

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0112

余倩楠, 徐茜, 周陶冶, 等. 2018. 长三角地区 2015 年大气重污染特征及其影响因素[J]. 环境科学学报, 38(8): 3185-3196

She Q N, Xu Q, Zhou T Y, et al. 2018. Characteristics of heavy air pollution episode and its impacting factors in the Yangtze River Delta during 2015 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(8): 3185-3196

长三角地区 2015 年大气重污染特征及其影响因素

余倩楠^{1,2}, 徐茜¹, 周陶冶³, 冯通⁴, 任浙豪⁴, 刘敏^{1,2,5,*}

1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241
2. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241
3. 上海市浦东新区环境监测站, 上海 200135
4. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241
5. 崇明生态研究院, 上海 200062

收稿日期: 2018-01-09 修回日期: 2018-03-06 录用日期: 2018-03-06

摘要: 基于 2015 年长三角地区 129 个环境空气质量监测站的空气质量指数 (AQI) 及主要大气污染物浓度数据, 结合气象资料和 HYSPLIT 后向轨迹模式, 探究长三角地区大气重污染的时间变化和空间集聚特征, 并深入分析气象条件和区域传输对重污染过程发生和维持的影响。结果表明, 2015 年长三角地区各城市平均出现 AQI 超过 200 的重污染天气共 8 d, 重污染频率为 2.01%, PM_{2.5} 作为首要污染物出现频次最多。从时间变化看, 重污染主要分布在 1 月和 12 月; 从空间分布看, 北部地区重污染相比南部地区更为严重, 徐州和常州市出现频率最高。选取典型重污染过程 1 月 9—11 日 (纬向扩散型)、1 月 24—26 日 (经向扩散型) 和 12 月 20—26 日 (两种模式相结合的重污染天气) 进行成因分析, 发现长三角地区重污染天气主要受到西北风向、低风速、高湿度和逆温层的影响, 导致大气污染物积累且不易扩散。基于 HYSPLIT 的大气传输轨迹及频率分布表明, 来自西北方向的气流对江苏北部地区的污染输送特征有着显著影响。

关键词: PM_{2.5}; 时空分异特征; 气象条件; 后向轨迹

文章编号: 0253-2468(2018)08-3185-12 中图分类号: X513 文献标识码: A

Characteristics of heavy air pollution episode and its impacting factors in the Yangtze River Delta during 2015

SHE Qiannan^{1,2}, XU Qian¹, ZHOU Taoye³, FENG Tong⁴, REN Zhehao⁴, LIU Min^{1,2,5,*}

1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241
2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-restoration, Shanghai 200241
3. Pudong New Area Environmental Monitoring Station, Shanghai 200135
4. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241
5. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062

Received 9 January 2018; received in revised form 6 March 2018; accepted 6 March 2018

Abstract: We analyzed ground air quality measurements from 129 monitoring stations in the Yangtze River Delta (YRD) region during 2015 to examine the spatial and temporal variabilities of severe air pollution episodes in this region. By using the meteorological information and backward trajectory model, we investigated the effects of meteorological factors and regional transport on typical severe air pollution episodes. There were on average eight days of severe air pollution (AQI >200) in 2015 in each city, and PM_{2.5} was the primary contributor. High AQI days were mainly concentrated in January and December. Spatially, monitoring data indicated more frequent high pollution days in the northern region of the YRD as compared to the southern region. In

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41471076); 上海市 2017 年度“科技创新行动计划”长三角科技联合攻关项目 (No.17295810603); 上海市自然科学基金 (No.17ZR1408700); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放课题 (No.SHUES2016B04)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41471076), the “Science & Technology Innovation Plan of Joint Key Project in the Yangtze River Delta” of Shanghai in 2017 (No. 17295810603), the Natural Science Foundation of Shanghai (No. 17ZR1408700) and the Opening Foundation of Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration (No. SHUES2016B04)

作者简介: 余倩楠 (1992—), 女, 博士研究生, E-mail: sheqiannan.Lindas@163.com; * 责任作者, E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

Biography: SHE Qiannan (1992—), female, Ph.D. candidate, E-mail: sheqiannan.Lindas@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

particular, Xuzhou city and Changzhou city had seen the most frequent high pollution days. We then analyzed three representative large regional episodes, i.e., a “north-south diffusion type” during January 9—11, an “east-west diffusion type” during January 24—26, and a “multi-process diffusion type” during December 20—26. During these heavy air pollution episodes, the predominant wind was of northwesterly direction, and the atmosphere was more stagnant as indicated by lower wind speeds and high relative humidity. Analysis of the backward trajectories and frequency distributions showed that the airflow from the northwest had an important influence on the transport of air pollutants in the YRD and particularly the northern region of Jiangsu Province.

Keywords: PM_{2.5}; spatial and temporal variability; meteorological condition; backward trajectory model

1 引言(Introduction)

近年来,大气重污染已经成为一种新的灾害性天气(Zhao *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2014; 许万智等, 2015; 方冬青等, 2016).国内外学者针对大气重污染特征及其影响因素开展了很多研究.李令军和王晓丽等通过利用时间序列分析法将大气重污染过程分为静稳积累型、沙尘型、复合型和特殊型等主要类型(李令军等, 2012; 王晓丽等, 2015).徐晓峰等研究发现近地面长时间静风或低风速条件和风场的辐合,是造成2004年10月7—10日北京地区连续数日重污染过程的重要原因之一(徐晓峰等, 2005).An等对2005年4月北京市一次重污染过程的数值模拟显示区域传输对北京PM_{2.5}和PM₁₀的平均贡献率分别为39%和30%(An *et al.*, 2007).张雅斌等利用高分辨监测资料分析表明,西安地区2013年12月18—25日重污染期间,高湿、静风、逆温和大气层结稳定等气象条件有利于污染物聚集、气溶胶增长和能见度下降(张雅斌等, 2016).马井会等分析指出上海地区一次连续颗粒物重污染过程中,垂直风场分布、大气层结变化和外来污染物输送为浮尘天气的发生及维持创造了有利条件(马井会等, 2013).上述研究表明高湿、逆温和小风等不利于扩散的气象条件是重污染天气发展维持的重要因子,外来污染源传输同样对污染物浓度的高低存在显著影响(Wang *et al.*, 2015; Zheng *et al.*, 2015; 王占山等, 2016).

然而,仅开展城市尺度的重污染研究工作难以解决严重的大气污染问题.近年来,我国越来越重视城市群污染物输送的控制与治理,国内外学者开始探讨我国城市群发展对区域重污染的影响(陈燕等, 2005).有关研究者从大气复合污染等角度对经济规模迅速扩大和城市化进程加快的区域进行了研究,认为持续的逆温层和干结的暖空气盖是导致京津冀城市群大气重污染的主要原因(任阵海等, 2004; Ji *et al.*, 2012),热带气旋外围下沉气流是珠三角地区连续PM_{2.5}重污染过程的主导气象因素(Wu *et al.*, 2013; 夏冬等, 2016),并且区域内城市

尺度的输送和相互影响作用明显(王文丁等, 2016).作为中国经济发展中心之一的长江三角洲地区,既是一个大气重污染受体区域同时又是一个大气污染物排放密度较高的城市群,是我国四大霾天气频发和危害较严重的地区之一(Fu *et al.*, 2008).我国2012年发布了《环境空气质量标准》(GB3095—2012),在新的空气质量标准和评价体系下,有必要重新审视长三角地区环境空气质量状况,深入分析大气重污染的特征及其与气象条件和区域传输的关系,为污染治理提供新的视角.

本研究基于2015年长三角地区129个环境空气质量监测站的空气质量指数(AQI)及大气污染物浓度数据,结合气象资料和HYSPLIT后向轨迹模型,全面分析长三角地区大气重污染的时间变化和空间集聚特征,在此基础上对三次典型重污染过程进行分析,深入探讨天气形势和区域传输对长三角重污染过程的影响.

2 研究数据与方法(Data and methods)

2.1 研究区域概况

长江三角洲地区(以下简称长三角地区)(116°29′~123°45′ E, 27°14′~35°33′ N)濒临东海与黄海,现辖“两省一市”(上海市、江苏省、浙江省)共25个城市(图1),总面积达21.07×10⁴ km²,属亚热带季风气候,年平均气温和降水分别为16.7℃和1536 mm(She *et al.*, 2017).

2.2 数据来源与处理

本研究中长三角地区大气污染数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>),包括129个环境空气质量监测站(江苏72个,上海10个,浙江47个)的空气质量指数(AQI)和6种主要大气污染物(PM_{2.5}、O₃、CO、NO₂、SO₂、PM₁₀)的逐时监测浓度数据.各监测站PM_{2.5}、O₃、NO_x浓度等通过Thermo Fisher 1405F监测仪、Thermo Fisher 49C紫外光度法分析仪、以及Thermo Fisher 42C基于化学发光的NO-NO₂-NO_x分析仪测定(程念亮等, 2016),且各监测仪器均参照国家标准定期校准,采样管路每月至少清洗1次,操作流程



图1 长三角地区环境空气质量监测站的空间分布图

Fig.1 The location of Yangtze River Delta and distribution of ambient air quality monitoring stations

严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193—2005)执行,以保证监测数据的准确性和有效性(王占山等,2015).本文的大气污染数据分析均基于小时浓度数据,在数据处理过程中剔除原始数据中缺失的值及少数异常值,通过分类统计计算2015年长三角地区逐日、逐月 and 不同季节的AQI值及其主要大气污染物浓度.为了研究气象条件对大气重污染过程的影响,本研究使用了来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)的逐时风速、气压和相对湿度等数据资料.

2.3 大气重污染过程中的区域传输影响识别——后向轨迹模型

大气结构的不稳定特性决定了一个地区或城市的大气环境不仅与本地的污染物排放有关,还通过不同尺度的传输过程与周边地区的大气环境相互影响(许万智等,2015).本研究利用后向轨迹模型(HISPLIT-4.9, <http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl>),模拟3个典型重污染过程(2015年1月9—11日、1月24—26日、12月20—26日)大气污染物长距离输送与扩散的方向、路径、影响范围及频率分布.由美国国家海洋和大气局(NOAA)开发的后向轨迹模型是一种欧拉和拉格朗日混合型的计算模式,包含多种物理过程,可以针对不同

类型排放源,进行较完整的输送扩散和沉降过程模拟,并能够处理多种气象输入场,被广泛应用于跟踪气流所携带的粒子或气体的移动方向,分析大气污染物来源和传输路径等方面.该模型所用气象资料是由美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)资料,水平分辨率为191 km,垂直方向上50~1000 hPa分为12个等压面层,时间间隔为6 h(Draxler *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2015; 黄毅等, 2016).计算轨迹时分析思路为,假设污染物气团的移动路径取决于风场,则气团轨迹为气团在时间和空间上的位置矢量的积分,其速度矢量为气团在时间和空间上的线性插值.设气团在初始位置 P 的速度为 V ,经过时间步长 Δt 后,第一估计位置为 P' ,即

$$P(t+\Delta t) = P(t) + V(P, t) \Delta t \quad (1)$$

气团的终点位置 $P(t+\Delta t)$ 可通过其初始位置 P 和第一估计位置 P' 的三维速度矢量的平均值计算得出,即

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5 [V(P, t) + V(P', t+\Delta t)] \Delta t \quad (2)$$

式中, Δt 为可变时间步长,根据一个时间步长内气团移动不超过半个气象格距大小确定.

本研究分别选取上海市、江苏省的徐州市以及浙江省的杭州市为后向轨迹的终点,模拟重污染天气发生前72 h的气流移动,模拟高度为500 m.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 长三角地区大气重污染的时空分异特征

2015年长三角地区所有城市平均出现AQI超过200的重污染天气共8 d,重污染频率约为2.01%,主要发生在1—3月以及10—12月,其中以1、12月份最多(图2).而4—9月几乎没有重污染天气发生,尤其是8、9月空气质量相对良好. $PM_{2.5}$ 是对长三角地区空气质量起主导作用的首要污染物,在全年的重污染过程中出现983 站点 \times 天,此外 PM_{10}

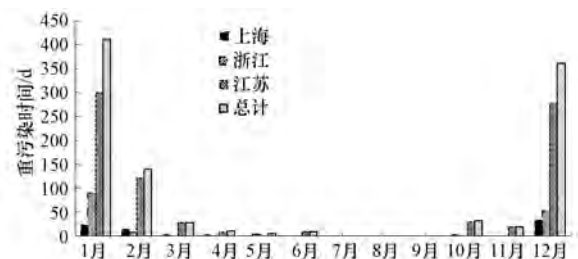


图2 长三角地区大气重污染的时间分布

Fig.2 Temporal variability of heavy air pollutions during 2015 in the YRD

和 O_3 分别出现 6 和 2 站点×天,因此长三角地区重污染过程主要表现为 $PM_{2.5}$ 细颗粒物污染.重污染天气发生时,主要大气污染物浓度均明显升高,其中 $PM_{2.5}$ 的增幅最明显,后文将详细分析重污染期间 $PM_{2.5}$ 浓度随气象条件变化的特征.

从空间分布特征来看,长三角地区北部大气污染相比南部地区更为严重,出现重污染天气的频次也有着显著差异(图 3),总体上呈北高南低的特征(江苏省>上海市>浙江省).全年尺度下,江苏省的徐州和常州市出现重污染天气最为频繁,多达 15

次、25 d 以上,其余城市均达到 6 次以上,污染较为严重;浙江省的空气质量明显优于江苏省,舟山、丽水和温州市未发生重污染事件,其余城市(除临近江苏省的湖州市外)重污染频次均小于 5 次.季节尺度下,春、夏、秋三季的大气重污染规模较小,分布不连续,频率最高的徐州市出现重污染天气共 5 次;而在冬季,无锡、常州和徐州三市的重污染天气多达 10 余次,江苏省其他城市(扬州除外)和上海市也达到 5 次以上,浙江省各城市出现重污染天气的频率也远远高于其他季节.

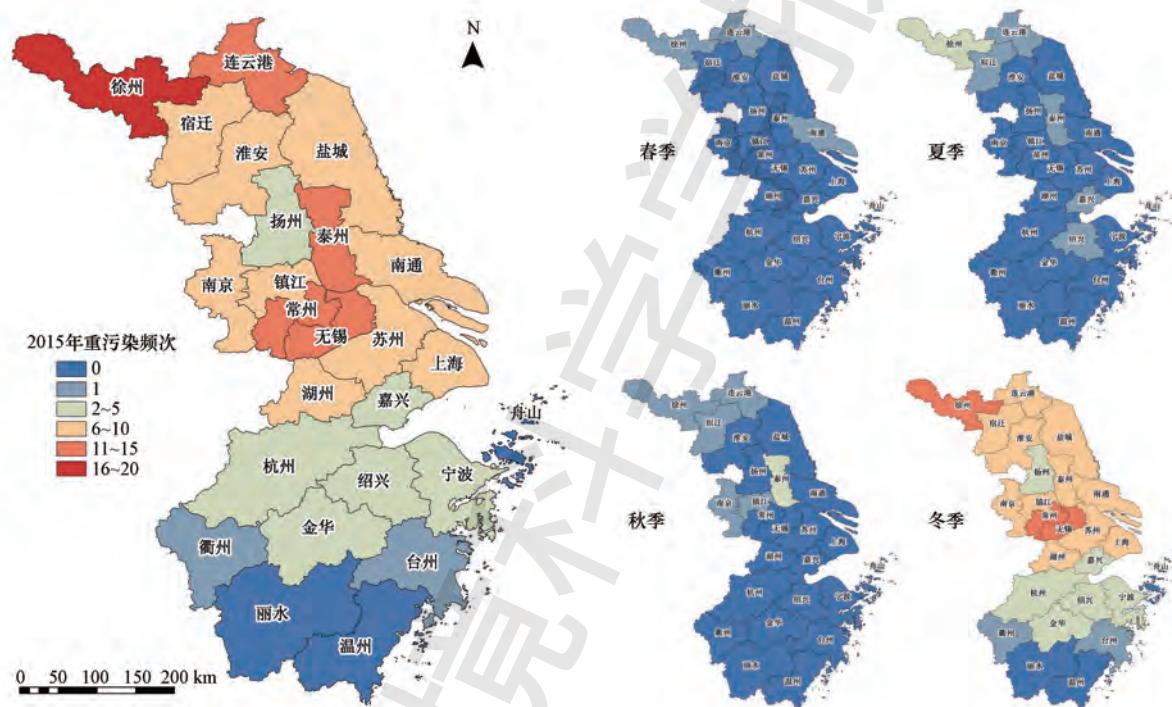


图 3 2015 年长三角地区全年和季节尺度下重污染频率的空间分布

Fig.3 The frequency of heavy air pollutions during 2015 in the YRD

3.2 长三角地区典型重污染事件特征

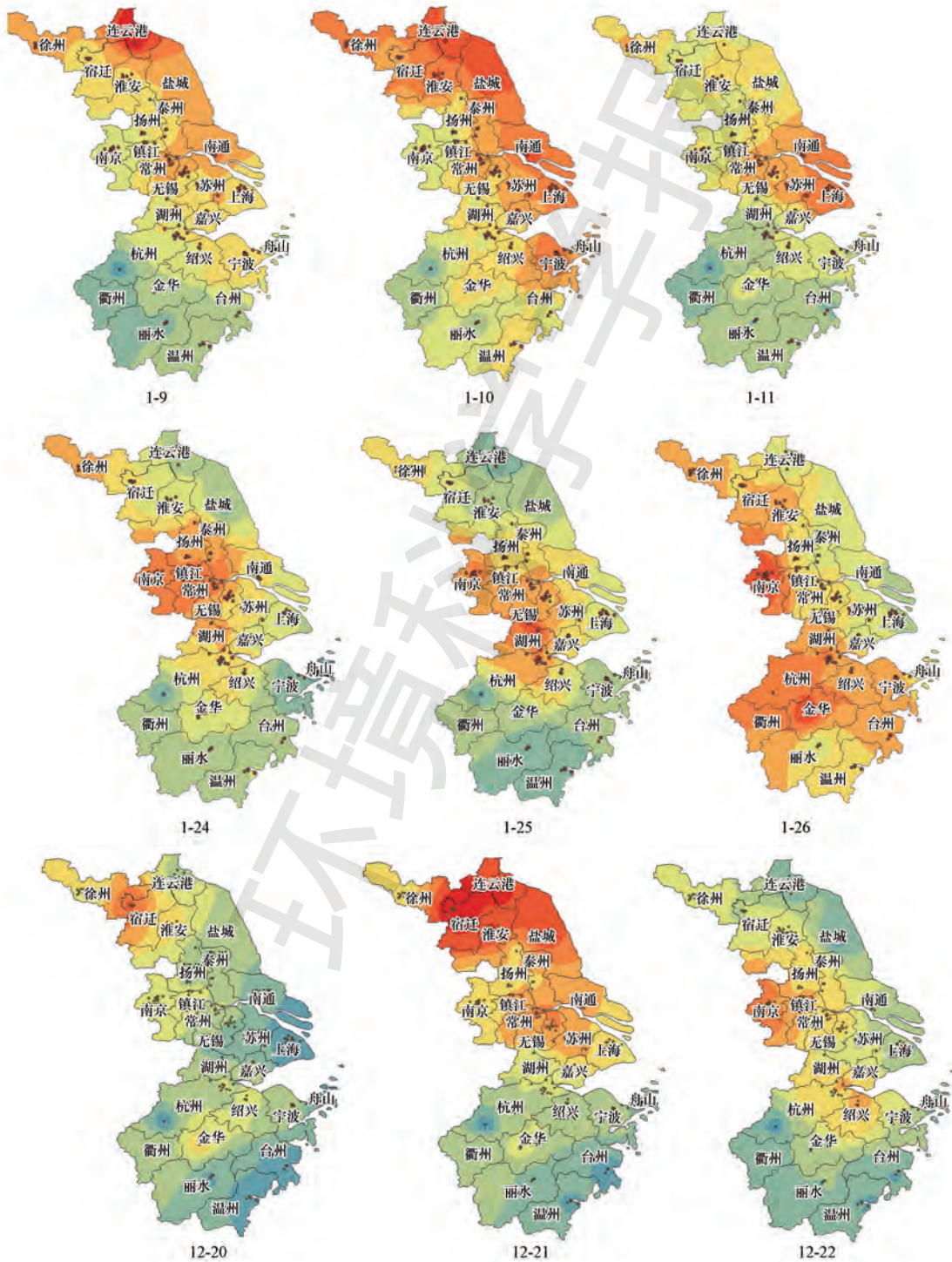
2015 年长三角地区连续 3 d 以上、超过 3 个城市出现重污染天气的频次共计 9 次,本研究重点分析典型重污染事件(1 月 9—11 日、1 月 24—26 日、12 月 20—26 日)的时空分异特征.如图 4 所示,1 月 9 日出现重污染天气时,AQI 指数最高的区域为江苏省的连云港市,并具有一定的污染辐射范围,由北至南逐渐减弱,而浙江省的南部地区空气质量依然较好.之后,虽然 AQI 最高的区域位于连云港附近的徐州市,但是浙江省部分区域的 AQI 已突破 200,也进入了重污染天气过程.虽然辐射面积扩大,污染程度却有所降低,1 月 11 日起各城市 AQI 均低于

250.1 月 12 日,整个长三角地区的 AQI 指数回落至 200 以下,仅上海仍有较严重污染,但也逐渐消散,重污染过程结束.在这一过程中,主要表现为长三角沿海地区的重污染天气由北至南迁移,接着在极大风速的影响下得到逐步缓解,这种类型的重污染天气被称为“纬向扩散型”.

1 月 24—26 日的重污染过程较上一次相比有较大差异.1 月 24 日的污染重心位于江苏省西部的南京、镇江和常州等市,而江苏北部的连云港市、浙江省南部的大部分地区以及东部的上海等地 AQI 均低于 100.第 2 天南北部地区的空气质量依旧良好,但重污染天气逐渐向东迁移,嘉兴、苏州等地也

开始进入重污染过程.至 1 月 26 日,长三角地区各城市均出现不同程度的重污染天气,这种在经向上由内地向外迁移、且污染范围和程度都逐渐增加的重污染天气被称为“经向扩散型”.12 月 20—26 日的重污染天气是两种模式的结合,20—21 日、24—26 日两个阶段主要为“纬向扩散型”,22—23 日为

“经向扩散型”.综上所述,长三角地区的大气重污染过程具有明显的时空序列分异特征,南部浙江地区出现重污染天气的时间晚于北部江苏地区,有一定的时间差,说明大气污染物还存在一定的区域传输过程.



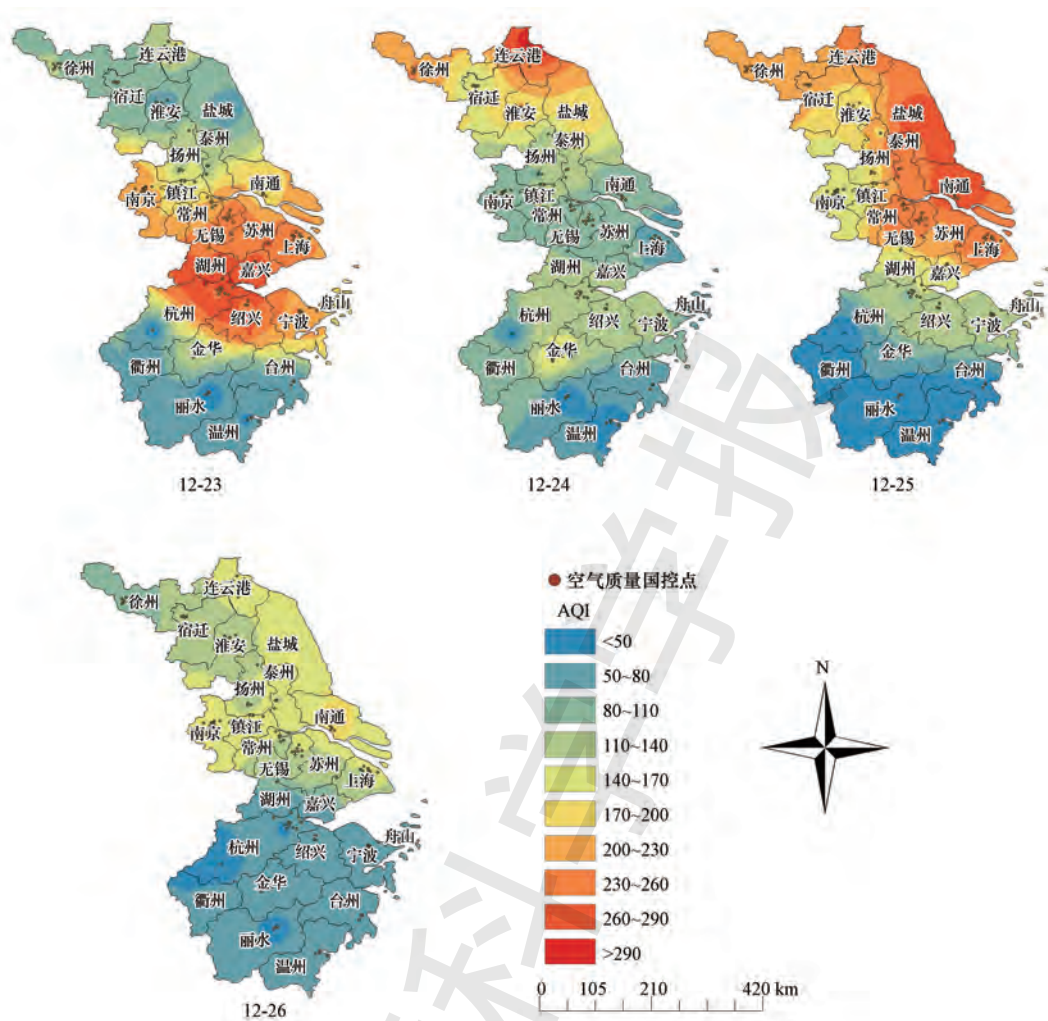


图4 长三角地区2015年典型重污染过程(1月9—11日、1月24—26日、12月20—26日)的AQI分布特征

Fig.4 Spatial variability of AQI during typical heavy air pollution episodes (Jan. 9—11, Jan. 24—26, Dec. 20—26) in the YRD

3.3 气象条件对区域重污染的影响

为了分析气象条件对重污染过程的影响,本研究分别计算了长三角地区1月、12月重污染及非重污染期间的各气象要素值,对比结果如表1所示.非重污染期间的平均风速为 $3.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度为71.63%, $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $79.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.重污染期间的平均风速仅为 $1.89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,显著低于非重污染期间;平均相对湿度为81.52%, $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度

高达 $136.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均显著高于非重污染期间.依据美国国家海洋和大气局大气资源实验室(NOAA-ARL)的大气稳定度数据库显示,重污染期间长三角83%以上的站点的帕斯奎尔-特纳大气稳定度类型处于E类(较稳定,存在逆温现象).说明长三角地区在重污染期间的天气形势较为静稳,风速较小和逆温层形成导致污染物积累且不易扩散.相关研究表明,二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成与大气湿度呈显著线性正相

表1 2015年长三角地区重污染和非重污染期间的气象条件对比

Table 1 The comparison of meteorological factors between heavy air pollution periods and clean air days

研究时段	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风向	降雨量/mm	气压/hPa	相对湿度
重污染期间	136.47	7.90	1.89	西北	162.70	1020.19	81.52%
非重污染期间	79.86	6.12	3.69	偏东	189.76	1023.02	71.63%

关(王英等,2015),Pan 等对华北地区重污染天气进行成因分析时也发现气溶胶粒子吸湿后粒径会增大 20%~60%(Pan *et al.*, 2009),说明较高的相对湿度也有利于污染物的二次转化和吸湿增长。另外,在重污染和非重污染两种天气形势下,长三角地区的气压、温度和降雨量并没有显著差异,因此长三角地区重污染过程主要受到风速风向和相对湿度的影响,西北风向、低风速、逆温层和高湿度的条件更易形成其重污染天气。

同时,以长三角地区经济发展最快、城市化水平最高,并且大气污染受重点关注的上海市为例,结合国控点浦东新区监测站数据进一步分析在不同重污染过程中气象因素变化对大气污染的影响。2015 年 12 月 20—26 日,上海出现了一次持续 7 d 的重污染过程。浦东监测站数据显示(图 5),20 日持续降水,但雨量较小,平均每小时降水量仅为 0.36 mm,平均相对湿度>90%,而平均最大风速仅为 0.88 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向由东北风转变为北到西北风。20 日晚间随着边界层降低,PM_{2.5} 浓度持续上升,于 21 日 11 时达到阶段最大值 184 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。期间长三角地区重污染区域不断扩大,呈现由北到南扩散、污染逐渐加重的趋势。21 日午后,风向逐渐转变为偏东风,吹散污染物,浦东监测站 PM_{2.5} 浓度逐步下降,空气质量于 22 日 11 时恢复到良,此时重污染区域主要位

于江苏省西南部。22 日午后至夜间,风向又逐渐转为西北风为主,平均最大风速 1.61 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度从 14 时的 79% 上升至 90% 以上,边界层高度始终位于距地面约 200 m 上空,扩散条件差,污染物迅速积累。23 日 4 时 PM_{2.5} 浓度高达 271 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,为此次重污染过程的最大值,空气质量为 VI 级严重污染,重污染持续时间超过 15 h,期间整个长三角中部区域均受到持续重污染天气影响。23 日 18 时起北到东北风加强,污染物向南移动并快速消散,22 时空气质量恢复到良。在持续北到东北风的作用下,至 24 日夜间浦东监测站空气质量维持在优-良水平,在此期间又有一波污染气团由北向南逐渐影响长三角地区。24 日午后至夜间,随着一次较弱的降水过程(平均每小时降水量仅为 0.42 mm)和边界层降低,PM_{2.5} 浓度迅速上升,25 日 4 时达到阶段最高值 246 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。24 日夜间至 26 日上午,风向维持西北风和偏西风,平均最大风速 1.36 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在持续静稳天气和污染物输送下,上海连续 31 h 处于重度污染,平均 PM_{2.5} 浓度为 181.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,直至风向逐渐转向西南,大气扩散条件转好,空气质量于 26 日下午恢复到 II 级良。2015 年 12 月 20—26 日的这次污染过程中,3 个重污染阶段均明显受到风向转变的影响,风速小、湿度大也是形成静稳天气,不利于污染物扩散的主要原因。

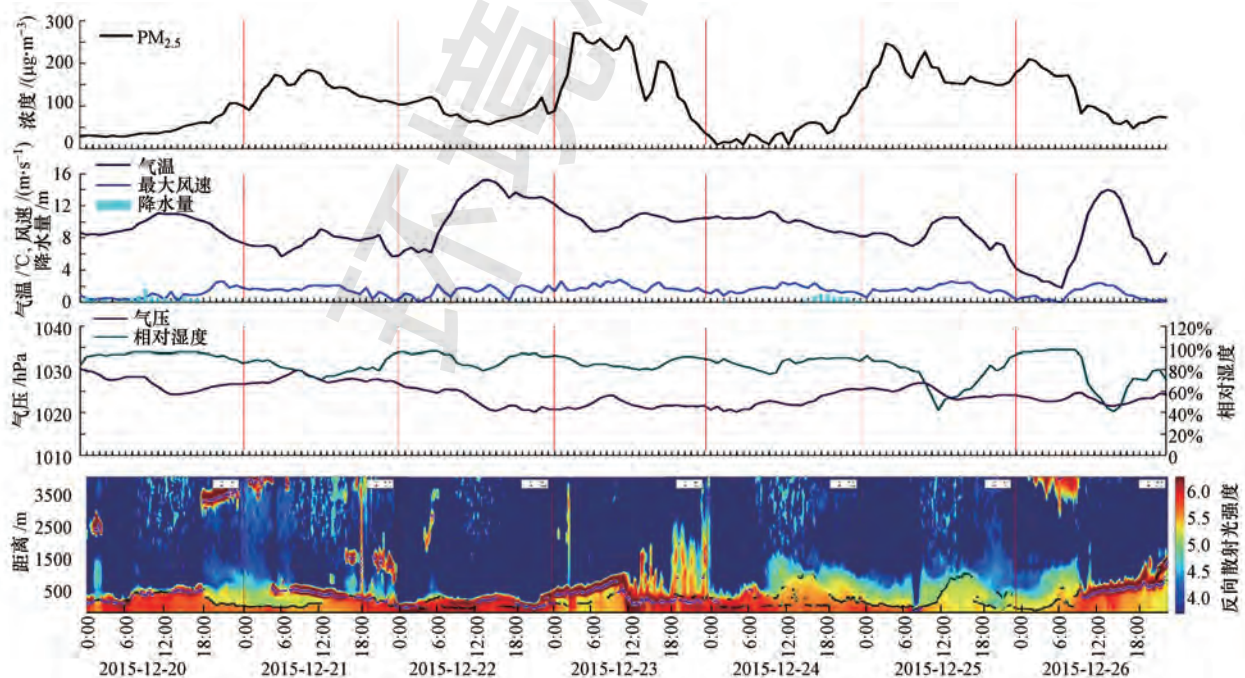


图 5 2015 年 12 月 20—26 日重污染过程中浦东新区监测站 PM_{2.5} 浓度、气象因子变化和雷达监测结果

Fig.5 Characteristics of PM_{2.5} concentrations, meteorological factors and LiDAR results during Dec. 20—26 in Pudong new area environmental monitoring station

2015年1月9—11日重污染期间,上海市处于地面弱高压中心,天气静稳,主导风向西北,风力小,不利于扩散(表2).空气质量总体为PM_{2.5}中度到重度污染,且PM_{2.5}小时浓度持续近30h表现为200 μg·m⁻³左右.本次污染过程为近地面静稳天气、不利气象条件下,污染累积叠加西北气流区域污染输送导致.以浦东监测站为例,本次重污染过程受上游持续颗粒物输送(消光系数;白圈所示)及本地较差扩散条件的共同影响(图6).由于夜间的辐射降温导致近地层出现逆温层,抑制污染物扩散,西北风向污染物持续输送,9—10日、10—11日夜间雾霾均明显加重,昼间大气边界层抬升也未能使雾霾有所好转,11日20时PM_{2.5}小时浓度达本次污染过程

最高值259 μg·m⁻³.11日夜间随风向转为东北风,风力增大,污染物扩散,空气质量显著改善.

表2 2015年1月9—11日及1月24—26日重污染期间上海市气象因素变化趋势

Table 2 Trend variations of meteorological factors during Jan. 9—11, Jan. 24—26 in Shanghai

日期	风速/(m·s ⁻¹)	风向	气压/hPa	温度/℃	相对湿度
9日	0.9	西北	1029.6	3.9	64%
10日	1.2	西北	1027.5	5.4	66%
11日	1.7	西北	1028.3	6.4	70%
24日	1.8	南-东南	1021.4	9.1	80%
25日	2.8	南-西北	1020.4	11.4	84%
26日	1.6	北-东北	1023.6	7.9	85%

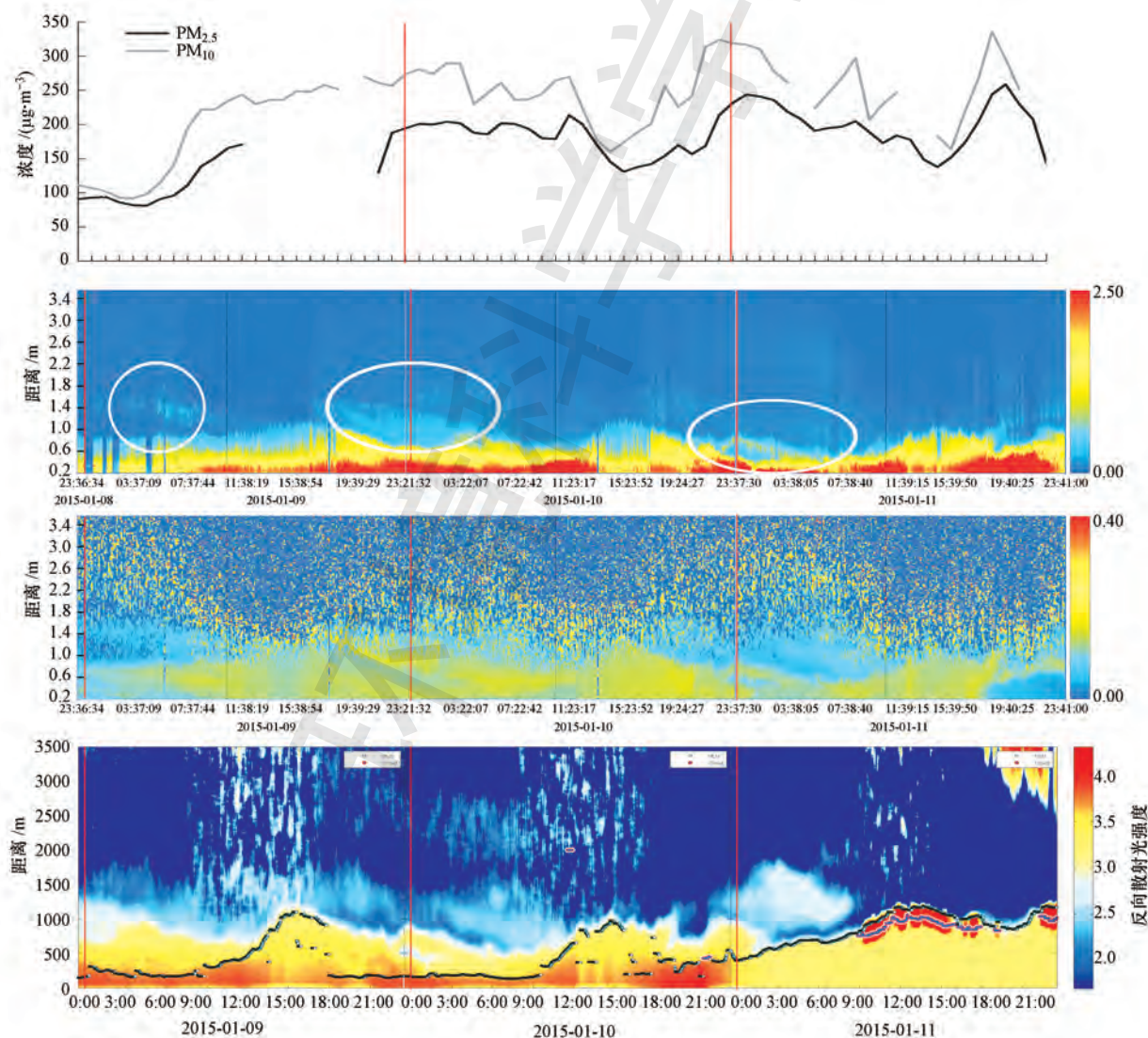


图6 2015年1月9—11日重污染过程中浦东新区监测站PM_{2.5}浓度、气象因子变化和雷达监测结果

Fig.6 Characteristics of PM_{2.5} concentrations, meteorological factors and LiDAR results during Jan. 9—11 in Pudong new area environmental monitoring station

2015 年 1 月 24—26 日重污染期间,长三角地区受静稳天气系统影响,水平气压梯度弱,平均风速小于 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大气扩散条件差,大部分地区空气质量处于轻-中度污染状态.24 日午后受高压后部影响,污染气团逐渐向江苏南部移动,而上海空气质量为优-良.24 日夜间至 25 日长三角地区处于低压倒槽,上海的主导风向由 24 日夜间的东南风,经 25 日上午的南风,转变为 25 日的西北风(表 2),位于江苏省南部与安徽省交界区域的污染气团迅速由西向东移动扩散影响长三角中部地区.加之上海市相对湿度由 21 日的 66% 逐渐增大到 25 日的 84%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 25 日午后迅速上升至 $357 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

(浦东监测站 25 日 21 时达最大值 $381 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),为 VI 级严重污染.26 日起,受到冷空气影响,风向逐渐转变为东北风,风力显著增大,大气扩散条件转好,污染物得以扩散,空气质量逐步恢复到优-良.

3.4 大气传输对长三角重污染过程的影响

为了更加深入地探究大气传输对长三角地区重污染过程的影响,本文基于 HYSPLIT 模式对长三角 3 个代表城市(上海、徐州和杭州市)进行污染物气团轨迹分析.如图 7a 所示,在 1 月 9—11 日的重污染过程中,长三角地区主要受到西北方向气流的影响,近距离输送轨迹的频率高达 90%,具体表现为来自山东南部及河南北部方向的气流开始向徐

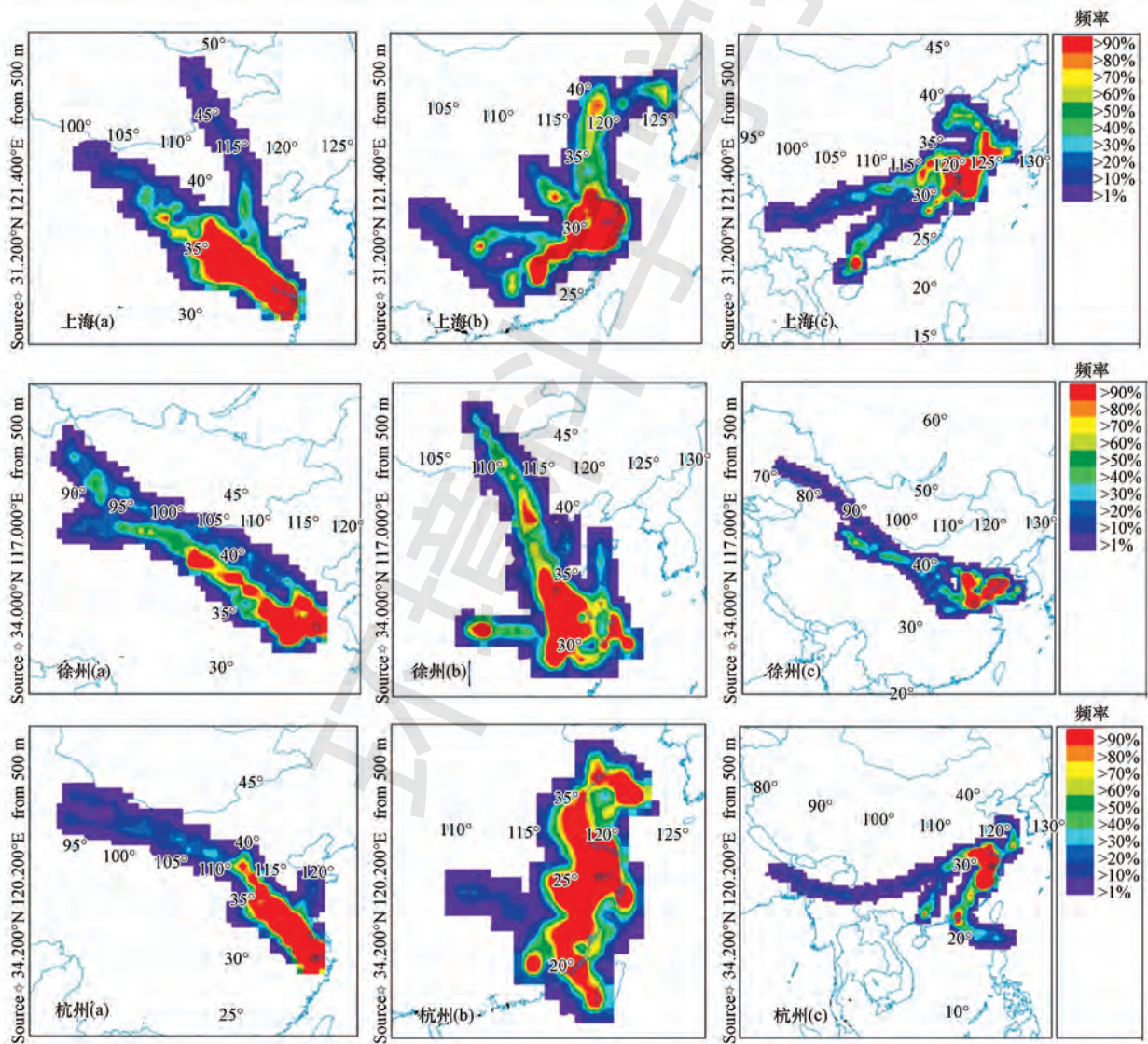


图 7 基于 HYSPLIT 模式模拟的 3 次重污染过程污染气团移动轨迹频率分布图(a 为 1 月 9—11 日,b 为 1 月 24—26 日,c 为 12 月 20—26 日)

Fig.7 Frequency distributions of backward trajectories during three typical heavy air pollution episodes in the YRD (a. Jan. 9—11, b. Jan. 24—26, c. Dec. 20—26)

州等江苏北部城市推进,该源区人口密集程度高,工业企业集中,各类污染物排放较大.接着,气流继续向南缓慢移动至浙江大部地区,后文将具体分析此次重污染过程中污染物输送的特征.在1月24—26日的重污染过程中(图7b),徐州受到西北偏北方向山东及京津冀地区的气流影响较大,70%以上的后向轨迹均经过该区域.而上海和杭州由于污染期间长三角地区受静稳天气条件控制,并未受到确定的气流方向影响.在12月20—26日的重污染过程中(图7c),除徐州仍受到西北的气流影响之外,上海和杭州也明显受到了正西或西南风的影响,气流轨迹频率均为30%以上,来自西南西北的气流在江苏北部、江苏南部、上海和浙江的分界线上汇集,特殊的地形导致污染积聚,加之当时不利的气象条件,形成了此次重污染天气.在以上3次重污染过程中,长三角地区大气污染物的区域传输特征有着明显差异.江苏北部均受到来自西北气流的影响,说明山东河南等地对长三角地区污染物有很大的贡献.

来自西南方向的气流对长三角地区的大气污染输送同样有着一定影响,且对南部的影响更为显著.王艳等也通过相关研究发现,影响长三角地区的输送气流主要来自华北地区,西南方向也是输送途径之一(王艳等,2008).

以2015年1月9—11日重污染过程为例,通过观察华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度、气压场和风向的变化,并选取长三角地区污染比较明显的7个城市(5个沿海城市,由北向南为连云港、盐城、南通、上海和宁波市;2个偏内陆城市,徐州和南京)的AQI逐时变化特征进行具体分析,可以发现(如图8所示),1月9日0时,重污染中心位于鲁南苏北交界处,连云港和徐州的AQI高于其他5市.在西北风的作用下,污染气团开始向东南方向扩散,对沿海城市的影响尤为明显,盐城、南通、上海、南京均陆续达到污染峰值.9日午后随边界层打开,各市AQI有所下降,而上海在持续的污染输送下污染程度未有所缓解.9日晚间至10日中午前后,持续来自西北方向的污染

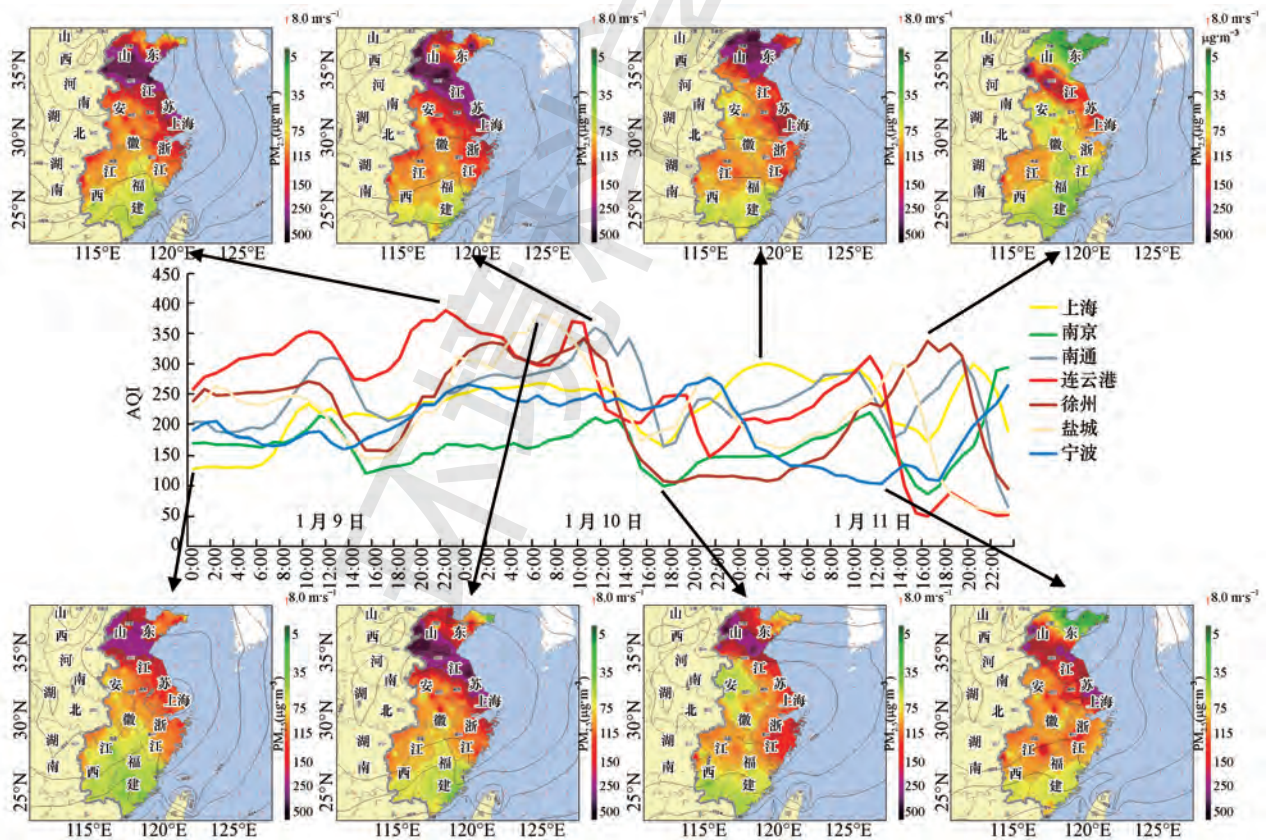


图8 2015年1月9—11日长三角地区重污染逐时变化特征(华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度与气象场空间分布图由长三角区域空气质量预报业务平台提供)

Fig.8 Hourly variation of the heavy air pollution episode during Jan. 9—11, 2015 in the YRD (The spatial distribution maps of $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological fields in East China were provided by the Air Quality Forecast Platform of the Yangtze River Delta region)

输送使各市污染程度再次加重,1月9日22时连云港首先达到污染峰值(为本次污染过程最大值),比盐城、南通的污染峰值分别早出现8h和13h.在气压场作用下,污染物经过杭州湾风向向东偏转影响宁波等浙江东北部城市,而位于江苏西南部偏内陆的南京受本阶段污染输送影响较小.10日10:00起,风向转向偏西风,各市扩散条件转好,污染程度有所下降,直至18:00长三角地区开始受高压控制,位于高压前部的上海污染加重最为明显,在外来输送气团的影响下,11日2:00上海AQI达300,显著高于长三角其他城市.此时,位于山东大部地区的污染气团在冷空气的作用下开始由北向南扩散,至11日11:00除宁波、上海外其余五市AQI均显著上升.11日午后,风向转为东北偏北风,各市AQI开始下降,位于江苏中北部沿海的连云港和盐城尤为明显,而16:00起南通、上海、南京、宁波受一波海上污染气团输送影响,陆续出现短时重污染过程,徐州也受到来自山东的污染物扩散影响出现短时严重污染,整体上污染物开始从东北向西南边消散边扩散.长三角地区(特别是中北部沿海城市)此次污染变化过程,充分体现出污染物输送是形成长三角地区重污染格局特征的重要影响因素.

4 结论(Conclusions)

1)长三角地区所有城市平均出现AQI超过200的重污染天气共8d,重污染频率为2.01%,且主要表现为PM_{2.5}颗粒物污染.大气重污染过程主要分布在1—3月以及10—12月,占全年的94.88%,且1月和12月最为频繁.长三角南、北部地区发生重污染天气的频次有着显著差异,总体上呈北高南低的特征,其中江苏省的徐州和常州市出现频率最高.

2)2015年长三角地区发生三次典型冬季重污染事件.1月9—11日在沿海地区出现由北至南迁移、并逐步得到缓解的“纬向扩散型”重污染天气;1月24—26日出现由内地向外迁移、污染范围和程度均逐渐增加的“经向扩散型”重污染天气;12月20—26日出现两种模式相结合的重污染天气.

3)长三角地区重污染天气主要受到风速风向和相对湿度的影响.重污染过程中主要为西北风向,并且天气形势较为静稳,风速较小、湿度较高以及逆温层形成导致污染物积累且不易扩散.同时,污染物输送也是形成长三角地区重污染格局特征的重要影响因素.后向轨迹结果表明,3次重污染过程

中长三角地区大气污染物的区域传输特征有着明显差异,但江苏北部均受到西北气流的影响.

参考文献(References):

- An X, Zhu T, Wang Z, *et al.* 2007. A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(12): 3103-3114
- 陈燕, 蒋维楣, 郭文利, 等. 2005. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J]. *环境科学学报*, 25(5): 700-710
- 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2016. 2014年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 37(6): 2041-2051
- Draxler R, Hess G. 1998. An overview of HYSPLIT-4 modeling system for trajectories dispersion and deposition [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 47(2): 295-308
- 方冬青, 魏永杰, 黄伟, 等. 2016. 北京市2014年10月重霾污染特征及有机碳来源解析[J]. *环境科学研究*, 29(1): 12-19
- Fu Q, Zhuang G, Wang J, *et al.* 2008. Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 42(9): 2023-2036
- 黄毅, 刘春琼, 谢志辉, 等. 2016. 基于后向轨迹模型的成都市典型灰霾期间PM_{2.5}演化的自组织分析[J]. *安全与环境学报*, 16(1): 313-319
- Ji D, Wang Y, Wang L, *et al.* 2012. Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 50: 338-348
- Ji D, Li L, Wang Y, *et al.* 2014. The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: Insights gained from observation [J]. *Atmospheric Environment*, 92: 546-556
- 李令军, 王英, 李金香, 等. 2012. 2000-2010北京大气重污染研究[J]. *中国环境科学*, 32(1): 23-30
- Pan X, Yan P, Tang J, *et al.* 2009. Observational study of influence of aerosol hygroscopic growth on scattering coefficient over rural area near Beijing mega-city [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 7519-7530
- 任阵海, 万本太, 虞统, 等. 2004. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J]. *环境科学研究*, 17(1): 7-13
- She Q, Peng X, Xu Q, *et al.* 2017. Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China [J]. *Ecological Indicators*, 75: 297-306
- 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 2016. 珠三角冬季PM_{2.5}重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 36(8): 2741-2751
- 王晓丽. 2015. 呼和浩特市2014年冬季AQI特点及重污染天气分析[J]. *内蒙古气候*, 5: 42-43
- 王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等. 2008. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. *环境科学研究*, 21(1): 22-29
- 王英, 李令军, 李成才. 2015. 北京大气能见度和消光特性变化规律及影响因素[J]. *中国环境科学*, 35(5): 1310-1318

- 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2015. 2014年10月上旬北京市大气重污染分析[J]. 中国环境科学, 35(6): 1654-1663
- 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2016. 2015年1月下旬北京市大气污染过程成因分析[J]. 环境科学学报, 36(7): 2324-2331
- Wang M, Cao C, Li G, *et al.* 2015. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 102: 112-121
- Wu D, Fung J, Yao T, *et al.* 2013. A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method [J]. Atmospheric Environment, 76: 147-161
- 夏冬, 涂建文, 陈均, 等. 2016. 珠三角地区2015年2月一次重污染天气污染物的时空分布特征[J]. 广东气象, 38(4): 12-16
- 许万智, 朱春涛, 陈仲榆, 等. 2015. 华北地区一次重污染天气的气象变化过程分析[J]. 中国环境监测, 31(6): 34-40
- 徐晓峰, 李青春, 张小玲. 2005. 北京一次局地重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技, 33(6): 543-547
- 张雅斌, 林琳, 吴其重, 等. 2016. “13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J]. 应用气象学报, 27(1): 35-46
- Zhao X, Zhao P, Xu J, *et al.* 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 13: 903-933
- Zheng G, Duan F, Su H, *et al.* 2015. Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(6): 2969-2983