J]. *Resources Survey and Environment*, 35(1):67- 72(in Chinese with English abstract).
- Tan Jianan. 1996. Environmental Life Elements and keshan disease[M]. Beijing: China Medical Science Press(in Chinese).
- Tan Jianan. 1989. The Atlas of Endemic Diseases and Their Environments in the People's Republic of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Shiji, Wu Xiaoyong, Liu Junbao. 2004. Characteristics of elemental selenium in soils and evaluation of eco-environmental effects in northern Zhejiang[J]. *Geology in China*, 31(S1): 118-125 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanliang, Hou Wei, HouZhanqing, XiongShaoli. 2010. The relationship between the kaschin-beck disease and the geological

- environment in Jilin Province[J]. *Geology in China*, 37(3): 577–581(in Chinese with English abstract).
- Wei Ran, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yin Guosheng, Zhong Cundi, Deng Guohui, Ma Yilin. 2012. Its transformation and enrichment in root soil of Poyang lake basin, Jiangxi Pprovince[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(1):109–113(in Chinese with English abstract).
- Wen Bangyong, ZhangTaoliang, LiXizhou, XieZhendong. 2014. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 41(1): 256–263 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiqiang, Li Jie, Zheng Guodong, Chen Biao, Zhong Xiaoyu. 2014. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(6):1260–1269(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongfang, Yu Tao, HouQingye, Yang Yi, Fu Yangrong, Zhao Xianglei. 2012. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. *Geoscience*, 26(5):837–849(in Chinese with English abstract).
- Zhang Haibo, LuoYongming, Wu Longhua, Zhang Ganlin, Zhao Qiguo, Huang Minghong. 2005. Hong Kong soil researches II. Distribution and content of selenium in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 42(3):404–410 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianming, Liang Xiaobing, Ling Hongwen, Wang Mingshi, Wang Fushun, Liu Shirong. 2003. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(1):75–81(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y G, Pilon-Smits E A H, Zhao J, Williams P N, Meharg A A.2009. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation[J]. *Trends in Plant Science*, 14(8): 436–442.
- 附中文参考文献**
- 安永会, 李旭峰, 何锦, 贾小丰, 李亮. 2010. 若尔盖县大骨节病分布特征及其与地质环境的关系[J]. *中国地质*, 37(3): 587–593.
- 郭莉, 杨忠芳, 阮起和, 胡省英, 周亚男, 冯辉. 2012. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. *现代地质*, 41(1):859–864.
- 侯少范. 2000. 中国低硒带人群硒营养状态的变化趋势与成因分析[J]. *地理研究*, 19(2):134–140.
- 胡艳华, 王加恩, 蔡子华, 宋明义, 康占军, 颜铁增. 2010. 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*, 29(6):84–88.
- 黄淇, 成杭新, 陈出新, 王海波, 郭莉, 赵冬冬, 王攀. 2013. 北京市房山区富硒土壤调查与评价[J]. *物探与化探*, 37(5): 889–894.
- 廖启林, 华明, 冯金顺, 金洋, 吴新民, 颜朝阳, 朱伯万. 2007. 苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究[J]. *中国地质*, 34(2): 347–353.
- 廖启林, 金洋, 吴新民, 毕葵森, 范迪富, 华明. 2005. 南京地区土壤元素的人为活动环境富集系数研究[J]. *中国地质*, 32(1):141–147.
- 李杰, 杨志强, 刘枝刚, 郑国东, 王英辉, 陈彪. 2012. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. *土壤学报*, 41(5):1012–1020.
- 刘铮. 1996. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社.
- 宋明义, 蔡子华, 黄春雷, 胡艳华, 王加恩. 2011. 杭嘉湖平原富硒土壤特征与成因分析[J]. *广东微量元素科学*, 18(8):20–26.
- 孙朝, 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 黄勇, 陈恩科. 2010. 典型土壤环境中硒的迁移转化影响因素研究——以四川省成都经济区为例[J]. *中国地质*, 37(6):1760–1768.
- 陶春军, 贾十军, 梁红霞, 邢润华, 陈永宁, 陈富荣. 2014. 安徽绩溪地区土壤硒元素有效性及开发研究[J]. *资源调查与环境*, 35(1): 67–72.
- 谭见安. 1996. 环境生命元素与克山病[M]. 北京: 中国医药科技出版社.
- 谭见安. 1990. 中华人民共和国地方病与环境图集[M].北京:科学出版社.
- 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 2004. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价[J]. *中国地质*, 31(增刊):118–125.
- 王延亮, 侯伟, 侯占清, 熊邵礼. 2010. 略论吉林省大骨节病与地质环境的关系[J]. *中国地质*, 37(3): 577–581.
- 魏然, 侯青叶, 杨忠芳, 尹国胜, 袁存堤, 邓国辉, 马逸麟. 2012. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律[J]. *物探与化探*, 35(1):109–113.
- 文帮勇, 张涛亮, 李西周, 谢振东. 2014. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. *中国地质*, 41(1):256–263.
- 杨志强, 李杰, 郑国东, 陈彪, 钟晓宇. 2014. 广西北部湾沿海经济区富硒土壤地球化学特征[J]. *物探与化探*, 38(6):1260–1269.
- 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 杨奕, 傅杨荣, 赵相雷. 2012. 海南岛农田土壤Se的地球化学特征[J]. *现代地质*, 26(5):837–849.
- 章海波, 骆永明, 吴龙华, 张甘霖, 赵其国, 黄铭洪. 2005. 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*, 42(3): 404–410.
- 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 王明仕, 汪福顺, 刘世荣. 2003. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 22(1):75–81.