

# 2025年7月南疆盆地东部两次冰雹天气成因的对比分析

陈艳丽<sup>1</sup>, 姜彩莲<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>新疆生产建设兵团第二师农业发展服务中心气象台, 新疆 铁门关

<sup>2</sup>新疆五家渠市气象局, 新疆 五家渠

收稿日期: 2025年12月5日; 录用日期: 2026年1月5日; 发布日期: 2026年1月14日

## 摘要

基于多源气象观测资料、雷达图像产品及ERA5再分析数据, 对2025年7月2日和7月4日发生在南疆盆地东部的两次冰雹事件进行了对比分析。结果表明, 两次事件在环流背景、触发机制、风暴结构及雷达特征等方面存在显著差异。(1) 2025702个例主要受500 hPa槽底短波及低层切变线的影响, 近地面存在明显的风场辐合区, 对流风暴的组织性强, CAPE值高达 $1669.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 而2025704个例则为槽后偏北气流引发的局地强对流, 具有一定CAPE值, 对流风暴发展主要受地形和水汽条件驱动, 低层辐合线触发作用显著。(2) 通过对比物理量参数, 两次个例的 $-20^\circ\text{C}$ 层高度均  $< 7.2 \text{ km}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ 层距 $0^\circ\text{C}$ 层高度差  $\leq 2.78 \text{ km}$ , 850 hPa与500 hPa温度差  $\geq 35^\circ\text{C}$ , 这些环境参量阈值可作为本研究区域冰雹判识的有效指标之一。(3) 雷达图像产品显示, 2025702个例的雷达强回波中心在短时间内迅速增强(68 dBz), 冰雹指数(HI)指数显著, 垂直积分液态水含量(VIL)的急剧跃增及衰减与冰雹的发生、发展过程高度相关。相比之下, 2025704个例的VIL值变幅较小, 回波强中心剖面表现为低质心降水特征, 显示出强降水过程的持续性。本研究有助于深入理解南疆盆地东部冰雹的形成机制, 并为提高该区域冰雹的监测预警能力提供了科学参考。

## 关键词

塔里木盆地, 触发机制, 对流风暴, 风廓线, 冰雹指数

## Comparative Analysis of the Causes of Two Hail Events in the Eastern Tarim Basin, Southern Xinjiang in July 2025

Yanli Chen<sup>1</sup>, Cailian Jiang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Agricultural Development Service Center, Meteorological Station, Second Division of Xinjiang Production and

\*通讯作者。

文章引用: 陈艳丽, 姜彩莲. 2025 年 7 月南疆盆地东部两次冰雹天气成因的对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 103-115. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151014

Construction Corps, Tiemenguan Xinjiang

<sup>2</sup>Meteorological Bureau of Wujiaqu City, Wujiaqu City Xinjiang

Received: December 5, 2025; accepted: January 5, 2026; published: January 14, 2026

## Abstract

Based on multi-source meteorological observation data, radar image products, and ERA5 reanalysis data, a comparative analysis was conducted on two hail events that occurred in the Eastern Tarim Basin, Xinjiang, on July 2 and July 4, 2025. The results show significant differences between the two events in terms of atmospheric circulation background, triggering mechanisms, storm structure, and radar characteristics. (1) The July 2nd event was primarily influenced by a 500 hPa trough-bottom shortwave and low-level shear lines, with a distinct surface wind convergence zone. The convection was well-organized with a high CAPE value of  $1669.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ . In contrast, the July 4th event was triggered by post-trough northerly winds, with a moderate CAPE value. The convection development was mainly driven by topographic effects and moisture conditions, with significant low-level convergence playing a key triggering role. (2) A comparison of physical parameters showed that for both events, the  $-20^{\circ}\text{C}$  layer height was  $<7.2 \text{ km}$ , the height difference between the  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $0^{\circ}\text{C}$  layers was  $\leq 2.78 \text{ km}$ , and the temperature difference between 850 hPa and 500 hPa was  $\geq 35^{\circ}\text{C}$ . These environmental parameter thresholds can serve as effective indicators for identifying hail events in this study region. (3) Radar image products revealed that for the July 2nd event, the radar reflectivity center rapidly intensified (68 dBz) within a short period, with a significant hail index (HI), and a sharp increase and subsequent decay of the vertical integrated liquid water content (VIL), which was highly correlated with the occurrence and development of hail. In contrast, the VIL value for the July 4th event showed a smaller variation, and the reflectivity profile exhibited low-echo precipitation characteristics, indicating the persistence of the strong rainfall process.

## Keywords

Tarim Basin, Triggering Mechanism, Convective Storms, Vertical Wind Profile, Hail Index

Copyright © 2026 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

冰雹天气作为典型的强对流性灾害天气之一,其形成机理复杂、突发性强、危害性大,是气象灾害防御的重点,也是气象短临监测预警的难点,因此长期以来备受国内外气象学者关注。目前,诸多研究依托野外观测实验、数值模拟与现场探测计划等手段,深入揭示了冰雹云的发展结构、微物理过程及其演变机制,逐步建立了较为完善的防雹评估与预警模型体系,为冰雹灾害防控提供了理论支撑[1]-[5]。我国作为全球冰雹灾害最为频发的国家之一,学者们围绕冰雹的发生机制、致灾时空演变规律及预警识别等方面开展了广泛而系统的研究,取得了丰硕的成果[6]-[8]。例如,衣娜娜通过对内蒙古地区冰雹个例的分析,构建了基于TT(地面温度)、850 hPa与500 hPa温度差、 $-20^{\circ}\text{C}$ 至 $0^{\circ}\text{C}$ 高度、大气可降水量等因素的冰雹预报模型,其判别准确率超过80% [9]。马中元利用雷达拼图中的(CR)、强回波面积(SEA)、强回波梯度(SEG)和云砧回波(CAE)四个要素,探讨了江西地区冰雹天气中的回波与冰雹云的对应关系[10]。刘

杰在青海高原的研究中指出,冰雹发生时的温度垂直积分波动大,反映出对流强烈;高露点温度和 500 hPa 较大的东西风表明充沛水汽、层动力条件良好;而 100 hPa 低温则体现了高层大气的特征[11]。尉英华在研究天津地区冰雹特征时指出,高空冷涡型和西北气流型的环境物理量阈值差异并不显著,但与西来槽型的阈值差异明显[12]。强德厚基于观测结果,拟合得到了 2020 年 7 月 23 日拉萨地区冰雹降落过程中,冰雹平均末速度与直径之间的关系公式[13]。近年来,随着气候异常波动的加剧,新疆地区极端暴雨[14]、冰雹灾害等极端气候事件呈现频发、重发态势。为此,学者们从气候统计、物理机制与预警方法识别等多维角度开展了新疆地区冰雹个例的研究,揭示了冰雹天气的成因[15]-[18];同时,基于冰雹灾害及短时强降水,系统地分析了该地区的雷达回波特征[19]-[21]。这些研究成果不仅丰富了对新疆地区冰雹特征的认知,也为区域防灾减灾提供了科学依据。然而,面对日益复杂的气候变化,如何进一步提升冰雹预警的精度与应对措施的有效性,仍是亟需深入探讨的重要课题。

近年来,新疆生产建设兵团第二师北部垦区及塔里木垦区的冰雹、短时强降水和雷暴大风等强对流天气频次显著增加,严重威胁着辖区农业生产和职工群众的生命财产安全。因此,深入开展本区域典型冰雹天气个例的综合分析,对于提升灾害性天气预警精度,加强农业防灾减灾能力具有重要的现实意义与紧迫性。本研究以 2025 年 7 月发生在新疆生产建设兵团第二师的两次典型冰雹个例为研究对象,综合利用多源气象观测资料、雷达图像产品、高空探测数据以及 ERA5 再分析资料,系统分析该地区冰雹发生的天气形势、对流触发机制、发展演变过程及冰雹落区特征。研究旨在揭示该地区冰雹天气形成与演变的关键影响因子,为优化新疆兵团第二师辖区短临预报预警服务流程、提升预警精准度和服务效率提供科学依据。此外,通过对比不同冰雹个例发生前后气象要素的变化特征,本研究可为辖区内科学指挥人工防雹作业、评估作业效果及制定后续防灾减灾策略提供关键判据,从而进一步提高区域农业防灾减灾能力和城市应急响应水平。

## 2. 研究区域概况及资料

新疆生产建设兵团第二师铁门关市,位于天山南麓的巴音郭楞蒙古自治州(以下简称“巴州”)境内,地处塔里木盆地东部,北依天山,南依阿尔金山,自北向南依次为焉耆垦区、库尔勒垦区、塔里木垦区、且若垦区(见图 1)。随着全球气候变暖趋势的日益加剧,天山南麓及塔里木盆地东缘的强对流性天气过程呈现出空间分布复杂、突发性强和局地极端性增强的特点。本研究基于常规气象探测数据、库尔勒与铁门关市天气雷达资料以及 ERA5 再分析数据(欧洲中期天气预报中心提供的再分析数据,分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ),结合天气形势和物理量对比方法,深入探讨了冰雹天气的发生机理、触发机制及雷达回波特征,以揭示冰雹天气形成的关键背景条件,进一步丰富了对冰雹云生成与演变过程的理解。

## 3. 天气实况

2025 年 7 月上旬,受伊朗副热带高压东伸北挺,西太平洋副热带高压西伸北抬影响,新疆受到副高外围的影响,导致南疆沿山一带出现间歇性的阵性风雨天气。与此同时,巴尔喀什湖低槽不断分裂,并伴随着短波扰动频繁出现,弱冷空气与副高的北抬南撤交替发生,加强了中小尺度天气系统的活动。这一环流背景为新疆生产建设兵团第二师辖区内间歇性降水天气提供了有利条件。2025 年 7 月 2 日 21:30,第二师 33 团局地出现冰雹天气,冰雹直径约 10~18 mm(以下简称“2025702 个例”)。2025 年 7 月 4 日 15:15 前后,第二师 30 团局地出现冰雹,最大冰雹直径约 10 mm,并伴随有短时强降水,累计降水量达 38.5 毫米(达到新疆暴雨标准);该次降水事件的分钟降水量(见图 2),为当日新疆地区 24 小时累计降水量的最大值,具有显著的局地性、突发性的强降水特征(以下简称“2025704 个例”)。

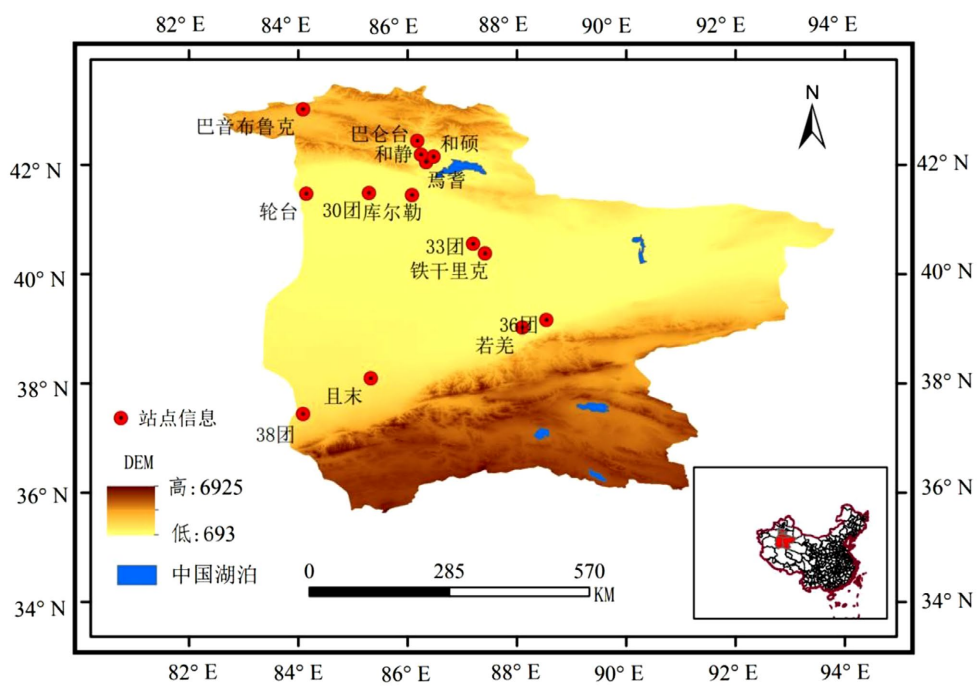


Figure 1. Topographic map of the study area and distribution of stations  
图 1. 研究区域地形及站点分布示意图

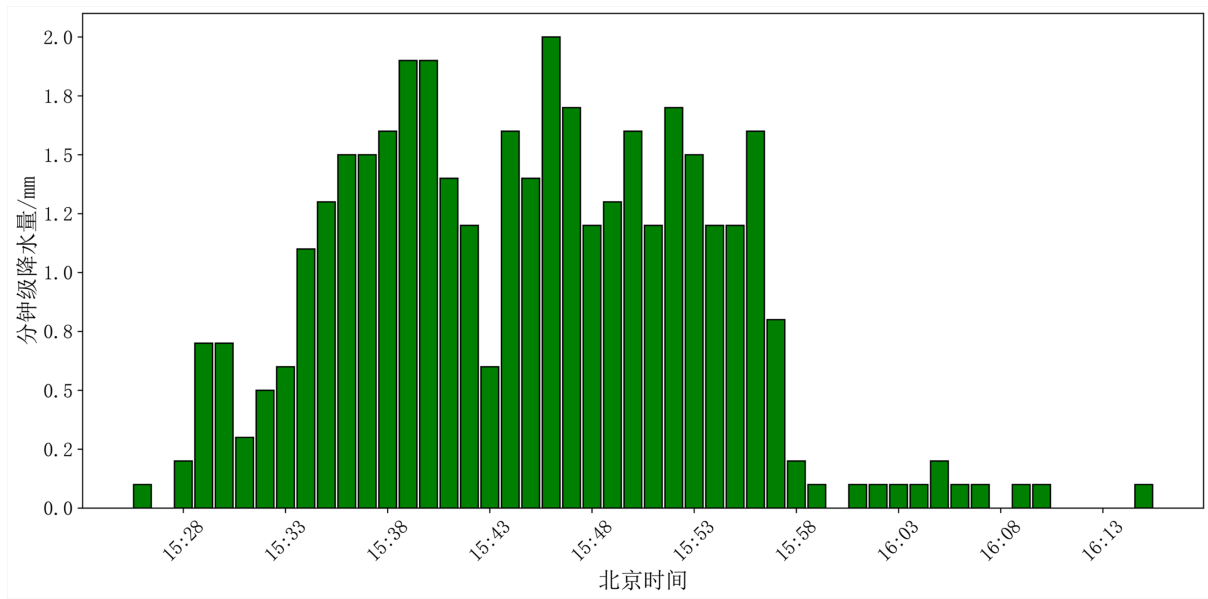


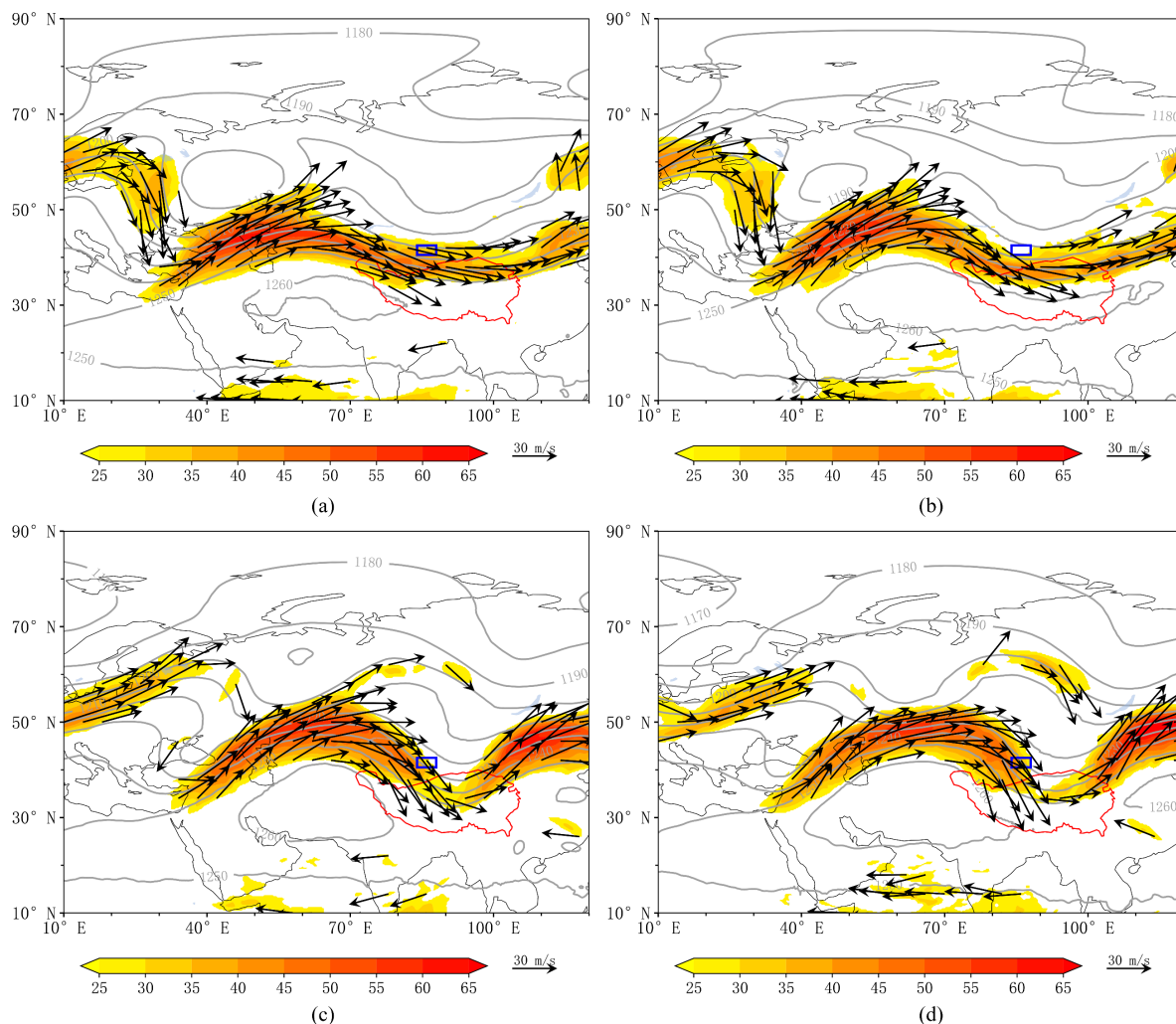
Figure 2. Minute-by-minute precipitation time series for 2025704 extreme precipitation events  
图 2. 2025704 个例的极端降水事件逐分钟降水量时序图

#### 4. 环境场特征对比分析

##### 4.1. 200 hPa 环流形势

2025 年 7 月 2 日 20 时至 7 月 4 日 20 时期间, 新疆生产建设兵团第二师先后出现两场冰雹天气。200 hPa 风场显示, 存在温带急流和副热带西风急流, 对冰雹的发生起到重要作用。7 月 2 日, 温带急流南伸

至 42°N 附近, 副热带西风急流则由 30°N 附近向东推进(见图 3(a)、图 3(b))。冰雹发生区域附近的风速较强, 导致该区域形成了明显的高空辐散区域, 辐散抽吸作用为冰雹天气的发生提供了较好的动力条件。随着时间的推移, 到 7 月 4 日 08 时, 第二场冰雹发生时, 副热带西风急流的强度较 7 月 2 日显著增强, 急流区域的风速明显增大, 进一步加剧了气流的辐散作用(见图 3(c)、图 3(d)); 在风速增强和气流的辐散作用等因素共同作用, 为第二次冰雹及短时强降水的发生提供了有利的动力条件。



**Figure 3.** Geopotential height at 200 hPa (black solid line, units: dagpm) and wind vectors (black arrows, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 2, 2025, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on July 4, 2025. The blue rectangular box represents the study area

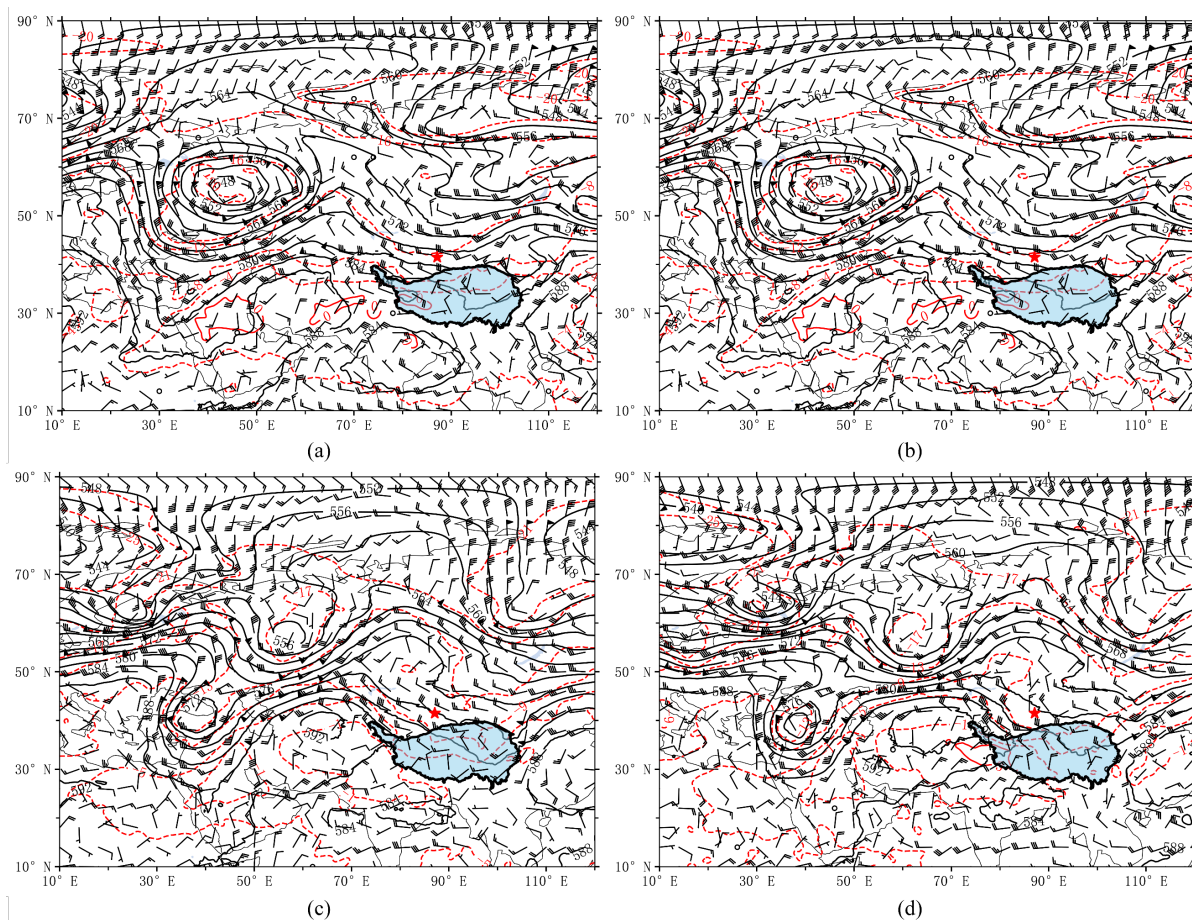
**图 3.** 2025 年 7 月 2 日 08 时(a)和 20 时(b)、2025 年 7 月 4 日 08 时(c)和 20 时(d) 200 hpa 位势高度(黑色实线, 单位: dagpm), 风矢量(黑色箭头, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); 蓝色矩形框为研究区域

#### 4.2. 500 hPa 环流形势

2025 年 7 月 2 日 08 时, 欧亚范围内 500 hPa 呈现“两槽一脊”环流形势, 巴尔喀什湖至贝加尔湖一带为低槽活动区。至 7 月 2 日 20 时, 伊朗副热带高压的 588 线已位于国境线外, 南疆盆地西部位于副高外围; 此时, 阿克苏地区和巴州地区受副高外围及巴尔喀什湖低槽底部分裂短波的共同影响, 导致该地区出现阵性风雨天气(见图 4(a)、图 4(b))。



7月3日至4日, 伊朗副热带高压显著东伸、北挺至 $40^{\circ}\text{N}$ 以北, 588线已压至南疆喀什地区, 并呈现进一步东移的趋势(见图4(c)、图4(d))。同时, 巴尔喀什湖低槽在东南移的过程中逐渐影响南疆东部地区。7月3日20时至4日08时, 新疆生产建设兵团第二师铁门关市位于伊朗副热带高压外围, 受500 hpa 偏北气流控制, 500 hpa 温度场滞后于高度场, 大气的倾压性增大, 且850 hpa 出现偏东气流。副高外围的高温高湿气流与中高纬度的干冷空气交汇, 导致大气垂直不稳定性增强, 为不稳定能量的积聚提供了有利条件, 进而引发了新疆生产建设兵团第二师强对流天气的发生。

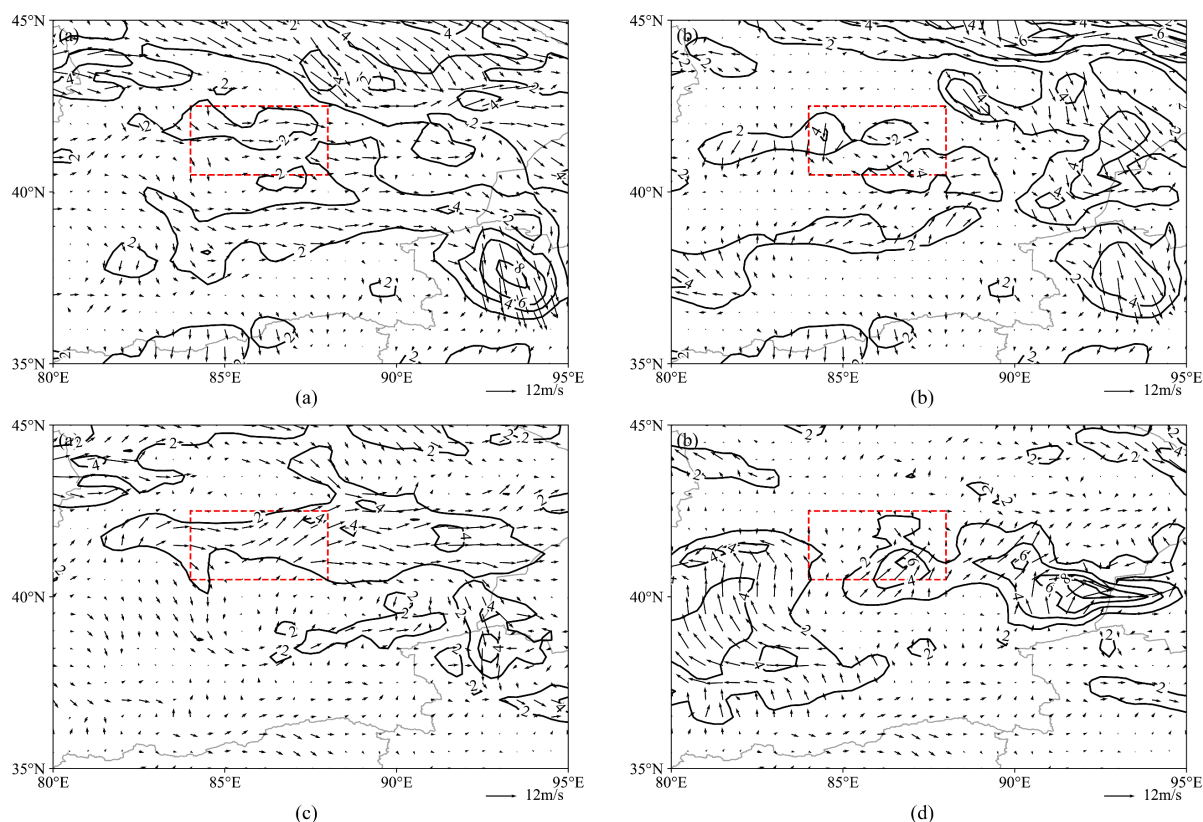


**Figure 4.** Distribution of the 500 hPa geopotential height field (black solid line, units: dagpm), temperature field (red dashed line, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), and wind field (wind barbs, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 2, 2025, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on July 4, 2025. The red star indicates the study area

**图 4.** 2025 年 7 月 2 日 08 时(a)和 20 时(b)、2025 年 7 月 4 日 08 时(c)和 20 时(d) 500 hpa 位势高度场(黑色实线, 单位: dagpm)、温度场(红色虚线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )与风场(风羽, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )分布; 红色星为研究区域

### 4.3. 850 hPa、700 hPa 环流形势

2025 年 7 月 2 日 20 时, 本研究区内 700 hpa 有西南气流, 850 hpa 由存在一支偏东急流, 且该急流厚度较厚(北伸至  $40^{\circ}\text{N}$  以北), 对于南疆盆地起到气垫作用, 有利于低层气团上升, 增强了大气的的不稳定性(见图 5(a)、图 5(b))。2025 年 7 月 4 日 08 时, 本研究区内 700 hpa 至 850 hpa 存在一致的西南气流, 且 850 hpa 的水汽通量为  $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 表现出较强的水汽输送, 有利于强的对流风暴发展(见图 5(c)、图 5(d))。



**Figure 5.** Water vapor flux at 700 hPa and 850 hPa (contours, units:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and wind field (arrows, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 20:00 on July 2, 2025 ((a), (b)) and 08:00 on July 4, 2025 ((c), (d)); the rectangular box denotes the study area

**图 5.** 2025 年 7 月 2 日 20 时((a)、(b))、2025 年 7 月 4 日 08 时((c)、(d)) 700 hPa 和 850 hPa 水汽通量(等值线, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和风场(箭头, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); 矩形框为本研究区域

## 5. 层结稳定度及触发机制

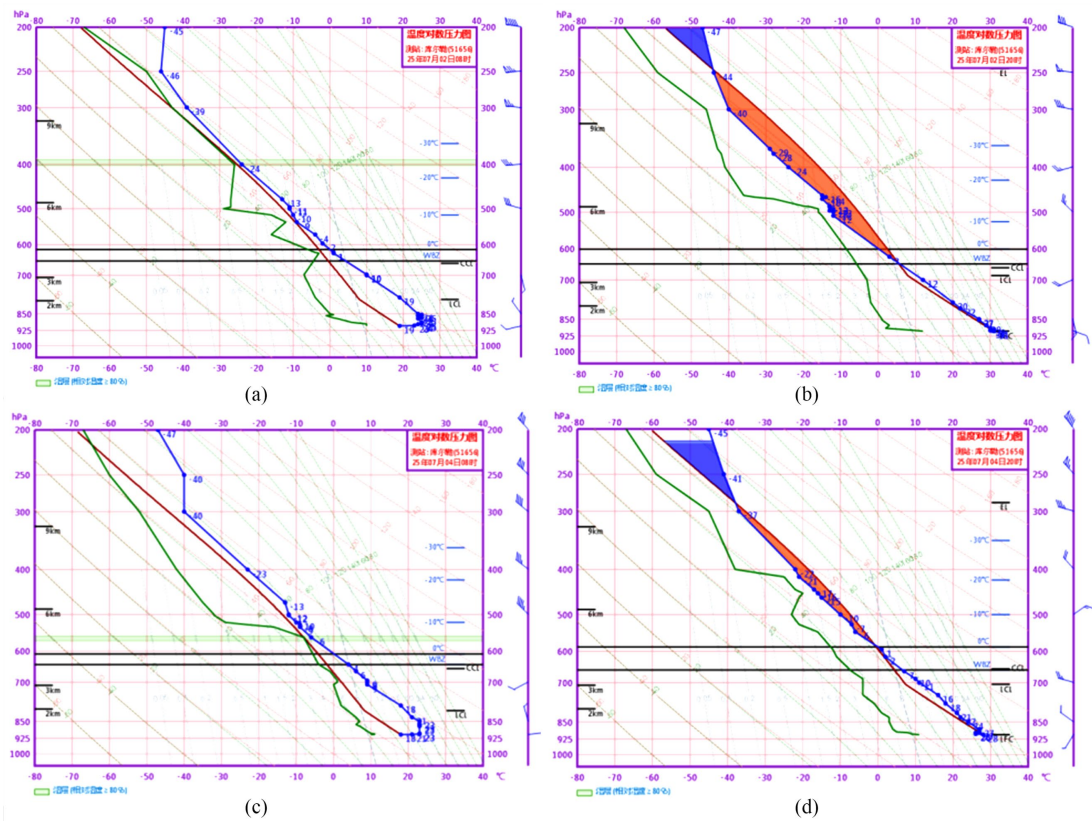
### 5.1. 气层结特征对比分析

2025 年 7 月 2 日 20 时, 库尔勒探空图显示, 在第二师 33 团冰雹发生前, 500 hPa 以下的垂直风切变相对较弱, 而 400 hPa 以上呈现明显的垂直风切变特征。此时, 受 500 hPa 干冷空气入侵影响, 形成了典型的“上干下湿”层结结构, 有利于不稳定能量的集聚(见图 6(a)、图 6(b))。随着午后气温升高, 不稳定能量进一步加强; 中高层的垂直风切变、层结的不稳定性以及较大的对流有效位能(CAPE)共同为强对流天气的发生提供了有利的环境条件。至 2025 年 7 月 4 日冰雹天气发生前, 垂直风切明显增强, 700 hPa 以下的风速随高度呈现顺转, 形成暖平流结构, 而 500 hPa 以上的风场整体为偏北风(见图 6(c)、图 6(d)), 并随高度的升高逐渐增强, 这一风场结构导致了显著的层结不稳定, 为强对流天气的发生提供了有利的动力条件。

### 5.2. 理量特征对比分析

从对流有效位能(CAPE)来看, 2025 年 7 月 2 日 20 时的 CAPE 值( $1669.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )明显大于 7 月 4 日 08 时的值, 且不稳定层深度较大(见表 1)。在强对流天气发生前, 两次冰雹事件的沙氏指数(SI)均为负值, 表明大气层结不稳定。尽管两次个例的地面温度差异不大, 冰雹云的  $0^\circ\text{C}$  层高度(4.5 km)接近, 但 7 月 4 日的温度露点差(T-TD)值较小, 表明近地面水汽含量较高, 更有利于短时强降水的发生。

两次冰雹事件的共同特征包括 $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度接近, 均 $<7.2\text{ km}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ 距  $0^{\circ}\text{C}$ 高度差  $\leq 2.78\text{ km}$ ;  $850\text{ hPa}$ 与  $500\text{ hPa}$  温度差  $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ; 且都呈现“上干下湿”的不稳定层结, 湿层浅薄。虽然两次过程均伴随强对流并产生冰雹, 但其不稳定能量和风切变的配置存在差异。



**Figure 6.** T-lnP diagrams at the Korla upper-air sounding station at 08:00 (a) and 20:00 (b) on 2 July 2025, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on 4 July 2025

**图 6.** 2025 年 7 月 2 日 08 时(a)和 20 时(b)、2025 年 7 月 4 日 08 时(c)和 20 时(d)库勒探空站 T-lnP 图

**Table 1.** Comparison of physical parameters for T-lnP diagram

**表 1.** T-lnP 图物理参量对比

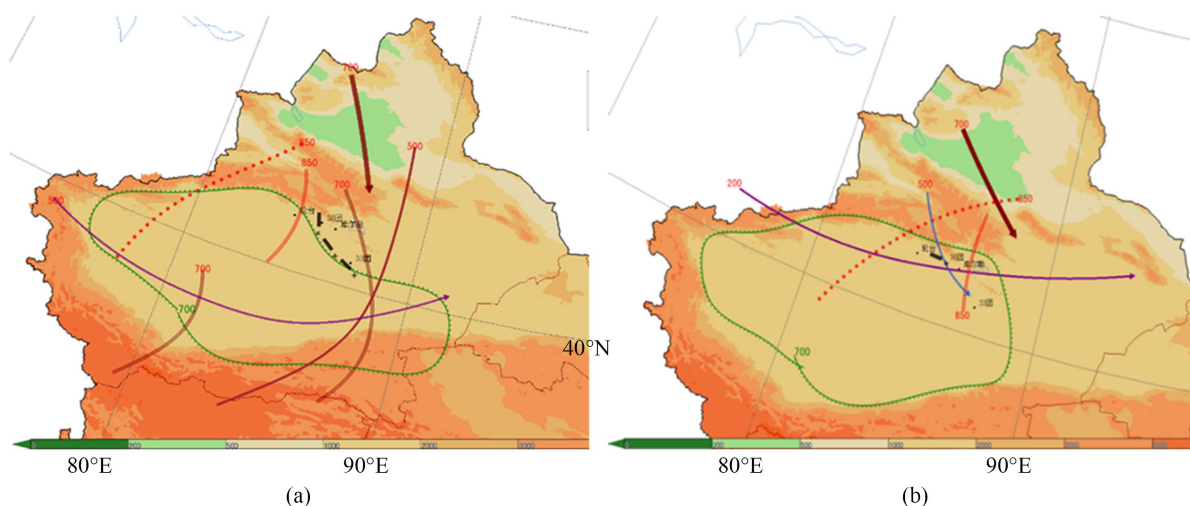
时间	站点	K 指数/ $^{\circ}\text{C}$		SI 指数/ $^{\circ}\text{C}$		CAPE/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$		CIN/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$		$0^{\circ}\text{C}$ 层高度/gpm		$-20^{\circ}\text{C}$ 层高度/gpm		T850 $^{\circ}\text{C}$ ~T500/ $^{\circ}\text{C}$		垂直风切变/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	
		08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时
2025 0702	乌鲁木齐	31	30	0.71	0.48	3.3	273.9	249.5	0.0	3869.4	3996.7	6688.6	6791.5	29	33	0.81	0.97
	库车	19	30	0.95	-1.21	0.0	169.2	0.0	0.0	4318.2	4455.0	6994.5	7174.5	37	38	1.78	1.08
	库勒	18	25	2.07	-1.16	0.0	1669.5	0.0	0.0	4366.2	4455.0	6933.1	6913.6	35	39	1.53	1.48
2025 0704	乌鲁木齐	32	29	-1.22	-0.16	0.0	112.9	0.0	0.0	4041.0	4320.5	6663.8	7052.5	34	36	2.1	1.07
	库车	30	31	-1.28	-2.74	319.8	0.0	0.0	0.0	4352.7	4465.0	7041.8	7184.5	35	35	1.76	1.22
	库勒	31	22	-2.57	1.43	0.0	544.1	0.0	0.0	4274.3	4524.3	7029.1	7210.0	35	35	1.25	1.24



### 5.3. 中尺度分析

2025年7月2日20时, 500 hPa存在明显的高空槽, 槽前西南气流有利于将中低纬度的水汽输送至强对流发生区域, 增强了大气的垂直不稳定性(见图7(a))。冰雹发生时间为7月2日21:30, 500 hPa的干冷空气入侵与700 hPa暖湿气流交汇, 形成了极为不稳定的大气层结, 为冰雹的生成提供了充分的动力和热力条件。700 hPa层的整个南疆盆地处于显著湿区, 比湿均在 $5\sim 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低层大气高温高湿为此次冰雹天气的发生提供了充足的水汽和热力支持。850 hPa与700 hPa风场均存在明显的切变, 进一步促进了垂直上升运动的发展。地面风场显示, 在7月2日20:00前后, 新疆巴州平原北部多站出现了8级及以上的偏北大风。与此同时, 第二师塔里木垦区辖区内(31团、32团、33团、34团)出现了东南风与偏北风的辐合区, 特别是33团恰好处于风向及风速的辐合中心, 加剧了大气层结不稳定性, 触发了不稳定能量的迅速释放, 从而为强对流天气提供了强烈的触发机制, 最终导致冰雹的发生。702冰雹个例发生在沙漠边缘地区, 近地面风场辐合是触发强对流的关键因素。

2025年7月4日, 第二师库尔勒垦区(29团、30团)处于槽后偏北气流区域, 850 hPa存在切变线, 且850 hPa为暖脊控制; 受前期断续降水的影响, 南疆盆地大部处于显著湿区, 比湿也维持在 $5\sim 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (见图7(b))。30团位于沿山一带, 受地形抬升影响, 该区域为第二师辖区内对流天气频发区; 当天, 新疆巴州北部至阿克苏地区沿山一带存在明显的地面辐合线。2025704个例发生在库尔勒垦区沿山一带, 该区域的地形抬升与显著的地面辐合线共同触发的强对流天气的发生。



**Figure 7.** (a) Mesoscale analysis at 20:00 on July 2, 2025, and (b) mesoscale analysis at 08:00 on July 4, 2025 (Purple solid line indicates the 200 hPa jet stream; brown solid line represents the 500 hPa trough; blue arrows denote the northerly flow behind the 500 hPa trough; green zigzag line indicates the 850 hPa moisture zone; red double solid line represents the 850 hPa shear line; brown double solid line represents the 700 hPa shear line; black dashed line represents the surface convergence line)

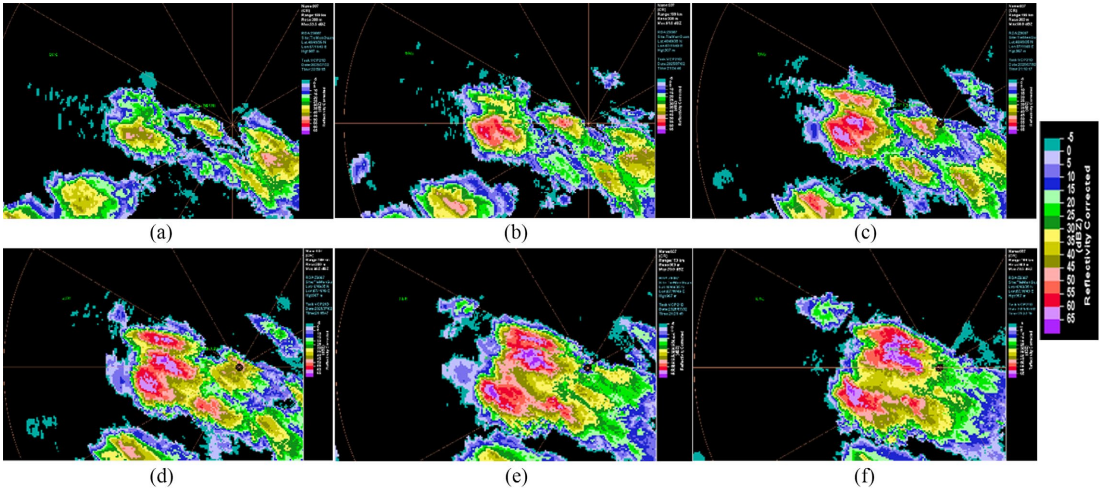
**图 7.** (a) 2025 年 7 月 2 日 20 时中尺度分析, (b) 2025 年 7 月 4 日 08 时中尺度分析(紫色实线为 200 hPa 急流; 棕色实线为 500 hPa 槽线; 蓝色箭头为 500 hPa 槽后偏北气流; 绿色锯齿线为 850 hPa 湿区; 红色双实线为 850 hPa 切变线; 棕色双实线为 700 hPa 切变线; 黑色点画线为地面辐合线)

## 6. 雷达图像产品特征分析

### 6.1. 组合反射率因子(CR)特征分析

在 2025702 个例过程中, 新疆铁门关市天气雷达图像产品显示: 20:59, 距雷达中心约 20 公里的正西方有对流单体生成, 主体成自西向东移动, 且在短时间内突然增强, 21:04, 回波强度  $\geq 50\text{ dBz}$  的面积

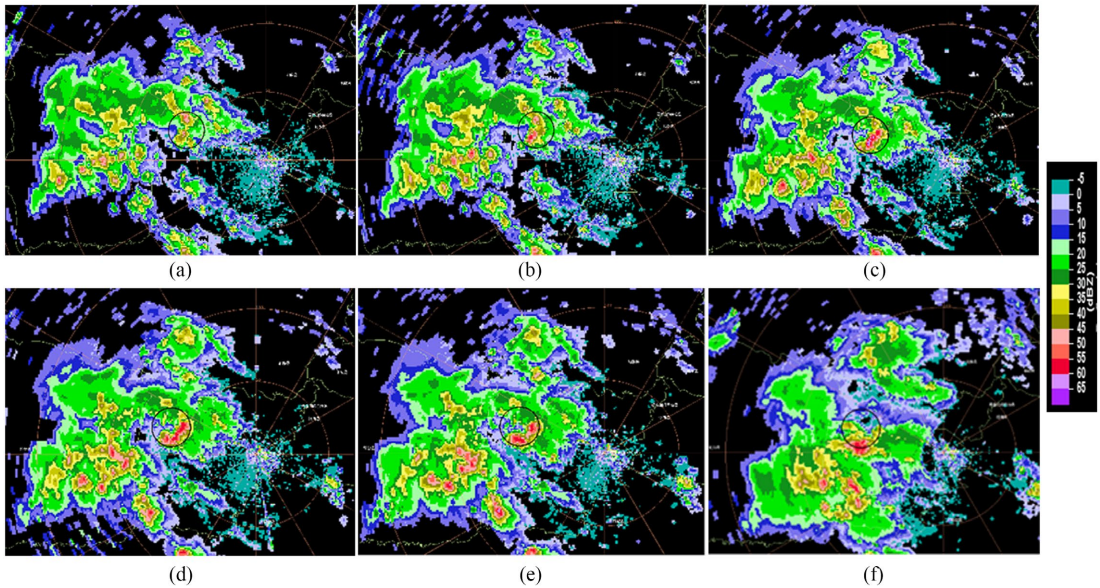
均明显增大。至 21:10, 强回波中心达 68 dBz, 并具有一定的冰雹指数(HI 为 1); 随着对流风暴东移, 21:26 其分裂为两个单体,  $\geq 50$  dBz 回波面积继续有所增大, 所经区域出现冰雹(见图 8(a)~(f))。



**Figure 8.** Composite reflectivity factor from the weather radar in Tiemenguan, Xinjiang, on July 2, 2025. (a) 20:59, (b) 21:04, (c) 21:10, (d) 21:15, (e) 21:26, (f) 21:32 (units: dBZ)

**图 8.** 2025 年 7 月 2 日新疆铁门关市天气雷达组合反射率因子。(a) 20:59; (b) 21:04; (c) 21:10; (d) 21:15; (e) 21:26; (f) 21:32; (单位: dBZ)

在 2025704 个例中, 新疆库尔勒新一代天气雷达图像产品资料: 14:57, 混合降水回波中出现了 $\geq 45$  dBz 的强回波, 由西北向东南移动过程中有所增强, 移动速度较慢。15:15,  $\geq 45$  dBz 的强回波面积增大, 并维持了三个体扫。15:27, 强回波对应的强时降水的开始, 直至 16:05 前后, 强回波逐渐移出 30 团区域(见图 9(a)~(f))。



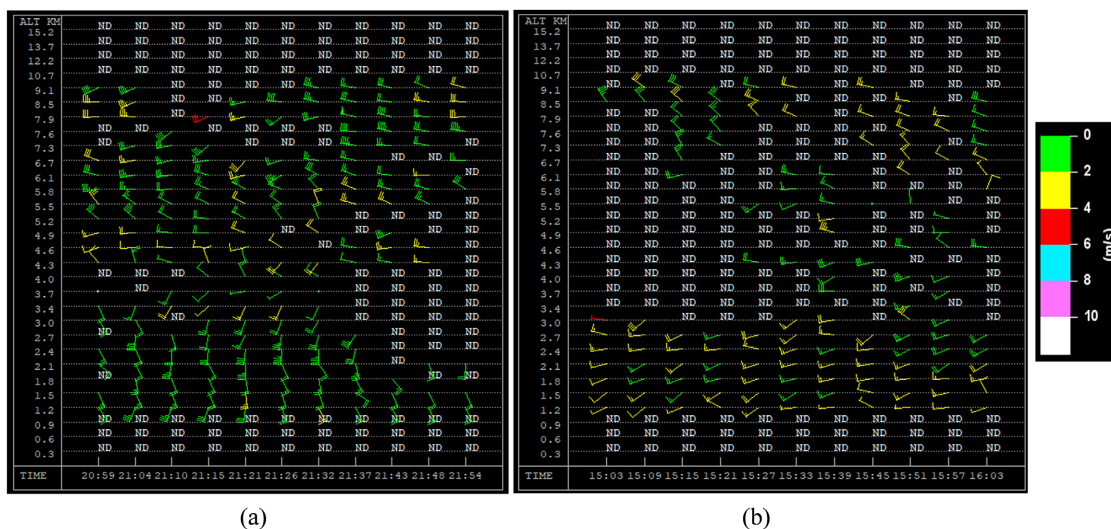
**Figure 9.** Composite reflectivity factor from the weather radar in Korla, Xinjiang, on July 4, 2025. (a) 14:57, (b) 15:03, (c) 15:15, (d) 15:21, (e) 15:27, (f) 15:57 (units: dBZ)

**图 9.** 2025 年 7 月 4 日新疆库尔勒天气雷达组合反射率因子。(a) 14:57; (b) 15:03; (c) 15:15; (d) 15:21; (e) 15:27; (f) 15:57 (单位: dBZ)

## 6.2. 风廓线(VWP)及垂直积分液态水含量(VIL)产品应用

在 2025702 个例中, 风廓线 VWP 产品显示: 20:53, 高空(9 km)出现较强的偏西风, 最大风速达  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 同时, 中低层风场为较一致的东南风, 导致中低层与中高层风场之间存在较为显著的垂直风切变(见图 10(a))。到 21:04, 低层风向转为西南风, 风速增强, 垂直风切变进一步加剧, 对流风暴的组织性较好, 这一时段正是冰雹云的形成和强度急剧增强的关键时期。21:48, 低层风场减弱, 3~4 km 高度处的风速明显降低, 垂直风切变随之减弱, 云团的垂直动能衰退, 对流风暴逐渐向东偏南方向移动, 离开 33 团营区。同时, 垂直液态含水量(VIL)产品(图略)显示, 在对流云发展初期, VIL 值从 20:59 的  $3.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  急剧增加至 21:04 的  $20.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 与回波急剧增强的时间点吻合。此后, VIL 值在 21:21 时减至  $17.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 反映了对流云的衰退过程。这表明, VIL 值的跃增、衰减与冰雹云的形成及强度变化高度密切相关, 且可作为南疆盆地沙漠边缘冰雹发生的重要判别指标之一。

在 2025704 个例中, 风廓线 VWP 产品显示, 从对流云生成至结束, 低层风场持续为西南风。15:27 至 15:51 期间, 垂直风切变的强度波动较大, 而 16:03 中高层风场表现为一致的西北风, 对流单体逐渐的东南移出 30 团营区(见图 10(b))。垂直积分液态含水量(VIL)产品(图略)分析显示, 在对流云发展初期, 14:57 时 VIL 为  $12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 随着云体增强, VIL 值逐步增加至  $27.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (15:03), 并在 15:09 时达到最大值  $39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。伺候, VIL 值在 15:15 至 15:39 间保持在  $34.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 直到 16:09 对流单体移出营区, VIL 仍维持在  $31 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。VIL 值的变化与对流云体发展及降水强度变化高度一致, 表明 VIL 作为评估云体发展与降水强度的重要参数, 能够有效反映降水量的变化。从回波强中心剖面图显示(图略), 强回波在 15:17 已部分接地, 表现为低质心降水; 随后降水从 15:28 开始, 持续较强, 小时降水量达  $37.4 \text{ mm}$ , 过程累计雨量为  $38.5 \text{ mm}$ 。低质心回波通常与强降水及强对流活动相关, 进一步支持了此次强降水发生的可能性。



**Figure 10.** (a) Wind profiler (VWP) from the weather radar in Tiemenguan, Xinjiang, on July 2, 2025, and (b) Wind profiler (VWP) from the weather radar in Korla, Xinjiang, on July 4, 2025 (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 10.** (a) 2025 年 7 月 2 日新疆铁门关市天气雷达风廓线(VWP), (b) 2025 年 7 月 4 日新疆库尔勒天气雷达风廓线(VWP) (单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

## 7. 结论和讨论

本研究基于多源气象观测数据、雷达图像产品及 ERA5 再分析数据, 对 2025 年 7 月 2 日和 7 月 4 日



发生在南疆盆地东部的两次冰雹事件进行了综合诊断。结果表明, 两次强对流过程在环境场、触发机制、发展演变及雷达产品特征等方面存在差异, 具体结论如下:

(1) 影响系统及触发机制。2025702 个例受 500 hPa 槽底分裂短波影响, 且 700 hPa 和 850 hPa 均存在切变线; 2025704 个例主要由槽后偏北气流造成的局地强对流。

(2) 风场辐合、高温高湿与对流发展。2025702 个例发生在沙漠边缘, 主要由局地热力对流触发, 低层风场的辐合(偏北风和偏南风)增强了垂直上升运动, 有利于对流风暴的快速增强; 前期的弱降水形成的高温高湿环境条件则为其提供了较好的热力条件, 对流风暴主体沿着自西向东的方向移动。2025704 个例发生在第二师北部垦区沿山一带, 垂直风切变相对较小, 出现冰雹的时间相对较短, 存在东南风与西北风的辐合, 且近地面阿克苏至巴州地区存在地面辐合线, 极有利于触发对流; 对流风暴整体沿着呈西北-东南走向移动。

(3) 大气不稳定性。2025702 个例的 CAPE 值达到  $1669.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 垂直风切变和深厚不稳定层为强对流提供了有利条件。相比之下, 7 月 4 日 CAPE 值较低, 但地形和低层充足的水汽对冰雹事件的发生起到了关键作用。通过对比物理参数, 两次个例  $-20^\circ\text{C}$  层高度均  $< 7.2 \text{ km}$ ,  $-20^\circ\text{C}$  距  $0^\circ\text{C}$  高度差  $\leq 2.78 \text{ km}$ , 850 hPa 与 500 hPa 温度差  $\geq 35^\circ\text{C}$ , 以上环境参量阈值可用于本研究区域冰雹样本的判别, 但普适性需要更多冰雹样本进行验证。

(4) 雷达图像产品特征。2025702 个例中, 雷达回波强度在短时间内急剧增强, 强回波中心达 68 dBZ, 伴随明显的冰雹指数; 垂直液态含水量(VIL)的跃增和衰减与冰雹的发生及消亡有较好的对应关系, 对该区域冰雹的发生预警较好的指示意义。相比之下, 2025704 个例的雷达回波强度变化较平稳, VIL 值持保持高位, 且有低质心降水回波特征, 符合强降水的持续性特征, 水汽持续供应也为强降水提供了支持。2025 年 7 月发生在南疆盆地东部的两次冰雹天气过程, 均表现为对流云发展并进入农业种植区后突然增强。由此引发的问题: 植物的蒸腾作用对于对流的发展加强是否有促进作用? 贡献率又如何定量评估? 这一现象的深入探讨对于认识具有相似局地对流特征的天气系统都具有重要现实意义。

## 基金项目

新疆生产建设兵团第二师强青科技领军人才计划(2023HZ0105)、新疆生产建设兵团第二师科技创新人才计划(2025RC0301)、新疆科技创新团队(天山创新团队)项目(2022TSYCTD0007)、新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202505)。

## 参考文献

- [1] Köcher, G., Zinner, T. and Knöte, C. (2023) Influence of Cloud Microphysics Schemes on Weather Model Predictions of Heavy Precipitation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23**, 6255-6269. <https://doi.org/10.5194/acp-23-6255-2023>
- [2] Wang, J., Yu, E., Ma, J., Wang, J., Chen, D. and Wang, H. (2025) Precipitation of Weak Tropical Cyclone Mulan (2022): Sensitivity to Cumulus and Microphysics Parameterization Schemes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **130**, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2024jd043011>
- [3] Veiga, C., da Silva, M.G.A.J. and da Silva, F.P. (2024) Heavy Rainfall Event in Nova Friburgo (Brazil): Numerical Sensitivity Analysis Using Different Parameterization Combinations in the WRF Model. *Natural Hazards*, **120**, 11641-11664. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06638-6>
- [4] 郑皎, 郭欣, 付丹红, 等. 云南春季典型冰雹天气的云微物理特征[J]. 应用气象学报, 2024, 35(2): 182-195.
- [5] 李喆, 陈小敏, 刘奇俊, 等. 冰雹微物理过程影响对流云降水的数值模拟个例研究[J]. 气象, 2025, 51(2): 182-190.
- [6] 辛悦, 苏立娟, 郑旭程, 等. 内蒙古冰雹特征及基于机器学习的冰雹识别方法研究[J]. 干旱区地理, 2025, 48(1): 11-19.
- [7] 谢海涛, 王昀, 陈静, 等. 新疆冰雹历时的气候特征[J]. 绿洲农业科学与工程, 2023, 9(2): 17-24.
- [8] 朱思华, 罗继, 曲良璐. 新疆阿克苏地区冰雹时空分布及雷达回波特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 81-88.



- 
- [9] 衣娜娜, 苏立娟, 郑旭程, 等. 冰雹天气的环境参量及预报模型[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 13-23.
- [10] 马中元, 王金鑫, 张林才, 等. 基于雷达拼图 CR 产品四要素识别冰雹云的方法[J]. 大气科学学报, 2024, 47(5): 826-840.
- [11] 刘杰, 张国晶, 王晓英, 等. 基于决策树算法的青海省高原地区冰雹预报及关键特征因子分析[J]. 高原气象, 2025, 44(6): 1519-1533.
- [12] 尉英华, 花家嘉, 王莹, 等. 近 11 年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析[J]. 气象, 2023, 49(2): 213-223.
- [13] 强德厚, 刘俊卿, 丁建芳, 等. 青藏高原夏季一次冰雹过程的微物理特征[J]. 气象, 2024, 50(6): 701-710.
- [14] 姚俊强, 陈静, 周桂香. 新疆南部干旱区暴雨研究: 科学认知与主要进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(5): 1-8.
- [15] 罗继, 曲良璐, 穆热扎. 吾守尔. 2016 年 5 月新疆第一师三团一次强冰雹天气成因分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(4): 45-51.
- [16] 陈艳丽, 姜爱红, 周雪英, 等. 新疆图木舒克市冰雹天气的环流背景和判识指标分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(5): 588-595.
- [17] 希热娜依·铁里瓦尔地, 胡素琴, 玛依热·艾海提, 等. 塔里木盆地西缘两次致灾冰雹环境场和雷达特征对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 16-23.
- [18] 彭军, 汤达章, 周雪英. 库尔勒市 2015 年两次冰雹天气成因及雷达回波特征对比分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 753-761.
- [19] 庄晓翠, 张云惠, 周雪英, 等. 新疆短时强降水天气雷达回波特征[J]. 气象, 2021, 47(11): 1402-1415.
- [20] 思华, 罗继, 曲良璐. 新疆阿克苏地区冰雹时空分布及雷达回波特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 81-88.
- [21] 安大维, 陈春艳, 窦刚, 等. 阿克苏地区西部冰雹天气雷达回波演变特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(6): 59-66.