

厦门 PM_{2.5} 污染类型及其成因分析

张宁宁^{1,2}, 曹军骥^{1,2}, 赵竹子^{1,2}, 王启元^{1,2}, 庄马展³, 张杰儒³, 张学敏³

1. 中国科学院地球环境研究所 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

3. 厦门市环境监测中心站, 厦门 361012

摘要: PM_{2.5} 污染已成为目前我国空气污染领域关注的焦点问题。为研究厦门地区 PM_{2.5} 污染的不同类型, 于 2013 年 1 月、4 月、7 月和 10 月选择厦门市五个代表性环境监测站进行了同步的 PM_{2.5} 离线滤膜和在线数据采集, 并收集了同期的 AQI、SO₂、NO₂、CO、O₃ 及气象数据。对滤膜中的水溶性无机离子、元素和碳组分进行了实验分析。基于实验分析数据, 利用 IMPROVE 方程定量计算了厦门空气污染期间 PM_{2.5} 中不同组分的颗粒物消光系数。根据不同组分消光系数的大小, 将厦门市的 PM_{2.5} 污染分为三种类型: 硫酸盐主导污染类型、有机物主导污染类型以及各区域不同污染物主导污染类型。对不同污染类型的成因进行了深入分析, 发现其主要与本地污染物排放、外来污染物输送以及气象要素有关。

关键词: PM_{2.5} 污染; 能见度; 污染类型; 厦门

PM_{2.5} pollution types in Xiamen and its causes

ZHANG Ningning^{1,2}, CAO Junji^{1,2}, ZHAO Zhuzi^{1,2}, WANG Qiyuan^{1,2}, ZHUANG Mazhan³, ZHANG Jieru³, ZHANG Xuemin³

1. Key Laboratory of Aerosol Chemistry & Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

3. Xiamen Environmental Monitoring Central Station, Xiamen 361012, China

Abstract: Background, aim, and scope Under the rapid economic expansion in China, air pollution has become a serious environmental problem. Indeed, the air in China now contains high concentrations of PM_{2.5} (fine particulate matter) whose equal aerodynamic diameters are <2.5 μm (PM_{2.5}). It is a mixture of inorganic components, organic matter, and water, it have been proven to affect human health, climate, ecosystems, and agriculture, and it also has adverse environmental effects, such as decreased visibility. **Materials and methods** the offline filters for collecting PM_{2.5} were conducted at five environmental monitoring stations including Gulangyu (GLY), Huli (HL), Hongwen (HW), Jimei (JM) and Xidong (XD) in January, April, July and October in 2013. Each sample was run for 24 h with quartz and teflon filters, respectively. All the filters were weighted before

收稿日期: 2016-12-11; 录用日期: 2017-01-03

Received Date: 2016-12-11; Accepted Date: 2017-01-03

基金项目: 厦门市环保专项项目(厦环规[2013]19号(10)); 2014福建省环保厅科技项目; 国家自然科学基金项目(41673125)

Foundation Item: Xiamen Environmental Protection Special Project (No. 19(10), 2013); Science and Technology Project of Fujian Provincial Environmental Protection Department (2014); National Natural Science Foundation of China (41673125)

通信作者: 张宁宁, E-mail: zhangnn@ieecas.cn

Corresponding Author: ZHANG Ningning, E-mail: zhangnn@ieecas.cn

引用格式: 张宁宁, 曹军骥, 赵竹子, 等. 2017. 厦门 PM_{2.5} 污染类型及其成因分析 [J]. 地球环境学报, 8(1): 37–45.

Citation: Zhang N N, Cao J J, Zhao Z Z, et al. 2017. PM_{2.5} pollution types in Xiamen and its causes [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(1): 37–45.

sampling, and quartz filter samples were pre-combusted at 800 °C for 3 h. Elements were analyzed by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) using teflon filters. For quartz filters, they all were cut into two pieces, one piece was selected for detecting water soluble ions by ion chromatograph while another part were used for obtaining OC/EC by DRI Model 2001 Thermal and Optical Carbon Analyzer following the IMPROVE-A thermal/optical reflectance protocol. Meanwhile, online data of PM_{2.5} were also collected as well as the data of AQI, SO₂, NO₂, CO, O₃ and meteorological parameters in Xiamen. **Results** Using the IMPROVE equation, the extinction coefficient of different species were calculated for various air pollution types, and then according to the value of extinction coefficients, PM_{2.5} pollution can be divided into three types at Xiamen including sulfate dominated type, OM (organic matter) dominated type and different pollutants dominated type. In 26 July, Sulfate dominated type is characterized by that (NH₄)₂SO₄ has the highest contribution for extinction coefficient at all five stations, and the values were 237.0 M·m⁻¹, 371.5 M·m⁻¹, 337.0 M·m⁻¹, 277.6 M·m⁻¹ and 399.1 M·m⁻¹ for GLY, HW, HL, JM and XD, respectively. Similarly, in 12 October, OM has the highest contribution for extinction coefficient at all five stations with the value of 229.2 M·m⁻¹, 128.4 M·m⁻¹, 184.7 M·m⁻¹, 122.3 M·m⁻¹ and 183.1 M·m⁻¹ for GLY, HW, HL, JM and XD, respectively. Differently, in 21 January, the components with highest contribution to extinction coefficient is different for each station, and the greatest contributor at GLY, HW, HL, JM and XD is NH₄NO₃ (241.2 M·m⁻¹), OM (120.2 M·m⁻¹), NH₄NO₃ (226.2 M·m⁻¹), (NH₄)₂SO₄ (201.2 M·m⁻¹) and OM (212.6 M·m⁻¹), respectively. **Discussion** Analyzing the variations of AQI, SO₂, NO₂, CO, O₃ and meteorological parameters, it was concluded that sulfate type was caused by the local emissions combined with pollutants transported from long distance, OM dominated type is related to the increase of wind speed, and different pollutants dominated type was mainly due to local emissions. **Conclusions** The results indicated that decreased visibility at Xiamen is caused by various factors, such as local emissions and long-range transport. According to the species that has the greatest extinction coefficient during pollution period, the pollution type can be divided into sulfate dominated type, OM dominated type and different pollutants dominated type. **Recommendations and perspectives** It should be considered the various pollution type when the government regulate the pollution emissions to deal with the air pollution.

Key words: PM_{2.5} pollution; visibility; pollution type; Xiamen

PM_{2.5} 是指悬浮在大气中空气动力学等效直径小于等于 2.5 微米的颗粒物, 由于其粒径小, 可以进入人体肺部, 被称为细颗粒物、入肺颗粒物或细粒子。PM_{2.5} 主要来自人为活动排放, 其组成中含有有毒成分 (如重金属和多环芳烃), 部分成分对太阳光有较强的吸收特性 (如黑碳组分), 具有较长大气滞留时间等特征。因此其对环境质量、大气能见度、人体健康及气候变化均有重要影响 (曹军骥, 2012, 2014; Chow et al, 2012)。

PM_{2.5} 污染最直观的表现就是对能见度的影响, 不仅影响城市景观, 而且给交通出行带来极大不便, 进而影响民众生活 (Watson, 2002)。颗粒物对能见度的影响很复杂, 不同粒径颗粒物对光散射或吸收的能力用效率因子表征, 效率因子定义为颗粒物的有效截面与其实际总截面的比值。

由于细颗粒物的散射效率因子远大于粗颗粒物, 因此 PM_{2.5} 是导致光散射, 即造成低能见度的主要物质。城市大气中, PM_{2.5} 质量浓度在 PM₁₀ 中所占比例一般都超过 50% (Cao et al, 2005; Yang et al, 2007), 因此需关注 PM_{2.5} 对能见度下降的贡献; 除粒径大小外, 颗粒物化学组分的不同也会造成其效率因子的差异。研究表明, PM_{2.5} 中的硫酸盐、硝酸盐、有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 是使能见度降低的主要物质 (Kim et al, 2006)。此外, 气象因素 (如湿度), 对能见度的降低也有很大的影响 (Watson, 2002)。可以看出, 通过分析大气污染期间 PM_{2.5} 中不同化学组分浓度, 不仅可以定量计算不同组分对能见度的影响, 而且可以根据不同组分对能见度影响程度的大小来判断空气污染的类型。

厦门是典型的沿海城市, 冬季主要受东亚冬

季风影响, 气流主要来自陆地, 冬季是我国空气污染较为严重的季节, 特别是北方的取暖季, 在合适的气象条件下, 可能会影响到厦门地区。夏季, 主要受东亚南海热带季风和西太平洋副热带高压影响, 7—9 月是台风季节, 气流主要来自海上, 空气较为清洁。按照空气质量指数 (AQI) 进行评价, 2013 年厦门市空气质量优的天数为 78 天, 良的天数为 263 天, 优良率 93.4%, 轻度污染的天数 24 天。轻度污染天气中首要污染物为 PM_{2.5}、O₃、NO₂ 的天数分别为 11 天、7 天、6 天。表明厦门市轻度污染主要是由 PM_{2.5} 引起的。之前已有诸多工作对厦门包括 PM_{2.5} 在内的颗粒物化学组成及其来源开展了相关研究 (庄马展等, 2006a, 2006b; 庄马展, 2007; 张学敏, 2007; Zhao et al, 2011; 张杰儒, 2015)。本次工作通过建立 PM_{2.5} 组分与能见度的关系, 明确厦门 PM_{2.5} 污染类型, 进而为厦门市 PM_{2.5} 污染治理提供依据。

1 样品与数据采集分析

1.1 样品采集与分析

本次工作的数据主要分为离线和在线数据。离

线部分选择 2013 年 1 月、4 月、7 月和 10 月分别代表冬季、春季、夏季和秋季, 依托厦门市环境监测站的 5 个站点 (鼓浪屿、洪文、湖里、集美和溪东) 同步进行了细颗粒物 (PM_{2.5}) 样品采集, 各站点采样仪器如表 1 所示, 使用前均进行了对比校验。采样滤膜为石英滤膜和特氟龙滤膜同步进行。滤膜由英国 Whatman 公司生产, 直径 47 mm, 孔径小于 0.2 μm, 可以保证对颗粒物的收集效率大于 98%。石英滤膜采样前在马弗炉中高温 (800℃) 烘烤 3 h, 以防止可能的含碳物质污染。为防止污染, 各滤膜在采样前均放置在专门清洗过的片夹内, 运输途中均用铝箔和密封袋包装。采样时间选择每个月 1 日至 21 日 24 小时连续监测, 监测时段为每天的 10:00 至次日 10:00。利用特氟龙滤膜进行了元素分析, 利用石英滤膜进行了离子和碳组分分析, 相关分析参数和质控见参考文献 Cao et al (2007)、Shen et al (2009)、Zhang et al (2012)。

在线数据包括离线滤膜采样期间全天 24 小时的 AQI、SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 数据, 这 7 种要素的浓度以及同期的气象数据 (能见度、风向、风速、湿度、温度和气压) 均通过相应的环境监测站获得。

表 1 不同采样点 PM _{2.5} 采样仪器列表 Tab.1 List of sampling instrument at different sites						
滤膜种类 Filter type	采样月份 Month	鼓浪屿 Gulangyu	洪文 Hongwen	湖里 Huli	集美 Jimei	溪东 Xidong
石英 Quartz	1	Thermo 2300	MiniVol	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
	4	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
	7	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
	10	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
特氟龙 Teflon	1	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
	4	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	Thermo 2300	MiniVol
	7	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	MiniVol	MiniVol
	10	Thermo 2300	Thermo 2000i2	MiniVol	MiniVol	MiniVol

1.2 PM_{2.5} 组分消光系数计算

消光系数与可视距离的关系可以使用著名的 Koschmieder 公式计算:

$$VR=3.912/b_{ext} \tag{1}$$

公式 (1) 中 VR 代表能见度, 而 b_{ext} 代表大气消光系数。后来, 美国通过长期观测与理论研究, 建立 PM_{2.5} 组分 (主要包括: 有机物、硫

酸盐、硝酸盐、黑碳和土壤尘) 与颗粒物消光系数的定量关系, 并于 2006 年进行修正, 计算公式 (IMPROVE 方程) 如下 (Pitchford et al, 2007) :

$$b_{ext} \approx 2.2 \times f_s(RH) \times [(NH_4)_2SO_4]_{Small} + 4.8 \times f_L(RH) \times [(NH_4)_2SO_4]_{Large} + 2.4 \times f_s(RH) \times [NH_4NO_3]_{Small} + 5.1 \times f_L(RH) \times [NH_4NO_3]_{Large} + 2.8 \times [OM]_{Small} + 6.1 \times [OM]_{Large} +$$

$$10 \times [\text{EC}] + 1 \times [\text{FS}] \quad (2)$$

$$[X]_{\text{Large}} = [X]_{\text{Total}}^2 / (20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}), [X]_{\text{Total}} < 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3)$$

$$[X]_{\text{Large}} = [X]_{\text{Total}}, [X]_{\text{Total}} \geq 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4)$$

$$[X]_{\text{Small}} = [X]_{\text{Total}} - [X]_{\text{Large}} \quad (5)$$

式中, X 分别为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和有机物 (OM)。公式(2)中, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 1.375 \times [\text{SO}_4^{2-}]$; $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 1.29 \times [\text{NO}_3^-]$; $\text{OM} = 1.6 \times [\text{OC}]$; $\text{Fine Soil (FS)} = [\text{Fe}] / 0.04$ 。相对湿度增长曲线 $f_s(\text{RH})$ 、 $f_l(\text{RH})$ 参见文献 Pitchford et al (2007)。

2 结果与讨论

根据 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化, 挑选了浓度较高的 2013 年 1 月 17 日、21 日、25 日、26 日, 4 月 26 日, 7 月 12 日, 10 月 2 日、3 日、12 日、22 日进行研究。同期 AQI 值也较高, 为轻度污染, SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 和 PM_{10} 也出现较高浓度值 (图 1)。表明 $\text{PM}_{2.5}$ 污染是影响厦门空气质量的主要因素。通过对轻度污染天气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分与能见度之间关系的分析, 发现厦门市在不同日期 $\text{PM}_{2.5}$ 污染类型不同, 主要有以下 3 种类型。

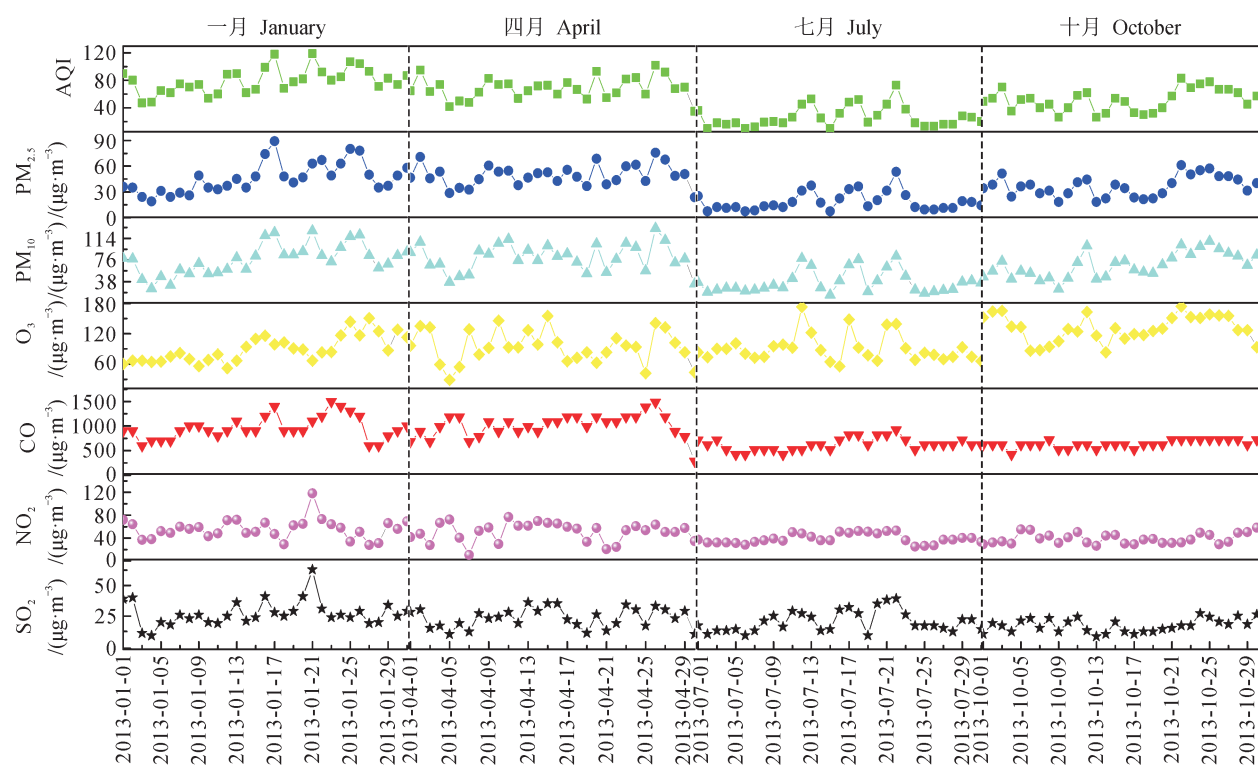


图 1 观测期间 AQI、CO、NO₂、SO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度值时间变化序列

Fig.1 Variations of AQI, CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} during sampling period

2.1 硫酸盐为主导的污染类型

该污染类型典型日期为 4 月 26 日。从表 2 可以看出, 鼓浪屿、洪文、湖里、集美和溪东的大气消光系数分别为 $520.7 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$, $769.4 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$, $723.1 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$, $511.6 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $591.1 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$, 五个站点的能见度均小于 10 km, 且均是硫酸盐对消光系数的贡献率最大, 鼓浪屿、洪文、集美、湖里贡献值相当。除硫酸盐外, 对消光系数的贡献大小依次为硝酸盐、有机物、黑碳、土壤尘和海盐; 在背景点溪东略有不同, 贡献由大到小分别为硫

酸盐、有机物、硝酸盐、黑碳、海盐和土壤尘。

为深入了解本次污染事件发生的原因, 选择洪文点污染前后一天各污染要素实时小时数据, 结合相关气象参数 (湿度、温度、风速和风向) 进行了分析 (图 2)。可以看出在 4 月 25 日, 无论是污染气体还是 PM 组分, 浓度变化较小, 一直在较低水平 ($50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 稳定小幅度波动, 且当天湿度一直稳定在 80% 左右; 进入 26 日缓慢上升, 波动明显, 大约到 26 日上午 9:00 左右, PM 浓度出现大幅度攀升, 且一直持续到 27 日凌晨到达峰

值 (PM₁₀ >200 μg·m⁻³, PM_{2.5} >110 μg·m⁻³), 之后逐渐下降。从化学组分上看 (表 3), 26 日除 Mg²⁺, Cl⁻ 和 As 外, 质量浓度、碳组分、离子组分及重金属浓度的五点均值都比 25 日和 27 日有不同程度的升高, 升高倍数从 1 到 3.2 不等, 其中升幅较大的组分为 SO₄²⁻、NH₄⁺、EC、GM 和 Cu。进一步计算其中不同化学组分占 PM_{2.5} 比例发现, 从

25 日到 26 日, 比例出现明显增大的组分是 SO₄²⁻ (由 20% 增加到 26%), NH₄⁺ 和地壳尘组分 (GM) 略微升高; 发生明显减少的组分有 NO₃⁻ (由 19% 下降到 13%) 和海盐组分, OM 变化不大。整体来看, 这次污染过程和风速、风向、湿度的转变存在一定的关系, 因此推测可能是本地污染排放叠加区域外污染物输送造成本次污染事件。

表 2 PM_{2.5} 中主要化学成分对消光系数 (单位: M·m⁻¹) 的贡献
Tab.2 Contributions from main components in PM_{2.5} to extinction coefficient (Unit: M·m⁻¹)

站点 Sites	湿度 Humidity/%	(NH ₄) ₂ SO ₄	NH ₄ NO ₃	OM	EC	GM*	海盐 Sea salt	消光系数 Extinction coefficient	能见度 Visibility/km
鼓浪屿 Gulangyu	70.5	237.0	155.1	79.1	39.4	5.5	4.6	520.7	7.5
洪文 Hongwen	67.9	371.5	231.6	115.9	36.7	7.3	6.5	769.4	5.1
湖里 Huli	61.1	337.0	201.9	125.0	45.9	6.7	6.6	723.1	5.4
集美 Jimei	71.6	277.6	98.3	75.5	44.6	10.6	5.2	511.6	7.7
溪东 Xidong	87.1	399.1	45.9	108.2	20.8	4.0	13.4	591.1	6.6

*GM (Geological Material=2.2×Al + 2.49×Si + 1.63×Ca + 1.94×Ti + 2.42×Fe)

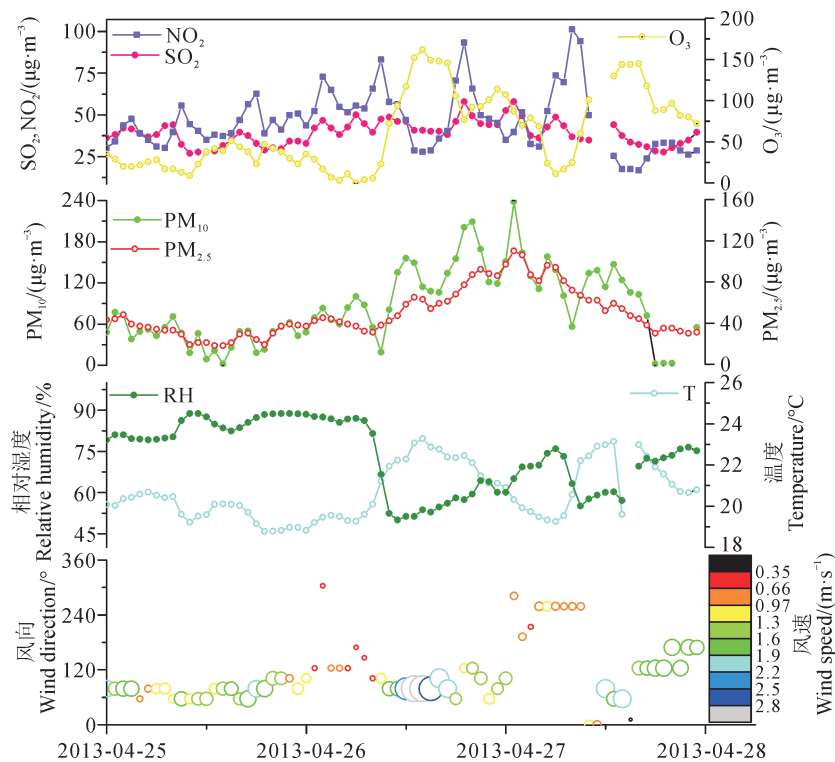


图 2 洪文点 4 月 25—27 日相关气象、PM、气体实时数据
Fig.2 Variations of real-time meteorological parameter, PM and gases during 25—27 April at Hongwen

表 3 污染期间(4月26日)与污染前后一天主要化学组分浓度比较
Tab.3 Concentration changes of main species before and after the polluted day (26th April)

组分 Species	4月25日 25th April/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	4月26日 26th April/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	4月27日 27th April/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	与4月25日比值 Ratio between 26th and 25th	与4月27日比值 Ratio between 26th and 27th
PM _{2.5}	59.1	90.6	55.9	1.5	1.6
OC	7.0	10.0	6.6	1.4	1.5
EC	2.7	3.8	2.0	1.4	1.9
SO ₄ ²⁻	11.6	23.8	15.9	2.1	1.5
NO ₃ ⁻	10.9	12.6	8.3	1.1	1.5
Cl ⁻	2.0	1.1	1.2	0.5	0.9
NH ₄ ⁺	7.9	13.4	8.1	1.7	1.7
K ⁺	0.6	0.7	0.7	1.2	1.0
Na ⁺	1.6	1.8	1.9	1.2	1.0
Mg ²⁺	0.1	0.1	0.2	1.9	0.8
Ca ²⁺	0.5	0.7	0.7	1.4	1.1
GM	3.7	6.8	3.5	1.9	2.0
Cu/($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)	4.7	15.0	12.6	3.2	1.2
Zn/($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)	146.0	278.0	188.1	1.9	1.5
As/($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.5	0.6	0.7	1.3	0.9
Pb/($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)	76.7	129.8	82.1	1.7	1.6

2.2 有机物为主导的污染类型

典型日期为10月12日。表4为10月12日PM_{2.5}中各化学组分对消光系数的贡献,根据IMPROVE公式计算的鼓浪屿、洪文、湖里、集美和溪东的大气消光系数分别为

304.5 $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$ 、214.5 $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$ 、305.8 $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$ 、211.4 $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$ 和260.1 $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$,五个站点的能见度范围在12—18 km。由表4可以看出,在五个站点有机物对消光系数的贡献率最大,其次为硫酸盐。

表 4 PM_{2.5} 中主要化学成分对消光系数(单位: $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$) 的贡献
Tab.4 Contributions from main components in PM_{2.5} to extinction coefficient (Unit: $\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$)

站点 Sites	湿度 Humidity/%	(NH ₄) ₂ SO ₄	NH ₄ NO ₃	OM	EC	GM	海盐 Sea salt	消光系数 Extinction coefficient	能见度 Visibility/km
鼓浪屿 Gulangyu	38.3	48.4	3.6	229.2	18.4	3.9	1.0	304.5	12.9
洪文 Hongwen	38.5	56.7	6.6	128.4	14.9	5.8	2.1	214.5	18.2
湖里 Huli	36.0	57.5	21.5	184.7	31.9	5.0	5.3	305.8	12.8
集美 Jimei	34.4	60.8	8.7	122.3	8.9	4.8	6.0	211.4	18.5
溪东 Xidong	49.2	57.9	8.5	183.1	2.6	2.5	5.4	260.1	15.0

图3是洪文10月11—13日三天湿度、温度、风速风向、PM、SO₂、NO₂和O₃的小时变化序列图。本次污染事件的特点如下:10月11日凌晨到早晨

9:00, 风速较小, 平均为1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 湿度在75%左右, 同时由于夜间大气边界层较低, 使得SO₂、NO₂、PM的浓度在这种静稳大气环境下有个累积的过

程; 9:00 后, 地面风向突然转变, 洪文转变为东南风, 且风速增大, 湿度不断下降, 一直持续, 污染事件发生时, 湿度一直保持在 30%—40%, 但污染气体和 PM 的浓度也随之下落; 进入 10 月 12 日后, 从 0:00 到 12:00, PM 呈现缓慢累积过程, 到 14:00 洪文风向不变但风速增大, 与此同时 PM 浓度达到峰值 ($\text{PM}_{10} > 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.5} > 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 并一直持续到 18:00, 之后 PM 浓度缓慢下降直至进入 10 月 13 日, 所有污染气体和 PM 表现出浓度较低和波动

幅度较平稳的状态。和 4 月 26 日污染明显区别的是, 本次污染仅 PM 出现明显增高现象, 尤其是 PM_{10} 浓度升高显著 (大约升高 4 倍, $\text{PM}_{2.5}$ 大约升高 2 倍), 而污染气体 SO_2 在污染时期几乎没有升高, NO_2 在 PM 下降后出现一个小的峰值, 总体而言变化不显著。从化学组分上看, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中的地壳尘组分, 12 日比 13 日增高倍数分别为 2.4 倍和 2.2 倍。因此推测本次污染事件主要是由于风速增大吹扬起更多污染物到大气中引起的。

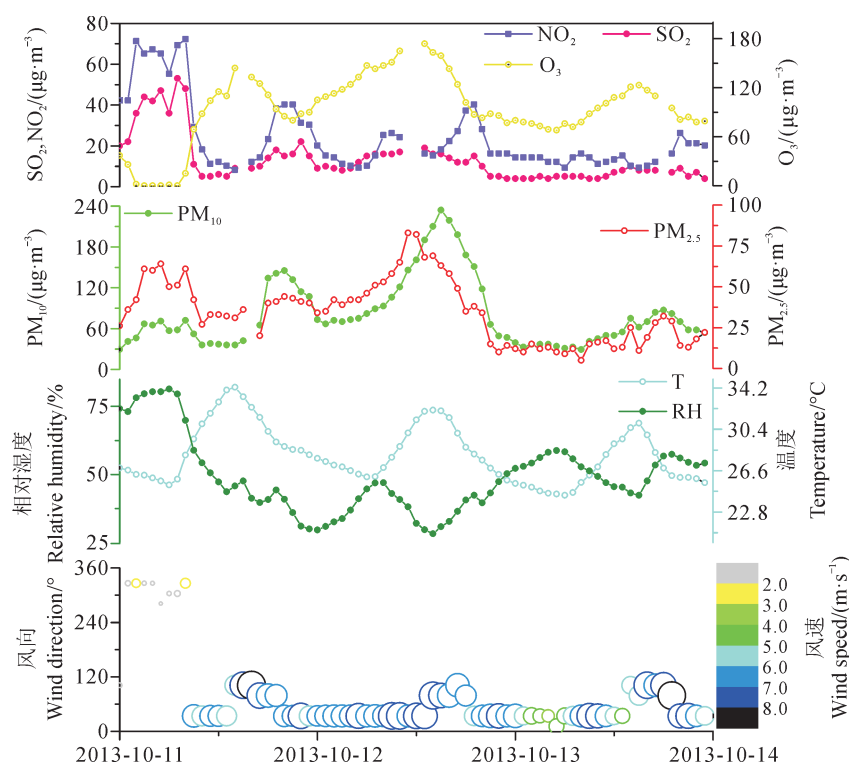


图3 洪文点 10 月 11—14 日相关气象、PM、气体实时数据

Fig.3 Variations of real-time meteorological parameter, PM and gases during 11—14 October at Hongwen

2.3 各区域不同组分主导的污染类型

典型日期为 1 月 21 日。表 5 为 1 月 21 日 $\text{PM}_{2.5}$ 中各化学组分对消光系数的贡献。根据 IMPROVE 公式计算的鼓浪屿、洪文、湖里、集美和溪东的大气消光系数分别为 $648.36 \text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $230.99 \text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $694.88 \text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $601.37 \text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $291.57 \text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$, 五个站点的能见度有很大差别。例如湖里、集美和鼓浪屿的能见度仅为 5—6 km, 而洪文和溪东的能见度则较好, 分别为 17 km 和 13 km。从化学组分对消光系数的贡献率上看, 五个站点也不尽相同, 鼓浪屿和湖里以硝酸盐为主, 其次为硫酸盐和有机物;

集美是以硫酸盐为主要消光系数的最主要贡献者, 硝酸盐和有机物次之; 而洪文和溪东则是以有机物为主, 其余组分贡献不大。本次污染事件和前两类有所区别, 没有呈现出区域特征, 很可能是一次受本地排放源强度影响较大的污染事件。

从质量浓度上看, 鼓浪屿、湖里和集美的 $\text{PM}_{2.5}$ 高于我国环境空气质量标准规定的 24 小时二级浓度限值 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 而洪文和溪东则空气质量较好, 仅为 $37.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $23.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 从主要化学成分的相对占比来看, 鼓浪屿的硝酸根占到质量浓度的 21%, 其次为 OM 和硫酸根 (~18%);

洪文、湖里、集美、溪东的 OM 是相对占比较多的组分,这和表 6 总结的不同化学组分对消光系数的贡献并不冲突。较高的湿度使硫酸盐、硝酸盐吸湿增长,从而导致这两者的散射能力增强,因此在湖里、集美这两个污染较严重的地区,硫酸盐和硝酸盐成为导致能见度下降的主要贡献者。

表 5 PM _{2.5} 中主要化学成分对消光系数 (单位: M·m ⁻¹) 的贡献									
Tab.5 Contributions from main components in PM _{2.5} to extinction coefficient (Unit: M·m ⁻¹)									
站点 Sites	湿度 Humidity/%	(NH ₄) ₂ SO ₄	NH ₄ NO ₃	OM	EC	GM	海盐 Sea salt	消光系数 Extinction coefficient	能见度 Visibility/km
鼓浪屿 Gulangyu	70.8	227.1	241.2	107.3	56.6	2.4	13.7	648.4	6.0
洪文 Hongwen	65.0	44.9	37.7	120.2	19.3	5.0	3.9	231.0	16.9
湖里 Huli	63.7	179.2	226.2	179.1	89.3	5.7	15.4	694.9	5.6
集美 Jimei	68.6	201.2	162.2	134.9	64.2	7.6	31.4	601.4	6.5
溪东 Xidong	74.9	49.7	9.6	212.6	13.1	2.4	4.2	291.6	13.4

表 6 1 月 21 日厦门市五个点位平均质量浓度及主要化学成分占总质量的百分比							
Tab.6 Average mass concentration of PM _{2.5} and its chemical abundance for 5 sites at 21 January at Xiamen							
站点 Sites	质量浓度 Mass concentration/(μg·m ⁻³)	OM /%	EC /%	SO ₄ ²⁻ /%	NO ₃ ⁻ /%	NH ₄ ⁺ /%	GM /%
鼓浪屿 Gulangyu	87.5	18.4	6.5	18.3	21.2	11.8	2.8
洪文 Hongwen	37.2	19.8	5.2	14.3	12.6	6.1	13.3
湖里 Huli	111.0	29.4	8.0	13.5	17.4	7.6	5.1
集美 Jimei	107.9	22.1	6.0	15.2	13.1	19.3	7.0
溪东 Xidong	23.3	35.9	5.6	21.2	5.7	—	10.5

3 结论

通过在厦门市选择不同季节不同站点进行的同步离线滤膜、在线数据和气象数据的采集,本研究对滤膜中的离子、元素和碳组分进行了实验分析。基于分析数据,利用 IMPROVE 方程定量计算了厦门空气污染期间 PM_{2.5} 中不同组分的颗粒物消光系数,发现观测期间厦门 PM_{2.5} 污染主要有以下三种类型:

(1) 硫酸盐主导类型。根据 IMPROVE 方程计算结果,这次污染和风速、风向、湿度的转变

存在一定的关系,因此推测该污染类型可能是本地污染排放与区域外污染物输送叠加引起的。

(2) 有机物主导污染类型。鼓浪屿、洪文、湖里、集美和溪东五个站点有机物对消光系数的贡献率最大,分别为 229.2 M·m⁻¹、128.4 M·m⁻¹、184.7 M·m⁻¹、122.3 M·m⁻¹ 和 183.1 M·m⁻¹。该污染类型主要是由于风速加大导致的颗粒物浓度升高引起。

(3) 各区域不同组分主导的污染类型。鼓浪屿和湖里以硝酸盐为主要消光物;集美以硫酸盐

为主要消光物; 洪文和溪东则是以有机物为主要消光物。该污染类型没有呈现出区域特征, 很可能主要受本地排放源影响。

参考文献

- 曹军骥. 2012. 我国 PM_{2.5} 污染现状与控制对策 [J]. *地球环境学报*, 3(5): 1030–1036. [Cao J J. 2012. Pollution status and control strategies of PM_{2.5} in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(5): 1030–1036.]
- 曹军骥. 2014. PM_{2.5} 与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Cao J J. 2014. PM_{2.5} & environment [M]. Beijing: Science Press.]
- Chow J C, 曹军骥, 李顺诚, 等. 2012. PM_{2.5} 及其测量与影响研究简史 [J]. *地球环境学报*, 3(5): 1020–1029. [Chow J C, Cao J J, Li S C, et al. 2012. A brief story of PM_{2.5}, its measurement and adverse effect [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(5): 1020–1029.]
- 张杰儒. 2015. 2013 年春夏季厦门市碳气溶胶的组成及来源特征 [C]// 陈斌. 第十二次全国环境监测学术交流会议论文集. 北京: 中国环境科学出版社: 520–526. [Zhang J R. 2015. Chemical composition and source apportionment of carbonaceous aerosol at Xiamen during spring and summer in 2013 [C]// Chen B. Proceedings of 12th Environmental Monitoring Symposium. Beijing: China Environmental Science Press: 520–526.]
- 张学敏. 2007. 厦门市大气可吸入颗粒物元解析的研究 [J]. *环境科学与技术*, 30(11): 51–69. [Zhang X M. 2007. Source Apportionment of Inhalable Particulates in Air of Xiamen City [J]. *Environmental Science and Technology*, 30(11): 51–69]
- 庄马展, 杨红斌, 王 坚, 等. 2006a. 厦门市大气颗粒物化学元素特征 [J]. *厦门科技*, 3: 42–44. [Zhuang M Z, Yang H B, Wang J, et al. 2006a. Elemental characteristics of air particles in Xiamen [J]. *Xiamen Science and Technology*, 3: 42–44.]
- 庄马展, 杨红斌, 王 坚, 等. 2006b. 厦门大气可吸入颗粒物离子成分特征研究 [J]. *现代科学仪器*, 6: 92–95. [Zhuang M Z, Yang H B, Wang J, et al. 2006b. Research on ionic characteristics of air particles in Xiamen [J]. *Modern Scientific Instruments*, 6: 92–95.]
- 庄马展. 2007. 厦门大气细颗粒物 PM_{2.5} 化学成分谱特征研究 [J]. *现代科学仪器*, 5: 113–115. [Zhuang M Z. 2007. Research on chemical characteristics of Xiamen fine air particles [J]. *Modern Scientific Instruments*, 5: 113–115.]
- Cao J J, Lee S C, Chow J C, et al. 2007. Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112, D22S11. DOI:10.1029/2006JD008205.
- Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 5: 3127–3137.
- Kim B M, Teffera S, Zeldin M D. 2000. Characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ in the South Coast Air Basin of Southern California: Part 1—Spatial variations [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 50: 2034–2044.
- Kim Y J, Kim K W, Kim S D, et al. 2006. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon [J]. *Atmospheric Environment*, 40: S593–S605.
- Pitchford M, Malm W C, Schichtel B, et al. 2007. Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57: 1326–1336.
- Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, et al. 2009. Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 43: 2911–2918.
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and Regulation [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 52: 628–713.
- Yang L X, Wang D C, Cheng S H, et al. 2007. Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 383: 164–173.
- Zhang N N, Cao J J, Ho K F, et al. 2012. Chemical characterization of aerosol collected at Mt. Yulong in wintertime on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 107: 76–85.
- Zhao J P, Zhang F F, Xu Y, et al. 2011. Characterization of water-soluble inorganic ions in size-segregated aerosols in coastal city, Xiamen [J]. *Atmospheric Research*, 99: 546–562.