Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1179-1189
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156124

Hans汉斯

宁波机场一次突发强雷雨天气过程诊断分析

王元豪[1,2]

[1]中国民用航空宁波空中交通管理站气象台，浙江 宁波
[2]民用航空宁波空中交通管理站甬象云枢工作室，浙江 宁波

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

利用机场地面观测、探空及ECMWF再分析等资料，对2026年4月9日宁波栎社机场一次春季局地突发强雷雨过程开展诊断分析。结果表明：本次过程由500 hPa高空短波槽、中低空多层西南急流与地面冷锋耦合触发，形成低层辐合、高层辐散的垂直抽吸结构，为对流发展提供了强上升动力；低空急流输送的充沛暖湿水汽在本场辐合堆积，叠加上干下湿的不稳定层结，为对流积蓄了充足能量。该过程表现为孤立中小尺度单体，突发性强，云团东移速度显著快于数值模式预报，全球模式对夜间弱强迫局地对流的预报存在明显缺陷。通过系统分析环流配置与动力、水汽、热力物理量场特征，本文提炼了沿海机场春季强对流的识别判据，可为华东民航机场强雷雨短临预报提供参考。

关键词

民航机场，宁波栎社，突发强雷雨，短波槽，低空急流，短临预报

Diagnostic Analysis of a Sudden Severe Thunderstorm Event at Ningbo Airport

Yuanhao Wang[1,2]

[1]Meteorological Observatory, Ningbo Air Traffic Management Station of Civil Aviation Administration of China, Ningbo Zhejiang
[2]Yongxiang Cloud Hub Studio, Ningbo Air Traffic Management Station of Civil Aviation Administration of China, Ningbo Zhejiang

Received: September 30, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

Abstract

Based on surface-station observations, radiosonde data and ECMWF reanalysis datasets, a diagnostic analysis is performed on a sudden local severe thunderstorm event at Ningbo Lishe International

文章引用: 王元豪. 宁波机场一次突发强雷雨天气过程诊断分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1179-1189.
DOI: 10.12677/ccrl.2026.156124

Airport on 9 April 2026. The results show that this convective event was triggered by the coupling of a short-wave trough at 500 hPa, multi-level south-westerly jets in the middle-lower troposphere and a surface cold front. A vertical pumping structure characterized by low-level convergence and upper-level divergence was formed, providing strong ascending motion for convection development. Abundant warm-moist water vapor transported by the low-level jet converged and accumulated over the airport, and an unstable stratification with dry upper layers and moist lower layers supplied sufficient convective energy. This event was an isolated meso- and small-scale convective cell with high suddenness. The eastward-moving speed of the cloud cluster was remarkably faster than predicted by numerical models, indicating obvious deficiencies of global models in forecasting nocturnal local convection under weak synoptic forcing. Through systematic analysis of circulation patterns as well as dynamic, moisture and thermal physical fields, identification criteria for severe convection in spring at coastal airports are summarized. The findings can provide a reference for the nowcasting of severe thunderstorms at civil aviation airports in East China.

Keywords

Civil-Aviation Airport, Ningbo Lishe, Sudden Severe Thunderstorm, Short-Wave Trough, Low-Level Jet, Nowcasting

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

强雷雨是春季影响华东民航运行的主要灾害性天气之一，其发展迅速、突发性强、局地性显著，常伴随短时强降水与雷暴大风，极易造成航班延误、备降甚至返航，严重威胁航空运行的安全与效率[1]。宁波栎社国际机场地处浙东沿海，春季冷暖空气交汇频繁，在西南暖湿气流与北方冷空气交替影响下，中小尺度对流系统频发，是强雷雨天气的高发时段[2]。以往针对宁波机场雷暴的研究多聚焦于夏季系统性强对流过程，对春季突发性、局地性雷雨天气的机制分析与预报复盘相对薄弱[3]。2026 年 4 月 9 日宁波机场出现一次突发强雷雨过程，夜间对流突发发展，超出常规数值模式预报范围，造成航班备降，对机场正常运行影响明显。本文通过梳理本次过程的天气实况、环流形势、物理量特征及雷达回波演变，系统诊断强雷雨的发生发展机制，复盘气象预报服务保障全过程，剖析预报难点与工作短板，提炼春季沿海机场突发强对流的预报思路，为民航气象精准保障提供技术支撑[4]。

2. 资料与方法

本文所用资料包括：宁波机场常规地面气象观测报文(METAR, SPECI)、杭州站探空资料、高低空天气形势分析图、多普勒天气雷达回波资料、ECMWF 数值模式预报产品及民航气象 MDRS 预报资料。采用天气学诊断、物理量分析、雷达回波动态分析及预报复盘对比等方法，从环流背景、动力条件、热力条件、水汽条件四个维度[5]，系统分析 2026 年 4 月 9 日宁波机场强雷雨的形成机制，并结合预报服务过程总结保障难点与改进方向。

3. 天气过程实况与影响

3.1. 天气实况演变

本次强雷雨过程降水呈间歇性、阶段性特点，以短时强降水和雷电为主，局地伴有大风，累计降水

量 10.9 mm。前期机场天气晴好，随后天气迅速转折，对流云团发展，相继出现小雨、雷雨并发展为强雷雨，能见度随之下降；此后降水强度波动减弱，转为弱降水与间歇性小雨；后期对流云团逐步消散，天气恢复平稳。

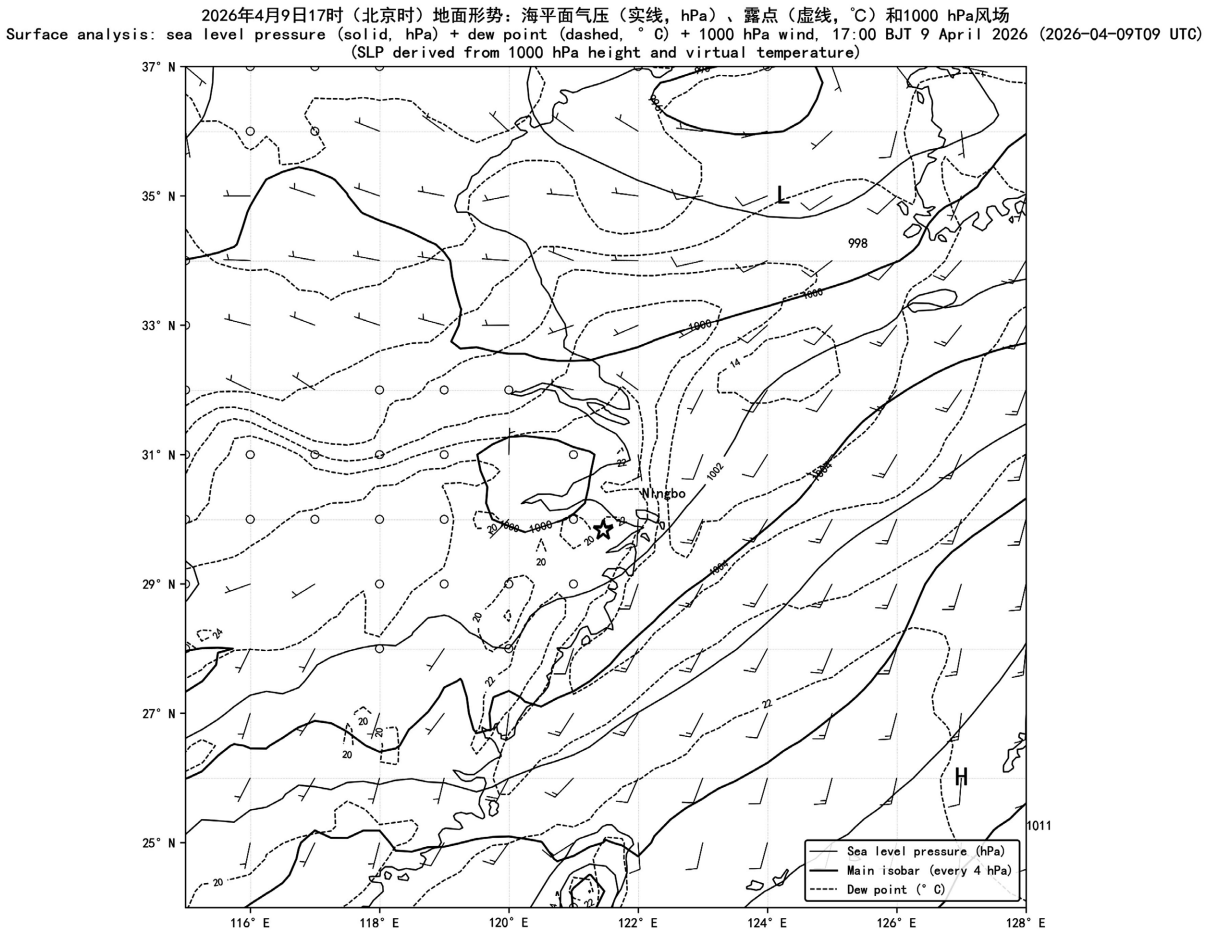
3.2. 天气影响情况

本次突发性强雷雨持续时间长、天气变化剧烈，打乱了机场正常航班运行秩序。受其影响，本场共计 1 架航班被迫备降；同时，强雷电与短时大风对地面作业、航空器起降构成安全隐患，是一次典型的影响民航运行的春季突发强对流天气过程。

4. 环流形势与天气机制分析

4.1. 地面形势分析

如图 1，4 月 9 日 17 时地面天气图显示，华北至东北地区有强冷锋逐步南下，西南地区低涡系统东移发展，携带充沛西南暖湿气流向北输送，与东南暖湿气流在长江中下游地区交汇。此时宁波机场处于 1000 hPa 等压线附近，地面气压梯度逐步增大，风场辐合作用持续增强，为对流发展提供了动力抬升条件。20 时地面形势进一步演变，江淮气旋快速东移入海，中心气压增强至 995 hPa，冷锋主体南下推进至长江中下游；宁波机场处于冷锋前部暖区，冷暖空气剧烈交汇，大气不稳定度显著提升，为夜间强雷雨的突发发展奠定了地面形势基础[6]。



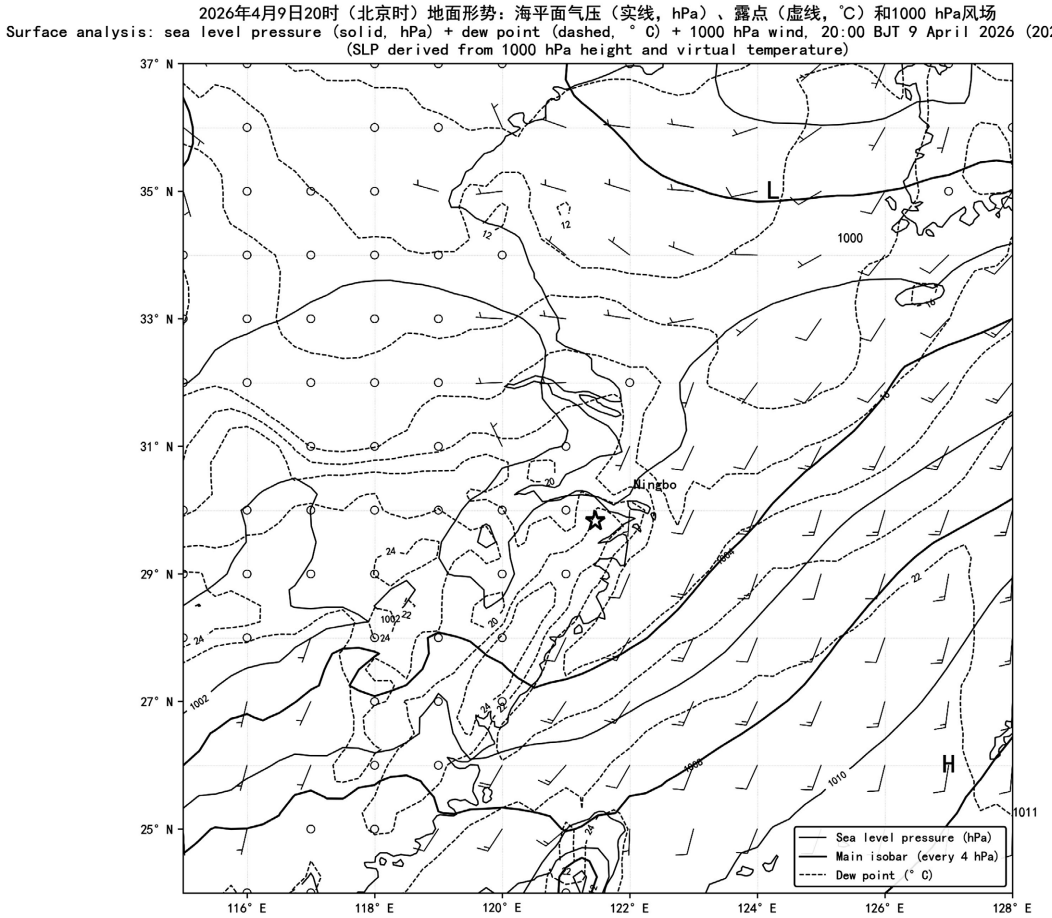


Figure 1. Surface Weather Maps at 17:00 (Top) and 20:00 (Bottom), 9 April
图 1. 4 月 9 日 17 时(上)、20 时(下)地面天气图

4.2. 高空环流形势

如图 2 所示：

500 hPa 上，4 月 9 日 20 时华北至华东有短波槽快速东移，槽前强盛西南急流覆盖长江中下游，风速 ≥ 20 m/s。宁波机场位于槽前正涡度平流控制区，高空辐散抽吸作用强烈，促使低层空气持续上升，强化垂直对流运动，是本次强雷雨发展的核心高空动力机制。

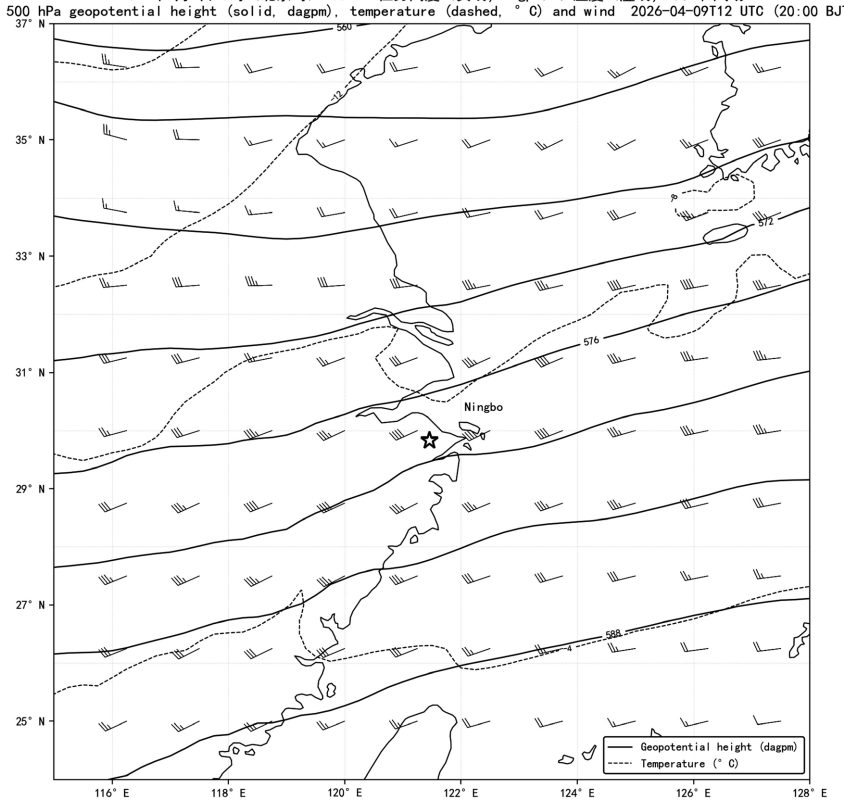
700 hPa 中纬度西风槽同步东移，槽前西南急流风速 ≥12 m/s，宁波机场处于急流轴左侧辐合区，水汽通量辐合显著；本场位于大范围高湿中心，比湿 ≥12 g/kg，温度露点差 ≤3℃，水汽近乎饱和，同时上空受暖脊控制，暖平流持续累积低层不稳定能量。

850 hPa 低空西南急流更为强盛，风速 ≥16 m/s，宁波机场处于急流轴左侧，低层风场辐合强烈，持续输送暖湿水汽与不稳定能量；同时江淮切变线东移至长江中下游一带，宁波机场位于切变线南侧，辐合抬升进一步增强，有效触发局地对流单体的新生、发展与维持[7]。

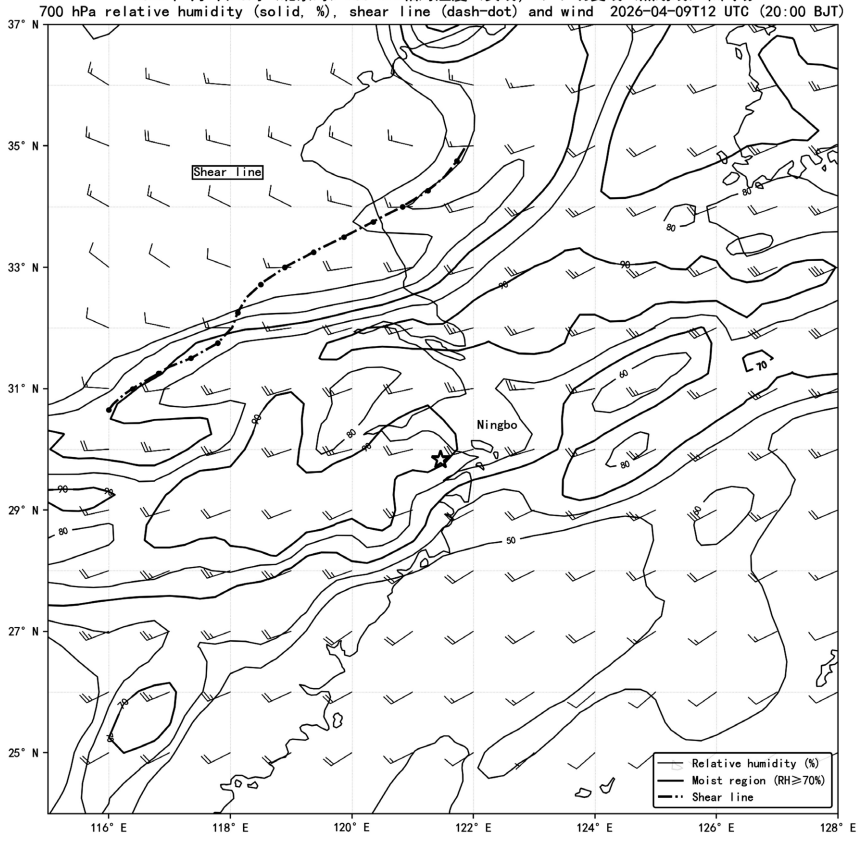
4.3. 物理量动力与热力诊断分析

为进一步揭示本次春季突发强雷雨的触发与维持机制，弥补常规天气形势分析的局限性，本文结合高低空物理量场，从散度、涡度、垂直速度、水汽通量散度四个核心参数开展诊断，剖析强对流发生的物理机制。

2026年4月9日20时（北京时）500 hPa位势高度（实线，dagpm）、温度（虚线，˚C）和风场
500 hPa geopotential height (solid, dagpm), temperature (dashed, ° C) and wind 2026-04-09T12 UTC (20:00 BJT)



2026年4月9日20时（北京时）700 hPa相对湿度（实线，%）、切变线（点划线）和风场
700 hPa relative humidity (solid, %), shear line (dash-dot) and wind 2026-04-09T12 UTC (20:00 BJT)



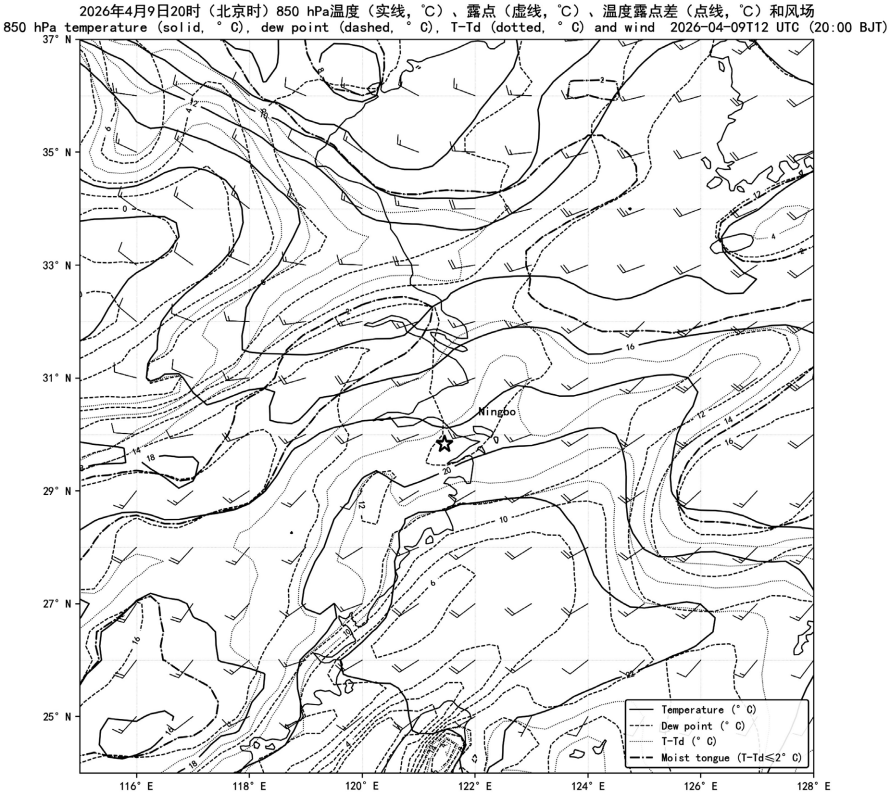


Figure 2. Weather Maps at 500 hPa (Top), 700 hPa (Middle) and 850 hPa (Bottom), 20:00, 9 April
图 2. 4 月 9 日 20 时 500 hPa (上)、700 hPa (中)及 850 hPa (下)天气图

4.3.1. 散度场特征

散度是判断大气辐合抬升、对流触发的核心物理量，负值代表辐合、正值代表辐散。如图 3，关键时段(4 月 9 日 20 时)，宁波机场对流层呈现典型的低层强辐合、高层强辐散结构：850 hPa、700 hPa 本场及周边散度为负，形成大范围辐合区，低层暖湿空气持续汇聚；500 hPa 高空槽前散度为显著正值，高空辐散抽吸强烈。这种垂直方向上的辐合–辐散耦合结构，不断抽拉低层空气向上爬升、突破对流抑制层结，为对流单体的生成、发展和维持提供了核心动力，是本次局地强雷雨突发的关键动力机制[8]。

4.3.2. 涡度场特征

涡度表征大气旋转运动，正涡度对应气旋性扰动，利于对流发展。如图 4，9 日 20 时低层 850 hPa、700 hPa，宁波机场处于正涡度大值中心，气旋性涡度扰动明显，配合江淮切变线东移，局地气流旋转上升运动显著增强；对流层中高层以负涡度为主，垂直方向的涡度差异进一步强化了大气垂直交换。本次过程涡度扰动尺度小、局地性强，正涡度中心仅锁定宁波及浙东沿海局地区域，相较于夏季大范围系统性涡度场特征突出，这也解释了本次过程局地突发、范围集中、常规数值模式难以预判的核心特征[2]。

4.3.3. 垂直速度场特征

垂直速度直接反映大气垂直运动强度，负值为上升运动，绝对值越大则抬升越强。如图 5，关键时段宁波机场上空整层维持强上升运动，925~700 hPa 垂直速度为显著负值，形成核心上升区。垂直剖面显示，本场低层上升运动强度大、范围集中，强烈抬升快速将低层暖湿气流输送至高空，促使水汽凝结、释放潜热，进一步加剧不稳定，形成“抬升–凝结–增温–更强抬升”的正反馈机制[5]。持续而强烈的上升运动，是对流云团快速发展、长时间维持的核心动力支撑，也是短时强降水与雷电持续出现的重要原因。

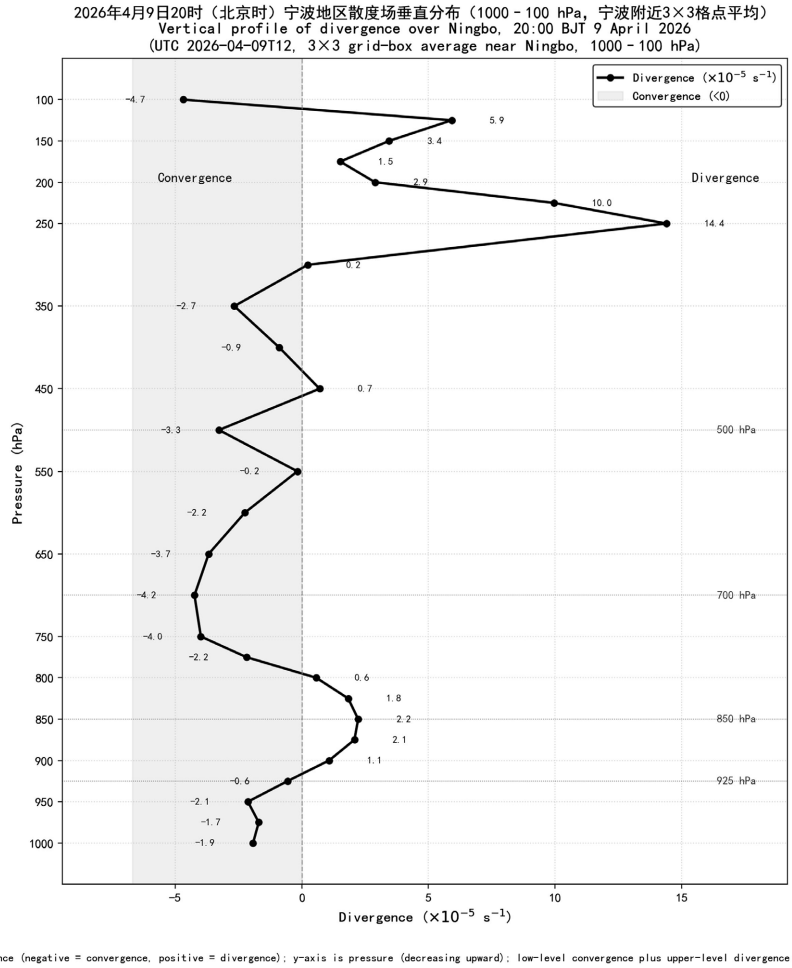


Figure 3. Vertical distribution of high and low level divergence field over Ningbo area at 20:00, 9 April 2026 (unit: 10^{-5} s^{-1})
图 3. 2026 年 4 月 9 日 20 时宁波区域高低空散度场垂直分布(单位：10^{-5} s^{-1})

4.3.4. 水汽通量散度场特征

水汽通量散度直观反映水汽的汇聚与流失，负值代表水汽辐合堆积。如图 6，9 日白天至夜间，浙东沿海持续存在大范围水汽辐合区，宁波机场始终处于水汽通量散度负值中心。低空西南急流持续将南海、西太平洋暖湿水汽向华东沿海输送，在本场局地汇聚，低层水汽饱和度持续攀升；配合前述高比湿、低露点差特征，构建了低层水汽充沛、高层干空气侵入的上干下湿结构[7]。水汽辐合区与垂直上升区高度重合，水汽在上升过程中充分凝结，为强雷雨提供了充足的物质基础，并进一步强化了层结不稳定。

综合物理量诊断可知，本次强雷雨并非单一系统作用，而是涡度扰动触发、散度场耦合、强垂直抬升驱动、局地水汽辐合支撑的综合结果，多重物理量的有利叠加造就了本次春季局地突发性强对流。

4.4. 层结稳定度分析

从温度层结看，本次过程呈典型的下暖湿、上干冷不稳定结构，对流有效位能 CAPE 显著增大，对流不稳定条件极佳。选取上游杭州站(因本场无探空)探空分析：9 日 08 时 K 指数达 30.9℃、SI 指数为 2.04；20 时 K 指数升至 32.8℃、SI 指数降至 1.96，大气稳定度持续降低，强对流发生概率大幅提升。同时 0℃层高度位于 600 hPa、−20℃层高度位于 400 hPa，层结配置有利于强对流的维持与发展，具备出现雷雨、大风等强天气的条件[4]。

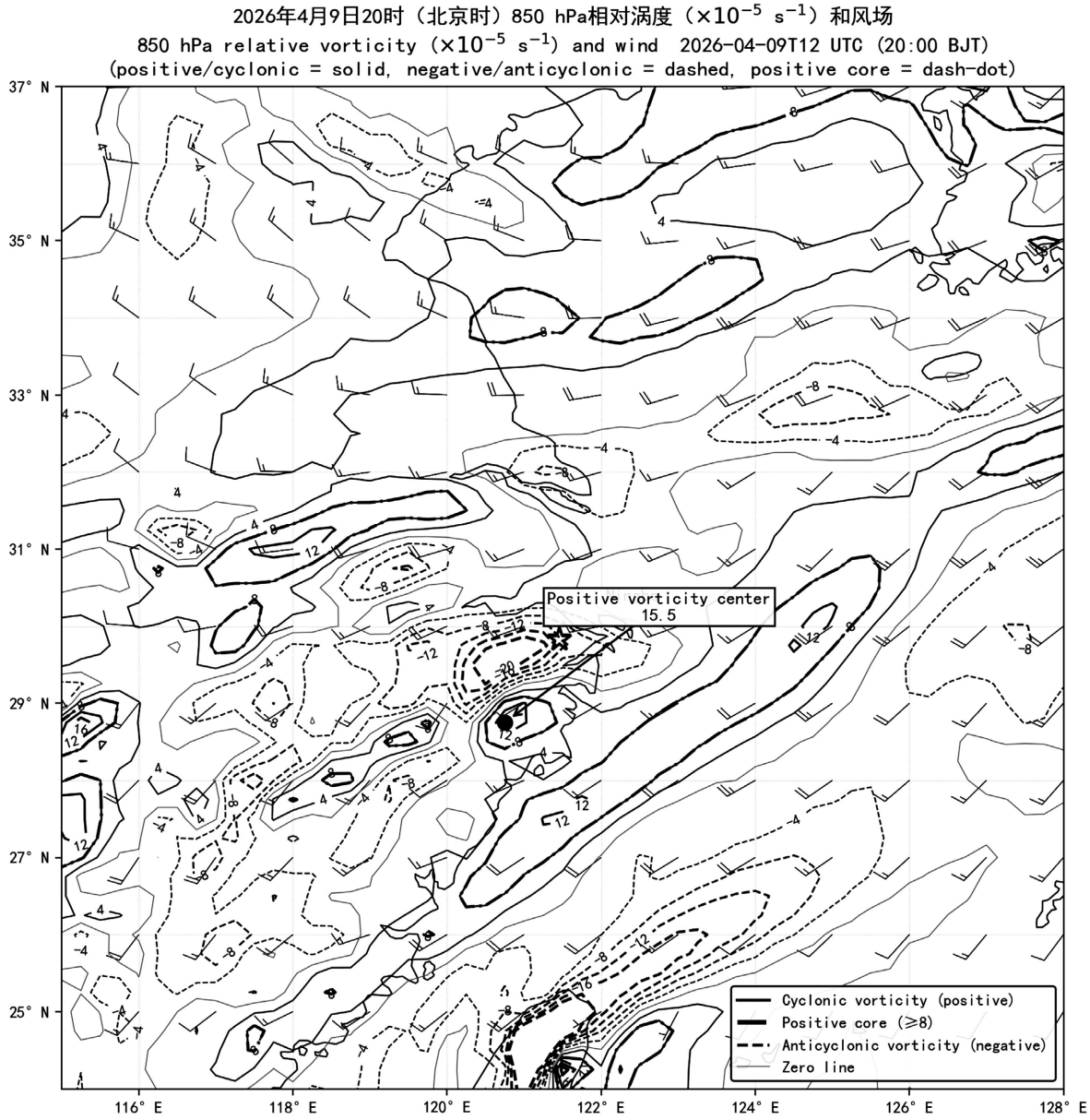


Figure 4. Vorticity field at 850 hPa at 20:00, 9 April 2026 (unit: 10^{-5} s^{-1})
图 4. 2026 年 4 月 9 日 20 时 850 hPa 涡度场分布(单位：10^{-5} s^{-1})

综合天气形势与物理量分析可知，本次过程是多重系统与动力、热力场叠加作用的结果：机场始终处于“高空槽前 + 低空急流左侧 + 地面锋前暖区”的有利对流环境，低层辐合、高层辐散的动力结构，配合强气旋性涡度扰动、强烈垂直上升运动与局地水汽辐合，使动力、水汽、不稳定能量三大条件同步匹配，最终触发突发性强雷雨。

5. 结论与讨论

5.1. 个例主要结论

2026 年 4 月 9 日宁波栎社机场发生的夜间突发强雷雨，是一次发生于浙东沿海春季暖区环境下的孤立中小尺度对流单体过程，区别于大范围锋面系统性强对流，本次个例的具体特征总结如下：

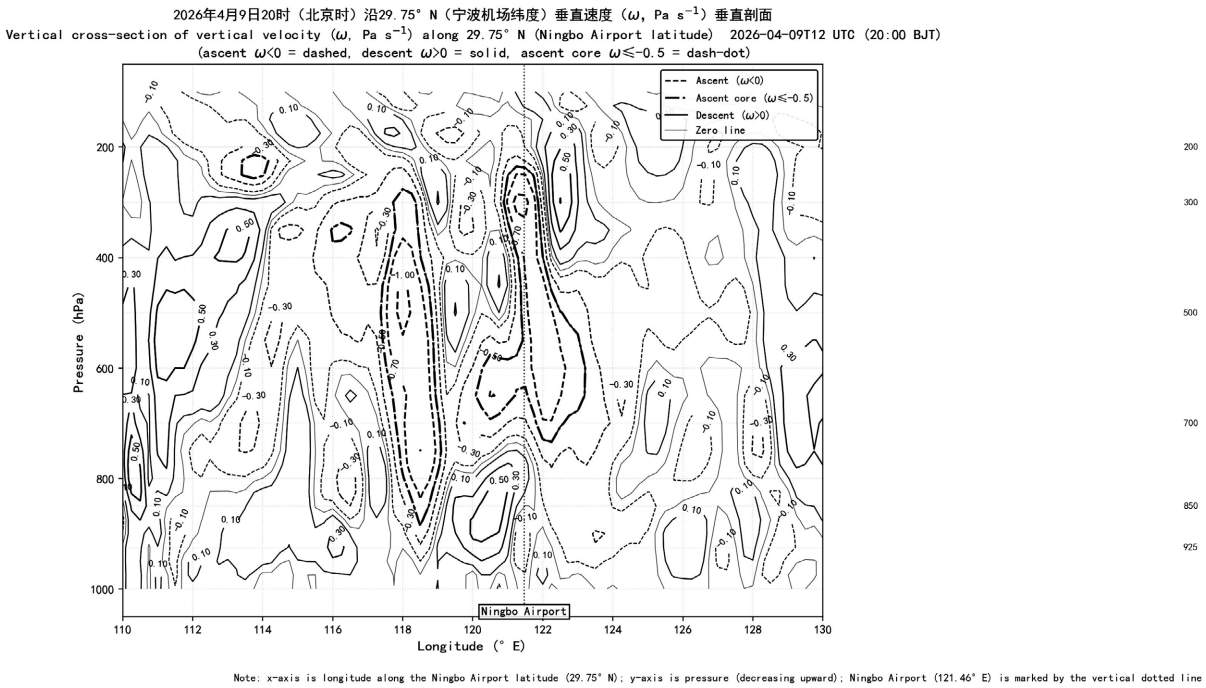


Figure 5. Cross-section of vertical velocity along the latitude of Ningbo Airport at 20:00, 9 April 2026 (unit: Pa·s^{-1})
图 5. 2026 年 4 月 9 日 20 时沿宁波机场纬度垂直速度剖面(单位：Pa·s^{-1})

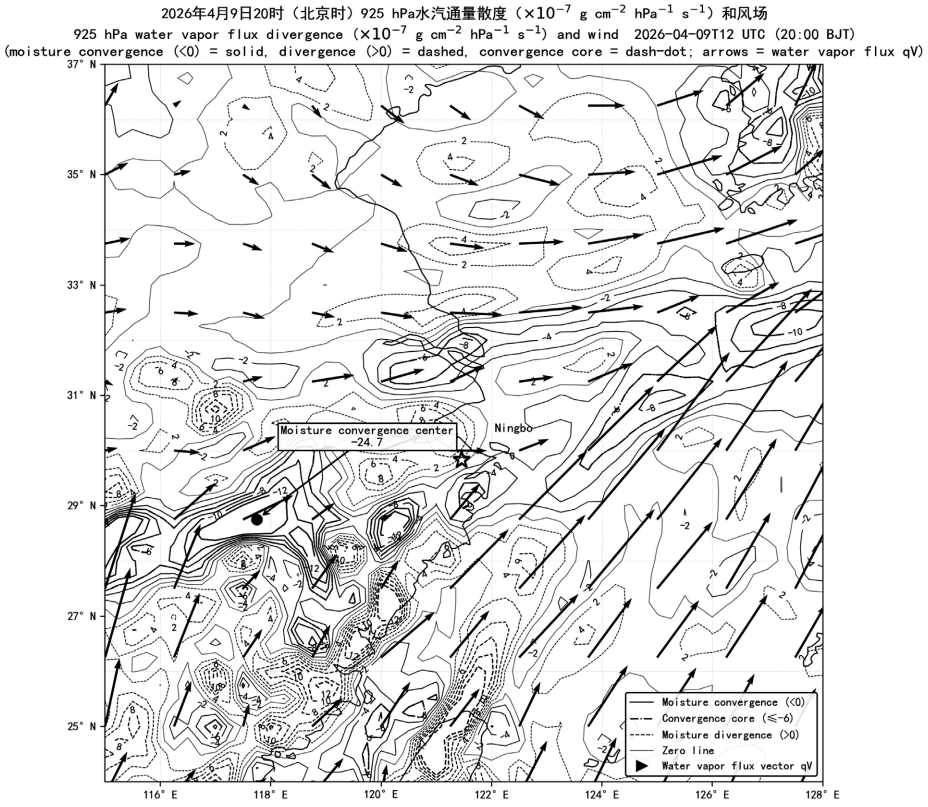


Figure 6. Superposition of water vapor flux divergence and wind field at 925 hPa at 20:00, 9 April 2026 (unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})
图 6. 2026 年 4 月 9 日 20 时 925 hPa 水汽通量散度与风场叠加(单位：10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})

1) 天气系统配置上，本次强雷雨由多重天气系统耦合触发。500 hPa 短波槽带来高空正涡度平流与高空辐散抽吸，700 hPa、850 hPa 多层西南急流输送暖湿水汽，地面冷锋与江淮切变线提供低层抬升条件；宁波机场处于高空槽前、低空急流轴左侧、锋前暖区的叠加位置，形成低层辐合-高层辐散的垂直动力结构，局地正涡度扰动进一步放大上升运动，为对流爆发提供直接动力来源。该过程没有强的天气尺度强迫，依靠多系统局部叠加实现对流启动，大尺度环流信号并不显著。

2) 水汽与层结条件体现春季沿海夜间对流的独有特点。低空急流将海洋暖湿水汽持续向本场输送，造成局地水汽通量显著辐合堆积，形成低层高湿、高层干空气侵入的上干下湿层结；杭州站探空显示 K 指数升高、SI 指数下降，不稳定能量夜间逐步累积释放。水汽、热力、抬升条件在夜间同步达到有利状态，促成对流在夜间突然爆发。

3) 对流本身具备显著的局地、突发、移动快速特征。本次过程为孤立中小尺度对流，影响范围局限于宁波机场及近岸小范围区域；天气前期机场维持晴好，转折十分突然；对流云团东移实际速度明显快于 ECMWF 全球模式预报。全球数值模式对这种弱强迫背景下的夜间局地对流识别不足，是本次预报出现偏差的直接原因。天气实况表现为间歇性短时强降水、雷电，伴随局地大风，过程累计降水量 10.9 mm，虽降水总量不大，但剧烈天气突变直接造成航班备降，对民航运行冲击突出。

4) 本次气象业务保障中，预警通报流程执行规范，但对春季夜间弱强迫局地突发对流的预判存在短板。一方面数值模式难以解析中小尺度扰动，给出的信号偏弱；另一方面预报员容易受大尺度环流“强迫不强”的表象干扰，对多层急流、锋前暖区叠加下的局地对流爆发风险研判不足，造成对流起始时间预报出现偏差。

5.2. 讨论

已有不少国内学者针对华东、华南地区春季强对流、机场雷暴开展过分析研究，与已有文献对比，本次宁波机场个例的特殊性集中体现在春季、沿海、夜间、弱天气尺度强迫下的暖区局地对流，可以从环流背景、触发方式、预报难点三方面展开对比。

在春季强对流的已有研究中，盛杰等[6]分析我国春季冷锋后高架雷暴，其对流多发生于冷锋过境之后，冷空气抬升暖湿空气，对流的强迫源为锋面后的冷池，对流发生环境常存在明显逆温层；而本次宁波机场雷雨发生在冷锋前部暖区，并非冷锋过境之后，没有明显的高架逆温结构，抬升来自多层急流－切变－地面风场的局地辐合，冷暖空气尚未直接剧烈交绥，大尺度锋面抬升信号不强，与高架雷暴环境存在明显区别。

许爱华等[5]对我国中东部强对流开展天气形势分型，其中春季强对流多数归为锋面类强对流，依靠锋面、气旋这类显著天气系统作为主要触发，对流系统尺度偏大，模式通常能够捕捉主要信号。但本次个例属于弱强迫环境，大尺度气旋、锋面距离本场尚有一定距离，真正起作用的是短波槽、多层西南急流、江淮切变线在浙东沿海小范围的空间重合，属于局部条件耦合产生的孤立单体，不属于典型锋面强对流，这也正是模式输出信号偏弱的根本原因。

从沿海机场雷暴的已有民航相关研究来看，吴福浪等[3]分析宁波机场一次高架雷暴，该次过程的对流是由边界层之上的急流强迫，近地面为冷性稳定层；而本次个例低层本身暖湿，不稳定层结建立在边界层内部，是边界层内水汽辐合叠加高空抽吸共同促成对流发展，二者虽同为宁波机场春季雷暴，但层结与触发机制完全不同。梁秋枫等[9]、李俊瑶等[10]分别对厦门、贵阳机场强对流复盘，两地个例大多伴随较为清晰的系统性回波东移，对流系统本身尺度更大；与之对比，本次浙东沿海个例是局地新生的中小尺度孤立单体，对流在本场及紧邻区域就地生成发展，并非上游对流系统平移过来，这进一步增大预报难度。

在夜间对流的角度，覃皓等[7]、钱卓蕾等[8]研究的春夏季对流案例，多数对流峰值出现在午后，依靠太阳辐射加热使边界层升温，积累不稳定能量，属于热力驱动为主的午后对流。而本次过程发生于夜间，地面辐射冷却本应抑制对流发展，不稳定能量并非来自地面太阳加热，而是低空急流夜间增强，持续输送暖湿空气，在局地辐合堆积，配合高空槽前的动力抽吸来完成能量积蓄。夜间低空急流的贡献远大于地面热力作用，这是本次个例和午后热对流最核心的差异，也是预报中容易被忽略的关键点。俞小鼎等[4]指出弱强迫局地对流是临近预报的难点，数值模式对夜间中小尺度扰动解析能力有限，这一论断在本次春季沿海夜间个例中得到印证：全球模式可以较好再现大尺度的槽、急流位置，但无法刻画宁波近岸局地风场辐合、水汽堆积等小尺度细节，云团移动速度预报显著偏慢。

综上，本次个例提示，对于浙东沿海春季夜间，即便大尺度天气系统强迫信号不强，当同时出现500 hPa短波槽过境、中低空多层西南急流建立、本场处于锋前暖区时，仍要高度警惕局地孤立对流突发风险。该类天气没有强的锋面、气旋信号作提示，又发生在夜间缺少地面加热的条件下，很容易被预报低估。后续复盘应当更多关注这类“大尺度条件一般，但多重要素局地空间重合”的特殊场景，从实况雷达、地面风场、水汽实况等观测资料挖掘先兆信号，弥补数值模式的缺陷。

参考文献

[1] 陶岚, 陈明轩. 上海地区雷暴天气特征及航空影响分析 [J]. 气象, 2020, 46(3): 312-320.

[2] 沈杭锋, 张红蕾, 高天赤, 等. 浙江盛夏一次强对流天气的特征及其成因分析[J]. 气象, 2016, 42(9): 1105-1113.

[3] 吴福浪, 杨丽敏, 杨琦堡, 等. 宁波机场一次高架雷暴天气过程分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2023, 34(5): 40-42.

[4] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.

[5] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 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, 2014, 40(4): 400-411.

[6] 盛杰, 毛冬艳, 沈新勇, 等. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.

[7] 覃皓, 罗建英, 黄明策, 等. 春季广西一次强对流过程多阶段特征及成因[J]. 应用气象学报, 2025, 36(3): 313-324.

[8] 钱卓蕾, 刘汉华, 李文娟, 等. 春季浙江两次强飑线特征和极端大风机理对比[J]. 应用气象学报, 2025, 36(2): 185-196.

[9] 梁秋枫, 苏蕾, 林航. 厦门机场一次强对流天气的气象保障分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2024, 35(4): 55-59.

[10] 李俊瑶, 罗璇, 娄欣悦, 等. 贵阳机场一次强对流天气过程成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 303-310.