

doi: 10. 11720/wtyht. 2024. 2403

刘金宝, 徐宏国, 袁宏伟, 等. 内蒙古土默特左旗典型草甸土中硒赋存形态特征[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 245–254. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2403>Liu J B, Xu H G, Yuan H W, et al. Speciation of selenium in typical meadow soils in Tumed Left Banner, Inner Mongolia, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 245–254. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2403>

内蒙古土默特左旗典型草甸土中硒赋存形态特征

刘金宝, 徐宏国, 袁宏伟, 张晓峰

(内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: 以内蒙古土默特左旗塔布赛乡表层土壤、土柱剖面等样品为研究对象, 测定了土壤硒形态、有效态、理化性质等指标, 据此研究了土壤硒形态、有效态组成特征及其影响因素。结果表明, 表层土壤硒形态主要以腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态为主; 阳离子交换量(CEC)、有机质、磷、钾含量与腐殖酸结合态硒含量呈正相关, 全量硒含量与腐殖酸结合态硒、铁锰氧化物结合态硒、强有机结合态硒、残渣态硒含量呈正相关, 均表现为促进作用; 硫含量与水溶态硒含量呈负相关, 表现为抑制作用; 由表层至深层, 各形态硒含量具有由高趋低特征; 有效硒含量与全量硒、有机结合态硒、水溶态硒含量呈正相关, 与硫含量呈负相关性。研究区土壤中水溶态硒含量处于高硒等级状态, 生物有效性处于较高水平, 适合种植、开发富硒农产品。

关键词: 硒形态; 草甸土; 土默特左旗; 内蒙古

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0245-10

0 引言

硒是自然界中广泛分布的一种准金属元素, 具有抗氧化、增强免疫等功能^[1-4], 是人和动物必需的微量元素之一, 其摄入不足或过量均会对人体及动物健康产生不良影响^[5-8]。适量的硒还对铅、镉、汞、砷、铊等重金属元素有拮抗作用^[9-11]。土壤是作物硒的主要来源, 土壤硒通过食物链影响人和动物的硒供应。因此, 研究土壤中硒的含量分布状况及其赋存形态特征, 对硒生态地球化学与生命健康具有重要意义。

河套平原是我国重要的商品粮和油料作物生产基地, 多年来, 研究、保护、开发土地资源一直是该区的工作重点。2016~2017 年, 内蒙古自治区地质调查院根据“内蒙古河套农业经济区生态地球化学调查”^[12]项目取得的成果, 选择在土默特左旗足硒土壤区 40 km² 内开展“内蒙古呼包平原富硒耕地开发及重金属污染治理示范”^[13]工作。通过该项目调查

发现, 研究区土壤 pH 值的变化范围介于 7.08~10.37, 平均值为 8.26, 属于碱性—强碱性土壤; 土壤硒含量介于 $(0.07\sim0.58)\times10^{-6}$ 。按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)^[14]及文献[15–19], 采用 0.4×10^{-6} 作为富硒土壤划分标准, 研究区富硒、足硒土壤面积分别为 6.385 5 km² 和 32.289 2 km², 分别占研究区总面积的 15.96% 和 80.72%, 表明研究区多为富硒或足硒土壤。富硒土壤集中分布于塔布赛乡小雨施格气等 3 个村庄的农田中。富硒土壤中种植的农作物, 如玉米、打籽西葫芦和向日葵等, 参照宁夏富硒农产品标准^[20]中相应的农作物富硒标准, 富硒率分别为 55.56%、100% 和 100%。

目前, 研究区工作偏重于富硒耕地开发调查评价, 对于碱性土壤环境下草甸土中硒形态分布特征则涉及较少。笔者以土默特左旗天然富硒草甸土为研究对象, 针对研究区草甸土富硒、作物富硒率高的现象, 重点分析和讨论研究区碱性土壤环境下硒的形态、有效态特征及影响因素, 为天然碱性草甸土区

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2023-04-14

基金项目: 内蒙古自治区自然资源厅土地专项“内蒙古呼包平原富硒耕地开发及重金属污染治理示范”

第一作者: 刘金宝(1968–), 男, 1992 年毕业于中国地质大学(武汉)地球化学与勘查专业, 高级工程师, 从事金属矿产、环境、农业生态等地球化学勘查工作。Email: nmgljb@126.com

硒的科学利用、富硒农产品种植开发提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古中部呼包平原区,东南临大黑河,北靠阴山山脉,面积 40 km²,行政隶属内蒙古呼和浩特市土默特左旗塔布赛乡,属准温带大陆性季风气候,半干旱地区,年均温度 6.3 ℃,年降水量 400 mm。区内主要种植玉米、打籽西葫芦和向日葵等农作物,是呼包平原粮食主产区。区内土地利用方式相同,均为水浇地。土壤质地均为粉砂质黏土,

为全新统冲湖积层砂、软泥,成土母质单一。土壤类型主要为草甸土,局部为潮土(图 1)。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

研究区表层土壤样品采集及测试工作已在项目前期完成,得出研究区土壤硒含量为(0.07~0.58)×10⁻⁶,本次重点在塔布赛乡小雨施格气等 3 个村庄的富硒农田中采集表层土壤形态分析样、土柱剖面样品和农作物样品,采样点位如图 1a、b、c 所示。

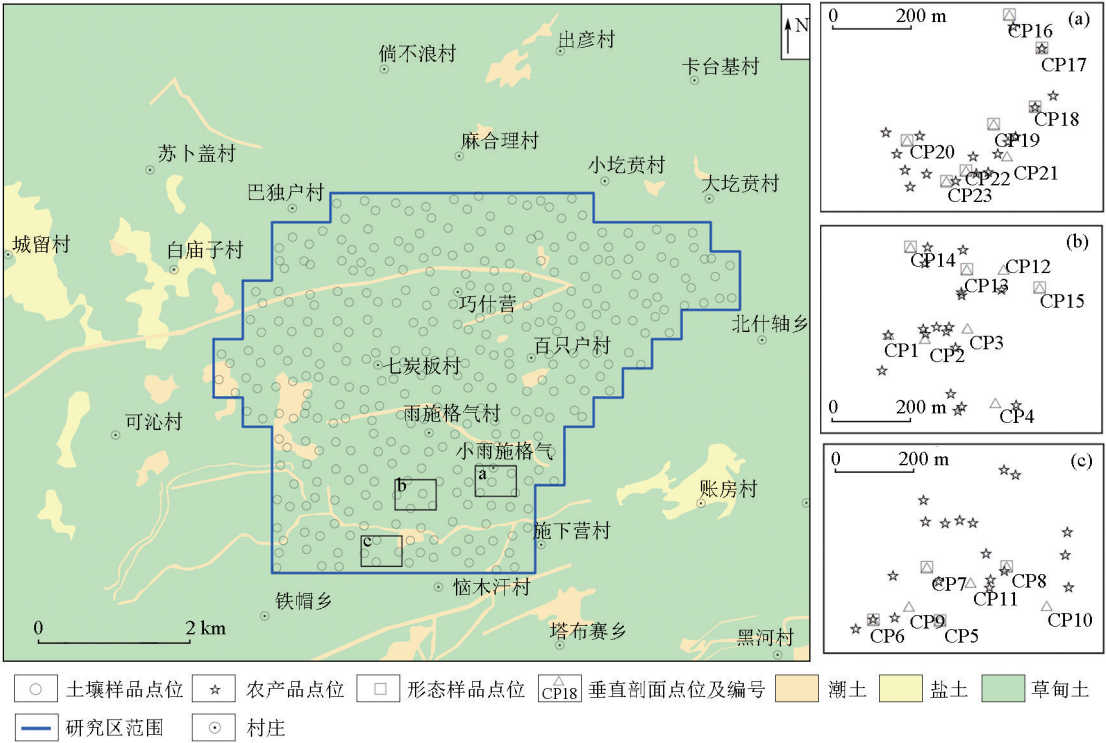


图 1 研究区土壤类型及样品点位

Fig. 1 Sampling points and land type of study area

表层土壤硒形态样品采集:采集农田耕作层(0~20 cm)土壤,在 GPS 定点点位周围 10 m 范围内,根据地块形状,采用梅花点法或蛇形法进行多点取样,由 5 个子样等量混合组成一件样品。采样时在 0~20 cm 上下均匀采集,以保证样品的代表性^[14,21]。样品除去杂草、草根、砾石、砖块、肥料团块后装入写有编号的干净布袋,套上聚乙烯塑料袋,以避免样品间交叉污染^[21-22]。共采集形态样品 14 件,每件样品质量不小于 1 kg。

土壤垂直剖面硒形态样品采集:在上述地区部署了 23 条土壤垂直剖面,其中 CP18 和 CP22 两条剖面中采集了硒形态样品。剖面由地表向下每 20 cm 采集 1 件样品,控制深度 1.6 m,样品质量 1 kg,共

采集 14 件样品(表层样品除外)。采样时观察发现,土壤物质成分在垂向上变化不大。

土壤—农作物套配样品采集:研究区作物简单,主要有玉米、向日葵和打籽西葫芦。分别在玉米、向日葵和打籽西葫芦成熟期,选择研究区土壤硒含量不同地段,多点采集籽实组合成了一件样品,共采集作物样品 54 件,样品干质量均大于 1 kg;同点位采集配套根系土样品 54 件,与形态样品采集方法相同。

2.2 野外加工制备

土壤样品在自然条件下晾干,使用木槌轻轻敲打、破碎,过 10 目(2 mm)尼龙筛,然后将样品混匀,按四分法称取 200 g 装入样品袋分别送至实验室,用于土壤硒形态、有效态、理化性质的测定。

农作物样品用蒸馏水冲洗 1~2 次,在无污染、无扬尘、通风的条件下自然风干后,凭借硬木搓板与硬木块进行手工脱粒;将脱粒后的样品反复混合均匀、缩分,将缩分好的样品装袋,用于作物硒测定;根系土样品处理方法与土壤样品相同。

2.3 分析测试方法

土壤硒形态、有效态及理化性质的测试工作由自然资源部合肥矿产资源监督检测中心完成。根据《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)^[23],土壤硒形态划分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸(弱有机)结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态等 7 种;有效态分析指标为浸提性硒,理化性质分析指标为阳离子交换量、有机质和 pH 值。

土壤硒形态采用分步提取法,分别用水、氯化镁溶液、醋酸—醋酸钠溶液、焦磷酸钠溶液、盐酸羟胺溶液、过氧化氢溶液、氢氟酸溶液等连续提取水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰

氧化物结合态、强有机结合态、残渣态,然后用氢化物发生—原子荧光光谱法(HG-AFS)测定;土壤有效硒(指浸提性硒)用硝酸溶液浸提,采用 HG-AFS 法测定;土壤 pH 值采用离子选择性电极法(ISE)测定;土壤有机质用重铬酸钾—硫酸溶液、砂浴加热煮沸后,采用氧化还原容量法(VOL)测定;采用 CEC400 阳离子交换量前处理系统对样品进行前处理,Hanon K1160 凯氏定氮仪对阳离子含量进行测试。

土壤硒形态、有效态采用国家一级标准物质(GBW07442、GBW07444)进行监控,精密度控制采用重复分析的方法进行监控,由自然资源部合肥矿产资源监督检测中心以密码形式插入在每一分析批次中。经检查,所有样品报出率均为 100%,准确度和精密度监控样总体合格率 100%,达到文献[14]的要求,数据真实可靠。土壤各形态硒及理化指标分析方法与检出限见表 1。

表 1 土壤中各形态硒及理化指标的分析方法与检出限

Table 1 Analysis methods and detection limits of selenium forms and physicochemical indexes in soil							
指标	规范要求	分析方法	检出限	指标	规范要求	分析方法	检出限
水溶态硒	0.005	AFS	0.005	有效硒		AFS	0.005
离子交换态硒	0.010	AFS	0.010	农产品硒	0.005	AFS	0.005
碳酸盐结合态硒	0.005	AFS	0.005	根系土硒	0.010	AFS	0.010
腐殖酸结合态硒	0.005	AFS	0.005	pH	0.1*	ISE	0.1*
铁锰氧化物结合态硒	0.010	AFS	0.010	有机质	0.1**	VOL	0.02**
强有机结合态硒	0.005	AFS	0.005	CEC	2.5***	VOL	2.5***
残渣态硒	0.010	AFS	0.010				

注:“*”表示无量纲;“**”表示含量单位为 10⁻²;“***”表示含量单位为 mmol/L;其余指标含量单位为 10⁻⁶;AFS 为原子荧光光谱法;ISE 为离子选择性电极法;VOL 为容量法。

根据测试分析数据统计,土壤连续提取的各形态硒含量之和与全量硒(全量分析硒含量)的比值介于 80%~105%,表明连续分步提取过程中硒的损失符合文献[23]的要求,能够反映土壤各项结合态硒的组成特征。通过 SPSS 19.0 软件对各形态硒含量之和与全量硒进行 Spearman 等级相关系数分析,各形态硒含量之和与全量硒在置信度(双侧)在 0.01 水平上,相关系数为 0.992 3,为显著正相关,说明连续分步提取后分级测定的结果具有较高的可信度。

农产品及根系土样品中硒的测试由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室完成。作物硒采用微波消解溶样,根系土硒采用 HF-HNO₃-HClO₄ 溶样,采用 HG-AFS 法测定硒的含量,作物硒和根系土硒的检出限见表 1。选择国家一级标准物质(GBW10014、GBW10015)对作物硒进行平行分析,相对误差值(RE)均≤15%,达到了内部质量控

制及质量水平。根系土中硒的分析质量控制与作物硒相同,其分析质量水平达到文献[14]的要求,数据真实可靠。

2.4 数据处理

原始数据及文中表格数据利用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPASS Statistics 19.0 软件进行处理与统计分析,图件使用 ArcMap 10.2 绘制。

3 结果与讨论

3.1 土壤硒形态与有效态含量组成特征

土壤中硒形态通常是按其土壤结合组分不同而划分的,因此其被植物利用的难易程度也不同。土壤中硒的各形态间是可以相互转化的,与土壤结合疏松的硒是植物硒的直接来源,而与土壤结合紧密的硒也是植物可利用硒的潜在来源^[24]。土壤中有效硒是指能够被植物直接吸收和利用的部分,它

是决定生物体内硒含量多少的关键因素。研究区表层土壤中各形态硒及有效硒含量统计见表 2。

3.1.1 表层土壤有效硒含量特征

有效硒作为衡量土壤中硒有效性的指标,其含量高低反映植物对土壤硒的吸收情况。从表 2 可知,研究区表层土壤有效硒含量范围在 $(0.010\ 2\sim 0.019\ 0)\times 10^{-6}$,平均含量为 $0.013\ 6\times 10^{-6}$,相较于浙江省中部典型富硒土壤区土壤有效硒含量

$[(0.016\sim 0.020)\times 10^{-6}]$ 和武汉市侏儒—消泗地区土壤有效硒含量 (0.018×10^{-6}) 略低^[25-26]。

3.1.2 表层土壤各形态硒含量特征

1)水溶态硒包括可溶性无机硒和有机硒,是最易被作物吸收的有效硒。从表 2、3 可知,研究区表层土壤水溶态硒含量范围在 $(0.007\ 3\sim 0.014\ 3)\times 10^{-6}$,平均含量为 $0.009\ 6\times 10^{-6}$,仅占表层土壤各形态硒含量之和的 1.88%~3.86%。

表 2 表层土壤中各形态硒及有效硒含量统计 (n=14)

Table 2 Statistics content of each form of selenium and effective selenium in the surface soil (n=14)					
硒形态	最小值/ 10^{-6}	最大值/ 10^{-6}	算术平均值/ 10^{-6}	标准离差/ 10^{-6}	变异系数
水溶态硒	0.0073	0.0143	0.0096	0.0018	0.1920
离子交换态硒	0.0040	0.0057	0.0049	0.0005	0.1009
碳酸盐结合态硒	0.0037	0.0065	0.0055	0.0008	0.1503
腐殖酸结合态硒	0.0610	0.1090	0.0824	0.0171	0.2081
铁锰氧化物结合态硒	0.0054	0.0109	0.0071	0.0014	0.2024
强有机结合态硒	0.0780	0.1550	0.1110	0.0201	0.1809
残渣态硒	0.0873	0.2216	0.1343	0.0315	0.2349
有效硒	0.0102	0.0190	0.0136	0.0031	0.2281

表 3 表层土壤中各形态硒所占比例

Table 3 Proportion of each form of selenium in the surface soil											%
指标	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐殖酸结合态	铁锰氧化物结合态	强有机结合态	残渣态	可溶态	有机态	难溶态	三项累加和
最大值	3.86	2.03	2.38	28.01	2.38	36.21	44.98	7.82	60.03	73.55	93.40
最小值	1.88	0.97	1.10	19.08	1.67	26.59	33.20	4.58	48.10	65.21	90.00
平均值	2.76	1.44	1.61	23.27	2.01	31.31	37.60	5.80	54.58	68.92	92.19

注:可溶态硒为水溶态硒、离子交换态硒、碳酸盐结合态硒之和;有机态硒为腐殖酸结合态硒和强有机结合态硒之和;难溶态硒为强有机结合态硒和残渣态硒之和;三项累加和为腐殖酸结合态硒、强有机结合态硒和残渣态硒之和。

谭见安等^[15,27]以土壤水溶态硒的含量差异来划定土壤硒背景所属级别,将土壤水溶态硒含量区间 $<0.003\times 10^{-6}$ 、 $(0.003\sim 0.006)\times 10^{-6}$ 、 $(0.006\sim 0.008)\times 10^{-6}$ 、 $(0.008\sim 0.020)\times 10^{-6}$ 和 $>0.020\times 10^{-6}$ 对应的土壤环境硒效应划定缺乏、边缘、中等、高硒和硒中毒。武少兴等^[28]研究认为中国土壤水溶态硒的含量均值为 0.010×10^{-6} ,研究区水溶态硒平均含量 $(0.009\ 6\times 10^{-6})$ 略低于中国土壤含量均值。按照谭见安等^[15,27]分级标准,高硒临界值为 0.008×10^{-6} 。研究区水溶态硒含量略低于临界值的 $[(0.007\ 3\sim 0.007\ 6)\times 10^{-6}]$ 占 14.29%,高于临界值的 $[(0.008\ 3\sim 0.014\ 3)\times 10^{-6}]$ 占 85.71%,多数属于高硒等级,能较好反映研究区的高硒土壤环境。

水溶态硒占有效硒的 49.71%~95.00%,平均占比 72.88%,说明水溶态硒占有效硒比例较高,可以认为研究区作物吸收的硒主要取决于土壤中的水溶态硒含量。

2)离子交换态硒主要是指吸附于土壤胶体表面的硒酸根和亚硒酸根离子,在一定条件下可释放并被植物吸收利用。从表 2、3 可知,研究区表层土

壤离子交换态硒含量范围在 $(0.004\ 0\sim 0.005\ 7)\times 10^{-6}$,平均含量为 $0.004\ 9\times 10^{-6}$,仅占表层土壤各形态硒含量之和的 0.97%~2.03%。因此,离子交换态硒对作物的富硒效应作用有限。

3)碳酸盐结合态硒一般可通过较为温和的酸将硒释放出来。研究区表层土壤属碱性—强碱性土壤,很难释放出作物可吸收利用的硒,对作物的作用极小。

4)有机结合态硒包括腐殖酸结合态硒和强有机结合态硒,主要由土壤中含硒生物体腐烂分解释放形成,主要成分为胡敏酸结合态硒(HA-Se)和富里酸结合态硒(FA-Se)^[29]。表 2、3 数据表明,研究区表层土壤腐殖酸结合态硒含量范围在 $(0.061\ 0\sim 0.109\ 0)\times 10^{-6}$,平均含量为 $0.082\ 4\times 10^{-6}$,占表层土壤各形态硒含量之和的 19.08%~28.01%;强有机结合态硒含量范围在 $(0.078\ 0\sim 0.155\ 0)\times 10^{-6}$,平均含量为 $0.111\ 0\times 10^{-6}$,占表层土壤各形态硒含量之和的 26.59%~36.21%。

有机结合态硒占表层土壤各形态硒含量之和的 48.10%~60.03%,平均占比为 54.58%,因此,有机

结合态硒是表层土壤硒形态的主要结合形态,与Mao 等^[30]、Sharmasarkar 等^[31]的结论相吻合,说明研究区土壤中硒的富集与有机质的活动密切相关。有关研究^[32-34]认为,土壤中有機态硒约占各形态硒含量之和的 25%~30%,表明研究区有机结合态硒明显高于平均水平。

5) 铁锰氧化结合态硒和残渣态硒二者在一般情况下极难转化成可供作物吸收利用的形态,因此对作物生长的影响甚微。

在研究区表层土壤各形态硒中,水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态三者属于可溶态硒^[35],其中水溶态硒为有效硒的主要来源,离子交换态硒和碳酸盐结合态硒在一定条件下可转化为有效硒;有机结合态硒是可溶性硒的重要来源,可视为潜在的有效硒^[32]。

3.1.3 表层土壤硒赋存形态特征

从表 2、3 可知,表层土壤中硒的 7 种形态含量排序为残渣态>强有机结合态>腐殖酸结合态>水溶态>铁锰氧化物结合态>碳酸盐结合态>离子交换态。土壤中各形态硒的含量差异较大,其中腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态的硒含量较高,均占各形态硒含量之和的 20%以上;而水溶态、离子交换态、铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态的硒含量较低,占比皆低于 3%。

水溶态硒、离子交换态硒、碳酸盐结合态硒三者

之和所占比例为 4.58%~7.82%,平均值为 5.80%,高于成都平原区酸性—中性土壤($\pm 3\%$)^[36]。碳酸盐结合态硒和铁锰氧化结合态硒之和占各形态硒含量之和的比例为 3.62%,高于浙江省富硒水稻土(2.6%)。强有机态硒、腐殖酸结合态硒和残渣态硒这三者硒形态加和所占比例为 92.19%,低于浙江省富硒水稻土(93.15%)^[37]。以上对比数据说明,土默特左旗碱性富硒土壤中硒形态特征显著区别于我国东部、南部等酸性—中性富硒土壤,表现出碱性土壤比酸性—中性土壤中的硒更易于被作物吸收的特征,与张亚峰等^[38]对青海东部碱性土壤中硒的形态分布特征研究一致。

研究区表层土壤中残渣态硒和强有机结合态硒累计占各形态硒含量之和的 65.21%~73.55%,表明研究区表层土壤中硒形态主要为难溶态,即硒主要以稳定形式赋存在表层土壤中,与唐玉霞等^[39]所得出河北地区土壤硒以强有机结合态和残渣态为主的结论相符。

3.2 土壤硒形态的垂向变化规律及其影响因素

根据研究区布设的两条土壤硒形态垂直剖面(CP18、CP22)分析数据(表 4),可以看出,两条垂直剖面的含量特征基本一致。下面以 CP22 垂直剖面为例(图 2、3),结合表 4 分析土壤硒形态的垂向变化规律及其影响因素。

表 4 垂直土壤剖面中各形态硒含量及所占比例(n=16)

硒形态	ZH6			ZH10		
	平均值/ 10^{-6}	范围/ 10^{-6}	所占比例/%	平均值/ 10^{-6}	范围/ 10^{-6}	所占比例/%
水溶态	0.0068	0.0049~0.0092	2.76	0.0084	0.0048~0.0143	3.30
离子交换态	0.0048	0.0040~0.0061	1.96	0.0047	0.0037~0.0106	1.85
碳酸盐结合态	0.0056	0.0039~0.0066	2.26	0.0053	0.0047~0.0061	2.09
腐殖酸结合态	0.0536	0.0270~0.0850	21.66	0.0613	0.0340~0.1090	23.96
铁锰氧化物结合态	0.0050	0.0035~0.0084	2.00	0.0046	0.0025~0.0082	1.78
强有机结合态	0.0879	0.0310~0.1550	35.49	0.0783	0.0380~0.1280	30.61
残渣态	0.0839	0.0413~0.1598	33.88	0.0931	0.0318~0.1679	36.41
各形态硒含量之和	0.2476	0.1179~0.4281	100.00	0.2556	0.1234~0.4352	100.00

3.2.1 土壤硒形态的垂向变化规律

由表 4 可知,CP22 剖面中各形态硒平均含量为残渣态>强有机结合态>腐殖酸结合态>水溶态>碳酸盐态>离子交换态>铁锰氧化物结合态。由图 2 可知,不同深度各形态硒比例分布基本一致,以残渣态、强有机结合态、腐殖酸结合态为主(占比累加和 90.98%),其他 4 种形态所占比例累加和不足 10%,表明 CP22 剖面中的硒主要赋存在腐殖质和残余晶格中^[40]。

随着土壤由表层至深层,各形态硒所占比例变

化较小(图 2),说明受土层深度影响不明显,且土壤各形态硒含量之和随采样深度的增加而呈总体减少的趋势(图 3)。

3.2.2 土壤硒形态的垂向影响因素

从图 3 可以看出,随着土壤由深层至表层,土壤各形态硒含量在垂向的变化趋势一致,即呈现出表层富集的特征,与宋明义等^[41]的研究结论一致,这是因为成土过程中硒趋向于在高铁铝、富泥炭和腐殖质的土壤中富集。其中 20~40 cm 土层各形态硒含量之和(0.4352×10^{-6})高于 0~20 cm 土层

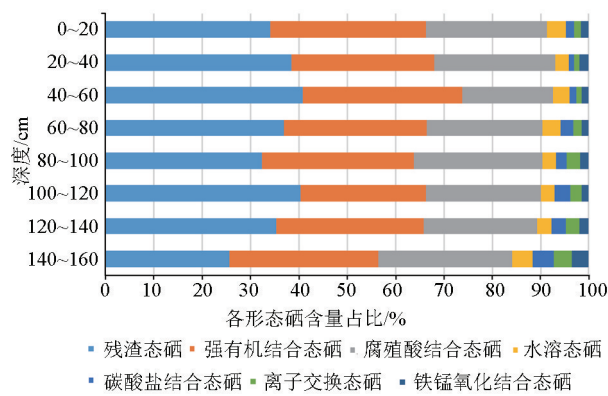


图 2 CP22 垂直土壤剖面中硒各形态特征对比

Fig. 2 Characteristic comparison of different selenium forms in the vertical soil section CP22

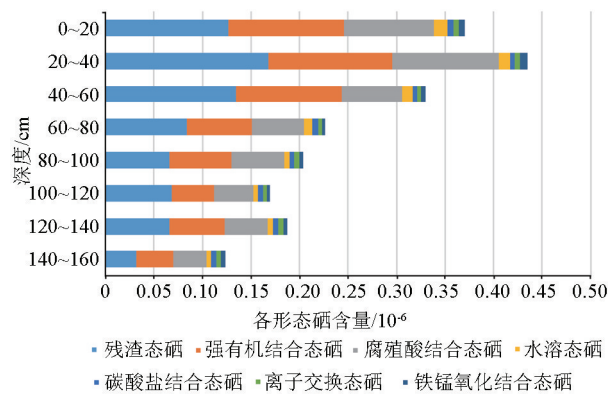


图 3 CP22 土壤各形态硒含量随剖面深度变化特征

Fig. 3 Distribution of selenium contents of various forms in the vertical soil section CP22

表 5 CP22 土壤理化指标、有效硒、全量硒与各形态硒含量 Spearman 等级相关系数 (r) 统计

指标	水溶态硒	离子交换态硒	碳酸盐结合态硒	腐殖酸结合态硒	铁锰氧化物结合态硒	强有机结合态硒	残渣态硒
有效硒	0.9341 **	0.1905	-0.0719	0.9701 **	0.6667	0.9524 **	0.7619 *
全量硒	0.9461 **	0.0476	-0.0958	0.9940 **	0.6667	1.0000 **	0.8810 **
有机质	0.8253 *	0.3473	0.0000	0.8916 **	0.4671	0.8743 **	0.6108
pH 值	-0.9940 **	-0.1190	-0.0120	-0.9461 **	-0.7381 *	-0.9524 **	-0.7619 *
CEC	0.1557	0.1429	-0.1198	0.2156	-0.2857	0.1905	0.0238
P	0.9102 **	0.1667	-0.2275	0.9940 **	0.6905	0.9762 **	0.8095 *
K	0.9515 **	0.1205	-0.0849	0.9940 **	0.6747	0.9880 **	0.8314 *
S	0.7545 *	0.0238	-0.2275	0.9102 **	0.5952	0.8810 **	0.8095 *

注：“**”表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的;“*”表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

(0.3703×10^{-6}),表明由于淋溶作用,0~20 cm 土层的各形态硒含量都有不同程度的淋失。

由表 5 可以看出,水溶态、腐殖酸结合态、强有机结合态、残渣态含量与全量硒、有效态硒、有机质、磷、钾、硫等含量在置信度(双测)为 0.01(或 0.05)水平上,相关性均为正相关,达到显著水平,说明这 4 种形态硒含量随以上 6 种指标含量升高而升高;水溶态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态、残渣态含量与 pH 值在置信度(双测)为 0.01(或 0.05)水平上呈负相关,达到显著水平,说明以上 5 种形态硒含量随 pH 值升高而降低,并且随着采样深度逐渐增加,各形态硒含量也逐渐降低(图 3)。

3.3 土壤硒形态与有效态影响因素分析

3.3.1 土壤硒形态影响因素分析

土壤理化性质影响着土壤中硒赋存形态及其转化,硒在有机质、黏土矿物、铁锰氧化物等土壤组分中不断发生着吸附—解吸、沉淀—溶解、(生物)氧化—还原等过程,而这些过程均受到土壤理化性质等各种因素的影响^[24]。土壤理化指标包括全量硒、有机质、pH 值、阳离子交换量(CEC)、黏土矿物、宏

量化学组分及质地等,讨论分析土壤理化指标与土壤硒形态含量之间的关系,可以更深入地了解土壤硒形态影响因素。研究区土壤质地为粉砂质黏土,对土壤硒形态影响有限。

土壤全量硒在很大程度上决定了土壤中各形态硒的含量。由表 6 可以看出,全量硒与腐殖酸结合态硒、铁锰氧化物结合态硒、强有机结合态硒、残渣态硒含量在置信度(双测)为 0.01 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明以上 4 种形态硒随全量硒的升高而升高,表明全量硒对这 4 种形态硒的含量起决定作用。

有机质含量与腐殖酸结合态硒含量在置信度(双测)为 0.01 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明腐殖酸结合态硒含量随有机质含量的升高而升高,表明有机质具有吸附或富集硒而防止硒流失的能力。

阳离子交换量(CEC)与腐殖酸结合态硒含量在置信度(双测)为 0.05 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明腐殖酸结合态硒含量随 CEC 的升高而升高,表明 CEC 高的土壤,其缓冲能力、保肥能力都较高,有利于腐殖酸结合态硒的积累。

表 6 土壤理化指标、有效硒与各形态硒含量 Spearman 等级相关系数(*r*) 统计

Table 6 Statistical of Spearman's rank correlation coefficients (*r*) between soil physicochemical indicators, effective selenium and each form of selenium in soils

指标	水溶态硒	离子 交换态硒	碳酸盐 结合态硒	腐殖酸 结合态硒	铁锰氧化物 结合态硒	强有机 结合态硒	残渣态硒
全量硒	0.4565	0.0330	-0.0352	0.8405 **	0.8490 **	0.9493 **	0.7877 **
有机质	0.1080	0.1716	-0.3212	0.7107 **	0.5006	0.4273	0.4158
CEC	0.0862	0.0540	-0.3252	0.6108 *	0.4641	0.2627	0.2514
pH	0.4823	-0.4141	-0.0220	-0.1850	0.0077	-0.0584	-0.3612
P	0.4724	0.1167	-0.2797	0.6806 **	0.3742	0.4498	0.3216
S	-0.6615 **	-0.1342	0.1276	-0.2992	-0.1808	-0.4053	-0.2772
K	0.0796	-0.0993	-0.2693	0.5464 *	0.4237	0.2232	0.2351
黏土矿物	0.1610	-0.1034	-0.2992	0.4224	-0.0243	0.1718	0.1628
有效硒	0.5254 *	-0.0859	-0.1123	0.4648	0.3322	0.5865 *	0.5198

注:“ ** ”表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的;“ * ”表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

磷、钾与腐殖酸结合态硒含量分别在置信度(双测)为 0.01(或 0.05)水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明腐殖酸结合态硒含量随磷、钾含量的升高而升高;硫含量与水溶态硒含量在置信度(双测)为 0.01 水平上,相关性为负相关,达到显著水平,说明水溶态硒含量随硫元素含量的升高而降低。

pH 值、黏土矿物与各形态硒含量相关性不明显,可能与样品数较少(14 件)以及 pH 值范围较小(8.33~8.85)有关。

由以上分析可知,全量硒与腐殖酸结合态硒、铁

锰氧化物结合态硒、强有机结合态硒、残渣态硒含量存在正相关,起决定作用;有机质、CEC、磷和钾含量与腐殖酸结合态硒含量存在正相关,有一定的促进作用;硫含量与水溶态硒含量存在负相关,有一定的抑制作用;pH 值、黏土矿物与各形态硒含量相关性不明显,影响有限。

3.3.2 土壤有效硒影响因素分析

研究表明,硒的生物有效性不仅与土壤全量硒有关,更取决于硒的形态分布特征^[24,42-43]。此外,土壤硒有效性还受其他因素的影响,比如黏土矿物、pH 值、CEC、宏量元素等指标(表 7)。

表 7 土壤理化指标与有效硒含量 Spearman 等级相关系数(*r*) 统计

Table 7 Statistical of Spearman's rank correlation coefficient (*r*) between soil physicochemical indicators and effective selenium in soils

指标	全量硒	黏土矿物	有机质	pH	CEC	P	S	K
有效硒	0.6161 *	0.4129	0.3378	0.0396	0.0055	0.2511	-0.5853 *	0.0916

注:参与计算样品数据为 14 个;“ * ”表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

土壤全量硒是有效硒的来源,对土壤有效硒具有直接的制约作用^[44]。由表 7 可以看出,有效硒含量与全量硒含量在置信度(双测)为 0.05 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明硒含量较高的土壤能够提供多的可溶性无机硒和有机硒,进而作物可吸收更多的有效硒。

由表 6 可以看出,有效硒含量与水溶态硒、有机结合态硒含量在置信度(双测)为 0.05 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,说明有效硒含量随水溶态硒、强有机结合态硒含量的升高而升高,硒的有效性随之增强。

研究表明^[45],硫在作物吸收有效硒的过程中存在拮抗作用。由表 7 可以看出,有效硒含量与硫含量在置信度(双测)为 0.05 水平上达到显著性负相关,说明硫的存在对有效硒的吸收起到了明显的抑制作用。

有效硒含量与黏土矿物、有机质、pH 值、CEC、磷及钾含量相关性不明显。

3.4 土壤硒形态、有效态与作物硒含量关系

根据文献[13],研究区采集了 54 件农作物(包括玉米籽粒 18 件,向日葵籽粒 19 件,打籽西葫芦籽粒 17 件)。对比以上 3 种农作物,选择大宗农作物玉米为研究对象,分析农作物中的硒与土壤硒形态、有效态含量的关系。

从表 8 可以看出,玉米籽粒中硒含量与水溶态硒、有效硒含量在置信度(双测)为 0.05 水平上,相关性为正相关,达到显著水平,与其他形态硒含量相关性不明显,说明玉米籽粒中硒含量随水溶态硒、有效硒含量的升高而升高,玉米吸收利用的硒主要是土壤中水溶态硒与有效硒,有利于研究区种植富硒玉米。

表 8 土壤硒形态、有效硒与玉米籽粒硒含量 Spearman 等级相关系数(*r*) 统计

Table 8 Statistical of Spearman's rank correlation coefficient (*r*) between soil selenium form, effective state and selenium content of maize seeds

指标	水溶态硒	离子交换态硒	碳酸盐态硒	腐殖酸结合态硒	铁锰氧化物结合态硒	强有机结合态硒	残渣态硒	有效硒
玉米籽粒硒	0.7289 *	0.0361	0.0719	0.0361	-0.1818	-0.0843	0.0838	0.8024 *

注:参与计算样品数据为 8 个;“*”表示在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的。

一般认为在碱性土壤中,可溶性的硒酸盐较多,有利于植物对硒的吸收,生物有效性高^[46-47]。研究区碱性土壤中水溶态硒含量高于临界值的比例达到 85.71%,土壤中赋存了大量的可被作物吸收的有效硒,说明研究区土壤中可溶性硒含量较高,硒的生物有效性处于较高水平,适合开发种植富硒农产品。

4 结论

1)研究区草甸土各形态硒含量具有残渣态>强有机结合态>腐殖酸结合态>水溶态>铁锰氧化物结合态>碳酸盐结合态>离子交换态的特征。

2)土壤中全量硒与腐殖酸结合态硒、铁锰氧化物结合态硒、强有机结合态硒、残渣态硒含量存在显著正相关性,CEC、有机质、磷、钾含量与腐殖酸结合态硒含量存在显著正相关,有一定的促进作用;硫含量与水溶态硒含量存在显著负相关,有一定的抑制作用;土壤中全量硒、水溶态硒、有机结合态硒含量与有效硒含量存在显著正相关,硫则相反。

3)随着土壤由表层至深层,各形态硒含量由高趋低。硒形态以腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态为主;全量硒、有效硒、磷、钾、硫、有机质等含量与水溶态、腐殖酸结合态、强有机结合态、残渣态等硒含量呈正相关;pH 值与各形态硒含量呈负相关。

4)土壤中水溶性硒、有效硒含量与玉米籽粒中硒含量呈显著正相关;研究区土壤硒的生物有效性处于较高水平,适合种植开发富硒农产品。

致谢:野外工作得到了内蒙古自治区自然资源厅土地专项“内蒙古呼包平原富硒耕地开发及重金属污染治理示范”项目的资助;室内研究工作得到了自然资源部合肥矿产资源监督检测中心、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室的支持和帮助;文章撰写过程中内蒙古自治区地质调查院杨立国高级工程师提供了宝贵建议,图件编制过程中得到了熊万里工程师的帮助,审稿人提出了中肯的意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

[1] Schwarz K, Foltz C M. Selenium as an integral part of factor 3 a-

gainst dietary necrotic liver degeneration[J]. Journal of the American Chemical Society, 1957, 79(12): 3292-3293.

[2] Zhang X L, Ren S F, Li W C, et al. Study on correlation between humic acid and selenium in Kaschin-Beck disease areas[J]. Journal of Environment Sciences, 1991, 3(4): 102-107.

[3] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 1973, 179(4073): 588-590.

[4] Rayman M P. The argument for increasing selenium intake[J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 2002, 61(2): 203-215.

[5] 李家熙, 张光第, 葛晓立, 等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京: 地质出版社, 2000.

Li J X, Zhang G D, Ge X L, et al. Prediction and geochemical environmental character of human selenium imbalances[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.

[6] 陈亮, 李桃. 元素硒与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(3): 58-59.

Chen L, Li T. Element selenium and human body health[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2004, 21(3): 58-59.

[7] Hartikainen H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4): 309-318.

[8] Mombo S, Schreck E, Dumat C, et al. Bioaccessibility of selenium after human ingestion in relation to its chemical species and compartmentalization in maize[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 38(3): 869-883.

[9] 袁星荣. 硒对现代慢性疾病的预防和治疗意义[J]. 世界元素医学, 2007, 14(1/2): 33-36.

Yuan X R. The significance of selenium in prevention and treatment of modern chronic diseases[J]. World Elemental Medicine, 2007, 14(1/2): 33-36.

[10] 梅光泉, 应惠芳. 微量元素硒与植物有机硒化合物[J]. 微量元素与健康研究, 2003, 20(6): 59-61.

Mei G Q, Ying H F. Trace element selenium and organic selenium compounds from plants[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2003, 20(6): 59-61.

[11] 何亚琳. 环境硒与硒营养[J]. 贵州科学, 1995, 13(3): 56-60.

He Y L. Environmental Se and Se nutrition[J]. Guizhou Science, 1995, 13(3): 56-60.

[12] 王喜宽, 黄增芳, 王忠, 等. 内蒙古河套农业经济区多目标区域地球化学调查报告[R]. 内蒙古自治区地质调查院, 2007.

Wang X K, Huang Z F, Wang Z, et al. Report of multi-purpose regional geochemical survey in Hetao agricultural economic zone, Inner Mongolia [R]. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, 2007.

[13] 王喜宽, 刘金宝, 孙凤霞, 等. 内蒙古呼包平原富硒耕地开发及重金属污染治理示范成果报告[R]. 内蒙古自治区地质调查

院,2019.

Wang X K, Liu J B, Sun F X, et al. Report on demonstration results of selenium-rich cultivated land development and heavy metal pollution control in Hubao Plain, Inner Mongolia[R]. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, 2019.

[14] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:地质出版社, 2016.

Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.

[15] 谭见安, 李日邦, 侯少范, 等. 环境硒与健康[M]. 北京:人民卫生出版社, 1989.

Tan J A, Li R B, Hou S F, et al. Environmental selenium and health[M]. Beijing: People's Health Publishing House, 1989.

[16] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319-336.

Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 319-336.

[17] 周墨, 唐志敏, 张明, 等. 赣州市水稻及根系土中硒的含量特征与富硒土壤界限值[J]. 地质通报, 2021, 40(4): 604-609.

Zhou M, Tang Z M, Zhang M, et al. Selenium contents of rice and rhizosphere soil and threshold value of selenium-rich soil in Ganzhou of Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(4): 604-609.

[18] 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 等. 天然富硒土地划定的富硒阈值[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 333-342.

Wang H Y, Zeng D M, Guo Z J, et al. Selenium threshold for the delimitation of natural selenium-enriched[J]. Land Environmental Science, 2021, 42(1): 333-342.

[19] 王锐, 余涛, 曾庆良, 等. 我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 359-366.

Wang R, Yu T, Zeng Q L, et al. Distribution characteristics, origin and influencing factors of soil selenium concentration of main farming areas in China[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 359-366.

[20] 宁夏回族自治区质量技术监督局. DB64/T 1221—2016 宁夏富硒农产品标准(水稻、玉米、小麦与枸杞干果)[S]. 银川:宁夏人民教育出版社, 2016.

Ningxia Quality and Technical Supervision Bureau. DB64/T 1221—2016 Standard for selenium-rich agricultural products of ningxia(rice, corn, wheat and medlar dried fruit)[S]. Yinchuan: Ningxia People's Education Press, 2016.

[21] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1: 250 000)[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.

Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey(1: 250, 000)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[22] 李健, 范学臻. 农产品产地环境采样中土壤样品采集点的布设[J]. 现代农业科技, 2020(1): 175, 180.

Li J, Fan X Z. Layout of soil sample collection points in environmental sampling of agricultural products[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(1): 175, 180.

[23] 中国地质调查局. DD2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.

China Geological Survey. DD2005-03 Technical requirements for sample analysis for eco-geochemical evaluation (trial)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

[24] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.

Wang S S. Fractionation and speciations of selenium in soil and its bioavailability[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.

[25] 黄春雷, 宋明义, 魏迎春, 等. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4405-4410.

Huang C L, Song M Y, Wei Y C, et al. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4405-4410.

[26] 周小娟, 张嫣, 祝莉玲, 等. 武汉市侏儒—消泗地区农田系统中硒的分布特征及有效性研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 158-163, 171.

Zhou X J, Zhang Y, Zhu L L, et al. Research on selenium distribution and effectiveness in the farm system in Zhuru and Xiaosi areas, Wuhan City[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 158-163, 171.

[27] 谭见安. 环境生命元素与克山病[M]. 北京:中国医药科技出版社, 1996.

Tan J A. Environmental life elements and keshandisease[M]. Beijing: China Medical Science Press, 1996.

[28] 武少兴, 龚子同, 黄标, 等. 我国土壤中的水溶态硒含量及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 522-525.

Wu S X, Gong Z T, Huang B, et al. Water-soluble selenium in main soil types of China and in relation to some soil properties[J]. China Environmental Science, 1997, 17(6): 522-525.

[29] 沈燕春, 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 Y C, Zhou J. Occurrence, migration and reansformation of selenium in soil[J]. Geology of Anhui, 2011, 21(3): 186-191.

[30] Mao J D, Xing B S. Fractionation and distribution of selenium in soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 30(17/18): 2437-2447.

[31] Sharmasarkar S, Vance G F. Fractional partitioning for assessing solid-phase speciation and geochemical transformations of soil selenium[J]. Soil Science, 1995, 160(1): 43-55.

[32] 何振立, 杨肖娥, 祝军, 等. 中国几种土壤中的有机硒及其分布特征[J]. 环境科学学报, 1993, 13(3): 281-287.

He Z L, Yang X E, Zhu J, et al. Organic selenium and its distribution in soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1993, 13(3): 281-287.

[33] Rosenfeld I, Beath O A. Selenium geobotany, biochemistry, toxicity and nutrition[M]. New York: Academic Press, 1964.

[34] 董广辉, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤—植物生态系统中硒的循环和调节[J]. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18(1): 65-68.

Dong G H, Wu Z J, Chen L J, et al. Cycling and regulation of selenium in soil-plant ecosystem[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2002, 18(1): 65-68.

[35] 黄淇, 成杭新, 陈出新, 等. 北京市房山区富硒土壤调查与评价

- [J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 889–894.
- Huang Q, Cheng H X, Chen C X, et al. The investigation and evaluation of selenium-rich soil in Fangshan District of Beijing City [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(5): 889–894.
- [36] 郎春燕, 黄秀丽, 李小娇. 成都东郊稻田土壤中硒的形态的分布特征[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(2): 642–646.
- Liang C Y, Huang X L, Li X J. Distribution of selenium species in rice paddy soils of east suburb in Chengdu [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(2): 642–646.
- [37] 郦逸根, 徐静, 李琰, 等. 浙江富硒土壤中硒赋存形态特征[J]. *物探与化探*, 2007, 31(2): 95–109.
- Li Y G, Xu J, Li Y, et al. The modes of occurrence of selenium in selenium-rich soil of Zhejiang Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(2): 95–109.
- [38] 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.
- [39] 唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 等. 河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(S): 194–197.
- Tang Y X, Wang H M, Liu Q L, et al. Study on the content, speciation distribution and availability of selenium in wheat field soils of Hebei [J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2010, 25(S): 194–197.
- [40] 陈铭, 谭见安, 王五一. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. *土壤学进展*, 1994, 22(4): 1–10.
- Chen M, Tan J A, Wang W Y. Soil chemistry and plant nutrition in the study of the relationship between environmental selenium and health [J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(4): 1–10.
- [41] 宋明义, 冯雪外, 周涛发, 等. 浙江典型富硒区硒与重金属的形态分析[J]. *现代地质*, 2008, 22(6): 960–965.
- Song M Y, Feng X W, Zho T F, et al. Chemical species of heavy metals and selenium in representative Se-rich area, Zhejiang Province [J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 960–965.
- [42] Tolu J, Di Tullo P, Le Hécho I, et al. A new methodology involving stable isotope tracer to compare simultaneously short-and long-term selenium mobility in soils [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(4): 1221–1231.
- [43] Peng Q, Guo L, Ali F, et al. Influence of Pak choi plant cultivation on Se distribution speciation and bioavailability in soil [J]. *Plant and Soil*, 2016, 403(1/2): 331–342.
- [44] 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 Y, Zong L G, Cao D, et al. Distribution and availability of selenium in typical tea garden of Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2467–2474.
- [45] 马友华, 丁瑞兴, 张继榛, 等. 植物体内硒和硫的相互作用[J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37(2): 161–166.
- Ma Y H, Ding R X, Zhang J Z, et al. Interaction of selenium and sulfur in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(2): 161–166.
- [46] 魏然, 候青叶, 杨忠芳, 等. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律[J]. *物探与化探*, 2012, 36(1): 109–113.
- Wei R, Hou Q Y, Yang Z F, et al. An analysis of speciation of selenium as its transformation and enrichment in root soil of Poyang lake basin, Jiangxi Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(1): 109–113.
- [47] Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(6): 443–517.

Speciation of selenium in typical meadow soils in Tumed Left Banner, Inner Mongolia, China

LIU Jin-Bao, XU Hong-Guo, YUAN Hong-Wei, ZHANG Xiao-Feng

(Geological Survey and Research Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: This study determined the speciation, available content, and physicochemical properties of selenium in soils using samples of topsoil and soil column profiles from Tabusai Township, Tumed Left Banner, Inner Mongolia, China. Accordingly, this study investigated the compositions of the speciation and available content of soil selenium, as well as their influencing factors. The results indicate that: (1) the major forms of selenium in topsoil include humic acid bound, strong organic bound, and residue forms; (2) the concentration of in the humic acid bound selenium correlates positively with the cation exchange capacity (CEC) and the concentrations of organic matter, phosphorus, and potassium; the total selenium concentration correlates positively with the concentrations of humic acid bound selenium, Fe-Mn oxide bound selenium, strong organic bound selenium, and residue selenium, all of which exhibit promotion effects; (3) the sulfur concentration correlates negatively with the concentration of water-soluble selenium, demonstrating an inhibitory effect; (4) the concentrations of selenium in various forms tend to decrease from the surface layer to the deep layer; (5) the concentration of bioavailable selenium correlates positively with the total selenium concentration, organic-bound selenium, and water-soluble selenium and correlates negatively with the sulfur concentration. The soils in the study area, featuring a high concentration of water-soluble selenium and fairly high bioavailability, are suitable for planting selenium-rich agricultural products.

Key words: selenium speciation; meadow soil; Tumed Left Banner; Inner Mongolia