

孔晨晨, 刘慧琳, 聂超甲, 等. 北京平原区土壤 Cr 空间分布及影响因素研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 229-236.

KONG Chen-chen, LIU Hui-lin, NIE Chao-jia, et al. Spatial Distribution and Influencing Factors of Cr in Soils of Beijing Plain, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 229-236.

北京平原区土壤 Cr 空间分布及影响因素研究

孔晨晨¹, 刘慧琳¹, 聂超甲¹, 葛 畅¹, 胡青青¹, 杨雪玲², 张世文^{1*}

(1.安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2.浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310000)

摘 要:以北京市平原区农田土壤为研究对象, 针对不同功能区、不同种植模式及不同母质类型等因素, 基于经典统计学、经验贝叶斯克里格插值法, 从点与区域两个方面对不同土壤深度(0~25、25~50 cm)重金属 Cr 含量的水平和垂直分布及影响因素作了系统分析。结果表明:从整体看, 不同土壤深度重金属 Cr 含量存在一定差异, 不同区域比较以海淀和丰台平均含量为最高;空间分布上, 不同土壤深度(0~25、25~50 cm) Cr 含量水平分布格局基本一致, 其分布以城区为中心向外逐渐降低。从单因子评价看, 处于警戒线以内的区域面积仅占研究区总体的 19.16%(0~25 cm)和 14.81%(25~50 cm), 存在明显富集现象。不同功能区重金属 Cr 含量在不同土壤深度中排序均为都市生活区>农业保障区>水源保护区, 且对不同土壤深度 Cr 含量存在显著性影响;种植模式及母质类型对不同土壤深度 Cr 含量无显著影响, 且组间无显著性差异。该研究成果可为农田土壤重金属污染进一步治理和管护提供科学依据。

关键词:北京市;平原区;农田土壤;重金属铬;分布特征

中图分类号:X825

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)03-0229-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0274

Spatial Distribution and Influencing Factors of Cr in Soils of Beijing Plain, China

KONG Chen-chen¹, LIU Hui-lin¹, NIE Chao-jia¹, GE Chang¹, HU Qing-qing¹, YANG Xue-ling², ZHANG Shi-wen^{1*}

(1.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2.College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Taking farmland soils in Beijing plain as the research object, selecting different functional zones, different planting patterns and different types of parent material, the study systematically analyzed the horizontal and vertical distribution and influencing factors of heavy metal Cr in different soil depths(0~25 cm, 25~50 cm) from the point and the area based on the classical statistics and Empirical Bayesian kriging interpolation. The results showed that there was a certain difference in the Cr contents in different soil depths on the whole, with the highest average content of Haidian District and Fengtai District. In the spatial distribution, the Cr content in different soil depths was basically consistent in horizontal pattern, and gradually decreased outwardly with the urban area as the center. From the single factor evaluation method, the area within the warning line accounted for only 19.16%(0~25 cm) and 14.81%(25~50 cm) of the overall study area, showing obvious enrichment. The contents of heavy metal Cr in different functional zone were ranked in different soil depths: urban living zone> agricultural security zone> water source protection zone, and there was a significant effect on heavy metal Cr content in different soil depths. Different planting patterns and different parent material types had no significant effect on the Cr content in different soil depths, with no significant difference between groups. The research results may provide a scientific basis for the further treatment and management of heavy metal pollution in farmland soils.

Keywords: Beijing; plain area; farmland soil; heavy metal Cr; distribution characteristics

近年来,随着工业化、城市化和农业集约化的快速发展,我国土壤环境所面临的情况不容乐观,其中重

金属污染问题尤为突出^[1-5]。土壤重金属作为土地生态系统中的慢变量,具有隐蔽性、积累性、地域性且不易降解、易富集等特点^[6-8]。工厂废水、废气,机动车尾气的排放以及农业活动化肥、农药的施用,更加剧了土壤重金属污染的局面。据2014年4月环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》报道,我国土壤无机污染物(重金属)超标点位占全部超标

收稿日期:2017-11-13 录用日期:2018-01-25

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

作者简介:孔晨晨(1991—),女,安徽淮南人,硕士研究生,主要研究土壤质量监测与评价。E-mail:494393177@qq.com

*通信作者:张世文 E-mail:mamin1190@126.com

点位的 82.8%, 其中 Cr 的点位超标率为 1.1%^[9]。土壤中的 Cr 主要来源于大气中重金属 Cr 的沉降, 农药、化肥和塑料薄膜的使用以及污水灌溉等^[10]。Cr 作为五毒元素之一, 它不仅能抑制土壤微生物的活性, 降低土壤中的生物多样性, 还会通过饮用水、食物链等方式对生物体以及生态环境造成严重影响^[11-14]。因此, 有必要对区域尺度上土壤重金属 Cr 的污染分布特征及其影响因素进行系统研究。

围绕农田土壤重金属分布特征, 很多学者已开展大量研究^[15-16], 张小敏等^[17]探讨了我国农田土壤重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 和 Cr 的空间富集现状, 表明我国重金属空间分布具有明显的区域特征; 王彬武等^[18]对耕地土壤重金属的时空变化进行研究, 运用潜在生态风险和指示克里格法对比分析不同年份耕地表层土壤重金属含量; 韩平等^[19]对北京顺义区土壤重金属污染生态风险进行评估研究; 索琳娜等^[20]研究表明, 北京市菜地重金属 Cd、Cr、Cu、Zn 存在累积污染风险, 但总体土壤环境安全; 王学军等^[21]应用克里格方法对北京东郊污灌土壤表层重金属含量进行了分析, 采用单因子和多因子评价, 结果表明研究区土壤属于轻度污染或无污染; 赵倩等^[22]运用多元统计分析和潜在风险指数方法, 研究土层中重金属的分布特征与潜在生态风险。鉴于目前对于北京市土壤重金属污染研究大多集中于水平空间、不同土壤类型以及不同功能区方面, 本文在已有研究的基础上, 以北京平原区农田土壤为研究对象, 基于所监测数据及土壤基本理化性质和相关环境因子, 研究不同土壤深度 Cr 水平和垂直分布特征, 并从不同功能区、不同种植模式, 以及不同母质类型等方面探究该区域土壤重金属 Cr 的影响因素, 旨在为今后该区域人为干预以及重金属 Cr 预警模型建立和污染治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于 115.7°~117.4°E、39.4°~41.6°N, 地处华北平原北部, 背靠燕山, 面积达 1.641 万 km², 其中山区面积约为 10 068 km², 约占全市总面积的 61.2%。地势西北高、东南低, 平均海拔为 43.5 m。北京为典型的北温带大陆性半湿润季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促。年平均温度 8~12℃, 降水量 600~700 mm。全年无霜期 180~200 d, 西部山区较短。

根据北京市数字高程, 结合农用地粮田、菜地(露天菜地、设施菜地)和果园的空间分布情况, 以 100 m

等高线为界线, 将高程 ≤ 100 m 的区域作为本文的研究区。研究区位于北京东南部, 面积为 7 779.12 km²。研究区的土壤质地分为轻壤、砂壤、砂土、中壤、重壤 5 种, 其中以轻壤质为主, 占到研究区总面积将近 50%, 其次是砂壤质和中壤质。根据北京市数字土壤系统, 研究区可分为农业保障区、都市生活区、水源保护区 3 类功能分区, 不同功能区土壤类型均以潮土、褐土为主, 还存在有少量水稻土。主要成土母质包括冲积物、洪冲积物、钙质岩类风化物、黄土物质、红黄土性物质、页片岩类风化物等。

1.2 数据的来源及处理

本文以北京市农业用地为研究对象, 采样时间为 2015 年 6 月, 针对不同种植模式、不同土壤深度(0~25、25~50 cm)选取 94 个采样点。每个样点选取中心点及相邻两角, 并将同一深度土样混合作为代表该点的样品, 样品均经野外剔除与金属采样器械接触部分。94 个采样点覆盖北京平原区各区县, 共分布于九区一县, 自北向南依次包括水源保护区的密云、平谷、怀柔、昌平, 农业保障区的顺义、通州、大兴和房山, 以及都市生活区的海淀、丰台。采样点分布位置见图 1。利用 GPS 定位采样点, 并记录采样点的功能区属性、种植模式、土壤类型和土质等基本属性, 检测了土壤样品中重金属 Cr 的含量。土壤中重金属 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法进行测定, 分析过程采用平行双样、加标进行质量控制。

采用 SPSS 21.0 进行描述性统计分析、方差分析,

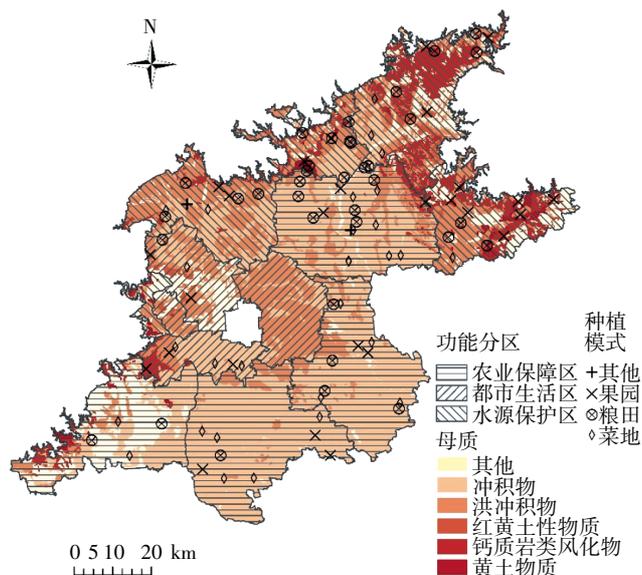


图 1 研究区位置及采样点位置分布图

Figure 1 Location of the study area and distribution of sampling points

计算变异系数,并结合 ArcGIS 10.2 软件对样点数据进行插值处理分析,预测其空间分布特征。

1.3 研究方法

1.3.1 单因子指数法

采用单因子指数法对土壤中不同深度的重金属 Cr 污染强度进行评价,评价标准见表 1,计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为污染物 i 的评价标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 土壤评价分级标准^[23]

Table 1 Evaluation of soil classification standard^[23]

等级	环境质量指数	污染程度	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1$	警戒线	尚清洁
3	$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	土壤轻度污染
4	$2 < P_i \leq 3$	中度污染	土壤受到污染
5	$P_i > 3$	重度污染	土壤受污染已较严重

1.3.2 经验贝叶斯克里格插值

经验贝叶斯克里格法(EBK)是一种常用的地统计插值方法,目前常用的克里格方法是通过已知的数据位置计算半变异函数,并使用此单一变异函数在未知位置进行预测,具有一定的平滑效应,不能够完全反映出土壤本身的性质特点^[24-26]。本文所采用的经验贝叶斯克里格法与其他克里格方法有所不同,它通过估计基础半变异函数来说明所引入的误差,可准确预测一般程度上不稳定的数据,预测标准误差比其他克

里格方法准确,尤其对于小型数据集更准确。因此,针对研究区的实际情况,该方法更适用于土壤重金属 Cr 污染空间分布的研究。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属 Cr 描述性统计分析

利用 SPSS 21.0 对各区县不同深度(0~25、25~50 cm)土壤重金属 Cr 含量特征进行描述性统计分析,结果见表 2。

由表 2 可知,大兴、怀柔、海淀、丰台、通州 5 个区域 0~25 cm 深度的土壤 Cr 含量均高于 25~50 cm 深度,顺义、房山、昌平、密云、平谷 5 个区 Cr 含量随土壤深度的增加而增加。除平谷和昌平,其他各地区土壤 Cr 含量均已超过北京市土壤重金属 Cr 环境背景值($29.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。0~25 cm 深度,海淀区和丰台区 Cr 含量最高,分别为(57.725 ± 18.055) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和(47.217 ± 6.298) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;25~50 cm 土壤中,海淀区 Cr 含量为(49.625 ± 10.471) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,位居首位,海淀和丰台两区的点位超标率均达 100%。平谷 25~50 cm 土壤 Cr 变异系数为 1.181,属强变异程度。为进一步分析不同区县土壤 Cr 含量是否存在显著差异,分别对不同区县 0~25 cm 及 25~50 cm 土壤深度的数据进行方差齐性检验及多重比较,检验结果表明,0~25 cm 土壤中丰台与昌平、平谷两地,以及平谷和通州地区 Cr 含量存在显著性差异($P < 0.05$),丰台位于市区周边,在区域农业生产及人类活动频繁的干扰下,该地区土壤 Cr 的聚集趋势较为明显^[22],通州处在研究区东南部,该

表 2 土壤重金属 Cr 含量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil heavy metal Cr

地区	计算样本数	Cr 含量(0~25 cm)				Cr 含量(25~50 cm)			
		均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数	超标率/%	$P_{i(\text{ave})}$	均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数	超标率/%	$P_{i(\text{ave})}$
顺义	17	34.159±10.460	0.306	58.82	1.146	34.424±11.632	0.338	52.94	1.155
房山	4	29.325±10.138	0.346	25.00	0.984	32.525±10.748	0.330	50.00	1.091
昌平	9	25.278±13.667	0.541	22.22	0.848	27.800±15.061	0.542	33.33	0.933
大兴	9	37.667±17.862	0.474	66.67	1.264	32.029±12.200	0.381	55.56	1.075
怀柔	10	34.800±10.850	0.312	60.00	1.168	32.230±8.174	0.254	60.00	1.082
海淀	4	57.725±18.055	0.313	100.00	1.937	49.625±10.471	0.211	100.00	1.665
密云	13	41.508±23.154	0.558	76.92	1.393	45.046±17.604	0.391	92.31	1.512
平谷	12	19.679±12.351	0.628	25.00	0.660	23.737±28.027	1.181	16.67	0.797
丰台	6	47.217±6.298	0.133	100.00	1.585	44.500±7.865	0.177	100.00	1.493
通州	10	36.810±9.675	0.263	70.00	1.235	35.980±10.327	0.287	60	1.207

注:北京市土壤重金属 Cr 环境背景值为 $29.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[27]。超标率为各区县超标样点数与各区县总样点数的比值。

Note: The environmental background value of soil heavy metal Cr in Beijing is $29.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[27]. The rate of exceeding standard is the ratio of the standard sample points of each county and the total sample number of each county.

地区主要是冲积平原,其 Cr 含量偏高与冲积过程有一定关系^[28],水源保护区的昌平与平谷受人类活动扰动相对较少,因此上述不同区县间土壤 Cr 含量存在差异;25~50 cm 土壤深度各区县 Cr 含量无显著差异。垂直方向 Cr 分布不同于以往随深度增加而降低的规律,表现出人为和自然地质的双重叠加影响,与赵倩等^[22]的研究结果一致。

不同土壤深度重金属 Cr 的单因子污染指数 P_i 在不同区域的数值存在差异。0~25 cm 土壤深度,平谷区 Cr 污染指数 $P_{i(ave)}$ 最低为 0.66,说明水源保护区的平谷土壤处于清洁水平;房山、昌平两区 $P_{i(ave)}$ 分别为 0.984 和 0.848,属尚清洁水平,但由于其处于警戒线位置,应予以重视;其余各区县均超过警戒线。25~50 cm 土壤中,除昌平和平谷处于尚清洁状态,其余各区县均达到轻度污染水平,其中以海淀区重金属 Cr 的 $P_{i(ave)}$ 最高,为 1.665。在 0~25 cm 及 25~50 cm 土壤中,受污染的样点数分别占总样点数的 73.4% 和 77.7%,整体比例较高。

2.2 土壤重金属 Cr 含量空间分布特征

利用 ArcGIS 软件中的地统计分析工具,采用 E-BK 法得到不同土壤深度重金属 Cr 的空间分布图(图 2),整体了解不同土壤深度 Cr 随区域变化的空间分布趋势。EBK 子集大小为 100,重叠因子为 1,模拟次数为 100 次。邻域类型为半滑圆形,平滑系数为 0.2。

图 2a、图 2b 分别为研究区 0~25 cm 和 25~50 cm 深度土壤重金属 Cr 含量分布图,其含量范围分别为 16.525~59.551 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,12.055~84.849 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整体

上,0~25 cm 和 25~50 cm 深度土壤 Cr 水平分布格局基本一致,均为都市生活区的海淀、丰台含量居高,并以城区周围为中心向外逐渐降低,可见人类活动导致了部分土壤中 Cr 的积累,对土壤 Cr 含量造成一定影响^[29]。密云北部在不同土壤深度下重金属 Cr 含量分布显著高于周边地区,这主要与该地区有一个 Cr 矿有关。25~50 cm 深度下,密云南部、顺义东部及平谷西部位置有明显的 Cr 富集现象,由于该区域土壤环境质量与北京市生活用水的水质有较大关系,因此 Cr 含量过高是否会对水质产生影响则值得关注。插值分析与表 2 所述结果基本一致,预测结果与实测的拟合程度较高。

为检验垂直方向重金属 Cr 的含量间相似性和来源差异,对 0~25 cm 及 25~50 cm 土壤深度的重金属 Cr 含量进行相关性分析(相关系数越接近 1 或-1,相关性越强;相关系数越接近 0,相关程度则越弱^[30])。结果显示 0~25 cm 和 25~50 cm 土壤深度重金属 Cr 含量呈显著正相关,相关系数为 0.579。因此,北京市平原区农田土壤垂直方向 Cr 的含量存在相关性。

2.3 土壤重金属 Cr 污染程度评价

采用 ArcGIS 中常用的地统计分析工具 EBK 对研究区不同土壤深度重金属 Cr 的环境质量指数 P_i 插值,并进行等级划分(图 3),统计出不同等级重金属 Cr 所占面积,从而判断研究区不同土壤深度整体 Cr 的富集程度。EBK 子集大小为 100,重叠系数为 1,模拟次数为 300,邻域类型为平滑圆形,平滑系数为 0.2。

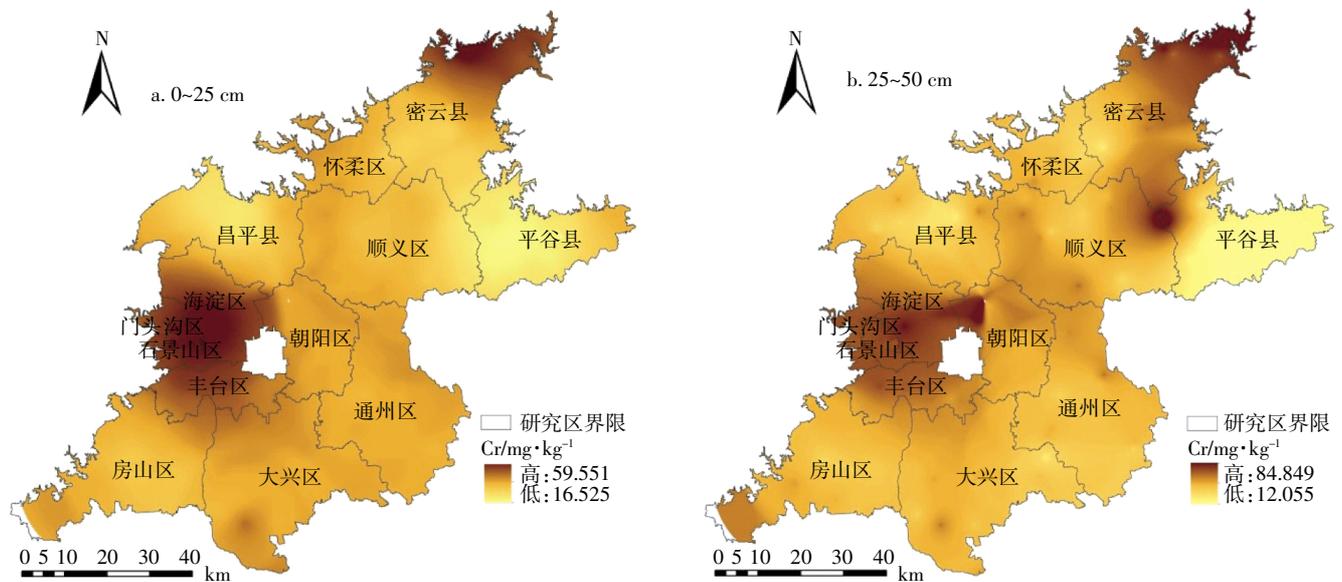


图 2 不同土壤深度 Cr 空间分布图

Figure 2 Different soil depths spatial distribution pattern of Cr

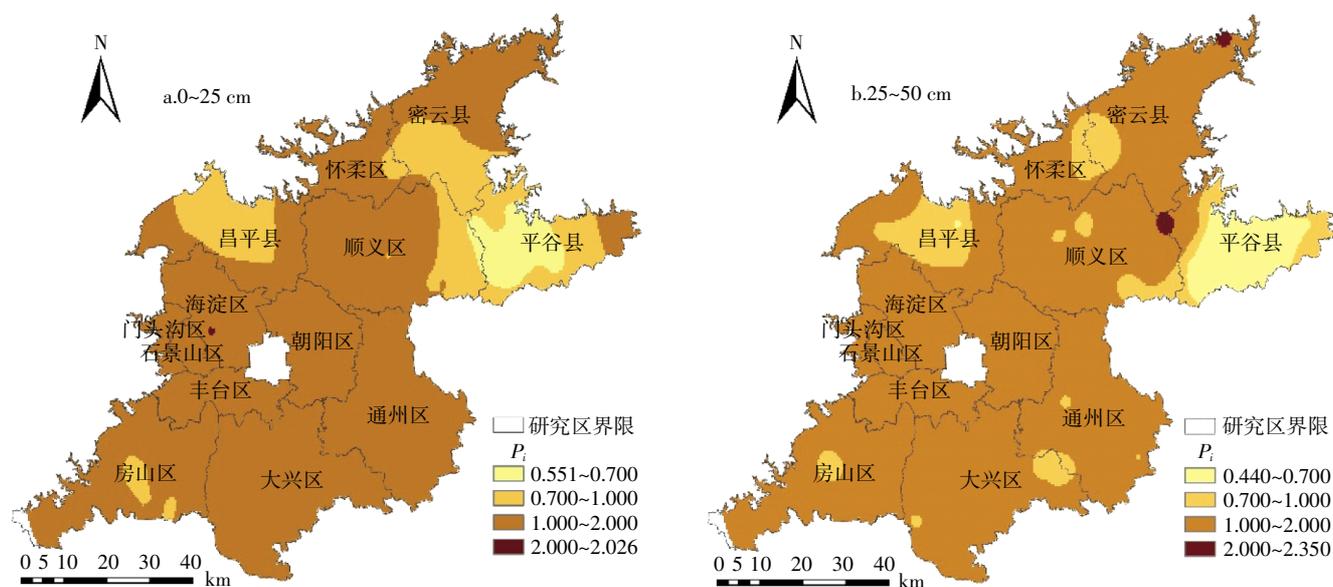


图 3 不同土壤深度 Cr 污染等级分布图

Figure 3 The distribution of Cr pollution grade in different soil depths

图 3 为北京平原区不同土壤深度 Cr 污染等级分布图。结合表 1,共分为 4 个等级,从研究区整体看,不同土壤深度重金属 Cr 污染指数分布格局大体一致,其中处于警戒线以内的区域占研究区总面积的 19.16%(0~25 cm)和 14.81%(25~50 cm),轻度污染的地区整体比例明显高于其他等级,分别占研究区总面积的 80.35%(0~25 cm)和 84.84%(25~50 cm);处于中度污染及以上等级的区域面积仅占总体的 0.03%(0~25 cm)和 0.36%(25~50 cm);保持在清洁水平的区域基本位于水源保护区的平谷区内。分析垂直方向不同土壤深度 Cr 污染等级分布可见,除清洁水平外,其余各等级 25~50 cm 土壤深度重金属 Cr 的富集程度均高于 0~25 cm,其中 0~25 cm 土壤深度中都市生活区的海淀存在 2.52 km² 区域处于中度污染,25~50 cm 深度密云北部及其与顺义、平谷交界处均出现了 Cr 的富集,达到中度污染等级。研究认为该区域土壤 Cr 含量受母质影响较大^[31],与郑袁明等^[28]的研究结果一致。

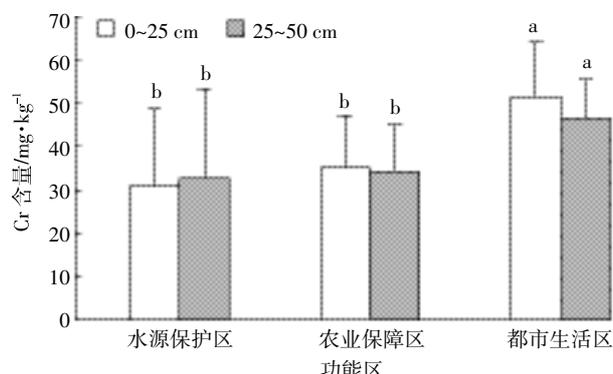
2.4 土壤重金属 Cr 含量影响因素分析

2.4.1 不同功能区土壤重金属 Cr 含量分析

本研究将北京市平原区农用地划分为 3 种不同的功能分区:包括水源保护区的密云、平谷、怀柔、昌平,农业保障区的顺义、通州、大兴和房山,以及都市生活区的海淀、丰台,对 0~25、25~50 cm 不同土壤深度的重金属 Cr 含量的分布特点进行比较分析。

图 4 为北京市平原区农用地不同功能区土壤 Cr

含量平均值。如图 4 所示,都市生活区和农业保障区中 0~25 cm 土壤重金属 Cr 含量均高于 25~50 cm。Cr 含量在不同土壤深度中排序均为都市生活区>农业保障区>水源保护区,且 0~25 cm 土壤中数值变化更为明显。影响土壤重金属含量与空间分布趋势的因素主要有两大类:一是母质及土壤自身的性质;二是人为活动的影响^[32]。水源保护区受人类活动扰动较少,因此土壤 Cr 含量极可能受其母质影响,pH 值、黏粒含量等会影响土壤对 Cr 吸附以及重金属本身的迁移,从而造成土壤中 Cr 含量发生变化。相比较水源保护区与农业保障区,都市生活区受人类活动影响较大,



同一土壤深度下不同字母表示在 0.05 水平具有显著性差异
Different letters at the same soil depth indicate significant differences at the 0.05 level

图 4 不同功能区土壤重金属 Cr 含量平均值

Figure 4 The average of soil heavy metal Cr content in different functional zones

进而导致了部分土壤中 Cr 的积累。为进一步分析不同功能区土壤 Cr 含量是否有显著差异,分别对 0~25 cm 及 25~50 cm 土壤深度的数据进行方差齐性检验,检验结果表明,0~25 cm 数据满足方差齐性,可采用 LSD 法进行多重比较,而 25~50 cm 数据不满足方差齐性,因此采用 Games-Howell(A)法进行多重比较,检验结果显示组间存在差异(图 4)。通过采用单因素方差分析,结果显示不同功能区对不同土壤深度重金属 Cr 的含量均存在显著性影响($P<0.05$)。

2.4.2 不同种植模式下土壤重金属 Cr 含量分析

该研究区主要种植模式为果园、耕地、菜地 3 种类型,3 种植物模式下不同土壤深度(0~25、25~50 cm)重金属 Cr 含量数值统计见表 3。通过方差齐性检验及多重比较分析,结果显示不同种植模式组间无显著性差异。

表 3 不同种植模式下土壤重金属 Cr 含量平均值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 The average of soil heavy metal Cr content under different planting patterns($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤深度	果园($n=27$)	耕地($n=36$)	菜地($n=31$)
0~25 cm	35.792±22.398	33.277±11.539	36.448±15.332
25~50 cm	35.494±21.836	34.903±14.192	34.295±13.680

由表 3 可见,0~25 cm 及 25~50 cm 土壤中不同种植模式下 Cr 含量均值较为接近,且 3 种不同种植模式下重金属 Cr 的含量均已超过北京市土壤重金属 Cr 环境背景值。果园的土壤 Cr 含量在 0~25 cm 土壤深度中高于耕地,25~50 cm 土壤深度中含量为最高。原因在于一些农业污染源如肥料、农药的施用,鸡粪是主要有机肥,鸡粪中 Cr 的含量达到 $20.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[33],磷肥中含有一定量的 Cr 元素^[34],相比耕地和菜地,果园需肥量较大,因此造成该区域果园重金属 Cr 含量偏高。此外,我国土壤有机质普遍较低,土壤磷素也普遍偏少,因此肥料的投入增加是导致研究区 Cr 累积的重要原因。河水和灌溉用水中 Cr 的沉淀易被土壤吸附,污水灌溉与该区域 Cr 含量富集程度较高也具有一定的关联性。

2.4.3 不同母质类型下土壤重金属 Cr 含量分析

母质是形成土壤的物质基础,是土壤的骨架和矿物质的来源。其机械组成影响土壤的机械组成,化学成分对土壤形成、性质和肥力均有显著影响^[35]。研究区不同区县其土壤母质类型有所差异,大兴区母质类型主要为冲积物,顺义、昌平、通州、海淀和丰台地区均以冲积物和洪冲积物为主,其中海淀区存在少量的

红黄土性物质,丰台地区存在部分钙质盐类风化物,密云和平谷地区母质类型较为复杂,密云地区为红黄土性物质、冲积物、洪冲积物、水库、长石岩类风化物,平谷地区则以钙质岩类风化物、洪冲积物、冲积物为主要母质成分。结合北京土壤环境背景特点分析不同母质类型下(主要分为冲积物、钙质岩类风化物、红黄土性物质、洪冲积物、黄土物质和其他 6 种类型)土壤重金属 Cr 的含量变化情况,见图 5。

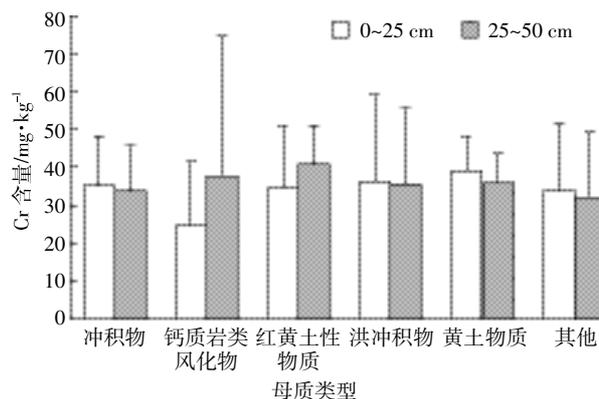


图 5 不同母质类型下土壤重金属 Cr 含量平均值
Figure 5 The average of soil heavy metal Cr content in different parent material types

由图 5 可知,冲积物、红黄土性物质、洪冲积物、黄土物质和其他这 5 种母质类型下在不同土壤深度重金属 Cr 含量均超过北京市土壤重金属 Cr 环境背景值($29.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其中在 25~50 cm 土层中红黄土性物质所形成的土壤重金属 Cr 含量最高,为 $40.975 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是北京土壤重金属 Cr 环境背景值的 1.375 倍。钙质岩类风化和红黄土性物质中,25~50 cm 土层深度 Cr 的含量高于 0~25 cm,而平谷和密云地区的母质分别存在大量钙质岩类风化和红黄土性物质,因而该区域部分样点 25~50 cm 中 Cr 含量高于 0~25 cm,这与图 2 通过 EBK 插值得到不同土壤深度重金属 Cr 的空间分布结果一致。多重比较分析表明,不同母质类型对各区县不同土层中土壤重金属 Cr 含量无显著影响,单因素方差分析显示不同土壤深度组间无显著性差异。

3 结论

(1) 从研究区整体看,不同土壤深度重金属 Cr 含量存在差异,海淀和丰台 Cr 平均含量最高。除昌平和平谷外,其余各区县 Cr 污染指数均已超过警戒线,应予以重视。空间分布上土壤 Cr 以城区周围为中心向外逐渐降低,不同土壤深度 Cr 分布格局基本一致,

垂直方向上 Cr 含量存在显著相关性,其分布不同于以往随深度增加而降低的规律,表现出人为和自然地质双重叠加影响。从 Cr 的污染等级分布看,处于轻度污染等级的区域占研究区总体的 80.35%(0~25 cm 深度)及 84.84%(25~50 cm 深度)。整个研究区土壤 Cr 存在富集现象,有一定污染风险。密云与平谷交界处土壤环境质量对北京市生活用水的水质影响较大,因此 Cr 含量过高是否会对水质产生影响则值得关注。

(2) 针对不同功能区,土壤 Cr 含量在不同土壤深度中排序均为都市生活区>农业保障区>水源保护区,不同功能区对不同土壤深度 Cr 含量存在显著影响($P<0.05$)。不同种植模式下,不同土壤深度 Cr 含量无显著性差异,由于其含量均已超过北京市土壤重金属 Cr 环境背景值,而农药、肥料的投入增加是导致研究区 Cr 累积的重要原因,因此今后化肥农药施用及污水灌溉等方面应严格要求。

(3) 本文主要针对土壤 Cr 的空间分布规律以及 Cr 污染评价方面进行研究,从定性角度分析不同功能区、不同种植模式及不同母质类型对不同土壤深度重金属 Cr 的影响,揭示了土壤 Cr 的分布特征,但并没有针对平原区农田土壤特点定量化地深入研究土壤 Cr 的来源,在后续研究中将继续探讨 Cr 分布特点并进行有关定量的析源分析,以期为农田土壤重金属污染防治提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李冰,王昌全,谭婷,等.成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J].核农学报,2009,23(2):308-315.
LI Bing, WANG Chang-quan, TAN Ting, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu Plain[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2):308-315.(in Chinese)
- [2] 陈红亮,谭红,谢锋,等.遵义东南部地区农业土壤重金属分布特征及风险评价[J].核农学报,2008,22(1):105-110.
CHEN Hong-liang, TAN Hong, XIE Feng, et al. Distribution and risk evaluation of heavy metals in agricultural soils of southeastern Zunyi City, China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(1):105-110.(in Chinese)
- [3] Macfarlane G R, Koller C E, Blomberg S P. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(9):1454-1464.
- [4] 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(12F):83-86.
TIAN Yuan, GUO Xi-juan, LIU Xiao-lan. Exploration on the pollution of topsoil heavy metal in the different areas of Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12F):83-86.(in Chinese)
- [5] 江宏,马友华,尹国庆,等.安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].农业资源与环境学报,2017,34(4):352-359.
JIANG Hong, MA You-hua, YIN Guo-qing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soils in a county of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4):352-359.(in Chinese)
- [6] Lin Y P. Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(1):1-10.
- [7] 翟航.长春市土壤重金属分布规律及土壤环境质量评价研究[D].长春:吉林大学,2007.
ZHAI Hang. Research on distribution characteristic of the soil heavy metals and assessment for the soil environmental quality in Changchun [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [8] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469:843-853.
- [9] 陈同斌,雷梅,杨军,等.关于重金属污染土壤风险控制区划的研究与建议[J].中国科学院院刊,2014,29(3):321-326.
CHEN Tong-bin, LEI Mei, YANG Jun, et al. Discussion on zoning of soil environmental risk control and remediation contaminated by heavy metals on regional scale[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3):321-326.(in Chinese)
- [10] Mapanda F, Mangwayana E N. The effects of long-term irrigation using water on heavy metal contents of soils under vegetables[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2):151-165.
- [11] 崔德杰,张玉龙.土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J].土壤通报,2004,35(3):366-370.
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):366-370.(in Chinese)
- [12] 吴昊.重金属铬污染土壤治理方法研究进展[J].农业科技与装备,2015(8):8-10.
WU Hao. Research progress of soil controlling methods for heavy metal chromium pollution[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2015(8):8-10.(in Chinese)
- [13] He Z L, Yang X E, Stoffella P J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine & Biology*, 2005, 19(2/3):125-140.
- [14] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.
- [15] Jiao W, Chen W, Chang A C, et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168(1):44-53.
- [16] Wang C, Yang Z, Zhong C, et al. Temporal-spatial variation and source apportionment of soil heavy metals in the representative river-alluviation depositional system[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:18-26.
- [17] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空

- 间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2):692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):692-703.(in Chinese)
- [18] 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 Bin-wu, LI Hong, JIANG Hong-qun, 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.(in Chinese)
- [19] 韩平, 王纪华, 冯晓元, 等. 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):103-109.
HAN Ping, WANG Ji-hua, FENG Xiao-yuan, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soils in Shunyi, Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):103-109.(in Chinese)
- [20] 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.(in Chinese)
- [21] 王学军, 席爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克立格插值及重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3):225-228.
WANG Xue-jun, XI Shuang. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing City[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(3):225-228.(in Chinese)
- [22] 赵倩, 马琳, 刘翼飞, 等. 北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1931-1937.
ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, et al. Distribution characteristics and potential ecological hazards assessment of soil heavy metals in typical soil profiles in southeast suburb of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1931-1937.(in Chinese)
- [23] 李良忠, 杨彦, 蔡慧敏, 等. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(s1):60-65.
LI Liang-zhong, YANG Yan, CAI Hui-min, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils in Taihu Lake Basin agricultural area[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(s1):60-65.(in Chinese)
- [24] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3):225-234.
LIU Qiong-feng, LI Ming-de, DUAN Jian-nan, et al. Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3):225-234.(in Chinese)
- [25] Yang P G, Mao R Z, Shao H B, et al. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332(6):558-566.
- [26] 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.
LIU Pei-jia, WU Ke-ning, LUO Ming, et al. Evaluation of agricultural land soil heavy metal elements exceed standards and safe utilization zones[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(23):254-262.(in Chinese)
- [27] 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.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.(in Chinese)
- [28] 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, 23(4):436-445.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, CHEN Tong-bin, et al. Spatial distribution patterns of Cr and Ni soils of Beijing[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(4):436-445.(in Chinese)
- [29] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(3):470-476.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, CHEN Huang, et al. The spatial structure and distribution of Ni contents in soils of suburbs of Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3):470-476.(in Chinese)
- [30] 钟巧, 王勇辉, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属含量特征及空间变异分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):360-365.
ZHONG Qiao, WANG Yong-hui, JIAO Li, et al. Characteristics and spatial variability of the soil heavy metals contents in Xiaerxili area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):360-365.(in Chinese)
- [31] Pierce F J, Dowdy R H, Grigal D F. Concentrations of six trace metals in some major minnesota soil series[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1982, 11(3):416-422.
- [32] 赵伟. 重庆耕地土壤重金属 Hg、Cr 含量的空间变异性研究[J]. 河南农业科学, 2009, 38(11):72-76.
ZHAO Wei. Study of spatial variability of soil heavy metals Hg, Cr content in Chongqing[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009, 38(11):72-76.(in Chinese)
- [33] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 果园土壤重金属污染调查与评价——以重庆市金果园为例[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14):244-249.
TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, et al. Pollution investigation and assessment of heavy metals in orchard soil: A case study in golden orchard of Chongqing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(14):244-249.(in Chinese)
- [34] 杨世琦, 刘国强, 张爱平, 等. 典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征[J]. 生态学报, 2010, 30(22):6201-6207.
YANG Shi-qi, LIU Guo-qiang, ZHANG Ai-ping, et al. Analysis on accumulation characters of 5 kinds of heavy metals in orchard topsoil in typical production zone in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22):6201-6207.(in Chinese)
- [35] 邵学新, 黄标, 赵永存, 等. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J]. 环境化学, 2008, 27(2):218-221.
SHAO Xue-xin, HUANG Biao, ZHAO Yong-cun, et al. Pollution assessment of soil heavy metals in a representative area of the Yangtze River Delta region[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(2):218-221.(in Chinese)