DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2018.02.022

露天煤矿周边不同深度土壤重金属空间变异及分布特征①

阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔[1,2]，王宏卫[1,2*]，杨胜天[3]，买买提·沙吾提[1,2]，再屯古丽·亚库普[1,2]，何珍珍[1,2]

(1 新疆大学资源与环境科学学院，乌鲁木齐 830046；2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室，乌鲁木齐 830046；3 北京师范大学地理学与遥感科学学院，北京 100875)

摘 要：以准东露天煤矿周边为研究对象，对矿区周围 52 个土壤样点分别采取 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 不同深度的土壤样品，在室内测定了 Zn、Cr、Hg 和 As 4 种重金属含量。采用地统计学方法，定量分析了不同深度土壤重金属元素的空间变异性，并通过普通克里金插值深入分析了其水平和垂直方向的空间分布规律。研究表明：土壤重金属元素含量大小顺序为 Cr＞Zn＞As＞Hg，其中 Cr、Hg 和 As 的均值分别超过了新疆背景值的 0.6 倍、2.1 倍和 1.8 倍，超标率均在 60% 以上，存在较严重的污染。从空间变异性来看，半方差函数符合高斯、指数和球状模型，其块金值均为正值，说明易受正基底效应的影响，而表层和深层土壤重金属元素的块金系数均在 25% ~ 75%，呈现中等空间相关性，受随机因素和结构性因素共同作用的影响。重金属元素在水平空间分布具有一定的规律性，其高值密集在矿区周边及工业园附近，而低值出现在研究区南部和古尔班通古特沙漠边缘，总体呈现南北方向递增趋势；而垂直分布上，Zn 和 Hg 元素随深度的增加其含量递减，而 As 元素在表层和其他两层的空间分布上存在较大的差异。

关键词：露天煤矿；重金属；空间变异；地统计分析

中图分类号：X53 文献标识码：A

露天矿区煤炭的大量开采导致土壤重金属污染，引发严重的区域生态破坏、土地退化和环境污染等一系列重要问题[1-2]。土壤重金属以不易分解、隐蔽性、稳定性和易被富集等特征，在一定程度通过不同途径进入食物链直接或间接地威胁人类健康和安全，日益成为高度重视的主要研究热点[3-5]。地统计学早已视为揭示土壤重金属空间变异性及直观地展示重金属含量空间分布的最有效工具之一[6-7]。因此，借助地统计方法深入分析研究区土壤重金属污染的空间分布特征及异质性，可为防治露天煤矿及周边土壤重金属污染、改善生态环境及合理利用土地资源提供理论依据及指导。

近年来，诸多国内外学者已在重金属污染空间分布方面开展了大量研究。如孙贤斌和李玉成[8]以大通煤矿为研究区，通过 GIS 技术分析了淮南大通煤矿废弃地土壤重金属元素含量的空间分布与变异特征；阿不都艾尼等[9]对准东露天煤矿周围进行了土壤样品的采集以及室内试验分析，采用了空间插值方法对 Zn、Cu、Cr、Hg、Pb 和 As 6 种重金属元素在土壤中的含量、污染状况和空间分布特征进行了研究；Ersoy 和 Yunsel [10]对英国德比郡马特洛克某矿区附近牧场受重金属污染土壤的特征进行分析，使用地统计学方法生成了该区域 Pb、Zn 和 Cu 元素的空间分布图；Benhaddya 和 Hadjel[11]利用 GIS 技术研究了阿尔及利亚表层土壤重金属污染空间分布特征；张晗等[12]以大宝山矿区周边为研究对象，定量分析了土壤和植被重金属含量和化学形态分布，以及不同区域污染特征。但多数研究只针对表层土壤重金属的空间分布，忽略了重金属空间变异特征及不同深度土壤重金属的空间分布。本文以准东露天煤矿为例，对不同深度的土壤进行采样，并通过室内试验分别测定了 Zn、Cr、Hg 和 As 4 种重金属元素含量，采用 GIS 技术及地统计学方法，定量研究了不同深度下土壤重金属的空间变异性，深入分析了重金属水平和垂直方向的

①基金项目：国家自然科学基金项目(U1603241，51704259)和国家科技支撑计划项目(2014BAC15B01)资助。

* 通讯作者(wanghw_777@163.com)

作者简介：阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔(1993—)，男(维吾尔族)，新疆喀什人，硕士研究生，主要从事干旱区资源与环境遥感应用研究。E-mail: salam1993@163.com

空间分布规律，以为土壤重金属污染治理和煤炭资源开采可持续发展提供基础参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

准东露天煤矿地处天山北麓，准噶尔盆地东南部，位于新疆昌吉州东部的吉木萨尔县、奇台县和木垒县三县境内。研究区范围为 88°40′ ~ 90°40′ E，44°10′ ~ 45°15′ N，北部为卡拉麦里山自然保护区，西至火烧山，南接古尔班通古特沙漠，总面积约 12 500 km^2。地貌以戈壁滩平原为主，地形平坦开阔，平均海拔在 350 ~ 700 m，地势由东南向北倾斜呈北高南低。该区域远离海洋，属于典型大陆性温带极端干旱沙漠气候，日照充足，干旱少雨，温差较大，多年平均气温为 7 ℃，年均降水量为 184 mm，蒸发量约为 2 000 mm，全年风向以西北风为主，一般风力 3 ~ 6 级。地表植被覆盖稀疏，类型少，结构单一，主要植物有假木贼、梭梭、琵琶柴、沙拐枣、柽柳和猪毛菜等。

1.2　土壤样品采集与测定

于 2014 年 7 月 12 日至 7 月 20 日在准东露天煤矿区域进行了野外调查，采样点布设在研究区范围内正在开采的五大矿区及周边工业园附近。通过 GPS 选取具有代表性的 52 个土壤采样点(图 1)，精确记录地理坐标、植被覆盖状况、周围矿区、工业园、煤炭加工厂及生活办公区位置及距离等信息，并分别拍摄东西南北方向的景观建立野外调查照片库。根据实地情况在各采样点采用梅花状进行采样，分别采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 深度土壤，各土样约取 500 g 装入采样袋封存以备测定土壤重金属含量。本研究在 52 个采样点，共采集 156 个土壤样本。

采集的土样，经过剔除土样中的杂质进行自然风干，用干净木棒研磨过 1 mm 孔径筛，并称取 0.500 g 土样，按照相应的化学方法[13-15]准备待测溶液，后送至新疆大学理化测试中心进行 Zn、Cr、Hg 和 As 4 种重金属含量的测定。为保证数据的准确性，每个样品进行 3 次测定，取均值作为测定最终值。

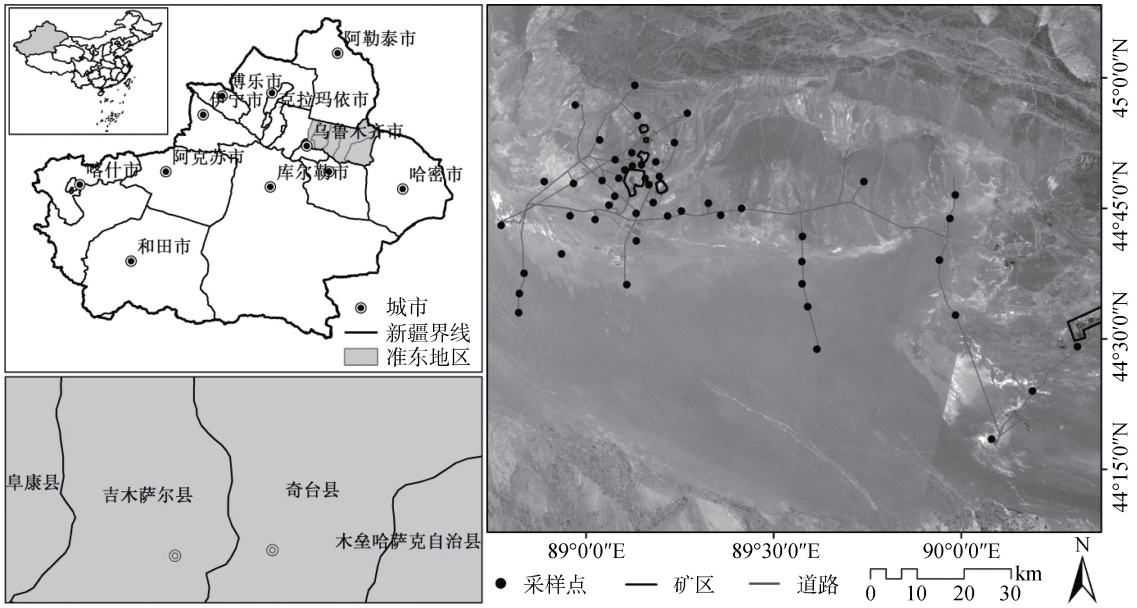


图 1　研究区及采样点分布图

Fig.1　Sketch map of study area and sampling sites

1.3　地统计分析方法

半方差函数(semi-variogram)是地统计学的基本函数，表述区域化变量结构性和随机性特点的基本手段，变量数据异质性的定量指标[16-17]。半变异拟合图则揭示空间数据变异性的主要工具，变异函数越大，空间异质性越弱。半变异函数通式为[18-20]：

$$r(h)=\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\left[\hat{Z}(x_i)+Z(x_i+h)\right]^2$$

式中：$r(h)$ 为变异函数；h 为步长；n 为样点数目；$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在 x_i 和 x_i+h 处的实测值。

在采用克里金插值过程中，可以采用多种标准函数(如指数函数、高斯函数、圆形函数、常数函数、球体函数等)用以进行理论半变异建模[21-22]，因此本文分别选取指数模型、球状模型和高斯模型进行拟合，从而探讨不同函数拟合半变异模型对空间插值精

度的影响。当计算变异函数时，一般要求数据符合正态分布或近似于正态分布[23]，否则可经对数转化后使其呈正态分布。

1.4 数据处理

本研究利用 SPSS19.0 软件对原数据进行描述性统计，使用 GS+ 9.0 软件对不同深度土壤重金属含量数据进行空间变异结构分析，并通过交叉验证检验以确定拟合度较高的理论模型和基础参数，借助 ArcGIS10.1 软件的地统计模块进行普通克里金(ordinary kriging，OK)插值生成研究区不同深度土壤重金属空间分布格局图。

2 结果与讨论

2.1 不同深度土壤重金属含量的描述性统计

对 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 深度土壤样品分别进行 Zn、Cr、Hg 和 As 含量的描述性统计分析，结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，研究区不同深度土壤 4 种重金属含量最大值均超过新疆土壤背景值[24]，Cr、Hg和As的平均值依次为82.09、0.063 和31.77 mg/kg，分别超过新疆土壤背景值的 0.6 倍、2.1 倍和 1.8 倍，超标率均大于 60%，表明准东露天煤矿周边土壤可能受到这 3 种重金属污染较为严重。其中根据前人学者的相关研究[25]，Cr 元素各深度的含量一直超过背景值且超标率较高，可知近几年 Cr 元素在准东露天煤炭资源开采过程中仍然存在较严重的污染。不同深度土壤 Zn 元素含量均值未超过新疆土壤背景值，超标率远小于 10%，说明 Zn 元素的污染程度较小，在研究区范围内不同深度土壤中该元素的污染并不明显。4 种重金属元素含量的大小顺序为 Cr＞Zn＞As>Hg，平均含量均以 0 ~ 10 cm 土壤最高，表明表层土壤更易受煤炭生产过程影响导致土壤重金属的积累。其中 Cr、As 元素在 0 ~ 10 cm 表层和 20 ~ 30 cm 底层的含量均大于 10 ~ 20 cm 中层，出现“高–低–较高”的分布规律，但 Zn、Hg 元素含量随深度的增加呈现逐渐降低的变化趋势。

标准差(SD)反映的是土壤重金属的绝对变异，而空间分布的相对离散程度由变异系数(CV)来表示[26-27]，一般情况下 CV ≥ 100 为强变异性，10＜CV＜100 为中等变异性，CV ≤ 10 为弱变异性。由表 1 可知，不同深度土壤 Cr、Zn 和 As 元素的变异系数均在 10% ~ 100%，属于中等变异，但其变异系数的变化差异较小，表示这 3 种元素在一定程度受到煤炭开采等人类活动的影响。其 Hg 元素变异系数为最大且均大于 100%，属于强变异性，不同深度含量离散程度波动比较明显，说明其受到外界因素作用的影响较剧烈。

表 1 研究区重金属含量的描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal contents in soils of study area

元素	深度(cm)	范围(mg/kg)	均值(mg/kg)	方差	标准差 SD	变异系数(%)	背景值(mg/kg)	超标率(%)	K-S 检验 *P* 值
Zn	0 ~ 10	26.24 ~ 81.23	48.05	144.82	12.03	25	68.80	2	0.75
	10 ~ 20	25.60 ~ 72.94	47.49	107.75	10.38	22		4	0.42
	20 ~ 30	24.55 ~ 86.06	46.06	135.97	11.66	25		2	0.72
Cr	0 ~ 10	30.84 ~187.06	84.74	2 484.72	49.84	59	49.30	63	1.66
	10 ~ 20	29.74 ~174.91	80.42	2 074.57	45.55	56		61	1.48
	20 ~ 30	26.67 ~191.90	81.11	2 227.99	47.20	58		59	1.59
Hg	0 ~ 10	0.01 ~ 0.51	0.07	0.01	0.10	142	0.02	61	2.11
	10 ~ 20	0.01 ~ 0.27	0.06	0.05	0.07	116		60	1.84
	20 ~ 30	0.01 ~ 0.58	0.06	0.10	0.09	150		62	2.18
As	0 ~ 10	1.48 ~ 119.20	32.63	290.59	17.05	52	11.20	92	1.22
	10 ~ 20	3.19 ~ 59.37	30.53	136.65	11.69	38		94	0.47
	20 ~ 30	3.53 ~ 97.31	32.17	250.58	15.83	49		96	1.13

2.2 不同深度土壤重金属含量的空间变异特征

描述性统计特征只能说明研究区范围内重金属含量的变化特征，不能定量地揭示其空间相关性、结构性和独立性，而地统计分析能够更好地解释重金属含量的空间变异性。本研究对研究区不同深度土壤重金属含量采用 K-S 检验方法进行正态检验，其 *P* 值均大于 0.05，同时采用直方图法和正态 QQ 分布图法来验证数据，其均服从正态分布。为更准确地分析各深度土壤重金属含量空间变异特征，以决定系数较大及残差较小原则，反复筛选并确定了较适合的半方差函数模型及参数如表 2 所示，半方差函数拟合如图 2 所示。块金值由 C_0 来表示，通常反映的是在一定采

样尺度范围内非连续而由非自然因素引起的空间变异性程度和测量过程产生的实验误差。基台值由 C_0+C 表示，反映系统总的变异，其基台值越小变量空间异质性越弱。结构性因子 $C_0/(C_0+C)$ 表示随机因素产生的空间变异占总体变异的比例，可反映变量的空间相关性程度，一般情况下若 $C_0/(C_0+C)\leq 25\%$，则变量具有较强烈的空间相关性；若 $25\%<C_0/(C_0+C)\leq 75\%$，则变量具有中等空间相关性；若 $C_0/(C_0+C)\geq 75\%$，则变量空间相关性很弱。变程 A 反映区域变量空间相关性作用范围的大小，是分析变量空间变异的重要参数。决定系数 R^2 反映半方差函数的拟合精度，其值越大并接近于 1 表示被选理论模型的拟合效果越好。分维数 D 反映变量在一定尺度上空间异质性的复杂程度，而分维数越小，说明数据的空间依赖性越强。

由表 2 可知，准东露天煤矿周边不同深度的土壤重金属含量数据主要符合高斯模型、指数模型和球状模型；各层深度土壤的 4 种重金属含量块金值均为正值，其中 Zn 和 As 元素的块金常数较大，说明主要受采样误差、短距离差异及随机变异等正基底效应的影响；对基台值而言，总体大小顺序为 Zn＞As＞Hg＞Cr，且 4 种重金属的基台值在表层土壤都大于其余两层深度土壤，表明表层土壤重金属含量的空间变异性相比深层土壤较为强。0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 等不同深度土壤重金属的结构性因子分别在 36.9% ~ 62.5%、12.8% ~ 25.0% 与 31.8% ~ 66.7%，表明中层土壤重金属具有强烈的空间自相关，其主要受地形、母质、土壤类型及气候等自然因素的影响较大；而表层和深层土壤结构性因子均在 25% ~ 75% 范围呈中等空间相关性，表明其重金属的空间异质性不仅受自然因素的影响，同时受到煤炭开采、工业污染及交通运输等人类活动的影响共同作用。研究区各层土壤重金属的空间自相关性范围大小相差较大，表示这几种元素的空间分布相互独立及整体存在较复杂的规律。除 10 ~ 20 cm 中层土壤的 Cr 元素外，其余决定系数范围在 0.54 ~ 0.92，说明拟合模型较好地反映了不同深度土壤 Zn、Cr、Hg 和 As 等重金属元素的空间变异结构特征，同时表明其半方差函数的拟合效果均较好。

表 2　土壤重金属半方差函数类型和模型参数

Table 2　Semivariance function types and model parameters of soil heavy metal contents

元素	深度(cm)	理论模型	块金值 C_0	基台值(C_0+C)	结构性因子 $C_0/(C_0+C)$(%)	变程 A(km)	决定系数 R^2	分维数 D
Zn	0 ~ 10	指数模型	84.06	181.07	46.4	0.58	0.69	1.98
	10 ~ 20	球状模型	33.15	153.21	21.6	0.41	0.57	1.91
	20 ~ 30	球状模型	76.64	179.35	42.7	0.61	0.63	1.94
Cr	0 ~ 10	高斯模型	0.05	0.08	62.5	0.03	0.54	1.94
	10 ~ 20	球状模型	0.02	0.08	25.0	1.07	0.46	1.98
	20 ~ 30	高斯模型	0.04	0.06	66.7	0.03	0.57	1.97
Hg	0 ~ 10	球状模型	0.14	0.28	50.0	0.87	0.89	1.56
	10 ~ 20	高斯模型	0.04	0.21	19.1	0.09	0.78	1.88
	20 ~ 30	指数模型	0.07	0.22	31.8	0.11	0.92	1.70
As	0 ~ 10	球状模型	71.08	192.38	36.9	0.48	0.89	1.84
	10 ~ 20	球状模型	19.32	150.42	12.8	0.18	0.91	1.89
	20 ~ 30	高斯模型	68.94	129.92	53.1	1.01	0.83	1.99

2.3　不同深度土壤重金属含量的空间分布特征

根据不同深度土壤重金属含量原始数据和理论半方差函数模型的特征参数，利用普通克里金插值方法，对准东露天矿区周边 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层土壤 Zn、Cr、Hg 及 As 重金属含量进行空间插值，得到各元素的空间分布格局图(图 3)。为保证空间插值分析的准确性，需要交叉验证时，以平均误差 ME 与标准平均误差 MSE 的绝对值接近 0，平均标准误差 ASE 接近于均方根误差 RMSE，标准均方根误差 RMSSE 接近 1 等原则进行评价预测精度。交叉验证结果(表 3)显示，研究区不同深度土壤重金属含量空间插值精度较高，可准确地反映其空间分布状况。

从图 3 插值结果可以看出，Zn、Cr、Hg 及 As 元素在水平空间分布具有一定的规律性，其含量的高值主要在露天煤矿、煤电煤化工厂及生活办公区周围出现，而低值主要出现在研究区南部及古尔班通古特

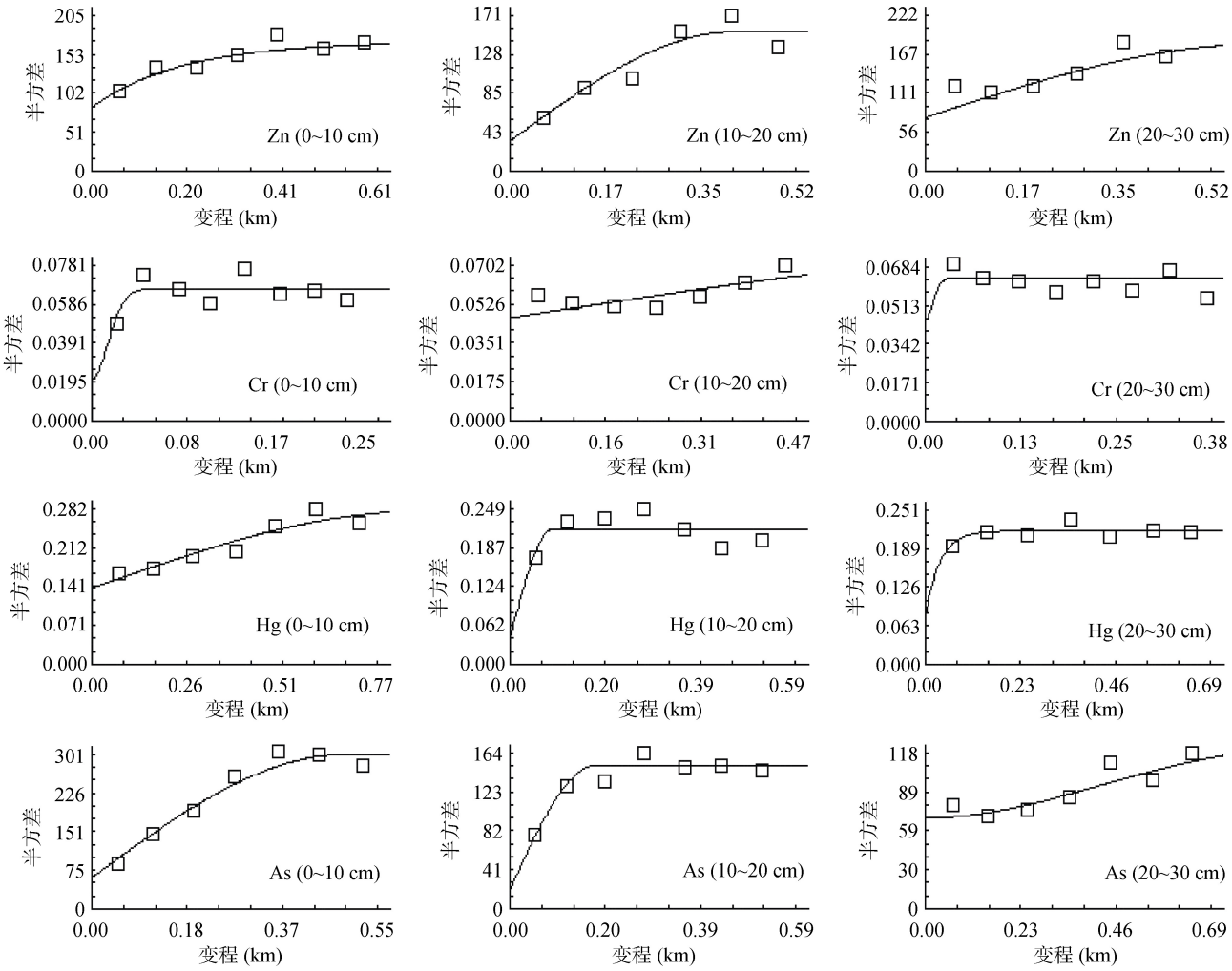


图 2　土壤重金属半方差函数拟合图

Fig. 2　Semivariance functions of soil heavy metal contents

表 3　土壤重金属交叉验证精度参数

Table 3　Precision parameters of cross validation of heavy metal contents in soils

元素	深度(cm)	平均误差 ME	标准平均误差 MSE	平均标准误差 ASE	均方根误差 RMSE	标准均方根误差 RMSSE
Zn	0 ~ 10	0.417	0.039	9.014	8.634	0.861
	10 ~ 20	–0.230	–0.012	7.826	6.476	1.095
	20 ~ 30	0.334	0.035	8.782	8.590	0.798
Cr	0 ~ 10	0.260	0.018	4.365	4.657	1.079
	10 ~ 20	0.208	0.009	3.982	4.054	1.025
	20 ~ 30	0.345	0.024	4.230	3.895	1.034
Hg	0 ~ 10	–0.105	–0.137	0.108	0.102	0.868
	10 ~ 20	–0.003	–0.246	0.105	0.078	1.156
	20 ~ 30	–0.011	–0.287	0.107	0.106	1.290
As	0 ~ 10	–0.037	0.005	8.641	9.785	1.119
	10 ~ 20	–0.123	0.002	7.524	9.060	1.114
	20 ~ 30	0.180	0.016	9.325	10.782	1.207

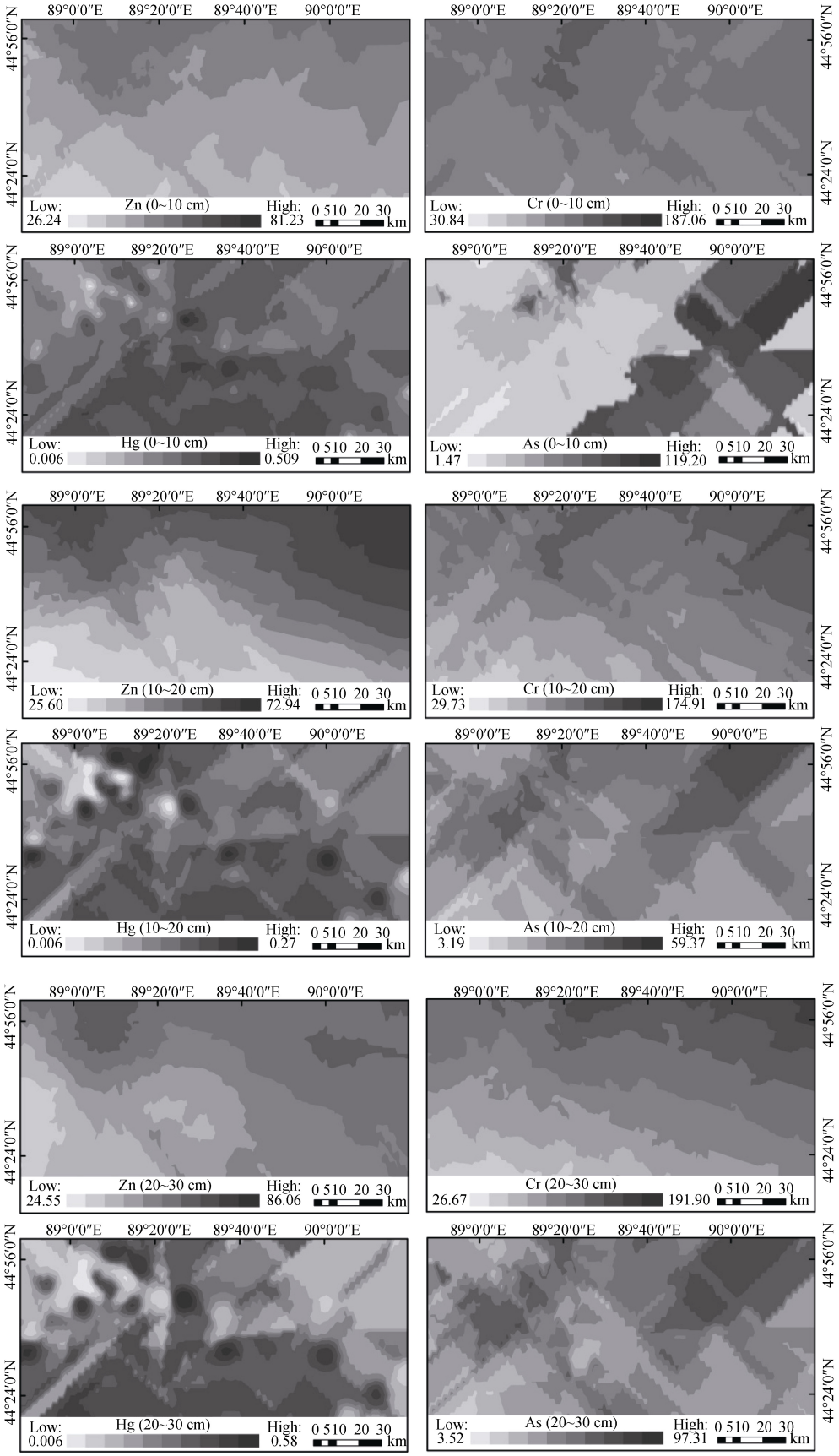


图 3　不同深度土壤重金属空间分布图

Fig. 3　Spatial distributions of heavy metal contents in soils at different depths

沙漠的西北缘，在整个研究区范围内土壤重金属含量(除 Hg 元素)总体呈现从南向北递增趋势。其中 Zn 和 Cr 元素具有以阶梯状格局分布，沿西南方向分布较为均匀且含量逐渐减少，高值主要密集研究区目前正在开采的五彩湾、将军庙、大井和北山等露天煤矿周边以及火烧山东部和公路两侧，低值则主要出现在以研究区南部为主的人类活动较少的区域和沙漠边缘，表明其不仅受土壤母质、地形地貌和风向等自然因素的影响，同时一定程度受到煤炭开采、交通运输等人类活动的影响较为明显。Hg 元素的分布较为离散，高浓度污染位置在离矿区很近的区域，大范围高值在研究区的中南部出现，反而在五彩湾和火烧山工业区西部呈现出小面积的低值区，可说明 Hg 的污染主要以煤矿开采形成的煤尘、排土场的扬尘以及近几年陆续建立的煤电煤化工厂等工业园排出的“三废”为污染源，在风力的作用下向周围区域扩散导致污染的不均匀。As 元素在研究区西北部的火烧山东部、五彩湾煤矿的北部和卡拉麦里山南部均出现较高值，同时在研究区中部存在一定的高浓度区域，而在研究区西南部的古尔班通古特沙漠边缘含量显而较少，可以说明自然因素和人为因素共同影响该元素在土壤的富集和分布。

各重金属元素在垂直方向总体呈现出比较相似的分布特征，但也存在一定程度的差异。其中，Zn 与 Hg 元素的含量不同深度的变化相对稳定，尤其 Hg 元素在 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 三层深度土壤均匀存在相似的高值和低值分布规律，呈现出随深度的增加其含量递减的趋势。Cr 元素在 20 ~ 30 cm 具有明显的阶梯状分布规律，高值从东北至西南方向逐渐减少，在表层和中层具有相同的分布特征，其随深度的增加变幅并不明显。As 元素含量在表层的空间分布与中层和深层土壤的空间分布具有很大的差异存在，其主要原因可能是煤炭开采区域高程较大且地形呈半盆地状，煤矿大量开采造成的煤尘向东和北方向扩散而逐渐沉积地表面上导致地表富集较大，说明该元素不仅受成土母质、地形和高程等自然因素的影响，同时受煤炭开采以及交通运输等人为因素的影响也比较显著。

3 结论

1) 研究区不同深度土壤重金属元素含量大小顺序为 Cr＞Zn＞As＞Hg，其中 Cr、Hg 和 As 的均值分别超过了新疆背景值的 1.6 倍、3.1 倍和 2.8 倍，超标率均在 60% 以上，存在较严重的污染，且随土层深度增加重金属含量表现出“高-低-较高”的变化规律。

2) 从研究区重金属空间变异性来看，半方差函数最符合的理论模型有高斯、指数和球状模型，其块金值均为正值，易受到正基底效应的影响，表层和深层土壤重金属元素的块金系数均在 25% ~ 75%，呈现中等空间相关性，主要受随机因素和结构性因素共同作用影响。

3) 研究区 4 种重金属在水平空间分布具有一定的规律性，其高值密集在卡拉麦里山南部矿区周边及工业园附近，而研究区南部和古尔班通古特沙漠边缘有低值存在，总体呈现由南至北方向递增趋势，但 Hg 元素的分布较为离散。就垂直分布来看，各重金属元素具有较相似的分布特征，其 Zn 和 Hg 元素随土壤深度的增加其含量递减，而 As 元素在表层和其他两层的空间分布上存在较大的差异。

参考文献：

[1] 李晓航, 张飞, 夏楠, 等. 新疆准东煤矿土壤重金属污染方法评价与分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(10): 74-80

[2] Bhuiyan M A H, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3): 384-392

[3] 岳荣, 史锐, 张红. 土壤中重金属累积特征及生态风险评价——以乌拉特后旗有色金属冶炼企业集中区为例[J]. 土壤, 2016, 48(2): 314-321

[4] 蒋红群, 王彬武, 刘晓娜, 等. 北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 731-746

[5] Soffianian A, Madani E S, Arabi M. Risk assessment of heavy metal soil pollution through principal components analysis and false color composition in Hamadan Province, Iran [J]. Environmental Systems Research, 2014, 3(1): 1-14

[6] 牛真茹, 齐硕, 吴庭雯, 等. 某有色冶炼场地浅层土壤重金属空间变异规律与分布特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 738-745

[7] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 81-91

[8] 孙贤斌, 李玉成. 淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1238-1244

[9] 阿不都艾尼·阿不里, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 准东露天煤矿土壤重金属的污染及空间分布特征分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(3): 58-64

[10] Ersoy A, Yunsel T Y, Cetin M. Characterization of land contaminated by past heavy metal mining using geostatistical methods[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2004, 46(2): 162-75

[11] Benhaddya M L, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1473−1486

[12] 张晗, 靳青文, 黄仁龙, 等. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J]. 土壤, 2017, 49(1): 141−149

[13] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 298−305

[14] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东露天煤田周边土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1388−1393

[15] 张继舟, 吕品, 王立民, 等. 大兴安岭森林土壤重金属含量空间变异与污染评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 810−819

[16] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 824−830

[17] 李海光, 施加春, 吴建军. 污染场地周边农田土壤重金属含量的空间变异特征及其污染源识别[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(3): 325−334

[18] 胡佳楠, 塔西甫拉提·特依拜, 宋玉, 等. 于田绿洲盐渍土主要参数的空间异质性分析[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1328−1333

[19] 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): 88−96

[20] 阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 基于不同插值方法的于田绿洲盐渍化土壤特性空间变异分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1039-1046.

[21] Mamat Z, Halik U, Muhtar P, et al. Temporal variation of significant soil hydrological parameters in the Yutian oasis in Northwest China from 2001 to 2010[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 1−16

[22] Abliz A, Tiyip T, Ghulam A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 260

[23] 钱翌, 于洪, 王灵. 乌鲁木齐市米东区农田土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 303−310

[24] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京, 中国环境科学出版社, 1990

[25] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1821−1828

[26] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(2): 109−113

[27] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 133−141

Spatial Variabilities and Distributions of Heavy Metal Contents in Opencast Mine Soils

Abdusalam ABDUJAPPAR[1, 2], WANG Hongwei[1, 2*], YANG Shengtian[3], Mamat SAWUT[1, 2], Zaytungul YAKUP[1, 2], HE Zhenzhen[1, 2]

(1 *College of Resources and Environmental Science*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *China*;
2 *Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *China*;
3 *School of Geography*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*)

Abstract: The open coal mine in East Junggar Basin was selected as study area, a total of 52 soil samples around mine were collected from the depths of 0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm of soil profiles and the contents of Zn, Cr, Hg and As were tested, geostatistical methods was used to quantitatively analyzed the spatial variability and distribution of heavy metal contents. The results indicated that the contents of soil heavy metals were in the order as Cr＞Zn＞As＞Hg, and Cr, Hg and As were 0.6, 2.1, 1.8 times higher than those of regional background values, respectively, the over-limit rates were all above 60%. The Gaussian, Exponential and Spherical models mostly conformed to semi-variance function, and nugget values were positive. The surface and deep nugget coefficients of soil heavy metal contents presented medium spatial correlation between 25%–75%, mainly influenced by random factors and structural factors. The spatial distribution showed that high values of heavy metal contents assembled around the coal mine area and industrial parks, while low values in the southern of study area and edge of the Gurbantunggut Desert. Heavy metal contents showed increasing trends from south to north. The contents of Zn and Hg decreased with the increase of soil depth, while As content existed great differences in all horizons. The above results provide theoretical bases for controlling of soil heavy metal pollution and improving the ecological environment.

Key words: Opencast mine; Heavy metal; Spatial variation; Geostatistical analysis