

区域土壤 Cd 和 Cr 空间分布的影响因素研究^①

张 慧, 马鑫鹏*, 史晓磊, 隋虹均, 苏 航, 杨 欢

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:以种粮大县肇源为研究区,对土壤表层 Cd、Cr 两种元素水平空间变异及分布特征的影响因素进行深入探讨。结果表明:肇源县土壤表层重金属 Cd 和 Cr 的平均含量分别为 0.078、46.006 mg/kg,略高于松嫩平原土壤背景值。表层土壤 Cd 的块金效应为 0.432,具有中等程度的空间自相关性;表层土壤 Cr 的块金效应为 0.227,存在强烈的空间自相关性。Cd、Cr 元素的空间自相关表现出较为明显的各向异性,均在 45°(东北-西南)和 135°(东南-西北)方向上空间自相关最强烈。表层土壤和成土母质中 Cd 和 Cr 元素含量相关分析结果显示 相关系数分别为 0.167、0.639,在 $P < 0.01$ 水平上显著相关;不同成土母质类型区域表层土壤中 Cd 和 Cr 元素含量的方差分析结果显示,方差齐性检验显著性分别为 0.627 和 0.975,表明成土母质是表层土壤重金属元素 Cd 和 Cr 水平空间分布的主要影响因素。研究区内表层土壤 Cd 和 Cr 元素的空间分布还受土壤类型、pH、土地利用及覆被类型的影响。

关键词:重金属; Cd; Cr; 空间分布; 影响因素

中图分类号: X53 文献标识码: A

土壤重金属是一种隐蔽性强、危害持久的污染物。土壤重金属以不同的方式影响人类健康。农田重金属污染可以通过农作物间接危害人体健康,而建设用地重金属污染可通过大气、水文等途径危害人居环境。因此,土壤污染问题日益受到学者和管理者的关注。目前,国内学者对重金属来源辨析、分布格局、污染评价、迁移扩散、修复技术以及管理法规等方面进行了研究^[1-6],主要以解决污染问题为目标,侧重于对已受重金属污染的区域开展研究,而对于重金属污染预防的相关研究较少,尤其是对重金属潜在污染或未受污染区域的研究较为匮乏。当前国家高度重视污染预防工作,国务院已于 2018 年开展了第二次全国污染源普查试点工作,重金属污染源普查是其重要的组成部分。由此可见,重金属污染预防意义重大,而对重金属的空间分布特征以及影响因素研究是重金属污染预防的重要前提,值得进行深入研究。

当前国内外学者对表层重金属的空间分布特征及影响因素研究多见于典型农田、城市、菜地、矿区、公路、灌区等^[7-12],通常以单一的地类、地块或者特定的污染源为主。这些研究主要分析特定的因素对表层重金属空间分布特征的影响,但由于区域土壤表层

重金属含量受多种复杂因素的影响,自然因素(成土母质、成土过程)^[13]、重金属迁移(地形因子、土壤有机质及土壤 pH)^[14]、人为干扰(交通因素、生活垃圾以及工业排放)^[15-16]等都能改变重金属含量的分布格局,因此,考虑单一因素对区域(尤其是县级以上尺度的区域)表层重金属空间分布的影响是不够全面的,不能真实地反映出区域表层重金属的空间分布特征。考虑以上各方面存在的问题,在对区域表层重金属空间分布特征进行研究时,需要综合、全面地考虑各类影响因素,才能为政府部门进行针对性的重金属防治以及治理工作提供指导。

松嫩平原是我国重要的商品粮生产基地,土壤健康状况对我国的粮食生产和食品安全有着重大影响,对该区域内表层土壤重金属空间分布的主控因素研究显得非常重要。重金属 Cd 和 Cr 易于在水稻中迁移^[17],对粮食安全的威胁更大,因此,对这两种重金属元素空间分布的影响因素进行研究备受重视。

本文综合运用地统计和多元统计相结合的方法,对松嫩低平原农业大县——肇源县表层土壤重金属 Cd 和 Cr 的空间变异特征进行深入分析,并结合深层土壤 Cd 和 Cr 含量,对比分析表层两种元素空间分

基金项目:黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z12032)资助。

* 通讯作者(xinpeng_ma@163.com)

作者简介:张慧(1976—),女,山东金乡人,博士,副教授,研究方向为土地质量和土地利用。E-mail: 2003zhanghui@163.com

布格局的主要影响因素,同时尝试利用表深层 Cd 和 Cr 含量差值及空间分布格局与土壤类型、土地利用类型、地形指标、土壤有机质、土壤 pH、交通以及居民点等的关系进行定性和定量分析,从整体到局部全面分析影响表层 Cd 和 Cr 分布格局的相关因素,以期为研究区土壤重金属污染的防治提供理论基础,为产粮大县的粮食安全、土壤保护、作物合理种植及农业区域规划提供指导。

1 研究区概况

肇源县隶属于黑龙江省大庆市,地处 45°23'~45°59' N, 123°47'~125°45' E,位于松嫩平原南部、松花江北岸,总面积 4 198 km²,下辖 8 个镇、8 个

乡。研究区成土母质主要以第四纪泥砂质湖积物和泥砂质河谷沉积物为主(图 1)。土壤类型复杂,主要包括黑钙土、盐土、沼泽土、草甸沼泽土、草甸黑钙土、草甸土等。气候类型属于温带大陆性气候,四季分明,光照条件良好,冬季寒冷干燥,温差悬殊,年均降水量在 600 mm 左右,水源丰沛。地势低平,西北高东南低,北部高南部低。土地利用类型主要以耕地、水域及水利设施用地、草地、其他土地为主,约占研究区面积的 77%。肇源是全国商品粮基地县,第一产业占全县比重较大,区内交通便利,铁路和高速路(通让线和大广高速)从县域南北穿过,高速 G201、G203 横穿东西,第三产业发展迅速,但同时也在一定程度上造成了局部区域生态环境的污染。

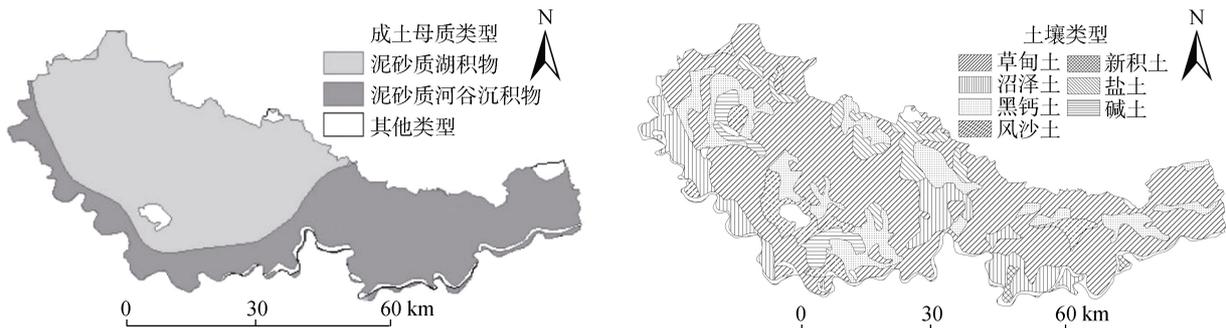


图 1 肇源县成土母质、土壤类型分布图

Fig. 1 Maps of soil parent materials and soil types of Zhaoyuan County

2 数据来源与研究方法

2.1 土壤样品采集及测定

在进行土壤样品采集时,用 4 km² 的标准格网对研究区进行划分,采样点位于格网中心。表层土壤按每 4 km² 采集 4 个土样,将 4 个土样混合为 1 个土壤样本,表层土壤样本采集深度为 0~20 cm,共采集土壤样品 1 031 个;深层土壤样品按每 16 km² 采集 1 个土壤样本,采样深度为 180~200 cm,共采集土壤样品 259 个(图 2)。

土壤重金属 Cr 元素采用原子光谱吸收法测定;Cd 元素采用石墨炉原子吸收分光光度法测定^[18]。土壤有机质和 pH 的测定采用土壤农化常规分析方法检测^[19]。采用 SPSS19.0 软件对数据进行统计分析。地形数据从国际科学数据共享平台提供的 30 m×30 m 的 DEM 数据(图 3)中获取,其他数据来源于政府相关部门。

2.2 研究方法

2.2.1 地统计模型 地统计学中的半方差函数是土壤属性空间变异特征研究中最有效的方法之一,也

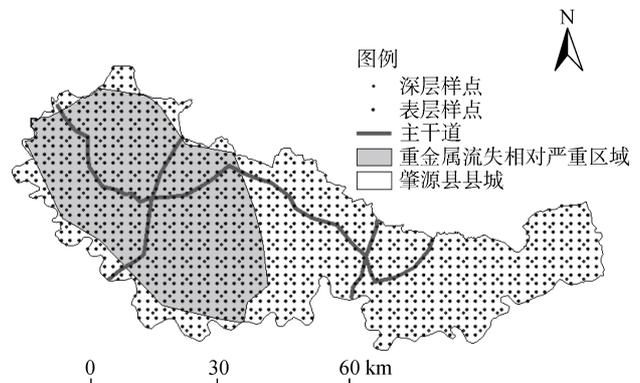


图 2 研究区样点分布图

Fig. 2 Sampling sites in studied area

是进行土壤属性空间插值的基础^[20]。本研究在 GS+9.0 软件中主要对土壤重金属 Cd、Cr 含量进行半方差函数拟合,半方差函数模型的公式为

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

式中: $\gamma(h)$ 为变异函数; $N(h)$ 是分割距离为 h 时的样本点对总数; $Z(x_i)$ 为 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 处的实测值; $Z(x_i+h)$ 是 $Z(x)$ 在 x_i 处距离偏离 h 的实测值。

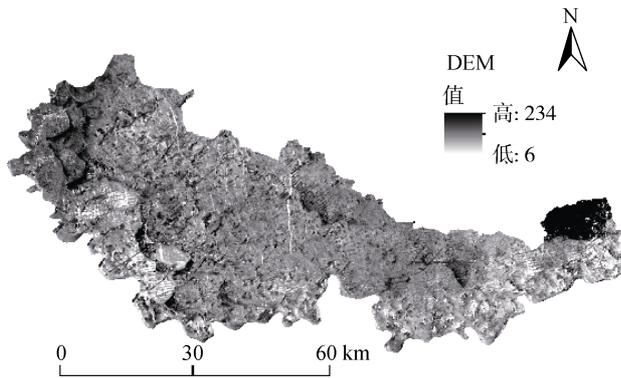


图 3 研究区 DEM 图
Fig. 3 DEM of studied area

2.2.2 克里格插值法 克里格插值法借助空间插值算法,可实现重金属含量从点状数据到面源信息的表达。普通克里格插值法从变量自身特点出发,考虑观测点的整体空间分布情况、样本点的空间相互位置关系及与待估计点的空间位置关系,是待估点进行的一种无偏最优估计,并且能给出估计精度。本研究利用 ArcGIS 10.0 软件分别对肇源县表、深层土壤 Cd、Cr 两种重金属元素含量以及含量差值进行普通克里格插值,得到表、深层重金属元素含量和含量差值在研究区范围内的空间分布图。

2.2.3 多元统计方法 相关分析就是对总体中确

实具有联系的指标进行分析,其主体是对总体中具有因果关系指标的分析,描述的是客观事物相互间关系的密切程度。单因素方差分析是用来研究一个控制变量的不同水平是否对观测变量产生了显著影响。两种统计方法都能很好地说明两种事物之间是否存在联系。本研究利用上述方法对表层 Cd、Cr 含量和相关的因素进行分析。

3 结果与分析

3.1 表层土壤重金属含量描述性统计

统计分析结果(表 1)表明,肇源县表层土壤 Cd 和 Cr 平均含量略高于松嫩平原土壤背景值,说明该研究区在整个松嫩平原属于 Cd 和 Cr 相对清洁的区域。与深层土壤重金属含量相比,Cd 和 Cr 均表现出表层含量的升高,分别是对应深层含量的 1.2 倍、1.14 倍,表明该区域表层 Cd 和 Cr 都受到外界因素的干扰,且 Cd 元素受到的干扰大于 Cr 元素。变异系数反映总体样本中各采样点平均变异程度,结合一般变异程度分类评估标准,两种元素变异系数分别为 0.282 和 0.288,都属于中等变异程度,表明自然因素、重金属迁移及人为干扰可能影响了表层土壤两种重金属的水平空间分布。

表 1 研究区表层土壤重金属描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistics of Cd and Cr in topsoil of studied area

元素	范围(mg/kg)	均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数	偏度	峰度	松嫩平原土壤背景值(mg/kg)	深层均值(mg/kg)
Cd	0.030 ~ 0.169	0.078	0.022	0.282	0.669	0.631	0.073	0.065
Cr	12.460 ~ 78.510	46.006	13.235	0.288	-0.044	-0.801	42.460	40.326

3.2 表层土壤重金属空间分异特征

地统计学中的半方差函数既能够描述区域化变量的结构性变化,又能描述其随机性变化。通过 GS+9.0 软件对研究区表层土壤两种重金属含量进行地统计分析,得到两种元素拟合的半方差函数模型及其参数(表 2)。研究区表层土壤 Cd、Cr 元素的半方差函数模型拟合结果分别为指数模型和球状模型;决定系数(R^2)表示理论模型的拟合精度,两种元素的决定系数都超过 0.9,说明理论模型的选取是恰当的。块金值(C_0)代表随机性的可能程度,肇源县表层土壤两种元素含量块金值分别为 0.000 353、55.7,表明该区域存在不可忽略的生态过程或人为因素对表层土壤重金属的空间分布产生影响。结构方差(C)代表系统因素,即本研究中代表土壤母质、地形地貌、土壤类型等自然因素引起的变异,基台值(C_0+C)通常表示系统的总变异,是随机性变异与结构性变异之

和。块金效应($C_0/(C_0+C)$)代表空间自相关性,揭示系统的空间异质性,可以反映影响因素中区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)的作用。研究区表层土壤 Cr 元素的块金效应 < 0.25 ,说明它具有强烈的空间自相关性,即主要受到土壤母质、地形地貌、土壤类型等自然因素控制,而受人类干扰影响较小;Cd 元素的块金效应在 $0.25 \sim 0.75$,具有中等程度的空间自相关性,说明其不仅受到成土母质等自然因素的影响,还受到人为因素的干扰。变程表示半方差达到基台值时的样本距离,又称空间最大相关有效距离,研究区中两种元素的变程分别为 37.7、83.0 km,说明表层土壤 Cd 和 Cr 元素分别在不同尺度内存在较强的连续性。

表层土壤 Cd 元素具有中等程度的空间自相关性,而 Cr 元素具有强烈的空间自相关性,二者受自然因素影响均较大,因此有必要对研究区表层两种重

表 2 研究区表层土壤重金属含量的半方差函数理论模型及相关参数
Table 2 Theoretical models and parameters of semi-variance functions of Cd and Cr in topsoil of studied area

重金属	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $C_0/(C_0+C)$	变程(km)	决定系数 R^2
Cd	指数	0.000 353	0.000 818	0.432	37.7	0.907
Cr	球状	55.7	245.2	0.227	83.0	0.992

金属进行更加深入的各向异性分析。在 0° (北-南)、 45° (东北-西南)、 90° (东-西)和 135° (东南-西北) 方向上的半方差函数图(图 4)表明:表层土壤 Cd 含量在间隔距离 $< 25\ 000$ m 时,各个方向的变异近似各向同性;在 135° (东南-西北) 方向上,随着间隔距离的增加,变异程度的变化幅度增大;在 45° (东北-西南) 方向上,间隔距离约在 $60\ 000$ m 处出现拐点,之后变异程度出现大幅度的减小;其他方向上的变异程度相对较小。

表层土壤 Cr 含量在间隔距离 $12\ 500$ m 处,各个方向变异程度和变化趋势接近,近似成各向同性;在 0° (北-南)方向上,变异程度随间隔距离增加变化幅度较为平缓,变异值在 100 左右起伏;在 45° (东北-西

南)方向上,变异值变化较大,间隔距离约在 $60\ 000$ m 处,出现拐点,之后出现急剧减小的趋势;在 90° (东-西)方向上,间隔距离约在 $35\ 000$ m 处,变异值达到最大,随后变异值不再随着间隔距离的增大而改变;在 135° (东南-西北) 方向上,变异值随着间隔距离的增加而不断增加。

综合分析表层两种元素的各向异性,可以发现两种元素分别在对应方向上的变化特征有相似的趋势,在 90° (东-西)和 135° (东南-西北) 方向上,和研究区的成土母质(东南部主要为泥砂质河谷沉积物,西北部主要为泥砂质湖积物)有关;在 0° (北-南) 和 45° (东北-西南)方向上,主要和地势变化相对较大、土壤类型丰富以及人口居住的疏密程度有关。

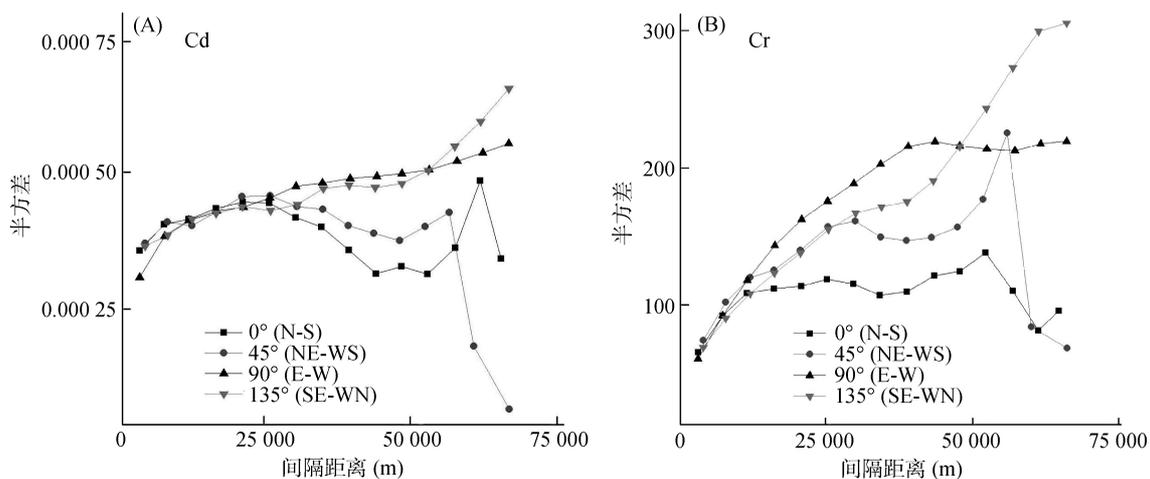


图 4 表层土壤重金属 Cd 和 Cr 的各向异性半方差函数模型

Fig. 4 Anisotropic semi-variance function models of Cd and Cr in topsoil

3.3 表层土壤重金属水平空间分布的影响因素

表层土壤重金属水平空间分布主要受自然因素、重金属迁移、人为干扰等因素的影响。其中在自然因素中成土母质起主导作用,而土壤类型是成土过程作用的结果,对重金属的分布可能有一定的影响;重金属迁移通常受地形地貌、土壤有机质、土壤 pH、河流及气候等因素的影响;在人为干扰中,人类活动范围对局部重金属分布产生一定的影响。考虑到县域气候的相对一致性以及数据的可获取性,本研究选取成土母质与表层两种元素含量进行分析。为了提高分析的精确性,排除不同成土母质的干扰,利用表、深层

Cr 和 Cd 元素含量的差值(表示为 Cr_{cz} 和 Cd_{cz})与土壤类型、土地利用类型、地形、土壤有机质、pH、人类活动、交通干扰等因素的关系进行分析。

3.3.1 主控因素 成土母质是表层土壤主要的物质基础,其类型差异会直接影响表层重金属含量。本研究取深度 $180 \sim 200$ cm 的土壤作为成土母质,通过分析表层和深层样点的重金属含量,能更准确地判定影响研究区表层土壤重金属空间分布的主控因素是否为成土母质。

1)表层土壤和成土母质中重金属空间分布格局的定性分析。研究区内两种重金属在表层和深层土壤

中的空间分布均表现为明显的空间自相关性,因此利用 GS+9.0 软件对表、深层两种元素进行空间分布模型拟合,并根据不同的拟合结果利用 ArcGIS 10.0 软件进行插值分析。利用普通克里格插值对 Cd、Cr 两种元素在表、深层土壤中的水平分异特征进行模拟,普通克里格插值结果的平均值分别为 $-0.000\ 03$ (表层 Cd)、 $0.000\ 14$ (深层 Cd)、 $0.027\ 3$ (表层 Cr)、 $0.067\ 3$ (深层 Cr),均接近于 0;标准均方根误差分别为 $1.001\ 3$ (表层 Cd)、 $0.974\ 2$ (深层 Cd)、 $0.892\ 1$ (表层 Cr)、 $0.953\ 1$ (深层 Cr),均比较接近于 1,表明普通克里格插值效果较好。由图 5 可知,表层 Cd 元素的水平空间分布格局与成土母质中 Cd 元素的水平空间分布格局总体上较为相似,Cd 含量在泥砂质湖积物母质区域明显低于泥砂质河谷沉积物母质区域;但表层和成土母质中 Cd 含量的空间分异强度存在差异,与深层成土母质中 Cd 空间分布相比,表层 Cd 含量空间分布图中图斑面积较小,并且相对零散,表现出相对显著的小尺度变异,说明表层土壤中 Cd 空间分布受到了一定的外在因素影响。Cr 在表层土壤中的水平分布格局与在成土母质中的水平分布格局相似度较高,进一步说明了 Cr 元素主要受成土母质的影响。

2) 表层土壤与成土母质中重金属含量的定量分析。为了对表层土壤和成土母质中土壤重金属含量进行相关性分析,本研究利用 ArcGIS10.0 软件对深层两种元素的栅格图进行提取分析,得到对应表层采样

点位置的深层重金属含量数据。表 3 相关系数表明两种重金属元素的表层与成土母质中的重金属含量均表现为在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,相关系数分别为 0.167 (Cd)、 0.639 (Cr)。说明表层两种元素含量都受到成土母质的影响,但 Cd 元素较 Cr 元素受成土母质影响相对较小。此外,表层两种元素含量均值在泥砂质湖积物母质区域明显低于泥砂质河谷沉积物母质区域,和上文表层、深层土壤重金属空间分布格局对比分析结果相一致。单因素方差分析中 Sig.(方差齐性检验) > 0.05 ,通过了方差齐性检验,表明可以进入下一步分析;Sig.(单因素方差分析) < 0.05 ,表明观测变量和控制变量之间存在显著关系。本研究中表层两种元素 Sig.(方差齐性检验显著性)分别为 0.627 和 0.975 ,Sig.(单因素方差分析显著性)均为 0.00 ,说明不同成土母质对表层两种重金属含量产生了显著的影响。总体而言,相关性分析和单因素方差分析从纵向和横向的角度分别阐明了表层两种重金属含量主要受成土母质的影响,其中成土母质对表层 Cr 元素影响更大。

3.3.2 其他相关因素 1) 土壤类型。利用 SPSS19.0 软件进行描述性统计分析,得到肇源县不同土壤类型中表、深层重金属含量差均值(表 4),Cd_{cz} 在各种土类中的均值大小顺序为:盐土 > 沼泽土 > 草甸土 > 碱土 > 黑钙土 > 新积土 > 风沙土,除了新积土和风沙土中 Cd_{cz} 均值较低,其他土类 Cd_{cz} 均值比较相

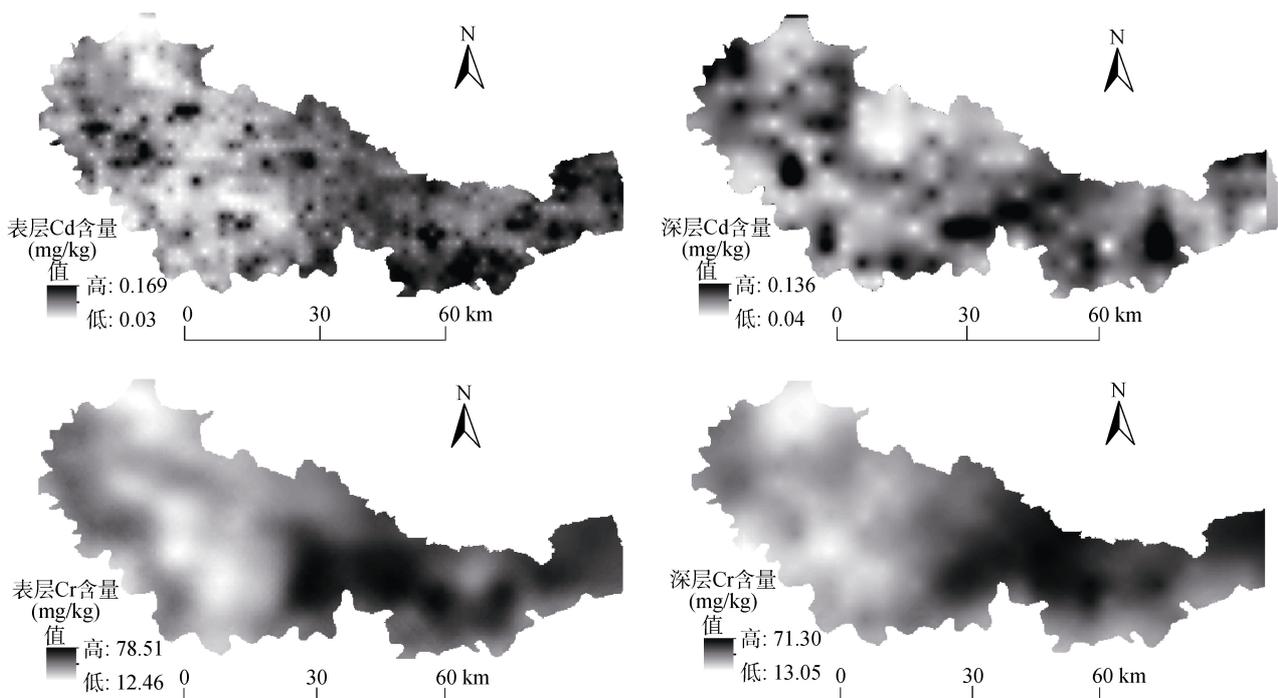


图 5 研究区表层土壤和成土母质重金属含量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of Cd and Cr in topsoil and parent material of studied area

表 3 研究区表层土壤重金属含量及其与成土母质重金属含量相关系数
Table 3 Contents and correlation coefficients of Cd and Cr in topsoil and in parent material of studied area

重金属	参数	泥砂质湖积物	泥砂质河谷沉积物	Sig.(方差齐性检验)	Sig.(单因素方差分析)	成土母质 Cd	成土母质 Cr
Cd (n=536)	范围(mg/kg)	0.030 ~ 0.156	0.033 ~ 0.169	0.627	0.00	0.167**	-
	均值(mg/kg)	0.070	0.086				
	标准差(mg/kg)	0.020	0.020				
Cr (n=438)	范围(mg/kg)	15.39 ~ 72.45	12.46 ~ 77.80	0.975	0.00	-	0.639**
	均值(mg/kg)	40.320	53.100				
	标准差(mg/kg)	11.58	11.83				

注：*表示在 $P < 0.05$ 水平(单侧)显著相关，**表示在 $P < 0.01$ 水平(单侧)显著相关；下同。

近。由于新积土样点较少，偶然性可能较大，在此不做探讨。Cr_{cz} 在不同土壤类型中的均值大小顺序为：沼泽土 > 草甸土 > 新积土 > 黑钙土 > 风沙土 > 盐土 > 碱土。其中沼泽土和草甸土中的 Cr_{cz} 均值较高，草甸土中 Cr_{cz} 均值较高可能与受到外部其他因素的影响有关，而沼泽土中 Cr_{cz} 均值可能与表层 Cr 易迁移汇集于江河和地势低洼区域有关。

虽然 Cr_{cz} 和 Cd_{cz} 均值在不同的土类中确实存在差异，但不能直接说明 Cr_{cz} 和 Cd_{cz} 受土壤类型影响，为了深入探讨土壤类型与 Cr_{cz}、Cd_{cz} 的关系，使研究更具精确性和科学性，本研究对 Cr_{cz}、Cd_{cz} 进行插值后与土壤类型图进行叠加分析。普通克里格插值结果的平均值分别为 0.031 6 和 0.000 007，均接近于 0，标准均方根误差分别为 0.965 628 5 和

1.001 31，均较接近于 1，说明普通克里格插值效果比较好。从图 6A 研究区中东部 Cd_{cz} 均值的空间分布图与土壤类型图叠加，发现二者在中东部区域具有较好的吻合性，中东部盐土、沼泽土以及草甸土中 Cd_{cz} 均值较高，黑钙土中 Cd_{cz} 均值较低，其分布与各种土类 Cd_{cz} 均值含量高低有较强的一致性，说明中东部 Cd_{cz} 值的空间分布主要受土壤类型的影响，而西部以及西南部重金属流失较为厉害，与土壤类型的关系不明显；从图 6B 研究区 Cr_{cz} 均值的空间分布图与土壤类型图叠加，发现二者在整个区域具有较好的吻合性，整体 Cr_{cz} 值较高的区域都在沼泽土和草甸土中，而黑钙土和碱土中 Cr_{cz} 值较低，同时和整个区域 Cr_{cz} 均值有较强的一致性，说明整个研究区 Cr_{cz} 均值的空间分布主要受土壤类型的影响。

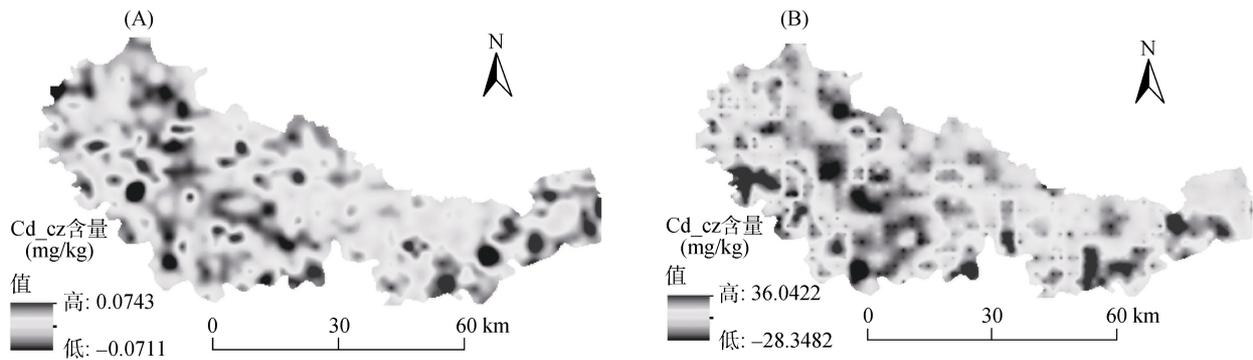


图 6 研究区表层土壤和成土母质重金属差值空间分布
Fig. 6 Spatial distributions of differences in Cd and Cr between topsoil and parental material of studied area

表 4 研究区不同土壤类型表层与成土母质重金属含量差均值(mg/kg)
Table 4 Mean values of differences in Cd and Cr between topsoils and parentals materials under different soil types in studied area

土类	草甸土(n=576)	风沙土(n=60)	黑钙土(n=157)	碱土(n=27)	新积土(n=4)	盐土(n=49)	沼泽土(n=109)
Cd _{cz}	0.014	0.004	0.011	0.013	0.007	0.017	0.015
Cr _{cz}	6.546	1.149	2.801	0.039	3.575	1.058	10.278

2) 土地利用类型。研究区主要土地利用类型表、深层重金属含量差值统计结果见图 7。重金属 Cd、Cr 表层、深层含量差值均在水域及水利设施用地中最大，在其他 3 种主要土地利用类型中，重金属 Cd

表层、深层含量差值几乎保持一致；在耕地和草地中，重金属 Cr 表层、深层含量差值基本保持一致，但是略高于其他土地中的含量差值。因此，在土地利用类型中，只有水域及水利设施对重金属含量产生了一定

的影响,而另外 3 种土地利用类型对重金属含量的影响相对较小。水域及水利设施用地在研究区内主要是内陆滩涂、河流水面和坑塘水面,这些水域及水利设施用地可能影响表层土壤重金属 Cd 和 Cr 的累积。

3) 地形及土壤性质。重金属流失严重区域主要是由迁移导致的,为了更精确地分析重金属流失严重区域表层重金属的影响因素,选取上文 Cd_{cz}、Cr_{cz} 空间分布图中重金属流失严重区域的样点(456 个)进行研究。本研究通过 ArcGIS10.0 软件直接从研究区 DEM 数据中提取主要地形指标因子,包括高程、坡度、坡向、曲率,利用 SPSS19.0 软件对 Cd_{cz}、Cr_{cz} 和主要的地形指标、土壤有机质、pH 等指标分别对整个研究区和重金属流失严重区域进行相关性分析。

表 5 数据显示,从整个研究区来看,Cd_{cz}、Cr_{cz} 与有机质呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关;在地形指标因子中,坡向对 Cd_{cz} 略有影响,而高程、坡度以及曲率对 Cd_{cz} 几乎无影响;曲率对 Cr_{cz} 略有影响,其他地形因子对 Cr_{cz} 影响较小。

重金属流失严重区域较整个研究区而言,Cd_{cz} 和有机质、pH 的相关性较低;在地形指标中,高程和坡向的相关性增强;Cr_{cz} 和有机质、pH 的相关性提高,而各类地形因子影响较小。综上,不同尺度下的地形指标、有机质、pH 与 Cr_{cz}、Cd_{cz} 相关性存在明显的差异。重金属流失严重区域,Cd_{cz} 的影响因素复杂,该区域有机质含量较低导致 Cd_{cz} 均值较低;地势高的区段,Cd_{cz} 均值明显较低,可能和表层 Cd 元素向下迁移有关;而坡向可能是通过影响植被的生长来影响 Cd 的迁移及累积(本研究区坡向超过 180°,主要为背光坡,背光坡植被长势明显低于向光坡)。Cr_{cz} 受地形因素影响在下降,受有机质和 pH 的影响在增强,说明表层 Cr 的流失与地形的关系不大,主要与土壤有机质和 pH 相关。经测定,该区域的有机质和 pH 分别是整个研究的 0.82 倍和 1.06 倍,因此可以认为,表层 Cr 的流失主要受有机质和 pH 的影响。

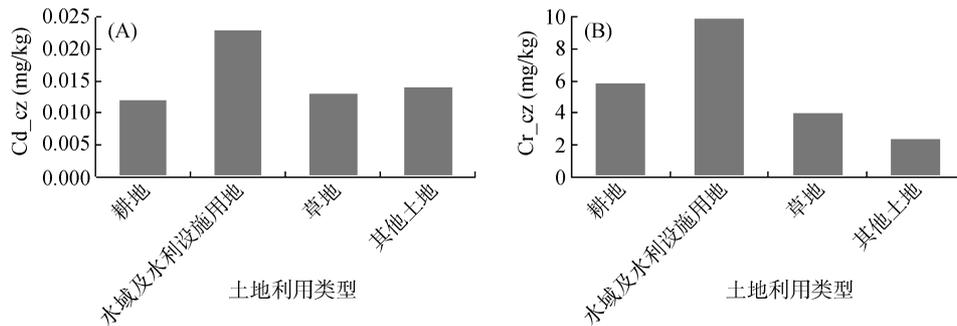


图 7 主要土地利用类型表层土壤和成土母质重金属含量差值统计图

Fig. 7 Mean values of differences in Cd and Cr between topsoils and parental materials under main soil types in studied area

表 5 表层土壤重金属含量差值与各类指标的相关分析

Table 5 Correlation between differences of Cd, Cr in topsoil and various indexes

区域	指标	相关系数						有机质(g/kg)	pH
		有机质	pH	高程	坡度	曲率	坡向		
整个研究区(n=1 031)	Cd _{cz}	0.325**	-0.244**	-0.004	-0.017	-0.240	-0.080**	24.64	8.95
	Cr _{cz}	0.516**	-0.317**	0.006	0.032	-0.670*	-0.041		
重金属流失严重区域(n=456)	Cd _{cz}	0.181**	-0.006	-0.095*	0.003	-0.065	-0.930*	20.32	9.48
	Cr _{cz}	0.539**	-0.285**	0.042	0.087	-0.067	-0.088		

4) 主干道。据相关研究可知,重金属污染随着与公路距离的增加而降低,污染集中在道路 200 m 范围内^[21]。为分析主干道对重金属含量的影响范围,本研究对道路分别以 50、100、200、300、400、500、1 500 m 建立缓冲区,提取缓冲区范围内的样点(共 127 个)进行分析。

为了排除样点所受异常因素的影响,在相同缓冲区内取相应的样点,计算数据的均值以及样点到主干道的平均欧氏距离。在 Orgin9.0 软件中获取表层重金属 Cd、Cr 的含量以及 Cd_{cz}、Cr_{cz} 和距主干道距离的关系图。如图 8A 显示,在缓冲区范围内,表层 Cd 含量的变化趋势和 Cd_{cz} 均值的变化趋势一

致,说明表层 Cd 含量的变化主要受主干道的影响,在距离主干道 0~600 m 内,Cd 含量和 Cd_{cz} 均值变化幅度较大,其中距离主干道 150 m 范围内,Cd 含量随距离逐步增加,之后 Cd 含量分别在 240 m 和 360 m 出现拐点,表明表层 Cd 的空间分布在局部受主干道的影响较大。如图 8B 显示,在缓冲区范围内,表层 Cr 含量在距主干道 0~440 m 波动较大,但这不能说明表层 Cr 含量受主干道的影响,可能还与该区域本底

背景值波动较大有关。为了进一步分析 Cr_{cz} 均值随着距主干道距离增大的变化趋势,在距主干道<80 m 时,Cr_{cz} 均值逐步增加,距主干道距离>80 m 后,Cr_{cz} 值波动较为平缓,说明表层 Cr 含量分布在距主干道 80 m 范围内受到影响。总体而言,主干道对表层重金属 Cd 和 Cr 的空间分布都产生了一定的影响,但在影响效应上存在差别。同时,该结果为进一步探究主干道对重金属空间分布的影响提供了指导。

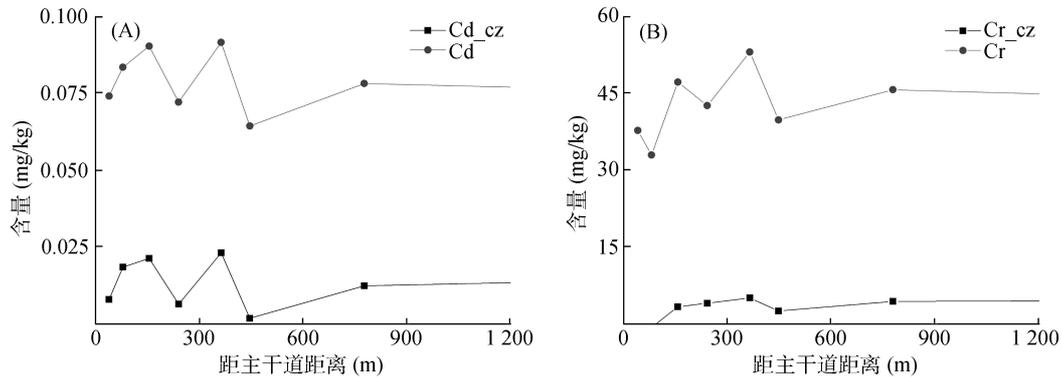


图 8 距主干道距离与表层土壤和成土母质重金属差值变化关系

Fig. 8 Effects of distance from main road on differences of Cd and Cr between topsoil and parental materials

5) 行政村点。行政村点分布较为广泛,可能会对整个研究区重金属含量空间分布产生影响。因此,本研究对所有采样点到最近行政村点的距离做统计分析。由于样点过多以及外部因素的干扰,难以找出对应的函数关系,因此分别以距行政村 100、200, ..., 2 500、3 000 m 为划分标准,取各个范围内的样点,计算其含量均值以及到最近行政村的平均欧氏距离;然后,利用 SPSS19.0 对数据进行回归分析,得出肇源县重金属 Cd_{cz} 和 Cr_{cz} 均值与距行政村距离的函数关系。结果显示,它们的函数拟合值(R²)都较低,分别是 0.269 83 和 0.382 29。进

一步分析认为,研究区的 Cd_{cz} 和 Cr_{cz} 均值和距行政村距离远近的规律性较差。Cd_{cz} 和 Cr_{cz} 值总体上分别在 0.0125 和 5 上下波动,说明表层两种重金属都存在富集状况,但富集程度较低,受外界因素干扰较小。其中,Cd_{cz} 值较小且在距离行政村点 0~280 m 内呈递增趋势(图 9A),Cr_{cz} 值在距行政村点不同距离的变化比较复杂,没有明显规律(图 9B),说明表层 Cd 的空间分布受到了人为干扰,但仅仅在一定距离下受到人为干扰的可能相对来说较为显著,而表层 Cr 的空间分布几乎不受生活垃圾、污水排放、燃烧取暖等干扰。

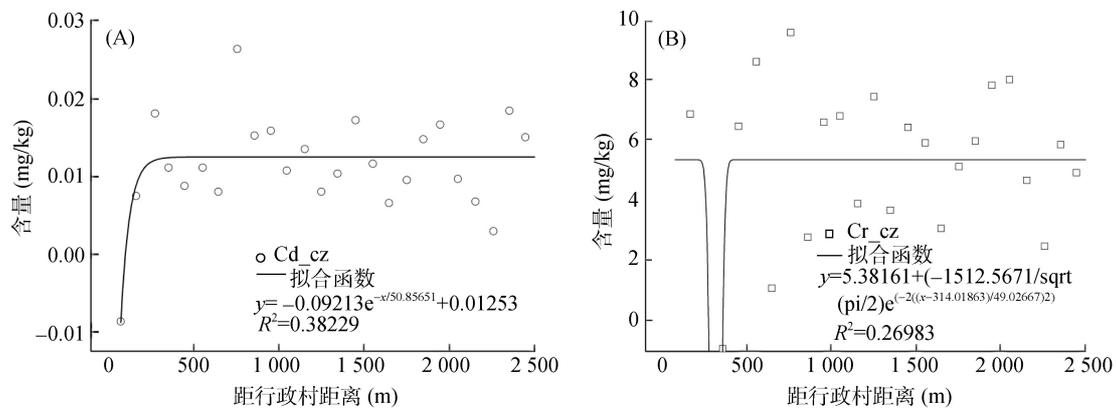


图 9 距行政村距离与表层土壤和成土母质重金属差值函数关系

Fig. 9 Effects of distance from village on functions of differences of Cd and Cr between topsoil and parental materials

4 结论

1) 肇源县表层土壤 Cd 和 Cr 含量略高于松嫩平原表层土壤背景值。表层土壤 Cr 元素的水平空间变异表现出较为明显的结构性, 而 Cd 元素表现出较为明显的随机性; 两种元素的水平空间分布均表现出较为明显的各向异性, 均在 45°(东北-西南)和 135°(东南-西北)方向上表现出强烈的空间变异结构性。

2) 表层土壤与成土母质中 Cd、Cr 的空间分布格局及含量特征表明, 成土母质是表层土壤中两种元素的最主要物质来源, 对两种元素的水平空间分布影响最为显著。

3) 在成土过程及土地利用过程中成土母质类型、土壤类型、土地利用类型和 pH 也对表层土壤中 Cd、Cr 的含量及水平空间分布产生了一定程度的影响。表层 Cd 含量在主干道两侧 800 m 范围内, Cr 含量在主干道两侧 80 m 内表现出明显的空间变异; 在距农村居民点 280 m 范围内, 表层土壤 Cd 含量产生一定程度的富集; 表层土壤 Cr 元素流失还受有机质、pH 等因素的影响。

参考文献：

- [1] 钟巧, 王勇辉, 焦黎. 夏尔西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, 3(23): 360-365
- [2] 岳荣, 史锐, 张红. 土壤中重金属累积特征及生态风险评估[J]. 土壤, 2016, 48(2): 314-321
- [3] 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
- [4] 阮心玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 基于高密度采样的土壤重金属分布特征及迁移速率[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1020-1025
- [5] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(20): 213-222
- [6] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡接合带土壤重金属时空变异特征与源解析[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1066-1077
- [7] 张慧, 付强, 赵映慧. 松嫩平原北部土壤重金属空间分异特征及生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2013, 2(20): 165-169
- [8] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 86-96
- [9] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1139-1146
- [10] Niu L L, Yang F X, Xu C, et al. Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. Environmental Pollution, 2013, 176(5): 55-62
- [11] Dou Y G, Li J, Zhao J T, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 67(1/2): 137-145
- [12] 刘世梁, 崔保山, 温敏霞, 等. 路域土壤重金属含量空间变异的影响因子[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 253-260
- [13] 徐尚平, 陶澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 337-345
- [14] 刘剑锋, 谷宁, 张可慧, 等. 土壤重金属空间分异及迁移研究进展与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 99-103
- [15] 陈雪龙, 齐艳萍, 吴海燕, 等. 大庆龙凤湿地土壤重金属空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2013, 4(20): 141-144
- [16] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 599-605
- [17] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12): 236-241
- [18] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1946-1954
- [19] 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): 225-235
- [20] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [21] 刘坤, 李光德, 张中文, 等. 城市道路土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 124-127

Influential Factors of Spatial Distribution of Cd and Cr in Regional Soils

ZHANG Hui, MA Xinpeng^{*}, SHI Xiaolei, SUI Hongjun, SU Hang, YANG Huan
(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Influential factors of spatial variabilities and distributions of Cd and Cr were analyzed in topsoils of Zhaoyuan County, a major agricultural county. The results showed that the average concentrations of Cd and Cr in topsoils were 0.078 mg/kg and 46.006 mg/kg, respectively, slightly higher than those of the Songnen Plain; the ratios of nugget/sill were 0.432 for Cd and 0.227 for Cr, respectively, indicating a moderate spatial autocorrelation for Cd and a strong one for Cr. Anisotropy analyses suggested that the spatial autocorrelation of Cd and Cr were dependent on the direction, and there were the most obvious spatial autocorrelation in 45°(northeast-southwest) and 135°(southeast-northwest) direction. Correlation coefficients of Cd and Cr between topsoil and parental material were 0.167 and 0.639, respectively ($P < 0.01$). Variance analyses of Cd and Cr in topsoils under different parent materials showed that F values were 0.627 and 0.975, respectively, indicated that the spatial distributions of Cd and Cr were dominated by parent material, while also affected by soil type and pH value, land use type and cover type.

Key words: Heavy metals; Cd; Cr; Spatial distribution; Influential factors