西南地区一次典型冰冻雨雪复合极端灾害天气事件的环流特征及降水

相态差异分析*

陈媛¹,周玉淑^{2,3},杨帅²,冉令坤^{2,3},颜玲^{2,4}

1 国能大渡河大数据服务有限公司,成都,610041

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室,北京 100029

3 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

4 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害 预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

摘要在全球变暖气候背景下,复合型极端灾害天气事件频发。2008 年以来我国南方 冬季频发的雨雪冰冻,就是一种典型的复合型致灾极端天气事件。因此,本研究(1) 分析了西南地区一次典型大雪冻雨复合天气事件的大雪与冻雨期环流特征及降水相 态差异,揭示了二者的关联特征。冻雨发生在贵州境内的云贵准静止锋锋面强斜压环 境中,降雪主要发生在四川北部,位于静止锋以北的冷区。降雪区和冻雨区的垂直环 流存在显著差异:降雪区以上升运动为主,温度基本随高度递减;冻雨区大气中低层 存在逆温层,导致温度层结出现冷-暖-冷的分布,垂直运动呈两层环流模态,低层的 上升运动受到中层下沉运动抑制,强上升运动不易发展。(2)借助可综合表征环流特 征和水汽相变的广义湿位涡理论,分别诊断大雪和冻雨发生发展时期的广义湿位涡分 布特点,发现其斜压项的异常能更好体现准静止锋附近的大气斜压性,也可指示出大 雪冻雨降水的落区及变化,可作为大雪冻雨区的动力识别特征量之一。(3)气压扰动 方程计算表明,向下的扰动气压梯度力与浮力的平衡差异,是降雪与冻雨垂直环流特 征差异的主要原因。本研究从环流特征入手开展雨雪冰冻复合极端灾害天气分析,可 为复合降水相态预报和发电企业电力运行保障提供参考。 关键词:西南地区,大雪冻雨,广义湿位涡,环流差异,降水相态



收稿日期 2021.11.24 网络预出版日期 *作者简介 陈媛,女,1986 年出生,工程师,主要从事气象水文预报和水电调度运行管理。E-mail: 403325641@qq.com 通讯作者 周玉淑, E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(41875056,42175012和41975137)

Analysis of circulation characteristics and precipitation phase difference

of an extreme freezing rain and snow weather in Southwest China

Chen Yuan¹, ZHOU Yushu^{2, 3}, YANG Shuai², RAN Lingkun^{2, 3}, YAN Ling^{2, 4}

- 1 Dadu River Basin Hydropower Development Co. LTD, Chengdu 610041
- 2 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 3 College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 4 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Compound extremely catastrophic weather events occur frequently in the background of global warming, and the frequent snowstorm or frozen rain event in southern China is a typical compound extreme weather event. Therefore, this study (1) analyzed the circulation characteristics and the rainfall phases of the heavy snow and freezing rain in a typical compound weather event in Southwest China, and revealed the characteristics of the two rain phases. It is found that the freezing rain occurring in the frontal strong baroclinic environment in Guizhou Province, but the snowfall occurred in the cold zone to the north of the front in Sichuan Province. Moreover, there is a significant difference in vertical circulation for that the ascent motions are over snowfall areas from low level to high level, whereas there is a temperature inversion layer in the lower atmosphere over the freezing rain area, which leads to a cold-warm-cold temperature configuration. Thus the vertical motions present a two-layer circulation mode, in which the strong ascent motions at low levels are inhibited by the descending motions at medium levels. The ascending motions are stronger over the snowfall area and the cloud top temperature is colder accompanied with the development of convection, resulting in the phase difference from the freezing rain. (2) Utilizing the generalized moist potential vorticity (GMPV) theory, which can comprehensively depict the circulation characteristics and the phase transition of water vapor, to diagnose the characteristics of the GMPV distribution during the occurrence and development of the heavy snow and the freezing rain, respectively. It is found that the anomalous distribution of baroclinic term can better reflect the atmospheric baroclinicity nearby the quasi-stationary front, as well as the

location or evolution of heavy snow and freezing rain. Thus it can be regarded as one of the dynamic identification characteristics of heavy snow and freezing rain. (3) The results by calculating of the disturbed pressure equation terms show that the balance diversity between the downward perturbance pressure gradient force and the buoyancy is the main reason for the difference of the vertical circulation characteristics between snowfall and freezing rain. This study can provide references for weather analysis and operational forecast on the perspective of circulation characteristics of this type of weather, and provide reference for power operation guarantee of power generation enterprises. **Key Words:** Southwest China, snow and freezing rain, generalized moist potential vorticity, difference of circulation characteristics, precipitation phase

1. 引言

我国的雨雪冰冻几乎每年都会发生,也有很强的地域特征,西南地区的雨雪冰冻 灾害较为常见,其中,四川西部的川西高原及其以东附近地区容易出现大雪和暴雪灾 害(陈晓刚等,2001;臧海佳,2009),而贵州则是我国冬季出现冻雨最为频繁的地区 (宗志平等,2013;刘朝茹等,2015;方获等,2020)。雨雪冰冻在西南地区影响范围 较广泛,其持续时间主要集中在 12 月到 2 月期间(许丹和罗喜平,2003;杜小玲, 2010)。无论是历史上还是现在,雨雪冰冻对西南地区的危害都很严重,除了造成严重 经济损失,还会危及人民生命安全。同时,西南地区界内,纵贯川西高原和四川盆地 的大渡河流域,沿途建有多个水力发电站,是四川电力运行和国家西电东送能源部署 的重要保障。该区域如果发生大面积雨雪冰冻天气,极易造成电力输送设施的破坏而 导致电力输送中断。由于气象灾害常造成关键电力设备故障(寇正等,2021),且雨雪 冰冻低温天气对电力负荷有极大影响(牛敏等,2014),诊断分析西南地区的雨雪冰冻 天气系统及其形成机理,对加强西南地区冬季雨雪冰冻天气过程的认识和电力部门电 网稳定运行均具有重要应用意义。

国际上对降雪和冻雨的研究已有很长的历史。早在 20 世纪初, Bennett (1913)、 Brooks (1920)和 Henry (1922)等气象学者就分析过冻雨的形成过程,他们指出, 冻雨出现时,低于 0℃的地面冷层之上有暖湿气层,高层云顶温度低于-10℃,冰晶粒 子从高空云层下落,穿过温度大于 0℃的暖层时,如果冰晶完全融化,在暖层中形成 雨滴,雨滴下落至地面冷层时形成过冷却雨滴,过冷却雨滴与地物碰撞时就会发生冻

结。McQueen and Keither(1956)和 Spengler(1972)等发现冬季降雨系统中存在降 水形态的过渡带,在过渡带中有雨、冻雨、雪和小冰粒之分。Stewart(1985)进一步 分析了冬季降雨类型及形成条件,讨论了包括冻雨、雪、冰粒等在内的冬季降水类型, 指出冬季降水的类型及分布与雪融化过程有关,并给出了过渡带降水形态分布的结构 模型。Rauber(2001)给出了冻雨形成过程中的暖云和融化过程这两种主要的微物理 过程的相对重要性。Meisinger(1920)最早利用高空探测和地面天气图分析揭示了冻 雨发生与锋面系统的关系,Szeto et al.(1999)和 John(2000)的分析也表明加拿大 东部和北美五大湖常发生在 35°N 以南地区的冻雨,多与温带气旋形成的暖锋有关。 Colenma and Marwitz(2002)指出低层急流演变、稳定度情况和等温层发展及融化动 力作用对冻雨天气形成有影响,Bernstein(2000)认为地形和湿源对冻雨天气产生也 有重要作用。美国中南部长时间持续的冻雨与 500 hPa 上稳定维持的深厚长波槽从墨 西哥湾向北输送暖湿空气有关,持续时间长的冻雨过程中暖层更明显(McCray et al., 2021)。

国内也有关于大雪和冻雨天气的统计、个例和数值模拟分析方面的研究成果。我 国的冻雨一般从11月开始,到来年3月结束,以1月居多(占72%),多发生在长江 以南区域,以暖雨为主,占总数的73%,冰相冻雨有27%(欧建军等,2011)。早期, 陈天锡等(1993)通过对 1991 年 3 月 7-8 日河南驻马店冻雨过程的分析得出该区域 冻雨形成的天气条件。赵彩(1995)利用贵阳 56 次探空资料分析了贵州中部严重积 冰过程时云内的动热力特征,指出云上部有0℃以上的暖层存在。杜小玲(2007)对 贵州冻雨做了环流分型和冻雨期间的垂直结构特征分析。自 2008 年我国南方大范围 的雨雪冰冻灾害之后,南方雨雪冰冻天气开始受到气象学者更多的关注。陶诗言等 (2008)指出,2008年南方的冰雪灾害天气成因与欧亚大陆的异常环流诱发低层静止 锋锋生有关。在异常的大气环流背景下,多尺度天气系统作用和低层水汽含量充沛以 及持续的水汽辐合是低温雨雪天气过程维持的重要原因(张昕等,2015)。大雪和冻雨 天气均是在对流层高、中、低层各纬度天气系统相互作用下形成,其中最直接和主要 的影响系统有高层的副热带高空急流锋区、低层的云贵准静止锋以及中低层的西南低 空急流等(高守亭等,2014),在高低空多天气系统影响下,由于温度、风场、水汽等 环境因素存在差异,会影响低温雨雪的强度和区域(赵思雄和孙建华,2008;杜小玲 等,2014)。雨雪冰冻时期,由于西南暖湿气流沿锋面爬升,形成界限分明的冷暖气

团,在2-4km高度存在融化层,冰水存在于融化层之上,在近地面层则含有丰富的冰 粒子,在850-700hPa间存在温度大约在0-4℃的逆温层,地面气温基本维持在-4—0℃ (王东海等,2008)。各物理量因子对于冻雨天气的发生、发展和维持有着不同的作 用,温度场的层结结构和地面温度条件决定了降水物相态的分布(陶玥等,2012),暴 雪冻雨过程存在多种云系共同降水,中低空 600-850 hPa 强逆温层尤其是 0℃层的存 在使得雪、冰晶等冰相粒子融化形成过冷却水,是大范围降雪和冻雨形成的必要条件 (朱坤等,2009)。其他一些研究(宗志平和马杰,2011;杜小玲等,2012,2014)也 指出,逆温层是冻雨持续出现的重要影响因素,逆温层强度与冻雨强度存在明显联系, 逆温层不但是冻雨发生的必要条件,也是冻雨强度发展的调节器。同时,统计表明, 不同站点间发生冻雨的机制有明显差异,冻雨发生机制与海拔高度有关,高海拔地区 易发生过冷暖雨过程的冻雨,而低海拔地区易发生融化过程的冻雨(刘朝茹等,2015)。 最近,Luetal.(2021)分析了2008-2017年间我国地面和探空站观测到的冻雨统计特 征和预报天气变量,认为通过改进模式中的 Ramer 方案,可为预测导线、道路等各种 结冰危害提供更准确的信息。

以上研究较为集中地探讨了异常大气环流特征、逆温层及冻结等过程对大雪冰冻 形成的影响。西南地区是西高东低,南高北低的喇叭口地形,冬季冷空气可以由喇叭 口地形爬升进入云贵高原,同时暖湿空气受低纬西南气流影响北上也进入云贵高原, 冷暖空气交汇对峙形成了云贵准静止锋,四川地区位于锋面以北的冷空气控制区,贵 州位于准静止锋区附近。受准静止锋影响,暖湿空气可叠加在近地面冷空气上,这种 上暖下冷的环境形成了利于冬季冰冻天气形成和维持的温度场结构(严小冬等,2009; 杜小玲等,2010,2012;DengDifeietal.2012)。其中,准静止锋附近温度层结的稳定 维持会导致冻雨持续发生,表明暖区对于冰冻天气的形成有重要作用,这与国外研结 果是一致的。但在,在冬季整层大气都是冷层的背景下,低层冻雨区上空的暖区为什 么能稳定存在?目前的研究都指出了暖层在冻雨天气形成中的重要性,但是对其维持 的机制还不是很清楚。同时,对同一次天气过程中,区域接近但是降水相态不同,有 的区域是降雪,有的区域是冻雨,不同降水相态的区域,其环流特点有何不同?为了 解释这两个问题,本文选取 2008 年 1 月下旬西南地区同时出现降雪和冻雨的复合灾 害天气过程进行分析。

2. 资料和方法

本文采用资料为中国气象局提供的地面降水观测资料, 天气形势和诊断计算采用 ERA5 再分析资料, 空间分辨率 0.25x0.25 度, 时间分辨率 6h。以广义湿位涡理论为 基础, 分析大雪冻雨时期温、湿以及风场条件和广义湿位涡生成对雨雪冰冻区的指示 作用, 并利用广义湿位涡斜压项的特征诊断降水落区变化。分析不同降水相态区域的 环流和温度层结差异, 在此基础上, 引入气压扰动诊断方程探讨冻雨区低层暖区维持 机理。

3. 大雪冻雨实况和雨雪冻雨过程的动热力条件分析

3.1 大雪冻雨过程观测实况简介

2008年1月,我过南方发生大范围雨雪冰冻天气,其中,26到29日的降水过程中,四川部分地区出现大雪,贵州主要是冻雨。图1是大雪冻雨时段的降水相态和6小时降水量的分布。26日08时(北京时,下同),四川西部、中部和北部为降雪,贵州冻雨范围偏小,位置偏南(图1a),到27日08时(图1b),四川降雪范围扩大,贵州北部地区降水相态也为小雪,冻雨相对集中出现在25-27°N的贵州西部和南部地区, 安顺、黔南等地有持续冻雨发生。28日08时(图1c),四川降雪持续维持,冻雨由贵州西部发展到贵州东部,冻雨强度达到最强,6小时降水量达到5mm,在贵州东部和湖南西部还出现了冰粒子降水。降雪和冻雨的降水量比液态降水量小,但是致灾却很严重。





(b) Fig.1 Surface weather phenomena (*, • and ~ are snow, rain, and freezing rain, respectively) and 6-hourly precipitation (shaded) on UTC (a) 00Z26, (b) 00Z27, and (c) 00Z28.

3.2 大雪冻雨过程的动热力和水汽条件分析

2008 年 1 月准静止锋持续维持在偏南地区,0℃线在过程前期位于贵州北部,四 川一直位于锋区后部气温低于0℃的冷空气中。锋区在 26 日开始略微北移,水平温度 梯度持续加大,在 28 日温度水平梯度最大,四川降雪和贵州冻雨强度重增强。29 日, 随着锋区南移,本次西南地区的降雪和冻雨过程也减弱并逐渐结束。

从风场来看,700hPa 上盛行西南风。26 日 08 时(图 2a),强西南风发展形成一 支低空急流,急流轴线位于贵州东部—湖北南部—浙江北部区域,急流中心区风速强 达 24 m s⁻¹。在云南地区上空,也存在一个较小范围的强风速中心,中心风速也达到 24 m s⁻¹。贵州主体位于两个强风速带过渡区,强风由贵州东部到西部递减。由于急流 后部常为风场辐散区,不利于垂直运动发展,这也是贵州西部降水明显小于东部降水 的原因之一。28 日 08 时(图 2b),低空急流发展明显,影响范围显著增大,长江流 域以南地区的 700hPa 风速均高于 24 m·s⁻¹,急流轴从贵州西部向西南延伸至云南东 部,急流中心风速高于 27 m s⁻¹,贵州处于急流控制区域,是贵州冻雨最为严重的时 段。此期间,四川一直位于低空急流以北地区,川北地区有明显的西南风和偏北风的 辐合,这里也是降雪较为集中的区域。



850 hPa 流场上,贵州以南分布着较强的偏南气流,偏南风风速高值中心位于广 西南部,中心风速达到 16 m·s⁻¹。南下东北风与偏南风在贵州西部和南部有明显辐合, 同时,四川地区出现明显的气旋性旋转流场,川北地区有偏东风和偏北风的辐合。28 日 08 时(图 3b)的流场分布与 26 日相似,但强风速区发展形成西南-东北走向的带 状分布,与 700 hPa 低空急流走向一致。但强风速带中心轴线位置较 700 hPa 上的位 置偏南了大概 2-3 个纬距,反映出与低空急流相伴的准静止锋系统有较强的斜压性。



Fig.3 850-hPa streamline, wind and wind speed (shaded) on UTC (a) 00Z26 and (b) 00Z28.

从冷暖平流分布来看,与西南暖湿气流和低空急流发展相对应,南方地区一直有 较强的暖平流维持。随着高纬冷空气分裂南下,冷平流区不断向南扩展到达长江流域 以南。700 hPa上,在28日08时(图4a),冷暖平流强度均达到最强,暖平流中心位 于贵州和湖南西部,而北侧的四川、湖北地区出现强冷平流。冷暖平流在28-30°N 附 近形成对峙。在低层 850 hPa 上(图 4b),暖平流区集中在华南地区,冷平流区较 700 hPa 上的分布向南扩展至 24°N 附近,基本控制了贵州和湖南,由此加剧了贵州附近 低层大气温度上冷下暖的不稳定层结。在整个大雪冻雨过程中,贵州境内的 0℃线始 终保持在 24°N 左右,四川地区的温度低于 0℃。



Fig.4 a) 700-hPa and (b) 850-hPa horizontal advection of temperature (shaded, units: °C s⁻¹) and wind with 0°C isothermal line on UTC 08Z28 Jan.

以上分析表明,除了北方冷空气爆发南下外,此次大雪冻雨的发生发展与西南低 空急流的变化也有密切联系。低空急流的存在,将大量暖湿空气由西南向北输送,为 大雪冻雨降水的产生和维持提供了有利的水汽和暖湿不稳定条件。

3.3 大雪冻雨过程的广义湿位涡分析

雨雪尤其是冰冻天气发生需要冷暖空气的对峙和充足的水汽,空气中存在水汽 及其凝结的不均匀分布,广义湿位温(Gao et al., 2004)在相当位温中引入无量纲的 凝结函数 $(q/q_s)^k$,表达式为: $\theta^* = \theta \exp(\frac{Lq_s}{c_p T} (\frac{q}{q_s})^k)$,这里的 θ 为干空气位温,q为比 湿,qs为饱和比湿。凝结函数表征了相对湿度增加与凝结发生的关系,能表针湿大气 中相对湿度达不到100%就能发生凝结的现象和过程。此定义表明相对湿度越大,水 汽越容易发生凝结。用广义湿位温代替相当位温,可得到广义湿位涡: *GMPV* = $\alpha \xi_a \cdot \nabla \theta^*$,这里的 α 为比容, ξ_a 为绝对涡度。广义湿位涡(下文简称为 GMPV) 包含了大气涡度、温度和水汽综合效应,以往用以分析其对暴雨、高温热浪等天气时 有很好的效果(Gao et al. 2004;高守亭等,2005;周玉淑,2009;高守亭等,2018), 但是尚未运用到大雪冻雨天气的诊断分析中。由于降雪和冻雨也是在冷暖空气对峙 和水汽供应充沛的条件下发生,符合 GMPV 可反映的动热力变化过程,但是否可以 用以分析大雪和冻雨发生发展过程,还需要具体诊断。本节就应用 GMPV 来分析此 次四川大雪和贵州冻雨天气的动热力变化。

图 5 是对 GMPV 的绝对值进行垂直积分后的水平分布。分析 GMPV 各时次的演变可知, GMPV 可以清晰体现出此次影响南方大雪冻雨以及北方降雪的天气系统的变化。26 日 08 时(图 5a), GMPV 在长江流域以北有异常高值区,与相应时刻的地面雪区一致。在四川大部、贵州西部以及贵州和湖南接壤地区分别存在 GMPV 的小范围异常高值区与地面雪区和冻雨区相对应。到 28 日 08 时(图 5b),北部的 GMPV 高值带向东发展与地面降雪带的发展东移对应。四川地区的 GMPV 异常区维持,贵州西部 GMPV 高值区发展东移,强度加强,与冻雨区的变化趋势也是一致的。可见,GMPV 异常区与降雪和冻雨区都有较好对应关系,说明 GMPV 也能较好的反应出降雪和冻雨降水天气系统的动热力发展变化。



Fig.5 The horizontal distribution of vertically integrated GMPV on UTC (a) 00Z26 and (b) 00Z28.

GMPV 包含正压项 GMPV1(*GMPV*1 = $-(\xi + g)\frac{\partial \theta^*}{\partial p}$)和斜压项 GMPV2 (*GMPV*2 = $-g\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta^*}{\partial y} + g\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta^*}{\partial x}$),通过对比发现(图略),GMPV2的分布较 GMPV1 更接近 GMPV 的整体分布,所以进一步对 GMPV 的斜压项 GMPV2 进行分析。GMPV2 绝对值的垂直积分表明,在此次西南雨雪冰冻较强时段的 27 和 28 日,GMPV2 异常 高值区呈西南-东北向带状分布(图 6),与地面四川和贵州的雨雪冰冻发展趋势较 GMPV 异常高值区域更为一致,表明冻雨发生在准静止锋斜压性较强的区域,湿位涡斜压项能更好对应降雪和冻雨落区分布,也证明了准静止锋斜压性对降雪和冻雨的作用更强。当然,此次过程中,斜压项与广义湿位涡的整体的分布形态都更为接近,表明广义湿位涡异常主要由斜压项造成,但是,正压项的影响重要与否也要根据具体的天气过程分析决定,但是这并不意味着其他过程也一定如此。



图 6 1 月 27 日 08 时 (a) 和 1 月 28 日 08 时 (b) 垂直积分的 GMPV2 水平分布

Fig.6 The horizontal distribution of vertically integrated GMPV2 on UTC (a) 00Z76 and (b) 00Z28.

降雪和冻雨主要发生在斜压锋区维持环境中,如图 7 所示,沿 106°E 的垂直剖面 显示,从贵州到四川地区,均有相当位温的密集带分布,表示了西南暖湿气流与偏北 冷气流辐合产生的辐合带(即准静止锋锋区),锋区在贵州上空高度较低,位于 900-700hPa 间,在四川上空位于 800-600hPa 间。暖湿的南风分量沿着相当位温面从南向 北逐渐抬升。



Fig. 7 The vertical distribution of equivalent potential temperature (isoline, units: K) and meridional wind component (vector, units: m s⁻¹) along 106°E on UTC (a) 00Z26, (b) 00Z27 and (c) 00Z28.

此次大雪和冻雨的发生与云贵准静止锋的斜压锋区关系密切,因此进一步分析 GMPV 的斜压项 GMPV2 中的各个因素作用。GMPV2 与水平风垂直切变和广义位温 水平梯度有关,以下就分别分析水平风垂直切变和广义位温水平梯度的变化与 GMPV2 的关系。由于云贵准静止锋为准东西向分布,可近似认为 $\frac{\partial}{\partial x} \equiv 0$,因此重点 讨论等式右侧第一项,即: $-g\frac{\partial u}{\partial n}\frac{\partial \theta^*}{\partial y}$ 的作用。从垂直风水平切变、广义位温经向梯度 和对流稳定度沿 106°E 剖面的垂直分布可见 (图 8), 在 26 日-28 日的强大雪冻雨期 间,从贵州到四川地区的大气中低层,均存在广义位温经向梯度的加剧,且经向梯度 大值中心从贵州到四川表现为从南到北逐渐倾斜抬升趋势,23-25°N 主要位于 800hPa 以下, 26-29°N 主要位于 700hPa 以下, 29-33°N 之间的四川界内 GMPV2 的异常中心 高度达到 600hPa, 这与相当位温表示的斜压锋区的变化一致(图 7)。24-25℃ 处的 800 hPa 以下至近地面的大气低层, $\partial u/\partial p$ 和 $\partial \theta^*/\partial y$ 都是负值,尤其是 25°N 附近冻雨较强 的区域,负值向上伸展到 650hPa,体现了低空南北向冷暖空气相对峙的情况。26 日 08 时(图 8a), 湿斜压度 $\partial \theta^* / \partial y$ 在22-25°N上空900-700 hPa之间为正值区, 且形成南 北两个中心,表明暖湿空气沿锋面爬升形成的暖湿区也是非均匀性分布的。纬向风垂 直风切变 ∂u/∂p 在 24-28°N的贵州大部区域上空 850-550 hPa 间均为正值区,这与西南 低空急流的西风分量风速大值区位于此处有关。28 日 08 时(图 8c),上述两项因子 在大气低层的分布前两日基本相同,但倾斜度明显增大。贵州上空的湿斜压度向上发 展到 500hPa,锋区北侧的四川上空,600hPa 层上的湿斜压度也明显增强,均表明暖 湿气流沿锋面抬升强烈。纬向风速的垂直切变和湿斜压度的配置形成了大雪和冻雨区 上空斜压度由南向北抬升的分布特征。



图 8 纬向风分量垂直切变(紫色等值线)、广义位温经向梯度(填色阴影)和对流稳定度 $(\partial \theta^* / \partial p)$ (黑色等值线)沿 106°E 剖面的垂直分布,

(a) 26 日 08 时; (b) 27 日 08 时; (c) 28 日 08 时

Fig.8 The vertical shear of the zonal wind component (purple contour), the meridional gradient of

generalized potential temperature (shaded) and the convective stability ($\partial \theta^* / \partial p$) (black contour) along

106 °E on UTC (a) 00Z26, (b) 00Z27 and (c) 00Z28.

因此,此次的大雪冰冻天气中,四川降雪和贵州冻雨均发生在暖湿和干冷空气交 汇形成的强斜压性锋区环流中。能体现大气动热力尤其是水汽凝结分布不均匀特性的 GMPV 尤其是其斜压项,其异常分布较好地体现出降雨和冻雨落区的分布,也可作为 降雪和冻雨落区的动力识别特征之一。

4. 低层暖区维持机理

此次大雪冻雨期间,冻雨区低层的温度出现冷-暖-冷的垂直分布,800-650hPa之间出现明显的暖层,气温高于 0℃,700hPa 附近达到 4℃(图 9a),而降雪区则是一致的冷空气控制,整层大气温度均低于 0℃,且温度随高度减小,只是在 700-600hPa 间的温度递减率较其他层次小,有浅薄的中性层结(图 9b)。本节将进一步从宏观动力场和气压扰动场两个方面分析这一时期冻雨区低层暖层的维持机理。宏观动力场主要从垂直运动和环流分布上来看,气压扰动场主要利用气压扰动诊断方程来探讨冻雨上空暖区的维持机制。

首先分析冻雨区上空垂直运动时间演变(图 9a),从 25-29 日之间,冻雨区的垂 直速度的垂直分布表现为近地面 850 hPa 以下为弱下沉运动,而 850-700 hPa 层为弱 上升运动,700-550 hPa 之间又转为下沉运动,500hPa 以上才转为相对强的上升运动。 可见,冻雨区的垂直运动不是一致的上升,而是中低层的下沉运动抑制了更低层的上 升运动。低层垂直环流利于近地面冷层和其上暖层的维持,而中高层垂直环流圈的下 沉支一定程度既抑制了低层强对流发生,也利于静止锋上的暖区维持,造成了冻雨形 成的有利暖层环境。从天气尺度背景场来看,冻雨区低层的上升运动受到中层下沉运 动的抑制,强的上升运动不容易发展。而降雪区上空则是一致的上升运动(图 9b), 800-600hPa 间的中性层结附近的上升运动明显强于其他层次,在降雪最强的 27-28 日, 更是从近地面到 150hPa 都出现一致的上升运动,垂直运动的发展是此时段降雪加强 的条件之一。可见,温度层结和垂直环流的明显区别,造成了贵州出现冻雨而四川出 现降雪。



间演变, (a)贵州冻雨区, (b)四川降雪区

Fig. 9 The temporal evolution of vertical velocity (shaded, units: Pa s⁻¹) and temperature (contour,

units: °C) along 106°E in (a) Guizhou freezing rain area and (b) Sichuan snowing area.

以下进一步从气压扰动诊断方程来探讨冻雨上空暖区的维持机制。先简单给出气 压扰动方程推导。

黏性近似下的水平和垂直运动学方程为:

$$\frac{D}{Dt}\vec{v} = -\alpha\nabla P - f\vec{k}\times\vec{v} - g \tag{1}$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\alpha\frac{\partial p}{\partial z} - g \tag{2}$$

把气压的平均和扰动形式带入运动方程,有:

$$(\rho_0 + \rho')\frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p_0}{\partial z} - \frac{\partial p'}{\partial z} - (\rho_0 + \rho')g$$
(3)

在环境场满足静力平衡假设下,减去平均状态,可得:

$$(\rho_0 + \rho')\frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p'}{\partial z} - \rho'g \tag{4}$$

公式(4)还可写为:

$$\frac{Dw}{Dt} = -\alpha \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\rho'}{\rho_0} g \tag{5}$$

公式 (5) 中的第二项
$$-\frac{\rho'}{\rho_0}g$$
 即为浮力项 (令: $B = -\frac{\rho'}{\rho_0}g$)。引入状态方程,并认为

p=p₀, 推导具体过程见 Klemp (1987)和 Parker (2010), 可得如下形式的气压扰动诊 断方程:

$$\nabla^{2} p' = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{0} B) - \nabla \cdot \left[\rho_{0} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \rho_{0} \nabla \cdot \left(f \stackrel{\circ}{k} \times \mathbf{u} \right)$$
$$= \nabla^{2} p'_{B} + \nabla^{2} p'_{G} + \nabla^{2} p'_{D}$$
(6)

其中, 扰动气压梯度力分为三部: 浮力引起的扰动气压梯度力, 平流散度引起的扰动气压梯度力和地转项引起的扰动气压梯度力, 分别为:

$$\nabla^{2} p'_{B} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{0} B), \qquad (7)$$

$$\nabla^{2} p'_{D} = -\nabla \cdot \left[\rho_{0} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right], \qquad (8)$$

$$\nabla^{2} p'_{G} = \rho_{0} \nabla \cdot \left(f \hat{k} \times \mathbf{u} \right) = \rho_{0} f \zeta \qquad (9)$$

公式(7)为浮力项,(8)为平流散度项,(9)为地转项。以下分别利用浮力项,平 流散度项和地转项对冻雨过程中的气压扰动进行诊断分析。

1) 浮力引起的气压扰动:

图 11 为浮力引起的气压扰动示意图, 冻雨区上空的逆温层附近, 当浮力向上

(B>0),则暖层以上有 $\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 B < 0$,而暖层以下, $\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 B > 0$ 。因此,暖层内会产 生向下的气压梯度力($\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 B < 0$),即有: $-\frac{\partial p'}{\partial z} < 0 \Rightarrow \frac{Dw}{Dt} = -\alpha \frac{\partial p'}{\partial z} + B \approx 0,$ B > 0

从而抑制了暖区中的气块因浮力而产生的对流。但是,降雪区不存在逆温层,不会 有明显向下的气压梯度力抑制浮力,水汽可直接随着上升运动抬升到高层,遇冷升 华形成雪花直接降落。



图 10 冻雨区上空温度层结和浮力引起的气压扰动项示意图(a)和降雪区上空温度层结和浮力 引起的气压扰动项示意图(b), H, L分别代表气压扰动的正值区和负值区

Fig.10 Schematic diagram of the pressure disturbance term induced by temperature stratification and buoyancy over the area of (a) freezing rain (b) snowfall. H (L) represent the positive (negative) values of

the pressure disturbance.

2) 平流散度项引起的气压扰动:

因大气水平输送引起的平流项散度影响,如图 11 所示。低层该项的数值较小, 不是主要影响因素。低层暖区上有弱的 $-\nabla \cdot [\rho_0(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}] > 0, p'_D < 0;$ 近地面冷层 中,有弱的 $-\nabla \cdot [\rho_0(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}] < 0, p'_D > 0,$ 从而也会产生特别弱的从上向下的气压



图 11 平流散度项沿 106°E 的纬度-气压剖面, (a) 26 日 08 时, (b) 27 日 08 时, (c) 28 日 08 时), H和L分别代表气压扰动的正值区和负值区



3) 地转项引起的气压扰动

冻雨发生时期,贵州上空垂直涡度的变化导致暖区及其以上大气内的涡度都小 于 0,图 12 可见, $\rho_0 f \zeta < 0$, $p'_G > 0$;而近地面冷区内, $\rho_0 f \zeta > 0$, $p'_G < 0$,从 而出现了向下的扰动气压梯度力($-\alpha \frac{\partial(p_G')}{\partial z} < 0$),同样也抑制了暖区中气块因浮力 而产生的对流。四川降雪区低层不存在这样的暖区,只是 800-600hPa 间有中性层 结,从底层到高层均为向上的扰动气压梯度力,因而空气整体表现为上升运动。





因此,在总的向下的扰动气压梯度力和向上浮力相互平衡的作用下,贵州冻雨 区的暖层垂直速度变化不会很大,也不会产生强烈的上升运动。同时,由于近地面 是冷层,暖区也不会向下运动。综合作用下,暖区得以稳定维持,高层雪花降落到 近地面暖区中可能融化成水,再往下进入近地面气温低于0℃的冷区又会再次凝结。 降雪区中低层没有暖区存在,只有较为浅薄的中性层结,整层大气均为气温低于0℃ 的冷区,高层雪花降落到近地面不会被融化成水,可直接以雪花降落到地面。可 见,贵州上空和四川上空温度层结和扰动气压梯度力与浮力非平衡差异造成的垂直 运动分层明显,是这两个区域降水相态明显不同的原因之一。 5. 小结和讨论

本文分析了 2008 年 1 月下旬西南地区一次强大雪冻雨过程的广义湿位涡及暖区 维持机理,指出北方冷空气爆发南下,低空急流发展引起的暖湿气流输送和云贵准 静止锋为大雪和冻雨发生提供了有利的天气背景场。利用广义湿位涡理论和气压扰 动诊断方程对降雪和冻雨过程的分析有如下结论:

1)在云贵准静止锋背景下,冻雨发生在冷暖空气交汇的锋面强斜压环境中,降 雪发生在锋后的冷空气中。能综合描述大气动热力作用和水汽凝结非均匀分布,并 能反映准静止锋斜压性的广义湿位涡较好地指示出降雪和冻雨落区及其变化,广义 湿位涡斜压项的异常分布能更好体现降雪和冻雨区,可作为降雪冻雨区的动力识别 特征量之一,这是广义湿位涡的一个新应用;

2)此次雨雪区和冰冻区的温度层结和垂直速度存在差异,四川降雪区上空以整 层弱上升运动为主,贵州冻雨区上空以两层环流为主,低层的上升运动受到中层下 沉运动的抑制,强上升运动不容易发展。

3)浮力和扰动气压梯度力诊断表明,降雪区以弱的向上的正浮力为主要特征, 冻雨区上空的浮力在总的向下的扰动气压梯度力和向上浮力相互平衡的作用下,大 气中低层垂直运动变化较小。近地面的冷层也导致暖区不会向下运动,由此暖区得 以稳定维持,并提供了冻雨发生的温度层结。可见,同一次天气过程中,处于锋区 不同位置的区域,扰动气压梯度力与浮力之间的非平衡状态不同引起的垂直运动强 度不同,加上温度层结的差异,会导致降水相态不同。

本文诊断发现贵州冻雨时垂直方向有两层倾斜环流维持,但对锋区内环流维持 的斜压内动力过程还没有展开分析,如何根据锋区内的大气斜压内动力过程特点结 合降雪与冻雨的微物理过程,针对性地提出降雪冻雨复合型灾害天气的预报因子, 是后续研究要考虑的重点内容。此外,降雪和冻雨这样的复合降水天气分析对电力 输送和运行管理有影响,但是论文内容还没有分析降雪和冻雨预报如何指导电力运 行管理,这个也是今后该方面工作可能的实际应用出口之一,需要进一步与电力部 门需求结合进行相关工作。

致谢: 感谢中国气象局气象干部培训学院的张昕博士提供大雪冻雨过程观测图1。

参考文献:

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

Bernstein, B. C., 2000: Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain and ice pellet events[J]. *Wea. Forecasting*, **15**:485-507.

Brooks, C.F., 1920: The nature of sleet and how it is formed[J]. Mon. Wea. Rev., 48, 69-73.

- 陈天锡, 陈贵发, 穆晓涛. 1993. 驻马店地区冻雨天气特征的分析和预报[J]. 气象, 19 (2): 33–36. Chen Tianxi, Chen Guifa, Mu Xiaotao. 1993. Analysis and forecasting of freezing rain characteristics in Zhumadian [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 19 (2): 33–36.
- 陈晓刚,郭斌,张政.2001. 川西高原大雪人工神经元网络短期预报系统[J].气象,25(8):36-38. Chen Xiaogang1, Guo Bing,Zhang Zheng. 2001. The Short-range Weather Forecast for Heavy Snow in Chuanxi Plateau by BP Artificial Neural network[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25(8):36–38.
- Colenman, H., and J. Marwitz, 2002: Thermodynamic and kinematic structure of a snowband and freezing rain event during STORM-FEST[J]. Wea Forecasting, 17:27-46.
- Deng Difei, Gao Shouting, Du Xiaoling, et al. 2012. A diagnostic study of freezing rain over Guizhou China in January 2011[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 138 (666): 1233–1244.
- 杜小玲. 2007. 贵州冻雨研究及数值模拟试验[D]. 南京大学硕士学位论文. Du Xiaoling. 2007. Research the freezing rain in Guizhou and its numerical experiments by a mesoscale model [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University.
- 杜小玲, 彭芳, 武文辉. 2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 36 (5): 92–97. Du Xiaoling, Peng Fang, Wu Wenhui. 2010. Distribution and cause on frequent freezing rain zone in Guizhou[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (5): 92–97.
- 杜小玲,高守亭,许可,等. 2012. 中高纬阻塞环流背景下贵州强冻雨特征及概念模型研究[J]. 暴雨灾 害, 31 (1): 15–22. Du Xiaoling, Gao Shouting, Xu Ke, et al. 2012. Study on the synoptic features of strong freezing rain with blocking pattern in Guizhou and conceptual model [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 31 (1): 15–22.
- 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 Xiaoling, Gao Shouting, Peng Fang. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 61-72.
- Gao, S., X. Wang, and Y. Zhou.2004.Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow[J], Geophys. Res. Lett., 31, L12113.

高守亭,周玉淑,雷霆.等. 2005.北京城市夏季高温高湿天气过程分析及动力识别[J]. 中国科学, 35(增):107-114. Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting et al. 2005. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification. Chin[J]. Sci., 35:107-104.

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13250. 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.

- 高守亭,周玉淑,冉令坤. 2018.我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 42 (4): 833-846. Gao Shouting, Zhou Yushu, Ran Lingkun.2018.A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 42 (4):833-846.
- Henry, A. J., 1922: The great glaze storm of February 21-23, 1922 in the upper lake region: Discussion of general conditions[J]. *Mon. Wea. Rev.*, **50**:77-82.
- John Cortinas JR. 2000. A Climatology of freezing rain in the Great Lake Region of North America[J]. Mon. Wea. Rev.,128: 3574-3588.
- Klemp, J. B., 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms[J]. Annu. Rev. Fluid Mech., 19, 369-402.
- 寇正,刘涛玮,刘轩,等. 2021.基于气象灾害的关键电力设备风险预警模型与实现方法[J].内蒙古电力 技术, 39(5):10-14. Kou Zheng, Liu Taowei, Liu Xuan. et al. 2021. Risk early warning model for key power equipment based on meteorological disasters and its realization[J]. Inter Mongolia Electric Power(in Chinese), 39(5):10-14.
- 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. Liu Chaoru, Han Yongxiang, Wang Jin, et al. 2015. Studies on Statistics and Formation Mechanism of Freezing Rain[J]. Journal of Catastrophology(in Chinese),30(3):219-222.
- List, R. and E. P. Lozowski. 1970. Pressure perturbation and buoyancy in convective clouds[J]. J. Atmos. Sci., 27:168-170.
- Lu Zhengqi, Han Yongxiang and Liu Yubao. 2021. Improving the Ramer scheme for diagnosis of freezing rain in China[J]. Atmospheric Research, 254(2021):105520.
- McCray, C D, J. R. Gyakum, and E. H. Atallah. 2021. Synoptic–Dynamic and Airmass Characteristics Distinguishing Long- and Short-Duration Freezing Rain Events in the South-Central United States[J]. Mon. Wea. Rev., 149:1287-1304.
- McQueen, H. R., and H. C. Keith, 1956: The ice storm of January 7-10 1956 over the Northeastern United States[J]. Mon. Wea. Rev., 84:35-45.
- 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.
- 牛敏,牛铎程,王燕涛.2014.一次暴雪降温天气对电力负荷特性的影响分析[J].科技与企业,2014(07):169. Niu Min, Niu Zecheng, Wang Yantao.2014. An analysis of the Influence of a Blizzard and Cooling Weather on the Electric Load Characteristics[J]. Technology and Enterprise. 2014(07):169.
- 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, 31(5):1294-

1301. Ou Jianjun,Zhou Yuquan, Yang Qi,et al. 2011. Analyses on spatial-temporal distribution and temperature-moisture structure of freezing rain in China1[J]. Plateau Meteorology(in Chinese) 31(5):1294-1301..

- Parker, M. D. 2010. Relationship between System Slope and Updraft Intensity in Squall Lines[J]. Mon. Wea. Rev., 138: 3572–3578.
- Rauber, R. M., L. S. Olthoff, M. K. Ramamurthy, et al, 2001: A synoptic weather pattern and soundingbased climatology of freezing precipitation in the United States east of the Rocky Mountains[]. J. Appl. Meteor., 40:1724-1747.
- 陶诗言,卫捷.2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析.气候与环境研究,13(4):337-350. Tao Shiyan, Wei jie. 2008. Severe Snow and Freezing-Rain in January 2008 in the Southern China[J]. Climatic and Enviro nmental Research(in Chinese), 13(4):337-350.
- 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. Tao Yue, Shi Yueqing, Liu Weiguo. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,. (in Chinese), 36(3): 507-522.
- Spengler, J. D., and N. R., 1972: Gokhale, Freezing of freely suspended, supercooled water drops in a large vertical wind tunnel. J. Appl. Meteo., **11**:1101-1107.
- Stewart, R.E., 1985: Precipitation types in Winter Storms. Pure Appl.Geophys.123:597-609.
- Szeto K K, A Tremblay, H Guan, et al. 1999. The Mesoscale Dynamics of Freezing Rain Storms over Eastern Canada[J. Atmos Sci, 56: 1261-1281.
- 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):405-423. 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.Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 66(3):405-422.
- 许丹,罗喜平. 2003. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析[J].高原气象, 22(4):401-404.Xu Dan, Luo Xi Ping. 2003. Time and Space Characters of Congeal in Guizhou and Circulation Features Analyses[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 22(4):401-404.
- 严小冬,吴战平,古书鸿. 2009. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J].高原气象, 28(3):694-701. Yan Xiaodong, Wu Zhanpin, Gu Shuhong. 2009. Analyses on the Space-Time Distribution Characteristics and Their Influence Factors of Freezing Rain in Guizhou Province[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 28(3):694-701.
- 臧海佳.2009. 近52年我国各强度降雪的时空分布特征[J]. 安徽农业科学, 37(13):6064-6066. Zang Haijia 2009. Temporal and Spatial Distribution Characters of the Snowfall with Various Intensities during 1954-2005 in China[J]. Journal of Anhui Agri.Sci(in Chinese), 37(13):6064-6066.

- 张昕,高守亭,王瑾. 2015. 2008年1月贵州冻雨的数值模拟和层结结构分析[J]. 高原气象, 34(2):368-377. Zhang Xin, Gao Shoutign, Wang Jin. 2015. Numerical Simulation and Stratification Structure Analysis of Freezing Rain Event in Guizhou in January 2008[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 34(2):368-377.
- 赵彩. 1995. 贵州雨凇积冰过程的云层特征及环流背景[J].气象, 21 (5):48-52. Zhao Cai. 1995. An analysis on the cloud macro characteristics and circulation background of the severe glaze icing in Guizhou [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 21 (5): 48-52.
- 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.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 Enviro nmental Research(in Chinese), 13(4): 351-367.
- 朱坤,刘华强,丁守智,等. 2009. 长江中下游一次暴雪冻雨微物理过程模拟研究[J]. 气象与环境学报, 23(3):1-7. Zhu Kun,LIU Huaqiang,Ding Shouzhi et al. 2009. Microphysical process simulation of a snow storm freezing rain in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Journal of Meteorology and Environment(in Chinese), 23(3):1-7.
- 周玉淑. 2009.广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用. 大气科学, 33(5):1101-1110.Zhou Yushu. 2009. Application of generalized moist potential vorticity to analysis and forecast of the torrential rain over the Changjiang-Huaihe River basin. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,. (in Chinese), 33(5): 1101-1110.
- 宗志平,马杰. 2011. 2008年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J]. 气象, 37(2):156-160. Zong Zhipign, Ma Jie. 2011. The relationship between the strength variability of freezing rain and the character of inversion in the beginning of 2018. Meteorloghy(in Chinese), 37(2):156-160.
- 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 Zhipign, Ma Jie, Zhang Hengde, et al. 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades. Meteorloghy(in Chinese), 39(7):813-820.



