

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 2683

邹山进洪. 闽侯县表层土壤及农产品硒含量特征[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 247-256. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 2683](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2683)

Zou S J H. Selenium contents in surface soil and agricultural products in Minhou County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 247-256. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 2683](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2683)

闽侯县表层土壤及农产品硒含量特征

邹 山 进 洪

(福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘 要: 依据福建省闽侯县农业地质调查评价数据, 研究了县域耕地和园地表层土壤硒分布特征及主要控制因素, 分析了农产品硒含量特征。结果表明, 表层土壤硒含量受控于地质背景, 晚侏罗世潜花岗岩斑岩分布区土壤硒含量明显高于其他地质背景区, 同时不同地貌条件、土壤类型、土地利用方式均对土壤硒含量有一定的影响。研究区大部分农产品硒含量较低, 主要富硒农作物为水稻, 初步评价表明稻米富硒率达 78. 6%, 但有个别稻米样品 As 或 Cd 含量超标, 开发利用富硒稻米应关注重金属超标风险。根据清洁富硒土壤分布结合农产品富硒情况, 研究区划分了 9 处天然富硒土地潜力区。

关键词: 闽侯县; 硒含量特征; 影响因素; 富硒稻; 天然富硒土地

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)01-0247-10

0 引言

硒是人畜必需的微量元素, 具有多方面的生理功能, 其丰缺与人畜健康有密切关系^[1]。硒含量过低会诱发克山病、大骨节病和白肌病等多种缺硒疾病^[1-2], 硒摄入量过高又可能造成毒害^[3-7]。全国硒含量分布较不均匀, 其中有高达 72% 的土壤处于不同程度的缺硒状态, 超过 1 亿人口硒摄入量不足^[7]。但若通过富硒农产品适量补硒, 则可有效提高机体的免疫能力, 降低克山病、大骨节病、心脑血管疾病的发生率^[5, 8], 富硒农产品特别是天然富硒农产品因此被称为 21 世纪重要的保健营养食品。富硒产业作为生态功能农业的一个重要组成部分, 可以有效提高农民的收入水平, 具有广阔的开发应用前景^[9-10]。

在“岩石—土壤—植物—动物—人体”链条体系中, 动物和人体硒主要来源于植物并最终来源于土壤及其成土母质, 特别是土壤中硒的含量、形态和作物对硒的吸收等都影响着食物链关键环节农作物中硒的水平, 因此, 将土壤—植物系统作为一个整体来考察硒在土壤中的分布特征及植物对土壤中硒的

吸收与积累具有现实意义^[11]。基于此, 笔者根据福建省闽侯县农业地质调查评价成果, 探讨了闽侯县不同区域表层土壤和重要农产品中硒含量特征、转化迁移规律及其可能的影响因素, 旨在为福建省闽侯县富硒产业布局和富硒农产品的合理开发提供理论依据。

1 研究区概况

闽侯县地处福建省东部, 省会福州市的西南侧, 位于北纬 25°47'~26°37', 东经 118°51'~119°25', 总面积 2 136 km²。该区地处中亚热带季风气候区, 其中闽江沿岸的低海拔地区具有南亚热带气候特征。全县地势呈西北高、东南低的特点, 包括中山、中低山、低山、丘陵、冲洪积盆地和海积平原 6 种地貌类型(图 1)。土壤类型较为复杂多样, 山地土壤垂直分带明显, 自下而上依次有红壤、黄红壤、黄壤、草甸土, 在红壤分布区镶嵌有紫色土、水化红壤等地域性土壤; 平原地区多为风沙土、冲积土和水稻土等土壤。

研究区广泛出露火山岩地层, 约占全县总面积的 73. 65%, 主要为上侏罗统南园组和下白垩统寨

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-07-19

基金项目: 福建省自然资源厅项目“闽侯县农业地质调查评价”(2019002)

第一作者: 邹山进洪(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事勘查地球化学、生态地球化学工作。Email: 81444319@qq. com

下组,下白垩统黄坑组、小溪组出露范围较小,侵入岩主要为早白垩世岩体,晚侏罗世、晚白垩世岩体零星出露,局部见有小面积潜火山岩,东南部闽江下游分布有较大面积的第四系长乐组冲洪积层、海积层及龙海组冲洪积层。

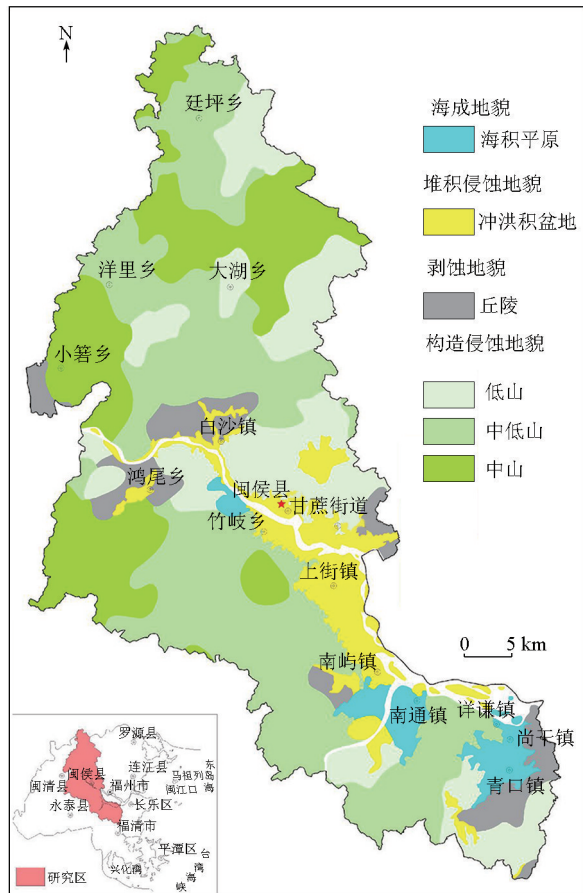


图1 闽侯县地貌图(据参考文献[12]修编)

Fig.1 Landform map of Minhou County

(Revised according to reference[12])

2 材料与方法

2.1 样品采集

针对闽侯县连片耕地及部分园地部署研究工作,表层土壤采样控制图斑总面积 250.18 km²,其中耕地面积 215.7 km²,园地面积 34.48 km²。按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中 1:50 000 面积性调查评价的要求,表层土壤平均采样密度为 9 件/km²,采样深度 0~20 cm,共采集表层土壤样品 2 250 件。采用多点组合形式采集耕层土壤,在 GPS 定点点位 20~50 m 范围内采集 3~5 个子样,等量混合组成 1 件样品。采样时先扒开地表植物残体和杂物,用化探锄挖坑,然后在坑的一侧自地表垂直向下用木质采样铲将表面一层土壤铲

去,自地表垂直向下连续均匀采集 20 cm 土柱。

项目同时采集了农产品—根系土配套样品。水稻为县域大宗农作物,针对永久基本农田、连片耕地部署,采样密度为 1 个点/3 km²,完成采样点 70 个;根据闽侯县主要特色农产品、经济作物种植情况,选择茶叶、脐橙、龙眼、大白菜、空心菜、佛手瓜、苦桔、上海青开展调查研究,其中茶叶、脐橙种植面积较大,每种选择 30 个点,其他农产品每种选择 15 个点,合计采集了 9 种作物共 220 组农产品—根系土配套样。样品较为均匀分布在全县各种农作物的主产区。

农产品—根系土配套样品集中在农作物成熟季节采集。选择种植面积较大的地块,在地块中心部位周边 30~50 m 范围内均匀采集,采样时注意避开病虫害植株。选取 15~20 个水稻植株各采集 8~10 个稻穗组合成一件稻谷样品;选取 15~20 个茶树植株,均匀采集“一芽三叶”的叶片混合成一件样品;空心菜、上海青由 15~20 个整株去根组合成一件样品;大白菜、佛手瓜由 10~15 个子样组成,四分法缩分后组合成一件样品;水果类选择 5~8 棵植株,每株采集数量相当的果实组合成一件样品。每件农产品样品鲜重均大于 2 kg。

农产品用自来水冲洗干净后,再用蒸馏水冲洗 1~2 次,装入聚乙烯塑料袋于当日送达实验室进行预处理。稻谷样品先进行脱粒、混匀,用砻谷机进行脱壳得到糙米,蔬菜类、橘子类、茶叶样品去除不可食部位,称其鲜样质量,于恒温干燥箱 60 ℃ 烘至干燥,称干样质量,计算干湿比。干样用 HR2056 粉碎机制成粉样,过 40 目尼龙筛,装入聚乙烯塑料密封袋中保存。龙眼样品剥除外皮,去核取果肉部分装入高速组织捣碎机捣成匀浆,装入聚乙烯塑料瓶中于冰箱冷冻保存。

配套根系土与农产品同时、同点采集,采样方法同表层土壤。采样深度根据不同农作物主根系分布范围确定。水稻、大白菜为 0~20 cm,空心菜、上海青为 0~15 cm,茶叶、佛手瓜为 0~40 cm,龙眼、脐橙、苦桔为 0~60 cm。

2.2 分析测试

样品分析测试执行《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)、《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DD2005-01)和《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)的有关规定要求。由福建省地质测试研究中心分析测试土壤全量指标 22 项,农产品指标 8 项。

土壤样品采用原子荧光法(AFS)分析 As、Hg、

Se,发射光谱法(ES)分析 B,等离子体质谱法(ICP-MS)分析 Mo、Cd,X-荧光光谱法(XRF)分析 Cr、Cu、Mn、Ni、P、Pb、Zn、 TFe_2O_3 、MgO、S、CaO、 K_2O 、Cl,化学容量法(VOL)分析 N、有机质,离子选择电极法(ISE)测定 pH。

根据《生态地球化学评价 动植物样品分析方法》(DZ/T 0253.1—2014)、《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)、《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》(GB 5009.11—2014),采用微波消解—等离子体质谱法测定农产品 Se、Mo、Zn、Pb、Cd、Hg、As、Cr,液相色谱—原子荧光光谱法测试稻谷的无机砷。

样品分析按规范要求监控分析质量,方法检出限、准确度、精密度、内检、异常抽查及报出率的各项分析质量参数达到规范要求,分析数据准确可靠。

3 结果与讨论

3.1 土壤硒地球化学特征

3.1.1 土壤硒含量特征

闽侯县表层土壤样品硒含量介于 $(0.057 \sim 1.561) \times 10^{-6}$,平均值为 0.276×10^{-6} ,略低于全国 A 层土壤平均含量 0.29×10^{-6} ,标准差为 0.091×10^{-6} ,变异系数 0.33。《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)在参照谭见安^[3]对地方病研究成果研究的基础上,提出了土壤硒的分级标准:缺乏($\leq 0.125 \times 10^{-6}$)、边缘($0.125 \times 10^{-6} \sim 0.175 \times 10^{-6}$)、适量($0.175 \times 10^{-6} \sim 0.40 \times 10^{-6}$)、高($0.4 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$)、过量($> 3.0 \times 10^{-6}$),其中土壤硒含量介于 $0.4 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$ 定义为富硒土壤。根据这一标准,对闽侯县表层土壤硒含量情况进行统计(表 1)。结

果表明,闽侯县表层土壤硒含量以适量为主,占比为 73.96%,其次为高(富硒),占比 13.91%,边缘、缺乏分别占 9.82%、2.31%,无过量样品。

3.1.2 土壤硒空间分布特征

闽侯县大部分耕地和园地土壤硒含量为适量,面积占比为 74.57%,在全县广泛分布。富硒土壤面积合计 34.72 km²,占比为 13.48%,主要分布于西北部的大湖乡—廷坪乡—洋里乡交界处、西部的洋里乡—小箬乡交界处及东南部的青口镇西南一带,其他乡镇亦见有零星分布。大湖乡富硒土壤资源最为丰富,面积达 8.34 km²,青口镇、小箬乡富硒土壤面积占比较高,分别为 29.84%、25.22%。硒含量处于边缘和缺乏的土壤面积占比分别为 9.03% 和 2.93%,主要分布于大湖乡的西南部、小箬乡的中部、洋里乡的中北部及荆溪镇的北部,闽江西南岸的竹岐乡东北部、上街镇东南部见有较大面积的缺硒土壤。闽侯县没有硒含量过剩的土壤分布。

3.2 土壤硒含量控制因素

闽侯县表层土壤中硒含量不仅继承了成土母岩的特征,还受到地形地貌、土壤类型的影响,同时不同的土地利用方式也影响着土壤的硒含量。

3.2.1 成土母岩

大量研究发现,土壤硒含量与成土母岩有一定关系^[3,13-16]。闽侯县不同成土母岩形成的土壤硒含量总体规律为晚侏罗世潜花岗斑岩>长乐组海积层>第四系冲洪积层>上侏罗统南园组火山岩>下白垩统寨下组、黄坑组火山岩>早白垩世、晚侏罗世花岗岩(表 2)。晚侏罗世潜花岗斑岩形成的土壤硒含量最高,平均值为 0.374×10^{-6} ,主要分布于西部洋里乡、小箬乡等地。这一结果不同于方金梅^[17]对包括闽侯县在内的福州市不同岩石及其风化土壤中硒元素含量的研究结果,除了研究区范围不完全相同导致的硒含量差异外,其他原因有待进一步分析。

相关性分析表明,闽侯县表层土壤中硒含量与 TFe_2O_3 、Cr、As、Ni、Zn、Cu、B、Pb、S、P、Mn、Mo 等多个指标均呈显著正相关($P < 0.01$)(表 3)。这同硒与上述元素在原生矿物中存在一定的伴生关系较为

表 1 闽侯县表层土壤硒含量等级分布情况
Table 1 The distribution of selenium content in surface soil of Minhou County

等级	缺乏	边缘	适量	高	过量
样品数	52	221	1664	313	0
比例/%	2.31	9.82	73.96	13.91	0

表 2 闽侯县不同成土母岩土壤硒含量平均值
Table 2 Characteristics of selenium content in different soil parent rocks of Minhou County

时代	第四系			下白垩统			上侏罗统			早白垩世		晚侏罗世	
地层	长乐组冲 洪积层	长乐组 海积层	龙海组冲 洪积层	寨下组 上段	黄坑组 上段	黄坑组 下段	南园组 第四段	南园组 第三段	南园组 第二段	二长花 岗岩	花岗 闪长岩	花岗 闪长岩	潜花 岗斑岩
样品数	73	223	50	233	152	75	47	555	455	72	94	55	36
$w(\text{Se})/10^{-6}$	0.285	0.316	0.305	0.271	0.259	0.254	0.238	0.297	0.267	0.184	0.232	0.216	0.374

表 3 闽侯县表层土壤中硒元素与其他指标的相关性

Table 3 Correlation between selenium element and other indicators in surface soil of Minhou County

指标	pH	有机质	N	P	K	S	CaO
相关系数	-0.005	0.268 **	0.259 **	0.276 **	-0.375 **	0.287 **	0.009
指标	MgO	B	Mo	Mn	TFe ₂ O ₃	Cl	Zn
相关系数	0.107 **	0.304 **	0.155 **	0.193 **	0.502 **	0.095 **	0.332 *
指标	Cu	Hg	Cd	Pb	As	Cr	Ni
相关系数	0.301 **	0.159 **	0.080 **	0.295 **	0.491 **	0.497 **	0.427 **

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;下同。

吻合^[18-19],此外,还可能与次生环境中铁锰氧化物对硒等元素的吸附和固结作用有关^[20-21]。

3.2.2 地形地貌

地形地貌对土壤的形成、发育影响十分深刻,不同地貌具有不同的水热分配和物质堆积特点,随地貌的不同,土壤形成及其组合分布也不相同。按地貌分区统计表明,闽侯县表层土壤硒含量从高到低依次为海积平原>中山>冲洪积盆地、丘陵、中低山>低山(表 4)。海积平原土壤硒含量最高,平均值为 0.333×10⁻⁶,其次为中山,硒含量平均值为 0.304×10⁻⁶。海积平原位于闽江下游河口两侧,海拔小于

10 m,地形低洼,土壤成分以淤泥、黏性土、泥炭组合为主。相关研究表明,黏质土硒含量较高,砂质土硒含量较低,土壤黏粒含量越多,硒含量越高^[22-23]。闽侯县不同地貌分区土壤硒含量差异可能是土壤质地差异性的反映。另外,闽侯县中山地貌分区硒含量较高与其海拔较高有关。章海波等^[24]、张钟华等^[25]、朱建明等^[26]研究发现,山地地貌中海拔增加后,气温的降低使土壤有机质分解速率降低,土壤中有机质含量相对较高,使得土壤吸附固定硒能力增加。相关性分析也表明,闽侯县表层土壤硒含量与有机质呈显著正相关(表 3)。

表 4 闽侯县不同地貌区土壤硒含量平均值

Table 4 Characteristics of soil selenium content in different landforms of Minhou County

地貌类型	海成地貌	堆积侵蚀地貌	剥蚀地貌	构造侵蚀地貌		
	海积平原	冲洪积盆地	丘陵	低山	中低山	中山
样品数	167	283	213	452	638	462
w(Se)/10 ⁻⁶	0.333	0.273	0.275	0.254	0.271	0.304

3.2.3 土壤类型

闽侯县不同土壤类型中,硒含量从高到低依次为黄壤>黄红壤>潴育水稻土>红壤、渗育水稻土、潜育水稻土、冲积土(表 5)。黄壤硒含量最高,平均值为 0.598×10⁻⁶,达到富硒水平(0.4×10⁻⁶~3.0×10⁻⁶)。黄壤、黄红壤主要分布于西北部廷坪乡、大湖乡、洋里乡中高海拔地区(800~1 000 m),日照短,气温较低,不利于有机复合态硒向水溶态硒转化,使得高海拔地区土壤持留更多的硒^[24-26]。闽江中下游大面积分布的潴育水稻土,耕作层水气肥协调,有机质及各种养分含量较高,硒含量在 3 种水稻土亚类中最高。

表 5 闽侯县不同类型土壤硒含量平均值

Table 5 Characteristics of soil selenium content in different soil types of Minhou County

土壤类型	红壤	黄壤	黄红壤	冲积土	渗育水稻土	潴育水稻土	潜育水稻土
样品数	979	72	192	61	471	345	90
w(Se)/10 ⁻⁶	0.266	0.598	0.334	0.248	0.263	0.302	0.254

3.2.4 土地利用方式

土地利用改变了土壤水热状况,影响土壤微生物活动,使得土壤中包括硒等各种元素发生再分配^[23]。闽侯县不同土地利用方式下的土壤硒含量

从高到低依次为茶园>水浇地>果园、旱地>水田(表 6)。茶园、水浇地土壤硒含量较高,平均值分别为 0.453×10⁻⁶、0.423×10⁻⁶,均达到富硒水平(0.4×10⁻⁶~3.0×10⁻⁶)。闽侯县茶园、水浇地主要分布于大湖乡、廷坪乡、洋里乡等高海拔山区,土壤腐殖层较厚,有机质含量高,固硒作用较强,而果园、旱地、水田一般分布在中低海拔地区,耕作强度大,土壤有机质含量较低,硒含量总体较低。

表 6 闽侯县不同土地利用方式下土壤硒含量特征

Table 6 Characteristics of soil selenium content under different land use patterns in Minhou County

土地利用类型	果园	旱地	茶园	水浇地	水田
样品数	322	121	35	87	1659
w(Se)/10 ⁻⁶	0.290	0.288	0.453	0.423	0.269

3.3 作物硒含量特征

3.3.1 农产品富硒情况

由于国家标准《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)中富硒稻谷是指三级大米中的硒含量,本研

究测定的是糙米硒含量,而糙米硒含量通常要高于三级大米硒含量^[27],因此,本文以国家标准为参考初步评价研究区稻米富硒情况。研究区 70 件稻米样品硒平均值为 0.059×10^{-6} ,是富硒标准下限的 1.48 倍,其中 55 件稻米样品硒含量达到富硒标准($(0.04\sim0.30)\times10^{-6}$),富硒率达 78.6%,其他农产品富硒率低,仅龙眼、空心菜各有 1 件样品达富硒标

准下限(表 7),稻米是闽侯县较具开发潜力的富硒农产品。不同类型农作物硒的吸收能力不同,植物籽粒中硒含量一般高于茎叶中硒含量,农作物对土壤中硒的生物富集能力大小顺序为根茎类>叶菜类>果实类>种子类^[28-30]。蔬菜非可食部位中硒的含量最高,且在种子成熟时大部分可溶性硒转移至种子或豆荚中^[31]。

表 7 闽侯县农产品富硒情况

Table 7 Selenium-enriched situation of agricultural products in Minhou County

农产品	硒含量			富硒标准/ 10^{-6}	样本数	富硒数	富硒率/%
	最大值/ 10^{-6}	最小值/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}				
稻米	0.162	0.032	0.059	0.04~0.30	70	55	78.6
龙眼	0.010	0.003	0.004	0.01~0.05	15	1	6.7
脐橙	0.006	0.003	0.004	0.01~0.05	30	0	0
苦桔	0.004	0.002	0.003	0.01~0.05	15	0	0
茶叶	0.147	0.053	0.091	0.25~4.00	30	0	0
大白菜	0.005	0.002	0.003	0.01~0.10	15	0	0
空心菜	0.010	0.003	0.005	0.01~0.10	15	1	6.7
佛手瓜	0.004	0.002	0.003	0.01~0.10	15	0	0
上海青	0.006	0.002	0.004	0.01~0.10	15	0	0

注:茶叶硒含量为干基,其他农产品均为湿基;稻米富硒参考标准为国家标准《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008),茶叶富硒参考标准为农业部标准《富硒茶》(NY/T 600—2002),其他农产品富硒参考标准为江西省地方标准《富硒农产品硒含量分类要求》(DB36/T 566—2017)。

3.3.2 稻米富硒原因分析

研究表明,在一定范围内农产品硒含量与土壤中硒含量具有一定的相关性^[32-33]。研究区各种农产品中硒含量与配套根系土中硒含量的相关系数及平均富集系数见表 8。

著正相关,相关系数均达 0.487($P<0.01$)。但脐橙硒含量变化区间较窄($0.003\times10^{-6}\sim0.006\times10^{-6}$),其相关性分析结果不具有统计意义。其他农产品硒含量与配套根系土硒含量相关性均不显著,这可能与这些农产品硒含量不具有显著性差异有关。

可见稻米、脐橙硒含量与其根系土硒含量呈显

表 8 闽侯县各类农产品与配套根系土硒含量的相关系数和富集系数

Table 8 Correlation coefficient and enrichment factor of selenium content between various agricultural products and soil in Minhou County

品种	稻米	茶叶	脐橙	龙眼	大白菜	空心菜	佛手瓜	苦桔	上海青
r	0.487**	-0.026	0.4871**	0.164	-0.258	0.173	-0.381	-0.193	-0.338
q	0.205	0.029	0.020	0.014	0.009	0.021	0.006	0.021	0.013

注: r 为相关系数, q 为富集系数,富集系数=农产品硒含量/土壤硒含量;下同。

闽侯县稻米对根系土中硒元素的平均富集系数为 0.205,明显高于其他农产品,其他农产品的富集系数都较低($0.006\sim0.029$),这也是大多数农产品不易富硒的原因之一。

(81.26%、65.11%、35.42%),稻米对根系土的富集系数高于全国(0.179)^[34],说明闽侯县种植的水稻品种相对易富集硒。当然,本研究测定的是糙米硒含量而不是稻谷标准中的三级大米硒含量,这对评价结果也带来了一定的影响。

值得注意的是,闽侯县 55 件富硒稻米中仅有 13 件配套根系土达到富硒土壤标准($0.4\times10^{-6}\sim3.0\times10^{-6}$),另外 38 件根系土仅达到适量($0.175\times10^{-6}\sim0.4\times10^{-6}$),4 件仅达到边缘($0.125\times10^{-6}\sim0.175\times10^{-6}$)(表 9)。闽侯县水稻主产区土壤硒含量高、适量、边缘分区中所产的稻米样品富硒比例分别为 100%、76%、57.14%,均显著高于全国 41 个水稻主产区相应土壤硒含量分区所产稻米富硒比例

蒋彬^[35]、李正文等^[36]、王家伟等^[37]、张标金等^[38]研究发现,不同基因型的水稻糙米硒含量差异显著,有色稻米硒含量极显著高于白色稻米,粳稻与籼稻硒含量也有一定的差异,但差异不显著。闽侯县种植的水稻品种主要有甬优、中浙优、野香优、昌两优等多个系列,本次采集的稻米均为甬优系列的籼粳杂交中稻品种。

表 9 闽侯县水稻主产区不同土壤硒分区稻米的富硒比例

Table 9 Selenium-enriched ratio of rice in different soil selenium subregions in the main rice-producing areas of Minhou County

土壤硒含量分区	稻米硒含量分区	闽侯县			全国		
		硒超标	富硒	不富硒	硒超标	富硒	不富硒
		$w(\text{Se}) \geq 0.3$	$0.04 \leq w(\text{Se}) < 0.30$	$w(\text{Se}) < 0.04$	$w(\text{Se}) \geq 0.3$	$0.04 \leq w(\text{Se}) < 0.30$	$w(\text{Se}) < 0.04$
边缘 $w(\text{Se}) \leq 0.175$	样本数	0	4	3	4	288	521
	比例/%	0	57.14	42.86	0.49	35.42	64.08
$0.175 < w(\text{Se}) \leq 0.4$	样本数	0	38	12	7	2027	1079
	比例/%	0	76	24	0.22	65.11	34.66
高 $0.4 < w(\text{Se}) \leq 3.0$	样本数	0	13	0	25	2419	533
	比例/%	0	100	0	0.84	81.26	17.90
过量 $w(\text{Se}) > 3.0$	样本数	0	0	0	8	4	2
	比例/%	0	0	0	57.14	28.57	14.29

姜超强等^[39]、黄太庆等^[40]的研究结果表明,总体上土壤中全硒含量越高,稻米硒含量也越高。这与本次闽侯县硒含量越高的土壤所产稻米富硒率越高的规律一致。付中彪等^[41]对赣南地区稻米与根系土硒含量的关系研究表明,稻米硒含量与土壤有效硒含量为显著正相关。可见土壤硒含量是影响稻米硒含量的重要因素之一。

稻米的硒含量不仅受到水稻品种、土壤硒含量的影响,还受到土壤理化性质、土壤质地、灌溉状况等多种因素的共同影响,其富集机理是极为复杂的^[42-44]。

3.3.3 稻米安全性评价

在开发利用富硒农产品时,必须保证农产品的

食用安全性。依据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)评价了研究区稻米安全性。70 件稻米样品中有 1 件无机砷含量超过国家食品限量标准(0.2×10^{-6}),其配套根系土 As 含量低于风险筛选值(优先保护类),该件稻米样品硒含量高达 0.162×10^{-6} ,为闽侯县稻米样品最高值;有 4 件稻米样品 Cd 含量超过国家食品限量标准(0.2×10^{-6}),其中 2 件样品的配套根系土 Cd 含量超过了风险筛选值(安全利用类),2 件样品配套根系土 Cd 含量低于风险筛选值(优先保护类)。重金属超标稻米中,有 4 件稻米达到了富硒标准(表 10)。可见闽侯县部分富硒稻米存在重金属超标风险。

表 10 闽侯县超标稻米硒含量、重金属含量情况

Table 10 Contents of selenium and heavy metals in over-standard rice in Minhou County

样点号	分布地区	稻米硒含量/ 10^{-6}	稻米超标重金属	稻米重金属含量/ 10^{-6}	根系土重金属含量/ 10^{-6}	根系土壤风险等级	富集系数
MHSD06	南通镇建南村	0.162	无机砷	0.248	9.580	优先保护类	0.026
MHSD03	青口镇东台村	0.117	Cd	0.757	0.486	安全利用类	1.558
MHSD08	竹岐乡榕中村	0.070	Cd	0.312	0.296	优先保护类	1.054
MHSD59	青口镇梅岭村	0.108	Cd	0.372	0.174	优先保护类	2.138
MHSD61	廷坪乡蕉溪村	0.039	Cd	0.337	0.493	安全利用类	0.684

注:根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定,土壤重金属含量低于或等于风险筛选值划分为优先保护类,高于风险筛选值且低于或等于风险管控值为安全利用类,高于风险管控值为严格管控类。

为了研究闽侯县稻米与根系土重金属含量相关性,计算了各种重金属含量与配套根系土中相应元素含量的相关系数及平均富集系数(表 11)。

可见,闽侯县稻米中 Hg、Cd 含量与根系土相应元素含量具显著正相关($P < 0.01$),As、Pb、Cr 含量与根系土相应元素含量的相关性不显著。稻米对根系土 Cd 的吸收率最高,平均富集系数高达 0.439,应当重点关注 Cd 含量较高的地块稻米 Cd 超标风险,保障农产品安全。

由表 10 可见,超标稻米样品 As、Cd 的富集系数明显高于研究区相应元素的平均富集系数,使得土壤环境风险等级为安全利用类甚至优先保护类区产生稻米重金属超标现象。闽侯县稻米对土壤重金属的富集系数与土壤有机质、pH 值的相关性见表 12,可见闽侯县稻米 Cd、Hg、Pb 的富集系数与根系土有机质含量呈显著负相关,Cr 富集系数与根系土 pH 值呈显著负相关,这一结果与相关研究结论一致^[45]。

表 11 闽侯县稻米重金属含量与根系土的相关性、富集系数

Table 11 Correlation and enrichment coefficient of heavy metal content in rice with root soil in Minhou County

元素	As	Cd	Hg	Pb	Cr
<i>r</i>	0.215	0.359 **	0.469 **	0.148	0.015
<i>q</i>	0.003	0.439	0.028	0.001	0.006

表 12 闽侯县稻米重金属富集系数与根系土理化指标的相关性

Table 12 Correlation between the enrichment coefficient of heavy metals in rice and the physical and chemical indexes of root soil in Minhou County

理化指标	As	Cd	Hg	Pb	Cr
有机质	-0.188	-0.353 **	-0.430 **	-0.237 *	0.095
pH	-0.163	0.088	0.036	-0.211	-0.304 *

3.4 天然富硒土地潜力区

2020 年以来,自然资源部中国地质调查局、中国地质学会共同推动天然富硒土地的划定与标识,对全国天然富硒土地进行官方认定,助力富硒土地的开发利用。根据《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DD 2019-10)的要求,土壤中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的含量均不高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中相应重金属元素的风险筛选值,且土壤硒含量 $\geq 0.4\times$

10^{-6} ($\text{pH}\leq 7.5$)或种植的农产品富硒比例大于 70% 的连片土壤方可划定为天然富硒土地。

结合县域调查发现的连片清洁富硒土壤、富硒稻米分布情况,将清洁土壤及稻米均达富硒标准的耕地划为 I 类潜力区,清洁土壤未达富硒标准但稻米富硒的耕地划为 II 类潜力区。全县共划分了 9 处天然富硒土地潜力区(图 2),统计了各个潜力区的分布范围、耕地面积、土壤硒含量平均值及农产品富硒情况见表 13。

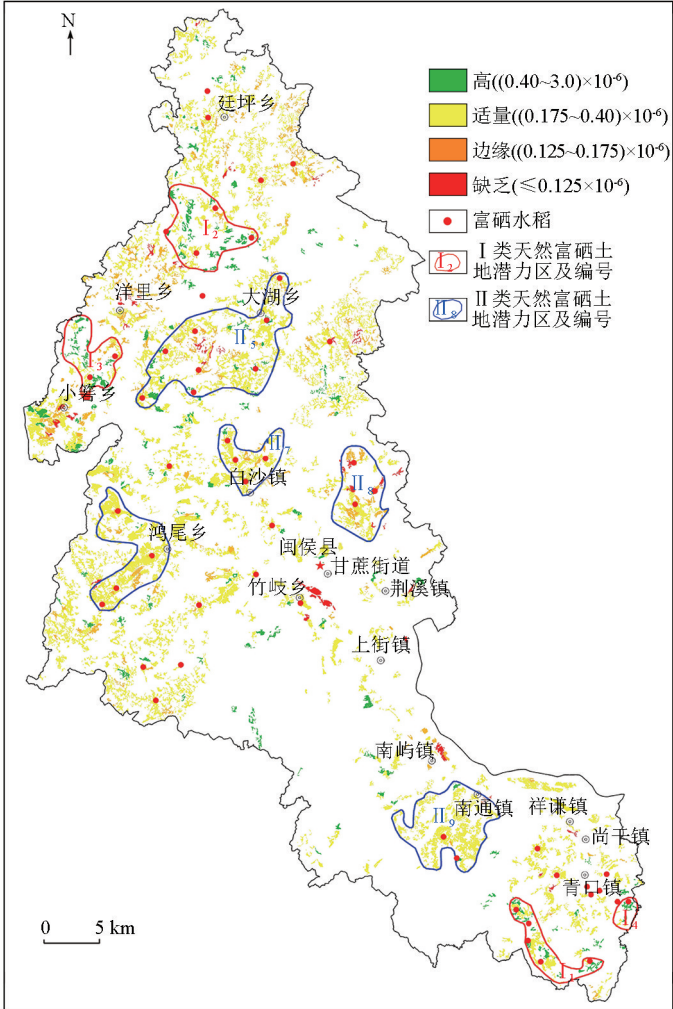


图 2 闽侯县硒元素地球化学等级及天然富硒土地潜力区分布

Fig.2 Geochemical grade of selenium element and distribution map of natural selenium-rich land potential area in Minhou County

表 13 闽侯县天然富硒土地潜力区

Table 13 Delimitation of potential areas of natural selenium-rich land in Minhou County

序号	分布范围	耕地面积/hm ²	土壤硒平均值/10 ⁻⁶	农产品富硒情况	潜力分类
1	青口镇西台村、东台村、青林村	63.60	0.412	5 件稻米均富硒	I
2	廷坪乡汶合村、大湖乡大池村、雪峰村、碾坑村、洋里乡刘洋村	90.15	0.539	4 件稻米均富硒	I
3	洋里乡友泉村、梧溪村、茶苑村、坪古洋村、小箬乡尚锦村	55.80	0.447	3 件稻米均富硒	I
4	青口镇青圃里村、青圃岭村	9.30	0.676	1 件稻米富硒	I
5	大湖乡东姚村等 10 个村及洋里乡洋头村	272.1	0.282	9 件稻米 8 件富硒	II
6	鸿尾乡垵头村、南下村、鸿尾村、桥头村、溪源村	221.1	0.255	5 件稻米 4 件富硒	II
7	白沙镇林炳村、新坡村、上寨村、溪头村、孔元村	87.45	0.250	4 件稻米均富硒	II
8	荆溪镇关东村、关西村、关中村、仁洲村	97.80	0.19	3 件稻米均富硒	II
9	南通镇大部及南屿镇尧沙村、桐南村、窗下村	169.95	0.324	2 件稻米均富硒	II

4 结论与建议

1) 闽侯县耕地和园地表层土壤硒含量以适量为主,平均值为 0.276×10^{-6} ,略低于全国 A 层土壤平均含量 0.29×10^{-6} 。

2) 闽侯县表层土壤硒含量受控于地质背景,晚侏罗世潜花岗岩斑岩分布区土壤硒含量明显高于其他地质背景区,同时受到地形地貌、土壤类型、土地利用方式等多种因素影响。这些影响因素具有空间耦合特征,共同决定了表层土壤硒含量特征。

3) 尽管闽侯县表层土壤硒含量总体仅达到适量水平,但稻米富硒率明显高于全国平均水平,富硒率达 78.6%,显示稻米是闽侯县有潜在优势的富硒农产品,具有较好的开发前景。农产品安全性评价表明,闽侯县个别稻米在富硒的同时存在重金属超标问题,在富硒稻米开发利用时应当注意重金属超标问题。

4) 建议对划定的天然富硒土地潜力区优选连片耕地进一步开展农田灌溉水水质等调查,结合地方产业规划积极申报天然富硒土地,助力乡村振兴发展。

参考文献 (References):

[1] 齐玉薇,史长义. 硒的生态环境与人体健康[J]. 微量元素与健康研究,2005,22(2):63-68.

Qi Y W, Shi C Y. Se ecological environment and human body health [J]. Research on Trace Elements and Health, 2005, 22 (2):63-68.

[2] 魏显有,刘云惠,王秀敏,等. 土壤中硒的形态分布及有效态研究[J]. 河北农业大学学报,1999,22(1):20-23.

Wei X Y, Liu Y H, Wang X M, et al. Study on the form distribution of selenium in soils and its available states [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 1999, 22(1):20-23.

[3] 谭见安. 环境生命元素与克山病:生态化学地理研究[M]. 北京:中国医药科技出版社,1996.

Tan J A. Environmental life elements and Keshan disease: A study

on ecological chemicoecography [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 1996.

[4] 秦俊法. 中国硒研究历史回顾(上)[J]. 广东微量元素科学, 2014, 21(11):44-57.

Qin J F. Historical review of selenium research in China (part 1) [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2014, 21(11):44-57.

[5] 尹昭汉,鞠山见,马晓丽,等. 硒(Se)的生物地球化学及其生态效应[J]. 生态学杂志,1989,8(4):45-50.

Yin Z H, Ju S J, Ma X L, et al. Biogeochemistry and ecological effect of selenium [J]. Chinese Journal of Ecology, 1989, 8(4):45-50.

[6] 崔剑波. 生态环境中的生命元素 Se 与健康的研究[J]. 生态学进展,1989,6(4):243-251.

Cui J B. Study on life element selenium and health in ecological environment [J]. Chinese Journal of Ecology, 1989, 6(4):243-251.

[7] 侯少范. 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,2000,19(2):134-140.

Hou S F. Change trend and factors of residential selenium nutrition status in low selenium belt in China [J]. Geographical Research, 2000, 19(2):134-140.

[8] 宫丽,马光. 硒元素与健康[J]. 环境科学与管理,2007,32(9):32-35.

Gong L, Ma G. The selenium elemental and health [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(9):32-35.

[9] 徐庆国,刘红梅,黄丰. 我国富硒农产品开发与推广的探讨[J]. 作物研究,2013,27(5):461-464.

Xu Q G, Liu H M, Huang F. Discussion on the development and extension of selenium-enriched agricultural products in my country [J]. Crop Research, 2013, 27(5):461-464.

[10] 傅嘉钰,覃帆,彭晓娜,等. 关于富硒农业与普通农业经济效益的对比研究[J]. 市场周刊,2020,32(65):12-13.

Fu J Y, Tan F, Peng X N, et al. Comparative study on economic benefits of selenium-rich agriculture and general agriculture [J]. Market Weekly, 2020, 32(65):12-13.

[11] 付强,王冬艳,李月芬,等. 吉林中部黑土区土壤硒元素土壤地球化学研究[J]. 世界地质,2014,33(1):1-10.

Fu Q, Wang D Y, Li Y F, et al. Pedogeochemical research on selenium in black soil areas of central Jilin Province [J]. Global Geology, 2014, 33(1):1-10.

[12] 福建省地质调查研究院. 中国区域地质志·福建志[M]. 北京:地质出版社,2016.

- Fujian Institute of Geological Survey. Regional geology of Fujian Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [13] 夏卫平, 谭见安. 中国一些岩类中硒的比较研究 [J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 125-131.
- Xia W P, Tan J A. Comparative study on selenium in some rocks of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(2): 125-131.
- [14] 张光弟, 葛晓立, 张绮玲, 等. 湖北恩施地区硒地质地球化学环境背景 [J]. 地球学报, 1998, 19(1): 59-67.
- Zhang G D, Ge X L, Zhang Q L, et al. Selenium geological and geochemical environmental background in Enshi of Hubei [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998, 19(1): 59-67.
- [15] 温汉捷, 裴愉卓, 凌宏文, 等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义 [J]. 沉积学报, 2003, 21(4): 620-626.
- Weng H J, Qiu Y Z, Ling H W, et al. Geochemistry and genesis of bedded cherts in some typical eopaleozoic high selenium black shales of China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(4): 620-626.
- [16] 田欢. 典型富硒区岩石—土壤—植物中硒的赋存状态及环境行为研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017: 53-57.
- Tian H. The occurrence state and speciation of selenium and its environmental behaviors in rock-soil-plant from typical high-selenium areas [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017: 53-57.
- [17] 方金梅. 福州市土壤硒形态分析及其迁移富集规律 [J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 103-107.
- Fang J M. Selenium speciation analysis and its transformation and enrichment in soils of Fuzhou City [J]. Rock and Mineral Analysis, 2008, 27(2): 103-107.
- [18] 王金达, 于君宝, 张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征 [J]. 地理科学, 2000, 20(5): 469-473.
- Wang J D, Yu J B, Zhang X L. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of loess plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(5): 469-473.
- [19] 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.
- Hu Y H, Wang J E, Cai Z H, et al. Content, distribution and influencing factors of selenium in soil of Jiashan area, Northern Zhejiang Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 84-88.
- [20] 王子健. 中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展 [J]. 环境化学, 1993, 12(3): 237-243.
- Wang Z J. Some Biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt [J]. Environmental Chemistry, 1993, 12(3): 237-243.
- [21] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征 [J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837-849.
- Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan island [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 837-849.
- [22] 廖金凤. 土壤粒级和酸度对硒吸附固定的影响 [J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(1): 46-49.
- Liao J F. Effects of soil separate and soil acidity on selenium absorption and fixation [J]. Guangdong Trace Elements Science, 1999, 6(1): 46-49.
- [23] 童建川. 重庆紫色土硒分布、迁移富集及影响因子研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2009: 36-38.
- Tong J C. The distribution, migration and enrichment law and influencing factors of selenium in purple soil of Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2009: 36-38.
- [24] 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.
- Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, et al. Hong Kong soil researches II. distribution and content of selenium in soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 404-410.
- [25] 张钟华, 季国松, 王小洪, 等. 贵州省桐梓县表层土壤硒地球化学特征及影响因素分析 [J]. 贵州地质, 2020, 37(3): 289-297.
- Zhang Z H, Ji G S, Wang X H, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in the topsoil of Tongzi County, Guizhou Province [J]. Guizhou Geology, 2020, 37(3): 289-297.
- [26] 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.
- Zhu J M, Liang X B, Ling H W, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 75-81.
- [27] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法 [J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319-336.
- Zhou G H. Research Progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 319-336.
- [28] 王秋营. 富硒红壤中硒与重金属关系及作物对硒的吸收规律研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016: 26-44.
- Wang Q Y. Study on the relationship of selenium and heavy metal and selenium uptake of crop in selenium-enriched red Soil [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016: 26-44.
- [29] 张华华, 康玉凡. 植物吸收和转化硒的研究进展 [J]. 山地农业生物学报, 2013, 32(3): 270-275.
- Zhang H H, Kang Y F. The advance in the uptake and transformation of selenium of plants [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2013, 32(3): 270-275.
- [30] 李瑜. 安康富硒土壤中不同农作物富硒能力比较研究 [J]. 陕西农业科学, 2015, 61(11): 13-14, 46.
- Li Y. Comparative study on selenium-enriching ability of different crops in Ankang selenium-enriched soil [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(11): 13-14, 46.
- [31] 林年丰. 医学环境地球化学 [M]. 长春: 吉林科技出版社, 1991.
- Lin N F. Medical environmental geochemistry [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991.
- [32] 李娜, 王旭, 万凯, 等. 硒对植物生长作用的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(9): 60-62.
- Li N, Wang X, Wan K, et al. Research progress on the effect of selenium on plant growth [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(9): 60-62.
- [33] 张迪, 李向民, 林中正, 等. 不同类型土壤栽培条件下外施硒对水稻含硒量的影响 [J]. 农业科技通讯, 2013(6): 57-59.
- Zhang D, Li X M, Lin Z Z, et al. Effects of external selenium application on selenium content in rice under different types of soil cul-

- tivation conditions [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2013(6): 57-59.
- [34] 成晓梦, 马荣荣, 彭敏, 等. 中国大宗农作物及根系土中硒的含量特征与富硒土壤标准建议 [J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1367-1372.
- Cheng X M, Ma R R, Peng M, et al. Characteristics of selenium in crops and roots in China and recommendations for selenium-enriched soil standards [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1367-1372.
- [35] 蒋彬. 水稻富硒基因型品种遴选 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2002(S1): 152-156.
- Jiang B. The select of variety in rice genotypic of rich in selenium [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2002(S1): 152-156.
- [36] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险 [J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112-115.
- Li Z W, Zhang Y L, Pan G X, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake [J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 112-115.
- [37] 王家伟, 陈雄波, 黄起东, 等. 不同水稻品种对硒的吸收转化试验 [J]. 农业工程, 2016, 6(4): 82-84.
- Wang J W, Chen X B, Huang Q D, et al. Test on absorption and transformation of selenium in different rice varieties [J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(4): 82-84.
- [38] 张标金, 史华新, 魏益华, 等. 高富硒水稻种质资源的筛选初报 [J]. 热带农业科学, 2018, 38(2): 52-55.
- Zhang B J, Shi H X, Wei Y H, et al. Screening of rice germplasm resources with high selenium content [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(2): 52-55.
- [39] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 809-816.
- Jiang C Q, Shen J, Zu C L. Selenium uptake and transport of rice under different selenium-enriched natural soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 809-816.
- [40] 黄大庆, 江泽普, 邢颖, 等. 水稻对外源硒的吸收利用研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 449-455.
- Huang T Q, Jiang Z P, Xing Y, et al. Effects of exogenous selenium on paddy rice growth, selenium uptake and accumulation [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 449-455.
- [41] 付中彪, 何宁洁, 鲍征宇, 等. 赣南地区水稻—根系土系统中硒含量影响因素分析 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 220-229.
- Fu Z B, He N J, Bao Z Y, et al. Analysis of influencing factors of selenium content in rice-root soil system in Southern Jiangxi [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 220-229.
- [42] Mikkelsen R L, Pang A L, Bingham F T. Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops [C] // Science Society of America, Special Publication, 1989, 23: 65-94.
- [43] Zhao F J, Lopez-Bellido F J, Gray C W, et al. Effects of soil compaction and irrigation on the concentrations of selenium and arsenic in wheat grains [J]. Science of Total Environment, 2007, 372: 433-439.
- [44] Ogaard A F, Sogn T A, Eich-Greatorex S. Effect of cattle manure on selenate and selenite retention in soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2006, 76(1): 39-48.
- [45] 周国华, 汪庆华, 董岩翔, 等. 土壤—农产品系统中重金属含量关系的影响因素分析 [J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(S1): 226-231.
- Zhou G H, Wang Q H, Dong Y X, et al. Factors affecting heavy metal concentrations in the soil-agricultural product system [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(S1): 226-231.

Selenium contents in surface soil and agricultural products in Minhou County

ZOU Shan-Jin-Hong

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

Abstract: Based on the evaluation data of agricultural geological surveys in Minhou County, Fujian Province, this study investigated the distribution of selenium contents in the surface soil of the cultivated land and garden plots in Minhou County and its major controlling factors. Moreover, it analyzed the selenium contents in agricultural products. The results are as follows. The selenium content in the surface soil is controlled by the geological setting. The areas with Late Jurassic concealed granite porphyries occurring have significantly higher soil selenium content than other areas. Moreover, different landforms, soil types, and land uses have certain effects on selenium content in the soil. Most of the agricultural products in the study area have low selenium content. The main selenium-rich crop is rice, which has a selenium accumulation rate of 78.6% according to the preliminary evaluation. However, some rice samples had excessive As or Cd content. Therefore, attention should be paid to the risk of excessive heavy metals in the development and utilization of selenium-rich rice. Based on the distribution of clean selenium-rich soil and the selenium-rich characteristics of agricultural products, this study determined nine potential areas of natural selenium-rich land in the study area.

Key words: Minhou County; selenium content; influencing factor; selenium-rich rice; natural selenium-rich land

(本文编辑: 蒋实)