

刘琳,白永清,林春泽,等,2018.华中区域空气质量数值预报系统评估及气溶胶辐射效应的模拟研究[J].气象,44(9):1179-1190.

华中区域空气质量数值预报系统评估及 气溶胶辐射效应的模拟研究^{*}

刘琳 白永清 林春泽 杨浩

中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074

提 要: 基于多种检验指标对2015年6月至2016年2月华中区域空气质量数值预报系统的6种污染物(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO , O_3)和AQI指数的预报结果进行检验评估,在确保模拟效果的基础上,通过敏感性试验研究区域气溶胶对地面气象要素的影响,结果表明:华中区域空气质量数值预报系统对湖北省6种污染物和AQI具有稳定且较好的预报效果。存在 O_3 预报较实况偏高,预报误差较大的问题,后期将通过误差订正来减小误差。对比CUACE模式预报效果表明,24~48 h的预报效果区域模式优于CUACE,72 h两个模式预报效果相当。气溶胶对地面气象要素具有一定的影响,对2015年1月9—12日的模拟过程而言,气溶胶的总辐射效应使地表接收太阳辐射减少 $7.740 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,2 m气温降低 0.162°C ,行星边界层高度降低16.457 m,相对湿度增加0.557%,10 m风速减小 $0.011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其中直接效应和间接效应各有一部分贡献,气溶胶对白天地面气象要素的影响比夜间大。由于区域接受太阳辐射减小、气温降低、行星边界层高度降低、风速降低、湿度增加有利于气溶胶吸湿增长等条件不利于污染物扩散,污染物浓度不断累积升高又促使气象条件的上述变化,由此产生了气象条件与大气污染之间的双向反馈作用。

关键词: 华中区域,空气质量数值预报系统,气溶胶辐射效应,反馈

中图分类号: P456, X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.006

Evaluation of Regional Air Quality Numerical Forecasting System in Central China and Its Application for Aerosol Radiative Effect

LIU Lin BAI Yongqing LIN Chunze YANG Hao

Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research,
Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

Abstract: Based on a variety of test indicators from June 2015 to February 2016, the six kinds of forecast pollutants (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO , O_3) and the AQI index of Air Quality Numerical Forecasting System in Central China were verified. Then the impact of aerosol radiation effect on surface meteorological factors was studied by sensitivity experiments. The results show that the Air Quality Numerical Forecasting System in Central China has stable and good forecasting effect on the six pollutants and AQI in Hubei Province, but the forecast error of O_3 is larger and forecast value is higher than the observation. The error could be reduced by the error correction in future. Compared with the CUACE forecasting model, the 24—48 h forecast is better than that of CUACE and the 72 h effect of the two models are similar. The aerosol radiation effect has affected the distribution of surface meteorological field to a certain extent. During this process, the total radiation effect of aerosols reduced the solar radiation by $7.740 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 2 m temperature decreased by 0.162°C , planetary boundary layer height decreased by 16.457 m, relative humidity

^{*} 国家重点研发计划(2016YFC0203304)、湖北省气象局科技发展基金项目(2017C04)和国家自然科学基金青年项目(41705034)共同资助
2017年3月28日收稿; 2018年7月26日收修定稿
第一作者:刘琳,主要从事数值天气预报研究. Email:liulinaacc@163.com

increased by 0.557%, and 10 m wind speed decreased by $0.011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The effect of aerosols on meteorological elements in the daytime is greater than that over night. The reduction of solar radiation, 2 m temperature, boundary layer height, 10 m wind speed and the increase of humidity are not conducive to the spread of pollutants. The increase of pollutants concentration also contributes to the above changes of meteorological conditions, resulting in a bidirectional feedback between meteorological conditions and atmospheric pollution.

Key words: Central China, air quality numerical forecasting system, aerosol radiation effect, feedback

引 言

自 20 世纪 90 年代以来,我国作为世界最大的发展中国家逐渐成为城市化浪潮中的主体。2011 年 12 月,我国城市化率首次突破 50%,京津冀、珠三角以及长三角等城市群蓬勃发展。然而,不断发展的城市群集中了很大比例的人口和经济活动,而高强度的人类活动加速了污染粒子的排放,导致空气质量急剧下降。目前,我国大气污染出现复合性、区域性的特点(王自发等,2008),大气污染影响范围之大,污染程度之重,已成为国内外广泛关注的焦点(吴兑等,2014;苗蕾等,2016;姚日升等,2017)。

改善空气质量,除了有效控制区域各类污染源以外,开展及时准确的空气污染预报,为管理部门提供有效的污染预警也是污染控制工作的重要方面(徐文帅等,2016)。目前国际上对大气污染预报的方法主要有两种,一种是统计模型方法,即利用现有气象环境观测数据,建立大气污染浓度与气象参数间的统计预报模型(张恒德等,2017);另一种则是数值模拟方法,基于对大气物理和化学过程的大量观测和认识,借助计算机模拟污染物在大气中传输、化学转化和沉降等过程从而预报大气污染物的动态分布(王自发等,2006)。随着高性能计算机的蓬勃发展和多种探测技术的不断完善,数值模拟以其科学性强、能再现不同天气过程中污染物的反应以及对气溶胶微物理、化学过程的综合模拟等特征,在空气质量预报方面得到了广泛的认可和应用(郭欣等,2017)。自 1970 年至今,美国环保局发展的空气质量数值模型经历了从第一代一无化学活性污染物的扩散模型到第三代一区域多尺度空气质量模型(Zhang et al, 2003)的发展过程。国际上比较认可的是基于一个大气概念的第三代空气质量模型,即将所有的大气问题包括微物理、化学等过程均考虑进模式之中,可以有效地进行较为全面的空气质量

预报。与天气气候模式完全耦合的空气质量模式系统已经成为大气环境模式发展的必然趋势(谭成好等,2014)。我国基于空气质量预报模型的研究起步稍晚,研究主要包括对模型的参数和功能做修订和改进,形成了具有中国区域特点的模式体系。比较成熟的有中国科学院大气物理所的嵌套网格空气质量预报系统(Nested Air Quality Prediction Modeling System, NAQPMS;王自发等,2006;2008)、中国气象局化学天气数值预报系统(CMA Unified Atmospheric Chemistry Environment, CUACE;龚山陵和张小曳,2008),以及南京大学区域大气环境模式系统(Regional Atmospheric Environment Modeling System, RegAEMS;Wang et al, 2010)。

大量学者研究表明,气象条件对大气气溶胶具有很大的影响,而气溶胶的辐射效应对天气和气候也具有一定的影响,两者的双向反馈作用不可忽视(Li, 1998; Ramanathan et al, 2005; 徐祥德等, 2015; Bollasina et al, 2011)。目前常用的空气质量模式多利用气象模式来驱动区域空气质量模式,为了研究区域空气质量模式与气象模式的双向反馈作用,NOAA、NCAR 等联合开发了“在线(online)”三维区域化学/传输模式(Weather Research Forecasting/Chemistry, WRF/Chem),该模式的气象与化学模块使用相同的格点、时间步长、传输方案和物理方案,避免因差值等造成的误差,两者为同步计算、完全耦合,从而实现太阳辐射、大气动力和气溶胶化学等多过程、多物种的耦合和反馈(Grell et al, 2005)。Tuccella et al(2012)利用 WRF/Chem 对欧洲地区的气溶胶和气态污染物进行模拟,结果表明 WRF/Chem 对 O_3 和 SO_2 具有较好的预报效果。周广强等(2016)基于 WRF-Chem 模式对华东地区冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 进行预报,结果表明,华东区域大气环境数值预报业务系统具有较好的预报效果,不同阶段和预报时效的相关系数基本在 0.7 以上;华东中北部相关系数较高,北部的偏差中值和均方根误差

较大。Zhang et al(2015)利用 WRF/Chem 对 2013 年 1 月中国东部地区的重霾污染进行了模拟,设置对比多组情景试验表明,气溶胶的辐射效应导致地面接受太阳辐射减小 $84.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 2 m 温度减小 3.2°C , 10 m 风速降低 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 边界层高度降低 268 m, 间接效应的影响相对较小, 气溶胶效应导致地表污染物浓度的增加。总体来说 WRF/Chem 模式对气溶胶和污染物浓度具有良好的模拟性能(Ntelekos et al, 2009; Zhang et al, 2009; Forkel et al, 2015; 刘香娥等, 2016; 沈新勇等, 2017)。

目前, 京津冀(王占山等, 2016; 何心河等, 2016)、珠三角(邓涛等, 2012; 陈焕盛等, 2013)和长三角(常炉予等, 2016; 周广强等, 2016)地区已相继开展空气质量预报系统的搭建和研究。2012 年国务院批复的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》中, 武汉及其周边城市群被纳入重点控制区, 对区域空气质量改善、污染减排目标均提出了明确要求。作为全国霾污染的另一个高发区, 华中区域迫切需要一个稳定且预报效果较好的空气质量预报系统。白永清等(2016)基于 WRF/Chem 大气化学模式建立了华中区域空气质量数值预报系统(Air Quality Numerical Forecasting System in Central China, AQFSCC), 仅对武汉站冬季的 24 h 预报结果进行了初步检验。本文将综合多种检验指标, 利用更多观测数据对该系统不同季节的 24~72 h 预报效果进行评估, 可在空气重污染或重大活动保障期间, 为管理部门提供科学有效的污染控制依据。在此基础上, 通过敏感性试验研究华中区域气溶胶对地面气象要素的影响, 有助于提高对区域大气污染和异常天气发生的认识, 具有一定的科学意义。

1 华中区域空气质量预报系统

1.1 空气质量预报系统简介

华中区域空气质量数值预报系统是以 WRF/Chem 3.4“在线”区域化学/传输模式为主模块, 集合基础数据处理与前处理系统、三维变分同化系统(3-DVAR)、排放源处理、WRF/Chem 主模式计算和预报结果分析 5 个部分, 其主要流程框架见图 1。化学模块是以 WRF/Chem 为主模块, 其中包括天气过程, 污染物输送与扩散, 干、湿沉降以及各种化学反应和气溶胶过程。化学初始场采用前一天的

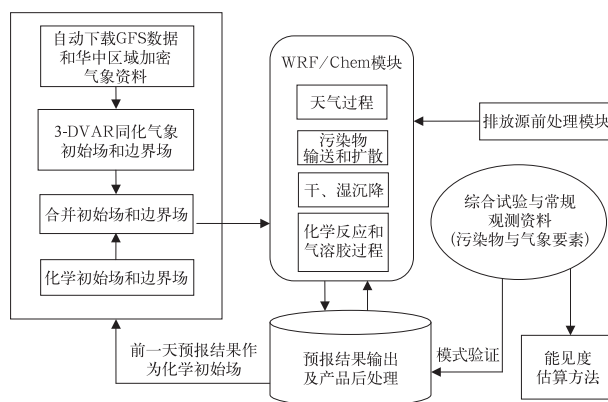


图1 华中区域空气质量数值预报系统框架

Fig.1 Main frame of Air Quality Numerical Forecasting System in Central China

24 h 预报结果, 初始边界条件采用模式自带的化学理想廓线。

该系统安装在与其相配套的计算峰值达到每秒 75 万亿次的 IBM 高性能计算机平台上, 模式系统每日 12 UTC 起报, 每次积分 78 h, 预报产品输出的时间间隔为 1 h, 空间分辨率 9 km, 产品主要包括华中区域主要污染物 ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , O_3 和 NO_2) 逐小时浓度、污染物地面浓度分布、逐日空气质量指数(AQI)、能见度和各站点气象要素等产品。预报时效 1~3 d, 基本满足空气质量预报业务需求, 为区域环境气象业务提供必要技术支撑。

1.2 模式系统设置

模式设置为双层嵌套(图 2), 空间分辨率为 $27 \text{ km} \times 9 \text{ km}$, 外层区域以中国为中心覆盖东亚等大片范围, 中心为 30.617°N , 114.133°E , 网格数 370 (经向) $\times$ 214 (纬向); 内层区域包括了华中地区河

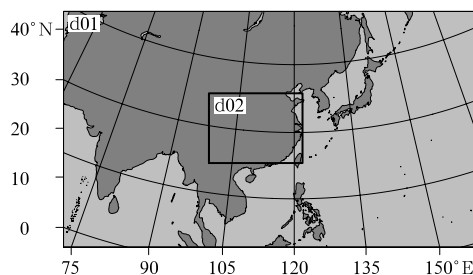


图2 华中区域空气质量数值预报系统区域选取

Fig.2 Nested domain setup of the Air Quality Numerical Forecasting System in Central China

表 1 华中区域空气质量数值预报模式的参数化方案设置

Table 1 Physics and chemistry options used for the Air Quality Numerical Forecasting System in Central China			
类型	方案	选项	备注
物理模块	边界层物理	YSU scheme	YSU Scheme
	积云参数化方案	KF scheme	Kain-Fritsch (new Eta) scheme
	微物理	WSM 6 scheme	WRF Single-Moment 6-class scheme
	长波辐射	RRTM scheme	Rapid Radiative Transfer Model (每 15 min 计算一次)
	短波辐射	Goddard Shortwave scheme	simple downward integration (每 15 min 计算一次)
	陆面模式	Noah Land-Surface Model	NCEP/NCAR/AFWA scheme with temperature and moisture in 4 layers
化学模块	化学方案	RADM2	direct effect
	气溶胶方案	MADE/SORGAM	MADE/SORGAM scheme

南、湖北、湖南、江西、四川、重庆等主要省(市),网格数 250(经向)×190(纬向),垂直方向分为 28 层,层顶气压设为 50 hPa。模式化学过程和气象过程同步计算,积分时间步长设为一致,外层 120 s,内层 40 s。经过批量试验的检验结果,最终确定最优的物理化学方案,详见表 1。需要说明的是,业务系统仅考虑气溶胶的直接效应,这样在保证预报效果的基础上,能尽量缩短预报时间,为业务需求提供保障。

1.3 排放源处理

人为排放源基于清华大学提供的 2012 年亚洲地区 0.25°×0.25°污染物排放清单(Li et al, 2015; 清华大学, 2015),包含工业、农业、电力、交通和民用 5 大类排放源,排放清单提供 SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMVOC, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC 和 CO₂ 等多种污染物。由于排放源清单具有很大的不确定性,加之缺乏能展现中国地域特色的关键排放因子而使得中国地区排放源清单不确定性更大(曹国良等, 2011)。因此,在模式系统运行前期,首先对该污染物排放清单进行了前期测试,通过多次比较华中区域污染物浓度的模拟与实测,适当调整了主要物种的逐月排放源强度。并通过经验统计了几种污染源日排放小时变化系数,形成适合模式实时运行的华中区域污染源排放数据集(白永清等, 2016)。通过引入污染物观测资料的约束,可以减少源清单的不确定性,以弥补排放源清单时效滞后及其他不确定性的不足。

2 空气质量预报系统评估

2.1 资料与评估方法

目前仅获取由湖北省环境监测总站提供的湖北

省 50 个监测站点的 6 种污染物(PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO 和 O₃)逐小时监测数据以及逐日 AQI 数据,下文将对湖北省空气质量预报效果进行检验。从站点分布图可见(图 3),空气质量监测站点分布基本均匀,武汉附近站点相对密集。该资料经过严格的质量控制,时间长度为 2015 年 1 月至 2016 年 6 月。

华中区域空气质量数值预报系统自 2014 年 9 月起,准业务运行两年多。选取湖北省 2015 年夏季(6—8 月)和冬季(2015 年 12 月至 2016 年 2 月)的逐小时预报结果,对模式 24~72 h 的预报结果进行检验。检验评估指标采用相关系数(R)、平均标准偏差(MNB)、均方根误差(RMSE)和平均绝对百分误差(MAPE),计算方法如式(1)~式(4)。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$MNB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_i - O_i}{O_i} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

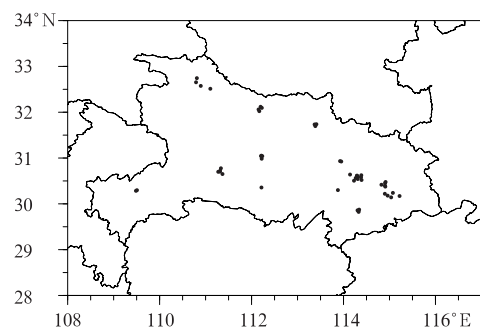


图 3 湖北省 50 个环境监测站点分布

Fig. 3 Spatial distribution of the 50 environmental monitoring stations in Hubei

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100\% \tag{4}$$

式中, P 为预报值, O 为观测值, N 为检验样本数。

按照 $AQI \leq 100$ (优良), > 100 (污染), $101 \sim 150$ (轻度污染), $151 \sim 200$ (中度污染) 和 > 200 (重度污染) 将 AQI 指数划分为 5 个污染等级, 采用 TS 评分、漏报率(PO)、空报率(FAR)检验模式 AQI 指数预报情况。

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \tag{5}$$

$$PO = \frac{NC}{NA + NC} \tag{6}$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \tag{7}$$

式中, NA 为预报正确样本数, NB 为空报样本数, NC 为漏报样本数。对应各等级, 当预报等级与实况等级相同为预报正确; 预报出现在等级内而实况不出现等级内, 为空报; 预报没出现在等级内, 实况出现在等级内, 为漏报。

式(5)~式(7)中, 采用 Cressman 差值方法(陈飞等, 2010)将 6 种污染物浓度数据插值到湖北省 50 个环境监测站点。下文将对模式预报效果进行评估, 并与中国气象局下发的 CUACE 环境气象模式产品(曹国良等, 2011)进行对比检验。

2.2 模式评估结果

表 2 和表 3 分别为湖北省空气质量预报系统夏季和冬季 6 种污染物日平均浓度 24~72 h 预报检

验结果。 R 反映了模式预报结果与实况的一致程度, R 越高, 预报效果越好。从夏季检验结果(表 2)可见, 模式对固体颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})浓度预报较好, 24 h 的 $PM_{2.5}$ 预报与实况的 R 达 0.73, 随着预报时效延长, 72 h R 降至 0.61。四种气体污染物的 R 区别较大, SO_2 和 O_3 的较低, 24~72 h 为 0.40~0.61; 而 NO_2 与 CO 的较高, 模式预报效果较好。从冬季检验结果(表 3)可见, 24~72 h 的 $PM_{2.5}$ 的 R 为 0.49~0.54, PM_{10} 的 R 为 0.43~0.52, 较夏季低, 四种气体污染物的 R 相差不大, 为 0.48~0.64。

MNB 指示检验时段内模式的系统偏差, 模式对前 5 种污染物预报偏小, 而对 O_3 的预报偏大, 随着预报时效增长, 模式系统偏差略增大。RMSE 也反映了模式预报与实况的偏差, 结果与 MNB 类似。

由于不同污染物浓度差异较大, MNB 不能统一比较其预报好坏, MAPE 则消除了浓度绝对量级。可见模式夏季预报结果的 MAPE 基本控制在 13%~47%, 预报效果较为理想。 O_3 预报误差最大, 固体颗粒物浓度与 NO_2 预报误差最小。MAPE 表现为固体颗粒物冬季较夏季偏高, 气体污染物冬季较夏季偏低。

综合 4 个评估指标来看, 华中区域空气质量数值预报系统对湖北省 6 种污染物具有稳定和较好的预报效果。存在 O_3 预报误差较大的问题, 预报较实况偏高, 但是模拟的变化趋势与实况相当, 后期将通过误差订正来减小预报误差。

根据 6 种污染物的实况监测与模式预报的逐时资料, 计算模式与实况的逐日 AQI 指数。图 4 为检

表 2 2015 年 6—8 月湖北省 6 种污染物日平均浓度 24~72 h 模式预报检验评估
Table 2 The 24—72 h forecast verification results of daily mean concentrations of air pollutants in Hubei from June to August 2015

	预报时效/h	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	O_3
R	24	0.73	0.74	0.53	0.81	0.81	0.59
	48	0.71	0.75	0.58	0.76	0.76	0.61
	72	0.61	0.62	0.44	0.62	0.68	0.40
$MNB/\mu g \cdot m^{-3}$	24	-0.26	-0.27	-0.40	-0.08	-0.35	0.54
	48	-0.33	-0.34	-0.44	-0.13	-0.39	0.56
	72	-0.33	-0.33	-0.44	-0.12	-0.39	0.57
$RMSE/\mu g \cdot m^{-3}$	24	15.64	24.27	6.28	3.72	0.34	38.83
	48	18.30	28.31	6.77	4.47	0.38	39.20
	72	19.28	29.74	6.89	5.26	0.39	40.20
$MAPE/\%$	24	28	29	40	13	34	46
	48	31	35	44	17	39	47
	72	33	36	45	18	40	46

表 3 同表 2, 但为 2015 年 12 月至 2016 年 2 月

Table 3 Same as Table 2, but from December 2015 to February 2016

	预报时效/h	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
R	24	0.54	0.52	0.48	0.53	0.47	0.64
	48	0.51	0.46	0.42	0.50	0.40	0.58
	72	0.49	0.43	0.45	0.51	0.38	0.49
MNB/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	24	-0.27	-0.25	-0.34	-0.06	-0.20	0.56
	48	-0.31	-0.29	-0.40	-0.09	-0.24	0.59
	72	-0.32	-0.30	-0.41	-0.09	-0.25	0.60
RMSE/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	24	46.57	48.72	9.08	8.63	0.43	27.54
	48	49.73	48.86	10.21	9.59	0.48	31.59
	72	50.69	50.97	10.42	9.60	0.50	33.62
MAPE/%	24	31	33	37	17	27	40
	48	33	36	42	19	30	42
	72	36	38	43	19	31	43

验时段内湖北省逐日 AQI 指数预报与实况对比,从夏季的检验结果(图 4a)可见,武汉市的 AQI 指数维持在 40~140,最重等级为轻度污染。24~72 h 的模式预报与实况 AQI 变化趋势非常一致,检验时段的前半段 24~72 h 模式预报 AQI 指数略高于实况,这可能与 O₃ 浓度预报偏高有关;而检验时段后期,则与实况接近。表 4 为湖北省夏季 AQI 分级检验评分,由于检验时段为夏季,湖北省中、重度污染少见,将空气质量指标分为优良、污染来检验。当 AQI 为污染等级时,模式预报的 24 h TS 评分为 0.363,随着预报时效的延长评分有所降低。漏报率和空报率均维持在可接受范围内,可见模式对湖北省夏季的 AQI 预报效果较好。

从冬季检验结果(图 4b)可见,模式对湖北省冬季 AQI 预报较实况偏弱,尤其是 2015 年 12 月偏弱较多,这可能与排放源的强度偏弱有关。但总体来看,模式预报的 AQI 变化趋势与实况非常接近,对冬季的 AQI 进行误差订正后,预报效果明显提高。表 5 为湖北省冬季的 AQI 分级检验评分,可见随着污染等级的提升,模拟效果逐渐降低,24 h 的 TS 评分从 0.506 降至 0.073。总体来看,华中区域空气质量数值预报系统对湖北省 AQI 预报具有一定的预报技巧,冬季的 AQI 指数评分低于夏季。

2.3 与 CUACE 预报效果对比检验

为了对比 WRF/Chem 与 CUACE 模式对湖北省空气质量预报效果,收集同时期 CUACE 模式的逐 3 h 预报结果,分别对两种模式的 24~72 h 的预报效果进行检验。图 5 为两个模式对冬季和夏季湖北省 6 种污染物逐 3 h 浓度的 24~72 h 预报评估对

比,可见 WRF/Chem 模式对 6 种污染物浓度的 24~48 h 预报 R 均高于 CUACE 模式;对应预报时效的 MAPE CUACE 模式普遍高于 WRF/Chem,但 WRF/Chem 对 O₃ 的预报绝对百分误差高于 CUACE。随着预报时效延长至 72 h, WRF/Chem 对 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 CO 夏季的预报 R 低于 CUACE,冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的 R 高于 CUACE,另外 3 种气

表 4 2015 年 6—8 月湖北省 AQI 分级检验评分

Table 4 Statistical tests for AQI grades of Hubei from June to August 2015

	预报时效/h	优良	污染
TS	24	0.736	0.363
	48	0.727	0.314
	72	0.665	0.204
PO	24	0.166	0.438
	48	0.157	0.524
	72	0.198	0.580
FAR	24	0.138	0.493
	48	0.159	0.521
	72	0.205	0.571

表 5 同表 4, 但为 2015 年 12 月至 2016 年 2 月

Table 5 Same as Table 4, but from December 2015 to February 2016

	预报时效/h	优良	污染	轻度	中度	重度
TS	24	0.506	0.258	0.172	0.105	0.073
	48	0.481	0.235	0.166	0.097	0.065
	72	0.431	0.204	0.144	0.092	0.042
PO	24	0.135	0.657	0.657	0.692	0.910
	48	0.107	0.524	0.608	0.765	0.962
	72	0.116	0.680	0.836	0.768	0.954
FAR	24	0.532	0.493	0.675	0.731	0.774
	48	0.545	0.521	0.689	0.744	0.897
	72	0.543	0.265	0.662	0.692	0.899

体污染物的 R 高于 CUACE,除了 SO_2 外其他 5 种污染物的 MAPE 都低于 CUACE。综上所述,24~48 h 的预报效果 WRF/Chem 优于 CUACE,72 h 两个模式预报效果相当。

3 气溶胶对地面气象要素的影响

上文对华中区域空气质量数值预报系统进行介

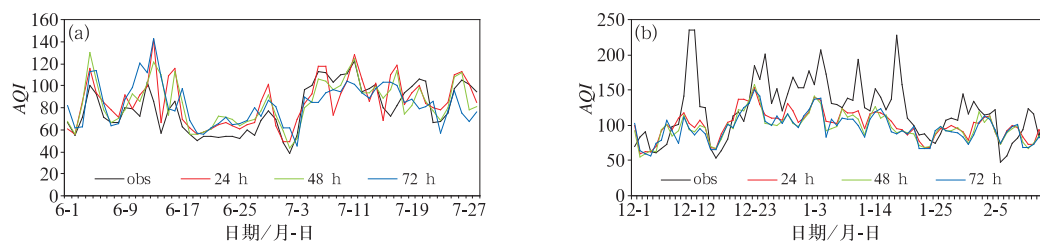


图 4 2015 年湖北省夏季(a)和冬季(b)逐日 AQI 指数预报与实况对比

Fig. 4 The observed and forecasted ambient air quality index in summer (a) and winter (b) in Hubei in 2015

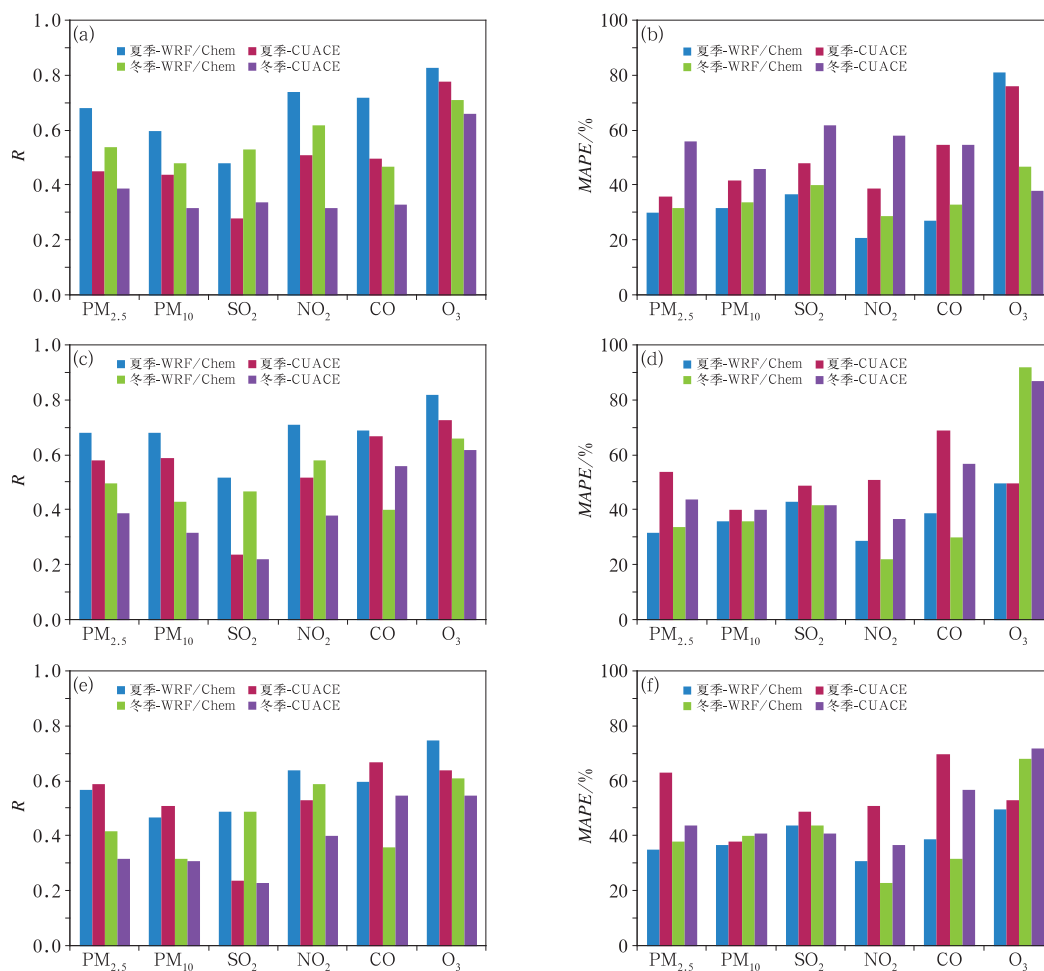


图 5 WRF/Chem 与 CUACE 模式对湖北省冬季与夏季 6 种污染物逐 3 h 浓度的 24 h(a,b)、48 h(c,d)和 72 h(e,f)的 R (a,c,e)和 MAPE(b,d,f)的预报评估对比

Fig. 5 The 24–72 h WRF/Chem and CUACE forecast verification results of every 3 h concentrations of air pollutants in Hubei

(a, b) 24 h, (c, d) 48 h, (e, f) 72 h; (a, c, e) R , (b, d, f) MAPE

绍和检验,结果表明该系统具有稳定和理想的预报效果,尤其对冬季颗粒物浓度的预报效果较好。本节将在业务系统的基础上,通过设置敏感性试验研究冬季重雾-霾污染过程中气溶胶对气象要素的影响。模拟时段选取 2015 年 1 月 9 日 12 时至 12 日 12 时(UTC),该时段内华中区域大部分地区 AQI 指数普遍高于 200 且无明显降水过程,属雾-霾重度污染。表 6 为三组敏感性试验的设置详情,其他方案设置与华中区域业务模式(表 1)一致。试验 1 为包含所有气象和化学过程以及气溶胶的辐射反馈作用,即为控制试验。试验 2 关闭气溶胶的液相反应,并关闭了湿清除机制和云化学机制,试验 3 则进一步关闭了气溶胶的反馈机制。控制试验和试验 3 的差值即为气溶胶总的辐射效应,试验 2 与试验 3 的差值为气溶胶的直接和半直接效应。

图 6 和图 7 分别为武汉地区几种污染物和气象要素的观测与模拟对比曲线图。从图可见,武汉地区几种主要污染物的浓度模拟与实况比较接近,模拟时段的前 12 h 由于模式冷启动造成污染物浓度

模拟偏弱,后期污染物的模拟浓度和变化趋势与实况相当。几种气象要素的模拟也与实况比较接近,风速模拟值较实况偏强,但变化趋势与实况接近。地面气压、相对湿度以及 2 m 气温的强度和日变化模拟比较理想。综上所述,WRF/Chem 对气象要素(风速、地面气压、相对湿度和 2 m 气温)以及污染物($\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 和 O_3)浓度随时间变化的趋势模拟比较理想,因此利用 WRF/Chem 研究气溶胶辐射反馈效应是基本可信的。

图 8 为 2015 年 1 月 10 日 10 时(UTC)WRF/Chem 模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布图,由图可见华东、华中大片区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,长三角以及武汉等城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,污染等级为严重污染。模拟区域内风速呈小风和静风,不利于污染物的扩散。从整个污染过程来看(图略),重污染区域主要位于华东和华中大片区域,整个过程风速偏小,污染物逐渐累积。1 月 12 日 18 时以后风速增大,雾-霾过程逐渐结束。

根据表 6 中设置的三组敏感性试验,计算得出

表 6 三组敏感性试验方案设置
Table 6 Setup of three simulation scenarios

方案设置	试验 1(控制试验)	试验 2	试验 3
化学方案	RADM2	RADM2	RADM2
气溶胶方案	MADE/SORGAM 包含液相反应	MADE/SORGAM	MADE/SORGAM
气溶胶反馈开关	打开	打开	关闭
湿清除机制	打开	关闭	关闭
云化学机制	打开	关闭	关闭

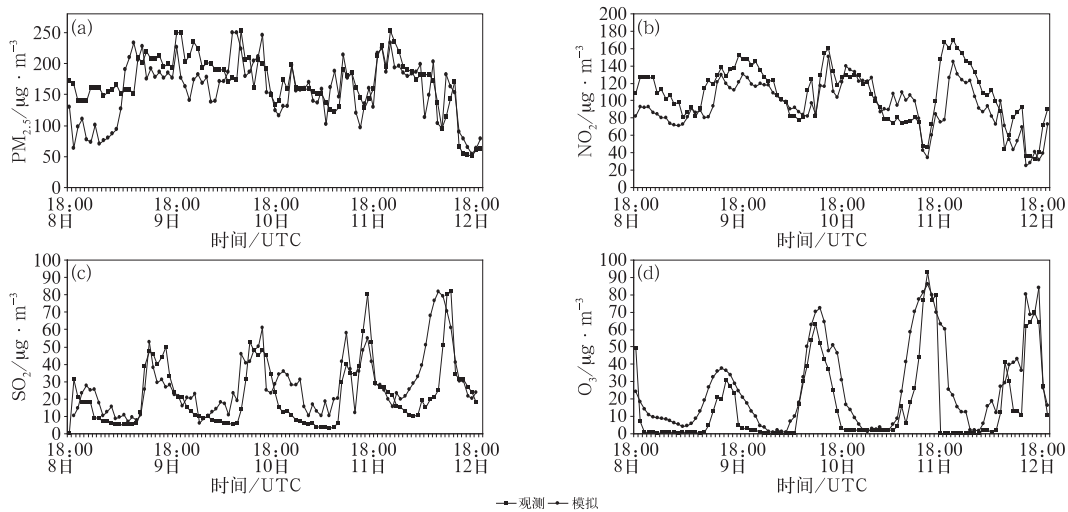


图 6 2015 年 1 月 8 日 18 时至 12 日 18 时武汉 $\text{PM}_{2.5}$ (a)、 NO_2 (b)、 SO_2 (c)、 O_3 (d) 的观测与模拟浓度对比

Fig. 6 Variations of $\text{PM}_{2.5}$ (a), NO_2 (b), SO_2 (c) and O_3 (d) between simulated and observed concentrations in Wuhan from 18:00 UTC 8 to 18:00 UTC 12 January 2015

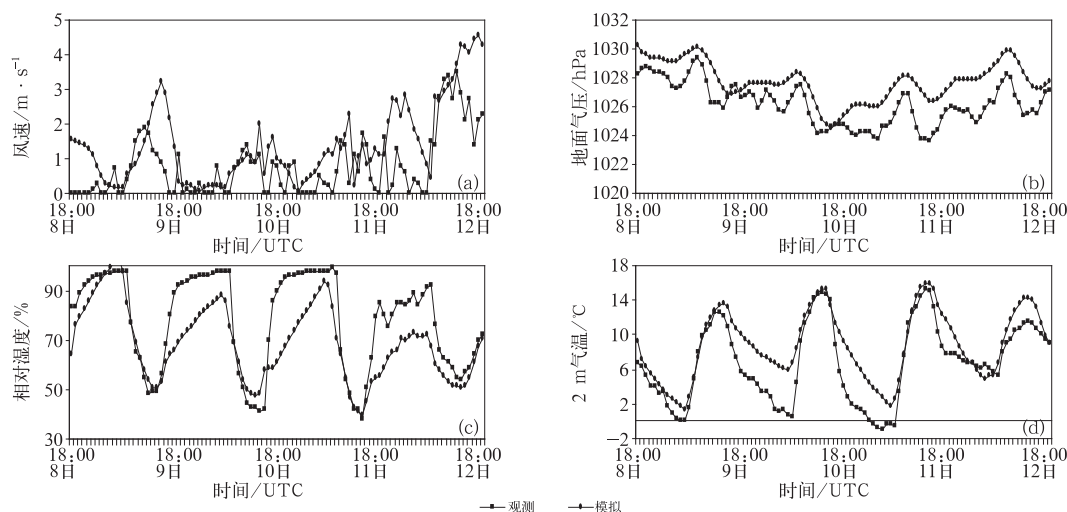


图7 同图6, 但为地面风速(a)、地面气压(b)、相对湿度(c)以及2 m气温(d)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for wind speed (a), pressure (b), relative humidity (c) and 2 m temperature (d)

模拟过程中气溶胶对地面气象要素的总辐射效应、直接效应以及间接效应。由于地面气象要素在白天和夜间受气溶胶影响有所差异, 本文将研究时段划分为白天时段(08—20 UTC)和夜间时段(20 UTC至次日08 UTC)分别进行研究, 表7为不同模拟时段内气溶胶对气象要素影响的时空平均值。结合白天时段内气溶胶总辐射效应、直接辐射效应和间接辐射效应对地面气象要素影响的时间平均分布图(图9)可见, 整个时段内, 气溶胶总辐射效应对地表接受太阳短波辐射(图9a)的影响为负强迫, 地表接

受太阳短波辐射平均浓度减少 $7.740 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中白天时段气溶胶对太阳短波辐射的负强迫较多 ($-15.636 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 夜间时段影响较小, 这与夜间地面接受短波辐射较小有关。气溶胶直接辐射效应(图9b)使白天地面接受短波辐射减少 $6.361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 负强迫中心与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的中心位置接近, 这是由于气溶胶直接辐射效应与气溶胶浓度大小相对应(张悦等, 2016)。间接辐射效应造成白天地面接受太阳短波辐射平均减小 $9.275 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

气溶胶对2 m温度的影响为负强迫, 整个模拟时段内2 m温度时空平均下降 0.162°C 。从其对白天2 m温度的影响(图9d, 9e, 9f)分布可见, 气溶胶直接和间接辐射效应均使得2 m温度下降, 其中间接辐射效应的影响较直接辐射效应稍大, 直接辐射效应影响的温度负中心与气溶胶浓度大值中心相对应。夜间时段气溶胶对2 m温度的影响也为负强迫, 比白天影响值稍小, 详见表7。

气溶胶对大气行星边界层高度(planetary boundary layer height, PBLH)的影响总体为负强迫, 模拟时段内PBLH平均降低 16.457 m 。对比白天与夜间的影响可见, 气溶胶对白天的PBLH影响比夜间大。从白天时段气溶胶对PBLH的影响(图9g, 9h, 9i)可见, 总辐射效应使得白天时段PBLH平均降低 24.290 m 。与2 m气温类似, 直接辐射效应对PBLH影响最大的负值中心与气溶胶高值中心对应, 且间接辐射效应的负强迫作用较直接辐射效应明显。气溶胶增加导致大气边界层厚度降低,

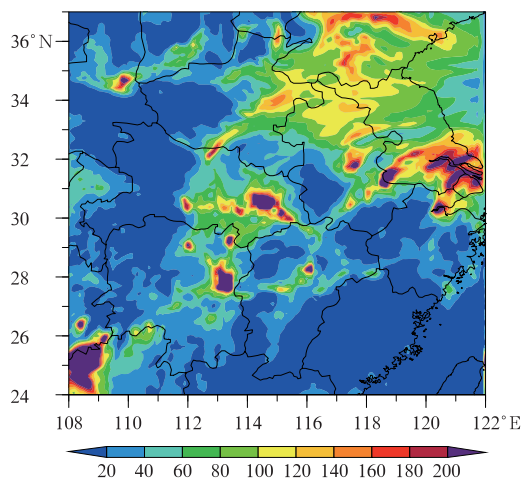


图8 2015年1月10日10时(UTC) WRF/Chem模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布图(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 8 Distribution of WRF/Chem simulated $\text{PM}_{2.5}$ concentration at 10:00 UTC 10 January 2015 (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

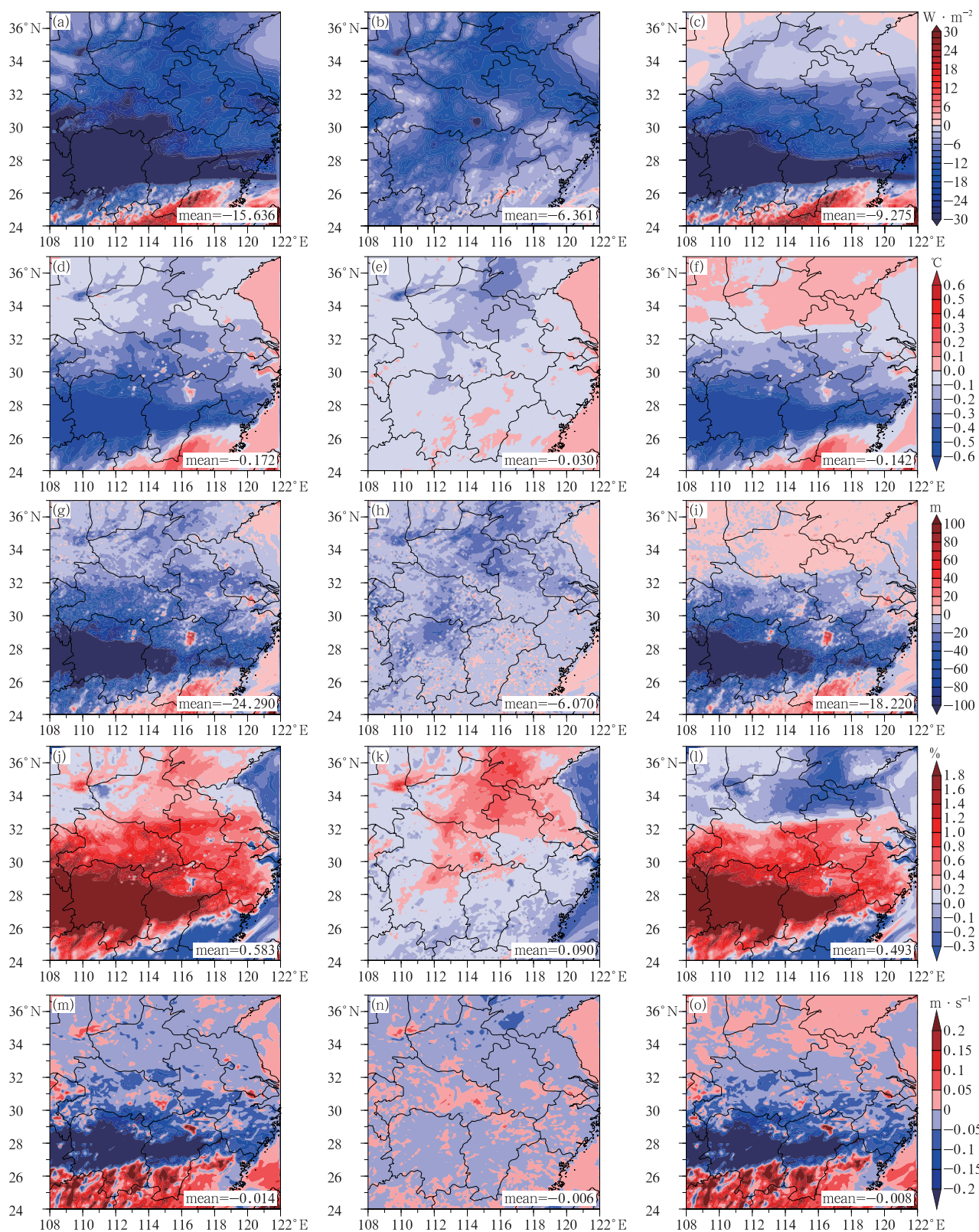


图9 白天时段气溶胶总效应(a,d,g,j,m)、直接辐射效应(b,e,h,k,n)以及间接辐射效应(c,f,i,l,o)

对地表短波辐射(a,b,c)、2 m气温(d,e,f)、行星边界层高度(g,h,i)、
相对湿度(j,k,l)、10 m风速(m,n,o)的影响模拟

Fig. 9 Simulation of influences of the whole aerosol effects (a,d,g,j,m), direct radiative effects (b,e,h,k,n) and indirect radiative effects (c,f,i,l,o) on the averages of surface short wave radiation (a,b,c), 2 m temperature (d,e,f), PBLH (g,h,i), relative humidity (j,k,l) and 10 m wind speed (m,n,o) during the daytime

表 7 不同模拟时段内气溶胶对气象要素的总体、直接与间接影响

Table 7 Overall, direct and indirect effects of aerosols to meteorological elements during different simulation periods

类别	整个时段			白天时段(08—20 UTC)			夜间时段(20 UTC 至次日 08 UTC)		
	总体	直接	间接	总体	直接	间接	总体	直接	间接
地表短波辐射/ $W \cdot m^{-2}$	-7.740	-3.152	-4.589	-15.636	-6.361	-9.275	-0.006	-0.008	0.002
2 m 气温/ $^{\circ}C$	-0.162	-0.026	-0.136	-0.172	-0.030	-0.142	-0.152	-0.021	-0.131
PBLH/m	-16.457	-3.425	-13.032	-24.290	-6.070	-18.220	-8.674	-0.723	-7.951
相对湿度/%	0.557	0.077	0.479	0.583	0.090	0.493	0.528	0.060	0.468
10 m 风速/ $m \cdot s^{-1}$	-0.011	-0.003	-0.008	-0.014	-0.006	-0.008	-0.009	-0.001	-0.008

不利于边界层内污染物的扩散,从而使得气溶胶进一步增加,两者呈现双向反馈的作用。

从气溶胶对白天相对湿度的影响(图 9j,9k,9l)可见,气溶胶的直接辐射效应使得模拟区域内相对湿度增加,平均增加 0.090%,间接辐射效应使得南部区域的相对湿度进一步增加,总辐射效应使相对湿度平均增大 0.583%。气溶胶对夜间相对湿度的影响与白天相差不大,具体见表 7。

从气溶胶对白天 10 m 风速的影响(图 9m,9n,9o)可见,总辐射效应使模拟区域内风速下降 $0.014 m \cdot s^{-1}$,直接辐射效应使得风速降低 $0.006 m \cdot s^{-1}$,间接辐射效应使得风速降低 $0.008 m \cdot s^{-1}$ 。气溶胶对夜间 10 m 风速的影响比白天小。

综上所述,气溶胶在一定程度上影响了地面气象要素。就本次模拟过程而言,气溶胶的总辐射效应分别使地表接收太阳短波辐射减少 $7.740 W \cdot m^{-2}$,2 m 气温降低 $0.162^{\circ}C$,PBLH 降低 16.457 m,相对湿度增加 0.557%,10 m 风速减小 $0.011 m \cdot s^{-1}$,其中直接效应和间接效应各有一部分的贡献。气溶胶对白天地面气象要素的影响比夜间大,尤其是对地表接受太阳短波辐射、PBLH 以及 2 m 温度的影响较夜间大很多。由于区域接受太阳短波辐射减小、气温降低、PBLH 降低、风速降低、湿度增加造成气溶胶吸湿增长等因素,使得颗粒物积聚,不利于污染物扩散,气象条件的变化又促使了污染物浓度升高,由此产生了气象与大气污染之间的双向反馈作用。

4 结论与讨论

(1) 基于多种检验指标对 2015 年 6 月至 2016 年 2 月华中区域空气质量数值预报系统的 6 种污染物(PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO 和 O_3)逐小时预报结果以及 AQI 指数进行检验评估。结果表明,华中区域空气质量数值预报系统对湖北省 6 种污染物具

有稳定和较好的预报效果。存在 O_3 预报较实况偏高,预报误差较大的问题,后期将通过误差订正来减小误差。系统对湖北省 AQI 预报比较理想,冬季的 AQI 指数评分低于夏季。

(2) 对比 WRF/Chem 与 CUACE 对湖北省空气质量预报效果表明,24~48 h 的预报效果 WRF/Chem 优于 CUACE,72 h 两个模式预报效果相当,各有优劣。

(3) 气溶胶在一定程度上影响了地面气象要素。对 2015 年 1 月 9—12 日的模拟过程而言,气溶胶的总辐射效应分别使地表接收太阳辐射减少 $7.740 W \cdot m^{-2}$,2 m 气温降低 $0.162^{\circ}C$,PBLH 降低 16.457 m,相对湿度增加 0.557%,10 m 风速减小 $0.011 m \cdot s^{-1}$,其中直接辐射效应与间接辐射效应各有一部分的贡献。气溶胶对白天地面气象要素的影响比夜间大,尤其是对地表接受太阳短波辐射、PBLH 以及 2 m 温度的影响比夜间大很多。由于区域接受太阳短波辐射减小、气温降低、PBLH 降低、风速降低、湿度增加有利于气溶胶的吸湿增长等因素,使得颗粒物积聚,不利于污染物扩散,气象条件的变化又促使了污染物浓度升高,由此产生了气象与大气污染之间的双向反馈作用。

值得注意的是,目前仅对湖北省的预报结果进行检验,后期会收集范围更广、时间更长的观测资料来考察模式系统的稳定性和预报准确率。同时,数值敏感试验方法存在非线性所导致的偏差问题、排放源的不确定性以及模式的能力有限等问题都对模拟结果造成一定的影响,进一步的模拟和观测工作仍然十分必要。

参考文献

白永清,祁海霞,刘琳,等,2016. 华中区域环境气象数值预报系统及其初步应用[J]. 高原气象,35(6):1671-1682.
曹国良,张小曳,龚山陵,等,2011. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 科学通报,56(3):261-268.
常炉予,许建明,周广强,等,2016. 上海典型持续性 $PM_{2.5}$ 重度污染

- 的数值模拟[J]. 环境科学, 37(3):825-833.
- 陈飞, 施平, 杜岩, 等, 2010. 基于 Cressman 客观分析的南海北部海区数据同化实验[J]. 热带海洋学报, 29(4):1-7.
- 陈焕盛, 王自发, 吴其重, 等, 2013. 空气质量多模式系统在广州应用及对 PM₁₀ 预报效果评估[J]. 气候与环境研究, 18(4):427-435.
- 邓涛, 邓雪娇, 吴兑, 等, 2012. 珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估[J]. 气象科技进展, 2(6):38-44.
- 龚山陵, 张小曳, 2008. CUACE/Dust: 亚洲沙尘暴计算机业务预报系统[J]. 计算机与应用化学, 25(9):1061-1067.
- 郭欣, 郭学良, 付丹红, 2017. 云凝结核浓度对不同弗罗德数下形成的地形云和降水的影响[J]. 气象学报, 75(2):314-327.
- 何心河, 马建中, 徐敬, 等, 2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 PM_{2.5} 污染过程的数值模拟[J]. 气象, 42(7):827-837.
- 刘香娥, 何晖, 贾星灿, 等, 2016. 北京一次污染天气过程特征的数值模拟[J]. 气象, 42(9):1096-1104.
- 苗蕾, 廖晓农, 王迎春, 等, 2016. 北京 2005—2014 年 PM_{2.5} 质量浓度的演变特征[J]. 气象, 42(8):954-961.
- 清华大学, 2015. 中国多尺度排放清单模型 MEIC[EB/OL]. 北京: 清华大学, [2015-05-27]. <http://www.meicmodel.org>.
- 沈新勇, 姜晓岑, 柳笛, 等, 2017. 利用 WRF-Chem 模式模拟分析人为气溶胶对台风 Fitow(1323) 强度及降水的影响[J]. 大气科学, 41(5):960-974.
- 谭成好, 陈昕, 赵天良, 等, 2014. 空气质量数值模型的构建及应用研究进展[J]. 环境监控与预警, 6(6):1-7.
- 王占山, 李云婷, 孙峰, 等, 2016. 北京市空气质量预报体系介绍及红色预警支撑[J]. 环境科技, 29(2):38-42.
- 王自发, 李丽娜, 吴其重, 等, 2008. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. 自然杂志, 30(4):194-198.
- 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.
- 吴兑, 廖碧婷, 陈慧忠, 等, 2014. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J]. 气候与环境研究, 19(2):248-264.
- 徐文帅, 李云婷, 吴其重, 等, 2016. AQI 标准下北京市空气质量数值预报系统及其在重大活动保障中的应用[J]. 中国环境监测, 32(2):11-19.
- 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等, 2015. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 60(12):1132-1143.
- 姚日升, 涂小萍, 张小伟, 等, 2017. 宁波一次罕见持续重度污染事件的成因分析[J]. 气象学报, 75(2):342-355.
- 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等, 2017. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. 气象, 43(8):998-1004.
- 张悦, 樊曙先, 李皓, 等, 2016. 气溶胶辐射效应在华东地区一次雾霾过程中的作用[J]. 气象学报, 74(3):465-478.
- 周广强, 谢英, 吴剑斌, 等, 2016. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 PM_{2.5} 预报及偏差原因[J]. 中国环境科学, 36(8):2251-2259.
- Bollasina M A, Ming Y, Ramaswamy V, 2011. Anthropogenic aerosols and the weakening of the south Asian summer monsoon [J]. Science, 334 (6055): 502-505. DOI: 10. 1126/science. 1204994.
- Forkel R, Balzarini A, Baró R, et al, 2015. Analysis of the WRF-Chem contributions to AQMEII phase2 with respect to aerosol radiative feedbacks on meteorology and pollutant distributions [J]. Atmos Environ, 115:630-645.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al, 2005. Fully coupled “on-line” chemistry within the WRF model[J]. Atmos Environ, 39(37):6957-6975.
- Li M, Zhang Q, Kurokawa J, et al, 2015. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. Atmos Chem Phys Dis, 15 (23): 34813-34869.
- Li Zhanqing, 1998. Influence of absorbing aerosols on the inference of solar surface radiation budget and cloud absorption [J]. J Climate, 11(1):5-17.
- Ntelekos A A, Smith J A, Donner L, et al, 2009. The effects of aerosols on intense convective precipitation in the northeastern United States [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 135 (643): 1367-1391.
- Ramanathan V, Chung C, Kim D, et al, 2005. Atmospheric brown clouds: impacts on south Asian climate and hydrological cycle [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 102 (15): 5326-5333. DOI: 10. 1073/pnas. 0500656102.
- Tuccella P, Curci G, Visconti G, et al, 2012. Modeling of gas and aerosol with WRF/Chem over Europe: evaluation and sensitivity study [J]. J Geophys Res, 117 (D3): D03303. DOI: 10. 1029/2011JD016302.
- Wang Tijian, Li Shu, Shen Yi, et al, 2010. Investigations on direct and indirect effect of nitrate on temperature and precipitation in China using a regional climate chemistry modeling system [J]. J Geophys Res Atmos, 115(D7):D00K26.
- Zhang B, Wang Y X, Hao J M. 2015. Simulating aerosol-radiation-cloud feedbacks on meteorology and air quality over eastern China under severe haze conditions in winter [J]. Atmos Chem Phys, 15(5):2387-2404. DOI:10. 5194/acp-15-2387-2015.
- Zhang Meigen, Uno I, Carmichael G R, et al, 2003. Large-scale structure of trace gas and aerosol distributions over the western Pacific Ocean during the Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) experiment [J]. J Geophys Res, 108 (D21):8820. DOI:10. 1029/2002JD002946.
- Zhang Ying, Liao Hong, Zhu Kefeng, et al, 2009. Role of black carbon-induced changes in snow albedo in predictions of temperature and precipitation during a snowstorm [J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 2(4):230-236.