

彭霞云,刘汉华,李文娟,等,2020.一次局地暴雪过程低层降温机制分析[J].气象,46(8):1015-1025. Peng X Y, Liu H H, Li W J, et al, 2020. Analysis of low-level temperature cooling mechanism of a local snowstorm process[J]. Meteor Mon, 46(8): 1015-1025(in Chinese).

一次局地暴雪过程低层降温机制分析^{*}

彭霞云 刘汉华 李文娟 赵 放 孔照林

浙江省气象台,杭州 310017

提 要: 2015 年 12 月 5 日在强西南暖湿气流和弱冷空气配合之下,浙江杭州到安徽黄山一带出现了局地大到暴雪,此次过程预报偏差较大。通过对水汽、动力和温度条件分析表明:强西南暖湿气流和冷暖空气的辐合为大量地面降水的产生提供了水汽和动力条件;深厚的湿层和合适的中层温、湿条件有利于生成大量可供降落的冰雪晶;转雪前杭州站低层异常降温是形成降雪的关键原因。通过对降温机制的分析表明:引起杭州站低层降温的原因主要是水物质相变相关的非绝热加热,冷平流的作用很弱。5 日 08 时之前低层降温主要是降水粒子蒸发吸热引起的;5 日白天低层降温主要是由大量冰(雪)晶融化吸收环境潜热导致,冷平流和垂直输送项也有部分贡献。预报中对降温机制分析不足,可能是导致预报偏差的主要原因。该个例中平流等降温机制较弱,冰晶融化吸热作用导致中低层形成 0℃ 的均温层,从而使冰晶顺利到达地面。中低层温度与常用的预报相态的温度阈值相差较大,说明预报中不能机械依赖温度指标,而应全面分析降雪形成的物理机制。当降水量大时,融化吸热可以成为降温的主要机制,预报中应予以充分考虑。

关键词: 降雪,非绝热加热,蒸发潜热,融化潜热

中图分类号: P458, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.002

Analysis of Low-Level Temperature Cooling Mechanism of a Local Snowstorm Process

PENG Xiayun LIU Hanhua LI Wenjuan ZHAO Fang KONG Zhaolin

Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017

Abstract: On 5 December 2015, with strong southwest warm and humid air and weak cold air, a heavy snowstorm occurred in the area from Hangzhou of Zhejiang Province to Huangshan of Anhui Province. The forecast for this process was quite inaccurate. The analyses of water vapor, power and temperature conditions in this paper show that the strong southwest warm and humid airflow, the convergence of cold and warm air provided abundant water vapor and dynamic conditions for the generation of a large amount of surface precipitation. The deep wet layer, suitable intermediate temperature and humidity conditions were favorable for the generation of a large number of snow and ice crystals for landing. The abnormal temperature drop at the lower level of Hangzhou Station before the snowfall was the key cause for snowfall. The analysis of the cooling mechanism shows that the cause of the low-level temperature drop at Hangzhou Station was mainly non-adiabatic heating related to water vapor phase transition, and the effect of cold advection was weak. The low-level cooling before 08:00 BT on 5 December was mainly caused by the evaporation of precipitation particles; the low-level cooling during the day was mainly caused by a large amount of ice (snow) crystal melting to absorb the latent heat of the environment, and the cold advection and vertical

^{*} 浙江省科技厅重点项目(2017C03035)资助

2019 年 4 月 24 日收稿; 2020 年 5 月 15 日收修定稿

第一作者:彭霞云,主要从事天气预报工作. E-mail:76608060@qq.com

transport items also contributed. The main reason for the failure of the forecast was the dependence on temperature index and the insufficient analysis of the cooling mechanism. In this case, the cooling mechanism such as advection was weak, and the melting and heat absorption of ice crystals caused the middle and lower layers to form a uniform temperature layer of 0°C , so that the ice crystals reached the ground. The middle and lower temperature was quite different from the temperature index commonly used in discerning precipitation type, which indicates that the temperature index can not be applied mechanically, and the physical mechanism of snowfall formation should be comprehensively analyzed. When precipitation amount is large, melting heat absorption can become the main mechanism of cooling, which should be fully considered in the forecasting operation.

Key words: snowfall, non-adiabatic heating, latent heat of evaporation, latent heat of melting

引 言

暴雪是冬季的主要灾害性天气之一,对交通运输、城市生活等危害巨大。近年来气象工作者在降雪天气的预报技术及形成机理上进行了大量研究(叶成志等,2009;周雪松等,2013;张备等,2014;姚晨等,2018;侯瑞钦等,2011;陈涛和崔彩霞,2012;张萍萍等,2015;覃志年等,2010;赵宇等,2018;刘畅等,2016;熊秋芬等,2018),并在水汽输送以及动力强迫和维持机制等方面取得了很多成果。

然而雨雪转换过程中对地面降水相态的准确判别仍然是预报中的难点问题。漆梁波和张瑛(2012)提出了用低层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)。甘文强等(2018)研究表明温度层结、云顶温度、地面温度等对不同降水相态的形成有重要影响。刘玉莲等(2018)研究了降水相态的单临界气温模型。另外也有许多研究人员针对不同地区降雪天气给出相态判别指标(杨成芳等,2013;张琳娜等,2013;高松影等,2014;苗爱梅等,2014)。这些研究显示低层温度层结是影响降水相态的关键因素。Thériault et al (2010) 研究认为温度廓线 0.5°C 的偏差就能引起降水相态变化。而引起温度层结变化的原因非常复杂,加强对温度层结变化机制的理解和认识对做好降水相态预报非常重要。Lackmann et al(2002)研究了低层逆温层结中冻结和融化作用对降水相态的影响。Thériault et al(2010)认为降水率也对降水相态有重要影响。Kain et al(2000)应用简化的公式估算雪花在融化过程中的非绝热冷却作用对相态转变的影响。国内,廖晓农等(2013)分析了北京地区一次相态转化的原因,认为其是回流冷空气和槽

后冷空气入侵导致。刘建勇等(2013)对比分析了寒潮型暴雪和冷暖空气对峙型暴雪的温度诊断方程各项,认为温度水平平流和非绝热加热项起主要作用。杨舒楠等(2017)研究了低层温度平流对相态的影响。翟亮等(2018)对北京 2016 年初雪过程进行温度平流分析,指出暖平流偏强导致零度层高度下降慢,使降雪实况比预报偏小。徐辉和宗志平(2014)分析了一次降水相态转换过程中温度垂直结构的变化特征,指出相关层次的融化作用引起温度垂直结构变化并伴随相态的变化。这些研究大部分侧重于温度平流的作用,对非绝热加热项的研究较少,对实际预报业务中复杂的天气状况而言,这些研究还远远不够。如 2015 年 12 月 5 日杭州局地大到暴雪过程,预报中对低层降温及雨雪转换预判不足,导致漏报,其雨雪转换机制及预报偏差原因值得进一步探讨和总结。

本文利用欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料、地面自动站逐小时观测和每日两次常规探空资料对 2015 年 12 月 5 日局地强降雪过程进行分析,从温度倾向方程和热力学方程出发,重点讨论相态变化过程中低层温度的变化及变化原因。文中所用时间均为北京时。

1 天气实况

2015 年 12 月 4 日夜间到 5 日白天随高空槽东移,降水带 4 日夜间开始先随着暖湿气流由浙江西南部北抬,5 日中午前后最北达到安徽和江苏沿江一带,6 日 02 时前后随着高空槽过境降水结束。从 5 日 08 时至 6 日 08 时降水量分布图(图 1a)看,江苏和安徽南部降水量大多在 10 mm 以下,浙江、福建和江西大部出现 30 mm 以上降水,浙江中南部地

区局部出现 50 mm 以上暴雨。过程中伴随局地大到暴雪,降雪区位置如图 1a 中虚线所示,分布在 30°N 附近、安徽黄山到杭州一带。从 6 日 08 时积雪深度分布图(图 1b)上可以看到,区域站中积雪深度最大站为杭州临安(13 cm),杭州本站积雪深度为 8 cm,另外根据气象协理员上报的数据,最大积雪深度出现在临安湍口镇(20 cm),并有 6 个乡镇(镇)积雪深度超过 10 cm。浙江西部山区于 5 日 05 时开始出现降雪(图略),杭州观测站于 05 时开始降雨,早晨到上午基本为雨,12 时前后转为雨夹雪,傍晚转为纯雪(图 2)。一般而言,纬度越高、冷空气越强、降雪的温度条件越好,但这次降雪没有出现在江苏和安徽沿江一带,而是集中在黄山到杭州附近,降雪范围小但局地雪量大。黄山和杭州的西部都是山

区,海拔高、地面温度低容易出现降雪,但杭州市区为平原为什么也出现大雪?

对于此次局地大到暴雪过程,模式预报有较大分歧,同为 12 月 4 日 00 时(世界时)起报,EC 模式预报准确报出 5 日白天安徽黄山到杭州一带的明显降雪(图略),而 GFS 模式仅在西部山区预报了降雪(图略)。由于此次过程西南气流强势,而冷空气势力较弱(见第 2 节形势分析),且中低层温度不符合本地预报降雪指标(一般认为 925 hPa 达到 -2℃)。4 日主观预报仅预报山区有纯雪,平原地区有雨夹雪,与实况有较大的偏差。预报中过多地依赖低层的温度指标,而对降雪物理机制及低层降温机制认识不足,可能是导致预报产生偏差的原因。

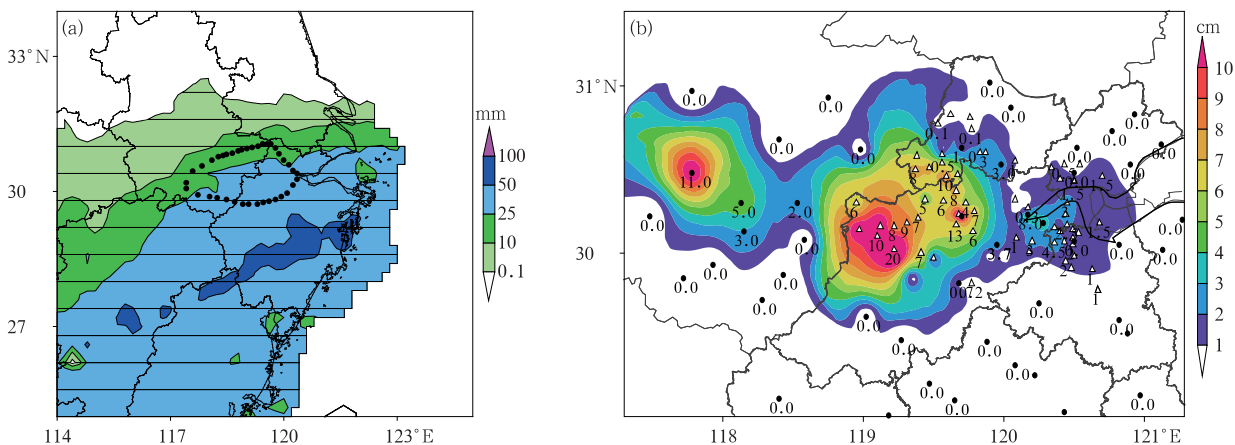


图 1 2015 年 12 月 5 日 08 时至 6 日 08 时降水量分布(a,填色)和 6 日 08 时积雪深度分布(b,填色)
(图 1a 中虚线所示范围为降雪区;图 1b 中圆点为国家观测站,三角形表示乡镇气象协理员观测位置)

Fig. 1 The 24 h accumulated precipitation from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 6 (a, colored) and snow depth valid at 08:00 BT 6 (b, colored) December 2015

(In Fig. 1a, dashed line represents snow area; in Fig. 1b, circle point represents data from national observation station, triangle point represents the data observed by assistant weather observer)

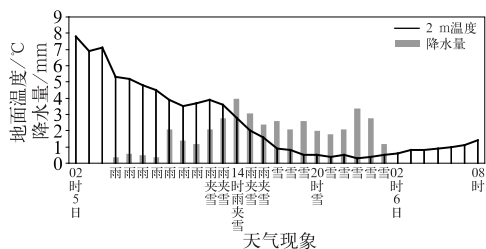


图 2 2015 年 12 月 5 日 02 时至 6 日 08 时杭州站地面 2 m 温度、雨雪量与天气现象演变

Fig. 2 The 2 m temperature, precipitation amount and weather condition at Hangzhou Station from 02:00 BT 5 to 08:00 BT 6 December 2015

2 环流形势

2015 年 12 月 2—4 日 500 hPa 亚欧中高纬维持两槽一脊的形势,我国东北地区为一深厚切断低涡,浙江位于低涡底部,涡后最大风速达 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,引导冷空气不断南下影响长江中下游地区(图略)。到 12 月 5 日 08 时 500 hPa 高度场(图 3a)上东北冷涡东移入海,南支槽和高原槽叠加东移到 100°E 左右,浙江处于槽前旺盛的西南气流中,西南气流强度超过 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,带来充沛的水汽,到 5 日 20 时仍被旺盛的西南气流控制(图 3b)。08 时地面气压场(图 3a)

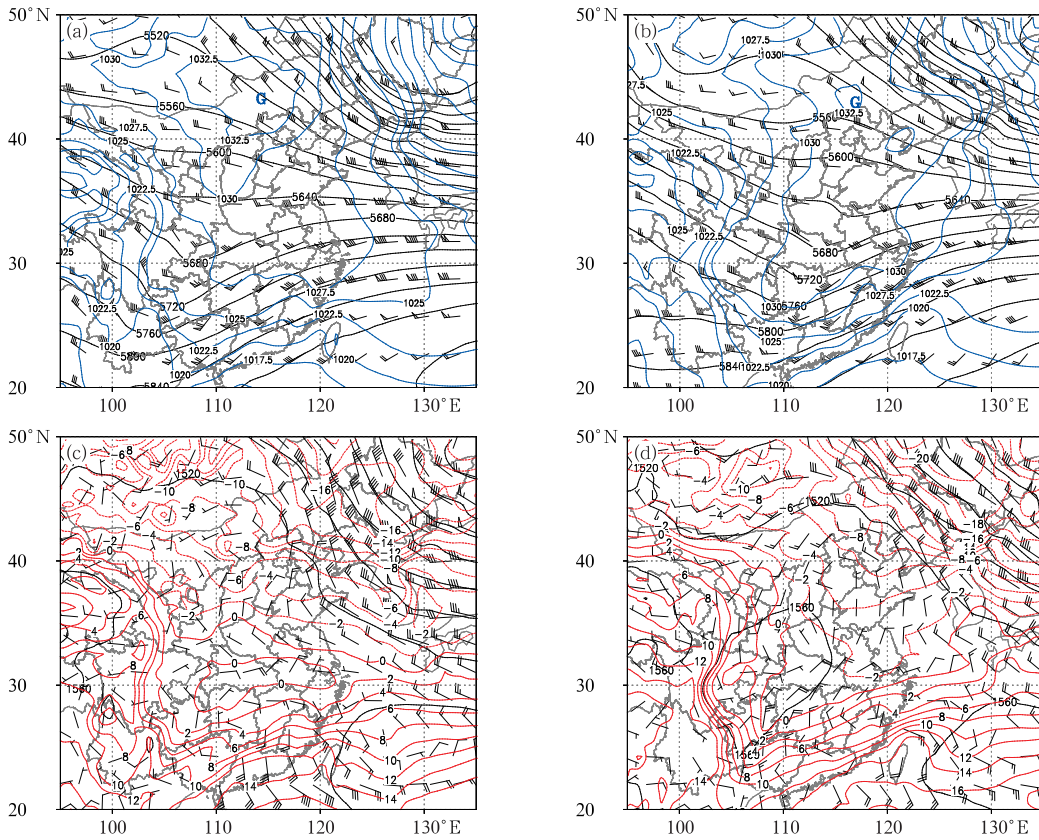


图 3 EC-Interim 资料绘制 2015 年 12 月 5 日 08 时(a)、20 时(b)500 hPa 高度场(黑线,单位:gpm)、风场(风羽)和海平面气压(蓝线,单位:hPa),5 日 08 时(c)、20 时(d)850 hPa 高度场(黑线,单位:gpm)、风场(风羽)、温度场(红线,单位:℃)

Fig. 3 The 500 hPa height (black line, unit: gpm), wind field (barb) and sea level pressure (blue line, unit: hPa) valid at 08:00 BT (a), 20:00 BT (b) 5 December 2015; the 850 hPa geopotential height (black line, unit: gpm), wind (barb), temperature (red line, unit: °C) valid at 08:00 BT (c) and 20:00 BT (d) 5 December 2015

显示前一股冷空气已达到华南地区,长江中下游地区处于锋后冷区,而北方蒙古地区有一冷高压中心,并小幅向南扩散,到 20 时(图 3b)浙北地区海平面气压增加了约 2.5 hPa。5 日 08 时 850 hPa 上(图 3c)切变线位于浙江中北部,降雪区基本为弱东北气流控制。到 5 日 20 时 850 hPa(图 3d)切变线位置少变,切变线北侧东北风略有增强,同时零度线也南压到浙北,表明低层冷空气势力略增强向南推进。从 850 hPa 温度场(图 3c,3d)看,杭州地区温度为 0℃左右。

高空南支槽前西南气流带来暖平流,低层冷空气较弱,另外低层温度较高,前期地面温度也较高,都不利于达到降雪所需的温度条件,预报员容易做出错误判断。

3 动力和水汽条件

ERA-Interim 每日数据集资料,其分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$,每日 4 个时次,是经过四维变分同化的再分析资料,准确率较高。本研究利用该数据分析风场、温度、水汽垂直分布特征。

沿 120°E 做 $v-w$ 合成风场垂直剖面(图 4a)可以看到,降雪区低层为偏北下沉气流,对应干冷空气,800 hPa 以上转为偏南上升气流,对应暖湿空气,表明暖湿空气在低层冷垫上爬升。由杭州站水平风场随时间演变图(图 4b)可以看到,700~500 hPa 西南气流从 5 日 08 时开始增强,6 日 08 时减弱;低层偏东气流也同步加强,5 日 14 时转为东北风,风速增

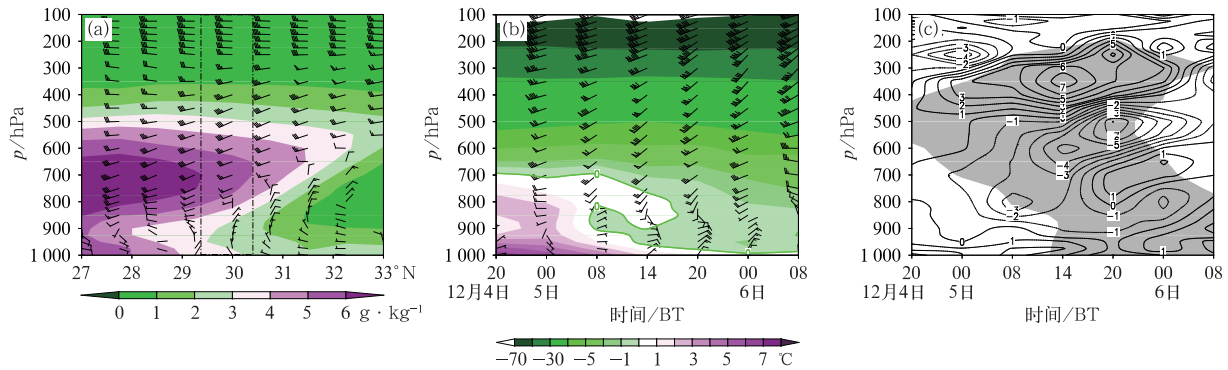


图 4 EC-Interim 资料绘制的 2015 年 12 月 5 日 08 时沿 120°E 的 $v-w$ 合成风场(风羽, w 扩大 10 倍)和比湿(填色)剖面(a; 虚线范围内为降雪区, 其左侧为大雨区, 右侧小雨区); 4 日 20 时至 6 日 08 时杭州站(b)温度(填色)和水平风(风羽), (c)相对湿度($>90\%$, 阴影)和散度(等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1})时间-高度剖面

Fig. 4 (a) Vertical cross sections of $v-w$ combined wind (barb, w enlarged 10 times) and specific humidity (colored) along 120°E valid at 08:00 BT 5 December 2015 (Region within the dashed line is snowfall, left is heavy rain, right is light rain); (b) time-height cross section temperature (colored) and horizontal wind (barb), (c) time-height cross section relative humidity (shaded, $>90\%$) and divergence of water vapor flux (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) in Hangzhou Station valid from 20:00 BT 4 to 08:00 BT 6 December 2015

强到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 6 日 02 时减弱。暖湿气流和低层冷空气的共同加强, 促进锋面抬升, 从散度场(图 4c)上也可以看到辐合强度从 5 日 08 时开始逐渐增强, 时间与图 2 中杭州站降水较强时段基本吻合。

从比湿的垂直剖面(图 4a)图中可以看到降雪区最大比湿位在 700 hPa 达到 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从相对湿度演变(图 4c)可以看到 5 日 02—14 时湿层同时向下和向上发展。08 时 800 hPa 以上空气接近饱和, 而该层以下空气较干。降水较强时段 5 日 14—20 时 200 hPa 到地面都为饱和湿层。6 日 02 时中高层大气逐渐变干, 降水渐止。

丰富的水汽供应以及深厚的湿层有利于形成冰晶的播撒反馈机制。由图 4c 可知, 5 日 14—20 时相对湿度达到 90% 的层次可达 200 hPa, 如果认为相对湿度 $\geq 90\%$ 就是云区, 那么云顶温度可达 -50°C 。上层云层以冰晶为主, 而低层 850~600 hPa 温度均在 $-5\sim 0^\circ\text{C}$, 并存在持续强辐合, 集聚大量可供消耗的过冷水, 在上层落下的冰晶的催化下, 产生大量可降落的冰(雪)晶。冰晶在下落过程中是否融化, 是决定降雪的关键, 只有足够低的零度层高度才能产生地面降雪。另一方面, 大量的冰晶也能通过融化蒸发等使低层的环境气温下降, 改善低层的温

度条件(Kain et al, 2000), 具体将在第 4 节讨论。

4 温度条件分析

4.1 杭州温度廓线的时间演变特征

从图 4b 杭州站温度廓线随时间演变来看, 4 日 20 时至 5 日 02 时 925~800 hPa 温度有所上升。到 5 日 08 时 800 hPa 以下气温快速降低, 900~800 hPa 降至略低于 0°C , 但 800~700 hPa 仍为 $0\sim 1^\circ\text{C}$ 的暖层, 形成弱逆温结构。5 日 08—14 时 900 hPa 至地面温度进一步下降, 但弱逆温层结仍然存在。直至 5 日 20 时逆温层结消失, 700 hPa 至近地面温度都降低至 $-1\sim 0^\circ\text{C}$, 此后继续缓慢下降。由温度廓线变化结合图 2 天气现象分析可见: ① 5 日 02—08 时 800 hPa 以下层温度快速降低, 伴随实况降水出现; ② 5 日 08—14 时低层温度进一步降低, 伴随实况开始出现雨夹雪; ③ 5 日 14—20 时融化层消失, 伴随实况转为纯雪。

4.2 杭州站低层冷池特征

用实况探空资料统计了杭州站和其北侧的南京站(天气现象为小雨)以及南侧的衢州站(天气现象

为大雨)700 hPa 到地面温度变化情况(表 1)。可以看到 4 日 20 时,杭州站各层温度都高于南京站,低于衢州站。到 5 日 08 时 700 hPa 降温幅度北大南小,南京站下降 1.6℃,杭州站下降 0.7℃,衢州站升温 0.2℃;850 和 925 hPa 杭州、衢州站降温显著(其中杭州站降至 0℃),南京站反而升温 0.2℃;1000 hPa 和 2 m 温度也类似,杭州和衢州站降温显著,南京站降温较少。由于杭州站基础温度较低,且降温幅度巨大,因此 5 日 08 时 850 hPa 以下杭州站周围形成一个温度较低的冷池,为后期转雪提供有利基础。

5 日 08—20 时杭州站 925~700 hPa 温度下降 0.5~1.0℃,1000 hPa 和地面 2 m 温度降幅达 4℃。衢州站 700 hPa 温度下降,850 和 925 hPa 温度上升,1000 hPa 和地面 2 m 温度略微下降。南京站 1000~700 hPa 温度降幅达 3℃左右,但地面 2 m 温度下降较少。由于 1000 和 925 hPa 的显著降温,5 日 20 时杭州站低层温度的冷池特征更加显著,为地面产生降雪和积雪提供有利条件。

杭州站低层温度相对于周围站点异常下降是产生降雪的关键因素,下面分别对 4 日夜間和 5 日白天杭州站温度异常下降的原因进行分析。

4.3 降水蒸发对低层温度变化的作用

由温度倾向方程可知,温度的局地变化由水平温度平流、垂直运动引起的垂直方向热量输送和非绝热加热共同组成。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V_g \cdot \nabla T - \omega(\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

表 1 2015 年 12 月 4 日 20 时、5 日 08 时和 20 时杭州、衢州、南京站温度对比(单位:℃)

Table 1 Comparison of temperatures observed by Hangzhou, Quzhou, Nanjing stations at 20:00 BT 4, 08:00 BT 5, 20:00 BT 5 December 2015 (unit: °C)

时间	站点	700 hPa	850 hPa	925 hPa	1000 hPa	2 m 温度
4 日 20 时	杭州	0.0	1.2	2.6	7.6	8.2
	衢州	1.4	3.6	4.0	8.4	8.8
	南京	-1.7	0.2	1.6	7.2	5.5
5 日 08 时	杭州	-0.7	0.0	0.0	4.6	4.5
	衢州	1.6	1.4	0.8	5.2	6.0
	南京	-3.3	0.4	1.8	5.4	5.4
5 日 20 时	杭州	-1.7	-0.5	-0.9	0.2	0.5
	衢州	0.0	3.0	1.2	4.0	5.2
	南京	-6.9	-2.9	-0.1	3.0	4.7

式中: γ_d 为干空气温度递减率, γ 为环境温度递减率。

利用 ERA-Interim 资料计算温度平流项和垂直热量输送项,图 5 给出杭州、衢州、南京站热量变化的垂直分布。总体来说:①800 hPa 以上层的热量变化显著大于低层。②平流项 800 hPa 以上多为暖平流,其中衢州站最强、杭州站次之、南京站最弱,与西南气流的输送强度一致;800 hPa 以下平流都很弱,衢州站低层冷平流最强,与其北侧为冷池有关。③垂直输送项杭州、衢州站 800 hPa 以上为强负变温,根据垂直项的公式, γ_d 约为每 100 m 下降 1℃,即 0.01℃·m⁻¹,从图 4b 中可知本个例中中低层大气环境温度递减率小于干绝热递减率,表明上升冷却作用较强。

分析 5 日 02—08 时杭州站低层温度降低的原因。5 日 02 时和 08 时,850 hPa 及以下杭州站平流和垂直输送项都较弱(图 5a,5b),仅在 5 日 02 时 950 hPa 以下存在弱冷平流,而垂直输送项各层都为增温,因此两项之和几乎都为正。以 925 hPa 为例,杭州站 5 日 02 时和 08 时为弱暖平流(<0.05℃·h⁻¹)和由下沉增温引起的正垂直热量输送(0.1~0.2℃·h⁻¹),两者都无法解释低层的显著降温,主要的原因只能是非绝热加热作用。非绝热加热项包括太阳短波辐射、地面长波辐射、水汽相变潜热、地面与大气之间的热量和水汽通量等。本个例中一直有厚云层覆盖,忽略太阳辐射的影响,925 hPa 及以上大气受地面热量通量的影响相对较小,因此主要考虑相变潜热的影响。

从图 4c 和图 6a 可知,4 日 20 时至 5 日 08 时杭州地区低层空气饱和度较低,5 日 05 时开始地面已产生降雨,降水经过下层较暖的未饱和空气时必然有融化或者蒸发,吸收环境的潜热。根据热力学第一定律:

$$c_p dT - \alpha dp = \Delta Q \quad (2)$$

式中: c_p 为定压比热容, ΔQ 为热量变化。杭州站 4 日 20 时抬升凝结高度为 813 hPa,考虑 925 hPa 在 4 日夜間到 5 日早晨处于云底以下,且温度基本在 0℃以上,仅考虑雨滴蒸发潜热的作用就可,舍去第二项做功项,可以简化为公式(3)。

$$c_p \cdot dT \approx L_v \cdot dq \quad (3)$$

式中: dq 为由于蒸发引起的单位质量空气水汽含量

的变化,即比湿的变化, L_v 为蒸发潜热。

根据比湿变化方程(杨军等,2011):

$$\frac{dq}{dt} = K_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + b \quad (4)$$

式中右边第一项为垂直方向湍流扩散项, K_z 为湍流扩散系数,第二项 b 为相变项。湍流扩散较难估算,考虑 4 日 20 时至 5 日 08 时低层 850 hPa 以下垂直风切变较小,且温度层结是稳定的,机械湍流和热力湍流活动都较弱,比湿的变化主要由相变引起。蒸发潜热取 $2500 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, c_p 取 $1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,则由蒸发引起 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的比湿增量,大致引起 2.5°C 降温。根据杭州、衢州、南京站 4 日 20 时和 5 日 08 时探空观测,计算得到 925 hPa 的 12 h 比湿

变化,估算相应的温度变化,结果见表 2。杭州站 12 h 比湿增加了 $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,引起了 5.8°C 的降温,相对于实况降温 2.6°C ,降温贡献达 223%,足以平衡平流和垂直输送引起的增温。可见在 4 日夜間到

表 2 2015 年 12 月 4 日 20 时至 5 日 08 时杭州、衢州、南京站 925 hPa 比湿变化和估算的温度变化
Table 2 Comparison of variations of specific humidity and estimated temperature at 925 hPa at Hangzhou, Quzhou and Nanjing stations from 20:00 BT 4 to 08:00 BT 5 December 2015

站点	$\Delta q/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
杭州	2.3	-5.8
衢州	0.7	-1.5
南京	-0.08	—

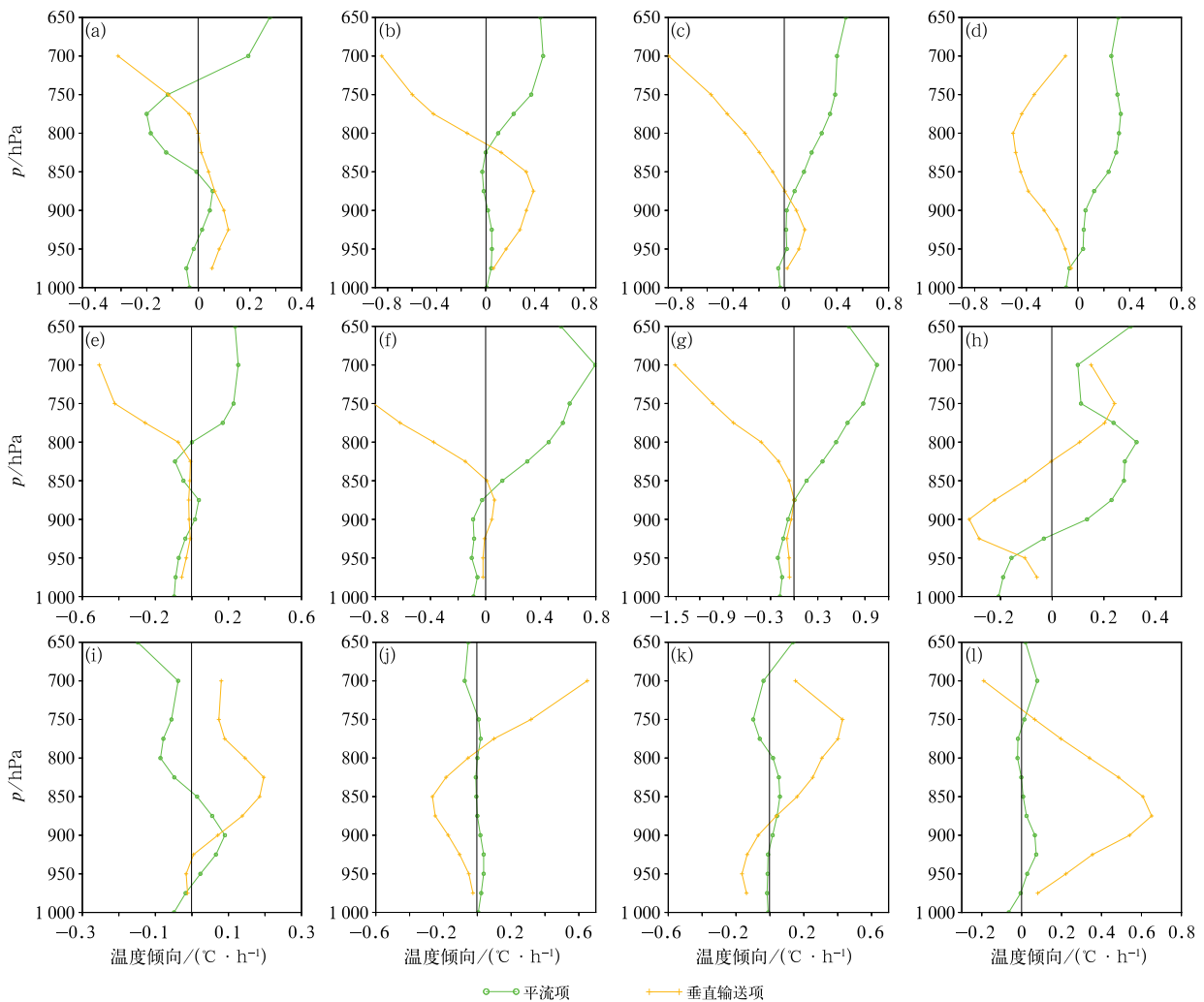


图 5 2015 年 12 月 5 日 02 时(a,e,i)、08 时(b,f,j)、14 时(c,g,k)、20 时(d,h,l) 杭州站(a~d)、衢州站(e~h)、南京站(i~l)局地温度变化的平流项和垂直输送项

Fig. 5 Profile of temperature advection, vertical transport valid at Hangzhou (a~d), Quzhou (e~h), Nanjing (i~l) stations at 02:00 BT (a, e, i), 08:00 BT (b, f, j), 14:00 BT (c, g, k), 20:00 BT (d, h, l) 5 December 2015

5日早晨降水粒子的蒸发吸热机制是杭州站925 hPa异常降温的关键原因。需要说明的是,对非绝热加热项的估算是建立在大量简化基础上的(比如忽略地表长波辐射对大气的加热作用,而且比湿的变化可能并不全是蒸发引起的),只能做定性的判断,不能使温度倾向方程完全平衡。

衢州站比湿变化为 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽蒸发引起的降温也较显著,降温贡献占46%。衢州站5日02时和08时900 hPa以下温度平流和垂直输送项都为负变温(图5e,5f)。可见衢州站低层降温为冷平流、上升冷却和相变三者综合作用。南京站4日20时至5日08时没有降水,比湿变化很小,没有蒸发潜热作用。图5i,5j中南京站5日02时、08时925和850 hPa为弱暖平流,垂直输送项5日02时为增温,08时为降温,综合起来温度变化较小,这与实况也较吻合。

另外南京站5日08—20时1000~700 hPa降温幅度很大,而从图5i,5j中可以看到温度平流和垂直输送项之和基本都为增温,因此温度下降也源于非绝热加热项的作用。从图6e,6f可以看到南京站低层从5日08—20时为显著的增湿过程,降水云团北抬过程中,云滴或雨滴的蒸发吸热作用可能是降温的主要原因。

4.4 冰晶融化对近地面温度变化的作用

从4.2节的分析中已知,5日08—20时杭州站1000 hPa和地面2 m温度降幅达到 4°C 。从图5c,5d可知,杭州站5日14—20时950 hPa以下有弱冷平流(约为 $-0.05^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$),5日20时950 hPa以下有垂直输送项有弱负变温(约为 $-0.1^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$),但这两项相加远不能达到 4°C 的降温幅度,因此非绝热加热项仍是降温的主要原因。

Lumb(1961)指出雪花能从融化层(零度层)下落大约400~700 m,取决于降水强度、环境湿度和温度垂直变化率。Lackmann et al(2002)指出地面温度大于 0°C ,但空中降雪强度足够大时,可逐渐吸收大量融化潜热,导致地面温度降至 0°C 。Kain et al(2000)、徐辉和宗志平(2014)利用经验式(5)估算了降雪过程中固态降水融化导致的低层温度变化。

$$\delta T = -193D/\delta p \quad (5)$$

式中: D 是以cm为单位的地面累计降水; δp 是融化潜热影响的气压层厚度,单位:hPa; δT 是引起的平均温度变化,单位: $^\circ\text{C}$ 。关于式(5)的具体推导过程参见Kain et al(2000)。

从图2可知,杭州站从05时开始有弱降水,09时开始雨量明显增强,考虑此时低层已接近饱和,蒸发作用减弱,固态粒子的融化吸热是温度非绝热变化的主要因素。杭州观测站录得10—16时(转为纯雪之前)地面累计雨量(雪量也转为雨量)为2.42 cm。由图4b温度层结的变化可知,5日08时925 hPa以下到地面温度都大于 0°C 。800~700 hPa为温度略大于 0°C 的暖层,925~800 hPa为略低于 0°C 的冷层,粒子通过该气层时先部分融化,又部分冻结。简单地考虑该暖层和冷层对固态粒子的热量作用基本平衡,那么融化作用的层次为925 hPa到地面1024 hPa约为100 hPa。考虑粒子全部融化,计算得到融化潜热将使气柱平均温度下降约 4.7°C 。

需要指出,12—16时地面为雨夹雪,粒子在空中并未完全融化。从杭州站08时探空(图6a),估算925 hPa到地面平均温度大约为 3.1°C 。气象观测中对于雨夹雪含液态水量的范围没有明确定义,如果假设固态粒子中50%的质量被融化,那么也能使气柱降温 2.35°C ,对降温贡献也非常大。而温度平流和垂直输送项起补充作用。

由式(5)可知,当降水量比较大时,融化潜热对环境温度的影响非常可观。杭州站降水量足够大,冰晶融化对低层大气的降温作用显著。从5日20时杭州站探空(图6b)可以看到,由于温度平流和垂直输送作用较弱或相互平衡时,持续的冰晶融化作用导致零度层以下逐渐形成一个接近零度的均温层。由自动站观测降水数据得到南京站过程总累计雨量仅为0.04 cm,融化潜热导致的降温作用远小于杭州站,5日20时南京站探空(图6f)零度层以下没有均温层形成,地面降温也很小。而衢州站,虽然降水量足够大,但气层温度过高,零度层高度在08时位于700 hPa以上(图6c)。由图5f~5h可知850~700 hPa暖平流作用较强,并且5日20时垂直输送也转为增温,因此到20时衢州站850 hPa温度反而有所上升(图6d)。

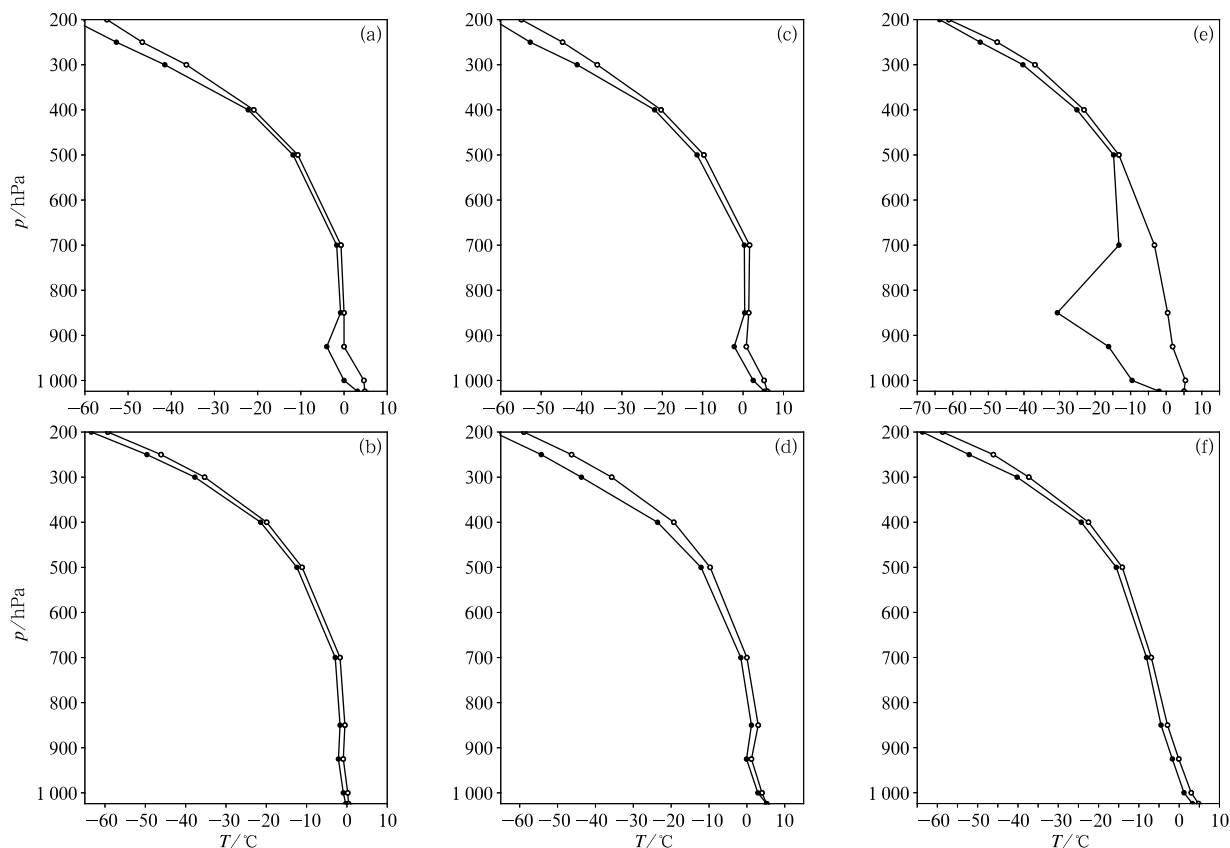


图 6 2015 年 12 月 5 日 08 时(a, c, e)和 20 时(b, d, f)杭州站(a, b)、衢州站(c, d)、南京站(e, f)探空温度(空心圆)和露点温度(实心圆)廓线

Fig. 6 Sounding temperature (open circle) and dew point temperature (closed circle) profiles at Hangzhou (a, b), Quzhou (c, d), Nanjing (e, f) stations valid at 08:00 BT (a, c, e) and 20:00 BT (b, d, f) 5 December 2015

5 结论与讨论

2015 年 12 月 5 日伴随一次大范围降雨过程,浙江杭州和安徽黄山一带出现局地大到暴雪,该过程降雪范围较小,局地雪量大,预报有一定的难度。通过对水汽、动力和低层降温机制分析表明:

(1)700~500 hPa 旺盛的西南气流为降雪提供充沛水汽条件,冷暖空气的辐合为降雪提供了有利的动力条件。

(2)深厚的湿层和合适的中层温湿度条件有利于贝吉龙机制作用,促进过冷水向冰晶转化,生成大量可供降落的冰雪晶。

(3)杭州站低层异常降温是形成降雪的关键原因,而引起杭州站低层降温的原因主要是水的相变相关的非绝热加热。5 日 08 时之前低层降温主要由降水粒子蒸发引起,5 日白天低层降温主要是大

量冰雪晶融化吸收环境潜热导致,平流和垂直输送起补充作用。

(4)该降雪过程发生在强冷垫上层暖平流和弱下层冷平流背景下,充足的水汽供应和较大的降水量及合适的中低层温度配置是降雪只在 30°N 附近产生的关键原因。偏南区域水汽条件充沛,但是暖平流强,温度高;偏北的区域水汽含量较少,湿层不深厚,冰晶产生量较少,冰晶融化引起的降温不足以使近地面温度降低到下纯雪。

(5)预报中依赖温度指标,而对降温机制考虑不足,可能是本次过程预报失败的主要原因。冰晶下落过程中只要环境温度(如果空气未饱和,更准确地说湿球温度)达到或低于零度就能不融化。本个例中平流等降温机制较弱,冰晶融化吸热作用导致中低层形成 0°C 的均温层,从而使冰晶顺利达到地面。中低层温度和常用的预报相态的温度阈值相差较大,传统的阈值判别,主要依赖统计,难免有遗漏

或谬误。我们在预报中不能机械依赖温度阈值,而应全面分析降雪形成的物理机制。首先考虑云中能形成多少可供下落的冰晶,关注云层厚度及水汽供应等;其次考虑低层温度层结条件是有利于冰晶增长还是融化?并综合判断作用效果;最后考虑低层温度未来的变化趋势是否会引起相态的变化,如平流降温以及非绝热加热引起的降温等。其中水物质的相变潜热易被忽视但某些情况下又较重要。如当降水发生前中低层大气较干时,降水初期的蒸发吸热作用可导致显著降温。在降水持续期,如果降水量较大,固态降水融化产生的吸热作用可使近地层温度逐渐降低,可能导致猝不及防的雨转雪发生。

参考文献

- 陈涛,崔彩霞,2012.“2010.1.6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制[J].气象,38(8):921-931. Chen T, Cui C X, 2012. The frontal structure and precipitation mechanism in the 6 January 2010 heavy snowfall event happening in North Xinjiang[J]. Meteor Mon, 38(8):921-931(in Chinese).
- 甘文强,蓝伟,杜小玲,等,2018.2018年1月底至2月初贵州低温雨雪天气成因初探[J].暴雨灾害,37(5):410-420. Gan W Q, Lan W, Du X L, et al, 2018. Tentative analysis on the cause of a low-temperature, freezing rain and snow event in Guizhou between the end of January and the beginning of February in 2018[J]. Torr Rain Dis, 37(5):410-420(in Chinese).
- 高松影,李慧琳,宋丽丽,等,2014. 丹东冬季降水相态判据研究[J]. 气象与环境学报, 30(2):38-44. Gao S Y, Li H L, Song L L, et al, 2014. Study on criteria for winter precipitation phase states in Dandong[J]. J Meteor Environ, 30(2):38-44(in Chinese).
- 侯瑞钦,张迎新,范俊红,等,2011.2009年深秋河北省特大暴雪天气成因分析[J].气象,37(11):1352-1359. Hou R Q, Zhang Y X, Fan J H, et al, 2011. Diagnoses of heavy snowstorm in Hebei Province in late autumn of 2009[J]. Meteor Mon, 37(11):1352-1359(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. Analysis on the mechanism of the 17 March 2012 precipitation type variety in Beijing[J]. Meteor Mon, 39(1):28-38(in Chinese).
- 刘畅,杨成芳,宋嘉佳,2016.一次江淮气旋复杂降水相态特征及成因分析[J].气象科学,36(3):411-417. Liu C, Yang C F, Song J J, 2016. Analysis on complex phases features and causes of a Jiang-Huai-cyclone precipitation[J]. J Meteor Sci, 36(3):411-417(in Chinese).
- 刘建勇,顾思南,徐迪峰,2013.南方两次降雪过程的降水相态模拟研究[J].高原气象,32(1):179-190. Liu J Y, Gu S N, Xu D F, 2013. Simulation study on precipitation phase state in two snow-fall processes of South China[J]. Plateau Meteor, 32(1):179-190(in Chinese).
- 刘玉莲,任国玉,孙秀宝,2018.降水相态分离单临界气温模型建立和检验[J].应用气象学报,29(4):449-459. Liu Y L, Ren G Y, Sun X B, 2018. Establishment and verification of single threshold temperature model for partition precipitation phase separation[J]. J Appl Meteor Sci, 29(4):449-459(in Chinese).
- 苗爱梅,董文晓,贾利冬,等,2014.近30a山西不同相态降水的统计特征及概念模型[J].干旱气象,32(1):23-31. Miao A M, Dong W X, Jia L D, et al, 2014. The statistical characteristics and conceptual model of different phase precipitation in recent 30 a in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 32(1):23-31(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).
- 覃志年,钟利华,刘莉红,等,2010.2008年初广西异常低温雨雪冰冻天气影响因子分析[J].气象,36(10):14-20. Qin Z N, Zhong L H, Liu L H, et al, 2010. Analysis on influence factors of the abnormal low temperature, sleet and frost weather in Guangxi at the beginning of 2008[J]. Meteor Mon, 36(10):14-20(in Chinese).
- 熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等,2018.锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源地及输送分析[J].气象,44(10):1267-1274. Xiong Q F, Zhang Y T, Jiang X F, et al, 2018. Analysis of moisture source and transport of snowstorm in hooked cloud area of an occluded cyclone[J]. Meteor Mon, 44(10):1267-1274(in Chinese).
- 徐辉,宗志平,2014.一次降水相态转换过程中温度垂直结构特征分析[J].高原气象,33(5):1272-1280. Xu H, Zong Z P, 2014. Analysis on characteristics of thermal vertical structure evolution during the transition of precipitation type in winter[J]. Plateau Meteor, 33(5):1272-1280(in Chinese).
- 杨成芳,姜鹏,张少林,等,2013.山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J].气象,39(3):355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al, 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteor Mon, 39(3):355-361(in Chinese).
- 杨军,陈宝君,银燕,等,2011.云降水物理学[M].北京:气象出版社:31,48. Yang J, Chen B J, Yin Y, et al, 2011. Physics of Clouds and Precipitation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 31, 48(in Chinese).
- 杨舒楠,徐璐,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).
- 姚晨,杨祖祥,朱月佳,等,2018.2018年初安徽省两次罕见大暴雪过程的对比分析[J].暴雨灾害,37(5):401-409. Yao C, Yang Z X, Zhu Y J, et al, 2018. Comparative analysis of two rare heavy snowstorm events in Anhui during January 2018[J]. Torr Rain Dis, 37(5):401-409(in Chinese).

- 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[J]. 气象学报,67(3):488-500. Ye C Z, Wu X Y, Huang X Y,2009. A synoptic analysis of the unprecedented severe event of the consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province[J]. Acta Meteor Sin,67(3):488-500(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).
- 张备,尹东屏,孙燕,等,2014. 一次寒潮过程的多种相态降水机理分析[J]. 高原气象,33(1):190-198. Zhang B, Yin D P, Sun Y, et al,2014. Mechanism analysis of multiphase precipitation during a cold wave process[J]. Plateau Meteor,33(1):190-198(in Chinese).
- 张琳娜,郭锐,曾剑,等,2013. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 高原气象,32(6):1780-1786. Zhang L N,Guo R, Zeng J, et al,2013. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter[J]. Plateau Meteor,32(6):1780-1786(in Chinese).
- 张萍萍,吴翠红,祁海霞,等,2015. 2013 年湖北省两次降雪过程对比分析[J]. 气象,41(4):418-426. Zhang P P, Wu C H, Qi H X, et al,2015. Contrast analysis of two snowfall events in Hubei 2013[J]. Meteor Mon,41(4):418-426(in Chinese).
- 赵宇,蓝欣,杨成芳,2018. 一次冬季江淮气旋逗点云区的雷达回波和气流结构分析[J]. 气象学报,76(5):726-741. Zhao Y, Lan X, Yang C F,2018. Radar echo and airmass structure of the comma head within a Jiang-Huai cyclone in winter[J]. Acta Meteor Sin,76(5):726-741(in Chinese).
- 周雪松,杨成芳,孙兴池,2013. 两次早春暴雪过程的对比分析[J]. 高原气象,32(2):446-455. Zhou X S, Yang C F, Sun X C, 2013. Comparative analyses on two early spring snowstorm processes [J]. Plateau Meteor,32(2):446-455(in Chinese).
- Kain J S, Goss S M, Baldwin M E, 2000. The melting effect as a factor in precipitation-type forecasting [J]. Wea Forecasting, 15(6):700-714.
- Lackmann G M, Keeter K, Lee L G, et al, 2002. Model representation of freezing and melting precipitation: implications for winter weather forecasting[J]. Wea Forecasting, 17(5):1016-1033.
- Lumb F E, 1961. The problem of forecasting the downward penetration of snow[J]. Meteor Mag, 90:310-319.
- Thériault J M, Stewart R E, Henson W, 2010. On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(7):1429-1442.