

# 2015—2019年厦门岛PM<sub>2.5</sub>污染特征及后向轨迹分析

巫晶晶<sup>1,2,3</sup>, 曾舒芬<sup>1,2</sup>, 龙美钿<sup>1,2</sup>, 王颂阳<sup>1,2</sup>, 林锦美<sup>1,2</sup>, 陈锦芳<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学港口与海岸工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市绿色与智慧海岸工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 福建省食品微生物与酶工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为促进厦门岛向“清洁空气”目标前进, 利用2015—2019年厦门岛国控大气监测站提供的逐时数据, 结合HYSPLIT后向轨迹模型, 展开PM<sub>2.5</sub>污染特征、污染月传输及轨迹分析。结果表明: 研究期厦门岛PM<sub>2.5</sub>年平均质量浓度由2015年的(29.59 ± 13.22) μg/m<sup>3</sup>降至2019年的(24.08 ± 11.58) μg/m<sup>3</sup>。1—3月及11月PM<sub>2.5</sub>月均质量浓度相对较高(31.68 ~ 35.86 μg/m<sup>3</sup>), 6—8月则相对较低, 均在20 μg/m<sup>3</sup>以下, 具有“冬高夏低, 春降秋升”的季节变化特点, 污染月主要集中在1、2、3和11月。在污染集中的月份, 温度和湿度对PM<sub>2.5</sub>影响不显著, 而风速是影响PM<sub>2.5</sub>的主要因素。短距离气流输送是造成厦门岛PM<sub>2.5</sub>污染的主要原因, 而来自西北及偏北方向的长距离输送加剧了厦门岛PM<sub>2.5</sub>污染。冬季污染潜在源区为闽东部沿海区域及浙、皖、赣、粤与闽交界区域, 具有污染轨迹数高、短距离输送的特点。春季污染潜在源区集中在川、赣、湘等地区, 具有污染轨迹数占比高、长距离输送的特点。

[关键词] 大气细颗粒物; 后向轨迹聚类分析; 轨迹特征; 厦门岛

[中图分类号] X 513

## Pollution Characteristics and Transport Trajectories of PM<sub>2.5</sub> in Xiamen Island from 2015 to 2019

WU Jingjing<sup>1,2,3</sup>, ZENG Shufen<sup>1,2</sup>, LONG Meikun<sup>1,2</sup>, WANG Songyang<sup>1,2</sup>, LIN Jinmei<sup>1,2</sup>, CHEN Jinfang<sup>1,2</sup>

(1. College of Harbor and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Key Laboratory of Green and Smart Coastal Engineering, Xiamen 361021, China;

3. Fujian Provincial Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** With objective of achieving Xiamen's "Clean Air" goal, the analysis of pollution characteristics, transportation pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> in Xiamen Island were carried out from 2015 to 2019. The results show as following: the annual average PM<sub>2.5</sub> concentration decreased from (29.59 ± 13.22) μg/m<sup>3</sup> to (24.08 ± 11.58) μg/m<sup>3</sup> during the study period. The monthly average concentration of PM<sub>2.5</sub> is relatively high from January to March and December, between 31.68 μg/m<sup>3</sup> and 35.86 μg/m<sup>3</sup>. The monthly average concentration of PM<sub>2.5</sub> from June to August is relatively low, all below 20 μg/m<sup>3</sup>. Seasonal variation characteristics show "high in winter and low in summer, falling in spring and rising in autumn", and the pollution months were mainly concentrated in January, February, March and November. By ignoring the seasonal effect, wind

[收稿日期] 2023-07-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(22178142); 福建省自然科学基金项目(2019J01700); 集美大学国家基金培育计划项目(ZP2020067); 福建省食品微生物与酶工程重点实验室开放基金项目(Z822232-2); 福建省高等教育学会高等教育科学研究实验室研究专项(22FJSYZD007); 福建省中青年教育科研项目(JAT210217); 厦门市科技补助项目(2022CX0308, 2023CX0312)

[作者简介] 巫晶晶(1980—), 女, 高级实验师, 从事环境监测研究。通信作者: 陈锦芳(1980—), 女, 博士, 副教授, 从事环境化学研究。E-mail: jfchen@jmu.edu.cn

speed was the significant factor affecting  $PM_{2.5}$ , compared with temperature and moist in these pollution months. Backward trajectory analysis indicated that the regional and short-distance sources from the northeast in Fujian were identified as the major contributors of  $PM_{2.5}$ , and long-distance transport from the northwest and north also contributes to  $PM_{2.5}$  pollution in Xiamen Island. In winter, the major source regions of  $PM_{2.5}$  were mainly in the coastal area of Eastern Fujian and the border area between Zhejiang, Anhui, Jiangxi, Guangdong and Fujian, with the characteristics of high pollution tracks, and short distance transportation. The potential source areas of  $PM_{2.5}$  were mainly distributed from Sichuan, Jiangxi, Hunan, Guangdong in Spring, which was characterized by high proportion of pollution tracks and long-distance transport.

**Keywords:** fine particulate matters; backward trajectory cluster analysis; trajectory characteristics; Xiamen Island

## 0 引言

近年来,以细颗粒物为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出<sup>[1]</sup>。对城市区域而言,空气污染治理必须了解其来源及产生的原因。城市空气污染物的累积除受当地人为、自然排放源及气候影响外,区域污染物的传输也是造成其累积的重要原因<sup>[2-3]</sup>。在污染物输送扩散方面,国内外学者运用后向轨迹模型(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)开展了大量研究<sup>[4-5]</sup>。Yuan 等<sup>[4]</sup>采用后向轨迹分析发现长三角地区港口主要气团为海洋气团、浙北内陆气团,以及山东和上海内陆海洋混合气团;田鹏山等<sup>[5]</sup>利用上述方法发现深圳市北部  $PM_{2.5}$  主要来源于短距离输送的本地源。

以往的研究多针对某污染事件或季节性某污染物的浓度值进行后向轨迹分析,而对于较长时间尺度内较清洁区域的污染物输送研究则较少。厦门岛污染源排放较少,颗粒物污染较轻,但近年来个别月份仍出现较严重的区域性颗粒物污染问题,有研究<sup>[6]</sup>认为区域外的颗粒物季风传输可能是厦门岛污染的重要原因,也有研究<sup>[7]</sup>认为本地复杂地形与台湾海峡“狭管效应”叠加,导致复杂的传输和扩散条件,是造成厦门局地污染物累积的原因。而现阶段关于厦门岛污染物输送的研究甚少。

本文拟利用 HYSPLIT 后向轨迹模型,对 2015—2019 年厦门岛污染天数占比较高月份的大气输送路径进行聚类分析,结合该月份颗粒物污染浓度变化特征,揭示厦门岛  $PM_{2.5}$  污染分布特征、输送路径及污染轨迹特征。这一方面可为后期深入研究厦门岛大气污染的传输机制奠定基础,另一方面也可为清洁区域特别是沿海宜居城市的大气污染治理、减排及联防联控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究使用的 2015 年 1 月—2019 年 12 月厦门岛  $PM_{2.5}$  质量浓度逐时观测资料来源于中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>)。厦门岛共有 3 个国控大气监测站,研究期内厦门岛内无工业区,建筑工地也较少,因此这三个站点的污染源主要为外来源、城市交通源及居民生活源。

后向轨迹使用的气象场数据来自美国环境预报中心提供的 2015—2019 年全球资料同化系统数据 (<ftp://gus.arlhq.noaa.gov/pub/archives/>),气象数据(温度、湿度、风速)来自美国国家气候数据中心 (<https://www.ncdc.noaa.gov/>),采用 SPSS 26.0 对  $PM_{2.5}$  与气象要素进行 Person 相关性分析。

### 1.2 轨迹聚类分析

本研究运用 TrajStat 软件中的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹模式(HYSPLIT-4),结合全球资料同化系统气象数据,计算每日到达厦门岛海拔高度 500 m 的 72 h 后向轨迹,时间间隔为 3 h,并采用欧拉距离算法对后向轨迹<sup>[8]</sup>进行聚类,对每类轨迹对应的污染物浓度特征进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 厦门岛大气细颗粒物浓度分布及污染特征

根据厦门岛PM<sub>2.5</sub>逐日质量浓度资料对2015—2019年的年、季节和月质量浓度变化特征进行分析, 结果如图1所示。

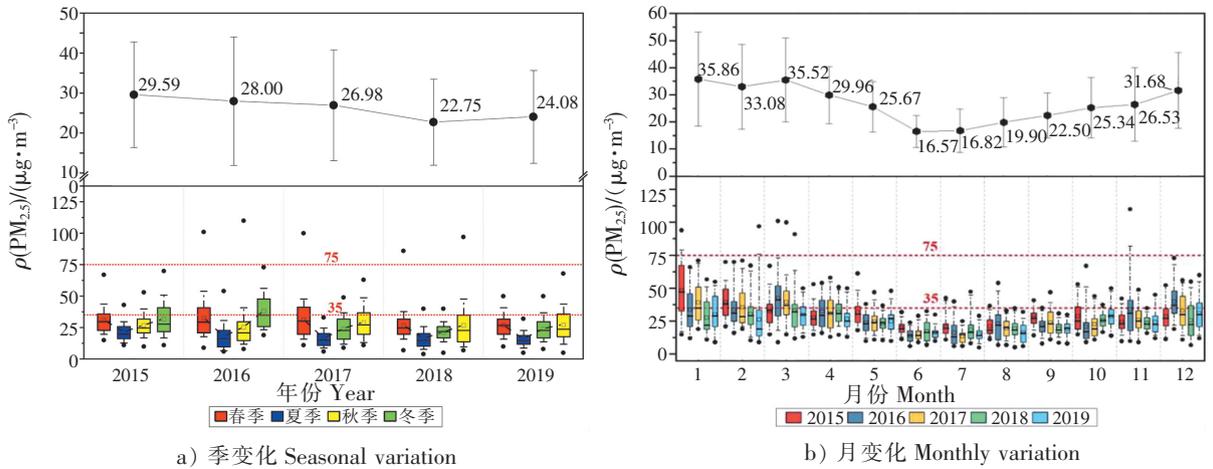


图1 2015—2019年厦门岛PM<sub>2.5</sub>的年、季节和月变化特征

Fig.1 Annual, seasonal and monthly variations of PM<sub>2.5</sub> concentration in Xiamen Island from 2015 to 2019

从图1a可知, 2015—2019年厦门岛PM<sub>2.5</sub>年平均质量浓度分别为(29.59 ± 13.22)、(28.00 ± 16.01)、(26.98 ± 13.83)、(22.75 ± 11.20)和(24.08 ± 11.58) μg/m<sup>3</sup>, 大体呈下降趋势。这5年年均PM<sub>2.5</sub>质量浓度均低于《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中年平均二级限值(35 μg/m<sup>3</sup>), 达到《厦门岛2014~2020年空气质量限期达标规划》中PM<sub>2.5</sub>年均质量浓度的目标要求(34 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[9]</sup>。这也与厦门岛对大气PM<sub>2.5</sub>污染积极进行治理及管理有关, 例如厦门岛实施机动车污染精准减排、严格实施国六排放标准、启动了三轮“守护蓝天”的大气防治专项行动, 并率先将大气污染联防联控从厦一漳一泉扩大至闽西南等。厦门岛PM<sub>2.5</sub>年平均质量浓度与同期的长三角和珠三角沿海城市相比较, 低于长三角的扬州市<sup>[10]</sup>、安庆市<sup>[11]</sup>和舟山市<sup>[12]</sup>(分别为55、53和(31.45 ± 22.89) μg/m<sup>3</sup>); 也低于珠三角的韶关市<sup>[13]</sup>、佛山市<sup>[14]</sup>和珠海市<sup>[15]</sup>(分别为43、37、31.0 μg/m<sup>3</sup>), 接近深圳市(29.8 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[16]</sup>, 说明厦门岛处于相对清洁的区域, 可能有受到周边区域潜在污染源的影响。

由图1b展示的5年PM<sub>2.5</sub>季节和月份变化可见: 2015—2019年厦门岛PM<sub>2.5</sub>月均质量浓度1—3月及12月相对较高, 为31.68~35.86 μg/m<sup>3</sup>; 6—8月相对较低, 均在20 μg/m<sup>3</sup>以下。说明厦门岛大气细颗粒物质量浓度具有“U”形的“冬高夏低, 春降秋升”的季节变化特点, 这可能是受气象条件和潜在源两因素的协同影响。冬季厦门岛多受冷高压影响, 大气层结稳定, 易形成静稳条件, 不利于污染物垂直输送和水平扩散; 加上早晨及夜间近地面温度低, 易形成逆温层, 使近地面大气污染物累积; 此外冬季正值北方采暖季节, 受偏北风影响, 北方污染物随之南移出现了区域性传输。春季厦门岛主要受西南暖湿气流影响, 造成污染物不易扩散。夏、秋两季厦门岛多处于副热带高压及其边缘, 盛行偏南风, 气团主要来自清洁的海面, 又降雨频发, 有利于大气污染物的扩散和清除<sup>[17-19]</sup>。

由厦门市环境质量公报知, 2015—2019年空气质量(AQI)为轻度污染的天数分别为2、4、3、5、9 d, 首要污染物为PM<sub>2.5</sub>的天数占比分别为50%、75%、33.3%、20%、22%, 因此PM<sub>2.5</sub>仍是厦门岛大气污染防治的主要对象。为明确这5年厦门岛PM<sub>2.5</sub>污染的月份, 将统计得出的各月份PM<sub>2.5</sub>污染等级和频率分布特征示于图2。由图2可知, 6月PM<sub>2.5</sub>达优(<35 μg/m<sup>3</sup>)天数频率最高, 达100%; 而1、2、3和11月, 达优频率最低, 轻度污染事件主要出现在这些月份。这与前述的年均、月均PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化的趋势吻合。且2015年1月、2019年2月、2016—2018年3月和2016年11月均出现PM<sub>2.5</sub>日均质

量浓度较大值 (>90 μg/m<sup>3</sup>)。因此,后期的污染月份轨迹路线特征分析主要集中在这4个月,并称其为易污染月份。

### 2.2 厦门岛 PM<sub>2.5</sub>与气象要素的相关性分析

厦门岛 2015—2019 年 PM<sub>2.5</sub>年质量浓度与气象要素之间的 Person 相关性分析(小时值)结果见表 1。由表 1 可知,温度与 PM<sub>2.5</sub>呈显著负相关。厦门属亚热带海洋性季风气候,受大气环流和台湾海峡地形的共同影响,具有夏无酷暑,冬无严寒的特点。为剔除季节性的影响,分别研究了易污染月(P, 1、2、3、11月)及清洁月(C, 6、7、8月)PM<sub>2.5</sub>和温度之间的关系(见表 1)<sup>[7,17]</sup>。由表 1 可知,剔除季节影响后:温度与 PM<sub>2.5</sub>二者之间无明显负相关关系,反而在部分月份存在弱正相关关系,说明高温有利于大气颗粒物的增多,使 PM<sub>2.5</sub>质量浓度增加;易污染月湿度与 PM<sub>2.5</sub>之间关系仍不显著,但是夏季湿度却与 PM<sub>2.5</sub>存在一定负相关关系,可能与夏季水汽增大、细颗粒被包裹直至被雨水清除有关;2017—2019 年污染月风速对 PM<sub>2.5</sub>影响更显著,而夏季则不明显。

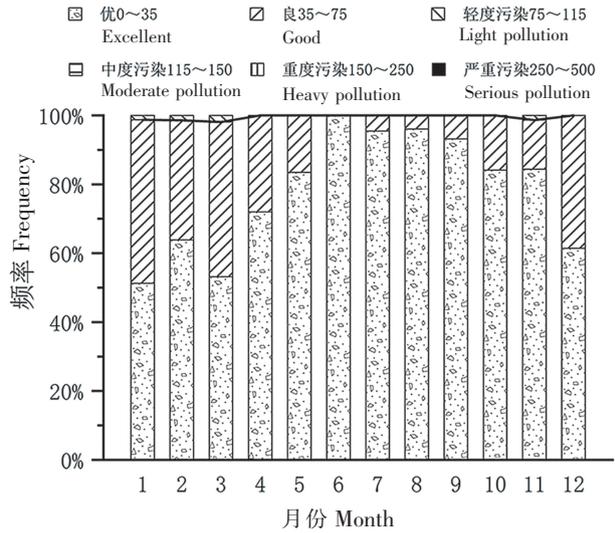


图 2 2015—2019 年逐月 PM<sub>2.5</sub> 污染天数频率图  
Fig.2 Monthly variations of daily proportion of PM<sub>2.5</sub> as pollutant from 2015 to 2019

表 1 2015—2019 年厦门岛 PM<sub>2.5</sub>与气象要素之间相关性

Tab.1 Correlation of PM<sub>2.5</sub> and meteorological factors in Xiamen Island from 2015 to 2019

气象要素 Meteorological factor	2015		2016		2017		2018		2019	
	全年 Annual		全年 Annual		全年 Annual		全年 Annual		全年 Annual	
	P (937)	C (735)	P (965)	C (734)	P (960)	C (735)	P (960)	C (734)	P (960)	C (734)
风速 Wind speed	-0.267**		-0.141**		-0.084		-0.347**		-0.280**	
温度 Temperature	-0.390**		-0.403**		-0.432**		-0.255**		-0.318**	
相对湿度 Relative humidity	-0.197**		0.056		-0.064		-0.093		-0.094	
	-0.165**	-0.255**	-0.242**	-0.262**	-0.139**	-0.036	-0.080*	-0.047	-0.127**	0.015
	-0.163**	0.187**	0.282**	0.071	0.072*	0.269**	0.052	0.290**	0.159**	0.094*
	-0.092**	-0.160**	-0.042	-0.130**	-0.054	-0.221**	-0.031	-0.288**	-0.045	-0.174**

注: P 指 1、2、3、11 月(污染月); C 指 6、7、8 月(清洁月); 括号内数字为轨迹数; \*\* 指在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 指在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Notes: P means pollution month, include January, February, March and November; C means clean month, include June, July and August; the number in bracket is traiecories; \*\* refers to significant association at 0.01 level (bilateral); \* refers to a significant at the 0.05 level (bilateral).

已有研究<sup>[20]</sup>发现长江中下游地区冬季 PM<sub>2.5</sub>与风速之间相关性较小,却与冬季北方污染物远距离输送有关,因为输送作用可以抵消风对污染物的稀释作用。厦门岛与之情况迥异,说明冬季远距离输送对厦门岛的影响明显弱于长江中下游地区。研究<sup>[19]</sup>发现,厦门岛春季受 E、NEN、ESE 方向的偏东风影响大,秋冬两季 NNE、NE、ENE 等偏北风占比较高,易于把北方城市的 PM<sub>2.5</sub>等大气污染物输送过来,导致厦门岛污染月 PM<sub>2.5</sub>浓度偏高。

### 2.3 后向轨迹聚类分布

2015—2019 年易污染月的后向气团轨迹聚类分析结果见图 3,影响易污染月中的气团轨迹,1、2

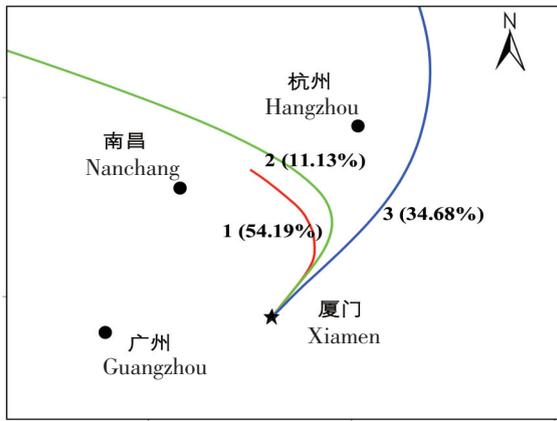
月可分为3类, 11月可分为4类, 3月分为5类。

1月, 轨迹类1占总轨迹数的54.19%, 该类轨迹是1月的主导气团轨迹, 具有短距离传输特征; 来自偏北方向的轨迹类3主要受季节性东北风影响, 占比为34.68%, 传输距离较轨迹类1长; 受北方寒流影响的西北向轨迹类2占比为11.13%, 具有传输距离长、移动速度快的特点。

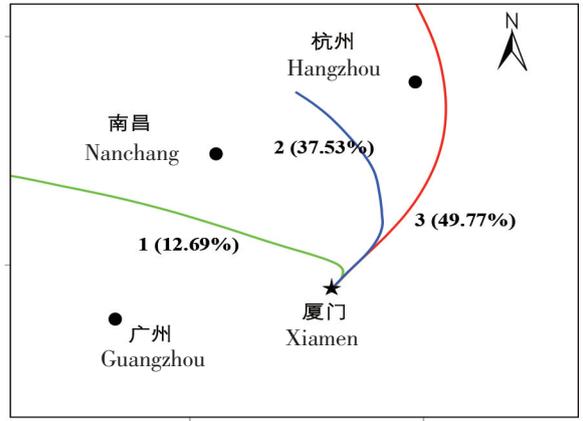
2月的3类气团轨迹与1月相似, 省内短距离输送的轨迹类2和沿岸输送的轨迹类3的占比相对较高, 分别占总轨迹数的37.53%和49.77%, 为该月的主导输送气团; 自西北向长距离输送的轨迹类1占总轨迹数的12.69%。

春季3月受暖流的影响, 气团轨迹相对复杂。自西北方向(寒流)来的长距离气团轨迹类2占比明显下降, 仅为8.39%。其他4类气团轨迹均为短距离输送, 来自西北方向的短距离轨迹类1比重最大, 为44.88%; 其次为来自东北方向的轨迹类3和轨迹类4, 分别占总轨迹数的11.49%和34.40%; 来自福建东北部地区的轨迹类5对厦门岛只有轻微影响, 约占0.84%。

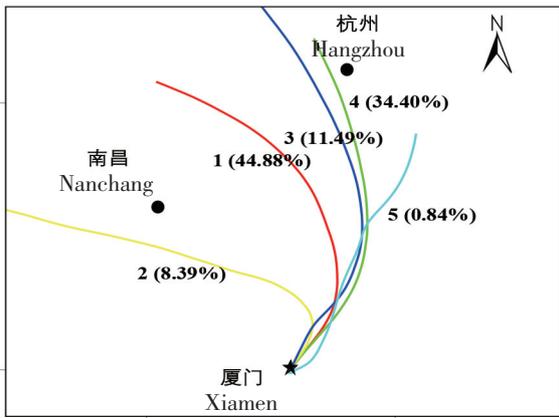
秋季11月的4类轨迹与1月相似, 其中来自东部的海洋气团轨迹类4占总轨迹数的41.01%, 为主导轨迹, 可能与此时厦门岛的主导风向为东北风及东风有关; 其次为偏北方向的沿岸轨迹类3(受东北风影响)和省内短距离输送的轨迹类1, 分别占总轨迹数的13.99%和36.23%; 由于此时寒流较弱, 长距离输送的轨迹类2占比相对冬季小, 但与春季相当, 为8.77%。



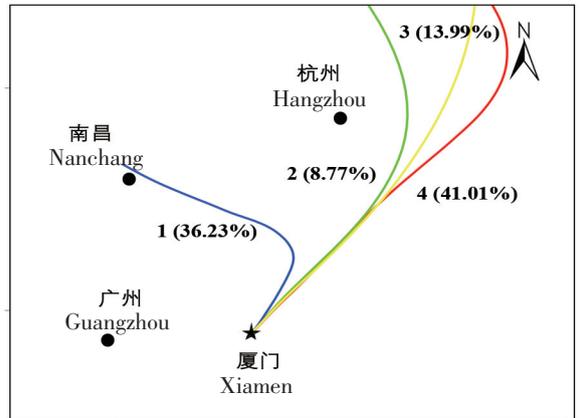
a) 1月 January



b) 2月 February



c) 3月 March



d) 11月 November

图3 2015~2019年厦门岛易污染月份后向轨迹聚类分析

Fig.3 Backward trajectory clustering analysis in pollution months during 2015-2019

综上所述:5年易污染月气团轨迹多为短距离输送气团,即短距离输送是造成厦门岛1、2、3、11月空气污染的主要原因;并且,来自西北方向及偏北方向(沿岸移动)的长距离输送在冬季明显增加,加剧了厦门岛冬季的大气污染。整体而言,除了11月个别出现来自东北(偏东)方向的海洋气团外,污染月份的气团轨迹多来自西部和北部的大陆气团。

#### 2.4 不同气流轨迹的污染特征分析

以《环境空气质量等级标准》中24 h  $PM_{2.5}$ 平均质量浓度二级标准( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )为阈值,来区分污染轨迹和清洁轨迹,并对污染月份各轨迹对应的 $PM_{2.5}$ 逐时质量浓度进行统计分析,探讨2015—2019年厦门岛易污染月份不同气流轨迹的污染特征。结果(见表2)发现,该阈值下各月污染轨迹占总轨迹的1.30%~2.82%;1月和2月的全部轨迹类均含有污染轨迹,且来自苏、浙和闽东北部地区的污染轨迹 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,分别达到( $91.79 \pm 11.15$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和( $100.81 \pm 31.68$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;3月的5类轨迹中有3类含污染轨迹,其中来自西北方向(赣、浙及闽东北部)方向的污染轨迹的 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,达( $96.13 \pm 19.35$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;11月污染轨迹中有3类污染轨迹,来自赣、闽中西部地区的轨迹类中 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,达( $97.01 \pm 16.94$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由此可知, $PM_{2.5}$ 阈值选取 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,质量浓度较高的污染轨迹主要来自浙、赣相邻省份以及本省的闽东北地区,尽管这些轨迹的占比数不大(1.10%~4.34%),却是造成厦门岛大气轻度污染的主要贡献轨迹,应引起重视。

$PM_{2.5}$ 阈值选择为 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 对厦门岛大气污染控制具有重要意义,但若要使厦门岛从较清洁地区向“清洁空气”目标前进,可采用24 h  $PM_{2.5}$ 平均质量浓度一级标准( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )为阈值进行分析(见表2),此阈值下污染轨迹相对总轨迹的占比数明显增加,在17.24%~44.56%之间。1月,来自赣、闽北部地区的轨迹类1的轨迹数及污染轨迹数均最高,分别达1982条和803条(相对总轨迹数占比分别为54.18%和21.95%), $PM_{2.5}$ 质量浓度也最高,可达( $54.24 \pm 15.62$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;来自苏浙和闽东北地区的轨迹类3,尽管该类轨迹的 $PM_{2.5}$ 质量浓度不高(( $48.78 \pm 11.30$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),但其污染轨迹数达677条,分别占该类轨迹及当月总轨迹的53.35%和18.51%,说明该类轨迹发生污染的概率较高。2月,来自黄海海域经苏浙、闽东部到达厦门岛的轨迹类3的 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,为( $51.43 \pm 17.86$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其污染轨迹数(564条)占比也最高,占2月份总轨迹数的17.08%;来自浙、闽东北部的轨迹类2的 $PM_{2.5}$ 质量浓度相对较低(( $50.33 \pm 17.55$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),但该类轨迹数及污染轨迹数仍较高,分别达1239条和305条,分别占总轨迹数的37.52%和9.24%。春季3月各类轨迹中污染轨迹的 $PM_{2.5}$ 质量浓度范围为( $44.99 \pm 4.61$ )~( $53.44 \pm 13.44$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其中来自川、鄂、湘、赣及闽中东部地区的轨迹类2的 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,其污染轨迹数仅144条,却占了该类轨迹的46.75%,说明该类轨迹发生污染的概率也很高;其次为来自赣、浙及闽东北部的轨迹类1,其 $PM_{2.5}$ 质量浓度为( $51.82 \pm 16.29$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,该类轨迹数及污染轨迹数均较高,分别为1646条和1023条,分别占总轨迹数的44.89%和27.90%。秋季11月所有轨迹分类中,来自赣和闽中西部的轨迹类1的 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,达( $56.05 \pm 22.58$ ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;污染轨迹数也最多,达243条,占期总轨迹数的6.88%。

综上所述,按现行空气等级质量标准,选择 $PM_{2.5}$ 阈值为 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,影响厦门岛的污染轨迹主要来自短距离输送的浙江、江西相邻两省及省内的闽东北部和闽中西部地区的污染源,这些区域的大气污染联防联控应受到重视。而厦门岛若要向“清洁”目标前进,24 h  $PM_{2.5}$ 阈值可选择为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,此时需要联防联控的区域范围将增大。除了上述区域外,冬季需要关注黄海海域、江苏和浙江较长距离输送的气团,该类气团轨迹到达时,厦门岛 $PM_{2.5}$ 质量浓度虽相对较低,但是污染轨迹数占比高;春季需关注来自四川、湖北、湖南、江西等西北方向较长距离输送的气团,该类气团轨迹使厦门岛 $PM_{2.5}$ 质量浓度升高,虽轨迹总数低但污染轨迹占比高(相对同类轨迹),污染频率也高。

表2 污染月份各类轨迹占比及对应PM<sub>2.5</sub>浓度值统计分析

Tab.2 The proportion of the number of trajectories and average mass concentration of PM<sub>2.5</sub> in pollution months

月份 Month	类别 Type	所有轨迹 All trajectories		污染轨迹(35ug/m <sup>3</sup> 基准) Pollution trajectories		污染轨迹(75ug/m <sup>3</sup> 基准) Pollution trajectories		途径区域 Transit area
		轨迹数 Track number	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	轨迹数 Track number	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	轨迹数 Track number	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
1	1	1982	38.41 ± 20.69	803	54.24 ± 15.62	86	87.89 ± 9.17	赣、闽北部地区 Jiangxi and Northern Fujian
	2	407	29.33 ± 15.34	106	49.70 ± 11.64	3	79.00 ± 3.61	青、川、鄂、赣、闽北部地区 Qinghai, Sichuan, Hubei, Jiangxi and Northern Fujian
	3	1269	35.96 ± 15.97	677	48.78 ± 11.30	14	91.12 ± 11.15	苏、浙、闽东北部地区 Jiangsu, Zhejiang and Northeastern Fujian
	总 All	3658	34.06 ± 18.30	1586	51.04 ± 13.86	103	88.07 ± 9.46	-
2	1	419	30.55 ± 13.48	200	46.07 ± 7.71	1	75.00 ± 0.00	甘、宁、陕、豫、皖、浙、闽东部沿海地区 Gansu, Ningxia, Shaanxi, Henan, Anhui, Zhejiang and Eastern Fujian
	2	1239	28.50 ± 17.95	305	50.33 ± 17.55	29	95.34 ± 17.50	赣、闽北部区域 Jiangxi and Eastern Fujian
	3	1643	33.95 ± 17.06	564	51.43 ± 17.86	33	100.81 ± 31.68	黄海、苏、浙、闽东部沿海地 The Yellow Sea, Jiangsu, Zhejiang and Eastern Fujian
	总 All	3302	31.30 ± 16.93	1069	49.94 ± 15.99	67	95.98 ± 24.10	-
3	1	1646	38.51 ± 19.15	1023	51.82 ± 16.29	69	96.13 ± 19.35	赣、浙、闽东北部、 闽东部沿海地区 Jiangxi, Zhejiang, Northeast and Eastern Fujian
	2	308	41.81 ± 17.70	144	53.44 ± 13.44	11	82.95 ± 4.40	川、鄂、湘、赣、闽中部、 闽东南部地区 Sichuan, Hubei, Hunan, Jiangxi Southeastern and Central Fujian
	3	421	22.91 ± 13.20	83	46.09 ± 11.07	5	78.95 ± 3.27	皖、浙、闽东部沿海地区 Anhui, Zhejiang, Eastern Fujian coastal area
	4	1261	32.06 ± 13.13	363	45.90 ± 8.57	0	0	浙、闽东部沿海地区 Zhejiang and Eastern Fujian coastal area
	5	31	38.59 ± 9.61	20	44.99 ± 4.61	0	0	浙、闽沿海地区 Zhejiang, Fujian coastal area
	总 All	3667	34.97 ± 17.75	1634	50.26 ± 14.57	85	93.41 ± 18.40	-
11	1	1279	29.55 ± 20.35	243	56.05 ± 22.58	43	97.01 ± 16.94	赣、闽中西部地区 Jiangxi, Central and Western Fujian
	2	310	21.76 ± 9.65	28	41.19 ± 4.54	0	0	蒙、晋、鲁、浙、闽东部地区 Nei Mongol, Shanxi, Shandong Zhejiang and Eastern Fujian
	3	494	21.49 ± 11.01	119	43.94 ± 9.32	2	78.00 ± 3.89	冀、鲁、浙、闽沿海地区 Hebei, Shandong, Zhejiang and Fujian coastal area
	4	1448	25.34 ± 10.32	219	42.84 ± 6.78	1	76.00 ± 0.00	东海、闽沿海地区 The East China Sea, Fujian coastal area
	总 All	3531	25.07 ± 14.26	609	48.25 ± 16.68	46	95.72 ± 17.10	-

### 3 结论

为促进厦门岛向“清洁空气”目标前进,对2015—2019年厦门岛空气质量影响较大的细颗粒物展开污染特征、污染月份的输送路径及污染轨迹特征分析,结果发现:1)厦门岛2015—2019年,PM<sub>2.5</sub>污染控制取得一定成效,其年平均质量浓度呈逐年下降趋势;其季节变化具有“冬高夏低,春降秋升”的特点,且月均高值多出现在1—3月及11月。2)剔除季节影响后,气象要素中温度、湿度对厦门岛PM<sub>2.5</sub>的影响均不显著,而风速对PM<sub>2.5</sub>具有较显著负相关关系,该现象在冬季尤为显著。3)厦门岛污染月的短距离气团输送是造成PM<sub>2.5</sub>污染的主要原因,来自西北及偏北方向的长距离气团输送加剧了冬季PM<sub>2.5</sub>污染。为了向“清洁”目标前进,选择35 μg/m<sup>3</sup>作为24 h PM<sub>2.5</sub>阈值对厦门岛大气污染联防联控更有意义。4)冬季污染潜在源区为闽东部沿海区域及浙、皖、赣、粤与闽交界区域,这些区域的大气污染联防联控应受到极大重视;而来自苏浙的较长距离气团输送因污染轨迹数占比高也应受到重视。春季污染潜在源区开始向西南方向移动,需关注来自川、赣、湘等方向较长距离输送的气团轨迹,轨迹总数虽低但污染频率高。

### [参考文献]

- [1] WANG Y Z, DUAN X J, LIANG T. et al. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics and socioeconomic drivers of urban air quality in China[J]. *Chemosphere*, 2022, 291: 132799.
- [2] JING H M, YU C, JIAN M X, et al. PM<sub>2.5</sub> concentration distribution patterns and influencing meteorological factors in the central and Eastern China during 1980-2018[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127565.
- [3] YANG G, HUA Y S, SHAO Q Z, et al. Characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> with focus on two severe pollution events in a coastal city of Qingdao, China[J]. *Chemosphere*, 2020, 247: 125861.
- [4] YUAN Q, TENG X M, TU S X, et al. Atmospheric fine particles in a typical coastal port of Yangtze River Delta[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 98: 62-70.
- [5] 田鹏山, 褚艳玲, 吴锋, 等. 深圳市东北部PM<sub>2.5</sub>的变化特征及潜在传输来源[J]. *广东气象*, 2017, 39(3): 65-68.
- [6] 张宁宇, 曹军骥, 赵竹子, 等. 厦门PM<sub>2.5</sub>污染类型及其成因分析[J]. *地球环境学报*, 2017, 8(1): 37-45.
- [7] 蒋永成, 张晗昀, 张伟, 等. 基于地基遥感资料的厦门岛污染边界层特征分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 450-458.
- [8] DORLING S R, DAVIES T D, PIERCE C E. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—method and applications[J]. *Atmospheric Environment Part A: General Topics*, 1992, 26(14): 2575-2581.
- [9] 厦门市人民政府办公厅关于印发厦门市空气质量限期达标规划的通知-厦门市政府[EB/OL]. [2020/5/16]. [http://www.xm.gov.cn/zwgk/ffg/sfbwj/201412/t20141230\\_1028710.htm](http://www.xm.gov.cn/zwgk/ffg/sfbwj/201412/t20141230_1028710.htm).
- [10] 何佳璐, 李鹏, 张永利, 等. 舟山市PM<sub>2.5</sub>浓度与气象因素的关系研究[J]. *预防医学*, 2018, 30(12): 1245-1247.
- [11] 朱义, 余光明, 潘永珩. 2015年安庆地区大气PM<sub>2.5</sub>污染特征[J]. *安庆师范学院学报(自然科学版)*, 2016, 22(4): 121-124.
- [12] 王亚林, 易睿, 陈相辉. 长江三角洲典型城市大气污染特征分析: 以扬州市为例[J]. *资源节约与环保*, 2016(12): 19-20.
- [13] 梁海发, 罗莹华, 冯海晴, 等. 韶关市PM<sub>2.5</sub>的时空分布特征研究[J]. *能源与环境*, 2019(4): 70-71.
- [14] 周柳艺. 佛山市南海区PM<sub>2.5</sub>污染特征分析[J]. *广东化工*, 2018, 45(12): 35-37.
- [15] 赵新锋, 钟欣, 胡嘉懿, 等. 珠海市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其成因分析[J]. *环境监控与预警*, 2017, 9(6): 53-58.
- [16] 陈嘉晔, 李仕平, 游泳, 等. 深圳市PM<sub>2.5</sub>浓度变化及污染输送特征分析[J]. *绿色科技*, 2017(2): 34-38.
- [17] 蒋永成, 郑辉, 蒋宗孝, 等. 基于多源观测资料的海峡西岸城市春季颗粒物污染研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1739-1750.
- [18] 赵丽娟. 厦门PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>时间变化特征[J]. *中国科技信息*, 2016(16): 54-56.
- [19] 林长城, 王宏, 陈彬彬, 等. 厦门市空气质量时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2010, 39(1): 79-83.
- [20] 邱坚, 霍玉玲, 万学平, 等. 镇江市四季PM<sub>2.5</sub>污染特征与潜在源区分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(6): 123-130.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)