

四川省冬季雾的数值模拟及能见度参数化

林艳¹ 王茂书² 林龙官³

摘要

利用中尺度模式 WRF 对 2009 年冬季四川省入冬后最大的一次浓雾过程进行模拟,模拟结果表明,模式对雾区的模拟与实测结果基本一致,模拟的相对湿度也接近实况.利用成都双流机场的实测能见度和相对湿度资料分别用确定性和概率性方法获得能见度(Vis)和相对湿度(RH)的参数化方案,用模拟的相对湿度来估算能见度.研究表明,概率为 5% 的 Vis-RH 的参数化方案在浓雾过程中估算的能见度最为准确,可以为今后能见度的预报提供参考.

关键词

雾;数值模拟;能见度;相对湿度;参数化

中图分类号 P426.4

文献标志码 A

收稿日期 2011-08-20

作者简介

林艳,女,硕士,助理工程师,主要从事数值模拟和天气预报工作.njliny@163.com

1 福建省气象服务中心,福州,350001

2 四川省巴中市气象局,巴中,636001

3 福建省闽侯县气象局,闽侯,350100

0 引言

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种胶体系统^[1].由于雾的存在,使得空气能见度大大恶化,视线受阻,视野模糊.按照能见度的大小,将雾分为雾(0.5~1.0 km)、浓雾(0.05~0.5 km)、强浓雾(<0.05 km).另外,轻雾是微小水滴或已湿的吸湿性质粒所构成的灰白色的稀薄雾幕,水平能见度 ≥ 1.0 km 并且 < 10.0 km^[2].雾给交通运输带来了极大的危害,比如对机场、高速公路和港口,因此它的预报对于公众的安全出行至关重要,并且有很高的经济效益.2009 年 12 月 24 日,四川省气象台发布了大雾橙色预警信号,四川省内迎来了 2009 年入冬后的最大浓雾.受大雾天气的影响,省内 10 条高速路最长封闭近 10 h,双流机场关闭 9 h,131 个航班延误,1.2 万名旅客滞留,多条公路客运线路停运,出行交通十分困难.成都市交管局因此紧急启动了“恶劣天气二级应急预案”.这些事实强调了雾的研究的重要性和紧迫性.

难以准确预报雾的原因是探测雾和表现相关的物理过程存在困难.从数值模拟的角度看,水平和垂直分辨率,物理过程参数化这几个方面都很重要.相关研究^[3-14]表明,高分辨率的初始条件和边界条件,更加精确和完善的微物理方案能有效地改进模拟结果.在预报和云模式中,通常使用由 Kunkel^[15]于 1984 年研发的雾的微物理参数化方案(以下简称 K84,其能见度参数化方案表达式为 $V_{K84} = 0.027C_{LW}^{-0.88}$),它是基于消光系数和液态水含量(LWC)之间的关系式.在北美通常以 Rapid Update Cycle (RUC)^[16]模式来进行数值预报,使用的也是 K84 参数化方案计算能见度.现在,Numerical Weather Prediction(NWP)模式预报的相对湿度(RH)已经用于能见度的参数化^[17].研究表明,各种能见度参数化方案之间存在着显著的区别^[18].考虑到各地的地形地貌、气象环境等均不相同,需要将能见度参数化方案本地化,才能更精确地估算能见度.由于国内的气象测站没有对 LWC 的观测,本文在中尺度模式 WRF 成功模拟 2009 年 12 月 24—26 日四川省一次罕见浓雾过程的基础上,使用成都双流机场 2009 年冬季能见度和相对湿度(RH)资料获得能见度的参数化方案,对能见度预报的业务化做了一些有益尝试.

1 雾过程概况和天气形势

2009 年 12 月 24 日早晨,四川盆地被大雾笼罩,部分地区能见度

在 100 m 左右,局部不足 100 m(图 1),是 2009 年入冬以来最严重的一场大雾天气. 受其影响,多条高速公路全线或部分封闭,双流机场被迫关闭. 成都中心气象台从 23 日起连续 3 d 发布了大雾橙色预警.

分析此次大雾过程的天气形势可知(图略),24 日 08 时,500 和 850 hPa 均受西南暖湿气流影响,为雾的形成和维持提供了充足的水汽. 700 hPa 为辐合场,925 hPa 有弱的辐散,可见存在系统性下沉运动,有利于稳定层结的建立和维持. 加上夜间少云,云量均维持在 3~4 成,辐射降温冷却明显(图 1),有利于水汽的凝结. 从温江站探空图(图 2)上看,近地层(地面至 925 hPa)和对流层中层(750~700 hPa)均有逆温层存在,850 hPa 以下为南风,风速 < 2 m/s,同时温度露点差小于 2 °C,大气处于一种近饱和的状态. 至 25 日 20 时(图 3),随着北方冷空气的南下,925 hPa 以下转为北风,风速增大至 5 m/s,逆温层开始减弱消失,同时温度露点差大于 6 °C,雾才逐渐消散. 从温江站(56187)的层结曲线(蓝线)看,24 日 08 时到 25 日 20 时,整层大气的温度有明显的升高,说明在此次雾过程中,西南暖湿气流伴随系统性下沉运动引起了强度较大的下沉逆温,使得大气层结稳定,并且提供充足的水汽,促成了雾的发生发展. 而偏北气流的产生、加强使得冷平流发展,最终导致雾消散. 故此次雾过程是比较典型的辐射雾.

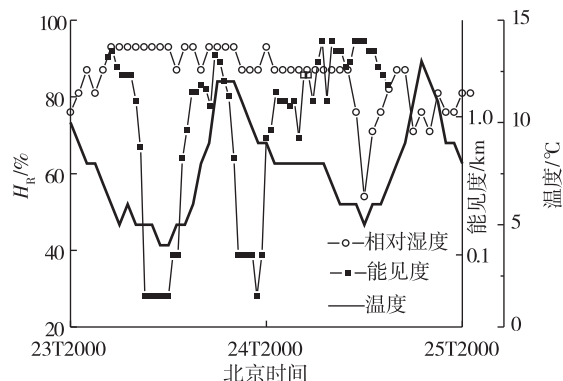


图 1 2009 年 12 月 23—25 日成都双流机场能见度、相对湿度和温度的时间序列

Fig. 1 Time series of visibility, relative humidity and temperature in Chengdu Shuangliu Airport from December 23 to 25, 2009

2 模式方案设计和初始化

本文使用的是 WRF V3.2 模式. 为了考虑天气过程以及分析中尺度过程的特征,设置模式区域中心点为重庆市(107.64°E, 28.68°N),采用双重嵌套(图 4). 大、小区域(分别用 DO1 和 DO2 表示)的格点距离分别为 27 和 9 km,格点数分别为 202 × 200 和 178 × 157,使得大区域能覆盖亚洲地区,保证环流形势的稳

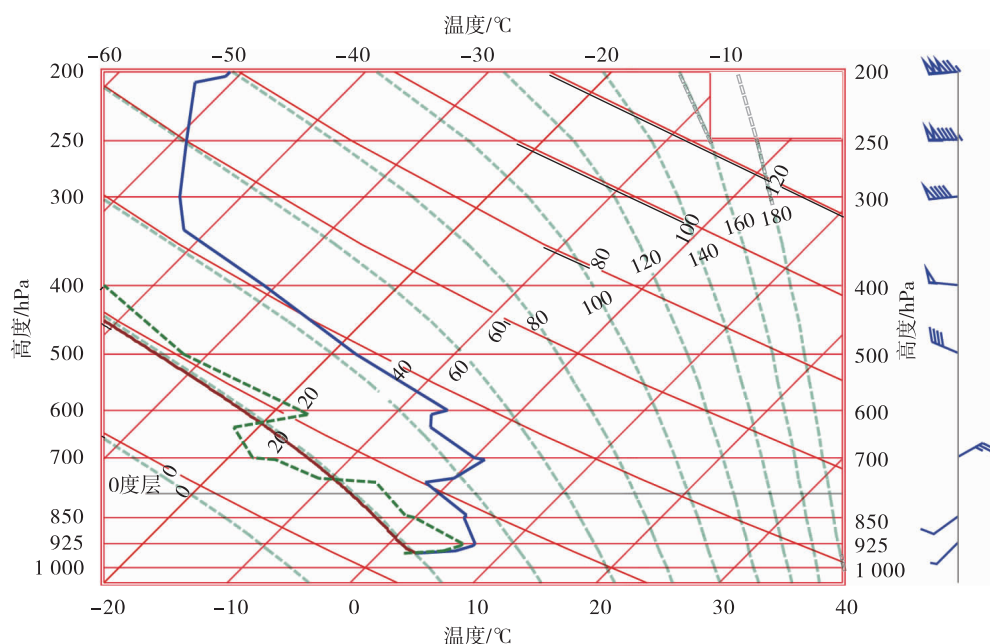


图 2 2009 年 12 月 24 日 08 时温江站(56187)探空曲线,其中蓝线为层结曲线,绿线为露点曲线,棕线为状态曲线

Fig. 2 Sounding plots of Wenjiang station(56187) at 8:00 on December 24, 2009, blue curve for temperature, green one for dew point and brown one for air condition

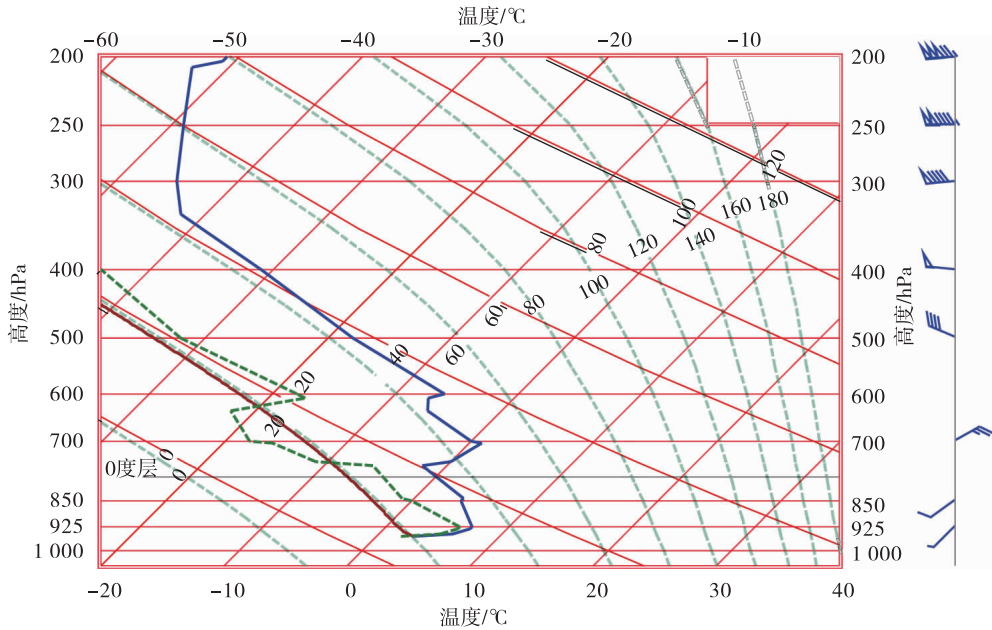


图3 2009年12月25日20时温江站(56187)探空曲线,其中蓝线为层结曲线,绿线为露点曲线,棕线为状态曲线
Fig.3 Sounding plots of Wenjiang station(56187) at 20:00 on December 25,2009,blue curve for temperature,green one for dew point and brown one for air condition

定,小区域能够覆盖西南地区,同时避免云贵高原和青藏高原的复杂地形对模式边界的影响。

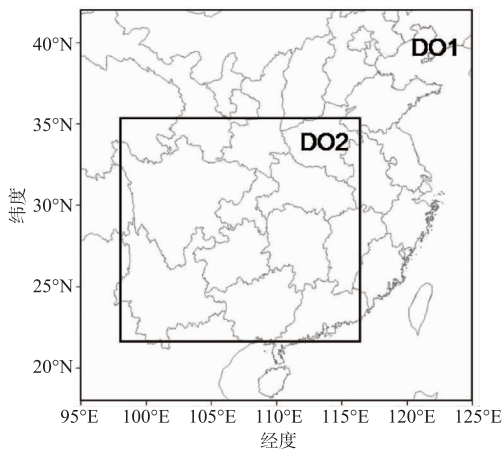


图4 模拟区域
Fig.4 Simulated domains

在垂直方向上分32个sigma层($\sigma = 1.000, 0.998, 0.996, 0.995, 0.993, 0.990, 0.988, 0.985, 0.983, 0.980, 0.975, 0.970, 0.960, 0.930, 0.890, 0.850, 0.800, 0.750, 0.700, 0.650, 0.600, 0.550, 0.500, 0.450, 0.400, 0.350, 0.300, 0.250, 0.200, 0.150, 0.100, 0.050, 0$). 为了提高边界层内的垂直分辨率,采用上疏下密的方式. 最低的模式层位于

10 m左右,可以代表地面上最低10 m范围内的平均状况. 地形分别采用10分和2分的全球地形和陆面资料. 微物理方案为WSM6类冰雹方案,辐射方案为GFDL(Eta)长波方案加短波方案,QNSE地表方案,5层热力扩散陆面方案和Quasi-Normal Scale Elimination边界层方案. 用NCEP 6 h 1次的 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL资料作为初始条件和边界条件,并用来自MICAPS站点的每天2次的探空和3 h 1次的地面资料进行客观分析,以提高插值分析场的精度. 以2009年12月23日20时(下文除特别说明均为北京时)为初始时刻,模拟时间为48 h,时间步长为30 s,模拟结果每小时输出1次.

3 模式评价

3.1 雾水的水平分布

根据雾的定义,将能见度低于1 km的站点定义为雾区. 根据我国目前开展的多次雾外场观测试验结果表明,各地区雾中含水量(质量分数)的平均值为 $0.1 \sim 0.5 \text{ g/kg}^{[19]}$,但根据各地的地域特点和雾形成条件的不同,雾中液态含水量范围也各有不同,本文在数值模拟研究中取液态水质量分数 0.01 g/kg 为雾区下界.

从实况图(图5a)上可以看出,24日08时西南一带均观测到有雾,其中四川东部、重庆和湖北的大

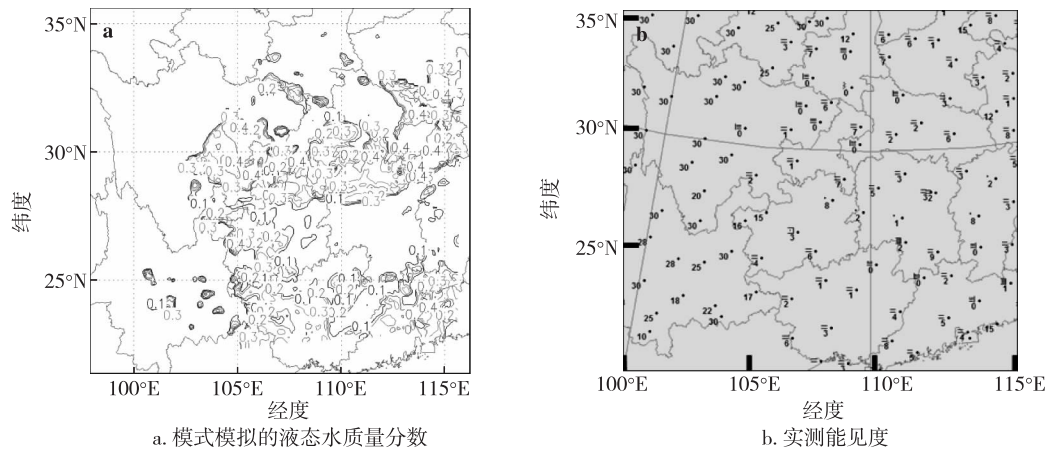


图5 2009年12月24日08时模式模拟的液态水质量分数的分布(单位:g/kg)和实测能见度(数字)与雾区(≡表示浓雾, =表示轻雾)(单位:km)

Fig. 5 Simulated cloud water (fig a, in g/kg) and observed visibility (in km) and fog regions (fig b, ≡ for heavy fog and = for light fog) at 08:00 on December 24, 2009

部出现了浓雾天气(图示为≡). 模拟的雾区范围(图5b)与实测一致. 四川与重庆交界处, 重庆与湖北交界处都出现了液态水质量分数的极大值0.4 g/kg, 与此相对应的是站点的能见度为0.

到了25日20时, 虽然雾区的面积有了明显的减小(图6b), 但四川省中南部一带仍维持浓雾天气, 与此对应的是模拟结果也显示这些地区出现液态水质量分数的极大值, 为0.3 g/kg.

3.2 相对湿度的变化趋势

如图7所示, 模拟的成都双流机场(103.95°E, 30.58°N)的相对湿度的变化趋势与实测基本一致,

能反映雾的生消过程, 只是在25日午后, 模拟的起雾时间比实况推迟3~4 h. 在浓雾阶段, 模拟值比实测值偏大, 模拟值的振幅也比实测偏大.

可见, 模式能较准确地表现了雾区的分布, 模拟的液态水质量分数处于合理的范围内, 模拟的相对湿度与实况基本一致. 因此, 对此次罕见浓雾过程的模拟是成功的.

4 能见度参数化方案

本文使用的资料是成都双流机场2009年冬季(11月、12月和2010年1月)逐小时的能见度和和相

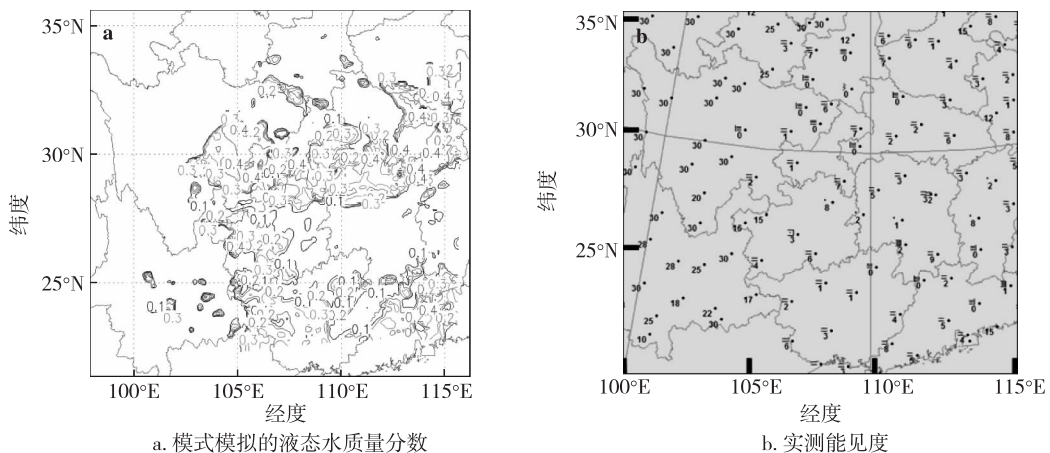


图6 2009年12月25日20时模式模拟的液态水质量分数的分布(单位:g/kg)和实测能见度(数字)与雾区(≡表示浓雾, =表示轻雾)(单位:km)

Fig. 6 Simulated cloud water (fig a, in g/kg) and observed visibility (in km) and fog regions (fig b, ≡ for heavy fog and = for light fog) at 20:00 on December 25, 2009

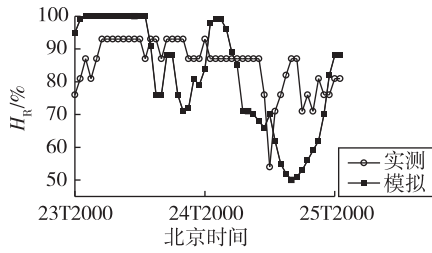


图7 2009年12月23—25日模拟和实测的成都双流机场相对湿度的时间序列

Fig. 7 Time series of simulated and observed relative humidity in Chengdu Shuangliu Airport from December 23 to 25, 2009

对湿度.

目前,确定性方法因为原理简单,应用得相对较多.在确定性方法中,通过对平均值进行曲线拟合来获得能见度(图8a).由图8a可见,在拟合线的周围分散了很多数据点,因为最佳拟合的统计意义在于更小的残差和更高的相关系数(比如,更小的变化性),对于一个给定的物理量(RH),能见度的变化范围可达一个数量级,因此一个确定性方法包含相当多的不确定性.而概率性方法虽然不能在各种条件下都预测准确,但能给出雾发生的可能性,也能给出某种特定情况的可预测性,比如低能见度^[20].

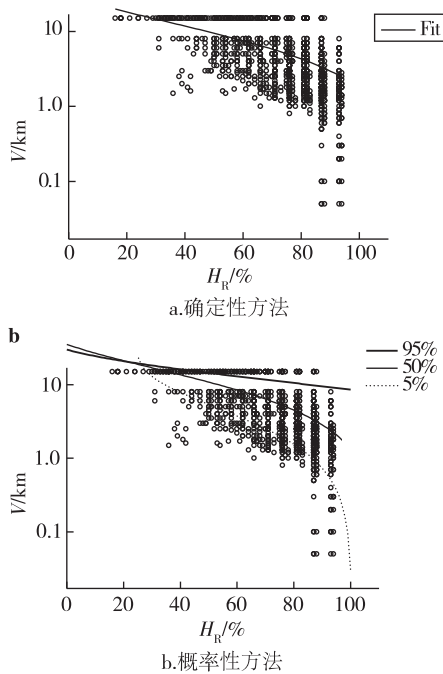


图8 用确定性方法和用概率性方法对实测的相对湿度的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves between calculated and observed RH by deterministic probabilistic method

在概率性方法中,对能见度分别取5%,50%,95%的概率进行曲线拟合.如果打算使用概率为5%曲线,意味着95%的数据点对应的能见度值高于这条5%的曲线.以机场为例,在浓雾过程中对于一架飞机降落来说,知道能见度可能达到的最低值比最可能出现的能见度值要有用得多.因此,对于一个给定的物理量,5%概率曲线可以用于表示发生几率为5%.图8b给出了用概率性方法对成都机场相对湿度进行拟合获得的概率为5%,50%,95%的拟合曲线.相关拟合函数见表2.

表2 不同的能见度参数化方案的表达式

Table 2 Expression of different parameterizations of visibility

参数化方案	条件
$V_{Fit} = 63.19 - 13.04\ln(H_R + 11.31)$	$20\% < H_R < 100\%$
$V_{95\%} = 56.71 - 10.16\ln(H_R + 13.77)$	
$V_{50\%} = 80.45 - 16.68\ln(H_R + 14.81)$	$20\% < H_R < 100\%$
$V_{5\%} = 21.38 - 4.938\ln(H_R - 24.53)$	

判断雾的模拟是否成功,最重要的指标是它是否能准确地估算能见度.本文利用模式模拟的相对湿度通过各种Vis-RH参数化方案来估算能见度,并利用实测能见度进行验证.由图9可见,概率为5%的拟合曲线无论从变化趋势还是量级上都与实况最为接近.因此,在低能见度条件下,特别是在对能见度极其敏感的情况下,比如对于机场飞机的起降,建议使用概率为5%的Vis-RH方案来估算能见度会更加准确.

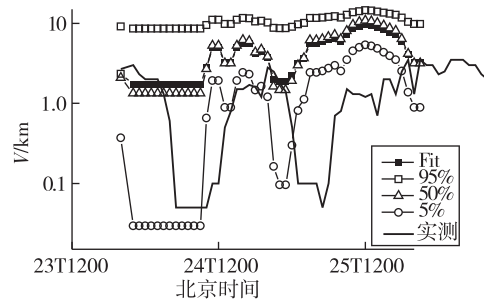


图9 2009年11月23—25日不同的参数化方案估算的能见度与实测值的时间序列(黑色实线为实测值)

Fig. 9 Time series of Vis values calculated by different parameterization of Vis-RH and observed ones in Chengdu Shuangliu Airport

5 结论

利用中尺度模式 WRF 对四川省 2009 年 12 月

24—25 日一次罕见浓雾过程进行模拟,结果表明:

1) WRF 模式成功地模拟了此次浓雾过程,对雾区分布的模拟与实测基本一致,对浓雾中心的表现也与实测吻合,对相对湿度的模拟与实况接近;

2) 通过成都双流机场的实测的能见度和相对湿度资料,用确定性方法和概率性方法获得不同的 Vis-RH 参数化方案;

3) 利用模式模拟的相对湿度通过各种能见度参数化方案来估算能见度,验证结果表明,在低能见度条件下,即在浓雾过程中,使用概率为 5% 的 Vis-RH 方案来估算能见度会更加准确。

参考文献

References

- [1] 邹进上,刘长盛,刘文保. 大气物理基础[M]. 北京:气象出版社,1982
ZOU Jinshang, LIU Changsheng, LIU Wenbao. Atmospheric physics basis [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1982
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:24-25
China Meteorological Administration. Ground meteorological observation norm [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 24-25
- [3] Pagowski M, Gultepe I, King P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. J Appl Meteor, 2004, 43(1): 3-16
- [4] Tardif R. The impact of vertical resolution in the explicit numerical forecasting of radiation fog: A case study [J]. J Pure Appl Geophys, 2007, 164(6/7): 1221-1240
- [5] Gultepe I, Pagowski M, Reid J. Using surface data to validate a satellite-based fog detection scheme [J]. Weather Forecasting, 2007, 22(3): 444-456
- [6] 樊琦,吴兑,范绍佳,等. 广州地区冬季一次大雾的三维数值模拟研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2003, 42(1): 84-86
FAN Qi, WU Dui, FAN Shaojia, et al. Numerical simulation of a heavy fog in Guangzhou [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsenti, 2003, 42(1): 84-86
- [7] 董剑希. 雾的数值模拟研究及其综合观测[D]. 南京:南京信息工程大学大气物理学院,2005
DONG Jianxi. The numerical simulation study on fog and comprehensive observations [D]. Nanjing: School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, 2005
- [8] 李元平,梁爱民,张中锋,等. 北京地区一次冬季平流雾过程数值模拟分析[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2007, 29(2): 167-172
LI Yuanping, LIANG Aimin, ZHANG Zhongfeng, et al. Simulation and analysis of a winter advection fog in Beijing area [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2007, 29(2): 167-172
- [9] 石红艳,王洪芳,齐琳琳,等. 长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2005, 6(4): 404-408
SHI Hongyan, WANG Hongfang, QI Linlin, et al. Numerical simulation of radiation fog event in Yangtze River [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2005, 6(4): 404-408
- [10] 樊琦,王安宇,范绍佳,等. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究[J]. 气象科学, 2004, 24(1): 1-8
FAN Qi, WANG Anyu, FAN Shaojia, et al. Numerical simulation study of a radiation fog in Pearl River Delta regions [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(1): 1-8
- [11] 史月琴,邓雪娇,胡志晋,等. 一次山地浓雾的三维数值研究[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 351-359
SHI Yueqin, DENG Xuejiao, HU Zhijin, et al. Three-dimensional numerical study on dense fog over mountain area [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(4): 351-359
- [12] 董剑希,雷恒池,胡朝霞,等. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 175-184
DONG Jianxi, LEI Hengchi, HU Zhaoxia, et al. Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(2): 175-184
- [13] 傅刚,王菁茜,张美根,等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究:以 2004 年 4 月 11 日为例[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726
FU Gang, WANG Jingqian, ZHANG Meigen, et al. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004 [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2004, 34(5): 720-726
- [14] 傅刚,张涛,周发琇. 一次黄海海雾的三维数值模拟研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 859-867
FU Gang, ZHANG Tao, ZHOU Faxiu. Three-dimensional numerical simulation of real sea-fog event over the Yellow sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(6): 859-867
- [15] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J Appl Meteor, 1984, 23(1): 34-41
- [16] Benjamin S G, Devenyi D, Weygandt S S, et al. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC [J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(2): 495-518
- [17] Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts [C] // Preprints, Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, FL, Amer Meteor Soc, 2000
- [18] Gultepe I, Isaac G. Visibility versus precipitation rate and relative humidity [C] // Preprints, 12th Cloud Physics Conf., Madison, WI, Amer Meteor Soc, 2006
- [19] Liu X L, Niu S J. Numerical simulation on the evolution of cloud particles in 3-D convective cloud [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(8): 1195-1206
- [20] Gultepe I, Milbrandt J A. Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility [J]. J Appl Meteor, 2010, 49(1): 36-46

Numerical simulation of a winter fog in Sichuan and parameterization of visibility

LIN Yan¹ WANG Maoshu² LIN Longguan³

1 Fujian Weather Service, Fuzhou 350001

2 Bazhong Meteorological Bureau of Sichuan Province, Bazhong 636001

3 Minhou Meteorological Bureau of Fujian Province, Minhou 350100

Abstract The heaviest fog in winter of 2009 in Sichuan province is simulated by the mesoscale model WRF, and the results show that both the simulated fog regions and relative humidity are in accordance with the observed data. The parameterization of Vis-RH is acquired by deterministic and probabilistic methods based on the data of visibility and relative humidity observed in Chengdu Shuangliu Airport, then the simulated relative humidity is used to calculate the visibility. The study shows that the visibility values calculated by the Vis-RH parameterization with 5% probability is most accurate, and this method can provide reference for the visibility forecast in the future.

Key words fog; numerical simulation; visibility; relative humidity; parameterization