

# 土壤性质对土壤-水稻系统中硒迁移的影响<sup>①</sup>

周 骏, 刘兆云, 孟立丰\*, 朱 晨

(浙江大学地球科学学院, 杭州 310027)

**摘 要:** 采集浙江省北部水稻种植区成熟期水稻和对应的土壤样品, 分析土壤中硒(Se)总量和 7 种形态 Se 的含量以及水稻根、茎、叶、谷各部位的 Se 含量。结果表明: 研究区土壤 Se 平均含量 0.344 mg/kg, 达到中 Se 土壤水平, 并且与土壤有机质含量呈显著正相关。7 种 Se 形态中, 强有机结合态和腐植酸结合态是主要的两种形态, 占 Se 全量的 75.92%; 离子交换态、水溶态的含量在 1.7% 左右; 碳酸盐结合态为 3.2%。水稻根部富集了大部分的 Se(73%), 其各部位中 Se 含量随根、叶、茎、谷的顺序依次减少。将土壤按有机质和 pH 的大小进行分区分析后发现, 当有机质含量小于 25 g/kg 时, 土壤铁锰氧化物结合态 Se 与水稻根部 Se 呈显著正相关; 当有机质含量大于 35 g/kg 时, 土壤铁锰氧化物结合态 Se 与谷 Se 呈显著正相关; 当 pH>7 时, 碳酸盐态 Se 与谷 Se 呈显著负相关。水溶态 Se 和离子交换态 Se 与水稻各部位 Se 含量之间并未呈现明显的相关性。水稻各器官 Se 含量受土壤 pH、有机质含量、各形态 Se 含量等土壤性质的交互作用影响。

**关键词:** 土壤; 水稻; 硒; 形态分析

**中图分类号:** S151.9

1973 年, 世界卫生组织(WHO)将硒(Se)元素确认为人体必需的微量元素之一。目前已有大量研究表明 Se 对人体健康的重要性, 摄入过量 Se 会导致蹒跚病<sup>[1]</sup>, Se 的缺乏又会直接导致克山病、大骨节病等疾病<sup>[2]</sup>, 而其在预防癌症、心血管病等疾病以及延缓衰老方面也功不可没<sup>[3-4]</sup>。人体 Se 摄入量的建议值为 55  $\mu\text{g}/\text{天}$ <sup>[5]</sup>, 地壳中 Se 元素的丰度只有 0.05 ~ 0.09 mg/kg<sup>[6]</sup>, 因此在世界范围内, 约有 5 ~ 10 亿的缺 Se 人口。中国是一个缺 Se 大国, 大约有 1 亿人长期处于缺 Se 状态<sup>[7-8]</sup>, 境内土壤中 Se 的含量呈西北地区(0.19 mg/kg)、东南地区(0.23 mg/kg)高, 中部地区低(0.13 mg/kg)的马鞍形分布<sup>[6]</sup>。

土壤中的 Se 被植物汲取后, 通过食物链被人体吸收利用, 这是人体中 Se 最主要的来源<sup>[9]</sup>。植物对 Se 的吸收效果与多种因素有关, 例如土壤中的 Se 含量及存在形态、植物的种类、土壤的理化性质等<sup>[10]</sup>。随着土壤中 Se 形态浸提技术的发展, 可以将 Se 细分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐植酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态 7 种形态<sup>[11]</sup>。研究证实, 植物中的 Se 含量并不是由土

壤中的 Se 总量所决定的, 与其所含各形态 Se 的占比有很大关系<sup>[12]</sup>, 植物在生长过程中对不同形态 Se 的吸收机制不同。其中水溶态 Se 和离子交换态 Se 是植物最容易吸收的两种形态<sup>[13]</sup>。目前关于植物 Se 含量与土壤中不同形态 Se 的相关性研究并不多见, 尤其是对水稻主要吸收的 Se 形态的研究方面还缺乏明确的结论。

水稻作为我国最主要的粮食作物, 多年来关于水稻对土壤中 Se 元素的吸收富集特征进行了许多研究<sup>[14-15]</sup>。土壤吸附和固定、淋溶与迁移、水稻吸收、气态挥发是 Se 在土壤-水稻系统中迁移转化最主要的 4 个过程<sup>[16]</sup>, 而在水稻吸收 Se 的过程中, 土壤中的 Se 形态和土壤性质又是制约其吸收效率的主要因素。已有初步研究表明, 土壤 Se 含量与有机质之间存在一定的正相关, 而与 pH 的相关性却要弱得多<sup>[17]</sup>, 但是, 关于土壤中不同形态 Se 与植物 Se 含量之间的相关性目前尚未有一个统一的认识。因此, 细致、深入地明确土壤性质对水稻 Se 吸收效果的影响, 对合理利用浙江省的富 Se 土地资源具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302165)和浙江省地质勘查资金项目(省资 2014002)资助。

\* 通讯作者(lifengmeng@zju.edu.cn)

作者简介: 周骏(1990—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事环境地球化学的研究。E-mail: zhoujunid@zju.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省北部、杭嘉湖平原内,平均海拔 3 m,地势低洼、平坦,河流密布,湖泊众多。浙北地区发育巨厚的第四系湖沼相和滨海相松散沉积物,岩性以亚砂土、亚黏土、黏土、粉砂土为主<sup>[18]</sup>;区内主要有 4 种土壤类型,即水稻土、红壤、潮土和滨海盐土<sup>[19]</sup>,成土母质以湖沼相沉积物和更新世红土为主。表层土壤中 Se 的富集程度较高,但不同地段富集程度差异较大,大多处于中等富集和强富集状态。Se 富集区部分对应于以古生代和中生代地层为

母质的富 Se 土壤区,部分对应于以滨海洪冲积-海积物为母质的富 Se 土壤区<sup>[19]</sup>。

### 1.2 样品采集和预处理

在浙江省北部的湖州市南浔区和嘉兴市嘉善县两个地区(图 1),选择面积较大的典型水稻种植基地,采用 GPS 定位的方法,于水稻成熟期间,定点采集具有代表性的水稻样品 30 株,以及相对应的耕作层(0~20 cm)土壤样品 30 件。水稻样品分离为根、茎、叶、谷 4 部分,用去离子水洗净,95℃ 烘箱内杀青 30 min 后,60℃ 下烘干至恒重,保存备用;土壤样品经自然风干、除杂、碾磨后,过 80 目尼龙筛,保存备用。

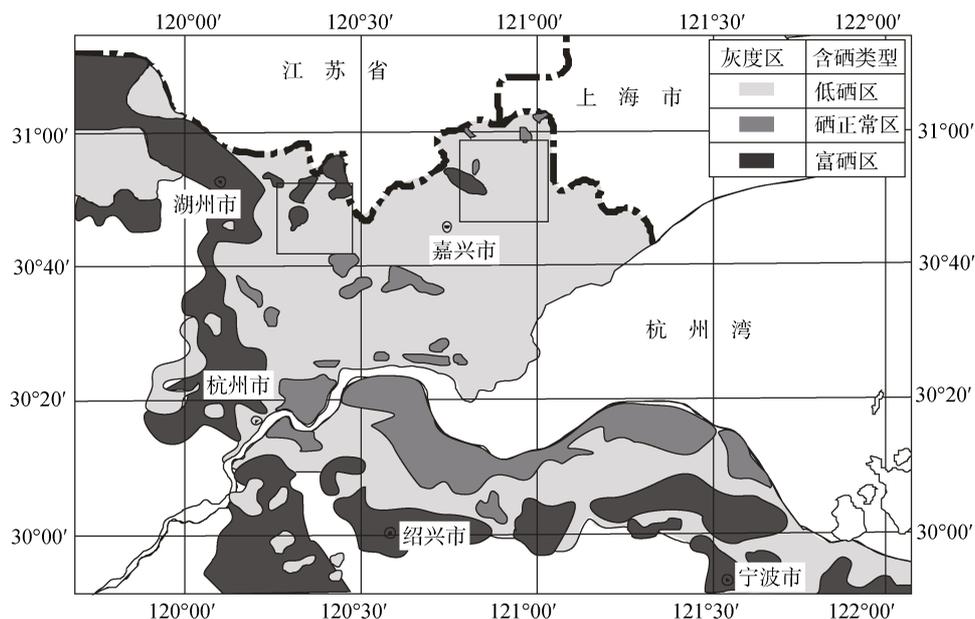


图 1 采样点位置图<sup>[20]</sup>

Fig. 1 Location of sampling sites

### 1.3 样品分析测定

土壤 pH 采用土水质量体积比为 1:2.5 的比例混合后用便携式 pH 计直接测定,土壤有机质含量用重铬酸钾外加热法测定<sup>[20]</sup>。土壤样品和水稻样品中各元素含量测定均由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心检测。土壤中不同 Se 形态的提取与检测依据《中国地质调查局地质调查技术标准》分步提取<sup>[11]</sup>:蒸馏水提取水溶态;MgCl 提取离子交换态;NaAc 提取碳酸盐态;Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 提取腐殖酸结合态;NH<sub>2</sub>OH、HCl 提取铁锰氧化态;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 提取强有机结合态;HNO<sub>3</sub> 提取残渣态,具体流程如图 2 所示。此外还检测了土壤中其他元素的含量:XRf 测定 S、Cr、Pb、Zn 含量;ICP-MS 测定 Cd 含量;AFS 测定 Se、As、Hg 含量。将水稻根、茎、叶、谷 4 个部位进行碾磨加工后,分别称取 0.500 0~2.000 0 g 样品于干净的微波消解仪内罐中,

加入 10 ml 浓硝酸、2 ml 过氧化氢进行样品分解,待消解完成后用洗瓶将溶液移入 50 ml 烧杯中,加高氯酸 0.5 ml,在电热板上溶样至高氯酸冒烟取下,用水定容至 50 ml,取 5 ml 溶液用 ICP-MS 测定 Se 含量<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理

所有测定结果采用 SPSS v19.0 for Windows 和 Excel 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 调查区土壤基本特征

本研究共采集 30 个土壤样品,对数据统计分析表明,研究区域水稻土属于弱酸性土壤,pH 5.30~7.46,平均为 6.35;土壤有机质含量变化范围较大,为 11.29~43.07 g/kg,平均值为 26.79 g/kg,变异系数为 29.2%。土壤中各元素的含量如表 1 所示,S、

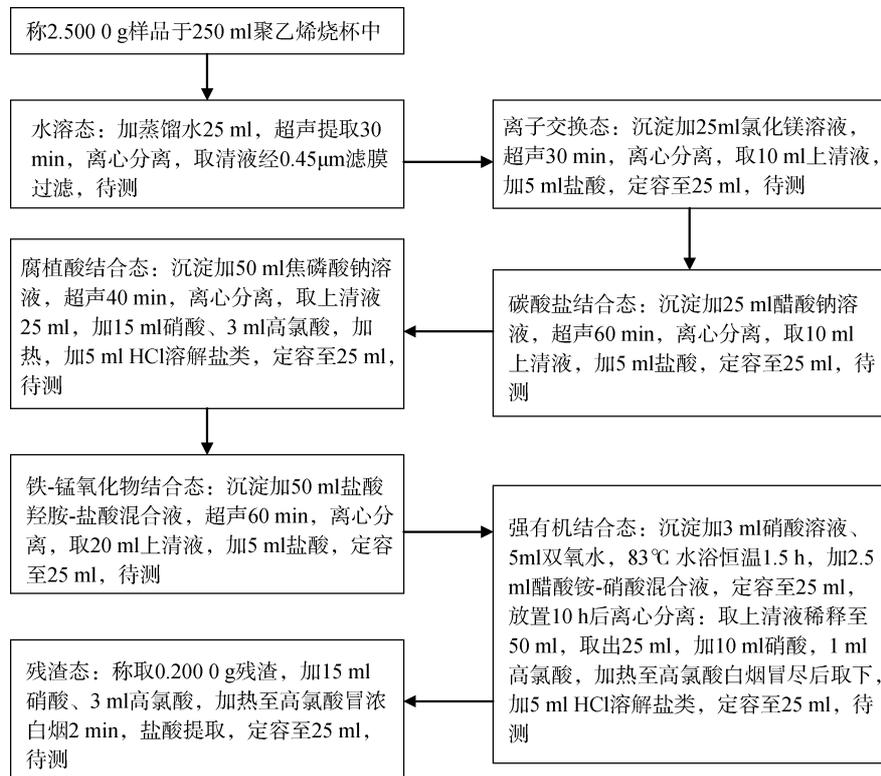


图 2 土壤中不同形态 Se 含量连续浸提流程图

Fig. 2 Sequential extraction process for different speciation Se in soil

表 1 调查区土壤中各元素含量(mg/kg)

Table 1 Concentrations of different elements in surveyed paddy soils

项目	S	Cr	Zn	Pb	Cd	As	Hg	Se
平均值	463.4 ± 23.1	83.7 ± 4.1	94.6 ± 4.7	33.2 ± 1.6	0.190 ± 0.009	8.228 ± 0.411	0.250 ± 0.01	0.344 ± 0.017
最小值	206.7	62.5	53.6	25.4	0.118	4.820	0.129	0.218
最大值	882.1	94.0	127	40.9	0.327	11.114	0.478	0.450
检出限	20	3	1	2	0.02	0.2	0.0005	0.01

Zn 等主要元素的含量与普通土壤中的含量相近<sup>[22]</sup>, Cr、Pb、Cd、As、Hg 等微量元素处于典型水稻土的含量范围之内<sup>[23-24]</sup>。

结果显示, 调查区表层水稻土中的 Se 平均含量为 0.344 mg/kg, 整体上属中 Se 土壤, 部分区域 Se 含量甚至超过 0.40 mg/kg, 达到富 Se 土壤的水平<sup>[25]</sup>。

## 2.2 土壤性质与硒全量的关系

在土壤的基本理化性质中, pH 和有机碳含量是影响土壤中各种元素迁移、转化和生物有效性的两个重要因素。研究区土壤 Se 全量与这两者的关系如图 3 所示。方金梅等<sup>[26]</sup>研究发现, 在表层土壤中, 全量 Se 与土壤 pH 拟合曲线为二次多项式, 且回归系数达到显著水平, 而本研究结果显示, pH 与土壤 Se 全量的相关性并不明显, 在散点图中呈杂乱无章的分布, 而土壤有机碳却与之有相当强的正相关性 ( $R^2 = 0.670$ ), 与先前的许多其他研究结果相符<sup>[27-28]</sup>, 这可

能是因为在自然条件下, 有机质经常作为阴离子的环境宿体而将 Se 固定在土壤当中<sup>[29]</sup>, 造成了土壤对 Se 的吸附效果。

## 2.3 土壤、水稻中硒分布特征

对土壤中总 Se 含量及 7 种形态 Se 含量的检测结果如表 2 所示, 强有机结合态和腐植酸态是含量最高的两种 Se 结合形态, 平均含量占比分别达到 49.90% 和 26.02%, 其次是残渣态(15.94%), 而水溶态(1.65%)和铁锰氧化物态(1.56%)含量最少。强有机结合态和腐植酸态两者加和的比例占土壤 Se 全量的 75.92%, 并且这两种形态的加和与土壤全量 Se 在  $P < 0.01$  的水平上呈显著正相关( $r = 0.854^{**}$ ), 这与先前的研究结果相一致<sup>[30]</sup>。此外, 对水稻根、茎、叶、谷 4 个器官分别进行 Se 含量的测定, 其结果如表 3 所示。结果表明, 绝大部分 (73%) 的 Se 都富集在水稻根部, 只有少部分经植物体内的迁移转化, 运输到其他各个部位

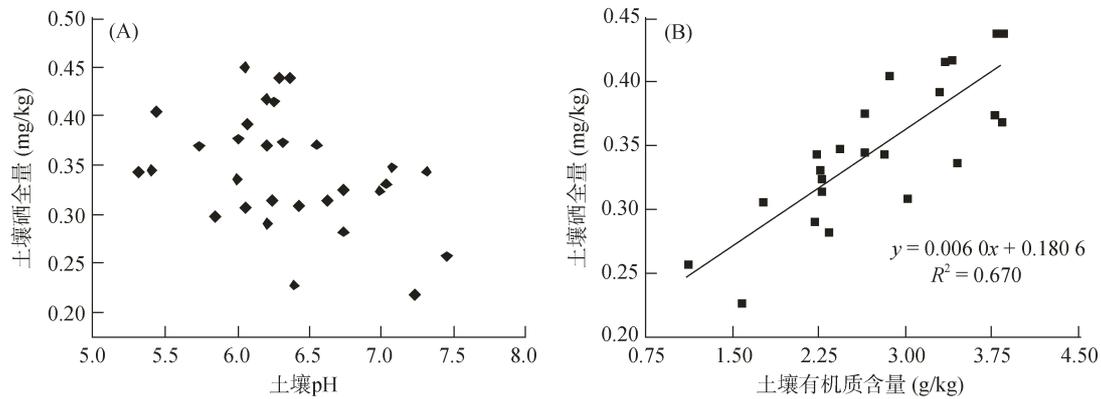


图 3 土壤 pH(A)、有机质含量(B)与土壤 Se 含量关系图

Fig. 3 Correlation of soil pH (A), organic matter content (B) and total Se content

表 2 调查区土壤样品中各形态 Se 含量

Table 2 Fractional partitions of Se contents in paddy soils

Se 形态	Se 含量 (mg/kg)				均值占全量比例 (%)	检出限 (mg/kg)
	最小值	最大值	平均值	标准差		
全量	0.218	0.450	0.344	0.059 1	—	0.01
水溶态	0.004	0.007	0.005	0.000 5	1.65	0.005
离子交换态	0.005	0.006	0.005	0.000 3	1.72	0.005
碳酸盐态	0.006	0.021	0.010	0.002 7	3.20	0.005
腐植酸态	0.012	0.120	0.077	0.020 5	26.02	0.005
铁锰氧化态	0.003	0.007	0.005	0.001 2	1.56	0.01
强有机结合态	0.083	0.232	0.156	0.039 5	49.90	0.005
残渣态	0.027	0.069	0.049	0.013 2	15.94	0.01

表 3 调查区水稻样品各器官中 Se 含量

Table 3 Se contents in different organs of matured rice plants

水稻器官	Se 含量 (mg/kg)				均值占总量比例 (%)
	最小值	最大值	平均值	标准差	
根	0.393	1.183	0.734	0.558 6	73.0
叶	0.110	0.283	0.155	0.122 3	15.4
茎	0.033	0.111	0.072	0.055 1	7.1
谷	0.032	0.066	0.045	0.024 0	4.5

(27%)。水稻内 Se 含量大小顺序为根 (73%)>叶 (15.4%)>茎 (7.1%)>谷 (4.5%)，本结果与郦逸根等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。土壤中的硒酸盐被植物吸收后很容易从根部转移到地上部<sup>[32]</sup>，而亚硒酸盐被植物根部吸收后常常转化成硒代蛋氨酸及其氧化物、硒甲基半胱氨酸等其他形态，这些形态的物质主要集中在根部，难以转运至地上部<sup>[33]</sup>。

### 3 讨论

土壤理化性质中的有机质含量和 pH 是影响土壤 Se 含量的两个重要因素，以这两个基本性质为出发点，分析水稻吸收 Se 的影响因素具有十分重要的意义。研究区土壤有机质含量在 11.29 ~ 43.07 g/kg，将 30 个土壤样品按有机质含量划分为低有机质 (<25 g/kg)、

中有机质 (25 ~ 35 g/kg)、高有机质 (>35 g/kg) 3 个区间，将 30 个土壤样品按 pH 的大小划分为酸性 (pH<6)、中性 (6<pH<7)、碱性 (pH>7) 3 个区间，统计分析在上述土壤性质区分下，7 种土壤 Se 形态含量与水稻根、谷两个器官之间的相关性，结果显示，除了铁锰氧化态、腐植酸态、碳酸盐态这 3 种形态在特定的土壤性质条件下与水稻根部或稻谷呈现显著相关外 (表 4)，其他各个形态的 Se 与水稻植株间并未展现出一定的相关性。一般把水溶态 Se 作为土壤有效 Se，但在自然种植条件以及低有机质环境下，水溶态 Se 与植物的相关性较差<sup>[34]</sup>。Bisbjerg 等<sup>[35]</sup>和侯军宁等<sup>[36]</sup>研究发现，水溶态等形态的 Se 与作物吸收性之间的良好相关性，常出现在盆栽试验中，但在大田试验中常有异常，这与此次在浙北水稻种植地区的调查分析结果相似。

表 4 不同土壤性质下水稻根、谷与土壤中各形态 Se 含量相关性  
Table 4 Correlation of Se contents in root, rice and in soil under different soil properties

土壤性质	土壤 Se 形态					
	铁锰氧化态		腐植酸态		碳酸盐态	
	根	谷	根	谷	根	谷
有机质 (<25 g/kg) (n = 11)	0.757**	-0.114	-0.082	0.263	-0.448	0.061
有机质 (25 ~ 35 g/kg) (n = 10)	0.011	0.409	-0.355	-0.643*	-0.464	-0.556
有机质 (>35g/kg) (n = 9)	0.364	0.678**	-0.224	0.646	0.099	0.006
pH (<6) (n = 6)	-0.517	0.362	-0.255	0.524	-0.454	0.766
pH(6 ~ 7) (n = 18)	0.575**	0.244	-0.233	-0.135	-0.090	-0.310
pH(>7) (n = 6)	0.905**	0.359	-0.261	-0.382	-0.704	-0.889**

注：\* 表示在  $P < 0.05$  水平上显著相关；\*\* 表示在  $P < 0.01$  水平上显著相关；n 表示样品数。

水稻对土壤中 Se 的吸收量，一方面取决于土壤中 Se 的含量，另一方面还受土壤性质和土壤中 Se 的形态分布情况影响。由表 4 可见，当土壤有机质含量小于 25 g/kg 时，土壤的铁锰氧化态 Se 与水稻根部 Se 的吸收量呈显著正相关 ( $r = 0.757^{**}$ )；但当有机质含量高于 25 g/kg 时，土壤铁锰氧化态 Se 与水稻根部 Se 并没有呈现出一定的相关性。这可能是因为在低有机质的环境中，有机态 Se 中存在的可溶性或是可被植物吸收的有效 Se 含量较少，而土壤中与铁锰氧化物有关的 Se 包括氧化物结合态 Se 以及被铁锰氧化物吸附的 Se 在水稻吸收过程中发挥了重要作用<sup>[32]</sup>。

当有机质含量在 25 ~ 35 g/kg 的范围内时，土壤腐植酸态 Se 与水稻稻谷 Se 呈显著负相关 ( $r = -0.643^*$ )；当有机质含量高于 35 g/kg 时，土壤铁锰氧化态 Se 又与稻谷中的 Se 呈显著正相关 ( $r = 0.678^{**}$ )。由表 4 还可见，当土壤 pH > 6 时，土壤铁锰氧化态 Se 与水稻根部 Se 呈显著正相关 ( $r = 0.575^{**}$ 、 $0.905^{**}$ )；当 pH > 7 时，土壤碳酸盐态 Se 又与稻谷中的 Se 含量呈显著负相关 ( $r = -0.889^{**}$ )，但当 pH < 7 的情况下，并未发现两者有相关性。不同土壤性质下，水稻根、谷的 Se 含量与土壤中铁锰氧化物结合态 Se、腐植酸结合态 Se 的关系如图 4 所示。

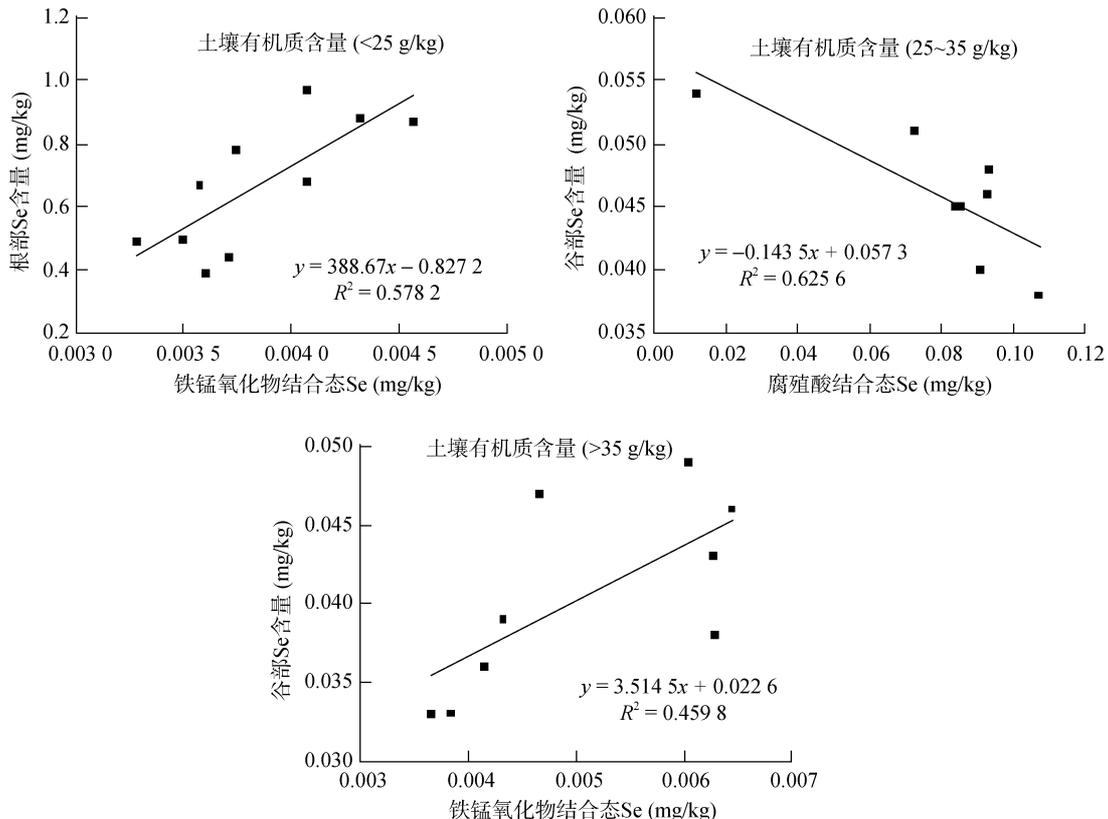


图 4 不同土壤有机质含量下，水稻根、谷 Se 含量与土壤铁锰氧化物结合态 Se、腐植酸结合态 Se 相关分析  
Fig. 4 Correlation between Se contents in root, rice and Fe/Mn oxide-bound Se, humic acid-bound Se under different soil organic contents

上述分析结果表明,不同的土壤有机质和 pH 的交互作用下,水稻根部、谷部内的 Se 含量与土壤中铁锰氧化物结合态 Se 大多呈正相关。铁锰氧化物因具有较大的比表面积和可变表面电荷,对土壤中的各种元素存在着巨大的吸附容量<sup>[37]</sup>。同时,厌氧条件下的铁锰还原现象是土壤中一个重要的机制,其对各种元素在土壤环境中的运移、转化都有显著影响<sup>[38]</sup>。李义纯等<sup>[39]</sup>通过室内培养试验,探讨了淹水还原条件下,铁锰氧化物结合态 Cd 的存在形态活性的变化,表明淹水后随着土壤  $p_e+pH$  的持续下降,铁锰氧化物结合态 Cd 的含量显著上升,即淹水还原条件下,表层土壤中铁锰氧化物的活化提高了其结合态 Cd 的形态活性。由此可以认为,研究区水稻土在长期的淹水条件下,铁锰活性增加导致其结合态 Se 的有效性增加,从而体现在土壤中铁锰氧化物结合态 Se 与水稻根部、谷部内 Se 含量的正相关性。本研究表明,在露天的大田种植基地上,由于环境复杂多变,水稻植株内 Se 含量与土壤中各形态 Se 的相关性很可能是有机质含量、pH、氧化还原条件等土壤理化性质与 Se 形态含量综合作用的结果。

#### 4 结论

1) 研究区水稻土总体上属于中 Se 土壤,部分地区达到富 Se 水平。土壤 Se 全量和土壤 pH 的相关性不明显,与土壤有机质含量显著相关。在浙北水稻种植区,土壤经过长期的农业耕作,熟化程度较高,Se 富集在土壤有机质中,其含量随着有机质含量的增大而增大。

2) 表层土壤 7 种 Se 形态分析结果表明,土壤中的 Se 主要以强有机结合态和腐植酸结合态这两种形态存在,约占全量的 75.92%,且与 Se 全量呈显著正相关,这也说明了水稻土中的 Se 与有机质含量关系密切。残渣态 Se 含量占全量的 15.94%,这部分 Se 虽然难以被植物直接吸收利用,但可以在长期的土壤熟化过程中被逐渐释放出来<sup>[40]</sup>,是土壤 Se 的储备库源<sup>[41]</sup>。

3) 水稻根、茎、叶、谷 4 部分中,Se 含量的大小顺序为根>叶>茎>谷,且大部分的 Se 都富集在根部(73%);将土壤按有机质和 pH 的大小进行划分后发现,在有机质含量较低的土壤中,铁锰氧化物结合态 Se 与根部 Se 呈显著正相关;在有机质含量大于 35 g/kg 的土壤中,铁锰氧化物结合态 Se 与谷 Se 呈显著正相关;当  $pH>7$  时,碳酸盐态 Se 与谷 Se 呈显著负相关。而在所有的分类中,植物容易吸收利

用的可溶态 Se、离子交换态 Se 却未与水稻根、谷的 Se 含量呈现相关性。因此,关于植物(尤其是水稻)与土壤中不同形态 Se 的相关性及吸收利用机制还有待深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Nielsen G G, Gupta U C, Lamand M, et al. Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition[J]. *Advances in Agronomy*, 1984, 37(1): 397-460
- [2] Shao S X, Zheng B S. The biogeochemistry of selenium in Sunan grassland, Gansu, Northwest China, casts doubt on the belief that Marco Polo reported selenosis for the first time in history[J]. *Environ. Geochem. Health*, 2008, 30(4): 307-314
- [3] Schrauzer G N, Surai P F. Selenium in human and animal nutrition: Resolved and unresolved issues. A partly historical treatise in commemoration of the fiftieth anniversary of the discovery of the biological essentiality of selenium, dedicated to the memory of Klaus Schwarz (1914-1978) on the occasion of the thirtieth anniversary of his death[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2009, 29(1): 2-9
- [4] 孟惠平, 吕明. 微量元素硒的抗衰老作用研究[J]. *世界元素医学*, 2008, 15(3): 29-33
- [5] Navarro A M, Cabrera V C. Selenium in food and the human body: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1): 115-141
- [6] Wang Z J, Gao Y X. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11): 1 345-1 351
- [7] Combs G. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5): 517-547
- [8] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992
- [9] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100(2): 254-268
- [10] Antanaitis A, Lubyte J, Antanaitis S, et al. Selenium concentration dependence on soil properties[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2008, 6(1): 163-167
- [11] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [12] 张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 388-391
- [13] 兰叶青, 毛景东. 土壤中硒的形态[J]. *环境科学*, 1994, 15(4): 56-58
- [14] 吴永尧, 彭振坤. 水稻对硒的生物富集作用动态研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 32(4): 490-494
- [15] 张均华, 朱练峰, 禹盛苗, 等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2 900-2 906
- [16] Martinez A F, Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: A structural chemist point of view[J].

- Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2009, 8(1): 81–110
- [17] 胡艳华, 王加恩, 蔡子华. 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
- [18] 郦逸根, 董岩翔, 郑洁, 等. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 323–330
- [19] 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价[J]. 中国地质, 2008, 31(z1): 118–125
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [21] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准食品中硒的测定(GB5009.93-2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010
- [22] Chen J, Wei F, Zheng C. Background concentrations of elements in soils of China[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, 57(1): 699–712
- [23] Pendias A K. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue[J]. Geoderma, 2004, 122(2): 143–149
- [24] Wang X C, Yan W D, An Z, et al. Status of trace elements in paddy soil and sediment in Taihu Lake region[J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 707–710
- [25] 李家熙. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征极其预测[M]. 北京: 地质出版社, 2000
- [26] 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
- [27] Bujdos M, Kubova J, Stresko V. Problems of selenium fractionation in soils rich in organic matter[J]. Analytica Chimica Acta, 2000, 408(1): 103–109
- [28] Eich G S, Song T A, Ogaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(3): 221–231
- [29] 李永华, 王五一. 硒的土壤环境化学研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 230–233
- [30] 宋明义, 刘建新, 黄春雷. 浙北富硒土壤地球化学特征与生物学效应[J]. 广东微量元素科学, 2012, 19(3): 32–38
- [31] 郦逸根, 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
- [32] 王晓芳, 陈思杨, 罗章, 等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014(6): 539–544
- [33] Li H F, Mcgrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenites[J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 92–102
- [34] 秦恩华, 杨兰芳. 烤烟苗期含硒量和根际硒形态的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 506–512
- [35] Bisbjerg B, Commission D A. Studies on selenium in plants and soils[M]. Danish Atomic Energy Commission, Risoe. Denmark, 1972
- [36] 侯军宁, 李继云. 土壤硒的形态及有效硒的提取[J]. 土壤学报, 1990, 27(4): 405–410
- [37] 李义纯, 葛滢. 淹水还原条件下土壤铁氧化物对镉活性制约机理的研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(2): 160–165
- [38] Zhang C H, Ge Y, Yao H, et al. Iron oxidation-reduction and its impacts on cadmium bioavailability in paddy soils: A review[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(4): 509–517
- [39] 李义纯, 周权锁, 葛滢. 淹水还原条件下不同类型土壤中 Cd 存在形态活性的变化[A]//中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集[C].《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社, 北京, 2008: 129–134
- [40] 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
- [41] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 92–95

## Selenium Transport in Soil-Paddy Plant System Influenced by Soil Properties

ZHOU Jun, LIU Zhaoyun, MENG Lifeng<sup>\*</sup>, ZHU Chen

(School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The content and form studies of selenium (Se) in the paddy soils as well as Se contents in the correspond organs (root, stem, leaf, rice) of matured rice plants from north Zhejiang was presented in this paper. The results showed that the studied paddy soils belonged to the medium Se rich soils with the average Se contents of 0.344 mg/kg. There was significant positive correlation between total Se content and organic matter content. Seven different Se forms were separated from the paddy soils, the strongly organic combined and humic acid combined Se were the dominant two forms, which together accounted for about 75.92%, the ion exchangeable and soluble Se together accounted for about 1.7% and the carbonate combined Se accounted for about 3.2%. Se content enriched in the root system, accounted for 73% of the total Se content in the rice plant. Se content in stems was higher than in ears but lower than in leaves. There was a significant positive correlation between the oxides of iron and manganese combined Se and Se content in the root when the total organic matters in the soils lower than 25 g/kg, while this type Se in the soils had a significant positive correlation with Se in the ears when the total organic matters in the soils higher than 35 g/kg; the carbonate combined Se negatively correlated with Se in ears when pH>7. However, there were no clear correlations between the soluble and ion exchangeable Se and Se in various organs of rice plants. The above results indicated that Se contents in the different organs of rice plants were influenced comprehensively by soil pH, organic matter content, and the contents of different form of Se.

**Key words:** Paddy soil; Rice; Selenium (Se); Speciation analysis