

东北典型黑土富硒区土壤与作物硒含量特征及影响因素 ——以海伦市为例^①

马婧萱^{1,2,3}, 崔晓丹^{1,3,4}, 梁 强^{1,2}, 胡文友^{1,2}, 黄 标^{1,2*}

(1 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 211135; 2 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏省地质调查研究院, 南京 210018)

摘要: 为探究东北典型黑土富硒区土壤-作物系统硒含量及影响因素, 选择海伦市为研究区, 调查分析了表层土壤的理化性质、全硒和有效硒含量, 大宗农产品(水稻、大豆、玉米)可食用部分硒含量。结果表明, 研究区土壤全硒含量水平相对较高, 均值为0.303 mg/kg, 有效硒含量均值为0.018 mg/kg, 硒活化率(有效硒的占比)偏低; 土壤全硒和有效硒含量都具有明显的空间分布特征, 高值区主要分布在研究区的西北部和中部(永和乡、爱民乡、向荣乡和长发乡); 3种大宗农作物硒含量由高到低为水稻(0.028 mg/kg)>大豆(0.014 mg/kg)>玉米(0.007 mg/kg); 相关性分析表明, 土壤硒含量的主要影响因素为土壤有机质、全氮、阳离子交换量和粉粒含量, 高有机质含量抑制了水稻和玉米对土壤硒的吸收。本研究为研究区开发利用富硒土壤提供了从区域选择到作物类型选择的数据支撑。

关键词: 海伦市; 黑土; 硒; 土壤-作物系统; 硒生物利用率

中图分类号: X825 文献标志码: A

Characteristics and Influencing Factors of Se Content of Soil and Crop in Se-rich Areas of Isohumosols (Mollisols) in Northeast China: A Case Study of Hailun

MA Jingxuan^{1,2,3}, CUI Xiaodan^{1,3,4}, LIANG Qiang^{1,2}, HU Wenyou^{1,2}, HUANG Biao^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), Ministry of Natural Resources, Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to investigate the selenium (Se) content of soil-crop system and its influencing factors in a typical Se-enriched Isohumosols area of northeast China, Hailun City was taken as the study area, the physicochemical properties, total Se and available Se contents in surface soils (0–20 cm), and Se contents in edible portions of crops (rice, soybean and maize) were analyzed. Results showed that soil total Se content was relatively high, with an average value of 0.303 mg/kg, yet Se activation rate (proportion of available Se to total Se) was low with an average value of 0.018 mg/kg for available Se. Both total and available Se contents in soil had obvious spatial distribution characteristics, and the high value areas were mainly distributed in the northwestern and central regions (Yonghe, Aimin, Xiangrong and Changfa towns). For the 3 main crops, Se content from high to low was rice (0.028 mg/kg) > soybean (0.014 mg/kg) > maize (0.007 mg/kg). Correlation analysis showed that the main influencing factors of soil Se content were soil organic matter, total nitrogen, CEC and clay contents, and high organic matter content inhibited soil Se uptake by rice and maize. This study provides data support from planting area to crop type selection for the development and utilization of Se-enriched soil in the study area.

Key words: Hailun City; Isohumosols; Selenium; Soil-crop system; Se bioavailability

^①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500202)、江苏省科技计划“一带一路”创新合作项目(BZ2023003)和自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题项目(GTST2021-013)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 马婧萱(1999—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境质量评价。E-mail: majingxuan@issas.ac.cn

硒是人体必需的微量元素,摄入适当硒可以提高人体免疫力,维持细胞生理功能,并起到保护心血管和视觉器官的作用,人体缺乏硒会导致克山病、软骨病和心肌病等疾病。我国土壤具有硒总体含量低、分布极不均匀的特点,耕地硒含量范围为 0.047~0.993 mg/kg,均值为 0.290 mg/kg,72% 的地区存在硒含量较低的情况^[1]。其中,东北平原土壤硒平均含量为 0.184 mg/kg^[2],黑龙江省土壤硒平均含量为 0.147 mg/kg^[3],均低于全国平均水平。缺硒地带产出的粮食等天然食物硒含量也较低,这造成了我国居民摄入硒含量均值远低于中国居民膳食营养素参考摄入量中提及的日最低摄入量^[4]。人体主要通过“土壤-作物-人体”的途径摄入硒。通常情况下,土壤中的硒并不能全部被作物吸收,小部分能被作物直接吸收的硒称为有效硒,土壤有效硒含量受到多种因素影响。因此,在进行土壤和作物中硒含量的研究时,应考虑土壤理化性质对土壤硒有效性的影响。

近年来,对土壤硒特征及影响因素的研究较多,而有关作物硒含量、硒生物有效性的研究较少。戴慧敏等^[2]在松辽平原中南部的研究表明,铁锰氧化物与有机质是影响土壤硒含量的主要因素;迟凤琴等^[3]在黑龙江省的研究表明,土壤有机质、黏粒含量与 pH 对土壤硒含量起重要影响;张立等^[5]在黑龙江绥化的研究认为,根系土中硒含量不能完全决定作物的硒含量,作物自身对硒的运输与富集差异是导致作物硒含量差异的重要因素。

东北黑土区是世界四大黑土区之一,东北耕地面积占我国耕地面积的 10.00%^[6]。研究表明,东北平原表层土壤中,缺硒和潜在缺硒土壤面积占比分别为 25.05% 和 22.63%,而富硒土壤面积占比小于 1.00%^[2],低硒环境引起的克山病、大骨节病分布较广^[7]。近年来又有研究发现,黑龙江省有两条富硒土壤带,硒含量高于 0.325 mg/kg^[8]。说明东北地区土壤硒含量空间异质性较大,有必要选择典型黑土富硒区,详细开展该地区硒含量特征与影响因素分析。

海伦市位于松嫩平原富硒土壤带的中心,“海伦市国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要”提出,要坚定不移发展富硒产业,高质量建成“中国黑土硒都”。以此为研究区,以土壤-作物系统作为研究对象,通过测定研究区土壤理化性质(颗粒组成,土壤 pH、有机质等)、硒含量等指标,绘制空间分布图,以了解研究区土壤硒的含量与分布,选出优先开发利用富硒土壤的区域;测定研究区主要作物(大豆、玉米、水稻)的硒含量,并通过土壤

性质、土壤硒含量与作物硒含量之间的相关性分析,探究土壤和作物硒含量的影响因素,为阐明典型黑土富硒区土壤和作物硒含量现状提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海伦市位于黑龙江省中部,绥化市北部,地跨 46°58' N~47°52' N, 126°14' E~127°45' E(图 1),属于温带大陆性季风气候区,年均温约 25 ℃,年降水量为 500~600 mm。研究区地处松嫩平原东北端、小兴安岭西麓,是小兴安岭向松嫩平原中北部的过渡地带,地势由东北向西南逐渐下降,以低山丘陵、高平原、河流阶地和冲积平原为主,最高海拔为 471 m,最低海拔为 147 m,平均海拔约 200 m^[9]。区内主要分布黑土、草甸土、暗棕壤、水稻土和白浆土等土壤类型;土地总面积 4 667 km²,其中,耕地面积约 2 954 km²,占总面积的 63.30%;主要农作物有水稻、玉米、大豆等,是我国重要的商品粮基地县。

1.2 样品采集与处理

本研究在耕地土壤中采集了 255 个土壤样品(0~20 cm),样点布设结合基础网格、加密点与随机点 3 种方法。基于基础网格法布设土壤采样点位,样点间距 4 km,对于土壤农业利用强度较高的地区进行加密布点,且对于上述样点未覆盖到的地区进行随机布点。由于海伦市中部农业活动较为频繁,选择该区域作为海伦市典型农业区,并进行作物与根系土的成对取样。根系土与作物样点的布设采用基础网格法,样点间距为 8 km。

采样时记录主点位经纬度信息,并从每个主点位周边采集 4~5 处分点位的表层土壤,去除枯枝落叶、石块等,均匀混合后,缩分取 1~2 kg 装袋,送回实验室风干、磨碎、过筛,储存在密封的聚乙烯袋中,常温保存待测。此外,采集了 64 对作物(玉米、水稻、大豆)及根系土样品,3 种作物样品的籽粒部分经晒干后研磨成粉末,储存在密封的聚乙烯袋中,常温保存待测,根系土样品处理方法同表层土壤样品。样点分布见图 1。

1.3 样品分析与测试

表层土壤样品的分析指标包括土壤机械组成、pH、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、阳离子交换量、全硒、有效硒、硒形态;作物样品的分析指标为硒含量。土壤 pH 采用电位法测定,有机质采用外加热重铬酸钾氧化-滴定法测定,土壤机械组成采用激光粒度仪法测定,全氮采用重铬酸钾-硫

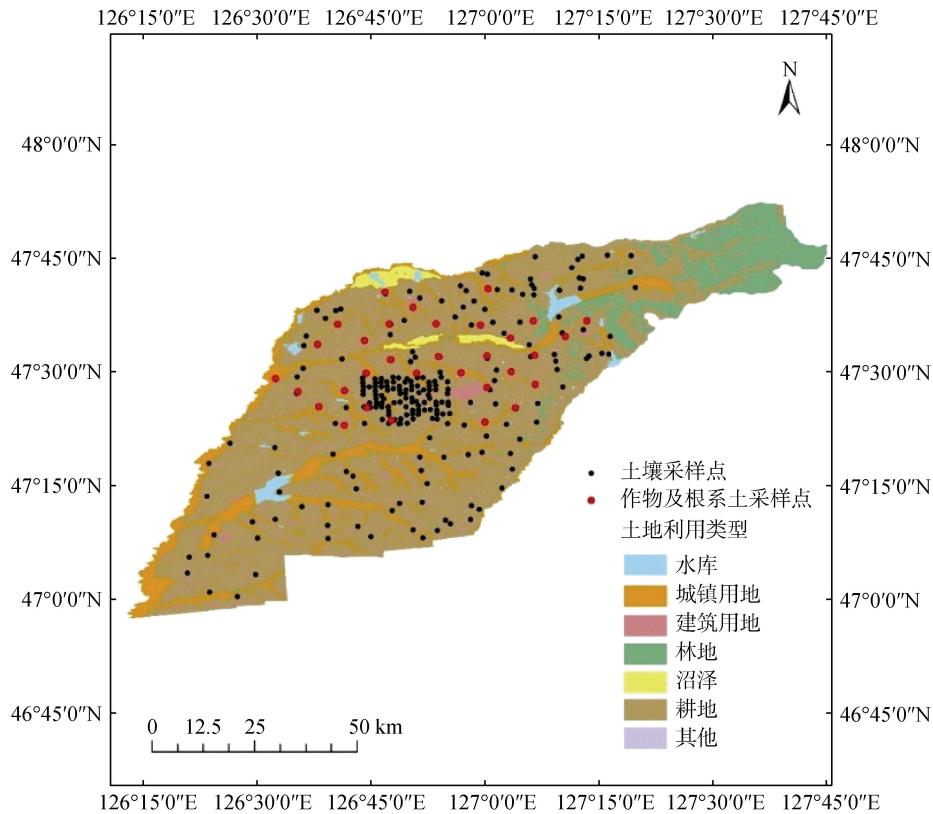


图1 研究区与样点分布图
Fig. 1 Study area and sampling sites

酸消化法测定,全磷和全钾采用碳酸钠熔融法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定,阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定,具体测定方法参考《土壤农化分析》^[10]。

土壤全硒的测定:称取0.5 g过100目筛的土壤样品于50 mL烧杯中,加入10 mL浓硝酸和2 mL浓高氯酸,在95~100℃下加热30 min,再加入15 mL盐酸,用50 mL容量瓶定容,最后用原子荧光光度计测定。

土壤有效硒的测定:随机选取98个土壤样品,测定其有效硒含量,提取剂为0.1 mol/L的K₂HPO₄/KH₂PO₄(pH=7,固液比1:5)溶液,使用硝酸-高氯酸消化、盐酸还原法对提取液中的硒进行分析测定^[11]。

作物硒含量的测定:称取0.5 g样品于烧杯中,加入1 mL双氧水和3 mL去离子水,于150℃加热至近干;冷却后再加入10 mL浓盐酸,持续微沸5~10 min;冷却后用去离子水稀释至25 mL,然后加入1 mL 0.03 mol/L的铁氰化钾溶液;最后用原子荧光光度计测定硒的浓度。过程中采用GBW 10048和GBW 10185进行质量控制,硒含量的相对误差在91.77%~111.11%。

1.4 评价方法

参考史艳美等^[12]的研究,采用土壤硒活化率作为评价土壤有效硒在土壤全硒中所占比例的指标,计算公式如下:

$$\text{土壤硒活化率} (\%) = \frac{\text{土壤有效硒含量}}{\text{土壤全硒含量}} \times 100$$

1.5 数据分析与统计

采用Excel 2016和SPSS 23.0完成数据的描述性统计、Pearson相关分析;运用半方差函数在GS⁺7.0软件进行空间结构分析后,选择合适的模型进行普通克里格插值;运用ArcGIS 10.2软件绘制空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质和硒含量

根据美国土壤质地分类方法^[13]对研究区土壤进行分类,发现研究区土壤质地偏粉,其中粉质壤土占比最多(50.22%),其次为粉质黏壤土(22.08%),次之为黏壤土和壤土,占比分别为16.45%和10.39%。

研究区土壤基本理化性质统计结果如表1所示。研究区土壤酸碱度整体以弱酸性为主,土壤pH变化范围在5.76~7.69,均值为6.36,弱酸性土壤(5.5<pH<6.5)占比为75.75%,低于黑龙江省平均值

表 1 研究区表层(0~20 cm)土壤理化性质及硒含量描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of topsoil (0~20 cm) physiochemical properties and Se contents of study area

指标	最小值	最大值	均值	中值	标准差	变异系数(%)
黏粒(g/kg)	84.2	611.6	251.9	248.6	6.59	26.15
粉粒(g/kg)	217.5	815.8	552.4	541.7	9.35	16.93
砂粒(g/kg)	7.2	593.9	195.8	197.1	8.44	43.11
pH	5.76	7.69	6.36	6.31	0.31	4.79
有机质(g/kg)	23.60	100.50	52.79	51.10	10.52	19.93
全氮(g/kg)	1.14	4.74	2.43	2.34	0.48	19.87
全磷(g/kg)	0.50	2.63	0.94	0.91	0.23	24.12
全钾(g/kg)	17.92	36.13	21.59	21.55	1.56	7.22
有效磷(mg/kg)	8.82	188.46	38.60	32.52	24.41	63.24
速效钾(mg/kg)	101.30	549.60	165.46	148.80	68.30	41.28
阳离子交换量(cmol/kg)	18.74	44.04	33.76	33.67	3.48	10.30
全硒(mg/kg)	0.180	0.500	0.303	0.320	0.058	19.19
有效硒(mg/kg)	0.010	0.080	0.018	0.016	0.009	47.74
硒活化率(%)	3.70	40.63	5.87	5.28	3.72	63.39

注: 黏粒, <0.002 mm; 粉粒, 0.002~0.02 mm; 砂粒, 0.02~2 mm。

(pH=6.6)和全国平均值(pH=8)^[14], 略低于黑龙江省绥化市土壤pH平均值^[5]。土壤有机质含量范围为23.60~100.50 g/kg, 均值为52.79 g/kg, 高于绥化市有机质平均水平(41.36 g/kg)^[5], 远低于黑龙江省平均水平(85.10 g/kg)^[14], 高于全国平均值(24.65 g/kg)^[14]。

土壤全氮和全磷平均值分别为2.43 g/kg和0.94 g/kg, 均高于对应的全国平均值(0.707 g/kg, 0.570 g/kg)^[14], 全氮含量高于黑龙江省宾县土壤平均值(2.05 g/kg)^[15], 全磷含量高于黑龙江省海沟河区域土壤平均值(0.48 g/kg)^[16]。土壤全钾的均值为21.59 g/kg, 高于黑龙江典型县域平均值(20.27 g/kg)^[17]。

土壤有效磷和速效钾的均值分别为38.60 mg/kg和165.46 mg/kg, 均低于黑土区对应的平均水平(39.4 mg/kg, 224.3 mg/kg)^[18], 高于松嫩平原平均水平(24.9 mg/kg, 159.93 mg/kg)^[19]。土壤阳离子交换量范围为18.74~44.04 cmol/kg, 均值为33.76 cmol/kg。

根据DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[20], 有机质含量均值等级为丰富(>40 g/kg), 全氮均值等级为丰富(>2 g/kg), 全磷均值等级为较丰富(0.8~1 g/kg), 全钾均值等级为较丰富(20~25 g/kg), 有效磷均值等级为较丰富(20~40 mg/kg), 速效钾均值等级为较丰富(150~200 mg/kg)。

综上, 研究区土壤质地偏粉, 酸碱度偏酸性, 有机质高于普通黑土区, 大量养分元素含量均比较丰富, 有效态养分含量较高, 适合开展对应的农业活动。

研究区土壤全硒含量变幅为0.180~0.500 mg/kg, 平均值为0.303 mg/kg, 高于黑龙江省土壤硒含量平

均值(0.147 mg/kg)^[3]与我国土壤硒含量背景值(0.290 mg/kg)^[21]。根据谭见安^[22]对我国元素生态景观安全阈值的划分标准(表2), 全部土壤样品硒含量处于足硒(0.175~0.400 mg/kg)和富硒(0.400~3.000 mg/kg)范围, 其中富硒样点占6.92%, 未出现硒缺乏现象(≤0.125 mg/kg)。这说明研究区域土壤硒含量整体处于较高水平, 拥有着充足的足硒土地资源。

表 2 耕地表层土壤硒丰缺划分界限值
Table 2 Threshold values between abundance and deficiency of soil Se

标准值(mg/kg)	硒含量等级	硒效应
≤0.125	缺乏	硒反应不足
0.125~0.175	边缘	硒潜在不足
0.175~0.400	适量	足硒
0.400~3.000	高	富硒
≥3.000	过剩	硒中毒

作为重要的粮食生产地区, 研究区土壤全硒含量处于安全范围之内, 但土壤全硒含量一般不能反映土壤对植物的供硒水平, 只能作为土壤硒的容量指标。因此, 为较全面地评估研究区粮食产业的硒健康风险, 使用土壤的有效硒含量作为进一步详细衡量土壤供硒能力的指标^[23]。土壤有效硒的测定结果如表1所示, 有效硒含量变幅为0.010~0.080 mg/kg, 平均值为0.018 mg/kg, 高于松嫩平原南部土壤有效硒平均值(0.009 mg/kg)^[24]。

研究区硒活化率变幅为3.70%~40.63%, 变异性较大, 平均值为5.87%。大部分的土壤样品硒

活化率的区间范围为 3.70% ~ 10.90%，该活化率水平与广西典型红壤区(平均值 5.52%)^[25]类似，低于江西丰城生态硒谷旱地土壤硒活化率平均水平(8.95%)^[26]，高于宁夏石嘴山地区硒活化率平均水平(5.05%)^[27]。

综上，研究区土壤中全硒含量较为充足，有效硒含量偏低，土壤能提供给植物吸收利用的硒相对较少。

2.2 土壤全硒及有效硒空间分布特征

采用半方差函数可研究土壤硒空间分布格局的随机性和结构性特征，拟合结果(表 3)表明，土壤全硒空间分布的最优模型为球状模型，拟合系数 R^2 为 0.798；有效硒空间分布的最优模型为高斯模型，拟合系数 R^2 为 0.490。全硒与有效硒的残差分别为 1.666×10^{-4} 和 0.0861，均趋近于 0，表明上述半方差函数与理论上的模型拟合较好，能够较好地反映土壤

硒的空间结构特征。块金系数代表空间异质性程度，该值<0.25、0.25 ~ 0.75、>0.75 分别代表变量强、中等、弱空间相关性^[28]。全硒与有效硒的块金系数分别为 0.514 和 0.732，均属于中等空间变异性，表明全硒和有效硒具有中等空间相关性，说明二者含量受土壤母质、土壤类型以及地形地貌等结构性因素和人为活动等随机性因素的双重影响。土壤全硒与有效硒变程分别为 38.90 km 和 73.92 km，说明二者的空间自相关范围较大。

为直观反映土壤硒的空间分布特征，在半方差函数模型拟合的基础上，对土壤全硒与有效硒含量进行普通克里格插值，获得研究区土壤全硒与有效硒含量的空间分布图(图 2)。整体上，土壤全硒含量由东北至西南方向先升高后降低。研究区土壤硒含量高值区(0.360 ~ 0.400 mg/kg)主要在西北部爱民乡、永和乡、向荣乡零星分布；硒含量范围为 0.320 ~ 0.360 mg/kg

表 3 土壤全硒和有效硒的半方差函数模型及相应参数
Table 3 Semi-variogram function models for soil total and available Se and corresponding parameters

指标	模型	块金值	基台值	块金系数	变程(km)	拟合系数	残差
全硒	球状模型	0.020 6	0.042 3	0.514	38.90	0.798	1.666×10^{-4}
	指数模型	0.017 0	0.043 1	0.606	42.90	0.737	2.170×10^{-4}
	高斯模型	0.021 4	0.042 9	0.501	31.87	0.787	1.879×10^{-4}
	线性模型	0.027 2	0.045 5	0.403	53.83	0.536	3.820×10^{-4}
有效硒	球状模型	0.076 0	0.331 8	0.771	110.33	0.457	0.089 6
	指数模型	0.074 0	0.386 8	0.809	227.40	0.446	0.090 8
	高斯模型	0.092 0	0.342 8	0.732	73.92	0.490	0.086 1
	线性模型	0.077 0	0.315 8	0.756	70.63	0.460	0.089 3

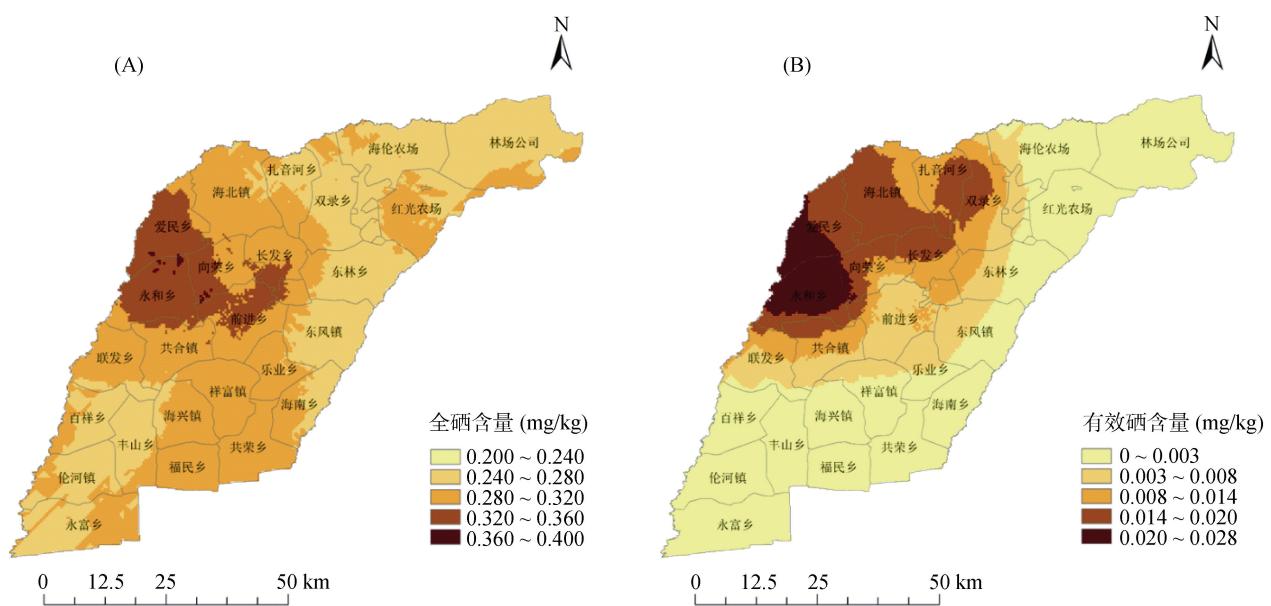


图 2 土壤全硒(A)与有效硒(B)的空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of soil total (A) and available (B) Se contents

的土壤在高硒含量土壤周边扩散, 主要分布在爱民乡、永和乡、向荣乡西部、前进乡北部和长发乡南部; 低硒含量区($0.200 \sim 0.280 \text{ mg/kg}$)则主要分布在研究区的西南部和东北部。

土壤有效硒含量空间分布与全硒具有一定的相似性, 总体呈现出由东南至西北递增的趋势。研究区西北部土壤有效硒含量最高, 变幅为 $0.020 \sim 0.028 \text{ mg/kg}$, 该区域与全硒含量为 $0.360 \sim 0.400 \text{ mg/kg}$ 的区域重

合度较高; 高值区($0.014 \sim 0.020 \text{ mg/kg}$)主要分布在爱民乡、永和乡、向荣乡西部和北部、海北镇、长发乡北部、扎音河乡东部和双录乡西部。

按不同区域对土壤全硒与有效硒含量水平进行划分(图 3), 永和乡、长发乡、爱民乡、向荣乡、前进乡的土壤全硒水平较高, 平均值均高于 0.320 mg/kg ; 永和乡、扎音河乡、爱民乡和向荣乡的土壤有效硒水平较高, 平均值均高于 0.018 mg/kg 。

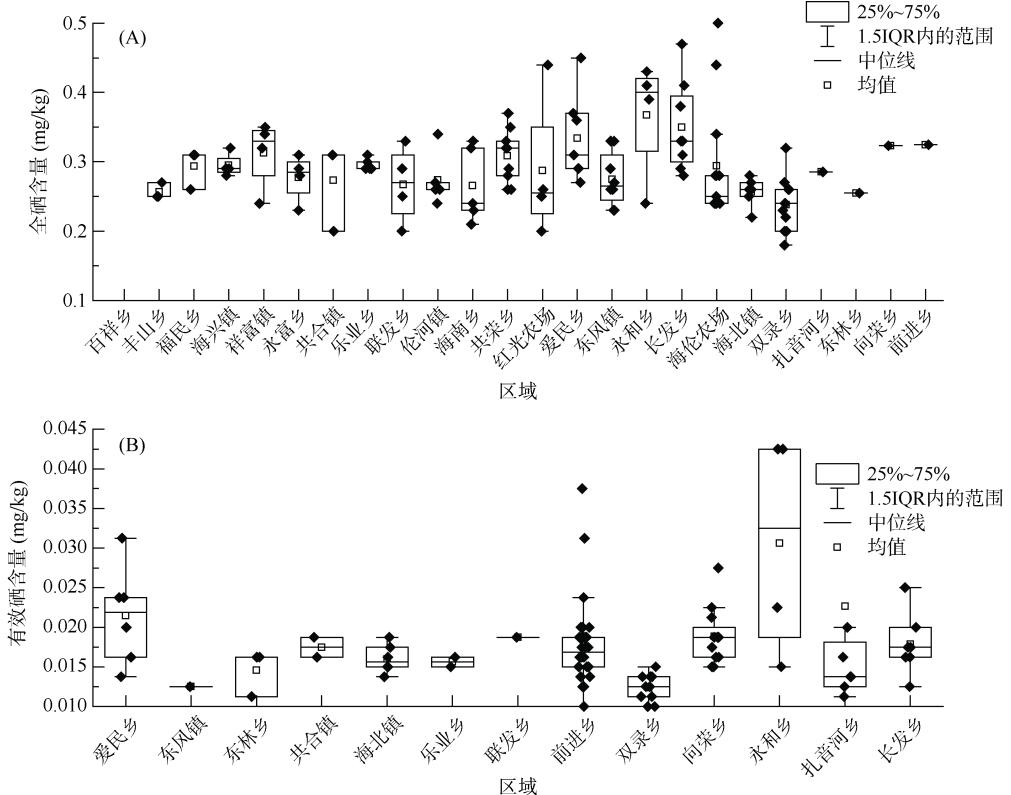


图 3 各区域土壤全硒(A)与有效硒(B)含量统计
Fig. 3 Statistics of total (A) and available (B) Se contents in soils in different regions

因此, 研究区较高的土壤硒资源分布在永和乡、爱民乡、向荣乡和长发乡, 应当优先考虑以上乡镇发展富硒产业。这与海伦市国土空间总体规划中提到的, 建立爱民乡富硒杂粮现代农业产业园、向荣乡的富硒大豆现代农业产业园、永和乡和长发乡的富硒水稻现代农业产业园的目标一致。

2.3 土壤全硒及有效硒含量影响因素

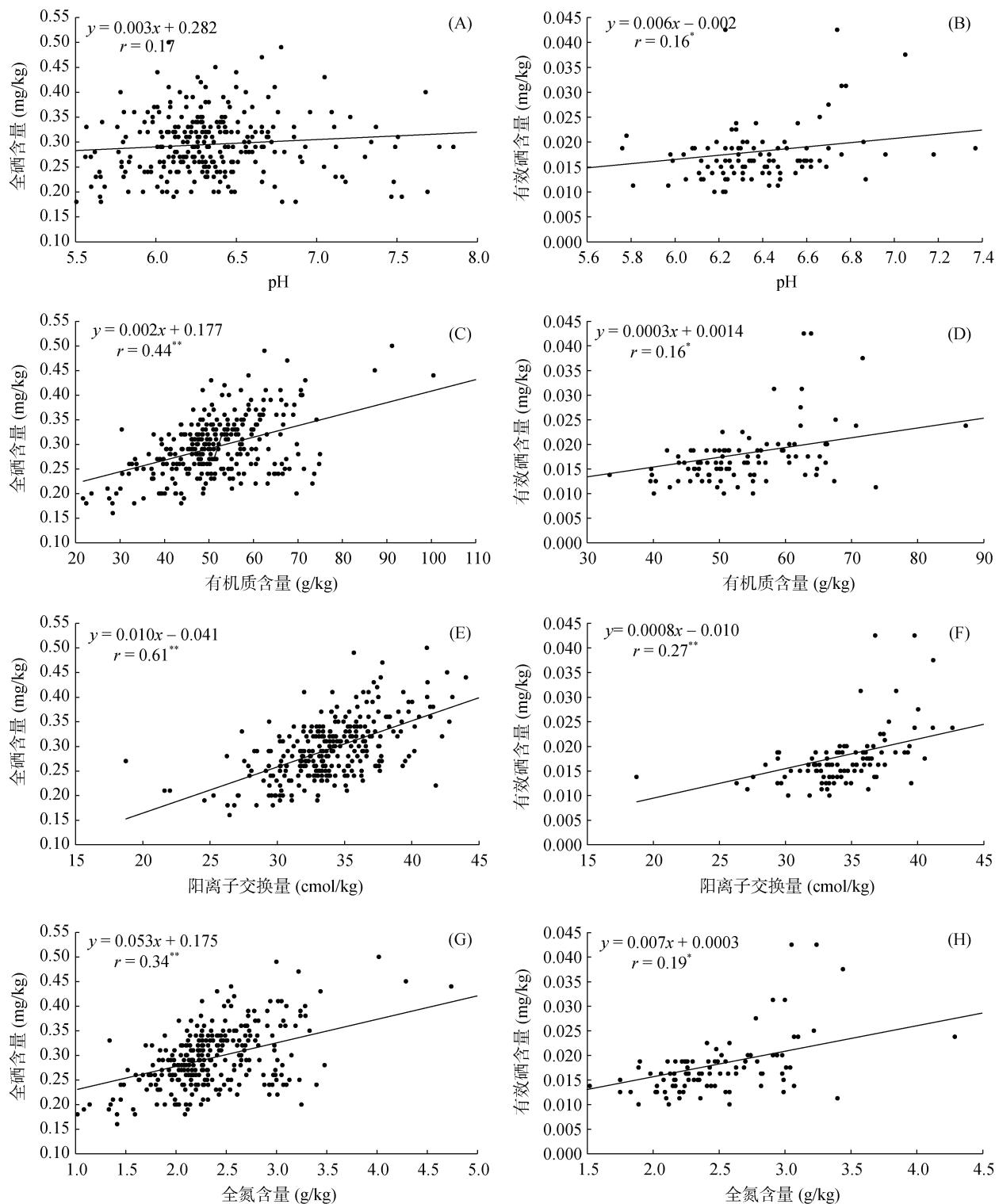
为了更好地探究各单一因素对土壤中硒含量的影响, 对土壤中全硒及有效硒含量和土壤各理化性质进行相关性分析, 结果如图 4 所示。

pH 与土壤全硒含量无显著的相关关系, 与有效硒含量为显著正相关关系($P<0.05$), 相关系数为 0.16。可见, pH 与土壤全硒含量关系较小, 而 pH 的增加能在一定程度上提高土壤硒的有效性。以往研究表

明, pH 与土壤硒含量之间的关系并不统一^[29]。但一般认为中、碱性土壤中全硒含量基本不受 pH 制约, 而 pH 与土壤有效硒含量能够产生显著的正向影响^[30]。

全硒含量与土壤有机质含量为极显著正相关关系($P<0.01$), 相关系数为 0.44; 有效硒含量与有机质含量为显著正相关关系($P<0.05$), 相关系数为 0.16。土壤有机质固定硒的非生物过程主要为亚硒酸盐和硒酸盐与有机质的结合, 而研究区土壤有机质含量相对丰富, 对硒具有较强的吸附与固定能力, 这使得该地区土壤硒含量相对较高。

全硒含量与有效硒含量均与土壤阳离子交换量呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数分别为 0.61 和 0.27。阳离子交换量能够直接反映土壤的保肥供肥性能和缓冲能力, 因此阳离子交换量越高的土壤能固



(*、** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平(双侧)显著相关, 下同)

图 4 表层土壤硒含量与部分理化性质之间的相关关系
Fig. 4 Correlation between topsoil Se and other physiochemical properties

定、吸附土壤中更多的硒。研究区内主要分布黑土, 有机质含量较高, 土壤无机矿质黏粒和有机质黏粒含量较高, 导致能够吸附和交换土壤溶液中的各种阳离子数量增多, 增加了土壤中硒的吸附交换, 进而提高

了土壤中硒的含量。

全硒含量与全氮含量表现为极显著正相关($P<0.01$), 相关系数为 0.34; 有效硒含量与全氮含量表现为显著正相关($P<0.05$), 相关系数为 0.19。土壤中大多数

氮素来源于有机质分解,因此,有机质含量较高的土壤中往往伴随着较高的氮素,土壤全硒与全氮呈显著性相关可能与土壤有机质对硒的吸附与固定作用有关。

土壤粒径大小对硒的吸附和固定也有影响。对研究区表层土壤样品进行质地分类,并分别统计不同质

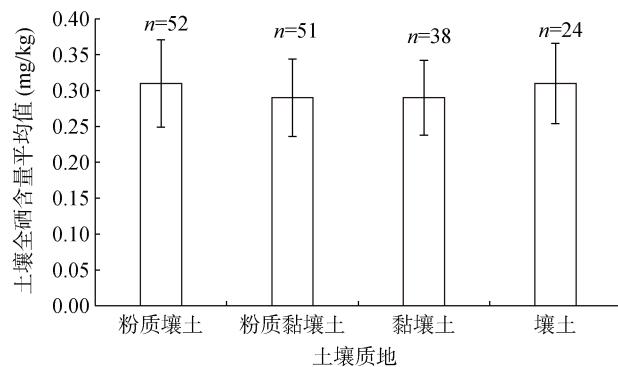


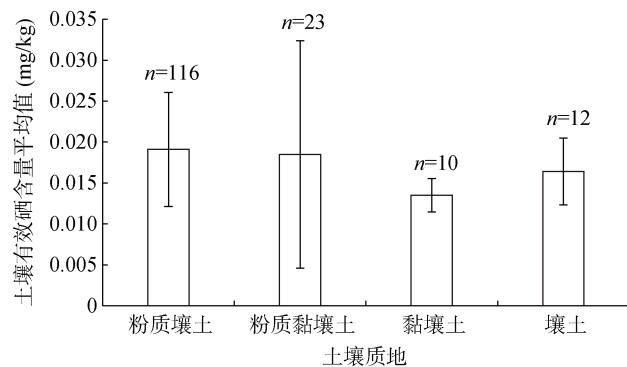
图 5 不同质地的土壤硒平均含量
Fig. 5 Average Se contents in soils with different textures

2.4 作物硒含量特征

研究区大宗农作物中,大豆、水稻和玉米耕种面积分别占总农作物耕种面积的 65.74%、16.14% 和 14.46%,因此本研究选取这 3 种作物,采集并测定其籽粒的硒含量(图 6)。总体来说,研究区作物中硒含量排序为水稻>大豆>玉米。水稻样品中硒含量范围为 0.015~0.050 mg/kg,平均含量为 0.028 mg/kg,根据 GB/T 22499—2008^[32]的富硒稻谷标准($\geq 0.04 \text{ mg/kg}$),有 4.69% 的样品达到富硒水平。大豆样品中硒含量为 0.006~0.016 mg/kg,平均含量为 0.014 mg/kg;玉米样品中硒含量范围为 0.003~0.012 mg/kg,平均值为 0.007 mg/kg。中华人民共和国供销合作行业标准 GH/T 1135—2017《富硒农产品》^[33]规定的富硒谷物类和豆类全硒含量分别为 0.100~0.500 mg/kg 和 0.100~1.000 mg/kg,以此为标准,研究区大豆和玉米样品硒含量均未达到富硒水平。因此,相比之下,水稻较适合作为研究区富硒农作物。

张立等^[5]在黑龙江绥化(距研究区 101 km)开展的研究表明,绥化地区水稻样品硒含量变幅为 0.009~0.081 mg/kg,平均值为 0.043 mg/kg;玉米样品硒含量变幅为 0.002~0.096 mg/kg,平均值为 0.028 mg/kg。梁帅等^[34]在黑龙江拜泉(距研究区 80 km)的研究表明,玉米样品平均硒含量 0.029 mg/kg,水稻样品平均硒含量 0.020 mg/kg,大豆样品平均硒含量 0.035 mg/kg。这两个地区总体农作物中硒含量高于本研究区,其中绥化地区土壤有效态硒均值达到 0.033 mg/kg,高于本研究中土壤有效硒平均水平

地土壤的硒和有效硒含量均值(图 5)。粉粒含量较高的粉质壤土和壤土中全硒含量相对较高,粉质黏壤土、粉质壤土中有效硒含量相对较高,说明 0.002~0.020 mm 范围内的土壤颗粒有利于硒在土壤中的吸附。黄锦法等^[31]认为浙江嘉兴平原地区的黏性土壤中含硒量高于砂性土壤,这可能与母质均一性有关。



(0.018 mg/kg),这可能导致当地作物对硒的生物富集效果更佳。

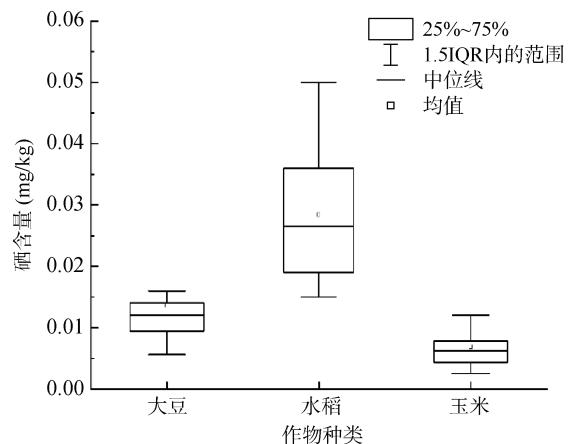


图 6 农作物硒含量统计特征
Fig. 6 Statistics of Se contents in crops

不同科(种)作物硒含量不同,主要原因在于作物生物学特性的差异。根据硒在植物细胞中的积累情况,可将植物分为超积累植物(1 000~20 000 mg/kg)、次积累植物(50~1 000 mg/kg)和非积累植物(<50 mg/kg)^[35]。本研究中收集的 3 种作物均属于硒的非积累植物^[35],本身并不具备富集硒的能力,因此作物对土壤硒的吸收能力较弱,作物自身硒含量处于较低的水平。

这说明,尽管研究区土壤拥有丰富的硒资源,但作物并不能充分吸收利用土壤中的硒,如果研究区居民主要依赖当地主食摄入硒,将面临一定的硒摄入不

足风险。

2.5 作物硒含量影响因素

农作物中的硒是人体摄入硒的重要途径,因此探讨作物硒含量的影响因素十分必要。土壤全硒含量和各理化性质与作物的硒含量、富集系数的相关性分析结果如表4所示。玉米硒含量与土壤全硒含量呈显著相关性($r=0.56$, $P<0.01$),但玉米硒含量较低、硒富集系数较低;水稻和大豆硒含量与土壤全硒含量无显著相关性,说明土壤全硒含量可能不是评估作物可吸收硒量的良好指标,仅仅提供了作物能够从土壤中获取硒元素的上限。尽管作物中的硒直接来源于土壤,但影响作物吸收和积累的因素很多,包括作物基因性状,自然条件(如温度、水分),以及土壤性状(如土壤质地、pH、矿物类型、氧化还原状况等),因此高硒含量的土壤不一定产出高硒含量的作物。梁帅等^[34]研究发现,大豆、水稻、玉米3种作物硒含量均与根系土全硒含量呈较弱正相关关系,作物硒含量并不完全取决于土壤全硒含量的高低,也与硒的存在形态、作物种类及土壤理化性质等多种因素有关。杨涛等^[36]研究发现,适量的土壤硒能够提高作物硒含量,而过

量的硒会降低作物硒含量。

土壤pH与大豆、水稻和玉米硒含量及硒富集系数均无显著相关性,说明该地区土壤pH对作物硒含量影响有限。土壤有机质、全氮和阳离子交换量与作物硒含量无显著相关性,但与水稻和玉米的富集系数呈显著的负相关性,相关系数分别为-0.50、-0.48、-0.48和-0.31、-0.30、-0.30,说明这些指标主要依靠间接方式影响作物中硒的含量。尽管土壤中较高的有机质含量能够将更多的硒固定和吸附在土壤中,提高土壤中硒的含量,但这部分硒往往滞留在土壤中,而非释放出足够的量以供作物充分利用,从而表现出较高含量的土壤有机质对作物吸收利用硒产生了抑制作用^[1]。此外,有机质含量高的土壤中往往微生物数量多、多样性高,存在微生物分解土壤硒,使其转化为难以被作物吸收的形态,降低作物对硒的吸收能力。与绥化地区调查数据^[5]对比发现,两个区域土壤pH、全硒含量接近,而本研究区的土壤有机质平均值(52.79 g/kg)高于绥化地区(41.36 g/kg),这说明有机质可能抑制了水稻与玉米对土壤中硒的吸收过程。

表4 作物硒含量和富集系数与土壤理化性质间相关系数
Table 4 Correlation coefficients between soil properties with crop Se content and crop BCF

	大豆		水稻		玉米	
	硒含量	硒富集系数	硒含量	硒富集系数	硒含量	硒富集系数
土壤全硒	0.38	0.22	0.02	-0.19	0.56**	0.02
pH	0.15	0.02	0.22	0.23	-0.05	-0.13
有机质	0.04	-0.11	-0.11	-0.50*	-0.05	-0.31*
全氮	0.21	-0.36	-0.018	-0.48*	-0.12	-0.30*
全磷	0.07	-0.02	0.07	-0.34	-0.22	-0.26
全钾	-0.14	-0.23	-0.07	0.12	-0.24	-0.10
阳离子交换量	-0.21	-0.36	-0.02	-0.48*	-0.12	-0.30*

3 结论

1) 研究区土壤全硒均值为0.303 mg/kg,全部土壤样品硒含量处于足硒和富硒范围;有效硒含量均值为0.018 mg/kg,土壤硒活化率均值为5.87%,对植物供给硒的效率偏低。

2) 研究区作物硒含量偏低,水稻的平均硒含量最高(0.028 mg/kg),仅有4.69%的水稻籽粒样品硒含量达到富硒水平(≥ 0.04 mg/kg);大豆、玉米硒含量均值分别为0.014 mg/kg和0.007 mg/kg;海伦市适合的富硒作物为水稻。

3) 土壤硒含量的主要影响因素为土壤有机质、全氮、阳离子交换量和粉粒含量。当土壤硒含量充足时,

土壤有机质含量对作物吸收硒影响较大,高有机质含量抑制了水稻和玉米对土壤硒的吸收。

4) 研究区应优先考虑在西北和中部的永和乡、爱民乡、向荣乡和长发乡发展富硒产业,并通过选择作物类型、改良土壤提升土壤硒的有效性最终提升作物硒含量。为保障富硒产品标准化生产,应考虑在作物生长过程中添加外源性硒,进一步提升作物硒含量。

参考文献:

- [1] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. Environment International, 2018, 112: 294–309.

- [2] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356–1364.
- [3] 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.
- [4] 国家卫生和计划生育委员会. 中国居民膳食营养素参考摄入量 第 3 部分: 微量元素: WS/T 578.3—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 张立, 杨晨梦, 孙广义, 等. 黑龙江绥化大宗农作物硒含量特征及影响因素分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(5): 510–519.
- [6] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158–161.
- [7] 尹昭汉, 崔剑波, 马晓丽, 等. 东北地区生态环境中的 Se 及其生态效应[J]. 应用生态学报, 1995, 6(3): 308–312.
- [8] 张立. 黑龙江省“两大平原”示范区综合改革试验区寒地富硒土地环境调查评价报告[R]. 黑龙江省地质调查研究总院, 2017-07-14.
- [9] 赵军, 张久明, 孟凯, 等. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用——以海伦市为例[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 53–57.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] Keskinen R, Ekholm P, Yli-Halla M, et al. Efficiency of different methods in extracting selenium from agricultural soils of Finland[J]. Geoderma, 2009, 153(1/2): 87–93.
- [12] 史艳美, 宗良纲, 张艳萍, 等. 茶树根际与非根际土壤硒特性及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1903–1909.
- [13] Barman U, Choudhury R D. Soil texture classification using multi class support vector machine[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(2): 318–332.
- [14] 王学求, 周建, 徐善法, 等. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1469–1480.
- [15] 宁静, 王婷, 刘佳会, 等. 东北典型黑土区土壤养分的空间分布特征及影响因素——以黑龙江省宾县为例[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(3): 301–310.
- [16] 张少良, 马泉来, 周军, 等. 东北黑土区小流域“林-旱-水”格局土壤磷空间分布特征研究[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1227–1236.
- [17] 焦晓光, 陈渊, 张兴义, 等. 黑龙江典型县域农田黑土全量养分性状分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 132–136.
- [18] 武红亮, 王士超, 槐圣昌, 等. 近 30 年来典型黑土肥力和生产力演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1456–1464.
- [19] 崔裕敬, 宋春威. 松嫩平原典型黑土区土壤养分空间分布特征[J]. 现代农业科技, 2023(14): 174–177.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 谭见安. 环境生命元素与克山病: 生态化学地理研究 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1996.
- [23] Dinh Q T, Li Z, Tran T A T, et al. Role of organic acids on the bioavailability of selenium in soil: A review[J]. Chemosphere, 2017, 184: 618–635.
- [24] 孙梓耀, 王菲, 崔玉军. 黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素的有效性与生态效应[J]. 黑龙江农业科学, 2016(9): 43–49.
- [25] 潘丽萍, 江泽普, 廖青, 等. 南方红壤区典型母质发育土壤硒素特征及影响因素[J]. 土壤, 2024, 56(3): 495–502.
- [26] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1588–1593.
- [27] 王志强, 杨建锋, 石天池. 宁夏石嘴山地区富硒土壤及其利用前景[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 228–237.
- [28] 丁庭康, 周卫军, 岳晴晴, 等. 宜章县耕地土壤硒含量空间分布特征及成因[J]. 土壤, 2023, 55(3): 626–633.
- [29] 刘瑞, 周卫军, 彭素华, 等. 湖南省石门县耕地土壤硒含量特征及影响因素解析[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 840–847.
- [30] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837–849.
- [31] 黄锦法, 洪春来, 陈轶平, 等. 浙北嘉兴平原土壤和作物硒元素研究初报[J]. 浙江农业科学, 2010, 51(6): 1356–1358.
- [32] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 富硒稻谷: GB/T 22499—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [33] 中华全国供销合作总社. 富硒农产品: GH/T 1135—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [34] 梁帅, 朱建新, 戴慧敏, 等. 黑龙江拜泉地区硒元素在土壤-植物系统中的迁移富集规律[J]. 地质与资源, 2021, 30(4): 456–464, 478.
- [35] Galeas M L, Zhang L H, Freeman J L, et al. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulators[J]. New Phytologist, 2007, 173(3): 517–525.
- [36] 杨涛, 龙澜, 商龙臣, 等. 土壤硒干预与 5 种作物集硒特性研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(1): 143–146, 150.