

黄政,袁成松,包云轩,等. 2016. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验. 气象, 42(8):944-953.

基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验^{* 1}

黄 政^{1,2} 袁成松^{2,3} 包云轩^{1,2} 焦圣明^{2,3} 周林义^{2,3} 谢晓金¹ 王 琳¹

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210009

3 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

提 要: 为了比较不同微物理方案、边界层方案和陆面方案对大雾过程模拟效果的影响, 本文利用 WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model) 对江苏省高速公路网 2011—2013 年发生的 21 场大雾过程进行了数值模拟, 探讨了模式不同参数化方案对大雾过程数值模拟的影响, 确定了基于模式输出结果的成雾判别指标。研究结果表明: (1) 综合考虑微物理方案、边界层方案和陆面方案对地面气象要素、高空温度及雾区分布等要素的影响, 微物理方案选用 WDM6 方案, 边界层方案选用 QNSE 方案, 陆面方案选用 SLAB 方案时, 雾的数值模拟效果最优; (2) 在最优参数化方案设置下, 兼顾气象业务部门有限的计算资源和较高的模式垂直分辨率, 对 21 个大雾个例发生的大气背景进行数值模拟和诊断分析后发现: 江苏省境内雾的预报指标应为模式最低层 (30~40 m 高度) 液态含水量 $>0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 或 2 m 相对湿度 $>95\%$, 且 10 m 风速 $<3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 高速公路, 大雾, 数值模拟, 参数化方案, 成雾预报指标

中图分类号: P49, P426

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.004

Numerical Simulations of Heavy Fog Processes on Expressways Based on Different Parameterization Schemes

HUANG Zheng^{1,2} YUAN Chengsong^{2,3} BAO Yunxuan^{1,2} JIAO Shengming^{2,3}

ZHOU Linyi^{2,3} XIE Xiaojin¹ WANG Lin¹

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210009

3 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

Abstract: In order to compare different effects on simulations of heavy fog processes under various microphysics, planetary boundary layer and land surface schemes, 21 heavy fog events selected from the observation data of expressway weather monitoring system from 2011 to 2013 were simulated using WRF (Weather Research and Forecasting Model). Influence of different parameterization schemes on simulating these fog events was discussed and the forecasting indexes of fog formation based on the output physical variables of WRF were determined. The results are as follows: (1) The simulation of the whole fog occurring processes is the best when selecting WDM6 scheme as the microphysics scheme, QNSE scheme as the planetary boundary layer scheme and the SLAB scheme as the land surface scheme considering the effects

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306043 和 GYHY201406029)、“十二五”国家科技支撑计划(2014BAG01B01)和江苏省科技支撑计划(BE2015732)共同资助

2015 年 9 月 16 日收稿; 2016 年 1 月 1 日收修定稿

第一作者: 黄政, 主要从事交通气象、气象灾害监测预警与评估研究. Email: nuistor@yahoo.com

通信作者: 包云轩, 主要从事交通气象、大气环境、气象与农业防灾减灾、遥感与资源环境研究. Email: baoyunxuan@163.com

of different parameterization schemes in simulating the near-surface meteorological factors, the air temperature in the upper-level atmosphere and the distribution of fog areas comprehensively. (2) Under the optimum configure of the parameterization schemes and giving consideration to the limited computing resources of the meteorological professional departments in China and the suitable vertical resolution of the model, the analysis on the numerical simulation results of atmospheric backgrounds during the 21 heavy fog events demonstrates that the forecasting indexes of heavy fog on the expressway of Jiangsu Province are that liquid water content at lowest model level (30—40 m) is more than $0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, or 2 m relative humidity is more than 95% and 10 m wind speed is less than $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at the same time.

Key words: expressway, heavy fog, numerical simulation, parameterization scheme, forecasting index of fog occurrence

引 言

雾常常因其带来的低能见度天气导致水、陆、空安全事故频繁发生,据估计,由雾造成的经济损失和人身伤亡与台风、雷暴等剧烈天气过程相当(Gultepe et al, 2007)。因此,提高雾的预报能力对国民经济发展及人民生活有重要意义。早期雾的预报以预报员的主观判断为主,预报准确率建立在预报员对雾生消机制及预报区域的天气、气候形势的充分认识和准确分析上(滕华超等, 2014; 王博妮等, 2016)。随着计算水平的提高,客观预报中的数值模式预报逐渐成为雾的主要预报方法之一(Gultepe et al, 2007)。但由于一维雾模式无法考虑环流背景场的变化对雾的影响,同时又依赖于反映大气层结信息的探空资料,中尺度数值模式已逐渐体现其优势并在科研和业务中得到广泛应用。

目前,国内外已有不少学者使用中尺度模式进行雾的模拟和预报研究(Van der veled et al, 2010; 万小雁等, 2010; 包云轩等, 2013; 王益柏等, 2014; Steeneveld et al, 2015; 何心河等, 2016),并取得了大量研究成果。但是,由于雾的形成、发展和消散过程受各种微物理结构、动力及热力过程的综合影响(Duynkerke, 1999),中尺度模式中垂直分辨率和大量参数化方案的使用对雾发生过程的模拟和预报有一定的限制。Van der veled 等(2010)利用中尺度模式 WRF 和 HIRLAM 对霜冻天气条件下的辐射雾过程进行了数值模拟试验,认为模式垂直分辨率对雾发展过程的模拟有重要影响。万小雁等(2010)比较了 WRF 模式中不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟效果,得出 SLAB 方案对团雾过程中水

汽参量及长波辐射变化率的模拟效果最优。陆雪等(2014)对 2005—2011 年 10 次春季黄海海雾过程进行了 WRF 模式参数化方案敏感性研究,发现边界层方案与微物理方案的最佳组合为 YSU 与 Lin 方案,最差为 MYJ 与 WSM5 方案。而 Steeneveld 等(2015)在对英国一次强浓雾过程的模拟中,得出微物理双参数方案 WDM6 要优于单参数方案 WSM6 和 WSM5,与陆雪等(2014)不同的是,作者认为 YSU 边界层方案对雾的模拟效果并不理想。

从以上研究可以看出,虽然中尺度模式对雾的模拟展现出一定的能力,但要精确模拟雾的发生过程还需要有更高的垂直分辨率,而且不同区域适用的参数化方案也不同。然而,由于现有计算成本和计算资源的限制,在现有业务预报上要大幅度提高垂直分辨率暂时还无法实现。因此,为提高江苏省境内雾的预报能力,本文利用 WRF 模式对 2011—2013 年 21 场大雾过程进行数值模拟,在不大量增加垂直分辨率的基础上,研究不同参数化方案对雾发生动力、热力和水汽条件模拟的效果,确定适合于模拟江苏省雾发生过程的最优方案组合。同时,为了弥补有时因垂直分辨率不足而无法模拟出地面雾(Zhou et al, 2010)的缺陷,研究还基于模式模拟数据确定了江苏省成雾的判别指标,以提高江苏雾的预报能力。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文研究所用资料包括:

(1)由江苏省 70 个能见度自动观测站提供的

2011—2013 年逐小时观测资料,包括 2 m 温度、2 m 湿度、2 m 露点温度、10 m 风速、地表温度及能见度等要素。

(2)由江苏省三个探空站(徐州站、射阳站、南京站)提供的 2011—2013 年每日 2 次(08 和 20 时)各气压层的探空资料。

(3)由美国国家环境预报中心提供的 2011—2013 年每日 4 次的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 FNL 全球气象再分析资料。

1.2 模式试验设计

本文采用 WRF3.6.1 版本,使用两重双向嵌套,模拟中心位于 (32°N 、 117°E),模拟区域如图 1 所示。d01 区域格距为 9 km,格点数为 241×241 ,覆盖整个中国东部地区;d02 区域格距为 3 km,格点数为 241×241 ,覆盖江苏全省。地表类型均采用目前江苏省气象业务上使用的土地利用分类,该分类与 WRF 模式自带的 1997 年全球土地利用分类体系相比,扩大了江苏地、县级市的城市覆盖面积,而相应的城市周边植被面积有所缩小。综合考虑模式垂直层数对雾模拟效果的影响及江苏省气象业务上现有大型计算机资源,按照上疏下密的原则,垂直层数由原来的 27 层增加到 35 层,其中 1 km 以下 12 层,第一层($\sigma=0.998$)厚度为 30~40 m。模式以 FNL 资料作为初始场,积分步长 50 s,每 1 h 输出一

理方案、长波辐射方案、短波辐射方案、近地层方案、陆面方案、边界层方案和积云对流方案。虽然积云对流方案对 10 km 以下的模拟影响很小,但在高分辨率下使用对模式仍然有益(Narita et al,2007),本文选用 Kain-Fritsch 方案。长波辐射方案选择在模拟雾过程中常用的 RRTM 方案,短波辐射方案选用 Dudhia 方案(万小雁等,2010;彭双姿等,2012;包云轩等,2013;荣昕,2013;王益柏等,2014;石春娥等,2015),城市下垫面方案选用 UCM 方案。由于雾是贴近地面的水汽凝结物(Gultepe et al,2007),且它主要发生在稳定的边界层中,并对下垫面性质极为敏感(周旺等,2008),因此本文主要研究微物理方案、边界层方案和陆面方案对雾模拟效果的影响。在利用模式模拟雾的研究中,经常被采用且模拟效果较好的陆面方案有 SLAB 方案(5-layer thermal diffusion)和 Noah 方案(Noah Land Surface Model);边界层方案主要有 YSU 方案(Yonsei University scheme)、MYJ 方案(Mellor-Yamada-Janjic scheme)和 QNSE 方案(Quasi-Normal Scale Elimination PBL),与之对应的近地层方案分别是 MM5 similarity 方案、Eta similarity 方案和 QNSE surface layer 方案;主要运用的微物理方案有 Lin 方案(Lin et al scheme)、WSM6 方案(WRF Single-Moment 6-class scheme)和 WDM6 方案(WRF Double-Moment 6-class scheme)。其中,WDM6 方案是在 WSM6 方案的基础上,考虑了云滴数浓度并诊断了云凝结核数浓度。因此,本文只考察 Lin 方案和 WDM6 方案。为了比较不同方案对雾模拟的影响效果,并找出最适合于模拟雾过程的参数化方案组合,本文将不同参数化方案进行排列组合,得到 12 套试验方案。另外,荣昕(2013)在其研究中提到,当微物理方案选择 Morrison 方案(Morrison double-moment scheme)、积云对流方案选择 G3 方案(Grell 3d ensemble cumulus scheme)、陆面方案选择 SLAB 方案、边界层方案选择 QNSE 方案时,对雾的模拟有较好的效果,因此本文将单独考虑这套组合方案的模拟效果。综上所述,本文共设计了 13 套试验方案(表 1),先通过对 3 场具有代表性的典型大雾过程中的地面气象要素、高空温度及雾区分布等要素的数值模拟,选出 3 套较优的试验方案,再用这 3 套较优试验方案模拟 2011—2013 年江苏省发生的 21 场大雾过程,比较模拟效果,确定出最适合于模拟江苏省大雾过程的参数化方案组合。

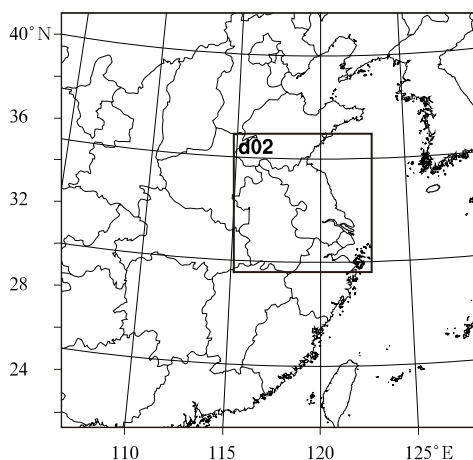


图 1 WRF 模式的模拟区域设置

Fig. 1 Simulation domains of WRF model

目前,WRF 模式的参数化方案主要包括微物

表 1 各参数化方案组合试验设计

Table 1 Experimental design of various parameterization schemes

试验方案	微物理方案	近地面层方案	陆面方案	边界层方案	积云对流方案
1	Lin	MM5	SLAB	YSU	KF
2	Lin	Eta	SLAB	MYJ	KF
3	Lin	QNSE	SLAB	QNSE	KF
4	Lin	MM5	Noah	YSU	KF
5	Lin	Eta	Noah	MYJ	KF
6	Lin	QNSE	Noah	QNSE	KF
7	WDM6	MM5	SLAB	YSU	KF
8	WDM6	Eta	SLAB	MYJ	KF
9	WDM6	QNSE	SLAB	QNSE	KF
10	WDM6	MM5	Noah	YSU	KF
11	WDM6	Eta	Noah	MYJ	KF
12	WDM6	QNSE	Noah	QNSE	KF
13	Morrison	QNSE	SLAB	QNSE	G3

1.3 评估方法

为了定量评价不同参数化方案对气象要素模拟的效果,本文选用的统计参数有:平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)。其具体算法如下:

$$\text{平均误差: } X_{\text{ME}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i,j}^m - X_{i,j}^n) \quad (1)$$

$$\text{平均绝对误差: } X_{\text{MAE}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |X_{i,j}^m - X_{i,j}^n| \quad (2)$$

$$\text{均方根误差: } X_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i,j}^m - X_{i,j}^n)^2} \quad (3)$$

式中, X^m 是模式模拟值, X^n 是气象要素观测值, M 是参与统计的气象站点总数, N 为参与统计的时次总数, i 为气象站点数编号, j 为时次数编号。

根据《中短期天气预报质量检验办法(试行)》(中国气象局, 2005)中对雾天落区预报的规定,雾区预报效果的评估方法为:

TS 评分(threat score):

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \times 100\% \quad (4)$$

漏报率(missing rate, MR):

$$MR = \frac{NC}{NA + NC} \times 100\% \quad (5)$$

空报率(false alarm rate, FAR):

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \times 100\% \quad (6)$$

式中, NA 为预报正确站(次)数, NB 为空报站(次)数, NC 为漏报站(次)数。

2 个例选取及天气背景

2.1 个例选取

本文研究的 21 次大雾过程在爆发时期都出现了 5 站以上能见度小于 50 m 的特强浓雾,并且能见度小于 500 m 的大雾过程覆盖江苏省 20 站以上,持续时间 5~38 h 不等。其中,冬季发生 12 次,春季发生 3 次,秋季发生 6 次。由于雾的种类(如辐射雾、平流雾、锋面雾等)及发生机制不同,且不同季节雾发生时的气象要素场差异较大,为了筛选出适合于各种雾发生过程的试验方案,本文选取了不同季节、不同天气背景下发生的 3 次大雾过程,它们的发生时间分别为 2011 年 11 月 27 日 19 时至 28 日 11 时、2012 年 5 月 21 日 01—08 时、2013 年 2 月 23 日 01—11 时,它们在爆发时期的能见度分布如图 2 所示。

2.2 天气背景

3 次大雾个例发生于三个不同季节,其天气背景也不相同:

2011 年的大雾过程主要是以平流雾为主,伴随有辐射雾过程。在 11 月 27 日 20 时的 500 hPa 高度场和温度场(图 3a)上,东亚中高纬地区为一槽一脊型,高压脊位于乌拉尔山上空,低压槽位于贝加尔湖以东至内蒙古北部地区。江苏省位于小槽槽前,受西南暖湿气流的影响,各站点 24 h 变温均为正。在 850 hPa 高空图(图略)上,江苏省西部有一弱暖脊,各站点受暖平流影响,盛行西南风或偏南风,24 h 变温均为正,温度露点差较小,成雾水汽条件较好。

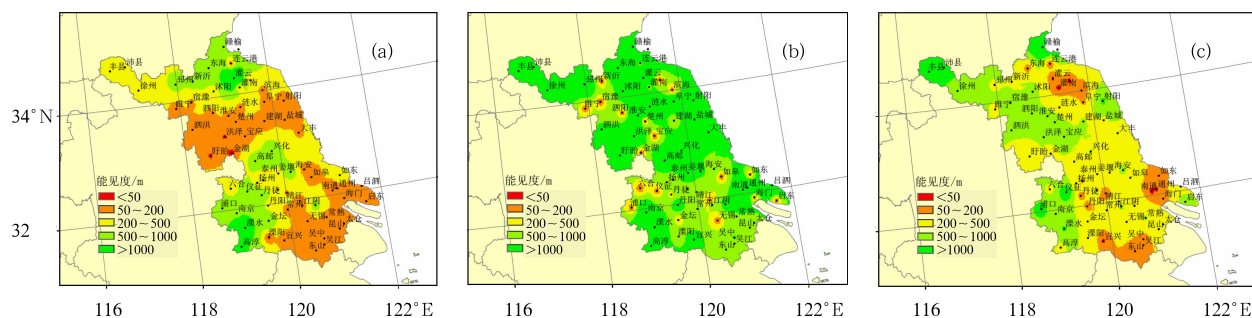


图 2 3 次大雾个例爆发时期江苏省能见度分布

(a) 2011 年 11 月 28 日 07 时, (b) 2012 年 5 月 21 日 05 时, (c) 2013 年 2 月 23 日 07 时

Fig. 2 Instantaneous visibility distribution during the three fog cases in Jiangsu

(a) 07:00 BT 28 November 2011, (b) 05:00 BT 21 May 2012, (c) 07:00 BT 23 February 2013

2012 年的大雾过程主要以辐射雾为主。5 月 20 日 20 时至 21 日 08 时的 500 hPa 高度场及温度场(图 3b)上均显示江苏省高空处在槽后弱高压脊控制下,受冷平流影响,盛行偏西北气流,24 h 变温为负。从 850 hPa 高度场及温度场(图略)中可以看出,江苏省主要盛行偏东气流,有利于海上水汽向该地区输送,湿度加大,并伴随辐射降温。21 日 02—05 时全省处于入海高压后部,盛行偏东风,地面图(图略)中显示天空云量较少,辐射条件好,等压线稀疏,风速小,温度露点差小于 2.0°C ,空气中水汽含量接近饱和状态,有利于成雾,到了 08 时,随着云量

的增加和太阳辐射的增强,雾渐渐消散。

2013 年的大雾过程也以辐射雾为主,但水汽来源与 2012 年不同。从 2 月 22 日 20 时的 500 hPa 高度场及温度场(图 3c)分布来看,江苏省高空有一弱的冷槽过境,20 时之前出现了少量降水,为雾的发生提供了较好的水汽条件。23 日 08 时,偏西气流转为西北气流,24 h 变温为负。在 850 hPa 天气图(图略)显示,22 日 20 时江苏省位于冷槽底端,23 日 08 时冷槽北退,温度回升。成雾时,全省受弱高压控制,辐射降温作用明显。

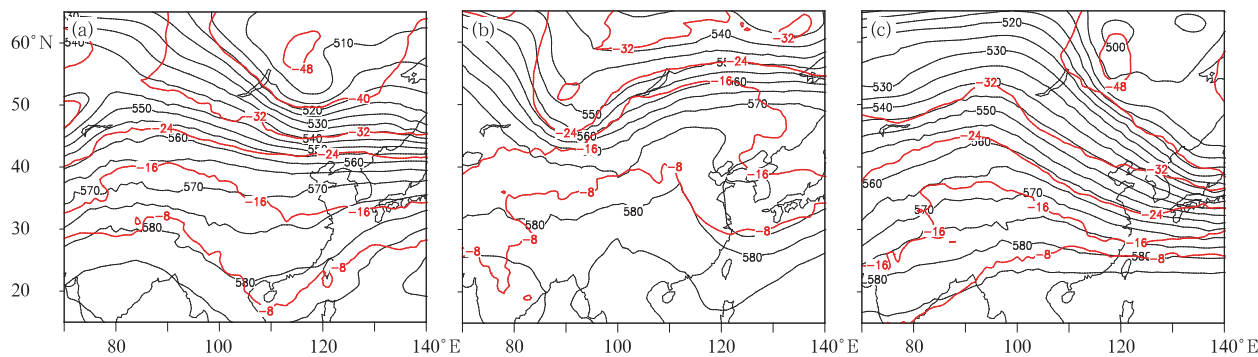


图 3 3 次大雾个例发生的 500 hPa 高度场和温度场

(黑线为等高线,红线为等温线)

(a) 2011 年 11 月 27 日 20 时, (b) 2012 年 5 月 20 日 20 时, (c) 2013 年 2 月 22 日 20 时

Fig. 3 Potential height and temperature at 500 hPa during the three fog cases

(Black line is for the contour of potential height, red line is for the isotherm)

(a) 20:00 BT 27 November 2011, (b) 20:00 BT 20 May 2012, (c) 20:00 BT 22 February 2013

3 不同参数化方案模拟效果比较

雾的形成通常是因为暖湿空气受降温增湿作用

使其温度达到露点温度或以下,空气中的水汽达到饱和或过饱和状态(Steenefeld et al, 2015)。因此,本文主要考察不同参数化方案对地表温度、2 m 气温、2 m 相对湿度、10 m 风速以及高空(925、850、

700、500、400、300 和 200 hPa)温度的影响;同时考察他们对雾区分布的预报效果,从而确定在江苏省雾的发生数值预报中应采用的参数化方案。

3.1 地面气象要素模拟效果比较

基于江苏省 70 个自动观测站的常规观测资料,本文利用式(1)~式(3)分别计算了不同试验方案对 3 次大雾个例中各地面气象要素场的模拟值与实测值的误差。从模拟值与实测值对比的结果来看,所有方案都能够模拟出大雾发生过程中低温、高湿、微风的情景,模拟的 2 m 气温、地表温度平均误差均为负值,平均绝对误差分别为 1.3~2.7、1.7~3.2℃,2 m 相对湿度平均误差均为正值,变化范围 4%~9%,模拟的 10 m 风速略大于实况值,平均绝对误差为 0.8~1.2 m·s⁻¹。不同方案对露点温度的模拟结果不同,SLAB 方案模拟的露点温度高于实测值,而 Noah 方案相反,表明 SLAB 方案比 Noah 方案更容易使水汽达到露点温度并产生凝结。

陆面方案和边界层参数化方案对各要素的模拟结果有较大影响,而微物理方案的影响极小,其均方根误差如表 2 所示。在其他方案相同的情况下,Lin 方案和 WDM6 方案对温度、相对湿度和风速的模拟误差差异分别在 0.1℃、0.1%、0.1 m·s⁻¹以内,这说明在地面气象要素的模拟中,这两种方案的结果基本一致,WDM6 方案在温度的模拟上要略好于 Lin 方案。而陆面方案和边界层方案的配合作用明显,不同组合对各地面气象要素的模拟差别较大,其中以 SLAB+MYJ 方案和 SLAB+QNSE 方案较好,其次是 SLAB+YSU 方案和 Noah+QNSE 方案,Noah+MYJ 和 Noah+YSU 方案误差最大。总体看来,SLAB 方案对地面气象要素的模拟效果要好于 Noah 方案,而边界层方案对地面气象要素的模拟受陆面方案的影响较大,当陆面方案为 SLAB 方案时,MYJ 方案和 QNSE 方案均优于 YSU 方案。

表 2 不同参数化方案下 3 个大雾个例各地面要素模拟值与观测值的均方根误差

Table 2 Root mean square error (RMSE) between simulation values and observation values of various near-surface factors during the three fog cases under different parameterization schemes

个例	要素	方案号												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2011	Dew	2.1	1.6	1.6	2.1	2	1.8	2.1	1.6	1.5	2.1	2	1.7	1.9
	Ground	2.7	2.5	2.2	2.2	2.3	2.2	2.8	2.5	2.2	2.2	2.2	2.1	2.4
	Humid	8.3	6.9	8.6	10.2	7.6	7.1	8.4	7	8.6	10	7.5	7	8.5
	Air	2.6	1.7	1.7	1.7	2.1	1.9	2.6	1.6	1.5	1.7	2.1	1.7	2.2
	Wspd	0.9	1	1	1	1	0.9	0.9	1.1	1	1	1	1	1
2012	Dew	2.2	1.3	1.6	2.4	2.7	2.6	2.2	1.3	1.5	2.4	2.7	2.6	1.8
	Ground	3.4	3.6	3.1	3	3.6	3.5	3.4	3.6	3	3	3.6	3.5	3.2
	Humid	6.2	6	6.7	9.4	8.6	8.2	6.3	6	6.6	9.5	8.6	8	6.7
	Air	3	1.6	2.3	2.3	2.9	2.8	2.9	1.6	2.2	2.3	2.9	2.8	2.5
	Wspd	1	1.2	1.1	1.5	1.2	1.2	1	1.2	1.1	1.5	1.2	1.2	1.1
2013	Dew	1.8	1.5	1.5	1.7	2	1.9	1.8	1.5	1.5	1.7	1.9	1.8	1.7
	Ground	3.2	2.6	2.6	2.9	2.9	2.8	3.3	2.6	2.6	3	2.8	2.7	2.4
	Humid	10.6	9.7	10.2	10.4	10.3	10.4	10.6	9.7	10.2	10.4	10.2	10.3	10.1
	Air	2.2	1.9	1.5	2.3	2.9	2.7	2.2	1.7	1.4	2.3	2.7	2.6	2.1
	Wspd	0.8	1	0.9	1	1	0.9	0.8	1	0.9	1	1	0.9	0.9

Dew: 2 m 露点温度(单位:℃), Ground: 地表温度(单位:℃), Humid: 2 m 相对湿度(单位:%), Air: 2 m 气温(单位:℃), Wspd: 10 m 风速(单位:m·s⁻¹), 其中加粗数字为该要素中模拟值与观测值均方根误差最小的值

Dew: 2 m dew temperature (unit: ℃), Ground: surface temperature (unit: ℃), Humid: 2 m relative humidity (unit: %), Air: 2 m air temperature (unit: ℃), Wspd: 10 m wind speed (unit: m·s⁻¹), bold number is the minimum value of RMSE for each factor

3.2 高空温度模拟效果比较

由于雾发生时一般都伴随有低层逆温(曹伟华等,2013;马翠平等,2014),因此本文比较了不同参

数化方案对各高度层(925、850、700、500、400、300 和 200 hPa)温度的模拟效果。结合 3 个个例在徐州、南京、射阳三个探空站每日 08 和 20 两个时次的成雾实况,共筛选出 6 组探空数据,分别是 2011 年 11

月 27 日 20 时徐州站和 28 日 08 时徐州、南京、射阳三站 4 组探空数据及 2013 年 2 月 22 日 08 时徐州、南

京两站 2 组探空数据。两个大雾个例的高空温度模拟值与观测值的平均绝对误差如图 4 所示。

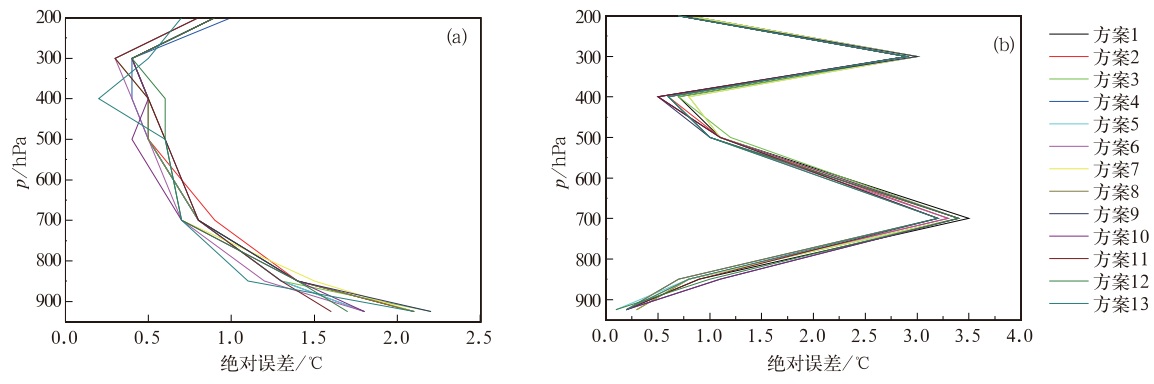


图 4 2011 年(a)和 2013 年(b)2 个大雾个例的高空温度模拟值与观测值的平均绝对误差(单位:℃)

Fig. 4 Mean absolute error (MAE) between simulation values and observation values of upper-level air temperature in the two heavy fog cases in 2011 (a) and 2013 (b)

从图 4 中可以看出,各参数化方案对高空温度的模拟结果较近地层温度模拟值而言,与实测值的误差差异更小,可能是由于在有雾存在的夜间,大气层结稳定,边界层高度低,925 hPa(750 m 左右)以上基本已经超出了边界层高度,导致边界层参数化方案和陆面方案对气温的模拟效果影响变小,主要受微物理方案影响,而 Lin 方案和 WDM6 方案差异很小,Morrison 方案稍大,但基本维持在 0.3℃以内。另外,模式对不同个例的温度模拟效果在各高度层不相同,如 925 hPa 高度上,2011 年个例的平均绝对误差在 1.6~2.2℃,2013 年个例在 0.1~0.2℃,而在 700 hPa 高度,前者的平均绝对误差在 0.7~0.8℃,后者在 3.2~3.4℃,这可能是模式使用的初始场资料与实际大气背景本身的误差所造成

的。

3.3 雾区的模拟比较

由于 WRF 模式中本身没有对能见度的直接模拟,目前,绝大多数模式研究中都用模式最低层输出的液态含水量(LWC)来推算成雾能见度,其成雾临界阈值一般由能见度(Vis)与 LWC 的经验关系式确定(Kunkel,1984):

$$Vis = 0.027LWC^{-0.88} \quad (7)$$

当 $LWC > 0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, $Vis < 1000 \text{ m}$ 。因此,本文取模式最低层(30~40 m) $LWC > 0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为成雾的判别指标。为比较各参数化方案对雾区模拟的影响,利用式(4)~式(6)计算结果评价了 3 个个例的雾区模拟效果,雾区预报评分见表 3。

表 3 不同参数化方案下 3 次大雾个例的雾区预报评分(单位:%)

Table 3 Forecasting scores of simulated fog area in the three heavy fog cases under different parameterization schemes (unit: %)

个例	评分	方案号												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2011	TS	37.7	43.9	61.4	16.6	32.5	29.1	38.7	45.0	62.6	18.2	33.3	31.1	58.5
	MR	59.4	53.0	26.2	82.9	65.3	69.3	57.9	51.4	23.9	81.0	64.1	66.9	29.5
	FAR	16.2	13.2	21.5	16.8	16.3	15.4	17.4	14.3	22.0	17.8	17.7	16.2	22.5
2012	TS	14.7	3.5	38.9	0	5.5	10.2	15.5	3.9	39.4	0	6.0	11.5	40.7
	MR	84.2	96.0	31.1	100	94.4	89.3	83.1	95.5	28.8	100	93.8	87.6	31.6
	FAR	33.3	77.4	52.9	—	37.5	32.1	34.8	77.1	53.2	—	38.9	40.5	49.8
2013	TS	48.0	54.0	66.2	46.0	50.9	47.2	48.8	55.0	67.7	45.6	53.4	48.9	62.1
	MR	46.8	41.8	23.4	51.1	44.9	50.2	44.9	39.9	21.3	50.9	41.9	47.8	32.0
	FAR	17.0	11.9	17.0	11.2	13.0	10.1	18.8	13.5	17.0	13.5	12.9	11.4	12.3

加粗数字为 TS 评分最大值、漏报率 MR 最小值和空报率 FAR 最小值

Bold numbers are for the maximum value of TS, the minimum value of MR and the minimum value of FAR

从表3中可以看出,不同参数化方案对不同个例的模拟效果基本一致。微物理方案对雾区的模拟效果差异较小,而陆面方案和边界层方案的模拟结果有较大差异。以2011年个例为例,在其他方案相同的情况下,方案3(Lin方案)、方案9(WDM6方案)和方案13(Morrison方案)三种不同微物理方案的TS评分分别为61.4%、62.6%、58.5%,差异并不明显;而陆面方案中方案9(SLAB方案)与方案12(Noah方案)的TS评分分别为62.6%和31.1%,SLAB方案较Noah方案表现出了更好的模拟效果。边界层方案中的方案9(QNSE方案)模拟效果最佳,其次是方案8(MYJ方案),方案7(YSU方案)模拟效果最差,TS评分分别为62.6%、45.0%、38.7%。

通过比较13套试验方案模拟3个大雾个例的效果可知,不同微物理方案对各物理量及雾区模拟效果影响不大,且WDM6方案与Lin方案的模拟效果基本一致,但在计算成本近似的情况下,WDM6方案能提供云凝结核数浓度和云滴数浓度,展现出了更好的计算能力。陆面方案中SLAB方案无论在地面气象要素还是对雾区的模拟上都要好于Noah方案。边界层方案中YSU方案对地面气象要素和雾区的模拟效果都不好,而MYJ方案和QNSE方案对地面气象要素的模拟效果较好,且MYJ方案要略好于QNSE方案,但在雾区的模拟上,QNSE方案更好。试验方案13对雾区的模拟效果较好,对各气象要素的模拟也表现出了不错的模拟能力。综合考虑,我们选出了3套较优的参数化方案组合,分别是试验方案8、试验方案9和试验方案13。

4 最优参数化方案组合及雾预报指标的确定

4.1 最优参数化方案的确定

为了确定江苏省大雾过程数值模拟的最优参数化方案,本文用3套较优参数化方案模拟了2011—2013年发生的21场大雾过程,检验3套方案对江苏省大雾过程雾区分布的预报效果。预报结果如表4所示。

从表4中可以看出,方案9和方案13对雾区的预报效果相似,TS评分和漏报率相差都在1%以内,但方案9要略好于方案13,主要是方案9的空

报率(34.9%)要略低于方案13(37.0%)。另外,从方案8和方案9可以看出,QNSE方案比MYJ方案的TS评分要高12.5%,表现出了更好的模拟效果。综上所述,在对江苏省大雾发生过程进行数值模拟时,微物理方案选择WDM6方案,边界层方案选择QNSE方案,陆面方案选择SLAB方案时,能够表现出最优的模拟效果。

表4 3套较优参数化方案下21场大雾

过程的雾区预报评分(单位:%)

Table 4 Forecasting scores of simulated fog area in 21 fog cases under three optimal parameterization schemes (unit: %)

试验方案	TS评分	漏报率MR	空报率FAR
8	35.0	57.5	33.6
9	47.5	36.3	34.9
13	46.7	35.7	37.0

4.2 成雾预报指标的确定

从表3中可以看出,模式对2012年大雾个例的雾区模拟效果要远低于2011、2013年的两个个例,可能是单一利用模式最低层液态含水量来反映成雾过程有时并不能够达到很好的预报效果。原因有两点:一是模式本身并没有专门针对近地层雾模拟而设计的参数化方案,目前业务上所用的参数化方案都是针对降水或高空云设计;二是业务上由于计算资源和成本的限制,模式分辨率并不能如个例分析一样选择很细的垂直分辨率,对小于模式最低层高度的地面雾模拟有很大困难。

因此,为了提高雾的预报能力,尤其是对地面雾的预报能力,基于模式对地面气象要素较好的预报效果,我们引入了2 m相对湿度和10 m风速来确定成雾指标。通常预报员把2 m相对湿度大于90%,10 m风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为雾的发生指标(Gultepe et al, 2007),但地面雾与下垫面性质密切相关,具有很强的局地性,找出适合江苏省本地的相对湿度和风速成雾指标十分必要。

表5是在用 $LWC > 0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的基础上,增加了2 m相对湿度和10 m风速不同阈值后的雾区预报TS评分。从表5可以看出,在相同风速下,随着相对湿度的增大(100%除外),TS评分差别很小,处于1%左右,这表明模式对成雾过程中相对湿度的模拟值基本上都在95%~100%,而小于95%的相对湿度指标对雾的判别贡献不大。但是,当相

对湿度以 100% 为指标时, TS 评分会降低到 47.5% (或 47.6%), 等同于此时仅 LWC 在发挥判别作用, 表明在实际成雾过程中, 模式模拟的相对湿度在还未达到饱和(100%)时大雾过程就已经发生, 这与有些学者研究结果相符(Zhou et al, 2010)。在相对湿度相同的情况下, 以相对湿度等于 80% 为例, 风速从 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, TS 评分会由 48.1% 升高到 52.5%, 但随着风速的继续升高, TS 评分稳定在 52.0%~52.5%, 表明模式对 21 场大雾过程的风速模拟值基本都 $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而相对湿度

$< 95\%$, 风速 $> 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的其他指标对大雾过程的模拟效果提升并不显著。考虑到业务上的预报是每天循环预报, 如果指标选得过于宽泛, 对雾的预报可能导致出现频繁的空报现象(如高湿、大风天气或低湿、微风的霾过程)。因此, 在不大量降低 TS 评分的基础上, 我们应选取阈值范围较小的预报指标。综上所述, 基于 WRF 模式输出资料的江苏省成雾判别标准应为: 模式最低层液态含水量 $> 0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 或 2 m 相对湿度 $> 95\%$, 且 10 m 风速 $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 5 不同 2 m 相对湿度和 10 m 风速预报指标下 21 场大雾过程的雾区预报 TS 评分(单位: %)

Table 5 The threat score of simulated fog area in 21 fog cases under different combinations of various 2 m relative humidity and 10 m wind speed as the forecasting indexes of fog formation (unit: %)

10 m 风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2 m 湿度						100%
	$> 60\%$	$> 70\%$	$> 80\%$	$> 85\%$	$> 90\%$	$> 95\%$	
$< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	48.1	48.1	48.1	48	47.9	47.9	47.5
$< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	50.9	51.0	51.0	50.9	50.9	50.7	47.6
$< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	52.3	52.4	52.5	52.5	52.4	52.2	47.6
$< 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	51.8	52.0	52.5	52.8	52.8	52.7	47.6
$< 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	51.5	51.8	52.4	52.8	52.9	52.8	47.6
$< 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	51.2	51.5	52.2	52.7	52.8	52.7	47.6

5 结论与讨论

5.1 结论

本文通过利用 WRF 模式对江苏省 2011—2013 年 21 场大雾过程进行数值模拟后得到如下结论:

(1) 通过不同微物理方案、边界层方案和陆面方案对地面气象要素、高空不同层次温度及雾区模拟效果影响的对比试验发现, 微物理方案选择 WDM6 方案、边界层方案选择 QNSE 方案、陆面方案选择 SLAB 方案时模拟效果最优, 其中陆面方案和边界层方案对模拟结果的影响较大, 微物理方案影响较小。

(2) 考虑到业务预报中模式垂直分辨率不高的限制, 通过对江苏省 2011—2013 年 21 场大雾过程的模拟分析得到, 江苏省境内成雾预报宜采用多指标判别: 模式最低层(30~40 m 高度)液态含水量 $> 0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 或 2 m 相对湿度 $> 95\%$ 且 10 m 风速 $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时可预报有雾形成。利用这一成雾综合指标, TS 评分由使用单一的液态含水量指标的 47.5% 提高到了 52.2%。

5.2 讨论

(1) 三种微物理方案都是从不同相态水的角度研究水汽、云水、云冰、雨滴、雪以及霰这六种水相在大气中的模拟及相互转化。与 Lin 方案相比, WDM6 方案的差别主要是通过预测雨滴数浓度进而改变雨滴大小分布, 从而对少量降水过程的模拟有更好的效果, Morrison 方案则主要是通过改变层状降水区的雨水蒸发率进而提高雨水混合比以及降水概率, 并促进了中层大气中云冰的增长过程。而江苏省多以辐射雾过程为主, 其生消的微物理过程主要是水汽和云水两个相态的相互转化, 三种微物理方案对云水混合比的模拟方法大致相似, 仅在碰并过程和一些经验参数的选择上有所不同, 因此不同微物理方案对雾的模拟影响较小。而 WDM6 方案和 Morrison 方案作为双参数方案, 不仅能够预报六种水物质, 还增加了云滴数浓度和云凝结核数浓度的预报, 同时减少了方案对模式时间步长的敏感性, 三者计算成本近似, 因此选择双参数方案更为适合, 其中 WDM6 方案更优。

(2) 陆面方案主要为边界层方案提供相应的感热、潜热及辐射通量。SLAB 方案是根据土地利用

类型及季节变化考虑能量收支,对其他因素考虑较为简单,而 Noah 方案充分考虑了城市下垫面及植被的影响,并通过诊断方案预报地表变量,但并没有表现出对成雾过程预报的优势,这可能是由于 WRF 模式中对不同下垫面类型的属性(如城市下垫面地表反射率、地表热容量、植被叶面积指数、粗糙层高度等)设置与江苏省本地的实际属性差别较大,而 Noah 方案再对这些要素进行较复杂的考虑,导致模拟误差进一步增大。

(3)不同边界层方案的模拟误差主要是由各方方案对边界层中垂直混合强度及边界层上层夹卷作用的考虑程度不同引起的。YSU 方案详细考虑了夹卷层作用及湍流扩散方程中的“反向梯度输送项”,但为了更好地模拟降水过程,加大了近地面层临界理查森数的设定,导致边界层混合作用加强,不利于水汽的聚集,同时,较强的湍流混合也会破坏辐射雾赖以发展和维持的逆温层结构,因此 YSU 方案对雾的模拟效果较差。而 MYJ 方案和 QNSE 方案并没有增强边界层内的湍流混合作用,更容易模拟出辐射雾发生时的低温、高湿、近地层逆温等天气条件。另外, QNSE 方案在稳定层结下摒弃了其他边界层方案中以预先设定的临界理查森数来判断湍流混合作用是否发生的假设,它通过考虑湍流与波的共同作用,针对不同的边界层特征计算出不同的临界理查森数,对稳定层结下的大气重要特性描述更为实际、精确,因此,对江苏省雾的模拟 QNSE 方案要优于 MYJ 方案。

由于江苏省地势低平、河网密布且东邻黄海,大雾过程多以辐射雾为主、平流雾为次,而辐射雾本身具有很强的局地性,因此,研究中所得的最优参数化方案组合及成雾判别综合指标主要针对江苏区域的大雾数值模拟,是否适用于其他地区还有待于进一步探讨。

参考文献

- 包云轩,丁秋冀,袁成松,等. 2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验. 大气科学, 37(1): 124-136.
- 曹伟华,梁旭东,李青春,等. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5): 940-951.
- 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. 气象, 42(7): 827-837.
- 陆雪,高山红,饶莉娟,等. 2014. 春季黄淮海雾 WRF 参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 25(3): 312-320.
- 马翠平,吴彬贵,李江波,等. 2014. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象, 40(6): 715-722.
- 彭双姿,刘从省,屈右铭,等. 2012. 一次大范围辐射雾天气过程的观测和数值模拟分析. 气象, 38(6): 679-687.
- 荣昕. 2013. 基于 WRF-CHEM 模式的连续雾霾过程数值模拟及其能见度参数化. 南京: 南京信息工程大学, 25-26.
- 石春娥,李耀孙,杨军,等. 2015. MM5 和 WRF 对中国东部地区东及边界层模拟效果比较. 高原气象, 34(2): 389-399.
- 滕华超,杨军,刘端阳,等. 2014. 基于 WRF 和一维雾模式的能见度集合预报的个例研究. 大气科学学报, 37(1): 99-107.
- 万小雁,包云轩,严明良,等. 2010. 不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟. 气象科学, 30(4): 487-494.
- 王博妮,濮梅娟,田力,等. 2016. 江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究. 气象, 42(2): 192-202.
- 王益柏,梅娜,范磊,等. 2014. WRF 模式对 2013 年 1 月华北一次大雾的数值对比试验. 气象, 40(12): 1522-1529.
- 中国气象局. 2005. 中短期天气预报质量检验办法(试行). 中国气象局. 气发(2005)109 号. 北京: 中国气象局.
- 周旺,刘昊,樊斌. 2008. 重庆机场辐射雾消散机制. 气象, 34(T1): 231-237.
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations. Mon Wea Rev, 119(2): 324-341.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. Pure Appl Geophys, 164(617): 1121-1159.
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. J Climate Appl Meteor, 23(1): 34-41.
- Narita M, Ohmori S. 2007. Improving precipitation forecasts by the operational nonhydrostatic mesoscale model with the Kain-Fritsch convective parameterization and cloud microphysics. 12th Conf on Mesoscale Processes, Waterville Valley, Amer Meteor Soc.
- Steenefeld G J, Ronda R J, Holtslag A A M. 2015. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. Boundary-Layer Meteorol, 154(2): 265-289.
- Van der velde I R, Steenefeld G J, Wichers Schreur B G J, et al. 2010. Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions. Mon Wea Rev, 138(11): 4237-4253.
- Zhou B, Du J. 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 25(1): 303-321.