

佛山市冬季 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征

王晴晴¹, 谭吉华¹, 马永亮², 贺克斌², 韦莲芳¹, 杨复沫^{1*}, 余永昌³, 王洁文³ (1.中国科学院研究生院地球科学学院, 计算地球动力学实验室, 北京 100049; 2.清华大学环境学院, 北京 100084; 3.广东省佛山市环境保护局, 广东广州 528000)

摘要: 为了解珠江三角洲典型工业城市佛山冬季大气细颗粒物中重金属元素的污染特征, 在佛山的城区(禅城)和城市清洁点(三水)同步采集 24h PM_{2.5} 样品, 分析了 16 种元素 Fe、Ti、Zn、V、Mn、Cu、As、Rb、Sr、Cd、Cs、Ba、Hg、Tl、Pb 和 Bi 的浓度。禅城的重金属处于较高的污染水平, 三水重金属元素浓度普遍低于禅城, 但 Fe、Ti、Sr、Cd 的浓度高于禅城。与国家大气颗粒物中重金属浓度标准相比, 禅城的 As、Cd 超标严重, Pb 略超标, 三水的 As、Cd 超标严重。Zn、Cu、As、Pb 的富集因子均高于 10, 表明其主要与人类活动导致的污染有关。重金属元素的浓度在灰霾期都有增高的趋势, 但各重金属浓度日变化趋势和幅度在禅城较为一致, 在三水则不太一致。气团后向轨迹分析表明, 研究期间重金属元素的浓度分布受靠近或者始于福建的广东东北方向气团、广福沿岸气团、海洋方向气团和来自江西的气团影响, 其中第 1 类气团主要使得重金属元素浓度提高, 后面 3 类气团均使得重金属浓度下降。

关键词: 重金属; 大气细颗粒物; 富集因子; 气团传输; 佛山

中图分类号: X703.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)08-1384-08

Characteristics of heavy metals in PM_{2.5} during winter in Foshan City. WANG Qing-qing¹, TAN Ji-hua¹, MA Yong-liang², HE Ke-bin², WEI Lian-fang¹, YANG Fu-mo^{1*}, YU Yong-chang³, WANG Jie-wen³ (1.Key Laboratory of Computational Geodynamics, College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.Foshan Environmental Protection Bureau, Guangzhou 528000, China). *China Environmental Science*, 2012,32(8): 1384~1391

Abstract: To investigate the characteristics of heavy metals in fine particles (PM_{2.5}) during winter in Foshan, a typical industrial city in Pearl River Delta, 24h integrated PM_{2.5} samples were simultaneously collected at a pair of sites, one urban site and one background site, and 16 elements (Fe, Ti, Zn, V, Mn, Cu, As, Rb, Sr, Cd, Cs, Ba, Hg, Tl, Pb and Bi) of the samples were analyzed. Heavy metals at the urban site were at a high level of pollution, and generally higher than those at the background site, except Fe, Ti, Sr, and Cd. Compared with the national standard of heavy metals, the concentrations of As, and Cd were much higher and Pb exceeded slightly at the urban site, while those of As and Cd at the background site were much higher. The enrichment factors of Zn, Cu, As, and Pb were greater than 10, indicating that they were mainly from anthropogenic activities. There were clear increases in the concentrations of heavy metals during the haze period, while their daily variations at the urban site were more consistent than those in the background site. Air mass back trajectory analysis showed that the concentration distribution of heavy metals was affected by four kinds of air masses: the ones close to or starting from the northeast of Guangdong or Fujian, the ones along the coast of Guangdong and Fujian, the ones from marine and the ones from Jiangxi. The first kind of air masses increased the heavy metals concentrations, while the others decreased the levels.

Key words: heavy metals; PM_{2.5}; enrichment factor; air mass back trajectory; Foshan

大气颗粒物对人类健康有着明显的直接危害作用,可引起机体呼吸系统、心脏及血液系统、生殖系统和内分泌系统等广泛的损伤^[1-2]。世界卫生组织(WHO)基于人体健康制定了大气颗粒物中重金属的标准^[3],我国根据该标准在继 Pb 之

后新增了大气 As、Cd、Hg、Cr(VI)的浓度限

收稿日期: 2011-12-31

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(XMXX280732);国家重点实验室专项基金(10K13ESPCT)

* 责任作者, 副教授, fmyang@gucas.ac.cn

值^[4]。大量的实验结果及流行病学资料证实,PM_{2.5} 在各方面的毒性均强于 PM₁₀^[5]。颗粒物中重金属元素 Pb、Zn、Cr、Ti、Cu、V、As 和 Mn 等均对人体健康产生危害^[6-7]。有研究认为大约 75%~90% 的重金属分布在 PM₁₀ 中,且颗粒越小,重金属含量越高^[8]。吸附在大气颗粒物上的重金属及其他污染物通过干湿沉降持续、大量地输入到地表环境中,对生态系统中的生物地球化学循环造成持久性的负面影响^[9-11]。大气颗粒物附着的重金属量与土壤中累积的重金属量呈一定正相关性,因而在颗粒物污染严重的地区,其重金属不仅对暴露人群产生危害,还通过大气沉降输入到土壤中进一步造成危害^[12]。珠江三角洲典型工业城市佛山市大气污染比较严重^[13],研究其细颗粒物中重金属的污染特征具有重要意义。

1 采样与分析

在佛山市的城区和城市清洁点 2 个采样点采用 Andersen 大流量采样器(1.13m³/min)同步采

集 PM_{2.5} 样品,采样周期为 24h。城区采样点设在禅城区环境保护局,城市清洁点设在水森林公园(图 1),二处相距约 30km。三水采样点采样时间为 2008 年 12 月 9~24 日,共采集了 13 个有效样品;禅城采样点采样时间为 2008 年 12 月 5~27 日,共采集了 22 个有效样品。采样期间 6 日和 23 日为非灰霾天,其他为灰霾天。

采用激光溶蚀—电感耦合等离子体质谱分析法(Laser Ablation/Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrum,LA/ICP-MS,LA 由 NEC 公司生产,ICP-MS(PMS2000 型)由 Yokogawa Electric 公司生产)对金属元素进行分析。在采集了 PM_{2.5} 样品的膜上截取 3 个直径 4.5 mm 圆形待测样品,用于平行分析。将滤膜放入 LA/ICP-MS 分析装置后,先经过 6×6 束激光进行溶蚀,然后由载气送入 ICP-MS 的分析部分进行分析,得到各金属元素的含量。本研究测定了 16 种元素 Fe、Ti、Zn、V、Mn、Cu、As、Rb、Sr、Cd、Cs、Ba、Hg、Tl、Pb 和 Bi 的浓度。

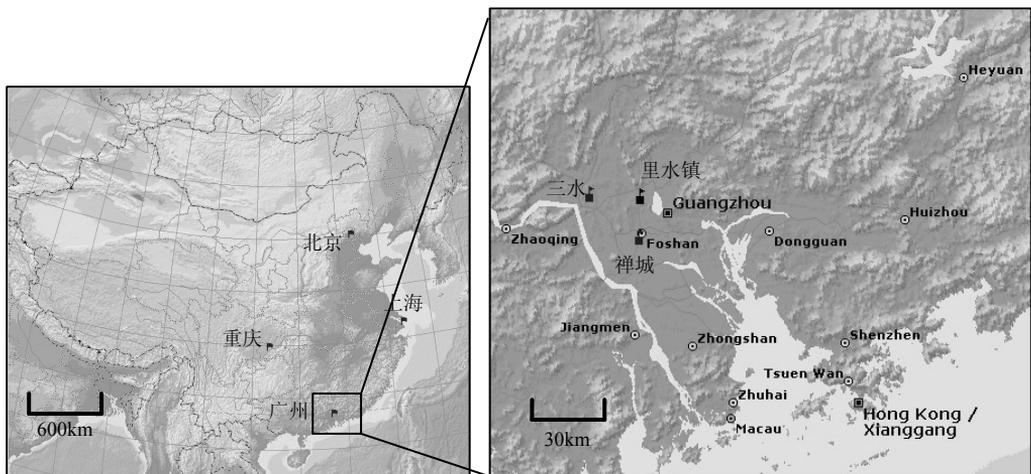


图 1 佛山市采样点示意

Fig.1 Location of the sampling sites in Foshan

2 结果与分析

2.1 重金属元素的浓度水平与日变化特征

2.1.1 重金属的浓度水平 图 2 为禅城与三水采样点重金属平均浓度及其比值。作为清洁背景点,三水的重金属元素浓度普遍低于禅城,但

Fe、Ti、Sr、Cd 的浓度高于禅城,高出比例分别为 9.9%、85%、40.8%、96.7%;禅城与三水其他元素的平均浓度比值范围为 1.4~3.9。Zn、Cu、Hg、Pb 在禅城的浓度较高。与国家大气颗粒物中重金属元素浓度标准相比,禅城 As、Cd 分别超标 22.4、7.16 倍,超标严重,Pb 稍微超标,超标

0.1 倍,三水的 As、Cd 分别超标 7.9、15.0,超标 严重.

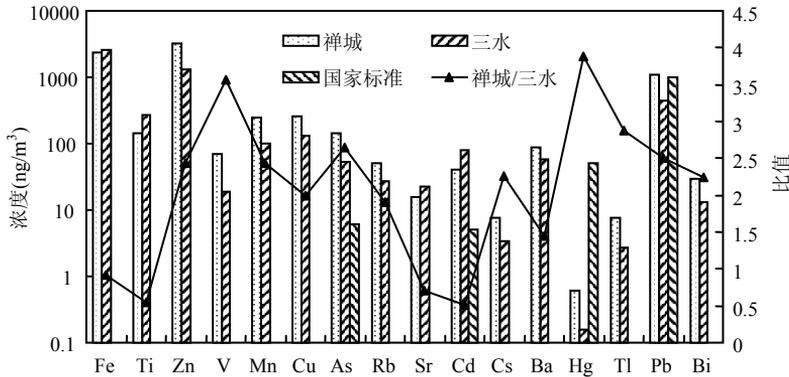


图 2 佛山市两采样点的重金属平均浓度、平均浓度比值和国家大气颗粒物中重金属浓度标准^[3]

Fig.2 Average concentrations of heavy metals and their ratios at the two sites in Foshan, in comparison with the national standards of heavy metals in atmospheric particulate matter.

Pb 为国家一、二级标准季均值,As、Cd、Hg 为国家一、二级标准年均值

禅城是佛山的行政中心,也是中国重要的陶瓷研发和生产地,有建筑、卫生陶瓷制品制造以及棉、化纤纺织加工,棉、化纤印染精加工,化工药品制造,塑料制品和有色金属加工等行业.禅城地势平坦开阔并利用其地理优势大规模发展物流行业,致使当地汽车尾气排放高于地势自西北高东南低、多丘陵的三水.三水有以健力宝为代表的饮料、包装、金属制品、电子电器、塑料制品、颜料、化工等行业.两地排放源分布均相对广泛而密集,决定了当地对于焚烧炉、燃煤锅炉、冶炼炉的使用量大.Hg 是陶瓷焚烧炉燃烧放的示踪元素,故在禅城的浓度偏高.三水颜料塑料制造业比禅城发达,还有禅城所没有的复合肥料制造公司,这可能是 Cd 在三水的浓度略高的原因.表 1 分析了一些重金属的主要来源,表明交通状况、产业布局对重金属浓度影响很大.

图 3 对比了佛山市城区与广州、北京、重庆、上海、美国底特律、西班牙坎塔布里亚各城区的重金属浓度及国家标准限值.佛山城区 Zn、Mn、Cu、As、Pb 的浓度均是最高的,依次是其他城市的 2.4~66.1、1.6~47.5、1.3~134.9、3.5~468.9 和 2.4~312.6 倍,佛山市冬季大气细颗粒物中的重金属处于较高的污染水平.与欧美国家相比,国内大

气颗粒物中重金属污染很严重.大体上来看,佛山、广州作为国内南方城市,污染程度最高,其次是西南部城市重庆,北方城市北京和东部的上海污染程度较低.

表 1 一些重金属元素的主要来源

Table 1 Major sources of some heavy metals

重金属元素	来源	文献
Hg	陶瓷焚烧炉燃烧	[14]
Cu	机动车排放	[15]
	冶炼炉	[14]
Pb	钢铁公司、塑料和颜料生产等	[7]
	被污染的土壤颗粒重新进入大气	[16]
Cd	燃煤锅炉、冶炼炉	[14]
	钢铁公司、塑料和颜料生产等	[7]
Zn	塑料焚烧的生成物农业施肥、原油燃烧	[17]
	垃圾焚烧	[18]
Mn、Fe 和 Ti	机动车尾气、燃煤飞灰	[19]
	钢铁冶炼	[20]
	橡胶轮胎的磨损	[21]
	焚烧炉、燃煤锅炉、冶炼炉	[14]
As	钢铁冶炼	[20]
As	冶炼炉	[14]

2.1.2 重金属浓度逐日变化 禅城和三水重金属浓度的日变化如图 4 所示.禅城各重金属元素浓度的日变化趋势较为一致,在 6~16 日呈现波浪

式先渐增后渐降,在 18、20、25 日均出现峰值,在 23、26 日均达到谷值.三水各重金属元素日变化趋势则不太一致,有交错,但绝大部分元素在 23 日出现谷值,低浓度元素在 13 日普遍达到峰值,19 日、20 日则依次出现了 Cd 和 Cu 的浓度

峰值.禅城重金属浓度日变化之间相关系数范围为 0.02~0.95,平均值为 0.68,三水重金属浓度日变化之间相关系数范围为-0.61~0.95,平均值为 0.6,这也表明禅城各重金属浓度的日变化趋势比三水更一致.

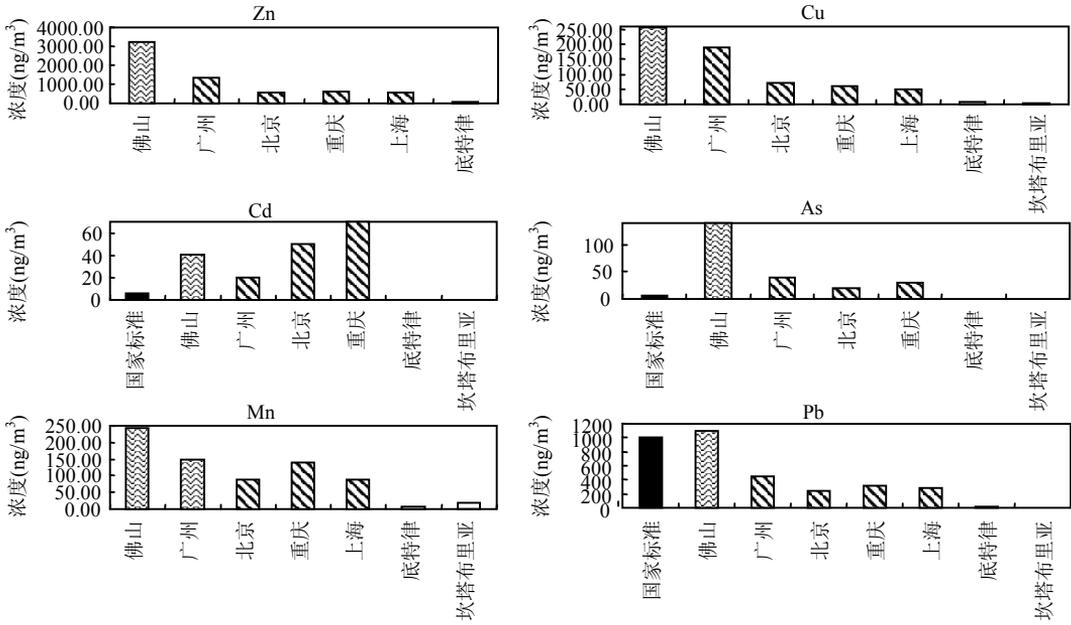


图3 佛山市与其他城市城区及国家标准的 PM_{2.5} 中重金属平均浓度对比

Fig.3 Comparison of average concentrations of some heavy metals in PM_{2.5} in urban Foshan and some other urban areas and the national standard

广州、北京、重庆、上海的数据取自[22];底特律和坎塔布里亚的数据分别取自[23]和[24]

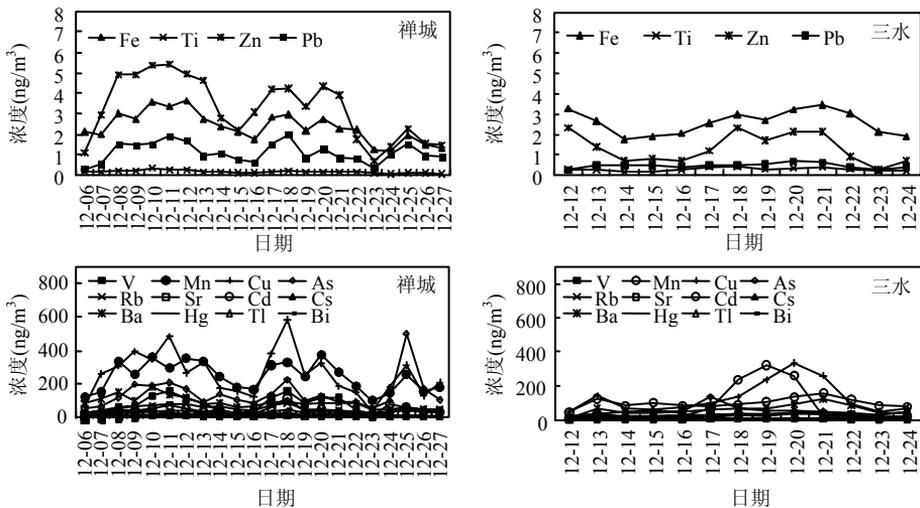


图4 禅城和三水采样点重金属浓度的逐日变化特征

Fig.4 Daily variations in the concentrations of heavy metals at the Chancheng and Sanshui sites

如图 5 所示,三水、禅城各重金属浓度灰霾期分别是非灰霾期的 1.1~8.7 倍和 1.2~20.5 倍,说明佛山 PM_{2.5} 中重金属元素的质量浓度在灰霾期有增高的趋势.Zn、V、Cu、Cd、Hg、Pb 在灰霾期间浓度增加较大,其中灰霾天 Cd 的浓度是非灰霾天的 6.7 倍(禅城)、20.5 倍(三水).图 6 为灰霾和非灰霾天重金属元素质量浓度百分比,两采样点非灰霾期 Fe、Ti 的百分比之和比灰霾期增加了 22%.在灰霾期和非灰霾期 Fe、Ti 的浓度日变化较小(图 4、图 5),与张丹等^[25]得到的地壳元素的日变化特征不明显的研究结论一致.其他元素百分比之和灰霾期增加 22%(图 6);其浓度日变化较大(图 4、图 5),与李晓等^[26]得到的人为污

染元素因受日照、降雨、人类活动、气候条件等因素的影响而日变化显著的研究结论一致.

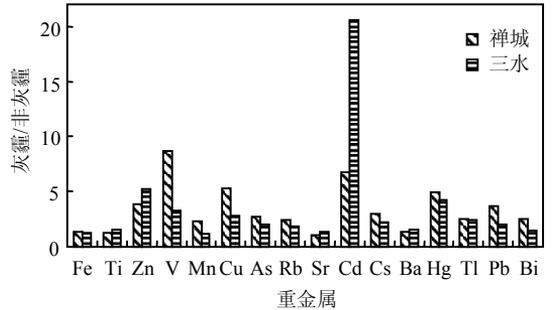


图 5 灰霾天和非灰霾天的重金属浓度比值
Fig.5 Mass ratios of heavy metals in the haze days and normal days

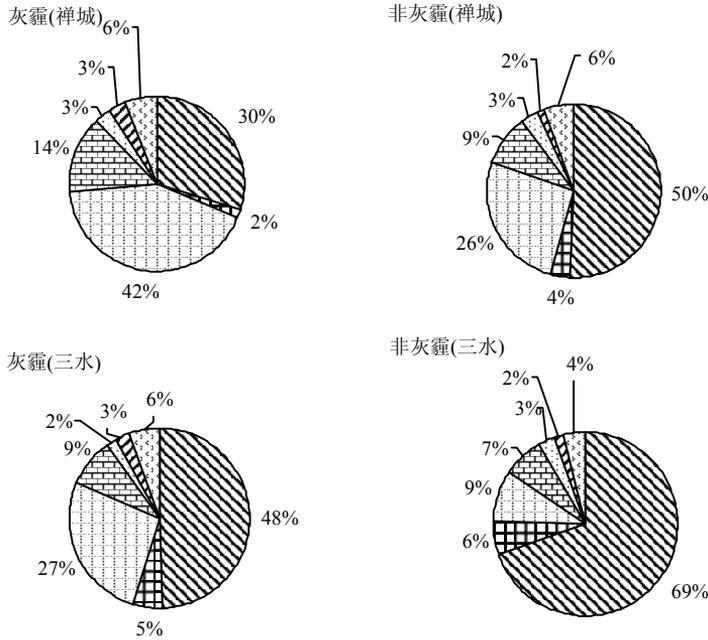


图 6 灰霾天和非灰霾天的重金属元素质量浓度百分比
Fig.6 Fractions of heavy metals in the haze days and normal days

2.2 重金属元素的来源分析

为了解非土壤源对微量元素的贡献程度,对这些元素的富集因子进行了计算.选取中国 A 层土壤作为参考物质,选择 Fe 作为参比元素.中国 A 层土壤平均值^[27]为:Fe 29400,Cu 22.6,Zn 74.2,Pb 26,As 11.2,Mn 583,K 18600.Zn、Cu、As 和 Pb 的富集因子均远高于 10(表 2),表明其主要

与人类活动导致的污染有关,且各元素在禅城的富集高于三水.人为污染元素中富集最高的是 Zn,其次是 Pb,Cu 和 As.这可能与当地的陶瓷、金属加工等产业布局以及机动车排放密切相关.虽然佛山地区已经限制含铅汽油的使用,但是 Pb 的工业源排放以及在此之前干湿沉降到地面的含铅扬尘使得大气颗粒物中的 Pb 含

量依然很高.而在北方城市,冬季采暖煤燃烧是北方 Pb 的一个重要排放源,如天津 Pb 在冬季 PM₁₀ 中富集最高为 741.3^[28].有研究^[29]表明汽油无铅化以后,其他来源的贡献率上升.因此,减少 Pb 的燃煤和工业源排放是减少颗粒物中 Pb 的重要措施.

图 7 为观测期间两采样点的气团后向轨迹图.这些气团大致分为 4 类:靠近或者始于福建的

广东东北方向气团、广福沿岸气团、海洋方向的气团和来自江西的气团.

表 2 一些重金属元素的富集因子

Table 2 Enrichment factors of some heavy metals

地区	Cu	Zn	Pb	As	Mn
三水	64.85	204.20	191.53	54.17	1.95
禅城	142.20	547.34	527.53	157.47	5.21

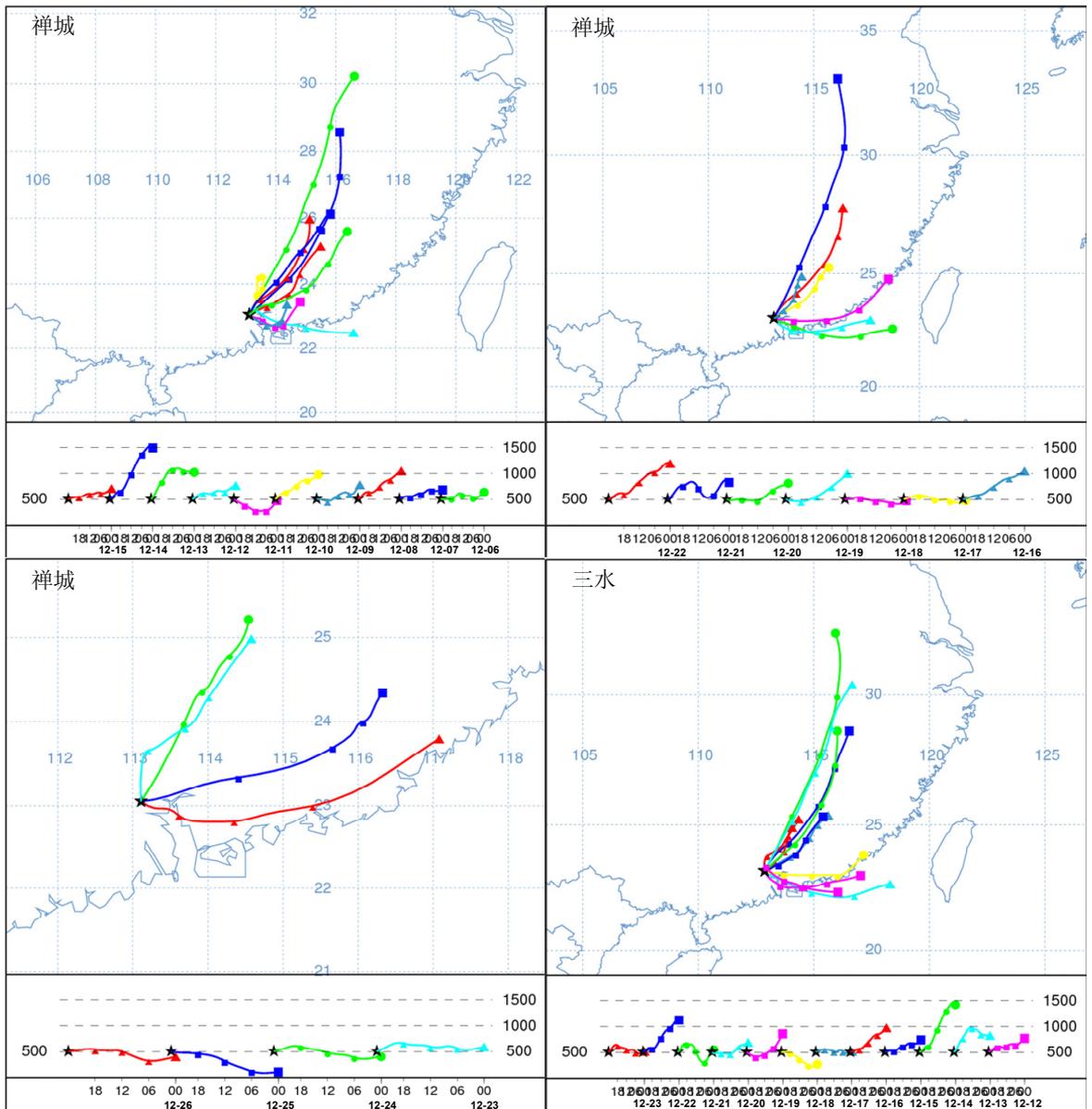


图 7 禅城和三水气团后向轨迹

Fig.7 Air mass backward trajectories at the Chan Cheng and Sanshui sites

禅城:结合图 4 分析,在 6、7、17、23、24 日,重金属浓度升高,期间受靠近或者始于福建的广东东北方向气团影响。在 13、14、21、22 日,重金属浓度下降,期间受来自江西的强度较大的气团影响。在 18、19、25、26 日,受广福沿岸气团影响,重金属浓度下降。随着浓度的先增后降,重金属浓度分别在 18、25 日达到峰值。

三水:17、23 日,重金属浓度升高,期间受靠近或者始于福建的广东东北方向气团影响,18 日有来自正东方的气团,19 日有来自海洋沿岸的气团和 20 日来自海洋方向的气团,17、18 日 Cd、Cu 浓度持续增加。19、20 日,Cd 浓度下降,Cu 浓度继续增加。21、22 日,来自江西的强度较大的气团使得重金属浓度下降。23 日重金属浓度达到低谷值,23 日后浓度升高。18~19 日 Cd 浓度迅速增加,19~20 日 Cu 浓度迅速增加,即 18 日来自东部的的气团使得 Cd 浓度迅速增加,19 日东南部来的气团使得 Cu 的浓度迅速增加且冲淡了 Cd,20 日 Cd 和 Cu 都被来自江西的强度较大的气团冲淡。三水的东部靠近里水镇,那里金属制品业较发达,可能排放较多 Cd。东南部有禅城和南海,南海区有色金属加工且交通流量高于三水,可能排放较多的 Cu。三水当地 Cd 平均浓度高于禅城,Cu 浓度低于禅城,二者浓度的依次增加可能是在气团传输的条件下本地源和外来源综合作用的结果。

由以上分析,重金属浓度日变化主要受靠近或者始于福建的广东东南方向气团、福建沿岸气团、自海洋方向的气团和来自江西的气团影响,第 1 类气团主要使得重金属元素浓度增加,后面 3 类气团均使得重金属浓度下降。有研究^[30]统计,工业废气地均排放(m^3/km^2):江西 1331549.9,福建 2327572.0,广东 4680131.0;生活烟尘地均排放(t/km^2):江西 0.036,福建 0.095,广东 0.065。广东、福建的工业废气排放均远高于江西,因而来自江西的较洁净气团使得重金属浓度下降。伴随第 1 类气团的主要是广东本地源排放,该气团的到来使得重金属浓度显著升高。

此外,地势也会影响浓度变化,三水地势自西北向东南倾斜,西北多高丘而东南多冲积平原及低丘,禅城则位于珠江三角洲腹地,因而在受到来自

东南方向(海洋方向气团或一些广福沿岸气团)气团的影响时,重金属元素在禅城较三水更易扩散,而在三水,气团带来的个别重金属元素还可能会有短时间的明显积累(如 12~13 日 Cd、Cu、Mn 浓度的增加),从这点来看,禅城各重金属元素日变化趋势应更一致。在禅城采样点,7 日的气团来自广东东北方向,8 日的气团来自江西,可推测 8 日浓度应出现峰值,9 日的气团来自广东东北方向,10 日的气团先来自广东东北方向,接着拐了个弯从东南方向吹入采样点,所以 10 日大部分元素应该出现峰值,但是影响浓度的不只是风向风力,还有地势等,故 8 日、10 日并不是所有元素都出现峰值也是合理的。

3 结论

3.1 三水重金属元素浓度普遍低于禅城,但 Fe、Ti、Sr、Cd 的浓度高于禅城,高出比例分别为 9.9%、85%、40.8%、96.7%。与国家大气颗粒物中重金属浓度标准相比,禅城的 Mn、As、Cd 超标严重,Pb 略超标,三水的 As、Cd 超标严重。对比各城区的观测,佛山城区冬季 Zn、Mn、Cu、As、Pb 浓度远高于广州、北京、重庆、上海、美国底特律、西班牙坎塔布里亚。各重金属元素浓度的日变化趋势在禅城较为一致,在三水则有所不同。灰霾期三水、禅城各重金属元素的浓度分别是非灰霾期的 1.1~8.7 倍和 1.2~20.5 倍,显示佛山冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的浓度在灰霾期有增高的趋势,其中的人为污染元素尤甚。

3.2 禅城和三水两地 Zn、Cu、As、Pb 的富集因子均高于 10,表明其主要来自于非土壤源,可能与当地的陶瓷、金属冶炼以及交通等的排放密切相关。后向轨迹的分析表明,研究期间重金属元素的浓度分布受靠近或者始于福建的广东东北方向气团、广福沿岸气团、来自海洋方向的气团和来自江西的气团影响,其中第 1 类气团主要使得重金属元素浓度提高,其他 3 类气团均使得重金属浓度下降。三水 19 日、20 日 Cd 和 Cu 浓度峰值可能与气团传输和排放源的分布有关。

参考文献:

[1] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康

- 经济学评价 [J]. 中国环境科学, 2010,30(3):410-415.
- [2] 刘芳盈,王王菲,丁明玉,等. 燃煤细颗粒物对血管内皮细胞 E A. h y 9 2 6 的细胞毒性 [J]. 中国环境科学, 2012,32(1):156-16.
- [3] WHO. Air quality guidelines for Europe [M]. WHO regional publications, European series no. 23. Copenhagen: Regional Office for Europe, World Health Organization, 1987.
- [4] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [5] 高竹,郭新彪. 大气 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的健康效应比较 [J]. 中国卫生工程学, 2006,5(1):52-55.
- [6] 郭艳萍. 气溶胶与人类健康 [J]. 周口师范学院学报, 2006, 23(5):97-100.
- [7] 周友亚,颜增光,周光辉,等. 制定场地土壤风险评价筛选值中关注污染物的预筛选方法 [J]. 环境工程技术学报, 2011,3(1): 264-269.
- [8] Mohanral R, Azeez P, Priscilla T, et al. Heavy metal in airborne particulate matter of urban Coimbatore [J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2004,47:162-167.
- [9] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals [J]. Nature, 1988,333:134-139.
- [10] Kelly J, Thornton I, Simpson P R. Urban geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain [J]. Applied Geochemistry, 1996,11:363-370.
- [11] Wong C S C, Li X D, Zhang G, et al. Atmospheric deposition of heavy metal in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2003,37:767-776.
- [12] 方凤满. 中国大气颗粒物中金属元素环境地球化学行为研究 [J]. 生态环境学报, 2010,19(4):979-984.
- [13] Guo S, Tan J, Ma Y, et al. Characteristics of atmospheric non-methane hydrocarbons during high PM₁₀ episodes and normal days in Foshan, China [J]. Atmospheric Research, 2011, 101: 701-710.
- [14] 杨复沫. 北京 PM_{2.5} 污染特征与来源研究 [D]. 北京:清华大学, 2002.
- [15] Lee E, Chan C K, Paatero P. Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 1999,33:3201-3212.
- [16] 杨勇杰,王跃思,徐宏辉,等. 泰山顶大气气溶胶中金属元素的特征分析 [J]. 分析测试学报, 2008,27(4):390-395.
- [17] 王济,王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应 [J]. 贵州师范大学学报, 2003,23(2):113-120.
- [18] Hopke P K. Receptor modeling for air quality management [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1991.
- [19] 张晶,陈宗良,王玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析 [J]. 环境科学学报, 1998,18(1):62-67.
- [20] Querol X, Zhuang X G, Alastuey A, et al. Speciation and sources of atmospheric aerosols in a highly industrialised emerging mega-city in Central China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2006,8:1049-1059.
- [21] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992:1-3,66.
- [22] Yang F, Tan J, Zhao Q, et al. Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2011,11:5207-5219.
- [23] Morishita M, Keeler G J, Kamal A S, et al. Identification of ambient PM_{2.5} sources and analysis of pollution episodes in Detroit, Michigan using highly time-resolved measurements [J]. Atmospheric Environment, 2011,45:1627-1637.
- [24] Arruti A, Fernández-Olmo I, Irabien A. Regional evaluation of particulate matter composition in an Atlantic coastal area (Cantabria region, northern Spain): Spatial variations in different urban and rural environments [J]. Atmospheric Research, 2011, 101:280-293.
- [25] 张丹,张卫东,蒋昌潭,等. 重庆市春季大气中 PM₁₀ 元素污染特征 [J]. 环境科学与技术, 2007,30(5):38-40.
- [26] 李晓,杨立中. 成都市东郊 TSP 及 Pb、Cd、Hg、As 浓度日变化规律研究 [J]. 地质灾害与环境, 2004,15(3):35-38.
- [27] 国家环境保护局,中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [28] 姬洪亮,赵宏,孔少飞,等. 天津近岸海域大气颗粒物无机组分季节变化及源析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):177-185.
- [29] 王婉,刘咸德,赵立蔚,等. 用同位素方法评估天津市汽油无铅化进程 [J]. 中国环境科学, 2003,23(6):627-630.
- [30] 段显明,周凌. 江西生态环境状况基本评价及与周边省份比较 [J]. 中国农业资源与区划, 2003,24(2):48-51.

作者简介: 王晴晴(1988-),女,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为大气环境.