

# Analysis on the Trajectory of Respirable Particulate Air Mass Delivery in the Middle Reaches of the Yangtze River

Yuqing Liu<sup>1</sup>, Hongwen Shi<sup>2</sup>, Zhe Yang<sup>1</sup>, Jinhui Zhao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Wuhan Institute of Landscape Architecture, Wuhan Hubei

Email: \*121747745@qq.com

Received: Nov. 16<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2019; published: Dec. 10<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the mass concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> released by the atmospheric environmental quality monitoring stations in four central cities of the middle reaches of the Yangtze River (Wuhan, Changsha, Hefei and Nanchang) from June 2015 to May 2016, the monthly variation and spatial distribution of PM<sub>10</sub> concentration and PM<sub>2.5</sub> concentration in the middle reaches of the Yangtze River were analyzed. At the same time, using the 72 h forward trajectory clustering method of HYSPLIT model, the horizontal conveying path and the vertical conveying height of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and other respirable particles were analyzed. The results showed that the changing trend of respirable particulate matter in the middle reaches of the Yangtze River was the same, showing the law of low summer and high winter, and the frequent fluctuations in winter and spring, which indicated that the inhalable particulate matter had a great relationship with regional pollutant migration. The concentrations of PM<sub>2.5</sub> in Wuhan were the highest in all four cities in all seasons; the concentrations of PM<sub>10</sub> were lower in winter and spring than in other cities, and higher in summer and autumn than in other cities. The horizontal trajectory cluster analysis shows that there are two main types of airflow transport in the middle reaches of the Yangtze River, namely the polluted air near the source (from the surrounding provinces and the urban agglomerations of this region) and the clean air from the distant ocean; The seasonal variation of the airflow trajectory is obvious, the particles in spring, summer and autumn are mainly from the surrounding areas such as Henan Province, Hunan Province and Anhui Province. Therefore, the influence of the airflow from the northerly direction in winter and spring in this area is significant. This conclusion can provide ideas for the winter haze control in this area and provide a reference for the joint control of air pollution in the middle reaches of the Yangtze River.

## Keywords

Middle Reaches of the Yangtze River, Trajectory Clustering Analysis, Respirable Particulate Matter Concentration, Horizontal Airflow Trajectory

---

\*通讯作者。

# 长江中游地区可吸入颗粒物气团输送轨迹的时空差异分析

刘玉青<sup>1</sup>, 史红文<sup>2</sup>, 杨 喆<sup>1</sup>, 赵锦慧<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>武汉市园林科学研究院, 湖北 武汉

Email: \*121747745@qq.com

收稿日期: 2019年11月16日; 录用日期: 2019年12月3日; 发布日期: 2019年12月10日

## 摘 要

利用2015年6月至2016年5月长江中游四个中心城市(武汉、长沙、合肥、南昌)大气环境质量监测站发布的PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>的质量浓度数据,分析了长江中游地区PM<sub>10</sub>浓度、PM<sub>2.5</sub>浓度的逐月变化和空间分布规律;同时利用HYSPLIT模型的72 h前向轨迹聚类方法,分析了PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>等可吸入颗粒物的水平方向输送路径。结果表明,长江中游地区可吸入颗粒物浓度的变化趋势一致,均呈现夏季低、冬季高的规律,且冬春季节波动频繁,表明可吸入颗粒物污染与区域性污染物迁移有较大关系,武汉市各季节PM<sub>2.5</sub>浓度在四个城市中均最高,PM<sub>10</sub>浓度冬春季节低于其他城市,夏秋季节高于其他城市;水平方向轨迹聚类分析表明,长江中游地区有两种主要的气流输送类型,即近源(来自周边省区及本区域城市群间的污染)污染气流和来自远源海洋的清洁气流;气流轨迹的季节变化特征明显,春、夏、秋季的颗粒物主要来源于周边河南省、湖南省、安徽省等本地和周边区域。因此冬春季节本区受到来自偏北方向的气流影响显著,这一结论可为本区冬季治霾提供思路,为长江中游地区大气污染联防联控提供参考依据。

## 关键词

长江中游地区, 轨迹聚类分析, 可吸入颗粒物浓度, 水平气流轨迹

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前我国大气污染问题逐渐呈现区域性复合型污染的特点[1][2],城市间大气污染的相互影响和叠加日渐突出,污染物二次转化的贡献也在增加[3]。其中以可吸入颗粒物为主的污染持续加重[4],表现为本地源和区域源外源并存的复合型污染特征[5]。定量分辨本地源和外源的影响,是城市间联防联控的依据。

国内学者针对部分城市群内部的大气污染问题及潜在源区进行了详细分析。在珠三角地区,低层大气污染物分为远距离输送、局地输送和城市间输送,其中城市间输送是最重要的输送方式[6];2014~2015年,来自海洋的清洁气流和来自内陆的污染气流是苏锡常地区的主要输送类型,春夏秋季的潜在源区主要分布在苏锡常本地和周边城市[7];影响冬季长三角地区区域空气质量的污染源区有西北内陆长距离输

送源、华北和华东地区,其中区域性污染和长距离输送对长三角地区空气质量有重要影响[8];在京津冀地区,北京城区 2014~2015 年  $PM_{2.5}$  的主要来源于华北及黄淮平原的污染输送,北京大气污染防治应特别注意鲁中、鲁西、冀南的近距离输送;秋冬季来自黄土高原及西部荒漠地区的远距离输送贡献依然很大[9]。2012~2013 年天津市大气污染物的高值集中在山东省北部、河北省及天津本地[10]。2016 年石家庄市  $PM_{2.5}$  污染受源于京津地区气团的影响较大,河北省是影响石家庄市环境空气质量的最主要潜在源区[11]。

归纳起来,上述四大城市群的潜在源区包括远距离输送、区域输送和城市群内部间的输送,然而针对长江中游地区大气污染物潜在源区的研究较少,有针对性的进行本区域可吸入颗粒物的时空分布和源区构成的量化研究不足,对特定地点水平方向输送路径在垂直方向的传输高度的对比研究较少,因此本文选择长江中游地区的中心城市作为研究地点进行分析。以长江中游地区的武汉、长沙、南昌、合肥四个城市的可吸入颗粒物作为研究对象,利用 HYSPLIT 多受点前向轨迹模型、轨迹聚类分析方法,对 2015 年 6 月至 2016 年 5 月的区域水平向和垂向主要污染传输通道和颗粒物质量浓度分布规律进行模拟研究,确定气团移动轨迹,研究可吸入颗粒物的输送路径,辨别影响本区  $PM_{2.5}$  污染的关键源区,同时为长江中游地区城市群大气复合污染联防联控提供参考数据。

## 2. 研究区概况

长江中游属亚热带季风区,气候温和湿润,雨量充沛。长江中游地区城市群是以武汉、长沙、南昌、合肥四大城市为中心的 4 省 40 座地级市所构成的城市群,经济社会联系紧密,占地面积约 31.7 万平方公里,是长三角城市群的 3 倍,珠三角城市群的 5 倍。近年来随着经济的快速增长,大气复合型污染日益突出,长江中游地区许多城市冬季霾污染情况正在加重。根据四个城市环境质量状况公报的结果,细颗粒物  $PM_{2.5}$  为长江中游地区的首要污染物,本研究即以  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  作为研究对象进行源区分析。

## 3. 研究方法

### 3.1. 数据来源

环境质量监测站点的  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  的资料来自于武汉、长沙、南昌、合肥四大城市的环境质量状况公报,用于基础输入数据服务于 HYSPLIT-4 模型。风速、能见度、温度、气压数据来自于美国国际气象数据中心(<http://www.meicmodel.org/>)提供的全球资料同化系统,代表常规气象数据服务于 HYSPLIT 模型。

### 3.2. 分析方法

本研究选用 2015 年 6 月至 2016 年 5 月长江中游地区 4 个中心城市(武汉、长沙、南昌、合肥)国家环境空气质量自动监测站的可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )、细颗粒物( $PM_{2.5}$ )数据,进行统计分析。同步气象要素数据(水平向和垂向风速、温度、气压、相对湿度、降水)从网站(<http://www.noaa.gov/archives>)下载得到。

本研究使用的分析方法是基于 GIS 的 TrajStat 软件,利用 HYSPLIT 模型进行轨迹聚类分析[12]。

HYSPLIT 模型是用于分析和计算大气污染物输送、扩散和沉降轨迹的专业模型[13],反映气流输送的特征。本研究中目标经纬度设置为  $30.55^{\circ}E$ 、 $114.32^{\circ}N$ ,模拟范围设置为  $0\sim 10000$  m,大气边界层的平均流场采用 500 m 高度,既可以代表区域气流流动特征(风),又能减少近地面摩擦力的影响[6]。本研究设置模型时间为 2015 年 6 月 1 日 0:00 到 2016 年 5 月 31 日 23:00,每 6 h 一条轨迹,推算时间为 72 小时,通过气流轨迹识别出在接收位点观察到的高浓度污染物的可能来源区域,当经过设定区域的气团到达受点所对应  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  值超过设定限值(以环境空气质量二级标准值为限),计算网格内所有轨迹的数值,采用 Angle Distance 算法[13]计算气流轨迹之间的距离并进行分类,利用 HYSPLIT 模型将轨迹数据划分

为不同的运输组或集群，进行轨迹聚类分析。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 可吸入颗粒物污染特征

根据武汉、长沙、南昌、合肥的环境质量公报里记录的 2015 年 6 月至 2016 年 5 月  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的日均值数据，计算出四个城市  $PM_{2.5}$  浓度、 $PM_{10}$  浓度的季节均值(表 1)。四个城市  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  月均浓度最小值都出现在夏季，月均浓度最大值都出现在冬季。

**Table 1.** Concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in aerosols from Wuhan, Changsha, Nanchang and Hefei (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

**表 1.** 武汉、长沙、南昌、合肥气溶胶中  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度值一览表(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

城市	颗粒物	2015 年夏季	2015 年秋季	2015 年冬季	2016 年春季
武汉	$PM_{2.5}$	$38.83 \pm 15.37$	$65.18 \pm 27.02$	$130 \pm 61.62$	$79.82 \pm 39.98$
	$PM_{10}$	$75.32 \pm 32.95$	$90.74 \pm 45.08$	$87.54 \pm 25.66$	$74.73 \pm 27.18$
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	1.9517	1.4748	0.7739	1.0046
长沙	$PM_{2.5}$	$35.23 \pm 17.55$	$53.03 \pm 23.68$	$75.19 \pm 38.24$	$50.54 \pm 22.94$
	$PM_{10}$	$55.04 \pm 23.91$	$77.89 \pm 36.78$	$91.42 \pm 43.18$	$74.98 \pm 34.47$
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	0.6411	0.7118	0.8672	0.6903
南昌	$PM_{2.5}$	$26.13 \pm 15.33$	$36.47 \pm 21.22$	$62.09 \pm 38.10$	$42 \pm 27.27$
	$PM_{10}$	$59.77 \pm 30.72$	$66.11 \pm 35.72$	$96.40 \pm 50.30$	$79.1 \pm 46.37$
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	0.4424	0.5579	0.6442	0.5347
合肥	$PM_{2.5}$	$40.93 \pm 19.33$	$57.93 \pm 27.38$	$77.16 \pm 41.54$	$60.60 \pm 32.01$
	$PM_{10}$	$68.64 \pm 28.33$	$85.51 \pm 40.36$	$97.13 \pm 48.97$	$95.68 \pm 47.33$
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	0.6009	0.7062	0.9075	0.7381

就年平均值而言，除合肥市  $PM_{10}$  高于武汉，其他城市的均值都低于武汉市。

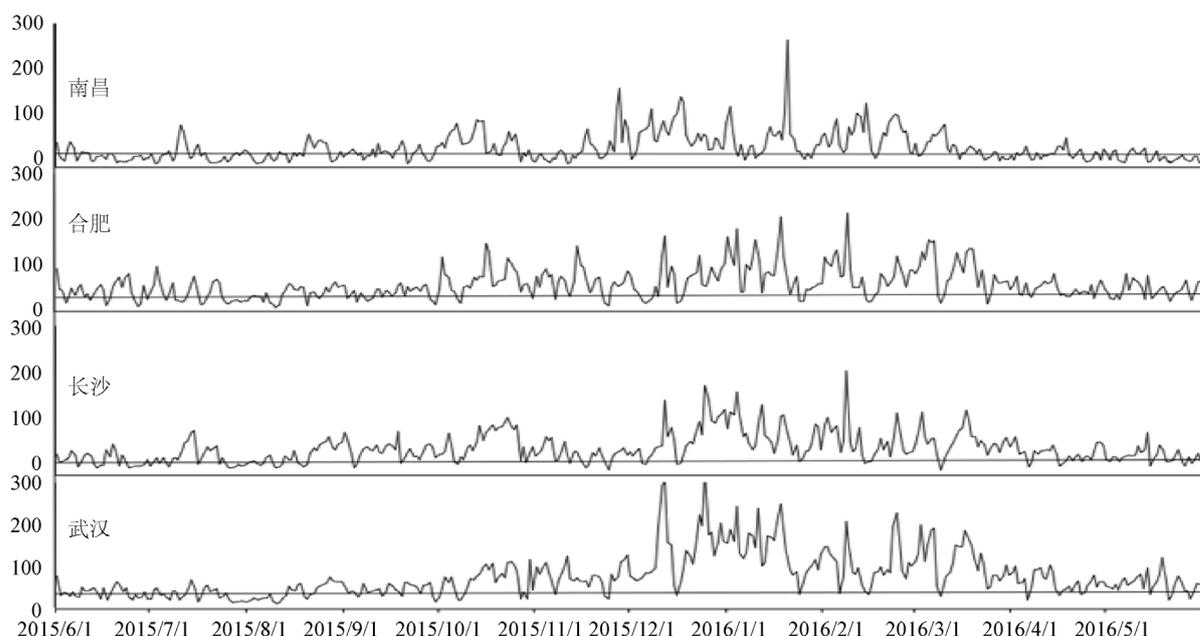
就季节平均值而言，武汉市各季节  $PM_{2.5}$  均值均高于长沙、南昌、合肥；武汉市  $PM_{10}$  夏季和秋季浓度均值与三城市差异不大，冬季和春季浓度均值略小于三城市。

就  $PM_{2.5}/PM_{10}$  数值来说，夏季各个城市的比值较小，但冬季比重显著增大，表明各个城市中细颗粒物的浓度均比较大，除南昌市夏季  $PM_{2.5}/PM_{10}$  比值小于 0.5，其他城市各个季节的细颗粒物污染都较严重。

2015 年 6 月至 2016 年 6 月四个城市  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  的年均浓度与中国环境空气质量标准的对比关系见图 1 所示(GB3095-2012 二级标准限值中  $PM_{2.5}$  的标准值是  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $PM_{10}$  的标准值是  $70 \mu\text{m}^3$ )。

图 1 显示，四个城市  $PM_{2.5}$  浓度均表现为冬季最高、其次为秋季、春季，夏季最低，冬、春季节的  $PM_{2.5}$  污染持续时间较长，且波动较为剧烈。这一结果与苏锡常地区  $PM_{2.5}$  浓度时间[7]变化特征相同，冬季高、夏季低，秋、春季节的波动较为剧烈。表明秋冬季节是灰霾的频发季节，较低的大气边界层，较多的静小风及稳定度高的天气，逆温现象多，不利于颗粒物污染物的扩散，导致  $PM_{2.5}$  浓度较高[14]。夏季的气象因素(风向和降水量)有助于  $PM_{2.5}$  的扩散，监测得到的浓度较低。

总之，四个城市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  污染的季节特征差异明显，但不同城市之间的质量浓度差异较小，其他城市群[7]也有类似的规律，这可能是因为四个城市区域位置相邻，气象环流条件类似，区域污染源状况影响的程度比较相似。



**Figure 1.** Variation curve of PM<sub>10</sub> concentration in urban area of Wuhan, Changsha, Nanchang and Hefei

**图 1.** 武汉、长沙、南昌、合肥市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化曲线

#### 4.2. 水平向气团输送轨迹聚类分析

利用 TrajStat 软件对气流轨迹进行聚类[13], 重点关注总空间方差(TSV)的变化速度, 分类的 TSV 由增加到缓慢增加再到迅速增大时, 此次分类合并结束, 合并各类气流轨迹类型即为分类结果。

**Table 2.** Trajectory numbers and PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> mean concentrations in different seasons

**表 2.** 不同季节 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 聚类轨迹数及平均浓度

季节	类型	NAL	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PAL (%)	途径区域
夏季	1	24	54.65 ± 13.09	22.9 ± 4.99	7.57	日本北海道岛、日本海、朝鲜、黄海、江苏、安徽、河南
	2	293	76 ± 33.76	40.25 ± 14.65	92.43	江西、湖南
秋季	1	99	90.5 ± 46.18	70.15 ± 21.34	27.81	安徽、河南
	2	195	94.52 ± 46.1	60.87 ± 25.66	59.82	湖南
	3	32	74.09 ± 48.92	60.88 ± 30.37	12.37	东海、浙江、江西
冬季	1	140	90.34 ± 30.63	126.27 ± 69.96	42.68	安徽省
	2	122	84.05 ± 22.35	135.44 ± 55.35	37.2	江西省
	3	18	102.11 ± 29.8	158.89 ± 81.5	5.49	西太平洋、东海、浙江、江西、湖南
	4	13	95.77 ± 27.34	130.98 ± 79.25	3.96	北海道、日本海、朝鲜、黄海、山东、江苏、安徽、河南
	5	18	67.42 ± 11.42	93.81 ± 28.56	5.49	柬埔寨、越南、南海、广东、湖南、江西
	6	12	82.73 ± 30.08	124.39 ± 70.15	3.66	西太平洋、东海、浙江、江西、湖南
	7	5	51 ± 7.68	77.4 ± 19.88	1.52	太平洋、本州岛、四国岛、九州岛、黄海、江苏、安徽
春季	1	125	80.52 ± 28.09	86.84 ± 45.45	37.99	安徽、河南
	2	172	71.5 ± 25.56	76.82 ± 36.61	52.28	福建、江西
	3	11	63.91 ± 34.92	71.64 ± 43.73	3.35	西太平洋、北海道岛、日本海、韩国、黄海、江苏、安徽、河南
	4	21	79.1 ± 41.04	83.05 ± 44.63	6.38	本州岛、九州岛、黄海、江苏、安徽

NAL 表示聚类轨迹总数; PLA 表示每类轨迹占总轨迹的百分比。

结合分析表 2 和图 2, 参与 2015 年夏季轨迹聚类的总数为 317 条, 主要分为 2 类轨迹, 其中来自湖南、江西附近的轨迹 1 占 92.43%, 是近距离污染源, 来自日本群岛北部区域的气团轨迹 2 占 7.57%, 输送距离远, 对长江中游地区污染的影响较小; 参与 2015 年秋季轨迹聚类的总数为 326 条, 主要分为 3 类轨迹, 近距离污染源(轨迹 1 和轨迹 2)占 87.63%, 来自东海海域附近的轨迹 3 经过浙江、福建等地, 属远源污染, 占 12.37%; 模拟出 2015 年冬季的主要轨迹有 7 类, 来自安徽等本地气团轨迹 1 占比最高, 为 42.68%, 来自广州、湖南等地的轨迹 2, 占 37.2%, 并且每类轨迹的  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度均高于其他季节, 这表明本地气团是造成冬季  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染的主要原因; 2016 年春季, 参与轨迹聚类的总数为 329 条, 主要分为 4 类轨迹, 来自河南、湖南的轨迹 1 和 2 分别占比 37.99%、52.28%, 这表明春季  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染受周边湖南、河南等地影响较大。

根据图 2 中轨迹线长短来判断气团移动速度[15], 本文中冬季 5 条气流移动速度较快, 途径珠三角、京津冀、河南和山东等地抵达本区域; 夏季受副热带高压影响, 远距离气流以东南和东北方向输入居多, 较为清洁。

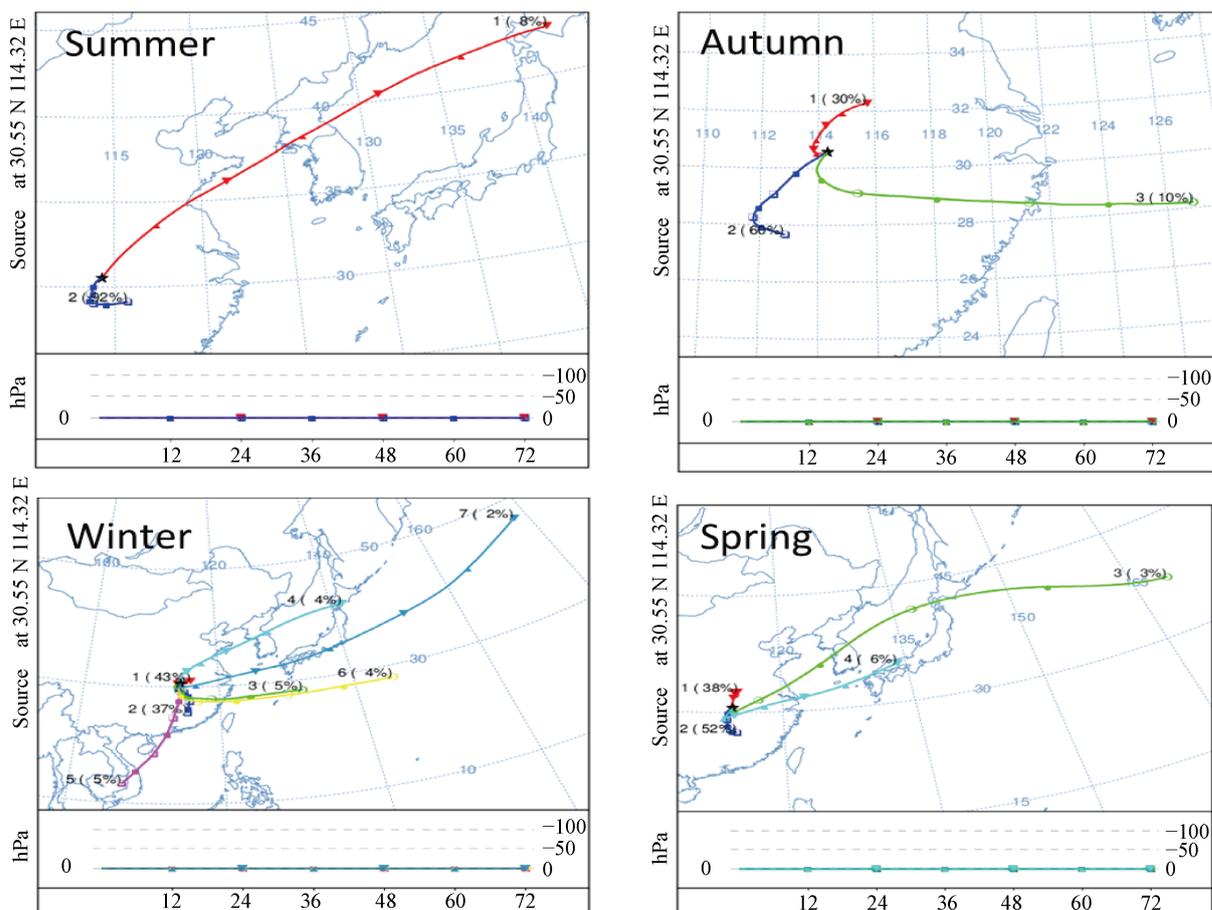


Figure 2. Clustering map of forward trajectories in different seasons in the middle reaches of the Yangtze River  
图 2. 不同季节长江中游地区前向轨迹聚类图

各季节其余方向轨迹线较短、说明气流移动速度较慢, 城市间局部的人为污染源贡献可能性较大, 这与同区域其他时间段的研究结果相近。长沙  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  外部潜在源区主要是中东部污染严重城市的污染物的区域输送, 主要省份是湖北、安徽、江西[16]; 南昌市  $PM_{2.5}$  外部污染物夏季主要来自邻近的福

建省和浙江省,另外三个季节主要来自东北和偏北方向的江苏省、浙江省、福建省和江西省[17];合肥市颗粒物夏季主要来源于长三角地区,秋冬季节的颗粒物主要来自正北和西北方向的河南、山东、山西、陕西等省,还包括远距离的来自内蒙古自治区和蒙古国的颗粒物来源[18];武汉市夏季本地贡献(65.7%)和毗邻城市(23.1%)为污染物主要来源,贡献之和为 88.8%,冬季外来源贡献对长期灰霾过程起决定性作用[19]。

本文所分析的  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染源中,近距离污染源占夏季所有轨迹总数的比例为 92.43%,在春季和秋季分别为 90.27%和 87.63%,在冬季为 79.88%,潜在的污染源区主要是来自河南、湖南、江西、安徽等附近省区;远距离源区所占的比例在夏季为 7.57%,在春季和秋季分别为 9.73%和 12.37%,在冬季为 14.63%,潜在的污染源区主要是来自东北部东海方向。

说明本区域四季的  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染以周边近距离污染源为主,其中河南、湖南、江西、安徽的贡献率较高,当地人为污染源[17]对  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  浓度的影响较大。

## 5. 结论

2015 年 6 月至 2016 年 5 月,通过横向对比长江中游地区主要城市(武汉、长沙、合肥、南昌)的可吸入颗粒物浓度,发现四个城市  $PM_{2.5}$  浓度、 $PM_{10}$  浓度均表现为冬季最高、其次为春季、秋季,夏季最低,且冬春季的波动较为剧烈。武汉  $PM_{2.5}$  的年均浓度大于其他各城市, $PM_{10}$  年均浓度小于合肥,大于长沙和南昌,武汉市颗粒物污染较为严重。

运用 HYSPLIT 模型分析可吸入颗粒物的输送、扩散轨迹的水平向气流,结果显示近距离污染源占夏季所有轨迹总数的比例为 92.43%,在冬季为 79.88%;远距离污染源占夏季所有轨迹总数的比例为 7.57%,在冬季为 14.63%;说明在春季和秋季,以周边污染源为主,其中河南等省区是潜在的污染源区,而在夏季和冬季, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染则主要来自本地。总之,本区域  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  污染的水平气流输送的特征是以近距离污染源为主,潜在的污染源区主要是来自河南等附近省区以及长江中游地区内部的湖南、江西、安徽、湖北等省区的本地区域污染。

就长江中游地区城市群中的分布状况而言,通过计算的数值和轨迹模型分析,武汉和合肥的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的数值明显大于长沙和南昌,表明除城市自身排放的污染外,纬度越高,颗粒物各季节的浓度越高。除夏季外,其他季节的颗粒物潜在来源主要是偏北方的地区,因此,纬度越高,离潜在污染源越近。冬季区域细颗粒的来源和浓度受气流传输影响较大,因此,确定长江中游区域主要气流的传输通道对开展大气联防联控有重要意义。

## 基金项目

课题项目:《武汉园林绿地调控空气细颗粒物( $PM_{2.5}$ )研究》,武园林发[2015]9号文。

## 参考文献

- [1] Cao, J.J., Lee, S.C., Ho, K.F., *et al.* (2004) Spatial and Seasonal Variations of Atmospheric Organic Carbon and Elemental Carbon in Pearl River Delta Region, China. *Atmospheric Environment*, **38**, 4447-4456. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.016>
- [2] Zhao, M., Huang, Z., Qiao, T., *et al.* (2015) Chemical Characterization, the Trans Sports Pathways and Potential Sources of  $PM_{2.5}$  in Shanghai: Seasonal Variations. *Atmospheric Environment*, **15**, 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.02.003>
- [3] 周侃. 中国环境污染的时空差异与集聚特征[J]. 地理科学, 2016, 36(7): 989-997.
- [4] 严晓瑜, 缙晓辉, 武万里, 等. 银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1727-1738.

- [5] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国  $PM_{2.5}$  时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [6] 龚宇麟, 银燕, 陈魁, 等. 南京北郊秋季气溶胶理化特征及潜在源区分布[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4032-4043.
- [7] 葛跃, 王明新, 白雪, 等. 苏锡常地区  $PM_{2.5}$  污染特征及其潜在源区分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 803-813.
- [8] 朱书慧, 周敏, 乔利平, 等. 2015 年 12 月气流轨迹对长三角区域细颗粒物浓度和分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4285-4294.
- [9] 任传斌, 吴立新, 张媛媛, 等. 北京城区  $PM_{2.5}$  输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2591-2598.
- [10] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的  $PM_{2.5}$  污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1931-1937.
- [11] 陈飞, 张小华, 于洪霞, 等. 石家庄市冬季  $PM_{2.5}$  污染特征、成因及潜在源区分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 975-982.
- [12] Wang, Y.Q., Zhang, X.Y. and Draxler, R.R. (2009) TrajStat: GIS-Based Software that Uses Various Trajectory Statistical Analysis Methods to Identify Potential Sources from Long-Term Air Pollution Measurement Data. *Environmental Modeling and Software*, **24**, 938-939. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.01.004>
- [13] Sirois, A. and Bottenhein, J.W. (1995) Use of Backward Trajectories to Interpret the 5-Year Record of PAN and  $O_3$  Ambient Air Concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 2867-2881. <https://doi.org/10.1029/94JD02951>
- [14] 成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气  $PM_{2.5}$  的碳组分与源解析[J]. 生态环境学报, 2012(9): 1574-1579.
- [15] 周沙, 刘宁, 刘朝顺. 2013-2015 年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1835-1842.
- [16] 朱奕, 傅鹏, 龙加洪, 等. 长沙城区  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的污染特征及气象因素溯源[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2014, 36(1): 96-101.
- [17] 赵阳, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 2013 年南昌市区  $PM_{2.5}$  时空分布特征与来源[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 854-863.
- [18] 陈刚, 刘佳媛, 皇甫延琦, 等. 合肥城区  $PM_{10}$  及  $PM_{2.5}$  季节污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1938-1946.
- [19] 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): 4227-4236.