doi: 10.11720/wtyht.2022.1417

张沁瑞,李欢,邓宇飞,等.北京东南郊土壤重金属元素分布及其在表层土壤中的富集特征[J].物探与化探,2022,46(2):490-501. http://doi. org/10.11720/wtyht.2022.1417

Zhang Q R, Li H, Deng Y F, et al. Distribution of heavy metal elements in soil of the Southeastern suburbs of Beijing and their enrichment characteristics in surface soil [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2):490-501. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1417

北京东南郊土壤重金属元素分布及其在 表层土壤中的富集特征

张沁瑞1,李欢1,邓宇飞2,黄勇1,张博1,许一波3

(1.北京市地质勘察技术院,北京 100120;2.中化地质矿山总局地质研究院,北京 100101;3.河 北经贸大学公共管理学院,河北石家庄 050062)

摘要:通过采集并分析北京东南郊地区表层(0~20 cm)和深层(160~200 cm)土壤样品的重金属元素,查明该地区 土壤中元素分布特征,并通过建立半变异函数模型探讨重金属元素的空间自相关性,利用富集系数探讨元素在表 层土壤中的富集特征,在此基础上划分出重金属元素显著富集区,并对富集原因进行了深入解释和分析。结果表 明:研究区表层土壤 Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 总体含量水平明显高于深层,差距在 1.2~3.9 倍不等;与北京地区和中国地 区土壤重金属元素含量相比,研究区土壤中相对富集 Cd、Hg。受成土母质来源差异性和人类活动等诸多因素的影 响,表层土壤 As、Cr 空间自相关性较强,深层土壤 Cr 空间自相关性较弱,表层和深层其他元素空间自相关性中等。 As、Ni、Cr 在表层土壤中的富集程度较弱,而 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 富集程度较强,富集程度最强的是 Hg。以富集系数 作为参考依据,圈定出 5 处重金属元素的显著富集区域,清晰地反映了人类生活、农业种植、工业生产等均是造成 重金属元素在表层土壤中富集的重要影响因素;因此,需要密切关注人类居住区、农业种植区、工业企业分布区的 土壤元素分布状况,以防止土壤环境恶化和保障生态环境安全。

关键词:土壤;重金属元素;空间结构;分布特征;富集特征

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2022)02-0490-12

0 引言

土壤作为人类赖以生存与发展的重要自然资源 和生态环境条件,其物质组成和演化过程都十分复 杂^[1]。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等重金属元素 进入土壤之后,一般不易随水淋失或被微生物分解, 长期存在于土壤中,难以彻底被清除,潜在危害性 大^[2]。经过长年累积,重金属元素会在土壤中产生 富集效应,不仅会对水体、农作物等造成生态风险, 更是直接或间接威胁人体健康^[3-5]。因此,应将重 金属作为土壤元素的首要关注对象,重点研究其富 集特征。 北京东南郊地区土壤肥沃、工农业发达,历史上 曾是北京地区的重要粮仓,长期、频繁的人类活动在 很大程度上已经改变了土壤原生环境。近年来该地 区城市发展快,2012年北京城市副中心选址于此地, 新城开发建设、企业腾退搬迁,以及北京市的百万亩 造林工程等也使该地区的土地利用类型不断改变,持 续影响着土壤元素分布状态。因此,该区域应作为北 京市域范围开展土壤相关研究工作的重要地区。

地球化学调查手段有助于科学精准掌握土壤元 素的含量状况、分布特征、变化规律,进而指导土壤 污染状况分析、土地质量评价等工作,是防止土壤环 境恶化、保障人居生态环境安全的重要方法^[6-8]。 将传统多元统计学方法与地统计学方法相结合,是

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-12-13

基金项目:北京市财政项目"北京市土地质量生态地球化学监测网运行"(11000022T000000439575)、"京西'一线四矿'及周边区域生态地质 专项调查与评价示范"(11000022T000000491145)

第一作者:张沁瑞(1980-),男,大学本科,从事水工环地质研究工作。Email:18601040279@163.com

通讯作者:李欢(1990-),男,硕士研究生,从事生态地球化学研究工作。Email:lihuan_8@163.com

分析土壤元素含量特征及其空间变化的有效途径之 一[9-12]。目前国内关于表层和深层土壤元素的研究 工作主要依托于全国多目标区域地球化学调查工作 (1:250 000)取得的数据,表层土壤采样密度是1 件/km²,1件/4km²进行组合分析;深层土壤采样密 度是1件/4km²,1件/16km²进行组合分析^[13-19]。 本次研究依托于"北京市土壤地质环境监测网运 行"和"通州区南部重大地质问题调查与评价"项 目,表层和深层土壤采样密度与分析密度一致,均达 到1件/4km²,很大程度上提升了数据精度。本文 基于传统多元统计学方法和地统计学方法,系统开 展土壤重金属元素含量特征、空间变化方面的分析: 以富集系数作为定量化指标,进行重金属元素在表 层土壤中富集特征的研究,并对圈定出的土壤重金 属元素显著富集区进行原因解释,为今后在该区域 开展相关研究工作和实施土壤环境监测提供参考依 据和目标靶区。

1 研究区概况

研究区位于北京市东南部,京杭大运河北端,面 积约906 km²(图1),属大陆性季风气候,春季干旱 多风,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干燥。 区内地表水系较发育,属潮白河、北运河两大水系, 有大小河流13条,总长度约245km,主要发育北运 河、凉水河、运潮减河等。

研究区第四系沉积物由永定河和潮白河的冲、 洪积物堆积而成,大致以温榆河(下游为北运河)为 界,界线以北为潮白河冲洪积扇,成土母质来源于北 京北部山区,以富含 K,O 为典型特征;界线以南为 永定河冲洪积扇,成土母质来源于北京西部山区,以 富含 CaO、MgO 为典型特征^[20-23]。北运河沿岸、潮 白河沿岸以及南部的马驹桥、于家务、永乐店等局部 地段主要分布砂质沉积物:北部的宋庄一带有小面 积的次生黄土:其他区域多为壤质沉积物。除西部 的通州城区、台湖等地外,研究区其他区域的土壤类 型主要为壤质潮土,局部有黏质潮土和砂质潮土;通 州城区附近主要分布潮褐土;台湖以砂姜潮土为主, 零星分布湿潮土和砂姜黑土。表层土壤 pH 值范围 为7.36~8.74,深层土壤 pH 值范围为7.56~8.83, 属于中性偏碱范围。研究区土地利用类型分布由遥 感数据解译获取,以建设用地、耕地和林地为主,其 中建设用地集中分布在通州城区、乡镇驻地及其周 边区域、台湖西部、马驹桥西部等地,耕地集中分布 在中部及南部的于家务、永乐店、漷县等地,而林地 则广泛分布于研究区内。





Fig. 1 Sampling points map of study area

2 样品采集、分析测试及数据处理

2.1 样品采集与分析

采用网格化方式进行布点,同点位采集表层、深 层土壤样品。采样点位处的土地利用类型主要为耕 地和林地,表层土壤采样深度为0~20 cm,深层土壤 采样点与表层土壤采样点位置相同,采样深度为 160~200 cm,采样密度为1件/4 km²,样品质量大于 1000g,表层土壤、深层土壤样品各采集 224 件。

将土壤样品进行自然风干,风干后的样品平铺 在制样板上,用木棍碾压,剔除植物残体、石块等。 利用 2 mm 的孔径筛对样品进行过筛,剔除未通过 大颗粒碎石等;对于土质结核进行揉搓,直至通过筛 子。采用对角线折叠法对过筛后的样品进行拌匀, 确保每件加工后的样品质量大于 500 g。

由北京一零一生态地质检测有限公司进行样品 实验测试,分析 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、 Al₂O₃、pH 等指标,具体分析方法、检出限见表 1。 采用国家一级标准物质进行准确度控制,每 500 件 样品中密码插入 12 个 GBW 标准物质(GSS1 ~ GSS12)与样品同条件进行分析,准确度合格率要求 ≥98%;随机抽取 5%的测试样品编成密码样重复分 析,进行精密度控制,精密度合格率要求≥98%。测 试结果显示,分析测试质量达到了《多目标区域地 球化学调查规范(1:250 000)》、《生态地球化学评价 样品分析技术要求》等规范的要求^[24-25]。

| Table 1 | The analysis method and | detection limit of target elements | |
|---------|-------------------------|------------------------------------|----|
| 夫 | 见范要求 | 检出限 | 分析 |

表1 各项指标的分析方法及检出限

| 分析指标 | 规范要求 | 检出限 | 分析方法 | | |
|--------------------------------|-------|---------|----------------------|--|--|
| As | 1 | 0.011 | 微波消解/原子壶光注(AFS) | | |
| Hg | 0.005 | 0.0004 | 减吸用用 从了 火儿公(113) | | |
| Cd | 0.03 | 0.017 | 电感耦合等离子质谱法(ICP-MS) | | |
| Cr | 5 | 0. 0003 | | | |
| Cu | 1 | 0. 4889 | | | |
| Ni | 2 | 0.0002 | 电感耦合等离子体光谱法(ICP-OES) | | |
| Pb | 2 | 0.0008 | | | |
| Zn | 4 | 0.0096 | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.05 | 0.008 | X 射线荧光光谱法(XRF) | | |
| рН | 0.10 | 0.03 | pH 计 | | |

注:元素含量单位为10⁻⁶;氧化物含量单位为%;pH为无量纲。

2.2 数据处理与图件编制

算数均值、中位值、标准离差、变异系数、峰度、 偏度等基本参数统计和相关性分析在 Excel 中完 成。变异系数通常用标准离差与平均值之比的百分 数来表示,表征元素空间分布的均匀程度。本次研 究将变异系数小于 15%定义为弱空间变异性,15% ~100%为中等程度空间变异性,大于 100%为强空 间变异性^[26-28]。

利用3倍标准离差原则将异常值剔除^[29],反复 剔除至无异常值为止。采用偏度和峰度参数(偏度 接近0,峰度接近3,则服从正态分布)来检验剔除后 的数据是否服从正态分布^[30]。经检验,表层As、 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn呈近似正态分布,Cd、Hg呈近似对 数正态分布;深层元素呈近似对数正态分布。

根据变异函数的定义,实验半变异函数由下式确定^[31-34]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i + h) - Z(x_i) \right]^2, (1)$$

式中:h为步长,即样本空间距离^[35-40];N(h)是以 h

为间距的所有观测点的成对数目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是变量Z在空间位置 x_i 和 x_i+h 的实测值。。

本次研究所建立的半变异函数模型有指数 (Exponential)和线性(Linear)两种。

指数模型:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{\alpha}\right) \right], & h > 0\\ 0, & h = 0 \end{cases}$$
(2)

线性模型:

 $\gamma(h) = C_0 + Ch/\alpha$, h > 0。 (3) 式中:块金值 C_0 表示随机性变异;结构方差 C 表示 结构性变异;变程 α 为半方差达到基台值所对应的 距离。基台值 C_0+C 表示包含随机性变异和结构性 变异的总变异,块基比 $C_0/(C_0+C)$ 反映土壤元素的 空间依赖性,可表明系统变量的空间相关性程度。 通常利用块基比来表征空间自相关性的强弱,当块 基比小于 25%时表明该元素空间自相关性较强,其 空间结构主要受结构性因素影响;当块基比介于 25%~75%之间时表明该元素空间自相关性中等,其 空间结构受结构性因素和随机性因素的共同影响; 当块基比大于 75%时表明该元素空间自相关性较 弱,其空间结构主要受随机性因素共同影响。

拟合模型的选择由回归系数 R² 和残差 RSS 共同决定, R² 越大, 模型拟合的精度越高; RSS 越小, 拟合曲线效果越好^[41]。本次研究利用 GS+10.0 软件进行半变异函数的计算以及最优拟合模型的选择。

为进一步分析土壤重金属元素在表层土壤中的 富集特征,引入富集系数的概念。富集系数是表层 土壤元素含量实测值与相对应的深层土壤元素含量 实测值的比值。成土过程中,受自然作用的影响会 产生元素的富集或贫化现象;而土壤环境中的 Al 等 常量元素相对稳定,其含量及分布特征不易受到自 然作用的影响^[42-43]。因此在计算富集系数时,选用 Al 作为参考因子进行数据校正,以消除自然作用的 影响。具体计算公式如下:

 $P = (C_{\frac{1}{8}}/C_{\frac{1}{8}AI})/(C_{\frac{1}{8}}/C_{\frac{1}{8}AI})$ 。 (4) 式中:P 为校正后的富集系数(下文所述的富集系数 均为校正后的数值); $C_{\frac{1}{8}}$ 为表层土壤元素的实测 值; $C_{\frac{1}{8}AI}$ 为表层土壤常量元素 AI 的实测值; $C_{\frac{1}{8}}$ 为 深层土壤元素的实测值; $C_{\frac{1}{8}AI}$ 为深层土壤常量元素 AI 的实测值。

不同学者关于利用富集系数划分富集程度的界限值有不同看法,这主要与不同研究区的土壤元素分布差异较大存在一定关系^[42-44]。本文采用的界限值是在参考前人研究成果的基础上,结合本研究区土壤元素分布的实际情况,根据富集系数的大小,

将富集程度分为不富集、弱富集、富集、强富集和极强富集5类:富集系数小于1.2为不富集,富集系数 介于1.2~1.5之间为弱富集,富集系数介于1.5~ 2.0为富集,富集系数介于2.0~5.0为强富集,富集 系数大于5.0为极强富集。

将重金属元素达到强富集及以上程度的分布范 围进行物理叠加,划定出富集系数普遍大于2.0的 区域;在此基础上,同时考虑不同土地利用类型对土 壤元素分布特征的影响差异性,人为活动相对强烈 的建设用地、耕地对表层土壤元素分布影响大,人为 活动相对较弱的林地、草地、未利用地对表层土壤元 素分布影响小,即可圈定出重金属元素在表层土壤 中的显著富集区。

采用地球化学勘查一体化系统(geochem studio) 绘制空间插值图,在 Mapgis 6.7 软件平台上进行图件 编辑与修饰。

3 结果与讨论

3.1 重金属元素含量的统计特征

表 2 列出了研究区土壤重金属元素的算数均值 (X)、最小值(X_{min})、中位值(X_{med})、最大值(X_{max})、 标准离差(S)及变异系数(C_x)等统计特征值。

在进行土壤元素含量对比研究时,利用中位值 代表元素的总体含量水平。通过对比表层元素与深 层元素的中位值可以发现,As、Cr、Ni在表层的总体 含量水平与深层较为接近,而Cd、Cu、Hg、Pb、Zn在

表 2 表层土壤、深层土壤重金属元素统计特征值

Table 2 Statistical eigenvalues of heavy metal elements in surface soil and deep layers soil

| | 项目 | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn |
|-----------------------------|---------------------------|------|--------|------|------|-------|------|------|------|
| | X/10 ⁻⁶ | 8.64 | 0. 171 | 55.1 | 24.9 | 0.079 | 27.3 | 25.5 | 76.1 |
| | $X_{\rm min}/10^{-6}$ | 3.89 | 0.070 | 37.6 | 12.6 | 0.011 | 17.8 | 17.7 | 37.3 |
| | $X_{ m med}/10^{-6}$ | 8.61 | 0.165 | 55.0 | 24.3 | 0.059 | 26.8 | 24.9 | 73.4 |
| 12/25 | $X_{\rm max} / 10^{-6}$ | 20.7 | 0.611 | 81.8 | 122 | 1.54 | 46.3 | 70.4 | 288 |
| | S/10 ⁻⁶ | 2.20 | 0.058 | 6.20 | 9.30 | 0.126 | 4.40 | 5.50 | 23.1 |
| | $C_v / \%$ | 25.5 | 33.4 | 11.2 | 36.4 | 134 | 16.0 | 21.4 | 30.3 |
| 深层 | X/10 ⁻⁶ | 8.76 | 0.108 | 53.8 | 21.0 | 0.026 | 26.8 | 20.4 | 59.4 |
| | $X_{\rm min}/10^{-6}$ | 1.82 | 0.040 | 15.9 | 4.50 | 0.005 | 8.30 | 13.4 | 20.2 |
| | $X_{ m med}/10^{-6}$ | 8.52 | 0.104 | 52.9 | 20.6 | 0.015 | 26.2 | 20.0 | 57.8 |
| | $X_{\rm max} / 10^{-6}$ | 28.6 | 0.550 | 128 | 39.9 | 0.882 | 47.7 | 46.8 | 107 |
| | S/10 ⁻⁶ | 3.97 | 0.049 | 12.1 | 7.60 | 0.064 | 7.80 | 4.20 | 17.6 |
| | $C_v / \%$ | 45.4 | 44.6 | 22.4 | 36.1 | 244 | 29.0 | 20.7 | 29.6 |
| 北京市表 | 長层土壤/10 ^{-6[45]} | 9.30 | 0.147 | 66.0 | 23.0 | 0.045 | 27.0 | 25.0 | 67.0 |
| 北京市涿 | 幕层土壤/10⁻6[45] | 9.70 | 0.096 | 67.0 | 23.0 | 0.023 | 29.0 | 23.0 | 64.0 |
| 中国表层土壤/10 ^{-6[45]} | | 8.50 | 0.140 | 58.0 | 23.0 | 0.066 | 25.0 | 24.0 | 69.0 |
| 中国深 | 层土壤/10 ^{-6[45]} | 8.40 | 0.095 | 58.0 | 20.0 | 0.017 | 26.0 | 20.0 | 62.0 |

注:北京市表层土壤(0~20 cm)样本量 n=2 268;北京市深层土壤(180~200 cm)样本量 n=483;中国表层土壤(0~20 cm)样本量 n= 376 743;中国深层土壤(180~200 cm)样本量 n=95 588。

表层的含量水平明显高于深层,差距在 1.2~3.9 倍 不等,呈现出表生富集的特征。表层 Cd 含量变化 范围(0.070~0.611)×10⁻⁶,深层含量变化范围 (0.040~0.550)×10⁻⁶,表层平均含量是深层的 1.58 倍;表层 Hg 含量变化范围(0.011~1.54)×10⁻⁶,深 层含量变化范围(0.005~0.882)×10⁻⁶,表层平均含 量是深层的 3.04 倍。

由图2可知,研究区表层土壤Cd含量水平高于 北京市均值和全国均值;Hg含量低于北京市均值, 但明显高于全国均值;其他元素含量水平基本与北 京市均值和全国均值一致。深层土壤元素含量与北 京市均值基本一致;除 Cd 外,其他元素含量明显低 于全国均值。由此可见,研究区表层土壤 Cd、Hg 含 量相对较高,深层土壤 Cd 含量相对较高。

应特别注意的是 Cd,诸多学者在该区域内针对 Cd 的研究结果表明^[46-48],表层、深层土壤的 Cd 高 含量分布与凉水河、凤港减河的污灌历史有很大关 系,Cd 不仅迁移到了深部土壤,而且在土壤中生物 可利用态含量占比高,可能会给人类健康带来潜在 风险。



Fig. 2 Comparison of mean values of heavy metal elements

3.2 重金属元素的空间结构特征

表层土壤重金属元素的最优拟合模型为指数模型(表3),回归系数介于 0.749~0.958 之间,说明选用指数模型进行拟合总体效果较好。Cr、Zn 的残差较大,分别为 52.1 和 655。As、Cr、Ni 的变程较小,分别为 1.56 km、2.27 km、3.18 km;Cd、Pb 的变程中等,分别为 7.32 km 和 6.18 km;Cu、Hg、Zn 的变程较大,分别为 27.97 km、18.21 km、14.98 km。As、Cr 的块基比小于 25%,呈现出较强的空间自相关性,说明它们的空间分布特征主要受控于结构性因素;Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的块基比介于 25%~75%,空间自相关性中等,除受结构性因素影响外,也受到人类活动等外界环境的随机性因素影响。

深层土壤 As、Hg、Pb 的最优拟合模型为指数模型,Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 的最优拟合模型为线性模型(表3),回归系数介于 0.831~0.970,残差均较小, 拟合效果总体较好。除 As、Pb 的变程为 4.79 km 和 11.06 km 外,其他元素的变程均超过 23 km;Hg 的 变程最大,在 39.15 km 达到平稳阶段。Cr 的块基比 为 82.37%,呈现出较弱的空间自相关性,主要受随 机性因素影响;其他元素均呈现中等自相关性,受到 结构性因素和随机性因素的共同影响。

研究区由潮白河冲洪积扇和永定河冲洪积扇组 成,受成土母质来源不同的影响,深层土壤未受人为 扰动而长期处于原生状态,不同冲洪积扇土壤中的 元素分布差异性大,反映的是土壤的原始特征;而表 层土壤长期裸露,在自然因素和人为因素的共同影 响下逐渐均一化,土壤元素分布差异性也逐渐减小, 反映的是经过后期改造后的土壤特征。这就造成了 深层土壤元素空间变异性大于表层,且多数深层土 壤元素的空间结构受到了结构性因素和随机性因素 的双重影响。

3.3 重金属元素在表层土壤中的富集特征

3.3.1 相关性分析

表层与深层土壤重金属元素含量间的相关性分析结果表明(表4),二者之间存在较为显著的正相关关系(Cd除外)。特别是 Hg 之间的相关性最好,相关系数达到 0.745;其他元素之间的相关系数普遍在 0.2~0.4 之间。

3.3.2 富集特征分析

利用富集系数能够建立表层与深层土壤重金属 元素之间的联系,可以反映出重金属元素在表层土

| | | Table 3 | Semi-variogram models of elements in soil and related parameters | | | | | | |
|----|----|---------|--|----------------------------|--------------|---------------------------|---|-----------------------|--|
| | 项目 | 拟合模型 | 块金值(<i>C</i> ₀) | 基台值 (C ₀ +C) | 变程(a)/ km | 回归系数 (R ²) | 块基比 [<i>C</i> ₀ /(<i>C</i> ₀ + <i>C</i>)] | 残差 (RSS) | |
| | As | 指数模型 | 0.590 | 4.43 | 1.56 | 0. 749 | 13.33% | 0.512 | |
| | Cd | 指数模型 | 0.0366 | 0.0733 | 7.32 | 0.883 | 49.93% | 1.21×10^{-4} | |
| | Cr | 指数模型 | 5.00 | 36.8 | 2.27 | 0.817 | 13.58% | 52.1 | |
| 表层 | Cu | 指数模型 | 21.3 | 42.6 | 28.0 | 0.940 | 49.99% | 10.1 | |
| | Hg | 指数模型 | 0.275 | 0.589 | 18.2 | 0.950 | 46.69% | 2.92×10^{-3} | |
| | Ni | 指数模型 | 7.16 | 18.4 | 3.18 | 0.852 | 38.87% | 8.8 | |
| | Pb | 指数模型 | 5.87 | 14.7 | 6.18 | 0.919 | 40.07% | 4.9 | |
| | Zn | 指数模型 | 130 | 281 | 15.0 | 0.958 | 46.23% | 655 | |
| | As | 指数模型 | 0.119 | 0. 239 | 4.79 | 0.957 | 49.79% | 4.10×10 ⁻⁴ | |
| | Cd | 线性模型 | 0.105 | 0.143 | 23.8 | 0.868 | 73.53% | 2.49×10 ⁻³ | |
| 深层 | Cr | 线性模型 | 0.0421 | 0.0511 | 23.8 | 0.831 | 82.37% | 1.90×10^{-5} | |
| | Cu | 线性模型 | 0.127 | 0.193 | 23.8 | 0.934 | 65.87% | 3.53×10^{-4} | |
| | Hg | 指数模型 | 0.122 | 0.325 | 39.2 | 0.948 | 37.55% | 5.35×10^{-4} | |
| | Ni | 线性模型 | 0.0785 | 0.101 | 23.8 | 0.870 | 71.42% | 1.69×10^{-4} | |
| | Pb | 指数模型 | 0.0207 | 0.0419 | 11.1 | 0.970 | 49.31% | 1.04×10^{-5} | |
| | Zn | 线性模型 | 0.0671 | 0.111 | 23.8 | 0.965 | 60. 29% | 8.18×10 ⁻⁵ | |

表 3 土壤元素半变异函数理论模型及相关参数

表 4 表层与深层土壤重金属元素之间的相关性

Table 4 Correlation of heavy metal elements in surface soil and deep layers soil

| 项目 | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn |
|-----------------------------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 相关性 | 0. 236 * | 0.095 | 0. 243 * | 0. 285 * | 0. 745 * | 0. 321 * | 0. 385 * | 0. 289 * |
| 注"*" 末子左 0 01 纽则/ 角层》 相关性目落 | | | | | | | | |

注:"*"表示在 0.01 级别(单尾),相关性显著。

壤中的富集特征,通过对各个表层土壤采样点富集 系数的数值进行统计可知(图3),As,Ni,Cr在表层 呈现不富集的点位数量分别占 64%、74%、82%,说 明该类元素的表生富集作用较弱。而 Cu、Pb、Zn、 Cd、Hg 呈弱富集程度以上的点位数量超过半数,特 别是Hg,呈极强富集程度的点位数量占比接近 40%,说明这5项重金属元素的表生富集作用显著, 这也为富集区域划分时的指标筛选提供了依据。城 市化和工业化进程中,人类活动向自然环境中释放 的重金属等污染物在表层土壤中逐年累积,导致该

类污染物的表生富集作用显著,因而土壤环境发生 了较大程度的改变,这与诸多学者的研究结果一 致[10,49-51]。

经统计,研究区内仅存在1个调查点位的Cd、 Cu、Zn含量超过了《土壤环境质量农用地土壤污染 风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)相应的风 险筛选值,超标率为 0.45%;该点位的 pH 值为 7.36,Cd 含量为 0.31×10⁻⁶,Cu 含量为 122×10⁻⁶, Zn 最大值为 288×10⁻⁶。





Fig. 3 Percentage of the enrichment degree of heavy metal elements in soil

3.3.3 富集区域划分

以1.2、1.5、2.0、5.0为间隔,勾绘出Cu、Pb、 Zn、Cd、Hg富集系数的空间分布(图4)。可以看出, 研究区重金属元素呈现出典型的"区域上普遍富 集、局部地区呈现强富集"的空间分布特征。

从空间位置角度分析,研究区位于北京市东南 部,地势相对较低,受风向、降雨等气象条件影响,以 大气干湿沉降方式向土壤中输送了一定量的重金属 元素:根据已有研究成果表明,研究区大气干湿沉降 中的 Pb、Cd、Hg 年沉降通量密度较高,造成了元素 呈现出面状富集的分布特征^[52]。从经济社会发展 角度分析,根据北京市通州区统计年鉴数据分析,以 2005~2018年这一时期为例,人口密度由 956 人/ km² 增加至1741 人/km²。该时期内每年度能源消 耗总量约200~300万t标准煤,纸制品年产量最高 达 54 499 t, 塑料制品年产量最高达 44 223 t; 煤燃烧 中 Hg 吸附于飞灰表面,导致在飞灰中富集,而炉渣 中则残留较多的 Cd、Pb^[53];纸制品、塑料制品生产 过程中的废水中富含 Cu、Zn、Cd 等,废水排放及灌 溉会造成土壤重金属的累积[54-55]。人口密度增大、 工业企业数量增加、持续的能源消耗等一系列人类 活动,这也是导致土壤重金属元素表生富集的重要

原因之一。

土壤元素含量受地形地貌、成土母质、土壤质 地、土壤理化性质等诸多自然因素的控制^[22-23,56]。 由于受到土壤系统内物理作用、化学作用、生物作用 的影响,土壤元素伴随着横向和纵向上的迁移、扩 散。在计算富集系数时选用 Al 作为参考因子进行 数据校正,在很大程度上消除了自然因素对元素含 量分布的影响。因此,本次圈定的元素富集区主要 反映人为因素的影响,在研究区内共圈定出 5 处(A 区、B 区、C 区、D 区、E 区)重金属元素在表层土壤 中的显著富集区(图 5)。

B 区与通州城区的范围基本吻合,该区域的人 口分布比较密集;C 区与亦庄新城通州部分的范围 基本吻合,该区域的企业分布比较密集;这两个区域 多以建设用地为主,生活污水排放、垃圾倾倒、汽车 尾气排放等行为频繁,向土壤中输入了外源物质,改 变了土壤元素的原生环境,造成重金属元素在表层 土壤中富集。研究区南部于家务一永乐店一带的 E 区是具有特色的农业种植区,灌溉和施肥等农业生 产活动会向土壤中输送大量重金属元素,也会造成 表层土壤元素富集。建设用地、耕地中的人类活动 较重,重金属元素在表层土壤中的富集特征比较显



Fig. 4 Distribution of heavy metal enrichment coefficient in soil



图 5 表层土壤重金属元素显著富集区域划分 Fig. 5 The division of areas with significant enrichment of heavy metal elements in surface soil

著;而林地、草地中的人类活动频繁较轻,重金属元 素在表层土壤中的富集特征不显著,这也说明土地 利用类型分布情况会影响土壤元素的分布特征。

工业企业中化石燃料燃烧、运输车辆轮胎磨损 以及尾气排放等,形成了含有重金属的粉尘,在外力 作用下可以进行较长距离的迁移,在合适条件下又 以沉降方式进入到土壤,从而改变了一定范围内土 壤重金属的原始分布状态,如 A 区分布有佰富苑工 业园、都市工业园等,D 区的张家湾镇及其周边区域 分布有大量小型工业企业。

由此可见,土壤元素在表生环境下的富集并非 单一因素造成,通常是多种因素综合作用的结果,人 类居住、农业种植活动、工业生产等均是造成元素富 集的主要人为因素。

4 结论

通过在北京东南郊地区开展土壤重金属元素分 布及其在表层土壤中富集特征的研究工作,得出以 下结论:

1)研究区表层土壤 As、Cr、Ni 的总体含量水平 与深层较为接近,而 Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 的总体含量 水平明显高于深层;通过与北京地区和中国地区土 壤重金属元素含量的对比可知,研究区土壤中相对 富集 Cd、Hg,其中 Cd 高含量分布与凉水河、凤港减 河的污灌历史有很大关系。

2) 表层土壤 8 项重金属元素的最优拟合模型 为指数模型;As、Cr 空间自相关性较强,其他元素空 间自相关性中等。深层土壤 As、Hg、Pb 的最优拟合 模型为指数模型,其他元素的最优拟合模型为线性 模型;Cr 空间自相关性较弱,其他元素空间自相关 性中等。深层土壤元素空间变异性大于表层,且多 数元素的空间结构受到了结构性因素和随机性因素 共同影响,主要是成土母质来源的差异性所致。

3) 富集系数能够反映出重金属元素在表层土 壤中的富集特征,利用富集系数分析了土壤重金属 元素在表层土壤中的富集特征。总体上,As、Ni、Cr 富集程度较弱,Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 富集程度较强,富 集程度最强的是 Hg。

4) 根据圈定出的 5 处重金属元素显著富集区 分析可知,重金属元素在表层土壤中的富集受多种 因素的影响,位于通州城区的 B 区、台湖—马驹桥 一带的 C 区基本以建设用地为主,说明人类生活和 工作是造成土壤元素富集的主要影响因素;位于于 家务—永乐店一带的 E 区是具有特色的农业种植 区,说明农业生产活动是造成土壤元素富集的主要 5)研究区总体土壤环境质量较好,但表层土壤 Cd含量水平高于北京市均值和全国均值,Hg含量 水平高于全国均值,需引起重视。

致谢:论文创作过程中得到了中国地质大学 (北京)汪明启教授、河北地质大学徐国志教授、北 京市地质勘察技术院教授级高工贾三满的大力支持 与帮助,在此深表感谢。

参考文献(References):

- 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2006.
 Chen H M. Environmental soil science [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 杨忠芳,朱立,陈岳龙.现代环境地球化学[M].北京:地质出版社,1996.

Yang Z F, Zhu L, Chen Y L. Modern environmental geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.

 [3] 魏贏,刘阳生. 汞污染农田土壤的化学稳定化修复[J]. 环境工 程学报,2017,11(3):1878-1884.

Wei Y, Liu Y S. Remediation on mercury polluted farmland soil by chemical stabilization [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(3):1878-1884.

- [4] 卢光华,岳昌盛,彭犇,等. 汞污染土壤修复技术的研究进展
 [J].工程科学学报,2017,39(1):1-12.
 Lu G H, Yue C S, Peng B, et al. Review of research progress on the remediation technology of mercury contaminated soil [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(1):1-12.
- [5] 王彬武,李红,蒋红群,等.北京市耕地土壤重金属时空变化特征初步研究[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1335-1344.

Wang B W, Li H, Jiang H Q, et al. Spatio-temporal variation of soil heavy metals in agricultural land in Beijing, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(7): 1335-1344.

[6] 赵秀芳,张永帅,冯爱平,等.山东省安丘地区农业土壤重金属 元素地球化学特征及环境评价[J].物探与化探,2020,44(6): 1446-1454.

Zhao X F, Zhang Y S, Feng A P, et al. Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in agricultural soil of Anqiu area, Shandong Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1446 – 1454.

[7] 李括,彭敏,赵传冬,等.全国土地质量地球化学调查二十年 [J].地学前缘,2019,26(6):128-158.

Li K, Peng M, Zhao C D, et al. Vicennial implementation of geochemical survey of land quality in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 128 – 158.

[8] 王茜,张光辉,田言亮,等.农田表层土壤中重金属潜在生态风险效应研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):165-172.
Wang Q, Zhang G H, Tian Y L, et al. Research on the potential ecological risk of farmland top-soil of heavy metals [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4):165-172.

[9] 刘伟,部允兵,周艳兵,等.农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤 Cd 为例[J].农业环境科学学报, 2019,38(1):87-94.

Liu W, Gao Y B, Zhou Y B, et al. Multi scale analysis of spatial variability of heavy metals in farmland soils: Case study of soil Cd in Shunyi District of Beijing, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 87-94.

- [10] 吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等. 污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 农业工程学报,2013,29(4):165-173.
 Wu W Y, Yin S Y, Liu H L, et al. Spatial structure and distribution characteristics of soil heavy metals in wastewater irrigation district [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 165-173.
- [11] 霍霄妮,李红,孙丹峰,等.北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析[J].环境科学学报,2009,29(6):1339-1344.
 Huo X N, Li H, Sun D F, et al. Spatial autocorrelation analysis of heavy metals in cultivated soils in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(6): 1339-1344.
- [12] 郑袁明,陈煌,陈同斌,等.北京市土壤中 Cr,Ni 含量的空间结构与分布特征[J].第四纪研究,2003(4):436-445.
 Zheng Y M, Chen H, Chen T B, et al. Spatial distribution patterns of Cr and Ni in soils of Beijing [J]. Quaternary Sciences, 2003(4): 436-445.
- [13] 张妍,李玉嵩,盛奇,等.河南省商丘地区土壤地球化学特征
 [J].现代地质,2019,33(2):305-314.
 Zhang Y, Li Y S, Sheng Q, et al. Soil geochemical characteristics of Shangqiu area in Henan Province [J]. Geoscience, 2019, 33 (2): 305-314.
- [14] 陈兴仁,陈富荣,贾十军,等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质,2012,39(2):302-310.
 Chen X R, Chen F R, Jia S J, et al. Soil geochemical baseline and background in Yangtze River—Huaihe River basin of Anhui Province [J]. Geology in China, 2012, 39(2): 302-310.
- [15] 廖启林,刘聪,许艳,等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质,2011,38(5):1363-1378.
 Liao Q L, Liu C, Xu Y, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1363-1378.
- [16] 曹峰,李瑞敏,王轶,等.海河平原北部地区土壤地球化学基准 值与环境背景值[J].地质通报,2010,29(8):1215-1219.
 Cao F, Li R M, Wang Y, et al. Soil geochemical baseline and environmental background values in northern Haihe Plain, China
 [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(8): 1215-1219.
- [17] 陈国光,奚小环,梁晓红,等.长江三角洲地区土壤地球化学基准值及其应用探讨[J].现代地质,2008,22(6):1041-1048.
 Chen G G, Xi X H, Liang X H, et al. Soil geochemical baselines of the Yangtze River Delta and their significances [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 1041-1048.
- [18] 郭海全,马忠社,郝俊杰,等.冀东土壤地球化学基准值特征及研究意义[J]. 岩矿测试,2007,26(4):281-286.
 Guo H Q, Ma Z S, Hao J J, et al. Characteristics and significance of reference values of the geochemical elements in soil samples from eastern Hebei Province [J]. Rock and Mineral Analysis,

2007,26(4): 281-286.

- [19] 汪庆华,董岩翔,郑文,等. 浙江土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 地质通报,2007,26(5):590-597.
 Wang Q H, Dong Y X, Zheng W, et al. Soil geochemical baseline values and environmental background values in Zhejiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2007,26(5): 590-597.
- [20] 蔡向民,张磊,郭高轩,等.北京平原地区第四纪地质研究新进展[J].中国地质,2016,43(3):1055 1066.
 Cai X M, Zhang L, Guo G X, et al. New progress in the study of Quaternary geology in Beijing Plain [J]. Geology in China, 2016, 43(3):1055 1066.
- [21] 蔡向民,栾英波,郭高轩,等.北京平原第四系的三维结构[J]. 中国地质,2009,36(5):1021-1029.
 Cai X M, Luan Y B, Guo G X, et al. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain [J]. Geology in China, 2009, 36(5):

1021-1029. [22] 李廷芳.影响北京土壤元素背景值的成土因素[J].中国环境 监测,1992,13(1):81-86.

Li T F. Soil forming factors affecting soil background contents of metal elements in Beijing area [J]. Environmental Monitoring in China, 1992,13(1): 81-86.

- [23] 邓勃,秦建侯,李廷芳. 影响北京地区土壤元素背景值的因素 分析[J]. 环境科学学报,1986,6(4):446-454.
 Deng B, Qin J H, Li T F. Analysis of factors affecting soil background contents of metal elements in Beijing area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1986,6(4): 446-454.
- [24] 奚小环,陈国光,张德存,等. DZ/T 0258—2014 多目标区域地 球化学调查规范(1:250000) [S].
 Xi X H, Chen G G, Zhang D C, et al. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250000) [S].
- [25] DD2005—03 生态地球化学评价样品分析技术要求[S]. DD2005—03 Technical requirements for analysis of ecological geochemical evalution samples [S].
- [26] 刘永红,倪中应,谢国雄,等.浙西北丘陵区农田土壤微量元素
 空间变异特征及影响因子[J].植物营养与肥料学报,2016,22
 (6):1710-1718.

Liu Y H, Ni Z Y, Xie G X, et al. Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1710 – 1718.

[27] 祝修高,李小梅,沙晋明. 福州市土壤 Zn、Pb 元素空间变异特 征及影响因子分析[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2016, 32(4):99-104.

Zhu X G, Li X M, Sha J M. Spatial variability and influencing factors of Zn and Pb in soil in Fuzhou City [J]. Journal of Fujian Teachers University:Natural Science, 2016, 32(4): 99 – 104.

[28] 王雪梅,柴仲平,毛东雷,等. 库车县土壤微量元素空间变异特 征分析[J].西南农业学报,2015,28(4):1746-1751.
Wang X P, Chai Z P, Mao D L, et al. Analysis of spatial variability characteristics of soil trace elements in Kuqa County [J].
Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(4): 1746-1751. [29] 郭安廷,崔锦霞,许鑫,等. 基于 GIS 与地统计的土壤养分空间 变异研究[J].中国农学通报,2018,34(23):72-79.
Guo A T, Cui J X, Xu X, et al. Spatial distribution of soil nutrients based on GIS and geostatistics [J]. Chinese Agricultural Sci-

ence Bulletin, 2018, 34(23): 72-79. [30] 郭鹏,徐丽萍,常存. 北疆小尺度滴灌棉田土壤全氮半变异函数建模及空间变异特征[J]. 西北农业学报,2013,22(6):79-84

Guo P, Xu L P, Chang C. Semivariogram modeling and spatial variation of drip irrigation soil total nitrogen at small scale cotton field in North Xinjiang [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidental-is Sinica, 2013, 22(6): 79–84.

[31] 胡以铿. 地球化学中的多元分析[M]. 北京:中国地质大学出版社,1991.

Hu Y K. Multivariate analysis in geochemistry [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991.

- [32] 杨全合,安永龙. 基于地统计学和 GIS 的通州区于家务乡土壤 肥力综合评价[J]. 西南农业学报,2019,32(4):882-891.
 Yang Q H, An Y L. Comprehensive evaluation of soil fertility in Yujiawu Town of Tongzhou District using geostatistics and GIS
 [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32 (4): 882-891.
- [33] 安永龙,杜子图,黄勇.基于地统计学和 GIS 技术的北京市大
 兴区礼贤镇土壤养分空间变异性研究[J].现代地质,2018,32
 (6):1311-1321.

An Y L, Du Z T, Huang Y. Spatial variation analysis of soil nutrients in Lixian Town of Daxing District in Beijing based on geostatistics and GIS [J]. Geoscience, 2018, 32(6): 1311–1321.

[34] 李洪芬,胡光道,李江风. 基于地质统计学方法的土地利用空 间变异尺度分析[J]. 地理与地理信息科学,2008,24(5):6-10.

Li H F, Hu G D, Li J F. Grain analysis of land use spatial pattern based on geo-statistic method [J]. Geography and Geo-Information Science, 2008,24(5): 6-10.

- [35] 刘伟, 部允兵, 潘瑜春. 农田土壤重金属空间变异多尺度研究
 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23):357-361.
 Liu W, Gao Y B, Pan Y C. Multi-scale study on spatial variation of heavy metals in farmland soils [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(23): 357-361.
- [36] 杨之江,陈效民,景峰,等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养 分与重金属空间变异[J].应用生态学报,2018,29(6):1893-1901.

Yang Z J, Chen X M, Jing F, et al. Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and Geostatistics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1893 – 1901.

- [37] 张瑞,戴伟,庞欢,等.北京市北运河流域耕地土壤性质空间变 异性[J].生态学杂志,2014,33(12):3368-3373.
 Zhang R, Dai W, Pang H, et al. Spatial variations in soil properties of cropland in North Canal basin in Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12): 3368-3373.
- [38] 舒彦军,张立亭.求解半变异函数的常用方法与新方法研究 [J].测绘与空间地理信息,2012,35(5):24-27.

Shu Y J, Zhang L T. Study of the commonly used methods and new methods of solving semi-variogram [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(5): 24–27.

- [39] Pardo-Iguzquiza E, Chica-Olmo M. Geostatistics with the Matern semivariogram model: A library of computer programs for inference, kriging and simulation [J]. Computers and Geosciences, 2007, 34(9):1073-1079.
- [40] Obroślak R, Dorozhynskyy O. Selection of a semivariogram model in the study of spatial distribution of soil moisture [J]. Journal of Water and Land Development, 2017, 35(1):161-166.
- [41]谢团辉,郭京霞,陈炎辉,等.福建省某矿区周边土壤-农作物 重金属空间变异特征与健康风险评价[J].农业环境科学学报,2019,38(3):544-554.

Xie T H, Guo J X, Chen Y H, et al. Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining area in Fujian Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3): 544 – 554.

[42] 代杰瑞,庞绪贵,喻超,等.山东省东部地区土壤地球化学基准 值与背景值及元素富集特征研究[J].地球化学,2011,40(6): 577-587.

Dai J R, Pang X G, Yu C, et al. Geochemical baselines and background values and element enrichment characteristics in soils in eastern Shandong Province [J]. Geochimica, 2011, 40(6): 577-587.

- [43] 廖启林,刘聪,金洋,等. 江苏省域土壤元素地表富集及其与人为活动的关系研究[J]. 第四纪研究,2013,33(5):972-985.
 Liao Q L, Liu C, Jin Y, et al. Surface environmental enrichment of some elements and its relationship between anthropogenic activity and elemental distribution in soil in Jiangsu Province [J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(5): 972-985.
- [44] 张秀芝,鲍征宇,唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报,2006,25(1):65-72.
 Zhang X Z, Bao Z Y, Tang J H. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. Geological Science and Technology Information, 2006,25(1):65-72.
- [45] 侯青叶,杨忠芳,余涛,等.中国土壤地球化学参数[M].北京: 地质出版社,2020.
 Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical parameters in China [M]. Beijing; Geological Publishing House, 2020.
- [46] 陈志凡,赵烨,郭廷忠,等. 污灌条件下重金属在耕作土壤中的 积累与形态分布特征——以北京市通州区凤港减河污灌区农 用地为例[J]. 地理科学,2013,33(8):1014-1021.

Chen Z F, Zhao Y, Guo T Z, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and chemical fractions in arable soils: A case study about sewage-irrigated farmlands of the Fenggangjian River in Tongzhou District of Beijing, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(8): 1014 – 1021.

[47] 朱宇恩,赵烨,李强,等.北京市郊污灌区镉、铜在小麦中的富 集特征[J].安全与环境学报,2011,11(2):15-20. Zhu Y E, Zhao Y, Li Q, et al. Translocation and enrichment

characteristics of cadmium and copper in Triticum aestivum in sew-age-irrigated suburb area of Beijing $[\,J\,]$. Journal of Safety and En-

vironment, 2011, 11(2): 15-20.

- [48] 胡文,王海燕,查同刚,等.北京市凉水河污灌区土壤重金属累积和形态分析[J].生态环境,2008,17(4):1491-1497.
 Hu W, Wang HY, Zha TG, et al. Soil heavy metal accumulation and speciation in a sewage-irrigated areaalong the Liangshui River, Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008,17(4): 1491-1497.
- [49] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变 异及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(3):1432-1439.
 Li Y L, Lu Y F, Chen W P, et al. Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city [J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1432-1439.
- [50] 崔邢涛,秦振宇,栾文楼,等.河北省保定市平原区土壤重金属 污染及潜在生态危害评价[J].现代地质,2014,28(3):523-530.

Cui X T, Qin Z Y, Luan W L, et al. Assessment of the heavy metal pollution and the potential ecological hazard in soil of plain area of Baoding City of Hebei Province [J]. Geoscience, 2014, 28(3): 523-530.

- [51] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘,2014,21(3):265-306.
 Cheng H X, Li K, Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J].
 Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [52] 蔡阳阳,杨复沫,贺克斌,等.北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J].中国环境科学,2011,31(7):1071-1076.
 Cai Y Y, Yang F M, He K B, et al. Characteristics of water-soluble ions in dry deposition in urban Beijing [J]. China Environmental Science, 2011, 31(7): 1071-1076.
- [53] 倪琳,崔小峰,徐立家,等. 燃料煤重金属元素在飞灰及炉渣中的 分布与富集研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(5):203-208.
 Ni L, Cui X F, Xu L J, et al. Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 203-208.
- [54] 惠淑荣,徐棚,刘惠,等. 造纸废水灌溉对辽河口湿地土壤重金 属污染的评价研究[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(6):695 -702.

Hui S R, Xu P, Liu H, et al. Assessment of heavy metal pollution in Liaohe estuary wetland irrigated by papermaking wastewater [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(6): 695-702.

[55] 李丽锋,苏芳莉,关驰,等.造纸废水灌溉对湿地土壤重金属累积影响及趋势评价[J].环境科学学报,2015,35(9):2964-2970.

Li L F, Su F L, Guan C, et al. The effect of irrigation with papermaking wastewater on the accumulation of heavy metals and their fate assessment in wetland soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2964 – 2970.

[56] 李欢,黄勇,张沁瑞,等.北京平原区土壤地球化学特征及影响因素分析[J].物探与化探,2021,45(2):502-516.
Li H, Huang Y, Zhang Q R, et al. Soil geochemical characteristics and influencing factors in Beijing Plain [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 502-516.

Distribution of heavy metal elements in soil of the Southeastern suburbs of Beijing and their enrichment characteristics in surface soil

ZHANG Qin-Rui¹, LI Huan¹, DENG Yu-Fei², HUANG Yong¹, ZHANG Bo¹, XU Yi-bo³

(1. Beijing Institute of Geo-exploratin Technology, Beijing 100120, China; 2. China Chemical Geology and Mine Bureau Research Institude of Geological, Beijing 100101, China; 3. School of Public Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050062, China)

Abstract: By collecting and analyzing the heavy metal elements insurface $(0 \sim 20 \text{ cm})$ and deep $(160 \sim 200 \text{ cm})$ soil samples in southeastern suburbs of Beijing, the distribution characteristics of elements in soil in this area were ascertained. The spatial autonomy of heavy metal elements was explored by establishing a semivariogram model. The enrichment characteristics of elements in surface soil were discussed, as well as the correlation of the enrichment coefficient. On this basis of the research, the significant enrichment areas of heavy metal elements are divided, and the reasons for the enrichment are explained and analyzed in depth. The results show that The content levels of Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn in surface soil of the study area are significantly higher than those in the deep layer, with a gap of 1.2 to 3.9 times. Compared with soil's heavy metal content in Beijing and China, , the soils in the study area is relatively rich in Cd and Hg. As it was affected by many factors such as the source of soil-forming parent material and human activities, the spatial autocorrelation of As and Cr in surface soil is strong, and the spatial autocorrelation of Cr in the deep soil is weak. The spatial autocorrelation of other elements in the surface and deep layers is medium. As, Ni, and Cr in the surface soil are weakly enriched. But Cu, Pb, Zn, Cd, Hg are strongly enriched, and Hg is the most enriched. Based on the enrichment coefficient, five significant enrichment areas of heavy metal elements are delineated. The division of this area clearly reflects that human life, agricultural planting, and industrial production are important factors that cause the accumulation of heavy metal elements in surface soil. Therefore, it is necessary to pay close attention to the distribution of soil elements in human settlements, agricultural planting areas, and industrial enterprise distribution areas. The purpose is to prevent the deterioration of the soil environment and ensure the safety of the ecological environment. Key words: soil; heavy metal elements; spatial structure; distribution properties; enrichment characteristics

(本文编辑:蒋实)