



昆明市夏季夜间冰雹天气分型及其环境参数特征

冯亮亮 詹正杰 刘雨润 刘博 华维

Characteristics of environment parameters and weather type of nighttime hail weather in Kunming City from June to August

FENG Liangliang, ZHAN Zhengjie, LIU Yurun, LIU Bo, HUA Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-046>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

豫南汛期暖区暴雨环流分型与环境参量分析

Classification of circulation and analysis of the environmental parameters of warm-sector rainstorms over southern Henan in flood season

暴雨灾害. 2025, 44(2): 167–176 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-041>

湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征

Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province

暴雨灾害. 2022, 41(1): 66–75 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.008>

海南岛雷暴大风天气形势和环境参数特征分析

Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm gales in Hainan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 86–93 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.010>

2021年苏州与武汉两地龙卷的环境条件与雷达特征对比分析

Comparative analysis of environmental conditions and radar characteristics for two tornadoes occurred in Suzhou and Wuhan in 2021

暴雨灾害. 2023, 42(4): 415–426 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-044>

浙江低涡暴雨环流分型及其优选集合动力因子研究

Circulation classification and preferred ensemble dynamic factors of rainstorm induced by vortexes in Zhejiang

暴雨灾害. 2025, 44(5): 700–712 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-045>

2016—2023年萍乡市突发性暴雨过程的基本特征与环境条件分析

Analysis of the basic characteristics and environmental conditions of sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023

暴雨灾害. 2025, 44(6): 767–779 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-174>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

冯亮亮,詹正杰,刘雨润,等.2026.昆明市夏季夜间冰雹天气分型及其环境参数特征[J].暴雨灾害,45(4):513–522. FENG Liangliang, ZHAN Zhengjie, LIU Yurun, et al. 2026. Characteristics of environment parameters and weather type of nighttime hail weather in Kunming City from June to August [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4):513–522 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–046

昆明市夏季夜间冰雹天气分型及其环境参数特征

冯亮亮¹, 詹正杰¹, 刘雨润², 刘博³, 华维⁴

(1. 昆明市气象局, 昆明 650500; 2. 云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室 云南大学, 昆明 650091;
3. 长春市气象局, 长春 130051; 4. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225)

摘要: 为提升昆明市夏季夜间 (20—08 时, 北京时, 下同) 冰雹的预报预警水平, 基于 2010—2023 年 6—8 月昆明 C 波段天气雷达、冰雹灾情记录及 ERA5 再分析数据, 分析了夜雹的时空分布与雹云移向特征, 并采用 T 模态斜交主成分分析方法 (T-mode principal component analysis, PCT) 对 500 hPa 环流场进行客观分型并分析各天气型的环境参数特征。结果表明: (1) 2010—2023 年 6—8 月昆明共出现 73 个夜间降雹日, 雹云移向以西风型为主 (占 39.4%), 其次为偏东风型 (占 31.6%)、正北风型 (占 13.2%)、静止型 (占 10.5%) 及正南风型 (占 5.3%); (2) 夜雹日 20 时 500 hPa 位势高度场的最优分型结果为 6 类, 其中孟加拉湾槽型 (占 30.1%)、印度低压型 (占 20.5%) 和孟加拉湾-中国南海双低压型 (占 21.9%) 为主要环流型; (3) 前两类表现为低层西风在滇中切变辐合特征, 偏西、偏北来向的雹云较多, 大气层结高能, 7 月对流有效位能 (CAPE) 中位数分别为 $754.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $940.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中低层气温直减率可至 15°C 以上, 不稳定条件较好, 造成的灾情较轻。孟加拉湾-中国南海双低压型背景下多东北来向的雹云, 700 hPa 东风和西风辐合促进湿空气饱和凝结 (比湿 $\geq 12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 局地对流活动增强, 特征高度层降低, 降雹集中在 7—8 月且致灾较重。该研究可为昆明夜间冰雹的潜势预报与灾害预警提供参考。

关键词: 夜间降雹; 环流分型; T 模态斜交主成分分析; 环境参数

中图法分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–046

Characteristics of environment parameters and weather type of nighttime hail weather in Kunming City from June to August

FENG Liangliang¹, ZHAN Zhengjie¹, LIU Yurun², LIU Bo³, HUA Wei⁴

(1. Kunming Meteorological Bureau, Kunming 650500; 2. Yunnan Key Laboratory of Meteorological Disasters and Climate Resources in the Greater Mekong Subregion, Yunnan University, Kunming 650091; 3. Changchun Meteorological Bureau, Changchun 130051; 4. Chengdu University of Information Technology Atmospheric Scientific School, Chengdu 610225)

Abstract: To improve the forecasting and warning level of summer nighttime (20–08 BT, the same as after) hail in Kunming, this study analyzes the spatiotemporal distribution of nighttime hail and the movement directions of hail clouds based on Kunming C-band weather radar, hail disaster records, and ERA5 reanalysis data from July to August during 2010–2023. The T-mode principal component analysis (PCT) method is applied to objectively classify the circulation patterns at 500 hPa and analyze the associated environmental parameters. The results are as follows. (1) There were 73 nighttime hail days from June to August during 2010–2023 in Kunming. Hail cloud movements were primarily westerly (39.4%), followed by easterly (31.6%), northerly (13.2%), stationary (10.5%), and southerly (5.3%). (2) The optimal classification of the 500 hPa geopotential height at 20:00 BT on nighttime hail days resulted in six types. The primary circulation types are the Bay of Bengal trough pattern (30.1%), the Indian low pattern (20.5%), and the Bay of Bengal-South China Sea double low pattern (21.9%). The first two types exhibit shear and convergence of low-level westerlies over central Yunnan, with hail clouds mostly coming from the west and north. These patterns are characterized by sufficient atmospheric energy, with median of available potential energy (CAPE) in July reaching $754.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $940.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The temperature lapse rate of the middle and lower layers can exceed 15°C , indicating favorable unstable conditions, but resulting in relatively slight hail disasters. (3) Under the Bay of

收稿日期: 2025–03–11; 定稿日期: 2026–02–13

资助项目: 云南省气象局基层台站气象科技创新与能力提升计划项目 (STIAP202401)。

第一作者: 冯亮亮, 主要从事天气预报及相关理论方法研究。E-mail: 1395604469@qq.com

通信作者: 华维, 主要从事高原气象学研究。E-mail: huawei@cuit.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

Bengal–South China Sea double low pattern, hail clouds tend to originate from the northeast. The convergence of easterlies and westerlies at 700 hPa promotes saturation and condensation of moist air (specific humidity $\geq 12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), enhancing local convective activity and lowering the height of key layers. Hail events under this pattern mainly occur from July to August and are associated with more severe disasters. This findings provides a reference for hail potential forecasting and disaster warning in Kunming.

Key words: nighttime hail; circulation classification; T-mode principal component analysis; environmental parameter

引 言

云贵高原地形、地貌特征复杂,主汛期强对流天气过程频发。影响云南强对流天气的环流系统包括南支槽、切变线、孟加拉湾低压、西行台风等,南支槽和西行台风分别以动力和水汽条件为主导因素(刘彬等, 2022)。其中南支槽东移可使滇中附近高空急流增强,配合中低层垂直风切变促进雹暴发展产生冰雹天气(张腾飞等, 2018),对农作物、基础设施及日常生活构成严重威胁。由于降雹过程具有空间尺度小,局地性强等特点,使其监测和预报难度较大(闵颖等, 2022; 唐佳等, 2023; 袁春梅和周筠珩, 2024),是灾害性天气预报预警的重点和难点之一。

冰雹天气通常与浮力作用导致的有组织深厚湿对流关系密切,水汽条件、不稳定条件及抬升条件是形成冰雹天气过程的关键因素(Giordani et al., 2024)。大尺度天气系统通过环境风引导中小尺度云团移动,受局部地形影响,不同天气型下冰雹事件的触发机制差异明显(袁潮等, 2020; Zhang et al., 2025)。苏永玲等(2011)发现京津冀地区冰雹天气多与冷涡型相关,而雷雨大风则由冷槽型触发。李强等(2023)指出山西地区雷雹大风环流配置易受前倾槽型触发,结合零度层高度可提高冰雹预测概率。不同的冰雹天气触发机制和不同天气环流型密切相关,黄麟媛等(2024)通过对高低空环流型分析,将黔南冰雹事件分为热低压辐合型、高架雷暴型和冷锋低槽型。不同天气环流型也会导致天气要素表现不同,雷瑜等(2022)指出西北气流型、低槽及低涡型天气背景的冰雹云雷达物理量差异较大,前者表现为液态水含量、回波顶高较高,后者则为回波顶高和垂直积分液态水含量密度偏低。以上研究表明,一个地区的冰雹天气发生的环流背景不尽相同,将环流进行分型并研究各自类别的共性特征是提高预报能力的有效方法。

目前常用的环流分型方法有 K 聚类、T-mode 斜交主成分分析(T-mode principal component analysis, PCT)、自组织映射神经网络等,其中 PCT 方法为天气分型研究提供了客观量化工具(Huth, 2000),该方法允许环流型之间存在关联,且对参数设定不敏感,可识别高影响天气环流型。传统分型方法依赖专家

经验划定环流型边界,而 PCT 通过正交变换提取环流场时空协变特征,可有效克服人为主观偏差。该方法采用斜交旋转技术处理非线性模态分离问题,尤其擅长捕捉复杂地形区域中多尺度环流的耦合特征。Gascon 等(2015)应用 PCT 方法解释了伊比利亚半岛的强风暴在空间分布和预测分析上存在的地域性;Merino 等(2013)基于该方法构建西班牙河谷地带的环流分型框架,发现对流不稳定、水汽通量散度等中尺度配置造成了冰雹空间分布上的异常;García-Ortega 等(2011)将 PCT 方法和聚类方法相结合探讨了不同冰雹事件的大气环流型,发现各环流型下的降雹过程存在季节倾向。Wu 等(2016)应用 PCT 结合 K 聚类方法,指出喜马拉雅山脉南坡的锋面强对流系统空间分布受西南季风进程的动态调控。Luo 等(2023)应用 PCT 方法研究了云贵高原东部冷锋后高架雷暴的环流特征,并指出地形和冷锋交汇可触发冷季雷暴。以上研究表明,PCT 在揭示环流配置方面具有独特优势,本文采用 PCT 方法对冰雹过程的环流场客观分型,应用解释聚类方差客观评估最优分型结果,避免了预报员主观识别误差,有利于强天气过程识别及预警发布。

昆明市地处滇中地区,其特殊地形和气候背景造成夏季冰雹天气过程频发(王菲等, 2024)。昆明冰雹事件多发于“上干下湿”的大气层结,700—500 hPa 温度露点差一般介于 12~17 °C(蒋雯玉等, 2021)。通常情况,由于夜间近地面辐射冷却,边界层较为稳定,雹灾发生几率较低;然而稳定边界层伴随低空急流可形成“高风切变,低有效位能”的潜势,可能造成显著恶劣天气(Wade and Parker, 2021; 孙敏等, 2023)。而对于夜间降雹过程,若实况和潜势预报不一致则会造成预报偏差(陈芳和冯金燕, 2022),给农业生产和财产安全带来重大影响。目前,本地冰雹研究多聚焦白天降雹的回波特征分析及时空分布方面(尹丽云等, 2023; 张思豆等, 2025),而对夜间降雹的相关分析较为缺乏,因其发生隐蔽,了解其天气特征从而发展相应的预报技术,成为亟待解决的科学问题。

本文基于昆明市 2010—2023 年 6—8 月雷达观测和冰雹灾情记录对夜间降雹过程的时空分布和冰雹云移向特征进行统计分析,然后应用 PCT 方法对 ERA5 再分析资料的 500 hPa 环流客观分型并分析各

环流型的环境参数特征,以期优化本地冰雹潜势预报指标,提升昆明冰雹天气的预警能力。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括:(1) 2010—2023 年昆明市新一代天气雷达 (CINRAD/CC) 全体扫基数据。昆明新一代天气雷达位于昆明市西山区棋盘山顶 (102°34'42" E, 25°03'06" N), 海拔 2 484 m, 扫描模式 VCP21; 该雷达体扫周期 6 min, 径向分辨率 250 m, 对龙卷、冰雹等中小尺度强天气的有效监测和识别距离大于 200 km, 可覆盖 14 个县市区 (图 1)。(2) 2010—2023 年 6—8 月冰雹灾情记录用于分析各环流型下的冰雹灾害程度, 该数据来自中国人寿财产保险股份有限公司昆明市中心支公司提供的逐日受灾记录, 用于防雹季结束后向政府提交的效益评估报告, 可信度较高。(3) 欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 再分析资料, 用于环流分型及环境参数计算, 物理量包括水平风场、位势高度场、湿度场、2 m 气温及近地面湿度等, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率 1 h。

雷达资料用来确定昆明夜雹的开始时间和降雹地点, 并用于辅助识别冰雹云移向, 此项工作由昆明市人工影响天气中心牵头, 各县市区气象局配合, 汇总后的冰雹灾情记录时间精度为 1 h, 落雹点精确到乡、镇、街道。

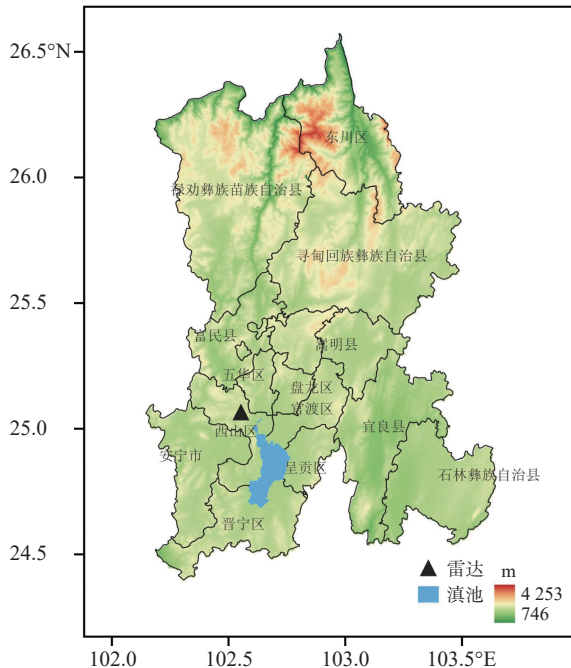


图 1 昆明行政区划、高程 (色斑) 及天气雷达站分布

Fig. 1 Administrative divisions, elevation (shaded) and distribution of weather radar station in Kunming

1.2 研究方法

1.2.1 夜间降雹记录及夜间降雹日定义

当日任一乡镇出现降雹记录, 该日即被记录为一个冰雹日 (汤兴芝等, 2023)。本文对夜间降雹记录限定为 20 时 (北京时, 下同) 至次日 08 时范围内出现的降雹, 全市范围内各乡、镇、街道至少出现一次夜间降雹记录, 即被定义为一个夜间降雹日。同一个夜间降雹日的降雹记录越密集, 代表当天的灾害越严重, 受灾范围越广。

1.2.2 T 模态斜交主成分分析法及质量评估

COST 733 是利用多种统计方法创建和评估天气及环流型分型的开源软件包 (Philipp et al., 2016)。本文使用 COST 733 内置的 PCT 方法对夜间降雹日 ERA5 再分析资料的 20 时 500 hPa 位势高度场进行计算, 并将获得的主成分分别投影到各子集数据集上。本文选取 90°—115°E, 10°—40°N 作为研究区域, 该范围位于影响滇中天气过程的水汽源地及环流系统活动区 (万云霞等, 2020)。

解释聚类方差 (Explained cluster variance, ECV) 是一种用于评估聚类结果质量的指标, 它反映了聚类分析中组间差异的显著程度, 是确定最优分型个数的重要依据。ECV (记为 E_{CV}) 通过比较组内平方和 (Within sum of square, 记为 W_{SS}) 与总平方和 (Total sum of square, TSS, 记为 T_{SS}) (Huth et al., 2008) 得到

$$E_{CV} = 1 - \frac{W_{SS}}{T_{SS}} \quad (1)$$

其中 W_{SS} 为组内平方和, 即每个聚类中所有数据点与其质心之间欧式距离的平方和。例如某次聚类共产生了 k 个聚类中心, 以第 j 个聚类中心为例 ($1 \leq j \leq k$), 需计算样本点 X_i 与质心 $\bar{X}_j$ 之间的欧式距离平方和 D^2 , 计算公式 (Huth et al., 2008) 如下

$$W_{SS} = \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} D^2(X_i, \bar{X}_j) \quad (2)$$

其中, W_{SS} 越小, 表明组内数据点越集中, 聚类效果越好。 T_{SS} 为总平方和, 即所有数据点与全局质心之间欧式距离的平方和。其中 n 为样本总数, m 为每个样本中的一维展开的数据点数, X_{il} 即为第 i 个样本 ($1 \leq i \leq n$) 中的第 l 个数据点 ($1 \leq l \leq m$) 对全局质心 $\bar{X}_j$ 的距离。 T_{SS} 反映了数据的总变异性, 其计算公式 (Huth et al., 2008) 如下

$$T_{SS} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m (X_{il} - \bar{X}_l)^2 \quad (3)$$

ECV 取值介于 0 到 1 之间。ECV 越接近 1, 说明组间差异越显著, 聚类效果越好; 反之, ECV 越接近 0,

说明组间差异不明显,聚类效果较差。在实际应用中,通常绘制 ECV 随分型个数变化的曲线,选择 ECV 显著增加但随后趋于平缓的点作为最优分型个数。

具体操作方法是:将夜间降雹日的 20 时 500 hPa 位势高度数据整合为一个 netcdf 文件,循环输入拟分型数 (本文选择 2~9),使用 COST 733 进行分析计算,并记录不同分型数对应的 E_{CV} 值及差值 $\Delta E_{CV(i,j)}$ (i 为分型数 n , j 为分型数 $n+1$),选择 ΔE_{CV} 最大时对应的分型数 j 作为最优结果,此时对应输出文件已包含了每个夜间降雹日 500 hPa 位势高度场的分型类别 $m(1 \leq m \leq j)$ 。

1.2.3 环境参数

昆明境内各县区海拔落差大,最高海拔 4 247 m,最低海拔 746 m,大部分地区海拔 1 500~2 800 m,选用单站探空分析全市的冰雹潜势特征或有欠缺,特别是对于北部高海拔山区环境参数差别大,因此这里选择再分析资料。

采用 700 hPa 散度和比湿 (反映低层气流辐合和水汽含量)、700—500 hPa 温度直减率、抬升指数 (Lifted index, LI)、 K 指数、对流有效位能 CAPE 等环境参数分析冰雹天气环境条件,其中判断气块潜在不稳定的抬升指数 LI (记为 L_I) 的计算公式 (刘健文等, 2005) 为

$$L_I = T_{500} - T_{P500} \quad (4)$$

式中, T_{500} 代表 500 hPa 环境温度, T_{P500} 表示气块从地面抬升至 500 hPa 的温度。

此外,文中还采用抬升凝结高度 (Lifted Condensation Level, LCL)、对流凝结高度 (Convective Condensation Level, CCL) 和自由对流高度 (Level of Free Convection, LFC) 进行环境条件分析。以上环境参数计算时刻以北京时间 20 时为准。

2 夜间降雹的时空分布及雹云移向

2010—2023 年昆明 6—8 月共有 73 个夜间降雹日,夜间降雹记录累计 98 次。降雹主要集中在当日 20—23 时,该时段占总量的 85.7%,次日 00—08 时降雹较少,占总量的 14.3%;6、7、8 月夜间降雹日数分别占总降雹日的 18.4%、42.9%、38.8% (图 2a)。其中寻甸县的夜间降雹日数和累计受灾面积占比最高,累计 47 个夜间降雹日,夜间降雹导致的受灾面积 7172.2 hm²,占总体的 74.9%,远高出其余县市区的受灾统计 (图 2b)。一方面寻甸国土面积 3 588.38 km² (位居昆明第二位),较大地理范围使得其灾害记录相对较多;且作为滇中地区经农作物重要生产基地,雹灾造成损失也相对偏重,仅 2023 年全县烤烟种植面积 9260 hm²,其中遭受冰雹灾害烟田面积达 626.7 hm² (中共寻甸县委党史研究室, 2024)。

6 月降雹记录主要集中于寻甸地区,冰雹云移向以偏西气流为主导 (图 3a);7 月降雹点呈现南扩趋势,伴随偏东、偏北气流的增强,昆明南部的晋宁、石林等地相继出现不同频次的降雹 (图 3b);8 月降雹范围进一步扩展至昆明西南部的安宁地区 (图 3c)。夜间降雹的发生与西风和东风的交替引导密切相关,其中偏西气流主导的雹灾随季节进程呈减弱趋势,影响范围逐步收缩至寻甸地区;而偏东气流引发的冰雹强对流天气则呈现增多态势,其影响范围沿东北—西南方向逐月扩张。

昆明夏季冰雹云的移动路径主要有偏东、西南、西北三条,其中西南路径影响范围最广 (王菲等, 2024)。昆明夜间冰雹云移动方向主要有偏西型和偏东型两大类,受季节变化和地理位置的影响,6—8 月,西移的夜间降雹日数呈增加趋势,而东移的夜间降雹日数在 7 月后大幅减少;此外,静止型降雹集中在 7 月 (图 4)。结合昆明地形地貌特征,昆明北部高

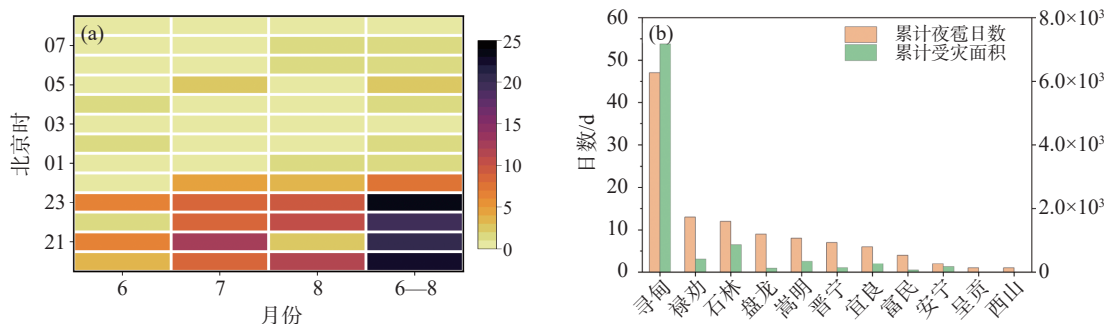


图 2 昆明 2010—2023 年 6—8 月夜间不同时段降雹日数 (色斑, 单位: d) 热图 (a) 和各区累计夜间降雹日数及农田受灾面积 (单位: hm²) (b)

Fig. 2 (a) Heat map of nighttime hail days (shaded, unit: d) at different times and (b) cumulative nighttime hail days and affected farmland area (unit: mu) of administrative districts in Kunming in June to August during 2010–2023

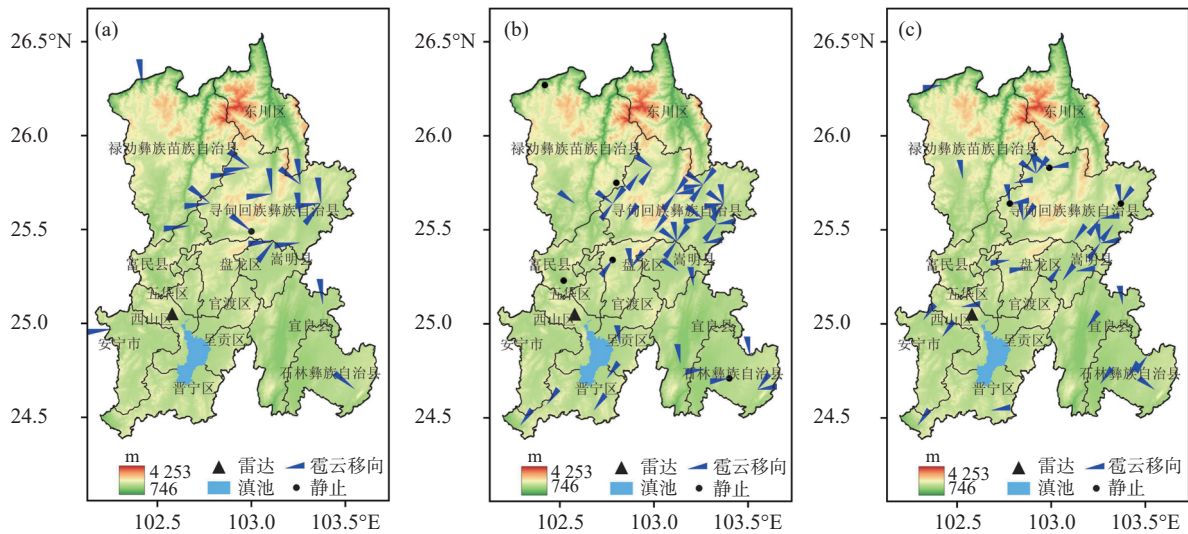


图3 昆明2010—2023年6月(a)、7月(b)、8月(c)夜间降雹的空间分布及冰雹云移向统计

Fig. 3 Spatial distribution of nighttime hail records and corresponding hail cloud movement directions statistics in Kunming on (a) June, (b) July and (c) August during 2010–2023

海拔山区冰雹云移向变化较大,而昆明南部冰雹云移向特征均一性较高。在各区域中,寻甸县冰雹记录最多,且移动方向变化显著,向西或向东移动的中小尺度对流云团均可能降雹。

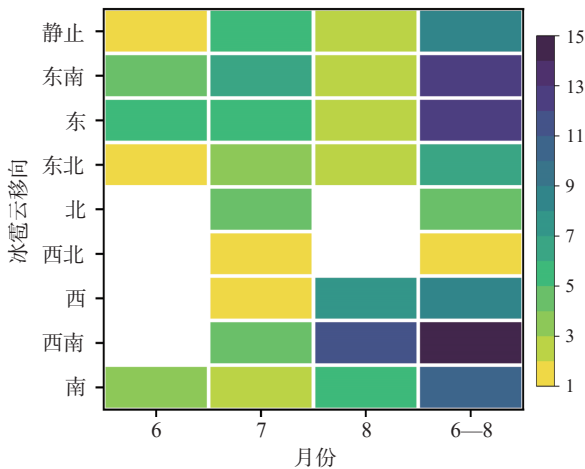


图4 2010—2023年6—8月昆明不同冰雹云移向的夜间降雹日数(色斑,单位:d)热图

Fig. 4 Heat map of nighttime hail day (shaded, unit: d) of different hail cloud movement directions in Kunming in June to August during 2010–2023

3 夜间降雹的天气分型及特征

为客观分析夜间降雹时的环流特征,使用COST 733对降雹日20时500 hPa位势高度场进行分析,循环设置分型个数为2~9,将整合后的netcdf文件进行多次计算,解释聚类方差ECV用以评估分型结果,以 ΔE_{CV} 最大时确定该类为最优分型(Huth et al., 2008)。73个夜间降雹环流场最终被分为6类(图5a)。前三类是影响降雹的主要环流,方差占比由高到低分别

是30.1%(环流类型3),21.9%(环流类型2)和20.5%(环流类型1)(图5b),其中环流类型3和2的对流系统来向分别以偏西、东北型为主,而环流类型1的对流系统来向差异较大,主要以偏北、静止类型为主(图5d),三类环流均可表现寻甸县夜间降雹频发的特点(图5c)。

对3、1、2类环流型的中低层环流场进行合成分析,分别得到了孟加拉湾槽型环流(以下简称T型环流)、印度低压型环流(以下简称D型环流)以及孟加拉湾-中国南海双低压型(以下简称2D型环流)(图6)。其中,T型环流占比为30.1%,该环流型500 hPa印度半岛东北部为小范围低压环流控制,低涡南侧的偏西气流影响中南半岛北部,700 hPa昆明东北部有风速辐合(图6a、d)。在这种环流背景下,冰雹云多以正西和西北来向为主(图5d),降雹点集中在寻甸、禄劝、宜良、石林(图5c)。

D型环流占比20.5%,该环流型表现为昆明上空700 hPa为西南气流控制(图6b);但500 hPa印度半岛的低压环流加深且位置偏西,高原东侧偏北气流南下影响昆明地区(图6e)。中低层风向差异较大,此时冰雹云来向变动较大,主要以北向、静止类型为主(图5d),降雹点集中在寻甸、盘龙、石林(图5c)等地区。

2D型环流占比21.9%,该环流型700 hPa印度洋近赤道地区的西南风与中国南海偏东风在滇中空形成辐合切变,昆明上空500 hPa和700 hPa有东风风速辐合(图6c、f)。冰雹云来向以东北向为主(图5d),降雹点集中在寻甸、晋宁(图5c)。

表1为昆明2010—2023年6—8月经PCT分型

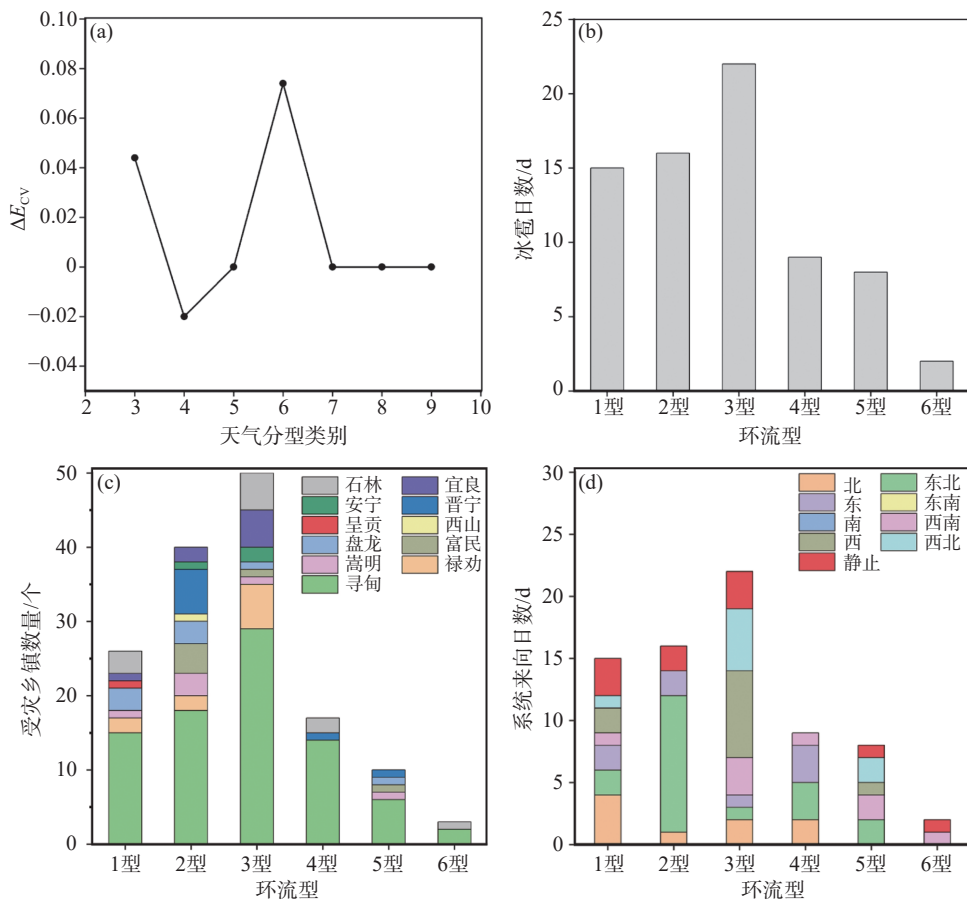


图 5 2010—2023 年 6—8 月昆明夜间降雹天气 20 时 500 hPa 位势高度场 PCT 分解后的天气分类别对应 ΔE_{CV} 变化图 (a)、最优分型下不同环流型的夜间冰雹日数 (b) 和受灾乡镇数 (c) 及系统来向日数 (d)

Fig. 5 (a) Variation of ΔE_{CV} corresponding to the category of weather types derived from PCT decomposition of the 500 hPa geopotential height field, (b) nighttime hail days under different circulation types in the optimal classification, (c) towns affected by hail disasters, and (d) days of weather system migration on night hail weather in Kunming at 20:00 BT in June to August during 2010–2023

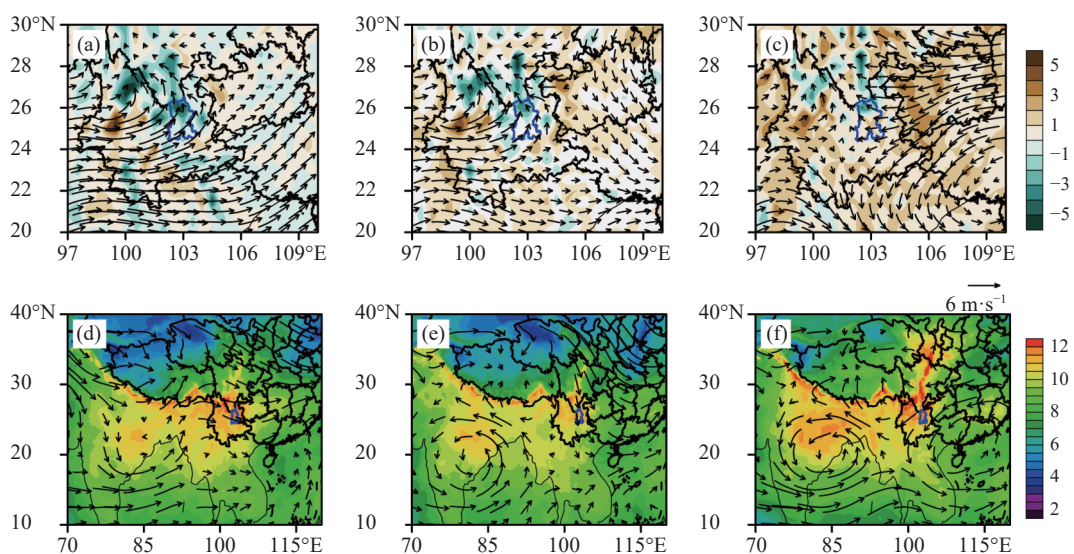


图 6 2010—2023 年 6—8 月 PCT 分型后环流 T (a, d)、D (b, e)、2D (c, f) 型合成的 700 hPa 风场 (矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和散度 (填色, 单位: $\times 10^5 \text{ s}^{-1}$) 分布 (a—c) 及 500 hPa 风场 (矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 700 hPa 比湿场 (色斑, 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分布 (d—f) (蓝线区域为昆明市)

Fig. 6 The (a—c) distributions of 700 hPa wind field (vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence (shaded, unit: $\times 10^5 \text{ s}^{-1}$) for PCT-classified circulation types (a, d) T, (b, e) D, and (c, f) 2D, (d—f) distributions of 500 hPa wind field (vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and 700 hPa specific humidity field (shaded, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in June to August during 2010–2023. (The blue line area in the figure represents Kunming)

后 T、D 和 2D 型环流逐月的夜间降雹日数及受灾乡镇数量,其中 T 型环流个例最多且主要发生在 6—7 月, D 型环流影响较为均匀,各月之间的偏差较小, 2D 型环流主要影响 7—8 月冰雹过程。对比平均受灾乡镇数量发现, 7 月 2D 型冰雹环流更易造成较大危害,日平均受灾乡镇 12.9 个。

表 1 2010—2023 年 6—8 月经 PCT 分型后 T、D 和 2D 型环流型昆明的夜间降雹日数 (单位: d) 及日平均受灾乡镇数 (单位: 个)

Table 1 Night hail days (unit: d) and the daily average towns (unit: num) affected by nighttime hail disasters under the T, D, 2D circulation types of PCT decomposition in Kunming in June to August during 2010—2023

月份	环流型	夜间降雹日数/d	日平均受灾乡镇数/个
6月	T	9	1.9
	D	4	2.3
	2D	/	/
7月	T	9	3.6
	D	5	5.2
	2D	7	12.9
8月	T	4	6
	D	6	6.3
	2D	10	4.4

注: “/”表示无。

4 夜间降雹 3 种主要环流型的环境参数分析

环境参数同时受到季节转变和大气环流类型的影响。应用 ERA5 再分析数据,对昆明市 (101.4°—

104.4°E, 24°—26.8°N) 范围内的环境参数进行区域平均,得到 T、D、2D 型逐月的夜间降雹日的环境参数箱线图 (图 7)。当受 T 型环流控制时,强劲的西南季风有助于低层水汽输送,6—8 月 700 hPa 比湿中位数分别为 $10.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $11.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $10.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7e)。能量指数显示,7 月滇中整层大气积聚了较强的不稳定能量,CAPE 中位数达到 $754.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 8 月的大气能量整体减弱,CAPE 降至 $640.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但仍存在较高的不稳定条件和较好的湿度条件, K 指数达到 50°C (图 7a、b), 且 LI 中位数为 -0.4°C (图 7c), 这可能受中层大气干空气侵入影响,使得 500 hPa 附近气块与环境温差较小。6—8 月 700—500 hPa 的温度差分别为 15.6°C 、 14.2°C 和 15.0°C , 在三类环流中处于较低水平 (图 7d)。LCL、CCL、LFC 逐月演变显示, LCL 和 CCL 中位数呈下降趋势 (图 8a、b), 7—8 月的 LFC 中位数基本持平, 维持在 550 hPa 附近 (图 8c)。由于 7 月个例较多, 导致整体波动较大。当对比实际冰雹日和平均乡镇受灾数量后发现, 7 月冰雹日数较多, 但强度略低于 8 月, 这种情况与 CCL 和 LCL 的变化基本一致。较低的抬升或凝结高度, 能让大气中的水汽更容易凝结成冰粒, 促进大范围降雹事件发生。

D 型环流的典型特征表现为孟加拉湾上空受偏南风控制, 由于低涡中心位置偏西且配合中纬度高空槽后较强偏北风, 西南暖湿气流中南半岛的输入较弱。对比 7—8 月 T 型和 D 型环流的低层水汽输送情况, D 型环流 700 hPa 比湿中位数普遍较低, 8 月 700 hPa 比湿为 $9.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7e)。然而, 7 月的

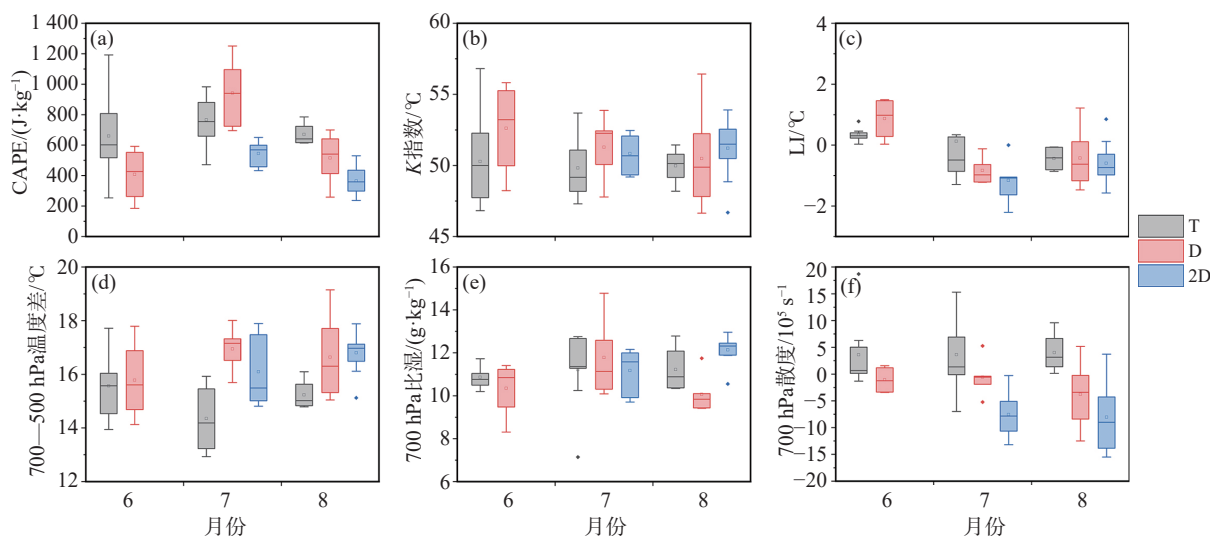


图 7 2010—2023 年 6—8 月昆明 T、D、2D 型夜间降雹日 CAPE (a)、K 指数 (b)、LI (c)、700—500 hPa 温度差 (d)、700 hPa 比湿 (e) 和 700 hPa 散度 (f) 箱线图 (“箱”中的短线和矩形分别代表中位数和均值)

Fig. 7 Boxplots of (a) CAPE, (b) K index, (c) lifting index, (d) temperature difference of 700-500 hPa level, (e) specific humidity at 700 hPa level and (f) divergence at 700 hPa level about T, D, 2D circulations on nighttime hail days in Kunming in June–August from 2010 to 2023.

(The short line and rectangle of boxplot represent the median and mean, respectively)

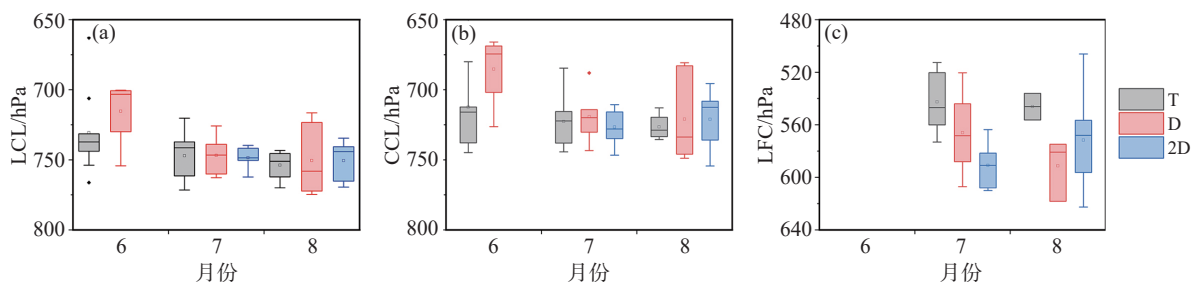


图 8 2010—2023 年 6—8 月昆明 T、D、2D 型的夜间降雹日 LCL (a)、CCL (b) 和 LFC (c) 箱线图

Fig. 8 Boxplots of (a) the lifted condensation level (LCL), (b) the convective condensation level (CCL) and (c) the level of free convective (LFC) about T, D, 2D circulations on nighttime hail days in Kunming in June–August from 2010 to 2023

CAPE 中位数高至 $940.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 强于 T 型环流 (图 7a)。这可能是局地加热受风场影响较弱, 因此 7—8 月 D 型环流中低层的温度直减率中位数较高 (17.2°C 和 16.3°C), 使气块更易达到云底 (图 7d), 7 月 LI 中位数低至 -1.0°C (图 7c)。而这种加热抬升也促进了近地层散度场发展加深 (7—8 月中位数分别为 $-0.6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 和 $-3.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$) (图 7f)。对比 T 型和 D 型环流的特征高度, 除 6 月 T 型环流的 LCL (737 hPa)、CCL (716 hPa) 明显偏低外 (图 8a、b), 7—8 月 D 型环流的特征高度下降, 8 月 LCL 和 CCL 分别降至 758 hPa 和 734 hPa, 对流活动加强。

2D 型环流造成 700 hPa 滇中地区出现东西向的风场辐合, 这与 T、D 型环流有所不同。在该环流类型下, 冰雹灾害主要集中在 7—8 月 (分别为 7 个和 10 个冰雹日), 且 7 月的灾害更为严重, 日均乡镇受灾数达 12.9 个。尽管其 CAPE 和 K 指数与 T、D 型相比无明显差异, 甚至 7 月的 CAPE 偏弱 ($568.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) (图 7a、b), 但 LI (-1.1°C) 和 700 hPa 散度 ($-7.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$) 均反映出强辐合特点, 配合较好湿度条件 (7、8 月 700 hPa 比湿中位数为 $11.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 有助于垂直上升运动发展及湿空气饱和凝结。此外, 7 月的 LCL、CCL 和 LFC 在三类环流中处于最低值, 分别为 749 hPa、728 hPa、591 hPa (图 8), 可造成更大范围、更强的冰雹灾害。

5 结论与讨论

本文基于昆明市 C 波段天气雷达探测数据、昆明市冰雹灾害统计数据及 ERA5 再分析资料, 对 2010—2023 年 6—8 月昆明市夜间降雹的时空分布特征、冰雹云移向及环流背景进行了分析, 并利用 T 模态斜交主成分分析法对夜间降雹环流进行分型, 探讨了前三类典型环流的环境参数, 得到主要结论如下:

(1) 2010—2023 年 6—8 月昆明共 73 个夜间降雹日, 降雹记录累计 98 次。其中 85.7% 发生在 20—23 时; 昆明各县市区中以寻甸县夜间降雹日数最多

(47 d), 受灾面积最大。

(2) 驱动夜间冰雹云发展和移动的环境气流以偏西风为主 (39.4%), 其次为偏东风 (31.6%)、正北风 (13.2%)、静止型 (10.5%) 和正南风 (5.3%)。偏西风型冰雹记录主要集中于 6—7 月, 而偏东风型则集中在 6—8 月, 且呈现逐月增加特点。空间分布上, 6 月夜间降雹主要发生在北部高海拔县区; 在东北气流引导下, 7 月冰雹落区向南扩展至石林、晋宁等低海拔区域; 8 月落区进一步向西延伸至安宁。

(3) 基于 PCT 方法对 500 hPa 位势高度场进行分解, 将大气环流背景划分为 6 类, 其中前三类分别为: 孟加拉湾槽型 (T 型, 30.1%)、印度低压型 (D 型, 20.5%) 和孟加拉湾-中国南海双低压型 (2D 型, 21.9%)。T 型和 D 型环流分别与偏西、偏北风型冰雹关系密切, 致灾程度较轻; 2D 型环流则引导东北风型冰雹, 致灾程度较重, 7 月日均乡镇受灾数达 12.9 个。

(4) 受中低层风场切变影响, T 和 D 型环流背景下偏西、偏北型雹灾居多, 大气层结高能, 7 月 CAPE 中位数分别为 $754.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $940.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中低层气温直减率可至 15°C 以上, 不稳定条件较好; 而 2D 型环流背景下易形成东北来向的雹云, 降雹集中在 7—8 月且受灾重, 700 hPa 东风辐合 (散度为 $-7.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$) 促进了湿空气 (比湿 $\geq 12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 饱和凝结, 对流增强, 特征高度层降低。

滇中昆明地处东亚与南亚夏季风的交汇区, 其 6—8 月冰雹过程受两类季风系统共同影响。本文针对夜间冰雹天气的分析发现, 2D 型环流背景下的冰雹过程致灾性更强, 这与南海低压和孟加拉湾低压在水汽输送及环境参数上的配置密切相关。此外, 地表加热可通过地气辐射改变大气层结, 可能使得触发昼夜间冰雹过程的环境参数阈值差异较大。因此, 分析不同环流配置和冰雹频次的定量关系时, 应关注特殊地形 (山坡、谷地等) 下的降雹过程, 为精准预报提供理论支持。

参考文献 (References):

- 陈芳,冯金燕.2022.一次冰雹天气过程的探空潜势预报和雷达预警指标检验[J].*高原山地气象研究*,42(S2):95–99. Chen F, Feng J Y. 2022. Sounding potential forecast and radar warning index test for a hail weather process [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 42(S2):95–99 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2022.ZZ.017
- 黄麟媛,罗喜平,罗雄,等.2024.黔南州冰雹天气环流特征分析[J].*山地气象学报*,48(3):80–85. Huang L Y, Luo X P, Luo X, et al. 2024. Analysis of circulation characteristics of hail weather in Qiannan [J]. *Journal of Mountain Meteorology*,48(3):80–85 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003-6598.2024.03.011
- 蒋雯玉,王占良,王菲.2021.昆明地区冰雹灾害事件的大气层结特征分析[J].*云南地理环境研究*,33(1):19–26. Jiang W Y, Wang Z L, Wang F. 2021. Characteristics of atmospheric junction of hail disaster events in Kunming area [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 33(1):19–26 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7852.2021.01.005
- 雷瑜,黄武斌,黎倩,等.2022.不同天气分型下甘肃河东地区强冰雹天气多普勒雷达产品特征[J].*干旱气象*,40(2):234–243. Lei Y, Huang W B, Li Q, et al. 2022. Characteristics of doppler radar products of strong hails under different weather classification in Hedong region of Gansu Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*,40(2):234–243 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-02-0234
- 李强,苗爱梅,王洪霞,等.2023.山西省雷暴大风的统计特征及概念模型[J].*干旱气象*,41(3):423–433. Li Q, Miao A M, Wang H X, et al. 2023. Statistical characteristics and conceptual models of thunderstorm gales in Shanxi Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*,41(3):423–433 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-03-0423
- 刘彬,邹灵宇,李晓鹏,等.2022.云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J].*气象*,48(11):1402–1417. Liu B, Zou L Y, Li X P, et al. 2022. Analysis on environmental characteristics of thunderstorm gales in Yunnan [J]. *Meteorology Monthly*,48(11):1402–1417 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.07.1502
- 刘健文,郭虎,李耀东,等.2005.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社,82. Liu J W, Guo H, Li Y D, et al. 2005. Fundamentals of calculating physical quantities in weather analysis and forecasting [M]. Beijing:China Meteorological Press, 82
- 闵颖,孙绩华,王曼,等.2022.静止锋东退背景下云南文山“4.28”局地强风暴过程分析[J].*暴雨灾害*,41(2):151–157. Min Y, Sun J H, Wang M, et al. 2022. Analysis of “4.28” sever local storm caused stationary front of Wenshan in Yunnan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(2):151–157 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.005
- 苏永玲,何立富,巩远发,等.2011.京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J].*气象*,37(2):177–184. Su Y L, He L F, Gong Y F, et al. 2011. A study of temporal-spatial distribution and synoptic characteristics of severe convective weather in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. *Meteorology Monthly*,37(2):177–184 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.007
- 孙敏,赵畅,吴君婧,等.2023.一次夜间 β 中尺度弓形回波形成机制机理研究[J].*气象*,49(10):1187–1202. Sun M, Zhao C, Wu J J, et al. 2023. Study on the formation mechanism of a nocturnal meso- β scale bow echo [J]. *Meteorology Monthly*,49(10):1187–1202 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.03.2201
- 唐佳,张昆,唐明晖,等.2023.低层暖平流强迫下两次大冰雹超级单体风暴结构特征分析[J].*暴雨灾害*,42(1):37–46. Tang J, Zhang K, Tang M H, et al. 2023. Structural characteristics of two heavy hail supercell storms forced by low-level warm advection [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(1):37–46 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-022
- 汤兴芝,黄治勇,张荣,等.2023.2010–2020年全国冰雹灾害事件时空分布特征[J].*暴雨灾害*,42(2):223–231. Tang X Z, Huang Z Y, Zhang R, et al. 2023. Temporal and spatial distribution characteristics of hail disaster events in China from 2010 to 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(2):223–231 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-089
- 万云霞,晏红明,金燕,等.2020.低纬高原水汽输送特征及其对云南气候的影响[J].*高原气象*,39(5):925–934. Wan Y X, Yan H M, Jin Y. 2020. Characteristics of water vapor transport over the low-latitude highlands and its effect on Yunnan climate [J]. *Plateau Meteorology*, 39(5):925–934 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00082
- 王菲,王占良,潘娅婷.2024.昆明市冰雹灾害特征及路径研究[J].*云南地理环境研究*,36(3):63–70. Wang F, Wang Z L, Pan Y T. 2024. Research on the characteristics and paths of hail disaster in Kunming city [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*,36(3):63–70 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7852.2024.03.010
- 尹丽云,李俊,李辰,等.2023.云南不同季节和区域冰雹云回波特征和预警指标对比[J].*灾害学*,38(4):71–79,113. Yin L Y, Li J, Li C, et al. 2023. Comparison of hail cloud echo characteristic and warning index in different seasons and regions in Yunnan province [J]. *Journal of Catastrophology*,38(4):71–79,113 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.013
- 袁潮,杨文艳,易希延,等.2020.渤海湾北部地区冰雹天气分型及预报方法研究[J].*沙漠与绿洲气象*,14(5):69–75. Yuan C, Yang W Y, Yi X Y, et al. 2020. Basic synoptic situation classification and forecasting methods of hail in the northern Bohai Bay [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,14(5):69–75 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.05.009
- 袁春梅,周筠珺.2024.我国西南地区春季典型雹暴观测与数值模拟研究[J].*高原山地气象研究*,44(2):19–31. Yuan C M, Zhou Y J. 2024. Observation and numerical simulation of typical hailstorm in Southwest China [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(2):19–31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.02.003
- 张思豆,段婧,张腾飞,等.2025.2012–2023年云南冰雹时空分布特征[J].*气象科技*,53(5):761–773. Zhang S D, Duan J, Zhang T F, et al. 2025. Spatiotemporal distribution characteristics of hail in Yunnan from 2012 to 2023 [J]. *Meteorological Science and Technology*,53(5):761–773 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20240280
- 张腾飞,张杰,张思豆,等.2018.云南南支槽线雹暴中尺度特征及环境条件[J].*高原气象*,37(4):958–969. Zhang T F, Zhang J, Zhang S D, et al. 2018. Mesoscale characteristics and environmental conditions

- of south trough squall-line hailstorm in Yunnan [J]. *Plateau Meteorology*,37(4):958–969 (in Chinese). doi:[10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00093](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00093)
- 中共寻甸县委党史研究室,寻甸县地方志编纂委员会办公室. 2024. 寻甸年鉴[M]. 德宏: 德宏民族出版社:239. Xundian County committee of the Communist Party of China party history research office, Xundian County local chronicles compilation committee office. 2024. Xundian Yearbook [M]. Dehong: Dehong Nationalities Press:239 (in Chinese)
- García-Ortega E, López L, Sánchez J L. 2011. Atmospheric patterns associated with hailstorm days in the Ebro Valley, Spain [J]. *Atmospheric Research*,100(4):401–427. doi:[10.1016/j.atmosres.2010.08.023](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.08.023)
- Gascon E, Merino A, Sanchez J L, et al. 2015. Spatial distribution of thermodynamic conditions of severe storms in southwestern Europe [J]. *Atmospheric Research*,164:194–209. doi:[10.1016/j.atmosres.2017.01.011](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.011)
- Giordani A, Kunz M, Bedka K M, et al. 2024. Characterizing hail-prone environments using convection-permitting reanalysis and overshooting top detections over south-central Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*,24(7):2331–2357. doi:[10.5194/nhess-24-2331-2024](https://doi.org/10.5194/nhess-24-2331-2024)
- Huth R. 2000. A circulation classification scheme applicable in GCM studies [J]. *Theoretical and Applied Climatology*,67(1-2):1–18. doi:[10.1007/s007040070012](https://doi.org/10.1007/s007040070012)
- Huth R, Beck C, Philipp A, et al. 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*,1146(1):105–152 doi:[10.1196/annals.1446.019](https://doi.org/10.1196/annals.1446.019)
- Luo X Y, Huang X G, Fei J F, et al. 2023. Role of topography in triggering elevated thunderstorms associated with winter cold fronts over the eastern Yunnan - Guizhou plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,128(8):e2023JD038640. doi:[10.1029/2023JD038640](https://doi.org/10.1029/2023JD038640)
- Merino A, García-Ortega E, López L, et al. 2013. Synoptic environment, mesoscale configurations and forecast parameters for hailstorms in Southwestern Europe [J]. *Atmospheric Research*,122:183–198. doi:[10.1016/j.atmosres.2012.10.021](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.021)
- Philipp A, Beck C, Huth R, et al. 2016. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software [J]. *International Journal of Climatology*,36(7):2673–2671. doi:[10.1002/joc.3920](https://doi.org/10.1002/joc.3920)
- Wade A R, Parker M D. 2021. Dynamics of simulated high-shear, low-CAPE supercells [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,78(5):1389–1410. doi:[10.1175/JAS-D-20-0117.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0117.1)
- Wu X K, Qie X S, Yuan T, et al. 2016. Meteorological regimes of the most intense convective systems along the southern Himalayan front [J]. *Journal of Climate*,29(12):4383–4398. doi:[10.1175/JCLI-D-14-00835.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00835.1)
- Zhang Y M, Su A F, Cui L M, et al. 2025. Radar climatology of summer convective activities over Zhengzhou City and its adjacent areas in 2017-2022 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*,156(2):1–24. doi:[10.1007/s00704-024-05256-3](https://doi.org/10.1007/s00704-024-05256-3)

(责任编辑 张文)