

成渝地区大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因 分析研究

——以广安市为例

秦竹梅¹, 杜俊杰², 舒洲^{2*}, 梅林德³, 曾丁山²

¹广安市广安区环境监测站, 四川 广安

²四川省广安生态环境监测中心站, 四川 广安

³四川省生态环境科学研究院, 四川 成都

收稿日期: 2023年1月15日; 录用日期: 2023年2月14日; 发布日期: 2023年2月22日

摘要

为研究成渝地区大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因, 选取成渝地区重点市(州)广安市为研究城市, 选择污染较重的年份2016~2017年监测数据为研究数据, 运用HYSPLIT模型、潜在源贡献因子分析法(PSCF)、浓度权重轨迹分析法(CWT)、移动式在线单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)对广安市大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因进行了分析。结果表明: 1) 广安市细颗粒物(PM_{2.5})后向轨迹传输路径季节性贡献率差异较大。2) 重污染天气期间, 广安市PM_{2.5}潜在源区域贡献依次为重庆市西部、川东北区域、重庆东南部, 占比分别为62.93%、22.41%、14.66%。3) 广安市东南部重庆地区、西北部南充市、东北部巴中市是广安市细颗粒物(PM_{2.5})重要潜在源区域, 对广安市细颗粒物(PM_{2.5})的潜在贡献率在50%以上。4) 广安市城区细颗粒物(PM_{2.5})主要成分来源为有机碳, 其次为重金属、元素碳。

关键词

细颗粒物(PM_{2.5}), 污染源, 贡献率, 污染成因

Analysis on Causes of Atmospheric Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Pollution in Chengdu-Chongqing Area

—Taking Guang'an City as an Example

Zhumei Qin¹, Junjie Du², Zhou Shu^{2*}, Linde Mei³, Dingshan Zeng²

*通讯作者。舒洲, 男, 1990年9月, 四川省广安市邻水县, 硕士研究生, 工程师, 主要从事大气污染防治、成渝地区双城经济圈建设、污染源普查等研究。

文章引用: 秦竹梅, 杜俊杰, 舒洲, 梅林德, 曾丁山. 成渝地区大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因分析研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(1): 71-79. DOI: 10.12677/aep.2023.131009

¹Environmental Monitoring Station of Guang'an District, Guang'an City, Guang'an Sichuan

²Sichuan Province Guang'an Ecological Environment Monitoring Center Station, Guang'an Sichuan

³Ecological Environment of Sichuan Province Academy of Sciences, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 15th, 2023; accepted: Feb. 14th, 2023; published: Feb. 22nd, 2023

Abstract

In order to study the causes of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in Chengdu-Chongqing region, Guang'an, a key city (prefecture) in the region, was selected as the research city and prefecture, and the monitoring data of 2016~2017 with heavy pollution was selected as the research data. There were used to analyze the causes of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution by the mean of HYSPLIT model, the potential source contributing factor analysis method (PSCF), concentration weight trajectory analysis method (CWT) and single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) in Guang'an city. The results show that: 1) the seasonal contribution rate of the backward trajectory of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Guang'an city was significantly different. 2) During heavy pollution days, the contribution of PM_{2.5} potential source regions in Guang'an city was the west of Chongqing, the northeast of Sichuan and the southeast of Chongqing, accounting for 62.93%, 22.41% and 14.66%, respectively. 3) Chongqing in the southeast of Guang'an city, Nanchong in the northwest and Bazhong in the northeast were the important potential sources of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Guang'an city, and the potential contribution rate of PM_{2.5} in Guang'an city was more than 50%. 4) The main component of PM_{2.5} in Guang'an city was organic carbon, followed by heavy metal particles and elemental carbon.

Keywords

Fine Particulate Matter (PM_{2.5}), Pollution Sources, Contribution Rate, Pollution Causes

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

大气细颗粒物(PM_{2.5})是大气中的重要污染物, 不仅对大气环境质量有显著影响, 而且与人体健康以及全球气候变化有着紧密的联系[1] [2]。研究表明, PM_{2.5}会对大气能见度、气候变化等造成不利影响[3], 此外, 大气细颗粒物(PM_{2.5})可在大气环境中停留产生二次污染, 而使其水平输送到其他地区影响区域大气环境[4]。

大气细颗粒物污染同时受本地污染物排放和跨区域输送的影响[5], 而跨区域输送受到地形、气象等条件的影响, 输送距离, 小至百米, 大至区域、全球等[6]。因此, 对于大气细颗粒物污染治理不仅仅需要确定污染物组成、来源、危害, 还需要了解大气污染的扩散路径以及时空变化特点。当前, 国内外学者已对大气细颗粒物的化学组成以及来源[7]、区域输送[8]、污染特征[9]及基于 HYSPLIT 模型[10]、CWT 与 PSCF 模型[11]、SPAMS 模型[12]等方面进行了大量的研究。根据四川省空气质量监测网络管理系统显示, 广安市 2016~2017 年环境空气质量为优良天数分别为 319 天、324 天, 轻度污染 39 天、34 天, 中度污染 5 天、7 天, 重度污染 3 天、0 天。随着广安市近年来大力推进蓝天保卫战等“九大”攻坚战, 全市环境空气质量有所改善, 但与《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准相比, 还有待提升, 且与周边的重庆市、南充市、达州市等省(市)还有一定差距。目前, 针对成渝城市群及广安市大气污染防治及

细颗粒物的科学研究主要集中于污染现状及防治措施研究[13]、时空分布与治理研究[14]等研究,对于广安市大气细颗粒物的潜在源和区域污染分析的研究还相对较少。

因此,本文选取广安市污染较重的 2016~2017 年监测数据为研究数据,运用 HYSPLIT、PSCF、CWT、SPAMS 等方法,对在不同类型气流输送、跨区域潜在源贡献污染影响下,广安市大气细颗粒物污染组成来源、污染贡献以及区域季节性贡献情况,从而增进对广安市大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因的了解,从而为广安市大气细颗粒物污染防治提供科学的依据,并为成渝城市群 PM_{2.5} 污染的时空分布与治理研究以及跨域大气污染协同治理研究提供参考。

2. 研究区域概况与方法

2.1. 研究区域概况

据第二次全国污染源普查统计可知,2017 年,广安市“五大源”普查对象数量 4763 个,主要污染物二氧化硫、氮氧化物、颗粒物、挥发性有机物排放量分别为 0.98 万吨、1.84 万吨、5.19 万吨、1.04 万吨。2016-2017 年全市环境空气质量分别为达标率 87.16%、88.76%,优良天数 319 天、324 天,轻度污染 39 天、34 天,中度污染 5 天、7 天,重度污染 3 天、0 天。全市共有五个环境空气质量国控自动监测点位(小平旧居、市委、友谊中学、广电花园及北辰小学),本研究选择具有广安市污染特征的国控点位(广安市委)为研究点位,地理位置(106.630°E, 30.458°N)。市委点位 2017 年 PM₁₀、PM_{2.5} 年均浓度分别为 78.2 μg/m³、44.8 μg/m³,同比 2016 年依次减少 6.0%、-3.9%。

2.2. 研究方法

2.2.1. HYSPLIT 模型

HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model)模型是一种欧拉和拉格朗日型混合的计算模式,其计算方法及分析逻辑见文献[10]。利用该模型对监测期间点位近地面 500 m 高空逐小时 48 h 后向轨迹进行聚类,分析不同源地、不同路径气流的平均源解析结果以及细颗粒物质量浓度。

2.2.2. PSCF 和 CWT 模型

潜在源贡献因子分析法(PSCF)是一种基于气流轨迹,以条件概率函数为基本原理,识别可能污染源位置或源区的方法,已被广泛应用于识别在受体部门观察到的高浓度污染物可能来源区域,并且是一种基于 HYSPLIT 区域污染源识别方法[11]。可以使用公式(1),计算第(*i, j*)网格单位处的 PSCF 值[15]。

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

式中, n_{ij} 为经过第(*i, j*)网格单元的所有轨迹端点的总数, m_{ij} 是同一网格单元中所测量污染物浓度超过该污染物所规定阈值的轨迹端点总数。由于 PSCF 是一种条件概率,当各网格内气流滞留时间较短时, PSCF 值会出现较大波动,使得这种不确定性增大,出现误差较大的情况。为了消除 n_{ij} 较小的像元中的不确定性,降低条件概率函数因样本总量 n 较小而产生误差的影响,更好地反映这些像元中值的不确定性[11],引入权重函数 $W(ij)$,其计算公式(2)如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & 3n_{avg} < n_{ij} \\ 0.70 & 1.5n_{avg} < n_{ij} \leq 3n_{avg} \\ 0.40 & n_{avg} < n_{ij} \leq 1.5n_{avg} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

其中, n_{avg} 为每个网格的平均轨迹端点数。WPSCF 分析只能反映网格单元中污染轨迹的比例,而对于具

有相同 WPSCF 值的区域, 无法区分对目标对象污染水平的影响。因此, 采用 CWT 方法以更好地突破上述限制并计算不同源区域的相对贡献, 其通过将每个污染物浓度与网格相关的轨迹求平均, 将停留时间加权浓度分配给每个网格单元[11]。其计算公式(3)如下:

$$C_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (3)$$

式中, C_{ij} 为第(i, j)网格单元的加权平均浓度, i 为轨迹的指数, m 为轨迹的总数, C_l 为轨迹 l 经过网络单元(i, j)时对应的污染物浓度, τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格单元(i, j)停留的时间。CWT 方法也存在不确定性, 本文采用与 PSCF 相同的权重因子 w_{ij} 消除其不确定的存在。

2.2.3. SPAMS 数据分析

本文采用移动式在线单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)对监测点位的 $PM_{2.5}$ 数浓度、粒径、化学组成等进行监测, 监测时间为 2016 年污染较为严重的 6 月 1 日 12:00 至 6 月 15 日 6:00。SPAMS 的采样原理与分析方法见文献[12], 本文 SPAMS 数据时间分辨率为 1 s, 检测速率最高可达 10 个/s, 质谱测量范围质荷比(m/z)最大为 ± 250 。

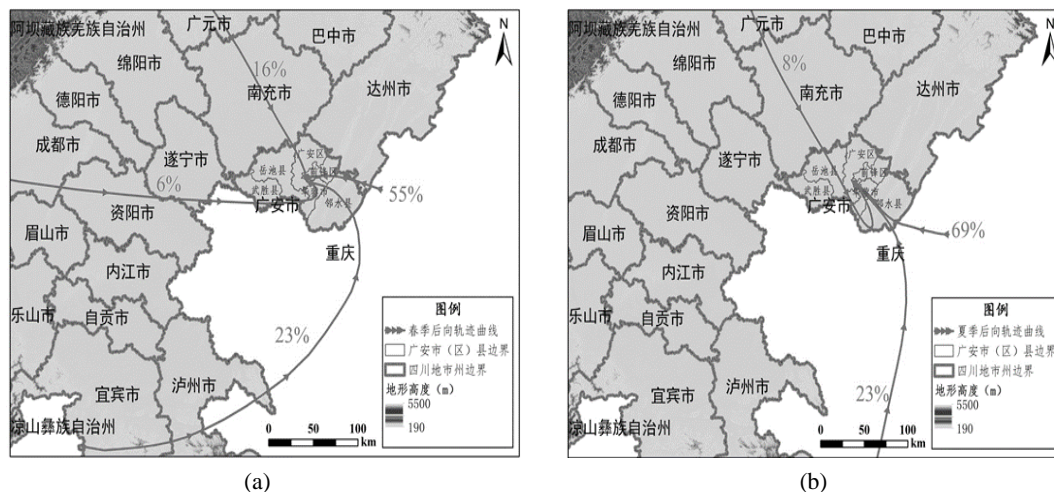
3. 结果与分析

3.1. 气流后向轨迹及聚类分析

基于 2016 年 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12 月至 2017 年 2 月的 NOAA Reanalysis 数据, 以监测点位为中心, 采用 HYSPLIT 模型模拟广安市大气细颗粒物后向轨迹传输路径, 得到广安市不同季节后向轨迹分析结果图, 如图 1 所示。

春季(3~5 月), 广安市后向轨迹模拟聚合得到 4 个主要的大气气流传输方向, 其气流来源主要是重庆中部和达州南部的贡献, 传输贡献占比为 55%; 其次是来自川南的宜宾市、泸州市以及重庆南部的传输贡献, 传输贡献占比为 23%; 北部的广元市、南充市传输贡献占比为 16%; 成都平原、资阳市、遂宁市的贡献占比仅为 6%。研究表明, 春季广安市的外来气流传输主要是受重庆的影响, 成都平原的贡献相对较小。

夏季(6~8 月), 广安市后向轨迹模拟聚合得到 3 个主要的大气气流传输方向, 夏季传输主要是来自于重庆市中部和南部, 总传输贡献占比为 92%, 此外, 北部的广元市、南充市也存在较小的传输贡献, 占比为 8%。



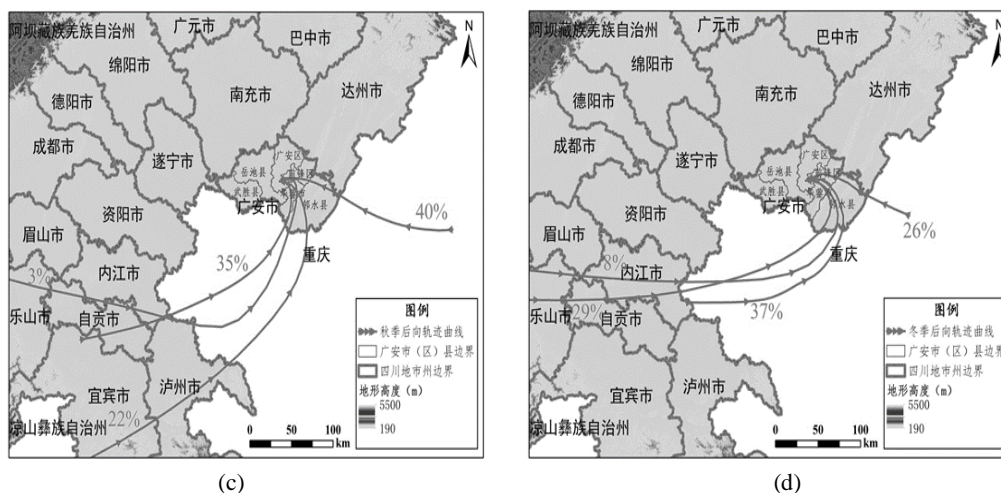


Figure 1. Backward trajectory clustering analysis results of Guang'an city
图 1. 各季度广安市后向轨迹聚类分析结果图

秋季(9~11月),广安市后向轨迹模拟聚合得到4个主要大气气流传输方向,其中重庆中、北部来源贡献占比为40%,其次是乐山市、内江市、自贡市、重庆南部的传输贡献,占比为38%,宜宾市、泸州市、重庆南部的来源贡献占比为22%。秋季的气象传输来源呈现出以川南城市群、重庆南部的传输贡献为主,其传输方向与WRF模型模拟的流场基本一致。

冬季(12月~次年2月),广安市后向轨迹模拟聚合得到4个主要大气传输方向,其来源仍以川南城市群的贡献为主,其中乐山市、内江市、自贡市及重庆西南部的传输贡献占比为74%,重庆北部的来源贡献占比为26%。

3.2. 污染源区域影响分析

3.2.1. 重要时段空气质量状况

广安市2016年2月重污染天气期间,PM_{2.5}浓度日平均变化情况如图2所示,对PM_{2.5}日均浓度进行统计,PM_{2.5}日均浓度为104.9 μg/m³,并得到监测期间不同污染等级天数及占比情况,分别为优1天、占比3.4%,良7天、占比24.1%,轻度污染13天、占比44.8%,中度污染3天、占比10.3%,重度污染5天、占比17.2%。监测期间,与国家二级浓度限值相比,广安市2月6~12日出现连续7天的中度以上污染天气,2月8日出现最大PM_{2.5}浓度日均值为274 μg/m³。

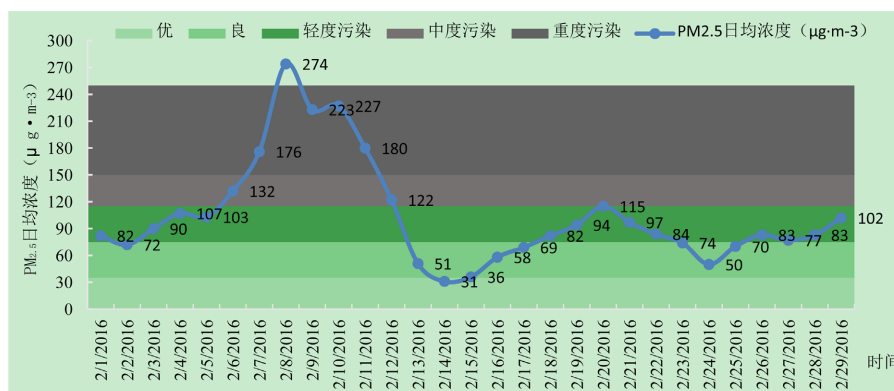
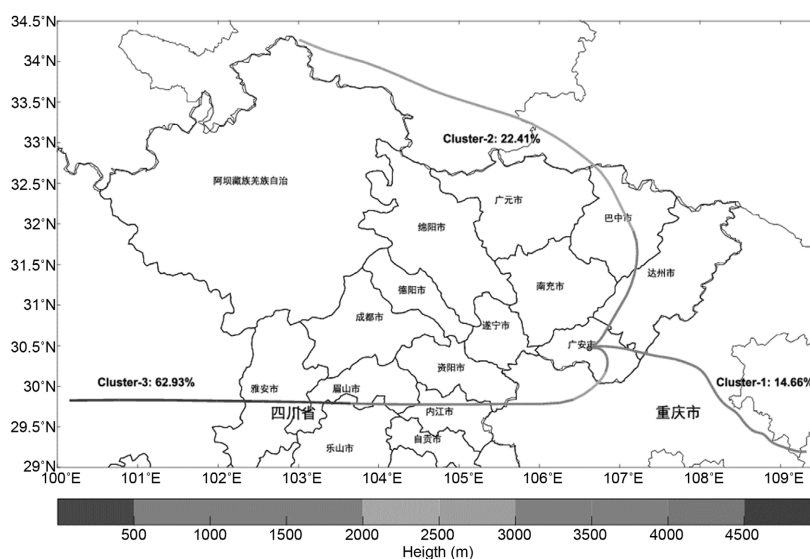


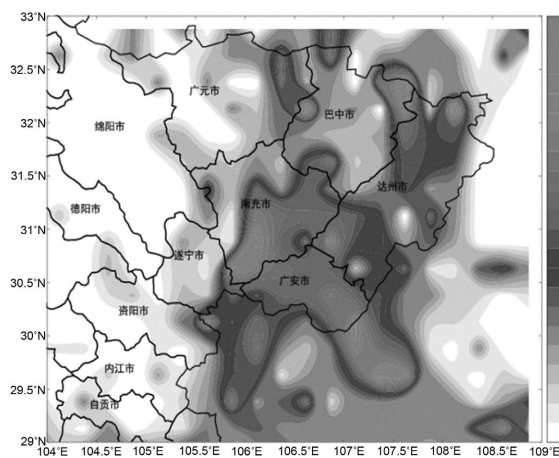
Figure 2. Daily average change of PM_{2.5} concentration
图 2. PM_{2.5}浓度日平均变化

3.2.2. 污染源区域模型分析

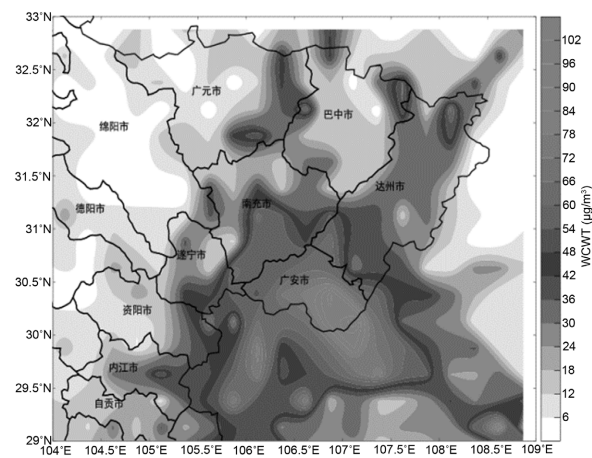
采用 HYSPLIT 模型对广安近地面(500 m)每日气团移动的 48 h 后向轨迹进行模拟并聚类, 考虑气象传输特点的影响, 重点对广安市 2016 年 2 月重污染天气期间的潜在源进行全面分析, 得到重污染天气期间广安市区域污染分析情况, 如图 3 所示。通过重污染天气期间后向轨迹模拟聚合, 得到 3 个主要的大气气流传输方向, 来自甘孜州, 经川南地区, 从重庆市西部到广安城区的气流轨迹(Cluster-3)占比最大, 为 62.93%; 来自阿坝北部边界, 经过巴中市、达州地区的气流轨迹(Cluster-2)占比为 22.41%; 来自重庆市的东南方向气流轨迹(Cluster-1)占比为 14.66%。广安市重污染天气期间, 应加强与重庆毗邻区域大气污染各类源强力管控。



(a) 后向轨迹聚类分布



(b) $PM_{2.5}$ 潜在源贡献分析



(c) $PM_{2.5}$ 浓度权重轨迹分析

Figure 3. Analysis of regional pollution in Guang'an city during heavy pollution weather

图 3. 重污染天气期间广安市区域污染分析

采用 PSCF 模型分析可知, 广安市 $PM_{2.5}$ 的潜在源贡献(PSCF)的较大值主要分布在东南部的重庆地区及西北方向的南充地区, 以及巴中市东北边界附近, 这些区域对广安市 $PM_{2.5}$ 的潜在贡献在 50% 以上, 表明这些区域是影响广安市 $PM_{2.5}$ 污染的重要潜在源区。其中, 与重庆市毗邻区域对广安市 $PM_{2.5}$ 污染潜

在贡献超过了 60%，应重点关注该区域并加强靠近重庆地区的大气污染防治管控。

采用 CWT 模型分析可知，监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度权重轨迹较高值主要集中于广安市东南部和重庆北部交汇地区，是广安市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要潜在源区，这些区域对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 贡献在 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，广安市东南部和重庆北部交汇处 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 贡献在 $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，表明这些地区是影响广安市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值大小的重要潜在源区。

3.3. 颗粒物在线源解析

3.3.1. $\text{PM}_{2.5}$ 成分分析

基于 SPAMS (0525) 对监测期间细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)成分分类特征如图 4 所示，正谱图中含有明显的 $\text{Al}^+/\text{C}_2\text{H}_3^+$ ($m/z = 27$)、 Na^+ ($m/z = 23$)、 K^+ ($m/z = 39$)、 C^+ 、 C^3+ 等 EC 的信息， C_2H_3^+ ($m/z = 12$ 、 36)、 C_3H^+ ($m/z = 27$ 、 37) 等 OC 信号峰，有机碳的信号峰也较为明显；负谱图中含有水溶性无机离子 NO_2^- ($m/z = -46$)、 NO_3^- ($m/z = -62$)、 HSO_4^- ($m/z = -97$) 的信号峰。研究可知，广安市重污染期间应加强燃煤源、工艺过程源、扬尘源等污染源监督管理，实施严格管控。细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)不同类型颗粒数浓度占比，如图 5 所示，广安市气溶胶中主要为元素碳(EC)颗粒，颗粒数量占气溶胶总颗粒数的 32%，其次为富钾颗粒(K-rich)、有机碳(OC)、长链元素碳(HEC)占比分别为 17%、11%、11%。结果表明监测期间广安市城区主要污染源为有机碳，其次为重金属、元素碳，再者就是以硫酸盐、硝酸盐等为主的二次污染。这与长沙市[12]、西安市[7]季节性 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成类似，元素碳、有机碳、富钾颗粒均占比较大。

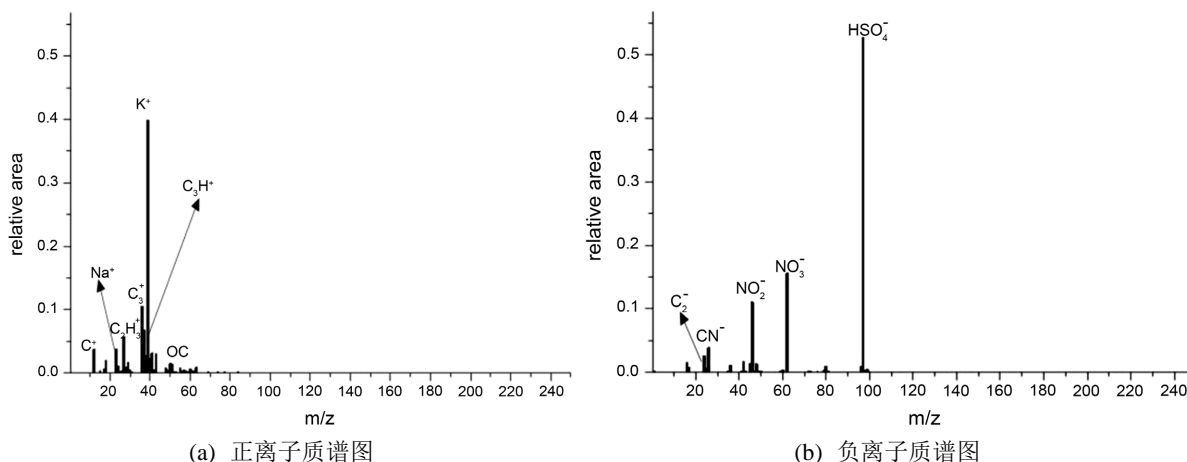


Figure 4. Positive and negative mass spectrometry of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$)

图 4. 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)正负质谱图

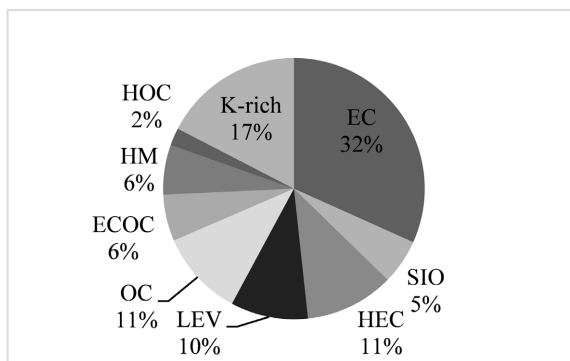


Figure 5. Proportion of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) in different particle number concentrations

图 5. 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)不同类型颗粒数浓度占比

3.3.2. PM_{2.5} 来源分析

监测期间广安市细颗粒物(PM_{2.5})污染源如图6所示,机动车尾气源为主要排放来源,贡献率为29%,其他源依次为燃煤源(22%) > 工业工艺源(20%) > 扬尘源(9%) > 二次无机源(8%) = 其他污染源(8%) > 生物质燃烧源(4%)。部分地区 SPAMS 源解析结果见表1。由表可知,广安市扬尘源仅低于扬州市;机动车尾气源高于北京市,低于杭州市和扬州市;燃煤源仅高于杭州市,比北京市同比低 54.54%;工业工艺源与杭州市持平,分别比北京市和扬州市高 41%、41.5%;生物质燃烧源最低;二次无机源仅比北京略低,说明广安市大气氧化性相对较强,气-粒转化过程可能比杭州市、扬州市稍强。

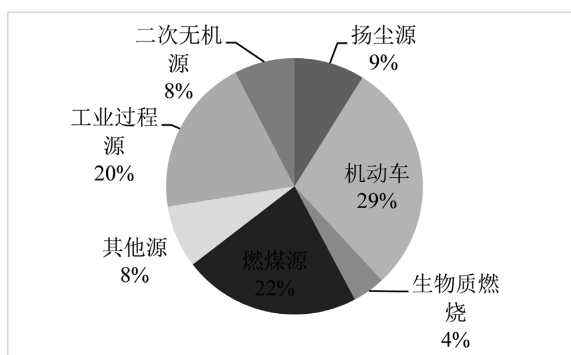


Figure 6. Source composition of fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution
图 6. 细颗粒物(PM_{2.5})污染源组成

Table 1. Analysis results of PM_{2.5} sources based on SPAMS in some regions

表 1. 部分地区基于 SPAMS 的 PM_{2.5} 源解析结果

地区	采样时间	污染源占比/%							
		餐饮	扬尘	生物质燃烧	机动车尾气	燃煤	工业工艺	二次无机	其他
杭州[16]	2016年8~9月	-	6.8	10.1	36.5	16.7	20.3	2.5	7.1
北京[17]	2016年12月~2019年1月	-	3.2	8.6	26.4	34.0	11.8	10.7	5.3
扬州[18]	2016年1~3月	-	18.4	6.7	32.5	23.3	11.7	2.9	4.4
广安(本研究)	2016年6月1~15日	-	9.0	4.0	29.0	22.0	20.0	8.0	8.0

4. 结论

通过多种模型和分析方法对广安市大气细颗粒物(PM_{2.5})污染成因进行分析研究,得到以下主要结论。

1) 广安市细颗粒物(PM_{2.5})后向轨迹传输路径季节性贡献率差异较大。春季、夏季、秋季、冬季分别以重庆中部和达州南部、重庆市中部和南部、川南城市群和重庆南部、川南城市群为主要贡献,占比分别为 55%、92%、60%、74%。

2) HYSPLIT 模型解析可知,重污染天气期间,广安市 PM_{2.5} 潜在源区域贡献依次为重庆市西部、川东北区域、重庆东南部,占比分别为 62.93%、22.41%、14.66%。

3) PSCF 与 CWT 模型分析可知,广安市东南部重庆地区、西北部南充市、东北部巴中市是广安市细颗粒物(PM_{2.5})重要潜在源区域,对广安市细颗粒物(PM_{2.5})的潜在贡献率在 50% 以上。广安市东南部和重庆北部交汇地区对广安市 ρ (PM_{2.5}) 贡献在 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,交汇处对 ρ (PM_{2.5}) 贡献在 102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。

4) 广安市城区细颗粒物(PM_{2.5})主要成分来源为有机碳, 其次为重金属、元素碳。机动车尾气源、燃煤源、工业工艺源为广安市城区细颗粒物主要污染源, 占比分别为 29%、22%、20%。

基金项目

四川省科技厅 2022 年科技创新基地(平台)和人才计划项目(2022JDR0066)。

参考文献

- [1] Tie, X.X., Wu, D. and Brasseur, G. (2009) Lung Cancer Mortality and Exposure to Atmospheric Aerosol Particles in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **43**, 2375-2377. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.036>
- [2] Kaufman, Y.J., Tanre, D. and Boucher, O. (2002) Satellite View of Aerosols in the Climate System. *Nature*, **419**, 215-223. <https://doi.org/10.1038/nature01091>
- [3] Toon, O.B. (2000) How Pollution Suppresses Rain. *Science*, **28**, 1763-1765. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1763>
- [4] Chen, Q.C., Wang, M.M., Sun, H.Y., et al. (2018) Enhanced Health Risks from Exposure to Environmentally Persistent Free Radicals and the Oxidative Stress of PM_{2.5} from Asian Dust Storms in Erenhot, Zhangbei and Jinan, China. *Environment International*, Part 1, **121**, 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.012>
- [5] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 PM_{2.5} 重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2741-2751.
- [6] 胡清华. 福州地区冬春典型污染过程 PM_{2.5} 特征及成因分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(3): 49-58.
- [7] 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩, 等. 西安市大气 PM_{2.5} 的化学组分及其来源[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1431-1441.
- [8] 王芳龙, 李忠勤, 杨宏, 等. 天水市大气颗粒物输送通道及污染源区研究[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2371-2383.
- [9] 姚玉兰, 李小宁, 闫海全, 等. 泸州市主城区 2019 年 3 月至 2020 年 2 月大气颗粒物污染特征及防治对策研究[J]. 四川环境, 2021, 40(1): 86-92.
- [10] Bouchlaghem, K., Chtioui, H., Gazzah, M.H., et al. (2021) Analyzing the Impact of Saharan Sand and Dust Storms Based on HYSPLIT Algorithm in Tunisian Regions. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 834. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07174-4>
- [11] 汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于 PSCF 与 CWT 模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3033-3042.
- [12] 黄河仙, 丁华, 殷芙蓉, 等. 利用 SPAMS 研究长沙市秋季 PM_{2.5} 化学组成及来源[J]. 环境监控与预警, 2021, 13(4): 40-46.
- [13] 谌均. 广安市大气污染现状及防治措施[J]. 绿色科技, 2016, 3(6): 53-55.
- [14] 陈春江. 成渝城市群 PM_{2.5} 污染的时空分布与治理研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [15] 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 14-20.
- [16] 郑仙珏, 王梅, 陶士康, 等. 2016 年某重大活动期间杭州市 PM_{2.5} 组分及来源变化研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(9): 936-942.
- [17] 索娜卓嘎, 谭丽, 周芮平, 等. 采暖期北京大气 PM_{2.5} 中碳组分的分布特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 54-59.
- [18] 王亚林, 易睿, 谢继征, 等. 扬州市大气 PM_{2.5} 来源解析研究[J]. 污染防治技术, 2016, 29(6): 22-28.