

中国城市地表灰尘中重金属的富集状况及空间分布特征

王 硕^{1,2}, 蔡立梅^{1,2,3}, 王秋爽^{1,2}, 罗 杰^{1,2}, 唐翠华^{1,2},
穆桂珍^{1,2}, 蒋慧豪^{1,2}, 刘天勇^{1,2}

(1. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100; 2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100; 3. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 在统计中国城市地表灰尘中重金属含量的已有相关文献基础上, 探讨了中国地表灰尘中Cr、Cu、Pb、Zn、Cd五种元素的空间分布特征及各省份的富集状况。搜集到的各地区地表灰尘重金属含量的研究数据分别为69、84、86、79、58个。对研究数据剔除异常值后分别进行克里金插值和统计各省份地表灰尘重金属含量的平均值, 并与土壤背景值作对比计算出累积指数, 得到中国地表灰尘中重金属的空间分布状况和各省份的富集水平。结果表明: 中国地表灰尘中重金属含量普遍较高, 且各地区重金属含量水平存在不同程度上的差异。就整体而言, Cu、Pb、Zn三种重金属含量的空间分布较为相似, 由高到低均大致呈南—北走势, 而Cr含量呈中部高两侧低的趋势, Cd并无明显趋势。各省份平均值与土壤背景值相比, 除Cr在山东省和贵州省无富集状况以外, 各省的地表灰尘中Cu、Pb、Zn、Cd均具有一定的富集。其中, 湖南省的Cd和Pb均富集最为严重, 分别是土壤背景值的177.95和42.82倍; Cr在福建省富集最为严重, 为背景值的7.11倍; 广东省的Cu富集水平最高, 是背景值的10.35倍, 而Zn在江西省的富集水平最高, 超出背景值39.13倍。

关键词: 地表灰尘; 重金属; 富集水平; 空间分布; 中国

DOI: 10.11821/dlyj201808012

1 引言

城市地表灰尘作为环境系统中分布较广的污染物质的载体, 其包含了特定的环境信息^[1], 对区域环境质量的监测具有良好的指示作用^[2]。由于地表受到各种社会、自然的影响, 灰尘中通常含有一系列高浓度的重金属, 包括Cr、Pb、Cu、Zn、Cd、As和Ni等。而灰尘中的重金属又会以呼吸、皮肤接触等途径可能对人类身体健康造成一系列的不利影响^[3]。对此, 近年来国内外许多学者分别从多种不同的角度对地表灰尘重金属展开了大量研究, 主要包括有来源解析、含量特征、富集水平、空间分布特征以及健康风险评估等。Al-Rajhi等通过相关分析和主成分分析, 发现沙特阿拉伯Riyadh市室内灰尘和室外地表灰尘中重金属的含量均主要来源于汽车尾气排放^[4]。张一修等通过相关分析研究发现

收稿日期: 2018-02-15; 修订日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203061); 湖北省自然科学基金项目(2015CFB603); 湖北省教育厅科学技术研究重点项目(D20161301); 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(OGL-201408); 长江大学大学生创新创业训练项目(2015007, 2016006)

作者简介: 王硕(1994-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 研究方向为环境地球化学。E-mail: wshd1210@163.com

通讯作者: 蔡立梅(1980-), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 研究方向为环境地球化学。

E-mail: clmktz88@yangtzeu.edu.cn

贵阳城市道路灰尘中 Cu 和 Zn 主要来源于汽车尾气排放、汽车轮胎和车体的老化磨损等因素, As 和 Ni 可能与地球化学成因有关^[5]。Sezgin 等研究了伊斯坦布尔 E-5 高速公路从 Topkapi 到 Avcilar 之间长达 18 km 的路段上地表灰尘中重金属的含量, 发现地表灰尘中重金属的含量均高于该地区典型土壤中重金属的最大含量, 明显存在着重金属污染^[6]。孙宗斌等利用地累积指数法对天津市环线道路的灰尘重金属的污染水平进行了分析评价^[7]。大量研究表明由于不同城市地区其自然条件以及社会经济发展水平不同, 地表灰尘中各重金属元素的含量及分布也不尽相同。随着中国近年来经济的快速发展, 地表灰尘中各重金属在土壤背景的基础上均存在不同程度的富集。对于不同地区的自然背景和人为活动的差异, 致使地表灰尘中各重金属元素的含量及分布同样具有差异性。而对灰尘重金属含量在全国范围内的空间分布状况及各省份的富集状况对比, 目前还研究较少。

本文根据前人已有研究成果, 从空间分析的角度出发, 收集全国各地地区地表灰尘中重金属含量数据^[5,7-76]。利用克里金插值对各地区的灰尘重金属含量进行空间分布上的分析评价, 探讨了中国各省份地表灰尘中重金属的富集状况及其影响因素。就全国性地表灰尘重金属的研究, 对宏观尺度上了解中国地表灰尘中重金属的空间分布状况及富集水平, 了解自然和人为的影响作用具有重要意义。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 数据收集与整理

本次研究从公开发表的相关文献中, 收集了 2006-2016 年间全国城市及城镇等地区地表灰尘中重金属含量数据, 部分数据来自于降尘^[5,7-76]。主要收集的重金属元素有 Cr、Cu、Pb、Zn、Cd 五种元素。共收集到有关 Cr、Cu、Pb、Zn 和 Cd 含量的研究数据分别为 69 个、84 个、86 个、79 个和 58 个 (表 1)。研究的区域包含有除西藏、宁夏、海南、台湾、香港及澳门以外的所有省级行政区域 (图 1)。

所收集的灰尘样本均是利用聚乙烯刷子进行采集, 并经过风干、过筛、研磨等程序得到备用实验样品。样品消解的方法有 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ 、 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HF-HClO}_4\text{-HNO}_3$ 等混酸消解。最后, 消解样品采用原子吸收法、原子荧光法、X 射线荧光光谱法和等离子体发射光谱法等不同方法测定样品中 Cr、Cu、Pb、Zn、Cd 等重金属的含量值, 这些方法均符合国家相关的土壤样品处理方法。

在整理所收集到的数据时, 将每个研究中的灰尘重金属的平均值作为该点位的含量值, 然后对原始数据采用均值 ± 3 倍标准差的方法剔除异常样本。虽然灰尘样本保留用于分析的粒径不同, 但在类似的取样、消解和测定方法下, 不同研究结果之间的直接比较是合理的。

2.2 研究方法

2.2.1 克里金插值法 确定所需插值的样本, 进行半变异函数分析后运用普通克里金法进行空间插值。克里金插值法, 又称为空间自协方差最佳插值法, 是空间插值的一种最优内插法^[77]。它是以样本的空间位置以及样本间相关程度的不同为依据, 对每个样本赋予权重量化, 然后进行滑动加权平均。

假设 x_1, \dots, x_n 为区域上的一系列观测点, $z(x_1), \dots, z(x_n)$ 为相应的观测值。区域变化量在 x_0 出的值 $z(x_0)$ 可采用一个线性组合来估计^[77]:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

表1 灰尘样点数据统计
Tab. 1 Statistics of dust samples

省份	城市	类型	数量	重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					采样时间	来源文献
				Cr	Cu	Pb	Zn	Cd		
北京	北京市 ¹	高校	50	85.07	82.41	54.30	308.31	0.77	2014年11月	[8]
	北京市 ²	城市广场及中学	30	-	54.30	59.00	243.00	0.77	2008年	[9]
	北京市 ³	道路	226	77.36	63.73	50.79	-	0.47	2009年夏季	[10]
上海	上海市 ¹	中心城区不同功能区	6	149.30	-	398.60	587.70	-	2006年8月	[11]
	上海市 ²	内环高架沿线	30	264.00	258.00	237.00	753.00	0.97	-	[12]
	上海市 ³	公园	44	162.59	235.89	416.63	906.29	1.58	-	[13]
	上海市 ⁴	功能区	48	218.91	186.41	212.94	687.25	0.97	2015年11月-2016年7月	[14]
天津	天津市 ¹	街道	144	121.41	100.62	61.48	-	0.99	-	[7]
	天津市 ²	公园	41	103.18	113.18	63.32	-	1.14	2011年12月-2012年1月	[15]
重庆	重庆市 ¹	街道	40	83.93	78.22	78.63	144.69	0.31	-	[16]
	重庆市 ²	街道	40	83.93	78.22	73.63	144.69	0.31	-	[17]
	万州区	街道	28	204.53	44.57	-	-	2.58	2014年4-5月	[18]
黑龙江	哈尔滨市 ¹	降尘	46	87.13	104.90	117.15	370.77	1.46	2008年4月-2009年4月	[19]
	哈尔滨市 ²	降尘	140	51.90	49.00	58.50	277.30	1.01	2006年11月-2007年11月	[20]
云南	昆明市	街道	60	79.41	168.80	97.49	316.53	-	2008年1-10月	[21]
吉林	长春市 ¹	街道	28	30.30	43.56	70.89	170.80	0.31	2013年6月1日	[22]
	长春市 ²	居民区	232	95.98	73.59	101.60	465.00	0.79	-	[23]
安徽	蚌埠市	地表	-	-	85.64	72.35	254.29	2.31	2012年1月	[24]
	合肥市	地表	52	96.88	67.50	132.15	2332.96	4.53	2010年4-7月	[25]
	淮南市	功能区	40	110.69	62.74	74.63	202.59	0.57	-	[26]
	芜湖市	功能区	76	110.31	135.42	138.61	313.53	1.95	2008年4月	[27]
	铜陵市	功能区	64	122.15	629.43	95.23	360.16	-	2011年11月	[28]
	宿州市	街道	23	109.00	34.00	51.00	206.00	-	2011年1月	[29]
山东	济南市	功能区	57	57.67	51.89	59.22	200.56	-	2007年6月	[30]
	青岛市	公园	-	-	109.27	126.02	326.88	1.79	-	[31]
	淄博市	街道	-	-	92.00	95.00	208.00	0.58	2004年4月	[32]
山西	太原市	功能区	33	313.86	119.23	92.71	-	-	2011年12月	[33]
	大同市	中学	-	-	74.67	68.16	401.19	9.46	2011年-2012年	[34]
广东	顺德市	降尘	10	159.30	176.00	240.00	586.00	2.41	-	[35]
	广州市	街道	39	502.00	899.00	0.31	-	-	2010年8月	[36]
江苏	南京市	街道	35	126.00	123.00	103.00	394.00	1.10	2009年8月	[37]
	徐州市	街道	-	-	76.20	440.80	382.20	2.48	2010年10-11月	[38]
	常州市	高架桥周边建筑物	126	257.55	181.95	211.24	709.99	2.74	2014年4月	[39]
	扬州市	道路	10	180.14	100.13	108.24	224.94	2.62	2010年4-5月	[40]
江西	南昌市	街道	31	138.74	169.84	51.18	2715.67	3.17	2009年9月	[41]
河北	保定市	功能区	14	225.00	177.00	279.00	416.00	2.84	2008年5-7月	[42]
	石家庄市	街道	252	131.79	97.70	155.65	1031.93	1.92	2007年6月	[43]
河南	洛阳市	功能区	18	401.63	240.94	176.04	1019.75	2.33	2009年5月	[44]
	开封市	公园	52	53.25	44.09	144.84	240.27	1.02	2014年3月	[45]
	许昌市	街道	22	96.70	35.40	41.90	145.30	-	-	[46]

续表 1

省份	城市	类型	数量	重金属含量 (mg · kg ⁻¹)					采样时间	来源文献
				Cr	Cu	Pb	Zn	Cd		
浙江	金华市	街道	45	154.03	109.08	139.69	696.72	-	2010年	[47]
	杭州市 ¹	街道	25	51.29	116.04	202.16	321.40	1.59	2005年11月	[48]
	杭州市 ²	功能区	18	121.61	96.37	142.04	471.90	-	2008年2月	[49]
	嘉兴市	功能区	15	211.12	112.18	232.28	578.26	-	2008年2月	[49]
	宁波市	功能区	15	352.35	244.18	235.16	494.55	-	2008年2月	[49]
	衢州市	功能区	15	184.99	107.82	117.16	494.55	-	2008年2月	[49]
	绍兴市	功能区	15	145.48	119.02	289.27	746.58	-	2008年2月	[49]
	台州市	功能区	15	143.53	305.34	225.64	787.03	-	2008年2月	[49]
	温州市	功能区	15	309.82	224.73	143.60	935.78	-	2008年2月	[49]
	舟山市	功能区	15	864.21	381.45	308.34	1481.89	-	2008年2月	[49]
	丽水市	功能区	15	64.87	58.20	60.35	104.49	-	2008年2月	[49]
	湖州市	功能区	15	164.91	59.23	106.70	190.56	-	2008年2月	[49]
	淳安县	街道	4	815.46	142.11	233.55	193.19	-	2013年7月-2014年4月	[50]
湖北	武汉市	公园	26	64.10	58.40	85.50	313.35	-	2002年9月	[51]
	大冶市	街道	-	150.87	5381.39	1754.00	3971.72	120.76	-	[52]
湖南	长沙市	功能区	-	-	79.16	271.08	798.00	12.11	2005年6月	[53]
	湘潭市	功能区	-	-	131.23	497.20	1599.33	10.82	2005年6月	[53]
	株洲市 ¹	街道	55	-	277.17	3046.67	3847.67	85.47	-	[54]
	株洲市 ²	功能区	-	-	277.17	3046.67	3847.67	85.47	2005年6月	[53]
甘肃	兰州市 ¹	降尘	11	88.73	82.22	130.31	369.23	4.34	2010年6月-2011年5月	[55]
	兰州市 ²	地表	13	94.78	85.68	96.36	227.85	0.84	2012年7月	[56]
福建	福州市 ¹	公园	11	78.21	111.04	73.81	386.62	0.58	2011年6月和10月	[57]
	泉州市	街道	28	114.10	273.90	600.40	1831.60	20.23	2008年7-8月	[58]
	福州市 ²	公交枢纽站	240	106.49	138.96	112.73	554.08	1.17	2012年8月	[59]
贵州	贵阳市	道路	78	131.20	129.80	67.80	185.97	0.62	2008年3-4月	[5]
辽宁	沈阳市 ¹	街道	-	-	81.33	106.26	334.47	4.35	2006年4月	[60]
	沈阳市 ²	街道	-	-	59.25	75.04	563.55	0.76	2013年-2014年	[61]
	葫芦岛 ¹	楼道、人行道	-	-	85.55	116.56	747.30	10.72	2007年干季	[62]
	葫芦岛 ²	街道	-	-	264.40	533.20	5271.00	72.84	-	[63]
陕西	西安市 ¹	小学/幼儿园	101	149.20	70.80	180.90	461.50	-	-	[64]
	西安市 ²	街道	72	138.35	50.66	119.73	279.00	8.82	-	[65]
	西安市 ³	公园	25	125.20	86.40	147.40	323.40	-	-	[66]
	宝鸡市 ¹	街道	38	126.70	123.20	408.30	715.10	5.50	2006年2月	[67]
	宝鸡市 ²	街道	28	126.70	123.20	433.20	715.30	-	-	[68]
	咸阳市	街道	30	135.63	132.17	77.30	375.38	0.13	2008年5月	[69]
青海	西宁市	街道	204	204.00	204.00	204.00	204.00	204.00	2012年7月	[70]
内蒙古	呼和浩特市	降尘	91	76.05	55.75	77.06	247.08	0.61	-	[71]
	包头市	公园及广场	26	189.60	29.40	64.90	89.50	-	2014年5月	[72]
新疆	乌鲁木齐市 ¹	道路	169	54.28	95.54	53.53	294.47	4.35	2007年8月	[73]
	乌鲁木齐市 ²	功能区	35	109.70	81.05	82.71	549.02	-	2004年8月	[74]
	喀什市	道路	-	-	-	62.15	-	-	-	[75]
广西	南宁市	家庭	23	154.00	159.00	296.00	1495.00	0.87	2011年11月-2012年3月	[76]

注: 同一地区不同文献数据加上角区别。

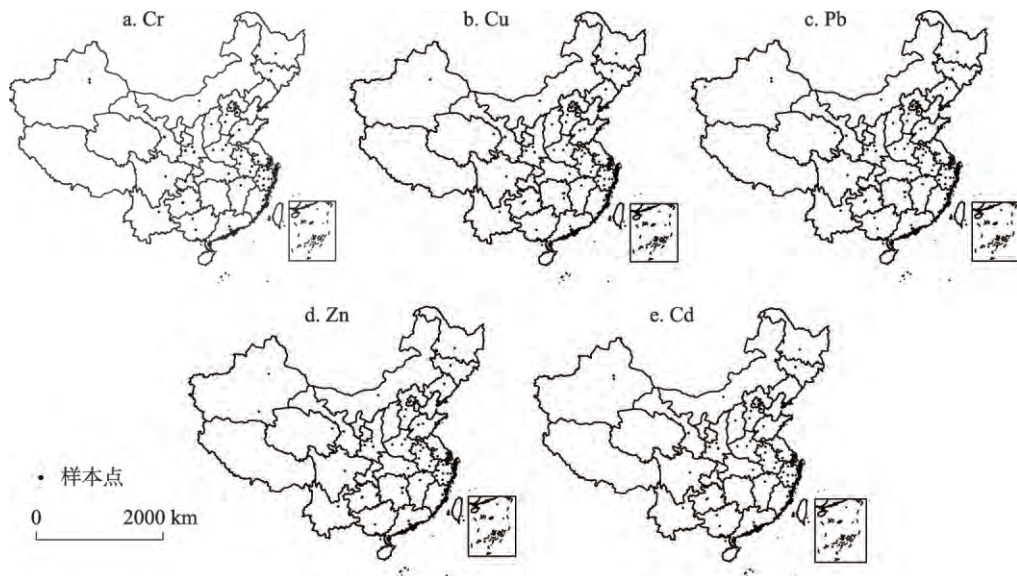


图1 灰尘样本点分布

Fig. 1 Spatial distribution of surface dust in China

式中： λ_i 为第*i*个样本的权值。

2.2.2 累积指数法 为评价土壤和灰尘重金属累积现状，以各省份土壤重金属背景值为基准，累积指数^[9]按下式计算：

$$R_i = \frac{C_i}{B_i} \quad (2)$$

式中： R_i 为元素累积指数； C_i 为各重金属元素符合正态分布的平均浓度； B_i 为对应各省区重金属元素的土壤背景值；*i*表示Cr、Cu、Pb、Zn、Cd五种元素。

3 结果分析

3.1 半变异函数分析

半变异函数是利用地统计学研究有关重金属空间分布特征至关重要的函数，其拟合产生的参数（如块金值、基台值、块金系数、变程等）可以用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变化特征（空间相关性及变异程度）^[78,79]。将预处理的灰尘重金属的地理坐标和含量数据通过地统计软件进行半变异函数分析，拟合出灰尘重金属含量的半变异函数模型，计算克里金插值的最优模型参数（图2、表2）。结果显示灰尘重金属Cr、Cu、Pb、Zn、Cd的含量数据均偏离标准正态分布，对此进行对数转换。在各向同性的情况下，指数模型为最优模型，其有较大的相关系数及较小的方差（表2），根据模拟的半方差模型参数进行克里金插值，得到重金属灰尘含量的空间分布。

3.2 地表灰尘重金属的空间分布

将收集的全国地表灰尘样本重金属含量点位数据，并根据半变异函数分析模型参数进行克里金插值。得到全国范围灰尘中重金属含量的空间分布（图3）。

从图3可看出，地表灰尘中Cr含量最高值位于河南省洛阳市，达401.63 mg·kg⁻¹，

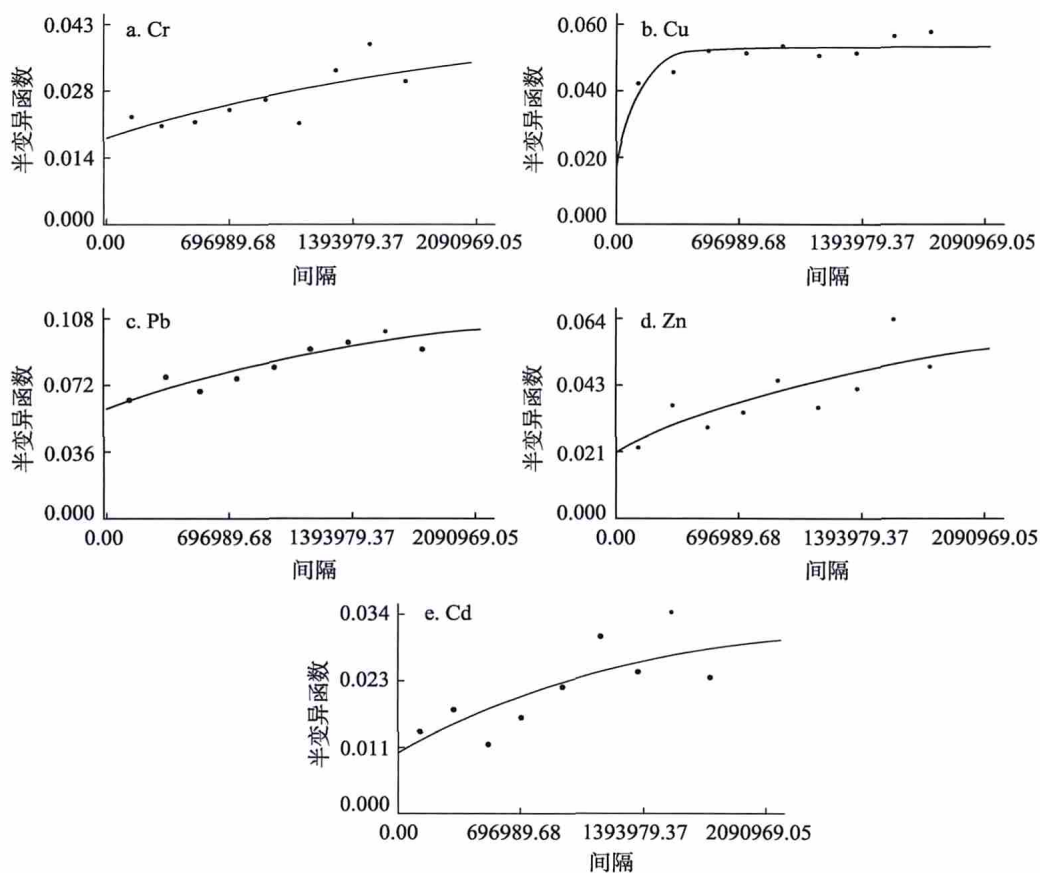


图2 灰尘重金属含量的半变异函数图

Fig. 2 Semi-variogram diagram of heavy metal concentrations in dust

表2 灰尘重金属的半变异函数模型参数

Tab. 2 Semi-variogram model parameters of dust heavy metals

参数	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd
模型	指数模型	指数模型	指数模型	指数模型	指数模型
块金 (C_0)	0.02	0.017	0.065	0.021	0.01
基台 (C_0+C)	0.053	0.055	0.131	0.067	0.034
变程 (A, m)	7875000	360000	5637000	4190200	4056000
方差 (SS)	0.00016	0.000076	0.00029	0.00042	0.00017
相关系数 (R^2)	0.564	0.614	0.842	0.638	0.593
$C/ (C_0+C)$	0.623	0.691	0.504	0.687	0.706

最低值则位于新疆乌鲁木齐市, 为 $54.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同时, Cr 含量的高值区还分布于山西省、江苏省南部以及上海市等地, 吉林省和黑龙江省等地出现低值区域, 其他地区 Cr 含量分布相对均匀, 区域变化较为平缓。Cu 含量的最高值为 $629.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 出现在安徽省的铜陵市, 最低值出现在内蒙古的包头市, 为 $29.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高值区普遍出现在东南部地区, 而在北部的内蒙古, 黑龙江省、吉林省处于低值区, 华北等地 Cu 的含量相对处于中等含量, 且区域变化不明显。Pb 含量的空间变化总体较为平缓, 与 Cu 相似的是其高

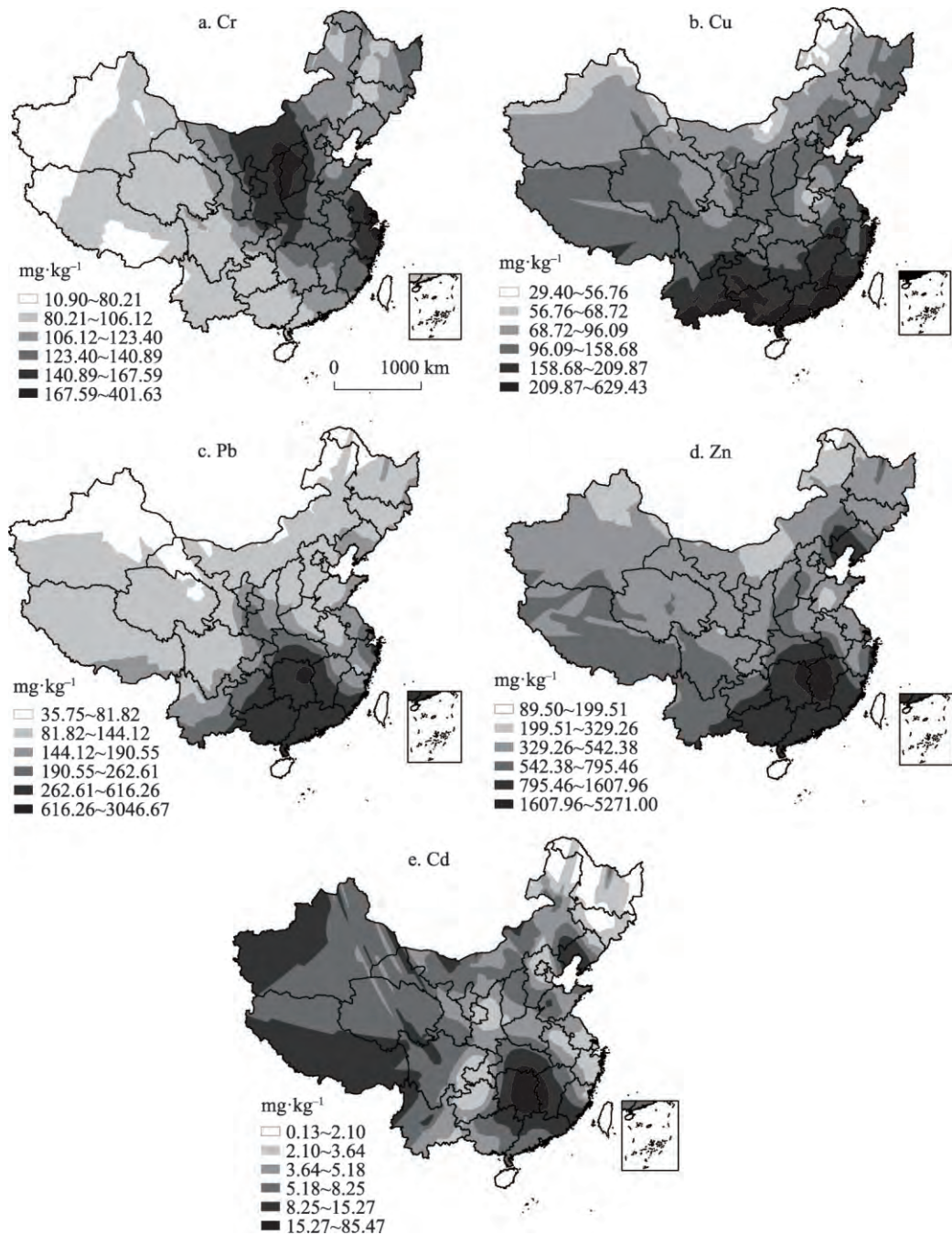


图3 灰尘重金属含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal concentrations in dust

值区也出现在南部地区，北部地区均处于低值区。Pb的最高值达到3046.67 mg·kg⁻¹，出现在湖南省株洲市，最低值为35.75 mg·kg⁻¹，分布在四川省的九寨沟地区。Zn含量的最高值出现在辽宁省葫芦岛（5271 mg·kg⁻¹），其次是湖北省大冶市（3971.72 mg·kg⁻¹），而最低值出现在内蒙古包头市（89.5 mg·kg⁻¹），但其高值区同样出现在东南部地区，特

别是湖南省、江西省以及广东省西北部等的部分地区, Zn的含量在西北部和东北部的平均值均较低。Cd含量的最高值和最低值分别为 $120.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 出现在湖北省大冶市和陕西省咸阳市, 高值区依旧出现在东南部地区, 但其出现多个低值区, 分别位于四川省、陕西省以及北京周边, 同时东北地区也普遍含量较低, 西北部则偏高。

就整体而言, Cu、Pb、Zn三种重金属含量的空间分布较为相似, 其含量由高到低均大致呈南—北走势, 而Cr和Cd并无明显趋势。在全国范围内, 东南部地区的地表灰尘重金属普遍较高, 特别是东南沿海的广东省、浙江省及福建省等地。

3.3 各省地表灰尘重金属含量分布与累积水平

对收集到的全国灰尘重金属数据进行分省统计, 获得各省份地表灰尘重金属的平均值, 同时查阅文献获取全国各省、直辖市以及自治区重金属元素的土壤背景值^[80,81] (由于资料限制, 不含西藏、宁夏、海南、台湾、香港、澳门土壤背景值) 作为对比。并利用累积指数计算出各省灰尘重金属元素的累积水平 (表3), 得到各省的空间分布图 (图4)。

各省份地表灰尘重金属的含量平均值显示, 地表灰尘中重金属元素Cr、Cu、Pb、Zn、Cd的含量变化范围分别为 $57.67 \sim 313.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $29.40 \sim 190.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $51.18 \sim 1271.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $89.50 \sim 2715.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.55 \sim 36.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其各自的平均值分别为 $129.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $115.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $180.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $640.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Cr、Cu、Pb、Zn、Cd五种重金属元素的最高值分别分布在山西省、安徽省、湖南省、江西省、湖南省, 它们分别比最低值高出5.44倍、6.48倍、24.85倍、30.34倍、65.94倍, 从中可以看出, Cd、Zn、Pb含量的空间变化明显大于其他两种重金属。

参考中国各省份的土壤背景值, 得出各省灰尘中Cr、Cu、Pb、Zn、Cd的累积程度。其中, 累积指数小于1则表示无累积状况, 大于1时越接近于1则表示累积程度越低^[51]。如图4和表2显示, 各省的地表灰尘中Cu、Pb、Zn、Cd均大于1, 表明各省份灰尘中这四种元素含量均超过该省的土壤背景值, 累积程度最高的为Cd, Cd含量累积指数的最大值出现在湖南省, 达到277.95, 而且大部分省份Cd的累积指数均达到10倍以上。湖南省、广西、陕西省、上海市和河北省的灰尘中Pb含量同样超过本省份土壤背景值的10倍以上, 最高累积水平的省份依然是湖南省, 累积指数达到42.82。Zn在江西、湖南、广西、广东、安徽以及福建累积指数均大于10, 江西达到39.13, 其次是湖南达到22.05。除山东和贵州以外, 各省份灰尘中Cr的累积水平均大于1, 表现出绝大多数省份的Cr均有不同程度的累积。福建、浙江、山西、内蒙古和江西Cr含量累积指数分别为7.11、5.21、5.08、4.58、3.02, 表明这几个省份的Cr含量存在明显的累积状况。Cu在广东富集最为严重, 累积指数为10.35, 其次分别为安徽(9.33)、浙江(9.07)、江西(8.37)、福建(7.66)。

根据中国三大经济地带的划分将地表灰尘中重金属的空间分布分为东部、中部、西部三个区域, 对灰尘中重金属的累积状况进行分析 (图5), 三个分区相比, Cr、Cu的累积水平排序为: 东部>中部>西部, 但差异水平较小; 而Pb、Zn、Cd的累积水平由高到低为: 中部>东部>西部。对于三个分区中的Pb、Zn、Cd, 中部要明显高于东部和西部, 特别是Cd, 中部的平均累积指数达到63.07, 而东部和西部分别为27.44和16.21。以上说明东部的Cr和Cu累积状况受到人为活动影响相对较大, 而中部的Pb、Zn、Cd累积状况受到人为活动影响相对较大。

4 讨论

对全国地表灰尘重金属的含量分布状况分析显示, 各省份地区的地表灰尘重金属含

表3 各省份地区灰尘重金属含量(mg·kg⁻¹)、土壤背景值(mg·kg⁻¹)及累积指数

Tab. 3 The heavy metal content (mg·kg⁻¹), soil background value (mg·kg⁻¹) and cumulative index of dust in different provinces

	Cr			Cu			Pb			Zn			Cd		
	平均值	背景值	累积指数	平均值	背景值	累积指数	平均值	背景值	累积指数	平均值	背景值	累积指数	平均值	背景值	累积指数
北京市	81.22	68.10	1.19	66.81	23.60	2.83	54.70	25.40	2.15	275.66	102.60	2.69	0.67	0.07	9.55
上海市	174.36	70.20	2.48	181.23	27.20	6.66	264.05	25.00	10.56	626.55	81.30	7.71	1.17	0.14	8.38
天津市	112.30	84.20	1.33	106.90	28.80	3.71	62.40	21.00	2.97	-	21.00	-	1.07	0.09	11.83
重庆市	125.35	76.14	1.65	139.00	23.83	5.83	140.75	25.48	5.52	385.79	75.83	5.09	1.00	0.13	7.69
黑龙江省	69.52	58.60	1.19	76.95	20.00	3.85	87.83	24.20	3.63	324.04	70.70	4.58	1.24	0.09	13.72
云南省	79.41	65.20	1.22	168.80	46.30	3.65	97.49	40.60	2.40	316.53	89.70	3.53	-	0.22	-
吉林省	78.14	46.70	1.67	58.58	17.10	3.43	86.25	28.80	2.99	317.90	80.40	3.95	0.55	0.10	5.48
四川省	114.09	79.00	1.44	60.87	31.10	1.96	64.01	30.90	2.07	367.73	86.50	4.25	5.82	0.08	72.75
安徽省	109.59	66.50	1.65	190.40	20.40	9.33	97.87	26.60	3.68	693.39	62.00	11.18	2.93	0.10	29.30
山东省	57.67	66.00	0.87	77.97	24.00	3.25	84.86	25.80	3.29	235.36	63.50	3.71	1.18	0.08	14.75
山西省	313.86	61.80	5.08	96.95	26.90	3.60	80.44	15.80	5.09	401.19	75.50	5.31	9.46	0.13	72.77
广东省	78.80	50.50	1.56	176.00	17.00	10.35	240.00	36.00	6.67	586.00	47.30	12.39	2.41	0.06	40.17
江苏省	168.60	77.80	2.17	108.80	22.30	4.88	187.58	26.20	7.16	382.74	62.60	6.11	1.90	0.13	14.63
江西省	138.74	45.90	3.02	169.84	20.30	8.37	51.18	32.30	1.58	2715.67	69.40	39.13	3.17	0.11	28.82
河北省	178.40	68.30	2.61	137.35	21.80	6.30	217.33	21.50	10.11	723.97	78.40	9.23	2.38	0.09	26.44
河南省	183.86	63.80	2.88	106.81	19.70	5.42	120.93	19.60	6.17	468.44	60.10	7.79	1.68	0.07	23.93
浙江省	275.67	52.90	5.21	159.67	17.60	9.07	187.38	23.70	7.91	576.69	70.60	8.17	1.59	0.07	22.71
湖北省	107.49	86.00	1.25	58.40	30.70	1.90	85.50	26.70	3.20	313.35	83.60	3.75	1.61	0.17	9.47
湖南省	-	71.40	-	162.52	27.30	5.95	1271.65	29.70	42.82	2081.67	94.40	22.05	36.13	0.13	277.95
甘肃省	91.76	70.20	1.31	83.95	24.10	3.48	113.34	18.80	6.03	298.54	68.50	4.36	2.59	0.12	21.58
福建省	99.60	14.00	7.11	174.63	22.80	7.66	262.31	41.30	6.35	924.10	86.10	10.73	7.33	0.07	104.67
贵州省	71.05	95.90	0.74	179.08	32.00	5.60	258.09	35.20	7.33	946.49	99.50	9.51	1.14	0.66	1.73
辽宁省	-	57.90	-	75.38	19.80	3.81	207.77	21.40	9.71	548.44	63.50	8.64	5.28	0.11	47.97
陕西省	133.63	62.50	2.14	97.74	21.40	4.57	227.81	21.40	10.65	478.28	69.40	6.89	4.82	0.09	53.52
青海省	-	70.10	-	56.40	22.20	2.54	51.60	20.90	2.47	307.00	80.30	3.82	5.50	0.14	39.29
内蒙古自治区	189.60	41.40	4.58	29.40	14.10	2.09	64.90	17.20	3.77	89.50	59.10	1.51	4.35	0.12	36.25
新疆维吾尔自治区	81.99	49.30	1.66	88.30	26.70	3.31	66.13	19.40	3.41	421.75	68.80	6.13	0.87	0.27	3.23
广西壮族自治区	115.53	82.10	1.41	159.00	27.80	5.72	331.18	24.00	13.80	1495.00	75.60	19.78	-	0.27	-

注：由于资料限制，不含西藏、宁夏、台湾、海南、香港及澳门地区的数据。

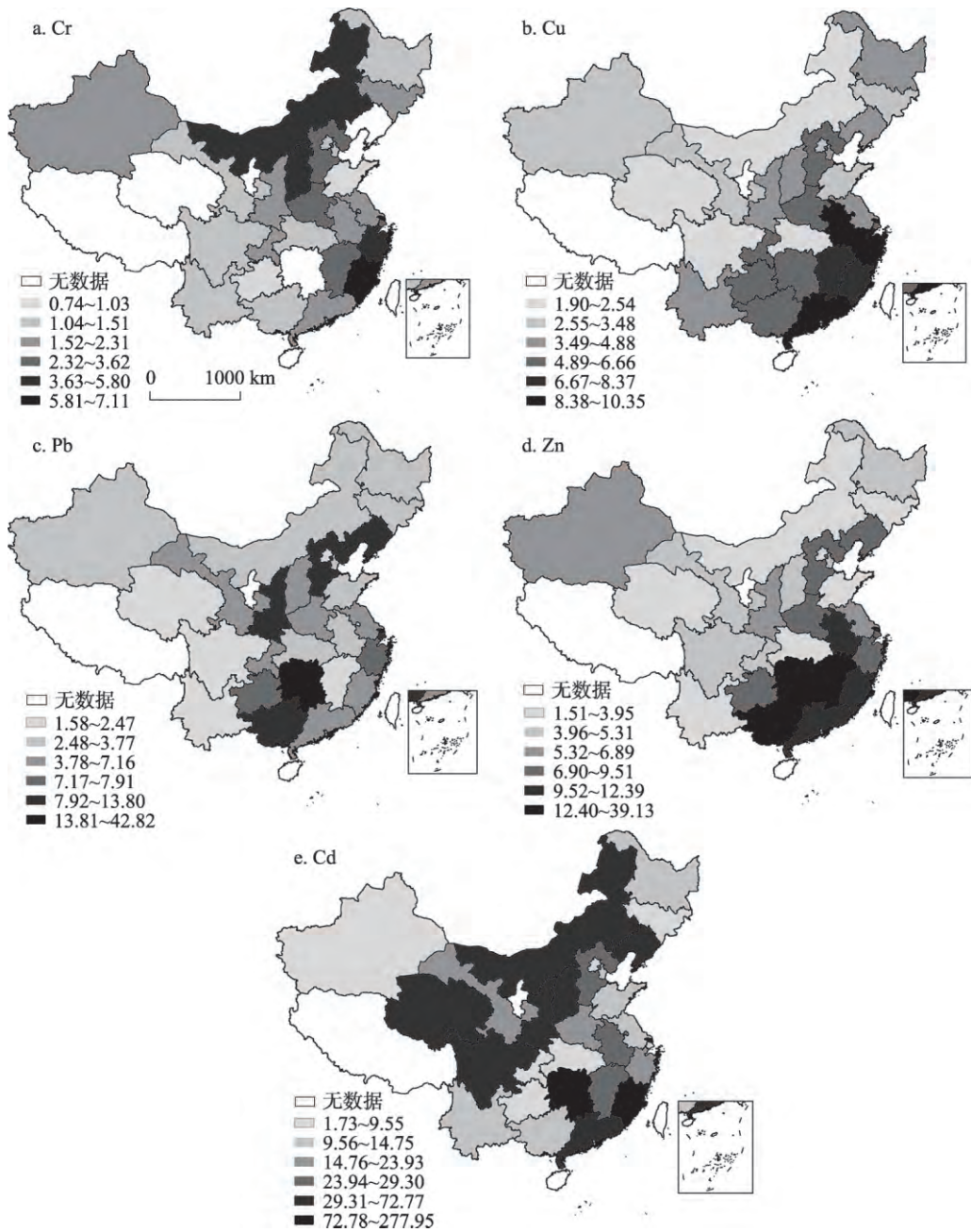


图4 各省份地区灰尘重金属累积水平

Fig. 4 Precipitation level of heavy metals in dust in different provinces

量空间分异特征明显。研究表明^[82,83]，地表灰尘中重金属的含量分布差异受到多方面因素的影响，主要影响因素可分为自然因素和人为因素。自然因素即土壤自身重金属的含量背景，人为因素则相对复杂，主要包括工业活动、城市建设和车辆交通等^[82,83]。

4.1 自然背景

土壤是地表灰尘的重要来源之一^[84]。各地区土壤背景的差异是造成地表灰尘重金属

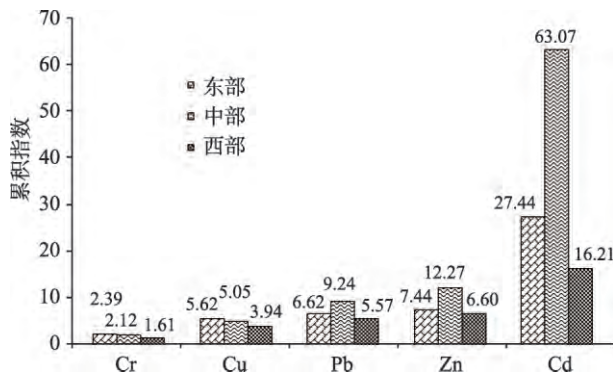


图5 中国东、中、西部灰尘重金属累积水平

Fig. 5 The accumulation level of dust heavy metals in eastern, central and western regions of China

湖南省、贵州省等地都是Pb和Zn的高值分布区，地表灰尘与土壤背景中的重金属含量具有一致性。地表灰尘与土壤背景中Cu的高值区都分布在西南地区的云南省、贵州省、四川省等地，也具有一致性。

4.2 人为活动

除了土壤重金属元素背景影响外，地表灰尘中的重金属含量变化还可归因于城市历史、工业类型和分布、能源类型和消费、人口密度、车辆交通等许多因素^[85]。由于以上因素在各省份中存在不同的差异，也会造成地表灰尘中重金属含量在空间上有着不同程度的累积状况，从而导致灰尘重金属的含量在空间上分布的差异。

4.2.1 工业活动 与金属矿山开采及冶炼活动、金属加工和原材料运输有关的行业是影响灰尘金属含量的最重要因素，不同类型的工业可能释放不同的重金属^[44,53]。钢铁制造行业主要影响Pb、Zn的含量，汽车工业可能会增加城市灰尘中的Cu和Zn的含量^[86]。电子、冶金工业是Cu、Cr的主要影响因素。Cd的释放可能与机械和电镀业相关，Pb的释放可能与火电行业有关。中国中部地区之所以Pb、Zn、Cd含量明显高于东部和西部，这可能与中部多工业城市有关。Pb、Zn、Cu在中国南部地区出现高值区，不仅是由于较高土壤背景值分布，还受到工业活动的影响。例如，湖南省是中国有色金属之乡，湖南省灰尘中Cd、Pb累积程度最高以及Zn处于第二位，可能主要是受到湖南省有色金属的开采及冶炼活动的影响。此外，南方地区内的两广地区、云贵地区是由于其金属加工、冶金等重工业的发展促使灰尘中重金属的富集。

4.2.2 人口与交通 已有研究表明^[87]，灰尘中重金属的含量会随人口密度的增加而增加。一般来说，人口越多，地区的公共基础设施（建筑物外墙、金属栏杆等）以及车辆也会越多，而这些因素都会不同程度上导致灰尘中重金属含量的积累。这同样表明，人口密度越大的地区，地表灰尘中重金属元素的含量可能也会偏高。例如，灰尘中Cu、Pb、Zn、Cd的含量在东南沿海地区出现较大值可能与东南沿海各地区的人口密度有关。而且就西部地区的重金属含量要普遍偏低（除矿业发达地区），都可能会受到人口密度小的影响。

研究表明^[58,59,88]，城市地表灰尘中重金属的累积与车辆交通（包括汽车数量、车流量等）有密切相关性，城市地表灰尘中Pb和Cu主要来源于含铅汽油燃烧后的机动车尾气排放和轮胎磨损；同时，刹车里衬的磨损也会造成灰尘中Cd、Pb和Cu的污染，因此，一般认为这三种重金属是交通污染的指示元素^[23]。中国南部大城市及特大城市较为密集

含量在空间上分布差异的初始原因。由表中土壤背景值与省平均值对比分析得出，土壤背景值各重金属含量由高到低分别为：Zn>Cr>Pb>Cu>Cd，而各省份的地表灰尘重金属含量由高到低分别为Zn>Pb>Cr>Cu>Cd。从中可以看出，除Pb和Cr的位序发生变化以外，其他元素的位序不变，两者具有一致性，特别是两端的Zn和Cd的位序没有变化，说明地表灰尘中重金属在一定程度上是受到土壤背景影响的。从地表灰尘重金属与土壤背景的空间分布上看，广东省、福建省、

且交通运输发达, 通过车辆磨损及尾气排放所释放的重金属与西部或中小城市相比也较多, 这是造成南部地区重金属含量及累积程度较高的主要因素之一。

本研究采用的数据主要来自搜集到的相关文献, 由于中东部地区研究成果较多, 样本数据相对集中, 而西部地区样本数据较少, 可能会在一定程度上对结果产生影响。其中统计出重金属元素含量在各省直辖市的平均值, 有些省份可能会受到一些重金属含量高值地区的影响(例如湖南省某些城市受到矿业开采及冶炼活动影响, 使得整个湖南省重金属含量偏高), 可能会造成不可避免的平均值偏高。

5 结论

通过对中国地表灰尘中Cr、Cu、Pb、Zn、Cd五种重金属空间插值分析及对各省份重金属含量累积指数分析, 可以得出: ① 中国地表灰尘中重金属含量普遍较高, 且各地区重金属含量水平存在不同程度上的差异。② 在全国范围内, 东南部地区的地表灰尘重金属普遍较高, 特别是东南沿海的浙江省、福建省等地。就整体而言, Cu、Pb、Zn三种重金属含量的空间分布较为相似, 含量由高到低均大致呈南—北走势, 而Cr含量呈中部高两侧低的趋势, Cd并无明显趋势。③ 各省份平均值与土壤背景值相比, 除Cr在山东省和贵州省无富集状况以外, 各省的地表灰尘中Cu、Pb、Zn、Cd均具有一定的富集水平。其中, 湖南省的Cd和Pb均富集最为严重, Cr在福建省富集最为严重, 广东省的Cu富集水平最高, 而Zn在江西省的富集水平最高。④ 各地区地表灰尘中重金属均存在不同程度的富集, 主要受到自然背景和人为活动的影响, 而且由于不同省份地表灰尘中重金属的累积程度不同, 故人为活动为主要的影响因素, 人为活动主要包括工业活动、人口密度、城市建设及车辆交通等。

参考文献(References)

- [1] Sun Y, Zhou Q, Xie X, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3): 455-462.
- [2] Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(21): 3835-3844.
- [3] Saeedi M, Li L Y, Salmanzadeh M. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 43(9): 227-228.
- [4] Al-Rajhi M A, Seaward M R D, Al-Aamer A S. Metal levels in indoor and outdoor dust in Riyadh, Saudi Arabia. *Environment International*, 1996, 22(3): 315-324.
- [5] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳市区地表灰尘重金属污染分析与评价. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 169-174. [Zhang Yixiu, Wang Ji, Zhang Hao. Pollution analysis and evaluation of heavy metals in urban dust in Guiyang. *Ecology and Environment Science*, 2011, 20(1): 169-174.]
- [6] Sezgin N, Ozcan H K, Demir G, et al. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway. *Environment International*, 2004, 29(7): 979-985.
- [7] 孙宗斌, 刘百桥, 周俊, 等. 天津城市道路灰尘重金属污染及生态风险评价. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 244-250. [Sun Zongbin, Liu Baiqiao, Zhou Jun, et al. Heavy metals pollution and ecological risk assessment on urban street dust of Tianjin. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(8): 244-250.]
- [8] 颜钰, 李盼盼, 陶军, 等. 北京高校校园道路灰尘重金属污染特征及健康风险评价. *环境污染与防治*, 2016, 38(1): 58-63. [Yan Yu, Li Panpan, Tao Jun, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dusts of universities in Beijing. *Environmental Pollution and Control*, 2016, 38(1): 58-63.]
- [9] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险. *地理研究*, 2010, 29(6): 989-996. [Li Xiaoyan, Chen Tongbin, Lei Mei, et al. Concentrations and risk of heavy metals in surface soil and dust in urban squares and school campus in Beijing. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 989-996.]

- [10] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2006-2015. [Tang Rongli, Ma Keming, Zhang Yuxin, et al. Health risk assessment of heavy metals of street dust in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 2006-2015.]
- [11] 王丽丽, 刘敏, 欧冬妮, 等. 上海城市地表灰尘重金属颗粒级效应与赋存形态研究. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009, 55(6): 64-70. [Wang Lili, Chen Zhenlou, Ou Dongni, et al. Particle size distribution of heavy metals in urban surface dusts in Shanghai. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2009, 55(6): 64-70.]
- [12] 王利, 陈振楼, 陈晓枫, 等. 上海内环高架沿线灰尘重金属污染分析与评价. 环境监测管理与技术, 2009, 21(5): 35-38. [Wang Li, Chen Zhenlou, Chen Xiaofeng, et al. Pollution analysis and evaluation of heavy metals in street dust along Inner-ring Overhead Highway in Shanghai. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, 21(5): 35-38.]
- [13] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征. 环境科学, 2007, 28(2): 238-242. [Shi Guitao, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, et al. Heavy metal concentrations of soils in Shanghai urban parks and their assessment. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 238-242.]
- [14] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价. 中国环境科学, 2009, 29(5): 548-554. [Chang Jing, Liu Min, Li Xianhua, et al. Primary research on health risk assessment of heavy metals in road dust of Shanghai. *China Environmental Science*, 2009, 29(5): 548-554.]
- [15] 郭金婷, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市公园灰尘重金属污染健康风险评价. 生态学杂志, 2014, 33(2): 415-420. [Guo Jinting, Zhou Jun, Hu Beibei, et al. Health risk assessment on heavy metals in dust of urban parks in Tianjin. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2): 415-420.]
- [16] 李燕燕, 李章平, 熊海灵, 等. 重庆市街道灰尘重金属污染的健康风险评价. 西南大学学报: 自然科学版, 2015, 37(2): 18-23. [Li Yanyan, Li Zhangping, Xiong Hailing, et al. Risk assessment of roadside heavy metal pollution to human health in Chongqing. *Journal of Southwest University: Natural Science*, 2015, 37(2): 18-23.]
- [17] 代勇, 李章平, 李燕燕, 等. 重庆市主城区街道灰尘重金属的污染特征分析. 环境化学, 2015, 34(1): 188-189. [Dai Yong, Li Zhangping, Li Yanan, et al. Pollution analysis of heavy metals in street dust of core district in Chongqing city. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1): 188-189.]
- [18] 林俊杰, 刘丹, 方伟, 等. 万州道路灰尘重金属空间分布及污染评价. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 89-92. [Lin Junjie, Liu Dan, Fang Wei, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metal in street dust of Wanzhou. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(10): 89-92.]
- [19] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3087-3091. [Tang Jie, Han Weizheng, Li Na, et al. Multivariate analysis of heavy metal element concentrations in atmospheric deposition in Harbin city, Northeast China. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 3087-3091.]
- [20] 李延生. 黑龙江省松嫩平原南部大气降尘地球化学特征. 物探与化探, 2011, 35(4): 536-540. [Li Yansheng. Geochemical characteristics of atmospheric dust in southern Songnen Plain, Heilongjiang province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(4): 536-540.]
- [21] 梁涛, 史正涛, 吴枫, 等. 昆明市街道灰尘重金属污染及潜在生态风险评价. 热带地理, 2011, 31(2): 164-170. [Liang Tao, Shi Zhengtao, Wu Feng, et al. Heavy metal pollution and the ecological risk assessment of urban street dust in Kunming. *Tropical Geography*, 2011, 31(2): 164-170.]
- [22] Liu Q, Wang Y, Liu J, et al. Grain-size distribution and heavy metal contamination of road dusts in urban parks and squares in Changchun, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, 37(1): 71-82.
- [23] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城市近地表灰尘重金属污染来源解析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 155-160. [Yang Zhongping, Lu Wenxi, Liu Xinrong, et al. Heavy metal identification for near-surface urban dust in Changchun city. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(12): 155-160.]
- [24] 朱兰保, 盛蒂, 戚晓明, 等. 蚌埠市地表灰尘重金属污染特征及潜在生态风险. 水土保持通报, 2014, 34(3): 242-246. [Zhu Lanbao, Sheng Di, Qi Xiaoming, et al. Heavy metal pollution characteristics and potential ecological risk in surface dusts of Bengbu city. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 242-246.]
- [25] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价. 环境科学, 2011, 32(9): 2661-2668. [Li Ruzhong, Zhou Aijia, Tong Fang, et al. Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2661-2668.]
- [26] 范佳民, 郑刘根, 姜春露, 等. 淮南市城区地表灰尘重金属分布特征及生态风险评价. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1643-1649. [Fan Jiamin, Zheng Liugen, Jiang Chunlu, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in urban dusts of Huainan city. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(10): 1643-1649.]
- [27] 蒋炳言, 方凤满, 汪琳琳. 芜湖市市区地表灰尘中重金属空间分布特征及来源分析. 安全与环境学报, 2010, 10(5): 107-

112. [Jiang Bingyan, Fang Fengman, Wang Linlin. Sources of heavy metals and their spatial distribution on the surface dust in Wuhu urban areas. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(5): 107-112.]
- [28] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2261-2270. [Li Ruzhong, Pan Chengrong, Chen Jing, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling city. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2261-2270.]
- [29] 许东升, 李琦, 黄淑玲. 宿州市街尘重金属污染特征、来源及风险评价. *赤峰学院学报: 自然版*, 2012, 28(5): 110-113. [Xu Dongsheng, Li Qi, Huang Shuling. Pollution characteristics, resources and risk assessment of heavy metals in street dust in Suzhou city. *Journal of Chifeng College: Natural Science Edition*, 2012, 28(5): 110-113.]
- [30] 陈青林, 王惠, 杨宝山, 等. 济南市地表灰尘重金属含量及其污染评价. *济南大学学报: 自然科学版*, 2013, 27(4): 428-432. [Chen Qinglin, Wang Hui, Yang Baoshan, et al. Determination and pollution assessment of heavy metal in surface dust from Jinan city. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2013, 27(4): 428-432.]
- [31] 钱翌, 刘峥延. 青岛城市公园灰尘重金属的形态分布及健康风险评估. *城市环境与城市生态*, 2011, 24(4): 20-23. [Qian Yi, Liu Zhengyan. Chemical speciation of heavy metals and health risk assessment in dust of Qingdao urban park. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2011, 24(4): 20-23.]
- [32] 张丽. 淄博城区土壤及街道灰尘重金属地球化学研究. 淄博: 山东理工大硕士学位论文, 2006. [Zhang Li. Geochemical study of heavy metals in urban soil and street dust in Zibo. Zibo: Master Dissertation of Shandong University of Technology, 2006.]
- [33] 曹冬霞. 太原市地表灰尘重金属的污染状况及环境风险. 太原: 山西大学硕士学位论文, 2012. [Cao Dongxia. Pollution and environmental risk of heavy metals in surface dust of Taiyuan. Taiyuan: Master Dissertation of Shan Xi University, 2012.]
- [34] 郭锋, 申慧芳, 樊文华. 大同市矿区中学地表灰尘重金属粒级效应及健康风险评估. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 162-166. [Guo Feng, Shen Huifang, Fan Wenhua. Particle size distribution and health risk of heavy metal of surface dust in middle school of mining district in Datong city. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 162-166.]
- [35] 吴国平, 王丰基, 梁志锋, 等. 顺德大气降尘中重金属污染特征分析. *环境保护*, 2009, (4): 46-48. [Wu Guoping, Wang Fengji, Liang Zhifeng, et al. Pollution analysis of heavy metals in atmospheric dust in Shunde city. *Environmental Protection*, 2009, (4): 46-48.]
- [36] Duzgorenaydin N S, Wong C S, Aydin A, et al. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China. *Environmental Geochemistry & Health*, 2006, 28(4): 375-91.
- [37] Hu X, Zhang Y, Luo J, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5): 1215-1221.
- [38] 孙美侠, 郝红艳. 江苏省徐州市区街道灰尘重金属污染分析与评价. *环境保护与循环经济*, 2013, 33(12): 52-54. [Sun Meixia, Hao Hongyan. Pollution analysis and evaluation of heavy metals in street dust in Xuzhou city, Jiangsu province. *Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology*, 2013, 33(12): 52-54.]
- [39] 姚静波, 王明新, 齐今笛, 等. 高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例. *环境科学*, 2017, 38(5): 1807-1816. [Yao Jingbo, Wang Mingxin, Qi Jindi, et al. Pollution risk of heavy metals in dust from the building along elevated road: A case study in changzhou. *Environmental Science*, 2017, 38(5): 1807-1816.]
- [40] 刘文婷. 扬州市城区道路两侧土壤和灰尘中重金属污染研究. 扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2011. [Liu Wenting. Study on heavy metal pollutions in soil and dust of road in Yangzhou city. Yangzhou: Master Dissertation of Yangzhou University, 2011.]
- [41] 唐凤舞. 南昌市街道灰尘重金属污染特征及形态分析研究. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2010. [Tang Fengwu. Pollution characteristics and speciation analysis of heavy metals in street dust in Nanchang city. Nanchang: Master Dissertation of Nanchang University, 2010.]
- [42] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评估. *环境科学学报*, 2009, 29(10): 2195-2202. [Zheng Xiaokang, Li Xiaohui, Huang Guohe, et al. Pollutant distribution in urban dusts of Baoding and health risk assessment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2195-2202.]
- [43] 崔那涛, 李随民. 石家庄市近地表灰尘重金属污染及环境质量评价. *安全与环境学报*, 2013, 13(6): 138-142. [Cui Xingtao, Li Suimin. Assessment of heavy metal pollution and the environmental quality in the atmosphere near the ground surface of Shijiazhuang city. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(6): 138-142.]
- [44] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险. *环境科学*, 2012, 33(1): 253-259. [Liu Dehong, Wang Fayuan, Zhou Wenli, et al. Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones of luoyang city and its potential ecological risk. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 253-259.]
- [45] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园灰尘重金属含量及潜在生态风险. *地球与环境*, 2016, 44(1): 89-95. [Duan

- Haijing, Cai Xiaoqiang, Ruan Xinling, et al. Potential ecological risk of heavy metals in surface dusts from parks of Kaifeng city, China. *Earth and Environment*, 2016, 44(1): 89-95.]
- [46] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价:以许昌市为例. *环境科学*, 2013, 34(10): 4017-4023. [Yan Hui, Chen Jie, Xiao Jun. Heavy metal content in street dust and environmental risk assessment of agricultural city: A case study of Xuchang city. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 4017-4023.]
- [47] 余琳琳, 李凤全, 施秋玮, 等. 城市灰尘重金属含量对城市土壤重金属的影响:以金华市为例. *广东微量元素科学*, 2014, (10): 7-12. [She Linlin, Li Fengquan, Shi Qiwei, et al. The influence of the heavy metal content in urban dust on heavy metal in urban soil: Taking Jinhua city as an example. *Guangdong Trace Elements Science*, 2014, (10): 7-12.]
- [48] Zhang M, Wang H. Concentrations and chemical forms of potentially toxic metals in road-deposited sediments from different zones of Hangzhou, China. *Journal of Environmental Science*, 2009, 21(5): 625-631.
- [49] 陈莉, 李凤全, 叶玮, 等. 浙江省城市灰尘重金属分布. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 241-245. [Chen Li, Li Fengquan, Ye Wei, et al. Distribution of heavy metals within Zhejiang province for urban dust. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 241-245.]
- [50] 陈佳. 淳安县主城区街道灰尘污染特征及风险分析. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2015. [Chen Jia. Characteristics and risk analysis of street dust pollution in county town of Chun'an. Hangzhou: Master Dissertation of Zhejiang University, 2015.]
- [51] Yang T, Zeng Q, Liu Z, et al. Magnetic properties of the road dusts from two parks in Wuhan city, China: Implications for mapping urban environment. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011, 177(1-4): 637-648.
- [52] 张丽, 袁攀, 王浩泉, 等. 有色冶炼厂周边地表灰尘中重金属污染特征及健康风险评价. *湖北理工学院学报*, 2016, 32(4): 11-16. [Zhang Li, Yuan Pan, Wang Haoquan, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal in the surface dust around the nonferrous smeltery. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2016, 32(4): 11-16.]
- [53] 龙永珍, 邹海洋, 戴塔根. 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(4): 1633-1638. [Long Yongzhen, Zou Haiyang, Dai Tagen. Heavy metal pollution in dust of Chang-Zhu-Tan city region. *Journal of Central South University*, 2010, 41(4): 1633-1638.]
- [54] Li Z, Feng X, Li G, et al. Distributions, sources and pollution status of 17 trace metal/metalloids in the street dust of a heavily industrialized city of central China. *Environmental Pollution*, 2013, 182(6): 408-416.
- [55] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价. *环境科学*, 2014, 35(3): 1021-1028. [Li Ping, Xue Suyi, Wang Shengli, et al. Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1021-1028.]
- [56] 白泽琳, 赵梦竹, 李萍, 等. 兰州市城关区地表灰尘重金属污染健康风险评价. *环境污染与防治*, 2014, 36(5): 54-58. [Bai Zelin, Zhao Mengzhu, Li Ping, et al. Health risk assessment of heavy metals of urban dusts from the Chengguan district of Lanzhou. *Environmental Pollution and Control*, 2014, 36(5): 54-58.]
- [57] 陈秀玲, 茅建彬, 何世虹, 等. 福州城市公园灰尘重金属污染特征. *城市环境与城市生态*, 2012, 25(6): 31-34. [Chen Xiuling, Mao Jianbin, He Shihong, et al. Heavy metal pollution of dust in Fuzhou urban parks. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2012, 25(6): 31-34.]
- [58] 于瑞莲, 胡恭任, 刘海婷, 等. 泉州市街道灰尘中重金属来源分析. *地球与环境*, 2014, 42(3): 328-332. [Yu Hailian, Hu Gongren, Liu Haiting, et al. Source analysis of heavy metals in the street dust of Quanzhou city. *Earth and Environment*, 2014, 42(3): 328-332.]
- [59] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 福州市公交枢纽站地表灰尘重金属含量、来源及其健康风险评价. *环境科学研究*, 2013, 26(8): 906-912. [Li Xiaofei, Chen Zhibiao, Zhang Yonghe, et al. Concentrations, sources and health risk assessments of heavy metals in ground surface dust from urban bus terminals of Fuzhou city. *Research of environmental science*, 2013, 26(8): 906-912.]
- [60] 李法云, 胡成, 张莹, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的环境影响与健康风险评价. *气象与环境学报*, 2010, 26(6): 59-64. [Li Fayun, Hu Cheng, Zhang Ying, et al. Environmental impact and health risk assessment of heavy metals in street dust in Shenyang, Liaoning province. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, 26(6): 59-64.]
- [61] 郑冬梅, 金丹, 蔺昕, 等. 沈阳市采暖期与非采暖期的街道灰尘重金属暴露. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 1047-1052. [Zheng Dongmei, Jin Dan, Lin Xin, et al. The exposure of heavy metals of street dust during heating period and unheating period in Shenyang. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 1047-1052.]
- [62] Zheng N, Liu J, Wang Q, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 726-733.
- [63] Zheng N, Liu J, Wang Q, et al. Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(27): 3239-3245.

- [64] 常玉玉, 卢新卫, 陈颖, 等. 西安市小学及幼儿园灰尘重金属含量及健康风险评价. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 100-104. [Chang Yuyu, Lu Xinwei, Chen Hao, et al. Health risk assessment of heavy metals in dust from the kindergarten and primary school of Xi'an city. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 100-104.]
- [65] 陈莹, 孙璐, 云中来, 等. 西安市城市道路灰尘重金属污染及健康风险评价. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 370-376. [Chen Ying, Sun Lu, Yun Zhonglai, et al. Heavy metal pollution of the urban street dust and health risk assessment in Xi'an. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 370-376.]
- [66] 黄丽, 卢新卫, 翟萌, 等. 西安城市公园灰尘重金属污染及其风险评价. 城市环境与城市生态, 2010, 23(1): 17-20. [Huang Li, Lu Xinwei, Zhai Meng, et al. Heavy metal pollution and risk assessment in dust of Xi'an city parks. Urban Environment & Urban Ecology, 2010, 23(1): 17-20.]
- [67] Lu X, Wang L, Li L Y, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1-3): 744-749.
- [68] 陈灿灿, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡市街道灰尘重金属污染的健康风险评价. 城市环境与城市生态, 2011, 24(2): 35-38. [Chen Cancan, Lu Xinwei, Wang Lijun, et al. Health risk assessment of heavy metals in street dust in Baoji city. Urban Environment & Urban Ecology, 2011, 24(2): 35-38.]
- [69] Shi X M, Chen L X, Wang J H. Multivariate analysis of heavy metal pollution in street dusts of Xianyang city, NW China. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(6): 1973-1979.
- [70] Zhao N, Lu X W, Chao S G, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in less than 100 μm particles of street dust from Xining, China. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5): 2319-2327.
- [71] 包凤琴. 呼和浩特市土壤及大气尘生态环境地球化学评价. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2008. [Bao Fengqin. The geochemistry assessment of ecology environment about urban soil and air dust in Hohhot. Chengdu: Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2008.]
- [72] 韩秀凤, 卢新卫. 包头市公园及广场灰尘中重金属污染特征. 环境化学, 2016, 35(12): 2606-2614. [Han Xiufeng, Lu Xinwei. Contamination characteristics of heavy metals in dusts from square and park of Baotou, China. Environmental Chemistry, 2016, 35(12): 2606-2614.]
- [73] Wei B G, Jiang F Q, Li X M, et al. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China. Microchemical Journal, 2009, 93(2): 147-152.
- [74] 刘玉燕, 刘浩峰, 刘敏. 乌鲁木齐市地表灰尘重金属含量及其健康风险. 干旱区研究, 2009, 26(5): 750-754. [Liu Yuyan, Liu Haofeng, Liu Min. Concentrations and health risk assessment of urban surface dust in Urumqi. Arid Zone Research, 2009, 26(5): 750-754.]
- [75] 丁志强. 喀什市城市道路灰尘重金属铅污染及评价. 城市建设理论研究: 电子版, <http://chinaxzzy.com/7-1.asp>, 2017-02-15. [Ding Zhiqiang. Lead pollution and its assessment in urban street dust of Kashi. Urban Construction Theory Research, <http://chinaxzzy.com/7-1.asp>, 2017-02-15.]
- [76] 李晓燕, 谢馨洁. 我国西南三市家庭灰尘重金属水平及差异. 中国环境科学, 2013, 33(2): 365-371. [Li Xiaoyan, Xie Xinjie. A study on heavy metals in household dusts in 3 cities in Southwestern China. China Environmental Science, 2013, 33(2): 365-371.]
- [77] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论. 北京: 科学出版社, 2012. [Liu Aili, Wang Peifa, Ding Yuanyuan. Conception of Geostatistics. Beijing: Science Press, 2012.]
- [78] 董立宽, 方斌. 茶园土壤重金属乡镇尺度下空间异质性分析: 以江浙优质名茶种植园为例. 地理研究, 2017, 36(2): 391-404. [Dong Likuan, Fang Bin. Analysis of spatial heterogeneity of soil heavy metals in tea plantation: Case study of high quality tea garden in Jiangsu and Zhejiang. Geographical Research, 2017, 36(2): 391-404.]
- [79] 方斌, 叶子君. 江浙典型茶园土壤铜含量的空间分异对比分析. 地理研究, 2016, 35(3): 525-533. [Fang Bin, Ye Zijun. Comparative analysis on spatial variation of copper in typical tea garden soils of Jiangsu and Zhejiang provinces. Geographical Research, 2016, 35(3): 525-533.]
- [80] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. [China National Environment Monitoring Center. Background Values of Soil Elements in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.]
- [81] 赵丽娟. 重庆都市经济圈土壤八种重金属元素的背景值特征和分布规律. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2008. [Zhao Lijuan. Background value and enrichment of eight heavy metals in soil of Chongqing metropolitan area. Chengdu: Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2008.]
- [82] 王济, 张一修, 高翔. 城市地表灰尘重金属研究进展及展望. 地理研究, 2012, 31(5): 821-830. [Wang Ji, Zhang Yixiu, Gao Xiang. The advances in research on heavy metals of the surface dust in urban areas. Geographical Research, 2012, 31(5): 821-830.]

- [83] Han Y M, Du P X, Cao J J, et al. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, 2006, 355(1-3): 176.
- [84] Hunt A, Johnson D L, Griffith D A. Mass transfer of soil indoors by track-in on footwear. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2-3): 360-371.
- [85] Ord Ez A, Loredó J, De M E, et al. Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in northern Spain. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2003, 44(2): 160-170.
- [86] Meng F, Liu M, Hou L J, et al. Heavy metals in urban dusts and soils of Shanghai and its pollution assessment. *Journal of East China Normal University*, 2007, 53(4): 56-63.
- [87] Acosta J A, Gabarr N M, Faz A, et al. Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas. *Chemosphere*, 2015, 134(4): 328-337.
- [88] Karmacharya N, Shakya P R. Heavy metals in bulk and particle size fractions from street dust of Kathmandu City as the possible basis for risk assessment. *Science World*, 2012, 10(10): 84-88.

Spatial distribution and accumulation of heavy metals in urban surface dust of China

WANG Shuo^{1,2}, CAI Limei^{1,2,3}, WANG Qiushuang^{1,2}, LUO Jie^{1,2}, TANG Cuihua^{1,2},
MU Guizhen^{1,2}, JIANG Huihao^{1,2}, LIU Tianyong^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technologies, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the domestic and foreign published papers about heavy metal contents of urban surface dust, the spatial variation of heavy metal contents in surface dust in China was explored. Totally, 69 studies on dust Cr, 84 on Cu, 86 on Pb, 79 on Zn and 58 on Cd were collected. Firstly, the abnormal values were picked up and removed, then the spatial distribution was obtained through Kriging method and average values in the provinces were calculated. Meanwhile, compared with the soil background values, the accumulation values of heavy metal contents were calculated. The results showed that the spatial distribution of heavy metal contents was universally high and had obvious regional difference. On the whole, the spatial distribution of Cu, Pb and Zn contents was similar, which was generally dominated by south-north trend from high contents to low contents, while the spatial distribution of Cr contents was high in the central part of the country and low in other parts, and Cd contents had no obvious trends in China. Compared with the corresponding background values of soil heavy metal concentration, nearly all provinces had higher Pb, Cu, Zn and Cd concentrations, except for the fact that Cr had no accumulation in Shandong and Guizhou provinces. The highest enrichment of Cd and Pb was found in Hunan province with 277.95 and 42.82 times of the background values, and the highest enrichment of Cr was in Fujian province with 7.11 times of the background values. The highest Cu enrichment was in Guangdong province with 1.35 times of the background values; and the highest Zn enrichment was in Jiangxi province with 39.13 times of the background values, respectively.

Keywords: surface dust; heavy metals; accumulation; spatial distribution; China