

北京市土壤中 Cr, Ni 含量的空间结构与分布特征

郑袁明 陈 煌 陈同斌 郑国砥
吴泓涛 周建利

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究室, 北京 100101)

摘要 本文以一个完整的省级行政单元(北京市)为例,进行系统的、大尺度的土壤 Cr, Ni 含量的空间分布与污染评价研究,通过地统计学方法分析揭示了北京市土壤中 Cr, Ni 的空间结构与分布特征,并探索其主要成因,为全面了解北京市的土壤环境质量和开展大规模的土壤环境质量评价研究等提供方法学借鉴和参考。结果表明:土壤 Cr, Ni 含量的空间结构具有较好的可迁性特点;指数模型拟合效果较好,变程分别为 174.6 km 和 15 km;半变异函数的方向性分析表明,Cr, Ni 均为各向同性,土壤中 Cr, Ni 具有中等程度的空间相关性。土壤中 Cr 含量的分布特征为空间相关范围较大,从总体趋势来看,土壤 Cr 含量的分布较为连续,呈明显的东高西低的分布趋势,大致可以分为 3 个大的斑块,西北方向(太行山山脉)土壤 Cr 含量较低,而东南方向(冲积平原)土壤 Cr 含量相对居中,东北部(燕山山脉)的土壤 Cr 含量最高。土壤 Ni 含量的空间分布比较零散,其分布大致表现为东北部地区最高,西南部居中,中部地区最低。研究还揭示,北京市土壤中 Cr, Ni 含量目前仍主要受成土母质的影响,但是个别地区也存在明显的 Cr, Ni 含量严重偏高现象。

关键词 北京市 土壤 Cr Ni 空间结构 半变异函数 Kriging 插值法

土壤重金属含量与人类健康息息相关,因此其污染状况及形成机理一直都是环境科学中备受关注的研究领域^[1,2]。为建立可靠的土壤重金属环境标准(基准),不仅要了解重金属在土壤中的含量、分布及其空间变异,而且要确定人为因素及自然因素对土壤中重金属含量的贡献^[3]。但是,过去对土壤污染的研究主要关注采样点中污染物的含量,对区域性土壤污染的程度、污染物的空间分布等问题研究得相对较少,对土壤污染源的分析也仅局限于定性评估^[4],其定量描述相对较少^[5]。将地统计学方法与多元统计学方法结合,探讨对污染源的定量描述是土壤环境研究中的一种新思路^[6]。

土壤信息(如土壤重金属含量)的一个基本特征就是其在特定的位置上具有空间和时间的相关性^[6]。地统计学可以将时空坐标与土壤属性值进行组合,为土壤信息处理提供

* 第一作者简介:郑袁明 男 26 岁 博士研究生 环境科学专业 E-mail: zhengym@igsnr.ac.cn

北京市自然科学基金重大项目(批准号:6990002)、中国科学院知识创新工程重点方向项目(批准号:KZCX2-04-01)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(批准号:CX10G-C00-04)资助

2003-03-30 收稿,2003-04-30 收修改稿

一系列的基本工具和手段。在地统计学中,可以利用半变异函数描述土壤属性的空间模式,并以此为基础通过 Kriging 插值法预测未采样地点的属性值^[7,8],揭示区域化变量的空间特征。因此,采用地统计学方法有助于了解未采样地点的土壤重金属含量,获取土壤重金属的空间结构与分布特征等诸多信息。近年来,地统计学在环境科学领域中越来越受到关注^[9,10],国内学者已将其应用于土壤环境研究^[9,11~13]。

随着城市化进程及工业的迅速发展,城市土壤的重金属污染日趋严重^[14]。城市是人类活动最密集的地区,其土壤环境质量与人类健康的关系颇为密切。研究发现,人类活动的强度与土壤重金属污染程度紧密相关^[12,15]。因而,近年来城市土壤重金属的研究已成为环境科学和土壤科学等相关领域中的国际研究热点^[16,17]。

关于北京市土壤重金属含量等研究在国内起步较早。但是,以前关于北京地区的土壤重金属研究多集中在东南郊和污灌区,其空间尺度较小^[12],研究范围仅局限于对北京市某些局部地区的典型调查。我们也曾以北京市近郊区为例,对土壤 Ni 的空间结构进行了前期的探索性研究^[13]。但是,到目前为止,对于全北京市的重金属含量与分布情况仍缺乏系统的研究。从 1999 年开始,我们首次以一个完整的省级行政单元(北京市)为例,开展系统的、大尺度土壤重金属空间分布与区域土壤环境质量(重金属污染)评价研究,并建立了“土壤重金属信息系统(SHMIS)”^[17],一方面为全面了解北京市的土壤环境质量提供基础信息,同时也为今后开展全国性的或其他省市的土壤环境质量研究以及第三次全国土壤普查等提供借鉴和参考。本文是该研究的系列成果之一,旨在通过地统计学方法分析和揭示北京市土壤中 Cr 和 Ni 的空间结构、分布特征,并探索其主要成因。

1 材料与方 法

1.1 样品采集及样品分析

北京市土壤类型以潮土及褐土为主,因而研究中土壤样品以这两种类型为主,兼有少量山地棕壤。从土地利用类型的角度划分,主要包括菜地、麦地、稻田、城市绿地、公园和林地等。在土壤采样过程中,主要根据北京市土壤重金属的空间变异性,采用非均匀布点的分层抽样方法来确定具体的取样地点和样本数,以保证取样地点和抽样样本数的代表性。采样过程共分两步:第一步,在北京市平原地区按照均匀布点的思想共采集 349 个样品,进行室内分析和 Kriging 插值,得到重金属含量分布图;第二步,以第一步的结果为基础,根据各区的土壤重金属的空间变异性,主要对重金属浓度较高的地区以及重点调查地区进行加密采样。前后两步共采集土壤样品 772 个。每个样点均采自 10m × 10m 正方形四个顶点和中心点,各取表层(0~20 cm)土壤约 1 kg,现场均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土壤,作为代表该点的混合样品。采样的同时采用 GPS 定位样点坐标(图 1)。为防止样品污染,在采样、样品保存和样品处理过程中,土壤样品始终没有与铁铲等金属器皿直接接触。

1) Lu Y, Gong Z T, Zhang GL *et al.* Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China. *Geoderma*, 2003

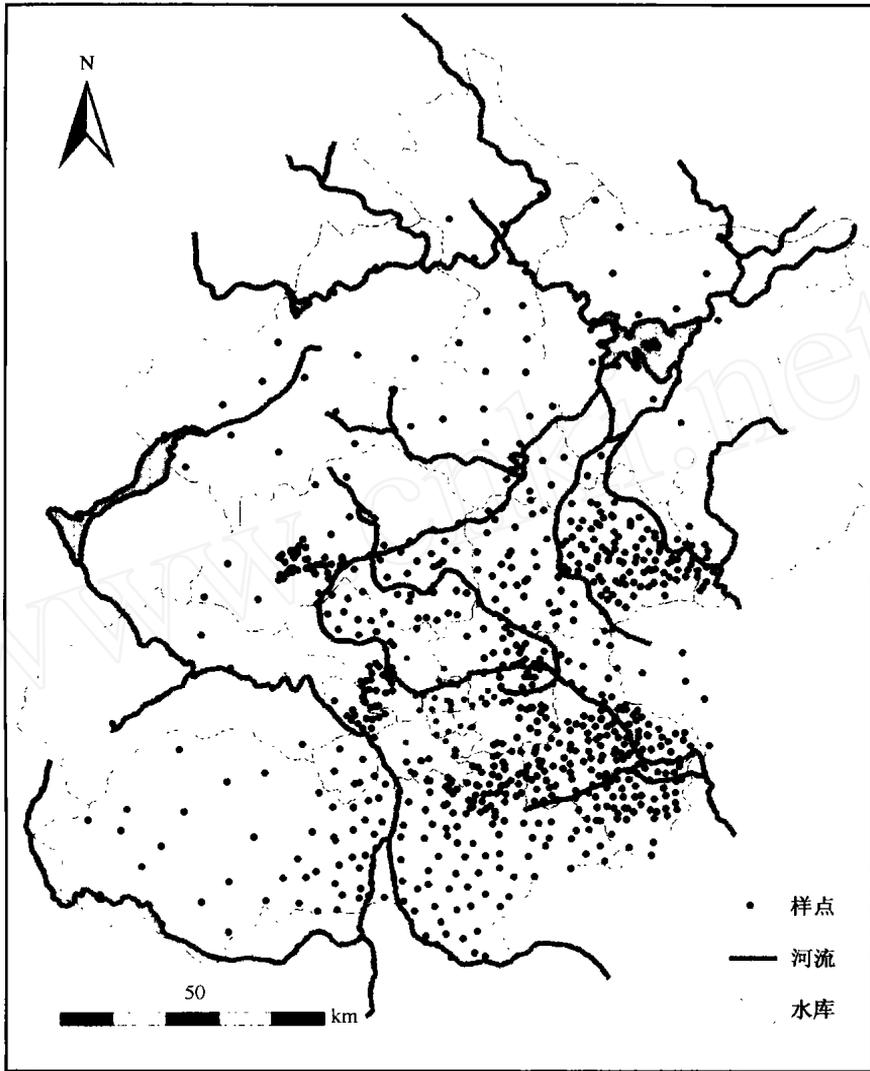


图1 北京市土壤取样的样点分布图

Fig. 1 A sketch map of Beijing showing the sampling sites

土样在室内风干,过 100 目尼龙网筛,用美国国家环境保护局(USEPA) 3050B 方法消煮^[18],原子吸收光谱仪(AAS Vario 6)测定 Cr, Ni 浓度。分析过程中全部使用优级纯或光谱纯的化学试剂和超纯水,并采用国家标准土壤样品(GSS-1)进行分析质量控制。样品分析测试过程中均采取了严格的数据质量控制和质量保证措施。

1.2 数据处理

数据的非正态分布会使得半变异函数产生比例效应,进而造成实验半变异函数产生畸变,抬高基台值和块金值(C_0)^[10],因此需消除比例效应。本研究中,土壤 Cr, Ni 含量经对数转换后满足正态分布,从而消除了比例效应。半变异函数()的计算分为距离组,步

长(h)划分以 3 km 为间距,距离容限为 ± 1.5 km。根据各向异性半变异函数的计算划分角度组,容限为 $\pm 22.5^\circ$ 。采用 SPSS 软件进行数据统计分析,半变异函数的计算及其拟合采用 Surfer、SPSS 软件完成。与直接使用普通 Kriging 插值法相比,复杂半变异函数模型以及趋势分析模型的盲目使用容易导致错误的数值估计^[3]。因此,本研究直接利用分析所得的半变异函数的理论模型进行普通 Kriging 插值,插值成图用 ARC/GIS 软件完成。

2 结果与讨论

北京市土壤中 Cr, Ni 含量的基本统计结果如表 1。从表 1 可以看出,Cr 的平均含量为 35.7 mg/kg,比其相应的土壤背景含量高 19.8%;其最大值达 228.2 mg/kg,比其相应的土壤背景值含量高 6.7 倍。土壤 Ni 的平均含量为 27.6 mg/kg,与背景值较为接近,其最大值为 168.9 mg/kg,比其背景值含量高 5.3 倍。从表 1 还可以看出,两种重金属含量的变异系数在 32%~39%左右,两者之间相差不大,因此北京市土壤中 Cr 和 Ni 的变异程度接近。这些结果表明,从总体上来说,北京市土壤中的 Cr 有一定程度的积累,Ni 的积累现象并不明显;但是在极个别地区,土壤 Cr, Ni 的含量均严重偏高,存在 Cr, Ni 污染的威胁。

表 1 北京市土壤 Cr 与 Ni 含量统计结果

Table 1 Statistics of Cr and Ni concentrations in the soils of Beijing

	重金属含量/mg·kg ⁻¹							背景值 ¹⁾
	最小值	中值	最大值	算术均值	几何均值	标准差	变异系数	
Cr	7.0	32.8	228.2	35.7	33.6	14	39.2%	29.8
Ni	2.8	27.3	168.9	27.6	26.5	8.7	31.6%	26.8

2.1 土壤 Cr, Ni 含量的空间结构特征分析

研究计算了北京市土壤中 Cr, Ni 的实验半变异函数,并根据其特点进行了理论模型的拟合,模型拟合参数见表 2。

表 2 理论半变异函数模型拟合参数

Table 2 Parameters of models of the theoretic semivariogram

	模型类型	块金值(C_0)	拱高(C)	$C_0/(C_0+C)$	变程/km	R^2
Cr	指数模型	0.0137	0.0136	0.502	174.6	0.940
Ni	指数模型	0.0072	0.0070	0.507	15.0	0.869

本研究中采用指数模型对 Cr 和 Ni 的实验变异函数进行拟合^[19]的效果较好,其决定系数 R^2 分别为 0.940 和 0.869(见表 2)。两种元素均具有很好的可迁性特点,反映出北京市土壤中 Cr, Ni 含量具有很好的空间结构性;均表现出明显的块金效应,块金值(C_0)分别为 0.0137 和 0.0072,与拱高(C)比较接近,块金值在基台值中所占的比例约为 50%(见表 2),这部分变异通常解释为随机效应。 C_0 与 (C_0+C) 的比值可以揭示区域化变量的空间相关程度。比值小于 0.25 表明空间相关性很强,大于 0.75 表明空间相关性较弱^[20]。

1) 陈同斌,郑表明,陈煌等.北京市土壤重金属背景值的系统研究.环境科学(待刊)

本研究中 Cr, Ni 的 C_0 与 $(C_0 + C)$ 的比值均在 0.5 左右,因此土壤中 Cr 与 Ni 的含量均具有中等程度的空间相关性,即随机效应与结构效应相近。虽然其不能完全反应更小尺度的空间变异,但在本研究中的大规模取样调查中已经足够。元素实验半变异函数随着步长 (h) 的增加而上升,逐渐达到基台值,拟合所得的变程分别为 174.6 km 和 15.0 km,其中 Cr 的相关性范围基本达到整个研究区域,表明其空间相关性的范围较大(见表 2)。

因而,从块金值 C_0 与 $(C_0 + C)$ 的比值两方面可以看出,在本研究中两种重金属的空间变异比较接近(即它们的空间结构具有近似性),但是二者的变程差别较大,Ni 的变程远小于 Cr。这可能与土壤中 Ni 的含量容易受到人为因素干扰有一定关系。

区域化变量在不同方向上表现出不同的空间结构时称为各向异性。在本研究中,为了比较元素在不同方向上的变异程度,分别计算了两种元素在多个方向上的半变异函数,最后选出其中变化差别最大方向上的半变异函数进行比较,同时计算了相应两个方向上步长相同时的实验半变异函数的比值(K) (图 2 和图 3)。从图 2 可以看到,土壤 Cr 的空间结构特征表现为明显的各向同性,在 33° 和 123° 两个方向上的实验半变异函数波动较为一致,曲线基本重合,而两个方向上相同步长时的半变异函数的比值 K 也接近于 1。

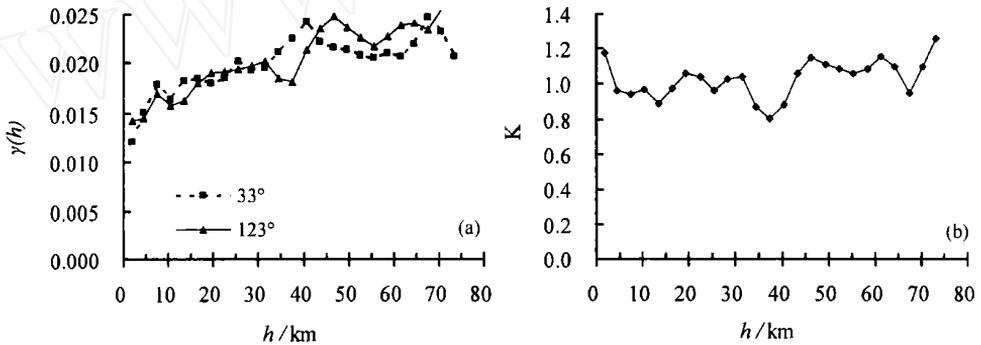


图 2 Cr 各向异性半变异函数 (a) 及不同方向半变异函数比 (b)

图中方向角度是以正东方向依逆时针方向的夹角。图 3 同

Fig. 2 Anisotropic semivariogram of Cr (a) and ratio of the semivariograms in different direction (b)

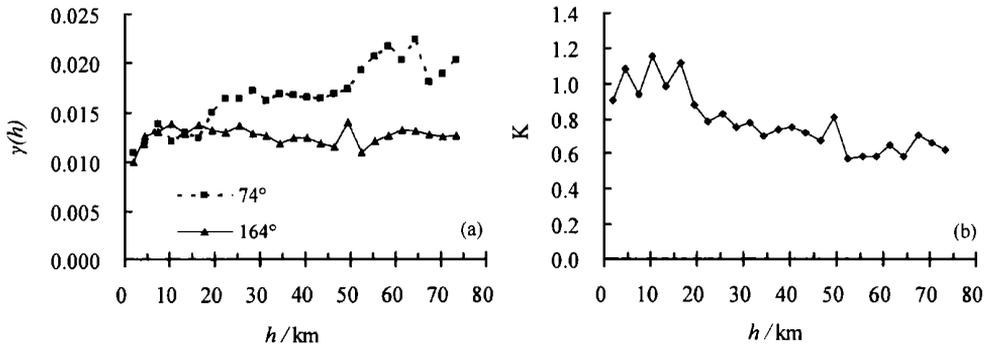


图 3 Ni 各向异性半变异函数 (a) 及不同方向半变异函数比 (b)

Fig. 3 Anisotropic semivariogram of Ni (a) and ratio of the semivariograms in different direction (b)

土壤中 Ni 的半变异函数也基本表现为各向同性(见图 3),在 74 和 164 两个方向上都具有可迁性特点。但是 74 方向上的半变异函数在大于 20 km 尺度上表现出漂移现象,164 方向的函数有一定随机波动,但较为平稳。因而 K 值在大于 20 km 后开始下降,主要是由于 74 方向的半变异函数的漂移所致。

Cr, Ni 均表现为各向同性,表明影响二者空间结构的因素不具有明显的方向性。由于二者的空间结构比较相似,因而可以认为,影响土壤 Cr, Ni 含量的主要因素基本相同。

2.2 土壤 Cr, Ni 含量的分布特征

利用拟合的半变异函数模型进行普通 Kriging 插值得到 Cr, Ni 的含量分布图(图 4 和图 5)。土壤 Cr 含量的空间分布具有较好的结构性(见图 4),由于其变程为 174.6 km(见表 2),空间相关范围较大。Cr 空间分布的方向性并不明显,这与其半变异函数的表现为各向同性相一致。

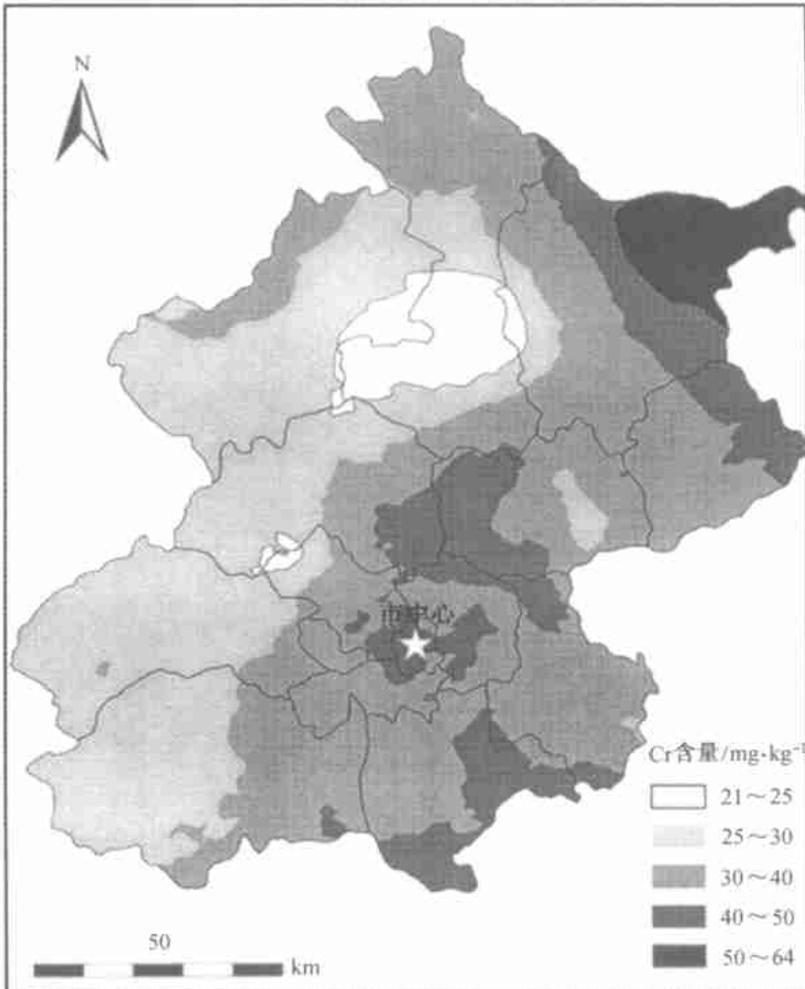


图 4 北京市土壤 Cr 含量分布图

Fig. 4 Distribution patterns of Cr concentrations in the soils of Beijing

在整个研究地区内, Cr 含量的分布较为连续, 大致可分为 3 个大的斑块, 呈明显的东高西低的分布趋势(见图 4 中东部地区的颜色较西部深)。如果以东北 - 西南方向的斜线进行划分, 西北方向主要为分布于太行山山脉的山地土壤, 其 Cr 含量较低, 基本上都低于 30 mg/kg; 而东南方向主要为冲积平原, 其 Cr 含量相对居中, 基本上都在 30 ~ 40 mg/kg 之间。此外, 在东北部有燕山山脉所发育的山地土壤, 其 Cr 含量相对较高, 基本上都在 40 ~ 64 mg/kg 之间。

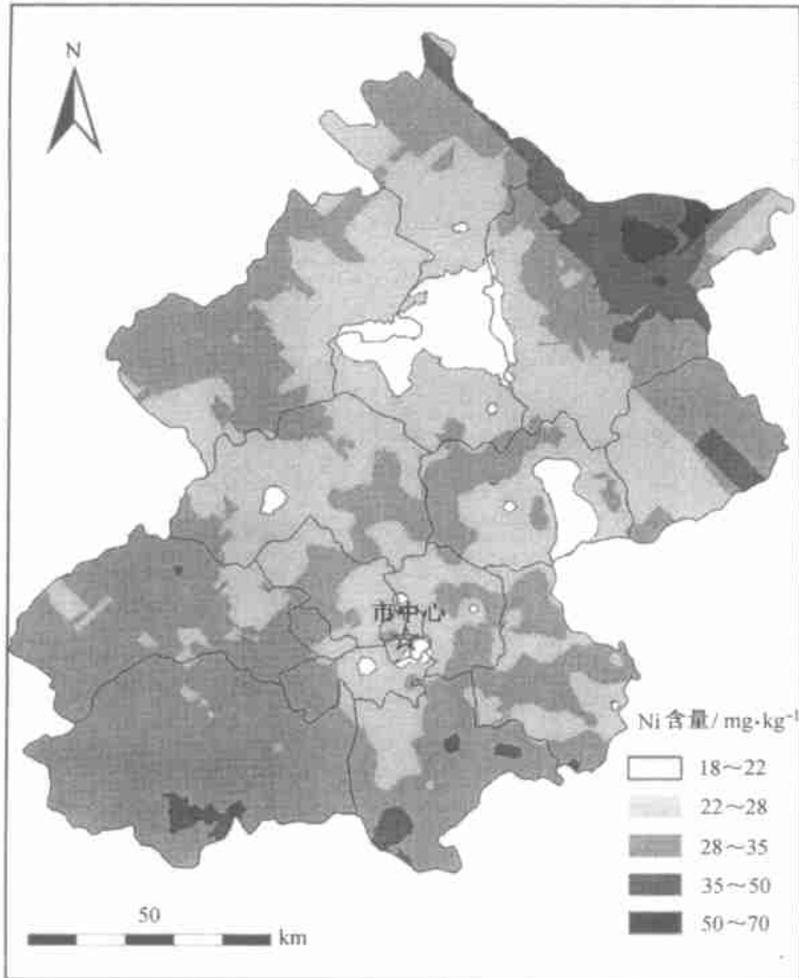


图 5 北京市土壤 Ni 含量分布图

Fig. 5 Distribution patterns of Ni concentrations in the soils of Beijing

土壤 Cr 含量的极低值出现在怀柔县中部地区, 极高值分布位于密云县北部地区。昌平与顺义交界以及大兴南部地区, Cr 含量为全市的中高水平(40 ~ 50 mg/kg)。以背景值 29.8 mg/kg 为标准(见图 4 中 Cr 含量大于 30 mg/kg 的区域), 东部地区的土壤 Cr 含量基本超出背景值, 约占全市面积的 1/2, 但是超出幅度并不是很高。密云县北部地区的极高值的出现, 极有可能与该地区分布有一个 Cr 矿有关^[21]。而北京的东南部地区主要是冲

积平原,其 Cr 含量也许与冲积过程有一定关系。因此,到目前为止,北京地区土壤 Cr 含量仍主要是受母质影响^[22]。

但是,从图 4 中也可以看出,市区的土壤 Cr 含量较高,基本上都在 40~50 mg/kg 范围,而且其分布与城区的形状大致类似,因此人类活动也导致了部分土壤中 Cr 的积累,对土壤 Cr 含量造成一定影响^[13]。

与 Cr 相比,土壤 Ni 含量的空间分布比较零散,半变异函数的分析结果显示其变程为 15 km(见表 2),因而其含量的斑块分布相对而言比较琐碎(见图 5)。Ni 分布的空间方向不是很强,只是在 74°方向上有漂移。这可能是由于在这个方向上 Ni 含量的分布从中部分别向东北、西南方向递增的趋势造成的。但总体上其空间分布呈各向同性。

从全市土壤 Ni 含量的总体趋势来看,大致表现为,东北部最高(与燕山山脉走向基本一致的一个狭长条状),西南部居中,中部地区最低。除北京平原地区的东南部有一些零星的、小范围高 Ni 区外,基本上 Ni 含量较高的地区分布在东北部的位 置,其含量多在 35~50 mg/kg 之间,且与燕山山脉的走向基本一致;西南部地区土壤 Ni 含量居中,多在 22~35 mg/kg 之间;对中部地区而言,大部分的 Ni 含量较低,绝大部分地区土壤都小于 22 mg/kg,但是在西北部太行山山脉形成的土壤中,Ni 的含量在 22~35 mg/kg 之间。

Ni 含量的极高值、极低值的出现位置与 Cr 极其类似,分别在密云县北部地区以及怀柔县中部。以土壤 Ni 的背景值 26.8 mg/kg 为标准进行比较,图 5 中约 1/3 面积的土壤 Ni 含量超出背景值(大致相当于图 5 中含量大于 28 mg/kg 的地区),除分布于密云县北部的 Ni 极高值地区外,在房山、门头沟以及大兴南部地区也有较高的 Ni 含量分布。

根据结构分析以及图 4 和图 5 中两种元素含量分布的相似性可以看出,土壤中 Cr 与 Ni 具有一定程度的近似性,这与他人的研究结果一致^[21, 22]。其主要原因可能是,通常土壤矿物中 Cr 与 Ni 是相伴出现的,土壤 Cr, Ni 含量受共同的土壤矿物的影响,因此二者的空间结构和分布具有一定的相似性,因而密云县北部的 Cr 矿分布可能也会导致土壤中的 Ni 含量增加。但与 Cr 不同的是,石油等燃料的使用也会影响环境中的 Ni 含量^[13]。因而北京市土壤中的 Ni 除受母质制约外,可能还受到石油消耗等人类排放的影响。

需要指出的是,在密云水库北部地区 Cr, Ni 分布异常,其含量达到背景值的 2 倍以上。由于该地区土壤环境质量对于北京市生活用水的水质有较大关系,因此该地的 Cr, Ni 含量过高对密云水库的水质是否会产生影响?这是一个值得关注的问题。

3 结论

用地统计学方法对北京市土壤中 Cr, Ni 含量的研究表明,两种重金属的空间结构具有一定的相似性,均具有较好的可迁性特点,利用指数模型进行拟合效果较好,其变程分别为 174.6 km 和 15.0 km。土壤 Cr 含量的分布特征为,在整个研究区域内,大致以东北-西南方向为界,呈现出西北部 Cr 低、东南部 Cr 高的趋势,其空间相关范围较大,高含量区分布在密云县北部地区。土壤 Ni 含量的空间分布比较零散,在 74°方向上含量分布有从中部分别向东北、西南方向递增的趋势。与 Cr 类似,Ni 高含量区分布也出现在密云县北部地区。北京市约有 1/2 的土壤 Cr 含量超过其 Cr 含量的背景值,有 1/3 的土壤 Ni 含量超过 Ni 含量的背景值,显示土壤中 Cr 与 Ni 存在一定程度的积累现象。

从总体来说,到目前为止北京市土壤的 Cr, Ni 含量主要受成土母质的影响,其分布格局在一定程度上反映了北京市土壤成土母质中 Cr, Ni 含量的空间分布。二者最大的区别在于变程, Cr 的含量分布更为均匀,而 Ni 的含量分布较为零散。这可能与 Ni 比 Cr 更容易受到石油燃烧等人为扰动有关。

参 考 文 献

- 1 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠等. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状. 地理学报, 1997, **52**: 228 ~ 236
- 2 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 2002, **47**: 207 ~ 210
- 3 Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, 2001, **114**: 313 ~ 324
- 4 Davies B E, Ballinger R C. Heavy metal in soils in north Somerset, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips. *Environmental Geochemistry and Health*, 1990, **12**: 291 ~ 300
- 5 Korre A. Statistical and spatial assessment of soil heavy metal contamination in areas of poorly recorded, complex sources of pollution, Part 1. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, **13**: 288 ~ 316
- 6 Govaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, **89**(1/2): 1 ~ 45
- 7 Vieira S R, Hatfield J L, Nielsen D R *et al.* Geostatistic theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 1983, **51**: 1 ~ 75
- 8 Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 1985, **38**: 45 ~ 94
- 9 Tao S. Spatial structure of copper, lead, and mercury contents in surface soil in the Shenzhen Area. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **82**: 583 ~ 591
- 10 张朝生, 章 申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. 地理学报, 1997, **52**: 185 ~ 192
- 11 Wang X J. Kriging and heavy metal pollution assessment in wastewater irrigated agricultural soil of Beijing 's eastern farming regions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/ Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 1998, **A33**: 1 057 ~ 1 073
- 12 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. 环境科学学报, 1997, **17**: 412 ~ 416
- 13 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. 地理学报, 2003, **58**(3): 470 ~ 476
- 14 Mantaa D S, Bellanca M A A, Neria R *et al.* Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *The Science of the Total Environment*, 2002, **300**: 229 ~ 243
- 15 郑袁明, 余 柯, 吴鸿涛等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价. 地理研究, 2002, **21**(4): 418 ~ 424
- 16 Imperato M, Adamo P, Naimo D *et al.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, **124**(2): 247 ~ 256
- 17 陈 煌, 郑袁明, 陈同斌. 面向应用的土壤重金属信息系统(SHMIS)——以北京市为例. 地理研究, 2003, **22**(3): 272 ~ 280
- 18 United States Environmental Protection Agency (USEPA). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges and soils (revision 2). U. S. A Government, 1996
- 19 庄恺玮, 李达源, 陈尊贤. 地理统计预测污染土壤中重金属的空间分布 I. 极端值与半变异图模式的影响. 中国农业化学会志, 1996, **34**: 560 ~ 574
- 20 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, **55**(5): 555 ~ 566
- 21 北京市计划委员会. 北京市国土资源地图集. 北京: 测绘出版社, 1990. 14
- 22 Pierce F J, Dowdy R H, Grigal D F. Concentrations of six trace metals in some major Minnesota soil series. *Journal of*

Environmental Quality, 1982, 11: 412 ~ 416

SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS OF Cr AND Ni IN SOILS OF BEIJING

Zheng Yuanming Chen Huang Chen Tongbin Zheng Guodi
Wu Hongtao Zhou Jianli

*(Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural
Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)*

Abstract

The knowledge of the distribution of heavy metal concentrations in soils is the base of environmental quality assessment of soils. Geostatistics is an appropriate method to study the spatial distribution patterns of soil heavy metals. Using geostatistical methods it was found that the semivariogram of Cr and Ni in soils of Beijing showed good transition character, which could be fitted well using the exponential model. The ranges of Cr and Ni were 174.6 km and 15.0 km, respectively. The spatial structures of Cr and Ni were isotropy. The distribution patterns of Cr and Ni were high in the north of Miyun County. So the soil environmental quality should be paid much attention to this area. The results show that the distribution patterns of Cr and Ni presented the variations of heavy metals in different districts and the Kriging method could provide with a suitable way to identify the contamination sources.

Key words Beijing, soil, Cr, Ni, spatial structure, semivariogram, ordinary Kriging