

兰州碱性土壤与农产品中硒分布及形态研究^①

李伟^{1,2}, 李飞², 毕德², 王华魁³, 李海勇³, 周守标^{1*}, 赵其国⁴, 尹雪斌^{2*}

(1 安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000; 2 中国科学技术大学苏州研究院苏州市硒与人体健康重点实验室, 江苏苏州 215123; 3 兰州市农牧局, 兰州 730000; 4 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 通过对兰州市主要农业区表层土壤总硒有效硒调查和部分农产品总硒有机硒测定, 研究了兰州市碱性农田土壤与农产品中硒的积累特征和分布规律。结果表明, 兰州市农田表层土壤 pH 8.39±0.26, 总硒含量为 (0.179±0.066) mg/kg ($n=473$), 处于全国中等水平。全市土壤总硒含量区域性差别较大, 市辖区明显低于三县, 榆中县居全市之首。土壤有效硒与总硒含量显著正相关, 有效硒占比为 4.63% ~ 15.8%, 平均 8.27%。农产品中玫瑰 (*Rosa rugosa*), 部分西兰花 (*Brassica oleracea var.italica*) 和芹菜 (*Apium graveolens*) 样品硒含量高于 0.015 mg/kg, 为该市天然富硒农产品。农产品中有机硒占总硒比例较高, 均值为 73.4%。从区域整体来看, 土壤硒含量较高的县区农产品硒含量相对也较高, 适合富有机硒优质农产品开发。

关键词: 兰州; 碱性土壤; 农产品; 总硒; 硒形态

中图分类号: N8; S154.4

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。严重缺硒是克山病、大骨节病两种地方性疾病的主要原因, 低硒摄入也会导致癌症、肝病和眼病等疾病高发^[2-3]。据调查中国有 72% 的县(市)不同程度缺硒, 其中 1/3 为严重缺硒区, 全世界 2/3 的地区缺硒^[4]。膳食硒是人体硒的主要来源, 食物硒的含量很大程度上取决于土壤总硒含量, 特别是生物有效硒含量^[5-6]。之前的研究多集中于较大区域土壤和成土母质中硒背景值的调查分析^[7-9], 工业生产对土壤硒的污染和植物中硒含量的关系研究^[10], 以及我国东部部分酸性土壤与植物中硒关系的研究^[11-12]; 而对碱性农耕土壤和农产品中硒的分布和形态研究较少。土壤偏碱性, 有利于提高植物对土壤中硒的吸收和利用^[13]。调查研究碱性土壤和农产品中硒含量间的关系, 可为今后农产品硒营养强化提供参考依据。

兰州市位于中国甘肃省中部地区, 祁连山东端, 陇西黄土高原西北部, 农耕土壤为碱性土壤。区内海拔高程为 1 500 ~ 2 500 m。由于海拔较高, 日照时间长, 昼夜温差较大, 农产品养分积累量大, 品质优越; 盛产的农产品如玫瑰 (*R. rugosa*)、百合 (*Lilium brownii*) 等都是我国特色的农产品品种。据 20 世纪 80 年代的

调查资料显示, 兰州地区位于我国低硒区^[14]。本文对兰州市主要农耕区的土壤和农产品的硒含量进行了系统调查研究, 旨在查明兰州碱性农耕土壤下主要农产品的硒积累特征及空间分布规律, 为兰州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 样品采集和处理

兰州地处中纬度地带, 远离海洋, 为典型大陆季风气候, 日照强烈、干旱少雨、温差较大、积温较高。全市土壤偏碱性, 主要类型为灰钙土、栗钙土、灰褐土、黄绵土、亚高山草甸土等。其中灰钙土是全市面积最大的地带性土壤, 占全市总面积的 66.21%。灰钙土、栗钙土、黄绵土为主要农田土壤类型^[15]。

为了准确反映兰州农业土壤中硒含量情况, 土壤采集区域主要沿着该市主要农耕区分布, 因此并不是均匀分布。具体采集方法是: 每 10 hm² 农田按“S”形采集 10 个土壤点混合为 1 个土壤样品, 并用 GPS 记录样品经纬度和海拔高度等信息。采集区域涉及兰州市三县四区的主要农耕区, 主要包含榆中县西南部, 皋兰县中部、南部, 永登县东部一线, 以及永登县北部和南部, 共计土壤样品 473 个 (图 1)。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40601088)、中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 (Y052010020) 和兰州市富硒农产品生产标准化技术研究项目资助。

* 通讯作者 (zhoushoubiao@vip.163.com; xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 李伟 (1984—), 男, 山西夏县人, 硕士研究生, 主要从事硒与人体健康方面研究。E-mail: laoshiliwei@163.com

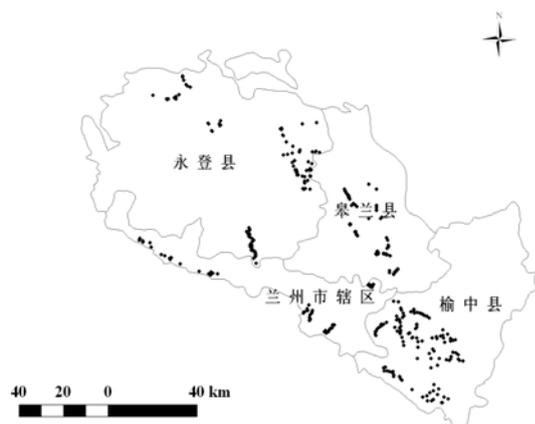


图1 兰州市土壤样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in Lanzhou

农产品样品采集已经成熟的农作物的可食部分。同样以每 10 hm^2 农田为一个单位, 在区域内采集同种农作物的果实 3 份, 混合为 1 个农产品样品。样点分布与土壤样点基本一致, 由于不同品种农作物成熟时间不同, 采集时间与土壤样点有差异。农产品样品总计 122 个, 包括玫瑰、枸杞、百合、娃娃菜和西兰花等兰州特色农产品。

土壤样品自然风干, 充分研磨后过 100 目筛, 装袋置干燥器中待测。农产品样品用自来水和去离子水依次冲洗 3 次晾干附着水分后, 粉碎机粉碎湿样检测硒含量。

1.2 实验方法

1.2.1 样品总硒测定 称取 0.2 g 样品于锥形瓶中, 用 $v(\text{HNO}_3) : v(\text{HClO}_4) = 4:1$ 的混酸冷消解过夜, 第二天于电热板加热消解至溶液澄清, 210°C 赶酸至瓶中有大量白烟, 待溶液冷却加入 5 ml 浓盐酸, 还原 3 h 。定容至 25 ml , 用氢化物发生-原子荧光法 (HG-AFS) 测定硒含量。消解过程采用国家土壤标准物质 (GBW07405) 作为质量控制, 设置样品空白, 此方法的回收率 $85.5\% \sim 117.8\%$ 。

1.2.2 土壤 pH 值测定 称取 10 g 土壤于 50 ml 烧杯中, 加去离子水 25 ml , 玻璃棒搅拌 1 min , 静置 30 min 待土液分层, 用酸度计测定上层液 pH 值。

1.2.3 土壤有效硒测定 称取 1 g 研磨过筛后土壤样品, 用 0.5 mol/L 的 KH_2PO_4 溶液 15 ml 震荡提取 90 min , 离心后取 5 ml 上清液^[16], 按照总硒测定方法处理测定硒浓度, 计算得土壤中有效硒含量。

1.2.4 农产品有机硒测定 称取粉碎后样品 2 g 于锥形瓶中, 加水超声 30 min , 再加热煮沸 20 min , 转移至离心管 10000 r/min 离心 1 h 。取上清液用环己烷

萃取后, 水相按照总硒测定步骤测定硒浓度, 计算得到样品中无机硒含量, 同时测定样品总硒含量, 差减后得到有机硒含量^[17]。消解过程采用国家生物标准物质 (GBW07602) 作为质量控制, 设置样品空白, 此方法的回收率 $85.5\% \sim 117.8\%$ 。

1.2.5 数据处理 将样品经纬度记录信息导入 Arcgis8.0 软件处理, 后结合兰州政区图得到样点分布图。将样品经纬度信息和总硒含量一一对应导入 Arcgis8.0 软件, 利用其图层分析功能, 结合兰州政区图, 用反距离加权插值法制得兰州市土壤总硒含量分布图, 并用 SPSS13.0 软件对检测数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤总硒和有效硒含量

2.1.1 土壤总硒含量及空间分布 对土样检测分析, 结果显示兰州主要农耕区表层土壤 pH 为 8.39 ± 0.26 , 总硒含量算术平均值为 0.179 mg/kg , 中值 0.170 mg/kg , 最小值 0.065 mg/kg , 最大值 0.703 mg/kg 。兰州地区表层土壤平均总硒含量低于中国土壤总硒背景值 (0.210 mg/kg), 略高于甘肃省土壤总硒含量平均值 (0.160 mg/kg), 处于全国硒背景值 ($0.04 \sim 9.93 \text{ mg/kg}$) 和世界背景值范围 ($0.01 \sim 12 \text{ mg/kg}$) 之内^[18], 高于东部沿海地区和东北地区, 但明显低于华北、南部沿海和西南地区, 属全国中等水平^[19-22]。

将土壤总硒含量和样品采集点经纬度记录信息导入 Arcgis8.0 软件, 图层分析得到兰州市土壤总硒含量分布图 (图 2)。参考中国土壤硒含量环境质量标准^[23], 即土壤总硒含量小于 0.125 mg/kg , 兰州市农耕土壤缺硒区域面积很小, 主要位于城关区与皋兰县结合部, 在永登县北部, 榆中县西南部, 七里河区有零星分布; 土壤总硒含量低于兰州市平均值面积相对较大, 主要分布于永登县西部和北部, 红古区西部, 城关区、七里河区大部, 皋兰县中部和榆中县西南部; 土壤总硒含量正常区域, 硒含量小于 0.235 mg/kg , 高于平均值而低于 90% 频度值, 占兰州市总面积的三分之一以上, 主要分布在永登县东部和南部, 皋兰县中西部以及榆中县东部和中部地区。上述 3 个县各有一个土壤总硒含量较高区域点, 土壤总硒含量介于 90% ~ 95% 频度值区间内, 分别位于永登县南部, 皋兰县东部, 榆中县西部, 尤其榆中县西部的土壤总硒含量位于兰州市之首, 且有多处土壤总硒含量较高点。

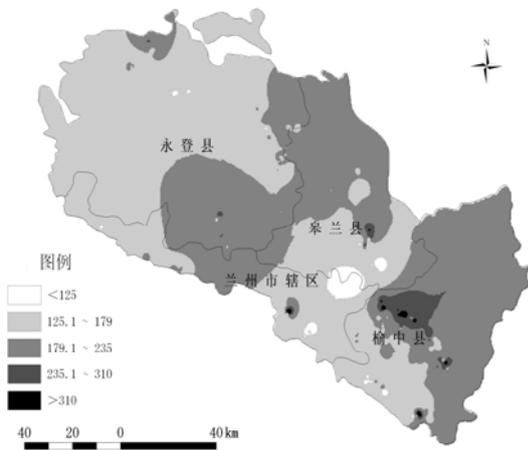
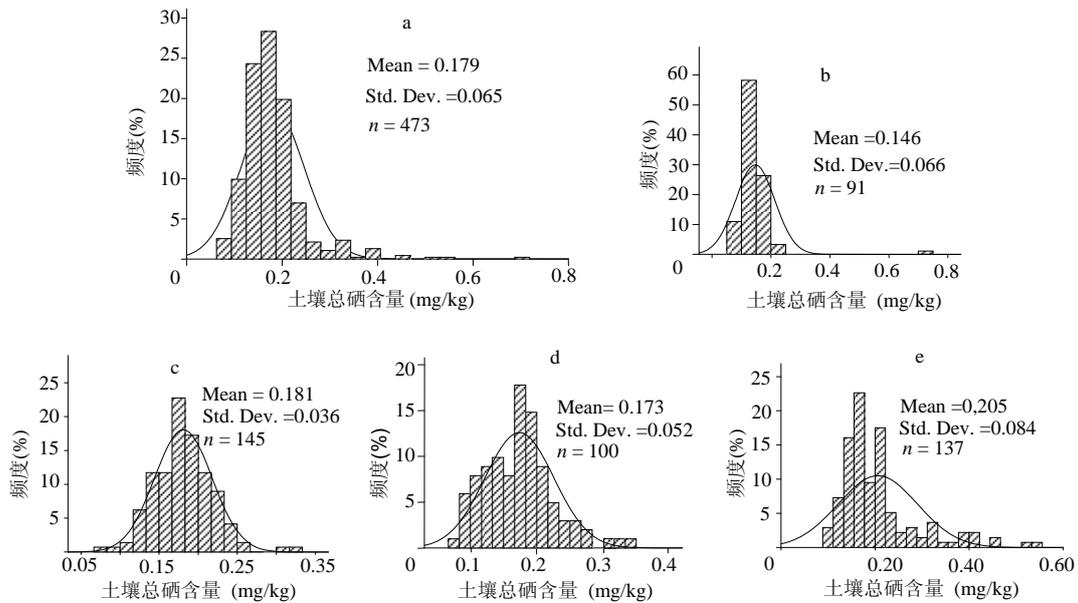


图 2 兰州市农业土壤总硒含量空间分布图 (mg/kg)

Fig. 2 Spatial distribution of soil total selenium contents in agricultural areas in Lanzhou

2.1.2 兰州市各区县和乡镇土壤总硒含量 兰州市土壤样点总硒含量频度分布图(图 3)显示,兰州市土壤表层总硒含量成正偏态分布:硒含量较高样点所占比例很小,硒含量 0.150 ~ 0.200 mg/kg 的样点占全市 60% 以上。参照市辖区和各县土壤总硒含量频度图,市辖区 90% 以上样点硒含量低于 0.200 mg/kg,只有一个样点偏高。各个县区中,永登县和皋兰县土壤总硒含量频度分布特性较为一致,土壤总硒频度图最接近于正态分布,这表明该县区内不同区域土壤总硒含量差异不大。而榆中县 0.300 mg/kg 以上样点频度明显高于市辖区和另外两个县区,而且在 0.170 ~ 0.200 mg/kg 之间有一个频度小于 10% 的样点区,表明榆中县境内不同区域土壤总硒含量差异较大。总体来看兰州市城乡之间土壤总硒含量有较大差异,各个县区明显高于市辖区(图 3)。



(a 兰州全市, b 市辖区, c 永登县, d 皋兰县, e 榆中县)

图 3 兰州市以及各县区土壤总硒含量频度图

Fig. 3 Frequency distribution of soil total selenium content distribution in Lanzhou

兰州市辖区的 6 个乡镇只有平安镇土壤总硒含量接近全市平均值,而且有两个乡镇低于缺硒土壤线。其他 3 县的 23 个乡镇中,皋兰县的什川镇处于缺硒土壤线以下。土壤总硒含量在全市均值附近的有 11 个乡镇。有 10 个乡镇高于兰州市平均值。榆中县的土壤总硒含量较高的乡镇最多,其中金崖镇土壤总硒 0.329 mg/kg,居兰州市各乡镇的表层土壤之首(表 1)。

2.1.3 土壤有效硒与总硒关系分析 在 473 个土壤样品中抽取 40 个土壤样品进行有效态硒浸提实验,所抽取土壤样品覆盖兰州各个县区。结果表明,兰州土壤有效态硒含量为 0.009 ~ 0.047 mg/kg,有效态硒占总硒比例范围 4.6% ~ 15.8%,平均为 8.27% ± 2.7%。土壤有效态硒(x)和总硒(y)含量呈显著正相关(图 4)。这一结果与国内其他地区土壤有效硒和总硒相关性关系类似^[24]。

表1 兰州市各乡镇土壤总硒含量 (mg/kg)

Table 1 Average soil selenium concentrations of towns in Lanzhou

县/市辖区	乡镇	样品数	平均值
城关区	青白石乡	15	0.103 ± 0.015
红古区	红古乡	12	0.142 ± 0.013
	花庄镇	16	0.159 ± 0.018
	平安镇	13	0.177 ± 0.019
七里河区	西果园镇	20	0.125 ± 0.018
西固区	金沟乡	15	0.144 ± 0.070
	皋兰县	什川镇	15
永登县	水阜乡	30	0.167 ± 0.043
	黑石乡	10	0.171 ± 0.035
	西岔镇	30	0.194 ± 0.013
	石洞镇	15	0.21 ± 0.054
	城关镇	10	0.138 ± 0.014
	上川镇	30	0.175 ± 0.027
	武胜驿镇	15	0.176 ± 0.036
	中川镇	30	0.177 ± 0.016
	秦川镇	30	0.179 ± 0.020
	苦水镇	30	0.217 ± 0.028
榆中县	马坡乡	13	0.139 ± 0.033
	小康营乡	3	0.152 ± 0.019
	城关镇	2	0.152 ± 0.001
	新营乡	15	0.155 ± 0.049
	和平镇	15	0.157 ± 0.021
	连搭乡	15	0.181 ± 0.028
	定远镇	15	0.189 ± 0.017
	来紫堡乡	15	0.207 ± 0.077
	清水乡	15	0.212 ± 0.060
	三角城乡	12	0.212 ± 0.012
夏官营镇	2	0.224 ± 0.083	
金崖镇	15	0.329 ± 0.060	

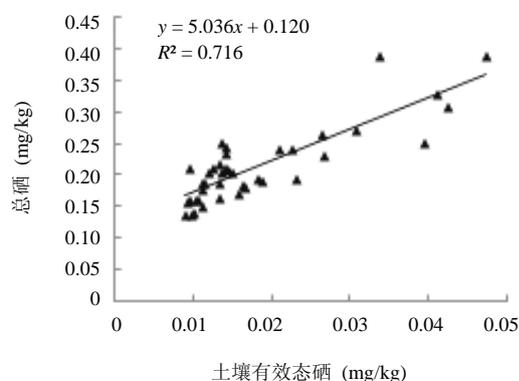


图4 土壤总硒和有效态硒相关性

Fig. 4 Correlation between total selenium and bioavailable selenium contents in soil in Lanzhou

2.2 农产品硒含量

在调查的19种农产品中, 硒含量范围为0.0011~0.0767 mg/kg, 农产品硒含量在品种之间和产地之间均有较大差异。永登县农产品的硒含量最高, 平均值为0.0288 mg/kg; 榆中县次之, 皋兰县和西固区的硒含量平均值较为接近, 分别为0.0054和0.0051 mg/kg; 而在市辖区, 红古区和七里河区的农产品硒含量相对较低, 分别为0.0028和0.0037 mg/kg。

调查涉及硒含量高于0.015 mg/kg的农产品主要分布于永登县和榆中县境内。如永登县玫瑰, 含量最高农产品位于本县苦水乡, 即兰州的特色农产品苦水玫瑰。榆中县的芹菜和西兰花有部分样品硒含量也高于0.015 mg/kg, 分布于榆中县土壤总硒含量较高区内。皋兰县没有农产品硒含量高于0.015 mg/kg。整体土壤总硒含量相对较低的市辖区没有发现农产品硒含量达到0.015 mg/kg (表2)。

兰州农产品有机硒比例为73.4% ± 18.7%。其中玫瑰有机硒比例最高, 平均88.7%, 有机硒比例最高达到94.3%。西兰花有机硒比例较低, 多数低于50%, 也是兰州农产品中唯一有机硒比例均值低于50%的农产品 (表3)。

2.3 土壤总硒与农产品硒关系

调查涉及农产品中, 单个农产品硒含量与对应的土壤总硒含量无明显的正相关性, 但在乡镇区域水平上, 同种农产品硒含量均值与土壤总硒含量变化基本一致。如, 玫瑰采集涉及的3个乡镇中, 苦水乡玫瑰硒含量显著高于秦川镇和中川镇的玫瑰, 这与苦水乡土壤总硒高于另外两镇相一致。百合、马铃薯也有类似的规律。同时, 区域农产品硒含量与土壤总硒含量均值并不是完全正相关。如, 秦川玫瑰与中川玫瑰土壤总硒含量相当, 农产品中硒含量却有较大差别; 榆中县三角城乡与永登县秦川的马铃薯, 农产品与土壤总硒则是负相关; 另外榆中县三角城乡与皋兰县石洞乡土壤总硒含量相当, 但马铃薯的硒含量有较大差别 (表4)。

3 讨论与结论

布和敖斯尔等^[25]将中国41个土壤类型按照硒含量水平分为3个类型区域。此次调查涉及的主要土壤类型有灰钙土、栗钙土、灰褐土和亚高山草甸土等, 均属于低硒土类区。兰州市碱性农耕土壤总硒含量0.179 mg/kg, 位于农牧业用土壤总硒含量安全阈值范围内^[23], 但含量偏低。其中市辖区部分土壤总硒含量低于安全阈值, 因为面积小、分布较为分散, 且在兰州市农产品生产中不占主导地位, 不会引起硒缺乏症。

表 2 兰州市农产品硒含量 (鲜重含量)

Table 2 Selenium concentration of agricultural products in Lanzhou

农产品	样品数	平均硒含量 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)
花椰菜 <i>Brassica.oleracea</i> var. <i>botrytis</i>	11	5.41×10^{-3}	10.86×10^{-3}	2.55×10^{-3}
大白菜 <i>B.campestris</i>	1	2.03×10^{-3}	-	-
大芥蓝 <i>B.albograbra</i>	3	4.46×10^{-3}	6.99×10^{-3}	2.23×10^{-3}
甘蓝 <i>B.oleracea</i>	5	2.90×10^{-3}	4.21×10^{-3}	1.69×10^{-3}
娃娃菜 <i>B. pekinensis</i>	9	2.91×10^{-3}	6.23×10^{-3}	1.11×10^{-3}
西兰花 <i>B.oleracea</i> var. <i>italica</i>	7	14.63×10^{-3}	44.59×10^{-3}	6.05×10^{-3}
紫甘蓝 <i>B.oleracea</i> var. <i>capitata</i> f. <i>rubra</i>	1	8.16×10^{-3}	-	-
百合 <i>Lilium brownii</i>	10	4.36×10^{-3}	12.87×10^{-3}	1.22×10^{-3}
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i>	1	10.07×10^{-3}	-	-
刀豆 <i>Canavalia gladiata</i>	1	3.01×10^{-3}	-	-
枸杞 <i>Lycium barbarum</i>	5	3.90×10^{-3}	5.89×10^{-3}	2.64×10^{-3}
胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	11	5.04×10^{-3}	10.04×10^{-3}	1.92×10^{-3}
绿萝卜 <i>Raphanus sativus</i>	2	2.33×10^{-3}	2.39×10^{-3}	2.27×10^{-3}
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	13	5.69×10^{-3}	11.07×10^{-3}	1.08×10^{-3}
芹菜 <i>Apium graveolens</i>	4	13.53×10^{-3}	33.20×10^{-3}	5.56×10^{-3}
西芹 <i>A.graveolens</i> var. <i>dulce</i>	4	8.15×10^{-3}	19.71×10^{-3}	2.95×10^{-3}
玫瑰 <i>Rosa rugosa</i>	30	16.67×10^{-3}	22.52×10^{-3}	5.06×10^{-3}
葡萄 <i>Vitis vinifera</i>	3	2.43×10^{-3}	2.97×10^{-3}	1.66×10^{-3}
西葫芦 <i>Cucurbita pepo</i>	1	5.20×10^{-3}	-	-

表 3 兰州部分农产品有机硒占总硒的比例 (%)

Table 3 Proportion of organic selenium in total selenium of agricultural products

农产品	样品数	平均有机硒比例	最大值	最小值
玫瑰 <i>R.rugosa</i>	8	88.75	94.33	75.04
花椰菜 <i>B.oleracea</i> var. <i>botrytis</i>	1	74.21	-	-
芹菜 <i>A.graveolens</i>	2	73.08	78.23	67.93
百合 <i>L.brownii</i>	1	71.33	-	-
枸杞 <i>L. barbarum</i>	2	70.69	74.67	66.71
马铃薯 <i>S.tuberosum</i>	1	51.03	-	-
西兰花 <i>B.oleracea</i> var. <i>italica</i>	4	45.61	60.62	37.63

表 4 兰州不同区域农产品总硒与土壤总硒含量 (mg/kg)

Table 4 Total selenium contents in agricultural products and soils in Lanzhou

农产品	乡镇	平均硒含量	土壤总硒
玫瑰 <i>R.rugosa</i>	苦水乡	54.73×10^{-3}	217×10^{-3}
	秦川镇	26.16×10^{-3}	179×10^{-3}
百合 <i>L.brownii</i>	中川镇	37.31×10^{-3}	177×10^{-3}
	西果园镇	3.13×10^{-3}	125×10^{-3}
马铃薯 <i>S.tuberosum</i>	金沟乡	5.60×10^{-3}	144×10^{-3}
	新营乡	2.14×10^{-3}	155×10^{-3}
	三角城乡	3.49×10^{-3}	212×10^{-3}
	黑石乡	5.80×10^{-3}	171×10^{-3}
	石洞镇	7.15×10^{-3}	210×10^{-3}
	秦川镇	7.96×10^{-3}	179×10^{-3}

兰州市表层农田土壤总硒含量分布不均匀, 城乡差异很大。永登、皋兰和榆中 3 个县的表层土壤总硒含量明显高于市辖区, 其中以榆中县最高, 永登县和皋兰县次之。土壤有效硒与土壤总硒含量显著相关。

Johnsson 等^[26]研究表明, 偏碱性、有机质含量较低而且砂质含量较高土壤, 有利于土壤中硒向植物可利用的形态转化, 促进植物对硒的吸收和积累。兰州市土壤偏碱性, 主要土壤类型为灰钙土, 在该地区种植的作物对土壤中的硒有较高的利用效率。因此利用人工硒强化技术, 开发富硒农产品, 在兰州市有很好的前景。

调查涉及的农产品中玫瑰和芹菜等达到兰州市富

硒农产品标准,是兰州是天然的富硒农产品。另有74%的农产品未达到富硒标准。但其农产品中有机硒所占比例较高,多数在70%以上,只有个别品种低于50%。针对该市硒含量较低的碱性农田土壤中种植生产出天然富硒农产品的现象,有待于进一步调查研究。

该市农产品硒含量与土壤中总硒含量在一定区域水平上的变化正相关,如3个乡镇的玫瑰硒含量与土壤总硒含量。但有例外证明农产品中硒与所调查土壤总硒只有较小相关性,尤其是部分品种单个农产品与对应的土壤样品的硒含量。说明农产品中的硒含量并不只受土壤总硒含量的影响,同时各种外界因子,如耕作方式、水肥管理和微域环境变化等,也对农产品硒含量有一定的影响。若该市通过人工硒强化技术种植富硒农产品,不但应注意种植地的土壤总硒含量背景值,还应该考虑不同农艺措施对农产品中硒含量的影响。关于后者还需进一步深入调查研究。

致谢: 实验室人员刘志奎、夏昭远等在样品分析检测过程中给予大量帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Lyons GH, Genc Y, Soole K, Stangoulis JCR, Liu F, Graham RD. Selenium increases seed production in Brassica. *Plant and Soil*, 2009, 318: 73-80
- [2] 王大鹏. 硒与人体健康及其分析方法. *世界元素医学*, 2008, 15(4): 44-46
- [3] Papp LV, Holmgren A, Khanna KK. Selenium and Selenoproteins in health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2010, 12(7): 793-795
- [4] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 马建华. 土壤硒及其与植物硒营养的关系. *生态学杂志*, 2003, 22(1): 22-25
- [5] 杨兰芳. 土壤中的硒. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2000, 18(1): 43-46
- [6] Bujdos M, Mulova A, Kubova J, Medved J. Selenium fractionation and speciation in rocks soils waters and plants in polluted surface mine environment. *Environmental Geology*, 2005, 47: 353-360
- [7] 朱传凤, 贾三春. 甘肃省土壤中硒背景值的调查研究. *甘肃环境研究与检测*, 1991, 14(2): 4-7
- [8] 袁建生, 束生庚, 刘惠麒, 李瑛, 闫海珠. 青海省水、土壤环境中硒含量水平分布的调查分析. *青海环境*, 1994(3): 128-135
- [9] 张晓平, 张玉霞. 西藏土壤中硒的含量及分布. *土壤学报*, 2000, 37(4): 558-562
- [10] 姚春霞, 尹雪斌, 张长波, 李志博, 宋静, 骆永明. 浙江富阳金属冶炼厂周围水田土壤-水稻系统中 As、Se 含量特征. *土壤*, 2006, 38(5): 534-538
- [11] Cao ZH, Wang XC, Yao DH, Zhang XL, Wong MH. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta. *Environment International*, 2001, 26: 335-339
- [12] 林小鸣, 杨晓文, 杨冬雪, 郭伟, 姜能座, 陈剑侠. 福建省茶园土壤硒研究. *化学工程与装备*, 2009(12): 31-33
- [13] 熊远福, 李辉勇, 刘军鸽. 水稻土壤中硒的价态转化及溶解性研究. *环境化学*, 1999, 18(4): 338-342
- [14] 中国科学院地理研究所环境与地方病研究组. 我国低硒带和克山病、大骨节病病因研究. *中国科学院院刊*, 1988(1): 54-60
- [15] 王建成, 田大礼, 刘庆云. 兰州市农业资源调查和农业区划报告汇编. 兰州: 兰州市农业区划委员会办公室, 1989: 72-75, 353-354
- [16] 吴雄平, 鲍俊丹, 伊田, 薛瑞玲, 梁东丽. 石灰性土壤有效硒浸提剂和浸提条件研究. *农业环境科学研究*, 2009, 28(5): 931-936
- [17] 秦昉. 植物中有机硒含量的测定. *无锡轻工大学学报*. 1998, 17(4): 74-77
- [18] 王云. 土壤环境元素化学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 217-227
- [19] 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价. *中国地质*, 2004, 31(增刊): 118-125
- [20] 徐文, 唐文浩, 邝春兰, 罗桂强. 海南省土壤中硒含量及影响因素分析. *安徽农业科学*, 2010, 38(6): 3 026-3 027
- [21] 何亚琳. 贵州省土壤含硒量及其分布. *土壤学报*, 1999, 33(4): 391-397
- [22] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 张甘霖, 赵其国, 黄铭洪. 香港土壤研究——II. 土壤硒的含量、分布及其影响因. *土壤学报*, 2005, 42(3): 404-409
- [23] 张东威. 中国土壤中硒及其土壤环境质量标准研究. *水土保持研究*, 1994, 1(5): 20
- [24] 廖启林, 华明, 冯金顺, 金洋, 吴新民, 颜朝阳, 朱伯万. 苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究. *中国地质*, 2007, 34(2): 347-353
- [25] 布和敖斯尔, 张东威, 刘力. 土壤硒区域环境分异及安全阈值的研究. *土壤学报*, 1995, 32(2): 186-193
- [26] Johnsson L. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH. *Plant and Soil*, 1991, 133: 57-64

Spatial Distribution and Speciation of Selenium in Alkaline Soils and Agricultural Products of Lanzhou

LI Wei^{1,2}, LI Fei², BI De², WANG Hua-kui³, LI Hai-yong³, ZHOU Shou-biao¹, ZHAO Qi-guo⁴, YIN Xue-bin²

(1 College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2 Suzhou Key Laboratory for Selenium and Human Health, USTC, Suzhou, Jiangsu 215123, China; 3 Livestock Bureau of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;

4 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To know the spatial distribution of soil total Se and Se speciation in agricultural products, totally 473 Lanzhou soils and 122 agricultural products were sampled and analyzed. The results showed that the average total Se concentration of the topsoil in Lanzhou was (0.179 ± 0.066) mg/kg ($n=473$), which ranked in middle level of China. Soil pH value was 8.39 ± 0.26 . Soil Se varied significantly among sampling sites, and the highest averaged soil Se was found in Yuzhong Area. The bioavailable Se of soils ranged from 4.63% to 15.8%, averagely 8.27% of the total Se. A significantly positive correlation between bioavailable Se and total Se in soils was observed. For the agricultural products, the total Se in rose (*Rosa rugosa*), Chinese wolfberry (*Lycium barbarum*), broccoli (*Brassica oleracea var.italica*) and celery (*Apium graveolens*) exceeded 0.015 mg/kg (a standard value for Se-enriched products in China). The organic Se covered averagely 73.4% of the total Se in these agricultural products. Generally, the areas with higher soil Se in Lanzhou could grow higher Se products. Because of alkaline properties of Lanzhou soil, it has a significant advantage in developing Se biofortification agricultural products.

Key words: Lanzhou, Alkaline Soil, Agricultural product, Total selenium, Selenium speciation