

北京市平原区土壤 类金属砷质量分数分布特征研究^①

王朋朋¹, 孔晨晨², 聂超甲², 杨雪玲³, 张世文², 黄元仿⁴

1. 滨州医学院, 山东 烟台 264003; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001;
3. 浙江大学 环境与资源学院, 杭州 310000; 4. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 基于变异函数理论、经典统计分析、地统计分析以及单因子污染评价方法, 以北京市平原区农用地为研究对象, 针对不同功能分区、种植模式和母质类型, 设置不同土壤深度(0~25 cm, 25~50 cm), 对土壤中类金属 As 的质量分数、水平和垂直分布特征及影响因素进行分析。结果表明: 整体上, 0~25 cm, 25~50 cm 土层 As 块基比值均小于 50%, 结构性因素占主导, 随着土壤深度增加, 随机性因素减少; 不同深度土壤 As 质量分数水平空间分布变化趋势基本一致, 平谷区 As 质量分数均值最高, 其污染指数达 1.54。不同功能区土壤 As 质量分数差异性无统计学意义($p < 0.05$)。种植模式对 0~25 cm 土壤类金属 As 质量分数影响有统计学意义($p < 0.05$), 对 25~50 cm As 质量分数的影响极有统计学意义($p < 0.01$), 果园土壤 As 质量分数存在累积现象; 不同母质类型对 0~25 cm, 25~50 cm 土壤类金属 As 的影响有统计学意义($p < 0.05$), 钙质岩类风化物母质下的不同土壤深度 As 质量分数均最高。

关键词: 农田土壤; 类金属砷; 空间分布; 变异函数; 污染评价; 北京平原区

中图分类号: X825; X53

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)05-0131-09

土壤是农产品质量安全的重要保障。近年来, 一系列由土壤污染所引起的农产品安全问题屡见不鲜, 如“镉大米”“有毒蔬菜”等事件引发了社会各界人士的广泛关注, 直接对人们生活健康以及社会稳定产生了恶劣影响^[1-5], 因此区域土壤环境质量尤其是农业用地利用的安全问题受到越来越多的重视。

北京作为传统和现代化相结合的大都市, 社会经济和城市建设均在快速发展, 为了加大对农业用地的集约利用强度^[6], 同时为了满足人们的物质生活需求, 应限制农药、化肥、地膜等的较大规模施用, 以减轻污水灌溉、大气沉降造成的污染^[7-15]。本文以土壤砷元素作为研究对象, 土壤中砷元素的理化性质、赋存形态、迁移转化及其他环境行为特征与重金属有很多相似之处, 因此被称为“准金属”, 并与其他 4 种重金属镉、铬、汞、铅组成“五毒”元素。土壤中砷元素平均质量分数为 6 mg/kg, 其主要积累于土壤表层, 存在形态以 As^{3+} , As^{5+} 两种价态为主, 但能被植物强烈吸收, 是土壤中重要的污染物之一, 在土壤环境中主要以硫化物的形式存在。土壤中类金属砷的来源分为两类, 一类是岩石、成土母质、矿床等自然因素使得土壤中 As 元素累积, 另一类则是来源于人类活动, 如工业燃煤、烟气排放、化工冶炼、电子行业等污染物排放以及含砷农业化肥、农药大量使用等^[16-20]。目前国内外已有大量学者进行土壤重金属污染研究, 如对北京市不同功能区^[21]、不同土地类型^[22-23]空间分布上^[24-26]的重金属污染特征及评价方法分析^[27], 王浩等^[28]对砷污染土壤加入复合稳定剂进行稳定效果评价并认为铁钙复配稳定土壤砷元素效果较好; 陈同斌等^[29]经过对土壤大量调查和系统研究于 2004 年提出了土壤重金属元素环境背景值。目前对土壤重金属的

① 收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471186, 41571217); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)。

作者简介: 王朋朋(1986-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事土壤质量评价和大学生思想政治教育研究。

通信作者: 张世文, 副教授, 硕士研究生导师。

垂直分布特征的研究较少, 本文以北京市平原区农业用地作为研究对象, 采样检测各区县土壤砷质量分数及基础理化性质, 运用插值分析、变异函数理论、污染评价及方差分析等方法, 探究土壤砷的空间分布特征及影响因素, 为后期研究分析北京平原区重金属砷的污染状况以及污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市地势总体呈西北高, 东南低, 地势垂直高差大, 最高点与最低点的相对高差达 2 295 m. 根据北京市数字高程模型, 选取高程小于 100 m 的区域, 并结合实际农业用地情况, 以北京市中部及东南部的平原地区作为研究区, 统计面积约有 7 686 km². 研究区共 10 个区县, 从南向北依次包括都市生活区的海淀区、丰台区, 农业保障区的大兴区、房山区、顺义区、通州区, 水源保护区的昌平区、怀柔区、平谷区和密云县. 按种植模式划分为菜地、果园和粮田 3 种, 母质类型以冲积物、洪冲积物为主, 此外还有钙质岩类风化物、红黄土性物质、洪积物和黄土物质共 6 种.

1.2 样品采集与分析

为揭示北京平原农业用地土壤类金属 As 的空间分布特征, 本研究布点范围覆盖北京平原区各区县, 选择菜地、果园和耕地 3 种植模式共 94 个采样点并设置不同土壤深度(0~25 cm, 25~50 cm)进行采样. 布点过程中遵循全面、客观、可行性原则, 采用先网格后随机的方法, 同时将不同区县、功能分区、土壤类型、种植模式、母质类型等可能影响土壤重金属质量分数的因素均考虑在内进行布点, 后将现场调查及预采样相结合, 为布点方式作适当验证, 从而保证布点的代表性与科学性. 采样时间选于 2015 年 6 月, 采样原则选择中心点及相邻两角采样, 并将同一深度土样混合作为代表该点的样品, 记录采样点基本信息, 如土质、土壤类型、种植模式和功能分区属性等. 土样检测方法选择 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱法, 分析过程所用试剂均为优级纯. 采样点分布位置如图 1 所示.

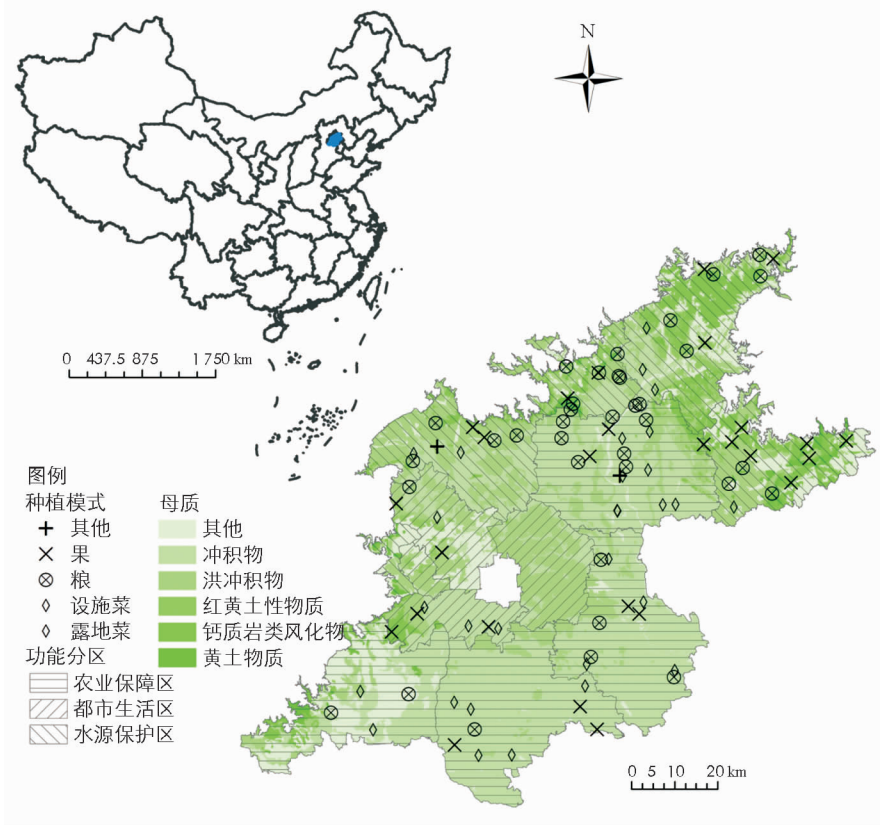


图 1 北京市平原区采样点位置分布图

1.3 研究方法

1.3.1 变异函数

区域化变量在某方向上距离 h 增量的方差, 称为区域化变量在该方向上的变异函数. 变异函数描述研究区域对象的非均质性, 能反应区域变量的结构特征. 其计算公式如下:

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

式中: $N(h)$ 为采样点对数, $Z(x_i)$ 指在 x_i 位置土壤某一属性的测定值, $\gamma(h)$ 表示样点距离为 h 时观测值 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 的变异函数. 本文在研究砷空间变化时采用了指数模型和高斯模型, 指数模型计算公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1(1 - e^{-\frac{h}{a}}) & h > 0 \\ 0 & h = 0 \end{cases} \quad (2)$$

高斯模型计算公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1(1 - e^{-(\frac{h}{a})^2}) & h > 0 \\ 0 & h = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_0 表示块金值, 是因测量误差或小于采样间隔距离处而产生的空间变化; C_1 值为偏基台值, 又称结构方差, 反应了空间结构性. $C = C_0 + C_1$ 为基台值, 指变异函数模型在变程处所获得的 y 轴上的值. 模型首次呈现水平状态的距离称为变程, 指数模型中主变程 $A = 3a$, 高斯模型中主变程 $A = \sqrt{3}a$.

1.3.2 经验贝叶斯克里格法

土壤中某些重金属质量分数在空间分布上具有很大的变异程度, 传统的线性克里格插值方法具有一定的平滑效应, 不能完全反映出重金属的空间实际变化阈值. 而经验贝叶斯克里格法考虑了半变异函数的不确定性, 通过模拟多个半变异函数来说明半变异函数估计的不确定性, 可准确预测一般程度上不稳定的数据.

1.3.3 单因子污染评价法

指对土壤中单个因子的污染程度进行评价, 采用单因子污染指数法对土壤砷污染强度进行评价, 计算公式:

$$P_i = C_i/S_i \quad (4)$$

式中: P_i 为某一污染因子的污染指数值; C_i 为该污染因子的实际测定值; S_i 为该污染因子环境背景值. 依据国家土壤环境质量标准, 本研究将 $P_i \leq 0.7$ 的土样定义为清洁无污染; $0.7 < P_i \leq 1$ 为尚清洁水平(警戒限), $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i > 3$ 为重度污染;

采用 SPSS 20.0 对本研究数据进行描述性统计分析、方差分析, 并结合 ArcGIS 10.2 地统计分析工具对样点数据进行处理分析.

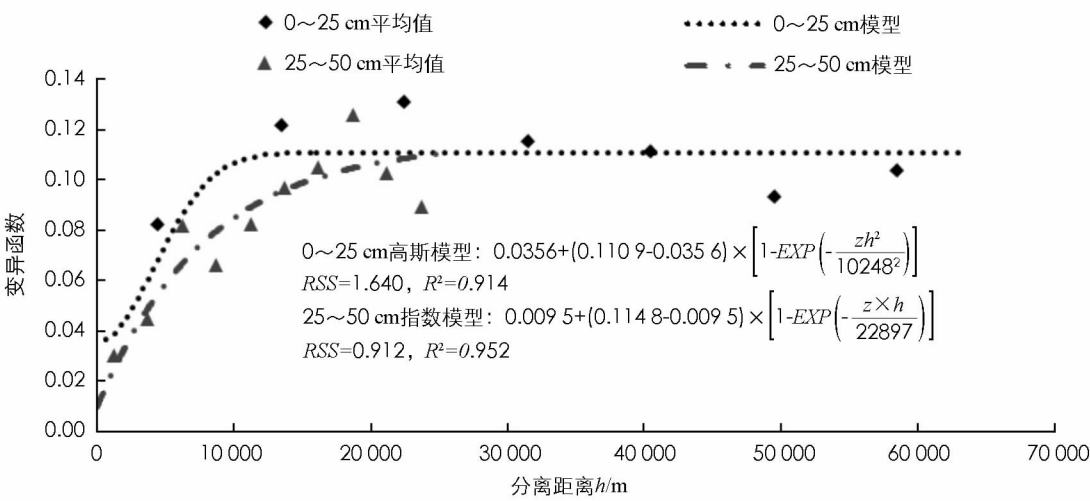
2 结果与分析

2.1 基于变异函数土壤类金属砷的空间相关性特征描述

运用 ArcGIS 统计分析工具研究不同尺度下的变异函数, 对各项参数进行调整, 结合考虑残差和和拟合相关系数, 保证残差和最小, 拟合相关系数最大, 拟合出最优变异函数模型.

变异函数是研究区域对象非均质性描述的一种手段, 其反应了区域变量的结构特性. 块基比 $C_0/(C_0 + C_1)$ 可用来衡量某一变量的空间相关性, 它表示由于随机因素产生的空间变化在空间总变异中所占的比例, 块基比值越小, 则表示空间相关性越强; 块基比值 $< 25\%$ 时表明该变量具有强烈空间相关性, 当值在 $25\% \sim 75\%$ 之间表示变量具有中等空间相关性, 当块基比值介于 $75\% \sim 100\%$, 则属弱空间相关性^[30]. 图 2 显示, $0 \sim 25$ cm 深度土壤 As 符合具有块金效应的高斯模型, $25 \sim 50$ cm 深度土壤 As 符合具有块金效应的指数模型. $0 \sim 25$ cm, $25 \sim 50$ cm 变异函数拟合残差和 RSS 分别为 1.640, 0.912, 拟合相关系数 R^2 分别为 0.914, 0.952, 表明随着土壤深度增加, 变异函数拟合效果越好; $0 \sim 25$ cm 土壤类金属 As 的块基比值为

32.1%，介于 25%~75%之间，属于中等空间变异，25~50 cm 土壤类金属 As 的块基比值为 8.3%，小于 25%，具有强烈的空间相关性，两者块基比值均小于 50%，说明其结构因素占主导。且随着土壤深度增加，随机因素引起的变异成分逐渐减少，即结构性控制增强。土壤 As 变异函数变程随土壤深度增加而显著增加，分别为 10.25 km(0~25 cm),23.89 km(25~50 cm)，25~50 cm 空间最大相关距离是表层 0~25 cm 的 2.33 倍。0~25 cm 土壤 As 变异函数平均值点分布较分散，而 25~50 cm 其平均值点较于稳定，变异函数拟合程度较好。



注：RSS 指残差和， R^2 表示拟合相关系数， h 为分离距离；
图 2 不同深度土壤砷变异函数及其参数

2.2 土壤类金属砷统计分析及单因子污染评价

2.2.1 基于 ArcGIS 土壤类金属砷空间分布格局

运用 ArcGIS 软件中经验贝叶斯克里格法对 94 个样点数据进行插值处理，得出图 3。

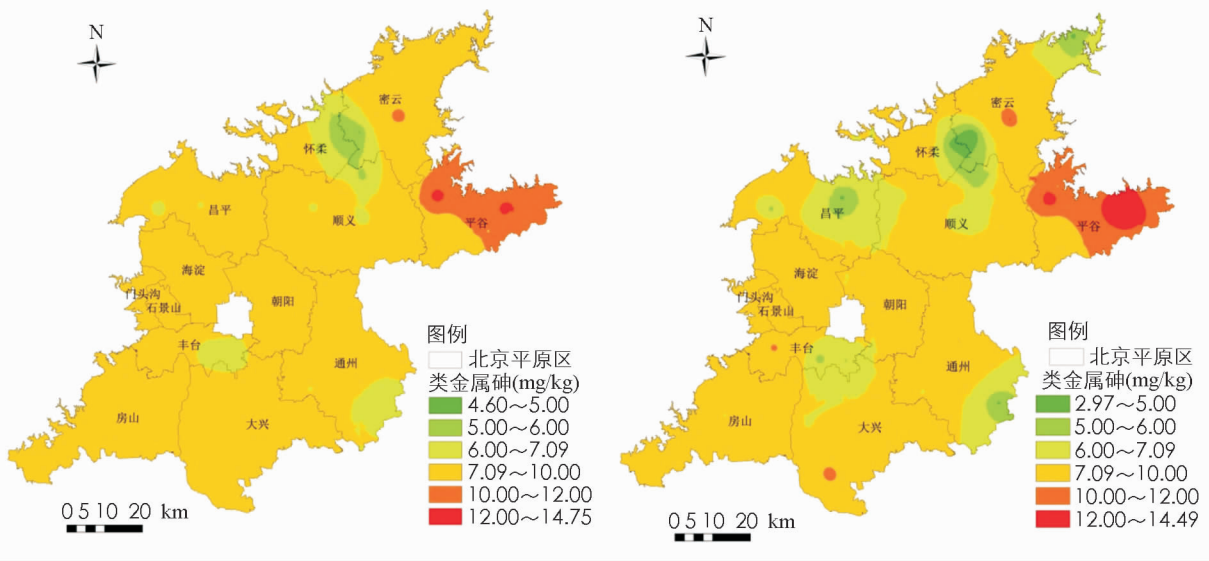


图 3 不同土壤深度砷质量分数空间分布

由图 3 可知，从整体来看北京市平原区 0~25 cm,25~50 cm 不同深度土壤 As 质量分数预测范围分别在 4.60~14.75 mg/kg,2.97~14.49 mg/kg 之间，值变化范围大，反映 As 质量分数预测值在各区县之间差异较大。不同深度土壤 As 质量分数水平空间分布变化趋势基本一致：0~25 cm,25~50 cm 土壤 As 质量分数均以平谷区最高，预测值范围在 7.09~14.75 mg/kg 之间，而昌平区、通州的东南部和密云、怀柔及顺义的交界处以及丰台和大兴交界处土壤 As 质量分数均较低，预测值范围主要在 2.97~7.09 mg/kg，

其他区域土壤 As 质量分数居于中等水平, 在 7.09~10.00 mg/kg 之间, 大于土壤环境背景值. 平谷区土壤 As 质量分数较高的原因可能与该研究区产业结构有关. 平谷区经济发展仍以工业为主, 由工业生产生活带来含 As 的三废以及交通运输排放的尾气等通过大气干湿沉降进入到土壤中, 使得土壤中 As 质量分数增加, 出现该区域 As 质量分数累积现象

2.2.2 土壤类金属砷描述统计及单因子污染评价

基于 SPSS 20.0 工具对研究区各区县不同深度(0~25 cm, 25~50 cm)土壤类金属砷质量分数进行描述性统计分析及单因子污染评价, 得出表 1.

表 1 北京市各采样区土壤类金属砷质量分数描述统计及单因子污染评价

地区	0~25 cm				25~50 cm			
	均值/(mg·kg ⁻¹)	变异系数	富集率/%	$\overline{P_i}$	均值/(mg·kg ⁻¹)	变异系数	富集率/%	$\overline{P_i}$
昌平	7.192±1.588	0.221	5.3	1.01	6.449±1.605	0.249	2.1	0.91
大兴	8.341±1.531	0.184	7.4	1.18	8.558±1.503	0.176	8.5	1.21
房山	8.555±2.311	0.270	3.2	1.21	8.305±1.398	0.168	3.2	1.17
丰台	7.027±1.814	0.258	3.2	0.99	7.527±2.458	0.327	4.3	1.06
海淀	8.988±1.221	0.136	4.3	1.27	9.043±1.100	0.122	4.3	1.28
怀柔	6.931±2.608	0.376	5.3	0.98	7.270±2.023	0.278	6.4	1.03
密云	7.379±3.332	0.452	6.4	1.04	6.908±2.887	0.418	5.3	0.97
平谷	10.926±3.716	0.340	12.8	1.54	10.693±2.470	0.231	12.8	1.51
顺义	7.251±1.877	0.259	10.6	1.02	7.337±1.391	0.190	9.6	1.03
通州	7.427±1.684	0.227	6.4	1.05	7.690±1.860	0.242	7.4	1.08

注: 北京市土壤 As 环境背景值参考 2004 年陈同斌、郑袁明、陈煌等人计算的北京市土壤环境背景值, 值为 7.09 mg/kg, 富集率是各区县超标样点数与总样点数(94 个)的比值.

由表 1 可知: 从整个研究区看, 0~25 cm 土壤与 25~50 cm 土壤中 As 质量分数均值介于 6.449~10.926 mg/kg 之间, 不同土壤深度类金属 As 质量分数在研究区水平空间分布上具有趋势一致性. 北京中北部和西南部的密云、平谷、昌平、房山区 0~25 cm 土壤类金属 As 质量分数均值稍大于 25~50 cm 土壤砷质量分数, 研究区中部和东南部的怀柔、顺义、通州、海淀、丰台和大兴区 0~25 cm 土壤中 As 质量分数均值稍小于 25~50 cm. 密云县不同土壤深度变异系数均最大, 说明该研究区土壤类金属 As 分布的不均匀性和不稳定变化. 对于 0~25 cm 土壤, 除怀柔区外, 研究区各区县土壤类金属 As 质量分数均值均大于土壤环境背景值, 变异系数差异较大, 大兴区、海淀区变异系数分别为 0.184, 0.316, 小于 0.20, 变异程度较低; 其他区县变异系数均在 0.20~0.50 之间, 属于中等程度变异, 其中密云县变异系数最高达 0.452, 怀柔区次之为 0.376, 由此可见 0~25 cm 土壤中 As 质量分数空间分布较稳定. 平谷区土壤 As 质量分数均值最高为 10.926±3.716 mg/kg, 变异系数较大为 0.340; 海淀区类金属 As 质量分数均值次高为 8.988±1.221 mg/kg, 变异系数最小为 0.136. 对于 25~50 cm 土壤, 各区县 As 质量分数均值在 6.449~10.693 mg/kg, 昌平区、密云县土壤 As 质量分数均值分别为 6.449±1.605 mg/kg, 6.908±2.887 mg/kg, 小于土壤环境背景值(7.09 mg/kg), 其他区县土壤 As 质量分数平均值均大于土壤环境背景值.

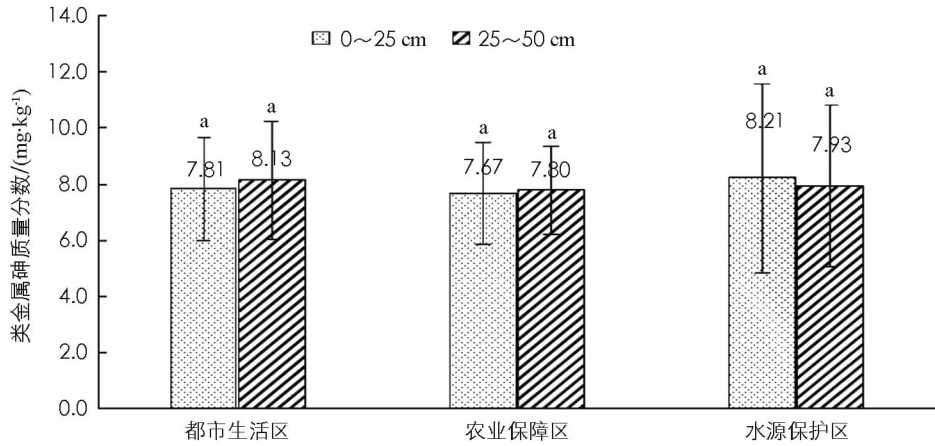
0~25 cm 土壤类金属 As 单因子污染指数 P_i 在不同区域的值存在差异. 丰台区、海淀区土壤 As 污染指数 P_i 均值分别为 0.99, 0.98(介于 0.7~1.0 之间), 属尚清洁水平(警戒线). 平谷区单项污染指数 P_i 均值为 1.54, 是所有采样区的最大值, 说明该研究区存在轻度~中度污染. 顺义区单项污染指数相对较小, 为 1.02; 海淀区、房山区 P_i 均值分别为 1.26, 1.21. 其他区县 P_i 均值介于 1.01~1.18 之间, 属轻微污染. 25~50 cm 土壤除昌平区、密云县砷单因子污染指数 P_i 均值小于 1.0 外, 其他区县 P_i 均值介于 1.0~2.0 之间, 且整体变化与 0~25 cm 土壤各研究区砷质量分数变化一致.

2.3 土壤类金属砷影响因素分析

2.3.1 不同功能区土壤类金属砷质量分数分析

北京市平原区产业定位有农业保障区、水源保护区、都市生活区 3 类. 根据北京市数字土壤系统, 本研究将平谷区和密云县、昌平区、怀柔区研究区划归到水源保护区(样本数 $n_1=44$), 大兴区、房山区、通州

区、顺义区的研究区划归为农业保障区($n_2=40$), 海淀区和丰台区的研究区划归到都市生活区($n_3=10$). 运用 SPSS 20.0 对各功能区的不同深度土壤类金属 As 质量分数进行统计分析并绘制成图, 从而探究北京各功能区对土壤类金属 As 质量分数的影响.



注: 同一土壤深度相同小写字母表示不同功能区土壤中差异性没有统计学意义($p<0.05$).

图 4 不同功能区土壤砷质量分数平均值

由柱状图可知, 不同功能区 0~25 cm 土壤类金属 As 质量分数均值从大到小顺序依次为: 水源保护区、都市生活区、农业保障区; 25~50 cm 土壤 As 质量分数均值从大到小顺序为: 都市生活区、水源保护区、农业保障区. 3 种功能区 As 质量分数均超过土壤环境背景值(7.09 mg/kg), 存在一定的累积现象. 0~25 cm 土壤水源保护区的 As 质量分数最高, 为 8.21 mg/kg, 分别是都市生活区、农业保障区的 105.1%, 107.0%, 水源保护因受外界人类活动的干扰较少, 其 As 质量分数高的原因可能与其土壤本身的质地、机械组成、矿物组成以及理化特性等有关; 都市生活区不同深度土壤 As 质量分数均值为 7.81 mg/kg(0~25 cm, 值次高), 8.13 mg/kg(25~50 cm, 值最高), 其 As 质量分数较高的原因可能与该功能区内交通尾气排放、工厂三废排污等有关; 农业保障区不同深度土壤 As 质量分数均最低, 分别为 7.67 ± 1.81 mg/kg(0~25 cm), 7.80 ± 1.57 mg/kg(25~50 cm), 变异系数均较小, 说明该功能区下土壤类金属 As 累积风险较小. 不同功能区对类金属 As 的影响无统计学意义($p>0.05$).

2.3.2 不同种植模式下土壤类金属砷质量分数分析

种植模式会直接影响对农作物的管理措施, 如培肥方式、灌溉措施、化肥农药等物质施用种类和用量等, 从而也会对土壤本身理化性质和功能产生不同影响. 本研究选择粮田、菜地、果园 3 种植植模式, 并分别设置 36, 31, 27 个采样点采集土样进行检测并对获得数据的均值、标准差、单因素方差分析并进行比较(表 2).

表 2 北京市不同种植模式土壤砷质量分数的统计分析

种植模式	0~25 cm/(mg · kg ⁻¹)			25~50 cm/(mg · kg ⁻¹)		
	样本数	均值	95%的置信区间	样本数	均值(mg/kg)	95%的置信区间
果园	27	9.16±3.05 a	7.95—10.37	27	9.21±2.37 a	8.28—10.15
粮田	36	7.58±2.52 b	6.72—8.43	36	7.33±2.18 b	6.59—8.07
菜地	31	7.29±2.10 b	6.52—8.06	31	7.40±1.93 b	6.69—8.11
F 值		4.44 *			7.06 * *	
P 值		0.01			0.00	

注: 单因素方差分析多重比较采用 LSD(最小显著差数法), 处理之间有不同字母表示同一列的不同种植模式土壤中的差异性有统计学意义($p<0.05$).

从表 2 可知, 经多重比较分析(LSD), 种植模式对 0~25 cm 土壤类金属 As 质量分数影响有统计学意义($p<0.05$), 对 25~50 cm 砷质量分数影响极有统计学意义($p<0.01$), 且果园、粮田和菜地的土壤 As 质量分数差异有统计学意义. 0~25 cm 土壤中类金属 As 质量分数从大到小顺序为: 果园、粮田、菜地, 果

园土壤 As 质量分数均值最高达 9.16 ± 3.05 mg/kg, 是相应土壤环境背景值(7.09 mg/kg)的 1.29 倍, 明显高于其他两种种植模式, 是粮田和菜地中土壤 As 质量分数的 1.21, 1.26 倍, 存在一定的 As 累积现象, 这可能与该研究区的灌溉措施、肥料施用等有关; 粮田 0~25 cm 土壤 As 质量分数均值为 7.58 ± 2.52 mg/kg, 稍高于菜地土壤中 As 质量分数. 25~50 cm 土壤中类金属 As 质量分数从大到小顺序为: 果园、菜地、粮田; 粮田 25~50 cm 土壤类金属 As 质量分数均值最小为 7.33 ± 2.18 mg/kg, 变异系数为 0.298, 属中等程度变异.

2.3.3 不同母质类型下土壤类金属砷质量分数分析

相比于其他重金属元素, 土壤类金属 As 元素质量分数具有一定的均匀稳定性, 这与区域的成土母质具有密切的关系. 成土母质是土壤形成的物质基础, 其对土壤的机械组成、矿物组成、化学组成和特征都起着关键作用^[29]. 本研究区土壤母质类型以冲积物、洪冲积物为主, 样点数分别占总样点数的 51.1%, 23.4%, 并结合北京平原区域土壤环境背景特点分析了不同母质类型土壤类金属 As 质量分数变化情况, 进行统计分析得出图 5.

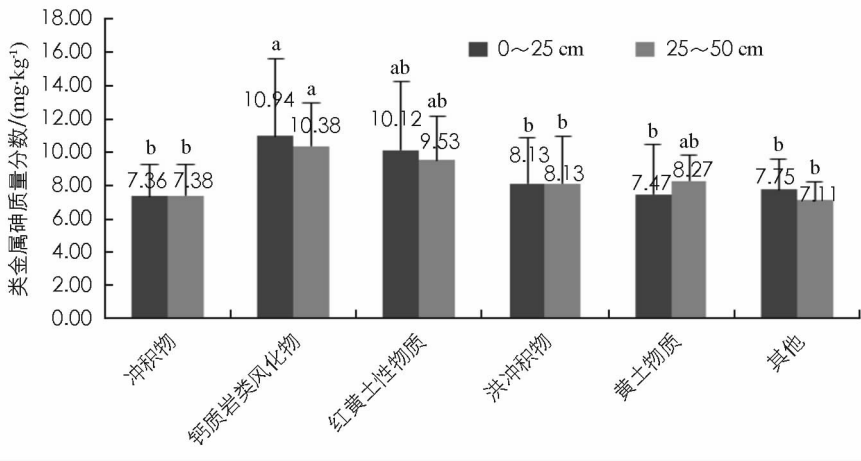


图 5 不同母质类型砷质量分数均值统计

图 5 反映了不同母质类型下土壤类金属 As 质量分数均值比较情况, 从图中看出钙质岩类风化物母质下的不同土壤深度 As 质量分数在上述母质类型中均最高, 分别为 10.94 ± 4.66 mg/kg(0~25cm), 10.38 ± 2.54 mg/kg(25~50 cm), 分别是北京土壤 As 环境背景值的 1.54, 1.46 倍, 存在较大的 As 累计风险; 红黄土性物质土壤 As 均值次高, 分别为 10.12 mg/kg(0~25 cm), 9.53 mg/kg(25~50 cm); 冲积物、黄土物质土壤 0~25 cm 深度类金属 As 均值分别居于最低和次低, 值为 7.36 ± 1.89 mg/kg, 7.47 ± 3.02 mg/kg, 这可能与土壤质地含沙成分较大, 土壤中一些物质较易随土壤水系迁移和淋溶, 因此 As 质量分数较低. 方差分析表明, 不同母质类型对 0~25 cm, 25~50 cm 土壤类金属 As 影响均有统计学意义($p < 0.05$); 0~25 cm 土壤钙质岩类风化物、红黄土性物质和黄土物质 As 标准差明显大于 25~50 cm 土壤 As 标准差, 且变异程度较高, 说明这 3 种母质类型受到外界因素扰动(尤其人类活动)的干扰较大而造成类金属 As 质量分数的不均匀性变化较大. 经多重比较分析(LSD), 钙质岩类风化物土壤与其他母质类型在土壤 As 质量分数差异有统计学意义($p < 0.05$).

3 结 论

1) 0~25 cm, 25~50 cm 土层 As 块基比值均小于 50%, 结构性因素占主导, 随着土壤深度增加, 随机因素引起的变异成分逐渐减少, 结构性控制增强. 土壤 As 变异函数变程随土壤深度增加显著增加, 可见 0~25 cm 土层受外界因素干扰性较大, 随机性增强. 25~50 cm 土壤 As 变异函数拟合程度好.

2) 0~25 cm, 25~50 cm 土壤 As 质量分数空间分布趋势基本一致, 均以平谷区质量分数最高; 昌平、通州的东南部, 密云、怀柔 and 顺义的交界处以及丰台和大兴交界处土壤 As 质量分数均较低; 研究区整体土壤 As 质量分数大于北京市土壤 As 环境背景值, 存在富集现象, 而北京东南郊是我国污水灌溉历史较长的

灌区, 污水灌溉所导致土壤中 As 的累积应予以重视。

3) 不同功能区土壤 As 质量分数差异无统计学意义($p>0.05$), 农业保障区不同土壤深度 As 累积风险较小; 种植模式对 0~25 cm 土壤 As 质量分数的影响有统计学意义($p<0.05$), 对 25~50 cm As 质量分数影响极有统计学意义($p<0.01$), 其中果园与粮田、菜地在土壤 As 质量分数上差异有统计学意义; 不同母质类型对不同土壤深度 As 影响有统计学意义($p<0.05$), 钙质岩类风化物下的 As 质量分数在不同母质类型中最高, 且与其他母质类型土壤 As 质量分数差异有统计学意义($p<0.05$)。

参考文献:

- [1] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 223—230.
- [2] ZHANG X, BOL R, RAHN C, et al. Agricultural Sustainable Intensification Improved Nitrogen use Efficiency and Maintained High Crop Yield During 1980—2014 in Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2017(596/597): 61—68.
- [3] 崔红标, 范玉超, 周 静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群落结构的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 197—205.
- [4] 吴耀楣. 中国土壤重金属污染修复技术的专利文献计量分析 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 901—904.
- [5] 樊 霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727—1736.
- [6] 霍霄妮, 李 红, 张微微, 等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 223—229.
- [7] WANG X H. Spatio-Temporal Changes in Agrochemical Inputs and the Risk Assessment Before and After the Grain-for-Green Policy in China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1927—1937.
- [8] 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.
- [9] 王学军, 邓宝山, 张泽浦. 北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征 [J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 412—416.
- [10] HE Z L, YANG X E, STOFFELLA P J. The Trace Elements in Agroecosystems and Impacts on the Environment [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 19(2/3): 125—140.
- [11] 梁国玲, 黄冠星, 孙继朝, 等. 珠江三角洲污灌区土壤中重金属含量特征 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2307—2312.
- [12] MIAO Y, STEWART B A, ZHANG F. Long-Term Experiments for Sustainable Nutrient Management in China. A Review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(2): 397—414.
- [13] 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.
- [14] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区农业生态系统土壤镉通量研究 [J]. 地质通报, 2007, 26(7): 869—877.
- [15] 丁真真. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 19—20.
- [16] LIAO X Y, LI Y, YAN X L. Removal of Heavy Metals and Arsenic from a Co-Contaminated Soil by Sieving Combined with Washing Process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 41(3): 202—210.
- [17] 湛天丽, 黄 阳, 滕 应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析 [J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 474—480.
- [18] MAHAR A, WANG P, LI R H, et al. Immobilization of Lead and Cadmium in Contaminated Soil Using Amendments: A Review [J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 555—568.
- [19] 张 磊, 宋凤斌, 王晓波. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策 [J]. 生态环境, 2004, 13(2): 258—260.
- [20] AMRO M M. Factors Affecting Chemical Remediation of Oil Contaminated Water-Wetted Soil [J]. Chemical Engineering and Technology, 2004, 27(8): 890—894.
- [21] 田 媛, 郭希娟, 刘效兰. 北京市不同功能区土壤重金属污染探究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 83—86.
- [22] 张天蛟, 刘 刚, 王圣伟. 基于 GIS/RS 的不同土地利用类型重金属面源污染比较 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 124—132.
- [23] 师荣光, 郑向群, 孙玉芳, 等. 不同土地利用类型下降雨径流重金属 Cd 的生态风险分析 [J]. 水土保持学报, 2013,

27(3): 106—109.

[24] 韩 平, 王纪华, 陆安祥, 等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 106—112.

[25] 李淑敏, 李 红, 孙丹峰, 等. 北京耕作土壤 4 种重金属空间分布的网络特征分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 208—215, 300.

[26] 戴斯迪, 马克明, 宝 乐. 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征 [J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5095—5102.

[27] 刘需珈, 吴克宁, 罗 明, 等. 农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 254—262.

[28] 王 浩, 潘利祥, 张翔宇, 等. 复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3587—3594.

[29] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117—122.

[30] ZHANG S W, HUANG Y F, SHEN C Y, et al. Spatial Prediction of Soil Organic Matter Using Terrain Indices and Categorical Variables as Auxiliary Information [J]. Geoderma, 2012, 171(2): 35—43.

Distribution Characteristics of Metal-like As in Soil of Beijing Plain

WANG Peng-peng¹, KONG Chen-chen², NIE Chao-jia²,
YANG Xue-ling³, ZHANG Shi-wen², HUANG Yuan-fang⁴

- 1. BinZhou Medical University, Yantai Shandong 264003, China;
- 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
- 3. School of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;
- 4. School of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Based on the theory of variance, classical statistical analysis, geostatistical analysis and single factor pollution evaluation, the agricultural land in plain area of Beijing was selected as the research object. According to different functional zoning, different planting patterns and different parental types, setting up different soil depth (0—25 cm, 25—50 cm), and the horizontal and vertical distribution characteristics and influencing factors of As content were analyzed. The results were as follows: On the whole , 0—25 cm, 25—50 cm soil As block ratio was less than 50%, structural factors play a dominant role. With the increase of soil depth, the randomness factor was reduced. The spatial distribution of As in different depths was basically the same, and the average content of As in Pinggu was the highest, its pollution index was 1.54. There was no significant difference in soil As content between different functional areas ($p<0.05$). There were significant effects of different cropping patterns on As in 0—25 cm soil ($p<0.05$), and the extremely significant effects in 25—50 cm soil ($p<0.01$). The As content in the orchard soil had a certain accumulation of As; There were significant effects of different parent material types on arsenic in soils of 0—25 cm and 25—50 cm($p<0.05$), and the mass fraction of As in the different soil depths of calcareous rocks was the highest.

Key words: farmland soil; metal-like As; spatial distribution; variation function; pollution evaluation; Beijing plain area