

西藏拉萨至曲水拉萨河沿岸农用地土壤硒锗空间分布与评价^①

袁 宏¹, 赵 利¹, 王茂丽², 徐开锋², 尊珠桑姆², 王海勇²

(1 四川省核工业地质调查院, 成都 610061; 2 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 拉萨 851400)

摘 要: 调查研究了西藏拉萨至曲水拉萨河沿岸农用地土壤中硒锗的含量与分布状况, 发现研究区内绝大部分农田土壤缺硒(<0.16 mg/kg), 而大部分农田土壤富锗(≥ 1.3 mg/kg); 土壤全硒、有效硒含量与 pH 不存在显著的相关关系, 土壤全锗、有效锗含量均与 pH 表现为极显著的负相关关系, 均与有机质含量表现为极显著的正相关关系。研究区整体土壤富锗情况较好, 具有富锗土壤开发潜力, 可以考虑富锗农牧产品的开发与推广。

关键词: 拉萨河; 土壤; 硒; 富锗; 相关性; 空间分布

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Spatial Distribution and Evaluation of Selenium and Germanium in Farmland Soils from Lhasa to Qushui Along the Lhasa River in Tibet

YUAN Hong¹, ZHAO Li¹, WANG Maoli², XU Kaifeng², ZUNZHU Sangmu², WANG Haiyong²

(1 *Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610061, China*; 2 *Sixth Geological Survey Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 851400, China*)

Abstract: The contents and distribution of Selenium (Se) and germanium (Ge) in farmland soils from Lhasa to Qushui along the Lhasa River in Tibet were investigated and studied. The results showed most of the farmland soils were deficient in Se (<0.16 mg/kg) while rich in Ge (≥ 1.3 mg/kg). The contents of total Se and available Se had no significant correlations with pH, while the contents of total Ge and available Ge had negative significant correlations with pH but positive significant correlations with organic matter content. In general, soils in the study area are rich in Ge and has potential for the development and popularization of Ge-rich agricultural and animal husbandry products.

Key words: Lhasa River; Soil; Selenium; Germanium rich; Correlation; Spatial Distribution

硒(Se)是人和动物必需、对植物有益的微量元素^[1]。硒在抵抗细胞衰老、增强机体免疫力、预防癌症上有重要作用^[2]。严重缺硒是克山病、大骨节病两种地方性疾病的主要原因。中国是缺硒大国, 而青藏高原一带尤为严重^[3]。锗(Ge)是一种具有多种生物活性的微量元素, 对人体具有广泛的防病治病等功效, 被科学家称为“21 世纪的救命锗”“生命的奇效元素”^[4-5]。世界土壤锗元素平均值为 1.0 mg/kg, 中国土壤锗元素平均值为 1.7 mg/kg^[6]。从植物获取硒和锗是对人体最安全有效的来源, 富硒富锗土壤可广泛应用于富硒富锗农产品的生产。

西藏拉萨地处青藏高原南部, 属于高原温带半干旱季风气候, 为一江两河农业区, 是西藏商品粮主要

生产基地^[7]。本文研究探讨西藏拉萨至曲水拉萨河沿岸农用地土壤硒和锗含量、空间分布特征及影响因素, 以为科学指导利用当地富硒富锗土壤资源, 为当地土地开发利用、农业结构调整、发展特色优质富硒富锗农牧业提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为拉萨市至曲水县拉萨河沿岸冲积平原, 主要为农业种植的平谷洼地, 属于一江两河农业区, 具体范围如图 1 所示。研究区地处雅鲁藏布江支流拉萨河流域, 喜马拉雅山北侧, 区内以下沉气流为主, 全年晴朗天气较多, 冬季严寒天气较少, 夏季很少有

①基金项目: 西藏自治区科学技术厅科技项目(CGZH2017000245)资助。

作者简介: 袁宏(1986—), 男, 重庆人, 工程师, 研究方向为地理信息系统、资源环境评价与信息处理、计算机应用技术。E-mail: yhyda@qq.com

极高气温,主要为高原半干旱季风气候。总体气候较为温暖、干燥,年平均气温为 7.4℃,平均相对湿度为 30%~50%,全年降水量 200~500 mm,干燥度为 1.5~10,干湿指数 3~7,≥10℃积温为 2 177℃,无霜期 133 d,全年日照时数在 3 000 h 以上。拉萨地区地形地貌的基本特点是山峦重叠、山高坡陡、沟谷纵横、沟深谷狭,并且山上植物较少^[8]。



图 1 研究区范围及采样点

根据《西藏自治区土地利用总体规划(2006—2020 年)》,研究区农用地主要属于基本农田和一般农田,土地利用现状主要为水浇地。该区属于典型的农牧区,农业以种植业为主,粮食作物主要有小麦、青稞,经济作物主要有蔬菜、瓜类、油菜等;农用地土壤类型主要为潮土。潮土是河流沉积物受地下水运动和耕作活动影响而形成的土壤,土壤腐殖积累过程较弱,具有腐殖质层、氧化还原层及母质层等剖面层次,沉积层理明显^[7]。它是拉萨河地区的主要农业耕作土壤。

1.2 样品采集

根据 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[9]和 DD2008—06《土地质量地球化学评估技术要求(试行)》^[10]的相关要求,结合研究区河谷冲积平原的地形特点,按照拉萨河流向、农用地分布与集中情况将研究区划分为若干农用地块,采用分块随机布点法对土壤采样点进行布设,分块内采样点间距约 500 m,共设置土壤采样点位 124 个,如图 1 所示。

每个点位采集表层土壤样品 1 个,采样深度 0~

20 cm。同时,在有成片大面积较统一的作物种植的土壤采样点采集剖面样品,共采集剖面样品 8 组(含小麦/青稞种植土壤剖面样品 4 组、大棚蔬菜种植土壤剖面样品 4 组),采样深度 0~120 cm。每个土壤剖面采集 4 个样品,采样深度分别为:0~30、30~60、60~90 和 90~120 cm。

每个采样点用 GPS 记录坐标、高程,现场填写采样记录表、拍照和样品装袋编号。表层土壤采样时,需将土壤表面覆盖的植被、落叶等杂物清除,并采用木铲去除与金属采样器接触部分的土壤,最后用木铲自上而下刮取土壤。为增强取样的代表性,以取样点为中心按 5 点混合四分法取样,每个土壤样品采集量约 2 kg。土壤剖面采样自下而上进行,先采剖面的底层样品,再采中层样品,最后采上层样品。

1.3 样品检测

土样由西南冶金地质测试所进行分析检测,检测内容包括:pH、阳离子交换量、全硒、有效硒、全锗、有效锗、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、全氮、全磷、全钾,具体方法参照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[11]、HJT 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[9]等标准规范。其中,pH 采用电位法测定;全硒、全锗含量采用原子荧光法测定;有效锗含量采用 10.0 g 样品加 20 ml 稀盐酸(1:5)浸提,ICP-MS 测定;有效硒含量采用水浸提的水溶态硒和 0.1 mol/L 磷酸二氢钾浸提的交换态硒之和表示;阳离子交换量采用铵盐快速法测定;碱解氮、全氮含量采用凯氏蒸馏法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定;速效钾、全钾含量采用原子吸收分光光度法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 消化分光光度法测定。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 进行描述性统计,采用 IBM SPSS 24.0 进行 Pearson 相关性分析,采用 SigmaPlot 12.0 进行数据制图,采用 Surfer 14.0 进行 Kriging 插值分析。

2 结果与分析

2.1 土壤硒含量分析与评价

研究区土壤硒含量如表 1 所示,可见,全硒含量介于 0.026~0.198 mg/kg,平均值为 0.083 mg/kg,全硒平均含量较背景值有所减少,并远小于我国土壤硒的平均含量 0.29 mg/kg^[12]。曲航等^[13]研究指出西藏土壤硒含量平均值为(0.150±0.084)mg/kg,由此,研究

区土壤硒含量也仅为西藏土壤硒平均含量的一半左右。从变异系数看,研究区土壤硒含量的变异系数为

0.32,表现为中等变异性,说明研究区土壤硒含量一定程度上受到人为活动影响。

表 1 土壤硒、锗含量描述性统计

项目	样点数	极大值(mg/kg)	极小值(mg/kg)	中数(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	方差	变异系数	背景值(mg/kg)
全硒	124	0.198	0.026	0.082	0.083	0.026	0.001	0.32	0.157
有效硒	124	0.009 2	0.001 1	0.003 5	0.003 7	0.002	0.000 003	0.453	—
全锗	124	1.62	0.91	1.28	1.27	0.129	0.017	0.102	1.8
有效锗	124	0.034	0.006	0.012	0.013	0.004	0.000 02	0.323	—

注:表中背景值参考《中国土壤元素背景值》(西藏部分)^[14]。

目前土壤硒含量未有一个全国性的丰缺标准,参考广西壮族自治区地方标准 DB45/T 1442—2016《土壤中全硒含量的分级要求》^[15]旱地土壤硒含量 >3 mg/kg 为过硒, 0.49 ~ 3 mg/kg 为富硒, 0.16 ~ 0.49 mg/kg 为足硒, <0.16 mg/kg 为缺硒。研究区 124 个土壤样品中仅有 4 个样品全硒含量处于足硒含量范围,其余 120 个样品均为缺硒含量范围,如图 2 所示。研究区土壤样品有效硒含量介于 0.001 1 ~ 0.009 2 mg/kg,平均值为 0.003 7 mg/kg,土壤样品有效硒平均含量占全硒含量约 4.5%,变异系数为 0.453,也表现为中等变异性。

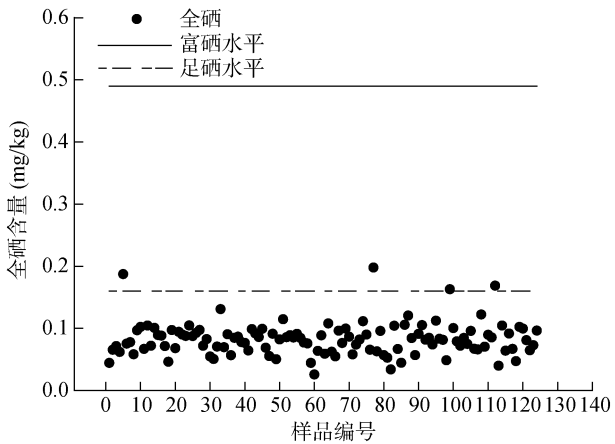


图 2 研究区土壤全硒含量散点图

2.2 土壤硒含量空间分布特征

研究区表层土壤全硒、有效硒含量平面等值图如图 3 所示。研究区绝大部分土壤全硒含量 <0.16 mg/kg,表现为缺硒(图 3A 中白色区域),仅研究区中部往下一小面积区域的土壤有足硒特征(图 3A 中浅灰色区域),其面积仅占总面积的约 1.0%。这与前人^[12-13]对青藏高原缺硒的论述吻合。研究区土壤有效硒含量普遍较低,大部分地区均 <0.005 5 mg/kg,整体上部稍多,南部主要为基本农田,结合土壤有效硒含量的中等变异性,说明该区域土壤有效硒含量受农业种植

影响较大。

从硒的剖面分布看,研究区 0 ~ 30 cm 深度土壤全硒含量介于 0.047 ~ 0.102 mg/kg,平均值 0.079 mg/kg; 30 ~ 60 cm 土层介于 0.055 ~ 0.116 mg/kg,平均值 0.089 mg/kg; 60 ~ 90 cm 土层介于 0.07 ~ 0.13 mg/kg,平均值 0.10 mg/kg; 90 ~ 120 cm 土层介于 0.052 ~ 0.117 mg/kg,平均值 0.085 mg/kg,即研究区 0 ~ 120 cm 深度土壤全硒含量均低于背景值。土壤有效硒含量 0 ~ 30 cm 土层介于 0.003 1 ~ 0.007 1 mg/kg,平均值 0.005 2 mg/kg; 30 ~ 60 cm 土层介于 0.002 8 ~ 0.009 4 mg/kg,平均值 0.005 7 mg/kg; 60 ~ 90 cm 土层介于 0.002 2 ~ 0.007 7 mg/kg,平均值 0.004 4 mg/kg; 90 ~ 120 cm 土层介于 0.001 2 ~ 0.005 5 mg/kg,平均值 0.003 8 mg/kg,即研究区 0 ~ 120 cm 深度土壤有效硒含量均较低。

2.3 土壤锗含量分析与评价

从表 1 看,研究区土壤全锗含量介于 0.91 ~ 1.62 mg/kg,平均值为 1.27 mg/kg,均低于背景值,略高于世界土壤锗元素平均值(1.0 mg/kg^[6]),低于我国土壤锗元素平均值(1.7 mg/kg^[6])。从变异系数看,研究区土壤样品全锗含量变异系数为 0.102,近弱变异性,说明受人为活动影响较小。

当前对富锗土壤尚无一个权威性的规范或标准,2017 年曾妍妍等^[6]暂定新疆土壤富锗标准为 1.3 mg/kg。研究区 124 个土壤样品中,全锗含量 ≥ 1.3 mg/kg 的样品有 54 个,比例达 43.5%,如图 4 所示。研究区 80% 的土壤样品全锗含量集中在 1.09 ~ 1.42 mg/kg,土壤富锗情况较好。研究区土壤有效锗含量介于 0.006 ~ 0.034 mg/kg,平均值为 0.013 mg/kg,80% 的土壤样品有效锗含量集中在 0.008 ~ 0.017 mg/kg,有效锗含量占锗总量约 1%,变异系数为 0.323,表现为中等变异性。

2.4 土壤锗空间分布特征

研究区土壤锗空间分布情况如图 5 所示。研究区大部分土壤全锗含量 ≥ 1.3 mg/kg,表现为富锗(图 5A

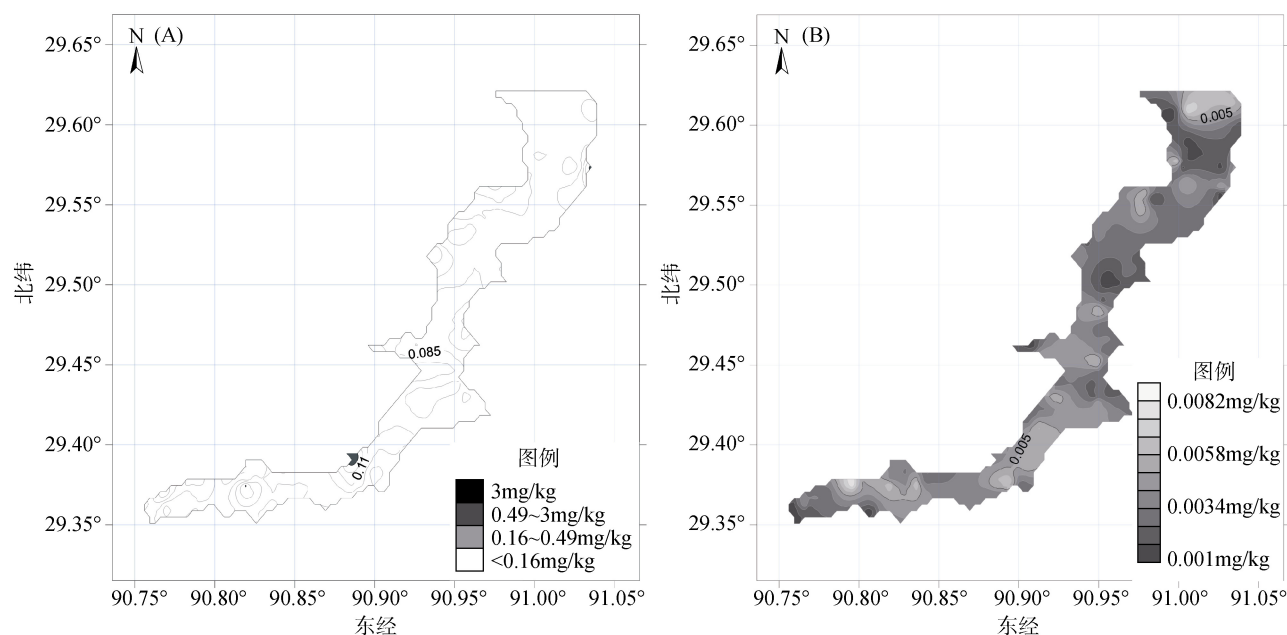


图 3 研究区土壤全硒(A)、有效硒含量(B)平面等值线图

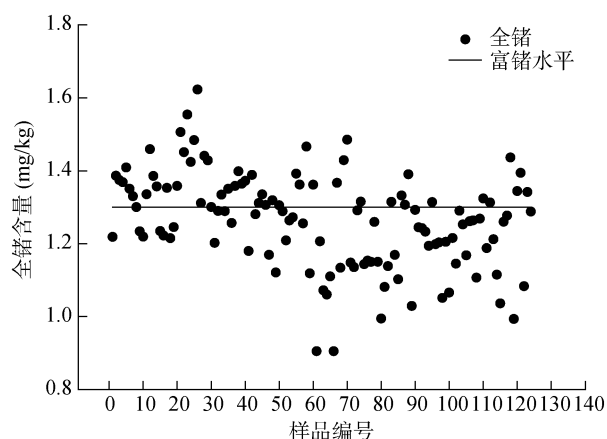


图 4 研究区土壤全镉含量散点图

中深灰色区域), 面积约占研究区总面积的 55.6%。说明研究区具有富镉土壤开发的潜力, 可以考虑富镉农牧产品的开发与推广。研究区土壤有效镉含量普遍较低, 大部分地区均 <0.018 mg/kg; 高值主要集中在研究区中部拉萨河西侧, 该区主要为大棚蔬菜种植, 结合研究区土壤有效镉含量的中等变异性, 说明该区域土壤有效镉含量受大棚种植影响较大。

从镉的剖面分布看, 研究区土壤样品全镉含量 0~30 cm 土层介于 0.99~1.44 mg/kg, 平均值 1.27 mg/kg; 30~60 cm 土层介于 1.23~1.39 mg/kg, 平均值 1.30 mg/kg; 60~90 cm 土层介于 1.04~1.37 mg/kg, 平均值 1.25 mg/kg; 90~120 cm 土层介于 1.20~1.40 mg/kg, 平均值 1.30 mg/kg。可见, 研究区不同深度土壤均具有富镉特征, 也进一步说明研究区土壤富镉情况较好。研究区有效镉含量 0~30 cm 土层介

于 0.009~0.025 mg/kg, 平均值 0.013 mg/kg; 30~60 cm 土层介于 0.011~0.021 mg/kg, 平均值 0.016 mg/kg; 60~90 cm 土层介于 0.010~0.023 mg/kg, 平均值 0.017 mg/kg; 90~120 cm 土层介于 0.010~0.023 mg/kg, 平均值 0.015 mg/kg, 即研究区 0~120 cm 深度土壤有效镉含量变化较小。

2.5 相关性分析

硒在岩石-土壤-植物-动物(人)间循环, 有效硒主要发生在土壤-植物这一环节。作为息息相关的硒循环体系中的某一特定组分, 硒的有效性必然受岩矿类型、土壤母质、土壤理化性质甚至植物种类的影响^[16]。母质是土壤形成的基础, 前人研究表明由于母质的差异致使土壤特性存在着很大变异^[17-19]。由于研究区地属拉萨河谷冲积平原, 土壤主要为潮土, 母质较为一致, 本文仅从土壤理化性质和土壤肥力角度研究分析研究区土壤硒、镉的相关性。前人已明确提出土壤理化性质是影响硒的有效性的主要因素之一^[12]。但在土壤镉相关性研究方面尚少见报道。

表 2 为研究区土壤硒、镉含量与土壤基本性质的 Pearson 相关分析结果。从表 2 可见, 研究区土壤全硒含量与有效镉、全磷、碱解氮、有机质、全氮含量及阳离子交换量(CEC)存在极显著的正相关关系($P<0.01$), 与全钾含量存在极显著的负相关关系($P<0.01$), 与全镉含量存在显著的正相关关系($P<0.05$), 与有效硒、有效磷、速效钾含量和 pH 不存在显著的相关关系。研究区土壤有效硒含量与全硒、全镉、有效镉、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机

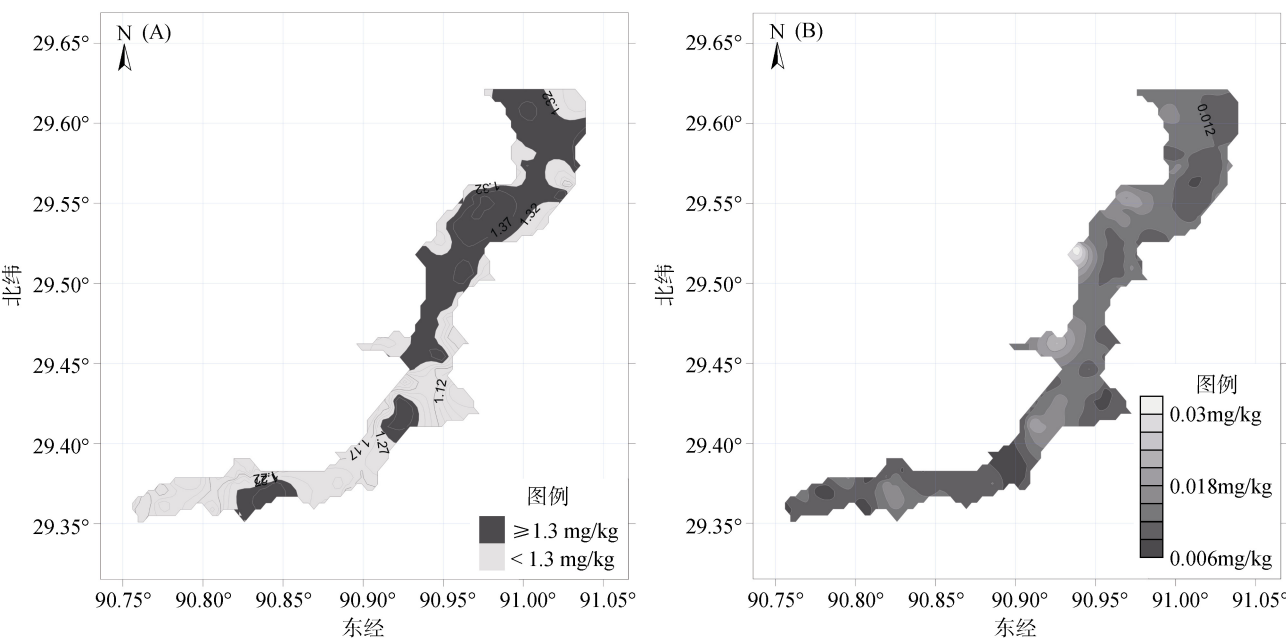


图 5 研究区土壤全锗(A)、有效锗含量(B)平面等值线图

质、全氮含量及阳离子交换量和 pH 均不存在显著的相关关系。

表 2 表层土壤硒、锗含量和土壤基本性质的 Pearson 相关性

	全硒	全锗	有效锗	有效硒
全硒	1			
全锗	0.207*	1		
有效锗	0.327**	0.476**	1	
有效硒	0.125	0.138	0.130	1
全磷	0.337**	0.079	0.296**	0.081
全钾	-0.352**	0.328**	0.057	0.136
碱解氮	0.279**	0.397**	0.463**	0.127
有效磷	0.045	0.186*	0.113	0.174
速效钾	0.128	0.163	0.257**	0.085
有机质	0.442**	0.306**	0.343**	-0.087
全氮	0.433**	0.338**	0.336**	-0.044
CEC	0.526**	0.303**	0.517**	0.033
pH	-0.092	-0.337**	-0.512**	-0.017

注：*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平相关性显著(双尾)。

王琪等^[12]研究表明,土壤 pH 是影响土壤中硒含量的一个重要因素,中性和酸性土壤中硒的有效性明显低于碱性土壤,而在碱性土壤中硒主要以溶解性高的硒酸盐形式存在^[20]。有机质也是影响土壤硒全量及其有效性的重要因素。有机质对硒的生态效应的影响具有两重性,一方面有机质矿化过程会释放出硒而增强其有效性,另一方面有机质对土壤溶液中硒有较强的固定能力,从而影响硒的传输^[21-22]。

在土壤硒含量方面,从表 2 可知研究区土壤全硒、有效硒含量均与 pH 表现为负相关性。研究区土壤 pH 介于 4.00~9.00,平均值为 7.77,中数为 8.03,土壤大部分为碱性。资料显示,土壤偏碱性有利于提高植物对土壤中硒的吸收和利用^[23]。但是,从显著性 $P(0.308$ 和 $0.848)$ 和相关性大小 $(-0.092$ 和 $-0.017)$ 看,研究区土壤全硒、有效硒含量与 pH 不存在显著的相关关系,与前人论述相悖。反之,研究区土壤全硒含量与 CEC 存在显著的强相关关系,相关性程度最大,与有机质含量存在显著的中等相关关系,相关性程度其次。CEC 的大小,基本上代表了土壤可能保持的养分数量,即保肥性的高低。研究区土壤样品 CEC 介于 1.96~13.37 cmo/kg,平均值为 7.39 cmol/kg。研究区土壤样品有机质介于 3.21~47.73 g/kg,平均值为 16.98 g/kg。参照全国第二次土壤普查对农田土壤养分分级相关标准,研究区土壤 CEC 处于较低水平,土壤有机质处于中等水平,说明研究区土壤保肥性偏低。研究区土壤全硒含量与 CEC 存在显著的强相关关系说明,研究区土壤硒易随土壤肥力改变而流失。研究区土壤平均全硒含量也仅为西藏土壤硒平均含量的一半左右,也说明区内土壤硒含量受农业种植影响较大。

在土壤锗含量方面,从表 2 可知研究区土壤全锗含量与有效锗、钾、碱解氮、有机质、全氮含量及 CEC 存在极显著的正相关关系 $(P<0.01)$,与 pH 存在极显著的负相关关系 $(P<0.01)$;与全硒、有效磷含量存在显著的正相关关系 $(P<0.05)$;与有效硒、速效钾

含量不存在显著的相关关系。研究区土壤有效锗含量与全硒、全锗、全磷、碱解氮、速效钾、有机质、全氮含量及 CEC 存在极显著的正相关关系($P<0.01$),与 pH 存在极显著的负相关关系($P<0.01$),与有效硒、全钾、有效磷含量不存在显著的相关关系。锗在土壤中主要以残渣态、酸可提态和有机结合态形式存在,土壤有机质能富集锗^[24]。研究区土壤全锗、有效锗含量均与 pH 表现为极显著的负相关关系,与锗在土壤中酸可提态的主要存在形式吻合。研究区土壤全锗、有效锗含量与有机质含量均为极显著的中等程度正相关关系,与研究区土壤中等水平的有机质含量吻合;研究区土壤全锗、有效锗含量与 CEC 均为极显著的正相关关系,也说明研究区土壤锗易随土壤肥力改变而流失。

3 结论

1)西藏拉萨至曲水拉萨河沿岸农用地绝大部分土壤全硒含量 $<0.16\text{ mg/kg}$,仅有一小面积土壤有足硒特征,其面积仅占总面积的约 1.0%,土壤平均全硒含量也仅为西藏土壤硒平均含量的一半左右;土壤有效硒含量普遍较低,约占硒总量的 4.5%。研究区大部分土壤全锗含量 $\geq 1.3\text{ mg/kg}$,表现为富锗,面积约占研究区总面积的 55.6%;土壤有效锗约占锗总量的 1%。研究区具有富锗土壤开发的潜力,可以考虑富锗农牧产品的开发与推广。

2)在土壤剖面上,研究区绝大部分区域 0~120 cm 深度土壤均表现为缺硒,而大部分地区 0~120 cm 深度土壤均具有富锗特征。

3)相关分析表明,研究区土壤全硒含量与阳离子交换量存在显著的强相关关系,土壤全硒、有效硒含量与 pH 均不存在显著的相关关系。土壤全锗、有效锗含量与碱解氮、有机质、全氮含量及阳离子交换量存在极显著的正相关关系,土壤全锗、有效锗含量均与 pH 表现为极显著的负相关关系,土壤锗与有效锗含量之间存在极显著的正相关关系。

参考文献:

[1] Lyons G H, Genc Y, Soole K, et al. Selenium increases seed production in Brassica[J]. Plant and Soil, 2009, 1/2: 73–80.
[2] 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.
[3] 杨林生,吕瑶,李海蓉,等. 西藏大骨节病区的地理环境特征[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4466–4471.

[4] 徐德海. 化学元素知识简明手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
[5] 叶铁林,徐宝财. 化学元素的奇妙世界[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
[6] 曾妍妍,周金龙,郑勇,等. 新疆若羌县绿洲区富锗土壤地球化学特征及成因分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1082–1086.
[7] 王国强. 西藏拉萨市农业主要土壤类型及改良利用途径[J]. 农业与技术, 2012, 32(3): 1+9.
[8] 张船红,何政伟,仇文侠,等. 拉萨市城关区土地利用与土壤侵蚀变化分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 73–78.
[9] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
[10] 中国地质调查局. 土地质量地球化学评估技术要求(试行) DD 2008—06[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[11] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
[12] 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.
[13] 曲航,尼玛扎西,韦泽秀,等. 西藏土壤硒状况与富硒青稞生产路径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3645–3653.
[14] 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: 330–491.
[15] 广西壮族自治区质量技术监督局. 土壤中全硒含量的分级要求: DB45/T 1442—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
[16] 李永华,王五一. 硒的土壤环境化学研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 230–233.
[17] 徐茂. 基于地统计学的江苏省环太湖地区土壤肥力质量演变特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
[18] 陈小梅,姚玉才,章明奎. 浙东海积平原耕地土壤肥力特征及空间变化规律研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 618–623.
[19] 王秀丽,冯新伟,张凤荣,等. 北京地区红黏土碱性特征及其成因分析[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 769–773.
[20] 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.
[21] Charak V S, Tripathi B R. Studies on selenium and iodine and iodine distribution in some soils of Kangra Valley Himachal Pradesh, India[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1989, 37(1): 167–170.
[22] 王莹. 硒的土壤地球化学特征[J]. 现代农业科技, 2008(17): 233–236.
[23] 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.
[24] 魏显有,刘云惠,王秀敏,等. 土壤中锗的形态提取和形态分布研究[J]. 环境化学, 2000, 19(3): 250–254.