

松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属 背景值及污染程度分析

张 慧,马鑫鹏,苏 航,隋虹均,史晓磊,李昕阳,杨 欢,郑志志

(东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030)

摘 要:以松嫩平原黑龙江省南部作为研究区,以多目标区域地球化学调查成果作为数据基础,采用置信区间法、累积频率法、迭代剔除法、普通克里金插值法、地累积指数法等方法研究土壤重金属背景值及污染程度。研究表明:松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的背景值分别为 9.33、0.016、0.079、50.82、18.74、24.16、22.70、57.34($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。普通克里金插值的结果表明:深层土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 在研究区的分布相对一致,呈现出东北高西南低的空间分布格局,重金属 Hg、Pb 在研究区分布相对较为均匀。以确定的松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值作为评价标准,采用地累积指数法对表层土壤重金属污染程度进行分析,结果表明重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 处于无污染程度的样本数量分别占总样本数量的 97.72%、59.92%、83.45%、97.63%、99.24%、98.86%、99.02%、99.26%,从总体上看,研究区土壤是相对清洁的,但在小范围区域内略微存在中等程度的 Hg、Cd 污染。

关键词:重金属;背景值;土壤污染;松嫩平原

中图分类号:X53 **文献标志码:**A

Soil heavy metal background values and pollution degree in southern Songnen Plain of Heilongjiang Province

ZHANG Hui, MA Xin-peng, SU Hang, SUI Hong-jun, SHI Xiao-lei,

LI Xin-yang, YANG Huan, ZHENG Zhi-zhi

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Songnen Plain is one of the important commodity grain production regions in China. It is of great practical significance for the agricultural production, food security, and soil protection in the Songnen Plain to determine the heavy metal background level in soil and better understand the soil pollution. In this paper, we took the southern part of Songnen Plain in Heilongjiang Province as the research area with the data of regional multi-objective geochemical survey, employed confidence interval method, cumulative frequency method, iterative elimination method, and ordinary Kriging interpolation method to determine the heavy metal (As, Hg, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) background levels in soil and its spatial distribution in the region. We also used cumulative index method to determine the pollution degree of heavy metals. The results showed that, the background levels of As, Hg, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn, in the southern part of Songnen Plain in Heilongjiang Province were 9.330, 0.016, 0.079, 50.817, 18.741, 24.159, 22.702, and 57.339 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The results from ordinary Kriging interpolation indicated that the distributions of As, Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn in the deep soil were relatively consistent, a spatial distribution pattern of high in southwestern and low in southwestern parts, and a relatively uniform distribution of Hg and Pb in the study area. The heavy metal background levels in soil in the southern Songnen Plain of Heilongjiang were used as the evaluation standard, and the degree of heavy metal pollution in the surface soil was analyzed by the cumulative index method. It is showed that number of samples with less than standard levels (defined as uncontaminated) of As, Hg, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were 97.72%, 59.92%, 83.45%,

97.63%, 99.24%, 98.86%, 99.02%, and 99.26% of the total samples, respectively, soil in the study area was generally not polluted and only a small portion of the soils was at a moderate degree of Hg and Cd pollution.

Keywords: heavy metals; background levels; soil pollution; Songnen Plain

土壤背景值通常是指在未受或者很少受到人类活动影响的条件下土壤本身的物质组成及含量,是反映土壤属性的重要参考依据^[1]。土壤重金属作为土壤环境的组成部分,其含量状况能够直接影响农作物的产量和质量,并且能够通过食物链进入人体,影响人体健康^[2]。因此合理确定土壤背景值并以此评估土壤中重金属的含量状况具有重要的现实意义^[3]。

当前对土壤重金属含量状况或污染评价研究采用的评价标准包括国家土壤环境质量一级标准^[4]、省市土壤背景值^[5]、区域土壤背景值^[6]、深层土壤重金属含量均值^[7]等等,大部分研究选取土壤背景值作为评价标准。不同的学者从各自的角度对土壤背景值进行了研究,主要集中在土壤重金属背景值空间分布状况,不同城市、地质条件、地貌类型等条件下的背景值含量状况,土壤重金属背景值的确定方法等方面^[8-12],但是对于土壤重金属背景值进行系统、全面的研究还相对较少,并且对背景值确定方法的研究通常是以一种重金属作为研究对象,研究结果的可靠性以及对不同重金属的适用性有待进一步考究。

本文以松嫩平原位于黑龙江省南部的区域作为研究区,以多目标区域地球化学调查成果作为数据基础,采用置信区间法、累积频率法、迭代剔除法^[13]对生物毒性明显的 5 种重金属(As、Hg、Cd、Cr、Pb)以及具有一定毒性的 3 种重金属(Cu、Ni、Zn)的背景值进行研究,确定 8 种重金属的背景值。在此基础上采用地统计学、普通克里金插值法^[14]对土壤重金属的空间分布进行探究,并根据确定的重金属背景值,采用地累积指数法对研究区土壤重金属累积、污染程度进行评价,以期土壤重金属背景值研究提供参考,为松嫩平原土壤重金属累积特征、污染评价等提供理论指导,同时也为松嫩平原农业生产、粮食安全、土壤保护等提供实践基础。

1 研究区概况

研究区主要是松嫩平原位于黑龙江省南部的区域,地理坐标为 122°20'E~128°00'E,44°40'N~48°00'N,包括齐齐哈尔市南部、大庆市、绥化市南部、哈尔滨市西部等 28 个市(县),覆盖区域面积约为 8.15 万 km²,占黑龙江省总面积的 17.23%(见图

1)。地貌景观以平原为主,地势平坦开阔,嫩江、松花江、拉林河、呼兰河等水系及其支流穿过。地貌类型主要包括褶断剥蚀低山、侵蚀-冰水台地、冲积湖积低平原、剥蚀冲积湖积平原、冲积平原、冲积-洪积平原、风蚀风积沙地等。研究区地处中温带,夏季温热多雨,冬季寒冷漫长。土壤以黑土、黑钙土、草甸土为主,土壤肥力较高,主要以农业为主,是我国重要的商品粮生产基地。

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

研究数据以多目标区域地球化学调查成果为基础,样本采集按照多目标区域地球化学调查技术规范要求进行。采用双层网格化采样方法,使用 GPS 并结合地形图定点采集表层和深层土壤样品,并记录采样点的经纬度、海拔高度等信息,在研究区表层(0~20 cm)按照 2 km×2 km 的格网采集四个土样混合成一个土壤样本,共采集 20923 个土壤样本;在研究区深层(180~200 cm)按照 4 km×4 km 的格网采集四个土样混合成一个土壤样本,共采集 5295 个土壤样本。

采集的土壤样本进行自然风干,剔除植物根系、砂砾、动物残体等杂质,经研磨后过 20 目尼龙筛,然后对土样进行消解,重金属 As 采用硝酸-盐酸-高氯酸消解,重金属 Hg 采用硝酸-硫酸-五氧化二钒消解,重金属 Cr 采用硫酸-硝酸-氢氟酸消解,重金属 Pb 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,重

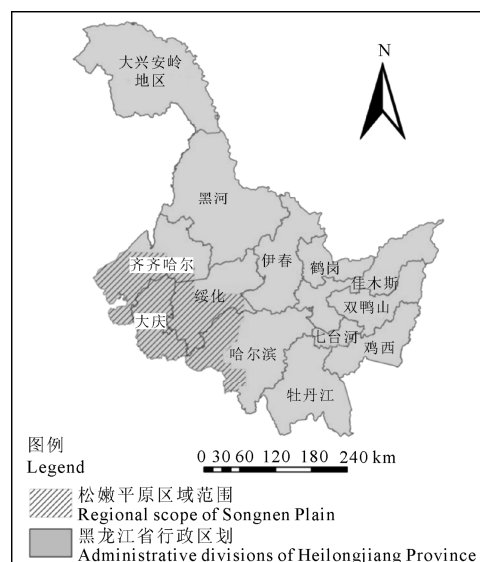


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Map of study area

金属 Cd、Cu、Ni、Zn 采用盐酸-硝酸-高氯酸消解。重金属土样进行消解后,在实验室测定元素含量。

Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 元素含量采用原子吸收光谱法测定;Cd 元素含量采用石墨炉原子吸收光谱法测定;Hg 元素含量采用冷原子吸收光谱法测定;As 元素含量采用硼氢化钾-硝酸银分光光度法测定,同时采用插入国家标准物质和加标回收两种方式来保证测试的准确度。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤重金属背景值确定方法

(1)置信区间法。置信区间法在土壤背景值确定的应用中通常是按照数据正态分布类型的不同,采用符合数据特征的计算方法确定区域土壤元素背景值的上限。此方法对元素含量数据的要求较高,数据需要服从正态分布或者对数正态分布,一般情况下采用 95% 置信上限来代表区域土壤元素背景值。

(2)累积频率法。累积频率法是在相对累积频率和元素含量分布图中,曲线拐点所对应的元素含量通常是该元素背景含量和异常值的分界点,高于拐点的样点代表了异常值,低于拐点对应含量的样本才能反映出区域土壤重金属背景值状况,元素含量低于拐点的样本含量均值可代表该元素的土壤背景值,同时该方法对数据也有要求,低于拐点的样本含量数据应该属于正态分布或者近似正态分布。

(3)迭代剔除法。迭代剔除法基于数据均值和标准差将异常值剔除,对剩余的数据进行计算以求取土壤重金属背景值^[15]。

2.2.2 土壤重金属空间分布研究方法 采用普通克里金插值法。普通克里金插值法从变量自身特点出发,考虑观测点的整体空间分布情况,考虑样本点的空间相互位置关系与待估计点的空间位置关系,对待估点进行一种无偏最优估计,并且能给出估计精度^[16]。在 ArcGIS 10.2 软件的支撑下,运用普通克里金插值法对样点进行空间插值,进而研究重金属在空间上的分布特征。

2.2.3 土壤重金属污染评价方法 采用地累积指数法。地累积指数法通常称为 Muller 指数,由德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller 在 1969 年提出,最初广泛应用于定量研究水环境沉积物中重金属污染程度,近年来逐渐引入到土壤重金属污染评价中^[17],其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n (k \times B_n)]$$

其中: I_{geo} 为地累积指数, C_n 为样品中元素 n 含量的实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为元素 n 的化学背景值 ($\text{mg} \cdot$

kg^{-1}); k 为修正系数,一般取 1.5。

地累积指数一般分为 7 个等级(0~6 级),污染程度从无污染到极强污染,具体等级划分见表 1。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属背景值

研究区表、深层 8 种土壤重金属元素含量描述性统计分析结果见表 2 和表 3。采用置信区间法、累积频率法、迭代剔除法三种方法,应用 SPSS 19.0 软件对深层土壤(180~200 cm)重金属样本数据进行统计,结果见表 4。从表中可以看出,采用置信区间法和累积频率法计算出的土壤重金属背景值基本上相一致,而采用迭代剔除法计算出的背景值含量相对于前两种方法偏差较大,主要是由于在进行迭代剔除时去除了个别元素大量的样本数据,致使个别元素样本数据量下降,在一定程度上不能很好地反映区域背景值整体情况,而置信区间法采用 95% 的置信区间,累积频率法通过分布曲线将自然背景值分离出来,两种方法测定的背景值相一致,因此采用置信区间法和累积频率法计算求得的土壤重金属元素背景值求均值的结果作为松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值(见表 5)。

与国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)一级标准相比,8 种重金属元素背景值都远低于国家土壤环境质量一级标准,与黑龙江省土壤背景值相比,除了重金属 As、Ni 的背景值略高于黑龙江省土壤背景值外,其余重金属元素背景值均低于黑龙江省土壤背景值,与 1986 年测得的松嫩平原土壤背景值相比,除了重金属 Hg 的背景值略低于 1986 年松嫩平原背景值外,其余重金属背景值均高于 1986 年测得的松嫩平原土壤重金属背景值。

表 1 地累积指数分级标准

Table 1 Classification standards of geo-accumulation index

地累积指数(I_{geo}) Cumulative index	级别 Grade	污染程度 Pollution degree
<0	0	无污染 Uncontaminated
0~1	1	无污染到中度污染 Uncontaminated to moderately contaminated
1~2	2	中度污染 Moderately contaminated
2~3	3	中度污染到强污染 Moderately to heavily contaminated
3~4	4	强污染 Heavily contaminated
4~5	5	强污染到极强污染 Heavily to severely contaminated
>5	6	极强污染 Severely contaminated

表2 表层土壤重金属描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of heavy metals in surface soil

重金属元素 Heavy metal	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum	中值/(mg·kg ⁻¹) Median	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average value	标准差 Standard deviation
As	1.40	8.80	41.00	8.69	2.51
Hg	0.01	0.02	1.17	0.03	0.03
Cd	0.01	0.09	1.70	0.10	0.06
Cr	2.29	58.30	116.69	53.62	15.28
Cu	1.80	20.00	64.20	18.59	5.37
Ni	0.16	24.99	59.09	23.34	7.05
Pb	1.90	21.80	119.50	22.00	3.49
Zn	4.10	59.50	171.30	55.96	14.92

表3 深层土壤重金属描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals in deep soil

重金属元素 Heavy metal	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum	中值/(mg·kg ⁻¹) Median	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average value	标准差 Standard deviation
As	1.00	9.60	55.80	9.30	3.31
Hg	0.01	0.02	0.15	0.02	0.01
Cd	0.03	0.08	0.32	0.08	0.02
Cr	5.59	54.75	102.78	50.58	16.84
Cu	2.70	20.50	44.05	18.65	6.17
Ni	2.48	26.10	54.65	24.04	8.30
Pb	10.67	22.34	49.94	22.68	3.03
Zn	6.03	60.80	108.73	57.11	16.26

表4 不同方法计算的土壤重金属元素背景值

Table 4 Background levels of heavy metals in soil predicted by various calculation methods

重金属元素(180~200 cm) Heavy metal	置信区间法/(mg·kg ⁻¹) Confidence interval method	累积频率法/(mg·kg ⁻¹) Cumulative frequency method	迭代剔除法/(mg·kg ⁻¹) Iteration culling method
As	9.37	9.28	10.00
Hg	0.016	0.016	0.014
Cd	0.079	0.079	0.075
Cr	51.04	50.59	60.95
Cu	18.82	18.66	22.76
Ni	24.27	24.05	29.11
Pb	22.75	22.65	22.22
Zn	57.56	57.12	66.16

表5 土壤重金属背景值比较

Table 5 Comparison of heavy metal background levels in soil

重金属元素 Heavy metal	A/(mg·kg ⁻¹)	B/(mg·kg ⁻¹)	C/(mg·kg ⁻¹)	D/(mg·kg ⁻¹)
As	9.33	15.00	7.30	9.14
Hg	0.016	0.15	0.04	0.031
Cd	0.079	0.20	0.09	0.073
Cr	50.82	90.00	58.60	42.46
Cu	18.74	35.00	20.00	17.78
Ni	24.16	50.00	22.80	23.65
Pb	22.70	35.00	24.20	20.23
Zn	57.34	100.00	70.70	52.05

注: A,松嫩平原黑龙江省南部土壤背景值; B,国家土壤环境质量一级标准; C,黑龙江省土壤背景值; D,1986年松嫩平原土壤背景值。

Note: A, Soil background level in southern Songnen Plain of Heilongjiang Province; B, National soil environmental quality standards; C, Soil background level in Heilongjiang Province; D, Soil background level of Songnen Plain in 1986.

3.2 土壤重金属空间分布

3.2.1 变异函数拟合 地统计学是以区域化变量理论作为依据,能够反映区域化变量的许多特征^[18]。采用 GS+9.0 软件对松嫩平原黑龙江省南部深层土壤(180~200 cm)样本含量数据进行拟合,确定拟合的最优模型,拟合结果及相关参数见表 6。重金属 As、Hg、Cd、Cr、Zn 变异函数拟合的结果为指数模型,重金属 Cu、Ni 变异函数拟合的结果为球状模型,重金属 Pb 变异函数拟合的结果为高斯模型。块金值 C_0 反映了区域化变量随机性大小;基台值 (C_0+C) 反映了区域化变量变化的幅度;块金系数 $C_0/(C_0+C)$ 通常能反映区域化变量的空间自相关性;变程反映了区域化变量的影响范围;拟合系数 (r^2) 反映了模型拟合的精度^[19],拟合系数越接近 1 表示拟合的精度越高。

重金属 As、Hg、Cr、Cu、Ni、Zn 块金系数均小于 0.25,具有强烈的空间自相关性,重金属 Cd、Pb 的块金系数介于 0.25~0.75 之间,具有中等程度的空间

自相关性,表明 8 种重金属元素含量均主要受结构性因素(地质、地貌类型条件等)的影响。

3.2.2 普通克里金插值 在变异函数拟合的基础上,根据拟合确定的最优模型,应用 ArcGIS 10.2 软件对深层土壤(180~200 cm)重金属样本含量数据进行空间插值,插值的结果见图 2。从图 2 中可以看出重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 在研究区的分布相对一致,呈现出东北高西南低的空间分布格局,特别是重金属 Cr、Cu 东北部和西南部差异更为明显;重金属 Hg、Pb 在研究区分布相对较为均匀,重金属 Hg 仅仅在研究区东部小范围内含量较高,重金属 Pb 在研究区西北部小范围内含量较高。

3.3 表层土壤重金属污染程度研究

采用地累积指数法对松嫩平原黑龙江省南部表层土壤(0~20 cm)重金属污染程度进行研究,以确定的松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值作为评价标准,8 种重金属处于不同污染程度的样本数量见表 7。重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn

表 6 变异函数拟合结果及相关参数

Table 6 Variation function fitting results and related parameters

重金属元素 Heavy metal	拟合模型 Fitting the model	块金值 C_0 Block gold value	基台值 (C_0+C) Abutment value	块金系数 $C_0/(C_0+C)$ Gold coefficient	变程/km Variation	拟合系数 (r^2) Fitting coefficient
As	指数模型 Exponential	9.15	37.10	0.25	1833.00	0.90
Hg	指数模型 Exponential	0.000041	0.000171	0.24	1833.00	0.94
Cd	指数模型 Exponential	0.000293	0.000632	0.46	223.20	0.99
Cr	指数模型 Exponential	54.00	508.50	0.11	630.00	0.99
Cu	球状模型 Spherical	9.20	42.83	0.21	173.20	0.99
Ni	球状模型 Spherical	17.30	79.31	0.22	180.00	0.99
Pb	高斯模型 Gaussian	8.27	17.44	0.47	352.65	0.97
Zn	指数模型 Exponential	121.00	552.90	0.22	688.20	0.99

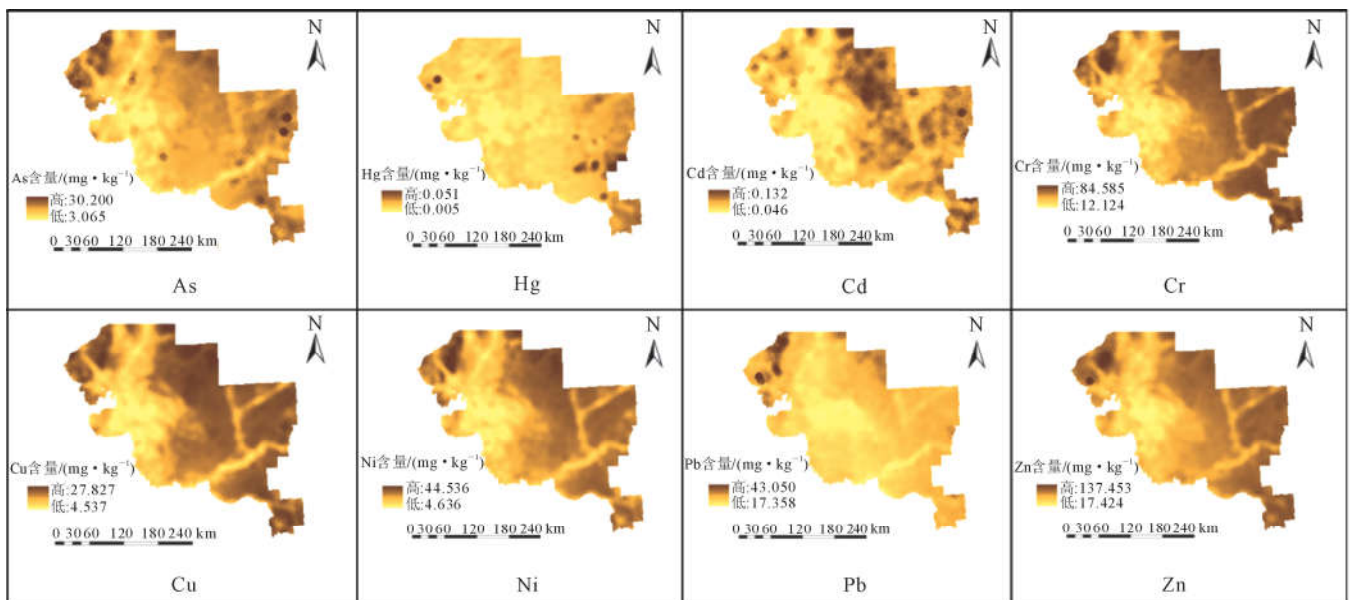


图 2 深层土壤重金属元素含量插值图

Fig.2 Interpolation of heavy metal content in deep soil

表7 重金属处于不同污染程度的样本数量

Table 7 The number of samples at different levels of heavy metal contamination

污染程度 Pollution level	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
无污染 Uncontaminated	20446	12537	17461	20427	20763	20684	20718	20769
无污染到中度污染 Uncontaminated to moderately contaminated	475	7532	3267	496	158	239	199	153
中度污染 Moderately contaminated	2	665	162	0	2	0	6	1
中度污染到强污染 Moderately to severely contaminated	0	127	22	0	0	0	0	0
强污染 Severely contaminated	0	40	9	0	0	0	0	0
强污染到极强污染 Severely to extremely contaminated	0	14	0	0	0	0	0	0
极强污染 Extremely contaminated	0	8	2	0	0	0	0	0

处于无污染程度的样本数量分别占总样本数量的97.72%、59.92%、83.45%、97.63%、99.24%、98.86%、99.02%、99.26%，只有重金属 Hg、Cd 无污染的样本量占全部样本量的比例低于 95%；重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 处于无污染到中度污染的样本数量占全部样本量的比例分别为 2.27%、36.00%、15.61%、2.37%、0.76%、1.14%、0.95%、0.73%，除重金属 Hg、Cd 污染样本占全部样本的比例较高之外，其余重金属所占比例都很低；重金属 Hg、Cd 处于中度污染的样本占全部样本量的比例分别为 3.18%、0.77%，除此之外，重金属处于中度污染到强污染、强污染、强污染到极强污染、极强污染的样本量都很少，可以忽略不计。

总体而言，松嫩平原黑龙江省南部表层土壤重金属 As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 处于无污染程度，是相对清洁的，但重金属 Hg 和 Cd 存在着一定程度的轻微污染，应当引起相关部门的注意，同时也需要加强对重金属 Hg 和 Cd 的污染控制与管理。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 采用置信区间法和累积频率法得到的松嫩平原黑龙江省南部 8 种土壤重金属元素 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的背景值分别为 9.33、0.016、0.079、50.82、18.74、24.16、22.70、57.34 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

(2) 普通克里金插值的结果表明，深层土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 在研究区的分布相对一

致，呈现出东北高西南低的空间分布格局，重金属 Hg、Pb 在研究区分布相对较为均匀。

(3) 地累积指数法评估的结果表明，松嫩平原黑龙江省南部表层土壤总体而言是相对清洁的，但重金属 Hg、Cd 出现了一定程度的轻微污染。

4.2 讨论

背景值作为土壤重金属污染评价的重要参考标准，其值的准确性决定了土壤污染状况判定的精度，尤其是对于较小范围区域内的土壤重金属污染状况进行研究时，更应该选取准确的背景值以刻画区域土壤重金属含量状况，在实际条件允许的前提下，应当采集深层土壤样本以确定区域背景值。同时应该在本研究的基础上考虑土壤重金属背景值的影响因素，探索不同地质、地貌等条件下的土壤重金属背景值，以实现从多角度、全面分析土壤重金属背景值特征，为土壤重金属背景值、污染评价等研究提供参考。

参考文献:

- [1] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 140-141.
- [2] Shomar B H, Müller G, Yahya A. Geochemical features of topsoils in the Gaza Strip: natural occurrence and anthropogenic inputs [J]. Environmental Research, 2005, 98(3): 372-382.
- [3] Díez M, Simón M, Martín F, et al. Ambient trace element background concentrations in soils and their use in risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(16): 4622.
- [4] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤重金属空间分布及其污染评价 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):

- 112-118.
- [5] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2425-2436.
- [6] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 集中区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1309-1316.
- [7] 徐福银, 胡艳燕. 重庆市不同功能区城市绿地土壤重金属分布特征与评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 227-231.
- [8] Komai Y. Heavy Metal Contamination in Urban Soils I Zinc Accumulation Phenomenon in Urban Environments as Clues of Study [J]. Bulletin of the University of Osaka Prefecture. ser. b Agriculture & Biology, 1981, 33:7-15.
- [9] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, (04): 848-852.
- [10] 谭和平, 陈能武, 黄苹, 等. 川西茶区土壤重金属元素背景值及其评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, (S1): 196-199.
- [11] 赵维钧. 云南土壤钴元素背景值及其特征研究[J]. 云南环境科学, 2005, (S1): 116-118.
- [12] 范凯, 韦朝阳, 杨晓松. 长沙市乔口镇土壤重金属地球化学基线值的厘定及应用[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3076-3083.
- [13] 王登峰, 魏志远, 漆智平. 海南岛农田土壤重金属背景值评价方法研究——以铬为例[J]. 热带作物学报, 2013, 34(01): 146-150.
- [14] 张慧, 郑志志, 马鑫鹏, 等. 哈尔滨市土壤表层重金属污染特征及来源辨析[J]. 环境科学研究, 2017, 30(10): 99-108.
- [15] Loska K, Wiechula D, Korus I, et al. Application of Various Methods for Assessment of Background Arsenic Concentration in Farming Soil [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2005, 74(4): 732-9.
- [16] 张慧, 郑志志, 杨欢, 等. 基于多元统计和地统计的肇源县表层土壤重金属来源辨析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 819-827.
- [17] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(01): 81-91.
- [18] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 105-106.
- [19] 胡孙, 袁旭音, 陈红燕, 等. 城郊农业土壤重金属不同尺度空间分布及源分析——以宁镇交界带为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2295-2303.

(上接第 229 页)

- [12] Williams A, Börjesson G, Hedlund K. The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67:41-46.
- [13] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因子分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1375-1384.
- [14] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 325-334.
- [15] 钱乐祥, 许叔明, 秦奋, 等. GIS 支持的土壤贫瘠化区域分异研究——以福建为例[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 85-90.
- [16] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价[J]. 土壤, 1995, (3): 119-128.
- [17] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(05): 1145-1150.
- [18] 卢树昌, 新楠, 王小波. 天津市农田土壤肥力质量现状及演变分析[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(7): 1546-1548.
- [19] 董杰, 罗丽丽, 杨达源, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤退化特征: 土壤养分贫瘠化[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 58-64.
- [20] 张彬, 杨联安, 冯武焕, 等. 基于改进 TOPSIS 和 COK 的土壤养分综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 180-185.
- [21] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983—2009 年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 132-140+296.
- [22] 毛朝明, 蒋灵华, 吴恒祝, 等. 松阳县毛竹林土壤养分贫瘠化评价[J]. 浙江林业科技, 2016, 36(1): 59-63.
- [23] 赖阳丹. 基于三种有机物料施用的宅基地复垦土壤氮素组分动态变化研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.