胡朝霞，雷恒池，董剑希，等. 2011. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟 [J]. 气候与环境研究，16 (1)：71－84. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Dong Jianxi, et al. 2011. Characteristic analysis and numerical simulation of a regional warm fog event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 71－84.

一次区域暖雾的特征分析及数值模拟

胡朝霞[1] 雷恒池[1] 董剑希[2] 余兴[3] 张晓庆[1]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室，北京 100029
2 国家海洋环境预报中心，北京 100081
3 陕西省气象科学研究所，西安 710015

摘 要 2004年12月17～19日在我国中东部的大部分地区出现了大雾天气，对这次大雾天气过程进行了综合探测，探测仪器包括粒子测量系统、能见度仪、雾滴谱取样仪以及常规气象观测等。作者分析了部分观测结果并结合区域尺度数值模式，揭示了区域雾的一些基本特征，研究了雾形成和发展机制。结果表明，这是一次典型的辐射雾过程，雾的覆盖范围大，水平分布很不均匀。雾先从地面生成，然后不断向高处扩展，没有出现雾的爆发性增长现象。近地面逆温层的存在、充沛的水汽供应和微风条件有利于雾的形成和维持，太阳短波辐射增温和地面长波辐射降温是雾形成和消散的主要因素。

关键词 区域暖雾 区域雾特征 雾生消 数值模拟

文章编号 1006－9585 (2011) 01－0071－14 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

Characteristic Analysis and Numerical Simulation of a Regional Warm Fog Event

HU Zhaoxia[1], LEI Hengchi[1], DONG Jianxi[2], YU Xing[3], and ZHANG Xiaoqing[1]

1 *Laboratory of Cloud－Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
2 *National Marine Environment Forecasting Center, Beijing* 100081
3 *Shaanxi Research Institute of Meteorological Science, Xi'an* 710015

Abstract The main purpose is to analysis a regional fog episode occurring in most of middle and eastern China from 17 December to 19 December 2004 based on the observation and the fifth generation Pann State/NCAR Mesoscale Model modeling. The characteristics and evolution process of the regional fog event are investigated. The results show that it is a typical radiation fog event with a large spatial scale and the horizontal distribution is not uniform. The fog appeared at the surface firstly and then expended to the high level. The burst development features of the fog are not found. The temperature inversion and abundant water vapor are the beneficial factors to the fog formation and maintenance as well as breeze condition. The influences of the shortwave radiation warming and longwave radiation cooling are examined.

Key words regional warm fog, characteristic of regional fog, fog evolution, numerical simulation

收稿日期 2009－06－26 收到，2010－11－21 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40475005，气象行业专项 GYHYQX20070626、GYHY200806001，中国科学院知识创新工程项目 IAP07215

作者简介 胡朝霞，女，博士，副研究员，主要从事云降水物理和人工影响天气研究。E-mail：huzx@mail.iap.ac.cn

1 引言

雾是悬浮在空气中的大量细小水滴（或冰晶）的可见集合体，是水平能见度小于1 km的天气现象。雾主要发生在近地层，严重威胁着机场、高速公路、城市道路和港口航道的安全，甚至造成恶性事故；另外大雾还会加剧近地层的空气污染，影响人类的生活健康。国际上第一次科学地进行雾的观测始于1917年，Taylor（1917）分析了陆地和海洋上雾的特点，指出晴空、小风和高湿是雾形成的主要因素，但满足此条件的夜晚实际上只有50%左右形成雾。20世纪50年代，在英国的Cardington进行了雾的观测①②，对比了低层大气的直接辐射降温与湍流扩散、分析了雾滴的沉降等。70年代初，在美国纽约附近进行了山谷雾的观测（Pilie et al.，1975），并结合数值模拟进行了研究。1971～1973年，由英国气象局（UK Meteorological Office，UKMO）组织在Cardington进行了一系列雾的观测（Roach et al.，1976），着重分析了辐射降温和湍流扩散对辐射雾的影响，同时指出重力沉降和土壤热通量也是影响雾的主要因子。1977～1981年，在纽约州Albany实施了一次历时4年的辐射雾观测计划（Jiusto and Lala，1980；Meyer et al.，1980），观测了能见度、粒子谱分布等，分析了雾形成和演变的复杂性。1989和1994年在意大利波河河谷进行了山谷雾观测试验（Fuzzi et al.，1992；Wobrock et al.，1992）。1991年在荷兰的Cabauw利用215 m铁塔进行了详细的雾观测（Duynkerke，1991）。这些试验均对雾的微物理过程及演变规律进行了讨论和研究，对雾的认识有了很大提高。自20世纪60年代Estoque（1963）建立了大气边界层的数值模式后，雾的数值模拟工作逐渐开展起来。如Fisher and Caplan（1963）、Zdunkowski and Nielsen（1969）、Roach and Brown（1976）、Barker（1977）、Brown（1980）、Turton and Brown（1987）、Bott et al.（1990）、Bott（1991）和Duynkerke（1991）等都从不同角度建立和完善了雾的模式，基本上能模拟出局地雾的生消特点。

在国内，20世纪60年代末对中国南方各省进行过一次雾的普查（李子华，2001），从80年代至20世纪末，开展过成都双流机场雾的观测（郭恩铭，1989）、浙江舟山海雾的研究（杨中秋等，1989）、西双版纳辐射雾的观测（黄玉生等，2000）、上海城市雾的研究（郭恩铭等，1990）、重庆雾害研究（李子华和彭中贵，1994）以及沪宁高速公路雾的观测等（李子华等，1999）。进入21世纪，开展过广东岭南雾和能见度的研究（吴兑等，2004，2007）和南京雾的观测研究（濮梅娟等，2008；李子华等，2008）。国内雾的数值模拟工作始于20世纪80年代，已发展了从一维至三维的雾的数值模式，能够清晰地给出雾生消的物理图像，有的还考虑了复杂地形的作用（石春娥等，1996）、生态环境如气溶胶和植被对雾的影响等（石春娥等，2001）。

随着社会经济的发展，持续时间长、覆盖范围大的区域雾对人们的经济行为造成更大的影响，也愈来愈受到重视。在区域雾的研究方面，Ballard et al.（1991）第一次用UKMO的中尺度模式模拟了苏格兰东北部一次海雾的生消和演变过程。Kong（2002）讨论了美国海军的中尺度模式在预报海岸雾等海洋边界层天气现象中的潜在用途。Pagowski et al.（2004）用中尺度模式MM5模拟分析了加拿大Ontario浓雾的成因，并讨论了初始场、边界条件的敏感性。Fu et al.（2006）用RAMS模式模拟了黄海上的一次浓雾过程。近年，国内也用中尺度数值模式MM5模拟分析雾的演变、探讨雾的预报等。樊琦等（2003）用MM5 v3.4模拟了2002年1月17日广州地区的一次平流辐射雾，分析表明冷空气南侵是造成这次雾的主要原因，MM5具有雾的数值预报能力；还讨论了辐射、模式垂直分辨率、不同陆面类型对雾的影响。而在长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟中，提高MM5的水平分辨率可有效改善水平范围的模拟效果（石红艳等，2005）。董剑希等（2006）对北京及其周边地区一次大雾的数值模拟

① Stewart K H. 1955. Radiation fog: Investigations at Cardington 1951－54. Air Ministry, Met. Res. Paper, 912.
② Stewart K H. 1957. Some observations on the composition of fog. Ibid. 1074.

研究表明，模拟雾生消的时间与实况一致，同时探讨了雾形成和演变的机制。史月琴等（2006）对南岭山地浓雾的数值研究表明，MM5 对预报山地浓雾具有潜在的能力。梁爱民等（2007）也使用非静力数值预报模式 WRF 对华北地区一次大雾过程进行了三维变分同化试验分析，对雾区的模拟结果有局部不同程度的修正，可明显改善模拟效果。

由于区域雾的观测少，也存在实际困难，因此目前对区域雾的认识还很不清楚，区域雾有什么特点，其水平范围及均匀性、垂直结构、时间变化、日变化特征以及雾生消的原因等，需要进一步加强观测及进行数值模拟研究。基于以上原因，本文的主要研究内容即以 2004 年 12 月的一场区域性大雾为例，用中尺度数值模拟的方法并结合在陕西省临潼机场进行的观测，分析雾的宏观、微观结构和雾生消的物理过程。

2 天气背景分析

2004 年 12 月以来，全国大部分地区都出现了有雾天气，一些地方出现了较强的大雾天气，尤其以四川盆地、汉水流域、江淮平原、华北大部及黄河中下游地区为甚。进入中旬以后，关中地区一直被雾所笼罩。15 日上午，汉中、安康、宝鸡、西安北部及渭南南部都出现了大雾天气。16 日汉中平原、关中的中东部地区出现弱降水，大雾有所减轻，大部分地区为轻雾。17 日凌晨宝鸡、武功、西安一带以及陕北的中东部地区再次降临大雾，到 17 日 08 时（北京时间，下同），大雾几乎覆盖整个关中平原。18、19 日西安及其周边地区仍被大雾包围，能见度最差时仅有几十米。20 日随着一股冷空气的东移，大雾逐渐消散，21 日一场大雪的降临，大雾过程彻底结束。

在 500 hPa 高空环流形势图上，2004 年 12 月 15 日 08 时陕西省受东亚大槽后的弱西北气流控制[①]。16 日高原槽东移，强度有所加强，在高原槽和高原东部低值系统的共同影响下，关中的中东部地区出现弱降水，20 时陕西省中、南部再次受槽前的偏西气流控制。17 日高原槽已移出，位置向南移动，关中地区受平缓的西风气流控制。高原槽前的正涡度区提供了低层辐合的动力机制，且它是一个弱的辐合区，不会因形成较强辐合而产生强上升气流破坏低层较稳定的层结系统。17 日晚间东移的高空槽使得影响陕西省的天气系统减弱，低云变薄，地面长波辐射加强，从而导致了 17、18 日的大雾天气。在 700 hPa 天气图（图略）上，15 日 08 时四川盆地有西南涡发展，涡的东侧存在系统的、较强盛的西南气流，气流越过秦岭，向关中地区输送了大量的水汽。同时，西安吹较干冷的西北风，西安周边有明显的风向辐合区，也是弱的冷热交汇地，从而导致了 16 日西安及周边地区的小雨天气，降水使该地区的空气含水量维持在一个较高的水平。17 日关中地区仍处在偏西气流中，随着高原脊的加强，陕西省受西北气流控制。

从以上分析来看，16 日的弱降水提供了充沛的水汽条件，陕西上空主要是西北偏西气流控制，没有明显的冷空气南下，再加之地面小风，有利的天气条件促成了 17～19 日西安及其周边地区的大雾。这次大雾过程范围大、持续时间长，给交通、运输和人民生活带来了严重的影响。

3 观测结果分析

3.1 能见度、气温和相对湿度的变化

2004 年 12 月 17～19 日，由陕西省气象科学研究所和陕西省人工影响天气办公室组织，在西安以及距西安 20 多千米的临潼军用机场进行了雾的综合观测及消雾试验。观测仪器主要有三用滴谱仪、粒子测量系统（Particle Measurement System，PMS）、前向散射分光计探头（Forward Scattering Spectrometer Probe-100，FSSP-100）、能见度仪等。试验前制定了详细的观测方案，在机场跑道、气象台、西塔台、机场附近农场和营房设了 5 个观测点，其中在气象台观测点还设置了一个梯度对比观测（董剑希，2005）。

17 日 22：55 能见度较小，为 420 m；之后能

① 董文乾，谢军. 2005. 陕西关中冬季的一次大雾天气过程分析［C］// 第十四届全国云降水物理和人工影响天气科学会议文集（下册）. 贵州，462－464.

见度逐渐增加，18日01:38能见度达到最大，为1250 m；随后能见度又稍有减小；在05:18至05:46之间，能见度有短暂增加；此后能见度不断减小，由1080 m减小到07:42的110 m（见图1a）。18日08:10至12:30，能见度逐渐增加，由50 m增加到650 m；然后能见度有小幅振荡，18:30能见度最大，为860 m；此后，能见度逐渐减小，18日21时至19日02时，能见度在300 m左右；19日02:30至04:30能见度在750 m左右，05时以后，能见度在550 m左右。

17～19日临潼的气温（图2a）除18日02时气温为−0.2 ℃以外，其余时间气温皆在0 ℃以上，17日16时气温最高，为4.5 ℃。从临潼站的观测可知，此次大雾天气是一次区域性暖雾过程。除17日14～17时相对湿度为89%外，其他时刻的相对湿度均在90%以上（见图2b），说明此次过程是一次大雾天气过程而非霾（吴兑，2008）。

由以上分析可知，雾的发展变化是不均匀的，能见度也是时刻变化着的。17～19日之间，能见度最低时为50 m，最大为1250 m，18日07:10至08:10的1 h中雾最浓，相对湿度达95%，地面气温也在0.4～0.8 ℃之间变化，属于暖雾。

3.2 粒子浓度的变化

观测中使用了美国PMS公司生产的FSSP-100（量程为0.5～47 μm），该仪器于2003年3月在美国PMS公司进行了标定。从图3可见，雾中粒子的浓度是变化的，这也说明雾的微观结构是变化的。

4 区域雾的数值模拟

4.1 模拟方案

利用美国宾夕法尼亚州立大学（PSU）和美国国家大气研究中心（NCAR）联合开发的非静力中尺度模式MM5 v3.7版本，使用NCEP/NCAR一天4次1°（纬度）×1°（经度）的再分析资料，并用实际探空进行订正。从2004年12月17日20时模拟到19日20时，预报时间为48 h。模拟区域（见图4）以西安为中心［站号57036，

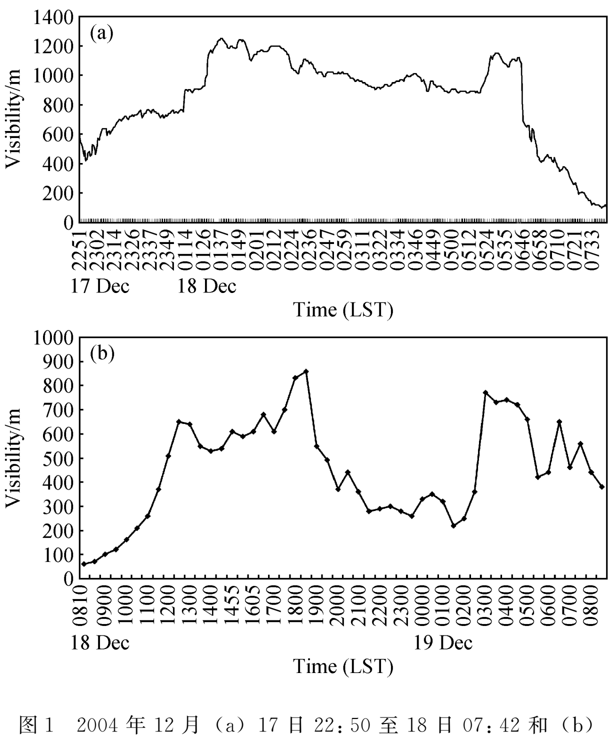

图1 2004年12月（a）17日22:50至18日07:42和（b）18日08时至19日08时西塔台能见度变化

Fig. 1 Variations of the visibility from (a) 2250 LST 17 Dec to 0742 LST 18 Dec, and (b) 0800 LST 18 Dec to 0800 LST 19 Dec 2004 at Xitatai

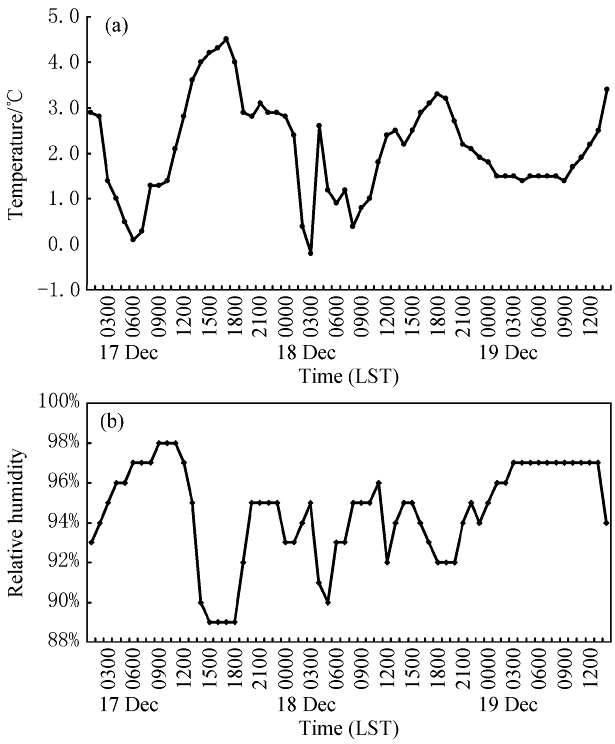

图2 2004年12月17～19日临潼自动气象站（a）气温和（b）相对湿度的变化

Fig. 2 Variations of the (a) temperature and (b) relative humidity from 17 Dec to 19 Dec at Lintong station

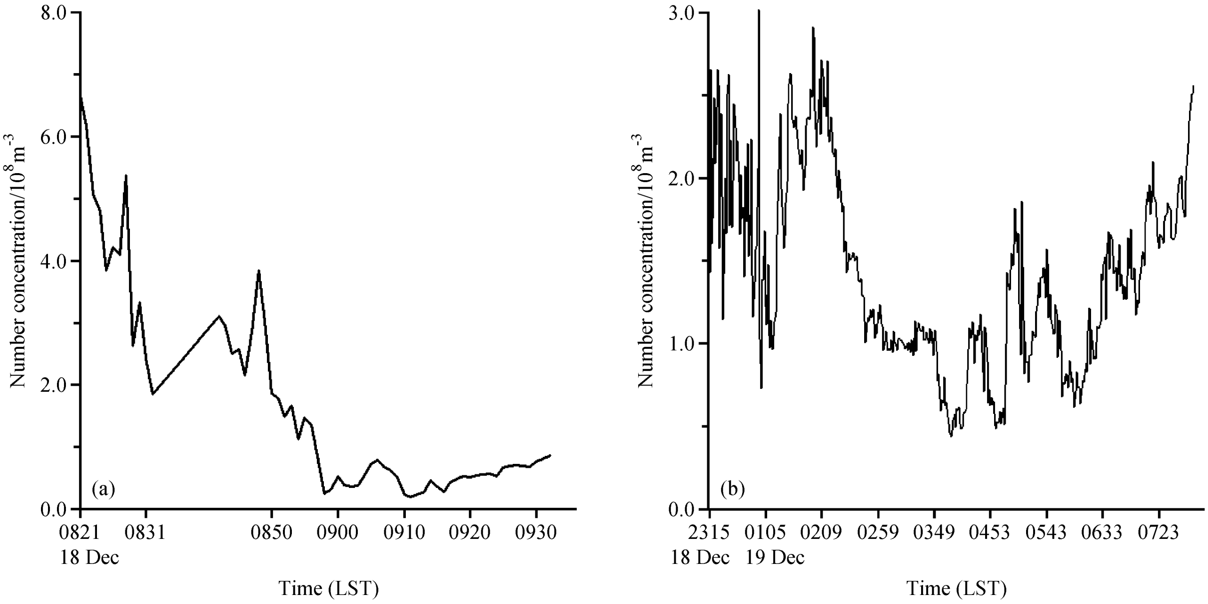

图 3　2004 年 12 月（a）18 日 08：20 至 09：30 和（b）18 日夜间至 19 日清晨 FSSP-100 测量的粒子浓度的变化

Fig. 3　Variations of the number concentration measured by FSSP-100 (a) from 0820 LST to 0930 on 18 Dec, and (b) from the night of 18 Dec to the morning of 19 Dec 2004

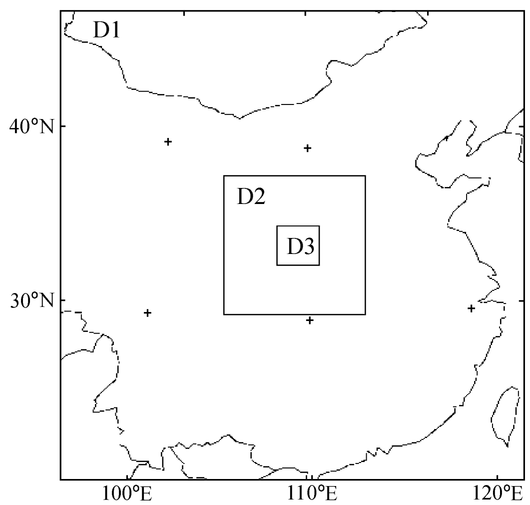

图 4　MM5 模拟区域

Fig. 4　Modeling domains of MM5

(34.18°N，108.56°E)，海拔 398 m]，模式采用三重嵌套，水平格距分别为 27 km、9 km 和 3 km。垂直方向 37 层，主要增加 3 km 以下的分层，第一层高度 4 m，第二层高度 10 m，第三层高度 17 m，…，模式顶为 100 hPa。显式微物理方案选用简单冰相方案和 Reisner2 方案，对流参数化方案选用 Grell 方案，边界层选用 Blackadar 方案，辐射方案选用云辐射方案。

4.2　雾的水平分布

雾是接地的云，一般情况下，雾的含水量较低（Cotton and Anthes，1993；Pruppacher and Klett，1997），约为 0.05～0.5 g·m^{-3}，所以经常用雾水含量的变化来描述雾的生消过程，本文定义液水的比含水量大于 0.01 g·kg^{-1}时生成雾。图 5 是区域 3 距地面 4 m 高度上雾水含量的水平分布。从模拟结果看，18 日 00 时在陕西省境内有连成一片的一条东北—西南走向的雾区，雾区面积大，东西方向充满了模拟区域（260 km），南北方向也有几十千米，西安（34.3°N，108.9°E）和临潼（34.4°N，109.2°E）都被大雾笼罩，在大片雾区下方，还有几片面积几十至几百千米的雾区。之后，雾有所减轻，04 时西安附近的雾区在东西方向不到 200 km，雾区面积有很大地减小，西安和临潼的雾水含量也减少，雾水比含水量小于 0.5 g·kg^{-1}。04～08 时雾的变化缓慢，雾区范围变化不大，但雾水比含水量减小，西安和临潼的比含水量小于 0.3 g·kg^{-1}。09 时以后雾开始逐渐减弱，到 12 时，西安和临潼的雾已消散，仅在临潼以北的耀县和白水附近有小片雾区，13 时雾全部消散。直至 18 时，在区域的左下方又出现面积为几至几十千米的零星雾区，20 时西安周围也出

现雾。之后，雾迅速发展，到19日凌晨浓雾再一次笼罩西安及其周边地区，雾的范围更大，液态比含水量大（雾浓），06时以后雾开始减轻，08时雾区的东西方向仍大于200 km，10时以后雾逐渐消散，至12时，雾已完全消散。

由于此次雾的范围大、雾浓，雾区覆盖面积超出了区域3的模拟范围。从图6可见，从18日00～08时，雾是缓慢发展的，雾区的范围是逐渐增加的，但浓雾区的范围是逐渐减小的，除大片相连的雾区外，周围还分布许多零星的小雾区，雾的扩散比较明显。从08～12时，雾迅速消散，只剩下小片雾区。18日20时雾又重新出现，19日00～08时，雾区范围扩大，并表现出与18日相似的变化特征，但19日雾的浓度和范围都有所减小。另外，雾区边界很不整齐，说明下垫面对雾的影响很大，下垫面的特性表现得非常清楚。

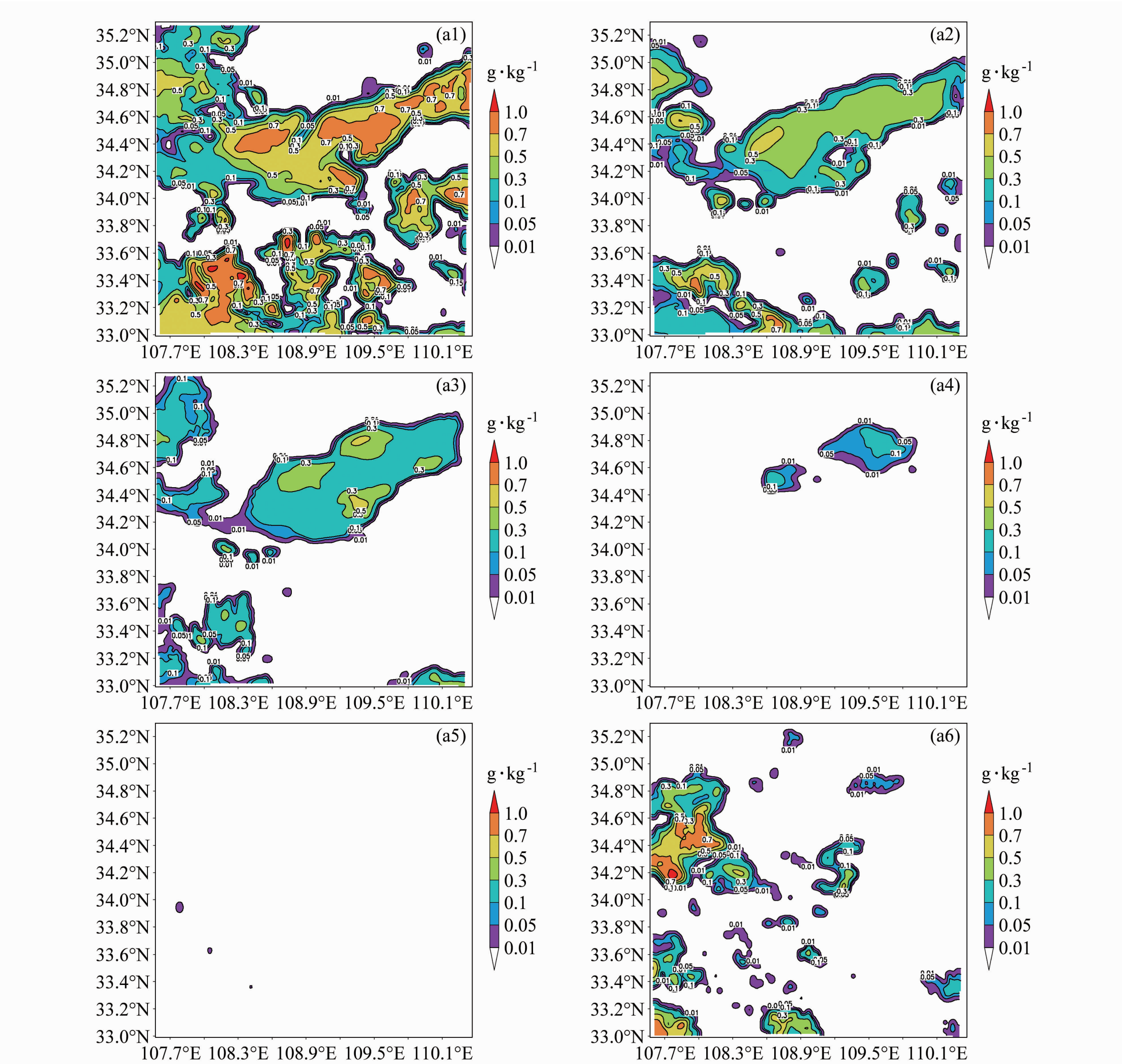

图5 区域3在地面4 m高度上模拟的液水混合比的变化：（a1）18日00时；（a2）18日04时；（a3）18日08时；（a4）18日12时；（a5）18日16时；（a6）18日20时；（b1）19日00时；（b2）19日04时；（b3）19日08时；（b4）19日12时

Fig. 5 Variations of the simulated liquid water mixing ratio at the height of 4 m in D3: (a1) 0000 LST 18 Dec; (a2) 0400 LST 18 Dec; (a3) 0800 LST 18 Dec; (a4) 1200 LST 18 Dec; (a5) 1600 LST 18 Dec; (a6) 2000 LST 18 Dec; (b1) 0000 LST 19 Dec; (b2) 0400 LST 19 Dec; (b3) 0800 LST 19 Dec; (b4) 1200 LST 19 Dec

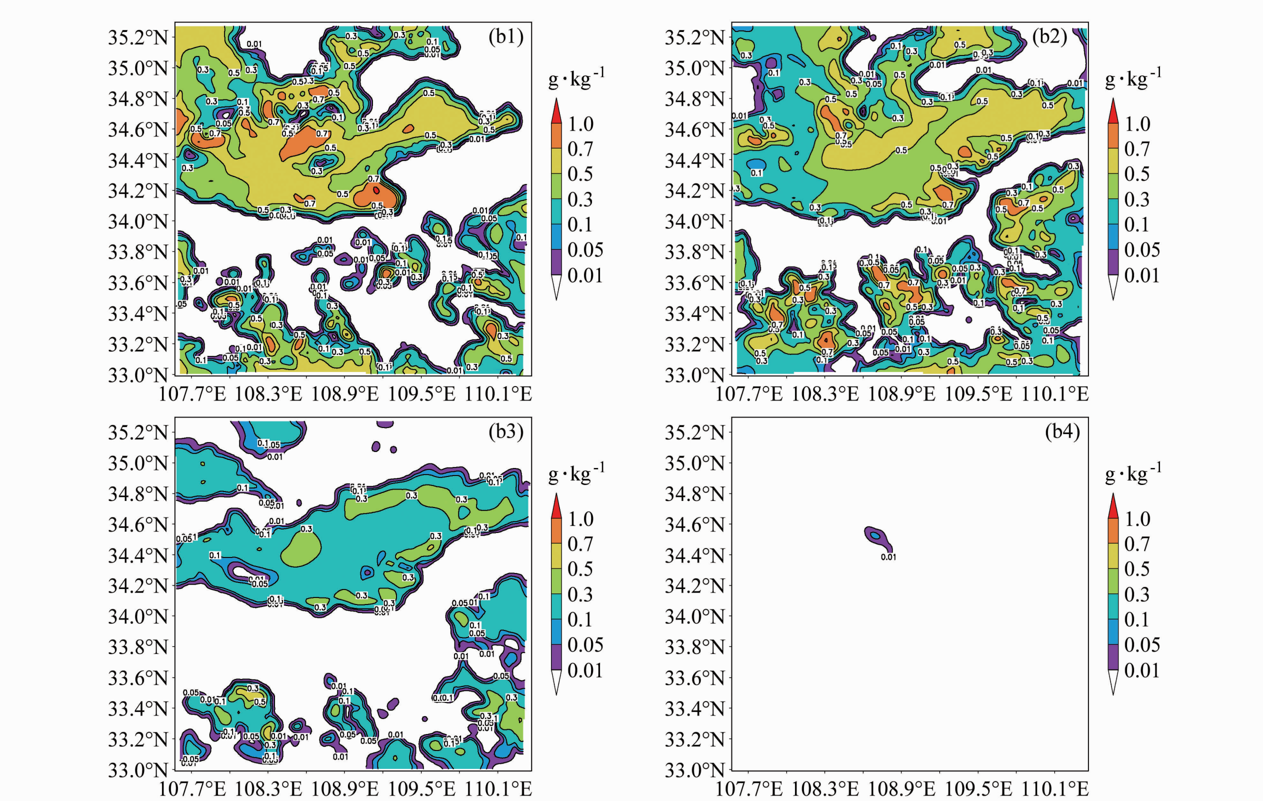

图 5　（续）

Fig. 5　(Continued)

从以上分析可见，雾的形成是在 20 时以后，午夜至日出前最浓，08 时以后雾开始减轻，中午前后雾开始消散，雾的日变化特征明显，这反映辐射在此次雾形成、维持和消散过程中的重要作用；且雾从发生到发展阶段以及雾的消散阶段是迅速的，雾的发展阶段是缓慢的。雾基本上成片出现，既有大片雾区相连，也有零星分布的小雾区，雾的水平分布很不均匀，下垫面会造成对雾的影响。与实际相比（地面天气图略），模拟的雾区比较符合，但雾水含量有一些差别，雾后至 20 时的轻雾也不能很好地表现出来。

18 日 00 时，即雾较浓时，西安和临潼的相对湿度都达到 100%，在雾的发展阶段，相对湿度也保持在 90%～100%，而 4 m 高度上的风都很小。12 时雾基本消散，西安附近的相对湿度减小到 70%～90%，风速变化也不大（见图 7）。这说明相对湿度大、小风的条件有利于雾的形成与维持。而风对于雾的消散影响也不大，说明雾消散的原因主要是由辐射等其他因素造成的。

4.3　雾的垂直结构

从图 9 和图 10 可以看到，17 日 22 时近地层的逆温最强，地面的液水混合比也最大。18 日 00 时（雾形成后）低层逆温已破坏，但 60 m 高度（σ 坐标值为 0.9915）以上仍然有深厚的逆温层存在，此时的液水混合比也是在 60 m 高度处最大，此高度以上迅速减小，雾顶高度约 60 m 左右。02 时 40 m 处高度以上有逆温层存在，同时液水混合比也比 00 时略小，最大雾水含量中心位于 40 m 处，雾顶高度大约 120 m。06 时温度变化不大，但液水混合比的最大值位于 85 m 高度（σ = 0.9880），向上的含水量逐渐减小，约 200 m 高度处为 0。到 10 时，上层逆温继续向下延伸，液水混合比也很小，最大仅有 0.03 $g \cdot kg^{-1}$，位于地面以上约 20 m 处。14 时，逆温层完全被破坏，雾也完全消散。直到 22 时，出现与 17 日相似的情形，近地层重新出现逆温，贴近地面的液水混合比最大，为 0.17 $g \cdot kg^{-1}$。02 时，近地层的垂直温度直减率为 0.7 ℃ · $(100\ m)^{-1}$，在约 60 m（σ=0.9915）以上出现逆温层，此处的液水混合

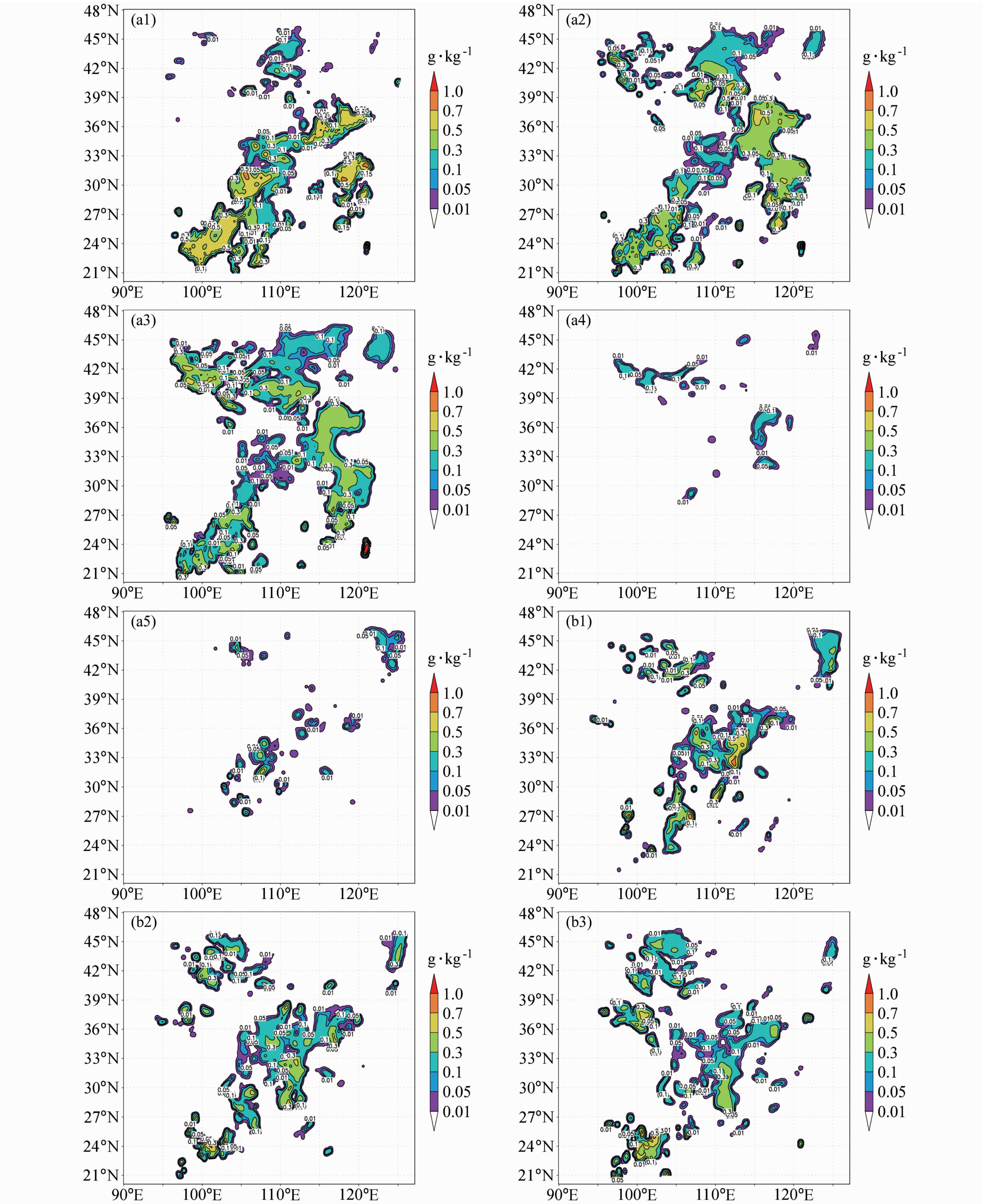

图 6 同图 5，但为区域 1 ：（a1）18 日 00 时；（a2）18 日 04 时；（a3）18 日 08 时；（a4）18 日 12 时；（a5）18 日 20 时；（b1）19 日 00 时；（b2）19 日 04 时；（b3）19 日 08 时

Fig. 5 Same as Fig. 5，but for D1：（a1）0000 LST 18 Dec；（a2）0400 LST 18 Dec；（a3）0800 LST 18 Dec；（a4）1200 LST 18 Dec；（a5）2000 LST 18 Dec；（b1）0000 LST 19 Dec；（b2）0400 LST 19 Dec；（b3）0800 LST 19 Dec

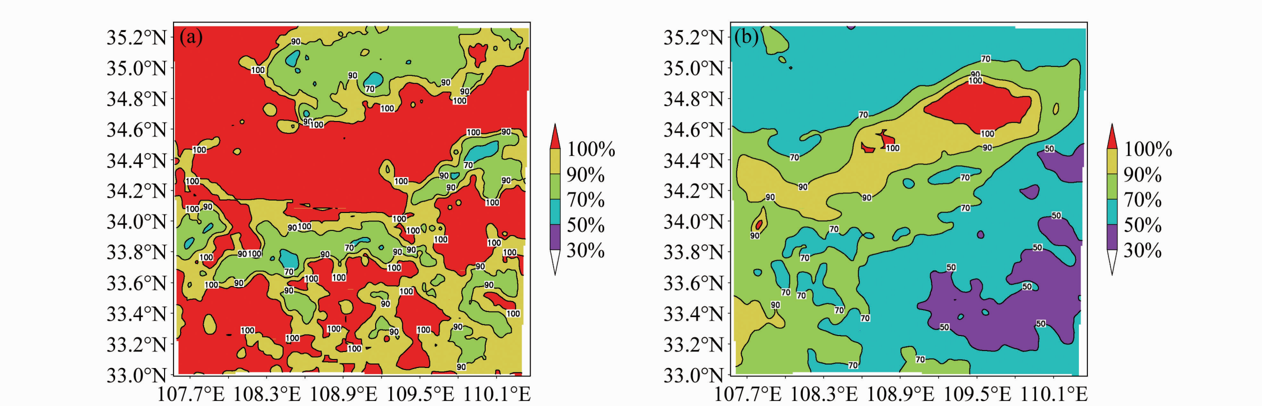

图 7　2004 年 12 月 18 日（a）00 时和（b）12 时在地面 4 m 高度上模拟的相对湿度

Fig. 7　Simulated relative humidity at (a) 0000 LST and (b) 1200 LST on 18 Dec 2004 at the height of 4 m

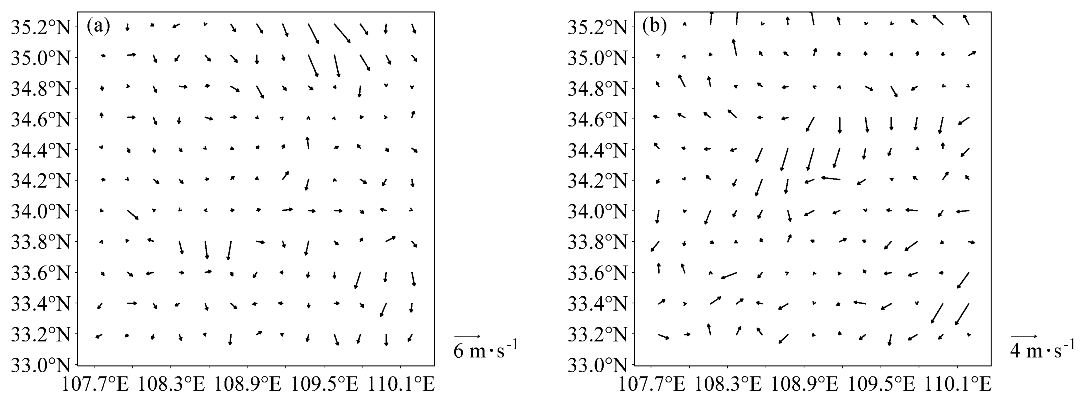

图 8　同图 7，但为风场

Fig. 8　Same as Fig. 7, but for wind fields

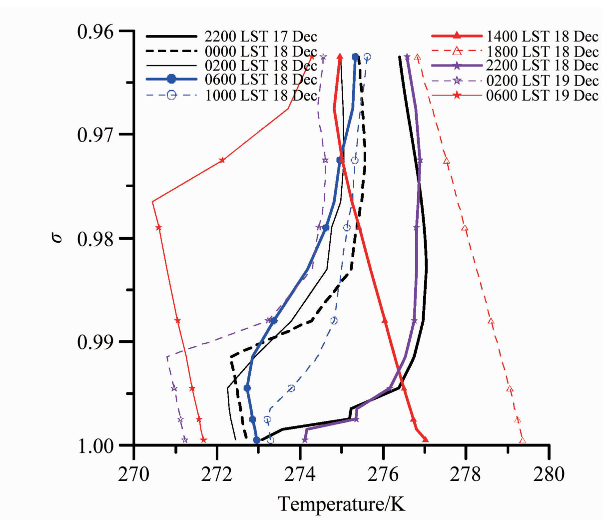

图 9　不同时刻气温随高度的变化

Fig. 9　Vertical variations of the air temperature

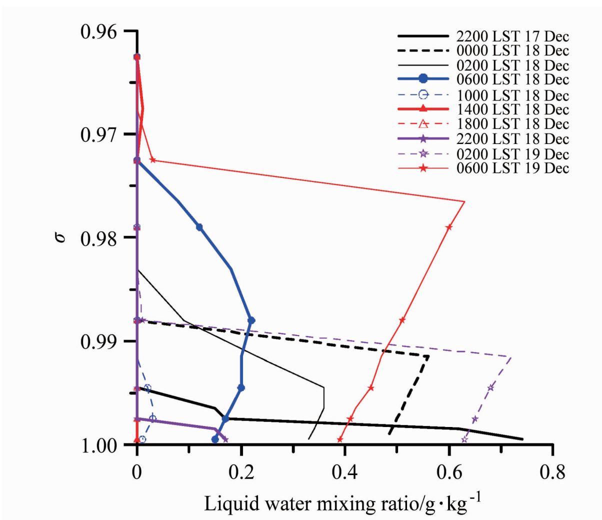

图 10　液水混合比随高度的变化

Fig. 10　Vertical variations of the liquid water mixing ratio

比也最大，为 0.72 g · kg^{-1}。06 时，低层的稳定层结抬升至约 170 m（σ=0.9765），此高度以上为深厚的逆温层，此处的液水混合比也最大，为 0.63 g · kg^{-1}。

从图 11 可以更清晰地看到雾垂直方向的发展和演变。雾最先出现在地面，然后不断向高处发展。浓雾中心位于地面或地面附近，没出现两层雾结构，也没有出现雾的爆发性增长现象。

以上分析表明，17 日 22 时雾首先在地面生成，然后由地面向上发展。雾形成时近地面有逆温层存在，雾形成后，原来的逆温层被破坏，但仍为相对稳定的层结，维持着雾的存在，次日 14 时，雾完全消散。18 日 22 时，又出现与前一日相似的情形。

4.4　能见度的变化

根据理论，雾中的能见距离即能见度 $V_{\rm is}$（单位：km）可以从下式算出：

$$V_{\rm is} = -\frac{\ln\varepsilon}{\beta},$$

其中，ε 是（人眼亮度）对比感阈，ε=0.02；β 是消光系数，决定于雾滴谱的分布，

$$\beta = \frac{\pi}{4}\sum_i Q_{\rm ext}(\lambda, D_i)n_i D_i^2,$$

其中，$Q_{\rm ext}$ 为单个水滴的衰减截面系数，λ 是光波

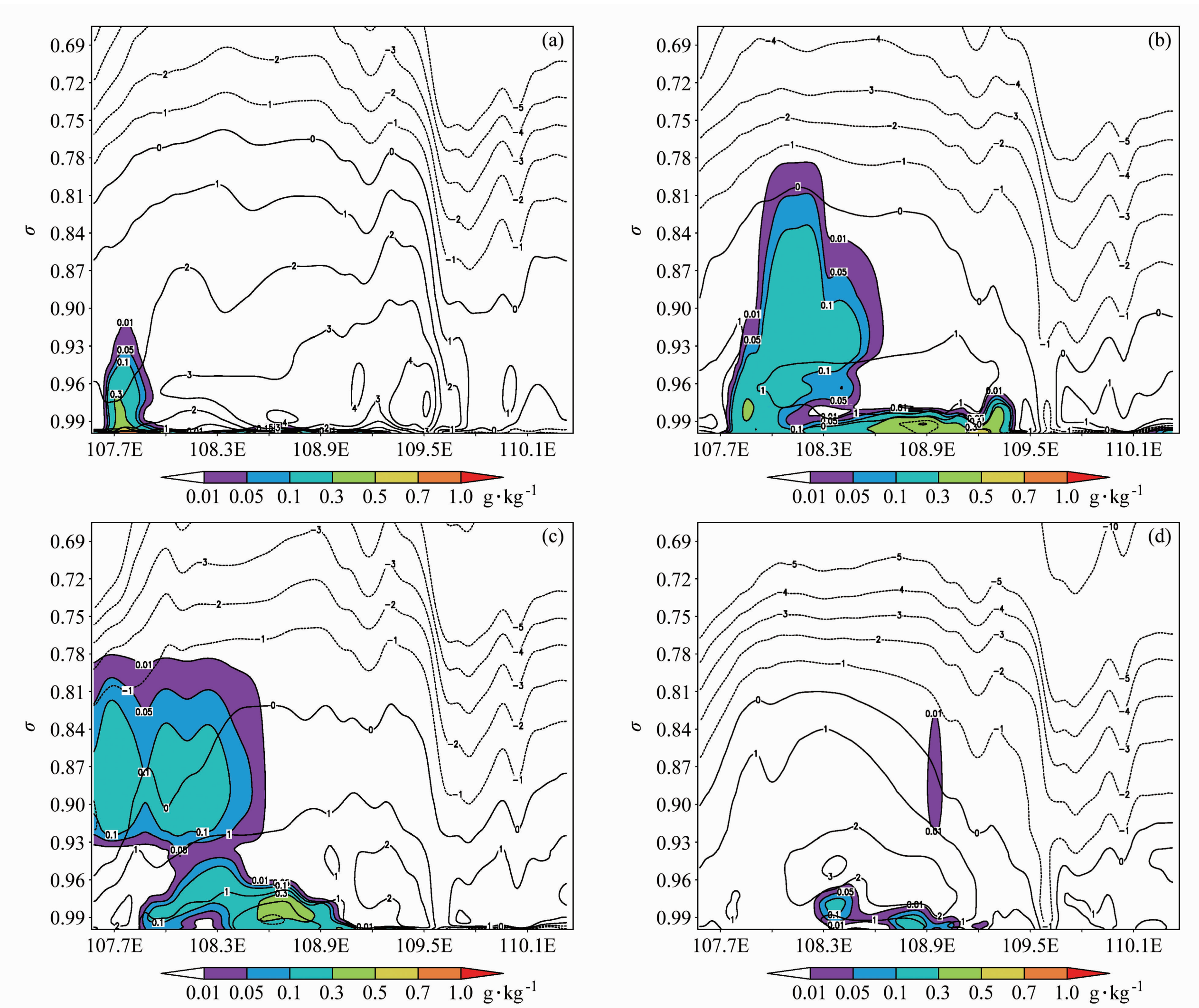

图 11　液水混合比（阴影）和空气温度（等值线，单位：℃）沿 34°N 的高度—经度剖面：（a）17 日 21 时；（b）18 日 02 时；（c）18 日 06 时；（d）18 日 10 时

Fig. 11　Vertical cross section of the liquid water mixing ratio (shaded) and air temperature (isolines, units: ℃) along 34°N: (a) 2100 LST 17 Dec; (b) 0200 LST 18 Dec; (c) 0600 LST 18 Dec; (d) 1000 LST 18 Dec

波长，D_i 为单个水滴直径，n_i是直径为 D_i 的雾滴浓度。当 $\pi D_i/_\lambda \ll 1$ 时，$Q_{\mathrm{ext}} \cong 2$，因此，

$$\beta=\frac{\pi}{2}\sum_i n_i D_i^2.$$

对于每次雾的过程，β 值是不同的。许绍祖和尹球（1988）用 7 次大陆性雾和海洋性雾过程的 165 份滴谱得到能见度 V_{is} 与含水量 w（单位：g・m^{-3}）之间的回归方程为

$$V_{\mathrm{is}} = 0.096 w^{-0.758},$$
$$\beta = 40.75 w^{0.758},$$

而用此总体样本的能见度公式比用单次雾自身的能见度公式计算得到的能见距离，最大偏差可达 50%以上。因此，对于不同的雾过程应采用自身的能见距离公式。本文中应用 Kunkel（1984）的经验公式

$$V_{\mathrm{is}} = -\frac{\ln 0.02}{\beta},$$
$$\beta = 144.7(\rho_0 q)^{0.88},$$

其中，ρ_0 是水的密度（单位：g・cm^{-3}），q 是液态水含量（单位：g・kg^{-1}）。模拟的 18 日 00 时（图 12a）西安站雾水含量为 0.44 g・kg^{-1}，能见度为 56 m，比实际能见度小（图略）；08 时（图 12b）雾水含量为 0.09 g・kg^{-1}，能见度为 225 m，与实际能见度接近。

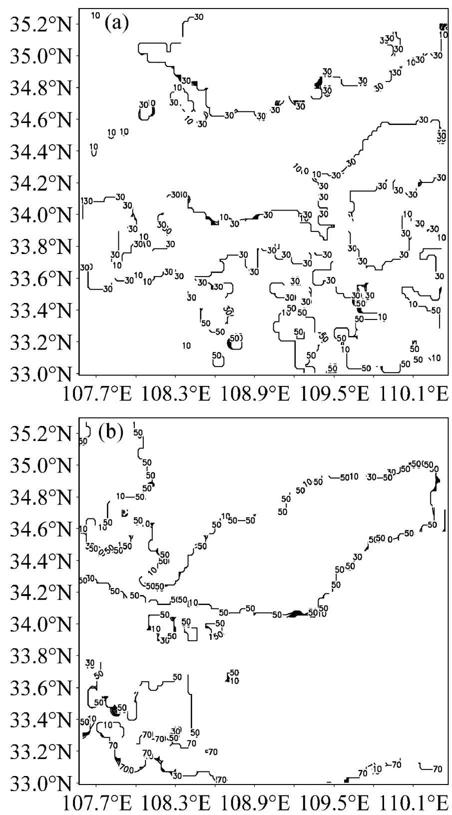

图 12　12 月 18 日（a）00 时和（b）08 时模拟的地面 4 m 高度上的能见度（单位：m）

Fig. 12　Simulated visibility (m) at (a) 0000 LST and (b) 0800 LST on 18 Dec at the height of 4 m

4.5　辐射对雾的影响

地面温度（图 13 所示）在 08～20 时之间是逐渐上升的，14 时达到一个次高峰 5.7 °C，16 时达到最高温 8.0 °C，这与地面吸收太阳短波辐射的变化一致（16 时地面吸收太阳短波辐射为 360.0 W・m^{-2}），地面吸收太阳辐射增温后，带动地面气温的增加。地面的长波辐射在 18 日 14 时前，大都在 310 W・m^{-2}左右；18 日 14 时至 19 日 00 时减小，大约为 260 W・m^{-2}。而云顶向外的长波辐射与地面长波辐射降温几乎是反相的，从 17 日 20 时至 18 日 05 时，辐射是逐渐减小的，由 240.0 W・m^{-2}减小到 124.6 W・m^{-2}，然后又逐渐增加，20 时最大，为 250.0 W・m^{-2}，一直到 19 日 06 时，长波辐射变化不大。

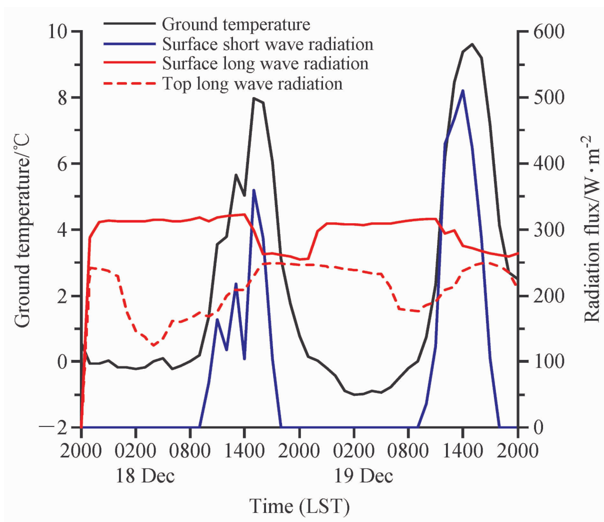

图 13　模拟的地面温度、地面长短波辐射与云顶长波辐射随时间的变化

Fig. 13　Variations of the simulated surface temperature, long and short wave radiations at the surface and the top long wave radiation

太阳短波辐射使大气增温，地面和云顶的长波辐射使大气降温。地面温度的变化，除了受湍流扩散、土壤和植被特性等影响外，主要受太阳辐射增温和地面辐射降温的影响，是地面吸收太

阳短波辐射增温和发射长波辐射降温的综合作用。而地面温度的变化与雾的日变化特征比较一致，18日00～08时地面降温、温度较低时有雾产生并发展，08～12时随着太阳辐射的增强、地面温度的升高，雾逐渐减弱并消散，同时雾产生后，云顶的长波辐射降温增加，会使云顶附近的相对湿度达到饱和而发生凝结，使雾向上发展。因此，这是一次典型的辐射雾过程。

5 结果与讨论

通过对这次大雾的数值模拟分析，此次大雾的主要特点有：

（1）这是一次典型的辐射雾过程，西安附近处于暖雾区，除暖雾区外，在西安以北还有大片冷雾区存在。

（2）这次区域雾的覆盖范围较大，既有小片、零星的雾区，也有面积上万平方公里的大片雾区，雾的水平分布很不均匀，随时间也有很大变化。雾区边缘的不均匀性，也反映了下垫面对雾的影响。

（3）雾首先从地面生成、然后不断向高处扩展。雾顶最高时，可达200 m，浓雾中心一般在地面附近，没有出现雾的爆发性增长。

（4）雾的形成是在20时以后，午夜至日出前最浓，00～08时雾区的范围逐渐增加，浓雾区的范围逐渐减小，雾的扩散明显。08时以后雾开始减轻，中午前后雾开始消散，雾的日变化特征明显。雾从发生到发展阶段以及雾的消散阶段是迅速的，雾的发展阶段是缓慢的。而实际观测表明中午前后雾是由清晨的浓雾减弱为雾，与模拟结果存在一些差异。

这次大雾的成因主要有：

（1）充沛的水汽供应，空气中的相对湿度在雾形成时达到100％；

（2）在雾的形成和消散阶段风力不大，小风的条件有利于雾的形成与维持；

（3）17日夜晚（22时）雾形成时近地面有逆温层存在，雾形成后，原来的逆温层被破坏，但仍为相对稳定的层结，维持着雾的存在，18日14时，雾完全消散；

（4）太阳短波辐射增温和地面长波辐射降温是这次雾形成和消散的主要原因。

虽然中尺度数值模式MM5模拟的液水混合比和能见度与实际相比有一些差别，但MM5可以较好地模拟出这次雾发生、发展的演变过程，基本反映雾的日变化特征，还能够清晰地看到雾的垂直结构，这可以弥补观测上的不足。此外，MM5中物理过程方案的选取对模拟结果也有较大影响，应选择合适的物理方案进行雾过程的模拟。

致谢 在本文完成过程中得到黄美元研究员的指导和帮助，在此表示感谢！

参考文献（References）

Ballard S P, Golding B W, Smith R N B. 1991. Mesoscale model experimental forecasts of the haar of northeast Scotland [J]. Mon. Wea. Rev., 119: 2107-2123.

Barker H E. 1977. A maritime boundary-layer model for the prediction of fog [J]. Bound.-Layer Meteor., 11: 267-294.

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

Bott A, Sievers U, Zdunkowski W. 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics [J]. J. Atoms. Sci., 47 (18): 2153-2166.

Bott A. 1991. On the influence of the physics-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. Bound.-Layer Meteor., 56: 1-31.

Cotton W R, Anthes R A（叶家东等译）. 1993. 风暴和云动力学[M]. 北京：气象出版社，331-356. Cotton W R, Anthes R A. 1993. The Dynamics of Storm and Cloud [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 331-356.

董剑希. 2005. 雾的数值模拟研究及其综合观测 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Dong Jianxi. 2005. Study on numerical simulation of fog and field observations [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

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., 119: 324-341.

Estoque M A. 1963. A numerical model of atmospheric boundary layer [J]. J. Geophys. Res., 68: 1103－1113.

樊琦，吴兑，范绍佳，等. 2003. 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），42（1）：83－86. Fan Qi, Wu Dui, Fan Shaojia, et al. 2003. Numerical simulation of a heavy fog in Guangzhou [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 42 (1): 83－86.

Fisher E L, Caplan P. 1963. An experiment in the numerical prediction of fog and stratus [J]. J. Atmos. Sci., 20: 425－437.

Fu G, Guo J, Xie S H, et al. 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea [J]. Atmos. Res., 81: 293－303.

Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1992. The Po valley fog experiment: An overview [J]. Tellus, 44B: 448－468.

郭恩铭. 1989. 双流机场雾宏微观结构研究. 全国云物理和人工影响天气会议文集 [C]. 北京：气象出版社，35－38. Guo Enming. 1989. Study on fog structure over Shuangliu airport. Proceedings of National Conference of Cloud Physics and Weather Modification [C] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 35－38.

郭恩铭，刘钟源，蒋瑞滨. 1990. 人工影响暖雾试验研究 [J]. 气象学报，48（2）：232－238. Guo Enming, Liu Zhongyuan, Jiang Ruibin. 1990. An experimental study on warm fog modification [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 48 (2): 232－238.

黄玉生，黄玉仁，李子华，等. 2000. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变 [J]. 气象学报，58（6）：715－725. Huang Yusheng, Huang Yuren, Li Zihua, et al. 2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (6): 715－725.

Jiusto J E, Lala G. 1980. Radiation fog formation and dissipation: A case study [J]. J. Rech. Atmos., 14: 391－397.

Kong F Y. 2002. An experimental simulation of a coastal fog-stratus case using COAMPS (tm) model [J]. Atmos. Res., 64: 205－215.

Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J. Climate and Appl. Meteor., 23: 34－41.

李子华，黄建平，周毓荃，等. 1999. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征 [J]. 气象学报，57（5）：622－631. Li Zihua, Huang Jianping, Zhou Yuquan, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (5): 622－631.

李子华，彭中贵. 1994. 重庆市冬季雾的物理化学特性 [J]. 气象学报，52（4）：477－483. Li Zihua, Peng Zhonggui. 1994. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (4): 477－483.

李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的研究 [J]. 气象学报，59（5）：616－624. Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 616－624.

李子华，杨军，石春娥. 2008. 地区性浓雾物理 [M]. 北京：气象出版社，39－54. Li Zihua, Yang Jun, Shi Chune, et al. 2008. The Physics of Regional Dense Fog [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 39－54.

梁爱民，张庆红，刘开宇，等. 2007. 华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验 [J]. 气象学报，65（5）：792－804. Liang Aimin, Zhang Qinghong, Liu Kaiyu, et al. 2007. 3D variation data assimilation experiments on a dense fog event over North China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (5): 792－804.

Meyer M B, Jiusto J E, Lala G G. 1980. Measurements of visual range and radiation-fog (haze) microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 37: 622－629.

Pagowski M, I Gultepe, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. J. Atmos. Meteor., 43: 3－16.

Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975. The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics [J]. J. Appl. Meteor., 14: 347－363.

Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of clouds and precipitation [J]. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 10－15.

濮梅娟，张国正，严文莲，等. 2008. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征 [J]. 中国科学（D 辑），38（6）：776－783. Pu Meijuan, Zhang Guozheng, Yan Wenlian, et al. 2008. Characteristics of an unusual advection-radiation fog process [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 38 (6): 776－783.

Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog I—A field study [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102: 313－333.

Roach W T, Brown R. 1976. The physics of radiation fog: 2-D numerical study [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Sci., 102: 335－354.

石春娥，曹必铭，李子华，等. 1996. 复杂地形上三维局地环流的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报，19（3）：320－328. Shi Chun'e, Cao Biming, Li Zihua, et al. 1996. Numerical simulation of 3D local circulation over a complicated terrain [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (3): 320－328.

石春娥，姚克亚，马力. 2001. 气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究，6（4）：485－492. Shi Chun'e, Yao Keya, Ma Li. 2001. Numerical studies of effects of aerosols on urban fog [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 485－492.

石红艳，王洪芳，齐琳琳，等. 2005. 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），6（4）：404－408. Shi Hongyan, Wang Hongfang, Qi Linlin, et al. 2005. Numerical simulation of radiation fog event in Yangtze River [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (in Chinese), 6 (4): 404－408.

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.

Taylor G I. 1917. The formation of fog and mist [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 183: 241－268.

Turton J D, Brown R. 1987. A comparison of a numerical study of radiation fog with detailed observation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113: 37－54.

Wobrock W, Schell D, Maser R, et al. 1992. Meteorological characteristics of the Po valley fog [J]. Tellus, 44B: 469－488.

吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 2004. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究 [J]. 气象学报, 62 (4): 476－485. Wu Dui, Deng Xuejiao, Ye Yanxiang, et al. 2004. The study on fog water chemical composition in Dayaoshan of Nanling Mountain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 476－485.

吴兑, 邓雪娇, 毛节泰, 等. 2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究 [J]. 气象学报, 65 (3): 406－415. Wu Dui, Deng Xuejiao, Mao Jietai, et al. 2007. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 406－415.

吴兑. 2008. 雾与霾的识别和资料分析处理 [J]. 环境化学, 27 (3): 327－330. Wu Dui. 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. Environmental Chemistry (in Chinese), 27 (3): 327－330.

许绍祖, 尹球. 1988. 雾能见距离和光衰减系数的参数化公式 [J]. 气象科学, 4: 62－68. Xu Shaozu, Yin Qiu. 1988. The parameterization of visibilities and extinction coefficients in fogs [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 4: 62－68.

杨中秋, 许绍祖, 耿骠. 1989. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构 [J]. 海洋学报, 11 (4): 431－438. Yang Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Biao. 1989. Formation and microphysical structure of spring sea fog over Zhoushan [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 11 (4): 431－438.

Zdunkowski W, Nielsen B. 1969. A preliminary prediction analysis of radiation fog [J]. Pure Appl. Geophys., 19: 45－66.