

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.07.2016111501

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 Ruoyu, HE Jiao, SHI Yajuan, et al. Bioavailability and profile distribution of selenium in soils of typical Se-enriched agricultural base[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(7): 1588-1595.

典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性及剖面分布分析*

梁若玉^{1,2} 和 娇³ 史雅娟^{1**} 陈 娟^{1,2} 吕永龙¹ 孙宏杰⁴

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京, 100085; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049;
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京, 100083; 4. 山东省淄博市博山区农业综合开发办公室, 淄博, 255200)

摘 要 以山东省淄博市博山区富硒农业用地作为研究区域, 从典型农业用地中采取土壤剖面样品, 测定土壤总硒、有效硒、土壤理化性质、土壤中重金属等指标, 对土壤中总硒和有效硒的土壤剖面分布并结合空间差异和水系进行分析. 结果表明, 博山区表层土壤 (0—10 cm) 总硒范围为 0.080—1.290 mg·kg⁻¹, 均值为 0.360 mg·kg⁻¹, 略高于全国土壤硒元素的平均值 (0.290 mg·kg⁻¹). 土壤有效硒均值为 0.033 mg·kg⁻¹, 占总硒比例为 10.16%. 土壤中全硒含量在剖面上的分布呈现出上高下低的规律, 土壤中有效硒在土壤剖面表现出上高下低、上低下高、上下相近等 3 种趋势. 土壤母质中硒含量的高低是影响区域富硒水平的一个重要因素. 研究区内硒元素和重金属镉呈极显著相关, 土壤硒可能与土壤中重金属存在伴生作用. 目前关于有效硒含量分级标准仍需要探讨, 发展富硒农业需要构建有效硒评价体系, 全面综合考虑土壤中全硒和有效硒.

关键词 硒资源, 有效硒, 土壤剖面, 富硒农业, 山东淄博.

Bioavailability and profile distribution of selenium in soils of typical Se-enriched agricultural base

LIANG Ruoyu^{1,2} HE Jiao³ SHI Yajuan^{1**} CHEN Juan^{1,2} LYU Yonglong¹ SUN Hongjie⁴

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;
3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University Beijing, 100083, China;
4. Boshan Agricultural Comprehensive Development Office, Zibo City, Zibo, 255200, China)

Abstract: Se-enriched agricultural base in Boshan, Zibo city was selected as the study area, where soil samples were collected. The content of total selenium, available selenium, physicochemical properties of the soil and heavy metals were determined. Moreover, soil profile distribution and spatial difference of total selenium and available selenium were analyzed. The results showed that the content of total selenium in surface soils (0—10 cm) ranged from 0.080 to 1.290 mg·kg⁻¹, with a mean of 0.360 mg·kg⁻¹, which was higher than the national level (0.290 mg·kg⁻¹). The average content of available selenium in soil was 0.033 mg·kg⁻¹, accounting for 10.16% of the total selenium. Profile distribution of total selenium showed characteristics of surface accumulation. Profile distribution of available selenium showed characteristics of surface accumulation, uniform distribution

2016 年 11 月 15 日收稿 (Received: November 15, 2016).

* 国家自然科学基金 (41671483), 国家重点基础性科技专项 (2013FY111100-02) 和公益性行业 (农业) 科研专项 (201303106) 资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (41671483), Ministry of Sciences and Technology (2013FY111100-02) and Ministry of Agriculture (201303106).

** 通讯联系人, Tel.: +0086-10-62849118, Email: yajuanshi@rcees.ac.cn

Corresponding author, Tel.: +0086-10-62849118, Email: yajuanshi@rcees.ac.cn

and bottom accumulation. The content of selenium in soil parent material played an important role in accumulating selenium in soil. Available selenium was significantly correlated with soil organic carbon and total nitrogen. Selenium had a significant correlation with cadmium in the study area and there might exist accociation effects between selenium and heavy metals. The classification standard of available selenium content still needs to be discussed. The available selenium evaluation system needs to be built for the development of Se-enriched agriculture. Overall, total selenium and available selenium should be considered together.

Keywords: selenium resources, available selenium, soil-profile distribution, Se-enriched agriculture, Zibo Shandong.

人体内缺硒会导致许多疾病,例如克山病和大骨病等,同时,硒元素也可以提高人体免疫力,防范心脑血管病、糖尿病、甲状腺癌等^[1-3].农作物可以从土壤中获取硒元素,土壤总硒是土壤中各种形态硒含量的总和,但并不是所有形态的硒都能直接被植物吸收并利用.能够从土壤中直接吸收利用具有生物有效性各种形态的硒统称为有效态硒^[4-5].土壤有效硒的含量高低是影响食物链中硒含量高低的关键因素,研究土壤硒的生物有效硒对发展富硒农业十分必要^[6].土壤剖面是指从表土层到母质的垂直截面,许多研究认为母质中硒含量的高低是区域土壤中硒含量的关键影响因素^[7-9].不同农作物根系有深有浅,农作物可以通过根系吸收土壤中不同深度的各种营养物质.因此,分析土壤硒及其有效性剖面分布特性,有利于人们更高效地开发和利用富硒土壤资源.

目前为止,关于土壤中硒和有效硒形态的划分还没有统一的标准,因采用不同的浸提技术和浸提剂,对硒形态划分也各有不同.本研究在前期研究^[10]的基础上,在缺硒、少硒、足硒和富硒典型地块布设采样点,采集剖面样品,拟采用朱英、葛晓立、张忠等提出的浸提技术和硒有效态的划分(水溶态、交换态和富啡酸态)方法,分析样品中总硒和有效硒的含量^[11-13].全面分析富硒农业基地土壤中硒有效性及剖面分布特性,硒和有效硒与土壤理化性质和土壤中重金属含量的相关关系,为富硒农业合理高效的发展提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

选取山东省淄博市博山区作为研究区域,土壤总面积 682 km²,海拔 300—1000 m 之间,地形多为山地、丘陵,全年平均气温为 12.8 ℃,全年平均降水量为 694.1 mm,雨热同季,多集中在 7—9 月份^[14-15].研究区主要灌溉水系为淄河和孝妇河,两条水系贯穿博山区南北,呈南高北低分布,落差约为 200 m.此外,灌溉水系还有青阳河和牛角河,淄河、孝妇河和青阳河属于小清水水系,牛角河属于黄河水系.博山区有机农业面积约有 20 万亩,主要作物有草莓、猕猴桃、金银花、黑五类、有机蔬菜等^[16].

1.2 样点布设、样品采集与处理

基于前期研究结果^[10],在博山区缺硒、少硒、足硒、富硒农业用地布设剖面样点,每个类型布设 2 个典型样点,样点分布如图 1 所示.本次采集的土壤剖面点位:缺硒 (BS6 和 BS10)、少硒 (BS11 和 BS87)、足硒 (BS28 和 BS88) 和富硒区域 (BS51 和 BS63),全部为农业用地,在城区和工业区没有布设点位.根据土壤自然发生规律和采样实际情况,在每个样点选择 0—10 (表层土)、10—30 (淋溶层)、30—50 (定积层) 和 50—80 cm (母质层) 等 4 个深度,采集的每个土壤样品约 2 kg.运用 GPS 对样点进行精确定位,采集的样品风干后,去除可见杂质,研磨后过 100 目筛,避光在实验室阴凉处保存.

土壤总硒含量的测定:称 0.5 g 过 100 目筛的土样,采用 HNO₃-H₂O₂ 体系,加入 10 mL 硝酸 (优级纯) 和 2 mL 过氧化氢 (优级纯) 用微波消解仪消解,原子荧光法测定.土壤总硒测量过程采用空白对照、插入重复样与标样进行质量监控.空白对照没有检测出硒元素,实验采用国家标准物质中心提供的土壤成分分析标准物质 GSS-3 (Se 0.090 ± 0.020 mg · kg⁻¹),3 组标土样实测值分别为 0.090、0.093、0.095 mg · kg⁻¹,均值为 0.093 mg · kg⁻¹,测量数据可靠.

土壤中有有效硒的提取与测定:参照朱英、葛晓立、张忠等对土壤中有有效硒提取方法^[11-13].提取后,采用原子荧光法测定.水溶态硒测出的平均误差分别为 3.43% 和 10.52%.水溶态硒的平行误差小于 15%,符合土壤环境检测技术规范^[17].

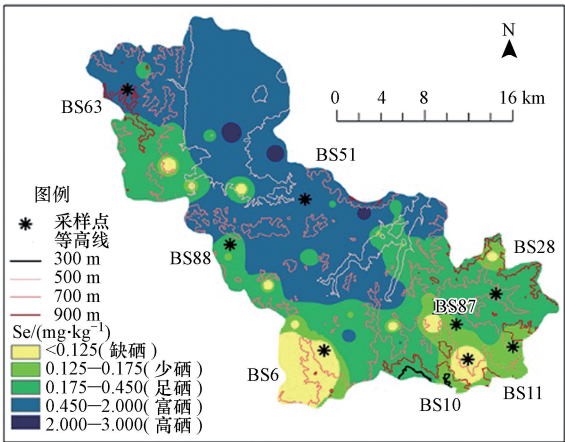


图 1 博山地区土壤采集样点分布图
Fig.1 Soil sampling locations in Boshan

土壤重金属含量测定:采用 HNO₃-HF-H₂O₂ 消解体系称 0.1 g 过 100 目筛的土样,加入 5 mL 硝酸(优级纯)、2 mL 氢氟酸(优级纯)和 2 mL 过氧化氢(优级纯),采用微波消解仪消解,ICP-MS 测定土壤中重金属元素铬、镉、锌、钴、锡(Cr、Cd、Zn、Co、Sn)的含量.

土壤理化性质测定:土壤粒径的测定,经过氧化氢除去有机质,盐酸除去碳酸盐,最后用激光粒度仪测定;土壤 pH 值测定,采用 pH 值电极法测定;土壤有机碳(TOC)测定,采用油浴加热重铬酸钾容量法;土壤总碳(TC)和总氮(TN)采用元素分析仪测定.以上都采用空白对照,样品平行和标样测定进行质量监控,保证数据可靠性.

1.3 数据处理

因为样本量小于 50,所以用 Shapiro-Wilk 对所测出的各项指标数据进行正态分布检验.其中硒元素相关的数据不符合正态分布,经过自然对数转换后符合正态分布;TOC(总有机碳)、TN(总氮)、TC(总碳)、重金属和土壤粘粒含量呈非正态分布.采用 SPSS19.0 统计软件,运用 Spearman 相关分析对土壤中有有效硒含量与土壤理化性质和土壤中重金属含量相关关系,作图使用 ArcGIS 10.2 和 Microsoft Excel 2013 完成.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 表层土壤总硒与有效硒

表层土壤(0—10 cm)中总硒含量范围为 0.080—1.290 mg·kg⁻¹,均值为 0.360 mg·kg⁻¹,此结果与前期研究结果相一致^[10],高于全国土壤硒元素的平均值(0.290 mg·kg⁻¹)^[18].土壤总硒是土壤中各种形态硒的总和,总硒含量并不能够很好反映土壤硒资源的生物有效性,因此常用土壤中有有效硒的含量多少体现土壤对植物硒的供给能力.表层土壤有效硒含量范围为 0.020—0.065 mg·kg⁻¹,均值为 0.033 mg·kg⁻¹,土壤硒的活化率为 10.16%.王兆双^[19]等在中国硒都湖北恩施测定表层土壤活化率为 0%—15%,王松山^[20]等在陕西紫阳富硒地区可溶态和可交换态及碳酸盐结合态约占总硒 16%,研究区土壤硒有效率低与前两者富硒地区.

表层土壤(0—10 cm)中水溶态、交换态和富啡酸态硒含量均值为 0.003,0.009、0.021 mg·kg⁻¹.如图 2 所示,各个样点测量结果都呈现出富啡酸态硒含量>交换态硒含量>水溶态硒含量.土壤中,水溶态硒和交换态硒含量通常比较低,硒元素主要以有机态或者残渣态形式存在.表层土壤中总硒含量与水溶态硒含量相关系数为 0.733(P<0.01),达到极显著水平.土壤中水溶态硒含量可能受土壤中总硒含量、土壤物理性质和化学性质的影响,其中最主要的影响因素为土壤中总硒含量^[21].硒元素本身难溶于水,水溶

态硒主要是亚硒酸盐和硒酸盐,东南部区域中区域表层土中总硒含量并不是最高,但是水溶态硒含量要高于其他区域.这可能是与地形地貌、水文环境有关,东南部区域农业生产基地沿河流分布,河流、洪流等冲击作用,将硒元素带到此处.

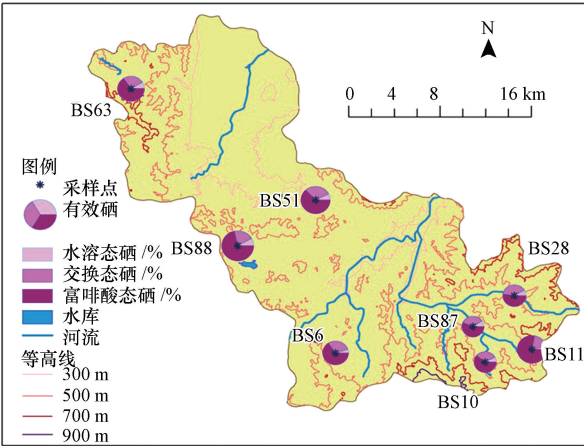


图 2 表层土壤中三种形态硒比例
Fig.2 Proportions of three types of available selenium in surface soils

2.2 土壤总硒和有效硒的剖面特性和空间差异分析

对总硒和有效硒土壤剖面的分布情况的分析,一定程度上可以反应硒元素随土壤发育和生物学过程的迁移与转化.王美珠^[22]等,将硒的土壤剖面结构划分为 3 类:(1)上高下低,即土壤中硒含量随深度的增加而降低;(2)上下相近,即各个深度硒含量变化差异不大;(3)上低下高,土壤中硒含量随深度的增加而增加型.如图 3 所示,除 BS11 外,其他样点总硒剖面硒含量表现为上层含量高下层含量低.BS51 农田所处区域为石炭二叠系含煤地层,其各个深度土壤总硒含量都要高于其他区域总硒含量.这可能由于该区域土壤母质中硒含量有关,土壤母质是影响地区硒含量决定性因素^[23-24],煤矿中含有大量的微量元素如汞、铜、锌、硒等,煤田是硒的高含量区^[25-26].研究区内有效硒的剖面结构有上高下低、上低下高、上下相近等 3 种类型.

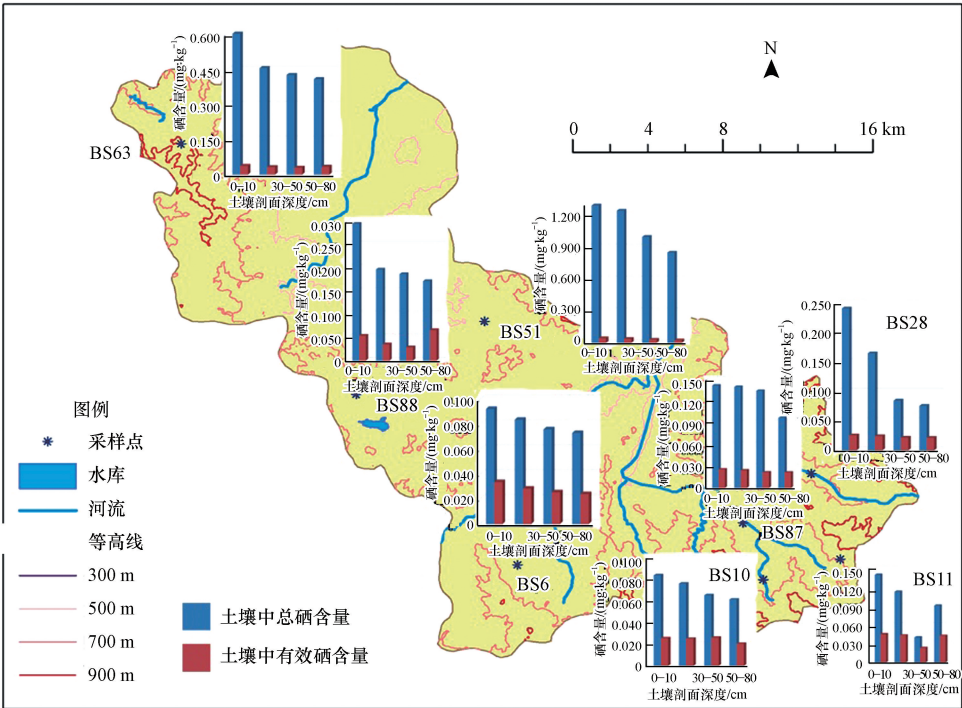


图 3 土壤中总硒和有效硒剖面特性和空间差异
Fig.3 Vertical distribution and spatial difference of total selenium and available selenium

博山区总体地势呈南高北低,中低山、丘陵、河谷环绕,山谷土壤中有效硒含量高于山脊处,可能与风化作用和雨水淋溶作用有关.同时土壤有效硒含量呈现出随海拔的升高而降低的趋势.有效硒在土壤剖面中分布情况也可能会受到土地利用方式、土壤理化性质、土壤母质中硒含量和土壤微生物群落作用等多方面的影响.

2.3 有效硒与土壤理化性质的相关性分析

土壤有效硒的含量可能受到土壤粒径、TOC、TN、TC 和 pH 等土壤理化性质的影响,利用 Spearman 相关分析分析土壤有效硒理化性质之间相关性,具体显著水平及相关系数见表 1,分析结果如下:

表 1 博山区有效硒与土壤理化性质的相关性分析

Table 1 Correlation coefficient among available selenium, soil physical and chemical properties in soils of Boshan

	有效硒 Available selenium	水溶态 Water- soluble states	交换态 Exchangeable states	富啡酸态 Fulvic acid states	pH	总有机碳 TOC	总氮 TN	总碳 TC	粘粒含量 Clay content
有效硒	1.000								
水溶态	0.265	1.000							
交换态	0.354 *	0.385 *	1.000						
富啡酸态	0.960 **	-0.155	0.172	1.000					
pH	-0.292	0.335 *	0.054	-0.369 *	1.000				
总有机碳	0.485 **	0.561 **	0.398 *	0.474 **	0.248	1.000			
总氮	0.273	0.585 **	0.246	0.253	0.229	0.784 **	1.000		
总碳	0.235	0.633 **	0.269	0.200	0.243	0.855 **	0.928 **	1.000	
粘粒含量	0.357 *	0.220	0.237	0.383 *	-0.336 *	0.377 *	0.243	0.191	1.000

注: ** 表示显著性水平 ($P < 0.01$), * 表示显著性水平 ($P < 0.05$).
Note: * denotes a significant correlation ($P < 0.05$); ** denotes a extremely significant correlation ($P < 0.01$).

有效硒与土壤有机质呈极显著的正相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.485. 土壤有机质其粘结力强, 虽然作用的机理尚不清楚, 但大量研究证明有机质提高许多微量元素有效性^[27-28]. 通常土壤有机质含量越高其对硒吸附性能与固定能力也就越强, 导致土壤中有效硒含量也就相对较高. 其原因可能是土壤有机质具有一定的活化作用将非有效态硒活化为有效态硒, 也有可能在微生物生理代谢活动过程中影响着硒形态的转化, 分解出一部分有效态硒. 水溶态、交换态硒和富啡酸态硒也和土壤有机碳呈极显著相关, 土壤有机质含量可能与土壤中这 3 种硒有效态含量、三者之间的动态平衡、相互转化等过程都密切相关. 因此, 在发展富硒农业时, 可以通过外源施肥提高土壤中有机质的含量, 活化土壤中非有效态硒, 提高土壤中硒的活化率.

水溶态硒与土壤总氮呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.585. 黄锦法^[29]等研究表面土壤中的氮、碳、硫与土壤中硒元素有正相关关系. 本研究中土壤有机碳与总氮呈极显著相关 ($P < 0.01$), 与许泉^[30]等根据全国第二次普查结果, 认为我国农田耕土层土壤有机碳与土壤总氮之间有着显著的耦合关系相符. 水溶态硒与总氮的极显著相关, 可能由于其与有机碳极显著相关有关.

本研究中水溶态硒与土壤 pH 值呈显著相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.335. 研究区大部分土壤样品 pH 偏中性. 李永华等以早古生代底层上发育的土壤研究对象, 认为水溶态硒含量, 随 pH 的升高含量先降后升^[31]. 土壤 pH 可以影响硒元素在土壤中存在形态以及相互之间的转化, 一方面表现为控制吸附和解吸附过程, 另一方面通过影响土壤有机质、粘着力等因素间接影响土壤中硒元素的存在形态^[32-33]. 土壤酸碱度可以影响控制硒价态的转化, 酸性和中性条件下硒主要以亚硒酸盐的形式存在, 碱性条件下主要以硒酸态的形式存在^[34-35].

土壤有效硒含量、富啡酸态硒都与土壤粘粒含量呈显著性相关 ($P < 0.05$). 许多研究证实土壤粒径是影响土壤中有效硒含量的重要因素^[36]. 土壤的粘粒含量越高对硒的吸附作用越强^[37], 此外黏粒含量与土壤有机质、酸碱度等理化性质也密切相关, 这些理化性质同时也会影响有效硒含量.

2.4 有效硒与土壤中重金属相关性分析

样品中有效硒含量与镉含量呈极显著相关, 相关系数为 0.509 (表 2), 可能与土壤中硒对镉的吸附

作用强有关^[38].有效硒含量与土壤中重金属铬、锌、钴、锡 4 种重金属含量进行相关性分析,均未达到显著水平.大量研究表明土壤中硒元素会与土壤中的重金属产生伴生现象.耿建梅等研究结果得出土壤中总硒含量与汞、镉、砷显著或极显著相关^[39].研究区样品中土壤重金属铬、镉、锌、钴、锡的含量较低,符合国家土壤环境质量一级标准.

表 2 有效硒与土壤重金属铬、镉、锌、钴、锡相关性分
Table 2 Correlation coefficient among available selenium, Cr, Co, Zn, Cd and Sn in soils of Boshan

	有效硒 Available selenium	铬 Cr	钴 Co	锌 Zn	镉 Cd	锡 Sn
有效硒	1.000					
铬	-0.113	1.0000				
钴	-0.124	0.264	1.000			
锌	0.008	0.402 *	0.118	1.000		
镉	0.509 **	0.082	-0.026	0.430 *	1.000	
锡	0.235	-0.166	0.051	0.360 *	0.130	1.000

注: ** 表示显著性水平 ($P<0.01$), * 表示显著性水平 ($P<0.05$).
Note: * denotes a significant correlation ($P<0.05$); ** denotes a extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 结论 (Conclusion)

(1) 研究区域农业用地土壤硒含量均值为 $0.360\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于全国土壤硒元素的平均值 ($0.290\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),研究区土壤有效硒含量均值为 $0.033\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其平均有效度为 10.16%.

(2) 研究区域农业用地土壤总硒剖面结构呈上高下低,有效硒土壤剖面结构上高下低、上低下高,上下相近都有.山谷土壤中有效硒含量高于山脊处,可能受风化和雨水淋溶的影响,土壤中有效硒含量随着海拔的升高而降低.

(3) 研究区域农业用地土壤有效硒与土壤有机碳、土壤粘粒含量显著相关;水溶态硒和土壤有机碳、土壤总氮、pH、土壤总碳显著相关;交换态硒和富啡酸态都与土壤有机碳显著相关.研究区土壤中有有效硒与镉呈现极显著相关,可能与硒元素会与重金属产生伴生作用有关.

(4) 研究区北部区域土壤中硒含量达到富硒水平,但其有效度却低于一些足硒或少硒区域,可以通过改变土壤理化性质,提高土壤中有效硒含量.东南部区域土壤中硒含量主要为少硒或足硒,有效硒含量也处于中等水平,可以通过外源施加硒肥、改变土壤理化性质提高土壤中硒含量及其有效性,使得富硒农业科学合理的发展.

参考文献 (References)

[1] COBOANGEL C, WLICHTTELL J, CEBALLOS M ÁRQUEZ A. Selenium in milk and human health [J]. Angel, 2014, 4 (2) : 38-43.

[2] TAN J, ZHU W, WANG W, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China [J]. Science of the Total Environment, 2002, 284 (1-3) : 227-235.

[3] WALSH P C. Re: vitamin E and the risk of prostate cancer: The selenium and vitamin e cancer prevention trial (SELECT). [J]. Journal of Urology, 2012, 187 (5) : 1640-1641.

[4] 唐崑. 低丘红壤硒的生物有效性及居民膳食硒摄入量评价 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.

TAND Y. Bioavailability of RED soil in low mountains and hills and assessment on dietary selenium intake of the local residents [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014 (in Chinese).

[5] 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 C, HOU Q Y, YANG Z F, 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).

[6] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉. 江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性 [J]. 植物营养与肥科学报, 2002, 8 (3) : 355-359.

ZHANG Y L, PAN G X, HU Q H. Selenium fraction and bio-availability in some low-Se soils of central Jiangsu Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8 (3) : 355-359 (in Chinese).

- [7] 朱晓华, 刘晓端, 刘久臣, 等. 川西高原天然剖面土壤硒的含量及分布特征[J]. 生态环境学报, 2015(4): 673-682.
ZHU X H, LIU X D, LIU J C, et al. Contents and distributions characteristic of selenium in natural soil profile samples from the western sichuan plateau area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 673-682 (in Chinese).
- [8] 侯少范, 李德珠, 王丽珍, 等. 暖温带地理景观中土壤硒的分异特征[J]. 地理学报, 1992, 44(1): 31-39.
HOU S F, LI D Z, WANG L Z, et al. The differentiation characteristics of soil selenium in warm-temperate geographic landscape [J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 44(1): 31-39 (in Chinese).
- [9] 李杰, 杨志强, 刘枝刚, 等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 1012-1020.
LI J, YANG Z Q, LIU Z G, et al. Distribution of selenium in soils of Nanjing city and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 1012-1020 (in Chinese).
- [10] 陈娟, 宋帅, 史雅娟, 等. 富硒农业生产基地土壤硒资源空间分布特征及评价[J]. 环境化学, 2015, 34(12): 2185-2190.
CHEN J, SONG S, SHI Y J, et al. Spatial distribution and assessment of selenium in soils of a Se-enrich agricultural production base [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12): 2185-2190 (in Chinese).
- [11] 葛晓立, 张光弟. 张家口地区土壤硒形态分布及其植物有效性初步研究[J]. 地球与环境, 1998, 26(2): 9-15.
GE X L, ZHANG G D. Soil selenium species and their availability to plant in Zhangjiakou area [J]. Earth and Environment, 1998, 26(2): 9-15 (in Chinese).
- [12] 张忠, 周丽沂, 张勤. 地球化学样品中硒的循序提取技术[J]. 岩矿测试, 1997, 16(4): 255-261.
ZHANG Z, ZHOU L Y, ZHANG Q. Speciation of selenium in Geochemical samples by partial dissolution technique [J]. Rock and Mineral Analysis, 1997, 16(4): 255-261 (in Chinese).
- [13] 朱英, 王铎, 熊玉祥. 土壤中有效硒的提取和测定方法[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(6): 859-862.
ZHU Y, WANG D, XIONG Y X. Extraction and determination of effective selenium in soil [J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(6): 859-862 (in Chinese).
- [14] 杨翠兰, 李明臣. 博山区荒山造林技术总结[J]. 山东林业科技, 1994, 90(1): 35-37.
YANG C L, LI M C. Summary of afforestation technology in Boshan area [J]. Journal of Shandong forestry Science and Technology, 1994, 90(1): 35-37 (in Chinese).
- [15] 杨刚, 侯乐明, 王俊亮, 等. 博山区封山育林效益调查报告[J]. 山东林业科技, 2001, 134(3): 29-31
YANG G, HOU L M, WANG J L, et al. The investigation report of afforestation benefit in Boshan District [J]. Journal of Shandong forestry science and technology, 2001, 134(3): 29-31 (in Chinese).
- [16] 谢斌, 吴文良, 郭岩彬, 等. 作物富硒研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 15-18.
XIE B, WU W L, GUO Y B. Research progress of selenium rich crops [J]. Jiangsu Agricultural Sciences 2014, 42(1): 15-18 (in Chinese).
- [17] 土壤环境监测技术规范[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1988.
Technical specification for soil environmental monitoring [M]. Nanchang: Jiangxi Science And Technology Press, 1988 (in Chinese).
- [18] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991(1): 1-6.
WEI F S, YANG G Z, JIANG D Z, et al. Basic statistics and characteristics of the background values of soil elements in China [J]. Environmental Monitoring in China, 1991(1): 1-6 (in Chinese).
- [19] 王兆双. 土壤有效硒提取方法比较及其生物有效性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
WANG Z S. Comparison of soil available selenium extraction methods and its bioavailability [D]. Wuhan: Huzhong agricultural university, 2014 (in Chinese).
- [20] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
WANG S S. Fractionation and speciations of selenium in soil and its bioavailability [D]. Yangling: Northwest A & F university, 2012 (in Chinese).
- [21] 武少兴, 龚子同. 我国土壤中的溶态硒含量及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 522-525.
WU S X, GONG Z T. Water-soluble selenium in main soil types of China and in relation to some soil properties [J]. China Environmental Science, 1997, 17(6): 522-525 (in Chinese).
- [22] 王美珠, 章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1996(1): 89-93.
WANG M Z, ZHANG M K. Preliminary study on the causes of some high and low selenium soils in China [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1996, 22(1): 89-93 (in Chinese).
- [23] 陈显著, 李就好. 广州市土壤硒含量的分布及其影响因素研究[J]. 福建农业学报, 2016, 31(4): 401-407.
CHEN X Z, LI J H. Concentration, distribution, and influencing factors on soil selenium in Guangzhou [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31(4): 401-407 (in Chinese).
- [24] 赵西强, 张贵丽. 章丘地区土壤硒的含量分布及影响因素[J]. 山东国土资源, 2015, 31(3): 46-49.
ZHAO X Q, ZHANG G L. Distribution and content of selenium in soil and its influence factors in Zhangqiu area [J]. Land and Resources in Shangdong Province, 2015, 31(3): 46-49 (in Chinese).
- [25] 李静贤, 刘家军. 硒矿资源研究现状[J]. 资源与产业, 2014, 16(2): 16-21.

- LI J X, LIU J J. Advances in selenium resource study [J]. Resources & Industries, 2014, 16(2): 16-21 (in Chinese).
- [26] Pazand K. Concentration and distribution of selenium in Iranian coals [J]. Environmental Nanotechnology Monitoring & Management, 2014, 3: 55-60.
- [27] 冷旭勇, 张宗元, 刘丰武, 等. 泰莱盆地土壤有机质含量及 pH 值对微量元素有效性的影响分析[J]. 山东国土资源, 2015, 31(4): 46-49.
- LENG X Y, ZHANG Z Y, LIU F W, et al. Analysis on effects of organic compounds and soil pH to availability of trace elements in the soil of Tailai basin [J]. Land and Resources in Shangdong Province, 2015, 31(4): 46-49 (in Chinese).
- [28] 宋刚, 胡腾胜. 剑河县土壤微量元素与有机质、pH 值的关系研究[J]. 耕作与栽培, 2014(3): 20-21.
- SONG G, HU T S. Relationship between microelements and organic matter, pH of soil in Jianghe [J]. Tillage and Cultivation, 2014(3): 20-21 (in Chinese).
- [29] 黄锦法, 洪春来, 陈轶平, 等. 浙北嘉兴平原土壤和作物硒元素研究初报 [J]. 浙江农业科学, 2010, 1(6): 1356-1358.
- HUANG J F, HONG C L, CHEN Y P, et al. A preliminary study on the soil and crops in Jiaxing plain selenium [J]. Acta Agricultural Zhejiangensis, 2010, 1(6): 1356-1358 (in Chinese).
- [30] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57-60.
- XU Q, RUI W Y, LIU J L, et al. Spatial variation of coupling characteristics of soil carbon and nitrogen in farmland of China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(3): 57-60 (in Chinese).
- [31] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 陕南土壤中水溶态硒、氟的含量及其在生态环境的表征[J]. 环境化学, 2005, 24(3): 279-283.
- LI Y H, WANG W Y, YANG L S, et al. Concentration and environmental significance of water soluble Se and water soluble F in soil of south Shanxi Province [J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(3): 279-283 (in Chinese).
- [32] 周越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 527-532.
- ZHOU Y, WU W L, MENG F Q, et al. Review on the content, specification of selenium and its availability in soils [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(6): 527-532 (in Chinese).
- [33] 赵妍, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2467-2474.
- ZHAO Y, ZONG L G, CAO D, et al. Distribution and availability of selenium in typical tea garden of Jiangsu Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2467-2474 (in Chinese).
- [34] 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 J M, LIANG X B, LING H W, 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).
- [35] 薛瑞玲, 梁东丽, 王松山, 等. 外源亚硒酸盐和硒酸盐在土壤中的价态转化及其生物有效性[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1726-1733.
- XUE R L, LIANG D L, WANG S S, et al. Valence state changes and bioavailability of selenium in soil treated with selenite and selenite [J]. Environmental Science, 2011, 32(6): 1726-1733 (in Chinese).
- [36] 何振立, 章明奎, 黄昌勇, 等. 嵊县几种主要土壤硒的状况及有效度评价[J]. 生态学报, 1994, 14(1): 51-56.
- HE Z L, ZHANG M K, HUANG C Y, et al. Studies on the status and availability of selenium in soils in Shenxian, Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(1): 51-56 (in Chinese).
- [37] 宋卫卫. 有机硒在不同土壤中转化初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- SONG W W. The preliminary study of organic selenium transformation in different soils [D]. Yangling: Northwest A & F university, 2015 (in Chinese).
- [38] 于洋. 富硒区蔬菜根—土微界面过程镉的物理化学作用及生物有效性特征[D]. 三亚: 海南大学, 2015.
- YU Y. The physical chemistry and biological effectiveness of Cd in vegetable root-soil interface from Se-rich area [D]. Sanya: Hainan University, 2015 (in Chinese).
- [39] 耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等. 海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3477-3486.
- GENG J M, WANG W B, WEN C P, et al. Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3477-3486 (in Chinese).