

基于地理信息系统对畜牧场重金属污染的空间分布规律研究

綦 峥*, 高 茜, 李金龙, 张 蕊

(哈尔滨商业大学药物工程技术研究中心, 哈尔滨 150076)

摘 要: **目的** 利用地理信息系统(geographic information system, GIS)可视化分析畜牧场中重金属污染的空间分布规律。**方法** 利用优化 GIS 布点, 结合 GPS 精准采集黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县整体畜牧场园区内部 10 cm, 50 cm 深度的土壤、地表水及园区粪便样品。对主要重金属元素 As、Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 依据国标和行标方法进行检测, 通过 GIS 反距离加权插值法和污染指数法对场地超标重金属进行污染空间格局分析和污染评价。**结果** 不同土层的单因子污染指数中 As 元素均为重度污染级别, 其他 7 种元素属于安全等级, 综合污染指数属于重污染等级。畜牧场内外地表水中 Ni 元素以及牛饮用水中 Sb 元素单因子污染指数属于警戒线等级, 其他元素属于安全等级, 其水样的综合污染指数均为轻度污染等级。粪便样品的所有重金属元素的单因子污染指数和综合污染指数均属于安全等级。重金属污染呈现垂向由上至下逐渐增大的空间分布特征, 水平分布结构相似。**结论** 应用 GIS 可更加准确更加直观的获得重金属在不同介质, 不同深度下的空间分布规律和污染情况。

关键词: 重金属; 地理信息系统; 畜牧场; 分布规律

Spatial distribution pattern of heavy metal pollution in livestock farm based on geographic information system

QI Zheng*, GAO Xi, LI Jin-Long, ZHANG Rui

(Harbin University of Commerce, Engineering Research Center for Medicine, Harbin 150076, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the spatial distribution pattern of heavy metal pollution in livestock farm by geographic information system (GIS) visualization. **Methods** The optimized GIS distribution points and GPS were used to accurately collect soil, surface water and feces samples at depths of 10 cm and 50 cm inside the whole livestock farm park in duerbert Mongol autonomous county, daqing city, Heilongjiang province. The main heavy metal elements including As, Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni and Zn were detected according to the national standard and row standard methods. The spatial pattern analysis and pollution assessment of heavy metals in the site were carried out by GIS inverse distance weighted interpolation method and pollution index method. **Results** Heavy metal element As in different soil layers was all in serious pollution levels, and the other seven elements belonged to safety level.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702368)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2019D007)、哈尔滨商业大学校级科研项目(18XN066)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41702368), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2019D007), and Project of Harbin Commercial University (18XN066)

***通讯作者:** 綦峥, 博士, 副研究员, 主要研究方向为环境科学与工程。E-mail: 18645039597@163.com

***Corresponding author:** QI Zheng, Ph.D, Associate Professor, Harbin University of Commerce, Engineering Research Center for Medicine, Harbin 150076, China. E-mail: 18645039597@163.com

The comprehensive pollution index of the whole farm was in a serious pollution level. The single factor pollution index of Ni element in surface water inside and outside the livestock farm and Sb element in cattle drinking water belonged to the warning level. Other elements belonged to the safety level, and the comprehensive pollution index of the water sample was mild pollution level. The single factor pollution index and comprehensive pollution index of all heavy metal elements in manure were safety. The pollution of heavy metal pollution showed a spatial distribution characterized by a vertical increase from top to bottom, and the horizontal distribution structure was similar.

Conclusion The application of GIS can obtain the spatial distribution law and pollution of heavy metals in different media and different depths more accurately and intuitively.

KEY WORDS: heavy metal; geographic information system; livestock farm; distribution law

1 引言

近年来,随着工农业的迅猛发展,重金属元素通过大气、水体、固废等多种途径进入到土壤环境中,给土壤环境造成了巨大的压力^[1,2]。同时也通过食物链等途径进入人体,为人体带来危害。土壤不仅是污染物的地球化学储层,而且是大气、水圈和生物质中化学物质和元素运输的天然缓冲剂,因此,土壤是污染物最终的汇集^[3,4]。为掌握土壤重金属污染的现状,合理安排开发活动,诸多国内外学者已在重金属污染空间分布方面开展了诸多研究。许继飞等^[5]通过对我国的规模化奶牛养殖污染物的探讨,提出应对畜牧场内重金属污染物引起重视。利用地理信息系统(geographic information system, GIS)模型空间分析和可视化功能构建污染物的主要评价指标^[6],用以模拟在污染物扩散(沉降)的范围和速度等相关参数^[7],更能可视化模拟污染范围和趋势。如 Sidibe 等^[8]以盆地作为研究区,通过 GIS 模型分析了土壤侵蚀情况;刘梦云等^[9]基于 GIS 对商洛烟区土壤环境进行质量评价;Zhang 等^[10]对京津冀城市碳代谢过程及其空间分布进行研究。Benhaddya 等^[11]利用 GIS 技术研究了阿尔及利亚表层土壤重金属污染空间分布特征;多数研究只针对表层土壤重金属的空间分布^[12],对重金属空间变异特征及不同深度土壤重金属的空间分布研究较少。

杜尔伯特蒙古族自治县(以下简称杜蒙),是黑龙江省重要的奶源畜牧业基地县,拥有最大的影响着全球气候变化的湿地面积^[13]。杜蒙畜牧业畜产品加工业的收入占县财政收入的三分之一以上;2016年杜蒙奶牛存栏26万头,畜牧业产值42.7亿元人民币^[14],是某知名牛奶品牌的奶源,同时黑龙江省地处世界著名的三大黑土带之一的东北黑土区核心区,其独有的冻融气候条件又与其他地区有所不同,因此开展奶源牧区的重金属污染情况调查具有重要意义。

本研究以杜蒙某畜牧场为例,运用GIS进行优化布点,结合全球定位系统(global positioning system, GPS)较全面地对畜牧场内不同深度的土壤、厂区内外的地表水、牛饮用水、粪便进行采样,并测定了As、Hg、Cd、Pb、Cr、

Cu、Ni和Zn等重金属元素含量。采用GIS模型定量可视化研究了不同深度下土壤、水和粪便样品的重金属空间变异性,全面分析了重金属水平和垂直方向的空间分布规律及畜牧场整体环境污染水平,为黑土地土壤重金属污染治理和杜蒙畜牧场地可持续发展提供基础参考。

2 材料与方法

2.1 试剂与仪器

过氧化氢(优级纯)、硝酸(电子纯)(天津市大茂化学试剂厂);盐酸、硼氢化钾(优级纯,国药集团化学试剂有限公司);高氯酸(高纯试剂)、氢氟酸(优级纯)、氢氧化钾(分析纯)、硫脲(分析纯)、L(+)-抗坏血酸(优级纯)、重铬酸钾(优级纯)(天津市科密欧化学试剂有限公司);硫酸(分析纯,西陇科学股份有限公司)。

AFS-9230 原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司);ZEEnit 700p 原子吸收分光光度计、contraAA 700 原子吸收分光光度计(德国耶拿分析仪器股份公司);iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司);Optima 8000 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国珀金埃尔默股份有限公司)。

2.2 畜牧场地概况调查

该采样畜牧场位于杜蒙,黑龙江省西部,嫩江下游东岸。杜蒙被欧盟及国内绿色食品认证组织誉为“绿色净土、天然宝石”。境内拥有大草原、大湿地等自然景观,地形平坦。整个地层的上部为黑色腐殖土、黄土和松砂层,下部为灰褐、黑色粘土。底部为灰白、黄灰色砂层和砂砾层,沉积厚度118m左右^[15]。该畜牧场历史土壤类型为盐土和碱土,畜牧场面积为67平方千米,拥有奶牛200头,在当地属于中型畜牧场。

2.3 基于GIS对土壤、粪便和水样进行采样

2.3.1 土壤样品

采样前运用GIS进行设计具体采样点,将每个采样点的经纬度输入GPS。现场采样时,抵达预计采样点附近,GPS发出提示音,根据GPS提示进行采样。但现场采样的地点

与预设采样点因地貌存在些许偏差,所以图 1 中实心圆点为实际的取样地点,其中红色为土壤采样点,黄色为粪便采样点,绿色为水样采样点。土壤采样点 10 个,分别在同一采样点采集土壤表面以下不同深度 10 cm 和 50 cm 的土壤样品各 500 g,同时用 GPS 记录采样位置。土壤采样工具为取土钻,在每个采样点 1 平方米内取 3 个平行样品。

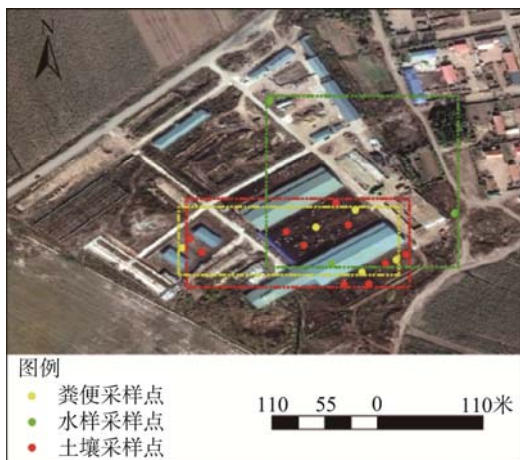


图 1 现场采样点分布图

Fig.1 Field sampling point distribution map

2.3.2 粪便样品

粪便样品采样标准依据 NY/T 1334-2007 畜禽粪便安全使用准则^[16]中的采样要求,在牧场内的每个放牧区随机选取具有代表性的牲畜粪便样品 1 份,每份 500 g,共 5 个样品,现场每份样品加入 50 mL 硫酸进行固定。并装入牛皮纸密封袋中,冰袋冷藏,同时用 GPS 记录采样位置。

2.3.3 水样品

水样品包括厂区内的地表水,厂区堆粪池外的地表水和牛饮用的水,每个样品 0.5 L,共 3 个样品,并采集平行样品。现场测量 pH 值并记录,随后每份样品加入 5 mL 硝酸($\text{pH} \leq 2$)进行固定,放入冰袋避光冷藏,并用 GPS 记录采样位置。

2.4 样品中重金属检测方法

对土壤及粪便样品中的 As、Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 八种重金属元素进行检测。土壤样品中砷(As)、汞(Hg)依据 GB/T 22105.2-2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》^[17]和 GB/T 22105.1-2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》^[18]进行样品预处理和检测;镉(Cd)、铅(Pb)依据 GB/T 17141-1997《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》^[19];铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)依据 HJ 491-2009《土壤 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》^[20]、GB/T 17138-1997《土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法》^[21]和 GB/T 17139-1997

《土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法》^[22]进行样品预处理和检测。分析过程中采用平行样复检,同时对土壤标准物质 GBW 07427 样品进行质控测试,实际检测结果在质控范围内,说明本次实验其他样品的检测结果合格。粪便样品则采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定样品中重金属 Cd、Pb、Cr、Zn、Ni、Cu、Hg、As 的含量。

水样的检测依据 HJ 700-2014《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》^[23]测定 Zn、Cu、As、Se、Cd、Sb、Pb、Ni、Cr 共 9 种元素。

2.5 重金属污染的 GIS 模型分析

采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法评价重金属的污染状况^[24],同时采取 GIS 的反距离加权插值对超标重金属进行空间分析。采用黑龙江土壤背景值^[25]和 GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》^[26]分析土壤中重金属的超标情况并对其进行评价;采用 GB 4284-1984《农用污泥中污染物控制标准》^[27]对畜牧场畜禽粪便进行重金属超标分析;采用 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》^[28]中的 III 类标准和 V 类标准,评价水样品中水质的超标状况(现场水样 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$)。

3 结果与分析

3.1 不同深度土壤重金属的浓度分析

对 10、50 cm 深度土壤样品分别进行 As、Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 含量的描述性统计分析,结果如表 1 所示。As、Cr 和 Zn 的平均值均超过黑龙江省土壤背景值,As 元素各深度的含量均超过背景值且超标值较高,10 cm 和 50 cm 深度土壤分别超过黑龙江省土壤背景值的 21.1 倍和 16 倍。Cr 元素在 10 cm 土层并未超标,但 50 cm 土层超过黑龙江省土壤背景值的 1.07 倍。Zn 元素在 50 cm 土层并未超标,但 10 cm 土层超过黑龙江省土壤背景值的 1.26 倍。

标准差(standard deviation, SD)反映的是土壤重金属的绝对变异,而空间分布的相对离散程度由变异系数(coefficient of variation, CV)来表示^[29](即标准差与平均值之比),本研究不同深度土壤的所有元素变异系数均在 10%~100%,属于中等变异。

3.2 粪便中重金属浓度分析

畜牧场中的牛粪中重金属监测结果如表 2 所示,依据农用污泥中污染物控制标准,所有粪便样品均达标。As 和 Ni 元素为强变异,其余的元素为中等变异。

3.3 水样中重金属浓度分析

如表 3 所示, S1 是厂区内的地表水, S2 是厂区堆粪池外的地表水, S3 是牛饮用的水。根据地表水环境质量标准中对应的 III 类标准和 V 类标准, S1 和 S2 中 Ni 的含量超标率分别为 49% 和 81%, S3 中 Sb 的超标率为 99%。

表 1 土壤重金属含量的描述性统计结果
Table 1 Descriptive statistical results of soil heavy metal content

| 元素 | 深度 /cm | 最小值 / (mg kg^{-1}) | 最大值 / (mg kg^{-1}) | 均值 / (mg kg^{-1}) | 标准差 / (mg kg^{-1}) | 变异系数 /% | 背景值 / (mg kg^{-1}) | 土壤环境质量标准 / (mg kg^{-1}) |
|----|--------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|----------------------------------|
| As | 10 | 5.59 | 259.76 | 161.25 | 92.44 | 57.33 | 7.30 | 40 |
| | 50 | 6.02 | 313.22 | 193.45 | 114.03 | 58.95 | 11.40 | |
| Hg | 10 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 42.85 | 0.04 | 1.8 |
| | 50 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 30.54 | 0.04 | |
| Cd | 10 | 0.05 | 0.14 | 0.09 | 0.03 | 27.68 | 0.09 | 0.3 |
| | 50 | 0.00 | 0.11 | 0.07 | 0.04 | 50.26 | 0.08 | |
| Pb | 10 | 3.08 | 13.47 | 7.59 | 3.70 | 48.79 | 24.20 | 90 |
| | 50 | 6.87 | 23.62 | 10.51 | 5.00 | 47.53 | 24.40 | |
| Cr | 10 | 16.15 | 78.71 | 45.11 | 19.20 | 42.57 | 58.60 | 150 |
| | 50 | 30.57 | 210.10 | 63.52 | 52.54 | 82.72 | 59.50 | |
| Cu | 10 | 11.71 | 34.84 | 19.13 | 7.28 | 38.07 | 20.00 | 50 |
| | 50 | 9.96 | 16.20 | 12.83 | 1.75 | 13.64 | 21.00 | |
| Ni | 10 | 7.06 | 20.83 | 15.29 | 4.51 | 29.48 | 22.80 | 70 |
| | 50 | 8.26 | 50.53 | 24.19 | 11.68 | 48.30 | 24.30 | |
| Zn | 10 | 49.14 | 174.60 | 88.73 | 41.04 | 46.25 | 70.70 | 200 |
| | 50 | 48.19 | 72.43 | 54.24 | 7.66 | 14.11 | 69.90 | |

表 2 畜禽粪便重金属含量的描述性统计结果
Table 2 Descriptive statistical results of heavy metal content in livestock manure

| 元素 | 最小值/ (mg kg^{-1}) | 最大值/ (mg kg^{-1}) | 平均值/ (mg kg^{-1}) | 标准差 | 变异系数/% | 控制标准/ (mg kg^{-1}) |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------|--------|-----------------------------|
| As | 0.085 | 26.430 | 8.986 | 12.46 | 139.11 | 75 |
| Hg | 0.001 | 0.015 | 0.008 | 0.01 | 71.23 | 5 |
| Cd | 0.025 | 0.096 | 0.063 | 0.03 | 42.07 | 5 |
| Pb | 0.036 | 2.766 | 1.430 | 1.01 | 70.58 | 300 |
| Cr | 0.189 | 3.225 | 1.444 | 1.20 | 83.38 | 600 |
| Cu | 10.430 | 28.470 | 16.930 | 6.97 | 41.14 | 250 |
| Ni | 0.063 | 4.157 | 1.219 | 1.69 | 138.39 | 100 |
| Zn | 51.210 | 141.700 | 86.198 | 33.60 | 38.98 | 500 |

表 3 水样的重金属含量及标准限值($\mu\text{g/L}$)
Table 3 Heavy metal content and standard limits of water samples ($\mu\text{g/L}$)

| 元素 | Zn | As | Se | Cd | Sb | Pb | Ni | Cr | Cu |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| S1 | 14.560 | 20.750 | 0.785 | 0.027 | 未检出 | 4.411 | 29.818 | 2.566 | 未检出 |
| S2 | 16.702 | 34.778 | 1.150 | 0.085 | 未检出 | 7.910 | 36.232 | 3.682 | 未检出 |
| S3 | 未检出 | 1.572 | 0.106 | 0.008 | 9.955 | 0.019 | 4.682 | 1.089 | 未检出 |
| 地表水iii类标准限值 | 1000 | 50 | 10 | 5 | 5 | 50 | 20 | 50 | 1000 |
| 地表水v类标准限值 | 2000 | 100 | 20 | 10 | 5 | 100 | 20 | 100 | 2000 |

3.4 牧场内重金属污染评价

评价结果如表 4 所示, 10 cm 和 50 cm 土壤中单因子污染指数除了重金属 As 大于 1, 其他 7 种重金属均小于 1, 根据单因子污染指数的评价标准, 10 cm 和 50 cm 深度土层的重金属 As 均属于重度污染等级。根据内梅罗综合污染指数的评价指标, 综合污染指数法的计算是单因子污染指数最大值的平方加所有重金属单因子污染指数平均值的平方相加后除以 2 开方^[24], 而 As 的单因子污染指数远大于其他重金属, 所以 50 cm 深度土层属于重度污染等级。牛粪中 8 种重金属的单因子污染指数值和内梅罗综合污染指数值均小于 1, 属于安全等级, 清洁水平, 未出现污染状况, 与表 2 的统计特征结果一致。厂区内外的地表水中 Ni 元素以及牛饮用水中 Sb 元素单因子污染指数大于 1, 属于警戒线等级, 尚清洁水平。其他元素属于安全等级, 其水样的

综合污染指数均为轻度污染等级。

3.5 不同深度土壤重金属含量的空间分布特征

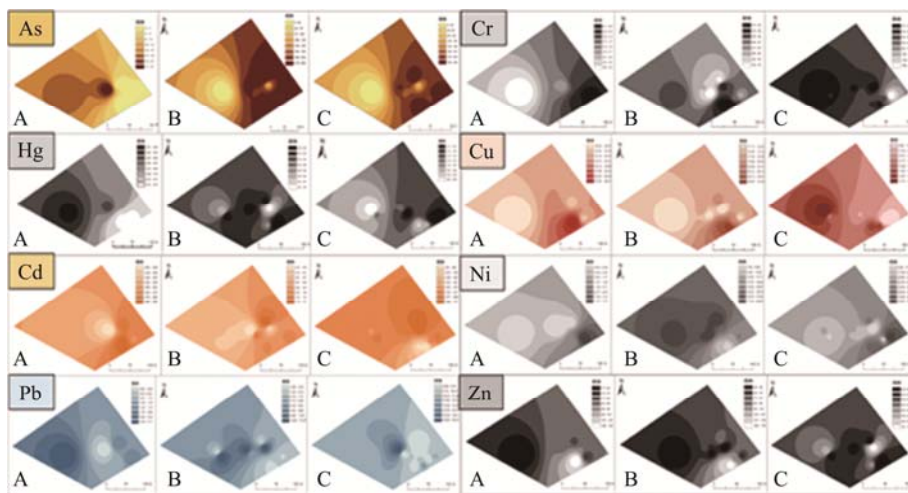
牧场内 As、Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 元素的反距离加权插值空间分布如图 2 所示。从污染物空间分布特征可知: 研究场地土壤均存在 As 污染, 垂向污染呈现由上至下逐渐增大的空间分布特征。10 cm 和 50 cm 土层 As 的空间分布的污染范围分布差异显著, 并有相似的结构。畜牧场内的 Zn 和 Cr 污染, 分别分布在 10 cm 和 50 cm 的土层中, 水平分布结构相似。污染物的水平污染均为由北至南, 由西至东逐渐增加。

图 3 和图 4 指出, 10 cm 深度和 50 cm 深度的土壤在东南部污染范围最大, 其中 As 元素的污染主要集中在整个东部地区, Zn 元素和 Cr 元素的污染范围较小, 集中在东南部地区。

表 4 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数评价

Table 4 Single factor pollution index method and Nemeru comprehensive pollution index evaluation

| 类别 | 单因子污染指数 P_i | | | | | | | | | | 综合污染指数 P_z |
|-----------|---------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| | As | Hg | Cd | Pb | Cr | Cu | Ni | Zn | Sb | Se | |
| 10 cm 深土壤 | 4.03 | 0.01 | 0.3 | 0.08 | 0.3 | 0.38 | 0.22 | 0.44 | - | - | 2.895 |
| 50 cm 深土壤 | 4.84 | 0.01 | 0.23 | 0.12 | 0.42 | 0.26 | 0.35 | 0.27 | - | - | 4.908 |
| 粪便 | 0.12 | 0.002 | 0.013 | 0.005 | 0.002 | 0.068 | 0.012 | 0.172 | - | - | 0.096 |
| S1 | 0.415 | - | 0.005 | 0.088 | 0.051 | 0 | 1.491 | 0.015 | 0 | 0.079 | 1.068 |
| S2 | 0.348 | - | 0.009 | 0.079 | 0.037 | 0 | 1.812 | 0.008 | 0 | 0.058 | 1.295 |
| S3 | 0.031 | - | 0.004 | 0.0004 | 0.022 | 0 | 0.234 | 0 | 1.991 | 0.011 | 1.419 |



注: A: 畜禽粪便重金属含量; B: 10 cm 深土壤重金属含量; C: 50 cm 深土壤重金属含量。

图 2 重金属污染的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal pollution

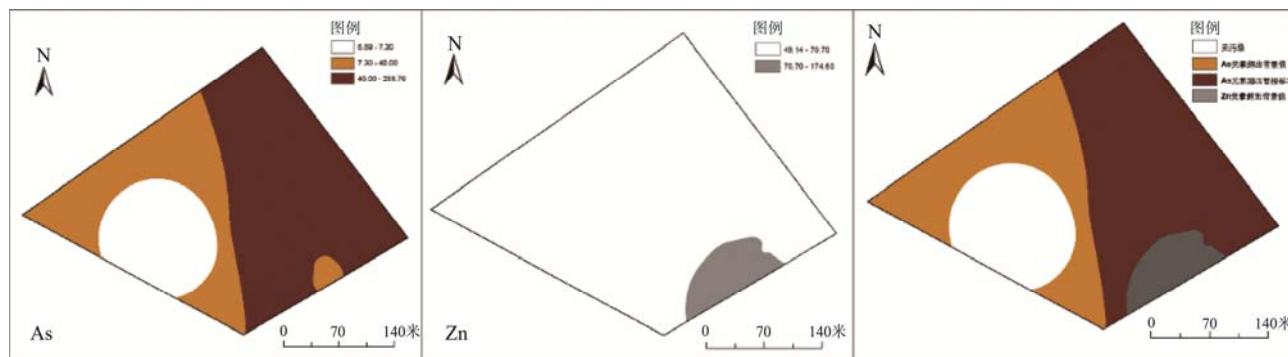


图 3 10 cm 深土层超标重金属元素的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil over-standard heavy metal elements at 10 cm depth

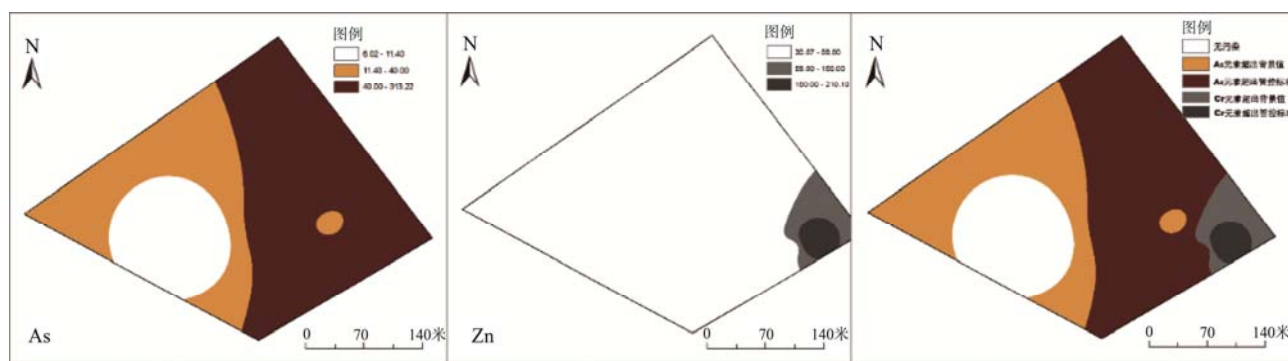


图 4 50 cm 深土层超标重金属元素的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of over-standard heavy metal elements in soil at 50 cm depth

4 讨 论

土壤重金属污染流动性差, 因此在空间上分布复杂, 在时间上具有显著的积累效应, 同时由于成土母质以及人类活动的影响, 局部特征差异明显^[30]。因此, 有必要探讨土壤重金属时空变异特征以及人类活动对其的影响, 为重金属污染防治提供借鉴。杜蒙是畜牧业为第一产业的行政区, 整个自治区贯穿着大大小小的畜牧场。本研究显示不同深度土层的 As 浓度均值不仅超过黑龙江省土壤元素背景值和土壤污染风险筛选值, 甚至超过了土壤污染风险管控值(管控值为 100 mg kg⁻¹), 畜牧场周围土壤中的 As 污染最为严重综合污染指数为重度污染等级, 很可能会危及畜牧业生产生物链及人体健康。

畜牧场各介质中共 5 种重金属含量最大值超标, 分别是 As、Cr、Zn、Sb、Ni。土壤中的 As 为重度污染, 水中 Ni 和 Sb 属于警戒线等级, 其他各介质重金属属于安全等级。其中土壤中的重金属 As、Cr 和 Zn 的平均值均超过黑龙江省土壤背景值, 表明该畜牧场内的土壤受到这 3 种重金属污染较为严重。3 种重金属元素污染程度为 As > Zn > Cr, 污染程度以 0~10 cm 土壤较高, 表明表层土壤更易受畜牧养殖过程导致土壤重金属的积累。其中 As、Pb、Cr 和 Ni 元素在 50 cm 土层的含量均大于 10 cm 土层, 出现

递增的分布规律, 说明这四种重金属元素是早期盐碱地遗留问题。Cd、Cu 和 Zn 元素含量随深度的增加呈现逐渐降低的变化趋势, 说明这 3 种元素易受养殖过程积累重金属污染, 与梁玉峰等的研究结果相似^[31]。Hg 元素含量随深度变化趋势不明显且含量较少, 远低于环境质量标准, 说明 Hg 元素在畜牧养殖过程中对环境污染较小。不同深度土壤的所有元素的变异属于中等变异, 表示这 8 种元素在一定程度上受到畜牧养殖等人类活动的影响。畜禽粪便重金属含量远低于土壤重金属含量, 并未超标, 表示土壤中的超标重金属的来源并不是畜禽粪便。畜牧场内的地表水有 Ni 元素污染, 牛饮用的水中 Sb 元素超标, 而 Sb 的毒性是相对的, 取决于其形态^[32]。因此畜牧场的水环境也有相对的重金属污染风险。

本研究中 GIS 贯穿采样, 数据分析及制图输出的整个研究过程, 采用反距离加权插值法进行空间分析。ArcGIS 与 SPSS 等软件相比, 其空间数据支持性强, 分析能力广, 定位精确等优势成为全球应用最广的地理信息系统软件。污染物 As 元素在整个牧场中的分布具有结构性, 但在特定样点位置又表现为具有一般随机变量的特征, 这种结构性和随机性主要表现为污染物 As 含量的水平和垂直分异。垂向污染呈现由上至下逐渐增大的空间分布特征。同时, 10 cm 和 50 cm 土层 As 的空间分布, 其污染范围分布差异

显著, 并有相似的结构性, 表明 As 元素在土壤污染的意义上来讲, 在垂向上有污染范围自相关的结构性特征, 这与 As 的自身特性分解、迁移、扩散有关^[33,34]。畜牧场内的 Zn 和 Cr 污染, 分别分布在 10 cm 和 50 cm 的土层中, 说明 Zn 元素易在土壤表层堆积, Cr 元素易向下扩散。3 个超标元素的水平分布结构相似, 均为由北至南, 由西至东逐渐增加, 其中东南部污染最为严重。本研究通过 GIS 进行空间分析实现了准确定位, 实际操作, 全面评估。提高了国内目前现有的评估方案, 并为类似的畜牧场污染地块评价提供了创新性方法和一定的参考价值。

5 结 论

畜牧场有奶牛 200 头, 在当地属于中型畜牧场, 在土壤中 As、Cr 和 Zn 元素都有不同程度的污染, As 的单因子污染指数属于污染级别, 其他重金属属于安全等级。土壤的综合污染指数属于重度污染等级, 粪便的综合指数属于安全级别。

研究区的水样中 Ni 和 Sb 元素有不同程度的污染, 畜牧场主应针对各种污染进行专项治理, 并加强环境检测。

研究区的空间污染分布显示 As 元素含量垂向污染呈现由上至下逐渐增大, Zn 元素易在土壤表层堆积, Cr 元素易向下扩散。3 个超标元素的水平分布均为由北至南, 由西至东逐渐增加, 其中东南部污染最为严重。

GIS 模型在土壤重金属研究中, 提供了更为精确的采样标准, 对污染物的污染和扩散评价实现了可视化。

参 考 文 献

- [1] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 437-444.
Wang YY, Li FF, Wang XY, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter [J]. *Environ Sci*, 2019, 40(1): 437-444.
- [2] Wang JH, Zhang X, Yang Q, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China [J]. *J Environ Sci*, 2018, 71(9): 283-291.
- [3] Liang C, Schimel JP, Jastrow JD. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. *Nat Microbiol*, 2017, 2(8): 17105.
- [4] Liu YS, Zheng XY, Wang YS, *et al.* Land consolidation engineering and modern agriculture: A case study from soil particles to agricultural systems [J]. *J Geogr Sci*, 2018, 28(12): 1896-1906.
- [5] 许继飞, 倪茹, 张数礼, 等. 我国规模化奶牛养殖污染物的特征及其资源化利用[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017, 3(6): 5-8.
Xu JF, Ni R, Zhang SL, *et al.* Characters and resource utilization of cow cultures pollutants in China [J]. *Heilongjiang Anim Sci Veter Med*, 2017, 3(6): 5-8.
- [6] Cui ZW, Wang Y, Zhao N, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in paddy soils of yongshuyu irrigation area from Songhua river basin, northeast China [J]. *Chin Geogr Sci*, 2018, 28(5): 797-809.
- [7] Khodami S, Surif M, Wo WM, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Bayan Lepas area, Penang, Malaysia [J]. *Mar Pollut Bull*, 2017, 114(1): 615-622.
- [8] Sidibe AM, Lin XY. Heavy metals and nitrate to validate groundwater sensibility assessment based on DRASTIC models and GIS: Case of the upper Niger and the Bani basin in Mali [J]. *J Afr Earth Sci*, 2018, 147: 199-210.
- [9] 刘梦云, 翟丙年, 刘效栋, 等. 基于 ARCGIS 的高洛烟区土壤环境质量评价[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(17): 4476-4479, 4483.
Liu MY, Zhai BN, Liu XD, *et al.* Soil Environment Quality Evaluation of the Tobacco Area of Shangluo Based on ARCGIS [J]. *Hubei Agric Sci*, 2016, 55(17): 4476-4479, 4483.
- [10] Zhang Y, Wu Q, Zhao XY, *et al.* Study of carbon metabolic processes and their spatial distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 645: 1630-1642.
- [11] Benhaddya ML, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria [J]. *Environ Earth Sci*, 2014, 71(3): 1473-1486.
- [12] Tang Y, Han GL. Characteristics of heavy metals in soils under different land use in a typical karst area, southwest China [J]. *Acta Geochim*, 2017, 36(3): 515-518.
- [13] Yang P, Wang MH, Derrick YF, *et al.* Methane dynamics in an estuarine brackish *Cyperus malaccensis* marsh: Production and porewater concentration in soils, and net emissions to the atmosphere over five years [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 132-142.
- [14] 杜尔伯特蒙古族自治县地方志编纂委员会. 杜尔伯特蒙古族自治县县志[M]. 北京: 中国文史出版社, 2016.
Dulbert Mongol Autonomous County local committee. *Dulbert Mongol Autonomous county annals* [M]. Beijing: China Literature and History Press, 2016.
- [15] 陈敬晶. 杜尔伯特蒙古族自治县湿地保护对策分析[J]. 科学技术创新, 2018, 8: 155-156.
Chen JJ. Wetland protection strategies analysis of Dulbert Mongol Autonomous county [J]. *Scient Technol Innov*, 2018, 8: 155-156.
- [16] NY/T 1334-2007 畜禽粪便安全使用准则[S].
NY/T 1334-2007 Regulation regarding the safety using of livestock and poultry manure [S].
- [17] GB/T 22105.2-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分: 土壤中总砷的测定[S].
GB/T 22105.2-2008 Soil quality-Analysis of total mercury, arsenic and lead contents-Atomic fluorescence spectrometry-Part 2: Analysis of total arsenic contents in soils [S].
- [18] GB/T 22105.1-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分: 土壤中总汞的测定[S].
GB/T 22105.1-2008 Soil quality-Analysis of total mercury, arsenic and lead contents-Atomic fluorescence spectrometry-Part 1: Analysis of total mercury contents in soils [S].
- [19] GB/T 17141-1997 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17141-1997 Soil quality-Determination of lead, cadmium-Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry [S].
- [20] HJ 491-2009 土壤 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
HJ 491-2009 Soil quality-Determination of total chromium-Flame atomic

- absorption spectrometry [S].
- [21] GB/T 17138-1997 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法 [S].
GB/T 17138-1997 Soil quality-Determination of copper, zinc-Flame atomic absorption spectrometry [S].
- [22] GB/T 17139-1997 土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17139-1997 Soil quality-Determination of nickel-Flame atomic absorption spectrometry [S].
- [23] HJ 700-2014 水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法[S].
HJ 700-2014 Water quality-Determination of 65 elements-Inductively coupled plasma-mass spectrometry [S].
- [24] 薛志斌, 李玲, 张少凯, 等. 内梅罗指数法和复合指数法在土壤重金属污染风险评估中的对比研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 119-125.
Xue ZB, Li L, Zhang SK, *et al.* Comparative study between nemerow index method and compound index method for the risk assessment of soil heavy metal pollution [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2018, 16(2): 119-125.
- [25] 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.
China National Environmental Monitoring Centre (CNEMC). Soil element background values of China [M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1990.
- [26] GB 15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
GB 15618-2018 Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].
- [27] GB 4284-1984 农用污泥中污染物控制标准[S].
GB 4284-1984 Control standards for pollutants in sludges from agricultural use [S].
- [28] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [29] 阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔, 王宏卫, 杨胜天, 等. 露天煤矿周边不同深度土壤重金属空间变异及分布特征[J]. 土壤, 2018, 50(2): 376-384.
Abdusalam ABDJPE, Wang HW, Yang ST, *et al.* Spatial variabilities and distributions of heavy metal contents in opencast mine soils [J]. *Soils*, 2018, 50(2): 376-384.
- [30] 李宏薇, 尚二萍, 张红旗, 等. 耕地土壤重金属污染时空变异对比——以黄淮海平原和长江中游及江淮地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3464-3473.
Li HW, Shang EP, Zhang HQ, *et al.* Comparative research on spatio-temporal variability of heavy metal pollution in cultivated soils—A case study of Huang-huai-hai plain and middle reaches of the Yangtze river and Jianghuai region [J]. *China Environl Sci*, 2018, 38(9): 3464-3473.
- [31] 梁玉峰, 谭长银, 曹雪莹, 等. 不同土地利用方式下土壤养分和重金属元素垂直分布特征[J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1791-1799.
Liang YF, Tan CY, Cao XY, *et al.* Vertical distribution of soil nutrient and heavy metals in soil under different land use [J]. *Chin J Environ Eng*, 2018, 12(6): 1791-1799.
- [32] 林祥龙, 孙在金, 马瑾, 等. 不同形态锑对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 657-664.
Lin XL, Sun ZJ, Ma J, *et al.* Toxicity differences of different forms of antimony to soil-dwelling springtail (*Folsomia candida*) [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2017, 36(4): 657-664.
- [33] DB-Suriyagoda L, Dittert K, Lambers H, *et al.* Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: A review [J]. *Pedosphere*, 2018, 28(3): 363-382.
- [34] Huang Y, Miyauchi K, Endo G, *et al.* Arsenic contamination of groundwater and agricultural soil irrigated with the groundwater in Mekong Delta, Vietnam [J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75(9): 7571-7577.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



蔡 崢, 博士, 副研究员, 主要研究方向为环境科学与工程。
E-mail: 18645039597@163.com