

基于环流分型的湖北省雨雪过程统计特征研究

孔海妹 钟 敏

湖北省气象台, 武汉 430074

提要: 基于 2000—2024 年湖北省 76 个国家级地面气象站观测资料与 ERA5 再分析资料, 对 108 次雨雪过程利用 TPCA 方法进行环流分型, 并统计各环流型的雨雪过程时间分布、环流配置和影响特征。结果表明: 近 25 年来, 湖北省雨雪过程年均发生 4.3 次, 年际波动明显, 且主要集中于 1 月和 2 月 (占 74%)。基于 500 hPa 环流形势将湖北省雨雪过程分为贝加尔湖高压脊型、低槽型和西北气流型, 其占比分别为 48.1%、30.6%和 21.3%。各环流型合成平均场上, 贝加尔湖高压脊型 500 hPa 南支槽最深, 地面冷高压影响最强; 贝加尔湖低槽型 700 hPa 西南急流最强 (20 m s^{-1}), 动力条件最优; 贝加尔湖西北气流型南支槽强度最弱。三类环流型对湖北造成的影响存在一定差异, 贝加尔湖低槽型日降水量平均值 (15.34 mm) 和平均最大积雪深度 (9.33 cm) 均高于其他两型, 更易形成深厚积雪; 贝加尔湖高压脊型降水量平均值 (19.63 mm) 最大, 平均积雪站数和积冰站数均最多且积冰强度最大, 平均最大电线积冰直径 3.83 mm, 过程持续时间最长, 平均 2.22 d; 贝加尔湖西北气流型降水量总体较小, 积雪和积冰强度均最弱, 且过程持续时间短。本研究结果可为湖北省雨雪过程分型预报及灾害风险研判提供参考。

关键词: 雨雪过程; 环流分型; TPCA 方法; 积雪深度; 电线积冰

中图分类号: P429 文献标志码: A doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2026.092801

Statistical Characteristics of Rain-Snow Events in Hubei Province Based on Circulation Classification

KONG Haimei ZHONG Min

Hubei Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Based on observation data from 76 national meteorological stations in Hubei Province and ERA5 reanalysis data during 2000-2024, 108 rain-snow events are classified by means of the T-mode principal component analysis (TPCA). The temporal distributions, circulation configurations, and impact characteristics of the rain-snow events under different circulation types are then analyzed. The results show that over the 25 years (2000—2024), Hubei Province experienced 4.3 rain-snow events on average annually, with a clear inter-annual variability. These events occurred mainly in January and February, accounting for 74% of the total. Based on the circulation patterns at 500 hPa, these rain-snow events are classified into three types: the Lake Baikal High-Ridge Type (48.1%), Lake Baikal Low-Trough Type (30.6%), and Lake Baikal

*湖北省自然科学基金项目(2024AFD209、2023AFD096)资助

2026 年 4 月 15 日收稿; 2026 年 9 月 28 日收修定稿

第一作者: 孔海妹, 主要从事天气预报相关研究. E-mail: khm199568@gmail.com

通讯作者: 钟敏, 主要从事天气预报相关研究. E-mail: zhongmin296@163.com

Northwesterly Flow Type (21.3%). In the composite mean fields of the three circulation types, the Lake Baikal High-Ridge Type features the deepest southern-branch trough at 500 hPa and the strongest influence of the surface cold high. The Lake Baikal Low-Trough Type is characterized by the strongest southwesterly jet at 700 hPa, with a maximum wind speed of $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the most favorable dynamical conditions. The Lake Baikal Northwesterly Flow Type has the weakest southern-branch trough. The three circulation types of rain-snow events produces distinct impacts in Hubei Province. The Lake Baikal Low-Trough Type has a higher daily average maximum precipitation (15.34 mm) and deeper average maximum snow depth (9.33 cm) than the other two types and is more prone to produce deep snow cover. The Lake Baikal High-Ridge Type has the largest average value of total precipitation (19.63 mm), the highest mean numbers of snow-covered and wire-icing stations, and the greatest wire-icing intensity with a mean maximum wire-icing diameter of 3.83 mm. It also has the longest duration of rain-snow event, lasting for 2.22 d on average. The Lake Baikal Northwesterly Flow Type generally generates smaller precipitation amount, the weakest snow accumulation and wire icing, and the shortest event duration. These findings could provide a reference for circulation-pattern-based forecasting of rain-snow events and disaster risk assessment in Hubei Province.

Key words: rain-snow event, circulation classification, T-mode principal component analysis (TPCA), snow depth, wire icing

引 言

湖北省作为我国中部重要的气候过渡带，地处东亚冬季风南下的关键通道，是南北冷暖气流交汇的敏感区。冬季降水相态复杂多变，雨、雪、冻雨、冰粒等多种降水相态交替出现，不仅对交通运输、电力保障、农业生产和公众生活等带来严重危害，而且其预报难度较高，特别是雨雪转换临界条件的精准判断一直是业务预报中的难点（苗爱梅等，2014；Harpold et al, 2017；谷秀杰等，2025）。2008年1月中旬至2月上旬，我国南方地区遭遇了历史罕见的特大低温雨雪冰冻灾害，湖北省作为重灾区，省内大部分地区出现冻雨和严重积雪，部分地区电线积冰严重，造成京广铁路湖北段中断运行、电网大面积瘫痪、农作物大范围受灾（李才媛等，2011；周悦等，2016）。2024年1月底至2月，湖北省再次遭遇大范围持续性低温雨雪冰冻天气过程，多地出现冻雨、暴雪和严重积冰（陈璇等，2024；董全等，2024）。这些极端事件表明，在全球气候变暖背景下，湖北省仍面临低温雨雪冰冻灾害的严重威胁（王淼淼等，2024；温泉沛等，2024；赵琳等，2025）。

雨雪过程的发生与特定的大尺度环流背景密切相关。廖圳（2017）研究指出，我国南方持续性低温雨雪冰冻事件至少有两种大尺度环流分型，即单阻型和双阻型，不同环流型对应的冷空气路径、水汽输送及逆温层结构存在明显差异。朱华等（2025）进一步提炼出单阻横槽型、两槽一脊型和平直环流型三种环流类型，指出单阻横槽型冷空气势力最强，造成的低温雨雪天气影响范围最广、持续时间最长。孙卉等（2022）利用 T-mode 主成分分析法对池州地区固态降水环流形势进行客观分型，划分为一槽一脊型、纬向波动型和两槽一脊型，展

示了客观分型方法在区域研究中的应用潜力。这些研究为理解雨雪过程的多尺度环流配置提供了重要参考，但针对湖北省特定地理位置和气候特征的环流分型研究仍相对薄弱。

近年来针对湖北地区雨雪过程的相关研究多多集中在个例机理分析方面。吴瑶等(2025)分析了2024年2月湖北省两次雨雪过程的环流异常特征，指出副热带高压(副高)异常增强与东路冷空气共同作用过程发生的关键因子，并指出厄尔尼诺事件提供了重要的海温背景。罗菊英等(2021)对鄂西南山区一次罕见暴雨转暴雪过程的分析表明，复杂地形下的动力锋生和次级环流是直接导致降雪增强的中尺度系统。王珊珊等(2023)对2022年湖北省两次雨雪过程的预报偏差分析表明，模式对边界层降温、地形作用以及云中冰相粒子含量的刻画能力不足，是导致相态和量级预报误差的主要原因。总体来看，针对湖北省长时间序列雨雪过程的系统性环流分型研究仍较薄弱，尤其缺少不同环流型环流配置及积雪和积冰等影响特征的综合对比分析。

本文基于2000—2024年湖北省108次雨雪过程实况资料和ERA5再分析资料，基于500 hPa环流形势，利用TPCA客观分型方法将环流型划分为贝加尔湖高压脊型、贝加尔湖低槽型和贝加尔湖西北气流型三类。在此基础上，分析雨雪过程的时间分布特征，对比不同环流型的环流配置，并从影响区域、持续时间、雨雪量、积雪及电线积冰特征等揭示其影响差异。

1 资料与方法

1.1 资料

本研究采用资料时段为2000—2024年的1—2月、11—12月，包括：(1)地面观测资料：湖北省76个国家级地面气象站2000—2024年逐三小时地面资料（包含降水量、雨、雪、冻雨、雨夹雪等天气现象），以及积雪深度、电线积冰直径等要素。其中2000年1月至2019年2月为特殊天气报资料、2019年11月至2024年12月为天擎平台获取的地面对应要素资料。(2)再分析资料：欧洲中期天气预报中心第五代全球再分析资料(ERA5)，包括高度场、温度场、风场、海平面气压场等要素，时间分辨率为1 h，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直方向共37层(1000~1 hPa)。

1.2 雨雪过程定义与筛选标准

本文参照现行地面气象观测相关规范，并借鉴区域性降雪过程评估中关于过程起止时间和区域影响范围的判识方法(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2017)，结合湖北省冬季雨雪天气特征和研究需求，制定雨雪过程定义和筛选标准。其中，雨雪过程定义为湖北省内出现雪、雨夹雪、冻雨等天气现象的一次完整天气过程。过程自全省首站出现降水之日开始，至末站降水结束之日终止。筛选标准定义为空间范围上过程期间至少有5个国家级地面气象站出现雪、雨夹雪或冻雨等天气现象；两次降水过程间隔时间 ≤ 24 h，且影响系统相同或连续，则视为同一次过程；若间隔时间 > 48 h，则视为两次独立过程；间隔时间 > 24 h且 ≤ 48 h，则结合天气形势综合判断。

基于上述标准，从研究时段内筛选出108次区域性雨雪过程作为研究对象，

并对各过程的起止时间、影响范围、降水相态、主要灾情等信息进行了详细核实。

1.3 环流分型方法

本文采用倾斜旋转 T-mode 主成分分析 (TPCA) 方法 (Huth, 1993; Huth et al, 2008) 对大气环流场进行客观分型。该方法将时间序列作为变量、空间格点作为样本, 对原始场进行主成分提取与正交旋转, 能够有效捕捉环流的主要空间模态, 已被广泛应用于欧洲及中高纬地区的天气分型研究。TPCA 环流分型采用 2000—2024 年 11 月至次年 2 月 108 次雨雪过程最强时段代表时次的 ERA5 500 hPa 位势高度场, 区域为 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 。分别设置 2~5 类进行分型, 并综合比较各方案的环流差异、样本数量及天气学意义。结果表明, 三类方案能够较好区分主要环流形势, 且各类样本数量较为适宜, 根据各类主要环流特征, 分别定义为贝加尔湖高压脊型 (52 次, 占 48.1%)、贝加尔湖低槽型 (33 次, 占 30.6%) 和贝加尔湖西北气流型 (23 次, 占 21.3%)。

分型完成后, 对各环流型代表时次的 500、700 和 850 hPa 环流场及海平面气压场分别进行合成平均。为检验不同环流型 700 hPa 西南急流强度差异, 选取 $20^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 为统一急流区, 以各代表时次区域风速 95% 分位数表征急流强度, 采用 Kruskal-Wallis 检验分析三类样本的总体差异, 并对两两比较结果进行 Holm 校正, 显著性水平检验取 0.05。

2 2000—2024 年湖北雨雪过程时间分布特征

2.1 年际变化特征

2000—2024 年湖北省共发生 108 次雨雪过程, 年均 4.3 次 (图 1a), 年际波动明显, 最多年份为 2000 年 (10 次), 最少年份为 2007 年和 2021 年 (均为 1 次)。线性趋势分析表明, 25 年来雨雪过程频次呈微弱下降趋势, 下降速率为 $1.0 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 但未通过显著性水平检验 ($P>0.05$, Mann-Kendall 检验), 说明下降趋势不显著。

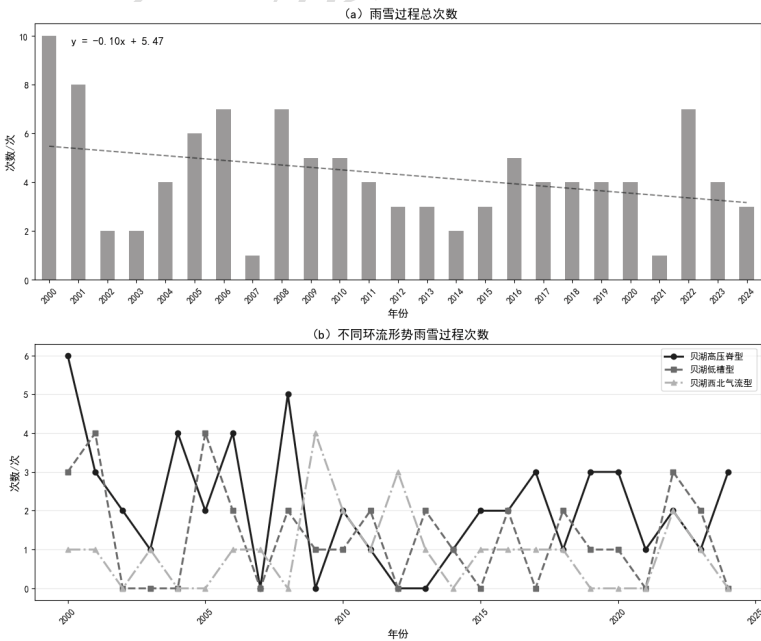


图1 湖北 2000—2024 年 (a) 雨雪过程次数和 (b) 各环流型次数逐年变化

Fig.1 Inter-annual variations in (a) the number of rain-snow events and (b) the counts for different circulation patterns in Hubei Province during 2000–2024

进一步分析不同环流型的年际变化（图 1b），三类环流型均呈明显年际波动，但峰值年份和阶段性变化有所不同。贝加尔湖高压脊型在 2000 年和 2008 年出现频次较多，分别为 6 次和 5 次；2000—2008 年总体偏多，此后明显减少，2016 年后波动回升。贝加尔湖低槽型以 2001 年和 2005 年最多，均为 4 次，2022 年次之（3 次），其余年份大多在 1~2 次；贝加尔湖西北气流型总体发生频次较低，2009 年最多（4 次）、2012 年次之（3 次），其余年份多为 0~1 次。

2.2 月际变化特征

从月际分布（表 1）看，雨雪过程主要集中在 12 月至次年 2 月，共计 101 次，占总数的 93.5%，其中 1 月最多，其次为 2 月和 12 月（，11 月最少。这种月际分布特征与湖北省冬季风活动的季节变化密切相关，12 月至次年 2 月是东亚冬季风最活跃时期，蒙古冷高压频繁南下，冷暖气流在湖北交汇，有利于雨雪天气的发生（支蓉和郑志海，2022）；11 月处于秋冬过渡期，冷空气活动相对较弱，但仍可出现强降温过程，引发雨雪天气。

表 1 2000-2024 年湖北省雨雪过程月际分布（单位：次）

Table 1 Monthly distribution of rain-snow events in Hubei Province during 2000–2024

环流型	11 月	12 月	1 月	2 月
贝加尔湖高压脊型	3(5.8%)	9(17.3%)	21(40.4%)	19(36.5%)
贝加尔湖低槽型	0(0%)	7(21.2%)	16(48.5%)	10(30.3%)
贝加尔湖西北气流型	4(17.4%)	5(21.7%)	7(30.4%)	7(30.4%)
合计	7(6.5%)	21(19.4%)	44(40.7%)	36(33.3%)

注：括号内数据为占比。

不同环流型的月际分布差异明显，贝加尔湖高压脊型主要出现在 1-2 月（占 76.9%），其中 1 月最多，2 月次之，11 月仅 5.8%。贝加尔湖低槽型均出现在 12 月至次年 2 月，其中 1 月占比最高，11 月无过程发生。贝加尔湖西北气流型月际分布相对均匀，主要集中于 1—2 月（占 60.8%），同时 11 月出现频率较高，表明发生时间较其他两型偏早。

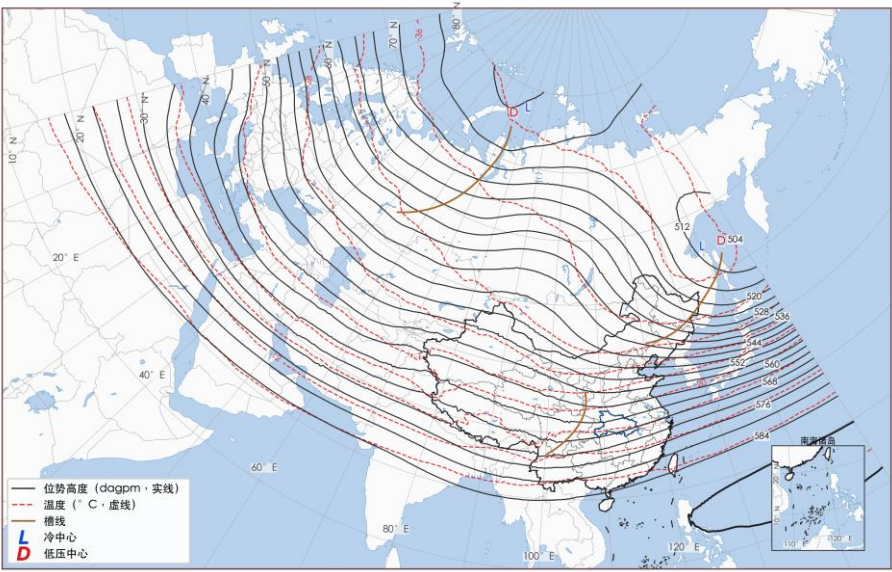
3 湖北雨雪过程不同环流型特征

3.1 贝加尔湖高压脊型特征

图 2 为贝加尔湖高压脊型 500 hPa 平均高度场和温度场。该环流型的显著特征为中高纬度地区呈现典型的“两低一高”气压场分布：乌拉尔山和鄂霍次克海附近分别为两个低压中心，

贝加尔湖附近为强盛的高压脊，脊线位于 108°E 附近，脊区 500 hPa 高度达 5400 gpm。从温度场看，两个低压中心均配合有 -40℃ 以下的冷中心，冷空气势力强劲。这种环流配置具有稳定性强、持续时间长的特点，有利于贝加尔湖高压脊前冷空气的堆积和向南输送。

低纬度上，四川东部为深厚的南支槽，西太平洋副热带高压（以下简称副高）位于海上，湖北位于南支槽前和副高北侧的西南气流中，为持续降水提供了充沛的水汽和动力抬升条件。随着贝加尔湖高压脊前冷空气不断南下，与南支槽前暖湿气流在湖北一带交汇，为持续性雨雪天气提供了有利的高空环流背景。

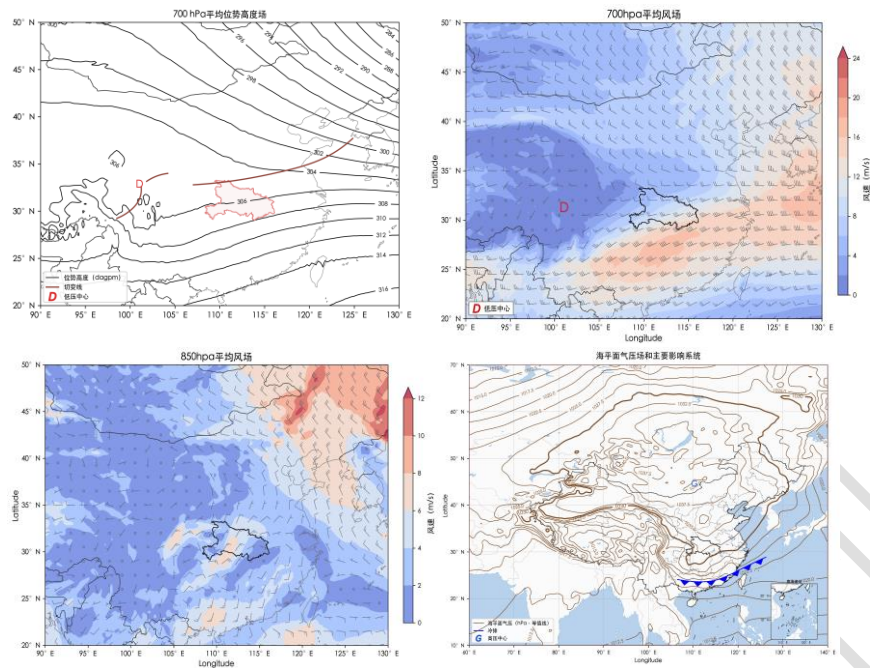


注：L 为冷中心，D 为低压中心，—为槽线。

图 2 贝加尔湖高压脊型 500 hPa 位势高度（黑色等值线，单位：dagpm）、温度（红色等值线，单位：℃）

Fig.2 The 500 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm) and temperature (red contour, unit: °C) of the Lake Baikal High-Ridge Type

700 hPa 是雨雪过程的主要水汽输送层，由图 3a 可以看出，该环流型四川东部存在西南涡，华北至华中北部维持冷式切变线，湖北位于西南涡东侧和冷切尾部，切变线南侧为一支强劲的西南急流，合成场最大风速约 16 m s^{-1} （图 3b）。850 hPa 上，湖北主要受东北气流控制，最大风速约 8 m s^{-1} （图 3c），东北风影响范围较广，表明低层冷空气已在湖北积聚并形成冷垫，700 hPa 西南暖湿气流沿冷垫抬升，有利于雨雪天气持续。地面冷高压中心位于内蒙古附近，中心气压达 1040 hPa，冷空气主要经东路南下影响湖北，冷锋前沿已经抵达华南（图 3d）。



注：D 为低压中心，—为切变线，—为冷锋。

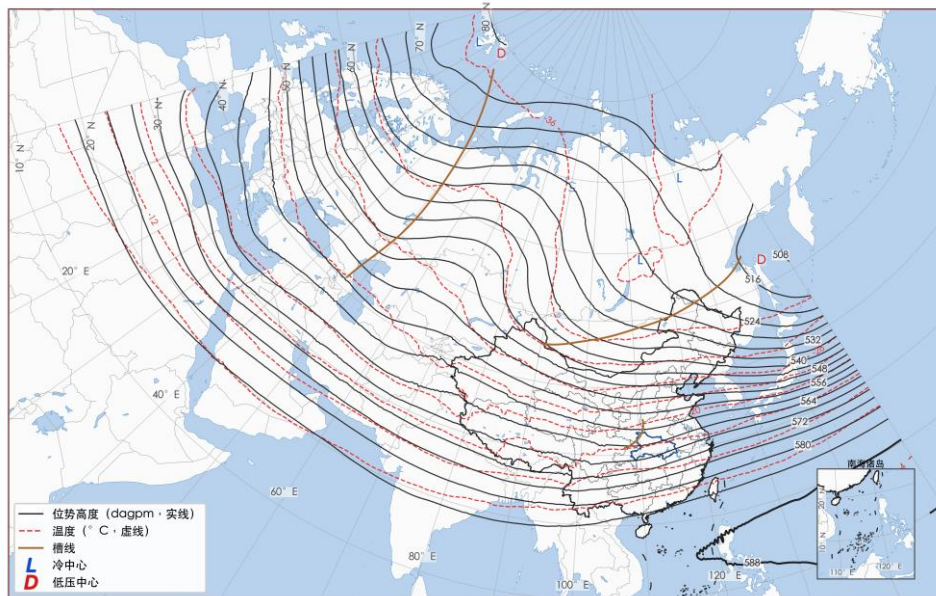
图 3 贝加尔湖高压脊型(a) 700 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)及主要影响系统、(b) 700 hPa 风场(风羽和填色)、(c) 850 hPa 风场(风羽与填色)、(d)海平面气压场(等值线, 单位: hPa) 及主要影响系统

Fig.3 (a) The 700 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and main impact systems, (b) 700 hPa wind field (barb and colored), (c) 850 hPa wind field (barb and colored), and (d) sea level pressure field (contour, unit: hPa) and main impact systems for the Lake Baikal High-Ridge Type

3.2 贝加尔湖低槽型特征

图 4 为贝加尔湖低槽型 500 hPa 平均高度场和温度场, 中高纬地区同样呈“两低一高”环流配置, 但槽脊位置和形态与贝加尔湖高压脊型不同。低压中心分别位于西西伯利亚北部和鄂霍次克海附近, 均配合 -40°C 以下的冷中心, 高压脊位于乌拉尔山东侧至西西伯利亚一带, 呈西南—东北走向, 相较于贝加尔湖高压脊型位置偏西。贝加尔湖附近为近东西向横槽, 是该环流型区别于贝加尔湖高压脊型的主要特征, 横槽维持时冷空气在槽后积聚, 随着横槽转竖并东移, 冷空气沿槽后西北气流向南输送。

低纬度地区, 南支槽强度整体弱于贝加尔湖高压脊型, 但重庆至陕西一带不断有短波槽东移, 说明西风带仍较为活跃。此外, 副高较贝加尔湖高压脊型偏强, 西脊点偏西, 湖北位于槽前和副高西北侧的西南气流中, 为持续降水提供了充沛的水汽和动力抬升条件。随着贝加尔湖横槽转竖引导冷空气南下, 南北两支气流在湖北一带持续交汇, 形成明显的冷暖对峙态势。

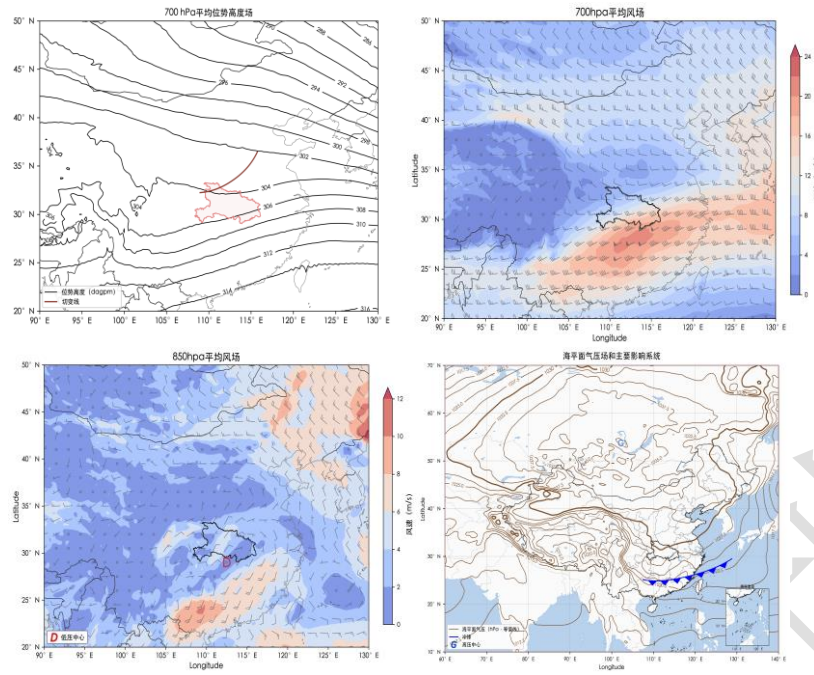


注：L 为冷中心，D 为低压中心，—为槽线。

图 4 贝加尔湖低槽型 500 hPa 位势高度（黑色等值线，单位：dagpm）、温度（红色等值线，单位：℃）

Fig.4 The 500 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm) and temperature (red contour, unit:℃) of the Lake Baikal Low-Trough Type

700 hPa 上，四川东部未形成明显的西南涡，湖北主要位于北方低槽的冷切尾部，切变线南侧西南急流合成场最大风速约 20 m s^{-1} ，显著高于贝加尔湖高压脊型（Holm 校正后 $P=0.033$ ）。尽管该型南支槽较弱，但强劲的西南急流加强了水汽向湖北输送，并在冷切附近形成辐合，是该型降水强度较大的重要环流条件。850 hPa 上，湖北东部受低涡环流影响，偏南、偏东和偏北三支气流交汇，低层风场辐合明显，中西部位于低涡后部偏北气流中，最大风速约 6 m s^{-1} ，弱于其他两型，尽管冷空气强度相对较弱，但仍能在湖北低层形成冷垫（图 5c）。地面冷高压主体位于贝加尔湖附近，位置较贝加尔湖高压脊型偏北，中心气压强度达 1040 hPa，其前沿冷空气主要经东路南下，冷锋快速南压至华南（图 5d）。



注：D 为低压中心，G 为高压中心，— 为切变线，— 为冷锋。

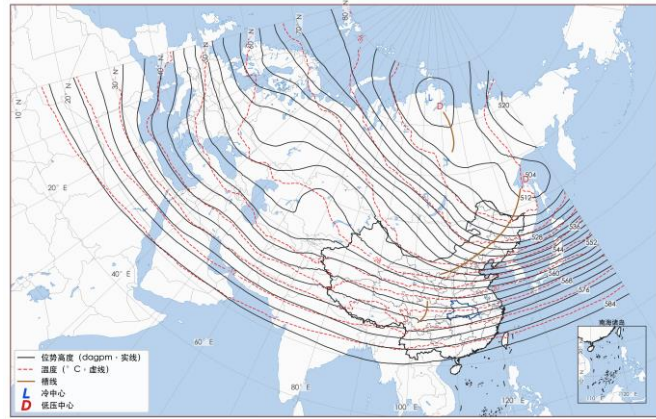
图 5 贝加尔湖低槽型 (a) 700 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 及主要影响系统、(b) 700 hPa 风场 (风羽与填色)、(c) 850 hPa 风场 (风羽与填色)、(d) 海平面气压场 (等值线, 单位: hPa) 及主要影响系统

Fig.5 (a) The 700 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and main impact systems, (b) 700 hPa wind field (barb and colored), (c) 850 hPa wind field (barb and colored), and (d) sea level pressure field (contour, unit: hPa) and main impact systems for the Lake Baikal Low-Trough Type

3.3 贝加尔湖西北气流型特征

图 6 为贝加尔湖西北气流型 500 hPa 平均高度场和温度场, 与前两型的“两低一高”配置不同, 该型中高纬总体呈“一槽一脊”结构, 表现为西高东低, 高压脊位于贝加尔湖以西的中亚至西西伯利亚一带, 呈西南—东北向, 贝加尔湖东侧为冷涡, 并配合 -40°C 以下的冷中心。贝加尔湖附近位于脊前槽后, 主要受西北气流控制, 故将其归类为贝加尔湖西北气流型。冷空气主要受贝加尔湖东侧冷涡引导, 沿槽后西北气流向南扩散。

低纬度上, 该型南支槽强度较前两型都偏弱, 四川东部有短波槽活动, 此外, 副高明显弱于前两型, 且主体位置偏南, 湖北位于高空槽前和副高北侧的西南气流中, 但南支系统整体偏弱, 暖湿气流输送和动力抬升条件不及前两型。

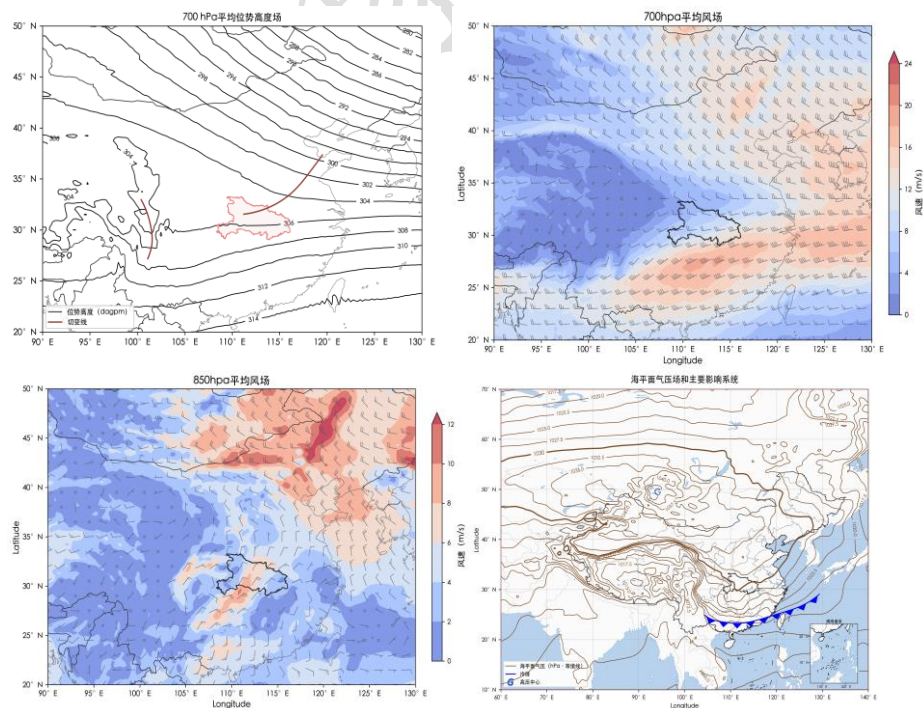


注：L 为冷中心，D 为低压中心，—为槽线。

图 6 贝加尔湖西北气流型 500 hPa 位势高度（黑色等值线，单位：dagpm）、温度（红色等值线，单位：℃）

Fig.6 The 500 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm) and temperature (red contour, unit:℃) of the Lake Baikal Northwesterly Flow Type

700 hPa 上，四川东部无明显西南涡，湖北位于北方低槽冷切尾部，切变线南侧西南急流维持，合成场最大风速约为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，但其急流强度与另外两型之间的差异未达到显著水平，该急流为湖北提供一定的水汽和能量输送（图 7a，7b）。850 hPa 上，湖北大部受东北气流控制，最大风速约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明低层冷空气扩散和冷垫作用明显（图 7c），700 hPa 西南暖湿气流沿冷垫抬升，但暖湿条件总体弱于前两型。地面冷高压中心位于贝加尔湖西侧，位置较前两型偏西，中心气压达 1040 hPa，冷空气自高压前沿扩散至华北地区后，主要经东路南下影响湖北，此时冷锋前沿已南压至华南一带（图 7d）。



注：—为切变线，—为冷锋，G 为高压中心。

图 7 贝加尔湖西北气流型(a)700 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)及主要影响系统、(b)700 hPa 风场 (风羽与填色)、(c)850 hPa 风场 (风羽与填色)、(d)海平面气压场 (等值线, 单位: hPa) 及主要影响系统

Fig.7 (a) The 700 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and main impact systems, (b) 700 hPa wind field (barb and colored), (c) 850 hPa wind field (barb and colored), and (d) sea level pressure field (contour, unit: hPa) and main impact systems for the Lake Baikal Northwesterly Flow Type

综上所述, 三类环流型的配置特征差异明显。500 hPa 上, 贝加尔湖高压脊型和贝加尔湖低槽型中高纬均呈“两槽一脊”形势, 贝加尔湖西北气流型则呈“一槽一脊”形势, 三类南支槽强度依次减弱。700 hPa 上, 三类均存在西南急流, 其中贝加尔湖低槽型最强, 贝加尔湖高压脊型最弱; 贝加尔湖西北气流型虽急流较强, 但由于南支系统偏弱, 暖湿输送相对较弱, Kruskal - Wallis 检验表明, 三类西南急流强度总体差异显著 ($P=0.029$)。850 hPa 上, 湖北均受东北气流影响, 低层冷垫特征明显, 其中贝加尔湖西北气流型冷空气输送最强。地面上, 三类均受冷高压控制, 冷空气主要沿东路南下, 但冷高压位置和强度存在差异, 其中贝加尔湖高压脊型冷高压对湖北的影响最强。

4 不同环流型影响特征对比

4.1 影响区域特征

根据雨雪过程的主要影响范围, 将 108 次过程划分为五种区域类型: 全省型 (影响全省 70% 以上站点, 47 次, 占 43.5%)、中西部型 (主要影响鄂中、鄂西南地区, 34 次, 占 31.5%)、鄂西北型 (主要影响十堰、襄阳、神农架等地, 20 次, 占 18.5%)、南部型 (主要影响鄂东南、鄂南地区, 5 次, 占 4.6%) 和西部型 (主要影响恩施州, 2 次, 占 1.9%)。

不同环流型的区域分布存在明显差异 (图 8)。贝加尔湖高压脊型以全省型和中西部型为主, 两者合计占该类型的 76.9%, 相比而言, 贝加尔湖低槽型则更多为鄂西北型和中西部型, 两者合计占 54.6%, 贝加尔湖西北气流型中鄂西北型更为突出, 占 34.8%。

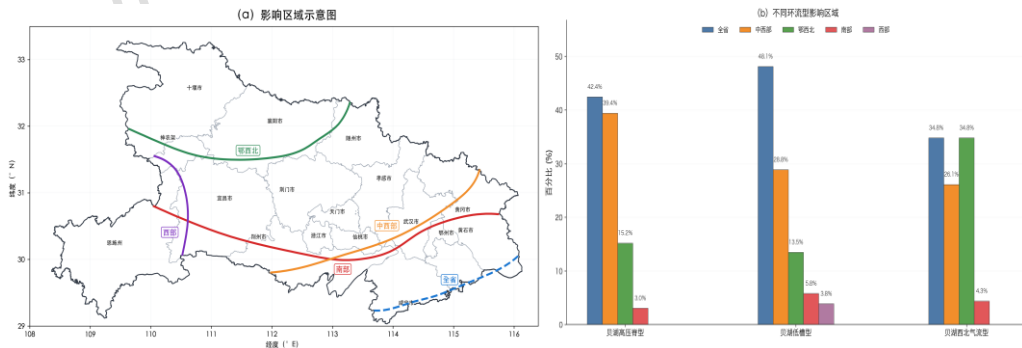
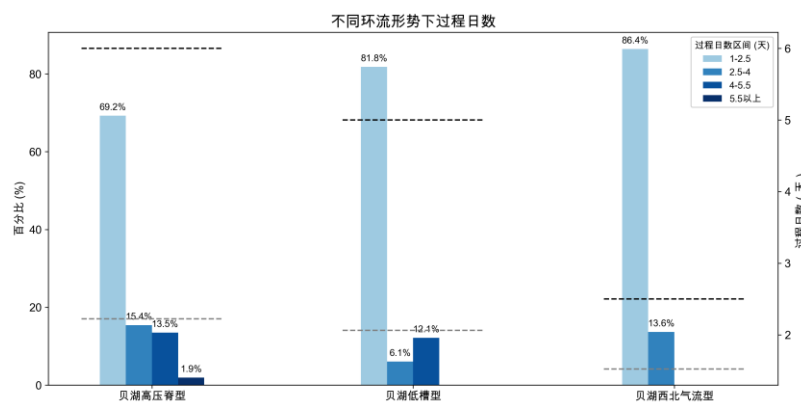


图 8 2000-2024 年湖北省雨雪过程不同环流型(a)影响区域和(b)频率分布

Fig.8 (a) Affected areas and (b) frequency distribution of different circulation types associated with rain-snow events in Hubei Province during 2000-2024

4.2 持续时间特征

过程日数反映了雨雪系统的持续能力，是衡量一次过程累积影响效应的重要指标。对于冬季低温雨雪冰冻灾害而言，持续时间越长，叠加效应越显著，灾害风险也随之增大。



注：黑色虚线为最大值，灰色虚线为平均值，下同。

图9 不同环流形势下不同等级过程日数的百分比分布

Fig.9 Percentage distribution of the number of days with processes at different levels under different circulation types

从过程日数统计结果（图9）来看，不同环流型持续时间存在明显差异。贝加尔湖高压脊型过程持续时间最长，平均为2.22 d，最长达6 d，其中2.5~4 d和4~5.5 d过程占比分别为15.4%和13.5%，均高于其他两型，表明该型最易引发持续性雨雪天气，特别是冻雨或雨淞在长时间维持下，电线积冰直径可不断增长。贝加尔湖低槽型过程日数平均值为2.06 d，最长达5 d，2.5~4 d和4~5.5 d的过程占比分别为6.1%和12.1%，持续性仅次于贝加尔湖高压脊型。贝加尔湖西北气流型过程日数平均值最短仅1.52 d，最长为2.5 d，且持续2.5 d及以上过程占比仅13.0%，整体持续性较弱。

4.3 降水量特征

不同环流型过程降水量特征存在一定差异。过程最大累计降水量是指单次过程中，全省各站累计降水量的最大值；过程最大日降水量是指单次过程中，全省各站单日（08时至次日08时，北京时，下同）降水量的最大值。

从过程最大累计降水量来看（图10a），贝加尔湖高压脊型降水量级整体较高，平均值和最大值分别为19.63 mm和99.60 mm，均高于贝加尔湖低槽型（18.37 mm、65.90 mm）和贝加尔湖西北气流型（14.38 mm、50.50 mm）。不同等级以上降水分布表明，贝加尔湖高压脊型达到 ≥ 25 mm和 ≥ 50 mm的比例分别为28.8%和9.6%，略高于贝加尔湖低槽型（27.3%、9.1%），明显高于贝加尔湖西北气流型（17.4%、4.3%），表明贝加尔湖高压脊型雨雪过程持续时间较长，降水持续累积特征明显，易产生较大的过程降水量，这与该型南支槽强度最强有一定关系。

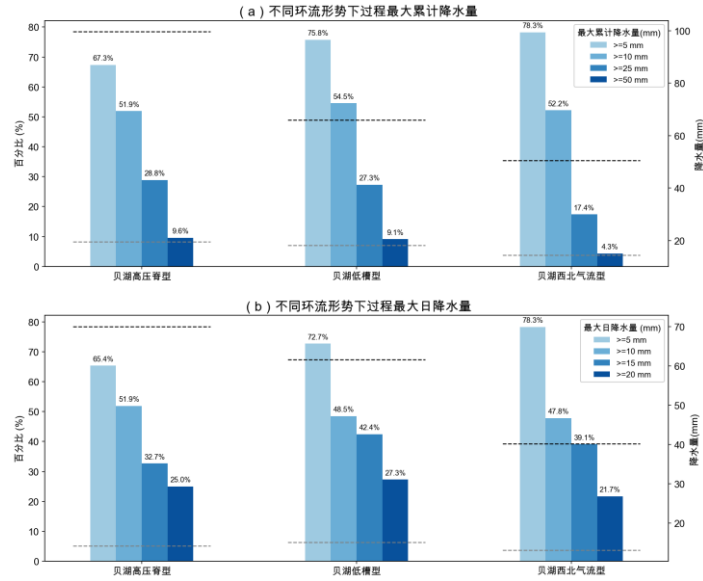


图 10 不同环流形势下不同等级以上过程 (a) 最大累计降水量和 (b) 最大日降水量的百分比分布

Fig.10 Percentage distribution of (a) maximum accumulated precipitation and (b) maximum daily precipitation of processes above different levels under different circulation types

从过程最大日降水量 (图 10b) 来看, 贝加尔湖低槽型平均值最高, 为 15.34 mm, 高于贝加尔湖高压脊型 (14.31 mm) 和贝加尔湖西北气流型 (13.10 mm)。同时, 贝加尔湖低槽型最大日降水量 ≥ 15 mm 和 ≥ 20 mm 的比例分别达到 42.4%和 27.3%, 均为三类最高, 贝加尔湖高压脊型和贝加尔湖西北气流型对应比例分别为 32.7%、25.0%和 39.1%、21.7%, 表明贝加尔湖低槽型过程日降水强度整体较高, 该类型西南急流最强, 较强的水汽输送条件更有利于强雨雪过程出现。其中贝加尔湖高压脊型虽然存在个别极端日降水事件(最大值 70.00 mm), 但从平均值和不同等级出现频率来看, 其日降水强度与贝加尔湖低槽型仍存在一定差异。

4.4 积雪特征对比

4.4.1 积雪深度

过程最大积雪深度是指单次雨雪过程中积雪深度最大的站点值, 用于表征该过程的极端强度。过程平均积雪深度是指全省所有站点最大积雪深度的平均值, 用于表征该过程的整体强度。对于每一环流型, 再统计过程最大积雪深度的平均值和过程平均积雪深度的平均值。

从过程最大积雪深度 (图 11a) 来看, 贝加尔湖低槽型的平均值最大 (9.33 cm), 且不同等级以上占比均最高, 其中最大积雪深度 ≥ 2 、 ≥ 5 、 ≥ 10 和 ≥ 20 cm 的频率分别为 90.9%、63.6%、36.4%和 12.1%, 略高于贝加尔湖高压脊型 (86.5%、61.5%、32.7%、11.5%), 明显高于贝加尔湖西北气流型 (69.6%、47.8%、30.4%、4.3%), 表明贝加尔湖低槽型更易出现较深积雪过程。此外, 贝加尔湖高压脊型和贝加尔湖低槽型均可出现极端深积雪过程, 最大积雪深度分别达到 29 cm (2024 年 2 月 1—6 日过程) 和 28 cm (2008 年 1 月 26—28 日过程); 贝加尔湖西北气流型最大积雪深度为 20 cm (2022 年 2 月 6—7 日过程)。

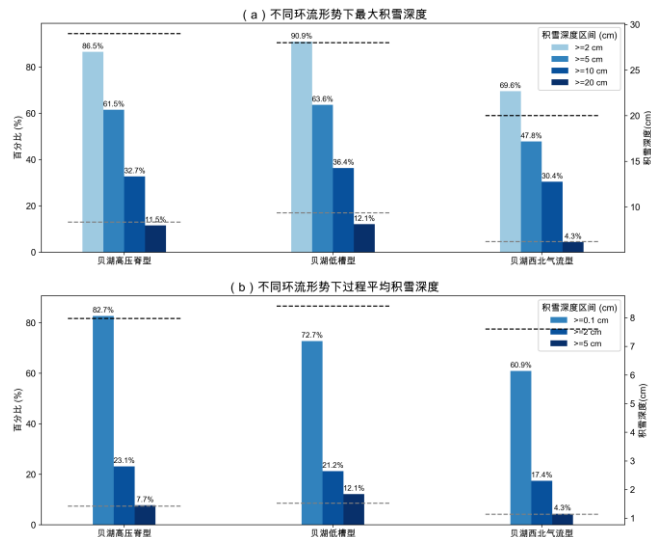


图 11 不同环流形势下不同等级以上过程 (a) 最大积雪深度和 (b) 平均积雪深度百分比分布

Fig.11 Percentage distribution of (a) maximum snow depth and (b) average snow depth of processes above different levels under different circulation types

从过程平均积雪深度统计量 (图 11b) 来看, 贝加尔湖低槽型的平均值 (1.52 cm) 和最大值 (8.4 cm) 均为三类环流型中最高, 且 ≥ 5 cm 强积雪过程频率 (12.1%) 明显高于贝加尔湖高压脊型 (7.7%) 和贝加尔湖西北气流型 (4.3%), 表明该型过程平均积雪强度较大。但贝加尔湖高压脊型在 ≥ 0.1 cm 微量和 ≥ 2 cm 的中等强度以上积雪过程占比分别为 82.7% 和 23.1%, 略高于贝加尔湖低槽型 (72.7% 和 21.2%) 和贝加尔湖西北气流型 (60.9% 和 17.4%)。

4.4.2 积雪站数

从过程中出现积雪站数比例 (图 12) 来看, 三类环流型表现出明显差异, 贝加尔湖高压脊型的平均积雪站数比例最高 (37.2%), 且在全省范围中 $\geq 25\%$ 站点和 $\geq 75\%$ 站点的频率分别为 55.8% 和 21.2%, 均明显高于其他两型, 表明该型更易形成大范围积雪过程。贝加尔湖低槽型所有过程均至少 1 站以上出现积雪 ($\geq 1\%$ 站频率为 100%), 积雪发生概率较高, 但不同等级站数比例变化较大, 多以小范围区域过程为主, 也有部分全省性大范围过程。贝加尔湖西北气流型 $\geq 50\%$ 站点的频率 (43.5%) 高于其他两型, 但 $\geq 75\%$ 站出现频率仅 8.7%, 明显低于其他两型, 表明该型大范围积雪过程较少。

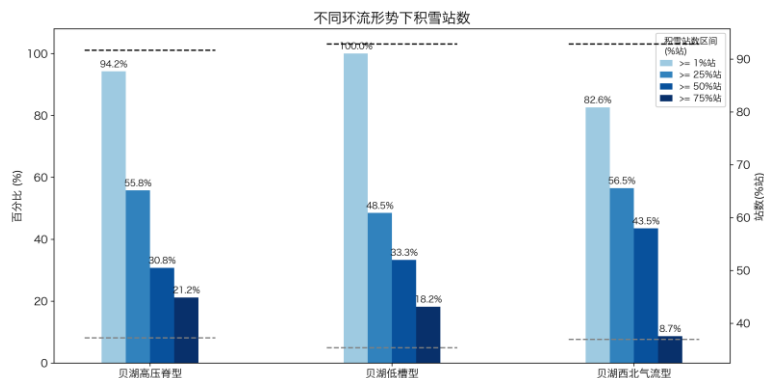


图 12 不同环流型形势下不同等级以上积雪站数百分比分布

Fig.12 Percentage distribution of the number of snow-covered stations with processes above different levels under different circulation types

4.5 电线积冰特征对比

4.5.1 电线积冰直径

过程最大电线积冰直径和过程平均电线积冰直径计算方式同积雪深度。电线积冰直径是衡量冻雨强度的重要指标。湖北省雨雪过程中出现冻雨的过程数较少，在 108 次过程中，贝加尔湖高压脊型出现电线积冰的过程数最多，共 22 次（占该型 42.3%）；贝加尔湖低槽型次之，共 11 次（占该型 33.3%）；贝加尔湖西北气流型最少，仅 6 次（占该型 26.1%）。这表明贝加尔湖高压脊型环流最有利于冻雨的形成，而贝加尔湖西北气流型发生此类过程的概率最低。

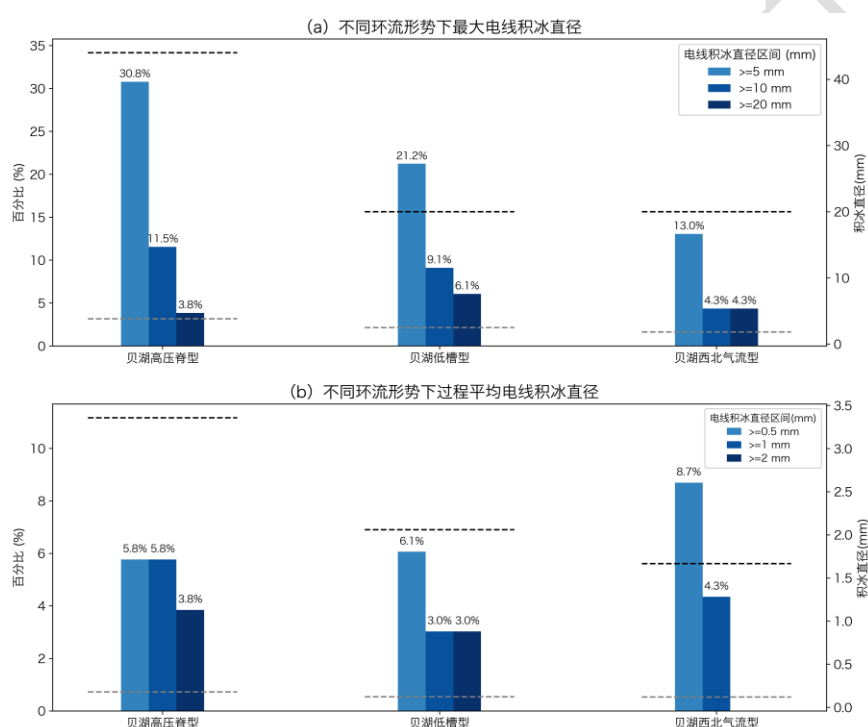


图 13 不同环流形势下不同等级以上 (a) 最大电线积冰直径和 (b) 平均电线积冰直径百分比分布

Fig.13 Percentage distribution of (a) maximum wire ice accumulation diameter and (b) average wire ice accumulation diameter of processes above different levels under different circulation types

从过程最大电线积冰直径(图 13a)来看，贝加尔湖高压脊型的平均值最大(3.83 mm)，且 ≥ 5 mm 和 ≥ 10 mm 的积冰过程占比（分别为 30.8%和 11.5%）均高于其他两型，同时出现了 44 mm 的极端最大值（2024 年 2 月 1—6 日过程），表明该型电线积冰强度总体较大，极端积冰风险较高。贝加尔湖低槽型 ≥ 20 mm 的过程占比（6.1%）略高于贝加尔湖高压脊型（3.8%），表明该型虽总体积冰强度不大，但仍可能出现严重积冰；贝加尔湖西北气流型各等级积冰过程占比均最低，表明该型积冰强度总体最弱。

从过程平均电线积冰直径（图 13b）来看，贝加尔湖高压脊型平均值最高，为 0.18 mm，其 ≥ 1 mm 和 ≥ 2 mm 积冰过程占比分别为 5.8%和 3.8%，略高于贝加尔湖低槽型（3.0%和 3.0%）和贝加尔湖西北气流型（4.3%和 0%），表明贝加尔湖高压型出现积冰频次和影响最高。贝加尔湖西北气流型仅在 ≥ 0.5 mm 等级中占比（8.7%）较高，但未出现 ≥ 2 mm 过程，表明该型以轻度积冰为主。

4.5.2 电线积冰站数

从过程中出现电线积冰站数比例（图 14）可见，贝加尔湖高压脊型不仅冻雨过程数最多（22 次），且积冰影响范围最广，积冰站数比例平均值（3.3%）最高， $\geq 1\%$ 站、 $\geq 25\%$ 站和 $\geq 35\%$ 站的过程占比分别为 40.4%、3.8%和 3.8%，均高于其他两型。同时，单次过程积冰站数比例最高达到 46.4%，说明该环流型更易出现较大范围冻雨。贝加尔湖低槽型冻雨过程数较少，且积冰站数比例平均值（2.7%）略低，但 $\geq 15\%$ 站和 $\geq 25\%$ 站的频率分别为 6.1%和 3.0%，与贝加尔湖高压脊型接近，说明该型虽整体影响范围较小，但仍可能出现区域性冻雨过程。贝加尔湖西北气流型冻雨过程数最少（6 次），积冰站数比例平均值最低（2.4%）， $\geq 1\%$ 站频率（26.1%）最低，且无 $\geq 25\%$ 站的积冰过程，表明其产生冻雨概率最低，以零星站点为主。

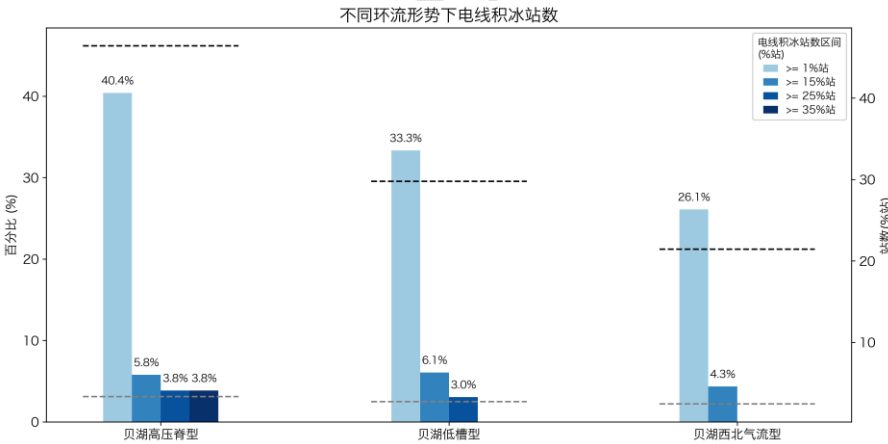


图 14 不同环流形势下不同等级以上电线积冰站数百分比分布

Fig.14 Percentage distribution of the number of stations with wire icing above different levels under different circulation types

综上所述，三类环流型的雨雪影响特征存在明显差异。贝加尔湖高压脊型过程持续时间较长，积冰影响较为突出；贝加尔湖低槽型降水量和积雪强度较大，极端积雪事件相对多发，同时也可能出现严重积冰；贝加尔湖西北气流型整体影响相对较弱，降水量及积雪、积冰程度均低于前两型。上述差异可为湖北省冬季雨雪天气预报及灾害风险研判提供参考。

5 结论与展望

本文基于 2000—2024 年湖北省 76 个国家级地面气象站观测资料与 ERA5 再分析资料，研究了 108 次雨雪过程的时间分布、环流配置及其影响特征，主要结论如下。

(1) 2000—2024 年湖北省年均发生雨雪过程 4.3 次，年际波动明显，总体下降趋势不显著 ($P>0.05$)。雨雪过程主要集中在 1—2 月，占总数的 74%。

(2) 基于 500 hPa 环流形势，利用 TPCA 客观分型方法，雨雪过程可分为贝加尔湖高压脊型、贝加尔湖低槽型和贝加尔湖西北气流型，分别占 48.1%、30.6% 和 21.3%。贝加尔湖高压脊型南支槽最深，常有四川东部西南涡配合，且地面冷高压影响较强；贝加尔湖低槽型西南急流最强，暖湿输送和动力抬升条件较好；贝加尔湖西北气流型南支系统和暖湿输送条件相对最弱。三类西南急流强度总体差异显著 ($P=0.029$)，其中贝加尔湖低槽型显著强于贝加尔湖高压脊型 ($P=0.033$)。不同环流型影响区域和持续时间存在差异。贝加尔湖高压脊型以全省型和中西部型为主，平均持续 2.22 d，影响范围广、持续时间长；贝加尔湖低槽型主要影响鄂西北和中西部，平均持续 2.06 d；贝加尔湖西北气流型影响以鄂西北型为主，平均持续 1.52 d，影响范围和持续时间总体弱于前两型。

(3) 三类环流型的雨雪量、积雪和电线积冰特征存在明显差异。贝加尔湖低槽型日降水量平均值 (15.34 mm) 和平均最大积雪深度 (9.33 cm) 均高于其他两型，更易出现深厚积雪。贝加尔湖高压脊型降水量平均值 (19.63 mm) 最大，平均积雪站数和积冰站数均最多且积冰强度最大，平均最大电线积冰直径 3.83 mm，是发生持续性、大范围雨雪冰冻灾害时需重点关注的环流型。贝加尔湖西北气流型雨雪量总体较小，积雪和电线积冰强度均最弱。

本研究揭示了湖北省不同环流型雨雪过程的主要天气学特征，但对其长期变化及形成机制仍需进一步研究。后续可结合更长时间序列和 CMIP6 模式资料，分析气候变化背景下雨雪过程频次、强度及降水相态的变化，并融合电网、交通等承灾体信息，开展雨雪冰冻灾害风险评估和影响预估。

参考文献

- 陈璇, 钟敏, 陈赛男, 等, 2024. 2024 年 2 月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析[J]. 暴雨灾害, 43(6): 668-679. Chen X, Zhong M, Chen S N, et al, 2024. Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024[J]. Torrential Rain Disasters, 43(6): 668-679 (in Chinese).
- 董全, 陈博宇, 胡宁, 等, 2024. 2024 年 2 月我国两次大范围雨雪冰冻天气对比[J]. 应用气象学报, 35(4): 385-399. Dong Q, Chen B Y, Hu N, et al, 2024. Comparison of two ice and

-
- snow storm processes in China in February 2024[J]. *J Appl Meteor Sci*, 35(4): 385-399 (in Chinese).
- 谷秀杰, 田金华, 王友贺, 等, 2025. 河南低温雨雪冰冻气象等级及时空特征[J]. *气象*, 51(3): 313-323. Gu X J, Tian J H, Wang Y H, et al, 2025. Meteorological grade and its spatio-temporal characteristics of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 51(3): 313-323 (in Chinese).
- 李才媛, 郭英莲, 王海燕, 等, 2011. 湖北省 1954/2008 年历史罕见持续低温冰雪过程对比分析[J]. *灾害学*, 26(1): 80-86. Li C Y, Guo Y L, Wang H Y, et al, 2011. Comparative analysis of the unusual continuous freezing-rain and snow weather in 1954 and 2008 in Hubei[J]. *J Catastrophol*, 26(1): 80-86 (in Chinese).
- 廖圳, 2017. 中国南方持续性低温雨雪冰冻事件环流分型特征[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Liao Z, 2017. Atmospheric circulation patterns associated with persistent wet-freezing events over South China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 罗菊英, 谭艳立, 虞列辉, 2021. 鄂西南山区一次罕见的秋季暴雨转暴雪天气成因分析[J]. *中低纬山地气象*, 45(6): 9-16. Luo J Y, Tan Y L, Yu L H, 2021. Analysis on the causes of the tranformation of a rare autumn rainstorm to blizzard in the mountain area of southwest Hubei Province[J]. *Mid-low Lat Mt Meteor*, 45(6): 9-16 (in Chinese).
- 苗爱梅, 董文晓, 贾利冬, 等, 2014. 近 30 a 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).
- 孙卉, 吴照宪, 刘玉林, 等, 2022. 池州地区冬半年固态降水及其环流背景统计特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 16(4): 104-111. Sun H, Wu Z X, Liu Y L, et al, 2022. Statistical characteristics of Chizhou solid precipitation and its circulation background in cold season[J]. *Desert Oasis Meteor*, 16(4): 104-111 (in Chinese).
- 王淼淼, 丁明虎, 吕俊梅, 等, 2024. 近 40 年中国冬季寒潮的气候特征及大气环流异常[J]. *应用气象学报*, 35(3): 298-310. Wang M M, Ding M H, Lü J M, et al, 2024. Climatology of winter cold waves and associated atmospheric circulation anomalies in China during the last 40 years[J]. *J Appl Meteor Sci*, 35(3): 298-310 (in Chinese).
- 王珊珊, 钟敏, 陈璇, 等, 2023. 2022 年湖北省两次雨雪过程对比及预报偏差分析[J]. *气象*, 49(7): 819-829. Wang S S, Zhong M, Chen X, et al, 2023. Comparison and forecast deviation analysis of two snow and rain events in Hubei Province in 2022[J]. *Meteor Mon*, 49(7): 819-829 (in Chinese).

-
- 温泉沛, 周月华, 李兰, 等, 2024. 湖北省持续低温雨雪过程评估与分析[J]. 暴雨灾害, 43(4): 440-447. Wen Q P, Zhou Y H, Li L, et al, 2024. Evaluation and analysis of continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province[J]. *Torrential Rain Disasters*, 43(4): 440-447 (in Chinese).
- 吴瑶, 郭广芬, 史瑞琴, 等, 2025. 2024 年 2 月湖北省两次雨雪冰冻天气特征及海温影响分析[J]. 暴雨灾害, 44(1): 31-40. Wu Y, Guo G F, Shi R Q, et al, 2025. Analysis of weather characteristics and sea surface temperature impact on rainfall/snowfall and freezing events in Hubei Province in February 2024[J]. *Torrential Rain Disasters*, 44(1): 31-40 (in Chinese).
- 赵琳, 姜允迪, 钟海玲, 等, 2025. 2024 年中国气候特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 51(3): 349-357. Zhao L, Jiang Y D, Zhong H L, et al, 2025. Climate characteristics and major meteorological events over China in 2024[J]. *Meteor Mon*, 51(3): 349-357 (in Chinese).
- 支蓉, 郑志海, 2022. 2021/2022 年冬季中国气候异常特征及南方降水异常偏多成因分析[J]. 气象, 48(7): 925-935. Zhi R, Zheng Z H, 2022. Characteristics of climate anomalies over China in winter 2021/2022 and causes for precipitation anomalies over Southern China[J]. *Meteor Mon*, 48(7): 925-935 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. GB/T 35224—2017 地面气象观测规范 天气现象[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. GB/T 35224—2017 Specifications for surface meteorological observation—weather phenomena[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 周悦, 许冠宇, 高正旭, 等, 2016. 湖北省冻雨天气特征及其判定方法研究[J]. 气象科技, 44(6): 949-955. Zhou Y, Xu G Y, Gao Z X, et al, 2016. Characteristics and discrimination method of freezing rain weather in Hubei Province[J]. *Meteor Sci Technol*, 44(6): 949-955 (in Chinese).
- 朱华, 张海涛, 周朝荣, 2025. 南方持续性低温雨雪事件的环流特征及影响因子分析[J]. 热带气象学报, 41(3): 413-426. Zhu H, Zhang H T, Zhou C R, 2025. Circulation characteristics and drivers of persistent cold rain and snow events in Southern China[J]. *J Trop Meteor*, 41(3): 413-426 (in Chinese).
- Harpold A A, Kaplan M L, Klos P Z, et al, 2017. Rain or snow: hydrologic processes, observations, prediction, and research needs[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 21(1): 1-22.
- Huth R, 1993. An example of using obliquely rotated principal components to detect circulation types over Europe[J]. *Meteor Z*, 2(6): 285-293.
- Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns[J]. *Ann*

NY Acad Sci, 1146(1): 105-152.

《世界科学》