

Component and Source Apportionment of PM_{2.5} in an Air Pollution Weather in Xiangyang

Zhonghua Wu¹, Fang Ji¹, Yanru Bi^{2*}, Wen Zhuang²

¹Hubei Province Xiangyang Environment Protection Monitoring Station, Xiangyang Hubei

²Guangzhou Hexin Instrument Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

Email: *527753156@qq.com, whutwzh@163.com

Received: Apr. 1st, 2019; accepted: Apr. 16th, 2019; published: Apr. 23rd, 2019

Abstract

A single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) was deployed in Xiangyang city from January 1 to 20 in 2019 to study the component and sources of PM_{2.5}. According to the monitoring result, the local atmosphere was mainly affected by motor vehicle exhaust, and the proportion of coal-fired and industrial process sources were also above 10% in addition. During the monitoring period, a continuous air pollution process occurred. When the lightly polluted weather, moderately polluted weather, and heavily polluted weather occurred, the proportion of elemental carbon as a primary component increased and the source of pollution was mainly affected by the massive accumulation of vehicle exhaust and the secondary conversion of particulate matter. When the severely polluted weather occurred, the proportion of mixed carbon, organic carbon and potassium-rich components increased, and elemental carbon remained the primary ingredient. In terms of pollution sources, apart from to the effects of vehicle exhaust, it was also significantly affected by coal and industrial process sources. The study also founded that the local atmospheric particulate matter was highly aged during the monitoring period, and the occurrence of sustained heavy pollution weather had a certain relationship with the higher degree of aging of particulate matter.

Keywords

Xiangyang City, Single Particle Aerosol Mass Spectrometer, Component and Source Apportionment of PM_{2.5}, Air Pollution Process, Particle Aging

襄阳市一次大气污染过程中PM_{2.5}组分及污染源解析

吴中华¹, 纪芳¹, 毕燕茹^{2*}, 庄雯²

*通讯作者。

¹湖北省襄阳市环境保护监测站, 湖北 襄阳

²广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州

Email: *527753156@qq.com, whutwzh@163.com

收稿日期: 2019年4月1日; 录用日期: 2019年4月16日; 发布日期: 2019年4月23日

摘要

利用单颗粒气溶胶质谱仪对襄阳市2019年1月1日至20日期间的大气PM_{2.5}组分及污染来源进行了研究。研究表明, 监测期间本地大气以机动车尾气的影响为主, 此外燃煤、工业工艺源的贡献率也在10%以上。监测期间出现持续大气污染过程, 其中轻度、中度及重度污染级别天气的发生, 成分方面表现为首要成分元素碳占比的增加, 污染源则主要受机动车尾气的大量累积及颗粒物的二次转化影响。严重污染天气时, 成分方面表现为混合碳、有机碳和富钾等成分占比增加以及元素碳始终保持为首要成分, 污染源方面除受到机动车尾气的影响外, 还明显受到燃煤和工业工艺源的影响。此外, 研究还发现监测期间本地大气颗粒物的老化程度较高, 且持续重污染天气的发生与颗粒物老化程度较高有一定关系。

关键词

襄阳市, 单颗粒气溶胶质谱仪, PM_{2.5}组分及污染来源, 大气污染过程, 颗粒物老化

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖北省属季风气候区, 冬季盛行偏北风。由于湖北地势西高东低, 为外高内低、向南开口的半封闭盆地地貌, 因此冬季北方冷空气经南阳盆地进入湖北后, 均经位于湖北省西北部的襄阳市传输至其他城市[1][2]。襄阳市独特的地理位置及气候条件, 使得襄阳市为霾天气内陆多发地区, 且具有河谷、城市多发, 及工业和人口聚集区多发的特点, 在冬季尤为严重[3]。

霾天气的本质是大气PM_{2.5}污染[4]。近年来为改善中国区域性霾污染现状, 全国各地均陆续开展大气PM_{2.5}来源解析工作。目前国内PM_{2.5}来源解析方法主要包括受体模型法、源清单法和扩散模式模拟法, 其中受体模型为我国PM_{2.5}源解析研究中最常用的手段[5], 包括化学质量平衡模型法(CMB)、正定矩阵因子分解法(PMF)、主成分分析法(PCA)、以及近年来发展起来的基于单颗粒气溶胶质谱或OCEC分析仪、离子色谱等分析仪器的在线源解析方法。从方法学和应用实效上看, 源解析是一项比较复杂的系统工作, 不同方法具有各自独特的优势、适用性、不确定性和局限性。

目前, 湖北省关于大气颗粒物的来源解析研究的记载为数不多, 如肖经汗等人[6]利用PMF方法对武汉市夏季PM_{2.5}样品进行来源解析, 得出交通源和路面扬尘贡献最大的结论; 张文娟等人[7]利用基于单颗粒气溶胶质谱仪的在线源解析方法对宜昌市的PM_{2.5}源解析进行初步研究, 并提出优化合理的污染防治对策。其中关于襄阳市大气颗粒物的来源解析研究的记载仅有1篇, 即襄阳市环境保护监测站的王洋[8]利用SPAMS, 对襄阳市2017年大气PM_{2.5}污染来源进行分析, 得出襄阳市该年度大气颗粒物主要受到机动车尾气和燃煤源影响为主的结论。相较于CMB、PMF等传统监测手段, 基于单颗粒气溶胶质谱(SPAMS)

的在线源解析方法具有高时间分辨率的优势[9] [10], 可得到小时级别的颗粒物成分、粒径等信息的变化特征, 在保障监测期间可实时掌握颗粒物的成分及来源动态变化过程。但王洋研究中, 仅对比罗列了襄阳市 2017 年四季的污染源分布结果, 未充分利用 SPAMS 仪器优势开展颗粒物动态变化及污染过程研究。

本研究选取了襄阳市 2019 年 1 月 1 日至 20 日的一次持续污染天气过程作为分析对象, 利用 SPAMS 观测大气 $PM_{2.5}$ 的颗粒成分及污染源变化情况, 了解该时段襄阳市大气颗粒物的污染特征及成因, 为襄阳市大气颗粒物污染防治及空气质量持续改善提供技术支撑。

2. 实验方法

2.1. 数据采集

点位设置在襄阳市环境保护监测站($32^{\circ}0'53''N$, $112^{\circ}7'43''E$), 利用单颗粒气溶胶质谱仪于 2019 年 1 月 1 日 0:00~2019 年 1 月 20 日 24:00 开展为期 20 天的连续监测。大气颗粒物经 $PM_{2.5}$ 切割头切割后进入仪器直接测量分析, $PM_{2.5}$ 切割头放置在监测站大楼顶层, 切割头与仪器进样口通过直径 1 cm 的导电硅胶管进行连接。本次观测共采集有粒径信息的颗粒物 14,592,570 个, 其中同时含正负质谱图信息的颗粒物 3,784,203 个。

2.2. 数据分析方法

采集的大气颗粒物数据导入到基于 Matlab 平台的数据处理软件 COCO V_1.3P (广州禾信仪器股份有限公司开发)中处理, 分别进行成分分类及污染源解析, 颗粒成分分类结果可在一定程度上反映点位受污染源的影响情况。

利用自适应共振神经网络算法(ART-2a) [11], 根据颗粒物的成分特征进行成分分类, 分类过程中使用的参数为: 相似度 0.75, 学习效率 0.05。分类后根据各类别化学成分特征将这些颗粒物合并成九类: 元素碳、有机碳、混合碳、重金属、富钾、左旋葡聚糖、富钠、矿物质及其它[12]。其中, 元素碳颗粒主要含有一系列元素碳簇峰; 有机碳颗粒主要含有有机碳碎片特征峰; 混合碳颗粒既含有元素碳, 又含有有机碳碎片峰, 且信号强度相当; 重金属颗粒主要含 Fe^+ 、 Cu^+ 、 Zn^+ 、 Pb^+ 等金属特征峰; 富钾颗粒是指只含 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 HSO_4^- 等二次离子及 Na^+ 、 K^+ 等常见无机离子峰的颗粒; 左旋葡聚糖颗粒主要含有较强的 K^+ 信号、有机碳碎片及左旋葡聚糖碎片(CNO^- , CHO_2^- , $C_3H_7O^-$)等特征峰; 富钠颗粒一般来源于海洋气团, 主要含有明显的 Na^+ 、 Na_2Cl^+ 、 Na_2O^+ 、 Cl^- 、 $NaCl_2^-$ 等特征峰; 矿物质颗粒主要含有 Mg^+ 、 Al^+ 、 Ca^+ 、 Fe^+ 、 CaO^+ 、 SiO_3^- 等地壳元素; 不属于以上类别的归为其它。

参照《大气颗粒物来源解析技术指南(试行)》[13], 根据大气颗粒物不同污染来源特征, 利用示踪离子法[9] [14] [15]将襄阳市本地大气颗粒物的污染来源归结为机动车尾气、燃煤、工业工艺源、二次无机源、扬尘、生物质燃烧、餐饮及其它等八类。其中, 机动车尾气包含柴油车、汽油车等排放的颗粒; 燃煤源包含散煤、锅炉、电厂等排放的颗粒; 扬尘包含建筑、道路、堆土等颗粒, 主要含矿物质成分; 生物质燃烧指生物燃料及秸秆露天焚烧等产生的颗粒, 其主要特征为左旋葡聚糖碎片离子; 工业工艺源包含了化工、水泥厂、金属冶炼等工艺过程排放颗粒; 二次无机源主要指除钾离子以外, 只含硝酸根、硫酸根、氨根等二次无机离子的颗粒, 该类颗粒物可一定程度上反映大气颗粒物二次反应强度; 餐饮源指含油酸类成分的颗粒, 其来源于餐饮油烟; 未包含在上述源类及无法识别来源的颗粒归为其它源。

3. 结果与讨论

3.1. 监测期间空气质量分析

襄阳市 2019 年 1 月 1 日至 20 日的 $PM_{2.5}$ 质量浓度及气象要素时间序列变化如图 1 (数据来自襄城运动

路国控点)。期间大部分时段的空气质量均处于轻度或以上污染水平, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时最大值达到 $392 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现在 1 月 6 日 5 时, 空气质量达到严重污染级别。结合气象数据来看, 在污染上升阶段的风速总体偏小, 空气相对湿度较高, 高湿静稳的天气条件下利于颗粒物的累积与二次转化。此外, 监测期间的部分时段出现风速突然增大现象, 如 1 月 6 日 7~8 时, 小时风速突然增大至 7.0 m/s 以上, 该时段 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度一直处于 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上较高水平, 可见, 风速瞬时增大未能使污染物充分扩散, 污染仍持续。

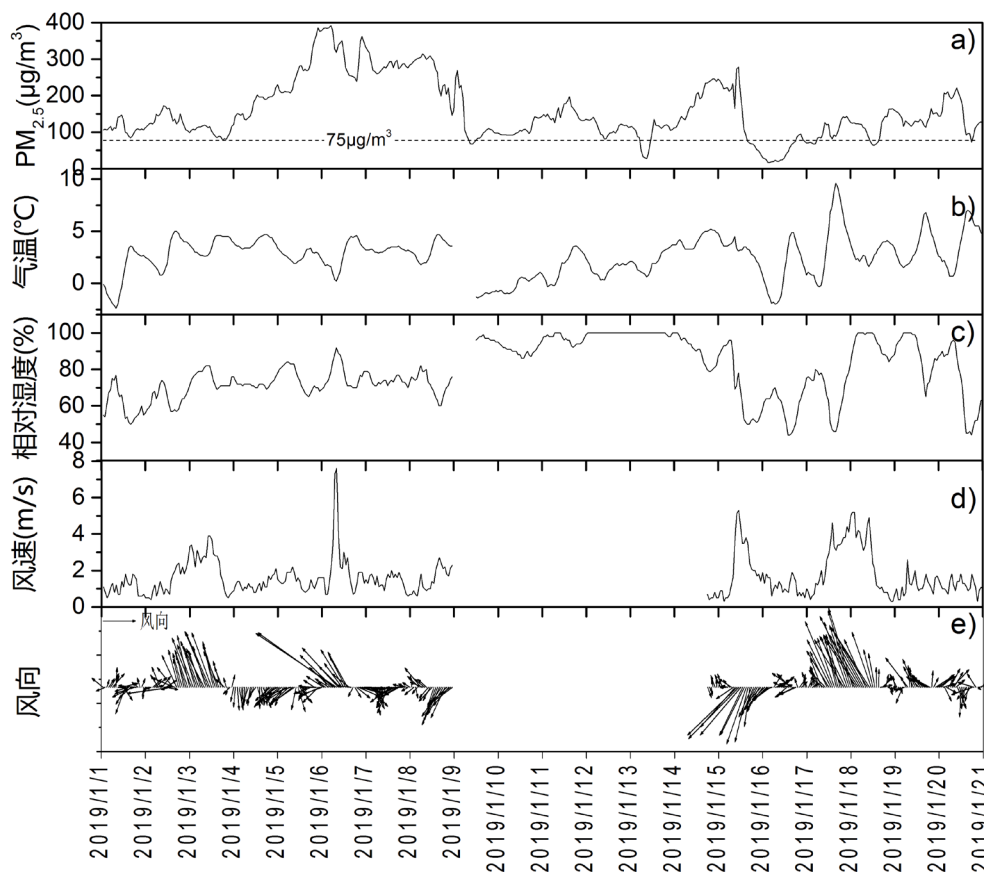


Figure 1. Mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and weather conditions during monitoring
图 1. 监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及气象要数时间序列图

3.2. 总体颗粒物分析

襄阳市大气颗粒物组分和污染源比例和数浓度及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的小时变化分别如图 2 和图 3。

从颗粒成分来看, 整个监测时段本地大气颗粒物成分以元素碳为主, 平均占比在 40% 以上。此外, 富钾、有机碳及混合碳等成分占比在 10%~15% 之间, 其余成分占比均在 10% 以下。从污染源来看, 机动车尾气源为首要污染源, 如表 1, 在时段 2、时段 3、时段 4、时段 6 等时段的平均占比在 34% 以上, 且机动车尾气源在 $\text{PM}_{2.5}$ 高值时段的占比稍高于 $\text{PM}_{2.5}$ 低值时段, 如时段 1 和时段 5 两个 $\text{PM}_{2.5}$ 低值时段的分别为 24.0% 和 21.5%, 明显低于其他时段。此外, 燃煤、工业工艺的贡献率也在 10% 以上, 其影响也不容忽视。

对比 6 个时段的颗粒成分和污染源分布结果, 时段 1 和时段 5 的成分及污染源分布与其他时段有明显差别。其中, 时段 1 的富钾成分及二次无机源的占比分别高达 30% 和 25.0%, 远高于其余时段, 这与该时段平均风速较低, 有利于颗粒物之间的二次反应有关。而时段 5 在成分上表现为有机碳、富钾、混合碳等

成分占比的明显上升，污染源方面表现为燃煤、生物质燃烧、扬尘等占比较高，机动车尾气占比则相较于时段 4 的明显下降，结合颗粒数浓度以及空气质量来看，该时段随着扩散条件好转，各类成分或污染源颗粒迅速扩散减少，由于本地排放的机动车尾气源(元素碳)颗粒物粒径偏小[16][17]，更易扩散，下降幅度明显大于其余污染源，因而使得扬尘、生物质燃烧、燃煤等下降幅度较低的污染源比例凸显出来。

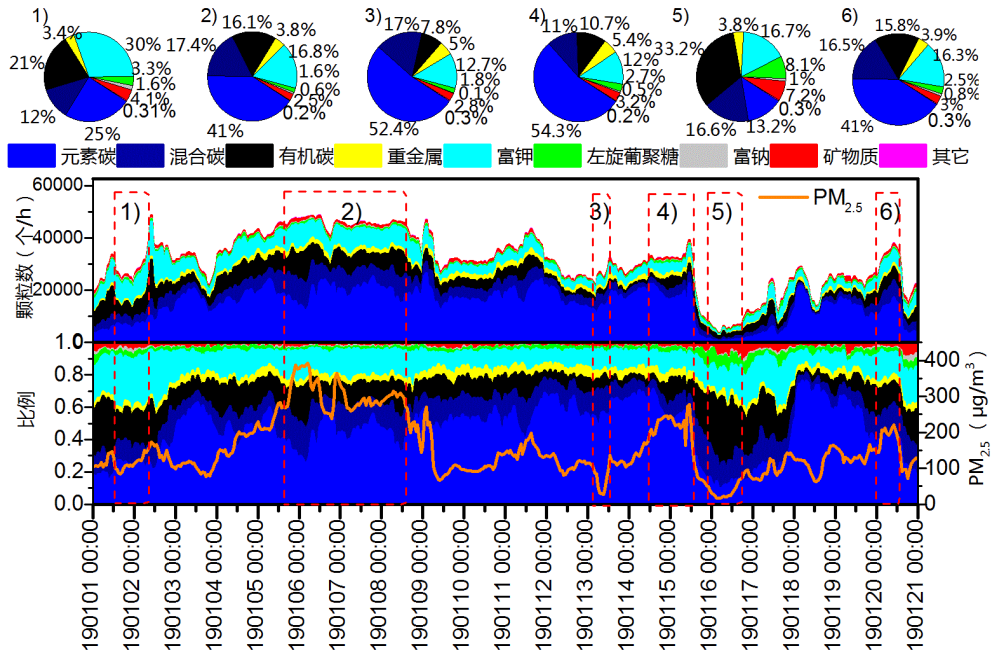


Figure 2. Time series of component ratio and particle number during monitoring
图 2. 监测期间各成分比例、数浓度及 PM_{2.5} 质量浓度时间序列

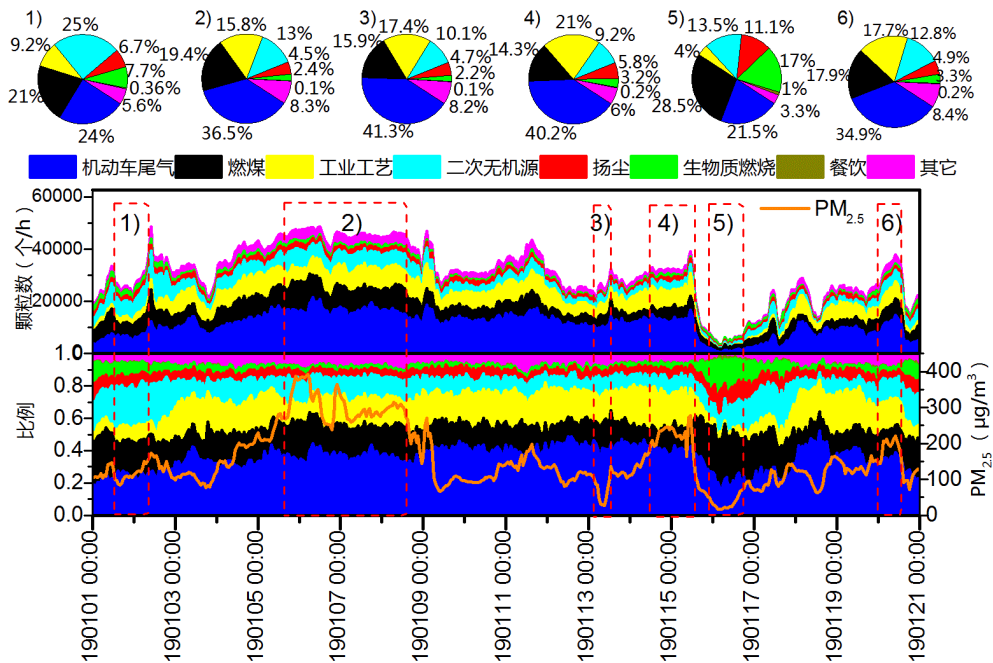


Figure 3. Time series of pollution source ratio and particle number during monitoring
图 3. 监测期间各源类比例、数浓度及 PM_{2.5} 质量浓度时间序列

Table 1. Information statistics for 6 time periods
表 1. 6 个时段信息统计

序号	时段	PM _{2.5} (μg/m ³)	湿度(%)	风速(m/s)
1	1/1 13:00~1/2 8:00	113	58	1.0
2	1/5 16:00~1/8 14:00	306	74	1.6
3	1/13 2:00~1/13 12:00	68	100	/
4	1/14 12:00~1/15 14:00	220	83	1.7
5	1/15 22:00~1/16 18:00	35	58	1.3
6	1/20 0:00~1/20 13:00	190	87	1.3

3.3. 不同污染等级下颗粒物对比

利用襄城运动路国控点的 PM_{2.5} 质量浓度数据,对监测期间襄阳市空气质量进行等级划分,可得到不同污染等级下颗粒物成分和来源构成,以及不同污染等级下颗粒物混合状态。其中,优: PM_{2.5} ≤ 35 μg/m³、良: 35 μg/m³ < PM_{2.5} ≤ 75 μg/m³、轻度污染: 75 μg/m³ < PM_{2.5} ≤ 115 μg/m³、中度污染: 115 μg/m³ < PM_{2.5} ≤ 150 μg/m³、重度污染: 150 μg/m³ < PM_{2.5} ≤ 250 μg/m³、严重污染: PM_{2.5} > 250 μg/m³。

图 4 为不同污染等级下颗粒物的成分(a)和来源(b)变化情况。随着空气质量从优上升至重度污染级别,成分方面主要表现为元素碳成分占比的大幅增加以及重金属占比的稍微上升,污染源方面主要表现为机动车尾气和工业工艺源贡献率上升。随着空气质量进一步升级严重污染级别,成分方面主要表现为混合碳、有机碳和富钾等成分占比的上升,元素碳的占比稍微下降,但仍为首要成分。污染源方面主要表现为元素碳、有机碳、富钾等源类贡献率的稍微上升。

单颗粒气溶胶研究中,通常以硝酸盐(⁻⁶²NO₃⁻)、硫酸盐(⁻⁹²HNO₄⁻)、铵盐(¹⁸NH₄⁺)作为二次气溶胶的标志物,颗粒物中二次气溶胶的存在可在一定程度上反映出颗粒在大气中经历的老化过程[12][18]。从图 5 可见,在不同污染等级下的颗粒物成分与二次组分均有不同程度的混合,且随着污染等级的上升,各类颗粒物成分与二次离子的混合程度总体呈增加趋势,可见在污染天气下颗粒物的老化程度较高;三种二次组分中,各颗粒成分与硝酸盐的混合程度最高,其次为硫酸盐,混合程度最低的为铵盐;各种颗粒成分中,元素碳、混合碳、有机碳、重金属、富钾与二次组分的混合程度最高,富钠和矿物质的次之,左旋葡聚糖和其他成分的明显较低。此外,硫酸盐与有机碳和混合碳的混合程度明显高于与其他颗粒成分,这主要是由于气态 SO₂ 更易与有机碳(OC)、混合碳(ECOC)颗粒结合,并在气溶胶表面发生二次反应生成硫酸盐[18]。

总的来看,在不同污染等级下的颗粒成分与污染来源占比变化趋势基本一致,其中,轻度、重度及严重污染级别天气的发生,成分方面主要表现为元素碳占比的增加,污染源则主要受机动车尾气的大量累积及颗粒物的二次转化影响。而严重污染天气时,成分方面表现为混合碳、有机碳和富钾占比增加以及元素碳始终保持为首要成分,污染源方面除受到机动车尾气的影响外,还明显受到燃煤和工业工艺源的影响。

3.4. 颗粒物老化过程分析

单颗粒质谱测得的成分峰面积与质量浓度相关,峰面积越小说明含量越少,峰面积越大含量相对越大。随着颗粒物的老化,二次生成的硝酸盐不断附着在颗粒物上,使得其峰面积、相对峰面积均有增长。

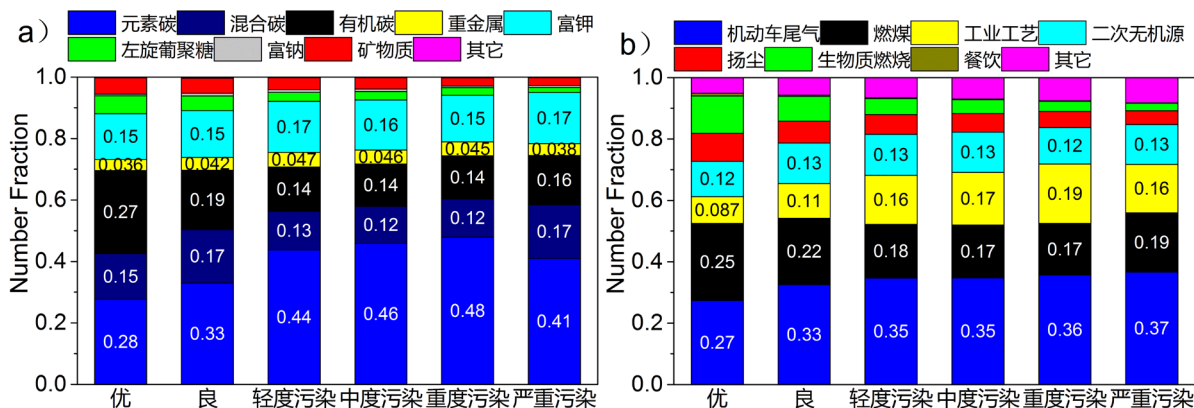


Figure 4. The proportional distribution of particle compositions a) and sources in different polluted weather b)
图 4. 不同污染等级下成分 a)和来源 b)分布

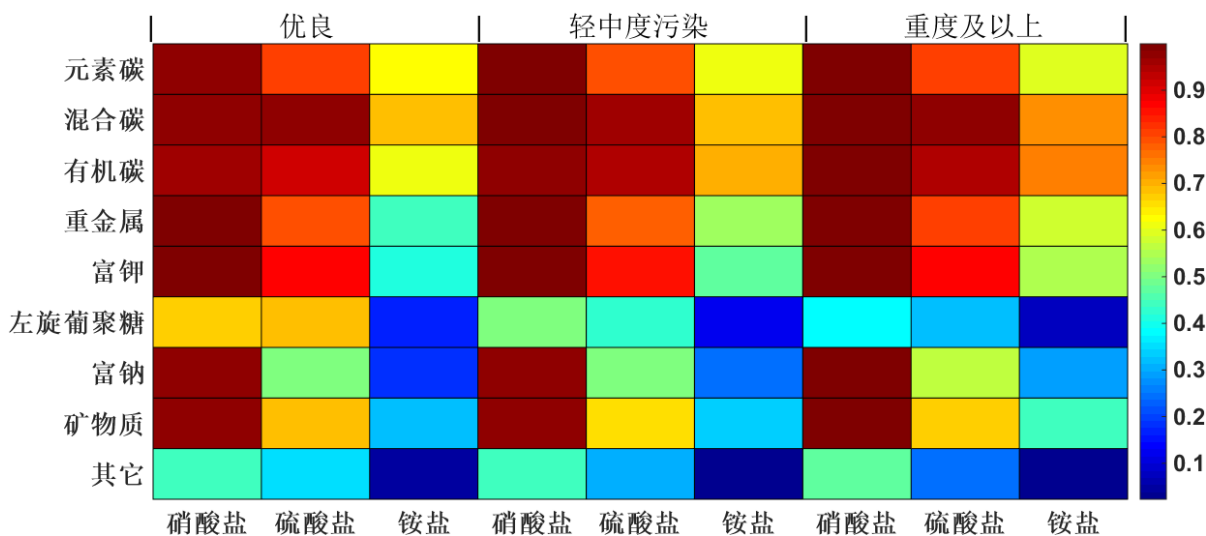


Figure 5. The mixing state of particles with secondary components in different polluted weather
图 5. 不同污染等级下颗粒物成分与二次组分的混合状态

陶士康等人的研究表明, 含有较小相对峰面积的硝酸盐颗粒(硝酸盐相对峰面积小于 0.3)为相对新鲜的颗粒, 而含有较大相对峰面积的硝酸盐颗粒(硝酸盐相对峰面积大于 0.3)则为相对老化的颗粒[14]。新鲜颗粒一般认为来自本地排放, 老化颗粒则主要来自传输或本地排放颗粒物老化的影响。由于监测期间襄阳市出现持续污染天气, 本研究以硝酸盐($^{-62}\text{NO}_3$)为判据, 根据颗粒物的老化程度, 对颗粒物进行新鲜和老化传输区分。

图 6 为含有硝酸盐不同相对峰面积颗粒数及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随时间的小时变化情况。从数量级来看, 大部分时段的硝酸盐老化颗粒(相对峰面积大于 0.3)的小时颗粒数均明显高于硝酸盐新鲜颗粒(相对峰面积小于 0.3), 在高污染时段($\text{PM}_{2.5}$ 高值时段)两者差距尤为明显, 说明监测期间本地大气颗粒物的总体老化程度较高, 这与上文颗粒物成分与二次组分混合程度较高的结果一致。从变化趋势来看, 硝酸盐老化颗粒与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势基本一致, 两者相关性 r 达到 0.89, 即在高污染时段硝酸盐颗粒的老化程度越高。而硝酸盐新鲜颗粒在监测期间总体处于较低水平, 其中在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降过程中出现颗粒数的小高峰。总的来看, 本地大气颗粒物的老化程度较高, 监测期间持续污染天气的发生与颗粒物老化程度较高有一定关系。

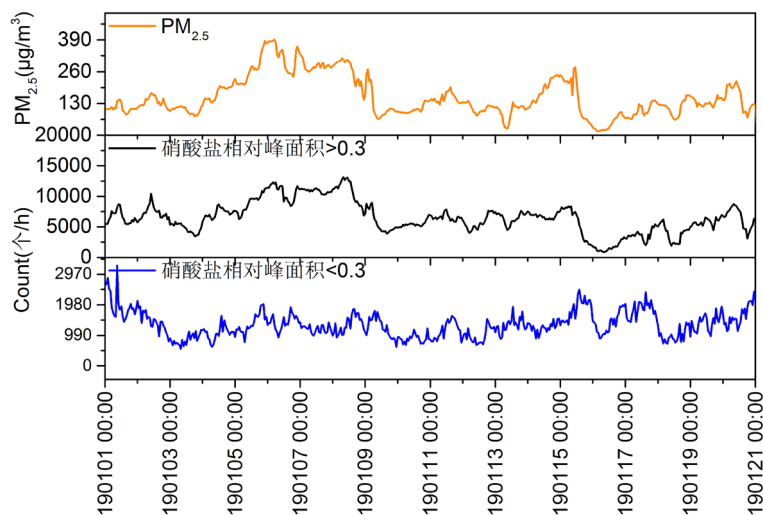


Figure 6. Number change of fresh and aged nitrate particles
图 6. 硝酸盐新鲜与老化颗粒数浓度变化

4. 结论

1) 本研究利用单颗粒气溶胶质谱仪分析了襄阳市 2019 年 1 月 1~20 日的持续污染天气过程中大气 $PM_{2.5}$ 的颗粒成分及污染源变化情况, 了解该时段襄阳市大气颗粒物的污染特征及来源, 为襄阳市大气颗粒物污染防治及空气质量持续改善提供技术支撑。

2) 监测期间襄阳市本地大气 $PM_{2.5}$ 颗粒成分以元素碳为主, 平均占比在 40% 以上, 富钾、有机碳及混合碳等成分占比在 10%~15% 之间。污染源方面则以机动车尾气源的影响为主, 此外, 燃煤、工业工艺的贡献率也在 10% 以上, 其影响也不容忽视。基于此次研究结果, 建议加强对机动车尾气、燃煤、工业工艺等源类的管控和污染防治。

3) 随着污染等级的升高, 颗粒成分与污染来源占比变化趋势基本一致。其中, 轻度、中度及重度污染级别天气的发生, 成分方面表现为首要成分元素碳占比的增加, 污染源则主要受机动车尾气的大量累积及颗粒物的二次转化影响。严重污染天气时, 成分方面表现为混合碳、有机碳和富钾等成分占比增加以及元素碳始终保持为首要成分, 污染源方面除受到机动车尾气的影响外, 还明显受到燃煤和工业工艺源的影响。基于污染过程的成分及污染源变化规律, 建议在污染初始发生阶段及污染过程中, 及时采取机动车限行等管控措施, 降低本地源类排放对污染累积过程空气质量的影响, 以起到削峰降频的作用。

4) 监测期间本地大气颗粒物的老化程度较高, 期间持续的重污染天气的发生与颗粒物老化程度较高有一定关系。

5) 大气污染防治工作是一项长期性工作, 建议进行长时期监测, 摸清每类污染源不同季节、不同时期变化规律, 做整体的管控设计, 从而实现襄阳市空气质量的持续改善。此外, 采用多点位、多种技术手段联合观测, 提供更全面的对策建议。

基金项目

国家重点研发计划(No. 2016YFC0208503)。

致谢

感谢广州禾信仪器股份有限公司技术人员在项目开展过程及数据分析方面给予的支持与帮助。

参考文献

- [1] 吕桅桅, 李兰. 湖北省主要观测站 $PM_{2.5}$ 污染特征及气象要素的影响分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2073-2080.
- [2] 王光义. 南水北调中线工程对襄阳市的影响与对策分析[J]. 水电与新能源, 2013(2): 1671-3354.
- [3] 尹欣, 陈瑾悦, 李易. 襄阳市近 55 年霾气候特征与突变分析[J]. 中国学术期刊电子出版社.
- [4] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [5] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报, 2014, 50(6): 1141-1154.
- [6] 肖经汗, 周家斌, 郭浩天, 等. 采用正定矩阵因子分解法对武汉市夏季某 $PM_{2.5}$ 样品的来源解析[J]. 环境污染与防治, 2013, 5(35): 6-12.
- [7] 张文娟, 饶少林, 张兆年, 等. 宜昌市颗粒物 $PM_{2.5}$ 源解析初步研究[J]. 绿色科技 2016(6): 50-52.
- [8] 王洋. 襄阳市区空气质量变化特征及对策研究[J]. 绿色科技, 2018(12): 112-116.
- [9] 蔡靖, 郑玫, 闫才青, 等. 单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪在线颗粒物研究中的应用和进展[J]. 分析化学, 2015, 5(43): 765-774.
- [10] Li, L., Huang, Z.X., Dong, J., *et al.* (2011) Real Time Bipolar Time-of-Flight Mass Spectrometer for Analyzing Single Aerosol Particles. *International Journal of Mass Spectrometry*, **303**, 118-124.
- [11] 张莉. 基于单颗粒气溶胶质谱信息的分类方法研究及其应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2013: 32-34.
- [12] 毕燕茹, 黄渤, 李梅. 张家口市沙尘天气过程气溶胶单颗粒特征研究[J]. 环境监控与预警, 2018(1): 46-50.
- [13] 环境保护部. 大气颗粒物来源解析技术指南(试行) [S]. 2013.
- [14] 陶士康. 2015 世界互联网大会期间嘉兴市大气细颗粒物污染特征及来源研究——以单颗粒气溶胶质谱技术为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2761-2770.
- [15] Shen, L.J., Wang, H.L., Lv, S., *et al.* (2017) Influence of Pollution Control on Air Pollutants and the Mixing State of Aerosol Particles during the 2nd World Internet Conference in Jiaxing, China. *Journal of Cleaner Production*, **149**, 436-447.
- [16] 周静博, 李治国, 路娜, 等. 抗战胜利 70 周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2855-2862.
- [17] 杜鹃, 张志朋, 宋韶华, 等. 桂林市细颗粒物部分典型排放源的粒径谱及成分分析[J]. 环境监控与预警, 2016, 8(5): 1556-1562.
- [18] 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2071-2080.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org