

陶玥, 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, doi:10. 3878 //j. issn. 1006-9895. 2011. 11082. 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.

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

陶玥 史月琴 刘卫国

中国气象科学研究院 人工影响天气中心, 北京 100081

摘要 2008 年 1 月中下旬, 我国南方经历了四次历史罕见的冰冻雨雪天气。本文针对 2008 年 1 月 25~29 日的一次典型冻雨天气过程, 在实测资料、NCEP 再分析资料综合分析的基础上, 利用中国气象科学研究院 (CAMS) 中尺度云分辨模式对 1 月 28 日~29 日的冻雨天气过程进行了数值模拟, 研究了冰冻天气形成的大气层结及云系冻雨区云的宏微观结构特征, 初步分析了冻雨形成的云微物理过程及云物理成因。结果表明, 深厚而稳定的逆温层和低空冷层的存在是大范围冻雨出现的直接原因。此次南方冰冻过程中, 湖南和贵州两地冻雨形成的云物理机理不同, 不同冻雨区上空为两种不同类型的云, 对应两种不同的云微物理结构和大气层结结构。湖南冻雨区云层较厚, 云顶温度较低, 属于混合相云, 云中高层存在丰富的冰相粒子 (雪的比含水量最大)。湖南冻雨在“冷—暖—冷”层结下, 通过“冰相融化过程”形成, 即在锋面之上的对流层中层水汽辐合中心内形成的雪, 从高空落入暖层, 雪融化形成雨, 再下落到冷层后, 形成过冷雨滴, 最后接触到温度低于 0℃ 的物体或降落到地面上, 迅速冻结形成冻雨。而贵州冻雨区云层较薄, 云顶温度较高, 属于暖云, 中高层基本无冰相粒子, 低层为云水和雨水 (云水的比含水量最大)。贵州冻雨是在“暖—冷”层结下通过“过冷暖雨过程”形成的。即水汽沿锋面抬升, 在对流层中低层的水汽辐合中心内, 经过冷却凝结成云滴, 通过碰并云滴增长的雨滴下落到低空冷层, 形成的过冷却雨滴直接冻结形成冻雨。

关键词 冻雨 云物理特征 层结特征

文章编号 1006-9895 (2012) 03-0507-16

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

doi: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2011. 11082

Characteristics of Stratification Structure and Cloud Physics of the Freezing Rain over Southern China in January 2008

TAO Yue, SHI Yueqin, and LIU Weiguo

Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Southern China suffered four severe freezing rain and snow storm processes during January 2008. In this paper, a classical freezing rain process during 25-29 January 2008 was selected as a research case. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain were analyzed. Combining with observation, the freezing rain process during 28-29 January 2008 was simulated by the CAMS (Chinese Academy of Meteorological

收稿日期 2011-04-25, 2011-10-20 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40905059, 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金面上项目 2008Y001, 国家自然科学基金资助项目 41075099

作者简介 陶玥, 女, 1979 年出生, 博士, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究。E-mail: taoyuedemail@163.com

Sciences) mesoscale cloud model. The authors studied characteristics of micro-mesoscale structure of cloud system over the freezing rain area and initially analyzed the microphysical process in the cloud and the mechanism of freezing rain formation. The results show that, the stable and thicker melting layer and cold layer at low levels was direct cause that the wide range of freezing rain appeared. Two different types of clouds existed over different freezing rain areas in this freezing rain process. Two types of clouds have different characteristics of stratification structure and cloud physics and mechanism of freezing rain formation. Clouds over the Hunan Province freezing rain area belonged to mixed-phase cloud; the cloud thickness was deeper, the cloud top temperature was lower, and in the clouds there were large amount of ice-phase particles. Under the consideration of stratification (“cold-warm-cold” layer), the freezing rain over Hunan Province was formed by ice-crystal mechanisms (the melting process). That is, the freezing rain developed as the falling snow encounters a layer of warm air, and then the snow completely melted and became rain. As the rain continued to fall, it passed through a thin layer of cold air just above the surface, cooled to a temperature below freezing, and formed supercooled drops. When the supercooled raindrop dropped and struck the ground, or anything else below 0°C, they instantly freeze, forming the freezing rain. However, clouds over the Guizhou Province freezing rain area belonged to warm clouds; the cloud thickness was thinner, the cloud top temperature was higher, and in the clouds there were little ice-phase particles. Under the consideration of stratification (“warm-cold” layer), the freezing rain over Guizhou Province was formed by supercooled warm-rain processes (collision-coalescence process). Supercooled raindrops developed by microscopic cloud droplets collecting one another as they fall. Ice processes were not involved in the formation of these raindrops.

Key words freezing rain, stratification structure, cloud microphysical characteristics

1 引言

冰冻天气是我国冬季和早春时期的一种严重灾害性天气,对农业、林业、交通运输、电力输送、通讯有很大的影响和危害。2008年1月10日至2月2日,一场低温雨雪冰冻天气袭击了中国南方,影响范围之广,持续时间之长,强度之大、灾害之重为历史罕见,这次冰冻灾害造成了国民经济与人民财产的巨大损失(丁一汇等,2008)。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。冻雨是在一定天气环境条件下,通过“特殊”的云物理过程形成的,是宏观动力、热力过程和微物理过程相互作用的产物,冻雨形成不但与近地层的气象环境条件有关,也与云和降水形成的物理过程有关。因此,要提高我国对冬季南方持续性雨雪、冰冻天气灾害的预报能力,除了需研究有利于冻雨形成的天气学条件外,还必须研究冰冻气象灾害的云物理形成机理。

目前,针对冻雨的研究主要集中在三个方面。一是研究了冻雨形成的物理机制;二是从气候学、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(Brooks, 1920; Cooper and Marwitz,

1980; Marwitz, 1980; Dunn, 1987, 1992; Forbes et al., 1987; Szeto et al., 1999; Cortinas, 2000, 2004; Rauber et al., 2001);三是少数国外学者利用数值模式研究了冻雨天气,研究冻雨的预报方法以提高冻雨的短期预报(Tremblay and Glazer, 2000; Rasmussen, 2002)。

通过研究,认为冻雨的云物理形成机制有两种:融化和暖雨过程。早在20世纪早期,气象学家(Bennett, 1913; Brooks, 1920; Meisinger, 1920; Henry, 1922)就提出第一种机制“融化过程”。冻雨形成的融化机制比较普遍,出现在许多个例的研究中(Forbes et al., 1987; Martner et al., 1993; Rauber et al., 1994, 2000; Czys et al., 1996),而且,这种冻雨多出现在暖锋面一侧(Huffman and Norman, 1988)。冻雨也可以通过第二种机制“过冷暖雨过程”形成(Bocchieri, 1980; Huffman and Norman, 1988; Rauber et al., 2000, 2001)。在“过冷暖雨过程”中,直径大于40 μm 云滴的形成是关键。这样大小的云滴形成后,才能启动碰并过程形成大的雨滴。利用探空等观测资料通过分析大气层结的温度和湿度特征,可以定性给出垂直方向上云中水凝物的相态特征,从而区分冻雨不同的形成机制。Huffman and Norman (1988)研究表明,约30%的冻雨是通过暖雨

过程形成的雨滴然后冻结形成的。暖雨过程中,在次冻结大气温度情况下,即使凝结核很少也可以产生液态凝结物,而且所有冻雨个例的云顶温度在 $0\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

相对于国外的冻雨研究,国内起步较晚,研究尚不够系统。2008年初我国南方地区出现了雨雪、冰冻天气后,国内有许多研究针对2008年南方冰冻灾害天气,从天气学气候学分析其成因。丁一汇等(2008)指出冻雨是导致南方致灾的主要原因,其中La Niña事件是灾害发生的气候背景,它为雨雪冰冻天气提供了冷空气侵袭中国南方的前提条件;欧亚大气环流异常持续性是造成冷空气不断侵袭中国南方的直接原因;孟加拉湾和南海地区暖湿气流的北上是大范围冻雨和降雪形成并持续在中国南方的必要条件。王东海等(2008)从行星尺度经由天气尺度/大尺度环流直到云尺度全面分析了2008年南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因,指出导致大气环流异常从而促使这次低温雨雪冰冻强天气事件出现的主要因素包括北极涛动的异常活跃、有极强的负涡度平流持续输送到阻塞区、青藏高原以南低纬地区南支气流活跃、长期存在有利于冰雪风暴生成发展的天气—动力—物理学条件等。通过资料分析指出,此次大范围冰冻灾害天气是由于冻结、凝华和冰雾粒子的附着增长等物理过程共同作用的结果。杨贵名等(2008)分析了2008年初冰冻天气的主要特点和环流特征及冻雨的成因,指出南支槽比较活跃;华南准静止锋、滇黔准静止锋稳定维持;逆温层稳定,融化层厚度较厚,是长时间冻雨天气的主要原因之一。2008年初低温雨雪冰冻期间的第一次过程为强冷、暖气流共同作用所致,其后是华南、滇黔准静止锋稳定,扩散冷空气渗透所为。孙建华和赵思雄(2008a)指出,锋面西段的逆温层和暖层强,有利于冻雨的形成。高辉等(2008)、黎惠金等(2008)针对不同地区的冰冻天气分析了成因,表明La Niña事件引起的欧亚地区持续大气环流异常是导致我国大范围持续低温雨雪冰冻灾害的重要原因。赵思雄和孙建华(2008)分析研究了冰冻灾害天气的环流场和多尺度特征,还指出在阻高与副高之间有一横槽维持,这种形势十分有利于冷空气从北方入侵。王凌等(2008)、王遵娅等(2008)从气候学的角度,对此次天气气候过程进行了分析,并与同期历史进行

了比较,表明其气候特征为:冰冻天气影响范围广、强度大、持续时间长、造成的损失极为严重。近来,也有用中尺度模式通过数值模拟研究冻雨天气(孙建华和赵思雄,2008b;苗春生等,2010),分析了冻雨期间的水汽条件、地面特征和大气层结条件等重要环境条件,指出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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线的位置。

由上可见,目前对冻雨天气的研究多数从天气学和气候学角度研究其发生的天气尺度条件、大气层结特征和气候特征等。许多对2008年南方冰冻灾害成因的研究都指出,在大气环流持续异常条件下云物理过程是此次灾害的根本原因。鉴于我们对南方冻雨形成的云物理特征和成因还不清楚,本文以我国南方2008年1月26~28日发生的罕见的持续性冰冻天气为例,通过对此次冰冻天气过程资料的深入分析,结合云数值模式的模拟,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 天气实况

2008年1月中下旬至2月初,我国南方经历了4次冻雨过程,其中第3次(1月25~29日)冰冻强且冻雨分布范围大,冻雨区自西向东依次为贵州、湖南、江西、安徽南部和浙江西北部(图1a)。26~28日3天的冻雨范围都分布较广,其中,28日冻雨主要集中在贵州、湖南,贵州、湖南的电线积冰直径为 $30\sim 60\text{ mm}$,甚至更严重。由图1b给出的28日08时(北京时,下同)地面天气图可见,影响此次雨雪冰冻天气的重要天气系统是位于长江或江南地区的东—西向或东北—西南向准静止锋。而稳定少动的高空切变为冷暖空气的汇合及锋区的发生发展提供了保障。同时,稳定少动的北高南低天气形势为北方冷空气的不断南下及西南暖湿水汽源源不断的补充提供了有利的环流形势。冻雨主要发生在准静止锋的西侧,其逆温层和暖层强,而降雪主要发生在其东侧。

3 冰冻天气形成的大气温、湿层结及冻雨区云系的宏微观结构特征

针对冻雨分布较广的26~28日,首先分析冻雨形成的层结条件。利用6小时 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP/

NCAR 再分析资料, 图 2 分别给出了逆温层的水平和垂直分布。图 2a 为 26~28 日 850 hPa 和 700 hPa 上时间平均 0°C 温度线, 即 26~28 日贵州大部、湖南中部、广西及浙江北部近地面层存在逆温, 结合冻雨的水平分布 (图 1a), 可见冻雨区上空的近地面层都存在逆温, 这是冻雨区的温度层结特征。

图 2b 为湖南、贵州冻雨区 ($26^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 116^{\circ}\text{E}$) 区域平均水平风场、温度、相对湿度的高度—时间剖面图, 由此图可以看出, 冻雨区的温度层结有明显的“冷—暖—冷”层结结构: 高层为冷层, 中层 (800~650 hPa) 为暖层 (厚度约 2 km, 温度 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$), 暖层内伴有西南风, 700 hPa 西南气流加强时, 暖平流使暖层也加强; 暖层之下为低层冷却层, 冷层内多为东北风或东风, 相对湿度比较高, 这表明近地面较潮湿, 冷层内温度变化较小, 风速也较小, 地表面存在过冷水, 有利于冻雨的形成。对应图 2c, 冻雨区, 低层 (700 hPa 以下) 存在大量的水汽辐合。可见冻雨发生时, 对流层中层要有一定厚度的暖层, 地面以上有一定厚度的冷层, 且低层的相对湿度比较高。这表明, 逆温的主要作用是确保上层降落下来的固态降水 (雪或霰) 通过逆温层后变成液态降水, 或在逆温层中直接产生液态降水。这样, 液态降水从逆温层下降过程中, 经过低层冷却层逐渐变成过冷却雨滴, 当过冷却雨滴接触到 0°C 以下的地面或者其他物体表面时, 迅速冻结形成冻雨。

为了进一步分析逆温层的成因, 我们重点针对 1 月 28 日出现冻雨的湖南长沙, 分析了 28 日 08 时长沙站探空 (图 3a) 以及沿长沙的经向锋面垂直结构 (图 3b)。由图 3a 也可以看到“冷—暖—冷”层结结构; 低层的逆温层, 它是倾斜的, 逆温层上部位于暖层中, 下部在低层的冷却层中, 550 hPa 以下相对湿度较大, 达到 80% (相对湿度图略)。对应沿长沙锋面的南北向垂直剖面, 可见锋面两侧的暖气团和冷气团都很强, 在 400 hPa 以下, 生成了一个较强而稳定少动的能量锋区 (图 3b 中 280~320 K 之间的假相当位温密集区), 锋区内水平温度梯度较强, 锋面坡度小, 锋面逆温显著。此次过程, 湖南发生冻雨的层结特征是, 中高层有接近饱和的冷层 (冻结层), 有利于形成冰晶和雪; 冻结层下有一定厚度的暖层 (融化层), 可使固态降水粒子融化; 近地层有一定厚度的冷层, 且低层的相对

湿度比较高, 有利于近地面的过冷水滴冻结形成冻雨。

由上可见, 冻雨与温度、湿度、风向风速有关, 深厚而稳定的逆温层和低层湿度较大的冷层的存在是大范围冻雨出现的直接原因。

在前面分析冻雨形成的大气温、湿层结特征的基础上, 我们重点通过 1 月 28 日 08 时到 29 日 08 时湖南、贵州冻雨两个例, 介绍冻雨区云系的宏微观结构特征。由卫星云图演变 (图略) 可见, 28~29 日, 大范围的锋面云系自西北向东南方向缓慢移动, 经过贵州和湖南, 其中, 冻雨区云系的云顶温度约 $-15\sim -20^{\circ}\text{C}$ 。利用周毓荃等 (2008) 的 FY-2C 卫星反演方法, 图 4 给出了 1 月 28 日 20 时的云顶温度、云顶高度、云顶有效粒子半径分布, 其中, 湖南冻雨区云顶高度约 8.5~9 km, 云顶温度 $-20\sim -25^{\circ}\text{C}$, 粒子有效半径 21~27 μm , 说明湖南冻雨区云系属于混合相云, 云顶温度低, 有冰相发展; 而贵州冻雨区云顶高度略低一些, 约 5.5~9 km, 云顶温度略高一些 $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$, 粒子有效半径略小一些, 约 12~27 μm , 其中贵州西北部冻雨区云顶高度 4~5 km, 云顶温度在 0°C 附近, 说明贵州冻雨区有部分云系云顶温度高, 冰相过程发展较弱, 属于暖云。

4 冰冻天气的数值模拟

4.1 模拟方案简介

本文采用中国气象科学研究院人工影响天气中心研制的耦合详细云微物理方案的中尺度 MM5 模式, 模拟了 2008 年 1 月 28~29 日湖南、贵州冻雨过程, 模拟起止时间是 28 日 08 时到 29 日 08 时。在模拟过程中使用双重嵌套, 粗、细网格模拟域的水平格距分别为 15 km 和 5 km。模拟时 D1 采用对流参数化方案和显式方案相结合的方法, D2 仅采用显式方案。第一层覆盖了华南大部, 这个粗网格范围覆盖了直接影响此次冰冻过程的天气系统; 第二层覆盖了主要冻雨区 (湖南和贵州), 便于对主要冻雨区云系及冻雨形成的微物理过程进行分析。模拟使用了 NCEP/NCAR 每 6 小时 1 次的再分析资料、常规地面及探空资料形成初始场。

4.2 模拟结果验证

为了验证模拟结果的可靠性, 下面利用观测资料与模拟结果进行比对。对比模拟云系 24 小时地

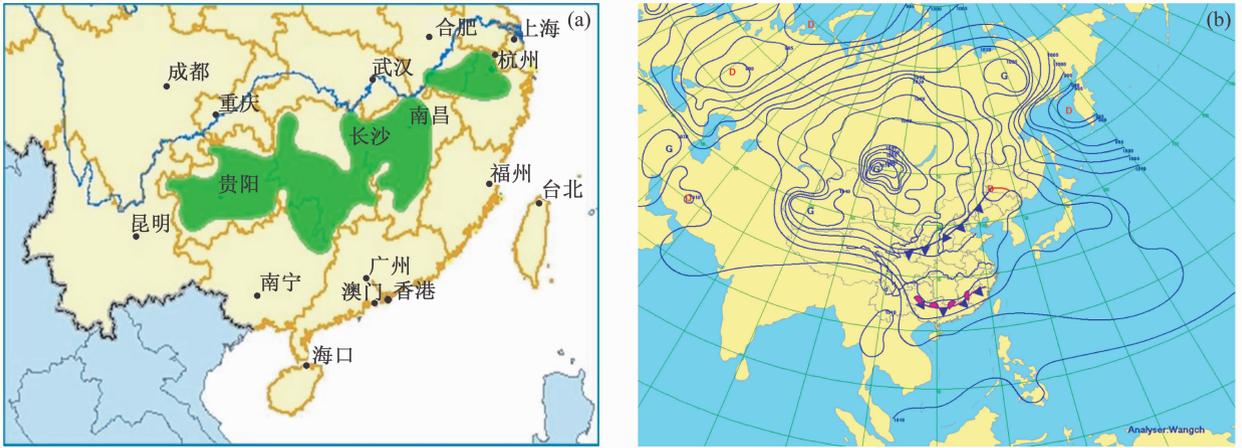


图 1 2008 年 1 月 (a) 25~29 日实况冻雨区 (绿色阴影) 的水平分布以及 (b) 28 日 08 时地面天气图 (等值线表示位势高度)

Fig. 1 (a) Horizontal distribution of observed freezing rain area from 25 to 29 Jan 2008 (green shading); (b) the surface chart at 0800 BJT (Beijing time) 28 Jan 2008 (the isolines indicate geopotential height)

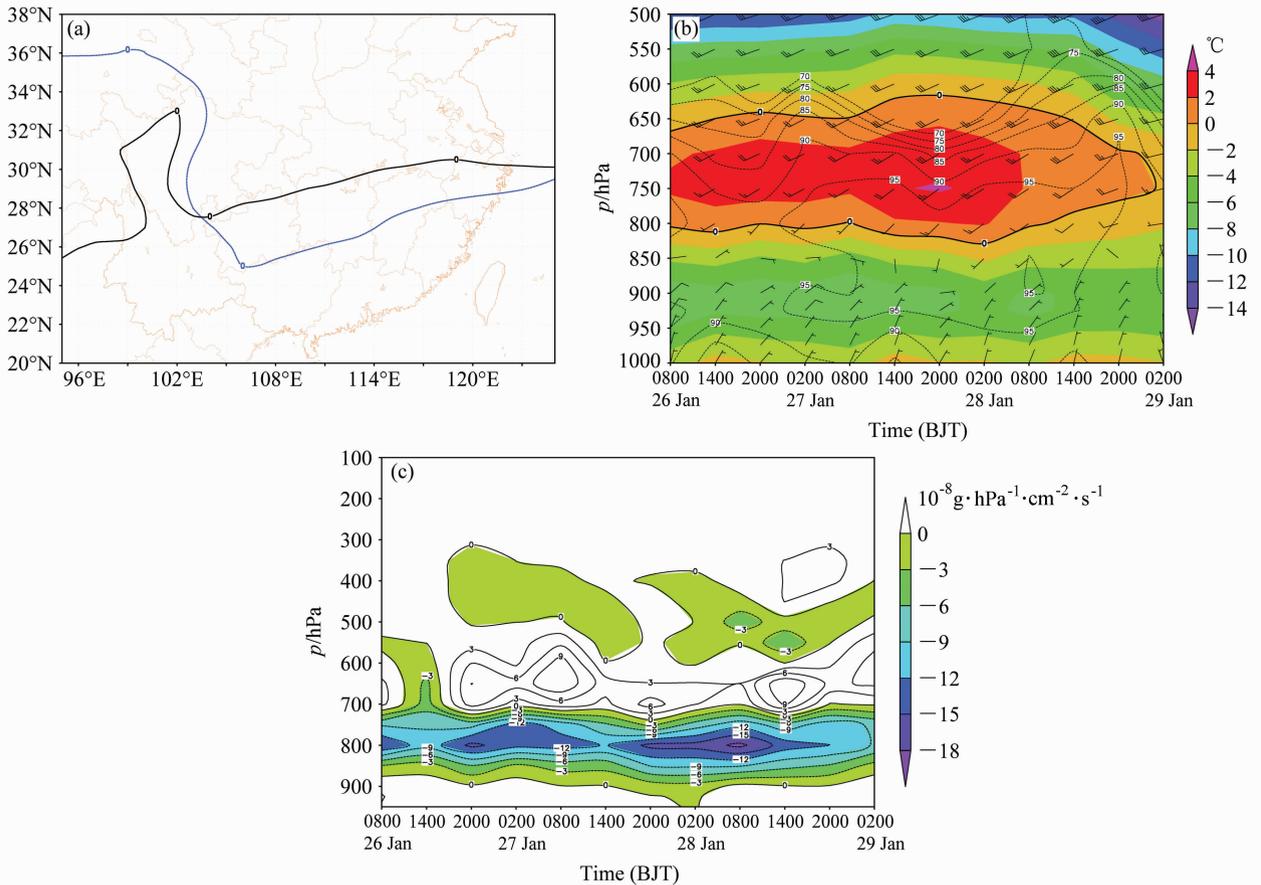


图 2 (a) 2008 年 1 月 26~28 日 850 hPa (黑色实线) 和 700 hPa (蓝色虚线) 上时间平均 0°C 温度线的水平分布; 2008 年 1 月 26~28 日湖南、贵州冻雨区平均 (b) 水平风场 (风羽)、温度 (彩色阴影)、0°C 线 (实线)、相对湿度 (虚线, %) 以及 (c) 水汽通量散度的高度-时间剖面 (彩色阴影: 辐合, 黑色实线: 辐散, 单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 (a) 0°C isotherm averaged over 26-28 Jan 2008 (solid black line; 850 hPa, dashed blue line; 700 hPa); height-time sections of (b) temperature (shaded areas), horizontal wind, and the relative humidity (dashed lines, %) and (c) water vapor flux divergence (shaded areas; convergence, solid black lines; divergence) averaged over the freezing rain area of Hunan and Guizhou provinces

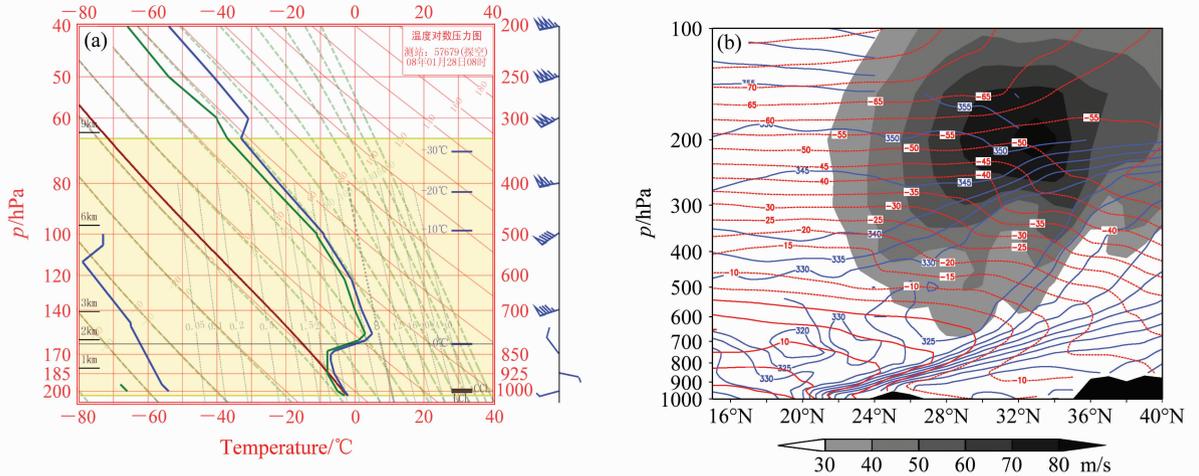


图3 2008年1月28日08时 (a) 湖南长沙站探空 (蓝色曲线为层结曲线, 绿线为状态曲线, 红线为等比湿线) 和 (b) 通过长沙站 (113°E) 相当位温 θ_{se} (蓝线, 单位: K)、西风急流 (阴影) 和温度 T (红线, 单位: °C) 经向剖面 (NCEP 资料)

Fig. 3 (a) Sounding plot ($T-lgp$) at Changsha station at 0800 BJT 28 Jan 2008; (b) vertical cross section of the equivalent potential temperature (blue line, units: K), temperature (red line, units: °C), and westerly jet (shaded) along Changsha station (113°E) at 0800 BJT 28 Jan 2008

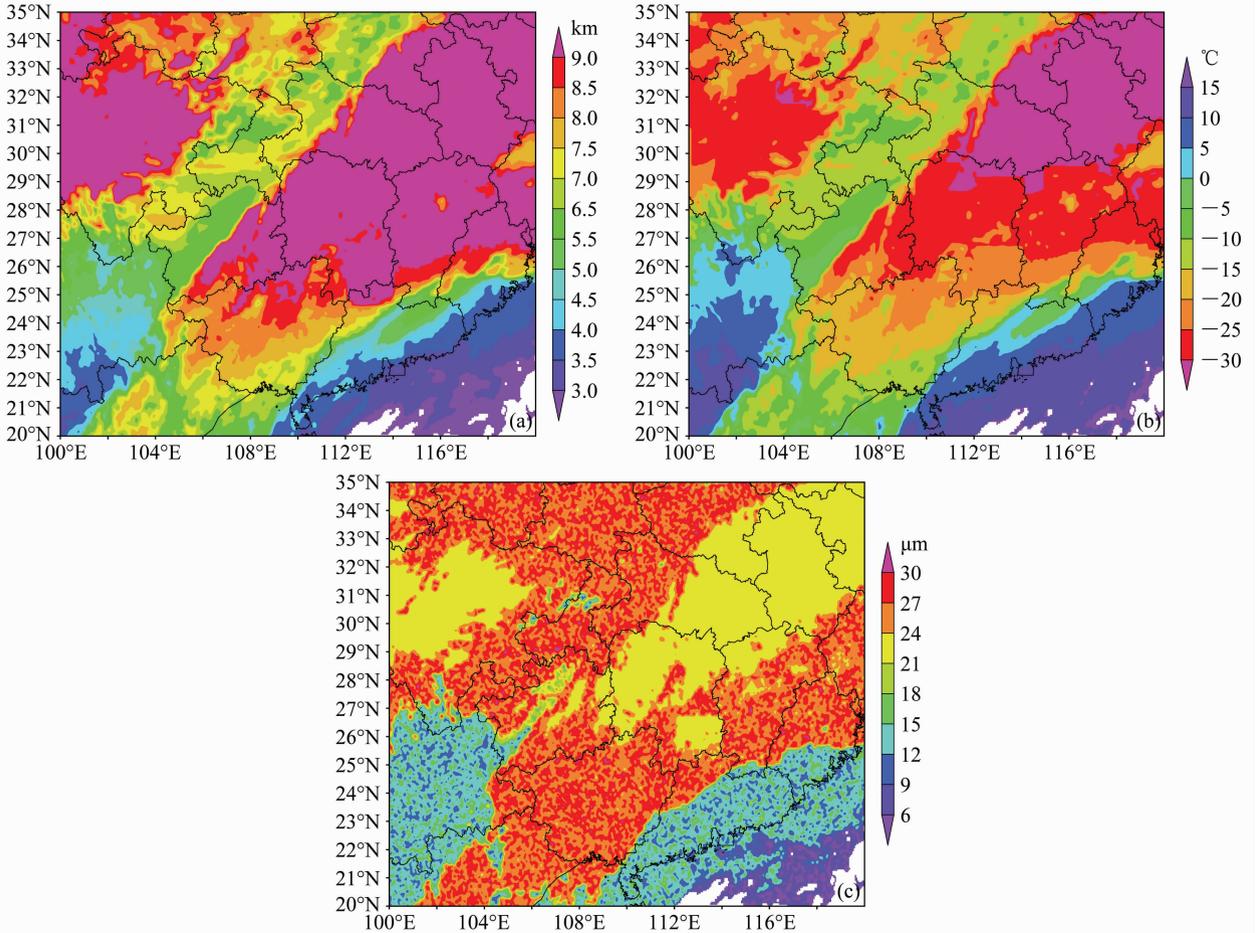


图4 利用2008年1月28日20时FY-2C卫星反演的云顶的高度 (a)、温度 (b) 和有效粒子半径 (c)

Fig. 4 FY-2C satellite retrieval cloud parameters at 2000 BJT 28 Jan 2008: (a) Cloud top height; (b) cloud top temperature; (c) effective particle radius at cloud top

面降水量和实况(图5)可以看出,模拟的雨带走向、雨带的形状、降水落区分布情况与实况降水较相似,但模拟的强降水区位置偏南。从模拟云系6小时降水演变与实况也基本吻合(图略),反映了雨带自西北向东南移动这一特点。模式模拟的各时次高、中、低层位势高度场、风场的走向和位置与同时次的实况客观分析场(图略)也基本吻合,说明模拟结果能较好地反映实况,基本再现了大气环流形势和地面降水分布。

通过对比FY-2C的TBB分布图和模拟云系,模拟的大范围锋面云系的走向、落区和移动基本与实况云系一致,图6给出了TBB分布和模拟云系的云顶温度分布,可见湖南上空的西北—东南走向锋面云系与实测基本一致。28日14时贵州、湖南上空的锋面云系比实况偏北且云带略窄,到29日04时,模拟的锋面云系向东南移动到湖南南部广西上空,此时模拟云系和实况较相似。28日14时CloudSat卫星经过湖南冻雨区,2B-CWC-RO产品冰水含量的垂直剖面图与模拟的云中总水凝物含量垂直剖面对比(图7),可见模拟的湖南上空($112^{\circ}\text{E}\sim 118^{\circ}\text{E}$)云系的垂直结构和卫星观测相似,但由于模拟的湖南上空的云带窄,从剖面图上可见,湖南上空的模拟云系的水平范围较小(图7b),但垂直方向都表现为明显的分层结构,特别是发生冻雨的区域均是冷—暖—冷的夹层结构:在实况和模拟的冻雨区,5 km以上的高层都存在较高的冰水含量,平均达到 0.3 g/m^3 以上,2~4 km(对应逆温层)高度范围内基本无冰水粒子存在,对应雷达回波图在2~4 km高度存在融化层(dBZ大值区)。这种分层特征是冻雨过程形成过冷水的必要条件,在未发生冻雨的区域没有这种情况出现。

5 冻雨区云系宏微观结构特征分析

这一节主要利用数值模拟结果分析冰冻天气中冻雨区云系宏微观结构特征。

5.1 冻雨区范围和逆温区特征

通过预报出的降水量,并不能确定是否有冻雨,还有可能是降雪、降雨,而雪、雨和冻雨是不同的降水类型,因此冻雨的预报需要区分降水类型。发生冻雨时,还需考虑地面温度特征因素。地面温度等于或低于 0°C ,有利于过冷却水的冻结。为此,通过分析模拟的地面上不同降水类型(雪、

霰、雨水)和地面温度的分布,可以大致给出冻雨的水平分布范围。图8a和8b给出了28日14时和20时模拟的地面水凝物(雨、雪、霰)与地面温度的分布。地面温度 0°C 以下的降雨区为冻雨区,冻雨区基本沿着 0°C 线呈带状分布,冻雨区主要集中在贵州、湖南南部。与14时相比,20时的冻雨区随着地面 0°C 线缓慢南移也随之移动。地面 0°C 线以南是降雨,以北的降水类型分布为冻雨、雪。对比实测的地面天气现象和温度的分布(图略),可见模拟的冻雨区和实况基本相近。此次南方冻雨基本发生在沿地面 0°C 线以北(温度低于 0°C)的带状范围内。

图8c和8d给出了对应时刻大气中低层的逆温强度(逆温层顶和底的温度差)分布,可见,准静止锋的冷暖空气交汇形成了华南大范围的逆温,其中逆温最强的地区出现在贵州南部和湖南南部。结合图8a、b,冻雨区上空都有逆温存在,但逆温区并没有都出现冻雨天气,说明冷暖空气交汇造成的逆温层有利于冻雨的发生,而逆温层的存在仅是冻雨形成条件之一。

5.2 冻雨区云的宏微观结构与层结结构特征

在同一天气尺度系统的云系中,并不是所有云系覆盖区都有冻雨出现,产生冻雨只是局部地区。这表明冻雨的产生有其特殊的环境条件。冻雨的形成,除了与逆温有关外,可能还要考虑水汽条件和云物理特征。下面,主要分析冻雨区云系的宏微观结构和大气温、湿层结配置特征。

5.2.1 冻雨区云的宏观特征

首先,分析冻雨区云系的水平分布。图9给出了28日14时和20时云系总水凝物含水量厚度分布随时间的演变,可见 0°C 以北的带状冻雨区随着锋面云系向东南方向缓慢移动。通过对比不同冻雨区,可见冻雨区不一定都位于云中总含水量的大值区及云厚的地区,例如,湖南冻雨区云层较厚,云中总含水量较大,而贵州冻雨区云层较薄,含水量较小。结合模拟的云顶温度分布(图略),湖南冻雨区的云层较厚,云顶温度较低,属于混合相云,有冰相过程发展;贵州冻雨区云层较薄,云顶温度较高,冰相过程较弱。

5.2.2 冻雨区云的垂直结构及冻雨形成的层结特征

冻雨是在有利于降水形成的天气形势下产生的特殊类型的降水。要做好冻雨的天气预报,除了解

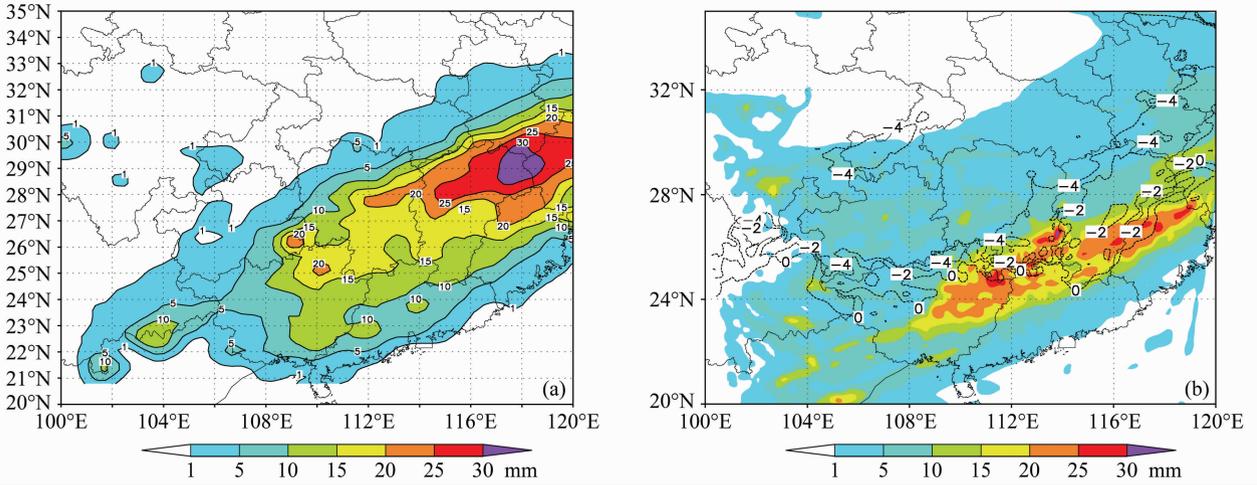


图5 2008年1月28日08时~29日08时24小时地面降水量(单位: mm): (a) 实况; (b) 模拟(黑虚线: 地面温度)
Fig. 5 (a) Observed and (b) simulated 24-hour cumulative rainfall (shaded) from 0800 BJT 28 to 0800 BJT 29 Jan 2008. (b) Black isoline: surface temperature (°C)

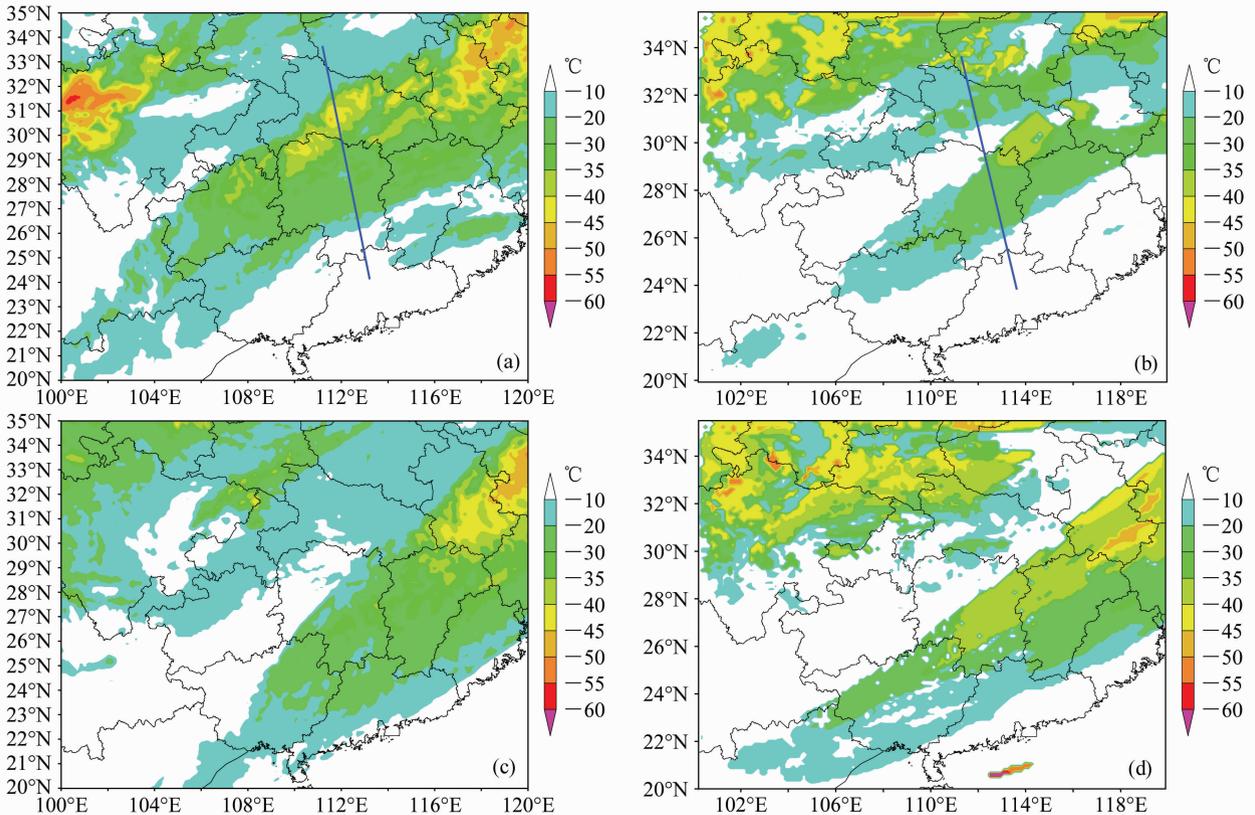


图6 2008年1月(a、c)FY-2C卫星的TBB分布和(b、d)模拟的云顶温度分布(单位: °C): (a、b)28日14时(蓝线: CloudSat卫星的轨迹); (c、d)29日04时
Fig. 6 (a, c) FY-2C satellite TBB and (b, d) simulated cloud top temperature: (a, b) 1400 BJT 28 Jan 2008 (blue line: CloudSat satellite track); (c, d) 0400 BJT 29 Jan 2008

冻雨形成的天气形势外, 还要了解冻雨形成的特殊条件, 如云物理条件、大气层结、地面条件等。为

此, 我们利用模式结果, 研究湖南和贵州冻雨区的结构特征和环境特征, 并进一步探讨是否可以利用

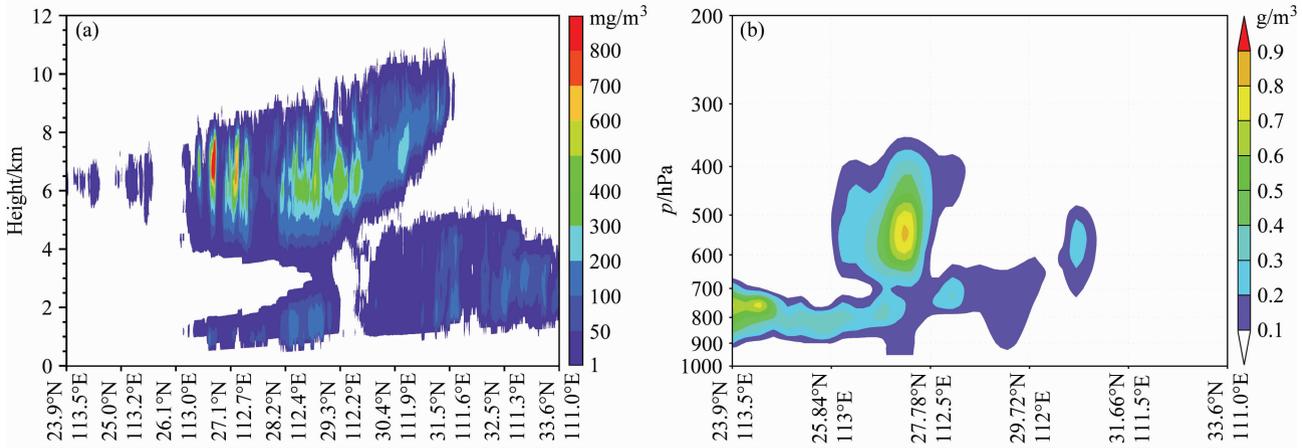


图7 2008年1月28日14时CloudSat卫星观测的冰水含量(a)和模拟的云中总水凝物含量(b)沿CloudSat轨迹的垂直剖面

Fig. 7 The vertical cross section along satellite track at 1400 BJT 28 Jan 2008; (a) The ice water content from CloudSat; (b) total water content of all hydrometeors from simulation

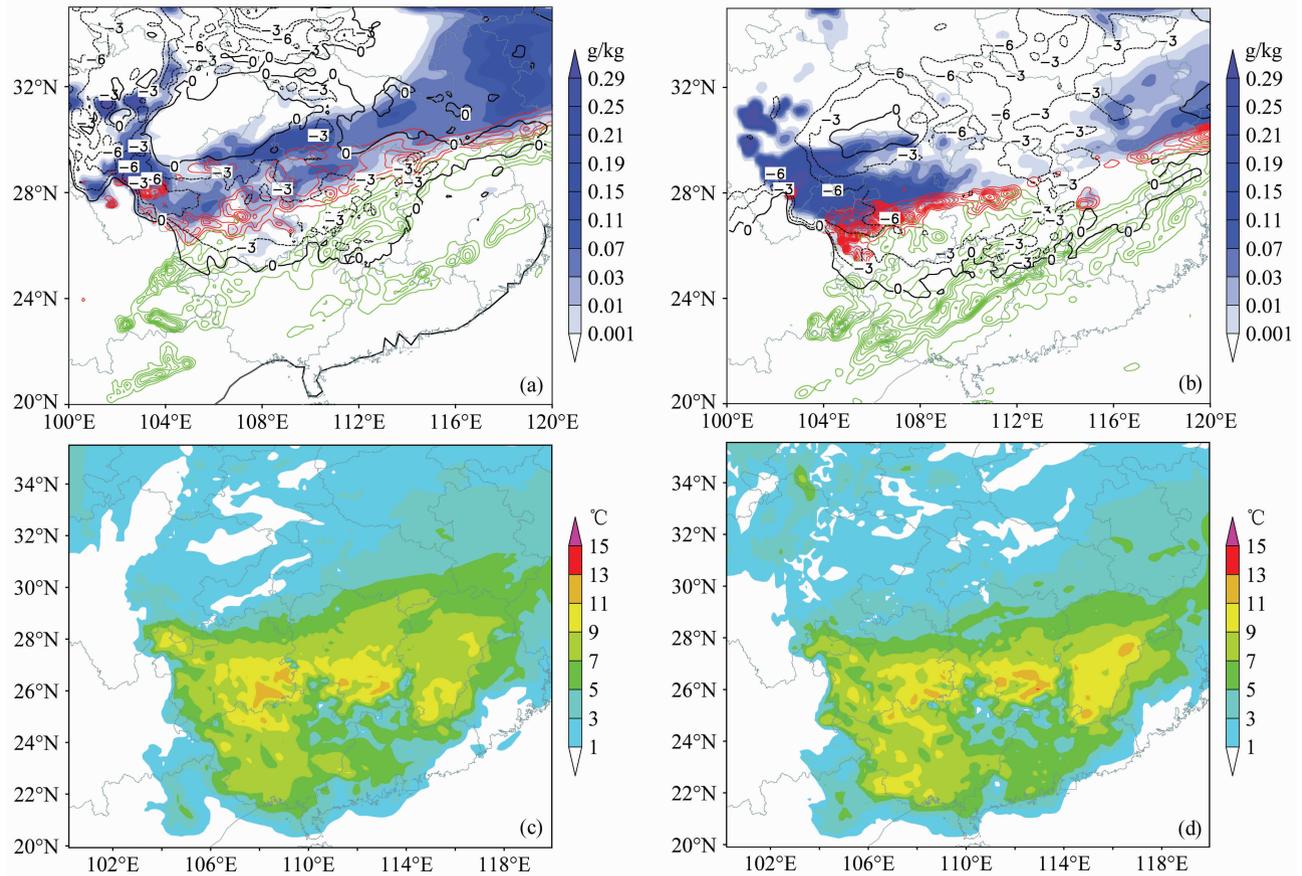


图8 2008年1月28日(a、c)14时和(b、d)20时地面水成物分布(a、b,单位:g/kg)和逆温强度分布(c、d,单位:°C)。(a、b)阴影:雪;绿色等值线:雨;红色等值线:霰;黑色等值线:地面温度

Fig. 8 Horizontal distribution of (a, b) surface hydrometeors (units: g/kg; blue shaded: snow; green line: rain; red line: graupel) and surface temperature (black line, units: °C), (c, d) intensity of temperature inversion: (a, b) 1400 BJT 28 Jan 2008; (c, d) 2000 BJT 28 Jan 2008

模式预报的云物理场结合层结、地面状况来预报冻雨出现的时间和位置。

1月28日,湖南长沙和贵州贵阳都发生了冻雨,下面分别沿长沙(113°E)和贵阳(106°E)做南北向垂直剖面,分析云中水凝物场(冰晶、雪、霰、云水、雨水)、温度场、假相当位温和水汽通量的垂直结构的演变。

从长沙的云系和温度场垂直剖面演变(图略)可见,28~29日在通过湖南长沙的经向剖面上,在25°N~28°N的湖南上空一直存在明显的逆温层。逆温层之上的高层为低于0°C的冷层,中层为暖层,其下的近地面层也为冷层,是典型的“冷—暖—冷”层结。28日12时,开始出现冻雨,冻雨一直持续到29日08时。冻雨发生在近地面冷却层接地的地面0°C线以北地区(26°N~28°N;温度范围0°C~-5°C)。冻雨区云中有冰相发展,为混合相云。

图10为28日14时和20时通过长沙站的云系经向垂直剖面结构。从14时(图10a、b)温度等值线的结构看,温度层结有显著差异,可分为三个不同的区域:大约20°N~25°N区域的上空,存在“冷—暖”温度层结结构,约600 hPa高度以上为冷层,以下直至地面温度都高于0°C,为暖层;25°N~28°N区域,存在“冷—暖—冷”温度层结结构,大约550~600 hPa高度以上是冷层,以下到900 hPa是暖层,900 hPa到地面又是冷层。大约28.5°N~32°N,从高空到地面,温度都低于0°C,整层为冷层。不同层结结构,对应的云的微物理结构也不同:在“冷—暖”温度层结结构区域,只有云水和雨水;“冷—暖—冷”温度层结结构区域,高空冷层存在冰晶、雪和霰(雪的含水量较高);暖层主要是云水和雨水,还有未融化完的雪和霰;最低层暖层是雨水。对于整层都为冷层的区域,高层为冰晶和雪;中下层只有雪和霰,即地面降雪和霰而不是雨。

具有“冷—暖—冷”温度层结的区域即是湖南冻雨区(25°N~28°N)。云的高空冷却层中存在冰晶、雪和霰,雪和霰含水量向下延伸到达暖层,因此中空暖层中存在云水、雨水,还有雪和霰,低层的冷却层内存在过冷雨水。1月28日20时(图10c、d)湖南冻雨区上空温度层结结构和云系的微物理结构与14时类似。从云中垂直方向上微物理

结构可以粗略地分析冷层过冷雨水的形成机制:云中高空冷层形成的雪和霰含水量区向下面的暖层延伸,进入暖层后应该发生融化过程,就是说冰粒子在暖层就融化成雨水。此外,暖层还存在云水,雨水通过碰并云水过程可以进一步长大。这些雨水下降到低层冷层后又成为过冷雨水。由此可见,低层过冷雨水的形成既与冰粒子融化有关,也与暖层中暖云过程有关。但从过冷雨水对应中高层冰相粒子来看,中高层雪和霰的融化对过冷雨水的形成有重大作用,低层雨水有很大可能主要通过冷云降水机制形成。最后过冷却雨水接触到温度低于0°C的物体或地面上,迅速冻结形成冻雨。

图11给出了模拟上面两个时刻对应位置的假相当位温和水汽通量散度的垂直剖面,可见锋区主要位于280~320 K之间的等假相当位温密集区,当来此洋面的暖湿气流水平输送到湖南上空的低层后,水汽沿锋面爬升,在湖南冻雨区(25°N~28°N)上空形成水汽辐合的强中心(位于锋面上的800~550 hPa左右),结合对应的云系结构(图10)可见,经锋面抬升的水汽冷却凝结成云滴,锋面上对流层中层的较强水汽辐合中心对应雪含水量的大值区,说明丰富的水汽有利于雪通过冰晶凝华增长形成,雪穿过锋面逆温的暖层,融化形成雨滴,并在下落过程中收集云滴增长,而后雨滴继续下落到近地面冷却层,雨滴保持过冷雨水形式,最终过冷雨水接触地面,快速冻结形成冻雨。由此可见,湖南冻雨区上空混合相云中的冰相粒子经过“冷—暖—冷”层结,主要通过“冰相融化过程”形成冻雨。

从贵阳的云系垂直剖面演变(图略)可见,28~29日沿贵阳106.7°E的南北向剖面上,在贵州的南部山区(24°N~27°N)上空的中层,也存在明显的逆温层。28日12时,开始出现冻雨,冻雨一直持续到29日03时,冻雨出现低层冷却层接地的地面0°C线以北(温度低于0°C)的地区(25°N~27°N)。与湖南冻雨区相比,贵州冻雨区的近地面冷层厚度较薄;贵州冻雨区云较薄,冰相过程较弱(冻雨区云系中冰晶、雪、霰的比含水量极小,水质粒主要为云水),属于暖云。图12a、b为28日20时沿贵阳的云系垂直剖面,可见贵州冻雨区上空的云系垂直结构为:中高层存在冰相粒子,含水量极小,中层暖层内为云水和雨水,低层的冷层内存在过冷雨水,说明雨水主要通过云水的碰并过程形成。可

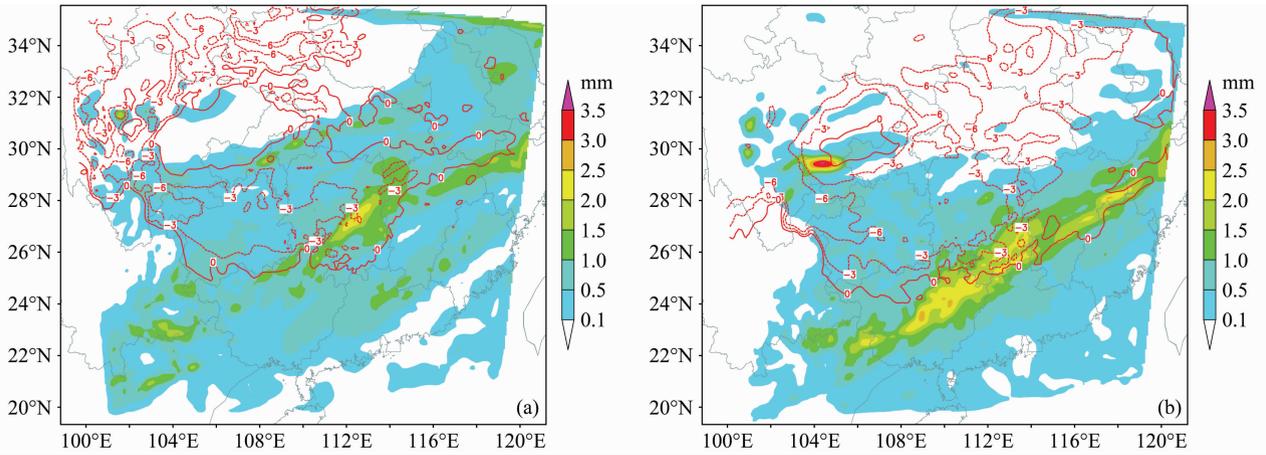


图9 2008年1月28日 (a) 14时和 (b) 20时模拟云系总水凝物含水量厚度 (阴影) 和地面温度 (红线) 的水平分布

Fig. 9 Horizontal distribution of the thickness of total water content of hydrometeors in simulated cloud (shading) and surface temperature (red line, units: °C) at (a) 1400 BJT and (b) 2000 BJT 28 Jan 2008

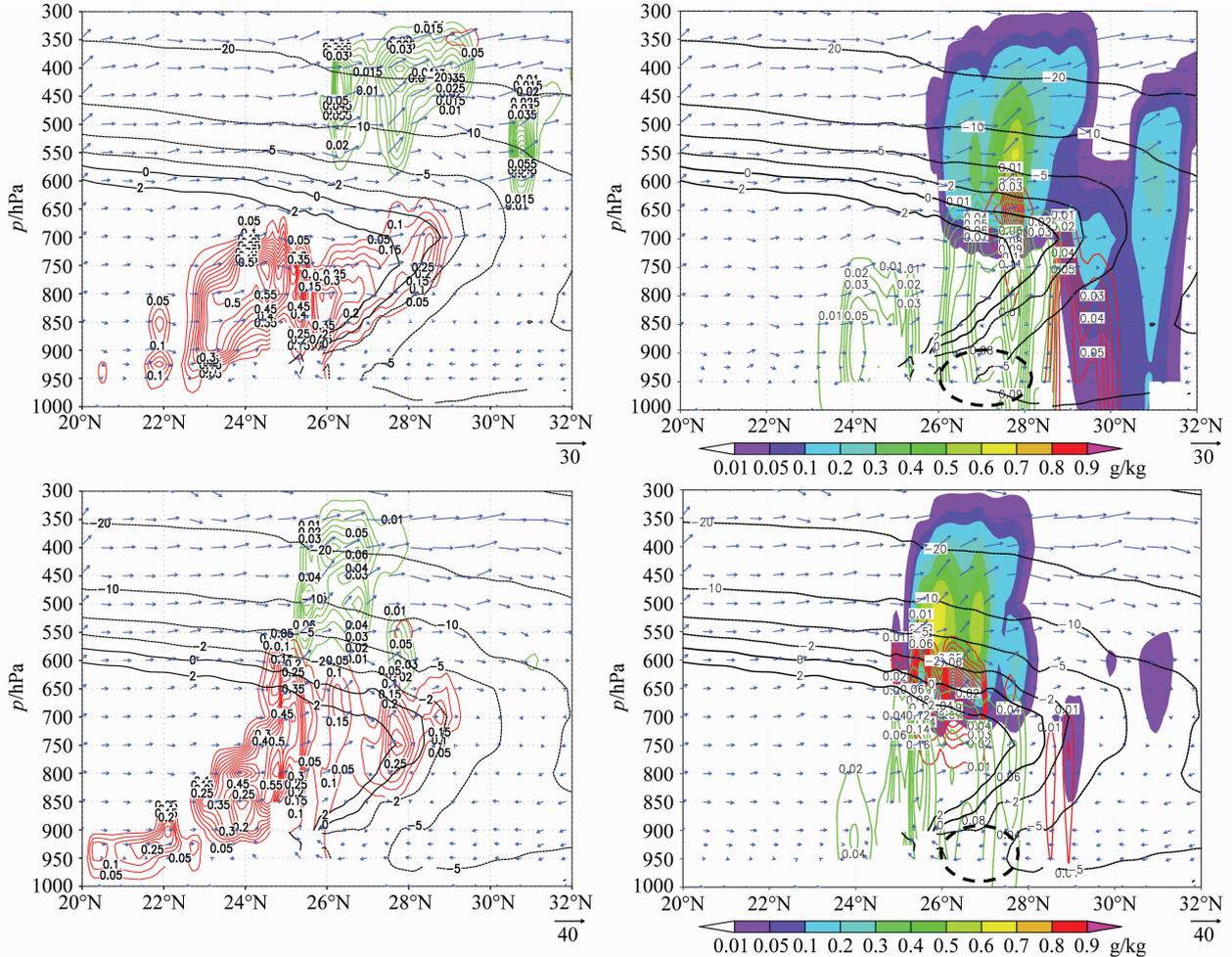


图10 2008年1月28日 (a, b) 14时和 (c, d) 20时通过长沙站 (113°E) 含水量 (单位: g/kg) 的经向-垂直剖面: (a, c) 云水 (红线)、冰晶 (绿线) 含水量; (b, d) 雪 (彩色阴影)、霰 (红线) 和雨水 (绿线) 含水量。黑线: 等温线 (单位: °C); 箭头: 风场; 虚线椭圆代表冻雨区

Fig. 10 Vertical section along Changsha station (113°E) for water content (g/kg) of hydrometeors in simulated cloud at (a, b) 1400 BJT and (c, d) 2000 BJT 28 Jan 2008; (a, c) Cloud water (red solid line), ice crystal (green solid line); (b, d) snow (shaded), graupel (red solid line), rain (green solid line). Black line; isotherm (°C); arrow: wind field; dashed ellipse: freezing rain area

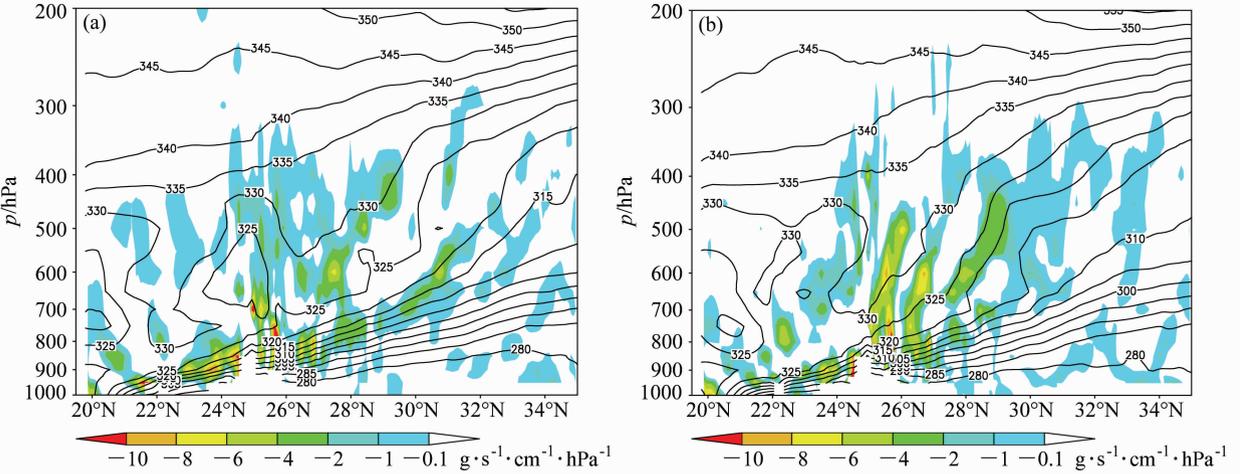


图 11 2008 年 1 月 28 日模拟的相当位温(黑线)、水汽通量散度(彩色, 负值表示水汽的辐合)通过长沙站(113°E)的经向-垂直剖面:
(a) 14 时; (b) 20 时

Fig. 11 Vertical cross section of the pseudo-equivalent potential temperature (black line, units; K) and water vapor flux divergence (shading, negative value; convergence) along Changsha station (113°E); (a) 1400 BJT 28 Jan 2008; (b) 2000 BJT 28 Jan 2008

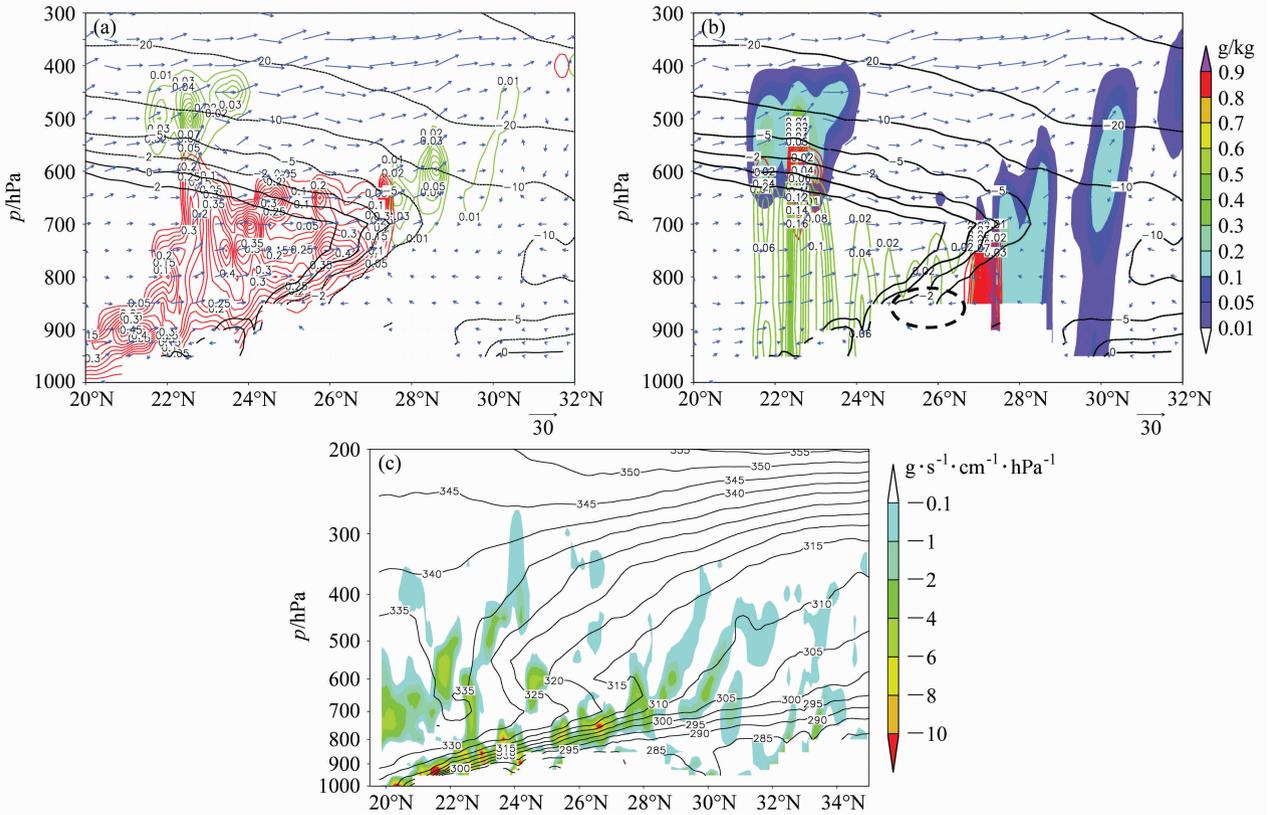


图 12 模拟的 2008 年 1 月 28 日 20 时通过贵阳站(106.7°E)含水量和水汽通量散度的经向剖面: (a) 云水(红线)和冰晶(绿线)含水量; (b) 雪(彩色阴影)、霰(红线)、雨水(绿线)含水量; (c) 水汽通量散度(彩色, 负值表示水汽的辐合)。(a, b) 黑线: 等温线; (c) 黑线: 相当位温; 虚线椭圆代表冻雨区

Fig. 12 Vertical cross section along Guiyang station (106.7°E) for (a, b) water content of hydrometeors in simulated cloud and (c) the water vapor flux divergence (shading, negative value; convergence) at 2000 BJT 28 Jan 2008: (a) Cloud water (red line), ice crystal (green line); (b) snow (shading), graupel (red line), rain (green line). (a, b) Black line; isotherm (°C); (c) black line; equivalent potential temperature (K); dashed ellipse; freezing rain area

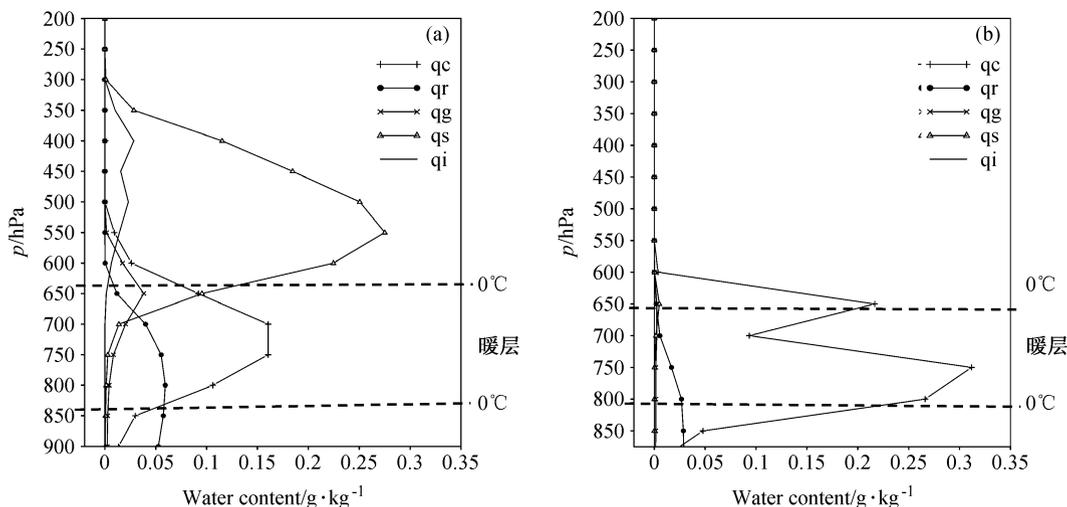


图 13 2008 年 1 月 28 日 20 时水凝物含水量经向平均的垂直廓线: (a) 沿长沙 (113°E) 冻雨区 (25°N~29°N); (b) 沿贵阳 (106.7°E) 冻雨区 (24.5°N~26.5°N)。qc: 云水; qr: 雨水; qg: 霰; qs: 雪; qi: 冰晶

Fig. 13 Vertical profiles of meridional-mean water content of hydrometeors at 2000 BJT 28 Jan 2008: (a) Along Changsha station (113°E) over freezing rain area (25°N-29°N); (b) along Guiyang station (106.7°E) over freezing rain area (24.5°N-26.5°N). qc: cloud water; qr: rain water; qg: graupel; qs: snow; qi: ice

见, 贵州冻雨主要通过“过冷暖雨过程”形成, 属于暖云降水机制。同时刻, 沿贵阳的假相当位温和水汽通量散度垂直剖面 (图 12c) 可见, 水汽沿锋面爬升, 在贵州南部冻雨区 (24°N~27°N) 上空形成水汽辐合的强中心 (位于锋面上的 800~700 hPa 左右)。与长沙剖面比较, 贵州冻雨区上空的强水汽辐合中心的高度较低。结合对应的云系结构可见, 锋面上对流层中低层的水汽辐合中心内形成的云滴下落到近地面冷层, 形成的过冷却雨滴落到低于 0°C 地面直接冻结, 形成冻雨。即贵州冻雨区上空暖云中的云滴、雨滴经过“暖—冷”层结, 主要通过“过冷暖雨过程”形成冻雨。

5.2.3 不同冻雨区的云微物理结构特征

从图 10 和图 12 看, 长沙和贵阳冻雨区的云系垂直微物理结构不同。为了分析方便, 图 13 给出了长沙和贵阳站冻雨区水凝物含水量经向平均值的垂直廓线。长沙冻雨区的云中各种水凝物含水量最大值出现的高度不同, 由高到低依次为冰晶、雪、霰、云水和雨水, 高层主要为冰晶、雪, 其垂直范围相当; 中层主要为霰和过冷云水; 低层主要是雨水。雪的最大值高度位于冰晶最大值高度之下冰晶迅速减少的高度, 说明冰晶对雪的形成可能有很大的贡献; 暖层 (625 hPa) 以上, 存在较多的雪, 也存在少量的霰, 当冰相粒子 (雪、霰) 下落到暖层,

开始融化, 在雪完全融化的高度, 雨水的含水量出现大值, 说明雪的融化对雨的形成贡献最大, 即雨水的形成主要靠雪降落到暖区的融化。这表明, 湖南冻雨区云系中雨水的形成主要以冷云降水过程为主。湖南冻雨区云的上部为冰晶, 冰晶凝华增长形成雪, 雪下落到暖区融化形成雨水, 而后雨水下落到近地面冷层, 形成过冷雨水, 最终过冷雨水接触地面, 快速冻结形成冻雨。与长沙相比, 贵阳冻雨区上空 (图 13b), 高层基本无冰相粒子, 且近地面的逆温层和其下的冷层较薄。冻雨区中低层为云水、雨水, 雨水的最大值高度位于云水最大值高度之下迅速减少的高度, 说明云水对雨水的形成可能有很大的贡献, 可见雨水主要通过云水的碰并形成。贵州冻雨区云系中雨水的形成主要以暖云过程为主, 通过碰并过程增长形成的过冷却雨 (云) 滴, 形成冻雨。

6 冻雨的云物理成因及主要微物理过程

图 14 给出了 1 月 28 日 20 时, 长沙和贵阳冻雨区范围内, 雨水的源项微物理过程产生率经向平均的垂直廓线, 研究形成过冷雨水的主要微物理过程。

长沙冻雨区上空雨水形成的主要微物理过程为

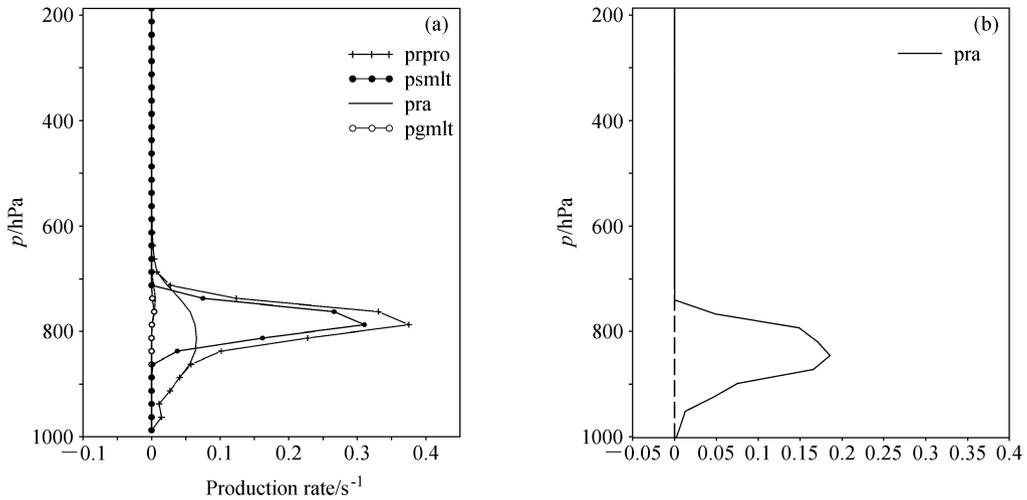


图 14 同图 13, 但为雨水及源项各微物理过程产生率 (prpro: 雨水产生率; psmlt: 雪的融化项产生率; pra: 雨水碰并云水项产生率; pgmlt: 霰的融化项产生率) 经向平均的垂直廓线

Fig. 14 Same as Fig. 13, but for vertical profiles of meridional-mean production rate of rain (prpro) and certain microphysical processes (psmlt indicates melting of snow, pra is collection of cloud water by rain, and pgmlt indicates melting of graupel)

雪的融化 (psmlt) 和雨水碰并云水 (pra) 过程, 其中雪的融化过程产生率最大。长沙冻雨区上空雨水主要通过雪降落到暖区的融化形成, 主要以冷云降水过程为主 (图 14a)。雨滴形成后, 继续下落到近地面冷却层, 雨滴保持过冷雨水形式, 最终过冷雨水接触地面, 快速冻结形成冻雨。这表明长沙冻雨通过“冰相融化过程”形成。

而贵阳冻雨区上空过冷雨水形成的主要微物理过程为雨水碰并云水过程 pra (图 14b), 表明贵州冻雨区降水主要以暖云过程为主, 通过碰并过程增长形成的过冷却雨 (云) 滴, 接触低于 0°C 地面迅速冻结, 形成冻雨, 即“过冷暖雨过程”形成。

由此可见, 相同天气系统影响的不同冻雨区, 在不同层结条件下, 云系的垂直结构和云微物理结构存在差异, 冻雨形成的云微物理过程也存在差异。

7 结论

本文对 2008 年 1 月 25~29 日的一次典型冰冻雨雪天气过程, 利用观测资料分析了冰冻天气形成的层结特征、云和降水的宏微观结构特征。在此基础上, 利用 CAMS 中尺度云分辨模式, 对 1 月 28~29 日的冻雨天气过程进行模拟试验, 同时将实测的降水、卫星、Cloudsat 资料同模拟结果进行检验, 结果显示, 模式较好地模拟了降水带的走向及

范围、降水云系的移动演变和冻雨区云系的结构。本文重点分析了冰冻天气中冻雨区云系宏微观结构及大气层结特征, 初步给出了冻雨形成的云物理过程及成因, 得到如下主要结论:

(1) 逆温层的存在是冻雨发生的必要条件, 低层湿度较大的逆温常与冻雨天气有关。此次冰冻过程的冻雨区上空 (如湖南、贵州冻雨区) 都存在逆温 (属于锋面逆温), 低层有水汽输入到冻雨区。可见, 冷暖空气交汇导致的逆温层结有利于冻雨的发生, 但逆温层的存在仅是形成冻雨的条件之一。发生冻雨还与湿度 (水汽含量)、风向风速、地面特征有关, 如地面温度等于或低于 0°C , 有利于过冷却水的冻结。

(2) 深厚而稳定的逆温层和低层冷却层的存在是此次大范围冻雨出现的直接原因。冻雨发生时, 对流层中层有一定厚度的暖层, 地面上有一定厚度的冷层, 低层的冷层中相对湿度比较高。中层的暖层可以确保上层降落下来的固态降水 (雪或霰) 通过融化层后变成液态降水或在融化层中直接产生液态降水。这样, 液态降水下降到低空冷却层后逐渐变成过冷却雨滴, 当过冷却雨滴接触到 0°C 以下的地面或者其他物体表面时, 迅速冻结形成冻雨。

(3) 此次冰冻过程中, 不同冻雨区上空有两种不同的云结构, 对应两种不同层结特征, 表明相同天气系统影响下, 不同冻雨区的层结和云也存在差

异: ① 湖南冻雨区上空为混合云(云顶温度低, 云层较厚, 有冰相发展), 经过“冷—暖—冷”层结形成冻雨; ② 贵州冻雨区上空为暖云(云顶温度高, 云层较薄, 冰相发展较弱), 经过“暖—冷”层结形成冻雨。

(4) 具有不同层结特征的不同冻雨区云系, 对应两种不同的云微物理结构: 湖南冻雨区上空的混合云, 高层为冰晶, 中高层为雪和霰, 低层为云水和雨水, 其中, 雪的比含水量较大, 低空存在过冷雨水, 雨水主要通过中高层雪的融化形成; 而贵州冻雨区上空的暖云, 中高层冰晶、雪、霰的比含水量很小, 冰相发展较弱, 低层为云水和雨水, 其中, 云水的比含水量最大, 存在过冷雨水, 雨水主要通过云水的碰并过程形成。

(5) 不同冻雨区的两种冻雨形成机制及主要云微物理过程: 湖南冻雨区的冻雨通过“冰相融化过程”形成, 即在锋面之上的对流层中层水汽辐合中心内通过冰晶凝华增长形成的雪, 从高空落入暖层, 融化后形成雨水, 再下落到低层的过冷层形成过冷雨滴, 最后接触到温度低于 0°C 的物体或地面上, 迅速冻结形成冻雨。贵州冻雨通过“过冷暖雨过程”形成, 即, 由于云顶温度高, 冰相发展较弱, 水汽沿锋面抬升, 在对流层中低层的水汽辐合中心内, 经过冷却凝结成云滴, 通过云滴碰并形成的雨滴下落到低空冷层, 形成的过冷却雨滴直接冻结, 形成冻雨。

参考文献 (References)

Bennett W J. 1913. The sleet storm in northern New York, March 25–27 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 41: 372–373.

Bocchieri J R. 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 596–603.

Brooks C F. 1920. The nature of sleet and how it is formed [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 48: 69–72.

Cooper W A, Marwitz J D. 1980. Winter storms over the San Juan Mountains. Part III: Seeding potential [J]. *J. Appl. Meteor.*, 19: 942–949.

Cortinas J V Jr. 2000. A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 3574–3588.

Cortinas J V Jr, John V, Bernstein B 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.

Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al. 1996. A physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets [J]. *Wea. Forecasting*, 11: 591–598.

丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, 66 (5): 808–825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 808–825.

Dunn L B. 1987. Cold air damming by the front range of the Colorado Rockies and its relationship to locally heavy snow [J]. *Wea. Forecasting*, 2: 177–189.

Dunn L B. 1992. Evidence of ascent in a sloped barrier jet and an associated heavy snow band [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 914–924.

Forbes G S, Thomson D W, Anthes R A. 1987. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold air damming [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 564–591.

高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II. 成因分析 [J]. *气象*, 34 (4): 101–106. Gao Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008. II: Possible climatic causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 101–106.

Henry A J. 1922. The great glaze storm of 21–23 February 1922 in the upper lake region: Discussion of general conditions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 50: 77–82.

Huffman G J, Norman G A Jr. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 2172–2182.

黎惠金, 韦江红, 覃昌柳, 等. 2008. 2008 年广西罕见低温雨雪冰冻天气成因及数值预报产品性能分析 [J]. *气象研究与应用*, 29 (1): 16–19. Li Huijin, Wei Jianghong, Tan Changliu, et al. 2008. Analysis on a rare cryogenic freezing rain and snow weather impacting Guangxi in early 2008 as well as the NWP forecast capabilities [J]. *Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese)*, 29 (1): 16–19.

Martner B E, Snider J B, Zamora R J, et al. 1993. A remote sensing view of a freezing rainstorm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 2562–2577.

Marwitz J D. 1980. Winter storms over the San Juan Mountains. Part I: Dynamical processes [J]. *J. Appl. Meteor.*, 19: 913–926.

Meisinger C L. 1920. The precipitation of sleet and the formation of glaze in the eastern United States January 20 to 25, 1920, with remarks on forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 48: 73–80.

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.
- Rasmussen R M. 2002. Freezing drizzle formation in stably stratified layer clouds: The role of radiative cooling of cloud droplets, cloud condensation nuclei, and ice initiation [J]. J. Atmos. Sci., 59: 837-860.
- Rauber R M, Ramamurthy M K, Tokay A. 1994. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's day ice storm [J]. Wea. Forecasting, 9: 183-208.
- Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K, et al. 2000. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events [J]. J. Appl. Meteor., 39: 1185-1195.
- Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K, et al. 2001. Further investigation of a physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets [J]. Wea. Forecasting, 16: 185-191.
- 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.
- 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, 23 (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), 23 (4): 510-519.
- Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al. 1999. The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada [J]. J. Atmos. Sci., 56 (10): 1261-1281.
- Tremblay A, Glazer A. 2000. An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 1289-1308.
- 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.
- 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估 [J]. 气象, 34 (4): 95-100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: I. Climatic features and its impact [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (4): 95-100.
- 王遵娅, 张强, 陈峪, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征 [J]. 气候变化研究进展, 4 (2): 63-67. Wang Zunya, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. 2008. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (2): 63-67.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. 气象学报, 66 (5): 836-849. Yang Guiming, Kong Qi, Mao Dongyan, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 836-849.
- 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.
- 周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 2008. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验 [J]. 气象, 34 (12): 27-35. Zhou Yuquan, Chen Yingying, Li Juan, et al. 2008. Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (12): 27-35.