

# 北京市大气气态汞变化特征

李亮<sup>1</sup> 张艳艳<sup>2</sup> 焦聪颖<sup>1</sup> 姚雅伟<sup>1</sup> 张辉<sup>3</sup> 田英明<sup>2</sup>

1. 中国环境监测总站 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室 北京 100012

2. 上海华川环保科技有限公司 上海 200232

3. 中国科学院地球化学研究所 贵州 贵阳 550081

**摘要:** 采用 Tekran 2537X 大气汞分析仪在线测量北京市城区大气中气态元素汞 (GEM, 简称大气汞) 浓度, 研究大气汞浓度随不同气象条件的变化特征。通过分析 2016 年 10 月—2017 年 9 月大气汞监测数据发现, 该监测点全年大气汞浓度为 0.48~16.25 ng/m<sup>3</sup>, 均值为 (3.41±1.79) ng/m<sup>3</sup>。春季、夏季、秋季和冬季大气汞浓度均值依次为 2.93、2.95、4.27、3.37 ng/m<sup>3</sup>, 其中秋季大气汞浓度明显高于其他季节。秋季大气汞浓度显著偏高可能由不利的大气扩散条件导致。大气汞夜间浓度显著高于白天浓度。同时, 将大气汞与 SO<sub>2</sub>、CO 及 PM<sub>2.5</sub> 进行相关性分析, 发现大气汞浓度变化趋势与 SO<sub>2</sub>、CO 和 PM<sub>2.5</sub> 呈显著正相关。结合风向和风速进行污染源分析, 得到该点位大气汞在西南和东北方向上受人为排放源影响较大。污染源类型分析表明, 冬季大气汞与 CO 同源性较强, 主要来自本地供暖用煤。

**关键词:** 大气汞; 北京; 日变化; 季节变化

中图分类号: X823 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2019)06-0040-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2019.06.06

## Variation Characteristics of Atmospheric Mercury in Ambient Air of Beijing

LI Liang<sup>1</sup> ZHANG Yanyan<sup>2</sup> JIAO Congying<sup>1</sup> YAO Yawei<sup>1</sup> ZHANG Hui<sup>3</sup> TIAN Yingming<sup>2</sup>

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

2. Shanghai Huachuan Environment Technology Corporation, Shanghai 200232, China

3. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** Tekran 2537X ambient mercury analyzer was used to measure gaseous elemental mercury content online in ambient air of Beijing, to investigate the characteristics of ambient mercury content changing with meteorological conditions. By analyzing atmospheric mercury monitoring data in the period from Oct. 2016 to Sept. 2017, it is found that mercury content ranged from 0.48 to 16.25 ng/m<sup>3</sup>, the mathematical average value was (3.41±1.79) ng/m<sup>3</sup>. The average values in spring, summer, autumn and winter were 2.93, 2.95, 4.27 and 3.37 ng/m<sup>3</sup>, respectively. Atmospheric mercury content in autumn was evidently higher than that of other three seasons, higher ambient mercury content was relevant with the poor air diffusion condition in autumn. Atmospheric mercury concentration at night was significantly higher than the mercury concentration during the day. At the same time, it displayed a significant positive correlation between atmospheric mercury concentration and SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>. Combining the wind direction and wind speed to analyze the source of the pollution, atmospheric mercury at this site was greatly affected by anthropogenic sources in the southwest and northeast directions. Source type analysis indicated that atmospheric mercury in winter had a homological source with CO, which fitted well with coal combustion for heating supply.

**Keywords:** atmospheric mercury; Beijing; diurnal variation; seasonal variation

汞是一种公认的全球性污染物, 大气中汞的分布和迁移转化在全球汞的生物地球化学循环中占有极其重要的地位。气态元素汞 (GEM, 以下简称大气汞) 在大气中的驻留时间长达 0.5~2

年, 能随大气循环在全球尺度传输, 使大气成为不同环境介质中汞迁移转化的重要传输通道。根据现有研究成果<sup>[1-3]</sup>, 全球大气汞背景值在北半球为 1.5~1.7 ng/m<sup>3</sup>, 在南半球为 1.1~1.3 ng/m<sup>3</sup>。在

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2019-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0201800)

第一作者简介: 李亮 (1980-), 男, 山东泰安人, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 姚雅伟

中国瓦里关、贡嘎山和长白山等地,分别有大气汞研究数据表明中国的大气汞背景值为 $1.60 \sim 5.07 \text{ ng/m}^3$ <sup>[4-7]</sup>。

大气汞浓度受人为排放源影响较大,中国是全球人为汞排放量最大的国家之一<sup>[8]</sup>,2个主要的人为汞排放源是有色金属冶炼和燃煤。国外学者对大气汞进行长期观测发现<sup>[9-10]</sup>,2010—2015年间,北美和欧洲地区大气汞浓度逐年降低,东亚地区大气汞浓度逐年升高,化石燃料的燃烧是首要原因。工业化和城市化发展以及城市热岛效应导致城市大气汞浓度水平受本地排放源影响比偏远地区更加明显。因此,监测城市大气汞浓度变化趋势,同时结合大气中 $\text{SO}_2$ 和 $\text{CO}$ 等其他污染物变化规律,可为了解城市大气汞污染特征,确定城市大气汞污染来源以及未来评估大气汞的健康风险提供基础数据。

国内外很多学者已经开展了城市大气汞的相关研究。LIU等<sup>[11]</sup>在1998年的冬季和夏季分别监测北京市大气汞浓度,城区不同点位冬季大气汞浓度均值为 $5.3 \sim 34.9 \text{ ng/m}^3$ ,夏季大气汞浓度均值为 $7.3 \sim 13.8 \text{ ng/m}^3$ 。冬季大气汞浓度较高的原因主要是采暖季大量燃烧煤炭导致汞大量排放。狄一安等<sup>[12]</sup>在2011年11月测试北京市城区北部的大气汞含量,测试大气汞浓度为 $(6.50 \pm 3.40) \text{ ng/m}^3$ ,略低于1998年冬季大气汞浓度。WANG等<sup>[13]</sup>分别在2005年1、4、7、10月监测北京市大气汞浓度,得到结果为 $(8.3 \pm 3.6)$   $(6.5 \pm 5.2)$   $(4.9 \pm 3.3)$   $(6.7 \pm 3.5) \text{ ng/m}^3$ 。张艳艳等<sup>[14]</sup>2008—2010年在上海西南部开展大气汞监测,全年大气汞浓度均值为 $(7.79 \pm 3.29) \text{ ng/m}^3$ 。上海市大气汞浓度还表现出明显的季节特征,秋季浓度最高,其次为冬季、春季和夏季。张晓华等<sup>[15]</sup>在2011年6、12月监测苏州市大气汞浓度时,分别测得大气汞浓度均值为 $(4.33 \pm 1.16)$   $(5.06 \pm 1.90) \text{ ng/m}^3$ 。2013—2014年,HONG等<sup>[16]</sup>在合肥进行大气汞浓度监测,在重污染天气条件下大气汞浓度均值为 $(4.74 \pm 1.62) \text{ ng/m}^3$ ,而非污染天气时大气汞浓度均值为 $(3.95 \pm 1.93) \text{ ng/m}^3$ 。2008年,满洪喆等<sup>[17]</sup>在重庆市主城区进行大气汞监测,得到大气汞浓度均值为 $6.45 \text{ ng/m}^3$ 。

值得注意的是,在对北京市大气汞浓度及特征的研究中,绝大部分研究对大气汞的监测是短期监测,数据量较少,对于综合分析北京市大气汞污染状况是不够的。因此,笔者选取北京市区作

为研究区域,采用大气汞在线分析仪,开展大气汞的长时间高分辨率观测,探讨其季节变化和日变化特征,以期更加全面认识北京市大气汞污染现状、变化特征及可能来源,为北京市大气污染防治和空气环境改善提供参考。

## 1 监测方法

### 1.1 点位简介

北京市属于典型的山前平原地貌,西部西山属太行山脉,北部和东北部军都山属燕山山脉,南部接华北平原。北京市气候属于典型的北温带大陆性季风气候,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风。

点位于北京市朝阳区中国环境监测总站(地理坐标为 $116^\circ 25' 08.7'' \text{E}$ ,  $40^\circ 02' 30.5'' \text{N}$ ),点位周边属居住、商业和办公混合区,无直接汞排放源。大气汞监测主体设备位于中国环境监测总站大气监测实验室,取样设备安装在楼顶。取样口距离顶部楼面垂直高度为 $1.2 \text{ m}$ ,离地面高度约为 $28 \text{ m}$ 。监测点周边 $2 \text{ km}$ 范围内无明显污染物固定排放源。

### 1.2 监测设备与方法

采用美国Tekran Instruments高精度大气汞分析仪(Tekran 2537X)连续 $24 \text{ h}$ 监测大气汞浓度,分析原理为金汞富集结合冷原子荧光法,检测限低于 $0.1 \text{ ng/m}^3$ 。汞分析仪具有内置汞源,设置每 $25 \text{ h}$ 自动校准一次。同时,运行人员使用外部汞发生器(Tekran 2505)每年对系统手工注射校核一次,偏差不超过 $5\%$ 。汞分析仪采样流量为 $1 \text{ L/min}$ ,分析间隔为 $5 \text{ min}$ 。该设备于2015年6月投入运行,使用过程中校准合格。笔者主要选取2016年10月—2017年9月小时均值数据进行分析。

大气污染物数据和气象数据分别来自美国赛默飞科技公司的气态污染物及颗粒物监测仪( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 监测所用仪器型号分别为Model 43i、42i、49i、48i和TEOM 1405DF),风速和风向等数据来自华创风云科技公司的气象监测仪(Huatron HydroMet Station MAWS860)。按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193—2005)定期对设备进行校准和质控操作。部分时段由于停电和仪器校准等原因,所测数据无效。数据统计有效性按照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013)执行。

## 2 大气汞浓度变化特征

### 2.1 监测数据概况

监测过程中,北京市大气汞浓度变化范围为 $0.48 \sim 16.25 \text{ ng/m}^3$ ,均值为 $(3.41 \pm 1.79) \text{ ng/m}^3$ 。由图1监测数据和表1其他研究者对大气汞的测试结果<sup>[11-23]</sup>可以看出,Tekran 2537X大气汞分析仪得到的大气汞浓度数据更集中,而且研究期间北京

市城区大气汞浓度明显低于早期的北京市城区大气汞浓度。北京市城区大气汞浓度明显高于全球大气汞背景值<sup>[10]</sup>、中国城市背景值(上海<sup>[23]</sup>)以及瓦里关<sup>[5]</sup>、长白山<sup>[7]</sup>等区域点位大气汞背景值,这说明北京市大气受到人为汞排放源的影响,形成大气汞污染。同时可以看出,除了宁波市大气汞浓度较低外,其他城市大气汞浓度都高于北京市大气汞浓度,可能是和北京市推进清洁空气行动计划,拆除本地燃煤锅炉和减少燃煤等措施有关。

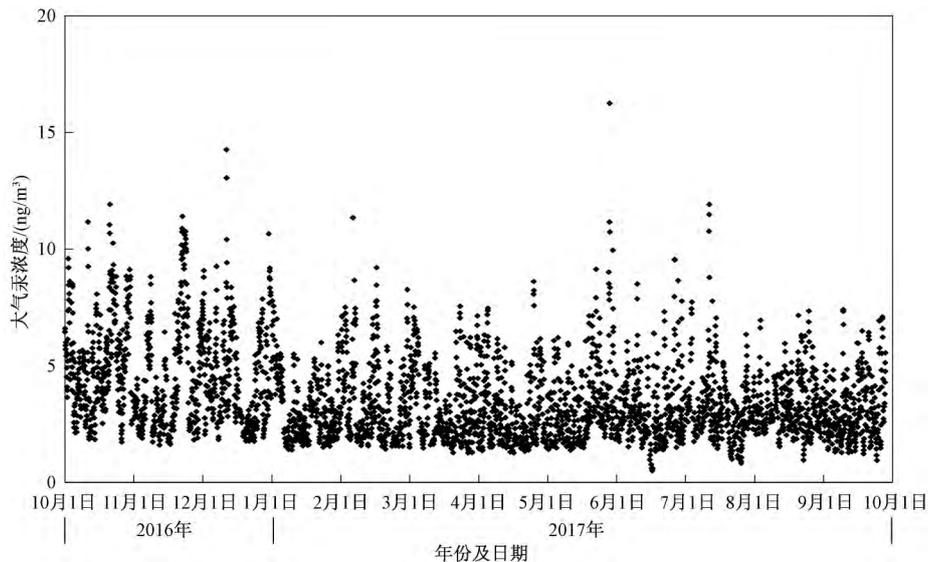


图1 北京市城区大气汞浓度监测值

Fig.1 Atmospheric mercury monitoring data in urban Beijing

表1 国内不同地区大气汞浓度水平

Table 1 Atmospheric mercury concentrations in different areas of China

观测点位	点位类型	观测时段	浓度(平均值 ± 标准差)
该研究	城市	2016年10月—2017年9月	$3.41 \pm 1.79$
北京市 <sup>[11]</sup>	城市	1998年2月	$7.90 \pm 2.60$
北京市 <sup>[12]</sup>	城市	2011年11月	$6.50 \pm 3.40$
北京市 <sup>[13]</sup>	城市	2005年1月	$8.30 \pm 3.60$
		2005年4月	$6.50 \pm 5.20$
		2005年7月	$4.90 \pm 3.30$
		2005年10月	$6.70 \pm 3.50$
上海市 <sup>[14]</sup>	城市	2008—2010年	$7.79 \pm 3.29$
苏州市 <sup>[15]</sup>	城市	2011年11月	$4.33 \pm 1.16$
合肥市 <sup>[16]</sup>	城市	2013—2014年	$4.74 \pm 1.62$ (重污染期间) $3.95 \pm 1.93$ (非重污染期间)
重庆市 <sup>[17]</sup>	城市	2008年	$6.45 \pm 0.03$
株洲市 <sup>[18]</sup>	城市	2013年8月	$4.20 \pm 3.37$
宁波市 <sup>[19]</sup>	城市	2015—2016年	2.50(夏季) 2.89(冬季)
广州市 <sup>[20]</sup>	城市	2011年6—9月	4.16
贵阳市 <sup>[21]</sup>	城市	2001—2002年	$7.45 \pm 12.80$
		2009—2010年	$8.88 \pm 7.06$
全球背景值 <sup>[10]</sup>	背景点	1994年	1.50~2.00
瓦里关 <sup>[5]</sup>	背景点	2007—2008年	$1.98 \pm 0.98$
长白山 <sup>[7]</sup>	背景点	2008—2010年	$1.60 \pm 0.51$
北京市 <sup>[22]</sup>	背景点	2008—2009年	$3.22 \pm 1.74$
上海市 <sup>[23]</sup>	背景点	2009年9—12月	$2.50 \pm 1.50$

## 2.2 大气汞日变化特征

从全年(2016年10月—2017年9月)监测数

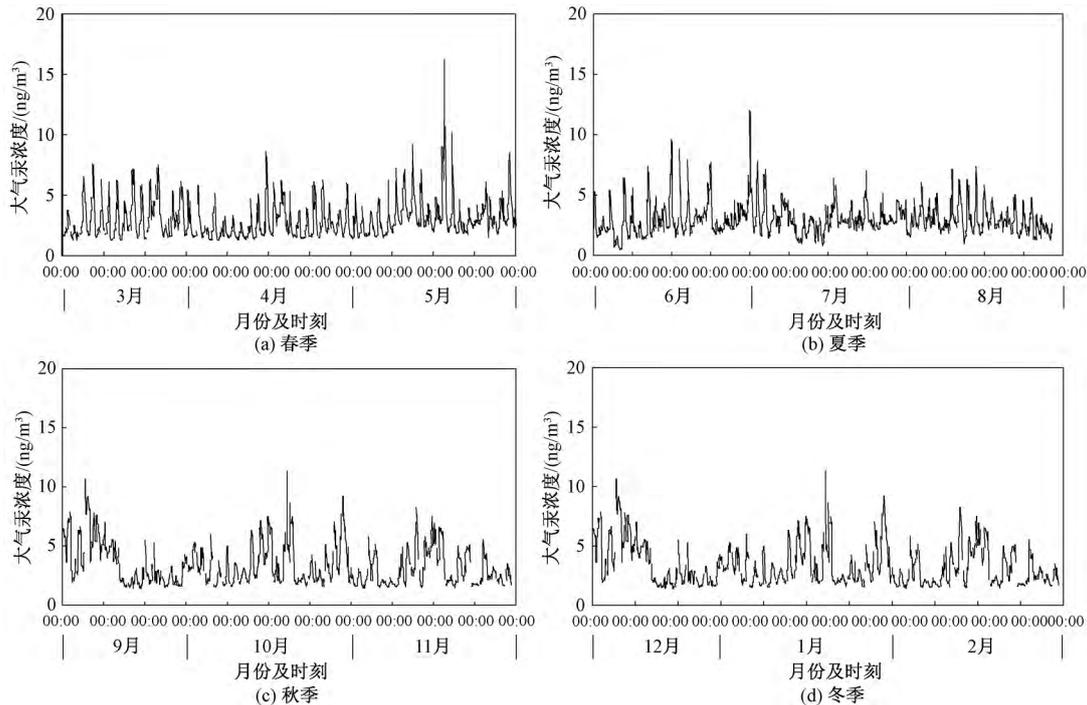


图2 不同季节大气汞浓度日变化特征

Fig.2 Diurnal variation of atmospheric mercury concentrations in different seasons

由图2可见,大气汞浓度整体表现出夜间升高,白天降低的趋势,浓度峰值一般出现在23:00—06:00,并没有表现出固定的规律。春夏季的大气汞日浓度变化表现出规律的单峰值,而秋冬季则大多表现为连续多天一个峰值,出现汞污染的持续累积。可能原因是白天太阳辐射增强,混合层厚度增加,有利于大气汞的稀释扩散,而夜晚地面辐射冷却,混合层厚度降低,导致大气汞浓度增加。秋冬季的汞污染持续累积则多是受气象条件影响。

一年时间段内,以日出时间和日落时间为白天和夜间的划分标准,计算白天和夜间大气汞浓度均值,见图3。

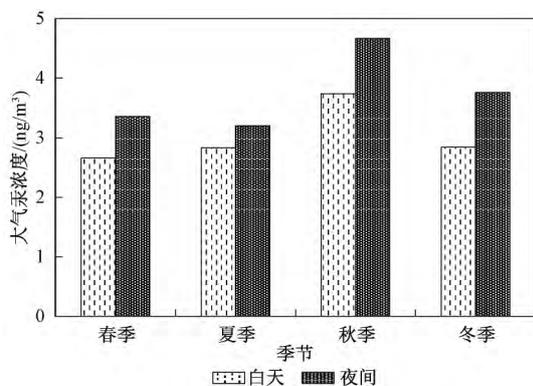


图3 不同季节白天和夜间大气汞浓度均值

Fig.3 Mean value of atmospheric mercury concentration during day and night in different seasons

据中按照春季、夏季、秋季和冬季的大气汞小时均值数据制图,得到图2大气汞浓度日变化特征。

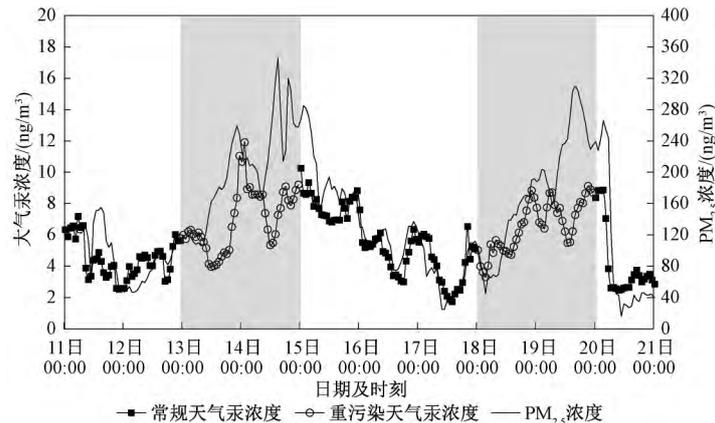
其中,秋季和冬季白天和夜间大气汞浓度均值差异较大,而夏季白天和夜间大气汞浓度均值差异最小。可能原因是秋季和冬季重污染天数较多,污染物不易扩散。

## 3 分析与讨论

### 3.1 大气汞在重污染天气变化特征

以2016年10月为例,10月13、14、18、19日为重污染天气,北京市分别发布了重污染天气蓝色和橙色预警。分析10月11—20日大气汞监测数据(图4)可知,在重污染天气时,大气汞浓度出现明显上升趋势,并且在重污染天气结束后突然下降。所选取数据段4d重污染天气(10月13、14、18、19日)大气汞浓度均值为 $6.78\text{ ng/m}^3$ ,其他6d常规天气下大气汞浓度均值则为 $4.97\text{ ng/m}^3$ 。

由图4可以发现,大气汞浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化曲线趋势基本一致。HONG等<sup>[16]</sup>研究表明,在重污染天气大气汞浓度主要受到本地排放源的影响,而不是远距离传输。同时,较差的大气扩散条件也导致大气汞的累积污染。

图4 典型重污染天气大气汞浓度与PM<sub>2.5</sub>浓度变化曲线Fig.4 Curves of atmospheric mercury and PM<sub>2.5</sub> in typical heavy pollution weather

### 3.2 大气汞与常规污染物相关性

将监测数据按照不同季节分析,大气汞浓度均值见表2。

由表2可以看出,秋季大气汞浓度最高,大气汞浓度依次为秋季>冬季>夏季>春季。该研究结

果和上海市研究结果<sup>[14]</sup>及合肥市研究结果<sup>[16]</sup>相似。此外,通过表2中的其他大气污染物浓度可以看出,SO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>均呈现和大气汞相同的季节变化趋势,即秋季监测浓度明显高于其他3个季节。

表2 不同季节大气污染物监测浓度

Table 2 Air pollutant concentrations in different seasons

季节	月份	Hg <sup>0</sup> /(ng/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )	CO/(mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )
春季	3—5月	2.93±0.79	9.45	0.71	58.56
夏季	6—8月	2.95±0.67	3.88	0.70	42.29
秋季	9—11月	4.27±1.64	19.54	2.05	107.22
冬季	12月—次年2月	3.37±1.31	5.67	1.28	81.82

对全年大气汞及SO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>等污染物监测数据进行相关性分析,结果见表3。可以看出,SO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>和大气汞在0.01水平上(双侧)显著正相关。因为SO<sub>2</sub>和CO为一次排放污染物,且燃煤和金属冶炼是大气汞和SO<sub>2</sub>、CO的共同来源,可以认为大气汞主要来源于一次排放,即受到人为排放源的影响较大。

表3 大气汞与常规污染物的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of atmospheric mercury and other air pollutants

类别	Hg <sup>0</sup> /(ng/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )	CO/(mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )
均值	3.41	8.93	1.13	71.25
Pearson 相关系数	1	0.176**	0.599**	0.573**
显著性	—	0	0	0

注:“—”表示无数值“\*\*”表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

### 3.3 污染源类型分析

大气汞和CO因其具有同源性而产生较强的相关性。工业燃煤、生活燃煤、水泥生产及钢铁生

产是这2种污染物的共同来源<sup>[24-25]</sup>。除此之外,汽车尾气是比较重要的CO排放源,燃煤发电和非铁金属冶炼是另外2个比较重要的大气汞排放源。环境空气中大气汞在自然界存在背景值,而CO不存在自然背景值。采用Hg<sup>0</sup>和CO浓度作图(图5),可以进行污染源类型分析。

由图5可见,趋势线斜率表示Hg<sup>0</sup>/CO值,燃煤发电的Hg<sup>0</sup>/CO值较高,而工业锅炉和居民生活燃煤的Hg<sup>0</sup>/CO值较低。WEISS-PENZIAs等<sup>[26]</sup>研究表明亚洲远距离输送、太平洋西北部美国生物质燃烧、阿拉斯加地区生物质燃烧的Hg<sup>0</sup>/CO值分别为5.7、1.5和0.8。图5趋势线截距代表大气汞受到自然背景值的影响程度。相关系数则表示同源排放源的贡献大小。

由图5可以看出,春季、夏季、秋季、冬季的Hg<sup>0</sup>/CO值依次为1.70、0.92、1.31、0.75,冬季的Hg<sup>0</sup>/CO值较低,可能是受本地生活燃煤污染物排放的影响,不完全燃烧释放的CO浓度较高,导致趋势线向X轴方向倾斜。冬季的Hg<sup>0</sup>与CO相关

系数较高(0.85) 表示冬季大气汞和 CO 同源排放源贡献最大,其次是秋季,与 ZHANG 等<sup>[22]</sup> 研究结

果相符,冬季相关系数最高正好与北方冬季因供暖而燃煤用量最大一致。

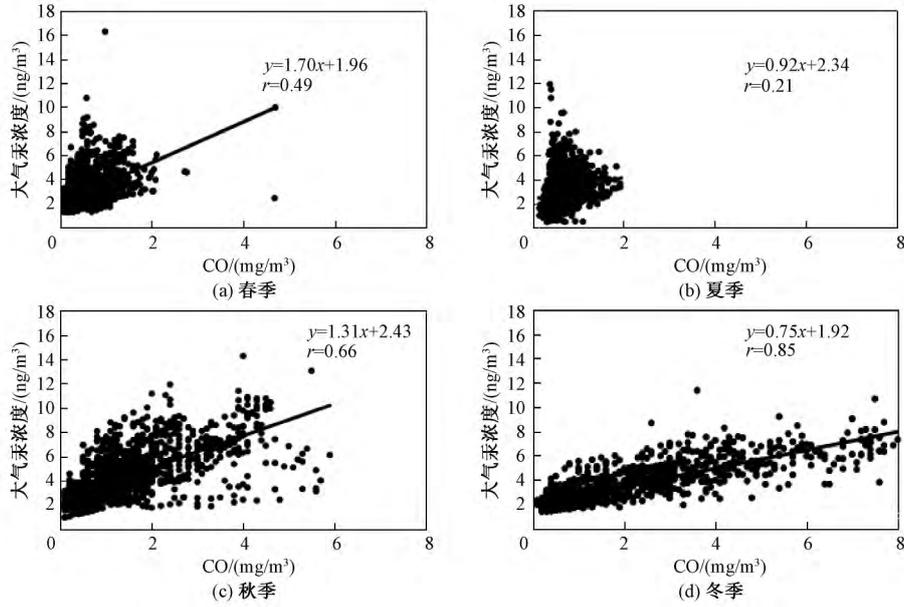


图 5 大气汞和 CO 浓度关系

Fig.5 Correlation between atmospheric mercury and CO

3.4 污染源分析

大气汞迁移和传输受风的影响较大,因为大气汞可以在大气环境中长时间停留并远距离迁

移。根据大气汞沿不同风向的分布状况可以推断出可能的大气汞排放源。图 6 为大气汞含量、平均风速与风向相对频率玫瑰图。

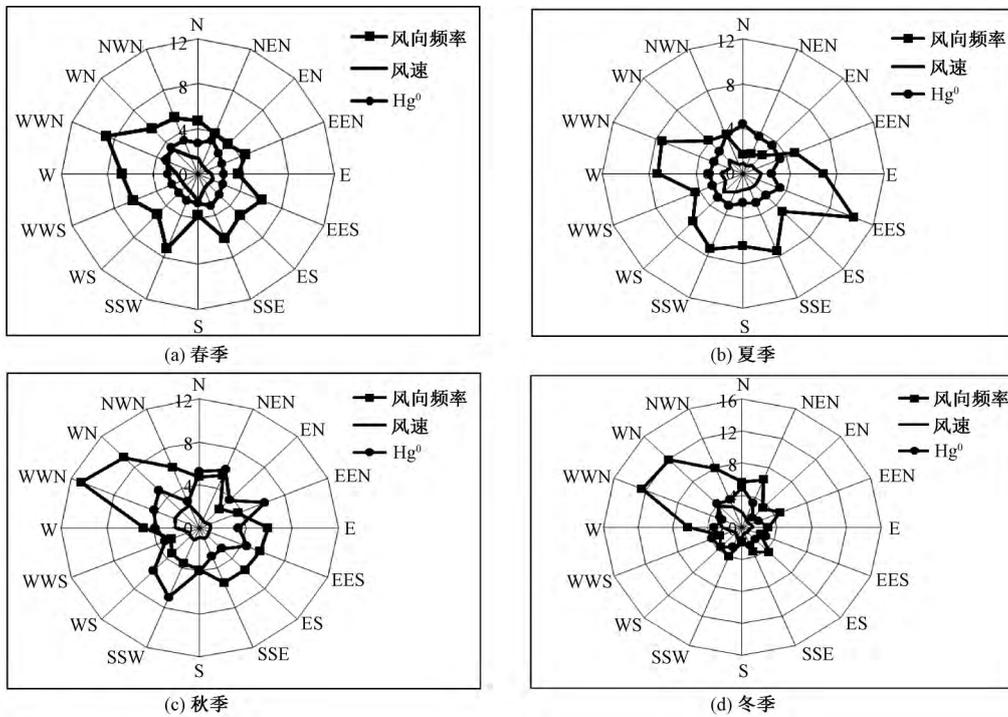


图 6 大气汞含量、平均风速与风向相对频率玫瑰图

Fig.6 Comparison of atmospheric mercury content, mean wind speed and relative wind direction frequency

从图6可以看出,春季和夏季主要风向为南方风向,而汞浓度在北方风向上略微偏高。秋冬季则主要风向为西北风,但秋季的汞浓度变化更为复杂,西南和东北风向上汞浓度都比较高,冬季则在北风方向表现出较高的汞浓度。值得注意的是,西南方向和东北方向上的风速和风向频率都不是很高,但是大气汞浓度较高。在该点位北部和东北部约15 km处分别有1座垃圾焚烧站,在北京市西南方向分布有水泥厂,污染源对该点位具体的大气汞排放贡献还有待进一步研究。

#### 4 结论

由研究结果可知,2016年10月—2017年9月,北京市大气汞浓度范围为0.48~16.25 ng/m<sup>3</sup>,均值为(3.41 ± 1.79) ng/m<sup>3</sup>,明显高于中国大气汞背景浓度。大气汞浓度整体表现出夜间升高,白天降低的趋势。大气汞浓度在秋季最高,为4.27 ng/m<sup>3</sup>。秋季大气汞浓度显著高于春季和夏季,可能是由不利的大气扩散条件影响导致。大气汞浓度和SO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>等浓度在0.01水平上显著正相关。结合风向和风速分析,大气汞在西南和东北方向上受到人为排放源影响较大。污染源类型分析表明,冬季大气汞与CO同源性较强,主要来自本地供暖用煤。研究中大气汞监测时间和数据还比较有限,待条件允许时,还需要进行多点的长时间高分辨率观测,尤其是进行形态汞监测分析,从而更加深入地分析北京市大气汞的分布规律和污染来源。

#### 参考文献(References):

- [1] LINDBERG S, BULLOCK R, EBINGHAUS R, et al. A Synthesis of Progress and Uncertainties in Attributing the Sources of Mercury in Deposition [J]. *AMBIO*, 2007, 36: 19-32.
- [2] VALENTE R J, SHEA C, HUMES K L, et al. Atmospheric Mercury in the Great Smoky Mountain Compared to Regional and Global Levels [J]. *Atmospheric Environment* 2007, 41(9): 1 861-1 873.
- [3] FU X W, FENG X B, DONG Z Q, et al. Atmospheric Gaseous Elemental Mercury (GEM) Concentrations and Mercury Depositions at a High-Altitude Peak in South China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(5): 2 425-2 437.
- [4] FU X W, FENG X B, ZHU W Z, et al. Total Gaseous Mercury Concentrations in Ambient Air in the Eastern Slope of Mt Gongga, South-Eastern Fringe of the Tibetan Plateau [J]. *China, Atmospheric Environment*, 2008, 42: 970-979.
- [5] FU X W, FENG X B, LIANG P, et al. Temporal Trend and Sources of Speciated Atmospheric Mercury at Waliguan GAW Station. Northwestern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(4): 1 951-1 964.
- [6] WAN Q, FENG X B, LU J L, et al. Atmospheric Mercury in Changbai Mountain Area, Northeastern China I: The Seasonal Distribution Pattern of Total Gaseous Mercury and Its Potential Sources [J]. *Environmental Research* 2009, 109: 201-206.
- [7] FU X W, FENG X B, SHANG L H, et al. Two Years of Measurement of Atmospheric Total Gaseous Mercury (TGM) at a Remote Site in Mt Changbai Area, Northeastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2012, 12(9): 4 215-4 226.
- [8] Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), and United Nations Environment Programme (UNEP): Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment [R]. Geneva: AMAP 2008.
- [9] WANGBERG I, MUNTHER J, BERG T, et al. Trends in Air Concentration and Deposition of Mercury in the Coastal Environment of the North Sea Area [J]. *Atmospheric Environment* 2007, 41(12): 2 612-2 619.
- [10] DAVID G S, HANNAH M H, LU Z F, et al. Global and Regional Trends in Mercury Emissions and Concentrations, 2010-2015 [J]. *Atmospheric Environment* 2019, 201: 417-427.
- [11] LIU S L, NADIM F, PERKINS C, et al. Atmospheric Mercury Monitoring Survey in Beijing, China [J]. *Chemosphere* 2002, 48: 97-107.
- [12] 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): 1 656-1 657.
- DI Yi'an, YANG Yongjie, MA Zhiqiang, et al. Analysis of Ambient Mercury Characteristics in Northern Beijing City [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(10): 1 656-1 657.
- [13] WANG Z W, CHEN Z S, DUAN N, et al. Gaseous Elemental Mercury Concentration in Atmosphere at Urban and Remote Sites in China [J]. *Journal of Environmental Sciences* 2007, 19: 176-180.
- [14] 张艳艳, 修光利, 张大年, 等. 上海市大气总汞季节

- 变化特征及与气象条件的关系[J].环境科学与技术 2012,35(1):155-158.
- ZHANG Yanyan, XIU Guangli, ZHANG Danian, et al. Total Gaseous Mercury in Ambient Air of Shanghai: Its Seasonal Variation in Relation to Meteorological Condition[J]. Environmental Science & Technology, 2011,34(12):155-158.
- [15] 张晓华,吴福全,邹强,等.苏州环境空气汞污染的特征初步分析[J].污染防治技术 2014,27(4):1-5.
- ZHANG Xiaohua, WU Fuquan, ZOU Qiang, et al. Characterization of Ambient Air Mercury Pollution in Suzhou City[J]. Pollution Control Technology 2014,27(4):1-5.
- [16] HONG Q Q, XIE Z Q, LIU C, et al. Speciated Atmospheric Mercury on Haze and Non-haze Days in an Inland City in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics 2016,16(21):13 807-13 821.
- [17] 满洪喆,杨永奎,王定勇.重庆市主城区大气汞调查研究[J].西南大学学报 2009,31(9):131-137.
- MAN Hongzhe, YANG Yongkui, WANG Dingyong. Investigation of Atmospheric Mercury in the Main Urban Area of Chongqing, Journal of Southwest University( Natural Science Edition), 2009,31(9):131-137.
- [18] 周静,张凯,柴发合,等.株洲夏季大气中气态总汞浓度特征[J].中国环境监测 2015,31(5):50-56.
- ZHOU Jing, ZHANG Kai, CHAI Fahe, et al. Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations in Zhuzhou City During Summertime[J]. Environmental Monitoring in China 2015,31(5):50-56.
- [19] 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.
- [20] 刘明,陈来国,陶俊,等.广州市大气气态总汞含量季节和日变化特征[J].中国环境科学 2012,32(9):1 554-1 558.
- LIU Ming, CHEN Laiguo, TAO Jun, et al. Seasonal and Diurnal Variation of Total Gaseous Mercury in Guangzhou City [J]. China Environmental Science, 2012,32(9):1 554-1 558.
- [21] 付学吾,冯新斌.贵阳市2001/2002和2009/2010两个年度大气气态总汞浓度变化特征及其对区域大气汞排放强度的指示意义[J].矿物岩石地球化学学报 2015,34(2):242-249.
- FU Xuewu, FENG Xinbin. Variations of Atmospheric Total Gaseous Mercury Concentrations for the Sampling Campaigns of 2001 /2002 and 2009 /2010 and Implications of Changes in Regional Emissions of Atmospheric Mercury [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry 2015,34(2):242-249.
- [22] ZHANG L, WANG S X, WANG L, et al. Atmospheric Mercury Concentration and Chemical Speciation at a Rural Site in Beijing, China: Implications of Mercury Emission Sources [J]. Atmospheric Chemistry and Physics 2013,13(20):10 505-10 516.
- [23] 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 Hongying, WANG Shuxiao, WANG Long, et al. Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China [J]. Environmental Science 2013,34(1):1-7.
- [24] 王丽涛,张强,郝吉明,等.中国大陆CO人为源排放清单[J].环境科学学报 2005,25(12):1 580-1 585.
- WANG Litao, ZHANG Qiang, HAO Jiming, et al. Anthropogenic CO Emission Inventory of Mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005,25(12):1 580-1 585.
- [25] WU Y, WANG S X, STREETS D G, et al. Trends in Anthropogenic Mercury Emissions in China from 1995 to 2003 [J]. Environmental Science & Technology, 2006,40(17):5 312-5 318.
- [26] WEISS-PENZIAS P, JAFFE D, PHIL S, et al. Quantifying Asian and Biomass Burning Sources of Mercury Using the Hg/CO Ratio in Pollution Plumes Observed at the Mount Bachelor Observatory [J]. Atmospheric Environment 2007,41(21):4 366-4 379.