

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.06.003

基于 HYSPLIT 模型的衡阳市大气 PM_{2.5} 潜在源分析

刘迎云,姜雨,宗梁,李宪

(南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:为查明外来输送对衡阳市大气 PM_{2.5} 的影响,基于 2015 年 3 月至 2018 年 2 月衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度数据和 GDAS 气象数据,利用 HYSPLIT 模型的后向轨迹模式,结合聚类分析,潜在源分析(PSCF)和浓度权重分析(CWT),对衡阳市不同季节 PM_{2.5} 外来输送通道及潜在源分布进行分析。研究表明:在春、秋、冬三季,途经湘赣交界处、湘东地区输送至衡阳的气团输送路径衡阳 PM_{2.5} 外来输送的通道方向,且贡献较大,而源自鄂豫交界处,贯穿鄂、经湘东北输送至衡阳的气团输送路径虽然也是衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的通道方向,但贡献较小。来自豫皖交界,途径鄂东,湘东北的气团输送路径为夏季的 PM_{2.5} 外来输送通道方向。湘东北、湘南、湘东、赣西、鄂中南及豫南地区为春、秋、冬三季衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的主要潜在源区,其中湘东北、湘南、湘东、赣西地区为高浓度贡献潜在源区;而湘东北及鄂中南地区为夏季 PM_{2.5} 外来输送的主要潜在源区,其中湘东北为高浓度贡献潜在源区。

关键词:后向轨迹;聚类分析;潜在源分析;浓度权重分析

中图分类号:X513 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2019)06-0012-06

Potential Source Analysis of PM_{2.5} Based on HYSPLIT Model in Hengyang

LIU Yingyun, JIANG Yu, ZONG Liang, LI Xian

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to ascertain the effect of external transportation on PM_{2.5} in Hengyang City, backward trajectory pattern of HYSPLIT model was used along with PM_{2.5} concentration data and GDAS meteorological data from March 2015 to February 2018 of Hengyang to analyze the distribution characteristics of the backward trajectory of the external air mass in Hengyang City. In addition, the distribution of PM_{2.5} external transport channels and potential sources in Hengyang City were analyzed via cluster analysis method, PSCF method and CWT method. The results showed that the air mass transport path from the junction of

收稿日期:2019-09-06

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目(17A180)

作者简介:刘迎云(1964-),女,教授,主要从事大气污染防治方面的研究。E-mail:gylyy0924@126.com

Hubei and Henan, and then through Hubei and northeastern Hunan to Hengyang is the channel direction of PM_{2.5} external transport in spring, autumn and winter, with a small contribution rate. In addition, the air mass transport path that passes through the junction of Hunan and Jiangxi and eastern Hunan to Hengyang is the channel direction of PM_{2.5} with higher contribution rate. In summer, the air mass transport path from the junction of Henan and Anhui, and then through eastern Hubei and northeastern Hunan is the channel direction of PM_{2.5} external transport. The northeastern and southern and eastern parts of Hunan, western Jiangxi, central and southern Hubei, and southern Henan are the main potential source areas for PM_{2.5} external transport in Hengyang City in spring, autumn and winter, while the high concentration contribution potential source area of PM_{2.5} is in northeastern and southern and eastern parts of Hunan, western Jiangxi. In northeastern Hunan, central and southern Hubei are the main potential source areas for PM_{2.5} external transport in summer, and the contribution rate of northeastern Hunan is higher.

key words: backward trajectory; cluster analysis; PSCF; CWT

0 引言

随着城市化进程和经济发展速度的加快,以 PM_{2.5} 为首要污染物的大气重污染现象备受关注,为缓解大气污染的严峻形势,国务院在印发的《大气污染防治行动计划》中明确指出要加强以 PM_{2.5} 为首要污染物的大气污染防治能力的建设。有研究证明,PM_{2.5} 易随大气环流汇聚并输送至风带途径区域,形成“输入性”污染^[1-3]。孙超等^[4]研究发现长江中下游地区典型城市 PM_{2.5} 的省外年均贡献率为 16.8% 至 60.3%,省内年均贡献率为 39.7% 至 83.2%,秋、冬季 PM_{2.5} 的区域传输贡献较高,春、夏季较低。大气的传输性和其结构的不稳定性决定了某一城市不可能仅仅依靠控制本地污染排放量而改善和维持空气质量,为了有效控制大气污染,打破行政区限制是必然趋势,因此需进一步深入研究外来气团输送对受点区域大气污染的影响规律,这也有利于区域大气联防联控和“一市一策”的实施。

近年来,国内外学者围绕 PM_{2.5} 本地污染排放特征及理化性质进行了大量研究^[5-8],针对衡阳市的相关研究也有进行^[9-12],结果表明衡阳市空气质量状况不容乐观。因此本研究利用 HYSPLIT (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory) 模型的后向轨迹模式,结合 GDAS 气象数据和衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度数据,对 2015 年 3 月至 2018 年 2 月衡阳市不同季节 PM_{2.5} 后向轨迹分布特征进行分析,并运用模式中的聚类分析法、PSCF (potential source contribution function) 分析

法、CWT (concentration weighted trajectory) 分析法,识别衡阳市各季节 PM_{2.5} 外来输送的主要通道及潜在源区分布情况,希望为衡阳市大气污染联防联控工作提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文季节划分按照气象年分类,春季为 3~5 月,夏季为 6~8 月,秋季为 9~11 月,冬季为 12 月和次年 1~2 月。PM_{2.5} 质量浓度数据采用 2015 年 3 月至 2018 年 2 月衡阳市环境监测站空气质量平台发布的 PM_{2.5} 小时质量浓度数据。后向轨迹模式采用的气象资料来源于美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的同时段 GDAS (global data assimilation system) 数据,该数据是利用全球资料同化系统,把全球 1°×1° 大气状态数据插值到正形投影的地图上,时间分辨率为 6 h (记录时间分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00 (UTC)),垂直方向分为 23 层。其中气象要素场包括水平和垂直风速、温度、气压、相对湿度、降水等。本文选取位于衡阳市城区空气监测点中心位置的市环境监测站所在点位 (26.89°N、112.60°E) 为受点位置。

1.2 研究方法

1.2.1 后向轨迹模型

HYSPLIT 模型由美国国家大气海洋管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 开发,是一种模拟大气传输和扩散的模型,目前被国内外相关学者广泛使用^[13],可基于三维网格化实时气象数据,模拟出任一地点到达

受点的气团质点的运行轨迹^[14]。绘制受点后向轨迹后,可利用模型中的 Trajstat 软件对后向轨迹基于空间相似度进行聚类分析,并结合 PM_{2.5} 质量浓度对聚类结果进行统计分析,从而识别污染物外来源和输送路径。

1.2.2 潜在源分析(PSCF)

PSCF 分析法是 HYSPLIT 模型中的一种外来输送潜在源区识别方法,是计算和描述潜在源区位置的条件概率函数。基于后向轨迹将轨迹覆盖区域划分为分辨率为 0.5°×0.5°的 $i \times j$ 个网格,然后依据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定的 PM_{2.5} 24 h 平均二级标准限值 75 μg/m³ 为条件阈值;当某条轨迹经过第 ij 个网格时对应的 PM_{2.5} 质量浓度超过阈值,则标记为污染轨迹。PSCF 值计算公式见公式(2),其值越大则说明该网格中污染轨迹占比越高^[15],该网格区域对受点 PM_{2.5} 提供外来输送的可能性越大。因 PSCF 的误差会随网格与受点距离的增加而增加,所以引入权重因子(W_{ij})进行数值修正^[16-17], $W(n_{ij})$ 计算如公式(2),修正后 WPSCF 值可定性分析外来输送的潜在源区位置。

$$P = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \times W(n_{ij}) \quad (1)$$

式中 m_{ij} 为研究区域内经过网格 ij 的污染轨迹数, n_{ij} 为经过第 ij 个网格的所有轨迹数。

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

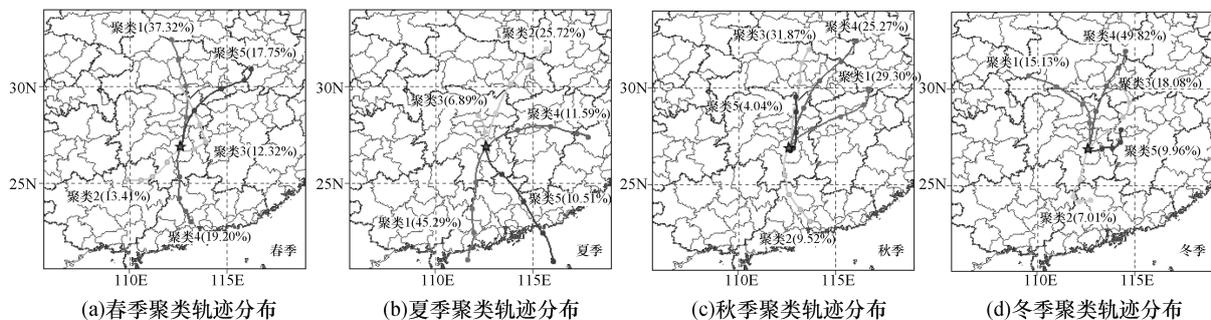


图1 衡阳市不同季节聚类轨迹分布

Fig. 1 Distribution of clustering trajectories in different seasons in Hengyang City

由图1可见,春季外来气团以西北偏北方向输送为主,其中聚类轨迹1出现频率最高,为37.32%,因此源自鄂北、途径鄂中、经湘东北输送

1.2.3 浓度权重分析(CWT)

CWT 法是计算研究时段内经过单个网格的全部轨迹对应 PM_{2.5} 质量浓度的加权平均值,用以区分潜在源区的源强。PSCF 分析法只能定性分析外来输送的潜在源区位置,不能对相同数值的网格进行区分,所以需进一步用 CWT 分析法来定量分析外来输送的浓度贡献水平^[16]。计算公式见公式(3),引入公式(2)中的 W_{ij} (权重因子)进行数值修正,加权后的平均浓度值 WCWT 值可用于定量区分潜在源的源强。网格较高的 CWT 值表示经过网格的气团对应较高的受点 PM_{2.5} 浓度,因此网格对应的区域可视为受点区域 PM_{2.5} 外来输送的高浓度贡献潜在源区。

$$C_{ij} = \frac{k}{\sum_{k=1}^M n_{ij}} \sum_{i=k}^M C_k n_{ijk} \quad (3)$$

式中 C_{ij} 为网格 ij 中的平均加权浓度, k 为轨迹的索引, M 为轨迹的总数, C_k 为轨迹 k 经过网格 ij 时对应的受点区域 PM_{2.5} 浓度, n_{ijk} 为轨迹 k 在网格 ij 中停留的时间。

2 结果与讨论

2.1 后向轨迹分析

利用 HYSPLIT4.9 模型的 Trajstat 软件,选取位于衡阳市环境监测站所在点位(26.89°N、112.60°E)为起始点,模拟起始高度为相对地面高度 500 m^[12,18],后向追溯的时间尺度为 48 h,模拟了 2015 年 3 月至 2018 年 2 月衡阳市不同季节外来气团的后向轨迹分布,并进行聚类分析,结果如图 1 所示。

至衡阳的气团移动路径为衡阳市春季 PM_{2.5} 外来输送的主要通道方向。夏季外来气团输送以南方为主,其中聚类 1 的出现频率最高,达

45.29%,表明源自南海,经珠三角、湘南地区输送至衡阳的气团移动路径为夏季外来气团输送的主要通道方向。秋季聚类轨迹中4类来自东北方向,出现频率累计达90.47%,说明秋季外来气团输送以东北方向为主,其中聚类3出现频率最高,为31.87%,因此源自鄂北,途经鄂中,经湘东北输送至衡阳的气团移动轨迹是秋季 PM_{2.5} 外来输送的主要通道方向。冬季聚类轨迹整体以偏北方向的输送为主,共占总轨迹数的83.03%,其中来自东北方向,途经的豫南、鄂、湘东北地区的聚类

4出现频率最高,气团移动路径为冬季 PM_{2.5} 外来输送的主要通道方向。

结合衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度,对聚类后结果进行统计分析,可对 PM_{2.5} 外来输送进行输送路径的识别,统计分析结果见表1,其中 PM_{2.5} 质量浓度值超过 PM_{2.5}《环境空气质量标准》24 h 平均二级标准限值 75 μg/m³ 的轨迹标记为超标轨迹,超标轨迹占比为该聚类中超标轨迹数量与该聚类中轨迹总数量之比。

表1 衡阳市不同季节聚类轨迹的统计分析结果

Table 1 Statistical analysis results of clustering trajectories of different seasons in Hengyang City

季节	编号	出现频率/%	途经区域	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	超标率/%
春季	1	37.32	鄂豫交界处,鄂,湘东北	44.90	6.80
	2	13.41	桂东北,湘南	49.02	10.81
	3	12.32	鄂南,湘北,湘赣交界,湘东	57.72	17.65
	4	19.20	粤北,湘南	43.53	7.55
	5	17.75	皖西南,鄂东南,湘东北	43.51	8.16
夏季	1	45.29	南海,粤西,湘南	20.72	0
	2	25.72	豫皖交界,鄂东,湘东北	39.16	4.23
	3	6.89	湘中	36.59	5.26
	4	11.59	闽东北,赣,湘东	36.87	3.13
	5	10.51	南海,粤东,湘南	20.19	0
秋季	1	29.30	赣东北,湘东	57.19	26.25
	2	9.52	粤,湘南	56.42	34.62
	3	31.87	鄂豫交界处,鄂,湘东北	42.55	12.64
	4	25.27	豫皖交界,鄂东,湘东北	52.04	17.39
	5	4.04	湘东北	56.22	9.10
冬季	1	15.13	鄂西南部,湘北	75.76	36.59
	2	7.01	粤西北,湘粤桂交界,湘南	90.70	63.16
	3	18.08	鄂东南,赣北,湘东	87.01	59.18
	4	49.82	鄂豫交界处,鄂,湘东北	69.76	37.78
	5	9.96	赣西,湘东	96.19	66.68

统计分析结果发现,春、秋、冬三季来自东北方向的外来气团主要输通道方向对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均存在一定比重的污染轨迹,但与其他方向聚类轨迹差异较小,而该方向的聚类轨迹在夏季出现概率较小,对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和污染轨迹占比却为当季最高,说明来自东北方向的外来气团主要输通道方向会输送一定程度的 PM_{2.5},为衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的通道方向,但贡献率较小。同时经对比发现,来自偏东方向,途经湘赣交界处、湘东地区输送至衡阳的聚类轨迹,出现概率较低,但对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和污染轨迹占比均为当季最高或次高,说明该路径也为衡阳市 PM_{2.5} 外来

输送的通道方向,且贡献率较高,主要由于轨迹移动较慢,扩散条件较差,且途经区域污染源丰富,并受地形影响,污染物容易在山前汇聚虽气团输送回衡阳。此外,来自南方向途经湘南地区输送至衡阳的聚类轨迹对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均较高,且污染轨迹占比也较高,但与偏东和东北方向的聚类轨迹不同的是,该类轨迹虽移动速度较慢,扩散条件较差,但途经区域的空气质量较好,气团水汽含量丰富,因此该类气团轨迹不是衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的通道方向,易出现污染天气主要是由于为 PM_{2.5} 的形成提供了水汽条件,同时气团途经湘南地区的连绵山脉,当气团输送方向切边时易

将由其他方向输送并停滞在湘南地区山体前的污染物重新输送回衡阳而造成污染。

2.2 PSCF 分析

衡阳市不同季节的 WPSCF 值分布特征如图

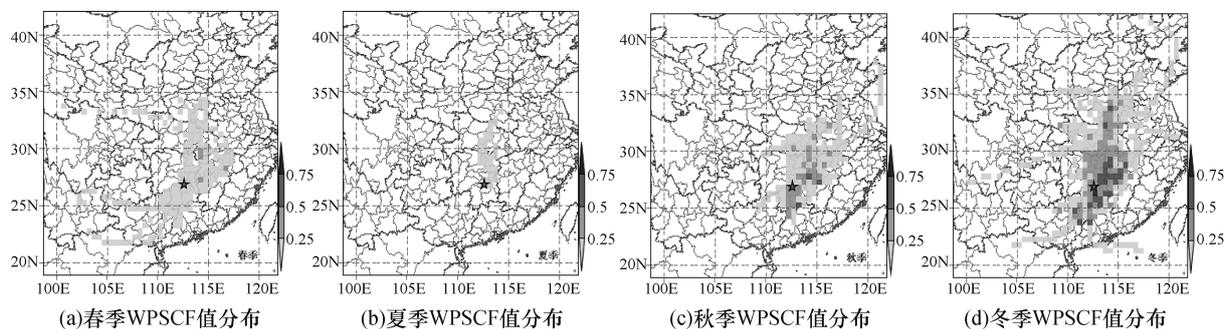


图2 衡阳市不同季节 WPSCF 值分布

Fig. 2 Distribution of WPSCF values in different seasons in Hengyang City

由图2可见,春季 WPSCF 值分布均大致呈东北-西南走向,主要分布在湘、赣、鄂、豫及两广地区,且分布的 WPSCF 数值较低;夏季 WPSCF 值分布呈南北走向,范围小且狭长,主要分布在湘东北及鄂中南地区, WPSCF 数值均低于 0.25;秋季 WPSCF 值分布集中,其中湘南、湘东北、鄂东南及赣西部分地区的 WPSCF 值高于 0.25,且衡阳以东和以南周边部分城市的 WPSCF 值高于 0.5;冬季 WPSCF 值分布范围最广,分布的 WPSCF 数值较高, WPSCF 较高值主要分布在湘南、湘赣交界城市、赣西、桂东北及豫南地区,以上高值分布区域为衡阳市冬季 $PM_{2.5}$ 外来输送的主要潜在源区,其次湘东北、鄂中南等地的 WPSCF 值高于

2 所示。颜色越深对应 WPSCF 值越高,单个网格中经过的污染轨迹占经总轨迹的比重越大,该网格区域对衡阳市提供 $PM_{2.5}$ 外来输送的可能性越大,可识别为 $PM_{2.5}$ 外来输送的主要潜在源区。

0.25,表明对衡阳市也有一定外来输送贡献。

综上发现,衡阳市 $PM_{2.5}$ 质量浓度春、秋、冬三季受湘东北、湘南、湘东、赣西、鄂中南、豫南地区的影响较大,为春、秋、冬三季 $PM_{2.5}$ 外来输送的主要潜在源区,而夏季受湘东北、鄂中南地区的影响较大,是夏季 $PM_{2.5}$ 外来输送的主要潜在源区。

2.3 CWT 分析

衡阳市不同季节的 WCWT 值分布特征如图3所示,网格颜色越深则网格平均加权浓度值越高,表明该网格对应的区域对受点区域提供了越高浓度的污染物贡献。

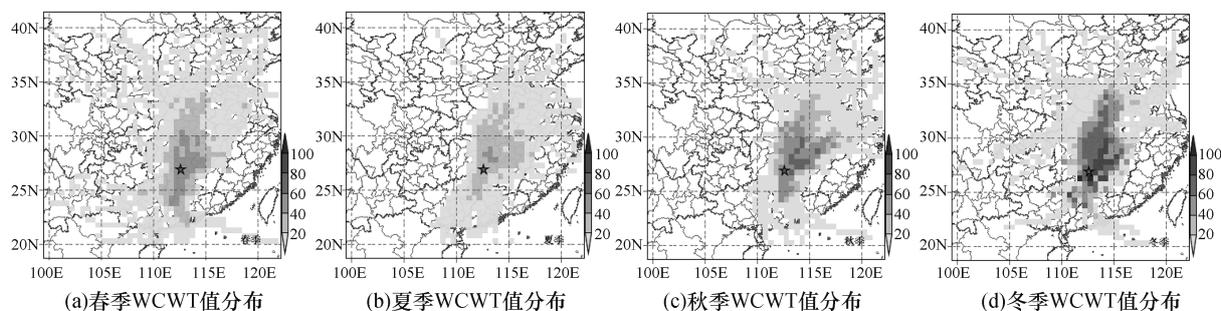


图3 衡阳市不同季节 WCWT 值分布

Fig. 3 Distribution of WCWT values in different seasons in Hengyang City

由图3可见,春季 WCWT 较高值(大于 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布在湘东北、湘南及赣西地区。夏季 WCWT 较高值(大于 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布在湘东

北地区。秋季 WCWT 较高值主要分布在湘东北及赣西地区。冬季 WCWT 较高值(大于 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布在湘东北、赣西、鄂中南、桂东北、豫南地

区,而 WCWT 值大于 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的地区主要分布在湘赣交界城市。综上发现,PM_{2.5} 外来输送高浓度贡献潜在源区主要分布在湘东北、湘南、湘东、赣西地区,而冬季的外来输送的高浓度贡献潜在源区分布范围最广,鄂中南地区、豫南地区也会对衡阳 PM_{2.5} 提供较高浓度的外来输送。

综合 PSCF 和 CWT 分析法结果发现,衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的主要潜在源区主要分布在湘东北、湘南、湘东、赣西、鄂中南及豫南地区,其中湘东北、湘南、湘东及赣西地区对衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度的贡献较高,以上结果表明衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度受到跨区域和区域传输的影响,且区域传输对 PM_{2.5} 质量浓度的贡献率较高。

3 结 论

1) 聚类分析结果表明:春、秋、冬三季衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的通道有两个方向,一是来自偏东方向,途经湘赣交界处、湘东地区输送至衡阳的气团输送路径,该路径气团贡献率较高;二是源自鄂豫交界处,由北向南贯穿鄂大部、经湘东北输送至衡阳的气团输送路径,虽为主要通道,但贡献率较小。而夏季的 PM_{2.5} 外来输送通道方向为来自豫皖交界,途径鄂东,湘东北的气团输送路径方向。

2) PSCF 和 CWT 分析结果表明:衡阳市 PM_{2.5} 质量浓度受到跨区域和区域传输的影响,但区域传输对 PM_{2.5} 质量浓度的贡献率较高,冬季受跨区域输送影响最为显著。湘东北、湘南、湘东、赣西、鄂中南及豫南地区为春、秋、冬三季衡阳市 PM_{2.5} 外来输送的主要潜在源区,其中高浓度贡献潜在源区主要分布在湘东北、湘南、湘东、赣西地区;而湘东北及鄂中南地区为夏季 PM_{2.5} 外来输送的主要潜在源区,其中高浓度贡献潜在源区主要分布在湘东北。

参考文献:

[1] 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.

[2] 卢苗苗,唐晓,王自发,等. 武汉地区 2014 年 PM_{2.5} 时空分布与来源贡献的数值模拟研究[J]. 环境科学学报,2017,37(11):4227-4240.

[3] 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.

[4] 孙超,郎建垒,孙晓伟. 长江中下游地区 PM_{2.5} 传输规

律分析[J]. 环境保护科学,2018,44(4):27-34.

[5] 闫广轩,杨争,席冬冬,等. 新乡市秋季大气细颗粒物 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及其来源解析[J]. 环境科学学报,2018,38(2):640-648.

[6] 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(94):274-286.

[7] FANIZZA C, BERARDIS B D, IETTO F, et al. Analysis of major pollutants and physico-chemical characteristics of PM_{2.5} at an urban site in Rome [J]. Science of the total environment, 2018, 616:1457-1468.

[8] JAIN S, SHARMA S K, CHOUDHARY N, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} using PCA/APCS, UNMIX, and PMF at an urban site of Delhi, India [J]. Environmental science & pollution research, 2017, 24(17):1-20.

[9] 刘嘉林,刘迎云,熊佩. 衡阳市区空气颗粒物的污染特征研究[J]. 南华大学学报(自然科学版),2014,28(4):107-112.

[10] 熊佩,刘迎云. 衡阳市冬春季大气颗粒物中重金属的污染评价[J]. 中国粉体技术,2016,22(3):78-80.

[11] 田蓉,刘迎云,陈攀,等. 衡阳城区 PM_{2.5} 中重金属污染水平及健康风险[J]. 环境工程,2017,35(9):127-130.

[12] 周益平,杨云芸,何炜炜,等. 衡阳冬季空气重污染过程特征及气象条件分析[J]. 防灾科技学院学报,2018,20(4):40-51.

[13] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American meteorological society, 2016, 96(12):2059-2077.

[14] 郝吉明,尹伟伦,岑可法. 中国大气 PM_{2.5} 污染防治策略与技术途径 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 52-58.

[15] 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.

[16] 王爱平,朱彬,银燕,等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(4):852-861.

[17] WANG Y Q, ZHANG X Y, ARIMOTO R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring [J]. Science of the total environment, 2006, 368(2):875-883.

[18] 朱好,蔡旭晖,张宏升,等. 内陆丘陵河谷地区小风条件下的大气扩散模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(3):613-623.

(责任编辑:周泉)