

李 欢,张沁瑞,闫广新,等. 2005~2018 年北京平原区土壤汞时空特征及其影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(1): 93-103.  
LI Huan, ZHANG Qin-rui, YAN Guang-xin, et al. Tempo-spatial Characteristics of Soil Mercury in Beijing Plain, China from 2005 to 2018 and Their Influence Factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(1): 93-103.

DOI:10.19814/j.jese.2022.10045

## 2005~2018 年北京平原区土壤汞时空特征 及其影响因素

李 欢,张沁瑞\*,闫广新,黄 勇

(北京市生态地质研究所,北京 100120)

**摘 要:**为了解北京平原区土壤汞的分布特征及变化规律,采样测定了 2005、2015、2018 年的土壤汞含量,获取了 270 条实验测试数据。采用定量与定性分析相结合的方式,阐述了土壤汞的时间和空间变化特征,并对影响土壤汞时空特征的因素进行了探讨。结果表明:北京平原区土壤汞含量整体呈下降趋势,2005~2015 年由  $0.093 \times 10^{-6}$  下降至  $0.064 \times 10^{-6}$ ,到 2018 年下降至  $0.058 \times 10^{-6}$ ,逐渐接近甚至低于北京市土壤背景值;土壤汞的块基比为 28.2%~29.9%,空间自相关性中等,空间结构受结构性因素和随机性因素的共同影响,在空间分布上呈现出“城区含量高、郊区含量低”的特点;由于外界输入土壤内部的含汞物质大幅度降低(输入减少),以及土壤中的汞通过排放、转化、吸收等方式不断流失(输出持续),造成 2005~2018 年土壤汞含量不断下降;工业生产、人类生活、城市建设历史等人为源加剧了城区土壤汞的富集,反映了随机性因素的影响;水系流域、土壤质地等自然源造成土壤汞分布的局部性差异,反映了结构性因素的影响。

**关键词:**土壤汞;时空特征;重金属;正态性检验;半变异函数;影响因素;北京

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2023)01-0093-11

## Tempo-spatial Characteristics of Soil Mercury in Beijing Plain, China from 2005 to 2018 and Their Influence Factors

LI Huan, ZHANG Qin-rui\*, YAN Guang-xin, HUANG Yong

(Beijing Institute of Ecological Geology, Beijing 100120, China)

**Abstract:** In order to understand the distribution characteristics and variations of soil mercury in Beijing plain, the contents of soil mercury in 2005, 2015 and 2018 were sampled and measured, and 270 analytical data were obtained. A combination of quantitative and qualitative analysis was used to explore the tempo-spatial variation of soil mercury, and to analyze the influence factors affecting the tempo-spatial characteristics of soil mercury. The results show that the contents of soil mercury in Beijing plain decrease from  $0.093 \times 10^{-6}$  in 2005 to  $0.064 \times 10^{-6}$  in 2015, and to  $0.058 \times 10^{-6}$  in 2018, which is close to or even lower than the soil background value in Beijing; the block-base ratios of soil mercury are 28.2% — 29.9%, indicating that the spatial autocorrelation of soil mercury is moderate, and the spatial structure is affected by both

收稿日期:2022-10-23;修回日期:2022-12-18 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:北京市地质勘探基金项目(11000022T000000439575,11000022T000000491145)

作者简介:李 欢(1990-),男,黑龙江绥化人,工程师,E-mail:lihuan\_8@163.com。

\* 通讯作者:张沁瑞(1980-),男,山西长治人,高级工程师,E-mail:18601040279@163.com。

structural and random factors; the spatial distribution of soil mercury in Beijing plain is characterized by “high content in urban areas, and low content in suburbs”; the mercury-containing substances imported from the outside into the soil are greatly reduced (input reduces), and the mercury in the soil is continuously lost through discharge, transformation and absorption (output continues), resulting in the continuous decline of the contents of soil mercury from 2005 to 2018; industrial production, human life, urban construction history and other human factors can aggravate the enrichment of mercury in urban soil, reflecting the impact of random factors; natural factors such as drainage basin and soil texture cause local differences in the distribution of soil mercury, reflecting the impact of structural factors.

**Key words:** soil mercury; tempo-spatial characteristic; heavy metal; normality test; semi-variance; influence factor; Beijing

## 0 引言

汞作为毒性较大的重金属元素之一,其在地球表层的分布与迁移规律受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。土壤是生态系统的重要组成部分,城市土壤中的汞以硫化物形式为主,人体汞中毒会导致肌萎缩性脊髓侧索硬化症、老年痴呆症、帕金森症等疾病<sup>[4-5]</sup>。中国土壤汞的空间分布具有地区性差异,东南沿海地区土壤汞含量相对较高,而在中部和西北地区的含量相对较低<sup>[6]</sup>。已有研究成果显示,影响土壤汞含量的因素可分为自然因素和人为因素<sup>[7-10]</sup>。自然因素主要是岩石经风化作用后,残留于成土母质中的一部分汞,这也是土壤汞最基本的来源;人为因素是指工业废水排放、化石燃料燃烧、采矿、冶金等工矿业活动,以及农药喷洒、化肥施用、污水灌溉等农业活动,这也会在很大程度上影响土壤汞的分布。

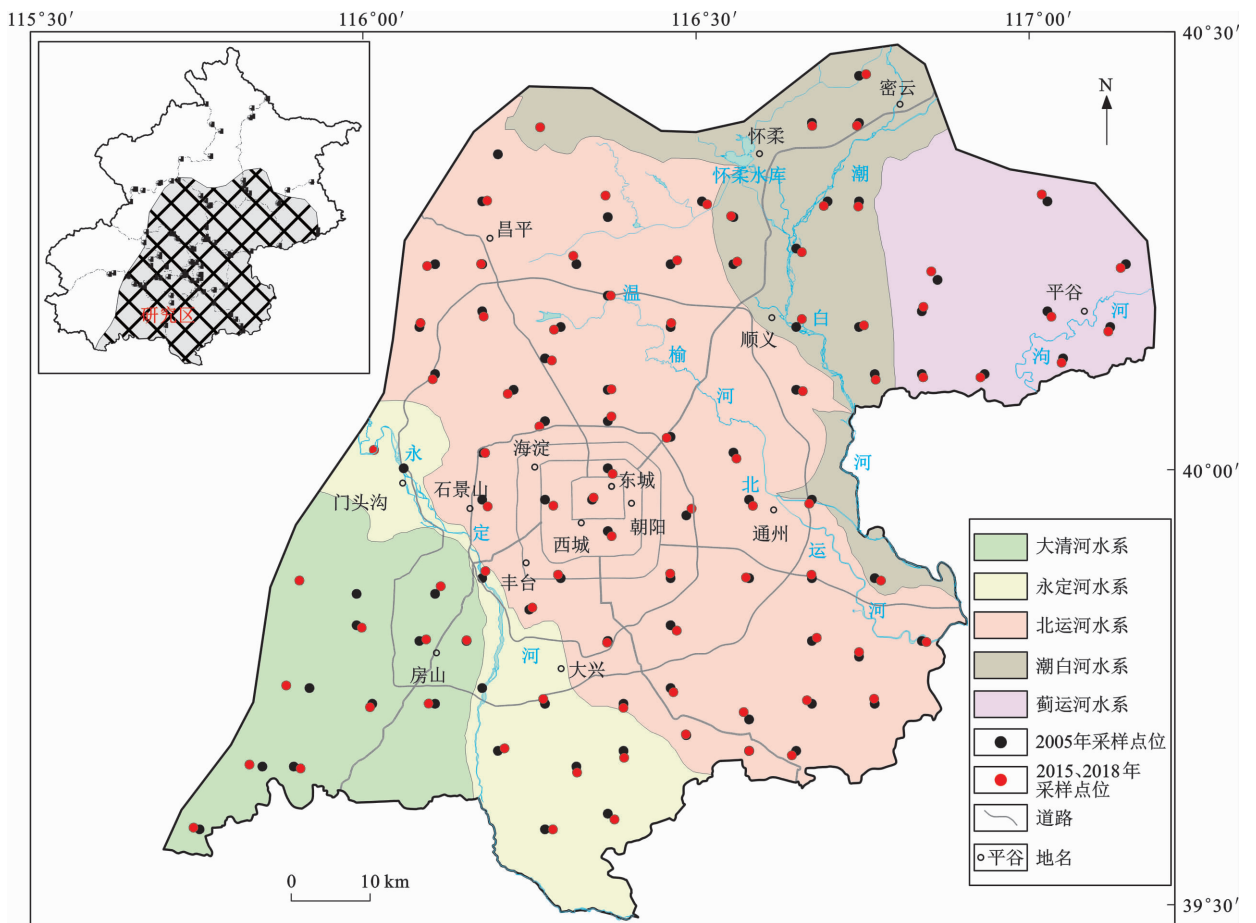
关于北京地区土壤汞分布特征、风险评价、来源解析等方面的研究较多。诸多学者从行政区划角度研究了土壤汞的分布特征,发现通州区土壤汞含量( $0.079 \times 10^{-6}$ )高于延庆区( $0.045 \times 10^{-6}$ )和怀柔区( $0.042 \times 10^{-6}$ )<sup>[11-13]</sup>;另外,不同土地利用方式的土壤汞含量也具有差异性,北京地区公园绿地土壤汞含量为  $1.42 \times 10^{-6}$ ,而菜地则为  $0.080 \times 10^{-6}$ <sup>[14-15]</sup>;李欢等在土壤地球化学特征的研究中发现,北京平原区土壤汞平均含量是全国背景值的 2.7 倍,属于典型的汞富集区<sup>[16]</sup>。目前针对北京地区土壤汞时空特征的研究成果相对较少,主要有黄勇等针对北京城区的研究结果<sup>[17]</sup>。黄勇等认为 1987~2011 年北京城区土壤汞含量由  $1.291 \times 10^{-6}$  下降至  $0.490 \times 10^{-6}$ ,这主要与能源消费结构的变化密切相关<sup>[17]</sup>。

2000 年以后,北京地区污染型工矿企业基本关停或迁出,重污染天气明显减少,城市空气环境质量

得到提升<sup>[18]</sup>。2001~2010 年,为改善京津冀地区的大气质量,实施了京津冀地区风沙源治理工程;2012~2017 年,为进一步改善北京地区生态环境质量,实施了百万亩平原造林工程,平原森林覆盖率由 14.85% 提升至 27.81%<sup>[19]</sup>;2018 年再次启动了新一轮百万亩造林工程。近 20 年来,北京地区在生态环境治理方面的举措众多,以往研究成果已无法反映出北京地区土壤汞的实际分布特征。基于此,本文根据 2005 年开展的 1:250 000 多目标区域地球化学调查以及 2015 和 2018 年开展的土壤监测工作,综合运用多种统计学方法,概述了北京平原区 2005、2015 和 2018 年土壤汞的分布特征和时空变化规律;从输入端和输出端两个角度分别阐述了影响土壤汞时间变化特征的因素,从人为源和自然源两个角度分别讨论了影响土壤汞空间变化特征的因素,以期能够为北京平原区的土地利用规划、生态环境保护、自然资源管理等提供科学依据。

## 1 研究区概况

北京市总面积为  $16\,410\text{ km}^2$ ,包括朝阳区、房山区、密云区等 16 个行政区。其中,东城区、西城区、朝阳区、海淀区、石景山区、丰台区等 6 个行政区为中心城区(以下简称“城区”),北京市的人口、建筑物主要集中在城区五环路以内的区域;其他行政区为郊区,人口、建筑物以行政区政府所在驻地最为密集,但密度明显低于城区。北京市的地势西北高东南低,基本构成西、北、东三面环山,东南低缓呈一平川的地形概貌;地表水系均属海河流域,主要包括大清河、永定河、潮白河、北运河和蓟运河五大水系;气候类型属于温带大陆性季风气候。研究区多位于北京平原区,仅北部和西部的少部分区域位于丘陵地带(图 1),面积约  $7\,000\text{ km}^2$ ,除延庆区之外,北京



左上角小图为北京市行政区划略图

图 1 北京平原区土壤汞采样点位分布

Fig. 1 Distribution of Soil Mercury Sampling Sites in Beijing Plain

市其他 15 个行政区均有涉及。研究区地处燕山山脉与华北平原的结合部位,被第四系广泛覆盖,总体上由永定河、潮白河、温榆河、拒马河等河流的冲洪积扇和马池口、后沙峪、平谷凹陷等沉积凹陷组成,其中以永定河和潮白河冲洪积扇为主。

## 2 样品采集与分析方法

### 2.1 样品采集

本文选取 2005、2015、2018 年采集的土壤样品各 90 件,具体位置分布见图 1。2015 年北京市开展了土壤监测工作,在平原区布设监测点 90 个,平均采样密度为 1 件/64 km<sup>2</sup>,每个监测点采集 1 件土壤样品;2018 年在同一点位再次对这 90 个监测点采集土壤样品,共获取土壤汞的测试数据 180 条。2005 年,北京市开展了平原区 1:250 000 多目标区域地球化学调查工作,表层土壤采样密度是 1 件/km<sup>2</sup>,本次研究选择了与土壤监测点距离最近的 2005 年采样点的土壤汞测试数据 90 条,用于 2005~2018 年土壤汞含量的变化情况对比研究。

采样时首先用铁锹刨采样坑,深度在 20 cm 左右,然后用竹铲取样,避免铁质器具对土壤样品的污染。将采集的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。

### 2.2 分析方法

样品分析参照《1:250 000 多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)<sup>[20]</sup>、《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)<sup>[21]</sup>等规范执行。2005 年土壤样品实验分析由福建省地质测试研究中心承担,2015 和 2018 年土壤样品实验分析由华北有色(三河)燕郊中心实验室有限公司(原华北有色地质勘查局燕郊中心实验室)承担,汞含量分析方法为原子荧光光谱法(AFS),检出限为 0.000 4×10<sup>-6</sup>,2005、2015、2018 年的分析报出率均为 100%。插入国家一级标准物质(GBW07301~

GBW07312、GBW07401~GBW07408)进行质量监控,精密度和准确度合格率均为 100%。

### 3 数据处理方法

#### 3.1 正态性检验

利用 Kolmogorov-Smirnov 法,在 95%置信区间下,对 2005、2015、2018 年土壤汞含量数据进行正态检验和对数正态检验。一般认为,当数据形态服从正态分布时,可用算术平均值代表平均值;当数据形态服从对数正态分布时,可用几何平均值代表平均值;当数据形态为其他分布类型时,可用中位值代表平均值<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 半变异函数

半变异函数是分析土壤元素空间结构特征的地质统计学方法之一<sup>[23-25]</sup>。理论半变异函数模型包括线性模型、指数模型、高斯模型、球状模型等,主要参数包括块金值( $C_0$ )、结构方差( $C$ )、基台值( $C_0+C$ )、变程(Range)等。块基比( $C_0/(C_0+C)$ )是反映变量空间结构特征的重要指标。当  $C_0/(C_0+C)<25\%$  时,表明变量的空间自相关性较强,空间结构主要受结构性因素影响;当  $25\%\leq C_0/(C_0+C)<75\%$  时,表明变量的空间自相关性中等,空间结构受结构性

因素和随机性因素的共同影响;当  $C_0/(C_0+C)\geq 75\%$  时,表明变量的空间自相关性较弱,空间结构主要受随机性因素影响。

### 4 结果分析

#### 4.1 参数统计特征

表 1 列出了北京平原区 2005、2015、2018 年土壤汞含量的算术平均值、几何平均值、中位值、标准离差等统计特征值。统计结果显示:2005 年土壤汞含量的最大值为最小值的 78 倍,变异系数为 152%;2015 年最大值为最小值的 2 292 倍,变异系数为 551%;2018 年最大值为最小值的 481 倍,变异系数为 391%。2005、2015、2018 年最大值与最小值的数值差别大,且变异系数均超过了 100%,说明研究区土壤汞的空间变异性强,分布极不均匀。

正态性检验结果(表 2)表明,2005、2015、2018 年土壤汞含量的 P 值(Sig.)均小于 0.05,说明汞含量数据既不服从正态分布,也不服从对数正态分布。因此,土壤汞的平均含量用中位值代表。2005 年土壤汞的平均含量为  $0.093\times 10^{-6}$ ,为海河流域的 2.66 倍、温带地区的 4.03 倍、全国的 2.07 倍;2015 年的平均含量为  $0.064\times 10^{-6}$ ,为海河流域的 1.83

表 1 土壤汞含量的统计特征值

Table 1 Statistical Characteristic Values of Soil Mercury

统计参数	算术平均值/ 10 <sup>-6</sup>	几何平均值/ 10 <sup>-6</sup>	中位值/ 10 <sup>-6</sup>	标准离差/ 10 <sup>-6</sup>	变异系数/ %	最小值/ 10 <sup>-6</sup>	最大值/ 10 <sup>-6</sup>	峰度	偏度
2005 年北京平原区	0.196	0.110	0.093	0.300	152	0.020	1.56	10.8	3.26
2015 年北京平原区	0.571	0.088	0.064	3.150	551	0.012	27.50	63.4	7.77
2018 年北京平原区	0.402	0.080	0.058	1.570	391	0.019	9.13	26.0	5.20
海河流域	0.052	0.038	0.035	0.141	270	0.001	14.70	4 249.0	51.60
温带地区	0.031	0.024	0.023	0.092	290	0.001	18.00	20 543.0	121.00
全国	0.076	0.048	0.045	0.466	610	0.001	177.00	63 701.0	208.00

注:2005、2015、2018 年的样本量均为 90 件;海河流域表层土壤(0~20 cm 深度段)样本量为 37 748 件;温带地区表层土壤(0~20 cm 深度段)样本量为 83 405 件;全国表层土壤(0~20 cm 深度段)样本量为 376 743 件;海河流域、温带地区及全国的数据引自文献<sup>[26]</sup>。

表 2 土壤汞含量数据的正态性检验结果

Table 2 Normality Test Results of Soil Mercury

检验方式	年份	Kolmogorov-Smirnov 法			Shapiro-Wilk 法		
		F 值	自由度	P 值	F 值	自由度	P 值
正态检验	2005 年	0.295	90	0.000	0.535	90	0.000
	2015 年	0.465	90	0.000	0.154	90	0.000
	2018 年	0.442	90	0.000	0.231	90	0.000
对数正态检验	2005 年	0.110	90	0.000	0.939	90	0.000
	2015 年	0.162	90	0.000	0.831	90	0.000
	2018 年	0.148	90	0.000	0.806	90	0.000

注:Kolmogorov-Smirnov 法采用 Lilliefors 显著性修正。

倍、温带地区的2.78倍、全国的1.42倍;2018年的平均含量为 $0.058\times 10^{-6}$ ,为海河流域的1.65倍、温带地区的2.52倍、全国的1.29倍(表1)。从流域、温度带、行政区划等角度的对比分析结果显示,北京平原区土壤汞含量明显高于海河流域、温带地区以及全国的平均值,呈现富集状态。

4.2 空间结构特征

表3为拟合的北京平原区土壤汞的最优半变异函数理论模型及相关参数,拟合模型的选择由判定系数( $R^2$ )和残差(RSS)共同决定。2005、2015、2018年的最优拟合模型均为高斯模型,判定系数为0.597~0.666,说明选用高斯模型进行拟合的精度

较高;2005年的残差为0.157,2015年的残差为0.533,2018年的残差为0.464。2005、2015、2018年的残差均小于1.0,说明拟合曲线的总体效果较好。

变程表示变量具有空间自相关性的范围。2005年北京平原区土壤汞含量的变程为28.8 km,2015年的变程为23.9 km,2018年的变程为23.4 km;2015和2018年的变程基本相同,但略小于2005年。2005、2015、2018年的块基比分别为28.2%、29.7%、29.9%,均介于25%~75%,说明北京平原区土壤汞的空间自相关性中等,空间结构受结构性因素和随机性因素的共同影响。

表 3 土壤汞的半变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Semi-variogram Theoretical Models of Soil Mercury and Related Parameters

年份	拟合模型	块金值	基台值	变程/km	判定系数	块基比	残差
2005 年	高斯模型	0.207	0.733	28.8	0.666	28.2%	0.157
2015 年	高斯模型	0.306	1.030	23.9	0.614	29.7%	0.533
2018 年	高斯模型	0.280	0.937	23.4	0.597	29.9%	0.464

4.3 时间变化特征

箱状图能够反映不同含量区间的数值变化情况。箱状图的上、下短横线分别表示9/10和1/10分位数,箱体上限和下限分别为3/4分位数和1/4分位数,箱体内部短线表示中位数的位置。北京平原区2005、2015、2018年土壤汞含量的十分位数值(9/10、1/10)、四分位数值(3/4、1/4)、中位值均呈现出了不同程度的下降趋势,特别是从2005年至2015年下降趋势更明显(图2)。

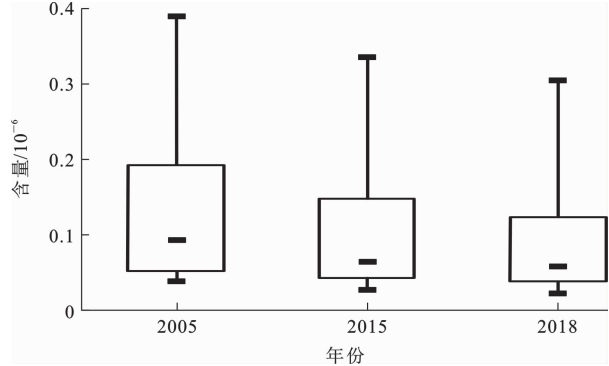


图 2 2005、2015、2018 年土壤汞含量箱状图

Fig. 2 Box Diagram of the Contents of Soil Mercury in 2005, 2015 and 2018

北京平原区2005年土壤汞的平均含量为 $0.093\times 10^{-6}$ ,2015年为 $0.064\times 10^{-6}$ ,2018年为 $0.058\times 10^{-6}$ 。由此可见,从2005年至2015年,土壤汞含量发生了明显变化,下降了31.2%;而从2015年至2018年下降幅度有所减少,为9.4%,并

逐渐接近甚至低于北京市土壤背景值( $0.066\times 10^{-6}$ )[26]。这说明经过这些年的生态环境治理,北京地区土壤汞平均含量已接近其本底值。

4.4 空间变化特征

北京平原区2005、2015、2018年土壤汞含量的空间分布特征基本一致(图3)。北京城区土壤汞含量普遍偏高,基本在 $0.400\times 10^{-6}$ 以上;而远郊区的含量普遍偏低,多低于 $0.148\times 10^{-6}$ 。北京平原区存在一个高值含量区、两个低值含量区。高值含量区集中分布在城区的五环路以内;低值含量区主要分布在东北部顺义区、密云区、平谷区一带,以及南部的大兴区、通州区一带。从总体情况来看,北京平原区土壤汞含量呈现出由城区向四周郊区同心圆状逐渐降低的趋势,城区土壤汞含量最高,近郊区次之,远郊区最低。

需要指明的是,北京市西北部 and 西南部土壤汞含量下降相对明显,这与西部山区(生态涵养区)的环境改善存在密切联系。北京市西部山区煤矿众多(均已关停或退出),含煤地层普遍富集汞。近年来,北京市加大了对生态涵养区的保护力度,陆续开展了矿山植被恢复工程,通过植树造林加强山区生态建设。这些措施有利于固定土壤中的重金属,从而导致由山区向平原区迁移的汞也在减少。北京市西北部 and 西南部作为山区与平原区的交界地带,土壤特征受山区环境改变的影响最为显著,因此,该区域土壤汞含量下降幅度较大。



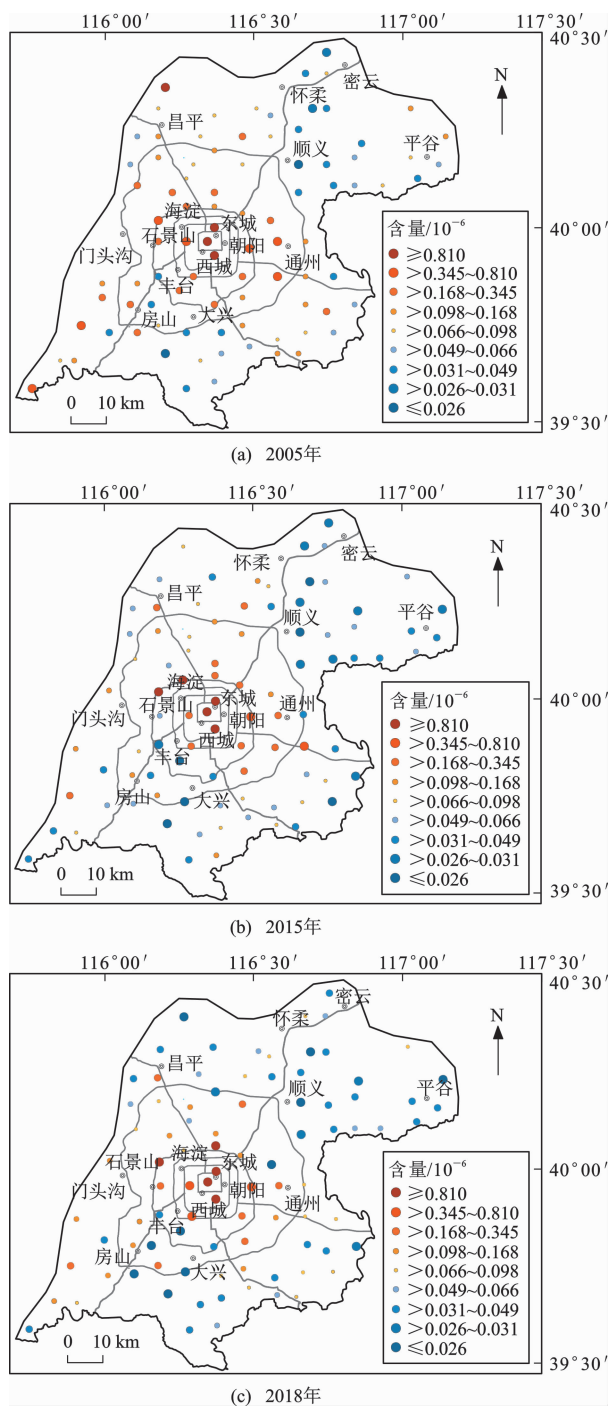


图3 土壤汞含量的空间分布

Fig. 3 Spatial Distributions of the Contents of Soil Mercury

5 讨 论

5.1 时间变化特征的影响因素

随着时间推移,土壤汞含量会发生一定程度的变化。在区域尺度上,可以从输入端和输出端两个角度分析影响其含量变化的因素。在输入端方面,需要判断从外界环境进入土壤内部的含汞物质的多少。大气干湿沉降、施肥、灌溉水等从输入端方面影

响土壤汞的含量<sup>[27-28]</sup>,其中大气干湿沉降的输入通量起主导作用,明显高于施肥和灌溉水,因此,在输入端讨论时重点分析大气干湿沉降对土壤汞含量的影响。在输出端方面,需要讨论从土壤向外界环境释放含汞物质的多少。如与元素自身性质有关的汞气循环、横向和纵向迁移等主动输出,以及植物根系对元素的吸收等被动输出,均能够导致土壤汞含量的降低。

5.1.1 输入端

城市土壤中的汞主要来源于化石燃料的燃烧,其中以燃煤产生的汞最多。由北京市统计年鉴数据可知,近年来北京市污染型能源占能源消耗总量的比重呈明显下降趋势,而清洁型能源占能源消耗总量的比重呈明显上升趋势。2010~2018年,北京市煤炭占能源消费总量的比重从29.60%下降至2.77%,而天然气的比重则从14.60%上升到34.17%(图4)。据北京市生态环境统计,2006年烟(粉)尘排放量为 $7.97\times10^4$  t,2018年为 $1.53\times10^4$  t,下降了80.7%<sup>[29-30]</sup>。

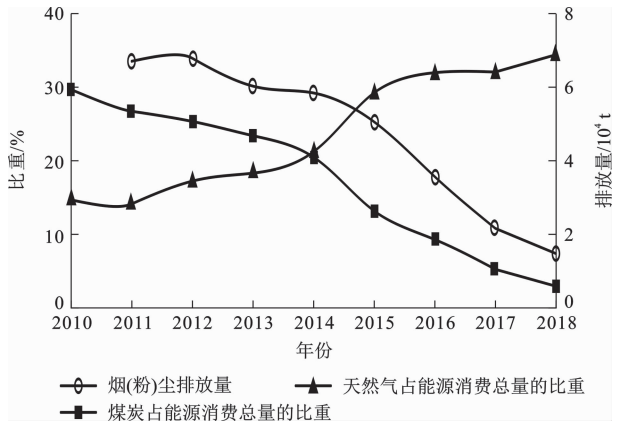


图4 2010~2018年北京市煤炭、天然气占能源消费总量比重及烟(粉)尘排放量变化

Fig. 4 Changes in the Proportion of Coal and Natural Gas in Total Energy Consumption and Smoke (Dust) Emissions in Beijing from 2010 to 2018

煤炭中普遍含汞,燃煤汞排放是大气汞的最主要人为排放源。汞具有很高的挥发性,在煤的燃烧过程中,其单质和化合物会在高温下汽化后进入烟气,随着烟气冷却,进而凝结或被吸附在飞灰表面,从而导致飞灰中汞的富集。飞灰中汞占煤中汞总量的23.1%~26.9%;燃煤炉口处空气中的汞含量为 $20.4\sim4\,584.0\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,平均值为 $824\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,明显高于周边环境空气中的汞含量( $5\sim13\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ),这也说明燃煤能够向空气中释放大量的汞<sup>[31]</sup>。飞灰经排放后进入大气,在合适条件下又以

沉降方式进入表层土壤,从而造成了土壤汞含量的升高。丛源等分别研究了北京平原区大气干湿沉降的汞年沉降通量<sup>[32-33]</sup>,其中 2005 年的年沉降通量为  $0.024 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ ,2018 年则下降至  $0.004 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ ,仅为 2005 年的 1/6。

### 5.1.2 输出端

土壤中的汞主要以向大气中排放、植被吸收、土壤内部迁移等 3 种方式不断流失。其中,最主要的流失方式是向大气中排放。零价汞( $\text{Hg}^0$ )以被水分子取代、蒸发等方式,通过土壤孔隙扩散到大气中,并以气态形式参与全球汞的生物地球化学循环。另外,因汞具有一定的生物活性,也会被植物根系所吸收,进而在植被内部发生运移,造成土壤汞含量的减少<sup>[34]</sup>。土壤汞还具有一定的迁移能力,从土壤汞迁移的运动方向来看,可分为横向迁移和纵向迁移。汞在土壤中进行横向迁移的速度要快于纵向迁移。

土壤汞含量、大气汞含量、光照强度、降雨量、土壤温湿度等因素与土壤汞的释放有着密切相关性,其中土壤汞含量起着决定性作用,是最本质的因素。谭清友等研究表明,土壤汞的释放量与土壤汞含量成显著的对数正相关关系<sup>[35]</sup>。北京平原区 2005 年土壤汞的平均含量为海河流域土壤汞含量( $0.035 \times 10^{-6}$ )的 2.66 倍、温带地区( $0.023 \times 10^{-6}$ )的 4.03 倍、全国( $0.045 \times 10^{-6}$ )的 2.07 倍,2018 年土壤汞的平均含量分别为海河流域的 1.65 倍、温带地区的 2.52 倍、全国的 1.29 倍,这说明北京平原区土壤汞含量相对较高;通过土壤汞含量与释放量成正相关关系推断,土壤中的汞向大气的释放量也相对较高。谭清友等研究表明,土壤中人为源的汞通常为颗粒态及活性气态汞,这两种形态的汞稳定性差、活性较强,较易还原成零价汞,进而通过土壤孔隙释放到大气中<sup>[35]</sup>。位于北京平原区的超大城市,人为活动频繁,工业化程度高,土壤中人为源的汞占比相对较高,可间接推断土壤汞的释放量也相对较高。

近年来,北京市能源结构由污染型向清洁型进行大幅度转变,烟(粉)尘排放量显著降低,这说明由外界环境输入土壤的汞减少。另外,土壤中的零价汞会通过土壤孔隙扩散到大气中。由于北京平原区土壤汞含量相对较高且人为源的汞占比相对较高,可推断土壤汞释放量较大。除此之外,土壤汞也会发生横向和纵向迁移,以及植物根系会吸收土壤汞等,这些因素均会导致土壤汞的流失。总体来看,北京平原区 2005 年土壤汞平均含量为  $0.093 \times 10^{-6}$ ,2015 年为  $0.064 \times 10^{-6}$ ,2018 年为  $0.058 \times 10^{-6}$ ,说

明北京平原区土壤汞含量逐年降低。这是由于由外界环境进入土壤的汞输入量减少,而土壤汞的输出行为在持续进行,从而造成了土壤中汞含量持续降低。

## 5.2 空间变化特征的影响因素

空间结构分析结果表明,北京平原区土壤汞的分布除受结构性因素影响外,也受到人类活动等随机性因素影响。工业生产、人类生活、城市建设历史等作为随机性因素,属于人为源影响;水系流域、土壤质地等作为结构性因素,属于自然源影响。本文选择上述因素来探讨随机性因素和结构性因素对土壤汞空间分布特征的影响。结构性因素和随机性因素既是造成北京城区土壤汞含量高、郊区土壤汞含量低的总体趋势特征的重要因素,也会影响到局部地区土壤汞的分布。

### 5.2.1 人为源

人为源主要包括工业生产、人类生活、城市建设历史等。对于工业生产,从 20 世纪 50 年代起,北京城区及周边区域建立了一系列工厂大院,逐步形成了以“西郊冶金和机械重工业区、东北郊电子工业区、东郊机械区和化工区”为主的工业格局<sup>[36]</sup>;到 21 世纪初期,这些工业企业相继搬出北京。位于西郊冶金和机械重工业区的首钢地区土壤汞平均含量为  $0.104 \times 10^{-6}$ <sup>[37]</sup>,东郊机械区和化工区的焦化厂地区土壤汞平均含量为  $0.316 \times 10^{-6}$ <sup>[38]</sup>,五环路以内的土壤汞平均含量为  $0.398 \times 10^{-6}$ <sup>[39]</sup>,均明显高于北京市土壤背景值。有关研究结果表明,城区的汞平均沉降量为郊区的 1.6 倍,从城区至郊区形成了明显的大气沉降量梯度<sup>[40]</sup>。在北京市长达五六十年工业生产历史中,燃煤和冶金向外界环境释放的大量含汞物质,在合适条件下通过大气干湿沉降方式进入表层土壤,因土壤中的黏土矿物和有机物的吸附作用,绝大部分会迅速被土壤吸持或固定,从而造成北京城区土壤汞含量高、郊区土壤汞含量低的分布特征。

对于人类生活,随着城市化进程的加剧,城镇人口在不断增多。2018 年,北京市城镇人口为 1 900 万人,其中 61.7% 集中居住在城区。人类生活产生的温度计、电池、废弃电子产品等固体废物垃圾均含有一定量的汞,造成人口相对集中的城区土壤汞含量高于郊区。北京地区道路网发达,城区路网密度远远大于郊区,车流量明显高于郊区。道路灰尘中的重金属元素大部分来源于交通运输及其排放的废气、汽车轮胎及其他部件磨损等,北京道路灰尘

中富集了大量的重金属元素,其中汞含量为 $(0.200\sim0.300)\times10^{-6}$ ,且城市灰尘中的汞含量要高于郊区<sup>[41]</sup>。此外,现阶段的取暖方式多以清洁能源为主,但北京地区也存在很长时间的燃煤取暖历史<sup>[42]</sup>。民用取暖烟囱一般高 $3\sim4$  m,而汞属于较重的元素,汞随烟尘颗粒物漂移的距离较近,多数沉降在烟囱附近的土壤中。因此,人口密度越大的区域,土壤汞含量也越高。

对于城市建设历史,由于北京城区采样点多位于公园内,而北京又是具有上千年建城史的古都,这类公园历史悠久、古建筑物多,如地坛公园、天坛公园、北海公园等,粉刷古建筑物多使用的是含辰砂的涂料。土壤汞含量高也可能与古建筑物上的汞挥发以及外皮脱落存在一定关系。

5.2.2 自然源

自然源包括水系流域、土壤质地等。对于水系流域,北京地区五大水系中,北运河水系上游为温榆河,下游为北运河,水系范围几乎涵盖了北京城区,多数土壤元素的分布特征明显受到了人类活动的干扰,因此,土壤汞的含量明显高于其他水系。大清河和永定河水系位于北京西部、西南部,水系上游地层岩性主要为中上元古界蓟县系雾迷山组、青白口系下马岭组,下古生界寒武系馒头组和张夏组、奥陶系冶里组和亮甲山组的碳酸盐岩、碎屑岩以及黏土岩,中上元古界地层分区范围内水系沉积物中汞含量为 $0.032\times10^{-6}$ ,下古生界地层分区范围内水系沉积物中汞含量为 $0.049\times10^{-6}$ 。潮白河水系位于北京北部,水系上游地层岩性主要为太古界的英云闪长片麻岩,太古界地层分区范围内水系沉积物中汞含量为 $0.030\times10^{-6}$ ,其含量低于大清河和永定河水系<sup>[33]</sup>。水系下游土壤的元素分布在很大程度上受控于上游物源区的元素组成,因此,大清河和永定河水系土壤汞含量要高于潮白河水系。

土壤质地是影响元素空间分布的重要自然因素之一,土壤质地特征与土壤元素分布密切相关。一般情况下,土壤黏性越大,对元素的吸附性越强,元素含量越高;相反,土壤砂性越大,对元素的吸附性越弱,元素含量越低。不同土壤质地的汞含量从大到小分别为黏土、壤土和砂壤土<sup>[43]</sup>。受潮白河、永定河冲洪积作用的影响,密云区南部、顺义区中东部、大兴区南部等区域普遍以砂壤土为主,因此,上述区域土壤中的汞平均含量明显偏低。

5.2.3 小 结

总体来看,工业生产、人类生活、城市建设历史

等人为源均会造成北京城区土壤汞含量相对高于郊区;水系流域、土壤质地等自然源则会造成土壤汞空间分布的局部性差异,大清河和永定河水系的土壤汞含量高于潮白河水系,砂性土壤分布区的汞含量一般低于黏性土壤分布区。

6 结 语

(1)北京平原区 2005、2015、2018 年土壤汞平均含量分别为 $0.093\times10^{-6}$ 、 $0.064\times10^{-6}$ 、 $0.058\times10^{-6}$ 。土壤汞含量整体呈下降趋势,其中 2005~2015 年下降幅度为 31.2%,2015~2018 年下降幅度为 9.4%。北京城区土壤汞含量基本大于 $0.400\times10^{-6}$ ,远郊区土壤汞含量多数低于 $0.148\times10^{-6}$ ,空间分布上呈现出由城区向四周郊区同心圆状逐渐降低的趋势。

(2)随着时间推移,土壤汞含量下降是外部输入量减少和内部输出行为持续进行共同作用的结果。一方面,能源结构调整使得通过大气干湿沉降方式进入土壤中的汞明显减少;另一方面,土壤中的汞通过向大气中排放、土壤内部迁移、植被吸收等方式不断流失。这也间接揭示了生态环境改善对降解土壤重金属的有利作用。

(3)工业生产、人类生活、城市建设历史等人为源会造成北京城区土壤汞含量相对高于郊区,水系流域、土壤质地等自然源则会造成土壤汞空间分布的局部性差异。

参 考 文 献 :

References :

[ 1 ] 董丽君,张展华,张 彤. 土壤环境汞污染现状及其影响因素研究进展[J]. 地球与环境,2022,50(3):397-414.  
DONG Li-jun, ZHANG Zhan-hua, ZHANG Tong. Mercury Pollution in Soil Environment: Current Status and Its Influencing Factors[J]. Earth and Environment, 2022, 50(3): 397-414.

[ 2 ] 李洪奎,李逸凡. 山东日照地区土壤重金属环境质量评价[J]. 地球科学与环境学报,2018,40(4):473-486.  
LI Hong-kui, LI Yi-fan. Environmental Quality Evaluation of Soil Heavy Metals in Rizhao Area of Shandong, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(4): 473-486.

[ 3 ] FORNASARO S, MORELLI G, RIMONDI V, et al. Mercury Distribution Around the Siele Hg Mine (Mt. Amiata District, Italy) Twenty Years After Rec-



- lination; Spatial and Temporal Variability in Soil, Stream Sediments, and Air[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 232: 375-6742.
- [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 Guang-hua, YUE Chang-sheng, PENG Ben, 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] 魏 赢, 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 Ying, LIU Yang-sheng. Remediation on Mercury Polluted Farmland Soil by Chemical Stabilization[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3): 1878-1884.
- [6] 张召阳. 我国表层土壤中汞和硒的分布特征及形成机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
ZHANG Zhao-yang. Distribution Characteristics and Formation Mechanism of Mercury and Selenium in Topsoil of China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [7] 成杭新, 庄广民, 赵传冬, 等. 北京市土壤 Hg 污染的区域生态地球化学评价[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 126-145.  
CHENG Hang-xin, ZHUANG Guang-min, ZHAO Chuan-dong, et al. Regional Eco-geochemical Assessment of Mercury in Soils in Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 126-145.
- [8] 高令健, 毛 康, 张 伟, 等. 贵州万山汞矿区稻田土壤汞的分布及污染特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(1): 148-154.  
GAO Ling-jian, MAO Kang, ZHANG Wei, et al. Temporal and Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Mercury in Paddy Soils of the Wanshan Mercury Mining Area, Guizhou Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(1): 148-154.
- [9] 张 琦, 郭庆军, 陶正华. 长江流域汞的生物地球化学研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1861-1873.  
ZHANG Qi, GUO Qing-jun, TAO Zheng-hua. Advances in Biogeochemistry of Mercury in the Yangtze River Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1861-1873.
- [10] ACQUAVITA A, BRANDOLIN D, CATTARUZZA C, et al. Mercury Distribution and Speciation in Historically Contaminated Soils of the Isonzo River Plain (NE Italy)[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(1): 79-92.
- [11] 黄 勇, 段续川, 袁国礼, 等. 北京市延庆区土壤重金属元素地球化学特征及其来源分析[J]. *现代地质*, 2022, 36(2): 634-644.  
HUANG Yong, DUAN Xu-chuan, YUAN Guo-li, et al. Geochemistry and Source Identification of Heavy Metals in the Top and Subsoil of Yanqing District in Beijing[J]. *Geoscience*, 2022, 36(2): 634-644.
- [12] 李 苹, 黄 勇, 林 赞, 等. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评估[J]. *现代地质*, 2018, 32(1): 86-94.  
LI Ping, HUANG Yong, LIN Yun, et al. Distribution, Source Identification and Risk Assessment of Heavy Metals in Topsoil of Huairou District in Beijing[J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 86-94.
- [13] 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.  
ZHANG Qin-rui, LI Huan, DENG Yu-fei, 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.
- [14] 索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 179-186.  
SUO Lin-na, LIU Bao-cun, ZHAO Tong-ke, et al. Evaluation and Analysis of Heavy Metals in Vegetable Field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 179-186.
- [15] 杨少斌, 于 鑫, 孙向阳, 等. 北京城区绿地土壤重金属污染评价与空间分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 933-941.  
YANG Shao-bin, YU Xin, SUN Xiang-yang, et al. Pollution Assessment and Spatial Structure Analysis of Heavy Metals of Greenbelt Soil in Beijing Urban Area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 933-941.
- [16] 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 Huan, HUANG Yong, ZHANG Qin-rui, et al. Soil Geochemical Characteristics and Influencing Factors in Beijing Plain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2): 502-516.
- [17] 黄 勇, 杨忠芳, 冯 辉, 等. 北京城区 24 年来土壤 Hg 元素时空变异特征[J]. *现代地质*, 2014, 28(5): 935-941.

- HUANG Yong, YANG Zhong-fang, FENG Hui, et al. Characteristics of Spatio-temporal Variability of Soil Mercury in Beijing Urban for 24 Years[J]. *Geoscience*, 2014, 28(5): 935-941.
- [18] 党 莹, 张小玲, 饶晓琴, 等. 北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3622-3632.
- DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, et al. Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3622-3632.
- [19] 杨文杰, 赵信如, 巩前文. 北京“百万亩造林”对浅山区生物多样性的影响评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(4): 83-93.
- YANG Wen-jie, ZHAO Xin-ru, GONG Qian-wen. Biodiversity Impact Assessment of “One Million Mu Afforestation” in the Shallow Mountain Area of Beijing[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(4): 83-93.
- [20] DZ/T 0258—2014, 多目标区域地球化学调查规范(1: 250 000)[S].
- DZ/T 0258—2014, Specification of Multi-purpose Regional Geochemical Survey(1: 250 000)[S].
- [21] 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 Evaluation Samples[S].
- [22] 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 Hang-xin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical Background and Baseline Value of Chemical Elements in Urban Soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3): 265-306.
- [23] 黎恒明, 杨苗苗. 汉江中游典型小流域土壤有效锌空间变异特征及评价[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(5): 700-707.
- LI Heng-ming, YANG Miao-miao. Spatial Variation Characteristics and Evaluation of Soil Available Zinc in a Typical Small Watershed of the Middle Hanjiang River[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(5): 700-707.
- [24] 倪碧珩, 陆 胤, 施维林. 土壤重金属元素含量的预测方法仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(5): 234-237.
- NI Bi-heng, LU Yin, SHI Wei-lin. Simulation Study on Prediction Method of Soil Heavy Metal Content[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(5): 234-237.
- [25] 张皓月, 刘文波, 张绪教, 等. 河套平原地下水中砷的空间变异特征及影响因素分析[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(1): 192-199.
- ZHANG Hao-yue, LIU Wen-bo, ZHANG Xu-jiao, et al. Analysis of Spatial Variability and Influencing Factors of Arsenic in Groundwater of Hetao Plain, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(1): 192-199.
- [26] 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 Qing-ye, YANG Zhong-fang, YU Tao, et al. Soil Geochemical Parameters in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [27] 杨忠芳, 侯青叶, 余 涛, 等. 农田生态系统区域生态地球化学评价的示范研究: 以成都经济区土壤 Cd 为例[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 23-35.
- YANG Zhong-fang, HOU Qing-ye, YU Tao, et al. An Example of Eco-geochemical Assessment for Agroecosystems: A Study of Cd in Chengdu Economic Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 23-35.
- [28] WANG Z J, WANG L, ZHANG G, et al. Characteristics of Mercury Pollution and Ecological Risk Assessment in Different Degraded Grasslands of the Songnen Plains, Northeastern China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(19): 1050-2071.
- [29] 北京市统计局. 北京统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Beijing Municipal Bureau Statistics. Beijing Statistical Yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [30] 北京市生态环境局. 北京市 2017 年环境统计年报[R]. 北京: 北京市生态环境局, 2017.
- Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Beijing Municipal Environmental Statistics Annual Report 2017[R]. Beijing: Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau, 2017.
- [31] 李 珊, 李 洋, 梁汉东, 等. 北京城郊燃煤汞排放及其对当地空气环境的影响[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1420-1425.
- LI Shan, LI Yang, LIANG Han-dong, et al. Atmospheric Mercury Emissions from Domestic Coal and Impacts on Local Environment of Suburban Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1420-1425.
- [32] 丛 源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. *地质通报*, 2008, 27(2): 257-264.
- CONG Yuan, CHEN Yue-long, YANG Zhong-fang, et al. Dry and Wet Atmospheric Deposition Fluxes of

- Elements in the Plain Area of Beijing Municipality, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 257-264.
- [33] 黄勇,李欢,孙朝,等.北京市土壤地质环境监测网建设成果报告[R].北京:北京市生态地质研究所,2018.
- HUANG Yong, LI Huan, SUN Zhao, et al. Report on the Construction of Soil Geological Environment Monitoring Network in Beijing[R]. Beijing: Beijing Institute of Ecological Geology, 2018.
- [34] 曾晓舵,王向琴,涂新红,等.农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J].生态环境学报, 2019, 28(9): 1900-1906.
- ZENG Xiao-duo, WANG Xiang-qin, TU Xin-hong, et al. Research Progress on Speciation and Physiological Control of Heavy Metal in Soil-plant System[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9): 1900-1906.
- [35] 谭清友,付学吾,何天容.我国自然源汞排放研究进展[J].生态学报, 2017, 36(3): 833-845.
- TAN Qing-you, FU Xue-wu, HE Tian-rong. Mercury Emission from Natural Sources in China: A Critical Review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 833-845.
- [36] 李天魁,刘毅,王超然,等.基于离散选择模型的北京市工业疏解环境影响[J].清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1163-1169.
- LI Tian-kui, LIU Yi, WANG Chao-ran, et al. Environmental Impact of Beijing's Industrial Decentralization Based on a Discrete Choice Modeling Approach[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(11): 1163-1169.
- [37] 韩鹏.北京市首钢地区土壤重金属分布及土壤质量评价[D].北京:中国地质大学, 2012.
- HAN Peng. The Distribution of Heavy Metals and Assessment of Soil Quality in Capital Steel Factory in Beijing, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [38] 孙天河.北京东南郊化工区土壤中重金属元素的环境地球化学研究[D].北京:中国地质大学, 2013.
- SUN Tian-he. The Study of Heavy Metals in the Soil of South-eastern Suburb Chemical Industry Zone in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [39] 安永龙,黄勇,刘清俊,等.北京城区表层土壤多元素分布特征及重金属元素污染评价[J].地质通报, 2016, 35(12): 2111-2120.
- AN Yong-long, HUANG Yong, LIU Qing-jun, et al. The Distribution of Surface Soil Elements and the Pollution Assessment of Heavy Metal Elements in Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(12): 2111-2120.
- [40] 王京文,谢国雄,章明奎.大气沉降对萝卜地上和地下部分铅镉汞砷积累的影响[J].土壤通报, 2018, 49(1): 184-190.
- WANG Jing-wen, XIE Guo-xiong, ZHANG Ming-kui. Effects of Atmospheric Deposition on the Accumulation of Lead, Cadmium, Mercury and Arsenic in Aboveground and Underground Parts of Radish[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1): 184-190.
- [41] 于向楠,李飞扬,符耿雪,等.北京市道路尘中重金属时空分布特征及污染程度评价[J].现代地质, 2019, 33(1): 169-175.
- YU Xiang-nan, LI Fei-yang, FU Geng-xue, et al. The Spatial-temporal Distribution Characteristics and Contamination Assessments of Heavy Metals in the Road Dusts of Beijing[J]. Geoscience, 2019, 33(1): 169-175.
- [42] 刘俊华,王文华,彭安.北京市二个主要工业区汞污染及其来源的初步研究[J].环境科学学报, 1998, 18(3): 109-114.
- LIU Jun-hua, WANG Wen-hua, PENG An. Pollution and Sources of Hg in Top Soil in Two District of Beijing City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(3): 109-114.
- [43] 熊定国,廖激.四川省环境中的汞[J].四川环境, 1994, 13(1): 46-49.
- XIONG Ding-guo, LIAO Ji. Mercury in the Environment of Sichuan Province[J]. Sichuan Environment, 1994, 13(1): 46-49.