

海口机场一次长时间雷雨天气过程分析

周文昊^{1,2}, 朱国辉^{2,3}, 钟佳李⁴, 央珍², 旦增卓嘎²

¹中国民用航空局空中交通管理局航空气象中心, 北京

²中国民用航空西藏自治区空中交通管理中心, 西藏 拉萨

³中国民用航空大连空中交通管理站, 辽宁 大连

⁴中国民用航空三亚空中交通管理站, 海南 三亚

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年7月15日; 发布日期: 2026年7月22日

摘要

海南岛极端强降水、强对流天气常导致飞机无法起降, 大面积延误, 对航空运行影响极大。利用常规天气资料、ERA5再分析资料和卫星云图资料等, 对2023年10月11日海南岛一次长时间雷雨天气过程的主要影响系统、物理过程及形成机制进行了分析。结果表明: 冷空气从中低层沿海洋南下并在华南东部沿海堆积, 热带赤道辐合带对流活动显著, 叠加稳定增强、西伸发展且呈东西带状的副高系统, 联合提供了有利环流条件, 推动低空东风急流从形成逐步走向发展与加强; 低空东风急流、弱冷空气南侵、西太平洋副热带高压南侧的东风波等为暴雨的发生提供了有利的条件。在各类条件促使下, 海南岛出现明显的对流列车回波效应, 且整体系统移动缓慢, 洋面上东风急流辐合区长时间维持, 使得不断有强回波经过海口机场, 造成持续时间较长的强降水伴对流天气。东风急流提供了暴雨所需水汽。对流层中层产生的正差动涡度平流扰动, 动力作用与热力作用双重强迫叠加, 进而引发次级环流活动, 导致暴雨区上空垂直运动的发展, 促使降水增强。Q矢量散度在海南岛附近辐合, 0~6 km低层弱切变都有利于新生对流不断触发。此次强对流天气过程云微物理过程中占主导地位的为冷雨过程, 原因为海南岛东部较强的风速脉动, 促使了较强的垂直速度, 将水汽带至高层, 促使过冷水的有效生成, 导致冷雨过程有效发展并占据了主导地位。

关键词

海南岛, 雷雨天气, 对流列车回波效应, 东风急流, 冷雨过程

Analysis of a Long-Duration Thunderstorm Event at Haikou Airport

Wenhao Zhou^{1,2}, Guohui Zhu^{2,3}, Jiali Zhong⁴, Yangzhen², Danzeng Zhuoga²

¹Aviation Meteorological Center of the Air Traffic Management Bureau of CAAC, Beijing

²Xizang Air Traffic Management Center of CAAC, Lhasa Xizang

文章引用: 周文昊, 朱国辉, 钟佳李, 央珍, 旦增卓嘎. 海口机场一次长时间雷雨天气过程分析[J]. 自然科学, 2026, 14(4): 462-470. DOI: 10.12677/ojns.2026.144050

³Dalian Air Traffic Management Station of CAAC, Dalian Liaoning⁴Sanya Air Traffic Management Station of CAAC, Sanya Hainan

Received: May 29, 2026; accepted: July 15, 2026; published: July 22, 2026

Abstract

Extreme heavy rainfall and severe convective weather in Hainan Island often lead to flight delays and cancellations, significantly impacting aviation operations. Using conventional meteorological data, ERA5 reanalysis, and satellite imagery, this study analyzes the main influencing systems, physical processes, and formation mechanisms of a long-lasting thunderstorm event over Hainan Island on October 11, 2023. The results show that cold air advected southward at mid-low levels along the coast of eastern South China, while convection in the tropical Intertropical Convergence Zone was active. Together with a stable, strengthened, westward-extending, and zonally oriented western Pacific subtropical high, these systems provided favorable large-scale circulation conditions, promoting the formation, development, and intensification of a low-level easterly jet. The jet, combined with southward-invading weak cold air and an easterly wave south of the subtropical high, created favorable conditions for heavy rainfall. Under these combined influences, a pronounced convective train echo effect occurred over Hainan Island. The system moved slowly, and the convergence zone of the easterly jet over the ocean persisted for an extended period, leading to repeated passages of intense echoes over Haikou Airport and resulting in prolonged heavy precipitation accompanied by convection. The easterly jet supplied abundant moisture for the heavy rainfall. Positive differential vorticity advection in the mid-troposphere, along with combined dynamic and thermal forcing, triggered secondary circulation and enhanced vertical motion over the rainfall area, thereby intensifying precipitation. Convergence of the Q-vector divergence near Hainan Island indicated conditions supporting convergent ascent at 0~6 km. The dominant cloud microphysical process during this severe convection event was the cold-rain process, attributed to strong wind pulsations over eastern Hainan Island, which enhanced vertical velocity, lifted moisture to upper levels, and promoted the efficient formation of supercooled water, allowing the cold-rain process to develop effectively and dominate.

Keywords

Hainan Island, Thunderstorm, Convective Train Echo Effect, Easterly Jet, Cold-Rain Process

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

在低纬度地区汛期强对流方面,国内研究多以华南汛期、热带气旋为主要对象,针对海南岛的过程研究偏少。海南岛极端强降水、强对流天气通常导致飞机无法起降,大面积延误等,对航空运行影响极大。各类天气尺度系统发生相互作用,最终促成暴雨天气,这一点已被相关研究证实[1]。Bosart [2]通过分析一个中尺度与天气尺度相互作用的个例指出天气尺度形势对中尺度环流的起源和发展起控制作用。行星尺度、天气尺度和中小尺度系统的共同作用造成了持续性的暴雨过程。近年来,我国气象学者对暴雨的研究取得了较大进展[3]-[5],对于 20°N 以南区域的相关研究,多数成果聚焦于热带气旋所致暴雨,非热带气旋暴雨尚未得到充分关注。海南岛常年遭遇强降水侵袭,暴雨灾害风险极高。当地降水过程成因多样,除热带气旋直接带来的强降雨外,冷暖系统相互作用形成的秋季东风急流,也会催生强度高、

历时久的持续性暴雨。这类暴雨的形成机理较为复杂,可预报性远低于热带气旋暴雨,为日常预报工作带来不小挑战。海南岛汛期漫长,强降水活动十分活跃,秋汛期(9~11月)更是极端降水的高发时段,当地单站日雨量大于250毫米的特大暴雨日数,接近全年总数的一半。已有研究表明,华南前汛期为冷暖季节过渡阶段,南下冷空气是当地绝大多数暴雨的重要诱因[6]。海南岛秋汛期同样经历冬夏季风的转换过程,南海北部冷暖空气交汇频发,致使降水相关天气系统结构复杂。秋季,越南中北部、海南岛及华南沿海区域暴雨多发,极端降水现象尤为突出。结合统计资料来看,此阶段特大暴雨事件中,热带气旋直接影响的占比为42%,另外58%的过程则源于冷暖系统耦合形成的偏东低空急流[7]。9~11月是偏东低空急流型降水的主要发生时段,此类过程的天气形势大体相近,然而暴雨形成与增强的影响条件错综复杂。由于形势场特征弱于热带气旋暴雨,该类天气的精准预报难度较大,也为防灾减灾工作增添诸多阻碍,加之其致灾程度往往更甚于热带气旋暴雨,故而被单独界定为秋汛期暴雨或后汛期暴雨。

2. 数据及使用方法

本文通过 ERA5 全球再分析资料、地面常规测站、卫星、雷达和数值预报模式数据,从高低空形势场环流特征、物理量场及云微物理特征方面对此次持续性强对流天气进行系统分析。

3. 天气过程实况概述

2023年10月11日,全国大部为适航天气西北地区受高原槽东移影响,以稳定性降水天气为主。华东、华南大陆地区受冷空气南下高压控制,均为晴好天气。海南岛受冷空气南下冷空气及东风急流加强共同影响,海口机场出现长时间雷雨天气过程,过程整体持续近13小时,累计降水量达到150毫米以上,达到大暴雨量级,机场当日航班起降困难。海口机场当日航班正常率57.5%,累计调时航班104架次。

机场实况方面,随着11日夜间,东风急流的增强,11日02时(北京时,下同)海口机场开始出现中雷雨天气。02时19分强度增强,转为强雷雨天气。05时,强度减弱为弱雷雨天气。至10时,弱雷雨与小阵雨相互转换。10时12分,强度再次增强,转为强雷雨天气,随后强度减弱。12时40分再度增强为强雷雨天气。此次长时间雷雨天气过程包含多次增强与减弱过程。强对流不断新生于海南岛东侧洋面上,并向西北方向移动,形成列车回波效应,其成因为地形抬升与低空东风急流辐合叠加。整体系统移动缓慢,洋面上东风急流辐合区长时间维持,使得不断有强回波经过海口机场,造成持续时间较长的强降水伴对流天气。

4. 过程背景场分析

4.1. 环流场分析

10月11日08时天气形势如图1,500 hPa上西北地区有高原槽东移,588线呈现东西走向带状分布,位于云南北部至福建中部一带,海南岛位于副高南侧偏东气流内。700 hPa切变线位于江西北部至浙江北部一带,由于低层为西北气流控制,水汽条件不足,因此均为晴好适航天气。850 hPa华南地区受南下冷空气以及台风残余环流影响,东北气流与洋面偏东气流于南海附近辐合。受两股气流辐合影响,925 hPa南海洋面上风速12 m/s以上,达到超低空急流标准。东风急流于海南岛东侧洋面上不断触发新生对流并向西北方向传播,影响海口机场。整体强回波位于925 hPa东风急流的偏南侧。此外,该时次海南岛上空200 hPa处于高空急流南侧的辐散区,高空西风急流带最南端达到25°N附近,提供较好的高层辐散条件。

此次过程海南岛存在低层东风急流,其成因为副高及台风残余环流共同导致,低层东风急流内脉动辐合上升运动,高层辐散下沉运动,中层有很强的上升运动,此类高低空配置极易产生强降水伴强对流天气过程。

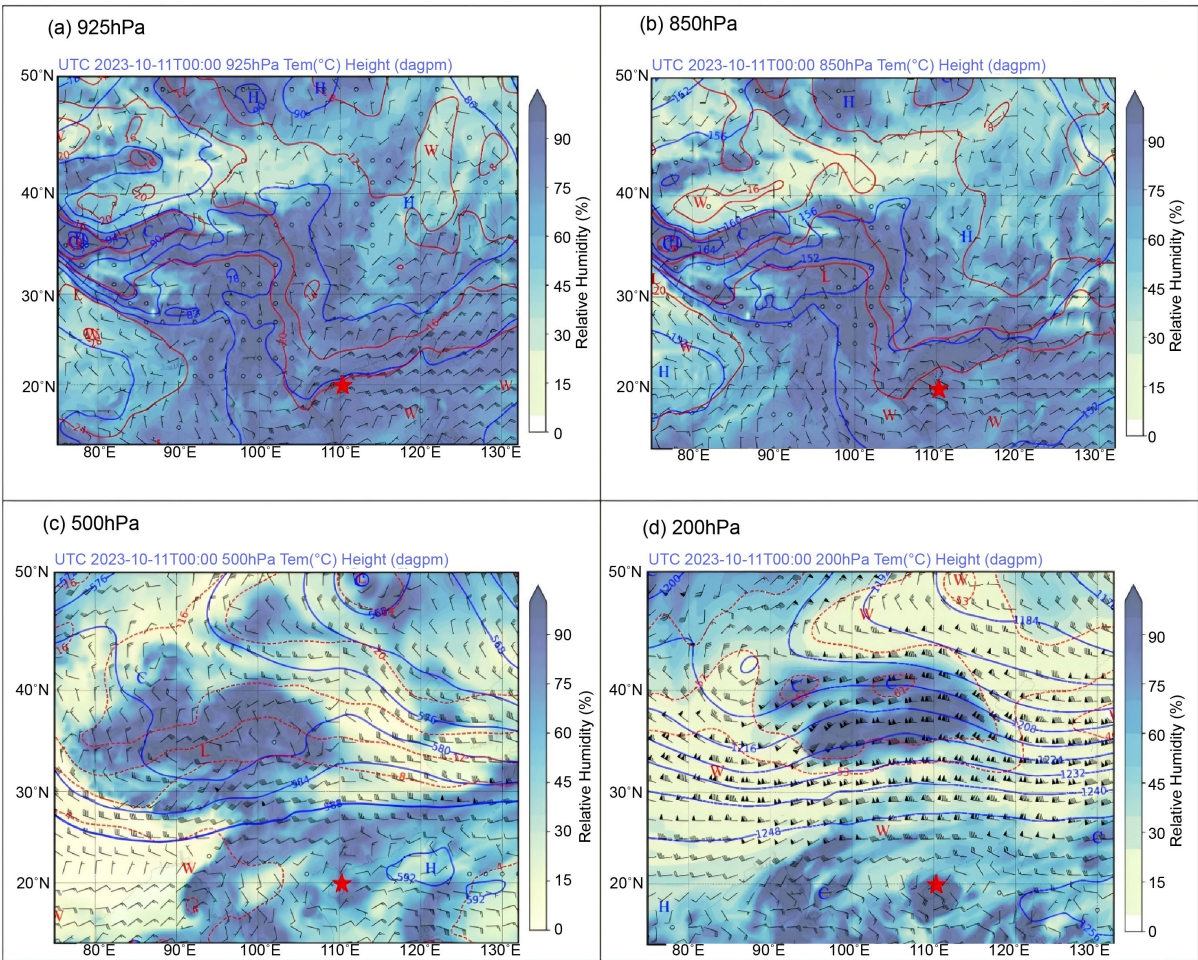


Figure 1. Synoptic charts at 925, 850, 500, and 200 hPa for 08:00 LST 11 October 2023 based on ERA5 data (Shading: relative humidity (unit: %); blue solid lines: geopotential height (unit: gpm); red solid lines: temperature (unit: °C))

图 1. ERA5 资料的 2023 年 10 月 11 日 08 时 925、850、500 和 200 hPa 形势场(填色: 湿度(单位: %)、蓝色实线: 位势高度(单位: gpm)、红色等值线: 温度(单位: °C))

4.2. 水汽条件及动力条件

充足的水汽供给是暴雨发生、发展的必要前提。通过分析单点水汽与 500 hPa 水汽通量散度空间分布(图 2、图 3)可见, 本次暴雨的水汽主要由东风急流输送, 水汽源自西太平洋并随东风气流不断向本地输送。机场单点湿区垂直伸展深厚, 从低层直达对流层顶。受低层偏东急流与海陆效应共同作用, 海南岛东部出现强烈辐合抬升。925 hPa 和 850 hPa 高度层上, 海南岛东侧和东北侧存在水汽通量散度极值中心, 水汽输送最强区域与急流轴出口区相匹配。强降水主要分布在水汽通量中心左侧、低空急流左前方、水汽通量散度大值区以及东风波曲率最大位置。

动力强迫抬升方面, 从这次过程可见, 11 日开始, 海南岛上空始终维持中心强度为 $1\sim2\times10^{-10}\text{ s}^{-2}$ 的正差动涡度平流区(图 4), 而该中心基本与上升运动最强烈区域重合。这说明, 正是由于差动涡度平流存在, 破坏了该处的准地转平衡, 动力强迫作用激发的次级环流导致垂直上升运动发展, 从而触发了强降水过程。图 5 为 08 时 Q 矢量散度分布, 其能够刻画非均匀的冷暖平流所导致的热力强迫。由图可见海南岛附近有较强的负 Q 矢量散度, 说明海南岛周边存在较好的垂直抬升条件, 非常有利于强对流天气的维持发展。

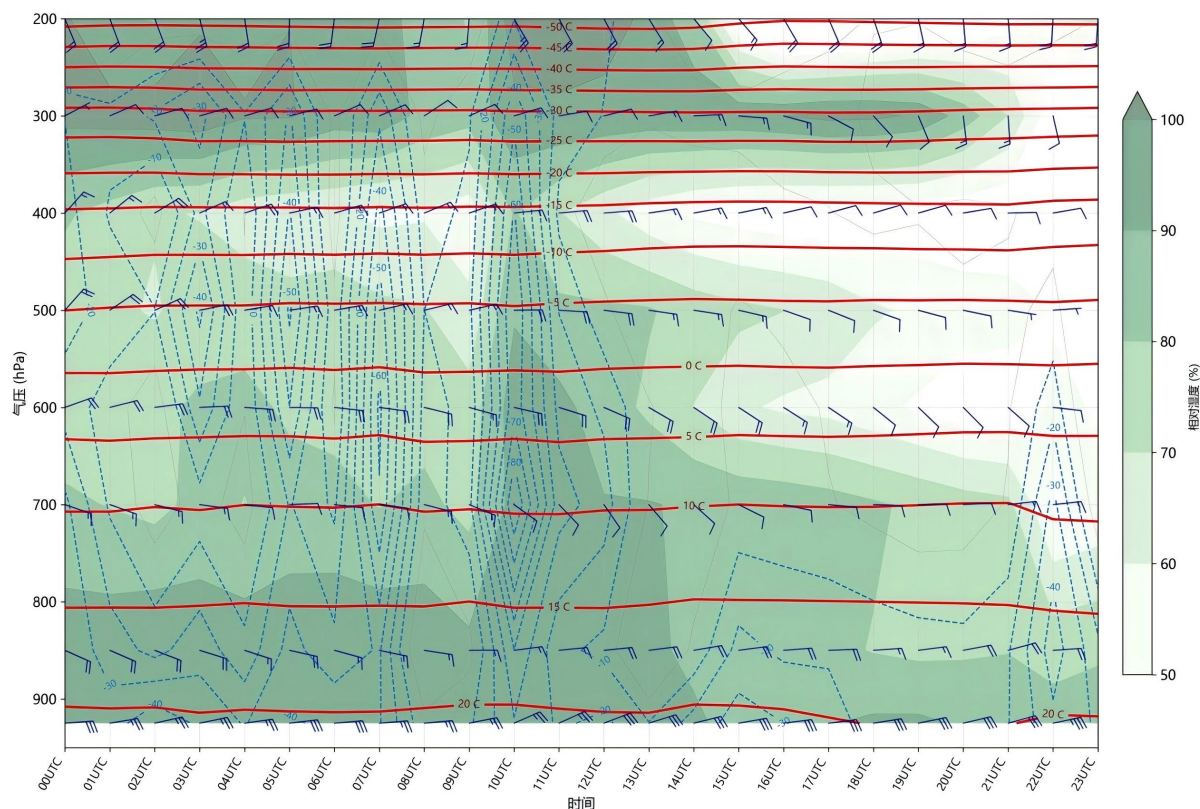


Figure 2. Time series at Haikou Airport based on ERA5 data (Shading: relative humidity (unit: %); red solid line: temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), blue dash line: velocity (unit: $10^{-2} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$))

图 2. ERA5 资料的海口机场单点时序图(填色: 相对湿度(单位: %), 红色实线: 温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), 蓝色虚线: 垂直速度(单位: $10^{-2} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$))

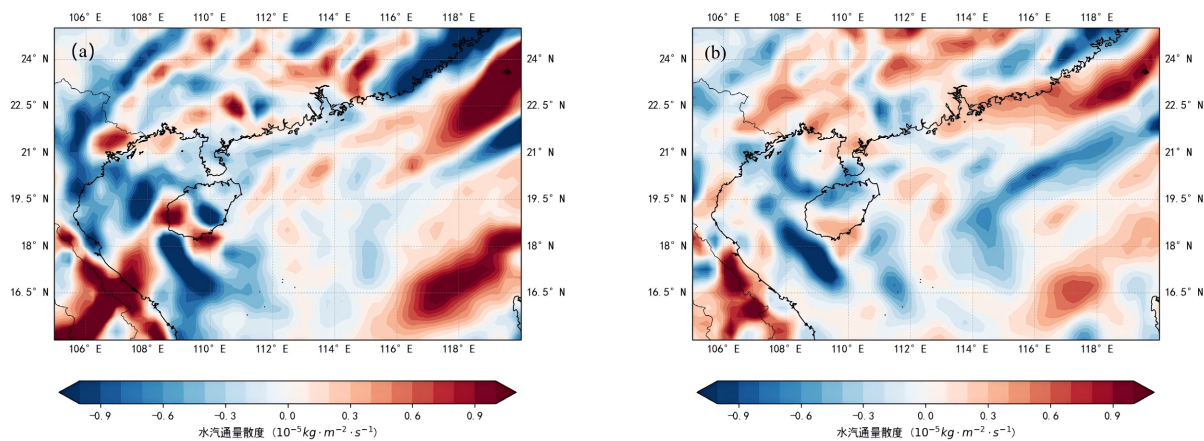


Figure 3. Moisture flux divergence at 925 (a) and 500 hPa (b) over Hainan Island at 08:00 LST 11 October 2023 based on ERA5 data (unit: $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 3. ERA5 资料 2023 年 10 月 11 日 08 时海南岛 925 hPa (a)和 500 h Pa (b)水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

4.3. 微物理特征

图 6 为 ERA5 再分析资料 10 月 11 日 00UTC 区域平均的四种水凝物粒子(云水、雨水、雪、冰晶)混合比的垂直廓线, 反映此次强对流天气过程水凝物含量的总体特征。温度层结条件十分有利于冷雨过程

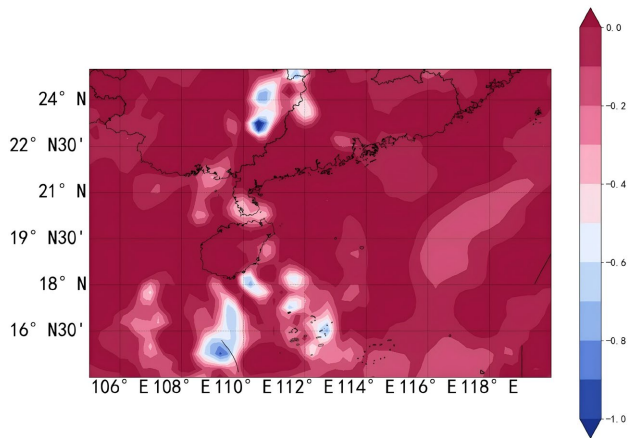


Figure 4. Differential vorticity advection (500~925 hPa) over Hainan Island at 08:00 LST 11 October 2023 based on ERA5 data (unit: 10^{-10} s^{-2})

图 4. ERA5 资料 2023 年 10 月 11 日 08 时海南岛差动涡度平流(500~925 hPa, 单位 10^{-10} s^{-2})

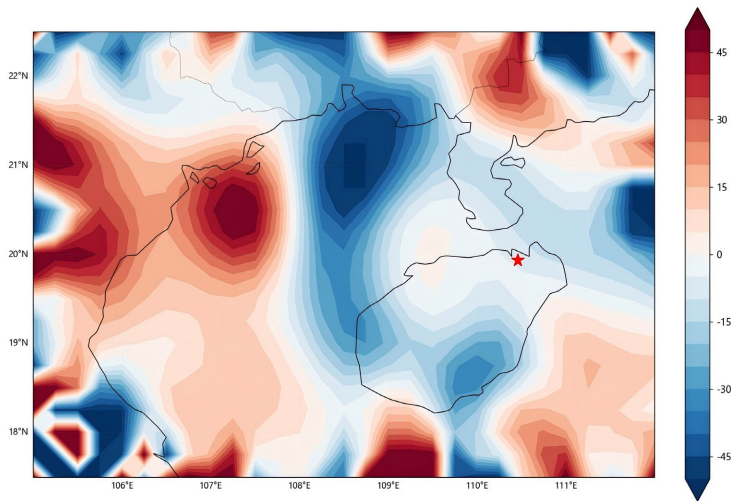


Figure 5. Q-vector divergence at 850 hPa at 08:00 LST 11 October 2023 based on ERA5 data (unit: $10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

图 5. ERA5 资料 2023 年 10 月 11 日 08 时 850 hPa Q 矢量散度分布(单位 $10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

的发展。此次过程起主导作用的水凝物为雪，而 0°C 层以上存在充沛的过冷水。充沛的过冷水增强了雪粒子的淞附增长以及冰晶、雪碰冻过冷雨滴转化成霰粒子的过程，这对于冷雨过程的发展十分重要。丰富的固态水凝物表明，此次强对流天气过程中较强的天气形势，促使了较强的垂直速度，将水汽带至高层，促使过冷水的有效生成，导致冷雨过程有效发展并占据了主导地位。冷雨过程造成潜热的释放一定程度上使得中高层局部增暖、使扰动加强。

5. 探空垂直分析

由探空图可见(图 7)该时次热力条件较为一般，计算得到 CAPE 仅为 206.25 J/kg ，表明此次强天气过程动力强迫抬升条件占主导。垂直风速 850 hPa 偏东风风速达到 13.67 m/s ，925 hPa 偏东风风速达 16.22 m/s 较强水平风速切变造成的脉动辐合为此次过程的触发条件。

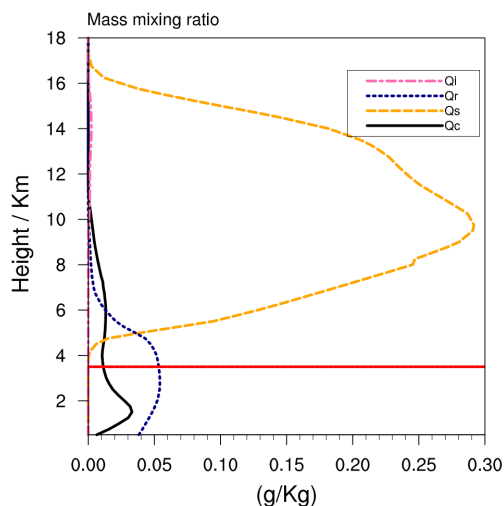


Figure 6. Regional average content of hydrometeors derived from ERA5 data (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图 6. 区域平均的 ERA5 反演的云水、雨水、雪、冰晶水凝物含量(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

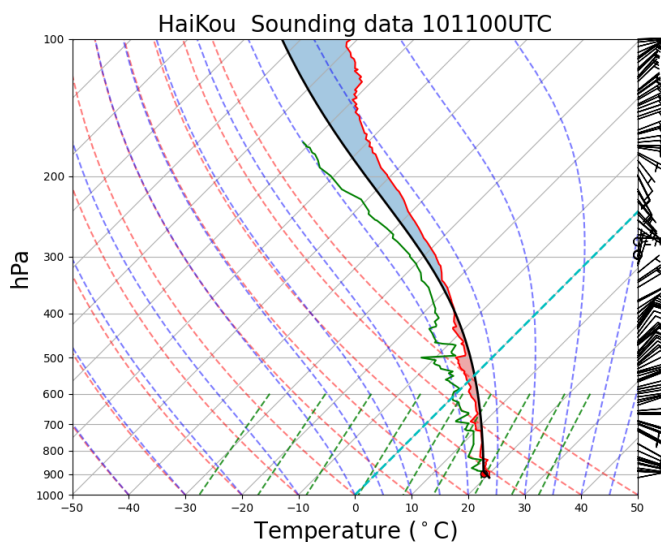


Figure 7. Haikou sounding chart at 08:00 LST on October 11, 2023

图 7. 2023 年 10 月 11 日 08 时实况海口探空图

华南沿海中低纬冷空气与南海低纬辐合系统的协同作用,是海南岛秋季非热带气旋暴雨形成的关键,二者缺一不可。这类天气现象集中在 9 至 11 月,降水过程往往伴随华南沿海低空东风急流。暖湿气流与南下的干冷空气在海南上空相遇,造成海南岛大范围的暴雨天气。此次强对流过程便为典型的海南岛发生秋季非热带气旋暴雨天气过程。

图 8 为海口机场垂直风切变、风速切变时间演变。由图可见,0~6 km 垂直风切变小于 10 m/s。风速垂直切变表明高层风速小于低层风速,低层西风急流较为强盛。该特征与 Liu 等[8]的研究结果相一致,在东南风和东风条件下的弱垂直风切变则有利于东南近海的辐合中心产生频繁的夜间对流初生。强垂直风切变通过增强垂直混合来降低近地面气块的正向上浮力,反而不利于海南岛夜间对流的初生。

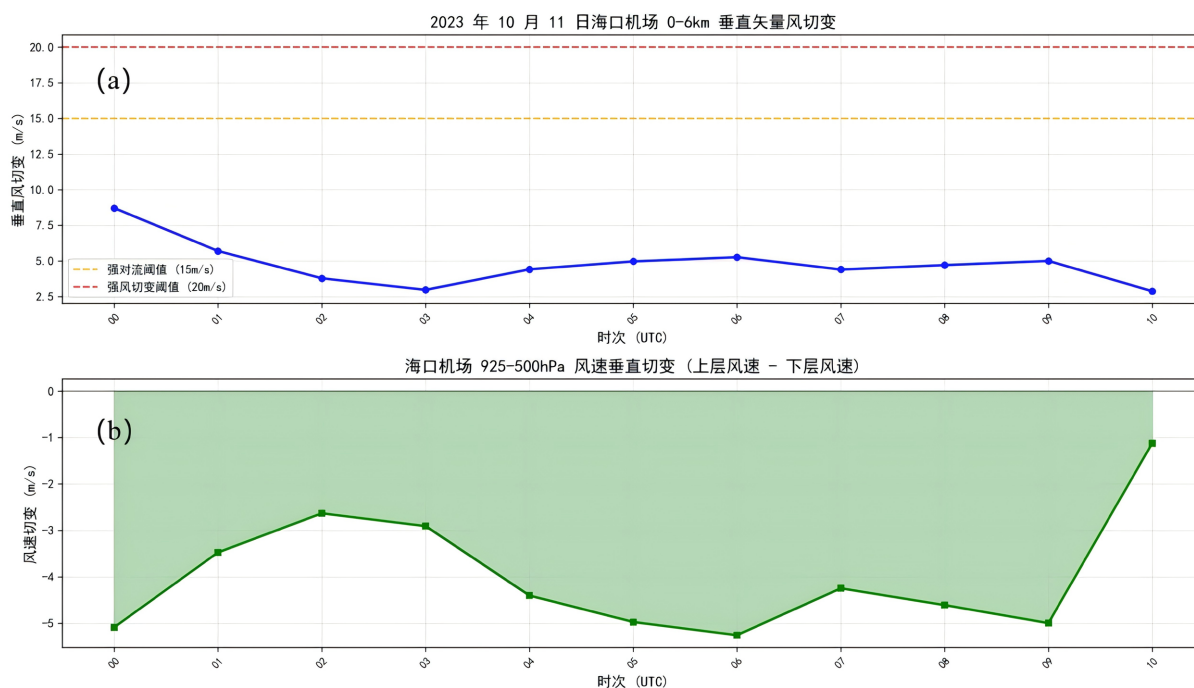


Figure 8. Temporal evolution of vertical wind shear, wind speed shear at Haikou Airport on October 11, 2023

图 8. 2023 年 10 月 11 日海口机场垂直风切变(a)、风速切变(b)时间演变

6. 数值模式预报分析

各家模式预报结果显示,此次对流过程,虽然各家模式均有体现,差异在于强度、落区及持续时间。20 时 CMA-MESO 能够预报出洋面上激发并向西北方向传播特征,AMC-MESO 强度偏弱且落区范围偏小,两家全球模式均预报准确,但随后各家模式预报对流西移减弱,且洋面不再激发。对比实况,各家模式对流西移减弱时间偏早,实况岛东侧在 20 时仍有局地激发。模式对于此次过程的差异主要为对于东风波的强度、辐合区预报的差异。未来海南岛受该类持续稳定偏东急流影响时需结合数值模式重点考虑修订其开始及结束时间。

7. 总结

利用常规天气资料、ERA5 再分析资料、卫星云图和海南省自动站资料,对 2023 年 10 月 11 日海南岛一次长时间雷雨天气过程的主要影响系统、物理过程及形成机制进行了分析。结果如下:

(1) 冷空气从中低层东移南下并在华南沿海堆积,副高稳定加强西伸呈东西带状分布,热带地区赤道辐合带活跃,和台风残余环流共同作用促使低空东风急流形成、发展和加强,此为本次过程主要影响天气系统。

(2) 长时间雷雨天气是由于各类条件促使下,海南岛出现明显的对流列车回波效应,且整体系统移动缓慢,洋面上东风急流辐合区长时间维持,使得不断有强回波经过海口机场,造成持续时间较长的强降水伴对流天气。

(3) 海南岛准地转平衡受正涡度平流扰动,动力强迫生成的次级环流促进垂直上升运动发展,最终触发强降水。Q 矢量散度分布,说明海南岛周边存在较好的垂直抬升条件,有利于强对流天气的维持发展。0~6 km 垂直风切小于 10 m/s,有利于夜间海南岛对流的初生。

(4) 此次强对流天气过程中占主导地位的为冷雨过程,原因为较强的天气形势,促使了较强的垂直速

度, 将水汽带至高层, 促使过冷水的有效生成, 导致冷雨过程有效发展并占据了主导地位。冷雨过程造成潜热的释放一定程度上使得中高层局部增暖、使扰动加强。

各家数值预报模式对流西移减弱时间偏早, 实况岛东侧在 12 UTC 仍有局地激发。未来海南岛受该类持续稳定偏东急流影响时需根据实况东风波强度及对流触发位置对模式加以订正

参考文献

- [1] Ninomiya, K. and Akiyama, T. (1992) Multi-Scale Features of Baiu, the Summer Monsoon over Japan and the East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Series II*, **70**, 467-495. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.70.1b_467
- [2] Bosart, L.F. (1984) The Texas Coastal Rainstorm of 17-21 September 1979: An Example of Synoptic Mesoscale Interaction. *Monthly Weather Review*, **112**, 1108-1133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1108:ttcros>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1108:ttcros>2.0.co;2)
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 赵思雄. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [5] Yokoi, S. and Matsumoto, J. (2008) Collaborative Effects of Cold Surge and Tropical Depression-Type Disturbance on Heavy Rainfall in Central Vietnam. *Monthly Weather Review*, **136**, 3275-3287. <https://doi.org/10.1175/2008mwr2456.1>
- [6] 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [7] 马学款, 符娇兰, 曹殿斌. 海南 2008 年秋季持续性暴雨过程的物理机制分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 795-803.
- [8] Liu, H., Liang, Z., Li, L. and Zhou, X. (2025) What Locks the Position of Nighttime Convection Initiation Center in Hainan Island? *Geophysical Research Letters*, **52**, e2025GL118097. <https://doi.org/10.1029/2025gl118097>