

基于多元统计和地统计的肇源县表层土壤重金属来源辨析^①

张 慧, 郑志志, 杨 欢, 马鑫鹏, 王居午

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 土壤圈是地圈系统中对人类健康影响最显著的圈层之一。土壤重金属的自然和人为来源辨析对土壤修复和保障人体健康有重要意义。本研究以黑龙江省肇源县为研究区域, 通过空间插值分析、主成分分析和聚类分析等方法, 对区域土壤表层和深层土壤重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 的含量和空间分异特征进行分析, 进而对区域表层土壤重金属来源进行辨析。结果表明: 成土母质作为表层土壤的重要物质来源对表层土壤重金属含量及空间分布有显著影响; 肇源县表层土壤中 Hg 元素表现出全局范围较明显的富集现象, 局部区域 Cd 元素表现出一定的富集现象, 富集原因是人为污染造成的; 嫩江上游汇水区土壤重金属元素的迁入, 是表层土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 等元素在研究区范围内轻度富集的主要原因。

关键词: 多元统计; 地统计; 重金属; 来源

中图分类号: X82 **文献标识码:** A

土壤是重要的人类生存环境和农业生产必需的物质基础, 土壤元素通过食物链富集和接触富集进入人体内, 从而对人类健康产生显著影响^[1]。自 19 世纪下半叶工业革命以来, 工业污染造成的土壤重金属富集, 并对人类健康造成重大威胁, 随着城镇进程的加快土壤污染问题日益加剧^[2]。在世界范围内, 土壤污染问题日益受到学者和管理者的关注。国内学者围绕土壤污染评价及污染源辨析、污染迁移扩散机制、土壤污染修复技术和土地管理法规等方面展开研究, 其中土壤重金属来源研究是土壤重金属污染修复及污染源控制的重要前提。

基于生态环境质量和食品安全质量的考虑, 国内外学者多以重金属土壤背景值或地球化学基线为依据进行土壤重金属污染判定^[3-4], 主要研究方法包括单因子指罗数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法和多元统计方法相结合等方法^[5-9]。该方法能够准确评价区域土壤生态环境质量, 但由于水平空间上土壤重金属含量的不均一性, 使得该方法不能有效区分土壤重金属的自然和人为来源。因此, 国外学者利用土壤元素的含量组合特征, 进行土壤重金属的自然和人为来源判定。Facchinelli 等^[10]用多元统计分析表层和深层土壤重金属的主要来源因素, 并且结合地统计方法确定污染源的位置;

海米提·依米提等^[11]用此方法探讨了焉耆盆地不同土地利用类型中重金属的来源; Benhaddya 和 Hadjel^[12]将主成分分析法应用于阿尔及利亚表层土壤重金属来源解析, 并且用地统计法绘制了污染分布图。本研究以成土母质中重金属含量组合特征及空间分布特征为依据, 试图为表层土壤重金属来源辨析提供更为有力的支持。

松嫩平原是我国重要的商品粮生产基地, 其土壤健康状况对我国的粮食安全和食品安全有重大影响, 因此该区域内表层土壤重金属含量特征及污染分析备受关注。松嫩平原土壤重金属含量及空间分异特征研究表明, 松嫩平原土壤重金属含量低于全国土壤环境背景值^[13-15], 其空间分布表现出较为明显的规律性, 并且空间分异特征与成土母质及植被分布有一定相关性^[16]。同时也有研究表明松嫩平原表层土壤存在一定程度的人为污染。于万辉等^[17]通过对松嫩平原湖泊底泥的分析发现, 松嫩平原表层土壤中 Zn 元素呈现人为来源的中度富集, Cu、Ni、Pb、Sr 等元素呈现出人为来源的轻度富集。孟昭虹等^[18]的研究表明哈尔滨市范围内工业、矿业、交通业已成为造成重金属在表层土壤中富集的重要原因。

本文以松嫩低平原农业大县——肇源县为研究区域, 研究目标包括: 结合成土母质特征确定研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571050) 和黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z12032)资助。

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

区 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 7 种重金属含量及水平空间分布特征；确定表层土壤重金属的自然和人为来源。

1 研究区概况

肇源县位于黑龙江省松嫩平原南部、松花江北岸，隶属于大庆市，地理坐标为 $45^{\circ}23' \sim 45^{\circ}59' N$ ， $123^{\circ}47' \sim 125^{\circ}45' E$ ，总面积 $4\,198\text{ km}^2$ ，包含 8 个镇、8 个乡。该区气候属于温带大陆性气候，四季分明，光照条件好，冬季寒冷干燥，温差悬殊，年均降水量在 600 mm 左右，水源丰沛。研究区地势低平，西北高东南低，北部高南部低。地貌主要有河漫滩和阶地两种，河漫滩主要分布在松花江与嫩江沿岸^[19]。该区域第四季地质地貌类型主要包括湖积泥沙质低平原和泥沙质河谷平原(图 1)。土壤类型主要为黑钙土、草甸黑钙土、草甸土。

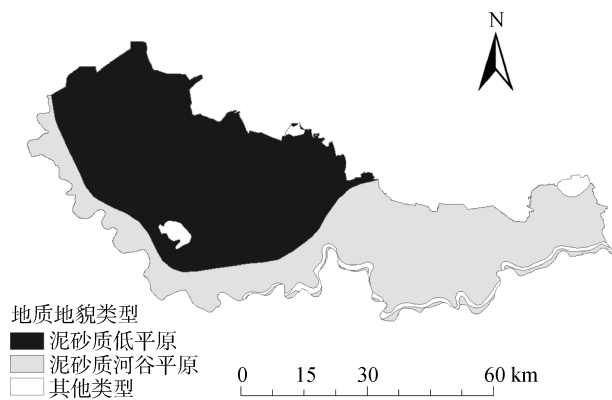


图 1 肇源县地质地貌类型分布图

Fig.1 Distribution of Geological and Geomorphological Types in Zhaoyuan County

2 数据来源与研究方法

运用空间插值分析和多元统计分析对松嫩平原肇源县土壤表层重金属空间分异特征和来源进行详细的解析，以为土壤治理提供科学方法。

2.1 土壤样品采集及测定

土壤样本采集时间为 2005—2007 年，用 4 km^2 的标准格网对研究区进行区域划分，采样点位于格网中心。表层土壤按每 4 km^2 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 $0 \sim 20\text{ cm}$ ，共采集表层土壤样品 1 031 个。深层土壤样本按每 16 km^2 采集 1 个土壤样本，采样深度为 1 m ，共采集深层土壤样本 259 个。土壤重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定；Cd 元素采用等离子发射光谱法(ICP-MS)测定；土壤中 Hg 和

As 含量采用原子荧光法(AFS)测定^[20]；N 元素采用半微量开氏法测定；P 元素采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮法测定；K 元素采用醋酸铵浸提火焰光度法测定；有机碳采用重铬酸钾容量法测定，pH 采用酸度计法测定^[21]。

2.2 研究方法

2.2.1 空间插值分析 克里金插值法，借助空间插值算法，可实现重金属含量点状数据到面源分布信息的表达^[22]。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，考虑样本点的空间相互位置关系与待估计点的空间位置关系，对待估点进行一种无偏最优估计，并且能给出估计精度。但是满足普通克里格插值条件需要满足二阶平稳假设，并且数据尽量符合正态分布^[23]。反距离权重插值法具有普适性，不需要根据样本点的数据特点对方法加以调整，当样本数据的密度足够大时，几何方法一般就能够达到满意的程度，适用于整体样本点密度较大，且样本点分布较均匀的数据^[24]。为了合理利用空间插值方法，本研究利用 ArcGIS 软件对肇源县土壤表层和深层 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种重金属元素含量进行普通克里格插值，得到重金属元素在研究区范围内空间分布图；对土壤表层和深层 Hg 重金属元素进行反距离权重插值，得到重金属元素在研究区范围内空间分布图。

2.2.2 主成分分析和聚类分析 主成分分析法是在损失较少信息的基础上，将多个指标问题变成少数几个新的综合变量，提高分析效率^[25]。聚类分析是根据样本本身的属性，并且按照某种相似性或差异性，定量确定样点的亲疏关系来进行分类^[26]。本研究应用 R 软件，利用主成分分析法将 7 种重金属作为指标进行降维，来分析 7 种重金属之间的相关性和主要来源。利用聚类分析将 7 种重金属进行分类，得出属性或者来源相似的重金属，并且可以验证主成分分析得到的结果。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质

在实验室中对采集的土壤样本进行基本理化性质分析。分析结果表明(表 1)肇源县 pH 范围在 $5.4 \sim 10.7$ ，平均值为 9.0，属于弱碱性土壤；N 和 P 含量较高，平均值分别是 456 mg/kg 和 $1\,068\text{ mg/kg}$ ，较为丰富； K_2O 含量范围为 $21.3 \sim 37.5\text{ mg/kg}$ ，分布较为均匀；有机碳含量范围为 $0.9 \sim 29.9\text{ g/kg}$ ，均值为 9.7 g/kg ，较为缺乏。这说明肇源县的土壤适合种植粮食作物，但长期的耕种和施肥，会导致土壤的理化性质发生变化，需要引

起重视。

3.2 土壤重金属含量特征

分别对表层和深层土壤样本重金属含量进行描述性统计分析。深层土壤由于隔水层和深度的影响受

人为干扰影响较小,土壤样本中重金属含量样本主要受第四纪成土母质影响。表层土壤受人为干扰较为显著,表层土壤样本中重金属元素的含量反映了在自然及人为干扰综合作用下土壤重金属的含量特征。

表 1 土壤基本理化性质统计
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

统计值	pH	N(mg/kg)	P(mg/kg)	K ₂ O(mg/kg)	有机碳(g/kg)
范围	5.4~10.7	189~1 847	214~2 942	21.3~37.5	0.9~29.9
最小值	5.4	189	214	21.3	0.9
最大值	10.7	1 847	2 942	37.5	29.9
均值	9.0	456	1068	28.3	9.7
标准差	1.1	430	430	3.3	4.6

表层和深层土壤重金属含量特征表明(表 2),肇源县表层土壤重金属含量虽表现出一定的富集现象,但在世界和中国范围内属于土壤环境清洁区域。表层 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 7 种元素的平均含量(分别是 6.84、0.024、0.078、46.01、15.75、19.78、49.93 mg/kg)明显低于中国土壤重金属含量均值;与世界土壤重金属含量均值相比,As 元素含量略高,Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种元素明显较低。与深层土壤重金属含量相比,As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 7 种重金属均表现出表层土壤重金属含量的升高,分别是深层对应重金属的 1.02 倍、1.7 倍、1.2 倍、1.14 倍、1.14 倍、1.07 倍、1.04 倍,其中 Hg 元素表现出表层含量值升高较大,其他 6 种元素含量值升高大体保持一致,相对较低。

变异系数是标准差与均值的比值,反映总体样本中各采样点平均变异程度。由于深层土壤受人为干扰较小,其含量特征主要受成土因素的影响。深层土壤中 7 种重金属元素的变异系数从大到小依次为 As、

Cu、Hg、Ni、Cr、Zn、Cd;变异系数值依次为 36.65、31.12、29.20、28.91、28.74、23.38 和 23.00。在土壤风化、侵蚀及人为干扰影响下表层土壤重金属的变异系数发生了一定的变化,大小顺序为 Hg、Cu、Ni、Cr、As、Cd、Zn;变异系数值依次为 358.33、32.06、29.93、28.77、28.33、28.21、25.63。其中变异系数增加最为显著的为 Hg,从深层变异系数为 29.2 增加为 358.33,其余元素表现为小幅度的升级。人为输入是导致表层土壤中 Hg 元素变异系数变化的主要因素,其余 6 种元素的含量变化主要受成土母质中元素含量的影响。肇源县处于松嫩河流的三级阶地,是松嫩平原地势较低区域,表层土壤重金属含量低于上游汇水区表层土壤重金属含量,在风化作用、流失侵蚀和重力侵蚀的影响下,上游土壤中重金属元素迁移进入该区域会造成轻度土壤重金属富集。

3.3 土壤重金属在不同成土母质中的差异

为了进一步分析表层土壤重金属和成土母质的关系,分别对不同成土母质的土壤重金属进行描述性

表 2 肇源县土壤表层、深层重金属描述性分析结果
Table 2 Descriptive statistics of heavy metals in topsoil and deep soil in Zhaoyuan County

元素	土层	范围 (mg/kg)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	中国土壤背景值 ^[27] (mg/kg)	全球土壤背景值 ^[28] (mg/kg)
As	表层	2.00~13.00	6.84	1.94	28.33	0.127	-0.549	11.2	6
	深层	1.90~15.70	6.71	2.46	36.65	0.456	0.057		
Hg	表层	0.007~2.552	0.024	0.086	358.33	26.327	736.479	0.065	0.06
	深层	0.004~0.033	0.014	0.040	29.20	0.831	2.306		
Cd	表层	0.030~0.169	0.078	0.022	28.21	0.669	0.631	0.097	0.35
	深层	0.040~0.136	0.065	0.150	23.00	1.07	2.593		
Cr	表层	12.46~78.51	46.01	13.24	28.77	-0.044	-0.801	61	70
	深层	13.05~71.30	40.33	11.60	28.74	0.009	-0.466		
Cu	表层	4.37~27.77	15.75	5.05	32.06	-0.08	-0.786	22.6	30
	深层	5.10~26.80	13.77	4.29	31.12	0.19	-0.332		
Ni	表层	5.01~35.30	19.78	5.92	29.93	-0.102	-0.657	26.9	50
	深层	6.09~33.90	18.45	5.34	28.91	0.107	-0.243		
Zn	表层	20.18~87.07	49.93	12.80	25.63	-0.094	-0.503	74.2	90
	深层	22.87~85.90	48.15	11.26	23.38	0.176	0.258		

统计分析,由于本研究区成土母质主要是泥沙质低平原和泥沙质河谷平原,因此只取这两种成土母质样点进行分析(表 3),其中表层样点取 974 个,深层样点取 239 个。

由表 3 可知,不同成土母质类型的土壤重金属含量存在差异。表层和深层土壤中 Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种元素平均含量较高的成土母质类型都是泥沙质河谷平原,而表层和深层土壤中重金属 As 平均含量较高的成土母质类型却不一致,表层中泥沙质河谷平原中 As 含量较高,深层反而较低。对同种成土母质类型下表层和深层土壤重金属均值进行比较,泥沙质低平原中,As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 7 种元素平均含量比值,分别是 0.93、1.38、1.30、1.10、

1.05、1.00、0.98;泥沙质河谷平原中,分别是 1.10、2.29、1.25、1.17、1.22、1.31、1.08。对比两种类型成土母质的表层和深层土壤含量比值,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种元素比值相接近,说明表层和深层土壤重金属含量比值在不同成土母质下具有较好的一致性,更加证明了表层 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种元素主要受成土母质的控制;而土壤泥沙质河谷平原中 6 种元素比值更大些,说明也可能受土壤风化、侵蚀及人为干扰使上游汇水区土壤重金属元素迁入的影响。Hg 比值从 1.38 增加到 2.29,说明除了受到不同成土母质的控制,还肯定受到人为因素的干扰,而且干扰的区域应该在成土母质为泥沙质河谷平原的范围内。

表 3 肇源县不同成土母质的土壤表层和深层重金属含量(mg/kg)
Table 3 Heavy metal contents in topsoil and deep soil with different soil parent materials in Zhaoyuan County

母质	土层	参数	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
泥沙质低平原	表层 (n=536)	范围	2.60 ~ 13.00	0.008 ~ 0.136	0.030 ~ 0.156	15.39 ~ 72.45	4.54 ~ 27.72	5.76 ~ 31.33	20.18 ~ 73.01
		均值	6.45	0.018	0.07	40.32	14.11	17.61	43.14
		标准差	1.64	0.008	0.02	11.58	4.69	5.34	10.08
	深层 (n=132)	范围	2.60 ~ 15.70	0.004 ~ 0.027	0.042 ~ 0.133	13.05 ~ 60.34	6.03 ~ 25.3	6.09 ~ 30.44	22.87 ~ 78.47
		均值	6.91	0.013	0.062	36.7	13.43	17.62	44.06
		标准差	2.47	0.0039	0.014	10.45	3.81	5.00	10.45
泥沙质河谷平原	表层 (n=438)	范围	2.00 ~ 11.80	0.007 ~ 2.552	0.033 ~ 0.169	12.46 ~ 77.80	4.37 ~ 27.5	5.01 ~ 35.3	22.28 ~ 86.30
		均值	7.48	0.032	0.086	53.10	17.94	22.55	57.52
		标准差	2.10	0.13	0.02	11.83	4.69	5.50	10.93
	深层 (n=107)	范围	1.90 ~ 13.40	0.008 ~ 0.025	0.040 ~ 0.136	17.01 ~ 71.30	5.1 ~ 26.8	8.45 ~ 33.9	27.34 ~ 85.90
		均值	6.76	0.014	0.069	45.35	14.67	19.94	53.28
		标准差	2.41	0.0037	0.015	11.27	4.52	5.39	10.22

3.4 土壤重金属空间相关特征

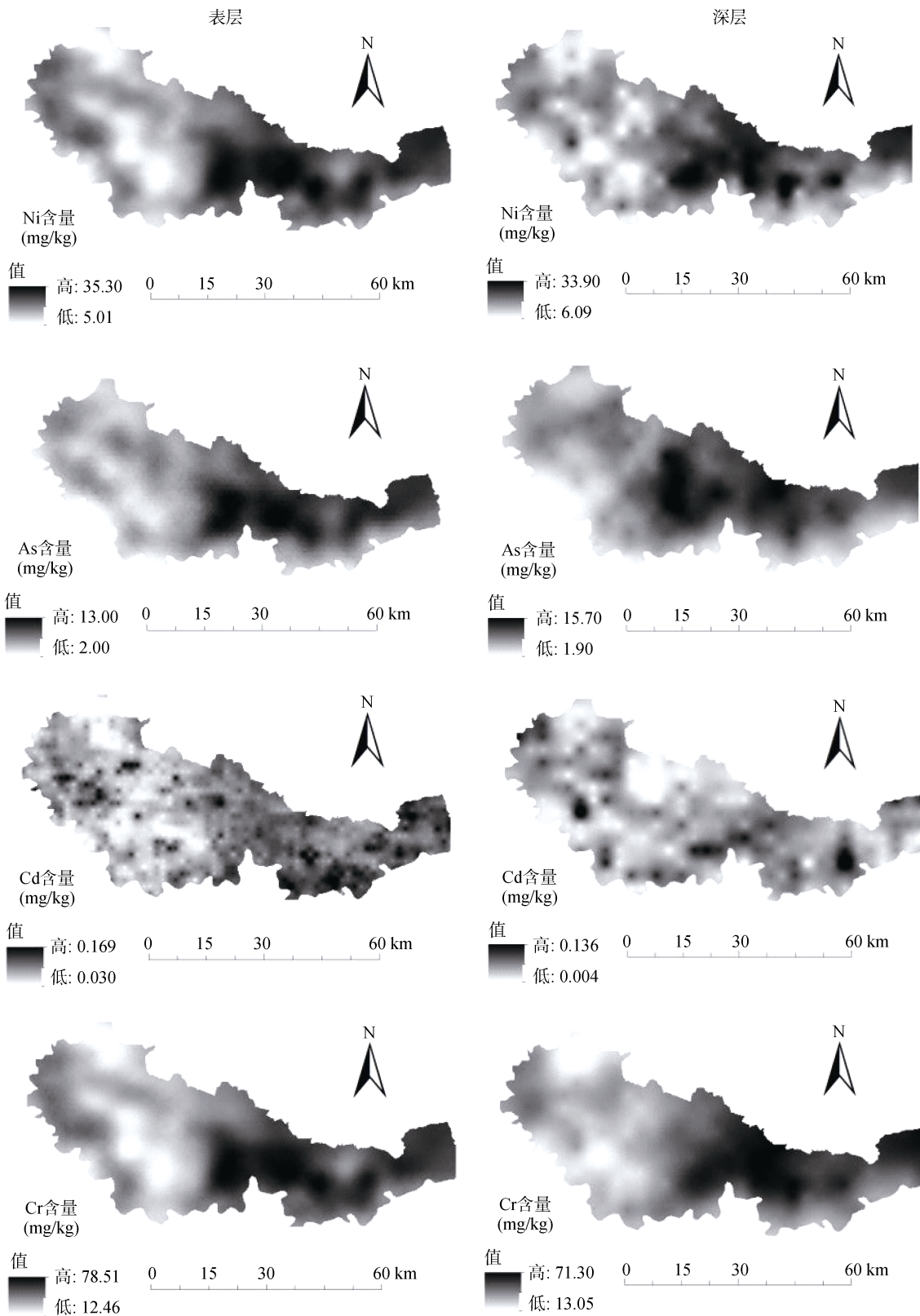
3.4.1 表层和深层土壤重金属含量相关分析 利用 SPSS 软件分别对 7 种重金属的表层和深层土壤重金属含量进行相关分析。相关系数表明,7 种重金属元素的表层土壤重金属含量均表现为 0.01 水平上的显著相关。元素相关系数由大到小分别为 Cr(0.639)、Ni(0.598)、Zn(0.585)、Cu(0.557)、As(0.493)、Cd(0.167)、Hg(0.100)。分析结果还表明,表层土壤中 7 种重金属元素含量都受到深层土壤重金属含量的显著影响,相比较而言,Cd、Hg 元素含量较其他元素受成土母质影响相对较小,受人为因素影响相对较大。

3.4.2 表层和深层土壤重金属空间分布格局分析 研究区内 7 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,因此本研究对研究区内土壤重金属含量进行空间分布模

型拟合,并根据不同的拟合结果利用 ArcGIS 软件进行插值分析。利用普通克里格插值对 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6 种元素在表层、深层土壤中的水平分异特征进行模拟,利用反距离权重插值对表层、深层土壤 Hg 元素进行插值分析,得到以上重金属元素的水平空间分布图,如图 2 所示。由图 2 可知:① As、Cr、Cu、Ni、Zn 等 5 种元素在表层土壤中的水平分布格局与在深层土壤中的水平分布格局较为相似,表层土壤 Cd 和 Hg 的空间分布格局与深层土壤中 Cd 和 Hg 的空间分布格局有较大偏差,说明表层土壤中 Cd 和 Hg 的空间分布受到了较为明显的人为干扰影响。该结果与土壤表层和深层重金属含量相关系数分析结果一致。② 表层 As、Cr、Cu、Ni、Zn 这 5 种元素含量分布格局较为相似,表现出重金属含量西北低而东南高(和成

土母质中重金属含量差异分析结果一致), 高值区主要分布在和平乡、肇源镇、古恰镇。Cd 元素的空间分布比较均匀, 表现出相对显著的小尺度变

异。Hg 元素的空间分布表现为全局范围内低含量的均一分布和局部的高值集聚, 高值集聚在古恰镇和肇源镇一带, 无明显过渡区域。



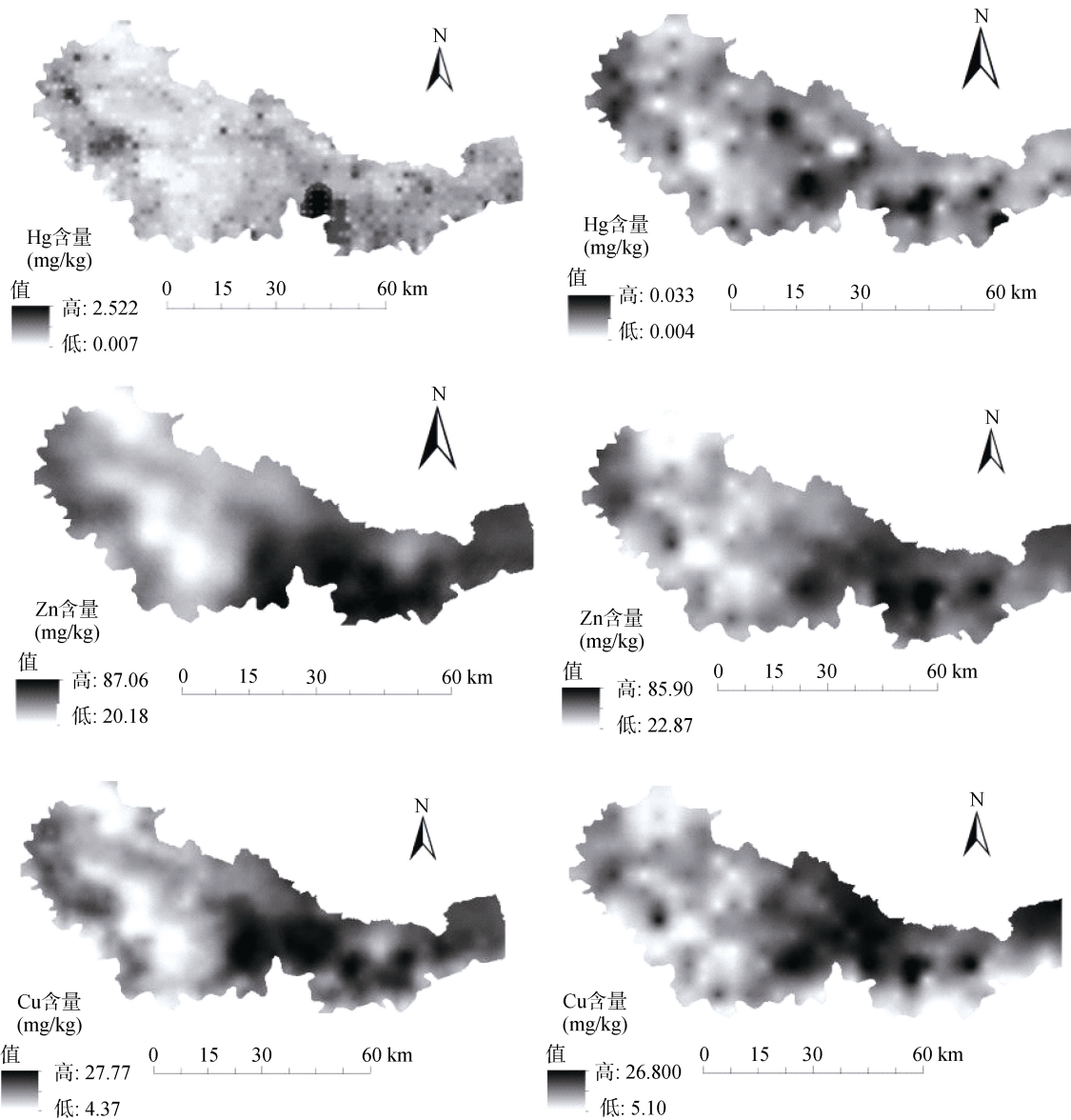


图 2 肇源县表层(左)、深层(右)土壤重金属含量空间分布
 Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal contents in topsoil and deep soil in Zhao Yuan County

3.5 土壤重金属来源辨析

3.5.1 聚类分析 岩石和土壤中的元素含量特征能够反映成岩及土壤风化的地质历史过程^[29], 因此参照深层土壤中元素间的相关关系及集聚特征能够判断出表层土壤重金属元素在自然风化、侵蚀和人类活动影响下产生的变化。

本研究利用 R 软件, 分别对表层和深层土壤重金属元素进行 R 型聚类分析。该分析是基于相关系数矩阵(Pearson 相关系数)对土壤重金属元素进行聚类, 并绘制热图。热图主要通过栅格图像和树状图来表达信息。本研究中利用颜色反映土壤重金属元素间相关系数, 并通过树状图表达土壤重金属元素的聚合特征(图 3)。如图 3 所示, 表层土壤重金属和深层土

壤重金属的相关关系有较明显差别。深层土壤重金属元素的聚合特征主要表现为 Ni、Cu、Cr、Zn、As 5 种元素依次聚类, 并且表现出相对较强的相关性, Cd、Hg 表现出相对较弱的聚合性。表层土壤中 Cu 与 Ni、Cr 两种元素的相关关系增强, Hg 与 Cd 的相关性明显降低, 并且成为与其他 6 种元素相关性最弱的元素。

3.5.2 主成分分析 主成分分析是识别重金属来源的有效办法之一^[23]。本研究利用 SPSS 软件对表层和深层土壤重金属元素进行主成分分析, 并 Kaiser-Harris 准则保留特征值大于 1 的主成分^[25](表 4)。深层土壤重金属分析结果提取 1 个主成分, 方差贡献率为 75.013%。主成分主要反映了在第四纪地质

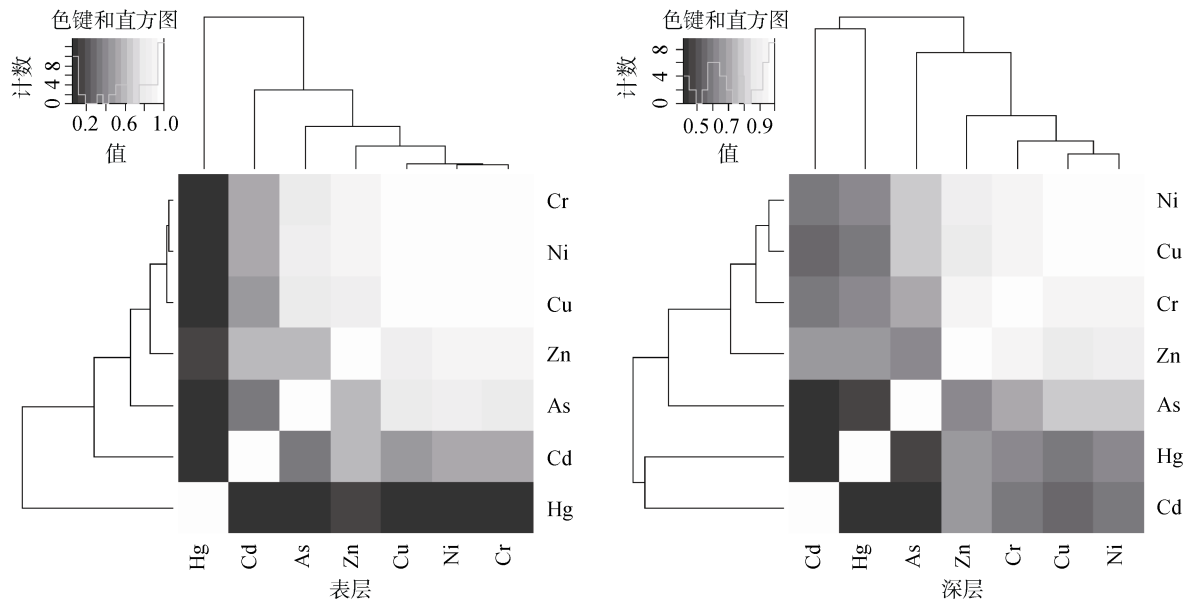


图 3 肇源县土壤表层重金属聚类分析结果
Fig. 3 Clustering analysis of heavy metals in topsoil in Zhaoyuan County

表 4 肇源县土壤重金属元素因子载荷
Table 4 Factor matrix of heavy metals in soil in Zhaoyuan County

元素	表层		深层
	主成分 1	主成分 2	主成分 1
As	0.833	-0.084	0.786
Hg	0.129	0.984	0.709
Cd	0.596	0.097	0.682
Cr	0.981	-0.057	0.96
Cu	0.968	-0.042	0.953
Ni	0.981	-0.066	0.972
Zn	0.917	0.051	0.944
方差贡献率(%)	68.147	14.227	75.013
累计累积贡献率(%)	68.147	82.373	75.013

环境下，成土母质中重金属的含量特征。主成分中 Cr、Cu、Ni、Zn 等 4 种元素的成分载荷较为接近，值域在 0.944 ~ 0.972；As、Hg、Cd 等 3 种金属的成分载荷较为接近，值域在 0.682 ~ 0.786。

对表层土壤 7 种重金属元素进行主成分分析，提取 2 个主成分，2 个主成分的方差贡献率分别是 68.147%、14.227%，累计方差贡献率为 82.373%。Cr、Cu、Ni、Zn 等 4 种元素的因子载荷依然接近，并且数值较大，主要反映出表层土壤重金属的成土母质来源。第二主成分中 Hg 元素为主要因子，因子载荷为 0.984，第二主成分主要反映人为干扰导致的土壤重金属元素含量的变化，通过实地调查，发现表层土壤 Hg 高值区位于新修水利工程和 G45 大广高速公路施工区；另外，该研究区交通、水利用地土壤 Hg

含量达 0.085 mg/kg^[30]，远高于该区 Hg 元素的平均含量；同时插值图也反映该区域 Hg 元素的平均含量相比其他区域差别较大，因此可以确定局部小范围重金属 Hg 污染导致整个研究区重金属 Hg 含量的异常。以上分析表明表层土壤中成土母质对重金属元素含量的影响占主导作用，人为输入只对局部小范围区域影响较大，对整个研究区土壤重金属含量的影响相对较小。

4 结论

1) 成土母质是表层土壤重金属的主要物质来源。表层与深层土壤重金属元素含量相关分析及空间格局分析结果表明，成土母质作为表层土壤的重要物质来源对表层土壤重金属含量及空间分布有显著影响。

2) 人为污染是造成表层土壤 Hg 富集的主要原因。R 型聚类分析和主成分分析结果同时表明，表层土壤重金属中 Hg 元素表现出与其他元素不同比例的富集，研究区内表层土壤 Hg 富集的主要原因是道路交通和农田水利工程项目施工。

3) 上游汇水区土壤迁移是造成 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 轻度富集的主要原因。通过表层和深层土壤重金属含量特征的对比分析，发现表层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 等重金属有轻微富集现象，并且富集程度具有较好的一致性。研究区域的轻微富集现象的主要原因是嫩江上游汇水区土壤重金属元素的迁入。

参考文献：

- [1] 宋长青, 谭文峰. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤科学发展过程解析[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 957-969
- [2] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001
- [3] Bednarova Zdenka, Kuta Jan, Kohut Lukas. Spatial patterns and temporal changes of heavy metal distributions in river sediments in a region with multiple pollution sources[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(7): 1257-1269
- [4] 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
- [5] 汤洁, 天琴, 李海毅, 等. 哈尔滨市表土重金属地球化学基线的确定及污染程度评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2408-2413
- [6] 段雪梅, 蔡焕兴, 巢文军. 南京市表层土壤重金属污染特征及污染来源[J]. 环境科学与管理学报, 2010, 35(10): 31-34, 77
- [7] 王海东, 方凤满, 谢宏芳, 等. 芜湖市土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 城市环境与城市生态学报, 2010, 23(4): 36-40
- [8] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态学报, 2009, 22(5): 29-33
- [9] 陈玉东, 周健民, 邢璐, 等. 黑龙江海伦市农田土壤重金属与磷素含量的特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(5): 965-972
- [10] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001(114): 313-324
- [11] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 夏库热·塔依尔. 焉耆盆地表层土壤重金属的分布、来源及区域差异[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2789-2795
- [12] Benhaddya ML, 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
- [13] 陈玉东, 王火焰, 周健民. 黑龙江省海伦市农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 土壤, 2012, 44(4): 613-620
- [14] 王粟, 史风梅, 裴占江. 松嫩平原农田土壤污染现状分析与评价——以黑龙江省绥化地区为例[J]. 东北农业大学学报, 2016, 46(5): 75-83
- [15] 赵淑苹, 陈立新. 大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 195-199
- [16] 周旭丹, 孙晓刚, 赵春莉, 等. 松嫩平原湿地水质及土壤重金属季节分布特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 222-228
- [17] 于万辉, 王俊杰, 臧淑英. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J]. 地理科学学报, 2012, 32(8): 1000-1005
- [18] 孟昭虹, 周嘉, 郑元福. 哈尔滨市城市土壤重金属生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 152-155
- [19] 田永圻. 肇源县土壤类型与土壤区划[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1985(4): 83-92
- [20] 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]. 水土保持研究学报, 2013, 20(2): 165-169
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [22] 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
- [23] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 96-97
- [24] 刘光孟, 汪云甲, 王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. 中国科技论文在线, 2010, 11(5): 879-884
- [25] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008
- [26] 张文娟. 热带土壤剖面风化成壤过程中的元素地球化学特征——以雷琼地区玄武岩母质土壤剖面为例[D]. 南京: 南京大学, 2011
- [27] 中国环境监测总局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-382
- [28] Meijer S N, Ockenden W A, Sweetman A, et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: Implications for sources and environmental processes[J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(4): 667-672
- [29] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984
- [30] 张福刚. 基于地统计学的肇源县土壤汞空间分异特征分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013

Discrimination of Heavy Metal Sources in Topsoil in Zhaoyuan County Based on Multivariate Statistics and Geostatistical

ZHANG Hui, ZHENG Zhizhi, YANG Huan, MA Xinpeng, WANG Juwu

(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Pedosphere is one of the most significant spheres for human health effects. Discriminating the natural and anthropogenic sources of soil heavy metals is of great significance to soil remediation and safeguarding human health. This study took Zhaoyuan County in Heilongjiang Province as the study area, by using the methods of spatial interpolation analysis, principal component analysis and cluster analysis, analyzed the contents and spatial distribution of heavy metals of As, Hg, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn in topsoil and deep soil, and then analyzed the sources of heavy metals in topsoil. The results showed that soil parent material, as an important source of topsoil, has a significant influence on the contents and spatial distribution of heavy metals in topsoil; Hg in topsoil showed a whole range of enrichment in topsoil, and Cd showed a certain enrichment in the local area, which are caused by human pollution; the immigration of heavy metals to upstream catchment areas is attributed to the mild enrichment of heavy metals of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn in topsoil in the study area.

Key words: Multivariate statistics; Geostatistical; Heavy Metal; Source