

顾涛, 赵信文, 雷晓庆, 等. 珠江三角洲崖门镇地区水稻田土壤-植物系统中硒元素分布特征及迁移规律研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 545-555.

GU Tao, ZHAO Xin-wen, LEI Xiao-qing, et al. Distribution and Migration Characteristics of Selenium in the Soil-Plant System of Paddy Fields in the Pearl River Delta, Yamen Town[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 545-555.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201811030118】

# 珠江三角洲崖门镇地区水稻田土壤-植物系统中硒元素分布特征及迁移规律研究

顾涛<sup>1</sup>, 赵信文<sup>1\*</sup>, 雷晓庆<sup>2</sup>, 黄长生<sup>1</sup>, 曾敏<sup>1</sup>, 刘学浩<sup>1</sup>, 王节涛<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 硒在自然环境中的分布及迁移规律一直是研究热点。多目标区域地球化学调查成果表明, 珠三角地区土壤硒含量较为丰富, 适宜富硒特色农产品种植, 但土壤-植物系统中硒的迁移转化规律尚不清楚。本文以典型富硒区—江门市崖门镇为例, 系统采集了岩石、风化土、稻田土壤、浅层地下水、灌溉水及水稻样品, 应用原子荧光光谱法进行硒含量测试, 探讨土壤-植物系统中硒元素分布特征及迁移规律。结果表明: 崖门镇花岗岩、花岗岩风化土、稻田表层土壤、剖面土壤、浅层地下水、灌溉水、大米硒含量平均值分别为0.0208 mg/kg、0.2325 mg/kg、0.5060 mg/kg、0.83 mg/kg、0.0003 mg/L、0.0004 mg/L、0.058 mg/kg, 表层土壤硒含量与珠江三角洲土壤地球化学背景值(0.51 mg/kg)相当, 大米硒含量达到富硒稻谷标准。土壤-植物系统中硒元素迁移规律为: 土壤剖面硒元素向下部迁移, 沿径流方向硒向下游迁移。土壤硒较易向水稻根部迁移, 较难从根部向水稻地上部分迁移。本研究获得的土壤-植物系统硒元素分布与迁移规律可为该地区富硒资源开发利用提供科学依据。

**关键词:** 水稻田; 硒; 原子荧光光谱法; 土壤-植物系统; 分布; 迁移

**要点:**

(1) 花岗岩风化成土过程中导致了硒元素的富集并形成富硒土壤。

(2) 土壤剖面硒元素向下部迁移, 沿径流方向向下游迁移。

(3) 水稻不同部位硒含量为: 根 > 茎叶 > 大米 > 稻壳。

**中图分类号:** S151.93; O657.31      **文献标识码:** A

硒是生态环境中一个重要的微量元素, 其丰缺与人 and 动植物的健康有着密切关系, 硒元素生物地球化学循环过程及健康风险评价一直是研究热点<sup>[1-3]</sup>。研究富硒地区土壤-植物系统中硒的分布特征及迁移规律, 对识别硒元素生物地球化学循环过程、指导富硒农产品开发种植具有重要意义。以往研究者围绕硒在自然环境中的分布及迁移规律开展了较多的研究工作, 主要集中在两个方面。第一,

开展硒元素调查, 掌握不同地区硒元素含量和分布情况。通过调查研究发现了一些典型富硒地区, 如英国东北部诺森伯兰郡石炭系煤层中硒异常丰富, 平均值达 12.1 mg/kg, 富含黄铁矿的煤层硒较高<sup>[4]</sup>; 日本农业区土壤硒为 0.05 ~ 2.8 mg/kg, 平均值 0.51 mg/kg, 旱地土壤硒高于水田土壤硒<sup>[5]</sup>, 关东、东北、北海道、九州的土壤硒较高<sup>[6]</sup>。我国湖北恩施渔塘坝地区土壤、岩石中存在异常高硒样品, 土壤

收稿日期: 2018-11-04; 修回日期: 2019-01-27; 接受日期: 2019-04-09

基金项目: 国家重点研究计划项目(2018YFC1800804); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190291)

作者简介: 顾涛, 硕士, 工程师, 主要从事环境地质调查研究。E-mail: cugyunnangt1@163.com.

中硒含量变化范围为 346 ~ 2018mg/kg,富硒岩石中硒为 6471 ~ 8390mg/kg<sup>[7-8]</sup>;陕西紫阳县土壤硒为 0.0015 ~ 36.6854mg/kg,平均值 0.9429mg/kg,呈南北高、中间低分布,硒分布区与寒武—奥陶—志留系的黑色含碳岩系分布一致<sup>[9]</sup>;安徽石台县土壤硒含量平均值为 0.56mg/kg,达到富硒水平<sup>[10]</sup>;福建省龙海市表层土壤硒为 0.031 ~ 2.361mg/kg,平均值 0.354mg/kg,富硒、足硒土壤面积占全地区面积的 88.69%<sup>[11]</sup>。

另有研究发现了一些典型低硒地区,如沙特阿拉伯西北部萨米尔地区土壤硒为未检出 ~ 0.19mg/kg,平均值 0.03mg/kg,玉米嫩芽中硒为未检出 ~ 0.008mg/kg,平均值 0.001mg/kg<sup>[12]</sup>;波兰弗罗茨瓦夫附近耕地土壤硒为 0.081 ~ 0.449mg/kg,平均值 0.202mg/kg,沙壤土中硒较低,平均值 0.174mg/kg<sup>[13]</sup>;我国川西高原大骨节病集中区域水体中硒较低,地表水硒为 0.001 ~ 0.148 $\mu\text{g/L}$ ,平均值 0.0221 $\mu\text{g/L}$ ,地下水硒为 0.001 ~ 0.210 $\mu\text{g/L}$ ,平均值 0.0523 $\mu\text{g/L}$ ,硒的分布受地质背景、地理条件以及水体地球化学影响<sup>[14]</sup>;黑龙江省土壤总体上处于缺硒及潜在缺硒土壤范畴,土壤硒为 0.008 ~ 0.660mg/kg,平均值 0.147mg/kg,几乎不存在高硒土壤<sup>[15]</sup>。

第二,针对富硒地区,开展不同系统中硒的迁移转化研究,揭示硒元素在环境与生物体之间的迁移转化规律及影响因素。如 Eiche 等<sup>[16]</sup>对印度旁遮普省富硒地区小麦和芥菜中硒的研究表明,该地区种植小麦土壤硒为  $13.7 \pm 0.07\text{mg/kg}$ ,种植芥菜土壤硒为  $6.8 \pm 0.01\text{mg/kg}$ ,小麦和芥菜各部分(根、茎、叶、花、谷粒)中硒为 133 ~ 931mg/kg,含量顺序为叶 > 花 > 根 > 茎,土壤中硒酸盐和有机硒是植物体利用硒的主要形态;Junior 等<sup>[17]</sup>对巴西亚马逊生态保护区种植的巴西坚果调查研究表明,研究区土壤硒较低,98%土壤的硒含量均小于 0.6mg/kg,但在该地区种植的巴西坚果硒含量较高,尤其是亚马逊州和阿马帕州坚果硒的中值分别为 66.1mg/kg 和 51.2mg/kg,富硒特征明显,均达到该地区土壤硒的 100 多倍,坚果中硒随着土壤总硒增加而增加,随土壤 pH 降低而降低。马迅等<sup>[18]</sup>研究表明江西丰城土壤全硒达到富硒土壤标准,易被生物利用的水溶态硒和可交换态硒质量比较少,全硒较高的土壤能够向作物提供较多的有效硒;王驰等<sup>[19]</sup>研究表明湖北恩施玉米种植地土壤均达到富硒土壤标准,但其上生长的玉米中硒含量存在较大差异,玉米对硒的富集受到土壤硒含量、种植时间以及 pH 值的共同

影响;廖启林等<sup>[20]</sup>指出江苏宜溧富硒稻米产区的富硒稻米主要受富硒耕地控制,地势、气候条件、断层等对富硒耕地的分布均有影响。

对于珠江三角洲富硒地区土壤—植物系统中硒的迁移规律研究则报道较少。据《广东省珠江三角洲经济区多目标区域地球化学调查报告》表明,珠三角地区土壤硒较为丰富,表层土壤硒含量范围为 0.102 ~ 1.886mg/kg,平均值 0.789mg/kg,而富硒优质土壤主要分布在江门、肇庆、惠州等地市。本文选取江门市新会区崖门镇作为研究区域,采集水稻田土壤、水稻不同部位样品和当地水样,利用原子荧光光谱、发射光谱和质谱等分析技术测定样品中的 Se、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 等元素含量<sup>[21-23]</sup>,深入开展土壤—植物系统中硒元素分布特征研究及迁移规律研究,拟为当地硒资源的开发利用、优质粮工程实施、沿海和潭江流域优质稻米产业带发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于珠江三角洲西南部,地处潭江下游,崖门水道东岸,属亚热带季风气候,年降雨量 1780mm,平均气温 21.8 $^{\circ}\text{C}$ 。农、林、牧、渔业发达,属于华南双季稻稻作区、闽粤桂台平原丘陵双季稻亚区,十分适合水稻生长<sup>[24]</sup>。地势西高东低,丘陵地主要分布在西部的古兜山脉,中东部主要以山谷冲积平原和三角洲平原为主,是耕地的主要分布区,耕地以种植水稻为主,优质稻比例约占总产量的 90% 以上。西部丘陵区地表出露地层岩性主要为晚侏罗世黑云母二长花岗岩,表层已强烈风化形成松散土状;中东部平原区主要出露为黄褐色砂质黏性土,成土母质主要为花岗岩风化物;靠近崖门水道两岸局部出露有第四纪全新世淤泥质黏土、淤泥质粉细砂层,为河流冲积物和海相沉积物。研究区以水稻土、赤红壤分布面积最广,灌溉水源为上游水库水。

## 2 实验部分

### 2.1 样品采集与制备

样品采集于 2017 年 7 月,早稻成熟时节。采样点位于江门市新会区崖门镇周边水稻田,如图 1 所示。

采集水稻田表层(0 ~ 20cm)土壤样品 10 件。采集与制备方法参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),每个样为 4 点混合样,每个样品 1kg。

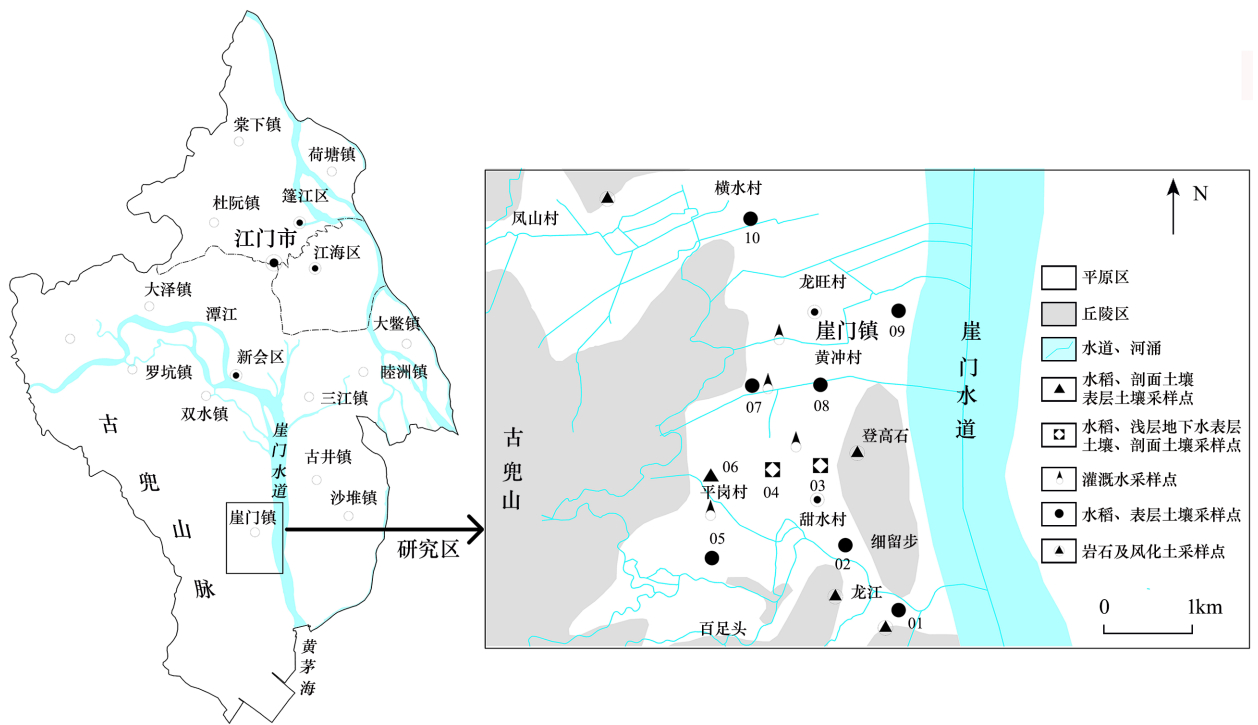


图1 研究区采样点位置示意图

Fig. 1 Sampling location map in the research area

采集水稻不同部位(根、茎叶、稻壳、大米)样品,水稻样品为即将收割的水稻,每个样品为一块稻田内4个子样的混合样,采样点与表层土壤采样点对应,共采集样品40组,采集与制备方法参照《生态地球化学评价动植物样品分析方法》(DZ/T 0253—2014),用自来水将水稻的根、茎叶、果实多次冲洗干净后,再用蒸馏水冲洗干净,晾干,称其鲜样质量,用剪刀剪成细片,置于60℃烘箱中烘干。烘干样用高速破碎机制成粉状,用纸袋外套塑料袋封装保存。水稻样品采集点与表层土壤样品采集点对应。

采集水稻田三个典型土壤剖面共计12件土壤样品,剖面柱状图如图2所示,三个剖面位于山间平原地带,6,4,3号剖面相对位置分别位于上中下游,剖面间距约500m,每个剖面分别采集0~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm样品各一件,将样品均匀化后,剔除砾石和植物根系,每一层取样2kg,其中1kg供元素含量分析用,另1kg供颗粒分析用。土壤样品经阴干(防止阳光直射和尘土落入)、无污染处理后进行分析。将土壤样品压碎,过2mm孔径筛,除去砂砾和生物残体。反复按四分法

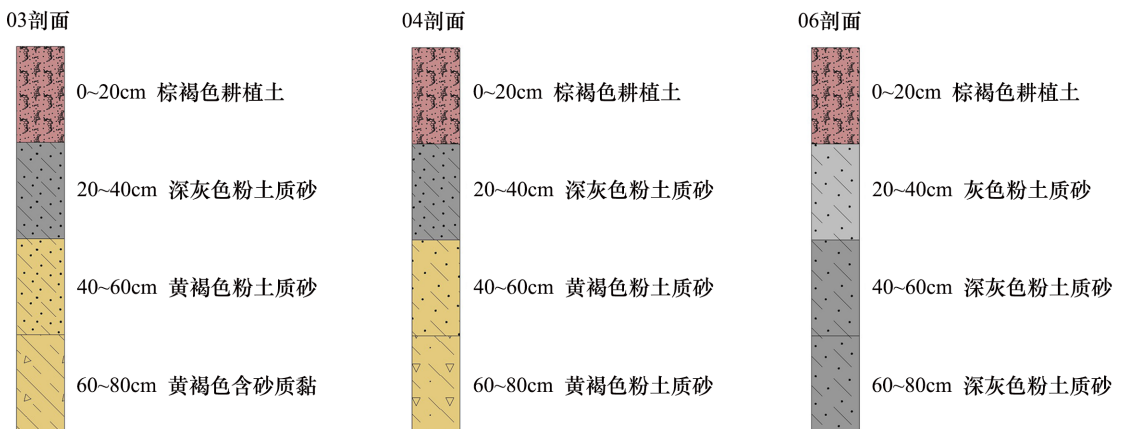


图2 研究区三个土壤剖面柱状图

Fig. 2 Three soil profile histograms in the research area

缩分,留下缩分后样品磨细,过160目筛,混匀、装瓶,测定备用。

依据《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)及《水质 采样样品的保存和管理技术规定》(HJ 493—2009)采集研究区灌溉水样4件、浅层地下水样品2件(通过人工浅钻揭露地下水,钻孔深80cm),各1000mL,于规定时间内送至实验室检测。在研究区北、西、南部采石场采集新鲜花岗岩样品4件,对应点采集花岗岩风化土样品4件,每件样品1kg,岩石、风化土样品为单点采集。

## 2.2 样品测定

水稻田浅层地下水、灌溉水、水稻根、茎叶、稻壳、大米样品分析测试由广东地质实验测试中心承担。浅层地下水、灌溉水样品测试指标为Se、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As和Hg,测试方法参照《食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538—2016)、《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)。水稻根、茎叶、稻壳、大米样品测试指标为硒,测试方法参照《生态地球化学评价动植物样品分析方法:硒量的测定原子荧光光谱法》(DZ/T 0253. 2—2014)。

岩石、风化土、表层土壤、剖面土壤样品分析测试由中南矿产资源监督检测中心承担。岩石、风化土样品测试指标为Se,测试方法参照《岩石和矿石化学分析方法》(GB/T 14506—2010)。表层土壤、剖面土壤样品测试指标为Se、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg和pH值,测试指标参照《土壤检测》(NY/T

1121—2006)。

送检实验室均已通过国家计量认证,分析方法均为国家或行业标准,并且在检测实验室的资质认定范围内。样品测试时严格按照国家或行业标准进行质量控制,包括插入国家标准物质、样品加标回收、抽取密码重复样和空白试验。质量控制严格按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)和《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)中关于分析过程准确度、精密度和空白试验的要求进行,所有样品报出率为100%,准确度和精密度监控样合格率达95%,检测结果可靠。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水土中硒元素含量特征

研究区表层土壤、剖面土壤、浅层地下水、灌溉水样品中硒、铜、铅、锌、铬、镍、镉、砷、汞9种元素含量描述性统计结果列于表1。研究区10个表层土壤样品硒含量范围为0.23~1.04mg/kg,平均值0.5060mg/kg,变异系数为47.5241%。尽管表层土壤硒含量变异系数偏高,但样品中的硒均值明显高于我国表层土壤中的硒平均含量(0.29mg/kg)<sup>[25]</sup>。根据我国学者研究成果<sup>[26]</sup>,我国土壤中的硒按照质量分数高低划分为:缺硒土壤(<0.125mg/kg)、少硒土壤(0.125~0.175mg/kg)、足硒土壤(0.175~0.45mg/kg)、富硒土壤(0.45~2.0mg/kg)和高硒土壤(2~3.0mg/kg)。研究区10组表层土壤中有5组

表1 研究区土壤和水体硒及重金属含量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of selenium and heavy metal concentrations in soil and water of study area

样品类型	测试参数	Se	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
表层土壤样品 (n=10)	平均值(mg/kg)	0.5060	26.9200	51.5900	55.9700	30.2300	13.3870	0.2200	5.4390	0.1981
	变异系数(%)	47.5241	42.6776	78.9071	29.0042	47.9257	43.2912	21.3201	46.7499	50.4596
剖面(0~20cm) 土壤样品(n=3)	平均值(mg/kg)	0.3500	21.0700	27.0000	48.5000	22.3300	10.9600	0.2000	4.9700	0.1900
	变异系数(%)	17.2900	33.4500	38.9700	42.9500	35.7000	38.8500	30.4100	28.9000	55.0100
剖面(20~40cm) 土壤样品(n=3)	平均值(mg/kg)	0.4233	10.4667	26.1333	27.7333	13.9667	6.5800	0.1500	3.2600	0.1607
	变异系数(%)	50.6820	30.2238	41.9914	39.9596	3.3836	21.3481	17.6383	34.5361	69.7577
剖面(40~60cm) 土壤样品(n=3)	平均值(mg/kg)	1.5567	10.4467	31.5667	36.1667	26.9333	9.8933	0.1667	4.4800	0.2020
	变异系数(%)	57.7170	34.3896	1.8562	19.4933	33.0786	30.4311	18.3303	75.2030	93.8403
剖面(60~80cm) 土壤样品(n=3)	平均值(mg/kg)	0.9867	8.1500	26.2333	35.8333	23.9667	10.0167	0.1467	5.4200	0.1430
	变异系数(%)	55.6726	29.0388	40.6045	30.3152	34.0544	55.3363	20.8299	98.0820	76.9135
浅层地下水 样品(n=2)	平均值(mg/L)	0.0003	0.0030	0.0014	0.01135	0.0145	0.0015	0.0002	<0.0001	<0.00005
	变异系数(%)	0.0000	64.7100	70.7100	70.4000	4.8800	18.8600	47.1400	-	-
灌溉水样品 (n=4)	平均值(mg/L)	0.0004	0.0019	0.0004	0.0121	0.0025	0.0009	<0.0001	0.0005	<0.00005
	变异系数(%)	20.4124	40.3200	70.7100	46.4700	14.9500	20.2900	-	74.8300	-

注:n为样品组数,“-”表示无相关数据。

硒含量达到富硒土壤标准,占比为50%,其余5组均达到足硒土壤标准。研究区三个典型剖面的12个土壤样品硒含量为0.28~2.59mg/kg,平均值0.83mg/kg,变异系数为82.55%。12组剖面土壤中,有7组达到富硒土壤标准,占比58.3%,另外5组达到足硒土壤标准。以上表层土壤和剖面土壤硒含量表明,研究区土壤硒含量丰富,整体上处于高硒环境,有利于富硒土地资源的形成。

与土壤硒含量相比,浅层地下水与灌溉水样品硒含量均较低。两个浅层地下水样品硒含量均为0.0003mg/L,4个灌溉水样品硒含量平均值为0.0004mg/L。

### 3.2 水土中重金属含量特征

富硒土地资源的开发,除了土壤中的硒达到富硒水平外,还需要考虑研究区水土环境质量状况。表层土壤中重金属分析结果(表1)表明,Cu、Zn、Cr、Ni、Cd、As和Hg等7种重金属含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),只有两组采集于公路附近的表层土壤铅含量达到137mg/kg和113mg/kg,略微超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值100mg/kg,但未超过GB 15618—2018农用地土壤污染风险管制值500mg/kg。

剖面土壤中8种重金属含量均未超过GB 15618—2018农用地土壤污染风险筛选值。剖面03点、04点浅层地下水分析结果,参照《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),7种重金属Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、As、Hg都为I类,都低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)限值;Cr含量也较低,两件浅层地下水Cr总量平均值为0.0145mg/L,远低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中六价铬的限值0.1mg/kg。所采集的4件灌溉水样中铜、铅、锌、铬、镉、砷和汞7种重金属含量均达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)限值,镍含量也较低,平均值为0.0009mg/L,达到《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)I类地下水标准。

从以上数据分析可见,研究区表层土壤、剖面土壤中重金属含量整体上低于GB 15618—2018农用地土壤污染风险筛选值,浅层地下水和灌溉水满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),总体较为安全,土壤硒含量较高,适宜发展富硒水稻种植。

### 3.3 硒元素迁移特征

#### 3.3.1 岩石-土壤硒元素迁移特征

研究区新鲜花岗岩及对应点风化土中Se含量见表2。研究区4件岩石样品均为晚侏罗系黑云母二长花岗岩,Se含量范围为0.019~0.025mg/kg,变异系数(13.84%)较小,平均含量仅为0.0208mg/kg,低于地壳丰度(0.05mg/kg)<sup>[27]</sup>。该分析结果与其他研究者关于该地区岩石中Se的研究结果一致。例如,刘子宁等<sup>[27]</sup>研究表明江门市台山地区岩石Se含量为0.01~1.34mg/kg,Se含量较低的岩石主要为富硅岩以及花岗岩,其中三件花岗岩样品Se含量分别为0.03mg/kg、0.01mg/kg、0.01mg/kg。《广东省珠江三角洲经济区局部生态地球化学评价报告》表明江门市台山地区花岗岩中Se偏低,Se含量范围为0.02~0.25mg/kg,平均值为0.06mg/kg,中位值为0.04mg/kg,变异系数较大,达到77%;岩石硒含量与岩性和形成时代密切相关,在该地区采集的花岗岩样品涵盖了三叠纪、白垩纪、侏罗纪等地层,花岗岩形成时代差异较大,固硒含量变异系数较大。

表2 岩石和风化土中Se含量

Table 2 Selenium concentrations of rocks and weathered soils

花岗岩样品	Se含量 (mg/kg)	风化土样品	Se含量 (mg/kg)
花岗岩1	0.025	风化土1	0.30
花岗岩2	0.019	风化土2	0.12
花岗岩3	0.020	风化土3	0.17
花岗岩4	0.019	风化土4	0.34

相比于岩石中的Se,研究区所采集的花岗岩对应的4个风化土样品中Se含量平均值为0.2325mg/kg,是岩石平均含量的11.2倍。根据这个研究数据,基本上可以推断岩石风化成土过程是Se元素富集过程。研究区温暖湿润气候条件下,花岗岩体遭受长期而又强烈的风化作用,形成土壤母质,在长期水岩相互作用下,盐基离子大量淋失,活性元素(如Ca、Na、Mg、K、Si等强迁移与易迁移元素)的淋失较快,稳定性元素的淋失较慢,结果会造成稳定性元素富集,易溶性元素亏损<sup>[28-30]</sup>。因此,风化土中稳定性元素Se显著高于新鲜花岗岩中Se,又由于风化淋溶程度及母岩Se含量差异,4个风化土中Se含量的差异较大。研究区表层土壤Se含量平均值为0.506mg/kg,为风化土Se平均含量的2.2倍。其主要原因是,研究区风化土变为水稻土的过程中,

风化淋溶作用持续进行,加之稻田的水耕熟化作用,促使 Se 在表层土壤中积累,使得表层土壤中 Se 高于风化土中 Se<sup>[31]</sup>。当然土壤发育程度及稻田的水耕熟化作用是存在差异的,从而 10 个表层土壤中 Se 含量变异系数较大,达到 47.5%。由上可知,研究区岩石风化成土过程为 Se 元素富集过程,主要受风化淋溶作用控制。

### 3.3.2 土壤剖面硒迁移特征

针对研究区所处地质环境特点及地貌形态,在研究区的上、中、下游选择了三条剖面来剖析,06 剖面、04 剖面、03 剖面分别位于研究区上、中、下游,成土母质均为花岗岩残积土。研究区三个典型土壤剖面中 Se 含量分布如图 3 所示。三个剖面 Se 含量呈现出相似特征,从上到下,先增大后减小。Se 含量平均值由大到小顺序为:03 号剖面 > 06 号剖面 > 04 号剖面,平均值分别为 1.325mg/kg、0.60mg/kg、0.565mg/kg,处于下游的 03 号剖面土壤 Se 整体含量较高。梁若玉等<sup>[32]</sup>报道了地形条件也能影响地表 Se 重新分配,03 号剖面地势相对低洼,相对位置处于 06 号剖面、04 号剖面下游,在低洼处易接受其他物质,故 Se 常趋向积聚,含量较高。

三个剖面同一深度 Se 含量由大到小顺序为:40~60cm > 60~80cm > 20~40cm > 0~20cm,平均值分别为:1.557mg/kg、0.987mg/kg、0.423mg/kg、0.353mg/kg,平均含量由上到下呈现出先增大后减小的特征,表现为在中下部富集,即出现 Se 在中下部淋溶淀积层富集的现象。与文帮勇等<sup>[33]</sup>的研究结果类似,可能与研究区降雨量大、淋溶作用强有关<sup>[34-35]</sup>。

从图 4 剖面颗粒组成可以看出,研究区土壤剖面粗粒组(粒径 >0.075mm)含量占比较大,含量范围为 48.2%~89.4%,平均值为 73%;细粒组(粒径 <0.075mm)含量范围为 10.6%~51.8%,平均值为 27%。三个剖面土壤均以粗粒土为主,剖面渗透性好,在研究区降雨量大因素影响下,淋溶作用较强,土壤中 Se 较易向下迁移,三个剖面土壤 Se 主要在中下部淋溶淀积层富集。

综上,土壤 Se 元素迁移,径流方向,主要是向下游迁移,在低洼处富集,垂向土壤剖面硒元素主要是向下部迁移,在中下部淋溶淀积层富集。

### 3.3.3 水稻硒元素迁移特征

研究区采集的水稻样品各部分 Se 含量统计结果列于表 3。根据《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)标准,以大米 Se 含量在 0.04~0.3mg/kg 判定为富硒大米,所采集的 10 件样品大米 Se 含量平均值为 0.058mg/kg,达到了富 Se 大米标准。从水稻各部位 Se 含量平均值来看,研究区水稻不同部位 Se 含量为:根 > 茎叶 > 大米 > 稻壳,与其他相关研究报道结果一致<sup>[36-39]</sup>。

植物迁移系数<sup>[40]</sup>用来反映某种元素在植物体中的迁移能力,它是植物地上部分中某元素含量与其根部中该元素含量比值。通过计算,水稻地上部分 Se 含量低于水稻根部 Se 含量,平均迁移系数为 0.19,远小于 1,说明 Se 在水稻中不容易从根部向地上部分迁移<sup>[41]</sup>。水稻根部 Se 含量较高,是因为水稻生长过程中,根部聚集了大量的微生物,增强了根部对 Se 的吸收能力<sup>[42-43]</sup>,因此根部对 Se 的富集作用最强。只有在根部累积了大量的 Se,才能进一步向茎和叶及果实部位迁移。

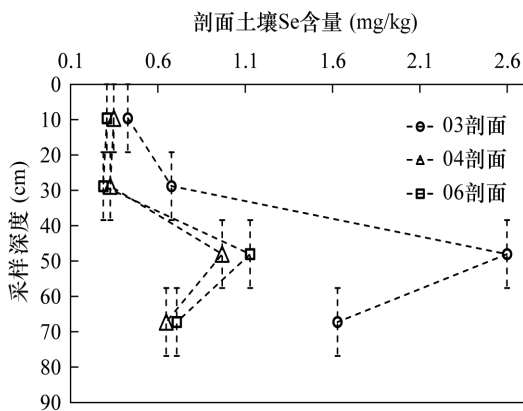


图 3 剖面不同深度土壤硒含量垂向分布  
Fig. 3 Vertical distribution characteristics of selenium in the different depth of soil profile

表 3 水稻不同部位硒含量

Table 3 Analytical results of selenium in different parts of rice

样品介质	Se 含量 (mg/kg)		
	平均值 (n=10)	最大值 (n=10)	最小值 (n=10)
水稻根	0.320	0.360	0.300
水稻茎叶	0.075	0.090	0.054
大米	0.058	0.072	0.045
水稻稻壳	0.053	0.072	0.038

### 3.3.4 土壤-水稻系统中硒元素迁移特征

将水稻各部分硒含量(表 3)与对应点的表层土壤硒含量(表 1)进行对比分析,探讨该研究区水稻对硒元素的富集能力。从富集系数<sup>[32,34]</sup>(即水稻各部位的硒含量与对应点土壤硒含量的比值)来看,

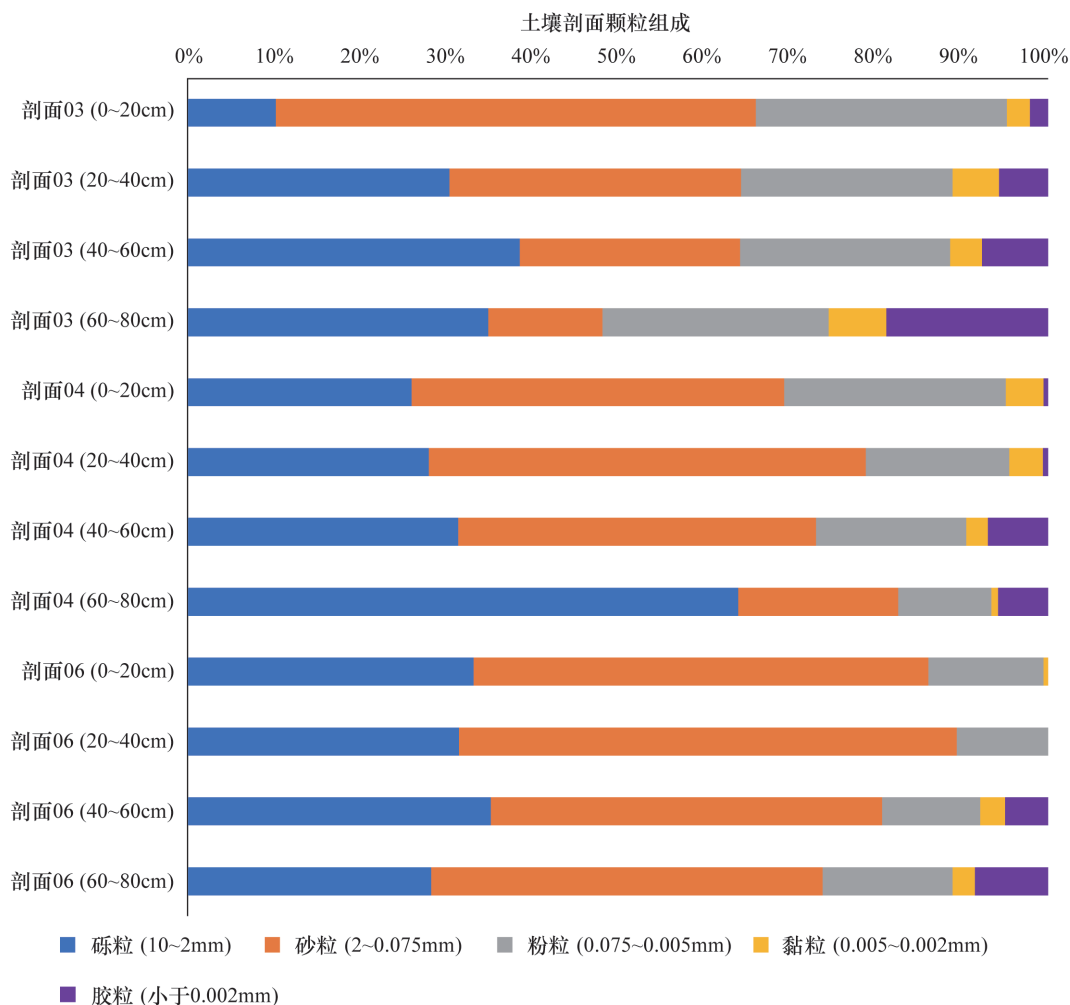


图 4 研究区土壤剖面颗粒组成

Fig. 4 Soil particle composition in the soil profile of the research area

研究区水稻根、茎叶、稻壳、大米富集系数平均值分别为 0.657、0.165、0.120、0.126,可见研究区水稻不同部位对 Se 的富集能力并不一致,其中根的富集系数远大于其他三个部分,说明土壤 Se 较易向水稻根部迁移,在根部富集,较不易进入水稻茎叶及大米部位。水稻各部分富集系数均小于 1,尤其是水稻茎叶、稻壳、大米富集系数远小于 1,说明土壤中 Se 含量高于水稻各部分 Se 含量,土壤中的 Se 是研究区土壤-植物系统中 Se 的物质循环基础。

## 4 结论

研究表明崖门镇周边水稻田土壤、大米硒含量较高,土壤、水环境质量较好,总体较为安全,适宜发展富硒水稻种植。研究区花岗岩风化成土过程中硒元素不断迁移富集,形成富硒土壤。沿地下水径流方向,土壤 Se 元素主要是向下游迁移,在低洼处富

集;沿土壤剖面垂向,土壤 Se 元素主要是向下部迁移,在中下部淋溶淀积层富集。水稻不同部位 Se 的含量为:根 > 茎叶 > 大米 > 稻壳,土壤 Se 较易向水稻根部迁移,较难从根部向水稻地上部分迁移。因此,建议当地充分利用富硒土地资源,发展富硒水稻种植,优先选种富硒水稻品种,做好水土环境保护,以提高富硒水稻品质,助力打造潭江流域优质稻米产业带。

## 5 参考文献

- [1] Dinh Q T, Cui Z, 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.
- [2] Ullah H, Liu G, Yousaf B, et al. A comprehensive review on environmental transformation of selenium: Recent

- advances and research perspectives [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, doi. org/10. 1007/ s10653 -018 -0195 -8.
- [3] 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.
- [4] Bullock L A, John P, Magali P, et al. High selenium in the carboniferous coal measures of northumberland, North East England [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 195: 61 - 74.
- [5] Yanai J, Mizuhara S, Yamada H. Soluble selenium content of agricultural soils in Japan and its determining factors with reference to soil type, land use and region [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61 (2): 312 - 318.
- [6] Yamada H, Kamada A, Usuki M, et al. Total selenium content of agricultural soils in Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55 (5): 616 - 622.
- [7] Zhu J M, Zheng B S. Distribution and affecting factors of selenium in soil in the high - Se environment of Yutangba mini - landscape [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999 (Supplement 2): 46 - 48.
- [8] 朱建明, 左维, 秦海波, 等. 恩施硒中毒区土壤高硒的成因: 自然硒的证据 [J]. *矿物学报*, 2008, 28 (4): 397 - 400.
- Zhu J M, Zuo W, Qin H B, et al. An investigation on the source of soil Se in Yu Tang Ba, En Shi: Evidence from native selenium [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28 (4): 397 - 400.
- [9] 张建东, 王丽, 王浩东, 等. 紫阳县土壤硒的分布特征研究 [J]. *土壤通报*, 2017, 48 (6): 1404 - 1408.
- Zhang J D, Wang L, Wang H D, et al. Distribution of soil total selenium in Ziyang, Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (6): 1404 - 1408.
- [10] 朱海娣, 毛雪, 吴承龙, 等. 石台县土壤硒资源分布特征及其利用 [J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38 (9): 130 - 134.
- Zhu H D, Mao X, Wu C L, et al. Distribution characteristics of selenium resources and their utilization in Shitai County [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38 (9): 130 - 134.
- [11] 曹容浩. 福建省龙海市表层土壤硒含量及影响因素研究 [J]. *岩矿测试*, 2017, 36 (3): 282 - 288.
- Cao R H. Study on selenium content of surface soils in Longhai, Fujian and its influencing factors [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36 (3): 282 - 288.
- [12] Farhud A A, Sewailem M A, Usman A R A. Status of selenium and trace elements in some arid soils cultivated with forage plants: A case study from Saudi Arabia [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2017, 19: 85 - 92.
- [13] Pytlik P B, Kulczycki G. Content of selenium in arable soils near Wroclaw [J]. *Journal of Elementology*, 2009, 14 (4): 755 - 762.
- [14] 李杰, 刘久臣, 汤奇峰, 等. 川西高原地区水体中硒含量及分布特征研究 [J]. *岩矿测试*, 2018, 37 (2): 183 - 192.
- Li J, Liu J C, Tang Q F, et al. Study of the contents and distribution of selenium in water samples from the Western Sichuan Plateau and the incidence of Kaschin beck disease [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37 (2): 183 - 192.
- [15] 迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究 [J]. *土壤学报*, 2016, 53 (5): 1262 - 1274.
- Chi F Q, Xu Q, Kuang E J, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1262 - 1274.
- [16] Eiche E, Bardelli F, Nothstein A K, et al. Selenium distribution and speciation in plant parts of wheat (*Triticum aestivum*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) from a seleniferous area of Punjab, India [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 952 - 961.
- [17] Junior E C S, Wadt L H O, Silva K E. Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region [J]. *Chemosphere*, 2017, 188: 650 - 658.
- [18] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17 (4): 1588 - 1593.
- Ma X, Zong L G, Zhu X D, et al. Effectiveness and influential factors of soil selenium inelenium valley, Fengcheng, Jiangxi [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17 (4): 1588 - 1593.
- [19] 王驰, 何慧, 张久亮, 等. 恩施鱼塘坝玉米硒富集及玉米肽抗氧化活性研究 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31 (9): 75 - 80.
- Wang C, He H, Zhang J L, et al. Study on selenium enrichment of corn in Yutangba, Enshi and the antioxidant activity of the corn peptides [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31 (9): 75 - 80.
- [20] 廖启林, 任静华, 许伟伟, 等. 江苏宜溧富硒稻米产区地质地球化学背景 [J]. *中国地质*, 2016, 43 (5): 1791 - 1802.



- Liao Q L, Ren J H, Xu W W, et al. Geological and geochemical background of Se - rich rice production in Yili area, Jiangsu Province [J]. *Geology of China*, 2016, 43(5):1791 - 1802.
- [21] Thakur R, Tarafder P K, Jha R R. An evolved GFAAS method for trace and ultratrace determination of Cr(III) and Cr(VI) in water and wastewater: Speciation of chromium [J]. *Atomic Spectroscopy*, 2018, 39(3):126 - 136.
- [22] Satyanarayanan M, Balaram V, Sawant S S, et al. Rapid determination of REEs, PGEs, and other trace elements in geological and environmental materials by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Atomic Spectroscopy*, 2018, 39(1):1 - 15.
- [23] Yuksel B, Arica E. Assessment of toxic, essential, and other metal levels by ICP - MS in Lake Eymir and Mogan in Ankara, Turkey: An environmental application [J]. *Atomic Spectroscopy*, 2018, 39(5):179 - 184.
- [24] 罗杰,王佳媛,游远航,等. 硒在土壤-水稻系统中的迁移转化规律[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 37(3):60 - 66.
- Luo J, Wang J Y, You Y H, et al. Migration and transformation of Se in the soil - rice system [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 37(3):60 - 66.
- [25] 商靖敏,罗维,吴光红,等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. *环境科学*, 2015, 36(1):301 - 308.
- Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Spatial distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe Watershed, China [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):301 - 308.
- [26] 郭宇,鲍征宇,马真真,等. 湖北恩施地区土壤-植物系统中Se元素的地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(1):151 - 155.
- Guo Y, Bao Z Y, Ma Z Z, et al. Geochemical characteristics of selenium in the soil - plants system of Enshi area, Hubei Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1):151 - 155.
- [27] 刘子宁,窦磊,游远航. 珠江三角洲台山地区硒的地球化学特征[J]. *现代地质*, 2014, 28(5):928 - 934.
- Liu Z N, Dou L, You Y H. Geochemical characteristics of selenium in Taishan Region of Pearl River Delta [J]. *Geoscience*, 2014, 28(5):928 - 934.
- [28] 熊平生. 江西赣县花岗岩型红土剖面常量元素地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(3):553 - 558.
- Xiong P S. Major elements geochemical characteristics of the granite - type laterite profile in Gan Xian, Jiangxi Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(3):553 - 558.
- [29] 陈俊坚,张会化,余炜敏,等. 广东省土壤硒空间分布及潜在环境风险分析[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6):1115 - 1120.
- Chen J J, Zhang H H, Yu W M, et al. Spatial variation and environmental indications of soil selenium in Guangdong Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6):1115 - 1120.
- [30] 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.
- Fang J M. Selenium speciation analysis and its transformation and enrichment in soils of Fuzhou City [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2008, 27(2):103 - 107.
- [31] 郭莉,杨忠芳,阮起和,等. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. *现代地质*, 2012, 26(5):859 - 864.
- Guo L, Yang Z F, Ruan Q H, et al. Content and distribution of selenium in soil of Beijing Plain [J]. *Geoscience*, 2012, 26(5):859 - 864.
- [32] 梁若玉,和娇,史雅娟,等. 典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性及剖面分布分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(7):1588 - 1595.
- Liang R Y, He J, Shi Y J, et al. Bioavailability and profile distribution of selenium in soils of typical Se - enriched agricultural base [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(7):1588 - 1595.
- [33] 文帮勇,张涛亮,李西周,等. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. *中国地质*, 2014, 41(1):256 - 263.
- Wen B Y, Zhang T L, Li X Z, et al. A feasibility study of selenium - rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province [J]. *Geology in China*, 2014, 41(1):256 - 263.
- [34] 赵少华,宇万太,张璐,等. 环境中硒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 S H, Yu W T, Zhang L, et al. Biogeochemical cycling of selenium, nutrition adjustment and differentiation cause in environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10):1197 - 1203.
- [35] 谢邦廷,贺灵,江官军,等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(3):273 - 281.
- Xie B T, He L, Jiang G J, et al. Regulation and evaluation of selenium availability in Se - rich soils in Southern China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(3):273 - 281.

- [36] 周骏,刘兆云,孟立丰,等. 土壤性质对土壤-水稻系统中硒迁移的影响[J]. 土壤,2016,48(4):734-741.  
Zhou J,Liu Z Y,Meng L F, et al. Selenium transport in soil-paddy plant system influenced by soil properties [J]. Soils,2016,48(4):734-741.
- [37] 姜超强,沈嘉,祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. 应用生态学报,2015,26(3):809-816.  
Jiang C Q,Shen J,Zu C L. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (3): 809-816.
- [38] 张靖源,陈剑平,黄邵华,等. 广西鹿寨水稻及其种植土壤中硒含量分布特征分析[J]. 南方农业学报,2016,47(11):1856-1860.  
Zhang J Y, Chen J P, Huang S H, et al. Distribution characteristics of selenium content in rice and rhizosphere soil in Luzhai, Guangxi [J]. Journal of Southern Agriculture,2016,47(11):1856-1860.
- [39] 黄太庆,江泽普,邢颖,等. 水稻对外源硒的吸收利用研究[J]. 农业资源与环境学报,2017,34(5):449-455.  
Huang T Q,Jiang Z P,Xing Y, et al. Effects of exogenous selenium on paddy rice growth, selenium uptake and accumulation [J]. Agricultural Resources and Environment,2017,34(5):449-455.
- [40] 李玲,张国平,刘虹,等. 广西大厂矿区土壤-植物系统中Sb、As的迁移转化特征[J]. 环境科学学报,2010,30(11):2305-2313.  
Li L,Zhang G P,Liu H, et al. Distribution and mobility of Sb and As in topsoil and plants in the Dachang multi-metalliferous mine area, Guangxi, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2010,30(11):2305-2313.
- [41] 吴汉福,田玲,翁贵英,等. 煤矸石山优势植物对重金属吸收及富集特征[J]. 水土保持学报,2016,30(2):317-322.  
Wu H F,Tian L,Weng G Y, et al. Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant plants species settled naturally on coal gangue pile [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(2):317-322.
- [42] White P J. Selenium accumulation by plants [J]. Annals of Botany,2016,117:217-235.
- [43] 徐聪,刘媛媛,孟凡乔,等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系[J]. 中国农学通报,2018,34(7):96-103.  
Xu C, Liu Y Y, Meng F Q, et al. Selenium content in agricultural products and its relationship with soil selenium [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2018,34(7):96-103.

## Distribution and Migration Characteristics of Selenium in the Soil-Plant System of Paddy Fields in the Pearl River Delta, Yamen Town

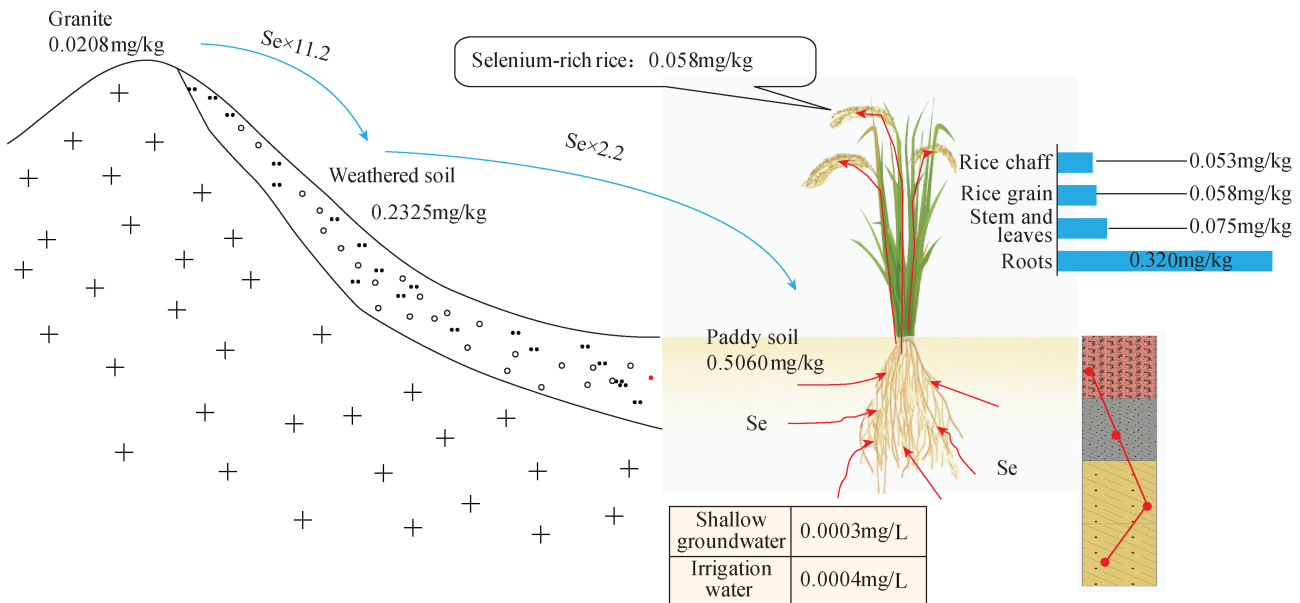
GU Tao<sup>1</sup>, ZHAO Xin-wen<sup>1\*</sup>, LEI Xiao-qing<sup>2</sup>, HUANG Chang-sheng<sup>1</sup>, ZENG Min<sup>1</sup>,  
LIU Xue-hao<sup>1</sup>, WANG Jie-tao<sup>1</sup>

(1. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, China;

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environment Geology, China University of Geosciences (Wuhan),  
Wuhan 430074, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The weathering of granite rocks to soils led to the enrichment of selenium and the formation of selenium-rich soils.
- (2) Selenium migrated downward in the soil profiles and downstream along the direction of groundwater runoff.
- (3) Selenium content in different parts of rice followed the order of root, stem and leaf, rice grain, rice hull.



## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The distribution and migration of selenium in the natural environment is a hot topic. The results of a multi-purpose, regional, geochemical survey showed that the content of selenium in the Pearl River Delta Region soils was relatively high, which was suitable for the planting of selenium-rich agricultural products. However, the rule of selenium migration and transformation in the soil-plant system is not yet clear.

**OBJECTIVES:** To understand the distribution and migration of selenium in the soil-plant system.

**METHODS:** Taking Yamen Town, Jiangmen City, a typical selenium-rich area in the Pearl River Delta region as an example, selenium contents in rocks, weathered soils, paddy soils, shallow groundwater, irrigation water and rice samples were analyzed by atomic fluorescence spectrometry.

**RESULTS:** The mean selenium concentrations in the granite rocks, granite weathered soils, surface soils, profile soils, shallow groundwater, irrigation water and rice of Yamen Town were 0.0208mg/kg, 0.2325mg/kg, 0.5060 mg/kg, 0.83mg/kg, 0.0003mg/L, 0.0004mg/L and 0.058mg/kg, respectively. The selenium contents in surface soils were equivalent to the soil background value of the Pearl River Delta (0.51mg/kg), the selenium contents of rice reached the standard of selenium-rich rice.

**CONCLUSIONS:** The rules of selenium migration in the soil-plant system are as follows: selenium migrates downward in the soil profiles, and migrates downstream along the direction of groundwater runoff. Soil selenium migrates to rice root easily, but migrates with difficulty from roots to the overground parts of rice. The study on the distribution and migration of selenium in the soil-plant system can provide a scientific basis for the exploitation and utilization of selenium-rich resources in this area.

**KEY WORDS:** paddy field; selenium; atomic fluorescence spectrometry; soil-plant system; distribution; migration