

陈新玉,王传根,戴泽武,等. 2018. 2018年初江西中北部冻雨暴雪天气过程特征及成因[J]. 气象与减灾研究,41(4):270-277.
Chen Xinyu, Wang Chuangen, Dai Zewu, et al. 2018. Characteristic and causes of severe freezing rain and snowstorm in early 2018 in Jiangxi[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,41(4):270-277.

2018年初江西中北部冻雨暴雪 天气过程特征及成因

陈新玉¹, 王传根¹, 戴泽武², 王桃¹

1. 九江市气象局, 江西 九江 332000

2. 湖口县气象局, 江西 九江 332005

摘要：2018年1月下旬,江西省中北部出现严重雨雪冰冻灾害天气,覆冰和积雪持续时间长达7 d,其间多次出现罕见的雨雪相态转换,先后经历了雨、冻雨、雪、冻雨、雪5个复杂过程。文中对此次天气过程的相态转换特征及成因进行了分析。结果表明:1)在有利的环流背景下,西风带小槽发展东移并携带冷空气南下,破坏850 hPa高度层附近的暖性逆温层,是冻雨转雪的重要因素,而700 hPa高度层上西南急流的脉动、偏南风增强为雪转冻雨提供了动力和热力条件。2)冻雨发生时最强风切变出现在925—850 hPa高度层,降雪发生时出现在850—700 hPa高度层。两次冻雨转降雪过程中,上升运动均增强,降雪时低层辐合、高层辐散强度较冻雨时强。3)近地面气温接近0.5 ℃时,850 hPa高度层冷暖平流对中低层大气的降温升温和作用至关重要,冷平流的降温作用剧烈,而暖平流的升温作用需要持续输送。暖层消失,冻雨即可转降雪;雪转冻雨时850 hPa和700 hPa高度层温度升至1 ℃,暖层内最高温度达2 ℃,相态的转变落后于暖性逆温层的形成。4)此次过程中,九江地区发生雨转冻雨以及冻雨转雪过程,地面气温下降明显。雨转冻雨时,气温 ≤ -0.5 ℃;冻雨转降雪时,气温 ≤ -1 ℃。雪转冻雨时,地面温度略有上升,仍在-1 ℃以下。高山站气温的持续上升,对雪转冻雨天气有指示意义。

关键词：冻雨，暴雪，相态转换，成因分析

中图分类号：P458.3

文献标识码：A

文章编号: 1007-9033(2018)04-0270-08

doi:10.12013/qxvijzvi2018-039

Characteristic and Causes of Severe Freezing Rain and Snowstorm in Early 2018 in Jiangxi

Chen Xinyu¹, Wang Chuangen¹, Dai Zewu², Wang Tao¹

1. Jiujiang Weather Bureau, Jiujiang 332000, China

2. Hukou Weather Bureau, Jiujiang 332005, China

Abstract: In late January 2018, there had been a severe freezing rain and snow disaster in Jiujiang since 2008, and lasted for 7 days. Phase transformation among rain, freezing rain, snow, freezing rain and snow occurred successively during the period. In this paper, its characteristics and causes were discussed. The results showed that: 1) under the favorable circulation background, the fluctuation of the south-west jet, the wind speed of the south-east wind and the position of the middle and low shear line were the decisive factors for the phase state of the precipitation. 2) During freezing rain, the strongest wind shear occurred at 925–850 hPa, while during snowfall, it occurred at 850–700 hPa. When the freezing rain turned to snow, the ascending motion increased, and the convergence and divergence intensity of the lower layer and the upper layer were stronger

收稿日期：2018-07-23；修订日期：2018-11-09。

^{基金项目}: 江西省气象局 2016 年预报员专项“台风‘苏迪罗’影响下赣北暴雨成因分析”。

作者简介：陈新玉，副高级工程师，主要从事中短期天气预报和决策气象服务研究，E-mail：wgc681203@163.com。

than those of the freezing rain. 3) As the ground temperature closed to 0.5°C , the cold and warm advections were very important for the cooling and warming of the middle and lower atmosphere. The cooling effect of the cold advection in the 850 hPa was intense, while the warming effect of the warm advection needs to be continuously transported. When the warm layer disappeared, the snow turned to freezing rain. When the temperature at 850 hPa and 700 hPa in the upper layer rised to 1°C , and the maximum temperature in the warm layer reached 2°C , the freezing rain turned to snow. The phase transformation happened after the formation of the warm inversion layer. 4) During the process, when the rain turned to freezing rain and then turned to snow in Jiujiang, the ground temperature dropped significantly. As the rain turned to freezing rain, the temperature was less than -0.5°C ; when the freezing rain turns to snow, the temperature was less than -1°C . When snow turns to freezing rain, the ground temperature rose slightly, but still below -1°C . The temperature of the alpine station continuously increasing, which was instructive for the phase transformation of weather.

Key words: freezing rain; snowstorm; phase transition; cause analysis

0 引言

冻雨和暴雪是我国冬季两种主要灾害性天气,南方出现频次较低。贵州及其周边区域,由于其特殊的地理位置、地形地貌和气候条件,是我国冻雨的高发地带,冻雨日数最多,其次是湖南、湖北、河南、江西等地(朱乾根等,2007),而江西则以鄱阳湖以南沿抚河流域至赣中一带为冻雨频发区(许爱华等,2011)。对于降雪,孙燕等(2014)认为 29°N 以北 120°E 以西的区域为华东地区的主雪区。自有完整气象记录以来,九江共出现 29 次冻雨天气(高山站除外,下同)、50 次暴雪天气,年际变化呈减少趋势。其中,20 世纪 90 年代至今,九江仅出现暴雪天气 12 次、冻雨天气 3 次。

2008 年初,我国南方出现了大范围的持续低温雨雪冰冻灾害,冻雨和暴雪给交通、电力、通讯、农业、林业等各行各业带来了严重影响,许多气象专家为此展开研究,寻求造成恶劣天气的原因。丁一汇等(2008)、杨贵名等(2008)、赵思雄和孙建华(2008)、魏慧娟等(2010)分别从气候变暖背景、大气环流特征、多尺度系统相互作用以及多普勒雷达探测等多角度开展研究。郑婧等(2008)对江西省冻雨和暴雪过程进行了对比分析。刘熙明和许爱华(2008)对近年国内外降雪和冻雨天气的研究进行了全面回顾总结。李才媛等(2009)研究认为,在长波系统背景场和地面冷空气影响路径相同的条件下,湖北冰冻灾害严重程度与对流层 850—700 hPa 逆温层维持时间、强度、是否中断以及温度的分布和强度有关。杜小玲等(2014)研究认为,贵州地区冻雨和降雪天气的温度场、锋区结构、大气运动状况等均存在差异,冻雨发生时,锋面逆温高度低、逆温梯度大、逆温厚度薄,逆温区有较厚的暖层;降雪发生时,锋面逆温高度较高、逆温梯度小、逆温厚度较厚,逆

温区无暖层。姚蓉等(2014a)研究认为,湖南出现冻雨时 850—700 hPa 高度层有明显逆温,700 hPa 高度层温度高于 0°C ,850 hPa 和 925 hPa 高度层温度低于 -4°C ,地面气温低于 0°C ;降雪时,地面气温为 0°C 左右,地面以上层次气温低于 0°C 。李丽等(2017)从高空急流与冷暖空气活动角度解释了高空急流对湖南雨雪冰冻过程的影响。

2018 年 1 月 24—31 日,江西省中北部地区出现继 2008 年以来又一次严重的雨雪冰冻天气过程,其间先后经历了雨、冻雨、雪、冻雨、雪 5 个复杂的相态转换阶段。这种相态反复转换过程与单一雨雪相态变化过程的环流特征、动力和热力条件、温度层结等物理量特征是否存在差异?文中利用 2018 年 1 月 23—31 日 NCEP 分析资料、高空观测资料(分辨率为 12 h)和地面观测资料(分辨率为 1 h),对此次天气过程进行诊断分析,以期为今后的雨雪相态的预报提供参考。

1 天气实况

2018 年 1 月 24—31 日,江西省中北部出现了一次严重的雨雪冰冻天气。24 日降雨开始,25 日 08 时(BT,下同)赣北沿江出现冻雨,20 时赣北北部转降雪。26 日冰冻天气向南发展,14 时赣北 34 站出现降雪,9 站出现雨夹雪,雪线位于浙赣铁路沿线。随后西南气流加强,降水相态改变,27 日 14 时南昌及其以北地区转冻雨(或雨夹雪),其他地区转为雨;20 时自北向南再次转为降雪,28 日 14 时雪线南压至江西省中部。整个雨雪天气过程中,全省先后有 83 站出现降雪,其中 40 站出现积雪,6 站积雪深度超过 5 cm(集中在九江地区),以九江市柴桑区 10 cm 积雪深度为最大;40 站出现电线结冰,最大电线结冰直径达 65 mm。由于气温低,积雪和覆冰持续时间长达 7 d(25—31 日),给交通、电力、林业等

造成严重影响。此次过程降水时段集中在1月24—28日,其间出现雨雪相态频繁转换。以九江为例,23日降雨,25日冻雨,26日降雪,27日雪转冻雨(其间伴短时冰粒或雨夹雪),28日再次转为降雪天气(表1),给降水相态预报带来难度。

表1 2018年1月24—28日九江地区雨雪冰冻天气过程概况

Table 1 Overview of the process of rain, snow and freezing weather from 24 to 28 Jan, 2018

时段	主要降水相态	雨(雪)量/mm	08时雪深/cm
24日	白天 雨	3.9	0.0
	夜间 冻雨	2.7	0.0
25日	白天 冻雨	5.4	0.0
	夜间 雪	4.2	0.0
26日	白天 雪	5.8	2.0
	夜间 雪转雨夹雪	8.1	0.0
27日	白天 冻雨	9.7	7.0
	夜间 雪	3.7	0.0
28日	白天 雪	0.4	10.0

2 环流背景分析

2018年1月24—28日雨雪冰冻期间,500 hPa

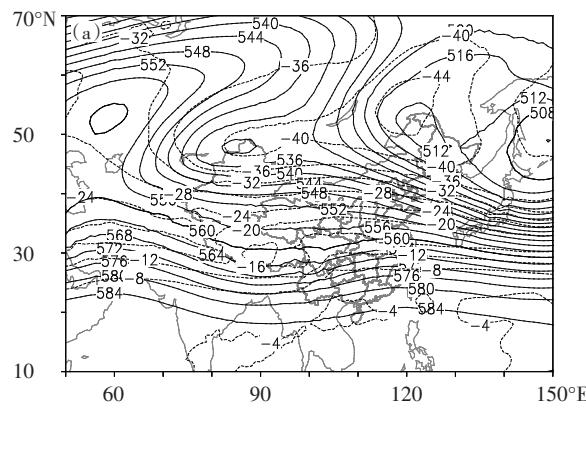
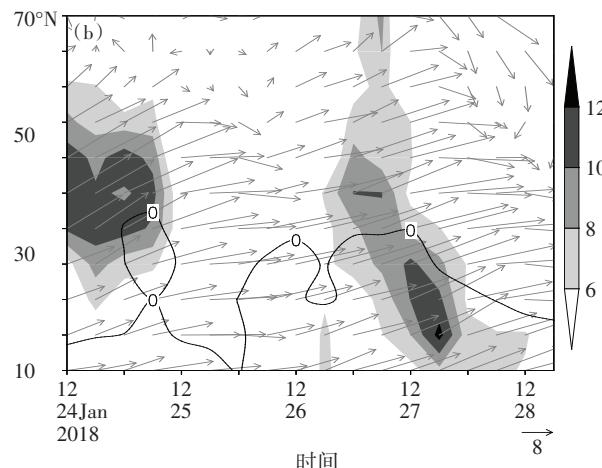


图1 2018年1月25日08时500 hPa高度场(实线,单位:dagpm)、温度场(虚线,单位:℃)(a)和2018年1月24—28日700 hPa高度层风(矢箭)、偏南风风速(阴影)沿116°E经线的时间—纬向垂直剖面(b,单位:m/s)

Fig. 1 500 hPa height (unit: dagpm) and temperature (unit: °C) field (a) at 08:00 BT on 25 Jan, 2018, 700 hPa wind (arrow) and southerly wind speed (shaded) zonal-temporal vertical section along 116° E on 24—28 Jan, 2018 (b; unit: m/s)

1月24日08时—28日08时,850 hPa高度层上的一条东北—西南向切变线在(108°—120°E, 26°—31°N)范围内南北摆动。700 hPa高度层西南急流存在明显脉动。24日20时—25日08时

高度层环流场上,中高纬度乌拉尔山以东阻塞高压自24日建立后,高压脊向东发展,26日形成东西向暖脊,暖中心值为-23 ℃;贝加尔湖东西两侧为冷低压,其西侧低压稳定少动,来自西伯利亚冷空气在此堆积,成为冷空气源地。横槽位于蒙古国境内,东西横跨60个经度,其南侧西风带上最大风速达40 m/s。该阻塞系统的稳定维持,使得我国大部分地区长时间受地面冷高压控制。孟加拉湾南支槽稳定在90°E,华南—江南北部为密集南支锋区。杨贵名等(2008)研究表明,南支锋区的建立、维持与持续的低温雨雪冰冻天气密切相关,强锋区使副热带地区长时间维持低温天气,也使得冷暖气流在长江流域长期处于交汇状态。锋区上偏南气流输送充足的水汽,与南下的冷空气在江淮至长江中下游地区交汇,江西省北部处在冷暖空气交汇带的南缘。25日晚和27日晚,西风带2个短波槽东移携带冷空气南下,促使赣北地区由降雨向降雪转变(图1a)。



700 hPa高度层湖南北部至湖北、安徽南部有风速大值区,中心风速为26 m/s。25日20时由于高空短波槽东移,大风速区南移,范围减小,汉口站由24 m/s西南风转为18 m/s偏西风。850 hPa高度层

切变线南压至江西省中部,温度锋区南移,此时九江由冻雨转为降雪。27日08时西南气流再度加强,700 hPa高度层急流核随西南风大值区北推至长江沿线,轴上最大风速为32 m/s,暖式切变北抬至31°N。由于27日晚第二个短波槽东移,急流核东移南压减弱,其间降雨相态发生了两次变化。图1b可以更加清楚地描述西南急流的变化,25日和27日冻雨阶段,九江地区上空700 hPa高度层偏南风明显加大,风速超过12 m/s。偏南风的加大使得700 hPa高度层附近的气温上升,形成有利于出现冻雨的融化层。

3 相态转换成因分析

3.1 冷暖平流

对于雨雪相态的研究,很多专家关注对流层中低层的温度状态(许爱华等,2006;姚蓉等,2014b;郑婧等,2014;余金龙等,2017),而杨舒楠等(2017)研究指出,温度平流对雨雪相态的转变有很重要的影响,降水相态取决于整个对流层低层(850—950 hPa)的水平温度平流。1月24日20时对流层低层气温已经接近雨雪相态转变的临界温度,赣北沿江地面气温触及冰点,天气现象为降雨,是否发生相态改变,要看冷暖平流的作用。分析2018年1月24—29日(114°—118°E, 27°—30°N)区域平均温度平流随时间的垂直剖面(图2),发现24—28日中低层温度平流发生了两次显著变化,不同相态降水,冷暖平流的强度、厚度有所不同。24日至25日白天850 hPa高度层以上为深厚暖平流,暖平流中心在

600 hPa高度层以上,而850—900 hPa有浅薄冷平流,冷平流层内盛行偏东风,偏东风将冷空气带到长江中下游地区,造成底层温度下降。当近地面层气温降至0℃以下,天气现象第一次转为冻雨。25日夜间西南气流强度减弱,暖平流减弱,高空小槽东移携带冷空气南下,冷平流增厚,600 hPa高度层以下被冷平流占据。700—850 hPa赣北西部有强冷平流中心东移(图略),850 hPa高度层南昌站温度从08时6℃降至20时-4℃,冷平流降温作用显著,对流层中低层0℃以上融化层消失,第一次冻雨转为降雪。26日夜间,700 hPa高度层转为西南风,850 hPa高度层为东南风,对流层中层以及850 hPa高度层以下暖平流均得到发展,冷平流层厚度变薄,仅维持在850—800 hPa,850 hPa和700 hPa高度层温度均上升至1℃,南昌地面天气现象为冻雨,而九江地区为雨夹雪,并非冻雨。27日08时之后,在暖平流持续作用下,融化层内温度继续上升达2℃,天气现象由雨夹雪转为冻雨。27日夜间,高空小槽和中低层切变东移南压,上下一致冷平流,整层几乎被冷平流占据,冻雨再次转为降雪。

综上所述,当近地面气温达到或接近雨雪相态转变的临界温度,冷暖平流对中低层大气的降温与升温至关重要,冷平流的降温作用剧烈,可以使大气温度短时间内迅速下降,转为固态降水,而暖平流的升温作用需要持续输送,只有当暖层温度足够高时,固态降水才可能转为液态降水。

3.2 垂直风切变

从垂直风切变特征来看,24—28日风向具有顺时针方向旋转特征,925 hPa高度层以下边界层为偏北风,700 hPa高度层为西南风(偏西风),垂直风切变主要发生在边界层1000 hPa至对流层中下层700 hPa之间,由6—8 m/s的偏北风转为24—30 m/s的西南风,旋转夹角接近270°。强烈的垂直风切变加剧上升运动,为冻雨和暴雪的产生提供动力条件。但冻雨阶段和降雪阶段,垂直风切变的强度和高度存在较大差异,冻雨时最强风切变出现在925—850 hPa高度层,而降雪时最强风切变出现在850—700 hPa高度层。

为了更好地对比冻雨和暴雪阶段垂直风切变强弱差异,分别将500 hPa、700 hPa和850 hPa高度层的风场作矢量差得到 $UV_{500-850}$ 、 $UV_{700-850}$,用以分析赣北上空风垂直切变等值线分布(图略)。在28°—31°N始终有一条近似东西向风切变,降水相态随着切变线位置的南北摆动而改变。冻雨转降雪

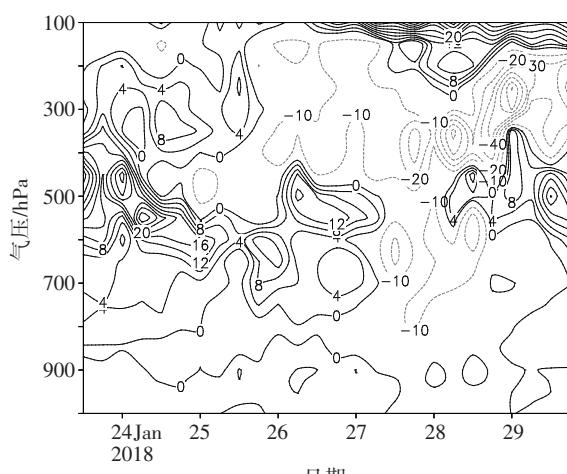


图2 2018年1月24—29日(114°—118°E, 27°—30°N)区域平均温度平流时间—高度的垂直剖面(单位:K/h)

Fig. 2 Regional (114°—118°E, 27°—30°N) average height-temporal vertical section of temperature advection field during 24—29 Jan, 2018 (unit: K/h)

前,500 hPa 高度层由西风转为槽前西南气流,垂直风切变有一个增大的过程,等值线密集。25 日 20 时 $UV_{500-850}$ 风速切变最强,中心值达 46 m/s,此时也是赣北降雪强度最强的时段。27 日 20 时第二次冻雨转降雪时, $UV_{500-850}$ 为 30 m/s,此时在湖南北部仍有 40 m/s 强切变中心沿 30°N 向东移动,随着风切变高值中心移近,降雪再次发展加强。虽然在冻雨阶段风的垂直切变特征也非常明显,但在强度上弱于暴雪阶段。而 $UV_{700-850}$ 无论是强度还是位置,都没有 $UV_{500-850}$ 变化大,只是在整个雨雪过程快结束时才表现出显著减弱和南移的特征。

3.3 散 度

分析 2018 年 1 月 24 日—29 日 ($114^{\circ}-118^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$) 区域平均散度随时间变化的垂直剖面(图 3)发现,24—25 日、27—28 日赣北上空存在较明显的低层辐合、高层辐散,辐合中心分别位于 850 hPa 和 700 hPa 高度层,中心强度为 $-1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-1.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,高层辐散区分别位于 650 hPa 和 500 hPa 高度层,中心强度为 $8.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这种低层辐合、高层辐散形势有利于增强大气的垂直运动,第二次上升运动强于前一次。对应于地面降水,27—28 日雨(雪)量较 24—25 日大。28 日降雪期间低层辐合、高层辐散强度远强于 27 日冻雨期间,强度达峰值时(28 日 14 时)地面降雪范围最广。26 日 850 hPa 高度层以下有浅薄的弱辐散层,这是由于西南气流减弱,切变线南压,底层为冷垫所致。

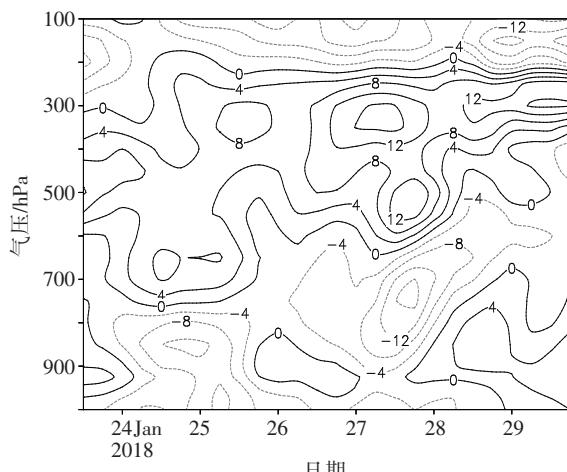


图 3 2018 年 1 月 24—29 日 ($114^{\circ}-118^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$) 区域平均散度的高度—时间剖面(单位: 10^{-6} s^{-1})

Fig. 3 Height-temporal vertical section of ($114^{\circ}-118^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$) regional average divergence during 24–29 Jan, 2018 (unit: 10^{-6} s^{-1})

3.4 垂直速度

杜小玲等(2014)研究认为准静止锋上不同相态降水过程的上升运动伸展高度有较大差异,冻雨过程表现为锋区附近存在浅薄的上升运动区,降雪过程则表现为锋上存在深厚的垂直上升运动区。这些差异是针对冻雨过程和降雪过程对比的结果,而 24—28 日的雨雪过程是同一过程中出现不同的降水相态,其上升运动是否也表现出同样的特点?24—28 日出现两个较强上升运动大值区(图 4),其中心强度和伸展高度各不相同。第一次上升运动自 24 日夜间开始,伴随西南气流加强,辐合抬升也在增强,25 日夜间达到最大,中心在 750 hPa 高度层附近,其值为 -0.2 Pa/s ,此时九江地区出现降雪。第二次上升运动自 27 日夜间增强,28 日达到峰值,最大中心在 650 hPa 高度层附近,极值达 -0.4 Pa/s ,上升运动最强时降雪范围覆盖江西省中北部。由此推断,降雪时上升运动比冻雨时强,垂直速度越强,强中心高度越高,降雪范围越广。

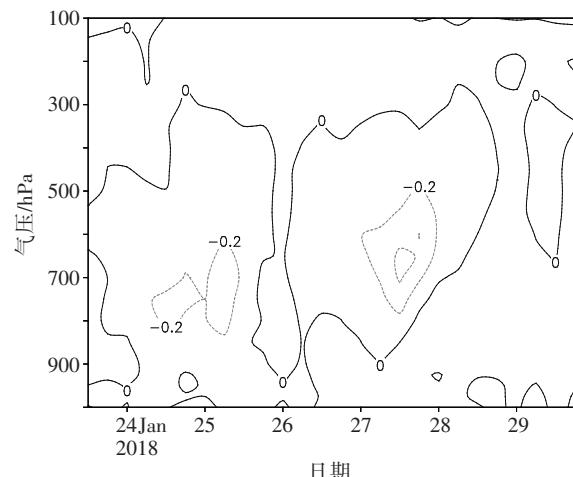


图 4 2018 年 1 月 24—29 日 ($114^{\circ}-118^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$) 区域平均垂直速度的时间—高度垂直剖面(单位: Pa/s)

Fig. 4 Height-temporal vertical section of ($114^{\circ}-118^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$) regional average vertical velocity during 24–29 Jan, 2018 (unit: Pa/s)

3.5 垂直温度层结和地面气温变化特征

3.5.1 垂直温度层结

由于冻雨是因地表温度低而凝固在裸露的物体上,它在下落过程中是液态的,它的发生需满足中低层存在 0°C 以上的逆温暖层,而降雪是固态水的沉降,在下落过程中不经过 0°C 以上的暖层。气象学者对冻雨和降雪的过程从不同角度给出了温度因子的预报判据(许爱华等,2006;漆梁波和张瑛,2012;

廖晓农等,2013),文中重点讨论短时间内相态转换过程中温度层结的特殊变化。

25日08时边界层内东北风携带冷空气迫使温度下降,925 hPa高度层出现一条东北—西南向冷舌,850—700 hPa高度层暖舌伸至长江沿线,850 hPa高度层南昌站与汉口站温差达12℃,水平温度梯度大。此时安庆上空存在逆温层但无暖层,长江以北地面天气现象为降雪;南昌上空存在逆温层和暖层,南昌地面气温1.3℃,天气现象为降雨;赣北北部地面气温0℃左右,沿江降至0℃以下,具备产生冻雨条件。20时850 hPa切变线南压,南昌站由18 m/s南风转为4 m/s北风,12 h气温骤降10℃。冷舌向南伸展,冷层厚度增加,0℃以下厚度接近2 km,925—850 hPa强逆温层破坏,仅在831—798 hPa存在逆温,700 hPa和850 hPa高度层0℃线南压至赣中。分析2018年1月24日—28日九江地区温度时间—高度垂直剖面(图5)可见,赣北北部暖层消失,温度的降低大大缩减了融化层的厚度,减小了冰雪在下落过程中被融化的可能性。25日晚上赣北北部冻雨转雪,降雪区主要位于九江地区。第一次降雪期间,九江地区上空900—700 hPa高度层存在逆温,且整层温度均在0℃以下,为冷性逆温结构。而南昌探空资料(图略)显示,25日20时—26日20时,其上空始终有暖层存在,

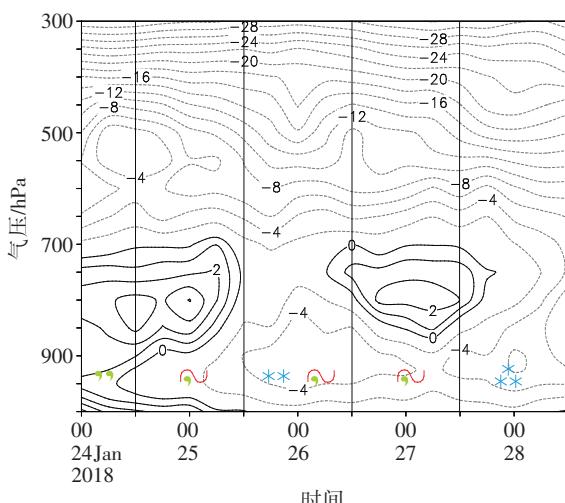


图5 2018年1月24日00:00—28日12:00九江地区温度的时间—高度垂直剖面(单位:℃;竖线为相态分界线)

Fig. 5 Height-temporal vertical section of temperature in Jiujiang during 00:00 BT 24 – 12:00 BT 28 Jan, 2018 (unit: °C; vertical line represents the time of phase transformation)

只是暖层厚度和逆温顶温度略有下降。因此,26日赣北南部22个测站出现飘雪,却无明显积雪。

26日夜间西南气流强度加强,对流层中低层开始升温。27日08时700 hPa高度层0℃线越过30°N,安庆站上空重新出现暖性逆温层,暖层位于787—700 hPa,逆温顶温度为2℃,位于741 hPa高度层,地面雪线北抬至沿江一线。27日14时暖层厚度最厚,位于875—700 hPa高度层之间,九江地区上空800 hPa高度层附近温度>2℃,此时南昌及其以北以冻雨为主。随着冷空气补充南下,28日08时南昌上空暖性逆温转为冷性逆温,融化层消失,江西省中北部出现降雪。值得注意的是,26日14时,对流层中低层温度呈现缓慢上升态势,直至27日14时,800—750 hPa高度层附近温度升至2℃,地面气温为-2.0—0.2℃,赣北才转为冻雨。综上所述,暖层消失,冻雨即可转为降雪;而雪转雨的相态变化要落后于暖层的形成,只有当暖层达到一定厚度,且暖层内温度足够高时,才可转为降雨。

3.5.2 地面气温变化

余金龙等(2017)研究认为,气温能用于区分降水相态,从地面到500 hPa区分能力逐渐降低;郑婧等(2014)研究发现,江西冻雨发生时最低气温0℃以下的概率为94%(0.5℃以下的概率为99.5%),平均气温1℃以下的概率为92%,地面气温越低,越有利于冻雨的形成。地面气温是降水相态形成的一个重要因素。此次雨雪过程中,降水相态在时间和空间上均发生了变化,不同站点之间降水相态演变时间有先有后。本节选用九江、南昌、庐山等不同纬度和高度测站的地面气温,分析其与降水相态之间的关系。24日20时九江气温为-0.2℃,天气现象为降雨;25日05时气温下降至-0.6℃,开始出现冻雨,冻雨阶段最低气温为-0.9℃,平均气温为-0.5℃。25日夜间冻雨转降雪时,九江气温为-1℃以下,降雪阶段最低气温和平均气温均在-1℃以下。南昌所地理位置偏南,气温较九江偏高1.5℃左右,25日最低气温和平均气温分别为0.5℃和1.2℃,未达到郑婧等(2014)冻雨统计阈值,实况为降雨;26—28日最低气温为-0.8—-0.7℃,平均气温在-0.3—-0.2℃之间波动,实况为雨雪共存。分析24—28日九江、南昌、庐山地区地面气温随时间演变(图6)发现,九江地区出现雨转冻雨以及冻雨转雪时,地面气温下降明显;雪转冻雨时,地面气温略有上升,但仍在-1℃以下。庐山站26—27日气温从-8.9℃升至-2.8℃,上

升了 6.1°C , 预示着低层大气持续升温, 这一升温现象对 27 日赣北地区第二次出现冻雨天气具有指示意义。

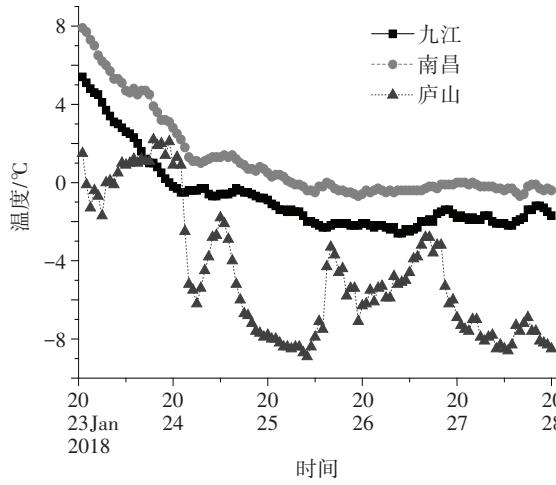


图 6 2018 年 1 月 24—28 日九江、南昌、庐山地区地面气温随时间演变

Fig. 6 Temperature variation from 08:00 BT 24 to 20:00 BT 28 Jan, 2018 in Jiujiang, Nanchang and Lushan regions

4 小结与讨论

2018年初江西中北部地区出现严重的雨雪冰冻灾害天气, 雨淞和积雪持续时间长, 其间出现罕见雨雪相态的多次转换, 赣北先后经历了雨、冻雨、降雪、冻雨、降雪等复杂过程, 实属罕见。文中对此次过程的天气实况、环流背景和雨雪相态转换成因进行分析, 得到以下结论:

1) 在有利的环流背景形势下, 西风带小槽发展东移并携带冷空气南下, 破坏 850 hPa 高度层附近的暖性逆温层, 是冻雨转雪的重要因素; 700 hPa 高度层上西南急流的脉动、偏南风增强和中低层切变线北抬为雪转冻雨提供了动力和热力条件。

2) 整个雨雪过程期间, 均有较强垂直风切变, 但在强度和高度上存在差异。降雪阶段垂直风切变更强, 高度更高。冻雨发生时, 最强风切变出现在 925—850 hPa 高度层, 降雪发生时, 最强风切变出现在 850—700 hPa 高度层。两次冻雨转降雪阶段, 上升运动均有所加大, 降雪时低层辐合、高层辐散强度较冻雨时强。

3) 当近地面气温接近 0.5°C 时, 850 hPa 高度层冷暖平流对中低层大气的降温与升温至关重要, 冷平流的降温作用剧烈, 使大气温度短时间内迅速

下降, 0°C 以下大气层厚度接近 2 km, 有利于固态降水的发生; 而升温作用需要持续的暖平流输送。对流层中低层暖层消失, 冻雨即可转降雪; 固态降水转液态降水时, 相态的转变落后于暖性逆温层的形成, 雪转冻雨时 850 hPa 和 700 hPa 高度层温度升至 1°C , 暖层内最高温度达 2°C 。

4) 此次过程中, 九江地区出现雨转冻雨以及冻雨转雪时, 地面气温下降明显。雨转冻雨时, 气温 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$; 冻雨转降雪时, 气温 $\leq -1^{\circ}\text{C}$ 。冻雨阶段最低气温 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$, 平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$; 降雪阶段最低气温 $\leq -1^{\circ}\text{C}$, 平均气温 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ 。雪转冻雨时, 地面气温略有上升, 但仍在 -1°C 以下。高山站气温持续上升, 对赣北降雪转冻雨天气有指示意义。

降水相态变化过程非常复杂, 文中仅就一次雨雪天气过程进行分析, 所得结论有待于今后更多个例中检验。

参考文献(References)

- 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 Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sinica, 66(5):808-825.(in Chinese)
- 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[J]. 大气科学, 38(1):61-72. Du X L, Gao S T, Peng F. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou[J]. Chinese J Atmos Sci, 38(1):61-72.(in Chinese)
- 李才媛, 王海燕, 郭英莲, 等. 2009. 2009年初湖北省持续雨雪过程分析[J]. 暴雨灾害, 28(4):328-332. Li C Y, Wang H Y, Guo Y L, et al. 2009. Analysis of the continuous rain and snow process in Hubei province at the beginning of 2009[J]. Torrential Rain Disaster, 28(4):328-332.(in Chinese)
- 李丽, 徐健, 冯涛, 等. 2017. 湖南地区雨雪冰冻过程中的高空急流演变特征[J]. 气象与减灾研究, 40(2):132-140. Li L, Xu X J, Feng T, et al. 2017. Effects of the upper-level jet stream on the freezing disaster event in Hunan[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 40(2):132-140.(in Chinese)
- 廖晓农, 张琳娜, 何娜, 等. 2013. 2012 年 3 月 17 日北京降水相态转变的机制讨论[J]. 气象, 39(1):28-38. Liao X N, Zhang L N, He N, et al. 2013. Discussion on the mechanism of precipitation phase transition in Beijing on March 17, 2012[J]. Meteor Mon, 39(1):28-38.(in Chinese)
- 刘熙明, 许爱华. 2008. 降雪与冻雨天气研究回顾[J]. 气象与减灾研究, 31(4):59-64. Liu X M, Xu A H. 2008. Review on snow event and freezing rain[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(4):59-64.(in Chinese)
- 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[J]. 气象, 38(1):96-102. Qi L B, Zhang Y. 2012. Study on

- the identification criterion of winter precipitation phase in eastern China[J]. Meteor Mon,38(1):96-102.(in Chinese)
- 孙燕,尹东屏,顾沛澍,等.2014.华东地区冬季不同降水相态的时空变化特征[J].地理科学,34(3):370-376. Sun Y, Yin D P, Gu P S, et al. 2014. Temporal and spatial variations of different precipitation phases in winter in East China[J]. Geogr Sci, 34 (3):370-376.(in Chinese)
- 魏慧娟,陈松,赵龙.2010.一次冻雨转暴雪天气的多普勒天气雷达探测分析[J].大气科学研究与应用,(1):97-103. Wei H J, Chen S, Zhao L. 2010. Doppler weather radar detection and analysis of a frozen rain-to-snowstorm[J]. Atmos Sci Res Appl, (1):97-103.(in Chinese)
- 许爱华,刘波,郑婧,等.2011.江西冻雨气候特征分析及频发地带成因探讨[J].暴雨灾害,30(1):6-10. Xu A H, Liu B, Zheng J, et al. 2011. Analysis of climatic characteristics of frozen rain in Jiangxi province and discussion on causes of frequent zones[J]. Torrential Rain Disaster,30(1):6-10.(in Chinese)
- 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[J].气象,32(3):49-55. Xu A H, Qiao L, Zhan F X, et al. 2006. Diagnostic analysis of a cold wave weather process in March 2005[J]. Meteor Mon,32(3):49-55.(in Chinese)
- 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 G M, Kong Q, Mao D Y, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008[J]. Acta Meteor Sinica,66(5):836-849.(in Chinese)
- 杨舒楠,徐珺,何立富,等.2017.低层温度平流对华北雨雪天气过程的降水相态雨雪分析[J].气象,43(6):665-674. Yang S N, Xu Y, He L F, et al. 2017. Analysis of precipitation phases of rain and snow in the process of rain and snow in North China by low-level temperature advection[J]. Meteor Mon,43(6):665-674.(in Chinese)
- 姚蓉,黎祖贤,许霖,等.2014a.湖南冻雨预报关键技术指标及应用[J].干旱气象,32(3):366-372. Yao R, Li Z X, Xu L, et al. 2014a. Key technical index and application of freezing rain forecast in Hunan[J]. Drought weather,32(3):366-372.(in Chinese)
- 姚蓉,唐佳,唐明晖,等.2014b.“14·02”湖南三次雨雪过程对比分析[J].气象,40(12):1500-1506. Yao R, Tang J, Tang M H, et al. 2014b. “14·02” comparative analysis of three rain and snow processes in Hunan[J]. Meteor Mon,40(12):1500-1506. (in Chinese)
- 余金龙,朱红芳,邱学兴,等.2017.安徽冬季地面降水相态的判别研究[J].气象,43(9):1052-1063. Yu J L, Zhu H F, Qiu X X, et al. 2017. Discriminant study on the phase behavior of winter surface precipitation in Anhui[J]. Meteor Mon,43(9):1052-1063.(in Chinese)
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理与方法(第四版)[M].北京:气象出版社:313-319. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. The principle and method of synoptic meteorology (4th ed)[M]. Beijing: Meteorological Press: 313-319. (in Chinese)
- 赵思雄,孙建华.2008.2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与尺度特征[J].气候与环境研究,13(4):351-367. Zhao S X, Sun J H. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January February 2008[J]. Clim Environ Res,13(4):351-367.(in Chinese)
- 郑婧,许爱华,许彬.2008.2008年江西省冻雨和暴雪过程对比分析[J].气象与减灾研究,31(2):29-35. Zheng J, Xu A H, Xu B. 2008. Contrastive analysis of the freezing rain and heavy snow processes in 2008[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(2): 29-35.(in Chinese)
- 郑婧,许爱华,许彬.2014.江西省冻雨垂直温度层结分析及预报[J].气象与环境学报,30(4):49-56. Zheng J, Xu A H, Xu B. 2014. Analysis of vertical temperature stratification of freezing rain and its prediction in Jiangxi province[J]. J Meteor Environ, 30 (4):49-56.(in Chinese)