

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.019

关中不同类型土壤硒含量特征及其对玉米籽粒 硒含量的影响

姬华伟,任蕊,陈继平,张继军,李傲瑞,冯伟华

(陕西省地质调查院,陕西省水工环地质调查中心,陕西 西安 710068)

摘要:于陕西省关中地区选取潮土、风沙土、褐土、黑垆土、红土、新积土及其上生长的玉米为研究对象,分别采集74个玉米和根系土样品,分析了土壤硒含量、形态特征及影响因素,以及土壤硒含量变异对玉米籽粒硒含量的影响。结果发现:①褐土和新积土全硒含量、各形态硒含量均明显高于其他土壤类型,且为富硒土壤。②褐土和新积土中易被生物利用的易利用态硒含量明显高于其他几种土壤类型。③褐土和新积土生长的玉米籽粒硒含量达到富硒标准,且明显高于其他4种类型土壤生长的玉米籽粒硒含量;当土壤硒含量累积增加到一定水平时,玉米籽粒硒含量随之增加。结果说明研究区内硒含量较高的褐土和新积土适宜于生产富硒玉米。本研究有助于加深认识关中地区土壤理化性质及其与硒有效性关系,并为调节土壤硒水平、改良植物硒营养状况、富硒资源开发利用及种植结构调整提供理论依据。

关键词:关中地区;土壤类型;硒含量;硒形态;玉米籽粒

中图分类号:P66

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)04-0239-11

Characteristics of Selenium Content in Different Soil Types in Guanzhong and Its Influence on Selenium Content of Corn Grain

Ji Huawei, Ren Rui, Chen Jiping, Zhang Jijun, Li Aorui, Feng Weihua

(Shaanxi Institute of Geological Survey, Shaanxi Hydrogeology, Engineering Geology and
Environmental Geology Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: This paper selects fluvo-aquic soil, aeolian sandy soil, cinnamon soil, black loessial soil, red soil, alluvial soil in Guanzhong of Shaanxi Province and corn growing on them as the research objects. 74 corn samples and 74 root soil samples were collected, and soil Se content, Se speciation and its influencing factors, the effect of soil Se content variation on corn grain Se content were analyzed. The results showed that contents of total Se and various Se fractions of both cinnamon soil and alluvial soil were significantly higher than those of other four soil types, and cinnamon soil and alluvial soil were Se rich soils. The bio-available Se content of cinnamon soil and alluvial soil was significantly higher than that of other four soil types. The Se content of corn

收稿日期:2020-12-25;修回日期:2021-06-03

基金项目:陕西省公益性地质项目“陕西省关中地区碱性富硒土地开发利用综合研究”(20180307)。

作者简介:姬华伟(1987-),女,理学博士,工程师,主要从事农业地质、生态地质调查、农业资源与环境及生态学研究。E-mail:huawei1001@126.com。

grain in cinnamon soil and alluvial soil met the standard of selenium enrichment, and was significantly higher than that of corn grain in the other four soil types. Furthermore, the Se content in corn grains increased when soil Se content increased to a certain level. These results suggested that cinnamon soil and alluvial soil with higher selenium content were suitable for selenium-rich corn. This study is of help to understand the physical and chemical properties of soil in Guanzhong area and the relationship with Se availability. It provides theoretical basis for the adjustment of soil selenium level, the improvement in plant selenium nutrition status, the development and utilization of selenium-rich resources and the adjustment of planting structure.

Keywords: Guanzhong area; soil types; selenium content; selenium speciation; corn grain

Se 是生态环境中十分重要的微量元素,同时,作为人体和动物所必需的一种微量元素,具有广泛的生物学功能,尤其表现在提高机体免疫力、预防心血管疾病、克山病及大骨节病、抗癌、抗氧化以及抗衰老等方面(Rayman,2000;彭耀湘等,2007)。作为人体或动植物体内硒的最终来源,土壤中硒的分布、赋存状态以及与农作物中硒的迁移转化关系等一直是关注的热点(周小娟等,2016;赵燕等,2021)。陕西关中地区是中国重要的商品粮产区,农业生产历史悠久,农特产资源极为丰富。任蕊等(2016)通过研究关中三原—阎良地区土壤及农作物 Se 含量特征发现,该区域具有发展“天然、绿色、安全”的富 Se 农作物得天独厚的优势。同时,任蕊等(2018)采用陕西省多目标区域地球化学调查深、表层土壤数据,系统研究了关中地区土壤中硒的分布特征及其影响因素,发现关中地区表层土壤硒含量为 $0.034 \times 10^{-6} \sim 2.628 \times 10^{-6}$,平均含量为 0.174×10^{-6} ,富硒土壤($\text{Se} \geq 0.2 \times 10^{-6}$)为 $8\,245.12\text{ km}^2$,其中褐土、新积土、潮土和水稻土具有开发富硒产品的潜力。在土壤-植物-人和动物生态系统中,土壤是硒的基本来源,区域土壤硒含量对于农产品硒水平及生物健康有重要意义。因此,关中地区具有开发天然富硒农产品的价值,在关中开展土壤硒含量特征及其对作物硒含量的影响研究,对于提高人民健康水平和社会经济发展具有重要意义。此外,任蕊等(2018)研究发现土壤类型是影响关中地区土壤硒含量的主要因素,不同类型土壤中有有机质对硒具有明显的富集作用,pH 值对硒的约束存在显著差异。陈继平等(2020)研究了关中塬土地区土壤 pH 对土壤硒形态及有效性的影响,发现关中塬土 pH 对 Se 的含量影响不显著,并且发现偏碱性土壤条件下硒的生物有效性较高。但是,有关关中地区土壤理化性质与硒及硒形态含量关系的研究以及土壤硒含量

变异对作物硒含量特征影响的研究较少。因此,开展这方面的研究将为陕西省硒资源的开发利用、种植结构调整提供科学依据。笔者以陕西关中不同类型土壤(潮土、风沙土、褐土、黑垆土、红土、新积土)及其上生长的玉米为研究对象,分别采集 74 个玉米样品和 74 个根系土壤样品,分析了不同类型土壤硒全量及 7 种形态硒含量,以及生长在不同类型土壤的玉米籽粒硒含量,探讨了土壤硒含量变异与土壤理化性质的关系以及其对农作物硒含量特征的影响,以期加深认识关中地区土壤理化性质,及其与硒有效性关系,并为调节土壤硒水平、改良植物硒营养状况提供理论依据。

1 自然地理与地质背景

陕西关中地区是中国重要的商品粮产区,农业生产历史悠久,农特产资源极为丰富,西起陇县,东至黄河,北部以甘肃省为界,南部为秦岭山脉的北缘,行政区划涉及西安市、咸阳市、宝鸡市、铜川市和渭南市,地理坐标为东经: $106^{\circ}34' \sim 110^{\circ}35'$,北纬: $34^{\circ}00' \sim 35^{\circ}50'$,总面积为 $39\,500\text{ km}^2$ 。该地区受大陆季风气候影响,四季分明,日照充足。年平均气温为 $12 \sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 $550 \sim 750\text{ mm}$ 。该研究区土壤类型多样,包括 12 个土类,以褐土和黄绵土为主,另有新积土、黑垆土、粗骨土、潮土、红土、风沙土、水稻土、沼泽土、棕壤、石质土。其中,褐土面积为 $14\,980.25\text{ km}^2$,占全区总面积的 37.94% ,且保水保肥能力好,土壤矿物质丰富,是适宜农业发展的优质土类。研究区出露地层从太古界—新生界均有分布,前新生界及花岗岩构成了盆地基底并出露于盆地边缘,巨厚的新生界形成了辽阔的渭河盆地,构造单元划分见图 1。同时该研究区集中分布

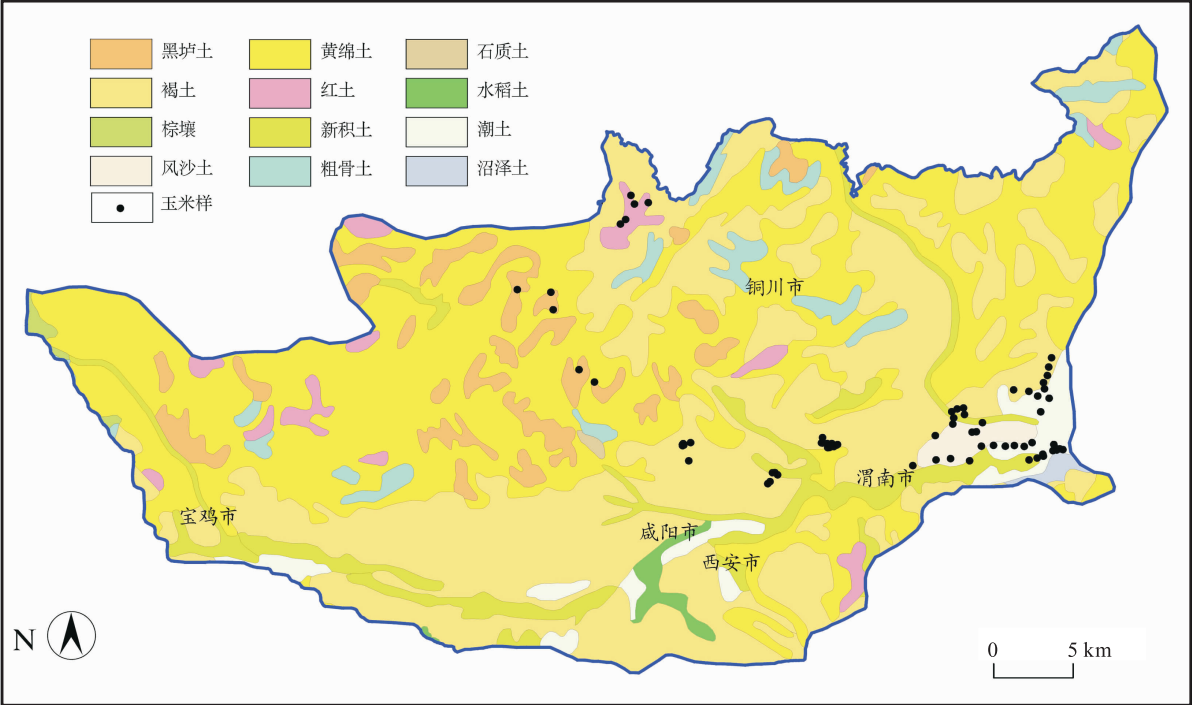


图 2 关中地区土壤类型分布图

Fig. 2 Soil type distribution map of Guanzhong, Shaanxi

法(ICP - AES)。称取适量玉米籽粒样品,加硝酸浸泡过夜,再加双氧水,盖好内盖,旋紧外套,放入微波消解仪器内消解 3~4 h 后,取出冷却,稀释至一定体积后进行分析。玉米籽粒样品分析指标为 Se,分析方法为原子荧光光谱法(AFS)。

2.3 质量评述

样品分析由国土资源部西安矿产资源监督检测中心承担。测试过程中加入国家一级标准物质进行分析质量控制,所有样品的报出率为 100%,准确度和精密密度监控样合格率达 98% 以上。

3 结果与分析

3.1 不同类型土壤硒含量特征及其与土壤性质的关系

通过对关中地区不同类型土壤全硒含量进行分析,结果显示,全硒含量在不同类型土壤间有一定差异,具体表现为:褐土(0.624)>新积土(0.372)>潮土(0.174)>黑垆土(0.148)>风沙土(0.133)>红土(0.124)(算术平均值,mg·kg⁻¹,表 1、图 3),其中褐土和新积土的全硒含量明显高于其他 4 种土壤的全

硒含量。富硒土壤,即富含硒的土壤。参照李家熙对土壤硒划分标准(李家熙等,2000),并进一步参照《天然富硒土地划定与标识》(试行)(DD 2019 - 10)对富硒土壤的划定,褐土和新积土为富硒土壤(土壤 pH>7.5),而潮土、黑垆土、风沙土和红土则为低硒土壤。

表 1 不同类型土壤全硒含量

Tab. 1 Total Se content of different soil types

土壤类型	样本数 (n)	均值±标准误 (mg·kg ⁻¹)	变幅 (mg·kg ⁻¹)	变异系数 (%)
潮土	17	0.174 ± 0.011	0.124~0.305	26.02
风沙土	6	0.133 ± 0.020	0.082~0.204	36.82
褐土	32	0.624 ± 0.077	0.070~1.613	70.04
黑垆土	5	0.148 ± 0.007	0.128~0.166	11.33
红土	5	0.124 ± 0.007	0.097~0.137	13.29
新积土	9	0.372 ± 0.103	0.067~0.789	83.31
总计	74	0.384 ± 0.043	0.067~1.613	97.84

但是由于方差不齐,本研究采用 Games - Howell 来检验硒含量在不同类型土壤间的统计差异。如表 2 所示,除了新积土外,褐土 Se 含量与其他 4 种土壤(潮土、风沙土、黑垆土、红土)的 Se 含量都呈显著差异,并且潮土还与红土 Se 含量差异显著。该

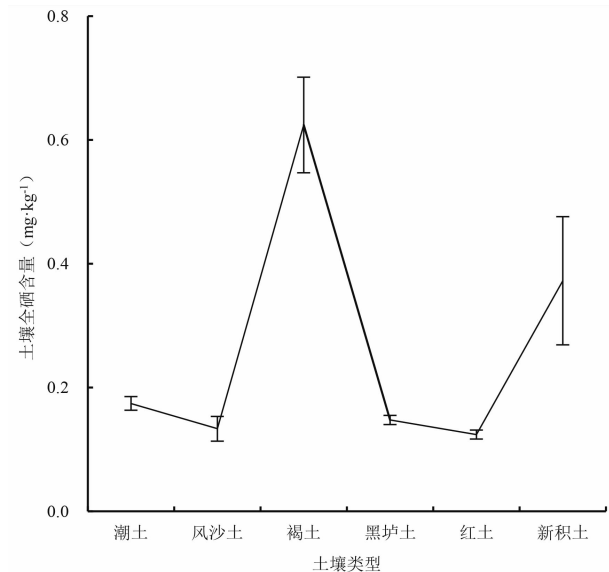


图 3 不同类型土壤全硒含量

Fig. 3 Total Se content of different soil types

研究区土壤类型中,褐土面积为 14 980.25 km²,占全区总面积的 37.94%,其保水保肥能力好,土壤矿物质丰富,肥力较高。相较而言,该研究区内其他土壤分布面积较小,同时,潮土受地下水影响强烈,土壤中有有机质含量不高,养分状况较差,肥力水平低;风沙土土质松散,渗透快,不保水,不抗旱,易受风蚀,一般来说风沙土的有机质及植物营养元素含量均很低;黑垆土有机质含量较低,矿质养分丰富,土质疏松,全磷、全氮含量不高;红土土质黏重,通透性差,耕性不良,肥力低(晁旭等,2017)。因此,褐土肥力高,有机质含量较高,可能是其 Se 含量高于其他 4 种土壤的原因(任蕊等,2018)。

通过分析不同类型土壤各形态硒含量,结果显示(表 3、图 4),不同类型土壤间各形态硒含量存在一定的差异,且与以往研究结果一致(张艳玲等,2002;王松山,2012;任蕊等,2016),土壤可溶态、交

表 2 不同类型土壤全硒含量的 Games – Howell 多重比较检验

Tab. 2 Games – Howell multiple comparison test of total Se content in different soil types

组别 I	组别 J	均值差 (I – J)	标准误	显著性	95 %置信区间	
					下限	上限
潮土	风沙土	0.041	0.023	0.519	−0.042	0.124
	褐土	−0.450	0.078	0.000	−0.686	−0.213
	黑垆土	0.027	0.013	0.379	−0.016	0.069
	红土	0.050	0.013	0.014	0.008	0.092
	新积土	−0.198	0.104	0.460	−0.576	0.180
风沙土	潮土	−0.041	0.023	0.519	−0.124	0.042
	褐土	−0.491	0.080	0.000	−0.732	−0.250
	黑垆土	−0.014	0.021	0.980	−0.098	0.069
	红土	0.009	0.021	0.997	−0.074	0.093
	新积土	−0.239	0.105	0.300	−0.617	0.139
褐土	潮土	0.450	0.078	0.000	0.213	0.686
	风沙土	0.491	0.080	0.000	0.250	0.732
	黑垆土	0.476	0.078	0.000	0.241	0.712
	红土	0.500	0.078	0.000	0.265	0.735
	新积土	0.252	0.129	0.406	−0.159	0.662
黑垆土	潮土	−0.027	0.013	0.379	−0.069	0.016
	风沙土	0.014	0.021	0.980	−0.069	0.098
	褐土	−0.476	0.078	0.000	−0.712	−0.241
	红土	0.024	0.011	0.316	−0.015	0.062
	新积土	−0.225	0.104	0.343	−0.602	0.153

续表 2

组别 I	组别 J	均值差 (I-J)	标准误	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
红土	潮土	-0.050	0.013	0.014	-0.092	-0.008
	风沙土	-0.009	0.021	0.997	-0.093	0.074
	褐土	-0.500	0.078	0.000	-0.735	-0.265
	黑垆土	-0.024	0.011	0.316	-0.062	0.015
	新积土	-0.248	0.104	0.261	-0.626	0.130
新积土	潮土	0.198	0.104	0.460	-0.180	0.576
	风沙土	0.239	0.105	0.300	-0.139	0.617
	褐土	-0.252	0.129	0.406	-0.662	0.159
	黑垆土	0.225	0.104	0.343	-0.153	0.602
	红土	0.248	0.104	0.261	-0.130	0.626

表 3 不同类型土壤各形态硒含量(μg·kg⁻¹)
Tab.3 Concentrations of various selenium fractions of different soil types (μg·kg⁻¹)

土壤类型	样本数	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐植酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态
潮土	17	4.61±0.33	4.30±0.29	5.70±0.68	48.07±2.96	5.45±0.33	29.72±4.30	67.55±3.74
风沙土	6	3.99±0.15	3.16±0.38	4.03±0.39	35.39±5.26	5.22±0.56	32.55±7.39	49.05±9.60
褐土	32	23.50±3.28	15.36±2.02	45.29±7.01	96.28±8.63	18.91±2.54	195.47±32.30	181.55±19.30
黑垆土	5	5.36±0.35	4.91±0.54	4.65±0.15	44.54±6.66	4.39±0.54	17.84±6.21	67.98±6.65
红土	5	4.45±0.32	4.00±0.28	3.62±0.40	46.66±3.00	3.06±0.19	5.97±2.40	58.16±4.59
新积土	9	13.34±4.25	9.41±2.41	19.59±5.79	64.43±14.91	9.82±2.29	105.67±35.20	123.28±31.88
总计	74	13.83±1.82	9.63±1.10	24.16±3.80	69.54±5.05	11.55±1.36	108.46±17.25	121.52±11.23

注:表中为均值±标准误。

换态硒含量一般较低,主要以有机结合态和残渣态硒存在;此外,褐土的 7 种形态硒含量在 6 种土壤类型中均最高,尤其是强有机结合态 Se 和残渣态 Se,并且与晁旭等(2018)研究中关于褐土 7 种硒形态含量大小的结果基本一致。基于已有研究(周小娟等,2016;梁东丽等,2017),土壤中的硒根据其溶解性、移动性、有效性和毒性的大小,与土壤结合强度越大,硒的有效性越低,一般认为:水溶态 Se 和离子交换态 Se 为可交换态 Se;水溶态 Se、离子交换态 Se 和碳酸盐结合态 Se 为易利用态 Se;腐植酸结合态 Se 和铁锰结合态 Se 为中等利用态 Se;强有机结合态 Se 和残渣态 Se 为惰性态 Se。本研究结果显示,褐土和新积土的惰性态 Se 含量显著高于其他几种土壤类型,并且褐土中易被生物利用的易利用态 Se 含量明显高于其他几种土壤类型(图 5)。这可能是由于与其他几种类型土壤相比,褐土含有较高的有

机质,保水保肥能力强,有利于硒酸盐等物质的积累。

土壤理化性质影响着土壤中硒赋存形态,硒在有机质、黏土矿物、铁锰氧化物等土壤组分间不断发生着吸附解吸、沉淀溶解、生物氧化还原等过程,而这些过程均受到土壤酸碱性等因素的影响(Zawishlanski, et al.,1996)。表 4 给出了土壤 pH、有机质、CEC、无定形铝、无定形铁、碳酸盐、物理性黏粒(<0.02 mm 粒级)的含量。并且基于表 4 给出的几种土壤理化性质,以其余土壤性质为控制变量,做某一土壤性质与各形态硒含量的偏相关分析,结果显示(表 5),土壤 7 种形态硒以及全硒含量均与土壤 pH、有机质含量呈显著正相关($p<0.05$),与土壤碳酸盐含量呈显著负相关($p<0.05$);此外,铁锰结合态 Se 以及残渣态 Se 与土壤黏粒呈显著正相关($p<0.05$),但相关系数(-0.242 和 0.243)很低。

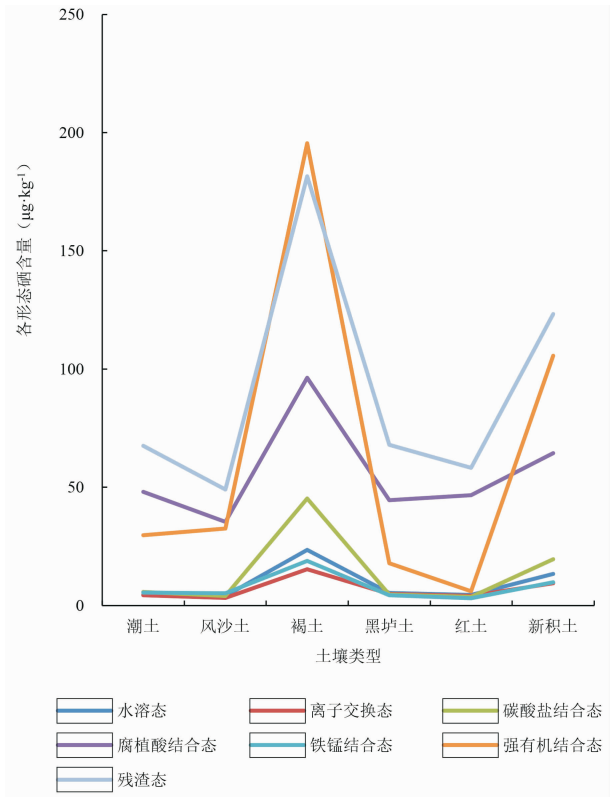


图 4 不同类型土壤各形态硒含量

Fig. 4 Concentrations of various selenium fractions of different soil types

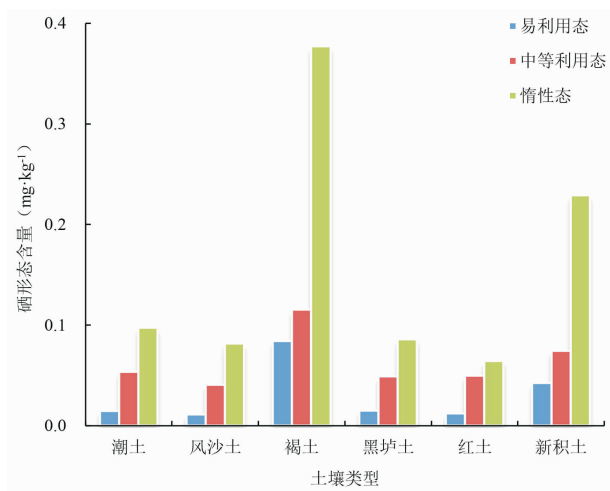


图 5 不同类型土壤各形态硒含量对比图

Fig. 5 Concentrations of various selenium fractions of different soil types

褐土和新积土较其他土壤明显高的全硒含量、各形态硒含量以及有机质含量和 pH 值(表 6)也进一步说明了土壤有机质和 pH 对土壤硒的较强的影响作

用(任蕊等,2018)。与本研究结果相一致的有:满楠(2013)发现土壤中各硒形态与土壤 pH 值、有机质、碳酸盐、无定形铁含量、阳离子交换量、电导率和黏粒均有不同程度的显著相关性;徐争启等(2011)发现土壤 pH 值与可溶可交换态和残渣态硒含量有显著相关关系;ZHAO 等(2005)发现土壤碳酸盐含量是控制磷酸盐浸提态硒量的主要因素。此外,土壤中黏粒对硒有较强的富集作用,黏粒含量越高,土壤的保肥性越好,从而能有效减少硒的流失(龚河阳等,2015)。因此,研究区内土壤硒有效性受到土壤硒全量、pH、有机质、碳酸盐等理化性质的制约,进一步说明土壤中硒的有效性不仅取决于总硒的含量,还受到土壤矿物质和有机质的影响,与土壤理化性质及环境因子等有关(Beladel, et al., 2013;梁东丽等,2017)。

3.2 不同类型土壤生长的玉米籽粒硒含量与土壤硒含量相关特征

植物对硒的吸收和积累能力因植物种类而异,一般分 3 类:①累积植物(指示植物),如十字花科的萝卜、油菜等。②中度含硒植物,如平常吃的蔬菜。③低度含硒植物,如农作物(迟凤琴,2001)。虽然玉米属于低含硒植物,但是褐土和新积土生长的玉米籽粒硒含量均达到陕西省富硒食用农产品硒含量标准(DB61/T 556 - 2018)规定($> 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (表 7)。影响作物吸收硒的土壤性质因素包括土壤本身的硒含量、pH、有机质及营养元素等,并且 LEE 等(2011)研究指出,作物中硒含量与土壤中硒含量、pH、正磷酸盐含量密切相关。本研究发现,玉米硒含量与土壤硒含量呈一定的相关性,表现为随土壤硒含量的升高而升高,并且褐土和新积土的玉米籽粒硒含量明显高于其他土壤类型(图 6)。这可能是由于褐土和新积土易利用态硒含量明显高于其他类型土壤的原因(图 5)。土壤 pH 影响硒的有效性,并且硒有效性随土壤 pH 的增加而提高(梁东丽等,2017),陈继平等(2020)研究也认为碱性土壤条件下硒的生物有效性高。本研究中褐土和新积土土壤 pH 值和有机质含量较其他土壤类型明显高,且土壤 7 种形态硒及全硒含量均与土壤 pH 值和有机质含量呈显著正相关($p<0.05$),因此,虽然土壤本身硒含量对作物吸收硒的影响最关键,但是,土壤 pH 值及有机质含量作为间接因素,也可以通过活化土壤硒而影响作物对土壤中硒的吸收(刘敏等,2018)。

表 4 土壤基本理化性质
Tab. 4 General chemical and physical properties of soils

土壤性质	样本数	均值±标准误	变幅	变异系数(%)
pH	74	8.657 ± 0.026	8.210~9.300	2.59
有机质(%)	74	1.729 ± 0.072	0.417~2.959	35.58
CEC(cmol·kg ⁻¹)	74	11.049 ± 0.459	3.413~24.127	35.73
无定形铝(mg·kg ⁻¹)	74	689.878 ± 25.072	207.000~1 241.625	31.26
无定形铁(mg·kg ⁻¹)	74	1 057.740 ± 31.556	655.750~2 061.250	25.66
碳酸盐(CO ₂ 计)(%)	74	4.032 ± 0.154	0.700~6.470	32.77
物理性黏粒(<0.02 mm)(%)	74	50.804 ± 2.238	7.910~91.200	37.89

表 5 土壤各形态硒含量与土壤性质的偏相关分析
Tab. 5 Partial correlation between soil properties and selenium content in various fractions

土壤性质	硒 形 态							全硒量
	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐植酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态	
pH	0.413 *	0.352 *	0.317 *	0.390 *	0.235	0.411 *	0.356 *	0.410 *
有机质	0.484 *	0.428 *	0.528 *	0.662 *	0.455 *	0.567 *	0.642 *	0.628 *
CEC	-0.159	-0.146	-0.180	-0.124	-0.182	-0.159	-0.174	-0.182
无定形铁	0.195	0.168	0.145	0.193	0.046	0.108	0.080	0.125
无定形铝	0.126	0.058	0.153	0.057	0.124	0.208	0.132	0.171
碳酸盐	-0.362 *	-0.339 *	-0.367 *	-0.333 *	-0.338 *	-0.315 *	-0.354 *	-0.375 *
物理性黏粒	0.178	0.182	0.188	0.163	-0.242 *	0.162	0.243 *	0.214

注: * 表示相关达到 95% 的显著相关;Note: * = significant at 95% level ($p<0.05$)。

表 6 不同类型土壤基本理化性质
Tab. 6 General chemical and physical properties of different types of soils

土壤类型	pH	有机质 (%)	CEC (cmol·kg ⁻¹)	无定形铝 (mg·kg ⁻¹)	无定形铁 (mg·kg ⁻¹)	碳酸盐(CO ₂ 计) (%)	物理性黏粒 (<0.02 mm)(%)
潮土	8.64	1.69	9.95	618.81	1 035.18	4.89	48.43
风沙土	8.59	1.24	8.66	524.75	1 200.42	3.46	41.81
褐土	8.76	1.91	11.90	700.78	1 002.79	3.84	53.66
黑垆土	8.34	1.47	12.15	1 027.83	1 065.83	4.87	63.13
红土	8.39	1.58	13.08	858.63	1 152.10	3.21	51.18
新积土	8.70	1.72	9.94	613.96	1 143.68	3.48	44.04

表 7 不同土壤类型玉米籽粒硒含量
Tab. 7 Se content of corn grain in different soil types

土壤类型	样本数(n)	均值±标准误(mg·kg ⁻¹)	变幅(mg·kg ⁻¹)	变异系数(%)
潮土	17	0.026 ± 0.002	0.014~0.048	29.73
风沙土	6	0.024 ± 0.002	0.017~0.033	23.98
褐土	32	0.174 ± 0.031	0.012~0.702	101.50
黑垆土	5	0.016 ± 0.002	0.013~0.024	28.85
红土	5	0.019 ± 0.001	0.018~0.021	6.01
新积土	9	0.069 ± 0.022	0.013~0.191	93.70
总计	74	0.094± 0.016	0.012~0.702	146.12

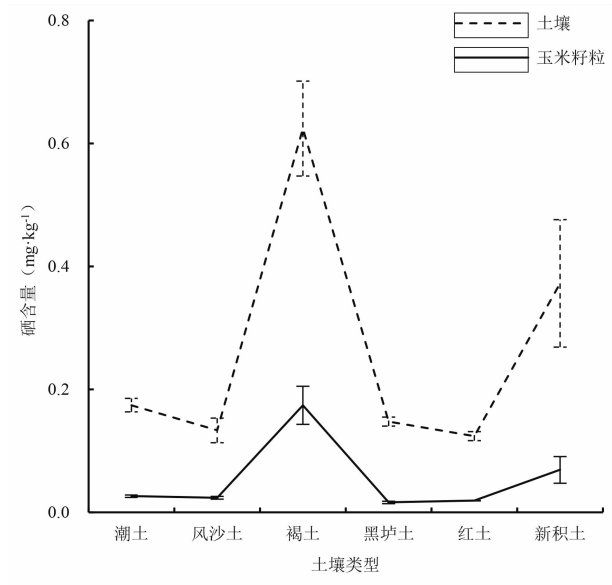


图 6 不同类型土壤及玉米籽粒硒含量对比图

Fig. 6 Comparison of Se content of corn grain and soils in different soil types

表 8 显示,不同土壤类型间土壤各形态硒含量与玉米硒含量呈现出不同的相关性,在土壤硒含量较高的潮土(0.124~0.305)、褐土(0.070~1.613)和新

积土(0.067~0.789)中,土壤各形态硒含量几乎都与玉米硒含量呈显著相关;而在土壤硒含量较低的风沙土(0.082~0.204)、黑垆土(0.128~0.166)和红土(0.097~0.137)中,土壤各形态硒含量与玉米硒含量相关性都不显著。这似乎说明只有当土壤硒含量累积增加到一定程度,玉米硒含量才随之增加。

因此,通过对土壤全硒含量与玉米硒含量进行曲线拟合(图 7),玉米硒含量随土壤全硒含量的增加呈上升趋势,并且结果进一步说明,当土壤硒含量累积增加到一定程度时,玉米硒含量才随之增加。与本研究结果相似的有:水稻根系、茎叶和籽粒中的硒含量均随着土壤硒含量增加而增加(姜超强等 2015);小麦籽粒中的硒含量与土壤中硒含量密切相关(Lee, et al., 2011);在不同植物间进行比较,总硒含量及可用硒含量在整个生长季对植物累积硒效果相似(Kikkert, et al., 2013);WANG 等(2012)结合土壤硒价态和形态以及玉米的硒含量,发现可溶态硒中的 6 价硒含量、可交换态硒含量及有机结合态硒含量均与玉米硒含量有较好的相关性。本研究结果也说明研究区内的褐土和新积土适宜于生产富硒玉米。

表 8 不同类型土壤各形态硒含量与玉米籽粒硒含量的相关性

玉米硒含量		水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐植酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态	土壤全硒量
潮土	Pearson' r	0.507	0.510	0.723	0.460	0.792	0.639	0.694	0.848
	p	0.038	0.037	0.001	0.063	0.000	0.006	0.002	0.000
风沙土	Pearson' r	0.467	−0.005	−0.194	−0.279	0.117	0.044	−0.018	−0.100
	p	0.351	0.993	0.712	0.592	0.826	0.935	0.973	0.850
褐土	Pearson' r	0.946	0.844	0.887	0.802	0.615	0.919	0.775	0.913
	p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
黑垆土	Pearson' r	−0.313	0.017	0.687	0.464	−0.373	−0.472	0.656	0.706
	p	0.608	0.978	0.200	0.432	0.536	0.422	0.229	0.182
红土	Pearson' r	−0.189	−0.073	−0.246	−0.078	0.010	0.714	0.066	0.215
	p	0.761	0.907	0.690	0.900	0.987	0.176	0.916	0.728
新积土	Pearson' r	0.927	0.922	0.837	0.845	0.840	0.977	0.933	0.937
	p	0.000	0.000	0.005	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000

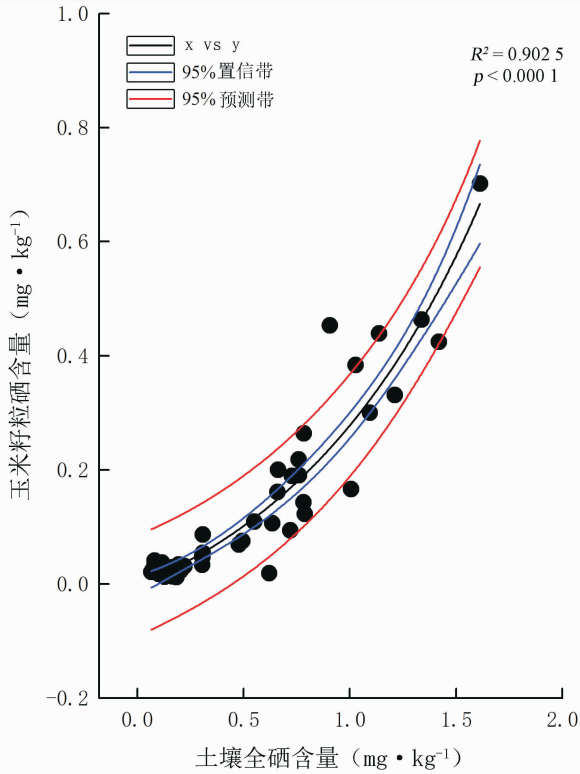


图 7 土壤全硒含量对玉米籽粒硒含量的影响

Fig. 7 The effect of soil total Se content on corn grain Se content

4 结论

(1)关中不同类型土壤全硒含量从大到小为:褐土(0.624)>新积土(0.372)>潮土(0.174)>黑垆土(0.148)>风沙土(0.133)>红土(0.124)(算术平均值,mg · kg⁻¹)。褐土和新积土为富硒土壤,潮土、黑垆土、风沙土和红土为低硒土壤。

(2)土壤全硒及各形态硒含量均与土壤 pH、有机质含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。研究区内褐土有机质含量较高,保水保肥能力较强,硒酸盐等物质可能因此积累较多。此外,不同类型土壤可溶态和交换态硒含量都较低,主要以有机结合态和残渣态硒存在,但是褐土和新积土中易被生物利用的易利用态硒含量明显高于其他几种土壤类型。因此,研究认为土壤硒全量、pH、有机质是影响关中地区土壤硒有效性的主要因素。

(3)褐土和新积土生长的玉米籽粒硒含量达到富硒标准,且明显高于其他 4 种类型土壤生长的玉米籽粒硒含量。当土壤硒含量累积增加到一定水平

时,玉米籽粒硒含量随之增加。因此,研究区内硒含量较高的褐土和新积土适宜于生产富硒玉米。

参考文献(References):

彭耀湘,陈正法. 硒的生理功能及富硒水果的开发利用[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(3):381-384.

PENG Yaoxiang, CHEN Zhengfa. Physiologic function of selenium and development utilization of rich selenium fruits [J]. Research of Agricultural Modernization, 2007, 28(3):381-384.

周小娟,张嫣,祝莉玲,等. 武汉市侏儒—消泗地区农田系统中硒的分布特征及有效性研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4):158-163.

ZHOU Xiaojuan, ZHANG Yan, ZHU Liling, et al. Research on selenium distribution and effectiveness in the farm system in Zhuru and Xiaosi areas, Wuhan city[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4):158-163.

任蕊,尹宗义,王明霞,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 Mingxia, et al. Survey and research of selenium content in soil and crops in Sanyuan - Yanliang[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(4):193-200.

任蕊,王明霞,陈继平,等. 陕西关中地区土壤硒分布特征及影响因素[J]. 矿产勘查, 2018, 9(9):1827-1833.

REN Rui, WANG Mingxia, CHEN Jiping, et al. Distribution of soil selenium in Guanzhong area and its influencing factors[J]. Mineral Exploration, 2018, 9(9):1827-1833.

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.

李家熙,张光第,葛晓立,等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京:地质出版社, 2000.

LI Jiayi, ZHANG Guangdi, GE Xiaoli, et al. Prediction and geochemical environmental character of human selenium imbalances[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.

晁旭,王会锋,任蕊,等. 关中—天水经济区(关中盆地)富硒区地球化学调查与评价成果报告[R]. 西安:陕西省地质调查中心, 2017.

CHAO Xu, WANG Huifeng, REN Rui, et al. Achievements reports of geochemical survey and evaluation of selenium-rich area in Guanzhong - Tianshui Economic

- Zone (Guanzhong Basin)[R]. Xi'an: Shaanxi Geological Survey Center, 2017.
- 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 等. 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 Yanling, PAN Genxing, HU Qiuhui, et al. Selenium fractionation and bio-availability in some low - Se soils of central Jiangsu Province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(3):355-359.
- 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究[D]. 西安:西北农林科技大学, 2012.
- WANG Songshan. Fractionation and speciations of selenium in soil and its bioavailability [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2012.
- 晁旭, 王会锋, 张志敏, 等. 陕西省三原县丁留村农田硒含量特征及成因浅析[J]. 南方农业, 2018, 12(18): 190-191.
- CHAO Xu, WANG Huifeng, ZHANG Zhimin, et al. A brief analysis on characteristics and causes of selenium content in Dingliu village farmland, Sanyuan county, Shaanxi Province[J]. South China Agriculture, 2018, 12(18):190-191.
- 梁东丽, 彭琴, 崔泽玮, 等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 374-380.
- LIANG Dongli, PENG Qin, CUI Zewei, et al. Progress on selenium bioavailability and influential factors in soil[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5):374-380.
- 满楠. 土壤中外源硒酸盐和亚硒酸盐的老化过程[D]. 西安:西北农林科技大学, 2013.
- MAN Nan. Aging process of exogenic selenate and selenite in soil[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2013.
- 徐争启, 倪师军, 张成江, 等. 四川省万源市土壤硒形态特征及影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(03): 1455-1458.
- XU Zhengqi, NI Shijun, ZHANG Chenjiang, et al. Analysis on Se state in soils and its influencing factors in Wanyuan of Sichuan province[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(03):1455-1458.
- 龚河阳, 李月芬, 汤洁, 等. 吉林省西部土壤硒含量、形态分布及影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(02): 177-184.
- GONG Heyang, LI Yuefen, YANG Jie, et al. Content, form distribution and influencing factors of soil selenium in western Jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2015, 37(02):177-184.
- 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):33-34.
- CHI Fengqin. Selenium in soil and the absorption, transformation of plant to it[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2001, (6):33-34.
- 刘敏, 张瑞瑞, 郑韵英, 等. 影响作物吸收硒的土肥因素研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(6):1100-1104.
- LIU Min, ZHANG Ruirui, ZHENG Yuning, et al. Edaphic and fertilizer factors influencing selenium uptake of crops: a review[J]. Soils, 2018, 50(6):1100-1104.
- 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 Chaoqiang, SHEN Jia, ZU Chaolong. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3):809-816.
- 赵燕, 栾文楼, 郭海全, 等. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 764-776.
- ZHAO Yan, LUAN Wenlou, GUO Haiquan, et al. Characteristics, causes and ecological environment health evaluation of Selenium-enriched soil in Gaocheng District of Shijiazhuang City, Hebei Province[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 764-776(in Chinese with English abstract).
- Rayman m P. Selenium and human health[J]. Lancet, 2012, 379(9822):1256-1268.
- Zawishlanski P T, Zavarin M. Nature and rates of selenium transformations: A laboratory study of kesterson reservoir soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3):791-800.
- ZHAO C, REN J, XUE C, et al. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. Plant and Soil, 2005, 277(1):197-206.
- Beladel B, Nedjimi B, Mansouri A, et al. Selenium content in wheat and estimation of the selenium daily intake in different regions of Algeria[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, 71(1):7-10.
- Lee S, Woodard H J, Doolittle J J. Selenium uptake response among selected wheat (Triticum aestivum) varieties and relationship with soil selenium fractions[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(6):823-832.
- Kikkert J, Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 65(3):458-465.
- WANG S, LIANG D, WANG D, et al. 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, 427-428:159-164.