

2023年滇西南一次强风暴过程形成机制 与雷达回波特征分析¹

高正南¹ 陈卓¹ 姚自伟¹ 何泉威¹ 段玮² 杨素雨³

1 普洱市气象局, 云南普洱 665000

2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

3 云南省气象台, 昆明 650034

摘要: 利用 C 波段天气雷达产品和多源观测资料, 对 2023 年 3 月 13—15 日滇西南持续性强风暴天气过程及昼夜不同时段 2 个典型风暴单体进行分析, 结果表明: 强风暴天气过程发生在地面冷锋东退、低(高)空西南急流建立并加强、中层西北气流持续侵入的环流背景下, 风暴在中、高空急流交角附近初生并发展加强。滇西南地区低层暖平流与中层冷平流持续且稳定的输送, 加剧了环境大气不稳定层结, 对流有效位能为 $826.6\sim 1481.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0\sim 3\text{ km}$ 、 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变分别为 $14.4\sim 19.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $27.6\sim 34.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 高度层结不稳定和强垂直风切变为致灾性风暴初生、发展和维持提供了良好的环境条件。昼发型风暴由暖平流强迫偏南风抬升配合地面弱辐合线耦合触发, 无量山脉两侧显著的水热差异使得风暴的发展得以增强, 而夜发型风暴则初生于中低空斜压锋生区附近, 在东移过程中由迎风坡强迫抬升作用触发, 并在西南低空急流配合下发展加强。在昼夜差异和不同地形强迫影响下, 风暴单体雷达回波特征各异, 1 号单体风暴具有入流缺口、有界弱回波区 (BWER) 和“V”型缺口等雷达回波形态特征, 径向速度表现出中气旋结构, 降雹时段内平均组合反射率为 60.5 dBz , 平均垂直累积液态水 (VIL) 为 $36.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均液态水含量密度 (VILD) 为 $4.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2 号单体风暴回波则表现有显著的后侧入流急流和前侧入流缺口, 回波对地形响应特征更为明显, 跨越澜沧江后强回波面积、VIL 和 VILD 出现跃增, VILD 由 $1.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增大至 $4.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; 风暴单体生命史及地面灾害性天气表现迥异, 1 号单体风暴生命史长达 6 h, 影响期间持续伴随降雹, 过境前后地面出现雷暴大风天气, 后期降水相态转变为冰雹混合 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水; 2 号单体风暴生命史为 3 h, 仅在单体发展后期出现降雹, 其他类型对流天气并不剧烈。

关键词: 强风暴, 对流初生, 超级单体风暴, 回波特征, 地形, 昼夜差异

中图分类号: P458.2

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.031902

基金项目: 中国气象局复盘专项 (FPZJ2023-119)、云南省气象局创新团队 (2022CX01)、国家自然科学基金项目 (42365001) 和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 (STIAP202229、STIAP202233) 共同资助
2024 年 3 月 4 日收稿; 2025 年 3 月 19 日收修定稿

第一作者: 高正南, 主要从事灾害性天气预报预警方法研究. E-mail: 1481371923@qq.com

通讯作者: 姚自伟, 主要从事中短期天气预报及短时临近预报研究. E-mail: 523340118@qq.com

Analysis of the Formation Mechanism and Radar Echo Characteristics of a Severe Storm in Southwest Yunnan in 2023

GAO Zhengnan¹ CHEN Zhuo¹ YAO Ziwei¹ HE Quanwei¹ DUAN Wei² YANG Suyu³

1 Meteorological Bureau of Pu'er City, Yunnan, Pu'er 665000

2 Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

3 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

Abstract: Based on C-band weather radar products and multi-source observations, the persistent severe storm weather process and two major rainstorm monomers in southwest Yunnan was analyzed on 13-15 March 2023, and the results were as followed. The severe storm weather process occurred in the circulation background of the eastward retreat of the cold front on the ground, the establishment and intensification of the southwesterly rapids in the low (upper) air, and the persistent intrusion of the mid-level northwesterly flow, and the storm singletons mainly developed and intensified near the angle of the intersection of the mid- and high-altitude rapids. The continuous and stable transport of the low-level warm advection and the mid-level cold advection in southwest Yunnan intensifies the unstable stratification of the ambient atmosphere. The effective potential energy of convection is 826.6-1481.6 J·kg⁻¹, the vertical wind shear from 0 to 3 km becomes 14.4-19.9 m·s⁻¹, and that from 0 to 6 km becomes 27.6-34.5 m·s⁻¹, and the unstable stratification of the high-level stratification and the strong shear environment are the main reasons for the development and maintenance of the catastrophic storms. The daytime storm was triggered by the coupling of southerly wind uplift forced by warm advection with weak surface convergence lines. The significant thermal and moisture contrast on either side of the Wuliang Mountains enhanced the storm's development. In contrast, the nighttime storm initially formed near the mid-to-low-level baroclinic frontogenesis zone and was triggered by upslope lifting during its eastward movement, intensifying under the influence of the low-level southwesterly jet. Under the influence of diurnal variations and diverse topographic forcing, the radar echo characteristics of the storm cells exhibited distinct features. Storm monomer No.1 displayed radar echo morphologies such as an inflow notch, a bounded weak echo region (BWER), and a "V" notch, with radial velocity indicating a mesocyclone structure. During the hailfall period, the average composite reflectivity was 60.5 dBz, the average vertically integrated liquid (VIL) was 36.1 kg·m⁻², and the average VIL density (VILD) was 4.0 g·m⁻³. In contrast, Storm monomer No.2 exhibited a prominent rear-inflow jet (RIJ) and a

forward-flank inflow notch (FIN), with more pronounced topographic responses in its echo, after crossing the Lancang River, the strong echo area, VIL, and VILD increased abruptly, with VILD rising from $1.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ to $4.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. The life cycles and surface severe weather manifestations of the storm cells differed significantly. Cell 1 had a lifespan of 6 hours, accompanied by continuous hailfall during its influence period, with thunderstorm winds observed before and after its passage. The precipitation phase transitioned to a mix of hail and short-term heavy rainfall exceeding $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ in the later stage. Cell 2 had a lifespan of 3 hours, with hailfall occurring only in the later stage of its development, and other types of convective weather were less intense.

Key words: strong storm, convective initiation, super storm monomer, echo characteristics, terrain, diurnal differences

引 言

强风暴天气突发性强且影响剧烈，一直以来都是灾害性天气研究领域的重点课题（唐明晖等，2023；高丽等，2021）。风暴单体，尤其是超级单体风暴作为局地强对流天气主要形式之一，常常产生暴雨、冰雹、雷暴大风/下击暴流和龙卷等气象灾害，造成严重的人员伤亡和经济损失（卜茂宾等，2018；覃丹宇和方宗义，2014；Reif and Bluestein, 2018）。因此，准确地预报和预警强风暴天气，减少由其带来的气象及次生灾害是短时临近预报服务的重难点，也是预报业务高质量发展的关键之一（Wilson et al, 2018；段鹤等，2014）。

强对流发生潜势和对流初生（CI）的研究揭示出不同类型风暴生成环境及风暴前期自身结构的差异性，提高了中小尺度灾害性天气可预报性和预报准确性。王秀明等（2014）对各种中尺度层结不稳定在风暴发生过程中的作用进行了详细论述；许爱华等（2014）基于强对流天气发生的热力、动力潜势条件，将中国中东部强对流天气分为冷平流强迫类、暖平流强迫类、斜压锋生类、准正压类、高架对流类等5类，并给出了基本解释；崔新艳等（2021）认为CI是强对流天气开始活动的标志，一般分为基于地面触发的CI和基于地面以上高度触发的CI两种（Wilson and Roberts, 2006），但真实的CI触发条件往往受下垫面地形、干线、边界层辐合线和低空急流等多重因素耦合影响（Klingele et al, 1987；苏涛等，2020）。此外，具有高时空分辨率的多普勒天气雷达产品已成为分析研究强风暴结构特征的重要资料，诸多学者基于雷达资料对风暴初生和发展演变机制、时空分布与短时临近预报技术等方面进行了深入研究（曹舒娅等，2021；段鹤等，2011；俞小鼎等，2012）。就

风暴的发展演变而言，普通对流单体风暴通常包括塔状积云、成熟和消亡 3 个阶段，而超级单体风暴作为高度组织化的风暴，具有深厚持久的中气旋这一独特的动力学特征，其生命周期更长，造成的灾害性天气也更为突出（陈明轩等，2013；韩颂雨等，2017；吴海英等，2017；于怀征等，2020）。

滇西南地处低纬度高原南部，哀牢山、无量山自北向南延伸，山脉平均海拔 2 km 以上，山地面积占比 95% 以上，地形高低起伏落差明显（张腾飞等，2023）；冬-春-初夏时节，南支槽前暖湿气流与南下冷空气在此处交汇或对峙，风暴天气突发频发，而风暴影响区域难以把握，往往导致出现严重灾情（张腾飞等，2016；尹丽云等，2023；彭启洋等，2023）。2023 年 3 月 13—15 日，滇西南出现一次影响持久、波及面广、气象灾害类型多样的强风暴天气过程。统计 2015 年以来普洱伴有冰雹的风暴天气发现，连续 3 d 以上的过程仅有 4 例。此次过程主客观融合短期预报效果欠佳，仅反映出 3 月 13 日 1 d 的强风暴天气。此外，过程期间风暴在凌晨、午后、深夜等不同时段均有发生，同一时段有多条独立风暴轨迹，叠加复杂的下垫面影响，加大了此次过程的预报难度。为探究滇西南复杂地形下强风暴发生的天气背景和对流发展维持机理，本文利用 C 波段天气雷达产品、多源实况数据和欧洲中期天气预报中心第五代全球大气再分析资料（ERA5）再分析资料，从风暴路径、CI 和发展环境、风暴单体回波特征以及单体生命史特征等方面进行分析，以期进一步了解高原山地环境下风暴发生机理，提升对此类强对流天气的预报预警能力。

1 资料及实况介绍

1.1 资料

本文所用的观测资料包括 2023 年 3 月 13—15 日滇西南地区普洱（海拔 1926 m）和临沧（海拔 2499 m）2 部 C 波段天气雷达资料、常规地面气象站逐小时观测资料、思茅站探空资料以及 ERA5 再分析资料。其中，雷达资料的分辨率为 6 min；ERA5 再分析资料的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 1 h（Hersbach et al., 2020）。

1.2 强风暴天气实况

2023 年 3 月 13—15 日，滇西南地区出现一次持续时间长、影响范围广、致灾性强的风暴天气过程。天气现象以冰雹和雷暴大风为主，局部伴有 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水。其主要影响区域在普洱，景东、镇沅、景谷、墨江等 9 个县（区）的 44 个乡镇监测到冰雹（图 1b, 1c, 局部），最大冰雹直径为 20 mm。过程期间地面出现 7 级以上阵风 47 站次，最大瞬时风速 $27.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （10 级）。

此次过程共造成普洱 3.04 万人受灾，农经作物受灾面积达 5101.5 hm，损坏房屋 348 间，直接损失达 3790 余万元。

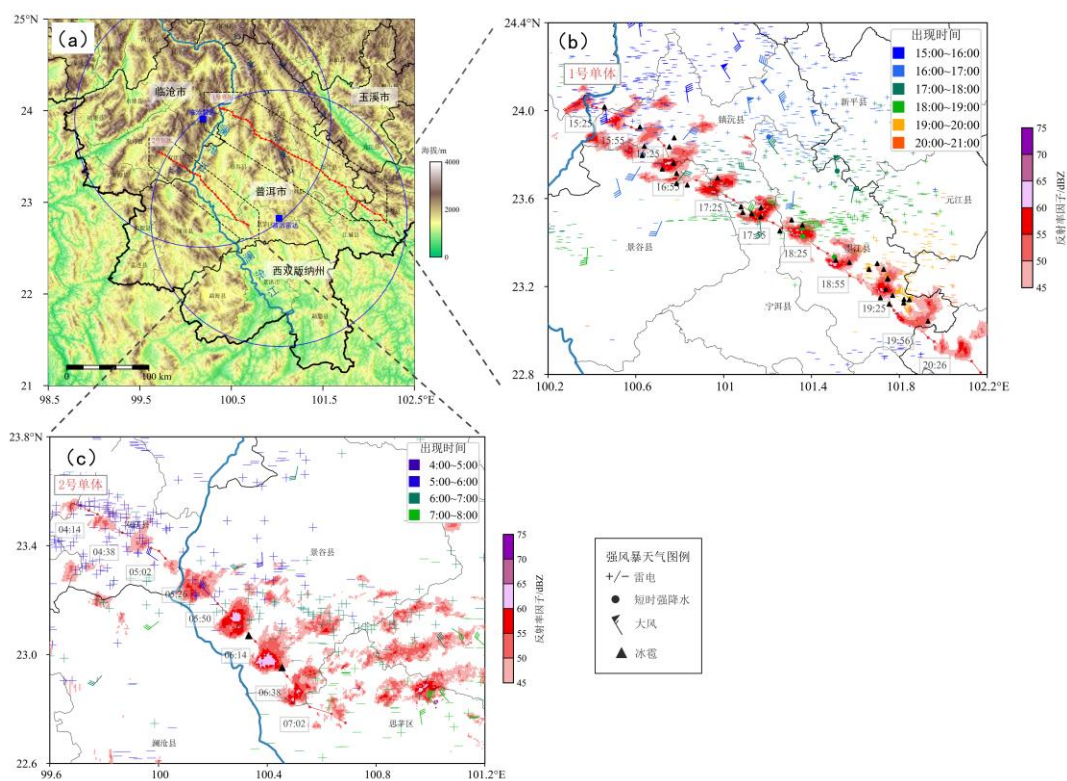
1.3 风暴路径及影响

2023 年 3 月 13—15 日滇西南出现多条自西向东移动的风暴轨迹，风暴多在临沧北部、缅甸东北部初生，东移至普洱境内发展旺盛，形成冰雹、雷暴大风等灾害性对流天气。其主要路径如下：

(1) 13 日 15 时（北京时，下同）由云县经景东—镇沅—景谷—宁洱—墨江后移至绿春，最终进入越南国境（图 1a, 1b 中 1 号单体）；(2) 13 日 16 时由镇沅西部至墨江北部；(3) 13 日 23 时后由缅甸东北部经澜沧中部，分南北 2 支，分别影响景谷和西双版纳州；(4) 14 日 04 时由耿马经景谷至思茅（图 1a, 1c 中 2 号单体）；(5) 15 日 18 时后由西双版纳州经思茅至江城；其中，(1) 和 (2) 由同一风暴母体分裂生成。此次过程风暴单体众多，但发生时段可以大体分为昼发和夜发两类，为探究过程期间风暴发生发展机制，本文选取 1、2 号单体风暴作为昼夜不同影响时段的典型风暴进行详细分析。

1 号单体风暴由线状风暴分裂形成，生命史长达 6 h，风暴中心轨迹整体呈直线，但移动至海拔 2 km 以上山地时轨迹呈现“一波三折”特征，这可能是风暴气流受山脉地形扰动导致；此外，风暴质心位置趋向于地势较低和更为平坦的区域（图 1a）。1 号单体风暴伴有显著的强对流天气，普洱域内风暴过境之处均出现冰雹，涉及 5 县 15 乡镇；出现 7 站 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上短时强降水；地闪主要分布于线状对流一侧，以负闪为主，夹杂有零星正闪。值得注意的是，13 日 17:25 前短时强降水仅出现 1 站，而风暴翻越无量山后却出现 6 站，这可能与单体发展阶段改变有关。1 号单体风暴过境前（18:00）宁洱梅子站出现 $12.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南风，风暴过境时梅子站地面转为西北风，风速为 $12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （图 1b），分别对应风暴过境前后的入流与出流。

2 号单体风暴为孤立普通单体，14 日凌晨在双江东部受地形影响，风暴质心少动，后经澜沧江移入普洱境内加强，风暴生命史 3 h。与 1 号单体风暴不同的是，2 号单体风暴影响期间除冰雹外，其他对流天气较弱，未出现短时强降水，雷电主要以分散的正闪为主（图 1c）。



注：■表示雷达位置。

图1 (a) 滇西南地形(填色)、天气雷达位置(■)及150 km探测半径(蓝色圆)和(b, c) 2023年3月(b) 13日1号单体风暴、(c) 14日2号单体风暴强度(填色)、路径(红色线)和地面强风暴天气实况

Fig.1 (a) Topography (colored), weather radar stations and detection radius of 150 km (blue circle) in southwest Yunnan, and (b,c) intensity (colored), track (red line) and surface severe storm weather facts (b) storm monomer No.1 on 13 and (c) storm monomer No.2 on 14 in March 2023

2 环流背景与大气环境特征

2.1 环流背景

2023年3月13日08时, 200 hPa西南高空急流轴位于云南北部至贵州北部一线, 最大风速超过 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 云南南部位于高空急流入口右侧的辐散区(图2)。500 hPa欧亚中高纬度地区为两槽两脊形势, 东亚大槽主体已东移入海, 我国大部地区为槽后西北气流控制。在孟加拉湾北部 90°E 附近有南支槽东移, 云南西部为高压脊, 云南中南部处在脊前西北风急流区内, 滇西南位于急流入口右侧的辐散区中。云南中南部为干区控制, 温度露点差(ΔT)为 $8\sim 15^\circ\text{C}$, 温度槽呈东北—西南走向, 位于云南东南部至老挝北部一线, 滇西南处在干冷区内。700 hPa 孟加拉湾北部南支槽较 500 hPa 偏西,

呈现后倾槽结构，云南大部受中南半岛反气旋环流西侧叠加南支槽前西南气流影响，西南气流利于输送水汽及能量，温度脊呈东北—西南走向，位于云南中部至缅甸中部一线，滇西南处在暖区内， ΔT 小于 4°C 的湿区主要位于云南中部以东地区。此时，地面冷锋已西推至临沧—普洱一线，海平面气压 1020 hPa 线推至普洱西部。午后随着滇西南地面快速升温，冷锋东退至无量山东侧，13 日 20 时，高空急流在滇南稳定维持且向中南半岛北部至华南地区发展加强，500 hPa 东亚大槽尾部推至华南地区， 20°N 附近南支槽减弱消失，脊前西北急流减弱南移，强度为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，700 hPa 滇西风速加大至 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，西南急流建立（图略）。

过程期间，随着东亚大槽东移南压，200 hPa 和 500 hPa 高、中空急流也逐渐向我国东南地区发展，700 hPa 西南急流加强，近地面层 850 hPa 偏东南风向西推进。强风暴出现在高、中空急流入口右侧与低空急流入口左侧，配合 700 hPa 暖湿区与 500 hPa 干冷区叠加影响，形成有利的热力和动力配置。

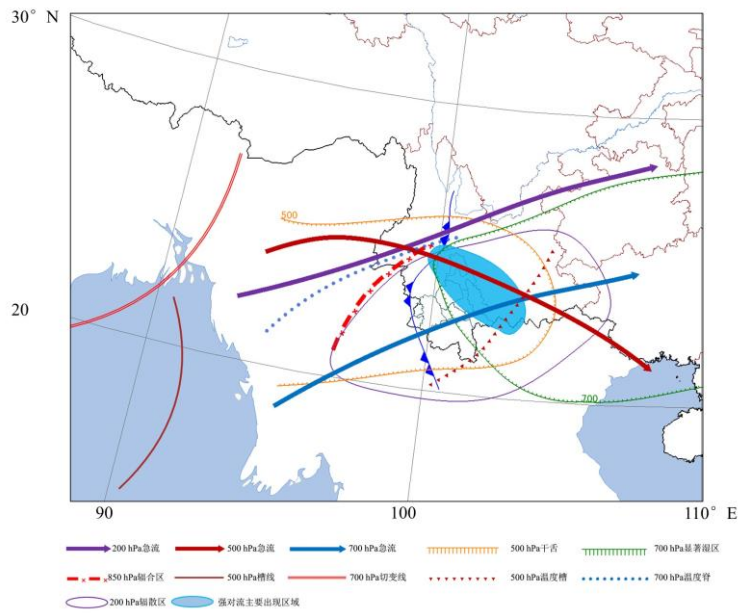


图 2 2023 年 3 月 13 日 08 时滇西南主要天气影响系统配置

Fig.2 Major weather affecting system configuration in southwest Yunnan at 08:00 BT 13 March 2023

2.2 大气环境特征

2.2.1 探空潜势

选用经实时气压、2 m 温度和露点温度订正后的思茅 3 月 13 日 08 时和 20 时的探空资料分析风暴发生前后的大气层结状况（图 3），可以发现：过程期间滇西南上空大气处于层结不稳定状态。13 日 08 时近地面平均 ΔT 为 6.4°C ，850~500 hPa 为 3.7°C ，400~300 hPa 为 15.4°C 。 $T-\ln p$ 图中层结曲

线和状态曲线呈“X”型分布（图 3a），大气整层可降水量（PWAT）为 27.2 mm，850~500 hPa 温差（ T_{85} ）为 29.1°C，对流有效位能（CAPE）达 1481.6 J·kg⁻¹，0~3 km 垂直风切变（SHR3）为 14.4 m·s⁻¹，0~6 km 垂直风切变（SHR6）达 34.5 m·s⁻¹（表 1）。俞小鼎等（2020）研究指出此种环境场配置较易出现风暴天气；另外，高空风向随高度顺转后逆转再顺转，表明大气低层和高层有暖平流输送、中层有冷平流侵入，加剧了大气的的不稳定度。13 日 20 时，随着 850 hPa 东南风西推，近地面层水汽条件改善，探空曲线呈“喇叭口”型分布，上干下湿特征明显（图 3b），PWAT 为 25.6 mm，CAPE 为 826.6 J·kg⁻¹，达到夜间较强的不稳定能量条件， T_{85} 达 29.8°C，低空急流建立并发展增强，SHR3 增大至 19.9 m·s⁻¹，SHR6 为 27.6 m·s⁻¹，期间沙氏指数 $SI < -3.5^\circ\text{C}$ ， K 指数 $> 30^\circ\text{C}$ （表 1），满足段鹤等（2014）提出的滇西南出现强风暴天气的大气物理条件。

综上，中等强度或以上的 CAPE 和深厚强垂直风切变有利于超级单体风暴等的形成发展和维持。此外，俞小鼎（2014）指出，冰雹的融化层更接近于湿球温度的 0°C 层（WBZ）高度，融化层高度太高，冰雹降落中融化过程越久，地面出现冰雹概率越小。此次过程中 WBZ 海拔高度在 3.3~3.5 km，距离地面约 2 km，-20°C 层高度 ($H_{-20^\circ\text{C}}$) 在 8.5 km 以下，满足冰雹出现条件。

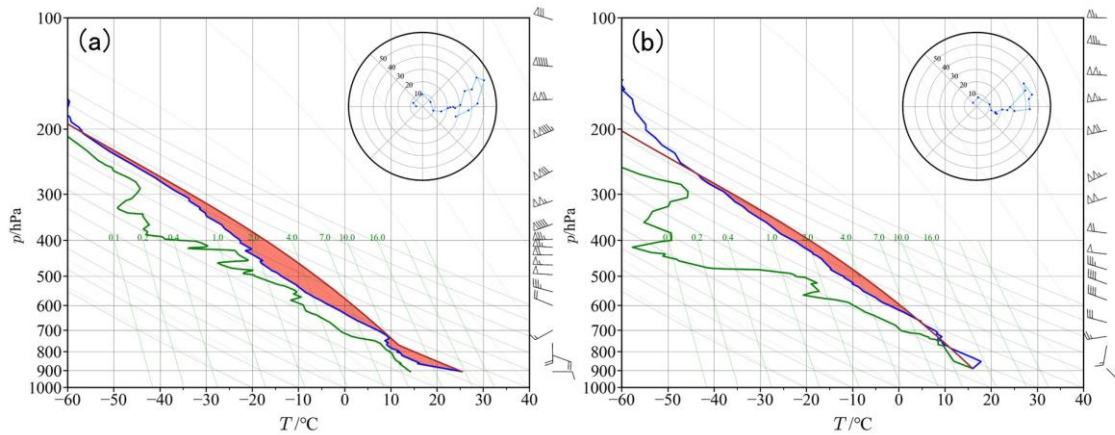


图 3 思茅站 2023 年 3 月 13 日 (a) 08 时、(b) 20 时探空曲线

Fig.3 Sounding at Simao Station at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 13 March 2023

表 1 2023 年 3 月 13 日不同时次思茅高空站订正后环境参数

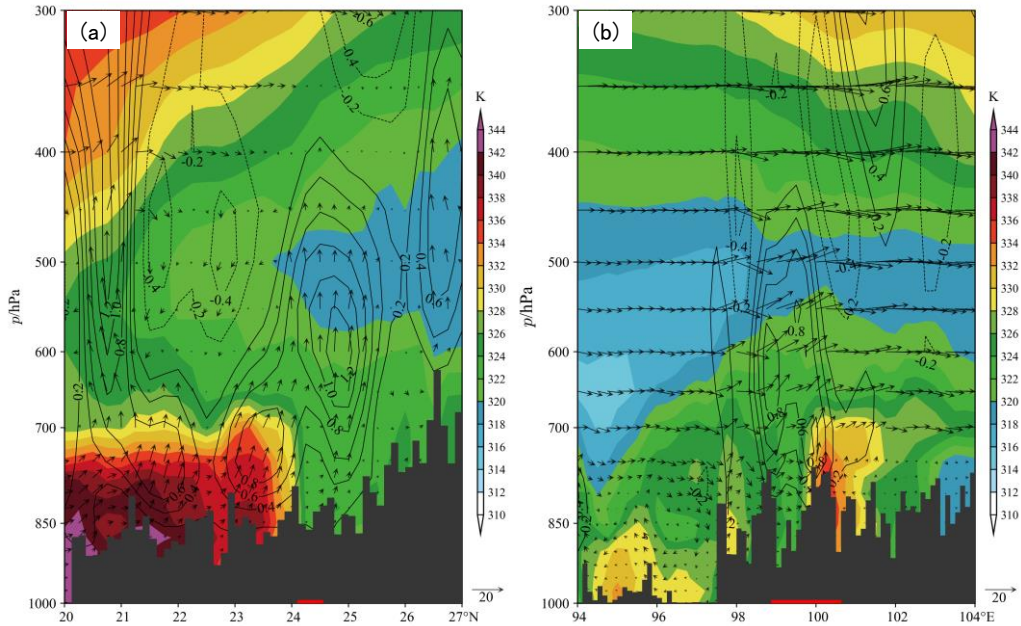
Table 1 Revised environmental parameters of Simao high-altitude station at different times on 13 March 2023

时间/BT	CAPE/(J·kg ⁻¹)	$K/^\circ\text{C}$	$SI/^\circ\text{C}$	PWAT/mm	$T_{85}/^\circ\text{C}$	SHR3/(m·s ⁻¹)	SHR6/(m·s ⁻¹)	WBZ/km	$H_{-20^\circ\text{C}}$ /km
08:00	1481.6	32.40	-3.54	27.2	29.1	14.4	34.5	3.46	8.28
20:00	826.6	34.50	-3.58	25.6	29.8	19.9	27.6	3.37	8.47

2.2.2 强风暴形成机制

利用 ERA5 再分析资料分别沿 13 日白天和 14 日凌晨风暴初生地作假相当位温 (θ_{se}) 及相关气象要素的经向与纬向垂直剖面, 结果如图 4、5 所示。对于昼发型风暴初生环境, 3 月 13 日 13 时经向剖面中 700 hPa 以下 24°N 以南均为 θ_{se} 高值区, 中心值超过 344 K, 22°N 以北则为 θ_{se} 低值区, 中心值小于 330 K, 此外, 南风分量对局地增温增湿和增加大气层结不稳定性起到关键作用, 23°~25°N 为一支略向北倾斜的上升气流柱, 高度达 400 hPa, 并在上升气流柱左侧构成垂直环流正涡度区, 23°N 低层 750 hPa 和 25°N 中层 600 hPa 有暖平流中心, 中心值分别为 $0.8 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$, 与上升运动大值区域重叠 (图 4a)。从纬向垂直剖面来看 (图 4b), 700 hPa 以下纬向风分量较弱, 100°~101°E 为高 θ_{se} 区, 中心值为 334 K; 暖平流自近地层延伸至 450 hPa, 中低层无明显冷平流。综上, 13 日午后风暴初生地 (24.15°~24.50°N, 98.85°~100.56°E) 位于低层 θ_{se} 梯度大值区附近, 层结不稳定性高于周边环境大气; 中低空暖平流强迫偏南风抬升形成强烈上升的暖湿气流柱, 这符合许爱华等 (2014) 提出的低层暖平流强迫类强对流热、动力及抬升触发条件。

对于夜发型风暴初生环境, 14 日 03 时经向垂直剖面上 (图 5a), 750 hPa 以下 24°N 以南持续为高 θ_{se} 区, 南风在 24°N 迎风坡爬升发展为垂直上升气流, 上升气流与暖平流发展高度均在 600 hPa 以下, 600 hPa 以上存在偏北干冷气流下沉侵入, 冷、暖平流中心值在 $0.8 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 25°N 附近 700~600 hPa 存在锋生区, 相较于 13 日午后中低空大气斜压性增强、上升运动减弱 (图 5b)。从纬向垂直剖面来看 (图 5b), 随着夜间低空西南急流的建立和加强, 700 hPa 以下西风分量较 13 日午后明显增大, 并伴有风速辐合, 96°E 与 99°E 近地面为高 θ_{se} 区, 西风自 96°E 暖湿区域向东沿迎风坡爬升, 此时低空暖平流位于 97°~99°E 强上升运动区, 而冷平流则由高层向中低层输送。综上, 14 日凌晨风暴初生地 (23.40°~24.10°N, 99.00°~100.00°E) 则位于 θ_{se} 中心附近及中低空锋区暖性一侧; 西南急流在迎风坡强迫抬升及中低空锋生作用下形成上升气流, 满足斜压锋生类强对流不稳定条件及触发条件。



注：黑色阴影：地形，红色线段：风暴初生位置，下同。

图4 2023年3月13日13时滇西南风暴初生环境

(a) 沿 99.5°E 的 u 、 ω 合成风场 (风矢, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、温度平流 (等值线, 单位: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) 与 θ_{se} (填色) 经向垂直剖面; (b) 沿 24.25°N 的 v 、 ω 合成风场 (风矢, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、温度平流 (等值线, 单位: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) 与 θ_{se} (填色) 纬向垂直剖面

Fig.4 Primary environment of storms in southwest Yunnan at 13:00 BT 13 March 2023

(a) longitudinal profile of u and ω synthetic wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperature advection (contour, unit: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_{se} (colored) along (a) 99.50°E , (b) latitudinal profile of v and ω synthetic wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperature advection (contour, unit: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_{se} (colored) along 24.25°N

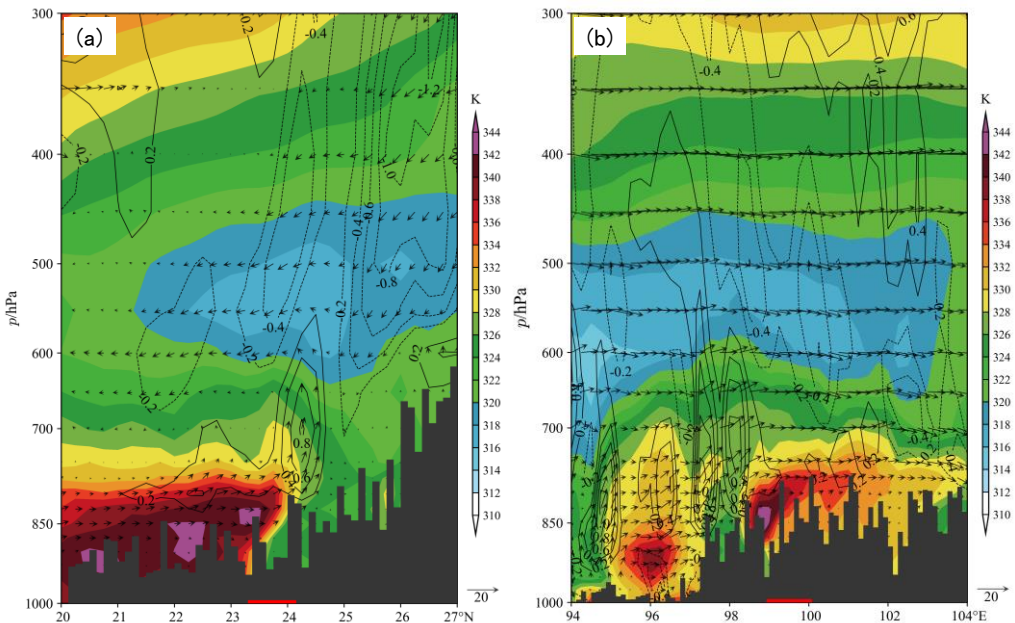


图 5 2023 年 3 月 14 日 03 时滇西南风暴初生环境

(a) 沿 99.0°E 的 u 、 ω 合成风场（风矢，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、温度平流（等值线，单位： $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ）与 θ_{se} （填色）经向垂直剖面；（b）沿 23.5°N 的 v 、 ω 合成风场（风矢，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、温度平流（等值线，单位： $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ）与 θ_{se} （填色）纬向垂直剖面

Fig.5 Primary environment of storms in southwest Yunnan at 03:00 BT 14 March 2023

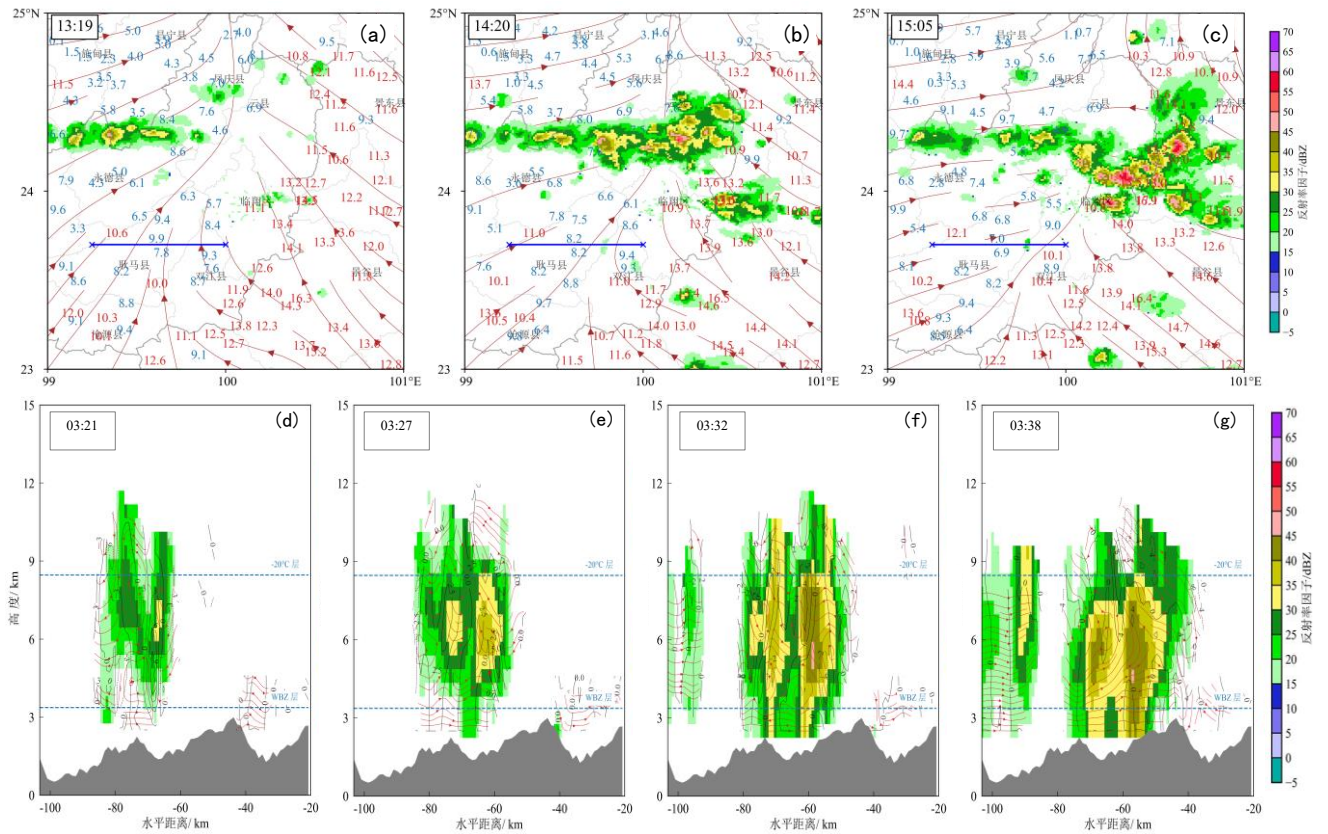
(a) longitudinal profile of u and ω synthetic wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperature advection (contour, unit: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_{se} (colored) along 99.00°E, (b) latitudinal profile of v and ω synthetic wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperature advection (contour, unit: $10^{-3}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_{se} (colored) along 23.50°N

3 风暴初生特征与增强机制

2023 年 3 月 13 日 13:00~15:00 冷锋东退至无量山脉附近，期间地面弱辐合线也随冷锋同步东退，山脉西侧站点 2 m 温度高于 25°C（图略），露点温度维持在 0.1~5.0°C， ΔT 超过 20°C，表明大气较为干燥；山脉东侧的温度较低，为 15°C 左右，但露点温度明显高于山脉西侧，为 10~16°C， ΔT 较小，表明大气湿润且近饱和（图 6a~6c），由此导致山脉两侧热力分布差异显著。昼发型风暴不仅初生于暖平流强迫偏南风抬升的暖湿气流柱内（图 4a），还伴随地面辐合线耦合触发，辐合线位于 CI 前侧约 20~50 km 处（图 6a）。14:20，初生风暴呈东西带状分布并快速东移，在辐合线附近不断触发新生回波并入风暴母体，回波面积不断增长，远离主回波区的东南侧有新生单体发展，风暴母体有向东南方向传播的趋势（图 6b）。15:05，回波主体由山脉西侧移入东侧，其东南侧的新生单体已并入母体回波，地面热力差异影响加剧，回波强度和面积出现爆发式增长，出现多个 55 dBz 以上的强中心，然后持续向东南方向传播和发展，回波形态逐渐由横向转竖（图 6c）。可以发现，暖平流强迫偏南风抬升与地面辐合线是 13 日午后风暴触发的主要原因，山脉两侧地面显著的热力差异则使风暴的发展得以增强。

就夜发型风暴而言，3 月 14 日凌晨，滇西南下垫面温度和露点温度分布差异已不明显，但低空西南急流建立并增强，中空西北急流逐步南移，大气垂直不稳定性加剧，中低空斜压性明显增强，CI 位于中低空锋生区附近。从 CI 与地形剖面（图 6a~6c 蓝色划线处）可以发现：03:21，新生回波底高位于 WBZ 以上，伸展高度超过 -20°C 层，垂直上升速度达 $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ （图 6d）；03:27，大于 30 dBz 的回波面积骤增，质心高度在海拔 5 km 以上，呈现高悬垂特征，风暴内部形成完整次级环流（图 6e）；03:32，回波中心强度迅速增至 49 dBz，垂直上升速度稳定在 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上，值得注意的是，受地形强

迫作用影响（图 5b），初生风暴内部纬向气流并没有立刻直接爬升翻越山地，而是在山地阻挡下近地层流场由西风转为东风，且伴随生成多个次级环流（图 6f）；03:38，初生风暴才开始在山前爬升，其内部紊乱的流场迅速调整为一致的斜升气流（图 6g）。综上，14 日凌晨风暴初生于中低空斜压锋生区附近，在东移过程中由地形强迫抬升作用触发，并配合西南低空急流的建立与加强，SHR3 增大至 $19.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，低层水平涡度扭曲成为垂直涡度，使得抬升运动变得剧烈和迅速。



注：图 6a~6c 中蓝色线为图 6d~6g 的剖面位置。

图 6 2023 年 3 月 (a~c) 13 日临沧雷达组合反射率 (填色)、13:00—15:00 整点流场 (红色流线) 和露点温度 (填值)，(d~g) 14 日沿 23.7°N 的回波反射率 (填色) 和地形剖面 (垂直风场: 红色矢量流场; 垂直速度: 黑色等值线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

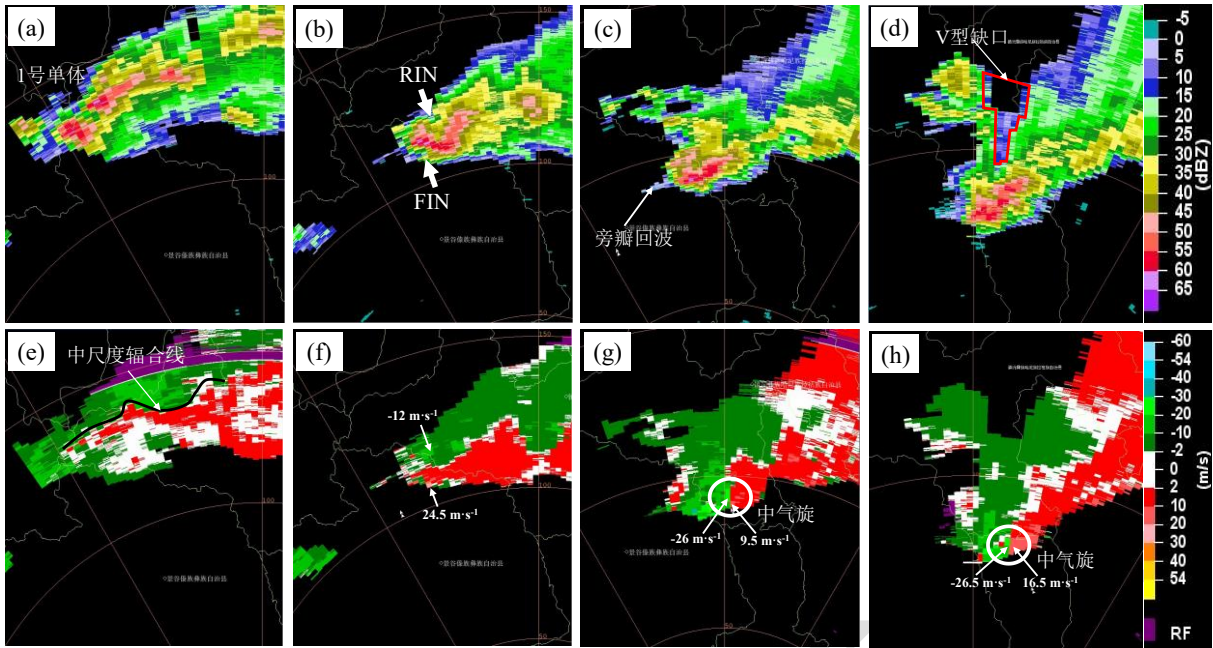
Fig.6 (a-c) Combined reflectivity (colored), 13:00 to 15:00 whole point flow field (red flow line), and temperature at the dew point (fill value) of the Lincang radar on 13 March (d-g) echo reflectivity (colored) and topographic profile (vertical wind field: red vector flow field; vertical velocity: black contour, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along 23.7°N on 14 March 2023

4 典型单体风暴回波特征分析

4.1 1号单体风暴

分析普洱天气雷达资料可以看出,受无量山脉两侧水汽和热力差异影响,2023年3月13日15:25线状风暴已经过临沧云县移入普洱境内,风暴内部对流单体之间存在合并发展。15:55,线状风暴内嵌有多个强中心,1号单体风暴开始脱离母体(图7a),径向速度场中仍以中层偏西北引导气流为主,但风暴内部的逆风区已逐渐增强发展形成中尺度辐合线(图7e)。16:25后,1号单体风暴与附近单体合并,形成强单体风暴,最大反射率超过60 dBz,回波中心结构呈现“V”字型钩状特征,强回波存在后侧入流缺口(RIN;高丽等,2021年),入流强度超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对应的1号单体风暴前侧有更强劲的前侧入流缺口(FIN),急流强度达 $24.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图7b,7f),之后单体向东南方向移动。17:25,回波移动至距离雷达站100 km处的无量山(镇沅段)附近,风暴中心粒子反射率增强,1号单体风暴左侧 0.5° 仰角出现明显旁瓣回波并有加强趋势(图7c),径向速度场上回波中心南侧生成中等强度的中气旋,转动速度达 $17.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,单体风暴加强为超级单体风暴(图7g),之后中气旋持续5个体扫以上(图7h),伸展高度超过 1.5° 仰角。17:43后,1号超级单体风暴后侧开始出现“V”型缺口(图7h),这是单体风暴内部大冰雹、大水滴等粒子对C波段雷达信号强烈衰减影响所致(夏文梅等,2016)。20:38后,随着1号超级单体风暴移出普洱,“V”型缺口特征消失(图略)。

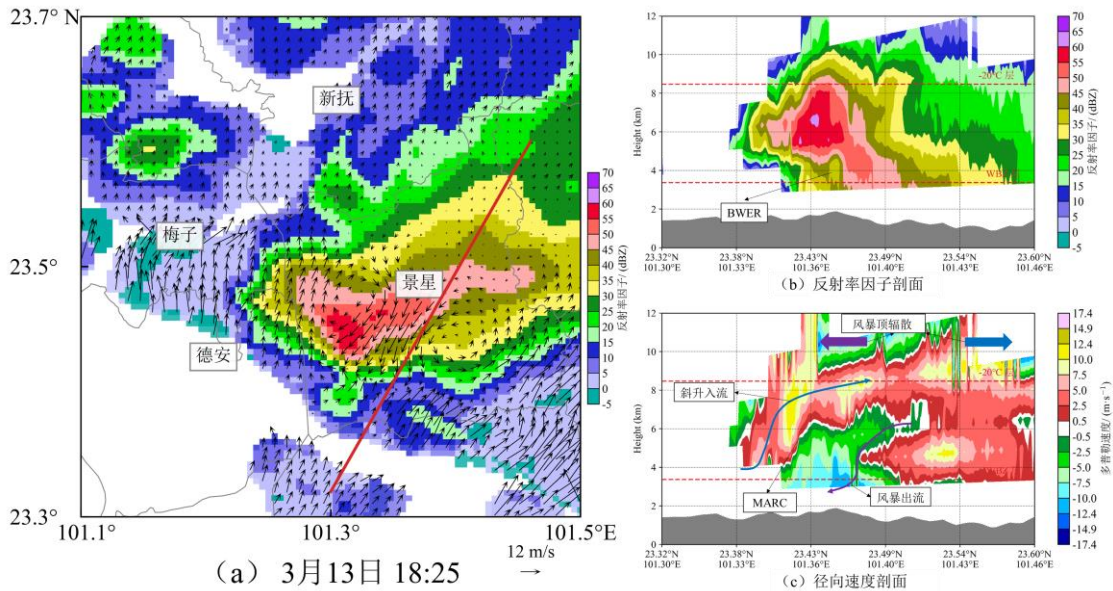
通过双多普勒雷达三维变分方法反演风场(罗云等,2021)可以发现,1号超级单体风暴发展至中后期(18:01—20:38),3.3 km等高平面上风暴速度场内中气旋减弱,转变为右侧气旋式旋转、左侧反气旋式旋转并存的一对涡旋(图8a),伸展高度超过5.4 km。气旋式涡旋对应强上升旋转运动区,雷达体扫表现出悬挂的强回波和反射率高梯度形成的有界弱回波区(BWER)特征,55 dBz以上强回波发展高度超过5 km,位于WBZ和 -20°C 层之间(图8b),有利于冰雹形成和增长;而反气旋式涡旋则位于强下沉运动区,雷达体扫特征表现为反射率因子最大值区域(图8a),与景星镇冰雹和大风落区相吻合(图1b)。从径向速度剖面来看(图8c),两涡旋之间4~8 km高度以上有一支强斜升入流,风暴出流位于入流右下方,入流与出流之间存在中层径向辐合(MARC),风暴顶表现为强辐散特征。上升与下沉气流独立分开的斜升运动使得单体持续时间延长,并有利于持续降雹。



注：图 g、h 中白色圆圈内为中气旋。

图 7 2023 年 3 月 13 日(a,e)15:55、(b,f)16:43、(c,g)17:25、(d,h)17:43 普洱雷达 0.5°仰角 (a,b,c,d) 反射率和 (e,f,g,h) 退速度模糊后径向速度

Fig.7 (a, b, c, d) Reflectivity factor and (e, f, g, h) radial velocity after develocity blur of Pu'er radar 0.5° elevation angle at (a, e) 15:55, (b, f) 16:43, (c, g) 17:25 and (d, h) 17:43 13 March, 2023



注：图 a 中红色实线为图 b、c 剖面位置。

图 8 2023 年 3 月 13 日 18:25 普洱雷达 3.3 km 等高平面位置显示产品(a) 反射率（填色）和水平风场（风矢），及同时刻(b)反射率和(c)径向风速剖面

Fig.8 (a) Constant Altitude Plan Position Indicator reflectivity factor (colored) and horizontal wind field (arrow), as well as simultaneous profiles of (b) reflectivity factor and (c) radial velocity with Pu'er radar 3.3 km altitude at 18:25 13 March 2023

从风暴各特征参量演变情况来看(图 9a),过程期间 1 号单体风暴回波的最大组合反射率(CR)、基于格点的最大 VIL 和最大 VILD 均显示出有利于冰雹出现的特征。地面降雹时段内 CR 平均为 60.5 dBz, VIL 平均为 36.1 kg·m⁻², VILD 平均为 4.0 g·m⁻³, 与段鹤等(2014)给出的滇南地区成熟阶段冰雹云 VIL 为 30~60 kg·m⁻²、VILD 为 3.0~6.5 g·m⁻³ 的统计值相当。强回波面积(反射率超过 55 dBz 的区域,下同)整体呈增长-维持-减小的趋势,在 1 号单体风暴发展形成中气旋(17:25)后强回波面积达到顶峰 69.2 km²。17:43 后随着强回波面积、VIL 和 VILD 逐渐减小,地面降水相态发生改变,由单一的冰雹转为冰雹混合短时强降水同时出现(图 1b)。对强回波质心进行轨迹跟踪发现(图 9b),单体风暴质心移速对地形高程阻挡作用的提前响应特征突出,风暴移至高海拔山地前 1~3 个体扫时移速减慢,在下山运动中和地势平缓的河谷盆地内移速相对较快,具体为 17:00 单体风暴移至海拔 2400 m 左右的无量山(宁洱段)前,中心移速由 17.4 m·s⁻¹ 减至 6.8 m·s⁻¹,越过无量山后,中心移速增至 15.7 m·s⁻¹。

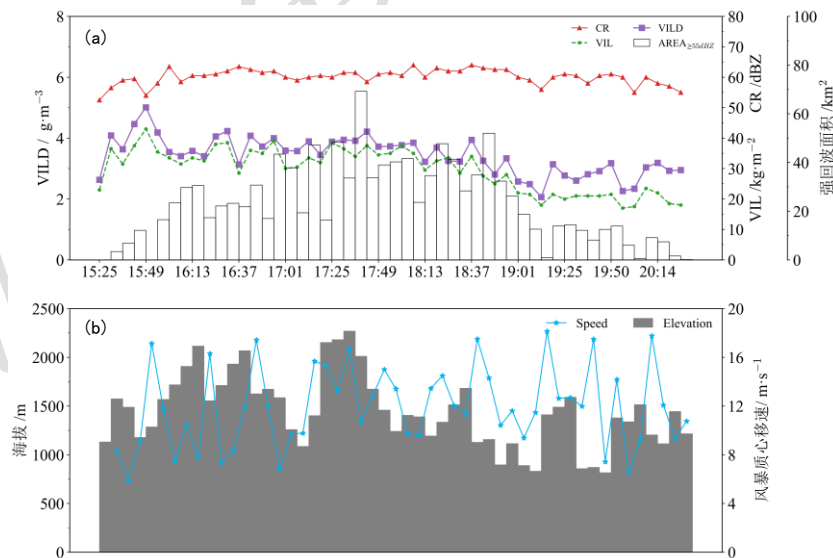
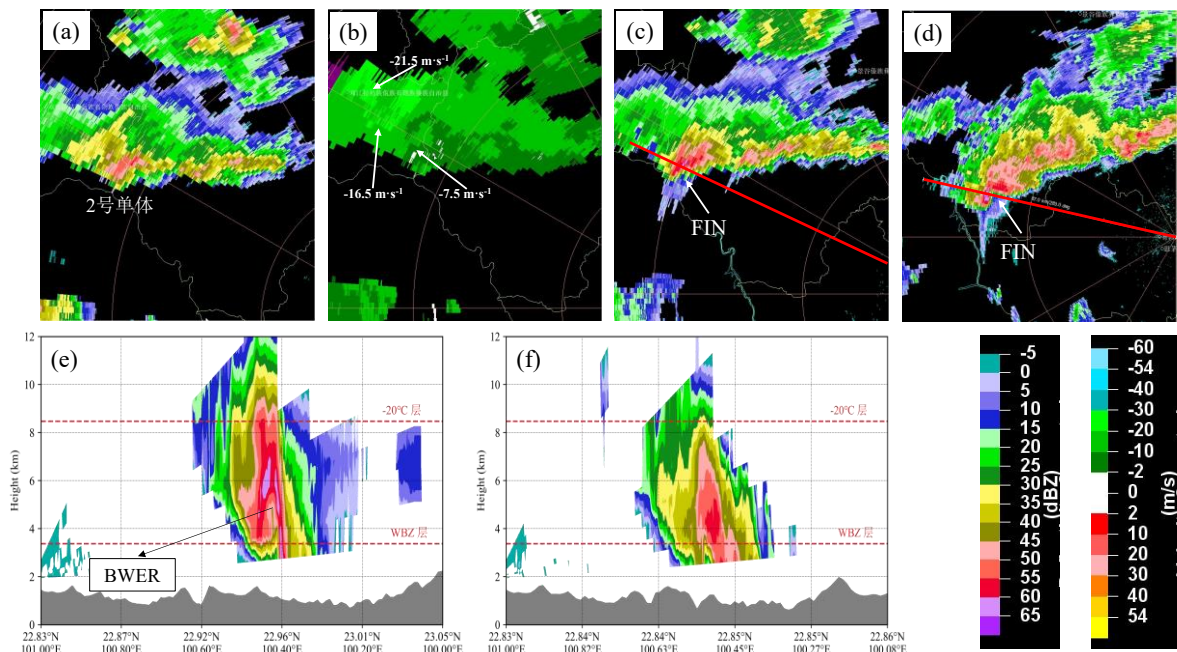


图 9 1 号单体风暴发展期间(a)雷达特征参量变化及(b)地形高程对风暴质心移速的影响

Fig.9 (a) Variations in radar characteristic parameters and (b) the influence of terrain elevation on the speed of the storm centroid during the development of monolithic storm No.1

4.2 2号单体风暴

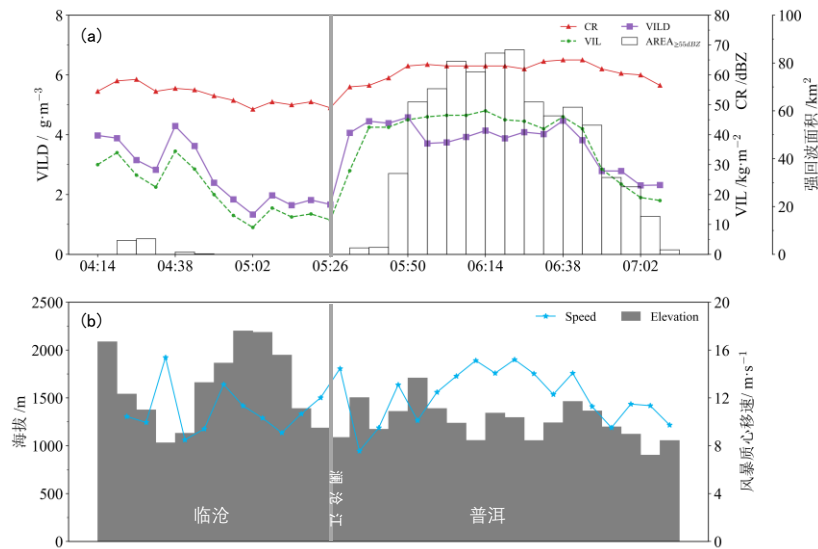
2023年3月14日05:32之前2号单体风暴位于临沧境内，受双江东侧高海拔山地影响，风暴出现后向传播，强度较弱。05:32，风暴东移越过澜沧江进入地势较为低缓的普洱境内，与后侧弱回波合并并加强（图10a），风暴质心移速开始加快（图11b）， 0.5° 仰角径向速度存在后侧入流急流，强度为 $21.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （图10b）；过江后，2号单体风暴VIL和VILD出现跃增，2个体扫的时间里VIL由 $11.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增长至 $42.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，VILD由 $1.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增长至 $4.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，此外CR也缓慢增至60 dBz左右并稳定维持（图11a），地面开始出现降雹。05:50~06:38单体风暴前侧出现入流缺口，并不断加深为倒“V”型结构（图10c、10d），中高空对应出现强悬挂回波（图10e），表明此阶段自低层至中高层存在一股由偏南风入流发展形成的强上升气流。06:38后，前侧入流缺口迅速减弱并消失，偏南风入流脱离风暴单体，强回波质心高度也逐渐由8 km下降至5 km左右（图10f），随后2号单体风暴消亡，残余回波并入线状对流带（图1c）。



注：图c、d中红色实线为图e、f剖面位置。

图10 2023年3月14日（a）05:32、（c）05:50、（d）06:38普洱雷达 0.5° 仰角反射率和（b）05:32退速度模糊后径向速度，（e）06:38、（f）06:56反射率径向剖面

Fig.10 Radial velocity of 0.5° elevation angles at 05:32 (a), 05:50 (c) and 06:38 (d) at Pu'er radar at 0.5° elevation angles on March 14, 2023, radial velocity maps of 0.5° (b) elevation angles at 05:32 with obscured velocity, radial profiles of reflectivity at 06:38 (e) and (f) 06:56



注：灰色竖线代表澜沧江。

图 11 2 号单体风暴发展期间(a)雷达特征参量变化及(b)地形高程对风暴质心移速的影响

Fig.11 (a) Variations in radar characteristic parameters and (b) the influence of terrain elevation on the speed of the storm centroid during the development of monolithic storm No.2

4.3 典型单体风暴生命史分析

风暴单体的初生与发展有赖于滇西南大气环境的高度层结不稳定以及中低层强垂直风切变稳定维持，另外，风暴承载层平均风向与风暴单体移动方向一致也使得持续时间延长，这与以往的相关研究基本一致（高晓梅等，2018）。但在本次过程中的 1、2 号单体风暴之间的生命史特征和轨迹路径大相径庭，还需要进行深入分析。

1 号单体风暴自 13 日 15:25 生成，16:25 发展为强单体，17:25 加强为超级单体，20:30 后减弱并逐渐消亡，期间风暴流场大体经历了中尺度辐合线-中气旋-气旋式涡旋与反气旋式涡旋共生等一系列的演变过程，且每个阶段持续 5~10 个体扫时间，风暴体对流运动活跃且持久。而 2 号单体风暴于 14 日 04:02 生成，05:32 加强为强单体，06:38 后中心减弱消散随之并入线状对流，风暴历经后侧入流急流和前侧入流急流两个阶段，且各阶段持续时间（2~8 个体扫）较短，过程演变迅速，没有超级单体生成和维持的特征。造成 1 号和 2 号单体风暴生命周期差异的主要原因如下。

(1) 触发机制对单体的生命史长短起决定作用。昼发型风暴由低空暖平流强迫和地面弱辐合线耦合触发，CI 附近强烈上升的暖湿气流柱伸展至 450 hPa，热力、动力条件优渥；而夜发型风暴主要由地形强迫抬升作用和中低空斜压锋生耦合触发，配合西南低空急流发展加强，CI 附近上升运动弱于 13 日午后，热力条件也相对较差。

(2) 滇西南地形及地面热力差异对风暴发展的影响。风暴在山前受地形抬升, 内部气旋式涡度减弱, 过山后, 气旋式涡度增强, 风暴重新发展(朱乾根等, 2000)。1 号和 2 号单体风暴对高海拔山地均有上述特征反馈, 具体表现为 1 号单体风暴于 13 日 17:25 翻越无量山(镇沅段)后发展为超级单体风暴, 其内部出现中气旋结构(图 7g), 2 号单体风暴则在 14 日 05:32 翻越大青山后与后侧弱回波发展为强单体风暴(图 11)。所不同的是, 1 号单体风暴在发展前、中期有 3 次过山运动(图 1a, 图 9), 分别为 13 日 16:07 (1929 m)、16:37 (2068 m)、17:25 (2269 m), 且地面热力条件明显优于后者, 而 2 号单体风暴仅在发展前期有 1 次过山运动(图 1b, 图 11), 即 14 日 04:56—05:20 (2201 m), 中、后期下垫面海拔在 1500 m 以下, 加之地面温度较低, 不利于风暴持续增强和发展。

5 结 论

本文利用常规地面观测资料、多普勒雷达资料和 ERA5 再分析等资料, 对 2024 年 3 月 13—15 日发生在滇西南地区影响持久且剧烈的强风暴天气过程, 特别是针对昼夜不同时间段内风暴的初生、增强与维持机制进行分析, 得到如下主要结论。

(1) 强风暴天气过程发生在地面冷锋东退期间, 低(高)空西南急流建立并加强, 中层西北气流持续侵入的环流背景下, 风暴主要在高空急流入口右侧与中空急流轴交角附近发展加强; 过程中随着系统南压, CI 位置也逐渐偏南偏西。

(2) 滇西南地区低层暖平流与中层冷平流持续且稳定的输送, 加剧了环境大气不稳定层结; CAPE 为 $826.6\sim 1481.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, SHR3 为 $14.4\sim 19.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, SHR6 为 $27.6\sim 34.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 高度层结不稳定和强垂直风切变为致灾性强风暴发生、发展和维持提供了良好的环境条件。

(3) 昼发型风暴由暖平流强迫偏南风抬升和地面弱辐合线耦合触发, 无量山脉两侧显著的水热差异使得风暴在东移越山后发展增强。夜发型风暴则初生于中低空斜压锋生区附近, 在东移过程中由迎风坡强迫抬升作用触发, 并在西南低空急流配合下发展加强。

(4) 在昼夜差异和不同地形强迫影响下, 风暴单体雷达回波特征各异。1 号单体风暴具有入流缺口、有界弱回波区和“V”型缺口等形态特征, 径向速度表现出中气旋结构, 降雹时段内平均 CR 为 60.5 dBz , 平均 VIL 为 $36.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均 VILD 为 $4.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2 号单体风暴回波则表现有显著的后侧入流急流和前侧入流缺口, 但回波对地形响应更为明显, 跨越澜沧江后强回波面积、VIL 和 VILD 出现跃增, VIL 由 $11.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增长至 $42.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, VILD 由 $1.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增长至 $4.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(5) 受昼、夜近地层和中高空大气热力、动力条件差异以及风暴发展演变阶段不同下垫面强迫的影响, 风暴单体生命史长度和地面灾害性天气表现迥异, 1 号单体风暴生命史长达 6 h, 影响期间持续伴随降雹, 过境前后地面出现雷暴大风天气, 后期降水相态转变为冰雹混合 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水; 2 号单体风暴生命史为 3 h, 仅在单体发展后期出现降雹, 其他类型对流天气并不剧烈。

参考文献:

- 卜茂宾, 白洁, 周著华, 等, 2018. 基于 FY-2G 静止气象卫星资料的对流初生预警[J]. 气象水文海洋仪器, 35(1): 8-13. Bu M B, Bai J, Zhou Z H, et al, 2018. Convective initiation forecasting based on FY-2G geostationary satellite data[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 35(1): 8-13 (in Chinese).
- 曹舒娅, 孙伟, 韦芬芬, 等, 2021. 双偏振雷达在江苏“7.6”降雹过程中的应用分析[J]. 大气科学学报, 44(4): 549-557. Cao S Y, Sun W, Wei F F, et al, 2021. Study of “7.6” hail event in Jiangsu based on dual-polarization weather radar observations[J]. Trans Atmos Sci, 44(4): 549-557 (in Chinese).
- 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等, 2013. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理[J]. 气象学报, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sin, 71(4): 569-592 (in Chinese).
- 崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等, 2021. 对流初生机理的研究进展[J]. 气象, 47(11): 1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11): 1297-1318 (in Chinese).
- 段鹤, 严华生, 马学文, 等, 2014. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象, 40(2): 174-185. Duan H, Yan H S, Ma X W, et al, 2014. Study of the method for hail forecasting and warning in southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 40(2): 174-185 (in Chinese).
- 段鹤, 严华生, 王晓君, 等, 2011. 滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究[J]. 气象, 37(10): 1216-1227. Duan H, Yan H S, Wang X J, et al, 2011. Analysis on Doppler radar statistical features and distinguishing methods of mesoscale and microscale disastrous weather in Southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 37(10): 1216-1227 (in Chinese).
- 高丽, 潘佳文, 蒋璐璐, 等, 2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象, 47(2): 170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and

- characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon, 47(2): 170-182 (in Chinese).
- 高晓梅, 孙雪峰, 秦瑜蓬, 等, 2018. 山东一次强对流天气的环境条件和对流风暴特征[J]. 干旱气象, 36(3): 447-455. Gao X M, Sun X F, Qin Y P, et al, 2018. Environmental conditions and convective storm features of a severe convective weather process in Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 36(3): 447-455 (in Chinese).
- 韩颂雨, 罗昌荣, 魏鸣, 等, 2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究[J]. 气象学报, 75(5): 757-770. Han S Y, Luo C R, Wei M, et al, 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual-and triple-Doppler radar retrieval[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 757-770 (in Chinese).
- 罗云, 黄锦灿, 李兆明, 等, 2021. 一次强降水对流风暴的三维风场特征分析[J]. 热带气象学报, 37(5-6): 770-780. Luo Y, Huang J C, Li Z M, et al, 2021. Analysis of three-dimensional wind field of convective storm during heavy precipitation[J]. J Trop Meteor, 37(5-6): 770-780 (in Chinese).
- 彭启洋, 尹丽云, 张腾飞, 等, 2023. 云南冰雹强对流的活动特征研究[J]. 灾害学, 38(2): 97-105. Peng Q Y, Yin L Y, Zhang T F, et al, 2023. Study on the activity characteristics of hail strong convection in Yunnan Province[J]. J Catastrophol, 38(2): 97-105 (in Chinese).
- 覃丹宇, 方宗义, 2014. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J]. 气象, 40(1): 7-17. Qin D Y, Fang Z Y, 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation[J]. Meteor Mon, 40(1): 7-17 (in Chinese).
- 苏涛, 董美莹, 余贞寿, 等, 2020. 浙江天目山背风坡对流触发个例的对比分析[J]. 气象, 46(2): 158-168. Su T, Dong M Y, Yu Z S, et al, 2020. Comparative analysis of convective initiation on the lee side of the Tianmu Mountain[J]. Meteor Mon, 46(2): 158-168 (in Chinese).
- 唐明晖, 陈龙, 陈鹤, 等, 2023. 基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J]. 暴雨灾害, 42(6): 692-703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al, 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data[J]. Torr Rain Dis, 42(6): 692-703 (in Chinese).

- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 40(4): 389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basic issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4): 389-399 (in Chinese).
- 吴海英, 陈海山, 刘梅, 等, 2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象, 43(2): 141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon, 43(2): 141-150 (in Chinese).
- 夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等, 2016. V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究[J]. 气象, 42(1): 67-73. Xia W M, Wang X J, Sun K Y, et al, 2016. Application study of 'V' notch used in C band Doppler radar[J]. Meteor Mon, 42(1): 67-73 (in Chinese).
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等, 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4): 400-411 (in Chinese).
- 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]. J Catastrophol, 38(4): 71-79, 113 (in Chinese).
- 于怀征, 刁秀广, 孟宪贵, 等, 2020. 山东省一次罕见强对流天气的环境场及雷达特征分析[J]. 暴雨灾害, 39(5): 477-486. Yu H Z, Diao X G, Meng X G, et al, 2020. Analysis of radar echo features and environmental backgrounds of a rare severe convective weather in Shandong Province[J]. Torr Rain Dis, 39(5): 477-486 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 40(6): 649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6): 649-654 (in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting on Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 311-337 (in Chinese).

- 张腾飞, 张杰, 尹丽云, 等, 2016. 滇南春季一次强对流风暴系统特征及成因[J]. 云南大学学报(自然科学版), 38(2): 245-255. Zhang T F, Zhang J, Yin L Y, et al, 2016. On features and formation causes of a severe convective storm system of spring in the South Yunnan[J]. J Yunnan Univ: Nat Sci Ed, 38(2): 245-255 (in Chinese).
- 张腾飞, 张杰, 尹丽云, 2023. 滇西南一次超级单体持续降雹过程分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 45(2): 409-417. Zhang T F, Zhang J, Yin L Y, 2023. Analysis of a continuous supercell hailfall process in Southwest Yunnan[J]. J Yunnan Univ: Nat Sci Ed, 45(2): 409-417 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法: 第3版[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. Principles and Methods of Meteorology[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Klinge D L, Smith D R, Wolfson M M, 1987. Gust front characteristics as detected by Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 115(5): 905-918.
- Reif D W, Bluestein H B, 2018. Initiation mechanisms of nocturnal convection without nearby surface boundaries over the Central and Southern Great Plains during the warm season[J]. Mon Wea Rev, 146(9): 3053-3078.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. Mon Wea Rev, 134(1): 23-47.
- Wilson J W, Trier S B, Reif D W, et al, 2018. Nocturnal elevated convection initiation of the PECAN 4 July hailstorm[J]. Mon Wea Rev, 146(1): 243-262.