

黄晴,李生艳,覃皓,等. 2024年1月19—26日广西低温雨雪冰冻过程成因及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用, 2025, 46(2): 63–68.

HUANG Q, LI S Y, QIN H, et al. Analysis of causes and forecast deviations for the low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in Guangxi from January 19 to 26, 2024[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2025, 46(2): 63–68.

2024年1月19—26日广西低温雨雪冰冻过程成因 及预报偏差分析

黄晴¹, 李生艳^{1,2}, 覃皓¹, 黄子怡¹

(1. 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2. 北部湾国家气候观象台开放实验室, 南宁 530022)

摘要: 利用常规观测资料、数值预报模式及欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料对2024年1月19—26日广西低温雨雪冰冻过程成因和预报偏差进行分析。结果表明, 此次过程气温呈阶梯式下降、低温持续时间长、雨雪冰冻范围广、多种降水相态同时出现。中高纬天气系统显著异常引导强冷空气两次南下, 强锋生作用和水汽辐合、深厚的上升运动、温度层结的改变共同造成复杂的降水相态转换。过程前暖低压发展增温, 过程期间锋面和冷平流长时间维持导致大幅降温 and 极端低温出现。数值模式预报雨雪相态转换线偏北、最低气温偏高, 对冷空气势力和移速预报能力不足, 低估冷平流强度, 造成广西温度层结预报有偏差。

关键词: 低温雨雪; 降水相态; 相态转换; 锋生作用; 温度平流

中图分类号: P458 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2025.2.10

广西地处华南西部, 地形复杂, 气候独特, 冬季常受低温雨雪天气影响, 农业、交通和电力设施往往受到严重威胁。广西低温雨雪天气具有独特的特点, 与其它地区相比, 其发生频率相对较低, 但一旦出现, 往往持续时间较长、局地性强, 且降水相态复杂, 雨、雪、冻雨等多种降水形式交替出现, 甚至在同一地区短时间内出现多种降水相态的转换, 预报难度较大。

近年来, 针对低温雨雪天气的物理机制研究取得一定进展, 学者们从大尺度环流配置^[1-3]、中尺度系统演变^[4-8]及微物理过程^[9]等角度揭示其成因。同时, 探讨地形对冷空气南下和水汽辐合的调制作用^[10-12]。随着新资料新技术的不断应用^[13-14], 雨雪相态转换的监测能力也有所提升。此外, 基于数值模式和统计方法, 研究者建立多种低温雨雪预报指标^[15-16], 并发展客观识别技术^[17]和客观预报技

术^[18-19], 以提高预报准确性。然而, 当前研究对广西局地性雨雪的精细化预报仍存在不足, 对特定气候背景下相态转换的关键影响因子及触发机制仍缺乏系统性研究。

2024年1月19—26日广西出现持续低温雨雪冰冻天气, 降雪范围为2016年以来最大。本文基于多种资料对此次过程的成因进行深入分析, 揭示相态转换和极端低温的主导物理机制; 同时对预报偏差进行系统评估, 并探讨改进预报技术的途径和方法, 以为广西低温雨雪天气的预报和灾害防御提供科学依据和技术支持。

1 资料与方法

1.1 资料

本研究所用资料是由广西壮族自治区气象信息中心提供的2024年1月17—26日常规地面、高空气

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 广西气象局创新平台专项(BNCO-N202304)、广西气象科研计划项目(桂气科2021QN02)

第一作者: 黄晴(1989-), 工程师, 主要从事灾害性天气预报预警业务。E-mail: hqsmile52@163.com

象观测站资料,广西气象部门及社会报告的雪、雨夹雪、冻雨、冰冻实况,以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式、中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)模式为代表的多家数值预报模式,欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料(ERA5)。文中含有地图的图片,基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS(2016)1593 的标准地图制作,底图无修改。

1.2 方法

应用天气学诊断分析方法,对此次过程的雨雪相态转换和极端低温成因与预报难点进行深入分析,重点分析锋生作用、垂直运动、水汽条件、温度层结、温度平流及微物理特征的协同作用,检验评估数值模式在此次过程中的预报性能。

使用环境场相对于历史同期气候平均值的标准差倍数表征其偏离气候态的程度。文中采用1994—2023年共30 a的ERA5再分析数据计算。气候标准差倍数公式^[20]如下:

$$k = \frac{X - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中 k 为环境场的气候标准差倍数, X 为计算时刻的环境场参数值, $\bar{x}$ 为环境场参数历史同期气候平均值, σ 为环境场参数历史同期气候态标准差,历史同期指的是计算日当天及前后两天共5 d。

2 结果与分析

2.1 过程实况特征

2024年1月19日起,受冷空气影响,广西自北向南出现大范围降温、大风天气,20—26日维持低温寒冷天气,高寒山区、桂北出现雨雪冰冻等多种灾害。此次过程具有气温阶梯式下降、低温持续时间长、偏北大风范围广、雨雪冰冻范围广、多种降水相态同时出现等特点。

据实况观测统计,1月19—26日,广西各地过程日平均气温下降10~15℃、局地下降16℃以上,最大降幅达22.9℃(资源县瓜里乡);桂林、柳州、贺州、来宾、河池、百色、南宁、梧州、贵港、玉林、钦州、防城港等12个市51个县(县级市、区)的241个乡镇最低气温低于0℃,最低气温县城为-3.6℃(资源县),高寒山区为-14.3℃(资源县瓜里乡)。全区大部分市

县还出现8级、局地9~11级偏北大风。

19—21日,广西大部分地区有小到中雨、局地大雨到暴雨;21日桂北降水相态转换,由降雨转为冻雨、雨夹雪或雪,22日降雪范围扩大,24日雨雪天气造成冰冻或道路结冰的出现。21—26日,全区有12个市54个县(县级市、区)有雨、雨夹雪、冻雨、冰冻或道路结冰;其中21—23日,桂林、柳州、河池、贺州、百色、来宾、梧州等7个市30个县(县级市、区)有雪,降雪范围为2016年以来最大。据各市气象台统计上报,22日河池市南丹县累积降雪量2.0 mm,桂林市资源、兴安两县积雪深度2.0 cm,灌阳县4.0 cm,是此次过程全区最大积雪深度,换算成累积降雪量约5.7 mm,达到大雪量级。

2.2 环流形势演变特征及偏差分析

此次过程广西连续受两股冷空气影响。1月19日前,亚洲中高纬为“两槽一脊”的环流形势。西伯利亚地面冷高压中心强度达1 060 hPa,比历史同期偏强2 σ 。低纬南支系统活跃,我国西南部500 hPa位势高度比历史偏低0.5~1 σ 。位于80°E的新西伯利亚高压脊前偏北气流引导地面冷高压分裂第一股冷空气南下。18日20时锋面进入桂东北并逐渐南下影响广西。850 hPa切变线南侧西南气流为12 m·s⁻¹,700 hPa西南气流达到16 m·s⁻¹,提供充足的暖湿水汽输送。20日白天地面冷空气到达北部湾海面,850 hPa切变线南压至桂北,此时第一股冷空气影响结束。21日转为间歇期,海平面气压1 030 hPa线稳定在桂东北,850 hPa切变线北抬至贵州和广西交界,锋面维持在广西,广西大部分地区仍维持阴雨天气。与此同时高纬的环流演变正在为第二股冷空气建立向南爆发的条件。乌拉尔山高压脊东伸发展并逐渐与新西伯利亚高压脊合并,在巴尔喀什湖形成切断低压并不断加强,低压中心位势高度比历史偏低2 σ (图1)。受冷空气堆积影响,地面冷高压持续加强达到1 075 hPa。随着切断低压东移南压,22日中纬横槽转竖,偏北气流再次引导地面冷高压分裂第二股强冷空气大举南下。前期稳定在广西的锋面受冷空气补充影响南压出海。850 hPa切变线也南下至广西沿海地区,其南侧偏南气流为10 m·s⁻¹,比前期弱,但桂北700 hPa西南气流仍维持在16

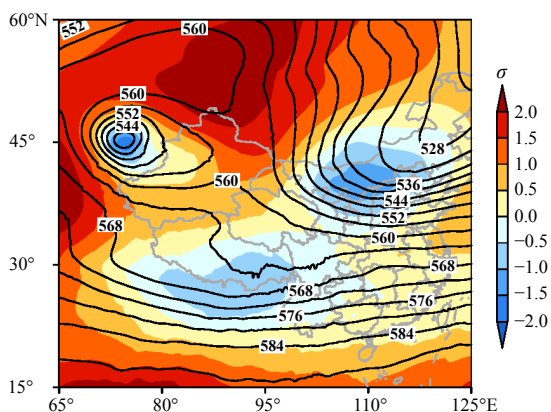


图1 2024年1月21日08时500 hPa平均位势高度(等值线, 单位: dagpm)和气候标准差倍数(填色, 单位: σ)

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 保证一定的水汽条件。23日08时海平面气压1 040 hPa线进入桂东北, 我国中东部受地面冷高压控制, 海平面气压比历史同期偏高2 σ 以上, 此时第二股强冷空气影响才结束。

由前文分析可看出此次过程是由中高纬异常偏强的天气系统两次引导低层切变线和锋面南下造成。多家模式预报地面高压偏弱, 中心强度只达到1 062.5 hPa。并且预报22日08时海平面气压1 040 hPa线已到达湖南省中部, 但实况仍位于湖南省北部; 预报23日08时1 040 hPa线只到达湖南省南部, 并未进入广西。说明模式预报冷空气势力偏弱且南下较快, 而实况冷空气移动较慢、势力强, 盘踞时间长更有利于持续降温。

2.3 雨雪相态转换成因及预报偏差分析

2.3.1 雨雪相态转换成因

第一股冷空气影响造成20日广西大部分地区有小雨, 其中桂东北有中到大雨。第二股冷空气影响期间, 22日全区大部分地区有小到中雨, 中雨范围扩大, 但雨强变弱, 只有分散的大雨, 并且桂北、桂中出现雪、雨夹雪或冻雨天气。

2.3.1.1 动力条件

跟随第一股冷空气南下, 锋生作用带自北向南移入广西, 进入桂北后锋生作用加强, 更具有组织性(图2), 南移至桂南后锋生作用减弱, 组织性变差, 所以20日较强降水集中在桂北。21日, 广西一直存在锋生作用, 有利于锋面在广西稳定维持, 使得广西持

续出现阴雨天气, 气温无法回升。第二股冷空气影响时, 在桂东和桂西的中南部产生锋生作用并逐渐南移加强, 与中雨以上量级降水相对应, 桂西北锋生作用较弱, 只有小雨量级。

沿110°E(桂东)做剖面发现, 第一股冷空气影响时锋面前沿到达23°N, 沿锋面存在明显辐合区, 400 hPa呈辐散, 高低空动力耦合形成深厚垂直上升运动, 强上升运动区稳定在25°N, 达到 $-1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 提供强的动力抬升强迫, 使得桂北、桂中出现小到中雨、桂东北部分地区有大雨。当第二股冷空气影响时, 在24.5°N再次形成显著辐合上升运动区, 在26°N(桂东北北部)对应另一个辐合区, 两个辐合区均生成在925 hPa冷垫上。低层辐合、高层辐散形势比之前更加明显, 上升运动区经向度更大, 锋面前沿南压至20°N以南, 造成22日全区大部分地区有中雨。桂南的降水系统垂直发展较弱, 辐散区只位于700 hPa, 所以只有小到中雨。

2.3.1.2 水汽条件

第一股冷空气影响时, 850 hPa全区大部分地区比湿达到 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水汽通量辐合大值区自北向南进入广西, 南下后逐渐减弱。水汽通量辐合区的移动和强度变化与实况降水落区和量级相一致。之后850 hPa比湿下降至 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当第二股冷空气补充影响时, 在桂北再次形成东弱西强、范围更大的

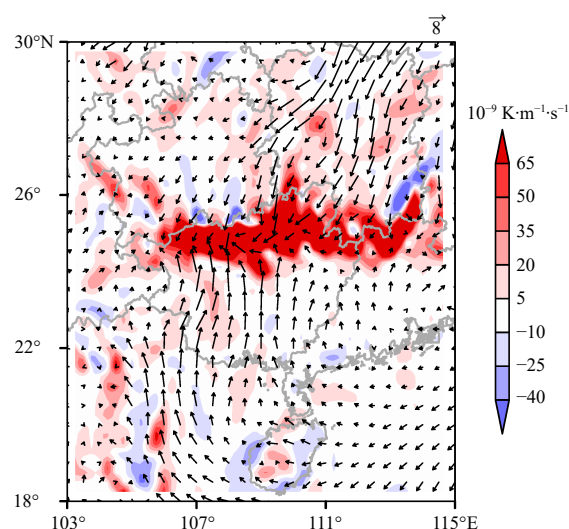


图2 2024年1月19日20时925 hPa锋生函数(填色, 单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

水汽通量辐合区,并跟随锋面一直南移出海,造成全区大部分地区有小到中雨、局地大雨,降水范围扩大,但累积降水量减小。另外在 700 hPa,第二股冷空气影响时水汽通量辐合区的范围显著扩大,覆盖桂北大部分地区。中层水汽通量辐合的加强说明在第二阶段水汽辐合的垂直尺度变得更深厚,强上升运动到达的高度更高,更有利于冰晶的形成,最终造成雨雪相态的转换。

2.3.1.3 温度层结条件

从各层特征温度线演变来看,第一股冷空气影响期间,地面 0 °C 等温线位于桂北北部。925 hPa 0 °C 等温线南压至桂东北,特别在资源、全州、灌阳三县一带比地面 0 °C 线位置更偏南。850 hPa 0 °C 线南压至湖南与广西交界,桂北大部分地区还是维持在 0 °C 气温以上,利于形成降雨。第二股冷空气影响期间,各层 0 °C 等温线快速南移,700 hPa 0 °C 线南压至桂东北,850 hPa 以及地面 0 °C 线位于桂中,925 hPa 位于桂南沿海地区,桂东北大部分地区整层都处于低于 0 °C 的温度层结,更有利于形成降雪。桂西北、桂中 700 ~ 850 hPa 存在逆温层,边界层气温偏低,利于冰晶下落融化后再次冷冻形成冻雨。

桂林的探空资料显示过程中桂东北湿层深厚。受第一股冷空气影响时,只有 925 hPa 气温降至约 0 °C,700 ~ 850 hPa 及地面气温都在 0 °C 以上,在 850 hPa 存在明显逆温层,整层温度层结条件更有利于液态降水。第二股冷空气补充后,700 hPa 以下迅速降温,850 hPa 降温幅度超过 15 °C。整层气温在 0 °C 附近及以下,并且 -10 °C 气温所在高度湿度条件好,更有利于冰晶的形成和雪的转换。

对桂林站做雪水比和雨水比的时间-高度剖面(图3),发现两股冷空气影响期间该站都有明显的雨水比大值区,但在 22 日后雨水比迅速减小,转而雪水比异常增大,充分体现该站受到第二股冷空气影响后的雨雪相态变化。

2.3.2 数值模式预报偏差分析

多家数值模式过程晴雨 24 h TS 评分在 54% ~ 72% 之间。其中 ECMWF 模式预报降水落区和量级与实况相近。该模式较准确预报出地面冷空气前沿和低层切变线的位置,和偏南气流的强度,对桂林、

柳州、河池三市南部的雨雪转换线位置有较好的指示效果。但是雪的落区范围较小,主要位于桂东北北部,而桂北其他地区以冻雨为主。主要原因是该模式预报 850 hPa 气温偏高,0 °C 等温线位于桂北,而实况已至桂南,造成低层偏暖易于融化形成冻雨。CMA-GFS 模式预报 19 日地面冷空气和低层切变线位置偏北,南下慢,偏南风较弱($8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。导致 20 日降雨落区偏北,中雨区位于湖南和贵州两省南部,雨强也较弱,只在贵州省南部局地出现大雨。在第二股冷空气补充时,CMA-GFS 模式预报 22 日系统南下快,08 时切变线已南压至桂东南,但实况仍位于桂中,系统影响时间短,且南风较弱,不利于降水累积,所以预报广西只有小雨量级的降水。

2.4 强降温和低温成因及预报偏差分析

强冷空气降温幅度的预报主要从前期空气回暖程度、冷空气强度、天气状况等方面考虑。自 1 月 15 日起西南暖低压发展,过程前广西大部分地区气温达到 20 °C 以上,当冷空气影响时降温幅度剧烈。并且暖低压的存在造成冷空气南下缓慢,在桂北盘踞时间较长,利于气温长时间持续下降。锋面长时间稳定在广西,造成连续阴雨天气,气温维持在偏低的状态。当第二股强冷空气补充时,气温在前期低温的基础上继续下降,导致桂东北大部分地区处于气温 0 °C 以下,最低达到 -14 °C。

两股冷空气影响时 925 hPa 都有明显的冷平流影响广西,使得该层气温比其它层偏低。850 hPa 在

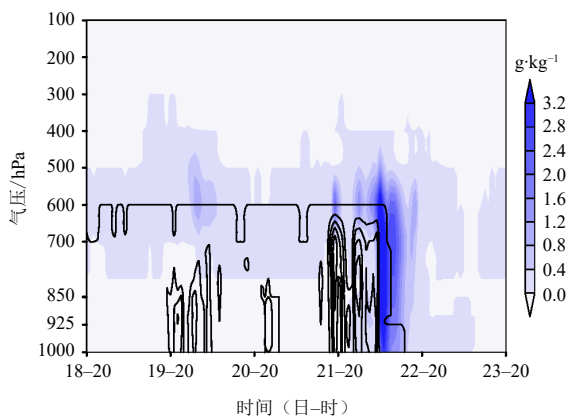


图3 桂林2024年1月19—23日雪水比(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和雨水比(实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)时间-高度剖面

18日之前湖南和贵州两省南部就有明显的暖平流维持,导致该层气温偏高。尽管19日地面锋面已南下至贺州市至河池市一带,但锋前的暖平流依旧较强,锋后的冷平流只能到达湖南、贵州、广西三省交界处,使得桂北在850 hPa出现明显的逆温层。22日第二股冷空气补充时,850 hPa出现强冷平流影响广西,导致850 hPa 0℃等温线迅速南压至桂中。强冷平流始终在桂东北北部维持,保证足够的时间降温,最终导致极端低温的出现。

多家模式对极端低温的预报能力欠缺,预报最低地面气温-9℃,高于实况的-14℃。是因为模式对850 hPa的气温预报偏高,0℃等温线只预报到达桂北,但实况已压至桂南,低估桂东北低层冷平流的强度和持续时间。另外,过程最低气温低于-10℃的站点海拔均高于1 500 m,模式对模拟地形影响的局限性也制约极端低温的预报准确率。

3 结论与讨论

本文利用常规地面和高空气象观测资料、多家数值预报模式及欧洲中期天气预报中心五代再分析资料,对2024年1月19—26日广西低温雨雪冰冻过程成因和预报偏差进行分析。重点探讨此次过程中环流形势演变、锋生作用、垂直运动、水汽条件、温度层结、温度平流及微物理特征的协同影响。得到主要结论如下:

(1)中高纬阻塞形势和地面冷高压显著异常,连续引导两股冷空气大举南下影响广西。强锋生作用、高低空动力耦合形成深厚垂直上升运动、强盛的水汽通量辐合和高比湿环境条件等原因共同造成广西大范围的降水天气。冷空气的补充造成温度层结的调整和水汽辐合区的垂直伸展导致桂北、桂中由雨转为雪或冻雨的复杂降水相态转换。

(2)天气系统显著异常,过程前暖低压发展增温,过程期间锋面和冷平流长时间维持共同造成剧烈的降温幅度、大范围的低温和极端低温的出现。

(3)数值预报模式低估地面高压强度和冷空气的势力,高估锋面南下的速度,对温度平流和温度层结的预报能力不足,导致降雨落区和量级、雨雪转换线位置、极端低温的预报存在偏差。

大气温湿层结垂直分布特征是雪、冻雨的关键预报点。应加强大气垂直层结精细化和降雪量、积雪深度的观测,提供数据支撑。加强对气象要素的实况监测和预报检验分析,寻找中长期时段对阻塞形势、地面冷高压发展具有指示意义的特征。

参考文献:

- [1] 陈业国,农孟松.2008年初广西罕见低温雨雪冰冻天气的成因初探[J].气象研究与应用,2008,29(2):12-14.
- [2] 覃丽,曾小团,高安宁.低温雨雪冰冻灾害天气与大范围霜冻天气对比分析[J].气象研究与应用,2008,29(2):9-11, 25.
- [3] 吕春艳,李旭,陈军,等.我国南方两次低温雨雪天气成因对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(1):96-104.
- [4] 李生艳,梁嘉颖,覃皓,等.2022年广西两次低温雨雪冰冻过程分析[J].气象研究与应用,2023,44(4):85-90.
- [5] 胡燕,叶成志,赵恩榕,等.2024年初湖南两次区域性低温雨雪冰冻天气的成因对比[J].暴雨灾害,2024,43(6):680-692.
- [6] 杨舒楠,徐珺,何立富,等.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,2017,43(6):665-674.
- [7] 阎琦,谭政华,苏雨萌,等.东北冷涡背景下辽宁省一次罕见暴雪过程不同阶段降雪成因分析[J].气象与环境学报,2024,40(4):1-9.
- [8] 任伟,任燕,全林生,等.山东西北部一次极端暴雪的动力和热力特征[J].陕西气象,2024(2):8-15.
- [9] 杨旗,张海鹏,吴建蓉,等.对冬季云贵—华南准静止锋上一次多相态降水过程的模拟研究[J].干旱气象,2024,42(1):75-83,106.
- [10] 谷秀杰,田金华,王友贺,等.河南低温雨雪冰冻气象等级及时空特征[J].气象,2025,51(3):313-323.
- [11] 温泉沛,周月华,李兰,等.湖北省持续低温雨雪过程评估与分析[J].暴雨灾害,2024,43(4):440-447.
- [12] 李江波,李根娥,裴雨杰,等.一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J].气象,2009,35(7):87-94,132.
- [13] 毛宇清,李力,姜有山,等.一次春季雨雪天气的降水相态演变特征分析[J].暴雨灾害,2022,41(3):290-297.
- [14] 温静,雷正翠,温龙,等.一次强寒潮过程的多相态降水分析[J].气象科技,2023,51(5):704-714.
- [15] 唐熠,韦健,伍静.广西低温雨雪冰冻天气过程评价[J].气象研究与应用,2012,33(增刊2):33-34.
- [16] 卢晶晶,涂小萍,郭宇光,等.一次强寒潮引发的浙北不同地区雨雪气象条件差异[J].气象科学,2019,39(1):129-136.
- [17] 宗海锋,布和朝鲁,彭京备,等.中国南方大范围持续性低

- 温、雨雪和冰冻组合性灾害事件:客观识别方法及关键特征[J].大气科学,2022,46(5):1055–1070.
- [18] 董全,张峰,宗志平.基于ECMWF集合预报产品的降水相态客观预报方法[J].应用气象学报,2020,31(5):527–542.
- [19] 卢晔,孟妙志,乔丹杨,等.宝鸡市冬半年降水相态精细化客观预报方法研究[J].干旱气象,2023,41(5):820–827.
- [20] 张霞,杨慧,王新敏,等.“21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J].大气科学学报,2021,44(5):672–687.

Analysis of causes and forecast deviations for the low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in Guangxi from January 19 to 26, 2024

HUANG Qing¹, LI Shengyan^{1,2}, QIN Hao¹, HUANG Ziyi¹

(1. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China; 2. Open Laboratory of Guangxi Beibu Gulf National Climate Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: The causes and forecast deviations of the rainfall/snowfall and freezing weather event in Guangxi from January 19 to 26, 2024 were investigated using the conventional meteorological observation data, numerical model forecasting products, and the fifth-generation global climate reanalysis data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5). The results show that this process was characterized by a stepwise decrease in temperature, a prolonged low-temperature duration, a wide range of rain and snow freezing, and the simultaneous occurrence of multiple precipitation phases. Significant anomalies in mid- and high-latitude circulation systems guided strong cold air southward twice. Strong frontogenesis, water vapor convergence, deep ascending motion, and changes in temperature stratification together contributed to the complex precipitation phase transition. The development of the thermal low-pressure system before the process and the prolonged maintenance of surface front and cold advection in the process led to the significant cooling and extreme low temperatures. Numerical models predicted the phase transition line of rain and snow to be northward and the minimum temperature to be higher. The models underestimated the intensity and moving speed of the cold air and the strength of cold advection, resulting in a biased forecast of the temperature stratification in Guangxi.

Key words: low-temperature rainfall/snowfall and freezing; precipitation type; phase transition; frontogenetic function; temperature convection