王传辉,姚叶青,苗开超,等,2020. 安徽省南部两次冻雨天气过程对比分析[J]. 气象,46(2):169-178. Wang C H, Yao Y Q, Miao K C, et al, 2020. Contrastive analysis of two freezing rain processes in southern Anhui Province[J]. Meteor Mon, 46(2): 169-178(in Chinese).

安徽省南部两次冻雨天气过程对比分析*

王传辉 姚叶青 苗开超 姚镇海 刘承晓 周建平
安徽省公共气象服务中心,合肥 230031

提 要: 基于逐时气象观测资料和一日4次ERA-Interim再分析资料对2018年1月4—7日(第一次过程)和24—27日(第二次过程)安徽省南部(简称皖南)两次冻雨过程中冻雨分布、时间演变及环流特征进行分析,结果表明:通过自动气象观测仪器的风速突然降为0 m·s^{-1}、风向固定不动,可大致推测出冻雨出现时间,比人工观测到冻雨出现时间早。两次冻雨天气均是在准静止锋天气下出现的,但导致冻雨形成的机制不同。第一次过程为典型的"冰相融化"机制,第二次过程为典型的"过冷暖雨"机制。东亚大陆近地面冷高压使两次冻雨天气中皖南处在东北气流之下,其带来的冷温度平流形成近地面到地面的冷垫,而750 hPa高度附近南支槽槽前暖湿气流带来暖温度平流是融化层或逆温层维持和发展的主要原因。当高空温度层结满足冻雨出现条件时,地面0℃线的位置会直接影响冻雨出现的范围。

关键词: 冻雨,天气过程,环流特征
中图分类号: P457,P458 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.003

Contrastive Analysis of Two Freezing Rain Processes in Southern Anhui Province

WANG Chuanhui YAO Yeqing MIAO Kaichao YAO Zhenhai
LIU Chengxiao ZHOU Jianping
Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031

Abstract: The freezing rain distribution, time evolution and circulation characteristics of the two freezing rain processes that occurred in southern Anhui Province from 4 to 7, and from 24 to 27 in January 2018 were analyzed based on the daily observation data and ERA-Interim reanalysis data collected four times a day. The results showed that the onset time of the freezing rain can be estimated approximately by the sudden drop of wind speed to 0 m·s^{-1} and the fixed wind direction from the automatic meteorological stations, which is earlier than human observation. The two processes appeared in the condition of quasi-static weather, but the mechanism for their formation were different. The process during 4—7 January 2018 was of typical "ice melting" mechanism, while the process during 24—27 belonged to typical "super-cooled warm rain" mechanism. The surface cold high in the East Asian Continent made the south of Anhui controlled by the northeastern wind during the two freezing rain processes. The cold advection of the northeastern wind developed a cold cushion from the near-surface to the ground, and the warm advection from the warm wet air in front of the southern branch trough near 750 hPa was the main cause for the maintenance and development of the melting or inversion layer. So, when vertical distribution of high-altitude

* 国家自然科学基金项目(41805060)资助
2018年7月22日收稿; 2019年12月30日收修定稿
第一作者:王传辉,主要从事公共气象服务. Email: wang_chh@aliyun.com
通讯作者:苗开超,主要从事软件系统设计和专业气象服务应用研究. Email: mkc2005@126.com

temperature satisfies the condition for freezing rain, the surface location of 0℃ directly affects the range of freezing rain.

Key words: freezing rain, weather process, circulation characteristics

引 言

冻雨是中国冬季主要灾害性天气之一。冻雨也叫雨凇,是一种由过冷水滴组成、与低于0℃的物体碰撞后立即冻结的降水,能形成毛玻璃状或透明的坚硬冰层。它在地物上冻结并积累后能压断电线,在风激励下可产生电线舞动,造成供电和通信中断,严重的冻雨会压塌房屋、损坏树木、冻死农作物和蔬菜(Rauber et al, 2001)。同时,因其具有外表光滑的坚硬冰层,交通运输、航空等方面也会因其受到巨大的损失(Bernstein, 2000;刘朝茹等,2015)。2008年初,中国南方受到冰冻雨雪天气的袭击,给交通、电力、林业和农业等方面造成了严重的影响(Shi et al, 2010)。

鉴于冻雨带来灾害的严重性,近年来相关学者在冻雨变化规律和形成原因等方面进行了积极的探索。一般认为冻雨形成主要有"过冷暖雨"和"融化过程"两种机制。基于不同历史个例样本统计结果显示"融化过程"样本占到总样本的25%～30%(Rauber et al, 2000)。早在1985年,Stewart(1985)通过总结美国东南部冻雨和降雪过程温度层结发现,暖锋爬升的暖空气导致逆温层中温度不断升高,在逆温层顶部出现大于0℃的融化层,落进暖层的雪花被融化,液滴在落到低层冷层中冷却处于过冷却状态,在低于0℃的地表上将很有可能观测到冻雨。在以往的研究中这种冻雨形成理论被普遍认可,称为"融化过程"或"冰相融化"机制(Frick and Wernli, 2012;宗志平等,2013;陶玥等,2013)。"冰相融化"机制中,融化层厚度、地形等因素起到重要作用(Zerr, 1997;Robbins and Cortinas, 2002)。对不同冻雨个例的分析后,学者们发现冰相融化机制不能解决所有的问题。很多观测和分析表明,有相当比例的冻雨天气过程并不存在中层暖层,"过冷暖雨"机制被越来越多的证实并认可(Bernstein, 2000;李登文等,2009)。2008年初中国南方数省(区、市)在短时间内大量过冷却水撞冻形成的雨凇,导致了1949年以来最严重的冰冻灾害(吴兑,2008;李登文等,2009;马中元等,2011)。吴兑(2008)对此次冰冻过程分析后认为,只要近地层有丰富的过冷却水,而缺乏冻结核也可以形成冻雨。李登文等(2009;2011)对此次冰冻灾害期间贵州省区域内相关资料分析,发现贵州区域内的冻雨两种形成机制均有出现。欧建军等(2011)认为中国冻雨发生主要以"过冷暖雨"机制为主。两种冻雨发生机制在中国冻雨过程中均有出现(漆梁波和张瑛,2012;刘朝茹等,2015)。中国30°N以北的地区发生冻雨主要是"冰相机制",30°N以南地区两种冻雨发生机制都存在(欧建军等,2011)。两种机制下产生的冻雨过程主要受温度层结的影响,但同时也受湿度、风速等气象要素的作用(Thériault, 2014;Chen et al, 2014)。

安徽省地处长江中下游地区,全省大部地区年平均冻雨日数不足1 d(王遵娅,2011)。2018年1月4—7日和24—27日安徽省南部先后出现两次连续冻雨天气(以下将2018年1月4—7日天气过程简称为第一次过程,将24—27日天气过程简称为第二次过程),其中第二次过程出现的冻雨范围之广,实属罕见。本研究从两次冻雨过程的特点出发,分析冻雨发生的时间演变、环流特征、锋面特点、温湿层结等特征,讨论冻雨出现的原因和机制,为安徽冬季冻雨预报提供技术参考。

1 资料介绍

研究所用资料包括:安徽省81个国家站2018年1月逐小时2 m气温、降水量、冻雨天气现象、10 m风速等气象要素,同时选取两次冻雨中心区域站点为代表站,分别为九华山站(海拔高度:647.3 m)和安庆站(海拔高度:62.0 m)(皖南地形及代表站位置见图1);需要说明的是,黄山光明顶站由于受地形等因素的影响天气具有特殊性(吴有训等,2000),此次冻雨天气对比分析中剔除了该站;欧洲中期天气预报中心第三代再分析资料(ERA-Interim)的全球范围一日4次0.125°×0.125°再分析温度、位势高度、U、V、垂直速度、比湿、相对湿度、液体含水量和固态含水量等资料;安庆站逐12 h温度、露点、风向、风速及气压探空数据;美国地质调查局地球资源观测卫星数据中心提供的空间分辨率为

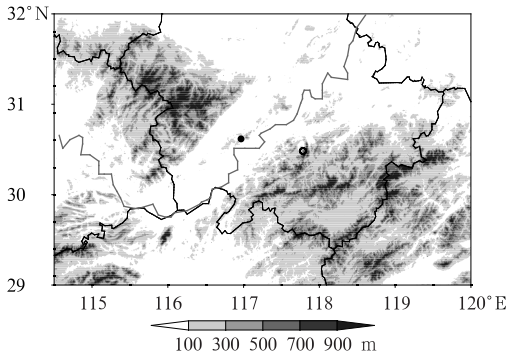

图 1　安徽省南部及周边地形和代表站
（阴影：海拔高度，●为安庆站，
○为九华山站）

Fig. 1　The surrounding terrain and representative stations in southern Anhui Province
(shaded: elevation, ●: Anqing Station, ○: Mount Jiuhua Station)

30″×30″的全球数字高程模型海拔高度数据（http://eros.usgs.gov/elevation-products）。

2　两次降水过程实况对比

为分析两次降水过程特点和冻雨出现区域，图 2 给出了两次过程中安徽省南部逐日降水量和冻雨出现位置分布。由图可见，在第一次过程主要降水时段集中在 3—4 日（图 2a 和 2c），第二次过程主要降水时段集中在 25 日和 27 日（图 2f 和 2j）。从冻雨出现站点数量及分布情况看，第一次过程九华山站在 4—7 日均观测到冻雨，4 日（图 2c），安徽省南部海拔高度较高的九华山、天柱山和岳西站（海拔高度分别为 647.3、968.2 和 434.2 m）出现冻雨。5 日只有九华山和天柱山出现冻雨（图 2e），6—7 日只有九华山站出现冻雨（图 2g 和 2i），此次过程与浙江省 2008 年初的冻雨分布相似，只出现在海拔较高的地区（康丽莉等，2017）。相比第一次过程，第二次过程冻雨范围较广，24—27 日每天有 6～12 个站点观测到冻雨，从冻雨站点的空间分布看，基本是以安庆站为中心分布的（图 2b，2d，2f，2h，2j）。

分别以九华山站和安庆站为例对两次过程做对比分析，图 3 给出了第一次过程九华山站和第二次过程安庆站逐小时 2 m 气温、降水量和 10 m 风速变化。从第一次过程九华山 3—7 日降水量演变看（图 3a），降水主要出现在 3—4 日，与图 2 相符，2 m 气温于 3 日 15 时由 0℃以上转为 0℃以下，一直维持到 7 日以后，10 m 风速主要处在 2.5 m·s^{-1}以下，并于 4 日 07 时首次出现缺测。经与观测人员联系得知，风速缺测是由于风速仪被冻住导致，表明在 07 时前已开始出现冻雨天气，人工观测记录冻雨出现时间为 4 日 08 时。第二次过程安庆站降水主要集中在 25 日和 27 日前后（图 3b），气温于 24 日 06 时由 0℃以上转为 0℃以下，之后在波动中不断下降，最低气温出现在 27 日 00 时前后，达到－3℃。相比于第一次降水过程，第二次过程安庆站风速明显偏大，最大风速出现在 25 日 05 时，达 8.9 m·s^{-1}。同样值得关注的是，此时风速仪在 24 日 14 时首次被冻结出现缺测，比人工观测得到冻雨出现时间早 3 h（人工观测出现冻雨时间为 24 日 17 时）。可见，由风速仪被冻结估测冻雨出现时间比人工观测时间明显提前，可通过风速仪的数据异常估算冻雨出现相对准确的时间。

3　两次过程天气形势分析

3.1　500 hPa 位势高度场和 700 hPa 风场

图 4 给出了两次冻雨过程出现期间 500 hPa 平均位势高度场空间分布，在中高纬地区蒙古西部均存在一个低压中心，40°N 附近的环流相对平直。相比于第一次过程，第二次过程在中国东北地区上空存在一个低压中心，在此低压的作用下，第二次过程华北地区偏北风分量更大。在低纬南亚地区均有南支槽的存在，安徽处在南支槽前，有利于皖南降水的发生（Wang et al, 2017）。从 700 hPa 平均风场上看（图略），两次过程中南支槽均位于 20°～25°N、90°E 附近，槽前的西南急流轴位于皖南和江西、浙江一带，第二次过程急流强度更强，两次过程中西南风风速均达到 18 m·s^{-1}以上，切变线分别位于两次降水过程的北界附近，有利于安徽境内降水的发生（杨玮等，2017）。

3.2　锋面特征

沿 116°～118°E 做温度和假相当位温纬向平均，从每次过程平均的温度和假相当位温经向-高度剖面图（图 5）上可以看出，两次过程温度层结分布相似，在 30°N 附近均存在逆温，其中第一次过程的逆温更为明显，逆温层相对较薄，且在九华山站附近

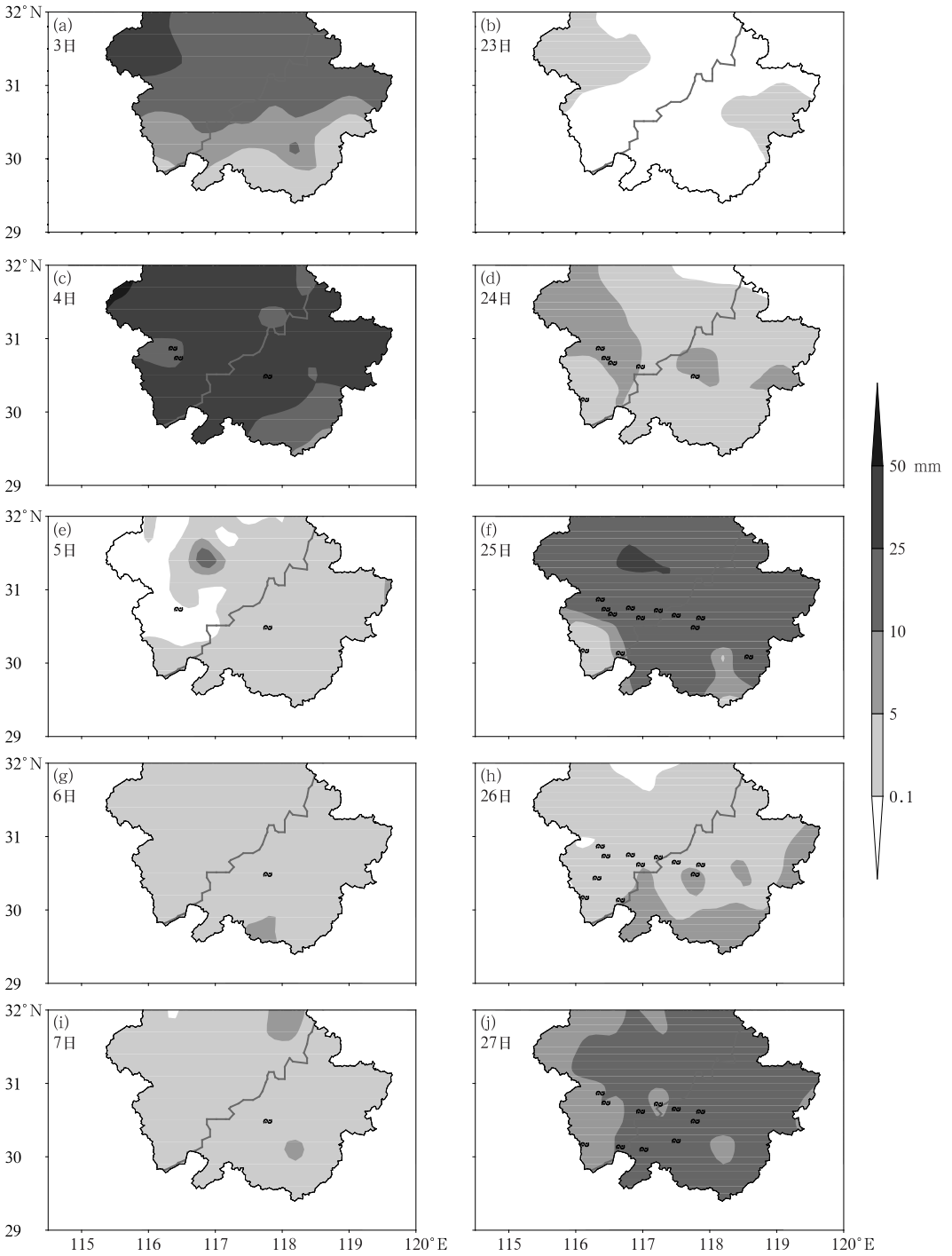

图2 2018年1月安徽省南部两次天气过程逐日降水量和冻雨出现站点分布

Fig. 2 Station distribution of daily precipitation and freezing rain during two weather processes in southern Anhui Province in January 2018

850～700 hPa存在明显的融化层，1000 hPa高度气温大于0℃(图5a)。安庆站虽然在950～700 hPa存在逆温，但各层温度均在0℃以下，1000 hPa气温在−3℃左右(图5b)。通过温度的垂直曲率和假相当位温的密集区(图5中浅色阴影)可以判断锋面位置在28°N附近，与此次降水过程的南界相近。通过各时次假相当位温经向-高度剖面分布可见(图略)，各时次假相当位温的密集区分布与平均情况下相似，南北略有摆动，属于典型准静止锋结构。

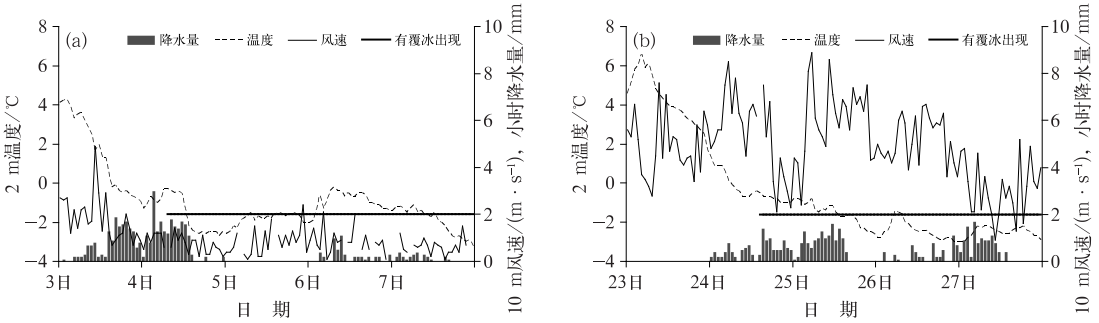

图 3　第一次天气过程九华山站(a)和第二次天气过程安庆站(b)2 m 温度、降水量和 10 m 风速逐小时变化

Fig. 3　Hourly change of 2 m temperature, precipitation and 10 m wind speed at Mount Jiuhua Station in the first weather process (a) and Anqing Station in the second weather process (b)

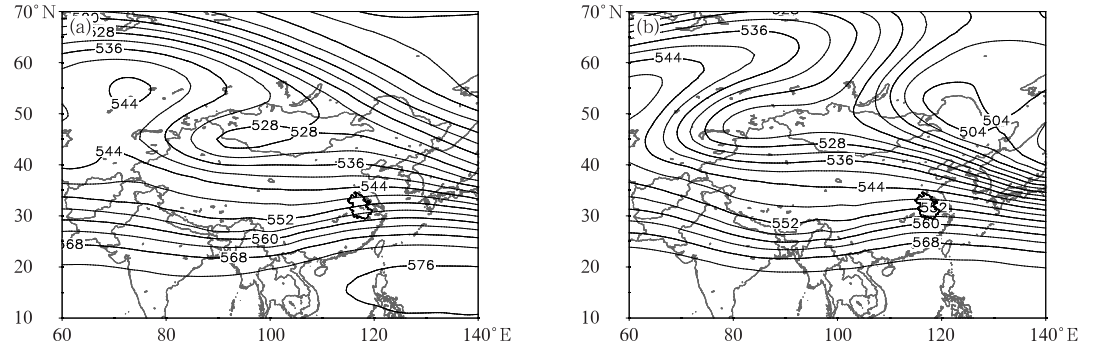

图 4　第一次(a)和第二次(b)天气过程 500 hPa 平均位势高度(单位：dagpm)

Fig. 4　Average potential height at 500 hPa during the first (a) and the second (b) weather processes (unit: dagpm)

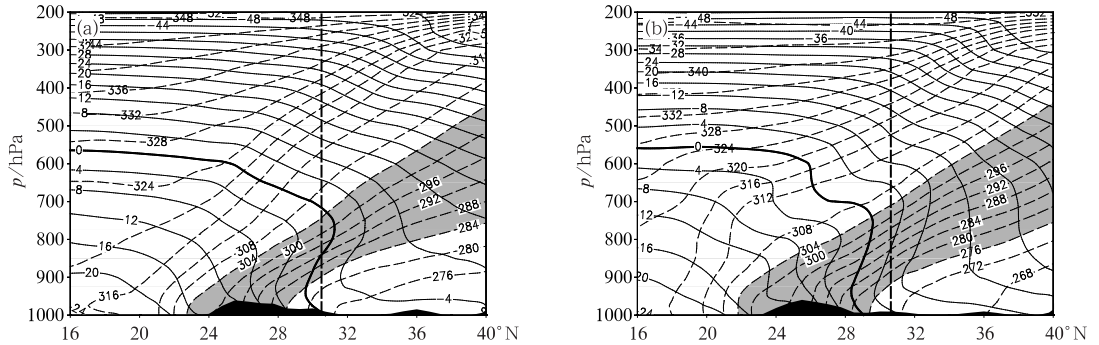

图 5　第一次(a)和第二次(b)天气过程 116°～118°E 平均温度、假相当位温经向-高度剖面

(垂直虚线：站点所在纬度；实线：温度，单位：℃；虚线：假相当位温，单位：K；黑色阴影：地形高度)

Fig. 5　116°－118°E meridian-height profile of average temperature and potential pseudo-equivalent temperature in the first (a) and the second (b) weather processes

(vertical dashed line: latitude of the station; solid line: temperature, unit: ℃; dashed line: potential pseudo-equivalent temperature, unit: K; black shadow: terrain height)

3.3 温度和湿度垂直分布

为探究两次冻雨天气过程温度、湿度的垂直结构特征，图6给出了九华山站和安庆站位置各高度上温度、相对湿度、垂直速度、液态含水量及固态含水量随时间的变化。从第一次过程九华山站各高度上垂直速度时间变化上看，3日14时到4日20时850 hPa以上存在明显的上升运动，尤其以700～500 hPa上升运动最为明显，受其影响对流层上层相对湿度较高。周毓荃和欧建军(2010)认为相对湿度>84%的区域为云区，可见，此次过程的云顶高度接近或超过200 hPa，此时500～400 hPa附近为固态含水量高值区，最大值区超过1.3×10^{-4} kg·kg^{-1}。从温度垂直分布上看，925～700 hPa存在明显的暖层，温度大于0℃的区域将下降的固态水融化为液态水。近地面到925 hPa为冷冻层，液态水降落到冷冻层(温度低于0℃)，处于过冷却状态形成冻雨，属于典型的“冰相融化”机制下形成的冻雨。同样，在5日08时至7日20时存在相似的情况。同时可发现，由于前期气温较高，地面气压高于1000 hPa的海拔较低的地区在整个过程中基本处在0℃以上，不能满足冻雨发生的条件，所以此次冻雨只出现

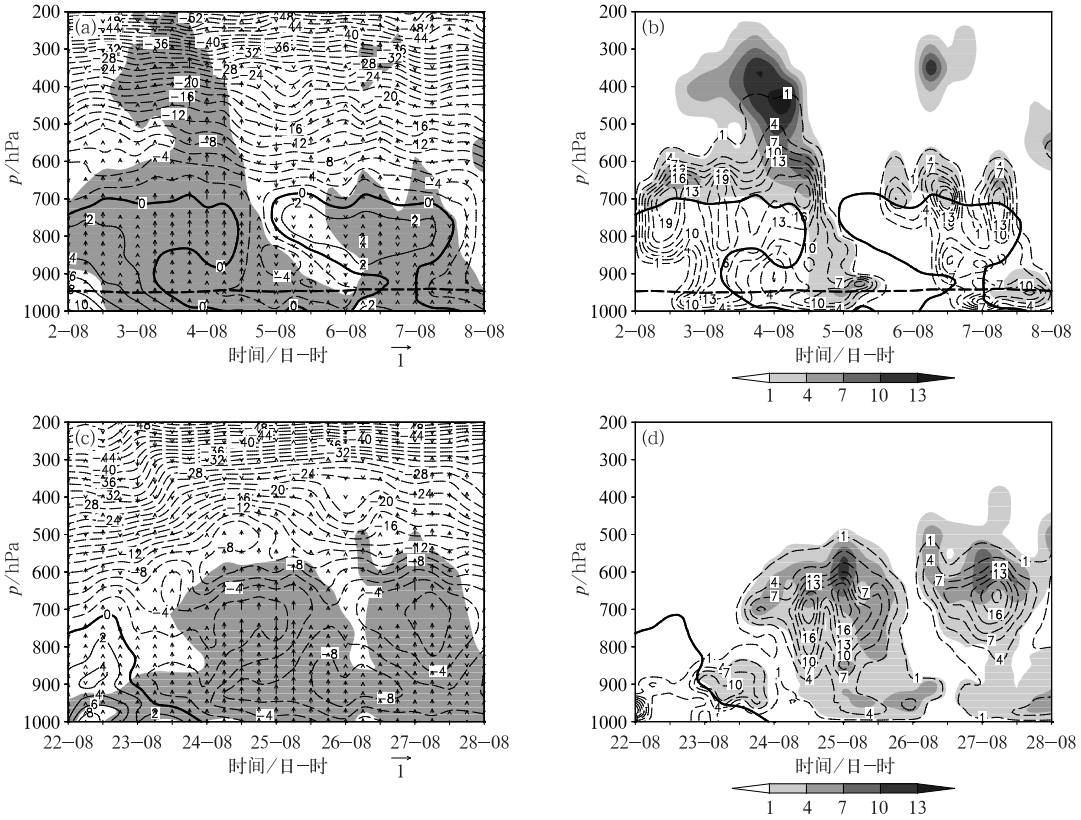

图6 第一次天气过程九华山站(a,b)和第二次过程安庆站(c,d)温度、相对湿度、垂直速度(a,c)，以及液态含水量、固态含水量(b,d)时间-高度分布

(图6a,6b中粗虚线：九华山站所在高度。图6a,6c中等值线：温度，单位：℃；阴影：相对湿度>84%；矢量：垂直速度，单位：-1 Pa·s^{-1}。图6b,6d中细虚线：液态含水量，单位：10^{-5} kg·kg^{-1}；粗实线：0℃温度等值线；阴影：固态含水量，单位：10^{-5} kg·kg^{-1})

Fig. 6 Time-altitude profile of temperature, relative humidity and vertical velocity (a, c), liquid water content and solid water content (b, d) during the first process at Mount Jiuhua Station (a, b) and the second process at Anqing Station (c, d)

(In Figs. 6a, 6b, dashed line is altitude of the Mount Jiuhua Station. In Figs. 6a, 6c, contour line is temperature, unit: ℃; shadow is relative humidity>84%; vector is vertical velocity, unit: -1 Pa·s^{-1}. In Figs. 6b, 6d, thin dashed line is liquid water content, unit: 10^{-5} kg·kg^{-1}; thick solid line is 0℃ contour, shadow is solid water content, unit: 10^{-5} kg·kg^{-1})

在少数的高海拔山区。

第二次过程的冻雨与第一次过程存在明显差异(图 6c 和 6d)，首先在整个过程中垂直速度大值区主要位于 600 hPa 以下，云顶高度较低，云内气温普遍在－8℃以上，云中为液态水和固态水的混合物，以液态水为主，虽然在 750 hPa 附近也存在暖层，但最高气温一直维持在 0℃以下，950 hPa 附近气温较低，冻雨期间普遍在－8～－2℃，液态水处于过冷却状态。第二次过程属于典型的“过冷暖雨”过程。

从风场和比湿垂直结构时间演变上看(图 7a 和 7b)，两次过程 925 hPa 附近处在东偏北气流的控制之下，表现为低温低湿。第一次过程在 750 hPa 及以上高度均受西南气流影响，尤其在 3—4 日期间，在西南气流的作用下对流层中高层的比湿较高，也是导致此时云顶较高的原因。第二次过程西南气流仅达到 600 hPa，600 hPa 以上为西到西北气流控制，湿度小，云顶高度低。

王传辉等(2018)对比了 ERA-Interim 再分析资料和探空温度资料发现，在江淮地区冻雨发生时，近地层 ERA-Interim 再分析资料与探空温度资料存在一定差异。为此给出距离两次冻雨中心区域最近的安庆站探空数据变化(图 7c 和 7d)，可见在两次过程中，再分析资料与探空资料在温度层结的变化、风速的垂直分布以及比湿的演变上均具有较好的一致性。由于探空资料在垂直方向的观测密度较为稀疏，在湿度和风场的垂直分布上，尤其在 850～700 hPa 不能被较为详细地刻画。可见，在两次过程中，再分析资料具有客观反映高空各主要气象要素能力，且时间空间精度较高。

综合以上分析，在第一次冻雨天气过程中，云顶高度较高，对流层高层固态含水量较高。750 hPa 高度附近西南风带来暖湿气流，为降水提供水汽的

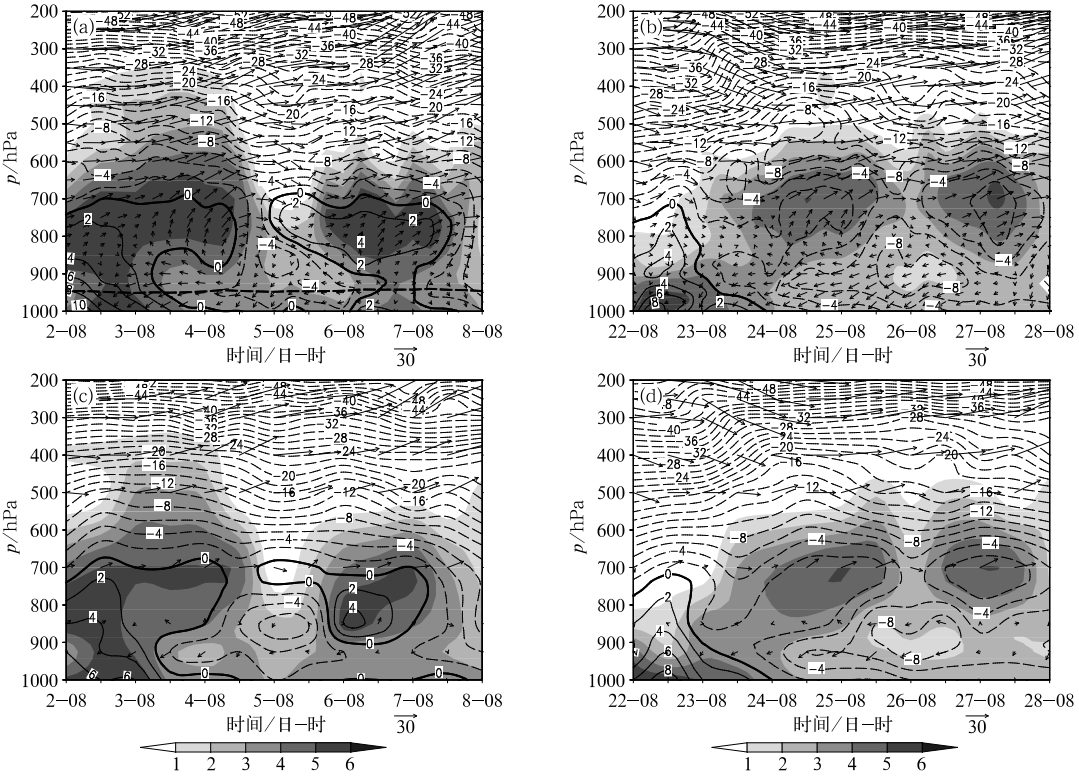

图 7　第一次天气过程九华山站(a,c)和第二次天气过程安庆站(b,d)温度(等值线，单位：℃)、风场(矢量，单位：m·s^{-1})和比湿(阴影，单位：g·kg^{-1})时间-高度分布

(a,b)再分析数据，(c,d)探空数据

Fig. 7　Time-altitude profile of temperature (contour, unit: ℃), wind field (vector, unit: m·s^{-1}) and specific humidity (shadow, unit: g·kg^{-1}) during the first process at Mount Jiuhua Station (a, c) and the second process at Anqing Station (b, d)

(a, b) ERA-Interim reanalysis data, (c, d) air sounding data

同时也起到了融化固态水的作用，为“冰相融化”过程。第二次降水过程中云顶高度在 600 hPa 附近，云内温度在－8～－2℃，以过冷却水为主，为“过冷暖雨”过程。

3.4 冻雨特定的中低层温度层结原因分析

低层的环流形势和温度平流对冬季降水相态具有重要影响（杨舒楠等，2017；翟亮等，2018）。下文通过对 925 和 750 hPa 等压面上位势高度、风场、温度和温度平流特征的分析（图 8），研究两次冻雨过程中低层特定温度层结形成的原因。在两次过程中，925 hPa 上（图 8a 和 8b）东亚地区均处在大陆高压的控制之下，在其作用下，冻雨出现区域处在东北气流带来弱冷温度平流的影响下，有利于 925 hPa 上低温的维持和发展，安徽省境内除第一次过程江南南部边缘地区外都处在 0℃以下。从地面各时次风场、温度和温度平流上看（图略），整体与 925 hPa 上相似，但在两次过程冻雨出现前和出现初期处在相对较强的冷平流的影响下。第一次冻雨过程地面温度虽有下降，但冻雨出现区域一直保持在 0℃以上（由于 ERA-Interim 资料高程数据与实际高度的偏差，小范围高海拔地区的温度无法真实反映；高路和郝璐，2014）。在第二次冻雨过程中，地面温度于 23—24 日迅速下降，到 14 日 20 时，冻雨出现的区域均降到了 0℃以下。在 750 hPa 上（图 8c 和 8d），安徽受南支槽槽前西南气流控制，暖平流为该高度上的暖层维持提供能量。在第一次冻雨过程中（图 8c），受暖平流的影响，750 hPa 上 0℃等值线维持在 31.5°N 附近，0℃以南地区存在融化层。而在第二次冻雨过程中（图 8d），虽然暖平流较强，但安徽上空均在 0℃以下。

可见，在冬季大陆冷高压作用下，在两次冻雨过

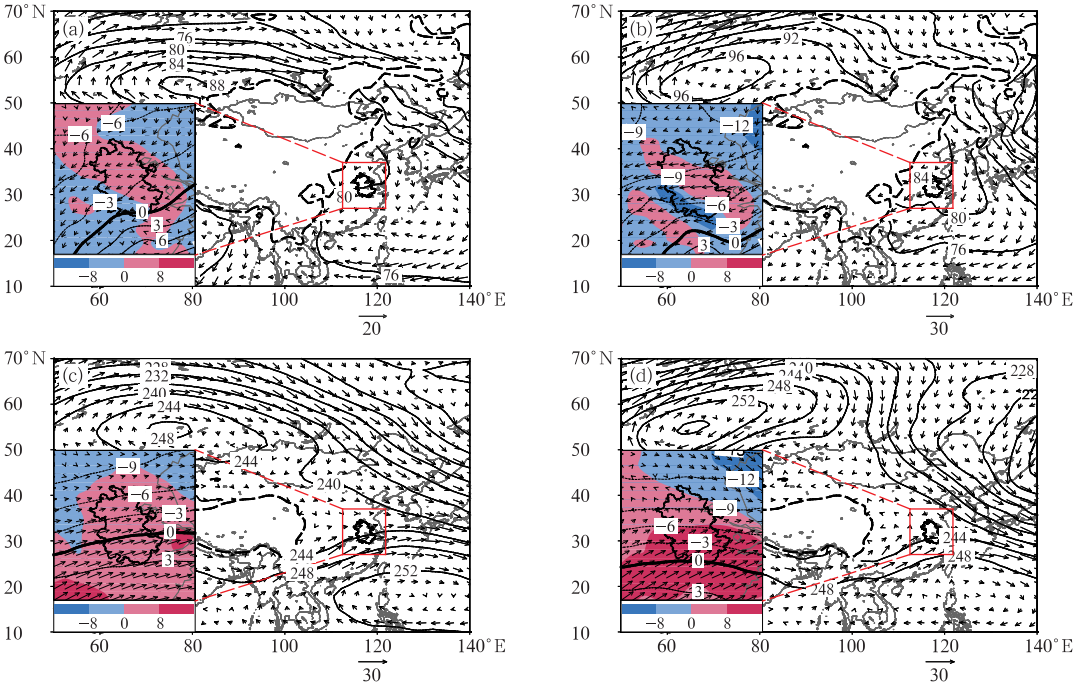

图 8 第一次（a，c）和第二次（b，d）天气过程 925 hPa（a，b）和 750 hPa（c，d）位势高度、风场、温度场和温度平流

（大图中等值线：位势高度，单位：dagpm；矢量：风场，单位：$m \cdot s^{-1}$。小图中等值线：温度，单位：℃；阴影：温度平流，单位：10^{-5} $K \cdot m \cdot s^{-1}$）

Fig. 8 Spatial distribution of geopotential height, wind field, temperature field and temperature advection at 925 hPa (a, b) and 750 hPa (c, d) during the first process (a, c) and the second process (b, d)

(Contour line in big figure is the geopotential height, unit: dagpm; vector is the wind field, unit: $m \cdot s^{-1}$. Contour line in small figure is temperature, unit: ℃; shadow is temperature advection, unit: 10^{-5} $K \cdot m \cdot s^{-1}$)

程中影响安徽冻雨的由偏北气流带来的冷平流是近地层低温出现和维持的关键，而在 750 hPa 高度附近南支槽的形成和发展给冻雨发生期间提供水汽的同时提供暖层，尤其是在第一次冻雨过程中起到融化层的作用。

4　结论与讨论

2018 年 1 月 3—7 日和 23—27 日安徽省南部发生两次降水过程，第一次过程只有海拔高度 400 m 以上的站点出现冻雨，低海拔地区未观测到冻雨；第二次过程出现了区域性的冻雨。对两次过程中冻雨分布、时间演变及环流特征进行分析得到以下几方面认识。

（1）通过自动气象观测仪器的风速突然降为 0 $m \cdot s^{-1}$、风向固定不动可大致推测出冻雨出现的时间，比人工观测到冻雨出现时间早，可作为人工观测冻雨出现时间的补充。

（2）两次冻雨天气出现均是在准静止锋天气下出现的，但导致冻雨形成的机制不同。第一次过程云顶高度较高，对流层中层存在大于 0℃的融化层，属于典型的“冰相融化”机制；第二次过程云顶高度相对较低，虽然高空存在逆温，但未出现明显的融化层，属于典型的“过冷暖雨”机制。

（3）东亚大陆近地面冷高压使两次冻雨天气中皖南处在东北气流控制之下，其带来的冷温度平流将 925 hPa 附近气温维持在 0℃以下，该高度上液态水处于过冷却状态。南支槽槽前暖湿气流带来水汽的同时，其带来的暖平流是 750 hPa 高度附近暖层维持和发展主要原因，在第一次过程中暖层起到融化高层降落下来固态水的作用。

在第一次过程中，九华山站出现了冻雨，而在九华山站周围海拔较低的站点却很少观测冻雨天气，主要是因为九华山站海拔高度为 647.3 m，站点气压一般在 950 hPa 上下。由图 7 可以看出，此次降水过程中此高度上始终维持在 0℃以下，而海拔较低地区的近地面在 0℃以上，虽然 ERA-Interim 资料空间分辨率较高，但格点间距仍为大约 12.5 km，无法精确刻画较小尺度的地形，小范围高海拔地区的温度无法真实反映（高路和郝璐，2014）。

通过对两次过程的分析可以发现，两次冻雨出现的形成机制存在差异，在以往的研究中甚至同一次冻雨过程中两种机制均会出现（李登文等，2011），其实无论哪种机制导致的冻雨，只要到达地面的降水处于过冷却状态，与地面低于 0℃物体碰撞都会形成冻雨（吴兑，2008）。在两次过程中 950 hPa 及以上的环流形势均满足冻雨出现的条件，但由于地面温度的差异导致第一次过程只有个别高海拔站点出现冻雨，在以往的研究中这种形势也经常出现（康丽莉等，2017）。在今后的冻雨预报中，除把握好高空温度层结是否满足两种冻雨出现条件，对数值预报等对地面 0℃温度线出现位置的可能偏差要有充分估计。同时，山区海拔较高地区 0℃的高度直接影响了冻雨的范围。

参考文献

高路，郝璐，2014. ERA-Interim 气温数据在中国区域的适用性评估[J]. 亚热带资源与环境学报，9(2)：75-81. Gao L，Hao L，2014. Verification of ERA-Interim reanalysis data over China[J]. J Subtrop Resour Environ，9(2)：75-81(in Chinese).

康丽莉，邓芳萍，岳平，等，2017. 一种浙江省冻雨落区的推算方法[J]. 气象，43(6)：756-761. Kang L L，Deng F P，Yue P，et al，2017. A new method of calculating falling zone of freezing rain in Zhejiang[J]. Meteor Mon，43(6)：756-761(in Chinese).

李登文，乔琪，魏涛，2009. 2008 年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象，28(5)：1140-1148. Li D W，Qiao Q，Wei T，2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of southern China in early 2008[J]. Plateau Meteor，28(5)：1140-1148(in Chinese).

李登文，杨静，吴兴洋，2011. 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰气象条件分析[J]. 气象，37(2)：161-169. Li D W，Yang J，Wu X Y，2011. Discussion on genesis of wire icing in Guizhou during the freezing rain and snow storm in January 2008[J]. Meteor Mon，37(2)：161-169(in Chinese).

刘朝茹，韩永翔，王瑾，等，2015. 我国冻雨统计及发生机制研究[J]. 灾害学，30(3)：219-222，234. Liu C R，Han Y X，Wang J，et al，2015. Studies on statistics and formation mechanism of freezing rain[J]. J Catastrophol，30(3)：219-222，234(in Chinese).

马中元，刘熙明，吴琼，等，2011. 江西强冻雨天气形成特征分析[J]. 气象，37(1)：66-74. Ma Z Y，Liu X M，Wu Q，et al，2011. Analysis of the severe freezing rain events in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon，37(1)：66-74(in Chinese).

欧建军，周毓荃，杨棋，等，2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象，30(3)：692-699. Ou J J，Zhou Y Q，Yang Q，et al，2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China[J]. Plateau Meteor，30(3)：692-699(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. Research on winter precipitation types' discrimination criterion in eastern China[J]. Meteor Mon，38(1)：96-102(in Chinese).

陶玥，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 Y,Li H Y,Liu W G,2013. Characteristics of atmospheric stratification and cloud physics of different types of freezing rain over southern China[J]. Plateau Meteor,32(2):501-518(in Chinese).

王传辉,姚叶青,时刚,2018. 江淮地区 ERA-Interim 再分析与观测温度资料对比分析[J]. 气象,44(9):1220-1228. Wang C H,Yao Y Q,Shi G,2018. Comparative analysis of ERA-Interim temperature reanalysis data and observations over Jianghuai Region[J]. Meteor Mon,44(9):1220-1228(in Chinese).

王遵娅,2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析[J]. 大气科学,35(3):411-421. Wang Z Y,2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China[J]. Chin J Atmos Sci,35(3):411-421(in Chinese).

吴兑,2008. 关于冻雨和雨凇、雾凇之我见[J]. 广东气象,30(1):12-13,23. Wu D,2008. Discussion on the distinguishing of freezing rain,rime and glaze[J]. Guangdong Meteor,30(1):12-13,23(in Chinese).

吴有训,陈健武,杨保桂,等,2000. 黄山冬季气温分类及雪、雨凇和雾凇的气候分析[J]. 气象学报,58(3):376-384. Wu Y X,Chen J W,Yang B G,et al,2000. Type of the winter air temperature in Huangshan Mountain and its climatic analysis of snow glaze and rime[J]. Acta Meteor Sin,58(3):376-384(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影响分析[J]. 气象,43(6):665-674. Yang S N,Xu J,He L F,et al,2017. Impacts of low-level temperature advection on the precipitation type of heavy rain-snow process in North China[J]. Meteor Mon,43(6):665-674(in Chinese).

杨玮,徐敏,周顺武,等,2017. 江淮流域 6—7 月极端强降水事件时空变化及环流异常[J]. 高原气象,36(3):718-735. Yang W,Xu M,Zhou S W,et al,2017. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events from June to July over Yangtze-Huaihe River Basin and the circulation anomalies[J]. Plateau Meteor,36(3):718-735(in Chinese).

翟亮,郭淳薇,马新成,等,2018. 北京 2016 年"11·20"初雪预报偏差分析[J]. 气象,44(1):151-158. Zhai L,Guo C W,Ma X C,et al,2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. Meteor Mon,44(1):151-158(in Chinese).

周毓荃,欧建军,2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象,36(11):50-58. Zhou Y Q,Ou J J,2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon,36(11):50-58(in Chinese).

宗志平,马杰,张恒德,等,2013. 近几十年来冻雨时空分布特征分析[J]. 气象,39(7):813-820. Zong Z P,Ma J,Zhang H D,et al,2013. Analysis on the spatial temporal characteristics of freezing rain in recent decades[J]. Meteor Mon,39(7):813-820(in Chinese).

Bernstein B C,2000. Regional and local influences on freezing drizzle,freezing rain,and ice pellet events[J]. Wea Forecasting,15(5):485-508.

Chen R S,Liu J F,Song Y X,2014. Precipitation type estimation and validation in China[J]. J Mt Sci,11(4):917-925.

Frick C,Wernli H,2012. A case study of high-impact wet snowfall in northwest Germany (25 — 27 November 2005): observations,dynamics,and forecast performance[J]. Wea Forecasting,27(5):1217-1234.

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(7):1185-1195.

Rauber R M,Olthoff L S,Ramamurthy M K,2001. Further investigation of a physically based,nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets[J]. Wea Forecasting,16(1):185-191.

Robbins C C,Cortinas J V. 2002. Local and synoptic environments associated with freezing rain in the contiguous United States[J]. Wea Forecasting,17(1):47-65.

Shi X H,Xu X D,Lu C G,2010. The dynamic and thermodynamic structures associated with a series of heavy precipitation events over China during January 2008[J] Wea Forecasting,25(4):1124-1141.

Stewart R E,1985. Precipitation types in winter storms[J]. Pure Appl Geophys,123(4):597-609.

Thériault J M,Rasmussen K L,Fisico T,et al,2014. Weather observations on whistler mountain during five storms[J]. Pure Appl Geophys,171(1/2):129-155.

Wang C H,Yang K,Li Y L,et al,2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in Eastern China[J]. J Climate,30(3):885-903.

Zerr R J,1997. Freezing rain:an observational and theoretical study[J]. J Appl Meteor,36(12):1647-1661.