
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2020

Vol.41 No.1

第41卷 第1期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第1期
2020年1月15日

# 目 次

环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第1期 2020年1月
Vol.41, No.1 Jan., 2020

# 基于模型模拟的成都市 $PM_{2.5}$ 污染来源解析

许艳玲[1,2], 易爱华[3], 薛文博[2*]
(1. 北京工业大学区域大气复合污染防治北京市重点实验室,北京 100124; 2. 生态环境部环境规划院区域空气质量模拟与管控研究中心,北京 100012; 3. 生态环境部环境工程评估中心,北京 100012)

**摘要**: 在建立成都市大气污染物排放清单的基础上,采用源开关敏感性分析法,设置 8 个排放情景,基于 WRF-CMAQ 模型模拟分析了 2015 年 1、4、7 和 10 月这 4 个典型代表月份的大气污染传输和不同行业对成都市 $PM_{2.5}$ 污染贡献. 结果表明成都市 $PM_{2.5}$ 污染较重,特别是 1 月达到 130 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上; 浓度的高值集中在中心城区,且与周边城市 $PM_{2.5}$ 污染连接成片. 由于气团比较稳定,大气污染物的区域传输能力较弱,成都市 $PM_{2.5}$ 污染以本地源的贡献为主,占比为 61%. 从行业贡献来看,移动源、扬尘源和生活源对成都市 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献率分别为 29%、26% 和 24%,是影响 $PM_{2.5}$ 污染的主要污染源,下一步应强化对这 3 类源的污染控制.

**关键词**: 成都; $PM_{2.5}$; WRF-CMAQ 模型; 区域传输; 行业贡献
**中图分类号**: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)01-0050-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201905041

## Modeling Studies of Source Contributions to $PM_{2.5}$ in Chengdu, China

XU Yan-ling[1,2], YI Ai-hua[3], XUE Wen-bo[2*]
(1. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Center for Regional Air Quality Simulation and Control, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 3. Center for Environment & Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract**: This study establishes eight emission scenarios in the air pollutant emissions inventory of Chengdu City, China. We use the Weather Research and Forecasting and Community Multiscale Air Quality (WRF-CMAQ) models and a "zero-out" approach to investigate contributions of air pollution transport and sources to aerosol fine particulate matter ($PM_{2.5}$) pollution in Chengdu City during January, April, July, and October 2015. The results showed that $PM_{2.5}$ pollution in Chengdu City was serious during these months and reached >130 $\mu g \cdot m^{-3}$ in January. Highest concentrations were measured in the city center. $PM_{2.5}$ pollution in Chengdu and the surrounding cities was found to exhibit regional characteristics. Since the air mass was stable during the monitoring periods, the interregional transmission capability of air pollution was poor, and thus local sources were the main contributors (61% of the annual average concentration) to $PM_{2.5}$ pollution in Chengdu City. The contributions of local sources in April and July were higher than of those in January and October. We found that the main sources of $PM_{2.5}$ pollution in Chengdu City were automobile emission (29% of the total), dust (26%), and domestic pollution (24%), and should be further controlled in the future.

**Key words**: Chengdu; $PM_{2.5}$; WRF-CMAQ model; regional transport; source contributions

$PM_{2.5}$ 污染已经成为影响我国城市空气质量的重要环境问题,呈现区域性污染特征,限制了经济可持续发展,并对人体健康产生严重危害[1~3]. 开展 $PM_{2.5}$ 污染的来源解析可为制定针对性防治措施和实现精准污染管控提供科学依据. 一种常见的方法是采用受体模型法分析不同行业污染物排放对 $PM_{2.5}$ 污染的贡献[4~8],该方法的不确定性主要来自于模型方法假设、大气 $PM_{2.5}$ 采集和化学成分测量的不确定性、源成分谱的共线性(即不同排放源可能有相似的源成分谱)以及对二次来源正确判定等[9~11]. 另一种比较常见的方法是采用数值模型模拟跨区域传输对区域 $PM_{2.5}$ 污染影响及不同行业对城市 $PM_{2.5}$ 污染贡献[12~16]. 模型法的优点是不局限于观测点位,可以根据需求选择目标点开展源解析和污染传输特征等研究,其不确定性主要来自气象场模拟和排放清单等. 目前,有关京津冀、长三角和珠三角等地区的 $PM_{2.5}$ 污染来源解析研究较多. 成都市位于四川盆地西部,是西南地区科技、金融中心和交通枢纽,位于亚热带湿润季风气候区,风速低,静风频率高,造成大气扩散条件差,污染物容易累积[17,18]. 目前,已有学者采用 PMF 方法、主成分分析法(PCA)等受体模型法对成都市 $PM_{2.5}$ 化学组分污染特征及来源进行了研究[19,20],但还没有基于模型模拟法对成都市区域传输和行业贡献解析的报道. 本研究采用 WRF-CMAQ 模型系统,识别成都市 $PM_{2.5}$ 污染的主要贡献源,以期为当地政府制定针对性的 $PM_{2.5}$ 污染控制政策提供科学支撑.

**收稿日期**: 2019-05-07; **修订日期**: 2019-08-26
**基金项目**: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0207502, 2016YFC0208805)
**作者简介**: 许艳玲(1980~),女,博士研究生,副研究员,主要研究方向为空气质量模型、大气污染控制对策, E-mail: xuyanling@caep.org.cn
* 通信作者, E-mail: xuewb@caep.org.cn

## 1　材料与方法

### 1.1　模型设置

(1)模拟时段　为2015 年的1、4、7 及10 月共4 个典型月,结果输出时间间隔为1 h.

(2)空气质量模拟　空气质量模型选择 CMAQ 模型. 区域采用 Lambert 投影坐标系,中心点经度为108.3°E,中心纬度为 33.9°N,两条平行纬度分别为27.9°N 和39.9°N. 模拟范围采用三层嵌套,空间分辨率分别为27、9 和3 km. 垂直方向共设置14 个气压层,层间距自下而上逐渐增大. 采用的化学机制为 CB-05 气相化学反应机制和 AERO5 气溶胶反应机制.

(3)气象模拟　CMAQ 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供,WRF 模型与 CMAQ 模型采用相同的模拟时段和空间投影坐标系,但模拟范围大于 CMAQ 模拟范围,垂直方向共设置 30 个气压层,层间距自下而上逐渐增大. WRF 模型的初始输入数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的6 h 一次、1°分辨率的 FNL 全球分析资料,利用 NCEP ADP 观测资料进行四维同化.

(4)模型参数　CMAQ 模型、WRF 模型参数设置如表1 和表2 所示,该模型参数在已有研究中得到验证[21,22].

**表1　CMAQ 模型参数化方案**

Table 1　Parameterization scheme of CMAQ model

| 模型参数 | CMAQ | 模型参数 | CMAQ |
|---|---|---|---|
| 模型版本 | 5.0.2 | 气溶胶化学机制 | AERO5 |
| 网格嵌套方式 | 单层网格 | 光化学速率 | In-line |
| 水平分辨率 | 20 km | 风沙尘 | off |
| 垂直分层层数 | 14 | 边界条件 | 默认 |
| 气相化学机制 | CB-05 | 初始条件 | 逐日重启 |

**表2　WRF 参数化方案**

Table 2　Parameterization scheme of WRF model

| 参数化方案 | 所选方案名称 | 参数化方案 | 所选方案名称 |
|---|---|---|---|
| 微物理过程 | WSM6 | 陆面过程 | Pleim Xiu |
| 长波辐射 | New Goddard scheme | 边界层 | ACM2 |
| 短波辐射 | RRTM | 积云对流 | Kain-Fritsch |
| 近地层 | Pleim Xiu | | |

### 1.2　排放清单

CMAQ 模型所需排放清单的化学物种主要包括 $SO_2$、$NO_x$、颗粒物($PM_{10}$、$PM_{2.5}$及其组份)、$NH_3$ 和 VOCs(含多种化学组份)等多种污染物. 成都市2015 年人为源大气污染物排放清单是在2014 年排放清单、环境统计及现场调研资料等数据基础上,采用物料衡算法、排放系数法、模型估算法等方法,通过对2014 年排放清单更新而建立的(图1). 周边城市排放数据均采用2015 年 MEIC 排放清单(http://www.meicmodel.org/),风沙尘排放基于 CMAQ 在线计算,生物源 VOCs 排放清单利用 MEGAN 天然源排放清单模型计算[23].

### 1.3　模型验证

利用成都市环境空气质量自动监测站2015 年实际观测数据,验证空气质量模型模拟结果的准确性,见图2 所示. 结果表明,1、4、7 和10 月这4 个典型月的模拟与观测日均浓度之间有很高相关性,$R$ 值均大于0.75,NMB 和 NME 处于 −12%~5% 和18%~29% 范围内,模拟误差处在可接受范围内,说明本研究所选用的空气质量模型及模拟参数设置等对 $PM_{2.5}$ 模拟效果较好,可用于分析成都市 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征.

### 1.4　情景设计

采用源开关敏感性分析法,设置8 个排放情景,基于 WRF-CMAQ 模型模拟分析区域大气污染传输规律以及不同行业对成都市 $PM_{2.5}$ 污染贡献. 模拟情景的具体设置见表3. ①将污染源分为本地源排放和外地源排放两大类. ②根据产业结构和污染物排放行业构成特点,将本地源分为6 类,包括重点工业(火电、钢铁、建材)、工业锅炉、生活源(民用燃烧、生物质燃烧、餐饮油烟)、移动源(机动车、非道路机械)、扬尘源和其他等.

**表3　模拟情景设置**

Table 3　Simulation scenarios

| 情景编号 | 情景内容 |
|---|---|
| 0 | 基本情景(含所有源) |
| 1 | 关闭所有本地源 |
| 2 | 关闭全市重点工业 |
| 3 | 关闭工业锅炉 |
| 4 | 关闭生活源 |
| 5 | 关闭移动源 |
| 6 | 关闭扬尘源 |
| 7 | 关闭其他行业 |

外地源对成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度贡献的计算方法为:

$$\omega_{ei} = \frac{\rho_{1i}}{\rho_{0i}} \tag{1}$$

式中,$\omega_{ei}$ 为第 $i$ 月外地源对成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度贡献比例,%;$\rho_{0i}$ 为基准情景下第 $i$ 月成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度,$\mu g \cdot m^{-3}$;$\rho_{1i}$ 为关闭本地源后第 $i$ 月成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度,$\mu g \cdot m^{-3}$. 扣除外地源贡献后,可得到本地源对 $PM_{2.5}$ 污染的影响.

对于本地源中6 类污染源对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献可以基于表3 中情景2~7 模拟结果进行计算:

$$\omega_{ni} = \frac{\rho_{0i} - \rho_{ni}}{\rho_{0i} - \rho_{1i}} \tag{2}$$

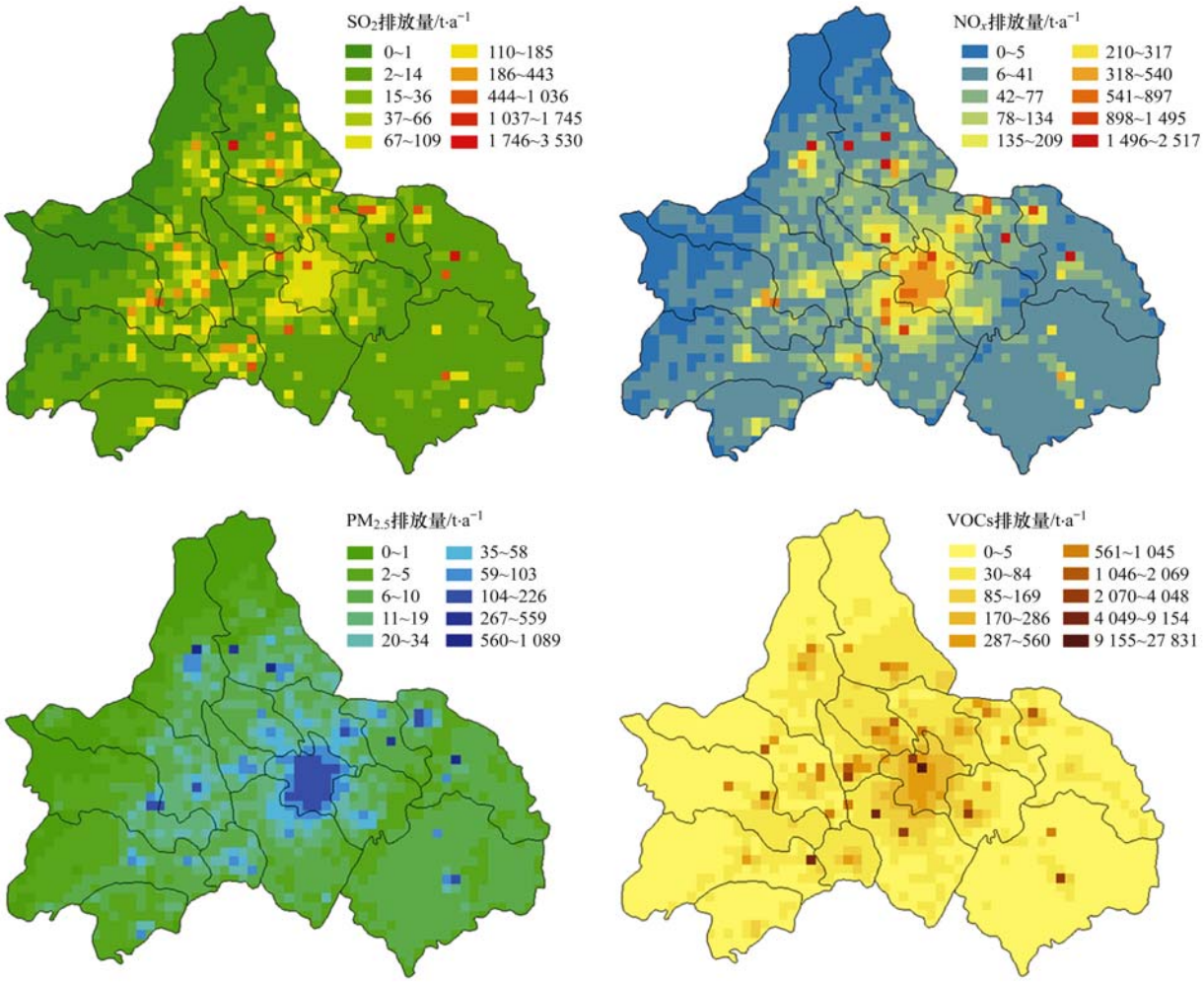



**图 1 成都市主要污染物排放清单**

Fig. 1 Air pollutants emissions inventory in Chengdu City

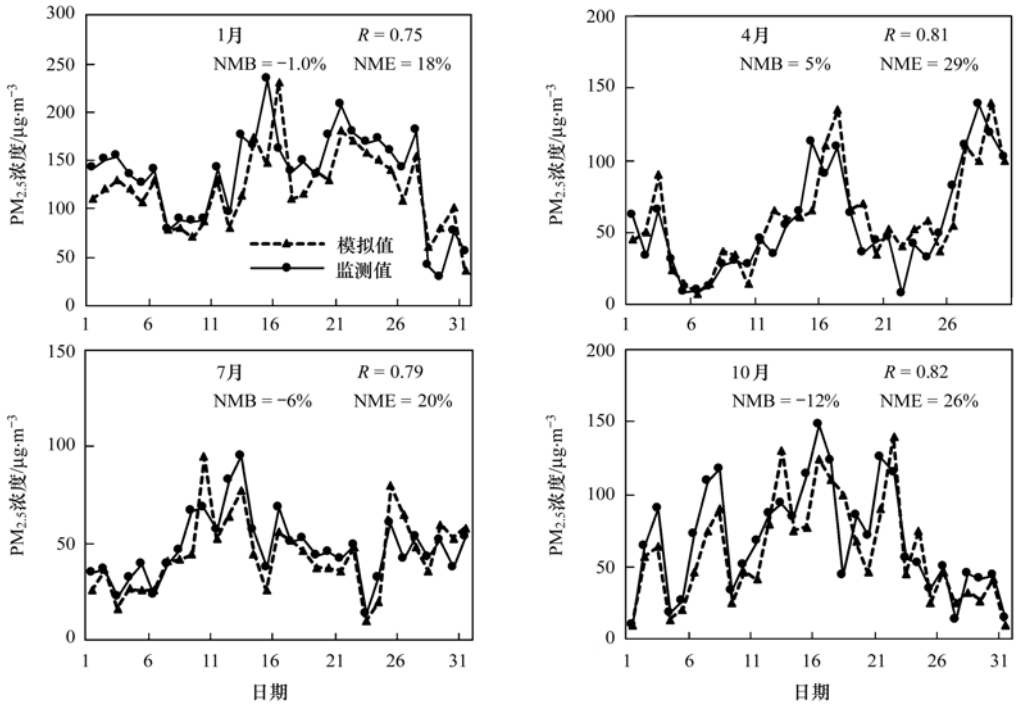



**图 2 成都市 $PM_{2.5}$ 模拟与监测日均浓度比对**

Fig. 2 Comparisons of the simulated and observed mean daily $PM_{2.5}$ concentrations in Chengdu City

式中，$\omega_{ni}$ 为第 $i$ 月第 $n$ 类源对成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度贡献占本地源贡献量的比例，%；$\rho_{ni}$ 关闭 $n$ 类源后第 $i$ 月成都市 $PM_{2.5}$ 月均浓度，$\mu g \cdot m^{-3}$.

1、4、7 和 10 这 4 个典型月分别代表冬季、春季、夏季和秋季，并通过对 4 个月的模拟结果取平均值，得到年均浓度. 参考公式(1)和(2)，可计算各类源对 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献.

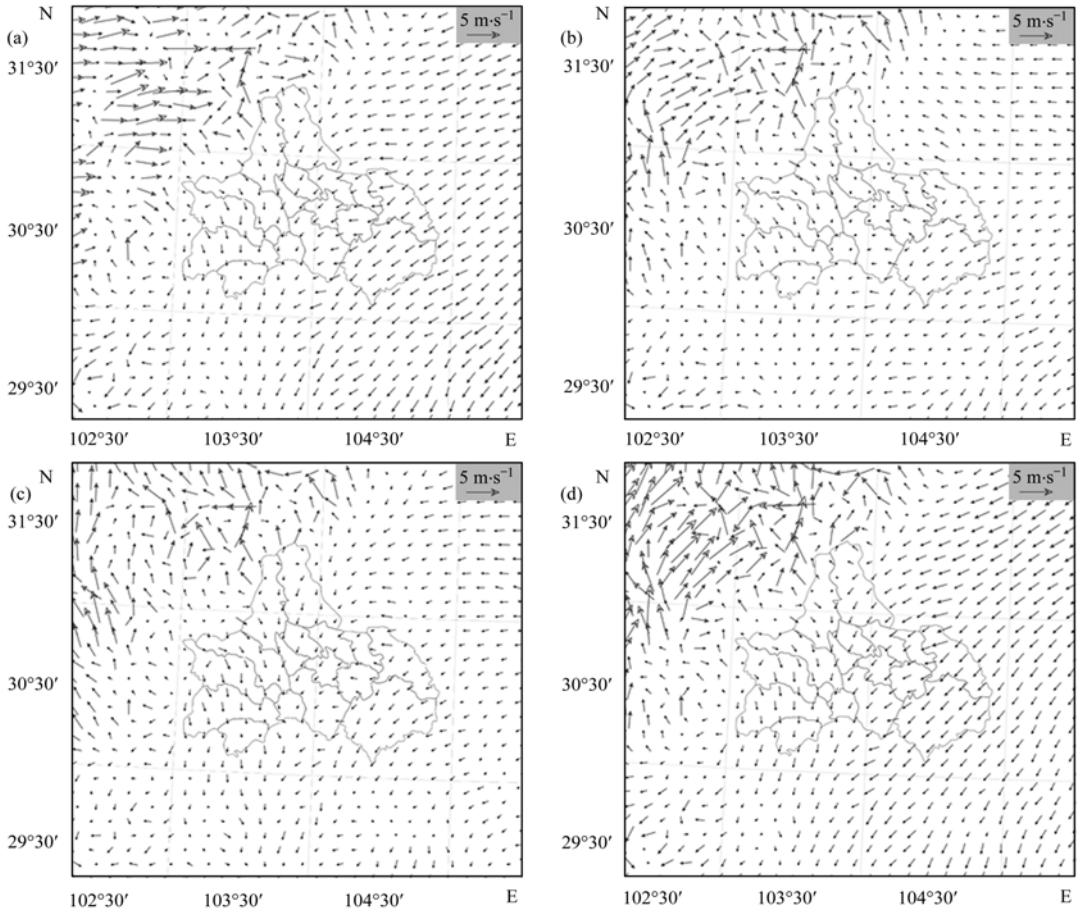
## 2　结果与讨论

### 2.1　污染气象特征分析

成都市地处四川盆地西部边缘，地势西高东低，东侧为龙泉山脉，西北侧为邛崃山脉，地形比较封闭，阻挡和削弱了冬季北方冷空气和寒潮侵袭，导致平均风速较小，特别是冬季降雨大幅减少，近地面逆温频率上升，冷空气强度弱，盆地内的污染物不易稀释扩散，容易造成污染物浓度快速增长[24~26]. 2015 年 1 月成都市 $PM_{2.5}$ 污染最严重，$PM_{2.5}$ 月均浓度高达 130 $\mu g \cdot m^{-3}$ 左右，然后依次是 4、10 和 7 月. 由于中心城区的人口和道路集中，造成城区的污染比区县严重. 此外，成都市与周边城市(雅安市、眉山市、德阳市、绵阳市和达州市等) $PM_{2.5}$ 污染连接成片，呈现区域性高污染特征. 图 3 ~ 4 是基于 WRF 气象模型模拟的 2015 年的 1、4、7 和 10 月风场和边界层高度的空间分布. 整个区域的风向基本呈现出偏东北-东气流，风速在成都地区明显减弱，呈现了局地辐合特征. 风场的季节差异不显著，风速多在 1 ~ 1.5 $m \cdot s^{-1}$. 受山体等影响，成都市大气边界层高度呈现出“中间高、东西低”条状梯度分布的总体特征. 位于成都市西部的区县边界层高度低于其他地区，低于 400 m，不利于污染物垂直扩散. 4 月边界层高度相对较大，有利于污染物垂直扩散.

### 2.2　区域传输贡献分析

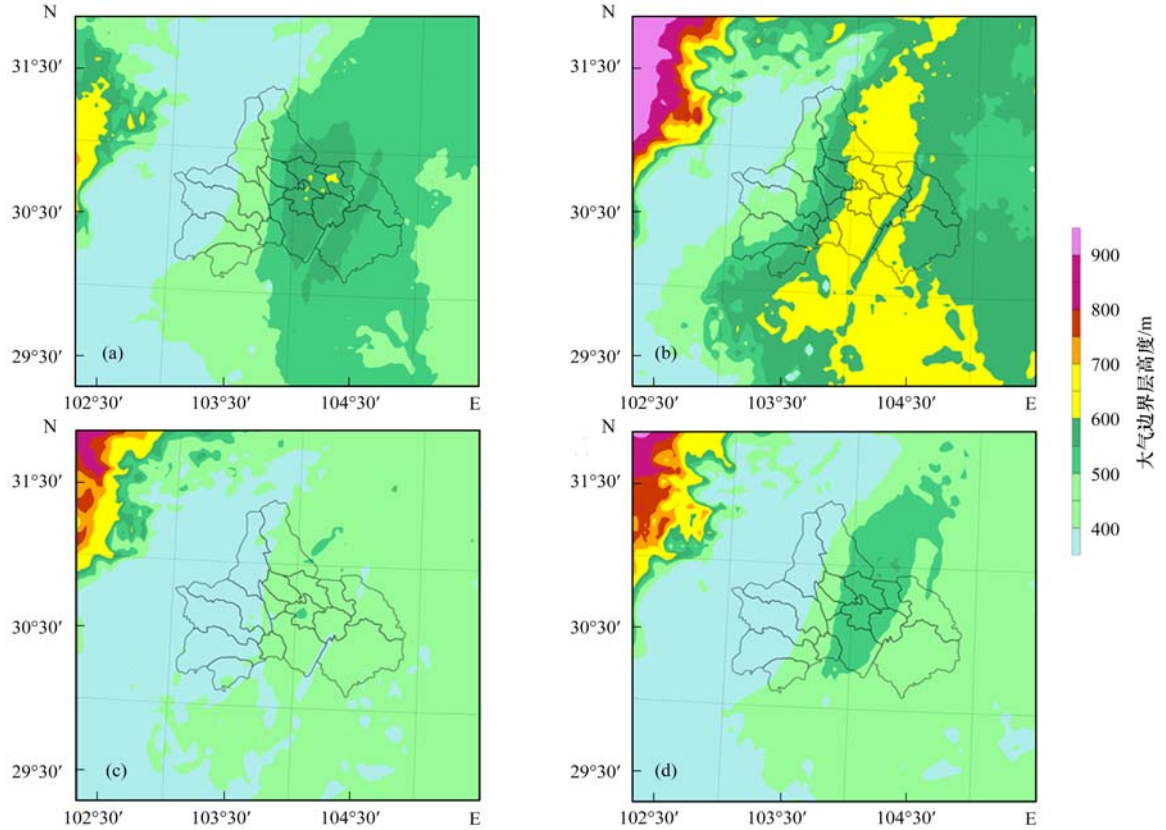
模拟结果表明，本地源对成都市 $PM_{2.5}$ 年均浓度的贡献约占 61%，外地源的贡献占 39%，见图 5. 不同月份的区域污染传输特征存在差异，4 月和 7 月区域传输对成都市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率较低，均为 30% 左右. 相关研究表明，京津冀和长三角等区域间污染输送规律显著[13]，天津、石家庄、秦皇岛、邯郸、邢台和保定等城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度受外来源的贡献高达 44% ~ 67%[27]. 与京津冀等地区的污染传输特征相比，成都市 $PM_{2.5}$ 污染以本地源贡献为主，外地源对其影响较小，这主要是因为成都市位于四




(a) 1 月；(b) 4 月；(c) 7 月；(d) 10 月

**图 3　风场的分布特征**

Fig. 3　Distributions of the wind field




(a) 1 月;(b) 4 月;(c) 7 月; (d) 10 月

**图 4 边界层高度的分布特征**

Fig. 4 Distributions of the boundary layer height

川盆地,地理位置相对独立,同时风速偏小且长期处于均压场控制,不利于大气水平扩散和污染物长距离输送.

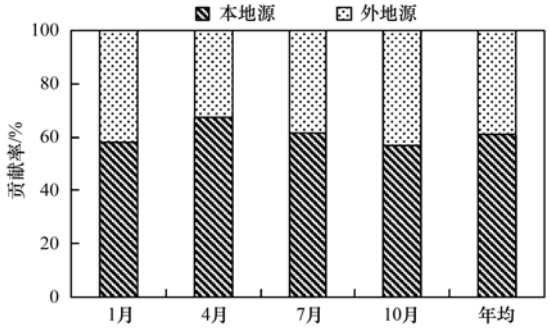



**图 5 区域传输对 $PM_{2.5}$ 污染的贡献率**

Fig. 5 Contribution of regional transport to $PM_{2.5}$

## 2.3 行业贡献分析

采用源开关敏感性分析法,基于 WRF-CMAQ 模型模拟结果,分析不同类别污染源对成都市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献. 成都市 $PM_{2.5}$ 年均浓度受本地源贡献约为 61%,其中重点工业、工业锅炉、生活源、移动源、扬尘源对 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献分别占本地源贡献总量的 12%、7%、24%、29% 和 26%,具体如图 6 所示. 从工业源来看,成都市建材企业较多,且主要集中在成都市区和位于城市上风向的温江区、郫都区和都江堰等中北部区域,颗粒物排放量大,对 $PM_{2.5}$ 贡献较大. 工业锅炉包括燃煤、燃气及生物质锅炉等,在彭州北部和新津县内分布比较集中. 生活源包含民用燃烧、生物质燃烧和餐饮油烟等污染源排放, 7 月污染排放对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献高达 27%,主要原因是 7 月是成都市餐饮业经营更加活跃,餐饮油烟排放是成都地区的特征排放源,餐饮油烟产生的 $PM_{10}$、$PM_{2.5}$ 排放量均占生活源排放量的 50% 左右. 移动源主要包括机动车和非道路移动源,在成都市区、双流区南部等成都市中部地区,路网密集,车流量大,机动车排放对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献较大. 总体来看,对成都市 $PM_{2.5}$ 影响较大的三类污染源分别是移动源、扬尘源和生活源,贡献率总计高达 79%.

## 3 结论

(1)成都市地处四川盆地,特殊地形和较差的大气扩散条件造成 $PM_{2.5}$ 污染较重,中心城区 $PM_{2.5}$ 污染程度高于区县.

(2)成都市 $PM_{2.5}$ 污染以本地污染源贡献为主. 2015 年成都市 $PM_{2.5}$ 年均浓度受本地源贡献约为 61%,外地源贡献为 39%. 4 个典型月的区域传输对成都市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率分别为 42%、32%、38% 和 43%.

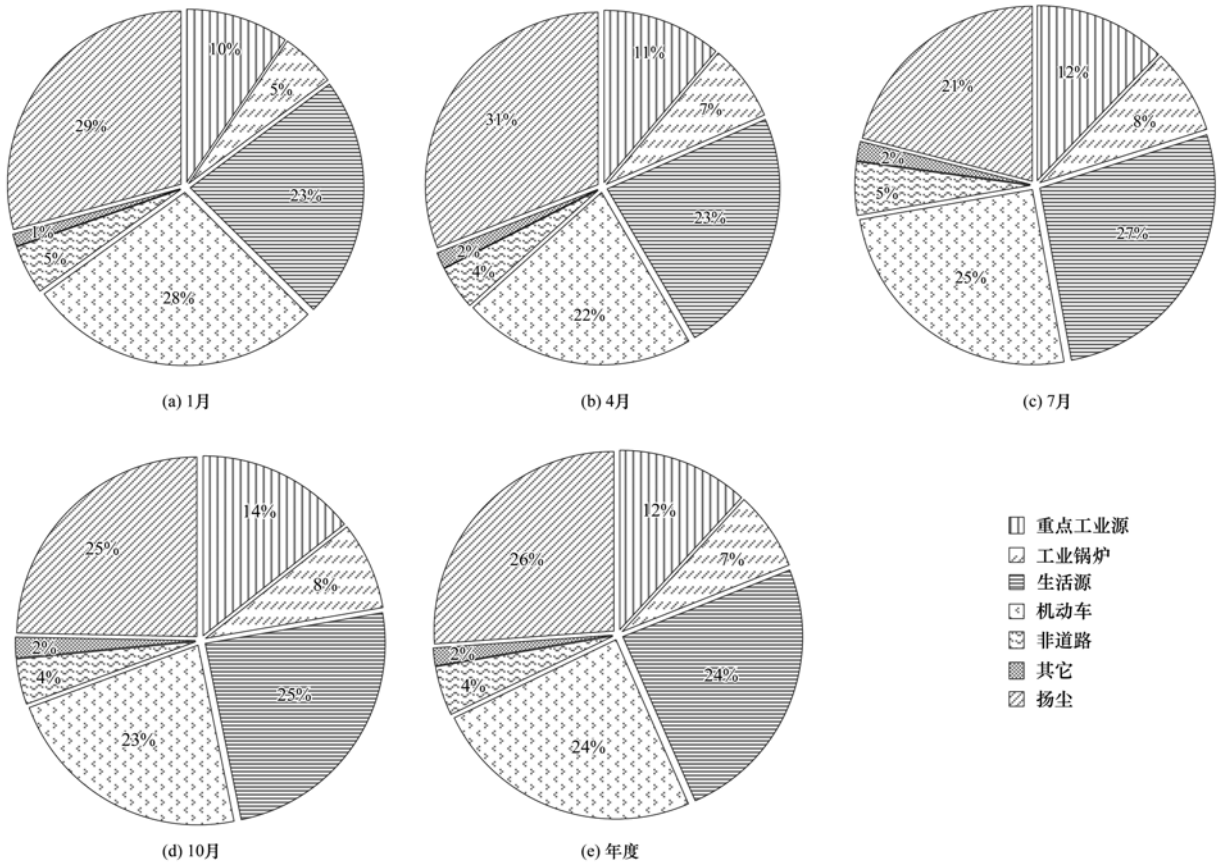



**图 6　各行业对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献占本地源贡献的比例**

Fig. 6　Contributions from different sources to $PM_{2.5}$ concentrations in Chengdu City

(3)重点工业、工业锅炉、生活源、移动源和扬尘源对 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献分别占本地源贡献总量的 12%、7%、24%、29% 和 26%. 其中,移动源、扬尘源和生活源三者的贡献率之和达到 79%,是成都市 $PM_{2.5}$ 污染的来源,因此需将其作为降低 $PM_{2.5}$ 污染的主要控制对象.

**参考文献:**

[1] Han X, Liu Y Q, Gao H, *et al*. Forecasting $PM_{2.5}$ induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved $PM_{2.5}$ and spatial analysis[J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 1009-1017.

[2] Liao Z H, Gao M, Sun J R, *et al*. The impact of synoptic circulation on air quality and pollution-related human health in the Yangtze River Delta region[J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 838-846.

[3] 韩士杰, 王佳, 燕启社, 等. 2014～2016 年间郑州市控制 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康效益评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2565-2571.
Han S J, Wang J, Yan Q S, *et al*. Health benefit evaluation for $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ pollution control in Zhengzhou, China, 2014-2016[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2565-2571.

[4] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体 $PM_{2.5}$ 四季污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1082-1090.
Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al*. Pollution characteristics and source apportionment of ambient $PM_{2.5}$ during four seasons in Yantai City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1082-1090.

[5] 赵雪艳, 杨文, 王静, 等. 典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1052-1061.
Zhao X Y, Yang W, Wang J, *et al*. Source apportionment and pollution characteristics of $PM_{2.5}$ during the two heavy pollution episodes in the winter of 2016 in a typical logistics city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1052-1061.

[6] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al*. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1035-1042.

[7] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4044-4053.
Zhang Y F, Yu R L, Hu G R, *et al*. Seasonal variation and source apportionment of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in Quanzhou city[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4044-4053.

[8] 黄凡, 陈楠, 周家斌, 等. 2016—2017 年武汉市城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(1): 17-25.
Huang F, Chen N, Zhou J B, *et al*. Characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in urban areas of Wuhan during 2016-2017[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, **35**(1): 17-25.

[9] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. $PM_{2.5}$ 源解析方法的比较与评述[J]. 科学通报, 2015, **60**(2): 109-121.
Zhang Y J, Zheng M, Cai J, *et al*. Comparison and overview of $PM_{2.5}$ source apportionment methods[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(2): 109-121.

[10] Yu S Y, Liu W J, Xu Y S, *et al*. Characteristics and oxidative potential of atmospheric $PM_{2.5}$ in Beijing: source apportionment and seasonal variation[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 277-287.

[11] Karnae S, John K. Source apportionment of $PM_{2.5}$ measured in South Texas near U. S. A.-Mexico border[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(5): 1663-1676.

[12] Lu X C, Chen Y A, Huang Y Q, *et al*. Differences in concentration and source apportionment of $PM_{2.5}$ between 2006 and 2015 over the PRD region in southern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **673**: 708-718.

[13] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国$PM_{2.5}$跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.
Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al*. Numerical study on the characteristics of regional transport of $PM_{2.5}$ in China[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1361-1368.

[14] Wang Y J, Bao S W, Wang S X, *et al*. Local and regional contributions to fine particulate matter in Beijing during heavy haze episodes[J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 283-296.

[15] Pirovano G, Colombi C, Balzarini A, *et al*. $PM_{2.5}$ source apportionment in Lombardy (Italy): comparison of receptor and chemistry-transport modelling results[J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 56-70.

[16] 杨再东, 朱云, 陶谨, 等. 基于曲面响应建模的$PM_{2.5}$可控人为源贡献解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(10): 3877-3887.
Yang Z D, Zhu Y, Tao J, *et al*. Response surface modeling based $PM_{2.5}$ source contribution analysis on anthropogenic controllable emission[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(10): 3877-3887.

[17] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al*. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ during the winter of 2013 in Chengdu (China)[J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 1056-1065.

[18] Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al*. Impact of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ pollution in China during winter[J]. Atmosphere, 2018, **9**(11): 429.

[19] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区$PM_{2.5}$季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 2947-2952.
Zhang Z S, Tao J, Xie S D, *et al*. Seasonal variations and source apportionment of $PM_{2.5}$ at urban area of Chengdu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(11): 2947-2952.

[20] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季$PM_{2.5}$化学组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 76-85.
Wu M, Wu D, Xia J R, *et al*. Analysis of pollution characteristics and sources of $PM_{2.5}$ chemical components in Chengdu in winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 76-85.

[21] 许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制$PM_{2.5}$污染的敏感性研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2482-2491.
Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al*. Sensitivity analysis of $PM_{2.5}$ pollution to ammonia emission control in China[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2482-2491.

[22] 许艳玲, 薛文博, 王燕丽, 等. 基于减排敏感性的武汉市$PM_{2.5}$污染控制研究[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(8): 959-964.
Xu Y L, Xue W B, Wang Y L, *et al*. Study on the $PM_{2.5}$ pollution control based on sensitivity analysis of emission reduction in Wuhan[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, **40**(8): 959-964.

[23] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al*. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**(11): 3181-3210.

[24] Li L L, Tan Q W, Zhang Y H, *et al*. Characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ during persistent extreme haze events in Chengdu, southwest China[J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 718-729.

[25] Liu F, Tan Q W, Jiang X, *et al*. Effects of relative humidity and $PM_{2.5}$ chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **86**: 15-23.

[26] Liu R C, Zeng J, Jiang X Y, *et al*. The relationship between airborne fine particle matter and emergency ambulance dispatches in a southwestern city in Chengdu, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 661-667.

[27] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域$PM_{2.5}$污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al*. Regional transport matrix study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji region, 2015[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4897-4904.

**HUANJING KEXUE** Vol. 41 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2020

# CONTENTS