

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016060602

王珊珊, 于瑞莲, 赵莉斯, 等. 宁波市不同形态大气汞含量特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 274-281.
WANG Shanshan, YU Ruilian, ZHAO Lisi, et al. Characteristics and sources of atmospheric species mercury in a coastal city, Ningbo, China[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 274-281.

宁波市不同形态大气汞含量特征及来源分析*

王珊珊^{1,2} 于瑞莲¹ 赵莉斯¹ 徐玲玲² 胡恭任^{1**}

(1. 华侨大学环境科学与工程系, 厦门, 361021; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门, 361021)

摘 要 于 2015 年夏季(6—8 月)和冬季(12 月、2016 年 1—2 月)利用汞形态分析仪(Tekran 1130/1135/2537B)对宁波市不同形态大气汞进行了连续监测,并对其含量特征和来源进行分析.结果表明,夏季气态单质汞(GEM)、颗粒态汞(PBM)及活性气态汞(RGM)浓度范围分别为 1.51—4.88 ng·m⁻³(均值 2.50 ng·m⁻³)、10.95—646.90 pg·m⁻³(均值 155.49 pg·m⁻³)和 8.64—316.68 pg·m⁻³(均值 88.22 pg·m⁻³);GEM 含量主要受到大气长距离输送和气象条件的影响,PBM 受交通影响较大,而 RGM 受到工业排放及气象条件的影响.冬季 GEM、PBM 及 RGM 浓度范围分别为 1.73—5.33 ng·m⁻³(均值 2.89 ng·m⁻³)、133.87—1723.99 pg·m⁻³(均值 713.15 pg·m⁻³)和 17.52—309.17 pg·m⁻³(均值 96.94 pg·m⁻³);GEM 受长距离输送的影响,PBM 除来自燃煤和交通外,还受到生物质燃烧和烟花爆竹排放的影响,而 RGM 的主要来源是工业排放.后向气团轨迹分析结果表明,我国北部为高浓度汞源,而海上气团携带汞含量较低.
关键词 宁波市, 不同形态大气汞, 分布特征, 来源, 后向气团轨迹.

Characteristics and sources of atmospheric species
mercury in a coastal city, Ningbo, China

WANG Shanshan^{1,2} YU Ruilian¹ ZHAO Lisi¹ XU Lingling² HU Gongren^{1**}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China;
2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, 361021, China)

Abstract: This study used a mercury speciation analyzer (Tekran 1130/1135/2537B) to monitor the speciated atmospheric mercury from June, 2015 to February, 2016 Ningbo, China, and analyzed the characteristics and sources of atmospheric mercury species. The results showed that the contents of the gaseous elemental mercury (GEM), particulate mercury (PBM) and reactive gaseous mercury (RGM) were respectively 1.51—4.88 ng·m⁻³(average 2.50 ng·m⁻³), 10.95—646.90 pg·m⁻³(average 155.49 pg·m⁻³) and 8.64—316.68 pg·m⁻³(average 88.22 pg·m⁻³) in summer. The GEM was influenced by long distance transport and meteorological condition. The sources of PBM and RGM were automobile exhaust and industrial emission, respectively. In winter, the contents of the above three atmospheric mercury species were 1.73—5.33 ng·m⁻³, 133.87—1723.99 pg·m⁻³ and 17.52—309.17 pg·m⁻³, with the mean values of 2.89 ng·m⁻³, 713.15 pg·m⁻³ and 96.94 pg·m⁻³, respectively. Compared with summer, the sources of PBM were coal combustion, automobile

2016 年 6 月 6 日收稿(Received: June 6, 2016).

* 国家自然科学基金(21477042)和华侨大学 2015 级研究生科研创新能力培育项目资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21477042) and the Program to Foster Innovation Ability of Graduate Students in Huaqiao University, 2015.

** 通讯联系人, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

exhaust, biomass burning and fireworks. The results of backward air mass trajectory using HYSPLIT software showed that mercury concentration is high from the north air mass but low from the ocean.

Keywords: Ningbo, speciated atmospheric mercury, distribution characteristic, source, backward air mass trajectory.

汞是常温常压下唯一以液态存在的金属,具有生物蓄积性,对生态环境存在巨大威胁.自然界中汞在土壤、水体、大气中广泛存在,并且能够相互迁移转化,完成汞的生物地球化学循环.由于大气中汞含量相对较低,传统方法难以检测,所以大气中汞研究相对于沉积物及水体^[1-2]中汞研究还比较欠缺.汞在大气中一般以 3 种形态存在:气态单质汞(Gaseous elemental mercury, GEM)、活性气态汞(Reactive gaseous mercury, RGM)及颗粒态汞(Particulate bounded mercury, PBM).GEM 为大气汞的最主要成分(占 95%左右),其化学性质稳定,在大气中停留时间较长(0.5—2 a),可进行长距离运输^[3].RGM 的化学性质活跃,易溶于水,能很快在排放源附近沉降下来;PBM 可以通过干、湿沉降的方式从大气中去除,RGM 和 PBM 浓度比 GEM 低 2—3 个数量级.随着工业化进程的发展,中国向大气中排放了大量汞^[4].2005 年 Streets 等对中国大气汞排放进行估算,认为人为源的大气汞排放量约为 536 t^[5].目前我国大气汞的研究大多数是关于 TGM(总气态汞)或 GEM 的^[6-8],对大气中不同形态汞研究的相对较少^[9-16],而对大气中不同形态汞研究更能体现大气汞来源和特征的真实情况.

本文以浙江省宁波市北仑区春晓镇中国科学院城市环境研究所宁波站为研究点,监测了夏冬两季不同形态大气汞浓度,对其污染特征进行分析,并利用后向气团轨迹法识别气团来源,以期对当地大气汞污染治理提供科学依据,并进一步丰富全球大气汞含量数据,为汞的生物地球化学循环提供数据支撑.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 监测点概况

监测点位于浙江省宁波市北仑区春晓镇中国科学院城市环境研究所宁波站(29°45′N,121°54′E),见图 1.北仑区春晓镇位于北仑东南方位,三面环山,一面临海,森林覆盖率达 58.8%.属亚热带海洋性季风区,四季分明,气候温和湿润,光照充足,雨量充沛.监测点东北方向为一片工业区,其内设有服装厂、汽车配件厂、汽车生产厂、造纸厂;北面相距约 200 m 有汽车厂.

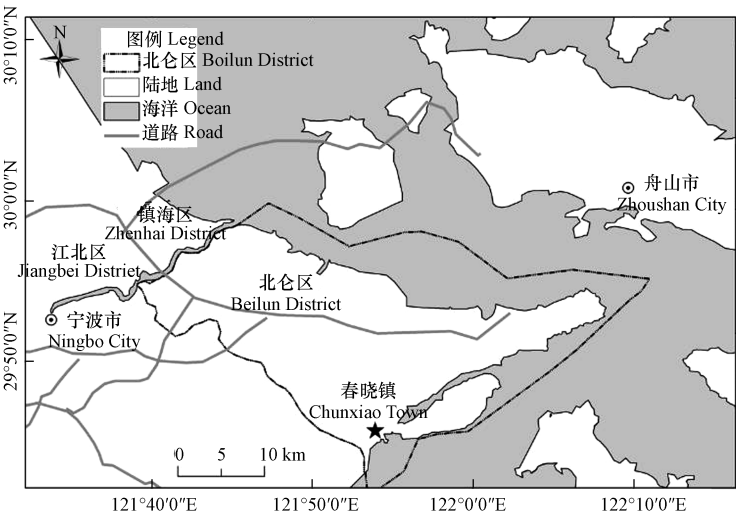


图 1 监测站点地理位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of location of sampling sites

1.2 采样方法及时间

采用不同形态大气汞分析仪 (Tekran 1130/1135/2537B) 连续监测 GEM、RGM 及 PBM 的含量. 2537B 是大气气态汞的分析仪器. 仪器通过采集大气样品, 并将其中的汞富集在金管内, 通过热分解后用冷原子荧光光谱法进行测定. Tekran 2537B 与 1130 活性汞单元、1135 颗粒汞单元连接, 进行大气 GEM、RGM 及 PBM 的分析. 1130 活性汞单元为涂有 KCl 涂层的环形扩散管, 1135 颗粒态汞单元为安置石英纤维滤膜的 L 形管. 分析分为采样阶段和热解阶段. 在采样阶段, 气体以 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速通过撞击板, 使气体和粒径 $<2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物进入, 气体经过活性汞单元使 RGM 被 KCl 涂层吸附, 再进入颗粒汞单元使颗粒物被滤膜吸附后分成两路, 一路以 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流速进入 2537B 进行 GEM 的分析, 一路排出去. 在热解阶段, 石英纤维滤膜上的颗粒物首先被热解 ($850\text{ }^{\circ}\text{C}$) 为零价汞, 进入 2537B 进行分析, 随后扩散管上的活性汞被热解 ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) 为零价汞, 进入 2537B 进行分析. 分析结束后, 再进行下一个阶段的采样, 每个采样周期为 2 h. 仪器能够实现不同形态大气汞的实时、连续、在线观测. 本研究分析了 2015 年 6—8 月 (夏季)、12 月及 2016 年 1—2 月 (冬季) 大气汞含量, 同时利用小型自动气象站 (德国 LUFFT, WS500-UMB) 同步采集了温度、风速、风向和相对湿度等气象数据. 由于采样期间设备维护问题, 2015 年 12 月下旬到 2016 年 1 月中旬部分数据缺失.

1.3 后向气团轨迹分析

后向气团轨迹法可以通过对大气中气团的移动轨迹进行模拟, 分析大气污染物的主要来源及迁移路径^[17]. 本文利用监测点风向和汞浓度频率分布玫瑰图, 结合美国国家海洋和大气管理局大气资源实验室开发的 HYSPLIT 后向气团轨迹模型对大气汞来源进行识别.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 各形态汞的含量水平

各形态大气汞含量见图 2, 各形态含量统计值与国内外其他城市和地区的比较结果见表 1. 夏、冬两季 GEM 的日均含量范围分别为 $1.51\text{—}4.88\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.73\text{—}5.33\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 均值分别为 $2.50\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.89\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于北半球背景值 $1.50\text{—}1.70\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[21], 冬季高于华东地区背景值 ($2.50\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[22], 表明宁波市存在一定程度的大气汞污染. 另外, 监测点具有较高的 PBM 和 RGM 含量, 夏季和冬季 PBM 日均含量范围为 $10.95\text{—}646.90\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (均值 $155.49\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 $133.87\text{—}1723.99\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (均值 $713.15\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$); RGM 含量范围为 $8.64\text{—}316.68\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (均值 $88.22\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 $17.52\text{—}309.17\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (均值 $96.94\text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$).

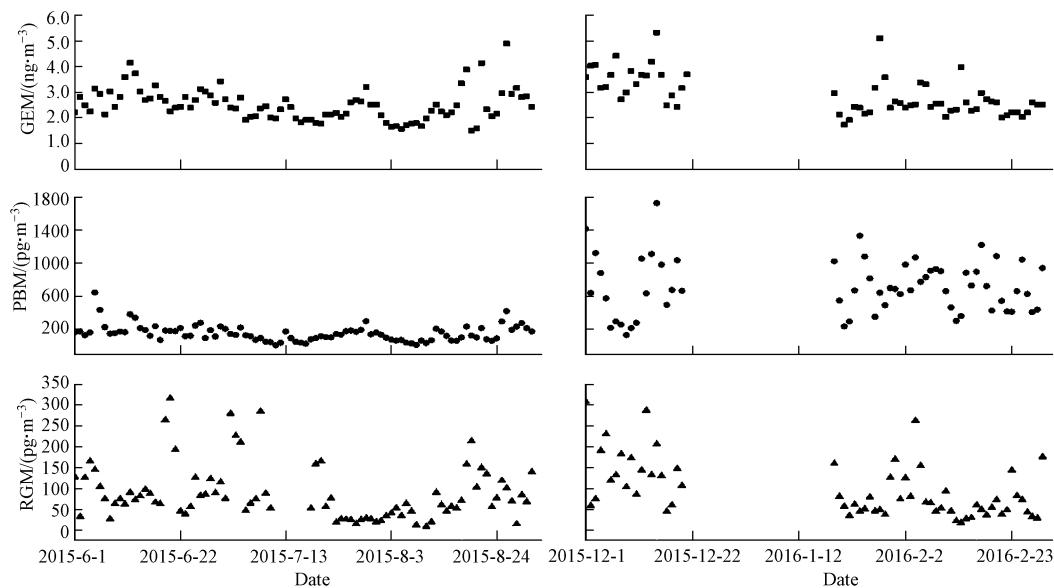


图 2 宁波市不同形态大气汞含量分布图

Fig.2 Distribution of atmospheric mercury species in Ningbo city

表 1 不同城市大气形态汞含量对比表

Table 1 Comparison of Hg species monitored in various cities of China

	TGM/GEM/ (ng·m ⁻³)	PBM/ (pg·m ⁻³)	RGM/ (pg·m ⁻³)	数据来源文献 References
Ningbo (Summer)	2.50 ^b ±0.62	155.49±100.37	88.22±66.51	本研究
Ningbo (Winter)	2.89 ^b ±0.77	713.15±300.30	96.94±67.63	本研究
Xiamen (One year)	3.50 ^a ±0.35	174.41±160.90	61.05±113.70	[12]
Nanjing (Winter)	7.90 ^b ±7.00	—	—	[8]
Guiyang (Winter)	9.72 ^a ±10.20	368.00±676.00	35.70±43.90	[9]
Guangzhou (One year)	4.60 ^b ±1.36	—	—	[6]
Changchun (Summer)	13.5 ^b	145	—	[18]
Changchun (Winter)	25.4 ^b	461	—	[18]
Seoul, Korea (One year)	3.22 ^b ±2.10	23.90±19.60	27.20±19.30	[19]
Chicago, USA (Summer and autumn)	2.50 ^b ±1.50	9.00±20.00	17.00±87.00	[20]

a;TGM;b;GEM.表中所有数据均为监测期间含量均值.The data in table 1 are the average value of monitoring period.

监测期间宁波市 GEM 含量除冬季高于美国^[20]外,夏冬两季含量均低于厦门^[12]、南京^[8]、贵阳^[9]、广州^[6]、长春^[18]和韩国^[19];而冬季 PBM 高于中国的厦门^[12]、贵阳^[9]和长春^[18]、韩国^[19]、美国^[20],夏、冬两季 RGM 含量均高于中国的厦门^[12]和贵阳^[9]、韩国^[19]、美国^[20],表明冬季存在 PBM 污染源,对当地大气汞含量贡献明显.另外,RGM 受到当地污染源的影响.

2.2 不同形态大气汞的季节变化特征

监测期间冬季宁波市大气 GEM、PBM 含量均明显高于夏季(图 3),这与冬季气象条件和燃煤排放有关.冬季北方取暖燃煤量增加,产生的 GEM 和 PBM 在偏北风影响下迁移到监测点,导致 GEM 和 PBM 含量的升高^[23].尤其是12月3种形态大气汞含量明显高于其他采样时段,这可能还与当地12月生物质燃烧导致污染物增多有关;而2月总汞浓度相对较低的条件下,PBM 含量却较1月高,这可能与春节期间烟花爆竹燃放有关.由于燃煤排放的 RGM 在大气中停留的时间较短,很快会在排放源附近沉降下来,区域污染源及长距离传输对 RGM 浓度的影响较小.因此 RGM 含量冬夏两季变化并不大,仍然主要受到监测点附近污染源(如工业排放、机动车尾气等)的影响.

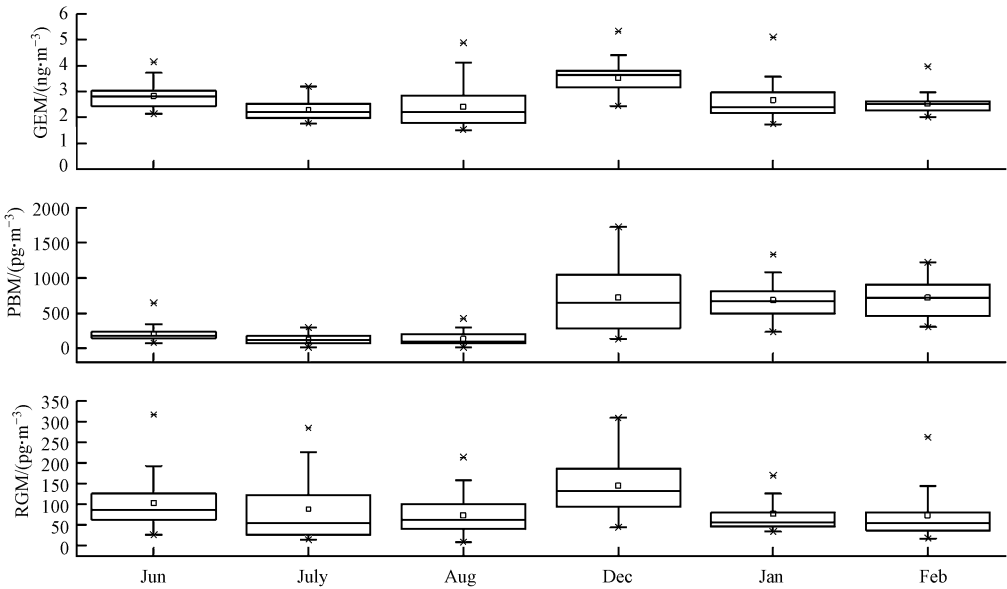


图 3 宁波市大气形态汞季节变化图

Fig.3 Seasonal variation of atmospheric mercury species in Ningbo

2.3 不同形态大气汞的日变化特征

夏季 GEM 的日变化特征比冬季显著,表现为凌晨到上午含量较高(6—8 时出现最大值),午后到傍晚

晚含量较低,19 时左右含量最低.夜间大气边界层较低,污染物不易扩散从而会导致 GEM 的积累;早晨光照加强,温度升高,可能使地表汞的释放加强^[24],大气 GEM 出现峰值;日间较高大气边界层和太阳辐射,促进 GEM 的迁移和氧化,导致午后 GEM 含量降低.

PBM 含量表现为夏季日间不断增大,在 18—20 时出现峰值,随后降低;冬季在交通高峰时段(6—8 时、16—18 时)具有较高的含量,表明 PBM 除受燃煤影响外,汽车尾气的影响也较大.

RGM 夏季日变化特征与 PBM 相似,日间含量不断增大,在 18—20 时出现峰值,随后降低;冬季日变化不明显,含量波动较小.

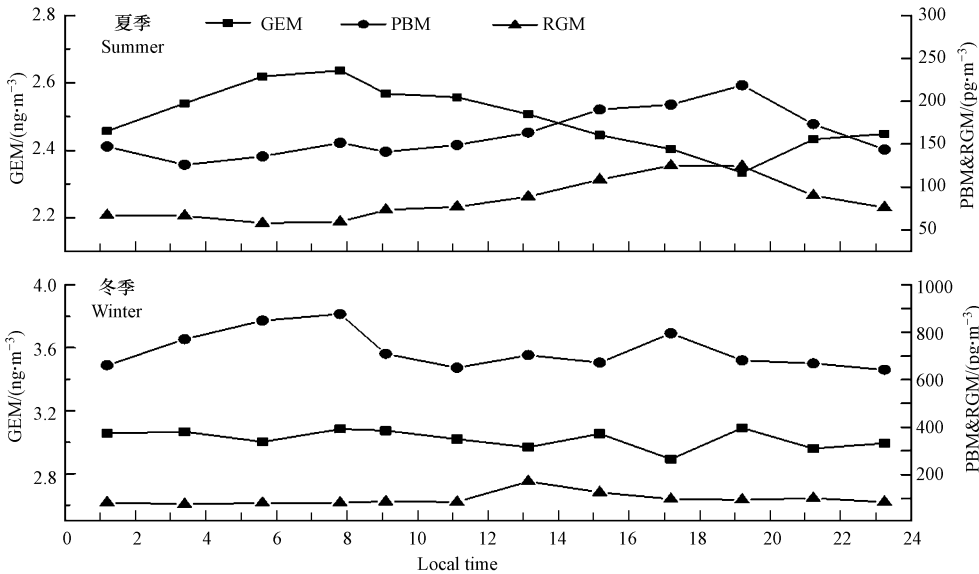


图 4 宁波市不同形态大气汞含量日变化分布图
Fig.4 Durational variation of atmospheric mercury species in Ningbo city

对 GEM 和 RGM 日均浓度做相关性分析,见图 5.夏季 RGM 含量与 GEM 呈负相关,通常认为 GEM 受到大气中 O₃和其他氧化物的影响生成 RGM,使 RGM 在中午或下午含量增高^[25],而 GEM 含量则会相对下降.表明 RGM 为 GEM 在大气中发生光氧化反应而形成的,进而说明 RGM 受到工业生产排放臭氧等污染物的影响.冬季 GEM 和 RGM 几乎无相关性,这是由于冬季温度较低,光化学反应较弱,GEM 转化为 RGM 的作用减弱.

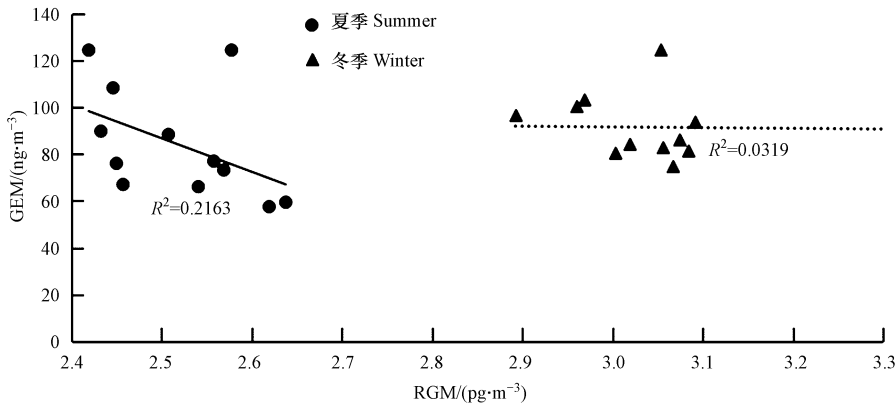


图 5 宁波市大气 GEM 与 RGM 相关性
Fig.5 Correlations between GEM and RGM in Ningbo

2.4 不同形态大气汞来源分析

2.4.1 风向与不同形态大气汞浓度的关系

监测期间宁波市风频率玫瑰图及汞浓度风向玫瑰图见图 6.宁波市夏季主导风向为东风和北风,而

GEM、PBM 与 RGM 在各风向上的浓度分布较为均匀,说明夏季风向不是影响各形态汞含量的主要因素.冬季主导风向为北风和西北风,GEM 浓度在偏南和偏西风向上较高,而 PBM 与 RGM 均在偏南风向上浓度较高.此外,夏冬两季大气中不同形态汞均未表现出偏北及东北(分别设有汽车厂和工业区)风向上浓度较高的特点,说明当地较多的高山及森林对三种形态大气汞具有阻挡和吸附作用.

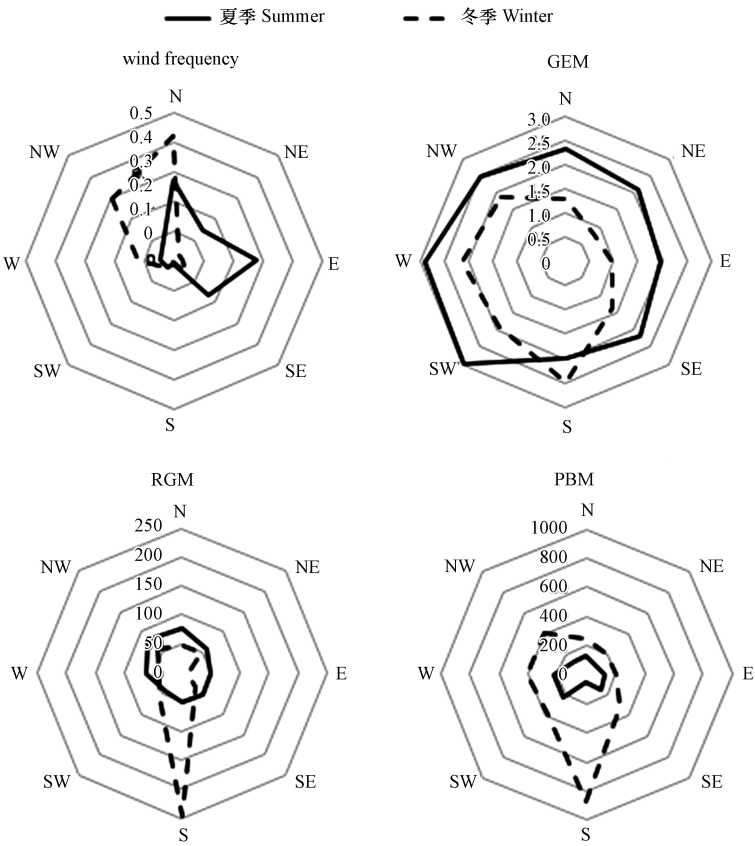


图 6 监测期间风玫瑰图和大气形态汞浓度风向玫瑰图

Fig.6 Wind roses and pollution roses of GEM, PBM, and RGM (averaged over 2 h) during the measurement period

2.4.2 后向气团轨迹分析

选取监测期间典型时段:2015 年 8 月 3—5 日(大气汞含量最低)以及 2015 年 12 月 13—15 日(大气汞含量最高)进行气团轨迹模拟,见图 7.结果表明,2015 年 8 月 3—5 日气团主要来自海洋,部分气团自南海经福建到浙江东南部到达监测点,另一部分气团直接来自东海,监测点 GEM 浓度在此时达到最低值 1.51 ng·m⁻³.

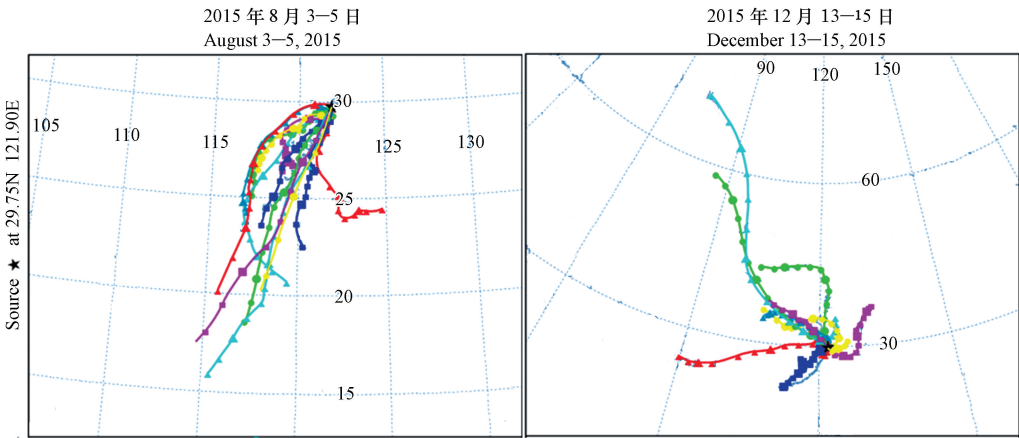


图 7 后向气团轨迹分析结果

Fig.7 Results of HYSPLIT analysis

2015 年 12 月 13—15 日气团主要来自内陆.北冰洋喀拉海以及俄罗斯西伯利亚为起点的两股气团经俄罗斯、蒙古到达我国内蒙古、甘肃、宁夏、陕西、河南、湖北、安徽、浙江地区后到达监测点;起点为蒙古的气团经过内蒙古、河北、辽宁、山东地区后到达监测点;起点为孟加拉国气团,经云南、四川、贵州、湖南、湖北、江西、安徽到达监测点;起点广东气团,经福建、江西到达监测点;起点为山东、山西的三股气团经山西、江苏到达监测点.值得注意的是,这些气团大多来自或途经中国北部地区,而此时段恰好为我国北部取暖时段,大规模燃煤导致大气中汞浓度增加,此时监测到 GEM 峰值 $5.33 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 综上,中国北部为高浓度汞源,而海洋干净气团携带汞含量小.

3 结论 (Conclusion)

(1) 监测期间宁波市三种形态大气汞含量均表现为冬季>夏季.GEM 夏季日变化较明显:凌晨至上午较高,午后到傍晚较低;冬季日变化不明显.交通高峰时段 PBM 的浓度较高.RGM 夏季呈现与 GEM 相反的变化趋势,冬季日变化不明显.

(2) GEM 受到气象条件和大气长距离运输的影响;PBM 主要来源于当地燃煤、交通排放和生物质燃烧,二月 PBM 还受到烟花爆竹燃放的影响;RGM 主要受当地工业区排放污染物以及气象条件的影响.

(3) 后向气团轨迹表明中国北部为高浓度汞源,而海洋气团中含汞量较低;汞含量与风向的关系表明当地高山和森林对三种形态大气汞具有阻挡作用.

参考文献 (References)

- [1] CHEN J, HINTELMANN H, ZHENG W, et al. Isotopic evidence for distinct sources of mercury in lake waters and sediments[J]. *Chemical Geology*, 2016, 426: 33-44.
- [2] YIN R, FENG X, ZHANG J, et al. Using mercury isotopes to understand the bioaccumulation of Hg in the subtropical Pearl River Estuary, South China[J]. *Chemosphere*, 2015, 147: 173-179.
- [3] SCHROEDER W H, MUNTHE J. Atmospheric mercury—An overview[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(5): 809-822.
- [4] WU Y, WANG S X, STREETS D G, et al. Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(17): 5312-5318.
- [5] STREETS D G, HAO J, WU Y, et al. Anthropogenic mercury emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(40): 7789-7806.
- [6] CHEN L, LIU M, XU Z, et al. Variation trends and influencing factors of total gaseous mercury in the Pearl River Delta—A highly industrial region in South China influenced by seasonal monsoons[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77(7): 757-766.
- [7] FRIEDRI H R, ARELLANO A F, GENG F, et al. Measurements of atmospheric mercury in Shanghai during September 2009[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2010, 11(8): 3781-3788.
- [8] ZHU J, WANG T, TALBOT R, et al. Characteristics of atmospheric Total Gaseous Mercury (TGM) observed in urban Nanjing, China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, 12(9): 25037-25080.
- [9] FU X, FENG X, QIU G, et al. Speciated atmospheric mercury and its potential source in Guiyang, China[J]. *Atmospheric environment*, 2011, 45(25): 4205-4212.
- [10] HUANG J, LIU C K, HUANG C S, et al. Atmospheric mercury pollution at an urban site in central Taiwan: Mercury emission sources at ground level[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(5): 579-585.
- [11] WAN Q, FENG X, LU J, et al. Atmospheric mercury in Changbai Mountain area, northeastern China II. The distribution of reactive gaseous mercury and particulate mercury and mercury deposition fluxes[J]. *Environmental Research*, 2009, 109(6): 721-727.
- [12] XU L, CHEN J, YANG L, et al. Characteristics and sources of atmospheric mercury speciation in a coastal city, Xiamen, China[J]. *Chemosphere*, 2014, 119C: 530-539.
- [13] 狄一安, 杨勇杰, 马志强, 等. 北京市城区北部大气气态汞的特征分析[J]. *环境化学*, 2012, 31(10): 1656-1657.
DI Y A, YANG Y J, MA Z Q, et al. Characteristics of gaseous mercury in the northern of Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(10): 1656-1657(in Chinese).
- [14] ASHBAUGH L L, MALM W C, SADEH W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(8): 1263-1270.
- [15] WANG C, CI Z, WANG Z, et al. Speciated atmospheric mercury in the marine boundary layer of the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 131: 360-370.
- [16] FOY B D, TONG Y, YI X, et al. First field-based atmospheric observation of the reduction of reactive mercury driven by sunlight[J].

- Atmospheric Environment, 2016, 134: 27-39.
- [17] LINDERRG S, BULLOCK R, EBINGHAUS R, et al. A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition[C].// International Conference on Mercury as A Global Pollutant. 2007: 19-32.
- [18] 张静静, 郑娜, 周秋红, 等. 内蒙古自治区原煤中汞含量分布及燃煤大气汞排放量估算[J]. 环境化学, 2014, 33(9):1613-1614. ZHANG J J, ZHENG N, ZHOU Q H, et al. Estimation of mercury emission from coal combustion in Inner Mongolia, China [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(9): 1613-1614(in Chinese).
- [19] FANG F, WANG Q, Li J. Urban environmental mercury in Changchun, a metropolitan city in Northeastern China: Source, cycle, and fate [J]. Science of the Total Environment, 2004, 330(1/3):159-170.
- [20] KIM S H, HAN Y J, HOLEN T M, et al. Characteristics of atmospheric speciated mercury concentrations (TGM, Hg(II) and Hg(p)) in Seoul, Korea[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(20):3267-3274.
- [21] 窦红颖, 王书肖, 王龙, 等. 长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 1-7. DOU H Y, WANG S X, WANG L, et al. Characteristics of total gaseous mercury concentrations at a rural site of Yangtze Delta, China[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 1-7(in Chinese).
- [22] ZHANG F, Xu L, CHEN J, et al. Chemical compositions and extinction coefficients of PM_{2.5} in peri-urban of Xiamen, China, during June 2009 May 2010[J]. Atmospheric Research, 2012, 106: 150-158.
- [23] GRATZ L E, KEELER G J, MARSIK F J, et al. Atmospheric transport of speciated mercury across southern Lake Michigan: Influence from emission sources in the Chicago/Gary urban area[J]. Science of the Total Environment, 2012, 448(6):84-95.
- [24] 张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2006, 42(2):220-225. ZHANG X, CAI X H, CHAI F H. Structures and characteristics of the atmospheric boundary layer over Beijing Area in autumn[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(2):220-225(in Chinese).
- [25] CHOI H D, HOLSEN T M, HOPKE P K. Atmospheric mercury (Hg) in the adirondacks: Concentrations and sources[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(15): 5644-5653.