

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.

# WRF 模式对 2013 年 1 月华北一次大雾 的数值对比试验<sup>\* 1</sup>

王益柏 梅 娜 范 磊 胡晓华 刘家峻 倪文琪

61741 部队,北京 100094

**提 要:** 采用 WRF 模式系统模拟了 2013 年 1 月 22—23 日华北大雾天气过程,针对不同的边界层方案、微物理方案和陆面方案,设计了三组数值试验方案,并利用地面观测资料对其模拟效果进行了对比分析,找出了部分最适合于此次大雾过程模拟的参数化方案,它们分别是 TEMF 边界层方案、Goddard 微物理方案和 RUC 陆面方案。此次数值试验结果还表明,WRF 模式对大雾天气地面风速风向的模拟能力较好,其他气象要素存在一定的误差,用 10 m 液态水含量和 10 m 相对湿度指标共同诊断大雾天气能有效提高大雾判断准确率。

**关键词:** 大雾,数值模拟,边界层方案,微物理方案,陆面方案,液态水含量

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.011

## Comparative Experiments of WRF Simulation on a Fog Event of January 2013 in North China

WANG Yibai MEI Na FAN Lei HU Xiaohua LIU Jiajun NI Wenqi

61741 Troops of PLA, Beijing 100094

**Abstract:** The WRF model system is utilized to simulating the fog event seen in North China in 22—23 January 2013. Three numerical simulation experiments about PBL schemes, Microphysics schemes, and LSM schemes are designed, and their simulative effects are evaluated by comparing with surface observations. The result shows that the most suitable parameterizations are TEMF PBL, Goddard Microphysics and RUC LSM. It also reveals that WRF model shows better capability in simulating surface wind than other surface elements, and the combination of 10 m relative humidity and 10 m liquid water content (LWC) can effectively improve the accuracy in fog identification.

**Key words:** fog, numerical simulation, PBL schemes, microphysics schemes, LSM schemes, LWC

## 引 言

雾是一种由大量水汽和结晶造成能见度低于 1 km 的边界层天气现象(WMO, 1992)。雾天的低能见度严重危害交通运输,并造成巨大的经济损失(Gultepe et al, 2007)。因此,国内外学者都对雾的

研究倾注了很大的兴趣(Gultepe et al, 2009; Zhou et al, 2010; Miao et al, 2010; 张礼春等, 2013; 刘梅等, 2014)。近年来,国内学者在全国范围不同区域展开了一些雾观测项目,并开展了相关的数值预报试验,取得了一些有意义的研究成果(Wu et al, 2007; Yang et al, 2009; Shi et al, 2010; Niu et al, 2010; 马翠平等, 2014)。已有的这些研究表明,大雾

\* 国家重点基础研究发展计划(2010CB950803)、国家自然科学基金项目(41105096、41275128 和 41305131)、山东省气象局重点课题(2014sdqz01)和江苏省监测科研基金 1016 共同资助

2014 年 5 月 14 日收稿; 2014 年 11 月 5 日收修定稿

第一作者: 王益柏,主要从事灾害性天气数值研究. Email: wang\_yi\_bai@163.com

是一种静稳大气环境下的天气现象,其预报水平远远滞后于降水的预报。雾的数值预报水平与模式各物理参数化方案密切相关,这些参数化方案包括微物理过程、边界层过程、陆面过程和垂直分辨率等。WRF 模式作为新一代中尺度数值天气预报模式,提供了多种完善的参数化方案供选择,模式分辨率可以精确到水平方向 1 km,垂直方向达几十米量级,因此被广泛应用于雾的诊断与预报试验。本文选取 2013 年 1 月华北地区一次大雾天气过程,采用 WRF 模式系统,设计多组数值试验方案,通过与地面观测资料的对比分析,检验不同模式参数化方案对大雾过程的模拟效果,力图找出部分适合于此次大雾过程模拟的最优参数化方案。本文工作将为雾的数值诊断与预报提供必要的参考和借鉴。

## 1 大雾过程简介

2013 年 1 月 22—24 日,华北地区出现大范围雾霾天气,京津冀鲁豫部分地区能见度不足 100 m。如图 1 所示,22 日 08 时(本文均采用北京时),北

京、天津、河北等地开始出现大雾,部分地区能见度不足 500 m,其中,石家庄能见度不足 100 m;14 时,石家庄  $\text{PM}_{2.5}$  数值达  $448 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,保定  $327 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,唐山  $364 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,空气质量状况达重度污染。23 日 08 时,北京南部、天津、河北中南部、山西中南部、河南中部、山东北部等地继续被大雾笼罩。24 日上午,华北部分地区仍然持续大雾天气,河北中南部、鲁西、豫东等地的雾层较为密实;此后,随冷空气快速东移南下,雾霾天气逐渐消散。

大雾造成上述地区交通受阻,部分路段道路封闭,机场航班延误,空气质量持续偏低。其中,以河北中南部受影响最为严重。22 日 05 时至 23 日 05 时,石家庄连续 24 h 大雾,能见度最低时仅有 50 m,导致石家庄国际机场航班较大面积延误,甚至无任何飞机起降。针对此次大雾过程,中央气象台与京津冀鲁豫等地气象部门均连续多次发布大雾预警信号,其中,河北省气象台 21—22 日两天发布了 4 次大雾最高级别红色预警信号,同时,为应对浓雾天气,河北省气象局启动了大雾四级应急响应并升级至三级。

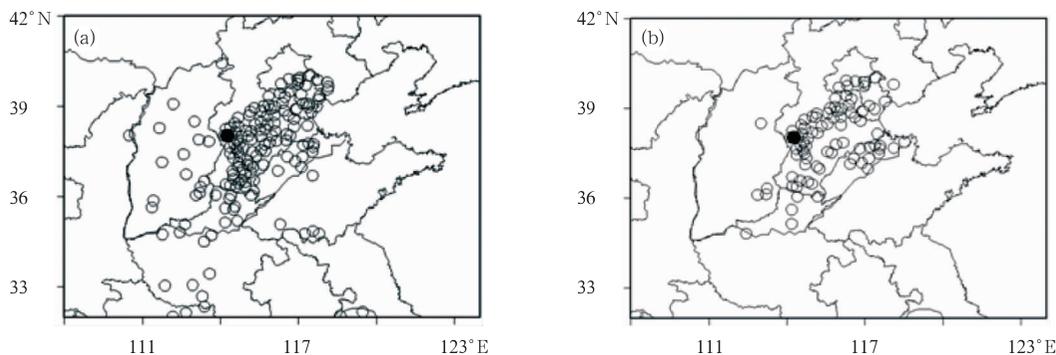


图 1 2013 年 1 月 22 日(a)08 时和(b)20 时华北地区雾区分布实况图

(“○”为大雾站点,“●”石家庄站)

Fig. 1 Fog distributions in North China at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 22 January 2013

(“○” means fog station, “●” means Shijiazhuang Station)

## 2 数值试验方案

### 2.1 资料和模式参数

采用 WRFV3.4 模式,设置两重双向嵌套网格(图 2),其中大区域覆盖东亚大部,小区域覆盖华北等大雾发生地区,区域范围设置和通用模式参数设置见表 1。

FNL 再分析数据( $1^\circ \times 1^\circ, 1$  次,  $(6 \text{ h})^{-1}$ )为初始时刻提供背景资料和时变侧边界资料。模拟时间从 2013 年 1 月 21 日 20 时至 23 日 08 时,共 36 h,其中前 12 h 为模式 spin-up 时间,结果分析从 22 日 08 时至 23 日 08 时。

### 2.2 对比试验方案

#### (1) 边界层方案对比试验

选取适合于静稳大气状态模拟的 4 种边界层方

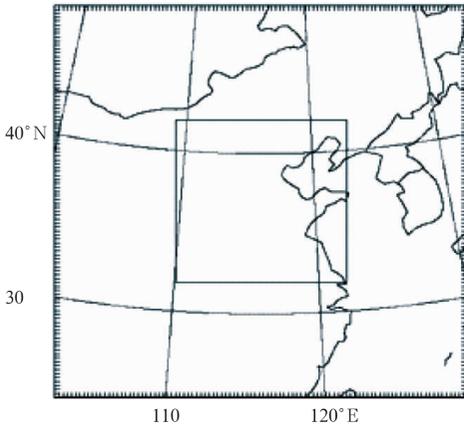


图 2 WRF 模拟区域示意图

Fig. 2 The simulation areas of WRF

表 1 WRF 模式参数设置

Table 1 Parameters setting of WRF model

区域	大区域	小区域
分辨率与格点范围	水平分辨率:27 km 格点数:100×100	水平分辨率:9 km 格点数:124×124
	垂直分辨率:38 层,其中 1000 m 以下有 12 层	
积云方案	Kain-Fritsch 方案	
辐射方案	长波辐射:RRTM 方案,短波方案:Dudhia 方案	

案:MYJ、MYNN、QNSE 和 TEMF 方案。其中,前两种方案为湍流动能闭合方案(TKE 方案),后两种方案为涡旋扩散/质量通量方案(EDMF 方案)。微物理方案为 Lin 方案,陆面方案为 Noah LSM。

(2) 微物理方案对比试验

选取 13 类微物理方案进行对比试验,包括:Wsm5、Wsm6、Wdm5、Wdm6、Ferrier、Milbrandt-Yau (Mil-Yau)、NSSL、Lin、Kessler、Goddard、Thompson、Morrison 和 SBU-YLIN 方案。陆面方案为 Noah LSM,边界层方案采用前面得出的最佳方案。

(3) 陆面方案对比试验

陆面方案分别采用 5 层的热扩散模式(Thermal LSM)、4 层的 Noah LSM、6 层的 RUC LSM 和 2 层的 Pleim-Xiu LSM(PX LSM)。边界层方案和微物理方案采用前面对比试验得出的最佳方案。

3 结果分析

3.1 边界层方案试验

(1) 大气中雾水含量比较分析

采用液态水含量(LWC)来描述模拟雾区,一般认为雾中液态水含量的范围为 $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (邹进上等,1982;Cotton et al,1993)。图 3 是 22 日 08 时不同边界层方案模拟的 10 m 处液态水含量水平分布图。对比同时次大雾实况(图 1a)可知,MYNN、QNSE和TEMF方案模拟的雾区范围与实况大致

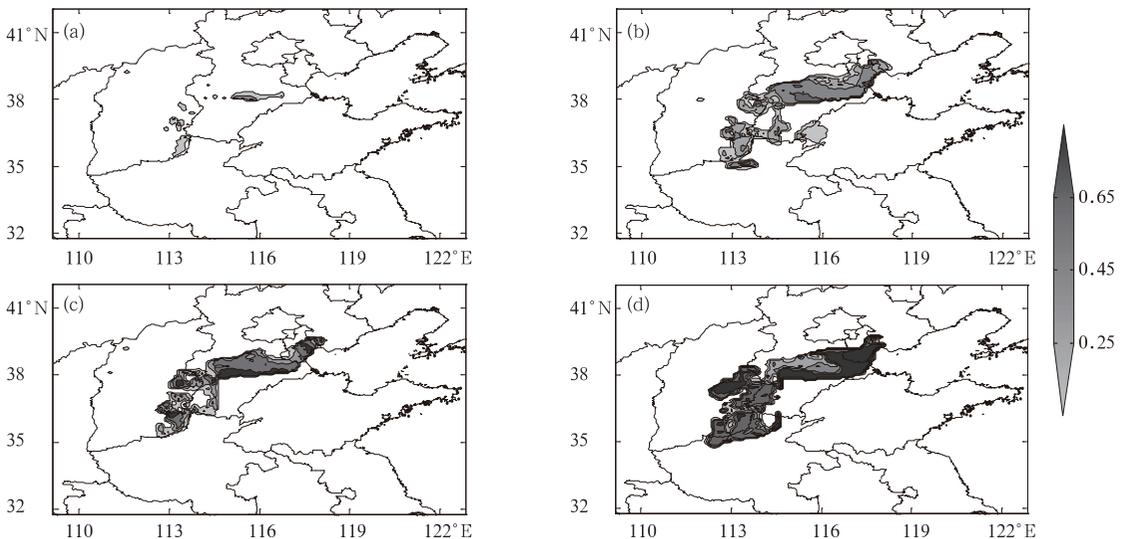


图 3 各边界层方案(a) MYJ,(b) MYNN,(c) QNSE,(d) TEMF 模拟的 22 日 08 时 10 m 处雾水含量分布( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 3 Distribution of 10 m LWC ( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) simulated by different PBL schemes

at 08:00 BT 22 January 2013

(a) MYJ, (b) MYNN, (c) QNSE, (d) TEMF

接近,均模拟出了天津、河北中部和西南部、山西东南部和河南北部的大雾区,其中,TEMF 方案模拟的雾区更均匀、更连续。从大雾模拟强度情况看,TEMF 方案模拟的强雾水浓度区范围较大,这与河北、山西、河南等多地出现能见度不足 100 m 的大雾实况非常一致。结合其他时次的对比分析发现(图略),TEMF 边界层方案对大雾的模拟效果优于其他方案。但所有方案对北京南部、河北南部、山东西北部和山西部分地区的大雾区没有模拟出来。

图 4 为各方案模拟的石家庄站 10 m 处液态水含量时间序列图。由图可知,4 种方案均没有模拟出整个连续的大雾过程,尤其是对 22 日中午前后和 23 日前期的大雾几乎没有模拟出来。究其原因,可能与其他参数设置有关,这在后面的试验中进一步验证。即便如此,TEMF 方案对雾水含量的模拟还是要优于其他方案,表现在只有 TEMF 方案模拟出了 22 日 20 时前后的雾现象。

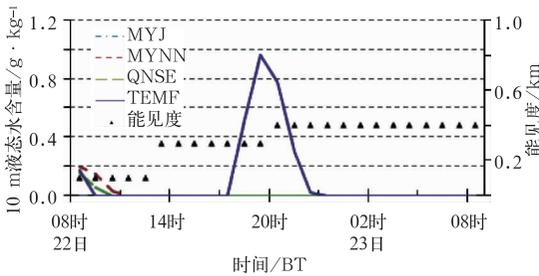


图 4 各边界层方案模拟的石家庄站 10 m 处液态水含量时间序列图  
Fig. 4 Time series of 10 m LWC at Shijiazhuang Station simulated by different PBL schemes

(2) 气象观测要素比较分析

图 5 是各方案模拟的石家庄站气象要素时间演变。各方案模拟的地面风速与实况基本一致,其中以 TEMF 方案的模拟效果相对较好。各方案模拟的相对湿度相互差异不是很明显,但与实况的差异主要体现早两个时段,一个是 22 日 14 时前后,一个是 23 日 08 时前后,这与 10 m 液态水含量(图 4)的模拟误差是一致的。

由地面气温和露点温度估算相对湿度存在一定误差,而且较高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 因气溶胶凝结核的吸附作用会显著降低大气湿度,因此在雾霾同时存在的低能见度天气中,仅由相对湿度的比来评判模拟效果的好坏并不完全可靠。而增加针对地面气温

和露点温度等因子的对比分析,可以减小误差增加评判的真实性。由图 5 可知,各方案模拟的石家庄站地面温度露点差虽然都小于 4℃(业务上用于判断发生大雾的经验阈值),但与实况差异还是比较明显。

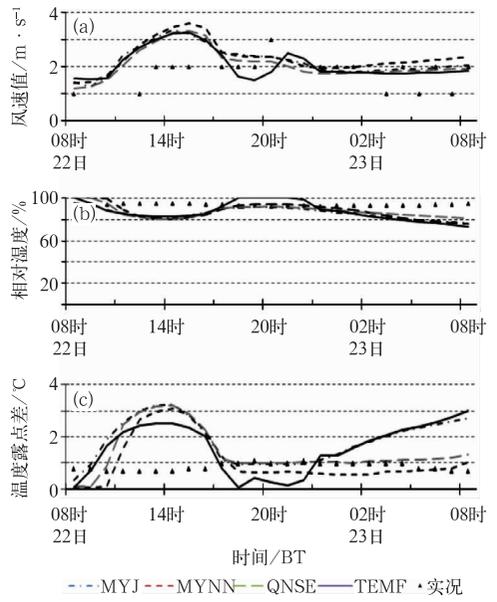


图 5 各边界层方案模拟的石家庄站气象要素时间序列图  
Fig. 5 Time series of surface wind (a), relative humidity (b) and T-T<sub>d</sub>(c) at Shijiazhuang Station simulated by different PBL schemes

上述比较分析表明,TEMF 方案模拟的总体效果比其他方案要好,这与该方案的理论设计是密不可分的。首先,TEMF 方案从本质上讲是一种 EDMF 方案,与前两种 TKE 方案相比,EDMF 方案是一种优化组合方案,它采用涡旋扩散参数化模拟边界层中的湍流,采用质量通量参数化计算边界层水汽对流(Angevine et al, 2010)。因此,EDMF 方案比 TKE 方案能更好地描述边界层浅干对流现象(Negggers, 2009; Witek et al, 2011; Suselj et al, 2012)。然而,TEMF 方案又不只是一种简单的 EDMF 方案,它是在 EDMF 方案的基础上改进发展起来的,主要是在计算涡旋扩散系数时采用总湍流能量(TTE,包括湍流动能和湍流位能)取代 EDMF 方案的湍流动能(TKE),因此,它能更好地描述大雾这种稳定的大气边界层现象(Mauritsen et al, 2007),故在本文后续的数值改进试验中将边界层方案设置为 TEMF 方案。

### 3.2 微物理方案试验

#### (1) 大气中雾水含量比较分析

图 6 和图 7 分别是各微物理方案模拟的 22 日

08 时 10 m 雾水含量分布。由图 6 可知,各种 Wsm-和 Wdm-方案均能模拟出大雾区域的大致分布,但都没有模拟出北京南部、河北南部和山东西北部的大雾。此外,单参数方案(Wsm-)模拟效果要优于双

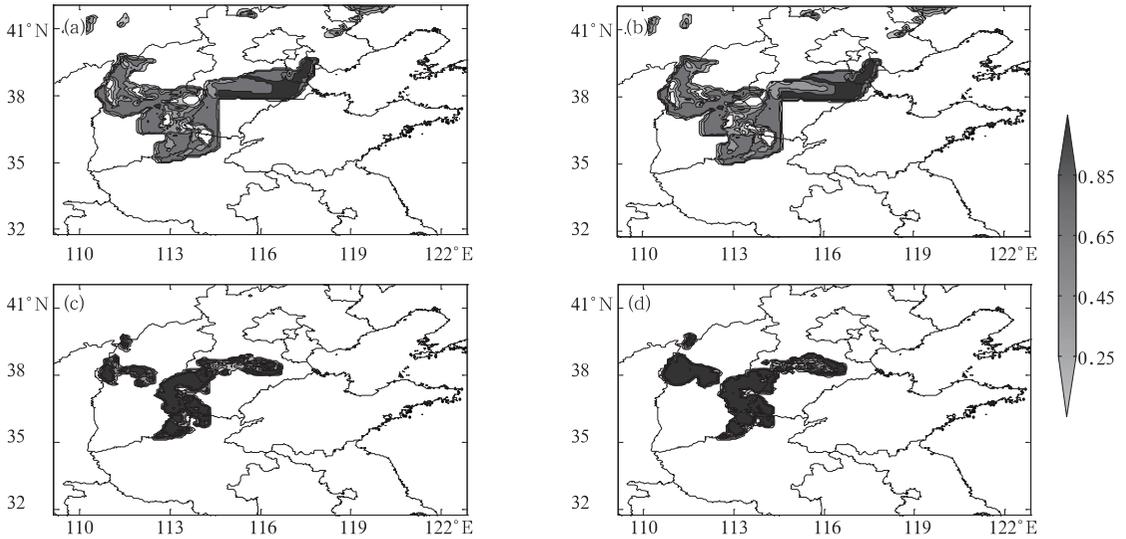


图 6 各微物理方案(a) Wsm5, (b) Wsm6, (c) Wdm5, (d) Wdm6 模拟的 22 日 08 时 10 m 处雾水含量分布( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 6 Distribution of 10 m LWC ( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) simulated by different microphysical schemes at 08:00 BT 22 January 2013

(a) Wsm5, (b) Wsm6, (c) Wdm5, (d) Wdm6

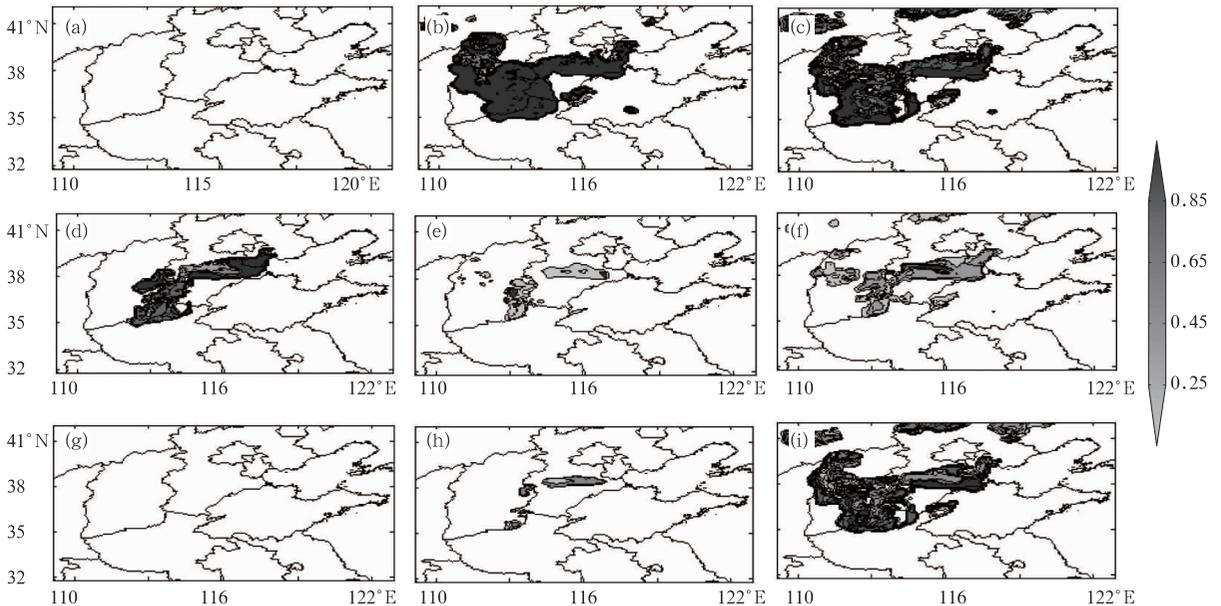


图 7 各微物理方案(a) Ferrier, (b) Goddard, (c) Kessler, (d) Lin, (e) Mil-Yau, (f) Morrison, (g) NSSL, (h) SBU-YLIN, (i) Thompson 模拟的 22 日 08 时 10 m 处雾水含量分布( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 7 Distribution of 10 m LWC ( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) simulated by different microphysical schemes at 08:00 BT 22 January 2013

(a) Ferrier, (b) Goddard, (c) Kessler, (d) Lin, (e) Mil-Yau, (f) Morrison, (g) NSSL, (h) SBU-YLIN, (i) Thompson

参数方案(Wdm-),前者模拟的大雾区范围更广,与实况更接近,这是因为双参数方案(Wdm-)的设计更适合于暖雾过程,而单参数方案(Wsm-)则更适合于混合相态的冷雾过程。由图 7 可知,Goddard、Kessler 和 Thompson 方案的模拟效果相对较好,大雾区基本上都模拟出了高雾水含量,而且对河北南部和山东西北部的大雾模拟也优于 Wsm-方案;这三种方案都有针对冬季低温大雾的设计考虑,其中又以 Goddard 方案模拟的雾区范围和强度与实况最为接近,而 Kessler 和 Thompson 方案在河北北部和辽宁西南部的区域边界有虚假的高值雾水含量区。Goddard 方案是在 Lin 方案基础上改进发展起来的高分辨率方案,其相对较好的模拟效果与它是一种集合模式方案很有关系。

图 8 给出的是各微物理方案模拟的石家庄站 10 m 液态水含量时间变化情况。由图可知,总体来说,Goddard 方案要优于其他方案,其模拟出了从 22 日 08 时至 22 日 23 时连续的大雾过程(液态水含量  $> 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),但对 23 日上午的大雾模拟不好。而其他方案模拟效果相对要更差一些,表现在能模拟出夜间大雾过程(Wdm5 和 Wdm6 方案表现更明显),但对白天的大雾没有模拟出来。此外,对 23 日 00 时之后的持续大雾,所有方案都没有模拟出来。究其原因,或许与其他模式参数化方案有关,这些都需要后续进行相关的模拟试验和资料验证。

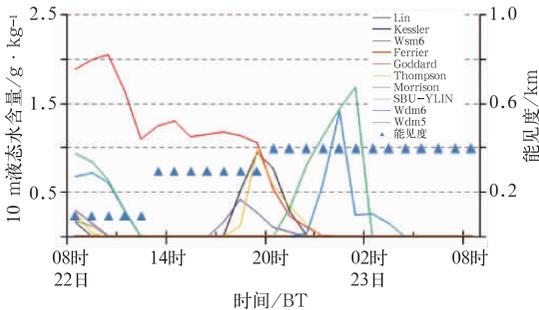


图 8 各微物理方案模拟的石家庄站 10 m 处液态水含量时间序列图  
Fig. 8 Time series of 10 m LWC at Shijiazhuang Station simulated by different microphysical schemes

(2) 地面气象观测要素比较分析

图 9 是各微物理方案模拟的石家庄站地面气象要素的时间变化情况。从地面风速模拟来看,各方案在夜间风速模拟效果较好且一致,下午模拟效果

较差且分散。其中,22 日 14 时左右,除 Goddard 方案模拟结果与实况相吻合外,其他方案模拟的地面风速比实况偏高  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上 ( $> 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),这也可能是导致它们未能成功模拟该时段大雾的重要原因之一,因为较高的风速不利于大雾的维持和发展。因此,各种微物理方案中 Goddard 方案对地面风速的模拟效果最好。从相对湿度模拟看,22 日 08 时至 22 日 23 时,Goddard 方案模拟的相对湿度均为 100%,而其他方案模拟结果在 22 日 11—17 时较低,该时段大部分时间相对湿度低于 85%,这与前面雾水含量的对比结果是一致的,这说明该段时间 Goddard 方案模拟效果优于其他方案。而地面温度露点差的模拟情况与 10 m 相对湿度类似,22 日 08 时至 22 日 23 时,只有 Goddard 方案模拟的温度露点差一直维持较低 ( $\leq 1^\circ\text{C}$ ),且与实况误差最小 ( $\leq 1^\circ\text{C}$ ),其他方案在 22 日 11—17 时的模拟误差都偏大。

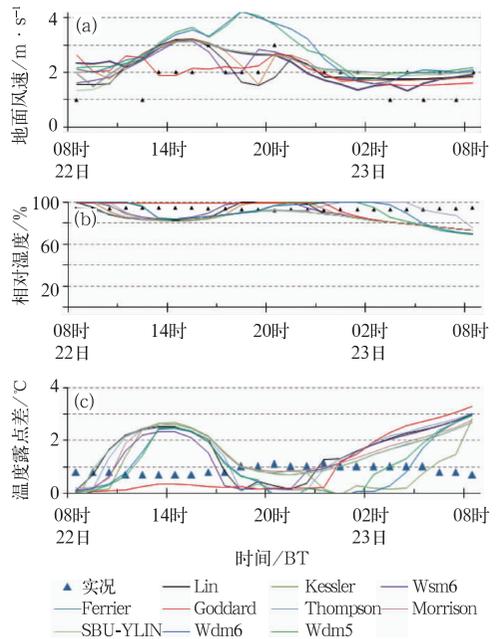


图 9 各微物理方案模拟的石家庄站气象要素时间序列图

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for different microphysical schemes

由上述分析可知,Goddard 方案由于具有针对冬季低温大雾的特殊考虑,而且是一种集合模式方案,因此其对本次大雾的总体模拟效果相对较好,是最适合模拟静稳大气条件下大雾天气过程的微物理参数化方案,后续的数值改进试验中将微物理方案设置为 Goddard 方案。

### 3.3 陆面方案试验

#### (1) 大气中雾水含量比较分析

从模拟的 10 m 处雾水含量水平分布来看(图 10),各陆面方案模拟的大雾范围和强度差别并不是很大,高雾水含量区都模拟在河北中部和西南部,以及山西东南部和东部,河南北部也有体现。它们之间的细微差别表现在:河北西南部和山西省内的

雾区范围稍有差别,其中 RUC LSM 方案模拟的雾区范围是几种方案中相对最广的,这与实况最为接近。

从模拟的石家庄站 10 m 液态水含量时间序列变化趋势来看(图 11),整个分析过程只有 RUC LSM 方案对应的试验完整地模拟出了连续 24 h 的大雾过程,其中雾水含量呈现夜间高,午后下降但仍然保持大雾水平的特点。而其他几种方案对 22 日午后的大雾过程模拟失败,对应雾水含量值为零。

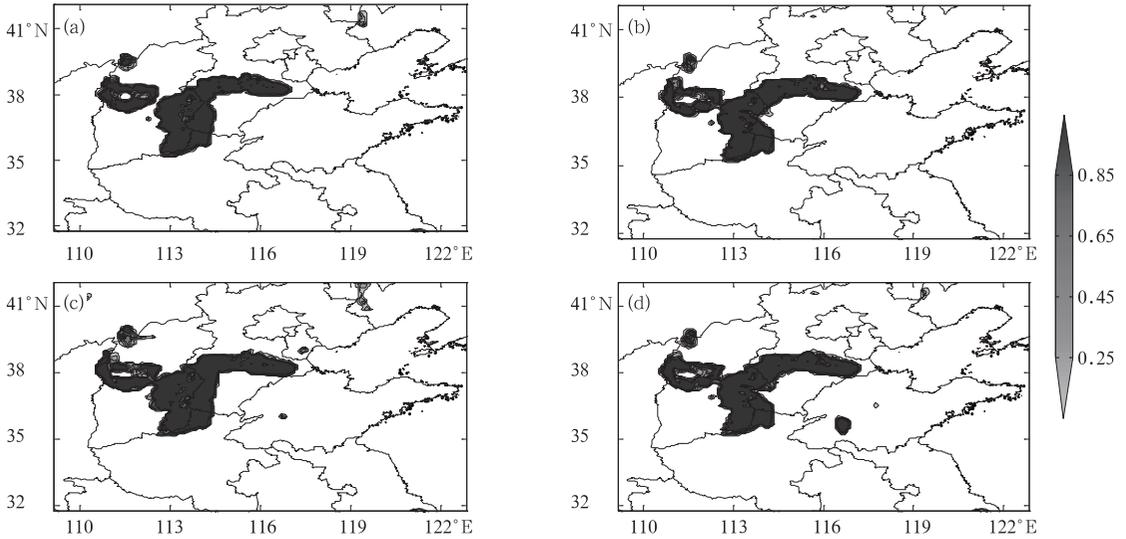


图 10 各陆面过程方案(a) Noah LSM, (b) PX LSM, (c) RUC LSM, (d) Thermal LSM 模拟的 22 日 08 时 10 m 处雾水含量分布( $\geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 10 Distribution of 10 m LWC at 08:00 BT 22 January 2013 simulated by different LSM (a) Noah LSM, (b) PX LSM, (c) RUC LSM, (d) Thermal LSM

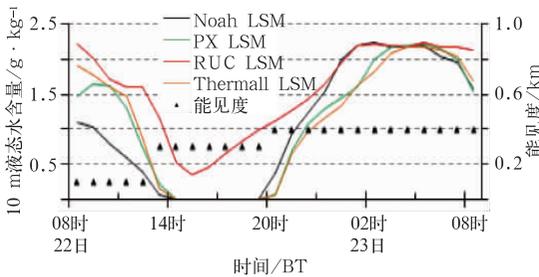


图 11 各陆面过程方案模拟的石家庄站 10 m 处液态水含量时间序列图

Fig. 11 Time series of 10 m LWC at Shijiazhuang Station simulated by different LSM

由此可知,RUC LSM 方案是唯一能成功模拟出此次过程石家庄站连续大雾的陆面方案。

#### (2) 地面气象观测要素比较分析

图 12 是石家庄地面气象要素的模拟情况。由图可知,各方案对风速的模拟误差较小,且趋势一致,均体现了风速夜间小,午后稍增大的趋势。而

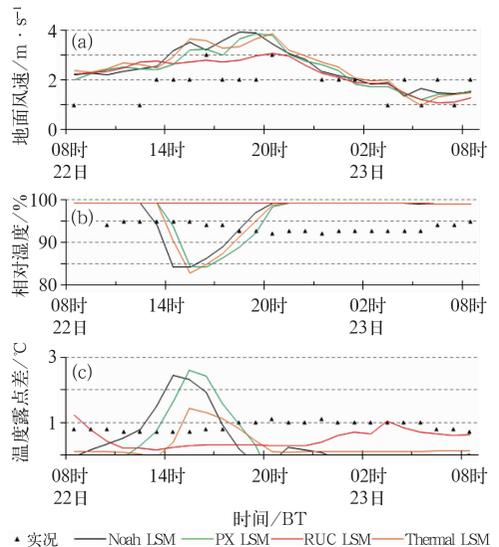


图 12 各陆面过程方案模拟的石家庄站气象要素时间序列图

Fig. 12 Same as Fig. 5, but for different LSM

10 m 相对湿度只有 RUC LSM 方案保持在 95% 以上,接近 100%,而其他方案在 22 日午后至夜间的相对湿度都较低。对地面温度露点差的分析也表明,整个大雾过程 RUC LSM 方案模拟结果与实况最接近,误差保持在 1℃ 以内。

虽然各陆面方案对雾水含量水平分布的模拟结果差异不大,但 RUC LSM 方案是唯一成功模拟出石家庄站大雾过程的陆面方案,而且该方案模拟的单站地面气象要素误差最小。究其原因,可能是:(1) RUC LSM 方案具有更高的模式分辨率(6 层土壤模式)和更合理的垂直分层设置(分别为 0、5、20、40、160 和 300 cm);(2) RUC LSM 方案具有对陆面水汽相态的细致考虑,特别是有针对冷季水相变化的考虑,而且全面考虑了土壤、植被和灌层等水汽来源;(3) RUC LSM 方案设置了特殊的邻近地表层,包括半层大气层和半层土壤层,在该层求解能量和水汽收支,通过隐式方法求解方程,并包括了很多诊断变量。

## 4 结论和讨论

本文针对华北地区一次大雾天气过程,采用 WRF 模式系统,设计了几组数值模拟试验,通过与地面观测实况的对比分析,检验了不同模式参数化方案的模拟效果,找出了部分最适合于此次大雾过程的模式试验方案,它们分别是 TEMF 边界层方案、Goddard 微物理方案和 RUC 陆面方案。本文数值对比试验表明,WRF 模式对此次大雾天气地面风速风向的模拟能力较好,对其他要素的模拟存在一定的误差。用 10 m 液态水含量和 10 m 相对湿度指标共同诊断大雾天气能有效提高大雾判识准确率。

当然,本文工作仅是针对一次大雾过程的模拟分析,某些结论还需后续更多的数值试验验证。大雾天气还与垂直分辨率设置、初始资料同化和大气辐射方案等有关,还有必要在这些方面作进一步的研究。

## 参考文献

刘梅,严文莲,张备,等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强

机制分析. 气象,40(7):835-843.

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.

张春礼,朱彬,耿慧,等. 2013. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析. 气象,39(10):1284-1292.

邹进上,刘长盛,刘文保. 1982. 大气物理基础. 北京:气象出版社,6.

Angevine W M, Jiang H, Mauritsen T. 2010. Performance of an eddy diffusivity-mass flux scheme for shallow cumulus boundary layers. *Mon Wea Rev*,138:2895-2912.

Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴和云动力学. 叶家东等,译. 北京:气象出版社,33 I-342.

Gultepe I, Tardif R, Michaelides S, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl Geophys*, 164:1420-9136.

Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(3):341-359.

Mauritsen T, Svensson G, Zilitinkevich S S, et al. 2007. A total turbulent energy closure model for neutrally and stably stratified atmospheric boundary layers. *J Atmos Sci*, 64:4113-4126.

Miao Y, Potts R, Huang X, et al. 2010. Application of fuzzy-logic NWP fog guidance to perth fog forecasting decision support system, 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. Munster, Germany, 25-30 July, 2010.

Neggers, R A J. 2009. A dual mass flux framework for boundary-layer convection. Part II: Clouds. *J Atmos Sci*, 66:1489-1506.

Niu S, Lu C, Yu H, et al. 2010. Fog research in china: An overview. *Adv Atmos Sci*,27(3):639-661.

Shi C, Yang J, Qiu M, et al. 2010. Analysis of an extremely dense regional fog event in Eastern China using a mesoscale model. *Atmos Res*,95(4):428-440.

Suselj K, Teixeira J, Matheou G. 2012. Eddy diffusivity/mass flux and shallowcumulus boundary layer: An updraft PDF multiple mass flux scheme. *J Atmos Sci*,69:1513-1533.

Witek M L, Teixeira J, Matheou G. 2011. An integrated TKE based eddy diffusivity/mass-flux boundary layer scheme for the dry convective boundary layer. *J Atmos Sci*, 68:1526-1540.

WMO. 1992. International Meteorological Vocabulary, WMO,182.

Wu D, Deng X, Mao J, et al. 2007. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling-Dayaoshan mountain. *Acta Meteor Sin*, 65(3):406-415.

Yang J, Xie Y, Shi C, et al. 2009. Differences in lon compositions of winter fog water between radiation and advection-radiation fog episodes in Nanjing. *Trans Atmo Sci (in Chinese)*,32:776-782.

Zhou B, Du J. 2010. Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system. *Wea Forecasting*, 25:303-322.