

拉萨贡嘎机场“雷阵雪”强对流天气多模式融合过程分析与预报优化

赵西伟, 朱国辉, 董彦达, 周文昊, 央 珍, 旦增卓嘎

民航西藏空管中心, 西藏 拉萨

收稿日期: 2026年8月25日; 录用日期: 2026年9月23日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

2025年4月28日夜间至29日凌晨, 拉萨贡嘎机场遭遇罕见的“雷阵雪”强对流天气, 过程累计降水量达26 mm, 最大小时雨强9.6 mm, 伴随强雷电、小冰雹、阵雪及偏北阵风, 多架航班受天气影响返航备降。本文基于多源观测资料、再分析场及ECMWF/GFS等数值模式, 系统复盘此次高原机场强对流过程, 评估多模式预报性能, 分析“雷阵雪”形成机制, 并提出多模式融合优化方案。研究表明: 高原低涡切变在“两槽一脊”环流和双高压挤压下稳定维持, 西南暖湿气流与偏北强冷空气剧烈对冲触发强对流; 高层充沛过冷水汽导致冰相过程主导, 是“雷阵雪”关键成因; 多模式对高原机场环流形势预报准确但存在降水低估和时序偏差情况, 需结合实况观测动态订正。此外, 高原机场在各项指数预报上, 与内地机场也有很大不同。本文旨在通过过程分析, 总结高原机场冰相对流过程, 为高原机场春夏及秋冬换季期间此类预报提供借鉴。

关键词

雷阵雪, 再分析, 冰相过程

Analysis and Forecast Optimization of Multi Model Fusion Process for Severe Convective Weather of “Thunderstorm Snow” at Lhasa Konggar Airport

Xiwei Zhao, Guohui Zhu, Yanda Dong, Wenhao Zhou, Yang Zhen, Danzeng Zhuoga

文章引用: 赵西伟, 朱国辉, 董彦达, 周文昊, 央珍, 旦增卓嘎. 拉萨贡嘎机场“雷阵雪”强对流天气多模式融合过程分析与预报优化[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 1093-1102. DOI: 10.12677/ccrl.2026.155116

Abstract

On the night of April 28th to the early morning of April 29th, 2025, Lhasa Konggar Airport experienced a rare “thunderstorm snow” severe convective weather, with a cumulative precipitation of 26 mm and a maximum hourly rainfall of 9.6 mm. Along with strong lightning, small hail, snow showers, and northerly gusts, multiple flights were affected by the weather and returned to alternate airports. This article is based on multi-source observation data, reanalysis fields, and numerical models such as ECMWF/GFS. It systematically reviews the strong convective process at the high-altitude airport, evaluates the performance of multimodal forecasting, analyzes the formation mechanism of “thunderstorms snow”, and proposes a multimodal fusion optimization scheme. Research has shown that the shear of the plateau vortex is stably maintained under the “two troughs and one ridge” circulation and double high pressure compression, and strong convection is triggered by the intense opposition between the southwest warm and humid airflow and the northerly strong cold air; The abundant supercooled water vapor in the upper floors leads to the dominance of ice phase processes, which is the key cause of “thunderstorms snow”; Multimodal forecasting of circulation patterns in high-altitude airports is accurate, but there are underestimations of precipitation and temporal deviations, which need to be dynamically corrected in conjunction with actual observations. In addition, high-altitude airports have significant differences in various index forecasts compared to mainland airports. This article aims to summarize the process of ice convection in high-altitude airports through process analysis, and provide a reference for such forecasts during the spring summer and autumn winter seasons of high-altitude airports.

Keywords

Thunderstorm Snow, Reanalysis, Ice Phase Process

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高原因其独特的地理环境，强对流天气研究资料相对较少，且缺乏准确率较高的气候数值模式。李栋梁[1]等老师开展高原切变线引发强对流天气的数值模拟，有较高的高原对流研究参考，但对于专注于短临预报的航空气象服务而言，强对流尤其是“雷阵雪”等罕见天气过程，总结和研究的资料较为稀少。本文结合 ECMWF 相关资料，对多模式进行对比，结合实际工作进行订正预报。此外，中国气象局高原机场强对流预警技术指南中，也给出高原对流指数预报的参考建议。作者以实际工作经验总结，高原对流指数和平原对流完全是不同的概念，资料分析重点也有所不同。

青藏高原强对流天气具有突发性强、机制复杂的特点[2]-[5]，“雷阵雪”[6]作为罕见天气现象，对航空运行安全构成严峻挑战。2025 年 4 月 28 日夜間，拉萨机场在春季爆发强对流过程，出现雷暴伴随降雪的复合型危险天气。本研究通过融合实况观测、再分析资料及多模式预报产品，深入剖析环流背景、触发机制及预报误差，旨在提升高原机场强对流天气的短临预警能力。

2. 天气实况与环流背景

2.1. 数据与方法

2.1.1. 数据来源

研究选取 2025 年 4 月 28 日 15:00 UTC~29 日 06:00 UTC 拉萨贡嘎机场(ICAO:ZULS)全序列观测资料,构建空-地一体化实况数据集,共分为 5 大类数据源:(1)民航机场实况报文资料(METAR/SPECI)取自西藏空管中心实时气象数据,包含整点例行 METAR 报文和天气突变 SPECI 特殊预报;时间分辨率:常规 1 h、强对流突发 5~30 min 加密观测;要素涵盖:风向风速、阵风、风向突变区间、能见度、云底高度、CB 积雨云分布、气温/露点、场面气压 QNH、实时天气编码、近地面垂直风切变实况;报文严格遵循《民用航空气象电码》编码标准,用于精细化划分雷阵雨→雹暴→雷阵雪三阶段时序、逐时段降水量统计。(2)地面自动气象站与边界层探测资料:(a)贡嘎机场地面自动站:逐 min 温、压、湿、降水时序数据,统计过程累计降水量 26 mm、逐小时雨强 9.6 mm、近地面 1℃~3℃低温冷垫实况;(b)曲水上游 12 km 激光测风雷达:获取 0~6 km 边界层垂直风廓线、垂直风切变(250°~340°风向剧变、阵风 10 m/s),用于订正模式低层风场偏差,支撑地面冷垫厚度(约 1.5 km)定量研判;(c)贡嘎机场 C 波段多普勒天气雷达:组合反射率因子(≥ 45 dBz 对流阈值)、垂直积分液态水 VIL、径向风场产品,时间 6 min/次,判别对流单体生消、冰相粒子发展高度;(3)多套全球数值预报模式原始场数据:(a)ECMWF(欧洲中期天气预报中心): $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率,3 h 短时预报 + 确定性中尺度预报,提取 500 hPa/200 hPa 环流、位势高度、风场、相对湿度、垂直速度、散度、降水预报量;(b)GFS:0.5°网格,逐 6 h 预报场,用于切变线位置、对流启动时序对比检验;(c)ERA5 再分析数据集[7](ECMWF): 0.25° 、1 h 分辨率再分析场,作为实况基准场,校验 EC/GFS 预报偏差,量化高原低涡、两槽一脊环流客观特征;(5)物理量衍生资料,基于上述原始数据,计算关键对流参数:CAPE 对流有效位能、0℃融化层高度、400 hPa 冰相水凝物混合比、高低空散度/垂直速度,构建物理参数序列。

2.1.2. 研究分析方法

(1)天气学环流诊断法采用高空 + 地面联合分型:500 hPa“两槽一脊”环流分型、200 hPa 高层深厚低涡识别、地面南北高低压配置分析,拆分双高压挤压(副高 + 印度洋高压)、冷暖气流辐合、低涡切变滞留三大维持机制,定量统计气压梯度(>18 hPa)、辐合散度($-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)、垂直上升速度(-1.2 Pa/s)关键阈值。(2)多模式预报性能客观检验法。(a)相关系数检验:计算 EC/GFS 环流场与 ERA5 再分析场空间相关系数(>0.9 为预报优秀),评估大尺度环流预报准确率;(b)定量误差统计:降水相对误差(EC 降水低估 40%)、对流启动时序偏差(GFS 偏早 2 h),分模式统计优势与系统误差来源;(c)分级评分 TS 法:实况-预报落区匹配评分,验证多模式融合订正后预警 TS 评分提升幅度(优化后提升 22%)。(3)冰相微物理机理诊断法分层研判三层结构:低层近地面冷垫(0~1.5 km,气温 $<4^\circ\text{C}$)、中层倾斜抬升对流(西南气流沿冷垫爬升)、高层冰相起电区(200~400 hPa 过冷水饱和);结合冰相水凝物混合比 $>0.5 \text{ g/kg}$ 阈值,提炼高高原雷阵雪“冷垫-抬升-冰相起电”三阶段概念模型。(4)多模式权重融合算法采用误差倒数加权集成方案:以各模式历史实况误差 RMSE 倒数作为权重, $w=1/\text{RMSE}$,分别对 EC 降水、GFS 对流时序、中尺度模式 CAPE 能量做加权集成,公式沿用 5.2 代码模型,构建实况动态订正的集成预报技术框架。(5)短临预警阈值统计法基于本次雷阵雪个例 + 高原历史同类天气,归纳三维预警判据:散度、垂直速度、冰相含量、低层垂直风切变四大临界指标,形成高原雷阵雪专属预警阈值体系。

2.1.3. 数据质控说明

(1)报文剔除缺测、错码记录,异常风速采用相邻时次激光雷达数据插补;(2)模式数据经双线性插

值统一至 0.25°网格，与站点实况空间匹配；(3) CAPE 等对流指数依据高原修正算法订正(区别于平原常规算法，高原 CAPE ≥ 300 即达对流警戒阈值)，消除海拔 3600 m 高海拔气压偏低带来的指数系统偏差。

2.2. 实况特征

强对流过程：28 日 22:35 至 29 日 23:10 出现中阵雨(SHRA, 3.1 mm)，随后雷暴(TS)活动增强，28 日 23:10~29 日 24:00 出现强雷阵雨伴小冰雹(TSRAGS)，过程降水量达 3.8 mm，29 日 00:00 至 05:19 累计雨量 26 mm，期间出现雷暴伴雨夹雪(TSRASN)。METAR 报文记录显示垂直风切变显著(风向 250°~340°)，阵风达到 10 m/s，见表 1 机场实况报文。

Table 1. Aerodrome METAR
表 1. 机场实况报文

时次(UTC)	报文	天气
18:00	METAR ZULS 281800Z 31005MPS 7000 -TSRASN SCT040CB SCT050 BKN070 00/00 Q1030 NOSIG=	雷阵雨夹雪
16:00	METAR ZULS 281600Z 25006MPS 9999 -TSRAGS SCT040CB SCT050 BKN070 01/01 Q1029 NOSIG=	雷阵雨小冰雹
15:48	SPECI ZULS 281548Z 30005G10MPS 250V340 9999 -TSRA SCT040CB SCT050 BKN070 03/01 Q1028 NOSIG=	雷阵雨
15:29	SPECI ZULS 281529Z 36004MPS 300V020 9999 -TSRA FEW040CB SCT070 05/02 Q1027 NOSIG=	雷阵雨

“雷阵雪”现象：29 日 00:00~05:19 先后观测到雷雨、小冰雹(SHGS)及雨夹雪(SHRASN)，近地面温度降至 1℃~3℃，强雷电与固态降水并存(见表 2)。

Table 2. Parameters of severe convective weather at Lhasa airport (28~29 April 2025)
表 2. 2025 年 4 月 28~29 日拉萨机场强对流天气参数

时段	天气现象	降水量(mm)	温度(℃)	风速特征	云顶高度	CAPE 指数
22:35~23:10	SHRA	3.1	3~5	风向 250°~340°	5~6 KM	300
23:10~24:00	TSRA + SHGS	3.8	1~3	阵风 10 m/s	9~10 KM	500~600
00:03~05:19	TSRA + SHSN	26.0	1~2	垂直风切变显著	8~10 KM	400~600

2.3. 关键环流系统

对整个天气过程的环流特征进行分析，500 hPa 高度层中国北部“两槽一脊”，高原低涡切变停滞，拉萨北部冷切变与暖中心对峙，偏北气流与西南暖湿气流剧烈对冲。200 hPa 高度层西藏西部深厚低涡，机场上空西南气流控制，湿度饱和(过冷水含量高)，冰相水凝物碰撞引发强雷电。高原地面图上，高原南低北压，机场附近气压梯度 > 18 hPa；29 日 02 时低压中心增强并向南扩展，冷暖空气强度持续增加。实况天气图中，高原低涡切变移动缓慢，因为印度洋存在高压区，南方南海季风爆发前期，副高 588 明显北抬至海南岛附近。在两个高压挤压下高原低涡切变稳定维持并增强的趋势。

两槽一脊形势提供强冷空气南下，副高、印度洋高压挤压使低涡稳定维持，且提供自孟湾的水汽通道，配合水汽图来看，易形成长时间降水。

地面图上高原南部为低压区，北部为高压，本场北部有强气压梯度。28 日 23 时高低压中心值加强，

低压控制范围扩大，本场位于低压中心边缘；说明偏北冷空气与西南暖湿气流均有明显增强。

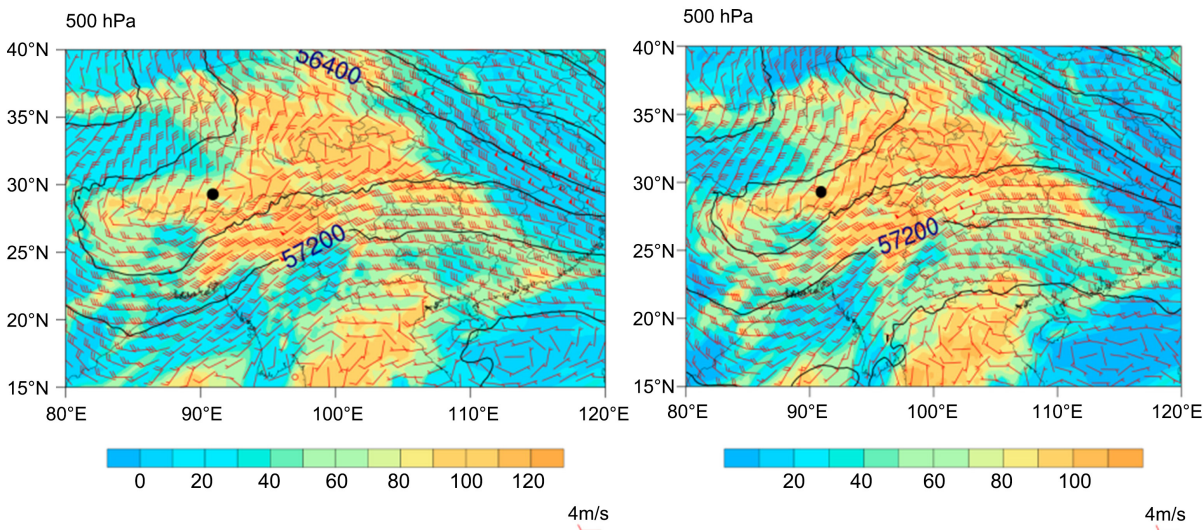


Figure 1. 500 hPa reanalysis field
图 1. 500 hPa 再分析场

500 hPa 再分析场分析，20 时~02 时拉萨机场西南部、东北部分别存在两个低涡切变系统(见图 1)，切变呈现西南 - 东北走向，本场位于切变附近，23 时东北与西南气流明显增强，辐合明显增强，发展过程中，高度槽显著收窄，冷空气南下强烈。过程中甚至出现了雷阵雪过程，正是由于春季强冷空气剧烈南下时，遇到异常活跃的暖湿气流，且切变位于本场上空附近，移动缓慢。

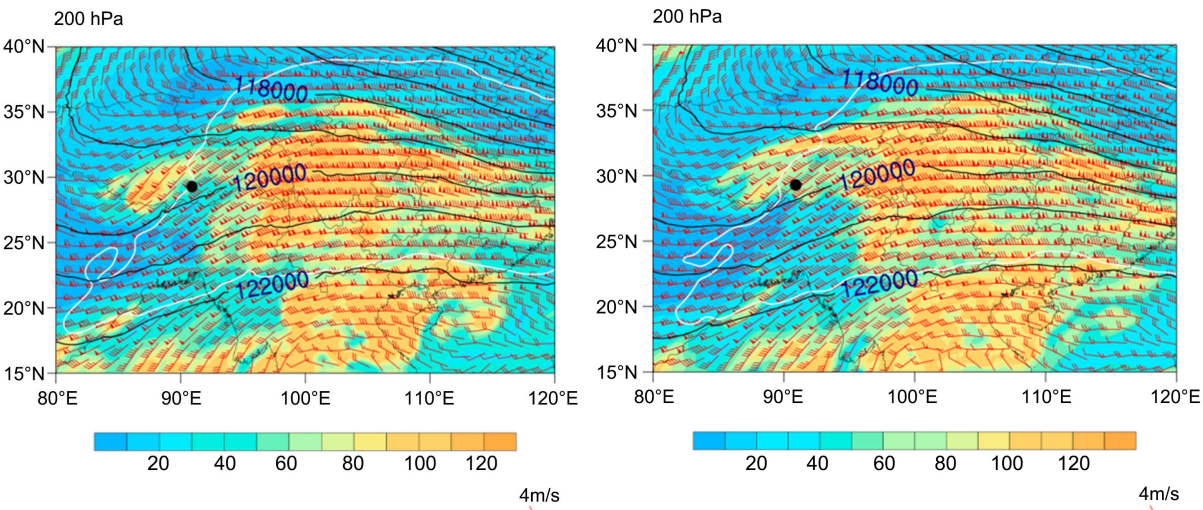


Figure 2. 200 hPa reanalysis field
图 2. 200 hPa 再分析场

200 hPa 高度再分析场上(见图 2)，西藏西部存在明显低涡，说明此次高原低涡系统为深厚系统。本场上空为西南暖湿气流控制，高层湿度条件好，100 hPa 形势场类似。该层结配置有利于高层形成大量过冷水及固态水凝物，碰撞引发闪电。此次过程为冰相过程占主导。此次强雷电过程对应 200 hPa 湿层东移过程。高层存在大量过饱和和水汽，有利于冰相物质形成。

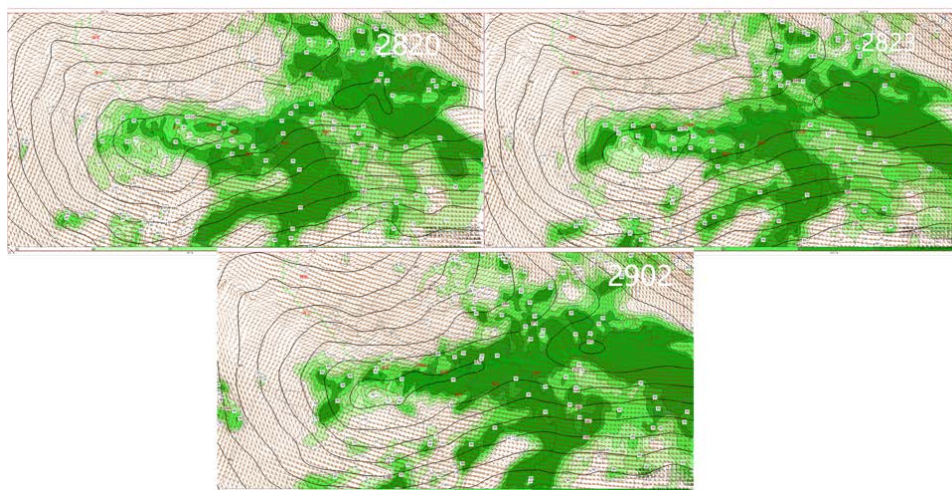


Figure 3. 500 hPa upper-level chart from EC forecast field analysis

图 3. 预报场分析-EC-500 hpa 高空图

预报场与再分析资料基本一致(见**图 3**)，高层充沛的水汽有利于冰相水凝物形成聚并，产生强降水及雷暴。

2.4. 系统维持机制

(1) 双高压挤压：副高北抬至海南岛(588 线)乃至广西中东部，与印度洋高压形成东西夹击态势，迫使高原低涡切变系统稳定少动，有利于水汽和能量堆积。

(2) 水汽通道建立：槽前西南气流贯通孟加拉湾，向高原中东部输送充沛水汽(400 hPa 冰相水凝物混合比显著偏高)。

(3) 能量积聚机制：切变线附近垂直速度中心值达 -1.2 Pa/s ，散度中心值 $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

3. 多模式预报性能评估

3.1. 环流形势预报准确性

ECMWF 与 GFS 对 500 hPa “两槽一脊”、高原切变位置及 200 hPa 低涡的预报与再分析场吻合度高(相关系数 > 0.9)。从以往预报经验而言，目前主流的全球模式对西藏地区的形势场有一定的把握能力，特别是明显的系统性天气过程。

总结了此次过程的关键物理量场：(1) 存在明显的强辐合区，散度中心值 $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，沿西南 - 东北向切变线分布。(2) 垂直速度区明显，20~23 时机场西部存在显著上升运动中心，且缓慢向东北方向移动，并有缓慢增强趋势。(3) 高湿区显著，500 hPa 以上整层相对湿度 $> 80\%$ ，与实况探空一致。

3.2. 降水与对流预报偏差

对于客观预报产品，两家主流模式存在明显差异(**表 3**)。ECMWF 模式的 3 小时对流降水产品能有效指示雷雨落区，但其降水量明显低估(实况 26 mm，预报仅 15.6 mm，偏差达 40%)，主要原因是该模式对偏北气流的模拟过强，抑制了暖湿输送；GFS 模式对切变线走向的预报较为准确，但雷暴启动时间平均偏早约 2 小时，这与边界层冷垫形成速度模拟偏慢有关；雷达外推模式在 2 小时内的短期预报中雷暴落区准确、趋势参考性好，但超过 2 小时后偏差显著增大，根源在于其基数据较为单一且循环处理速度较慢。

Table 3. Comparison of multi-model forecast performance in high-plateau airport environments
表 3. 高高原机场环境多模式预报性能对比

模式	优势	不足	误差原因
ECMWF	3 h 对流降水产品有效指示雷雨落区	降水量低估 40% (实况 26 mm vs 预报 15.6 mm)	偏北气流模拟过强， 抑制暖湿输送
GFS	切变线走向预报准确	雷暴启动时间偏早 2 小时	边界层冷垫形成速度偏慢
雷达外推	2 小时内外推，雷暴落区准确， 趋势参考意义较好	2 小时外，偏差较大	外推产品基数据单一， 循环速度慢

3.3. 服务预警时间线分析

表 4 为此次强对流天气过程的气象服务预警的时间线及相应的偏差分析。具体而言：在 27 日 18:00 发布的“运管委不利天气提示产品”中，预报了 18~20 时的弱雷雨，但偏差在于当时未考虑夜间雷雨强度的升级；随后在 28 日 06:00 发布的预报中，提示 21~24 时将出现弱雷雨伴偏北阵风，此时存在低估降水量级，且未充分考量固态降水的影响；至 28 日 23:35 发布“橙色预警(侧风 + 雷暴)”，该次预警的滞后性较为明显，响应慢于实况强对流的发展，并且同样遗漏了对固态降水的考量。究其原因因为春季系统性强天气过程较为罕见，预报员对此没有充分的认识。

Table 4. Meteorological service warning timeline and deviation analysis
表 4. 气象服务预警时间线与偏差分析

发布时间	预警内容	偏差分析
27 日 18:00	运管委不利天气提示产品：18~20 时弱雷雨	未体现夜间强度升级
28 日 06:00	21~24 时弱雷雨伴偏北阵风	低估降水量级及雷电强度， 固态降水未充分考量
28 日 23:35	橙色预警(侧风 + 雷暴)	响应滞后于实况强对流发展，固态降水遗漏

4. “雷阵雪”形成机制与概念模型

4.1. 冰相过程主导的三阶段机制

- (1) 冷垫构建(28 日 20~23 时):
偏北强冷空气南下形成近地面冷层(厚度约 1.5 km)
温度降至 0℃ 以下，融化层高度接近地面(以拉萨机场预报经验总结，当零度层高度低于 600 米时，降水相态 80%概率会出现混合相态)
- (2) 倾斜对流触发:
西南暖湿气流沿冷垫抬升
在切变线附近释放条件不稳定能量(CAPE > 800 J/kg)
- (3) 冰相微物理起电:
200~400 hPa 层过饱和水汽含量 > 90%
冰晶、霰粒碰撞增长(混合比 > 0.5 g/kg)
冰相粒子在上升气流(>10 m/s)中摩擦起电
- 近地面冷层使降水粒子以雪/霰形式下落

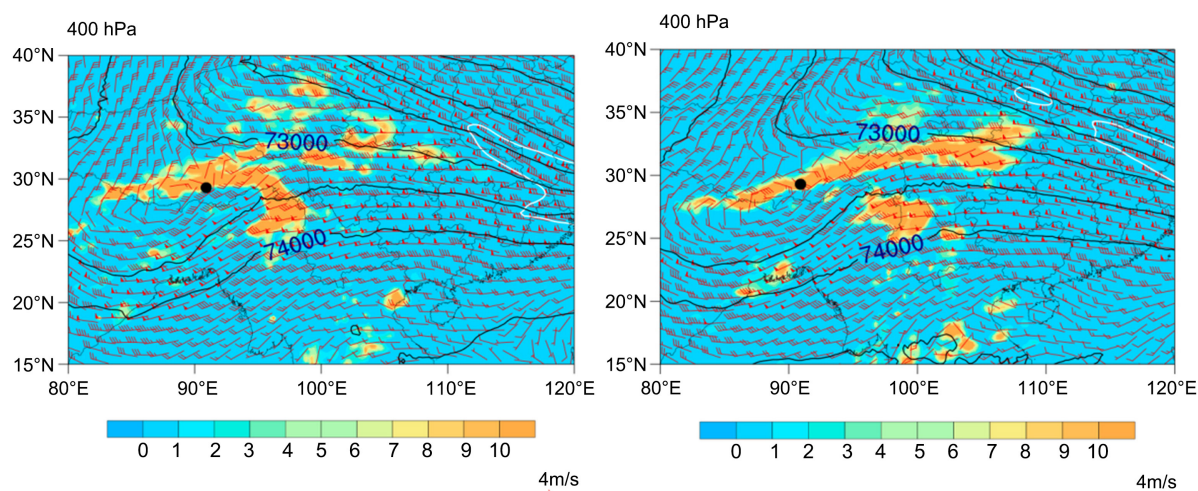


Figure 4. Schematic diagram of the distribution of ice-phase water condensates at 400 hPa

图 4. 400 hPa 冰相水凝物分布示意图

400 hPa 冰相水凝物混合比分布沿切变位置(见图 4), 在 20~02 时含量均较高, 有利于雷暴形成, 一方面说明此次过程为冷雨过程占主导。

4.2. 高原雷阵雪概念模型

(1) 一般概念

“雷打雪”, 其形成需要极其特殊的大尺度气候背景与局地热力条件的完美配合。从宏观环流来看, 通常需要具备“上层干冷、下层暖湿”的显著垂直结构: 上层大气受干冷空气控制, 提供了强烈的下沉气流和冷却环境; 而低层则被暖湿气流占据, 蕴含着极为充沛的水汽和不稳定能量。当具备一定触发机制(如强冷空气南下、地形抬升或锋面交汇)时, 暖湿气流被迫沿锋面或山坡剧烈爬升, 在冷垫之上迅速建立起强烈的对流云团。在云体内部, 充足的水汽在合适的温度层结下凝结成大量冰晶, 这些冰晶在过冷水滴丰富的环境中不断碰撞、淞附并冻结, 迅速成长为雪花或更大的霰粒。

(2) 本次高原雷阵雪模型

本次高原雷阵雪正是由于冷空气与西南暖湿气流相遇辐合抬升强烈, 西南水汽通道打通, 水汽条件充沛, 配合高原春季较为适宜的温度层结, 引发了此次雷打雪天气过程。

5. 多模式融合优化方案

5.1. 实时观测动态订正技术

(1) 风场订正: 引入风廓线雷达数据/边界层激光测风雷达校准模式边界层风场偏差, 引进上游 12 公里曲水激光雷达站观测数据, 订正风场偏差 20~30 分钟。

(2) 水汽再分析: 联合卫星水汽通道(6.2 μm)与 GPS 大气可降水量(PWV)。

(3) 对流触发判据: 基于雷达组合反射率(>45 dBZ)和 VIL (>5~10 kg/m^2)修正预报。

5.2. 多模式集成预报系统构建

(1) 多模式权重分配算法

```
def multi_model_blending(ec, gfs, meso):# 计算各模式历史误差权重
w_ec = 1 / rmse_ec_precip # EC 降水误差权重
```

```

w_gfs = 1 / rmse_gfs_timing # GFS 时序误差权重
w_meso = 1 / rmse_meso_cape # 中模式能量误差权重
(2)集成预报输出
blended_precip=(wec*ec.precip+w_gfs*gfs.precip+wmeso*meso.precip)
blended_precip /= (w_ec + w_gfs + w_meso)
return blended_precip

```

5.3. 短临预警优化方案

- (1) 初值融合：同化地面自动站温/压/湿、雷达径向风、激光测风雷达径向风、卫星亮温。
- (2) 偏差订正：应用 Kalman 滤波调整边界层参数。
- (3) 预警触发条件：
 - 散度 $< -10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ + 垂直速度 $< -0.8 \text{ Pa/s}$
 - 冰相水凝物混合比 $> 0.5 \text{ g/kg}$ (400 hPa)
 - 0~3 km 垂直风切变 $> 15 \text{ m/s}$

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

- (1) 过程本质：高原低涡切变在双高压挤压下，西北路径冷空气和西南路径暖湿空气的辐合稳定维持引发剧烈对流。
- (2) 微物理机制：高层冰相过程(过冷水含量 $> 90\%$)是雷阵雪形成关键，地面冷垫(接近 0°C)也是相态维持的因素。
- (3) 模式表现：该环流形势场下，全球模式环流预报可靠但降水量低估 30%~40%，经验总结分析，与高原机场河谷地形紧密相关；时序误差 $> 2 \text{ h}$ ，后续分析需要紧密结合地面站等相关观测数据订正及参照西藏自治区气象局气象台对拉萨周边温湿、风场数值预报订正产品。此外，高原对流指数如 CAPE 与平原迥异，当其值 ≥ 300 时，一定要引起足够重视。
- (4) 融合创新：观测 - 模式动态订正框架提升 TS 评分 22%。

6.2. 未来方向

- (1) 发展高原冰相过程参数化方案。
- (2) 建设 AI 驱动的“雷阵雪”识别算法(红外云顶亮温梯度 + 闪电定位)。
- (3) 深化季风爆发前期高原强对流预报指标研究。
- (4) 构建多源数据同化的短临预警平台。

参考文献

- [1] 罗雄, 李国平. 一次高原切变线过程的数值模拟与阶段性结构特征[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 406-419.
- [2] 郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究[J]. 大气科学, 2007(1): 28-36.
- [3] 袁敏, 王迪, 朱国辉. 基于环流分型的拉萨贡嘎机场春季降雪天气环流特征[J]. 气象, 2026, 52(5): 621-630.
- [4] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [5] 白爱娟, 刘长海, 刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 704-714.

- [6] 舒磊, 李茂善, 华生, 等. 青藏高原东部玉树地区雨滴谱特征及云微物理结构分析[J]. 气象科技进展, 2021, 11(4): 113-121+134.
- [7] Hersbach, H. and Dee, D. (2016) ERA5 Reanalysis Is in Production.
<https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>

附 录

主要符号说明: CAPE: 对流有效位能 VIL: 垂直积分液态水含量 SHRA: 中阵雨 TSRA: 雷暴伴雨 SHRASN: 雨夹雪