

泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价*

于瑞莲 胡恭任** 戚红璐 陈福料

(华侨大学环境科学与工程系, 厦门, 361021)

摘 要 通过泉州市不同功能区大气降尘中重金属含量分析,发现泉州市大气降尘中重金属 Pb、Zn、Cu、Cr、Cd 和 Ni 含量的平均值分别为 284.49、1628.7、112.4、126.87、2.01 和 106.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,同福建省海岸带土壤背景值相比,均处于较高的积累水平.潜在生态风险指数法评价结果表明:重金属污染程度顺序: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr}$;不同功能区大气降尘重金属生态危害程度为:工业区 > 商业区 > 交通繁忙区 > 居民区 > 农业区.富集因子法污染评价表明: Cd、Zn 的富集较严重, Pb、Ni 次之, Cu、Cr 在各功能区都没有富集.两种评价方法的评价结果较为一致.

关键词 大气降尘, 重金属污染, 生态风险评价, 富集因子, 泉州市.

重金属是具有潜在危害的重要污染物之一,与其它污染物不同,重金属污染威胁在于其不能被微生物所降解,在地表环境中具有累积性,可被农作物吸收、富集,从而引起代谢失调,生长发育受阻或导致遗传变异,并通过食物链直接威胁人们的健康与安全^[1-2].有关大气降尘中的重金属,目前研究较多的是重金属含量、形态和来源解析,生态风险评价方面还鲜见报道.

富集因子评价法和潜在生态风险评价法侧重点不同,富集因子是评价表生环境中重金属污染来源和污染程度的有效指标,它根据样品与背景区比率的变化来判断人为源的存在及污染的程度,不考虑重金属污染对生物的危害性有多大,是一种污染现状的评价;而生态风险评价则弥补了这方面的不足,是评价重金属对生物潜在风险,体现了重金属其生物毒性和相对贡献比例,重金属对生物毒性越大,其权值越大.富集因子评价和生态风险评价法分别考虑到重金属在土壤中的地球化学行为及环境毒性差异等因素,因而二者结合应用能较为合理地对重金属污染状况进行系统评价.

本文通过对泉州市不同功能区大气降尘中重金属含量的分析调查,对各功能区大气降尘重金属污染进行生态风险评价和富集因子评价,揭示其存在的生态危害,为相应的环境污染治理提供理论和技术支持.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

本文详细调查了泉州市工业、交通、文教、居住、商业等分布状况后,主要对居民区(J1)、商业区(J8)、工业区(J233)、农业区(J38)、交通繁忙区(J3)进行了布置采样.于 2006 年冬季,在天气保持晴朗干燥至少 3d 后,选择晴朗无风的天气,在不同功能区采样点的一定范围内(约 10 m^2)收集样品.为了能够反映大气降尘对人体的直接影响,选择的采样高度为 1.5—2.0 m(一般人体的呼吸高度).采样过程中用毛刷扫集木质门窗、玻璃表面以及无油漆脱落的其它木质物件上的降尘于聚乙烯塑料采样袋中,系紧袋口以防污染,贴上标签备用.

1.2 样品的预处理

将降尘样品在 35°C 条件下烘干,过 120 目的尼龙网筛,除去大的砂石或植物残渣等杂质,过筛后的

2009 年 12 月 29 日收稿.

* 国家自然科学基金项目(40673061)、泉州市科技计划项目(2007Z43)和环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(SKLEG7021)资助.

** 通讯联系人, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

样品用密实塑料袋保存用以分析.

1.3 样品分析

准确称取约 0.1000 g 样品于 50 ml 聚四氟乙烯消解罐中,加 0.5 ml 去离子水、5 ml 盐酸、2 ml 硝酸和 1 ml 氢氟酸至消解罐中,室温暗处消解 1 h,加入 1 ml H₂O₂,加盖室温暗处过夜(≥10 h);拧紧盖,置罐于微波消解仪中,二档加热 5 min,三档加热 4 min,四档加热 3 min,反复用 3 档加热 4 min 或 4 档加热 3 min,每档间停 5 min,冷却;用 10 mL 3% 硝酸转移至 50 ml 塑料离心管中,开盖水浴锅中 90℃ 消解 2 h,冷却;离心,上清液转移至 100 ml 容量瓶中,用 3% 硝酸洗残渣 2—3 次(20 ml/次),上清液合并于上述容量瓶中,最后用 3% 硝酸定容后放于冰箱 4℃ 保存待测. 每批样品(10 个)做一个试剂空白. 用 ELAN6000 型 ICP-MS 测定金属含量.

1.4 生态风险评价方法

1.4.1 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法在土壤/沉积物重金属污染评价中应用较多^[3]. 本文借鉴土壤/沉积物重金属的评价方法,对大气降尘重金属 Cr、Cu、Pb、Cd、Ni 和 Zn 的潜在生态风险进行评价.

单个金属的潜在生态风险指数:

$$E_r^i = T_r^i \times C_i/C_0$$

式中 C_i 、 C_0 、 T_r^i 分别为第 i 种重金属的监测浓度、参比值和毒性系数. 目前还未制定出针对大气降尘重金属含量的标准,而未受污染的大气颗粒物主要来源于本地土壤扬尘,本文选择福建省海岸带土壤背景值作为参比值(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 分别为 22.4、39.0、83.6、40.7、0.060 和 17.4 mg·kg⁻¹)^[4]. T_r^i 被用来反映重金属的毒性水平及生物对重金属的敏感程度,Cr、Cd、Ni、Cu、Pb 和 Zn 的毒性系数分别取值为 2、30、5、5、5 和 1^[3].

某区域多个重金属的综合潜在生态风险指数:

$$RI = \sum E_r^i$$

Hakanson 根据底泥中 8 种污染物(包括 PCB、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn)的含量对 E_r^i 和 RI 值的范围进行了划分并确定了沉积物的污染等级^[5]. 针对本研究涉及的重金属的种类和数量(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 6 种元素),考虑各元素毒性系数的权重,得出泉州市大气降尘中重金属单元素潜在生态危害指数(E_r^i)和以上 6 种元素综合潜在生态风险指数(RI)相对应的生态风险程度等级划分标准(表 1).

表 1 潜在生态风险评价指标和等级划分

Table 1 Evaluation index and grade division of potential ecological risk

单个金属潜在生态危害系数 (E_r^i) 范围	多个金属潜在生态危害 指数(RI) 范围	重金属潜在生态 风险程度
<40	<50	I 生态危害低
40—80	50—100	II 生态危害中等
80—160	100—200	III 生态危害较高
160—320	200—400	IV 生态危害高
≥320	≥400	V 生态危害极高

1.4.2 富集因子法

富集因子是用以定量评价污染程度与污染来源的重要指标^[6],它选择满足一定条件的元素作为参考元素(或称标准化元素),样品中污染元素质量分数与参考元素质量分数的比值与背景区中二者质量分数比值的比率即为富集因子 EF:

$$EF = (C_x/C_w)_s / (C_x/C_w)_b$$

式中 C_x 为元素 x 浓度, C_w 为参比元素的浓度, s 和 b 分别表示样品和背景.

根据富集因子大小可将元素大体上分为两类,当某种元素的富集因子值小于 10 时,可以认为是非富集的成分,来源于地壳;当富集因子增大到 10—10⁴,则可认为已富集,来源于人为污染源^[7].

2 结果与讨论

2.1 重金属的含量水平

大气降尘中重金属总量分析结果见表 2 ,重金属 Pb、Zn、Cu、Cr、Cd 和 Ni 含量的平均值分别为 284.49、1628.7、112.4、126.87、2.01 和 106.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各重金属空间分布差异较大 ,这可能是降尘中重金属来源的复杂性所决定的. 与福建省海岸带土壤重金属背景值相比 ,各功能区金属 Cu、Zn、Cr、Cd、Ni、Pb 的平均含量都超过了背景值 ,交通繁忙区 J3 的 Pb 含量最高(553.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ;Zn、Cd 和 Ni 的含量以工业区 J233 为最高 ,分别为 3765.6、3.47 和 248.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu 的最高含量在商业区(196.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ;Cr 最高值出现在居民区 J1(206.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ,重金属元素在泉州市各功能区降尘中积累已达到比较严重的程度.

表 2 大气降尘中重金属的总量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 The total amount of heavy metals in dustfall($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

功能区	样号	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	Li	Ti	Zr	Cs	Sc
居民区	J1	62.17	327.02	582.48	206.54	1.62	101.76	23.09	4369.6	289	3.04	7.24
商业区	J8	196.61	231.58	616.00	81.37	2.43	102.85	32.78	3380.1	458	4.22	8.74
工业区	J233	95.73	258.84	3765.6	195.70	3.47	248.23	107.56	2538.6	435	4.67	63.95
农业区	J38	96.18	51.92	2071.2	46.33	0.47	15.39	28.24	697.56	145	3.40	21.55
交通繁忙区	J3	111.31	553.09	1108.0	104.40	2.04	64.01	27.46	3044.6	298	4.17	8.70
平均值		112.40	284.49	1628.7	126.87	2.01	106.45	43.83	2806.1	325	3.90	22.04

2.2 潜在生态风险指数法评价结果

泉州市各功能区大气降尘各重金属的平均潜在生态风险指数(E_r^i) 见表 3. 重金属 Cd 的潜在生态危害最大 ,其次是 $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu}$,Zn 和 Cr 的潜在生态危害较低. 表明泉州市大气降尘重金属 Cd 的潜在生态危害极高 ,应引起有关部门的重视 ,而 Zn 和 Cr 的生态危害指数较小 ,生态危害程度不大.

表 3 大气降尘中重金属的潜在生态风险程度分级
Table 3 Classification of the heavy metal ecological risk indices in dustfall

重金属	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
E_r^i	25.09	36.47	19.48	6.23	1005	30.59
等级	I	I	I	I	V	I
危害水平	生态危害低	生态危害低	生态危害低	生态危害低	生态危害极高	生态危害低

泉州市各功能区大气降尘重金属单元素潜在生态风险指数(E_r^i) 及上述 6 种元素综合潜在生态风险指数(RI) 见表 4.

表 4 泉州各功能区大气降尘重金属的潜在生态风险程度分级
Table 4 Classification of the heavy metal ecological risk indexes in each functional area in Quanzhou city

重金属	工业区		农业区		居民区		商业区		交通繁忙区	
	E_r^i	等级	E_r^i	等级	E_r^i	等级	E_r^i	等级	E_r^i	等级
Cu	21.37	I	21.47	I	13.88	I	43.89	II	24.85	I
Pb	33.18	I	6.66	I	41.93	II	26.69	I	70.91	II
Zn	45.04	II	24.78	I	6.97	I	7.37	I	13.25	I
Cr	9.62	I	2.28	I	10.15	I	4.00	I	5.13	I
Cd	1735	V	235	IV	810.0	V	1215	V	1020	V
Ni	71.33	II	4.42	I	29.24	I	29.55	I	18.39	I
RI	2323	V	529.3	V	941.9	V	1374	V	1217	V

重金属 Cd 在五个功能区均表现出高到极高的潜在生态危害; Pb 在居民区和交通繁忙区为中等潜在生态危害 ,在其余三个功能区呈较低潜在生态危害; Zn、Ni 在工业区、Cu 在商业区为中等潜在生态危害 ,在其余功能区为较低潜在生态危害; Cr 在各功能区均表现出较低的潜在生态风险. 各功能区大气降

尘中 6 种重金属的综合潜在生态风险指数都达到 V 级水平,潜在生态风险顺序为: 工业区 > 商业区 > 交通繁忙区 > 居民区 > 农业区. 工业烟尘及粉尘排放、城市扬尘及机动车尾气等已造成工业区、商业区、交通繁忙区大气降尘重金属具有极高的潜在危害,应加以有效控制.

2.3 基于富集因子的评价

根据参比元素的选择条件^[8],可用作参比元素的有: Zr、Li、Ti、Sc、Ca、Cs 等. 本文以 Zr、Li、Ti、Sc、Cs (表 2) 为候选参比元素. 在候选的参比元素与污染元素之间进行相关分析(表 5). 每种候选参比元素与 6 种污染元素的相关性有较大区别. 为了解各污染元素与参比元素的分散程度,同时计算了各元素的变异系数 CV,得到 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Sc、Li、Ti、Zr、Cs 的变异系数分别为 0.40、0.57、0.73、0.50、0.49、0.73、0.98、0.73、0.43、0.35 和 0.15. Cs 和 Zr 的分布具有一定的稳定性,变异系数小于其它元素. 综合以上分析,本文选取 Cs 作为评价金属 Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 的参比元素,选取 Zr 作为评价金属 Cu 的参比元素.

表 5 污染元素与候选参比元素之间的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between polluted elements and reference elements

元素	Sc	Li	Ti	Zr	Cs
Cu	-0.418	-0.094	0.030	0.566	-0.030
Pb	-0.871	-0.104	0.608	0.278	0.513
Zn	0.873	0.892	-0.530	0.045	0.549
Cr	-0.216	0.478	0.635	0.614	0.935
Cd	-0.486	0.763	0.419	0.908	0.980
Ni	-0.007	0.907	0.285	0.750	0.891

背景值的选择传统上是 以地壳元素质量分数平均值或全球页岩元素质量分数平均值作为背景值. 在特殊的地质环境中,用全球页岩元素质量分数平均值代替地区背景值往往会产生较大的差距. 目前大多数研究人员倾向于使用区域背景值^[9-11]. 因大气降尘中重金属含量评价没有统一的标准,本文选用福建省海岸带土壤背景值作为评价标准.

表 6 为大气降尘重金属元素富集因子的计算结果. 重金属 Cu 和 Cr 在五个功能区的富集因子都小于 10,说明受人为污染较轻,主要来自于地壳物质;因汽车尾气中含 Pb,重金属 Pb 在交通繁忙区和居民区存在一定的富集;重金属 Zn 除在商业区外,在其它功能区均有富集,且在工业区和农业区的富集因子分别高达 43.10 和 32.56,可见 Zn 主要来源于人类工农业生产活动,部分来自于地壳物质(如土壤扬尘);Cd 在各功能区均有富集,说明 Cd 主要来自人类日常生活活动,Cd 在各功能区富集程度顺序: 工业区 > 商业区 > 居民区 > 交通繁忙区 > 农业区. 工业区的 Cd、Zn、Ni 富集较严重,说明受到一定的污染,其它金属都不存在富集;商业区 Cd 存在较严重的人为污染;农业区只有 Zn 和 Cd 存在污染;交通繁忙区的 Pb、Zn、Cd 都存在一定的富集.

表 6 各功能区大气降尘重金属的富集因子
Table 6 Enrichment factors of heavy metals in dustfall from different areas

功能区	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
居民区	2.564	13.62	10.24	7.378	43.62	8.503
商业区	5.117	6.950	7.802	2.094	47.13	6.191
工业区	2.623	7.020	43.10	4.551	60.82	13.50
农业区	7.906	1.934	32.56	1.480	11.31	1.150
交通繁忙区	4.452	16.80	14.20	2.719	40.04	3.899

3 结论

(1) 泉州市各功能区大气降尘重金属 Pb、Zn、Cu、Cr、Cd 和 Ni 含量的平均值分别为 284.49、1628.7、112.4、126.87、2.01 和 106.45 mg·kg⁻¹. 与福建省海岸带土壤背景值相比,以上各重金属元素在泉州市各功能区降尘中积累已达到相当严重的程度.

(2) 运用潜在生态风险指数法评价大气降尘中单元素平均生态危害程度: $Cd > Pb > Ni > Cu > Zn > Cr$; 各功能区以上六种元素综合潜在生态风险程度顺序: 工业区 > 商业区 > 交通繁忙区 > 居民区 > 农业区。

(3) 运用富集因子法对泉州各功能区大气降尘中重金属的污染评价结果表明, Cd 、 Zn 的富集较严重, Pb 、 Ni 次之, Cu 、 Cr 在各功能区都没有富集。

参 考 文 献

- [1] Azimi S, Rocher V, Muller M, et al. Sources, distribution and variability of hydrocarbons and metals in atmospheric deposition in an urban area (Paris, France) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337: 223–239
- [2] 邹海明, 李粉茹, 官楠, 等. 大气中 TSP 和降尘对土壤重金属累积的影响[J]. *中国农学通报* 2006, 22(5): 393–395
- [3] 徐争启, 倪师军, 度先国, 等. 潜在生态危害指数法评价重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术* 2008, 31(2): 112–115
- [4] 刘用清. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用[J]. *海洋环境科学*, 1995, 14(2): 68–73
- [5] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001
- [6] 付川, 潘杰, 牟新利, 等. 长江(万州段)沉积物中重金属污染生态风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 2(16): 236–239
- [7] 潘贵仁, 李春燕, 邢海斌. 唐山市大气颗粒物源解析研究[J]. *环境保护科学*, 2000, 22(5): 34–36
- [8] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报* 2006, 25(1): 65–72
- [9] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 312: 195–219
- [10] Liaghati T, Preda M, Cox M. Heavy metal distribution and controlling factors within coastal plain sediments, bells creek catchment, southeast Queensland, Australia [J]. *Environment International*, 2004, 29: 935–948
- [11] Rubio B, Nombela M A, Vilas F. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 968–980

POLLUTION AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT OF HEAVY METALS IN THE DUSTFALL FROM DIFFERENT FUNCTIONAL AREAS OF QUANZHOU CITY

YU Ruilian HU Gongren QI Honglu CHEN Fuliao

(Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China)

ABSTRACT

Heavy metal contents in the dustfall collected from different functional areas in Quanzhou city were investigated. The results showed that the average contents of Pb , Zn , Cu , Cr , Cd and Ni were 284.49, 1628.7, 112.4, 126.87, 2.01 and 106.45 $mg \cdot kg^{-1}$ respectively. Compared with the background values of coastal soils in Fujian province, the heavy metal contents in the dustfall showed higher values. The assessment results of potential ecological risk of heavy metal pollution indicated that the pollution degree of single element showed the order of $Cd > Pb > Ni > Cu > Zn > Cr$, and the comprehensive ecological hazardous degree of heavy metals in the dustfall from different functional areas followed the order of industrial area > commercial area > heavy traffic area > residential area > agricultural area. The method of enrichment factor was used to evaluate the contamination of heavy metals in dustfall. And the results showed that the enrichments of Cd and Zn were considerably serious, followed by Pb and Ni , whereas Cu and Cr presented no enrichment in each functional area. The results of the above two evaluation methods were similar.

Keywords: dustfall, heavy metal pollution, ecological risk assessment, enrichment factor, Quanzhou city.