

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.020

安康西部农田土壤硒形态及农作物富硒特征

张亚丽^{1,2}, 张志敏^{1,2*}, 张继军^{1,2}, 乔新星^{1,2}, 陈继平^{1,2}, 任蕊^{1,2},
冯伟华^{1,2}, 余鹏涛^{1,2}, 姬华伟^{1,2}, 李傲瑞^{1,2}, 赵飞飞^{1,2}

(1. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054)

摘要:笔者在安康西部县域土壤地球化学调查评价基础上,研究了紫阳、汉阴两县农田土壤 Se 含量及赋存形态、主要农作物富 Se 能力特征。研究区农作物根系土 Se 平均含量为 $1.24 \times 10^{-6} \sim 2.27 \times 10^{-6}$, 高于天然富硒土地划定标准(DD-2019-10)2.1~4.7倍。土壤中 Se 各形态含量占全量的比例由高到低排序为:残渣态(0.891×10^{-6}) > 腐殖酸结合态(0.255×10^{-6}) > 强有机结合态(0.217×10^{-6}) > 水溶态(0.015×10^{-6}) \geq 碳酸盐结合态(0.015×10^{-6}) > 离子交换态(0.012×10^{-6}) > 铁锰氧化态(0.008×10^{-6})。8种农作物可食部位 Se 含量均达到或超过富硒农产品标准,农作物 Se 富集系数由大到小排序为:油菜(1.03) > 水稻(0.47) > 大蒜(0.36) > 茶叶(0.20) > 玉米(0.13) > 红薯(0.11)、魔芋(0.10) > 土豆(0.08)。建议当地农业生产充分利用土壤的 Se 资源,按照作物富 Se 能力大小合理规划种植结构。

关键词:Se 形态;富 Se 农作物;富 se 特征

中图分类号:P642.1

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)03-0229-07

Soil Selenium Speciation in Cropland of Western Ankang and the Characteristics of Crop Selenium Enrichment

ZHANG Yali^{1,2}, ZHANG Zhimin^{1,2*}, ZHANG Jijun^{1,2}, QIAO Xinxing^{1,2}, CHEN Jiping^{1,2},
REN Rui^{1,2}, FENG Weihua^{1,2}, SHE Pengtao^{1,2}, JI Huawei^{1,2}, LI Aorui^{1,2}, ZHAO Feifei^{1,2}

(1. Shaanxi Hydrogeological Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: On the basis of geochemical investigation and evaluation of the soil in western Ankang, Shaanxi province, this paper studies the soil selenium content, soil selenium speciation, and the characteristics of crop selenium enrichment in cropland of Ziyang and Hanyin County. The average content of selenium in soil of crop root is $1.24 - 2.27 \times 10^{-6}$, 2.1 to 4.7 times higher than the standard for natural selenium-enriched land (DD-2019-10). The proportion of selenium speciation in soil from high to low is residual fraction (0.891×10^{-6}) > humic acid compound (0.255×10^{-6}) > strong organic combined fraction (0.217×10^{-6}) > soluble fraction (0.015×10^{-6}) \geq

收稿日期:2020-08-09;修回日期:2021-03-27

基金项目:陕西省地质调查院公益性地质调查项目“陕西省安康西部县域土壤地球化学调查与评价”(20170101),陕西省地质调查院公益性地质调查项目“陕西省安康地区土地质量调查评价与综合研究”(201908)。

作者简介:张亚丽(1979-),女,博士,主要从事农业地质、土壤生态研究工作。E-mail:liyaz@hotmail.com。

* 通讯作者:张志敏(1985-),男,工程师,主要从事农业地质、地球化学调查和研究工作。E-mail:935643307@qq.com。

carbonate bound fraction (0.015×10^{-6}) > ion exchanged fraction (0.012×10^{-6}) > Fe-Mn oxidized fraction (0.008×10^{-6})。Selenium contents in the edible parts of 8 kinds of crops have met the standard of selenium-enriched agricultural products. The crop selenium enrichment coefficient from high to low is rape (1.03) > rice (0.47) > garlic (0.36) > tea (0.20) > corn (0.13) > sweet potato (0.11), konjak (0.10) > potato (0.08)。It is suggested that the agricultural production should take full advantage of selenium resource and make reasonable plan for planting according to crop selenium enrichment.

Keywords: selenium speciation; selenium enriched crop; selenium enrichment characteristic

当前,中国集约化农业发展到了一个新的历史转折点,改变传统农业生产模式,以绿色发展为导向,协同实现提质增产、资源高效、环境安全、经济发展、农民增收等目标,走资源节约、环境友好、食品安全、人类健康的高质量农业发展道路成为必然选择(张俊玲等,2020)。发展健康引领型农业和功能农业,推动健康中国战略成为新时期中国广大人民群众的普遍需求和政府指导农业生产、促进农业经济的重点方向。地壳中的 Se 对人体健康的重要性除了能够克服大骨节病、克山病等缺 Se 造成的地方病,近年来,还发现其具抗氧化、增强免疫力等功能,对现代人群多发糖尿病、心血管疾病、肿瘤等疾病有特殊疗效(熊咏民等,2018)。土壤中 Se 的形态是决定植物吸收,人体利用的关键因素(Lü et al., 2014; Wang et al., 2012; 王松山等, 2011)。应用连续浸提技术将土壤 Se 分为可溶态、可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态等 5 种形态,其生物有效性依次降低。因此,认识和查明土壤中 Se 的赋存形态对于土壤硒资源开发利用具有非常重要的实际意义。陕西安康境内大巴山东段黑色岩系的成土母岩造就了面积广大,非常适宜开发利用的天然富 Se 区。近年来,在政府和农业部门的努力下,富硒产业发展规模越来越大,但也存在富硒农业产业发展总体质量不高,规模不大,效应不强等问题(崔用慧等,2014)。为了更好地变资源优势为经济优势,进一步深入发掘安康富硒农业经济增长点,服务地方经济,陕西省地质调查院自 2017 年始,在安康西部紫阳县、汉阴县开展 1:5 万等多尺度土壤地球化学调查工作,旨在查明区内土壤环境质量状况、农田土壤养分和富 Se 土壤资源分布格局及土壤质量的关键影响因子,为当地政府决策提供基础地球化学资料。笔者在此调查工作的基础上,深入研究调查区 Se 的形态特征和不同农作物对 Se 吸

收积累效能的差异,为安康地区富硒农业发展提供基础依据。

1 自然地理与地质背景

安康市地处中国内陆腹地的陕西省东南部,居川、陕、鄂、渝交接部,位于东经 $108^{\circ}00'58'' \sim 110^{\circ}12'$, 北纬 $31^{\circ}42'24'' \sim 33^{\circ}50'34''$,北依秦岭,南靠巴山,汉水横贯东西,是秦巴山地生态屏障,南水北调中线水源区绿色生态走廊,在维护森林生态系统和生物多样性方面具有重要地位。安康属亚热带大陆性季风气候,年平均降水量 1 050 mm,无霜期年平均 253 d。汉阴、紫阳两县位于安康西部,属于安康富硒区圈定范围,是安康“中国硒谷”的发源地。近年来,在安康富硒、绿色农林产品生产加工等社会发展功能中占有重要地位。紫阳县南北长 97.3 km,东西宽 57.4 km,总面积 2 204 km²;汉阴县面积 1 365 km²。研究区主要岩石类型为黑色板岩、碳质硅质板岩、灰岩;土壤类型以黄棕壤为主,水稻土、棕壤、粗骨土有少量分布。其中黄棕壤表层有机质含量较高,土壤结构较好,水分充足,是适宜农业发展的优质土类,占安康地区总面积的 55%。主要农作物水稻、玉米、茶叶、魔芋、油菜、马铃薯等成为安康现代农业发展的主导作物。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

开展 1:5 万土壤地球化学测量,对研究区 8 种主导农作物水稻、玉米、茶叶、大蒜、土豆、油菜、红薯、魔芋进行农作物和根系土调查取样,取样点位见图 1。采样严格按照《土地质量地球化学评价规范》DZ/T 0295-2016 中的采样方法和技术要求进行,

并确保采样具有代表性。在农作物收获盛期或收获后晴天采集农作物及农作物根系土样品。农作物及其相同点位根系土采用棋盘法、梅花点法、对角线

法、蛇形法等方法采集多点混合样。在研究区以 0.1~0.2 hm²/点为采样单元采集农作物及其根系土样品。农作物样选取 10~15 棵植株,采集可食用

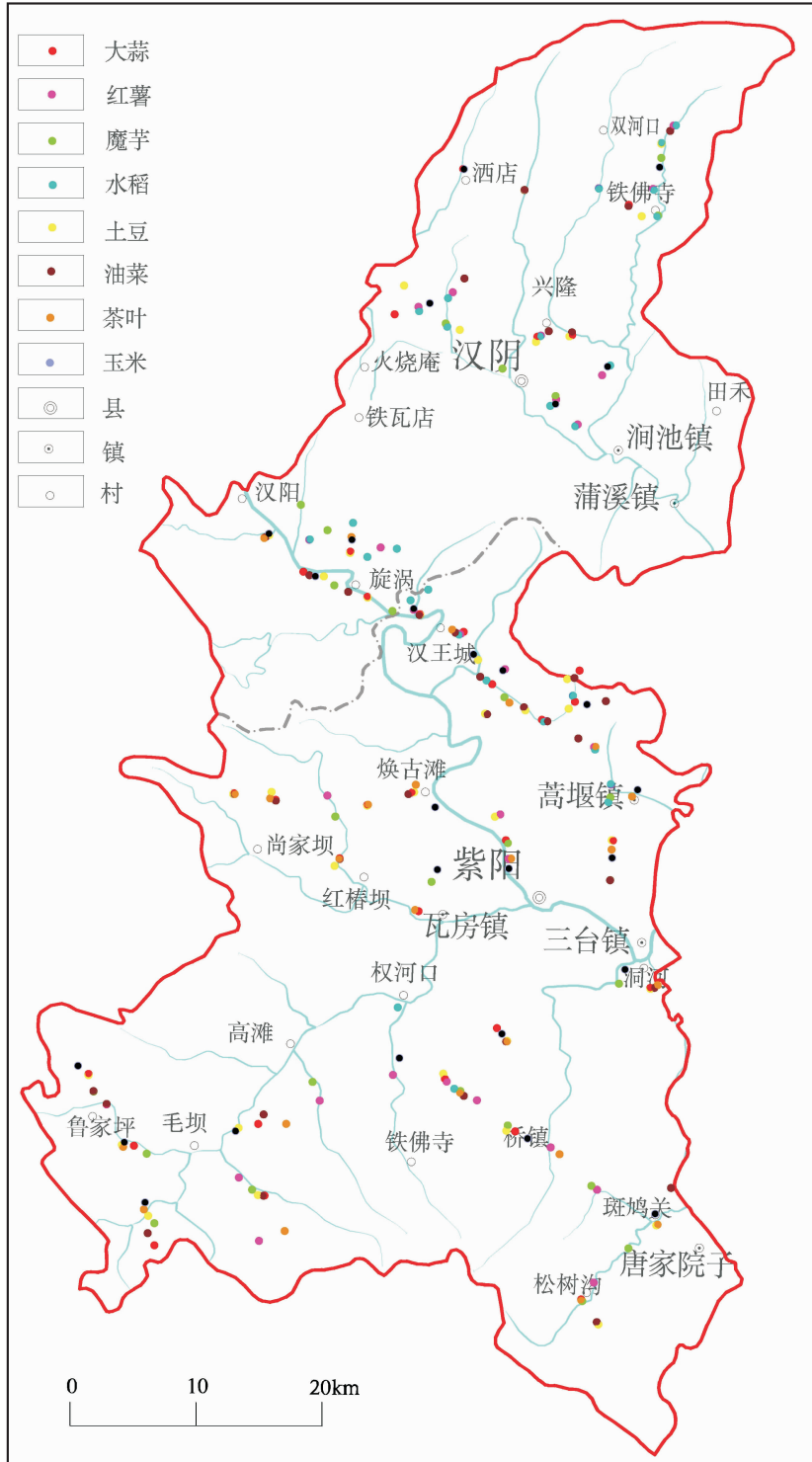


图 1 安康西部县域(汉阴、紫阳)地球化学调查农作物采样点位图

Fig. 1 Crop and root soil sampling location in western Ankang (Hanyin county, Ziyang county)

部位混合成 1 件样品;根系土样品采集深度为 0~20 cm,采集重量约 1 kg。农作物根系土壤样由 4~6 个子样采用四分法混合成 1 件样品。共采集农作物、根系土样品各 238 件。

2.2 样品加工与测试分析

根系土壤样品经自然风干,用木棒压碎团块,剔除杂物,过 20 目尼龙筛后,提取 500 g 分析样。分析指标为:pH、Se 及各形态。分析方法采用生态地球化学评价样品分析技术要求 DD2005-03、生态地球化学评价动植物样品分析方法 DZ/T 0253-2014 中 Se 分析方法,采用 X series II 型等离子体质谱仪测定,pH 采用 pH 计测定。

农作物样品经洗净,晾干,去掉非食用部分后用组织捣碎机捣碎,称取适量试样,加硝酸浸泡过夜,再加双氧水,放入微波消解仪器内消解 3~4 h 后,取出冷却,转移溶液,稀释至一定体积进行分析。分析项目为全量 Se,分析方法依照 DD2005-03、DZ/T 0253-2014 进行,采用 X series II 型等离子体质谱仪测定。

2.3 质量评述及数据分析

样品分析由国土资源部西安矿产资源监督检查中心承担。测试过程中加入国家一级标准物质进行分析质量控制,所有样品报出率为 100%,准确度和精密度监控样合格率达 98% 以上。数据结果采用 SPSS25.0 软件统计分析,方差分析采用 Turkey (HSD)法。

3 结果与分析

3.1 根系土壤 Se 含量特征

研究区作物根系土 Se 地球化学特征见表 1。茶叶根系土与其他作物根系土 pH 值存在显著差异,这表明在土壤酸碱度整体中性偏酸的安康西部汉阴、紫阳境内仍存在土壤酸碱度的差异,存在不同酸碱度土壤类型多样性。茶叶种植区土壤偏酸性,土壤 pH 值显著低于其他作物根系土,其他作物种植区土壤为中酸性。而不同作物根系土 Se 含量没有显著差异。研究区土壤 Se 含量可能受安康地区土壤母质等地质环境及地质背景影响强烈,受耕作及土壤理化性质影响较弱。各农作物根系土平均 Se 含量为 $1.24 \times 10^{-6} \sim 2.27 \times 10^{-6}$,整体 Se 含量较高。中国地质调查局地质调查技术标准《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DD-2019-10)对于天然富硒土地划定标准为:pH ≤ 7.5 的地区,土壤 Se

含量 ≥ 0.40 mg/kg。研究区不同作物根系土 Se 含量均高于天然富硒土地划定标准,高出 2.1~4.7 倍。由此可见,研究区土壤属于富 Se 土壤,农田土壤硒资源丰富。

表 1 农作物根系土壤 Se 特征表

Tab.1 Root soil selenium characteristic in cropland of western Ankang

根系土 作物	样点数	pH	Se 含量范围 (10^{-6})	Se 平均值 (10^{-6})	标准 偏差
茶叶	24	5.64 b	0.171~7.534	1.241 a	1.738
大蒜	34	7.30 a	0.204~8.224	1.491 a	1.678
土豆	35	6.87 a	0.135~18.229	1.757 a	3.163
油菜	33	7.13 a	0.237~8.375	1.648 a	2.230
红薯	32	6.84 a	0.217~9.398	1.460 a	1.938
水稻	27	6.58 a	0.235~5.914	1.601 a	1.542
玉米	26	7.02 a	0.234~4.952	1.348 a	1.259
魔芋	27	7.15 a	0.113~14.520	2.270 a	3.301

注:表中不同字母表示任意 2 种不同作物根系土平均 Se 含量或 pH 存在显著差异,差异显著性系数 $P < 0.05$,相同字母表示不存在显著差异, $P > 0.05$ 。以下同。

3.2 土壤 Se 赋存形态特征

土壤中可提取水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、腐殖酸结合态、强有机结合态以及残渣态 7 种 Se 形态,其生物可利用性难度依次增强。水溶态、离子交换态 Se 是植物可直接吸收利用形态,即生物有效性 Se。碳酸盐结合态、铁锰氧化态是经过土壤作用,较容易转化为水溶态、离子交换态的 Se 形态。腐殖酸结合态、强有机结合态均为有机结合态 Se,能够缓慢释放大量可溶性有机和无机 Se 为植物利用,而残渣态是非常稳定的形态,其有效性较差,很难被植物吸收,但这部分 Se 是土壤 Se 的重要储存库源(任蕊等,2016)。采用浸提法对研究区农作物根系土壤提取 7 种 Se 形态,测定其含量(表 2),发现不同形态 Se 含量之间存在显著差异。残渣态、腐殖酸结合态、强有机结合态 Se 含量较高。其中残渣态 Se 含量最高,含量为 $0.05 \times 10^{-6} \sim 11.89 \times 10^{-6}$,平均 Se 含量占全量 Se 含量的 63.06%,其次是腐殖酸结合态、强有机结合态,平均含量分别为 0.255×10^{-6} 、 0.217×10^{-6} ,分别占全量 Se 含量的 18.06%、15.35%。Se 的水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态含量均较低,平均含量分别为 0.0150×10^{-6} 、 0.012×10^{-6} 、 0.014

5×10^{-6} 、 0.008×10^{-6} , 占全量 Se 比例较低, 均在 1% 左右及以下。不同形态 Se 含量由高到低排序为残渣态 > 腐殖酸结合态 > 强有机结合态 > 水溶态 > 碳酸盐结合态 > 离子交换态 > 铁锰氧化态。

表 2 农作物根系土壤中 Se 的不同形态含量统计分析表
Tab. 2 Contents of selenium species in cropland root soil

Se 形态	含量范围 (10^{-6})	平均值 (10^{-6})	标准 偏差	占全量 比率(%)
水溶态	0.004~0.060	0.015 cd	0.009	1.06
离子交换态	0.003~0.097	0.012 d	0.010	0.88
碳酸盐结合态	0.003~0.126	0.015 d	0.022	1.03
铁锰氧化态	0.001~0.036	0.008 d	0.006	0.56
腐殖酸结合态	0.023~2.845	0.255 b	0.354	18.06
强有机结合态	0.015~2.178	0.217 bc	0.258	15.35
残渣态	0.050~11.890	0.891 a	1.650	63.06

该结果与任蕊等人(任蕊等, 2016)、陈继平等(陈继平等, 2020)在关中地区土壤 Se 各形态的构成比例研究结果有所不同。任蕊等人发现, 关中地区土壤 Se 形态以有机结合态含量最高, 另外, 离子交换态、水溶态含量较高, 占全量 4% 以上, 而本调查研究结果研究区土壤 Se 形态以残渣态为最多, 强有机结合态、腐殖酸结合态较高, 占 15% 以上, 水溶态、离子交换态仅 1% 左右。该结果表明安康西部土壤全 Se 含量整体较高, 但生物有效态 Se 在整体 Se 形态构成比例中相对关中土壤较低。这反映了关中和陕南安康在土壤母质、气候等自然环境方面的差异导致土壤理化性质的不同, 造成土壤 Se 形态

特征的差异。该土壤 Se 形态构成特征与宋明义等人研究浙江西部富 Se 地区结果又有所不同(宋明义等, 2012)。再次证明了土壤中 Se 形态受不同地理区域的环境因素影响而发生变化。

Pearson 相关性分析结果(表 3)显示, 7 种 Se 形态含量均与全量 Se 及其他形态 Se 含量极显著相关, 说明 7 种 Se 形态之间存在密切的相互迁移转化关系。从 Pearson 相关性系数的大小可以看出不同 Se 形态之间关系的紧密程度, 表明不同形态 Se 来源的可能性大小。水溶态与离子交换态、碳酸盐结合态、强有机结合态相关性高, 相关系数分别达到 0.896、0.812、0.737, 而与腐殖酸结合态相关性较低, 相关系数为 0.309。离子交换态与碳酸盐结合态、强有机结合态相关性较高, 相关系数分别为 0.748、0.786, 而与残渣态、腐殖酸结合态相关性较低, 相关系数分别为 0.366、0.403。碳酸盐结合态与强有机结合态、铁锰氧化态相关性较高, 相关系数分别为 0.782、0.703, 而与腐殖酸结合态相关性较低, 相关系数为 0.263, 铁锰氧化态与全量相关性较高, 相关系数达 0.758, 腐殖酸结合态与残渣态、全量相关性相对最低, 相关系数分别为 0.231、0.476, 残渣态与全量之间相关性最高, 相关系数达到 0.959。由该结果可以推断, 水溶态 Se 主要由离子交换态 Se、碳酸盐结合态 Se、强有机结合态 Se 转化而来, 而腐殖酸结合态 Se 较少提供可溶态 Se。离子交换态 Se 可能由碳酸盐结合态、强有机结合态提供, 而非残渣态和腐殖酸结合态。碳酸盐结合态由强有机结合态、铁锰氧化态转化, 而非腐殖酸结合态。全量 Se 的主要形态是残渣态, 其次是铁锰氧化

表 3 不同形态 Se 含量之间 Pearson 相关性分析表
Tab. 3 Pearson relating coefficient among contents of selenium species

Se 形态	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化态	腐殖酸结合态	强有机结合态	残渣态	全 Se
水溶态	1	0.896**	0.812**	0.655**	0.309**	0.737**	0.514**	0.612**
离子交换态	0.896**	1	0.748**	0.509**	0.403**	0.786**	0.366**	0.509**
碳酸盐结合态	0.812**	0.748**	1	0.703**	0.263**	0.782**	0.473**	0.575**
铁锰氧化态	0.655**	0.509**	0.703**	1	0.530**	0.734**	0.643**	0.758**
腐殖酸结合态	0.309**	0.403**	0.263**	0.530**	1	0.669**	0.231**	0.476**
强有机结合态	0.737**	0.786**	0.782**	0.734**	0.669**	1	0.408**	0.621**
残渣态	0.514**	0.366**	0.473**	0.643**	0.231**	0.408**	1	0.959**
全 Se	0.612**	0.509**	0.575**	0.758**	0.476**	0.621**	0.959**	1

注:表中**表示各形态 Se 含量之间 Pearson 相关系数达到极显著水平, $P < 0.01$ 。

态。腐殖酸结合态、强有机结合态与全量、残渣态关系不密切,说明与全量、残渣态 Se 相互转化微弱,而主要为生物有效性较高的 Se 形态提供来源。

3.3 农作物富 Se 特征

对研究区 8 种主要农作物水稻、玉米、茶叶、大蒜、土豆、油菜、红薯、魔芋可食用部位进行 Se 含量测定,对照中国富硒食品行业标准、陕西富硒含硒农产品标准(表 4)进行分析。结果(表 5)发现,8 种农作物均富硒。各作物 Se 含量达到中国富硒食品行业标准、陕西富硒含硒农产品标准的达标率均为 65.4%以上,多数农作物富 Se 达标率达到 100%。油菜 Se 含量为 $0.025 \times 10^{-6} \sim 5.19 \times 10^{-6}$,平均含量为 0.907×10^{-6} ,高于国家富硒食品行业标准,陕西富硒农产品标准达标率为 100%。玉米、大蒜平均 Se 含量分别为 0.548×10^{-6} 、 0.387×10^{-6} ,陕西

富硒农产品标准达标率分别为 84.6%、100%。茶叶、土豆、红薯、水稻、魔芋平均 Se 含量范围为 $0.113 \times 10^{-6} \sim 0.209 \times 10^{-6}$ 。茶叶国家行业标准达标率高达 91.7%,土豆、红薯、魔芋陕西省富硒农产品达标率均达到 100%。

表 4 农产品富硒标准表

Tab. 4 Standard of selenium enriched agricultural products

农产品 种类	中国富硒食品行业标准 (HB001/T-2013) (mg/kg)	陕西富硒含硒农产品标准 (DB61/T 556-2018)(mg/kg)	
		富 Se	含 Se
茶叶	0.05~5.00	≥0.15	0.075~0.140
鲜蔬菜	0.01~0.90	≥0.02	0.010~0.015
油料植物	0.005~0.51	≥0.02	0.010~0.015
粮食	0.02~0.28	≥0.05	0.01~0.045

表 5 安康西部农作物 Se 含量特征表

Tab. 5 Selenium accumulating characteristics of agricultural products in western Ankang

农作物	样点数	Se 含量 范围 (10^{-6})	平均 Se 含量 (10^{-6})	Se 富集 系数	中国富硒食品行业标准		陕西富硒含硒农产品标准			
					达标样 品数	达标率 (%)	富 Se		含 Se	
							达标样 品数	达标率 (%)	达标样 品数	达标率 (%)
茶叶	24	0.039~0.314	0.113b	0.20 b	22	91.7	6	25	17	70.8
大蒜	34	0.022~5.640	0.387ab	0.36 b	32	94.1	34	100		
土豆	35	0.015~2.320	0.119b	0.08 b	34	97.1	35	100		
油菜	33	0.025~5.190	0.907a	1.03 a	20	60.6	33	100		
红薯	32	0.018~1.910	0.209b	0.11 b	29	93.5	32	100		
水稻	27	0.028~1.270	0.199b	0.47 b	21	77.8	22	81.5	27	100
玉米	26	0.017~3.570	0.548ab	0.13 b	17	65.4	22	84.6	26	100
魔芋	27	0.021~1.670	0.208b	0.10 b	25	96.2	27	100		

农作物 Se 含量方差分析结果显示(表 5),不同农作物可食部位 Se 含量存在显著差异,可见不同农作物对 Se 的吸收能力是不同的。其中,油菜 Se 含量最高,与茶叶、土豆、红薯、水稻、魔芋 Se 含量达到显著差异;大蒜、玉米 Se 含量较高,介于油菜与茶叶、土豆、红薯、水稻、魔芋 Se 含量之间;茶叶、土豆、红薯、水稻、魔芋 Se 含量较低。农作物 Se 含量由大到小排序为:油菜>玉米>大蒜>红薯、魔芋>水稻>土豆>茶叶。Se 富集系数是农作物 Se 含量与土壤 Se 含量的比值,考察农作物对 Se 元素的富集系数,可为富 Se 农作物筛选提供依据,进而为特定区域功能农业发展适宜性评价奠定基础(郇逸根等, 2005;陶春军等,2020)。Se 富集系数油菜与其他作物存在显著差异。与 Se 含量趋势一致,Se 富集系数也是油菜最高,高达 1.03,其余作物均在 1.0 以

下。各农作物 Se 富集系数由大到小排序为:油菜>水稻>大蒜>茶叶>玉米>红薯、魔芋>土豆。与农作物 Se 含量结果不同的是,Se 富集系数较高的是水稻、大蒜,玉米反而较低,这可能是由于玉米根系土 Se 含量相对玉米对 Se 的吸收量较高,玉米对土壤中 Se 的吸收能力较油菜等作物较弱导致。该研究结果与任蕊等人在陕西关中地区的土壤调查研究结果:粮油作物中以油菜、小麦富 Se 能力较强,蔬菜作物以大蒜富 Se 能力较强有一致之处,说明油菜是富硒能力较强的作物。继油菜之后,水稻、茶叶、玉米富 Se 能力较高,而魔芋、土豆富 Se 能力相对较弱。这与袁知洋等人(袁知洋等,2018)在湖北恩施富 Se 土壤上的调查研究结果较为一致。本研究将作物富 Se 含量特征和 Se 富集系数结果结合进行综合分析后,初步筛选出研究区富 Se 能力较强的作物

为:油菜、水稻、大蒜、茶叶、玉米。

4 结论

(1)安康西部县域农业区土壤普遍富 Se,土壤硒资源丰富。土壤中 Se 形态以残渣态为主,各形态含量占全量 Se 的比例由高到低排序为残渣态(0.891×10^{-6}) > 腐殖酸结合态(0.255×10^{-6}) > 强有机结合态(0.217×10^{-6}) > 水溶态(0.015×10^{-6}) > 碳酸盐结合态(0.015×10^{-6}) > 离子交换态(0.012×10^{-6}) > 铁锰氧化态(0.008×10^{-6})。

(2)研究区 8 种农作物均达到富硒农产品标准。农作物 Se 富集能力由大到小排序为:油菜 > 水稻 > 大蒜 > 茶叶 > 玉米 > 红薯 > 魔芋 > 土豆。

(3)建议政府合理开发利用当地富硒资源,结合农作物对土壤 Se 富集的能力,充分利用研究区富 Se 土壤资源,将种植结构和土地利用合理规划、匹配,开发富硒高附加值农产品。

致谢:非常感谢陕西省水工环地质调查中心王会锋总工程师在论文评审修改中给予的宝贵意见和建议。

参考文献(References):

张俊玲,张江周,申建波,等. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J]. 土壤学报,2020,56(4):783-796.
ZHANG Junling, ZHANG Jiangzhou, SHEN Jianbo, et al. Soil Health and Agriculture Green Development: Opportunities and Challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,56(4):783-796.
熊咏民,杨晓莉,张丹丹,等. 硒的生物学效应与环境相关性疾病的研究进展[J]. 土壤,2018,50(6):1105-1112.
XIONG Yongmin, YANG Xiaoli, ZHANG Dandan, et al. Research Progress in Biological Function of Selenium and Environmentally Associated Diseases [J]. Soils, 2018,50(6):1105-1112.
崔用慧,唐德剑,解松峰. 安康市富硒农业产业发展现状及对策[J]. 安康学院学报,2014,26(3):85-90.
CUI Yonghui, TANG Dejian, XIE Songfeng. The Situations and Countermeasures to Se-rich Industry in Ankang[J]. Journal of Ankang University,2014,26(3):85-90.
王松山,梁东丽,魏威,等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报,2011,48(4):823-830.
WANG Songshan, LIANG Dongli, WEI Wei, et al. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis[J]. Acta Pedologica

Sinica,2011,48(4):823-830.
任蕊,尹宗义,王明,等. 三原—阎良地区土壤及农作物 Se 含量特征[J]. 西北地质,2016,49(4):193-200.
REN Rui, YIN Zongyi, WANG Ming, et al. Survey and Research of Selenium Content in Soil and Crops in Sanyuan-Yanliang[J]. Northwestern Geology, 2016, 49 (4):193-200.
宋明义,岑静,胡艳华,等. 高镉地质环境富硒土壤特征及其生态效应[J]. 地球与环境,2012,40(3):354-360.
SONG Mingyi, CEN Jing, HU Yanhua, et al. Study on the Characteristics of Selenium-rich Soil under Geological Environment with High Contents of Cadmium and Its Ecological Effects [J]. Earth and Environment,2012,40 (3):354-360.
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,2005,3:323-330.
LI Yigen, DONG Yanxiang, ZHENG Jie, et al. Selenium: A-bundant Soil Survey and Assessment in Zhejiang [J]. Quaternary Sciences,2005,3:323-330.
袁知洋,许克元,黄彬,等. 恩施富硒土壤区绿色富硒农作物筛选研究[J]. 资源环境与工程,2018,32(4):569-575.
YUAN Zhiyang, XU Keyuan, HUANG Bin, et al. Screening of High Quality Crops in Selenium Rich and High Cadmium Soil Area of Enshi [J]. Resources Environment and Engineering,2018,32(4):569-575.
陈继平,任蕊,王晖,等. 关中塬土地区土壤 pH 变化对硒形态及有效性的影响[J]. 西北地质,2020,53(1):254-260.
CHEN Jiping, REN Rui, WANG Hui, et al. Effect of Lou Soil pH Change on Selenium Forms and Availability[J]. Northwestern Geology,2020,53(1):254-260.
陶春军,周天健,张笑蓉,等. 安徽岳西翠兰产地土壤环境质量及种植适宜性评价研究[J]. 西北地质,2020,53(1):261-268.
TAO Chunjun, ZHOU Tianjian, ZHANG Xiaorong, et al. Research on Soil Environmental Quality and Planting Suitability Evaluation of Cuilan Producing Area in Yuexi, Anhui Province [J]. Northwestern Geology, 2020,53(1):261-268.
LÜ Yaoyao, YÜ Tao, YANG Zhongfang, et al. Constraint on selenium bioavailability caused by its geochemical behavior in typical Kaschin-Beck disease areas in Aba, Sichuan Province of China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 737-749.
WANG Songshan, LIANG Dongli, WANG Dan. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 159-164. doi: 10.1016/j. scitotenv. 2012.03.091.