

齐琳琳, 王晓丹, 宁应惠, 等. 2010. 耦合模式在局地辐射雾三维数值模拟研究中的应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 53-63. Qi Linlin, Wang Xiaodan, Ning Yinghui, et al. 2010. Application of a coupled model in numerical simulation of local radiative fogs [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 53-63.

# 耦合模式在局地辐射雾三维数值模拟研究中的应用

齐琳琳<sup>1,3</sup> 王晓丹<sup>2</sup> 宁应惠<sup>1</sup> 孙建华<sup>3</sup>

1 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 本文利用中尺度数值模式 MM5 与三维辐射雾模式相耦合, 分别对重庆和长沙地区的一次冬季辐射雾过程进行了模拟研究。结果表明, 中尺度数值模式与三维辐射雾模式的单向耦合可以较好地模拟出雾的生消演变过程, 以及雾的浓度、地理分布特征、形成和维持。由此可以说, 利用耦合模式开展雾的预报是可行的。

**关键词** 雾 中尺度数值模式 三维辐射雾模式 单向耦合

**文章编号** 1006-9585 (2010) 01-0053-11 **中图分类号** P45 **文献标识码** A

## Application of a Coupled Model in Numerical Simulation of Local Radiative Fogs

QI Linlin<sup>1,3</sup>, WANG Xiaodan<sup>2</sup>, Ning Yinghui<sup>1</sup>, and SUN Jianhua<sup>3</sup>

1 *Institute of Aeronautical Meteorology and Chemical Defense, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085*

2 *Institute of Meteorology, PLA University of Sciences and Technology, Nanjing 211101*

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

**Abstract** A 3D fog model coupling with the MM5 is used to simulate the local winter radiation fogs in Chongqing and Changsha respectively. The results show that the unilaterally coupled model can reproduce the circulation and the heavy radiation fogs, especially, the occurrence, location, dissipation, and concentration of the fogs. So it is feasible to apply the 3D fog model, coupled with the MM5, in the forecast of fog.

**Key words** fog, mesoscale model, 3D fog model, unilateral coupling

## 1 引言

雾是大量微小水滴悬浮于空中, 使近地面水平能见度降到 1 km 以下的天气现象。近年来随着社会经济的迅速发展, 大雾引发的低能见度不仅会严重阻碍交通运输, 而且也使得空气质量日趋

恶化, 造成的社会危害愈加突出。因此, 加强雾的成因机理和结构特征研究, 完善雾的监测和预报已成为当前气象部门十分紧迫的任务。目前, 随着数值预报模式的日趋完善, 利用高分辨率数值模式开展雾的研究已成为相对便捷、直接的手段。有效的雾预报不仅能为净化大气、保护环境提供一定科学依据, 而且在减少交通事故、

**收稿日期** 2008-12-17 收到, 2009-09-28 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金项目 40605016

**作者简介** 齐琳琳, 女, 1973 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟研究。E-mail: niceqll@mail.iap.ac.cn

降低国民经济损失方面 also 具有重要的现实意义。

自 1963 年 Fishe 等人首次建立雾数值模式以来, 雾的数值模拟研究得到了广泛地开展 (Brown, 1980; Ohat et al., 1986; Bott, 1991; Duynkerke et al., 1991)。迄今为止, 经过国内外众多学者数十年的不断深入研究, 雾的数值模拟研究已取得了显著成果 (Brown and Roach, 1976; Turton and Brown, 1987; 周斌斌, 1987; Bott et al., 1990), 从不同角度建立的雾模式基本上可以较好地模拟出雾的形成和发展特点 (黄培强和郭岚, 1986; 钱敏伟和雷孝恩, 1990; 尹球和许绍祖, 1993; 张利民和李子华, 1993)。孙旭东等 (1991) 利用建立的二维非定常平流辐射雾数值模式, 成功地模拟出辐射雾、平流雾和在海陆交接处的平流辐射雾的形成和发展演变规律, 指出盛行风的大小及地表温度梯度的强度对平流雾影响很大, 雾滴的辐射对辐射雾的雾顶抬升起着重要的作用。石春娥等 (1997) 构建出三维非定常雾模式, 并在理想初值条件下成功地模拟出冬季雾的生消过程和空间分布特征, 以及重庆地区因山地、河流和城市热岛而引起的局地环流。

以往研究表明, 尽管三维非定常雾模式考虑了较多因子的影响, 适合于复杂地形上的小尺度雾的模拟, 能近似地表达出雾的规律, 且运行时间短, 是制作小范围或单点上空雾的宏微观特征预报的很好工具。但模式是针对局地性雾设计的, 运行需要定点区域内的大气层结信息, 而目前用于反映大气层结信息的探空资料时空尺度过于稀疏, 无法满足实时局地性雾的预报。与此同时, 大量研究表明 (董剑希等, 2006; 周梅等, 2008), 随着中尺度模式发展日益成熟, 其在区域性雾的预报中也得到广泛应用。但由于模式的通用性, 因此提供的多是区域性雾特征、演变预报, 不适用于局地性快速、定点雾预报。由此可见, 如能将雾模式与中尺度模式耦合, 利用中尺度模式为雾模式提供时空分辨率均较高的初始场, 同时发挥雾模式在物理机制上的优势及雾的反馈机制, 可成为提高雾预报的一个重要发展方向。为此, 本文尝试性地开展了 MM5 中尺度模式与三维雾模式相耦合的雾预报研究, 以期探讨其在雾的实际预测中应用的可行性, 为进一步实现雾的业务预报提供基础。

## 2 模式简介及方案设计

中尺度数值模式 MM5V3 是目前发展成熟且应用广泛的数值预报模式, 曾成功地用于夏季华南与长江流域梅雨过程、热带气旋登陆引发的城市暴雨灾害等研究 (孙建华和赵思雄, 2000; 齐琳琳和赵思雄, 2003, 2006; )。

三维非定常雾模式是一种主要用于模拟辐射雾的小尺度模式。它不仅考虑了湍流交换、地表大气的长波辐射、太阳短波辐射、水汽蒸发和凝结、雾水重力沉降和地表能量平衡等物理过程, 而且还进一步考虑了大气气溶胶粒子辐射及植被的影响, 可以较好地再现区域内雾的不均匀分布及其三维结构等特征 (石春娥等, 1997)。此模式曾成功地用于重庆城市雾和西双版纳山谷雾等的研究中 (石春娥等, 1997)。

本文分别针对重庆和长沙地区辐射雾过程, 开展了 MM5 中尺度模式与三维雾模式相耦合的雾模拟研究, 以此来分析耦合模式对不同地形环境下辐射雾的模拟效果, 从而探讨地域差异对雾预报的影响, 以及耦合模式进行雾预报的可行性。下面我们将 MM5 模式与三维雾模式单向耦合的这种模拟方法简称为 MM5-FOG, 具体模拟方案设计如下:

(1) MM5 中尺度模式均采用双向两重嵌套网格, 格距分别为 15 km 和 5 km, 重庆的模式中心区域为 (29.52°N, 106.49°E), 长沙的中心区域为 (28.1°N, 113°E)。模式初边值均采用  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP 再分析资料, 且经过地面和高空观测资料的客观订正形成。物理过程分别采用混合相微物理方案、Grell 积云参数化方案及 RRTM 长波辐射方案等。模拟时段分别为 2003 年 1 月 22 日 00 时 (协调世界时, 下同) 至 23 日 00 时 (重庆雾过程), 2003 年 12 月 12 日 00 时至 13 日 00 时 (长沙雾过程), 输出频率均为 6 h。

(2) 雾模式水平采用  $30 \times 30$  的交错网格分布, 格距为 5 km。为减小侧边界的影响, 将水平网格边界上的 3 个网格作为模式的伸展网格。模式垂直方向不等距地分为 19 层, 分别为 0、2、6、15、30、50、75、100、125、150、200、250、350、450、550、700、900、1200、1500 m。

(3) 雾模式的初始场、地形和地表植被类型等来自 MM5 中尺度模式区域 2 的输出结果, 以此来驱动三维雾模式的运行。重庆和长沙地区辐射雾过程的模拟时段分别为 2003 年 1 月 22 日 12 时至 23 日 12 时, 2003 年 12 月 12 日 12 时至 13 日 12 时, 输出频率均为 30 分钟。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 重庆地区辐射雾的模拟分析

2003 年 1 月 22 ~ 23 日重庆地区出现了一次大雾过程, 天气形势分析表明 (图略), 重庆地区 700 hPa 以下均处于高压控制区内, 天气形势稳定, 气压梯度很小, 系统性风场很弱, 低层水汽充沛, 有利于辐射雾的形成。从大雾过程的地面实况也可以看出 (表 1), 22 日 12 时至 18 时, 重庆地区天空晴朗无云, 地面为西北风, 风速很小, 湿度较大, 且已有轻雾出现。21 时前后, 地面温度由 11.8 急剧下降到 5.9, 同时相对湿度增加到 95.7%, 空气接近饱和, 表明轻雾已开始向大雾发展。23 日 00 时, 大雾发展到最强的阶段, 地面能见度降至 100 m 以下。03 时前后, 由于太阳辐射增温作用, 大雾逐渐消散, 天气有所好转。

MM5 模式模拟的 2003 年 1 月 22 日 12 时 850 hPa 位势高度和风场分布显示 (图略), 中尺度模式较好地模拟出了该地区对流层低层处于高压控制区内, 天气形势稳定, 系统性风弱, 以及低层水汽充沛等形势特点, 模拟效果较好。这为下一步利用此模拟结果进行重庆雾模拟提供了合理的依据。

气象观测对大雾的定义为: 悬浮在贴近地面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。一般认为 (Cotton and Anthes., 1993; 邹进上等, 1982): 雾在 -15 ~ 0 时的液态水含量范围为  $0.05 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 所以我们采用液态水含量来描述模拟结果中雾的消长过程。图 1 是由 MM5-FOG 模拟得到的 22 日 13 时 30 分、15 时、21 时、23 日 00 时近地层液态水含量分布。由图 1 可见, 2003 年 1 月 22 日 13 时 30 分, 雾首先形成于东部高山区, 范围较小。15 时, 雾区范围扩大, 覆盖了大部分的模拟区域, 东侧等值线比较密集, 雾的浓度稍强。21 时, 重庆地区已由轻雾发展成大雾, 东侧高地上的液态水含量最大值达到  $0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。液态水含量的大值中心几乎与地形等高线高值区相一致, 这可能是由于这些地方辐射冷却快, 水汽凝结比较充分造成的。模拟区域中部的液态水含量相对较小, 这可能与城市热岛效应有关。市区内的相对高温使得成雾过程中, 空气冷却程度不强, 饱和度不高, 雾滴不能充分凝结增长, 因而造成液态水含量相对较小。23 日 00 时, 整个区域的液态水含量继续上升, 但幅度不大, 此时大雾发展到了最强阶段。00 时后, 随着地面温度的上升, 地面相对湿度减小, 雾开始消散。23 日 02 时 30 分后, 整个模拟区域的地面辐射雾全部消散殆尽, 残余的雾以低云的形式存在。图 2 和 3 分别是模拟的 2003 年 1 月 22 日 15 时和 21 时温度、湿度、液态水含量沿 29.5°N 和 106.5°E 的垂直分布图。从剖面图上可以看出, 处于形成阶段时, 近地面逆温层已经形成, 地面和近地层大气的温度降低, 其中中部的降温幅度稍小些, 南北两侧的降温明显。相对湿度的高值区位于东南部, 与地形等高线的大值区相对应, 10 m 以下的相对湿度达到 85% 以上, 与观测的结果基本一致, 有利于辐射雾的形

表 1 2003 年 1 月 22 日 12 时 ~ 23 日 03 时重庆地区地面实况

Table 1 The surface observations in Chongqing from 1200 UTC 22 to 0300 UTC 23 Jan 2003

时间	风向	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	能见度/km	温度/	露点/	相对湿度
22 日 12 时	270°	2	2.0	11.8	8.1	76.4%
22 日 15 时	290°	2	1.8	9.6	7.5	85.8%
22 日 18 时	290°	2	1.8	8.1	6.7	90.3%
22 日 21 时	290°	0	1.6	5.9	5.3	95.7%
23 日 00 时	270°	1	< 0.1	6.2	5.6	95.7%
23 日 03 时	290°	1	1.3	10.3	9.1	91.6%

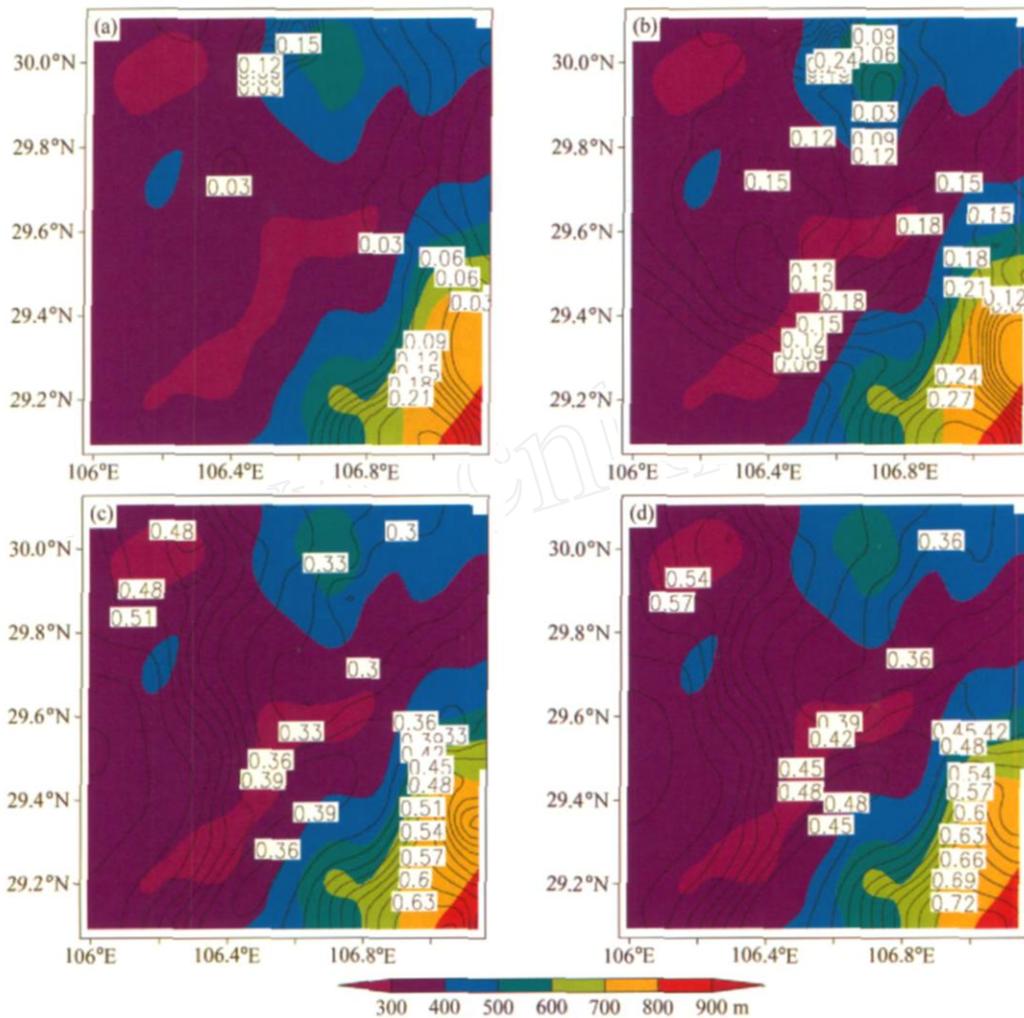


图1 2003年1月22日(a)13时30分、(b)15时、(c)21时、(d)23日00时近地层液态水含量(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和地形高度(阴影)分布图

Fig. 1 The simulated liquid water content (contour, units:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) at surface and topography (shaded) at (a) 1330 UTC 22, (b) 1500 UTC 22, (c) 2100 UTC 22, and (d) 0000 UTC 23 Jan 2003

成。雾的厚度基本上都很薄,只有几米。而处于发展阶段时,地面和近地层大气的温度持续降低,相对湿度明显增大,30 m以下的空气都已经接近饱和,中高层中部的相对湿度稍小些。南部大雾发展迅速,高地处雾的厚度大,大约在100 m左右,中部地区雾厚度薄,不到40 m,以往的观测指出,重庆雾的厚度一般在200~400 m,而模拟雾的厚度基本低于100 m,远小于以往的观测值,模拟结果明显偏小(石春娥等,1997)。

由此可以说,此次重庆大雾过程可分为四个阶段:1)雾形成阶段(2003年1月22日13时30分至15时),东侧高地首先产生辐射雾,然后向中西部扩展,至15时雾区基本覆盖了整个模拟

区域;2)雾发展阶段(2003年1月22日15时至21时),空气继续冷却,雾体浓度和厚度加大,重庆地区由轻雾发展为大雾;3)雾成熟阶段(2003年1月22日21时至23日00时),地面降温停止,液态水含量继续上升,但变化不大,雾顶升高;4)雾消散阶段(2003年1月23日00时至02时),由于太阳辐射导致地表增温,热量向上传输,雾底液态水含量迅速减小,大雾消散。所得结论与石春娥的模拟结果(石春娥等,1997)具有很好的一致性。

综上所述,除模拟的大雾消散时间较实况有所提前以及雾的厚度偏小外,由MM5-FOG得到的模拟结果还是很好地模拟出了此次重庆辐射雾

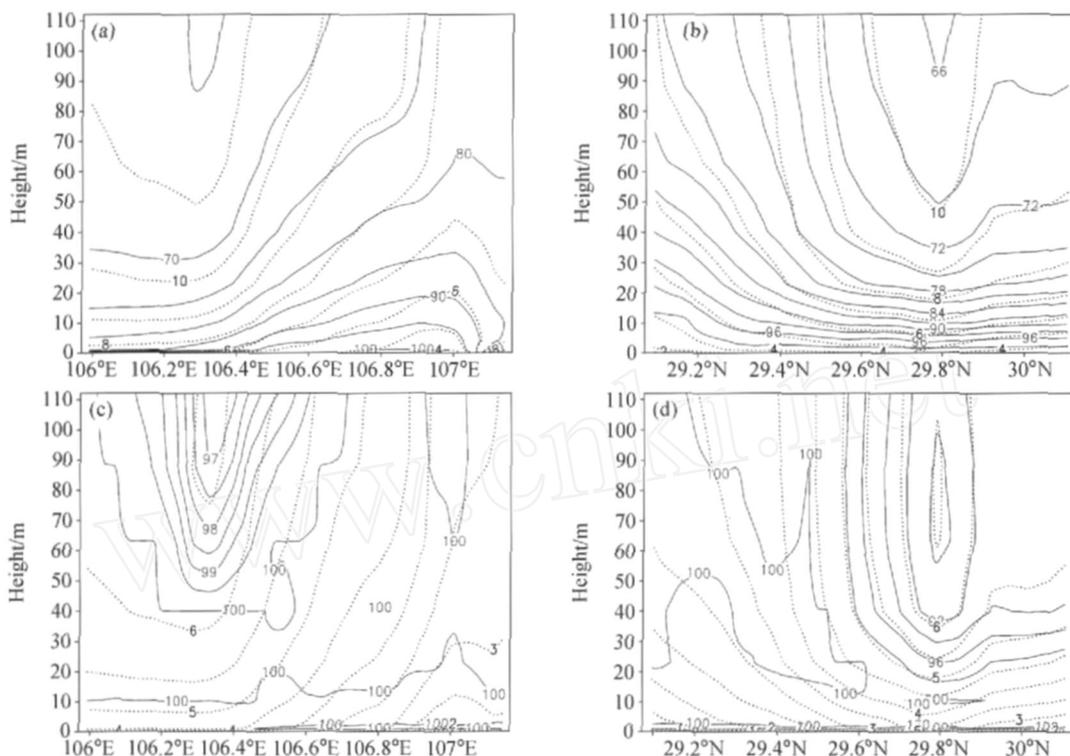


图2 2003年1月22日 (a、b) 15时和 (c、d) 21时温度 (虚线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、湿度 (实线, %) 沿 (a、c) 29.5°N 和 (b、d) 106.5°E 垂直分布

Fig 2 The vertical cross sections for simulated temperature (dashed line, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity (solid line, %) along (a, c) 29.5°N and (b, d) 106.5°E at (a, b) 1500 UTC and (c, d) 2100 UTC 22 Jan 2003

形成、发展、成熟和消散的宏观演变过程，以及雾的微观结构特征。对于模拟雾的厚度相对于实况偏小，结合石春娥等 (1997) 对理想初值条件下重庆雾的模拟分析表明，江面与陆地的初始位温差及城市与市郊的初始位温差对重庆雾的高度有一定影响。而文中雾模式的地形、地表资料均来自 MM5 中尺度模式，可能对局地地形差异反映不够明显，使得模拟雾的厚度相对较小。

### 3.2 长沙地区辐射雾的模拟分析

长沙位于我国中南部，与重庆多山脉的复杂地形相比，其地势相对平坦。因此鉴于长沙、重庆地形环境差异较大，而辐射雾的形成演变与地形密切相关，为弄清耦合模式对不同地域雾的预报效果，下面我们针对 2003 年 12 月 12~13 日长沙地区的一次大雾过程进行了模拟研究。表 2 是 12 日 12 时至 13 日 03 时的长沙地面实况。可以看到，12 日 12 时至 18 时，该地区地面风速很小，近地面层大气比较稳定，地面降温有利于水汽凝结。能见度观测显示，15 时前后有轻雾形

成，随着能见度的不断降低，相对湿度的不断增大，该地区雾于 12 日 21 时至 13 日 00 时左右发展成熟，之后，随着地面温度的升高，雾开始消散。

同样利用 MM5 模式进行了形势场模拟。模式模拟的 2003 年 12 月 12 日 12 时 850 hPa 位势高度和风场的分布表明 (图略)，长沙地区低层处于弱高压脊控制中，气压梯度和风速较小，天气形势稳定，有利于辐射雾的形成。

将该模式结果应用于雾模式，对此次大雾过程进行了模拟。图 4 是由 MM5-FOG 得到的 2003 年 12 月 12 日 13 时、15 时、21 时、13 日 00 时近地层液态水含量分布。由图 4 可见，13 时模拟的大部分区域液态水含量的含量都为零，表明雾尚未形成。12 日 15 时雾在模拟区域的东北部基本形成，这主要是因为地形的影响，导致了雾的发展不平衡，东边地形高的地方液态水含量的等值线比较密集，雾的浓度稍强些，其余地方液态水含量的等值线则比较稀疏。东边高地上雾中液态

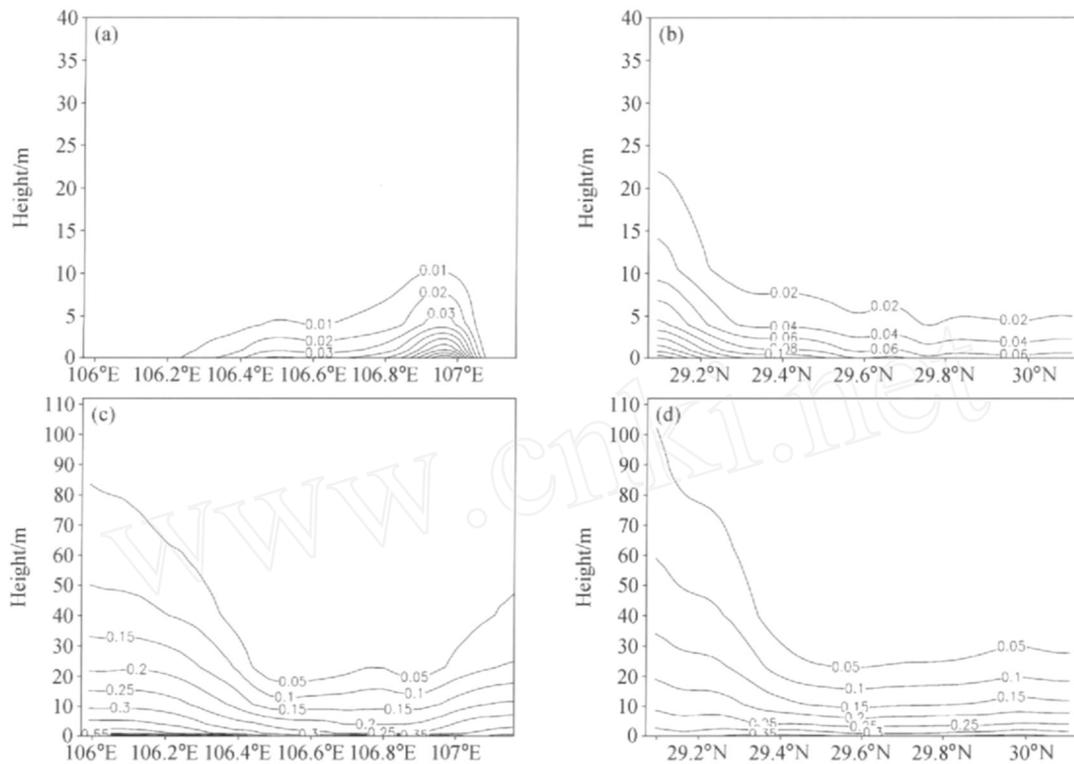


图3 2003年1月22日(a、b)15时和(c、d)21时液态水含量(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )沿(a、c)29.5°N和(b、d)106.5°E垂直分布  
Fig. 3 The vertical cross sections for simulated liquid water content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) along (a, c) 29.5°N and (b, d) 106.5°E at (a, b) 1500 UTC and (c, d) 2100 UTC 22 Jan 2003

表2 2003年12月12日12时至13日03时长沙地区地面实况

Table 2 The surface observations on Changsha from 1200 UTC 12 to 0300 UTC 13 Dec 2003

时间	风向	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	能见度/km	温度/	露点/	相对湿度
12日12时	290°	2	2.0	4.7	2.7	86%
12日15时	290°	3	2.0	3.4	2.6	94%
12日18时	220°	2	1.8	2.1	1.6	96%
12日21时	220°	2	0.7	2.5	2.0	96%
13日00时	250°	1	1.3	4.3	3.1	96%
13日03时	250°	1	1.3	4.3	3.1	92%

水含量最大, 已达  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但整体上模拟区域的雾的强度偏弱。21时大雾基本在整个模拟区域出现, 东部液态水含量等值线更加密集, 其余地方的液态水含量也普遍增大, 西北部液态水含量最大值达到  $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 西南部的雾发展迅速, 液态水含量达到  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 东部高地附近液态水含量仍然最大, 大都在  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上。13日00时模拟区域中部的雾逐渐消散, 东西部继续维持, 但强度减弱, 这主要是由于日出后太阳辐射对大气和地面的加热作用, 使地面和近地层

大气长波辐射冷却作用减弱, 因此地面和近地层温度开始缓慢上升, 导致雾的水平分布发生了明显的改变, 强度减弱。日出后, 太阳高度角逐渐增大, 日照时间加长, 地面对太阳辐射的吸收作用加强, 地面和近地面层温度继续升高, 同时, 雾内因凝结潜热的加热作用, 湍流加热的范围也逐渐增大, 雾内层开始变得不稳定, 贴地逆温层开始减弱并消失随着湍流上下热交换充分, 雾的蒸发也由地面向上不断扩大, 强度加强, 13日00时后雾中液态水含量迅速减小, 浓度降低, 到

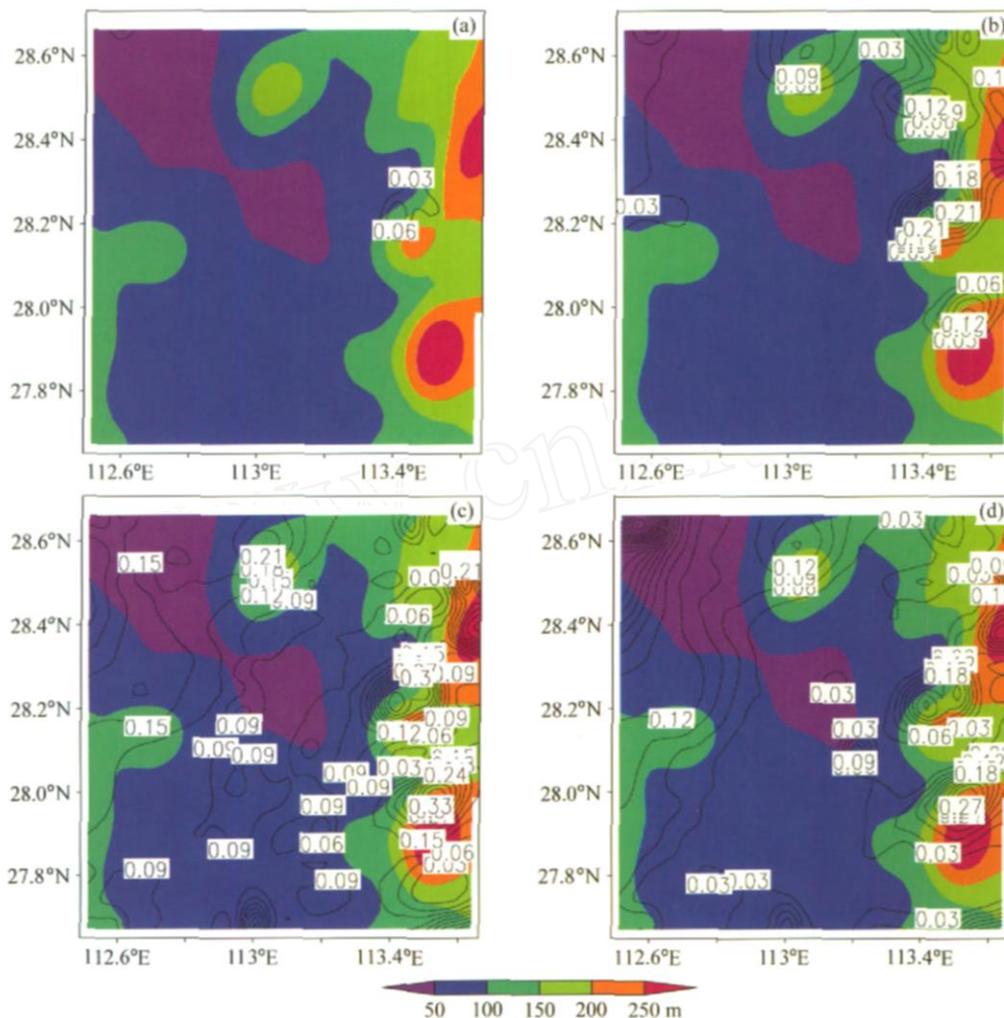


图4 2003年12月12日 (a) 13时、(b) 15时、(c) 21时、(d) 13日00时近地层液态水含量 (等值线, 单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和地形高度 (阴影) 分布图

Fig 4 The simulated liquid water content (contour, units:  $g \cdot kg^{-1}$ ) at surface and topography (shaded) at (a) 1300 UTC 12, (b) 1500 UTC 12, (c) 2100 UTC 12, and (d) 0000 UTC 13 Dec 2003

01时, 雾体基本消散尽。图5是模拟的12日21时温度、湿度和液态水含量沿 $27.9^{\circ}N$ 和 $113.5^{\circ}E$ 的垂直分布图。可以看出, 地面和近地面层大气的温度都在不断下降, 但与之前长沙地区地面观测资料相比, 降温幅度偏大, 东部高地附近的降温要强于中部地区。近地面10m以下的空气接近饱和, 东部高地附近相对湿度较大, 但从大雾发展的整体情况上看相对湿度的模拟偏小。沿 $27.9^{\circ}N$ 的东西剖面图上东部液态水含量的等值线比较密集, 厚度达到25m, 而南北剖面图中等值线密集的地方基本与地面液态水含量的大值区相一致, 可见地形高的地方雾的厚度大浓度大, 而相对平坦低洼的地方形成的雾较稀薄。

上述分析显示, MM5-FOG可以基本模拟出长沙地区大雾的分布、演变概况。雾形成阶段, 由于受地形的影响, 雾的分布很不均匀, 东边高地附近雾的强度大, 雾是由地形高的地方向地形低的地方发展。随后整个模拟区域内的雾都有所发展, 液态水含量增大到 $0.2 g \cdot kg^{-1}$ 。当雾发展成成熟后, 由于雾体不断增厚增浓, 其对地面的逆辐射增大使得地表向上的长波辐射减小。同时土壤向地表输送热量的增大使得地面温度开始回升, 因此, 雾区底部的液态水含量逐渐减小, 但雾区上部还在继续发展。日出后, 太阳辐射加热增强, 地面开始增温, 使得液态水含量减小, 雾区逐渐消散。将上述雾的演变过程与地面实况观测对比

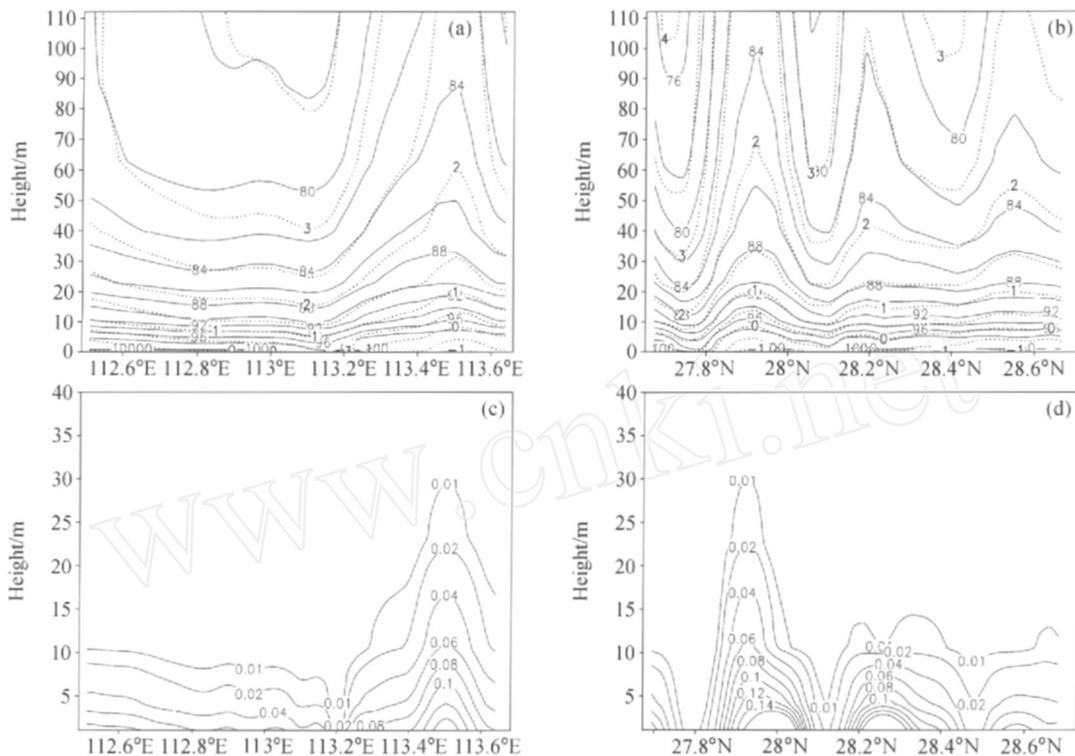


图5 2003年12月12日21时(a、b)温度(虚线,单位: )和湿度(实线,%), (c、d)液态水含量(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )沿(a、c) 27.9°N和(b、d) 113.5°E的垂直分布

Fig. 5 The vertical cross sections for simulated (a, b) temperature (dashed line, units: ) and relative humidity (solid line, %), (c, d) liquid water content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) along (a, c) 27.9°N and (b, d) 113.5°E at 2100 UTC 22 Jan 2003

可知, 模拟轻雾的形成时间和大雾出现的时间均与实况相符, 而大雾消散的时间相对实况有所提前, 这之前模拟重庆地区雾的情况有所相似。另外, 对于此次长沙雾强度、厚度模拟相对偏小的原因, 分析认为可能与三维雾模式地形针对复杂区域设计, 对相对平坦地势考虑较粗有关。

为了进一步讨论 MM5 模式与三维雾模式耦合的实际意义, 我们将仅使用 MM5 模式得到的雾的模拟结果与 MM5-FOG 的模拟结果进行对比。图 6 是由 MM5 模拟得到的 2003 年 12 月 12 日 13 时、15 时、21 时、13 日 00 时近地层液态水含量分布。从图 6 可以看到, 2003 年 12 月 12 日 13 时, 已经有雾出现, 且雾区范围覆盖了整个模拟区域, 液态水含量达到  $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 之后雾的发展较快, 15 时, 模拟区域发展成大雾, 液态水含量最高也达到  $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此后雾区范围开始缩小, 大雾逐渐由中部向两侧消散, 液态水含量降低, 21 时, 液态水含量最高仅为  $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 13 日 00 时, 液态水含量已小于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表明

雾已消散。图 7 是分别由 MM5 和 MM5-FOG 模拟的区域平均液态水含量随时间的演变趋势。由图 7 可见, MM5 的模拟结果表明, 雾已于 12 日 13 时前形成, 在 14 时 30 分前后发展成熟, 之后迅速消散。而 MM5-FOG 的模拟结果显示, 雾由 13 时开始形成, 19 时前后发展成熟, 之后进入成熟阶段, 雾区浓度变化不大, 23 时 30 分雾开始逐渐消散。与地面的观测(表 2)相比, 我们可以看到耦合后的液态水含量变化趋势与实际情况比较接近, MM5-FOG 基本模拟出了此次长沙地区辐射雾的演变过程, 而 MM5 的模拟结果无论是在雾的形成时间还是发展演变过程都没能较好地把握, 与实际情况相差很大。此外, 与 MM5 模拟的液态水含量值相比, MM5-FOG 的液态水含量值有些偏小。造成这一现象的原因, 一方面是我们前面提到的可能与三维雾模式地形针对复杂区域设计, 对相对平坦地势考虑较粗有关, 另一方面, 三维雾模式的初始场资料是用由 MM5 的模拟结果插值得到的, 其过程中也经过了一定的

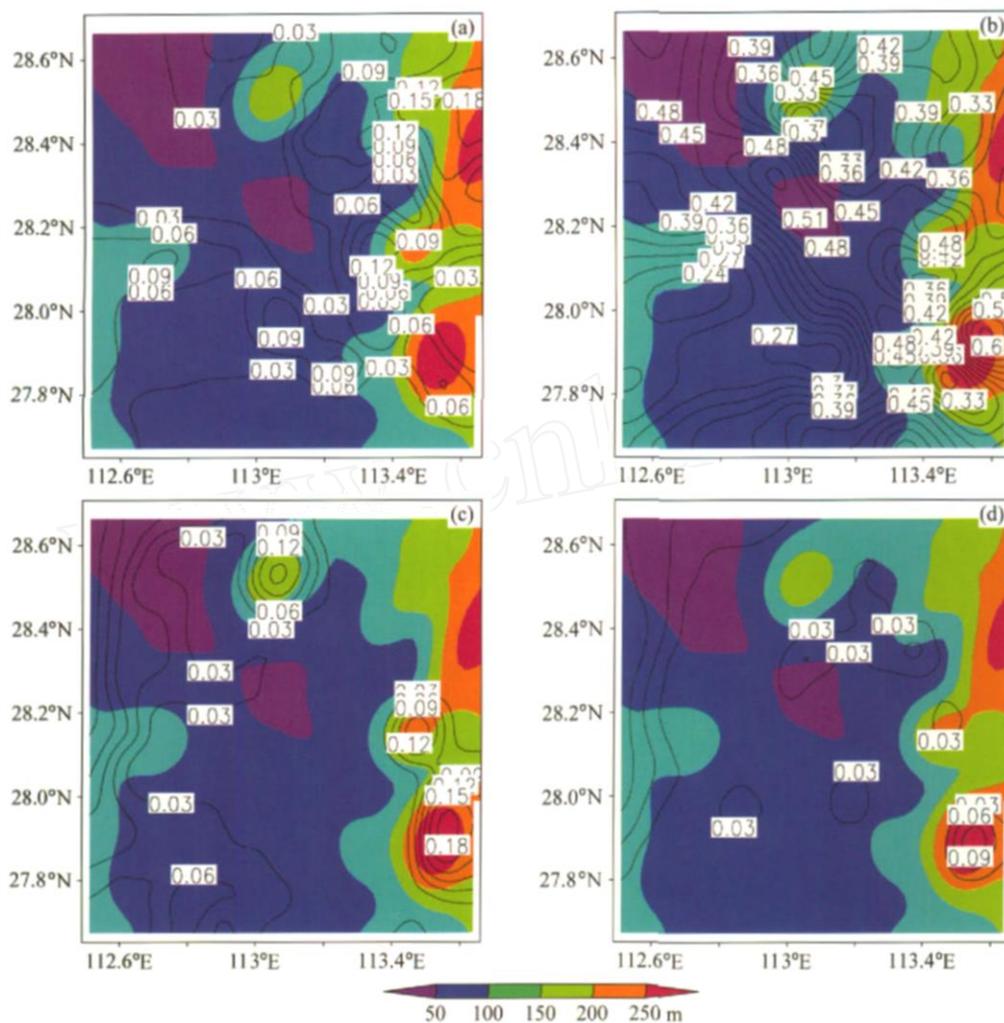


图 6 MM5 模拟的 2003 年 12 月 12 日 (a) 13 时、(b) 15 时、(c) 21 时、(d) 13 日 00 时近地层液态水含量 (等值线, 单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和地形高度 (阴影) 分布图

Fig. 6 Liquid water content (contour, units:  $g \cdot kg^{-1}$ ) at surface and topography (shaded) simulated by MM5 at (a) 1300 UTC 12, (b) 1500 UTC 12, (c) 2100 UTC 12, and (d) 0000 UTC 13 Dec 2003

平滑作用, 削弱了初始近地层大气和地面的辐射冷却作用。

通过以上分析我们可以发现, MM5-FOG 对不同地形环境的地区辐射雾均具有一定模拟能力, 能很好地模拟出局地辐射雾形成、发展、成熟和消散的宏观演变过程。尤其是对复杂地域雾的模拟能力更是相对强些, 相对 MM5 模式单独进行雾的模拟来看, 将两种模式相结合的方法可以在一定程度上解决仅使用 MM5 模拟中出现的雾的形成时间和发展演变过程不准确, 对地形条件不够敏感等问题。而三维雾模式的单独运行, 需要定点区域内的大气层结信息, 目前用于反映大气层结信息的探空资料时空尺度过于稀疏, 无法满

足实时局地性雾的预报。因此, MM5-FOG 更能满足局地雾实际业务预报的需要, 利用 MM5 中尺度模式与三维雾模式相耦合制作雾预报是可行的, 预报中加强模式局地地域特点的描述对于提高局地雾预报也是必要的。

#### 4 结论与讨论

雾是大量微小水滴悬浮于空中, 使近地面水平能见度降到 1 km 以下的天气现象。近年来随着社会经济的迅速发展, 大雾引发的低能见度造成的社会危害愈加突出。因此, 加强雾的预报具有重要的现实意义。文中分别针对不同地域的冬季

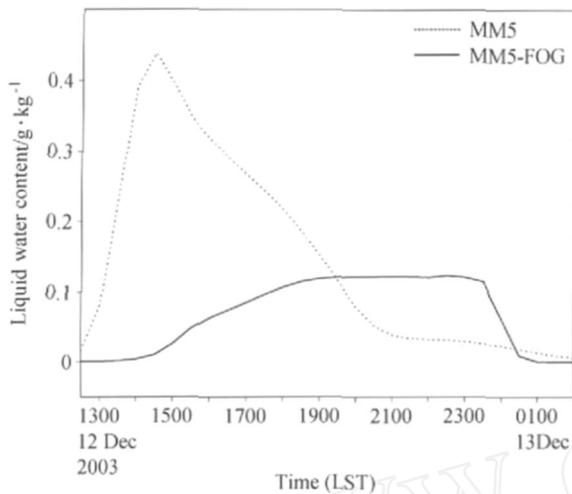


图7 MM5 和 MM5-FOG 模拟的区域平均液态水含量随时间的演变趋势

Fig. 7 Evolution tendency of the regional mean liquid water content simulated by MM5 and MM5-FOG

辐射雾, 利用三维辐射雾模式单向耦合 MM5 中尺度模式开展了数值模拟研究。耦合模式在局地辐射雾三维数值模拟研究中的应用表明, 耦合模式可以较好地反映出局地雾的消演变, 以及雾的浓度、地理分布特征、形成和维持, 尤其是对复杂地域局地雾具有更强的模拟能力。尽管耦合模式对雾的消散时间和厚度模拟还存在一定的不足, 需进一步完善模式物理机制, 但总的来讲, 耦合模式在辐射雾实际预报中的应用是可行性的。此外, 还需指出的是, 对于考虑雾反馈机制的双向耦合雾的模拟将是我们的下一步研究的重点。

### 参考文献 (References)

- Bott A, Siever U, Zdunkowski W. 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (18) : 2153-2166.
- Bott A. 1991. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 56: 1-31.
- Brown R, Roach W T. 1976. The physics 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.
- Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴和云动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 331-342. Cotton W R, Anthes R A. 1993. The Dynamics of Storm and Cloud [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.
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 324-341.
- 黄培强, 郭岚. 1986. 辐射雾形成的数值模拟 [J]. 气象科学, 44 (2) : 68-74. Huang Peiqiang, Guo Lan. 1986. Numerical simulation of radiation fog formation [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 44 (2) : 68-74.
- Ohat S, Tanaka M. 1986. A numerical study of the formation and the dissipation of radiation fogs [J]. *J. Meteor. Res. Japan*, 64 (1) : 65-67.
- 齐琳琳, 赵思雄. 2003. 利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (4) : 417-435. Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2003. A numerical simulation of the heavy rainfall in Shanghai using non-conventional observational data [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (4) : 417-435.
- 齐琳琳, 赵思雄. 2006. 局地地形、地表特征对上海暴雨过程影响的研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (4) : 33-48. Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006. The analysis of the influence of the terrain and the earth's surface on the heavy rainfall in Shanghai [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (4) : 33-48.
- 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 study of radiation fog in Yangze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (4) : 483-489.
- 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 Chune, 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.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (3) : 381-392. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (3) : 381-392.
- 孙旭东, 徐华英, 李桂忱, 等. 1991. 二维平流辐射雾的数值模拟 [J]. 大气科学, 15 (6) : 99-109. Sun Xudong, Xu Huaying, Li Guichen, et al. 1991. Two-dimension numerical model of advection-radiation fogs [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 15 (6) : 99-109.

- Turton J D, Brown R. 1987. A comparison of a numerical model of radiation fog with detailed observation [J]. *Quart. J. Roy Meteor. Soc.*, 113: 37-545.
- 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) : 351-359. 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) : 351-359.
- 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. Zhang Limin, Li Zhihua. 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.
- 周斌斌. 1987. 辐射雾的数值模拟 [J]. *气象学报*, 45 (1) : 21-29. Zhou Binbin. 1987. The numerical modeling of radiation fog [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 45 (1) : 21-29.
- 周梅, 银燕, 王巍巍. 2008. 2006年12月24~27日大范围大雾过程数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 19 (5) : 602-610. Zhou Mei, Yin Yan, Wang Weiwei. 2008. A numerical study on the long-lasting wide spread dense fog event during December 24-27, 2006 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (5) : 602-610.
- 邹进上, 刘长盛, 刘文保. 1982. 大气物理基础 [M]. 北京: 气象出版社, 365pp. Zou Jinshang, Liu Changsheng, Liu Wenbao. 1982. *The Base of Atmospheric Physics [M] (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 365pp.

WWW.CNKI.NET