

陈镭,周广强,毛卓成,等,2020. 上海地区 2017 年三次短时重度污染过程变化特征及其气象影响因素[J]. 气象,46(5):675-686. Chen L,Zhou G Q,Mao Z C, et al,2020. Variation characteristics and meteorological impact factors of three short-time severe air pollutions in Shanghai in 2017[J]. Meteor Mon,46(5):675-686(in Chinese).

上海地区 2017 年三次短时重度污染过程变化特征及其气象影响因素*

陈 镭^{1,2} 周广强^{1,2} 毛卓成^{1,2} 瞿元昊^{1,2}

1 长三角环境气象预报预警中心,上海 200030

2 上海市气象与健康重点实验室,上海 200030

提 要: 2017 年 10 月 29 日、11 月 2—3 日和 7—8 日上海地区出现了三次 PM_{2.5} 短时重度污染过程,根据环流形势可以将其分为两种污染类型:10 月 29 日为输送型污染,具有污染输送过程快,污染持续时间短的特点;11 月 2—3 日和 7—8 日为静稳叠加输送型污染,具有污染输送过程较慢,污染持续时间长的特点。分析这三次污染过程的气象要素特征可知,小的风速、稳定的垂直结构及下沉运动使得污染物在水平和垂直方向上都不易扩散出去,为污染物的积聚和污染的长时间维持创造了有利条件。另外,分析北京—上海一线 PM_{2.5} 浓度、地面气象要素和垂直环流的剖面图发现,10 月 29 日污染带自北向南呈窄带状分布,中低空和近地面对上海的污染输送都有贡献;11 月的两次污染过程污染自北向南持续时间较长,分布范围较广,对上海的污染输送以近地面传输为主。计算三次污染过程的静稳指数和输送指数,进一步验证了 10 月 29 日的重度污染由外源输送造成,而 11 月的两次污染则由本地积累和外源输送叠加造成。应用 FLEXPART 扩散模式和华东区域大气环境数值预报系统对 11 月的两次污染过程进行定量分析,得到与观测数据分析一致的结论,同时发现这两次污染过程的潜在来源区域均为上海周边地区,来源集中,且江苏、浙江和安徽都有贡献。

关键词: 空气污染,气象要素,PM_{2.5},输送,静稳

中图分类号: P49,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.008

Variation Characteristics and Meteorological Impact Factors of Three Short-Time Severe Air Pollutions in Shanghai in 2017

CHEN Lei^{1,2} ZHOU Guangqiang^{1,2} MAO Zhuocheng^{1,2} QU Yuanhao^{1,2}

1 Yangtze River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Shanghai 200030

2 Shanghai Key Laboratory of Meteorology and Health, Shanghai 200030

Abstract: Three serious PM_{2.5} pollution events which occurred in Shanghai on 29 October, 2—3 November and 7—8 November 2017 were investigated. They can be divided into two pollution types according to atmospheric circulation as follows. The pollution event on October 29 was transport pollution which features fast transportation and short period of pollution; the other two are static stability superimposed transport pollution which features slow transportation and long duration. By analyzing the weather conditions of the three pollution events, we found that the low wind speed, stable vertical stratification and descending motion made air pollutants difficult to disperse. The cross-sections of the PM_{2.5} concentration, surface meteorological elements and vertical circulation from Beijing to Shanghai showed that the pollution belt was distributed in a narrow strip from north to south on October 29, and the wind which was in the mid-low level

* 国家自然科学基金重点项目(91644223)和上海市科委扬帆计划项目(18YF1421200)共同资助

2018 年 12 月 23 日收稿; 2019 年 12 月 27 日收修定稿

第一作者:陈镭,主要从事环境气象预报业务和技术研究. Email:yuhuashi19840414@163.com

and the near surface layer contributed to the pollution transport in Shanghai; the two pollution events in November had longer durations and wider ranges, and the pollution transport channel of Shanghai was the near surface layer. Calculating the stable weather index and the transport intensity index of the three pollution events were also carried out to prove that the pollution on October 29 was caused by transportation and the other two were caused by the local accumulation and transportation. By using the FLEXPART model and the Regional Atmospheric Environmental Modeling System for Eastern China (RAEMS). It was found that the potential sources of the two pollution processes in November were all around Shanghai, and the sources were concentrated, with contributions from Jiangsu, Zhejiang, and Anhui.

Key words: air pollution, meteorological element, $PM_{2.5}$, transport, static stability

引 言

空气质量与人们的健康和生活息息相关,空气污染会导致人群呼吸系统和心脑血管疾病发病率增加(张莹等,2014;郑山等,2012;胡伟等,2000;Englert,2004),严重危害人体健康(Brook et al,2010;Hu et al,2013;Dong et al,2013),是近年来公众关注的焦点问题。环境空气质量除了与局地污染源有关外,还与局地气象要素及气候变化息息相关(孙家仁等,2011)。已有研究表明(张裕芬等,2006;王淑云等,2006),在相同的污染源排放作用下,气象条件对空气质量的变化起主导作用。因此,研究空气质量与气象要素的关系,探讨其对空气质量的潜在影响,对我国减污治污具有一定的指导作用。近年来,许多学者在这方面做了研究,孙家仁等(2011)回顾了国内外气候变化对环境空气质量影响的相关研究成果,结果表明气候变化可以通过改变地面气温、边界层高度、天气系统出现频率、大气环流形势等,进而改变污染物的自然源排放、扩散速度、传输方式;气候变化不仅影响室外空气质量,也影响室内空气质量。周兆媛等(2014)、侯梦玲等(2017)、杨兴川等(2017)在分析京津冀地区空气质量与气象因素的关系时发现,京津冀地区的空气质量与气压、气温、相对湿度、风速及边界层高度关系密切。赵晨曦等(2014)、毛婉柳等(2017)也研究发现风速、相对湿度、降水量是影响 $PM_{2.5}$ 浓度的重要气象因素。不少学者(夏思佳等,2013;于兴娜等,2015;康娜等,2017;王继康等,2017)研究南京地区秋、冬季污染天气时发现,空气污染主要发生在相对稳定的天气条件下,稳定的大气层结,地面微风、静风环境使得大气污染物在沉降和扩散方面都受到阻碍,有利于污染天气的发生发展。郭蕊等(2016)、杨旭等(2017)、袁东敏和马小会(2017)研究河北地区、京津冀地区、

华北黄淮地区冬半年空气污染天气也得到类似的结论。另外,在风场对大气污染物的输送作用方面,王艳等(2008a;2008b)做了一系列详细的研究,研究表明:长三角地区风场具有显著季节性变化,不同季节该地区 500 m 高度层及近地面层的输送气流的来源不同,而长三角地区对外界的中尺度污染传输主要受东亚季风活动的影响,其中冬季季风是长三角污染物向华南和西太平洋地区传输的一个主要机制。

上海地处我国东部,长江入海口,是一个经济发达、人口稠密的超大型城市,其环境空气质量的变化与人们的生活密切相关,历来备受关注。国内已有众多学者进行了相关研究(王璟等,2008;张国琰等,2010;陈敏等,2013;陈镭等,2016;刘超等,2017),分析表明地面风向、风速、大气层结条件等气象要素对空气质量有重要的影响。本文利用常规气象资料、NCEP 每 6 h 一次的 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料和 $PM_{2.5}$ 浓度数据对比分析 2017 年上海地区三次短时重度污染过程及其气象要素特征,并应用 FLEXPART 扩散模式和华东区域大气环境数值预报系统对污染过程的 $PM_{2.5}$ 来源进行定量分析,为上海地区空气污染的成因和来源,及污染的预报和防控提供一定的参考依据。

1 资料与方法

本文采用的 $PM_{2.5}$ 浓度资料来自上海市环境监测中心的 10 个环境空气质量自动监测国控点位(图 1,青浦淀山湖为对比点)的每小时浓度资料,这 10 个站点中有 7 个分布在市区,3 个位于市区边缘,监测资料具有一定的代表性。上海地区 $PM_{2.5}$ 状况用空气质量分指数(individual air quality index, IAQI)做定量描述,该指数是无量纲量, $PM_{2.5}$ 浓度和分指数的换算参照环境保护部(2016)制定的《环境空气

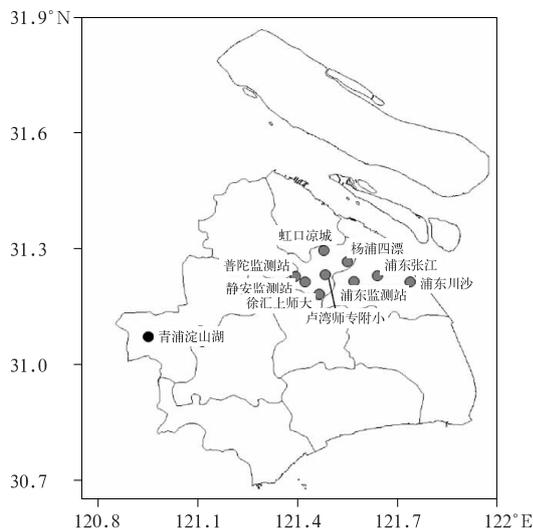


图 1 上海市环境监测中心自动监测点分布示意
Fig. 1 Sketch map of the automatic observation stations in Shanghai

质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ633—2012》中的公式及相应浓度限值计算。此外,文中还使用了常规气象观测资料、NCEP 每 6 h 一次的 FNL 1°×1°再分析资料。

2 三次污染过程概述

2017 年 10 月 29 日、11 月 2—3 日和 7—8 日上海地区均出现了 PM_{2.5} 短时重度污染,其中 11 月 3 日和 7—8 日 PM_{2.5} 的日 IAQI 均达到轻度污染级别,10 月 29 日和 11 月 2 日没有达到污染级别。

图 2 给出三次污染过程上海地区的 PM_{2.5} 小时质量浓度时序,对比来看,10 月 29 日的污染过程 PM_{2.5} 浓度具有“骤升骤降”的特点:29 日 10 时 PM_{2.5} 浓度从良等级迅速上升至中度污染级别,11—12 时

达到重度污染,13 时 PM_{2.5} 浓度开始下降,整个污染过程仅维持了 4 h,其中重度污染持续了 2 h;11 月 2—3 日污染过程 PM_{2.5} 浓度出现了两个峰值:2 日 20 时 PM_{2.5} 浓度先小幅上升至轻度污染级别,半夜后浓度回落至良等级,至 3 日 04 时才再次回升到轻度污染,并出现了迅速上升的过程,两个浓度峰值分别出现在 3 日 10 时和 15 时,15 时之后 PM_{2.5} 浓度迅速下降,3 日整个污染过程持续了 14 h,其中重度污染持续了 3 h;11 月 7—8 日上海地区连续 2 d 出现轻度污染,从 PM_{2.5} 浓度变化来看,这两天 PM_{2.5} 浓度是一个持续攀升的过程,没有出现“骤升”的现象,主要有 3 个浓度峰值,且峰值浓度一次高于一次,最高的峰值出现在 8 日 09 时,达到重度污染级别,10 时以后 PM_{2.5} 浓度迅速下降,整个污染过程从 7 日 09 时开始,共持续了 30 h,其中重度污染持续了 6 h。

总体来看,11 月 7—8 日污染持续时间最长,共维持了 30 h,10 月 29 日污染持续时间最短,仅出现了 4 h;从 PM_{2.5} 浓度变化来看,10 月 29 日和 11 月 3 日浓度上升迅速,升幅明显,尤其是 10 月 29 日仅用 2 h 就从良等级升至重度污染,而 11 月 7—8 日则没有出现“骤升”现象,PM_{2.5} 浓度是逐渐上升的;从 PM_{2.5} 污染峰值来看,三次过程均达到重度污染级别,其中 11 月 3 日峰值质量浓度最高,达 175.6 μg·m⁻³,10 月 29 日次之,但 11 月 7—8 日重度污染维持时间最长,达 6 h。

3 天气形势概述

图 3 给出三次污染过程的海平面气压场和地面风场,根据环流形势,可以将三次污染过程分为输送

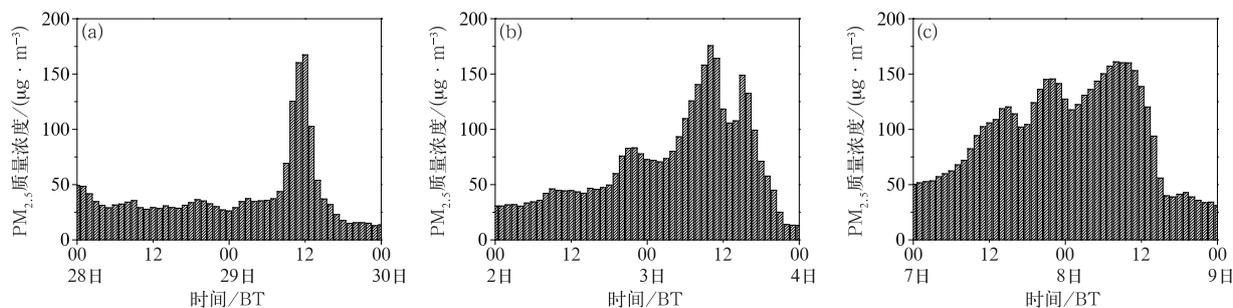


图 2 2017 年上海地区三次污染过程 PM_{2.5} 小时质量浓度时间序列
(a)10 月 28—29 日,(b)11 月 2—3 日,(c)11 月 7—8 日

Fig. 2 Time series of hourly mass concentration of PM_{2.5} in Shanghai during the three pollution events in 28—29 October (a), 2—3 November (b) and 7—8 November (c) 2017

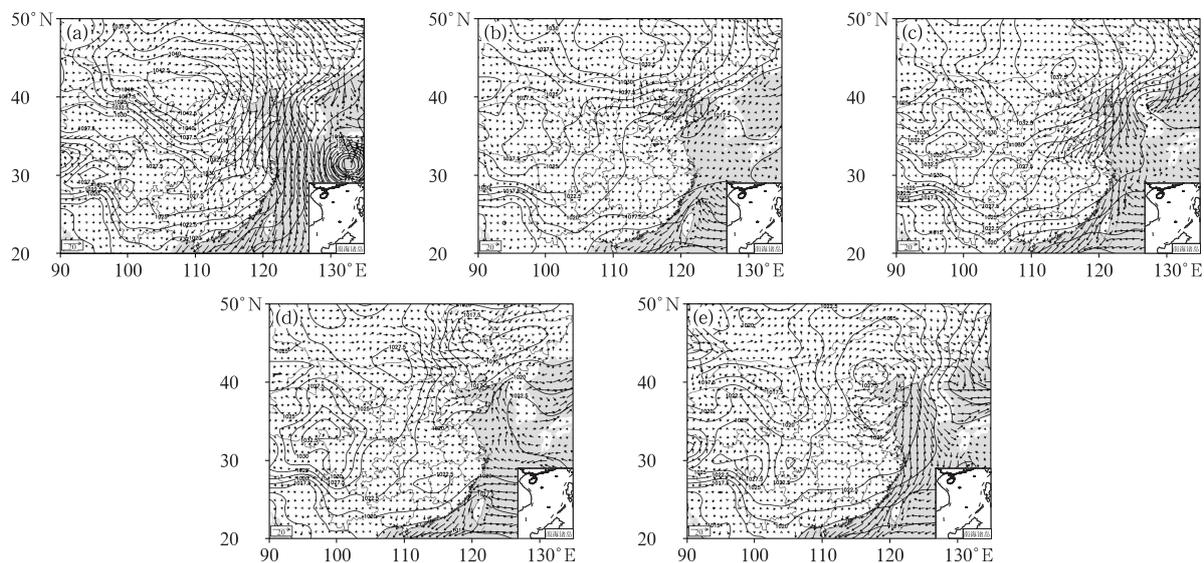


图 3 2017 年上海地区三次污染过程的海平面气压场(等值线,单位:hPa)和地面风场(箭矢)

(a)10月29日08时,(b)11月2日20时,(c)11月3日08时,(d)11月7日08时,(e)11月8日08时

Fig. 3 The sea-level pressures (contour, unit: hPa) and wind fields (arrow) of the three pollution events in 2017

(a) 08:00 BT 29 October, (b) 20:00 BT 2 November, (c) 08:00 BT 3 November,

(d) 08:00 BT 7 November, (e) 08:00 BT 8 November

型污染和静稳叠加输送型污染,其中10月29日为输送型污染,前期没有天气静稳时段,污染主要是由冷空气输送造成,如图3a所示,29日08时上海地区受冷空气影响,其北部为冷高压控制,高压中心位于内蒙古西部,扩散南下的冷空气将上游污染物输送至上海地区,容易造成短时高浓度的污染,但由于受冷空气影响时,地面风力会有明显增大过程,污染物容易被迅速扩散,因此冷空气输送虽然会造成污染,但不利于污染物的长期维持,因此29日白天 $PM_{2.5}$ 浓度出现了“骤升骤降”的现象,整个污染过程仅持续了4h,具有污染输送过程快,污染持续时间短的特点。

11月2—3日和7—8日为静稳叠加输送型污染,前期有天气静稳时段,后期有冷空气扩散南下,具有污染输送过程较慢,污染持续时间长的特点。具体来看,11月2日夜间(图3b)和7日(图3d)华东中北部地区为鞍型场控制,属于天气静稳时段,气压场比较稳定,不利于污染物的水平扩散,有利于污染物在本地积累,对应这一时段, $PM_{2.5}$ 浓度有一个上升的过程;11月3日和8日属于后期的冷空气扩散南下时段,从图3c和3e可以看到,在上海地区北部均有冷高压存在,高压中心位置分别位于内蒙古中部和河北北部,受其影响,华东中北部地区的风向均转至北向,风力均开始增大,如前文所述,冷空气扩散虽然会将北方污染物输送至上海本地造成污

染,但却不利于污染物的长期维持,因此11月的两次污染过程虽然 $PM_{2.5}$ 浓度都在冷空气影响时段达到重度污染,但是冷空气也结束了这两次污染过程。

4 重污染过程机理分析

如前所述,三次污染过程都出现了短时重度污染,但每次过程的演变情况均有所不同,下文将对此进行重点探讨。

4.1 地面气象要素分析

图4给出三次污染过程徐家汇观测站的整点2min平均风向、风速,对比来看,10月29日污染过程的风速整体较大,不利于污染物的本地积累;而另外两次污染过程都存在小风时段,平均风速不超过 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中11月2—3日静风时段占总时段的26%,7—8日则占10%,小的风速使得污染物在水平方向上不易扩散出去,为前期污染物的积聚创造了有利条件。从风向变化来看,三次污染过程在10月29日、11月3日和8日都有转西北风的过程,从第3节分析可知,这三天上海地区有冷空气扩散南下,因此有利于将上游远距离的污染物输送至上海本地,造成高浓度的污染;另外,对比11月两次污染过程的小风时段发现,风向存在明显的差异,2日白天风向以偏东风为主,来自海上的洁净空气对污

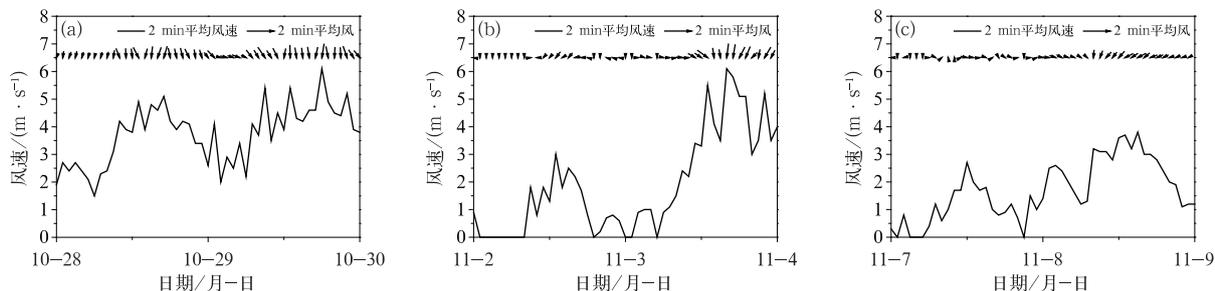


图 4 2017 年上海地区三次污染过程徐家汇观测站整点 2 min 平均风向、风速时间序列

(a)10 月 28—29 日,(b)11 月 2—3 日,(c)11 月 7—8 日

Fig. 4 Time series of average wind direction and speed of 2 min wind per hour at Xujiahui Station in Shanghai during the three pollution events

in 28—29 October (a), 2—3 November (b) and 7—8 November (c) 2017

染物的稀释是有利的,到夜间风向才转为偏西风,而 7 日则全天以偏西风为主,有利于将上海西部近距离的污染物向本地输送,因此,虽然小风时段风速条件相似,但不同的风向造成了 PM_{2.5} 浓度出现了明显的差异。总体来看,西北向的风为三次污染过程带来了远距离的高浓度的污染输送,但较大的风力不利于污染的长期维持,而 11 月两次污染过程的小风静稳时段,则为污染物的前期积聚创造了十分有利的条件,再叠加后期的西北风输送,容易出现较长时间的高浓度污染过程。

4.2 垂直层结分析

已有研究结果表明(耿建生等,2006;Carrol and Dixon,2002),污染物的垂直扩散速度,受到大气层结稳定度的影响,当出现逆温时,大气层结变得稳定,污染物在垂直方向的扩散受到抑制,容易在地面积累。图 5 为三次污染过程的温度廓线,其中 10 月 28—29 日近地面没有逆温存在,而 11 月 2—3 日和 7—8 日近地面都出现了逆温,且 2—3 日的逆温强

度更强,逆温层厚度更厚。逆温的存在,使得上海地区近地面有一层“暖盖”覆盖,会减弱大气的湍流交换和热力对流,阻碍污染物在垂直方向上的扩散稀释,导致其在地面不断积聚,从而造成污染物浓度的持续攀升。因此 11 月的两次污染过程在冷空气影响前的静稳时段,垂直扩散条件较差,较稳定的大气垂直结构为前期污染物的积累创造了条件,有利于维持较长时间的空气污染。另外,虽然 11 月 2 日 08 时也出现了较强的逆温,但 2 日白天上海地区以偏东风为主,且天气晴朗,有利于逆温层被迅速“打破”,因此对于污染物的积累是不利的;而 7 日白天上海地区以弱的偏西风为主,云系很多,不利于逆温层的“破坏”,对于污染物的积聚十分有利。

4.3 物理量分析

利用三次污染过程 NCEP 每 6 h 一次的 FNL 1°×1°的再分析资料对上海地区(31°~32°N、121°~122°E)做区域平均的垂直速度垂直剖面,从图 6 可以看到,三次污染过程垂直速度的绝对值在 700 hPa

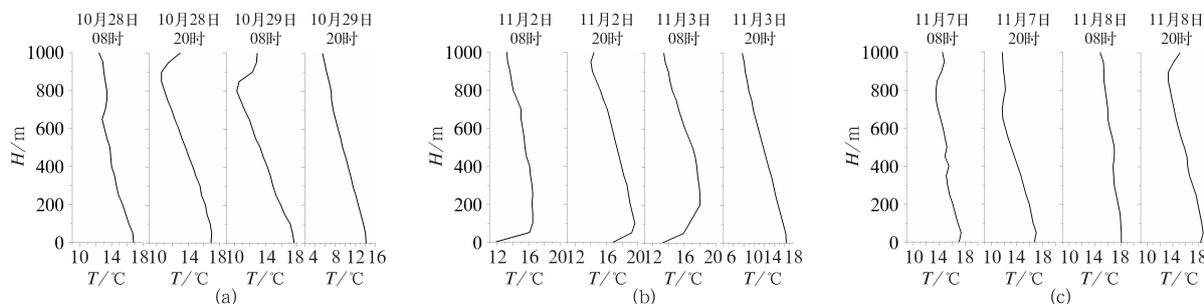


图 5 2017 年上海地区三次污染过程温度廓线

(a)10 月 28—29 日,(b)11 月 2—3 日,(c)11 月 7—8 日

Fig. 5 Temperature profiles in Shanghai during the three pollution events in 28—29 October (a), 2—3 November (b) and 7—8 November (c) 2017

以下都较小,基本在 $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,尤其是 11 月 2—3 日的污染过程大部分时段的垂直速度绝对值都在 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,较弱的垂直速度说明这三次污染过程在中低空上下层的垂直交换较弱。另外,11 月的两次污染过程,在静稳积累时段(2 日夜间和 7 日)中低空都以下沉运动为主,进一步抑制污染物的向上扩散,对污染程度的加剧起到重要的作用。

4.4 剖面分析

由前文分析可知,三次过程的重度污染都出现在冷空气输送时段,为了更好地探讨污染物从上游输送至上海地区的过程,图 7 和图 8 沿北京至上海一线分别做剖面图,其中图 7 给出北京至杭州沿线各城市的地面风场、气温和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随时间的变化过程。从图上可以看出随着冷空气的向南扩

散, $\text{PM}_{2.5}$ 有明显的自北向南输送的过程,具体来看:10 月 29 日为典型的输送型污染,在冷空气影响前,上海及周边城市都没有污染带存在,受冷空气影响时,污染物随时间自北向南呈窄带状分布,上海没有出现持续性污染过程;11 月的两次污染过程在冷空气输送前,上海及周边城市已经出现了污染,尤其是 7—8 日,污染物自北向南的分布范围更广,持续时间更长,因此在偏西风和西北风的作用下,有利于将上游的污染物源源不断地向上海地区输送,从而导致 7—8 日污染持续时间最长。

图 8 利用 NCEP 每 6 h 一次的 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料,沿北京至上海做西北—东南向的垂直环流剖面(该图制作时将垂直速度扩大了 10^2 倍)。从图上可以看到,10 月 29 日冷空气影响时段(图 8a),北京至上海上空基本为一致的西北气流,垂直方向上

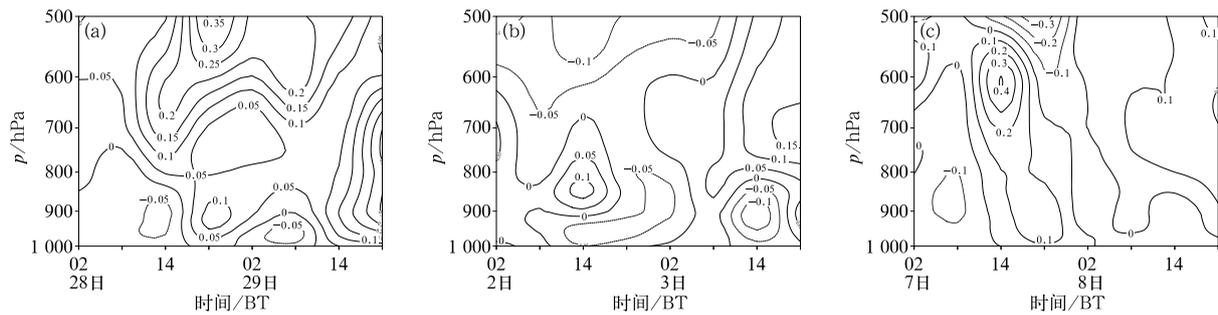


图 6 同图 4, 但为平均垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直剖面

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for vertical cross-sections of average vertical velocity (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

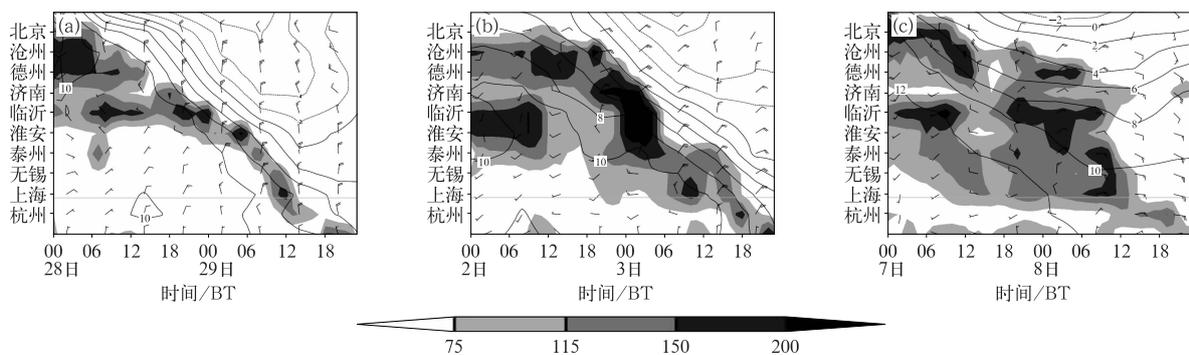


图 7 2017 年上海地区三次污染过程北京—杭州沿线城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度(阴影,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、地面风场(风向杆)及气温(等值线,单位: $^\circ\text{C}$)随时间变化的剖面

(a)10 月 28—29 日,(b)11 月 2—3 日,(c)11 月 7—8 日

Fig. 7 Cross-sections of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration (shaded, unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), wind (wind barb) and the temperature (isoline, unit: $^\circ\text{C}$) with time from Beijing to Hangzhou during the three pollution events in Shanghai in 28—29 October (a), 2—3 November (b) and 7—8 November (c) 2017

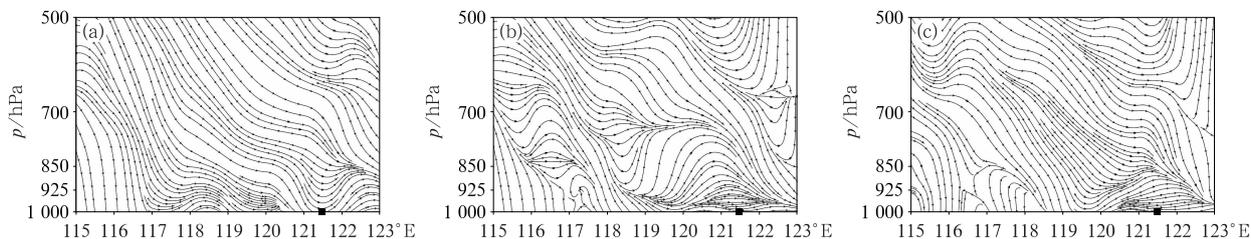


图 8 2017 年上海地区三次污染过程北京—上海垂直环流剖面(■:上海位置)

(a)10月29日08时,(b)11月3日08时,(c)11月8日08时

Fig. 8 Vertical cross-sections of vertical circulation from Beijing to Shanghai during the three pollution events in Shanghai in 2017 (■: location of Shanghai)

(a) 08:00 BT 29 October, (b) 08:00 BT 3 November, (c) 08:00 BT 8 November

也是以下沉运动为主,有利于将上游的污染物迅速往南输送,并沉降至地面,容易造成下游地区的短时重度污染;而 11 月的两次污染过程在冷空气影响时段(图 8b 和 8c),垂直环流形势与 10 月的污染有所区别,北京至上海上空并不是一致的西北气流和下沉运动,垂直环流形势较复杂,北方的污染物先通过西北气流和下沉运动输送至 119°~120°E 附近(江苏境内),然后通过 925 hPa 以下的西北气流和垂直运动将污染物输送至上海上空,并沉降至地面,造成上海地区的重度污染,而 925~850 hPa 的气流在上海没有下沉运动将污染物沉降至地面,对上海地区的污染没有贡献。因此,地面和中低空对 10 月的污染输送都有贡献,11 月的污染输送则主要以近地面传输为主。

4.5 静稳指数和输送指数

为定量描述大气的静稳程度和对污染物的输送强度,张恒德等(2017)和瞿元昊等(2018)分别提出静稳天气综合指数(以下简称静稳指数)和空气污染输送指数(以下简称输送指数):静稳指数综合考虑了与污染物扩散相关的大气动力和热力条件,反映了大气的静稳程度,静稳指数越高,说明空气污染扩散能力越差;输送指数则是后向轨迹经过区域的污染物在一定的时衰和距离衰减后到达终点的输送强度的累加,经归一化处理为 0~1 的数值,输送指数越高,说明上游污染物输送对本地的贡献越大。在实际业务应用中这两个指数在表征大气的静稳程度和输送强度上效果较好。静稳指数和输送指数分别见式(1)和式(2):

$$SWI = \sum_{i=1}^n W_i \tag{1}$$

式中:SWI 表示静稳指数; n 表示静稳天气相关气象因子个数; W_i 表示各因子在不同阈值范围内给予的权重(张恒德等,2017)。

$$T = R \times C \times W_D \times W_t \times PSCF \tag{2}$$

式中: T 表示输送指数; R 表示输送概率; C 表示上游 PM_{2.5} 的实况质量浓度(单位:μg·m⁻³); W_D 表示距离权重因子; W_t 表示时间权重函数; $PSCF$ 为潜在源区贡献因子;各参数的计算方法详见文献(花丛等,2016;瞿元昊等,2018)。

利用式(1)和式(2)计算三次污染过程的输送指数和静稳指数,对比发现(图 9),10 月 29 日静稳指数维持较低水平,输送指数的高值主要出现在 08 时,

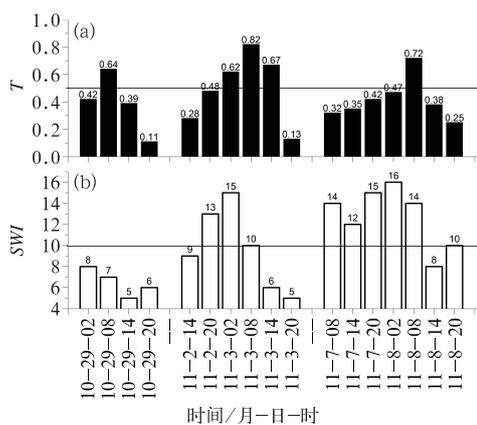


图 9 2017 年上海地区三次污染过程的输送指数(a)和静稳指数(b)

Fig. 9 The transport intensity index (a) and the stable weather index (b) of the three pollution events in Shanghai in 2017

为冷空气影响时段,说明此次重度污染过程以外源输送为主。11月的两次污染过程,在2日夜間和7日至8日早晨静稳指数都较高,有利于污染物的积累,而输送指数在此期间是一个逐渐上升的过程,前期数值较低,说明这段时间污染以本地积累为主,后期受冷空气影响时,输送指数达到峰值,同时静稳指数开始下降,说明此时污染来源由本地积累转为外源输送,因此,11月的两次重度污染是本地积累叠加外源输送造成的。这也与前文分析结论一致。

5 污染过程数值模拟结果分析

为了进一步探讨上海地区 $PM_{2.5}$ 的来源,应用 FLEXPART 扩散模式和华东区域大气环境数值预报系统对这三次污染过程进行定量分析,但由于模式对于10月29日污染过程模拟效果较差,故仅对11月的污染过程进行详细分析。

FLEXPART 模式是由挪威大气研究所(NILU)开发的一种拉格朗日粒子扩散模式,它可用于大气污染物输送、大气水循环、对流层-平流层交换以及气候学尺度上的全球污染物的输送研究,适用于大范围的大气输送过程(Stohl et al, 2005; 陈赛华等, 2017; 余钟奇等, 2019);该模式支持前向轨迹和后向轨迹计算,后向轨迹计算可以分析对研究区域有影响的潜在源区分布(Seibert and Frank, 2004)。因此利用该模式可以研究影响上海地区的污染物来

源。利用 FLEXPART 模式分析11月2日20时至3日17时及7日08时至8日17时上海地区污染物的潜在贡献来源区(仅考虑气象条件),结果显示(图10),影响11月2—3日的主要区域为上海及周边地区,来源较为集中,上海、江苏、浙江和安徽都有较大的贡献,其他区域的贡献相对不大;影响11月7—8日污染的主要区域也主要为上海及周边地区,但更集中,上海和江苏东南部的贡献较大,浙江北部、江苏其他地区和安徽也有一定的贡献,其他地区贡献很小,可忽略。

华东区域大气环境数值预报系统是以 WRF-Chem 模式(Grell et al, 2005; Skamarock et al, 2005)和 INTEX-B(Streets et al, 2003)与清华大学中国多尺度人为排放清单(MEIC, <http://www.meicmodel.org/>)为基础建立的(周广强等, 2015)。其中 WRF-Chem 模式是由美国国家大气科学研究中心(NCAR)、国家海洋和大气管理局(NOAA)等多所研究部门的学者联合开发的“在线(online)”区域化学/传输模式。该模式包含了详细的大气物理和化学处理方案,其化学部分(Chem)和物理部分(WRF)在线耦合,在线耦合技术减少了离线模式中时间尺度小于气象模式输出间隔的大气过程的信息丢失。华东区域大气数值预报系统中使用的化学机制为:RADM2 机制、ISORROPIA 动力平衡无机气溶胶机制和 SORGAM 有机气溶胶机制;物理方案为:WSM6-class 显示云物理方案、Kain-Fritsch 积

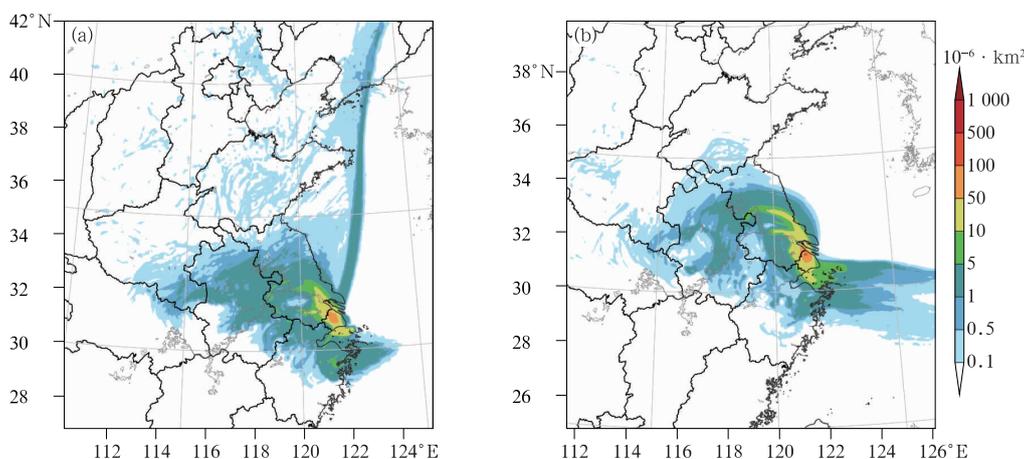


图 10 2017 年(a)11月2—3日和(b)11月7—8日上海地区污染过程 $PM_{2.5}$ 的潜在贡献来源区域分布

Fig. 10 Distribution of the potential sources of $PM_{2.5}$ in Shanghai in 2—3 November (a) and 7—8 November (b) 2017

云参数化方案、RRTM 长波和 Dudhia 短波辐射方案、Monlin_Obukhov 表面层物理方案、Unified Noah 陆面物理方案和 YSU 边界层物理方案,其中在光解和辐射方案中均增加了气溶胶的消光作用。已有研究表明,该数值预报系统对上海地区的 $PM_{2.5}$ 浓度具有较好地预报和模拟能力(常炉予等,2016;周广强等,2016;2017;Zhou et al,2017)。图 11 给出华东区域大气环境数值预报系统模拟的 11 月两次污染过程 $PM_{2.5}$ 浓度和实况观测的对比,可以看到模式对于这两次污染过程模拟效果较好, $PM_{2.5}$ 浓度值和变化趋势与实况较接近,但污染峰值比实况偏高,且出现的时间偏早,总体来说,模式可以在一定程度上反映出上海地区 $PM_{2.5}$ 浓度的变化过程,可以从模式的角度来定量分析 $PM_{2.5}$ 的来源。因此,本

文利用华东区域大气环境数值预报系统模拟结果开展保留和去除上海地区排放源的数值试验,结果显示(图 12),两次污染过程,在冷空气影响前的污染时段,上海地区的 $PM_{2.5}$ 来源均以本地积累为主,2 日和 7 日的本地贡献率均达到 98% 以上,3 日和 8 日受冷空气影响时,外源输送的贡献率明显上升,3 日外源输送贡献率达到 65.9%,8 日达到 66%,均超过本地贡献率,说明这两次污染过程为静稳叠加输送型污染。另外,图 12a 在 3 日 15—18 时去除上海地区排放源后 $PM_{2.5}$ 的浓度值略高于基本试验的浓度值,其原因可能和该时段模式模拟的降水有关,如图 13 给出 3 日 11—17 时的基本试验和去除上海地区排放源后的模拟降水量,可以看到去除上海地区排放源后,降水发生和结束的时间均较基本

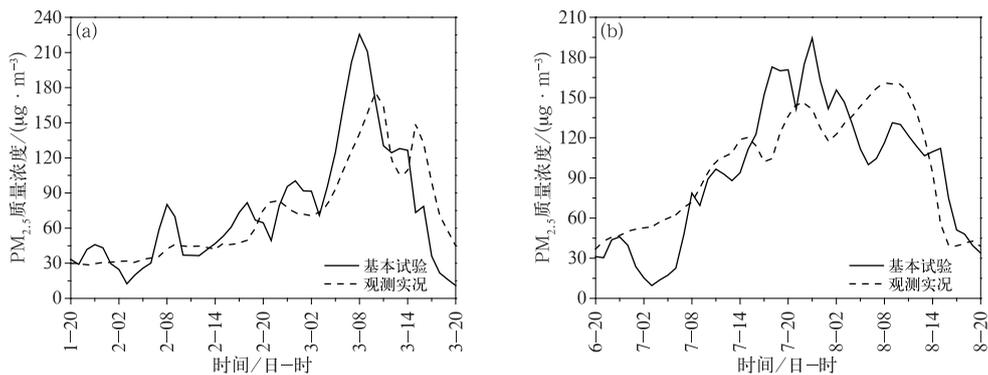


图 11 2017 年上海地区两次污染过程 $PM_{2.5}$ 质量浓度观测实况和模式基本试验对比

(a)11月1日20时至3日20时,(b)11月6日20时至8日20时

Fig. 11 The actual and simulated mass concentration of $PM_{2.5}$ in Shanghai in two pollution events in 2017

(a) 20:00 BT 1 to 20:00 BT 3 November, (b) 20:00 BT 6 to 20:00 BT 8 November

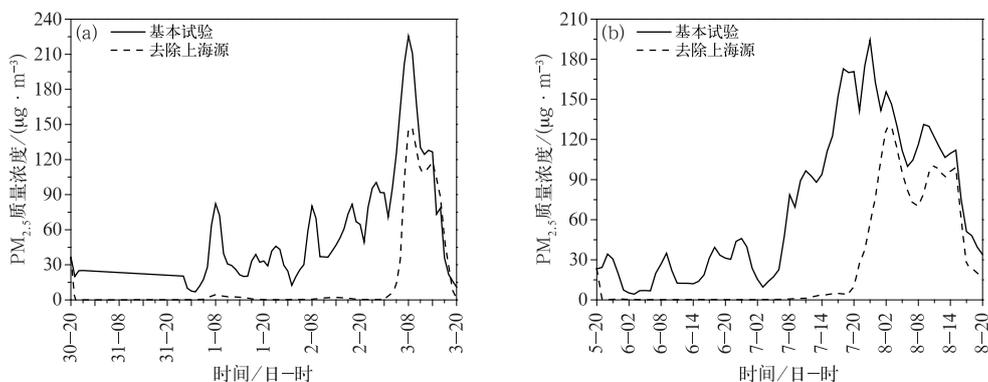


图 12 2017 年上海地区两次污染过程保留与去除上海地区排放 $PM_{2.5}$ 模拟的 $PM_{2.5}$ 质量浓度

(a)10月30日20时至11月3日20时,(b)11月5日20时至8日20时

Fig. 12 The simulated $PM_{2.5}$ mass concentration in two pollution events in Shanghai in 2017 with retaining and removing the $PM_{2.5}$ emissions

(a) 20:00 BT 30 October to 20:00 BT 3 November, (b) 20:00 BT 5 to 20:00 8 November

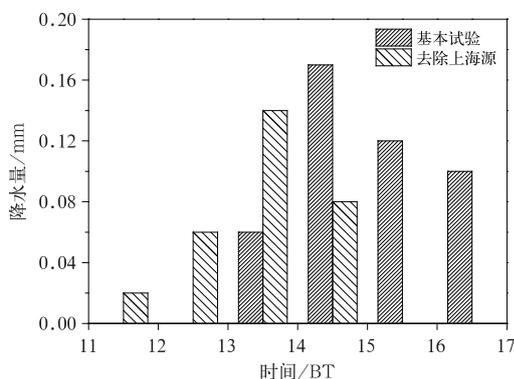


图 13 2017 年 11 月 3 日 11—17 时保留和去除上海地区排放 $PM_{2.5}$ 的上海模拟降水量

Fig. 13 The simulated precipitation in Shanghai with retaining and removing the $PM_{2.5}$ emissions from 11:00 BT to 17:00 BT 3 November 2017

试验提前了 2 h, 最强降水发生时段在 13—14 时, 而基本试验则出现在 14—15 时, 此时前者的降水量已明显减弱, 因此对颗粒物的湿清除作用也明显降低, 3 日上海地区受冷空气输送影响, $PM_{2.5}$ 的主要来源逐渐由本地积累转为外源输送, 因此 3 日后期两种试验的 $PM_{2.5}$ 浓度值相差很小, 再叠加不同时段降水的湿清除作用, 容易造成个别时段 $PM_{2.5}$ 浓度值出现反常现象。降水的这种差异和气溶胶有关, 基本试验在 3 日前期的 $PM_{2.5}$ 浓度值较去除排放源后高, 颗粒物会导致气溶胶辐射效应, 颗粒物越多, 越容易阻挡太阳短波辐射, 导致上午时段的升温较慢, 垂直交换减弱, 对流发展偏慢, 降水时段和较强降水发生时段均偏晚, 去除排放源后, 颗粒物减少, 上午时段升温快, 对流更容易发展, 降水时段和较强降水易偏早。总体而言, 数值模式模拟结果证实了天气形势和气象要素观测资料的分析结论。

综上所述, 11 月 2—3 日和 7—8 日的污染过程在冷空气输送发生前基本为本地积累作用, 冷空气影响期间输送的作用高于本地积累, 两次输送过程的潜在来源区域均为上海周边地区, 来源集中, 江苏、浙江和安徽都有贡献。

6 结论与讨论

2017 年 10 月 29 日、11 月 2—3 日和 7—8 日上海地区 $PM_{2.5}$ 出现了短时重度污染过程, 通过对三次污染过程的常规气象资料、物理量场资料、 $PM_{2.5}$ 浓度数据以及数值模式模拟分析, 得出以下结论:

(1) 根据三次污染过程的环流形势可以分为两

种污染类型: 10 月 29 日为输送型污染, 前期没有本地静稳积累时段, 具有污染输送过程快, 污染持续时间短的特点; 11 月 2—3 日和 7—8 日为静稳叠加输送型污染, 均是前期为鞍型场控制, 后期有冷空气扩散南下的环流形势, 具有污染输送过程较慢, 污染持续时间长的特点。

(2) 分析三次重污染过程的气象要素特征可知: 小的风速使得污染物在水平方向上不易扩散出去, 为污染物的前期积聚创造了有利条件; 较稳定的大气垂直结构, 减弱了大气湍流交换和热力对流, 下沉运动则进一步抑制了污染物在垂直方向上的扩散, 有利于维持较长时间的空气污染。

(3) 通过分析北京至上海一线的地面风场、气温和 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化及垂直环流剖面可以发现: 随着冷空气的向南扩散, $PM_{2.5}$ 有明显的自北向南输送的过程, 其中 10 月 29 日污染带自北向南呈窄带状分布, 上海没有出现持续性污染过程, 地面和中低空对污染输送都有贡献; 而 11 月 2—3 日和 7—8 日的污染带自北向南均维持了较长的时间, 分布范围也较广, 对上海的污染输送以近地面传输为主。

(4) 计算三次污染过程的静稳指数和输送指数发现: 10 月 29 日的污染输送指数较高, 重度污染过程以外源输送为主; 11 月的两次污染过程, 前期静稳指数较高, 后期输送指数较高, 两次重度污染过程是本地积累叠加外源输送造成的。

(5) 应用 FLEXPART 扩散模式和华东区域大气环境数值预报系统对 11 月的两次污染过程进行定量分析发现: 这两次污染过程在冷空气输送发生前基本为本地积累作用, 冷空气影响期间输送的作用高于本地积累, 两次输送过程的潜在来源区域均为上海周边地区, 来源集中, 江苏、浙江和安徽都有贡献。另外, 模式对于 10 月 29 日的污染过程模拟效果较差, 这可能与该污染过程的特点有关, 10 月 29 日为输送型污染, 且输送过程很快, 目前模式对于这种类型的污染可能不太适用, 无法正确捕捉和模拟其过程。

参考文献

- 常炉予, 许建明, 周广强, 等, 2016. 上海典型持续性 $PM_{2.5}$ 重度污染的数值模拟[J]. 环境科学, 37(3): 825-833. Chang L Y, Xu J M, Zhou G Q, et al. 2016. A numerical study of typical heavy air pollution episode of $PM_{2.5}$ in Shanghai[J]. Environ Sci, 37(3): 825-833(in Chinese).
- 陈锴, 马井会, 耿福海, 等, 2016. 上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析[J]. 气象, 42(2): 203-212. Chen L, Ma J H, Geng F

- H, et al, 2016. Analysis of a typical air pollution event in Shanghai[J]. Meteor Mon, 42(2): 203-212(in Chinese).
- 陈敏, 马雷鸣, 魏海萍, 等, 2013. 气象条件对上海世博会期间空气质量影响[J]. 应用气象学报, 24(2): 140-150. Chen M, Ma L M, Wei H P, et al, 2013. Weather impacts on air quality of the World Expo in Shanghai[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2): 140-150(in Chinese).
- 陈赛华, 周广强, 朱彬, 等, 2017. 一种快速定量估计大气污染物来源的方法[J]. 环境科学学报, 37(7): 2474-2481. Chen S H, Zhou G Q, Zhu B, et al, 2017. A method for fast quantification of air pollutant sources[J]. Acta Sci Circumst, 37(7): 2474-2481(in Chinese).
- 耿建生, 丁爱萍, 陈佩君, 2006. 南通市一次连续空气污染过程的气象特征分析[J]. 广州环境科学, 21(3): 18-21. Geng J S, Ding A P, Chen P J, 2006. Meteorological analysis on a continuous air pollution process in Nantong City[J]. Guangzhou Environ Sci, 21(3): 18-21(in Chinese).
- 郭蕊, 段浩, 马翠平, 等, 2016. 河北中南部连续12 d重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J]. 气象, 42(5): 589-597. Guo R, Duan H, Ma C P, et al, 2016. Analysis on the characters and influencing factors of a 12 d heavy haze pollution weather process[J]. Meteor Mon, 42(5): 589-597(in Chinese).
- 侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等, 2017. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究[J]. 大气科学, 41(6): 1177-1190. Hou M L, Wang H, Zhao T L, et al, 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei of China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1177-1190(in Chinese).
- 胡伟, 魏复盛, 滕恩江, 等, 2000. 空气污染对儿童及其父母呼吸系统健康的影响[J]. 中国环境科学, 20(5): 425-428. Hu W, Wei F S, Teng E J, et al, 2000. The impact of air pollution on respiratory health of children and their parents[J]. China Environ Sci, 20(5): 425-428(in Chinese).
- 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. Hua C, Zhang H D, Zhang B H, 2016. Analysis on advective transport condition for heavy air pollution processes in Beijing during the 2013—2014 winter months and design of transmission weather index[J]. Meteor Mon, 42(3): 314-321(in Chinese).
- 环境保护部, 2016. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行): HJ 633—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社: 1-2. Ministry of Environmental Protection, 2016. Technical regulation on ambient air quality index (on trial): HJ 633-2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press: 1-2(in Chinese).
- 康娜, 胡康, Kumar K R, 等, 2017. 2015年10月南京霾污染过程分析[J]. 环境科学研究, 30(12): 1832-1840. Kang N, Hu K, Kumar K R, et al, 2017. Analysis of haze weather process in Nanjing City in October 2015[J]. Res Environ Sci, 30(12): 1832-1840(in Chinese).
- 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. Liu C, Hua C, Kang Z M, 2017. Characteristics of air pollution and its resources during winter and summer seasons of 2014 and 2015 in Shanghai[J]. Meteor Mon, 43(7): 823-830(in Chinese).
- 毛婉柳, 徐建华, 卢德彬, 等, 2017. 2015年长三角地区城市PM_{2.5}时空格局及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 26(2): 264-272. Mao W L, Xu J H, Lu D B, et al, 2017. An analysis of the spatial-temporal pattern and influencing factors of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta in 2015[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 26(2): 264-272(in Chinese).
- 瞿元昊, 马井会, 许建明, 等, 2018. 空气污染气象指数在上海地区的应用[J]. 气象, 44(5): 704-712. Qu Y H, Ma J H, Xu J M, et al, 2018. Application of meteorological air pollution index in Shanghai[J]. Meteor Mon, 44(5): 704-712(in Chinese).
- 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等, 2011. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. 气候与环境研究, 16(6): 805-814. Sun J R, Xu Z C, Liu Y, et al, 2011. Advances in the effect of climate change on air quality[J]. Clim Environ Res, 16(6): 805-814(in Chinese).
- 王继康, 花丛, 桂海林, 等, 2017. 2016年1月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J]. 气象, 43(7): 804-812. Wang J K, Hua C, Gui H L, et al, 2017. Transport of PM_{2.5} of the haze pollution episode over mid-eastern China in January 2016[J]. Meteor Mon, 43(7): 804-812(in Chinese).
- 王璟, 伏晴艳, 王汉峥, 等, 2008. 上海市一次罕见的连续11天空气污染过程的特征及成因分析[J]. 气候与环境研究, 13(1): 53-60. Wang J, Fu Q Y, Wang H Z, et al, 2008. Study on an infrequent multi-day air pollution episode in Shanghai[J]. Clim Environ Res, 13(1): 53-60(in Chinese).
- 王淑云, 节江涛, 熊险平, 等, 2006. 城市空气质量与气象条件的关系及空气质量预报系统[J]. 气象科技, 34(6): 688-692. Wang S Y, Jie J T, Xiong X P, et al, 2006. Correlation analysis between urban air quality and meteorological conditions[J]. Meteor Sci Technol, 34(6): 688-692(in Chinese).
- 王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等, 2008a. 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. Wang Y, Chai F H, Liu H F, et al, 2008a. Analysis on the characteristics of horizontal transport of the atmospheric pollutant over the Yangtze Delta[J]. Res Environ Sci, 21(1): 22-29(in Chinese).
- 王艳, 柴发合, 王永红, 等, 2008b. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J]. 环境科学, 29(5): 1430-1435. Wang Y, Chai F H, Wang Y H, et al, 2008b. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta[J]. Environ Sci, 29(5): 1430-1435(in Chinese).
- 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等, 2013. 南京地区典型大气污染过程分析[J]. 环境科学与技术, 36(4): 97-102. Xia S J, Zhao Q Y, Li B, et al, 2013. Analysis on typical atmospheric pollution process in Nanjing Area[J]. Environ Sci Technol, 36(4): 97-102(in Chinese).
- 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等, 2017. 2016年京津冀地区PM_{2.5}时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 26(10): 1747-1754. Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, et al, 2017. Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Area in 2016 and its relationship with meteorological factors[J]. Ecol Environ Sci, 26(10): 1747-1754(in Chinese).
- 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等, 2017. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 37(9): 3201-3209. Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al, 2017. Circulation weather type classification

- for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter[J]. *China Environ Sci*, 37(9):3201-3209(in Chinese).
- 于兴娜,马佳,朱彬,等,2015. 南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响[J]. *环境科学*, 36(6):1919-1925.
- Yu X N, Ma J, Zhu B, et al, 2015. Effects of relative humidity and aerosol physicochemical properties on atmospheric visibility in northern suburb of Nanjing[J]. *Environ Sci*, 36(6):1919-1925(in Chinese).
- 余钟奇,马井会,曹钰,等,2019. 影响上海 PM_{2.5} 污染不同源地和路径的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 39(1):21-31. Yu Z Q, Ma J H, Cao Y, et al, 2019. Numerical simulations of sources and transport pathways of different PM_{2.5} pollution types in Shanghai[J]. *China Environ Sci*, 39(1):21-31(in Chinese).
- 袁东敏,马小会,2017. 2016年12月16—21日重度霾过程及大气环流异常[J]. *气候与环境研究*, 22(6):757-764. Yuan D M, Ma X H, 2017. The severe haze process in 16—21 December 2016 and associated atmospheric circulation anomalies[J]. *Clim Environ Res*, 22(6):757-764(in Chinese).
- 张国珏,甄新蓉,谈建国,等,2010. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析[J]. *热带气象学报*, 26(1):124-128. Zhang G L, Zhen X R, Tan J G, et al, 2010. The analysis of the relationship between the air quality in Shanghai and surface pressure patterns and meteorological factors[J]. *J Trop Meteor*, 26(1):124-128(in Chinese).
- 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等,2017. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. *气象*, 43(8):998-1004. Zhang H D, Zhang B H, Lü M Y, et al, 2017. Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology[J]. *Meteor Mon*, 43(8):998-1004(in Chinese).
- 张莹,邵毅,王式功,等,2014. 北京市空气污染物对呼吸系统疾病门诊人数的影响[J]. *中国环境科学*, 34(9):2401-2407. Zhang Y, Shao Y, Wang S G, et al, 2014. Relationship between air pollutant and respiratory diseases hospital outpatient visits in Beijing[J]. *China Environ Sci*, 34(9):2401-2407(in Chinese).
- 张裕芬,朱坦,冯银厂,等,2006. 气象因素对环境空气质量达标的影响分析[J]. *城市环境与城市生态*, 19(4):33-36. Zhang Y F, Zhu T, Feng Y C, et al, 2006. Meteorological effects on ambient air quality to come up to national standard[J]. *Urban Environ Urban Ecol*, 19(4):33-36(in Chinese).
- 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等,2014. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 35(2):418-427. Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al, 2014. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. *Environ Sci*, 35(2):418-427(in Chinese).
- 郑山,王敏珍,王式功,等,2012. 大气污染物对兰州心脑血管疾病住院影响的病例交叉研究[J]. *中国环境科学*, 32(7):1182-1187. Zheng S, Wang M Z, Wang S G, et al, 2012. A case-crossover analysis of air pollution and hospital admissions for cardiovascular and cerebrovascular diseases in Lanzhou[J]. *China Environ Sci*, 32(7):1182-1187(in Chinese).
- 周广强,高伟,谷怡萱,等,2017. WRF-Chem 模式降水对上海 PM_{2.5} 预报的影响[J]. *环境科学学报*, 37(12):4476-4482. Zhou G Q, Gao W, Gu Y X, et al, 2017. Impact of precipitation on Shanghai PM_{2.5} forecast using WRF-Chem[J]. *Acta Sci Circumst*, 37(12):4476-4482(in Chinese).
- 周广强,耿福海,许建明,等,2015. 上海地区臭氧数值预报[J]. *中国环境科学*, 35(6):1601-1609. Zhou G Q, Geng F H, Xu J M, et al, 2015. Numerical ozone forecasting over Shanghai[J]. *China Environ Sci*, 35(6):1601-1609(in Chinese).
- 周广强,谢英,吴剑斌,等,2016. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 PM_{2.5} 预报及偏差原因[J]. *中国环境科学*, 36(8):2251-2259. Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, et al, 2016. WRF-Chem based PM_{2.5} forecast and bias analysis over the East China Region[J]. *China Environ Sci*, 36(8):2251-2259(in Chinese).
- 周兆媛,张时煌,高庆先,等,2014. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. *资源科学*, 36(1):191-199. Zhou Z Y, Zhang S H, Gao Q X, et al, 2014. The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and trend analysis[J]. *Res Sci*, 36(1):191-199(in Chinese).
- Brook R D, Rajagopalan S, Pope III C A, et al, 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease; an update to the scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 121(21):2331-2378.
- Carroll J J, Dixon A J, 2002. Regional scale transport over complex terrain, a case study: tracing the Sacramento plume in the Sierra Nevada of California[J]. *Atmos Environ*, 36(23):3745-3758.
- Dong G H, Qian Z M, Xaverius P K, et al, 2013. Association between long-term air pollution and increased blood pressure and hypertension in China[J]. *Hypertension*, 61(3):578-584.
- Englert N, 2004. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies[J]. *Toxicol Lett*, 149(1/21):235-242.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al, 2005. Fully coupled “on-line” chemistry within the WRF model[J]. *Atmos Environ*, 39(37):6957-6975.
- Hu H, Dailey A B, Kan H D, et al, 2013. The effect of atmospheric particulate matter on survival of breast cancer among US females[J]. *Breast Cancer Res Treat*, 139(1):217-226.
- Seibert P, Frank A, 2004. Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode[J]. *Atmos Chem Phys*, 4:51-63.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2005. A description of the advanced research WRF version 2[R]. NCAR/TN-468 + STR. Colorado: National Center for Atmospheric Research; 1-74.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al, 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *J Geophys Res*, 108(D21):8809-8832.
- Stohl A, Forster C, Frank A, et al, 2005. Technical note: the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6. 2[J]. *Atmos Chem Phys*, 5(9):2461-2474.
- Zhou G Q, Xu J M, Xie Y, et al, 2017. Numerical air quality forecasting over eastern China: an operational application of WRF-Chem[J]. *Atmos Environ*, 153:94-108.