

江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究

文帮勇¹ 张涛亮¹ 李西周² 谢振东¹

(1.江西省地质调查研究院, 江西南昌 330030; 2.陕西省地质矿产勘查开发局物化探队, 陕西西安 710000)

摘要:多目标区域地球化学调查结果显示,江西龙南地区表层土壤Se平均含量为0.34 mg/kg,总体足硒,局部富硒,且土壤中重金属元素含量处于安全水平。异常查证结果表明,富含硒的基岩是富硒土壤分布的控制因素。在研究区发现天然富硒水稻、富硒大豆优质农产品,其中大豆的富硒率达100%。土壤中有效Se与总Se呈极显著的正相关,总Se含量增大可增加有效Se量;有效Se与阳离子交换量(CEC)、N、P呈较显著的正相关,土壤中粘土矿物及有机质对Se有较强的吸附、络合作用,且土壤中有效Se主要以亚硒酸盐形式存在。水稻、大豆中Se的生物富集系数均与土壤Se、N呈显著负相关,与土壤K₂O呈显著正相关。

关键词:富硒;重金属;土壤开发;迁移

中图分类号:P618.76 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0256-08

元素硒(Se)是对生命体一个极为重要的微量营养元素,研究表明硒具有抗氧化、抗衰老、抗辐射、抗病毒、保护视力以及提高人体免疫力功能,还能预防和抑制镉、砷、汞等有毒重金属元素对机体的伤害^[1-11]。硒属于分散元素,其在大陆地壳中含量很低,世界上绝大多数土壤硒含量为0.1~2.0 ng/kg,平均0.2 ng/kg,且分布极不均匀。中国处于地球低硒带,全国72%国土面积存在不同程度的缺硒现象^[12],约有1亿多人口的膳食结构中硒含量不足,造成人体低硒状态。由此可见,富硒农产品开发前景非常广阔。

1 研究区概况

龙南县位于江西省南部,处于中纬度偏南区,属典型的亚热带湿润季风气候,日照充足,温暖多雨,气候宜人。年平均气温为18.9℃,年平均降雨量为1509.7 mm。

江西省地质调查院于2010年开展了《江西大余—南康地区1:25万区域地球化学调查》,初步发现

赣州龙南县表层土壤中存在较大面积的富硒土壤,其中富硒土壤(Se含量>0.4 mg/kg)面积约392 km²,占龙南县国土面积的23.9%。综合考虑富硒土壤的空间分布、土地利用情况及交通枢纽位置,本文选择龙南县东北的里仁镇—东坑镇一带(图1)作为典型地区来探讨富硒土壤的开发。该区地貌以低山、丘陵为主;广布红壤、水稻土;区内地层较为发育,以侏罗系为主,震旦系、石炭系和第四系等次之,其中石炭统在研究区北部及中心地带较发育,且有煤层出露;京九铁路、高速及国道贯穿南北,交通便利;农作物主要为谷类、油菜、大豆、花生、西瓜等。

2 样品采集及分析测试

江西省地质调查院于2010年在研究区的多目标区域地球化学调查中采集表层土壤样品30件、深层土壤7件,并于2011年10-12月的异常查证工作中,在研究区采集水稻13件、大豆7件、岩石8件、土壤(包括根系土、垂向剖面土壤)53件,其中表层土壤样为0~20 cm的耕作层土壤,深层土壤为150~

收稿日期:2013-03-27;改回日期:2013-10-31

基金项目:中国地质调查局项目(J[2011]02-23-21)资助。

作者简介:文帮勇,男,1984,助理工程师,从事环境地球化学及农业地质研究;E-mail:343170393@qq.com。

表1 样品分析及检出限要求 (mg/kg)

Table 1 Analytical method and detection limits of the samples(mg/kg)

品种	元素	方法	检出限	品种	元素	方法	检出限
土壤	Se	原子荧光法	0.01	植物	Se	原子荧光法	0.01
	As	原子荧光法	1		As	原子荧光法	0.3
	Cd	无焰原子吸收法	0.03		Cd	无焰原子吸收法	0.03
	Cr	X 荧光法	5		Cr	X 荧光法	0.2
	Pb	发射光谱法	2		Pb	发射光谱法	0.1
	Hg	原子荧光法	0.0005		Hg	原子荧光法	0.005

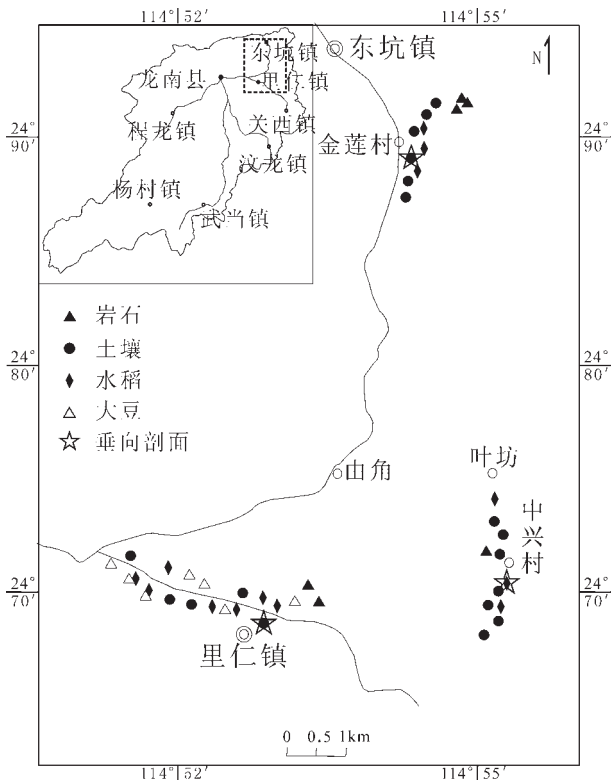


图1 研究区样点位置图

Fig.1 Sampling location in the study area

200 cm 的土壤,垂向剖面土壤样的剖面深度为 150~200 cm 或以见到潜水面、基岩为准,土壤分层明显时,分层采样,若分层不明显,采样密度为 1 件样/50 cm。土壤、植物样品采集、切割、洗涤和保存等各环节严格按照《区域生态地球化学评价技术要求》执行。

采集的岩石、土壤元素全量分析由国土资源部南昌矿产资源监督检测中心完成,农作物元素分析及土壤有效态分析均由国土资源部合肥矿产资源

监督检测中心完成。土壤样品主要分析了 Se、As、Cd、Cr、Hg 和 pH 等元素和指标,植物样品分析了 Se、As、Cd、Cr、Hg 等元素。不同样品的分析方法、检出限见表 1。所有测试结果都满足 DD2005-3《生态地球化学评价样品分析技术要求》所规定分析方法的精密度和准确度要求。对重复样相对偏差 $RD=|A_1-A_2|/(A_1+A_2) \times 100$ 的统计分析表明,所有样品的合格率都超过 85%,检测结果可信。

3 土壤中 Se 等元素含量特征

只有良好的生态环境,才能生产出优质农产品。富硒土壤的开发,除了土壤中需富硒外,生产基地中土壤环境质量也应达到国家土壤环境质量 GB15618-1995 二级标准。从区域地球化学调查中 Se 等元素在深表层土壤中的分布特征参数统计表(表 2)可以看出:①研究区深层和表层 pH 较低,如表层土壤 pH 范围为 4.73~5.86,土壤酸化较严重,对土壤的潜在危害较大^[13-15];②研究区表层土壤 Se 含量均值为 0.34 mg/kg,范围为 0.17~0.79 mg/kg,其含

表2 区域地球化学调查土壤 Se 等元素含量统计

Table 2 Content statistics of Se and some other elements in surface soil and deep soil

元素	表层土壤 (n=30)			深层土壤 (n=7)		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
pH	5.17*	4.73	5.86	5.56*	5.08	6.27
Se	0.34	0.17	0.79	0.31	0.19	0.52
As	10.20	1.70	31.50	9.03	3.80	27.60
Cd	0.18	0.08	0.33	0.16	0.09	0.40
Cr	91.34	19.30	284.50	69.80	16.10	119.80
Hg	0.11	0.07	0.32	0.07	0.05	0.11
Pb	40.87	15.70	62.50	41.77	22.30	71.70

注:pH 无量纲,其他元素单位为 mg/kg; *为中位值。

量适中,达到足硒水平,其中在研究区中部地区和北部的东坑地区达到富硒水平;深层土壤中Se含量均值为0.31 mg/kg;③对重金属元素而言,深层和表层土壤中的元素从高到低依次均为:Cr>Pb>As>Cd>Hg,其中表层土壤Cr平均含量为91.34 mg/kg,范围为19.30~284.50 mg/kg,而深层土壤中Cr含量为69.80 mg/kg,在成土过程中,耕作层土壤中Cr元素表现出富集的趋势,同样As、Cd、Hg元素也有略微富集。

参照国家土壤环境质量标准 GB15618-1995,土壤在pH<6.5的酸性环境下,其起始污染下限取值分别为Hg 0.30 mg/kg、Cd 0.30 mg/kg、Pb 250 mg/kg、As 30 mg/kg、Cr 250 mg/kg。深层土壤各重金属元素含量均在限量值范围内,而表层土壤中As、Cd、Cr与Hg元素的含量均有1~2件样品超标。采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区的土壤进行统计评价,表层土壤中As、Cd、Cr、Hg与Pb的单项污染指数分别为0.79、0.87、0.85、0.80和0.21,综合污染指数为0.79,各指数值均小于1,说明研究区表层土壤重金属元素局部存在轻微污染,但总体较为安全。

农田生态系统是自然地质地球化学作用和人类生产活动共同作用的产物。农田生态系统中土壤Se元素自然来源主要为岩石的风化作用,土壤中Se元素含量与母质岩性和成土过程密切相关。土壤异常查证主要利用“横拉纵切”的“T”型剖面追踪法,即采用表层土壤水平剖面测量加深层垂直剖面测量的方法。针对研究区Se异常分布、所处地质环境背景等地质地球化学特点及地貌形态,在研究区选择了3条剖面来剖析。

A剖面位于研究区北面的东坑附近,该处微地貌为山间盆地,成土母质低处为第四纪红土,四周

表3 水平剖面表层土壤Se元素含量统计表(mg/kg)
Table3 Se content of surface soil in horizontal section(mg/kg)

水平剖面	Se			成土母质
	均值	最小值	最大值	
A (n=9)	0.51	0.39	0.58	第四系红土 石炭系页岩
B (n=19)	0.40	0.30	0.50	第四系水稻土
C (n=10)	0.35	0.22	0.68	侏罗系板岩、火山岩

高处为石炭系粉砂质、炭质页岩;B剖面位于研究区西南的里仁附近,该处微地貌为冲积平原,地势较为平缓,成土母质为第四纪水稻土,但剖面东北面(由角)的低山区有石炭系出露;C剖面位于研究区东南的中兴村附近,该处微地貌为丘陵—低山区,成土母质为侏罗系板岩及火山岩。从表3可知,A剖面表层土壤中Se均值含量最高,为0.51 mg/kg,范围为0.39~0.58 mg/kg,达到富硒水平的样品8件,富硒率88.89%;B剖面土壤中Se平均含量0.40 mg/kg,范围为0.30~0.50 mg/kg,达到富硒水平的样品10件,富硒率52.63%,其中有8件富硒样品位于剖面东段,该处为由角(低山区)岩石风化的沉积区;C剖面Se含量最低,均值为0.35 mg/kg,有3件样品达到富硒水平,富硒率30.00%。岩石样分析结果显示,A剖面中炭质泥岩Se含量为0.60 mg/kg,含炭硅质泥岩为1.93 mg/kg,煤为0.48 mg/kg,而B剖面出露的杂砂岩、砾岩和C剖面的板岩Se元素含量较低,均约为0.06 mg/kg。这说明研究区土壤中的Se元素是富含硒的基岩(如煤、炭质岩等)岩石风化后的产物,其含量空间分布受基岩Se含量制约。

土壤垂向剖面测量结果(图2)表明,各垂向剖面上Se含量的变化趋势非常相似,即由上而下均表现为先升后降的规律,且在40~50 cm深处富集最高,随后随着剖面深度的增加Se含量逐渐降低,如

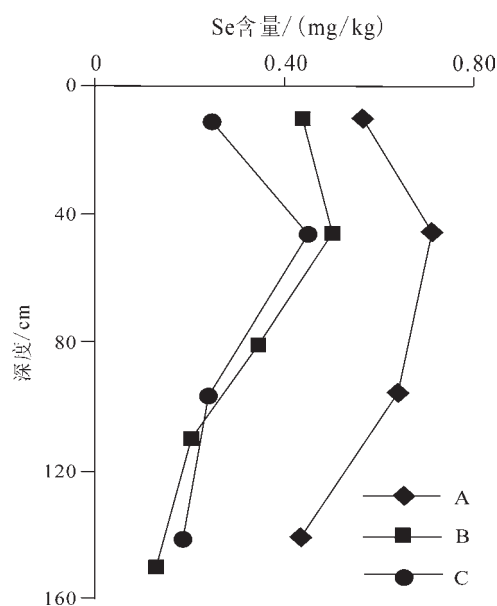


图2 土壤剖面Se含量垂向变化特征
Fig.2 Distribution of total Se in soil section

A剖面中的耕作层、45 cm、95 cm、140 cm处的Se含量分别为0.57 mg/kg、0.71 mg/kg、0.64 mg/kg、0.44 mg/kg,而前人研究^[13-15]表明Se在表层土壤中富集显著,造成这一差异的原因可能与研究区的降雨量大、淋溶作用强有关^[29]。与水平剖面相似,在A水平剖面处的垂直土壤剖面Se含量最高,C剖面处的含量最低。

4 农作物中Se等元素含量特征

植物在Se循环生态链中占有十分重要的地位,是Se生态链上不可缺少的关键环节。植物是动物摄入Se的主要直接Se源。人体所摄入的Se,也主要是直接或间接来源于植物,人体Se水平决定于所食用的植物性或动物性食物的含Se量。

通过生物地球化学调查,经水稻、大豆采样测试发现了天然富硒大米、富硒大豆优质特色农产品。从表4可知,水稻中Se含量范围为0.02~0.10 mg/kg,平均为0.05 mg/kg,其生物富集系数为13.72%;大豆中Se含量范围为0.10~0.13 mg/kg,平均为0.11 mg/kg,生物富集系数为26.99%。大豆中Se的含量及其富集能力大约是水稻的2倍。按照国家标准GB/T 22499-2008(粮食、豆类富硒食品限量值0.04mg/kg)衡量,8件水稻样品达到富硒水平,富硒率为61.54%;7件大豆样品达到富硒水平,富硒率100.00%,作物中Se高含量高富集特征为开发水稻、大豆富Se农产品提供物质前提。

目前食品生产所面临的主要问题之一就是食品安全问题,在追求营养丰富的同时,还要注意食品中有毒有害重金属元素的含量水平。农作物中Cr含量最高,水稻Cr均值为0.14 mg/kg,大豆为0.18 mg/kg;其次为Cd,水稻Cd含量为0.09 mg/kg,大豆Cd

为0.10 mg/kg;Hg含量最低,水稻、大豆Hg含量均为0.01 mg/kg。根据绿色食品标准NY/T 419-2006、粮食卫生标准GB 2715-2005衡量,水稻中As、Pb、Cd的含量均符合绿色食品标准,水稻中Hg有1件样品达到无公害食品要求,其他均符合绿色食品标准;根据绿色食品标准NY/T1049-2006衡量,大豆中各重金属的含量均低于绿色食品标准;水稻、大豆中Cr含量符合国家卫生食品限量标准。水稻、大豆中重金属元素含量总体较低,其安全性高。

5 土壤-农作物中Se元素迁移规律

饮食是人体摄取Se的主要途径,土壤-植物系统中Se的迁移累积规律以及主要影响因素,是Se生态地球化学与生命健康研究的热点。Se在土壤中以硒酸盐(Se^{6+})、亚硒酸盐(Se^{4+})、元素硒、硒化物、有机硒和气态硒等多种形式存在,其中亚硒酸盐、硒酸盐和有机态硒是植物主要的吸收形态。研究区表层土壤有效Se含量范围为0.010~0.034 mg/kg,约占土壤总Se含量的2.47%~6.05%,这一比例要略高于前人的研究结果^[21-23],这很可能与本文提取能力较强的浸提剂——稀硝酸有关。

大量研究表明,Se的有效性除受形态影响之外,还与土壤质地、pH、Eh、阳离子交换量(CEC)、有机质、氧化物等有关^[2-5]。对土壤有效Se与总Se等元素或指标作相关性分析,结果表明(图3~4),研究区表层土壤中有效Se与总Se有着极显著的正相关性,与CEC、N、P有较显著的正相关性,与有机质、pH无显著相关性,如有效Se与总Se的相关方程为 $y=0.0414x+0.0025$,相关系数 r 为0.72($p=0.01, n=20$)。总体上,有效Se含量随总Se含量增大而增加,但直线斜率比较低,其增加的幅度较小,而有效Se含量对土壤CEC变化敏感。土壤矿质颗粒和有机质颗粒都带负电,对土壤中的阳离子有吸附性,土壤粘粒所能吸附的盐基阳离子总量称为阳离子交换量(CEC),土壤CEC与有效Se具有较好的正相关性,说明土壤无机矿质粘粒和有机质粘粒能提高土壤有效Se含量,从而促进植物对Se的吸收。

土壤中的氮素,能被植物直接吸收利用的无机态氮仅占总氮量的5%左右,而绝大部分是以有机形态存在^[19],有研究^[20-24]表明,Se具有亲生物性,易被有机质富集,土壤中约80%的Se以与腐殖质缔合

表4 水稻、大豆Se等元素含量特征表(mg/kg)
Table 4 Content of Se and some other elements in crops(mg/kg)

元素	水稻			大豆		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
Se	0.05	0.02	0.10	0.11	0.10	0.13
As	0.08	0.03	0.14	0.03	0.01	0.04
Cd	0.09	0.01	0.18	0.10	0.08	0.15
Cr	0.14	0.08	0.41	0.18	0.13	0.26
Hg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Pb	0.06	0.03	0.20	0.07	0.05	0.10

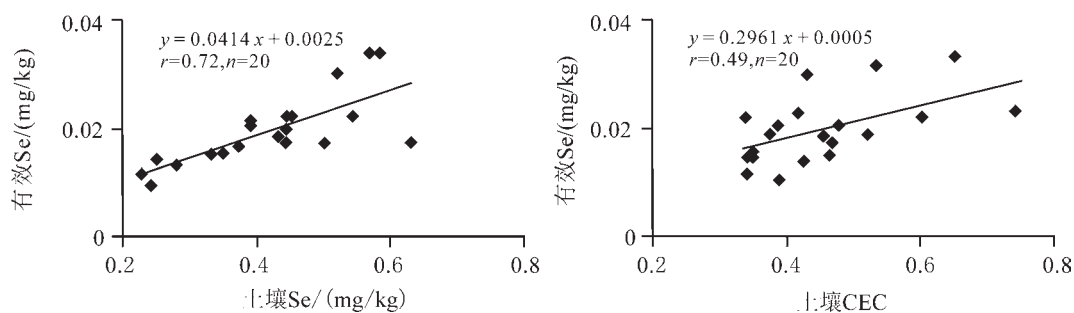


图3 土壤有效Se与总Se、CEC的散点图

Fig.3 Scatter plot between available Se and total Se, CEC in surface soil

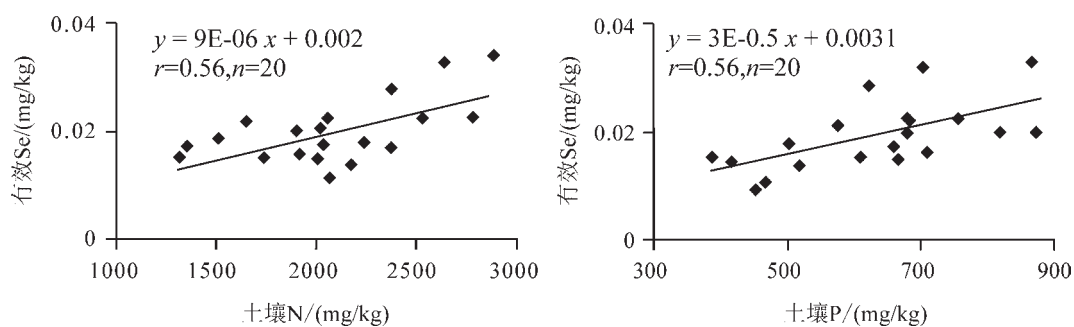


图4 土壤中有有效Se与N、P的散点图

Fig.4 Scatter plot between available Se and total N, P in surface soil

的形态赋存,一般认为与富里酸结合的硒能被植物吸收,而与胡敏酸结合的硒植物难以吸收。表层土壤中有有效Se与N的正相关关系,说明研究区表层土壤中氮能增加土壤中有有效Se的含量,因直线斜率极低,意味着有效Se含量随之增加的幅度亦极小;有效Se与有机质无显著相关关系,这可能是有效Se中可被提取的与富里酸结合的有机态Se所占比例较低,或绝大部分Se以与胡敏酸结合的形态在土壤中被固定下来。

在碱性土壤中,硒酸盐含量较高,迁移能力较强,较容易被植物吸收;在酸性条件下,Se多以亚硒酸盐形式存在,虽易溶于水,易被植物直接吸收,但更易被土壤粘粒、氧化物等吸附而降低生物有效性^[21-23],研究区土壤酸化较严重,土壤中Se倾向于以亚硒酸盐形式存在。有研究表明^[21],土壤中P主要以磷灰石形式存在,且磷灰石易吸附亚硒酸盐,而几乎不吸附硒酸盐,也有人认为^[23]磷酸盐易于被土壤吸附,取代了土壤中固结的亚硒酸盐,从而提高了Se的生物可利用性。研究区表层土壤中有有效Se

与P呈正相关说明研究区土壤中有有效Se可能主要以亚硒酸盐形式存在。

土壤中元素含量高低、理化性质等都制约着植物对元素的吸收或富集能力。据相关性分析,水稻、大豆Se的生物富集系数与土壤中总Se、N显著负相关,与K₂O显著正相关(图5),如水稻Se的生物富集系数与土壤Se的相关方程为 $y = -0.3841x + 0.2994$,相关系数 r 为0.63($p=0.01, n=13$)。钾是作物必须的大量营养元素,它能促进作物根系发育,能促使水果和谷物籽实增大,从而促使了作物对Se的吸收,土壤中K₂O的含量从1.74%上升至2.79%时,水稻对Se的生物富集系数从10.72%上升至18.51%;氮素虽也是作物必须的大量营养元素,但主要以有机态的形式存在土壤中,总氮的含量越高,有机态氮也越高,即有机质含量越高,被有机质固定的Se越多,可被作物吸收的越少;有效Se随总Se含量的增大而增多,但增加的幅度极小,这意味着随着总Se的增加,有效Se含量占总Se的比例越来越低,即Se的生物有效性降低。

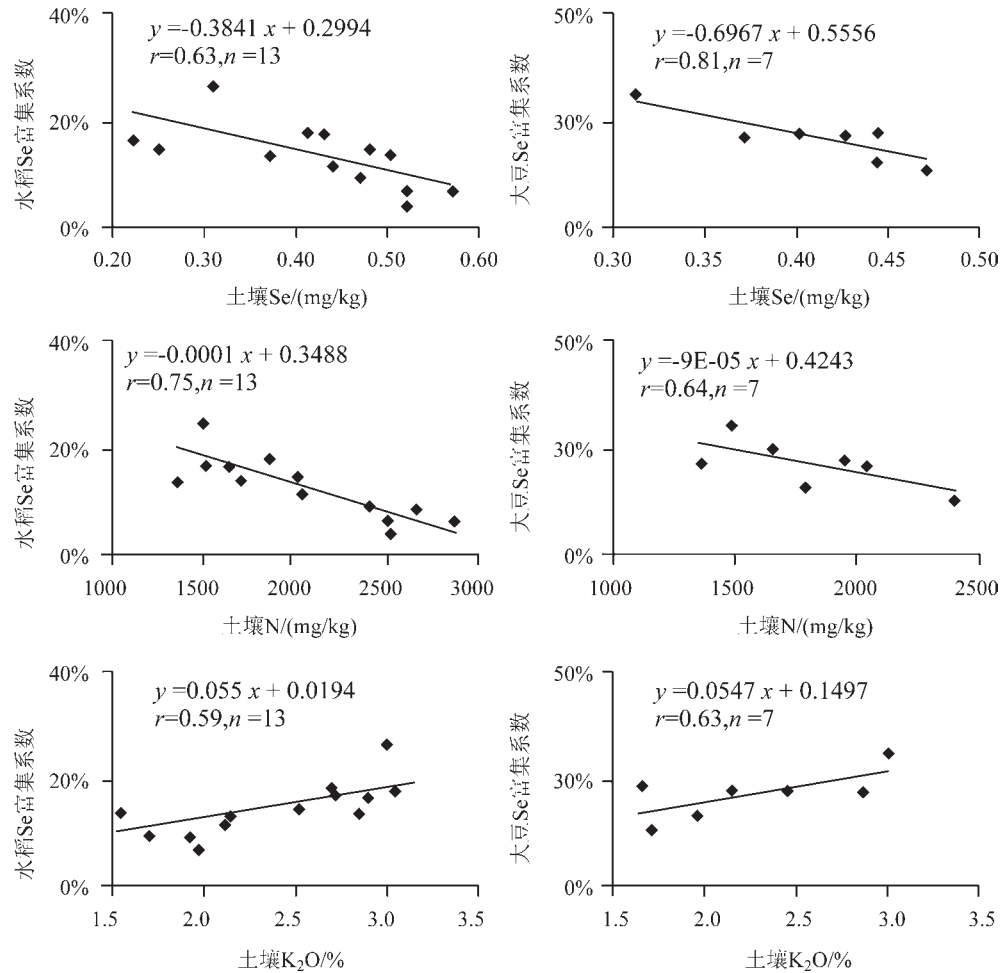


图5 作物中Se的生物富集系数与土壤总Se、N、K₂O含量的散点图
Fig.5 Scatter plot between enrichment factors of Se in crops and total Se, N, K₂O in soil

6 结论及建议

(1)区域地球化学调查数据显示研究区深表层土壤酸化趋势明显,表层土壤Se含量为0.34 mg/kg,在研究区中部地区和北部的东坑地区达到富硒水平,表层土壤重金属元素局部存在轻微污染,但总体较为安全。研究区表层土壤Se含量总体达到足硒,局部达到富硒水平,具备了开发富硒农产品的Se贮量资源。

表层土壤水平剖面表明,在成土母岩富硒的地区,土壤中Se含量较高,如东坑附近Se含量为0.51 mg/kg;垂向剖面表明,由上而下土壤Se含量变化表现为先升后降的规律,在40~50 cm深处富集最高。成土母质中Se的含量是土壤Se的持续供给来源,故富硒土壤的开发应尽量选择在富Se基岩所风化

土壤中。

(2)经生物地球化学调查发现:水稻中Se含量为0.05 mg/kg,生物富集系数为13.72%,富硒率为61.54%;大豆中Se含量为0.11 mg/kg,生物富集系数为26.99%,富硒率达100%;水稻、大豆中重金属元素含量总体偏低,其安全性极高。作物中Se高含量高富集特征为开发水稻、大豆富Se农产品提供物质前提。

(3)研究区表层土壤中有效Se与总Se有着极显著的正相关性,说明有效Se含量随总Se含量增大而增加,但直线斜率比较低,其增加的幅度较小;有效Se与CEC、N、P有较显著的正相关性,说明土壤中具有吸附性的粘土矿物、有机质粘粒能增加土壤中有效Se的含量,且土壤中有效Se主要以亚硒酸盐形式存在。因此,富硒农产品开发区,应选择

土壤中CEC、P、有机质含量略低地区。

水稻、大豆中Se的生物富集系数与土壤总Se、N具有显著负相关关系,与K₂O有显著的正相关关系。土壤钾含量丰富地区,作物对Se的富集能力较强,故在钾含量不足或贫乏地区,可以适量增施钾肥。在异常查证工作中所采集的水稻、大豆样品数略少,可能会影响到土壤—作物间Se迁移受控因素的可靠性。

致谢:感谢陈金华教授级高工在撰写及修改本文的过程中所提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 张艳玲,潘根兴,李正文,等.土壤-植物系统中Se的迁移转化及低Se地区食物链中Se的调节[J].土壤与环境,2002,11(4):388-391.
Zhang Yanling, Pan Genxing, Li Zhengwen, et al. Translation of selenium in the system of soil-plant and its regulation in food-chain [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(4):388-391 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵少华,宇万太,张璐,等.环境中Se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.
Zhao Shaohua, Yu Wantai, Zhang Lu, et al. Biogeochemical cycling of selenium, nutrition adjustment and differentiation cause in environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1197-1203(in Chinese with English abstract).
- [3] 王延亮,侯伟,侯占清,等.略论吉林省大骨节病与地质环境的关系[J].中国地质,2010,37(3):577-581.
Wang Yanliang, Hou Wei, Hou Zhanqing, et al. The relationship between the Kaschin-Beck disease and the geological environment in Jilin Province[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 577-581(in Chinese with English abstract).
- [4] 安永会,李旭峰,何锦,等.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,2010,37(3):587-593.
An Yonghui, Li Xufeng, He Jin, et al. Distribution characteristics of Kaschin-Beck disease in relation to geological environment of Zoige County[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 587-593(in Chinese with English abstract).
- [5] 许模,刘国,陈旭,等.川西北高原壤塘县大骨节病区水环境微量元素分析[J].中国地质,2010,37(3):600-606.
Xu Mo, Liu Guo, Chen Xu, et al. Trace element analysis of water environment in Kaschin-Beck disease area, Zamtang County, northwest Sichuan plateau[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 600-606(in Chinese with English abstract).
- [6] 王子健.中国低Se带生态环境中Se的环境行为研究进展[J].环境化学,1993,12(3):237-243.
Wang Zijian. Some biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt [J]. Environmental Chemistry, 1993,12(3): 237-243(in Chinese with English abstract).
- [7] 王子健,赵利华,彭安.低Se带土壤中Se的挥发过程研究[J].环境化学,1989,8(2):7-11.
Wang Zijian, Zhao Lihua, Peng An. Selenium evaporation from soils of Chinese Se-deficient belt [J]. Environmental Chemistry, 1989, 8(2): 7-11(in Chinese with English abstract).
- [8] 戎秋涛,翁焕新.环境地球化学[M].北京:地质出版社,1990:231-233.
Rong Qiutao, Weng Huanxin. Environmental geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 231-233(in Chinese with English abstract).
- [9] 郑达贤,李日邦,王五一.初论世界低硒带[J].环境科学学报,1982,2(3):241-249.
Zheng Daxian, Li Ribang, Wang Wuyi. A preliminary exposition on low-selenium zone in the world [J]. Acta Scientiae Circumstantian, 1982, 2(3): 241-249(in Chinese with English abstract).
- [10] 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.
Tan Jianan. The Atlas of Endemic Diseases and Their Environments in the People's Republic of China [M]. Beijing: Science press, 1989(in Chinese with English abstract).
- [11] 易秀.生态环境中的Se及其地方病[J].西安工程学院学报,2000,22(4):69-72.
Yi Xiu. Selenium in ecological environment and endemic disease [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2000, 22(4): 69-72(in Chinese with English abstract).
- [12] 布和敖斯尔,张东威,刘力.土壤硒区域环境分异安全阈值的研究[J].土壤学报,1995,32(2):186-193.
Bober Aoseer, Zhang Dongwei, Liu Li. Regional environmental differentiation and regional safety threshold of soil selenium[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(2): 186-193(in Chinese with English abstract).
- [13] 杨忠芳,余涛.湖南洞庭湖地区土壤酸化特征及机理研究[J].地学前缘,2006,13(1):105-112.
Yang Zhongfang, Yu Tao. A study of the characteristics and mechanisms of soil acidification in the Dongting Lake region in Hunan Province, South China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 105-112(in Chinese with English abstract).
- [14] 余涛,杨忠芳,唐金荣,等.湖南洞庭湖区土壤酸化及其对土壤质量的影响[J].地学前缘,2006,13(1):98-104.
Yu Tao, Yang Zhongfang, Tan Jinrong, et al. Impact of acidification on soil quality in the Dongting Lake region in Hunan Province, South China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 98-104(in Chinese with English abstract).
- [15] 文帮勇,杨忠芳,侯青叶,等.鄱阳湖地区土壤酸化与人为源氮的关系[J].现代地质,2011,15(3):562-568.
Wen Bangyong, Yang Zhongfang, Hou Qinye, et al. The relationship between soil acidification and nitrogen inputs in the Poyang Lake Area, Jiangxi Province, China[J]. Geoscience, 2011, 15(3): 562-568(in Chinese with English abstract).
- [16] 孙朝,侯青叶,杨忠芳,等.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,2010,37(6):

- 1760–1768.
Sun Zhao, Hou Qingye, Yang Zhongfang, et al. 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*, 2010, 37(6): 1760–1768 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴跃东, 向钊, 马玲, 等. 安徽石台大山地区硒的地球化学研究[J]. *矿物岩石*, 2007, 27(4): 53–59.
Wu Yuedong, Xiang Fan, Ma Ling, et al. The geochemistry study of selenium in the stone mountain area of Anhui Province[J]. *Mineral Petrol.*, 2007, 27(4): 53–59(in Chinese with English abstract).
- [18] 郇逸根, 董岩翔, 郑洁, 等. 地质因素影响下的硒在土壤–水稻系统中的迁移转化[J]. *物探与化探*, 2007, 31(1): 77–80.
Li Yigen, Dong Yanxiang, Deng Jie, et al. The transport and transformation of selenium in the soil–paddy plant system affected by geological factors[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(1): 77–80(in Chinese with English abstract).
- [19] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
Zhu Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783(in Chinese with English abstract).
- [20] 李永华, 王五一. Se的土壤环境化学研究进展[J]. *土壤通报*, 2002, 33(3): 230–233.
Li Yonghua, Wang Wuyi. Process on the study soil environmental chemistry of selenium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(3): 230–233(in Chinese with English abstract).
- [21] 樊海峰, 温汉捷, 凌宏文, 等. 表生环境中硒形态研究现状[J]. *地球与环境*, 2006, 34(2): 19–26.
Fan Haifeng, Wen Hanjie, Lin Hongwen, et al. Present progress in research on selenium speciation in the superegene environment[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2): 19–26(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘小明, 李泽琴, 沈松. 土壤中硒的生物可利用性研究进展[J]. *江西农业学报*, 2012, 24(9): 120–123.
Liu Xiaoming, Li Zeqin, Shen Song. Research progress in bioavailability of selenium in soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(9): 120–123(in Chinese with English abstract).
- [23] 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 Jianming, Liang Xiaobing, Lin Hongwen, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(1): 75–81(in Chinese with English abstract).
- [24] 李家熙, 张光弟, 葛晓立, 等. 人体硒的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: 1–7, 11–14.
Li Jiexi, Zhang Guangdi, Ge Xiaoli, et al. Prediction and Geochemical Environmental Character of Human Selenium Imbalances[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1–7, 11–14(in Chinese with English abstract).

A feasibility study of selenium–rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province

WEN Bang–yong¹, ZHANG Tao–liang¹, LI Xi–zhou², XIE Zheng–dong¹

(1. *Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang 330030, Jiangxi, China*; 2. *Geophysical and Geochemical Exploration Party, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration, Xi'an 710000, Shaanxi, China*)

Abstract: The results of regional geochemical survey show that selenium content of topsoil is 0.34 mg/kg, which indicates that the soil in the study area is selenium–sufficient or selenium–rich. The results also show that the content of heavy metals in soil is at a safe level. Geochemical anomaly inspection reveals that the Se–rich bedrock controls the distribution of Se–rich soils. There are many kinds of selenium–rich and high–quality agricultural products in the study area, such as selenium–rich rice and soybean, with the proportion of the selenium–enriched soybean reaching 100%. There is a significant positive correlation between plant available selenium and total selenium, and a remarkable correlation between plant available selenium and soil CEC, N and P; the clay minerals and organic matters in soils have a strong adsorption and solidification function for selenium. The available selenium mainly exists in the form of selenite. The biological enrichment coefficients of selenium show a significant negative correlation with soil total selenium and nitrogen but a positive correlation with K₂O.

Key words: selenium–rich; heavy metal element; soil development; transportation

About the first author: WEN Bang–yong, male, born in 1984, assistant engineer, mainly engages in the study of environment geochemistry and agogeology; E–mail: 343170393@qq.com.