

日喀则南部冬末春初一次强降雪天气过程的成因及模式检验分析

玉 拉^{1*}, 格桑卓玛², 卓玛次仁^{2#}

¹西藏日喀则市气象局, 西藏 日喀则

²日喀则国家观象台, 西藏 日喀则

收稿日期: 2025年12月2日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月14日

摘要

本文以2024年3月2~4日日喀则南部区域性强降雪为研究对象, 利用ERA5再分析资料、常规观测及探空数据, 结合多数值模式产品, 从环流背景、水汽输送、动力热力机制及模式预报性能四方面开展系统分析, 旨在揭示高原南部冬末春初暴雪成因, 为同类天气预报提供参考。结果表明: (1) 此次暴雪由500 hPa南支槽东移与低空西南急流协同作用引发, 中高纬“两槽一脊”经向环流为冷暖气流交汇提供了有利条件; (2) 阿拉伯海与孟加拉湾的水汽通过西南急流持续输送至降雪区, 700~250 hPa整层相对湿度维持85%以上, 配合200 hPa高空急流右后侧强辐散场, 形成“上散下合”的垂直环流与强烈上升运动; (3) 探空资料显示风随高度顺转的暖平流特征显著, 逆温层的建立与破坏过程调控不稳定能量的积聚与释放, 影响降雪强度变化; (4) 聂拉木、吉隆特殊地形对水汽辐合与上升运动具有显著促进作用, 是暴雪落区集中的重要因素; (5) 各数值模式对降雪落区预报一致性较好, GERMAN模式对降水量级的预报最接近实况, ECMWF模式预报偏强, CMA-GFS和CMA-TYM模式预报偏弱。本研究揭示的高原南部强降雪成因机制及模式表现, 可为同类天气的预报准确率提升提供理论支撑与技术参考。

关键词

日喀则南部, 暴雪天气, 成因机制, 环流演变, 物理量特征, 模式检验

Causes and Model Verification Analysis of a Heavy Snowfall Event in Southern Shigatse in Late Winter and Early Spring

La Yu^{1*}, Gesang Zhuoma², Zhuoma Ciren^{2#}

¹Tibet Shigatse Meteorological Bureau, Shigatse Tibet

*第一作者。

#通讯作者。

²Shigatse National Observatory, Shigatse Tibet

Received: December 2, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 14, 2026

Abstract

To reveal the formation mechanism of heavy snowfall in the southern Qinghai-Xizang Plateau in late winter and early spring and improve forecast accuracy, this study takes the regional heavy snowfall event in southern Shigatse from March 2 to 4, 2024 as the research object. Using ERA5 reanalysis data (spatial resolution $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$; temporal resolution 1 h), surface and sounding observation data (observation times at 08:00 and 20:00), combined with forecast products from four numerical models including GERMAN, ECMWF, CMA-GFS and CMA-TYM, a systematic analysis was carried out from four dimensions: circulation background, water vapor transport, dynamic and thermal mechanisms, and model forecast performance. The results show that: (1) This heavy snowfall was triggered by the synergistic effect of the eastward movement of the 500 hPa southern branch trough and the low-level southwest jet, under the favorable background of the “two troughs and one ridge” meridional circulation in the middle and high latitudes, which provided conditions for the convergence of cold and warm air masses. (2) Water vapor from the Arabian Sea and the Bay of Bengal was continuously transported to the snowfall area via the southwest jet, with the whole-layer relative humidity between 700 hPa and 250 hPa maintaining above 85%, combined with the strong divergence field on the right rear side of the 200 hPa upper-level jet, a vertical circulation of “upper divergence and lower convergence” was formed, inducing strong upward motion. (3) Sounding data showed significant warm advection with wind turning clockwise with height; the establishment and destruction of the inversion layer regulated the accumulation of unstable energy, which affected the variation of snowfall intensity. (4) The special terrain of Nyalam and Gyirong has a significant promoting effect on water vapor convergence and upward motion, and is an important factor for the concentration of heavy snowfall areas. (5) All models had good consistency in forecasting the snowfall area, among which the GERMAN model had the closest prediction to the observed precipitation magnitude, the ECMWF model overestimated the precipitation, and the CMA-GFS and CMA-TYM models underestimated it. The research results can provide theoretical support and technical reference for the forecast and early warning of similar heavy snowfall events in the southern Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords

Southern Shigatse, Heavy Snowfall Event, Formation Mechanism, Circulation Evolution, Physical Quantity Characteristics, Numerical Model Verification

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

在全球气候变化背景下，青藏高原极端降雪事件呈现频发态势[1][2]。青藏高原暴雪的发生与南支槽活动、低空急流及水汽输送密切相关[3][4]，但受特殊地形及观测限制，暴雪预报仍存在不确定性[5]。西藏南部暴雪依赖南支系统与地形的协同作用[4]，与其他高原区域的暴雪成因存在显著差异，因此深入分析该区域暴雪的天气学特征与成因机制，对提高预报准确率具有重要意义。2024年3月2~4日，日喀则市南部出现冬末春初区域性暴雪天气过程，过程最大降水量达55.2 mm（聂拉木县曲乡），最大积雪深度

超过 10 cm(吉隆县)。本文利用同期 ERA5 再分析数据、探空观测及多模式预报数据, 系统分析此次过程的环流演变、水汽来源、动力与热力机制, 检验数值模式预报效果, 为深入认识日喀则南部强降雪特征及今后预报提供参考。

2. 天气实况

2024 年 3 月 2~4 日, 日喀则市西部和南部地区出现强降雪天气, 聂拉木、吉隆、定日等县达到暴雪量级。过程累计降水量(图 1): 聂拉木县曲乡 55.2 mm、县城 23.5 mm, 定日县曲当乡 22.2 mm, 吉隆县贡当乡 18.3 mm、吉隆镇 17.6 mm(雨夹雪)。强降雪时段集中在 2 日 20 时至 3 日 20 时, 期间个别地方积雪深度达 10 厘米。

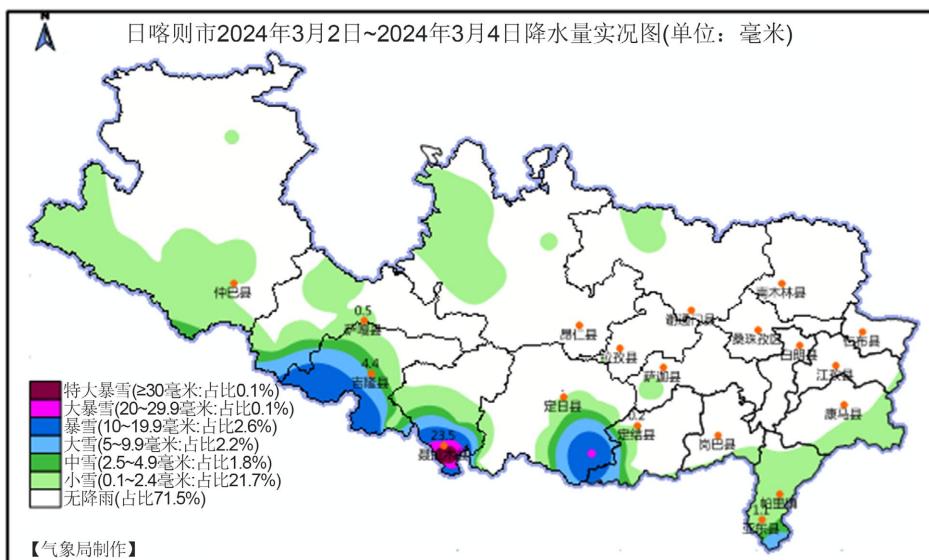


Figure 1. Precipitation observed from March 2 to 4, 2024

图 1. 2024 年 3 月 2 日~4 日降水量实况(通过业务软件自行绘制(基于西藏日喀则市气象局观测数据))

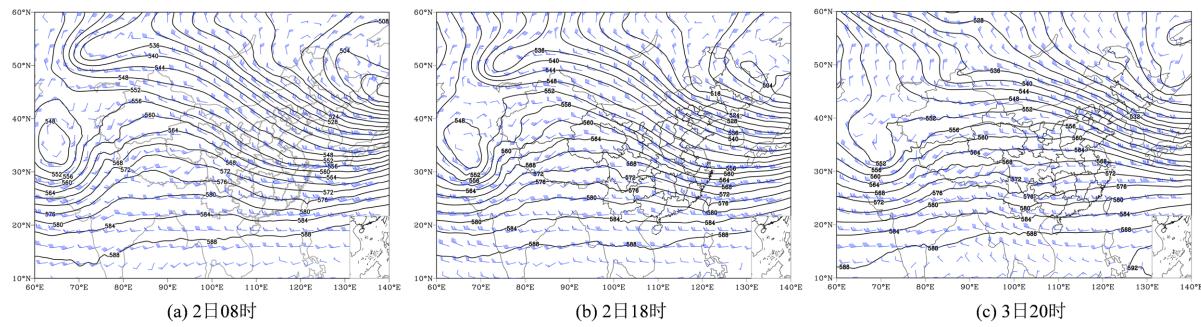
3. 大尺度环流背景

3.1. 环流背景

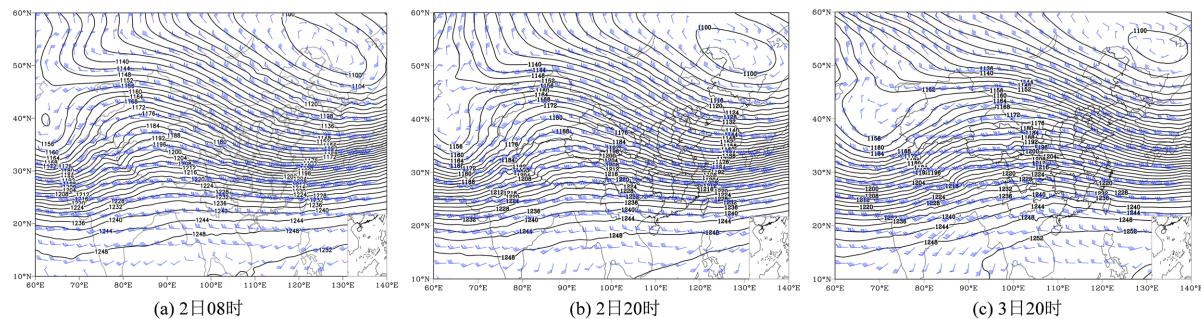
500 hPa 中高纬地区呈现显著的经向环流特征: 黑海以北为高压脊区, 里海至高原西侧为低涡槽区, 贝湖以东则被宽广槽区控制, 为冷空气南下与暖湿气流北上提供了动力通道, 是高原强降雪的典型环流形势。

3.2. 环流演变特征

500 hPa 环流分析, 2 日 08 时, 南支槽位于高原西侧(偏西), 高原主体受西南风控制(风速 12 m/s, 西南低空急流雏形显现), 水汽通道初建, 但日喀则西南部(吉隆、聂拉木)西南风弱, 暴雪酝酿(图 2(a)); 2 日 18 时南支槽东移, 该区域西南风增至 20 m/s, 低空西南急流建立, 打通阿拉伯海水汽输送通道, 暖湿气流沿着西南低空急流北上高原, 聂拉木、吉隆一带因冷下垫面及地形辐合作用, 暖湿气流强烈抬升, 触发暴雪天气(图 2(b)); 3 日西南风急流依旧保持强盛态势, 20 时日喀则南部西南风急流风速增强至 30 m/s, 暖湿水汽来源扩展至孟加拉湾与阿拉伯海, 大量暖湿水汽持续向吉隆和聂拉木输送, 使得暴雪天气维持且强度较大(图 2(c)); 4 日低槽曲率明显减小, 南支系统北抬东移减弱, 吉隆和聂拉木一带以槽后西风气流控制, 水汽输送切断, 降雪趋于减弱。此次系统移速快, 但因前期水汽和动力条件充足, 降水强度大。

**Figure 2.** 500 hPa circulation field from March 2 to 3**图 2.** 3月 2~3 日 500 hPa 环流场

200 hPa 环流分析, 2 日 08 时 200 hPa 高原主体受西风槽控制(图 3(a)), 西风急流在高原西南部开始发展, 风速达 60 m/s 左右, 形成明显高层辐散场, 为垂直上升运动提供初始动力支持, 此时虽未触发降雪, 但为暴雪发生奠定了高层动力基础。2 日 18 时随着 500 hPa 南支槽东移, 200 hPa 西风槽同步加深(图 3(b)), 槽前正涡度平流显著增强, 高层辐散场范围扩大且强度提升。暴雪区(聂拉木、吉隆)上空风速达 60 m/s, 位于高空急流核右后侧。根据急流动力学理论, 高空急流核右后侧为下沉运动与辐散的过渡区, 易触发低层上升运动。同时, 高层急流动能通过垂直动量下传, 增强低层气流的输送, 触发暴雪开始。3 日 20 时 200 hPa 高空急流持续强盛(图 3(c)), 风速中心达 65 m/s 以上, 暴雪区上空最大风速维持在 60 m/s。高层急流核右后侧的强辐散场与低层水汽输送形成“上散下合”的垂直环流, 持续维持强上升运动, 使得暴雪强度得以持续, 4 日 200 hPa 西风槽东移北抬, 槽前辐散场显著减弱, 垂直上升运动消失。对应 500 hPa 南支系统减弱, 水汽输送中断, 降雪过程趋于结束。

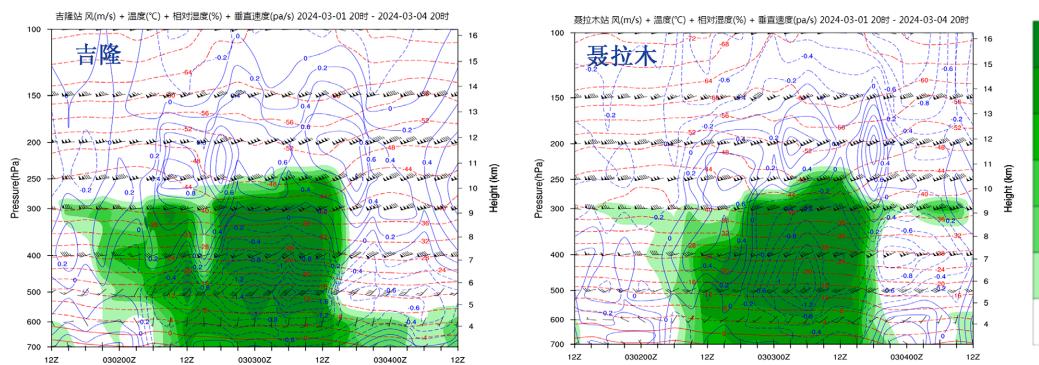
**Figure 3.** 200 hPa circulation field from March 2 to 3**图 3.** 3月 2~3 日 200 hPa 环流场

4. 物理量分析

4.1. 水汽与垂直运动条件

聂拉木、吉隆两站模式剖面图(图 4)显示, 2 日 17 时, 强降雪开始前 700~250 hPa 整层相对湿度 60% 左右, 400 hPa 为偏西风, 2 日 18 时 700~250 hPa 整层相对湿度基本跃升至 85%, 400 hPa 西风转为西南风, 风速增大, 且持续维持到 3 日夜间, 表明该区域上空存在深厚且充沛的水汽条件。南支槽前的西南气流将阿拉伯海暖湿水汽持续不断地向高原输送, 在聂拉木和吉隆上空堆积, 满足了暴雪天气对水汽量的需求, 持续的高相对湿度保证了水汽的持续供应; 与此同时, 吉隆 2 日 20 时 500 hPa 垂直速度负值中心达 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 聂拉木 3 日 08~20 时 500~400 hPa 负值中心达 $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应时段上升运动更强、降雪

强度更大。强烈的上升运动不仅能促使更多的水汽快速抬升、冷却凝结，还能将水汽输送到更高的高度，增加降雪的强度和范围，而相对湿度的持续高位，则保证了在垂直上升运动作用下，始终有充足的水汽供应，维持了暴雪天气的强度和持续时间。结合 3.1 节的 500 hPa 环流场，南支槽前的西南气流不仅带来了高湿水汽，也为上升运动提供了动力支持。水汽是强降雪发生的物质基础，不同区域暴雪过程的水汽来源与输送特征存在差异，伊犁河谷暴雪主要依赖西风带系统带来的水汽输送[6]，而北方强降雪的水汽收支则与中纬度环流系统密切相关[7]，本次过程的水汽主要源自阿拉伯海与孟加拉湾，体现了高原南部暴雪独特的水汽输送特征。



风：黑色($m \cdot s^{-1}$)，温度：红色虚线($^{\circ}C$)，相对湿度：绿色阴影(间隔 5%)，垂直速度：蓝色实线($Pa \cdot s^{-1}$)。

Figure 4. Single-Station numerical model cross-sections of Gyirong and Nyalam (wind + temperature + relative humidity + vertical velocity)

图 4. 吉隆、聂拉木单站数值模式剖面图(风 + 温度 + 相对湿度 + 垂直速度)

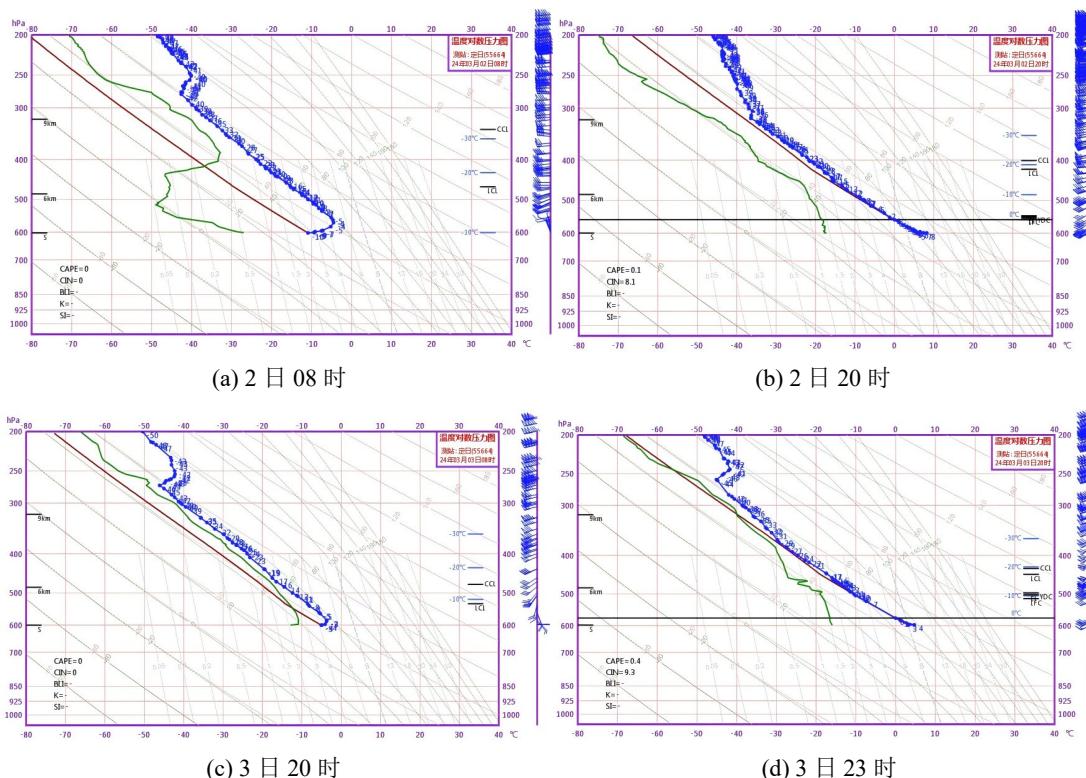


Figure 5. Sounding data from March 2 to 3
图 5. 3 月 2~3 日探空资料

4.2. 热力与不稳定条件

定日探空资料显示, 2日08时600~300 hPa为西南风, 逆温层限制垂直对流, 低纬暖湿气流输送的水汽与能量在逆温层下积聚, 为降雪储备条件(图5(a)); 2日20时强降雪时段, 600~300 hPa西南风强盛且随高度旋转, 暖平流促使空气强烈上升, 水汽快速凝结, 不稳定能量逐步释放, 推动降雪发展(图5(b)); 3日08时西南风维持, 但逆温层未消失, 暖湿气流输送与逆温限制的矛盾使降雪强度趋稳(图5(c)); 3日20时整层西南风风速显著加大, 强风切变引发动量下传, 彻底破坏逆温层, 稳定层结被打破, 前期积聚的不稳定能量迅速释放, 降雪强度显著增强(图5(d))。

5. 预报模式检验

对比四家数值模式(GERMAN模式、CMA-GFS、CMA-TYM模式、ECMWF模式)前三天(图6)及临近时段的降雪预报(图7)与实况发现(图1), 各模式整体降雪落区预报整体上基本一致, 但各家模式降水量级预报上存在差异。德国模式预报结果与实况更为接近; ECMWF模式预报降水量级偏大, CMA-GFS和CMA-TYM模式预报量级偏小, 从降水落区和降水量级的总体表现上GERMAN模式比ECMWF模式接近实况, ECMWF模式优于CMA-GFS、CMA-TYM模式, 为提高冬末春初的降雪预报准确率提供参考, 各模式具体预报偏差情况详见表1[6]。

Table 1. Verification of snowfall area and magnitude forecast by each model
表1. 各模式降雪落区及量级预报检验表

模式	聂拉木曲乡(实况 55.2 mm)	吉隆贡当乡(实况 18.3 mm)	量级偏差特征
GERMAN	52.8 mm	17.9 mm	最接近实况
ECMWF	68.5 mm	24.1 mm	偏强
CMA-GFS	41.3 mm	13.2 mm	偏弱
CMA-TYM	38.7 mm	12.5 mm	偏弱

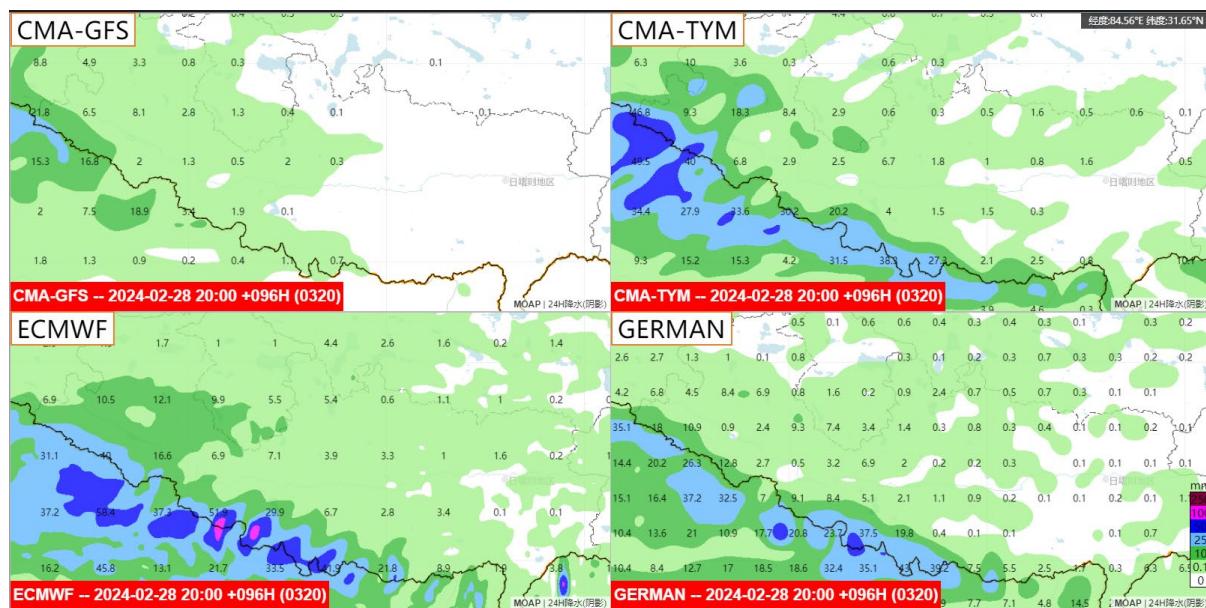


Figure 6. Numerical model precipitation forecast with a 3-day lead time

图6. 提前三天的数值模式降水预报

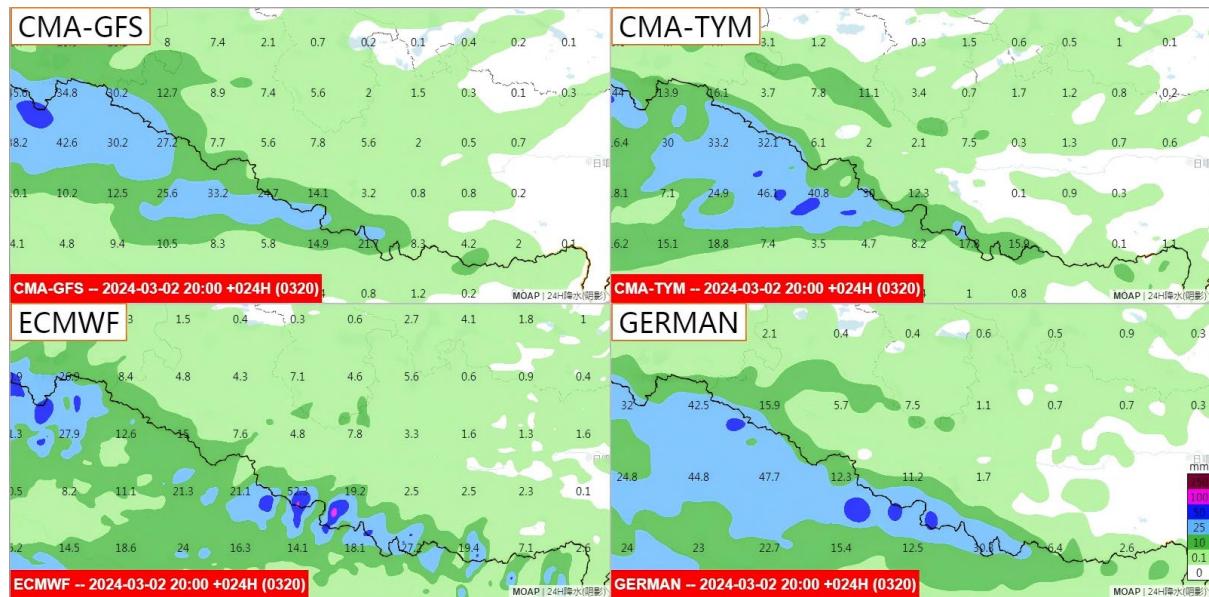


Figure 7. Short-range numerical model precipitation forecast
图 7. 临近时的数值模式降水预报

6. 结论

- (1) 在此次天气发生前, 500 hPa 中高纬地区呈现“两槽一脊”的显著经向环流特征, 日喀则位于南支槽前, 南支槽的东移和西南低空急流的强盛, 共同造成日喀则南部暴雪天气的发生发展。
- (2) 天气发生期间, 吉隆和聂拉木中低层存在垂直速度负值中心及整层深厚相对湿度, 500 hPa 水汽输送与 200 hPa 动力抬升协同是关键成因, 降水强度与急流强度、高层辐散密切相关, 强上升运动区与强降雪区域较吻合。
- (3) 聂拉木、吉隆特殊地形对水汽辐合与上升运动有促进作用, 是暴雪落区集中的重要因素。
- (4) 此次天气过程, 各数值模式预报在降水落区和降水量级的总体表现上 GERMAN 模式表现最优, 其次为 ECMWF 模式, CMA-GFS 和 CMA-TYM 模式降水量级预报偏低。

参考文献

- [1] 格桑卓玛, 德吉白珍, 尼玛拉宗. 西藏聂拉木 2013 年 2 月暴雪天气气候特点及其成因分析[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(25): 141-145, 148.
- [2] 普布次仁, 边巴次仁, 拉巴, 等. 青藏高原复杂地形对暴雪影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1013-1024.
- [3] 奚凤, 旦增冉珍, 边玛罗布, 等. 西藏南部特大暴雪的动力成因分析[J]. 高原气象, 2024, 43(12): 33-40.
- [4] 边琼. 2018 年末昌都一次特大暴雪天气过程与预报服务分析[J]. 西藏科技, 2020(3): 23-25.
- [5] 武敬峰, 张雷, 刘静颖, 等. 川西高原冬末春初连续性强降雪天气过程特征分析[J]. 内蒙古气象, 2024, 42(4): 9-18.
- [6] 庄晓翠, 赵江伟, 李博渊, 等. 伊犁河谷暴雪过程水汽特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 15-25.
- [7] 王遵娅, 周波涛. 影响中国北方强降雪事件年际变化的典型环流背景和水汽收支特征分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2654-2666.