

文章编号:1000-5471(2012)03-0060-07

# 硒在土壤—水稻系统中的迁移转化规律<sup>①</sup>

罗 杰<sup>1</sup>, 王佳媛<sup>1</sup>, 游远航<sup>2</sup>, 欧阳春飞<sup>1</sup>, 石迪秋<sup>1</sup>

1. 广东省工程勘察院, 广州 510510; 2. 广东省地质调查院, 广州 510510

**摘要:** 通过研究江门市都斛、牛江、宅梧 3 个优质稻产地土壤 Se 的空间分布规律及其与指示不同物质来源的特征元素组合的相互关系, 得出土壤 Se 来源于陆相沉积, 其中基性物源对土壤硒的贡献率大于花岗岩物源. Se 的 7 种形态中, 强有机态 Se 和腐殖酸态 Se 均占全量的一半以上, 且此 2 种形态与全量间相关系数高, 说明土壤中 Se 的富集与有机质的活动密切相关. 硒在水稻植株根、茎、叶、谷壳、米粒中的分布、迁移和总量传输, 是一个动态过程. 从土壤和根部传输上来的硒会逐渐在各器官内积累, 浓集系数大小顺序表现为  $C_{\text{茎-谷壳}} > C_{\text{土-根}} > C_{\text{茎-米}} > C_{\text{根-茎}}$  的特点. 水稻在地面以上部分的硒量不足植株总硒量的 50%. 高硒区土壤总硒与土壤有机态硒和残渣态硒有关, 硒的含量、形态明显受土壤 pH、Eh 和有机质含量影响.

**关键词:** 硒; 土壤-水稻系统; 地质地球化学特征

**中图分类号:** S153; P618.76

**文献标志码:** A

Se 是一种稀有分散元素, 在自然环境中广泛分布. 低 Se 土壤一般指含 Se 量小于 0.131 mg/kg 的土壤; 当土壤中 Se 量大于 0.4 mg/kg 时, 称其为富 Se 土壤, 大于(等于)3.0 mg/kg 时则属于 Se 过剩土壤<sup>[1-2]</sup>. 适当浓度的 Se 是人体和动物生长的必需微量元素, 但浓度太高时又会对人畜产生毒害作用. Se 能提高动物机体的免疫功能; Se 的代谢产物(如甲基化产物)具有抗癌作用, 可抑制癌的发生<sup>[3-4]</sup>; 含 Se 的抗氧化酶或蛋白可阻断活性氧和自由基的致病作用; Se 还能预防和抑制镉、砷、汞、银等有毒元素对机体的伤害<sup>[5]</sup>. 在食物链中, 由于 Se 主要来源于植物并最终来源于土壤, 土壤中 Se 的含量、形态和作物对 Se 的吸收转化等都直接影响着食物链中 Se 的水平<sup>[6-7]</sup>, 因此土壤中的 Se 一直是研究热点.

稻田土壤淹水耕作, 导致土壤 Se 在心土层积累<sup>[8]</sup>. 由于淹水条件下进行的还原淋溶作用, 还原态 Se 化合物因溶解度极小而难以下移, 这种情况下 Se 以何种形态由表土层向心土层移动; 干湿交替的种植过程中随着土壤的 Eh 变化, Se 的形态、价态及水稻对其吸收利用的能力如何变化; Se 在土壤—根系—茎—籽实—米粒之间的转化率及最终被人类吸收利用的程度都是土壤化学研究者非常关注的问题.

江门市是珠江三角洲地区重要的粮仓及菜篮子, 其社会经济发展与自然环境质量及生命健康的关系日益引起人们的重视. 开展江门土壤与健康质量元素 Se 的含量、分布及其影响因素的调查与研究, 揭示 Se 元素环境地球化学过程与土壤环境健康质量的关系, 发掘并开发富硒土壤及大宗富硒农作物, 具有明显科学价值和经济意义.

## 1 研究区概况

江门市位于广东省珠江三角洲经济区, 属于华南双季稻稻作区闽粤桂台平原丘陵双季稻亚区, 十分适

① 收稿日期: 2011-03-10

基金项目: 省部合作项目, 广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查“国土资源部农业地质与生态地球化学调查项目”(121201511216).

作者简介: 罗 杰(1981-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 工程师, 主要从事农业地质与生态地质研究.

合水稻生长<sup>[9-10]</sup>.

为研究不同土壤环境类型及地形地貌对水稻汲取 Se 能力的影响,选取了 3 处土壤成因不同、环境质量不同的的工作区进行详细研究.分别为都斛镇、牛江镇及宅梧镇.

A. 位于海冲积平原的都斛镇,南北均为侏罗纪细粒斑状黑云母二长花岗岩和白垩纪二长花岗岩,花岗斑岩.富硒土壤面积占研究区的 43.71%,呈岛状分布,随地形地貌变化不明显.

B. 位于宽谷冲积平原的牛江镇,土壤环境质量为一类.牛江富硒土壤面积占研究区的 24.46%,高值区呈岛状分布,在空间上具有较明显的由北向南含量增加的趋势.

C. 位于山间谷地冲积平原的宅梧镇,土壤环境质量以二类为主,西南部有少量一类土壤.宅梧富硒土壤面积占研究区的 35.83%,高值区呈条带状分布,受地形地貌控制强烈,在空间上具有明显的由山坡向平原,含量逐渐降低的趋势.

3 个水稻种植区的共同特点是水耕时间长,土壤熟化程度高亢,不存在干旱、涝渍、咸、酸、毒等土壤障碍因素,耕作层下面有完整的犁底层,犁底层下面有发育良好的潜育层,潜育层下是潜育层或母质层.区域内均存在较大面积的富硒水稻.

## 2 研究方法

### 2.1 土壤样的采取

表层土壤样品采集方法:避开明显点状污染地段(避开施肥穴等),刮去地表薄层浮土,自地表向下连续采集 0~20 cm 样品,在样点直径 15 m 范围内采集 3 个子样品组合为 1 件 1 kg 样品;

深层土壤样品采集方法:用洛阳铲挖掘 200 cm,按土壤剖面分为耕作层(A)—犁底层(P)—渗育层(W)—潜育层(G)—母质层(C)分别取样,2~3 点组合成 1 个 1 kg 土壤样.表层和深层土壤样品在室内风干备用;

### 2.2 水稻样的采取

水稻采样时间为大面积采摘或收获期,水稻采样点同时采集作物及根系土壤,样品采取分早茬和晚茬分别采取,以晚茬为主,早茬用于对比.由于水稻生长的不均一性,采用多点取样,每一个采样点选取 3~5 个面积 1~3 m<sup>2</sup> 的水稻地块进行取样,及时脱粒混合.

### 2.3 样品检测

硒元素分析采用原子荧光光谱法,由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心检测.测试过程加入土壤国家标准样品 GBW07401 进行分析质量控制.除全量外还检测 Se 的水溶态、离子交换态、弱有机结合态、强有机结合态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物吸附态、残渣态及各价态.所有样品的报出率为 100%,准确度和精密度监控样合格率达 97%~100%.

土壤按 >20, 20—60, 60—120 和 120—160 目各粒级检测 Se 的含量.

水溶态 Se: 0.25 mol/LKCl 提取,室温(25℃)连续震荡 1 h;

交换态及碳酸盐结合态 Se: 0.7 mol/LKH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 提取,室温(25℃)连续震荡 4 h;

铁锰氧化物结合态 Se: 2.5 mol/LHCl 提取,90℃水浴中间隙震荡 50 min;

有机结合态及元素态 Se: 5%K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 和 1:1HNO<sub>3</sub> 按体积比 4:1 提取,95℃水浴中间隙震荡 3 h;

残渣态 Se: 测定方法同总 Se.

土壤经风干后,过 0.15 mm 筛,按水土比 10:1 的比例加入浸提液,震荡后 4 000 r/min 离心 10 min,所得上清液作 Se 含量测定.其残渣供下一形态提取.

### 2.4 数据处理

所有分析结果用 Excel、SPSS 16 和 Statistica 6.0 统计分析软件进行统计分析.

## 3 结果与分析

### 3.1 表层土壤 Se 的物质来源

从地质统计学角度,通过计算元素 Se 的半方差函数,都斛、牛江、宅梧 3 个研究区 Se 的块金值和基台

值的比值分别为 18.80%, 29.27% 和 17.04%, 均小于 30%, 表明自然过程是土壤属性空间变异的内在驱动力, 说明区域内 Se 元素受人为扰动极小, 主要是受自然背景控制<sup>[11-12]</sup>.

从地质、地球化学角度, 结合本次土地质量地球化学评估工作成果, 都斛土壤中的 Se 与指示花岗岩物源的 Ga—Al—Mo—Zn—Pb 组合为强正相关, 相关系数大于 0.65; 与指示基性物源的 Ti—Cr—Fe 组合存在正相关关系, 相关系数大于 0.45; 与指示土壤肥力和有机质的 N—Corg 为强正相关, 相关系数为 0.58; 与指示海相沉积及岩体内石英和长石的 Si—K—Na 组合为强负相关, 相关系数小于 -0.55(表 1). 说明都斛土壤中的 Se 主要来源于花岗岩物源, 并与有机质紧密结合、部分被生物胶体吸附.

牛江土壤中的 Se 与指示基性物源的 Ti—Cr—Ni—Fe—Co 的组合为强正相关, 与其中的 Ti, Cr 和 Ni 为极强正相关, 相关系数大于 0.75; 与指示花岗岩物源的 Mo—Al—P 存在正相关关系, 相关系数大于 0.35; 与指示土壤肥力和有机质的 N—Corg 为强正相关, 相关系数大于 0.55. 说明牛江土壤中的 Se 来源于基性物源和花岗岩物源, 其中基性物源对土壤的 Se 贡献率大于花岗岩物源.

宅梧土壤中的 Se 与指示基性物源的 Fe—Ni—Cr—Ti 组合为极强正相关, 相关系数大于 0.70; 与指示花岗岩物源的 Al—Mo—Zn 组合为强正相关, 与其中的 Mo 为极强正相关, 相关系数为 0.80; 与代表岩体中石英和长石的组合 Si—Na—K 为强负相关, 相关系数小于 -0.65; 与指示土壤肥力和有机质的 N—Corg 为极强正相关, 相关系数大于 0.70. 说明宅梧土壤中的 Se 来源于基性物源和花岗岩物源, 土壤中的 Se 与有机质结合十分紧密.

表 1 研究区土壤 Se 与特征元素组合相关系数表

	Ga	Al	Mo	Zn	Pb	Ti	Cr	Fe
都斛 Se	0.73**	0.68**	0.82**	0.69**	0.72**	0.63*	0.47	0.59*
牛江 Se	0.49	0.43	0.54	0.51	0.54	0.87**	0.92**	0.65*
宅梧 Se	0.51	0.54	0.8**	0.58*	0.59*	0.78**	0.81**	0.84**
	N	Corg	Si	K	Na	Ni	Co	P
都斛 Se	0.58*	0.58*	-0.58*	-0.61*	-0.57*	0.59*	0.42	0.51
牛江 Se	0.56*	0.61*	-0.47	-0.58*	-0.53	0.76**	0.67**	0.48
宅梧 Se	0.81**	0.78**	-0.66**	-0.74**	-0.68**	0.76**	0.51	0.42

\* Sig<0.05; \*\* Sig<0.01.

### 3.2 Se 在土壤剖面中的分布特征及其影响因素

3 个研究区土壤 Se 变异系数较小, 分别为 0.19, 0.45 和 0.25, 说明各数值与平均值偏离不大, 即平均值可以较好的代表各个区的情况.

土体构型总体反映了土壤形成过程中的物质迁移、转化和积聚的结果. 土壤剖面硒含量分布研究表明硒多富集在表土层中, 向深部至母质层有迅速降低的趋势(表 1). 这是因为成土过程中硒趋向于在高铁铝、富泥炭和腐殖质的土壤中富集. 土壤呈酸性时, 硒易被结合于土壤腐殖质物质中, 不利于溶解迁移, 降低了硒的淋溶流失. 硒在表土层以腐殖酸结合态、强有机态和残渣态的形式聚集, 为此论点提供论据(表 2).

表 2 不同土壤层次及氧化还原电位土壤 Se 的含量及价态 Se: (mg · kg<sup>-1</sup>), Eh/mV

	海陆交互相					宽谷冲积					丘间谷地				
	Se	Eh	Se <sup>6+</sup>	Se <sup>4+</sup>	Se <sup>(0, -2)</sup>	Se	Eh	Se <sup>6+</sup>	Se <sup>4+</sup>	Se <sup>(0, -2)</sup>	Se	Eh	Se <sup>6+</sup>	Se <sup>4+</sup>	Se <sup>(0, -2)</sup>
耕作层	0.43	427	94.6%	1.0%	6.4%	0.68	476	89.6%	2.8%	6.6%	0.58	387	84.3%	1.7%	12.6%
犁底层	0.35	237	83.2%	2.8%	13.7%	0.49	268	79.2%	4.4%	12.8%	0.41	213	71.6%	3.4%	19.4%
渗育层	0.34	92	52.8%	10.6%	33.0%	0.26	98	40.3%	17.5%	39.9%	0.46	426	92.1%	0.8%	8.2%
潜育层	0.32	-27	27.8%	6.2%	70.2%	0.22	21	17.3%	10.0%	77.7%	0.32	8	30.5%	8.8%	59.6%
母质层	0.29					0.17					0.30				

收割时期土壤耕作层被晒干, 兼之有腐烂的稻秆覆盖, 所以 Eh 最高, 一般达 450 mV 以上; 犁底层含水, Eh 降低; 都斛和牛江地下水水位埋深较浅, 犁底层以下水分饱和, 氧化还原电位随土壤层次降低; 宅梧地下水水位埋深较深, 由于犁底层阻隔, W 层干燥, Eh 较高.

随着  $Eh$  逐渐下降时,  $Se^{6+}$  迅速下降,说明  $Se^{6+}$  还原时的  $Eh$  约为 450~200 mV,  $Eh$  由 450 mV 降至 100 mV,  $Se^{6+}$  的还原产物  $Se^{4+}$  逐渐上升,其中在 250~100 mV 内上升较快,但  $Eh < 100$  mV 时  $Se^{4+}$  又迅速下降,推测  $Se^{4+}$  还原时的  $Eh$  值在 100 mV 左右。

氧化还原电位直接控制着水稻土壤中硒的价态及溶解性<sup>[13-14]</sup>。氧化性条件下硒主要以  $Se^{6+}$ 、 $Se^{4+}$  存在,此时硒的溶解性最高;硒的溶解性随氧化还原电位降低而逐渐下降,在较强的还原性条件下硒的溶解性很低,主要以不溶性  $Se^{(0, -2)}$  存在(表 1)。

### 3.3 Se 在表层土壤中的形态

农作物对赋存在土壤中 Se 吸收的程度取决于 Se 形态的有效性,各种形态 Se 含量与土壤的全量 Se 在量上存在内在的联系。

都斛海陆交互平原表层土壤中全量 Se 在 0.087~0.281 mg/kg,有效态 Se 含量范围为 0.004~0.009 mg/kg,其中 7 种形态 Se 平均占全量比例的大小顺序为:残渣态(39.72%),强有机态(32.89%),腐殖酸态(15.43%),水溶态(4.61%),离子交换态(2.84%),碳酸盐态(2.08%)和铁锰氧化态(1.73%),有效 Se 占全量的 2.73%。

牛江宽谷冲积平原表层土壤中全量 Se 在 0.131~0.429 mg/kg,有效态 Se 含量范围为 0.005~0.018 mg/kg,其中 7 种形态 Se 平均占全量比例的大小顺序为:强有机态(33.67%),残渣态(26.13%),腐殖酸态(24.62%),水溶态(3.52%),离子交换态(3.02%),碳酸盐态(2.51%)和铁锰氧化态(1.51%),有效 Se 占全量的 5.53%。

宅梧丘间谷地表层土壤中全量 Se 在 0.382~0.476 mg/kg,有效态 Se 含量范围为 0.014~0.019 mg/kg,其中 7 种形态 Se 平均占全量比例的大小顺序为:腐殖酸态(50.45%),强有机态(25.45%),残渣态(19.09%),水溶态(2.27%),离子交换态(2.02%),碳酸盐态(1.82%)和铁锰氧化态(0.68%),有效 Se 占全量的 3.41%。

不同成因土壤中 Se 的形态均以腐殖酸态、强有机态和残渣态为高,且远高于其他形态,3 个研究区土壤 7 种形态 Se 中,强有机态 Se 和腐殖酸态 Se 均占全量的一半以上,且此 2 种形态与全量间相关系数高,说明土壤中 Se 的富集与有机质的活动密切相关<sup>[15]</sup>。水溶态 Se 和铁锰氧化态 Se 随土壤 Se 全量变化的幅度极小,相关性也不显著,这说明江门市多数土壤的水溶态 Se 基本上处于溶解平衡的状态,而铁锰氧化物对 Se 的吸附能力远不如有机质团块。

残渣态 Se 在全量中所占比例和相关系数均高,说明有相当含量的 Se 附于矿物晶格不能被作物吸收利用。

### 3.4 Se 在土壤中的转化与迁移

土壤中各种形态的硒通过氧化作用、还原作用、生化作用和甲基作用可以相互转化。元素态硒在土壤中存在较少,不溶于水,作物不能直接吸收利用<sup>[16]</sup>。在一定条件下,可以氧化成为硒酸盐和亚硒酸盐。

硒化物存在于还原的酸性富有机质环境中,不易溶解于水且极难被氧化,其低溶解度有利于保留在土壤中,使作物不能直接吸收,在风化过程中可释放出一些可溶性硒;亚硒酸盐是水溶性的,存在于弱酸性氧化土壤条件下(表 1),易与铁、铝氧化物形成难溶性复合体存在于土壤中,易被还原为不能被植物吸收利用的单质元素态硒;硒酸盐为水溶性硒,容易从氧化碱性土壤中淋滤出来被植物吸收,是植物最易吸收的形式;有机态硒是富硒植物腐解的产物,并非都能被作物吸收利用,部分易被微生物分解呈气态烷基硒化物而挥发,碱土中硒的挥发作用比酸土大。

除土壤化学性质外,土壤粒度也对 Se 的形态和迁移转化有一定的影响。土壤粘粒对硒有吸附作用,一般而言,亚硒酸盐与吸附质间的亲和力较强,受粘粒矿物和倍半氧化物固定,而硒酸盐与吸附质的亲和力较弱<sup>[17]</sup>。

土壤有机质对土壤硒的影响具有二重性:当它作为有机—无机复合体的一部分并且吸附阴离子时,可能有利于硒的循环;当它作为阴离子的环境物质时,则可能成为屏障从而影响硒的传输,而后者占主导地位,即有机质对硒的影响主要表现为固定<sup>[18]</sup>。

由表 3 可知, 粒度最粗的样品(20 目)具有最高的 Se 含量和最低的变异系数, 变异系数仅为 0.134, 这是因为 Se 以残渣态存在于矿物晶格中或以吸附态存在于大的有机质团块中.

表 3 表层土壤硒全量形态分析的统计

/(mg · kg<sup>-1</sup>)

土壤成因	项目	全量	水溶态	离子交换态	碳酸盐态	腐殖酸态	铁锰氧化态	强有机态	残渣态
海陆交互相	含量范围	0.087~0.281	0.005~0.013	0.005~0.008	0.004~0.006	0.020~0.065	0.003~0.006	0.019~0.107	0.019~0.140
	平均	0.22	0.01	0.01	0	0.03	0	0.07	0.09
	变异系数	0.19	0.20	0.14	0.14	0.31	0.21	0.29	0.34
	占全量比例/%		4.61	2.84	2.08	15.43	1.73	32.89	39.72
	与全量相关系数		-0.18	0.28	0.26	0.63	0.11	0.85	0.68
宽谷冲积	含量范围	0.131~0.429	0.002~0.010	0.004~0.010	0.003~0.007	0.017~0.103	0.001~0.004	0.034~0.152	0.025~0.114
	平均	0.20	0.007	0.006	0.005	0.049	0.003	0.067	0.052
	变异系数	0.395	0.257	0.317	0.317	0.585	0.227	0.462	0.446
	占全量比例/%		3.52	3.02	2.51	24.62	1.51	33.67	26.13
	与全量相关系数		-0.05	0.37	0.26	0.82	-0.13	0.91	0.83
丘间谷地	含量范围	0.382~0.476	0.009~0.011	0.003~0.010	0.003~0.011	0.186~0.257	0.001~0.003	0.101~0.128	0.060~0.106
	平均	0.44	0.01	0.007	0.008	0.222	0.002	0.112	0.084
	变异系数	0.114	0.083	0.033	0.544	0.16	0.121	0.128	0.271
	占全量比例/%		2.27	2.27	1.82	50.45	0.68	25.45	19.09
	与全量相关系数		-0.03	0.36	-0.26	0.79	-0.24	0.76	0.95

根据 Se 的形态分析, 3 个研究区 Se 的腐殖酸态、强有机态和残渣态的含量远高于其他形态(表 2), 此粒级与水稻 Se 呈一定负相关关系, 相关系数为 -0.44; 中等粒度的样品(20—60 目)具有最低的 Se 含量和最高的变异系数, 变异系数为 0.291, 受样品中富 Se 岩石碎块、碎屑的扰动和影响, 也是唯一一个与水稻 Se 呈正相关关系的粒级; 粒度较细的样品(60—120 和 120—160 目)Se 含量和变异系数极为相似, 平均含 Se 分别为 0.392 和 0.386 mg/kg, 变异系数分别为 0.143 和 0.144, 此粒级与水稻中的 Se 无明显相关关系.

说明粘粒淋溶迁移对土壤 Se 的迁移的影响不可忽视.

表 4 土壤各粒级 Se 含量

/(mg · kg<sup>-1</sup>)

	>20 目	20—60 目	60—120 目	120—160 目
都斛土壤粒度 1	0.406	0.365	0.352	0.308
都斛土壤粒度 2	0.396	0.366	0.444	0.409
都斛土壤粒度 3	0.401	0.391	0.418	0.392
牛江土壤粒度 1	0.327	0.291	0.322	0.356
牛江土壤粒度 2	0.501	0.250	0.336	0.359
牛江土壤粒度 3	0.359	0.389	0.363	0.372
宅梧土壤粒度 1	0.447	0.447	0.473	0.483
宅梧土壤粒度 2	0.454	0.147	0.431	0.412
含量范围	0.327~0.501	0.147~0.447	0.322~0.473	0.308~0.483
平均值	0.411	0.331	0.392	0.386
变异系数	0.134	0.291	0.143	0.144

### 3.5 Se 水稻中的积累与分配

都斛水稻土的成土母质为海相冲积物, pH 值的平均值为 5.2, 变异系数为 0.12; 牛江水稻土的成土母质为宽谷冲积物, pH 值的平均值为 5.6, 变异系数为 0.11; 宅梧水稻土的成土母质为丘间谷地冲积物, pH 值的平均值为 5.2, 变异系数为 0.10. 3 个研究区均属酸性土壤环境.

水稻根系 Se 量 0.27~0.56 mg/kg, 普遍高于土壤 Se 含量, 分配系数值为 1.27~2.35 之间, 说明水稻根系能从土壤中浓集硒. 水稻地上部各器官硒量普遍低于根系值, 其多少顺序表现为根, 谷壳, 茎和米的

特点, 地上部硒量仅占植株总硒量的 40%~50%。

根茎之间的分配系数为 0.13~0.30, 说明水稻从土壤吸收 Se 以后, 向地上部分运转是比较困难的。而谷壳-茎的分配系数为 3.36~4.41, 远大于米-茎的分配系数, 可能原因有三点:

1. 稻谷由米糠、麸皮和精米构成, 硒进入稻谷后遭受米糠和麸皮的截留和累积, 精米中的硒量必定减少;
2. 谷壳通过茎吸收营养元素的时间长于米粒, 研究表明水稻拔节期至灌浆期之间对营养元素的吸收能力最强<sup>[19]</sup>, 在孕穗期谷壳即可吸收养分, 而米粒则要到灌浆期才能汲取。
3. 硒的外源输入。尘土、动植物、土壤及沉积物中微生物代谢释放出的挥发性硒和人类燃煤、燃油释放的硒可进入空气; 燃煤过程所释放的硒主要以气溶胶形式存在、排放的粉煤灰中, 硒以  $Se^{4+}$  形式存在<sup>[20]</sup>, 谷壳从大气获取 Se 后先截留一部分再传导给米粒。

表5 各介质 Se 分配系数

	土壤 Se	根系 Se	茎 Se	谷壳 Se	稻米 Se	$\frac{C_{根}}{C_{土壤}}$	$\frac{C_{茎}}{C_{根}}$	$\frac{C_{谷壳}}{C_{茎}}$	$\frac{C_{米}}{C_{茎}}$
都斛	0.22	0.39	0.076	0.255	0.048	1.77	0.19	3.36	0.63
牛江	0.2	0.47	0.082	0.362	0.043	2.35	0.30	4.41	0.52
宅梧	0.44	0.56	0.074	0.261	0.046	1.27	0.13	3.53	0.62

## 4 结 论

1) 研究区水稻土总体上属中硒土壤, 不同区水稻土硒变异系数极小, 局部有富积并产出较大面积的富硒水稻。硒多富集在表土层中, 与造岩元素组合的相关性极高, 说明土壤中的硒主要来源于岩石风化并向深部至母质层有迅速降低的趋势。

2) 随着土层的变化, 氧化还原条件及土壤粒度改变, 硒的迁移转化富集规律也发生了变化。随着  $Eh$  逐渐下降时, 可溶性的六价硒迅速下降, 在淹水条件下  $Eh$  进一步降低, 最终产生可溶性极低的单质硒和硒化物。土壤中硒的活动性状主要取决于土壤成土过程和成土层的风化淋溶产物, 以及腐殖酸对其的控制和影响。

3) 硒的形态以腐殖酸态、强有机态和残渣态为高, 其中强有机态硒和腐殖酸态硒均占全量的一半以上, 且此 2 种形态与全量间相关系数高, 说明土壤中硒的富集与有机质的活动密切相关。

4) 水稻根系能从土壤中富集硒, 但向地上部分运转则相对困难, 根系硒含量占植株的一半以上, 谷壳也能从不同的环境富集硒。根系和谷壳可用来饲养动物。

## 参考文献:

- [1] 刘兴艳, 朱静平, 陈 研. 成都市龙泉驿区土壤含硒量的研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(12): 74-78.
- [2] 李家熙, 张光第, 葛晓云. 人体硒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: 54-58.
- [3] 廖金凤. 土壤环境中的硒对人和动物健康的影响 [J]. 广东微量元素科学, 2002, 9(3): 20-23.
- [4] 陈以水, 熊 红. 硒与癌症 [J]. 广东微量元素科学, 2002, 9(10): 44-46.
- [5] 赵中秋, 郑海雷, 张春光. 土壤硒及其与植物硒营养的关系 [J]. 生态学杂志, 2003, 22(1): 22-25.
- [6] 张瑞宇, 周文斌. 重庆城口主要资源植物含硒量调查及评价 [J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(3): 270-274.
- [7] 宋代军, 李建文. 奶山羊毛奶及体组织硒含量研究 [J]. 西南农业大学学报, 1995, 17(6): 557-560.
- [8] KANG Yu-mei, NAKO N, KYMA K. Distribution and form of Selenium in Paddy Soil [J]. Soil Sci Plant Nutr, 1991, 37(3): 447-485.
- [9] 任久江. 气候波动对水稻产量的影响 [J]. 西南农业大学学报, 1991, 13(3): 275-279.
- [10] 程方民, 钟连进. 不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析 [J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 187-191.

- [11] 郑茂坤, 骆永明, 赵其国. 企业密集区土壤主要污染物的空间分布及其预测性初步探讨 [J]. 土壤, 2009, 41(4): 540-547.
- [12] 孙 凡, 游 翔, 刘伯云. 四川省水土流失空间分布特征 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(12): 40-44.
- [13] 何振立, 章明奎, 黄昌勇. 岷县几种主要土壤 Se 的状况及有效度评价 [J]. 生态学报, 1994, 14(1): 512-561.
- [14] 赵美芝. 影响土壤 Se 有效性的若干因子 [J]. 土壤, 1991, 23(5): 236-2240.
- [15] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文. 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.
- [16] 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.
- [17] 廖金凤. 海南省土壤中的硒 [J]. 地域研究与开发, 1998, 17(2): 65-68.
- [18] GUSTAFSSON J P, JOHNSON L, 王美珠. 瑞典森林土壤中有有机质对硒的吸持作用 [J]. 土壤学进展, 1995, 23(2): 43-49.
- [19] 季彪俊. 影响水稻产量因子的研究 [J]. 西南农业大学学报, 2005, 27(5): 579-583.
- [20] 秦海波, 朱建明, 朱咏喧. 大气环境中硒的存在形式、来源及通量 [J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 304-314.

## Migration and Transformation of Se in the Soil-Rice System

LUO Jie<sup>1</sup>, WANG Jia-yuan<sup>1</sup>, YOU Yuan-hang<sup>2</sup>,  
OU-YANG Chun-fei<sup>1</sup>, SHI Di-qiu<sup>1</sup>

1. Guangdong Engineering Investigation Institute, Guangzhou 510510, China;

2. Guangdong Geologic Survey Institute, Guangzhou 311203, China

**Abstract:** The interrelationship between the spatial distribution of soil Se and its characteristic element combinations that indicate different origin materials of three high quality rice-cultivating areas in Jiangmen city (Douhu, Niujiang and Zhaiwu) of Guangdong province was study. The results showed that soil Se in those areas resulted from continental deposits, of which the base source contributed more to soil Se than the granite source. Of the seven Se species studied, the species strongly bound in organic compounds and the humic acid-bound species accounted for more than half of total Se content, and the correlation coefficient between these two Se forms and total Se was high, indicating that the enrichment of Se in soil is closely related with organic matter activities. The distribution, migration, and the total transmission of Se in the roots, stems, leaves, chaff and grain of rice constituted a dynamic process. The Se transferred upward from the soil and the roots was gradually accumulated in various organs, the concentration factor being in the order of C stem-chaff > C soil-root > C stem-grain > C root-stem. Se content of the shoots of rice was less than 50% of total Se of the plant. Total soil Se of the high-Se areas was related to organic Se and residual Se in the soil. The content and forms of Se were significantly affected by soil pH, Eh and organic matter content.

**Key words:** Se, soil-rice system; geological and geochemical characteristics

责任编辑 陈绍兰