

南方红壤区典型母质发育土壤硒素特征及影响因素^①

潘丽萍^{1,2,3}, 江泽普^{1,2,3}, 廖青^{1,2,3}, 陈锦平^{1,2,3}, 黄太庆^{1,2,3}, 刘永贤^{1,2,3}, 邢颖^{1,2,3*}

(1 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2 广西富硒农业研究中心, 南宁 530007; 3 广西耕地保育重点实验室, 南宁 530007)

摘要: 为探究南方红壤区不同母质土壤硒素特征及理化性质对硒有效性的影响, 以广西典型红壤区不同母质土壤为研究对象, 通过测定硒形态特征及理化性质, 并利用 AMOS 路径分析模型及土壤培养试验, 量化了不同因子对不同母质土壤有效硒的影响。结果表明: 南方红壤区不同母质土壤总硒含量均高于 0.4 mg/kg, 其中以花岗岩母质土壤总硒含量最高, 以砂页岩母质土壤有效硒含量最高, 且变幅最大。土壤硒形态主要以残渣态和有机结合态为主, 不同形态硒含量由高到低均表现为: 残渣态硒>有机结合态硒>铁锰氧化物结合态硒>交换态硒>可溶态硒。AMOS 路径分析模型结果表明, 影响不同母质土壤硒形态分配贡献的主要因素是全磷、有机质和 pH, 第四纪红色黏土母质土壤中的全氮及砂页岩母质土壤中的速效氮的影响也值得关注。利用贡献较大的理化因子开展土壤培养试验, 外源理化因子添加后均在一定的时间及剂量条件下出现土壤有效硒含量最大值, 且不同母质土壤获得的最佳因子条件不同。因此, 不同土壤母质因土壤理化性质的不同, 其硒形态特征存在较大差异, 不同理化因子作用于土壤后, 土壤硒会因土壤环境的变化而重新分配。

关键词: 南方红壤; 不同母质; 土壤硒; 有效硒; 硒形态

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Characteristics and Influencing Factors of Selenium (Se) in Red Soils Derived from Typical Parent Materials in Southern China

PAN Liping^{1,2,3}, JIANG Zepu^{1,2,3}, LIAO Qing^{1,2,3}, CHEN Jinping^{1,2,3}, HUANG Taiqing^{1,2,3}, LIU Yongxian^{1,2,3}, XING Ying^{1,2,3*}

(1 Agricultural Resource and Environmental Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2 Selenium Enriched Agriculture Research Center of Guangxi, Nanning 530007, China; 3 Guangxi Key Laboratory of Arable Land Conservation, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to understand Se characteristics and their influence physicochemical properties of red soils derived from different parent materials in southern China, soil samples were collected from the typical red soils of Guangxi, the contents of total Se, available Se and different Se forms were determined, and their influence factors were explored through the AMOS path analysis model and soil culture experiment. The results showed that soil total Se content was higher than 0.4 mg/kg, which was the highest in red soil derived from granite, while available Se content was the highest and with the largest variation in red soil derived from sand shale. Se was mainly in forms of Se bound to organic matter and residual Se, and the contents of different Se forms from high to low were as follows: residual Se > Se bound to organic matter>Se bound to iron and manganese oxides >exchangeable Se >soluble Se. The results of AMOS path analysis showed soil total phosphorus, organic matter and pH contributed more to the distribution of Se forms. The influences of total nitrogen in red soil derived from quaternary red clays and available nitrogen in red soil derived from sand shale were also noteworthy. Soil culture experiment conducted with the physicochemical factors of greater contribution showed that, after the addition of exogenous physicochemical factors, the maximum soil available Se content appeared at a certain time and concentration conditions, and the optimal factors obtained were different for red soils derived from different parent materials. In conclusion, the differences

①基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFAA297086), 广西农业科学院团队项目(桂农科 2020YT039)和广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2023YM67)资助。

* 通讯作者(463302660@qq.com)

作者简介: 潘丽萍(1988—), 女, 广西南宁人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤生态与高值农业研究。E-mail: plping1013@163.com

in physiochemical properties lead to the great differences in the characteristics of Se forms in red soils derived from different parent materials, and the addition of different physiochemical factors result in the redistribution of Se forms due to the changes in soil environment.

Key words: Red soil in southern China; Different parent soil; Soil selenium; Available selenium; Selenium form

硒是人和动物必需的微量元素, 对人体抗氧化、免疫系统功能等均有一定的作用^[1]。广西是富硒土壤资源大省, 也是南方典型红壤区域, 富硒土壤面积达到 7.57 万 km²^[2]。广西土壤硒元素平均含量为 0.54 mg/kg, 是全国土壤背景值(0.2 mg/kg)的 2.7 倍。但因南方红壤区土壤偏酸, 整体硒有效性较低^[3-4]。天然富硒土壤受控于成土母质, 因此天然富硒土壤的开发, 要针对不同母质土壤理化性质开展土壤硒活化研究。已有研究表明, 母质作为土壤形成的主要因素之一, 直接影响着土壤各类元素的有效性 & 物理化学性质, 同时也决定着有机物、无机胶体、pH 等的数量与性质^[5]。因此, 利用影响硒形态转化的主要土壤因素开展外源硒调控, 是目前天然富硒土壤开发的思路之一。邢颖等^[6]前期利用磷与有机物配施在红壤区富硒茶园开展试验, 研究结果表明单施氨基酸或氨基酸与 337.5 kg/hm² 的磷配施均能显著提高土壤有效硒含量, 且茶叶硒含量相对于对照分别提高了 40.03% 和 20.40%。路丹等^[7]在南方富硒红壤区利用生物质炭进行土壤硒活化研究, 结果表明, 施用 1% 的生物质炭能够显著提高土壤有效硒含量并促进作物对硒的吸收累积。当前在天然富硒区的研究主要集中于对土壤硒形态及相关影响因素的研究^[8-9], 在提高土壤有效硒方面则主要是针对一个区域或一类土壤开展试验研究^[10-11]。广西富硒土壤面积广, 土壤类型多样, 且不同母质土壤本身土壤理化性质存在较大差异。第

四纪红色黏土和砂页岩发育的红壤和部分花岗岩发育的红壤是南方亚热带地区的代表性土壤^[12-13]。本研究以南方典型红壤区上述 3 种母质土壤为研究对象, 开展硒素特征及其有效性研究, 并进一步利用 AMOS 软件确定不同母质土壤的关键影响因素, 继而进行土壤硒素活化初探, 通过对不同母质土壤的系统分析确定其硒素特征差异及活化途径, 以利于后续在不同区域开展相关的富硒土壤资源开发利用研究与应用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试验设计

供试土壤: 供试土壤为采自广西红壤区 3 种主要母质(第四纪红色黏土、砂页岩、花岗岩)发育的土壤。在各母质样区随机布点采集未耕作土壤, 共计采集 60 个土样, 其中, 第四纪红色黏土母质土壤样品 23 个, 砂页岩母质土壤样品 22 个, 花岗岩母质土壤样品 15 个。采样时, 以梅花形多点采样法在布设点位周边取 0~20 cm 耕层土壤充分混匀后用四分法留取 1 kg 土样, 装袋标记后带回实验室。土样风干后分成两份, 一份研磨过 0.15 mm 筛后, 装瓶备用, 用于土壤总硒、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)和有机质(OM)的测定; 另一份研磨过 1 mm 筛用于土壤有效硒、土壤硒形态、pH、速效氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)的测定。供试土样基本理化性质见表 1。

表 1 广西不同母质土壤基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of red soils derived from different parent materials in Guangxi

母质类型	样点数	pH	OM(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	TK(g/kg)	AN(mg/kg)	AP(mg/kg)	AK(mg/kg)
第四纪红色黏土	23	5.05	18.65	0.71	0.34	7.05	80.36	9.06	60.35
砂页岩	22	4.59	18.82	1.43	0.56	16.78	101.38	11.62	133.53
花岗岩	15	4.62	23.64	0.92	0.37	8.31	100.45	24.63	153.80

土壤培养试验: 每个外源因子设计 5 个水平, 3 个重复。采用 150 mL 广口瓶, 每瓶装过 2 mm 筛的土壤 150 g。将化学添加剂按表 2 设计与土壤充分混匀。用去离子水调节土壤含水量为最大土壤持水量的 40% 左右(相当于最大田间持水量的 50%), 充分混合均匀, 用封口胶封住瓶口, 上

部留多个小孔用于通气, 于 25 °C 恒温培养箱中培养, 连续培养 90 d。培养期间, 通过称重法, 以去离子水来补充因蒸发而损失的水分。于处理后 15、30、60 和 90 d 取样, 每次取土样 10 g。土壤置于 45 °C 下通风干燥, 研磨过 60 目筛后储存储备用。

表 2 外源因子种类及添加量
Table 2 Types and amounts of exogenous factors

处理	添加剂	添加量(mg/kg)				
		水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5
对照(CK)	—	0	0	0	0	0
P	磷酸二氢钠	25	50	75	100	150
Ca	碳酸钙	25	50	75	100	150
H	黄腐酸	50	100	150	200	300

1.2 测定项目与方法

土壤基本理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[14]的方法:OM 的测定采用重铬酸钾容量法(外加热法);TN 的测定采用半微量凯氏定氮法;AN 的测定采用碱解扩散法;AP 的测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 8.5) 提取,钼蓝比色法;AK 的测定采用冷的 2 mol/L HNO₃ 溶液浸提-火焰光度法。

土壤样品中总硒含量测定依据 NY/T1104—2006^[15],用体积比 3 : 2 的 HNO₃-HClO₄ 混酸于 170 ℃ 下采用电热板加热进行消解;土壤有效硒含量的测定参照 NY/T3420—2019^[16],用 0.1 mol/L 的磷酸二氢钾溶液浸提,用体积比 7 : 1 的 HNO₃-H₂O₂ 混酸进行微波消解;土壤硒形态测定参考瞿建国等^[17]的分级处理方法,将土壤中的硒分为有机态、可溶态、交换态、铁锰氧化物结合态和残渣态 5 种形态。硒测定采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定,仪器为北京吉天 AFS-930 双道原子荧光光度计。仪器的测定条件为:负高压 280 V,原子化器高度 8 mm,灯电流 80 mA,载气和屏蔽气流量分别为 400 和 800 mL/min。仪器的检出限为 0.1 μg/L,仪器的定量限为 0.4 μg/L,

工作线性范围为 0 ~ 80 μg/L。

1.3 数据处理与分析

数据处理与统计分析采用 SPSS16.0 和 AMOS 26.0 软件。

2 结果与分析

2.1 南方红壤区不同母质土壤硒素特征

研究区不同母质土壤总硒含量分别为:第四纪红色黏土母质 0.791 mg/kg,砂页岩母质 1.297 mg/kg,花岗岩母质 1.475 mg/kg,总平均值为 1.173 mg/kg(表 3),均高于 0.4 mg/kg(DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[18]规定的硒养分地球化学等级划分标准的高含量等级和谭见安等^[19]提出的硒效应划分标准的足硒等级),其中以花岗岩母质土壤硒含量最高,且不同母质土壤总硒含量间差异明显。土壤有效硒含量不同母质间也存在差异,但不同母质土壤有效硒含量占比均较低,最高为第四纪红色黏土,占 7.510%。可见,南方红壤区不同母质土壤呈现出总硒含量高但有效硒含量低的整体趋势,且不同母质间差异较大。

表 3 不同母质土壤总硒及有效硒含量
Table 3 Total and available Se contents in red soils derived from different parent materials

母质类型	总硒(mg/kg)		有效硒(μg/kg)		有效硒占比(%)
	含量	变幅	含量	变幅	
第四纪红色黏土	0.791 b	1.770 ~ 0.210	59.4 a	123.0 ~ 23.0	7.510 a
砂页岩	1.297 a	2.170 ~ 0.420	70.2 a	265.0 ~ 3.5	5.412 a
花岗岩	1.475 a	1.912 ~ 0.567	61.8 a	82.0 ~ 13.3	4.192 a
平均	1.173	2.170 ~ 0.210	64.7	265.0 ~ 3.5	5.517

注:表中同列数据后小写字母不同表示不同母质土壤间差异显著(P<0.05)。

2.2 南方红壤区不同母质土壤硒形态特征

土壤硒形态测定结果(表 4)表明,不同母质土壤硒均主要以残渣态和有机结合态为主,不同形态硒占比由高到低均表现为:残渣态硒(RES-Se) > 有机态硒(OM-Se) > 铁锰氧化物结合态硒(FMO-Se) > 交换态硒(EX-Se) > 可溶态硒(SOL-Se),但不同形态硒在

各母质土壤中的具体占比有一定的差别。第四纪红色黏土母质和砂页岩母质土壤中 OM-Se 占比较高,高于花岗岩母质土壤。不同母质土壤硒形态间差异可能是不同母质地质成因及理化性质不同造成的。整体来看,有效态硒主要以 EX-Se 为主,SOL-Se 占比普遍偏低。

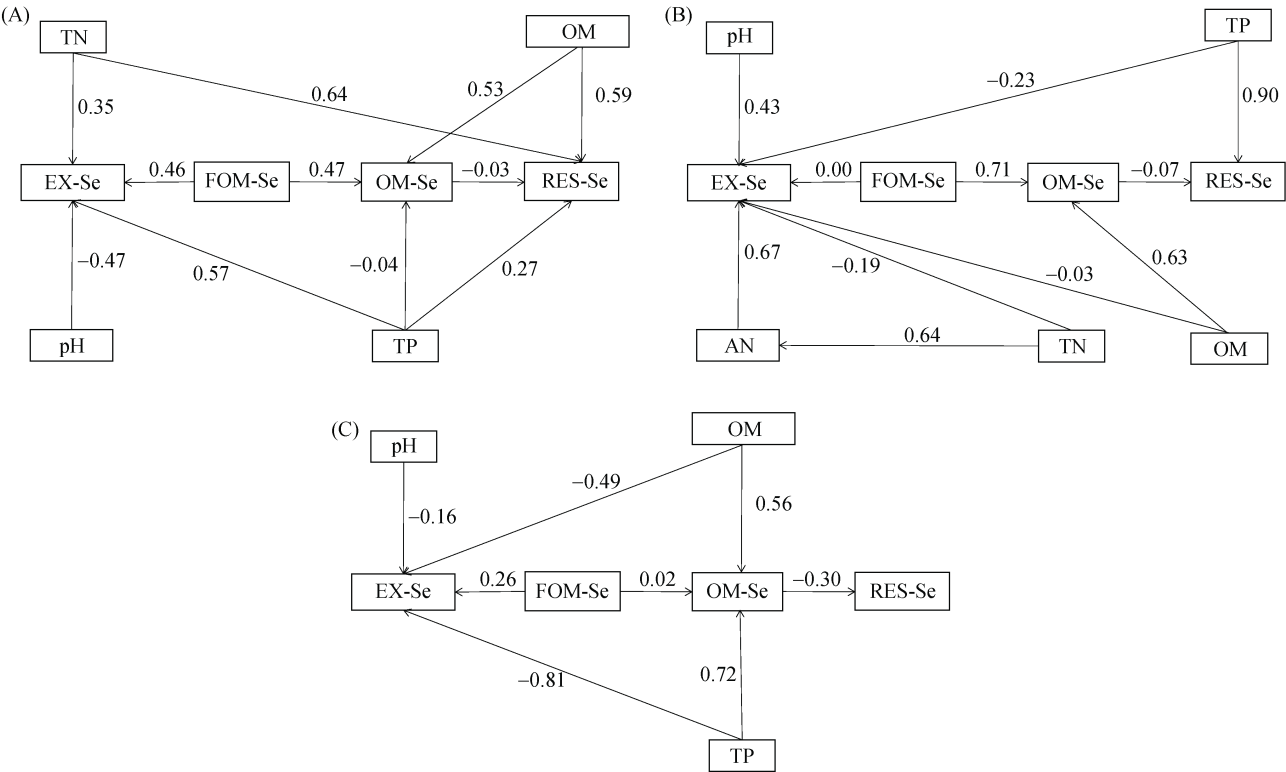
表 4 不同母质土壤各硒形态占比及变幅(%)
Table 4 Proportions and variations of Se forms in red soils derived from different parent materials

母质类型	SOL-Se		EX-Se		FMO-Se		OM-Se		RES-Se	
	占比	变幅	占比	变幅	占比	变幅	占比	变幅	占比	变幅
第四纪红色黏土	0.23	0.68 ~ 0.00	7.59	11.61 ~ 5.83	16.05	28.11 ~ 3.94	25.08	46.10 ~ 8.92	51.05	68.65 ~ 24.07
砂页岩	0.21	0.39 ~ 0.05	6.76	18.49 ~ 2.32	15.37	34.11 ~ 2.92	29.52	54.66 ~ 10.50	48.14	72.13 ~ 19.09
花岗岩	0.09	0.12 ~ 0.06	5.22	6.51 ~ 3.62	15.22	20.70 ~ 9.12	23.12	28.76 ~ 14.48	56.35	71.62 ~ 44.05
平均	0.19	0.68 ~ 0.00	6.69	18.49 ~ 2.32	15.52	34.11 ~ 2.92	27.19	54.66 ~ 8.92	50.42	72.13 ~ 19.09

2.3 土壤理化性质对南方红壤区不同母质土壤硒形态的影响

将土壤理化性质与各形态硒含量进行 AMOS 路径分析, 得到土壤理化性质与各形态硒间的关系, 各箭头连接的两个变量之间均有显著的相关关系 ($P<0.05$), 箭头上的数值为标准化后的权重系数值, 表明正或负影响作用的相对大小。因土壤有效硒与 EX-Se 间存在极显著相关关系, 且 SOL-Se 含量较低, 因此为优化路径分析仅选择 EX-Se 进行权重分析。从图 1 可以看出, 影响不同母质土壤硒形态分配的主要因子有全磷、有机质和 pH, 不同母质土壤间有一定的差异。在第四纪红色黏土母质(图 1A)土壤中, pH 对 EX-Se 有负影响, 全磷对 EX-Se 的影响作用最大, pH 和全氮的影响作用依次减小。此外, 全氮对

RES-Se 有显著正影响, 有机质对 OM-Se 和 RES-Se 有显著正影响。因此, 可以推断全氮、有机质、全磷和 pH 在第四纪红色黏土母质土壤硒形态分配中起主要作用。图 1B 显示, 在砂页岩母质土壤中, pH 和速效氮对土壤 EX-Se 有显著正影响, 且土壤速效氮又显著受全氮影响, 因此土壤全氮同样影响 EX-Se。土壤全磷对土壤 RES-Se 有显著正影响, 有机质显著影响 OM-Se, 同时, OM-Se 与 FMO-Se 间有显著正影响。说明在砂页岩母质土壤中 pH、全磷、速效氮和有机质对土壤硒形态分配起主要作用。在花岗岩母质土壤中(图 1C), 土壤有机质、全磷和 pH 对土壤 EX-Se 有显著负影响, 说明在花岗岩母质土壤中 pH、全磷和有机质对土壤硒形态分配起主要作用。



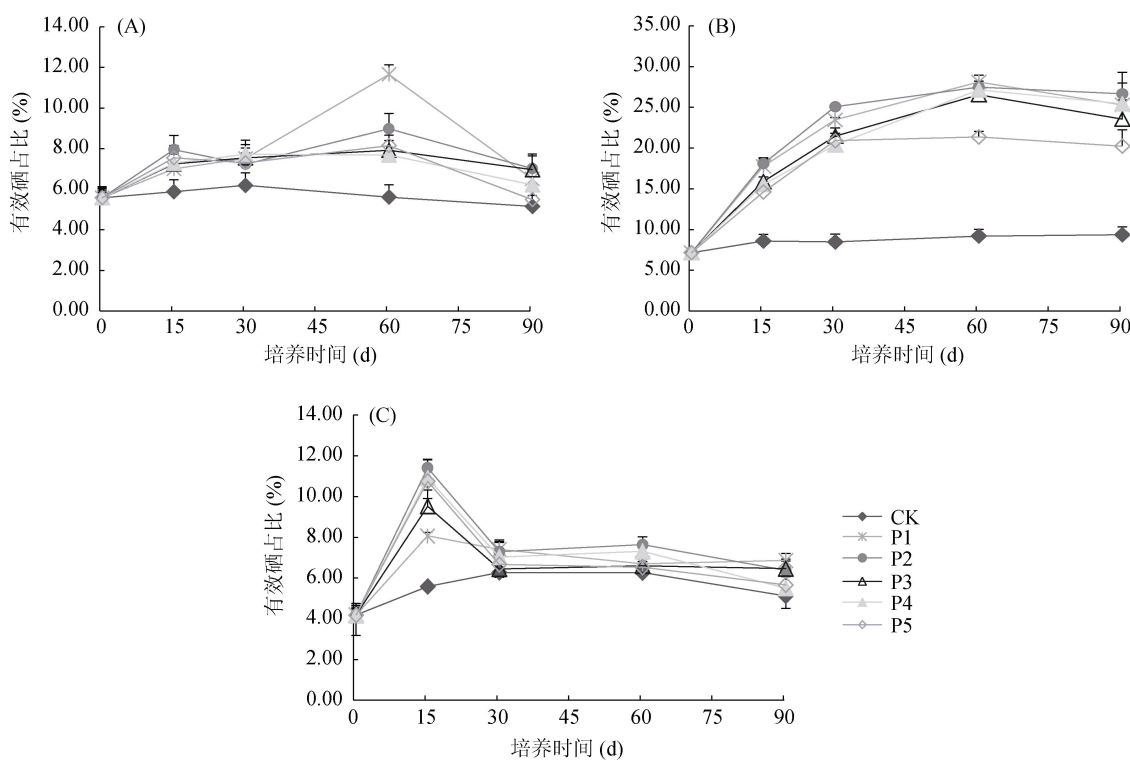
(A: 第四纪红色黏土母质; B: 砂页岩母质; C: 花岗岩母质)
图 1 不同母质土壤理化性质对各形态硒含量的影响

Fig. 1 Effects of physicochemical properties on contents of various Se forms in soils derived from different parent materials

2.4 外源影响因子添加对南方红壤区不同母质土壤有效硒的影响

基于路径分析结果,筛选出全磷、有机质和 pH 为影响土壤硒形态转化的主要因子,进行外源影响因子添加的土壤培养试验,分析不同剂量外源因子对土壤有效硒的影响。图 2 为不同磷含量对不同母质土壤有效硒的影响,可以看出,外源磷作用在不同母质土壤中对有效硒含量变化规律的影响不同,且不同磷水平下不同培养时间均出现了有效硒含量最高点。其中,在第四纪红色黏土母质土壤(图 2A)中,在 P1 处理下培养 60 d 时土壤有效硒含量最高,相对于对照提高了 107.87%。在砂页岩母质土壤(图 2B)中,整体规律为外源磷添加后在 0~60 d 随着培养时间增加,

有效硒含量也逐渐增加,但超过 60 d 后有效硒含量逐渐减少,其中 P1 处理下培养 60 d 时有效硒含量最高,相对于对照提高 205.96%。在花岗岩母质土壤(图 2C)中,外源磷添加后土壤有效硒含量在 P2 处理下培养 15 d 时达到最高值,相对于对照提高 104.40%,但随着培养时间延长,土壤有效硒含量在 30 d 时下降至接近对照,培养后期有效硒含量不再增加。结合路径分析结果,土壤全磷对土壤 EX-Se、OM-Se 和 RES-Se 都有一定的影响,外源磷的添加打破了硒形态间原有的平衡,但因磷本身和硒间的互作效应也存在一定的影响,因此外源磷在不同土壤上均能够提高土壤有效硒含量,但其持续时间和提高的程度等均存在差异。



(A: 第四纪红色黏土母质; B: 砂页岩母质; C: 花岗岩母质)

图 2 不同磷含量对不同母质土壤有效硒的影响

Fig. 2 Effects of different phosphorus contents on available Se contents in red soils derived from different parent materials

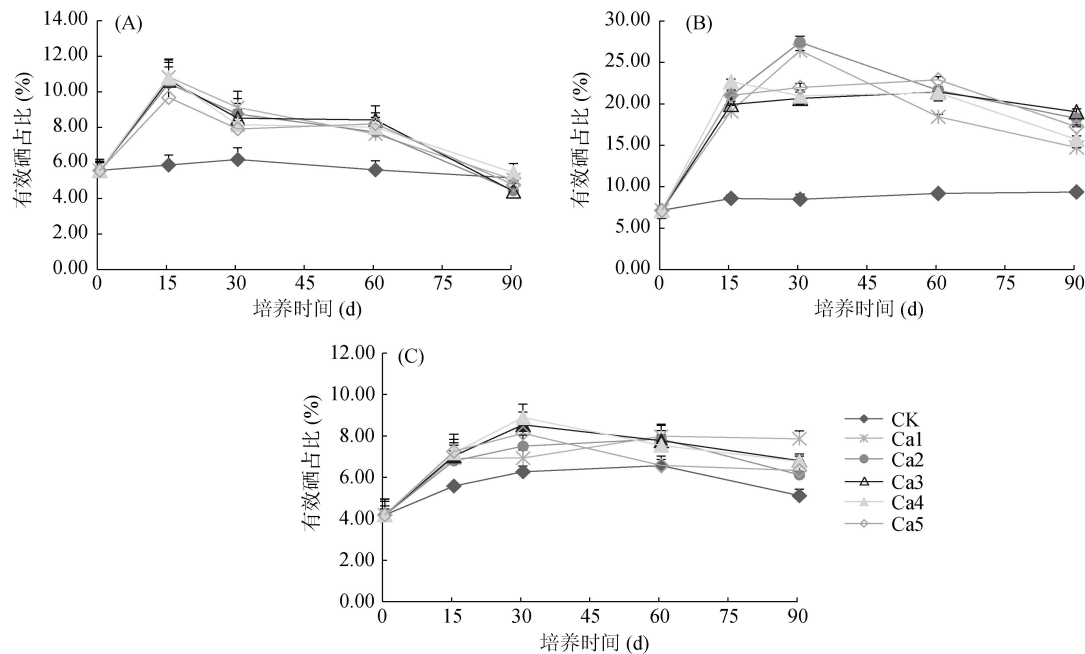
图 3 为不同钙含量对不同母质土壤有效硒的影响,可见,碳酸钙的添加一定程度上提高了土壤 pH,且土壤中碳酸钙含量与 pH 两者关系紧密。在第四纪红色黏土母质土壤中(图 3A),有效硒含量占比先升高后降低,在培养 90 d 时与对照没有显著差异,其最高值出现在 Ca1 处理下培养 15 d 时,相对于对照提高 84.38%,而 Ca1~Ca4 四个处理间无显著差异。在砂页岩母质(图 3B)和花岗岩母质土壤中,整体规律相似,有效硒含量占比均在培养 30 d 时达到最高

值,其中,在砂页岩母质土壤中 Ca2 处理最高,相对于对照提高 223.45%,而花岗岩母质土壤(图 3C)中 Ca3 处理最高,相对于对照提高 36.10%。结合路径分析结果,第四纪红色黏土母质土壤中 pH 对 EX-Se 为负影响,因此调节土壤 pH 后土壤有效硒含量虽然有一定的增加,但是最终下降至与对照相当的水平;砂页岩母质土壤中 pH 为正影响,因此 pH 的调节提高了土壤有效硒含量,且在 3 种母质中以砂页岩母质有效硒含量增加最多;对于花岗岩母质土壤,

pH 对 EX-Se 有负影响, 但影响相对较小, 因此外源 pH 调节可能是改变了土壤其他理化性质而导致土壤有效硒有一定的变化, 但有效硒含量增加较少。

图 4 为不同黄腐酸含量对不同母质土壤有效硒

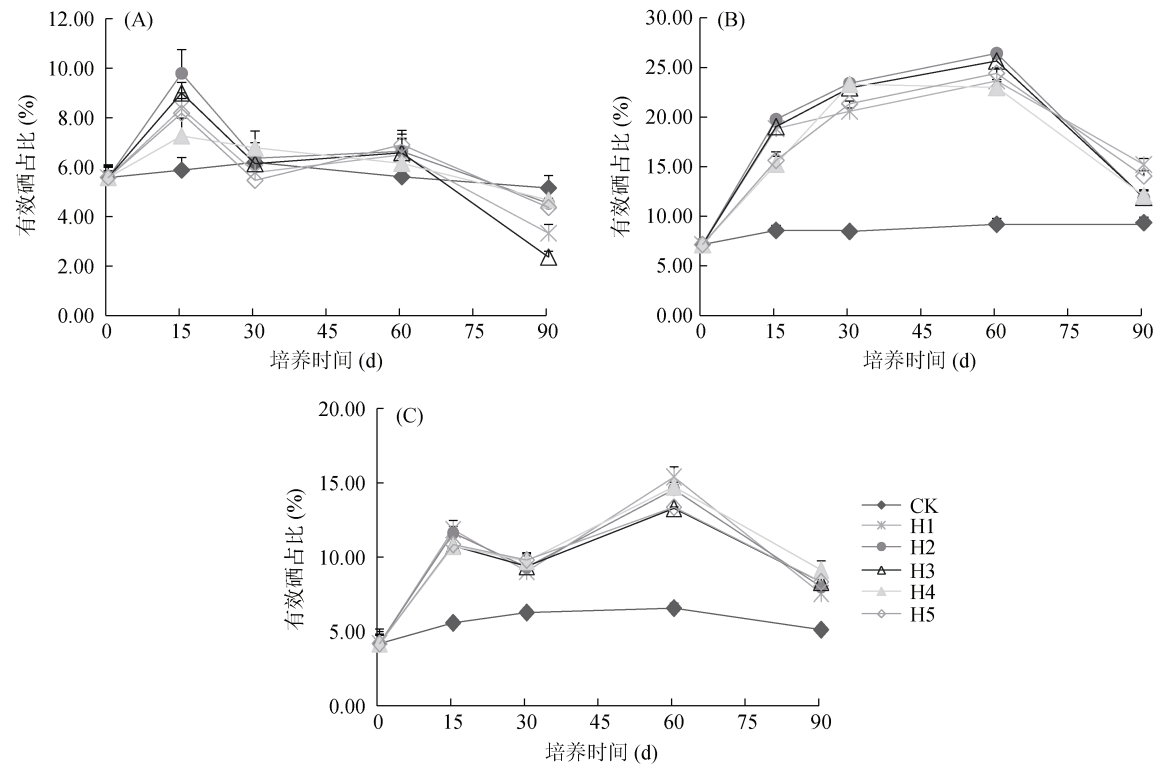
的影响。黄腐酸富含多类含氧活性官能团, 且分子量较低, 是一种活性较高的有机物质, 也是一种理想的有机质来源^[20]。在第四纪红色黏土母质土壤(图 4 A)中, 有效硒含量占比相对于对照呈先升高后下降的趋



(A: 第四纪红色黏土母质; B: 砂页岩母质; C: 花岗岩母质)

图 3 不同钙含量对不同母质土壤有效硒的影响

Fig. 3 Effects of different calcium contents on available Se contents in red soils derived from different parent materials



(A: 第四纪红色黏土母质; B: 砂页岩母质; C: 花岗岩母质)

图 4 不同黄腐酸含量对不同母质土壤有效硒的影响

Fig. 4 Effects of different fulvic acid contents on available Se contents in red soils derived from different parent materials

势,且在培养 30 d 后部分处理有效硒含量显著低于对照。这可能是因为有机质主要影响 OM-Se 和 RES-Se 含量,二者的增加会直接引起有效硒含量的下降。在砂页岩母质土壤(图 4 B)中,随培养时间增加,土壤有效硒占比呈先升高后降低的趋势,在 H2 处理下培养 60 d 时达到最高值,相对于对照提高 187.56%。在花岗岩母质(图 4 C)土壤中,在不同培养时间下有效硒含量波动较大,但均高于对照,在 H1 处理下培养 60 d 时达到最高值,相对于对照提高 134.34%。

3 讨论

本研究结果表明,南方红壤区 3 种母质土壤总硒和有效硒含量变幅较大,整体表现为总硒含量高而有效硒含量低,与刘娜娜^[21]对广西红壤的分析结果一致。不同母质土壤硒形态间存在较大差异,一般情况下土壤硒以 RES-Se 和 OM-Se 为主,SOL-Se 和 EX-Se 含量相对较低^[22],本研究验证了这一结果,但不同母质土壤间差异较大。大量相关研究表明,土壤中的硒以多种形态共存,受土壤理化条件的控制而导致不同土壤类型或母质类型间硒形态的差异^[23-24]。

AMOS 路径分析模型基于不同母质土壤理化性质差异,分析不同理化性质对土壤硒形态的贡献大小。第四纪红色黏土母质土壤质地黏重,富含铁铝氧化物;花岗岩母质土壤质地较砂;砂页岩母质土壤粉粒含量较高^[25]。3 种母质土壤 pH、有机质均对硒形态有不同程度的影响,这与目前的大量研究结果一致^[13,26]。而全磷在广西红壤区含量较高,且以 O-P、Fe-P、Al-P 等难溶磷化物的形态存在于土壤中,这些磷随土壤环境的变化而发生吸附或释放^[27],而磷硒间本身存在复杂的互作关系,磷的含量与存在状态直接决定了磷硒间的相互关系^[28]。在第四纪红色黏土母质土壤中,对于 EX-Se,其中 pH 为负影响,但在利用碳酸钙作为调节 pH 措施进行土壤硒素活化时,第四纪红色黏土母质土壤有效硒含量呈现先升高后降低的趋势。这可能是因为短时间内 pH 的升高,增加了 OH⁻ 的数量,土壤对硒酸盐、亚硒酸盐及羟基官能团等的吸附能力减弱,有效硒含量增加^[29]。但因土壤本身具有缓冲作用,且土壤环境复杂,pH 的改变会引起多种因素的变化,最终会恢复到原来的状态。在砂页岩母质土壤中,理化性质对 EX-Se 影响大小依次为:速效氮>pH>全磷。氮和硫元素严格相关,而硫硒为同族元素,其转运通道相同。因此,氮含量的增加有利于载体蛋白的合成,从而促进其与硒

结合进入植物体内^[30]。在花岗岩母质土壤中,对硒影响较大的是全磷和有机质,且均对 EX-Se 是负影响,对 OM-Se 是正影响。说明这两个理化性质均是调节土壤 OM-Se 与 EX-Se 间的分配而影响两者含量的。全磷的添加在短时间能提高了土壤有效硒含量,但是之后迅速下降,前期磷酸盐的添加竞争了土壤胶体对硒的吸附位点,有效硒含量增加;但是随着时间增加,磷的施入进一步改变了土壤性质、微生物及土壤酶等^[31],复杂的变化影响了土壤硒形态,可能是有效硒迅速降低的原因^[10,32]。黄腐酸的添加显著提高了土壤有效硒的含量,这是因为黄腐酸是一种低分子量的腐殖酸,相对于大分子量的腐殖酸其具有更强的活性,是一种较为理想的有机质来源。有研究表明,黄腐酸中大量不同官能团的富里酸,这些富里酸能与硒结合形成易被吸收利用的生物活性硒^[20,33],从而提高土壤中硒的活性。

4 结论

1)南方红壤区不同母质土壤总硒含量均高于 0.4 mg/kg,其中以花岗岩母质土壤总硒含量最高,而有效硒含量均较低,其中以砂页岩母质土壤有效硒含量最高,变幅也最大,不同母质间存在较大差异。

2)南方红壤区土壤硒主要以 RES-Se 和 OM-Se 为主,不同形态硒含量由高到低均表现为:RES-Se>OM-Se>FMO-Se>EX-Se>SOL-Se,但不同母质土壤硒形态组成不同。

3)对不同母质土壤硒形态分配有贡献的因子主要为全磷、有机质和 pH,此外,在第四纪红色黏土母质土壤中全氮也有较大的影响,砂页岩母质土壤中速效氮的影响也值得关注。

4)外源理化因子的添加一定程度上提高了土壤有效硒的含量,但不同母质土壤理化性质的差异以及外源单一因子的添加对土壤理化性质、微生物以及硒形态均产生影响,不同区域不同母质应针对性地开展土壤硒素活化相关研究与应用。

参考文献:

- [1] Fairweather-Tait S J, Bao Y P, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14(7): 1337-1383.
- [2] 潘正伟,石立,王磊. 广西初步圈定富硒土壤 7.57 万平方公里面积为全国之最[N]. 中国新闻网, 2021-11-16.
- [3] Dinh Q T, Li Z, Tran T A T, et al. Role of organic acids on the bioavailability of selenium in soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 618-635.

- [4] 黄金兰, 蒋代华, 王明释, 等. 广西富硒土壤中氧化铁对 Se(IV)吸附解吸的影响机制[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 479–490.
- [5] Yu T, Yang Z F, Lv Y Y, et al. The origin and geochemical cycle of soil selenium in a Se-rich area of China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 97–108.
- [6] 邢颖, 廖青, 梁潘霞, 等. 磷与有机物配施对南方茶园土壤硒有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 97–103.
- [7] 路丹, 黄太庆, 陈锦平, 等. 施用生物炭对红壤富硒区硒生物有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 118–126.
- [8] 陈玉真, 王峰, 单睿阳, 等. 闽北地区不同类型茶园土壤硒赋存形态特征及影响因素分析[J]. 茶叶学报, 2022, 63(4): 243–250.
- [9] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 鲁中碳酸盐岩区土壤硒来源、有效性及影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(4): 841–846.
- [10] 马迅, 诸旭东, 宗良纲, 等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 284–290.
- [11] 闫颖. 磷硒配施对小白菜生长及土壤磷硒有效性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [12] Araujo M A, Zinn Y L, Lal R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands[J]. Geoderma, 2017, 300: 1–10.
- [13] 邬奇峰, 谢国雄, 王京文, 等. 浙西 3 类石灰岩发育土壤有机碳和团聚体稳定性的研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 567–574.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤中全硒的测定: NY/T 1104—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国农业农村部. 土壤有效硒的测定 氢化物发生原子荧光光谱法: NY/T 3420—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277–283.
- [18] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 谭见安, 郑达贤, 侯少范, 等. 克山病与自然环境和硒营养背景[J]. 营养学报, 1982(3): 175–182.
- [20] 安梦鱼, 张青, 章赞德, 等. 不同用量腐植酸对土壤有效硒含量和硒的形态以及大蒜硒吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 128–133.
- [21] 刘娜娜. 陕西塬土和广西红壤硒有效性差异及其主控因子初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [22] 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823–830.
- [23] Wang D, Dinh Q T, Anh Thu T T, et al. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil[J]. Chemosphere, 2018, 199: 417–426.
- [24] Xu Y F, Hao Z, Li Y H, et al. Distribution of selenium and zinc in soil-crop system and their relationship with environmental factors[J]. Chemosphere, 2020, 242: 125289.
- [25] 谷忠元, 康黎, 罗梦娟, 等. 湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 58–63, 69.
- [26] Wang D, Zhou F, Yang W X, et al. Selenate redistribution during aging in different Chinese soils and the dominant influential factors[J]. Chemosphere, 2017, 182: 284–292.
- [27] 骆妍妃, 覃潇敏, 农玉琴, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 72–79.
- [28] 邢颖, 刘永贤, 梁潘霞, 等. 磷对富硒赤红壤与红壤上小白菜硒吸收及土壤硒形态的影响[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1170–1175.
- [29] Goh K H, Lim T T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption[J]. Chemosphere, 2004, 55(6): 849–859.
- [30] Marques A C, Lidon F C, Coelho A R F, et al. Quantification and tissue localization of selenium in rice (*Oryza sativa* L., Poaceae) grains: A perspective of agronomic biofortification[J]. Plants, 2020, 9(12): 1670.
- [31] 赵婧, 王亚男, 曾希柏, 等. 不同改良措施对第四纪红壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1160–1176.
- [32] Lee S H, Doolittle J J, Woodard H J. Selenite adsorption and desorption in selected South Dakota soils as a function of pH and other oxyanions[J]. Soil Science, 2011, 176(2): 73–79.
- [33] 刘波, 黄道友, 周建利, 等. 硒与黄腐酸组配对水稻镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 350–355, 362.