

文章编号: 2096-1618(2024)02-0246-09

川东北五市 PM_{2.5} 输送轨迹及潜在源区分析

尹黎昊, 张小玲, 樊晋, 李双志

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 基于全球数据同化预报系统数据(GDAS)资料和气象数据,分析川东北五市广元、巴中、达州、南充和广安 PM_{2.5} 的污染特征、传输途径和污染源分布。通过 HYSPLIT 后向轨迹模型模拟五市 2015–2020 年冬季(12–2月)的逐日48 h的气流后向轨迹,同时进行聚类分析,并使用潜在源贡献因子(PSCF)方法和浓度加权轨迹(CWT)方法识别川东北地区的 PM_{2.5} 的潜在污染源区,分析 PM_{2.5} 质量浓度的区域性污染特点及其输送特征。结果表明,研究期间川东北五市的污染物总体呈现下降趋势,其中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 下降幅度较大, PM_{2.5} 污染最严重的季节出现在冬季。后向轨迹表明,五市的污染轨迹均以近距离输送为主。通过潜在源区分析表明广元的主要源区为巴中和南充,巴中的主要源区位于广元南部、南充北部及达州中部地区,达州的主要源区为巴中南部、南充的东南部及重庆的北部地区,南充的主要源区在广元南部、巴中南部、达州的中南部、广安及重庆的中西部和遂宁,广安的主要源区主要在达州中部、南充及重庆的中部地区。

关键词: PM_{2.5}; PSCF; CWT; 后向轨迹; 川东北地区

中图分类号: X513

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.017

0 引言

随着经济的快速发展,工业化进程的加快,城市中大气污染问题逐渐引起重视。尤其是以 PM_{2.5} 为首的细颗粒物,已经成为大城市最重要的空气污染物质^[1–3]。有研究表明 PM_{2.5} 对大气能见度^[4–5]、生态系统^[6]、人体健康^[7–9] 及气候变化^[10] 均会产生影响。因此,对于细颗粒物(PM_{2.5})造成的污染问题及如何防范成为大气污染研究的焦点。目前,使用后向轨迹(HYSPLIT)模型对大气中污染物的长距离传输路径进行分析是最有效且适用的方法,并且可以通过分析气流轨迹,识别 PM_{2.5} 的潜在源区。Ma 等^[11] 通过后向轨迹发现内蒙古东部、吉林西北部和辽宁大部分地区是沈阳冬季 PM_{2.5} 的主要潜在来源。余创等^[12] 利用潜在源贡献因子(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT)揭示银川市 PM_{2.5} 的潜在源区及其贡献特征,发现了银川市 PM_{2.5} 浓度的主要源区位于新疆东部与甘肃交界区域、内蒙古西南部与甘肃交界区域以及甘肃中南部地区。彭康等^[13] 发现长沙市的 PM_{2.5} 潜在源区主要分布在湖南西南、北部及广东、湖北等地。通过研究污染物的区域性传输路径,分析城市周边区域对城市污染的贡献特征,为区域性大气污染治理和减排政策制定提供科学依据,对于科学防治细颗粒物污染物具有重要意义。

地处中国西南的四川盆地,是中国四大盆地之一,因其复杂的地形和不利的气象条件^[14–16],是中国五大区域空气重污染地区之一^[17]。然而,目前对于区域性大气污染的研究主要集中在沿海经济发达地区,如长三角^[18]、京津冀^[19]、珠三角^[20] 地区等,对于深居内陆的四川盆地的研究相对较少,且主要集中在成都平原和川南城市群。二者分别是四川第一、第二大经济区,也是四川盆地内污染较重的两大区域。而作为四川盆地三大生态经济区之一的川东北城市群(图1),虽其总体污染水平低于成都平原城市群和川南城市群^[21],但受盆地地形的影响,部分城市的空气污染情况也较严重,个别城市虽自身污染较轻但仍受到周边高污染区域的影响^[22]。目前,关于川东北地区大气质量的研究主要集中在个别污染严重城市或污染特征、时空演变^[23] 等方面,对大气区域性污染的研究相对较少。

基于此,本文以 2015–2020 年川东北城市群(广元、巴中、达州、南充和广安) PM_{2.5} 数据与 NECP(美国环境预报中心)全球气象同化数据(GDAS),利用拉格朗日后向轨迹模型、潜在源贡献因子和浓度权重轨迹分析等方法,探究川东北城市群冬季 PM_{2.5} 的传输路径,揭示各城市间 PM_{2.5} 的潜在源区及其贡献特征。为川东北地区的区域性 PM_{2.5} 污染治理提供理论依据,同时对于改善川东北地区的空气质量以及对周围地区的联防联控具有重要的意义。

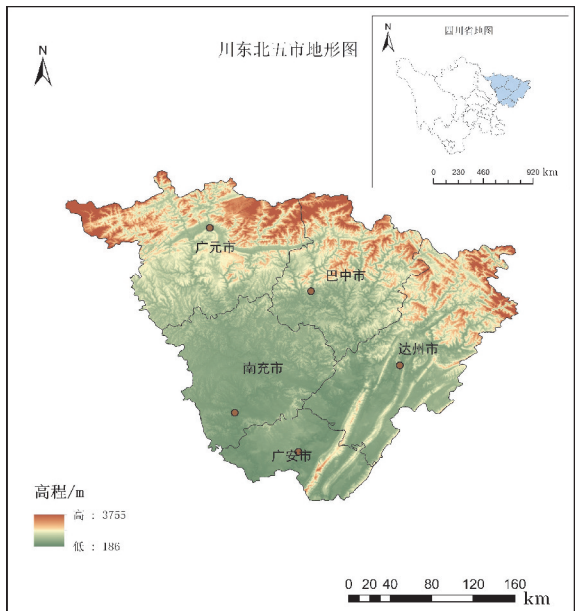


图1 川东北城市群分布和地形高度

1 研究方法与数据

1.1 数据来源

本研究中使用了川东北地区5个城市的空气质量监测站的PM_{2.5}小时浓度数据,该数据采用自动空气质量监测仪24 h连续监测,时间为2015–2020年,来源于国家环境保护部数据中心 (<http://datacenter.mep.gov.cn/index>)。使用的后向轨迹模型的气象场资料来源于美国国家环境预报中心提供的全球资料同化系统数据,时间为2015–2020年该数据的空间分辨率为0.5°×0.5°,时间分辨率为6 h。(ftp://gus.arlhq.noaa.gov/pub/archives/)。季节划分采用的是气象意义上的定义:3–5月为春季、6–8月为夏季、9–11月为秋季和12月至次年2月为冬季。

1.2 研究方法

1.2.1 HYSPLIT 模型

由国家海洋和大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局(BOM)开发的HYSPLIT模型计算方法是拉格朗日方法的一种混合方法,它使用了移动的参考系进行对流和扩散计算,常用于描述污染物和有害物质的大气传输、扩散和沉积模拟,适用于研究大气污染物的传输路径和扩散^[24]。利用TrajStat软件中的欧氏距离聚类算法,结合HYSPLIT模型和GIS技术,对抵达川东北地区的5个城市采样点的气流轨迹进行聚类,得到5个城市不同的聚类结果。HYSPLIT每日运行6次,轨迹初始时间点设置为00:00,04:00,08:00,12:00,

16:00,20:00,抵达位置设置为监测点上空距地面高500 m处。

1.2.2 PSCF 方法

PSCF 全称为潜在源贡献因子分析法,它是利用条件概率函数作为识别大气中潜在污染源的基本原理^[25–27]。PSCF 分析方法是利用后向轨迹来定位污染源,并结合PM_{2.5}质量浓度的数据来确定潜在源区的位置。PSCF 模型在识别受体部位的高浓度污染物的潜在源区上有较为广泛的适用性,可以计算第(*i,j*)网格单元处的潜在源概率^[28]:

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \tag{1}$$

由于当 n_{ij} 的值较小时,使结果值的不确定性增大,为减小误差,使结果更准确、更实用,引入了加权因子 W_{ij} ,其值取决于给定网格中所有轨迹的传输时间之和与每个网格的平均停留时间之间的关系。引用经验权重函数 W_{ij} ,将PSCF值乘以权重函数 $W(n_{ij})$,权重函数如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 3n_{avg} < n_{ij} \\ 0.70, & 1.5n_{avg} < n_{ij} \leq 3n_{avg} \\ 0.40, & n_{avg} < n_{ij} \leq 1.5n_{avg} \\ 0.20, & n_{ij} \leq n_{avg} \end{cases} \tag{2}$$

进而,对PSCF进行加权计算最终得到:

$$WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W_{ij} \tag{3}$$

1.2.3 CWT 方法

CWT 全称为浓度加权轨迹法,通过获取研究期间单一网格的所有轨迹对应的样品浓度平均值,来量化外部输运的浓度贡献水平^[29–31]。因为PSCF分析存在一定的局限性,只能反映污染轨迹在网格单元中所占的比例,当研究区域有相同的PSCF值时,不能区分对目标对象污染水平的影响。因此,采用浓度权重分析法可以通过获得研究期间单个网格的所有轨迹对应的样本浓度平均值,量化外部迁移的浓度贡献水平,同时通过在PSCF方法中引入与 W_{ij} 相同的数值校正,加权平均浓度值(WCWT值)用来区分潜在源的源强度。CWT计算如下:

$$CWT_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \tag{4}$$

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*在栅格格点(*i,j*)停留的时间。与PSCF类似,CWT方法需要引入权重因子 W_{ij} 来进行数值校正:

$$WCWT_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \times W_{ij} \tag{5}$$

2 研究结果与讨论

2.1 川东北城市群污染物特征分析

通过统计川东北城市群 2015–2020 年的 6 大污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3) 的年平均浓度值(图 2)可知,在统计期间的年平均最大值分布于达州,最大可达 $63.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小浓度值分布于广元,为 $22.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2020 年南充和达州的 $\text{PM}_{2.5}$ 均未达到国家 GB3095–2012《环境空气质量标准》(以下简称为“标准”)对环境空气的质量要求。对于 PM_{10} 而言,其空间分布特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 相似,年平均最大值分布于达州,最小值分布于巴中。

2015 年,川东北城市群中,有 4 个城市的 PM_{10} 浓

度超出标准,但在 2020 年,五市均达到标准对环境空气的质量要求。 PM_{10} 浓度随时间的年际变化呈现明显的下降趋势。2015–2020 年川东北五市 SO_2 浓度年均值均达标。广元、巴中、南充和广安的 SO_2 浓度值相较于 2020 年均存在明显下降,而达州有所上升。 NO_2 浓度值除了巴中有明显下降外,其他城市波动不明显。在 O_3 浓度值的变化上,巴中、达州和南充 2020 年浓度较 2015 年浓度有所上升,广元有所下降,广安基本不变。相较于 2015 年,川东北五市 2020 年的 CO 浓度均有所下降。虽然近些年来的污染防治工作取得了一定的进展,环境空气质量得到了改善,但是相对于其他地区的污染情况而言,川东北五市的污染情况还是需要引起重视,尤其是南充和达州,其 $\text{PM}_{2.5}$ 均未达到该标准对环境空气的质量要求。

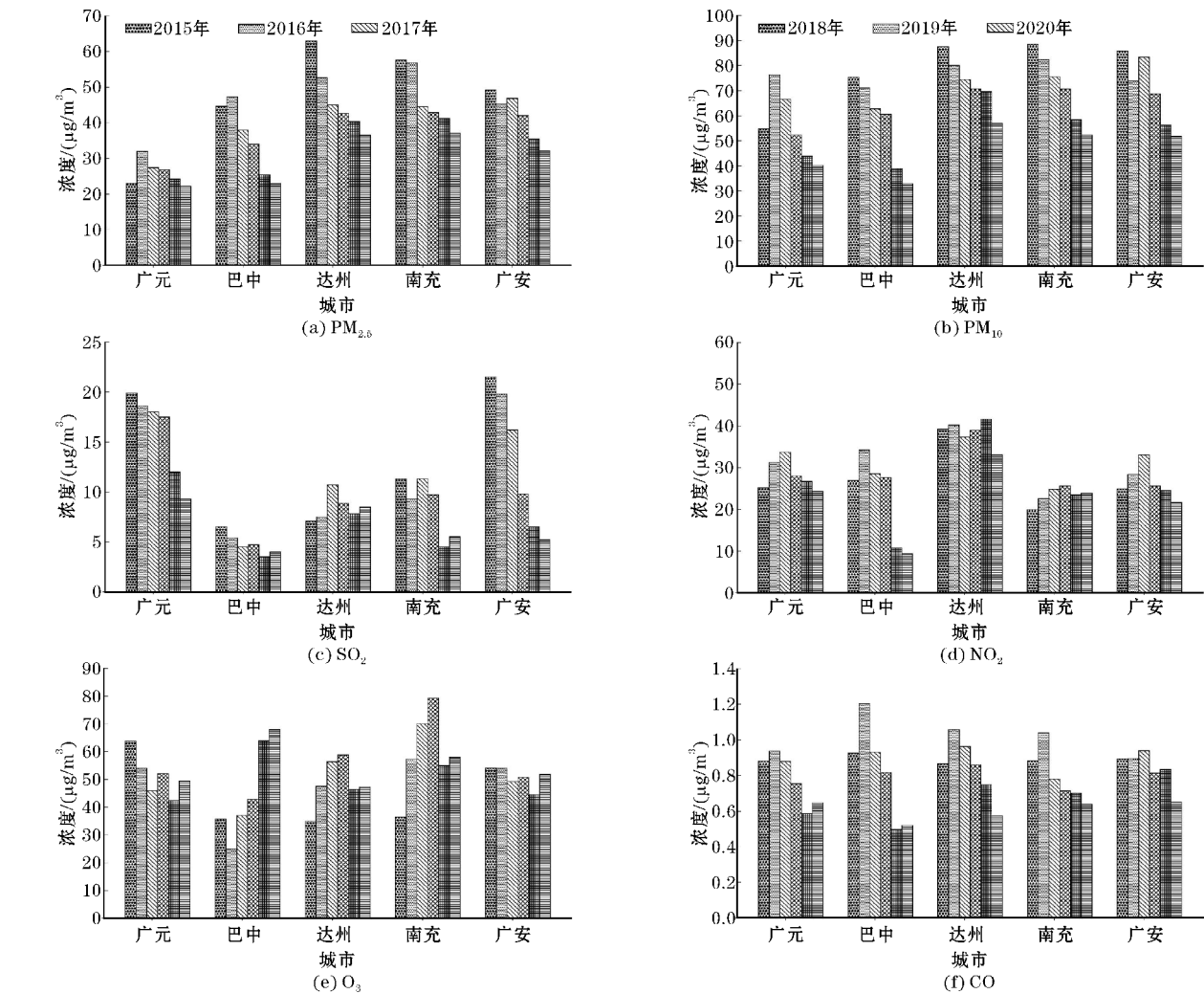


图 2 川东北各市年平均污染物

此外结合川东北城市群的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节变化(图 3)和川东北各市四季平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(表 1)所示,可知 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随季节变化趋势明显, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季

节特征总体上表现为冬季在一年中最高,夏季最低,春秋季相差不大,春季略高于秋季。春季的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均水平为南充>达州>广安>巴中>广元,且在 2018 年 3 月

18日达州达到 $173\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 重度污染天气。夏季的PM_{2.5}水平为南充>达州>广安>巴中>广元,夏季较频繁的降雨,对PM_{2.5}的清除起重要作用,也是夏季PM_{2.5}浓度偏低的主要原因^[32]。秋季的PM_{2.5}水平为南充>达州>广安>巴中>广元,达州南充和广安均存在中度污染的天气。冬季的PM_{2.5}水平为达州>南充>广安>巴中>广元,冬季达州的浓度要高于南充,且在2015年1月4日发生了PM_{2.5}严重污染的天气,PM_{2.5}浓度高达 $323\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。综合来看,五市中南充和达州的污染情况较严重,且冬季平均值和峰值均高于其他季节,表明

在冬季PM_{2.5}的污染更严重,因此也是本文重点研究的季节。

表1 川东北各市不同季节平均PM_{2.5}浓度 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

城市	春季	夏季	秋季	冬季
广元	23.64	13.06	19.16	44.97
巴中	33.18	19.35	23.11	58.01
达州	44.10	30.68	37.26	82.87
南充	49.11	32.49	38.50	73.43
广安	35.86	23.88	29.15	64.01

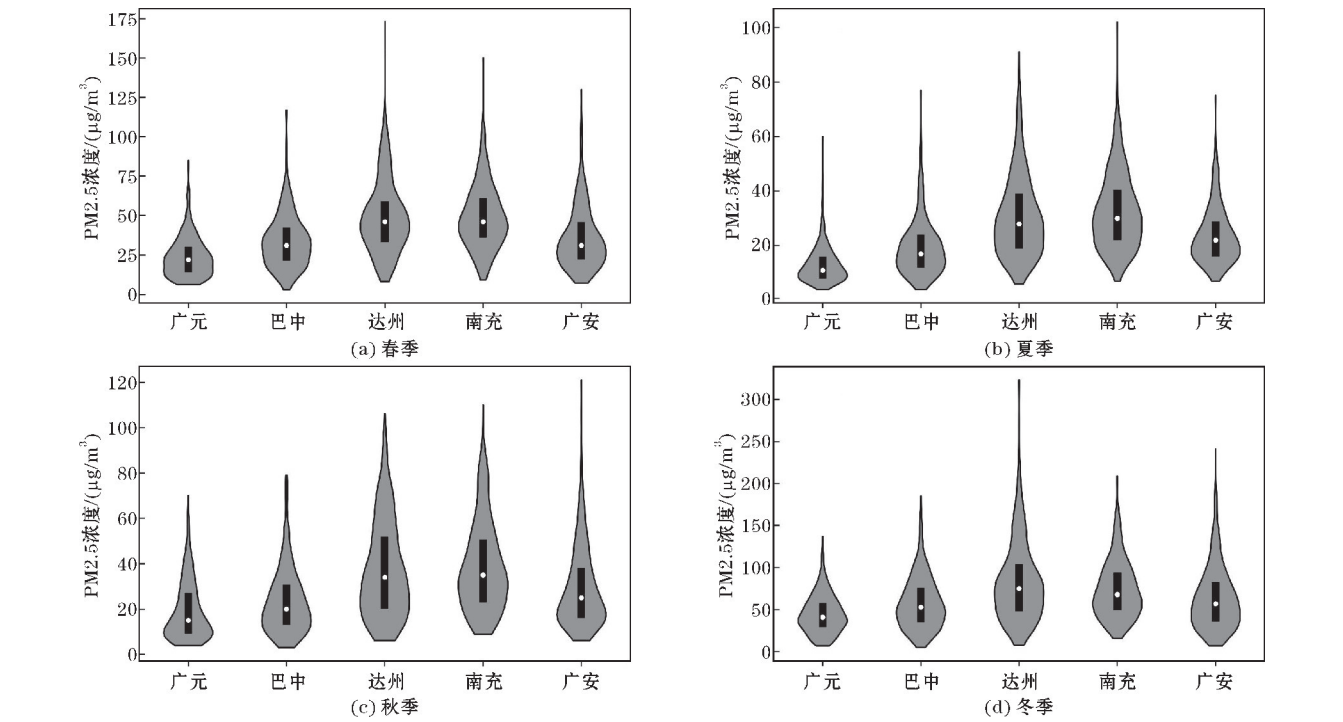


图3 川东北各市不同季节PM_{2.5}浓度(黑色矩形的上下边框分别代表位于75%下四分位数和25%上四分位数之间的浓度,矩形中的白点表示平均值)

2.2 后向轨迹分析

根据2015–2020年的冬季全球数据同化预报系统数据(GDAS)和PM_{2.5}小时浓度数据,使用Meteoinfo软件对通过川东北城市群气流的后向轨迹模拟进行聚类分析,HYSPLIT模型设置的观测高度为500 m,研究气团的后向时间为48 h,每天每间隔4 h进行模拟,分别是在每天的00:00,04:00,08:00,12:00,16:00,20:00(世界时),使用TrajStat插件采用欧拉距离聚类,根据每个地点的TSV变化曲线,选择曲线增长变化最大时的值,将其作为聚类的轨迹数量。为更好地分析含有污染物的后向气流轨迹特征,将后向轨迹与川东北城市群PM_{2.5}逐日小时浓度数据结合进行分析。通过软件运算将广元市聚类为4类,巴中市聚类为3类,达州市聚类为4类,南充市聚类为3类,广安市聚类为5类,并计算出各类轨迹占总轨迹的比例。

分析图4和表2可知,不同城市间污染轨迹数量、轨迹途径区域、轨迹携带的污染浓度及来自各方位轨迹的占比均存在差异。由图4(a)可知,在广元市的后向轨迹中,将其聚类为4类,来源于广元市北部区域的气流轨迹1占比为61.09%,途径四川盆地的气流轨迹2占比为16.89%,来源于河西走廊的气流轨迹3的占比为12.33%,来源于河西走廊的气流轨迹4占比为11.64%,其中轨迹2的污染概率最高为80.97%,污染轨迹浓度最高达到 $70.71\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由图4(b)可知,巴中市的后向轨迹中,将其聚类为3类,其中来源于达州的气流轨迹占比61.24%,来源于广元的气流轨迹占比33.72%,来源于青藏高原地区的远距离输送气流轨迹占比5.04%,其中轨迹2的污染概率最高为77.22%,污染轨迹浓度最高达到 $90.68\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由图4(c)可知,在达州市的后向轨迹中,将其聚类为4类,来源于重庆北部地区的气流轨迹占比为44.67%,来源于南充地区

的气流轨迹占比为26.91%，来源于重庆北部与陕西交界地区的气流轨迹占比为22.14%，来源于青海与甘肃交界地区的气流轨迹占比为6.29%，其中轨迹2的污染概率最高为88.85%，污染轨迹浓度最高达到93.27 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图4(d)可知，在南充市的后向轨迹中，将其聚类为3类，来源于南充本地的气流轨迹占比为73.63%，来源于青海与西藏交界地区方向的气流轨迹占比为20.08%，来源于西藏途径川南的气流轨迹占比为6.29%，其中轨迹2的污染概率最高为87.09%，污

染轨迹浓度最高达到82.97 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图4(e)可知，广安市的后向轨迹中，将其聚类为5类，来源于遂宁地区的气流轨迹占比为45.43%，来源于重庆中部的气流轨迹占比为27.12%，来源于西藏中部气流轨迹占比为11.57%，来源于川西地区的气流轨迹占比为10.87%，还有来自青藏高原南部的远距离输送的气流轨迹占比为5.01%，其中轨迹5的污染概率最高为88.68%，污染轨迹浓度最高达到101.97 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

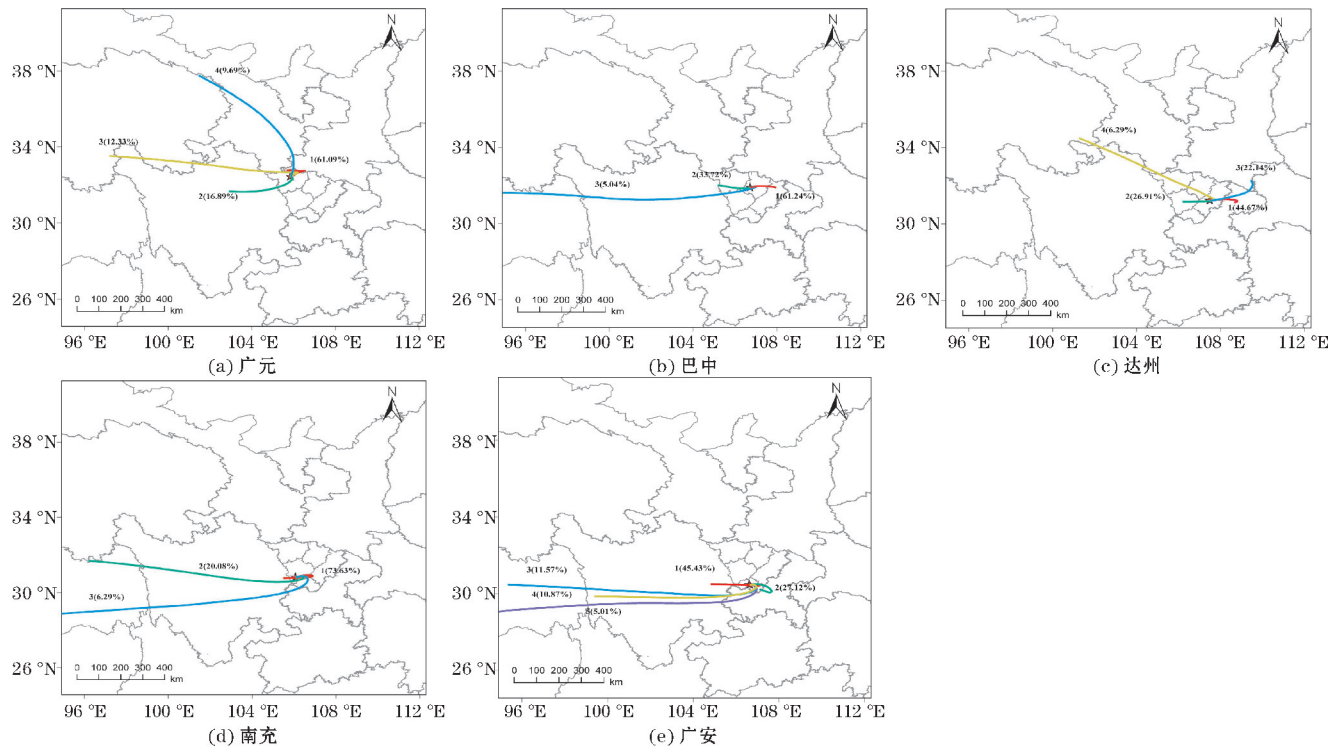


图4 川东北各市后向轨迹聚类

表2 川东北城市群 2015–2020 年冬季各类轨迹路径及出现概率

城市	污染轨迹	所有轨迹		污染轨迹	
		概率/%	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	污染概率/%	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$
广元	1	61.09	51.80	68.89	65.39
	2	16.89	61.50	80.97	70.71
	3	12.33	34.29	37.95	61.31
	4	9.69	46.64	62.62	63.51
巴中	1	61.24	57.35	66.98	74.61
	2	33.72	70.66	77.22	84.58
	3	5.04	67.96	67.08	90.68
达州	1	44.67	79.48	86.97	87.87
	2	26.91	85.60	88.85	93.27
	3	22.14	52.77	65.42	68.48
	4	6.29	63.24	73.23	77.60
南充	1	73.63	68.56	87.09	74.83
	2	20.08	74.27	86.38	81.88
	3	6.29	74.99	85.86	82.97
广安	1	45.43	72.91	80.82	84.85
	2	27.12	56.14	67.95	72.55
	3	11.57	86.56	80.60	101.97
	4	10.87	87.96	85.30	99.32
	5	5.01	88.79	88.68	97.65

2.3 大气污染物潜在源区分析

利用 HYSPLIT5 模型可以初步探明影响川东北地区各城市的 PM_{2.5} 浓度的气团及其来源的位置和方向,但要探究潜在源区对目标城市的 PM_{2.5} 污染浓度的贡献程度,还需要使用潜在源贡献因子分析法(PSCF)来进行研究。PSCF 分析需要确定 PM_{2.5} 浓度的限值,研究中将以日均 PM_{2.5} 浓度大于 35 μg · m⁻³ 的气流轨迹定义为污染轨迹来进行研究,计算川东北地区各城市的 PM_{2.5} 的潜在源贡献因子,WPSCF 的值在 0 ~ 1.0,数值越大,说明其成为污染物潜在源的概率越大,对所研究城市的污染贡献也越大。本文以 WPSCF 值的大小来区分潜在源区的属性,分别以 0 ~ 0.3 为轻度源区,0.3 ~ 0.7 为中度源区,0.7 ~ 1.0 为重度源区,当 WPSCF 值位于 0.7 ~ 1.0 时可以被认为是污染物的主要潜在源区。从图 5(a) 可以看出,广元的重度源区主要为巴中和南充以及绵阳的东部地区,而中度源区主要为达州及汉中地区,轻度源区主要在重庆北部、甘肃南部

以及陕西中部等地区。图 5(b) 显示了巴中市的重度源区位于广元南部、南充北部以及达州中部地区,中度源区基本覆盖了整个川东北地区,而轻度源区主要是陕西南部 and 重庆的北部和中部地区。图 5(c) 可以发现达州的重度污染源区主要为巴中南部和南充的东南部以及重庆的北部地区,中度源区主要包括了重庆南部区域、陕西南部以及湖北西部地区,轻度源区在陕西南部、湖北西部以及湖南的西北区域。在图 5(d) 中,南充的重度源区相比于其他城市的面积要更大一些,且其 WPSCF 数值上的高值区更多,其主要的重度源区在广元南部、巴中南部、达州的中南部、广安以及重庆的中西部和遂宁,其中度源区覆盖了川东北的大部分区域以及重庆,而轻度源区包括了陕西南部、湖北西部以及湖南西北地区。图 5(e) 为广安的 PSCF 分析结果,显示重度源区主要在达州中部、南充以及重庆的中部地区,中度源区分布主要在重庆,而轻度源区还包括了贵州北部及湖南和湖北西部交界的区域。

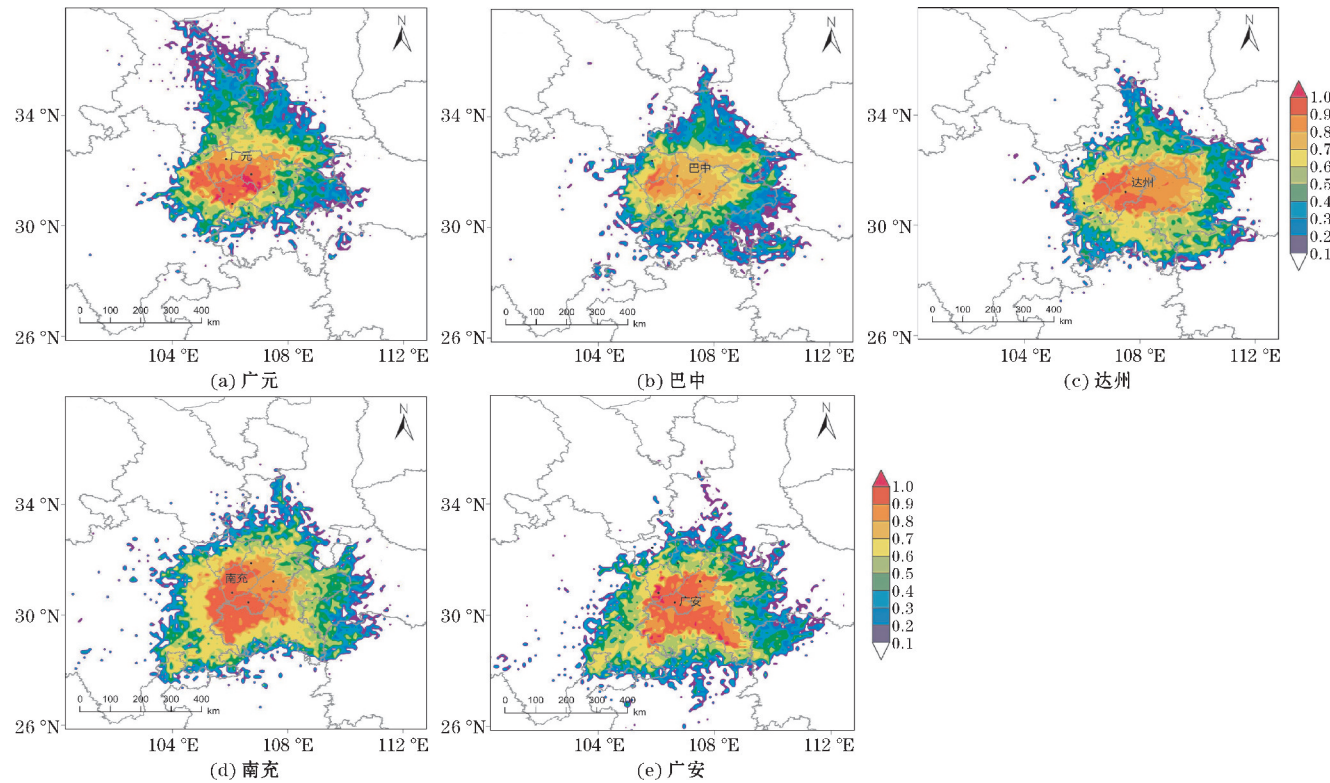


图 5 川东北各市 PM_{2.5} 潜在源区分析

2.4 大气污染物浓度权重轨迹分析

PSCF 可以较好反映单位网格的污染轨迹的比例,但是当区域中的 WPSCF 值相同时,不能区分出对研究区域的污染程度的影响。因此,同时使用 CWT 方法分

析了浓度权重轨迹,CWT 分析方法可以通过计算加权程度得到污染轨迹的污染程度差异,并且定义了 WCWT 值大于 75 μg · m⁻³ 为主要的潜在源区。根据 CWT 分析结果(图 6)可以得出,广元的潜在源区主要在集中在南充、达州以及绵阳的东部地区。巴中没有存在

明显的潜在源区,主要零星的分布在南充北部和广安北部区域。达州的主要潜在源区为达州本地,南充东部及重庆的中部地区。南充的主要潜在源区分布在南

充本地,绵阳东部,以及广安与重庆交界处。广安的主要潜在源区分布在广安本地,达州南部以及广安与重庆交界的地区。

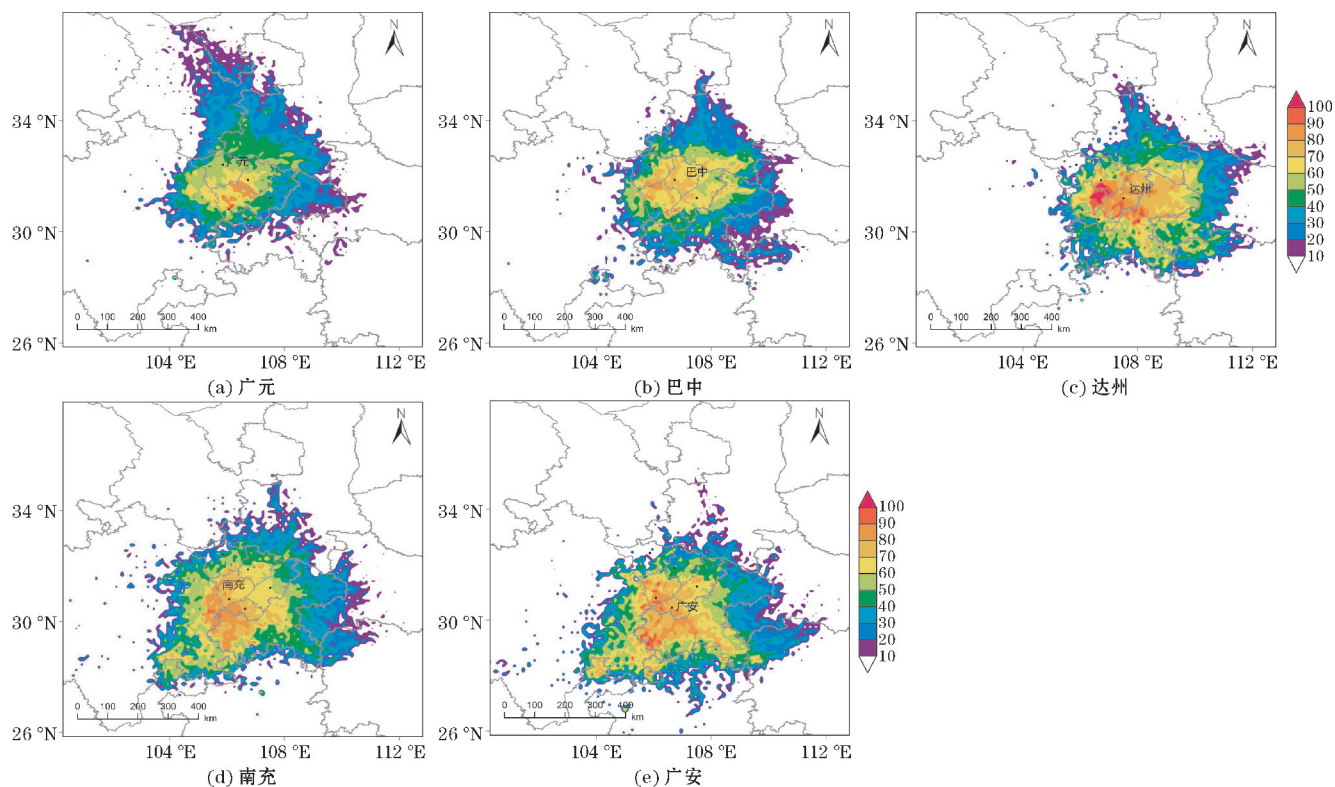


图6 川东北各市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度权重轨迹分析

3 结论

(1)川东北城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 浓度的年际变化均呈现逐年下降的趋势, NO_2 浓度值除了巴中有明显下降外,其他城市波动不明显。巴中、达州和南充的2020年 O_3 浓度较2015年有所上升,广元有所下降,广安基本保持不变。川东北五市 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度的季节特征总体上体现为冬季高,夏季低,春秋季节相差不大,春季略高于秋季。

(2)在川东北五市的后向轨迹中五市均以近距离的输送为主,且主要来自东部方向和本地区域。五市均有来自西部或西北方向的远距离的 $\text{PM}_{2.5}$ 输送,其中广元市的占比最高,巴中次之。

(3)通过PSCF和CWT分析冬季各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源分析结果表明,广元的主要源区为巴中和南充,巴中的主要源区位于广元南部、南充北部以及达州中部地区,达州的主要源区为巴中南部、南充的东南部以及重庆的北部地区。南充的主要源区在广元南部、巴中南部、达州的中南部、广安以及重庆的中西部和遂

宁,广安的主要源区主要在达州中部、南充以及重庆的中部地区。因此,各市在加强本地治理的同时,也要注重周边区域污染物的传输效应。

致谢:感谢成都市重大科技应用示范项目(2020-YF09-00031-SN)对本文的资助

参考文献:

- [1] 王跃思,张军科,王莉莉,等.京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J].地球科学进展,2014,29(3):388-396.
- [2] 杨文涛,谯鹏,刘贤赵,等.2011-2017年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 多尺度时空分异特征分析[J].环境科学,2020,41(12):5236-5244.
- [3] Liu Y, Shi G, Zhan Y, et al. Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ spatial distribution and influencing meteorological conditions in Sichuan Basin, southwestern China [J]. Atmospheric Environment, 2021, 253 (12):118364.
- [4] 刘艳菊,杨峥,刘庆阳,等.北京4个功能区春冬季大气重污染期间 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学污染特征

- 及影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 631–646.
- [5] 李军, 王京丽, 屈坤. 相对湿度和 PM_{2.5} 浓度对乌鲁木齐市冬季能见度的影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3322–3331.
- [6] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害[J]. 前沿科学, 2012, 6(1): 22–31.
- [7] 尹春苗, 张莹, 胡文东, 等. 成都市 PM_{2.5} 和臭氧交互作用对心脑血管疾病死亡人数的影响研究[J]. 四川大学学报(医学版), 2021, 52(6): 981–986.
- [8] 覃芳葵, 高绪芳, 鹿茸, 等. 2017 年成都市 PM_{2.5} 浓度与循环系统疾病急救人次的关系[J]. 现代预防医学, 2019, 46(7): 1186–1189.
- [9] Zhang Y, Wang S, Fan X, et al. Temperature modulation of the health effects of particulate matter in Beijing, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(11): 10857–10866.
- [10] 王薇, 陈明. 城市绿地空气负离子和 PM_{2.5} 浓度分布特征及其与微气候关系——以合肥天鹅湖为例[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1499–1507.
- [11] Ma Y, Liu Q, Bian Y, et al. Analysis of transport path and source distribution of winter air pollution in Shenyang[J]. Open Geosciences, 2021, 13(1): 1105–1117.
- [12] 余创, 张玉秀, 陈伟. 银川市 PM_{2.5} 的输送路径及潜在源解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3055–3065.
- [13] 彭康, 侯美羽, 罗达通, 等. 长沙市冬季重污染过程 PM_{2.5} 污染特征和潜在源分析[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 80–88.
- [14] Ning G, Wang S, Ma M, et al. Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 612: 975–984.
- [15] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3136–3146.
- [16] 史海琪, 曾胜兰, 李浩楠. 四川盆地大气污染物时空分布特征及气象影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 763–778.
- [17] An Z, Huang R J, Zhang R, et al. Severe haze in northern China: A synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(18): 8657–8666.
- [18] 张懿华. 长三角地区 PM_{2.5} 区域性污染时空变化特征[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 1–10.
- [19] 王情, 朱欢欢, 杜鹏, 等. 京津冀及周边地区“十四五”及中长期 PM_{2.5} 污染控制目标的健康效益预估研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 220–228.
- [20] Hu M, Wang Y, Wang S, et al. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2021, 254(13): 118415.
- [21] 钱骏, 冯小琼, 陈军辉, 等. 四川盆地典型城市 PM_{2.5} 污染过程组分特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4366–4376.
- [22] 甘茂林, 吕王勇, 符璐. 探究四川省 PM_{2.5} 污染的空间分布[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 29–37.
- [23] 危诗敏, 冯鑫媛, 张铮子. 四川盆地城市群环境空气质量时空分布特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(1): 110–117.
- [24] Chen Z, Chen D, Zhao C, et al. Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism[J]. Environment International, 2020, 139(C): 105558.
- [25] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 915–927.
- [26] 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.
- [27] 王姝涛, 张强, 温肖宇, 等. 运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 74–84.
- [28] Fang C, Wang L, Li Z, et al. Spatial Characteristics and Regional Transmission Analysis of PM_{2.5} Pollution in Northeast China, 2016–2020[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12483.
- [29] Li C, Dai Z, Liu X, et al. Transport Pathways and Potential Source Region Contributions of PM_{2.5} in

Weifang: Seasonal Variations [J]. Applied Sciences,2020,10(8):2835.

[30] Tian S, Liu Y, Wang J, et al. Chemical Compositions and Source Analysis of PM_{2.5} during Autumn and Winter in a Heavily Polluted City in China [J]. Atmosphere,2020,11(4):336–336.

[31] 宁一,孙洁亚,薛志钢,等. 受焦化影响的下风向城区臭氧污染特征及潜在源区分析[J]. 环境工程技术学报,2022,12(3):710–717.

[32] 孟丽红,郝天依,李培彦,等. 天津市夏季重污染天气过程 PM_{2.5} 输送特征[J]. 环境工程技术学报,2020,10(1):39–46.

Analysis of PM_{2.5} Transport Trajectory and Potential Source Areas in Five Cities in Northeast Sichuan

YIN Lihao, ZHANG Xiaoling, FAN Jin, LI Shuangzhi

(Sichuan Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract:Based on the Global Data Assimilation Forecasting System (GDAS) data and meteorological data, this paper analyzes the PM_{2.5} pollution characteristics, transmission routes and pollution sources distribution among five cities in northeastern Sichuan, Guangyuan, Bazhong, Dazhou, Nanchong and Guang'an. The 48 h daily airflow backward trajectories of five cities in the winter of 2015–2020 (December to February) were simulated by the HYSPLIT backward trajectory model, and cluster analysis was performed at the same time, and the potential source contribution function (PSCF) method and the concentration weighted trajectory (CWT) analysis method identifies the potential pollution source areas of PM_{2.5} in northeastern Sichuan, and analyzes the regional pollution characteristics and transport characteristics of PM_{2.5} mass concentration. The results showed that during the study period, the pollutants in the five cities generally showed a downward trend, among which PM_{2.5} and PM₁₀ decreased significantly, and the season with the most serious PM_{2.5} pollution occurred in winter. The backward trajectory shows that the pollution trajectories of the five cities are dominated by short-range transportation. The analysis of potential source areas shows that the main source areas of Guangyuan are Bazhong and Nanchong, the main source areas of Bazhong are located in the south of Guangyuan, the north of Nanchong and the central area of Dazhou, and the main source areas of Dazhou are the south of Bazhong and the southeast of Nanchong. The main source areas of Nanchong are in southern Guangyuan, southern Bazhong, central and southern Dazhou, Guang'an, and the central and western parts of Chongqing and Suining. The main source areas of Guang'an are mainly in central Dazhou, Nanchong and central Chongqing.

Keywords:PM_{2.5}; PSCF; CWT; backward trajectory; Northeast Sichuan