

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0282

张子睿, 刘哲, 戴潞泓, 等. 2018. 2017 年厦门金砖会晤期间气象因素与管控措施对空气质量的影响[J]. 环境科学学报, 38(11): 4464-4471

Zhang Z R, Liu Z, Dai L H, et al. 2018. The influence of meteorological factors and control measures on air quality during the 2017 Xiamen BRICS summit [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(11): 4464-4471

## 2017 年厦门金砖会晤期间气象因素与管控措施对空气质量的影响

张子睿<sup>1</sup>, 刘哲<sup>1</sup>, 戴潞泓<sup>1</sup>, 朱恒<sup>1</sup>, 戴楠珍<sup>2</sup>, 蒋冬升<sup>2</sup>, 胡清华<sup>2</sup>, 陈晓秋<sup>2</sup>, 吴水平<sup>1,\*</sup>

1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102

2. 福建省环境监测中心站, 福州 350003

收稿日期: 2018-04-15 修回日期: 2018-07-01 录用日期: 2018-07-01

**摘要:** 2017 年厦门金砖会晤期间采取了大气污染临时管控措施, 使 AQI 小时值和日均值均达到了双优的预期目标。本文根据管控措施实施的前、中、后阶段, 厦门及周边城市大气污染物浓度的变化, 对气象因素和人为因素的影响分别进行分析。结果发现, 气态污染物对临时管控措施的敏感性最强, SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的降幅(39.9% 和 25.6%) 明显高于 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的降幅(5.5% 和 4.8%)。台风外围带来的大风和降水可显著改变大气污染物的周期性变化规律。大气 PM<sub>2.5</sub> 组成及 SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、OC/EC 和 WSOC/OC 等比值变化显示机动车(尤其是柴油货车)是本地区大气污染物的重要来源。控制变量分析显示, 厦门金砖会晤期间气象因素对颗粒物和 NO<sub>2</sub> 削减的贡献更大(20.3%), 而临时管控措施对 SO<sub>2</sub> 的削减效果更明显(23.2%), 且有一半以上(51%~64%) 的大气污染物来自外来源输送。

**关键词:** 管控措施; 气象因素; 空气质量; PM<sub>2.5</sub>

文章编号: 0253-2468(2018)11-4464-08 中图分类号: X51 文献标识码: A

## The influence of meteorological factors and control measures on air quality during the 2017 Xiamen BRICS summit

ZHANG Zirui<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>1</sup>, DAI Luhong<sup>1</sup>, ZHU Heng<sup>1</sup>, DAI Nanzhen<sup>2</sup>, JIANG Dongsheng<sup>2</sup>, HU Qinghua<sup>2</sup>, CHEN Xiaochu<sup>2</sup>, WU Shuiping<sup>1,\*</sup>

1. College of Environments & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102

2. Environmental Monitoring Central Station of Fujian Province, Fuzhou 350003

Received 15 April 2018; received in revised form 1 July 2018; accepted 1 July 2018

**Abstract:** The hourly and daily means of AQI were both below 50 (perfect level) during the 2017 Xiamen BRICS Summit due to the temporary air pollution control measures. In this study, the influence of meteorological factors and control measures on the air pollutants were discussed based on their variations during the pre-control, under-control and after-control periods. The results showed that gaseous pollutants were more sensitive to the control measures than that of particulate matters. The drops of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> during the under-control period were 39.9% and 25.6%, respectively which were much higher than those of PM<sub>2.5</sub> (5.5%) and PM<sub>10</sub> (4.8%). The high winds and rainfall caused by Typhoon Mawar could significantly reduce the air pollutant levels and their periodicities. The daily variations of major components in PM<sub>2.5</sub> and the ratios of SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OC/EC and WSOC/OC indicated that the vehicle exhaust especially heavy duty diesel truck was the major source of air pollutants in Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou cities. Around 20.3% drop of NO<sub>2</sub> during the BRICS Summit was attributed to the meteorological factors while 23.2% drop of SO<sub>2</sub> was due to the influence of temporary control measures. More than half (51%~64%) of the air pollutants in Xiamen was from regional transport during the under-control period.

**Keywords:** control measures; meteorological factors; air quality; PM<sub>2.5</sub>

基金项目: 国家重点研发计划(No.2016YFC0502901); 国家自然科学基金(No.41471390); 厦门大学校长基金本科生项目(No.20720162006)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0502901), the National Natural Science Foundation of China (No.41471390) and the President Foundation of for Undergraduate Program in Xiamen University (No.20720162006)

作者简介: 张子睿(1996—) 男, E-mail: 476903038@qq.com; \* 责任作者, E-mail: wsp@xmu.edu.cn

Biography: ZHANG Zirui (1996—), male, E-mail: 476903038@qq.com; \* Corresponding author, E-mail: wsp@xmu.edu.cn

## 1 引言( Introduction)

近年来,随着我国经济和城市化的快速发展,化石能源消耗快速增加的同时,排放的大气污染物大大超出了环境的承载能力,出现了以  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  为首要污染物的大气复合污染( Fann *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2014). 但由于大气污染物排放清单存在较大的不确定性,空气质量模式的情景分析往往偏离实际观测结果,而影响空气质量改善措施的具体实施效果( Chang *et al.*, 2004). 如能针对性地减少污染源排放,并将实测结果与模拟结果进行比较验证,对完善污染物排放清单及提高本地化空气质量模式的准确度都具有重要意义,而举办国际赛事、国际会议和国家大型活动采取的临时管控措施,则可为空气质量模式的验证提供绝好的机会( Zhou *et al.*, 2010).

王占山等( 2016) 将北京 APEC 会议期间的大气污染物浓度与往年具有相似气象条件时段的污染物浓度进行对比,发现 APEC 期间的临时减排措施使得  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度分别降低了 74.1%、48.0%、66.6%和 64.7%; 与同年 10 月份的大气污染过程相比, APEC 会议期间同样在不利气象条件下,呈现出管控措施后  $PM_{2.5}$  浓度峰值明显降低,积累速度明显减缓的趋势. 康志明等( 2016) 基于 CAMx 模式模拟的结果,发现 2015 年北京九三阅兵期间与 2014 年同期相比,气象条件的作用对  $PM_{2.5}$  浓度下降的贡献率达 73%,而相同气象条件的模拟显示管控措施使  $PM_{2.5}$  浓度下降 33%,进而估算出本地管控措施对空气质量改善的贡献率约 72%,周边地区减排的贡献率约 28%. 赵军平等( 2017) 在杭州 G20 峰会期间的研究发现,机动车限行是杭州  $NO_2$  降低的主要原因,但不利气象条件却使得  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$  和  $O_3$  出现不同程度的增长,但增幅明显低于周边城市,表明管控措施对杭州空气质量的确具有一定的改善作用.

尽管厦门由于海风稀释而具有名列前列的空气质量,但由于汽车保有量和港口吞吐量的快速增加,  $NO_2$  和  $O_3$  对空气质量的影响呈现逐年增强的态势( 2017 中国生态环境状况公报, 2018). 为保障 2017 厦门金砖会晤期间的空气质量,福建省在借鉴其它城市举办重大活动时的保障经验,在厦门及周边城市采取了机动车限行、工地扬尘治理、不达标排放企业整治等措施,使得会晤期间( 2017 年 9 月 3

日—9 月 5 日) 厦门空气质量达到优级水平. 本研究于金砖会晤前后,在厦门、漳州和泉州( 厦漳泉) 共设置了 5 个采样点进行大气  $PM_{2.5}$  的采集与主要化学组成分析,并结合同期气象要素和可能的污染减排措施,探讨了空气质量保障措施的实施效果,可为厦门市大气污染治理及其它地区进行类似活动提供参考.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 样品采集与相关数据来源

为保障金砖会晤期间空气质量,厦门市在 2017 年 8 月 31 日—9 月 6 日采取了本地车单双号限行,非闽 D 车、大型货车和危险化学品车辆限制通行的管制措施,而在厦漳泉地区的重污染企业及厦门本地的建筑工地都要求停产停工. 与厦漳泉的严格管控措施相比,福建省其它城市的管控措施力度相对较小. 据以上管控措施,本研究将 2017 年 8 月 24 日—8 月 30 日、8 月 31 日—9 月 6 日和 9 月 7 日—9 月 13 日分别定为“管控前”、“管控中”和“管控后”阶段,以此对不同阶段厦门市的空气质量进行比较分析; 另外,为研究周边城市对厦门空气质量的影响,对泉州、漳州、龙岩、莆田、福州、南平、三明、梅州、汕头、潮州、揭阳和金门在以上 3 个阶段的空气质量也进行了比较分析. 厦门及周边各城市的 AQI、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  等数据来自空气质量在线分析平台( <https://www.aqistudy.cn/>), 金门县的大气监测数据来自台湾地区的行政环保署网站( <http://taqm.epa.gov.tw>), 其 AQI 值按照 GB3095-2012 的方法由实测污染物数据计算得到. 厦门市狐尾山气象站的气象参数来自世界气象组织( <https://rp5.ru/>), 台风信息来自中央气象台台风网( <http://typhoon.nmc.cn/web.html>), 厦门市混合层高度数据来自中国科学院城市环境研究所的同期监测数据( AGHJ-I-LIDAR, 中科光电).

金砖会晤期间,厦门及周边地区大气  $PM_{2.5}$  采样点和区域内空气质量自动站位置如图 1 所示. 厦大站( S1) 位于厦门大学海洋楼,处于厦门岛最南端,距离海边约 50 m; 泉州市站( S2) 位于泉州市环境监测中心站,处于城市密集区; 南安一中( S3) 处于厦门岛东北方向; 漳州市站( S4) 和龙海中医院站( S5) 处于九龙江河口,位于厦门岛的西侧. 厦门市有 4 个空气自动站,其中溪东( A1) 位于汀溪水库,是厦门市的对照点,周围没有污染源; 湖里中学( A2) 和洪

文(A4)处于厦门岛城区内,受机动车影响明显;鼓浪屿(A3)处于九龙江河口下游和厦门西港航线内,本地没有机动车,但受海上船舶及九龙江河口上游的影响较大.A5位于金门县环保局,位于厦门岛东侧,周围以农田为主.PM<sub>2.5</sub>采用多通道环境空气颗粒物采样器(ZR-3930,青岛众瑞)进行收集,流量为16.7 L·min<sup>-1</sup>,采样时间为2017年8月31日—9月7日,每次采集22 h(上午8:00—次日上午6:00).颗粒物收集于石英滤膜上(25000 QAT-UP, Pall Co.),使用前于马弗炉600 °C焙烧4 h以去除杂质,采样后经恒重、称重,结合采样体积计算得到PM<sub>2.5</sub>质量浓度.

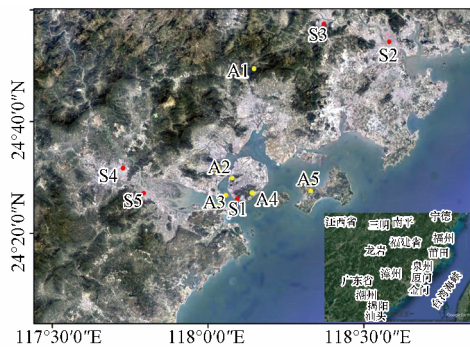


图1 大气PM<sub>2.5</sub>采样点及空气自动站位置图

Fig.1 PM<sub>2.5</sub> sampling sites and air quality auto stations

## 2.2 主要化学组成分析

截取部分滤膜(2个直径10 mm膜片),用超纯水浸泡萃取,经过0.22 μm滤头过滤后用离子色谱仪(PIC-10A,青岛普仁)分析主要水溶性离子SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和K<sup>+</sup>.截取0.49 cm<sup>2</sup>膜片,采用气溶胶碳分析仪(DRI 2001A,美国沙漠所)对有机碳(OC)和元素碳(EC)进行测定,以蔗糖作标准进行定量.截取1个直径10 mm膜片,用纯水萃取,经0.22 μm滤头过滤后,滴加磷酸酸化后进行水溶性有机碳(WSOC)的测定(TOC-VCPH, Shimadzu Co.).截取2个直径10 mm膜片,用硝酸和双氧水混合液进行消解,使用电感耦合等离子体质谱(7700X, Agilent)进行元素测定,测定元素种类包括Be、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Ba和Pb.化学组成分析过程中,每批样品有空白平行及空白加标样品,以检测分析流程中可能的干扰并进行回收率校正.

## 3 结果与讨论(Results and discussion)

### 3.1 金砖会晤期间区域空气质量

为探究厦门及周边城市临时管控措施的成效,参照高庆先等(2015)的方法,对管控前(2017-08-24—08-30)、管控中(2017-08-31—09-06)和管控后(2017-09-07—09-13)3个阶段的AQI值进行了比较(表1).从表1中的数据可以看出,厦门及周边城市的空气质量在管控前、中、后3个阶段整体情况良好.厦漳泉地区的AQI值,在金砖会晤的3 d内,其空气质量都是优(AQI < 50),达到预期目标.厦门及周边城市AQI的整体变化规律如下:在“管控前”阶段,AQI值呈现先降低后升高的趋势,其中厦门、金门整体的空气质量一直处于优的水平,漳州、汕头、揭阳则整体处于良的水平,其它城市介乎两者之间;在“管控中”阶段,受管控措施和有利气象条件的共同影响,各城市的AQI整体水平达到最低,厦门的AQI仍处于较低水平,会晤期间(9月3日—9月5日)的AQI均值仅为35;在“管控后”阶段,随着管控措施的取消,加之在广东陆丰市登陆的台风“玛娃”在9月4日转为“热带低压”,使得有利于污染扩散的气象条件也逐渐消失.这些因素共同导致厦门及周边城市的AQI都出现一个明显的增加,空气质量基本回到“管控前”的水平,其中厦门和漳州在9月6日AQI值升高最为突出.

金砖会晤期间,福建省不同城市的大气污染临时管控措施存在一定差异,大气扩散条件也略有不同,因此不同城市不同污染物较往年同期的降幅也存在差别.参考赵辉等(2017)对杭州及周边城市往年同期降幅的研究方法,将厦门及周边城市2017年与2015—2016年同期空气质量的变幅整理于表2.从表2中可知,厦门及周边城市各种污染物在“管控中”的浓度(除O<sub>3</sub>外)较往年同期整体呈下降趋势,特别是管控措施最为严格的厦漳泉地区,各种污染物的降幅明显高于其它城市,如厦漳泉的AQI降幅均值为14.1%,高于其它地区降幅均值(3.1%),厦漳泉的PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>降幅均值为42.2%和41.1%,也高于其它地区的降幅均值(28.9%和20.0%).直接受污染减排影响的一次污染物SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>在厦漳泉的降幅均值分别高达64.3%和42.8%,显著高于其它地区的9.8%和15.1%.这些数据显示,厦漳泉的管控措施使得本地区大气污染物浓度出现明显下降,其降幅最大的SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>可能直接受到重污染企业与工地停工及车辆限行的影响.

表 1 厦门及周边城市金砖会晤期间空气质量指数

Table 1 Comparison of the AQI values in Xiamen and its surrounding cities during the BRICS Summit

| 阶段               | 日期   | 厦门 | 漳州 | 泉州 | 福州 | 龙岩 | 南平  | 宁德 | 三明 | 莆田 | 汕头 | 梅州 | 揭阳 | 潮州 | 金门 |
|------------------|------|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 管<br>控<br>前      | 8.24 | 27 | 34 | 31 | 34 | 47 | 39  | 46 | 36 | 54 | 38 | 28 | 34 | 34 | 30 |
|                  | 8.25 | 45 | 79 | 81 | 60 | 36 | 43  | 49 | 53 | 65 | 33 | 37 | 65 | 43 | 32 |
|                  | 8.26 | 36 | 55 | 34 | 19 | 42 | 28  | 21 | 30 | 23 | 51 | 46 | 69 | 57 | 25 |
|                  | 8.27 | 27 | 32 | 27 | 32 | 27 | 27  | 21 | 26 | 33 | 29 | 20 | 22 | 22 | 18 |
|                  | 8.28 | 42 | 44 | 76 | 76 | 34 | 39  | 46 | 44 | 82 | 26 | 27 | 36 | 33 | 40 |
|                  | 8.29 | 49 | 99 | 42 | 43 | 43 | 45  | 44 | 53 | 38 | 84 | 40 | 81 | 94 | 30 |
|                  | 8.30 | 38 | 57 | 36 | 35 | 37 | 32  | 39 | 35 | 36 | 51 | 60 | 77 | 47 | 31 |
| 管<br>控<br>中<br>期 | 8.31 | 44 | 52 | 49 | 55 | 49 | 48  | 59 | 51 | 66 | 55 | 54 | 70 | 50 | 46 |
|                  | 9.1  | 45 | 55 | 52 | 57 | 55 | 44  | 72 | 56 | 69 | 54 | 50 | 57 | 50 | 47 |
|                  | 9.2  | 47 | 50 | 48 | 50 | 62 | 59  | 68 | 59 | 65 | 46 | 42 | 50 | 42 | 36 |
|                  | 9.3  | 40 | 41 | 36 | 36 | 39 | 43  | 32 | 48 | 41 | 41 | 33 | 41 | 40 | 22 |
|                  | 9.4  | 33 | 35 | 32 | 34 | 33 | 41  | 36 | 35 | 40 | 39 | 33 | 40 | 37 | 24 |
|                  | 9.5  | 31 | 42 | 44 | 64 | 37 | 37  | 62 | 40 | 64 | 33 | 38 | 50 | 47 | 36 |
|                  | 9.6  | 70 | 74 | 48 | 43 | 52 | 55  | 37 | 68 | 46 | 70 | 51 | 70 | 94 | 39 |
| 管<br>控<br>后      | 9.7  | 39 | 60 | 47 | 79 | 45 | 47  | 67 | 47 | 56 | 54 | 57 | 55 | 87 | 30 |
|                  | 9.8  | 36 | 56 | 43 | 43 | 33 | 34  | 28 | 41 | 60 | 35 | 31 | 43 | 48 | 24 |
|                  | 9.9  | 29 | 44 | 37 | 61 | 39 | 33  | 52 | 43 | 48 | 33 | 41 | 45 | 62 | 16 |
|                  | 9.10 | 31 | 55 | 42 | 68 | 32 | 50  | 62 | 48 | 52 | 32 | 46 | 49 | 49 | 24 |
|                  | 9.11 | 46 | 80 | 85 | 48 | 47 | 106 | 60 | 56 | 89 | 41 | 53 | 56 | 80 | 33 |
|                  | 9.12 | 47 | 55 | 54 | 47 | 46 | 63  | 87 | 46 | 46 | 69 | 52 | 71 | 50 |    |
|                  | 9.13 | 55 | 75 | 70 | 45 | 40 | 91  | 75 | 40 | 79 | 69 | 44 | 80 | 65 |    |

注: 加粗代表空气质量为优(0~50); 其他代表空气质量为良(51~100)。

表 2 厦门及周边城市空气污染物在金砖会晤期间与历史同期(2015—2016 年)比较

Table 2 The relative variations of air pollutant concentrations during the 2017 BRICS Summit with respect to the same period in 2015—2016 in Xiamen and its surrounding cities

| 指标   | 厦门     | 漳州     | 泉州     | 福州      | 龙岩     | 南平     | 宁德     | 三明     | 莆田     | 汕头     | 梅州     | 揭阳     | 潮州      |
|--|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| AQI  | -8.7%  | -8.4%  | -25.5% | -3.3%   | -9.0%  | -6.8%  | 6.4%   | 4.7%   | -4.5%  | 6.6%   | -6.23% | -5.9%  | -13.2%  |
| PM <sub>2.5</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | -45.1% | -34.9% | -46.7% | -28.3%  | -28.0% | -49.6% | -39.2% | -35.9% | -38.9% | 2.3%   | -15.3% | -29.0% | -27.1%  |
| PM <sub>10</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )  | -44.2% | -30.8% | -48.0% | -32.5%  | -21.5% | -34.2% | -17.4% | -33.8% | -29.1% | 4.4%   | -1.6%  | -16.2% | -18.0%  |
| SO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )   | -60.9% | -68.0% | -64.1% | 28.8%   | -6.8%  | -45.0% | 11.4%  | -17.4% | 13.1%  | -20.0% | -10.3% | -34.0% | -17.44% |
| NO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )   | -44.4% | -60.4% | -23.7% | -27.34% | -21.8% | -20.6% | -36.3% | -23.6% | -26.6% | 6.16%  | 31.78% | -12.6% | -20.4%  |
| O <sub>3</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )    | 2.74%  | -8.4%  | 24.3%  | 17.51%  | -1.3%  | 6.5%   | 11.5%  | 37.1%  | -0.4%  | 11.99% | -4.73% | 0.1%   | -10.3%  |

### 3.2 气象因素对空气质量的影响

厦门处于典型的东亚季风区,夏季来自海上的干净气团,有利于污染物的扩散(郑秋萍等,2016)。为此,本研究选择 2014—2017 年 8 月 24 日—9 月 13 日的 AQI、PM<sub>2.5</sub>和气象数据,对气象要素和空气质量之间的关系进行分析(图 2)。从图 2 可以明显看出,厦门市 AQI 和 PM<sub>2.5</sub>的变化趋势极为类似,且厦门市自动站的 AQI 小时值为良时,主要污染物以 PM<sub>2.5</sub>居多,其次为 PM<sub>10</sub>,推测此期间颗粒物对空气质量的影响占主。2017 年 8 月 25 日—9 月 10 日的 AQI 值与 PM<sub>2.5</sub>浓度与其它年份相比整体偏低,可能

与较高的风速有利于扩散稀释而较低的湿度不利于二次转化有关(Yang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2013)。

台风“玛娃”于 8 月 31 日 5 时在南海东北部生成(热带低压)随后 9 月 1 日 02 时转为热带风暴并向广东省方向移动,9 月 2 日 15 时转为强热带风暴继续向西北方向移动,9 月 3 日 21 时降级为热带风暴并在广东陆丰市登陆,登陆后向偏西方向移动并在 9 月 4 日 02 时降级为热带低压。受台风外围影响,厦门地区自 9 月 2 日 18 点左右颗粒物出现明显下降,9 月 3 日夜晚—9 月 4 日凌晨出现的强降水,

使颗粒物浓度达到最低(图3).在“管控后”阶段,随着台风影响的减弱,厦门的风速快速下降到 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之下,并且温度出现快速升高,形成了不利于污染物扩散的静稳天气,使得大气污染物浓度在9月6日—9月7日也出现了明显峰值(图3).除此之外,混合层(边界层)高度也影响着污染物的稀释与扩散.在“管控前”和“管控后”两个阶段,厦门的混合层高度都呈现周期性变化,但在“管控中”阶段,混合层高度达到1000 m 以上的时间明显增多,也有利于各种污染物的稀释和垂直输送,降低其污染浓度.从图3还可以看出,AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 的变化折线图极为相似,呈现周期性的变动趋势;在9月3日—9月5日期间,污染物浓度整体下降,峰值也相应下降;在9月6日之后,各指标又恢复为9月3日前的周期性变化,表明台风天气对空气质量的影响明显.与颗粒物相比, $\text{O}_3$ 受光氧化条件的影响更加明显,在9月3日—9月5日的阴雨天气期间出现极低值.但仅从气象条件的差异难以完全解释2017年大气污染物浓度偏低的现象.

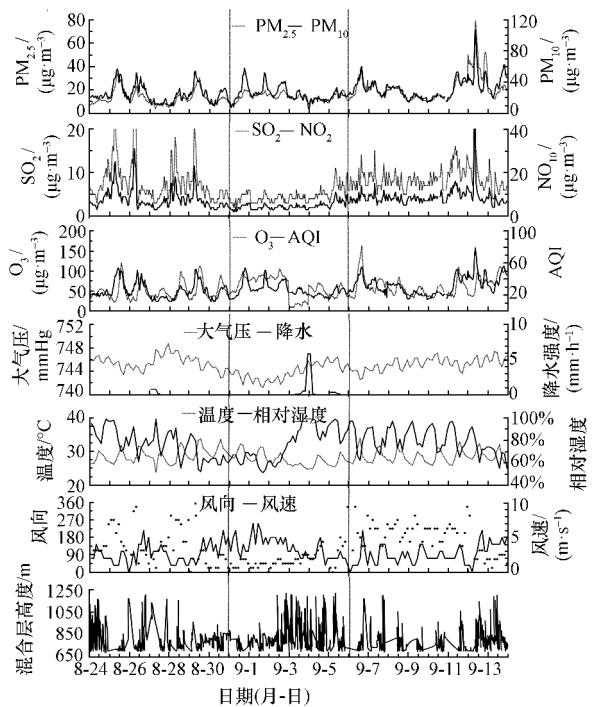


图3 金砖会晤期间各污染物浓度与气象因素逐时变化图  
Fig.3 Hourly variation of air pollutants and Meteorological parameters during the BRICS Summit 3.3 临时管控措施对空气质量的影响

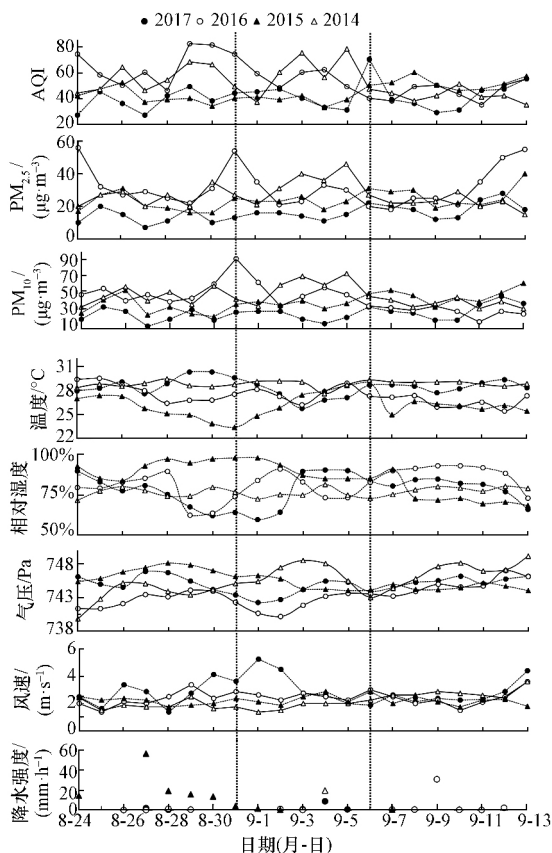


图2 厦门历年同期空气质量与气象参数对比图  
Fig.2 Diurnal variations of air quality and meteorological factors from August 24 to September 13 in in different year

北京2014 APEC会议期间的临时管控措施涵盖地区包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东等地的24个地市,并组织了大量的人力开展相应的督查行动(贾佳等,2016; APEC会议空气质量保障方案,2014).杭州G20峰会期间,其临时管控区域包括浙江省境内的11个城市,并细化了核心区、严控区和管控区(G20峰会浙江省环境保障工作方案,2016).相比之下,厦门金砖会晤期间的临时管控区域更小(以厦门岛为主),程度也较轻(有选择性的车辆限行、工厂和工地停工),但却达到了小时值和日均值双优的目标.除有利于扩散稀释的气象条件外,具有针对性的大气污染临时管控措施的作用也不可忽视.为了科学区分气象条件与人为管控措施对厦门金砖会晤期间空气质量改善的贡献,本研究采取控制变量的方法,即采用“比较相同气象条件下,临近监测站点的污染物在不同时期的变幅”、“比较不同时期污染物之间的比值变化”等方法,来评估人为管控措施的“净减排效益”.厦门市面积小( $1700\text{ km}^2$ ),溪东背景点与湖里中学的直线距离小于30 km,因此,可认为辖区内气象条件近似相同,不同空气质量监测自动站的污染物浓度主要受周边人类活动的影响.厦门岛内有洪文、鼓浪屿和湖里

中学 3 个国控点,处于人口和交通密集区域,在金砖会晤期间受到管控措施的影响最大;而溪东站点处于远郊区,本地污染源较少,可反映厦门市空气质量的背景值.表 3 给出了不同站点不同管控阶段  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的变幅.可以看出,洪文、鼓浪屿和湖里中学 3 个站点的  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  浓度自“管控前”到“管控中”阶段的降幅和“管控中”到“管控后”阶段的升幅,明显高于溪东监测点相应污染物的变幅.通过这明显的差异对比,可以反映出在相似气象条件下,厦门岛内的管控措施有明显的“净减排效益”.

表 3 管控期间厦门空气质量国控点  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  浓度变化分析

Table 3 The variations of  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  at different air quality auto stations in the different control periods

| 站点   | $\text{NO}_2$ 变幅 |       | $\text{SO}_2$ 变幅 |       |
|------|------------------|-------|------------------|-------|
|      | 前至中              | 中至后   | 前至中              | 中至后   |
| 洪文   | -21.3%           | 14.2% | -23.4%           | 50.1% |
| 鼓浪屿  | -32.0%           | 30.6% | -51.7%           | 96.3% |
| 湖里中学 | -23.7%           | 34.3% | -25.6%           | 79.9% |
| 溪东   | -7.5%            | 40.1% | -9.5%            | 30.9% |

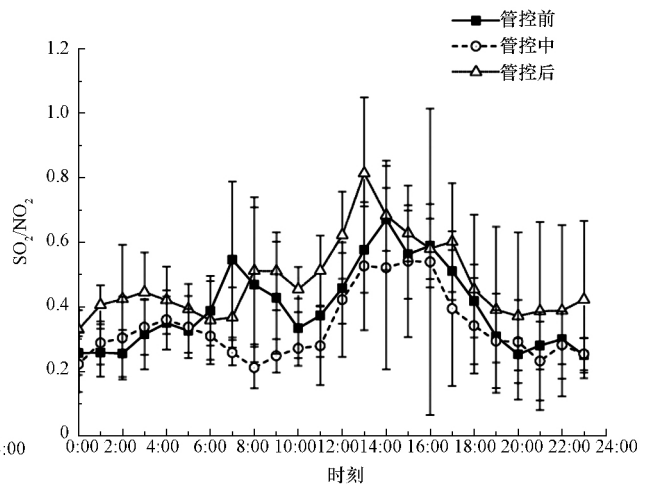
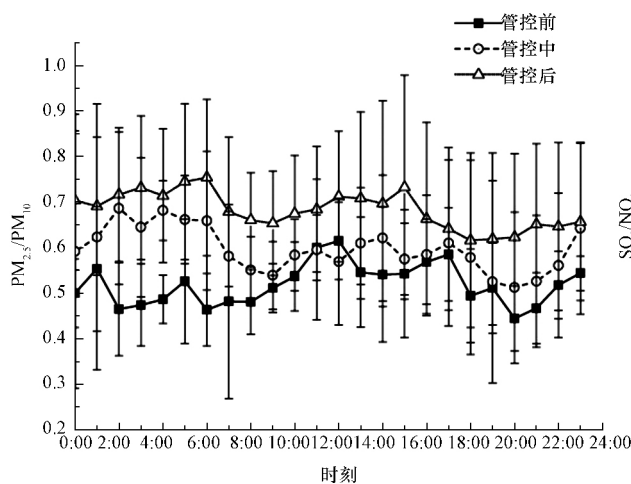


图 4 金砖会晤前、中和后期  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  和  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  比值逐时变化

Fig.4 Hourly variations of  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  and  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  ratios in the different control periods

(人群活动和机动车)和潮湿天气利于  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的转化有关.柴油车由于排放  $\text{SO}_2$  比汽油车更多,车辆限行时,其相对于  $\text{NO}_2$  的变化也更明显,相应地  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  比值出现降低;在管制后阶段,由于柴油货车出行快速增加,导致  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  比值及  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度都出现同步升高.OC 和 EC 的逐日变化与  $\text{SO}_4^{2-}$  接近,但 8 月 31 日执行车辆限行后,其下降速度更快,且在车辆限行规定取消后,OC 和 EC 都出现快速上升(图 5b).与之相比,OC/EC 比值幅度不

$\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$  与  $\text{NO}_2$  的浓度均受到气象因素和人为管控措施的共同作用,而相对比值的变化则可排除气象因素的干扰,更多地反映人为管控措施的影响.从图 4 中可以看出,在“管控中”和“管控后”阶段,  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  比值偏高,即细颗粒物的比重较大,显示出建筑工地停工后,建筑扬尘等粗颗粒物的贡献降低了;  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  比值在“管控中”阶段低于“管控前”和“管控后”两个时段,表明临时管控措施改变了大气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的相对比例,且  $\text{SO}_2$  对管控措施的反馈更为敏感.

$\text{PM}_{2.5}$  及化学组分浓度受气象因素与污染来源的影响,但其组分浓度的相对组成变化,则更多受污染来源的影响.图 5 给出了大气  $\text{PM}_{2.5}$  中部分化学组成及比值的变化.自 8 月 31 日采取管控措施以来,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在不同站点之间的差异性小,且呈现先降低后增大的趋势,与  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  比值变化趋势一致,表明  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  受临时管制措施的影响明显(图 5a).管制措施取消后,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的浓度都出现明显升高,可能与排放源活动水平快速增加

大,在“管控后”阶段出现略微降低的趋势,其原因可能是 EC 的浓度增速快于一次有机碳(POC),而二次有机碳(SOC)产生受到前体物 VOCs 的累积不足和不利转化的潮湿天气的抑制.从 WSOC 的变化也可看出,其在“管控后”阶段的增速低于 OC 和 EC,且 WSOC/OC 比值在“管控中”阶段出现升高,进一步说明大气环境的 POC 在“管控中”阶段有明显下降,而在“管控后”阶段, SOC(近似于 WSOC)的累积速率低于 POC.受扬尘影响明显的 Al 和 Ca,其

在不同采样点的变化规律不尽相同,可能与不同站点周围的环境影响;而来自于垃圾焚烧和工业排放的 Zn,则具有较为一致的变化规律(图 5c).V、Ni 和 Pb 的变化规律在厦大站点的吻合度要强于其它站

点,且 V 和 Ni 的浓度也偏高,与其更靠近船舶航线有关(图 5d);漳州市站 Pb 的变化最为显著,浓度也偏高,说明该站点受交通源的影响最明显.

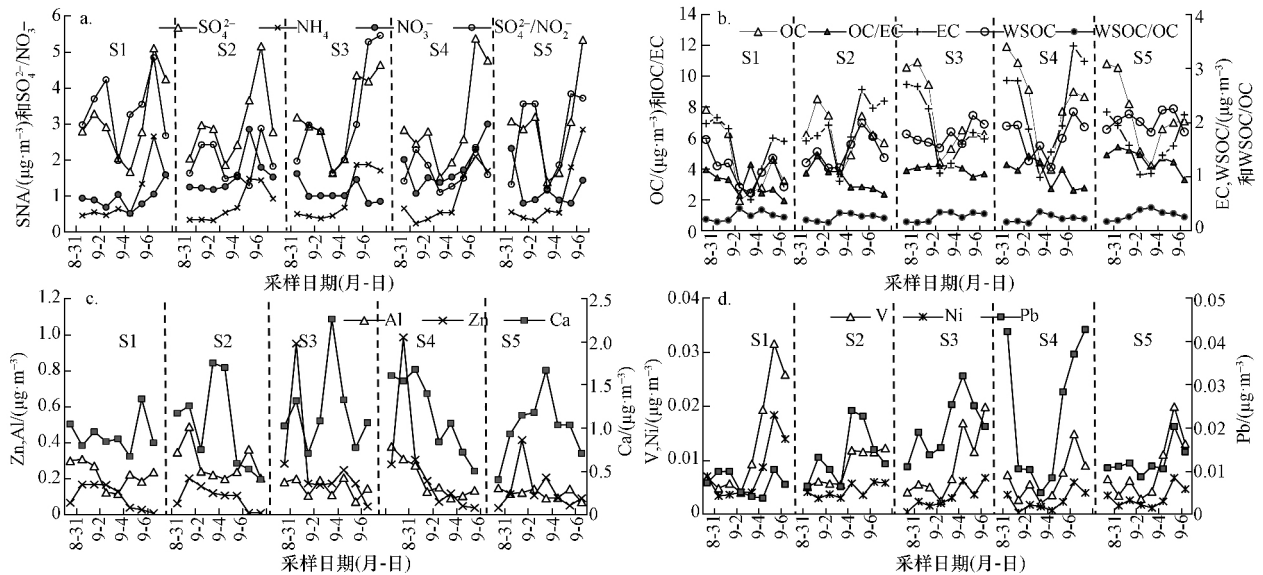


图 5 不同站点大气  $PM_{2.5}$  部分组分变化图

Fig.5 Diurnal variation of selected components in  $PM_{2.5}$  at the different sites during the BRICS Summit

### 3.4 来源贡献分析

本研究采用一种新型的针对小区域、小样本量的模型量化方法,用于定量评估气象因素与管控措施对金砖期间空气质量改善的贡献,并分不同阶段估算本地源和外地源的贡献.该方法中的气象因素贡献是指“天气条件”与“区域输送”对污染物浓度贡献的总和.本方法是基于“溪东站点可以反映厦门仅受气象因素(天气条件与区域输送)影响下的污染物水平”这一基本假设.但实际上位于厦门郊区的溪东站点和厦门岛内站点在空间上不完全重合,导致假设在某些情况下不成立,由此会增大该方法的不确定性.

将“管控中”阶段定为“管控期”,而将“管控前”和“管控后”阶段定义为“非管控期”;厦门岛内 3 个国控站点可反映厦门岛内的污染物总体水平,而厦门郊区的溪东站点处于水源保护区、几乎无污染源,可作为厦门的背景点,反映天气条件与外地源输送对厦门本地污染物水平的影响.定义厦门岛内污染物总降幅等于管控措施贡献加上气象因素贡献(此处的气象因素包括由厦门天气条件所导致的污染物浓度变化,及因天气形势、气团、风速风向等气象因素所导致的污染物区域输送).因此,将厦

门岛内 3 个站点在“管控期”与“非管控期”的降幅定义为“厦门岛内污染物总降幅”,将溪东站点的同期降幅定义为“气象因素贡献”,将两者之差定义为“管控措施”的贡献.从表 4 可知,颗粒物总体降幅不明显,管控措施对颗粒物的贡献极小,这可能是由于颗粒物自身形成机理较为复杂且在大气中寿命较长,难以通过较短的管控时间与较简单的减排方案而得到有效削减.但是气态污染物的管控效果比较明显,特别是体现在有无控制排放源下的  $SO_2$  浓度差异十分明显.

表 4 管控措施与气象因素对污染物浓度降幅的贡献

Table 4 Contributions of control measures and meteorological factors to the decrease of pollutants

| 参数     | $PM_{2.5}$ | $PM_{10}$ | $SO_2$ | $NO_2$ | $O_3$   |
|--------|------------|-----------|--------|--------|---------|
| 总降幅    | 5.51%      | 4.85%     | 39.96% | 25.65% | -25.51% |
| 管控措施贡献 | 1.11%      | 0.70%     | 23.22% | 5.35%  | 7.99%   |
| 气象因素贡献 | 4.40%      | 4.15%     | 16.74% | 20.30% | -33.50% |

利用 Meteoinfo&Traject 软件,绘制“管控中”阶段厦门溪东站点的后向轨迹图,每条轨迹都对应该一时刻的多种污染物浓度,由此可以反映不同的轨迹即不同的污染物输送通道对厦门溪东站点的贡献,厦门辖区内的轨迹认为是本地源贡献,而辖区

边界外的轨迹认为是外地源贡献.本地源轨迹与外地源轨迹中所对应的各种污染物总浓度的比例,即认为是本地源与外地源贡献的相对比例.估算结果显示,“管控中”阶段外地源输送对  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 和  $O_3$ 的贡献分别为 59.1%、63.3%、51.6%、63.4%和 57.0%,主要来自厦门东北方向的泉州和莆田等地(图 6).

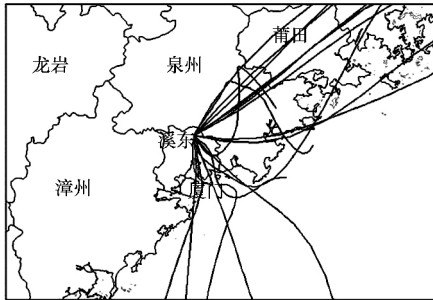


图 6 “管控中”阶段溪东站点后向轨迹图

Fig.6 Backward trajectories during the under-control period

#### 4 结论(Conclusions)

1) 2017 年厦门金砖会晤期间,受有利气象条件和临时管控措施的影响,空气质量达到优级水平.厦漳泉大气污染物浓度与历史同期相比,出现明显高于其它城市的降幅,且以  $SO_2$ 和  $NO_2$ 的降幅为最大,表明一次污染物受临时管控措施的影响更为显著.

2) 受台风外围影响,风速增大和降雨增多,除显著降低大气污染物浓度外,还能干扰大气污染物的周期性变化规律.与厦门岛外背景点相比,厦门岛内的“净减排效益”更加明显.管控前后不同阶段大气  $PM_{2.5}$  的主要化学组分,以及  $SO_2/NO_2$ 、 $SO_4^{2-}/NO_3^-$ 、 $OC/EC$  和  $WSOC/OC$  等比值的变化显示机动车(尤其是柴油货车)是本地区大气污染物的重要来源,可为本地大气污染物削减措施的制定提供科学参考.

3) 采用“管控期”大气污染物浓度相对于“非管控期”的降幅分析方法,估算出管控措施和气象因素对不同污染物浓度降幅的贡献,管控措施对气态污染物的影响大于颗粒物.基于气象信息和后向轨

迹的模型显示,金砖会晤期间,厦门有一半以上的污染物来自外来源输送.

致谢:感谢中科院城市环境研究所陈进生老师课题组提供的大气混合层厚度数据.

#### 参考文献(References):

- Chang J C, Hanna S R. 2004. Air quality model performance evaluation [J]. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 87( 1/3): 167-196
- Fann N, Risley D. 2013. The public health context for  $PM_{2.5}$  and ozone air quality trends [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6 ( 1): 1-11
- Ji D, Li L, Wang Y. 2014. The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: Insights gained from observation [J]. *Atmospheric Environment*, 92: 546-556
- Zhou Y, Wu Y, Yang L. 2010. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 44( 3): 285-293
- 王占山,李云婷,张大伟,等. 2016. 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量分析[J]. *环境科学学报*, 36( 2): 675-683
- 康志明,桂海林,王继康,等. 2016. 2015 年北京“阅兵蓝”特征及成因探讨[J]. *中国环境科学*, 36( 11): 3227-3236
- 赵军平,罗玲,郑亦佳,等. 2017. G20 峰会期间杭州地区空气质量特征及气象条件分析[J]. *环境科学学报*, 37( 10): 3885-3893
- 生态环境部. 2018. 2017 中国生态环境状况公报[Z].
- 高庆先,刘俊蓉,王宁,等. 2015. APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析[J]. *环境科学*, 36( 11): 3952-3960
- 赵辉,郑有飞,魏莉,等. 2017. G20 峰会期间杭州及周边地区空气质量的演变与评估[J]. *中国环境科学*, 37( 06): 2016-2024
- 郑秋萍,王宏,林长城,等. 2016. 海峡西岸沿海城市群大气污染物浓度特征及其与天气形势的关系[J]. *环境科学学报*, 33( 2): 356-363
- Yang Y, Liu X, Qu Y, et al. 2015. Characteristics and formation mechanism of continuous hazes in China: a case study during the autumn of 2014 in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15: 8165-8178
- Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 5685-5696
- 环境保护部. 2014. APEC 会议空气质量保障方案[Z].
- 贾佳,郭秀锐,程水源. 2016. APEC 期间北京市  $PM_{2.5}$  特征模拟分析及污染控制措施评估[J]. *中国环境科学*, 36( 8): 2337-2346
- 浙江省环境保护厅. 2016. G20 峰会浙江省环境保障工作方案[Z].