

何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174-1186.
He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174-1186.

北京一次大雾天气边界层结构特征及 生消机理观测与数值模拟研究

何晖^{1, 2, 3} 郭学良^{4, 1} 刘建忠² 金华² 娄淑娟²

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 中科院研究生院, 北京 100049

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 在对 2007 年 10 月 26 日北京大雾天气形势及能见度分析的基础上, 利用 12 通道微波辐射计、风廓线仪及 NOAA 极轨卫星监测资料与中尺度数值模拟结果, 比较研究了雾的分布区域、温度、湿度、风速及液态水含量的边界层分布特征。利用中尺度模式模拟结果探讨了此次大雾的维持和形成机理, 具体展现了此次大雾是在稳定大气层结、充沛水汽条件下, 地面长波辐射冷却及雾顶的长波辐射冷却降温形成发展的过程, 而太阳的短波辐射对雾的减弱消散有重要影响。

关键词 北京大雾 微波辐射计 数值模拟 垂直结构 机理

文章编号 1006-9895 (2009) 06-1174-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

Observation and Simulation Study of the Boundary Layer Structure and the Formation, Dispersal Mechanism of a Heavy Fog Event in Beijing Area

HE Hui^{1, 2, 3}, GUO Xueliang^{4, 1}, LIU Jianzhong², JIN Hua², and LOU Shujuan²

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 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract On the basis of Analysis of the synoptic situation and the visibility for the heavy fog event on 26 October 2007 in Beijing area, comparative analysis of the fog area, the boundary layer distribution characteristics of the temperature, humidity, wind speed, and liquid water content (LWC) is conducted with the observation data of the radiometer, wind profiler, satellite, and the simulation results. In addition, the mechanism of the fog formation, maintenance and dispersal is analyzed with the simulation results of a mesoscale model. The results indicate that the long-wave radiation cooling is the important factor of the fog formation in addition to the steady atmospheric stratification and plenty of moisture, while the fog dispersal was most influenced by the shortwave radiation.

Key words heavy fog, radiometer, numerical simulation, vertical structure, mechanism

1 引言

大雾是近地层中水汽凝结成水滴或冰晶使水平能见度小于 1 km 的危害性天气现象。大雾对航空、地面交通等均有重要的影响,这种影响随着社会经济的发展呈现日益显著的趋势。城市化发展及污染物排放都可导致区域环境边界层结构特征的改变,进而影响雾的形成和演变。

研究雾是为了揭示近地面大气中的各种物理现象和物理过程,观测试验和数值模拟是其主要手段(周小刚等,2004)。国内外对大雾的产生和维持机制进行了大量研究。国外学者在对雾过程进行观测试验的基础上,开展了大量雾的数值模拟研究工作,通过这些研究工作揭示了雾形成各种物理过程和机制。例如,Zdunkowski et al. (1969) 和 Brown et al. (1976) 通过模拟研究显示了雾顶的辐射冷却在雾的发展过程中的重要性,Brown (1980) 和 Mason (1982) 研究了辐射冷却对雾滴增长和雾滴谱改变方面所起的作用,Musson (1987) 着重研究了在雾形成和发展过程中湍流的重要性,Bott (1991) 研究了大气中不同气溶胶的成分对雾滴谱的分布以及能见度的影响。Duynderke (1991) 的模拟研究显示了不同地表植被类型通过改变地表的水汽和热通量对雾的形成有着重要的影响。

近些年来,随着数值模式的快速发展,国内利用二维和三维数值模式也开展了一些雾的数值模拟研究,所使用的模式主要为辐射雾模式(赵德山和洪钟祥,1981;周斌斌,1987;钱敏伟和雷孝恩,1990;尹球和许绍祖,1993;张利民和李子华,1993;石春娥等,1997;黄建平等,2000;孙学金,2000;周小刚等,2004)。在中尺度模式方面,主要偏重于针对降水及催化过程进行研究(李宏宇等,2006;洪延超等,2006;孙晶等,2006;史月琴等,2008;方春刚等,2009),近几年,也有一些学者开始利用中尺度模式对雾过程进行研究,樊琦等(2004)利用三维中尺度数值模式 MM5 对发生在广州地区的辐射雾进行了数值模拟研究,并利用敏感性数值试验探讨了长波辐射、短波辐射以及模式的垂直分辨率和不同的下垫面类型对辐射雾形成和发展的影响。李元平等(2007)利用三维中尺度模

式 WRF 对发生在北京的一次平流雾进行了数值模拟研究,分析了平流雾的发生、发展和消散机制,结果表明,北京地区的偏东南风将暖湿空气向西北推进,遇到较冷的下垫面冷却饱和凝结形成了此次平流雾。持续且不强的偏南风是雾维持的原因之一。冷空气的入侵导致了大雾的消散。董剑希等(2006)利用中尺度模式 MM5 对发生在北京的一次辐射雾进行了数值模拟研究,分析了雾形成和维持的机制,讨论了雾发生发展阶段的物理过程。史月琴等(2006)利用中尺度模式 MM5 对发生在南岭山地浓雾进行了数值模拟,结合外场综合观测资料,分析浓雾发生、发展和消散机制,表明低层的偏南暖湿气流沿山坡爬升冷却凝结形成爬坡雾,而大范围层状云系在山头接地形成了地面的浓雾。随后,锋面逆温促进了低云和浓雾的长期维持与发展。

雾的研究难点在于缺乏探测资料,尤其缺乏针对雾液态水含量、风速垂直结构的探测仪器,特别是缺乏连续的长时间对雾过程的监测。本文利用非静力平衡中尺度数值模式 MM5V3,对模式进行了适当的改造,增加了长波辐射降温率项及雾滴源汇项的输出。结合 NOAA 极轨卫星、十二通道微波辐射计、卫星监测图像及风廓线仪的观测资料,对 2007 年 10 月 25~26 日发生在北京的一次大雾天气过程进行了数值模拟研究,探讨了大雾期间的边界层垂直结构特征和大雾形成消散原因。

2 资料与数值模拟试验方案

本文所用的微波辐射计资料是用北京市气象局从美国 Radiometrics 公司引进的 12 通道 TP-WVP 3000 微波辐射计观测的。该微波辐射计安装于北京市气象局内(40.0°N,116.3°E)处。其观测原理主要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,采用防水天线罩及鼓风机去除降水液态水的影响,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^①。

① Radiometrics Corporation. 2006. Profiler Operator's Manual: 1-10

大气廓线仪主要是利用大气中的各种尺度的湍流引起折射指数的变化而对电波产生的散作用,测量得到空气运动的多普勒效应的信号,经过资料处理得到实时风速廓线。大气廓线仪对水平风的垂直结构有较强的探测能力,能实时监测中尺度降水期间风的垂直切变和对流特征(王欣等,2005)。本文利用安装于北京气象局(40.0°N,116.3°E)的廓线仪资料对北京大雾期间的边界层的风场特征进行了详细分析。

卫星作为一种重要的探测工具,它的观测范围大,从卫星影像图上可以直观看出大雾的覆盖范围和影响区域。由于雾顶光滑、纹理均匀,与其它云类,特别是中高云顶的特征差别十分显著,所以可见光通道对雾和高云有较好的区分。而近红外和中红外通道对雾顶温度和低云顶温度和雪的温度较为敏感,对此也有较好的区分。所以,选择可见光和近红外或中红外通道来进行合成,对大雾天气的监测效果较好。本文主要用 NOAA-18 和 NOAA-17 气象卫星监测图像,该卫星使用的通道主要是 3 通道(1.58~1.64 μm 或 3.55~3.93 μm)、2 通道(0.725~1.00 μm) 和 1 通道(0.58~0.68 μm) 红、绿、蓝合成。该合成方案能使云、雾有较好的区分(曹治强等,2007)。

本文使用 PSU (Penn. State University) 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可供选择,适合于研究各种不同的天气过程。数值模拟采用了 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和 Resiner 霰显式方案,以及云辐射计算方案。

模拟采用三重嵌套,格距分别是 27 km、9 km 和 3 km,模式顶层为 100 hPa。模拟的中心点设在微波辐射计观测点(40.0°N,116.3°E),其中 3 km 水平分辨率的模拟只用了 Resiner 霰显式方案,而没有运用 Grell 对流参数化方案。为了更好地模拟这次雾过程,在边界层内增加了 12 层,主要增加近地面 300 m 以下,增加后的 δ 层达到了 35 层。利用 NCEP 的 6 小时一次的再分析资料启动模式,并用实际探空做订正。模拟开始时间为 2007 年 10 月 24 日 08 时(北京时,下同),共运行 72 小时。

3 雾的数值模拟

3.1 大雾期间天气形势

2007 年 10 月 25 日 08 时 500 hPa 天气形势图上,整个欧亚 30°N 以北地区维持两槽一脊形势,比较宽广的极涡稳定维持在俄罗斯西伯利亚地区,涡后部有一横槽,位于中西伯利亚-萨耶岭-巴尔喀什湖一线。我国北方大部分地区处在极涡的南部,以纬向环流为主,风向基本为 WNW [图 1 (见文后彩图)]。25 日 20 时涡后横槽南压至贝加尔湖-新疆北部,26 日 20 时东移南压至贝加尔湖以南,27 日 08 时位于中蒙边境附近,此时横槽南部已有一小浅槽移过华北地区,造成北京地区 27 日凌晨雷阵雨天气。

850 hPa 高度,在 25 日 08 时后,位于青藏高原上暖区继续向东偏北方向扩展,25 日 20 时已影响华北地区,26 日 08 时暖区发展为比较强的暖舌,其顶部已影响到华北北部,北京地区处在暖舌中心区控制。26 日 20 时暖舌有所减弱,并东移东北南部,此时北京地区仍处于暖区,锋区位于华北北部,27 日 08 时锋区已压过北京地区。

与空中形势相对应,25 日 08 时华北地区处在“鞍型”场中 [图 2 (见文后彩图)],随后受逐渐减弱东移的河套地区小高压控制,气压场较弱,进而处在比较强的冷锋天气系统的前面,地面辐合加强;27 日 08 时后随着北京地区雷阵雨天气的结束,地面冷空气南下,北京地区能见度转好。

图 3 为北京市气象局在观测点(40.0°N,116.3°E)处观测的逐时能见度演变图,从图 3 可看到从 25 日 16:00 左右能见度开始下降,在 20:00 附近能见度下降到 1000 m 左右,属于轻雾,在随后的几个小时里,能见度持续下降,在 26 日 05:00 时能见度达到最低值,不到 80 m;05:00 以后能见度逐渐好转,到 26 日 12:00 能见度已超过 1000 m,12:00~15:00 时之间能见度在 1000~1100 m 之间。16:00 时雾能见度又达到 900 m。持续一个多小时后,又开始降低到 700 m,后来略有起伏。27 日 08:00 时当地出现雷阵雨,降雨停止过后,雾消散。可见,此次雾的主体是在 25 日 20:00 到 26 日 12:00,本文也主要是针对这段时间雾的演变过程结合观测进行模拟研究。

3.2 雾的分布

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 1000 m。按照一般定义(Cotton and Anther, 1993)雾中液态含水量的范围为 0.05~0.2 g/kg,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含量 0.05 g/kg 为雾区下界临界值,但对上临界值不作限制。

图 4(见文后彩图)是控制试验模拟的 2007 年 10 月 25 日 13:31 及 10 月 26 日 10:29 地面层雾中液态含水量的水平分布图及相应时刻的极轨卫星大

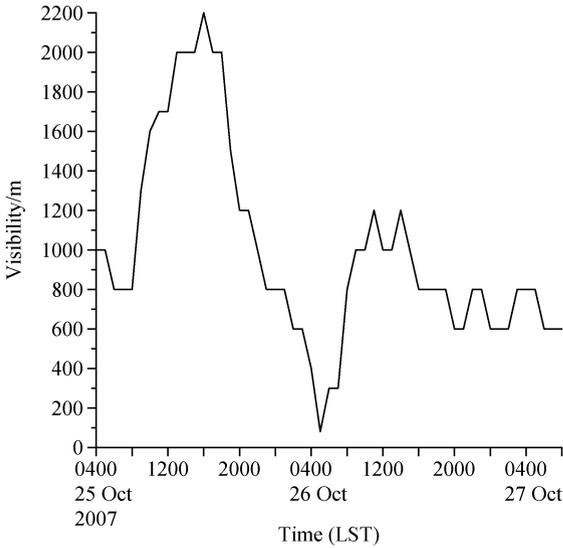


图 3 2007 年 10 月 25 日 04 时~27 日 08 时(40.0°N, 116.3°E)处的小时能见度演变

Fig. 3 Temporal variation of visibility from 0400 LST 25 Oct to 0800 LST 27 Oct 2007

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。

3.3 大雾期间边界层特征

3.3.1 相对湿度廓线

图 5 是 12 通道微波辐射计观测和模式模拟的(40°N, 116.3°E)处的 2007 年 10 月 26 日 05 时相对湿度廓线,从能见度演变图(图 3)可以看出,此时正是全天大雾最强的时段,能见度小于 80 m。由图 5 可见,在边界层区域之内,模拟和观测的相对湿度有较好的一致性。约在 200 m 以下,相对湿度都接近 100%,且沿垂直方向基本没有明显变化,可以看出,此时刻观测点附近雾的高度为 200 m,200 m 以上相对湿度都迅速减小。在 1800 m 左右的高度,观测和模拟的相对湿度都有小幅度的增加。到 3000 m 高度以上,观测和模拟的相对湿度都迅速减少。模拟结果表明,数值模式在对雾区相对湿度模拟方面是较为成功的,不足之处是在 1500 m 到 3000 m 高度之间,和观测的相比,模拟的相对湿度明显偏高。

3.3.2 液水含量廓线

图 6 是和图 5 相应的液水含量廓线。从图 6 可以看出,模拟的液水含量较观测值明显偏大,观测的液水含量最大值为 0.25 g/kg,而模拟最大值达到 0.58 g/kg,但观测和模拟的液水含量随高度的变化趋势基本一致:从地面向上液水含量逐渐增大,在距地 100 m 的高度左右达到液水含量最大值,从 100 m 的高度向上,液水含量迅速下降,液

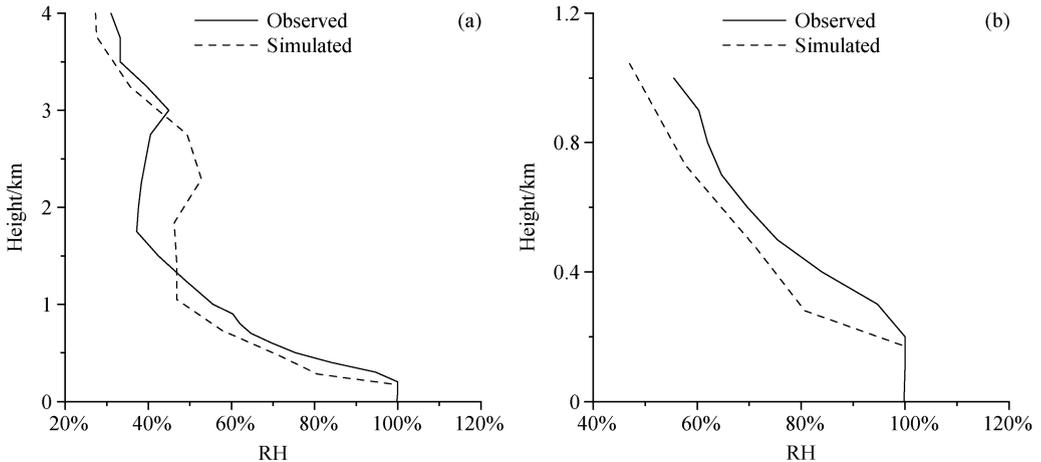


图 5 观测和模拟的 2007 年 10 月 26 日 05 时观测点的湿度廓线(%):(a)从地面到 4 km 高度;(b)从地面到 1 km 高度

Fig. 5 Observed and simulated relative humidity (RH) profiles at 0500 LST 26 Oct 2007; (a) From ground to 4-km height; (b) from ground to 1-km height

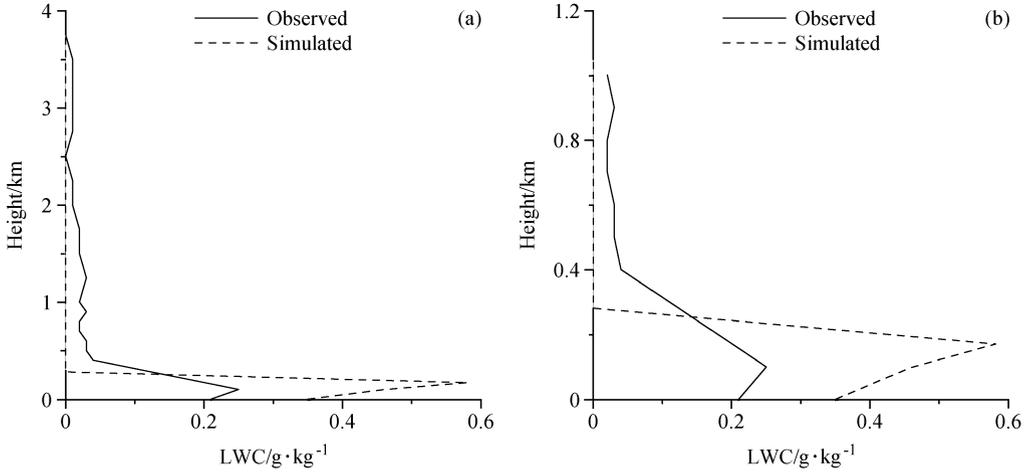


图 6 同图 5, 但为液水含量廓线

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for the liquid water content (LWC)

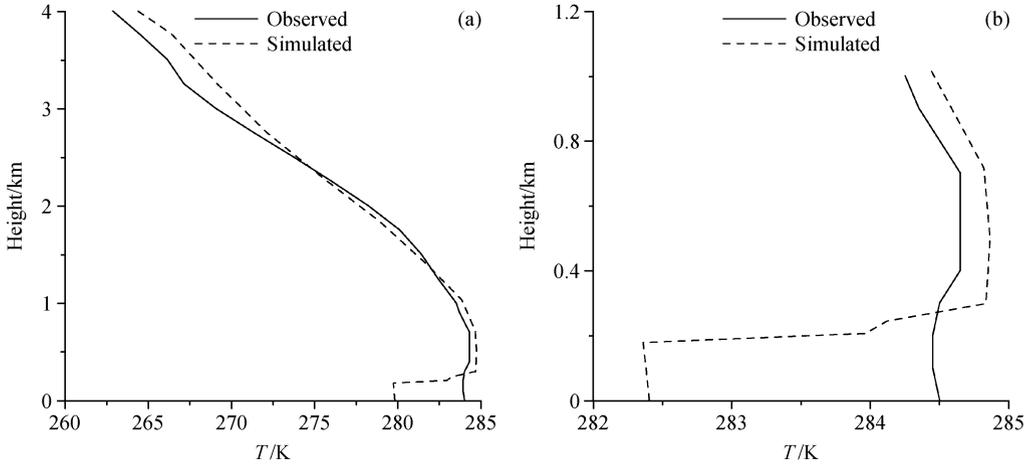


图 7 同图 5, 但为温度廓线 (单位: K)

Fig. 7 Same as Fig. 5, except for the temperature (K)

水含量主体为从地面到 200 m 高度范围之内。再次表明该区域是雾区。

3.3.3 温度廓线

观测表明, 没有雾和有雾的夜间边界层温度廓线特征有明显的不同。没有雾的夜间边界层内逆温层由下向上发展, 逆温层顶高度增加平缓, 后期甚至降低, 降温减缓; 日出后地面增温, 形成强递减温度梯度, 逆温层脱离地面, 抬升、减薄后逐渐消散。而在有雾的夜间边界层, 边界层结构变得很复杂, 并随雾的发展而变化。最突出的特征是, 雾层内没有逆温, 逆温层抬升到雾顶以上 (周小刚等, 2004)。图 7 是和图 5 相对应的温度廓线。由图 7a 可见, 在雾顶高度以上, 数值模式较好地模拟出了从地面到 4 km 高度的观测点的温度廓线, 两者基

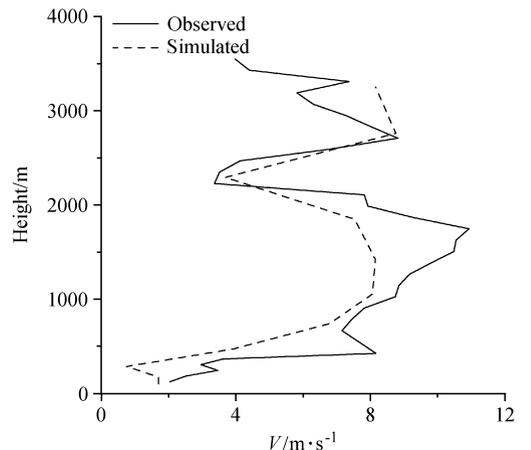


图 8 同图 5, 但为风速廓线 (从地面到 3500 m 高度)

Fig. 8 Same as Fig. 5, except for the wind speed from ground to 3500-m height

本一致。图 7b 反映的是从地面到 1 km 高度的比较情况, 可以看出模式可以较好地模拟出有雾情况下边界层温度廓线的主要特征, 即在 200 m 以下的雾区内没有逆温, 雾区以上是较强的逆温层。但是, 模拟的近地面层温度明显小于实际观测, 模拟的逆温层强度超过实际观测, 模拟的逆温强度为 4.0 K/100 m, 而观测的逆温强度只有 0.5 K/100 m, 在逆温层以上观测和模拟的温度廓线均呈中性层结分布, 在中性层结以上, 模拟的边界层温度略高于观测的温度。

3.3.4 风速廓线

图 8 是与图 5 相应的边界层风速廓线, 由图可见, 数值模式基本上刻画了此次辐射雾时段边界层风速廓线的特征, 即近地层风速较小 (2 m/s 左右), 雾顶以上风速随高度的增加迅速增大, 在 1500 m 高度出现大风中心, 从大风中心向上, 风速随高度逐步减小, 再往上风速又随高度逐渐增加。模拟结果的不足之处在于 400 m 的高度左右, 由观测可以看出存在一个急流中心, 而模拟结果则没有出现。

3.3.5 边界层时空演变特征

图 9a、b (见文后彩图) 分别是由 12 通道微波辐射计观测和模式模拟的自 2007 年 10 月 25 日 20 时到 26 日 12 时观测点的边界层液水含量的时间-高度剖面, 通过图 9a 可以看出在 26 日雾较强的时段主要出现在 04 时到 08 时。观测液水含量范围为 0.01~0.21 g/kg。模拟结果显示的较强雾出现的时段与实测基本符合, 在 26 日的 04 时到 08 时也出现了较高液水含量值, 但不足之处在于模拟的液水含量值明显偏大, 最大值达到 0.65 g/kg。

图 10a、b 分别是由 12 通道微波辐射计观测和模式模拟的自 10 月 25 日 20 时到 26 日 12 时观测点的边界层温度的时间-高度剖面图, 通过图 10a 可以看出在 25 日 20 时~26 日 02 时, 温度层结基本接近中性, 只是在雾出现的较强时段内 (26 日 02 时~08 时) 在雾顶以上出现了较弱的逆温层结, 而雾顶以下温度层结仍接近中性。和观测相比, 模拟的温度层结中对应于雾顶高度的等温线模拟过于密集, 逆温层强度模拟偏强, 模拟的近地面温度偏低, 这可能是与模式没有考虑边界层动力强迫的演变有关。但模拟近地面层温度的演变趋势基本与实测一致, 即在 26 日 00 时近地面层温度开始降低, 10 时后温度开始升高。同时, 从图 10b 也可以看

出模拟的温度层结在雾顶以下基本是中性层结, 和观测结果一致。

图 11a、b 分别是风廓线仪观测和模式模拟的观测点的边界层风速的高度-时间剖面图, 可以看出模拟与观测的风速高度-时间剖面具有相似之处, 例如在 26 日最强雾出现之前的几个小时内 (00 时~04 时) 边界层风速相对较大, 进入凌晨 04 时以后, 无论是观测还是模拟均可以看出边界层风速均急剧下降, 尤其是模拟的边界层风速, 在以后的时段内近地面层的风速均非常小, 基本上在 2 m/s 左右。另外一个特征是在近地面层向上的一定的高度存在风速线的密集区, 但模拟的不足之处在于, 模拟的风速线密集区大概位于 500 m 左右, 而观测的风速线密集区则主要位于 600 m 的高度, 另外, 模拟的风速较实际观测的偏小。

3.4 大雾形成原因分析

MM5 模式的 Reisner 霰方案考虑的微物理过程比较全面, 包括 7 个预报量: 水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰、冰晶数浓度, 考虑了 31 种微物理过程 (Reisner et al, 1998)。这些微物理过程对水成物来说可以作为产生项和消耗项, 即源项和汇项。其中涉及到雾滴的过程主要包括: 水汽凝结成云水 ($P_{\text{cnd}} > 0$)、云水蒸发 ($P_{\text{cnd}} < 0$)、冰粒子在暖区的融化 (P_{mit})、云滴自动转化成雨滴 (P_{cncr})、雨滴对云滴的碰并 (P_{racw})、雪晶对云滴的撞冻 (P_{sacw})、霰粒子对云滴的碰并 (P_{gacw})、云滴冻结成冰晶 (P_{ifzc}) 等。

但哪些微物理过程是形成雾的主要过程, 现在结合长波辐射冷却率、地面温度以及短波辐射的变化研究此次大雾形成和消散的微物理机制。

图 12 (见文后彩图) 给出 26 日 02 时温度和水汽含量的分布情况, 为了分析方便还叠加了气流场。可以看出, 在 26 日 02 时有暖湿气流向北京地区输送, 北京地区有充足的水汽供应, 在雾的维持和发展期间也一直有暖湿气流向北京地区输送。这是大雾形成和持续的原因之一。

由于晴空少云, 地面长波辐射降温显著, 从 26 日 02 时的观测点上空的长波辐射降温率图可以看出, 在该时刻近地面层出现长波辐射降温, 贴近地面处降温率约为 1.9 K/h (图 13a), 与此相对应, 贴地面层温度降低, 导致近地面层出现逆温。从该时刻雾滴源汇项分布图 (图 13d) 可以看出, 在暖

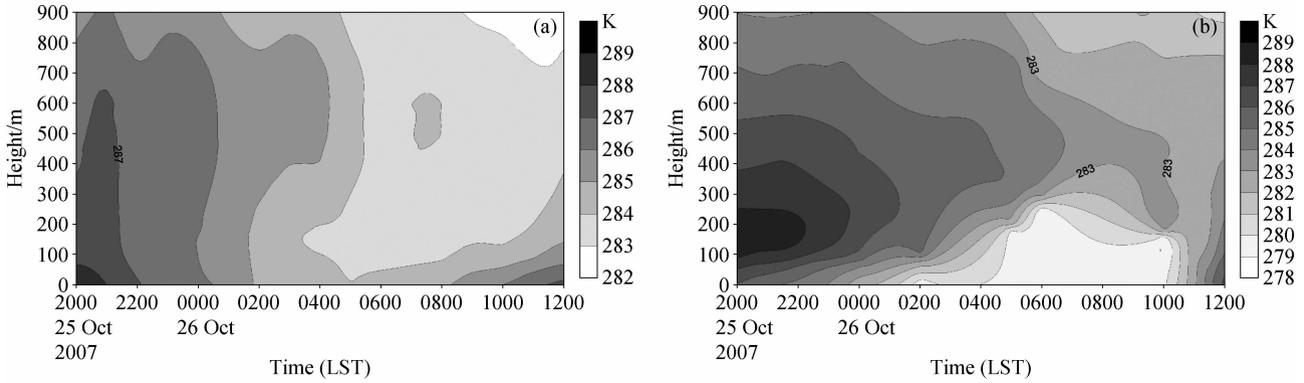


图 10 同图 9, 但为温度

Fig. 10 Same as Fig. 9, except for the temperature

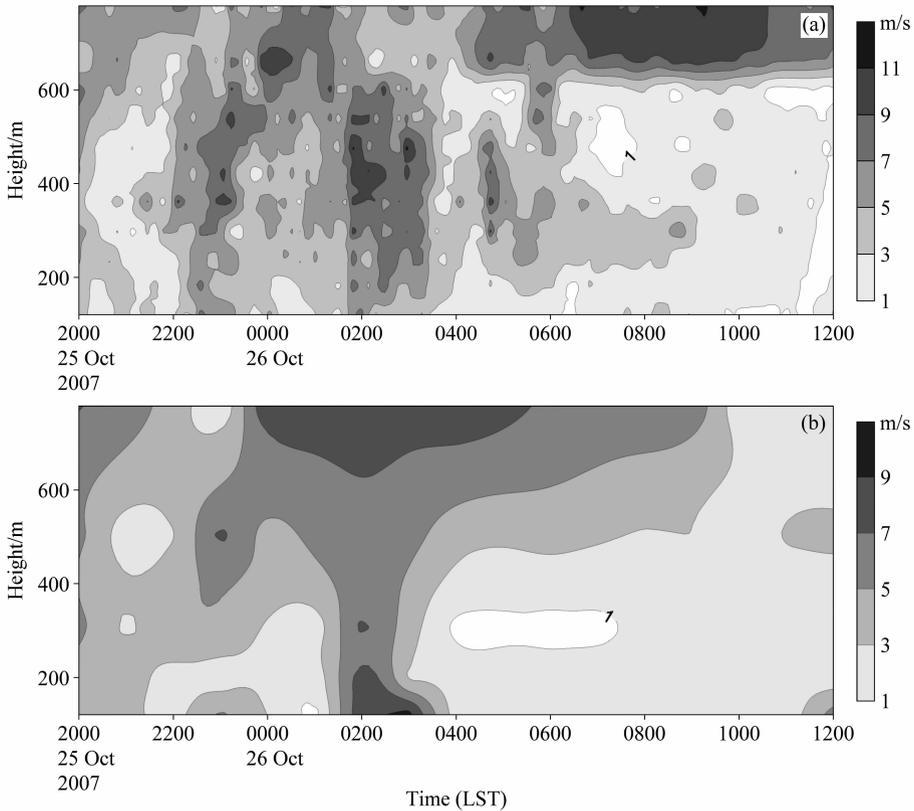


图 11 同图 9, 但为风速

Fig. 11 Same as Fig. 9, except for the wind speed

湿气流的源源不断的输送之下, 由于长波辐射导致贴地层温度的降低, 雾滴主要由水汽凝结形成, 此时近地面层的液水含量约为 0.1 g/kg 。

图 14 为全天大雾较强时段 06 时的观测点上空的长波辐射降温率、液水含量、温度以及雾滴源汇项分布图。可以看出此时最大长波辐射降温率已由贴地层上升到近地面层 250 m 处, 降温率已由 02

时的 1.9 K/h 上升到 7.5 K/h , 最大降温出现在雾顶, 形成深厚的冷中心 (图 14a), 同时雾顶以上存在着较强的逆温层结 (图 14c)。与此相对应, 在长波辐射降温率最强处, 形成雾滴的唯一源项, 水汽凝结率也是最强, 达到了 $0.0006 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时也可以发现在近地面层由于此时液水含量较大, 出现了微弱的雾滴向雨滴转化以及雨滴碰并雾滴的

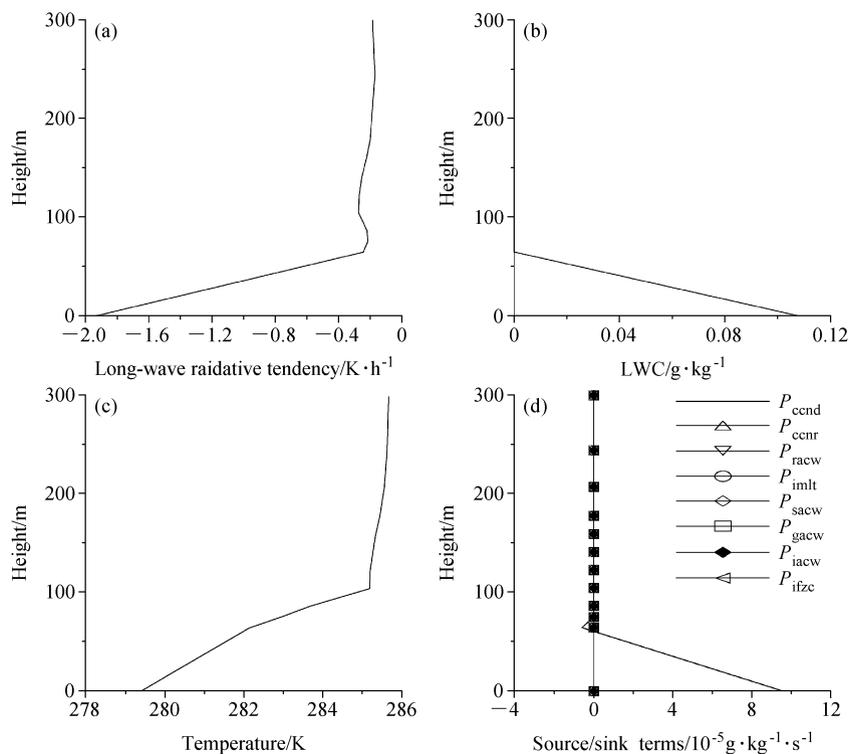


图 13 2007 年 10 月 26 日 02 时观测点上空各物理量的垂直分布: (a) 长波辐射率 (单位: K/h); (b) 液水含量 (单位为 g/kg); (c) 温度 (单位: K); (d) 雾滴源汇项 (单位: $g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)

Fig. 13 Vertical distributions of simulated (a) radiative tendency, (b) liquid water content, (c) temperature, and (d) major fog source/sink terms at the observation site at 0200 LST 26 Oct 2007

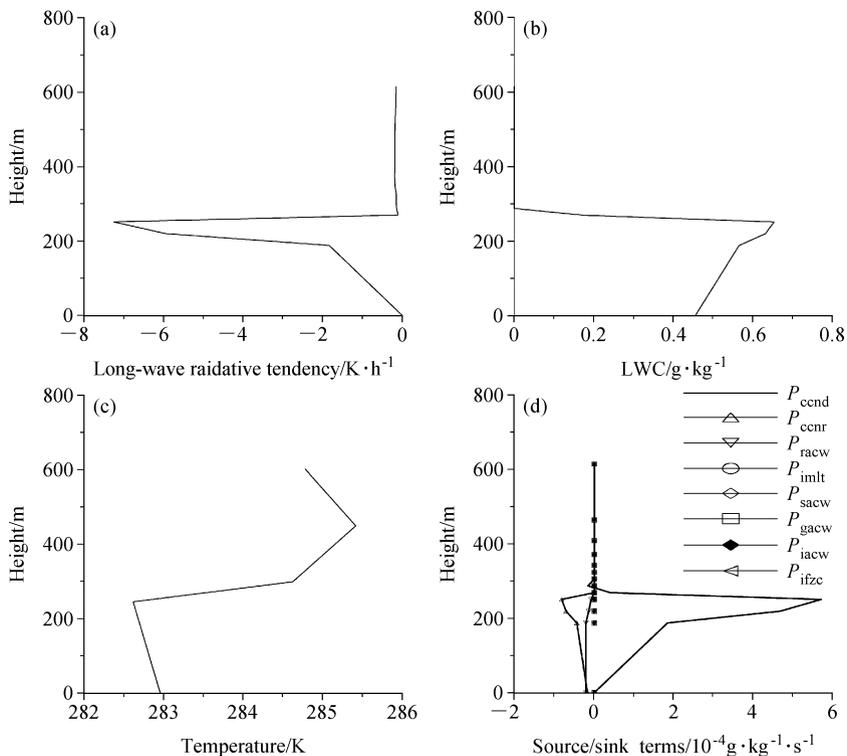


图 14 同图 13, 但为 2007 年 10 月 26 日 06 时

Fig. 14 Same as Fig. 13, except for 0600 LST 26 Oct 2007

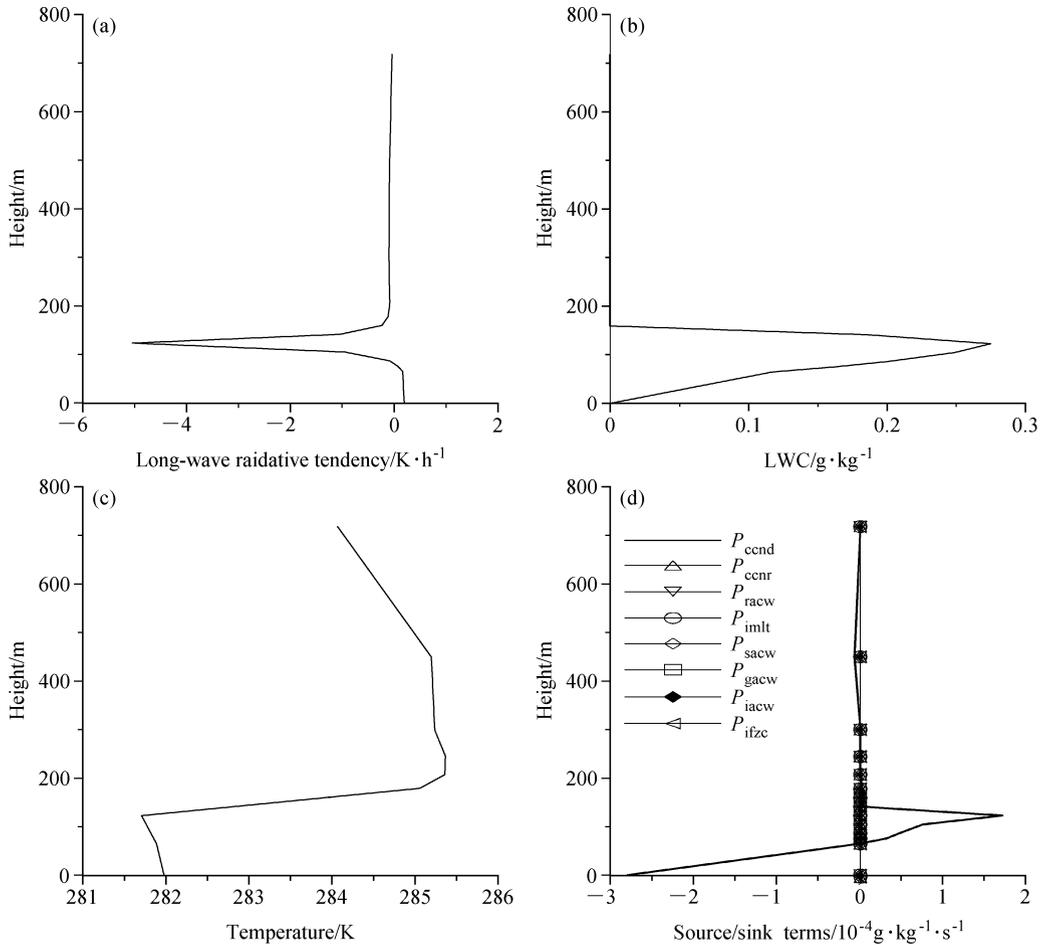


图 15 同图 13, 但为 2007 年 10 月 26 日 10 时
Fig. 15 Same as Fig. 13, except for 1000 LST 26 Oct 2007

过程。对应的液水含量也是在此处达到最高, 约为 0.65 g/kg。可以看出, 雾形成后发出长波辐射, 特别是在雾顶会存在较强的长波辐射, 使得雾顶处出现最大降温, 有着较强的逆温层结, 使辐射冷却得以向上发展, 导致凝结, 于是雾得以继续生成、发展。

图 15 为大雾接近消散时段 10 时的观测点上空的长波辐射降温率、液水含量、温度以及雾滴源汇项分布图。从图 15 可以看出, 最大长波辐射降温率明显减弱, 最强降温率下降为 5 K/h, 对应的雾顶以上的逆温层强度也明显减弱, 从该时刻的雾滴源汇项分布可以看出此时刻雾滴的源项——水汽的凝结已非常微弱, 仅出现于最强长波辐射降温处。而在近地面层已出现较强的雾滴的蒸发过程, 促使大雾趋于消散。

图 16 为 2007 年 10 月 25 日 20 时到 26 日 12

时地面温度和短波辐射的变化曲线, 可以看出地面温度在 16 日 02 时基本达到最低值, 从 02 时到 05 时基本维持在这个状态, 从 05 时到 07 时地面温度有小幅增加, 虽然这段时间地面短波辐射为零。这主要是因为雾的出现会增加向下的长波辐射, 同时大量水汽凝结成雾也要释放潜热有助于地面温度升高。07 时以后随着短波辐射的增强, 地面温度随之升高, 正是因为地面温度的升高, 导致了近地面层相对湿度的下降, 从而导致了雾滴的蒸发。

从以上分析可见地面温度下降有利于雾的形成, 雾的形成又阻碍地面温度的下降, 大气长波辐射的作用使得雾得以形成并向上发展, 而雾的向上发展又使得长波辐射冷却范围抬升。从这些分析中可以得出这次大雾的主要原因是长波辐射使地面降温, 而又有充足的水汽供应, 为大雾的形成、发展提供了极有利的条件, 与此同时短波辐射是导致大

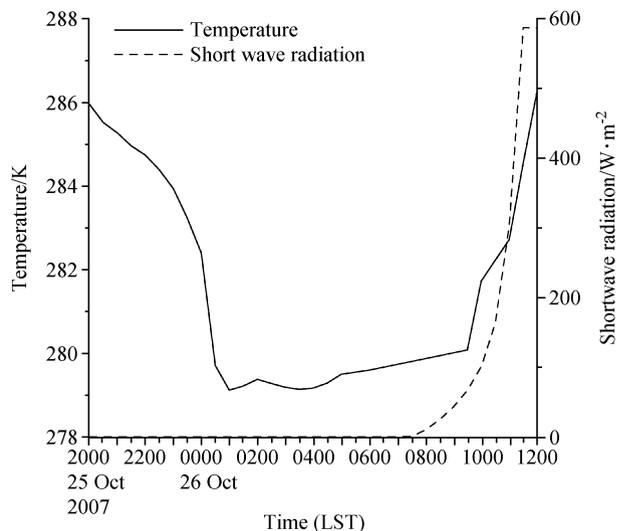


图 16 2007 年 10 月 25 日 20 时~26 日 12 时 (40°N , 116.3°E) 处模拟的地面温度及地面短波辐射变化图

Fig. 16 Temporal variations of the ground temperature and shortwave radiation at (40°N , 116.3°E) from 2000 LST 25 Oct to 1200 LST 26 Oct 2007

雾减弱及日变化直接原因之一。

4 结论

利用十二通道微波辐射计、风廓线仪及 NO-AA 极轨卫星监测资料结合中尺度数值模拟结果分析了雾发生时段边界层内温度、湿度、液水含量和风速等物理量的特征和演变规律。研究表明,此次雾最大液态水含量可达 0.25 g/kg , 雾层内温度垂直变化不明显, 逆温层抬升到雾顶以上; 在雾顶以上, 相对湿度急剧变小; 有雾时, 近地层风速不大, 雾顶以上有一相对风速大值区; 雾顶附近是各种物理量等值线的密集区等。

同时, 利用数值模拟结果简要分析了此次大雾天气的生成和维持的原因, 数值模拟分析表明, 北京及其周边地区在处于西南向的暖湿气流的条件下, 具有充足的水汽供应, 夜间地面辐射降温, 水汽达到饱和凝结成雾。空气湿度大、地面长波辐射冷却和雾顶的辐射冷却是这次大雾过程的主要原因, 而逆温层的维持对雾层长时间维持起着重要的作用。太阳短波辐射致使地面温度升高, 是引起大雾减弱和引起日变化的直接原因之一。

参考文献 (References)

Bott A. 1991. On the influence of the physico-chemical properties of

aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 56: 1-31.

Brown R, Roach W. 1976. The physics of radiation fog: II—A numerical study [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102: 335-354.

Brown R. 1980. A numerical study of radiation fog with an explicit formulation of the microphysics [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 781-802.

曹治强, 方翔, 吴晓京, 等. 2007. 2007 年初一次雪后大雾天气过程分析 [J]. *气象*, 33 (9): 52-58. Cao Zhiqiang, Fang Xiang, Wu Xiaojing, et al. 2007. A study on heavy fog process after snowfall in the beginning of 2007 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (9): 52-58.

Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴动力学 [M]. 叶家东, 范蓓芬, 程麒生, 译. 北京: 气象出版社, 331-342. Cotton W R, Anthes R A. 1993. *Storm and Cloud Dynamic [M]*. Academic Press, 311-320.

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.

Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 19: 324-341.

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 Pearl River Delta regions [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 24 (6): 821-834.

方春刚, 郭学良, 王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 33 (3): 621-633. Fang Chungang, Guo Xueliang, Wang Panxing. 2009. The physical and precipitation response to AgI seeding from mesoscale WRF-based seeding model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 621-633.

洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. *大气科学*, 30 (5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 913-926.

黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 24 (6): 821-834. Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (6): 821-834.

李宏宇, 王华, 洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究 [J]. *大气科学*, 30 (2): 341-350. Li Hongyu, Wang Hua, Hong Yanchao. A numerical study of precipitation enhancement potential in frontal cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 341-350.

- 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 Aimin, 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.
- Mason J. 1982. The physics of radiation fog [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60: 486 - 498.
- Musson L. 1987. Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 592 - 607.
- 钱敏伟, 雷孝恩. 1990. 长江上空辐射雾的数值研究 [J]. 大气科学, 14 (4): 483 - 489. Qian Minwei, Lei Xiaoen. 1990. Numerical simulation study of a radiation fog over the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (4): 483 - 489.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124: 1071 - 1107.
- 石春娥, 杨军, 孙学金, 等. 1997. 重庆雾的三维数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 20 (3): 308 - 317. Shi Chun'e, Yang Jun, Sun Xuejin, et al. 1997. 3D model study on fog for complicated terrain [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 20 (3): 308 - 317.
- 史月琴, 邓雪娇, 胡志晋, 等. 2006. 一次山地浓雾的三维数值研究 [J]. 热带气象学报, 22 (4): 351 - 359. Shi Yueqin, Deng Xuejiao, Hu Zhijin, et al. 2006. Three-dimensional numerical study on dense fog over mountain area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 351 - 359.
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验 [J]. 大气科学, 32 (6): 1256 - 1275. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. Seeding numerical experiments of cold front clouds in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1256 - 1275.
- 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. 2007. 梅雨暴雨对流系统的中小尺度结构特征分析研究 [J]. 大气科学, 31 (1): 1 - 18. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijing, et al. 2007. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems. [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 1 - 18.
- 孙学金. 2000. 芜湖机场辐射雾生消过程的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报, 1 (4): 85 - 88. Sun Xuejin. A numerical study of the formation and dispersion of radiative fog at Wuhu airport [J]. Journal of PLA University of Science And Technology (in Chinese), 1 (4): 85 - 88.
- 王欣, 卞林根, 彭浩, 等. 2005. 风廓线仪系统探测试验与应用 [J]. 应用气象学报, 16 (5): 693 - 698. Wang Xin, Bian Lin'gen, Peng Hao, et al. 2005. The atmospheric wind profiler and radio acoustic sounding system with its application [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (5): 693 - 698.
- 尹球, 许绍祖. 1993. 辐射雾生消的数值研究 I——数值模式 [J]. 气象学报, 51 (3): 351 - 360. Yin Qiu, Xu Shaozu. 1993. A numerical study on the formation and dissipation of radiation fog. I. The numerical model of radiation fog [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (3): 351 - 360.
- Zdunkowski W B, Nielsen B C. 1969. A preliminary prediction analysis of radiation fog [J]. Pure Appl. Geophys., 75: 278 - 299.
- 张利民, 李子华. 1993. 重庆雾的二维非定常数值模拟 [J]. 大气科学, 17 (6): 750 - 755. Zhan Limin, Li Zihua. 1993. A two-dimensional time-integral numerical model of Chongqing fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17 (6): 750 - 755.
- 赵德山, 洪钟祥. 1981. 典型辐射逆温生消过程的爆发性特征 [J]. 大气科学, 5 (4): 407 - 415. Zhao Deshan, Hong Zhongxiang. 1981. Some burst characteristics during the process of occurring and dissipating of typical radiation inversion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 5 (4): 407 - 415.
- 周斌斌. 1987. 辐射雾的数值模拟 [J]. 气象学报, 45 (1): 21 - 29. Zhou Binbin. 1987. Numerical simulation study of radiation fog [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 45 (1): 21 - 29.
- 周小刚, 王强, 邓北胜, 等. 2004. 北京市一次大雾过程的边界层结构的模拟研究 [J]. 气象学报, 62 (4): 468 - 475. Zhou Xiaogang, Wang Qiang, Deng Beisheng, et al. 2004. Numerical simulation on the boundary layer structure during a heavy fog process over Beijing metropolitan area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 468 - 475.

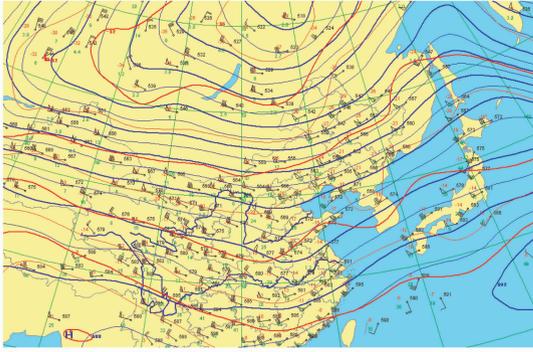


图1 2007年10月25日08时500 hPa天气形势。蓝线代表位势高度场，红线代表温度场

Fig. 1 The geopotential height (blue) and temperature (red) fields at 500 hPa at 0800 LST 25 Oct 2007

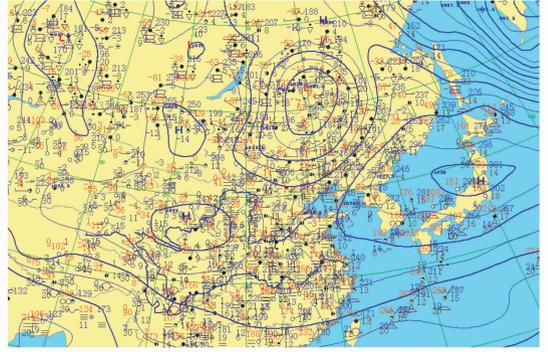


图2 2007年10月25日08时1000 hPa位势高度场

Fig. 2 The geopotential height field at 1000 hPa at 0800 LST 25 Oct 2007

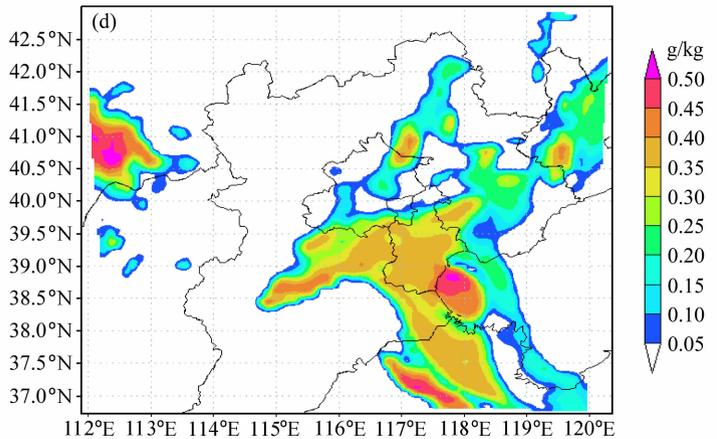
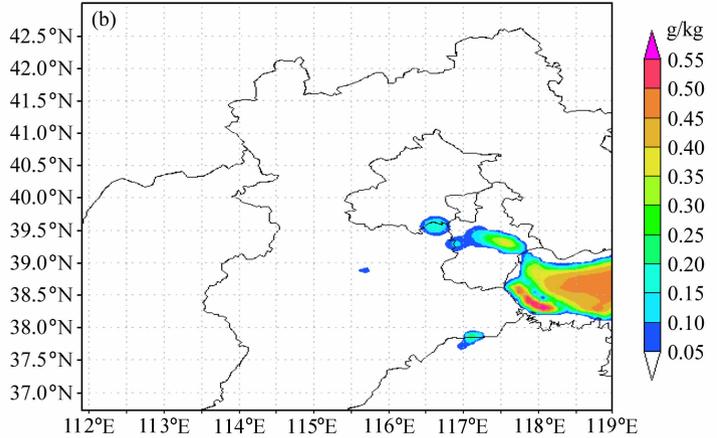
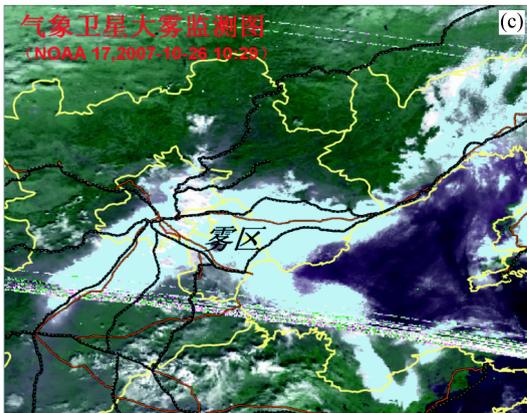
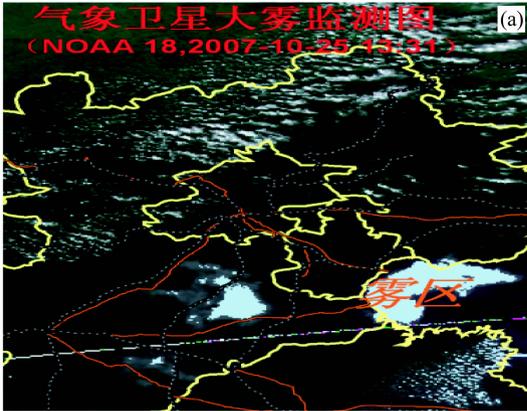


图4 2007年10月(a、c)极轨卫星大雾监测图像和(b、d)模拟的地面层雾中液态含水量分布图：(a、b)25日13:31；(c、d)26日10:29

Fig. 4 (a, c) The polar orbit meteorological satellite fog image and (b, d) the simulated liquid water content (LWC) in the ground surface layer: (a, b) 1331 LST 25 Oct 2007; (c, d) 1029 LST 26 Oct 2007

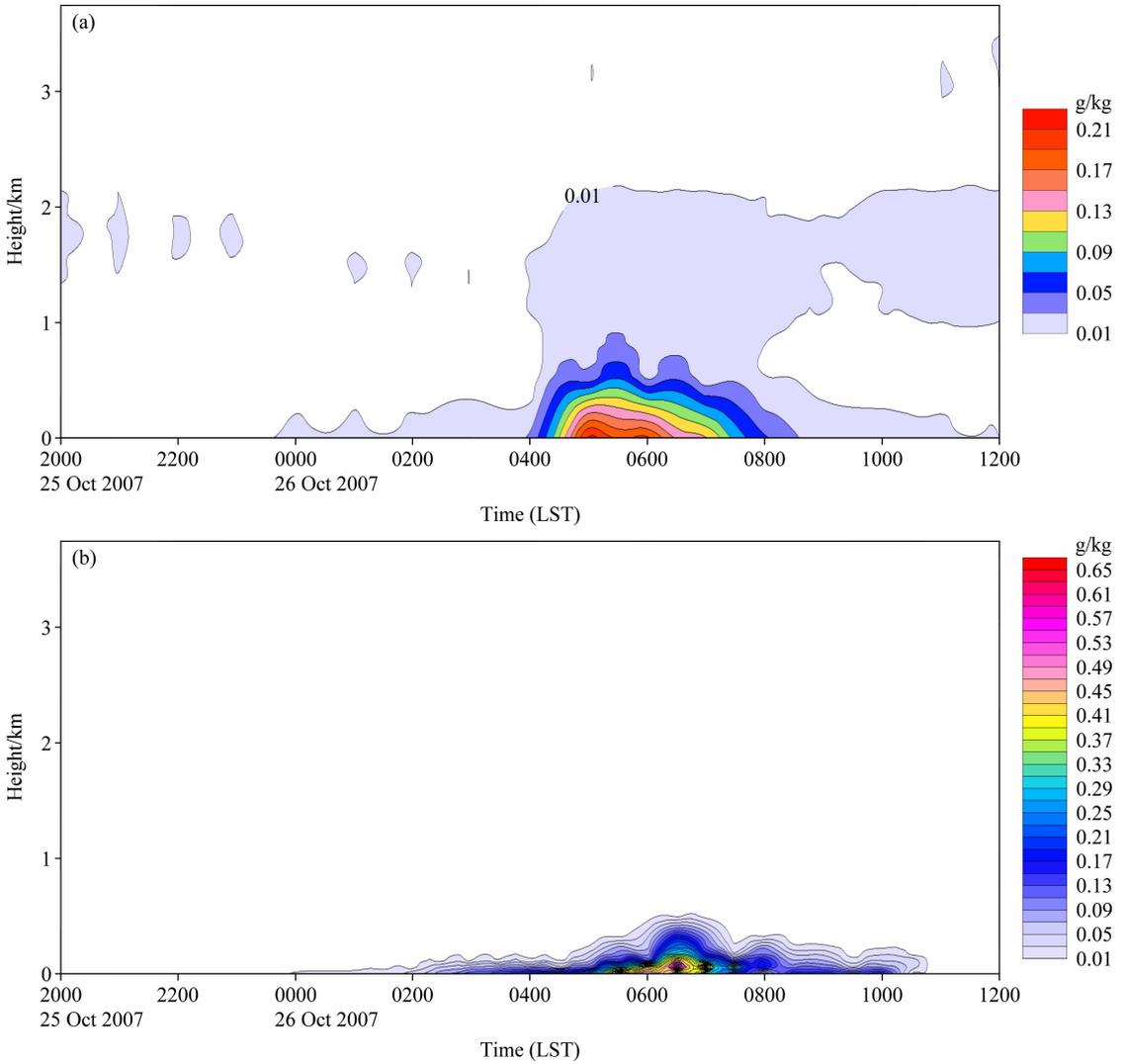


图9 2007年10月25日20时~26日12时观测点的液水含量高度-时间剖面图: (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 9 Time-height cross sections of (a) observed and (b) simulated liquid water content at the observation site from 2000 LST 25 Oct to 1200 LST 26 Oct 2007

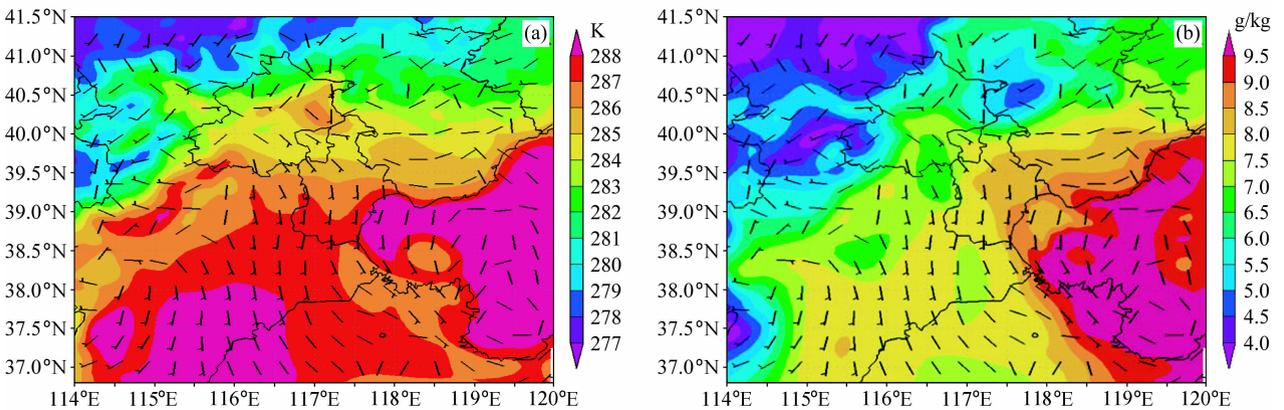


图12 2007年10月26日02时叠加在流场上的温度 (a) 和水汽含量 (b) 分布

Fig. 12 (a) Temperature and (b) vapor mixing ratio obtained from MM5 model at 0200 LST 26 Oct 2007. The full barb denotes 5 m/s wind speed