

一次冷涡背景下江淮气旋暴雨过程的诊断分析与基于MODE方法的模式检验

张 玥¹, 李 蕊^{2*}

¹威海市气象局石岛气象台, 山东 威海

²威海市气象局, 山东 威海

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月26日; 发布日期: 2025年9月3日

摘 要

气旋暴雨是造成山东区域性暴雨的主要天气系统之一, 对其诊断分析与数值模式ECMWF、CMA-GFS、CMA-MESO、CMA-SH9 (以下简称为EC、GFS、MESO、SH)的检验对于此类型暴雨的预报具有实际意义。本文基于2024年汛期威海地区首次气旋影响下较大范围的暴雨天气过程展开分析, 结果表明: 此次暴雨过程由华北冷涡及高空槽, 配合低涡诱发的江淮气旋北上造成, 气旋移动的路径有利于威海出现暴雨, 槽前的正涡度平流、暖平流及槽后弱冷空气的侵入使得地面倒槽在北抬的过程中发展形成气旋, 配合200 hPa强辐散, 导致上升运动强烈发展, 低空急流和超低空气流向威海持续输送水汽及能量, 是此次暴雨的核心机制; 传统检验结果表明: (1) 48 h预报时效山东半岛地区暴雨预报GFS最好, EC最差, 在于其较高的空报率和漏报率; (2) 36 h预报时效EC最优、SH次之, GFS最差; (3) 临近时次EC模式的调整具有参考性; 基于MODE方法的36 h和48 h预报时效的目标整体相似度检验均表现为大尺度模式预报优于中尺度模式。

关键词

冷涡, 江淮气旋, 暴雨, 模式检验

Diagnostic Analysis and MODE-Based Model Verification of a Rainstorm Case Associated with the Jianghuai Cyclone under the Background of a Cold Vortex

Yue Zhang¹, Rui Li^{2*}

¹Shidao Meteorological Station of Weihai Meteorological Bureau, Weihai Shandong

²Weihai Meteorological Bureau, Weihai Shandong

*通讯作者。

文章引用: 张玥, 李蕊. 一次冷涡背景下江淮气旋暴雨过程的诊断分析与基于 MODE 方法的模式检验[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 892-903. DOI: 10.12677/ccrl.2025.145089

Abstract

Cyclonic rainstorm is one of the main systems causing the regional rainstorm in Shandong Province, diagnostic analysis and verification of the ECMWF, CMA-GFS, CMA-MESO, CMA-SH9 (hereinafter referred to as EC, GFS, MESO, SH) numerical models have practical significance in forecasting this type of rainstorm. Based on the analysis of a large-scale rainstorm case associated with the first cyclone affecting Weihai during the 2024 flood season, the results show that the rainstorm case was caused by the North China Cold Vortex and an upper-level trough, combined with the northward movement of the Jianghuai cyclone induced by the vortex. The cyclone's track was conducive to the rainstorm in Weihai. The positive vorticity advection and warm advection ahead of the trough, together with weak cold air behind it caused the surface inverted trough to develop into a cyclone during its northward movement. Combined with the strong divergence at 200 hPa, this led to the vigorous development of upward motion. The low-level jet and ultra-low-level flow served as key mechanisms, continuously transporting substantial moisture and energy to Weihai, which constituted the fundamental driver of this rainstorm case. The traditional test results show that: (1) for the 48 h forecast, GFS performs best while EC performs worst due to its high false alarm rate and missing alarm rate; (2) for the 36 h forecast, EC performs best, followed by SH, with GFS being the worst; (3) EC model's progressive adjustments as the forecast lead time shortens provide valuable reference. The MODE-derived overall object-based similarity for both 36 h and 48 h forecast lead times demonstrate the superior performance of the large-scale model over the mesoscale model.

Keywords

Cold Vortex, Jianghuai Cyclone, Rainstorm, Model Verification

Copyright © 2025 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

山东地区的汛期主要包括每年的 5 至 9 月, 这期间降水充沛, 暴雨出现时间多集中在 7 月上、下旬和 8 月中旬[1]。气旋是山东大范围暴雨的主要天气系统之一, 而影响山东暴雨的气旋主要可分为江淮气旋、黄淮气旋和黄河气旋([1], p. 74)。关于气旋类暴雨的研究, 国内外学者已经取得了丰硕的成果[2]-[4]。毛程燕等[5]利用湿位涡理论分析了浙江省一次江淮气旋后部冷空气影响的暴雨过程特征, 指出此次暴雨是由对流不稳定和斜压不稳定、动力和热力共同作用形成, 同时伴有明显的“列车效应”, 强降水持续时间长, 影响范围广。张达文等[6]统计分析了近十年江淮气旋环流背景下的梅州暴雨的成因、时空分布特点, 指出江淮气旋南侧的低空急流是造成梅州暴雨最主要原因。陈筱秋等[7]分析了江淮和江南地区一次生成于地面低槽倒槽中的江淮气旋暴雨过程, 并利用准地转理论解释了江淮气旋东移的原因。董疆南等[8]研究了华北地区的一次黄淮气旋暴雨的发生、发展及消亡机理, 指出东南和西南季风是此次暴雨过程的主要水汽来源。梁钰等[9]对影响河南省的黄淮气旋暴雨两个例进行综合诊断分析, 指出河南省黄淮气旋暴雨产生有两个源地, 并且是大气斜压性强烈发展的结果。张雅乐等[10]对 2016 年华北特大暴雨过程分析时指出黄河气旋与华北地形作用是此次特大暴雨过程的最直接成因。上述研究结果可为深入解析气

旋暴雨过程的动力-热力耦合机制等提供科学依据,但气旋移动的路径具有不确定性,对暴雨落区影响较大,预报员对暴雨落区的把握具有一定的难度,因此,本文利用常规观测资料、ERA5再分析资料、多普勒天气雷达资料及EC、GFS、MESO、SH数值模式预报产品等,详细分析此次气旋暴雨过程发生发展机理、江淮气旋移动路径的成因,同时应用传统检验和MODE(Method for Object-based Diagnostic Evaluations)方法[11][12]对比分析不同数值模式的预报结果,为模式选优具有一定参考意义。

2. 降水实况特征

7月1日后半夜~2日白天威海市出现一次全区大雨局部暴雨天气过程(图1(a)),这是威海今年首场较大范围暴雨过程。全市平均降水量45.8 mm,其中,30个国家和区域自动站降水量超过50 mm,最大降水量出现在荣成夏庄镇(83.1 mm)。降水时段主要集中在08:00~15:00,最大小时雨强为35.3 mm,出现在10:00~11:00(图1(b))。

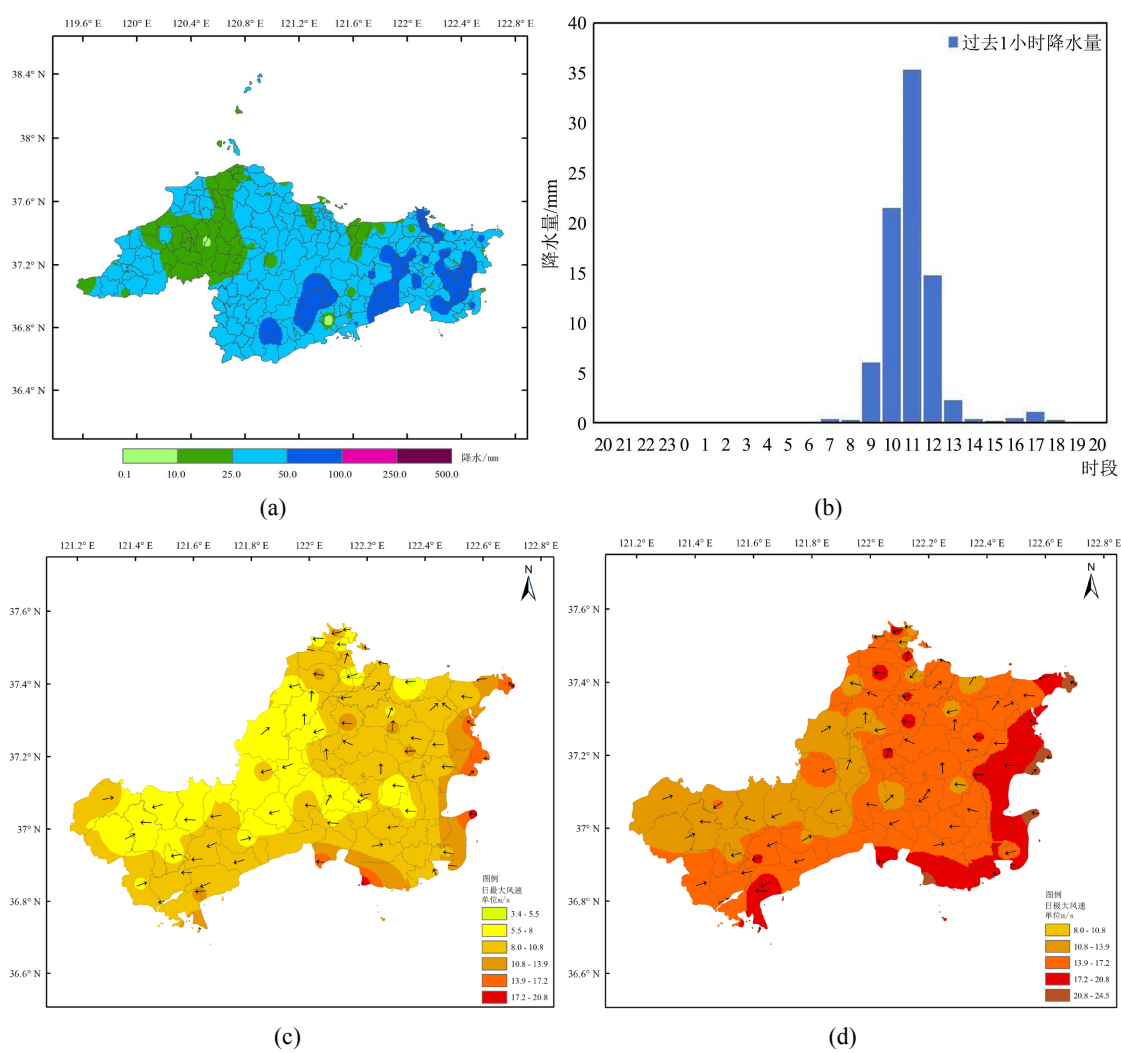


Figure 1. Cumulative precipitation in the Yantai-Weihai area from 20:00 CST on July 1st to 20:00 CST on July 2nd, 2024 (a), hourly precipitation evolution in Xiazhuang Town, Rongcheng (b), daily maximum wind speed distribution (c), daily extreme wind speed distribution (d) (the arrow represents the wind field)

图 1. 2024 年 7 月 1 日 20:00~2 日 20:00 烟威地区降水实况(a)、荣成夏庄镇逐小时降水演变(b)、日最大风速分布(c)、日极大风速分布(d) (箭头为风场)

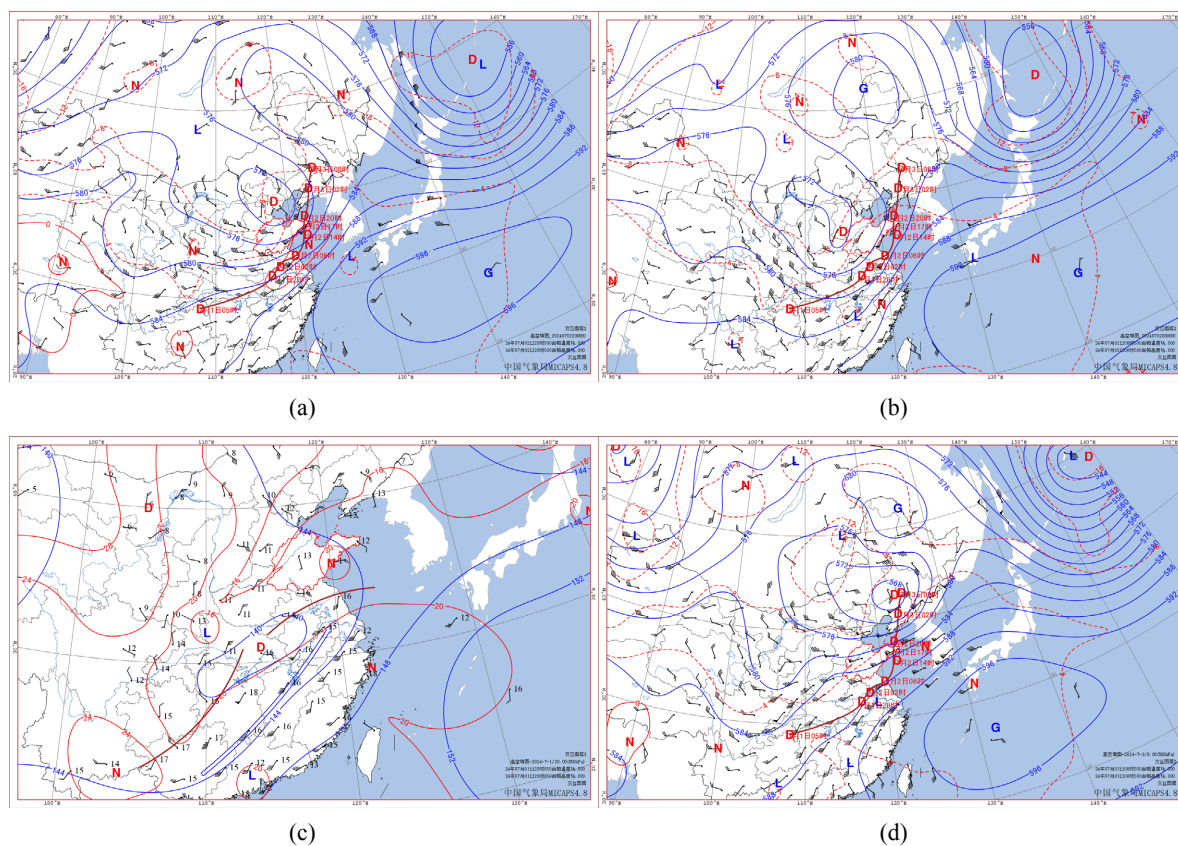
此次强降水的主要特点: (1) 降水持续时间相对长, 但强降水影响时段相对集中(09:00~11:00)。(2) 降水具有一定对流性。(3) 暴雨的产生与气旋路径有关, 暴雨点主要集中在威海地区。(4) 此次暴雨过程伴有气旋影响的系统性东南大风, 且阵风风力强, 日最大风速: 凤凰尾东南风 19.1 m/s (8 级)(图 1(c)), 日极大风速: 爱伦湾海洋牧场西南风 24.4 m/s (9 级)(图 1(d))。

3. 天气形势及环境场分析

3.1. 环流形势和主要天气系统发展演变

500 hPa 上 2 日 08:00 (图 2(a)), 华北地区已形成冷涡, 温度槽落后于高度槽, 有利于冷涡及槽前正涡度平流进一步发展加强, 冷涡底部槽后西北气流引导冷空气南下, 下游副高成带状稳定维持在东部海上, 与沿海高压脊同位相叠加形成阻挡形势, 使上游系统移动缓慢且有利于上游槽的发展和加强, 冷暖空气显著交汇。2 日 20:00 (图 2(b)), 冷涡中心略有北移, 3 日 08:00 (图 2(c))冷涡中心移动到辽宁境内, 系统影响趋于结束。

850 hPa 上 1 日 20:00 西南涡已形成(图 2(d)), 山东位于低涡倒槽顶部受倒槽切变影响, 2 日 08:00 低涡发展加强向东北偏北方向移动到鲁东南一带(图 2(e)), 850 hPa 急流持续维持, 水汽通道持续建立, 西南低空急流和偏东急流(24 m/s)提供水汽和能量, 威海地区比湿达 12 g/kg, 温度场上涡前部的暖脊和涡后部的冷槽明显, 冷暖空气交汇, 斜压性会进一步增强。2 日 20:00 (图 2(f))低涡继续北上, 仅威海北部地区出现小雨。3 日 08:00 低涡中心继续北上入海。强降水发生时段(图略), 2 日 08:00 925 hPa 形成了非常强的东南风边界层急流(16~20 m/s), 进一步增加了水汽输送的厚度和强度, 与 850 hPa 低空急流位置耦合, 为威海的强降水提供充沛的水汽。



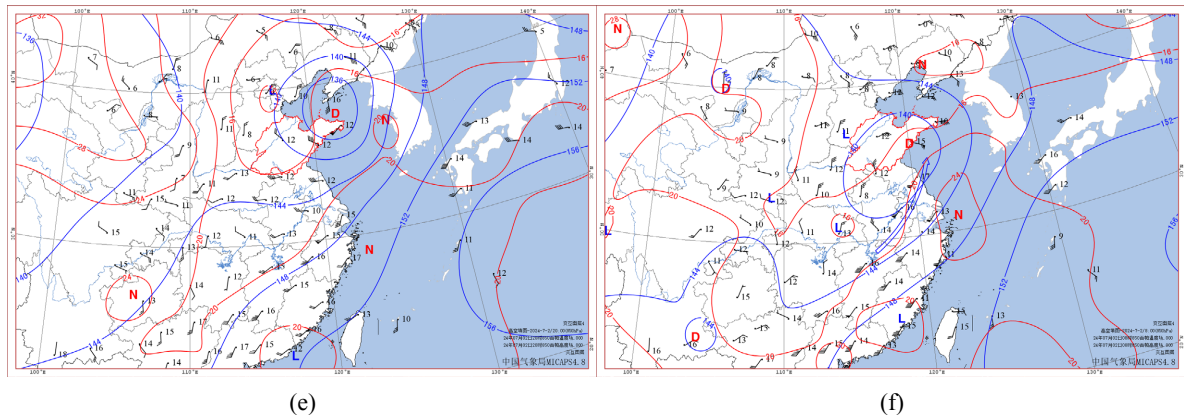


Figure 2. High-altitude situation at 500 hPa ((a): 08:00 CST on the 2nd, (b): 20:00 CST on the 2nd, (c): 08:00 CST on the 3rd) and 850 hPa ((d): 20:00 CST on the 1st, (e): 08:00 CST on the 2nd, (f): 20:00 CST on the 2nd)
图 2. 500 hPa ((a): 2 日 08:00, (b): 2 日 20:00, (c): 3 日 08:00)和 850 hPa ((d): 1 日 20:00, (e): 2 日 08:00, (f): 2 日 20:00)高空形势

地面气压场上最初山东南部受倒槽影响,后期发展形成气旋,移动路径以北上为主。2 日 08:00 气旋中心位于江苏北部沿海一带(图 3(a)),中心气压值为 995 hPa,后期继续北上,2 日 20:00 经威海入海,最低气压在渤海海峡 - 黄海北部一带达到 992.5 hPa。3 日 02:00 以后气旋中心位置已经移动到我国东北地区。

地面气旋长轴方向为东北 - 西南向,后期气旋有向着长轴方向移动的趋势;冷涡底部低槽受下游高压的影响,经向度变大,引导气流为西南偏南方向(图 2(a)),即 500 hPa 引导气流有利于气旋向东北偏北方向移动;2 日 08:00 地面三小时变压场上看,山东半岛地区有强的三小时负变压(图 3(b)),最强为 -30 hPa,气旋有向负变压方向即向山东半岛移动的趋势。以上三点有利于气旋路径偏北,及山东半岛一带发生强降水。

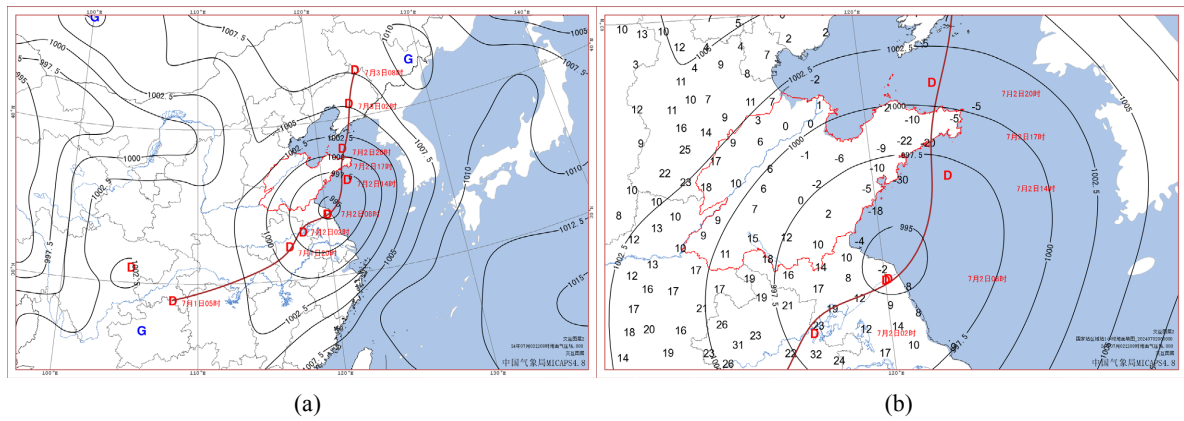


Figure 3. Surface pressure field (a) and surface 3-hour allobaric field (b) at 08:00 CST on the 2nd
图 3. 2 日 08:00 地面气压场(a)和地面三小时变压场(b)

综上,此次过程在华北上空有冷涡,涡后西北气流携带冷空气南下,副高稳定在东部海上呈带状分布,与下游高压脊同位相叠加,有利于其外围西南气流加强北上,冷暖空气交汇,气旋得以发展加强,且下游高压脊形成阻挡形势,使得气旋路径以北上为主。

3.2. 关键物理量场诊断分析

3.2.1. 水汽条件

此次降水过程由于低空急流和超低空急流的持续维持,使得山东半岛地区的水汽输送十分可观。1 日

20:00 降水开始前, 威海地区 850 hPa 比湿达 12~13 g/kg, 整层大气可降水量达 60~70 mm 左右, 绝对湿度和相对湿度均较高。对水汽通量和水汽通量散度进行诊断分析发现(图 4): 2 日 11:00 整层水汽通量大值区位于鲁东南至山东半岛及其北部海面上, 700 hPa 和 850 hPa 水汽通量大值区位于黄海中部海面上 (700 hPa 最大达 $320 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、850 hPa 达 $380 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)与 2 日 11:00 的气旋中心位置相匹配。同时强的西南低空急流在威海地区产生气旋性弯曲, 将水汽通量大值区的海面上的水汽向威海地区持续输送, 整层、700 hPa 和 850 hPa 的水汽通量散度负值区覆盖整个威海地区, 即表现出水汽通量强辐合。

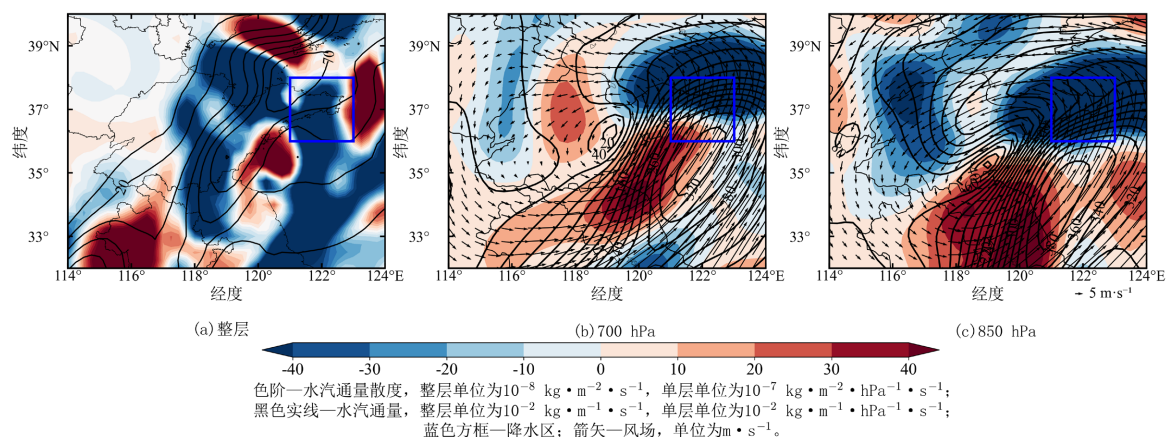


Figure 4. Water vapor flux, water vapor flux divergence and wind field at 11:00 CST on the 2nd ((a): the entire atmosphere, (b): 700 hPa, (c): 850 hPa)

图 4. 2 日 11:00 水汽通量和水汽通量散度叠加风场((a): 整层、(b): 700 hPa、(c): 850 hPa)

3.2.2. 动力条件

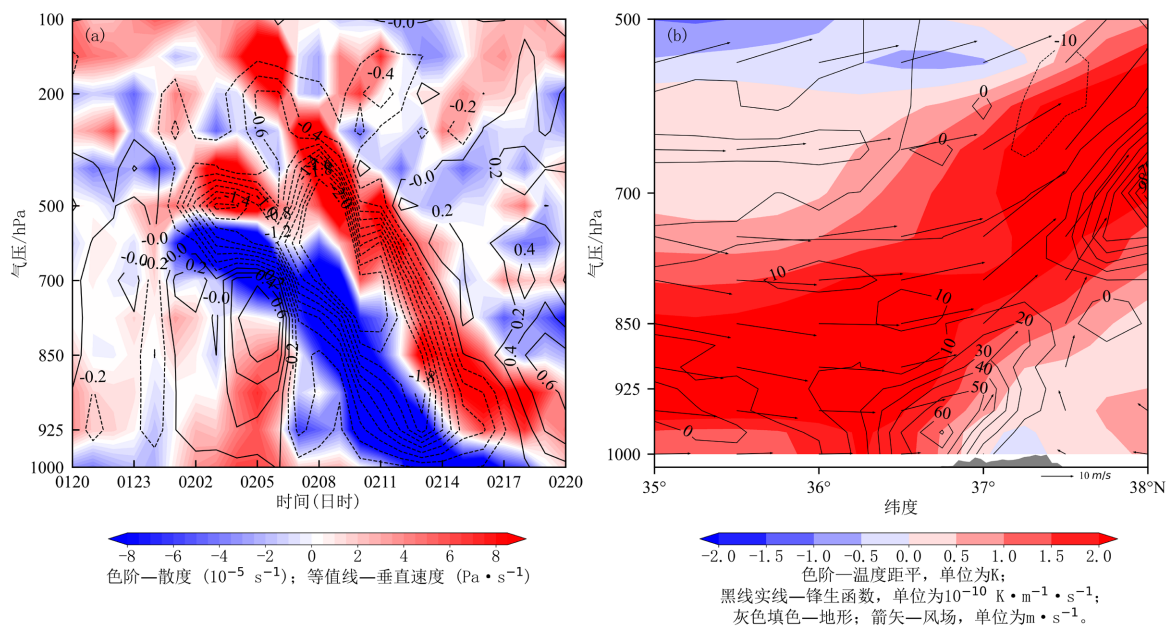


Figure 5. The vertical velocity and divergence of Rushan Dagushan change over time (a), vertical profiles of temperature anomaly and frontal generation function at 11:00 CST on the 2nd (b)

图 5. 乳山大孤山垂直速度、散度随时间变化(a), 2 日 11:00 温度距平和锋生函数垂直剖面(b)

在此次降水过程形成气旋, 山东半岛地区动力抬升条件明显, 近地面至 200 hPa 附近威海地区上空形成明显的上升运动区(图 5(a)), 表现为低层辐合高层辐散有利于垂直运动的发展, 其中 2 日 08:00~11:00 垂直上升运动最为强烈, 这与降水实况展示的强降水集中时段相对应。利用锋生函数公式计算此次降水的锋生情况(图 5(b)), 可见 850 hPa 以下威海南部地区形成了锋生带, 锋生函数最大达到 $60 \times 10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时气旋中心位于 35°N 附近, 而锋生区从南至北、由低到高向冷区倾斜, 暖平流输送明显, 同时在气旋中心偏北一侧有冷平流渗入, 冷暖交汇, 斜压性增强, 有利于气旋进一步向锋生区北上移动发展。

3.2.3. 不稳定条件

1 日 20:00 荣成探空(图 6(a))显示降水发生前, 威海地区湿层深厚, 抬升凝结高度 LCL 为 532 m, 0°C 层高度在 600 hPa 附近, 暖云层深厚, K 指数为 38.4°C , CAPE 值为 205.6 J/kg , 存在一定不稳定, 有利于上升气流抬升触发不稳定产生强降水, 带来较高的降水效率。2 日 11:00 CAPE 分布(图 6(b))可见威海地区虽没有较强的对流有效位能, 但还是存在 200 J/kg 的不稳定能量的维持, 使得降水有较长的持续时间。

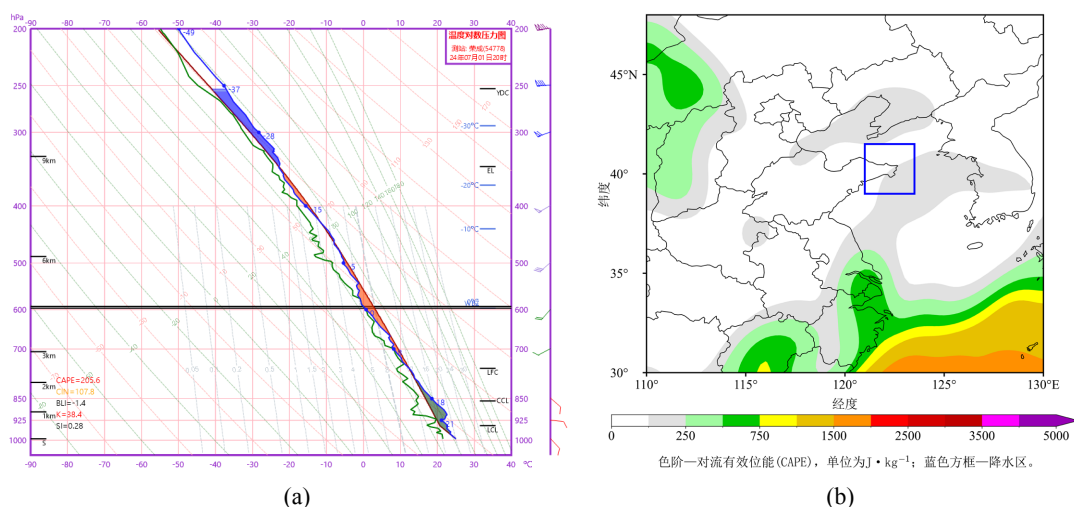


Figure 6. Sounding curves of Rongcheng sounding station at 20:00 on the 1st (a) and CAPE distribution at 11:00 on the 2nd (b)

图 6. 1 日 20:00 荣成探空站探空曲线(a)和 2 日 11:00 CAPE 分布(b)

3.2.4. 地形作用

烟威地区整体呈现西高东低的地势形态, 2 日 11:00 地面气旋中心在青岛南部黄海海面上, 地面主要受偏东气流的影响。威海东部沿海地区位于地面低压的顶前部, 气旋式切变明显, 风力较西部内陆地区大, 同时存在海陆分布造成的地形增幅作用, 偏东气流从海上输送的水汽受西侧较高地势阻挡, 使得荣成东部沿海降水强度相对较大(图 7(a)、图 7(b))。

3.3. 雷达特征分析

7 月 2 日凌晨降水刚开始时, 强度较弱, 威海一直处于层状云降水回波的影响下。2 日白天, 回波主体自南向北影响, 最强回波达 $45\sim 50 \text{ dBZ}$, 无雷电发生, 降水效率较高, 以层积混合降水回波影响为主(图 8(a)), 0.5° 径向速度图上看存在低层大值区($>20 \text{ m/s}$)(图 8(b)), 零速度线呈近似直线形穿过显示中心, 负值区在右侧, 正值区在左侧, 说明风向为偏东风, 表明气旋在本站的南部逐渐向北移动。层状云降水回波顶高普遍在 $5\sim 7 \text{ km}$, 积状云回波顶高在 $10\sim 12 \text{ km}$ (图略)。沿着 80° 方位角做反射率因子的剖面(图 8(c))可见回波表现出低质心高效率的暖云降水特征, $45\sim 50 \text{ dBZ}$ 回波伸展到 6 km 高度, 降水具有对流性,

此时 1 h 降水量达 24.7 mm。

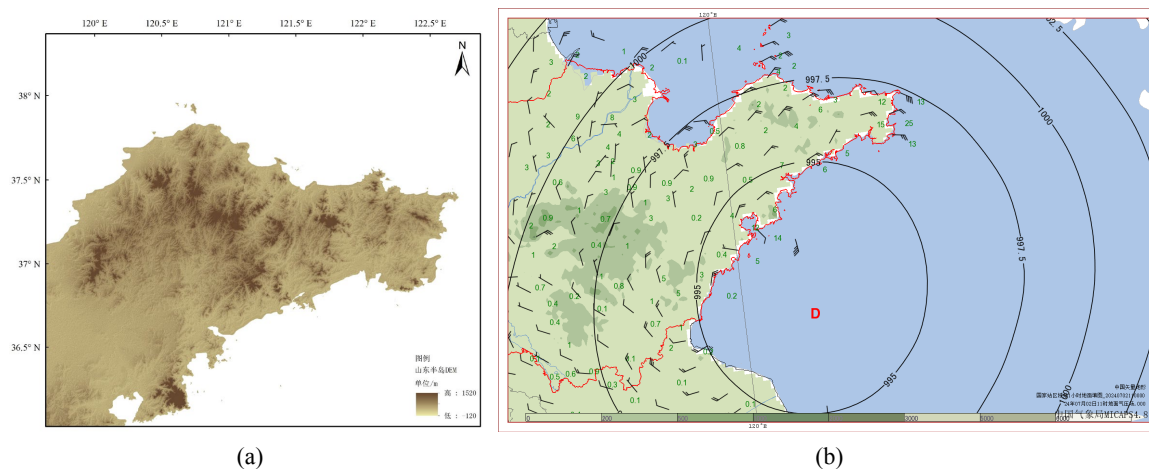
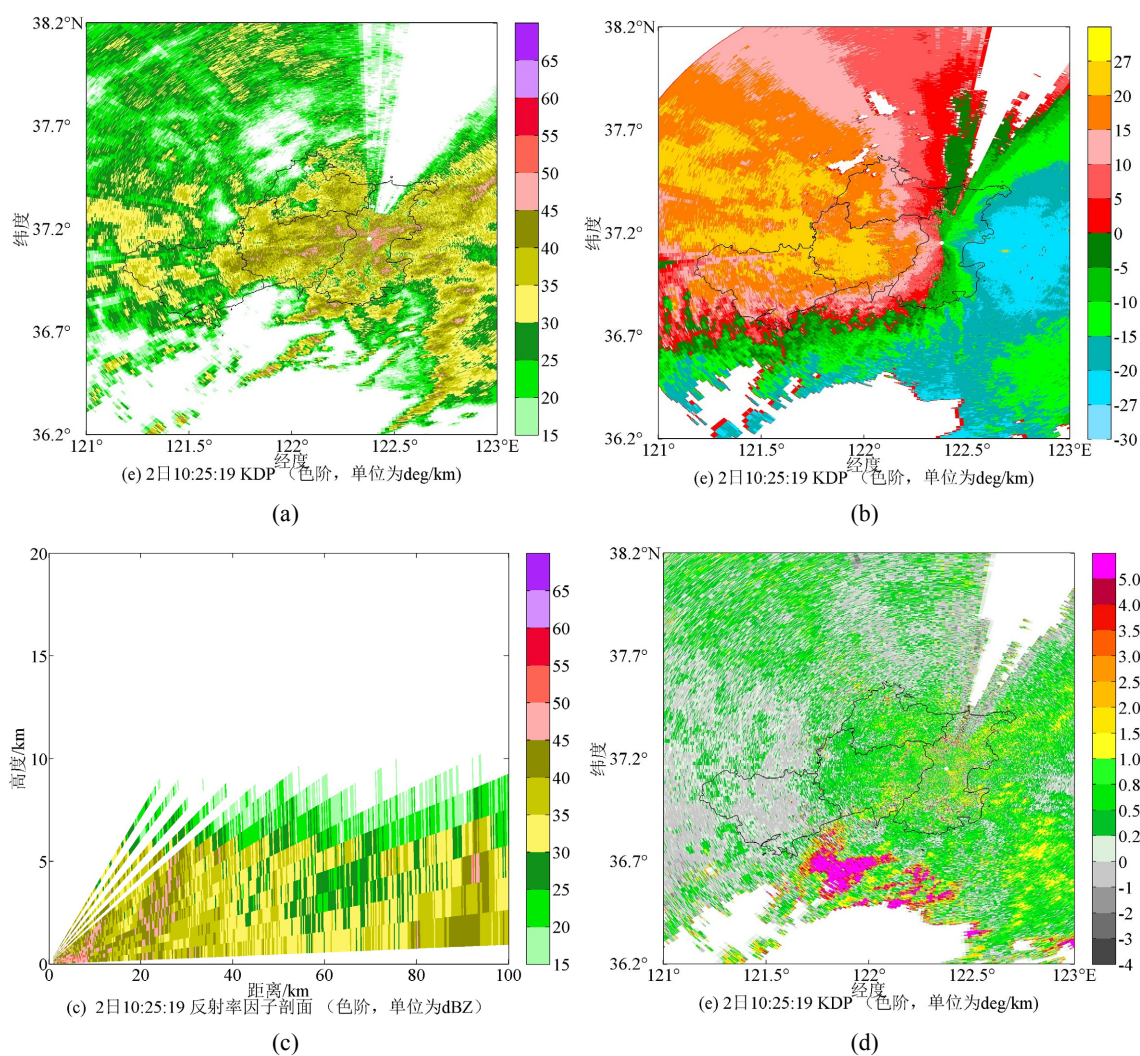


Figure 7. DEM distribution in the Shandong Peninsula (a) and surface situation at 11:00 on the 2nd (b)
图 7. 山东半岛 DEM 分布(a), 2 日 11:00 地面形势场(b)



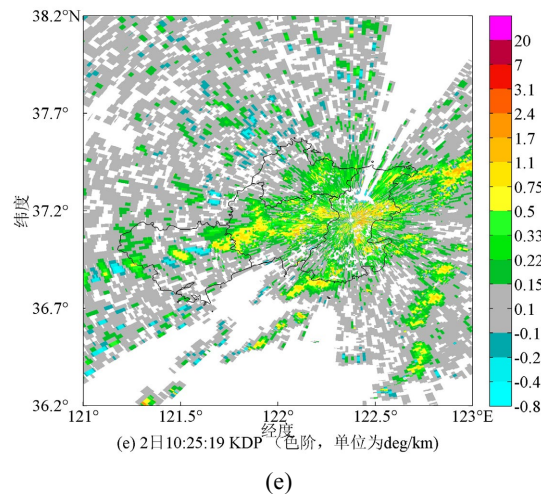


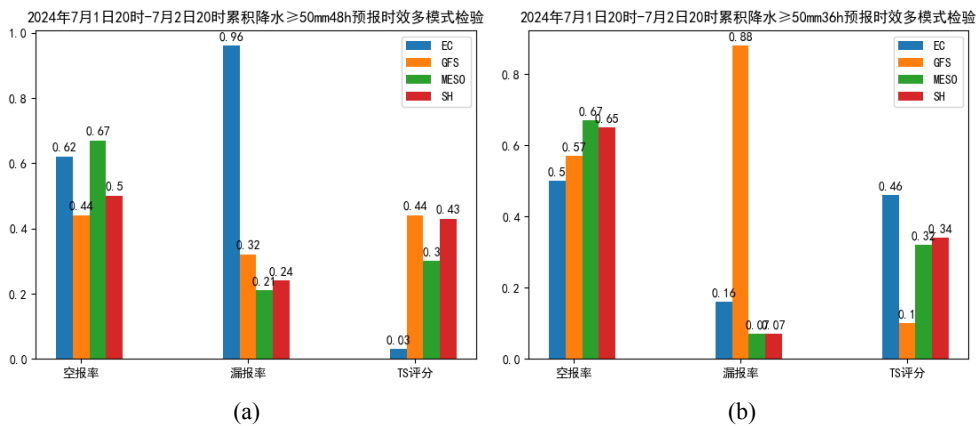
Figure 8. Reflectivity factor (a), radial velocity (b), ZDR (d), KDP (e) at 0.5° elevation, and vertical sections of reflectivity factor along the 80° azimuth (c) of the radar in Rongcheng at 10:25:19 on the 2nd
图 8. 2 日 10:25:19 荣成雷达 0.5°仰角反射率因子(a)、径向速度(b)、ZDR (d)、KDP (e)、PPI 平面位置显示图及反射率因子沿 80°经向剖面(c)

从偏振参量特征来看, 2 日 10:25:19 威海地区 ZDR 在 0.5~1.5 dB(图 8(d)), 降水以小雨滴为主, KDP 值最大达 1.7~2.4 deg/km, 45~55 dBZ 回波对应的 KDP 值相对大一些, 代表较强降水区(图 8(e)); 协相关系数 CC 接近 1, 降水性质均一, 以纯雨为主(图略)。

4. 模式传统检验与空间检验

4.1. 传统检验

对山东半岛地区(烟台、威海、青岛)国家和区域自动站暴雨以上量级降水进行传统检验(图 9(a)、图 9(b))可见: 此次过程山东半岛地区 48 h 预报时效 EC 模式 TS 评分(0.03)最低, 主要是由于较高的空报率(0.62)和最高的漏报率(0.96), GFS 和 SH 模式相对较好, MESO 居中; 36 h 预报时效 TS 评分 EC > SH > MESO > GFS, EC 模式表现较好, GFS 表现最差, 两个时效中尺度模式均表现出大于 0.75 的相对高的命中率(图 9(c)、图 9(d))。对山东省国家和区域自动站暴雨以上量级降水进行传统检验(图略)可见: 全省范围内 48 h 预报时效 EC 模式 TS 评分最低, 几乎为 0.00, 主要是由于非常高的空报率(0.94)和漏报率(0.96), GFS 表现相对较好, MESO 和 SH 模式次之; 36 h 预报时效 TS 评分 EC > MESO > SH > GFS, EC 模式表现较好, GFS 表现最差。综合来看, EC 模式在临近预报中表现较好, 具有较高的参考意义。



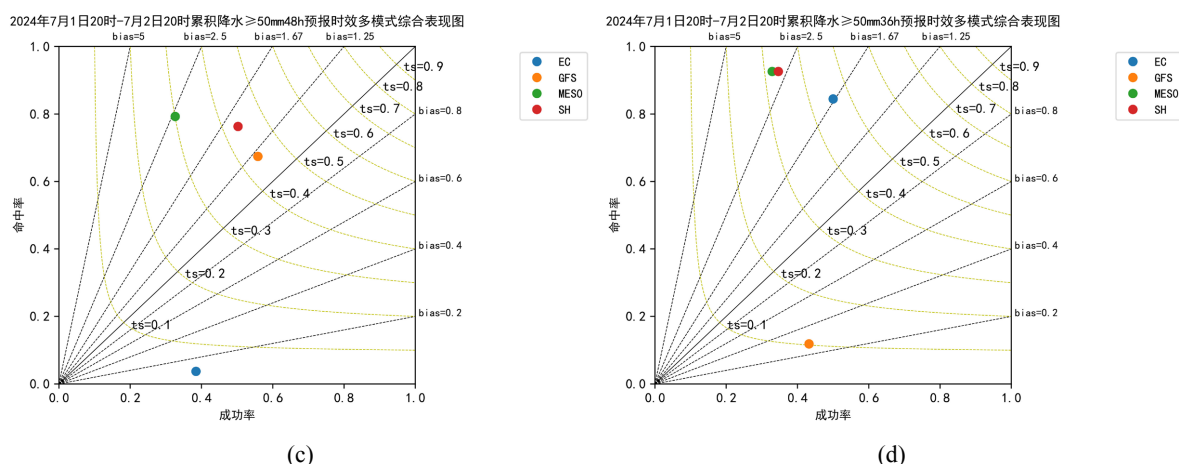


Figure 9. The traditional multi-model verification results for 48 h (a, c) and 36 h (b, d) forecast lead times of cumulative precipitation ≥ 50 mm (from 20:00 CST on July 1st to 20:00 CST on July 2nd) over the Shandong Peninsula region

图 9. 7 月 1 日 20:00~2 日 20:00 累积降水量 ≥ 50 mm 的 48 h (a, c) 和 36 h (b, d) 预报时效多模式传统检验结果(山东半岛地区)

4.2. MODE 检验

此次过程各模式均提前报出暴雨雨带(图 10), 但是 EC 模式 48 h 落区明显偏南, 临近时次有向北调整的趋势, 当模式多个时次均做出明显落区的调整时, 参考性较高。且 36 h 预报时效, 各模式预报区域相对一致, 均指示有暴雨出现可能, 总体上看各模式均表现较好。

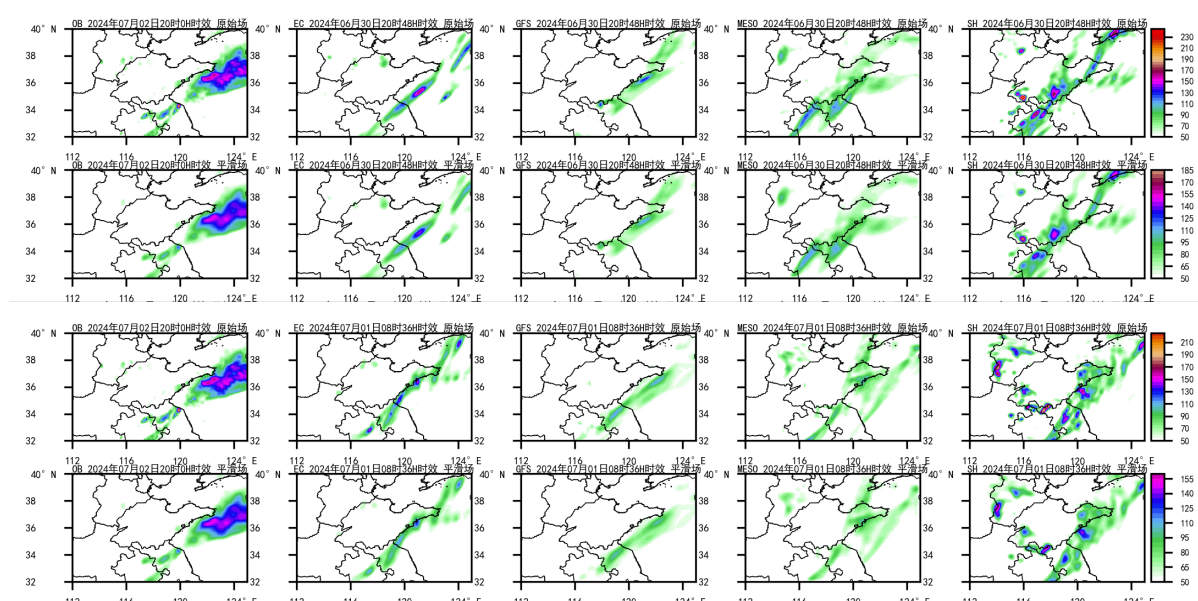


Figure 10. The original fields and smoothed fields from each model based on MODE for 48 h and 36 h forecast lead times

图 10. MODE 空间检验各模式原始场、平滑场(48 h 和 36 h 预报时效)

MODE 检验可以给出目标对象的匹配情况及定量给出目标对象属性(图 11、表 1), 此次过程观测场识别两个目标对象, 48 h 预报时效 EC、GFS、MESO 和 SH 分别识别了 2、1、3、2 个对象, 36 h 预报时效分别识别出 3、1、2、4 个对象, 重点关注目标 1 各模式的匹配情况, 图中可见各模式均做出匹配。其

中, 48 h 预报时效目标 1 的整体相似度 $EC(0.940) > GFS(0.912) > MESO(0.817) > SH(0.753)$, 36 h 预报时效目标 1 的整体相似度 $GFS(0.940) > EC(0.937) > SH(0.932) > MESO(0.911)$, 均表现为大尺度模式对此次暴雨的预报优于中尺度模式。

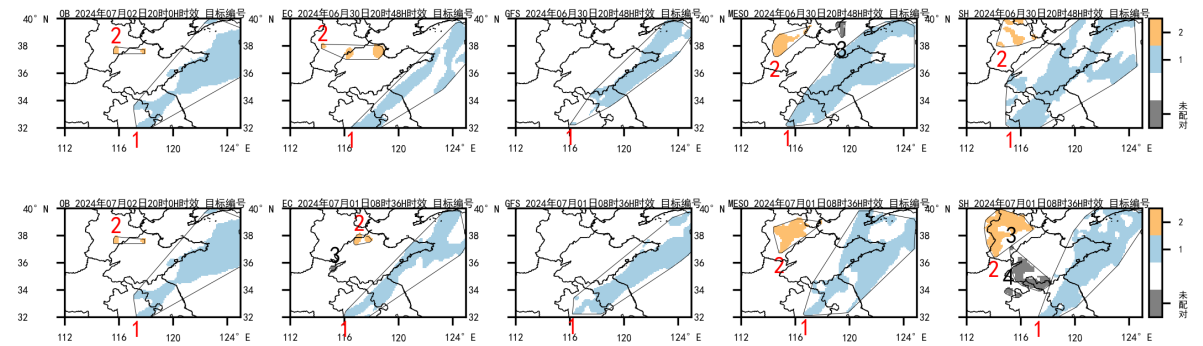


Figure 11. Object recognition results from each model based on MODE for 48 h and 36 h forecast lead times
图 11. MODE 空间检验各模式目标匹配情况(48 h 和 36 h 预报时效)

Table 1. Attributes of matched objects based on MODE
表 1. MODE 空间检验匹配目标属性

1 日 20:00~2 日 20:00		48 h				36 h			
		EC	GFS	MESO	SH	EC	GFS	MESO	SH
目标整体相似度		0.940	0.912	0.817	0.753	0.937	0.940	0.911	0.932
面积	观测	17.960	17.960	17.960	17.960	17.960	17.960	17.960	17.960
	预报	12.180	12.550	24.780	25.870	14.820	16.150	22.470	22.080
主轴倾角	观测	41.225	41.225	41.225	41.225	41.225	41.225	41.225	41.225
	预报	39.592	39.137	36.720	21.983	36.335	34.835	35.774	40.094
面积比		0.678	0.699	0.725	0.697	0.825	0.899	0.799	0.813
重叠面积比例		0.644	0.425	0.364	0.295	0.522	0.729	0.535	0.570
质心距离		0.549	0.884	1.868	2.375	0.820	0.799	0.964	0.795
质心_x	观测	122.041	122.041	122.041	122.041	122.041	122.041	122.041	122.041
	预报	121.629	121.359	120.173	119.666	121.227	121.360	121.112	121.405
质心_y	观测	35.982	35.982	35.982	35.982	35.982	35.982	35.982	35.982
	预报	35.619	36.545	36.015	36.048	36.079	35.566	36.242	36.459
中位数强度	观测	88.198	88.198	88.198	88.198	88.198	88.198	88.198	88.198
	预报	66.808	65.160	65.120	72.500	67.170	59.820	63.222	71.100
最大值	观测	198.672	198.672	198.672	198.672	198.672	198.672	198.672	198.672
	预报	165.38	130.256	126.978	283.0	148.08	114.95	117.422	164.6

5. 结论与讨论

本文基于多源观测资料及数值预报模式产品等, 对 2024 年汛期威海首次较大范围气旋暴雨过程的环流特征、物理量场等进行了诊断分析, 并对模式进行了检验。主要结论如下:

(1) 此次暴雨过程受高空冷涡及江淮气旋的共同影响,降水持续时间相对长,具有一定的对流性,强降水时段相对集中。同时伴有气旋影响的系统性东南大风,且阵风风力强。

(2) 高空槽前的正涡度平流和暖平流以及槽后的弱冷空气侵入使得低层倒槽在北抬的过程中发展加强,地面上逐渐发展为气旋,气旋路径以北上为主,有利于威海暴雨的出现。

(3) 此次过程水汽充沛,强的西南低空急流和超低空急流在威海地区产生气旋性弯曲,打通了水汽通道。同时东部沿海存在整层水汽通量散度辐合区,850 hPa 以下存在水汽通量大值区及水汽通量散度负值区,有利于威海强降水天气的发生。

(4) 此次过程动力抬升条件明显,且存在不稳定条件及地形增幅作用。暖湿气流北上形成明显的锋生作用,斜压性的增强同样有利于垂直运动在威海附近发展,配合深厚的暖云层使得降水效率较高。

(5) 强降水时段以层积混合降水回波影响为主,强回波表现出低质心高效率的暖云降水特征,降水性质均一,以纯雨为主。

(6) 数值预报模式的传统检验结果表明山东半岛地区暴雨预报 48 h 预报时效 GFS 预报较好,EC 最差,36 h 预报时效 EC 最优,GFS 表现最差,即 EC 模式在临近时次中的调整具有参考性。空间检验结果表明临近时次各模式对此次过程暴雨雨带的落区预报较为一致,从目标整体相似度来看,36 h 和 48 h 预报时效均表现为大尺度模式预报优于中尺度模式。

声 明

本文地图基于山东省标准地图服务网站下载的审图号为鲁 SG(2024)035 号的标准地图制作,底图无修改。

基金项目

山东省气象局科学技术研究项目(2022SDQN16)。

参考文献

- [1] 郑丽娜,孙兴池. 气旋类山东暴雨过程天气学特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 74-80.
- [2] 罗箭宇,高松影,于文革,等. 一次黄河气旋暴雨过程分析[J]. 农业开发与装备, 2019(6): 57-60.
- [3] 颜佳任,王伟健,张红华,等. 2019 年江苏两次江淮气旋暴雨大风过程分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 83-89.
- [4] 孙贞,徐晓亮,盛春岩,等. 两次气旋暴雨过程风廓线特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(2): 28-34.
- [5] 毛程燕,荆思佳,潘欣,等. 浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究[J]. 热带气象学报, 2021, 37(4): 530-540.
- [6] 张达文,姚建春. 近 10 a 江淮气旋东移影响下梅州暴雨统计分析[J]. 广东水利水电, 2020(6): 44-50.
- [7] 陈筱秋,王咏青. 基于 NCEP 资料的一次东移引发暴雨的江淮气旋结构特征分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(1): 53-60.
- [8] 董疆南,于雷,马鸿青,等. 保定市一次黄淮气旋暴雨过程分析[J]. 山西科技, 2018, 33(6): 134-138.
- [9] 梁钰,王新敏,邵宇翔,等. 河南省黄淮气旋暴雨的天气特征及个例诊断[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(1): 24-29.
- [10] 张雅乐,俞小鼎. 黄河气旋暴雨过程发展演变成因分析[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 74-84.
- [11] Davis, C., Brown, B. and Bullock, R. (2006) Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part I: Methodology and Application to Mesoscale Rain Areas. *Monthly Weather Review*, **134**, 1772-1784. <https://doi.org/10.1175/mwr3145.1>
- [12] Davis, C., Brown, B. and Bullock, R. (2006) Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part II: Application to Convective Rain Systems. *Monthly Weather Review*, **134**, 1785-1795. <https://doi.org/10.1175/mwr3146.1>