

# 贵州典型富硒区农作物对硒的富集转运特征研究

蒲 帅<sup>1,2,\*</sup>, 钱晓莉<sup>1,2,\*</sup>, 毛 旭<sup>1,2</sup>, 王 琳<sup>1,2</sup>, 贺 宇<sup>1,2</sup>, 仇广乐<sup>3</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081)

**摘 要:** 选择典型富硒区——贵州省遵义市凤冈县西北部为研究区域, 以主要农产品水稻和茶叶为研究对象, 分析了不同农作物中总硒的含量, 以及根际土壤中总硒和有效硒的含量, 并探讨了农作物对硒的富集能力和迁移能力。结果表明: 研究区表层土壤中硒含量的平均值为 1.56 mg/kg, 属于典型富硒土壤。同时土壤中有有效态硒含量范围为 0.007 64~0.030 8 mg/kg, 只占到总硒含量的 0.5%~4.45%, 处于相对较低水平。研究区内, 影响硒生物有效性的主要因素为土壤总硒含量和土壤 pH 值, 土壤中总硒含量与硒的活化率呈显著负相关, 相关系数  $r = -0.492 (n = 106, P < 0.01)$ , 土壤 pH 与硒活化率呈显著正相关, 相关系数  $r = 0.413 (n = 106, P < 0.01)$ 。研究区农作物中, 水稻各部位的富集特征为: 根>籽实>茎, 水稻根系富集系数均值为 0.221, 分别是籽粒和茎平均值的 2.87、4.44 倍, 差异显著。茶叶的富集特征为: 老叶>新叶, 老叶和新叶的富集系数范围分别在 0.018 4~0.146 0 和 0.003 2~0.091 6 之间, 水稻籽实达到了富硒农产品标准(0.04~0.30 mg/kg), 但绝大部分茶叶样品的硒含量都不在富硒茶的范围(0.20~4.00 mg/kg)。

**关键词:** 总硒; 茶叶; 水稻; 富集; 转运

**中图分类号:** P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2023)06-0612-08 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2023.51.004

硒(Selenium, Se), 硒是一种在地壳中分布稀散的准金属元素, 在元素周期表中位于第四周期第 VI A 主族, 由于与硫属同族元素, 其地球化学性质与硫元素十分相似<sup>[1]</sup>。最初, 硒只被认为是一种对人体有害的元素, 直到 1973 年, 人们才发现硒是人体谷胱甘肽过氧化物酶(GSH2Px)的重要组成部分, 具有提高人体免疫力、抗氧化和防癌等生物学功能<sup>[2]</sup>。人们主要通过进食来满足人体对硒的营养摄入, 因此, 探究植物对土壤硒的富集转运特征对富硒植物的开发与生产具有重要的指导意义。影响植物对硒元素吸收的主要因素是硒在土壤中的含量及形态分布和植物本身的性质。硒在土壤中的含量和形态直接影响着植物的赋硒含量<sup>[3]</sup>。世界土壤硒分布极不均匀, 其含量范围在 0.01~2.0 mg/kg 之间, 均值为 0.4 mg/kg, 全球多个地区都存在硒缺乏的现象<sup>[4]</sup>。而土壤中主要存在有硒酸盐、亚硒酸盐、有机硒、元素硒等形式的硒, 植物能够吸收利用的主要是硒酸盐和亚硒酸盐。一般来说, 相比于

Se(IV), Se(VI) 更容易被植物吸收, 因为前者易被铁铝氧化物等矿物胶体吸附和固定, 进而一定程度上降低了硒的生物有效性<sup>[5]</sup>。植物种类的不同也会影响其对硒的吸收富集, Thiry 等<sup>[6]</sup>的研究发现, 蔬菜中总硒含量在 51~601 mg/kg, 而粮食作物的籽粒总硒含量却在 100 mg/kg 以内。梁帅等<sup>[7]</sup>在研究硒元素在土壤-植物系统中的迁移富集规律时发现, 黄豆和水稻富硒占比相比其他作物要高。对于同一植物, 不同部位的吸收能力也存在差异。一般来说, 作物非食用部分吸收硒的能力要高于可食用部分。

贵州省遵义市凤冈县是有名的富硒作物种植地, 被誉为“中国富锌富硒有机茶之乡”<sup>[8]</sup>。富硒资源丰富, 发展潜力巨大, 具备种植开发富硒农作物的土壤条件。而前人研究主要集中在土壤中总硒含量以及硒元素对人体健康的影响等方面<sup>[9]</sup>, 对于不同农产品对硒的富集能力和转移能力以及影响因素等研究相对薄弱。因此, 论文以该区域土壤-农作物为研究对象, 开展不同作物对土壤硒的富集

收稿日期: 2022-08-15; 改回日期: 2023-02-08

基金项目: 贵大人基合字(2019)06号。

第一作者简介: 蒲 帅(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤污染治理与生态修复。E-mail: 799021460@qq.com。

\* 通讯作者: 钱晓莉(1978-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土壤重金属汞污染的生态修复。E-mail: xiaoliroap2000@163.com。

和转运特征研究,并探讨影响硒生物有效性的因素,旨在为富硒区农产品的安全开发提供数据支撑和理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

凤冈县位于贵州省东北部,介于东经 107°31'20"~107°56'42"和北纬 27°32'13"~28°21'14"之间,被誉为“中国富锌富硒有机茶之乡”,目前全县茶园面积近 50 万亩。研究区位于凤冈县境内西北部,地形以丘陵、盆坝为主,平均海拔 945 m,年均气温 14.2 °C,属亚热带高原季风湿润气候区。研究区农作物主要以水稻、茶叶、马铃薯等为主,茶叶为该地区主要经济作物,其中田坝村现有茶园 4.4 万亩,通过有机认证的茶园 2 万余亩,是西南地区最大的有机茶生产基地<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样品采集与预处理

选择凤冈县西北部永安镇和绥阳镇辖区内的崇新村、田坝村、龙山村、金鸡村为采样区域,进行样品采集,共采集到 106 件土壤样品,以及对应的农作物(茶叶+水稻),并将茶叶分作老叶和新叶,水稻分作根、茎、叶。采样区域及地质背景如图 1、图 2 所示。

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 土壤总硒与植物总硒

参考高温密闭消解法<sup>[11]</sup>,采用 HNO<sub>3</sub>-HF(体积

比 3:1)混合酸高温消解土壤及作物,消解完全后,利用原子荧光光谱仪进行测定,样品测定过程中通过标准物质 GBW07405(Se 质量分数为(1.6±0.2)×10<sup>-6</sup>)对土壤样品进行质量控制,通过标准物质 GBW10194(Se 质量分数为(66±7)×10<sup>-9</sup>)控制植物实验质量,标准样品回收率均达到实验要求。同时做空白样以消除试剂影响。样品检测相对标准偏差绝对值小于 10%。

#### 1.3.2 土壤有效硒含量的测定

用 10 mL 0.5 mol/L 的磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)对土样进行浸提<sup>[12]</sup>。浸提完成后,用原子荧光光谱仪测定,同时做空白样以消除试剂影响。样品检测相对标准偏差绝对值小于 10%。

#### 1.3.3 土壤理化参数的分析

土壤 pH 值采用 pH 计测定,土液比为 1:5(v/w);土壤有机质含量采用重铬酸钾法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提原子吸收法测定;方法的具体步骤参见《土壤农化分析》。

### 1.4 数据作图与处理

采用变异系数(Coefficient of Variation, CV)评价数据的离散程度,其计算方法为:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 表示样本的标准偏差, $\mu$ 表示样本均值。

采用生物富集系数(bioconcentration factor,

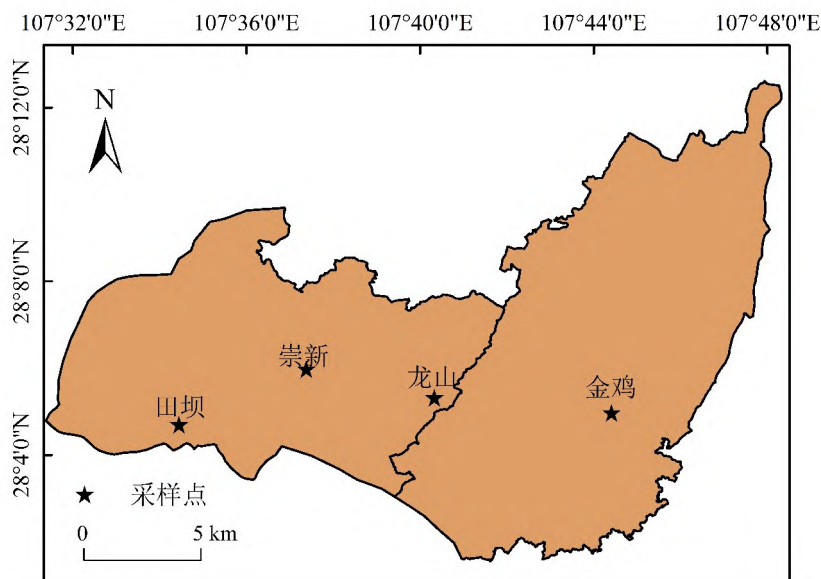


图 1 采样点位置示意图

Fig. 1 Map of the study area and sampling sites

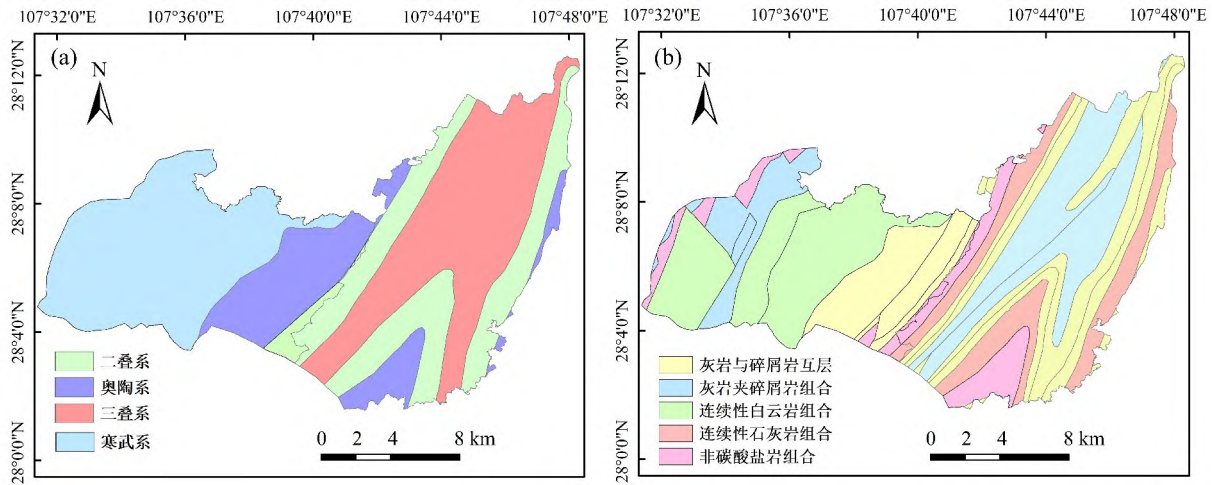


图2 研究区地层岩性图

Fig. 2 Stratigraphic lithology map of the study area

BCF)评价作物中的硒富集程度,其计算方法为:

$$\text{富集系数} = \frac{\text{植物地上部分某元素含量}}{\text{根限土壤该元素含量}} \times 100\% \quad (2)$$

采用活化率(activation rate)评价硒在土壤中的生物有效性,其计算方法为:

$$\text{活化率} = \frac{\text{土壤有效态硒含量}}{\text{土壤总硒含量}} \times 100\% \quad (3)$$

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对土壤硒含量、有效硒含量、理化性质与植物硒含量进行方差分析和相关性分析,利用 ArcGIS 10.1 和 Origin 2021 作图,其他数据用 Excel 2010 软件进行处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 根际土壤总硒含量

统计研究区农田土壤的硒含量(表1),硒含量范围 0.52 ~ 2.91 mg/kg,均值 1.56 mg/kg,是世界土壤硒含量(0.4 mg/kg)的 3.9 倍,是我国农田土壤表层硒含量(0.217 mg/kg)的 7.2 倍<sup>[13]</sup>,是贵州耕地土壤硒含量(0.482 mg/kg)的 3.2 倍<sup>[14]</sup>,土壤硒含量样品处于足硒和富硒水平。根据我国 Se 元素生态景观界限值标准,土壤硒含量界限值划分为

5 个等级,分别为缺硒 (< 0.125 mg/kg)、少硒 (0.125~0.175 mg/kg)、适量 (0.175~0.40 mg/kg)、高硒 (0.40~3.0 mg/kg)、过剩 ( $\geq 3.0$  mg/kg)<sup>[15]</sup>。由此研究区土壤硒含量样品均处于高硒水平。

为了反映变量数据的离散程度,采用变异系数来描述硒在土壤中的分布特征,当  $CV < 10\%$  为弱变异性,  $10\% < CV < 100\%$  为中等变异性,  $CV > 100\%$  为强变异性,当变异系数值越大,则表示其空间分布越不均匀。从表 1 可以看出,各村样品的变异系数都不大,不属于强变异,说明研究区内土壤硒的分布较为均匀,元素含量变幅较小。不同村之间土壤 Se 含量表现出差异性,其平均含量的大小顺序表现为田坝村>金鸡村>崇新村>龙山村。

成土母质被认为是影响土壤总硒含量的最主要因素,土壤依赖于成土母质来提升硒含量<sup>[16]</sup>。高硒地区的成土基岩一般为沉积岩<sup>[17]</sup>。研究区岩石类型主要是以寒武系、奥陶系、二叠系、三叠系地层出露的灰岩、碎屑岩、白云岩为主。其中,寒武系地层出露的白云岩、灰岩所形成的土壤硒含量最高。前人研究表明,富硒成土母质主要为硅质页岩和炭质页岩,我国的恩施和紫阳即为典型的高硒炭质页岩类土,其次为长兴灰岩和玄武质火山岩。魏泽权

表1 研究区不同村的土壤样本数据描述性统计

Table 1 Statistics of soil sample data from different villages in the study area

采样点	样本数/件	平均值/(mg/kg)	范围/(mg/kg)	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
金鸡村	40	1.68	0.52~2.91	0.63	-0.35	-1.04	38
田坝村	21	1.75	1.29~2.34	0.31	0.09	-0.87	18
龙山村	24	1.31	0.91~1.78	0.22	-0.01	-0.38	17
崇新村	21	1.42	1.11~1.72	0.20	-0.19	-1.46	14

等<sup>[18]</sup>在调查遵义地区耕地土壤硒含量分布规律时发现,白云岩、灰岩为母质的耕地土壤,硒含量为中上水平。因此本研究区域土壤的成土母质能够为富硒土壤的形成提供客观条件。

## 2.2 土壤有效态硒的含量

土壤有效硒含量为 0.007 64~0.030 8 mg/kg, 平均值和中位数分别为 0.016 3 mg/kg 和 0.016 1 mg/kg。有效态硒与总硒的分布呈现明显的差异性,总硒含量高的采样点有效硒含量不一定高。为了能够直观地揭示土壤硒的有效程度和反映土壤的供硒能力,本文引用了活化率指标。活化率是指土壤有效硒含量在总硒含量中的占比,其范围为 0.5%~4.45%,平均值和中位数分别为 1.14% 和 0.99%。与中国其他富硒地区相比,如福建省大田县茶园土壤硒的活化率均值为 20.23%<sup>[19]</sup>,湖北恩施地区富硒土壤硒活化率均值为 14.14%,紫阳富硒核心区土壤硒活化率均值为 2.99%<sup>[20]</sup>。研究区农田土壤中有有效硒比率明显处于较低水平,这可能也是研究区作物不富硒的原因之一。对土壤硒活化率作频数分析可知,其小于 1% 的样本有 55 个,占样品总数的 51.9%,在 1%~2% 范围的样品有 44 个,占样品总数的 41.5%;大于 2% 范围的样品仅有 7 个,仅仅占样品总数的 6.6%。由此可见,虽然研究区土壤富硒,但土壤有效硒含量及硒活化率偏低,因此存在较大的提升空间。

水田旱地两种土壤利用类型的硒活化率呈现明显的差异性,茶叶土壤的有效性相比于水稻土壤普遍偏低,水稻土壤活化率分别为金鸡村 2.03%、崇新 1.22%、龙山 1.17%,而其茶叶土壤则分别为金鸡 0.82%、龙山 0.90%、崇新 0.97%、田坝 1.06%。这可能是因为土壤耕作方式不同而造成的。有研究表明,水分条件变化频繁是水田区别于旱地的最大特点,干湿交替循环的土壤环境促进了水田土壤中硒的活化,使得土壤中的硒向有效性更高的可溶态和可交换态转化<sup>[21]</sup>。水田相对于旱地还有着更强的累积有机质的能力,有机质会促进土壤中游离态硒的释放<sup>[22]</sup>,从而提高硒的生物有效性。

## 2.3 土壤有效硒的影响因素

土壤中硒的生物有效性是指土壤有效硒与总硒的比值,硒在土壤中的有效形态及总硒含量共同决定着土壤硒元素生物有效性,而土壤总硒含量高的地区,有效硒含量不一定高,故本研究选用土壤

有效硒的活化率来揭示各影响因子对土壤硒有效性的影响程度,并选择土壤理化性质、总硒含量作为影响因子与富硒区土壤硒的活化率进行相关性分析,探究其对土壤中硒的生物有效性的作用效果。将土壤硒的活化率与土壤理化性质和总硒含量作相关分析,结果见表 2。

表 2 土壤硒活化率与理化性质和总硒相关系数统计  
Table 2 Correlation coefficient of soil selenium activation rate with physical and chemical properties as well as total selenium concentration

项目	活化率	pH	有机质	速效钾	总硒
活化率	1				
pH	0.413 **	1			
有机质	0.037	0.144	1		
速效钾	-0.019	0.059	0.202 *	1	
总硒	-0.492 **	0.459 **	0.34	0.106	1

注: \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ ), \* 表示显著相关( $P < 0.05$ )。

根据硒在土壤中的溶解性、移动性和有效性大小,可将硒分为可溶态、交换态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态五种形态<sup>[23]</sup>。水溶态和交换态以及部分有机态可被称为有效态硒,是植物最易吸收利用的形态<sup>[24]</sup>。通过对研究区 106 件表层土壤样品中硒的活化率与总硒含量的相关性分析发现,硒活化率与总硒含量呈显著负相关,相关系数  $r = -0.492$  ( $n = 106, P < 0.01$ ),随着土壤中总硒含量的增加,硒的活化率反而降低了。这说明总硒含量高的土壤,其生物有效性不一定高。它还受到其他土壤理化性质的制约。因此,土壤全硒含量一般不能很好地反映土壤对植物的供硒水平,还需要结合其它因素进行分析。

土壤 pH 可以影响土壤氧化物、有机质和粘粒矿物对土壤硒的吸附,从而影响硒元素的生物有效性<sup>[25]</sup>。为了进一步地了解研究区的土壤酸碱度情况,本文对土壤 pH 值作分段统计,结果见表 3。pH 在 5.0 以下为强酸性土,供试土壤样品占比 43.40%;40.57% 土壤 pH 在 5.0~6.5,为酸性土;15.09% 样品 pH 在 6.5~7.5,为中性土;仅有 0.94% 土样 pH 在 7.5~8.5,属于碱性土。从表 3 中可以看出,随着 pH 的降低,硒的活化率也随之降低。研究区供试土壤类型为淹水期水稻土和茶土,水稻土一般呈弱酸性或中性,茶土为酸性土,部分点位土壤呈碱性原因可能与土壤管理方式有关。整体而言,研究区土壤的酸性较强。

表3 土壤pH值频数分布与硒活化率关系表

Table 3 Relationship between pH frequency distribution and selenium activation rate in soils

土壤性质	强酸性	酸性	中性	碱性
pH值	<5.0	5.0~<6.5	6.5~<7.5	7.5~<8.5
样品数/件	46	43	16	1
占比/%	43.40	40.57	15.09	0.94
硒活化率均值/%	0.9	1.2	1.3	4.5

将活化率与土壤pH值进行相关性分析,发现土壤中硒的活化率与pH值呈显著正相关,相关系数 $r=0.413$ ( $n=106, p<0.01$ ),硒的活化率随着土壤pH值升高而升高,这与前人的研究一致。处于碱性条件时,亚硒酸盐将会转换为硒酸盐,从而提高了硒的生物有效性<sup>[26]</sup>。

土壤有机质是土壤的重要组成成分,其含量是体现土壤肥力的重要指标之一,动植物及微生物残体是有机质的主要来源<sup>[27]</sup>。土壤有机质不但能影响土壤渗透性、吸附性等理化性质,还可以与土壤中的一些元素形成络合物从而影响元素的形态转化及其在土壤中的迁移活动<sup>[28]</sup>。对研究区农用表层土壤有机质含量进行统计分析,其平均值为4.92%,变化范围较大,为0.94%~15.20%,变异系数为46%,属于中等变异程度。参照《全国第二次土壤普查养分分级标准》中有机质的分级标准,明确土壤有机质含量特征,等级分布占比(表4)。供试土壤有机质含量总体较丰富,大多处于1、2和3级,60.38%的样品为1级水平,从表中可看出硒活化率的变化趋势是随有机质的降低而逐渐减少的。这可能是因为土壤中有有机质的矿化会引起部分有机结合态硒转化为可溶态和可交换态硒,在一定程度上提高土壤中有效硒的含量<sup>[29]</sup>。有相关研究表明,土壤有机质组成成分中的富啡酸比例越高,有效性硒含量越高,当胡敏酸比例升高时,有效性硒含量则降低<sup>[30]</sup>,说明土壤硒的生物有效性不仅与土壤有机质含量高低有关,而且与有机质的组成有关。

本研究对土壤有机质与硒活化率进行了相关

表4 土壤有机质含量频数分布与硒活化率关系表

Table 4 Relationship between frequency distribution of soil organic matter and selenium activation rate

有机质含量/%	分级	样品数/件	占比/%	硒活化率均值/%
>4	1	64	60.38	1.2
3~4	2	22	20.75	1.1
2~3	3	15	14.15	1.0
1~2	4	4	3.77	0.8
0.6~1	5	1	0.94	1.2

性分析,结果显示土壤硒的活化率随着有机质含量的增加而升高,这与谢薇等<sup>[31]</sup>对天津市蓟州富硒区土壤硒有效性的调查研究结果一致。出现这一现象可能与土壤微生物生理代谢活动或土壤有机质对硒的活化作用有关<sup>[32]</sup>。而本研究中土壤硒活化率与有机质的相关性并不显著,可能是因为土壤有机质对土壤硒生物有效性的影响复杂,土壤硒有效性受有机质含量和组成的双重制约,一方面土壤有机质可与硒形成有机金属化合物而降低土壤硒的生物有效性,另一方面有机结合态硒又是有效态硒的潜在来源<sup>[33]</sup>。

## 2.4 水稻与茶叶硒的含量分布特征

### 2.4.1 水稻

本文采集了研究区的主要农作物(水稻、茶叶),对其硒含量进行测定。水稻分为根、茎、籽实,水稻根系平均硒含量较高,为0.2036 mg/kg,范围介于0.0695~0.3650 mg/kg之间,籽粒次之,其硒含量集中在0.0757 mg/kg,变化范围为0.0420~0.1760 mg/kg,茎硒含量最低,范围在0.0015~0.1535 mg/kg之间,均值仅为0.0550 mg/kg。根据国家现行富硒水稻标准界限(0.04~0.3 mg/kg),对水稻籽粒硒含量分布进行等级评级,其100%的样本达到富硒水平,未出现硒超标稻谷。

根据本次水稻样品硒测定结果,结合本课题组同步测定的土壤硒含量,计算了各采样点水稻对硒的富集系数,结果如图3a所示。水稻根系富集能力远高于籽粒和茎,其平均富集系数为0.221,分别是籽粒和茎的2.87倍和4.44倍,且系数范围存在较大的变化区间,最大可达68.9%,最小仅为5.7%。说明同一采样区域水稻富集能力也存在较大差异,这可能是土壤中可利用硒含量存在空间差异所致。

### 2.4.2 茶叶

茶叶分为新叶和老叶,新叶硒含量均值为0.0687 mg/kg,范围介于0.0055~0.1835 mg/kg之间,老叶的含量普遍比新叶高,其硒含量范围为0.0265~0.3320 mg/kg,平均值为0.1118 mg/kg。我国茶叶富硒标准规定:茶叶硒含量在0.20~4.00 mg/kg范围内的,可称为富硒茶。对茶叶硒含量分布进行等级评级,绝大部分茶叶样品未达到富硒标准。可见,研究区茶园土壤的硒生物有效性还不够高,而土壤硒的活化率偏低是其主要原因之一。目前添加土壤调理剂和外源添加硒是增加土壤硒生

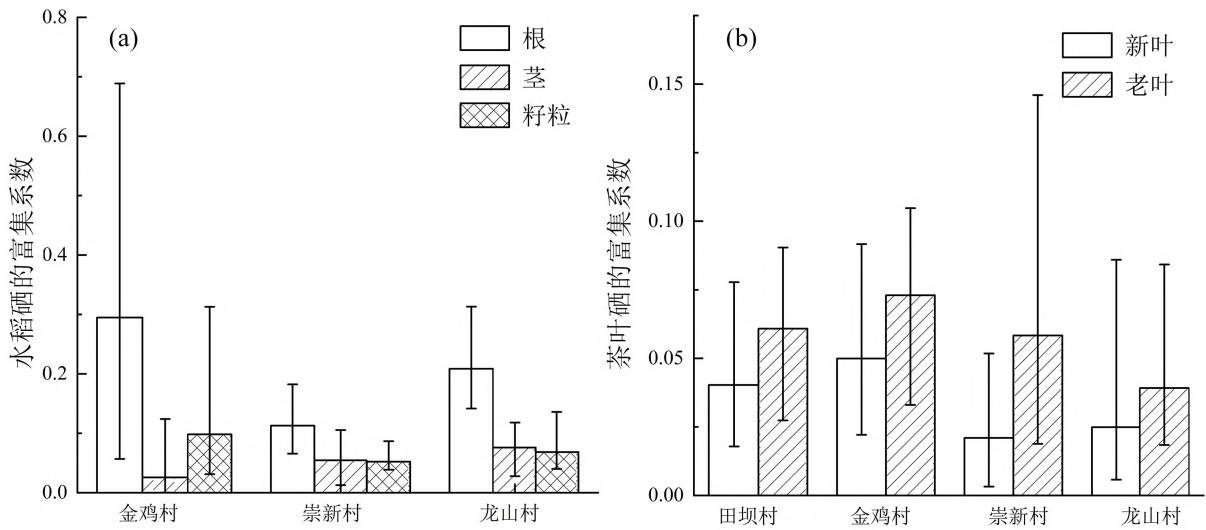


图 3 茶叶和水稻各部位硒的富集系数  
Fig. 3 Enrichment coefficient of selenium in tea and rice

物有效性的主要方式<sup>[34]</sup>,而长期施加硒肥会对环境以及人体健康造成潜在风险<sup>[35]</sup>,添加土壤改良剂的方法相对安全。张志敏等<sup>[36]</sup>通过施加粉煤灰、生物炭和磷矿粉,研究其对土壤硒的生物有效性的影响。结果表明,3种添加剂均可不同程度提高土壤中硒的生物有效性。因此,选择什么样的土壤改良剂需要因地制宜,本研究区茶园土壤酸化现象较严重,可以通过改良土壤酸化程度提高pH,增加土壤有效硒水平,从而提高农作物硒含量。

对采样区域茶老叶的富集系数做分析,结果如图3b所示。老叶的富集系数为0.0184~0.1460,

均值为0.0610;崇新村为0.0188~0.1460,均值为0.0584;龙山村为0.0184~0.1460,平均值为0.0392,其富集能力处于较低水平;田坝村平均为0.0274~0.0904,金鸡村富集系数的范围区间为0.0330~0.1048。从新老叶富集系数来看,老叶对硒的富集能力总是强于新叶。前人研究发现,随着茶树叶片的成熟老化,体内的硒会向结合态转变,逐渐形成不易流动的大分子硒蛋白<sup>[37]</sup>。这可能是导致新老茶叶对土壤硒富集能力表现不同的主要原因。

#### 2.4.3 水稻与茶叶硒富集规律差异分析

茶树中老叶和新叶硒含量算术平均值分别为

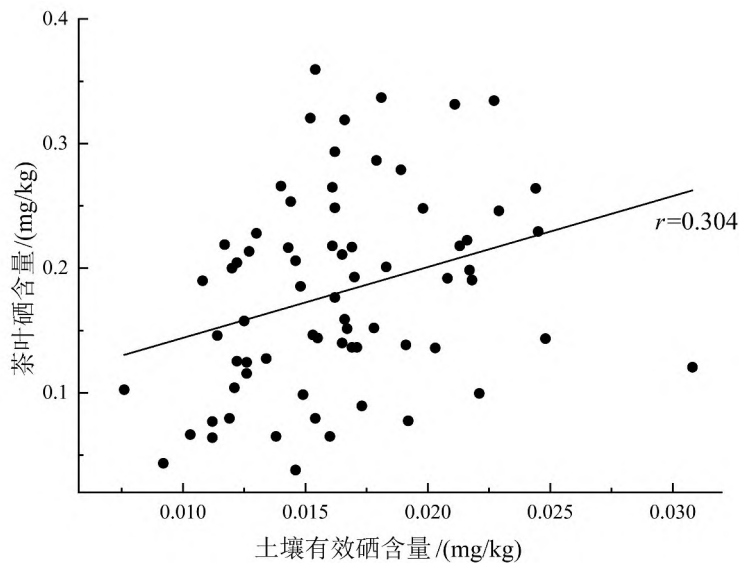


图 4 土壤有效硒含量与茶叶硒含量相关性图

Fig. 4 Correlation between bioavailable selenium content in soils and tea selenium content

0.112 和 0.069 mg/kg, 水稻籽实硒含量平均值为 0.076 mg/kg。总体来看, 茶树可食部分的硒含量要高于水稻, 前人研究表明, 农作物一般比蔬菜作物等对硒的吸收能力相对要低一些, 农作物含硒量顺序一般为: 油菜籽>大豆>小麦>稻谷>蚕豆<sup>[38]</sup>。而不同类型蔬菜可食用部分富硒能力依次为: 葱蒜类>白菜类>绿叶菜类>豆类>瓜类>薯芋类>茄果类<sup>[39]</sup>。硒被植物摄入的途径主要是转运蛋白的吸收和转运<sup>[40]</sup>, 因此茶树体内积累的硒含量高于水稻的原因可能是它们的转运蛋白具有不同的选择性和转运能力。

通过对研究区茶叶样品中硒的含量与对应土壤中有效态硒含量的相关性分析发现, 茶叶(老叶+新叶)与土壤的有效态硒含量呈显著正相关, 相关系数  $r=0.304$  ( $n=70, P<0.05$ ), 如图 4 所示, 茶叶的硒含量随着土壤中有效态硒含量的升高而升高。而水稻籽实硒含量与土壤中有效态硒含量并无显著的相关性。

### 3 结论

1) 研究区表层农田土壤中硒含量的平均值为 1.56 mg/kg, 明显高于我国表层土壤硒含量平均值, 属于典型富硒土壤, 具有很大的硒农业发展潜力。

土壤有效硒含量为 0.007 64~0.030 8 mg/kg, 仅占总硒含量的 0.5%~4.45%, 有效性较低。两种土地利用类型中, 水稻田土壤的硒活化率均值(1.49%)比茶园土壤(0.96%)的高。

2) 研究区内, 影响硒生物有效性的主要因素为土壤总硒含量和土壤 pH 值。总硒含量与硒的活化率相关系数为  $r=-0.49$  ( $n=106, P<0.01$ ), 呈显著负相关, 硒的活化率随土壤总硒的升高而降低。土壤 pH 与硒活化率呈显著正相关, 相关系数  $r=0.413$  ( $n=106, P<0.01$ ), 与前人研究结果一致。土壤有机质含量为 0.94%~15.20%, 其与土壤硒的活化率相关性并不显著。

3) 研究区采集的农作物中, 水稻各部位的富集特征为: 根>籽实>茎, 根系富集系数均值为 0.221, 分别是籽粒和茎平均值的 2.87、4.44 倍, 差异显著。茶叶的富集特征为: 老叶>新叶, 老叶和新叶的富集系数分别在 0.018 4~0.146 0 和 0.003 2~0.091 6 之间。水稻籽实皆达到了富硒产品标准(0.04~0.30 mg/kg), 而茶叶样品绝大多数都未达到富硒标准(0.20~4.00 mg/kg)。

4) 研究区内茶园土壤中硒的生物有效性较低, 可以通过施加碱性土壤改良剂等手段, 调控土壤的酸碱性, 以提高硒元素的生物有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 申兰芹. 硒元素的发现与应用[J]. 化学世界, 2009, 50(8): 511-512.
- [2] Rayman M P, Rayman M P. The argument for increasing selenium intake[J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 2002, 61(2): 203-215.
- [3] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [4] Fordyce F. Selenium geochemistry and health[J]. Ambio, 2007, 36(1): 94-97.
- [5] 司振兴, 梁郅哲, 钱建财, 等. 植物对硒的吸收、转运及代谢机制研究进展[J]. 作物杂志, 2022:1-11.
- [6] Thiry C, Ruttens A, De Temmerman L, et al. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 767-784.
- [7] 梁帅, 朱建新, 戴慧敏, 等. 黑龙江拜泉地区硒元素在土壤-植物系统中的迁移富集规律[J]. 地质与资源, 2021, 30(4): 456-464, 478.
- [8] 黄俊明, 熊玉唐, 曾涛, 等. 贵州省优质稻产业发展现状及对策[J]. 耕作与栽培, 2018(4): 42-47, 33.
- [9] 潘年松, 刘英波, 张学愈, 等. 凤冈锌硒茶中锌硒含量调查与启示[J]. 中国西部科技, 2015, 14(1): 12, 15.
- [10] 杨武红. 凤冈县田坝有机茶叶生产示范园区耕地土壤养分地球化学特征[J]. 冶金管理, 2020(9): 104, 135.
- [11] 朱建明, 李璐, 秦海波, 等. 高压密闭罐溶样-氢化物原子荧光法测定环境样品中的硒[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 187-190.
- [12] 许海钊. 广西硒高背景区土壤-稻米系统中硒相互关系及其生物有效性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [13] 王锐, 余涛, 曾庆良, 等. 我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 359-366.
- [14] 蔡大为, 李龙波, 任明强, 等. 贵州省土壤硒含量背景值研究[J]. 地球与环境, 2021, 49(5): 504-509.
- [15] 李海蓉, 杨林生, 谭见安, 等. 我国地理环境硒缺乏与健康研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 381-386.
- [16] 刘永贤, 陈锦平, 潘丽萍, 等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1139-1144.
- [17] 李金峰, 聂兆君, 赵鹏, 等. 土壤-植物系统中硒营养的研究进展[J]. 南方农业学报, 2016, 47(5): 649-656.
- [18] 魏泽权, 陈云明, 郭宇, 等. 贵州遵义地区硒在耕地土壤及农作物中的分布规律[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 642-649.
- [19] 陈玉真, 单睿阳, 王峰, 等. 天然硒在茶园土壤-茶树-茶汤中吸收转运特征[J]. 茶叶学报, 2019, 60(3): 106-113.

- [20] 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, 2017.
- [21] 翟辉. 水分和有机质对土壤硒形态转化的影响机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [22] 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.
- [23] Wang S S, Liang D L, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 159–164.
- [24] 诸旭东. 酸性富硒土壤中硒有效性的内源调控技术及其应用效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [25] 牛忠磊, 王建, 李本玉. 山东省淄博市淄川区土壤硒水平影响因素分析[J]. *黑龙江农业科学*, 2020(9): 53–56.
- [26] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 等. 江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 355–359.
- [27] 伍正菊, 黎玉国. 永胜县耕地土壤有机质含量及丰缺状况分析[J]. *农业与技术*, 2014, 34(2): 25.
- [28] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2011, 34(4): 82–87.
- [29] 唐沫岚, 范博伦, 姚凌阳, 等. 土壤—作物系统中硒的地球化学特征及影响因素研究(代序2)[J]. *贵州地质*, 2020, 37(4): 417–424.
- [30] 文雄, 罗沐欣键, 柴冠群, 等. 土壤硒的生物有效性及调控技术研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(21): 11–14.
- [31] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及其影响因素[J]. *环境化学*, 2019, 38(10): 2306–2316.
- [32] Natasha, Shahid M, Niazi N K, et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 915–934.
- [33] 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.
- [34] 姚欢, 宗良纲, 孟蝶, 等. 增施磷肥对提高强酸性高硒茶园土壤硒有效性的效果[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(4): 288–293.
- [35] 刘聪. 中国农业化肥面源污染的成因及负外部性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [36] 张志敏, 晁旭, 郑小锋. 添加改良剂对土壤中硒的生物有效性的影响[J]. *江苏科技信息*, 2020, 37(22): 43–45.
- [37] 周超, 胡玉荣, 曾建明, 等. 土壤因子对茶树硒吸收特性的影响[J]. *茶叶科学*, 2015, 35(5): 429–436.
- [38] 谢斌, 吴文良, 郭岩彬, 等. 作物富硒研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(1): 15–18.
- [39] 黄凯丰, 时政, 冯健瑛. 富硒蔬菜的研究现状[J]. *长江蔬菜*, 2011(10): 14–17.
- [40] 王丽霞. 硒元素的植物生理作用及生理机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(1): 31–32, 47.

## Selenium Enrichment and Transport in Crops from Typical Selenium-rich Areas in Guizhou Province

PU Shuai<sup>1,2</sup>, QIAO Xiaoli<sup>1,2</sup>, MAO Xu<sup>1,2</sup>, WANG Lin<sup>1,2</sup>, HE Yu<sup>1,2</sup>, QIU Guangle<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University,

Guiyang 550025, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** To explore the impact of the crops on selenium (Se) enrichment and migration, total Se contents in the major agricultural products, i. e. rice and tea, as well as total and bioavailable Se contents in rhizosphere soils from a typical Se-rich area, northwestern Fenggang County, Zunyi City, Guizhou Province were investigated. The surface soil from the investigated area had a mean Se content of 1.56 mg/kg, which is a typical Se-rich soil. Meanwhile, the bioavailable Se content in the soil ranged from 0.007 64 to 0.030 8 mg/kg, which only accounted for 0.5% to 4.45% of the total Se content and was at a relatively low level. The major factors affecting the Se bioavailability were soil total Se content and soil pH value. Soil activation rate correlated negatively with soil total Se ( $r = -0.492$ ,  $n = 106$ ,  $p < 0.01$ ) but positively with soil pH ( $r = 0.413$ ,  $n = 106$ ,  $p < 0.01$ ). The Se enrichment in different parts of rice were generally in the order of root > seed > stem. The enrichment coefficient of rice root averaged 0.221 which was respectively 2.87 and 4.44 times higher than those of grain and stem. The Se enrichment of tea leaves was in the order of old > new leaves and the Se enrichment coefficient of old and new tea leaves ranged respectively from 0.018 4 to 0.146 0 and 0.003 2 to 0.091 6. The rice grain met the standard for Se-rich agricultural products (0.04–0.30 mg/kg), whereas the vast majority of tea samples investigated were not in the range of Se-rich tea (0.20–4.00 mg/kg).

**Key words:** total selenium; tea leaf; rice; enrichment; migration