

刘超,花丛,康志明,2017. 2014—2015 年上海地区冬夏季大气污染特征及其污染源分析[J]. 气象,43(7):823-830.

# 2014—2015 年上海地区冬夏季大气 污染特征及其污染源分析\*

刘 超<sup>1</sup> 花 丛<sup>1</sup> 康志明<sup>2</sup>

1 国家气象中心,北京 100081

2 江苏省气象台,南京 210008

**提 要:** 利用上海地区冬、夏季空气质量数据和常规地面观测数据,分析了 2014—2015 年冬、夏两季大气污染特征,并通过聚类分析法和后向轨迹模式对污染物输送路径进行统计分析。结果显示:上海市冬、夏两季空气质量均以优良为主,首要污染物分别以  $PM_{2.5}$  和  $O_3$ ;来自夏季的西北输送路径对应  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度最高,分别为  $62.8$  和  $130.2 \mu g \cdot m^{-3}$ ,来自冬季的西北和西南方向的输送路径对应  $PM_{2.5}$  浓度较高;进而基于潜在源区贡献和污染源排放强度等要素建立了传输指数。总体而言,江苏中南部、浙江中北部以及安徽中南部等地对上海地区夏季空气质量影响较为显著,而冬季周边区域的传输指数范围有所扩大,主要包括河北南部、河南中东部、山东、安徽、湖北中东部、江苏以及浙江中北部等地。

**关键词:** 污染特征,传输路径,源区贡献,传输指数

中图分类号: X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.07.006

## Characteristics of Air Pollution and Its Resources During Winter and Summer Seasons of 2014 and 2015 in Shanghai

LIU Chao<sup>1</sup> HUA Cong<sup>1</sup> KANG Zhiming<sup>2</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Jiangsu 210008

**Abstract:** In this paper, characteristics of air pollution during winter and summer seasons of 2014 and 2015 were analyzed by using the air quality data and the ground surface observation data of Shanghai, and pollution transport paths were analyzed by cluster analysis method and backward trajectory model as well. The results show that the air quality in Shanghai was good and primary pollutants were  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  respectively in winter and summer. The northwest transport path corresponding to the highest  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentrations, were  $62.8$  and  $130.2 \mu g \cdot m^{-3}$  respectively, and northwest and southwest transport paths corresponding to higher  $PM_{2.5}$  in winter. Then, the transport index was established by combination of potential source contribution function and pollution sources emission intensity and other factors. In general, the pollutants of southern and middle Jiangsu, northern and middle Zhejiang and southern and middle Anhui had great contribution to the quality of Shanghai in summer, while the transport index areas were expanded in winter, including southern Hebei, eastern and middle Henan, Shandong, Anhui, eastern and middle Hubei, Jiangsu and northern and middle Zhejiang.

**Key words:** pollution characteristics, transport path, source contribution, transport index

\* 气象预报预测业务与科研结合专项(CMAHX20160601)、科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0203301)、国家科技支撑计划项目(2014BAC16B02)和公益性行业(环保)科研专项(201509001)共同资助

2016 年 11 月 23 日收稿; 2017 年 5 月 19 日收修定稿

第一作者:刘超,主要从事环境气象预报. Email:liu\_chao0120@126.com

## 引 言

颗粒物是大气环境中的重要组成部分,通过对太阳辐射的散射和吸收作用影响着地气系统的能量收支平衡,同时对大气能见度以及人体健康产生重要的影响(周敏等,2013;吴兑等,2012)。高浓度大气颗粒物是当前中国东部城市群所面临最突出的大气污染问题。上海作为长三角城市群中重要核心城市之一,其快速发展导致的灰霾问题引起了广泛的关注(Qiao et al,2016),尤其是2013年1月,中国中东部地区连续遭遇多场大范围的灰霾天气,上海、南京等多个城市  $PM_{2.5}$  最大小时浓度超  $250 \mu g \cdot m^{-3}$  (安静宇等,2014)。

当前,关于上海污染物传输等问题开展了大量的研究。王茜(2013)对2010年12月至2011年11月上海大气污染的主要输送来源的研究表明,冬、春和秋季来自西北、西南等区域的大陆性气流对上海空气质量影响较为明显;李莉等(2015)对2013年12月上海地区4次重污染过程  $PM_{10}$  的潜在源区贡献差异分析表明,西北路径和北路径是典型污染事件中的主要输送通道,冬季影响上海的潜在源区主要分布于江苏、安徽、山东、河南以及河北等地。此外,Zhao et al(2015b)对2009年上海  $PM_{2.5}$  及其二次无机气溶胶、含碳组分的研究表明污染物输送路径来自西北方向,但随着上游地区  $SO_2$  减排等措施的实施,来自环渤海城市群的气团成为最主要的污染输送路径;Wang et al(2016b)针对上海2011年1月至2013年12月期间的主要潜在贡献源区和输送路径分析发现,来自长三角西部的气团对上海污染较为严重,而来自海上的气团正好相反;Zhao et al(2015a)利用因子分析法、潜在源区贡献分析法(potential source contribution function, PSCF)和浓度权重轨迹分析法(concentration-weighted trajectory, CWT)等方法对2011—2012年秋、冬季上海  $PM_{2.5}$  及其化学组分进行潜在源区贡献分析显示,秋、冬季来自环渤海地区和中国北方地区的长距离输送对上海空气质量有显著影响。

当前关于上海污染物传输问题的研究主要侧重于全年、单一季节或典型污染过程(赵倩彪等,2014; Xu et al,2015),针对上海不同季节污染物输送路径的对比分析仍鲜有报道。长三角地区相较于华北地区,其特殊的地理位置和气象条件以及污染

源排放也相应带来了特殊的大气环境问题,这就给空气质量预报服务带来一定困难。本论文针对上海冬、夏两季大气污染特征以及污染物传输路径进行分析,以期加深对华东地区大气污染发生、发展和消散过程的认识和理解,为探究上海大气污染成因和制定防控措施提供依据。

## 1 资料方法

### 1.1 数据来源

选取2014年6—8月和2015年6—8月作为夏季代表月份,2014年11月至2015年2月和2015年11月至2016年2月作为冬季代表月份。其中,所采用的上海10个国家控制站点(虹口、浦东新区、徐汇上师大等)的逐小时空气质量指数(air quality index, AQI)和六种污染物浓度数据,均来源于全国城市空气质量实时发布平台(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>);地面观测数据则来源于上海地面观测基本站(站号58362)的每日8次(每3h1次)MICAPS数据。污染物排放数据采用清华大学2012年排放清单,网格分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

### 1.2 研究方法

当前关于不同输送路径对目标城市大气污染物来源分析的研究较多(Wang et al,2016a),其中采用美国国家海洋大气研究中心(NOAA)开发的一款欧拉和拉格朗日混合型大气扩散模式 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)是一种可以直观了解大气中的气团或粒子运动轨迹的方法,所利用的气象数据初始场为美国 NCEP 全球资料同化系统 GDAS(Global Data Assimilation System)提供的  $1^\circ \times 1^\circ$  分析场资料。

由于轨迹聚类方法只能确定气团的来向和移动快慢,对于其可能来自的“污染源区”无法准确定位,而轨迹气团统计方法可以很好地解决该问题,其中 PSCF 方法通过结合气团轨迹和某种要素来确定潜在污染源的可能区域,是一种用来描述高于“某一评判标准”且基于条件概率函数对污染源可能发生位置进行判断的方法(Polissar et al, 2001; Squizzato and Masiol, 2015)。在 PSCF 计算过程中,假设某一种污染物从网格中排放到大气中,并随着气团

传输到受体点,气团在传输过程中无化学转化、大气清除等过程发生,而对于二次污染物(O<sub>3</sub>等),该方法也有较好的指示意义(Dimitriou and Kassomenos,2015)。

## 2 结果分析

### 2.1 大气污染特征

对上海冬、夏两季 6 种污染物浓度进行统计(表 1 和图 1)分析表明:上海夏季各类大气污染物

均处于较低的浓度水平,空气质量以优良为主,轻度污染和重度污染天数占比分别为 13.0%和 8.7%。由于夏季光照强度大,日照时间长,为大气中各种气态前体物(NO<sub>x</sub>、VOCs)发生光化学作用而生成 O<sub>3</sub> 提供了充足的光照反应条件,使得 O<sub>3</sub> 成为夏季首要污染物(占总时次的 45.2%),最大 8 h 平均浓度为 120.9 μg·m<sup>-3</sup>。根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)(中华人民共和国环境保护部,2012a),夏季大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 平均质量浓度分别为 41.4 和 53.4 μg·m<sup>-3</sup>,空气质量分指数水平为良。冬季,在大气污染扩散条件转差与周边污染源

表 1 上海冬、夏两季污染物浓度

Table 1 The concentration of pollutants during winter and summer seasons in Shanghai

季节	月份	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub> 8 h 最大	总样本天数/d
夏季	6	43.7	55.9	11.4	36.4	0.71	121.1	184
	7	42.1	53.6	11.4	31.5	0.67	120.3	
	8	38.7	50.8	12.3	31.6	0.73	121.1	
	均值	41.4	53.4	11.7	33.1	0.70	120.9	
冬季	11	54.4	66.6	17.1	55.4	0.93	73.4	241
	12	76.7	104.1	30.3	68.9	1.13	48.5	
	1	75.6	93.8	26.6	60.4	1.06	61.6	
	2	58.8	77.8	20.1	45.1	0.88	87.7	
	均值	66.7	85.9	23.6	57.8	1.01	67.3	

注: CO 单位为 mg·m<sup>-3</sup>,其他污染物单位均为 μg·m<sup>-3</sup>。  
Note: CO unit is mg·m<sup>-3</sup>, other pollutants units are μg·m<sup>-3</sup>.

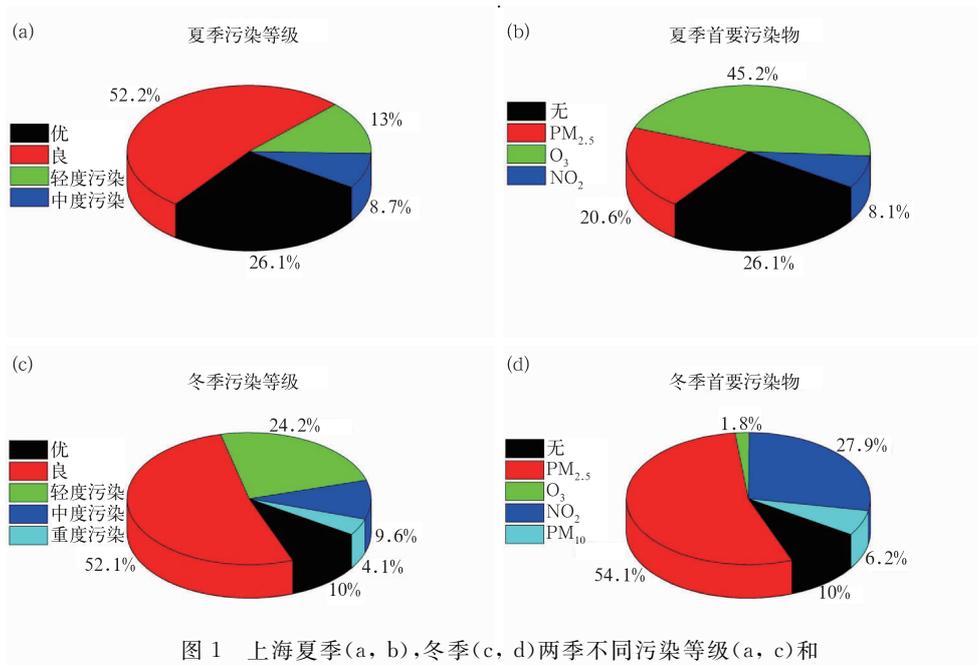


图 1 上海夏季(a, b),冬季(c, d)两季不同污染等级(a, c)和首要污染物(b, d)所占比例

Fig. 1 The air pollution level (a, c) and primary pollutants (b, d) during summer (a, b) and winter (c, d) seasons in Shanghai

排放强度增加的两者共同作用下,轻度污染以上级别所占比例(37.9%)较夏季明显增加,且有 4.1%的天数为重度污染。首要污染物为  $\text{PM}_{2.5}$  (54.1%),其次是  $\text{NO}_2$  (27.9%)。除  $\text{O}_3$  外,上海冬季各类污染物浓度较夏季明显升高, $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度分别增长 61.1%和 60.9%,达到 66.7 和  $85.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于冬季光照时间和强度明显低于夏季, $\text{O}_3$  最大 8 h 平均浓度下降为  $67.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此外,随着冬季主要大气污染物排放量的明显增加,一次污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  及  $\text{CO}$  浓度较夏季明显升高,分别为  $23.6$ 、 $57.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.01 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

## 2.2 输送路径

采用气团后向轨迹统计 TrajStat 软件,对污染物输送路径、PSCF 值进行聚类分析和计算。以上海( $31.2^\circ\text{N}$ 、 $121.43^\circ\text{E}$ )为受体点,确定受体点 500 m 高度处气流作为研究高度,这主要是由于 500 m 的风场既可以反映近地层的气团输送特征,又可以减少地表摩擦对气团的影响(李莉等,2015)。分别对上海地区 2014 和 2015 年冬、夏两季每天 00、06、12 和 18 时(世界时)4 个时刻进行后向轨迹模拟计算,每条轨迹模拟时长为 48 h,时间分辨率为 1 h。同时,基于上海地区夏季( $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$ )、冬季( $\text{PM}_{2.5}$ ) 两个季节污染物质量浓度数据,采用 K 均值聚类算法对轨迹路径进行聚类分析,得到冬、夏两季上海地区主要污染物输送路径及对应的污染物浓度。

结果表明(图 2a),夏季影响上海地区的主要输送路径共 4 条,在来自海上的清洁气团的作用下,东北和东南输送路径对应的  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  浓度在所有输送路径中较低,为典型的清洁路径,其中东北部输送路径只有  $32.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 和  $66.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

( $\text{O}_3$ ) (表 2)。尽管来自内陆的西部输送路径频率最低(14.9%),但其对应  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  浓度在 4 条输送路径中最高,分别为 62.8 和  $130.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为典型污染输送路径。西北部输送路径主要经过安徽、江苏南部等地区,由于这些地区污染物排放量较大,在传输作用下影响上海地区的空气质量。结合上海周边地区 VOCs 以及  $\text{NO}_x$  的排放清单(图略)可以看出,江苏南部、安徽中南部以及浙江北部的 VOCs 和  $\text{NO}_x$  排放量大,由于 VOCs 和  $\text{NO}_x$  是  $\text{O}_3$  的前体物,途经上述区域的西北部和西南部的输送路径  $\text{O}_3$  浓度较东部输送明显偏高。但是,究竟是 VOCs 还是  $\text{NO}_x$  使得  $\text{O}_3$  成为上海地区首要污染物,仍需要通过更多手段进行分析研究,如数值模拟、来源解析以及敏感性分析等。

对于冬季而言(图 2b),来自西北方向和西南方向的轨迹输送路径对应  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高,其中西北方向近距离、远距离输送路径  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分别为 90.9 和  $68.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其中西北近距离输送的研究结果与 Wang et al(2015)对上海地区冬季研究结果相一致,主要经过河北、河南、安徽等高污染源排放地区;西南输送路径主要经过浙江北部等地高污染排放区,造成上海地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度偏高。

## 2.3 污染源分析

### 2.3.1 潜在源区贡献

研究根据后向轨迹出现范围,将研究区域设置为  $20^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ 、 $105^\circ \sim 135^\circ\text{E}$ 。考虑到 GDAS 数据为  $1^\circ \times 1^\circ$  分析场资料,故利用插值算法对 GDAS 数据进行插值,使之与源清单匹配,将每个网格格距设定为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。结合《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ633-2012)(中华人民共和国环境保护部,2012b),将  $\text{PM}_{2.5}$  二级标准浓度 ( $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

表 2 上海冬、夏两季输送路径出现频率和方位及  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  贡献浓度  
Table 2 The frequency and direction of transport paths and concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{O}_3$  during winter and summer season in Shanghai

季节	聚类数	频率/%	方位	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{O}_3$ 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
夏季	1	24.2	东南	39.1	86.2
	2	42.7	东北	32.5	66.1
	3	14.9	西北	62.8	130.2
	4	18.2	西南	49.1	118.7
冬季	1	23.2	西北 1	90.9	—
	2	26.9	西北 2	68.3	—
	3	36.0	北	49.7	—
	4	13.9	西南	75.3	—

注:1 为近距离输送,2 为远距离输送。

Note: 1 represents short distance transportation, 2 represents long distance transportation.

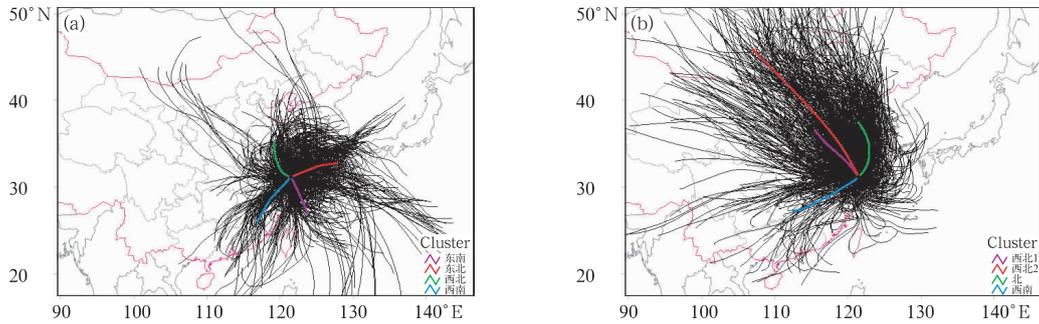


图 2 上海夏季(a)和冬季(b)轨迹聚类分析结果

Fig. 2 Trajectory clustering in summer (a) and winter (b) in Shanghai

作为“评判标准”，并根据式(1)计算每个网格的 PSCF 值。由于较低的  $n_{ij}$  可能会使网格具有较高的 PSCF 值，为了避免网格具有较大的不确定性，根据每个网格的节点数引入 PSCF 权重系数进行分析，当某个网格的节点数低于所有网格的平均节点数  $n_{ave}$  的 3 倍时(Cheng et al, 2011; Wang et al, 2015)，采取式(2)计算权重系数。

$$PSCF(i, j) = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} W(i, j) \tag{1}$$

$$W(i, j) = \begin{cases} 1.00, & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70, & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.40, & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.10, & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \tag{2}$$

式中,  $n_{ij}$  为所有轨迹在某一网格  $(i, j)$  中的节点数或停留时间之和,  $m_{ij}$  为大于某一特定“评判标准”并经过相同网格  $(i, j)$  的所有轨迹节点数或停留时间之和, 在此  $n_{ave}$  为 1.8。

由图 3a 可以看出, 影响上海夏季  $PM_{2.5}$  的高 PSCF 值主要分布于安徽中南部、江苏南部以及浙江北部等地, 这些地区 PSCF 值均在 0.5 以上。由轨迹聚类分析可知, 经过西部内陆区域的聚类轨迹(轨迹 3 和轨迹 4)对应较高  $PM_{2.5}$  浓度, 来自该方向的聚类轨迹移动速度较慢且停留时间较长, 经过污染源排放量较大的区域, 因此夏季途经上述区域的气团加剧了上海  $PM_{2.5}$  污染。对于冬季而言(图 3b), PSCF 值分布呈现出分布区域广、强度大的特点, 河北南部、河南大部、山东、安徽、湖北中东部、江苏以及浙江大部等地的 PSCF 值均在 0.5 以上, 其中湖北中东部、江苏南部、安徽南部、浙江中北部以及山东南部等地 PSCF 值超过 0.7, 个别地区达到 0.9 以上。结合冬季轨迹聚类分析结果, 造成上述区域 PSCF 值较高的主要影响路径分别为西北和西南输送路径。通过对比可以发现, 夏季上海主要受周边地区污染物影响, 冬季在大陆气团的影响下, 北方远距离污染源区对上海的影响明显加强。

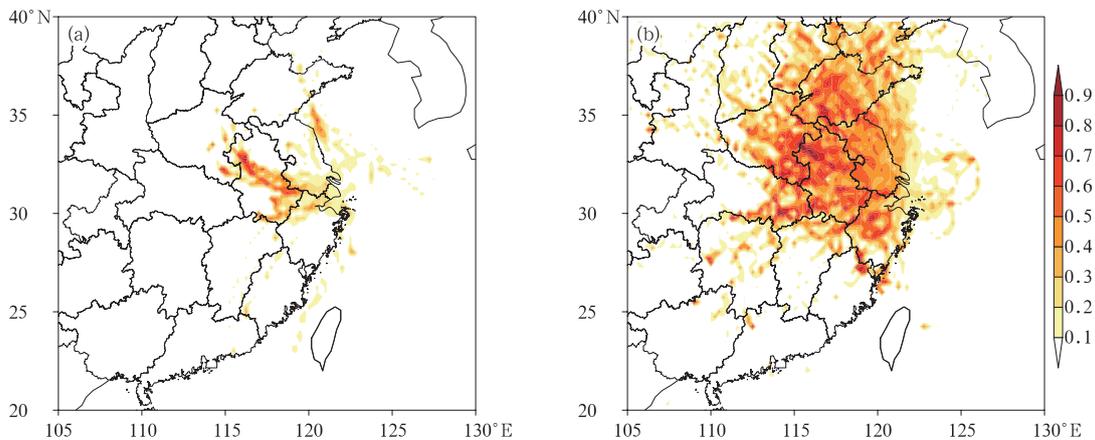


图 3 上海夏季(a)和冬季(b)  $PM_{2.5}$  PSCF 值分布

Fig. 3 The value of PSCF in summer (a) and winter (b) in Shanghai

### 2.3.2 实际污染源贡献

研究表明(吴烈善等, 2015),  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NO}_3^-$  的比值关系是否大于 1 可用于定性判断固定源或移动源的贡献相对大小, 也常用该比值来衡量外来源和本地源的贡献大小。若该比值  $> 1$ , 则称固定源或外来源占据主导; 若该比值  $< 1$ , 则反映出该区域主要受移动源或本地源的控制。因此, 利用  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的气态前体物  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的比值关系评估固定源(外来源)和移动源(本地源)对上海大气环境的排放影响大小。由上海冬、夏两季  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  比值可知(图 4), 2014 和 2015 年冬、夏两季  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  的比值平均值均低于 1, 其平均值分别为 0.35(2014 年夏季)、0.40(2015 年夏季)、0.44(2014 年冬季)和 0.42(2015 年冬季), 表明上海冬、夏两季均主要受本地源(移动源)影响, 其中冬季平均值相较于夏季平均值(略有升高, 反映出冬季外来源占比有所增多)。从污染源排放强度变化来看, 尽管上海处于非供暖燃煤区, 但冬季北方周边区域供暖燃煤量加大, 在上海本地  $\text{SO}_2$  排放量一定的情况下, 受上游区域(河北、山东、河南等地)污染物传输影响, 容易导致本地大气环境中  $\text{SO}_2$  浓度相较于夏季明显增高, 造成冬季该比值略高于夏季的情况。此外, 结合传输

路径分析可知(2.2 节), 冬季来自大陆的传输路径占 64.0%, 明显高于夏季的 33.1%, 与外来源比例明显升高的结论相一致。

### 2.4 污染物传输指数

为分析传输作用的影响, 王爱平等(2014)利用轨迹聚类方法对 2011 年 6—8 月黄山光明顶的气团进行聚类分析, 得到不同输送路径与黄山光明顶积聚模态颗粒物数浓度的关系; 花丛等(2016)基于上述方法, 构建了一种可以客观反映污染物输送强度的指数——传输指数, 并将 PSCF 结果与之相结合, 对北京地区 2013—2014 冬半年重污染天气传输指数进行了分析, 研究发现传输指数与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的演变规律具有较好的一致性。本研究基于上述方法采用 2012 年清华大学全国污染源排放清单, 建立了上海地区冬、夏两季的传输指数:

$$T_l(i, j) = R_l(i, j) \cdot E(i, j) \cdot W_d(i, j) \cdot W_t(i, j) \cdot PSCF \quad (3)$$

式中,  $T$  为传输强度函数,  $R$  为输送概率函数,  $E$  为污染物排放强度,  $W_d$  为距离权重函数,  $W_t$  为时间权重函数,  $PSCF$  为潜在源贡献因子。

传输指数的大小可以反映输送能力的空间分布

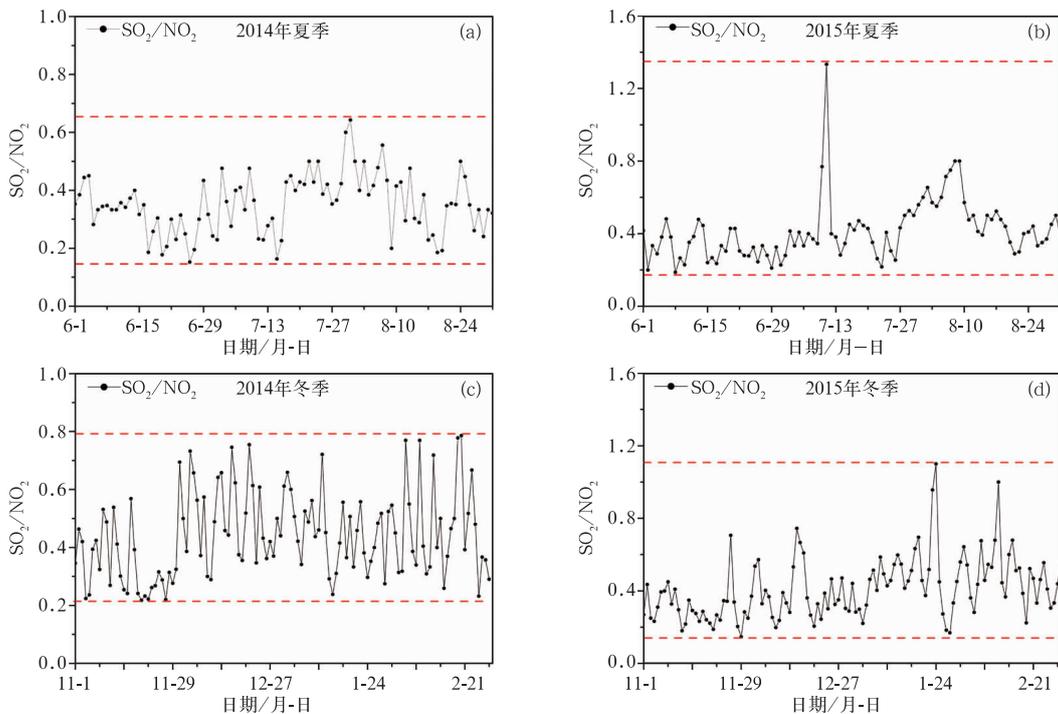


图 4 2014 年(a, c)和 2015 年(b, d)上海夏季(a, b)和冬季(c, d)  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  变化  
Fig. 4 The ratio of  $\text{SO}_2$  to  $\text{NO}_2$  during summer (a, b) and winter (c, d) seasons in Shanghai in the 2014 (a, c) and 2015 (b, d)

情况,通过对上海的污染物传输指数分布进行分析发现:夏季江苏中南部、浙江中北部以及安徽中南部等地的传输指数 $>1$ (图5a),说明上述地区的污染物可通过区域传输作用对上海地区空气质量产生显著的影响,由于江苏南部、安徽中部以及浙江北部为经济发达的工业区,PM<sub>2.5</sub>排放量较大,经过上述区域的气团携带高浓度PM<sub>2.5</sub>向上海地区输送,传输作用较为明显。冬季(图5b),影响上海的传输指数

强度和范围均有所增大,表明来自河北南部、河南中东部、山东、安徽、湖北中东部、江苏以及浙江中北部等地的气团均可对上海形成污染物的有效输送。其中,来自京津冀及周边高污染区的气团在偏北气流的作用下,对上海的影响不可忽视。这与轨迹分析研究结果相符合,也进一步说明冬季需加大联防联控范围和强度,才能有效减少上海及周边地区的大气污染事件。

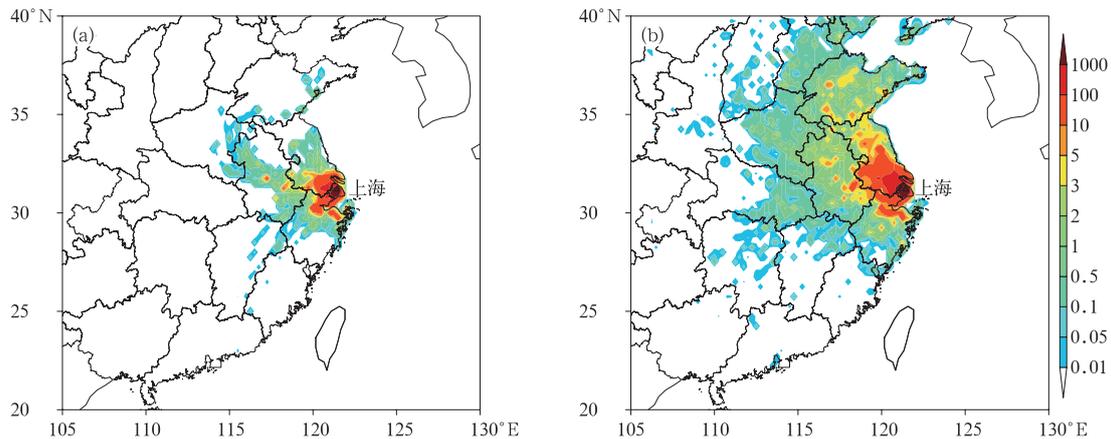


图5 上海夏季(a)和冬季(b)PM<sub>2.5</sub>传输指数分布

Fig. 5 The transport index of PM<sub>2.5</sub> in summer (a) and winter (b) in Shanghai

### 3 结论

本文利用上海地区冬、夏季空气质量数据和常规地面观测数据,分析了2014—2015年冬、夏两季大气污染特征,并通过聚类分析法和后向轨迹模式对污染物输送路径进行统计分析,主要结论如下:

(1) 上海市2014、2015年夏季首要污染物均以O<sub>3</sub>为主,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度分别为41.4和53.4 μg·m<sup>-3</sup>;而冬季首要污染物则以PM<sub>2.5</sub>为主,其中PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度较夏季分别升高了61.1%和60.9%,其他污染物浓度均不同程度的增加。

(2) 冬、夏两季SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>的比值均低于1,介于0.35~0.44,以本地源(移动源)污染为主。

(3) 夏季影响上海的西北输送路径为主要污染路径,其对应PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度最高,分别为62.8和130.2 μg·m<sup>-3</sup>;对于冬季而言,来自西北方向和西南方向的轨迹输送路径对应PM<sub>2.5</sub>浓度较高,其中西北方向短距离输送路径PM<sub>2.5</sub>浓度最高,为90.9 μg·m<sup>-3</sup>。

(4) 夏季江苏中南部、浙江中北部以及安徽中南部等地对上海的传输影响较为明显;冬季传输指数范围明显扩大,主要包括河北南部、河南中东部、山东、安徽、湖北中东部、江苏以及浙江中北部等地区,偏北气流对污染物的输送作用明显加强。

### 参考文献

- 安静宇,李莉,黄成,等,2014. 2013年1月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. 环境科学学报,34(10):2635-2644.
- 花丛,张恒德,张碧辉,2016. 2013—2014冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建[J]. 气象,42(3):314-321.
- 李莉,蔡盛琳,周敏,2015. 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学,36(7):2327-2336.
- 王爱平,朱彬,银燕,等,2014. 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,34(4):852-861.
- 王茜,2013. 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,26(4):357-363.
- 吴兑,廖碧婷,吴晟,等,2012. 2010年广州亚运会期间灰霾天气分析[J]. 环境科学学报,32(3):521-527.
- 吴烈善,孔德超,孙康,等,2015. 香河夏季PM<sub>2.5</sub>水溶性无机离子组分特征[J]. 中国环境科学,35(10):2925-2933.

- 赵倩彪,胡鸣,张懿华,2014. 利用后向轨迹模式研究上海市  $PM_{2.5}$  来源分布及传输特征[J]. 环境监测管理与技术,26(4):21-26.
- 周敏,陈长虹,乔利平,等,2013. 2013年1月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报,33(11):3118-3126.
- 中华人民共和国环境保护部,2012a. 环境空气质量标准:GB3095—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国环境保护部,2012b. 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行):HJ633—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社.
- Cheng Shuhui, Yang Lingxiao, Zhou Xuehua, et al, 2011. Evaluating  $PM_{2.5}$  ionic components and source apportionment in Jinan, China from 2004 to 2008 using trajectory statistical methods [J]. *J Environ Monit*,13(6):1662-1671.
- Dimitriou K, Kassomenos P, 2015. Three year study of tropospheric ozone with back trajectories at a metropolitan and a medium scale urban area in Greece[J]. *Sci Total Environ*,502:493-501.
- Polissar A V, Hopke P K, Poirot R L, 2001. Atmospheric aerosol over Vermont: chemical composition and sources[J]. *Environ Sci Technol*,35(23):4604-4621.
- Qiao Ting, Zhao Mengfei, Xiu Guangli, et al, 2016. Simultaneous monitoring and compositions analysis of  $PM_1$  and  $PM_{2.5}$  in Shanghai: implications for characterization of haze pollution and source apportionment[J]. *Sci Total Environ*,557/558:386-394.
- Squizzato S, Masiol M, 2015. Application of meteorology-based methods to determine local and external contributions to particulate matter pollution: a case study in Venice (Italy)[J]. *Atmos Environ*,119:69-81.
- Wang Fujiang, Chen Ying, Meng Xi, et al, 2016a. The contribution of anthropogenic sources to the aerosols over East China Sea [J]. *Atmos Environ*,127(5):22-33.
- Wang H L, Qiao Liping, Lou Shengrong, et al, 2016b. Chemical composition of  $PM_{2.5}$  and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China[J]. *J Clean Prod*,112:1302-1311.
- Wang Lili, Liu Zirui, Sun Yang, et al, 2015. Long-range transport and regional sources of  $PM_{2.5}$  in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010[J]. *Atmos Res*,157:37-48.
- Xu Jianming, Yan Fengxia, Xie Ying, et al, 2015. Impact of meteorological conditions on a nine-day particulate matter pollution event observed in December 2013, Shanghai, China[J]. *Partic-uology*,20(3):69-79.
- Zhao Mengfei, Huang Zhongsi, Qiao Ting, et al, 2015a. Chemical characterization, the transport pathways and potential sources of  $PM_{2.5}$  in Shanghai: seasonal variations[J]. *Atmos Res*,158/159:66-78.
- Zhao Mengfei, Qiao Ting, Huang Zhongsi, et al, 2015b. Comparison of ionic and carbonaceous compositions of  $PM_{2.5}$  in 2009 and 2012 in Shanghai, China[J]. *Sci Total Environ*,536:695-703.