

祁海霞,崔春光,赵天良,等,2019. 2015 年冬季湖北省 PM_{2.5} 重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J]. 气象,45(8): 1113-1122. Qi H X, Cui C G, Zhao T L, et al, 2019. Numerical simulation on the characteristics of PM_{2.5} heavy pollution and the influence of weather system in Hubei Province in winter 2015[J]. Meteor Mon, 45(8): 1113-1122 (in Chinese).

2015 年冬季湖北省 PM_{2.5} 重污染传输特征 及影响天气系统的数值模拟^{*}

祁海霞¹ 崔春光¹ 赵天良² 白永清¹ 刘 琳¹

1 中国气象局武汉暴雨研究所,暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

2 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室,南京 210044

提 要: 为了研究湖北省两种污染来源的重污染天气特征及其形成机制,采用 WRF/Chem 零排放情景模拟方案,将 2015 年冬季湖北省 PM_{2.5} 模拟浓度分离为外源传输量和本地累积量,基于对数值模拟结果的统计分析,确定了湖北省污染传输通道和外源传输贡献率,研究了敏感区天气系统对两种污染来源的影响作用。结果表明,外源污染物输送在湖北省内有两条主要通道,一是由南襄盆地夹道直接输送汇入江汉平原,二是沿京广线从信阳到随州、孝感、武汉至江汉平原。湖北长距离跨区域传输的潜在污染源区为河南、安徽、江苏、山东等地。2015 年冬季湖北省 17 个地(市)平均外源贡献率为 42%,而对于重污染过程,平均外源贡献率高达 66%,外来源输送对湖北重污染过程贡献非常显著。对外源传输型,我国东南地区为主要敏感区,气压(气温)变化与 PM_{2.5} 输送显著负(正)相关,对维持南、北两支矢量带(PM_{2.5} 输送与风场相关),推动偏南和偏东气流起到积极作用。此外,伊朗高原天气系统通过上下游效应对东亚地区大气环流起到一定影响,从而也间接影响了区域污染输送。对本地累积型,冬季风环流系统为主要影响天气系统,在弱的冬季风环流形势下,蒙古高压系统偏弱、西太平洋地区海平面气压值偏高,对应湖北本地累积污染总量贡献大。

关键词: WRF/Chem, PM_{2.5}, 外源传输, 本地累积, 天气系统

中图分类号: X16, P448

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.008

Numerical Simulation on the Characteristics of PM_{2.5} Heavy Pollution and the Influence of Weather System in Hubei Province in Winter 2015

QI Haixia¹ CUI Chunguang¹ ZHAO Tianliang² BAI Yongqing¹ LIU Lin¹

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Using the WRF/Chem zero-emission scenario simulation scheme, the simulated PM_{2.5} concentration in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016 was separated into regional transmission component and local accumulation component. Based on the statistical analysis of numerical simulation results, the transmission channel of pollutants and the transmission contribution rate in Hubei Province as well as the influence of weather systems in key areas on different pollution components were studied. It was found that the heavy pollution process is dominated by the northerly and the easterly winds, showing the obviously regional transport characteristics. There are two main channels for pollutant transmission. The first is from Nanyang Basin in Henan Province to Xiangyang and into Jiangnan Plain in Hubei Province,

^{*} 国家重点研发计划(2016YFC0203304)、国家自然科学基金项目(41705034)和湖北省环境保护厅环保科研项目(2016HB03)共同资助
2018 年 4 月 19 日收稿; 2019 年 7 月 8 日收修定稿
第一作者: 祁海霞, 主要从事天气及大气环境预报工作. Email: qxylnl@163.com

and the second is from Xinyang in Henan Province to Suizhou, Xiaogan and Wuhan, and then into the east of Jiangnan Plain. The potential pollution source of the long-distance regional transmission lies in Henan, Anhui, Jiangsu, Shandong Provinces etc. In the process of heavy pollution, the contribution rate of external sources is as high as 66% on average for all cities, and the contribution rate is over 75% for the cleaner cities. The regional transport component shows, that in southeast China, which is the main sensitive region, the correlation of pressure (temperature) change and $PM_{2.5}$ conveying is significantly negative (positive), having a good effect in maintaining the two vector belts of south and north associated with wind field ($PM_{2.5}$), and promoting the south and east airflow. In addition, the Iranian Plateau weather system has a certain influence on the atmospheric circulation in East Asia through the upstream and downstream effects, which indirectly affects the regional pollution transportation. For the local accumulation component, the winter monsoon circulation system acts as the main weather system. Under the weak winter monsoon circulation, Mongolian high pressure system is weak and the western Pacific sea level pressure is higher, making the pollution contribution of local accumulation component higher.

Key words: WRF/Chem, $PM_{2.5}$, regional transport, local accumulation, weather system

引言

随着过去数十年气溶胶排放的增加,与 20 世纪 70、80 年代相比,中国很多地区 2000 年以后霾出现日数明显增多(吴兑,2012),高含量气溶胶已经给中国带来了严重的霾污染问题。霾污染日益严重除了与污染源排放增加有关外,与气象条件的变化紧密联系(张小曳等,2013;王跃思等,2014;吴国雄等,2015;徐祥德等,2015)。吴国雄等(2015)和 Li et al (2017)通过对东亚季风环流变化进行研究指出,东亚季风环流强弱变化会直接影响大范围气溶胶的输送和存留时间,弱(强)东亚冬季风导致更多(少)的雾-霾天气。张人禾等(2014)针对 2013 年 1 月发生在中国东部的大范围持续性强雾-霾天气过程诊断分析表明,2013 年 1 月中国东部的东亚冬季风明显偏弱,而区域内对流层中低层出现异常南风,加强了水汽向中国东部地区的输送,为霾天气的发生提供了有利的水汽条件;与弱东亚冬季风相联系的高空西风急流的减弱,天气尺度扰动的发展和大气垂直混合均减弱,造成大气更加稳定,对流层中低层的异常南风减弱了雾-霾向区域外的输送。

在大气环流作用下,污染物传输影响范围大、传输距离远,具有明显跨界传输效应(Squizzato et al, 2012; Lang et al, 2013; Gao et al, 2016; Li et al, 2017; Guo et al, 2017)。而不同城市或地区的大气污染传输路径及影响源区又有不同特征(张志刚等, 2004; 陈朝晖等, 2008; 常炉予等, 2013; 杨浩等,

2017; 刘琳等, 2017; 张恒德等, 2017; 刘超等, 2017; 王继康等, 2017; 陈洪滨等, 2018)。薛文博等(2014)基于 CAMx 空气质量模型的颗粒物来源追踪技术(PSAT)定量模拟了全国 $PM_{2.5}$ 及其化学组分的跨区域输送规律。结果表明,跨区域传输对重点区域及典型城市的 $PM_{2.5}$ 污染均有显著贡献,其中京津冀、长三角、珠三角区域及成渝城市群 $PM_{2.5}$ 年均浓度受区域外省(市)的贡献分别达到 22%、37%、28%、14%。

目前随着长江经济带和长江中游城市群的建设,中部地区城市化快速发展,华中区域已经变成全国霾污染的一个高发区(黄亚林等, 2015; 白永清等, 2018)。该区域细颗粒物浓度与较高相对湿度共同影响和制约着大气能见度的变化,高湿天气和高浓度污染使区域能见度显著恶化(Ding and Liu, 2014; 白永清等, 2016a; 2016b; 陈龙等, 2016; 范元月等, 2016; 石春娥等, 2017)。谭成好等(2015)通过对近 50 年华中地区霾污染的特征研究,结果指出随着近年春夏秋三季霾日的增加,华中地区霾污染的季节性差异减小,霾日增加是受人为污染物排放加强和东亚季风减弱的共同影响。岳岩裕等(2016)分析了 2013 年武汉市空气质量状况与气象条件的关系,指出当静风和风速很大时,污染物浓度相对较高,东南风影响下 $PM_{2.5}$ 浓度在四季均较高,而秋、冬季在西北风影响下 $PM_{2.5}$ 浓度最高; $PM_{2.5}$ 浓度主要增长阶段以正变温、负变压为主。

本文采用 WRF/Chem 多组排放情景模拟方案,研究 2015 年冬季湖北省 $PM_{2.5}$ 外源传输通道和

传输贡献率及两种污染来源的重污染天气特征,为认识本地区重污染特征及天气机理、提高重污染预报预警水平有一定参考价值。

1 资料与方法

1.1 PM_{2.5}浓度监测数据

湖北省环境监测中心站提供2015年12月2日至2016年1月31日湖北省17个地(市)PM_{2.5}逐小时监测数据,经质量控制剔除奇异值。湖北省气象局提供相应时段内的17个地(市)代表站常规气象要素观测数据。

1.2 污染源排放清单

污染源排放清单数据采用清华大学2012年亚洲地区污染物排放清单,包括农业、工业、电厂、交通和居民五种排放类型,提供SO₂、NO_x、CO、NH₃、NMVOC、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC和CO₂等多种污染物,空间分辨率为0.25°×0.25°,时间尺度分配到逐月。通过经验方法统计了主要污染源日排放小时变化系数,形成适合模式实时运行的华中区域污染源排放数据集,具体详见白永清(2016b)。

1.3 排放源情景模拟方案

本研究采用区域中尺度大气化学模式WRF/Chem(Grell et al, 2005),该模式实现了大气动力学与大气化学的双向耦合,化学模块包括天气过程、污染物输送与扩散、干湿沉降以及各种化学反应和气溶胶过程。基于华中区域环境气象数值预报系统(白永清等, 2016b)框架,以湖北省为中心,设置双层嵌套区域27 km/9 km, d01覆盖东亚大部地区, d02覆盖华中地区。主要物理化学参数化方案包括:YSU边界层方案、RRTM长波辐射方案、Godard短波辐射方案、Noah LSM陆面模式、RADM2气相化学、MADE/SORGAM气溶胶化学机制。采用排放源情景模拟方法(Guo et al, 2017),将湖北省PM_{2.5}模拟浓度分离为外源传输分量和本地累积分量。首先在基准人为排放源情景(S0)情况下进行模拟,然后在此基础上,将湖北省人为排放源关闭(S1)后进行模拟。在湖北省研究范围内, S1模拟结果即为湖北省的外源输送污染分量, S0与S1模拟结果的差值即为湖北省本地累积污染分量, S1与

S0模拟结果的比值即为湖北省外源传输贡献率。但由于形成二次气溶胶的化学过程是非线性的,本敏感性试验(关闭本地源)会有一些误差。

模拟时段为2015年12月1日至2016年1月31日,运用模式 nudging 四维同化过程,使模式输出结果松弛逼近到“观测”,剔除前24 h spin-up时间,对2015年12月2日至2016年1月31日逐小时模拟结果进行分析。将模式输出逐小时结果插值到湖北省17个地(市)站点,以所有站点PM_{2.5}平均值代表湖北省大气污染状况。

1.4 预报效果检验

采用平均偏差(MB)、标准化平均偏差(NMB)、标准化平均绝对误差(NME)、均方根误差(RMSE)、相关系数(R)等评估指标(Zheng et al, 2015)检验模式模拟结果。

WRF模式对近地面风速模拟有系统性正偏差,依据前人经验,通过修订WRF边界层参数化方案摩擦速度因子来订正地面风速系统偏差(Zheng et al, 2015)。图1给出湖北省10 m风速模拟订正前、后与实况的散点分布。由图可见,模式订正后,计算的10 m风速MB由1.06 m·s⁻¹降低到-0.05 m·s⁻¹, NMB由55.3%降低到-2.4%,有效减小了模拟风速的系统性正偏差。风场模拟效果改进后, PM_{2.5}质量浓度模拟效果也得到改进, PM_{2.5}订正前、后的各项评估指标见表1,表明地面风速对PM_{2.5}质量浓度水平有较大影响。图2分别给出湖北省PM_{2.5}质量浓度实况及模拟空间分布和时间序

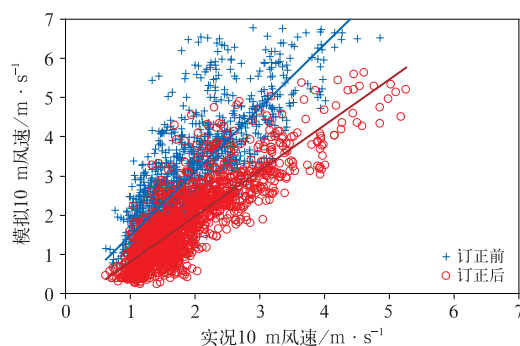


图1 2015年12月2日至2016年1月31日湖北省10 m风速模拟订正前、后与实况的散点分布

Fig. 1 Scatter distribution of simulated and observed 10 m wind speed before and after the correction for Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016

表 1 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟订正前与订正后的效果评估
Table 1 Evaluation statistics of simulated $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016 before and after the correction

	R	$MB/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$NMB/\%$	$NME/\%$	$RMSE/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
订正前	0.56	-13.9	-15.6	33.8	27.7
订正后	0.71	-0.46	-0.5	21.6	26

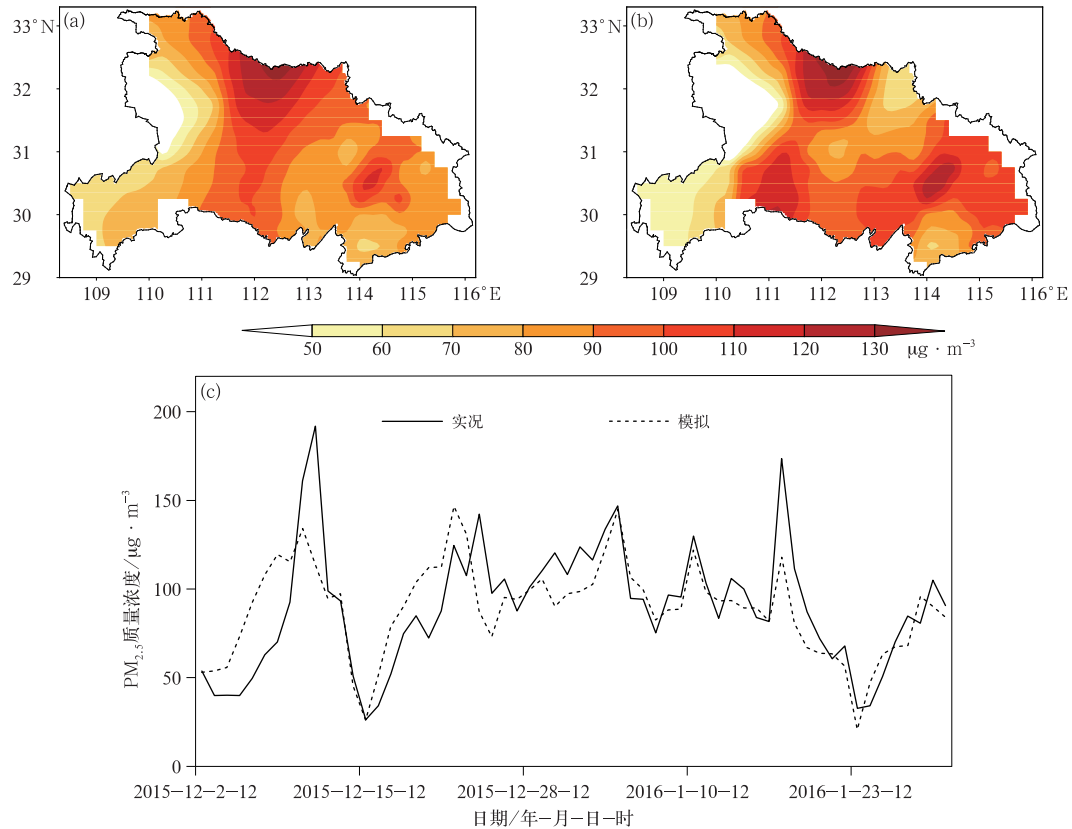


图 2 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日(世界时)湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度实况(a)、数值模拟(b)空间分布及二者逐小时时间序列(c)

Fig. 2 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration observation (a), simulation (b) and their hourly time series data (c) in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016

列。由图可见,湖北省污染较严重的地区主要分布在襄阳、武汉、宜昌及江汉平原地区,模拟结果较好地反映了实况分布特征。模拟的逐小时时间序列与实况趋势较为一致,但对重污染过程有一定低估。总体来说对湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度模拟结果合理,有较高可信度。

2 湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 外源传输通道及贡献率

2.1 外源传输通道

湖北省拥有特殊的马蹄型地形条件,地势西、

北、东三面环山,中部江汉平原向南敞开。重污染传输通道与地形分布特征有重要关联,其中南襄夹道东北窄、西南宽,呈喇叭口状,是南北气团进入南阳、襄阳盆地的走廊,对外源污染传输和汇聚有很大影响。

挑选研究时段内的所有重污染过程(取 10% 的异常样本,对应实况 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $> 130 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),模拟合成湖北省重污染时次 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度传输通量($\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与地面 U 、 V 矢量乘积合成)的空间分布(图 3)。由图可见,污染物从省界北部输入,沿两条主要通道向省内输送,一是由南襄盆地夹道直接输送汇入到江汉平原,二是沿京广线从信阳到随州、孝感、武汉至江汉平原,两条通道上的

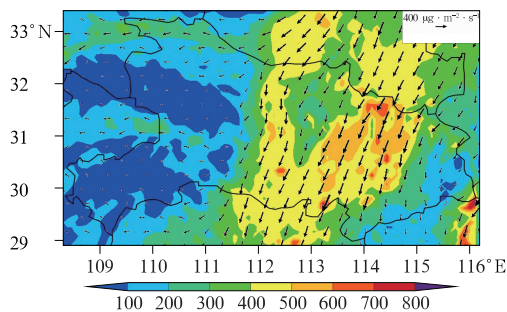
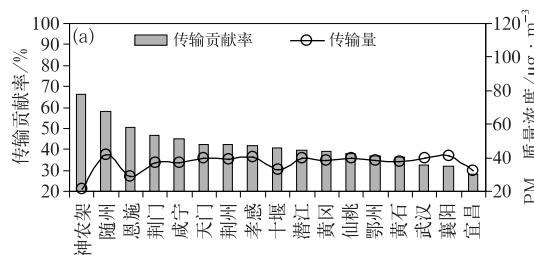


图3 2015年12月2日至2016年1月31日
湖北省重污染时次PM_{2.5}浓度传输

通量空间分布(阴影,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Simulated spatial distribution of PM_{2.5} concentration regional transmission flux for heavy pollution period in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016 (shaded, unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)



PM_{2.5}质量浓度传输通量值较大,污染传输特征明显。

2.2 外源传输贡献率

PM_{2.5}呈现出典型的区域性、复合型污染特征,当前以省为单位主体、孤立的大气污染防治模式已难以有效解决PM_{2.5}污染问题(薛文博等,2014)。对于特定城市,首要厘清外源传输对本地污染的贡献,尤其要关注重污染过程的外源传输贡献率。

图4给出了模式估算湖北省17个地(市)PM_{2.5}质量浓度2015年冬季所有时次平均以及重污染过程平均外源传输贡献率和传输量。由图4a可见,对于冬季平均状况,本地污染源较少的城市如神农架、随州和恩施外来污染源贡献率超过50%,其他城市

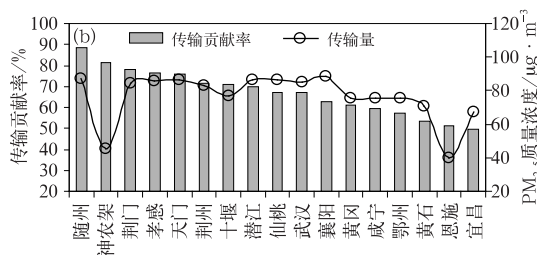


图4 湖北省17个城市PM_{2.5}质量浓度冬季所有时次平均(a)及
重污过程平均(b)外源传输贡献率和传输量

Fig. 4 Transmission contribution rate and transmission amount of PM_{2.5} mass concentration in 17 cities in Hubei Province of all times average (a) and heavy pollution process average (b)

传输贡献率为20%~50%。湖北省PM_{2.5}质量浓度平均外来输送量为 $38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,贡献率为42%,说明对于湖北大部分城市,污染均以本地源为主,外来源输送加重本地污染,两者相互叠加形成区域复合型污染。

值得关注的是,对于挑选出来的所有重污染过程(图4b),各城市外源传输贡献率均达到50%以上,湖北省外来污染源平均贡献率高达66%。北部的襄阳、随州和江汉平原地区、武汉PM_{2.5}外来输送量达到 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,传输贡献率均达到60%以上,其中武汉为67%、襄阳为63%、潜江为69%、仙桃为67%。边界站和本地源较少的城市重污染过程外源贡献率更高,均达到70%以上,如随州、神农架、荆门和孝感外源贡献率分别为89%、81%、78%和76%。表明湖北重污染过程具有明显区域传输特征,重污染过程的跨区域外来源输送对城市影响作用非常显著。

3 天气系统对湖北外源传输和本地累积污染的影响作用

3.1 外源传输型与本地累积型重污染天气的大气环流特征分析

筛选重污染过程中大于1.5个标准差的标准化PM_{2.5}外源传输量和本地累积量时间序列样本,分别对WRF/Chem模拟的两种污染型天气的大气环流场进行合成。图5给出模拟合成的两种污染型过程大气对流层中层500 hPa位势高度、地面2 m温度以及10 m风场的距平空间分布(相对于2015年12月2日至2016年1月31日平均值)。

对于外源传输型,由图5a可见,伊朗附近上空500 hPa为位势负距平,温度负距平达到 -2°C 以

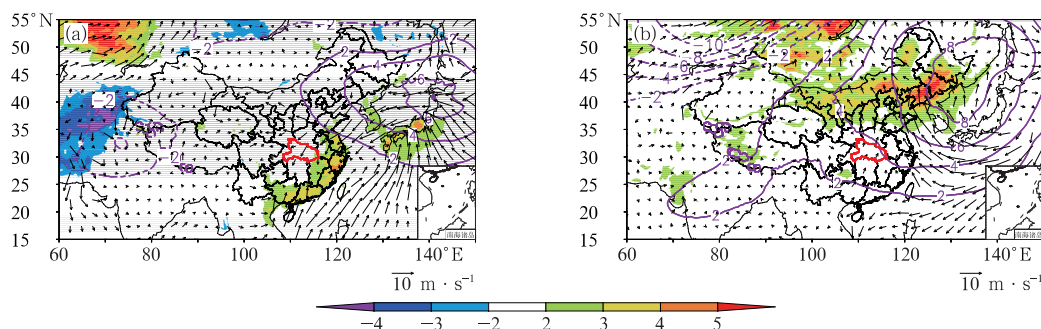


图 5 湖北省重污染时次外源传输型(a)和本地累积型(b)500 hPa 位势高度(紫色等值线, 单位: dagpm)、2 m 温度(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)及 10 m 风场(矢量)距平的数值模拟合成图

Fig. 5 The composite chart of 500 hPa geopotential height (purple isoline, unit: dagpm; 2 m temperature (shaded area, unit: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m wind field (vector) for regional transmission (a) and local accumulation (b) of heavy pollution times in Hubei Province

下,表明地面冷高压系统异常偏强。这种上低下高的配置也表明该系统比较浅薄,主要是受伊朗高原热力作用下的冷汇作用形成的。日本附近上空 500 hPa 位势为正距平,东部位势高度异常增强,表征东亚大槽减弱,随着大槽减弱,槽后冷平流减弱,高空系统引导北方弱冷空气持续南下,利于北方污染物向南传输。同时我国中部以南至西太平洋地区气温为 2°C 以上正距平,地面表现为异常偏暖形势。地面异常风场以日本附近为中心呈现出完整的气旋性环流系统,湖北省受较强的偏北和东北气流影响,呈现出明显的传输特征。南海异常偏南气流向我国东南部输送,与异常偏北气流在长江中游地区相互汇合,使得污染输送在湖北地区不断汇合并堆积。

对于本地累积型,由图 5b 可见,500 hPa 位势高度在欧亚大陆中高纬呈现西低东高的分布形势,巴尔喀什湖以北为较强负值区域,我国东北地区为较强闭合正异常中心,表明贝加尔湖脊和东亚大槽减弱,导致中高纬环流经向度减弱、纬向环流发展,北方冷空气不能有效南下。另外,我国东部上空 500 hPa 位势高度大范围异常偏高,可以抑制对流的发展,有利于污染物在大气低层的聚集(张人禾等,2014)。北方大部地区温度距平达到 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$,表明北方冷空气活动减弱,东部地区地面为弱的异常偏南风,冬季风明显减弱,有利于湖北本地污染堆积。

综上所述,湖北外源传输型重污染天气环流特征为,伊朗地面冷高压系统异常偏强,东亚大槽系统偏弱,我国东南地区地面呈现异常偏暖形势,湖北地面为异常偏北风,利于外源污染传输。湖北本地累积型重污染天气环流特征为,高空中高纬环流经向度减弱、纬向环流发展,贝加尔湖脊和东亚大槽减

弱,北方冷空气明显偏弱,湖北地面为弱的异常偏南风,有利于本地污染持续堆积。

3.2 敏感区天气系统对湖北重污染天气影响

为确定湖北重污染天气敏感区影响系统,分别将同期时段的湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 外源传输浓度及本地累积浓度小时时间序列与模拟海平面气压场、2 m 温度场及 10 m 风场(u 、 v 分量)的 d01 网格分别求相关系数,绘制相关矢量场分布图(徐祥德等,2015;蒋永成等,2015)。显著相关区域为敏感区影响系统。

3.2.1 外源传输型

风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关矢量场可以反映风场对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送作用及主要污染物源地。对于外源传输型,由图 6 可见,以我国东南地区为中心,矢量场逆

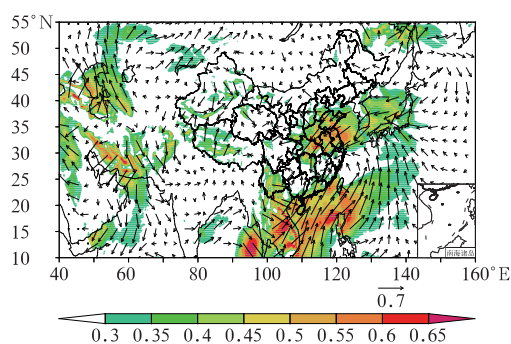


图 6 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日数值模拟的湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 外源传输浓度与 10 m 风场相关矢量(阴影:通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 6 Simulated correlation vector of regional transmission of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and 10 m wind field in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016 (Shaded areas passed significance test at 0.05 level)

时针辐合,形成南、北两支显著输送相关带。北支矢量输送带,表示地面风场对 PM_{2.5} 输送方向,从日本海经过华北、华东地区输送到华中区域,湖北受东北方向大尺度污染输送影响,显著相关区主要分布在河南、安徽、江苏、山东等地,为湖北长距离区域传输的主要污染源区所在地。南支矢量输送带,显著相关区表现在低纬度南海地区,向华南和东南地区输送,其作用表现为抑制北方污染物气流南进扩散,减弱南下的冬季风,使污染物在中部地区持续堆积。

图 7 给出 PM_{2.5} 外源传输浓度与温、压场的空间相关分布,由图可见,我国东南及华南地区为主要

敏感区,温压场的变化影响区域污染输送,气压(气温)变化与 PM_{2.5} 输送显著负(正)相关。受冬季西太平洋暖池(何金海等,2015)及南海北部海湾暖流影响,东南地区温度升高,海平面气压降低,使得南北气压梯度变大,北风增强,对应湖北 PM_{2.5} 输送增强。另一方面,南海地区暖低压使得南风增强,减缓北部气流南下,有利于湖北 PM_{2.5} 污染物输送后在本地堆积滞留。图 8 分析也表明,我国东南地区气压值偏低,对维持南、北两支矢量带,推动偏南和偏东气流起到积极作用。

此外,冬季伊朗高原天气系统通过上下游效应

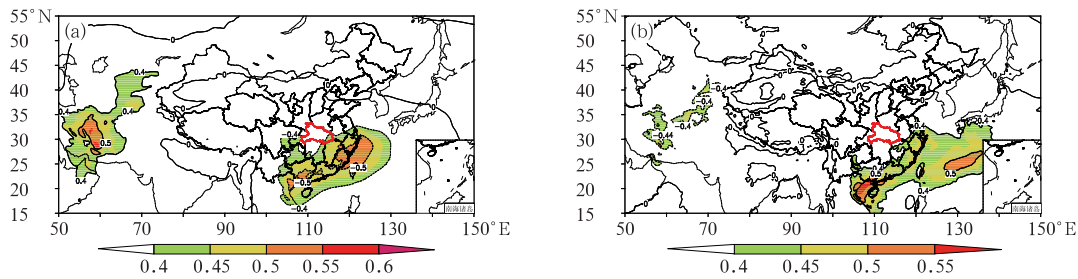


图 7 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日数值模拟的湖北省 PM_{2.5} 外源传输浓度与海平面气压场(a)和 2 m 温度场(b)相关系数
(阴影:通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 7 Simulated correlation coefficient of PM_{2.5} concentration and sea level pressure field (a) and 2 m temperature (b) for regional transmission in Hubei Province from 2 December 2015 to 31 January 2016
(Shaded areas passed significance test at 0.05 level)

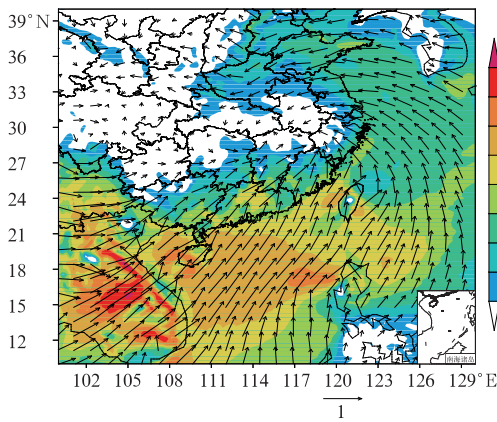


图 8 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日数值模拟的东南地区海平面气压场与 10 m 风场相关矢量
(阴影:通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 8 Correlation vector of sea level pressure field and 10 m wind field in the southeast region from 2 December 2015 to 31 January 2016
(Shaded areas passed significance test at 0.05 level)

对东亚地区环流起到一定影响,在大尺度环流作用下,伊朗冷高压系统发展强盛,对青藏高原和东北附近的地面气压影响均较为显著。由图 9 可见,受伊

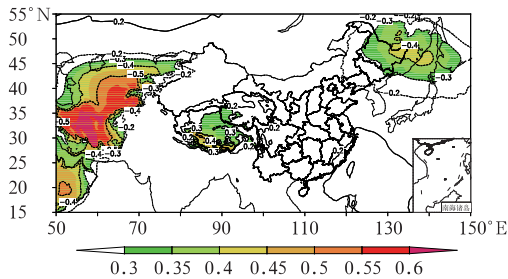


图 9 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日数值模拟的伊朗敏感区 2 m 温度与海平面气压场相关系数
(阴影:通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 9 Correlation coefficient of 2 m temperature and sea level pressure field in Iranian critical area from 2 December 2015 to 31 January 2016
(Shaded areas passed significance test at 0.05 level)

朗高原冷汇作用,青藏高原气压值偏低,东北附近气压值偏高,进而有利于驱动地面东北风南下,将外源污染物向湖北地区输送。

以上分析表明,我国东南地区气压(气温)异常偏低(偏高),对湖北外源污染输送影响显著。伊朗高原天气系统通过上下游效应对东亚地区大气环流起到一定影响,从而也间接影响了湖北地区外源污染输送。

3.2.2 本地累积型

蒙古高压和北太平洋海区的气压差被认为是造成东亚冬季风及其变化的重要原因(李崇银等, 2011)。图 10 给出数值模拟的湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 本地累积浓度与温、压场的空间相关分布。由图可见,污染物的本地累积分量与蒙古高原至我国北方大部地区气压(温度)显著负(正)相关,与西太平洋日本附近气压显著正相关。对于湖北冬季本地累积型重污染,北方大部地区 2 m 气温异常偏高,蒙古弱冷高压系统与西太平洋暖高压形成对峙,形成弱的冬季风环流形势。蒙古高压偏弱,西太平洋地区气压值偏高,南北气压场将趋于“平衡”,水平气压梯度力减小,形成相对静稳天气形势,导致湖北本地污染累积加重。而当蒙古高压发展强盛,冷空气迅速南下,扩散条件转好,本地污染将被驱散。

这与东亚冬季风对气溶胶的影响结论一致,中国中东部冬季雾-霾天气与东亚冬季风存在显著的联系,弱东亚冬季风导致更多的雾-霾天气(吴国雄等, 2015)。将污染总量分离后发现,东亚冬季风主要决定的是湖北本地累积污染分量,在弱的冬季风环流形势下,湖北以本地累积污染为主,本地排放对污染总量贡献大。

综上所述,湖北省两种污染来源的重污染天气对应天气形势特征分别为,当伊朗及周边冷高压系统发展强盛、我国东南地区温压场异常暖低,则对应湖北外源传输污染加重;当蒙古高压系统偏弱、西太平洋地区气压值偏高,则对应湖北本地累积污染总量贡献大。

4 结论与讨论

(1) 湖北省重污染过程外源污染物传输有两条通道,一是由南襄盆地夹道直接输送汇入江汉平原,二是沿京广线从信阳到随州、孝感、武汉至江汉平原,该两条通道上的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度传输通量值较大,污染传输特征明显。湖北长距离跨区域传输的潜在污染源区为河南、安徽、江苏、山东等地。

(2) 2015 年冬季 17 个地(市)平均受外来污染源贡献率为 42%,外来源输送加重本地污染。对于重污染过程,平均受外来污染源贡献率高达 66%,边界站和本地源较少的城市外源贡献率更高。表明湖北重污染过程具有明显区域传输特征,外来源输送对城市重污染过程贡献非常显著。

(3) 湖北外源传输型重污染天气环流特征为:伊朗冷高压系统异常偏强,东亚大槽偏弱,东南地区地面呈现异常暖低形势,湖北地面为异常偏北风,利于外源污染传输。本地累积型重污染天气环流特征为,高空环流经向度减弱、纬向环流发展,贝加尔湖脊和东亚大槽减弱,北方冷空气明显偏弱,湖北地面为弱的异常偏南风,利于本地污染堆积。

(4) 两种不同污染来源的重污染天气形成机制不同。对外源传输型,我国东南地区为主要敏感区,

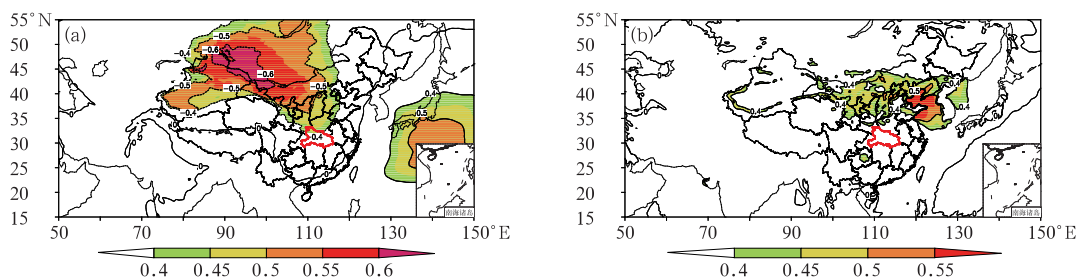


图 10 2015 年 12 月 2 日至 2016 年 1 月 31 日数值模拟的湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 本地累积浓度与海平面气压场(a)和 2 m 温度场(b)相关系数

(阴影:通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 10 Correlation coefficient of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and sea level pressure field (a) and 2 m temperature (b) for local accumulation from 2 December 2015 to 31 January 2016
(Shaded areas passed significance test at 0.05 level)

气压(气温)变化与PM_{2.5}输送显著负(正)相关,对维持南、北两支矢量带(PM_{2.5}输送与风场相关),推动偏南和偏东气流起到积极作用。此外,伊朗高原天气系统通过上下游效应对东亚地区大气环流起到一定影响,从而也间接影响了区域污染输送。对本地累积型,主要与东亚冬季风环流系统有关,弱冬季风、蒙古高压系统偏弱、西太平洋地区海平面气压值偏高,对应湖北本地累积污染总量贡献大。

需要指出的是,本文通过将湖北地区人为排放源进行零排放处理,采用WRF/Chem模拟估算出湖北外源传输量及外源传输贡献率,利用小范围零排放方案估算排放源对大气污染的贡献,同实际大气中污染物与大气的相互作用不一致,会存在不确定性。本文研究结论只适用于2015年冬季,湖北地区重污染过程是否以外源传输占主导,其贡献率及敏感区天气影响系统是否有较大年际变化差异,均需要通过多年计算分析确定。

参考文献

- 白永清,祁海霞,刘琳,等,2016a. 武汉大气能见度与PM_{2.5}浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报, 74(2): 189-199. Bai Y Q, Qi H X, Liu L, et al, 2016a. Study on the non-linear relationship among the visibility, PM_{2.5} concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction[J]. Acta Meteor Sin, 74(2): 189-199(in Chinese).
- 白永清,祁海霞,刘琳,等,2016b. 华中区域环境气象数值预报系统及其初步应用[J]. 高原气象, 35(6): 1671-1682. Bai Y Q, Qi H X, Liu L, et al, 2016b. Development and preliminary application of environmental meteorology numerical model system in Central China[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1671-1682(in Chinese).
- 白永清,祁海霞,赵天良,等,2018. 湖北2015年冬季PM_{2.5}重污染过程的气象输送条件及日变化特征分析[J]. 气象学报, 76(5): 803-815. Bai Y Q, Qi H X, Zhao T L, et al, 2018. Analysis of meteorological conditions and diurnal variation characteristics of PM_{2.5} heavy pollution episodes in the winter of 2015 in Hubei Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 803-815(in Chinese).
- 常炉予,赵天良,何金海,等,2013. 周边气象条件对南京城区大气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 29(6): 95-101. Chang L Y, Zhao T L, He J H, et al, 2013. Impact of regional meteorological conditions on concentration of atmospheric pollutants in Nanjing urban area[J]. J Meteor Environ, 29(6): 95-101(in Chinese).
- 陈洪滨,范学花,夏祥鳌,2018. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用[J]. 大气科学, 42(3): 621-633. Chen H B, Fan X H, Xia X A, 2018. Review of satellite remote sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3): 621-633(in Chinese).
- 陈龙,智协飞,覃军,等,2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象, 42(7): 819-826. Chen L, Zhi X F, Qin J, et al, 2016. Surface atmospheric circulation types of air pollution and its relationship with concentration of air pollutants in Wuhan[J]. Meteor Mon, 42(7): 819-826(in Chinese).
- 陈朝晖,程水源,苏福庆,等,2008. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J]. 环境科学研究, 21(1): 17-21. Chen Z H, Cheng S Y, Su F Q, et al, 2008. Analysis of synoptic patterns and transports during regional atmospheric pollution process in North China[J]. Res Environ Sci, 21(1): 17-21(in Chinese).
- 范元月,闵锦忠,罗剑琴,2016. 宜昌一次连续性严重污染过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 35(1): 76-83. Fan Y Y, Min J Z, Luo J Q, 2016. Analysis on the cause of a persistent pollution episode of Yichang[J]. Torr Rain Dis, 35(1): 76-83(in Chinese).
- 何金海,武丰民,祁莉,等,2015. 秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系[J]. 地球物理学报, 58(4): 1089-1102. He J H, Wu F M, Qi L, et al, 2015. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature[J]. Chin J Geophys, 58(4): 1089-1102(in Chinese).
- 黄亚林,刘超,曾克峰,等,2015. 2013—2014年武汉市PM_{2.5}的时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 生态环境学报, 24(8): 1330-1335. Huang Y L, Liu C, Zeng K F, et al, 2015. Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Wuhan and its relationship with meteorological conditions in 2013—2014[J]. Ecol Environ Sci, 24(8): 1330-1335(in Chinese).
- 蒋永成,赵天良,王宏,等,2015. 福州市PM_{2.5}污染过程中大气边界层和区域传输研究[J]. 中国环境科学, 35(2): 347-355. Jiang Y C, Zhao T L, Wang H, et al, 2015. Analysis on atmospheric boundary layer and regional transport during PM_{2.5} pollution episodes in Fuzhou[J]. China Environ Sci, 35(2): 347-355(in Chinese).
- 李崇银,王力群,顾薇,2011. 冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系[J]. 大气科学, 35(2): 193-200. Li C Y, Wang L Q, Gu W, 2011. Interannual time-scale relationship between Mongolia high and SST anomaly in the North Pacific in winter[J]. Chin J Atmos Sci, 35(2): 193-200(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).
- 刘琳,王玲玲,白永清,等,2017. 应用WRF/Chem模拟河南冬季大气颗粒物的区域输送特征[J]. 环境科学学报, 37(5): 1843-1854. Liu L, Wang L L, Bai Y Q, et al, 2017. Simulation for the impacts of regional transport on winter particulate matter levels over Henan based on WRF/Chem model[J]. Acta Sci Circumst, 37(5): 1843-1854(in Chinese).
- 石春娥,张浩,弓中强,等,2017. 2013—2015年合肥市PM_{2.5}重污染特征研究[J]. 气象学报, 75(4): 632-644. Shi C E, Zhang H, Gong Z Q, et al, 2017. Characteristics of severe PM_{2.5} pollution

- in Hefei during 2013–2015[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(4): 632–644(in Chinese).
- 谭成好, 赵天良, 崔春光, 等, 2015. 近 50 年华中地区霾污染的特征[J]. *中国环境科学*, 35(8): 2272–2280. Tan C H, Zhao T L, Cui C G, et al, 2015. Characterization of haze pollution over Central China during the past 50 years[J]. *China Environ Sci*, 35(8): 2272–2280(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).
- 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等, 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(1): 15–26. Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al, 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over Central and Eastern China[J]. *Sci China: Earth Sci*, 57(1): 14–25(in Chinese).
- 吴兑, 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. *环境科学学报*, 32(2): 257–269. Wu D, 2012. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. *Acta Sci Circumst*, 32(2): 257–269(in Chinese).
- 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 等, 2015. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(11): 1609–1627. Wu G X, Li Z Q, Fu C B, et al, 2016. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China[J]. *Sci China: Earth Sci*, 59(1): 1–16(in Chinese).
- 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等, 2015. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. *科学通报*, 60(12): 1132–1143. Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al, 2015. “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze[J]. *Chin Sci Bull*, 60(12): 1132–1143(in Chinese).
- 薛文博, 付飞, 王金南, 等, 2014. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. *中国环境科学*, 34(6): 1361–1368. Xue W B, Fu F, Wang J N, et al, 2014. Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China[J]. *China Environ Sci*, 34(6): 1361–1368(in Chinese).
- 杨浩, 白永清, 刘琳, 等, 2017. 基于轨迹聚类河南地区大气污染过程空气输送通道研究[J]. *气象与环境学报*, 33(4): 29–39. Yang H, Bai Y Q, Liu L, et al, 2017. Analysis of air transport channels during pollution process in Henan Province based on trajectory clustering[J]. *J Meteor Environ*, 33(4): 29–39(in Chinese).
- 岳岩裕, 王晓玲, 张蒙晰, 等, 2016. 武汉市空气质量状况与气象条件的关系[J]. *暴雨灾害*, 35(3): 271–278. Yue Y Y, Wang X L, Zhang M X, et al, 2016. Air quality condition in Wuhan and its relationship to meteorological factors[J]. *Torr Rain Dis*, 35(3): 271–278(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).
- 张人禾, 李强, 张若楠, 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(1): 27–36. Zhang R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Sci China: Earth Sci*, 57(1): 26–35(in Chinese).
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等, 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 58(13): 1178–1187. Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al, 2013. Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chin Sci Bull*, 58(13): 1178–1187(in Chinese).
- 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等, 2004. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. *环境科学研究*, 17(1): 14–20. Zhang Z G, Gao Q X, Han X Q, et al, 2004. The study of pollutant transport between the cities in North China[J]. *Res Environ Sci*, 17(1): 14–20(in Chinese).
- Ding Y H, Liu Y J, 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 36–46.
- Gao M, Carmichael G R, Wang Y, et al, 2016. Modeling study of the 2010 regional haze event in the North China Plain[J]. *Atmos Chem Phys*, 16(3): 1673–1691.
- 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.
- Guo J P, Lou M Y, Miao Y C, et al, 2017. Trans-Pacific transport of dust aerosols from East Asia: insights gained from multiple observations and modeling[J]. *Environ Pollut*, 230: 1030–1039.
- Lang J L, Cheng S Y, Li J B, et al, 2013. A monitoring and modeling study to investigate regional transport and characteristics of PM_{2.5} pollution[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 13(3): 943–956.
- Li J, Du H Y, Wang Z F, et al, 2017. Rapid formation of a severe regional winter haze episode over a mega city cluster on the North China Plain[J]. *Environ Pollut*, 223: 605–615.
- Squizzato S, Masiol M, Innocente E, et al, 2012. A procedure to assess local and long-range transport contributions to PM_{2.5} and secondary inorganic aerosol[J]. *J Aerosol Sci*, 46: 64–76.
- Zheng B, Zhang Q, Zhang Y, et al, 2015. Heterogeneous chemistry: a mechanism missing in current models to explain secondary inorganic aerosol formation during the January 2013 haze episode in North China[J]. *Atmos Chem Phys*, 15(4): 2031–2049.