

doi: 10.11720/wtyht.2023.2412

王志强,杨建锋,石天池.宁夏石嘴山地区富硒土壤及其利用前景[J].物探与化探,2023,47(1):228-237. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2412>

Wang Z Q, Yang J F, Shi T C. A preliminary study of Se-rich soil in the Shizuishan area, Ningxia and its potential for application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 228-237. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2412>

宁夏石嘴山地区富硒土壤及其利用前景

王志强, 杨建锋, 石天池

(宁夏回族自治区地球物理地球化学调查院, 宁夏 银川 750004)

摘要: 通过对宁夏石嘴山地区 8 835 件土壤样品及 240 套农作物—根系土样品 Se 分布及其相关调查数据的统计分析,总结了当地富硒土壤的元素地球化学特征,探讨了其开发利用前景及相关问题。结果表明:①圈定的富硒土地总面积约 705 km²(根据宁夏地方标准,土壤 Se 含量 $\geq 0.222 \times 10^{-6}$ 为富硒土壤),土壤 Se 平均含量与全国平均值相当,而土壤有效 Se 含量相对较高,在土壤全 Se 中占比 5%左右;②富硒土壤 pH 大于 7.5,有机质含量小于 10.26%,无重金属污染,Se 与有机质、B、Mn、Mo、Cu、Zn 呈显著正相关性,与 pH 呈负相关性;③土壤有效 Se 与全 Se 的相关系数为 0.39,与有机质、阳离子交换量、N 的相关系数为 0.33~0.5;④富硒土壤中抽检到富硒小麦等 10 类富硒农产品,其中小麦吸收土壤 Se 的能力最强,平均生物富集系数为 0.174;⑤本区特有的富硒土壤资源具有极高开发利用价值,应加强特色富硒作物(小麦、稻米、枸杞、葡萄等)的研发力度及相关富硒标准的研制,通过综合研究,科学规划以促进当地富硒土地资源的合理开发利用。

关键词: 富硒土壤;有效硒;元素地球化学特征;利用前景;石嘴山;宁夏

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)01-0228-10

0 引言

硒(Se)被喻为“主宰生命的微量元素”,具有保护心脏、抗氧化、防衰老、增强人体免疫力、解毒、防癌、抗癌等多种功用^[1-5],研究土壤 Se 分布及其地球化学特征是近期国内应用地球化学领域的一大热点^[6-13]。富硒土壤作为一种特殊的自然资源,深受各地重视,围绕富硒土壤及其开发利用的环境地球化学评价更是中国地质调查局近期主导的一大民心工程,国内许多地区都有这方面的研究成果或文献报道^[13-19]。研究富硒土壤一方面可为了解我国土壤 Se 分布规律提供思路或依据,另一方面也可为科学利用珍贵的富硒土地资源提供技术支撑。中国地质调查局在近 20 年来涌现出丰富的富硒土壤研究及开发利用成果,是缘于 21 世纪初开展的多目标

区域地球化学调查及其后续的土地质量地球化学评价等工作,作为这一重大工程的组成部分,银川平原也完成了多目标区域地球化学调查,并通过对重点地区的土地质量生态地球化学评价在石嘴山地区发现了大片富硒土壤。与我国南方酸性环境下的富硒土壤有所不同,新发现的富硒土壤产于较典型的碱性环境,是黄河流域中上游富硒土壤的一个代表。之前也有过宁夏境内富硒土壤的报道^[13],但甚少涉及富硒土壤对农作物的影响。在对宁夏石嘴山地区新获得的土壤 Se 等元素地球化学调查数据、农产品 Se 等微量元素分布数据进行系统分析整理的基础上,本文拟对当地富硒土壤元素地球化学特征及其开发利用前景等做进一步探讨,期望能为有效开发利用当地的富硒土地资源提供依据,也为外界了解银川平原的土壤富 Se 状况、丰富人们对黄河中上游碱性环境富硒土壤的生态地球化学认识等提供新的

收稿日期: 2021-07-26; **修回日期:** 2022-08-11

基金项目: 宁夏回族自治区地质勘查基金项目“石嘴山地区富硒土地质量调查评价”(HZ20170040-Ⅲ);宁夏回族自治区重点研发计划项目“宁夏石嘴山地区土壤硒元素生态效应研究与应用”(2021BG03015)

第一作者: 王志强(1968-),男,高级工程师,1989年毕业于成都地质学院,主要从事地球化学调查、矿产勘查、土地质量调查等工作。Email: nxw12@163.com

通讯作者: 杨建锋(1989-),男,工程师,毕业于成都地质学院,主要从事地球化学调查、矿产勘查、土地质量调查等工作。Email: 623552149@qq.com

线索与借鉴。

1 区域背景及主要研究方法

1.1 区域背景

研究区位于银川平原北部,地处黄河中上游,隶属宁夏回族自治区石嘴山市,被誉为“塞上煤城”。石嘴山市还是宁夏唯一的荣获“国家森林城市”称号的地级市,总面积 7 200 km²,地势西高东低,海拔在 1 090~3 476 m 之间,按地形地貌类型,从西向东依次分布有贺兰山东麓山前洪积扇、洪冲积平原、黄河冲积平原和鄂尔多斯台地。研究区属典型的中温带大陆性干旱气候,降水少,蒸发强,年平均降水量在 167.5~188.8 mm,年蒸发量在 1 708.7~2 512.6 mm,蒸发量是降水量的 10~14 倍。地表水体主要有黄河以及引黄灌渠及排水沟。境内有主干渠 7 条:唐徕渠、惠农渠、西干渠、昌涝渠、第二农场渠、官泗渠、工农大渠,引水量历年约 10 亿 m³,灌溉面积约 120 万亩,是全市主要农业灌溉水源。农业灌溉以引黄自流灌溉为主,局部辅以地下水灌溉。全市农作物种植面积约 164 万亩,粮地约 100 万亩,稻田约 23 万亩。

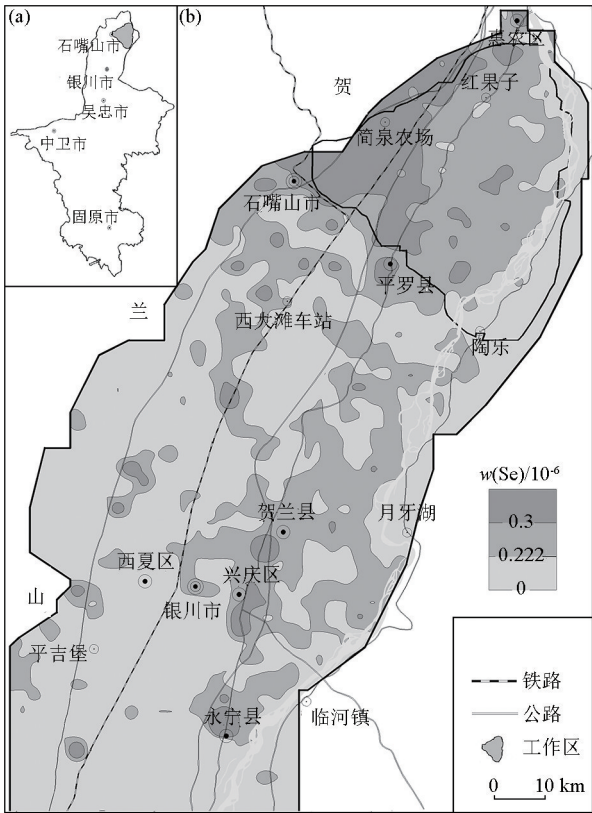


图 1 研究区区域位置(a)及土壤富硒区分布(b)

Fig. 1 Regional location (a) and distribution of Se-riched soil (b) in the study areas

2004 年以来,先后在研究区及其附近完成了 1:250 000 多目标区域地球化学调查、“银川平原环境中 Se 对人和动物健康的影响”等项目,特别是“富硒土地质量调查评价(1:50 000)”项目的实施,系统取得了大量的当地富硒土壤元素分布基础数据,为本次研究提供了翔实的资料。新增的 1:50 000 加密调查占地 1 050 km²,分布于黄河与贺兰山之间,其成土母质类型以灌水淤积为主,主要的土壤类型有灌淤土、潮土、盐土、碱土、灰钙土和风沙土等,其中灌淤土分布面积最大,达到 422 km²,占调查区面积的 40.2%,其次为盐土 265 km²,占调查区面积的 25.25%。通过多年的各类地球化学调查工作,已在石嘴山市境内圈定了约 705 km² 的富硒土地(如图 1 所示)。相关区域内的大宗农产品包含水稻、小麦、玉米、蔬菜等。

1.2 主要研究方法

土壤采样:按照 1:50 000 工作比例尺要求进行,实行近似网格化采样,采样网格为 333 m×333 m,基本采样密度为 9 个样/km²。按“十字型”采集 5 个子样,等份组合成一个混合样,每个子样点的采样部位、样品质量、采样深度(0~20 cm)均一致。样品介质为耕层土壤,采样粒径-20 目,样品质量≥400 g。每个样品采完后,清除干净采样工具上的泥土,再进行下一个样品的采集。采样时间选择在农作物收获后,主要在农用地中采集。

植物采样:植物样品采集于农作物收获盛期,一般集中在 7~10 月份。采样类型主要为小麦、玉米、水稻籽粒、枸杞、西红柿、芹菜、韭葱、葡萄、苜蓿、芥蓝等。通常在采样点地块内采用棋盘法进行多点取样,然后等量混匀组成一个样品。大型果实采集 3~10 个以上的植株(即分点样),小型果实采集 10~20 个以上的植株。采集量以满足实验室分析要求为准,一般是谷物类为 0.3~1 kg/样(干重),水果、蔬菜类为 1~2 kg/样(鲜重)。

植物根系土采样:在与植物样品对应的植株根部采集,农作物根系土样品采集深度为 0~20 cm,样品粒径-20 目,样品质量≥400 g。

样品分析测试:土壤样品测试 Se、B、Mo、F、Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As、Hg、pH、有机质、CEC、有效 Se、有效 B 等指标,其中电位法测定土壤 pH 值,其余元素含量分析以电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为基本手段,辅以原子荧光光谱法(AFS)、交流电弧—发射光谱法(ES)、离子选择性电极法(ISE)、高频燃烧红外吸收法(HFIR)、容量法(VOL)、催化

分光光度法 (COL) 等。土壤 Se 及其有效 Se 均采用 AFS 分析,有效 Se 采用磷酸二氢钠标准液浸取。植物样品测试 Se 等 10 个指标,其测试方法及其元素含量检出限见表 1。土壤样品与植物样品均按照规范要求进行处理,制成清液后再上机测试。整个样品分析测试过程采用加标样、密码样、随机抽查等方式控制其分析质量。利用原始样品与对应重复样品分析数据之间的相对误差 D_r 进行测试分析质量评估: $D_r = |A_1 - A_2| / [1/2 \times (A_1 + A_2)] \times 100$, D_r 为重复样相对双差, A_1 为原始样检测结果, A_2 为重复样检测结果。要求有效态 $D_r \leq 50$ 为合格,合格率须达到 85%。共采集有效态重复样 192 件,经计算重复样合格率为 90%,符合规范要求。

表 1 植物样品分析及检出限

Table 1 Elements detected line and its testing methods for some phyto-samples			10 ⁻⁶		
检测项目	检测方法	检出限	检出限要求		
			大米、 稻谷	脱水 蔬菜	
Pb	石墨炉原子吸收光谱法	0.005	0.1	0.1	
Cd	石墨炉原子吸收光谱法	0.003	0.10	0.03	
Hg	原子荧光光谱法	0.0001	0.010	0.005	
As	电感耦合等离子体质谱法	0.005	0.3	0.3	
Cu	火焰原子吸收光谱法	0.02	1.0	1.0	
Zn	火焰原子吸收光谱法	0.4	1.0	1.0	
Ni	石墨炉原子吸收光谱法	0.004	0.1	0.1	
Cr	石墨炉原子吸收光谱法	0.01	0.5	0.2	
F	离子色谱法	0.05	1.0	1.0	
Se	氢化物原子荧光光谱法	0.005	0.005	0.005	

表 2 石嘴山土壤 Se 等元素基本地球化学参数统计

Table 2 Statistics of Se and other elemental geochemical distributive parameters in soil in Shizuishan areas											
参数	Se	Mn	Cu	Zn	Cd	Hg	As	Pb	Cr	有机质	pH
最小值	0.018	4.69	7.44	0.91	0.03	0	2.90	11.40	2.86	0.06	6.88
最大值	1.800	1500.00	49.08	138.60	0.58	0.65	19.77	50.00	93.21	10.26	10.40
平均值	0.260	597.60	22.54	65.56	0.19	0.03	11.98	21.57	60.69	1.50	8.61
标准差	0.120	124.80	5.00	14.43	0.06	0.02	3.04	3.47	11.92	0.68	0.31
变异系数	0.46	0.21	0.22	0.22	0.31	0.73	0.25	0.16	0.20	0.46	0.04

注:有机质含量单位为%,pH 无量纲,其余元素含量单位为 10⁻⁶。

对研究区富硒土壤有关元素含量进行相关性统计分析(表 3),证实土壤中 Se 与 SOM、B、Mo 等之间存在显著正相关性,在参与统计的 8 835 个土壤样品中,Se 与 SOM 的相关系数 $r=0.643$,Se 与 B 的相关系数 $r=0.642$,Se 与 Mo 的相关系数 $r=0.695$,均为显著正相关关系,但 Se 与 pH 的相关系数 $r=-0.376$,说明 Se 与 pH 之间存在较显著的负相关性(或弱负相关性)。此外,还发现当地土壤 Se 与 Zn、Pb、Cr、N 等元素之间也存在显著正相关关系,其相关系数 r 全部大于 0.5,土壤 Se 与 Cd、Cu、Mn 等元素之间存在较显著的正相关关系,其相关系数 r 介

2 样品分析结果与讨论

2.1 区域土壤 Se 分布

石嘴山地区土壤 Se 含量介于 $(0.018 \sim 1.8) \times 10^{-6}$,平均含量为 0.26×10^{-6} ,与全国土壤 Se 均值相当,对应的土壤 pH 值介于 7.5~10.4,属于典型的碱性土壤环境;土壤有机质(SOM)含量普遍不高,介于 0.06%~10.26%,平均含量 1.5%;其他元素的统计结果如表 2 所示。按照宁夏的地方富硒土壤标准^[20],土壤 Se 含量 $\geq 0.222 \times 10^{-6}$ 即可划分为富硒土壤,以此在研究区共圈定富硒土壤 705 km²,分布范围如图 2 所示。渠口—头闸镇—灵沙—礼和—一线之西北地区为当地富硒土壤的大片分布区,陶乐镇—红崖子—一线之东南为主要的贫硒土壤分布区(其土壤 Se 含量普遍小于 0.116×10^{-6})。富硒土壤主要由灌淤土、灰钙土加少量的盐土、潮土等组成,形成富硒土壤的成土母质为当地的黑色岩系风化所致。在新圈出的富硒土壤中,有一部分为耕地,不同地段富硒区的土壤 Se 含量及富硒耕地占比也不尽相同,例如大武口区土壤 Se 平均含量为 0.372×10^{-6} ,其富硒耕地占比(耕地占整个富硒土壤区的比例,余同)为 26%,而惠农区土壤 Se 平均含量为 0.332×10^{-6} ,其富硒耕地占比为 29%。富硒土地中的富硒耕地无疑具有更高的开发利用价值。

于 0.37~0.45 之间。上述相关性统计分析结果说明,石嘴山地区的富硒土壤中聚集了一定量 Se 的同时,聚集了相当数量的 B、Mo、Mn、Cu、Zn 等植物生长必需的矿质元素或有益微量元素,还可能同步富集了少量 Pb、Cr、Cd 等重金属元素,因其土壤环境中包含 Pb、Cr、Cd 在内的毒害重金属总体未超标,在开发利用富硒土地时可不考虑土壤重金属污染问题。关于富硒土壤(或土地)的成因及其土壤 Se 富集的地球化学控制因素一直是富硒土地利用潜力评价所不可回避的现实问题,前人已在富硒土壤成因及其影响因素研究方面留下了大量可查的文

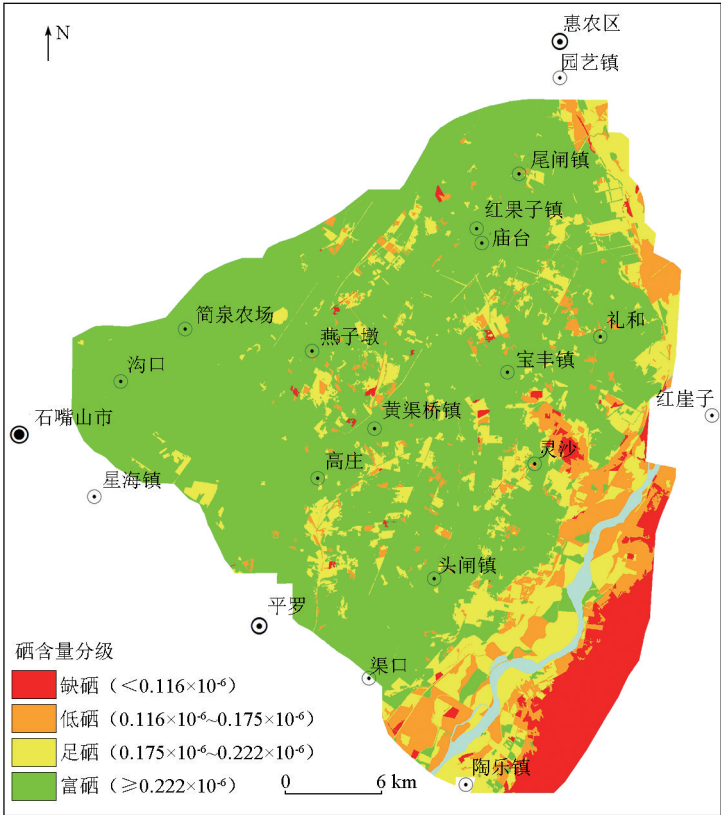


图 2 石嘴山地区富硒土壤分布状况

Fig. 2 Distribution of Se-rich soil in the Shizuishan areas

表 3 土壤硒与各土壤理化指标之间的相关关系 (n=8835)

Table 3 Table of correlation between soil selenium and soil physical and chemical indexes (n=8835)

指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数
Li	0. 803	N	0. 514	Ge	0. 256
Mo	0. 693	F	0. 505	MgO	0. 148
B	0. 648	阳离子交换量	0. 500	S	0. 119
有机质	0. 642	Mn	0. 444	As	0. 069
TFe ₂ O ₃	0. 622	K ₂ O	0. 434	全盐量	-0. 030
Pb	0. 582	Cd	0. 398	CaO	-0. 035
Zn	0. 56	P	0. 329	pH	-0. 382
Cr	0. 529	I	0. 290		
Co	0. 516	Hg	0. 275		

献^[21-28],基本证实了在富硒区土壤中 SOM 和 N 等养分元素同 Se 之间多存在正相关性,pH 与 Se 之间可能存在负相关性,土壤矿质元素、重金属元素和 Se 之间的相关性是受具体的成土母质、Se 物质来源与迁移途径等控制。在石嘴山地区的富硒土壤中,Se 除了与 SOM、N 等养分元素呈显著正相关性、与 pH 呈较显著负相关性外,还与多种矿质元素、有益微量元素、重金属等呈(较)显著正相关性,这在之前报道的类似文献中并不常见,推测石嘴山富硒土壤的形成与黄河中上游局部存在特殊的富硒地球化学背景有关。

石嘴山地区的土壤有效 Se 含量普遍相对较高,介于(0.001 9~0.029 3)×10⁻⁶,其中介于(0.008 ~

0.02)×10⁻⁶ 的有效 Se 占比约为 70%,平均含量为 0.012 9×10⁻⁶;土壤 Se 有效度(土壤有效 Se/全 Se 的百分数)介于 0.62%~11.48%,均值为 5.05%,这部分有效 Se 相对容易为农作物所吸收。也就是说,在目前测试土壤有效 Se 的技术条件下,本地区(包括非富硒区)土壤 Se 中的有效 Se 占比为 5%左右,在国内名列前茅^[29]。

2.2 农作物根系土有效 Se 分布

土壤有效 Se 分布特征在富硒土地开发利用潜力评价中占据特殊位置,因为通常都认为植物主要吸收土壤中的有效 Se,植物根系土的有效 Se 分布自然也更令人关注^[30-32]。分析统计了当地 240 个代表性农作物根系土样品的有效 Se 含量,发现根系

土有效 Se 分布具有以下特征。

- 1)农作物根系土有效 Se 含量与正常土壤的有效 Se 分布特征基本一致,含量介于(0.001 9~0.027 5) $\times 10^{-6}$;农作物根系土 Se 有效度最大值为 6.98%,平均为 4.76%,与正常土壤 Se 有效度(5.05%)相近(表 4)。
- 2)土壤有效 Se 同全量 Se 之间呈现较显著的正相关性,相关系数 $r=0.39$,而有效 Se 同土壤 SOM、CEC、N 呈显著正相关性,相关系数 r 分别达到 0.50、0.334、0.535(如图 3 所示)。
- 3)不同农作物根系土的有效 Se 含量存在一定差异,种植区域的不同可能是影响因素之一,如枸杞

产地的土壤有效 Se 含量最高,一般为(0.007 2~0.026 1) $\times 10^{-6}$,平均达到 $0.015\ 8\times 10^{-6}$ (表 4),应与其种植区域的土壤 pH 值相对较高有关。

2.3 相关农作物 Se 分布特点

采集小麦、水稻样品各 30 件,在局部富硒耕地中检测到天然富硒稻籽 4 件、富硒小麦籽粒 10 件,由天然富硒稻籽与小麦籽粒的系统采样分析结果(表 5),可基本断定小麦籽粒吸收土壤 Se 的能力要强于水稻籽粒。由该表可以看出,稻籽的 Se 含量为(0.043~0.076) $\times 10^{-6}$,所对应土壤样品的 Se 介于(0.17~0.25) $\times 10^{-6}$,可见富硒稻籽样本所对应的土壤 Se 含量并非全部达到富硒土壤标准(足硒标准为

表 4 石嘴山地区主要农作物及其根系土 Se 分布特征对比
Table 4 Se distribution of main plant foods and its cultivated soil in the Shizuishan areas

作物	土壤 Se	土壤 Se 均值	土壤有效 Se	有效 Se 均值	有效度/%	作物 Se	作物 Se 均值	Se 生物富集系数	富硒作物样占比/%
玉米(40)	0.12~0.31	0.252	0.0024~0.0268	0.0140	5.56	0.013~0.041	0.0225	0.089	2.50
小麦(30)	0.10~0.48	0.261	0.0042~0.0178	0.0116	4.44	0.011~0.167	0.0453	0.174	33.33
稻籽(30)	0.10~0.28	0.182	0.0045~0.0221	0.0127	6.98	0.011~0.076	0.0288	0.158	13.33
葡萄(20)	0.17~0.42	0.272	0.0029~0.0196	0.0113	4.15	0.009~0.021	0.0152	0.056	40.00
枸杞(15)	0.17~0.48	0.289	0.0072~0.0261	0.0158	5.47	0.013~0.024	0.0160	0.055	40.00
苜蓿(15)	0.19~0.72	0.370	0.0053~0.0245	0.0136	3.68	0.010~0.024	0.0163	0.044	66.67
芹菜(15)	0.22~0.34	0.263	0.0099~0.0171	0.0129	4.91	0.014~0.040	0.0213	0.081	46.67
西红柿(15)	0.21~0.76	0.405	0.0019~0.0254	0.0116	2.86	0.008~0.020	0.0105	0.026	26.67
芥蓝(15)	0.08~0.41	0.246	0.0043~0.0275	0.0109	4.43	0.009~0.032	0.0180	0.073	33.33
韭葱(15)	0.18~0.28	0.254	0.0088~0.0212	0.0131	5.16	0.013~0.029	0.0181	0.071	46.67

注:Se 含量单位为 10^{-6} ;生物富集系数=作物 Se/土壤 Se;富硒作物样占比=富硒样品数/总抽检样品数;参考 GB/T 22499—2008 和 DB/T 1221—2016,玉米、小麦、稻籽等粮食作物富硒标准为籽粒 Se 大于 0.04×10^{-6} ,枸杞、葡萄、芹菜等果蔬作物富硒标准为食品 Se 大于 0.01×10^{-6} 。

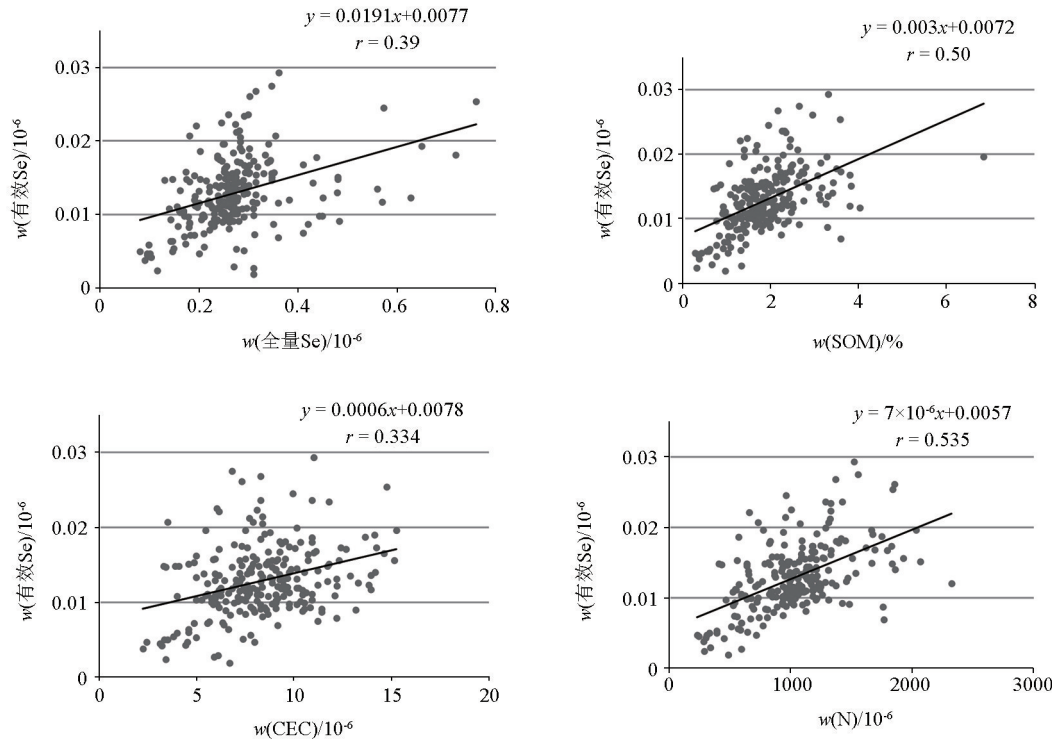


图 3 根系土壤有效 Se 与土壤全 Se、SOM、CEC、N 相关性统计分析结果

Fig. 3 Scatter plots of effective selenium content vs Se, SOM, CEC and N in root soil

表 5 石嘴山地区天然富硒粮食及其根系土采样分析结果

Table 5 Testing results of element content of some Se-riched foods and its soil samples in the Shizuishan areas

样号	粮食								根系土			
	Se	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Se	Se-B	pH	SOM
稻籽	0.076	0.0076	未检出	未检出	0.1870	未检出	52.1	25.1	0.24	0.0119	8.59	1.25
稻籽	0.050	0.0031	未检出	未检出	0.0689	未检出	53.2	17.4	0.25	0.0196	8.33	6.84
稻籽	0.044	0.0038	0.0034	未检出	0.0816	未检出	20.2	19.2	0.20	0.0116	7.98	1.31
稻籽	0.043	0.0022	未检出	未检出	0.0508	未检出	20.4	13.0	0.17	0.0103	8.17	1.06
小麦	0.167	0.0095	未检出	0.020	0.0214	未检出	6.52	20.8	0.24	0.0177	9.17	1.91
小麦	0.083	0.0172	0.0064	0.303	0.4570	0.2800	21.6	26.4	0.27	0.0132	8.56	2.40
小麦	0.074	0.0102	未检出	未检出	0.0179	0.0405	5.41	24.2	0.44	0.0178	8.41	3.49
小麦	0.073	0.0149	未检出	未检出	0.0120	未检出	5.54	20.2	0.48	0.0130	8.52	2.06
小麦	0.052	0.0111	未检出	未检出	0.0167	0.0429	6.40	21.0	0.27	0.0102	8.56	1.79
小麦	0.047	0.0119	未检出	未检出	0.0120	未检出	5.44	17.5	0.29	0.0131	8.41	2.28
小麦	0.045	0.0152	0.0171	0.0085	0.0509	0.0830	11.7	27.0	0.24	0.0119	8.47	2.06
小麦	0.044	0.0194	未检出	未检出	0.0295	0.0724	4.98	14.8	0.31	0.0073	8.72	1.03
小麦	0.042	0.0100	未检出	未检出	0.0166	0.0410	6.43	24.2	0.27	0.0110	8.52	1.97
小麦	0.040	0.0089	0.0082	未检出	0.0095	0.0501	7.11	17.8	0.35	0.0147	8.63	1.85

注:“Se-B”为土壤有效 Se,含量单位为 10^{-6} ,pH 无量纲,SOM(有机质)含量单位为%。目前国内富硒米、麦的标准是籽粒 Se 大于 0.04×10^{-6} ,参见 GB/T 22499—2008;表中所列小麦是为小麦籽粒,余同。

($0.175 \sim 0.222$) $\times 10^{-6}$);小麦籽粒的 Se 含量为 ($0.04 \sim 0.167$) $\times 10^{-6}$,所对应土壤样品的 Se 含量介于 ($0.24 \sim 0.48$) $\times 10^{-6}$,总体而言这批富硒小麦籽粒样品所对应的土壤 Se 含量全部达到了当地富硒土壤标准^[20](土壤 Se 含量 $\geq 0.222 \times 10^{-6}$)。根系土壤有效硒含量相差不大,但作物硒与土壤有效硒含量关系不明显。另外,富硒稻籽与小麦籽样品中,Cd、Hg、As、Pb、Cr 等毒害重金属的含量均不超标,表明当地所产的天然富硒稻籽与小麦不仅是营养食品,还属于绿色安全食品,这与当地富硒土壤中重金属含量均不超标是一致的,也更加证实了这些天然富硒食品的利用价值。

石嘴山富硒土壤调查中除了检测天然富硒稻籽、小麦等粮食样本外,还检测了枸杞、葡萄、芹菜、韭葱等果蔬类富硒食品,表 5 对比了当地最新检出的主要富硒作物有关样本的 Se 分布情况及其相关参数统计结果,从该表所列统计数据中不难看出:

1)富硒农作物大多产于富硒土壤中,表明土壤富硒是导致农作物富硒的物质基础;各类农作物根系土有效 Se 含量范围较宽(极值相差十几倍),但其均值却相差不大(介于 ($0.0109 \sim 0.0158$) $\times 10^{-6}$)。

2)不同农作物吸收土壤 Se 的能力是不同的,各类农作物吸收土壤 Se 的生物富集系数(植物 Se/土壤 Se 之比值,余同)平均值排序是小麦 > 水稻 > 玉米 > 芹菜 > 芥蓝 > 韭葱 > 葡萄 > 枸杞 > 苜蓿 > 西红柿,说明农作物籽粒的富硒能力明显高于果蔬类,其中稻籽与小麦吸收土壤 Se 的能力最强,作为富硒土壤所在地的主要农作物,这对于开发利用当地的富

硒土壤资源是很有利的。

3)抽检的农作物中,小麦籽粒的最高 Se 含量与平均 Se 含量都是最高的,进一步证实了小麦吸收土壤 Se 的能力最强,与其生物富集系数均值排在第一位是一致的。

4)富硒农作物样占比排在前三名的依次为苜蓿、芹菜、韭葱,其中芹菜与韭葱并列第二;在小麦、水稻、玉米这 3 类主要粮食作物中,其富硒样品占比排序也是小麦 > 水稻 > 玉米。本地区的主要粮食作物富硒样品占比普遍低于果蔬类作物(与其富硒能力是矛盾的),可能与粮食作物的富硒食品标准远高于果蔬类作物有关系(本次执行的富硒食品标准中,粮食富硒的限定标准比果蔬类作物高出 4 倍)。

5)小麦种植区多分布于西部(贺兰山),水稻种植区多分布于东部(黄河),而土壤硒含量分布特征在区域上呈明显的西高、东低,造成作物采样点土壤硒含量的差异(小麦 0.261×10^{-6} 、水稻 0.182×10^{-6})很大,应是稻籽富硒占比偏低的原因之一。

除此之外,通过相关性统计分析还发现,粮食样品(稻籽、小麦、玉米)的 Se 含量与土壤 Se 之间存在较显著正相关性,其相关系数 r 大于 0.3,但粮食样品 Se 含量与其土壤有效 Se 之间的正相关性反而不显著,相关系数 r 小于 0.1;果蔬类样品 Se 含量与其土壤 Se、土壤有效 Se 之间均未发现显著相关性,其相关系数的绝对值全部小于 0.1。这可能与参与统计的样本数量偏少有关,也可能与本地区不同农作物吸收土壤 Se 控制机制的特殊性有关,有待做进一步的专题研究。

3 富硒土壤利用前景

开发富硒土地资源对于宁夏这个西部少数民族地区而言,具有特别重要的现实意义,但在有效开发富硒土地资源之前,我们必须对富硒土壤的成因、产出条件及影响富硒土地资源开发的主要因素等做一个客观全面的分析。依据前人的有关经验,地质、地球化学背景及成土母质^[15,24]、土壤富硒的先天物质来源^[11,19,25]、土地利用类型^[33]、降雨(尘)^[34]、水土流失^[35]、土壤成因及农作物品种^[36]等都可能成为影响富硒土地资源开发利用的重要因素,尤其是当今强调绿色发展和乡村振兴的时代,更应该加强对石嘴山地区这类天然富硒土壤的开发应用与研究。石嘴山地区分布的天然富硒土壤既是银川平原新圈定的富硒土地资源的一部分,更是我国黄河流域中上游地区碱性土壤环境下值得开发的珍贵富硒土地资源的一个代表,其土壤富硒的物质来源目前还不能完全确定,但基本能确定当地富硒土壤主要是自然形成,土壤中聚集的 Se 可能来自某些天然富硒地层的风化与搬运沉积。本地区的富硒土壤具有分布广、基本不存在重金属超标、Se 与多个有益元素之间存在显著正相关性、产有多种富硒作物等优势,其

基本特征总结列于表 6。可以推断,石嘴山及其附近的大面积天然富硒土地资源具有极高的开发利用价值,可望为当地乡村振兴提供重要助力。

结合石嘴山地区富硒土壤产出的实际特点及当前开发利用现状,今后在开发利用当地丰富的天然富硒土地资源时,需注重以下事宜:一是要提高大宗作物富硒小麦,尤其是特色作物富硒稻米(宁夏大米)的开发力度,由于目前的稻米检测数据与其所占有的富硒土地资源比例不适配,必要时可借助水稻品种优选、合理规划及土壤改良等让当地的富硒土壤生产出更多、更优质的富硒稻米和富硒小麦;二是要加强对当地富硒土地资源的整体开发保护与利用,充分利用富硒土壤促进当地的枸杞、葡萄、苜蓿等特色农作物经济效益的提升,打造具有宁夏特色的天然绿色富硒食品生产基地;三是要在开发利用这片富硒土壤时,充分利用其土壤 Se 与 Mn、Mo、Cu、Zn 等有益元素呈显著正相关的属性,综合开发利用其他相关有益元素;四是要进一步加大对地方富硒标准的研制,目前在土壤 Se 同有效 Se 之间、农作物 Se 同土壤有效 Se 之间均建立不了确切的正相关关系,这些都有可能在完善地方富硒土壤系列标准研制中得到解决,同时,针对这些问题我们已经申请了相应的系列科研项目,必定能找到其内在的特殊规律。

表 6 石嘴山地区富硒土壤资源基本特征
Table 6 Basic features of Se-riched soil resources in the Shizuishan areas

资源属性	主要特征	代表性参数	影响因素或其他
富硒土壤分布	石嘴山及所属银川平原存在大片优质富硒土地,富硒土地占比超过已调查面积的 67%,其中包含大面积的耕地	土壤 Se 含量范围介于 (0.0018 ~ 1.8)×10 ⁻⁶ ,平均含量 0.26×10 ⁻⁶ ,与全国土壤硒平均含量相当;土壤硒有效度约为 5%,高于国内多数地区	与贺兰山煤系地层关系密切,是黄河中上游地区代表性的天然富硒土壤之一
产出环境	碱性土壤环境下的多个土类同时相对富硒,富硒土类包含灌淤土、灰钙土、盐土、潮土等,土壤 Se 分布不均衡	pH>7.5, w(SOM)<10.26%,土壤 Se 同有效 Se 的相关系数 r=0.39;重金属元素含量低	土壤 Se 同 SOM、B、Mo、Mn、Cu、Zn、Pb、Cr 等存在显著正相关性
与农作物关系	在富硒区分析稻秆、小麦、玉米、葡萄、苜蓿、芹菜等 10 种天然富硒作物,以小麦吸收土壤 Se 能力最强。粮食样品与土壤 Se 之间存在较显著正相关性,但其与土壤有效 Se 相关性却不明显	麦籽 Se 生物富集系数最高达到 0.71、平均值为 0.174,天然富硒小麦样品占比达到 33.33%	富硒稻米样品占比低于小麦,可能同部分抽查样品未落在真正富硒土壤区有关,土壤富硒是农作物富硒的前提或物质基础
利用前景或潜力	大面积开发利用还没有真正开始,天然富硒小麦、稻米可作为最基本的开发产品,目前的天然富硒稻米选区不够理想	通过调整种植规划、改良土壤,提高天然富硒稻米占比(现为 13.33%)	调整规划、优选品种、改良土壤(有机质与酸碱度等),提高富硒土壤利用效率

4 结论

1)石嘴山地区及其所属的银川平原产有丰富的天然富硒土壤资源,据不完全统计:新圈定的天然富硒土地资源总面积约为 705 km²(宁夏地方富硒土壤标准 0.222×10⁻⁶),包含大面积的富硒耕地;土

壤有效 Se 占比在 5%左右。
2)本区富硒土壤具有独特表征:pH 大于 7.5,土壤有机质含量(SOM)小于 10.26%,重金属基本不超标;Se 与有机质、B、Mn、Mo、Cu、Zn 等呈显著正相关性,与 pH 呈负相关性(相关系数 r=-0.38);有效 Se 与全 Se 的相关系数 r=0.39,有效 Se 与 SOM、CEC、N 的相关系数在 0.33~0.50。

3)在局部富硒土壤环境中发现 10 类富硒农产品,以小麦籽粒吸收土壤 Se 的能力相对最强,小麦富硒样品占比在 33%以上,其吸收土壤 Se 的生物富集系数为 0.05~0.71,均值为 0.174。

4)在石嘴山地区富硒土地资源的开发利用过程中,首先应对存在问题进行系统的研究,以保护性、可持续开发为原则,以宁夏特色富硒作物(小麦、稻米、枸杞、葡萄等)为基础,制定合理的产业规划,同时加快相关地方富硒标准的研制。

参考文献 (References) :

[1] Tan J A, Huang Y J. Selenium in geo-ecosystem and its relations to endemic diseases in China[J]. Water, Air, Soil Pollut., 1991, 57(59-68): 59-68.

[2] Rayman M. The importance of selenium to human health[J]. Lancet, 2000,356(9225): 233-241.

[3] Zhu J M, Wang N, Li S H, et al. Distribution and transport of selenium in Yutangba, China: Impact of human activities [J]. Science of the Total Environment, 2008,392(23): 252-261.

[4] Qin H B, Zhu Z M, Liang L, et al. The bioavailability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China[J]. Environment International, 2013, 52: 66-74.

[5] Wang J, Li H R, Yang L S, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017,39(1): 221-229.

[6] 王金达,于君宝,张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. 地理科学, 2000,20(5): 469-473.

Wang J D, Yu J B, Zhang X L. Geochemical characteristics of selenium and other elements in Loess Plateau Soil [J]. Geoscience, 2000,20(5): 469-473.

[7] 杨忠芳,余涛,侯青叶,等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012,26(5): 837-849.

Yang Z F, Yu T, Hou Y Q, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. Geoscience, 2012,26(5): 837-849.

[8] 吴跃东,向钊,马玲,等. 安徽石台大山地区硒的地球化学研究[J]. 矿物岩石, 2017,27(4): 53-59.

Wu Y D, Xiang F, Ma L, et al. The geochemistry study of selenium in the stone mountain area of Anhui province[J]. Journal Mineral Petrol, 2017, 27(4): 53-59.

[9] 姬丙艳,沈晓,姚振,等. 青海柴达木盆地绿洲农业区硒地球化学特征——以诺木洪绿洲为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 199-206.

Ji B Y, Shen X, Yao Z, et al. Geochemical characteristics of selenium in the oasis agricultural area of Qaidam Basin, Qinghai Province: Exemplified by Nomhon oasis [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(1): 199-206.

[10] 时章亮,金立新,廖超,等. 四川雷波县重点耕地地区土壤硒含量特征及其成因分析[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1253-1260.

Shi Z L, Jin L X, Liao C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Si-

chuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(5): 1253-1260.

[11] 韩伟,王乔林,宋云涛,等. 四川省沐川县北部土壤硒地球化学特征与成因探讨[J]. 物探与化探, 2021,45(1): 215-222.

Han W, Wang Q L, Song Y T, et al. Geochemical characteristics and genesis of selenium in soil in northern Muchuan County, Sichuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 215-222.

[12] 肖高强,宗庆霞,向龙洲,等. 云南省盈江县旧城—姐冒地区土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. 物探与化探, 2020,44(2): 412-418.

Xiao G Q, Zong Q X, Xiang L Z, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils and agricultural products in the Jiucheng-Jiemao area, Yingjiang County, Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(2): 412-418.

[13] 高宇,刘志坚. 宁夏长山头富硒区土壤硒地球化学特征研究[J]. 地球与环境, 2017,45(6): 628-633.

Gao Y, Liu Z J. Geochemical characteristics of soil selenium in selenium-rich area in Changshantou, Ningxia Province [J]. Earth and Environmen, 2017,45(6): 628-633.

[14] 黄子龙,林清梅,范汝海. 广西全州县富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探, 2018,42(2): 381-385.

Huang Z L, Lin Q M, Fan R H. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Quanzhou County of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018,42(2): 381-385.

[15] 廖启林,崔晓丹,黄顺生,等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. 中国地质, 2020,47(6): 1813-1825.

Liao Q L, Cui X D, Huang S S, et al. Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2020,47(6): 1813-1825.

[16] 刘永贤,陈锦平,潘丽萍,等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1139-1144.

Liu Y X, Chen J P, Pan L P, et al. Studies on causes and influential factors of selenium-rich soil in Xunyu Plain [J]. Soils, 2018, 50(6): 1139-1144.

[17] 乔新星,晁旭,任蕊,等. 陕西关中富硒土壤研究及开发利用——以三原—阎良地区为例[J]. 物探与化探, 2020,45(1): 230-238.

Qiao X X, Chao X, Ren R, et al. Research, development and utilization of selenium-rich soil of Shaanxi: A case study of Sanyuan-Yanliang area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(1): 230-238.

[18] 文帮勇,张涛亮,李西周,等. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. 中国地质, 2014,41(1): 256-263.

Wen B Y, Zhang T L, Li X Z, et al. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province [J]. Geology in China, 2014, 41(1): 256-263.

[19] 吴兴盛. 福建省武平县富硒土壤特征及成因分析[J]. 物探与化探, 2021,45(3): 778-784.

Wu X S. Characteristics and genesis of selenium-rich soil in Wuping area, Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(3): 778-784.

[20] 宁夏回族自治区质量技术监督局. DB64/T 1220—2016 宁夏富硒土壤标准[S].

- The Quality and Technology Supervision Bureau of Ningxia Province. DB64/T 1220—2016 Selenium-enriched soil standards of Ningxia[S].
- [21] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356–1364.
- Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the northeast china plain and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1356–1364.
- [22] 杨良策, 李明龙, 杨延安, 等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 825–829.
- Yang L C, Li M L, Yang T A, et al. Study on distribution characteristics of selenium content of surface soil and its influencing factors in Enshi City, Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(6): 825–829.
- [23] 迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1262–1274.
- Chi F Q, Xu Q, Kuang E J, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Heilongjiang Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1262–1274.
- [24] 廖启林, 任静华, 许伟伟, 等. 江苏宜溧富硒稻米产区地质地球化学背景[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1791–1802.
- Liao Q L, Ren J H, Xu W W, et al. Geological and geochemical background of Se-rich rice production in Yili area, Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1791–1802.
- [25] 吴俊. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1167–1176.
- Wu J. The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing factors[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1167–1176.
- [26] 余飞, 张风雷, 张永文, 等. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 830–838.
- Yu F, Zhang F L, Zhang Y W, et al. Geochemical characteristics and influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 830–838.
- [27] 周墨, 陈国光, 张明, 等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究: 以青塘—梅窖地区为例[J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1292–1301.
- Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of south Jiangxi province: A typical area of Qingtang-Meijiao[J]. Geoscience, 2018, 32(6): 1292–1301.
- [28] 牛雪, 何锦, 庞雅婕, 等. 三江平原西部土壤硒分布特征及其影响因素[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 223–229.
- Nin X, He J, Pang Y J, et al. Distribution feature of soil selenium in west Sanjiang plain and its influencing factors[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 223–229.
- [29] 王志强, 杨建锋, 魏丽馨, 等. 石嘴山地区碱性土壤硒地球化学特征及生物有效性[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 229–237.
- Wang Z Q, Yang J F, Wei L X, et al. Geochemical characteristics and bioavailability of selenium in alkaline soil of Shizuishan area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 229–237.
- [30] 成晓梦, 马荣荣, 彭敏, 等. 中国大宗农作物及根系土中硒的含量特征与富硒土壤标准建议[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1367–1372.
- Cheng X M, Ma R R, Peng M, et al. Characteristics of selenium in crops and roots in China and recommendations for selenium-enriched soil standards [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1367–1372.
- [31] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1138–1144.
- Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1138–1144.
- [32] Deng X F, Liu K Z, Li M F, et al. Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages[J]. Field Crop Research, 2017, 211: 165–171.
- [33] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 301–308.
- Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Distribution and influencing factors of soil selenium (Se) in different land use types in the Yanghe River Basin [J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 301–308.
- [34] 陈锦平, 刘永贤, 曾成城, 等. 降雨对土壤硒迁移转化的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1909–1915.
- Chen J P, Liu Y X, Zeng C C, et al. Research advances in the effects of rainfall on soil selenium migration and transformation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1909–1915.
- [35] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 257–273.
- Tian Y C, Huang Y L, Zhang Q, et al. Soil erosion and selenium loss in Qinjiang River Basin in Beibu Gulf coastal zone [J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 257–273.
- [36] 张栋, 张妮, 侯振安, 等. 石灰性土壤硒含量与小麦籽粒硒相关性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 152–157.
- Zhang D, Zhang N, Hou Z A, et al. Study on correlation between selenium content in calcareous soil and selenium in wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 152–157.

A preliminary study of Se-rich soil in the Shizuishan area, Ningxia and its potential for application

WANG Zhi-Qiang, YANG Jian-Feng, SHI Tian-Chi

(Geophysical and Geochemical Survey Institute of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750004, China)

Abstract: Based on the statistical analysis of the Se distribution in 8,835 soil samples and 240 sets of crop-root soil samples, as well as related survey data in the Shizuishan area of Ningxia, this study summarized the element geochemical characteristics of the local Se-

rich soil and explored the development and utilization prospects of the soil and related issues. The study results are as follows. ① The newly delineated Se-rich land (soil with Se content of $\geq 0.222 \times 10^{-6}$; local standard of Ningxia) covers a total area of more than 705 km², the average content of soil Se is equivalent to the national average, while the content of soil available Se is relatively high, and the effective Se content is mostly over 5% of Se in the soil; ② The Se-rich soil has pH of greater than 7.5 and organic matter content of less than 10.26%, without heavy metal pollution. There are significant positive correlations between the Se content and the contents of organic matter, B, Mn, Mo, Cu, and Zn and a negative correlation between the Se content and pH; ③ The correlation coefficient between effective Se and Se in the soil is $r = 0.39$, and those between effective Se and OM, CEC, and N are 0.33 to 0.5; ④ Among the 10 types of Se-rich agricultural products (i.e., Se-rich wheat) obtained in Se-enrich soil through spot check, the wheat has been proven to have the strongest capacity to absorb Se, with an average bioconcentration coefficient of 0.174; ⑤ Since the unique Se-rich soil resources in this area is of great value in development and utilization, it is necessary to strengthen the R&D of characteristic Se-rich crops (i.e., wheat, rice, wolfberry, and grape) and the development of relevant Se-rich standards through scientific research and reasonable planning.

Key words: Se-rich soil; available selenium; element geochemical characteristics; applied prospects; Shizuishan; Ningxia

(本文编辑:蒋实)