

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1440

任蕊,张志敏,王晖,等. 陕西关中土壤富硒标准研究与探讨——以小麦为例[J]. 物探与化探, 2023, 47(5): 1354–1360. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1440>

Ren R, Zhang Z M, Wang H, et al. Exploring selenium enrichment criteria for soils in the Guanzhong area, Shaanxi Province: A case study of wheat[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1354–1360. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1440>

# 陕西关中土壤富硒标准研究与探讨 ——以小麦为例

任蕊<sup>1,2</sup>, 张志敏<sup>1,2</sup>, 王晖<sup>1,2</sup>, 陈继平<sup>1,2</sup>, 乔新星<sup>1,2</sup>, 梁东丽<sup>3</sup>

(1. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省健康地质研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 建立陕西省富硒小麦产地土壤硒阈值不仅关系到天然富硒小麦精益化、精细化、精确化生产, 更能够提高富硒土地利用效率, 促进陕西富硒产业发展。本文以 1: 25 万土地质量地球化学调查数据为基础, 依托陕西省近年来采集的 544 组土壤及其对应的小麦籽实样品硒含量数据, 基于关中地区表层土壤硒地球化学异常下限和小麦—土壤隶属函数结果, 提出以  $0.27 \times 10^{-6}$  作为陕西省富硒小麦产地土壤硒阈值。实证研究发现, 采用随机抽样得到的验证集的小麦富硒率达到 83.78%, 第三方检验的富硒率高达 87.14%, 以该阈值圈定的土地生产出的小麦能够满足中国营养学会规定的硒推荐摄入量 ( $60 \mu\text{g}/\text{d}$ ), 土地面积约为  $1\,500 \text{ km}^2$  (225 万亩), 比按  $0.3 \times 10^{-6}$  圈出的富硒土地增加了  $640 \text{ km}^2$  (96 万亩)。由此可见, 按照农作物种类有针对性界定富硒土壤界限值, 能够较大幅度地提高富硒土地利用效率, 促进富硒产业发展, 为制定陕西省富硒土壤标准提供科学依据。

**关键词:** 富硒土壤; 评价标准; 关中地区

**中图分类号:** X142; X825

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2023)05-1354-07

## 0 引言

硒是人体必需的微量营养元素<sup>[1-2]</sup>, 适量硒的摄入对人体具有抗氧化、促生长、延缓衰老、保护心血管及提高机体免疫能力等生理作用<sup>[3]</sup>; 硒的缺乏则会引起克山病、大骨节病等疾病<sup>[4-5]</sup>。人类主要通过食物链从土壤中获取硒<sup>[6-10]</sup>, 然而硒在地壳中的丰度仅为  $0.05 \times 10^{-6}$ , 世界上有 40 多个国家和地区缺硒<sup>[11]</sup>, 约 15% 的人口 (5~10 亿人) 面临缺硒问题<sup>[12-13]</sup>。我国有 51% 的地区存在不同程度的缺硒或少硒, 约 39%~61% 的人口日硒摄入量低于 WHO/FAO 的推荐标准 ( $55 \mu\text{g}/\text{d}$ )<sup>[14-15]</sup>, 缺硒已经成为影响国民健康的限制因子之一。

硒元素作用于人体生理的特性和富硒土壤的稀

缺性, 使得天然富硒农产品有着潜在的巨大消费需求和良好的开发前景。富硒土壤能生产出天然富硒农产品, 并通过食物链将硒元素安全、有效地转移到人体, 保证人体健康。习近平总书记明确指出要利用好硒这一宝贵资源, 把它转化为富硒产业。截至 2018 年底, 陕西省 1:25 万土地质量地球化学调查实现关中地区全覆盖, 调查面积  $3.95 \text{ 万 km}^2$ , 区内土壤基本呈碱性<sup>[16]</sup>, 按照中国地质调查局推荐的碱性富硒土壤标准下限  $0.3 \times 10^{-6}$ <sup>[17]</sup>, 协同《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 中规定的风险筛选值<sup>[18]</sup>, 共圈定富硒土地  $936.75 \text{ km}^2$  (140.51 万亩)。同时, 我们研究发现, 在土壤硒含量低于  $0.30 \times 10^{-6}$  的耕地上, 采集到的 206 件小麦籽实样品中, 有 119 件籽粒硒含量超过陕西省富硒食品标准 ( $0.05 \times 10^{-6}$ )<sup>[19]</sup>, 富硒达标

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2023-03-30

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目“秦巴山区健康地质调查与评价”(202201)、“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: 任蕊 (1984-), 女, 高级工程师, 主要从事农业地质调查与地球化学研究工作。Email: 877529793@qq.com

率为 56.80%;有 42 件籽粒硒含量超过富硒农产品标准( $0.10\times10^{-6}$ )<sup>[20]</sup>;说明对富硒土壤“一刀切”式的评价,势必会出现一定程度的误判和漏判。研究发现,不同植物对土壤硒的吸收转化能力有很大差异<sup>[21]</sup>,如农作物中的十字花科对土壤硒具有较强的吸收转化能力,其次是豆科、菊科等植物,禾本科的则相对较弱<sup>[22-23]</sup>。因此,在圈定富硒土壤时,应根据不同农作物规定相应的富硒土壤标准,以实现富硒农作物的精益化、精细化、精确化生产。

笔者在陕西关中地区 1:25 万土地质量地球化学调查表层土壤数据基础上,系统整理了该地区近 10 年采集的 544 组小麦籽粒硒含量数据及其根系土硒含量、pH 值数据,对如何界定小麦对应的富硒土壤标准进行了探讨。

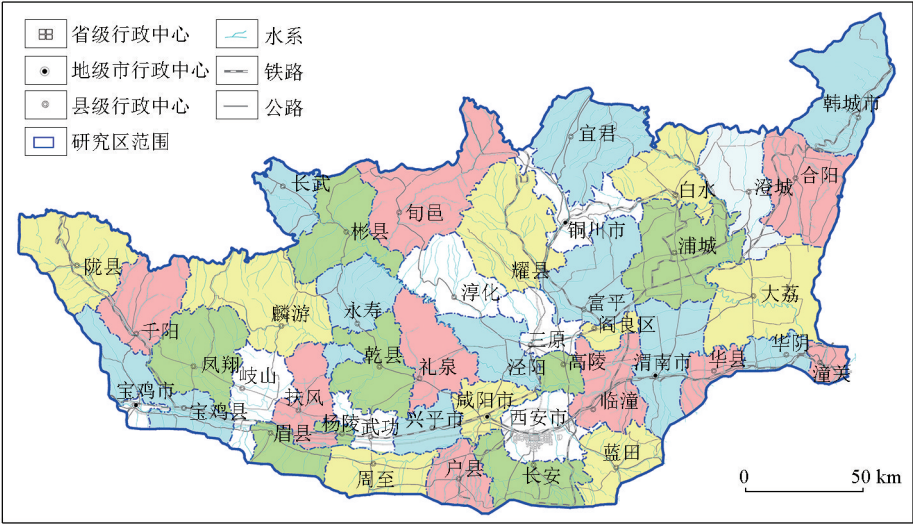


图 1 关中地区行政区划  
Fig. 1 Administrative division of Guanzhong region

1.2 样品采集与分析测试

1.2.1 样品采集

陕西省 1:25 万土地质量地球化学调查采用网格化方式开展土壤测量工作,表层(0~20 cm)土壤样品的采样密度为 1 个点/ $\text{km}^2$ ,每 4  $\text{km}^2$  组合分析一件样品,共获得表层土壤数据 10 114 个。将上述表层土壤硒元素含量数据作为区域统计研究的基础数据。

按照土壤硒含量不同区间采集土壤和对应小麦的籽粒样品各 544 组。小麦样品采用梅花点法进行多点采样,然后等量混匀组成 1 件混合样品,样品质量大于 500 g。与农作物样品采集相配套,同时采集相同点位的农作物根系土,样品质量大于 1 000 kg。

1.2.2 样品分析及质量控制

样品分析由自然资源部西安矿产资源检测中心承担。植物和土壤样品均分析全硒含量,分析方法

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,西起宝鸡,东至潼关,南接秦岭,北到陕北高原,包括西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、韩城市和杨凌示范区,面积为 39 500  $\text{km}^2$  (图 1)。受大陆季风气候影响,区内四季分明,日照充足,年平均气温为 12~13  $^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 550~750 mm。关中地区自古灌溉发达,物产丰富,是陕西省乃至全国重要的商品粮产区,根据《陕西统计年鉴》(2021 年)各市(区)粮食产量统计,关中地区小麦产量占到全省的 90.14%<sup>[24]</sup>。

为原子荧光光谱法(AFS)。另外,用 pH 计电极法(ISE)测定土壤样的 pH 值。测试过程中加入国家一级标准物质进行分析质量控制,准确度和精密度监控样合格率达 98% 以上。

2 结果与分析

2.1 关中地区表层土壤硒地球化学含量特征

关中地区表层土壤硒含量为  $(0.03\sim2.63)\times10^{-6}$ ,平均含量为  $0.17\times10^{-6}$ ,分别是陕西省表层土壤背景值( $0.115\times10^{-6}$ )<sup>[25]</sup>的 1.48 倍、全国表层土壤背景值( $0.29\times10^{-6}$ )的 0.59 倍。按照地球化学统计原理,采用累积频率法确定硒元素分级界线<sup>[26]</sup>,得到了关中地区表层土壤硒含量分级统计结果(表 1)。

根据表 1 确定 85 % 累积频率对应的  $0.22\times10^{-6}$  为关中地区表层土壤硒元素异常下限值,以此作为确定富硒土壤阈值的重要参考依据。

表 1 关中地区表层土壤硒含量分级统计  
Table 1 Classification statistics of selenium content in surface soil

计算方法	地球化学定义	区间划分	表层 Se 含量区间/ $10^{-6}$
累积频率法 ( $n=10\ 114$ )	低值区	<5%	$w(\text{Se})<0.11$
	低背景区	5%~<25%	$0.11\leq w(\text{Se})<0.14$
	背景区	25%~<75%	$0.14\leq w(\text{Se})<0.20$
	高背景区	75%~<85%	$0.20\leq w(\text{Se})<0.22$
	弱异常区	85%~<95%	$0.22\leq w(\text{Se})<0.28$
	异常区	95%~<98.5%	$0.28\leq w(\text{Se})<0.37$
	强异常区	$\geq 98.5\%$	$w(\text{Se})\geq 0.37$

表 2 小麦样品数据分组统计  
Table 2 Group statistics of wheat samples data

土壤分组	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组
根系土硒含量	$0.1\leq w(\text{Se})<0.2$	$0.2\leq w(\text{Se})<0.3$	$0.3\leq w(\text{Se})<0.4$	$0.4\leq w(\text{Se})<0.5$	$0.5\leq w(\text{Se})<0.6$	$w(\text{Se})>0.6$
样本量	32	174	139	78	46	66
根系土硒均值	0.156	0.249	0.346	0.441	0.537	0.808
小麦硒均值	0.079	0.086	0.133	0.207	0.255	0.488
小麦硒最小值	0.018	0.011	0.011	0.027	0.050	0.059
小麦硒最大值	0.339	0.590	0.525	0.472	0.856	1.395

在方差不齐的情况下,采用 Games-Howell 检验不同组间的统计差异,由于自变量(根系土硒含量)分为 6 组,因此因变量小麦硒含量均值共有 15 种不同的组间组合。除小麦组 1 和组 2,组 4 和组 5 的检验  $p$  值大于显著性水平 0.05,其余 13 种组合的检验  $p$  值均小于显著性水平 0.05,说明其余 13 种组合间的均值差异显著,检验结果见表 3。

表 3 小麦硒含量的多重比较检验  
Table 3 Multiple comparative tests of selenium content in wheat

根系土硒含量组别	小麦硒含量组别	显著性	根系土硒含量组别	小麦硒含量组别	显著性
1	2	0.996	4	1	0
	3	0.009		2	0
	4	0		3	0
	5	0		5	0.461
	6	0		6	0
2	1	0.996	5	1	0
	3	0		2	0
	4	0		3	0
	5	0		4	0.461
	6	0		6	0
3	1	0.009	6	1	0
	2	0		2	0
	4	0		3	0
	5	0		4	0
	6	0		5	0

2.2 小麦硒—土壤硒隶属函数模型

2.2.1 单因素方差分析

将调查区采集的 544 组小麦及根系土壤样品分析数据采用  $X\pm 3S$  方法剔除异常数据,保留 535 组数据进行单因素方差分析。将数据按根系土中硒含量分为 6 组,由表 2 可知:关中地区的小麦硒含量与土壤中的硒含量呈现出较好的对应性,即小麦籽粒中硒含量随着土壤硒含量的增加有增加的趋势。

为了说明土壤硒含量对小麦硒含量有显著影响,采用单因素方差分析法证明不同土壤组别的小麦硒含量间存在显著差异。首先使用方差齐性检验,检验  $p$  值为 0,小于显著性水平 0.05,说明方差不齐。

此外,由不同土壤中小麦硒含量均值折线图(图 2)也可以看出,除组 1 和组 2、组 4 和组 5 之间的均值差异不显著外,其余组两两之间的均值差异均较大。由单因素方差分析检验可知至少一组与其他一组存在显著性差异,则可认为关中地区土壤硒含量对小麦中硒含量有显著影响。

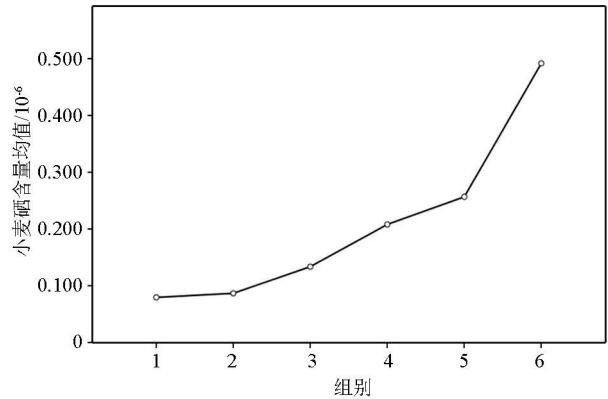


图 2 不同土壤中小麦硒含量均值折线  
Fig. 2 Broken line graph of wheat selenium content in different soils

2.2.2 土壤—小麦硒含量相关性分析

应用双变量相关分析检验指标间的相关性,结果显示:土壤硒含量和小麦中硒含量的相关系数为 0.750,所以,关中地区的小麦籽粒中的硒含量与土

壤中的硒含量呈现出显著的线性相关性。

2.2.3 土壤硒临界值的确定

对 535 组小麦及根系土壤样品硒数据,使用随机抽样程序,随机选取 59 组样本作为验证集,应用 476 组样本数据建立回归模型。由前述相关分析可知,小麦中的硒含量与土壤中的硒含量呈现出显著的线性相关性,因此对其建立一元线性回归模型,回归方程如下:

$$Y = 0.624X - 0.071,$$

其中: $X$  表示土壤硒含量; $Y$  表示小麦硒含量。

检验可决系数  $R^2$  值为 0.552,说明土壤硒含量和小麦硒含量之间是正比关系,而且极显著,其相关性见图 3。

根据此回归方程,当  $Y$  (小麦籽粒硒含量) 为  $0.10 \times 10^{-6}$  时,可确定对应  $X$  (土壤硒含量) 为  $0.27 \times 10^{-6}$ 。

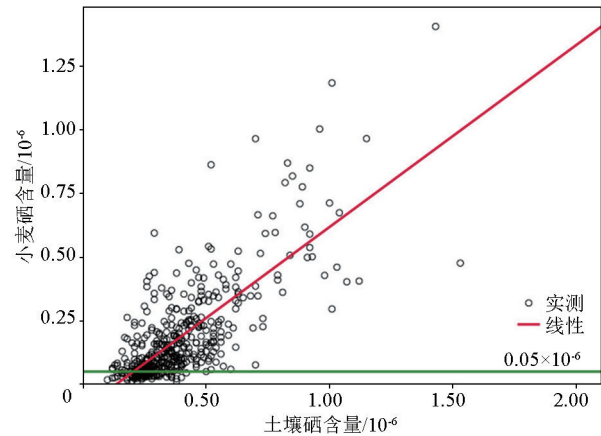


图 3 土壤—小麦硒含量相关性

Fig 3 Correlation map of soil-wheat selenium content

2.3 富硒土壤分级指标的确定

根据富硒小麦标准下限值  $0.10 \times 10^{-6}$ , 计算出对应的土壤硒含量  $0.27 \times 10^{-6}$ , 高出关中表层土壤硒元素地球化学异常下限值  $0.22 \times 10^{-6}$ , 确定小麦产地富硒土壤的下限值为  $0.27 \times 10^{-6}$ 。

由于我国在《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2012) 中取消了食品中硒的限量规定,因此,不设小麦产地富硒土壤的上限值。

2018 年,我国推出了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),旨在对农用地进行分类管理,以保障农产品质量安全。鉴于此,小麦产地富硒土壤标准还对土壤中镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍和锌共 8 种元素含量作了要求,见表 4。

表 4 陕西小麦产地富硒土壤分级指标  
Table 4 Grading index of selenium-rich soil in wheat production area of Shaanxi

指标要求	土壤硒含量/ $10^{-6}$	土壤环境质量
富硒	$w(\text{Se}) \geq 0.27$	镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍和锌元素含量低于 GB 15618—2018 标准中农用地土壤污染风险筛选值

2.4 实证研究

2.4.1 验证集检验

在建立回归模型之前,先使用随机抽样程序,随机选取 59 组样本作为验证集(样本分布位置见图 4),对模型的富硒率进行检验,其中根系土壤硒含量大于(等于)临界值  $0.27 \times 10^{-6}$  的 37 件小麦样品中,31 件小麦样品硒含量高于富硒标准下限值  $0.10$

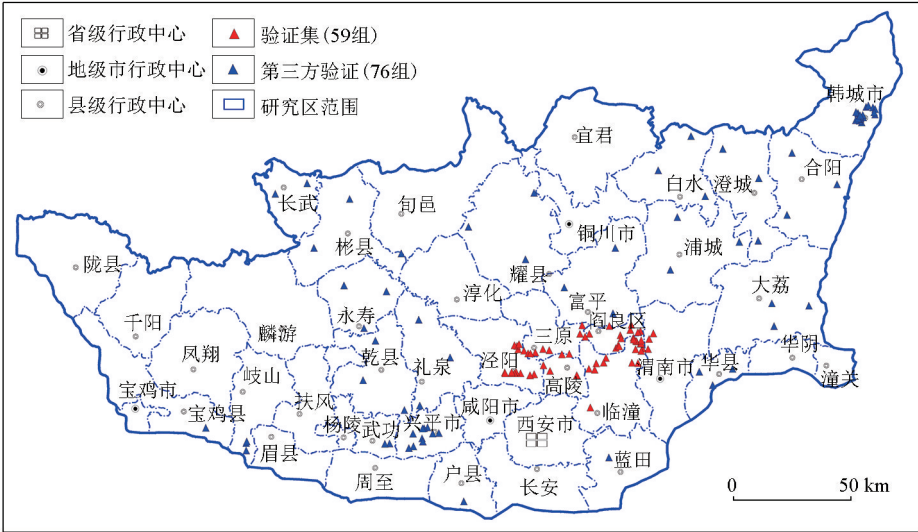


图 4 验证样本分布位置示意

Fig. 4 Distribution map of verificaton samples

$\times 10^{-6}$ ,小麦富硒率达 83.78 %。

### 2.4.2 第三方检验

从西北农林科技大学收集到 76 组小麦及其根系土样品(分布位置见图 4)测试数据(统计结果见表 5),对模型的富硒率进行检验,其中根系土硒含量大于(等于)临界值  $0.27 \times 10^{-6}$  的 69 组小麦样品中,61 组小麦样品硒含量高于富硒标准  $0.10 \times 10^{-6}$ ,样品中富硒率达 87.14 %。

表 5 小麦样品数据统计表( $n=76$ )

Table 5 Statistics of wheat sample data( $n=76$ )

统计量	小麦籽粒硒/ $10^{-6}$	根系土硒/ $10^{-6}$	土壤 pH
最小值	0.014	0.102	7.670
最大值	0.165	1.674	8.670
中位数	0.053	0.754	8.185
平均值	0.056	0.781	8.163
标准差	0.031	0.390	0.214

## 3 讨论

大量研究表明,土壤酸碱度对土壤—作物体系中硒的迁移转化特别是有效性起着重要作用。在酸性和中性土壤中,硒多以亚硒酸盐形式存在,与铁铝等形成难溶的氧化物或水合氧化物,不易被植物吸收利用;在碱性土壤中,硒多以硒酸盐形式存在,水溶性较高,容易被植物吸收利用<sup>[27-28]</sup>,且在一定程度上硒有效性随着 pH 的升高而增高<sup>[29]</sup>。鉴于陕西省 90 % 的小麦产地位于关中平原和渭北旱塬地区,多为石灰性土壤( $\text{pH} \geq 7.5$ ),故在确定富硒土壤划定指标时,不考虑地貌景观、土壤理化性质等因素,最终仅采用土地硒含量作为划定指标。

实际应用方面,根据中国居民膳食指南<sup>[30]</sup>,我国居民每人每日应摄入的谷物在 250~400 g,谷物硒约占日均硒摄入量的 1/4,按照陕西省富硒小麦标准下限值  $0.10 \times 10^{-6}$ ,对应的居民日均硒摄入量在 100~160  $\mu\text{g}/\text{d}$ ,满足中国营养学会规定的推荐摄入量(60  $\mu\text{g}/\text{d}$ )。因此本次富硒土壤划定工作选用  $0.10 \times 10^{-6}$  作为富硒小麦的下限值。

## 4 结论

农产品市场是开放型完全竞争市场,农产品产量大、可替代性高,因同类农产品上市时间无法拉开距离,因此其市场风险可想而知。富硒农产品自身具有无可替代的属性,加之市场需求逐渐走高,与普通农产品差异较大,因此其市场供求风险相对较小,

且有着较大的市场需求空间。同时,伴随着中国老龄化社会的不断发展,人民生活水平的不断提高,健康养生产品更加受到青睐,日益增长的市场需求为富硒农业发展奠定了坚实的基础。

根据本文提出的富硒小麦产地土壤硒含量阈值  $0.27 \times 10^{-6}$ ,结合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的风险筛选值,在关中地区共圈定富硒土地 1 500  $\text{km}^2$ (225 万亩),该面积比之按  $0.3 \times 10^{-6}$  圈出的富硒土地增加了 640  $\text{km}^2$ (96 万亩)。由此可见,按照农作物种类有针对性界定富硒土壤界限值,能够较大幅度地提高富硒土地利用效率,促进富硒产业发展。

依据陕西省富硒农作物种植示范基地实测数据<sup>[31]</sup>:普通面粉价格 2.5 元/斤,富硒面粉参考价格 4.5 元/斤,增收 2 元/斤。以亩产 800 斤、出粉率 60%、种植成本增加 160 元/亩计算,每亩预计增收  $2 \times 800 \times 0.6 - 160 = 800$  元。在圈定的富硒小麦产地上种植 1 万亩小麦,将比普通小麦增收约 800 万元,因此,该标准如果推广到全省,并形成市场认可的陕西富硒小麦品牌,获得的产值将大幅度地增加陕西农业和农民收入,助力健康陕西行动和乡村振兴战略。

## 参考文献(References):

[1] Zhai H,Xue M Y,Du Z K,et al. Leaching behaviors and chemical fraction distribution of exogenous selenium in three agricultural soils through simulated rainfall [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2019,173:393-400.

[2] Zhou F,Yang W X,Wang M K,et al. Effects of selenium application on Se content and speciation in lentinula edodes [J]. Food Chemistry,2018,265:182-188.

[3] Rayman M P. Selenium and human health [J]. Lancet,2012,379:1256-1268.

[4] Rayman M P. The importance of selenium to human health [J]. Lancet,2000,356:233-241.

[5] Altekin E,Coker C,Sisman A R,et al. The relationship between trace elements and cardiac markers in acute coronary syndromes [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology,2005,18:235-242.

[6] Combs G F J. Selenium in global food system [J]. British Journal of Nutrition,2001,85:517-547.

[7] Hawkesford M J,Zhao F J. Strategies for increasing the selenium content of wheat [J]. Journal of Cereal Science,2007,46(3):282-292.

[8] Broadley M R,White P J,Bryson R J,et al. Biofortification of UK food crops with selenium [J]. Proceedings of the Nutrition Society,2006,65:169-181.

[9] Miguel N A,Carmen C V. Selenium in food and the human body:A review [J]. Science of the Total Environment,2008,400:115-141.

[10] Ros G H,Rotterdam A M D,Bussink D W,et al. Selenium fertiliza-

tion strategies for bio-fortification of food: An agro-ecosystem approach [J]. *Plant and Soil*, 2016, 404(1/2): 99–112.

[11] Xu Z C, Shao H F, Li S, et al. Relationships between the selenium content in flue-cured tobacco leaves and the selenium content in soil in Enshi, China tobacco-growing area [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44: 1563–1568.

[12] Jones G D, Droz B, Greve P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2017, 114: 2848–2853.

[13] Tan L C, Nancharaiya Y V, van Hullebusch E D, et al. Selenium: Environmental significance, pollution, and biological treatment technologies [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34: 886–907.

[14] Dinh Q T, Cui Z W, 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.

[15] Ge K, Yang G. The epidemiology of selenium deficiency in the etiology of endemic diseases in China [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1998, 57(S): 259–263.

[16] 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): 195–201.

Ren R, Wang M X, Chen J P, et al. Distribution of soil selenium in Guanzhong Area and its influencing factors [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 195–201.

[17] 中国地质调查局. DD2019–10 天然富硒土地划定与标识(试行) [S/OL]. [https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201911/t20191121\\_497935.html](https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201911/t20191121_497935.html)

China Geological Survey. DD2019–10 Delimitation and logo for natural selenium-enriched land (Trial) [S/OL]. [https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201911/t20191121\\_497935.html](https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201911/t20191121_497935.html)

[18] 中华人民共和国生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].

[19] 陕西省安康市人民政府. DB61/T 566—2018 富硒含硒食品与相关产品硒含量标准[S].

Ankang Municipal People's Government. DB61/T 566—2018 Standard for selenium content in selenium-enriched/selenium-containing foods and related products [S].

[20] 中华全国供销合作总社. GH/T 1135—2017 富硒农产品[S].

All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives. GH/T 1135—2017 Selenium-enriched agricultural products [S].

[21] Terry N, Zayed A M, de Souza M P, et al. Selenium in higher plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 2000, 51: 401–432.

[22] Wiesner-Reinhold M, Schreiner M, Baldermann S, et al. Mechanisms of selenium enrichment and measurement in brassicaceous vegetables and their application to human health [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1365.

[23] El Mehdaoui A F, Reynolds R J B, Prins C N, et al. Analysis of selenium accumulation, speciation and tolerance of potential selenium hyperaccumulator *Symphytotrichum ericoides* [J]. *Physiol Plant*, 2014, 152: 70–83.

[24] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

Shaanxi Bureau of Statistics. Shaanxi statistical yearbook—2021 [J]. Beijing: China Statistics Press, 2021.

[25] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[26] 贾十军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. *资源调查与环境*, 2013, 34(2): 133–137.

Jia S J. Evaluation standards and genesis of selenium-rich soil in Anhui Province [J]. *Resources Survey & Environment*, 2013, 34(2): 133–137.

[27] Peng Q, Wang M K, Cui Z W, et al. Assessment of bioavailability of selenium in different plant-soil systems by diffusive gradients in thin-films (DGT) [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 637.

[28] Winkel L H E, Johnson C A, Lenz M, et al. Environmental selenium research: From microscopic processes to global understanding [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 571–579.

[29] Winkel L H E, Vriens B, Bañuelos G S, et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review [J]. *Nutrients*, 2015, 7(6): 4199–4239.

[30] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 科学研究报告(2021) [R]. 2021.

Chinese Nutrition Society. Scientific research report on dietary guidelines for Chinese residents (2021) [R]. 2021.

[31] 乔新星, 任蕊, 姬华伟, 等. 陕西省富硒农作物种植示范基地建设报告 [R]. 陕西省水工环地质调查中心, 2022.

Qiao X X, Ren R, Ji H W, et al. Report on the construction of selenium-rich crop planting demonstration base [R]. Shaanxi Hydraulic Engineering and Environment Geological Survey Center, 2022.

Exploring selenium enrichment criteria for soils in the Guanzhong area, Shaanxi Province: A case study of wheat

REN Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-Min<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Ji-Ping<sup>1,2</sup>, QIAO Xin-Xing<sup>1,2</sup>, LIANG Dong-Li<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, China; 2. Shaanxi Health Geology Research Center, Xi'an 710054, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Establishing the selenium threshold for soils in selenium-rich wheat producing areas in Shaanxi Province is closely related to the lean, fine-scale, and accurate production of natural selenium-rich wheat. Moreover, it can improve the utilization efficiency of selenium-rich land, thus promoting the development of selenium-rich industry in this province. This study determined the selenium thresh-

old of soils in selenium-rich wheat producing areas in Shaanxi at  $0.27\times10^{-6}$  based on the 1:250 000 land quality geochemical survey data, the selenium concentration data of 544 sets of soil samples and corresponding wheat seed samples collected in Shaanxi in recent years, the lower limit of geochemical anomalies of selenium in topsoil in the Guanzhong area, and the wheat-soil function. The empirical study showed that the validation set formed via random sampling yielded a selenium accumulation rate of 83.78%, while the third-party inspection yielded a selenium accumulation rate of 87.14%. The wheat produced from selenium-rich land delineated based on the selenium threshold  $0.27\times10^{-6}$  satisfies the recommended nutrient intake of selenium (60  $\mu\text{g}/\text{d}$ ) stipulated by the Chinese Nutrition Society. Furthermore, the area of the selenium-rich land is about 1 500  $\text{km}^2$ (2 250 000 mu), increasing by 640  $\text{km}^2$ (960 000 mu) compared with that of land delineated based on a selenium threshold of  $0.3\times10^{-6}$ . Therefore, determining selenium-rich soil threshold by crop species can greatly improve the utilization efficiency of selenium-rich land, thus promoting the development of the selenium-rich industry. This study provides a scientific basis for setting selenium enrichment criteria for soils in Shaanxi Province.

**Key words:** selenium-rich soil; evaluation criterion; Guanzhong area

( 本文编辑:蒋实)