

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

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

韩丽娜^{1,2} 唐晓² 陈科艺¹ 隋玟萱² 周慧³ 刘娜^{2,4}
孔磊^{2,4} 冼志鹏^{1,2} 吴林² 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 气象预报是影响大气重污染预报精度的关键所在。针对 2016 年 12 月 16~21 日北京市一次重污染过程, 开展了中尺度气象模式 WRF 的参数化方案配置敏感性试验。对微物理过程、长波辐射过程、短波辐射过程、陆面过程、边界层过程、近地面过程以及积云对流参数化过程进行组合优选, 共设计 51 组参数化方案组合, 分析不同模拟方案下北京市 8 个气象站点温度、相对湿度、10 m 风速的模拟精度及其敏感性。试验结果表明: 温度模拟对长波过程参数化方案最为敏感, 集合离散度达 2.4~7.4°C, 再次是短波过程参数化方案; 相对湿度模拟也对长波过程参数化方案最敏感, 再次是陆面过程; 风速模拟对不同过程参数化方案的敏感性程度差异不大。通过模拟结果与观测的统计对比, 优选出模拟误差最小的方案组合为 Lin 微物理方案、RRTMG 长波方案、RRTMG 短波方案、Tiedtke 积云对流方案、Noah 陆面方案、MYNN 3rd 边界层方案和 MYNN 近地面方案, 并将其与集合平均、基准方案进行对比。对于集合平均来说, 其温度模拟与观测相关系数为 0.69, 高于基准方案, 其模拟偏差与均方根误差比基准方案低 25% 和 11%; 集合平均的相对湿度和风速模拟相比基准方案变化较小。与集合平均相比, 优选方案能同时改进温度、相对湿度和风速模拟, 使温度模拟偏差和均方根误差比基准方案下降 35% 和 17%, 使相对湿度模拟偏差和均方根误差下降 43% 和 13%, 使风速模拟偏差和均方根误差下降 33% 和 24%。以上结果表明, 参数化方案的敏感性试验和优选能显著减小重污染期间气象要素的模拟误差, 重污染预报改进需重点关注参数化方案模拟上的不确定性。本研究也发现 MYNN3rd 边界层方案在这次重污染过程的气象要素模拟上具有良好性能, 可为未来重污染预报改进提供参考。

关键词 大气重污染 气象模拟 参数化方案 敏感性试验 WRF 模式

文章编号 1006-9585(2020)03-0253-15

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19053

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

HAN Lina^{1,2}, TANG Xiao², CHEN Keyi¹, SUI Wenxuan², ZHOU Hui³, LIU Na^{2,4},
KONG Lei^{2,4}, XIAN Zhipeng^{1,2}, WU Lin², and WANG Zifa^{2,4}

收稿日期 2019-04-10; 网络预出版日期 2019-09-22

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 国家自然科学基金项目 41875164、41575128 和 41875039, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA19040201

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41875164, 41575128, and 41875039), Chinese Academy of Sciences Strategic Pilot Science and Technology Project (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 Station, Changsha 410118*

4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Meteorological forecasting is an important factor affecting the accuracy of atmospheric heavy pollution prediction. In response to a heavy pollution event in Beijing during 16–21 December 2016, this paper carried out a sensitivity test for the parameterization scheme of a mesoscale meteorological model Weather Research and Forecasting (WRF). Combining microphysical, long-wave radiation, short-wave radiation, land surface, boundary layer, near-surface, and cumulus convective parameterization processes, a total of 51 sets of parameterization schemes were designed to analyze the simulation accuracy and sensitivity of the temperature, relative humidity, and 10-m height wind speed of eight meteorological stations in Beijing under different simulation schemes. The temperature simulation is the most sensitive to a long-wave process parameterization scheme, the set dispersion is 2.4–7.4°C, followed by the short-wave process parameterization scheme. Additionally, the relative humidity simulation is the most sensitive to the long-wave process parameterization scheme, followed by the land surface process and the wind speed simulation had little difference in sensitivity to different process parameterization schemes. In the comparison of the statistical results of the simulation results with observations, we prefer the combination of the smallest simulation error: Lin microphysical, RRTMG long-wave, RRTMG short-wave, Tiedtke cumulus convection, Noah land surface, MYNN 3rd boundary layer and MYNN near-surface scheme, and compared the best scheme to the ensemble mean and baseline scheme. For the ensemble mean, the correlation coefficient between the temperature simulation and observation was 0.69, which is greater than the baseline scheme. The simulated deviation and root-mean-square error were 25% and 11% less than the baseline scheme and the ensemble mean relative humidity and wind speed simulation were less variable than the baseline scheme. Compared with the ensemble mean, the best scheme can simultaneously improve the temperature, relative humidity, and wind speed simulation, such that the temperature simulation deviation and root-mean-square error decreases by 35% and 17% compared with the baseline scheme, the relative humidity simulation deviation and root-mean-square error decreases by 43% and 13%, and the wind speed simulation deviation and root-mean-square error decreases by 33% and 24%. The above results show that the sensitivity test and optimization of the parameterization scheme can significantly reduce the simulation error of meteorological elements during heavy pollution. The improvement of heavy pollution prediction needs to focus on the uncertainty of the parametric scheme simulation. Additionally, the MYNN 3rd boundary layer scheme has good performance in the simulation of meteorological elements in this heavy pollution process, which can provide reference for future improvements of heavy pollution forecasting.

Keywords Atmospheric heavy pollution, Meteorological simulation, Parameterization scheme, Sensitivity test, WRF model

1 引言

随着我国工业迅速发展和城市化进程的加快,大气污染问题日益突出,尤其是京津冀地区重污染事件频发,给社会生活和人体健康带来严重不利影响。重污染预报预警是有效防控重污染事件的重要手段。为了提高重污染预报预警的准确率,开展了许多模拟优化研究。Zheng et al. (2018) 利用资料同化方法对京津冀地区 2015 年重霾时段进行实时 PM_{2.5} 预报评估,结果发现资料同化能显著改善污染实时预报,并指出进一步改善资料同化系统有必要加入气象数据资料同化和化学参数优化。

黄思等 (2015) 结合多模式集合预报与多元线性回归集成方法来降低空气质量预报的不确定性,发现不同模式对不同污染物的预报技巧差异较大,并不能选出一种模式完全优于另外两种模式,采用线性回归集成方法对污染过程的预报有大幅改善。Zheng et al. (2015) 将新增多相反应的 WRF-CMAQ 模型用于东亚地区,以此评价多相化学和气象场对区域霾形成的影响,发现非均相化学修正后的 CMAQ 模型不仅捕获了硫酸盐和硝酸盐的大小和时间变化,而且再现了从晴天到霾日硫酸盐和硝酸盐对 PM_{2.5} 质量相对贡献的增强,证明了非均相化学在区域霾形成过程中发挥了重要作用。虽

然上述研究从不同角度为重污染预报改进提供了很好思路,但气象要素仍然是决定重污染事件演变最为关键的控制要素,其预报准确程度直接决定了重污染生消关键节点与污染程度预报的准确度。因此,对气象预报进行改进对重污染预报预警具有非常重要的作用。

为了改进气象预报,许多学者采用观测、数值模拟等方法开展了大量研究(杜吴鹏等,2017)。杨旭(2017)利用 WRF-Chem 模式对京津冀地区的一次典型污染过程进行模拟研究,结果发现模式能模拟出近地面温度、风速、相对湿度变化趋势,但模拟值均偏高;从污染物模拟结果看,模式对北京的模拟效果最差,污染物浓度模拟值偏低。张颖龙(2017)采用 WRF-Chem 模式对京津冀地区一次污染过程进行预报评估,发现气象要素和污染物浓度的模拟效果在前期较好,但在后期气象预报存在一定误差,降低了污染预报的准确性。有研究表明风速、相对湿度等气象条件影响细颗粒物的污染程度,风速低、相对湿度高时,PM_{2.5} 浓度会升高(王琪等,2014)。在臭氧模拟过程中,风向是影响其过程的不确定性因子之一,且随着高度增加,风向逐渐成为不确定性的主导因子(唐晓等,2010)。上述研究表明:提高气象场模拟的准确度对预报重污染过程有积极作用,可在一定程度上提升污染预报水平。

在中尺度数值天气预报模式中,由于模式分辨率不足等因素,不能较好地描述次网格尺度的物理过程,这样就需要一些物理过程(如辐射过程、边界层过程、微物理过程等)参数化来完善模拟的效果(胡向军等,2008)。廖镜彪等(2012)利用 WRF 模式探究不同微物理参数化方案对珠江三角洲(珠三角)降水模拟的影响,结果发现不同的方案之间模拟结果存在一定的差异,其中 Lin 方案能较好地模拟出降水实况。Chaouch et al.(2017)利用 WRF 模式对 2014 年阿联酋国际机场发生的 5 次烟雾事件进行模拟,对比分析模式中 7 种不同边界层方案的模拟效果。通过评估气象要素发现 QNSE 边界层方案在一定程度上要优于其余方案,呈现更好的模拟效果。沈晓燕等(2018)利用 50 个气象站观测资料,对比 WRF 模式不同参数化方案组合对青海省气象要素模拟效果的影响,发现 Eta 微物理方案和 KF 积云对流方案对气温模拟效果较好;Thompson 微物理方案、KF 积云对流方案

和 ACM2 边界层方案的组合能较好地模拟降水;风速对边界层方案的敏感性较高。张颖等(2016)对四川盆地的一次重污染过程进行参数化方案优选,对微物理方案、陆面方案、边界层方案和积云对流方案进行排列组合,共设计 24 组参数化方案配置。结果表明,MYJ 边界层方案模拟出风速的变化趋势,WSM3 微物理方案、SLAB 陆面方案、MYJ 边界层方案和 GD 积云对流方案的组合可更好地模拟风速的日变化和水平分布。贾文星等(2019)运用 WRF3.9 模式对 2015 年 1 月 16~25 日苏州东山的近地层气象要素进行模拟并评估了 4 种边界层参数化方案对近地层气象要素的模拟能力以及边界层参数化方案与近地层方案的耦合对气象要素模拟的影响。结果表明,无论白天或夜间 4 种边界层方案对 2 m 温度的模拟结果统计量差异较小;对 2 m 相对湿度的模拟均高于观测值,模拟效果最佳的是 BL 方案,偏差最大的是 MYJ 方案;对 10 m 风速的模拟存在一定程度的高估,模拟效果最好的是 MYJ 方案;BL 边界层方案与 MM5 近地层方案耦合对 2 m 温度、2 m 相对湿度的模拟效果最好。谢菲等(2016)模拟南京及其周边的一次区域雾天气变化过程并评估不同陆面过程参数化方案的模拟效果,发现不同的参数化方案模拟的地面温湿风存在较大的差异,模拟可信度最高、偏差范围最小的是 SLAB 方案。周心河和熊喆(2019)利用 WRF 模式中 7 种不同积云对流参数化方案对新疆地区 2006 年 10 月 1 日至 2008 年 3 月 1 日进行模拟,探究模式在水平分辨率 10 km 下不同积云对流方案对新疆地区气象要素的敏感性。结果发现采用不同积云方案的模式均能较好地模拟出年、季节平均温度的空间分布以及平均温度随时间的演变,方案之间的差异较小。因此,针对不同地区不同污染过程,如何设计物理参数化方案优选组合并揭示不同方案导致的预报不确定性仍是大气污染预报值得关注的

关键问题。

2016 年 12 月 16~21 日北京市发生了一次重污染过程,环境保护部在 2016 年 12 月 15 日发布了京津冀及周边地区重污染天气预警,经中国环境监测总站会同京津冀及周边省级环境监测中心预报显示,此次重污染过程受不利气象条件影响,影响范围广,重度及以上污染天数达到 4 d 的城市超过 20 个,且可能出现 2 d 以上的严重污染。针对此次污染过程,刘娜等(2018)采用目标观测方法进行

了分析,考虑风速、温度、湿度 3 个变量的不确定性对污染预报的影响,结果表明气象模式采用的再分析初始场可以显著减小重污染时段的预报偏差,但也发现 WRF 模式模拟值与实测数据之间仍存在较大差异。因此,本文在已有研究的基础上,设计多组参数化方案组合对此次污染过程进行模拟分析,对比方案间优劣,评估不同过程参数化方案导致的模拟不确定性,优选参数化方案配置,为污染预报提供更加准确的气象场。

2 资料与方法

2.1 模式系统简介及区域设置

WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model) 是由 NCEP、NCAR 等机构研发的中尺度天气预报模式,该模式系统具有可移植、可扩充、高效率、易维护等诸多特性,是一个完全可压缩、非静力模式 (闫之辉和邓莲堂, 2007)。本文使用的是 WRFV3.6.1 版本,模拟时间是 2016 年 12 月 15~21 日,模式的初始和边界数据资料均采用逐 6 小时、 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 分辨率的 FNL (Final Operational Global Analysis) 全球再分析资料,该资料是由 NCEP 和 NCAR 联合制作的,采

用先进的全球资料同化系统以及完善的数据库,对各种资料来源 (无线电探空、地面、船舶、卫星等) 的观测资料进行质量控制和同化处理,其包含的要素多范围广,延伸的时段长,并被广泛用于数值模式和天气、气候的诊断分析研究中 (柏枫等, 2013)。模式采用双重嵌套网格设置,母区域和子区域的空间分辨率分别为 45 km 和 15 km,网格数分别是 185×157 、 433×340 (图 1)。垂直上采用 30 层 sigma- p 坐标系,模式层顶至 50 hPa。模式积分时间步长 120 s,逐小时输出一次模拟结果。

2.2 参数化方案简介

WRFV3.6.1 版本提供多种参数化配置,主要包括微物理过程、长波辐射过程、短波辐射过程、积云对流过程、陆面过程、近地面过程以及边界层过程。微物理过程通过调节温湿场结构以及过程中相变潜热的释放,影响积云对流发生发展条件,影响积云降水、温湿场预报。Kessler 方案是一种简单暖云方案,忽略水与冰之间相变过程 (Kessler, 1969)。Lin 方案是 WRF 模式中相对比较成熟、物理过程描述比较复杂的一种方案,包含 5 种水相物质:云水、云冰、雨、雪和冰雹,主要描述水相物质的碰并、转换和生成过程 (Lin et al., 1983)。WSM3、WSM5、WSM6 方案是在简单冰方案的基

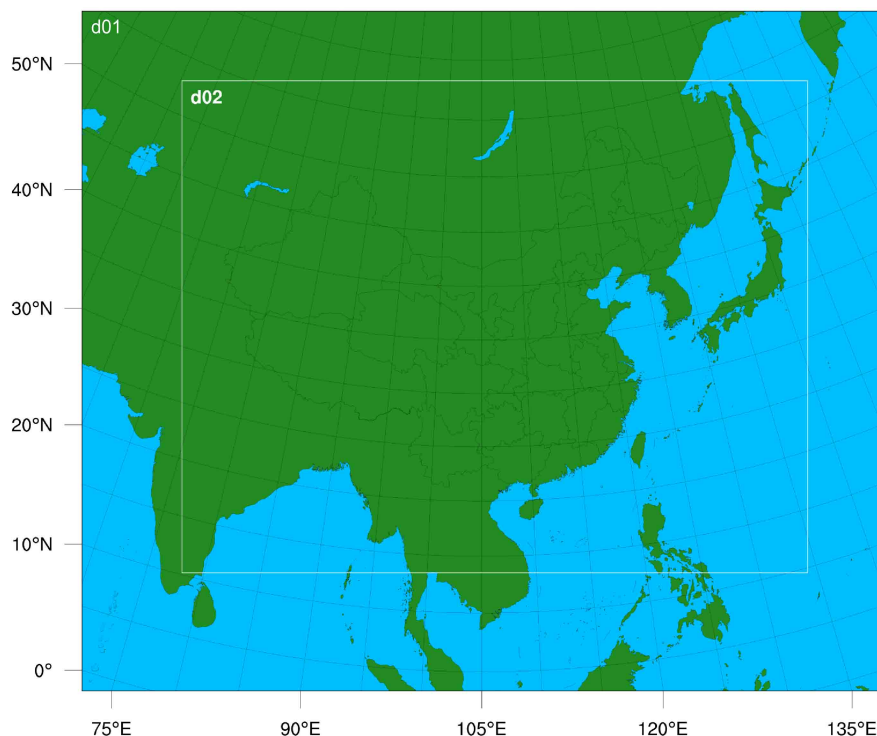


图 1 WRF 两层嵌套网格设置

Fig. 1 The grid settings of two nested domains for WRF simulation

础上发展而来的，增加了预报量，描述的微物理过程越来越复杂（王晓君和马浩, 2011; 黄海波等, 2011）。有研究表明，辐射传输过程不仅对长期预报有影响，而且对中、短期预报也非常重要，如 WRF 模式的长波辐射方案对极端低温天气的预报有较大影响（陈春艳和黄海波, 2016）。RRTMG 方案（Bae et al., 2016）广泛用于天气预报模式，指定水成物的大小，而不考虑云的类型或辐射计算的量，该方法可以有效地计算通量和升温速率。Dudhia 短波辐射方案采用 Dudhia（1989）的方法，可以简单地对干净空气辐射、云吸收和散射、水蒸汽吸收所引起的太阳辐射通量进行累加。Goddard 短波辐射方案同样计算了水汽、氧气、臭氧、二氧化碳、气溶胶和云的吸收，以及气溶胶、云和各种气体的散射所产生的太阳辐射通量。

积云对流过程是大气中重要的物理过程，也是数值模式中不可缺少的过程，它不仅能直接决定降水过程，同时还会影响温度的模拟。不同积云对流过程对温度的模拟差异较大，因而积云对流过程是模式中需要准确进行参数化的过程（谢博文等, 2012）。KF 积云对流方案（Soni et al., 2014）在次网格尺度上同时考虑深对流和浅对流，在中纬度地区更有效。大气与陆面不断交换物质和能量，地气之间动量、热量和水分的交换会对地表状况变化产生响应，影响气候。陆面过程方案（赖锡柳等, 2017）是气象模式的重要组成部分，为大气动力学控制方程提供影响和控制气候系统发展的下边界条件。Noah 陆面方案（Salamanca et al., 2018）一直是 WRF 陆面过程方案的默认选项，它将陆地表面定义为由大块表面属性（如反照率等）定义的表面元素混合。而新 Noah-MP 方案可以对关键陆气相互作用过程进行多种选择，包含不同植被冠层，具有规定尺寸、方向、密度和辐射特性，分别计算冠层和地面温度，同时改善不同下垫面水和热的模拟。大气边界层是直接受地面影响的气层，是发生地气相互作用和大气污染的主要源地，因此边界层过程对地气之间动量、热量和水汽交换有重要作用，并影响模拟效果（贵志成等, 2013）。MYJ 边界层方案（Sušelj and Sood, 2010）基于 TKE 理论，更真实地描述边界层物理，有可能实现风和势温的真实剖面。

2.3 试验设计

区域模式预报中选用适合本地的物理参数化方

案是必要的，对提高模式预报性能具有至关重要的作用（马红云等, 2009）。表 1 是控制试验中 WRF 模式的物理参数化方案配置。微物理过程采用 Lin 方案，该方案物理过程描述较为复杂，包含云水、雨水、冰、雪等水相物质预报；长波辐射和短波辐射过程均采用 RRTMG 方案；积云参数化过程采用 Tiedtke 方案；陆面过程采用 Noah 方案，可预报土壤积雪、结冰影响，具有处理城市地面的能力；近地面过程采用 Monin-Obukhov 方案；边界层过程采用 Mellor-Yamada-Janjic（MYJ）方案，该方案应用较多，在实际模式中效果也较好，适合研究精细的边界层结构。表 2 给出了 50 组敏感性试验，以控制试验为标准，每组敏感性试验只对一类过程中的方案进行修改。通过对 7 种过程中参数化方案进行选择，探究不同参数化过程中不同方案对模拟的影响。

表 1 控制试验中 WRF 模式的物理参数化方案配置

Table 1 Physical parameterization scheme configuration of the WRF model in control tests

控制试验	描述
mp2_ra13_ras4_cu6_su2_sf2_bl2	微物理过程(mp): Lin方案 (Chen and Sun, 2002) 长波过程(ral): RRTMG方案 (Iacono et al., 2008) 短波过程(ras): RRTMG方案 (Iacono et al., 2008) 积云参数化过程(cu): Tiedtke方案 (Zhang et al., 2011) 陆面过程(su): Noah方案 (Tewari et al., 2004) 近地面过程(sf): Monin-Obukhov方案 (Janjić, 1994) 边界层过程(bl): Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)方案 (Janjić, 1994)

2.4 验证数据及统计指标

验证数据包括研究区域内 8 个北京气象站点逐小时观测资料以及使用最邻近插值方法得到的 8 个北京气象站点逐小时模拟资料，利用观测数据资料对 WRF 模拟的温度、相对湿度、风速 3 种气象要素进行对比分析，8 个气象站点的分布如图 2 所示。

在进行验证对比时，提取气象站点所在模式格点值与观测数据进行对比，所使用的统计指标有：相关系数（ R , Correlation coefficient）、均方根误差（RMSE, Root-mean-square error）、偏差（MB, Mean bias）。相关系数反映模拟与观测之间变化

表 2 敏感性试验中 WRF 模式的物理参数化方案配置

Table 2 Physical parameterization scheme configuration of WRF model in a sensitivity test

	简称	描述
微物理过程	MP1	Kessler方案 (Kessler, 1969)
	MP2	WSM3方案 (Hong et al., 2004)
	MP3	WSM5方案 (Hong et al., 2004)
	MP4	Ferrier (new Eta) 方案 (Zhao and Carr, 1997)
	MP5	WSM6方案 (Hong and Lim, 2006)
	MP6	Goddard方案 (Tao et al., 1989)
	MP7	Thompson方案 (Thompson et al., 2008)
	MP8	Morrison 2-moment方案 (Morrison et al., 2009)
	MP9	CAM方案 (Gao et al., 2011)
	MP10	SBU_YLin方案 (Lin and Colle, 2011)
	MP11	WDM5方案 (Lim and Hong, 2010)
	MP12	WDM6方案 (Lim and Hong, 2010)
	MP13	NSSL 2-moment 4-ice方案 (Mansell et al., 2010)
	MP14	NSSL 2-moment 4-ice with predicted CCN方案 (Mansell et al., 2010)
	MP15	NSSL 1-moment, 6-class方案 (Gilmore et al., 2004)
	MP16	NSSL-LFO 1-moment, 6-class方案 (Gilmore et al., 2004)
长波过程	RAL1	RRTM方案 (Mlawer et al., 1997)
	RAL2	CAM方案 (Collins et al., 2004)
	RAL3	Goddard方案 (Chou et al., 2001)
	RAL4	FLG (UCLA) 方案 (Gu et al., 2011)
	RAL5	Earth Held-Suarez forcing方案 (Held and Suarez, 1994)
	RAL6	GFDL (Eta) 方案 (Fels and Schwarzkopf, 1981)
短波过程	RAS1	Dudhia方案 (Dudhia, 1989)
	RAS2	oldGoddard方案 (Matsui et al., 2018)
	RAS3	CAM方案 (Collins et al., 2004)
	RAS4	Goddard方案 (Chou et al., 2001)
	RAS5	FLG (UCLA) 方案 (Gu et al., 2011)
	RAS6	GFDL (Eta) 方案 (Fels and Schwarzkopf, 1981)
积云参数化过程	CU1	KF方案 (Kain, 2004)
	CU2	BMJ方案 (Janjić, 1994)
	CU3	GF方案 (Grell and Freitas, 2014)
	CU4	OSAS方案 (Pan and Wu, 1995)
	CU5	New Grell scheme (G3) 方案 (Grell and Dévényi, 2002)
	CU6	Zhang-McFarlane from CESM方案 (Zhang and McFarlane, 1995)
	CU7	New GFS SAS from YSU方案 (Han and Pan, 2011)
	CU8	New SAS (HWRF) 方案 (Han and Pan, 2011)
	CU9	Grell-Devenyi ensemble方案 (Grell and Dévényi, 2002)
	CU10	previous Kain-Fritsch方案 (Kain, 2004)
陆面过程	SU1	thermal diffusion方案 (Dudhia, 1996)
	SU2	RUC方案 (Benjamin et al., 2004)
	SU3	Noah-MP方案 (Yang et al., 2011)
	SU4	Pleim-Xiu方案 (Gilliam and Pleim, 2010)
边界层过程+ 近地面过程	PBL1	YSU方案 + Revised MM5 Monin-Obukhov方案 (Hong et al., 2006; Jiménez et al., 2012)
	PBL2	QNSE-EDMF方案 + QNSE方案 (Sukoriansky et al., 2005)
	PBL3	MYNN 2.5方案 + Monin-Obukhov (Janjic Eta)方案 (Nakanishi and Niino, 2006)
	PBL4	MYNN 3rd方案 + MYNN方案 (Nakanishi and Niino, 2006)
	PBL5	ACM2 (Pleim) 方案 + Pleim-Xiu方案 (Pleim, 2007)
	PBL6	BouLac方案 + Monin-Obukhov (Janjic Eta) 方案 (Bougeault and Lacarrere, 1989)
	PBL7	Bretherton-Park/UW方案 + Monin-Obukhov (Janjic Eta) 方案 (Bretherton and Park, 2009)
	PBL8	GBM TKE-type方案 + Revised MM5 Monin-Obukhov 方案 (Grenier and Bretherton, 2001)

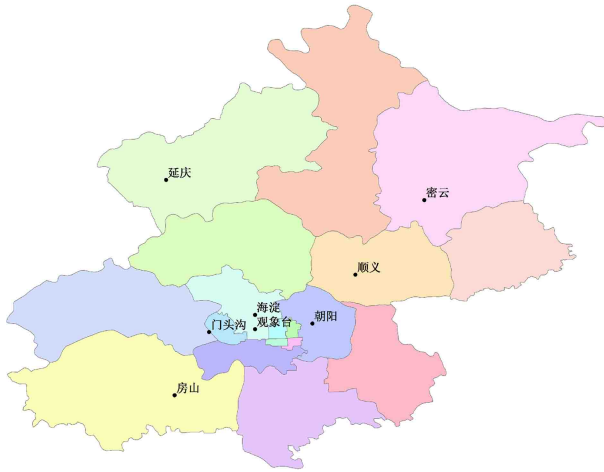


图2 北京市8个气象要素观测站点分布

Fig. 2 Distribution of observation sites for the meteorological element measurements in Beijing, China

趋势的相似程度；均方根误差用来表征模拟误差；偏差反映模拟相比于观测的偏离程度。主要统计指标计算公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S(i) - \bar{S})(O(i) - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S(i) - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O(i) - \bar{O})^2}}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S(i) - O(i))^2}{n}}, \quad (2)$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S(i) - O(i)), \quad (3)$$

其中， S 表示站点模拟值， O 表示站点观测值， $\bar{S}$ 表示模拟平均值， $\bar{O}$ 表示观测平均值， i 表示模拟时段第 i 个小时， n 表示模拟时段总小时数。

3 试验结果分析

3.1 控制试验的模拟效果评估

本文首先对比控制试验模拟的北京市温度、相对湿度、10 m 高度风速的站点均值与观测，表 3

列出了 2016 年 12 月 15 日 00:00（北京时间）至 21 日 00:00 污染过程模拟站点均值与观测站点均值的各项对比指标。模拟温度与观测的相关系数为 0.67，模拟偏差为 2.0°C，存在高估。模拟相对湿度与观测的相关系数为 0.80，说明 WRF 模式能较好地模拟北京市近地面相对湿度随时间的变化趋势，相对湿度模拟偏差为 -5.2%，均方根误差为 14.2%。模拟风速与观测的相关性最低，相关系数为 0.57，模拟偏差为 1.8 m/s，存在高估。

图 3 给出了控制试验模拟的北京市温度、相对湿度、10 m 高度风速的 8 个站点均值与观测值的时间序列对比。温度模拟往往在夜间出现高估，并随着污染过程持续，偏差呈现增大趋势。值得注意的是，温度模拟高估时段往往会出现相对湿度低估。此外在模拟时段内 WRF 模式模拟的风速明显偏大，说明控制试验对重污染时段近地层风速模拟存在系统性偏差。

图 4 给出了两个时段模拟的温度均值、相对湿度均值和观测均值的空间对比，时段一为 15 日 12:00 至 16 日 12:00，属于重污染初始阶段；时段二为 18 日 12:00 至 19 日 12:00，属于重污染持续阶段。

在重污染初始阶段，观测温度呈现城中心高、北部低的空间分布，模拟温度场也具有类似的空间结构，且模拟值与观测值之间差异相对较小。在重污染时段（图 4b），观测温度呈现城中心高、北部低的格局，模拟温度场为北部低、城中心及南部高，且模拟和观测温度均高于重污染初始阶段。同时也可以发现，重污染时段温度模拟场与观测差异要显著大于重污染初始阶段的差异。从相对湿度来看，在重污染初始阶段（图 4c），观测相对湿度呈现城中低、周边高的空间分布，模拟相对湿度场呈现城中及西南部低、东北部高的特征，模拟值与观测值的差异相对较小；在重污染时段（图 4d），观测和模拟的相对湿度显著高于重污染初始阶段，

表 3 北京市 8 个站点 2016 年 12 月 15~21 日期间气象要素观测均值与控制试验模拟均值对比的统计指标

Table 3 The statistical indices of the mean values of meteorological elements observed and simulated in the control test at eight stations Beijing, China, during 15–21 Dec 2016

	偏差	均方根误差	相关系数	观测平均值	模拟平均值
温度	2.0°C	3.5°C	0.67	-0.8°C	1.2°C
相对湿度	-5.2%	14.2%	0.80	60.2%	55.0%
10 m 高度风速	1.8 m/s	2.1 m/s	0.57	1.3 m/s	3.1 m/s

并且模拟偏差也大于初始阶段。上述模拟观测对比结果表明,在这次重污染过程中模拟温度和相对湿度与观测均存在较大差异,并有随时间误差不断增

长趋势。后续试验将从 WRF 模式的物理参数化方案敏感性试验着手,分析不同参数化方案对这次污染过程中气象要素模拟精度的影响。

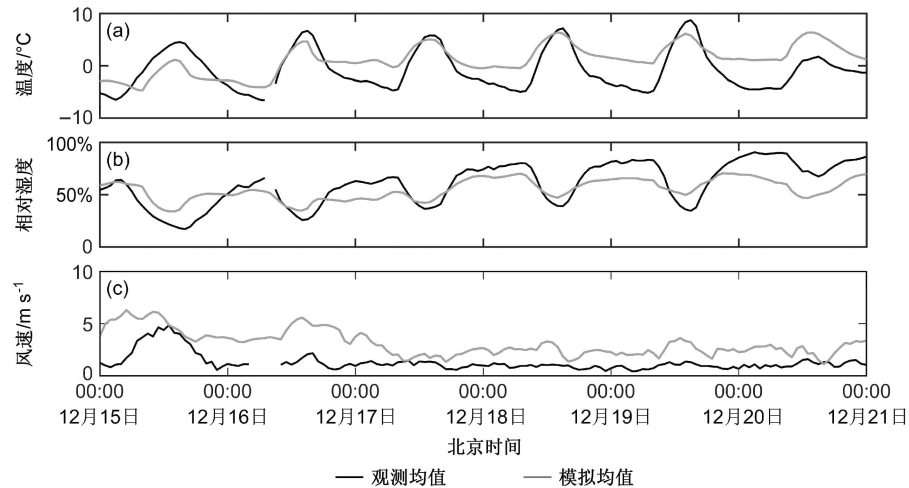


图3 北京市8个站点2016年12月15~21日控制试验模拟温度、相对湿度、10 m高度风速均值与观测均值的对比

Fig. 3 Comparison between the means of simulated temperature, relative humidity, wind speeds at 10-m height in the control test and hourly observations at eight stations Beijing, China, during 15–21 Dec 2016

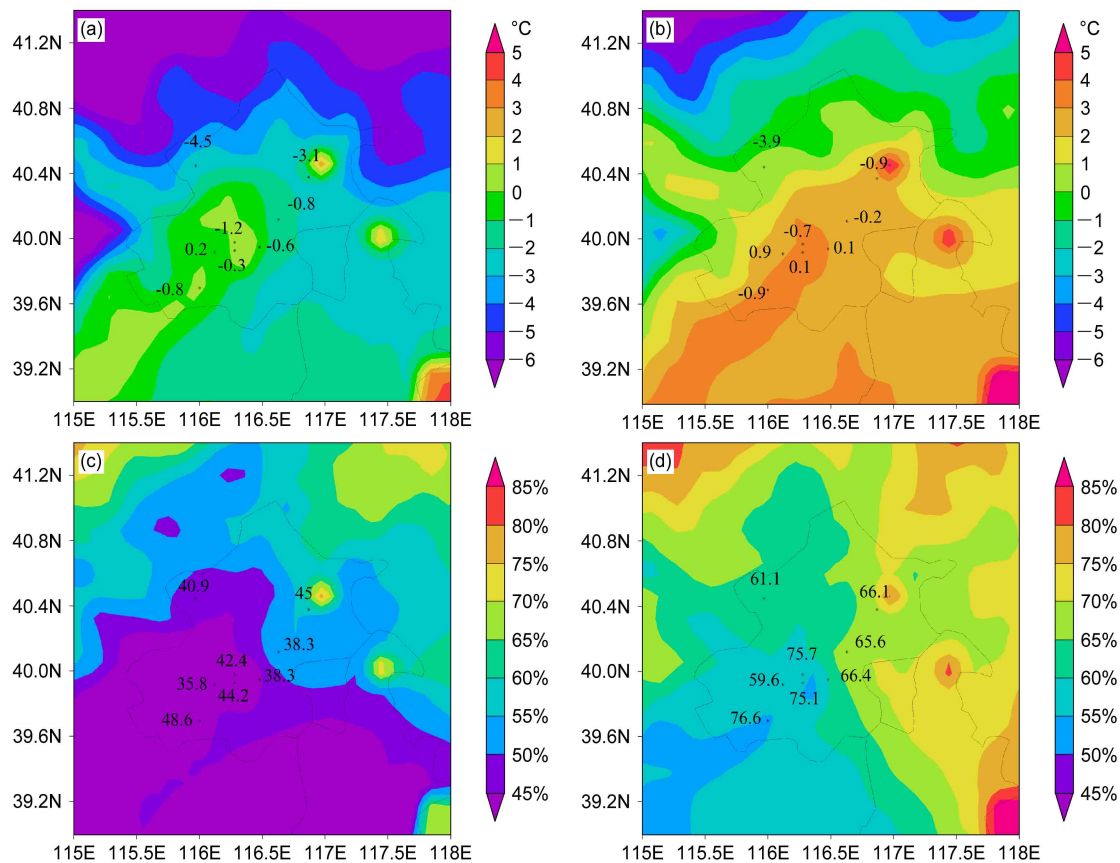


图4 北京市8个站点2016年12月(a)15日12:00至16日12:00、(b)18日12:00至19日12:00控制试验模拟(阴影区域)与观测(数字)的温度日均值对比;(c)、(d)同(a)、(b),但为相对湿度

Fig. 4 Comparison of the simulated daily mean temperature (shaded area) in the control test and observed daily mean temperature (number) (a) from 1200 LST on 15 Dec to 1200 LST on 16 Dec and (b) from 1200 LST on 18 Dec to 1200 LST on 19 Dec 2016 at eight stations in Beijing, China; (c) and (d) the same as (a) and (b), but for the daily mean relative humidity

3.2 参数化方案的敏感性分析及优选

3.2.1 参数化方案的敏感性分析

为了了解不同过程对气象模拟的敏感性程度，采用表2中敏感性试验的WRF模式物理参数化方案配置方案，开展不同方案配置下的气象模拟敏感性试验。我们将敏感性试验分为微物理过程、积云参数化过程、长波过程、短波过程、边界层过程和陆面过程共6个敏感性试验小组，进而分析不同小组中不同方案设置下模拟结果的差异程度，这种差异程度用所有敏感性试验的集合离散度（标准差）来表征。表4给出了6个敏感性试验小组内部温度、相对湿度和风速的集合离散度。

表4 WRF模式6类物理参数化过程气象要素的离散度
Table 4 The dispersion of meteorological elements in six physical parameterization processes of the WRF model

	离散度		
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度	10 m风速/ m s^{-1}
微物理过程	0.4~1.7	2.2%~10.1%	0.4~2.4
积云参数化过程	0.3~1.8	1.9%~10.9%	0.3~2.6
长波过程	2.4~7.4	4.9%~24.9%	0.7~2.5
短波过程	1.5~5.5	3.5%~10.9%	0.6~2.5
边界层过程	0.6~1.8	3.2%~11.4%	0.5~2.2
陆面过程	0.6~2.9	10.8%~26.6%	0.5~2.5

从结果可以看出，温度模拟对长波过程最敏感，离散度为2.4~7.4 $^{\circ}\text{C}$ ，对短波过程敏感程度次之。相对湿度模拟对长波过程最敏感，离散度为4.9%~24.9%，对陆面过程敏感程度次之，可能是由于辐射过程和陆面过程相互作用，相互提供辐射通量，同时边界层内的湿度、风廓线等模拟的准确性要依赖于下垫面的温湿特征，因而相对湿度模拟对这两种过程最为敏感。风速模拟的离散度差异相对较小，表明不同参数化过程对风速模拟结果影响的差异较小。

3.2.2 物理参数化方案的优选

本节从统计指标的角度优选出对模拟此次过程适用性较好的参数化方案组合，参考的统计指标分别是MB、RMSE以及R。经过统计指标筛选出温度模拟效果相对较好的两种方案分别是Noah-MP陆面方案和Dudhia短波辐射方案。对相对湿度来讲，筛选出的两种方案分别是MYNN 3rd边界层方案和QNSE边界层方案。对于风速来讲，筛选出的两种方案分别是MYNN 3rd边界层方案和GBM边界层方案。综合考虑最优参数化方案组合

为Lin微物理过程方案、RRTMG长波方案、RRTMG短波方案、Tiedtke积云对流方案、Noah陆面过程方案、MYNN 3rd边界层方案和MYNN近地面过程方案。

表5给出了北京市此次污染过程中模拟基准方案、集合均值与最优方案之间统计参数的对比。经过集合平均后，温度模拟与观测相关系数由0.67提高到0.69，高于基准方案；平均偏差和均方根误差分别比基准方案减少了25%、11%。模拟相对湿度和风速相比基准方案变化较小。经过优选后，温度模拟与观测相关系数由0.69提高到0.73，相关性更高；平均偏差减少了13%，相比基准方案减少了35%，均方根误差减少了6%，相比基准方案减少了17%。风速和相对湿度的相关系数无明显提高，但均方根误差和平均偏差均有明显的减少。与集合平均相比，相对湿度的平均偏差减少了42%，均方根误差减少了13%；风速的平均偏差减少了29%，均方根误差减少了20%。由此可见，最优方案对3类气象要素的模拟相比基准方案、集合平均均有较好的效果。

表5 北京市8个站点模拟基准方案、集合均值与最优方案气象要素统计指标

Table 5 The meteorological factor statistical indices for the simulated baseline scheme, ensemble mean, and best scheme at eight stations in Beijing, China

	方案分类	偏差	均方根误差	相关系数
温度	基准方案	2.0 $^{\circ}\text{C}$	3.5 $^{\circ}\text{C}$	0.67
	集合均值	1.5 $^{\circ}\text{C}$	3.1 $^{\circ}\text{C}$	0.69
	最优方案	1.3 $^{\circ}\text{C}$	2.9 $^{\circ}\text{C}$	0.73
相对湿度	基准方案	-5.3%	14.2%	0.80
	集合均值	-5.2%	14.2%	0.81
	最优方案	-3.0%	12.3%	0.81
10 m高度风速	基准方案	1.8 m/s	2.1 m/s	0.57
	集合均值	1.7 m/s	2.0 m/s	0.59
	最优方案	1.2 m/s	1.6 m/s	0.58

图5给出了此次污染过程3类方案气象要素时间序列图。可以看出，对于温度低值、相对湿度高值时段，最优方案比基准方案更接近观测值。常用的边界层参数化方案按照闭合框架来划分，可分为1阶闭合、1.5阶闭合、2阶闭合或者更高阶闭合，最高阶预报方程确定闭合阶数（孙文奇和李昌义，2018）。基准方案中使用的MYJ边界层方案运用1.5阶的局地闭合方案，在描述湍流通量项时引

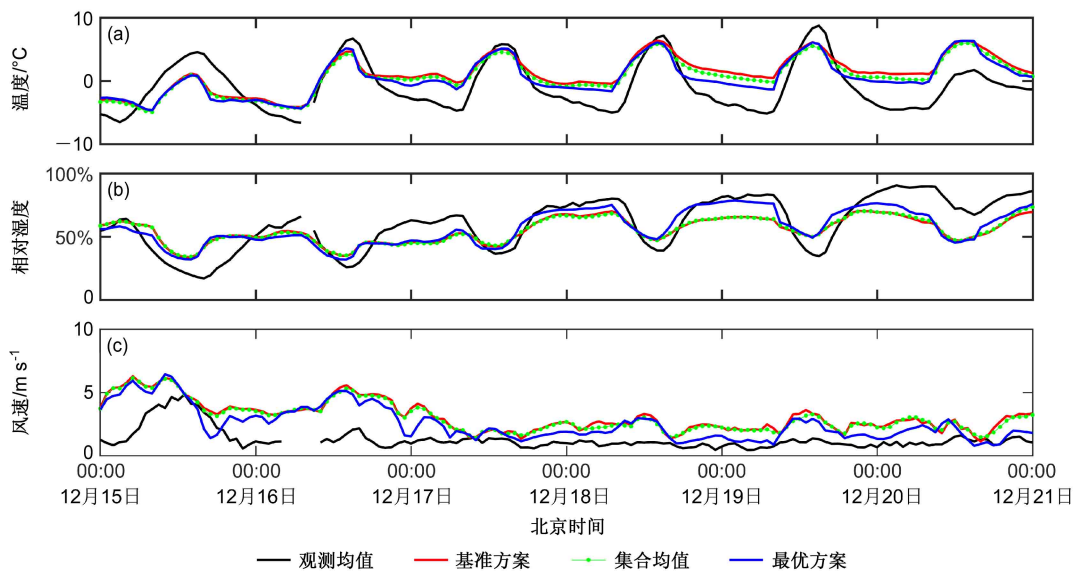


图5 北京市8个站点2016年12月15~21日间基准方案、集合均值、最优方案气象场模拟与观测小时值的对比

Fig. 5 Comparison of hourly means of observed and simulated meteorological fields for the baseline scheme, ensemble mean, and best scheme at eight stations Beijing, China, during 15–21 Dec 2016

入了部分二阶矩预报方程, 而最优方案中 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。高阶闭合的特性详细地描述湍流中更复杂的非线性过程, 提高了边界层的计算精度, 因此最优方案有较好的模拟效果。

3.3 代表性站点的敏感性试验及分析

以上结果呈现了北京市的模拟平均状况, 为了对比不同站点的模拟性能, 选取了北京市8个站点中具有代表性的观象台城区站点、密云郊区站点以及延庆山区站点。王佳丽等(2012)对不同时间尺度的气温观测资料进行计算, 结果均表明观象台是最能代表城区特征的站点, 郊区站点远离城市中心, 具有不同的代表性, 考虑到山区与平原地区的天气和气候差异, 因此将延庆山区站点考虑进去。

图6、7、8给出了北京市3个站点基准方案、集合均值与最优方案气象场模拟与观测小时值时间序列。从温度模拟来看, 无论在城区、郊区、山区, 最优方案在夜间模拟效果要优于集合均值和基准方案; 所有方案对城区温度模拟效果较好, 均大致模拟出温度随时间的变化趋势。从相对湿度来看, 基准方案与集合均值之间差异相对较小, 最优方案呈现出更好的模拟效果; 3种方案对城区湿度模拟效果相对较好。从风速来看, 对城区、郊区、山区的模拟效果均较差, 总体表现为模拟高估。

综上所述, 3种方案对城区站点模拟效果相对较好, 郊区次之, 山区最差, 这可能受复杂地形和下垫面特征等影响。从气象要素的模拟情况来看, 温度模拟效果较好, 相对湿度次之, 风速最差。

4 结论

针对2016年12月16~21日北京市一次重污染过程, 本文开展了中尺度气象模式 WRF 的参数化方案配置敏感性试验。针对微物理过程、长波辐射过程、短波辐射过程、陆面过程、边界层过程、近地面过程以及积云对流参数化过程进行组合优选, 共设计51组参数化方案组合, 分析不同模拟方案下北京市8个气象站点温度、相对湿度、10 m 高度风速的模拟精度及其敏感性。主要结论如下:

(1) 从控制试验的结果可以看出, WRF 能较好地模拟温度和湿度的变化趋势, 但存在一定偏差, 温度模拟往往在夜间出现高估, 并随着污染过程持续, 偏差呈现增大趋势。温度模拟高估时段往往会出现相对湿度低估。此外在模拟时段内 WRF 模拟的风速明显偏大, 说明控制试验对重污染时段近地层风速模拟存在系统性偏差。

(2) 对 WRF 模式中参数化方案进行选择, 共设计50组敏感性试验。温度模拟对长波过程最敏感, 离散度为 2.4~7.4°C, 对短波过程敏感程度

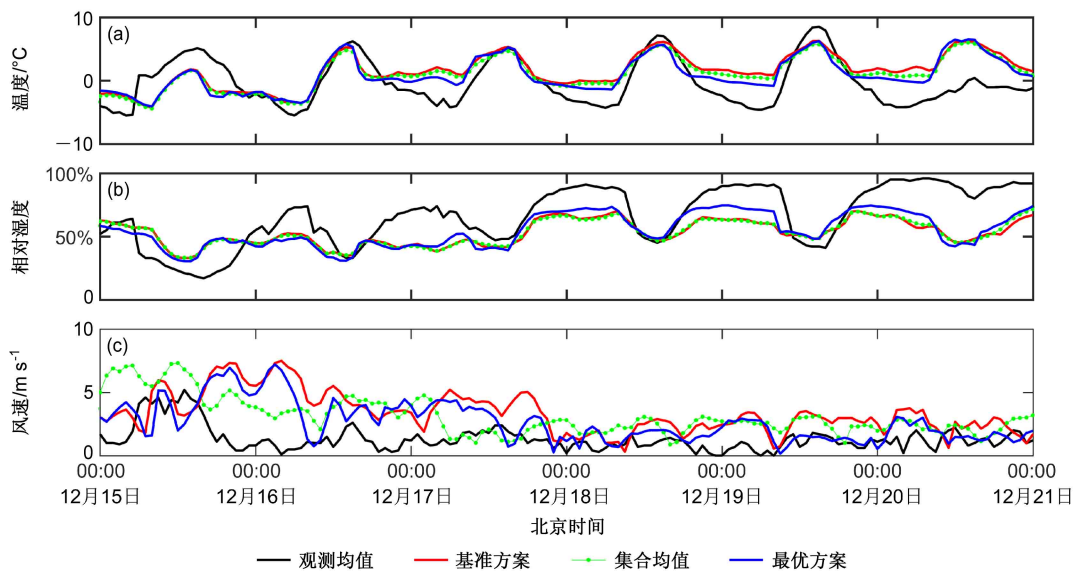


图 6 北京市观象台站 2016 年 12 月 15~21 日间基准方案、集合均值与最优方案气象场模拟与观测均值的对比

Fig. 6 Comparison of hourly means of observed and simulated meteorological fields for the baseline scheme, ensemble mean, and the best scheme at Guanxiangtai station Beijing, China, during 15–21 Dec 2016

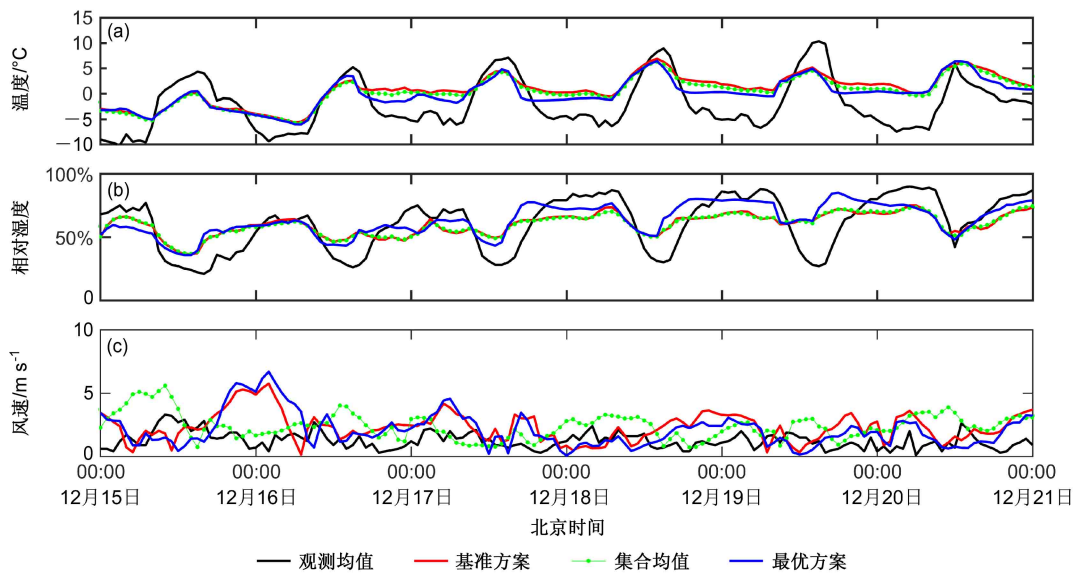


图 7 同图 6, 但为北京市密云站

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for Miyun station Beijing, China

次之。相对湿度模拟对长波过程最敏感, 离散度为 4.9%~24.9%, 对陆面过程敏感度次之。风速模拟离散度差异相对较小, 因此不同参数化过程对风速模拟结果影响的差异较小。

(3) 对此次污染过程适用性较好的参数化方案组合为 Lin 微物理过程方案、RRTMG 长波方案、RRTMG 短波方案、Tiedtke 积云对流方案、Noah 陆面过程方案、MYNN 3rd 边界层方案和 MYNN 近地面过程方案。经过集合平均, 温度模拟与观测

相关系数为 0.69, 高于基准方案; 平均偏差和均方根误差分别比基准方案减少了 25%、11%。经过优选, 温度模拟与观测相关系数为 0.73, 相关性更高; 平均偏差减少了 13%, 相比基准方案减少了 35%, 均方根误差减少了 6%, 相比基准方案减少了 17%。风速和相对湿度的相关系数无明显提高, 但均方根误差和平均偏差均有明显的减少。与集合平均相比, 相对湿度的平均偏差减少了 42%, 均方根误差减少了 13%; 风速的平均偏差减少了 29%, 均方根

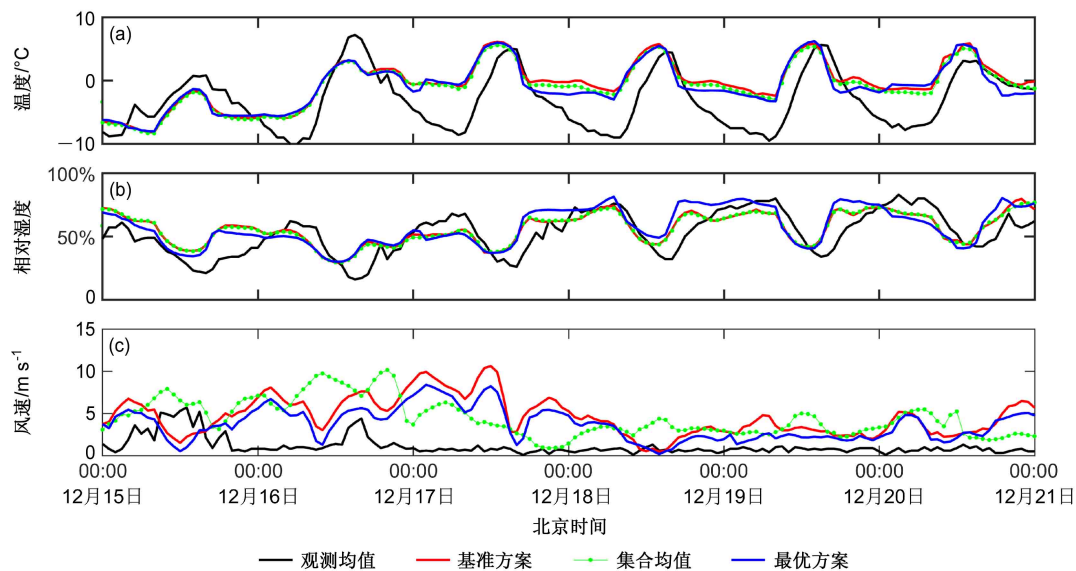


图 8 同图 6, 但为北京市延庆站

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for Yanqing station Beijing, China

误差减少了 20%。

(4) 为了比较不同站点的模拟性能, 选取了北京市城区、郊区、山区代表性站点进行对比分析, 发现 3 个站点中城区代表站点观象台的模拟效果较好, 郊区次之, 山区最差, 这可能受复杂地形和下垫面特征等影响。从气象要素的模拟情况来看, 温度的模拟效果较好, 相对湿度次之, 风速最差。

本文仅对北京地区进行了初步模拟分析, 对 WRF 模式中物理参数化方案的选择具有一定的参考价值, 后期可以考虑应用于空气质量模型中, 但针对不同的区域、不同的地形条件需要具体分析。

参考文献 (References)

- Bae S Y, Hong S Y, Lim K S S. 2016. Coupling WRF double-moment 6-class microphysics schemes to RRTMG radiation scheme in weather research forecasting model [J]. *Adv. Meteor.*: 5070154. doi:10.1155/2016/5070154
- 柏枫, 谌孙荣, 陈邦怀, 等. 2013. NCEP FNL 分析资料本地化应用系统设计与实现 [J]. *计算技术与自动化*, 32(3): 141–144.
- Bai Feng, Chen Sunrong, Chen Banghuai, et al. 2013. How to design and implement the localized application system of NCEP FNL data analysis [J]. *Computing Technology and Automation (in Chinese)*, 32(3): 141–144. doi:10.3969/j.issn.1003-6199.2013.03.031
- Benjamin S G, Grell G A, Brown J M, et al. 2004. Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(2): 473–494. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0473:MWPWTR>2.0.CO;2
- Bougeault P, Lacarrere P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(8):

- 1872–1890. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2
- Bretherton C S, Park S. 2009. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model [J]. *J. Climate*, 22(12): 3422–3448. doi:10.1175/2008JCLI2556.1
- Chaouch N, Temimi M, Weston M, et al. 2017. Sensitivity of the meteorological model WRF-ARW to planetary boundary layer schemes during fog conditions in a coastal arid region [J]. *Atmos. Res.*, 187: 106–127. doi:10.1016/j.atmosres.2016.12.009
- 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
- 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
- Chou M D, Suarez M J, Liang X Z, et al. 2001. A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies [R]. NASA Tech. Memo., 104606, 68pp.
- 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. Note NCAR/TN-464+STR, 214pp. doi:10.5065/D63N21CH
- 杜吴鹏, 房小怡, 黄弘, 等. 2017. 北京空气重污染红色预警期间污染物与气象因子特征 [J]. *环境工程学报*, 11(6): 3577–3586.
- Du Wupeng, Fang Xiaoyi, Huang Hong, et al. 2017. Beijing pollutants and meteorological factors characteristic during red alert periods of air heavy pollution [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering (in Chinese)*, 11(6): 3577–3586. doi:10.12030/j.cjee.201609093
- 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
- Dudhia J. 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5 [C]// The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR, 49–50.
- Fels S B, Schwarzkopf M D. 1981. An efficient, accurate algorithm for calculating CO₂ 15 μ m band cooling rates [J]. *J. Geophys. Res. Oceans*, 86(C2): 1205–1232. doi:10.1029/JC086iC02p01205
- Gao W H, Zhao F S, Hu Z J, et al. 2011. A two-moment bulk microphysics coupled with a mesoscale model WRF: Model description and first results [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(5): 1184–1200. doi:10.1007/s00376-010-0087-z
- Gilliam R C, Pleim J E. 2010. Performance assessment of new land surface and planetary boundary layer physics in the WRF-ARW [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49(4): 760–774. doi:10.1175/2009JAMC2126.1
- 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
- Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14): 38–1–38–4. doi:10.1029/2002GL015311
- Grell G A, Freitas S R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(10): 5233–5250. doi:10.5194/acp-14-5233-2014
- Grenier H, Bretherton C S. 2001. A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(3): 357–377. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0357:AMPPFL>2.0.CO;2
- Gu Y, Liou K N, Ou S C, et al. 2011. Cirrus cloud simulations using WRF with improved radiation parameterization and increased vertical resolution [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(D6): D06119. doi:10.1029/2010JD014574
- 贵志成, 郑益群, 曾新民, 等. 2013. WRF 模式不同边界层参数化方案对东亚夏季季风气候模拟影响的对比研究 [C]// 中国气象学会. 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S6 短期气候预测理论、方法与技术. 南京: 中国气象学会, 13. Gui Zhicheng, Zheng Yiqun, Zeng Xinmin, et al. 2013. Comparative analysis of the impact of different planetary boundary layer parameterization on the simulation of East Asia Summer Monsoonal Climate in WRF Model [C]// Chinese Meteorological Society. Innovation-Driven Development to Improve the Ability of Meteorological Disaster Prevention-S6 Short-Term Climate Prediction Theory, Method and Technology (in Chinese). Nanjing: Chinese Meteorological Society, 13.
- Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system [J]. *Wea. Forecasting*, 26(4): 520–533. doi:10.1175/WAF-D-10-05038.1
- Held I M, Suarez M J. 1994. A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75(10): 1825–1830. doi:10.1175/1520-0477(1994)075<1825:APFTIO>2.0.CO;2
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(1): 103–120. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *J. Korean Meteor. Soc.*, 42(2): 129–151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- 胡向军, 陶健红, 郑飞, 等. 2008. WRF 模式物理过程参数化方案简介 [J]. *甘肃科技*, 24(20): 73–75. Hu Xiangjun, Tao Jianhong, Zheng Fei, et al. 2008. Introduction to the parameterization scheme of physical process in WRF model [J]. *Gansu Science and Technology (in Chinese)*, 24(20): 73–75. doi:10.3969/j.issn.1000-0952.2008.20.028
- 黄海波, 陈春艳, 朱雯娜. 2011. WRF 模式不同云微物理参数化方案及水平分辨率对降水预报效果的影响 [J]. *气象科技*, 39(5): 529–536. Huang Haibo, Chen Chunyan, Zhu Wenna. 2011. Impacts of different cloud microphysical processes and horizontal resolutions of WRF model on precipitation forecast effect [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 39(5): 529–536. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.05.001
- 黄思, 唐晓, 徐文帅, 等. 2015. 利用多模式集合和多元线性回归改进北京 PM₁₀ 预报 [J]. *环境科学学报*, 35(1): 56–64. Huang Si, Tang Xiao, Xu Wenshuai, et al. 2015. Application of ensemble forecast and linear regression method in improving PM₁₀ forecast over Beijing areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 35(1): 56–64. doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.0728
- 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. Atmos.*, 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
- 贾文星, 姜海梅, 袁伟红, 等. 2019. 中尺度天气预报模式边界层参数化方案以及近地层方案对苏州东山冬季近地层气象要素模拟的影响 [J]. *科学技术与工程*, 19(17): 32–43. Jia Wenxing, Jiang Haimei, Yuan Weihong, et al. 2019. The effect of planetary boundary layer parameterization schemes and surface layer schemes in mesoscale weather research forecasting model on the simulation of surface layer meteorological parameters at Dongshan, Suzhou in winter [J]. *Science Technology and Engineering (in Chinese)*, 19(17): 32–43. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2019.17.005
- Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al. 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140(3): 898–918. doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1

- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(1): 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- Kessler E. 1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations [M]. Boston: American Meteorological Society. doi:10.1007/978-1-935704-36-2
- 赖锡柳, 王颖, 杨雪玲, 等. 2017. WRF 模式不同陆面过程方案模拟兰州新区低空气象场特征 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 53(3): 329–340. Lai Xiliu, Wang Ying, Yang Xueling, et al. 2017. Meteorological characteristics in Lanzhou New District simulated by WRF with different land surface model parameterizations [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science) (in Chinese)*, 53(3): 329–340. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2017.03.007
- 廖镜彪, 王雪梅, 夏北成, 等. 2012. WRF 模式中微物理和积云参数化方案的对比试验 [J]. *热带气象学报*, 28(4): 461–470. Liao Jingbiao, Wang Xuemei, Xia Beicheng, et al. 2012. The effects of different physics and cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall simulation in PRD [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28(4): 461–470. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.04.004
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(5): 1587–1612. doi:10.1175/2009MWR2968.1
- Lin Y L, Colle B A. 2011. A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature-dependent ice characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139(3): 1013–1035. doi:10.1175/2010MWR3293.1
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 22(6): 1065–1092. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
- 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
- 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
- Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C. 2010. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67(1): 171–194. doi:10.1175/2009JAS2965.1
- Matsui T, Zhang S Q, Tao W K, et al. 2018. Impact of radiation frequency, precipitation radiative forcing, and radiation column aggregation on convection-permitting West African monsoon simulations [J]. *Climate Dyn.*, 1–21. doi:10.1007/s00382-018-4187-2
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102(14): 16663–16682. doi:10.1029/97JD00237
- Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(3): 991–1007. doi:10.1175/2008MWR2556.1
- 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
- Pan H L, Wu W S. 1995. Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium range forecast model [R]. NMC Office Note, 409.40: 20–233.
- Pleim J E. 2007. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46(9): 1383–1395. doi:10.1175/JAM2539.1
- Salamanca F, Zhang Y Z, Barlage M, et al. 2018. Evaluation of the WRF-urban modeling system coupled to Noah and Noah-MP land surface models over a semiarid urban environment [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123(5): 2387–2408. doi:10.1002/2018JD028377
- 沈晓燕, 颜玉倩, 肖宏斌, 等. 2018. WRF 模式不同参数化方案组合对青海气温、降水及风速模拟的影响 [J]. *干旱气象*, 36(3): 423–430. Shen Xiaoyan, Yan Yuqian, Xiao Hongbin, et al. 2018. Influence on simulation of temperature, precipitation and wind speed by using different combinations of parameterization schemes in WRF model in Qinghai Province [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 36(3): 423–430. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0423
- Soni M, Payra S, Sinha P, et al. 2014. A performance evaluation of WRF model using different physical parameterization scheme during winter season over a semi-arid region, India [J]. *Int. J. Earth Atmos. Sci.*, 1(3): 104–114.
- Sukoriansky S, Galperin B, Perov V. 2005. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 117(2): 231–257. doi:10.1007/s10546-004-6848-4
- 孙文奇, 李昌义. 2018. 数值模式中的大气边界层参数化方案综述 [J]. *海洋气象学报*, 38(3): 11–19. Sun Wenqi, Li Changyi. 2018. A review of atmospheric boundary layer parameterization schemes in numerical models [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 38(3): 11–19. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.002
- Sušelj K, Sood A. 2010. Improving the Mellor-Yamada-Janjić parameterization for wind conditions in the marine planetary boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 136(2): 301–324. doi:10.1007/s10546-010-9502-3
- 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
- Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice–water saturation adjustment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(1): 231–235. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2
- Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of the unified Noah land–surface model in the WRF model Paper [C]// Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: American Meteorological Society, 2165–2170.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(12): 5095–5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1
- 王佳丽, 张人禾, 王迎春. 2012. 北京不同区域表面气温的变化特征以及北京市观象台气温的代表性 [J]. *气候与环境研究*, 17(5): 563–573. Wang Jiali, Zhang Renhe, Wang Yingchun. 2012. Features of the surface air temperature in different areas of Beijing and the representativeness of Beijing observatory [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(5): 563–573. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11024
- 王晓君, 马浩. 2011. 新一代中尺度预报模式 (WRF) 国内应用进展 [J]. *地球科学进展*, 26(11): 1191–1199. Wang Xiaojun, Ma Hao. 2011. Progress of application of the Weather Research and Forecast (WRF) model in China [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 26(11): 1191–1199.
- 王琪, 孙巍, 张新宇. 2014. 北京地区 PM_{2.5} 质量浓度分布及其与气象条件影响关系分析 [J]. *计算机与应用化学*, 31(10): 1193–1196. Wang Qi, Sun Wei, Zhang Xinyu. 2014. Analysis of PM_{2.5} distribution characteristics and impacts of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Beijing [J]. *Computers and Applied Chemistry (in Chinese)*, 31(10): 1193–1196. doi:10.11719/com.app.chem20141010
- 谢菲, 何宏让, 张云. 2016. 不同陆面过程参数化方案模拟效果评估 [J]. *安徽农业科学*, 44(9): 210–215, 220. Xie Fei, He Hongrang, Zhang Yun. 2016. Evaluation of simulation results for different parameterization schemes of land process [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 44(9): 210–215, 220. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2016.09.072
- 谢博文, 朱勇, 李永秀. 2012. 不同积云对流参数化方案对华南气温和降水模拟的影响 [J]. *安徽农业科学*, 40(31): 15346–15349, 15377. Xie Bowen, Zhu Yong, Li Yongxiu. 2012. Impact of different cumulus convective parameterization schemes on simulation of the temperature and precipitation in South China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 40(31): 15346–15349, 15377. doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2012.31.096
- 闫之辉, 邓莲堂. 2007. WRF 模式中的微物理过程及其预报对比试验 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 1(6): 1–6. Yan Zhihui, Deng Liantang. 2007. Description of microphysical processes in WRF model and its prediction experiment [J]. *Desert and Oasis Meteorology (in Chinese)*, 1(6): 1–6. doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2007.06.001
- 杨旭. 2017. 京津冀地区空气污染特征与气象成因及其预报研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 79pp. Yang Xu. 2017. Research on characteristics of air pollution and its meteorological reasons and forecasting method in Beijing–Tianjin–Hebei region [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University, 79pp.
- 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. Atmos.*, 116(D12): D12110. doi:10.1029/2010JD015140
- 张颖龙. 2017. 基于 WRF-Chem 模式对京津冀地区 PM_{2.5} 污染过程分析及预报实验 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 73pp. Zhang Yinglong. 2017. Analysis and forecasting on PM_{2.5} episodes over Beijing–Tianjin–Hebei region by using WRF-Chem model [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 73pp.
- 张颖, 刘志红, 吕晓彤, 等. 2016. 四川盆地一次污染过程的 WRF 模式参数化方案最优配置 [J]. *环境科学学报*, 36(8): 2819–2826. Zhang Ying, Liu Zhihong, Lü Xiaotong, et al. 2016. Optimal configuration of parameterized schemes in WRF model during a pollution episode in Sichuan Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 36(8): 2819–2826. doi:10.13671/j.hjkxxb.2016.0009
- 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
- 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
- Zhao Q Y, Carr F H. 1997. A prognostic cloud scheme for operational NWP models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125(8): 1931–1953. doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1931:APCSFO>2.0.CO;2
- 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. doi:10.5194/acp-15-2031-2015
- Zheng H T, Liu J G, Tang X, et al. 2018. Improvement of the real-time PM_{2.5} forecast over the Beijing–Tianjin–Hebei region using an optimal interpolation data assimilation method [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(5): 1305–1316. doi:10.4209/aaqr.2017.11.0522
- 周心河, 熊喆. 2019. 区域气候模式不同积云对流参数化方案对新疆气候模拟的影响研究 [J]. *气候与环境研究*, 24(2): 169–185.
- Zhou Xinhe, Xiong Zhe. 2019. Impacts of different cumulus convective parameterization schemes on regional climate model simulation over Xinjiang [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 24(2): 169–185. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18075