

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018052904

林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 2015年春节成都市郊大气PM₁污染特征分析[J]. 环境化学, 2019, 38(4): 721-728.

LIN Yu, YE Zhixiang, YANG Huaijin, et al. Pollution characteristics of atmospheric PM₁ in suburban Chengdu City during the 2015 Spring Festival[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(4): 721-728.

2015年春节成都市郊大气PM₁污染特征分析*

林瑜^{1,2} 叶芝祥^{1,2**} 杨怀金^{1,2} 张菊^{1,2} 王碧菡³

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 成都, 610225; 2. 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室, 成都, 610225; 3. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都, 610225)

摘要 为研究西南郊区春节期间气象条件和燃放烟花爆竹对大气PM₁的影响, 本文于2015年2月1日至28日期间, 对大气PM₁进行了膜样品采集, 并分析了化学成分. 结果表明, 采样期间大气PM₁质量浓度的平均值为76.67 μg·m⁻³, 大气PM₁中无机元素平均占比为19.9%. 2月1日至17日期间, 大气PM₁中无机元素平均占比为12%, 2月18日至28日期间, 大气PM₁中无机元素平均占比为28%, 说明烟花爆竹的燃放大幅度增加了大气PM₁中的无机元素. 2月9日至14日期间的重污染现象表明, 高空500 hPa受弱高压脊控制, 高空形势稳定, 850 hPa的较高温度(8℃)对逆温层的形成和维持有重要作用, 且四川盆地无明显变压, 均不利于污染物扩散. 后向轨迹分析表明, PM₁浓度累积与来自东南和东北低空气团有关.

关键词 成都, 春节, 大气, PM₁, 无机元素, 重污染, 后向轨迹.

Pollution characteristics of atmospheric PM₁ in suburban Chengdu City during the 2015 Spring Festival

LIN Yu^{1,2} YE Zhixiang^{1,2**} YANG Huaijin^{1,2} ZHANG Ju^{1,2} WANG Bihan³

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China;
2. Air Environmental Modeling and Pollution Controlling Key Laboratory of Sichuan Higher Education Institutes, Chengdu, 610225, China;
3. College of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China)

Abstract: To investigate the influence of firecrackers and the winter meteorological conditions on PM₁, samples of atmospheric PM₁ in suburban Chengdu were collected during February 1st to 28th, 2015 and their chemical components were analyzed. Results showed that during the whole sampling period, the average mass concentration of the atmospheric PM₁ was 76.67 μg·m⁻³, 19.9% of which was inorganic elements. It was noted that the inorganic elements accounted for 12% in the period of February 1st—17th, and 28% in the period of February 18th—28th, indicating that the firecrackers contributed to the inorganic elements in the atmospheric PM₁. The heavy pollution process in the period of February 9th—14th showed that 500 hPa at high altitude was controlled by the weak high pressure ridges, and the situation at high altitude was stable. The heavy pollution process also

2018年5月29日收稿(Received: May 29, 2018).

* 成都信息工程大学“大气环境模拟与污染控制”四川省高校重点实验室开放课题(KFKT2016003)和成都信息工程大学校选项目(CRF201708)资助.

Supported by “Atmospheric Environment Simulation and Pollution Control” Sichuan University Key Laboratory Open Project of Chengdu University of Information Technology (KFKT2016003) and School Selected Project of Chengdu University of Information Technology (CRF201708).

* * 通讯联系人, Tel: 028-85966089; E-mail: yzxiang@cuit.edu.cn

Corresponding author, Tel: 028-85966089, E-mail: yzxiang@cuit.edu.cn

showed that the high temperature (8 °C) at 850 hPa played an important role in the formation and maintenance of inversion layer, and there was no significant pressure change in the Sichuan Basin, which was not conducive to the diffusion of pollutants. Analysis of the backward trajectory revealed that the accumulation of PM₁ at suburban Chengdu city was associated with low air masses from the southeast and northeast.

Keywords: Chengdu, the Spring Festival, atmospheric, PM₁, inorganic elements, heavy pollution process, backward trajectory analysis.

大气气溶胶目前是我国各城市大气环境的首要污染物,可通过直接或间接辐射效应影响全球气候变化,且大气颗粒物可以负载各种无机及有机有毒污染物,会对人体健康造成威胁^[1-2].而目前国内外对大气气溶胶的前沿课题主要集中在对细颗粒物^[3-4],特别是 PM₁ 的研究,其原因主要是由于 PM₁ 粒径小,对能见度的影响最大,停留时间长、输送距离远,吸附有大量有毒、有害成分,如多环芳烃^[5-7]等,更容易深入渗透到呼吸道,吸入并沉积在肺部,从而会对人群健康造成更大的危害.烟花爆竹燃放会产生大量的气态污染物和颗粒态污染物,而颗粒物中又含有金属元素、二次污染物以及黑炭等多种对人体健康有影响的物质.目前国内对烟花爆竹排放的研究仅仅局限于少数城市,如北京^[8-9]、上海^[10]、珠三角^[11]、天津^[12]、南京^[1]、嘉兴^[13]、太原^[14]、石家庄^[15]等地,且大多数研究都局限于对 PM_{2.5} 的研究,针对 PM₁ 的研究还极少.而且有研究显示^[16],烟花爆竹的燃放直接释放的主要是 <1 μm 的粒子,因此了解春节期间 PM₁ 的污染特性及来源对制定有针对性的污染控制措施有重要意义.

成都市地处四川盆地,具有盆地地形特征,风速小,静风频率高,空气中的污染物不易扩散,尤其是在冬季,而春节期间大量燃放烟花爆竹加剧了空气的污染程度.目前针对成都市春节期间空气质量的研究较少,特别是针对 PM₁ 的研究更未见报道.春节期间工厂、商铺、建筑工地停工,行驶的机动车数量减少,且家家户户燃放烟花爆竹以示庆祝和消灾祈福,因此,春节期间大气污染物排放特征(如浓度、化学成分等)与平时有很大不同.了解节假日和重大社会活动期间污染物特性及来源对制定有针对性的污染控制措施有重要意义.近年来,在分析污染物传输方面,Hysplit 模式及轨迹聚类方法成为重要工具,许多学者以此为基础,对国内大气污染现象较为严重的城市和地区的污染物传输问题进行了研究^[8, 17].

本文通过对成都市郊 2015 年春节 PM₁ 的组成成分、气象条件、传输条件以及污染来源进行分析,研究此期间成都市郊 PM₁ 中各成分的特征及其来源,为成都市郊春节空气质量控制提供基础数据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

采样点位于双流区学府路一段 24 号四川省成都信息工程大学资环楼楼顶 (30°37'45.22" N, 104°03'50.36" E),楼顶距离地面 10 m 左右,采样点距楼顶地面 1.5 m 以上.采样点地处成都市郊,与成都制鞋工业区紧邻,距离采样点资环楼约 150 m 处有一条绕城高速.于 2015 年 2 月 1 日—28 日进行样品采集,共采集 28 个有效样品,样品采集时间为每日(当日 10:00—次日 9:30),连续采集 23.5 h;样品用配有 PM₁ 粒径切割的颗粒物采样器(KS-306 型, German)采集,额定流量为 2.3 m³·h⁻¹,使用 47 mm 石英膜进行 PM₁ 样品的采集,采样前将石英膜放于马弗炉在 800 °C 下灼烧 3 h 以去除有机物.石英膜在采样前后于恒温恒湿箱(20±1) °C、50%±5%平衡 24 h 后,再用十万分之一电子天平进行称量以确定 PM₁ 的质量浓度,所有样品均放入冷冻柜(-4 °C)中保存至实验分析^[18].

1.2 气象数据来源

采样期间利用 VFP 能见度仪进行采样点大气能见度的同步观测,温度以及大气压数据从成都信息工程大学大气观测场自动监测站获得.

1.3 样品处理及分析方法

首先用直径为 8 mm 的环刀切割石英膜样品,采用美国沙漠所 DRI Model 2001A 型热光碳分析仪对石英膜样品中碳组分进行测定.

剪取 1/2 石英膜加入 10 mL 超纯水 (18.2 MΩ) (Milli-Q Gradient, Millipore Company), 超声提取 1 h 后转移至 50 mL 比色管, 再向样品中加入 10 mL 超纯水, 超声提取 1 h 后合并两次溶液定容至 50 mL, 用 0.22 μm 微孔滤膜进行抽滤. 处理后的石英膜样品使用离子色谱仪 (ICS-90A 型, Dionex company) 对水溶性阳离子进行测定, 离子色谱仪 (IC-761 型, Metrohm company) 对水溶性阴离子进行测定. 将剩下的 1/2 石英膜样品进行微波消解 (消解酸用量: 5 mL 硝酸+4 mL 氢氟酸), 于 180 °C 下消解 30 min 后定容至 25 mL, 消解后的样品利用 ICP-OES (ICP-725 型, Agilent company) 进行无机元素的测定^[18].

后向轨迹图由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) HYSPLIT 在线后向气流轨迹模式运行生成.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 春节期间成都天气状况

结合气象条件分析 2 月份 PM₁ 的污染状况, 图 1 是成都市 2015 年 2 月气象条件的时间变化序列. 从图 1 可以看出, 2015 年成都春节期间天气总体状况平稳, 无冷空气影响, 气温在逐渐回暖, 无强降温、强降雨等重大灾害性天气影响, 能见度多在 1—10 km 之间 (除 25 日、27 日), 相对湿度 61%—89%, 日平均气温 5—16 °C, 月平均气温 11 °C 左右, 风速小 (0.49—1.5 m·s⁻¹, 平均 0.97 m·s⁻¹), 全月无风无雨天气较多, 期间仅 22 日、27 日有零星小雨, 空气静稳, 有利于霾的形成, 各种气象条件都表明污染物扩散条件差, 整个 2 月成都都笼罩在霾下, 不利于人群健康.

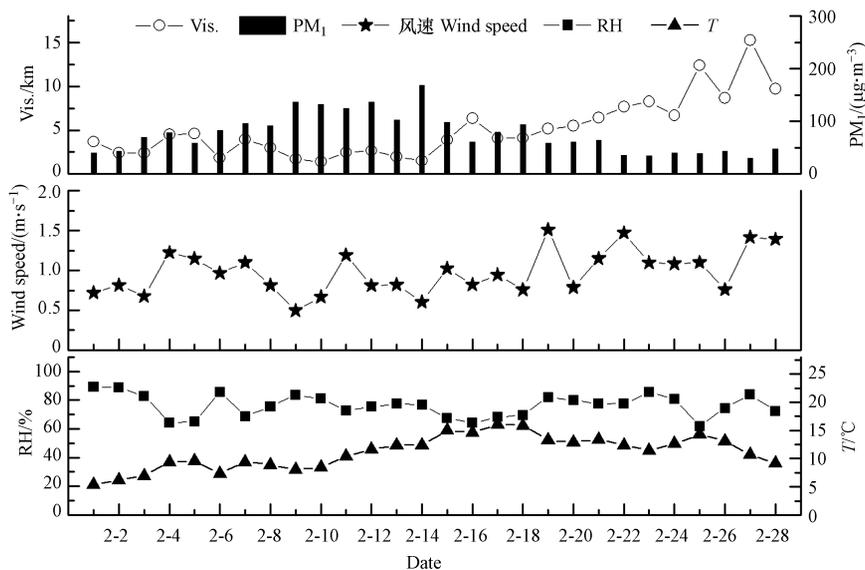


图 1 春节期间气象条件和 PM₁ 质量浓度的时间变化序列

Fig.1 List of meteorological elements during the Spring Festival

2.2 春节期间 PM₁ 质量浓度

从图 2 可以看出, 2 月份 PM₁ 质量浓度变化趋势为 29.45—168.95 μg·m⁻³, 其中 2 月 9 日—2 月 15 日浓度偏高, 空气污染较为严重, 而从 2 月 16 日开始, PM₁ 质量浓度突降, 正值春节放假, 工厂停工, 空气污染有所缓解, 但随后又呈上升趋势, 到 2 月 18 日 (除夕夜) 达到最大 (93.34 μg·m⁻³), 虽然 2015 年 1 月 1 日开始成都市划定了烟花爆竹的禁燃区域“中心城区禁止燃放烟花爆竹. 中心城区是指锦江区、青羊区、金牛区、武侯区、成华区等五城区以及其他区 (县) 伸入绕城高速公路外侧 500 m 生态保护带以内的地区”, 而采样点处在绕城外大约 200 m, 属禁燃区, 但随着春节的到来, 大部分非禁燃区民众为庆祝节日的到来, 都会燃放烟花爆竹, 而采样点处于交界处, 所观测到的除夕夜 PM₁ 浓度增加, 其原因主要在于气象扩散条件不利叠加禁燃区外以及其他城市输入性烟花爆竹燃放的污染, 烟花爆竹的燃放对大气中的 PM₁ 的浓度有所增加, 除夕后 1 d PM₁ 浓度明显降低, 后略有升高, 至 2 月 22 日开始, PM₁ 浓度整体水平保持在 50 μg·m⁻³ 以下. 由图 2 中同一采样点同一时段 PM_{2.5} 实时观测数据可知, 燃放期 PM_{2.5} 的质量

浓度因为烟花爆竹的燃放而在短时间内急剧上升,在 19 日 01:00 出现明显的峰值,因王红磊研究的春节期间气溶胶的粒径分布中提到,PM₁ 和 PM_{2.5} 的质量浓度变化趋势一致^[16],因此可推断 PM₁ 质量浓度也随烟花爆竹的燃放而急剧上升,且在 19 日 01:00 亦会出现明显的峰值.烟花爆竹的燃放造成 PM₁ 的质量浓度在短时间内急剧升高,但对城市大气环境的长远影响较小.

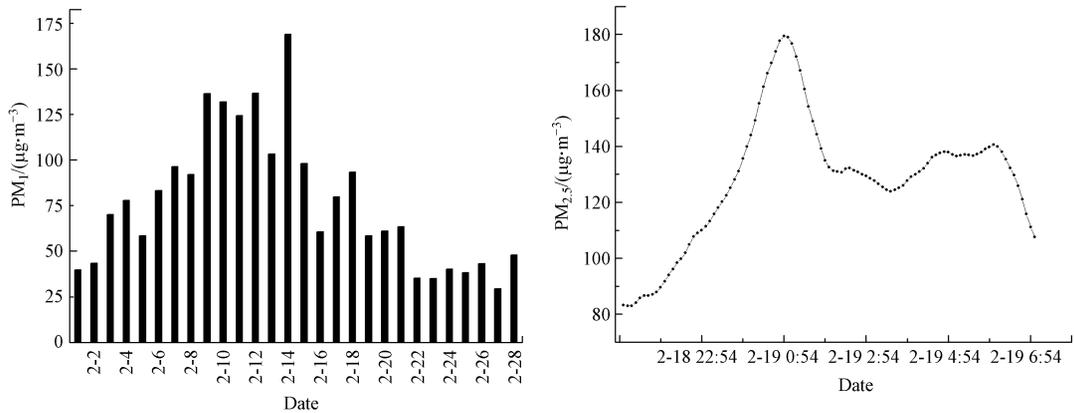


图 2 2015 年春节期间 PM₁ 质量浓度及除夕夜 PM_{2.5} 实时在线监测质量浓度

Fig.2 Online mass ConcentrationS of PM₁ during the Spring Festival and PM_{2.5} on the New Year's Eve in 2015

PM₁ 中各组分质量浓度水平见图 3 可知,水溶性离子 Ca²⁺、K⁺、Cl⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 质量浓度变化趋势分别为 (Ca²⁺:0.87—3.56 µg·m⁻³、K⁺:1.03—4.62 µg·m⁻³、Cl⁻:0.93—5.90 µg·m⁻³、NH₄⁺:1.86—16.93 µg·m⁻³、SO₄²⁻:2.65—25.85 µg·m⁻³ 和 NO₃⁻:2.60—25.32 µg·m⁻³),总水溶性离子浓度变化趋势为 11.81—78.6 µg·m⁻³,占 PM₁ 的 29%—63%,平均值为 31.81 µg·m⁻³,占 PM₁ 的 42.11%,元素碳(EC)和有机碳(OC)质量浓度变化范围分别为 1.54—10.82 µg·m⁻³、4.3—24.38 µg·m⁻³,平均值为 5.04 µg·m⁻³ 和 11.33 µg·m⁻³,分别占 PM₁ 的 6.5% 和 14.7%,总的总碳(TC)含量占 PM₁ 的 21.3%,总无机元素质量浓度变化趋势为 3.36—37.63 µg·m⁻³,占 PM₁ 的 5.7%—39%,平均值为 13.11 µg·m⁻³,平均占 PM₁ 的 19.9%. 总体而言,烟花爆竹对 PM₁ 各组分的影响在除夕急剧增加,随后趋于稳定.

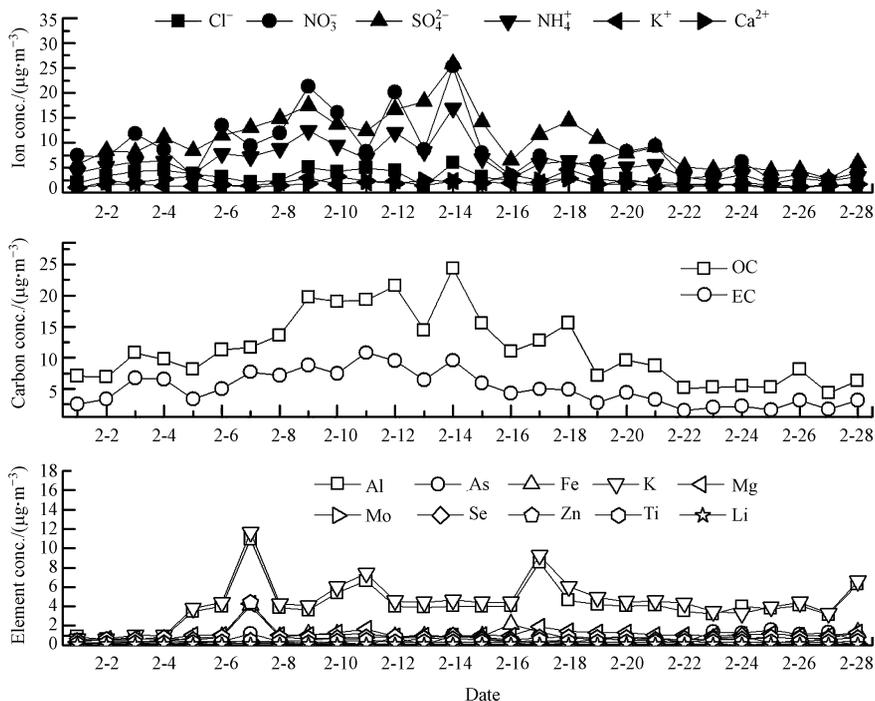


图 3 2015 年春节期间 PM₁ 各组分质量浓度

Fig.3 Concentrations of PM₁ components during the Spring Festival in 2015

2.3 春节期间PM₁无机元素污染特征

爆竹的主要成分是黑火药,含有硫磺、木炭粉、硝酸钾等,有的还含有氯酸钾.制作闪光雷、电光炮、烟花炮、彩色焰火时,还要加入镁粉、铁粉、铝粉、锑粉和无机盐.本研究由于燃放烟花导致PM₁中元素Al、K和Mg等3种元素的相对含量较高,三者之和平均占了总无机元素的70%以上,由于烟花爆竹的燃放使得总无机元素在PM₁中的占比较其他非燃放期高很多(如图4),且此时段(2月18—28日)趋于相对稳定,2月17日和2月18日的PM₁中这3种无机元素(Al、K和Mg)在总的无机元素中的占比总和最大,达80%以上,说明烟花爆竹燃放对PM₁中无机元素影响较大,且对Al、K和Mg等3种元素的影响最大,虽然除夕后不会像除夕夜家家户户燃放烟花爆竹,但在元宵前烟花爆竹的燃放伴随在整个春节期间(2月18—28日),在此期间无机元素占比相对趋于稳定且占PM₁中的成分较多,平均约占PM₁的28%,而2月1—17日无机元素在PM₁中平均约占14.3%,说明烟花爆竹燃放虽然对城市空气质量不会产生长远影响,但对空气中PM₁无机元素的影响较大.

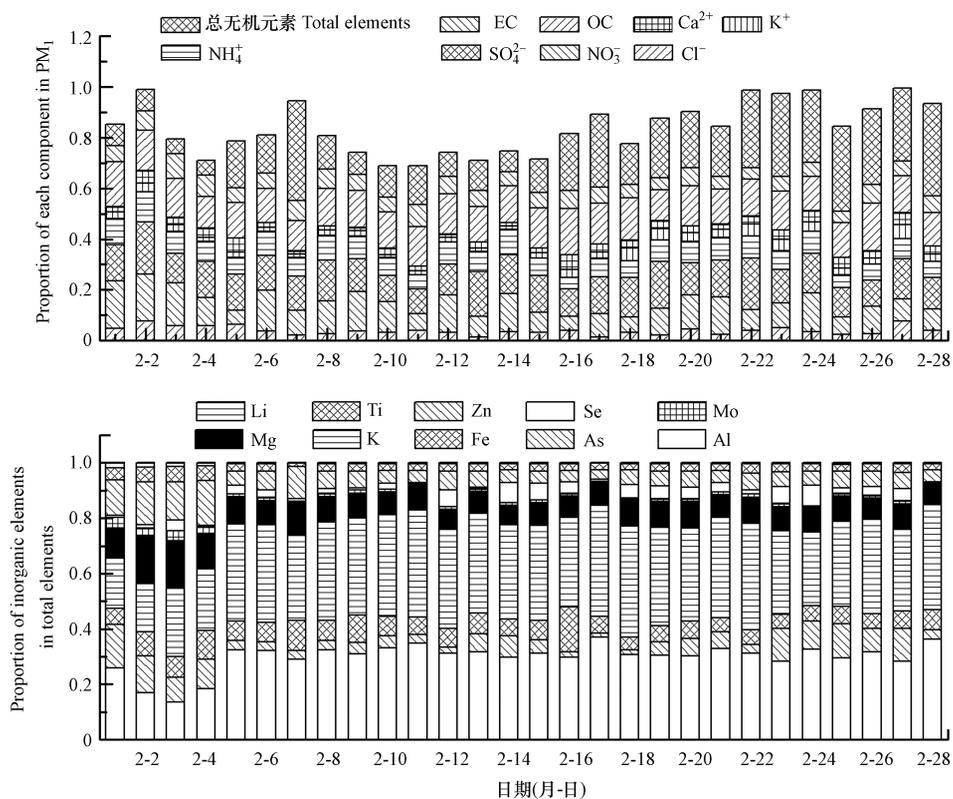


图4 2015年春节期间PM₁各组分在PM₁中占比及各无机元素在总元素中的占比

Fig.4 Proportion of PM₁ components in PM₁ and the proportion of each inorganic element in the total elements

2.4 2月9—14日重污染过程分析

由图2可知,2015年2月9—14日出现了1次重污染过程,6日内PM₁质量浓度日均值大于100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,大于国家制定的PM_{2.5}二级浓度限值(75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),其中14日的污染最为严重,PM₁的日均浓度达到168 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.重污染过程发生期间各气象参数值大小如表1所示,由于2月能见度平均值为5.07 km,而此次重污染过程中,能见度仅为1.95 km,说明细颗粒物的污染加剧对能见度的影响很大,且有研究表明,0.1—1 μm 的颗粒物对能见度的影响最大^[19].成都市常年风速较低,2月的28 a平均风速为0.97 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,此次重污染过程中,6 d平均风速仅为0.76 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,低风速不利于污染物扩散,也是重污染天气维持的有利条件.2月9—14日平均相对湿度为78%,略高于2月的28 a平均值(76%),利用中华人民共和国气象行业标准(QH/T113—2010)霾的观测与预报等级划分标准,观测期间(2月9—14日均是霾天气),其中2月11—12日为中度霾(2<能见度<3),而2月9—10日和2月13—14日为重度霾(能见度<2).

表 1 2015年2月9—14日各气象参数

Table 1 Meteorological parameters from February 9th to 14th in 2015

| | 2月9日 | 2月10日 | 2月11日 | 2月12日 | 2月13日 | 2月14日 | 平均值 Mean | 月均值 Monthly mean |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------------|
| 温度/℃ | 8.04 | 8.45 | 10.39 | 11.61 | 12.39 | 12.37 | 10.54 | 11.11 |
| 相对湿度/% | 83.56% | 80.97% | 72.75% | 75.44% | 77.32% | 76.83% | 77.81% | 76.15% |
| 风速/(m·s ⁻¹) | 0.50 | 0.67 | 1.19 | 0.81 | 0.82 | 0.60 | 0.76 | 0.97 |
| 能见度/km | 1.71 | 1.38 | 2.47 | 2.68 | 1.97 | 1.51 | 1.95 | 5.07 |
| 霾类型 | 重度霾 | 重度霾 | 中度霾 | 中度霾 | 重度霾 | 重度霾 | | |

为进一步了解重污染天气过程的气象因素对大气污染的影响,本研究对各气象场要素进行了分析,由2015年2月9—15日500 hpa平均高度场和风场图可见(图5),四川地区北部受弱高压脊控制,高空形势稳定少变.中部纬向环流型,西北和偏西气流控制,天气形势较好,晴朗,天气静稳,下沉气流为主,容易造成污染物堆积,这与颜玉倩等^[20]对2013年成都的高空形势分析一致.

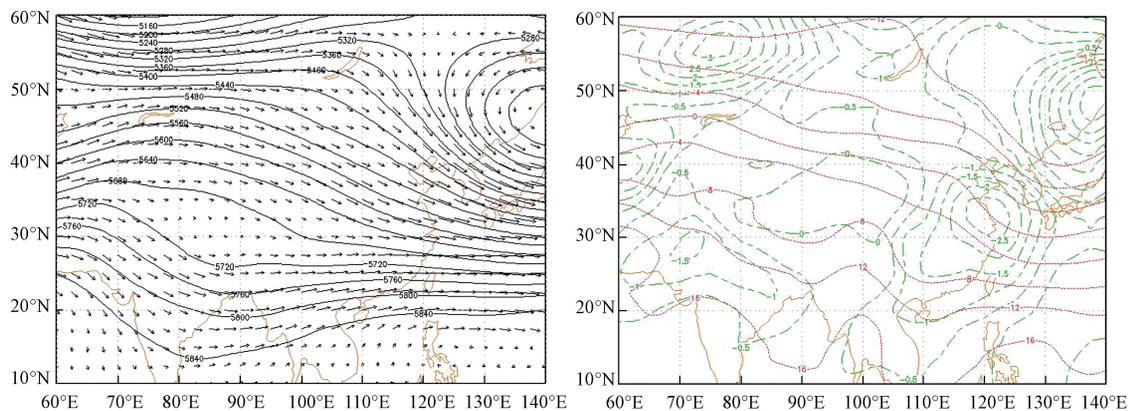


图 5 2015年2月9—15日500 hpa高度场和风场(左)以及850 hpa温度场和近地面的变压场图(右)

Fig.5 500 hpa height field and wind field (left) and 850 hpa temperature field and near-surface pressure field map (right) on February 9th–15th, 2015

由850 hpa平均温度场和地面变压场图可见(图5),低层850 hPa温度暖脊,无明显冷空气活动,盆地内部温度较高,为8℃.稳定的大尺度环流及较弱的天气系统,有利于污染物聚集,而850 hPa的较高温度对逆温层的形成和维持有重要作用,同样不利于污染物扩散.四川盆地无明显变压,没有冷锋天气产生,不利于污染物扩散.

除气象条件影响外,2月9—14日处于春节放假之前,大部分工人未放假,工厂处于赶工阶段,而节前十天人们已经开始庆祝春节的到来,因此在此期间大气污染加剧.

2.5 气团后向轨迹分析

由于成都地处四川盆地腹地,大气流动性不强,空气湿度大、风速小,静风频率高,尤其冬季易出现逆温,且PM₁的停留时间最长,随着大气气团可以远距离传输.因此考察春节期间大气气团来源可获得PM₁的来源,为PM₁的针对治理提供基础数据.本研究利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)HYSPLIT在线后向气流轨迹模式获得采样期间出现的高PM₁污染天气(春节前:2月14日、春节期间:2月18日)的气团来源,进一步分析PM₁的来源,以每天更换滤膜的时间为起点(10:00)往后推两天(即48 h)的气流轨迹,后推起始位置的地理坐标为30°37' N, 104°03' E,每日执行4次,即世界时(UTC)02、08、14和20时,共计4条轨迹,轨迹计算的起始点高度为500 m,这主要是因为500 m高度的风场既能减少地面摩擦对于气流轨迹的影响,又能较准确地反映近地层的气团输送特征.

2月14日污染物出现大量累积,处于全月空气质量最差水平,PM₁浓度高达168 μg·m⁻³,从10:00时采样开始,气团从东北方向传输至成都,16:00时气团主要受成都本地影响,由成都上空绕成都周边

一周后由成都东北方向回到成都,22:00 时气团主要来自东南方向,2月15日凌晨4:00时由近地面东北方向,经东南方向,再由正东方进入成都,说明成都市 PM₁ 污染受成都东南和东北方向近地面气团的影响较大。2月18日也出现了一次污染累积过程,气团运动规律与2月14日明显不同,从10:00时采样开始,气团主要来自近地面由东北方向输送至成都,16:00时气团主要来自500 m 高度从东北方向进入成都,22:00时的气团主要来自近地面由正东方绕道东北方向输送至成都,2月19日凌晨4:00时气团主要来自1000 m 高度自东南方向、途经东方以及东北方向输送至成都,从气团运动轨迹亦可以看出,PM₁ 污染主要仍是受东南和东北方向近地面气团的影响,这与成都市区周边对大气有影响的重污染工业有关^[21]。

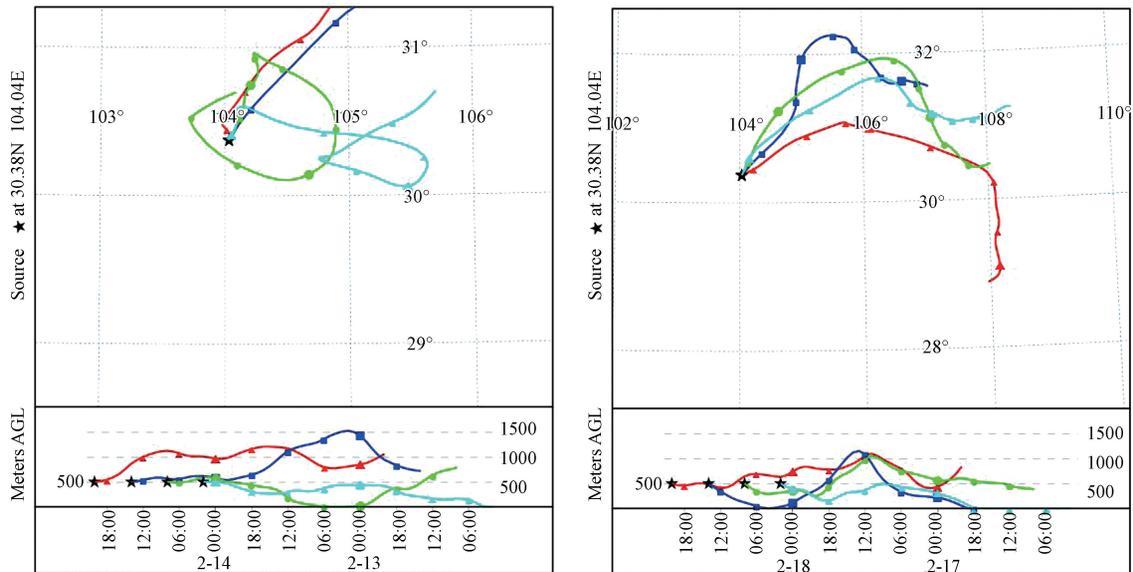


图6 Hysplit 模拟的2月14日、2月18日PM₁浓度累积的48 h后项轨迹图

Fig.6 Hysplit simulated trajectory of the 48 h post-accumulation of PM₁ concentration on February 14th and 18th, 2015

3 结论 (Conclusion)

(1) 采样期间成都市郊大气 PM₁ 的平均值为 $76.67 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 期间有一次重污染过程(2月9—14日), 6日均值大于 $130 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 除夕出现了一次 PM₁ 峰值, 随后浓度下降, 2月22日至结束, PM₁ 质量浓度均小于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 烟花爆竹对城市大气环境质量长远影响较小。

(2) 整个采样期间无机元素占 PM₁ 的 19.9%. 春节期间(2月18日至采样结束), 无机元素占比相对趋于稳定且占 PM₁ 中的成分较多, 平均约占 PM₁ 的 28%, 证明烟花爆竹对 PM₁ 中无机元素影响较大。

(3) 2月9—14日重污染天气过程分析发现, 2月9—10日是雾霾, 而2月11—12日为中度霾, 2月13—14日为重度霾, 高空500 hPa受弱高压脊控制, 高空形势稳定少变; 稳定的大尺度环流及较弱的天气系统使得污染物不易扩散, 而850 hPa的较高温度(8℃)对逆温层的形成和维持有重要作用, 同样不利于污染物扩散. 四川盆地无明显变压, 没有冷锋天气产生, 不利于污染物扩散。

(4) 成都地处四川盆地腹地, PM₁ 浓度与气象条件关系密切. 分析气团后向轨迹时发现, PM₁ 浓度较高时, 气团运动主要来自东南和东北低空。

参考文献 (References)

- [1] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 春节期间南京气溶胶质量浓度和化学组成特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 30-39.
WANG H L, ZHU B, SHEN L J, et al. The mass concentration and chemical compositions of the atmospheric aerosol during the Spring Festival in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 30-39 (in Chinese).
- [2] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 592-597.

- TAO Y, LIU Y, MI S Q, et al. Atmospheric pollution characteristics of fine particles and their effects on human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3):592-597(in Chinese).
- [3] ROGULA-KOZŁOWSKA W, KLEJNOWSKI K, ROGULA-KOPIEC P, et al. Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Poland[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2014, 7(1):41-58.
- [4] MARC P, WILLIAM M, BRET S, et al. Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 2007, 57(11):1326-1336.
- [5] 李英红, 饶志国, 谭吉华, 等. 兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(7):2428-2435.
LI Y H, RAO Z G, TAN J H, et al. Pollutional characteristics and sources analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particulate matter in Lanzhou City[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7):2428-2435(in Chinese).
- [6] 王超, 张霖琳, 刀谔, 等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1):1-6.
WANG C, ZHANG L L, DAO X, et al. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particulates of Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1):1-6(in Chinese).
- [7] 陈刚, 周潇雨, 吴建会, 等. 成都市冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃的源解析与毒性源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10):3150-3156.
CHEN G, ZHOU X Y, WU J H, et al. Source apportionment and toxicity quantitation of PM_{2.5}-associated polycyclic aromatic hydrocarbons obtained from Chengdu, China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10):3150-3156(in Chinese).
- [8] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(12):4340-4351.
ZHANG H D, LU M Y, ZHANG B H, et al. Analysis of the stagnant meteorological situation and the transmission condition of continuous heavy[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12):4340-4351(in Chinese).
- [9] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2014年春节期间北京市空气质量分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2):371-378.
WANG Z S, ZHANG D W, LI Y T, et al. Analysis of air quality in Beijing City during Spring Festival period of 2014[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2):371-378(in Chinese).
- [10] 王广华, 林俊, 姚剑, 等. 上海市郊春节期间大气颗粒物及其组分的粒径分布[J]. *环境化学*, 2011, 30(5):913-919.
WANG G H, LIN J, YAO J, et al. Size distribution of number concentration and chemical components of particulate matters during spring festival in shanghai suburb[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(5):913-919(in Chinese).
- [11] 赵伟, 范绍佳, 谢文彰, 等. 烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(12):4358-4365.
ZHAO W, FAN S J, XIE W Z, et al. Influence of burning fireworks on air quality during the Spring Festival in the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4358-4365(in Chinese).
- [12] 杨志文, 吴琳, 元洁, 等. 2015年春节期间天津烟花爆竹燃放对空气质量的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(1):69-75.
YANG Z W, WU L, YUAN J, et al. Effect of fireworks on the air quality during the Spring Festival of 2015 in Tianjin City[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(1):69-75(in Chinese).
- [13] 沈利娟, 李莉, 吕升, 等. 嘉兴市春节期间烟花爆竹燃放对大气污染物分布特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5):1548-1557.
SHEN L J, LI L, LU S, et al. Impacts of fireworks on the atmospheric pollutant distributions during Spring Festival in Jiaxing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1548-1557(in Chinese).
- [14] 耿红, 宣莹莹, 蔡夏童, 等. 太原市 2014 年春节期间常规大气污染物浓度变化及聚类分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4):965-974.
Geng H, Xuan Y Y, Cai X T, et al. 2015. Mass concentration variation and cluster analysis of urban air pollutants in Taiyuan, Shanxi Province during Chinese New Year of 2014 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4):965-974(in Chinese).
- [15] 康苏花, 高康宁, 赵鑫, 等. 石家庄市春节期间大气颗粒物有机碳和元素碳的变化特征[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(6):77-82.
KANG S H, GAO K N, ZHAO X, et al. Atmospheric particles of organic carbon and elemental carbon variation during the Spring Festival in Shijiazhuang[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(6):77-82(in Chinese).
- [16] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(2):442-450.
WANG H L, ZHU B, SHEN L J, et al. Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):442-450(in Chinese).
- [17] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4):357-363.
WANG Q. Study of air pollution transportation source in Shanghai using trajectory model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(4):357-363(in Chinese).
- [18] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市中心城区大气 PM₁ 的污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(9):3220-3226.
LIN Y, YE Z X, YANG H J, et al. Pollution level and source apportionment of atmospheric particles PM₁ in downtown area of Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(9):3220-3226(in Chinese).
- [19] 杜蔚. 青藏高原背景站细颗粒物理化特性及粒子增长机制研究[D]. 成都:成都信息工程大学, 2015.
DU W. Study on physical and chemical characteristics and particle growth mechanism of fine particulate in the background station of qinghai-tibet plateau[D]. Chengdu, Chengdu University of Information Technology, 2015(in Chinese).
- [20] 颜玉倩, 朱克云, 张杰, 等. 成都地区春季一次持续性灰霾天气过程特征及预测[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(1):33-39.
YAN Y Q, ZHU K Y, ZHANG J, et al. Characteristics of a haze weather event and prediction during spring in Chengdu[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(1):33-39(in Chinese).
- [21] 廖婷婷, 王珊, 王莉莉, 等. 2013年成都财富论坛期间空气质量状况分析研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(1):271-278.
LIAO T T, WANG S, WANG L L, et al. 2016. Analysis of air quality in urban Chengdu during Fortune Global Forum in 2013[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1):271-278(in Chinese).