

刘香娥, 高茜, 何晖, 等. 2017. 一次冻雨过程云物理特征的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 191–202. Liu Xiang'e, Gao Qian, He Hui, et al. 2017. A numerical simulation on cloud physical characteristics of freezing rain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 191–202, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15238.

一次冻雨过程云物理特征的数值模拟

刘香娥^{1,2} 高茜^{1,2} 何晖^{1,2} 李杰³ 李兴宇⁴ 贾星灿^{2,5}

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

3 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106

4 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

5 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 运用中尺度数值模式 WRF3.5.1 对 2011 年 1 月 1 日贵州境内的一次冻雨天气过程进行了数值模拟, 研究了本次过程的大气层结、冻雨区云系的宏微观结构和云物理特征, 初步分析了冻雨形成的云微物理过程和成因。结果表明, 贵州境内的冻雨区 (26°N~29°N) 具有冷性和部分“冷—暖—冷”的温度层结, 在高层没有显著的冰相粒子, 冻雨区是相对较强的水汽辐合中心, 丰富的水汽输送在冷性的环境条件下形成云滴, 进而碰并产生雨滴, 过冷雨水主要通过暖雨过程形成; 雨滴继续下落至近地层并保持过冷雨水形式, 最后接触到低于 0 °C 的物体或地面, 迅速冻结而产生地面冻雨。

关键词 冻雨 WRF 模式 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0191-12

中图分类号 P426.5⁺1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15238

A Numerical Simulation on Cloud Physical Characteristics of Freezing Rain

LIU Xiang'e^{1,2}, GAO Qian^{1,2}, HE Hui^{1,2}, LI Jie³, LI Xingyu⁴, and JIA Xingcan^{2,5}

1 Beijing Municipal Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation, and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089

3 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106

4 Laboratory of Cloud and Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

5 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract The WRF3.5.1 model is used to simulate a freezing rain process that occurred on 1 January 2011 in Guizhou Province. The atmospheric stratification and macro and micro cloud structures and cloud physical characteristics are analyzed. Results show that in Guizhou Province, the atmosphere above the freezing rain area (26°N–29°N) is characterized by a cold and partial “cold–warm–cold” temperature stratifications. There were no significant ice phase

收稿日期 2015-10-26; 网络预出版日期 2017-01-05

作者简介 刘香娥, 女, 1982 年出生, 高级工程师, 主要从事云降水物理和大气化学研究。E-mail: lxe3399@163.com

资助项目 北京市自然科学基金资助项目 6154027、8164058, 国家重点研发计划项目 2016YFA0601704, 国家自然科学基金项目 41675138、41375136, 中央高校基本科研业务费专项资金 NJ20140015, 国家电网公司科技项目 GCB17201400162, 公益性行业(气象)科研专项项目 GYHY201306065

Funded by Beijing Municipal Natural Science Foundation (Grants 6154027, 8164058), the National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601704), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675138, 41375136), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant NJ20140015), Science and Technology Projects of State Grid Corporation of China (Grant GCB17201400162), the National Department of Public Benefit Research Foundation of China (Grant GYHY201306065)

particles at the top; the freezing rain area corresponded to a relatively strong water vapor convergence center, and cloud droplets formed under the cold condition with abundant water vapor. These cloud droplets collided during their falling, and supercooled raindrops mainly formed during the warm rain process. Raindrops stayed supercooled and fell to the ground. When they were exposed to below zero degrees of objects or on the ground, freezing rain quickly formed.

Keywords Freezing rain, WRF model, Numerical simulation

1 引言

冻雨是过冷雨滴与空中或地面物体接触而迅速冻结的雨。冰冻天气灾害之所以严重,主要是由于冻雨积冰。冻雨的产生常会给电力、交通、农业等部门造成极大的影响,如 2008 年初发生在我国南方的雨雪冰冻灾害天气(陶诗言和卫捷, 2008; 赵思雄和孙建华, 2008; 赵琳娜等, 2008; 苗春生等, 2010)。

对冻雨的研究有一定的历史,20 世纪初即有国外学者(Bennett, 1913; Brooks, 1920)认识到冻雨的形成过程并提出了冻雨的发生条件:大量存在于高空云顶的冰晶粒子下落,穿过温度大于 0°C 的深厚暖层完全融化,而后下落至地面冷层与地物碰撞并冻结。20 世纪 70、80 年代,Young (1978) 和 Bocchieri (1980) 提出了另一种冻雨形成的条件:过冷却暖雨过程,在此过程中,云顶温度大于 -10°C ,所以冰晶粒子浓度较低,当冻雨发生时,整层温度廓线都小于 0°C 。此后有研究者从气候学天气学的角度研究冻雨天气,针对大量冻雨个例进行天气分析,研究冻雨形成的环境条件、冻雨的气候态分布(Marwitz, 1980; Forbes et al., 1987; Szeto et al., 1999; Cortinas, 2000; Cortinas et al., 2004) 并有少数学者利用数值模式研究冻雨的预报方法以提高冻雨的短期预报(Tremblay and Glazer, 2000; Rasmussen et al., 2002)。

我国对于冻雨的研究开始于 20 世纪 70 年代,研究的对象主要为青藏高原、西北和东北等北方地区。2008 年发生在南方的灾害性冰冻雨雪天气引起了国内对冻雨研究的广泛关注,至今有众多的研究成果发表。李崇银等(2008)、王东海等(2008)、赵琳娜等(2008)、陶诗言和卫捷(2008)和高守亭等(2014)研究了此次过程的天气特征及成灾机理,指出大气环流的组合性异常是造成持续雨雪冰冻天气的直接原因。曾明剑等(2008)指出合适的逆温区暖层(温度大于 0°C 、不能太厚太低,也不能太薄太高)和地面温度是造成冻雨灾害的主要温

度特征。孙建华和赵思雄(2008a)进一步总结了比较有利于冻雨出现的地面温度和温度露点差,并提出了适合于我国南方雨雪、冰冻天气的锋面结构与大气层结的物理模型。卫捷等(2008)、孙建华和赵思雄(2008b)和高守亭等(2014)分别研究了关于冻雨的天气尺度可预报性、用数值模式预报冻雨发生范围的可能以及对冻雨的诊断预测方法。陶玥等(2012, 2013)研究了冻雨产生时云系的降水粒子云物理特征等。

贵州地处云贵高原东北侧的斜坡地带,地势西高东低,特殊的地形很容易产生冻雨(张昕等, 2015),加上受自然和人为因素的影响,对冰冻天气的观测比较困难,因此数值模式成为研究这种天气过程的有利工具(孙建华和赵思雄, 2008b; 苗春生等, 2010; 陶玥等, 2012)。本文主要利用中尺度数值模式 WRF3.5.1,对 2011 年发生在贵州省境内的一次冻雨天气过程进行数值模拟研究,在模拟结果可信的基础上进行云微物理分析,研究云系冻雨区的层结和云物理特征以及冻雨形成的云物理机制。

2 2011 年贵州个例概况

2.1 贵州冻雨实况

如图 1 所示,2011 年 1 月 1 日至 2 日早晨,贵州、湖南等地持续出现雨雪天气,贵州大部、湖南西部等地出现大范围冻雨,地面气温一般为 $-3\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。截止到 1 月 2 日 08:00(北京时间,下同),贵州省有 62 个县市区出现冻雨,贵州省中北部地区导线积冰直径(气象观测站电线积冰观测项目)普遍有 $25\sim 40\text{ mm}$,以开阳县的 46 mm 最大;湖南省湘西和湘中地区出现冻雨,冻雨厚度在 $3\sim 12\text{ mm}$,湘西自治州的凤凰县、怀化市的辰溪县最大为 12 mm 。

2.2 天气背景

2011 年 1 月 1 日 08:00 的天气形势场(图 2)显示,500 hPa 为两槽一脊的大尺度形势,其配置非常有利于冷暖空气在西南地区的交汇;700 hPa

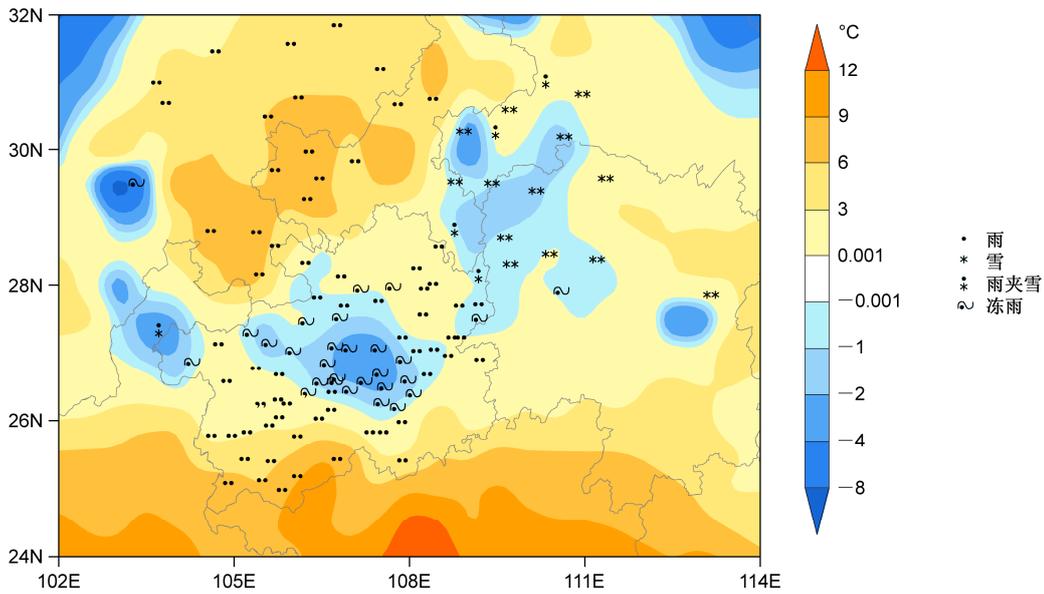


图 1 2011 年 1 月 1 日 08:00 (北京时间) 贵州冻雨 (天气现象图例) 及地面温度 (填色) 分布

Fig. 1 Distribution of freezing rain (weather phenomenon legend) and surface temperature (colored) at 0800 LST 1 January in Guizhou Province

的西南急流明显, 给贵州湖南等地提供了丰富的水汽, 并且 700 hPa 的暖平流有助于逆温层的形成, 使得固态降水物融化形成过冷水滴; 850 hPa 贵州东北部受冷空气控制, 冻雨发生处正是冷暖交汇处, 锋生明显, 有利于上升运动产生雨雪天气。从贵州 08:00 的探空可以看到, 垂直气象要素的分布也十分有利于冻雨的形成, 700 hPa 有非常明显的逆温层, 温度在 0 °C 左右, 有利于降水粒子融化并形成过冷水滴, 此外超过 20 m/s 的低空急流提供的水汽有利于雨雪形成。最终由于近地面受冷空气控制, 温度在 0 °C 以下, 从而过冷水滴在近地面形成冻雨。

3 模式参数设置及验证

3.1 模式参数设置

文中所用模式版本为 WRF3.5.1 (Weather Research and Forecasting), 模拟相关参数设置如表 1 所示。模拟选用 Morrison 微物理双参数方案, 该方案包含有 6 种水成物: 水汽、云水、云冰、雨、雪、霰 (雹) 以及多种液态、固态和混合态过程。该方案中可根据需要选择常数云滴数浓度和可变云滴数浓度方法来进行模拟。从理论上讲, 是一种能够实时计算数浓度和混合比的双参数方法, 可以更好地反映云雨过程。

表 1 WRF-ARW 模式参数设定

Table 1 WRF-ARW model configuration

参数	具体设定
水平分辨率	网格一: 格距 9 km, 网格数 150×150/网格二: 格距 3 km, 网格数 196×196
垂直分辨率	σ -z 地形跟随坐标, 35 层, 模式顶为 50 hPa
积分时间	2010 年 12 月 31 日 00:00 至 2011 年 1 月 2 日 12:00
微物理过程	Morrison 方案
辐射方案	长波辐射: (Rapid Radiation Transfer Model) 方案; 短波辐射: Dudhia 方案
积云对流参数化	网格一: Betts-Miller-Janjic 方案/网格二: 无
边界层方案	Yonsei University 方案
地表方案	Monin-Obukhov with Carslon-boland 方案
土壤方案	Noah 方案

模拟的水平方向为双重双向嵌套网格, 第一层嵌套涵盖了西南大部分地区, 第二重嵌套覆盖了贵州及周边几个省份 (图 3), 两重嵌套分别间隔 3 h 和 1 h 输出一次结果。模式的初始及侧边界条件采用 NCEP 1° (纬度) × 1° (经度) 逐 6 h 分析资料启动模式。

3.2 数值模拟检验

为了验证模拟结果的可靠性, 将利用观测资料与模拟结果对比, 图 4 给出模拟云系 24 h 地面降水量与实况的对比。可以看到模拟的雨带走向、雨带的形状、降水的落区分布情况与实况降水特征大体相似, 但模拟的降水偏北, 中心偏弱。图 5 给出模拟的 1 月 1 日 08:00 地面温度和降水量的分布, 与图 1 的实况监测对比可以看到, 模拟的 0 °C 线由西

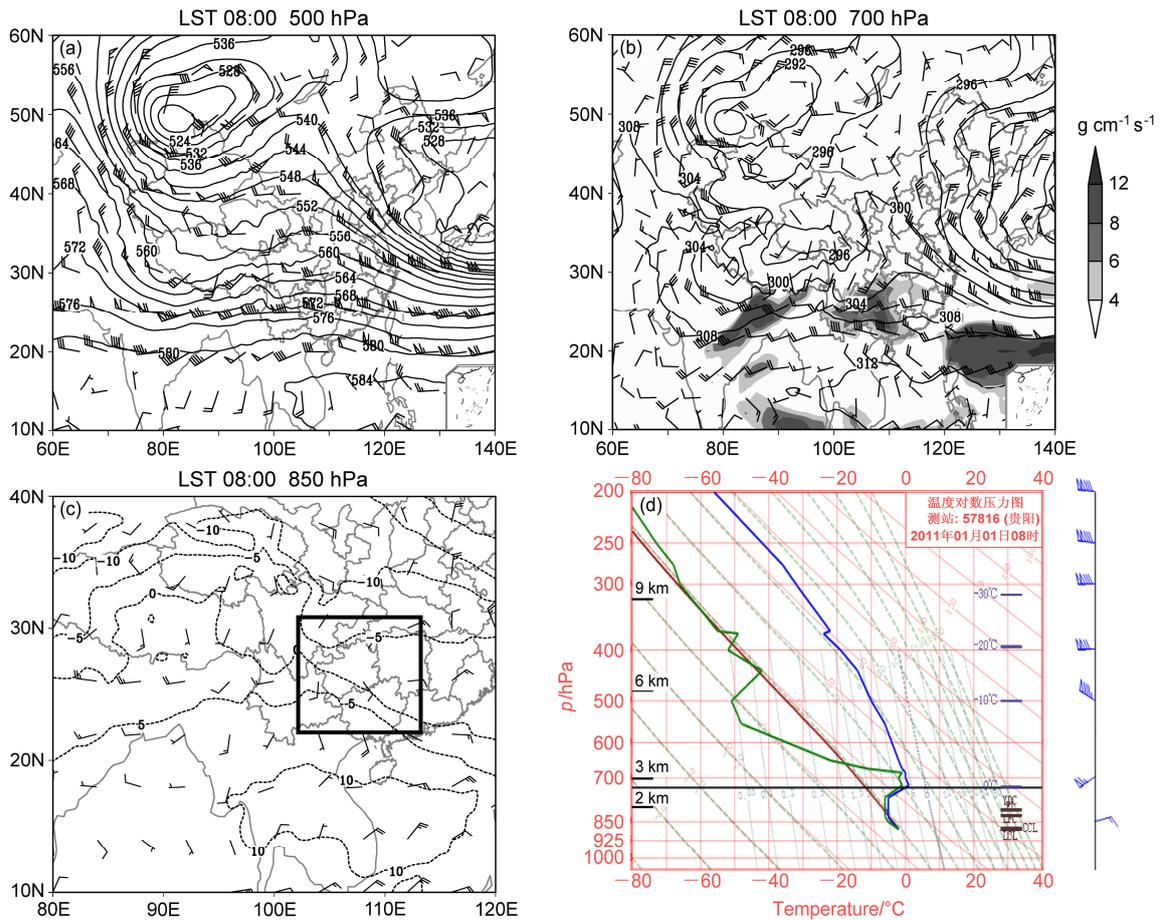


图2 2011年1月1日08:00的(a)500 hPa、(b)700 hPa、(c)850 hPa天气形势(黑实线为等高线,单位: dagpm; 风场: 全杆为4 m/s; 黑点线为温度,单位: °C; 图b中阴影为水汽通量; 图c中黑色框为研究区域)和(d)贵阳的探空曲线,蓝色线为层结曲线(温度),绿色线为状态曲线(露点)

Fig. 2 Synoptic weather charts at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, and (c) 850 hPa at 0800 LST 1 January 2011 and (d) the sounding plot at Guiyang station. Black solid and dotted lines represent the geopotential height at 4 dagpm interval and temperature at 5 °C interval respectively, wind barbs show the horizontal winds (full barb: 4 m/s) in (a-c); shaded areas in (b) denote water vapor flux; the black box in (c) denotes the study area. In (d) the blue line represents the stratification curve (temperature), the green the green line shows the state curve (dew point temperature)

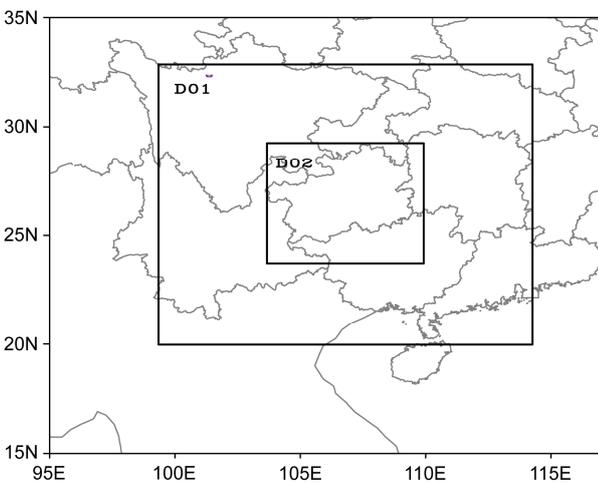


图3 模拟区域设置图
Fig. 3 Simulation area setting

至东贯穿贵州中部地区,贵州中—北部地面温度较低,同时有降雨产生,这与实况基本接近,贵州南部为地面暖区。模拟的高中低层位势高度场、风场的走向等与同时次的客观分析场也基本吻合(图略)说明模拟结果能较好地反映实况,基本再现了冻雨发生时大气的环流形势和地面降水的分布,可以用来对冻雨的产生进行进一步分析。

4 冻雨区云系宏微观结构特征

4.1 冻雨区范围和逆温特征

本节主要利用 WRF 数值模式的结果对这次冰冻雨雪天气进行冻雨区云系的宏微观结构特征分析。图6给出的是1月1~2日冻雨的分布演变图。

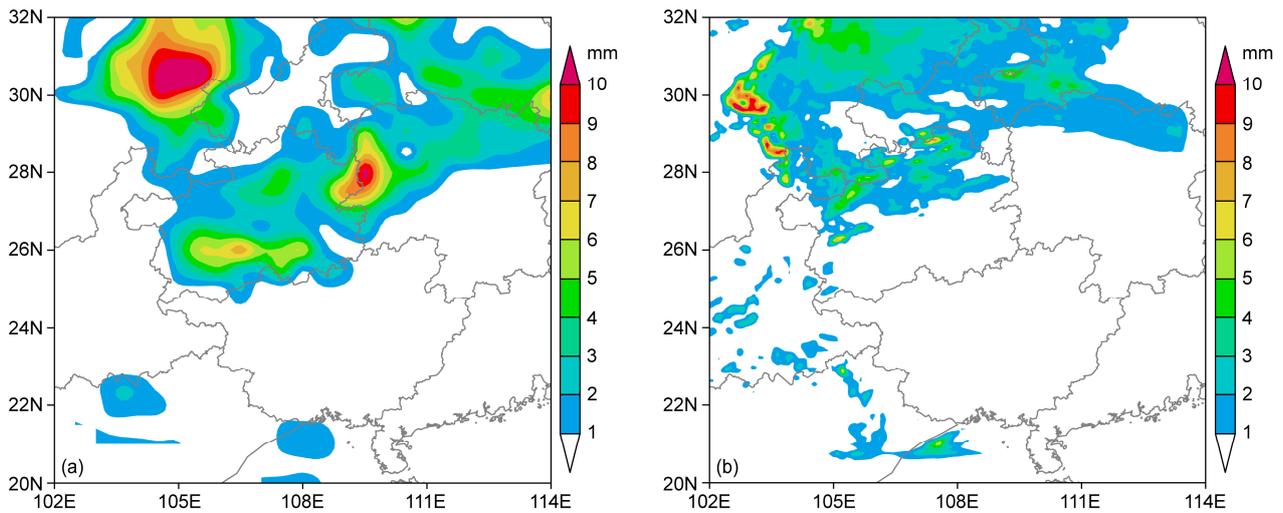


图4 2011年1月2日08:00 (a)观测和(b)模拟的24 h地面降水量

Fig. 4 (a) Observed and (b) simulated 24-h accumulative precipitation from 0800 LST 1 to 0800 LST 2 January 2011

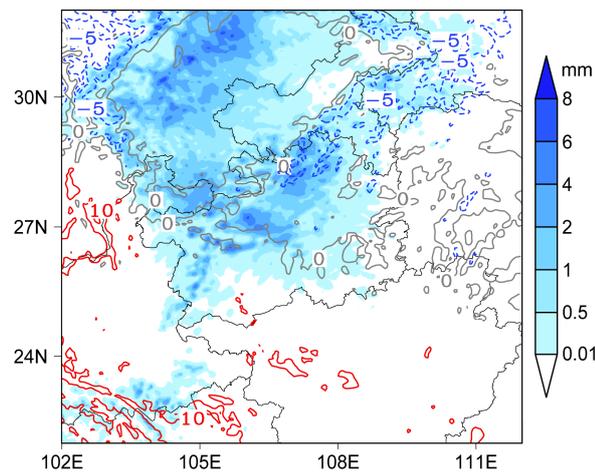


图5 2011年1月1日08:00模拟的地面温度(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和24 h降水量分布(填色,单位: mm)

Fig. 5 Distributions of surface temperature (contours, units: $^{\circ}\text{C}$) and 24-h precipitation (colored, units: mm) at 0800 LST 1 January 2011

可以看到, 1日08:00贵州省北部地区的地面温度基本都处于 0°C 以下, 相应的降水应为冻雨。至2日08:00, 模拟区域内大部分地区的地面温度都显著变冷, 贵州全省的地面温度基本都处于 0°C 以下, 冻雨区的范围覆盖整个中北部地区。在温度更低的区域, 如黔渝湘赣四省交界和四川的部分地区, 地面温度在 -10°C 左右, 地面的降水形式主要表现为降雪。从以上可以看到, 本次冰冻雨雪天气过程, 冻雨主要出现在贵州省境内, 并且该省的降水形式基本全部为冻雨, 降雪和霰很少。

与图6对应, 在此次冰冻雨雪天气过程中, 贵州省中部及北部地区一直处在显著的逆温层控制

之中(图7), 1日08:00表现的还不是非常明显, 至午后14:00已经非常显著, 此后逆温层一直存在并扩展至湖南境内, 一直持续到2日08:00。冻雨区与逆温层的存在有一定的联系, 但二者并非是完全的充分必要条件。冻雨的出现除了与特殊的环境条件有关, 还要考虑水汽, 云系的宏微观特征及各种物理条件的结构配置等。

4.2 冻雨区云系的宏微观结构与层结构特征

在同一天气尺度的云系中, 并不是所有的云系覆盖区都会出现冻雨, 通常只有在特殊的环境条件下冻雨才能出现, 并且只是在局部地区。冻雨的形成, 除了与上述描述的逆温有关, 还可能与云系的物理特征, 环境的水汽条件等等有关, 下面, 主要分析冻雨区云系的宏微观结构和大气温湿层结的配置特征。

4.2.1 冻雨区云的宏观特征

为了分析云系, 文中用模式结果700 hPa高度层以上的水成物总量作为代表, 如图8中所示, 给出的是云系的水平分布及时间演变, 通过对比可以看到, 贵州省冻雨区开始主要出现在西北部, 此后逐渐向北至东部扩展, 而对应的贵州北部地区空中一直都是水成物的相对丰值区, 地面的冻雨区与云中含水量的丰值区并未表现出非常好的一致性。例如1日08:00, 云系的丰水区主要位于贵州北部并向东延伸至湖南一带, 而冻雨区则位于贵州偏西北部, 2日08:00, 湖南北部大部地区被总水成物含量高于 1.2 g/kg 的云系覆盖, 但地面并无冻雨出现。这可能与云系的厚薄及云体温度的分布有较大关

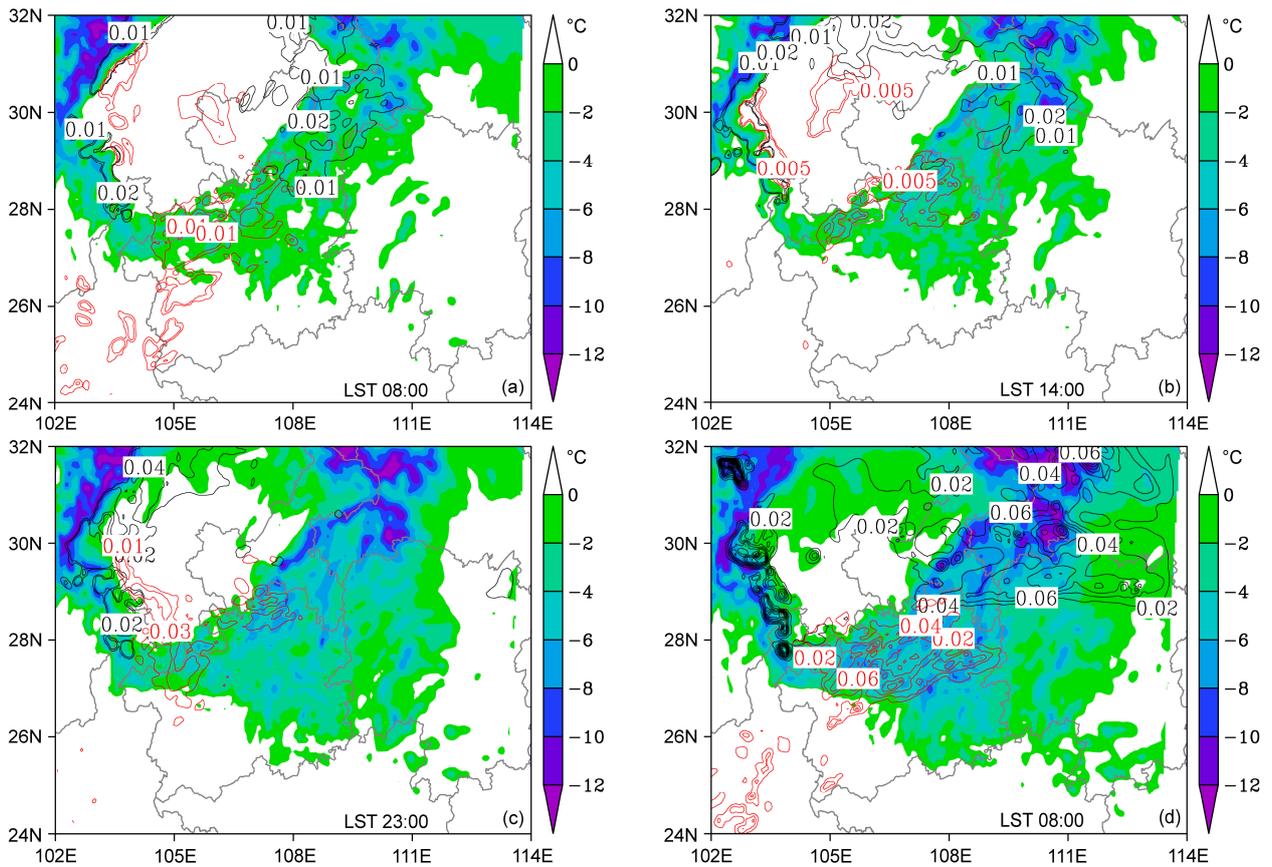


图 6 2011 年 1 月 1~2 日地面温度(填色)和降水量(红色等值线: 降雨量, 黑色等值线: 降雪量, 单位: mm)的分布: (a) 1 日 08:00; (b) 1 日 14:00; (c) 1 日 23:00; (d) 2 日 08:00

Fig. 6 Distributions of surface temperature (colored) and precipitation (red lines: rainfall; black lines: snowfall; units: mm): (a) 0800 LST 1 January; (b) 1400 LST 1 January; (c) 2300 LST 1 January; (d) 0800 LST 2 January

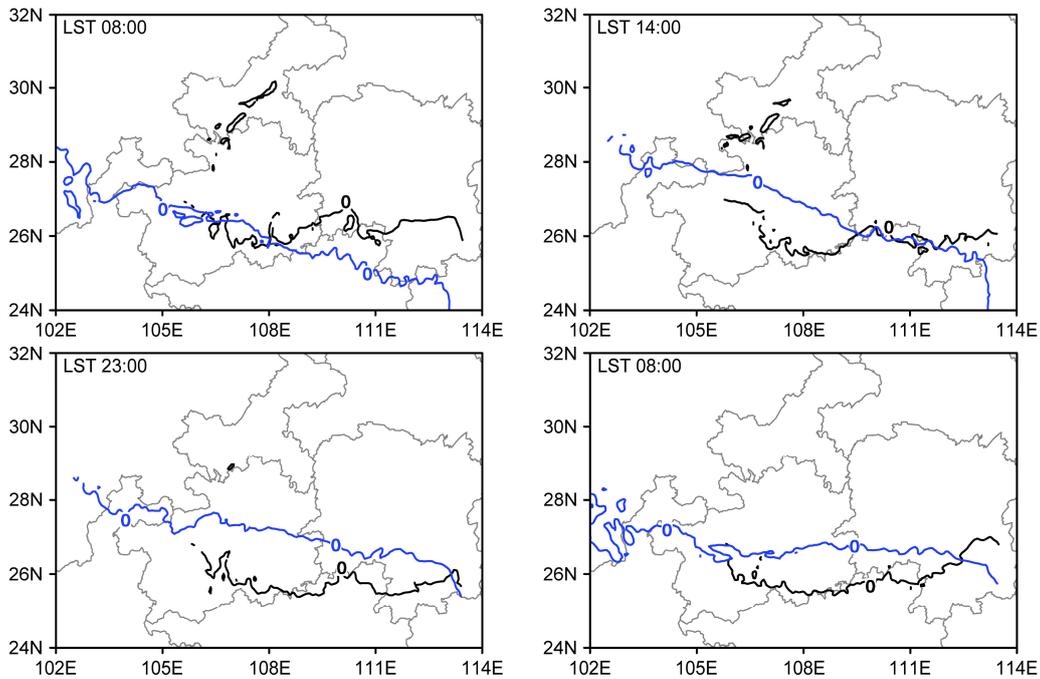


图 7 2011 年 1 月 1~2 日 850 hPa (黑实线) 和 700 hPa (蓝实线) 0°C 线分布: (a) 1 日 08:00; (b) 1 日 14:00; (c) 1 日 23:00; (d) 2 日 08:00
Fig. 7 Distributions of 0°C isotherm at 850 hPa (black line) and 700 hPa (blue line): (a) 0800 LST 1 January; (b) 1400 LST 1 January; (c) 2300 LST 1 January; (d) 0800 LST 2 January

系，不同物理特征的云系导致的降水相态有所差异。

4.2.2 冻雨区云的垂直结构及冻雨形成的层结特征

本节主要运用模式结果，分析贵州冻雨区的结构和环境特征，了解冻雨形成的特殊云物理，大气层结及地面条件等。根据前文图 4 地面降水分布和图 8 空间水成物的分布，选择 1 日 08:00 有冻雨出现沿 106.8°E 和 2 日 08:00 未有冻雨出现沿 111°E 做经向剖面图(图 9)。可以看到，1 日 08:00 在 26.8°N 附近，逆温层从 800 hPa 延伸至 600 hPa，云水主要集中在中低空深厚暖区的中下部并延伸至冷区，云中云滴碰并产生的雨滴在下落至近地面浅薄的冷层并降落到低于 0 °C 的地面即产生明显的冻雨；而 2 日 08:00，在 25°N~27°N，也有显著的逆温舌，

但由于云体浅薄缺乏云水，难以产生雨滴，因此地面并没有冻雨出现。此外，这两个时次在 29°N 附近，在中高层都有一定数量的冰晶，下落过程中由于没有合适的暖层使其融化，最后以雪花的形式降至地面。因此通过以上可以看到，冻雨的出现是一定的逆温、水汽、层结结构相配合的结果，单一的气象条件并不一定能导致冻雨的产生。这一结果与前期众多的研究结论相吻合（曾明剑等，2008；孙建华和赵思雄，2008a；陶玥等，2012）。

由于本次过程贵州省内的雨区大致呈东西走向，为了更清楚了解南北向云系的垂直结构，文中沿贵州省贵阳龙洞堡机场位置（26.53°N，106.8°E）做南北向的垂直剖面，分析云中水凝物如雨、雪、霰、云水场、温度、水汽通量等分布与演变。

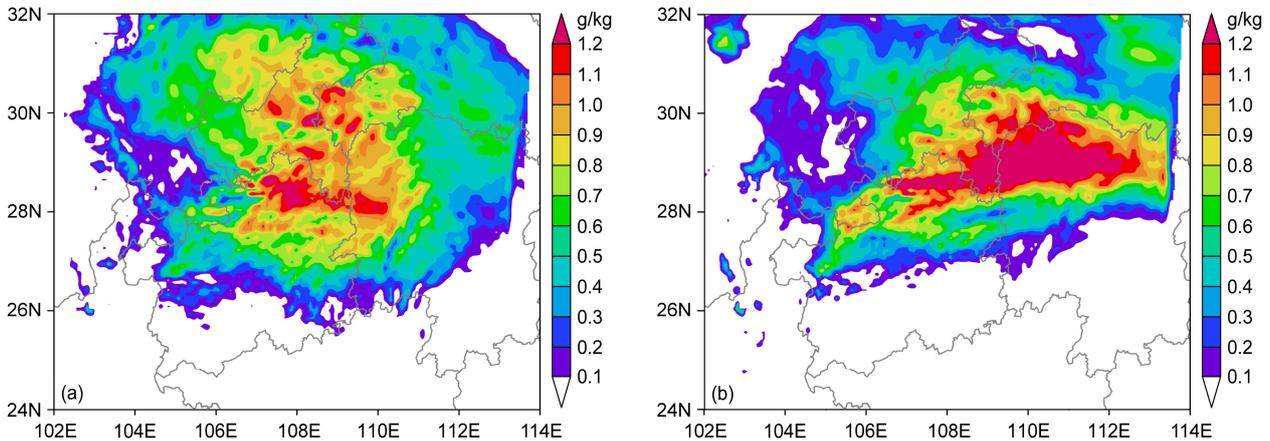


图 8 700 hPa 高度层以上的水成物总量分布：(a) 2011 年 1 月 1 日 08:00；(b) 2011 年 1 月 2 日 08:00。

Fig. 8 Water content distributions above 700 hPa: (a) 0800 LST 1 January 2011; (b) 0800 LST 2 January 2011

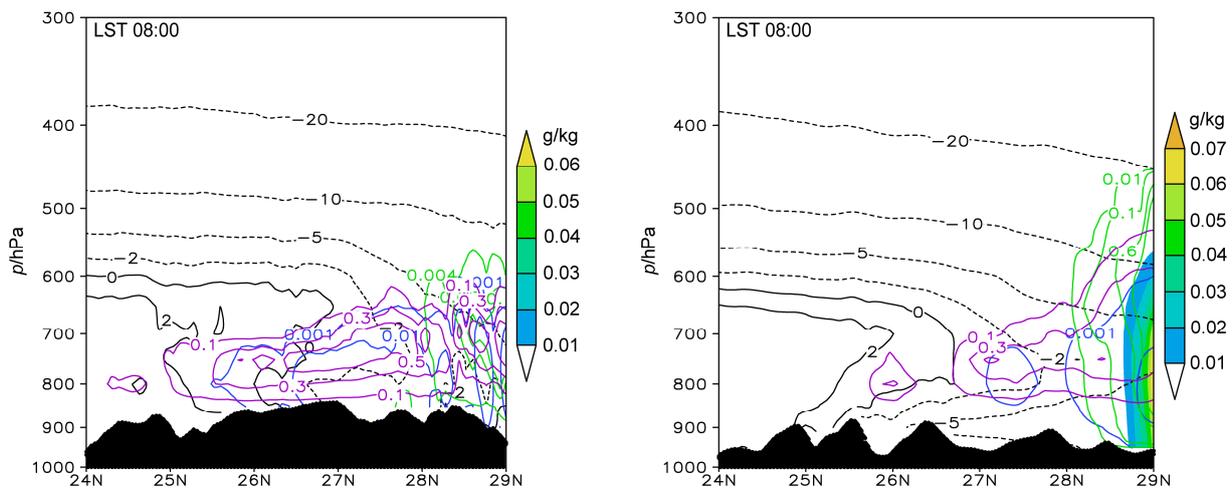


图 9 2011 年 1 月 (a) 1 日 08:00 沿 106.8°E 和 (b) 2 日 08:00 沿 111°E 的水成物比含量和温度（黑色等值线，单位：°C）经向—垂直剖面：云水比含量（紫色等值线，单位：g/kg）、冰晶比含量（绿色等值线，单位： 10^{-4} g/kg）、雪比含量（填色，单位：g/kg）、雨比含量（蓝色等值线，单位：g/kg）

Fig. 9 Vertical cross sections of cloud water content ratio (purple lines, units: g/kg), ice crystal content ratio (green lines, units: 10^{-4} g/kg), snow content ratio (shaded, units: g/kg), rain content ratio (blue lines, units: g/kg) and temperature (black lines, units: °C) along (a) 106.8°E at 0800 LST 1 January 2011 and (b) 111°E at 0800 LST 2 January 2011

从机场云系及温度场的垂直剖面演变来看(图 10), 1 日 08:00 至 2 日 08:00, 贵州省几个时次的温度层结比较相似, 自南向北一直有逆温层存在, 但该逆温并不是整层覆盖, 是以逆温舌的形式向北伸展。从温度等值线的分布来看, 不同区域在垂直分布上有显著差异, 其中大约 27°N 附近主要是“冷—暖—冷”性结构, 在 600 hPa 上为冷层, 600~800 hPa 为暖层, 800 hPa 以下至地面为冷层; 28°N 附近(贵州北部地区)自地面到高空整层云系都低于 0 °C, 为显著的冷层。不同的层结结构对应着不同的云微物理结构, 在“冷—暖—冷”层的云系结构里, 只在中低层含有云水和雨水; 在纯冷性结构里, 除了在中低层存在云水和雨水, 在低层还出现少量的霰。

具有冷性和部分“冷—暖—冷”温度层结的区域即是贵州的冻雨区(26°N~29°N), 从上述云中垂直方向微物理结构可粗略分析, 由于高层并无显著的冰粒子存在, 雨水的形成主要来自云中云滴粒子的碰并过程, 低层过冷雨水很大可能是通过暖雨过程形成, 最后过冷雨水接触到低于 0 °C 的物体或地面, 迅速冻结形成地面冻雨。

图 11 给出前述 1 日 08:00 和 14:00 两个时次对应的水汽通量散度垂直剖面, 可以看到在贵州的冻雨区, 是相对较强的水汽辐合中心(28°N 附近), 丰富的水汽输送在冷性的环境条件下容易形成云滴, 进而碰并产生雨滴, 而后雨滴继续下落至近地层并保持过冷雨水形式, 最终接触地面形成冻雨。

5 冻雨区云物理特征及成因

由之前的分析可以看到, 贵州的冻雨主要出现在北部地区, 为了分析方便, 此处给出沿龙洞堡经向方向上(27°N~29°N, 冻雨区)和沿图 9b(28°N~30°N, 非冻雨区)水凝物平均值的垂直廓线。图 12 a、12b 可以看到冻雨区各种水凝物含量的最大值出现的高度不同, 高层没有冰相粒子, 云水主要出现在 600 hPa 以下, 而雨水的高值则出现在 800 hPa 附近, 并且雨水最大值的高度位于云水迅速减少的高度, 充分说明云滴对雨滴的形成有很大的贡献, 雨水主要通过云滴的碰并形成。在整个云系中也有一定的雪, 但与雨水相比, 雪的含量可以忽略。而在非冻雨区(图 12 c、12d), 云层稍浅薄, 云水含量明显偏低, 但冰晶粒子含量非常丰富。尽管如此,

由于底层未有逆温层的存在, 下落的冰雪晶没有融化的暖层, 因此空中的冰晶通过聚并和凝华产生雪晶, 并最终降落至地面, 产生降雪, 这与前节图 9 的分析相呼应。

综上所述, 这次贵州冻雨过程是在一定的天气背景下, 形成了产生冻雨的大气逆温特征和适宜的地面(表)温度条件。与一般出现冻雨的三层大气垂直结构不同, 本次过程高层并无显著的冰晶或雪, 只是暖层下降的液态水经过低空温度低于 0 °C 的大气层结形成过冷却雨滴降落, 与地物碰撞并冻结而产生冻雨, 因此低层和地表的低温起了主要的作用, 两层结构是本次冻雨过程的主要特征。

6 结论和讨论

本文对 2011 年 1 月 1 日发生在贵州的一次冻雨过程进行了数值模拟分析, 模拟结果显示, WRF 模式能基本再现这种冻雨过程以及与产生冻雨密切相关的逆温层、暖层及地面温度分布等特征。在此基础上, 运用模拟结果研究了冰冻天气的层结特征, 冻雨云系的宏微观结构和云物理特征, 初步分析了冻雨形成的云微物理过程和成因。得到以下结论:

(1) 此次冰冻雨雪天气过程覆盖范围较广, 在贵州省内主要表现为冻雨。1 月 1 日午后 14:00 到 2 日 08:00 贵州中部和北部地区一直有逆温层覆盖, 这是冻雨产生的条件之一, 但除此之外冻雨的出现与云系水汽、宏微观特征及动力热力条件的结构配置也密不可分。

(2) 贵州境内的冻雨区(26°N~29°N)具有冷性和部分“冷—暖—冷”的温度层结, 冷性部分在高层并无显著的冰粒子存在; 冻雨区是相对较强的水汽辐合中心, 丰富的水汽输送在冷性的环境条件下形成云滴, 进而碰并产生雨滴, 过冷雨水主要通过暖雨过程形成; 雨滴继续下落至近地层并保持过冷水雨的形式, 最后接触到低于零度的物体或地面, 迅速冻结而产生地面冻雨。此次过程低层和地表的低温起了主要的作用, 两层结构是其主要特征。

本文从数值模拟分析的角度入手, 探讨了冻雨产生的云微物理特征和原因, 获得了一些有意义的结果, 但本工作还是初步的研究, 今后还要在冻雨产生的云降水物理—动力—热力相互作用等方面

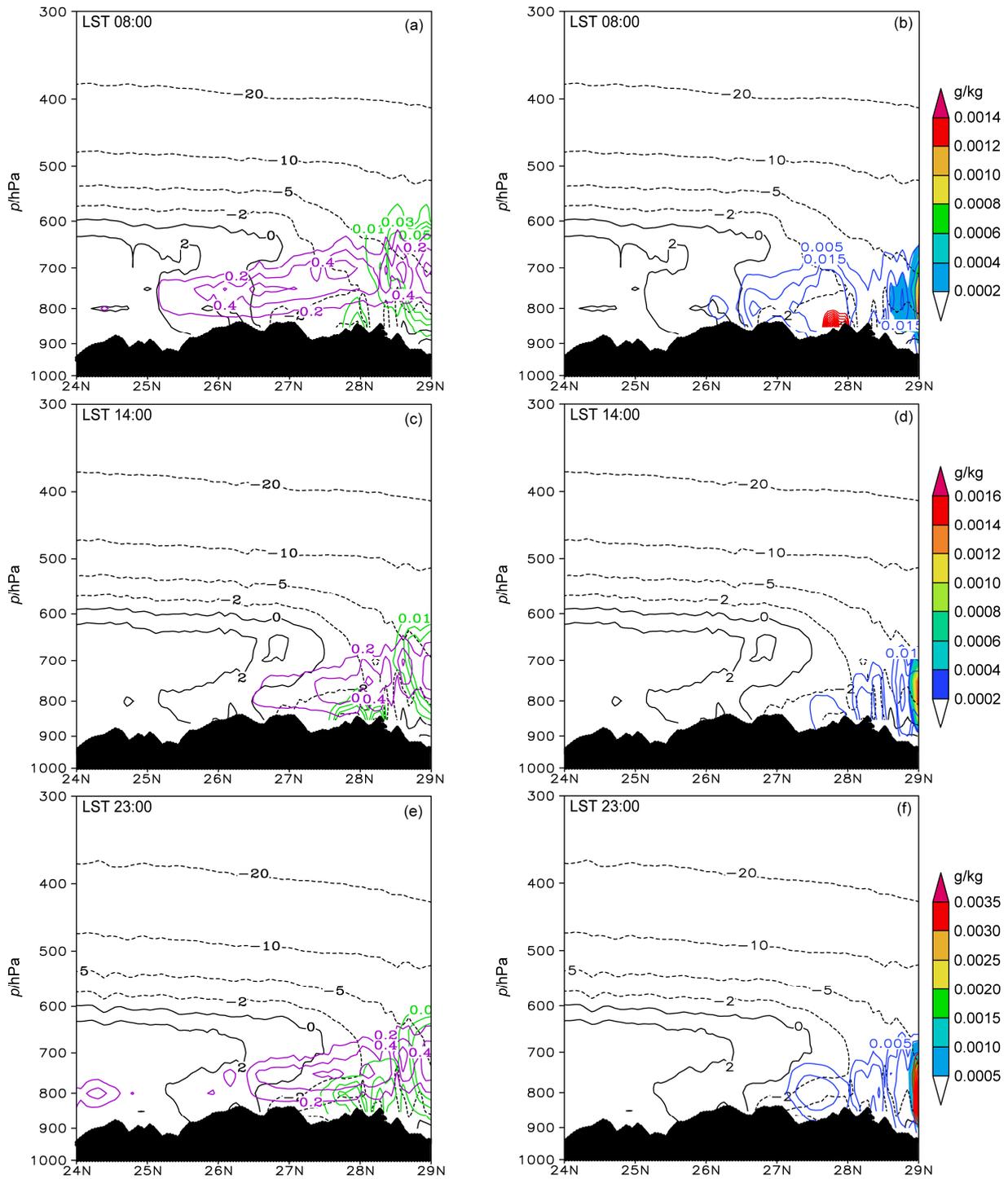


图 10 2011 年 1 月 1 日 (a, b) 08:00、(c, d) 14:00、(e, f) 23:00 的沿龙洞堡 (106.8°E) 水成物比含量和温度 (黑色等值线, 单位: °C) 经向—垂直剖面: (a, c, e) 云水比含量 (紫色等值线, 单位: g/kg)、冰晶比含量 (绿色等值线, 单位: 10^{-4} g/kg); (b, d, f) 雪比含量 (填色, 单位: g/kg)、雨比含量 (蓝色等值线, 单位: g/kg)、霰比含量 (红色等值线, 单位: g/kg)

Fig. 10 Vertical cross sections of cloud water content ratio (purple line, units: g/kg), ice crystal content ratio (green lines, units: 10^{-4} g/kg), snow content ratio (shaded, units: g/kg), rain content ratio (blue lines, units: g/kg), graupel content ratio (red lines, units: g/kg) and temperature (black lines, units: °C) along Longdongbao station (106.8°E) at (a, b) 0800 LST, (c, d) 1400 LST, and (e, f) 2300 LST 1 January

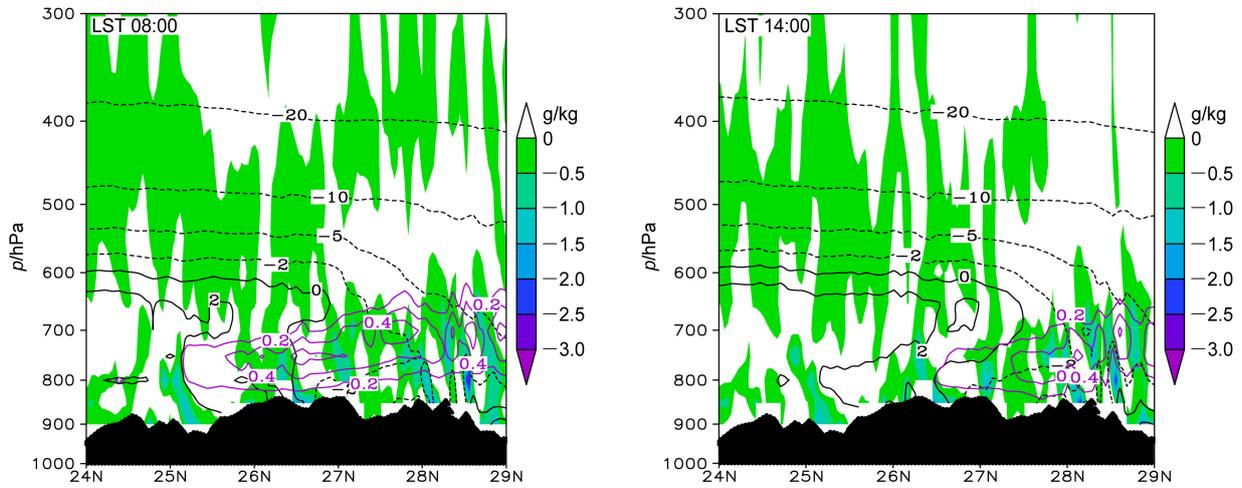


图 11 2011 年 1 月 1 日 08:00 和 14:00 通过龙洞堡 (106.8°E) 的云水比含量 (紫色等值线, 单位: g/kg)、水汽通量散度 (填色) 和温度 (黑线等值线, 单位: °C) 径向垂直剖面

Fig. 11 Vertical cross sections of cloud water content ratio (purple lines), water vapor flux divergence (colored), and temperature (black lines, units: °C) along Longdongbao station (106.8°E) at (a) 0800 LST and (b) 1400 LST 1 January

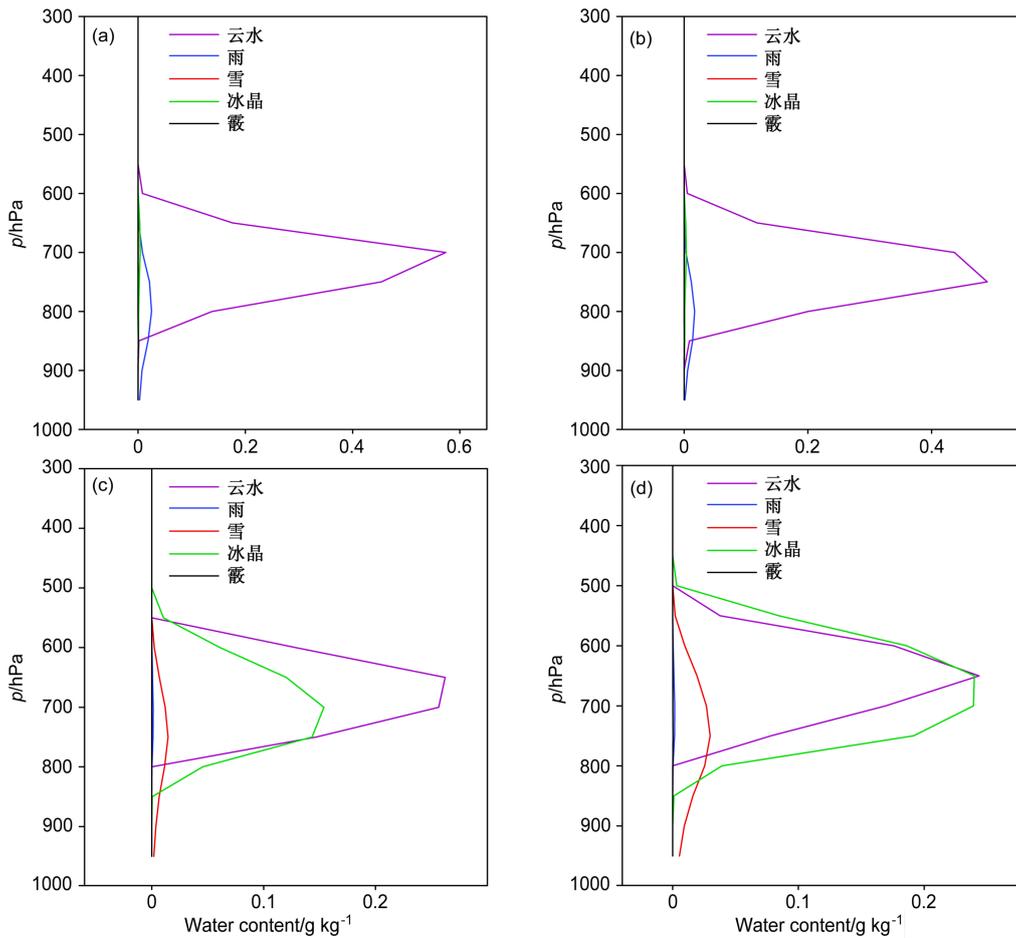


图 12 2011 年 1 月 1 日 (a, c) 08:00 和 (b, d) 11:00 水凝物含量 (单位: g/kg) 径向 (沿 106.8°E) 平均的垂直廓线: (a, b) 冻雨区 (27°N~29°N); (c, d) 非冻雨区 (28°N~30°N)

Fig. 12 Vertical profiles of meridional-mean water content of hydrometeors along 106.8°E in (a, b) 27°N~29°N and (c, d) 28°N~30°N at (a, c) 0800 LST January and (b, d) 1100 LST 2 January

进行更深入的探讨, 为天气预报、防灾减灾、制定策略等提供一定的理论依据和支持。

参考文献 (References)

- Bennett W J. 1913. The sleet storm in northern New York, March 25–27 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 41: 372–380, doi: 10.1175/1520-0493(1913)41<372:TSSINN>2.0.CO;2.
- Bocchieri J R. 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 596–603, doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<0596:TUOUUA>2.0.CO;2.
- Brooks C F. 1920. The nature of sleet and how it is formed [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 48: 69–72, doi: 10.1175/1520-0493(1920)48<69b:TNOSA>2.0.CO;2.
- Cortinas J R. 2000. A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 3574–3588, doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<3574:ACOFRI>2.0.CO;2.
- Cortinas J V Jr, Bernstein B C, Robbins C C, et al. 2004. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976–90 [J]. *Wea. Forecasting*, 19: 377–390, doi: 10.1175/1520-0434(2004)019<0377:AAOFRI>2.0.CO;2.
- Forbes G S, Anthes R A, Thomson D W. 1987. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 564–591, doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<0564:SAMAOA>2.0.CO;2.
- 高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法 [J]. *大气科学*, 38 (4): 645–655. Gao Shouting, Zhang Xin, Wang Jin, et al. 2014. The environmental field and ensemble forecast method for the formation of freezing rain over Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (4): 645–655, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13250.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113–122. Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain, and snow over south China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113–122, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.01.
- Marwitz J D. 1980. Winter storms over the San Juan Mountains. Part I: dynamical processes [J]. *J. Appl. Meteor.*, 19: 913–926, doi: 10.1175/1520-0450(1980)019<0913:WSOTSJ>2.0.CO;2.
- 苗春生, 赵瑜, 王坚红. 2010. 080125 南方低温雨雪冰冻天气持续降水的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 33 (1): 25–33. Miao Chunsheng, Zhao Yu, Wang Jianhong. 2010. Numerical simulation of 080125 cold air, freezing rain, and snow in southern China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(1): 25–33, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2010.01.004.
- Rasmussen R M, Geresdi I, Thompson G, et al. 2002. Freezing drizzle formation in stably stratified layer clouds: The role of radiative cooling of cloud droplets, cloud condensation nuclei, and ice initiation [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 59: 837–860, doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<0837:FDFISS>2.0.CO;2.
- 孙建华, 赵思雄. 2008a. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 368–384. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008a. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 368–384, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.03.
- 孙建华, 赵思雄. 2008b. 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 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 510–519. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008b. Numerical simulation on stratification and surface features of freezing rain and snow storm over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 510–519, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.15.
- Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al. 1999. The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 56: 1261–1281, doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<1261:TMDOFR>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 337–350. Tao Shiyang, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(4): 337–350, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01.
- 陶翔, 史月琴, 刘卫国. 2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征 [J]. *大气科学*, 36 (3): 507–522. Tao Yue, Shi Yueqin, Liu Weiguo. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (3): 507–522, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11082.
- 陶翔, 李宏宇, 刘卫国. 2013. 南方不同类型冰冻天气的大气层结和云物理特征研究 [J]. *高原气象*, 32 (2): 501–518. Tao Yue, Li Hongyu, Liu Weiguo. 2013. Characteristics of atmospheric stratification and cloud physics of different types of freezing rain over southern China [J]. *Plateau Meteorology*, 32 (2): 501–518, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00048.
- Tremblay A, Glazer A. 2000. An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 1289–1308, doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<1289:AIMSFF>2.0.CO;2.
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析 [J]. *气象学报*, 66 (3): 405–422. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (3): 405–422, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.03.011.
- 卫捷, 陶诗言, 赵琳娜. 2008. 2008 年 1 月南方冰雪过程的可预报性问题分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 520–530. Wei Jie, Tao Shiyang, Zhao Linna. 2008. Predictability of snow storm and freezing rain disaster in southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 520–530, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.16.
- Young W R. 1978. Freezing precipitation in the southeastern United States [D]. M. S. thesis, Texas A&M University, 123pp.
- 赵思雄, 孙建华. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 351–367. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 351–367,

- doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.02.
- 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等. 2008. 2008 年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害形成的温度场结构分析 [J]. 气象学报, 66 (6): 1043–1052. Zeng Mingjian, Lu Weisong, Liang Xinzong, et al. 2008. Analysis of temperature structure for persistent disasterous freezing rain and snow over southern China in early 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (6): 1043–1052, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.06.017.
- 张昕, 高守亭, 王瑾. 2015. 2008 年 1 月贵州冻雨的数值模拟和层结构分析 [J]. 高原气象, 34 (2): 368–377. Zhang Xin, Gao Shouting, Wang Jin. 2015. Numerical simulation and stratification structure analysis of freezing rain event in Guizhou in January 2008 [J]. Plateau Meteorology, 34 (2): 368–377, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00189.
- 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008. 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 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 556–566. Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. 2008. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 556–566, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.20.