

姚蓉,唐佳,唐明晖,等. 2014. “14·02”湖南三次雨雪过程对比分析. 气象, 40(12):1500-1506.

“14·02”湖南三次雨雪过程对比分析^{* 1}

姚 蓉¹ 唐 佳¹ 唐明晖¹ 陈红专² 杨云芸¹

1 湖南省气象台,长沙 410118
2 怀化市气象台,怀化 418000

提 要: 本文利用常规探空和地面观测资料、NCEP 1.0×1.0 再分析资料及多普勒雷达资料,对 2014 年 2 月上中旬发生在湖南的三次雨雪过程(简称“14·02”)进行了对比分析。结果表明:(1) 第一次过程湘南出现冻雨,温度层结表现为 850~700 hPa 有明显逆温层,700 hPa 温度高于 0℃,850 和 925 hPa 温度低于-4℃,地面温度低于 0℃。从主要影响系统配置来看,700 hPa 强盛的西南急流为水汽的输送和湘南融化层的形成和维持起到了重要作用,低层冷空气受南岭山脉阻挡而形成的地面静止锋和深厚的冷垫是导致湘南冻雨较长时间维持的原因。(2) 第二、三次过程以降雪为主,温度层结显示地面温度 0℃左右,地面以上层次温度低于 0℃。(3) 第三次雨雪强度最强,暖湿空气沿锋面强迫抬升,在低层冷空气共同作用下,导致较强雨雪天气的发生。雷达回波显示强降雪过程具有积层混合性降水回波及低质心高效降水回波特征。

关键词: 降水相态, 锋区强度, 概念模型, 过程对比

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.008

Diagnostic Analysis of Three Rain and Snow Processes
in Hunan in February 2014

YAO Rong¹ TANG Jia¹ TANG Minghui¹ CHEN Hongzhuan² YANG Yunyun¹

1 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118
2 Huaihua Meteorological Observatory of Hunan, Huaihua 418000

Abstract: Using conventional sounding data, surface observation data, NCEP 1.0×1.0 reanalysis data and Doppler radar data, three times of rain and snow processes in Hunan in early February 2014 are analyzed. The results show that (1) the first process is a freezing rain process in southern Hunan, which is characterized by obvious inversion layer between 700 hPa and 850 hPa. The temperature at 700 hPa is above 0℃, but at 850 hPa and 925 hPa it is below -4℃ while the ground temperature is below 0℃. From the perspective of main system configuration, strong southwest jet at 700 hPa plays an important role in water vapor transmission and the formation of melting layer. A stationary front and deep cold pad which is comprised of the cold air blocked by Nanling Mountains, are the causes for the long lasting southern Hunan freezing rain. (2) The second and third processes are snow-based processes with surface temperature around 0℃, and the temperature above surface is lower than 0℃. (3) The third process of rain/snow is the heaviest. Warm moist air rises along the front, and low-level cold air results in this severe rain and snow process. Radar echo of this process has the characteristics of mixed echo of cumulus and stratus as well as low-centroid high efficient precipitation feature.

Key words: precipitation phase, frontal intensity, concept model, process contrast

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY 201306016)和中国气象局关键技术集成项目(CMAGJ2014M37)共同资助
2014 年 4 月 16 日收稿; 2014 年 9 月 15 日收修定稿
第一作者: 姚蓉,主要从事中短期预报和灾害性天气研究. Email:543828780@qq.com

引 言

冬季冻雨、暴雪过程是湖南的主要灾害性天气。2008 和 2011 年冬季的雨雪冰冻过程给湖南省交通运输、电力、通信及工农业生产造成了严重损失，社会影响很大(胡爱军等,2010;马宗晋,2009)。国内学者针对雨雪冰冻过程,开展了大量的分析研究工作(陈红专等,2012;黄小玉等,2008;陶玥等,2012;王东海等,2008;杨贵名等,2009;姚蓉等,2009;2012;叶成志等,2009;曾明剑等,2008;邹海波等,2011;王颖等,2013;吴古会等,2012)。研究表明:湖南冻雨形成的温度层结是冷-暖-冷层结(陶玥等,2012),深厚且稳定的逆温层和低层冷垫的存在是冻雨产生的直接原因(黄小玉等,2008;王东海等,2008;姚蓉等,2009;何彩芬等,2009;叶成志等,2009;曾明剑等,2008;邹海波等,2011),并且高守亭等(2014)指出形成贵州、湖南冻雨的最直接影响系统是高低空急流以及低层云贵静止锋,并探索出“动力因子”和“三步判别法”相结合的冻雨诊断预测方法,姚蓉等(2012)指出上升运动和持续的水汽辐合为暴雪过程提供了动力、水汽条件,“冷空气楔”上爬升的暖湿气流维持时间较长,是持续性大范围暴雪产生的重要热力条件。陈红专等(2012)指出高空急流和锋面耦合加强了湖南区域的上升运动是暴雪天气持续的主要原因。由于冷空气爆发,温度突降,降水性质的转变以及降水相态的区别给预报带来一定难度。为此,漆梁波(2012)和漆梁波等(2012)提出了用温度因子和厚度因子作为判据条件和阈值来识别冬季雨、雨夹雪、雪及冻雨(冰粒),以及通过云顶

高度、暖层强度和厚度、地面气温来区分江南区域冻雨和冰粒天气。许爱华等(2006)分析 2005 年 3 月一次寒潮天气过程得出 925 hPa 气温低于 -2°C 可作为南方降水雨转雪的判据。杜小玲等(2014)分析贵州地区冻雨和降雪天气的温度场、锋区结构等均存在差异,其中冻雨发生时,锋面逆温高度最低、逆温梯度最大、逆温厚度最薄,云层高度在 600 hPa 以下;降雪发生时,锋面逆温高度较高、逆温梯度最小、云层伸展高度超过 500 hPa。

本文通过对 2014 年 2 月上中旬 3 次雨雪过程中主要影响系统、降水相态演变特点与温度层结变化特征分析,结合 3 次雨雪过程锋生动力作用与南风强弱变化、雷达回波特征,探讨雨雪过程降水相态变化及降雪强弱成因,对湖南降水相态落区预报有一定指示意义,为提高冬季冻雨、暴雪等灾害性天气过程预报提供一定参考。

1 雨雪过程实况特点

第一次雨雪过程从 2 月 6 日开始,10 日结束,全省自北向南出现相态转变,多种降水相态相继出现,包括雨、雨夹雪、雪以及冻雨。其中 6—8 日降雪或雨夹雪主要出现在湘西北、湘北,9 日全省大范围出现降雪,湘南部分地区出现冻雨(图 1a),10 日自北向南降水结束。

第二次雨雪过程(2 月 12 日):全省大部分地区出现降雪,其中湘东南局部地区出现中到大雪。这次过程雨雪时间短且量级小,主要降水相态表现为纯雪(图 1b)。

第三次雨雪过程(2 月 17 日晚至 18 日晚):全

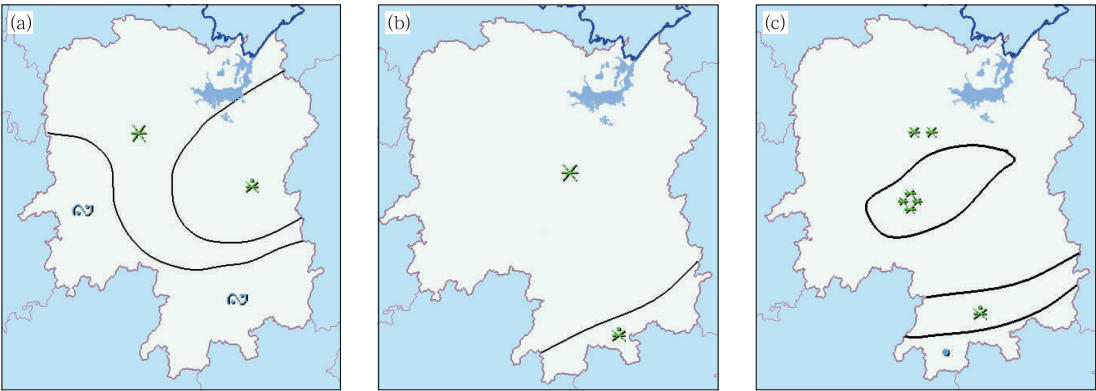


图 1 2014 年 2 月 9 日(a)、12 日(b)、18 日(c)雨雪相态分布图

Fig. 1 Rain and snow phase distributions on 9 (a), 12 (b), 18 (c) February 2014

省自北向南转雪(湘东南局地雨夹雪),影响范围广,这次过程相比前两次过程而言,雨雪强度最强,湘中以南大部分地区出现中到大雪,并且湘中8个县市出现暴雪。此次过程降水相态以雪为主(图1c)。

可以看出,3次雨雪过程在降水相态类型、降雪强度、影响时间等方面均存在较大差异。

2 影响系统及温度层结分析

2.1 影响系统及温度层结概念模型

雨雪冰冻过程发生,除了具有降水条件外,还需要有利的温度层结配合。基于3次雨雪过程主要影响系统及各层温度的分析,提炼出3次雨雪过程的概念模型(图2)。

6—10日低温雨雪冰冻过程(图2a),500 hPa上,有低槽东移,湖南大部分地区的温度在 -14°C 以下,有利于冰晶与雪粒子生成;700 hPa西南急流存在先加强后南压减弱过程,湘中以南西南急流超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0°C 线位于湘中附近;850及925 hPa湖南处于较强偏东北气流控制下, 0°C 线均位于南岭附近;地面为静止锋控制,气温也已达 0°C 附近,湘北由雨夹雪转为纯雪,而湘中以南存在逆温,且850 hPa以下冷垫深厚,地面气温也达 0°C 以下,此外,湘南处于南岭山脉北侧,低层冷空气由于山脉阻挡,易形成南岭静止锋,是出现冻雨的典型形势。图2a基本反映了混合性雨雪冻雨过程的概念模型。

11日晚至12日降雪过程,500 hPa有低槽东移,全省大部分地区温度在 -10°C 以下,湘北为 -12°C 以下;700 hPa湖南上空为偏西南气流控制,湘北已转北风,并有弱切变线,全省温度在 0°C 以下;850 hPa及以下层湖南处于偏东北气流控制下,全省温度也在 0°C 以下,其中850 hPa湘东南有切变线,地面冷锋自北向南影响并移至华南,由于500 hPa以下整层温度在 0°C 以下,且大部分地区动力条件相对较弱,是出现弱降雪的形势,提炼的概念模型说明了此次过程以降雪为主,且雪的量级较小(图2b)。

17日晚至18日强降雪过程(图2c),500 hPa南支低槽分裂东移,湖南大部分地区温度在 -10°C 以下,湘北为 -12°C 以下;700 hPa湘南西南急流旺盛,风速超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,切变线位于湘北,湘北转北风,850 hPa及以下层湖南处于偏东北气流控制

下,全省温度均在 0°C 以下,850 hPa切变线与地面冷锋位于南岭附近,由于高空横槽带动冷空气南下,地面冷锋自北向南影响湖南,整层温度在 0°C 以下,加之冷暖气流在湘中附近交汇,且中层切变由北向南缓慢移动,导致了湘中偏北及偏南出现较大范围大到暴雪。图2c是湖南出现大范围强降雪的典型概念模型,与图2a相比,主要差别在于地面为冷锋而非静止锋,且700与850 hPa 0°C 线均在南岭附近,位置偏南,此外,图2a中700 hPa的 0°C 线较850 hPa偏北。与图2b相比,图2c中700 hPa西南急流位置偏北,且偏南分量更明显。

2.2 温度层结与雨雪相态变化

2.2.1 3次雨雪过程温度对数压力图

9日14时桂阳出现冻雨,分析该时刻探空曲线(图3a),可以发现900~700 hPa之间存在逆温层,700 hPa有一层浅薄的融化层,850 hPa温度 -4°C 左右,14时地面图显示地面温度 0°C 。此温度层结符合湖南冻雨形成的条件,但是700 hPa融化层不深厚,且降水较弱,故冻雨强度不大,与叶成志等(2009)和姚蓉等(2008)的分析结果一致。

12日14时长沙开始降雪,结合地面天气图和探空曲线(图3b)分析,地面温度 1°C ,地面以上层温度低于 0°C 。18日邵阳出现暴雪,积雪深度达12 cm。14时探空曲线(图3c)显示,地面温度 1°C ,地面以上气温低于 0°C ,因此降雪相态表现为纯雪。

从风场结构分析后两次过程降雪强度,12日中层西南气流的偏南风量较小,并没达到急流标准,850 hPa以下为偏北气流,且风速较小,不利于12日出现强降雪;18日中层西南急流建立,并且800 hPa以下均为偏北气流,冷垫深厚。另外,从3次雨雪过程主要降水时段的多普勒雷达VWP资料也可分析出第二次过程西南风相对较弱(图略),第三次过程西南风最强盛并冷平流伸展的高度比前两次过程高(图略),深厚的冷垫有利于纯雪的产生和维持。因此中层强盛的西南暖湿气流、深厚的冷垫、低层的辐合导致了第三次过程在湘中出现局部暴雪。

漆梁波等(2012)指出当某一层的温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 且 $\geq -20^{\circ}\text{C}$ 时,温度露点差 $\leq 4^{\circ}\text{C}$ 可认为是云内,从探空曲线(图3)发现,桂阳600 hPa以下、长沙500 hPa以下、邵阳400 hPa以下均为云内,由此看出冻雨云顶高度最低,与杜小玲等(2014)的结论一致。

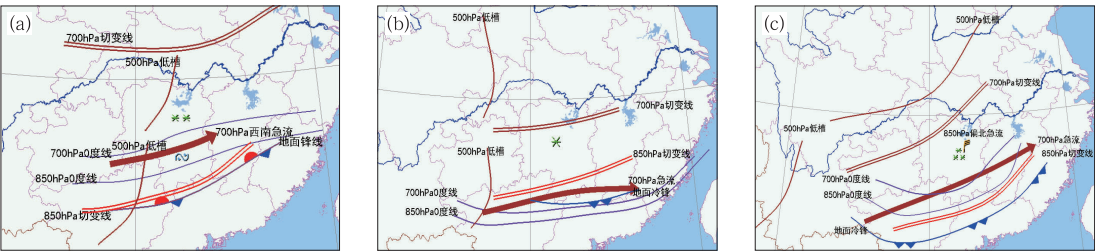


图 2 2014 年 2 月 9 日(a)、12 日(b)及 18 日(c)雨雪过程概念模型
Fig. 2 Conception models of rain and snow processes on 9 (a), 12 (b), 18 (c) February 2014

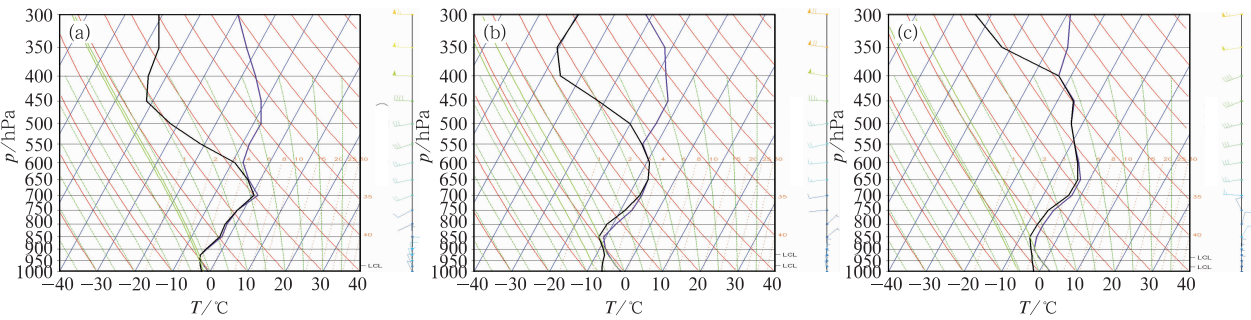


图 3 2014 年 2 月 9 日 14 时桂阳(a)、12 日 14 时长沙(b)、18 日 14 时邵阳(c)探空图
Fig. 3 Sounding map at (a) 14:00 BT 9 February in Guiyang, (b) 14:00 BT 12 February in Changsha, (c) 14:00 BT 18 February 2014 in Shaoyang

2.2.2 站点各层温度变化

我们下面从温度层结剖析降水相态的转变,选取长沙、怀化、桂阳 3 个代表站(图 4)。这 3 次低温雨雪期间的降水相态呈现多样性,期间存在雨、雨夹雪、雪、冻雨等天气的相态转变。由于自 2014 年 1 月起,取消了夜间人工天气现象观测,而且雨夹雪和雪的转换时间较短,因此图中不区分雨夹雪和雪,都按雪表示。第一次过程湘南部分地区出现冻雨,而

其他两次过程大部分地区以纯雪为主。第一次过程 9 日 14 时桂阳出现冻雨,从温度曲线(图 4a)可看出,850~700 hPa 存在较明显的逆温层,700 hPa 存在一个温度大于 0℃的暖性层结,925~850 hPa 温度低于-4℃,并且地面温度低于 0℃。长沙(图 4b)和怀化站(图 4c)虽然有逆温层存在,但不存在融化层,除了地面温度为 0℃左右,其他层均在 0℃以下,因此降水相态表现为雨夹雪(雪)。第二次过程全省

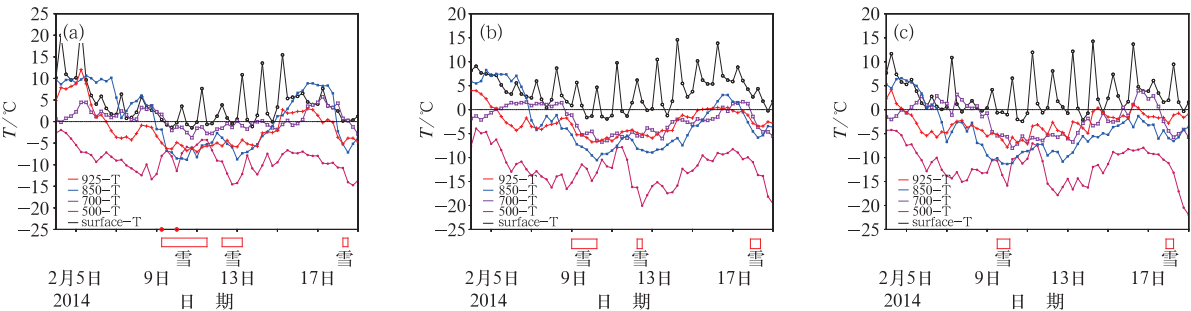


图 4 2014 年 2 月 4—19 日桂阳(a)、长沙(b)、怀化(c)温度时间序列图
(红色圆圈表示冻雨,红色方框表示降雪)

Fig. 4 Time evolution of temperature in Guiyang (a), Changsha (b), Huaihua (c) during 4-19 February 2014
(Red circle denotes freezing rain, red square denotes snow)

大部分地区除了地面温度 0℃ 左右,其他层均低于 0℃,因此过程开始便出现纯雪,不像其他两次过程存在先雨后雪的阶段、并且全省由北向南逐渐转雪。

3 物理量条件差异分析

3.1 水汽条件对比

分析过程期间水汽通量沿 113°E 的剖面图(图 5a),第一次过程和第三次过程开始前,华南的水汽通量都明显加强,并向北推进,尤其第三次水汽通量输送到达 28°N,这与低层西南急流的北抬密切

相关,且在降水过程中,两次过程水汽通量中心值超过 $10\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,给降水提供充足的水汽条件。而第二次过程期间,水汽通量的加强并不明显,位置也偏南,这与第一次和第三次过程雨雪较强,而第二次过程较弱相对应,说明了水汽输送对雨雪强度有重要作用。而分析比湿的区域平均图($25^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)可以发现(图 5b),第一次和第三次过程比湿垂直伸展高度较高,分别到达 700 和 800 hPa,说明这两次过程水汽发展较旺盛,并且第三次过程比湿最大,中心最大值超过 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,对应降雪强度最大,而第二次过程比湿发展较低,中心值较小,则降雪较弱。

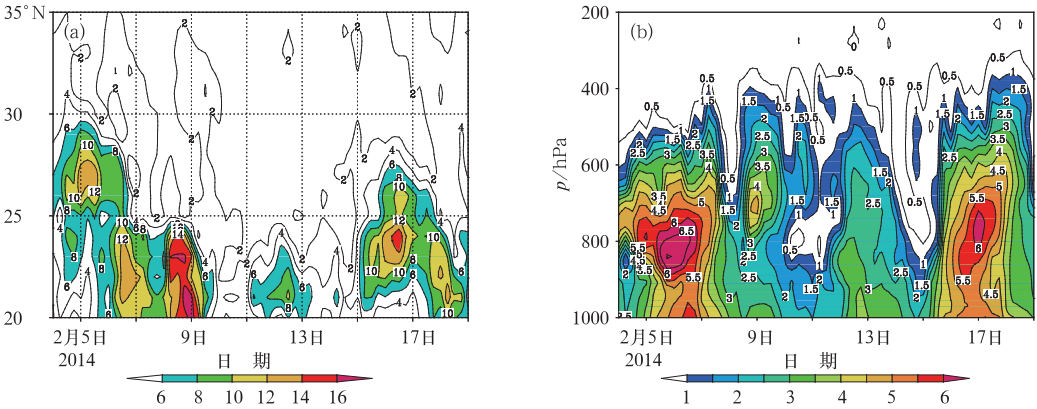


图 5 2014 年 2 月 4—19 日 850 hPa 水汽通量(a,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)沿 113°E 剖面图,比湿(b,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)区域平均($25^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)垂直变化图
Fig. 5 850 hPa vapor flux (a, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) along the 113°E profile map, the vertical section of regional average ($25^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) specific humidity (b, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) during 4—19 February 2014

3.2 动力条件对比

分析 850 hPa 经向风沿 113°E 的纬向时间演变图可以发现(图 6),3 次过程期间中低层切变线有 3 次自北向南推进的过程,与 3 次雨雪天气过程相对应。3 次雨雪过程前南风加强,有利于低纬地区水汽和不稳定能量的向北输送,为雨雪天气的发生提供源源不断的水汽。而且加强的偏南气流与北方南下的冷空气相遇,有利于冷暖空气在长江中下游及其以南的地区交汇,致使该区域持续性、大范围雨雪冰冻天气的发生。第一次过程为偏东路冷空气影响,5 日开始不断有冷空气渗透南下,第一次雨雪过程开始前,偏南气流明显加强,华南出现 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 南风中心,而且偏南气流向北推到了湖南北部,8 日又有一股冷空气南下,并且地面静止锋在湘南持续时间较长,造成湖南低温阴雨天气持续时间较长。

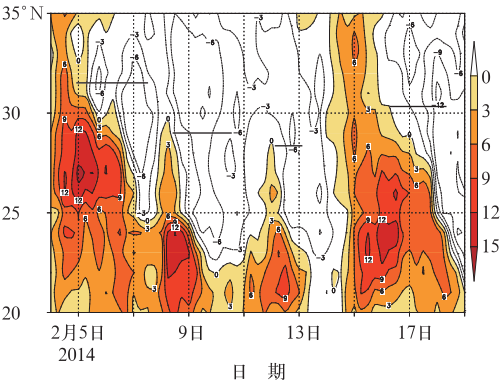


图 6 2014 年 2 月 4—19 日 850 hPa 经向风沿 113°E 剖面图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(黑实线表示冷空气活动)
Fig. 6 850 hPa meridional wind along 113°E time section (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) during 4—19 February 2014
(Black solid line represents cold air activities)

第二次过程开始前,偏南气流没有明显的加强,南风最大中心值为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中低层切变线位置偏南,冷空气强度较弱,因而第二次过程降雪过程较弱。第三次过程开始前,偏南气流特别强盛,向北伸展到 35°N ,18 日南下的北路冷空气强度最强,造成冷暖空气交汇最剧烈,降水量级最大。

3.3 热力不稳定条件

若以 T20 表示 $19^{\circ}\sim21^{\circ}\text{N}$ 、 $109^{\circ}\sim114^{\circ}\text{E}$ 范围内平均温度,T30 表示 $29^{\circ}\sim31^{\circ}\text{N}$ 、 $109^{\circ}\sim114^{\circ}\text{E}$ 范围内平均温度,以 $T20-T30$ 表示锋区强度。从湖南区域平均的锋区强度图上可见(图 7),2 月上中旬有 3 次明显的锋区加强的过程,与 3 次雨雪天气出现的时段一致。而且锋区强度的变化与雨雪天气的强度对应较好,第一次和第三次过程的锋区强度较强,实况也是这两次过程雨雪范围大,雨雪量大,强锋区的维持使低层和地面维持低温天气,冷暖气流处于交汇状态,有利于暖湿空气沿锋面强迫抬升,导致较强雨雪天气的发生。

4 雷达特征分析

分析这 3 次过程主要降水时段的长沙雷达回波

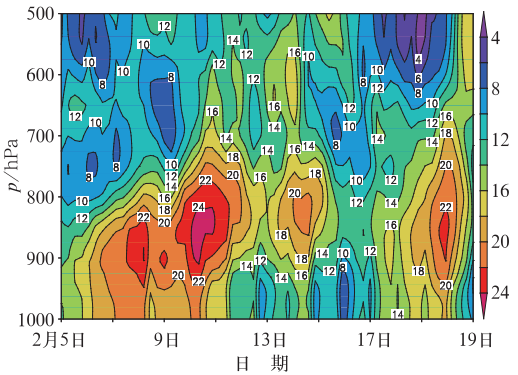


图 7 2014 年 2 月 5 日 08 时至 19 日 08 时
湖南区域平均锋区强度(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7 Regional average front intensity from
08:00 BT 5 to 08:00 BT 19 February 2014

反射率因子图,发现第二次过程以层状云降水回波为主(图 8c),回波比较松散,反射率因子较其他两次过程明显偏低,最大值为 25 dBz 左右,扩展的高度位于 3 km 以下(图 8d),结合探空曲线可知(图 3b),没有融化层存在,故这次过程主要是以小雪为主。第一、三次过程(图 8a 和 8e)都以积层混合性降水回波为主且最大值超过了 45 dBz , 35 dBz 的回波扩展的高度位于 3 km 以上(图 8b 和 8f),为低质心的高效率的降水回波,结合对应的探空曲线

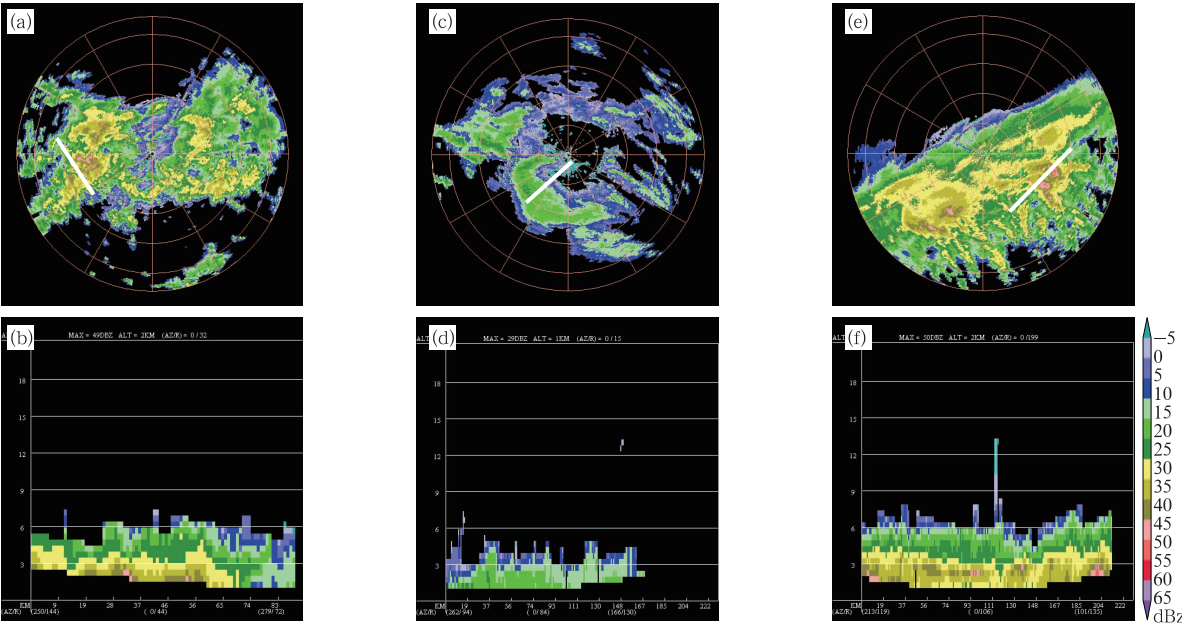


图 8 2014 年 2 月 9 日 01:14(a, b)、12 日 11:43(c, d)和 18 日 08:35(e, f) 0.5° 仰角
反射率因子(a, c, e)及垂直剖面图(b, d, f)
(沿反射率因子图中白线方向做剖面)

Fig. 8 0.5° elevation reflectivity factor (a, c, e) and its vertical cross section (b, d, f) at 01:14 BT 9 (a, b),
11:43 BT 12 (c, d), 08:35 BT 18 (e, f) February 2014
(The cross-section is parallel to white line in reflectivity factor chart)

分析可知(图 3a),第一次过程有明显的融化层的存在,故本次过程出现了冻雨;在第三次过程,从 0.5° 仰角径向速度图上分析出,25 km 距离圈内(对应的最大高度为 2.5 km)负速度面积大于正速度面积,低层有辐合的存在(图略),有利于降水的维持与发展(杨淑华等,2011),因此降水回波在湘中停留的时间长,并且第三次过程没有融化层的存在(图 3c),故导致了第三次过程在湘中出现了局部暴雪。

5 结 论

本文通过对比 2014 年 2 月上中旬湖南 3 次雨雪天气过程的影响系统、温度层结以及各物理量场的差异,结合雷达资料对比分析,得到如下结论:

(1) 3 次降雪过程中高低空影响系统均包含有高空低槽、高低空急流、中低层切变线和地面锋线。急流的强弱以及锋区强度与雨雪强度密切相关。第三次过程急流和冷空气强度最强,冷暖空气交汇最剧烈,故降水强度最强。

(2) 温度层结的不同对应了 3 次过程降水相态的差异,第一次过程 850~700 hPa 之间逆温层较明显,700 hPa 存在温度 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的融化层,并且 925~850 hPa 温度低于 -4°C ,地面温度在 0°C 以下,因此湘南部分地区出现冻雨;第二次过程地面温度为 0°C 左右,其他层在 0°C 以下,因此一开始就降雪;第三次过程受强冷空气影响,并且整层温度下降较快,全省自北向南转雪。

(3) 水汽与动力条件诊断分析结果,能较好地反映 3 次过程强弱差异原因。第一、三次过程水汽输送明显加强,并向北推进,而第二次过程水汽通量的加强并不明显,位置也偏南。第三次过程比湿最大,对应降雪强度最强。3 次雨雪过程开始前,偏南气流都发展加强并向北推进,尤其第三次过程南风发展最强盛,冷空气南下时冷暖交汇最剧烈。

(4) 多普勒雷达资料分析能反映降雪量级的差异。第二次过程以层状云降水回波为主,第一、三次过程都以混合性降水回波为主表现为低质心的高效率的降水回波。第三次过程冷平流伸展的高度比其余两次过程高,冷垫最深厚。中层强盛的西南暖湿气流、深厚的冷垫、低层的辐合均有利于纯雪的产生

和维持,导致湘中出现局部暴雪。

参考文献

- 陈红专,叶成志,龙丽华. 2012. 2011 年 1 月湖南罕见持续性暴雪天气成因分析. 暴雨灾害, 31(2):141-148.
- 杜小玲,高守亭,彭芳. 2014. 2011 年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究. 大气科学, 38(1):61-72.
- 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. 大气科学, 38(4):645-655.
- 何彩芬,黄旋旋,卢晶晶. 2009. 基于多普勒天气雷达产品的降雪及冻雨综合分析. 应用气象学报, 20(6):767-771.
- 胡爱军,李宁,祝燕德,等. 2010. 论气象灾害综合风险防范模式——2008 年中国南方低温雨雪冰冻灾害的反思. 地理科学进展, 29(2):159-165.
- 黄小玉,黎祖贤,李超,等. 2008. 2008 年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析. 气象, 34(11):47-53.
- 马宗晋. 2009. 2008 年华南雨雪冰冻巨灾的反思. 自然灾害学报, 18(2):1-3.
- 漆梁波. 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点. 气象, 38(7):769-778.
- 漆梁波,张瑛. 2012. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究. 气象, 38(1):96-102.
- 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. 大气科学, 36(3):507-522.
- 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. 气象学报, 66(3):405-422.
- 王颖,王晓云,江志红,等. 2013. 中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划. 气象, 39(5):585-591.
- 吴古会,彭芳,崔庭,等. 2012. 2011 年冬季贵州低温雨量冰冻天气的成因分析. 气象, 38(3):291-299.
- 许爱华,乔林,詹丰兴,等. 2006. 2005 年 3 月一次寒潮天气过程的诊断分析. 气象, 32(3):49-55.
- 杨贵名,毛冬艳,孔期. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析. 气象学报, 67(4):652-665.
- 杨淑华,梁进秋,张小冬,等. 2011. 大同市一次暴雪天气过程多普勒雷达速度特征. 气象与环境学报, 27(3):56-60.
- 姚蓉,黎祖贤,戴泽军,等. 2009. 2008 年初持续雨雪灾害过程分析. 气象科学, 29(6):838-843.
- 姚蓉,叶成志,田莹,等. 2012. 2011 年初湖南暴雪过程的成因和数值模拟分析. 气象, 38(7):848-857.
- 叶成志,吴贤云,黄小玉. 2009. 湖南省历史罕见的一次低温雨雪冰冻灾害天气分析. 气象学报, 67(3):489-500.
- 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. 气象学报, 66(6):1043-1052.
- 邹海波,刘熙明,吴俊杰,等. 2011. 定量诊断 2008 年初南方罕见冰冻雨雪天气. 热带气象学报, 27(3):345-356.