

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021061002

刘杰, 陈秀玲, 范逸飞, 等. 中国城市公园灰尘的重金属空间分布特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2022, 41(2): 450-459.

LIU Jie, CHEN Xiuling, FAN Yifei, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of heavy metals in urban park dust in China[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (2): 450-459.

中国城市公园灰尘的重金属空间分布特征及其影响因素*

刘杰^{1,2} 陈秀玲^{1,2,3**} 范逸飞^{1,2} 周笑笑^{1,2} 陈晓薇²

(1. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州, 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州, 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州, 350007)

摘要 通过收集公开发表的中国城市公园灰尘重金属数据, 分析公园灰尘中 Cr、Cu、Zn、Pd、Ni 和 Cd 等 6 种元素的空间分布特征及富集状况, 并对其影响因素进行了探讨. 结果表明, Cr、Cu、Zn、Cd 等 4 种重金属含量的空间分布具有相似性, 东部地区为高值区, 东北地区和西北地区为低值区; Pb 和 Ni 具有相似的空间分布特征, 东部和中部地区为高值区, 西北地区则为低值区. 与各省份的土壤背景值对比发现, 除 Cr 在武汉市和开封市、Zn 在包头市、Ni 在北京市、武汉市和焦作市无富集状况以外, 在其他城市公园灰尘中均具有一定的富集水平, 且 Cu、Pb、Cd 等 3 种重金属元素在各城市公园灰尘中的累积指数均大于 1. 社会经济发展指标与公园灰尘重金属的相关性分析表明, Pb 与总人口呈显著正相关; Cu、Zn 与原煤呈显著正相关; Pb、Ni 与民用汽车拥有量呈显著正相关. Cu、Zn 元素含量主要受燃煤能源等能源结构的影响, Pb 元素含量主要受到人口和交通因素的控制, Ni 元素含量主要受交通因素的影响; Cr、Cd 来源较为复杂, 可能是自然和人为的混合源.

关键词 公园灰尘, 重金属, 空间分布, 影响因素, 中国.

Spatial distribution characteristics and influencing factors of heavy metals in urban park dust in China

LIU Jie^{1,2} CHEN Xiuling^{1,2,3**} FAN Yifei^{1,2} ZHOU Xiaoxiao^{1,2} CHEN Xiaowei²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology (Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province), Fujian Normal University, Fuzhou, 350007, China; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, 350007, China)

Abstract The data published on heavy metal contents in urban park dust in China were collected to analyse the spatial distribution and enrichment of Cr, Cu, Zn, Pd, Ni, and Cd in this dust. In addition, the factors that influence the distribution and enrichment of heavy metals were investigated. The results showed that the spatial distribution of Cr, Cu, Zn, and Cd contents was similar, and the eastern region was the high-value region, whereas the northeast and northwest regions were the low-value regions. The spatial distribution characteristics of Pb and Ni were similar, with high values in the eastern and central regions and low values in the northwest regions. By comparing the soil background values of each province, we found that except for Cr in Wuhan and Kaifeng, Zn in Baotou, and Ni in Beijing, Wuhan, and Jiaozuo, dust of other city parks exhibits a certain

2021年6月10日收稿(Received: June 10, 2021).

* 福建省自然科学基金(2019J01259)和福建师范大学创新团队项目(IRTL1705)资助.

Supported by Natural Science Foundation of Fujian (2019J01259) and Innovation Research Team Fund of Fujian Normal University (IRTL1705).

** 通信联系人 **Corresponding author**, Tel:13314946470, E-mail: xiulingchen@163.com

concentration level. In all the city parks, the three heavy metal elements, namely Cu, Pb, Cd, exhibited a dust accumulation index of >1 . The correlation analysis of social and economic development indicators and heavy metals in park dust showed that Pb was significantly positively correlated with the total population; Cu and Zn were positively correlated with raw coal; and Pb and Ni were significantly positively correlated with the occupancy of civil vehicles. Moreover, Cu and Zn contents were mainly affected by the energy structure such as coal burning energy, the Pb content was chiefly controlled by population and traffic factors, and the Ni content was principally affected by traffic factors. The sources of Cr and Cd may be both natural and artificial and thus are highly complex.

Keywords park dust, heavy metal, spatial distribution, influence factor, China.

城市地表灰尘是一种物质组成和来源复杂的环境介质,是城市环境中重金属等污染物质的源汇载体^[1-2]。重金属作为一种潜在有毒污染物,具有环境持久性、难以降解性和有毒性等特点^[3]。重金属微粒可以跟随地表灰尘在一定的动力条件下通过再悬浮过程进入大气,还可以通过淋洗和径流等作用污染地表水和地下水,通过食物链循环、呼吸吸入、皮肤直接接触、手-口摄入等途径进入人体^[4],危害环境系统和人类健康^[5-6]。

公园作为现代城市建设中不可或缺的一部分,承载着市民和旅游者休闲、锻炼、社交和传播集体文化的功能,特别是在如今快节奏的城市生活中,扮演着市民放松和缓解压力“避难所”的角色^[7]。而对于工业化以来日渐严重的环境污染、城市热岛效应、雾霾天气等城市病,城市公园也起着吸烟滞尘、调节城市小气候、维系城市生态平衡等多种生态功能^[8]。对于放松警惕和戒备心来到公园游玩的人们而言,评价城市公园灰尘重金属污染状况就成了评价城市生态环境质量的一个重要方面^[9]。近年来国内已经开展了一些关于公园灰尘重金属的研究,研究成果涉及公园灰尘重金属的污染特征^[4,9-11]、形态分布^[12]、粒径效应^[13]、磁性特征^[14]、健康风险评价^[15-17]以及生物有效性^[17]等方面。研究对象均为单个城市,对城市公园灰尘重金属含量在全国范围内的空间分布特征及富集状况对比,以及社会经济发展状况对公园灰尘重金属的影响,目前还鲜见报道。而对全国公园灰尘重金属的研究,可以从宏观尺度上了解中国城市公园灰尘的重金属空间分布特征,对认识自然和人为的影响作用具有重要意义,为城市居民健康防护和城市环境管理规划提供科学依据。

本研究汇总了从 2002 年到 2018 年中国 15 个城市有关公园灰尘重金属的数据^[4,7,9-21],对城市公园灰尘重金属含量进行空间分析,利用累积指数分析其富集状况,对社会经济发展指标与公园灰尘重金属含量进行相关性分析,并对其影响因素进行了探讨。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 材料来源

本研究从公开发表的相关文献中,收集了 2002—2018 年间中国城市公园灰尘中重金属含量数据^[4,7,9-21],主要收集的重金属元素有 Cr、Cu、Zn、Pd、Ni 和 Cd 等 6 种元素。共收集到有关 Cr、Cu、Zn、Pd、Ni 和 Cd 含量的研究数据分别为 14 个、15 个、14 个、14 个、12 个和 10 个,数据均选用其平均值。收集的数据中研究区域包含上海市^[4]、北京市^[7]、包头市^[9]、天津市^[10]、福州市^[11]、青岛市^[12]、长春市^[13]、武汉市^[14]、开封市^[15]、西安市^[16]、焦作市^[17]、乌鲁木齐市^[18]、南京市^[19]、东莞市^[20]和漳州市^[21]。社会经济发展指标数据摘自各城市国民经济与社会发展公报以及各城市统计年鉴^[22-36],因当年社会经济发展的影响主要在后期的灰尘污染中表现^[37],故本文以各城市公园采样时间前一年的社会经济数据,文献中没有说明采样时间的则以发表时间前一年的社会经济数据,与公园灰尘重金属含量进行相关性分析。数据包括:总人口、地区生产总值、工业生产总值、原煤、民用汽车拥有量,其中长春、西安、福州的原煤无数据,武汉市的民用汽车拥有量无数据。本文城市公园灰尘的重金属表格数据采用 Excel 2019 完成,运用 SPSS19.0 统计软件对社会经济发展指标与重金属元素的相关性进行处理和统计分析。

1.2 研究方法

累积指数法为评价灰尘重金属的累积现状,以各省份土壤重金属背景值为基准,累积指数^[38]按下式计算:

$$I_i = \frac{C_i}{C_j}$$

式中, I_i 为元素累积指数, C_i 为重金属符合正态分布的平均浓度, C_j 为对应各省区重金属元素的土壤背景值. i 表示 Cr、Cu、Zn、Pd、Ni 和 Cd 的 6 种元素.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 公园灰尘重金属的空间分布

从表 1 可以得出, 公园灰尘中 Cr 元素的最高值位于东莞市, 为 2874.10 mg·kg⁻¹, 最低值位于乌鲁木齐市, 为 51.56 mg·kg⁻¹. 同时, Cr 含量的高值区分布于东部地区的上海市、南京市以及中部地区的包头市等地, 东北地区的长春市、中部地区的开封市和武汉市等地为低值区. Cu 元素的最高值为 627.40 mg·kg⁻¹, 出现在东莞市, 最低值出现在包头市, 值为 26.90 mg·kg⁻¹, 其高值区主要分布在东部地区, 而低值区为西北地区的乌鲁木齐市、东北地区的长春市和中部地区的包头市、开封市、武汉市等地. Zn 含量的最高值出现在东莞市, 为 4733.10 mg·kg⁻¹, 最低值为 49.70 mg·kg⁻¹ 出现在包头市, 其高值区主要出现在东部地区和中部地区, 低值区与 Cu 元素的低值区相似. Cr、Cu 和 Zn 元素的最高值均出现在东莞市城市公园灰尘中, 可能主要受到莞城区公园辖区内莞城工业科技园以及交通流的影响^[20]. Pb 的最高值为 416.63 mg·kg⁻¹, 出现在上海市, 其高值区分布在东部地区的北京市、南京市和中部地区的西安市、开封市等地区, 而最低值出现在包头市值为 36.20 mg·kg⁻¹, 其低值区分布在西北地区的乌鲁木齐市和中部地区的焦作市等地区. 包头市城市公园灰尘中 Cu、Zn 和 Pb 元素含量最低, 明显低于其他城市, 这可能与其他城市有较高的交通流有关^[9]. Ni 的高值区主要位于东部地区, 最高值出现在南京市, 为 115.00 mg·kg⁻¹, 其低值区主要位于东北地区, 最低值出现在长春市, 值为 23.08 mg·kg⁻¹. Cd 含量的最高值和最低值分别为 1.92 mg·kg⁻¹ 和 0.30 mg·kg⁻¹, 出现在南京市和乌鲁木齐市, 高值区出现在东部地区, 如青岛市和上海市等地, 低值区则出现东北地区和西北地区. 城市公园灰尘中 Ni 和 Cd 元素的最高值均出现在南京市, 可能与其能源使用模式——燃煤以及交通有关^[19].

表 1 公园灰尘样点数据统计

Table 1 Statistics of park dust samples

城市 City	采样时间 Sampling time	样品量 Sample amount	重金属含量/(mg·kg ⁻¹) Heavy metal content						数据来源 Data sources
			Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	
上海	—	44	162.59	235.89	906.29	416.63	92.19	1.58	[4]
北京	2010年4—7月	50	69.33	72.13	219.2	201.82	25.97	0.64	[7]
包头	2014年5月	26	154.1	26.9	49.7	36.2	25.1	—	[9]
天津	2012年11—12月	51	103.18	113.18	—	63.32	40.58	1.14	[10]
福州	2011年6月和11月	11	78.21	111.04	386.62	73.81	—	0.58	[11]
青岛	—	128	—	109.27	326.88	126.02	—	1.79	[12]
长春	2013年6月	28	59.28	37.82	169.26	69.12	23.08	0.33	[13]
武汉	2002年9月	58	64.1	58.4	313.35	85.5	25.8	—	[14]
开封	2014年3月	52	53.25	44.29	240.27	144.84	23.15	1.02	[15]
西安	2009年4—5月	20	125.2	91	337.2	147.4	35.8	—	[16]
焦作	2016年2月	41	112.07	49.85	374.3	55.26	51.7	1.25	[17]
乌鲁木齐	2017年10—11月	83	51.56	29.66	184.3	36.6	31.59	0.3	[18]
南京	2014年6月	60	133	141	585	119	115	1.92	[19]
东莞	—	31	2874.1	627.4	4733.1	—	—	—	[20]
漳州	2018年11月	83	61.74	77.89	379.95	71.74	25.2	—	[21]

从整体上来看, Cr、Cu、Zn、Cd 的 4 种重金属含量的空间分布具有相似性, 东部地区为高值区, 东北地区和西北地区为低值区; Pb 和 Ni 具有相似的空间分布特征, 东部地区和中部地区为高值区, 西北地区则为低值区. 在全国范围内, 东部地区的公园灰尘重金属含量普遍较高, 特别是东南沿海的东莞市、南京市和上海市等地.

2.2 公园灰尘重金属的累积水平

根据收集的 15 个城市公园灰尘重金属数据, 查阅资料获取所需的各省、直辖市以及自治区重金属元素的土壤背景值(涉及新疆维吾尔自治区^[18]、内蒙古自治区^[39]、吉林省^[40]、北京市^[7]、天津市^[10]、山东省^[41]、河南省^[17]、陕西省^[16]、江苏省^[42]、上海市^[4]、福建省^[43]和广东省^[20]), 将城市公园灰尘重金属含量与土壤背景值进行对比, 并利用累积指数法计算出各城市公园灰尘重金属元素的累积水平(表 2).

参照中国各省份的土壤背景值, 通过累积指数法, 得出各城市公园灰尘中 Cr、Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的累积程度. 其中, 累积指数小于 1 则表示无累积情况, 大于 1 时越接近于 1 则表示累积程度越低^[44]. 如表 2 所示, 各城市公园灰尘中 Cu、Pb、Cd 的累积指数均大于 1, 表明各城市公园灰尘中这 3 种重金属元素的含量均超过各省的土壤背景值存在累积状况, 累积程度最高的为 Cd, 焦作市城市公园灰尘中 Cd 元素的累积指数最大, 达到 17.86, 而且大部分城市公园灰尘 Cd 的累积指数均达到 10 倍以上. 上海市城市公园灰尘中 Pb 元素的累积程度超过其土壤背景值的 10 倍以上, 累积指数达到 16.36, 为 Pb 含量的最高累积水平. Cu 在东莞市的累积情况最为严重, 累积指数为 36.91, 其次为上海市(8.25). 除武汉市和开封市以外, 各城市公园灰尘中 Cr 的累积指数均大于 1, 表现出绝大多数城市公园灰尘中 Cr 均有不同程度的累积, 最高的累积指数出现在东莞市, 达到 56.91. 除包头市 Zn 元素的累积指数小于 1 以外, 其他城市公园灰尘中 Zn 的累积指数均大于 1, 其中东莞市和上海市的累积指数达到 10 倍以上, 分别为 92.81 和 10.53. 北京市、武汉市和开封市城市公园灰尘中 Ni 元素的累积指数分别为 0.97、0.65 和 0.77, 表明其无累积情况, 并且其他城市公园灰尘中 Ni 的累积指数均小于 4, 表明其累积程度相对较低.

根据中国三大经济地带的划分将公园灰尘中重金属的空间分布分为西部、中部和东部 3 个区域^[44], 西部区域包括乌鲁木齐市; 中部区域包括包头市、长春市、西安市、开封市、焦作市、武汉市; 东部区域包括北京市、天津市、青岛市、南京市、上海市、福州市、漳州市、东莞市, 对公园灰尘中重金属的累积状况进行分析(图 1). 从图 1 中可以看出, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 累积水平在 3 个分区的排序均为: 东部>中部>西部, 差异水平较大, 尤其是 Cr、Cu、Zn 东部的累积水平显著大于中部和西部. 但 3 个分区中 Ni 的累积水平排序为: 东部>西部>中部, 其差异水平较小. 公园灰尘中 Cr、Cu、Zn、Pb、Ni、Cd 等 6 种重金属均表现为东部累积水平最高, 说明东部的累积状况受到人为活动影响相对较大.

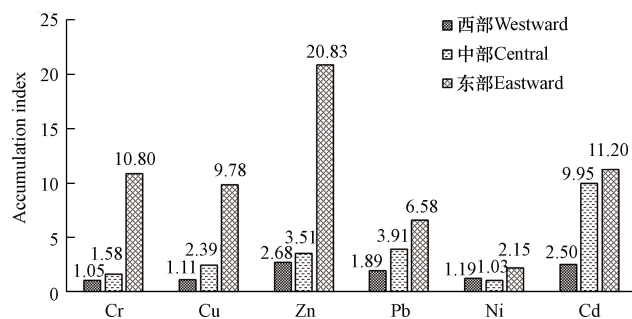


图 1 中国西、中、东部公园灰尘重金属累积水平

Fig.1 The accumulation level of park dust heavy metals in western, central and eastern regions of China

2.3 社会经济发展对公园灰尘重金属污染的影响

为探究各城市社会经济发展状况对城市公园灰尘重金属的影响, 本文选取了总人口、地区生产总值、工业生产总产值、原煤、民用汽车拥有量五个经济发展指标, 以期从人口、经济、工业、能源、交通 5 个方面探讨社会经济发展对公园灰尘重金属累积的影响.

表 2 城市公园灰尘重金属浓度累积指数
Table 2 city park dust concentration of heavy metal accumulation index

城市 City	Cr		Cu		Zn		Pb		Ni		Cd	
	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index	背景值/ (mg·kg ⁻¹) Background value	累积指数 Accumulation index
上海	75	2.17	28.59	8.25	86.1	10.53	25.47	16.36	31.9	2.89	0.13	12.15
北京	66.7	1.04	18.7	3.86	57.5	3.81	24.6	8.2	26.8	0.97	0.12	5.33
包头	56.4	2.73	19.2	1.4	55.7	0.89	18.8	1.93	24.5	1.02	0.045	—
天津	84.2	1.23	28.8	3.93	79.3	—	21	3.02	33.3	1.22	0.09	12.67
福州	41.3	1.89	21.6	5.14	82.7	4.67	34.9	2.11	13.5	—	0.054	10.74
青岛	62	—	22.6	4.83	63.3	5.16	23.6	5.34	27.1	—	0.132	13.56
长春	50.17	1.18	17.96	2.11	59.47	2.85	20.4	3.39	23.07	1	0.09	3.61
武汉	90	0.71	32	1.83	79	3.97	25	3.42	40	0.65	0.12	—
开封	65.7	0.81	19.9	2.23	61.9	3.88	25.4	5.70	30	0.77	0.07	14.57
西安	62.5	2	21.4	4.25	69.4	4.86	21.4	6.89	28.8	1.24	0.094	—
焦作	65.7	1.71	19.9	2.51	61.9	6.05	25.4	2.18	30	1.72	0.07	17.86
乌鲁木齐	49.3	1.05	26.7	1.11	68.8	2.68	19.4	1.89	26.6	1.19	0.12	2.5
南京	76	1.75	22.3	6.32	73	8.01	26.8	4.44	32.9	3.5	0.151	12.72
东莞	50.5	56.91	17	36.91	51	92.81	36	—	27.7	—	0.04	—
漳州	41.3	1.49	21.6	3.61	82.7	4.59	34.9	2.06	13.5	1.87	0.054	—

社会经济发展指标与公园灰尘重金属含量间的相关性分析表明, Pb 与总人口呈显著正相关, 相关系数为 0.628; Cu、Zn 与原煤呈显著正相关, 相关系数分别为 0.626、0.765, 说明能源消费方式尤其燃煤对重金属 Cu、Zn 元素的影响较大; Pb、Ni 与民用汽车拥有量呈显著正相关, 相关系数分别为 0.566、0.644, 说明灰尘重金属 Pb、Ni 元素的含量与交通有关. 灰尘重金属 Pb 元素与 5 个经济指标的相关性都较显著, 说明城市公园灰尘中 Pb 元素的含量易受城市活动的干扰, 社会经济发展状况对其影响较大. 其他经济发展指标和公园灰尘重金属的相关性及其系数如表 3 所示.

表 3 公园灰尘重金属与经济相关关系

Table 3 Correlation between heavy metal and economic development in different cities

	总人口 Total population	地区生产总值 Gross domestic product	工业总产值 Gross industrial output value	原煤 Coal	民用汽车拥有量 Possession of civil vehicles
Cr	-0.077	-0.142	-0.180	0.503	-0.101
Cu	0.153	0.059	-0.003	0.626*	0.082
Zn	0.023	-0.066	-0.121	0.765**	-0.137
Pb	0.628*	0.343	0.460	0.304	0.566*
Ni	0.178	0.291	0.144	0.409	0.644*
Cd	0.189	0.222	0.110	0.380	-0.057

注: ** 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著, $P < 0.01$. * 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著, $P < 0.01$.

从表 3 中可以看出, 除 Pb 与总人口呈显著正相关外, 其他重金属元素与总人口的相关性不显著; 6 种灰尘重金属元素与地区生产总值的相关性均不显著, Pb 与地区生产总值的相关系数最大, 仅为 0.343. 已有研究表明^[45], 地表灰尘重金属的含量与城市人口和经济发展程度呈正相关. 公园灰尘中 6 种重金属元素的含量并未都与城市人口和经济发展程度呈正相关, 有的甚至呈负相关, 如 Cr 与总人口、Cr 与地区生产总值、Zn 与地区生产总值, 这可能是因为, 随着经济发展阶段的变化, 经济发展更加注重环境效益, 在发展的同时不能再以牺牲环境为代价, 追求高质量发展. 相关性分析表明, 工业总产值与 6 种灰尘重金属元素的相关性均不显著, 且与 Cr、Cu、Zn 呈负相关; 民用汽车拥有量除与 Pb 和 Ni 呈显著正相关外, 与其他重金属元素的相关性不显著, 且与 Cr、Zn、Cd 呈负相关. 原煤与 6 种灰尘重金属元素的相关性较其他 4 种经济指标的相关性高, 相关系数均大于 0.3, 且 Cu、Zn 与原煤呈显著正相关, 表明燃煤能源是影响公园灰尘重金属含量的主要社会经济因素, 这也验证了已有研究^[46-48]得出的燃煤对地表灰尘中重金属的含量有一定影响的结论. 社会经济发展指标与公园灰尘重金属含量之间出现个别指标与个别元素呈显著正相关的现象, 推测一方面与重金属元素本身的理化性质和赋存形态有关, 另一方面可能与社会经济指标涵盖的范围太大, 而公园作为一个小区域无法进行全面的解释有关.

2.4 公园灰尘重金属的影响因素

土壤是地表灰尘的重要来源之一^[49]. 各地区土壤背景的差异是造成地表灰尘重金属含量在空间上分布差异的初始原因^[50]. 由表 2 中土壤背景值与表 1 中各城市公园灰尘平均值对比分析得出, 各重金属的土壤背景值含量由高到低分别为: Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>Cd, 而各城市的公园灰尘重金属含量由高到低分别为: Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>Cd. 可以看出, 除 Cu 和 Ni 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 的位序没有发生变化, 说明公园灰尘重金属在一定程度上是受到土壤背景影响的.

社会经济发展指标与公园灰尘重金属含量间的相关性分析显示, Pb 与总人口呈显著正相关, 且公园灰尘重金属的空间分布显示, Pb 的最高值出现在上海市, 其高值区为北京、西安、南京等地区, 这些城市属于我国发达城市, 北京由于其“首都效应”经济基础雄厚, 上海和南京属于长三角城市群——是中国最发达的经济区域, 人口众多, 城市发展的需求大, 人为排放的污染增加, 灰尘重金属的含量随之增加. Cu、Zn 与原煤呈显著正相关, 原煤主要用于动力、工业原料、民用原料等, 且公园灰尘重金属的

空间分布显示, Cu、Zn 的空间分布具有相似性, 东部地区为高值区, 东北地区和西北地区为低值区. 我国东部地区人口众多, 外来人口规模庞大, 原煤用于发电的需求量大, 且工业种类多类型齐全, 能源需求量大. 东部地区相较于东北地区、西北地区经济社会发展水平总体较高, 但区域内部存在着一定差异. 长三角城市群在上海国际化大都市的带动下, 产业结构高级化趋势日趋明显, 但珠三角城市群外资企业中劳动密集型企业多, 低端组装加工仍占很大比例. 西北地区能源、矿产资源丰富, 是中国重要的能源重化工基地, 但西北地区受地理区位和发展阶段等多种因素的影响, 经济发展水平总体低于东部地区, 为东部地区输送能源. Pb、Ni 与民用汽车拥有量呈显著正相关, 且公园灰尘重金属的空间分布显示, Pb 具有和 Ni 相似的空间分布特征, 高值区集中在东部地区和中部地区, 低值区则位于西北地区. 东部地区和中部地区的城镇化水平高于西北地区, 东部地区经济发展水平高, 人民对生活质量要求高, 民用汽车拥有量远高于西北地区, 中部地区地处我国地理区位的中心, 建成四通八达的交通网络和信息高速公路网络. Pb 在东北地区也出现较高值, 其原因是东北地区经济起步早, 东北老工业基地的装备制造在我国区域经济分工中举足轻重, 其长春市是中国汽车工业的摇篮, 是全国瞩目的汽车城^[51]. Pb、Ni 主要受到交通污染的影响, 汽车交通污染主要表现为汽车尾气排放、汽车橡胶轮胎老化磨损、刹车里衬和车体自身的磨损等^[52]. 灰尘重金属 Pb 元素与各经济指标的相关性都较显著, 说明城市公园灰尘中 Pb 元素的含量易受城市活动的干扰, 经济社会发展状况对其影响较大. Pb 在上海市的累积水平最高也证明了这一点. Cr、Cd 并未与 5 个经济发展指标呈显著的相关性, 表明重金属 Cr、Cd 来源的复杂性、多样性与不确定性.

综上所述, 城市公园灰尘中 Cu、Zn 元素含量主要受燃煤能源等能源结构的影响, Pb 元素含量受到人口和交通因素的控制, Ni 元素含量主要受交通因素影响; Cr、Cd 来源较为复杂, 可能是自然和人为的混合源.

3 结论 (Conclusion)

(1) 中国城市公园灰尘的重金属空间分布特征表现为, Cr、Cu、Zn、Cd 的 4 种重金属含量的空间分布具有相似性, 东部地区为高值区, 东北地区和西北地区为低值区; Pb 和 Ni 具有相似的空间分布特征, 东部地区和中部地区为高值区, 西北地区则为低值区.

(2) 社会经济发展指标与灰尘重金属的相关性分析表明, Pb 与总人口呈显著正相关; Cu、Zn 与原煤呈显著正相关; Pb、Ni 与民用汽车拥有量呈显著正相关. 城市公园灰尘中 Cu、Zn 元素含量主要受燃煤能源等能源结构的影响, Pb 元素含量受到人口和交通因素的控制, Ni 元素含量主要受交通因素影响; Cr、Cd 来源较为复杂, 可能是自然和人为的混合源. 社会经济发展指标与公园灰尘重金属含量之间出现个别指标与个别元素呈显著正相关的现象, 推测一方面与重金属元素本身的理化性质和赋存形态有关, 另一方面可能与社会经济指标涵盖的范围太大, 而公园作为一个小区域无法进行全面的解释有关.

参考文献 (References)

- [1] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1155-1160.
CHANG J, LIU M, HOU L J, et al. Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1155-1160(in Chinese).
- [2] 方凤满, 蒋炳言, 王海东, 等. 芜湖市市区地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评价 [J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1193-1202.
FANG F M, JIANG B Y, WANG H D, et al. Particle size distribution and health risk assessment of heavy metals in surface dust of Wuhu urban area [J]. Geographical Research, 2010, 29(7): 1193-1202(in Chinese).
- [3] 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 [J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2661-2668.
LI R Z, ZHOU A J, TONG F, et al. Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2661-2668(in Chinese).
- [4] 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 [J]. 环境科学, 2007, 28(2): 238-242.

- SHI G T, CHEN Z L, XU S Y, et al. Characteristics of heavy metal pollution in soil and dust of urban Parks in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 238-242(in Chinese).
- [5] INYANG H I, BAE S. Impacts of dust on environmental systems and human health [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 132(1): 16442715.
- [6] LIOY P J, FREEMAN N C G, MILLETTE J R. Dust: a metric for use in residential and building exposure assessment and source characterization [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2002, 110(10): 969-983.
- [7] DU Y R, GAO B, ZHOU H D, et al. Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban Parks of Beijing, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 18: 299-309.
- [8] 郭芙蓉. 浅析城市公园的功能与作用[J]. *科技与经济发展*, 2008(10): 4-5.
GUO F R. Analysis on the function and function of Urban Parks [J]. *Science and Economic development*, 2008(10): 4-5(in Chinese).
- [9] 韩秀凤, 卢新卫. 包头市公园及广场灰尘中重金属污染特征 [J]. *环境化学*, 2016, 35(12): 2606-2614.
HAN X F, LU X W. Contamination characteristics of heavy metals in dusts from square and park of Baotou, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(12): 2606-2614(in Chinese).
- [10] 吴绽蕾, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津公园灰尘与土壤重金属污染特征 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 1030-1037.
WU Z L, ZHOU J, HU B B, et al. Characteristics of heavy metal pollution in dust and soil of Tianjin City, North China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 1030-1037(in Chinese).
- [11] 陈秀玲, 茅建彬, 何世虹, 等. 福州市城市公园灰尘重金属污染特征 [J]. *城市环境与城市生态*, 2012, 25(6): 31-34,38.
CHEN X L, MAO J B, HE S H, et al. Heavy metal pollution of dust in Fuzhou urban Parks [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2012, 25(6): 31-34,38(in Chinese).
- [12] 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价 [J]. *城市环境与城市生态*, 2011, 24(4): 20-23,28.
QIAN Y, LIU Z Y. Chemical speciation of heavy metals and health risk assessment in dust of Qingdao urban Parks [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2011, 24(4): 20-23,28(in Chinese).
- [13] LIU Q, WANG Y, LIU J S, et al. Grain-size distribution and heavy metal contamination of road dusts in urban Parks and squares in Changchun, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, 37(1): 71-82.
- [14] YANG T, ZENG Q L, LIU Z F, et al. Magnetic properties of the road dusts from two Parks in Wuhan City, China: Implications for mapping urban environment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177: 637-648.
- [15] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 [J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2972-2980.
DUAN H J, CAI X Q, RUAN X L, et al. Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from Parks of Kaifeng, China [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2972-2980(in Chinese).
- [16] 赵珀, 卢新卫, 黄丽, 等. 西安市公园灰尘重金属污染及其健康风险评价 [J]. *城市环境与城市生态*, 2015, 28(6): 5-9.
ZHAO P, LU X W, HUANG L, et al. Pollution level and health risk of heavy metals in dust from city Parks of Xi'an [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2015, 28(6): 5-9(in Chinese).
- [17] HAN Q, WANG M S, CAO J L, et al. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban Parks and schools of Jiaozuo, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 191: 110157.
- [18] 姑力巴努·艾尼, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维, 等. 乌鲁木齐市地表灰尘微量元素污染及生态风险 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(9): 230-236.
GULBANU A N, MAMATTURSUN E Z Z, WANG W W, et al. Contamination and ecological risk of trace element in street dust of Urumqi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(9): 230-236(in Chinese).
- [19] WANG J H, LI S W, CUI X Y, et al. Bioaccessibility, sources and health risk assessment of trace metals in urban park dust in Nanjing, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 128: 161-170.
- [20] 胡静姝, 余俞堂. 东莞市主要公园灰尘重金属含量分析研究 [J]. *广州化工*, 2019, 47(10): 106-107,123.
HU J S, YU Y T. Analysis of heavy metal content of dust in Dongguan park [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(10): 106-107,123(in Chinese).
- [21] 范逸飞, 陈秀玲, 方滋婧, 等. 漳州市城市公园灰尘重金属来源及健康风险评价 [J]. *地球环境学报*, 2021, 12(1): 104-120.
FAN Y F, CHEN X L, FANG Z J, et al. Heavy metal sources and health risk assessment of dust in Zhangzhou urban Parks [J]. *Journal of Earth Environment*, 2021, 12(1): 104-120(in Chinese).
- [22] 上海市统计局. 上海市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
Shanghai Municipal Bureau of Statistics. *Shanghai Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007(in Chinese).
- [23] 北京市统计局. 北京市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Beijing Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011(in Chinese).
- [24] 包头市统计局. 包头市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Baotou Municipal Bureau of Statistics. *Baotou Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014(in Chinese).
- [25] 天津市统计局. 天津市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

- Tianjin Municipal Bureau of Statistics. Tianjin Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012(in Chinese).
- [26] 福州市统计局. 福州市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
Fuzhou Municipal Bureau of Statistics. Fuzhou Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011(in Chinese).
- [27] 青岛市统计局. 青岛统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 10-Aug-2011.
Qingdao Municipal Bureau of Statistics. Qingdao Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 10-Aug-2011(in Chinese).
- [28] 长春市统计局. 长春市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
Changchun Municipal Bureau of Statistics. Changchun Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2013(in Chinese).
- [29] 武汉市统计局. 武汉统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 01-Jan-2002.
Wuhan Municipal Bureau of Statistics. Wuhan Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 01-Jan-2002(in Chinese).
- [30] 开封市统计局. 开封市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Kaifeng Municipal Bureau of Statistics. Kaifeng Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014(in Chinese).
- [31] 西安市统计局. 西安市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
Xi'an Municipal Bureau of Statistics. Xi'an Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009(in Chinese).
- [32] 焦作市统计局. 焦作市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
Jiaozuo Municipal Bureau of Statistics. Jiaozuo Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016(in Chinese).
- [33] 乌鲁木齐市统计局, 国家统计局乌鲁木齐调查队. 乌鲁木齐统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Urumqi Municipal Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Urumqi Survey Team. Urumqi statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017(in Chinese).
- [34] 南京市统计局. 南京市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Nanjing Municipal Bureau of Statistics. Nanjing Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014(in Chinese).
- [35] 东莞市统计局. 东莞市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
Dongguan Municipal Bureau of Statistics. Dongguan Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019(in Chinese).
- [36] 漳州市统计局. 漳州市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
Zhangzhou Municipal Bureau of Statistics. Zhangzhou Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018(in Chinese).
- [37] 徐明星, 周生路, 王晓瑞, 等. 长江三角洲典型区社会经济发展对土壤重金属累积的影响 [J]. 地理科学, 2010, 30(6): 880-885.
XU M X, ZHOU S L, WANG X R, et al. Impact of socioeconomic development on accumulation of soil heavy metals in a typical region of the Changjiang river delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(6): 880-885(in Chinese).
- [38] 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 [J]. 地理研究, 2010, 29(6): 989-996.
LI X Y, CHEN T B, LEI M, et al. Concentrations and risk of heavy metals in surface soil and dust in urban squares and school campus in Beijing [J]. Geographical Research, 2010, 29(6): 989-996(in Chinese).
- [39] 王喜宽, 黄增芳, 苏美霞, 等. 河套地区土壤基准值及背景值特征 [J]. 岩矿测试, 2007, 26(4): 287-292.
WANG X K, HUANG Z F, SU M X, et al. Characteristics of reference and background values of soils in Hetao area [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2007, 26(4): 287-292(in Chinese).
- [40] 金丕兴. 吉林省土壤环境背景值研究 [J]. 吉林地质科技情报, 1993(3): 13-24.
JIN P X. Research on the background value of soil environment in Jilin Province [J]. Jilin Geological Science and Technology Information, 1993(3): 13-24(in Chinese).
- [41] 庞绪贵, 代杰瑞, 胡雪平, 等. 山东省土壤地球化学背景值 [J]. 山东国土资源, 2018, 34(1): 39-43.
PANG X G, DAI J R, HU X P, et al. Background values of soil geochemistry in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(1): 39-43(in Chinese).
- [42] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值 [J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1363-1378.
LIAO Q L, LIU C, XU Y, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1363-1378(in Chinese).
- [43] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1992, 13(4): 70-75,95.
CHEN Z J, CHEN C X, LIU Y Q, et al. Study on soil environmental background values in Fujian Province [J]. *Environmental Science*, 1992, 13(4): 70-75,95(in Chinese).
- [44] 张子珍. 中国经济区域划分演变及评价 [J]. 山西财经大学学报(高等教育版), 2010, 13(2): 89-92.
ZHANG Z Z. Evolution and evaluation of the Chinese economic regions division [J]. *Journal of Shanxi University of Finance and Economics (Higher Education Edition)*, 2010, 13(2): 89-92(in Chinese).
- [45] 李崇, 李法云, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究 [J]. 生态环境, 2008, 17(2): 560-564.
LI C, LI F Y, ZHANG Y, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals in street dust in Shenyang city [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 560-564(in Chinese).
- [46] 杨梅, 李晓燕. 贵阳市冬季地表灰尘重金属含量动态变化及原因探析 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(8): 2070-2076.

- YANG M, LI X Y. Dynamic changes and cause analysis of heavy metals in street dust in Guiyang City, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(8): 2070-2076(in Chinese).
- [47] 李晓燕. 季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 [J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2407-2415.
LI X Y. Influence of season change on the level of heavy metals in outdoor settled dusts in different functional areas of Guiyang city [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2407-2415(in Chinese).
- [48] 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 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 1047-1052.
ZHENG D M, JIN D, LIN X, et al. The exposure of heavy metals of street dust during heating period and unheating period in Shenyang [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 1047-1052(in Chinese).
- [49] HUNT A, JOHNSON D L, GRIFFITH D A. Mass transfer of soil indoors by track-in on footwear [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3): 360-371.
- [50] 王硕, 蔡立梅, 王秋爽, 等. 中国城市地表灰尘中重金属的富集状况及空间分布特征 [J]. *地理研究*, 2018, 37(8): 1624-1640.
WANG S, CAI L M, WANG Q S, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in urban surface dust of China [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1624-1640(in Chinese).
- [51] 杨文哲, 赵海乔. 长春汽车工业比较优势研究 [J]. *现代经济(现代物业下半月刊)*, 2009, 8(3): 42-45.
YANG W Z, ZHAO H Q. Research on the comparative advantage of Changchun automobile industry [J]. *Modern Economics(Second Half of Modern Property)*, 2009, 8(3): 42-45(in Chinese).
- [52] 方凤满, 林跃胜, 王海东, 等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应 [J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 316-325.
FANG F M, LIN Y S, WANG H D, et al. Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 316-325(in Chinese).