

俞小鼎,费海燕,王秀明,2024. 2024 年 2 月 17—23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. 气象, 50(9):1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. Meteor Mon, 50(9):1033-1042(in Chinese).

2024 年 2 月 17—23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻 强对流过程涉及的若干问题^{*}

俞小鼎 费海燕 王秀明

中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 2024 年 2 月中下旬我国出现一次多灾种高影响天气过程。这是一次几十年一遇的过程, 出现了大范围强寒潮雨雪冰冻天气并伴随强对流发生, 涉及到强寒潮、沙尘、降雨、降雪、冻雨, 以及强对流和伴随的大冰雹和雷暴大风, 多种高影响天气在一次过程中都有所呈现, 其过程之复杂异常罕见。本文针对此次过程中值得深入探讨的问题、高影响天气发生发展可能机理、相应的预报挑战等进行简要梳理, 为后续对此次过程的细致和深入分析研究做一个引子。

关键词: 雨雪冰冻, 强对流, 高架对流, 条件对称不稳定, 重力波

中图分类号: P458, P431

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080902

Some Issues Concerning the Large Area Rainstorm, Snowstorm, Sleet, Freezing Rain and Severe Convection Event over China from 17 to 23 February 2024

YU Xiaoding FEI Haiyan WANG Xiuming

CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: During mid and late February of 2024, a strong cold surge, dust storm and various freezing weathers (snowstorm, sleet, freezing rain, rainstorm and severe convection producing large hail and damaging gust), associated with severe convection to the south, occurred in a large area over China. Multiple high-impact-weather events showed up during this extreme complicated process. In order to provide an introduction for the subsequent detailed and in-depth analysis and research of this process, in this article we discuss briefly the mechanisms and forecasting challenges of these high-impact-weather events, without exploration in details and in depth.

Key words: freezing rain and snow weather, severe convection, elevated convection, conditional symmetric instability, gravity wave

引 言

我国地处欧亚大陆东部, 冬季冷空气活动频繁, 寒潮大风、低温雨雪冰冻天气等气象灾害多发。20 世纪

50 年代以来, 诸多学者针对冬季灾害性天气的气候背景、大尺度环流、天气过程及其预报预警等开展了大量研究(陶诗言, 1959; 朱乾根, 1990; 高守亭等, 1992; 许爱华等, 2006; 王遵娅和丁一汇, 2006)。2008 年初我国南方发生一次特大低温雨雪冰冻天气过程, 造成

^{*} 国家重点研发计划(2022YFC3004103)和中国气象局青年创新团队(CMA2023QN06)共同资助

2024 年 3 月 6 日收稿; 2024 年 8 月 9 日收修定稿

第一作者, 俞小鼎, 主要从事雷暴和强对流天气临近预报和雷达气象学研究. E-mail: xdyu1962@126.com

巨大经济损失,引起社会各方高度重视,也进一步促进了相关研究(王东海等,2008;杨贵名等,2008;丁一汇等,2008;高辉等,2008;林良勋等,2009)。

2024 年 2 月 17—23 日,我国出现了一次几十年一遇的强寒潮雨雪冰冻天气(图 1)并伴随强对流过程,分别出现了强寒潮、沙尘、降雨、降雪、冻雨,以及强对流和伴随的大冰雹和雷暴大风。自 17 日开始直到 23 日,分别来自西北和东北的强冷空气先后南侵,导致强寒潮和大风,多地降温 20°C 以上甚至到达 30°C 。南边来自南海和印度洋的强暖湿气流沿着冷空气垫爬升,导致大范围降水。强斜压的大气容易形成条件对称不稳定(Bennetts and Hoskins, 1979; Emanuel, 1979),同时也有条件不稳定,大范围降雨中分别呈现出倾斜对流和垂直对流(Schultz et al, 2000),大大增强了降水天气的剧烈程度。倾斜对流可以导致大到暴雪以及显著降雨,而垂直对流除了导致强降水,还可以产生大冰雹、雷暴大风和暴雨等强对流天气。降水相态呈现为干雪、湿雪(雨夹雪)、霰(冰粒)、冻雨和雨多种类型,强对流系统在局地产生直径 $3\sim 4\text{ cm}$ 的大冰雹和雷暴大风。本次过程中大部分对流位于冷垫以上,属于高架对流(Colman, 1990a; 1990b; 俞小鼎等, 2012; 2016; 盛杰等, 2014)。多种高影响天气在一次过程中都有所呈现,其过程之复杂异常罕见,其形成的原因是多种影响因素在相同的时间段和空间范围内相互配合的结果(丁一汇等, 2008; 陶祖钰等, 2008; 王东海等, 2008; 杨贵名等, 2008)。本文针对此次过程中高影响天气演变的可能机理及值得进一步深入分析的科

学问题进行简要梳理,不展开详细讨论和论证;提出的问题主要是相关天气涉及到的可能物理机制和相应的预报挑战,并给出适当建议,为此次过程后续的细致和深入分析研究做一个引子。

1 资 料

本文选取资料时段为 2024 年 2 月 17 日 08 时至 23 日 08 时(全文均为北京时)。主要资料包括:(1)中国气象局预报业务平台 MICAPS4(以下简称 MICAPS4 平台)的高空观测资料,时间间隔为 12 h;(2)MICAPS4 平台的地面观测资料,时间间隔为 3 h;(3)可在 MICAPS4 平台上显示的全国组合雷达反射率因子拼图资料,时间间隔为 6 min,区域范围选取 $23.0^{\circ}\sim 41.5^{\circ}\text{N}$ 、 $97.5^{\circ}\sim 129.3^{\circ}\text{E}$,使用 Python 程序将 2 月 21 日 08—21 时、逐小时孤立强单体的组合反射率因子拼图位置标注在区域范围地图上;(4)国家信息中心天擎实况业务平台统计数据。

2 实 况

2024 年 2 月 17—23 日,我国天气形势复杂严峻,低温雨雪冰冻、大风、冰雹、沙尘暴等都有不同程度发生。17—20 日,2024 年首场沙尘天气过程影响西北地区部分省份,强度达到强沙尘暴级别,为 2010 年以来出现时间最早的强沙尘暴。受大风、沙尘暴和降雪等叠加影响,甘肃、新疆等地部分地区遭受风雹、沙尘暴等灾害,雨雪范围大(图 1,图 2)。

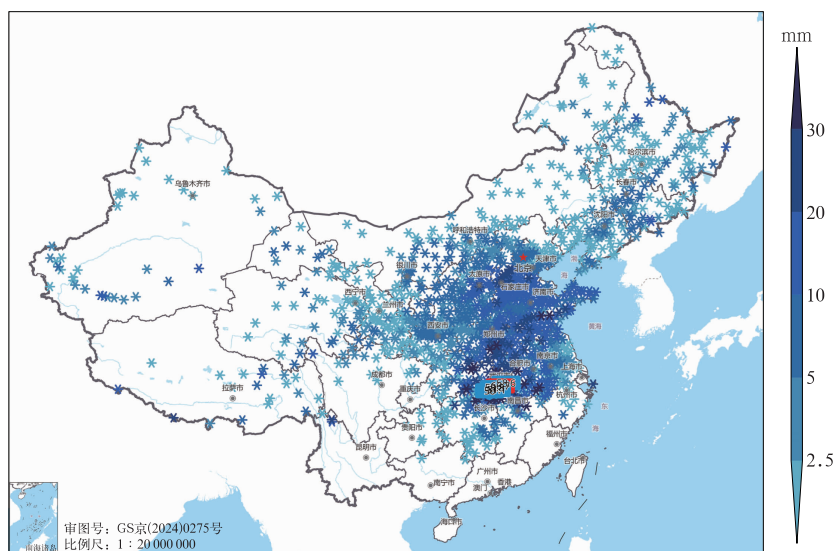


图 1 2024 年 2 月 17 日 08 时至 23 日 08 时全国累计降雪量分布

Fig. 1 Distribution of accumulated snowfall in China from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 23 February 2024

低温雨雪冰冻天气过程影响中东部地区,具有影响省份多、持续时间长、降水相态复杂、雨雪强度大、冻雨范围广等特点,其中,多地降温超过 20°C 甚至到达 30°C ,最大累计降水量(图2)出现在江西省上饶市德兴(173.6 mm),最大降雪量出现在湖北省咸宁市(66.7 mm),西南地区东部、江南、华南北部等地局部地区出现雷暴大风和冰雹等强对流天气,其中最大冰雹直径达到 $3\sim 4\text{ cm}$ 。

3 问题、可能机理和挑战

3.1 流型配置、相态转换温湿廓线结构和双偏振雷达相态识别

此次过程中,南下的冷空气和沿着冷垫北上的西南暖湿气流都很强,尤其是后者(图3)。这样强的冷暖空气配置很罕见,几十年一遇。这次过程天气尺度流型配置的主要特点是什么?什么样的行星尺度环流特征或异常和其他因素导致了这样的天气尺度流型配置,尤其是如此强烈和持续的低层大气西南暖湿气流?数值预报和主观预报能够在多长时间效内预报出此次过程的强度和持续时间?与2024年初(1月31日至2月4日)冰冻雨雪过程和2008年初的长时间持续雨雪冰冻过程的异同如何?

此次过程中,山东、安徽、江苏、上海、江西、河

南、湖北、湖南和贵州都出现了冻雨。为什么会出现如此大范围的冻雨?其探空曲线主要特征是什么?预报效果如何?此外,很多地方都经历了雨、冻雨、雨夹雪、霰(冰粒)和雪的各种降水相态,这些相态变化的预报效果如何?每种降水相态的探空曲线温度、湿度层结特征分别是什么?

此次过程中降冰粒(霰)情况很多,这与暖季的降水中含有霰是不同的,后者是霰(小冰雹)伴随降水,通常都是对流性降水。而本次过程中很多情况下降水粒子全部都是固态小冰粒(霰),这种现象出现的天气尤其是探空温湿廓线特征是什么?其层结稳定度是稳定的,近中性的还是不稳定的?亦或是在稳定、近中性和不稳定层结情况下都可以出现?本文初步分析表明,这些固态降水(小冰粒)基本上是在冷垫和逆温层之上的近湿中性的层结下形成。

除了温度和湿度廓线,结合了温度和湿度的湿球温度廓线对于确定降水相态也很有帮助。目前MICAPS4平台尚不能给出湿球温度廓线,但给出了有关湿球温度的一个关键参数:湿球温度 0°C 层高度。降水粒子融化层的起始位置更接近湿球温度 0°C 层高度而不是干球温度 0°C 层高度(Johns and Doswell III, 1992)。

目前,我国很多省份的新一代天气雷达都已经升级了双偏振(双极化)功能,原则上可以识别降水粒子的各种相态,其在业务运行中识别效果具体如

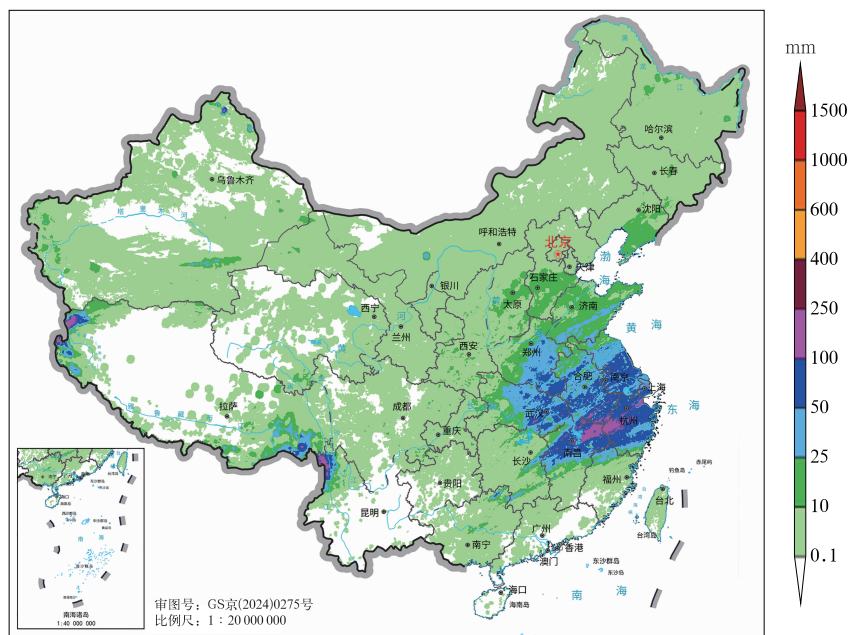
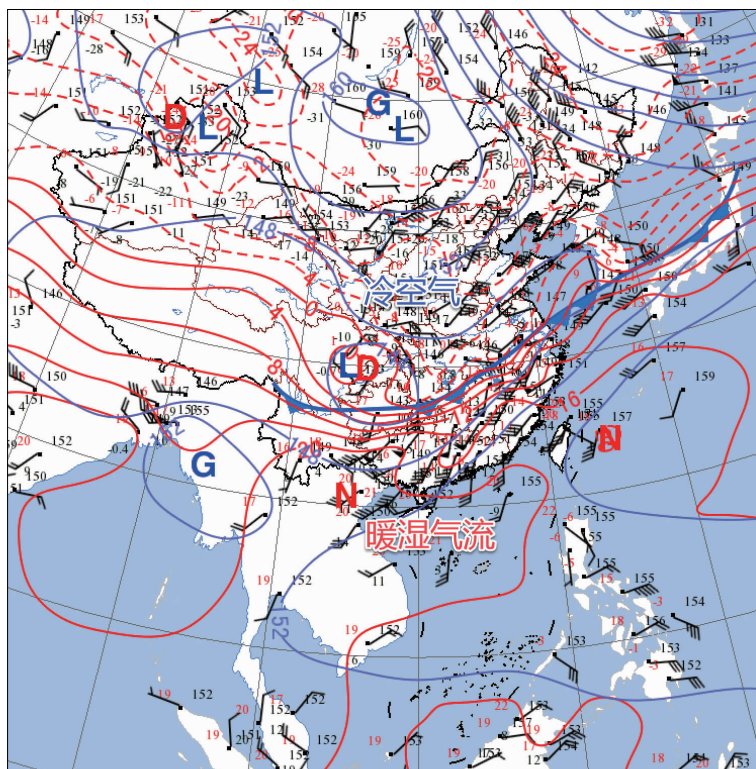


图2 2024年2月17日08时至23日08时全国累计降水量分布

Fig. 2 Distribution of accumulated precipitation from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 23 February 2024



注:蓝色等值线为等高线,红色等值线为等温线;图中破例标注了冷锋位置(代替了切变线)。

图 3 2024 年 2 月 21 日 08 时 850 hPa 天气图示意

Fig. 3 850 hPa synoptic chart at 08:00 BT 21 February 2024

何? 本文初步分析发现,此次过程中普遍出现了冷-暖-冷的温度廓线结构,即低层为冷垫、冷垫之上有强烈逆温;而当出现这种结构时,双偏振多普勒天气雷达的水凝物分类算法(Park et al, 2009)容易出现严重误判,给出的降雨区域范围远小于降雨的实际范围。因此这种情况下,预报员需要根据基本的双偏振参数(如水平极化反射率因子 Z_H , 差分反射率因子 Z_{DR} , 相关系数 CC , 差分传播相移率 K_{DP} 等)在某一仰角上的分布特征主观判别降水粒子相态(Picca et al, 2014),而不是依赖于水凝物分类算法的产品粒子分类。

3.2 倾斜对流、垂直对流、高架对流以及重力波的触发

很多大雪、暴雪都与条件对称不稳定有关(王建中和丁一汇, 1995; 俞小鼎等, 2016; 2020)。图 4 中蓝色方框内的平行带状回波高度疑似条件对称不稳定导致的倾斜对流。其中两条平行的倾斜对流带(反射率因子在 25~30 dBz)位于北京上空, 导致了 2 月 20 日傍晚到夜间北京大部分地区出现大雪。

倾斜对流多重平行回波带通常沿着地面至 500 hPa 的热成风方向, 即地面至 500 hPa 的垂直风切变方向。除了呈现为多重平行回波带, 倾斜对流回波的另一个特点是只有沿着风暴承载层平均风的平流, 没有由于不断有单体新生导致的传播(Markowski and Richardson, 2010), 这一点与垂直对流有很大不同, 后者回波的移动是平流和传播的矢量和。对条件对称不稳定的确定, 需要分析垂直于地面至 500 hPa 垂直风切变方向(深层热成风方向)的剖面, 在该剖面内绘制地转绝对动量和饱和相当位温等值线, 在后者坡度大于前者的区域存在条件对称不稳定。目前, 无论在 MICAPS4 还是在国家级、省级预报平台上都没有条件对称不稳定的诊断工具, 因此非常有必要增加。

在条件不稳定情况下, 结合水汽形成的对流有效位能(CAPE)释放, 其产生的垂直深厚湿对流中上升气流垂直速度的量级为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 比单纯倾斜对流中上升气流速度量级($1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)高一个数量级, 比大尺度抬升导致的稳定性降水中上升气流速度量级($0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)高两个数量级。与垂直湿对流

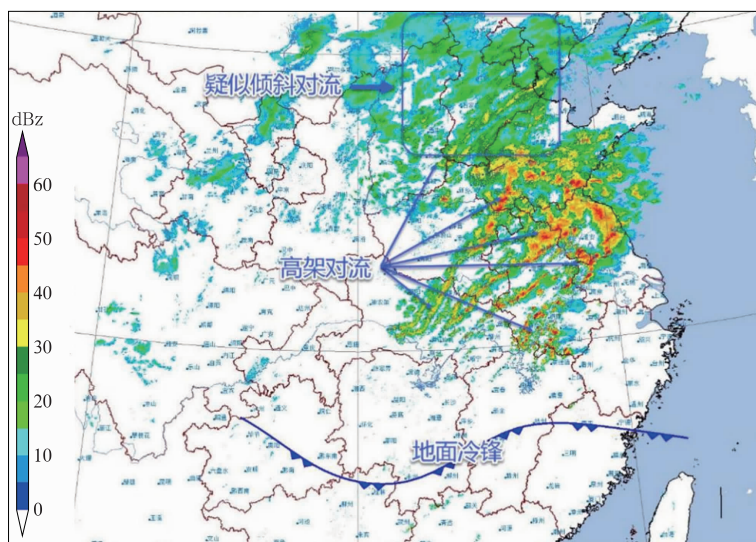


图4 2024年2月20日20时全国天气雷达拼图及地面冷锋位置示意

Fig. 4 National radar mosaics and the position of surface cold front at 20:00 BT 20 February 2024

类似,倾斜湿对流形成的三个要素为条件对称不稳定、水汽和抬升触发,当对流层深层大气达到饱和时,暖平流以及锋生过程导致的热力直接环流的上升支就可以触发倾斜对流(Schultz and Schumacher, 1999)。除了导致大到暴雪,倾斜对流也可以导致中到大雨甚至暴雨,有时伴随雷电。图5给出了条件对称不稳定导致倾斜对流的示意图(Markowski and Richardson, 2010),一个包含很多气块的物质管从位置A移动到位置B经历加速度,该加速度使得该物质管离开原始平衡位置。在实际过程中,只需将其中的位温等值线更换为饱和相当位温等值线,就可以用来判断条件对称不稳定。

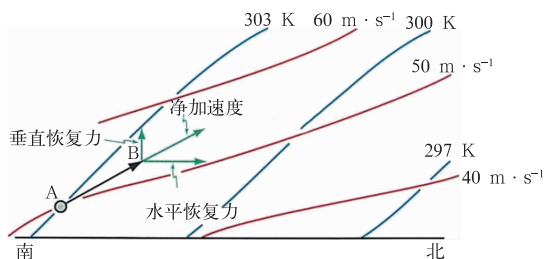
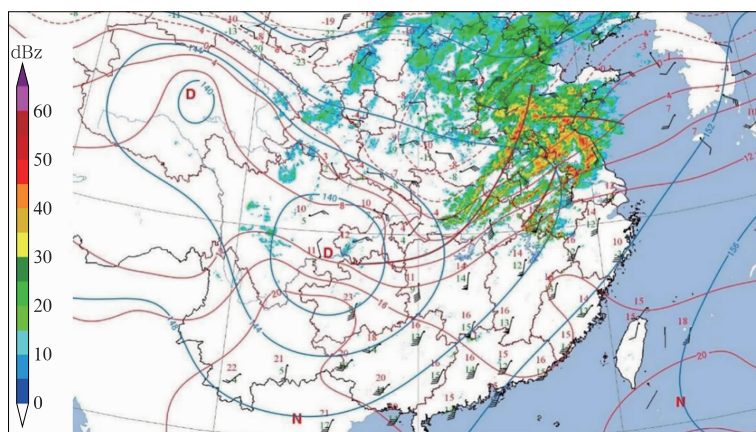


图5 对称不稳定大气中垂直于深层热成风的地转绝对动量(红线)和位温(或相当位温)(蓝线)垂直剖面(Markowski and Richardson, 2010)

Fig. 5 Schematic meridional cross-section of isentropic (blue) and geostrophic momentum (red) in a symmetrically unstable atmosphere (Markowski and Richardson, 2010)

图4中,在蓝色方框内疑似倾斜对流区域以南,位于地面冷锋以北一段距离以外的对流是高架的垂直对流(Colman, 1990a; 1990b; 俞小鼎等, 2012; 2016; 2020)。其触发和暖湿气流供应位于冷锋后的冷垫以上。倾斜对流因为其触发都是位于锋面冷空气一侧的冷垫之上,因此所有倾斜对流都可归为高架对流(Colman, 1990a; 1990b)。已有不少学者对我国高架对流进行了研究(农孟松等, 2013; 吴乃庚等, 2013; 许爱华等, 2013; 盛杰等, 2014; 张一平等, 2014; 俞小鼎等, 2016; 刘洲洋等, 2018),俞小鼎等(2020)指出,在我国,高架对流在冷季发生频率高,在暖季的夜晚和凌晨也时有发生。图4中所标识的高架垂直对流(蓝色方框以南的部分)发生在CAPE值在 $100 \sim 500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 环境下,逆温层顶到其上6 km之间的风矢量差超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,深层垂直风切变较强。对流形态以线状形态为主,局部有孤立的对流风暴以及对流风暴簇,最强反射率因子在45 dBz以上,个别对流区域超过50 dBz。

判断高架对流的不稳定条件通常使用扰动逆温层顶附近的气块绝热上升而得到的最不稳定的CAPE,其抬升触发机制之一是由900~600 hPa辐合切变线触发(Wilson and Roberts, 2006),此种机制占绝大多数。由于高空观测的时间分辨率有限(一天两次)和数值模式的偏差,在业务上很难精准把握中下层辐合切变线(900~600 hPa)的具体位置,因此对高架对流短时临近预报的难度远大于地基对流。图6给出了2024年2月20日20时850 hPa



注:蓝色等值线为等高线,红色等值线为等温线,棕色线段为切变线,风羽代表 850 hPa 等压面上风矢量。

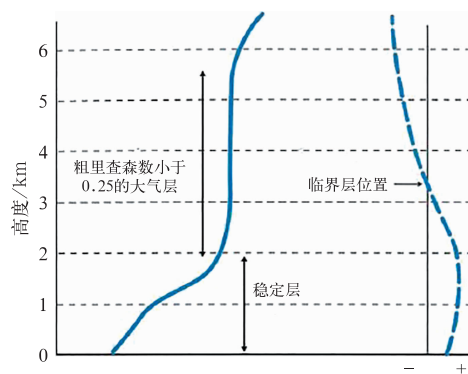
图 6 2024 年 2 月 20 日 20 时 850 hPa 天气图叠加全国天气雷达组合反射率因子拼图

Fig. 6 850 hPa synoptic chart with superposition of radar mosaics at 20:00 BT 20 February 2024

天气图叠加同一时刻的全国天气雷达组合反射率因子拼图,图中棕色实线为切变线,可以看出这些以线状对流为主要形态的雷达回波走向的确与 850 hPa 切变线关联密切,这些垂直对流区域内的逆温层顶高度大多在 850~700 hPa,更接近 850 hPa 高度,因此高度怀疑这些以线状形态为主的高架垂直对流是由 850 hPa 附近的辐合切变线触发。

高架对流的另一个触发机制可能是大振幅重力波,即相应地面气压振幅在 1 hPa 以上的中尺度重力波。由于强烈冷空气南侵导致低层存在冷垫和强烈逆温,其产生的低层稳定层结有利于重力波的产生和传播,配合冷垫上方深层条件不稳定和强烈垂直风切变条件,有利于形成大振幅的捕获重力波 (Lindzen and Tung, 1976; Markowski and Richardson, 2010; 俞小鼎等, 2016; 2020), 这类重力波的形成对高架对流初生和组织形态的演变影响显著。判断重力波触发对流的一个重要判据是平行带状对流的主轴方向与逆温层顶附近高度的风向几乎垂直,根据这一点可以在这次过程中寻找疑似的重力波,估计重力波触发对流所占的比例。地形和对流本身都可以激发重力波,而要形成能够触发对流的大振幅重力波,还需要有利于捕获重力波形成的环境条件 (Markowski and Richardson, 2010; 俞小鼎等, 2016; 2020), 即在低层冷垫之上存在一个低的粗里查森数的温湿风的垂直层结 (图 7)。当位温垂直廓线类似于图 7 时,可确定风速等于重力波相速度位

置为临界层高度 (图 7); 重力波通过群速度向上传播的能量遇到临界层会被向下反射,在低层稳定层内与原有重力波叠加,形成较大振幅的所谓“捕获重力波”,该大振幅捕获重力波具有触发深厚垂直湿对流并对形成后的对流模态进行调制的能力。重力波是频散波,相速度与群速度方向垂直,如果不存在上述临界反射层,能量会很快频散掉,无法形成大振幅的捕获重力波,而小振幅重力波触发对流的可能性非常小。



注:蓝色粗实线为位温垂直廓线,蓝色粗虚线为重力波相速度减去各高度平均风速的垂直廓线。

图 7 捕获重力波形成的典型环境条件示意图 (Markowski and Richardson, 2010)

Fig. 7 Schematic representation of the typical environmental conditions for trapped gravity wave (Markowski and Richardson, 2010)

3.3 超长生命史的强单体雹暴

2024 年 2 月 21 日傍晚前后,浙江南部出现直径 2~4 cm 大冰雹。18:24,组合反射率因子拼图(图 8)中箭头所指为位于浙江南部的超级单体雹暴,其最大反射率因子超过 70 dBz,并呈现出三体散射长钉特征,说明该雹暴中存在大冰雹。值得注意的一点是,该孤立对流大约在当天 07 时前后在桂林附近生成,由于差不多同时有多个孤立对流生成,很难确认该孤立对流的最初生成位置。不过从当天

08 时起,就可以追踪到该孤立对流,08—16 时都呈现为多单体风暴或强风暴,强度一直有所变化,16—19 时期间演变为超级单体,19 时之后又成为多单体风暴,直到 21 时左右在东海上海消散。这个孤立对流风暴的生命史长达 14 h,极为罕见,而且是对高架孤立对流风暴而言。图 8 中叠加了该长生命史强单体在多个时刻的组合反射率因子。

2 月 21 日 20 时,浙江台州椒江探空如图 9 所示,逆温层顶(也是冷垫顶部)位于 850 hPa 左右(大约海拔 1500 m),850 hPa 和 500 hPa 之间温差为

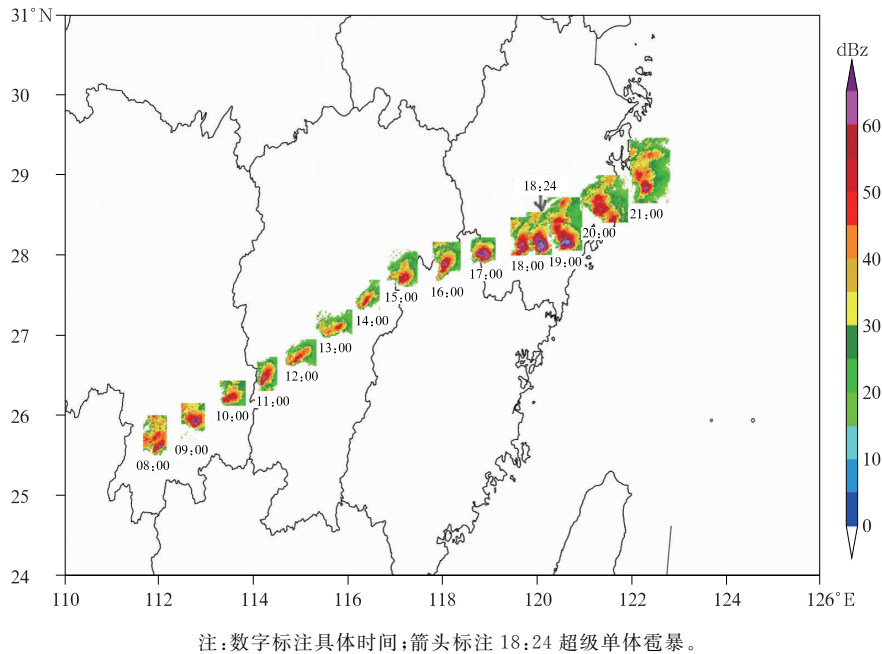


图 8 2024 年 2 月 21 日 08—21 时孤立雹暴逐小时的雷达组合反射率因子
Fig. 8 Composite reflectivity of the isolated hailstorm at every hour from 08:00 BT to 21:00 BT 21 February 2024

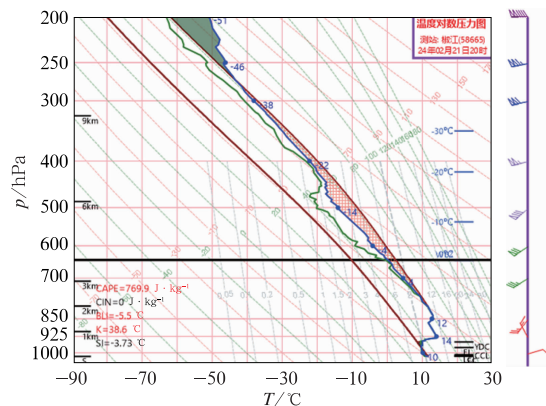


图 9 2024 年 2 月 21 日 20 时浙江台州椒江探空
Fig. 9 T-lnp diagram of Jiaojiang Sounding in Zhejiang at 20:00 BT 21 February 2024

26℃,850 hPa 露点温度为 13℃,CAPE 值约为 770 J·kg⁻¹,逆温层顶和其之上 6 km 处的风矢量差为 32 m·s⁻¹。对应 2 月下旬的强斜压天气和强暖湿气流,尽管 CAPE 值相对较低,但 0~6 km(从冷垫顶算起)垂直风切变很强,因此有利于江南早春和华南春季的超级单体形成。当天 08 时桂林探空(图略)显示,逆温层顶(也是冷垫顶部)位置在 925 hPa,850 hPa 和 500 hPa 之间温差为 26℃,925 hPa 附近露点温度为 18℃,CAPE 值为 870 J·kg⁻¹,冷垫顶部和其上 6 km 处的风矢量差为 30 m·s⁻¹,也属于相对低 CAPE 和强的深层垂直风切变,同样有利于华南春季超级单体产生。无论椒江还是桂林探空,其呈现的低 CAPE 和强切变的环境特征,代

表了江南早春和华南春季有利于超级单体和强飑线产生的主要环境特征之一。

2月21日从凌晨到夜间,江南地区先后有数十个高架孤立对流风暴形成,但其中只有上述高架对流风暴具有14 h之久的超长生命史,该孤立对流风暴具有如此长的生命史的原因值得深入探讨和研究。虽然对流层中层具有明显干层,这一点有利于雷暴大风,但先后形成的各个对流系统中,只有个别孤立对流风暴产生了大冰雹,并没有产生极端雷暴大风,这很可能是由于低层冷垫所起的缓冲作用。高架强对流可以产生很大的冰雹,也可以产生雷暴大风,但由于冷垫的缓冲作用,极少产生极端雷暴大风,几乎不产生龙卷,可以产生强降水甚至极端强降水(Horgan et al, 2007; 俞小鼎等, 2016)。

3.4 预报的检验、多个类似过程对比以及人工观测的启动

气象部门一直在强调精准天气预报。此次过程发生在强斜压环境下,大气可预报性相对较高。对此次过程进行数值预报模式检验,可以为天气预报在大气可预报性相对较高情况下究竟可以精准到什么程度提供一个参考。首先需要进行天气尺度环流形势(流型配置)检验,包括动力场、热力场和水汽,其次是降水预报的检验。除了上述常规检验外,还应开展以下两项进一步的检验。

一是对模式探空的检验,即垂直温湿风廓线的检验。雨雪冰冻等各种降水相态都与实际大气的温湿廓线密切相关。此次过程中,对流层中低层都存在一个明显逆温层和从地面往上直到逆温层顶的一个冷垫,自北往南,冷垫厚度(逆温层顶高度)逐渐降低。模式只有很好预报出大气温湿廓线特征,尤其是对流层中低层的逆温层结构和融化层/湿球温度 0°C 层高度,才有可能正确预报出降水的具体相态(雨、冻雨、雨夹雪和干雪等);同时,模式只有预报好大气温湿风廓线特征,才能给出正确的CAPE值和深层垂直风切变大小,以及对流层中层干层及其强度等等,才能进一步正确预报出强对流风暴结构和强对流类型,进而给出强冰雹、雷暴大风、强降水以及龙卷等强对流天气可能性的判断。

二是将高分辨率区域模式(例如CMA-MESO)预报的组合反射率因子与实际的雷达拼图进行比较(万子为等, 2024)。首先需检验倾斜对流回波,例如图4蓝色方框内回波,主要检验条件对称不稳定导

致的平行带状回波的区域大小、强度和走向等。其次需检验垂直对流回波,除了TS评分和偏差等基本统计判据,还要注意对流回波形态。例如,此次过程中线状对流回波占支配地位,而模式预报的线状对流区域、线状对流主轴方向和移动方向、线状对流强度等,与实况的吻合情况如何值得分析。再如,此次过程中还出现了一些离散状态的对流,包括3.3节中生命史长达14 h,其中相当部分时间为超级单体或多单体强风暴,并产生直径 $2\sim 4\text{ cm}$ 大冰雹的强烈雹暴;模式能够在多大程度上预报出这些离散型对流风暴,包括其离散状形态(线状、团状或孤立状)、强度、移动方向和速度等,这也是检验模式对强对流系统预报能力的一个重要方面。

有必要进行多个类似过程对比。例如,2024年1月31日至2月4日我国也出现了一次寒潮雨雪冰冻过程。与本次过程相比,前者也出现了各种相态和形态的降水,不过垂直对流强度远不如本次,也没有出现本次过程中持续10 h以上的强对流孤立雹暴。通过比较两次过程中的行星尺度环流背景,天气尺度流型配置,温湿风廓线特征,对流(包括倾斜对流和垂直对流)形态、结构和强度,降水相态及其变化等,可以更加突出此次过程的特点,加深对此过程的领悟。此外,如3.1节中所建议,可将上述两次过程与2008年初特大低温冰冻雨雪期间的某一次或某几次强过程进行比较,包括行星尺度环流背景,天气尺度流型配置,降雪、纯冰粒、雨夹雪、冻雨和雨等温湿廓线,并结合湿球温度廓线特征,有助于更深刻地理解雨雪冰雹天气的环流背景和温湿廓线特征,改进对于降水相态的精准预报。

此次复杂过程也为气象观测工作改进提供了启发。降水相态主要包括干雪、雨夹雪、霰(小冰粒)、冻雨、雨和冰雹,目前的自动观测系统尚不能很好地区分上述降水相态和形态。此次过程中,由于降水形态复杂,有些省份启动了降水相态的人工观测。通过将人工观测和自动观测结果进行对比,可以确定自动观测系统在降水相态和形态判断方面的局限性,有助于预报员更好地使用探测数据,也有助于相关部门进一步改进降水相态和形态的自动观测技术及具体实施方案。另外一个具有挑战性的是冰雹的观测。冰雹经常会导致非常严重的农作物受损灾情,我国新一代天气雷达升级双偏振功能的主要目的之一也在于提高冰雹预警的准确率,进一步完善冰雹观测工作对于提高其预报预警水平都非常重

要。随着新型观测技术大量应用,2013年起我国冰雹人工观测业务基本取消,因此目前正式的冰雹观测渠道相对缺乏。建议,建立搜集互联网等不同渠道降雹信息,并用雷达资料验证、存档和发布的业务流程;同时,在有明显冰雹潜势情况下,可临时恢复可能涉及的国家级站点每日24h的冰雹人工观测。另外,设立大型科研项目,组织较大规模的高时空分辨率的冰雹观测试验,可借鉴美国国家气象局开展的冰雹观测计划 HailSTONE(the Hail Spatial and Temporal Observing Network Effort)(Blair et al, 2017),适宜在平原地区进行这类试验,为中国三个波段的新一代天气雷达的冰雹探测算法,尤其是基于双偏振参数的新的冰雹探测算法的建立、改进和验证提供坚实的冰雹实况数据基础。

4 小 结

2024年2月中下旬的中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程是一次几十年一遇的过程,涉及到强寒潮、沙尘、降雨、降雪、冻雨,以及强对流和伴随的大冰雹、雷暴大风和短时强降水。本文对此次过程可能值得深入研究和探讨的一些现象如条件对称不稳定导致的倾斜对流、大振幅重力波、各种相态和形态的降水、长生命史的孤立超级单体电暴等进行了梳理和简要讨论,同时提出若干值得进一步深入研究的建议,比较粗略,希望可以起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- 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 Sin, 66(5):808-825(in Chinese).
- 高辉,陈丽娟,贾小龙,等,2008.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析[J].气象,34(4):101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice snow and frozen disasters in South China during January 2008: II. possible climatic causes[J]. Meteor Mon, 34(4):101-106(in Chinese).
- 高守亭,陶诗言,丁一汇,1992.寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用[J].大气科学,16(06):718-724. Gao S T, Tao S Y, Ding Y H, 1992. Upper wave-East Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak[J]. Sci Atmos Sin, 16(06):718-724(in Chinese).
- 林良勋,吴乃庚,蔡安安,等,2009.广东2008年低温雨雪冰冻灾害及气象应急响应[J].气象,35(5):26-34. Lin L X, Wu N G, Cai A A, et al, 2009. Disaster and emergency response of the cryogenic freezing rain and snow weather in Guangdong in 2008[J]. Meteor Mon, 35(5):26-34(in Chinese).
- 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等,2018.中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].气象,44(2):258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al, 2018. Climatology of cold season elevated convection in northern China[J]. Meteor Mon, 44(2):258-267(in Chinese).
- 农孟松,赖珍权,梁俊聪,等,2013.2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J].气象,39(7):874-882. Nong M S, Lai Z Q, Liang J C, et al, 2013. Analysis on elevated thunderstorm hail in Guangxi in early spring of 2012[J]. Meteor Mon, 39(7):874-882(in Chinese).
- 盛杰,毛冬艳,沈新勇,等,2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].气象,40(9):1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al, 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring[J]. Meteor Mon, 40(9):1058-1065(in Chinese).
- 陶诗言,1959.十年来我国对东亚寒潮的研究[J].气象学报,30(03):226-230. Tao S Y, 1959. Research on East Asia cold wave in China in the last ten years[J]. Acta Meteor Sin, 30(03):226-230(in Chinese).
- 陶祖钰,郑永光,张小玲,2008.2008年初冰雪灾害和华南准静止锋[J].气象学报,66(5):850-854. Tao Z Y, Zheng Y G, Zhang X L, 2008. Southern China quasi-stationary front during ice-snow disaster of January[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):850-854(in Chinese).
- 万子为,孙思远,赵滨,等,2024.CMA-MESO模式对“21·7”河南特大暴雨的预报评估与误差分析[J].气象,50(1):33-47. Wan Z W, Sun S Y, Zhao B, et al, 2024. Evaluation and error analysis of the July 2021 extremely severe rainstorm in Henan Province simulated by CMA-MESO model[J]. Meteor Mon, 50(1):33-47(in Chinese).
- 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[J].气象学报,66(3):405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al, 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January[J]. Acta Meteor Sin, 66(3):405-422(in Chinese).
- 王建中,丁一汇,1995.一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究[J].气象学报,53(4):451-460. Wang J Z, Ding Y H, 1995. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in North China[J]. Acta Meteor Sin, 53(4):451-460(in Chinese).
- 王遵娅,丁一汇,2006.近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J].大气科学,30(6):1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H, 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6):1068-1076(in Chinese).

- 吴乃庚,林良勋,冯业荣,等,2013. 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析[J]. 气象,39(4):410-417. Wu N G, Lin L X, Feng Y R, et al, 2013. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early-spring of South China[J]. Meteor Mon, 39(4):410-417(in Chinese).
- 许爱华,陈云辉,陈涛,等,2013. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报,24(2):197-206. Xu A H, Chen Y H, Chen T, et al, 2013. Environment characteristics and causes of a continuous hail fall event occurred within the cold air mass to the north of a cold front[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2): 197-206(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. Diagnosis of a cold wave weather event 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 Sin, 66(5):836-849(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2016. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. 气象学报,74(6):902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. Acta Meteor Sin, 74(6):902-918(in Chinese).
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等,2014. 2012 年早春河南一次高架雷暴天气成因分析[J]. 气象,40(1):48-58. Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al, 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012[J]. Meteor Mon, 40(1):48-58(in Chinese).
- 朱乾根,1990. 我国的东亚冬季风研究[J]. 气象,16(1):3-10. Zhu Q G, 1990. A review of studies on East Asia winter monsoon in China[J]. Meteor Mon, 16(1):3-10(in Chinese).
- Bennetts D A, Hoskins B J, 1979. Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 105(446):945-962.
- Blair S F, Laflin J M, Cavanaugh D E, et al, 2017. High-resolution hail observations; implications for NWS warning operations[J]. Wea Forecasting, 32(3):1101-1119.
- Colman B R, 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: a climatology[J]. Mon Wea Rev, 118(5):1103-1122.
- Colman B R, 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: organization and instability mechanisms[J]. Mon Wea Rev, 118(5):1123-1144.
- Emanuel K A, 1979. Inertial instability and mesoscale convective systems. Part I: linear theory of inertial instability in rotating viscous fluids[J]. J Atmos Sci, 36(12):2425-2449.
- Horgan K L, Schultz D M, Hales J E Jr, et al, 2007. A five-year climatology of elevated severe convective storms in the United States east of the Rocky Mountains[J]. Wea Forecasting, 22(5):1031-1044.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 7(4):588-612.
- Lindzen R S, Tung K K, 1976. Banded convective activity and ducted gravity waves[J]. Mon Wea Rev, 104(12):1602-1617.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: Wiley-Blackwell; 407.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3):730-748.
- Picca J C, Schultz D M, Colle B A, et al, 2014. The value of dual-polarization radar in diagnosing the complex microphysical evolution of an intense snowband[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(12):1825-1834.
- Schultz D M, Schumacher P N, 1999. The use and misuse of conditional symmetric instability[J]. Mon Wea Rev, 127(12):2709-2732.
- Schultz D M, Schumacher P N, Doswell III C A, 2000. The intricacies of instabilities[J]. Mon Wea Rev, 128(12):4143-4148.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. Mon Wea Rev, 134(1):23-47.

(本文责编:戴洋)