氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

气象预报模式参数化方案对重污染过程PM2.5浓度预报效果的影响

韩丽娜 唐晓 陈科艺 周慧 孔磊 张佩文 黄树元 吴倩 曹凯 王自发

Inflence of Meteorological Forecast Model Parameterization Schemes on PM2.5 Concentration Forecast Effect in Heavy Pollution Process

HAN Lina TANG Xiao CHEN Keyi ZHOU Hui KONG Lei ZHANG Peiwen HUANG Shuyuan WU Qian CAO Kai WANG Zifa

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20073

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

北京地区一次PM2.5重污染过程的边界层特征分析

Boundary Layer Characteristics during a Heavy PM2.5 Pollution Process in Beijing

气候与环境研究. 2019, 24(1): 61 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057

秸秆燃烧排放对北京及其周边地区PM2.5浓度影响的数值模拟

Modeling the Impact of Emissions from Crop Residue Burning on PM2.5 Concentration in Beijing and Its Surrounding Areas

气候与环境研究. 2018, 23(5): 587 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17171

北京地区一次空气重污染过程的气象条件模拟参数化敏感性试验

Sensitivity Experiments of Meteorological Parameterization Schemes for WRF Model during a Heavy Air Pollution Episode in Beijing

气候与环境研究. 2020, 25(3): 253 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19053

基于能见度及AOD数据的北京市PM2.5浓度的反演

Inversion of PM2.5 Concentration in Beijing Based on Visibility and AOD Data

气候与环境研究. 2020, 25(5): 521 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19114

北京地区一次空气重污染过程的目标观测分析

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

气候与环境研究. 2018, 23(5): 619 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18025

基于无人机垂直观测的南京PM2.5污染个例研究

A Case Study of PM2.5 Pollution in Nanjing Based on Unmanned Aerial Vehicle Vertical Observations

气候与环境研究. 2020, 25(3): 292 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19014

关注微信公众号，获得更多资讯信息

韩丽娜, 唐晓, 陈科艺, 等. 2021. 气象预报模式参数化方案对重污染过程 PM2.5 浓度预报效果的影响 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 312−322. HAN Lina, TANG Xiao, CHEN Keyi, et al. 2021. Inflence of Meteorological Forecast Model Parameterization Schemes on PM2.5 Concentration Forecast Effect in Heavy Pollution Process [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 312−322. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20073

气象预报模式参数化方案对重污染过程 PM2.5 浓度预报效果的影响

韩丽娜[1,2] 唐晓[2] 陈科艺[1] 周慧[3] 孔磊[2,4] 张佩文[1,2]
黄树元[1,2] 吴倩[2,4] 曹凯[2,4] 王自发[2,4]

1 成都信息工程大学，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029
3 湖南省气象台，长沙 410118
4 中国科学院大学，北京 100049

摘　要　针对北京市 2016 年 12 月 16～21 日的重污染过程，基于嵌套网格空气质量模式预报系统（NAQPMS），面向气象驱动模式 WRF 中 7 类物理过程的参数化方案，通过单扰动和组合扰动方式构建了 51 组不同的 WRF 模式运行配置，对比分析不同方案配置下 NAQPMS 对这次重污染过程细颗粒物（PM2.5）浓度预报的性能。结果表明：在重污染时段，组合扰动优化方案在城中心站点和城郊站点的 PM2.5 浓度预报精度都显著高于基准参数化方案配置下的预报结果，特别是能显著改进基准方案下模式对重污染过程结束时间的预报误差问题，显著减小 12 月 21 日存在的预报偏差。从统计指标来看，城中心站点在组合扰动优化方案下预报相关性最高，相关系数在 0.7 以上；从预报均方根误差来看，组合扰动优化方案误差最小。城郊站点同样是在组合扰动优化方案下预报相关性最高，与观测之间的偏差更小。从污染物与气象要素的空间分布来看，组合扰动优化方案比基准方案能更好再现污染时段的气象要素变化，预报的风速更小、相对湿度更高，从而有利于 12 月 21 日北京高浓度 PM2.5 的维持和累积。本文结果表明气象预报模式参数化方案不确定性是重污染预报的关键不确定性来源，选择合适的参数化方案可以减小重污染期间气象要素的模拟偏差，并可进一步提高重污染时段的 PM2.5 浓度预报精度。

关键词　细颗粒物（PM2.5）浓度预报　气象参数化方案优选　大气重污染过程　北京
文章编号　1006-9585(2021)03-0312-11　　**中图分类号**　P435　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20073

Inflence of Meteorological Forecast Model Parameterization Schemes on PM2.5 Concentration Forecast Effect in Heavy Pollution Process

HAN Lina[1,2], TANG Xiao[2], CHEN Keyi[1], ZHOU Hui[3], KONG Lei[2,4], ZHANG Peiwen[1,2], HUANG Shuyuan[1,2], WU Qian[2,4], CAO Kai[2,4], and WANG Zifa[2,4]

收稿日期　2020-06-27；**网络预出版日期**　2020-09-28
作者简介　韩丽娜，女，1994 年出生，硕士研究生，主要从事数值模拟研究。E-mail: hanliina@163.com
通讯作者　唐晓，E-mail: tangxiao@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划 2018YFC0213503，国家自然科学基金面上项目 41875164，中国科学院信息化专项课题 XXH13506-302，中国科学院战略性先导科技专项 XDA19040201
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC0213503), National Natural Science Foundation of China (Grant 41875164), Special Subject of Informatization of Chinese Academy of Sciences (Grant XXH13506-302), Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Program (Grant XDA19040201)

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *Hunan Provincial Meteorological Observatory*, *Changsha* 410118
4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract　Based on the Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS), this paper is oriented toward the parameterization of seven types of physical processes in the weather-driven model, Weather Research and Forecast Model (WRF). Fifty-one sets of different WRF model operating configurations are constructed through single disturbance and combined disturbance methods. The paper compares and analyzes the performance of NAQPMS for PM2.5 concentration forecasting during the heavy pollution period in Beijing from 16–21 December 2016, under different scheme configurations. The results show that during the heavy pollution period, the PM2.5 concentration forecast accuracy of the combined disturbance optimization scheme at the central station and the suburban station is significantly higher than the forecast results under the configuration of the baseline parameterization scheme. The combined disturbance optimization scheme can significantly improve the model's forecast error for the end time of the heavy pollution process under the baseline scheme, and significantly reduce the forecast deviation that exists on 21 December 2016. Judging from the statistical indicators, the city center station has the highest forecast correlation under the combined optimization scheme, with a correlation coefficient>0.7; from the perspective of the root mean square error of the forecast, the combined optimization scheme has the smallest error. Furthermore, suburban stations have the highest forecast correlation under the combined optimization scheme, and the deviation from the observations is smaller than that of the central station. From the perspective of the spatial distribution of pollutants and meteorological elements, the combined disturbance optimization scheme can better reproduce the changes in meteorological elements during the pollution period than the baseline scheme. The forecasted wind speed is low and the relative humidity is high, which is conducive to the maintenance and accumulation of high concentrations of PM2.5 in Beijing on 21 December. The results of this paper show that the uncertainty of the parameterization scheme of the meteorological forecasting model is the key source of uncertainty for heavy pollution forecasting. Choosing a suitable parameterization scheme can reduce the simulation deviation of meteorological elements during the heavy pollution period and further increase the PM2.5 concentration forecast accuracy during the heavy pollution period.

Keywords　PM2.5 concentration forecast, Meteorological parameterization scheme optimization, Air Pollution Process, Beijing

1　引言

在高强度污染排放和能源消耗背景下，我国区域大气重污染事件频发，尤其是北京—天津—河北（京津冀）及周边地区。重污染期间高浓度污染物以及低能见度对公众健康、大气环境以及交通安全均造成了诸多的负面影响。对重污染的范围、污染物来源以及发生发展时间节点等做出准确的预报预警是重污染防控的关键环节（高文康等, 2016; 皇甫玮喆, 2017; 耿东颖, 2018）。但由于大气污染面临排放数据不准确、化学反应机制不清晰等难题，精准的重污染预报预警仍面临巨大挑战。国内外学者为了改进大气污染预报精度，开展了大量工作。李冬青等（2020）利用不同分辨率 CMAQ 模式对北京市 PM2.5 的浓度预报效果进行对比分析，发现高分辨率模式的预报效果整体优于低分辨率预报模式。张天航等（2019）利用均值集成、多元线性回归集成、权重集成以及 BP-ANNs 方法开展了集成预报研究，结果表明最优集成的 PM2.5 浓度预报效果最好，能较大幅度降低我国重污染区域的预报偏差，但在预报污染峰值上存在一定的不足。潘锦秀等（2019）建立了多元线性回归集成预报模型，发现该预报模型能显著提高 PM2.5 浓度预报的准确率。胡译文等（2019）通过同化气象资料探究其对 PM2.5 模拟效果的影响，发现同化试验表现出明显的优化效果，在预报的第 10～30 小时时段上有显著的预报改进效果。

以上研究可以看出数值模式是当前进行大气污染预报的重要工具，同时也是改善预报的关键，但数值模式的不确定性使其在实际应用中仍面临巨大

挑战。巨菲等（2019）根据陕西重污染天气的防治现状以及近 5 年来的重污染天气预报情况，总结分析了重污染天气预报过程中存在的一些问题，指出由于缺乏精准的区域大气污染源资料等问题，数值预报模式在预报时效、空间分辨率以及预报准确率等方面仍存在很多不足。大气污染数值模式预报的不确定性来源主要为模式误差、初始和边界条件误差、排放源、化学过程、干沉降过程以及气象场输入误差（朱江等, 2018）。针对空气质量预报的不确定性，有研究认为初始气象场数据的精度对重污染过程预报的影响较大（刘娜等, 2018）。有研究发现不同天气背景条件下，同一地区在相同排放强度所造成的近地面污染物浓度要相差几倍甚至几十倍（陈敏等, 2013）。重污染天气频发的主要原因是气溶胶污染程度加剧（张小曳等, 2013），在本地排放一定的情况下，影响气溶胶浓度的因素主要是气象条件，且 PM2.5 的污染源主要分布在边界层内，因此气象条件是决定污染物浓度短期变化的关键因素（廖晓农等, 2014; 张建忠等, 2014, 2016; 程念亮等, 2015）。Zhang et al.（2007）发现休斯顿及周边地区污染物预报的不确定性很大程度上是由气象不确定性导致。Bei et al.（2017）通过 WRF-Chem 模式对京津冀一次大气重污染过程进行模拟，结果表明气象条件的不确定性极大地影响了北京地区观测点的气溶胶成分模拟。因此，在大气重污染预报中考虑气象不确定性是非常必要的。

气象模式参数化方案的选择可以显著影响关键气象要素的预报精度。杜娟等（2019）利用 WRF 数值模式，评估不同的参数化方案对新疆地区温度和风速预报结果的影响，发现修改后的参数化方案组合能提高模式对 2 m 温度的预报精度。陈锋等（2012）评估了 WRF 模式对浙江省夏季温度的预报性能，并探究了不同微物理参数化方案和积云参数化方案的影响效果。但在针对大气重污染预报方面，从气象模式参数化方案入手改善重污染预报的工作仍非常少，其影响和潜力亟待分析。因此，本文从气象模式的参数化方案着手，开展不同参数化方案配置下的 PM2.5 浓度预报试验，对比不同方案间的优劣，为减小重污染预报的不确定性提供参考。2016 年 12 月 16～21 日北京地区发生了一次重污染过程，北京市启动了空气重污染红色预警措施，是一次覆盖面积广、污染程度重、持续时间长的大气重污染过程。针对此次污染过程，韩丽娜等（2020）分析了不同模式参数化方案下气象要素预报精度的差异。本文在此基础上，进一步分析不同气象参数化方案配置下重污染期间 PM2.5 浓度预报精度的差异。

2 模式介绍与试验设计

2.1 模式系统介绍

本文试验使用的区域空气质量模式是由中国科学院大气物理研究所自主研发的嵌套网格空气质量预报模式系统 NAQPMS（王自发等, 2006）。该模式集成了国际先进的大气污染物理化学机制模拟模块，实现大气污染复杂物理化学过程的相互作用模拟，具备上百种污染物三维时空分布与输送转化过程的模拟能力，在研究酸雨、沙尘、臭氧和灰霾等空气污染问题上有广泛的应用（郑捷等, 2016; 卢苗苗等, 2017; 刘娜等, 2018; 赵芸程等, 2019）。

NAQPMS 模式区域覆盖整个中国区域（图 1a），水平分辨率为 15 km×15 km。垂直方向采用地形追随坐标，分为 20 层，取第一层作为近地面层的污染物浓度与地面观测污染物浓度进行对比，模式层顶高度为 20 km。图 1b 给出了北京市 12 个国控空气质量监测站点的分布。将 12 个国控站点分成两类，一类是城中心站，包括海淀区万柳、奥体中心、农展馆、官园、东四、万寿西宫、天坛、古城共 8 个观测站；另一类是城郊站，包括定陵、昌平镇、顺义新城、怀柔镇 4 个观测站。模式系统需要提供两部分重要输入数据作为强迫场，一部分是由 WRF 气象模式提供的气象数据资料；另一部分是排放源清单，模式所使用的 HTAP 排放源清单（Hemispheric Transport of Air Pollution）是以 2010 年为基准年的排放源，空间分辨率为 0.1°（纬度）×0.1°（经度），排放类型包括 7 类（Janssens-Maenhout et al., 2015）。

2.2 试验设计

本研究通过调整 WRF 模式中物理参数化方案配置来模拟得到不同气象场数据，并利用其驱动 NAQPMS 模式对北京市 2016 年 12 月 16～21 日的空气重污染过程进行模拟。试验所使用的 WRF 模式为 WRFv3.6 版本，此版本提供多种参数化方案配置，主要包括长波辐射过程、短波辐射过程、微物理过程、积云对流过程、近地面过程、边界层过程以及陆面过程。表 1 给出了基准试验中参数化方案配置。单扰动方案是基准试验基础上，一次改变

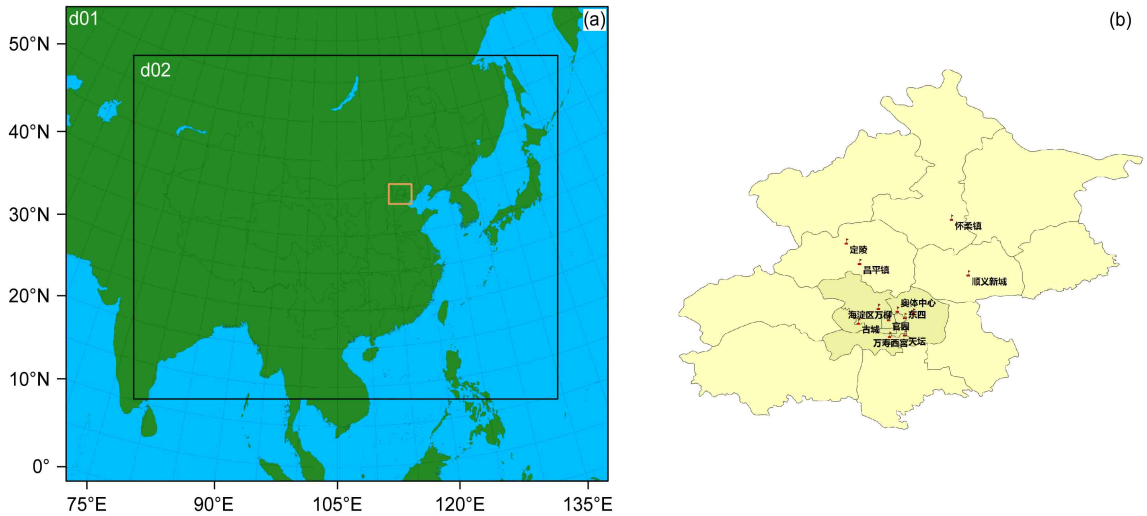

图 1　（a）WRF 模式两层嵌套网格设置（d01 和 d02 分辨率分别为 45 km 和 15 km，d02 区域为 NAQPMS 模式模拟区域）和（b）北京市 12 个国控站点分布

Fig. 1　(a) Two nested domains grid settings in WRF model (the resolutions are 45 km and 15 km, respectively, and d02 is the simulation area of NAQPMS model) and (b) distribution of 12 state-controlled stations in Beijing

表 1　基准试验中参数化方案配置

Table 1　Parameterization scheme configuration in baseline test

物理过程	基准方案
微物理过程	Lin方案（Chen and Sun, 2002）
长波辐射过程	RRTMG方案（Iacono et al., 2008）
短波辐射过程	RRTMG方案（Iacono et al., 2008）
积云参数化过程	Tiedtke方案（Zhang et al., 2011）
陆面过程	Noah方案（Tewari et al., 2004）
近地面过程	Monin-Obukhov方案（Janjić, 1994）
边界层过程	Mellor-Yamada-Janjic（MYJ）方案（Janjić, 1994）

某一个过程的参数化方案配置，共开展了 49 组试验。将 49 组试验中优选出的气象要素（温度、相对湿度、风）模拟效果最好的一类方案组合称为“单扰动优化方案”（如表 2）。此单扰动优化方案的选择是基于韩丽娜等（2020）的气象参数化方案优选结果，该方案组合主要是将基准方案中的边界层方案改为 MYNN 3rd 边界层方案。此外，针对 7 类过程中的每一类过程，优选出气象要素模拟效果最优的一种方案，再将这些单项最优方案组合，这种方案配置称为“组合扰动优化方案”（如表 3）。

3　结果分析

3.1　重污染预报的时间序列评估

为了对比不同方案的浓度预报精度差异，选取

表 2　单扰动优化参数化方案配置

Table 2　Single-perturbation optimal parameterization scheme configuration

物理过程	单扰动优化方案
微物理过程	Lin方案（Chen and Sun, 2002）
长波辐射过程	RRTMG方案（Iacono et al., 2008）
短波辐射过程	RRTMG方案（Iacono et al., 2008）
积云参数化过程	Tiedtke方案（Zhang et al., 2011）
陆面过程	Noah方案（Tewari et al., 2004）
近地面过程	Monin-Obukhov方案（Janjić, 1994）
边界层过程	MYNN 3rd方案（Nakanishi and Niino, 2006）

注：在表1基准方案的基础上修改了边界层方案。

表 3　组合扰动优化参数化方案配置

Table 3　Combined perturbation optimization parameterization scheme configuration

物理过程	组合扰动优化方案
微物理过程	NSSL-LFO 1-moment, 6-class方案（Gilmore et al., 2004）
长波辐射过程	CAM方案（Collins et al., 2004）
短波辐射过程	Dudhia方案（Dudhia, 1989）
积云参数化过程	Zhang-McFarlane from CESM方案（Zhang and McFarlane, 1995）
陆面过程	Noah-MP方案（Yang et al., 2011）
近地面过程	MYNN方案（Nakanishi and Niino, 2006）
边界层过程	MYNN 3rd方案（Nakanishi and Niino, 2006）

注：微物理方案是针对基准方案中微物理方案进行单扰动后的最优方案，长波方案是针对基准方案中长波方案进行单扰动后的最优方案，短波方案是针对基准方案中短波方案进行单扰动后的最优方案，以此类推。

了奥体中心站、怀柔镇站分别作为城中心站、城郊站的代表站点进行分析。图 2 为奥体中心站不同方案 PM2.5 模拟与实测浓度之间的时间序列。从观测数据中可以看出 14～17 日污染浓度不断累积，在 17～18 日 PM2.5 浓度达到 400 μg/m^3 左右，18～19 日浓度降至 200 μg/m^3 左右，持续了两天之后在 20～21 日浓度又上升至 400 μg/m^3 左右，污染程度加剧。从图中模拟结果可以看出，所有方案均能较好地模拟出 14～19 日污染物浓度持续累积的过程，但对于 20～21 日污染程度加剧的时段，不同的方案呈现了不同的模拟结果。组合扰动优化方案相比其余方案能更好再现 20～21 日污染程度加剧的趋势，预报 PM2.5 浓度最大值达到 320 μg/m^3 左右，而其余方案预报的 PM2.5 浓度最高才达到 100 μg/m^3 左右。因此，对于重污染时段 20～21 日期间，组合扰动优化方案对于 PM2.5 浓度峰值的模拟效果更优。从物理方案角度看，不同积云对流方案和微物理方案模拟结果差异较小，长波过程、边界层过程、短波过程方案间的模拟结果差异较大。这说明对于这次污染过程，不同积云方案和微物理方案的不确定性对 PM2.5 浓度模拟结果影响较小，长波过程、边界层过程和短波过程的不确定性对 PM2.5 浓度模拟结果影响较大。

图 3 为怀柔镇站不同方案 PM2.5 模拟与实测浓度的时间序列。城郊站点的实测情况与城中心站存在一些差异，尤其在 14～18 日期间。从怀柔镇的实测数据可以看出，在 14～18 日期间呈现 PM2.5 浓度累积的趋势，但累积的浓度值相比城中心站低，最高浓度为 200 μg/m^3 左右。与城中心站类似，怀柔镇实测值在 20～21 日期间达到污染程度最重，PM2.5 浓度达 400 μg/m^3 左右。从模拟结果可以看出，所有方案在 14～18 日期间均能较好再现观测浓度的上升趋势，方案间的差异较小。方案间差异主要体现在 20～21 日期间的 PM2.5 浓度

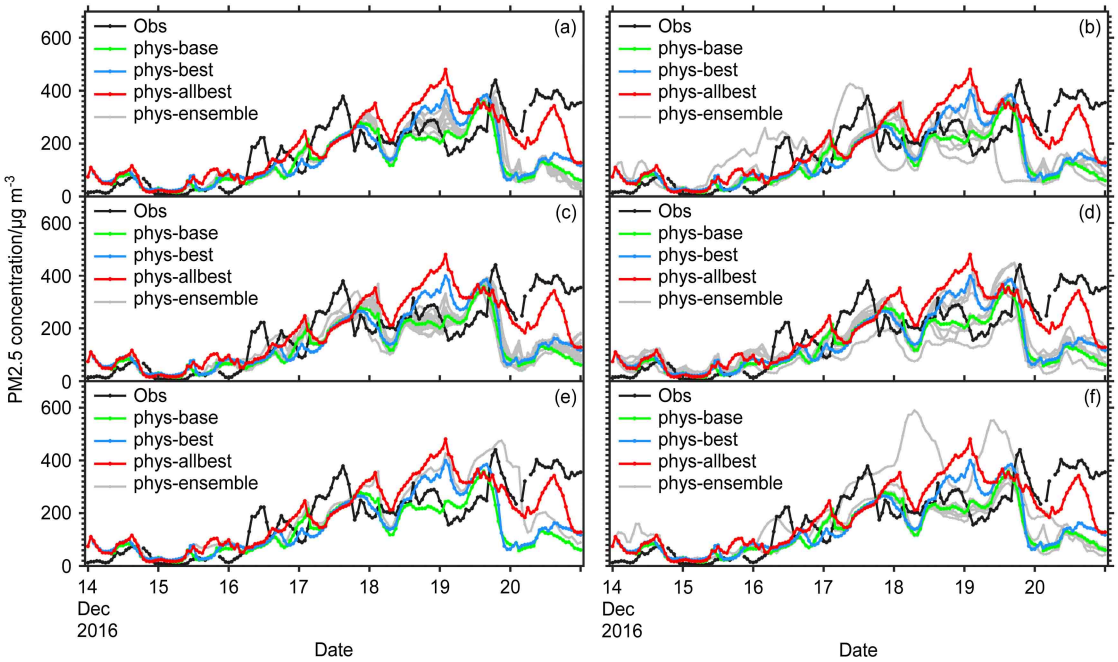

图 2 北京市奥体中心站不同物理过程 PM2.5 模拟与观测浓度之间对比的时间序列：（a）积云对流过程；（b）长波过程；（c）微物理过程；（d）边界层过程；（e）陆面过程；（f）短波过程。phys-base 为基准方案模拟浓度值，phys-best 为单扰动优化方案模拟浓度值，phys-allbest 为组合扰动优化方案模拟浓度值，phys-ensemble 为其余方案模拟浓度值

Fig. 2 Time series of comparison between different physical process-simulated and observed concentrations of PM2.5 at Olympic Sports Center station, Beijing: (a) Cumulus convective process; (b) longwave process; (c) microphysical process; (d) boundary layer process; (e) land surface process; (f) shortwave process. phys-base is the simulated concentration value of the base-line test, phys-best is the simulated concentration value of the single-perturbation optimal scheme, phys-allbest is the simulated concentration value of the combined perturbation optimization scheme, and phys-ensemble is the simulated concentration value of the rest of the scheme. phys-base is the simulated concentration value of the base-line test, phys-best is the simulated concentration value of the single-perturbation optimal scheme, phys-allbest is the simulated concentration value of the combined perturbation optimization scheme, phys-ensemble is the simulated concentration value of the rest of the scheme

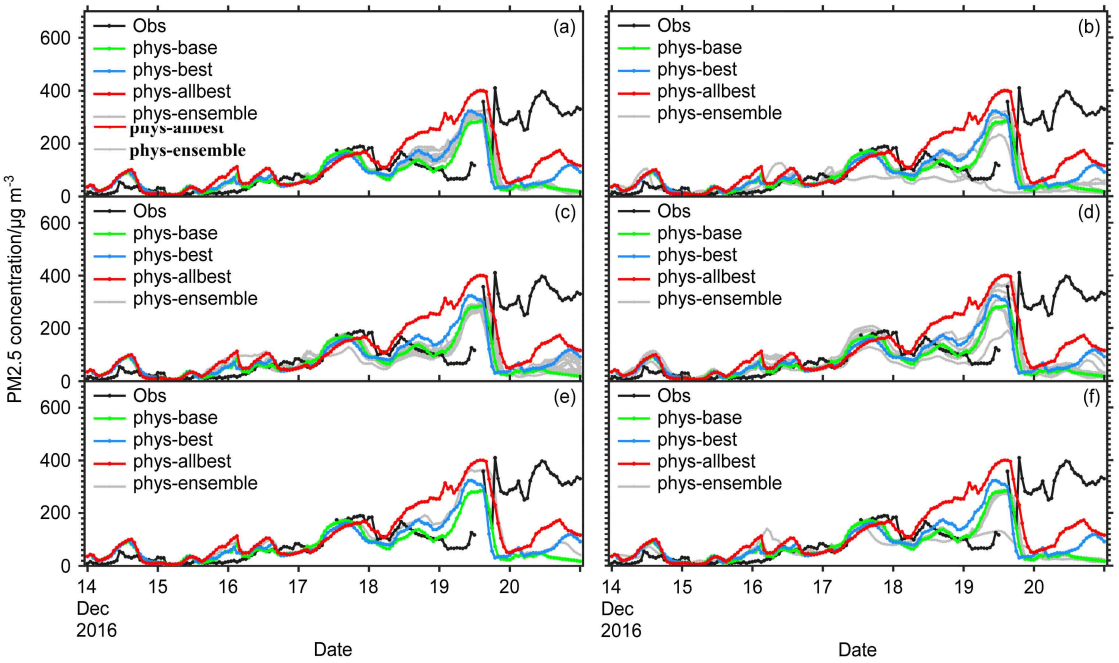

图 3　同图 2，但为北京市怀柔站

Fig. 3　Same as Fig. 2, but for Huairou station, Beijing

模拟结果，组合扰动优化方案的模拟结果最好，能更好地模拟出污染过程的变化趋势以及起止时间，呈现出更好的预报技巧。从物理过程角度来看，边界层过程模拟方案的差异导致的 PM2.5 模拟浓度差异较大，其余过程参数化方案变化引入的模拟结果差异相对较小。

综上所述，无论是在城中心站点还是城郊站点，改变 WRF 模式中边界层方案、长波方案的配置对重污染过程 PM2.5 浓度预报的影响最大，表明其可能是这次重污染预报的关键不确定性来源。从目前的模拟结果来看，可以将北京这次污染过程分成两个时段，时段 1 是重污染起始阶段，即 2016 年 12 月 14～19 日；时段 2 为重污染爆发时段，即 2016 年 12 月 20～21 日。针对时段 2，组合扰动优化方案呈现了比其他方案更好的预报效果，能更好再现重污染时段预报的起止时间与变化趋势，能显著改进基准方案下模式对重污染过程结束时间的预报误差问题，显著减小 12 月 21 日存在的预报偏差。

3.2　重污染预报的综合统计参数评估

为了定量分析不同参数化方案配置下模式对这次污染过程的预报技巧，计算了每一种参数化方案配置下模式预报结果的统计参数。图 4 展示了北京市 8 个城中心站点 PM2.5 在不同参数化方案下模式浓度预报结果的统计参数。从图中可以看出，组合扰动优化方案相关性最好，相关系数在 0.7 以上，其次是针对陆面过程的单扰动最优方案，相关系数在 0.6 以上；其余方案的相关性系数主要分布在 0.3～0.5 之间。从数据的偏离程度来看，针对陆面过程的单扰动最优方案的数据离散程度和观测比较接近，其次是组合扰动优化方案。从均方根误差来看，组合扰动优化方案误差最小，在 100 μg/m^3 左右，其余方案的均方根误差集中在 125 μg/m^3 左右。

从图 5 中 4 个城郊站点 PM2.5 浓度结果的统计参数来看，组合扰动优化方案相关性最高，相关系数在 0.4 以上，其余方案基本都低于 0.4；从数据的离散程度来看，组合扰动优化方案的数据离散程度和观测比较接近；从均方根误差来看，组合扰动优化方案与观测之间的差异更小，所有方案均方差主要在 100～125 μg/m^3 之间。因此，综合北京市所有站点的 PM2.5 浓度预报指标来看，组合扰动优化方案的预报技巧最高，与观测的相关性最高，与观测的偏离程度更小。

3.3　参数化方案对重污染预报影响的机制分析

在 3.1 和 3.2 节的结果分析中，组合扰动优化方案呈现了显著优于其他方案的预报技巧，其可能的原因如下。有研究表明 WRF 模式中不同的辐射方案对极端低温天气预报的影响很大，尤其是长波辐射方案（陈春艳和黄海波, 2016），本研究中组合扰动优化方案所使用的长波辐射方案为 CAM 方

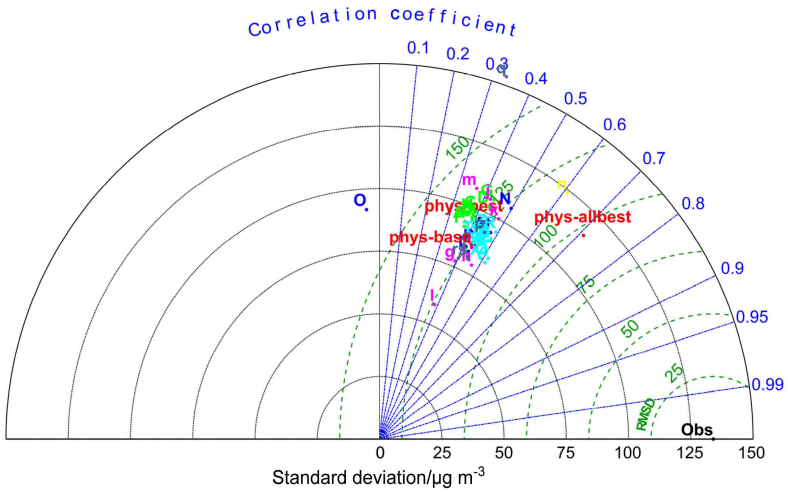

图 4 北京市城中心 8 个站点 PM2.5 浓度统计参数平均。绿色点代表积云对流参数化方案，蓝色点代表长波过程方案，蓝绿色点代表微物理过程方案，紫红色代表边界层过程方案，黄色点代表陆面过程方案，灰色点代表短波过程方案

Fig. 4 Average value of PM2.5 concentration statistical parameters at eight sites in the city center of Beijing. The green dots represent the cumulus convective parameterization scheme, the blue dots represent the longwave process scheme, the blue-green dots represent the microphysical process scheme, the mulberry dots represent the boundary layer process scheme, the yellow dots represent the land surface process scheme, the gray dots represent the shortwave process scheme

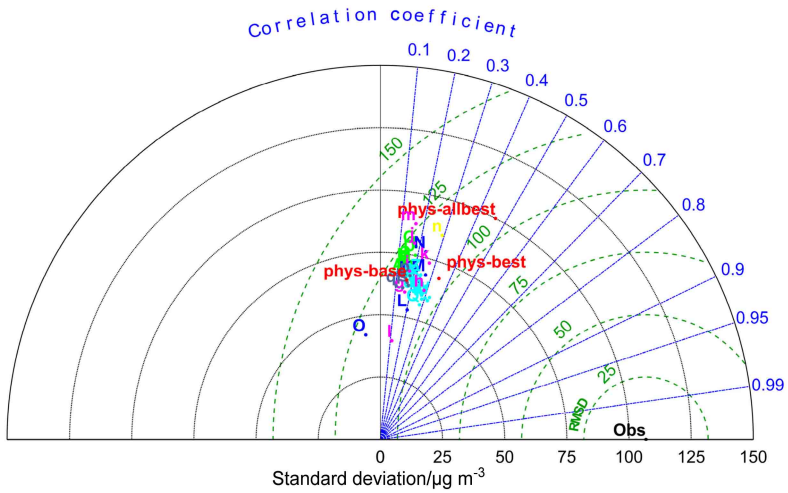

图 5 同图 4，但为北京市城郊 4 个站点

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for four sites in the suburbs of Beijing

案，该方案将云看做灰体，云相、冰粒子有效半径和液态水路径决定了云的发射率，并且吸收物质中包括气溶胶等一些粒子，特别适用于区域研究（张入财等, 2007）。组合扰动优化方案采用了 Noah-MP 陆面方案考虑了植被、土壤等下垫面状况，并且考虑了能量和水分收支过程，对更好模拟气象过程提供了条件（马红云等, 2009）。组合扰动优化方案采用的 MYNN3rd 边界层方案运用了 2 阶闭合方案，比 MYJ 方案阶数更高，增加了高阶量的预报方程，高阶闭合的特性能更详细地描述湍流中较为复杂的非线性过程，提高了边界层的计算精度。这可能是组合扰动优化方案能更好再现污染过程的起止时间和变化趋势的重要原因。

图 6 给出了单扰动优化方案和组合扰动优化方案下模式对第二个时段污染物浓度与气象要素模拟的均值分布。可以看出，不同方案配置下模式模拟的气象要素和污染物浓度的区域分布有较大差异。从风场来看，组合扰动优化方案下模拟的时段 2 风场具有更小的风速，不利于污染物的扩散；单扰动优化方案模拟的风速较大，且为东北风，有利于北京地区污染物的向南扩散，导致重污染区域偏南，从而造成北京城区和北部郊区的污染物浓度值低估。

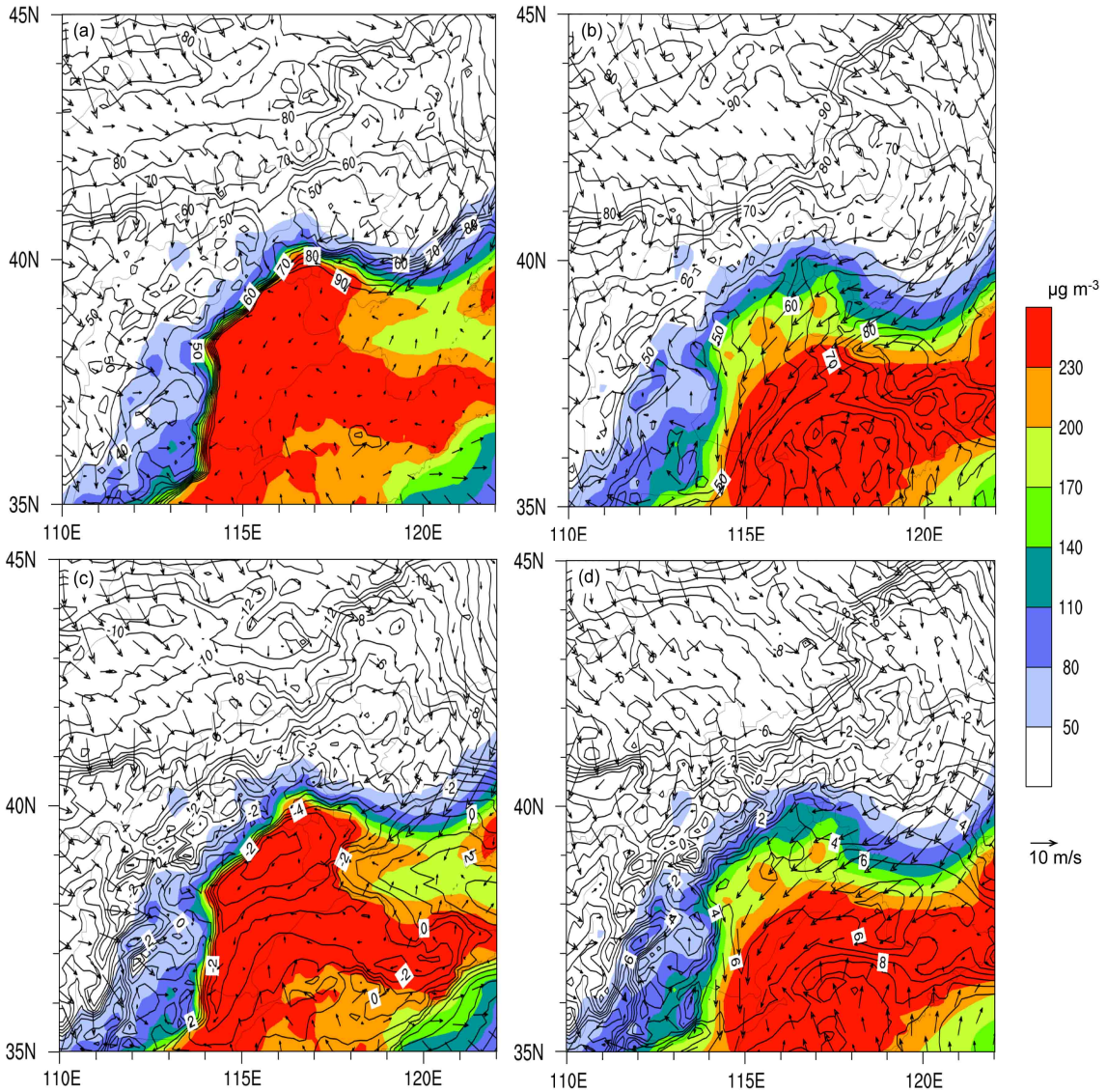

图 6　时段 2 组合扰动优化方案（左列）和单扰动优化方案（右列）下北京及其周边地区污染物浓度（填色）与（a、b）风场和相对湿度（%）、（c、d）风场和温度（等值线，单位：°C）模拟均值空间分布

Fig. 6　Pollutants concentration (shadings) with (a, b) wind field and relative humidity (%) and (c, d) wind field and temperature (isolines, units: °C) under the combined disturbance optimization scheme (left panel) and single disturbance optimization scheme (right panel) simulated mean spatial distribution in period 2 in Beijing and its surrounding areas

从相对湿度来看，组合扰动优化方案模拟的北京地区相对湿度更高，最高达 90%，而单扰动优化方案模拟的相对湿度较低，在 60% 左右。在冬天高的相对湿度条件下（大于 70%），会有利于气溶胶—水多相化学反应的发生，导致硫酸盐、硝酸盐等无机气溶胶组分的快速增长，单扰动优化方案下模式对相对湿度低估也可能是重污染浓度峰值低估的重要原因，而组合扰动优化方案能显著减小相对湿度的模拟偏差。从温度来看，组合扰动优化方案下模式模拟的温度整体要比单扰动优化方案下低，区域温度基本都在−2°C 以下，而单扰动优化方案模拟的温度更高，在北京地区比组合扰动优化方案模拟偏高 2°C 左右。

从上面分析可以看出，组合扰动优化方案与单扰动优化方案配置下 WRF 模拟的区域气象要素在第二时段具有显著差异，组合扰动优化方案模拟的风速更小、相对湿度更高、温度更低，这些条件总体有利于冬季 PM2.5 浓度的累积以及二次气溶胶组分的增长，从而能更好再现 12 月 21 日北京高 PM2.5 浓度的维持现象。这个结果也表明了关键气

象要素模拟的不确定性是重污染预报中的关键不确定性来源，而合适参数化方案的选择对减小其不确定性非常重要。

4 结论

本文基于嵌套网格空气质量模式预报系统（NAQPMS），针对北京市 2016 年 12 月 16～21 日的重污染过程开展了 WRF 模式参数化方案的敏感性试验，采用不同方案模拟的 WRF 气象场驱动 NAQPMS 模式，对比分析不同方案配置下 NAQPMS 对这次重污染过程 PM2.5 预报的性能。主要试验结论如下：

（1）从模式对 PM2.5 浓度变化趋势的预报来看，在重污染起始时段，所有方案均能较好模拟出污染过程中 PM2.5 浓度的上升趋势，但在浓度量值预报上存在一定的差异；在重污染爆发时段，组合扰动优化方案表现出明显的优势，能更好地预报出重污染过程的起止时间以及变化趋势。

（2）从模式对 PM2.5 浓度预报的综合统计参数来看，采用组合扰动优化方案下城中心 8 个站点和城郊 4 个站点的预报统计参数都优于其他方案下的预报结果，与观测的相关性更高，与观测值的差异更小，均方根误差最小，在 100 μg/m^3 左右，而其余方案的均方根误差在 100～125 μg/m^3 之间。

（3）分析了不同方案下区域气象要素与污染物浓度模拟的差异，组合扰动优化方案与单扰动优化方案配置下的区域气象要素模拟具有显著差异，在重污染第二时段组合扰动优化方案模拟的风速更小、相对湿度更高、温度更低，这些条件总体有利于 PM2.5 浓度的累积以及二次气溶胶组分的增长，从而能更好再现 12 月 21 日北京高 PM2.5 浓度的维持现象。

参考文献（References）

Bei N F, Wu J R, Elser M, et al. 2017. Impacts of meteorological uncertainties on the haze formation in Beijing−Tianjin−Hebei (BTH) during wintertime: A case study [J]. Atmos. Chem. Phys., 17(23): 14579−14591. doi:10.5194/acp-17-14579-2017

陈春艳, 黄海波. 2016. WRF 模式辐射方案对极端低温天气预报的影响 [J]. 干旱区研究, 33(4): 718−723. Chen Chunyan, Huang Haibo. 2016. Influence of different radiation parameterization schemes of WRF model on predicting extreme low temperature events [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 33(4): 718−723. doi:10.13866/j.azr.2016.04.05

陈锋, 董美莹, 冀春晓, 等. 2012. WRF 模式对浙江 2011 年夏季降水和温度预报评估及其湿过程敏感性分析 [J]. 浙江气象, 33(3): 3−12. Chen Feng, Dong Meiying, Ji Chunxiao, et al. 2012. WRF model's evaluation of summer precipitation and temperature forecast in Zhejiang in 2011 and sensitivity analysis of wet process [J]. Zhejiang Meteorology (in Chinese), 33(3): 3−12. doi:10.3969/j.issn.1004-5953.2012.03.002

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]. Journal of Applied Meteorogical Science (in Chinese), 24(2): 140−150. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.02.002

Chen S H, Sun W Y. 2002. A one-dimensional time dependent cloud model [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80(1): 99−118. doi:10.2151/jmsj.80.99

程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2015. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析 [J]. 环境科学研究, 28(2): 163−170. Cheng Nianliang, Li Yunting, Zhang Dawei, et al. 2015. Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 28(2): 163−170. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2015.02.01

Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0) [R]. NCAR Tech. No. NCAR/TN-464+STR, 214pp. doi:10.5065/D63N21CH

杜娟, 李曼, 于晓晶, 等. 2019. 基于不同分辨率和参数化方案的新疆区域数值模式性能初步评估 [J]. 沙漠与绿洲气象, 13(3): 57−65. Du Juan, Li Man, Yu Xiaojing, et al. 2019. Effects of different spatial resolutions and parameterization schemes on operational numerical prediction system in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 13(3): 57−65. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.03.008

Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a Mesoscale Two-Dimensional Model [J]. J. Atmos. Sci., 46(20): 3077−3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

高文康, 唐贵谦, 吉东生, 等. 2016. 2013～2014 年《大气污染防治行动计划》实施效果及对策建议 [J]. 环境科学研究, 29(11): 1567−1574. Gao Wenkang, Tang Guiqian, Ji Dongsheng, et al. 2016. Implementation effects and countermeasures of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 29(11): 1567−1574. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2016.11.01

耿东颖. 2018. 区域大气污染预报预警新技术与协同控制 [J]. 中国高新区, (13): 26. Geng Dongying. 2018. Regional air pollution forecast and warning new technology and cooperative control [J]. Science and Technology Industry Parks (in Chinese), (13): 26.

Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N. 2004. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme [J]. Mon. Wea. Rev., 132(11): 2610−2627. doi:10.1175/MWR2810.1

韩丽娜, 唐晓, 陈科艺, 等. 2020. 北京地区一次空气重污染过程的气象条件模拟参数化敏感性试验 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 253−267. Han Lina, Tang Xiao, Chen Keyi, et al. 2020. Sensitivity experiments of meteorological parameterization schemes for WRF model during a heavy air pollution episode in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(3): 253−267. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19053

胡译文, 臧增亮, 马晓燕, 等. 2019. 气象资料同化对 PM2.5 预报影响的模拟分析 [J]. 中国环境科学, 39(2): 523−532. Hu Yiwen, Zang Zengliang, Ma Xiaoyan, et al. 2019. Research on the effects of assimilation meteorological observation data on aerosol concentration [J]. China Environmental Science (in Chinese), 39(2): 523−532. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2019.02.010

皇甫玮喆. 2017. 区域大气污染预报预警新技术与协同控制 [J]. 低碳世界, (5): 32−33. Huangfu Weizhe. 2017. Regional air pollution forecast and warning new technology and cooperative control [J]. Low Carbon World (in Chinese), (5): 32−33. doi:10.3969/j.issn.2095-2066.2017.05.021

Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J. Geophys. Res., 113(D13): D13103. doi:10.1029/2008JD009944

Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. Mon. Wea. Rev., 122(5): 927−945. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2

Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. 2015. HTAP_v2: A mosaic of regional and global emission gridmaps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution [J]. Atmos. Chem. Phys. Dis., 15(8): 12867−12909. doi:10.5194/acpd-15-12867-2015

巨菲, 吴林荣, 张黎, 等. 2019. 陕西重污染天气应对策略分析 [J]. 陕西气象, (5): 60−63. Ju Fei, Wu Linrong, Zhang Li, et al. 2019. Analysis of coping strategies for heavy polluted weather in Shaanxi [J]. J. Shaanxi Meteor. (in Chinese), (5): 60−63. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2019.05.013

李冬青, 吴其重, 徐旗, 等. 2020. 不同分辨率 CMAQ 模式系统对北京 PM2.5 预报效果研究 [J]. 环境科学学报, 40(5): 1587−1593. Li Dongqing, Wu Qizhong, Xu Qi, et al. 2020. Study on the model performance of different resolution CMAQ model system on Beijing PM2.5 forecast [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 40(5): 1587−1593. doi:10.13671/j.hjkxxb.2020.0003

廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 2014. 北京地区冬夏季持续性雾—霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. 环境科学, 35(6): 2031−2044. Liao Xiaonong, Zhang Xiaoling, Wang Yingchun, et al. 2014. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 35(6): 2031−2044. doi:10.13227/j.hjkx.2014.06.001

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

卢苗苗, 唐晓, 王自发, 等. 2017. 武汉地区 2014 年 PM2.5 时空分布与来源贡献的数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 37(11): 4227−4240. Lu Miaomiao, Tang Xiao, Wang Zifa, et al. 2017. Investigating the spatial−temporal distribution of the PM2.5 over Wuhan in 2014 and quantifying the contributions from different source regions with both observation and model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 37(11): 4227−4240. doi:10.13671/j.hjkxxb.2017.0178

马红云, 郭品文, 宋洁. 2009. 耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟 [J]. 大气科学, 33(3): 557−567. Ma Hongyun, Guo Pinwen, Song Jie. 2009. Simulation of " 2007.7 " heavy rainfall case in the Changjiang−Huaihe valley using the WRF model with different land surface schemes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(3): 557−567. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.13

Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog [J]. Bound.-Layer Meteor., 119(2): 397−407. doi:10.1007/s10546-005-9030-8

潘锦秀, 晏平仲, 孙峰, 等. 2019. 多元线性回归方法对北京地区 PM2.5 预报的改进应用 [J]. 中国环境监测, 35(2): 43−52. Pan Jinxiu, Yan Pingzhong, Sun Feng, et al. 2019. Application of ensemble forecast and linear regression method in improving PM2.5 forecast over Beijing area [J]. Environmental Monitoring of China (in Chinese), 35(2): 43−52. doi:10.19316/j.issn.1002-6002.2019.02.06

Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of the unified Noah land-surface model in the WRF model [C]//Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: American Meteorological Society, 2165–2170.

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, Xie Fuying, 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

Yang Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins [J]. J. Geophys. Res., 116(D12): D12110. doi:10.1029/2010JD015140

Zhang C X, Wang Y Q, Hamilton K. 2011. Improved representation of boundary layer clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF using a modified tiedtke cumulus parameterization scheme [J]. Mon. Wea. Rev., 139(11): 3489−3513. doi:10.1175/MWR-D-10-05091.1

Zhang F Q, Bei N F, John W, et al. 2007. Impacts of meteorological uncertainties on ozone pollution predictability estimated through meteorological and photochemical ensemble forecasts [J]. J. Geophys. Res., 112(D4): D04304. doi:10.1029/2006JD007429

Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate

centre general circulation model [J]. Atmos.-Ocean, 33(3): 407−446. doi:10.1080/07055900.1995.9649539

张建忠, 孙瑾, 王冠岚, 等. 2014. 北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系 [J]. 气象与环境科学, 37(1): 33−39. Zhang Jianzhong, Sun Jin, Wang Guanlan, et al. 2014. Relation between the spatial−temporal distribution characteristics of air quality index and meteorological conditions in Beijing [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 37(1): 33−39. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2014.01.006

张建忠, 李坤玉, 王冠岚, 等. 2016. 京津冀 4 次重度污染过程的气象要素分析 [J]. 气象与环境科学, 39(1): 19−25. Zhang Jianzhong, Li Kuiyu, Wang Guanlan, et al. 2016. Meteorological element analysis of four severe pollution processes in Beijing−Tianjin−Hebei Region [J]. Meteorological Environmental Sciences (in Chinese), 39(1): 19−25. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.01.003

张入财, 付伟基, 王亮, 等. 2007. 不同辐射方案对强对流天气过程的影响 [C]//中国气象学会. 中国气象学会 2007 年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集. 广州: 中国气象学会, 1676–1686. Zhang Rucai, Fu Weiji, Wang Liang, et al. 2007. The Influence of Different Radiation Schemes on Strong Convective Weather Process [C]//Chinese Meteorological Society. Proceedings of the Subcommittee on Weather Forecasting, Early Warning and Impact Assessment at the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society (in Chinese). Guangzhou: Chinese Meteorological Society, 1676–1686.

张天航, 王继康, 张恒德, 等. 2019. 一种最优多模式集成方法在我国重污染区域 PM2.5 浓度预报中的应用 [J]. 环境工程技术学报, 9(5): 520−530. Zhang Tianhang, Wang Jikang, Zhang Hengde, et al. 2019. Application of a best multi-model ensemble method in PM2.5 forecast in heavily polluted regions of China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology (in Chinese), 9(5): 520−530. doi:10.12153/j.issn.1674-991X.2019.04.250

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 Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58(13): 1178−1187. doi:10.1360/972013-150

赵芸程, 李杰, 杜惠云, 等. 2019. 北京夏季近地面臭氧及其来源的数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 39(7): 2315−2328. Zhao Yuncheng, Li Jie, Du Huiyun, et al. 2019. Numerical simulation of near-surface ozone and its sources in Beijing in summer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 39(7): 2315−2328. doi:10.13671/j.hjkxxb.2019.0078

郑捷, 王自发, 朱江, 等. 2016. 非结构网格空气质量模式对东亚强沙尘暴的初步模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 21(6): 663−677. Zheng Jie, Wang Zifa, Zhu Jiang, et al. 2016. A preliminary simulation study of an East Asian super dust storm by unstructured mesh air quality model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(6): 663−677. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15194

朱江, 唐晓, 王自发, 等. 2018. 大气污染资料同化与应用综述 [J]. 大气科学, 42(3): 607−620. Zhu Jiang, Tang Xiao, Wang Zifa, et al. 2018. A review of air quality data assimilation methods and their application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 607−620. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17260