

doi: 10.11720/wtyht.2022.0051

李秋燕, 张一鹤, 魏明辉, 等. 海伦市土壤主要微量元素空间分布特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1114-1120. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0051>

Li Q Y, Zhang Y H, Wei M H, et al. Spatial distribution of the soil trace elements in Hailun City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1114-1120. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0051>

海伦市土壤主要微量元素空间分布特征

李秋燕^{1,2,3}, 张一鹤^{1,2,3}, 魏明辉^{1,2,3}, 贺鹏飞^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 以海伦市研究区 1 175 件表层(0~20 cm)土壤样品主要微量元素(B、Cu、Mn、Mo、Zn)的实测含量为研究对象, 采用地统计学与 GIS 相结合的方法, 对土壤微量元素的含量及空间分布特征进行分析。结果表明: 研究区表层土壤中 B 和 Mo 含量较缺乏; Mn 和 Mo 的块金效应大于 75%, 空间自相关性弱, B、Cu 和 Zn 块金效应在 25%~75% 之间, 属于中等空间相关, 空间变异主要受到自然因素影响; B 和 Cu 的空间分布相似, 由中心向四周逐渐减少, Mn 和 Mo 含量呈明显带状分布, Zn 含量北部高于南部。微量元素之间既存在着共生关系, 也可能存在拮抗关系。土壤有机质含量、成土母质、土壤类型和土地利用对微量元素均有不同程度的影响。

关键词: 微量元素; 地统计学; ArcGIS; 空间分布; 海伦市

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)05-1114-07

0 引言

土壤中的硼、铜、锰、钼、锌(B、Cu、Mn、Mo、Zn)等元素是植物生长所必需的微量元素。微量元素作为辅酶或者活化剂参与多种酶的合成, 调节植物体内的氧化还原作用, 其含量影响植物体的生长^[1]。土壤中缺乏微量元素会导致农作物产量和品质下降, 进而通过食物链威胁人体健康^[2]。近年来, 国内外众多学者运用地统计学与 GIS 相结合的方法, 对不同地区土壤中微量元素的空间变异规律进行研究, 发现影响土壤中微量元素含量及分布的因素主要有自然因素(成土母质、土壤理化性质、土壤类型、气候等条件)和人为因素(耕作方式、施肥、种植制度等)^[3-6]。

海伦是中国黑土硒都, 是国家重要的商品粮基地。目前对于海伦土壤质量状况的研究基本上是以

土壤养分以及土壤硒元素为主, 有关微量元素的空间变异及空间分布规律的研究相对较少。本文以海伦地区表层土壤(0~20 cm)为研究对象, 采用 GIS 与地统计学相结合的方法, 以了解当地土壤微量元素丰缺情况, 分析土壤中微量元素的空间分布情况, 为当地农业产业区划, 提高农作物产量和品质提供数字依据。

1 研究区概况

海伦市位于黑龙江省中部、绥化市北部, 地处松嫩平原东北端, 小兴安岭西麓, 地形为丘陵、漫岗, 平均海拔 239 m。该区属中温带大陆性气候, 无霜期近 120 d, 有效积温 2 200~2 400 °C, 年降水量 500~600 mm。土壤类型主要为黑土、草甸土、暗棕壤, 还有少量的白浆土和水稻土, 总面积为 4 679 km²。

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-07-21

基金项目: 中国地质调查局项目“东北黑土地 1: 25 万土地质量地球化学调查”(121201007000161312)、“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520)

第一作者: 李秋燕(1993-), 女, 工程师, 2018 年毕业于东北大学, 主要从事土地质量地球化学调查工作。Email: 2284435292@qq.com

通讯作者: 张一鹤(1992-), 女, 工程师, 2018 年毕业于东北农业大学, 主要从事土地质量地球化学调查工作。Email: 343847617@qq.com

2 材料与方 法

2.1 样品采集与测试

采样区域为海伦市全域。样品采集和分析测试工作均严格按照《多目标地球化学调查规范(1:250 000)》^[7] 执行。按照 2 km × 2 km 规则格网采样法进行土壤样品采集,采样密度为 1 个点/km²,采样深度 0~20 cm,每个土壤样品均由 3 个子样点组成,每 4 km² 组合成一个样品分析,共获取表层土壤分析样品 1 175 件。土壤样品的分析测试由黑龙江省地质矿产实验测试研究中心完成,分析方法配套方案及检出限见表 1。以国家一级土壤标准物质(GBW)系列进行准确度、精密度监控,随机抽查异常点监控分析质量,土壤样品准确度、精密度均为 100%,重复样合格率 100%,数据可靠。

表 1 各项指标的分析方法与检出限

Table 1 The analysis method and detection limit of target elements

元素	分析方法	检出限
B	发射光谱法(ES)	0.3×10^{-6}
Cu	X 荧光光谱法(XRF)	1×10^{-6}
Mo	等离子质谱法(ICP-MS)	0.12×10^{-6}
Mn	X 荧光光谱法(XRF)	2.1×10^{-6}
Zn	X 荧光光谱法(XRF)	4×10^{-6}

2.2 数据处理

文中采用 SPSS25.0 统计软件进行描述性统计和正态分布检验,对不服从正态分布的数据,则需要

表 2 土壤微量元素含量统计分析

Table 2 Description statistics of trace elements in surface soil

元素	含量范围/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	标准差/ 10^{-6}	变异系数/%	松嫩平原背景值 ^[10] / 10^{-6}	全国背景值 ^[11] / 10^{-6}
B	9.5~78.8	30.79	6.46	20.99	33.72	47.8
Cu	16.3~35.8	22.75	1.67	7.33	22.55	22.6
Mn	366~2216	732	167	22.84	774	583
Mo	0.32~1.69	0.58	0.20	34.33	0.95	2
Zn	40.9~106	67.02	6.95	10.37	67.87	74.2

3.2 土壤微量元素含量趋势分析

正态分布检验是选择适宜插值模型的主要依据,正态分布的数据经地统计学插值时得到的效果更好,所以需要 对偏分态的数据进行变换使其变成正态分布。采用 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验方法 $[P(k-s) \geq 0.05]$ 来检验数据是否服从正态分布,按照算术平均值加(减)3 倍算术标准偏差($X \pm 3S$)的方法进行迭代剔除离群值后,研究区土壤中 5 种微量元素符合正态分布。

全局趋势分析可以反应土壤微量元素在研究区

对其剔除异常值,以达到较好的地统计学插值效果。采用 GS+10.0 软件进行半方差函数的计算、理论模型的拟合。利用 ArcGIS10.4 软件中的 Geostatistical Analyst 模块进行趋势分析和克里金插值。

3 结果与讨论

3.1 土壤微量元素含量统计特征

海伦市土壤微量元素含量统计结果如表 2 所示。由表 2 可知,研究区土壤 B、Cu、Mn、Mo、Zn 平均含量分别为 30.79×10^{-6} 、 22.75×10^{-6} 、 732×10^{-6} 、 0.58×10^{-6} 和 67.02×10^{-6} 。与松嫩平原背景值相比,B、Mn、Mo 含量低于松嫩平原背景值,Cu、Zn 与松嫩平原背景值相当。与全国土壤背景值相比,研究区土壤 B 和 Mo 严重低于全国土壤背景值,Zn 低于全国背景值,Mn 含量接近全国土壤背景值的 1.5 倍,相对富集,Cu 含量与全国土壤背景值相比差别不大。

变异系数(C_v)是表征元素在空间分布上变异程度的指标,在一定程度上可以反应出元素受到人为干扰的程度^[8]。一般认为, $C_v < 10\%$ 为弱变异, $10\% \sim 100\%$ 为中等强度变异, $C_v \geq 100\%$ 为强变异^[9]。从表 2 可以看出,B、Mn、Mo、Zn 变异系数大于 10%,均属于中等强度变异,说明这 4 种微量元素在一定程度上受到了人为因素的影响,如施肥、灌溉、喷洒农药等;Cu 变异系数低于 10%,属于弱变异,说明海伦市 Cu 分布受人为影响不大。

域上的总体变化趋势,忽略局部变异情况,从宏观上揭示研究区总体土壤微量元素变化规律^[1]。利用 ArcGIS 中的 Geostatistical Analyst 模块对研究区 5 种微量元素进行趋势效应分析,结果如图 1 所示。其中 X 轴表示正东方向,Y 轴表示正北方向,Z 轴表示各样点数值的大小,横向投影面上的曲线表示 EW 向的全局性趋势效应变化,纵向投影面上的曲线表示 SN 向的全局性趋势效应变化。

从图中可以看出,研究区 B、Cu 在 EW 方向和 SN 方向上均具有二阶趋势效应,并且都呈先增加后

减少的“n”型趋势;Mn、Mo 在 EW 和 SN 方向上都具有二阶效应,但是与 B、Cu 不同的是,Mn、Mo 由西向东呈现出一直增加的趋势,由南到北呈先减少后

增加的“u”型趋势;Zn 在 EW 和 SN 方向上均为“u”型二阶趋势效应。

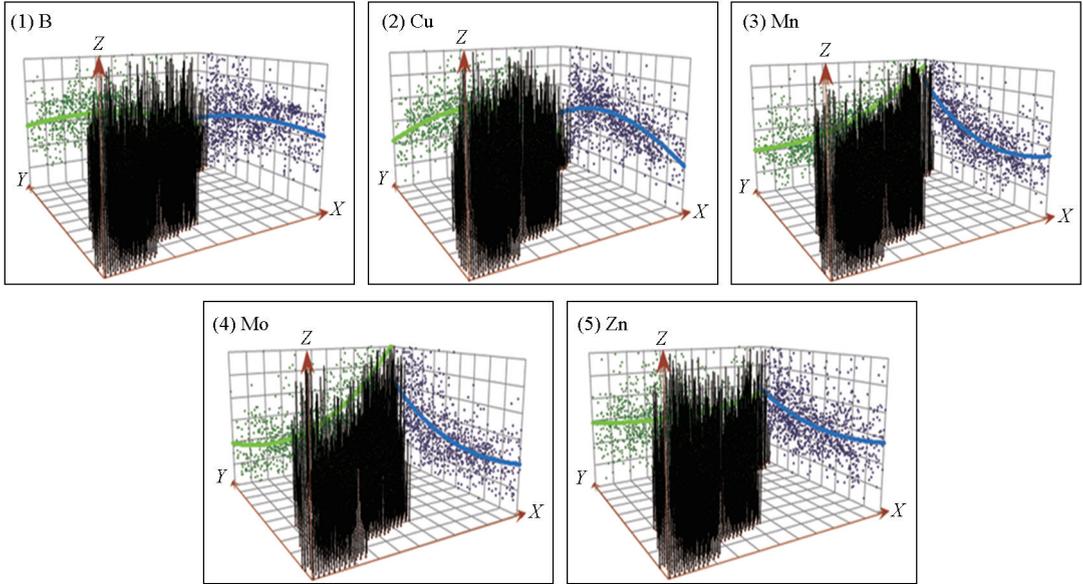


图 1 土壤微量元素趋势分析

Fig. 1 Trend analysis of soil trace elements

3.3 土壤微量元素含量的空间变异结构特征

土壤微量元素的变异函数反映了不同距离的观测值之间的变化^[12]。变异函数的计算需要数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[13]。因此,对海伦地区土壤中 5 种微量元素经迭代剔除异常值后的数据进行半方差分析。

块金值(C_0)反映的是最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差,属于随机变异;基台值(C_0+C)表示变量的最大变异程度;块金值与基台值的比值 $[C_0/(C_0+C)]$ 表示空间相关度,又称为块金效应,表明系统变量的空间相关性的程度,反映了空间变异影响因素中自然因素和人为因素的影响程度^[14]。当 $[C_0/(C_0+C)] < 25\%$ 时,说明系统具有强烈的空间相关性,受自然因素影响较多,人为因素影响较少; $25\% \leq [C_0/(C_0+C)] \leq 75\%$,表明系统具有中等的空间相关性;若 $[C_0/(C_0+C)] > 75\%$ 说明系统空间相关性很弱,变量受人为因素影响较大^[15]。

变程(a)指半变异函数的取值由初始的块金值达到基台值时,采样点的距离,表示元素的空间自相关范围。变程越大,说明土壤中该元素的均一性越强;变程越小,则意味着土壤中该元素的均一性越弱^[12]。

根据表 3 可以看出,B 和 Zn 符合指数模型,Cu 符合球状模型,Mn、Mo 符合高斯模型。从块金效应来看,5 种微量元素块金效应都大于 25%,最小值为 52.5%,说明研究区 5 种微量元素空间分布受人为因素和自然因素双重影响。Mn、Mo 的块金效应大于 75%,空间相关性较弱,说明这两种元素受人为因素影响较多,其余 3 种元素块金效应在 25%~75%之间,属于中等空间相关。研究区土壤微量元素含量的变程存在较大差异,B 的变程较大,为 633 km,表明在较大范围内存在空间自相关性,空间分布的均一性较强,Zn 变程较小,表明在较小范围内存在自相关性,农作物对微量元素的吸收偏好也可能会影响土壤微量元素含量的变程大小^[4]。

表 3 海伦市土壤微量元素半方差理论模型与参数

Table 3 Theoretical model and parameter of semi-variance function for soil trace elements in Hailun City

元素	拟合模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	$[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程 a/km	拟合度 R^2
B	指数模型	0.01550154	0.02162	71.7	633	0.689
Cu	球状模型	1.8513	3.025	61.2	181	0.975
Mn	高斯模型	0.0114639	0.01442	79.5	126	0.990
Mo	高斯模型	0.01972296	0.02484	79.4	121	0.992
Zn	指数模型	17.073	32.52	52.5	21.6	0.827

3.4 土壤微量元素空间分布特征

在趋势分析和半方差分析的基础上,选用普通克里金插值法绘制各元素的空间分布图(图 2)。由图 2 可以看出,研究区内各微量元素含量都表现出较为明显的空间分布格局,与趋势分析结果显著一

致。B、Cu 呈现出由中部向四周逐渐递减的趋势; Mn、Mo 含量呈现明显的带状特征,含量最高值出现在研究区的东北部,由东北部向西南部逐渐递减,变程较大;Zn 在东西方向上高值区和低值区分布无明显特征,北部含量高于南部。

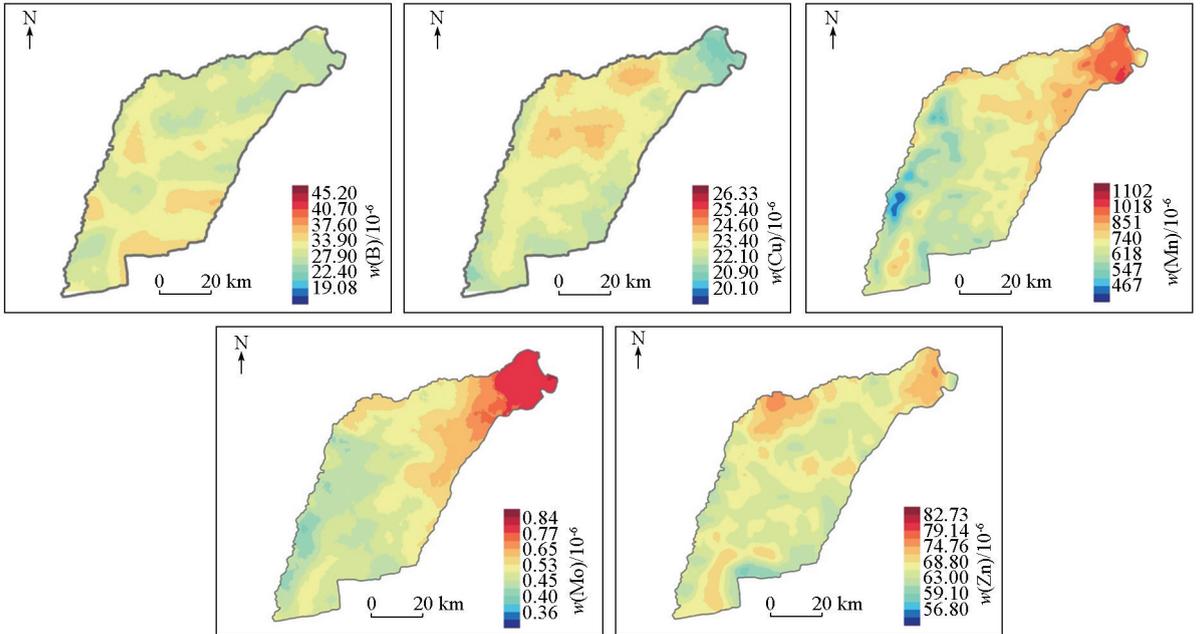


图 2 表层土壤微量元素含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of trace elements in surface soils

依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)对各微量元素含量进行等级划分^[16],研究区土壤养分单指标分等统计结果见表 4。土壤中 B 明显缺乏,较缺乏(四等)和缺乏(五等)等级占到了研究区面积的 98.03%;Mo 相对缺乏,丰富(一

等)和较丰富(二等)等级仅占到了研究区面积的 22.76%;Cu、Zn 以中等(三等)为主,分别占研究区面积的 71.98%、56.79%;Mn 主要以丰富(一等)和较丰富(二等)为主,较丰富(二等)以上占研究区土地总面积的 80.87%。

表 4 土壤养分单指标评价结果统计

Table 4 Statistics of single index evaluation results of soil nutrients

成分	丰富(一等)		较丰富(二等)		中等(三等)		较缺乏(四等)		缺乏(五等)	
	面积/km ²	百分比/%								
B	4	0.09	16	0.34	72	1.54	2499	53.41	2088	44.62
Cu	18.13	0.39	773.3	16.53	3368.18	71.98	519.1	11.09	0.29	0.01
Mn	2450	52.35	1334	28.52	768	16.4	123	2.64	4	0.09
Mo	462	9.87	603	12.89	707	15.11	1836	39.23	1071	22.9
Zn	107	2.3	885	18.91	2658	56.79	1025	21.91	4	0.09

3.5 土壤微量营养元素空间分布的影响因素

3.5.1 有机质的影响

土壤中有机质的含量影响着土壤对微量元素的吸附能力,有机质的含量主要受到地形地貌、气候、土壤质地、成土母质、土壤类型、土地利用方式等因素的影响^[17]。土壤有机质通过对微量元素产生吸附、络合或沉淀作用,影响它们在土壤环境中的迁移转化^[18]。土壤有机质与土壤微量元素含量的相关性分析见表 5。土壤有机质与 B、Mn、Mo、Zn 呈显著

相关关系,其中与 B 为显著负相关关系,与 Mn、Mo、Zn 为显著正相关关系,与 Mo、Mn 的相关性最大,与 Cu 相关性不明显。有机质对于土壤中 B 的吸附和解吸机理至今仍未搞清,有研究表明土壤有机质与 B 呈正相关关系^[18],也有学者认为土壤有机质的大量存在是导致 B 缺乏的一个原因^[19]。本研究中土壤有机质与 B 呈显著负相关关系,有可能是因为吸附在有机质上的 B 的解吸有滞后现象,造成了它们之间的负相关关系^[20]。

微量元素间的相关分析表明,除了 B 和 Zn 不存在相关关系外,其余元素均存在明显的正相关或负相关关系,并且 Mn、Mo、Zn 之间存在着显著正相关关系,表明这 3 种元素存在着共生关系。Cu 与

Zn 存在正相关的原因可能是这两个元素均为亲硫元素,具有相似的地球化学性质^[21]。相关性分析可以说明,由于不同元素的地球化学性质不同,微量元素之间具有共生关系,也有拮抗关系。

表 5 土壤微量元素和有机质相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil trace elements and organic matter

指标	B	Cu	Mn	Mo	Zn	Corg
B	1	0.091**	-0.146**	-0.130**	-0.012	-0.147**
Cu		1	-0.131**	-0.207**	0.239**	0.054
Mn			1	0.740**	0.352**	0.539**
Mo				1	0.331**	0.634**
Zn					1	0.251**
Corg						1

注:“**”表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

3.5.2 成土母质的影响

成土母质是影响土壤微量元素含量的重要因素,成分不同的成土母质下,土壤中元素含量差异较明显^[22]。由表 6 可以看出,B 的平均含量表现为冲湖积>坡洪积>冲积>冰积;Cu 的平均含量表现为坡洪积>冲湖积>冲积>冰积;Mn 和 Mo 的平均含量表现为冰积>冲积>冲湖积>坡洪积;Zn 的平均含量表现为冰积>冲湖积>坡洪积>冲积。不同母质发育的土壤,微量元素含量分布不同。Mn、Mo、Zn 含量在研究区东北部明显较高,可能原因是研究区北部成土母质为冰积,在冰川沉积作用下,岩石碎屑沉积这些元素较多。

3.5.3 土壤类型的影响

研究区土壤类型为暗棕壤、草甸土和黑土。由表 6 可以看出,Mn、Mo、Zn 的平均含量表现为暗棕壤含量最高,草甸土和黑土中含量相近;Cu 的平均含量在 3 种土壤类型中分布较均匀;B 的平均含量表现为黑土>草甸土>暗棕壤。土壤类型对有机质

含量影响较大,研究区暗棕壤中土壤有机质的含量为 45.1×10^{-6} ,高于草甸土和黑土中有机质含量,由于土壤中的有机质易与金属元素形成螯合物,从而截留于土壤表层中^[23],因此使得 Mn、Mo、Zn 在暗棕壤中含量最高。由于 B 和有机质为显著负相关关系,所以 B 在暗棕壤中含量最低。

3.5.4 土地利用类型的影响

土地利用是自然因素和人类活动影响的综合过程,不同的轮作制度、管理模式、施肥方式等都可能会导致土壤微量元素分布的差异^[24]。由表 6 可以看出,B 平均含量表现为草地>旱地>沼泽>林地>水田,Cu 为水田>旱地>草地>沼泽>林地,Mn 为林地>沼泽>草地>水田>旱地,Mo 为林地>沼泽>草地>旱地>水田,Zn 为林地>沼泽>水田>草地>旱地。Mn 和 Mo 含量在不同土地利用类型下具有较为明显的差异,说明人类活动对这两个微量元素含量影响较大。

表 6 不同成土母质、土壤类型和土地利用类型的土壤微量元素平均含量

Table 6 Average contents of trace elements in soils of different soil parent materials, soil types and land use patterns

分类		$w(B)/10^{-6}$	$w(Cu)/10^{-6}$	$w(Mn)/10^{-6}$	$w(Mo)/10^{-6}$	$w(Zn)/10^{-6}$
成土母质	冰积	28.78	21.73	987	0.96	71.19
	冲湖积	31.40	22.93	703	0.54	66.73
	冲积	29.59	22.68	725	0.55	65.27
	坡洪积	30.42	23.16	664	0.49	66.69
土壤类型	暗棕壤	28.04	21.76	965	0.90	70.43
	草甸土	30.62	22.83	728	0.57	66.83
	黑土	31.41	22.85	690	0.53	66.46
土地利用类型	草地	31.31	22.62	772	0.57	66.43
	林地	28.62	21.44	987	0.96	71.73
	旱地	31.25	22.88	688	0.53	66.22
	沼泽	29.12	22.50	837	0.69	68.80
	水田	28.06	23.53	708	0.52	66.44

4 结论

1) 研究区土壤中微量元素 B 和 Mo 含量分别为 30.79×10^{-6} 、 0.58×10^{-6} , 远小于松辽平原背景值和全国土壤背景值。B、Mn、Mo、Zn 属于中等强度变异, Cu 属于弱变异。

2) 通过半变异函数模型分析可知, Mn 和 Mo 的块金效应大于 75%, 属于中等空间自相关, 空间变异受到自然因素和人为因素的双重影响, 其余 3 种元素空间自相关较强, 空间变异主要受到自然因素的影响。

3) 研究区土壤 5 种微量元素空间分布各异, B 和 Cu 含量由中部向四周逐渐递减, Mo 和 Mn 含量呈现明显的带状特征, 由东北部向西南部逐渐递减, Zn 含量北部高于南部。5 种微量元素之间既具有共生作用也具有拮抗作用。同时, 土壤有机质含量、成土母质、土壤类型和土地利用类型对土壤微量元素的含量均有不同程度的影响。

参考文献 (References):

[1] 郑新如, 潘爱芳, 马润勇, 等. 石泉县中部地区土壤微量营养元素空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 183-189.
Zheng X R, Pan A F, Ma R Y, et al. Spatial distribution characteristics of soils micronutrient in central region of Shiquan County [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2): 183-189.

[2] 潘方杰, 王宏志, 王璐瑶, 等. 湖北省土壤微量元素县域分异特征及其与健康相关性[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2019, 53(1): 137-146.
Pan F J, Wang H Z, Wang L Y, et al. Differential characteristics of soil trace elements and their correlation with health in Hubei Province [J]. Journal of Central China Normal University: Nat. Sci., 2019, 53(1): 137-146.

[3] 严明书, 黄剑, 何忠庠, 等. 地质背景对土壤微量元素的影响——以渝北地区为例[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 199-205, 219.
Yan M S, Huang J, He Z X, et al. The influence of geological background on trace elements of soil: A case study of Yubei area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 199-205, 219.

[4] 武婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1596-1605.
Wu J, Li Y H, Li Z B, et al. Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1596-1605.

[5] 曾妍妍, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆民丰县中部地区土壤微量营养元素空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 76-81.
Zeng Y Y, Zhou J L, Wang S T, et al. The spatial distribution characteristics of soils micronutrients in central region of Minfeng County, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(7): 76-81.

[6] Foroughifar H, Jafarzadeh A A, Torabi H, et al. Using geostatistics and geographic information system techniques to characterize spatial variability of soil Properties, including micronutrients [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(8): 1273-1281.

[7] 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(1:250000) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Ministry of Land and Resources, PRC. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250000) [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

[8] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 768-774.
Xie X J, Kang J C, Li W J, et al. Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai [J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 768-774.

[9] 李秋燕, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地质与资源, 2021, 30(4): 465-472.
Li Q Y, Wei M H, Dai H M, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in Jinzhou City [J]. Geology and Resources, 2021, 30(4): 465-472.

[10] 戴慧敏, 刘国栋. 东北黑土地 1:25 万土地质量地球化学调查 [R]. 沈阳: 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 2019.
Dai H M, Liu G D. Northeast black soil 1:250,000 land quality geochemical survey [R]. Shenyang: Shenyang Geosurvey Center CGS, 2019.

[11] 迟清华, 鄯明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 82-83.
Chi Q H, Yan M C. Handbook of applied geochemical element abundance data [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 82-83.

[12] 李瑞平, 姜咏栋, 李光德, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究——以山东省泰安市为例 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2): 232-238.
Li R P, Jiang Y D, Li G D, et al. The spatial distribution of heavy metals in the cropland based on GIS [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2012, 43(2): 232-238.

[13] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究 [J]. 安全与环境学报, 2007(2): 109-113.
Liu Q, Wang J, Shi Y X, et al. On the spatial distribution of heavy metal in the cropland on GIS [J]. Journal of Safety and Environment, 2007(2): 109-113.

[14] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501-1511.

- [15] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, 128: 289-300.
- [16] 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, PRC. DZ/T 0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [17] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(3): 20-24, 28.
Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Spatial heterogeneity and pattern of black soil organic carbon of sloping field[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(3): 20-24, 28.
- [18] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(10): 208-215.
Mu G Z, Luo J, Cai L M, et al. Relationship between soil trace elements with organic matter and pH in Jiexi country, Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(10): 208-215.
- [19] 刘铮, 朱其清, 唐丽华. 我国缺硼土壤的类型和分布[J]. *土壤学报*, 1980(3): 228-239, 300.
Liu Z, Zhu Q Q, Tang L H. Types and distribution of boron-deficient soils in my country[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1980(3): 228-239, 300.
- [20] Yermiyahu U, Keren R, Chen Y. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1436-1441.
- [21] 李广文, 张福平, 冯起, 等. 西咸地区土壤重金属特征及土壤性质关系分析. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1259-1263.
Li G W, Zhang F P, Feng Q, et al. Soil heavy metal characteristics and relationship analysis of soil properties on the Xi'an and Xianyang region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1259-1263.
- [22] 刘道荣, 焦森. 天然富硒土壤成因分类研究及开发适宜性评价[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1157-1163.
Liu D R, Jiao S. Assessment of genetic classification and development suitability of natural selenium-rich soil[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1157-1163.
- [23] 赵翠翠, 南忠仁, 刘晓文, 等. 绿洲农田土壤主要微量元素的影响因素及分布特征研究——以张掖甘州区和临泽县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 127-132.
Zhao C C, Nan Z R, Liu X W, et al. Spatial distribution and affecting factors of main trace elements in oasis cropland: A case of Ganzhou District and Linze of Zhangye[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 127-132.
- [24] 王雪梅, 柴仲平, 杨雪峰. 荒漠绿洲区不同土地利用方式下土壤养分差异分析[J]. *干旱地区农业研究*. 2017, 35(1): 91-96.
Wang X M, Chai Z P, Yang X F. Analysis on soil nutrients difference under different land use patterns in desert oasis region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*. 2017, 35(1): 91-96.

Spatial distribution of the soil trace elements in Hailun City

LI Qiu-Yan^{1,2,3}, ZHANG Yi-He^{1,2,3}, WEI Ming-Hui^{1,2,3}, HE Peng-Fei^{1,2,3}

(1. *Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China*; 2. *Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China*; 3. *Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Liaoning Province, Shenyang 110034, China*)

Abstract: Based on the measured contents of the main trace elements (B, Cu, Mn, Mo, and Zn) in 1175 surface soil samples (sampling depth: 0~20 cm), this study analyzed the contents and spatial distribution characteristics of the trace elements in the soil in Hailun City using both geostatistics and geographic information system (GIS). The results are as follows. The surface soil in the city is deficient in B and Mo. Elements Mn and Mo in the surface soil have nugget-to-sill ratios greater than 75%, with weak spatial autocorrelation. Elements B, Cu, and Zn in surface soil have nugget-to-sill ratios of 25%~75%, with moderate spatial correlation, and their spatial variations are mainly affected by natural factors. Elements B and Cu in the surface soil have similar spatial distribution, with the contents gradually decreasing from the center to the surroundings of the city. The Mn and Mo contents in the surface soil show an obvious zonal distribution, and the Zn content is higher in the north than in the south. There are both symbiotic and antagonistic relationships among trace elements. The soil organic matter content, soil parent materials, soil type, and land uses have different effects on the trace elements in the surface soil in the city.

Key words: trace elements; geostatistics; ArcGIS; spatial distribution; Hailun City

(本文编辑:蒋实)