

何晖, 金华, 刘建忠, 等. 2009. 北京地区一次辐射雾的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 390–398. He Hui, Jin Hua, Liu Jianzhong, et al. 2009. Simulation and analysis of a radiation fog event in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 390–398.

北京地区一次辐射雾的数值模拟

何 晖^{1,2,3} 金 华² 刘建忠² 张天明⁴ 高燕虎⁵

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 北京市观象台, 北京 100089

5 北京市气象局气候中心, 北京 100089

摘 要 利用非静力中尺度模式 MM5V3 对 2006 年 11 月 20 日北京地区的一次大雾天气过程进行了数值研究。模拟结果与极轨卫星监测图像以及十二通道微波辐射计观测资料的对比表明, 模式对此次雾的模拟是比较成功的, 尤其是在雾区的分布位置、雾的高度以及雾的维持时间等方面。针对不同的云物理方案、长波辐射项、短波辐射项以及模式的垂直分辨率进行了 4 组敏感性实验。结果表明, 地面的长波辐射冷却促使辐射雾的形成, 而短波辐射的加热是辐射雾消散的主要原因。另外, 增加模式的垂直分辨率以及选取更加详细的云微物理方案可以使模式模拟的辐射雾的结果有明显的改善。

关键词 辐射雾 数值模拟 微波辐射计 液水含量

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0390-09 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Simulation and Analysis of a Radiation Fog Event in Beijing Area

HE Hui^{1,2,3}, JIN Hua², LIU Jianzhong², ZHANG Tianming⁴, and GAO Yanhu⁵

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4 *Beijing Weather Observatory, Beijing 100089*

5 *Beijing Climate Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089*

Abstract A radiation fog on 20 November 2006 in Beijing area is simulated and diagnosed with MM5 nonhydrostatic model. By contrasting the image of the NOAA satellite with the observation data of radiometer, the results showed that the MM5 could well simulate this fog event, especially in simulating the fog area, the height and the duration of the fog. Furthermore, aiming at explicit moisture scheme, longwave radiation, shortwave radiation, and vertical resolution, four sensitivity experiments were performed. The results show that longwave radiative cooling is an important factor of the formation of the fog, while the shortwave radiative warming is an important factor of the fog dispersal. In addition, the results were obviously improved by increasing the vertical resolution or using more complicated explicit cloud scheme.

收稿日期 2008-04-02 收到, 2009-04-20 收到修定稿

资助项目 国家“十一五”科技攻关项目 2006BAC12B04、公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806001-1

作者简介 何晖, 男, 1977 年出生, 博士研究生, 工程师, 主要从事云降水物理研究。E-mail: hehui@bjmb.gov.cn

Key words radiation fog, numerical simulation, microwave radiometer, liquid water content

1 引言

雾是在特定天气背景之下形成的一种局地性天气现象, 它主要发生在近地面层, 对人类活动有很大的影响。研究雾主要是为了揭示近地面大气中的各种物理现象和物理过程, 观测实验和数值模拟是其主要手段。国外学者如 Brown (1980)、Turton et al. (1987)、Duynkerke (1991) 等相继对雾进行了数值模拟研究, 并和观测做了详细的对比。1980 年以来, 国内学者利用二维和三维数值模式开展了雾的数值模拟研究, 得到了很多有意义的研究成果。樊琦等 (2004) 利用三维中尺度数值模式 MM5 对广州地区的辐射雾进行了数值模拟研究。李元平等 (2007) 利用三维中尺度模式 WRF 对北京的一次平流雾进行了数值模拟研究。董剑希等 (2006) 利用中尺度模式 MM5 对北京的一次辐射雾进行了数值模拟研究。这些研究表明, 利用中尺度数值模式对雾生消过程进行模拟是有发展前景的。

本文采用非静力平衡中尺度数值模式 MM5V3 结合极轨卫星监测图像以及十二通道微波辐射计的观测资料, 对 2006 年 11 月 20 日北京的一次大雾天气过程进行数值模拟研究和敏感性实验, 以进一步了解中尺度数值模式对辐射雾的模拟能力以及对辐射雾生消有明显影响的物理过程。

2 模式、资料以及实验方案

本文所用的十二通道微波辐射计资料来源于北京市气象局从美国 Radiometrics 公司引进的十二通道 TP-WVP3000 微波辐射计的观测资料, 该微波辐射计安装于北京市气象局南郊观象台一个两层高的楼顶上, 观测点的经纬度为 (39.8°N , 116.47°E), 观测点位置距地面大约 6 m, 在本文中用该位置的测值代替地面的测值。微波辐射计的观测原理是利用大气对微波具有选择吸收和透明 (即所谓大气窗) 的特性, 依据基尔霍夫定律反演大气的水汽廓线和温度廓线, 同时从观测云液态水对大气光谱特性的贡献来推算云液态水廓

线。该辐射计采取被动式遥感, 采用防水材料的天线罩及鼓风机以去除降水液态水的影响, 从而可以在任何天气下实时获取从地面到 10 km 高的温度、水汽和液态水的垂直分布, 采样频率为每分钟一个数据。

本文使用 PSU 和 NCAR 的三维非静力平衡中尺度数值模式 MM5V3, 该模式的动力学框架与物理过程都比较完善, 提供了多种参数化方案, 适合于研究各种不同的天气过程。本文采用 Grell 对流参数化方案, 侧重模式底部边界层刻画的 Blackadar 高分辨率边界层方案, 混合相微物理显式方案 (Mix phase), 以及 RRTM 辐射计算方案。

模拟的范围如图 1 所示, 模式采用了三重嵌套, 格距分别是 27、9 和 3 km, 垂直方向为 23 层, 模式顶层为 100 hPa。模拟的中心点设在接近于微波辐射计观测点的 (40.0°N , 116.5°E), 其中 3 km 水平分辨率的模拟只用了混合相微物理显式方案 (Mix phase), 而没有运用 Grell 对流参数化方案。利用 NCEP 的 6 h 一次的再分析资料启动模式, 模拟开始时间为 2006 年 11 月 19 日 8 时 (北京时间, 下同), 共运行 48 h。

为了了解不同的云微物理方案、长波辐射项、短波辐射项、垂直分辨率对这次辐射雾形成和发展的影响, 我们进行了 4 个敏感性实验, 将数值预报实验称为控制实验。第 1 个敏感性

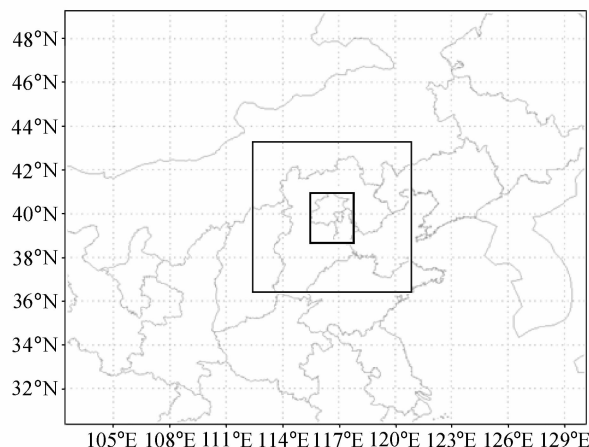


图 1 模拟研究的区域范围

Fig. 1 Spatial domain for model experiments

实验（敏感性实验 1），选择了云微物理方案 Resiner2；第 2 个敏感性实验（敏感性实验 2），在 MM5 模式中垂直层数采用了 32 层；第 3 个敏感性实验（敏感性实验 3），去掉了长波辐射项；第 4 个敏感性实验（敏感性实验 4），去掉了短波辐射项。

3 天气实况

2006 年 11 月 19~21 日北京及其周边地区相继出现大雾天气。19 日 17 时北京、天津等地开始出现轻雾，20 时保定、石家庄等地发展成大雾，20 日 5 时北京、天津大雾，8 时大雾范围继续扩大，北京、天津、保定、石家庄等地均出现大雾天气，11 时北京地区雾的强度减弱，属于轻雾范畴，到 21 日 11 时北京一直维持轻雾天气，14 时北京雾消。从图 2a 可以看出，等值线比较平直，北京及其周边地区没有明显的槽脊活动。从图 2b 可以看出，北京地区南部中低层有明显的暖湿气流流向北京地区输送，这种形势为大雾的形成和维持提供了良好的水汽条件。另外，从 19~21 日的地面天气形势图（图略）上可以看出，连续几天华北地区气压场较弱，风力较弱，天气形势十分稳定。北京市气象局布设的微波辐射计的观测表明，这几天北京地区一直维持低温、高湿及逆温层结的特点。因此，这次大雾的主要原因是稳定的大气层结和较高的相对湿度以及地面的辐射降温，同时逆温层的维持使得大雾持续不散。此次大雾属于辐射雾。21 日 14 时前后，由于强冷空气的入侵，大雾的形成条件不再存在，于是大雾消散。

图 3 是北京气象局南郊观象台观测的自 2006 年 11 月 19 日 14 时至 21 日 14 时每 3 h 一次的能见度变化。由图 3 可见，从 19 日 14 时开始能见度逐渐降低，到 20 日 5 时降到最低值 800 m，20 日全天能见度都较低，除了 23 时达到 2.5 km 以外均维持在 2 km 以下，自 21 日 0 时开始，能见度逐渐改善，虽然在 8 时能见度出现一个较低值，但总体均明显改善，到 21 日 14 时能见度已达到 10 km，雾基本消散。可见此次雾的主体是在 20 日，本文也主要是针对 20 日雾的过程结合观测进行模拟研究。

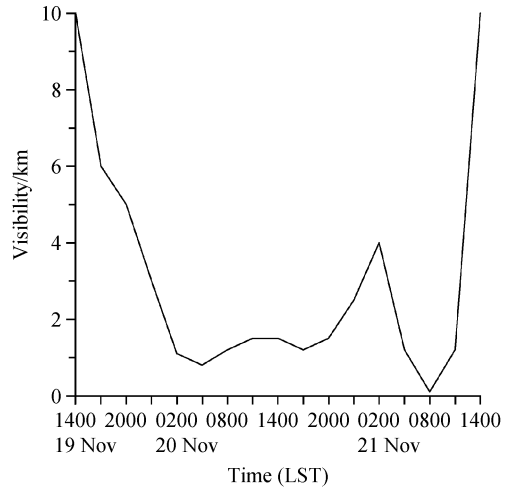


图 3 2006 年 11 月 19~21 日北京大雾期间能见度的变化

Fig. 3 Temporal variation of visibility during heavy fog period in Beijing

4 结果分析

首先对比分析了模式模拟的 2006 年 11 月 20 日 8、14 和 20 时 500 和 850 hPa 形势场，发现模式较好地模拟出对流层中下层的槽、脊位置和演变趋势（图略）。因此可以说模式对此次辐射雾过程的大尺度环流背景及影响系统的模拟是成功的。

气象观测对大雾的定义为：悬浮在贴近地面的大气中的大量细微水滴（或冰晶）的可见集合体，能见度小于 1 km。按照一般定义（Cotton et al., 1993），雾中液态含水量的范围为 $0.05 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，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，本文取液态水含量 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为雾区临界值。

图 4 是控制实验模拟的 2006 年 11 月 20 日 11 时 15 分及 13 时 18 分地面层雾中液态含水量的水平分布及相应时刻的极轨卫星大雾监测图像。通过对比可以看出 MM5 模式对北京地区的这次辐射雾过程模拟得比较好，模拟的雾区分布与实况基本一致。

图 5a 是由微波辐射计观测到的 2006 年 11 月 19 日 12 时至 21 日 8 时从地面至 2 km 高度的单站液水含量。可以看出，本次大雾开始时间为 20 日 0 时，结束时间大约为 21 日 2 时，雾区高度约 400 m，大雾较强时间段为 20 日 4 时至 12 时左右，其

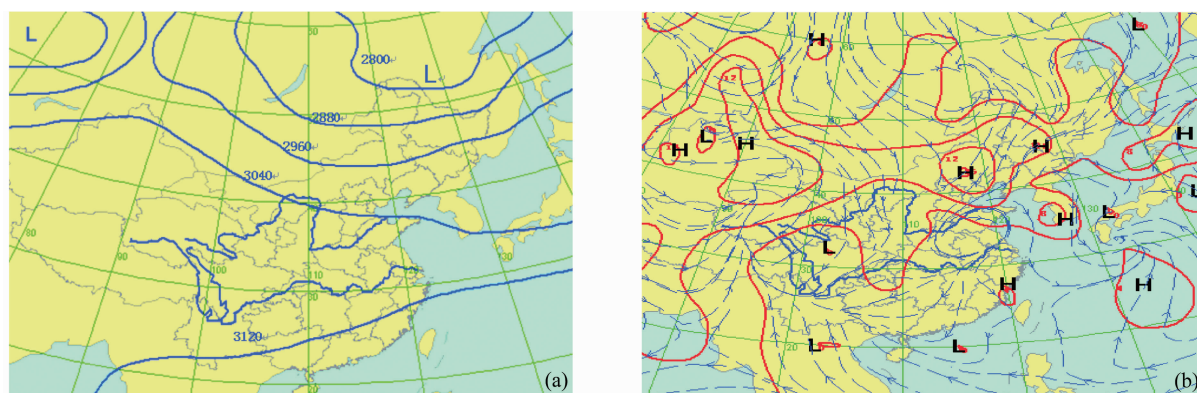


图2 2006年11月19日20时 (a) 700 hPa 位势高度场(单位: gpm) 以及 (b) 850 hPa 流场(蓝虚线) 和温度露点差(红实线, 单位: K)

Fig. 2 (a) The geopotential height field (gpm) at 700 hPa and (b) the streamline field (blue dashed line) and the difference between temperature and the dew-point temperature (red solid line, units: K) at 850 hPa at 2000 LST 19 Nov 2006

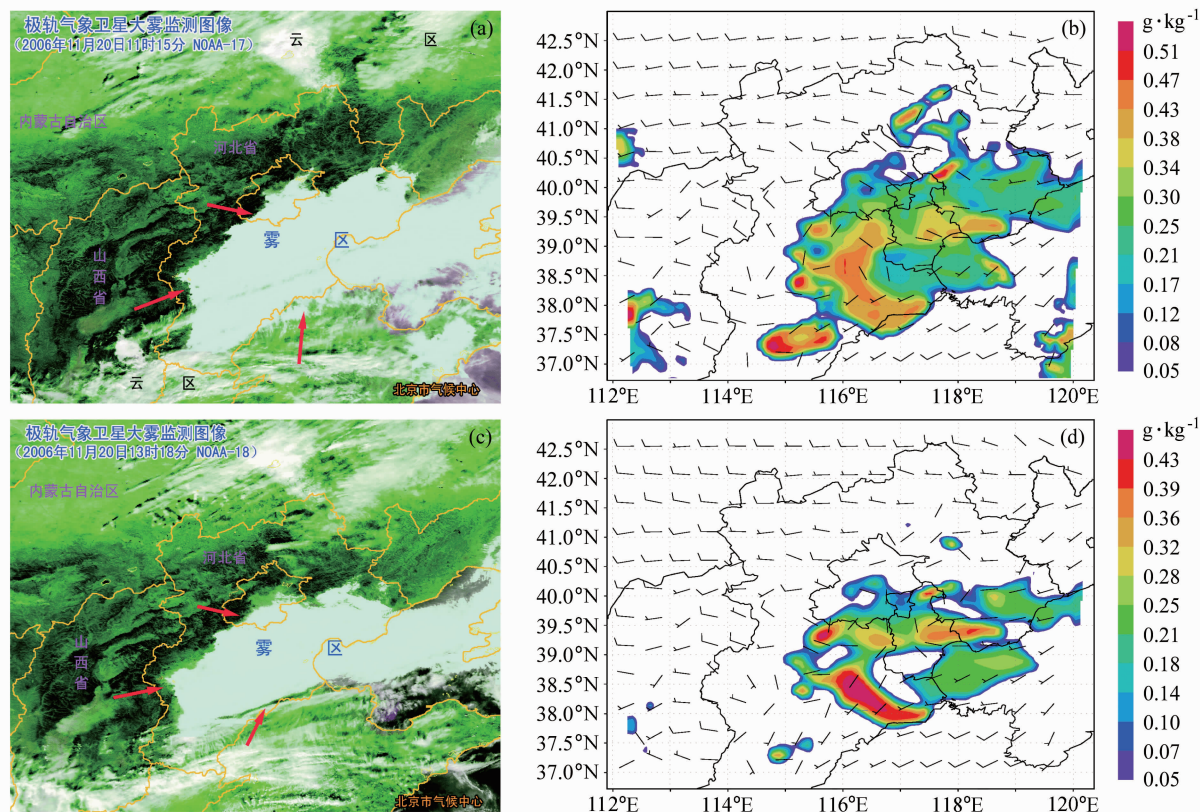


图4 2006年11月20日 (a、b) 11时15分和 (c、d) 13时18分 (a、c) 极轨卫星大雾监测图像和 (b、d) 模拟的地面层雾中液态含水量分布

Fig. 4 (a, c) The polar orbit meteorological satellite fog image and (b, d) the simulated liquid water content at (a, b) 1115 LST and (c, d) 1318 LST on 20 Nov 2006

中雾区最高含水量为 $0.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在20日6时, 这一观测结果与在本场进行的每3 h一次的能见度观测得出的5时能见度最差的观测结果基本一致。图5b是控制实验模拟的相应时段的液水

含量。由图可知, 模拟雾的起始时间与结束时间相对于实况偏晚, 高度相对于实况也偏低, 尤其是在20日3~6时左右。但出现最强雾的时段与实况基本一致, 最高含水量的值也是出现在6时

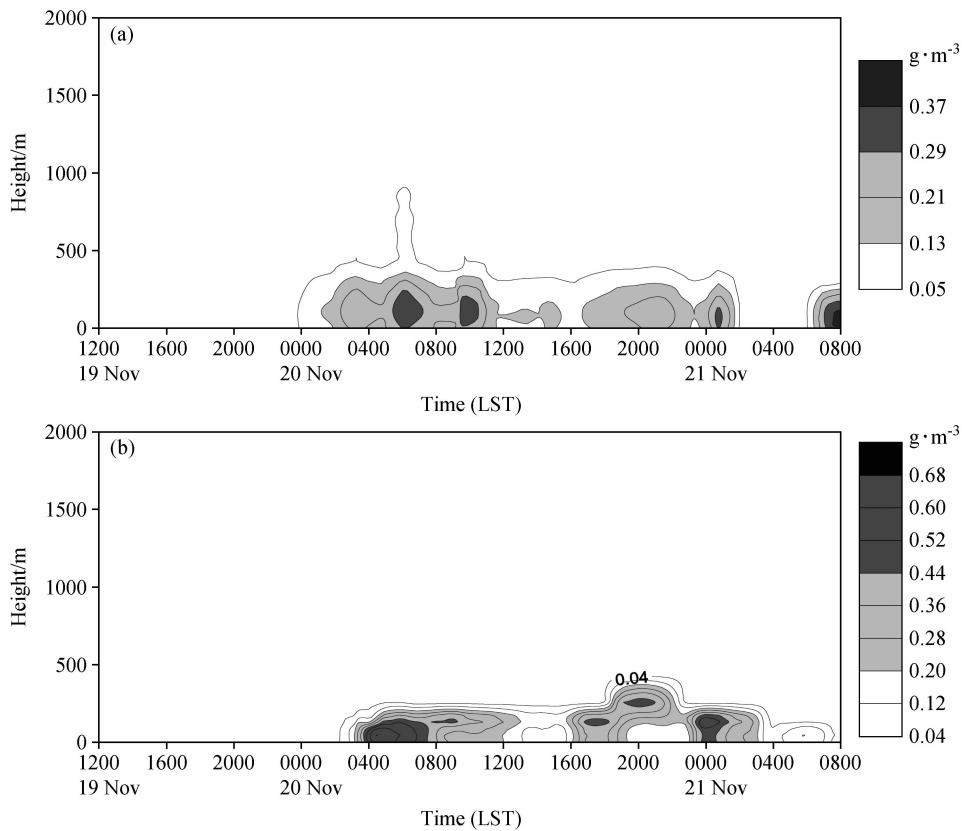


图5 (a)微波辐射计观测和(b)MM5模拟的2006年11月19日12时至21日8时从地面到2 km高度的单站(39.8°N, 116.47°E)液水含量

Fig. 5 The liquid water content from the surface to 2 km height at (39.8°N, 116.47°E) from 1200 LST 19 Nov to 0800 LST 21 Nov 2006; (a) Measured by microwave radiometer; (b) simulated by MM5 model

左右,模拟雾的强度明显大于实测雾,最高含水量达到了 $0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。模拟的结果与实况趋势基本一致。

图6a是由微波辐射计观测到的11月19日12时至21日8时从地面到2 km高度的单站相对湿度。可以看出,在20日全天本场的近地面层一直维持着较高的相对湿度,尤其是在大雾的维持时段,近地面层基本维持相对湿度100%。图6b是控制实验模拟的相应时段的相对湿度。模式也模拟出了近地面高湿度的现象,模拟的结果与实况基本一致。不足之处是高湿度区域的高度相对于实况稍偏低以及高湿的维持时间段相对于实况偏晚。

图7a是由微波辐射计观测到的自11月19日12时至21日8时从地面到2 km高度的相对湿度。可以看出在大雾的维持时间段,近地面的温度层结主要呈近中性,20日12时后,在雾顶以下的温

度层结依然呈现中性,在雾顶以上开始呈现较明显的逆温层结。图7b是控制实验模拟的相应时段的温度,和观测相比,模拟结果也显示在雾顶以下温度层结呈近中性,但在雾顶以上,模拟出了较实况更强的逆温层结,对应于雾顶高度的等温线模拟过于密集,这可能是和模式没有考虑边界层动力强迫的演变有关。但模拟的近地面层温度的演变趋势基本与实测一致,即19日12时至20日0时地面温度较高,20日0时以后近地面层温度开始降低,到21日4时后温度又逐渐升高。

5 敏感性实验分析

5.1 云微物理过程对模拟的影响

为了研究云微物理过程对模拟的影响,敏感性实验1采用了描述云雾微物理过程更加详细的Resiner2显式方案。图8是采用Resiner2显式方

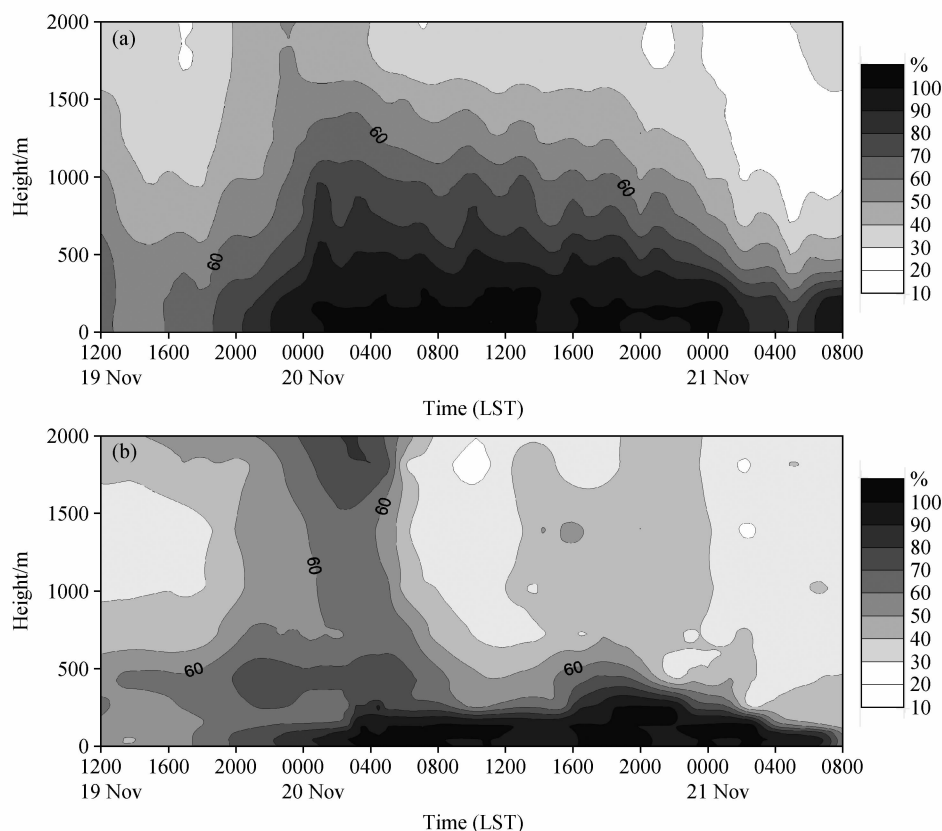


图6 同图5, 但为相对湿度

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for relative humidity

案模拟的此次大雾过程中 (39.8°N , 116.47°E) 处 2006 年 11 月 19 日 12 时至 21 日 8 时从地面到 2 km 高度的单站液态水含量, 与敏感性实验 1 模拟的液态含水量的最大值 ($0.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 比控制实验模拟的雾中液态水含量的最大值 ($0.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 减小了 $0.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

通过与微波辐射计观测的结果 (图 5a) 对比可以看出, 敏感性实验 1 模拟的结果更加理想。其原因可能是由于 Resiner2 方案在模拟雾的形成、发展和消散的微物理过程中考虑了更多、更复杂的微物理过程, 较控制实验所选用的方案更加符合实际。

5.2 模式垂直分辨率对模拟的影响

为了解模式垂直分辨率的变化对模拟结果的影响, 进行了敏感性实验 2, 在边界层内增加了 9 层, 主要增加近地面 250 m 以下, 垂直方向由原来的 23 层增加为 32 层, 新的 δ 层分别为: 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 和 0。图 9 是采用垂直方向的 32 层模拟的此次大雾过程中 (39.8°N , 116.47°E) 处 2006 年 11 月 19 日 12 时至 21 日 8 时的从地面到 2 km 高度单站液态水含量。模拟显示, 敏感性实验 2 模拟的液水含量最大值为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比控制实验模拟的雾中液态水含量的最大值 ($0.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 减小了 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。模拟的雾起始时间与实况一致, 雾区的高度较控制实验也更加接近实际观测, 模拟效果较控制实验有明显改善。

5.3 辐射对模拟的影响

很多研究 (如: Peter et al., 1991; Musson-Genon, 1987) 都表明辐射雾形成和发展的主要原因是地面的长波辐射冷却, 而辐射雾衰退的根本原因是太阳辐射对地面的加热和热量向大气的湍流输送。为了探讨辐射对雾形成和衰退的影响, 分别进行了 2 个敏感性实验, 即敏感性实验 3、4。

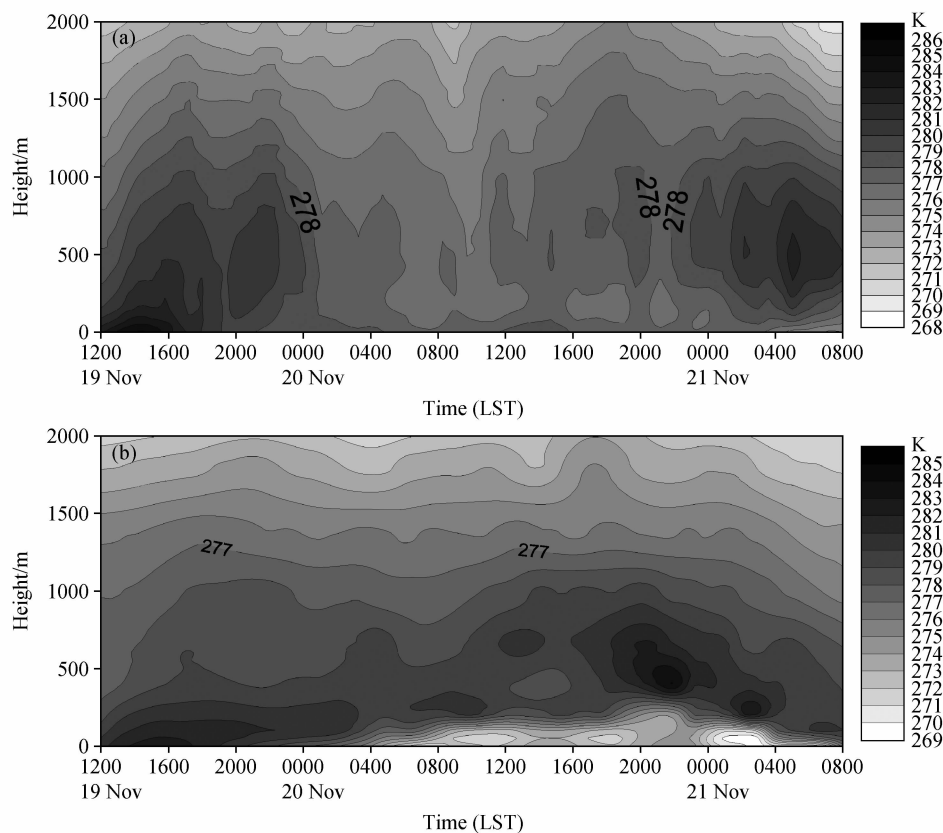


图7 同图5, 但为温度

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for temperature

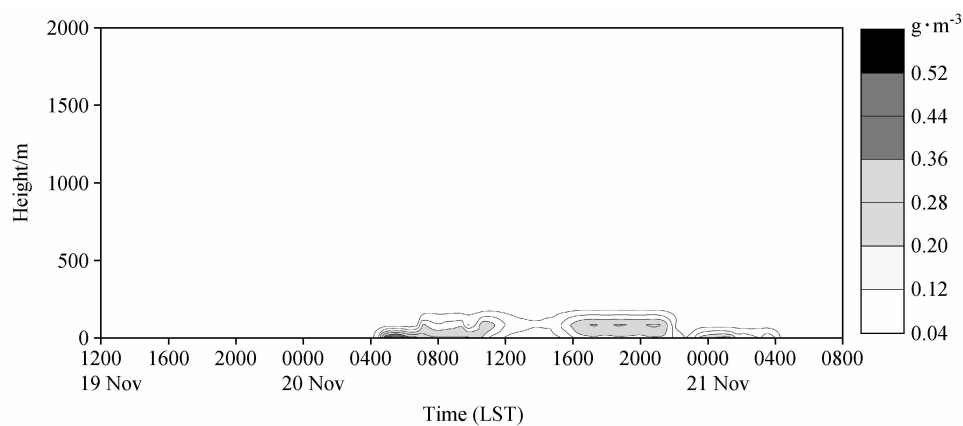


图8 同图5b, 但为敏感性实验1模拟

Fig. 8 Same as Fig. 5b, but simulated in sensitive experiment 1

敏感性实验3是在模式中去掉了长波辐射项, 但保留短波辐射项; 敏感性实验4是在模式中去掉了短波辐射项, 但保留长波辐射项。

去除长波辐射项后, 模式虽然也能够模拟雾的出现, 但雾出现的时间较控制实验推迟了近10 h才出现(控制实验出现雾的时间为11月19日

12时36分, 敏感实验3出现雾的时间为11月19日22时12分), 雾的强度与覆盖范围也减小了很多, 并且敏感性实验模拟的雾在11月20日11时左右基本消失, 比控制实验雾的维持时间也缩短了很多。图10a为去掉长波辐射项后模拟的11月20日10时24分的雾区分布图, 与控制实验模拟

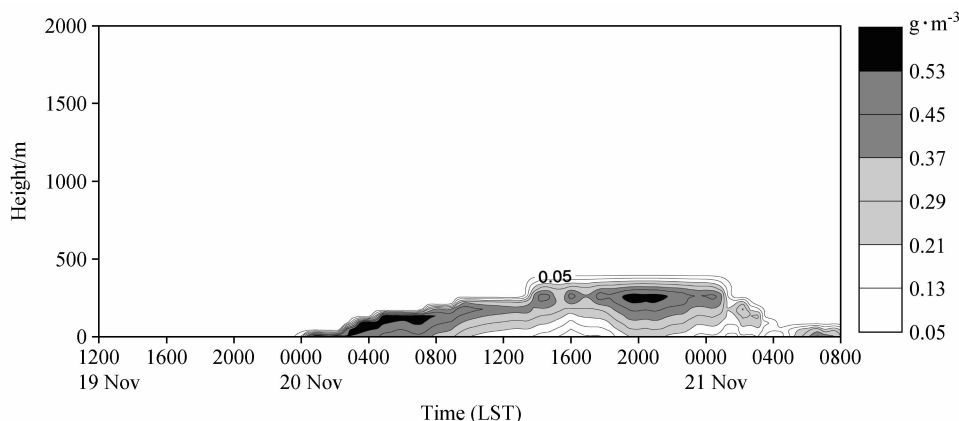


图9 敏感性实验2模拟的(39.8°N, 116.47°E)处11月19日12时~21日8时的从地面到2 km高度的单站液水含量的时间序列
Fig. 9 The simulated liquid water content from the surface to 2 km height at (39.8°N, 116.47°E) from 1200 LST 19 Nov to 0800 LST 21 Nov 2006 in sensitive experiment 2

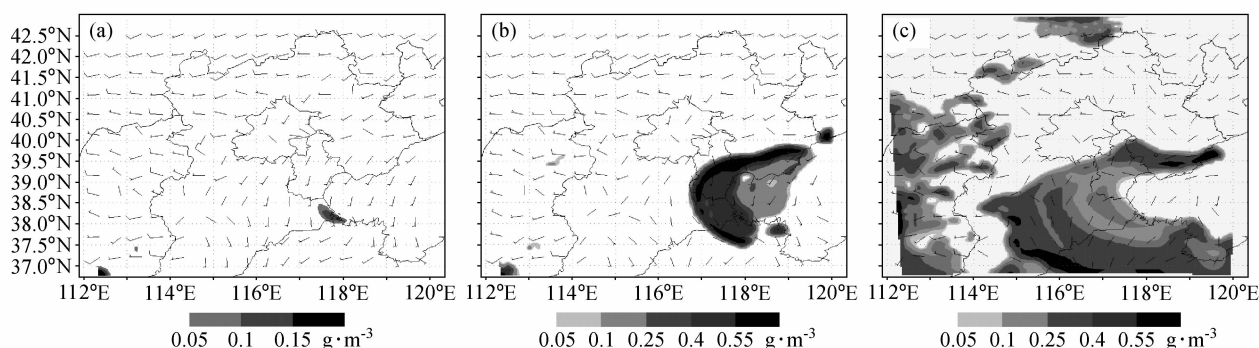


图10 模拟的2006年11月20日10时24分地面液态含水量分布:(a)敏感性实验3;(b)控制实验;(c)敏感性实验4
Fig. 10 The simulated liquid water content on the ground at 1024 LST on 20 Nov 2006: (a) Sensitive experiment 3; (b) control experiment; (c) sensitive experiment 4

的同时刻雾区分布图(图10b)比较可以看出,敏感性实验3模拟的雾区范围明显缩小。这说明由于没有地面长波辐射冷却直接导致没有贴地逆温层的形成,使近地面接近饱和空气很难发展成辐射雾,在敏感实验中去掉长波辐射后依然有雾的形成主要是由于连续几天大雾过程较复杂,此次过程虽然以辐射雾为主但同时存在平流雾、烟尘雾等其他因素的作用。

敏感性实验4模拟的雾的出现时间较控制实验提前了3 h(控制实验出现雾的时间为11月19日12时36分,敏感性实验3出现雾的时间为11月19日9时36分),模拟雾的强度与雾覆盖范围比控制实验也增加了很多,模拟雾的消散速度也明显比控制实验慢了很多。图10c为去掉短波辐射项后模拟的11月20日10时24分的雾区分布

图,与控制实验模拟的同时刻雾区分布图(图10b)比较可以看出,敏感性实验4模拟的雾区范围和雾的强度明显变大。这主要是由于地面不接受短波辐射,影响了地面升温,不能通过湍流将热量传给大气,雾滴也不会受热蒸发,所以导致雾的浓度偏高,雾滴消散也偏慢。这也可以看出太阳短波辐射是雾消散的主要因子。

6 结论

利用三维非静力中尺度气象模式MM5对北京地区一次辐射雾天气过程进行数值模拟,通过与极轨卫星云图以及十二通道辐射计观测比较可以看出,模式对此次雾的模拟是比较成功的,尤其是在雾区的分布位置、雾的高度以及雾的维持

时间等方面。

4 个敏感性数值实验探讨了云微物理过程、辐射项中短波辐射、长波辐射以及模式的垂直分辨率对辐射雾形成和发展的影响。从 4 个敏感性实验的模拟分析可以看出：

(1) 地面长波辐射冷却是辐射雾形成的主要机制，而太阳短波辐射则是辐射雾消散的主要原因。如果去除了长波辐射，辐射雾就很难形成；而去除了太阳短波辐射，辐射雾消散就要推迟很多。

(2) 增加模式的垂直分辨率以及选取更加详细的云微物理过程能使雾的模拟结果有明显改善。

参考文献 (References)

- Brown R. 1980. A numerical study of radiation fog with an explicit formulation of the microphysics [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (450): 781–802.
- Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 331–342. Cotton W R, Anthes R A. 1993. *Storm and Cloud Dynamics* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 331–342.
- 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 2006. 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*, 11 (2): 175–184. Dong Jianxi, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2006. Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (2): 175–184.
- 樊琦, 王安宇, 范绍佳, 等. 2004. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究 [J]. *气象科学*, 24 (6): 821–834. Fan Qi, Wang Anyu, Fan Shaojia, et al. 2004. Numerical simulation study of a radiation fog in the Pearl River delta regions [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 24 (6): 821–834.
- 李元平, 梁爱民, 张中锋, 等. 2007. 北京地区一次冬季平流雾过程的数值模拟分析 [J]. *云南大学学报*, 29 (2): 167–172. Li Yuanping, Liang Aiming, Zhang Zhongfeng, et al. 2007. Simulation and analysis of a winter advection fog in Beijing Area [J]. *Journal of Yunnan University (in Chinese)*, 29 (2): 167–172.
- Musson-Genon L. 1987. Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (4): 592–607.
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (2): 324–341.
- Turton J D, Brown R. 1987. A comparison of numerical model of radiation fog with detailed observation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113 (475): 37–54.