

绥化市典型黑土硒含量、赋存形态及有效性影响因素^①

刘立芬^{1,2,3}, 栾欣婷¹, 杨兴^{1,2}

(1 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036; 2 黑龙江省黑土地水土资源研究重点实验室, 哈尔滨 150036; 3 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086)

摘要: 以中国典型黑土核心分布区绥化市的五营乡–三合镇一带耕作层土壤为研究对象, 利用地统计分析等方法研究了土壤硒元素含量、分布及赋存形态特征, 探讨了土壤硒有效性影响因素。结果显示: 研究区表层土壤硒元素分布较均匀, 平均含量为 0.343 mg/kg, 高于全国平均值, 约 15% 地块符合绿色富硒土地标准; 土壤中各形态硒含量从低到高依次为离子交换态、铁锰结合态、水溶态、碳酸盐结合态、残渣态、腐殖酸结合态、强有机结合态, 易于植物吸收利用的水溶态和离子交换态硒仅占 2.5%, 而难于利用的铁锰结合态、强有机结合态和残渣态硒占 58.4%; 土壤有效硒含量在 0.007~0.02 mg/kg, 硒活化率在 2.06%~6.19%, 水田中有效硒含量和硒活化率高于旱地。土壤中硒赋存形态及土壤理化性质影响硒元素有效性, 土壤有效硒与总硒、氮、硫和有机质等呈不同程度正相关, 与锰、氧化镁、二氧化硅、pH 等呈不同程度负相关, 表明土壤中高有机质及氮、硫元素含量有利于土壤硒元素的活化释放。

关键词: 典型黑土; 硒元素; 地球化学; 赋存形态; 有效性

中图分类号: P595; S153 文献标志码: A

Content, Form and Availability Influencing Factors of Selenium in Typical Black Soil in Suihua City

LIU Lifen^{1,2,3}, LUAN Xinting¹, YANG Xing^{1,2}

(1 *Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China*; 2 *Key Laboratory of Black Soil and Water Resources Research of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China*; 3 *Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Ministry of Natural Resources, Harbin 150086, China*)

Abstract: Taking the cultivated soil layer in the Wuying Township-Sanhe Town area of Suihua City, a typical core distribution area of black soil in China, as the research object, this study investigated the content, distribution and occurrence forms of selenium in the soil by using geostatistical analysis and other methods, and explored the influencing factors of soil selenium availability. The results showed that the distribution of selenium in the surface soil of the study area was relatively uniform, with an average content of 0.343 mg/kg, which was higher than the national average. About 15% of the plots met the standard of green selenium-rich land. The contents of various forms of selenium in the soil from low to high were ion-exchangeable, iron-manganese bound, water-soluble, carbonate-bound, residual, humic acid-bound and strongly organic-bound. The water-soluble and ion-exchangeable selenium, which are easily absorbed and utilized by plants, accounted for only 2.5%, while the iron-manganese bound, strongly organic-bound and residual selenium, which are difficult to utilize, accounted for 58.4%. The available selenium content in the soil was 0.007–0.02 mg/kg, and the selenium activation rate was 2.06%–6.19%. The available selenium contents and selenium activation rates in paddy fields were higher than those in dry fields. The occurrence forms of selenium in the soil and soil physical and chemical properties affected the availability of selenium. The available selenium in the soil was positively correlated with the total selenium, nitrogen, sulfur and organic matter to varying degrees, and negatively correlated with manganese, magnesium oxide, silicon dioxide and pH to varying degrees, indicating that high organic matter and nitrogen and sulfur contents in the soil were conducive to the activation and release of selenium in the soil.

Key words: Typical black soil; Se; Global chemistry; Occurrence form; Availability

①基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2022D029)和黑龙江省地质环境保护项目(黑国土资函[2016]737号)资助。

作者简介: 刘立芬(1984—), 女, 黑龙江宾县人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事生态地球化学、地球化学勘查领域相关工作。E-mail: 107294895@qq.com

硒元素(Se)于 1817 年首次被发现, 1973 年世界卫生组织将其列为人体必需的微量元素, 随着人们对硒生物学功能认识的加深, 各领域对硒元素的研究日趋深入^[1-2]。硒元素主要通过土壤→植物→农畜产品的迁移途径进入食物链, 土壤中硒含量及有效性特征直接影响产出作物硒含量水平, 与食用者健康关系密切, 缺硒或硒过剩都有可能引起地方性疾病^[3-5]。近年研究表明, 土壤中硒元素含量和有效利用率受多种因素影响, 研究高硒区域内硒含量、赋存形态及有效性特征, 对促进富硒土地资源开发利用有着重要意义^[6-7]。

黑龙江省绥化市是我国寒地黑土核心分布区, 也是国家重要的商品粮生产基地, 科学保护好、利用好珍稀的黑土地资源一直是备受社会关注的热点问题^[8]。前人通过土地质量地球化学调查工作在松嫩平原西部绥化地区发现了大面积的硒元素高背景分布区, 因此, 本研究以绥化市北林区北部五营乡-三合镇一带典型黑土为研究对象, 对区内土壤硒元素含量、分布及赋存形态特征进行分析研究, 以揭示典型黑土硒有效性特征, 探讨硒有效性影响因素, 为当地富硒土地资源开发利用提供科学依据, 服务乡村振兴发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑土是举世公认的最肥沃、最适宜耕种的珍稀土壤资源。广义上的黑土包含了黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、暗棕壤等, 具有腐殖质含量高、颜色呈黑色的显著特点, 广泛分布于我国东北地区^[9-10]; 而狭义黑土又称典型黑土, 指中国土壤发生分类中的黑土亚类, 也有学者将黑土、黑钙土划定为典型黑土分布区, 主要分布于松嫩平原东部和北部中高平原地区^[11]。本研究以绥化市北林区北部五营乡-三合镇一带为研究区, 该区位于松嫩平原东北部典型黑土核心分布区, 面积约 80 km²。区内第四系沉积地层发育, 土壤类型为典型黑土, 黑土层厚度多在 30~80 cm, 以黏土为主, 鲜有含砂或砾石, 成土母质主要为上荒山组河湖相沉积的黄褐色黏土、砂质黏土。区内地势平坦, 土地集中连片, 利用方式以耕地为主, 水田、旱地兼有, 主要种植玉米、大豆、水稻, 局部地块种植马铃薯、烤烟等作物。据近年开展的土地质量地球化学调查工作成果显示, 研究区土壤养分良好, 氮、磷、钾元素及有机质均较为丰富, 且土壤中砷、镉、汞等元素含量普遍较低, 土壤环境质量优良, 绿色农业发展条件得天独厚。

1.2 样品采集

在研究区内均匀布设采样点(图 1)采集表层土壤样品, 密度为 4 个/km²。采样时避开沟渠、田埂、公路、垃圾堆等不具代表性地段, 主要采集耕地土壤, 先去除土壤表面植物残体、砾石等杂物, 再以不锈钢锹挖掘采样坑, 在一侧坑壁上下均匀采集 0~20 cm 土壤, 同时观察记录样品颜色、质地、是否污染, 以及样点土地利用类型、周边环境等信息。同一地块 20~50 m 范围内采集 3~5 个子样混匀组成 1 件样品, 去除大块杂物后, 以四分法留取大于 1 000 g 样品装入干净布袋(水田或湿度较大样品加套聚乙烯自封袋), 避免样品污染。此外, 本研究还采集了 50 个根系土样品, 主要采自农作物根系附近, 每个土样为 30 m 范围内多点取样混合而成, 同样以四分法留取大于 1 000 g 样品装袋。

样品采集完成后, 置于自然通风场地晾干, 适时翻动以加速干燥, 待晾干后以木棍捶打粉碎, 过 10 目(2 mm)孔径筛后称取 200 g 装入牛皮纸袋封装, 整理编录后送检测机构完成分析测试。

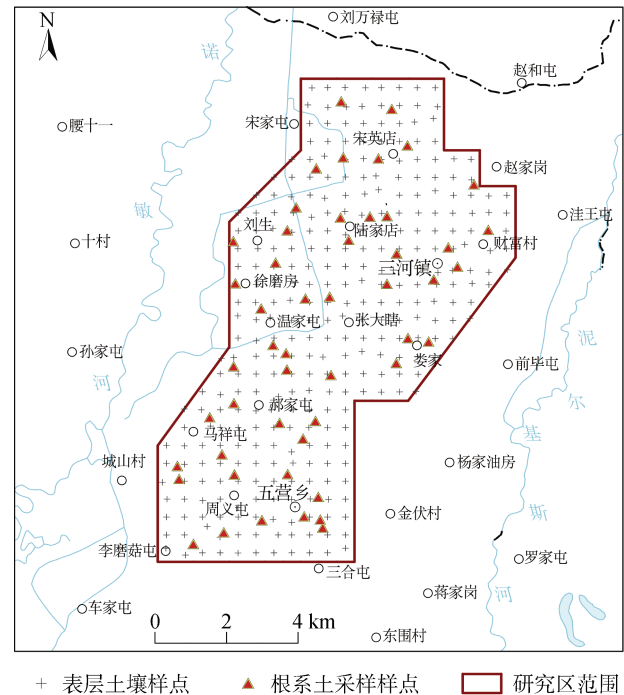


图 1 研究区范围及采样点
Fig.1 Study area and sampling sites

1.3 样品分析测试

本次样品分析测试工作主要委托国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成。表层土壤样品测试指标为硒、砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌、有机质(SOM)及 pH; 根系土样品分析指标为硒、

砷、镉、铬、铜、汞、氮、磷、锰、镍、铅、硫、钒、锌、二氧化硅、全铁、氧化铝、氧化镁、氧化钙、氧化钠、氧化钾、有机质、pH 及有效硒。部分土壤样品以连续浸提法测试硒元素形态,依次为以蒸馏水为提取剂提取水溶态硒,以氯化钠溶液为提取剂提取离子交换态硒,以醋酸钠溶液为提取剂提取碳酸盐结合态硒,以焦磷酸钠溶液为提取剂提取腐殖酸结合态硒,以盐酸羟胺溶液为提取剂提取铁锰氧化物结合态硒,以硝酸和过氧化氢为提取剂提取强有机结合态硒,以氢氟酸为提取剂提取残渣

态硒。分析方法主要有原子荧光光谱法(AFS)、X射线荧光光谱法(XRF)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、容量法(VOL)及离子选择电极法(ISE)。各指标分析方法经 12 次分析测定国家一级土壤地球化学标准物质系列样品,计算统计其检出限、准确度及精密密度均达到《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》^[12]、《土地质量地球化学评价规范》^[13]等标准要求。样品分析过程中依照行业标准严格控制分析质量,分析质量充分保障。各指标对应的分析方法及检出限如表 1 所示。

表 1 土壤样品分析及检出限
Table 1 Analysis methods and detection limits of soil elements

指标	单位	分析方法	检出限	测试依据	指标	单位	分析方法	检出限	测试依据
As	mg/kg	AFS	0.01	DZ/T0279—2016 ^[14]	TFe ₂ O ₃	g/kg	XRF	0.03	DZ/T0279—2016 ^[14]
Cd	mg/kg	ICP-MS	0.021	DZ/T0279—2016 ^[14]	MgO	g/kg	XRF	0.05	DZ/T0279—2016 ^[14]
Cr	mg/kg	XRF	0.4	DZ/T0279—2016 ^[14]	CaO	g/kg	XRF	0.02	DZ/T0279—2016 ^[14]
Cu	mg/kg	XRF	0.6	DB34/T2127—2014 ^[15]	Na ₂ O	g/kg	XRF	0.07	DZ/T0279—2016 ^[14]
Hg	mg/kg	AFS	0.001	DZ/T0279—2016 ^[14]	K ₂ O	g/kg	XRF	0.01	DZ/T0279—2016 ^[14]
N	mg/kg	VOL	20	DZ/T0279—2016 ^[14]	pH	无量纲	ISE	0.1	DZ/T0279—2016 ^[14]
Mn	mg/kg	XRF	4.9	DZ/T0279—2016 ^[14]	SOM	%	VOL	0.02	DZ/T0279—2016 ^[14]
Ni	mg/kg	XRF	0.3	DB34/T2127—2014 ^[15]	有效 Se	mg/kg	AFS	0.001	AHDS-ZZ-C05—2019 ^[16]
P	mg/kg	XRF	8.5	DZ/T0279—2016 ^[14]	水溶态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
Pb	mg/kg	XRF	0.9	DZ/T0279—2016 ^[14]	离子交换态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
S	mg/kg	XRF	4	AHDS-ZZ-C05—2019 ^[16]	碳酸盐结合态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
Se	mg/kg	AFS	0.01	DZ/T0279—2016 ^[14]	腐殖酸结合态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
V	mg/kg	XRF	1.1	DZ/T0279—2016 ^[14]	铁锰结合态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
Zn	mg/kg	XRF	1	DZ/T0279—2016 ^[14]	强有机结合态 Se	mg/kg	AFS	0.005	DD 2005-03 ^[17]
SiO ₂	g/kg	XRF	0.5	DZ/T0279—2016 ^[14]	残渣态 Se	mg/kg	AFS	0.02	DD 2005-03 ^[17]

1.4 数据处理

利用 Excel 2010、SPSS 19.0 软件进行数据处理与统计分析。其中,以变异系数(CV)表征数据离散程度;以 Person 相关性分析研究元素指标间相关性,并计算相关系数,在 $\alpha=0.05$ 水平下进行双侧显著性检验^[18];以硒活化率表征硒元素在土壤中的有效性^[19-20],其值为土壤有效硒含量与总硒含量的比值。采用 Excel 2010、OriginPro2024、GeoIPAS V4.6 和 MapGIS67 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 土壤硒地球化学分布

研究区内表层土壤硒元素含量在 0.13~0.50 mg/kg,平均含量为 0.343 mg/kg,变异系数为 0.151,硒元素在研究区内离散程度较小,分布较为均匀(图 2)。不同土地利用方式统计结果表明,水田、旱地表层土壤

硒元素平均含量分别为 0.347、0.335 mg/kg,相差并不显著。经对比,研究区内表层土壤硒元素含量显著高于黑龙江省松嫩平原南部(0.20 mg/kg)^[21]和全国(0.17 mg/kg)^[22]表层土壤平均值,为硒高背景区,且局部地块硒含量 ≥ 0.40 mg/kg,达到《天然富硒土地划定与标识》^[23]中富硒土地标准,约占研究区面积的 15%。同时,对砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌 8 项重金属污染元素的研究结果表明,区内表层土壤中 8 项重金属元素含量普遍低于农用地土壤污染风险筛选值^[24],土壤环境质量优良,达到绿色食品产地环境质量要求。由此可见,区内局部地块具备绿色富硒农业发展的基础条件。

2.2 土壤硒赋存形态特征

土壤硒元素形态表征硒在土壤中的化学结合形式和实际存在状态,赋存形态不同,其在土壤环境中表现的行为也不同^[25-26]。本研究对 30 个根系土样品

进行分析测试硒元素形态，其中 1 ~ 14 号样品采自水田，15 ~ 30 号样品来自旱地。研究结果(表 2)表明，土壤中不同形态硒含量差异显著，土壤中水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态及铁锰结合态硒含量较低，

平均含量低于 0.01 mg/kg，而腐殖酸结合态和强有机结合态硒含量较高，平均含量高于 0.1 mg/kg，有机态硒约占总量 85%，黑土中高有机质含量有利于硒元素在土壤中留存和富集。

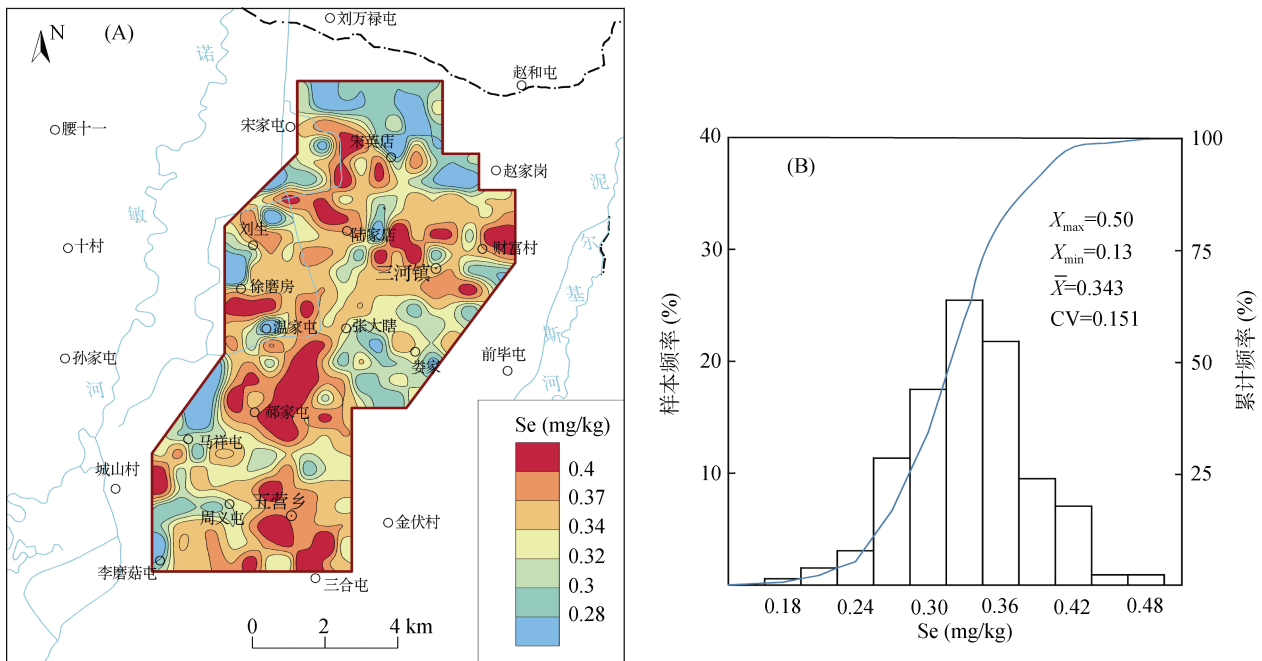


图 2 研究区土壤硒地球化学分布(A)及含量频率直方图(B)

Fig. 2 Geochemistry distribution of soil total Se content (A) and content frequency histogram (B)

表 2 根系土中各形态硒平均含量及占比

Table 2 Average contents and proportions of various Se forms in root soils

硒形态	平均值(mg/kg)	变异系数	占比(%)	硒形态	平均值(mg/kg)	变异系数	占比(%)
水溶态	0.005 1	0.254	1.8	水溶态+离子交换态	0.007	0.184 8	2.5
离子交换态	0.001 9	0.161	0.7	碳酸盐结合态+腐殖酸结合态	0.109 7	0.242 9	39.1
碳酸盐结合态	0.007 5	0.745	2.7	铁锰结合态+强有机结合态+残渣态	0.164 1	0.296 8	58.4
腐殖酸结合态	0.102 2	0.251	36.4				
铁锰结合态	0.003 2	0.959	1.1				
强有机结合态	0.136 4	0.319	48.6				
残渣态	0.024 5	0.520	8.7				

土壤中各形态硒占比见图 3，各形态硒平均含量从低到高依次为离子交换态、铁锰结合态、水溶态、碳酸盐结合态、残渣态、腐殖酸结合态、强有机结合态。水田和旱地中各硒形态占比略有差异，水田中硒残渣态硒含量占比高于旱地，而旱地中碳酸盐结合态硒显著高于水田。研究区内，易于为植物吸收利用的水溶态和离子交换态硒含量占比较小，硒可利用性较低；碳酸盐结合态硒和腐殖酸结合态硒为潜在利用性硒源，黑土中腐殖质含量丰富，腐殖酸结合态硒含量占比较高，使得区内硒潜在利用性较高；铁锰结合态、强有机结合态和残渣态硒平均占比达 58.4%，土壤中

大部分硒较为稳定，难于为植物吸收利用。

2.3 土壤有效硒含量及分布

土壤有效硒是土壤中容易被植物吸收的部分硒形态，是直观反映土壤供给硒能力的重要指标。根系土样品分析结果显示，研究区土壤有效硒含量在 0.007 ~ 0.02 mg/kg，平均值为 0.014 mg/kg，变异系数为 0.24。其中，旱地样品有效硒平均含量为 0.012 mg/kg，变异系数为 0.25；而水田样品有效硒平均含量为 0.016 mg/kg，变异系数为 0.13，表明研究区域内旱地土壤中有效硒离散程度大于水田，而水田有效硒含量高于旱地。

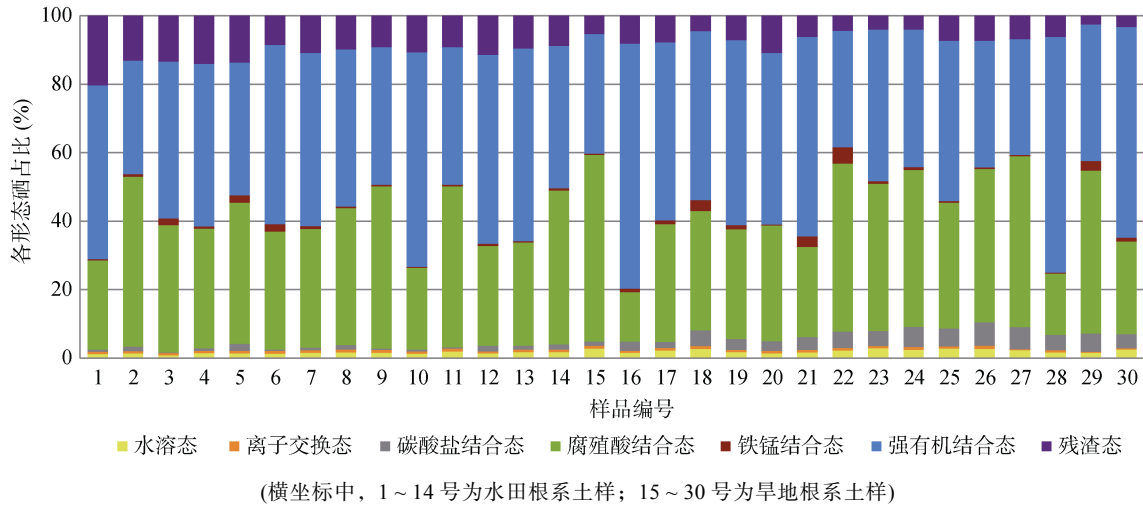


图 3 根系土中各形态硒含量占比

Fig. 3 Proportions of various Se forms in 30 root soil samples

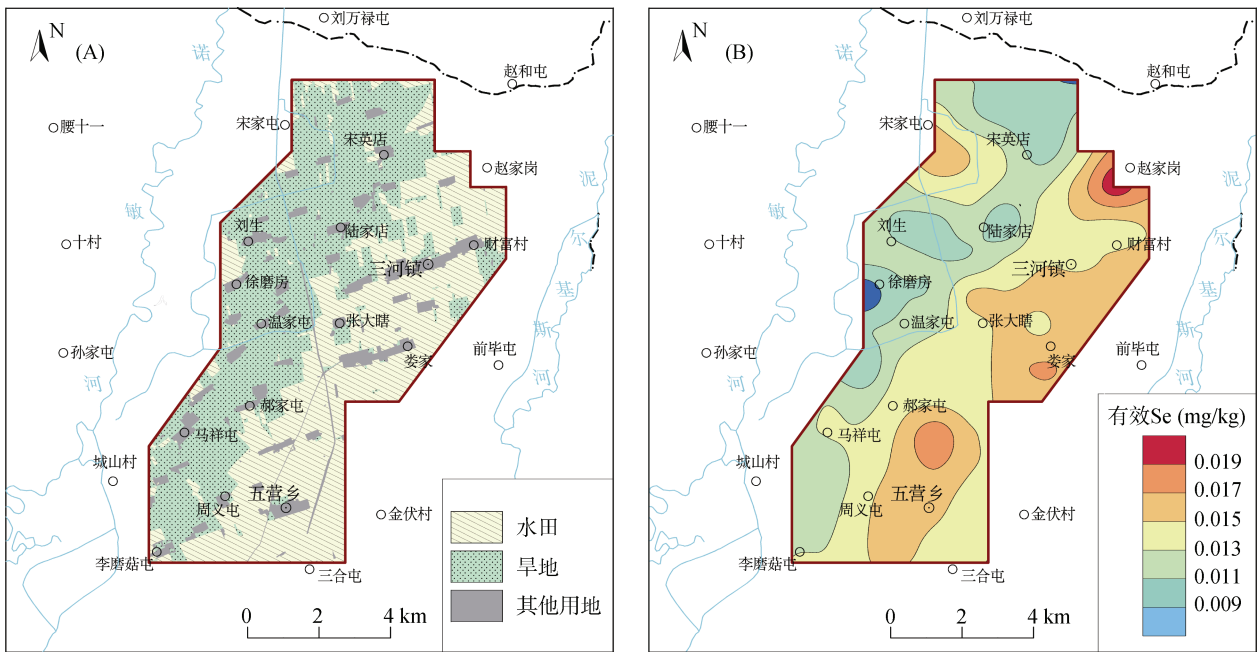


图 4 研究区土地利用类型(A)及土壤有效硒分布特征(B)

Fig. 4 Land use types (A) and distribution of soil available Se (B)

硒元素活化率为土壤有效硒和土壤总硒含量的比值。研究区土壤总硒含量分异不大,分布较为均匀,而水田、旱地土壤中有有效硒含量差异显著,因而,水田和旱地土壤硒活化率差异明显。其中,水田土壤硒活化率在 3.93% ~ 6.19%,平均值为 5.00%;而旱地土壤硒活化率在 2.06% ~ 5.83%,平均值为 3.66%,水田显著高于旱地。

2.4 土壤硒有效性影响因素

土壤是地球系统中能量交换和物质循环最为活跃的环境体系,母质、气候、地貌、生物、人为扰动等因素共同作用导致土壤理化性质差异,从而对土壤养分元素的有效性产生影响^[27-28]。本文对土壤理化指

标与有效硒进行相关分析,讨论土壤硒有效性的影响因素。

2.4.1 土壤总硒 土壤总硒含量是决定能否划定为富硒土地的基础,土壤有效硒含量与其紧密相关^[29]。本次根系土样品分析结果显示(表 3),土壤总硒和有效硒呈正相关关系,但相关性不显著。由上文分析可知,土地利用方式对土壤硒有效性影响显著,因此进一步分别对水田、旱地样品进行分析,结果表明,总硒与有效硒在水田土壤中显著正相关;在旱地土壤中总硒与有效硒也呈正相关,但相关性弱于水田。土壤硒活化率与总硒含量显著负相关,表明研究区土壤硒总量较高时硒活化率下降,但有效硒含量不会减少。

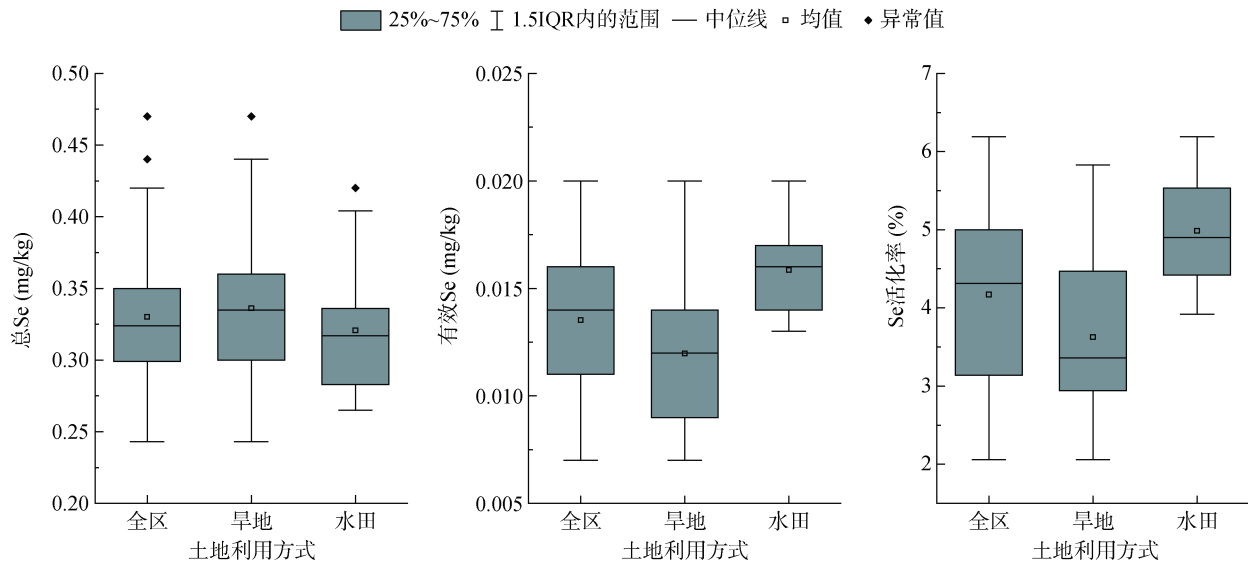


图 5 研究区不同土地利用方式下土壤总硒、有效硒含量及硒活化率

Fig. 5 Soil total and available Se contents, and Se activating rates under different land use types

表 3 根系土中总硒、有机质含量与有效硒、硒活化率间相关性

Table 3 The correlation between total selenium, organic matter content, available selenium, and selenium activation rate in root soil

	全区(n=50, r _{0.05} =0.273)		旱地(n=30, r _{0.05} =0.349)		水田(n=20, r _{0.05} =0.444)	
	总 Se	SOM	总 Se	SOM	总 Se	SOM
有效硒	0.081	0.286*	0.112	0.376*	0.524*	-0.242
硒活化率	-0.447*	0.125	-0.425*	0.116	-0.526*	-0.267

注：* 表示在 P<0.05 水平下显著相关。

2.4.2 土壤有机质 由前文可见,研究区土壤中腐殖酸结合态和强有机结合态硒含量显著高于其他赋存形态,且区内土壤总硒含量与有机质含量显著正相关,相关系数为 0.302,土壤有机质对硒元素有吸附固定作用,与以往黑土区研究结果相一致^[30-31]。全区范围内土壤有机质与有效硒含量也呈显著正相关(表 3),与硒活化率也呈一定程度的正相关。研究区土壤易被利用的水溶态和离子态硒含量之和小于土壤有效硒含量,可能是一部分潜在利用性硒被活化释放,增加了有效硒含量,而潜在利用硒中以腐殖酸结合态为主,且腐殖酸结合态硒占总有机硒较大比例,因而,研究区域内有机质含量丰富有利于提高土壤硒利用率。

2.4.3 土壤养分元素 土壤养分元素对植物生长至关重要,为其提供生长所必需的营养物质,也是评价土壤肥力的重要指标。部分养分对土壤硒元素活化有一定的协同或拮抗作用。土壤中养分元素与有效硒含量和硒活化率相关分析结果表明,植物正常生长发育中需要量较大的养分元素中,氮和硫元素与有效硒和硒活化率均呈显著正相关,氧化钾与之也呈一定程度的正相关关系,氧化镁与土壤有效硒显著负相关。其他养分指标中,二氧化硅、锰元素与有效硒显著负相关,全铁与硒活化率显著正相关,其他元素与有效硒和硒活化率相关性均不显著。因此,研究区域内土壤高氮、硫元素含量,有利于硒元素活化,从而提升有效硒含量。

表 4 土壤有效硒和硒活化率与养分元素相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil available Se and Se activating rate with nutrients

	N	P	K ₂ O	S	CaO	MgO	Mn	TFe ₂ O ₃	SiO ₂	Cu	V	Zn
有效 Se	0.398*	-0.106	0.122	0.590*	0.088	-0.432*	-0.333*	0.206	-0.357*	0.065	-0.004	-0.093
Se 活化率	0.376*	-0.146	0.219	0.478*	-0.098	-0.255	-0.062	0.328*	-0.27	-0.081	0.132	0.111

注：* 表示在 P<0.05 水平下显著相关, n=50。

2.4.4 pH 土壤 pH 是土壤的重要化学性质之一,对土壤中的氧化还原、沉淀溶解、吸附解吸和配合反

应起支配作用,是土壤生态环境的重要影响因素^[32]。梁冬丽等^[33]和付强等^[34]认为,土壤 pH 通过影响元素

形态及价态间转化而影响硒的有效性。本研究区土壤呈酸性, 区域内差异不大, 变异系数仅为 0.064。相关分析结果显示, 土壤 pH 与有效硒含量和硒活化率均呈弱负相关, 相关系数为 -0.162, 这可能与部分水田样品长期处于浸水环境, 高 pH 利于硒元素活化的同时, 也提高了植物吸收利用和发生淋滤流失的几率有关。

3 结论

1) 绥化市北林区典型黑土表层硒元素分布较均匀, 平均含量为 0.343 mg/kg, 高于全国表层土壤平均值; 区内约 15% 地块硒达到富硒土地标准, 且砷、镉等 8 项重金属元素含量较低, 富硒地块具备绿色富硒农业发展的基础条件。

2) 研究区土壤中各形态硒含量差异显著, 从低到高依次为离子交换态、铁锰结合态、水溶态、碳酸盐结合态、残渣态、腐殖酸结合态、强有机结合态; 易于为植物吸收利用的水溶态和离子交换态硒仅占 2.5%, 而难于吸收利用的铁锰结合态、强有机结合态和残渣态硒占 58.4%。

3) 研究区土壤中有效硒含量在 0.007 ~ 0.02 mg/kg, 平均值为 0.014 mg/kg, 硒活化率在 2.06% ~ 6.19%; 不同土地利用方式下有效硒含量和硒活化率存在差异, 水田显著高于旱地。

4) 土壤中硒赋存形态及土壤理化性质影响硒元素有效性。与土壤有效硒显著正相关的指标有氮、硫和有机质, 土壤总硒和氧化钾与有效硒呈不同程度的正相关; 与土壤有效硒显著负相关的指标有锰、氧化镁和二氧化硅, 磷、氧化钠及土壤 pH 与有效硒呈不同程度负相关。研究认为, 区域内提高有机质及氮、硫元素含量, 有利于土壤硒元素的活化释放。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Wan H S, Zhang W C, Wu W, et al. The controlling factors of soil selenium content in a selenium-deficient area in southwest China[J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 1031.
- [3] 王学求, 柳青青, 刘汉粮, 等. 关键元素与生命健康: 中国耕地缺硒吗?[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 412-423.
- [4] Natasha, Shahid M, Niazi N K, et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 915-934.
- [5] Wang J, Li H R, Li Y H, et al. Speciation, distribution, and bioavailability of soil selenium in the Tibetan Plateau Kashin-beck disease area—a case study in Songpan County, Sichuan Province, China[J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, 156(1/2/3): 367-375.
- [6] 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.
- [7] 田强国, 侯进凯, 杨在伟, 等. 河南省洛阳市土壤硒含量、有效性及形态分布特征[J]. *物探与化探*, 2023, 47(5): 1371-1378.
- [8] 刘立芬, 栾欣婷. 寒地黑土养分元素地球化学特征及丰缺评价——以抚远市为例[J]. *土壤*, 2024, 56(3): 681-688.
- [9] 刘驰, 刘希瑶, 刘澎. 松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 550-555.
- [10] 刘航, 李瑞红, 李胜荣, 等. 松辽平原典型黑土区不同土壤结构的古气候背景与黑土成因机制[J]. *地质通报*, 2024, 43(5): 766-778.
- [11] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. *科学通报*, 2021, 66(1): 96-106.
- [12] 中华人民共和国国土资源部. 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000):DZ/T0258—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [13] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法: DZ/T 0279—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] 安徽省质量技术监督局. 区域地球化学调查样品分析方法: DB34/T 2127—2014[S]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [16] 安徽省地质实验研究所. 安徽省地质实验研究所作业指导书: AHDS-ZZ-C05—2019[R]. 合肥: 安徽省地质实验研究所, 2019.
- [17] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD2005-03[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [18] 夏学齐. 地球化学样品分析与数据应用统计[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [19] 刘志宗, 王晟, 刘奇, 等. 西盟县土壤硒元素空间分异特征及影响因素[J]. *土壤*, 2024, 56(5): 1111-1119.
- [20] 蒲帅. 富硒区土壤—作物中硒的富集特征及土壤硒的生物有效性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [21] 夏学齐, 杨忠芳, 薛圆, 等. 黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素循环特征[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 850-858, 864.
- [22] 奚小环, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1095-1108.
- [23] 中华人民共和国自然资源部. 天然富硒土地划定与标识: DZ/T 0380—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [24] 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: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [25] 周亚龙, 彭敏, 杨志斌, 等. 典型地质高背景区土壤硒—镉迁移累积特征及其生物有效性[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4860-4869.
- [26] 李永春, 刘玖芬, 李雪珍, 等. 河套平原腹地土壤硒的赋存形态特征及生物有效性[J]. *环境科学*, 2024, 45(11): 6734-6744.

- [27] 褚宏欣, 党海燕, 王涛, 等. 我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况评价及影响因素[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 129–139.
- [28] 丁燕芳, 赵凤霞, 米琳, 等. 豫中植烟土壤有效态微量元素与 pH 和有机质的关系[J]. 土壤, 2022, 54(1): 88–94.
- [29] 王敏, 徐生发. 富硒土壤生物有效性及其影响因素研究[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(4): 84–88.
- [30] 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.
- [31] 张立, 姜侠, 崔玉军, 等. 松嫩平原吕大火房垂直剖面中硒赋存形态及影响因素分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 603–608, 584.
- [32] 陈岳龙, 杨忠芳. 环境地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [33] 梁东丽, 彭琴, 崔泽玮, 等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 374–380.
- [34] 付强, 王冬艳, 李月芬, 等. 吉林中部黑土区土壤硒元素土壤地球化学研究[J]. 世界地质, 2014, 33(1): 102–111.