

# 安徽省冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染来源及其成因分析

章群英 麻金继 沈非 李超<sup>1</sup>

- (1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;
2. 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 安徽 芜湖 241002;
3. 安徽师范大学 自然灾害过程与防控研究重点实验室, 安徽 芜湖 241002)

**【摘要】:** 随着中国城市化和工业化的加速发展, 大气污染的问题日益突出, 严重危害公众身体健康。基于安徽省逐小时 PM<sub>2.5</sub> 浓度监测数据, 采用后向轨迹模式、潜在源因子分析法 (PSCF) 和权重浓度分析法 (CWT), 构建 PM<sub>2.5</sub> 来源分析模型, 分析了安徽省 PM<sub>2.5</sub> 的来源, 并结合地理探测器辨析了影响 PM<sub>2.5</sub> 本底贡献浓度的驱动因子。结果表明: (1) 本底贡献、本底外溢和外地输送这 3 个动态过程对安徽省 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空变化有重要的影响; (2) PM<sub>2.5</sub> 月累计逐小时测量浓度、总浓度、外地输送浓度、本底贡献浓度、本底外溢浓度和月均 PM<sub>2.5</sub> 本底排放贡献率, 均在整体呈现出西南高、东北低的分布趋势, 但前 3 项在安徽西北部的阜阳、亳州和淮北等地出现高值区; (3) 安徽省约 97.5% 的面积外地输送贡献率 > 50%, 下辖市 PM<sub>2.5</sub> 本底排放贡献率在 30%~50%, 说明 1 月污染以外地输送为主; (4) 工厂密度、车辆保有量密度和人口密度对 PM<sub>2.5</sub> 月累计本底贡献浓度的解释力  $q$  值分别为 0.33、0.47 和 0.61, 通过与 PM<sub>2.5</sub> 月累计测量浓度地理探测分析结果的比较, 表明人为要素与 PM<sub>2.5</sub> 月累计本底贡献浓度的关系更加密切。研究结果可为区域大气污染治理提供科学的参考依据。

**【关键词】:** PM<sub>2.5</sub> 来源分析 本底贡献浓度 人为要素 地理探测器

**【中图分类号】:** X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2020) 12-2737-10

随着城市化和工业化的快速发展, 中国大气污染问题日益突出, 雾霾天气的增多, 对人类健康造成了严重的影响; PM<sub>2.5</sub> (空气动力学直径小于等于 2.5  $\mu\text{m}$  的细颗粒物) 是造成和加重雾霾天气的罪魁祸首<sup>[1]</sup>。由于 PM<sub>2.5</sub> 能被人类直接吸入肺中, 引发呼吸系统、哮喘、心血管疾病, 甚至肺癌<sup>[2~5]</sup>, 这种细颗粒物的污染问题日益引起了政府、学者和公众的广泛关注<sup>[6, 7]</sup>。围绕 PM<sub>2.5</sub> 的来源、传输以及驱动因素等, 学者们开展了大量研究。

目前, 研究 PM<sub>2.5</sub> 来源、传输主要包括正交矩阵因子分析 PMF (Positive Matrix Factorization, PMF)、空气质量模型法 CAMx (Potential Source Contribution Function, CAMx)、化学质量平衡受体模型法 CMB (Chemical Mass Balance, CMB)、污染源排放清单法以及后向轨迹模式<sup>[8~14]</sup>。PMF 可对 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 等污染物的本底来源进行解析<sup>[9]</sup>; 空气质量模型法 CAMx 与气象要素相结合可获得不同来源 PM<sub>2.5</sub> 的贡献以及污染时段 PM<sub>2.5</sub> 的传输过程和污染特征<sup>[10~11]</sup>; CMB 受体模型可分析污染组成成分贡献及其与气象条件之间的关系<sup>[12, 13]</sup>; 高时空分辨率的排放清单与大气动力-化学在线耦合模式 WRF/Chem (Weather Research and Forecasting/

<sup>1</sup>作者简介: 章群英 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染变化. E-mail: 1721011202@ahnu.edu.cn  
麻金继 E-mail: Jinjima@mail.ahnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671352); 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2019A0496)

Chemistry, WRF/Chem) 气象研究与预报模型的结合, 有利于探究  $\text{PM}_{2.5}$  本底污染源的排放和区域输送特性<sup>[14, 15]</sup>; 后向轨迹模式的聚类分析算法、潜在源因子分析模型 PSCF (Potential Source Contribution Function, PSCF)、权重浓度分析模型 CWT (Concentration Weighted Trajectory, CWT) 是研究地区  $\text{PM}_{2.5}$  的输送途径和潜在源区的有效方法<sup>[16, 17]</sup>。综上, 当前所采用的方法在研究  $\text{PM}_{2.5}$  来源时大多仅孤立的分析了某个研究区上的测量值, 较少的定量的分析研究区域之间相互交互的影响, 如  $\text{PM}_{2.5}$  的本底贡献 (包括污染物的本底排放和二次生成与转化)、外地输送、本底外溢等。本研究基于后向轨迹模式、PSCF、CWT 方法, 构建来源分析模型, 对安徽省  $\text{PM}_{2.5}$  月累计的测量浓度、总浓度、本底贡献浓度、外地输送浓度、本底外溢浓度、月均本底排放贡献率进行定量化空间分析。

国内外在  $\text{PM}_{2.5}$  与影响要素之间的关联性研究主要采用了线性回归方法<sup>[18]</sup>、广义加法混合模型<sup>[19, 20]</sup>、灰色关联模型<sup>[21]</sup>以及地理探测器<sup>[22, 23]</sup>, 这些方法都在不同程度上揭示了  $\text{PM}_{2.5}$  测量值驱动因子的影响机制。但是, 由于  $\text{PM}_{2.5}$  测量浓度等于本底贡献浓度加上外地输送浓度减去本底外溢浓度, 本底排放污染的主导因素为人为因素, 而现有关于  $\text{PM}_{2.5}$  测量值与影响因子之间关联性的研究, 学者们主要综合考虑了  $\text{PM}_{2.5}$  测量值与各因子之间的相关性。然而  $\text{PM}_{2.5}$  本底贡献浓度与人文要素之间的关联性研究却鲜少, 探究本底贡献浓度与人为因素的关联性可对已有研究成果进行丰富和补充。

因此, 为了探究安徽省 2017 年 1 月  $\text{PM}_{2.5}$  污染的来源和月累计本底贡献浓度与人为因素之间的关联性, 拟基于后向轨迹、PSCF 和 CWT 方法构建的来源分析模型, 对安徽省  $\text{PM}_{2.5}$  月累计测量浓度、总浓度、本底贡献浓度、外地输送浓度、本底外溢浓度以及月均  $\text{PM}_{2.5}$  本底排放贡献率进行探析, 并采用地理探测器模型分析并比较人为因素与  $\text{PM}_{2.5}$  月累计本底贡献浓度相较于与  $\text{PM}_{2.5}$  测量浓度之间的关联性, 以期为国家环保部门大气污染的治理提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

(1) 后向轨迹模式采用的是美国环境预报中心 (<ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/Archives>) 发布的全球资料同化系统 NCEP (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) GDAS (Global Data Assimilation System, GDAS)  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  气象数据产品 (2017. 1. 1~2017. 1. 31), 主要包括相对湿度、气压、气温、垂直风速、水平风速和降水等要素, 时间间隔为协调世界时 UTC (Universal Time Coordinated, UTC) 时间 00, 06, 12, 18 时。

(2) 安徽省空气质量监测站 (<http://sthjt.ah.gov.cn>) 2017 年 1 月 1 日~1 月 31 日逐小时  $\text{PM}_{2.5}$  数据, 为与 NCEP 气象数据 UTC 时间匹配, 研究选取了安徽省空气监测站 02, 08, 14, 20 时的  $\text{PM}_{2.5}$  数据。

(3) 风速、风向数据产品可由欧洲中期天气预报中心获取 (<http://apps.ecmwf.int/datasets>), 分辨率为  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

(4) 社会要素包括 2016 年年底工业密度数据、人口密度数据、汽车保有量密度, 这些要素由国家统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>)、安徽省统计年鉴 ([http://tjj.ah.gov.cn/tjjweb/web/tjnj\\_view.jsp](http://tjj.ah.gov.cn/tjjweb/web/tjnj_view.jsp)) 提供, 利用 C# 语言进行数据的剔除和筛选, 并采用 ArcGIS 软件进行二次分析处理获得。为与 NCEPGDAS 气象数据匹配, 人文要素均重采样为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  分辨率。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 轨迹聚类分析

后向轨迹模式在 NCEPGDAS 气象数据基础上, 利用拉格朗日算法<sup>[24]</sup>, 模拟气流到达安徽省各个网格的实际路径。本研究采用王

亚强团队基于 HYSPLIT 模式开发的后向轨迹分析软件(Trajstat)进行轨迹模拟, 轨迹起始时间分别为每日的 UTC 时间 00、06、12、18, 起始高度为 100m, 后推时间 24h, 并根据气流方向和移动速度对轨迹进行聚类, 获得几组不同类型的轨迹。

### 1.2. 2PSCF 方法

潜在源因子分析法是通过计算轨迹经过的网格 (i, j) 内超出某一设定阈值的网格端点数  $m_{ij}$  与网格总端点数  $n_{ij}$  之比:

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

对于那些较偏远的网格, 由于轨迹经过的端点数  $n_{ij}$  太少, 可能会给 PSCF 的计算带来较大的不确定性。因此引入权重  $W_{ij}$  来降低这些偏远网格所带来的影响<sup>[25]</sup>。权重因子  $W_{ij}$  的赋值主要取决于轨迹经过的某一网格端点数  $n_{ij}$  与该网格平均端点数  $n_{ave}$ ,  $WPSCF=P_{ij} \times W_{ij}$ , 权重因子公式如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.7 & 1.5n_{ave} < n_{ij} < 3n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} < 1.5n_{ave} \\ 0.05 & n_{ij} < n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2. 3CWT 方法

权重浓度分析法(CWT) 计算每个网格的污染物对受体点的相对浓度贡献大小, 弥补了潜在源因子分析法无法区分相同 PSCF 值的网格对受点  $PM_{2.5}$  质量浓度贡献大小的缺陷<sup>[26]</sup>。CWT 计算原理如下:

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

式中: $C_{ij}$ 是网格  $ij$  的平均权重浓度; $C_l$ 是轨迹  $l$  经过网格  $ij$  时的污染物浓度; $t_{ijl}$ 是轨迹  $l$  经过网格  $ij$  的停留时间。采用与 PSCF 相同的权重公式和方法, 可获得  $WCWT=C_{ij} \times W_{ij}$ 。

### 1.2.4 来源分析模型

将研究区按 CWT 网格划分为若干个网格单元, 以每个研究网格为受体, 进行轨迹模拟、CWT 分析。根据获得的网格轨迹点数和所对应的 WCWT 值可以计算出受体网格的  $PM_{2.5}$  测量浓度、外地输送浓度、本底外溢浓度, 进而获得  $PM_{2.5}$  月累计本底贡献浓度和月均本底排放贡献率。 $PM_{2.5}$  测量浓度为每个网格单元的轨迹端点数与端点所在网格 WCWT 值乘积的累加和; 外地输送浓度为除受体网格外, 其他每个网格的轨迹端点数与所对应的 WCWT 值乘积的累加和; 本底外溢浓度为受体网格吹向所有辅助网格的轨迹点数与所对应的 WCWT 值乘积的累加和; 本底贡献浓度等于测量浓度减去外地输送浓度加上本底外溢浓度。

$$P_e = \sum_{k=1}^N N_k C_k \quad (4)$$

$$P_w = \sum_{i=1}^n N_i C_i \quad (5)$$

$$P_y = \sum_{j=1}^m N_j C_j \quad (6)$$

$$P_b = P_e - P_w + P_y \quad (7)$$

$$V = \frac{P_b}{P_b + P_w} \quad (8)$$

式中: $C_i$ 为除受体网格外其他网格所对应的 WCWT 值; $C_j$ 为受体网格吹向辅助网格的 WCWT 值; $N_i$ 为除受体网格外其他网格所对应的轨迹端点数; $N_j$ 为受体网格吹向辅助网格的轨迹端点数。 $C_k$ 为轨迹经过的每个网格的 WCWT 值; $N_k$ 为对应每个网格内端点数; $P_e$ 、 $P_w$ 、 $P_y$ 、 $P_b$ 分别定义为  $PM_{2.5}$ 测量浓度;外地输送浓度、本底外溢浓度、本底贡献浓度; $V$ 表示  $PM_{2.5}$ 本底排放贡献率。

### 1.2.5 地理探测器

地理探测器是不仅可以用来探究地理空间的分异性,还可以揭示其背后影响因素驱动力强弱的一种统计学方法,因此该方法被广泛的应用于环境、经济等各个领域。地理探测器中所包含的因子探测器可用来检测某种地理要素是否与某个指标值空间分布差异的形成有关,具体的方法是将该指标在不同类别分区上的总方差与该指标在整个研究区域上的总方差作比较<sup>[27]</sup>,其原理如下:

式中: $q_{D,H}$ 为  $PM_{2.5}$ 驱动因素的解释力; $D$ 为  $PM_{2.5}$ 某个时间段内的平均浓度变化的驱动因素; $n$ 与  $\sigma^2$ 分别为研究区域整体样本量与方差; $H$ 表示不同类别分区; $n_{D,i}$ 为  $D$ 指标在  $i$ 类上样本的个数。 $q_{D,H}$ 取值区间为[0, 1],其数值越大则表明该因子对  $PM_{2.5}$ 浓度的变化解释能力越强,数值为 0,表明分类因素与  $PM_{2.5}$ 浓度变化完全无关;数值为 1,说明分类因素可以完全解释  $PM_{2.5}$ 浓度差异特征。

本研究首先对安徽省进行网格化,图 1 是划分的安徽省研究网格分布图,其中红色网格为污染来源计算网格,灰色为外溢污染的辅助计算网格。

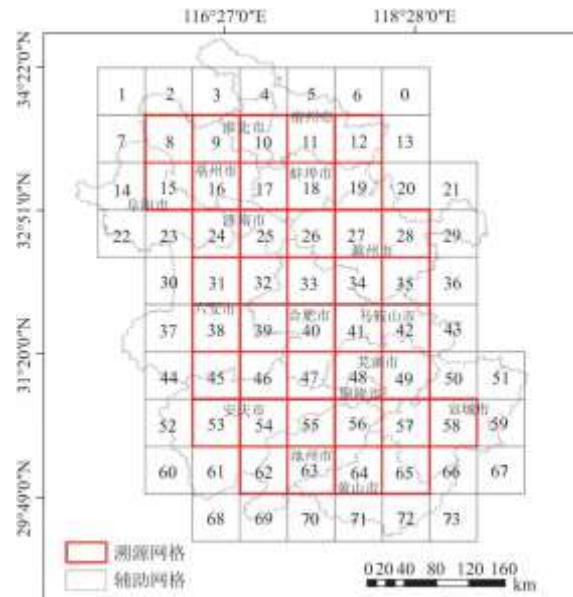


图 1 安徽省研究网格分布图

## 2 结果与讨论

### 2.1 安徽省冬季 $PM_{2.5}$ 污染源分析

冬季是雾霾多发的季节, 本文根据 2017 年冬季日空气质量状况, 统计安徽省各地级市污染天数, 选择安徽省 11 个城市污染天气超过 15 天的 1 月份(表 1)进行研究。 $PM_{2.5}$  浓度变化主要受外地输送、本底贡献、本底外溢三个过程的影响, 这三个过程直接决定空气监测站点的  $PM_{2.5}$  测量值, 进而影响月累计污染测量值, 本文计算的月累计测量值不同于站点测量值的简单逐日累加, 是基于后向轨迹停留时间和 WCWT 污染贡献值的一个动态过程的计算。每日后向轨迹起算点为 UTC00、06、12、18 时, 后推时间为 24h, 每天有 4 条不同方向的轨迹共 96h, 一个月累计 2976h, 以月累计测量污染为例,  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度是本底贡献浓度与外地输送浓度之和再减去本底外溢浓度所得, 月累计测量浓度即为这 2976h 的污染浓度累计值。鉴于各类污染计算均采用  $PM_{2.5}$  月累计浓度值, 因此污染延迟效应可忽略。研究以位于合肥市的 40 号网格(图 1)为例, 利用后向轨迹模式、PSCF、CWT 和来源分析模型对该网格进行污染源分析。

表 1 2017 年 1 月安徽省各地级市轻度污染以上天数

城市	合肥	芜湖	蚌埠	淮南	马鞍山	淮北	铜陵	安庆	黄山	滁州	阜阳	宿州	六安	亳州	池州	宣城
污染天数(d)	19	5	19	19	9	20	15	19	5	17	24	25	10	23	23	13

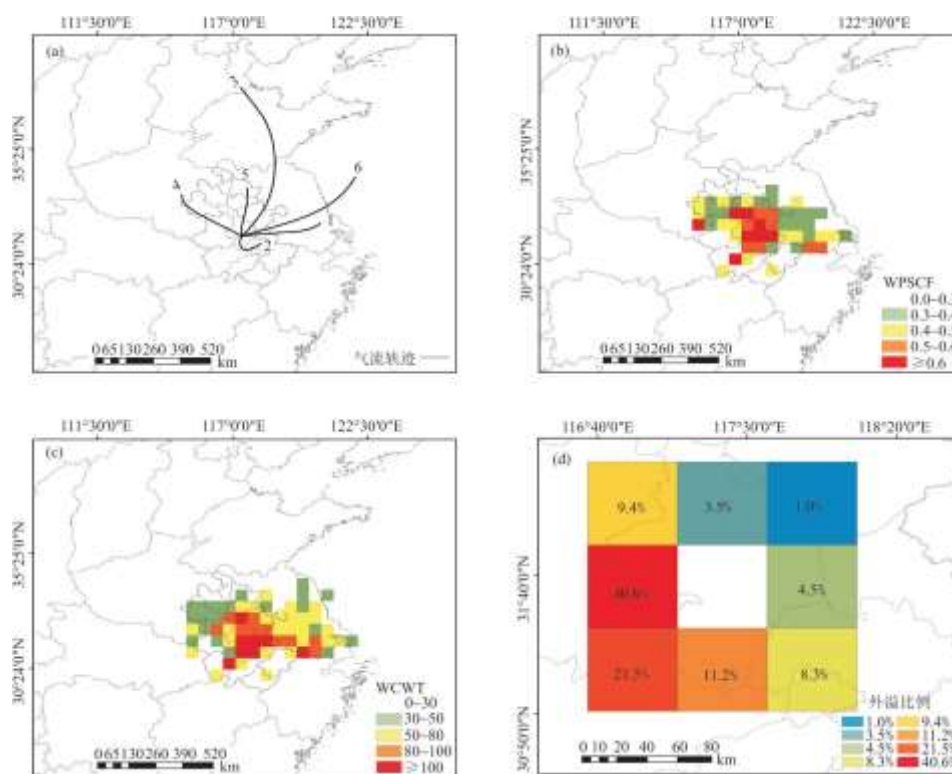


图 2 40 号网格轨迹聚类(a)、PSCF 分析(b)、CWT 分析(c)、本底外溢浓度在辅助网格中所占比例(d)

利用每日 02、08、14、20 时  $PM_{2.5}$  数据,借助后向轨迹模式模拟得到每日有效轨迹(4 条),31 天共计 124 条轨迹。聚类分析后得到 6 类不同方向的聚类气流(图 2(a)),其中,1、6 轨迹来自于东北方向,横跨江苏省,污染轨迹数占总轨迹数的 32.3%;轨迹 3 来自于西北方向远距离输送,传输时间较慢,污染轨迹主要由山东省传输而来,占总轨迹数的 8.1%;2、4、5 轨迹分别来自于安徽省的芜湖、阜阳、蚌埠和宿州等市,这 3 类气流的污染轨迹占总轨迹数的 31.5%。

PSCF 分析表明(图 2(b)):WPSCF 高值区主要分布在合肥、马鞍山、滁州、安庆等市,说明 40 号网格的高污染天气主要受近距离输送影响。为探究各污染源区对受体网格的相对贡献大小,利用 CWT 方法进一步分析可知,合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆以及滁州市的凤阳、定远县贡献浓度较大(图 2(c)),高贡献值的潜在污染源区的分布与 PSCF 分析高值区基本一致。

通过后向轨迹模拟、PSCF、CWT 分析,利用公式(4)可计算 40 号网格的  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度(不包含本底外溢浓度)。本底外溢浓度取决于区域本底吹向外地的污染,由于后向轨迹后推时间为 24h,24h 后气流才到达受体网格,因此 24h 内吹向外地的污染应为本底排放的污染。另外,由于  $PM_{2.5}$  监测主要针对人类活动频繁的近地面 100m 高度,因此近距离本底外溢应为主导,故选择四周 8 个辅助网格结合后向轨迹与 CWT 方法,运用公式(6)对外溢污染浓度进行计算,如图 2(d)所示,40 号网格在西南方向的外溢污染浓度较高,占外溢污染浓度总值的 73.3%;东北方向外溢较少,仅占 9.0%,表明合肥市的污染主要是向位于市域西南方的六安、安庆、池州等地传输,究其原因,与当月盛行东北风有关(图 3)。

基于计算的 40 号网格  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度和本底外溢浓度值,结合  $PM_{2.5}$  来源分析模型(公式(4)~(8))计算得到 2017 年 1 月安徽省 40 号研究网格的  $PM_{2.5}$  月累计逐小时测量浓度、总浓度、外地输送浓度、本底贡献浓度、本底外溢浓度和月均  $PM_{2.5}$  本底排放贡献率六项指标,采用相同的方法计算出其他 39 个研究网格的各个污染浓度值,从空间分布上可以看出(图 4),各类污染指标浓度整体呈现出西南高、东北低的分布趋势,但是后 3 项指标与前 3 项指标在西南部和西北部的分布略有差异,前 3 项指标在西北部亳州、阜阳和淮北的浓度值明显高于安徽省 80%的地区,西南部污染高值区南延到宣城和黄山等地。

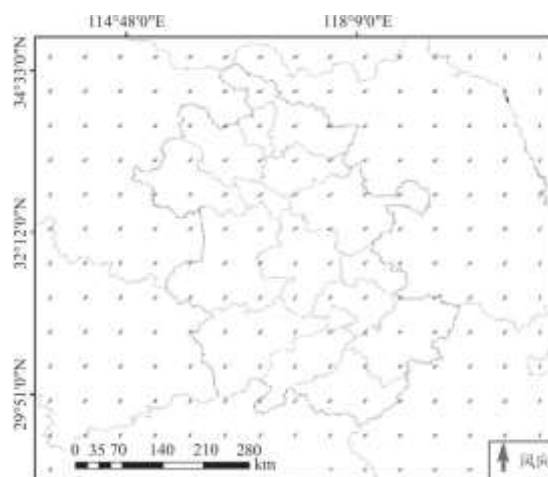


图 3 安徽省 2017 年 1 月平均风向图

$PM_{2.5}$  月累计测量浓度(图 4(a))是由月累计本底贡献浓度与外地输送浓度之和再减去本底外溢浓度所得,能够表征月累计实测  $PM_{2.5}$  浓度的分布状况,可以看出:月累计测量浓度在整体上呈现出东北低、西南和西北高的分布趋势。安徽西部地区包括淮北平原的阜阳、亳州、淮北、宿州和沿江平原的合肥、安庆、池州的月累计测量浓度值较高,表明这些地区在本月的污染天气较多,这与天气后报统计信息相符(表 1)。天气后报统计资料显示,阜阳、亳州、淮北、宿州、合肥、安庆、池州污染天数分别为 24、23、20、25、19、19、23,均超过 19 天,而沿江平原的芜湖、马鞍山,皖南山区的宣城、黄山以及滁州月累计测量污染值较低,对应的污染天数分别为 17、5、9、13、5,相比之下污染天气相对较少。



PM<sub>2.5</sub>月累计总浓度(图 4(b))是本底贡献浓度与外地输送浓度之和,其与月累计测量浓度在空间分布上基本一致,但是对应的网格值明显增大。总浓度热点区域(高值区)主要分布在人口密度较大的安徽省淮北平原以西城市(阜阳、亳州)和沿江平原部分城市(合肥、安庆和池州),它们的面积超过研究区总面积的 50%。总污染浓度冷点区域(低值区)主要集中在滁州和马鞍山一带。春节期间工业企业放假,且安徽省主导风向为东北风,因此工业城市马鞍山等地污染相对较低。PM<sub>2.5</sub>总浓度与测量浓度之差即为本底外溢浓度(图 4(e)),安徽省沿江平原城市尤其是安庆、池州和芜湖等地,月逐小时累计本底外溢浓度相对较高。本底外溢浓度与本底贡献浓度分布趋势十分相似,说明安徽省本底贡献浓度较高的区域,外溢 PM<sub>2.5</sub>污染也相对较多。PM<sub>2.5</sub>月累计本底贡献浓度(图 4(c))和外地输送浓度是总浓度的两个构成要素,沿江平原的池州、宣城,合肥、安庆大别山区以及亳州等地本底贡献污染相对较高,滁州和马鞍山等地则相对较低;主要是由于合肥、安庆等城市人口密度大,机动车辆多,导致污染排放量相对较高。工业城市马鞍山以大型工厂企业为主,春节期间停工,人口密度较小,因此本底污染排放量减少。

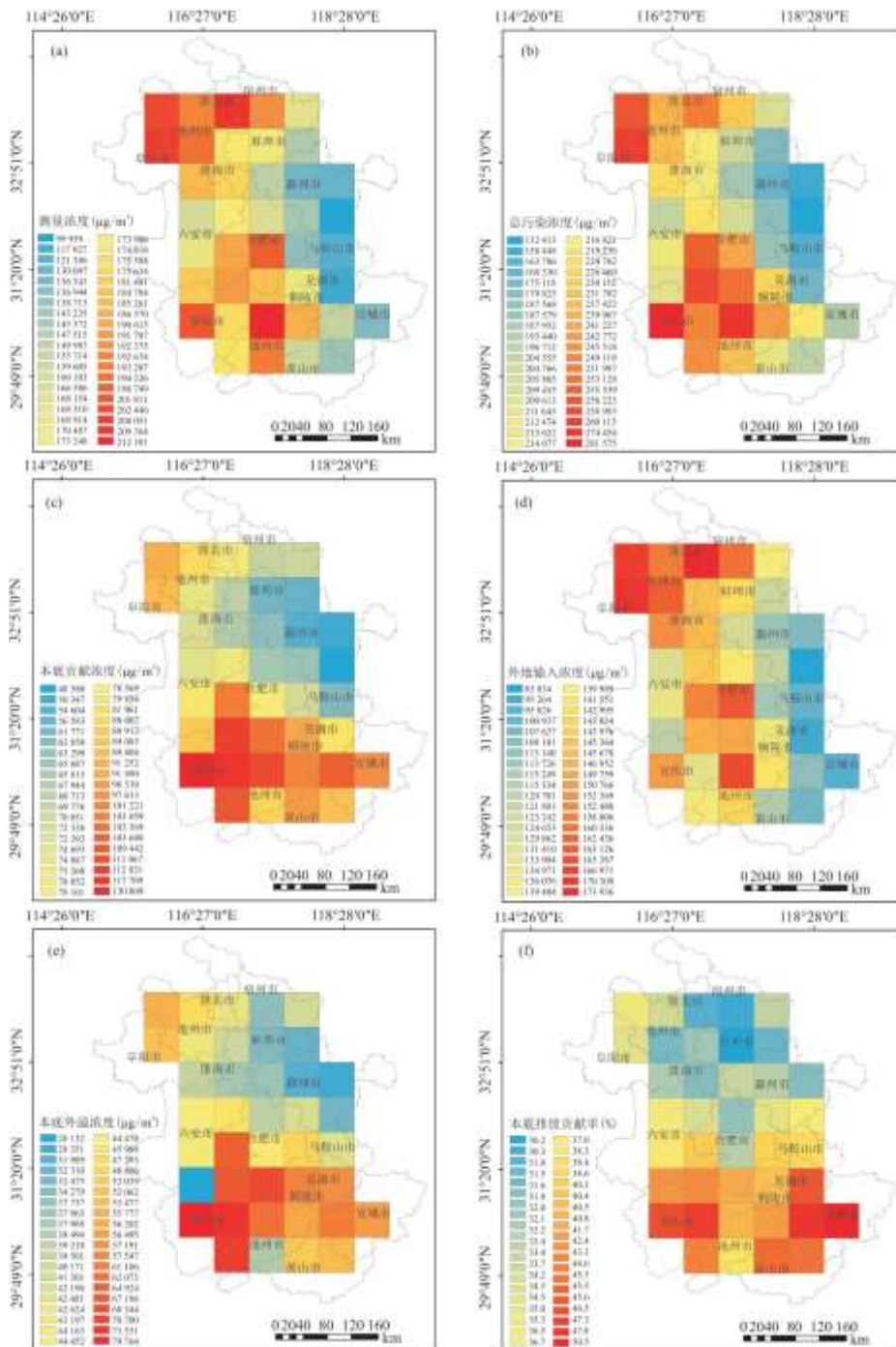


图 4  $PM_{2.5}$ 月累计的测量浓度(a)、总浓度(b)、本底贡献浓度(c)、外地输送浓度(d)、本底外溢浓度(e)、月均本底排放贡献率(f)

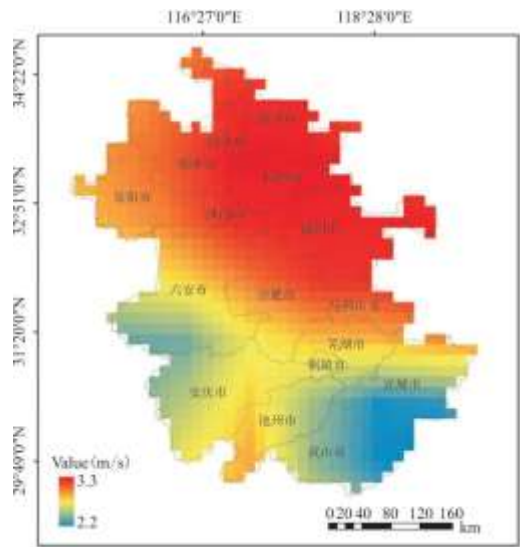


图 5 安徽省 2017 年 1 月平均风速图

月累计外地输送浓度(图 4(d))与总浓度空间分布趋势差异明显,热点区域主要集中在安徽的合肥以及淮北平原的阜阳、亳州、淮北、蚌埠等地,这些城市地势较平坦,并且是主导风东北风的风速削弱地(图 5),因此江苏、山东等地外地输送污染易在这些地区聚集;冷点区域主要出现在安徽滁州、皖南山区的宣城、黄山以及沿江平原的马鞍山、芜湖等地,马鞍山、滁州、宣城等地东北方向风速较大,地势较平坦,污染物难以积聚;而黄山地处山区,风速小,海拔高,阻碍了外地污染的输入。本月风速、风向和地势在安徽省月累计外地输送浓度上起着主导作用。

月累计本底排放贡献率(图 4(f))是本底贡献浓度与总浓度的比值,反映地区本底贡献的污染在总污染中所占的比例,分布趋势与本底外溢浓度趋势相同。外地输送贡献率是单位 1 与本底排放贡献率之差,经计算统计可知,安徽省约 97.5%的面积  $PM_{2.5}$  外地输送贡献率超过 50%,说明安徽省 1 月份污染以外地输送为主。与其他区域相比,安庆大别山区,沿江平原的池州、芜湖以及皖南山区的宣城和黄山等地本底排放贡献率相对较高,由前面分析可知与当地地势和气象因素有关。

2.2 成因分析

区域的  $PM_{2.5}$  污染状况受许多自然因素和人为因素的影响,但是人为因素对  $PM_{2.5}$  测量浓度时空变化的影响是间接的。三大污染源包括本底工业企业、机动车和居民生活等排放的废气直接影响  $PM_{2.5}$  本底贡献浓度的总量<sup>[28]</sup>。因此研究选用  $PM_{2.5}$  的人为因素(工厂密度( $X_1$ ))、车辆保有量密度( $X_2$ )和人口密度( $X_3$ ))3 个驱动因子利用地理探测器方法对安徽省  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度(表 2)和月累计本底贡献浓度进行计算(表 3)。

表 2  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度因子探测解释力

	工厂密度( $X_1$ )	车辆保有量密度( $X_2$ )	人口密度( $X_3$ )
q	0.17	0.38	0.43



p	0.64	0.59	0.71
---	------	------	------

表 3  $PM_{2.5}$ 月累计本底贡献浓度因子探测解释力

	工厂密度 ( $X_1$ )	车辆保有量密度 ( $X_2$ )	人口密度 ( $X_3$ )
q	0.33	0.47	0.61
p	0.21	0.30	0.19

工厂密度 ( $X_8$ )、车辆保有量密度 ( $X_9$ ) 和人口密度 ( $X_{10}$ ) 能够在一定程度上反映本底人为活动排污量的情况, 直接影响本底贡献浓度, 从而间接影响  $PM_{2.5}$  测量浓度。表 2 表明 3 者对  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度的探测解释力 q 值分别为 0.17、0.38 和 0.43, 可信度均 < 50%, 显然, 这 3 个人文要素与  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度关系不显著。工厂密度、车辆保有量密度和人口密度对  $PM_{2.5}$  月累计本底贡献浓度的解释力 q 值分别为 0.33、0.47 和 0.61 (表 3), 可信度均 > 70%, 通过与  $PM_{2.5}$  月累计测量浓度地理探测分析结果比较, 证明人文要素与  $PM_{2.5}$  月累计本底贡献浓度关系更加密切。

区域大气污染通常受多种因素的相互作用和影响, 研究利用地理探测器交互分析模块, 探究 3 个人为因素对安徽省  $PM_{2.5}$  月累计本底贡献浓度的两两交互探测解释力 (表 4)。

表 4  $PM_{2.5}$ 月累计本底贡献浓度的因子交互探测解释力

指标	工厂密度	车辆保有量密度	人口密度
工厂密度	—	0.75	0.75
车辆保有量密度	0.75	—	0.93
人口密度	0.75	0.93	—

工厂密度、车辆保有量密度和人口密度对安徽省本底污染贡献率的交互探测解释力分别为 0.75、0.75 和 0.93。人为因素在两两交互后对安徽省  $PM_{2.5}$  本底污染贡献率的解释力明显增强, 尤其是人口密度和车辆保有量密度这两个要素, 它们的交互解释力达到了 0.93, 超过 90%。春节期间安徽省外出工人的返乡, 同时伴随着车辆的增多, 对安徽省  $PM_{2.5}$  月累计本底贡献浓度的变化起着十分重要的作用。

### 3 总结

本文基于 2017 年 1 月安徽省  $PM_{2.5}$  逐小时浓度数据、气象数据、统计数据, 利用来源分析模型和地理探测器方法, 分析了  $PM_{2.5}$  污染的来源及其成因。主要结论如下:

(1) 安徽省  $PM_{2.5}$  浓度的时空变化主要受本底贡献、本底外溢和外地输送这 3 个动态过程的影响。 $PM_{2.5}$  月累计逐小时测量浓度、总浓度、外地输送浓度、本底贡献浓度、本底外溢浓度和月均  $PM_{2.5}$  本底排放贡献率等 6 项污染指标, 在整体上呈现出西南高、东

北低的分布趋势,但测量浓度、总浓度、外地输送浓度在西北部地区明显较高,本底贡献浓度、本底外溢浓度和月均  $\text{PM}_{2.5}$  本底排放贡献率在西南部污染高值区南延到宣城和黄山等地。外地输送浓度和本底外溢浓度受风速、风向和地势影响较大;风速大、地势平坦的地区,有利于  $\text{PM}_{2.5}$  的扩散,反之污染物容易滞留积聚。

(3)安徽省各市  $\text{PM}_{2.5}$  本底贡献率在 30%~50%,其中 40%以上地区主要分布在长江以南各城市。安徽省约 97.5%的面积外地输送贡献率>50%,下辖市  $\text{PM}_{2.5}$  本底排放贡献率在 30%~50%;安徽省各城市的污染以外界输入为主,尤其是安庆、合肥以及淮北平原的阜阳、亳州、淮北和蚌埠等地。

(4)工厂密度、车辆保有量密度和人口密度与  $\text{PM}_{2.5}$  月累计本底贡献浓度的关联性相较于测量浓度更加紧密。人口密度和车辆保有量密度对安徽省  $\text{PM}_{2.5}$  月累计本底贡献浓度的交互作用明显强于单要素的影响,人口密度的增大与机动车数量的增多是影响安徽省 2017 年 1 月各市大气污染状况的重要因素。

(5)本研究结果可应用于区域范围内  $\text{PM}_{2.5}$  联防联控治理,为寻找污染来源和影响因素提供科学依据;另外,本底贡献浓度与人为因素的关联性探究还可为已有研究结果进行丰富和补充。但本研究仍存在一些不足,如对  $\text{PM}_{2.5}$  各项污染指标没有结合当地特征进行深刻的阐释,未来需要提高后向轨迹所用到的气象数据分辨率,探究城市甚至城镇范围内的  $\text{PM}_{2.5}$  污染来源和成因。

#### 参考文献:

- [1]GAO J J, TIAN H Z, CHENG K, et al. The variation of chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China[J]. Atmospheric Environment 2015, 107:1-8.
- [2]ZHAO B, ZHENG H T, WANG S X, et al. Change in household fuels dominates the decrease in  $\text{PM}_{2.5}$  exposure and premature mortality in China in 2005-2015[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(49):12401-12406.
- [3]XING Y F, XU Y H, SHI M H, et al. The impact of  $\text{PM}_{2.5}$  on the human respiratory system[J]. Journal of Thoracic Disease, 2016, 8(1):E69-E74.
- [4]SHI L H, ZANOBBETTI A, KLOOG I, et al. Low-concentration  $\text{PM}_{2.5}$  and mortality:estimating acute and chronic effects in a population-based study[J]. Environmental Health Perspectives, 2015, 124(1):46-52.
- [5]ZHANG A, QI Q W, JIANG L L, et al. Population exposure to  $\text{PM}_{2.5}$  in the urban area of Beijing[J]. PloS One, 2013, 8(5):e63486.
- [6]LI G D, FANG C L, WANG S J, et al. The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ) concentrations in China[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(21):11452-11459.
- [7]张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 城市规模对大气污染物  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16):5049-5057.
- [8]余光明, 李法松, 韩铖. 安庆大气颗粒物污染外来输送轨迹及源区研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12):2111-2119.
- [9]陈刚, 刘佳媛, 皇甫延琦, 等. 合肥城区  $\text{PM}_{10}$  及  $\text{PM}_{2.5}$  季节污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7):1938-1946.

- 
- [10] JIA J, CHENG S Y, LIU L, et al. An integrated WRF-CAMx modeling approach for impact analysis of implementing the emergency PM<sub>2.5</sub> control measures during red alerts in Beijing in December 2015[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17:2491-2508.
- [11] 李璇, 聂滕, 齐琨, 等. 2013 年 1 月北京市 PM<sub>2.5</sub> 区域来源解析[J]. *环境科学*, 2015, 36(4):1148-1153.
- [12] SHI G L, TIAN Y Z, ZHANG Y F, et al. Estimation of the concentrations of primary and secondary organic carbon in ambient particulate matter: Application of the CMB-Iteration method[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(32): 5692-5698.
- [13] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型(CMB)对北京市大气 PM<sub>2.5</sub> 来源的解析研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2693-2700.
- [14] CHEN D S, WANG X T, NELSON P, et al. Ship emission inventory and its impact on the PM<sub>2.5</sub> air pollution in Qingdao Port, North China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166:351-361.
- [15] 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 等. 兰州市煨炕污染物排放清单及其对 PM<sub>2.5</sub> 浓度贡献[J]. *环境科学*, 2018, 39(11):11-19.
- [16] ZHAO M F, HUANG Z S, QIAO T, et al. Chemical characterization, the transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai: Seasonal variations[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 158-159:66-78.
- [17] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014 年北京地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化特征[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(6):783-790.
- [18] 周一敏, 赵昕奕. 北京地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度与气象要素的相关分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1):111-124.
- [19] HUANG F F, LI X, WANG C, et al. PM<sub>2.5</sub> spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013-2014 in Beijing, China[J]. *PloS One*, 2015, 10(11):e0141642.
- [20] ZHANG Z Y, WANG J B, HART J E, et al. National scale spatiotemporal land-use regression model for PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> concentration in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 192:48-54.
- [21] 贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素的分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(7):1119-1129.
- [22] DING Y T, ZHANG M, QIAN X Y, et al. Using the geographical detector technique to explore the impact of socioeconomic factors on PM<sub>2.5</sub> concentrations in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211:1480-1490.
- [23] LOU C, LIU H Y, LI Y F, et al. Socioeconomic drivers of PM<sub>2.5</sub> in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(10): 928-946.
- [24] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(6):637-642.

---

[25]翟华, 朱彬, 赵雪婷, 等. 长江三角洲初冬一次重污染天气成因分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11):4001-4009.

[26]DIMITRIOU K, REMOUNDAKI E, MANTAS E, et al. Spatial distribution of source areas of PM<sub>2.5</sub> by Concentration Weighted Trajectory (CWT) model applied in PM<sub>2.5</sub> concentration and composition data[J]. Atmospheric Environment, 2015, 116:138-145.

[27]王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.

[28]HUANG H, LEE S C, CAO J J, et al. Characteristics of indoor/outdoor PM<sub>2.5</sub> and elemental components in generic urban, roadside and industrial plant areas of Guangzhou City, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(1): 35-43.