

李晓慧, 高宇, 赵万伏, 等. 宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 422-429.

LI Xiao-hui, GAO Yu, ZHAO Wan-fu, et al. Distribution characteristics of selenium in cultivated soil and its influencing factors in Qingtongxia City of Ningxia[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 422-429.

宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析

李晓慧, 高宇, 赵万伏, 刘志坚

(宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 银川 750002)

摘要:通过对青铜峡市农耕表层土壤和水稻全硒含量的测定,分析了青铜峡市农耕土壤硒含量分布特征及水稻子实硒含量影响因素。结果表明,表层土壤硒元素含量在 $0.057\sim 0.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.226\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,83.55%的农耕土壤达到足硒水平($0.175\sim 0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其中连湖农场土壤硒元素含量均值最高,树新林场最低。不同土壤类型土壤硒元素含量表现为灌溉土>潮土>粗骨土>盐土>灰钙土>新积土。相关分析结果表明,影响研究区土壤硒元素含量的因素主要是土壤pH、有机质、铁氧化物、锰和CEC。此外,水稻子实硒含量不只受土壤全硒含量的影响,而且与土壤pH、有机质等因素密切相关。

关键词:青铜峡;农耕土壤;全硒;分布;相关分析

中图分类号:X825

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)05-0422-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0038

Distribution characteristics of selenium in cultivated soil and its influencing factors in Qingtongxia City of Ningxia

LI Xiao-hui, GAO Yu, ZHAO Wan-fu, LIU Zhi-jian

(Ningxia Institute of Land Resources Survey and Monitor, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The study determined cultivated surface soil and rice total selenium and analyzed the main influencing factors of selenium distribution characteristics in soil and rice of cultivated soil in Qingtongxia. The results showed that the range of total selenium content in surface soil of farm was $0.057\sim 0.950\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the average value of calculation was $0.226\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 83.55% of the cultivated soil reached the level of sufficient selenium ($0.175\sim 0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and the soil in Lianhu farmland was the highest average, and Shuxin tree farm was the lowest. The contents of selenium in different soil types were as follows: irrigation silting soil>moisture soil>skeleton soil>saline soil>sierozem>fluent soil. The correlation analysis showed that soil pH, organic matter, ferric oxide, manganese and CEC were the main factors affecting the soil selenium content in the research area. In addition, the selenium content in rice grain not only correlated with soil total selenium content, but also closely related to soil pH, organic matter and other factors.

Keywords: Qingtongxia; cultivated soil; total selenium; distribution; correlation analysis

硒是地球上极其稀少而又分散的一种重要的微量元素^[1]。它是人体和动物所必需的,同时也是对植物有益的一种微量元素。硒对机体的免疫功能和防御机能具有重要影响,可调节机体代谢,延缓衰老,提高人体免疫力,降低癌症等疾病的发生率^[2-3]。我国是世

界上大面积缺硒的国家之一,据统计我国有72%的县(市)不同程度缺硒,约有1亿多人口因食物中摄入的硒不足,导致人体处于低硒状态^[4]。人体和动物中缺硒会引起各种疾病的发生,如大骨节病、白肌病和克山病等。由于人体和动物中的硒主要通过食物摄入,而土壤是食物硒来源的库,因此土壤及农作物中硒含量水平对人体健康有着非常重要的意义。目前,国内外学者对土壤及农作物硒元素特征已作了诸多研究,特别是对酸性土壤研究相对较多^[5-7],对碱性农

收稿日期:2018-02-06 录用日期:2018-04-16

基金项目:宁夏回族自治区地质调查基金项目(2015-地勘基金06)

作者简介:李晓慧(1983—),女,硕士,工程师,主要从事农业地质及环境地球化学方面的研究。E-mail:122451267@qq.com

耕土壤及农产品硒研究相对较少^[8-10]。干旱地区的偏碱性土壤中,硒易被植物有效地吸收和利用,因此调查研究碱性土壤硒元素的特征,对合理开发富硒土地资源、提高富硒农产品附加值、增加农民收入具有重要意义。

青铜峡市位于宁夏平原引黄灌区中部,平均海拔1150~1700 m,平均年日照时数2897 h,日照率达65%。由于干旱少雨、日照充足、光能丰富、昼夜温差大,农产品品质优越,素有塞上江南“鱼米之乡”之称,盛产小麦、水稻、玉米、葡萄、蔬菜等粮食作物和经济作物,是我国现代农业基地和酿酒葡萄最佳生态种植区。因此,在该地区开展对硒元素的研究,对于提升当地农产品附加值发挥着至关重要的作用。近几年,在当地政府和相关部门大力支持下,宁夏富硒产业得到一定的发展,该市也在积极地推进富硒工作,开展了宁夏青铜峡市富硒土地质量地球化学调查。本文利

用此次调查研究结果,研究了该区农耕土壤硒元素含量分布特征及其影响因素,以期为科学开发和利用该区富硒土地资源提供强有力的地球化学数据支撑,为加快该区富硒优质特色农产品的开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青铜峡市位于西北内陆(东经105°36'~106°13'、北纬37°36'~38°16'),远离海洋,属于中温带大陆性气候区,具有典型大陆性气候特征。青铜峡市地貌受构造控制,形成了西南高东北低,似簸箕状地貌景观,北部属于银川平原南部,东部为牛首山、山前台地及丘陵地区,中部为卫宁平原北端和青铜峡库区,南部、西部为卫宁北山东端及山前台地,地面起伏较大。

研究区(图1)位于青铜峡除西部和东南部山区外的平原和丘陵区,该区的地貌主要为黄河冲积平

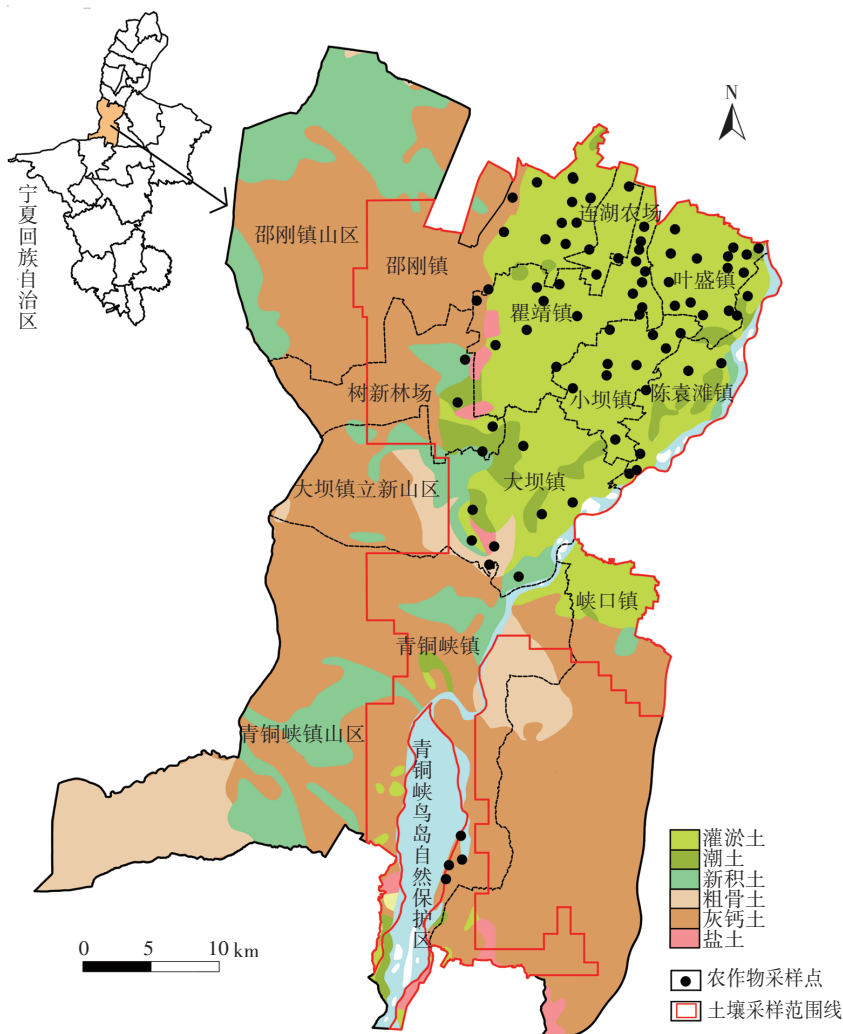


图1 研究区地理位置及土壤类型分布图

Figure 1 Geographical location and soil type distribution map of the study area

原,洪积倾斜平原和红土丘陵也有少量分布,成土母质相对较为单一,主要有冲积物、洪积物和零星发育粗质残坡积物。由于黄河由南向北纵贯研究区,其灌溉便利、地面平坦,是宁夏引黄灌溉区最具代表性的农耕土壤区,也是青铜峡市主要的粮食生产基地。研究区土壤偏碱性(pH为7.67~9.70),主要土壤类型为灌淤土、灰钙土、新积土和潮土等,零星分布粗骨土和盐土等,其中灌淤土为主要农耕土壤类型,面积为445.76 km²,占研究区面积的49.25%,其次为灰钙土,占研究区面积的39.89%,新积土、盐土和粗骨土分布较少,分别占研究区面积的7.06%、1.78%和1.52%。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 土壤样品的采集与分析测试

土壤样品于2016年4—10月采集,以网格加地块图斑(1:50 000土地利用现状图)的原则布设采样点,同时参考地形地貌、土壤类型等因素,按照每1 km² 9个点的密度采集0~20 cm的表层土壤样品5290件,每件样品重量约1.5 kg。采集的土壤样品无污染风干后,剔除样品中植物残体、石块等杂质,用研钵研磨过10目尼龙筛,装300 g送湖北省国土资源部武汉矿产资源监督检测中心测试,所有样品测试全硒、有效态硒、锰、铁氧化物(TFe₂O₃)、有机质、pH、CEC等指标。

土壤全硒经硝酸-高氯酸消化,盐酸还原,用氢化物-原子荧光光谱法(北京吉天,AFS-820)测定,检出限为0.01 mg·kg⁻¹;有效态硒采用沸水提取,氢化物-原子荧光光谱法(北京吉天,AFS-820)测定,检出限为0.000 5 mg·kg⁻¹;CEC采用氯化铵预处理,乙酸铵浸取,容量法(VOL)测定,检出限为1 mmol·L⁻¹;铁氧化物和锰经硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸分解,用盐酸溶解后,定容,用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES,美国热电,ICAP6300)测定,其中铁氧化物检出限为0.02%,锰检出限为5 μg·g⁻¹;有机碳经硫酸、重铬酸钾消解,硫酸亚铁铵容量法(VOL)滴定,检出限为0.02 mg·kg⁻¹,经换算(乘以1.724)得到有机质含量;pH加无二氧化碳蒸馏水润溶,采用电位法(ISE)测定,检出限为0.01。样品测试分析的准确度和精密度及监控样的分析质量水平等,均符合中国地质调查局地质调查技术标准DZ/T 0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》有关技术要求。

1.2.2 农作物样品采集与分析测试

在秋季作物收获季节,采集研究区主要粮食作物

水稻的子实部分。以每4 km² 1个点的采样密度,采集水稻子实5份,混合成1个样品进行测试分析,共计93件,同时采集根系土壤样品93件。

将水稻子实用自来水多次冲洗烘干后磨碎,称取0.100 0~2.000 g试样于微波消解罐中,加入亚沸硝酸和MOS级过氧化氢,进行消化,比色,定容,氢化物-原子荧光光谱法(北京吉天,AFS-820)测定,检出限为0.002 mg·kg⁻¹;

1.3 数据处理

数据统计分析前,对土壤及农作物样品分析数据进行异常值迭代剔除,即反复剔除平均值±3倍标准差。采用Microsoft Excel 2007进行数据处理,采用MapGIS 6.7软件进行图件编制。

2 结果与讨论

2.1 青铜峡市农耕区土壤中全硒量分析

本研究表明,青铜峡市农耕区表层土壤全硒量变幅为0.047~0.950 mg·kg⁻¹,平均值为0.226 mg·kg⁻¹,变异系数(CV) 20.57%,总体来看,研究区内的表层土壤硒含量分布均匀(表1)。其表层土壤硒含量高于甘肃兰州市的表层土壤硒含量(0.179 mg·kg⁻¹)^[8]和陕西土壤硒含量(0.118 mg·kg⁻¹)^[11],略高于我国土壤全硒背景值(0.20 mg·kg⁻¹)^[12]和宁夏银川平原土壤全硒含量平均值(0.21 mg·kg⁻¹)^[13],但明显低于南部沿海和西南地区,属全国中等水平^[14-15]。

对青铜峡市8个乡镇、2个农林场的农耕区表层土壤全硒量进行了统计,其平均值高低顺序为连湖农场>叶盛镇>小坝镇>瞿靖镇>大坝镇>峡口镇>邵刚镇>青铜峡镇>陈袁滩镇>树新林场。其中,连湖农场土壤全硒平均含量最高,达0.257 mg·kg⁻¹,树新林场最低,只有0.164 mg·kg⁻¹,最高值是最低值的1.57倍。青铜峡镇和树新林场硒含量均值的变化范围较大,变异系数相对较高(>30%),这在一定程度上反映出青铜峡镇和树新林场全硒量呈不均匀分布状态。总体来看,整个青铜峡市不同区域农耕区土壤全硒量差异不大,这可能与农耕区绝大多数分布在引黄灌区,土壤为碱性,土壤类型主要以灌淤土为主有关。

按照谭见安^[16]对土壤硒的丰缺划分标准:<0.125 mg·kg⁻¹为缺硒,0.125~0.175 mg·kg⁻¹为潜在缺硒,0.175~0.40 mg·kg⁻¹为足硒,0.40~3.0 mg·kg⁻¹为富硒,青铜峡市83.55%农耕土壤达足硒水平,12.87%的土壤为潜在缺硒,3.27%的土壤为缺硒,富硒土壤较少,不足1%,无硒过剩土壤。总体来看,青铜峡市农耕表

层土壤全硒量处于足硒水平。

2.2 不同土壤类型的土壤全硒量分析

根据全国第二次土壤普查资料,对青铜峡农耕区分布的6种土壤类型分别统计土壤全硒量,由表2可以看出:土壤全硒量在不同土壤类型之间存在一定差异性,表现为灌淤土>潮土>粗骨土>盐土>灰钙土>新积土。其中,灌淤土的全硒量最高,平均值为 $0.239\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,潮土次之,为 $0.209\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,新积土最低,仅为 $0.197\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,只有灌淤土全硒量远高于研究区平均值,其余土壤类型均低于研究区平均值。

灌淤土是研究区主要耕种土壤,是引入含有大量泥沙的黄河水进行灌溉,经过长期的灌水落淤与人为耕作,在非交迭作用下逐渐形成的。灌淤土主要特点是全土层均匀,且具有一定厚度的灌淤熟化层,其表层土壤有机质和养分含量相对较高,保水保肥能力强,有利于硒酸盐物质的积累,这可能是全硒量高的原因之一。研究区的潮土主要为灌淤潮土,开垦灌溉后,也可逐渐形成薄的表层熟化层。灰钙土母质主要为第四纪洪积冲积物,质地一般较粗,黏粒含量低,有

机质含量低,有一定的淋溶作用,其对硒的淋溶作用强于吸附作用,因此全硒量相对较低。新积土是流水新近堆积物上形成的一种初育土,生物作用弱,母质特征明显,其土壤质地轻、孔隙较大、表层有机质含量低,对硒的淋溶作用也较强,因而全硒量较低。总体看来,研究区不同土壤类型全硒量的高低与土壤的发育(熟化)程度有关,土壤熟化程度越高,该类型土壤全硒量也较高,其原因可能是土壤在不断耕作和熟化过程中土壤有机质不断地增加,从而将硒吸附和固定在表层土壤中^[17-18]。

2.3 土壤全硒量与土壤特性相关性分析

土壤理化性质对土壤硒含量有着不同程度的影响。对研究区土壤全硒量与土壤特性作相关性分析(图2),结果表明:土壤全硒量与pH呈极显著负相关关系($P<0.01$),与有机质、CEC、铁氧化物和锰含量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

pH是土壤重要的理化指标之一,其高低对土壤硒的赋存形式及其有效性有重要影响。本研究结果表明,随着土壤碱性增强,土壤中硒含量有减少的趋

表1 青铜峡市农耕区各乡镇、农场土壤全硒量

Table 1 Total selenium content of soil in towns and farmland of Qingtongxia City

采样点	样品数(n)	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%
小坝镇	444	0.240	0.108	0.318	0.048	19.97
大坝镇	908	0.226	0.087	0.462	0.049	21.52
陈袁滩镇	398	0.212	0.086	0.333	0.055	25.97
叶盛镇	498	0.244	0.130	0.395	0.047	19.24
瞿靖镇	908	0.238	0.084	0.379	0.050	21.11
邵刚镇	764	0.222	0.067	0.950	0.060	26.91
青铜峡镇	542	0.216	0.057	0.783	0.071	33.00
峡口镇	393	0.225	0.067	0.307	0.051	22.63
连湖农场	207	0.257	0.169	0.524	0.049	18.91
树新林场	189	0.164	0.082	0.427	0.052	31.76
研究区	5251	0.226	0.057	0.950	0.057	20.57

表2 青铜峡市农耕区不同土壤类型全硒量

Table 2 Total selenium content of different soil type in Qingtongxia City

土壤类型	样品数(n)	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变幅/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%
灌淤土	3589	0.239	0.085~0.524	0.044	18.38
灰钙土	896	0.200	0.057~0.950	0.072	36.01
潮土	426	0.209	0.088~0.404	0.053	25.56
粗骨土	64	0.206	0.087~0.312	0.045	21.65
新积土	180	0.197	0.101~0.427	0.056	28.64
盐土	84	0.205	0.108~0.298	0.040	19.71

势。这是因为在中性和酸性土壤中硒主要以亚硒酸盐(SeO_3^{2-})形式存在,迁移淋溶作用较弱,容易与土壤中金属氧化物和有机质吸附或者络合。在干旱地区通气良好的碱性土壤中,硒主要是以溶解性高的硒酸盐(SeO_4^{2-})形式存在,溶解性好^[18-19],随着土壤pH值的升高,加速了 SeO_3^{2-} 向 SeO_4^{2-} 的转化, SeO_4^{2-} 易溶于水,极易被植物吸收,或者随土壤溶液迁移淋失,从而使得土壤中全硒量降低。

土壤有机质是自然环境中的还原物质之一,土壤有机质在腐质化过程中可产生腐植酸和细颗粒胶体,易与硒产生结合。一般情况下,土壤中有机质含量较高,硒含量一般也比较高,在母质基本相同的条件下,硒含量与有机质呈正相关^[20-21]。研究区土壤有机质与全硒量呈极显著正相关,这可能是由于硒能够以与腐

殖质结合的形式存在,或者在有机质增加的情况下促进了土壤微生物的活性^[22],加强了土壤中硒元素的吸附和固定作用,从而使硒快速固定富集在研究区表层土壤中。另外,研究区土壤为成熟的耕作土壤,随着耕作过程有机质被带入土壤,在人为因素作用下和熟化过程中,土壤表层的硒与有机质结合,逐步增加了土壤中的硒含量。

CEC是指带负电荷的土壤胶体借静电引力吸附土壤溶液中各种阳离子的数量,是土壤缓冲性能的主要来源^[23]。研究区表层土壤CEC与全硒量呈极显著正相关关系(图2),说明随着CEC的增加,土壤全硒量也增加。这可能是由于研究区内主要分布灌淤土,其土壤中的黏粒含量较高(20%~60%)^[24],使其吸附土壤溶液中各种阳离子的数量增多,增加了土壤

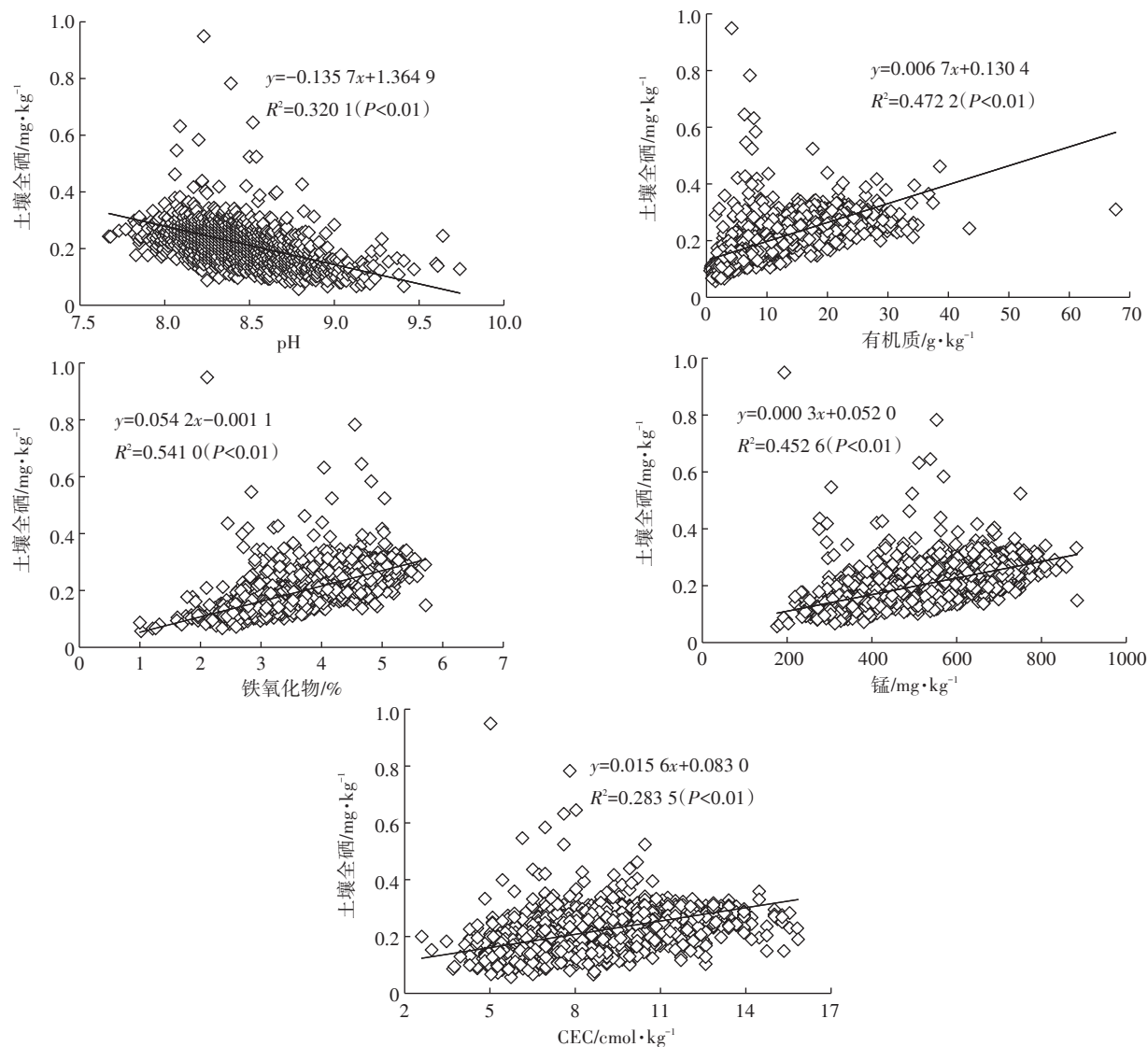


图2 研究区土壤pH、有机质、铁氧化物、锰、CEC与土壤全硒量的关系($n=5251$)

Figure 2 Correlation of pH, organic matter, ferric oxide, manganese, CEC with total selenium in the study area ($n=5251$)

中硒的吸附交换。此外,CEC还受土壤pH的影响,当土壤溶液pH较高时,土壤胶体微粒表面所负电荷增大,CEC也随之增大,进而使得土壤全硒量也相对较高。

从图2可以看出,随着土壤铁氧化物和锰含量的增加,土壤全硒量也明显增加,这主要是因为铁氧化物、锰对硒具有强的吸附能力,且强于黏土矿物,其吸附能力与氧化铁的活度和含量正相关^[25]。铁氧化物、锰对硒的吸附主要受到土壤pH的影响,最大吸附量出现在pH 4~6时^[26],在碱性条件下,土壤氧化铁与硒酸盐形成的复合物稳定性较低,有利于 SeO_3^{2-} 转化成可溶性 SeO_4^{2-} ^[27],利于硒的迁移和生物可利用,从而使得硒富集在表层土壤中。在碱性条件下,铁氧化物和锰促进硒的活化效能的主控因素有待于进一步研究。

2.4 土壤全硒量与农作物硒相关性分析

对研究区水稻样品进行统计分析,结果显示,水稻子实硒含量为 $0.014\sim 0.125\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.044\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,对应的根系土全硒量为 $0.136\sim 0.334\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.225\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。按照富硒稻谷国家标准(GB/T 22499—2008)和宁夏富硒农产品地方标准(DB64/T 1221—2016)中富硒稻谷硒含量 $0.04\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,研究区达到富硒标准的水稻子实样品48件,富硒率为56.47%,富硒水稻和非富硒水稻子实所对应的根系土全硒量均值分别为 $0.233\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.228\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

对水稻子实硒含量与根系土全硒量、土壤pH和有机质进行相关分析(图3),结果发现,水稻子实硒含量与对应的根系土全硒量呈弱正相关($P<0.1$),与土壤pH和有机质呈正相关($P<0.05$)。说明土壤中全硒量的增加对作物的吸收和富集有一定的促进作用,但不是主要因素。作物对硒的吸收和富集还受土壤条件的影响,如土壤pH和有机质等,因为在碱性环境中,随着土壤pH和有机质的增加,硒溶解度增大, SeO_3^{2-} 含量增高,易于作物的吸收利用,同时还可能与作物本身对硒的吸收积累能力有关,但具体影响机制有待进一步深入研究。以上原因也说明了为什么研究区土壤全硒量大多处于足硒水平,但是其作物硒含量却相对很高。

3 结论

(1)研究区表层土壤全硒量变幅为 $0.047\sim 0.950\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.226\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于我国土壤全

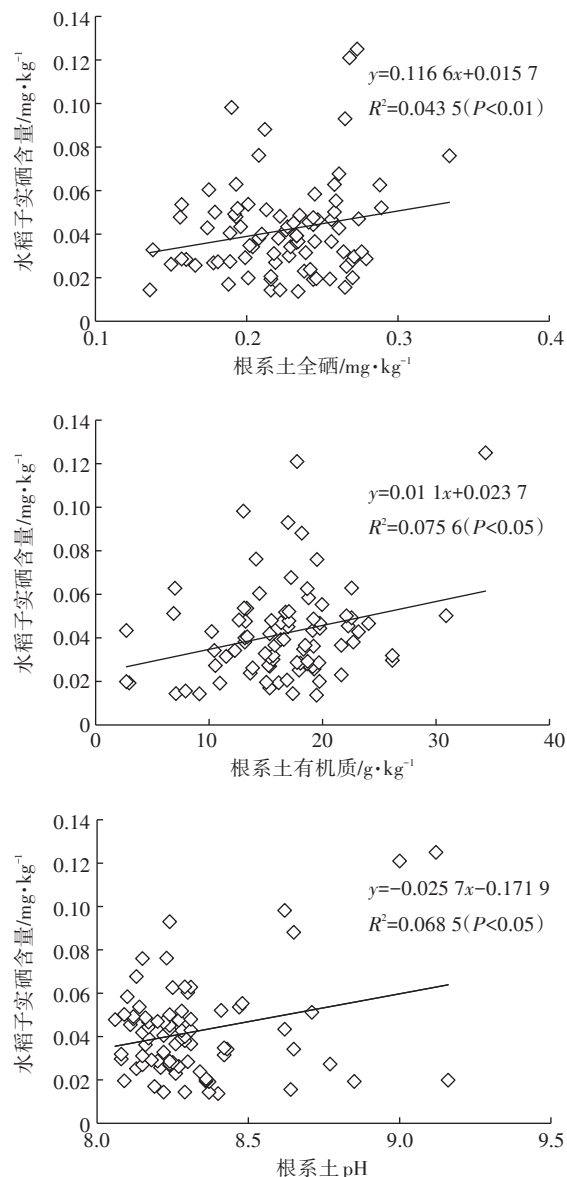


图3 研究区根系土全硒量、有机质、pH与水稻子实硒含量关系($n=85$)

Figure 3 Correlation of rhizosphere soil Se, soil pH and organic matter with rice grain selenium in the study area ($n=85$)

硒背景值。其中,83.55%的农耕土壤达足硒水平;12.87%的土壤为潜在缺硒,3.27%的土壤为缺硒,富硒面积不足1%,无硒过剩土壤。总体来看,青铜峡市农耕表层土壤全硒量处于足硒水平。不同区域农耕区土壤全硒量差异不大,连湖农场、小坝镇、叶盛镇和瞿靖镇的土壤全硒量相对较高,其中连湖农场明显高于其他地区。不同土壤类型的全硒量大小顺序为灌淤土($0.267\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>潮土($0.209\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>粗骨土($0.206\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>盐土($0.205\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>灰钙土($0.200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>新积土($0.197\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(2)土壤有机质、铁氧化物、锰及 CEC 与土壤全硒量呈显著正相关关系,pH 与土壤全硒量呈显著负相关关系。说明这些指标对土壤硒含量的富集有显著的影响。

(3)研究区水稻子实硒含量平均值为 $0.044 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根系土全硒量平均值为 $0.225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水稻富硒率为 56.47%,相关分析表明:水稻子实硒含量与根系土全硒量呈弱正相关,与土壤 pH 和有机质呈正相关。作物硒含量并不只受土壤全硒量的影响,与其土壤 pH 和有机质的高低,以及作物本身对硒的吸收积累能力等因素也有密切关系。因此在土壤为碱性、土壤全硒量相对较高、农业生产条件好的连湖农场、小坝镇、瞿靖镇、叶盛镇等地区,应充分合理开发与推广富硒土地资源,大力发展富硒优质特色农产品,让硒资源成为发展当地农业的有利条件。

参考文献:

- [1] Tapiero H, Townsend D M, Tew K D. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds[J]. *Biomedicine Pharmacotherapy*, 2003, 57(3):134-144.
- [2] 赵中秋,郑海雷,张春光,等.土壤硒及其与植物硒营养的关系[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(1):22-25.
ZHAO Zhong-qiu, ZHENG Hai-lei, ZHANG Chun-guang, et al. Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):22-25.
- [3] 尹红星,张殊佳,郑学仿,等.硒的抗肿瘤作用研究综述[J]. *大连大学学报*, 2008, 29(6):18-25.
YIN Hong-xing, ZHANG Shu-jia, ZHENG Xue-fang, et al. Review in the antitumor research of selenium[J]. *Journal of Dalian University*, 2008, 29(6):18-25.
- [4] 王子健.中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展[J]. *环境化学*, 1993, 12(3):237-243.
WANG Zi-jian. Some biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt[J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12(3):237-243.
- [5] 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 Yan, ZONG Liang-gang, CAO Dan, et al. Distribution and availability of selenium in typical tea garden of Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2467-2474.
- [6] 杨良策,李明龙,杨廷安,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):825-848.
YANG Liang-ce, LI Ming-long, YANG Ting-an, et al. Study on distribution characteristics of selenium content of surface soil and its influencing factors in Enshi City, Hubei Province[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2015, 29(6):825-848.
- [7] 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研究[J]. *土壤学报*, 2012, 29(6):1012-1020.
LI Jie, YANG Zhi-qiang, LIU Zhi-gang, et al. Distribution of selenium in soils of Nanning City and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 29(6):1012-1020.
- [8] 李伟,李飞,毕德,等.兰州碱性土壤与农产品中硒分布及形态研究[J]. *土壤*, 2012, 44(4):632-638.
LI WEI, LI Fei, BI De, et al. Spatial distribution and speciation of selenium in alkaline soils and agricultural products of Lanzhou[J]. *Soils*, 2012, 44(4):632-638.
- [9] 高宇,刘志坚.宁夏长山头富硒区土壤地球化学特征研究[J]. *地球与环境*, 2017, 45(6):628-633.
GAO Yu, LIU Zhi-jian. Geochemical characteristics of soil selenium in selenium-rich area in Changshantou, Ningxia, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(6):628-633.
- [10] 王琪,刘禹含,杨景娜,等.新疆伊犁土壤硒资源分布及与土壤性质的关系分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(6):555-559.
WANG Qi, LIU Yu-han, YANG Jing-na, et al. Analysis on the distribution of selenium resources and its relationships with soil properties of Ili District, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(6):555-559.
- [11] 陈代中,任尚学,李继云.陕西地区土壤中的硒[J]. *土壤学报*, 1984, 21(3):65-68.
CHEN Dai-zhong, REN Shang-xue, LI Ji-yun. Selenium in soils of Shaanxi Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(3):65-68.
- [12] 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,1990:370.
China National Environmental Monitoring Centre. The background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990:370.
- [13] 李新虎,王志强.银川平原硒的地球化学调查及评价[J]. *宁夏农林科技*, 2006(5):15-17.
LI Xing-hu, WANG Zhi-qiang. Geochemical survey and evaluation of selenium in Yinchuan Plain[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2006(5):15-17.
- [14] 徐文,唐文浩,邝春兰,等.海南省土壤中硒含量及影响因素分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(6):3026-3027.
XU Wen, TANG Wen-hao, QI Chun-lan, et al. Analysis on content of Se in soil of Hainan Province and its influencing factors[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(6):3026-3027.
- [15] 何亚琳.贵州省土壤含硒量及其分布[J]. *土壤学报*, 1996, 33(4):391-397.
HE Ya-lin. Se contents and distribution in soils of Guizhou Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(4):391-397.
- [16] 谭见安.中华人民共和国地方病与环境图集[M].北京:科学出版社,1989:39.
TAN Jian-an. The atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China[M]. Beijing: Science Press, 1989:39.
- [17] 王金达,于君宝,张学林,等.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 Jin-da, YU Jun-bao, ZHANG Xue-lin, et al. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of Loess Plateau[J]. *Sci-*

- tia Geographica Sinica*, 2000, 20(5):469-473.
- [18] Masscheleyn P H, Delaune R D, Patrick Jr W H. Transformations of selenium as affected by sediment oxidation-reduction potential and pH[J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24(1):91-96.
- [19] Johnsson L. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH[J]. *Plant and Soil*, 1991, 133:57-64.
- [20] Bruggeman C, Maes A, Vancluysen J. The interaction of dissolved Boom Clay and Gorleben humic substances with selenium oxyanions (selenite and selenate)[J]. *Appl Geochem*, 2007, 22(7), 1371-1379.
- [21] 李丽娟. 土壤中硒元素丰度及富集因素分析[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(3):38-42.
- LI Li-juan. Analysis of selenium abundance and enrichment factors in soil[J]. *Marine Environmental Science*, 1994, 13(3):38-42.
- [22] Gustafsson J P, Johnsson L. The association between selenium and human substances in forested ecosystems: Laboratory evidence[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 1994, 8(2):141-147.
- [23] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:165-166.
- HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:165-166.
- [24] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 银川:宁夏人民出版社, 1990:186.
- WANG Ji-zhi. Soil of Ningxia[M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 1990:186.
- [25] 赵美芝. 土壤和粘粒矿物对亚硒酸盐的吸附和解吸[J]. 土壤学报, 1991, 28(2):139-145.
- ZHAO Mei-zhi. Adsorption and desorption of selenite by some soils and clay minerals[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(2):139-145.
- [26] 刘 铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1996:396.
- LIU Zheng. Microelement in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996:396
- [27] 沈春燕, 周 俊. 土壤硒的赋存状态与迁移转化[J]. 安徽地质, 2011, 21(3):186-191.
- SHEN Chun-yan, ZHOU Jun. Occurrence, migration and transformation of selenium in soil[J]. *Geology of Anhui*, 2011, 21(3):186-191.