

浔郁平原不同作物的硒富集特征及其影响因素^①

陈锦平¹, 刘永贤^{1*}, 潘丽萍¹, 吴天生², 杨彬³, 邢颖¹, 廖青¹, 梁潘霞¹, 江泽普¹

(1 广西农业科学院农业资源与环境研究所/广西富硒农业研究中心, 南宁 530007; 2 广西地质调查院, 南宁 530023;

3 广西贵港市富硒农产品开发领导小组办公室, 广西贵港 537100)

摘要:作物中的硒含量是影响食物链硒水平的关键因素。以浔郁平原土地质量地球化学评价项目中的农作物调查结果和多年定位试验结果为基础,探究不同作物对土壤硒的富集特征及其影响因素。结果表明:浔郁平原的覃塘、港南、桂平市和平南县等4个县(市、区)的水稻富硒率均高于86%。花生、黄豆、玉米和水稻的天然富硒率最高,富硒率依次为100%、100%、100%和89%。水稻根、茎、籽粒的生物富集系数依次下降,分别为0.663、0.130和0.108,水稻籽粒的生物富集系数远高于龙眼、荔枝和甘蔗。根系土与水稻籽粒硒含量的相关系数为0.660,远高于龙眼和荔枝。港南区作物硒与土壤pH相关系数为0.342,在碱性土壤中甘蔗茎的硒含量(0.012 1 mg/kg)最高,在酸性土壤中水稻的硒含量(0.065 3 mg/kg)最高。本研究中,以种子为可食部分的作物其天然富硒率较高,土壤硒含量和土壤酸碱性对水稻籽粒硒含量影响较大。

关键词:浔郁平原;作物;硒富集特征;pH

中图分类号:S184; S314 **文献标识码:**A

硒是动物和人体的一种必需营养素^[1],与人体健康息息相关,缺硒不仅导致免疫功能下降,还会引发疾病,有“生命的火种”、“心脏的守护神”和“抗癌之王”等美誉^[2]。在世界范围内土壤硒缺乏极为普遍,有2/3的地区缺硒,硒摄入不足严重威胁着人类健康的发展,近10亿人受此影响^[3]。植物中的硒含量是影响食物链硒水平的关键环节,人和动物体内获得硒的来源都是直接或间接从植物中摄取,因此食用富硒农作物是缺硒人群最主要的补硒方法。

充分利用富硒地区的富硒土壤资源开展天然富硒农作物的生产研究,以满足缺硒地区人们对膳食补硒的需要,具有极其重要的现实意义。浔郁平原是浔江平原与郁江平原的合称,位于广西中南部,是我国为数不多的优质天然富硒区之一,拥有全国最大连片的平坦优质自然富硒土壤资源,具有得天独厚的土壤资源与农业产业基础,在生产富硒农产品上极具优势^[4]。从2014年开始到2015年底该平原区域内就有21家龙头企业带头创建了1 266.7 hm²的富硒产业示范基地,并形成富硒十大优势产业^[5]。但该平原生产

的作物天然富硒情况尚未开展较为全面的调查,影响该平原作物硒吸收的关键因素也缺乏深入探讨。为了进一步探究该富硒地区在生产天然富硒农产品上的潜力,以浔郁平原“土地质量地球化学评价”项目中的农作物地球化学调查数据与多年的定位试验调查研究数据等为基础,总结分析不同农作物对土壤硒的富集特征,兼以讨论土壤硒在农作物上的迁移特征及其影响因素,为该科学合理开发天然富硒农产品提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(浔郁平原)位于广西中南部(22°30′~23°21′N, 109°03′~110°03′E),包括贵港市港南区、覃塘区、平南县及桂平市4个县(市、区)。该区土壤肥沃,经济发达,是广西重要的商品粮、糖、果、茶、菜和禽畜、水产生产基地,盛产优质大米、白砂糖、荔枝、龙眼等特色农产品,素有广西“鱼米之乡”、“中国糖城”的美誉。年均气温21.5℃,年均降雨

基金项目:广西科技重大专项(桂科AA17202026)、广西重点研发计划项目(桂科AB16380207)、广西农业重点科技计划项目(201604)、广西富硒特色作物试验站项目(桂TS2016011)、广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科2017YZ03)和广西农业科学院科技发展基金项目(2017JM07)资助。

* 通讯作者(liuyx27@163.com)

作者简介:陈锦平(1989—),男,广西岑溪人,硕士,主要研究方向为微量元素与植物生理。E-mail: 447355175@qq.com

量 1 600 mm。

1.2 数据来源

研究区样品来源于广西《土地质量地球化学评价》项目成果中的农作物调查结果和多年定位试验结果,涵盖贵港市港南区、覃塘区、平南县及桂平市的研究成果。土壤样品以梅花形多点采样法采样,垂直采集地表至 20 cm 深处的土柱,保证上下采集均匀,去除草根、砾石、砖块等杂物,混匀并用四分法取约 2 kg 土样。采集的农作物有水稻、花生、黄豆、玉米、甘蔗、莲藕、蔬菜、荔枝、淮山、木薯和龙眼等共 11 种。采用原子荧光法测定样品硒含量, pH 计电极法测定土壤 pH。

1.3 数据处理

数据统计分析及作图均采用 Microsoft Excel 2013 软件。

2 结果与讨论

2.1 主要作物的富硒特征

一般来说,植物中的无机化学组分都是从土壤中得到的,尽管硒元素尚未确定是否是植物的必需元素,但植物只要种植在含硒土壤中都会或多或少地吸收一些土壤中的硒。植物对硒的吸收程度取决于植物的种类,根据植物对硒的吸收能力大小可以将植物分为 3 种类型,即累积植物(指示植物)、中度含硒植物与低度含硒植物^[6]。一般累积植物对硒的吸收和耐受能力都很强,而大部分栽培作物吸收累积硒的能力都较差,南京市某设施蔬菜种植基地蔬菜硒含量范围为 26.4 ~ 64.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[7]。除植物因素外,土壤中的硒含量也是影响植物对土壤硒吸收转化最重要的因素之一^[8-9]。浔郁平原具有丰富的优质富硒土壤资源,作物天然富硒的可能性也因此较大。以国家《富硒稻谷》(GB/T22499—2008)规定的水稻硒含量 0.04 ~ 0.30 mg/kg 为富硒标准,调查发现,该平原内的覃塘区、港南区、桂平市和平南县等 4 个县(市、区)的水稻天然富硒率极高且差别不大,均在 86%以上,覃塘区、桂平市的水稻富硒率都超过 90%(图 1)。在港南区的 75 件水稻样品中,硒含量范围在 0.037 ~ 0.340 mg/kg ,硒平均含量达到 0.064 mg/kg ,可见这些水稻样品中即使硒含量最低的样品其硒含量也极为接近富硒标准(0.04 mg/kg),浔郁平原生产天然富硒水稻的优势非常明显。

综合覃塘、桂平、港南和平南 4 个县(市、区)的作物数据进行统计发现,除水稻外,花生、黄豆和玉米的富硒率也极高,均达到了 100%,甘蔗、莲藕、

蔬菜、荔枝、淮山、木薯和龙眼的富硒率依次降低,其中淮山、木薯和龙眼的富硒率都低于 10%(图 2)(以安康市《富硒食品硒含量分类标准》(DB6124.01—2010)划分)。在港南区的 110 件甘蔗样品中,硒含量范围为 0.003 ~ 0.041 mg/kg ,平均硒含量 0.011 mg/kg 。可见即使生长在相同的富硒土壤环境中,作物间的天然富硒水平仍然存在较大差异,对浔郁平原来说,粮食作物中以籽粒为食用部分的作物类型(花生、黄豆、玉米和水稻)其天然富硒率最高。可能是因为这些可食用的籽粒同时也是该作物的种子,因此籽粒是这些作物最重要的营养储存器官,在成熟时其他器官中大部分可溶性硒化物被转移到籽粒中^[10]。大体来看,粮食作物中籽粒或种子的含硒量大于茎秆^[11]。

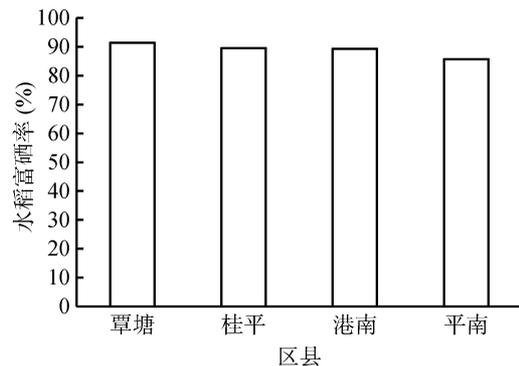


图 1 浔郁平原不同区县的水稻富硒率

Fig. 1 Se-rich proportions of rice in different areas of Xunyu plain

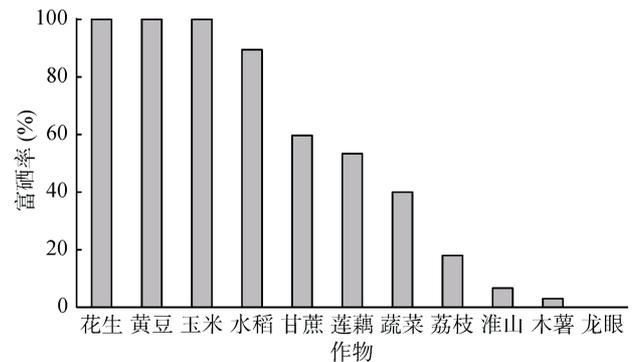


图 2 不同作物的富硒率

Fig. 2 Se-rich proportions in different crops

2.2 不同作物的硒富集能力

生物富集系数是反映植物对元素富集程度的高低或富集能力强弱的一项重要指标,不同物种或者同一植株的不同部位积累某一元素的能力不同,其生物富集系数差异也较大,生物富集系数越大,表明该作物对元素吸收的能力越强。计算方法为:作物对硒的生物富集系数(BCF)=根或地上器官硒含量(mg/kg)/土壤硒含量(mg/kg)^[12]。

对平南县采集的 70 个水稻样品进行统计分析发现,水稻根系土硒含量为 0.546 mg/kg,水稻根、茎、籽粒的生物富集系数依次下降,根部富集系数高达 0.663,但茎和籽粒的只有 0.130 和 0.108(图 3)。可见水稻从根系土到根、茎、籽粒的硒含量是一个递减的过程,而且从根到茎的减少幅度最大,说明水稻从土里吸收的硒元素有很大一部分积累在了根部,限制了绝大部分硒往地上器官的转移。姜超强等^[12]和钟松臻等^[13]的研究也发现,水稻根系、茎叶和籽粒中的硒含量也呈现根系 > 茎叶 > 籽粒的特点,这与张城铭等^[14]的研究结果一致。籽粒硒含量较低可能是水稻的一种保护机制,植株为了防止地上部分重要的生理器官受到过量硒的损害而减少转运,也可能与水稻植株对不同土壤形态硒的迁移转化机制有所差异有关。研究发现,植物根部吸收硒酸盐后可以将大部分硒酸盐转移到地上部分^[15]。而对于亚硒酸盐态硒则不然,植物根部吸收的亚硒酸盐极易转化成有机态硒。Huang 等^[15]对小麦进行 3 d 的亚硒酸盐处理后其有机硒含量即接近于总硒的 90%,而这些生成的有机硒大部分可以直接积累在根部,因此不容易转移到地上部分^[16-17]。水稻土由于长期处于滞水状态,因此其还原性较强,土壤硒主要以亚硒酸盐的形式存在,吸收的亚硒酸盐大部分在根部即转化成有机硒进行积累,所以造成地上部分的硒生物富集系数偏低。

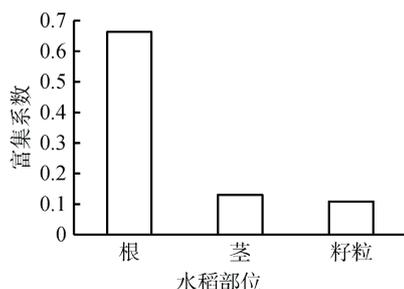


图 3 水稻不同部位的硒富集系数

Fig. 3 Se bioconcentration factors in different organs of rice

只从食用部分来看,与平南县的龙眼、荔枝以及港南区的甘蔗的生物富集系数相比,水稻的生物富集系数远远高于其他作物(图 4)。这也可以看出水稻对土壤硒的富集能力要高于龙眼、荔枝和甘蔗。

2.3 影响作物硒含量的因素

2.3.1 土壤硒含量 植物吸收的硒主要来源于土壤,因此土壤硒含量、土壤质地、pH、土壤水分含量、土壤盐度和土壤氧化还原电位等都与植物对土壤硒的吸收转化过程密切相关^[18]。尽管植物能够吸收

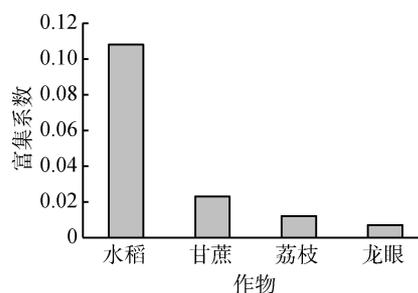


图 4 不同作物的硒富集系数

Fig. 4 Se bioconcentration factors in different crops

利用的只是土壤中的有效硒,但土壤有效硒含量水平与土壤全硒含量仍具有显著相关关系^[19]。因此,土壤全硒对作物硒含量具有重要的影响作用,但根据作物的不同也有所差异。

对平南县主要农作物食用部位及其根系土中 Se 含量的关系进行相关性分析发现,水稻、龙眼和荔枝的根系土硒含量依次为 0.546、0.430 和 0.818 mg/kg,水稻籽粒硒含量与土壤硒的相关系数为 0.660,远高于龙眼和荔枝(表 1)。可见根系土中的硒含量对水稻籽粒硒含量具有重要的决定性作用,想要提高水稻籽粒硒含量,增加土壤的硒是一个行之有效的办法,对龙眼和荔枝则效果较差。耿建梅等^[20]研究两个水稻品种对土壤硒的吸收也发现,高硒土壤的水稻硒累积量、糙米和精米的硒含量与有机硒含量都显著高于低硒土壤。

表 1 作物硒含量与土壤硒含量的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between Se contents in crops and soil

作物	根系土硒含量(mg/kg)	相关系数
水稻	0.546	0.660
龙眼	0.430	0.070
荔枝	0.818	0.111

2.3.2 土壤酸碱性 土壤理化性质通过影响土壤硒形态而间接影响植物对土壤硒的吸收转化。其中土壤酸碱性在很大程度上决定了硒在土壤的存在形态,并由此影响硒的有效性,在碱性和氧化条件下,硒酸盐是土壤硒的主要形态^[21]。很多研究表明,硒酸盐的生物有效性要高于亚硒酸盐,因此植物对硒酸盐的吸收速率大于亚硒酸盐^[22-24]。本研究对港南区采集的 110 件甘蔗茎样品及其土壤酸碱性进行统计分析发现,甘蔗茎硒含量在碱性土壤中较高,其硒含量均值最大,达到 0.012 1 mg/kg(表 2)。这可能是因为碱性土壤中的硒主要以硒酸盐态存在,因此更有利于甘蔗的吸收转运。

表 2 不同酸碱性土壤的作物硒含量
Table 2 Crop Se contents in soils with different pH values

组别	硒含量 (mg/kg)	
	甘蔗茎	水稻籽粒
总平均值	0.010 6	0.063 8
酸性土壤	0.008 9	0.065 3
碱性土壤	0.012 1	0.061 3

然而,与同在港南区采集的甘蔗相比,水稻籽粒(75 件)的硒含量则在酸性土壤中较高,酸性土壤中水稻硒含量均值达到 0.065 3 mg/kg,碱性土壤则为 0.061 3 mg/kg(表 2)。

由此可见,土壤酸碱性对不同作物硒吸收的影响存在较大差异,对甘蔗和水稻的影响作用相反。这可能与两者生长环境的水分条件存在较大差异有关,甘蔗是在旱地生长,水稻生长环境为滞水水田,水淹或滞水土壤其还原性也较强^[25]。土壤水分通过影响土壤氧化还原条件又能间接影响土壤硒形态。在土壤水淹条件下,水稻土中存在 $\text{Se}^{6+}/\text{Se}^{4+}$ 的还原体系,因此水稻土和旱地土壤的硒形态会存在较大的差别,水稻土以亚硒酸盐态硒为主^[26]。基于作物对自己长期生长环境的一种适应,研究表明旱地作物和水生植物对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收转移规律不同^[27-28]。通常情况下旱地植物对硒酸盐的吸收能力要高于亚硒酸盐,而水生植物对亚硒酸盐的吸收速率则更快^[24]。不仅如此,还有学者研究发现,在不同 pH 环境下,亚硒酸盐会以不同的形式存在,且水稻对不同形式的亚硒酸盐具有不同的吸收机制,整体来看,水稻根系对硒的吸收能力在不同 pH 条件下的大小顺序为 $\text{pH } 3.0 > \text{pH } 5.0 > \text{pH } 8.0$ ^[29]。总的来说,不管是旱地作物还是水生作物,土壤酸碱性对作物的硒含量都具有重要影响。

进一步对港南区采集的 225 件农作物硒含量与土壤 pH 的关系进行分析发现,农作物硒含量与土壤 pH 的相关系数为 0.342(数据未列出)。综上,土壤 pH 在作物对土壤硒的吸收上扮演着重要角色,但影响作用因物种而异,尤其对生长环境差异较大的不同物种来说,土壤酸碱性的影响作用有可能是相反的。

3 结论

浔郁平原的水稻天然富硒率极高,覃塘、港南、桂平和平南 4 个县(市、区)的水稻富硒率均在 86% 以上。以种子为食用部分的作物其天然富硒率最高,花生、黄豆、玉米和水稻的富硒率依次为 100%、100%、100% 和 89%。水稻根、茎、籽粒的生物富集系数依

次下降,依次为 0.663, 0.130 和 0.108。

水稻籽粒与根系土硒含量的相关系数为 0.660,远高于龙眼和荔枝,根系土中的硒含量对水稻硒含量具有重要的决定性作用。土壤 pH 对农作物硒含量的影响较大,作物硒与土壤 pH 相关系数为 0.342。土壤酸碱性对甘蔗和水稻的影响作用相反,在碱性土壤中甘蔗茎的硒含量(0.012 1 mg/kg)最高,在酸性土壤中水稻的硒含量(0.065 3 mg/kg)最高。

综上,浔郁平原极适宜生产天然的富硒花生、富硒黄豆、富硒玉米和富硒水稻,以种子为食用部位的作物可重点研发;土壤硒含量和土壤酸碱性对水稻籽粒硒含量影响较大。

参考文献:

- [1] 高阿祥,周鑫斌,张城铭. 硒()预处理下根表铁膜对水稻幼苗吸收和转运汞的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 989-998
- [2] Williams P N, Lombi E, Sun G X, et al. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(15): 6024-6030
- [3] Combs G F. Selenium in global food systems[J]. British Journal of Nutrition, 2001, 85(5): 517-47
- [4] 刘永贤,潘丽萍,杨彬,等. 科学推进贵港市富硒生态产业发展打造西江流域“中国硒港”[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(1): 158-160
- [5] 张原天. 广西贵港富硒农业产业化发展前景研究[J]. 农技服务, 2017, 34(7): 171-172
- [6] 迟凤琴. 土壤环境中的硒和植物对硒的吸收转化[J]. 黑龙江农业科学, 2001(6): 33-35
- [7] 符明明,贾萌萌,胡文友,等. 设施栽培条件下蔬菜含硒状况及其健康风险评估[J]. 土壤, 2016, 48(5): 887-892
- [8] 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
- [9] 陈松灿,孙国新,陈正,等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 612-624
- [10] 马友华,转可钦,丁瑞兴. 硒对农作物的效应[J]. 中国农学通报, 1999(1): 44-46
- [11] 赵春梅,曹启民,唐群锋,等. 植物富硒规律的研究进展[J]. 热带农业科学, 2010, 30(7): 82-86
- [12] 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
- [13] 钟松臻,张木,张宝军,等. 硒高/低累积型水稻富硒特征的比较研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 943-947
- [14] 张城铭,周鑫斌,高阿祥. 水稻不同生育期对硒吸收累积及铁膜的吸附特性[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 693-702
- [15] Huang Q Q, Wang Q, Wan Y N, et al. Application of X-ray absorption near edge spectroscopy to the study of the effect of sulphur on selenium uptake and assimilation in wheat seedlings[J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(4): 726-732

- [16] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92–102
- [17] Jiang Y, Zeng Z H, Bu Y, et al. Effects of selenium fertilizer on grain yield, Se uptake and distribution in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61(8): 371–377
- [18] 果秀敏, 牛君仿, 方正, 等. 植物中硒的形态及其生理作用[J]. *河北农业大学学报*, 2003(S1): 142–143, 147
- [19] 陈铭, 刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用(一)[J]. *土壤通报*, 1996(2): 88–89
- [20] 耿建梅, 王文斌, 吴露露, 等. 两个水稻品种富硒特性比较研究[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 66–69
- [21] Neal R H, Sposito G, Holtzclaw K M, et al. Selenite adsorption on alluvial soils: I. soil composition and pH effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1161–1165
- [22] Shanker K, Srivastava M M. Uptake and translocation of selenium by maize (*Zea mays*) from its environmentally important forms[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2001, 22(3): 225–228
- [23] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants[J]. *Planta*, 1998, 206(2): 284–292
- [24] Zhang Y, Pan G, Chen J, et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2003, 253(2): 437–443
- [25] Hefting M, Clement J C, Dowrick D, et al. Water table elevation controls on soil nitrogen cycling in riparian wetlands along a European climatic gradient[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 67(1): 113–134
- [26] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1423–1429
- [27] 喻达辉, 刘少明. 钝顶螺旋藻对不同无机硒的吸收研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22(2): 137–141
- [28] 黄峙, 郑文杰, 向军俭, 等. 硒硫比值对钝顶螺旋藻有机化硒的影响及藻体中硒的形态、价态构成[J]. *海洋科学*, 2002, 26(5): 60–62
- [29] 张联合, 李友军, 苗艳芳, 等. pH 对水稻离体根系吸收亚硒酸盐生理机制的影响[J]. *土壤学报*, 2010(3): 523–528

Selenium Accumulation Characteristics and Influential Factors of Different Crops in Xunyu Plain

CHEN Jinping¹, LIU Yongxian^{1*}, PAN Liping¹, WU Tiansheng², YANG Bin³, XING Ying¹,
LIAO Qing¹, LIANG Panxia¹, JIANG Zepu¹

(1 *Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Selenium Enriched Agriculture Research Center of Guangxi, Nanning 530007, China*; 2 *Geological Survey Institute of Guangxi, Nanning 530023, China*; 3 *Leading Group Office for Se-enriched Agricultural Products R&D, Guigang, Guangxi 537100, China*)

Abstract: Selenium (Se) content in crop is one key factor affecting Se level in food chains. Based on the results of geochemical survey of soil environmental quality regarding crops and long-term positioning observation in Xunyu plain, Se accumulation characteristics of crops and influential factors were studied. Results showed that more than 86% of the rice were rich in Se in Qingtang, Gangnan, Guiping and Pingnan. In the studied area, the proportions of Se-rich peanut, soybean, corn and rice were 100%, 100%, 100% and 89%, respectively. Se bioconcentration factors of the root, stem, and grain of rice were 0.663, 0.130 and 0.108, respectively. Se bioconcentration factor of rice grain was much higher than those of longan, litchi and sugarcane. The correlation coefficient between Se contents in the rice grain and rice rhizosphere soil was 0.660, higher than those of longan and litchi. The correlation coefficient between Se contents in crops and soil pH was 0.342 in Gangnan. Se content in sugarcane stem (0.012 1 mg/kg) was higher in the alkaline soils than in other crops, whereas in the acid soils Se content in rice grain (0.065 3 mg/kg) was the highest among all the crops. These results indicated that the crops with seeds as edible part are generally rich in Se in the Xunyu plain, and Se content in rice is largely affected by soil Se content and pH.

Key words: Xunyu plain; Crop; Selenium accumulation characteristic; pH value