

刘娜, 段晚锁, 王自发, 等. 2018. 北京地区一次空气重污染过程的目标观测分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 619–632. Liu Na, Duan Wansuo, Wang Zifa, et al. 2018. A study on target observation of a heavy air pollution event in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 619–632, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18025.

北京地区一次空气重污染过程的目标观测分析

刘娜^{1,2} 段晚锁^{1,2} 王自发^{2,3} 唐晓³ 周非凡⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

4 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

摘 要 针对北京市 2016 年 12 月 16~21 日的空气重污染过程进行了回报试验, 探讨了该次事件预报的目标观测敏感区。使用新一代高分辨率中尺度气象模式 (Weather Research Forecasting, WRF) 和嵌套网格空气质量模式 (Nested Air Quality Prediction Model System, NAQPMS), 针对初始气象场的不确定性, 通过 4 套初始场资料识别了影响北京地区细颗粒物 (PM_{2.5}) 预报水平的目标观测敏感变量及其敏感区。结果表明: 当综合考虑初始气象场的风场、温度、比湿不确定性的影响时, 发现改善黑龙江区域上述气象要素的初始场精度, 对北京地区 PM_{2.5} 预报不确定的减小最显著; 当分别考察风场、温度、比湿的不确定性的影响时, 发现初始风场精度的改善, 尤其是黑龙江区域风场精度的改善, 能够更大程度地减小北京地区 PM_{2.5} 的预报误差, 对北京东南地区的 PM_{2.5} 预报误差的减小甚至可达到 40% 以上。因此, 优先对黑龙江区域的气象场, 尤其是该区域的风场进行目标观测, 并将其同化到预报模式的初始场中, 将会有效提高初始气象场的质量, 进而大大减小北京地区 PM_{2.5} 浓度的预报误差, 提高北京地区空气质量的预报技巧。初始风场代表了北京地区该次空气重污染事件预报的目标观测变量, 而黑龙江地区则是该目标观测的敏感区域。

关键词 空气污染 数值预报 目标观测 北京

文章编号 1006-9585 (2018) 05-0619-14

中图分类号 X513

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18025

A Study on Target Observation of a Heavy Air Pollution Event in Beijing

LIU Na^{1,2}, DUAN Wansuo^{1,2}, WANG Zifa^{2,3}, TANG Xiao³, and ZHOU Feifan⁴

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A hindcast experiment is conducted for the heavy air pollution event in Beijing that occurred during 16–21 December 2016 and the sensitive area for target observation that can help to improve initialization are explored using the

收稿日期 2018-04-26; **网络预出版日期** 2018-05-02

作者简介 刘娜, 女, 1992 年出生, 硕士, 主要从事空气质量数值预报的目标观测问题研究. E-mail: liuna_1228@126.com

通讯作者 段晚锁, E-mail: duanws@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 41525017

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41525017)

Weather Research Forecasting (WRF) model and the Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS). To address the uncertainty of meteorological initial field, the sensitive variables and areas for the prediction of PM_{2.5} concentration in Beijing are identified by adopting four sets of initial analysis fields. The results show that when considering the initial uncertainties of wind, temperature, and specific humidity, their reductions in Heilongjiang region can most significantly decrease the forecast error of the PM_{2.5} concentration in Beijing. Furthermore, it is found that the improvement of the accuracy of initial wind fields, especially that in Heilongjiang region, decreases the forecast error of the PM_{2.5} concentration in Beijing to a great extent, and the decrease can be up to more than 40% in southwestern Beijing. Therefore, increasing more meteorological (especially wind) observations in Heilongjiang region and assimilating these observations into the initial field of the WRF model will significantly improve the quality of the initial meteorological condition and thus greatly reduce the PM_{2.5} forecast error of the air pollution event in Beijing. The model forecast skill will be greatly improved. It is concluded that the wind component in the initial field represents the physical variable and Heilongjiang region is the sensitive area for target observation associated with the forecast of the heavy air pollution event in Beijing that is selected for the present study.

Keywords Air pollution, Numerical forecast, Target observation, Beijing

1 引言

随着我国工业化进程的飞速发展,我国各大城市大气污染现象开始频繁发生,严重地影响了公众的正常生活和工作。北京作为中国的首都,是全国政治、经济、文化中心和国际交往的枢纽,其空气质量的好坏也直接影响我国在国际上的大国形象。因此,预报、预警以及防治大气污染是必要和紧迫的,它不仅有利于环保部门制定及时有效的重污染天气应急减排措施,缓解空气污染造成的影响,而且在国家重大活动期间,在空气质量的保障以及对公众的出行和健康提示方面具有重要作用(佟彦超, 2006; 任万辉等, 2010)。

空气质量模式是大气污染过程业务预报预警的核心工具。然而,由于气象场(高怡和张美根, 2014; Gilliam et al., 2015)、排放源清单(唐孝炎等, 2006)等方面存在的不确定性,使得空气质量数值预报依然存在较大的预报不确定性。研究表明,相对湿度、风速和日照时长与 PM_{2.5} 浓度具有很高的相关性,并且在各季节中,冬季的各气象因素对 PM_{2.5} 质量浓度的影响较其他季节更为显著(Chen et al., 2018)。在不同气象场背景下,同一污染源对同一地区造成的近地面污染物平均环境浓度可相差几倍到几十倍(陈敏等, 2013)。因而气象资料作为空气质量模式的重要输入数据,其不确定性能导致空气质量预报产生较大不确定性。因此,提供更准确的气象数据是提高空气质量预报技巧的有效途径之一。

气象数据是通过天气模式的预报得到的,因此要提高输入空气质量的气象数据的精度,须改进天

气模式关于气象场的预报技巧。天气模式预报气象场,主要是一个初值问题(Lorenz, 1963; 丑纪范和郇吉东, 1995; Kalnay, 2003),初始场的不确定性是数值天气预报的主要误差来源之一。而且, Gilliam et al. (2015) 通过集合预报的方法表明了初始气象场的精度对空气污染过程预报的重要性。因此,改进初始场精度可以有效提高天气模式预报技巧,进而改进空气质量的预报技巧。

要提供更准确的初始场,方法之一是增加额外的观测。这一思想可以追溯到美国 1947 年开始的飓风监测计划(Riehl et al., 1956)。该思想也被应用到关于气候预测研究的海洋观测计划中,如世界气候研究计划(WCRP)分别于 1985 年和 1990 年启动的 Tropical Ocean and Global Atmosphere (TOGA) 计划和 World Ocean Circulation Experiments (WOCE)。但是,由于观测资料的有效利用取决于具体的天气和气候过程,人们随后开始寻求重点在一些关键地区(敏感区)加强观测,这就是目标观测(Snyder, 1996)。理论上,如果在初值的敏感区同化观测资料,预报模式初始场的改善会更加有效地改进模式的预报效果;而在初值的其它区域同化观测资料,初始场的质量不会明显地改进或对模式预报效果不产生任何积极影响,甚至可能对整个预报效果产生负面影响,大大增加不必要的计算时间。而且,关于数值天气预报的研究表明,在资料缺乏、模式较为简单的情况下,不论是用何种同化方案,相对于简单的在某些固定地点增加观测,目标观测对预报效果的提高更加有效(Morss and Battisti, 2004; Mu, 2013)。目标观测的关键在于目标观测区域(或称敏感区)的确定,这

直接影响目标观测的有效性。因此,天气和气候预报预测的目标观测首先应该识别敏感区(图1),即考虑应优先在哪些区域增加观测并同化到数值模式,进而提高预报技巧。

对于本文探讨的空气质量预报,如前文所述,气象场初始条件精度的提高,有利于空气质量预报的改进,而目标观测是改进气象场初始条件精度的有效方法之一。所以,为了提高空气质量的预报技巧,对气象场初始条件进行目标观测是必要的。那么,究竟应该在哪些区域进行气象场目标观测呢?也就是说,我们需要探讨空气质量预报的气象场的目标观测敏感区。考虑到目标观测敏感区对所预报事件可能的敏感依赖性(Zhou and Mu, 2012),本文选取北京市2016年12月16~21日空气重污染过程进行研究。该事件是北京2016年冬季灰霾最重、持续时间最长的一次污染过程,当时,环保部启动了重污染天气Ⅰ级(红色预警)应急响应,并且由于空气质量模式对该污染过程后期的预报有较大误差,因而探讨该次空气污染过程的目标观测敏感区具有重要意义,可对北京冬季的重污染天气预报提供有用建议。

2 空气质量预报系统

研究使用的嵌套网格空气质量模式(Nested Air Quality Prediction Model System, NAQPMS)是由中国科学院大气物理研究所自主研发的多物种、多尺度空气质量数值模拟系统(Wang et al., 2001; 王自发等, 2006),该模式充分结合我国大气区域复合污染的排放、输送和演变特点,模式包括动态污染源、平流、扩散、干湿沉降、气溶胶过程、气相、液相和非均相大气化学反应模块,同时还纳入了大气化学资料同化和污染源反演模块(Tang et al., 2011; 王哲等, 2014),可以有效减小模式对大气化学成分的模拟误差。在沙尘输送、臭氧化学、酸雨以及城市空气质量预报预测等污染物的形成等科学研究领域NAQPMS均有广泛应用(Li et al., 2012; 王威等, 2016)。为2008年北京奥运会、2010年上海世界博览会、2010年广州亚运会、2014年南京青奥会、2014年APEC峰会、9·3抗战胜利日大阅兵、2016年G20峰会等重大国际活动空气质量保障提供了关键支撑,形成了集预报、溯源和调控评估为一体的国家重污染天气预报预警业务

平台。已被国内多个省市应用到空气质量业务化预报中(吴其重等, 2010)。

考虑背景浓度对区域污染物浓度的影响,本研究中NAQPMS模式区域以京津冀为中心设置采用3层嵌套网格(图2),水平分辨率分别为 $45\text{ km} \times 45\text{ km}$ 、 $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ 、 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 。其中,最外层区域覆盖整个东亚地区,第二层嵌套覆盖了中国大部分区域,主要为中东部,第三层嵌套区域覆盖华北地区,外层选择较大的区域可以保证模式长期积分过程中内层区域具有较为合理的侧边界条件,并可以充分考虑大尺度天气系统对京津冀地区的影响。NAQPMS模式采用地形追随坐标,垂直方向上分为20层,模式顶高度为海拔20 km,取模式第一层作为近地面层计算污染物浓度。

该研究使用的天气模式是由NCEP/NCAR联合开发的新一代高分辨率中尺度气象模式WRF(Weather Research Forecasting)。该模式集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体,主要用于中小尺度的数值预报和大气科学研究。WRF能够为空气质量模式NAQPMS提供逐时的气象场,进而强迫NAQPMS开展空气质量预报。本研究中WRF模式采用2014年8月发布的WRF-ARW V3.6版本。WRF同样采用3层嵌套,区域设置、分辨率与空气质量模式设置一致,采用地形追随坐标,垂直分30层。

3 数值试验方案

为考察北京市2016年12月16~21日空气重污染过程预报的目标观测敏感区,本研究选取不同的初始气象分析场,用WRF和NAQPMS模式对该次污染过程进行回报,考察不同初始气象场之间的不确定性对空气质量预报的影响。本研究采用4种不同的初始条件,表1给出了这4种初始条件的联系和区别,其中第一个初始条件来自于NCEP提供的全球预报系统资料(Global Forecast System, GFS),简称为“GFS初始场”;第二个是来自NCEP的全球再分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL),该资料同化了地面观测、气球、飞机和卫星观测等不同数据源的资料,称为“FNL初始场”;第三个初始条件则采用WRF模式,通过四维变分资料同化(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, FDDA)模块同化FNL资料而产生的初始分析场,从而减小同化窗口中相关变量的

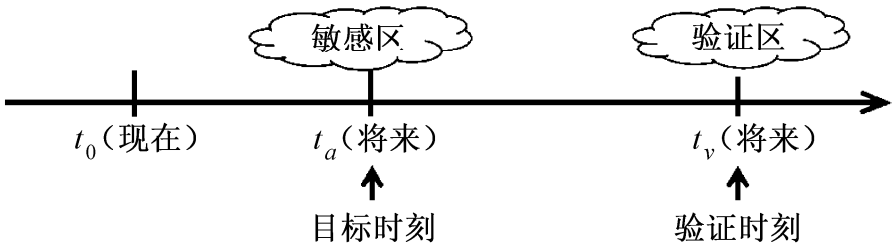


图1 目标观测示意图 (穆穆等, 2012)
Fig. 1 A schematic diagram of target observation (Mu et al., 2012)

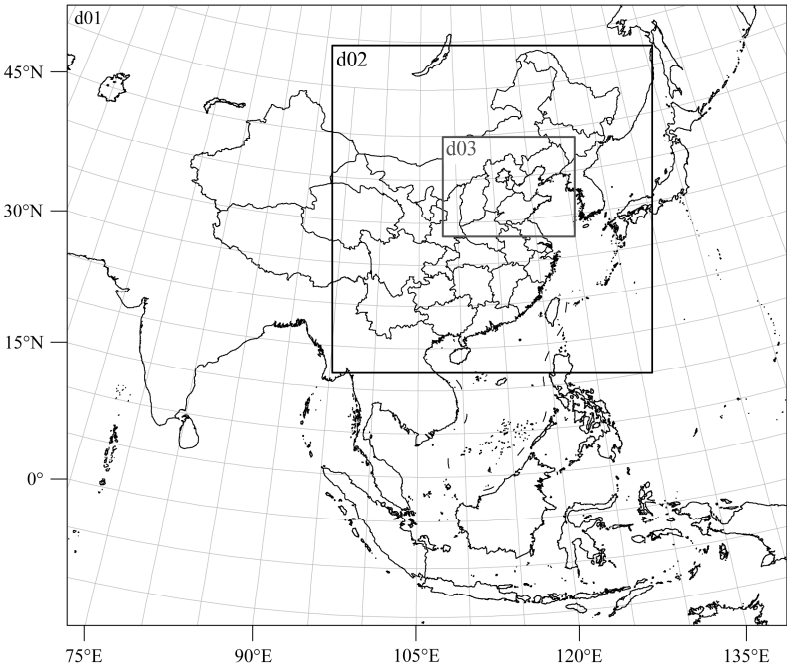


图2 NAQPMS 三层嵌套网格设置
Fig. 2 Triple-nested domains for the NAQPMS simulation

表1 空气质量回报试验中采用的4种不同初始气象条件及排放源清单

初始条件及其来源		排放源清单及其来源
GFS 初始场	NCEP 通过 GFS 产生的气象场预报资料	清华大学 2012 年 MEIC 排放清单
FNL 初始场	NCEP 用 GFS 同化观测产生的初始分析场	清华大学 2012 年 MEIC 排放清单
FNL(FDDA)初始场	WRF 模式, 通过四维变分同化方法同化 FNL 资料产生的初始分析场 (同化窗口为 7 d)	清华大学 2012 年 MEIC 排放清单
FNL(OPT)初始场	用 FNL 作为 WRF 模式的初始场, 积分一天而输出的气象场作为空气质量预报的初始条件	清华大学 2012 年 MEIC 排放清单

模拟误差。为方便, 将该初始场称为“FNL(FDDA)初始场”; 第四个初始条件也采用 WRF 模式, 但它是将 FNL 资料作为 WRF 模式初始场积分 WRF 一天输出的结果作为空气质量预报的初始气象条件, 该初始条件减弱了误差累积增长的影响, 可以得到更加优化 (Optimization) 的初始场, 这里将其称为“FNL(OPT) 初始场”。

该研究中空气质量模拟使用的人为排放源为 2012 年 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory

for China) 排放清单, 该清单是清华大学开发的 中国多尺度排放清单, 涵盖了 10 种主要大气污染物和温室气体 (SO₂、NO_x、CO、NMVOC、NH₃、CO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC) 和 700 多种人为排放源, 提供了可供空气质量模型直接使用的多层嵌套高时空分辨率[0.25° (纬度) × 0.25° (经度)]排放清单, 是目前国内具有较高代表性的中国区域排放源清单 ([http://www.meicmodel.org/\[2017-04-03\]](http://www.meicmodel.org/[2017-04-03]))。

采用上述 4 种初始条件和排放源清单, 对北京

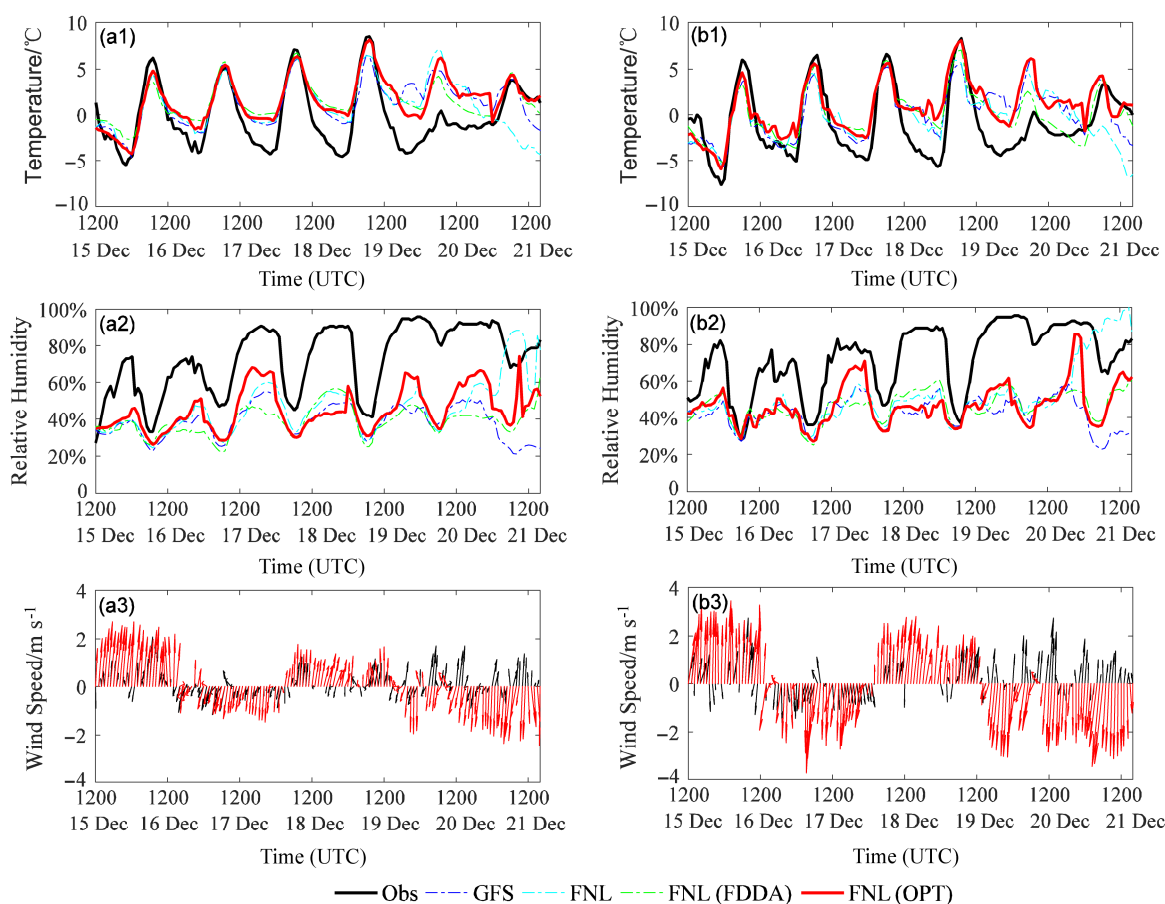


图3 北京市观象台(左列)、房山(右列)2016年12月15~21日期间(a1、b1)温度、(a2、b2)相对湿度、(a3、b3)风速的小时预报和观测值对比
Fig. 3 Temporal variations of hourly observed and predicted (a1, b1) temperature, (a2, b2) relative humidity, and (a3, b3) wind speed at Guanxiangtai (left column) and Fangshan (right column) stations during 15–21 Dec 2016 in Beijing

市2016年12月16~21日空气重污染过程进行回报,可以得到关于该次重污染过程的4种预报结果;将最接近观测的预报结果作为参考态,考察其它3个初始条件对应的预报结果与该参考态的偏差(为方便起见,称该偏差为关于参考态的预报误差);基于这些预报误差,挑选能够导致参考态最大预报误差的初始条件,并考察其与参考态初始条件的差别,即初始误差;利用该初始误差,识别对预报结果影响最大的初始不确定性所属的气象变量和空间区域,进而确定该次空气质量重污染过程预报的目标观测敏感区。

4 数值试验

按照第3节的试验方案,首先采用4种初始气象条件,通过WRF模式预报气象场,然后用该气象场强迫NAQPMS,对北京市2016年12月16~

21日空气重污染过程进行预报。如引言所述,相对湿度、风速和日照时长与PM_{2.5}具有很高的相关性(隋珂珂等,2007;杨兴川等,2017),因此本研究将主要考虑风场、温度、湿度3个大气变量的初始不确定性对PM_{2.5}预报的影响。图3给出了WRF模式预报的北京市观象台和房山两个站点气象预报结果及其监测数据的时间序列图。从图可以看出,WRF模式对此次空气重污染过程气象场的预报效果并不理想,但就上述4组初始场来说,采用FNL(OPT)初始场(即第3节中的第4种初始气象场)的预报效果与观测最为接近。表2和表3进一步统计了北京市3个气象站点(即观象台、房山区和朝阳区站点)的风场、温度、相对湿度3个气象要素模拟与观测的相关系数和均方根误差。综合两者,可以得出结论:用GFS初始场进行预报的效果最差,而用FNL(OPT)初始场进行预报的总体效果最好。

表 2 北京市观象台、房山和朝阳区站点 2016 年 12 月 15~21 日期间温度、湿度、风场预报和观测的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between hourly observed and predicted temperature, relative humidity, wind speed at Guanxiangtai, Fangshan, and Chaoyang stations during 15–21 Dec 2016 in Beijing

		相关系数			
气象变量	站点	GFS 预报 与观测	FNL 预报 与观测	FNL(FDDA) 预报与观测	FNL(OPT) 预报与观测
温度	观象台	0.52	0.69	0.81	0.82
	房山	0.58	0.65	0.81	0.72
	朝阳	0.45	0.63	0.77	0.78
湿度	观象台	0.55	0.68	0.74	0.75
	房山	0.44	0.53	0.77	0.57
	朝阳	0.44	0.68	0.75	0.8
风速	观象台	0.02	0.08	0.02	0.21
	房山	0.08	0.01	0.03	0.25
	朝阳	0.01	0.16	0.12	0.05

表 3 北京市观象台、房山和朝阳区站点 2016 年 12 月 15~21 日温度、湿度、风场预报和观测值的均方根误差
Table 3 Root-mean-square errors (RMSEs) of hourly observed and predicted temperature, relative humidity and wind speed at Guanxiangtai, Fangshan, and Chaoyang stations during 15–21 Dec 2016 in Beijing

		RMSE			
气象变量	站点	GFS 预报 与观测	FNL 预报 与观测	FNL(FDDA) 预报与观测	FNL(OPT) 预报与观测
温度	观象台	3.25	2.82	2.65	2.66
	房山	3.11	2.96	2.30	2.91
	朝阳	3.40	2.90	2.81	2.73
湿度	观象台	31.27	37.02	36.57	30.49
	房山	27.80	33.36	29.03	29.36
	朝阳	28.77	33.69	35.10	27.39
风速	观象台	10.30	10.30	10.86	10.45
	房山	10.36	10.18	10.83	10.15
	朝阳	8.39	8.30	9.00	8.79

采用上述气象场的 4 种预报结果，强迫并积分 NAQPMS，得到北京市 2016 年 12 月 16~21 日空气重污染过程的 4 种预报结果。图 4 给出了 PM_{2.5} 浓度的预报结果。由图可知，对应于气象场预报效果最好的初始场[即 FNL(OPT) 初始场]，对应的 PM_{2.5} 的预报结果也与观测最接近。类似地，表 4 和表 5 计算了北京市 12 个国控站点 PM_{2.5} 的预报和观测的相关系数和均方根误差。同样，由 FNL(OPT) 初始场作为 WRF 初始场得到的 PM_{2.5} 预报效果最好，而 GFS 作为初始场得到的 PM_{2.5} 的预报效果最差。由此可见，初始气象场精度的高低在很大程度上决定了空气质量预报的精度。因此，根据第 3 节的试验方案，可用 FNL (OPT) 初始

场进行预报得到的 PM_{2.5} 浓度作为参考态来考察空气质量预报对初始气象场的敏感性。相应地，用 GFS 初始场进行预报得到的 PM_{2.5} 浓度关于参考态就具有最大预报误差。为方便叙述，将用 FNL(OPT) 和 GFS 初始场进行的预报分别记为“FNL(OPT) 预报”和“GFS 预报”。接下来，我们通过分析 GFS 预报和参考态 FNL(OPT)预报的初始场的偏差，即

表 4 北京市天坛、古城、万寿西宫、昌平各站点 2016 年 12 月 15~21 日期间 PM_{2.5} 小时预报和观测的相关系数统计
Table 4 Correlation coefficients between hourly observed and predicted PM_{2.5} concentrations at Tiantan, Gucheng, Wanshouxigong, and Changping stations during 15–21 Dec 2016 in Beijing

		相关系数			
站点		GFS 预报 与观测	FNL 预报 与观测	FNL(FDDA) 预报与观测	FNL(OPT) 预报与观测
定陵		0.03	0.3	0.6	0.6
东四		0.11	0.23	0.57	0.74
天坛		0.16	0.2	0.48	0.57
奥体中心		0.01	0.31	0.69	0.71
农展馆		0.17	0.21	0.61	0.57
古城		0.04	0.2	0.56	0.68
观园		0.08	0.29	0.53	0.78
海淀区万柳		0.07	0.23	0.69	0.73
万寿西宫		0.15	0.23	0.44	0.59
顺义		0.02	0.08	0.56	0.58
怀柔		0.34	0.29	0.55	0.51
昌平		0.17	0.19	0.68	0.81

表 5 北京市天坛、古城、万寿西宫、昌平、各站点 2016 年 12 月 15~21 日 PM_{2.5} 小时预报和观测的均方根误差统计
Table 5 Root-mean-square errors of hourly observed and predicted PM_{2.5} concentrations at Tiantan, Gucheng, Wanshouxigong, and Changping stations during 15–21 Dec 2016 in Beijing

		RMSE			
站点		GFS 预报 与观测	FNL 预报 与观测	FNL(FDDA) 预报与观测	FNL(OPT) 预报与观测
定陵		231.11	203.76	182.99	167.19
东四		196.99	194.21	186.47	115.76
天坛		243.79	247.04	219.58	190.88
奥体中心		209.82	175.81	194.76	141.42
农展馆		223.5	234.02	280.14	164.84
古城		262.09	228.43	185.73	161.41
观园		199.54	175.83	163.46	112.14
海淀区万柳		202.48	164.43	117	100.87
万寿西宫		242.49	235.46	202.06	179.38
顺义		192.96	194.97	199.35	113.5
怀柔		191.48	197.57	117.94	116.35
昌平		218.08	182.56	146.69	92.34

初始误差, 识别哪个气象变量以及哪个区域的初始不确定性对 PM_{2.5} 的预报结果不确定性的影响更大, 从而确定北京市 2016 年 12 月 16~21 日空气重污染过程 PM_{2.5} 浓度预报的目标观测变量和敏感区。

4.1 目标观测变量

如上所述, 可将 FNL(OPT) 预报作为“参考态”。基于该参考态, 对具有最大预报误差的 GFS 预报设计 3 组试验, 分别考察 WRF 模式中初始风场、温度场和比湿场的不确定性对 PM_{2.5} 浓度预报的影响。第一组试验将 GFS 预报的初始风场替换为参考态的初始风场, 进行更新预报, 从而估计当 GFS 预报的初始风场精度改善时, 其关于参考态 PM_{2.5} 的预报误差的减小程度; 第二组试验则将 GFS 预报的初始温度替换为参考态的初始温度, 考察初始温度场的改善对 PM_{2.5} 预报误差的减小程度; 第三组试验用参考态的初始比湿替换 GFS 预报的初始比湿进行类似的敏感性试验。为方便叙述, 记初始场改善后的 GFS 预报为“GFS(update) 预报”。

3 个试验中 PM_{2.5} 浓度预报结果的改善程度 c :

$$c = \frac{|P_G - P_R| - |P'_G - P_R|}{|P_G - P_R|} \times 100\%, \quad (1)$$

[其中, P_G 为 GFS 预报, 是 WRF 模型采用 GFS 初始场资料进行预报的结果; P_R 为 FNL (OPT) 预报, 是 WRF 模型采用 FNL (OPT) 作为初始场资料进行预报的结果; P'_G 为 GFS(update) 预报, 是 WRF 采用改善后的 GFS 初始场资料进行更新预报的结果。] 正值表示对预报结果有所改善, 值越大改善程度越好; 相反, 负值代表预报结果变差, 且值越小预报结果变差的程度越严重。从图 5 可以看出, 3 组试验给出的北京地区 PM_{2.5} 的预报均有不同程度的改善, 其中初始风场精度的改善对北京 PM_{2.5} 浓度的改善程度最大, 平均改善可达到 48.9%, 依次为初始温度的 37.4% 和初始比湿的 10.3%。可见, 3 个气象场变量中, 北京市 2016 年 12 月 16~21 日空气重污染过程 PM_{2.5} 浓度预报不确定性对初始风场的改善最敏感, 其次为初始温度和比湿。所以, 为了改进此次污染过程空气质量的预报, 应优先改进初始风场的精度, 即风场为该次污染过程 PM_{2.5} 浓度预报的优先目标观测变量, 其次为温度和比湿。

4.2 目标观测敏感区

上述研究结果已经表明, 优先对初始风场实施观测可以为提高 2016 年 12 月 15~21 日空气重污

染过程中 PM_{2.5} 的预报技巧提供一个有效途径。那么, 究竟应该在哪个区域实施观测对提高该次空气重污染事件 PM_{2.5} 浓度的预报最有效呢? 即该次事件预报的目标观测敏感区在何处? 关于目标观测敏感区, 这里仍然考虑具有最大预报误差的 GFS-预报的初始误差。考虑到风、温和比湿场在垂直方向上是连续的, 且模式设置采用了 3 层嵌套区域, 所以这里考察不同高度 (即 1000 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa 和 200 hPa) 和不同嵌套区域范围 (见图 2 中的 d01、d02 和 d03 区域) 的初始误差。如图 6 所示为 GFS 预报与参考态关于风场的初始误差, 图 7 为 GFS 预报与参考态关于温度场的初始误差, 图 8 所示为比湿场的初始误差。通过观察该初始误差的空间结构发现, 在该初始误差场中, 风场、温度、比湿的分布具有明显的局地性特征, 且初始风场误差主要集中在渤海湾 (1000 hPa) 和黑龙江区域 (850 hPa 及以上), 初始温度误差则分布在河南区域 (1000 hPa), 以及黑龙江区域 (850 hPa 及以上), 而初始比湿场主要在江苏区域 (1000 hPa) 存在一个误差大值区。

由上述结果可见, GFS 预报的初始场误差主要集中在少数区域, 具有明显的局地性特征。这种局地性特征说明, 上述区域的初始误差对 GFS 预报的 PM_{2.5} 浓度预报误差贡献最大。因此, 如果优先在这些区域实施观测, 减小这些区域的初始误差, GFS 预报的预报误差可能会有效减小。所以, 这些区域可能代表了该次空气重污染事件预报的目标观测敏感区。为了验证该推理, 针对上述识别的 GFS 预报的 3 个变量的 5 个误差大值区, 用参考态的初始场代替 GFS 预报在上述误差大值区的初始场, 并进行更新预报, 考察 GFS 预报在上述误差大值区 GFS 预报初始场精度的改善对该次事件 PM_{2.5} 预报技巧的改进程度 [此处预报技巧的改善程度也是通过公式 (1) 度量]。图 9 所示为提高初始风场在误差大值区的数据精度, 得到 PM_{2.5} 浓度预报水平的改善程度, 图 10 为提高初始场温度在误差大值区的数据精度, 得到 PM_{2.5} 浓度预报水平的改善程度, 图 11 为对应比湿场的 PM_{2.5} 预报改善程度。不同大值区对应气象变量初始场的改善对北京地区 PM_{2.5} 浓度的预报技巧均有不同程度的改善。事实上, 无论是风场、温度, 还是比湿场, 上述大值区的误差都可以理解为额外叠加在参考态上的初始扰动, 该扰动的发展使得参考态的气象场

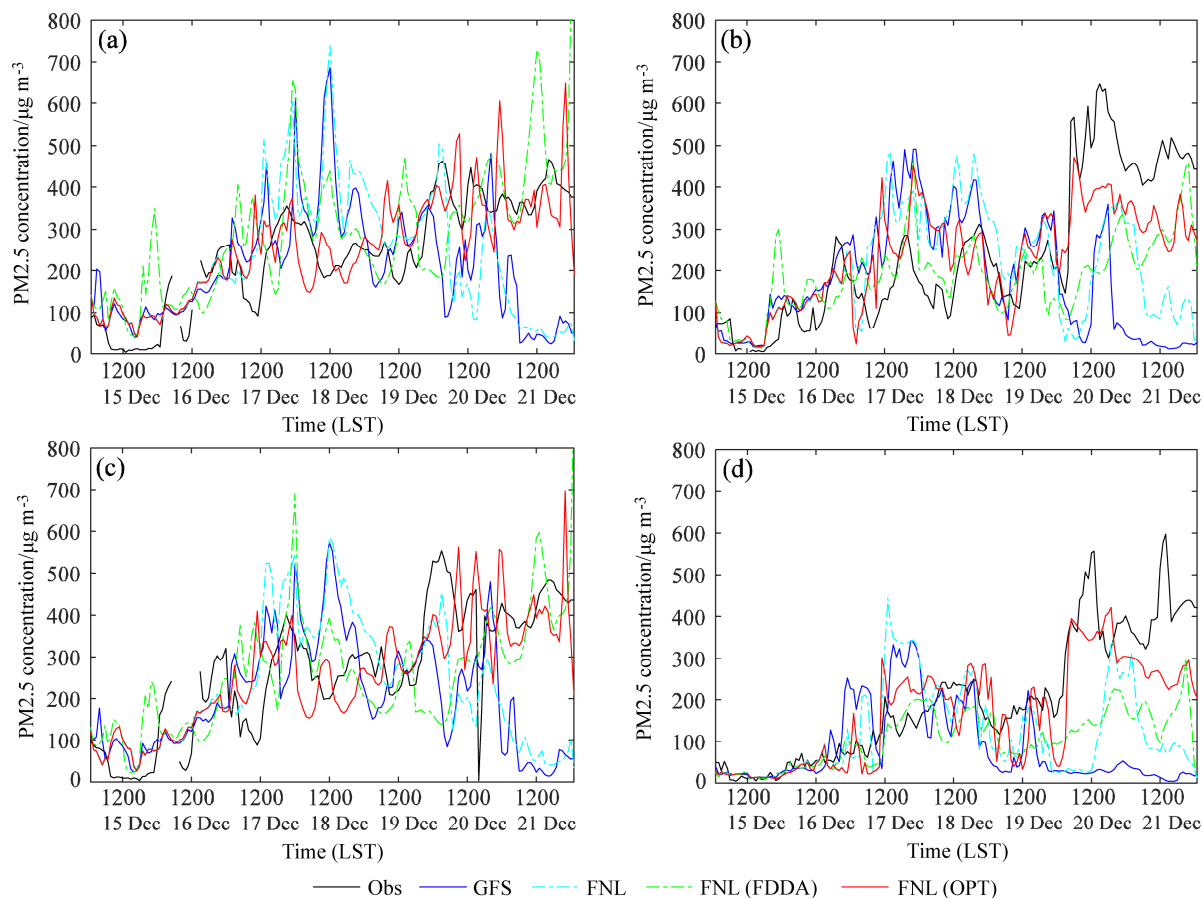


图4 北京市各站点 (a) 天坛、(b) 古城、(c) 万寿西宫、(d) 昌平 2016 年 12 月 15~21 日期间 PM_{2.5} 预报和观测值的对比

Fig. 4 Temporal variations of hourly observed and predicted PM_{2.5} concentrations at (a) Tiantan, (b) Gucheng, (c) Wanshouxigong, and (d) Changping during 15–21 Dec 2016 in Beijing

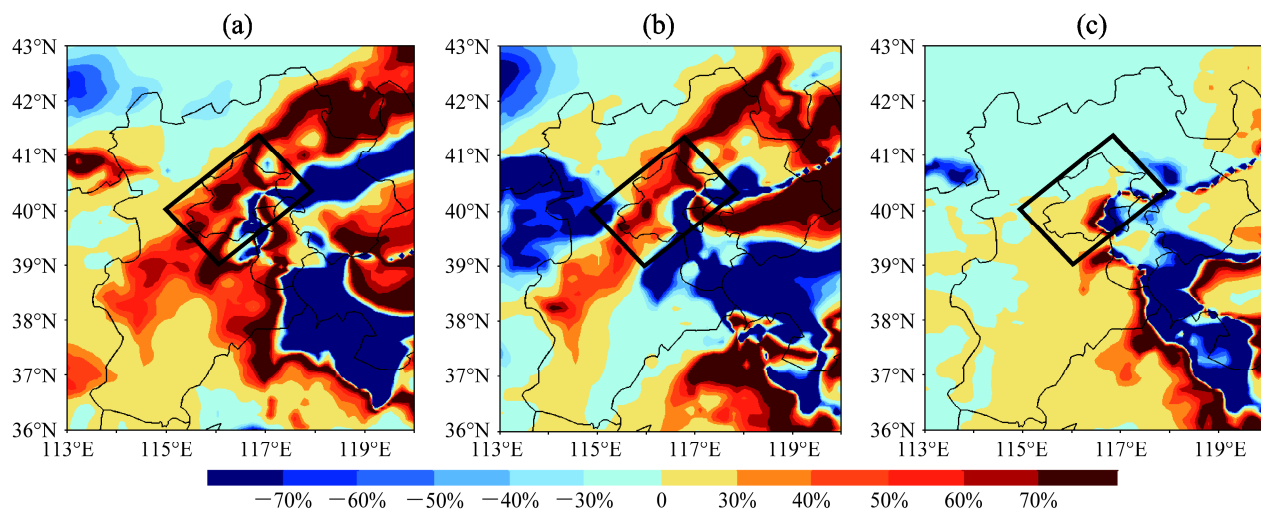


图5 WRF 模式中 (a) 初始风场、(b) 初始温度和 (c) 初始比湿精度的改善对 2016 年 12 月 15~21 日空气重污染过程 PM_{2.5} 浓度预报技巧的改善程度 (北京地区的改善程度可分别达到 48.9%、37.4% 和 10.3%。黑色框标记了北京地区)

Fig. 5 Improvement of the accuracy of (a) initial wind field, (b) initial temperature, and (c) initial specific humidity in WRF model for improving the PM_{2.5} concentration prediction skill in the heavy air pollution event during 15–21 Dec 2016 (their improvements in Beijing area can reach up to 48.9%, 37.4%, and 10.3%, respectively. Black box denotes Beijing area)

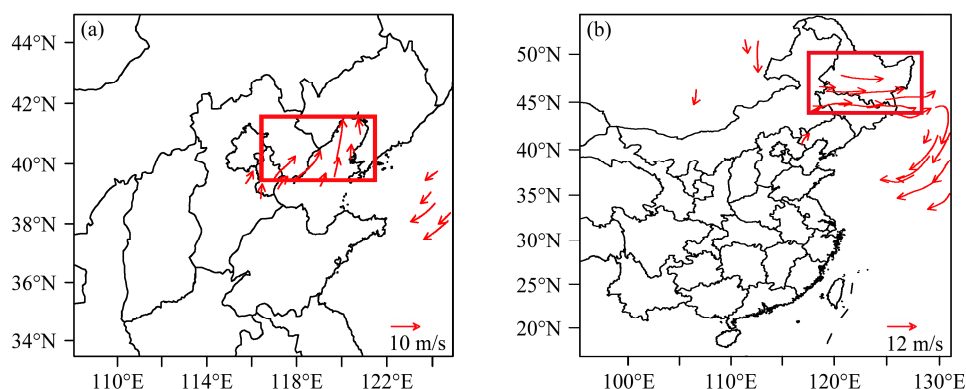


图6 GFS-预报关于参考态的初始风场误差: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa。红色框标注了误差的大值区

Fig. 6 Errors in GFS prediction of initial wind field relative to the reference state: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa. Red box marks the large error region

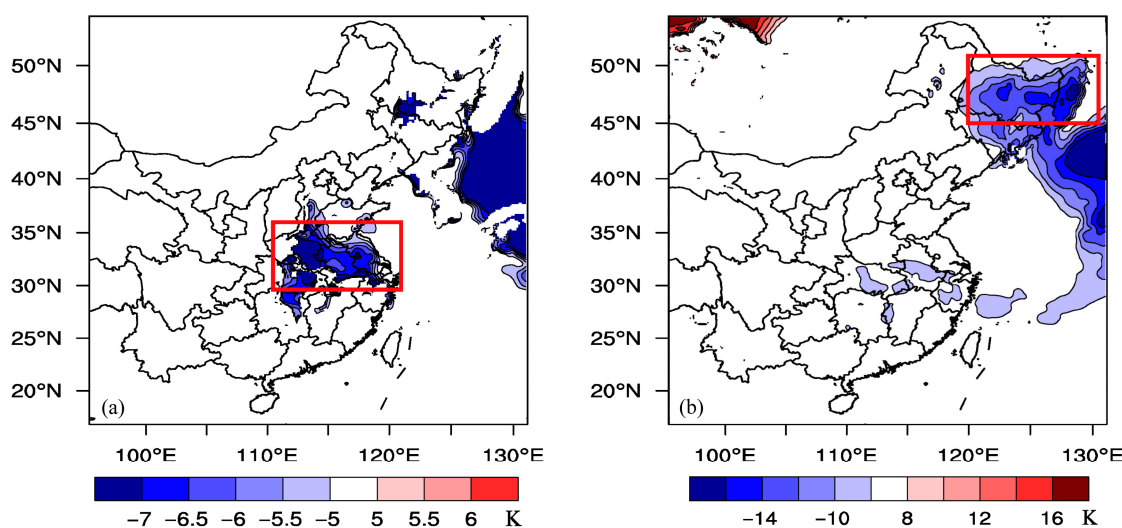


图7 同图6, 但为温度场

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for initial temperature field

产生偏差, 进而影响 PM_{2.5} 的预报结果。对于扰动风场, 它会直接通过动力学行为扰动 PM_{2.5} 的空间分布; 对于扰动温度场, 它则在空间上形成温度梯度, 产生扰动风场进而影响 PM_{2.5} 的分布; 扰动的比湿场将在风场的作用下, 影响目标区域的比湿, 加强或减弱区域凝结核的作用, 进而影响 PM_{2.5} 的预报。通过上述结果的对比, 我们发现, 在黑龙江地区改善初始风场的精度对北京 PM_{2.5} 浓度预报的改善最明显, 平均改进可达 9.49%, 占整个风场改进预报技巧的约 20%, 在北京东南地区的改善效果甚至可达到 40% 以上。

由于不同变量识别的误差大值区不统一, 不能统一地讨论北京空气质量对哪个区域气象场更敏感, 也为目标观测的实施提出了严峻挑战。为考察气象场不同要素的综合影响, 本研究进一步采用湿能量范数 (周菲凡, 2009) 来度量上述 3 个气象变

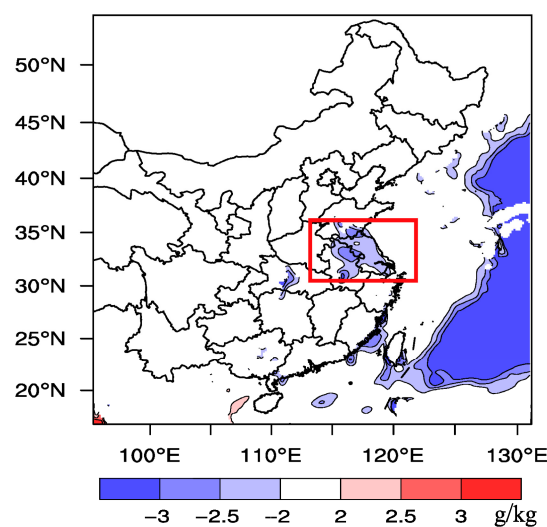


图8 GFS-预报关于参考态的初始比湿场误差 (红色框标记了 1000 hPa 高度的误差大值区)

Fig. 8 Errors in GFS prediction of initial specific humidity field relative to the reference state (red box marks the large error region in 1000 hPa)

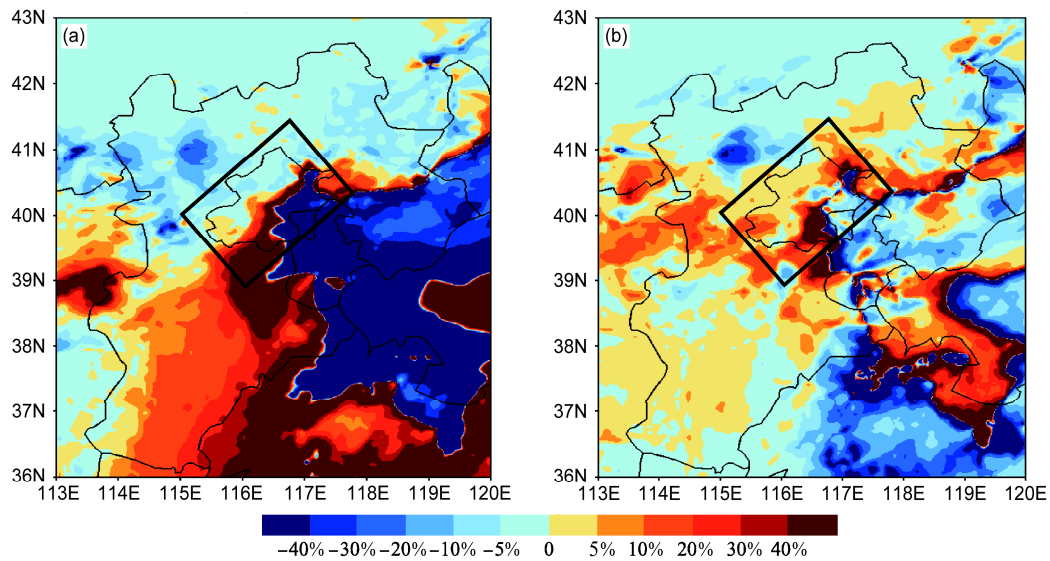


图9 提高误差大值区(a)渤海和(b)黑龙江的初始风场精度对PM2.5预报的改善程度。两者对北京地区PM2.5浓度预报的平均改善程度分别达到5.82%和9.49%(黑色框标注了北京地区)

Fig. 9 The improvement of PM2.5 prediction by improving the accuracy of wind field in large error regions: (a) Bohai; (b) Heilongjiang. The improvements in Beijing area on average reach up to 5.82% and 9.49%, respectively (black box marks Beijing area)

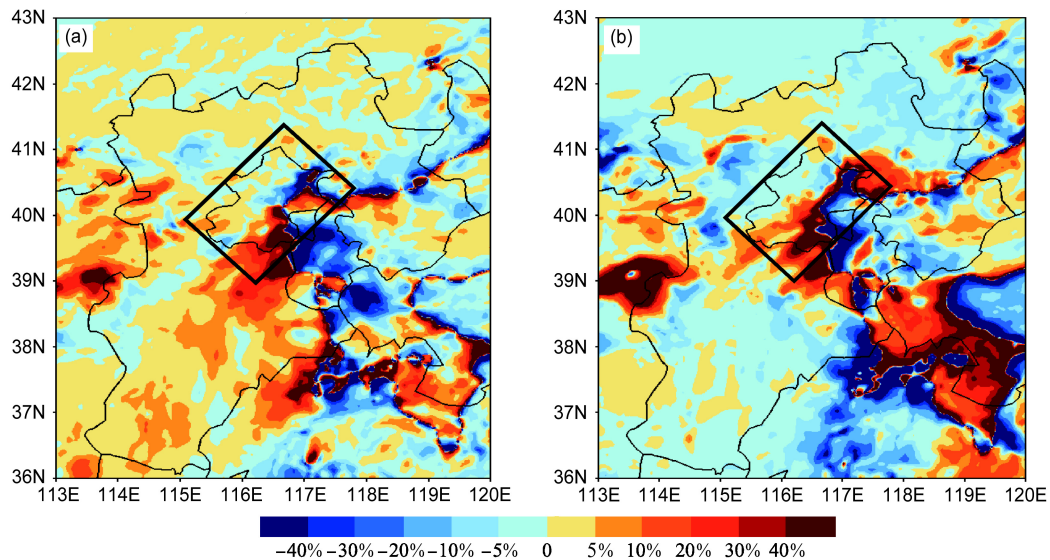


图10 提高误差大值区(a)河南和(b)黑龙江的初始温度场精度对PM2.5预报的改善程度。两者对北京地区PM2.5浓度预报的平均改善程度分别达到4.48%和6.87%(黑色框标注了北京地区)

Fig. 10 The improvement of PM2.5 prediction by improving the accuracy of temperature field in large error regions: (a) Henan; (b) Heilongjiang. The improvements in Beijing area on average reach up to 4.48% and 6.87%, respectively (black box marks Beijing area)

量不确定性对PM2.5浓度预报的共同影响。湿能量范数 S 公式如下:

$$S = U^2 + V^2 + \frac{c_p}{T_r} T^2 + R_a T_r \left(\frac{P}{p_r} \right)^2 + \frac{L^2}{c_p T_r} Q^2, \quad (2)$$

其中, U 、 V 分别为水平、垂直方向风速, T 为温度, p 为气压, Q 为水汽混合比(单位: kg/kg), $c_p=1005.7$

$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ 为定压比热, 干空气气体常数 $R_a=287.04 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, 潜热 $L=2.5104 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$; 参数 $p_r=1000 \text{ hPa}$, $T_r=270 \text{ K}$ 。通过公式(2), 我们计算了用湿能量范数度量的 GFS 预报的初始误差的空间分布(如图12所示)。由图可以看出, 初始误差在1000 hPa的高度上, 在天津附近存在一个误差大值区, 而在850 hPa及以上在黑龙江附近存在一个误

差大值区。这两个误差大值区与初始风场识别的误差大值区位置大致相符, 从而进一步说明了初始风场的不确定性是影响空气质量的主导气象因素。对这两个误差大值区, 将 GFS 预报在其中的初始风、温度、比湿场替换为参考态的初始场, 进行更新预报, 考察误差大值区初始气象场的改善对北京地区 PM_{2.5} 预报技巧的改进程度。如图 13 所示, 改善黑龙江地区比改善天津地区的初始风场、温度场和比湿场, 在更大范围对北京 PM_{2.5} 预报技巧有明显

改善, 区域平均改善可达到 11.18%, 在北京东南区域的改善效果甚至可达到 40% 以上。即是说, WRF 初始场中黑龙江地区气象数据精度的提高对北京 PM_{2.5} 预报效果改善更大, 更有利于提高模式对北京空气质量的预报水平。因此, 黑龙江地区是北京此次空气重污染事件预报的一个重要的气象场目标观测区域。

黑龙江距离北京如此遥远, 为什么黑龙江地区的气象条件, 尤其是初始风场的不确定性对北京 PM_{2.5} 浓度预报的影响更大, 从而使该地区可以作为此次空气重污染事件的目标观测敏感区呢? 为解释该问题, 在图 14 中给出了参考态和 GFS 预报的初始风场。从图可以看出, 参考态的初始风场中来源于黑龙江地区的东北风倾向于通过东亚大槽影响北京气象条件, 进而调制北京地区 PM_{2.5} 的浓度, 而在 GFS 预报中黑龙江地区呈现的是西北风, 削弱了吹向北京的风, 低估了黑龙江风场对北京地区 PM_{2.5} 浓度预报的影响, 从而凸显了黑龙江地区初始风场的精度在北京此次空气重污染事件预报中的重要作用。这也解释了为什么黑龙江地区可以作为北京此次空气重污染事件预报的一个目标观测敏感区。

5 结果与讨论

本文将目标观测方法应用于空气质量数值预报中, 针对北京市 2016 年 12 月空气重污染红色预警个例, 围绕 WRF 初始场误差, 通过敏感性试验识别了该次事件 PM_{2.5} 浓度预报的目标观测变量

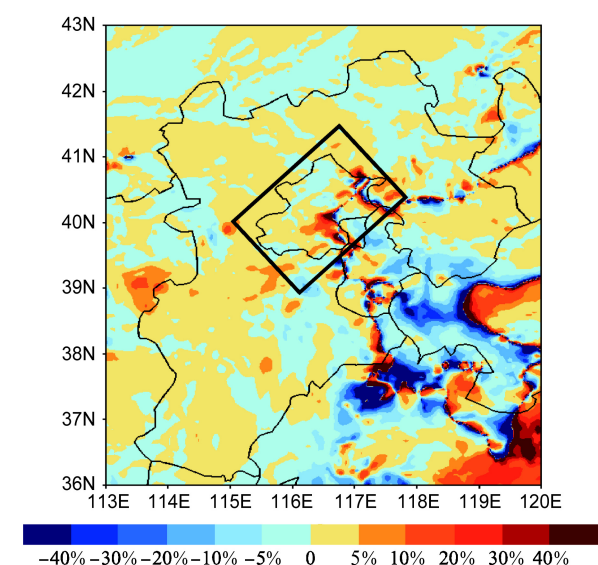


图 11 提高比湿场误差大值区(即江苏)初始场的精度对 PM_{2.5} 预报的改善程度, 其中对北京地区的平均改善程度仅为 2.04% (黑色框标注了北京地区)

Fig. 11 The improvement of PM_{2.5} prediction by improving the accuracy of specific humidity field in large error region (Jiangsu). The improvement in Beijing area is only about 2.04% (black box marks Beijing area)

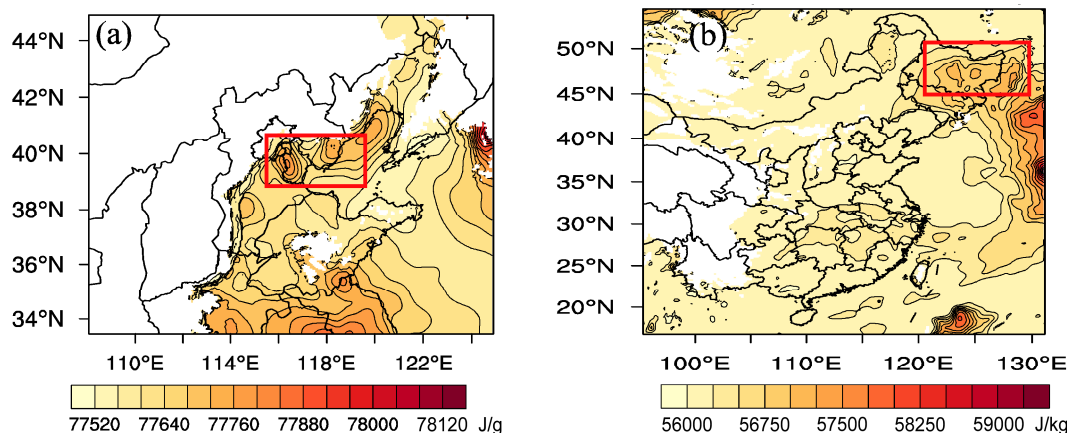


图 12 GFS-预报的用湿能量范数度量的初始误差的空间分布: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa。红色框标记了误差大值区

Fig. 12 Spatial distributions of initial error measured by the wet energy norm in GFS prediction: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa. Red box marks the large error region

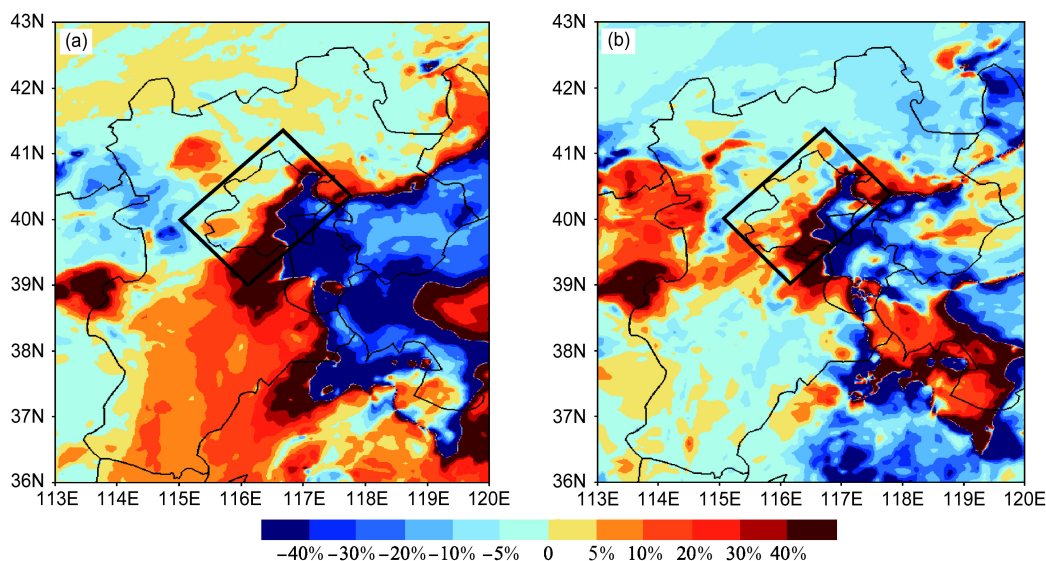


图 13 改进 GFS-预报在图 12 中的误差大值区 (a) 天津和 (b) 黑龙江的初始气象场精度对 PM_{2.5} 浓度预报技巧的改进程度。两者分别对北京地区 PM_{2.5} 的平均改善程度为 10.8% 和 11.18% 初始误差大值区; 黑色框标注了北京地区

Fig. 13 The improvement of PM_{2.5} prediction by improving the GFS initial meteorological field over two large error areas of (a) Tianjin and (b) Heilongjiang in Fig. 12. The improvements in Beijing area on average reach up to 10.8% and 11.18%, respectively. Black box marks Beijing area

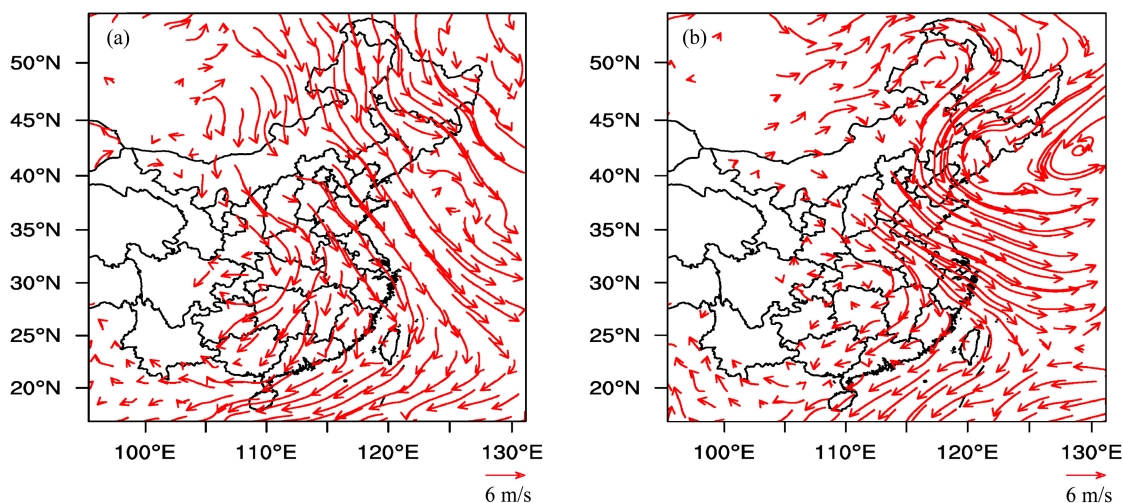


图 14 850 hPa 处 (a) GFS-预报的初始风场和 (b) 参考态的初始风场

Fig. 14 (a) Initial wind field in GFS prediction at 850 hPa; (b) initial wind field in the reference state at 850 hPa

及敏感区。由试验结果可知, WRF 模式初始场资料精度的提高有利于 PM_{2.5} 预报效果的改善, 并且在初始风场、温度、比湿 3 个气象变量中, 提高初始风场的精度对 PM_{2.5} 浓度的预报效果改进最大, 因而风场被认为是此次事件预报的目标观测变量; 进一步研究发现, 改善黑龙江地区的初始气象条件的精度, 尤其是初始风场的精度, 对北京地区 PM_{2.5} 浓度预报效果的改进最大, 因而黑龙江地区可作为初始气象场的一个重要目标观测敏感区。

程兴宏等 (程兴宏, 2008; 程兴宏等, 2009)

研究不同气象模式对空气质量数值预报的影响、并通过“源同化”模型研究排放源清单的不确定性对空气质量预报的影响。唐晓等 (2010) 通过蒙特卡洛方法研究模式参数不确定性对空气污染预报精度的影响。本文则从初始气象场的角度, 探讨通过增加观测来改进空气污染过程预报技巧的思路。当然, 前人也有研究气象场模拟差异对空气质量预报效果的影响, 并指出改进气象要素的模拟可显著减小空气质量的预报误差 (程兴宏等, 2009), 而且 Meng et al. (2016) 通过数值试验结果指出

PM_{2.5} 浓度对风场较温度和湿度更加敏感。本文的结论支持该观点, 尤其本文基于不同的初始分析场, 研究识别了北京地区 2016 年 12 月 16~21 日空气重污染事件预报的目标观测敏感区, 即优先通过增加观测提高该地区初始气象场的精度, 北京 PM_{2.5} 浓度的预报技巧会明显提高。该结论只针对该次事件, 为能够得到更多更有效地改进北京地区空气质量预报技巧的目标观测阵列, 需要对北京地区近几年众多的空气重污染个例进行目标观测研究, 以期提出更具普适性的目标观测建议, 从而提高空气质量预报技巧提供新的思路。

参考文献 (References)

- 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 Min, Ma Leiming, Wei Haiping, et al. 2013. Weather impacts on air quality of the World Expo in Shanghai [J]. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 24 (2): 140–150, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.02.002.
- Chen Z Y, Xie X M, Cai J, et al. 2018. Understanding meteorological influences on PM_{2.5} concentrations across China: A temporal and spatial perspective [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18 (8): 5343–5358, doi:10.5194/acp-2017-376.
- 程兴宏. 2008. 空气质量模式“源同化”模型及排放源影响效应研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 149pp. Cheng Xinghong. 2008. Research on inverse modeling of SO₂ and NO_x emissions coupled with air quality model using adaptive nudging scheme and its application on regulation of surrounding emission sources [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 149pp.
- 程兴宏, 徐祥德, 丁国安, 等. 2009. MM5/WRF 气象场模拟差异对 CMAQ 空气质量预报效果的影响 [J]. 环境科学研究, 22 (12): 1411–1419. Cheng Xinghong, Xu Xiangde, Ding Guoan, et al. 2009. Differences in MM5 and WRF meteorological field simulations and impact on air quality forecasting by CMAQ Model [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 22 (12): 1411–1419.
- 丑纪范, 郇吉东. 1995. 长期数值天气预报 (2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 353pp. Chou Jifan, Gao Jidong. 1995. Long-Term Numerical Weather Prediction (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 353pp.
- 高怡, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135.
- Gilliam R C, Hogrefe C, Godowitch J M, et al. 2015. Impact of inherent meteorology uncertainty on air quality model predictions [J]. J. Geophys. Res., 120: 12259–12280, doi:10.1002/2015JD023674.
- Kalnay E. 2003. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability [M]. The Edinburgh Building, New York: Cambridge University Press, 341pp.
- Li J, Wang Z, Zhuang G, et al. 2012. Mixing of Asian mineral dust with anthropogenic pollutants over East Asia: A model case study of a super-duststorm in March 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12 (16): 7591–7607, doi:10.5194/acp-12-7591-2012.
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. J. Atmos. Sci., 20 (2): 130–141, doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2.
- Meng G, Carmichael G R, Saide P E, et al. 2016. Response of winter fine particulate matter concentrations to emission and meteorology changes in North China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 16 (18): 11837–11851, doi:10.5194/acp-2016-429.
- Morss R E, Battisti D S. 2004. Evaluating observing requirements for ENSO prediction: Experiments with an intermediate coupled model [J]. J. Climate, 17 (16): 3057–3073, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3057: EORFEP>2.0.CO;2.
- 穆穆, 秦晓昊, 周非凡, 等. 2012. 加强目标观测, 服务防灾减灾 [J]. 成都信息工程学院学报, 27 (1): 20–26. Mu Mu, Qin Xiaohao, Zhou Feifan, et al. 2012. Developing the adaptive observations, reducing the disasters [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 27 (1): 20–26, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2012.01.002.
- Mu M. 2013. Methods, current status, and prospect of targeted observation [J]. Science China Earth Sciences, 56 (12): 1997–2005, doi:10.1007/s11430-013-4727-x.
- 任万辉, 苏枫枫, 赵宏德. 2010. 城市环境空气污染预报研究进展 [J]. 环境保护科学, 36 (3): 9–11. Ren Wanhui, Su Congcong, Zhao Hongde. 2010. Research progress of air pollution forecasting in urban area [J]. Environmental Protection Science (in Chinese), 36 (3): 9–11, doi:10.3969/j.issn.1004-6216.2010.03.004.
- Riehl H, Haggard W H, Sanborn R W. 1956. On the prediction of 24-hour hurricane motion [J]. J. Meteor., 13 (5): 415–420, doi:10.1175/1520-0469(1956)013<0415:OTPOHH>2.0.CO;2.
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (5): 953–961, doi:10.1175/1520-0477-77.5.953.
- 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 2007. 北京 PM₁₀ 持续污染及与常规气象要素的关系 [J]. 环境科学研究, 20 (6): 77–82. Sui Keke, Wang Zifa, Yang Jun, et al. 2007. Beijing persistent PM₁₀ pollution and its relationship with general meteorological features [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (6): 77–82.
- 唐晓, 王自发, 朱江, 等. 2010. 蒙特卡罗不确定性分析在 O₃ 模拟中的初步应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 541–550. Tang Xiao, Wang Zifa, Zhu Jiang, et al. 2010. Preliminary application of Monte Carlo uncertainty analysis in O₃ simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 541–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.05.02.
- Tang X, Zhu J, Wang Z F, et al. 2011. Improvement of ozone forecast over Beijing based on ensemble Kalman filter with simultaneous adjustment of initial conditions and emissions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11 (24): 12901–12916, doi:10.5194/acp-11-12901-2011.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 2006. 大气环境化学 (2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 49–62. Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. 2006. Atmospheric Environmental Chemistry (2nd ed) (in Chinese) [M].

- Beijing: Higher Education Press, 49–62.
- 佟彦超. 2006. 中国重点城市空气污染预报及其进展 [J]. 中国环境监测, 22 (2): 69–71. Tong Yanchao. 2006. Air quality forecast and development in major cities of China [J]. Environmental Monitoring in China (in Chinese), 22 (2): 69–71, doi:10.3969/j.issn.1002-6002.2006.02.022.
- 王威, 李杰, 朱莉莉. 2016. 9·3 阅兵期间京津冀及周边地区污染源减排贡献模拟分析 [C]//2016 中国环境科学学会学术年会论文集 (第一卷). 海口: 中国环境科学学会, 38–45. Wang Wei, Li Jie, Zhu Lili. 2016. 9·3 simulation analysis of contribution of pollutants to emission reduction in Beijing–Tianjin–Hebeiregion and peripheral areas during parade [C]//Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences (in Chinese). Haikou: Chinese Society for Environmental Sciences, 38–45.
- Wang Z, Maeda T, Hayashi M, et al. 2001. A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales: Application for high-ozone episode in Taiwan [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 130 (1–4): 391–396, doi:10.1023/A:1013833217916.
- 王哲, 王自发, 李杰, 等. 2014. 气象—化学双向耦合模式 (WRF–NAQPMS) 研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 153–163. Wang Zhe, Wang Zifa, Li Jie, et al. 2014. Development of a meteorology–chemistry two-way coupled numerical model (WRF–NAQPMS) and its application in a severe autumn haze simulation over the Beijing–Tianjin–Hebei area, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 153–163, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13231.
- 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 2006. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用 [J]. 大气科学, 30 (5): 778–790. Wang Zifa, XieFuying, Wang Xiquan, et al. 2006. Development and application of Nested Air Quality Prediction Modeling System [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 778–790, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.07.
- 吴其重, 王自发, 徐文帅, 等. 2010. 多模式模拟评估奥运赛事期间可吸入颗粒物减排效果 [J]. 环境科学学报, 30 (9): 1739–1748. Wu Qizhong, Wang Zifa, Xu Wenshuai, et al. 2010. Multi-model simulation of PM10 during the 2008 Beijing Olympic Games: Effectiveness of emission restrictions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 30 (9): 1739–1748.
- 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2017. 2016 年京津冀地区 PM2.5 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 Xingchuan, Zhao Wenji, Xiong Qiulin, et al. 2017. Spatio-temporal distribution of PM2.5 in Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors [J]. Ecology and Environment Sciences (in Chinese), 26 (10): 1747–1754, doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.014.
- 周非凡. 2009. 条件非线性最优扰动方法在台风目标观测中的应用研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 136pp. Zhou Feifan. 2009. Application of the optimal nonlinear perturbation method to typhoon target observation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 136pp.
- Zhou F F, Mu M. 2012. The time and regime dependencies of sensitive areas for tropical cyclone prediction using the CNOP method [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (4): 705–716, doi:10.1007/s00376-012-1174-0.