

# 云南大理州一次风雹天气过程诊断分析

易小蓉<sup>1</sup>, 万花<sup>1</sup>, 黄春娟<sup>1\*</sup>, 雷石金<sup>2</sup>

<sup>1</sup>云南省南涧彝族自治县气象局, 云南 大理

<sup>2</sup>云南省祥云县气象局, 云南 大理

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月28日

## 摘要

本文以2025年8月5日大理州一次典型风雹天气过程为例, 综合利用地面常规观测资料、探空资料及再分析数据, 对其环流背景、相关诊断量特征及中尺度触发机制等诊断分析, 结果表明: 500 hPa环流场中, 高纬度低涡引导冷空气南下, 中低纬度副热带高压边缘引导暖湿气流北上, 二者在大理附近交汇, 同时风场辐合促使暖湿空气强烈上升, 构建了有利的大尺度环流背景。动力条件上, 天气过程期间, 禾甸镇中高层存在显著上升运动, 为强对流提供关键动力, 下沉运动与之配合形成强烈垂直气流切变, 且风场有效输送暖湿气流和不稳定能量, 成为强对流发生的直接动力因素。热力条件方面, 禾甸镇假相当位温垂直分布的不均匀性是不稳定能量积累的重要基础; 西南地区K指数空间差异显示云南西部及部分中部大气不稳定度高、对流潜力大; 温度平流变化, 尤其是中层冷平流侵入, 加大大气垂直温度梯度, 进一步增强大气不稳定度, 提供了充足热力条件。此外, 丽江探空站资料表明, 强天气发生前大气已处于不稳定状态, 具备强对流所需的充足不稳定能量(较高CAPE值)及有利动力抬升条件(低CIN、负SI、利于边界层空气抬升的BLI), 为灾害发生提供了必要局地条件。

## 关键词

云南大理, 风雹天气, 诊断分析

# Diagnostic Analysis of a Hail Weather Process in Dali Prefecture of Yunnan Province

Xiaorong Yi<sup>1</sup>, Hua Wan<sup>1</sup>, Chunjuan Huang<sup>1\*</sup>, Shijin Lei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bureau of Meteorology, Nanjian Yi Autonomous County, Dali Yunnan

<sup>2</sup>Xiangyun County Meteorological Bureau, Dali Yunnan

Received: October 23, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 28, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 易小蓉, 万花, 黄春娟, 雷石金. 云南大理州一次风雹天气过程诊断分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1479-1487. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146147

## Abstract

In this paper, a typical wind hail weather process in Dali Prefecture on August 5, 2025 is taken as an example. Based on the conventional ground observation data, sounding data and reanalysis data, the circulation background, related diagnostic characteristics and mesoscale triggering mechanism are analyzed. The results show that in the 500 hPa circulation field, the high-latitude vortex leads the cold air to the south, and the edge of the subtropical high in the middle and low latitudes leads the warm and humid air to the north. The two converge near Dali, and the wind field convergence promotes the warm and humid air to rise strongly, which constructs a favorable large-scale circulation background. In terms of dynamic conditions, during the weather process, there was a significant upward movement in the middle and upper layers of Hedian Town, which provided the key power for the strong convection. The sinking movement cooperated with it to form a strong vertical airflow shear, and the wind field effectively transported warm and humid airflow and unstable energy, which became the direct driving factor for the occurrence of strong convection. In terms of thermal conditions, the inhomogeneity of the vertical distribution of pseudo-equivalent potential temperature in Hedian Town is an important basis for the accumulation of unstable energy. The spatial difference of K index in Southwest China shows that the atmospheric instability is high and the convective potential is large in western and central Yunnan. The change of temperature advection, especially the intrusion of cold advection in the middle layer, increases the vertical temperature gradient of the atmosphere, further enhances the atmospheric instability, and provides sufficient thermal conditions. In addition, the data of Lijiang sounding station show that the atmosphere was in an unstable state before the occurrence of strong weather, with sufficient unstable energy (higher CAPE value) and favorable dynamic uplift conditions (low CIN, negative SI, BLI conducive to boundary layer air uplift) required for strong convection, which provided the necessary local conditions for the occurrence of disasters.

## Keywords

Yunnan Dali, Hailstorm Weather, Diagnostic Analysis

Copyright © 2025 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

云南地处低纬高原，复杂的地形与多样的季风系统交汇，使其成为中国雷暴、冰雹、短时强降水等强对流天气的高发区之一[1]。其中，位于滇西的大理白族自治州(以下简称“大理州”)三面环山、洱海横亘，海拔落差大，下垫面热力差异显著，为深厚对流提供了有利触发条件[2]。近十年来，随着多源观测资料时空分辨率的提高和数值模式的快速发展，针对大理州及其周边地区的强对流天气机理研究取得了显著进展，但专门聚焦于“风雹”这一兼具灾害性大风与冰雹的混合型强对流过程的综合诊断仍相对稀缺。

目前对风雹天气的认识多源于孤立个例的雷达特征或环流分型，缺乏对其共性环境参数、云微物理结构及中尺度触发机制的系统性比较研究[3]，黄慧君等[3]针对一次强冷空气过程指出，洱海东侧的辐合线与苍山东坡地形重力波共同触发了飚线发展，导致局地雷雨大风和冰雹，钟爱华等[4]通过对一次低纬高原强冷空气入侵过程分析发现，降雪、雷暴和冰雹可出现在同一系统不同象限，其差异主要源于0℃层高度、低层水汽辐合及逆温层强度，张万诚[5]等研究指出的秋季水汽输送研究发现当孟加拉湾风暴与南

支槽同位相叠加并配合 500 hPa 冷槽后倾, 形成典型“上干冷、下暖湿”的不稳定层结, 为冰雹胚胎的反复凝结提供有利环境。段鹤等[6]基于普洱雷达统计指出, 滇西冰雹云多呈现“高质心、高三体散射、弱回波穹窿”特征, 杨澄等[7]探讨 WRF 模式在复杂地形条件下的适用性, WRF 模式对于滇西复杂地形区的降水具有一定模拟能力, 耦合 GSI 同化系统后, 能够对模式输入场各变量分布进行调整, 从而影响模式模拟性能, 但总体模拟效果还有待进一步提高。

综上所述, 近年来国内外学者围绕云南大理州强降水、强对流天气开展了大量卓有成效的工作, 涵盖气候统计、环流分型、雷达特征及数值模拟等多个方面, 为理解风雹天气的多尺度机理奠定了坚实基础。本文以 2025 年 8 月 5 日大理州一次典型风雹天气过程为例, 综合利用地面常规观测资料、探空资料及再分析数据, 对其环流背景、相关诊断量特征进行诊断分析, 旨在揭示高原复杂地形下风雹风暴的消演变规律, 为提升滇西地区高影响天气的精准预警能力提供科学依据。

## 2. 资料与方法

本文利用的降水量地面观测数据来自于中国气象数据网, 环流形势、相关诊断量基于 NCEP FNL 全球大气再分析资料绘制, 该资料空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 时间分辨率为 6 小时。基于上述数据资料, 利用天气学方法诊断方法, 对 2025 年 8 月 5 日云南省大理州一次风雹天气进行诊断分析。

## 3. 天气实况简介

2025 年 8 月 5 日, 云南省大理州禾甸镇部分区域遭遇风雹灾害, 天气过程期间 17:00 禾甸站小时降水量达到 21.4 mm, 许长站小时降水量达到 14.3 mm (图 1), 均达到短时强降水标准。极端天气导致温水村、黄联村农作物受灾面积较大, 禾甸镇内部分农户房屋受损, 公路沿线多棵树木倒伏, 对道路通行产生影响。此外茨芭村、旧邑村电力设施受损, 部分电线杆倾倒, 多处公共场所 LED 屏等设备损坏, 造成一定经济损失。

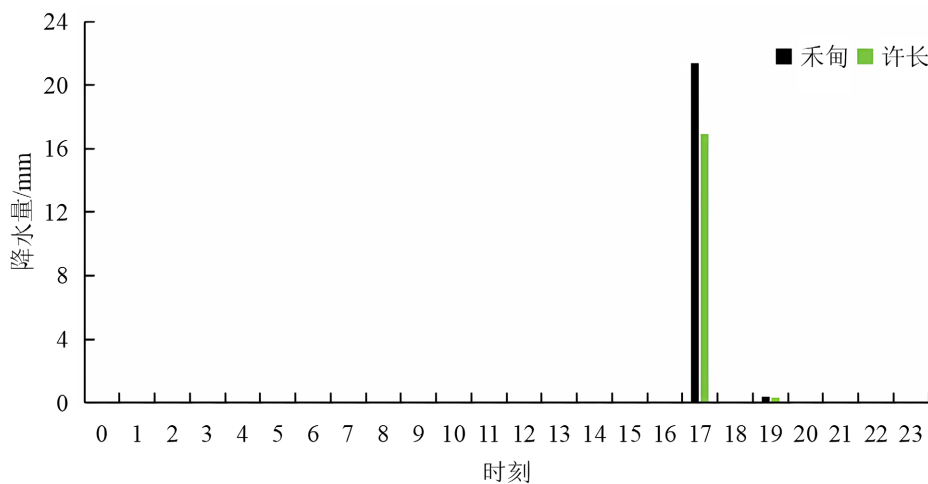


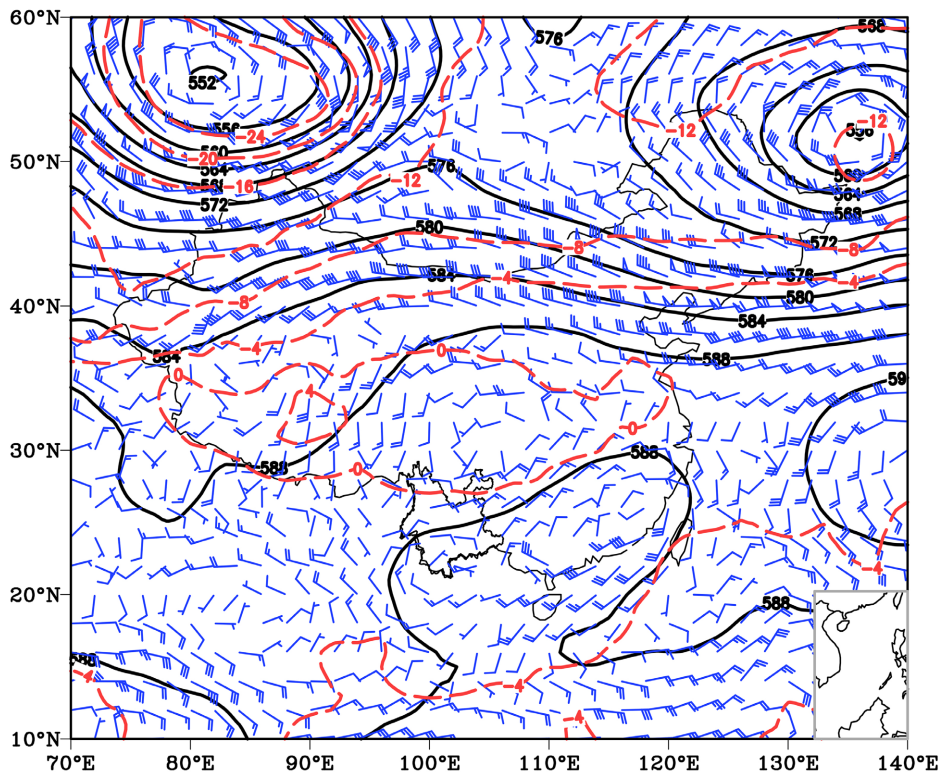
Figure 1. 24-hour precipitation at Hedian station and Xuchang station on August 5  
图 1. 8 月 5 日禾甸站、许长站 24 小时降水量

## 4. 诊断分析

### 4.1. 环流形势

分析 8 月 5 日天气发生前 14:00 500 hPa 环流形势图可知(图 2), 巴尔喀什湖以北及黑龙江以东(约

50~60°N)存在闭合低涡系统,中低纬度(30~40°N),存在相对高值的等高线区域,反映出副热带高压的影响。其中在30°N附近副热带高压势力较强。副热带高压边缘的气流辐合上升,引导低纬度的暖湿空气向北输送,为强对流天气提供充足的水汽和不稳定能量。等温线与温度平流分析等温线分布:红色虚线等温线显示,北部地区等温线密集且数值低,南部等温线稀疏且数值高,存在明显的温度梯度。这种温度梯度反映了冷暖空气的差异,而冷暖空气的交汇区域是天气系统活跃的地带。在云南大理周边,风场呈现出辐合的趋势。这种辐合的风场有利于空气的垂直上升运动,把低层的暖湿空气抬升到高空,促使水汽冷却凝结,形成对流云系,为强对流天气提供了必要的上升运动条件。来自低纬度海洋的暖湿气流,在风场的作用下向云南大理地区汇聚,为强对流天气的发生提供了充足的水汽条件,使得降水得以加强。对大理强对流天气的综合影响结合上述分析,高纬度的低压系统引导冷空气南下,中低纬度副热带高压边缘引导暖湿气流北上,冷暖空气在云南大理附近交汇,同时风场的辐合作用促使暖湿空气强烈上升,加之充足的水汽供应,这些因素共同作用,营造了有利于强对流天气发生的环境,导致当日出现强对流天气。



文内涉及地图的,基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

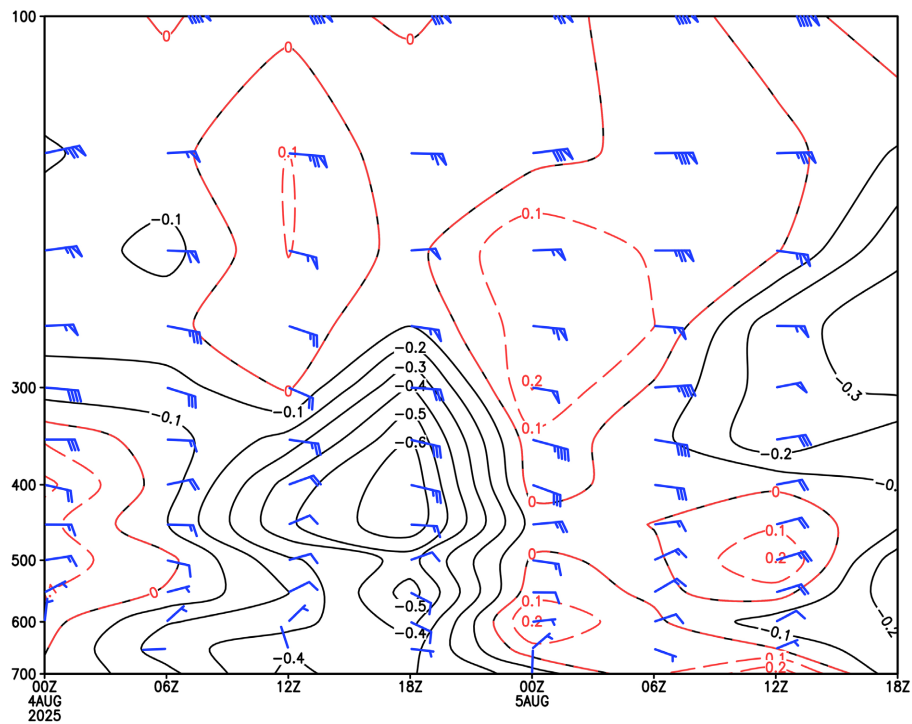
Figure 2. Circulation situation at 500 hPa at 14:00 on August 5

图2. 8月5日14:00 500 hPa环流形势

#### 4.2. 动力条件

分析禾甸8月4日~5日禾甸垂直速度、风场时间高度剖面可知(图3),4日08:00~5日02:00时间段内,垂直运动整体较弱,上升运动和下沉运动的强度与范围都有限。风场分布从高层至底层为偏东气流,未形成明显的有利于强对流发展的配置,天气相对平稳。5日02:00~5日14:00垂直运动开始发生变化,

上升运动在中低层 300~700 hPa 逐渐增强,范围有所扩大,下沉运动也开始在部分区域出现,与上升运动形成初步的垂直结构。5日 14:00~20:00 强对流天气发生的时段,上升运动在 300~700 hPa 层次极为显著,上升运动中心强度达到 0.2 Pa/s,为强对流提供了关键动力,能快速抬升低层暖湿空气,促使水汽凝结释放潜热,强化上升运动。下沉运动与上升运动配合,形成强烈垂直气流切变,利于大风、冰雹等剧烈天气产生。同时风场有效输送暖湿气流和不稳定能量,为强对流发展提供充足水汽与能量,最终引发雷暴、短时强降水等强对流天气。



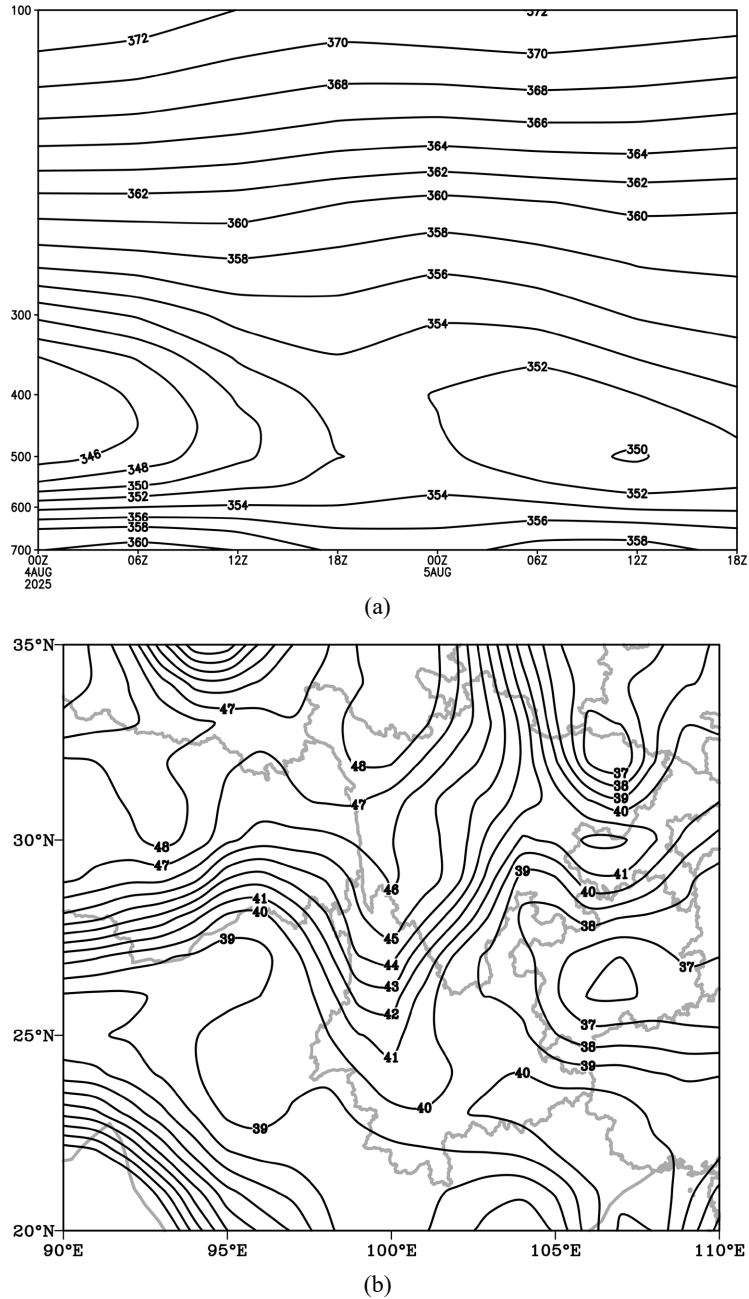
**Figure 3.** Vertical velocity and wind field time height profile of Hedian from August 4 to 5  
**图 3.** 8月4日~5日禾甸垂直速度、风场时间高度剖面

### 4.3. 热力条件

分析禾甸镇假相当位温时间高度剖面图(图 4(a)),从垂直分布、时间演变及天气意义等方面分析可知,700 hPa 以下的低层,假相当位温数值相对较低,且等值线较为密集,反映出低层大气在能量和水汽分布上梯度较大;而随着高度向高层延伸,假相当位温数值逐渐增大,高层大气蕴含的能量更多,与低层形成显著的垂直能量差异,这种差异导致大气垂直方向热力结构的不均匀。在中层 500 hPa 附近,假相当位温的分布也并非均匀一致,存在局部的低值区与周围区域的假相当位温数值形成对比,显示出中层大气能量分布的不均匀性,这种不均匀与大气环流的局部调整、冷暖空气的交汇等因素相关。总体而言,禾甸镇假相当位温在垂直方向上的不均匀分布反映了大气垂直热力结构的复杂性,是大气不稳定能量积累、对流潜在发展等天气过程的重要热力基础。

K 指数是衡量大气不稳定度的重要指标,较高的 K 指数意味着大气中蕴含的不稳定能量较多,更有利于对流天气(如雷暴、短时强降水等)的发生。从 8月5日 08:00 西南地区 K 指数分布图来看(图 4(b)),K 指数整体分布呈现出较为明显的空间差异,等值线疏密不均,表明西南地区不同区域的大气不稳定程度存在显著区别。高值区域分析位置:在图中偏西和偏北部分区域,K 指数相对较高,出现了 K 指数 48℃

高值区域。云南区域内 K 指数存在明显的空间差异。在云南西部及部分中部区域, K 指数相对较高, 30°N、95°E 区域 K 指数在 40°C~41°C 左右; 而在云南东部, K 指数相对较低, 多在 37°C~39°C 之间, 局部甚至低至 37°C。云南西部及部分中部较高的 K 指数, 反映出这些区域大气不稳定性较高, 对流发展的潜力较大。

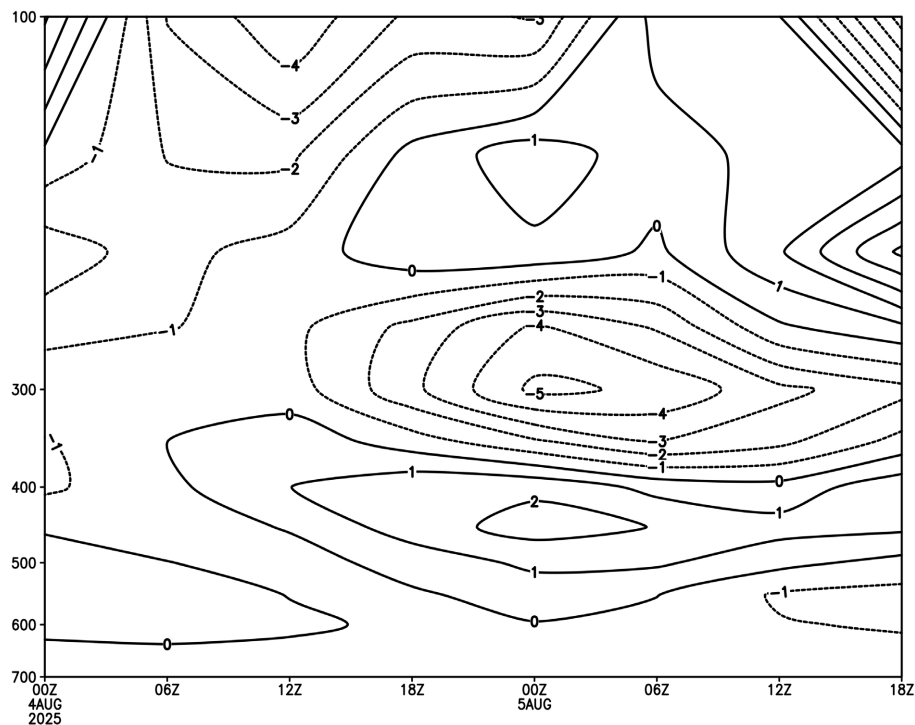


文内涉及地图的, 基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作, 底图无修改。

**Figure 4.** (a) The height profile of the Hedian pseudo-equivalent potential temperature time on August 4~5, (b) The exponential distribution at 08:00 K on August 5

**图 4.** (a) 8 月 4 日~5 日禾甸假相当位温时间高度剖面、(b) 8 月 5 日 08:00 K 指数分布

禾甸镇温度平流的时间高度剖面中(图 5), 在 700 hPa 及以下的低层区域, 在强对流天气发生前, 存在不同方向和强度的温度平流变化, 表现在天气发生前期有较弱的暖平流或冷平流活动, 这影响低层大气的热力结构。暖平流会使得低层大气增温, 增加大气的不稳定能量; 而冷平流则可能促使冷空气下沉, 与暖空气形成交汇。中层在 300~500 hPa 的中层区域, 是温度平流变化较为剧烈的层次, 在 5 日 14:00~20:00 期间, 出现了明显的冷平流中心, 表明有冷空气从中层侵入。冷平流的侵入使得中层大气降温, 加大了大气的垂直温度梯度, 增强了大气的的不稳定度, 为强对流天气的发生提供了动力和热力条件。100~300 hPa 的高层, 温度平流的强度和分布也对对流发展有影响, 高层的暖平流可以起到维持对流云顶、抑制对流云顶上方冷空气下沉的作用, 有利于对流系统的持续发展; 反之, 高层的冷平流可能会对对流系统产生抑制作用。强对流发生时中层强烈的冷平流与低层可能存在的暖湿空气相互作用, 形成了强烈的垂直上升运动。这种垂直上升运动是强对流天气发生的关键因素, 它能够将低层的暖湿空气迅速抬升, 冷却凝结形成云系, 并释放潜热进一步加强对流。



**Figure 5.** The height profile of temperature advection time in Hedian from August 4 to 5  
**图 5.** 8 月 4 日~5 日禾甸温度平流时间高度剖面

#### 4.4. 探空分析

利用丽江探空站代表禾甸高空各要素分布, 分析可发现 8 月 4 日 20:00 和 8 月 5 日 08:00 的温度对数压力图, 分析对强天气发生前大气不稳定条件展开分析, 结果如下:

8 月 4 日 20:00 (图 6(a)), 在 700 hPa 至 200 hPa 高度层, 温度廓线与露点廓线等特征表明, 大气存在明显的不稳定层结。通过计算相关热力与动力参数, 该层对流有效位能 CAPE 高达 2504 J/kg, 显示不稳定能量极为充足; 对流抑制能量 CIN 为 28.5 J/kg, 虽对气块抬升有一定抑制作用, 但仍处于易突破的阈值范围内; 沙氏指数 SI 为  $-3.54^{\circ}\text{C}$ , 远低于 0, 指示大气处于极不稳定状态; 边界层抬升指数 BLI 为  $-3.8$ , 有利于边界层空气的抬升运动, 为对流的触发提供了动力条件。到 8 月 5 日 08:00 (图 6(b)), 700 hPa 到

300 hPa 高度层的对流有效位能(CAPE)为 230.4 J/kg，这一数值表明该层仍存在可供对流发展的不稳定能量；对流抑制能量(CIN)为 0 J/kg，意味着气块在抬升过程中几乎不受抑制，极易触发对流活动；沙氏指数(SI)为 $-0.86^{\circ}\text{C}$ ，呈负值，反映出大气依旧处于不稳定状态；边界层抬升指数(BLI)为 $-1.1$ ，同样对边界层空气的抬升具有促进作用。综合上述两个时次的探空资料分析可知，在强天气发生之前，大气已处于不稳定状态，且具备强对流发生所需的充足不稳定能量以及有利的动力抬升条件。

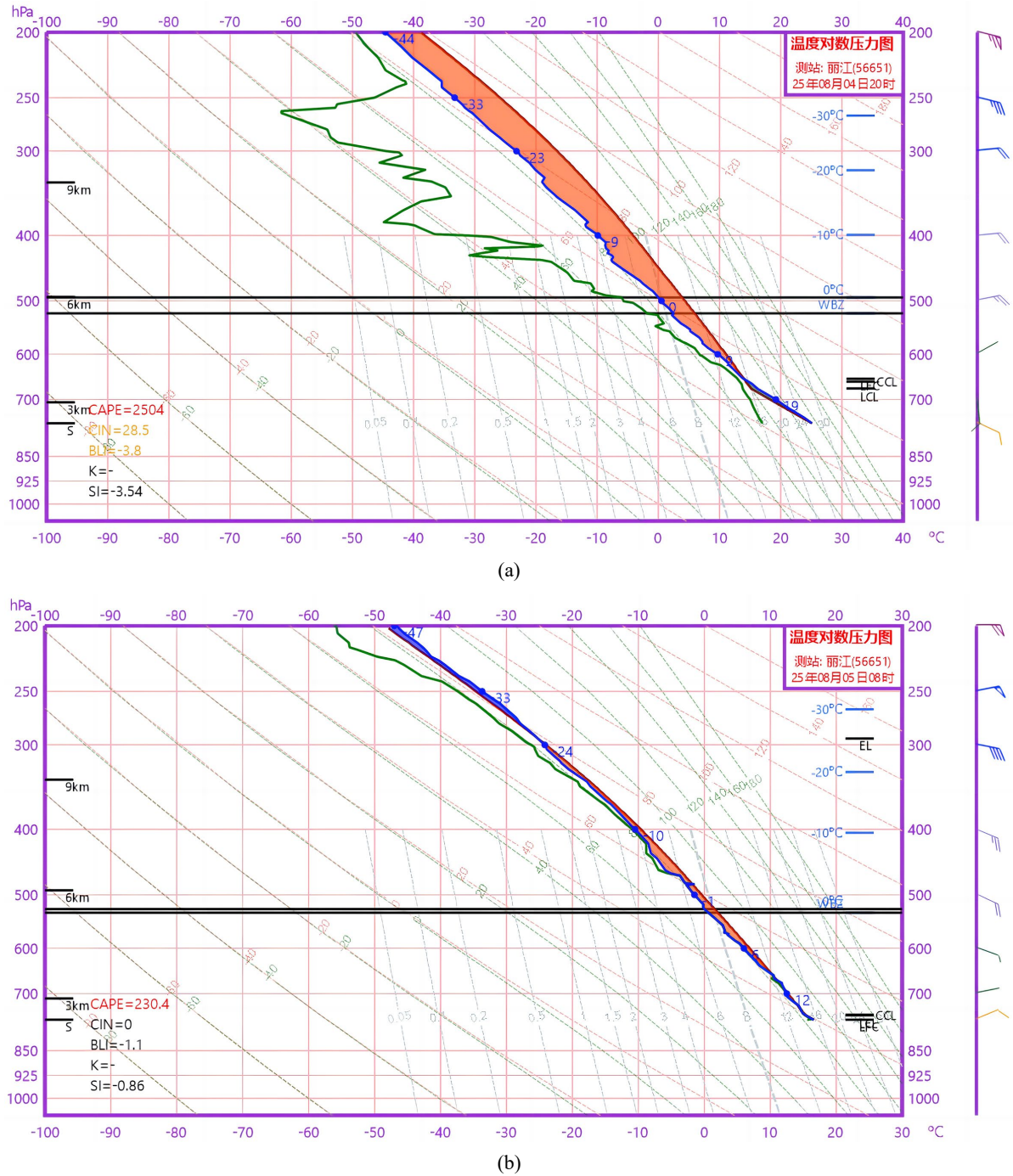


Figure 6. Lijiang sounding station in August 2025 (a) 4 20:00, (b) 08:00 in May  
图 6. 丽江探空站 2025 年 8 月(a) 4 日 20:00、(b) 5 月 08:00

## 5. 结论

本文以 2025 年 8 月 5 日大理州一次典型风雹天气过程为例,综合利用地面常规观测资料、探空资料及再分析数据,对其环流背景、相关诊断量特征及中尺度触发机制等诊断分析,结果表明:

1) 2025 年 8 月 5 日云南省大理州禾甸镇的风雹灾害是多种气象条件共同作用的结果。500 hPa 环流场上,高纬度低涡引导冷空气南下,中低纬度副热带高压边缘引导暖湿气流北上,冷暖空气在大理附近交汇,同时风场辐合促使暖湿空气强烈上升,为强对流天气提供了有利的大尺度环流背景。

2) 动力条件方面,8 月 5 日 14:00~20:00 期间,禾甸镇 300~700 hPa 层次显著的上升运动为强对流提供了关键动力,下沉运动与之配合形成的强烈垂直气流切变,以及风场对暖湿气流和不稳定能量的有效输送,是雷暴、短时强降水等强对流天气发生的直接动力因素。

3) 热力条件上,禾甸镇假相当位温垂直分布的不均匀性反映了大气垂直热力结构的复杂性,是不稳定能量积累的重要基础;西南地区 K 指数的空间差异显示云南西部及部分中部大气不稳定性较高,对流发展潜力大;温度平流的变化,尤其是中层冷平流的侵入,加大了大气垂直温度梯度,进一步增强了大气不稳定性,为强对流天气提供了充足的热力条件。

4) 探空资料表明,强天气发生前禾甸镇所在区域大气已处于不稳定状态,具备强对流发生所需的充足不稳定能量(CAPE 值较高)以及有利的动力抬升条件(CIN 低、SI 为负、BLI 有利于边界层空气抬升),为禾甸镇强对流天气的发生提供了必要的局地大气不稳定条件。

## 基金项目

云南省气象局科研项目(YZ202430)。

## 参考文献

- [1] 于淑婷,罗亚丽,李建. 1982-2016 年云南省不同强度降水气候态及其变化[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(4): 363-371.
- [2] 黄慧君,李庆红,高月忠,等. 云南省大理州区域性强降雨的影响系统及其特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(3): 45-50.
- [3] 刘彬,邹灵宇,李晓鹏,等. 云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J]. 气象, 2022, 48(11): 1402-1417.
- [4] 钟爱华,周泓,黄慧君,等. 低纬高原 2013 年一次寒潮天气过程不同相态降水诊断分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 210-215, 384.
- [5] 段鹤,夏文梅,苏晓力,等. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象, 2014, 40(10): 1194-1206.
- [6] 张万诚,马涛,郑建萌,等. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系[J]. 气象, 2014, 40(3): 336-348.
- [7] 杨澄,付志嘉. 复杂地形条件下 WRF 模式的适用性: 以滇西地区降水模拟为例[J]. 气象科技进展, 2019, 9(1): 23-29.