

山西省冬季雾中能见度的数值模拟研究

林艳¹ 杨军¹ 鲍艳松¹ 王智娟² 戴有学²

摘要

利用中尺度模式 MM5 对 2009 年冬季山西省一场持续 30 多个小时的罕见浓雾过程进行模拟. 结果表明, 山西省气象局现行的 MM5 设计方案对雾区的模拟结果与实测结果基本一致, 但夜间近地层的温度存在冷偏差, 相对湿度偏高. 另外, 由于山西省空气污染较重, 空气中的粒子数对能见度的影响不能忽略, 因此仅用能见度 (Vis) 与液态水含量 (LWC) 的参数化方案估算的能见度, 只有在浓雾时才与实测一致, 具有很大的局限性; 而利用能见度 (Vis) 与相对湿度 (RH) 的参数化方案估算的能见度比实测值偏大, 但在能见度的趋势预报上与实测值基本一致. 用太原机场的实测资料对 Vis-RH 关系式进行修订后, 其估算的能见度更加准确, 可以为业务预报提供参考.

关键词

雾; 数值模拟; 能见度; 参数化

中图分类号 P426.4

文献标志码 A

收稿日期 2010-05-06

资助项目 中国博士后科学基金(20090461131); 山西省气象局开放式研究基金(SXKKFTQ-20090201)

作者简介

林艳, 女, 硕士生, 研究方向为中小尺度雾的数值模拟和能见度预报. njlinyan@163.com

0 引言

Introduction

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. 这种漂浮在近地面的水汽凝结物使得水平能见度降低到 1 000 m 以内的天气现象即称为雾^[1]. 雾害常常导致高速公路关闭, 机场航班延误或取消, 轮渡停航, 大量的车辆和旅客滞留. 山西省地形较为复杂, 境内有山地、丘陵、高原、盆地、台地等多种地貌类型, 其中山地面积占全省总面积的 40%、丘陵占 40.3%、平原和台地仅占 19.7%, 大部分在海拔 1 000 ~ 2 000 m. 山西复杂的地形使得雾的分布不均, 中部的太原和南部的临汾、长治为雾的多发地, 而这一带也是山西省主要公路的必经之路^[2]. 据统计, 雾天中的交通事故发生率比其他灾害性天气高 2.5 倍, 这与人们对“雾灾”缺乏防范意识有直接关系^[3]. 因此, 气象部门对高速公路沿线的雾害进行及时有效地预测预报, 帮助交通管理部门科学合理地采取限速、限量或封闭道路措施, 对保证高速公路沿线的行车安全具有重要的意义.

雾的形成、分布和消散是微物理过程、热力过程和动力过程之间复杂相互作用的结果, 因此, 提高雾的预报能力, 需要模式能准确地模拟这些过程^[4]. 国内外用数值模式在雾的模拟研究方面已经取得了不少成果^[5-16], 对雾过程的发生、发展和消散机制进行了大量研究, 并对模式的初始条件和边界条件, 垂直和水平分辨率, 辐射方案, 下垫面条件等进行了敏感性试验. 结果表明, 提高初始条件和边界条件的准确性, 适当提高垂直和水平分辨率, 选择合适的微物理方案和下垫面条件对雾的预报会有很大的改善. 在能见度 (Vis) 的预报方面, 在过去的应用中, Vis 的参数化, 即 Vis 是相对湿度 (RH) 和降水率 (PR) 的函数, 已经在包括数值天气预报 (NWP) 模式^[17] 和雾模式^[18] 在内的各种模式中广泛使用^[19], 但早期的研究表明各种 Vis 参数化方案之间存在显著的差异^[20]. 目前大部分 NWP 和雾模式使用的转换算法是将水凝物的含水量 (例如液态水含量 LWC) 转换为消光系数对 Vis 进行参数化^[17-21]. 本文将利用中尺度模式 MM5 对 2009 年冬季山西省一次罕见的持续 30 多个小时的浓雾过程进行模拟, 同时, 分别用 Vis-LWC 和 Vis-RH^[22] 参数化方案来估算能见度. 用山西省的地面常规站点资料和太原机场的观测资料对模拟结果和估算值进行分析, 以评估中尺度模式对山西省雾过程的模拟能力和两种参数化方案对

1 南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 南京, 210044

2 山西省临汾市气象局, 临汾, 041000

山西雾过程中能见度估算的准确程度.

1 雾过程概况和天气形势

The fog event and weather patterns

1.1 雾过程实况

秋冬季节是山西省雾天气多发的时段^[23],尤其是在每年的12月至次年的1月雾天最多.2009年12月上旬,省会太原雾天已达4天(1日、8日、10日、11日)^[24],明显多于12月的气候平均值1.2天,从历史资料看,也打破12月中上旬雾天日数纪录.其中,从9日23时—11日午时,雾一直没有间断,持续30多个小时,成为进入12月以来,国内雾持续时间最长的城市.山西省气象台2009年12月10日9时40分发布大雾橙色预警信号:吕梁、太原、阳泉、晋中、运城、临汾、长治、晋城等预警区域内已经出现能见度大于50 m、小于200 m的浓雾并将持续.据山西省气象台观测数据显示,10日8时—11日8时,山西省有14个县市

出现能见度小于1 000 m的雾天,其中,五台山、武乡出现了能见度小于100 m的浓雾.

从这次过程的地面天气图(图略)分析可得,12月9日20时山西省受地面冷高压控制,气温较低,以西南风为主,风力较小.受前期雨雪过程影响,空气中水汽充足,加上由于进入采暖季,空气中存在大量的凝结核,有利于雾的形成.从9日夜里开始,山西全省出现大范围低能见度天气.从9日19时(图1a)太原站的探空图可以看到,近地层为东南风,风速很小,温度和露点略有差值,925~700 hPa出现逆温,深厚逆温层长时间的存在使得雾过程持续了30多个小时之久.到10日7时(图1b)800 hPa以下温度露点差几乎为零,整层空气饱和.逆温层从925 hPa抬升到900 hPa,因为雾顶一般位于逆温层底,可见雾层加厚.10日19时(图1c)出现贴地逆温,但逆温强度有所减弱.到11日7时(图1d)到了11日8时,随着北方冷空气的快速南下,风向转为北风,风

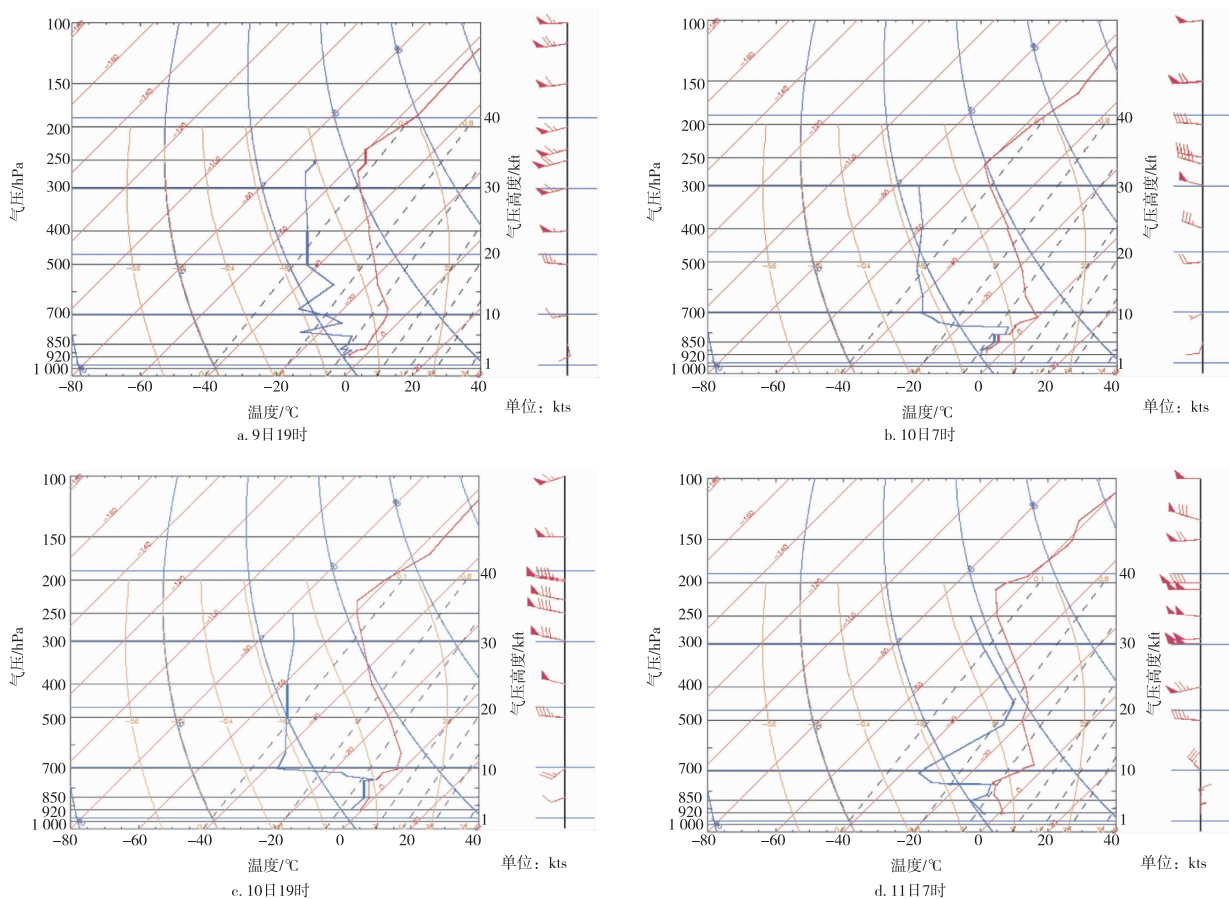


图1 太原站(53772)12月探空图(图中标注时间为世界时;红色曲线为温度廓线;蓝色曲线为露点廓线)

Fig. 1 The sounding plots of Taiyuan station(53772) 2009(the universal time is indicated in the plots; the red profile is for temperature and the blue one for dew point)

力加大到4级左右,近地层几百米内温度露点差增大,整层空气都为不饱和状态,贴地逆温层也抬升到750~680 hPa,雾开始消散。

1.2 后向轨迹

水汽对雾的维持非常重要.后向轨迹分析能较好地表示拉格朗日轨迹以及到达受体区域的空气团承的水汽量.用HYSPLIT4计算太原市48 h的后向轨迹,计算时间从2009年12月9日12时—11日20时(北京时).HYSPLIT4是一个单一粒子拉格朗日轨迹扩散模型,使用FNL(最终分析)气象存档数据来运行,该数据是全球数据同化系统(GDAS)的产品之一.存档的FNL气象场数据的分辨率是190 km.在每条水平轨迹末端的数字(图2)表示从12月9日20时—12月11日20时每隔12 h高度780 m处的计算结果.在雾形成前(12月9日20时,轨迹1),空气团的输送方向开始由北方转为南方,雾过程中(10日,轨迹2和3),到达山西的空气团全是来自南方,表明暖湿空气被输送到雾区.从11日8时起,后向轨迹(轨迹4、5)的方向急剧变化,转变为来自蒙古高原,意味着干冷空气被输送到雾区.来自蒙古高原的轨迹不仅干冷,而且移动速度快,导致了大风和雾的消散。

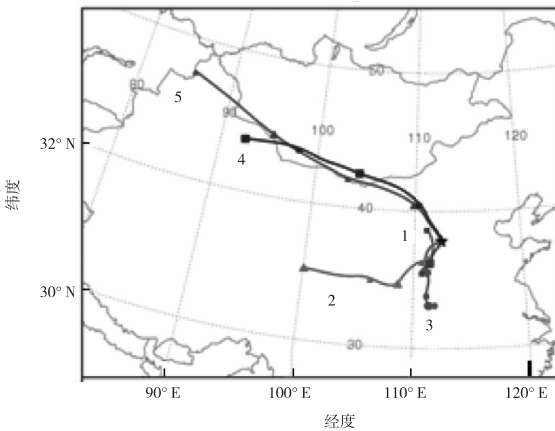


图2 太原市48 h后向轨迹

Fig. 2 The 48 h back trajectories of air parcels ending at Taiyuan

可见,此次雾过程是由于空气中水汽充足,风力小,夜晚的辐射冷却导致空气饱和形成,南方的暖湿空气源源不断地补充使得雾得以维持30多个小时,而干冷的北风是雾消散的原因。

2 模式方案设计和初始化

The model configuration and initialization

使用PSU/NCAR的三维非静力平衡中尺度数

值模式MM5(Version3.7)^[25],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太原市(112.55°E,37.78°N),采用双向嵌套(图3).大、小区域(分别用DO1和DO2表示)的格点距离分别为27 km和9 km,格点数分别为64×52、115×100,使得大区域能覆盖中国华北地区,小区域能够覆盖山西省。

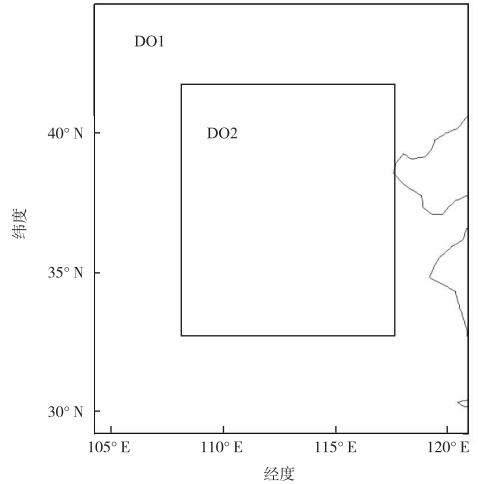


图3 模式嵌套区域

Fig. 3 Nested model domains

在垂直方向上分26个完整的Sigma层($\sigma = 1.000, 0.999, 0.994, 0.9875, 0.970, 0.960, 0.950, 0.940, 0.930, 0.920, 0.910, 0.900, 0.895, 0.885, 0.875, 0.865, 0.855, 0.845, 0.835, 0.800, 0.700, 0.600, 0.500, 0.400, 0.300, 0.200, 0.100, 0$),在半Sigma层上计算水平风分量和热力学变量,在完整的Sigma层上计算垂直速度.为了提高边界层内的垂直分辨率,采用上疏下密的方式,其中1.5 km以下有16层,以捕捉边界层内的湍流过程.最低的模式层位于10 m左右,可以代表地面以上最低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。

在山西省气象局现行的MM5模式中的积云对流参数化方案选用Grell方案,下垫面采用多层土壤温度模式.辐射方案选择云方案,它较为复杂,足以说明长短波与显云和晴空之间的相互作用,该方案除了提供地面辐射通量外,也提供大气温度的变化倾向.水汽方案为Schultz方案,它是一个高效的简化方案,包含了冰和霰/雹过程,该方案运行较快且宜于在实时预报系统中调试.在PBL方案上,选用高分辨率的Blackadar方案.用NCEP 6 h一次的 $1^\circ \times$

1° FNL 资料作为初始条件和边界条件,并用来自 MICAPS 站点的每天两次的探空和 3 h 一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 9 日 20 时(下文除特别说明均为北京时间)为初始时刻,模拟时间为 48 h,时间步长为 78 s,模拟结果每小时输出一次.

3 模式评价

Model evaluation

3.1 雾水的水平和垂直分布

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,各地区雾中水质量分数的平均值为 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-6}$ ^[26],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 0.01×10^{-6} 为雾区下界.

从实况图(图 4a)上可以看出,10 日 8 时山东大部,河北中部和南部,河南大部,山西和陕西南部观测到有雾,其中山西和河北中南部,山东西北部出现了浓雾天气(图示为 ≡). 模拟的雾区范围(图 5a)与实测一致. 山西的中东部与河北交界处,河南西北部,湖北北部都出现了液态水质量分数的极大值 0.4×10^{-6} ,与此相对应的是站点的能见度为 0. 内蒙

古北部出现了虚假的雾区,可能与该地区位于模式边界有关.

与 10 日相比,11 日 2 时(图 4b)雾区的范围已缩小到河南局部,山西的中东部,其他地区雾的强度也大大减弱,由浓雾转为轻雾. 模拟的(图 5b)雾区范围与实测吻合,液态水质量分数的极大值 (0.4×10^{-6}) 位于山西中东部,与此对应的是该地区站点的能见度为 0.

可见,模式能较准确地表现了雾区的分布,模拟的液态水含量处于合理的范围内,因此,对此次罕见浓雾过程的模拟是成功的.

图 6 为模拟的太原机场(112.63°E,37.75°N)液态水质量分数的时间-高度剖面. 10 日 7 时左右雾层爆发性增长,雾顶位于 0.975σ 层(约 200 m),但模拟的雾顶比实测值(图 1b)低很多. 对于 11 日 7 时雾层的抬升,模式则没有反映. 同时注意到,模拟结果显示在 2 d 的时间里太原市的雾有明显的生消过程,均为夜间起雾,午时左右消散,而观测显示,太原雾过程持续了 30 多个小时,中间不曾间断(图 7). 由于太原市处于采暖期,空气中的污染物较多,再加上深厚逆温层的存在,同时风力较小,这就使得近地面层的污染物聚集不易扩散,从而导致水平能见度降低,但午时空气中的含水量已经很低($H_R < 80\%$ 且温度露点差 $> 5^\circ\text{C}$),因而模式模拟的结果为雾已消散.

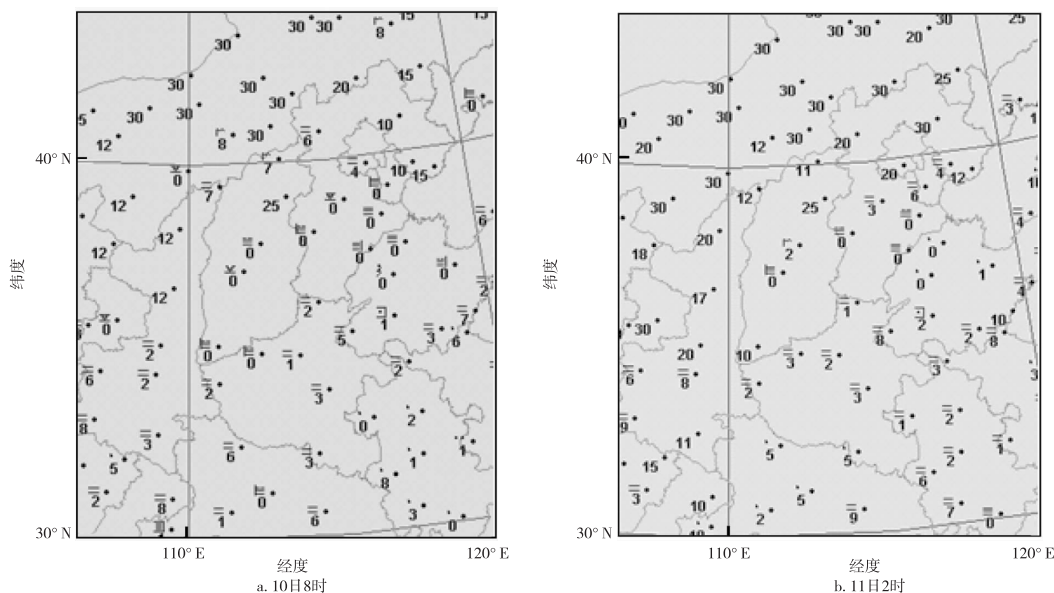


图 4 10 日 8 时、11 日 2 时实测能见度(数字,单位:km)与雾区(≡表示浓雾;=表示轻雾)

Fig. 4 The Vis (indicated by the figures; km) and fog regions(≡ for heavy fog and = for light fog) observed at 8:00 on December 10 and at 2:00 on December 11

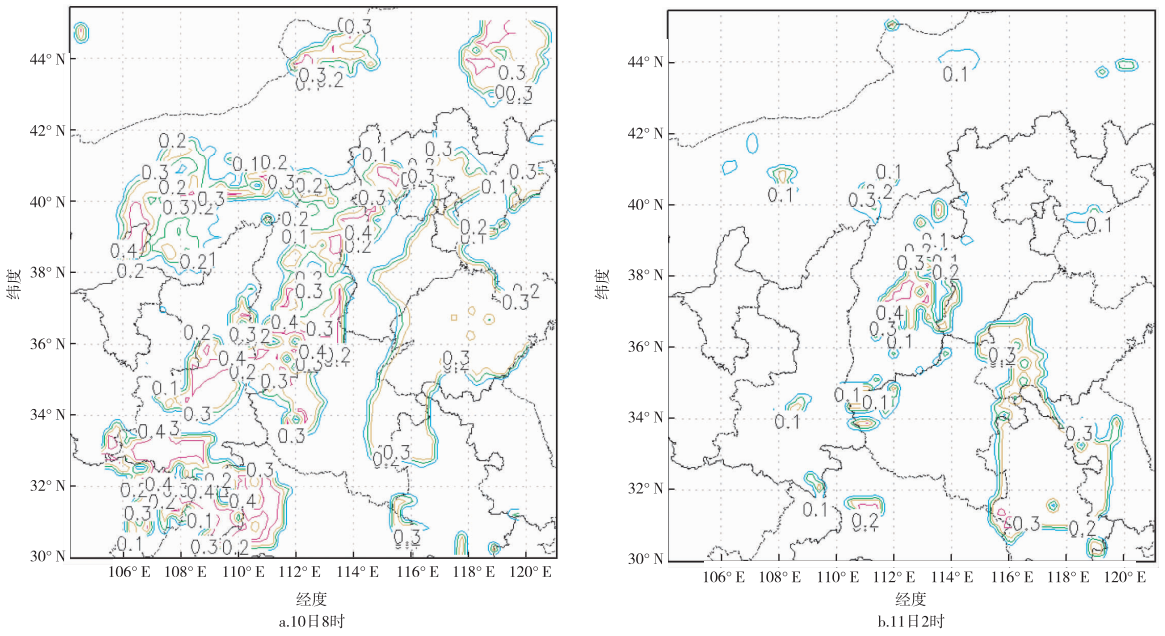


图5 10日8时、11日2时模式模拟的20 m处的液态水质量分数 ($\times 10^{-6}$) 的分布
Fig. 5 The simulated cloud liquid water ($\times 10^{-6}$) at 8:00 on December 10 and at 2:00 on December 11

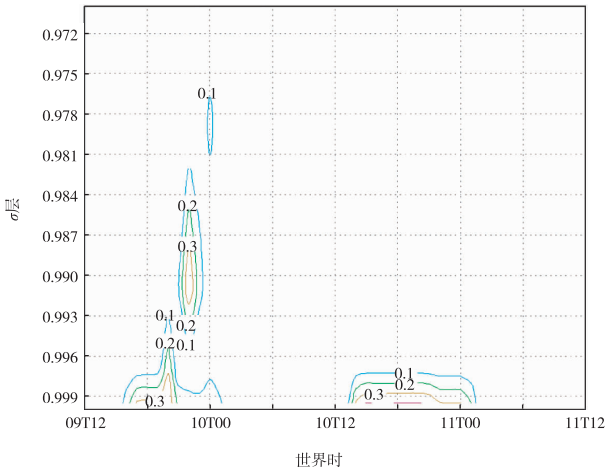


图6 模拟的太原机场2009年12月液态水质量分数 ($\times 10^{-6}$) 的时间-高度剖面

Fig. 6 The time-height cross-section of simulated cloud liquid water ($\times 10^{-6}$) at Taiyuan airport in December 2009

3.2 地面层气象要素

众所周知,地面层的风场和温度场是影响雾形成和维持的两个要素^[27],同时雾是水汽在近地层凝结的产物,形成雾时大气应该是饱和的,因此相对湿度也是表征雾的一个重要的物理量.在本文中,太原机场1 h一次的风场资料、温度和相对湿度用于评估模式在地面气象场的表现.在11日8时之前,地面风速大多在2 m/s左右(图8a),而模拟的风速比

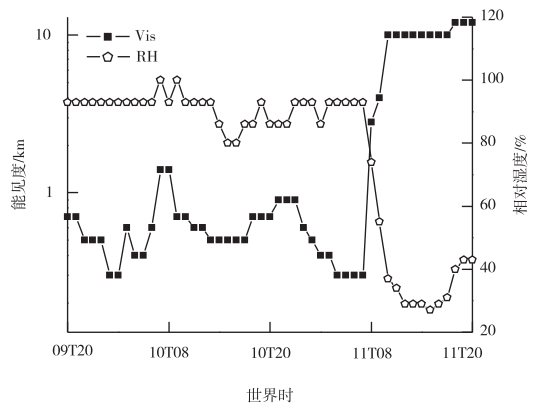


图7 实测的太原机场2009年12月能见度与相对湿度的时间序列

Fig. 7 The time series of the visibility and relative humidity at Taiyuan airport in December 2009

实测值偏大1 m/s左右,在11日8时之后又比实测值偏小1 m/s左右.从9日夜里到11日7时,风向以南到西南风为主,与后向轨迹一致,到了8时,风向转为北风,而模式准确地捕捉到这一风向的转变(图8b).

模拟的太原机场的温度在白天与实测基本一致,但在夜间均比实测值偏低2~3℃.模拟的湿度的变化倾向与实测基本一致,在夜间达到100%,比实测值偏高.之前的研究^[28-29]指出,MM5模拟中的偏冷偏湿现象是模式中设定的地面可用水汽量

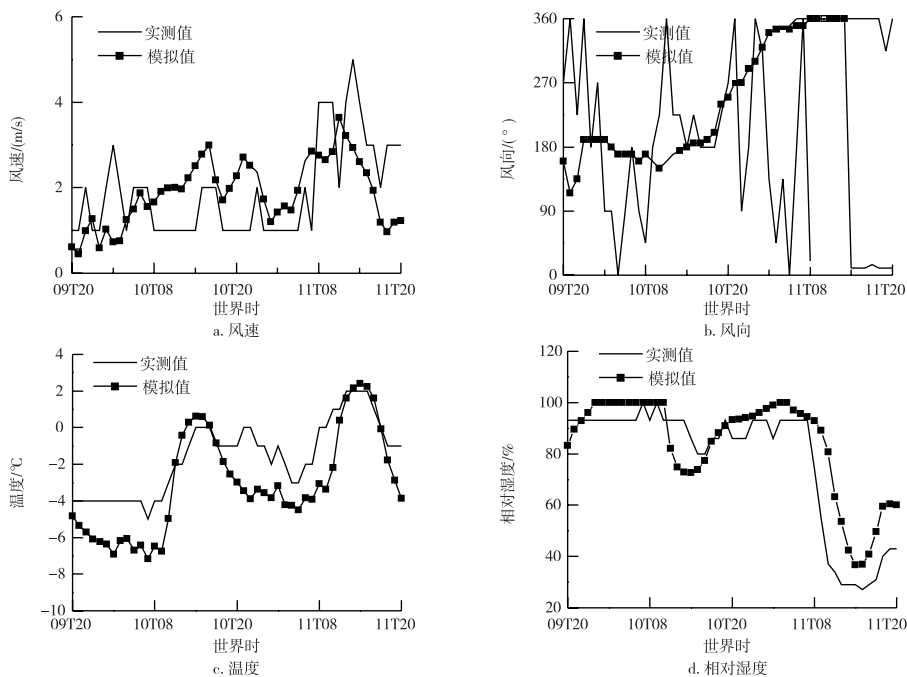


图8 2009年12月太原机场的地面风速、风向、温度和相对湿度

Fig. 8 The wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity near surface at Taiyuan airport in December 2009

(MA)不准确所致,尤其是在冬季. 山西省气候中心发布的2009年12月气候评价指出,山西省12月的降水比常年同期偏少,全省平均降水量为2 mm,较常年偏少近五成,为近十年以来同期第4少雨年. 而模式中较高的MA导致了温度和相对湿度与实测有一定的偏差,在之后的预报工作中,需要对MA进行必要的调整,使之符合山西省的实际情况.

4 能见度预报

The forecast of visibility

由于在MM5中没有明确地针对能见度的预报或诊断方程,需要使用后处理算法来诊断模式模拟的气象变量的数值. 与NWP一样,MM5也没有考虑空气中粒子数浓度的影响,因此本文采用NWP中常用的Vis-LWC和Vis-RH参数化方案来计算能见度(表1).

表1 不同的能见度参数化方案的表达式

Table 1 The expressions of different Vis parameterization

参数化方案 ^[21,31]	条件
$L_{Vis,K} = 0.027 \times q_{LWC}^{-0.88}$	所有雾类型
$L_{Vis,RUC} = 60 \exp(-2.5 \times (H_R - 15)/80)$	$30\% \leq H_R \leq 100\%$

4.1 Vis-LWC

Vis-LWC参数化方案基于可见光的消光系数,该系数是云水(包括雾)的质量浓度的函数. 该方案估算的能见度如图9a所示,设定能见度的上限为10 km. 当模拟结果显示液态水存在时,该方案估算的能见度与实测值较一致. 当模式结果显示液态水接近0或消失时,由于实际大气中烟煤颗粒物的比例较高,粒子数浓度的消光对能见度的影响不可忽略,实测的能见度仍然低于1 km,但该方案估算的能见度则为10 km,远大于实测值. 空气中的粒子可以通过2种途径减少能见度^[21]: 1) 减少平均下落末速度来减少液态水的沉降; 2) 当液态水含量为一定值时,粒子数量的增加会导致消光系数的增加. Gulpepe等^[31]建议,雾的能见度的参数化方案必须包括粒子数浓度,否则能见度预报的不确定性将超过50%. 因此在山西这样污染比较重的地区采用该方案来估算能见度具有很大的局限性.

4.2 Vis-RH

Vis-RH参数化方案是晴空条件下基于近地面层相对湿度的算法,在快速更新循环(RUC)^[30]系统中,预先设定当相对湿度为95%时,能见度为5 km. 该方案估算的能见度较实测值明显偏大4~5 km左右(图9b),原因是预设的能见度值偏大,而

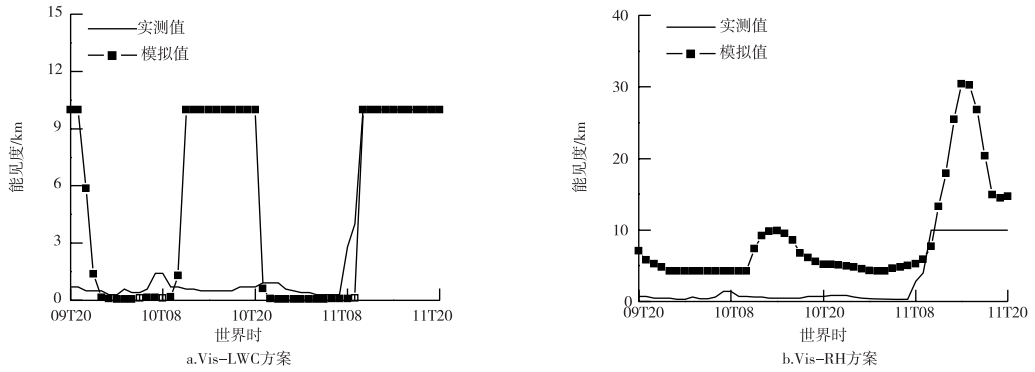


图9 采用 Vis-LWC 方案和 Vis-RH 方案估算的 2009 年 12 月能见度与实测的能见度对比
Fig. 9 The comparison of Vis obtained from observation and estimation by Vis-LWC parameterization and Vis-RH parameterization respectively in December 2009

在实测中,当太原机场的相对湿度达到 93% 时,能见度维持在 0.3 ~ 1 km 之间. 在 RUC 模式中根据表达式计算可得:当 $H_R < 70\%$ 时, $L_{Vis} > 10$ km,雾基本消散. 但根据太原机场 2009 年冬季的能见度、相对湿度的统计结果表明,当 $40\% < H_R < 70\%$ 时, L_{Vis} 仍可维持在 1 ~ 10 km 之间. 但是应该注意到,该方案对能见度的变化趋势的预报是比较准确的. 因此,需要根据山西的实际气象条件,对该方案进行修订,使得其估算的能见度更加准确.

4.3 对 Vis-RH 的修订

用太原机场 2009 年冬季(11 月、12 月和 2010 年 1 月)半小时观测一次的能见度和相对湿度数据对 Vis-RH 进行修订(图 10),表达式为

$$L_{Vis} = 26.12263 \times \exp(-0.03052 \times H_R). \quad (1)$$

其中, $20\% \leq H_R \leq 100\%$. 用该关系式对此次雾过程的进行能见度预报,结果如图 11 所示. 很明显,修订后的 Vis-RH 关系式估算的能见度与实测值更加接近. 除了少数时间段之外(10 日午后和 11 日午后)其预测值较修订前有了明显的改善,估算的能见度与实测的差值范围均在 1 km 以内.

Bergot 等^[32]指出能见度预报的难点在于准确表现大气的初始状态. 对于地面常规资料,如 2 m 处的温度,相对湿度等时空分辨率高、测量准确;而影响雾的形成和发展的边界层结构的资料,如垂直探空廓线、辐射通量、云量等的时空分辨率较低或缺失^[33],导致模式在预报地面气象要素场,如地面温度、相对湿度、露点等的准确性较水汽凝结物如云水、云冰等高. 因此,使用 Vis-RH 参数化方案来预报能见度是可行的,可以为实际业务预报提供参考,同时亟需开展粒子数浓度的监测工作.

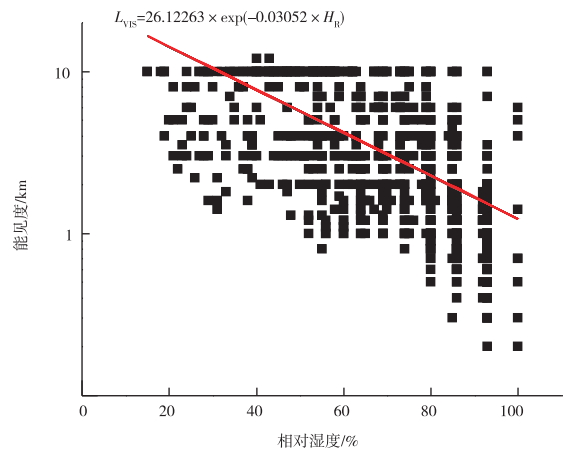


图 10 太原机场 Vis-RH 关系(斜线是对数拟合)
Fig. 10 Visibility(Vis) versus relative humidity measuring at Taiyuan airport(an fit to observations is given with solid line)

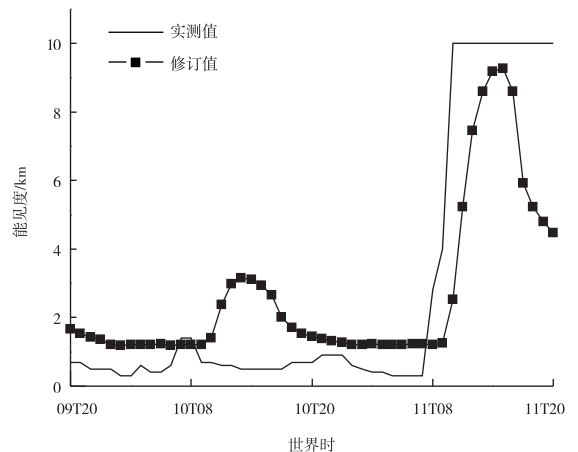


图 11 修订过的 Vis-RH 关系式估算的 2009 年 12 月能见度与实测的能见度对比
Fig. 11 The comparison of Vis obtained from observation and estimation by modified Vis-RH relationship in December 2009

5 结论

Conclusion

利用中尺度模式 MM5 对山西省 2009 年 12 月一场持续 30 多个小时的罕见雾过程进行模拟,结果表明:

1) 山西省局现行的 MM5 设计方案成功地模拟了此次浓雾过程,对雾区分布的模拟与实测结果基本一致,对浓雾中心的模拟也与实测吻合. 在气象要素场的模拟上,对风速的模拟存在少许偏差,但准确地表现了风向的转变. 模拟的温度和相对湿度的变化趋势与实测结果基本一致,但存在偏冷偏湿现象,这是由模式中设定的地面可用水汽量(MA)不准确造成的.

2) 山西省冬季污染较严重,空气中的粒子数对能见度的影响不可忽略,因此采用 Vis-LWC 的参数化方案估算能见度仅在浓雾阶段与实测较一致,有很大的局限性. 而由于 Vis-RH 参数化方案的预设值过大,导致其高估了能见度,但对能见度的趋势预报较准确. 根据太原机场的实测的气象资料对其进行修订后估算的能见度更加准确,可以为实际的业务预报提供参考.

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] 杨小萍,骆丽楠,张宏雨,等. 山西省雾的分析和预报[J]. 山西气象,2001(3):7-9
YANG Xiaoping, LUO Linan, ZHANG Hongyu, et al. Foggy analysis and forecast in Shanxi province[J]. Shanxi Meteorological Quarterly, 2001(3): 7-9
- [3] 马姝瑞. 大雾成灾暴露防灾薄弱环节[J]. 中国减灾,2008(1):3
MA Shurui. The weak link of disaster prevention exposed by the frequent fog events[J]. Disaster Reduction in China, 2008(1): 3
- [4] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspectives[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164: 1121-1159
- [5] Ballard S P, Golding B W, Smith R N B. Mesoscale model experimental forecasts of the Haar of northeast Scotland[J]. Monthly Weather Review, 1991, 119(9): 2107-2123
- [6] Pagowski M, Gultepe I, King P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 3-16
- [7] Kong F. An experimental simulation of a coastal fog-stratus case using COAMPS model[J]. Atmospheric Research, 2002, 64(1): 205-215
- [8] 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):83-86

- FAN Qi, WU Dui, FAN Shaojia, et al. Numerical simulation of a heavy fog in Guangzhou[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(1): 83-86
- [9] 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
- [10] 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 Science Edition, 2007, 29(2): 167-172
- [11] 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 Science Edition, 2005, 6(4): 404-408
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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 enumbra[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(2): 175-184
- [15] 傅刚,王菁茜,张美根,等. 一次黄淮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 Qingqian, ZHANG Meigen, et al. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow sea on 11 April, 2004[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(5): 720-726
- [16] 傅刚,张涛,周发琇. 一次黄淮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
- [17] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38: 385-404
- [18] Roquelaure S, Bergot T. Seasonal sensitivity on COBEL-ISBA local forecast system for fog and low clouds[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6/7): 1283-1301
- [19] Gultepe I, Milbrandt J A. Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(1): 36-46
- [20] Gultepe I, Isaac G. Visibility versus precipitation rate and relative humidity[C] // Amer Meteor Soc. Preprints, 12th Cloud Physics

- Conference, Madison, WI, 2006
- [21] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. *Journal of Climate Applied Meteorology*, 1984, 23(1):34-41
- [22] Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts [C] // Amer Meteor Soc. Preprints, 9th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, FL. 2000;31-36
- [23] 李清华, 何瀚原, 朱金花. 山西高速公路沿线大雾天气特征及预报服务[J]. *太原科技*, 2007, 50(3):50-52
LI Qinghua, HE Hanyuan, ZHU Jinhua. Foggy weather feature and forecast along the line of Shanxi speedway [J]. *Taiyuan Science and Technology*, 2007, 50(3):50-52
- [24] 中国天气网. 太原大雾持续 30 小时, 今晚冷空气到来大雾消散 [EB/OL]. (2009-12-11) [2010-03-26]. <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20091211/164269.shtml>
Chinese Weather Net. The dense fog in Taiyuan had lasted 30 hours, and the cold airmass will arrive tonight to clear the fog [EB/OL]. (2009-12-11) [2010-03-26]. <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20091211/164269.shtml>
- [25] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [M]. NCAR Tech Note NCAR/TN-398 + STR, 1994;121
- [26] 张利民, 石春娥, 杨军, 等. 雾的数值模拟研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2002
- ZHANG Limin, SHI Chune, YANG Jun, et al. The numerical simulation study on fog [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002
- [27] Shi C, Yang J, Qiu M, et al. Analysis of an extremely dense regional fog event in Eastern China using a mesoscale model [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 95(4):428-440
- [28] Zhong S Y, Fast J. An evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta models at subkilometer resolution using VTMX field campaign data in the Salt Lake valley [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131:1301-1322
- [29] Manning K W, Davis C A. Verification and sensitivity experiments for the WISP94 MM5 forecasts [J]. *Weather and Forecasting*, 1997, 12(4):719-735
- [30] Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts [C] // Amer Meteor Soc. Preprints, 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, FL. 2000;31-36
- [31] Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm fog applications in numerical weather prediction models [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(11):1469-1480
- [32] Bergot T, Carrer D, Noilhan J, et al. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study [J]. *Weather and Forecasting*, 2005, 20:627-646
- [33] Benjamin G S. An hourly assimilation forecast cycle: The RUC [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(2):495-518

The numerical simulation of visibility during the fog in Shanxi province in winter

LIN Yan¹ YANG Jun¹ BAO Yansong¹ WANG Zhijuan² DAI Youxue²

1 Key Laboratory of Atmospheric Physics and Atmospheric Environment,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Linfen Meteorological Bureau, Linfen 041000

Abstract An unusual dense fog event, occurring in Shanxi province in winter and lasting more than 30 hours, was simulated by a mesoscale model MM5. The results showed that the fog regions simulated by the current configuration of MM5 used in Shanxi Meteorological Bureau was consistent with the observations, but the liquid water content was overestimated in generally. Corresponding with that, the temperature near surface had a cold bias and the relative humidity had a positive bias. Due to the severe air pollution in Shanxi, the influence of particles on the visibility couldn't be ignored, the visibility was underestimated by the Vis-LWC parameterization than the observation. Though the Vis-RH parameterization overestimated visibility than observation, it could predict the actual tendency of visibility. The revised Vis-RH parameterization by actual observation values of Taiyuan Airport was more accurate, which can provide reference for visibility forecast.

Key words fog; numerical simulation; visibility; parameterization