

2008年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟

孙建华 赵思雄

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 冬季的雨雪预报, 尤其是冻雨的预报涉及多种尺度系统与复杂物理因素的影响。为了探讨这方面的问题, 作者采用中尺度数值模式 MM5 对 2008 年初我国南方持续性雨雪、冰冻灾害天气中的 1 月 26 ~ 29 日过程做了模拟试验研究, 并根据模拟结果对 1 月 26 ~ 29 日期间的的水汽条件、地面特征和大气层结条件等重要环境条件进行了分析。分析指出, 模拟结果能基本再现冬季这种持续性过程的降水带分布; 长江或江南地区的准静止锋的存在, 水汽在锋前对流层低层辐合, 并沿锋面向上爬升凝结, 爬升到达的高度和强水汽带的宽度与观测基本一致。模式还能再现有利于冻雨产生的层结条件, 包括中层冻结层、暖层、逆温层和地面温度 0 线的位置; 研究指出, 利用模式输出的层结、地面条件以及降水状况可以大致得到冻雨可能发生的范围。

关键词 数值模拟 冻雨 静止锋 层结条件 逆温层

文章编号 1006-9585 (2008) 04-0510-10 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

Numerical Simulation on Stratification and Surface Features of Freezing Rain and Snow Storm over Southern China in January 2008

SUN Jian-Hua and ZHAO Si-Xiong

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

Abstract The PSU/NCAR MM5 model is utilized to simulate the severe freezing rain and snow storm during 26 - 29 January 2008. And then, the simulation results is used to diagnose the moisture flux, surface temperature, stratification conditions for freezing rain occurrence. The results are that, the numerical model could reproduce the distribution of precipitation band during 26 to 29 January 2008. The east-west oriented quasi-stationary front located along Yangtze River Basin is favorable for the transportation and convergence of water flux. The strongest moisture convergence occurs ahead the front at low-level and then climbs slantly along the front to middle troposphere. The lifting height and width of moist flux along front surface is consistent with the observed, but the intensity is slightly weaker than the latter. The model also reproduces the stratification and surface features, including inversion layer, warm layer, 0 isoline in surface ground temperature field. It is suggested that the freezing rain area could be predicted by composite consideration of stratification, surface condition and precipitation.

Key words numerical simulation, freezing rain, quasi-stationary front, stratification, inversion layer

收稿日期 2008-03-05 收到, 2008-03-30 收到修定稿

资助项目 中国科学院大气物理研究所创新基金领域前沿重点项目 IAP07120、国家自然科学基金项目 40605016 和国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301

作者简介 孙建华, 女, 1972 年出生, 博士, 研究员, 主要从事中尺度分析和数值模拟研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

1 引言

2008 年 1 月 10 日~2 月 2 日, 出现在我国南方地区的低温雨雪冰冻灾害持续时间长、覆盖地域广, 为历史罕见。此次灾害给当地群众的生活生产带来了很大困难, 对社会经济发展产生了严重影响, 造成的损失为历史罕见^[1]。我国对冻雨的研究开展得尚不够多, 但在冻雨发生比较多的贵州和一些机场对冻雨的预报有一些经验^[2~5]。国外对冻雨天气及其形成机理有较多的研究, 欧洲和美国对冻雨的研究主要集中在几个方面: 研究冻雨的预报方法以提高冻雨的短期预报^[6~8], 冻雨的气候态分布^[9~11]和一些冻雨个例的天气分析研究^[12,13]。国外对冻雨形成的条件有较详细和系统的研究^[14~16], 特别是冻雨雷达回波特征的研究^[17], 因而对冻雨形成的条件有了一定的了解。

相对国外的研究, 国内起步较晚, 研究的内容尚不够系统。2008 年初我国南方地区出现了雨雪、冰冻天气后, 赵思雄和孙建华^[18]对冻雨的环流系统及多尺度特征进行了研究, 指出这次过程中高纬阻塞高压位于西西伯利亚长达 20 余天, 副热带高压偏西偏北, 在阻高与副高之间有一横槽维持, 此种形势十分有利于冷空气从北方入侵; 西风带南支槽稳定维持且十分活跃, 将大量水汽输送至中国大陆尤其是南方地区; 一条准静止锋长期稳定维持于长江流域, 是雨雪冰冻天气的重要影响系统, 这在冬季并不多见。在贵州和湖南等地区, 低层浅薄的冷空气垫与其上的暖湿空气形成了逆温层并有暖层配合, 有利于冻雨出现。孙建华和赵思雄^[19]对 1 月 25~29 日期间 (第 3 次过程) 的天气形势、水汽条件以及地面和大气层结条件进行了分析, 指出, 水汽在准静止锋前的对流层低层辐合, 沿锋面爬升凝结; 锋面西段的逆温层和暖层相互配合, 有利于冻雨的形成; 最有利于冻雨产生的层结条件应有中层冻结层、暖层、逆温层, 且这些层结的强度和厚度要合适; 最有利于冻雨出现的地面温度在 $0 \sim -3$ 。他们提出, 冻雨的产生涉及多尺度的系统, 预报难度较大, 但是否有可能对发生的环境及重要的条件用数值模式事前作出一些估计呢? 如果可能, 则使我们在预报冻雨的道路上向前迈出了一步。为

此, 本文对 2008 年 1 月 25~29 日过程进行数值模拟, 重点探讨模式能否模拟出冬季的雨带以及产生冻雨的层结和地面条件等重要的环境因素。

2 模拟方案及模拟结果的验证

2.1 数值模拟方案

本研究采用 PSU/NCAR 的 MM5^[20]对 2008 年初的持续性雨雪、冰冻灾害天气过程中 1 月 26~29 日进行模拟, 该模式较成功地模拟过夏季华南和长江流域的梅雨降水过程^[21,22]。模拟采用非静力、双重双向嵌套方案, 两个模拟区域的格距分别为 60 和 20 km, 格点数为 180×220 和 352×334 。模拟区域取 (30°N, 100°E) 为中心, 嵌套区域以长江和江南地区为中心。整层 坐标垂直分 32 层, 其 各为: 1.00, 0.995, 0.99, 0.985, 0.98, 0.97, 0.96, 0.95, 0.93, 0.91, 0.89, 0.87, 0.85, 0.83, 0.80, 0.77, 0.74, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00。行星边界层计算采用 MRF (NCEP Medium-Range Forecast Model) 高分辨方案和 OSU/Eta 陆面过程 (Oregon State University 发展的陆面模式) 以模拟土壤的湿度和温度。

本研究对 2008 年 1 月 26 日 0000 UTC (世界协调时, 下同) ~29 日 0000 UTC 进行 72 h 模拟。采用 NCEP 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 分析格点资料作背景场, 初值为 26 日 0000 UTC, 在背景场的基础上, 常规观测的 26 日 0000 UTC 探空和地面资料都分析后加入初始场, 6 h 间隔侧边界条件也由上述资料分析得到。

2.2 模拟结果的验证

在利用模拟结果分析冻雨等产生的地面和层结条件前, 首先对模拟的降水量和形势场进行验证。图 1 给出了模拟和观测的 24 h 降水量, 1 月 26 日观测有 3 个降水中心 (图 1d): 长江下游、华南和云南, 模拟的云南降水中心强度、范围与实况基本一致, 东部的两条降水带也模拟出来 (图 1a), 但强度偏弱, 长江口降水带强度实况在 10 mm 以上, 模拟只有 5 mm 以上, 华南的降水带非常强, 而模拟的较弱。1 月 27 日的观测降水区有两个中心 (图 1e): 安徽、江苏地区和云南,

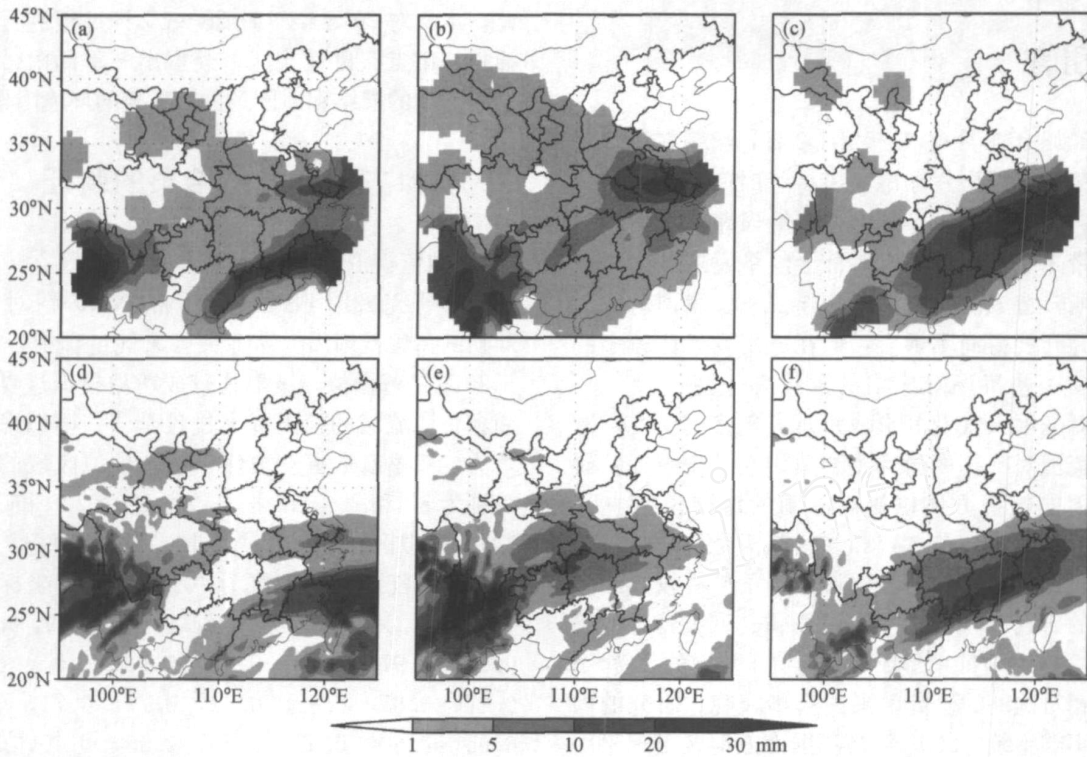


图1 2008年1月26~28日模拟(上行)和观测(下行)的24 h降水量。(a)、(d) 26日0000 UTC~27日0000 UTC, (b)、(e) 27日0000 UTC~28日0000 UTC, (c)、(f) 28日0000 UTC~29日0000 UTC

Fig 1 The simulated (upper panel) and observed (lower panel) 24 h precipitation amount from 26 to 28 Jan 2008: (a), (d) 0000 UTC 26 - 0000 UTC 27; (b), (e) 0000 UTC 27 - 0000 UTC 28; (c), (f) 0000 UTC 28 - 0000 UTC 29

模拟的云南降水中心强度和范围与实况仍然基本一致,但东部安徽、江苏中心未模拟出来,只模拟出了比较弱的降水,湖南和贵州的降雨模拟稍偏强(图1b)。1月28日模拟降水带的强度和分布与实况都较相似,但位置偏南(图1c和1f),观测的强中心位于浙江、江西的北部,而模拟的位于江西南部、福建北部。28日云南的降水已经减弱,这与观测较为相近。

连续3天雨带的模拟以第1天最好,第2天没有模拟出江苏、安徽的中心,第3天的雨带偏南。形势场模拟结果分析表明:模拟的形势场,特别是低层的风场与观测有一些差别,造成水汽的输送和辐合与实况存在一些差别。模拟的云南降雨与实况基本相符,该区域的降水与孟加拉湾的水汽输送有关,模式对这支水汽输送模拟得较好(图2),模拟的云南、广西的低空急流中心与实况都比较一致。26日0000 UTC是模式的初值,分析场和模式初始场都反映了华南的低空急流中心、西南风辐合以及在湖南的气旋环流中心(图

2a和2e)。27日0000 UTC,分析场中从浙江到湖南地区为东西向的西南风与偏东风的切变线(图2b),模拟的华南西南风偏弱,切变线北侧的偏东风也偏弱,辐合偏弱(图2f),这也许是模拟得到的27日0000 UTC~28日0000 UTC江苏、安徽的降水中心不强的主要原因。28日0000 UTC、29日0000 UTC模拟的切变线偏北(图2c~d和2g~h),这两日的冷空气来自西北,因模拟的西南低空急流稍偏强,使冷空气没有南下到江南,只到了长江流域,使水汽的辐合中心偏南,模拟降水带偏南。这可能是由于南海海洋上气象资料稀少,观测信息不完全所致。应当看到,这次过程中主要的影响天气系统非常清楚,而且也基本被模式正确复制,模式在连续3天的模拟中也大致模拟出了主要降水带的分布,这一结果是令人鼓舞的,然而需指出,实际的天气预报,尤其是冻雨的预报是很困难的。从中尺度预报,尤其是精细的预报要求而言,要求在冬季非常准确地预报强降水中心、落区、雨强以及降水类型

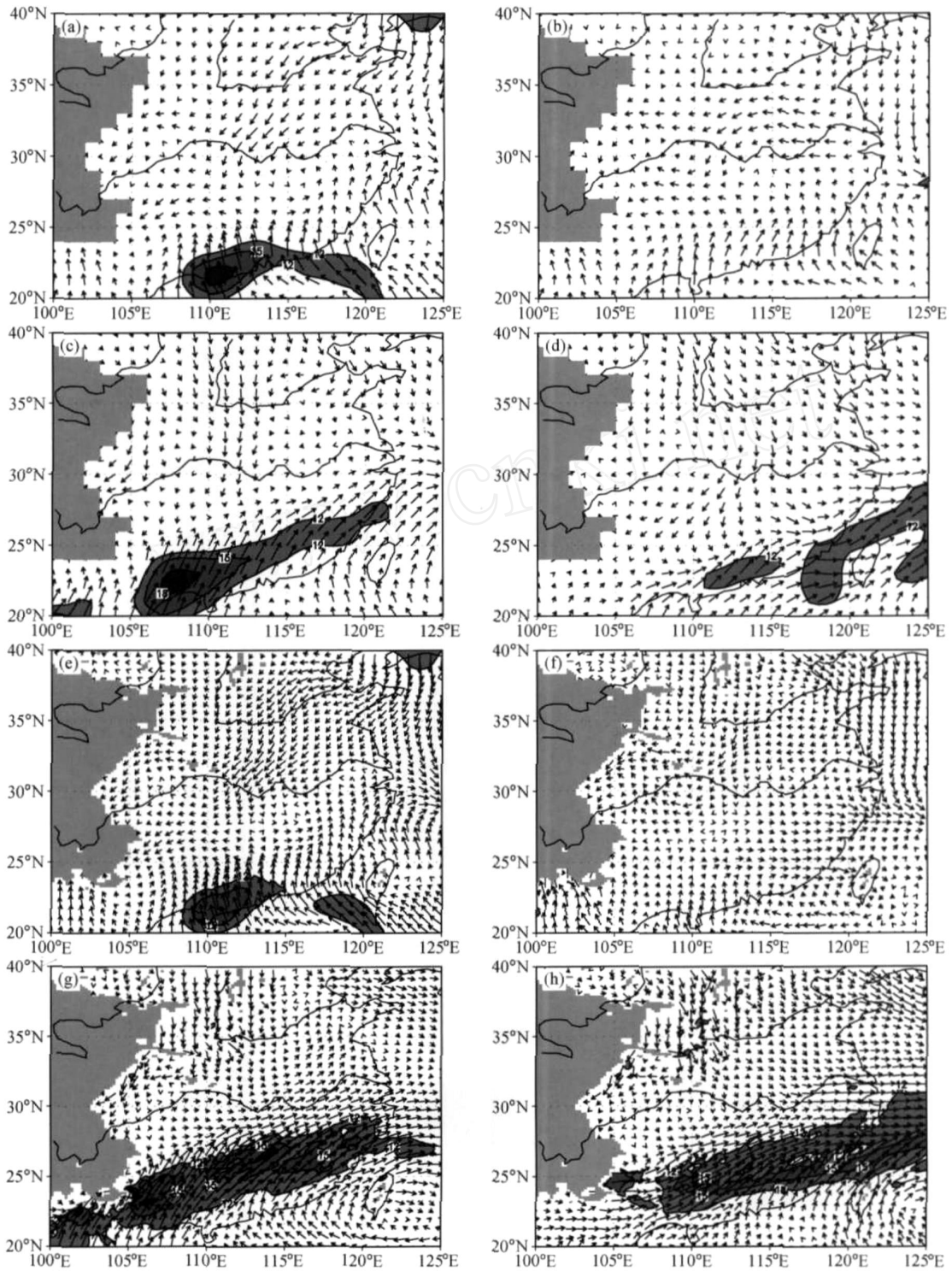


图 2 2008 年 1 月 26 ~ 29 日观测 (a) ~ (d) 和模拟 (e) ~ (h) 的 850 hPa 风场。深色阴影为低空急流 ($12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 浅色阴影为地形大于 1 500 m。(a)、(e) 26 日 0000 UTC, (b)、(f) 27 日 0000 UTC, (c)、(g) 28 日 0000 UTC, (d)、(h) 29 日 0000 UTC

Fig. 2 The observed (a) - (d) and simulated (e) - (h) wind field at 850 hPa from 26 to 29 Jan 2008, dark shaded is low-level jet (larger than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), light shaded is topography higher than 1 500 m. (a), (e) 0000 UTC 26; (b), (f) 0000 UTC 27; (c), (g) 0000 UTC 28; (d), (h) 0000 UTC 29

仍有很大的难度。这是今后要进一步努力解决的一个重要问题。

3 模拟的准静止锋结构和水汽来源

文献 [19] 中提到这次过程是一条呈东 - 西向或东北 - 西南向位于长江流域和江南地区的准静止锋, 这种沿长江流域的准静止锋在冬季并不多见, 且这次过程中冻雨主要发生在准静止锋的西侧, 而降雪主要发生在其东侧。本文利用模拟结果, 分析模式是否可能提前预报出有利于冻雨发生的层结和地面条件。在文献 [19] 的图 3 中给出了 1 月 26 ~ 28 日 0000 UTC 沿 113°E (锋面西段) 和 119°E (锋面东段) 分析场的假相当位温和水汽通量的垂直剖面, 这里将模拟结果作再分析, 类似的剖面 (图 3) 也沿 113°E 表示锋面西段, 119°E 表示锋面东段, 图 3 中两条红色假相当位温

280 ~ 320 K 之间的等假相当位温密集区为锋区。与观测相比, 模拟的锋区位置和强度都与观测相似, 西段锋面较窄, 而东段较宽, 假相当位温等值线的分布在锋面西段更密集, 表明锋区更强。从水汽通量的模拟看 (图 3), 模式模拟出了水汽沿锋面的爬升, 爬升到达的高度和强水汽带的宽度也与观测基本一致 (文献 [19] 的图 3), 到 400 hPa 水汽通量可达到 $3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 水汽通量的强中心分别位于锋前近地层的 900 hPa 以下和锋面上的 800 ~ 500 hPa 左右。因为锋前的中心温度 > 0 , 该区域形成的是降雨, 而锋面上对流层中层的水汽通量中心形成的降雪会落到地面锋区之后, 在锋面西段经过锋面的暖层融化而形成冻雨, 在锋面的东段直接下落形成降雪。此外, 总体来看, 模拟得到的水汽通量的量级与观测大体相近, 这是模拟的成功之处, 但模拟水汽通量的强度稍弱于观测的强度, 尤其是在 27 日

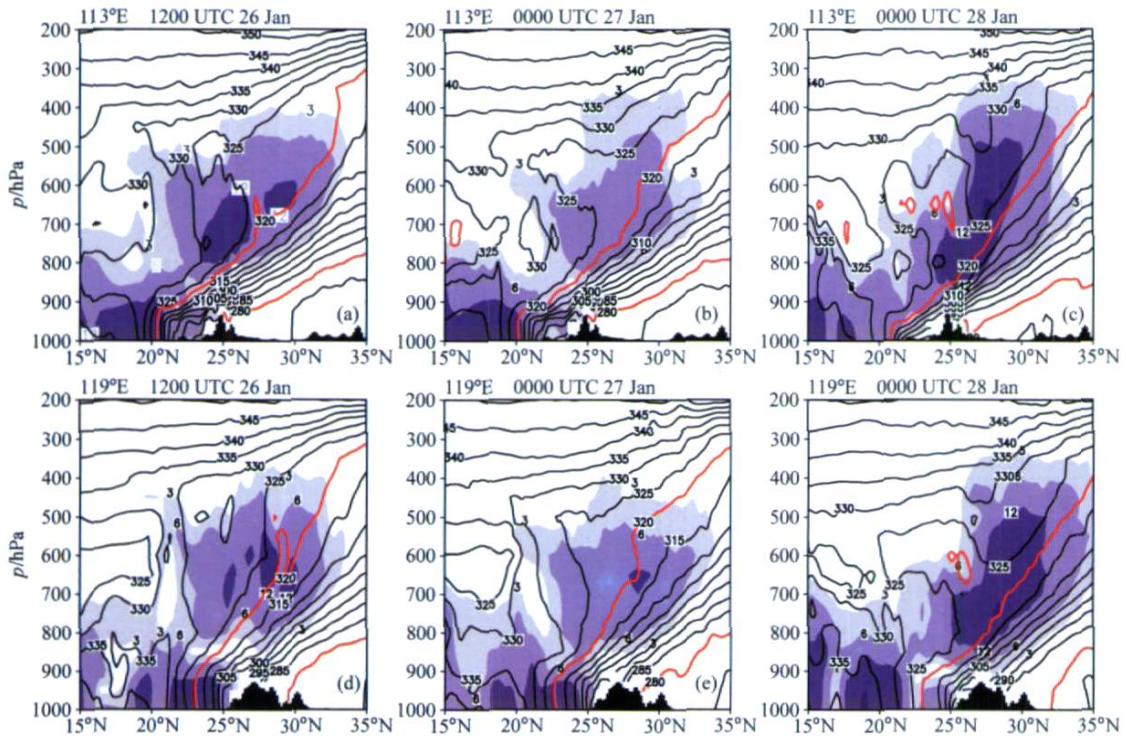


图 3 2008 年 1 月 26 ~ 28 日模拟的假相当位温 (实线, 单位: K) 和水汽通量 (阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 沿 113°E (上行) 和 119°E (下行) 的垂直剖面。黑色阴影为地形。(a)、(d) 26 日 1200 UTC, (b)、(e) 27 日 0000 UTC; (c)、(f) 28 日 0000 UTC

Fig. 3 Vertical cross section of the pseudo-equivalent potential temperature (solid line, units: K) and moisture flux (shaded, units: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) along 113°E (upper panel) and 119°E (lower panel) from 26 to 28 Jan 2008. Dark shaded area represents the terrain. (a), (d) 1200 UTC 26 Jan; (b), (e) 0000 UTC 27 Jan; (c), (f) 0000 UTC 28 Jan

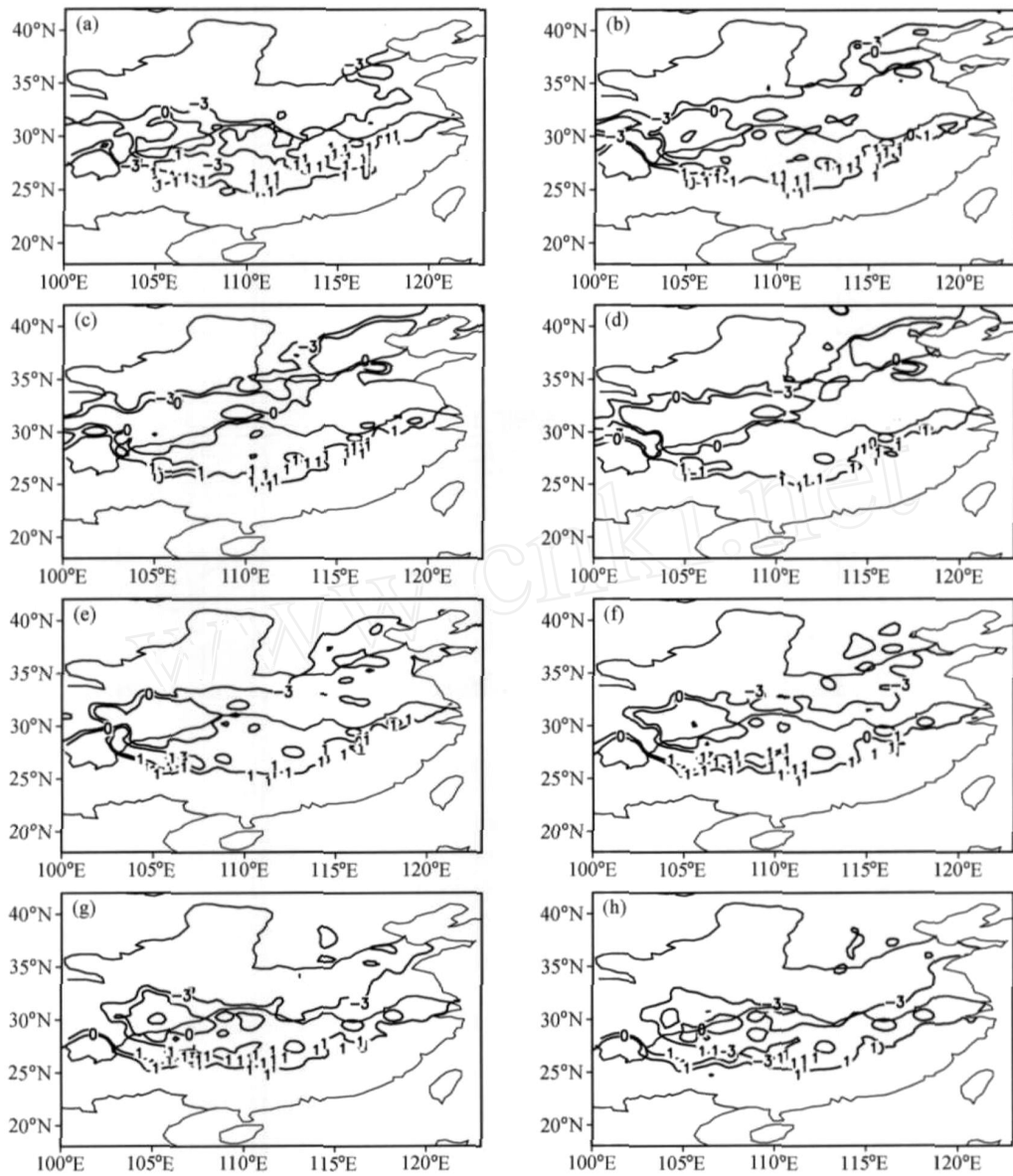


图 4 2008 年 1 月 28 日的地面温度 (实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和冻雨分布 (数字 1): (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC, (d) 0900 UTC, (e) 1200 UTC, (f) 1500 UTC, (g) 1800 UTC, (h) 2100 UTC
Fig 4 The surface temperature (solid line, units: $^{\circ}\text{C}$) and freezing rain (number 1) on 28 Jan 2008: (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC, (d) 0900 UTC, (e) 1200 UTC, (f) 1500 UTC, (g) 1800 UTC, (h) 2100 UTC

0000 UTC, 观测的锋面东、西段的水汽通量都到达了 $15 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 而模拟的通量只有 $12 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 这也可能是 1 月 27 日模拟的降水量偏小, 未能模拟出强中心的原因之一。

上述提到在锋面上中层的水汽通量中心分别形成降雪和冻雨过程, 在锋面西段经过锋面的暖层融化而形成冻雨, 在锋面的东段形成降雪。通过对观测的地面天气现象和温度的分析发现 (图 4), 冻雨区沿着 0°C 线呈带状分布, 最东出现在

江西, 最西到云南、贵州, 即冻雨基本发生在地面 0°C 线以北很窄的范围内。通过对模拟的温度和相对湿度垂直剖面的分析 (图 5), 锋面西段地面温度的 0°C 线在 25°N , 锋面东段地面温度的 0°C 线在 $28 \sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间, 锋面西段 $25 \sim 28^{\circ}\text{N}$ 在 $950 \sim 700 \text{ hPa}$ 为深厚的逆温层, 其温差达到 5°C , 且 $900 \sim 600 \text{ hPa}$ 温度高于 0°C , 满足冻雨形成的条件, 即对流层中层有冻结层, 冻结层下有暖层 (融化层) 和逆温层, 近地层温度在 0°C 以下。而

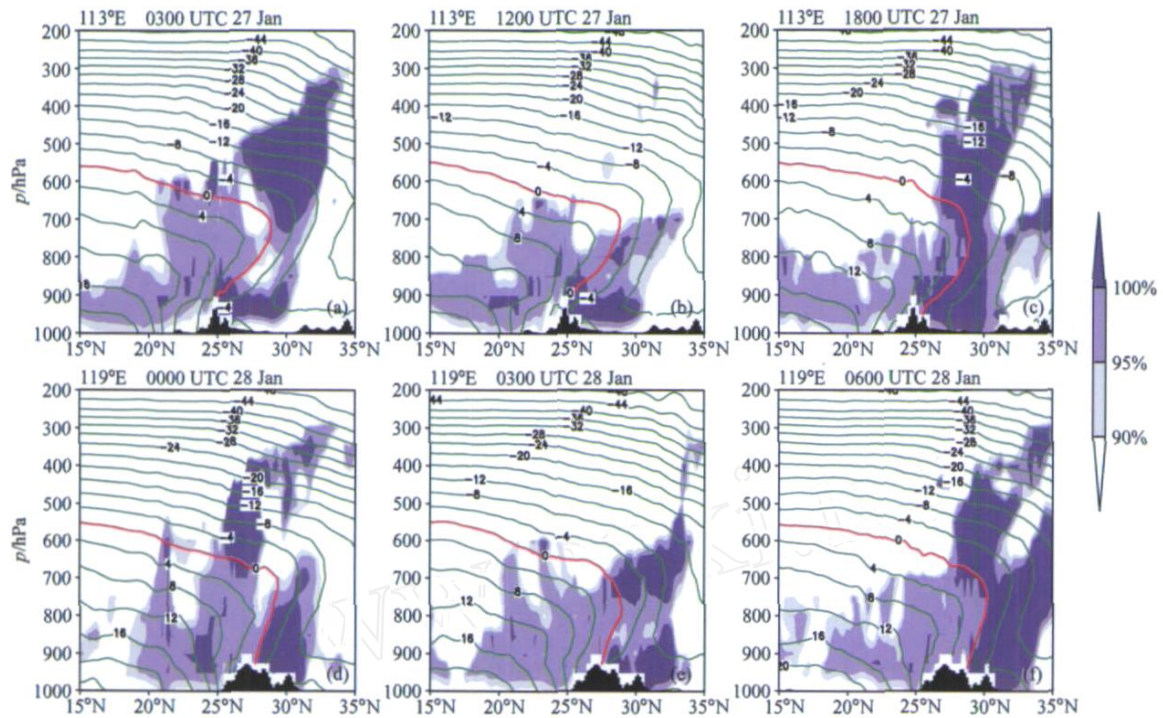


图5 2008年1月26~28日的模拟温度(单位: $^{\circ}\text{C}$, 绿色实线, 红色实线为 0°C)和相对湿度(蓝色阴影)沿 113°E (上行)和 119°E (下行)的垂直剖面。黑色阴影为地形。(a)、(d) 26日 1200 UTC, (b)、(e) 27日 0000 UTC; (c)、(f) 28日 0000 UTC
Fig. 5 Vertical cross section of simulated temperature (solid green line is 0°C) and relative humidity (blue shaded) along 113°E (upper panel) and 119°E (lower panel) from 26 to 28 Jan 2008. Dark shaded area represents the terrain. (a), (d) 1200 UTC 26 Jan; (b), (e) 0000 UTC 27 Jan; (c), (f) 0000 UTC 28 Jan

在锋面的东段, 对流层中低层的逆温层和 $> 0^{\circ}\text{C}$ 的暖层都不明显, 几乎整层温度 $< 0^{\circ}\text{C}$, 不满足冻雨形成的条件, 在锋面的东段地面 0°C 温度线成为雨和雪的分界线。

从模拟的相对湿度看(图5), 虽然水汽沿着锋面爬升, 但饱和区主要出现在地面锋后, 大约有 $300 \sim 500 \text{ km}$ 宽, 有时能伸展到 300 hPa 高度。图5给出了27~28日的相对湿度分布, 结合图3的锋面分布, 26日 1200 UTC 和 27日 0000 UTC, 降水主要出现在锋面前和锋面上, 而 28日 0000 UTC, 主要的饱和区出现在锋后, 而且中低层有非常强的逆温层(5°C)和暖层($900 \sim 600 \text{ hPa}$), 下面将通过28日 0000 UTC 前后模拟的云水、雨水和雪的变化, 进一步探讨是否有可能利用模式的微物理过程结合层结、地面状况来预报冻雨的出现。

4 冻雨的模拟

冻雨的预报不仅涉及定量降水预报问题, 而

且涉及冻雨形成的条件, 诸如大气层结和地面条件等, 这些在文献[19]中已经给出了较详细的论述。仅简单地预报出降水量是不能确定是否为冻雨的, 其有可能是降雪、降雨。雪、雨和冻雨是不同的降水类型和概念, 不可混淆。为此, 这一节重点分析1月27~28日的层结与云水、雨水的分布。

图6给出了模拟的云水、雨水以及 0°C 等温线的分布。与图3的锋面和水汽通量对比, 水汽在锋面上的爬升形成了大范围的云带, 从锋后到锋前, 大约有 $500 \sim 700 \text{ km}$ 宽, 主要的云区在锋面上, 且在 $500 \sim 900 \text{ hPa}$ 之间。图6中从27日 0300 UTC 到 28日 0300 UTC, 沿 113°E 的云带变化不大, 比较稳定, 但雨水的变化比较明显, 雨水分布的高度从云顶到地面。因为冻雨形成在中层有逆温层和暖层, 近地面温度在 0°C 附近的条件下, 图6中逆温层在 $25 \sim 30^{\circ}\text{N}$, 大约有 500 km 宽, 冻雨可能出现在 $25 \sim 27^{\circ}\text{N}$ 。图4给出1月28日的地面温度和冻雨分布, 冻雨的分布也基

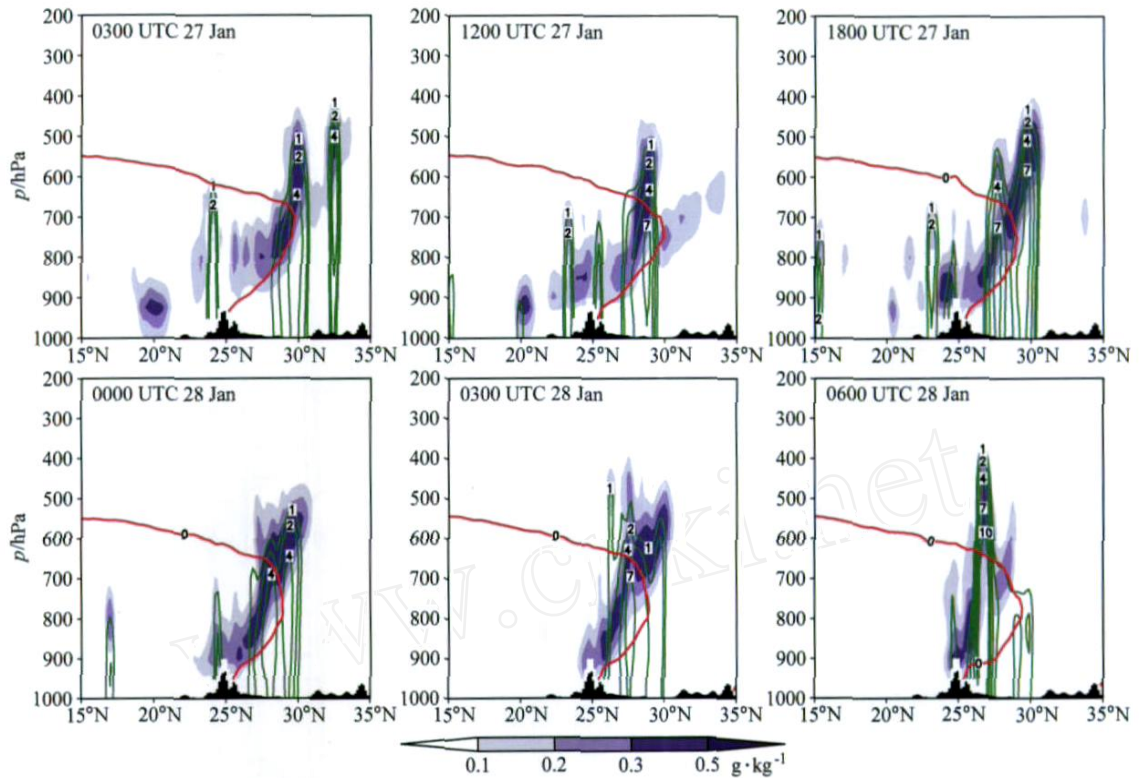


图 6 2008 年 1 月 27~28 日的模拟温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 红线为 0°C), 云水 (蓝色阴影) 和雨水 (绿线, 单位: $10^{-2}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 沿 113°E 的垂直剖面。黑色阴影为地形
Fig. 6 Vertical cross section of simulated temperature (units: $^{\circ}\text{C}$, red line is 0°C), cloud specific humidity (blue shaded) and rain specific humidity (green line, units: $10^{-2}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) along 113°E at 27 - 28 Jan 2008. Dark shaded area represents the terrain

本在 $0\sim-3^{\circ}\text{C}$ 。模拟的地面温度 0°C 线与观测基本一致, 观测的冻雨也基本沿着模拟的地面温度 0°C 线分布, 且也位于模拟的雨区中, 虽然模拟的 28 日雨带整体偏南, 但地面温度的 0°C 线位置与观测基本一致。结合层结和地面温度的分布, 可推知沿 113°E 的剖面冻雨应出现在 $25\sim27^{\circ}\text{N}$ 的大约 200 km 的范围内。

5 结论和讨论

利用中尺度数值模式重点对 2008 年 1 月的持续性雨雪冰冻天气过程中的 1 月 26~29 日过程进行了模拟试验, 模拟结果显示, 模式能基本再现冬季这种持续性降水带的分布和主要影响天气系统的演变, 与产生冻雨密切相关的逆温层、暖层及地面温度分布特征。通过对模拟结果的分析得出主要结论如下: 模拟结果再现了冬季长江流域江南准静止锋的水平分布与垂直结构; 模拟的水

汽主要在锋前的对流层低层辐合, 沿锋面向上爬升凝结, 最大的水汽通量在对流层中层, 爬升到达的高度和强水汽带的宽度也与观测基本一致, 但模拟的水汽通量的强度稍弱于观测的结果; 模拟结果还再现了冻雨发生的基本层结条件和地面特征, 模拟的锋面西段在 $950\sim700\text{hPa}$ 有深厚的逆温层, $900\sim600\text{hPa}$ 有温度高于 0°C 的暖层, 可满足冻雨形成的条件, 模拟的地面温度的 0°C 线与观测的位置基本一致。本文的研究表明, 虽然数值模式不能直接预报冻雨过程, 但结合模式的层结和地面条件以及降雨情况, 有可能大致给出冻雨发生的范围。当然, 从更高的要求来讲, 要非常准确地预报强降水中心的落区和强度目前仍有很大的难度。

冻雨的产生是在有利的天气形势下, 当层结和地面条件呈一定的有利配置时出现的天气现象, 因涉及大尺度系统、中尺度系统、云微物理、微气象学等诸多问题, 其预报有相当的难度, 目前

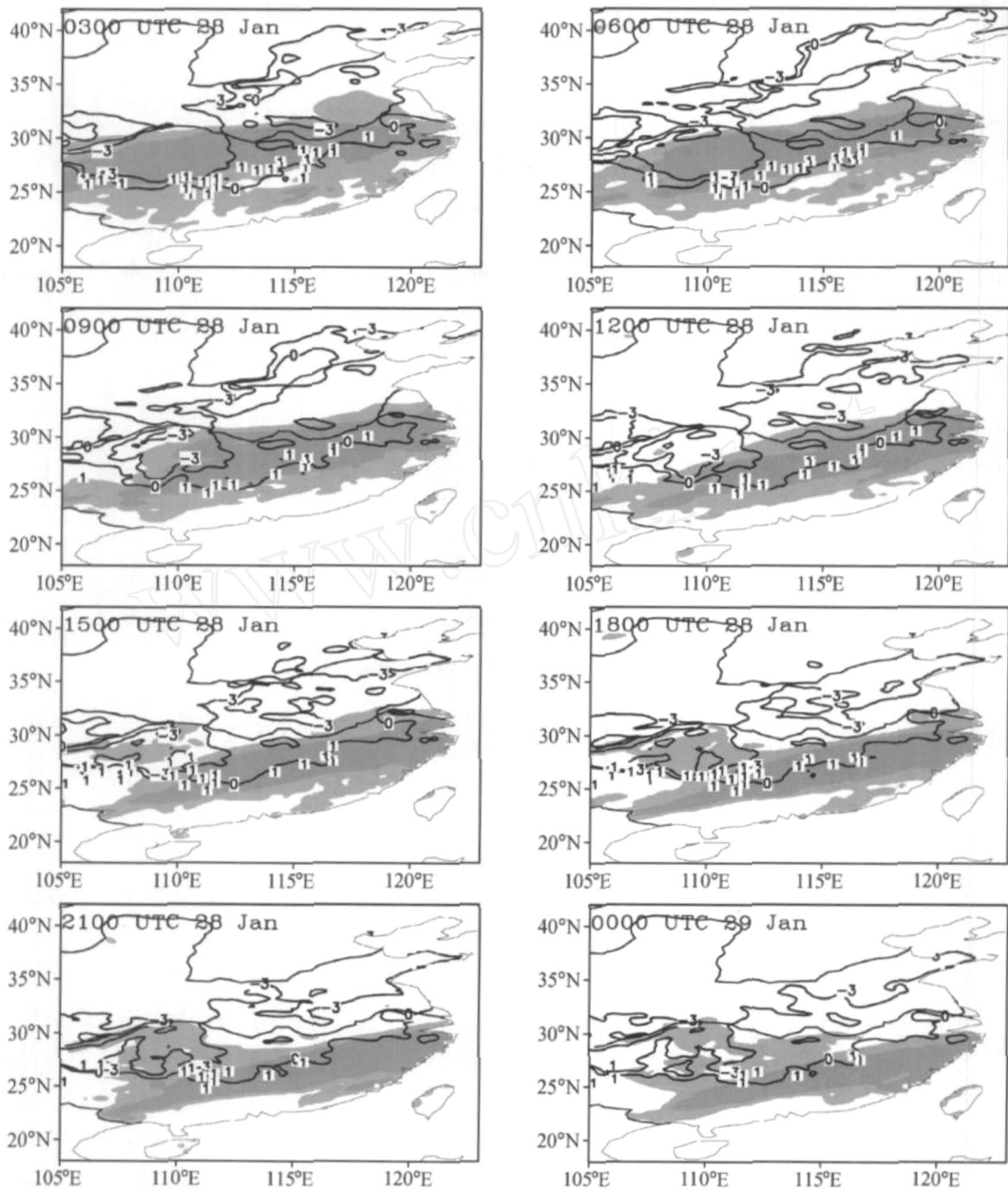


图7 2008年1月28日模拟的地面温度(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、3 h 降雨区(阴影)和观测的冻雨分布(数字 1)

Fig. 7 The simulated surface temperature (solid line, units: $^{\circ}\text{C}$), 3 h precipitation (shaded) and observed freezing rain (number 1) on 28 Jan 2008

的模式不能直接预报冻雨。本文从个例的数值试验入手,探讨了从层结和地面特征的模拟结果来预报冻雨发生的可能性,获得了一些有意义的结果,但本工作还是初步的研究,今后还要在定量降水预报的基础上进一步做出降水类型(Type of precipitation)的更精细的预报,这需要在将来的研究中作更深入的探讨。

参考文献 (References)

- [1] 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析. 气候与环境研究, 2008, 13 (4): 556~566
Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over

- southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 556~566
- [2] 陈天锡, 陈贵发, 穆晓涛. 驻马店地区冻雨天气特征的分析 and 预报. *气象*, 1993, **19** (2): 33~36
Chen Tianxi, Chen Guifa, Mu Xiaotao. The diagnosis and prediction on characteristics of freezing rain at Zhumadian. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1993, **19** (2): 33~36
- [3] 杨向东. 桃仙机场一次冻雨天气分析. *辽宁气象*, 1999, (2): 11~12
Yang Xiangdong. The diagnosis on a freezing rain at Tiaoxian airport. *Liaoning Meteorological Quarterly* (in Chinese), 1999, (2): 11~12
- [4] 何玉龙, 黄建菲, 吉廷艳. 贵阳降雪和凝冻天气的大气层结特征. *贵州气象*, 2007, **31** (4): 12~13
He Yulong, Huang Jianfei, Ji Tingyan. The features of stratification for the freezing rain and snow at Guiyang. *Journal of Guizhou Meteorology* (in Chinese), 2007, **31** (4): 12~13
- [5] 叶茵, 杜小玲, 严小冬. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析. *贵州气象*, 2007, **31** (6): 11~13
Ye Yin, Du Xiaoling, Yan Xiaodong. The spatial and temporal distribution of freezing rain at Guizhou and its circulations. *Journal of Guizhou Meteorology* (in Chinese), 2007, **31** (6): 11~13
- [6] Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al. A physical based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets. *Wea. Forecasting*, 1996, **11**: 591~597
- [7] Cortinas Jr J V, Brill K F, Baldwin M E. Probabilistic forecasts of precipitation type, Preprints, Conf th 16. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. 2002, Orlando, FL, AMS, 140~145
- [8] Bourgouin P. A method to determine precipitation types. *Wea. Forecasting*, 2000, **15**: 583~592
- [9] Bernstein B C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. *Wea. Forecasting*, 2000, **15**: 485~507
- [10] Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K, et al. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 1185~1195
- [11] Cortinas Jr J V, Bernstein B C, Robbins C C, et al. Analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976 - 90. *Wea. Forecasting*, 2004, **19**: 377~390
- [12] Forbes G S, Anthes R A, Thomson D W. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 564~591
- [13] Rauber R M, Ramamurthy M K, Tokay A. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's Day ice storm. *Wea. Forecasting*, 1994, **9**: 183~208
- [14] Stewart R E, King P. Freezing precipitation in winter storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1270~1279
- [15] Stewart R E, King P. Rain-snow boundaries over southern Ontario. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1894~1907
- [16] Zerr R J. Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor.*, 1997, **36**: 1647~1661
- [17] Prater E T, Borho A A. Doppler radar wind and reflectivity signatures with overrunning and freezing-rain episodes: Preliminary results. *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**: 1350~1358
- [18] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征. *气候与环境研究*, 2008, **13** (4): 351~367
Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January - February 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 351~367
- [19] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结构分析. *气候与环境研究*, 2008, **13** (4): 368~384
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 368~384
- [20] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1493~1513
- [21] 孙建华, 赵思雄. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的中尺度对流系统的数值模拟研究. *大气科学*, 2002, **26** (4): 541~557
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China. Part I: A numerical simulation study of Mesoscale convective system inducing heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 541~557
- [22] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. *大气科学*, 2004, **28** (5): 675~691
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. A study on vortex and its mesoscale convective system during China Heavy Rainfall Experiment and Study in 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 675~691