

## 百色市冬季 PM<sub>2.5</sub> 传输路径及来源分析

杨俊超<sup>1</sup>, 陈志明<sup>1</sup>, 支国瑞<sup>2</sup>, 毛敬英<sup>3</sup>, 刘慧琳<sup>1</sup>, 黄炯丽<sup>1</sup>, 李宏姣<sup>1</sup>, 梁桂云<sup>1</sup>, 张达标<sup>1</sup>, 莫招育<sup>1\*</sup>

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 广西 南宁 530022;

2. 中国环境科学研究院, 环境基准和风险评估国家重点实验室, 北京 100012;

3. 暨南大学, 广东 广州 510632)

**摘要:**通过采用后向轨迹结合聚类分析方法计算 2015—2016 年百色市 PM<sub>2.5</sub> 潜在源贡献因子(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT), 分析影响该市冬季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的潜在源区, 并探讨不同源区对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率。同时, 使用 CAMx 模式模拟百色市各县区及周边区域对该市大气传输的影响。结果表明, 影响百色市 PM<sub>2.5</sub> 浓度潜在源主要集中在该市和临近的河池、南宁、崇左, 以及北部的贵州省; CAMx 模式模拟对百色市冬季大气污染物传输的地区来源与该市大气污染物的 PSCF 分析和 CWT 分析权重较大的区域较为一致, 这些区域对百色市 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率达 73%。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 后向轨迹; 潜在源贡献因子; 浓度权重轨迹; CAMx 模式; 百色

中图分类号: X513 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2020)01-0023-05

## Transmission Path and Potential Sources of PM<sub>2.5</sub> During the Winter in Baise

YANG Jun-chao<sup>1</sup>, CHEN Zhi-ming<sup>1</sup>, ZHI Guo-rui<sup>2</sup>, MAO Jing-ying<sup>3</sup>, LIU Hui-lin<sup>1</sup>, HUANG Jiong-li<sup>1</sup>,

LI Hong-jiao<sup>1</sup>, LIANG Gui-yun<sup>1</sup>, ZHANG Da-biao<sup>1</sup>, MO Zhao-yu<sup>1\*</sup>

(1. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning, Guangxi 530022, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

**Abstract:** By adopting backward trajectory and cluster analysis method, the potential source contribution function(PSCF) and the concentration weight trajectories (CWT) of PM<sub>2.5</sub> in Baise from 2015 to 2016 were calculated. The potential source of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in winter and the contribution rates of different sources were analyzed. Meanwhile, CAMx model was used to simulate the impact of air transmission from the counties of Baise and their surroundings. The results indicated that the potential PM<sub>2.5</sub> sources were mainly in Baise and the adjacent cities, such as Hechi, Nanning, Chongzuo, and in north of Guizhou province. The simulated result of air transmission source during the winter in Baise by CAMx model was consistent with the results by PSCF and CWT in high weighted area, where the contribution rate was up to 73%.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; Backward trajectory; Potential source contribution factor; Concentration weight trajectory; CAMx model; Baise

百色市是我国红色根据地, 亦为最典型的老少边穷行政区域, 2015 年以来开展的 PM<sub>2.5</sub> 监测结果表明, PM<sub>2.5</sub> 成为了百色市最主要的首要污染物, 尤其是在气象条件不佳的冬季。研究表明, 我国 PM<sub>2.5</sub> 二次组分(硫酸盐、硝酸盐、氨盐、二次有机碳等)占比较高, 甚至超过 50%。由于 PM<sub>2.5</sub> 成因复杂, 来源广泛, 在大气中停留时间较长, 除了本地排

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-11-14

基金项目: 2019 年广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFAA185061); 广西科技基金资助项目(桂科 AB16380292); 广西青年基金资助项目“南宁市大气新粒子生成的环境影响因素研究”

作者简介: 杨俊超(1990—), 男, 河南郟县人, 工程师, 硕士, 研究方向为大气污染来源解析与传输。

\* 通信作者: 莫招育 E-mail: 65678503@qq.com

放,还有可能来自区域、跨区域的传输<sup>[1-2]</sup>。为此,选取 2015—2016 年气象条件较为不佳的冬季<sup>[3-4]</sup>对百色市 PM<sub>2.5</sub>本地源和外来输送源进行定性定量分析。国内外学者对大气污染物的外来传输开展了广泛的研究,后向轨迹是主要研究手段<sup>[5-6]</sup>。如石春娥等<sup>[7]</sup>应用轨迹分析和聚类分析的方法,得到合肥地区大气污染事件超过 50% 与远程输送有关;王茜<sup>[8]</sup>运用后向轨迹及潜在源分析得到上海冬、春和秋季,PM<sub>10</sub>和 NO<sub>2</sub>的潜在源主要集中在江苏。虽然后向轨迹在大气污染传输研究方面已得到广泛应用,但此类研究多集中在京津冀、长三角、珠三角等区域<sup>[9-10]</sup>,而在广西特别是百色市还很少应用。因此,研究百色市大气污染物的外来传输及潜在源,既填补了广西大气输送研究的空白,又对百色地区大气污染防治管理具有一定意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

百色市(E106.62°,N23.91°)工业结构以电解铝、电解锰等高耗能企业和制糖、造纸等重污染企业为主,常年以东南风为主导风向,而平果、田阳、田东等工业集中地正处于百色市东南方向。百色市城区地处右江河谷西北端尽头,四面山峰环抱,气象条件不佳时,污染物易集聚,很难向外扩散,易引起二次污染。

### 1.2 资料来源

百色市 PM<sub>2.5</sub>质量浓度为该市 2 个空气自动监测站点的平均值,监测期间为 2015 年 12 月 1 日—2016 年 2 月 29 日(冬季)。

后向轨迹模式采用的气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)数据,直接从 [http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php) 网址下载。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 聚类分析法

聚类分析法是根据地理变量(或指标样品)特征的相似性、亲疏程度,用数学方法将其逐步分型划类,最后得到一个能反映个体或站点之间、群体之间亲属关系的分类系统<sup>[11-12]</sup>。利用 TrajStat 软件中的聚类方法对气流轨迹进行聚类分析,采用 angle distance 算法对到达百色的气流轨迹作分类,得到不同的输送气流类型,并在此基础上对百色市冬季气流所对应的污染物浓度特征作统计分析。

#### 1.3.2 潜在源贡献因子(PSCF)分析法

PSCF 算法是一种基于气流轨迹分析来识别源区的方法<sup>[13-14]</sup>。PSCF 值是所选研究区域内经过网格  $ij$  的污染轨迹数( $x_{ij}$ )与该网格上经过的所有轨迹数( $y_{ij}$ )的比值,即

$$PSCF_{ij} = x_{ij}/y_{ij} \quad (1)$$

利用该方法可以对影响研究区空气质量的污染源区进行确认,并在此基础上分析这些潜在源区的环境属性对受区(百色市)的影响。为了便于研究不同地区潜在源的贡献大小,将研究区内气流轨迹所涉及的区域网格化,分成  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的水平网格,计算各个网格内经过的气流轨迹条数和研究区所有网格内的气流轨迹条数,以此计算各研究区每个网格内的气流轨迹出现概率。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。为了减少误差,相关学者引入了权重函数  $W_{ij}$  来减小误差,使不确定性降到最低。当某一网格中的  $y_{ij}$  小于研究区内每个网格内平均轨迹端点数的 3 倍时,就要使用  $W_{ij}$  来减小 PSCF 的不确定性。即  $WPSCF = W_{ij} \times PSCF$ 。文中将  $W_{ij}$  定义为:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & y_{ij} > 80 \\ 0.70 & 20 < y_{ij} \leq 80 \\ 0.42 & 10 < y_{ij} \leq 20 \\ 0.05 & y_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.3.3 浓度权重轨迹(CWT)分析法

CWT 分析法是一种计算潜在源区气流轨迹权重浓度,反映不同轨迹的污染程度的方法<sup>[15-16]</sup>。利用 CWT 分析法可模拟潜在源区污染物的权重浓度数值。由于 PSCF 值只能反映潜在源区贡献率的大小,即每个网格中污染轨迹所占的比例多少,不能反映潜在源区的污染程度,也就无法模拟数值的大小。因此,文中引入 CWT 分析法对潜在源区的污染程度进行分析。方法如下:

$$C_{ij} = k / \left( \sum_{k=1}^M \tau_{ijk} \right) \left( \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} \right) \quad (3)$$

式中: $C_{ij}$ 为网格  $ij$  上的平均权重浓度; $k$ 为轨迹; $C_k$ 为轨迹  $k$  经过网格  $ij$  时对应的百色市大气污染物质量浓度; $\tau_{ijk}$ 为轨迹  $k$  在网格  $ij$  停留的时间。在 PSCF 分析法中所用的权重函数  $W_{ij}$  也适用于 CWT 分析法,以减少  $x_{ij}$  值较小时所引起的不确定性。

#### 1.3.4 大气化学传输模式 CAMx

CAMx 模式可以利用 MM5、WRF 等中尺度气象模式提供的气象场,在三维嵌套网格中模拟对流层污染物的排放、传输、化学反应,以及消除等过程<sup>[17-19]</sup>。CAMx 模拟过程中提供几项扩展功能,包括臭氧源识别技术、颗粒物源识别技术、敏感性分析、过程分析和反应示踪。

文中 CAMx 模式模拟采用两层嵌套方式,地图投影采用 Lambert 方法,中心经度为 E107°。第一层网格水平分辨率为 24 km,包括全国及东南亚区域;第二层网格水平分辨率为 8 km,模拟区域包含中国西南部地区和东南亚部分地区。根据 2012 年清华的 MEIC 污染源普查数据和广西统计的污染排放数据建立模式的污染源排放清单。通过模拟 2015 年百色市冬季气象场,并选用 SAPRC99 气相化学机理进行模拟,利用 CAMx 示踪功能,以百色市区为受体点对该地区及周边城市之间污染源传输进行示踪,再通过计算百色市涵盖的所有模拟网格的 PM<sub>2.5</sub> 月平均浓度,最终得出地区贡献率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冬季大气污染物浓度水平

监测期间,百色市 PM<sub>2.5</sub> 日平均质量浓度范围为 8 μg/m<sup>3</sup> ~ 166 μg/m<sup>3</sup>,平均值为 44 μg/m<sup>3</sup>。按照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)(以下简称《标准》)中 PM<sub>2.5</sub> 年平均质量浓度二级标准限值(35 μg/m<sup>3</sup>)评价,PM<sub>2.5</sub> 未达标,高于标准值 25.7%;按照《标准》中 PM<sub>2.5</sub> 24 h 平均质量浓度二级标准限值(75 μg/m<sup>3</sup>)评价,PM<sub>2.5</sub> 达标率为 93.4%。

图 1(a)(b)为监测期间百色市各大气污染物质量浓度逐日变化。由图 1(a)可见,监测期间,PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 日均变化趋势较为相似,且在颗粒物浓度上升期间,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 值也在不断增加,说明颗粒物污染加重时,PM<sub>2.5</sub> 占比不断增加。由图 1(b)可见,SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 日均变化趋势较为相似。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 可以作为污染源的标识物,显示其主要来源,SO<sub>2</sub> 主要由煤的燃烧排放,NO<sub>2</sub> 主要来自机动车和燃煤的排放。由各污染物之间的相关性分析可知,PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 均呈显著正相关,相关性系数分别为 0.94、0.54 ( $P < 0.01$ ),说明百色市冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度受扬尘污染影响较小,受 SO<sub>2</sub> 排放影响较大,这也与该市铝行业消耗大量的煤炭有关。NO<sub>2</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 的相关性较弱,相关性系数仅为 0.29,说明百色市冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度受 NO<sub>2</sub> 排放影响

较小。另外,SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 是 PM<sub>2.5</sub> 的前体物,据研究表明,在液相条件下(高湿度或云过程中)通过 NO<sub>2</sub> 氧化 SO<sub>2</sub> 会导致硫酸盐产率大幅增加,并促进硝酸盐和有机质在液相中生成,同时颗粒物吸湿增长,加速重污染的发生和发展<sup>[20]</sup>。

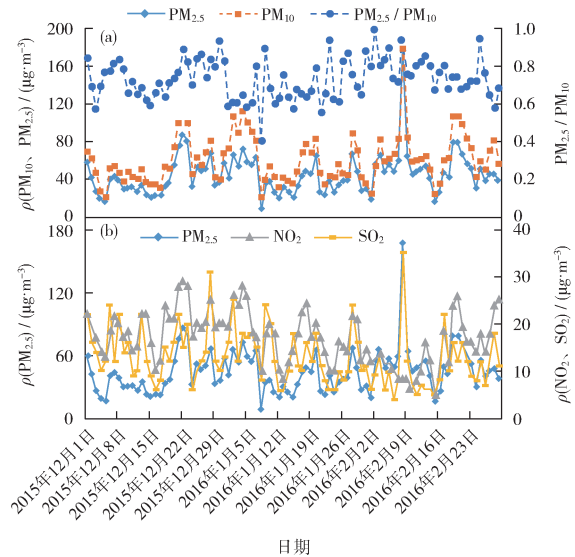


图 1 监测期间百色市各大气污染物质量浓度逐日变化  
Fig. 1 Daily variation of the mass concentration of air pollutants in Baise during the monitoring period

### 2.2 后向轨迹分析聚类分析

以百色市为目标城市,监测期间为模拟时段,每日 0:00、8:00、16:00 (UTC) 为后推起始时间,利用 TrajStat 模拟气流移动的 72 h 后向轨迹,模拟高度为 500 m。对各轨迹进行聚类分析,根据每类气流轨迹所代表的典型空间类型,将模拟时段中百色市气流轨迹方向分为 3 类,见图 2。

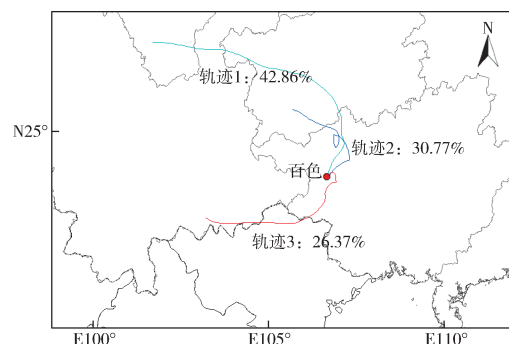


图 2 监测期间百色市后向轨迹聚类分析结果  
Fig. 2 Results of backward trajectory clustering analysis in Baise during the monitoring period

由图 2 可见,百色市冬季来自四川南部,途经云南东北部、贵州大部、广西河池的轨迹(轨迹 1)占比最多,占总轨迹数的 42.86%;其次是来自贵州西南部,途经广西河池、广西百色市东部(轨迹 2),占总轨迹数的 30.77%;第三是来自云南南部,途经越南北部、广西百色南部(轨迹 3),占总轨迹数的 26.37%。

基于模拟时段百色市后向轨迹聚类分析结果,对各类轨迹对应的各项大气污染物质量浓度的算术平均值作统计分析,以表征在该类气流影响下的大气污染物浓度水平特征。结果发现,轨迹 2 对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度最高,为  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,也是唯一全部大于百色市模拟期间  $PM_{2.5}$  平均值( $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的轨迹,且轨迹 2 呈现相对较短的气流轨迹,说明当时大气环境较为稳定,易于污染物的积累。可见,该轨迹经过区域的排放源,以及稳定的区域气象条件是百色市高浓度颗粒物污染过程的重要原因。另外,轨迹 2 对应的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  质量浓度分别为  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,也是 3 条轨迹中最高的,说明该轨迹经过区域  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  排放量较大。

### 2.3 污染气流潜在源分析

将后向轨迹计算的气流轨迹所覆盖的区域网格化,网格大小为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,  $PM_{2.5}$  标准值设为  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (监测期间百色市  $PM_{2.5}$  平均值),得到百色市冬季  $PM_{2.5}$  潜在源分布,见图 3。由图 3 可见,高于百色市冬季  $PM_{2.5}$  平均质量浓度的轨迹经过的区域主要有贵州中南部,湖南西北部,广西河池市,百色市北部、东部和南部,广西崇左市,广西南宁市,越南北部,其中百色市本地、东部、南部的 WP-SCF 均  $>0.5$ ,说明超过一半气流经过这些区域时,百色市  $PM_{2.5}$  浓度大于冬季平均浓度。表明,这些区域是百色市  $PM_{2.5}$  污染源主要分布区。

### 2.4 CWT 分析

应用 CWT 分析法对影响模拟期间百色市  $PM_{2.5}$  潜在源区的权重浓度进行模拟,结果见图 4。由图 4 可见,与百色市冬季  $PM_{2.5}$  的 WPSCF 分布区域相似,对百色市冬季  $PM_{2.5}$  浓度贡献较大的地区同样主要集中在百色市本地、东部、南部地区。就整个贵州省而言,虽然 WCWT 的浓度不是太高,但贡献的区域大,故整个贵州省对百色市的贡献也较大。

百色冬季后向轨迹  $PM_{2.5}$  浓度最高的气流经过的区域和 WPSCF 较高的区域,以及对  $PM_{2.5}$  浓度贡献较大的地区均分布在百色市本地、东部和南部地

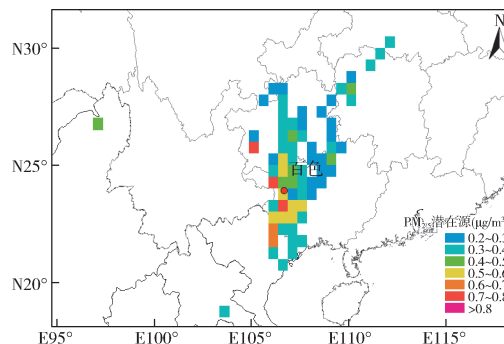


图 3 监测期间百色市  $PM_{2.5}$  潜在源分布

Fig. 3 Distribution of  $PM_{2.5}$  potential sources in Baize during the monitoring period

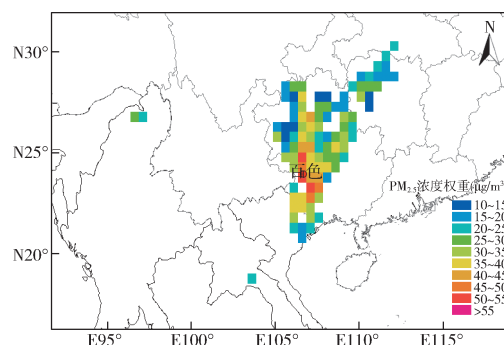


图 4 监测期间百色市  $PM_{2.5}$  的 CWT 分布

Fig. 4 Distribution of  $PM_{2.5}$  CWT in Baize during the monitoring period

区。这与百色市本地和东部布局有百色工业园区、百色新山铝产业示范园区、田东石化工业园区、平果工业区,南部有德保工业集中区、靖西铝工业区 6 大工业园区有关。2015 年数据显示,百色全市工业园区总产值达 1 051.63 亿元,而上述工业园区总产值为 843.34 亿元,占全市工业园区总产值的 80.19%,这些工业园区以铝行业、石油化工、水泥、铁合金等相关行业为主,生产规模大、排放污染物多,是百色市颗粒物等污染物的主要排放区域。

### 2.5 CAMx 模式分析

通过 CAMx 模式对百色市监测期间  $PM_{2.5}$  来源进行模拟,其结果显示,百色市本地贡献率为 26.48%,该市其他县市地区的排放对百色市的  $PM_{2.5}$  贡献为 14.47%,特别是百色市东部的田东、田阳、平果和南部的靖西、德保共贡献了百色市  $PM_{2.5}$  的 13.02%,是百色市除市区外的主要贡献地区;外市中,临近百色市的南宁、崇左、河池三市是贡献较大的地区,贡献率分别为 5.46%、4.51%、

5.51% ;外省中  $PM_{2.5}$  贡献占比最大的是贵州省,贡献率为 16.57%。这是由于贵州省是百色市冬季污染物的主要潜在源之一,虽然 WCWT 的浓度不是太高,但贡献的区域大,故贵州省对百色市颗粒物的贡献较高。可以看出,百色市冬季  $PM_{2.5}$  传输的地区来源还是本市和临近的河池、南宁、崇左,以及北部的贵州省,这些区域与百色市冬季  $PM_{2.5}$  潜在源的区域较为一致,说明 CAMx 模式模拟结果较为可信。另外,较远地区中,国外(越南)和中国其他省份贡献了百色市  $PM_{2.5}$  的 17.95%。

### 3 结论

(1) 百色市冬季  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  与  $PM_{2.5}$  日均变化趋势较为相似,其中  $PM_{10}$ 、 $SO_2$  与  $PM_{2.5}$  呈显著正相关,说明百色市冬季  $PM_{2.5}$  的浓度受到扬尘污染影响较小,受  $SO_2$  排放影响较大,这也与百色市铝行业消耗大量的煤炭有关。 $NO_2$  与  $PM_{2.5}$  的相关性较弱,说明百色市冬季  $PM_{2.5}$  的浓度受到  $NO_2$  排放影响较小。

(2) 百色市冬季  $PM_{2.5}$  的 PSCF 和 CWT 分析表明,对该市颗粒物浓度贡献较大的是百色市本地、东部和南部地区,主要由于这些地区工业分布较多。

(3) 利用 CAMx 模式模拟百色市冬季大气污染物的传输影响,得到百色市冬季大气污染物传输的地区来源是本市和临近的河池、南宁、崇左,以及北部的贵州省。

(4) 百色市冬季污染物 CAMx 模型模拟对百色市冬季大气污染物传输的地区来源与百色市大气污染物的 PSCF 分析和 CWT 分析权重较大的区域较为一致。

### [参考文献]

- [1] 李璇,聂滕,齐珺,等. 2013 年 1 月北京市  $PM_{2.5}$  区域来源解析[J]. 环境科学,2015,36(4):1148-1153.
- [2] 贾海鹰,程念亮,何友江,等. 2014 年春季山东省  $PM_{2.5}$  跨区域输送研究[J]. 环境科学,2015,36(7):2353-2360.
- [3] 李啸天,吴绍华,徐于月,等. 江苏省  $PM_{2.5}$  质量浓度的时空变化格局模拟[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(2):16-22.
- [4] 王无为,黄建武,龚胜生,等. 2016 年武汉市大气污染物时空分布特征及影响因素[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(6):20-24.
- [5] ZHAO S P, YIN D Y, QU J J. Identifying sources of dust based on CALIPSO, MODIS satellite data and backward trajectory model[J]. Atmospheric Pollution Research,2015,6(1):36-44.
- [6] 孔珊珊,刘厚凤,陈义珍. 基于后向轨迹模式的北京市  $PM_{2.5}$  来源分布及传输特征探讨[J]. 中国环境管理,2017,9(1):86-90.
- [7] 石春娥,姚叶青,张平,等. 合肥市  $PM_{10}$  输送轨迹分类研究[J]. 高原气象,2008,27(6):1383-1391.
- [8] 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.
- [9] YU T Y. Identification of source regions of  $PM_{10}$  with backward trajectory-based statistical models during  $PM_{10}$  episodes[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 6465-6475.
- [10] 赵恒,王体健,江飞,等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报,2009,25(2):181-186.
- [11] PEKNEY N J, DAVIDSON C I, ZHOU L M, et al. Application of PSCF and CPF to PMF-modeled sources of  $PM_{2.5}$  in Pittsburgh [J]. Aerosol Science and Technology, 2006, 40(10):952-961.
- [12] CHERIAN R, VENKATARAMAN C, KUMAR A, et al. Source identification of aerosols influencing atmospheric extinction: Integrating PMF and PSCF with emission inventories and satellite observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D22):1842-1851.
- [13] KULSHRESTHA U C, RAMAN R S, KULSHRESTHA M J, et al. Secondary aerosol formation and identification of regional source locations by PSCF analysis in the Indo-Gangetic region of India [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2009, 63(1):33-47.
- [14] DO W G, JUNG W S. Estimation of  $PM_{10}$  source locations in Busan using PSCF model[J]. Journal of Environmental Science International, 2015, 24(6):793-806.
- [15] DIMITRIOU K. The dependence of PM size distribution from meteorology and local-regional contributions, in Valencia (Spain): A CWT model approach[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(5):1979-1989.
- [16] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. Environmental Modelling and Software, 2009, 24(8):938-939.
- [17] NOPMONGCOL U, KOO B, TAI E, et al. Modeling Europe with CAMx for the air quality model evaluation international initiative (AQMEII) [J]. Atmospheric Environment, 2012, 53:177-185.
- [18] 陈云波,徐峻,何友江,等. 北京市冬季典型重污染时段  $PM_{2.5}$  污染来源模式解析[J]. 环境科学研究, 2016, 29(5):627-636.
- [19] BOVE M C, BROTTTO P, CASSOLA F, et al. An integrated  $PM_{2.5}$  source apportionment study: Positive Matrix Factorisation vs. the chemical transport model CAMx[J]. Atmospheric Environment, 2014, 94:274-286.
- [20] 刘畅. 大气复合污染条件下矿质颗粒物表面的非均相转化机制研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2012.

本栏目编辑 谢咏梅