

渤海一次海上强风过程的成因及预报服务难点分析

节江涛¹, 窦慧敏², 王佳希³, 孙思远^{4,5*}

(1.沧州市气象局,河北沧州 061001;2.温州市气象局,浙江温州 325000;3.民航华北空管局气象中心,北京 100641;4.中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081;5.哈尔滨市气象局,黑龙江哈尔滨 150000)

摘要: 利用常规站点观测资料、ERA5逐小时再分析资料、天气雷达拼图组网组合反射率产品和中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)预报产品对2024年6月13—14日渤海一次海上强风天气过程成因进行分析,并讨论预报服务难点。结果表明:源于贝加尔湖附近的500 hPa高空冷涡在本次过程前2~3天开始发展并缓慢东移,于13日移入东北地区,冷涡后部冷空气南下,配合低层切变系统和暖湿背景,于13日午后触发中尺度对流系统,对流系统在19—20时移至渤海海域,导致了局地10~12级强风过程。以黄骅港保税区站(B2776)为例,低层风速辐合形成强上升运动,上冷下暖湿层结有利于触发不稳定能量释放, K 指数较大,其主要贡献项为垂直温度递减率;此外,中层水汽饱和程度的时间变化与 K 指数变化有很好的对应关系,较好的热力和动力条件是本次雷暴大风发生发展的基础。CMA-MESO能提前2~3天指示本次渤海海域的强风过程,为做好港口海洋气象预报服务提供了重要参考,但在大风极值的预报中仍存在一定局限性。

关键词: 渤海;大气环流;数值预报;港口气象服务

中图分类号: P732.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)05-0063-10

0 引言

渤海作为西太平洋海域的内陆边缘海,是我国北方地区的重要出海口。近年来,国家能源运输结构调整带动环渤海地区港口吞吐量快速增长^[1]。然而,海上航运作业常受复杂多变的天气气候变化影响,海上强风、海雾、强对流、台风等恶劣天气直接影响港口作业进度及海上航运安全^[2-4],不仅会降低港口运营效率,还严重威胁作业船舶及沿海地区人民群众的生命财产安全^[5-6]。因此,海洋经济发展为海上防灾减灾、海上交通气象服务带来了新的机遇和挑战。

高空冷涡作为致使中国中东部地区暖季强对流的典型天气背景之一,已有学者针对其天气气候

特征、系统演变机理、强对流个例等开展了大量研究^[7-9]。5—8月是华北地区以及渤海海域雷暴大风天气的多发时段^[10],吕爱民等^[11]和左涛等^[12]的研究表明,渤海海域近半数的雷暴大风由冷涡型天气背景主导。在冷涡背景下,存在高低空冷暖平流交汇的现象,同时具备较大的风垂直切变和温度垂直递减率^[13-15]等环境条件,这些条件有利于中小尺度系统的形成和发展,进而引发雷暴大风天气;同时,高空冷涡所诱发的中小尺度系统具有局地性、突发性、反复性和不对称性等显著特点^[16-17]。2024年6月13日午后—14日,我国北方地区出现较大范围的强对流天气,华北和东北多地有线状对流或超级单体系统生成并发展,伴随雷暴大风和短时强降水,河北沧州局地还出现了龙卷风天气。本次过程中,

收稿日期: 2024-10-09。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004102);沧州专业气象融合服务创新团队专项;中国气象局地球系统数值预报中心台风及海洋环境数值预报技术创新团队专项。

作者简介: 节江涛(1981-),男,工程师,本科,主要从事气象环境预报和行业气象服务研究。E-mail: jiejiangtao@me.com

*通信作者: 孙思远(1994-),女,高级工程师,博士,主要从事数值模式检验评估和极端天气气候事件形成机理研究。E-mail: sunsy@cma.gov.cn

渤海海上局地极大风风力可达12级,黄骅港保税区站(B2776)、中心三号平台应用(海洋)站(54740)和中心一号平台应用(海洋)站(54741)的极大风速在13日12时(北京时间)—14日08时分别可达35.3 m/s、34.6 m/s和34.4 m/s,其中,B2776站的极大风由13日18时的8.2 m/s(风力5级)迅速增至19时的17.9 m/s(风力8级),随后继续增强至35.3 m/s(风力12级)。极端雷暴大风使得港区及锚地作业船只出现风损事故的风险增大^[18],但得益于数值预报模式和短临预报技术的发展,本次过程及时落实了防风和避险措施。

为进一步加深对渤海及沿岸地区冷涡背景下雷暴大风过程的理解,本文将从2024年6月渤海一次强风天气过程的预报服务需求出发,分析本次大风过程的大尺度环流特点、中尺度环境条件以及数值模式预报性能,总结极端大风预报预警经验和难点,为近海港航气象服务的高质量、可持续发展提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文主要研究时段为2024年6月13—14日,采用的资料有:

①国家气象信息中心的国家基准站、基本站等地面观测资料,使用的变量有2 min平均风、极大风速等,时间分辨率为1 h。

②欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代全球大气再分析数据集ERA5,使用的变量有经向风、纬向风、垂直速度、位势高度、温度、比湿等^[19]。资料水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h。

③中国气象局气象探测中心研发的天气雷达拼图系统V3.0组网组合反射率产品,时间分辨率为6 min;

④中国气象局地球系统数值预报中心自主研发的中国气象局中尺度天气数值预报系统(China Meteorological Administration Regional High-Resolution Mesoscale Model, CMA-MESO)的业务预报数据^[20-21]。CMA-MESO采用三维变分同化系

统、WSM6云微物理方案、Noah陆面过程方案等技术。选用起报时间为00时(世界时)或12时的预报结果,模式预报时长为72 h,预报输出频次为1 h,水平空间分辨率为3 km,预报范围为($10^\circ \sim 60^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$)。

本文采用最近邻插值方案将再分析或模式资料插值到观测站点后再进行单点诊断分析。

1.2 方法

K 指数作为热力不稳定指标,用于评估本次强风天气过程的大气层结稳定程度以及对流是否容易发展,其表达式为:

$$K = \underbrace{(T_{850} - T_{500})}_{K1} + \underbrace{Td_{850}}_{K2} - \underbrace{(T - Td)_{700}}_{K3} \quad (1)$$

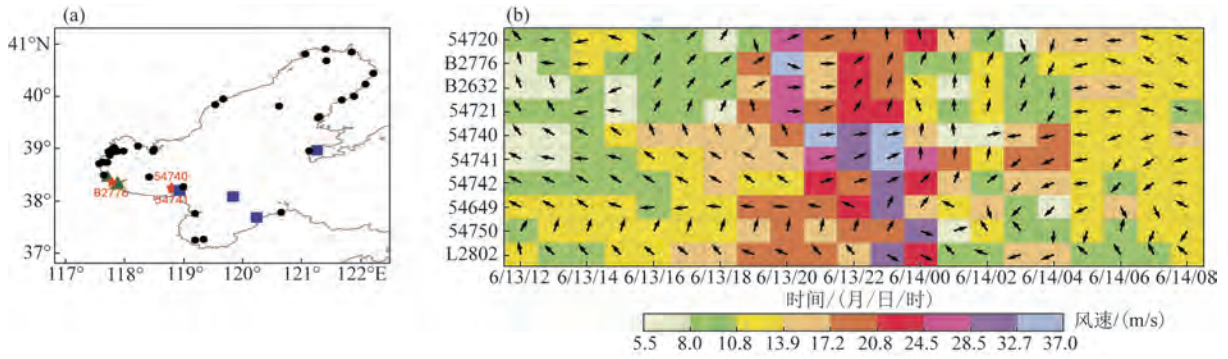
式中: T 和 Td 分别表示温度和露点温度,下标表示等压面层。 K 指数越大,大气层结越不稳定性,强对流天气发生的可能性也越高^[22]。对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)、沙氏指数(Showalter Index, SI)和最有利抬升指数(Best Lifted Index, BLI)同样也是用于判别雷暴大风潜在强度的重要热力指标。CAPE值越大,对流潜势越强;SI和BLI小于0时,表示大气层结不稳定,且负值越大,越不稳定。

垂直风切变作为影响中尺度对流系统发生发展的关键动力因子,在本文用于诊断强风发展维持的机理。在计算垂直风切变时,采用将 u 分量和 v 分量分别相减再合成上下两层风矢量差的简单计算方案,单位为m/s。考虑海面平滑,下层取1 000 hPa,上层分别取900 hPa、700 hPa和300 hPa,对应0~1 km、0~3 km和0~9 km 3个层次的垂直风切变。

2 渤海海上强风实况及成因分析

2.1 强风实况

由于部分测站风场资料存在缺失,为保证所用资料的完整性和连续性,已对缺测观测站进行剔除。最终,经筛选渤海海域共获得45个海上观测站点(见图1a)。本次极端强风天气过程中,共有3个测站(见图1a红色星形)出现12级极大风,4个测站(见图1a蓝色方形)出现11级极大风,3个测站(见图1a绿色三角形)出现10级极大风。从雷达回波的



注: *、■和▲形分别为出现12级、11级和10级极大风的站点

图1 渤海海上测站位置(a)和极大风实况(b)

Fig.1 Locations of the offshore observation stations in the Bohai Sea (a) and the maximum wind observations (b)

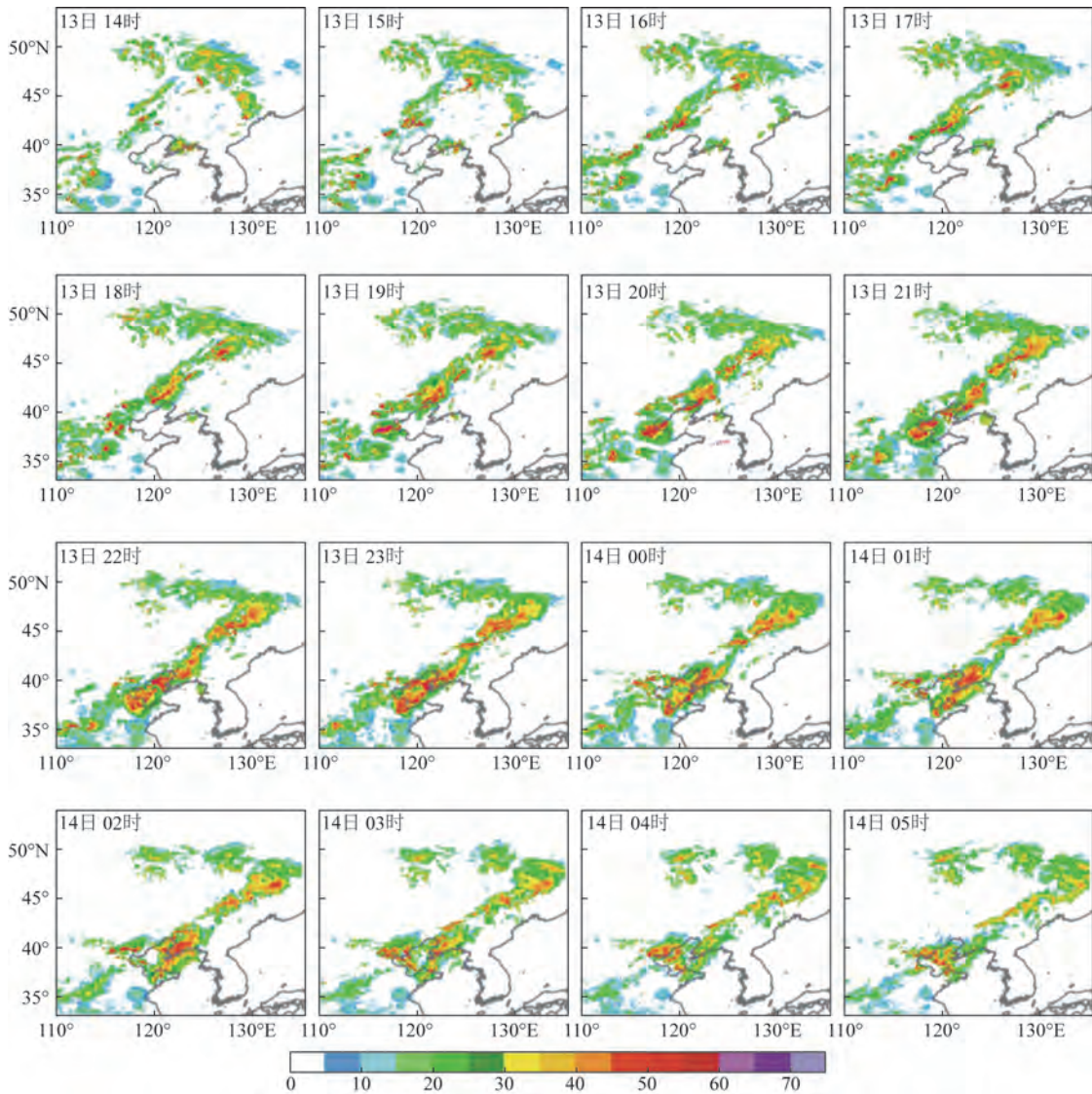


图2 2024年6月13日14时—14日05时逐小时雷达组合反射率(单位:dBZ)

Fig.2 Hourly combined radar reflectance from 14 BJT on 13 June to 05 BJT on 14 June, 2024 (unit: dBZ)

演变来看(见图2),中尺度对流系统于13日午后开始在山西、河北北部和内蒙古东南部等地爆发,数小时后发展成为组织性较强的线状对流带及超级单体风暴,18时系统开始影响渤海沿岸,强中心组合反射率超过70 dBz,随后对流系统继续增强发展,移入渤海后因摩擦力减小,海上风力进一步增大;14日凌晨系统开始减弱消散,其影响范围和雷暴大风强度亦逐步减弱。受中尺度对流系统东移影响,渤海在13日18时—14日04时自西向东出现8级以上大风,13日20时—14日00时共有10站次出现10~12级的极端大风,该极端强风天气过程于14日05时基本结束。整体而言,本次强风过程系统性强、影响范围广、持续时间较长且极端性突出,与常见冷涡引发的大风过程相比,其不同之处在于本次强风过程发生前,华北大部分地区处于极端高温背景下,充沛的热力条件使得能量积累,有利于触发中小尺度对流系统强烈发展。

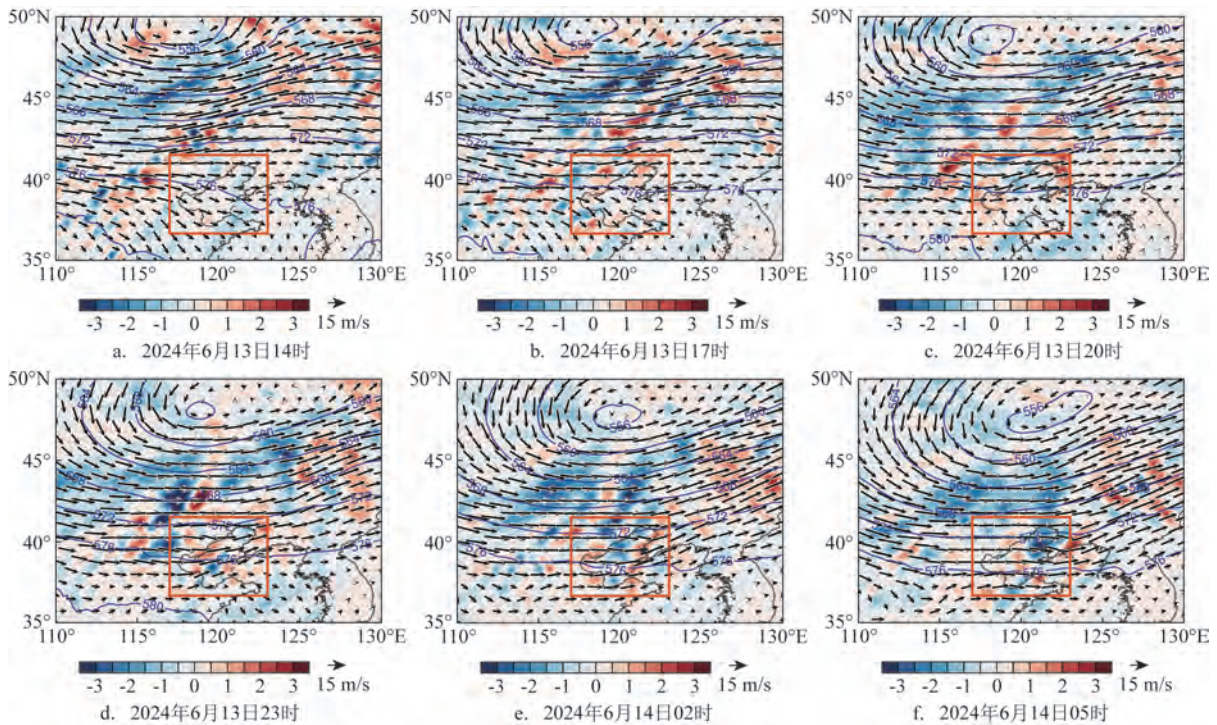
2.2 大尺度环流形势背景

本次过程前2~3天,500 hPa贝加尔湖附近出

现一冷性低涡,低压中心强度为560 dagpm,冷中心强度为-20 °C,随后该高空冷涡东移加强(图略)。13日午后,500 hPa高度上的高空冷涡已进入我国内蒙古北部地区,并以较慢速度继续向东移动,低涡中心位势高度在此期间基本维持在556 dagpm(见图3蓝色实线)。冷涡后部冷空气南下,高空出现明显冷平流(见图3阴影),配合850 hPa高度上维持在华北地区上空的暖湿气流,以及自辽宁西部延伸至河北东部及南部地区的明显低空切变线(见图4),使该地区上空大气层结趋向不稳定,有利于触发强对流天气。此外,低层切变线前侧西南急流在13日傍晚一夜间明显增强,低空急流最大强度超过16 m/s(见图4c—e),渤海大部分海域位于急流区;由于海洋表面摩擦力通常小于陆地,因此对流系统移入渤海湾后,13日夜间出现极端大风。

2.3 热力和动力不稳定条件分析

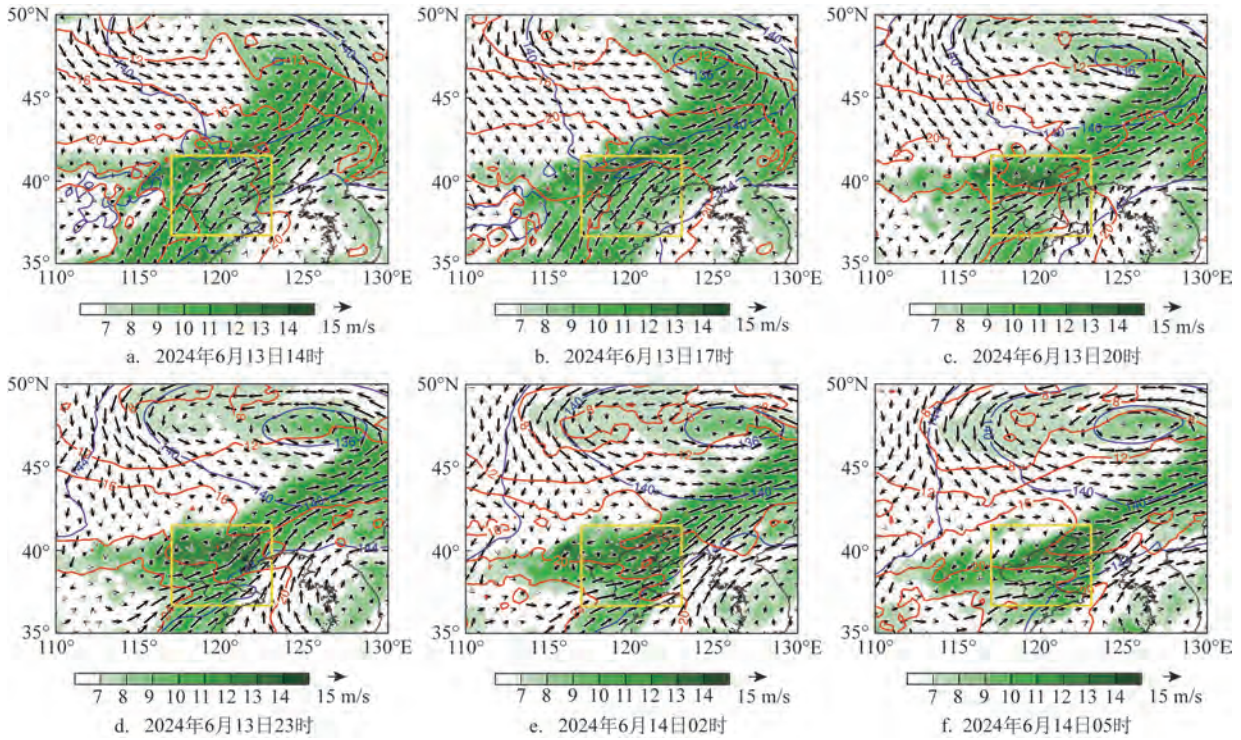
单站探空是分析局地大气热力稳定度、动力稳



注:橘色矩形框为渤海海域

图3 2024年6月13日14时—14日05时逐3 h的500 hPa高度场(蓝色等值线,单位:dagpm)、温度平流(阴影,单位:10⁻⁴ K/s)和水平风场(箭头,单位:m/s)

Fig.3 500 hPa geopotential height field (blue contour, unit: dagpm), temperature advection field (shaded, unit: 10⁻⁴ K/s), and horizontal wind field (arrow, unit: m/s) at a time interval of 3 hours from 14 BJT on 13 June to 05 BJT on 14 June, 2024



注:黄色矩形框为渤海海域

图4 2024年6月13日14时—14日05时逐3 h的850 hPa高度场(蓝色等值线,单位:dagpm)、温度场(红色等值线,单位:℃)、比湿场(阴影,单位:g/kg)和水平风场(箭头,单位:m/s)

Fig.4 850 hPa geopotential height field (blue contour, unit: dagpm), temperature field (red contour, unit: °C), specific humidity field (shaded, unit: g/kg), and horizontal wind field (arrow, unit: m/s) at a time interval of 3 hours from 14 BJT on 13 June to 05 BJT on 14 June, 2024

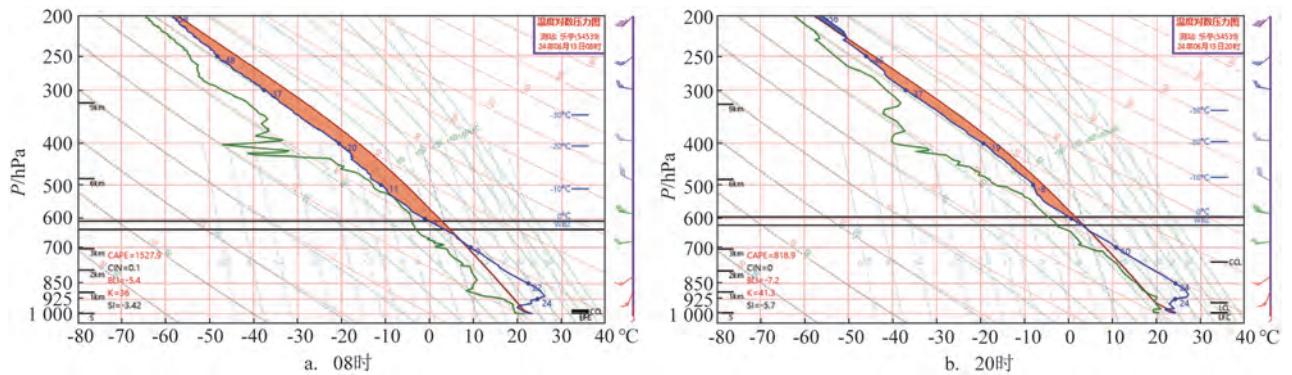


图5 2024年6月13日乐亭站探空图

Fig.5 Laoting Sounding on 13 June 2024

定度的重要手段。由于探空站分布较稀疏,且在海洋上几乎无覆盖,故选择距离黄骅港保税区站(B2776)较近的乐亭站(54539)进行分析。乐亭站上空13日08时呈上干下湿状态,20时整层偏湿;08—20时,逆温特征显著,CAPE从1527.9 J/kg减弱

至818.9 J/kg,表明环渤海地区能量条件较好,且存在能量释放;SI和BLI始终小于0,SI略减弱但BLI呈增大趋势,说明层结仍趋向不稳定,有发生强雷暴的可能。然而,由于探空站观测间隔较长,难以较好反映天气系统的中小尺度特征,下文将基于

ERA5逐小时资料继续对B2776站进行诊断。

首先,分析热力不稳定指标在B2776站的演变情况。从图6所示的K指数时间演变序列可以发现,引起本次过程该站K指数(黑色实线)偏大的主要贡献项是第一项K1(红色虚线),即业务中常用的850 hPa与500 hPa温度之差。这说明该站强风发生期间,上冷下暖结构明显,温度直减率较大,与图3和图4所示的对流层中低层温度场实况相符,十分有利于冰雹、大风等强对流天气出现,但实际的K1指数随时间缓慢变化。第二项K2(蓝色虚线)所表示的对流层低层水汽条件变化同样不显著,平均值约为10.7℃。第三项K3(绿色虚线)为700 hPa温度露点差,反映对流层中层水汽饱和程度,该项在海上强风发生前快速减小,表明该地水汽含量存在快

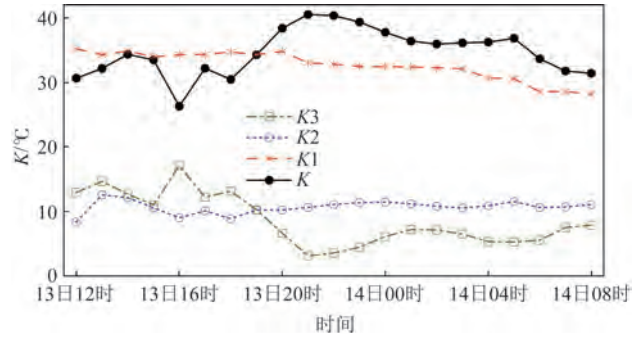
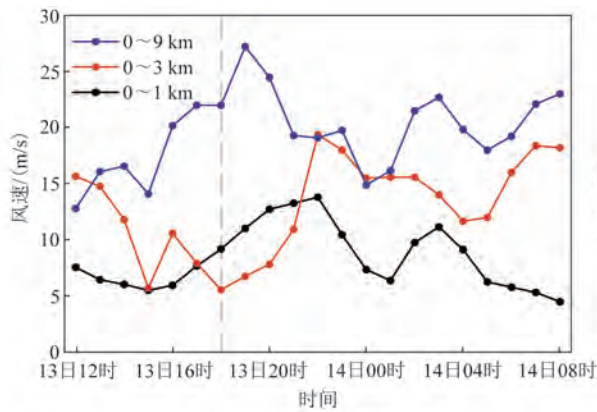
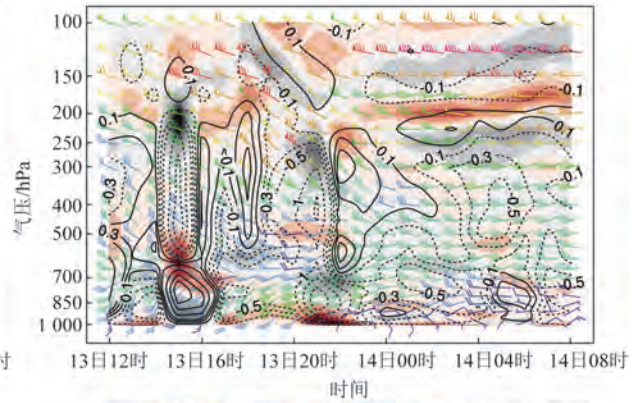


图6 2024年6月13日12时—14日08时黄骅港保税区站(B2776)的K指数及其分量(单位:℃)的时序图

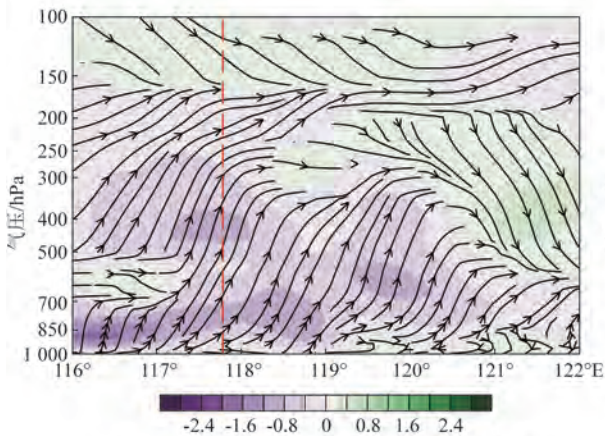
Fig.6 Time series of K-index and its components (unit: °C) at Huanghua Port Bonded Logistics Zone (B2776) from 12 BJT on 13 June to 08 BJT on 14 June



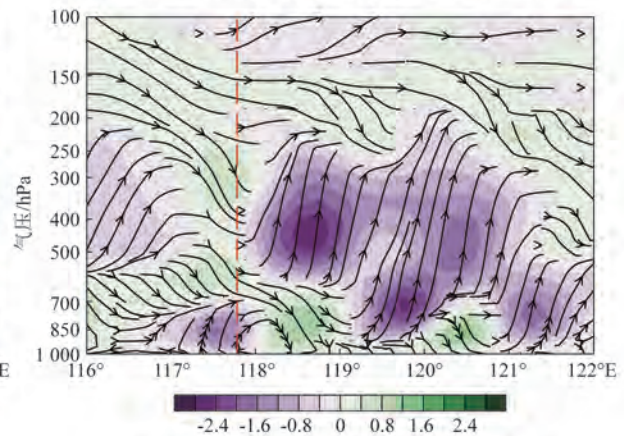
a. 上空垂直风切变的时序图



b. 水平风场(彩色风矢,单位:m/s)、垂直风场(等值线,单位:Pa/s)及水平散度场(阴影,单位:10⁻⁵/s)的时间垂直剖面图



c. 13日20时纬圈环流(流线, $\omega \times 10^4$)和垂直速度(阴影,单位:Pa/s)



d. 13日22时纬圈环流(流线, $\omega \times 10^4$)和垂直速度(阴影,单位:Pa/s)

图7 强风发生期间黄骅港保税区站(B2776)动力场分析

Fig.7 Dynamical parameters analysis at Huanghua Port Bonded Logistics Zone (B2776) during the thunderstorm gale event

速增加过程;值得注意的是, $-K3$ 的变化趋势与 K 指数的变化趋势有很好的一致性,说明中层水汽饱和程度的时间演变在本次强风天气的发生发展中亦起着至关重要的作用。

接下来,具体分析 B2776 站的动力不稳定条件性。雷暴大风多由对流风暴的强下沉气流造成,有时也可由雷暴低层的强烈入流产生^[23],但总体而言,大气强烈的垂直运动是引发强对流天气特别是强风的重要原因。由图 7 可见,从 13 日 18 时对流系统影响渤海沿岸开始直到 14 日 00 时,受低层切变和夜间暖湿西南急流增强的共同影响(见图 4),B2776 站上空的低层和高层垂直风切变整体呈先增后减的变化趋势(见图 7a)。0~9 km 垂直风切变对 13 日 20 时极端大风的出现影响较大;强风发生前,对

流层低层风速存在由东南转西南且逐渐增强的过程,对流层中层为较稳定的西北或偏西气流,对流层高层在 13 日 20 时左右出现西北风增强,加剧了大气层结的不稳定性(见图 7b);较强的高层风切使垂直抬升增大,强烈的上升气流自地面延伸至对流层上层(见图 7b 和 7c),有利于对流系统的维持与发展。随后,配合从 13 日 20—23 时的低层较强辐合(见图 7b),强烈入流触发对流层低层上升运动进一步增强(见图 7b 和 7d);同时,B2776 站上空的低层垂直风切(0~1 km 和 0~3 km)最大值出现在 13 日 22 时,与极大风速的第二个极值点相对应(见图 1b 和图 7a)。也就是说,低层和高层垂直风切变对本次渤海夜间极端大风的发生发展起着至关重要的作用。

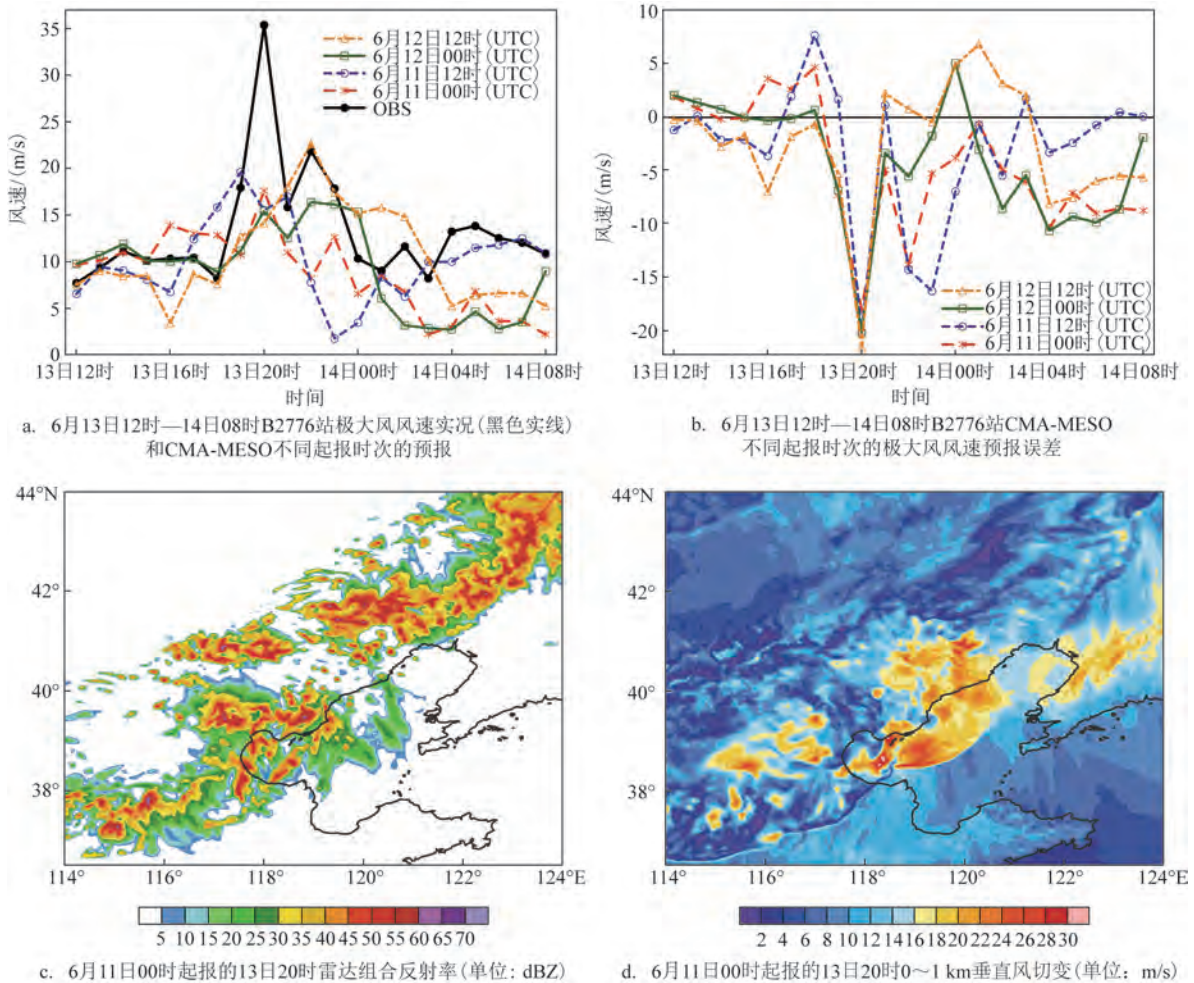


图8 CMA-MESO 预报结果

Fig.8 Forecasting results of CMA-MESO

3 预报服务与思考

近年来,区域中尺度数值模式系统不断发展完善,并在短期临近预报中发挥重要作用。针对渤海此次强风天气过程,同样以 B2776 站为例,CMA-MESO 具备预报该站 8~9 级阵风的能力,尤其在起报时次为 2024 年 6 月 12 日 12 时(世界时)的预报结果中,其对 13 日 22 时(北京时)出现的极大风风速(实况为 21.8 m/s)预报误差仅约为 0.8 m/s(见图 8a 和 8b)。但整体而言,模式对 13 日 18 时—14 日 00 时期间出现的强风以负偏差为主,即预报大多偏弱。此外,CMA-MESO 的雷达组合反射率和 0~1 km 垂直风切等客观产品可提前 2~3 天指示本次过程(见图 8c 和 8d)。需要注意的是,各起报时次均未体现夜间 20 时出现的极值,这表明中尺度模式虽然对此次强风天气有一定预报能力和参考价值,但融合的多源观测资料来源仍存在不足,且物理过程、积云对流等参数化方案有待进一步改进,因此在预报极端天气事件方面仍存在一定的局限性,业务技术人员在实际应用中需要借助实时加密观测及相关客观订正技术进行及时滚动调整。

本次过程中,沧州市气象服务中心参考区域中尺度模式 CMA-MESO 以及实时业务雷达组网资料,提前至少 12 h 为港务管理部门启动重要天气“伴随式”精细化服务,提前 1~3 h 多次提示强对流天气预计影响时间,并发布 11 级以上强风预警。相关气象实况和预警信息通过国家应急广播、网站、微信等渠道实时推送至在港施工船舶,严格落实了海洋灾害防灾减灾避险工作,切实保障了港口安全和生产平稳有序。

4 总结

本文利用常规海上观测资料、ERA5 逐小时再分析资料、雷达组网资料以及 CMA-MESO 数值模式业务预报产品,对 2024 年 6 月 13—14 日渤海海域一次强风天气过程进行了成因分析和预报服务思考。结果表明:

①此次过程是在源于贝加尔湖附近的高空冷涡东移背景下,配合低层暖湿急流夜间加强及低空切变线长时间维持,触发中尺度对流系统产生的局

地 10~12 级强风过程,极大风速为 35.3 m/s,出现在黄骅港保税区站(B2776)。

②强风发生期间,渤海海域位于高能量区域,K 指数在本次过程中数值较大,上冷下暖湿层极易触发不稳定能量释放,进而促使渤海海域雷暴大风增强。垂直温度递减率和中层水汽饱和程度分别在 K 指数的量级和时序演变中产生显著影响。同时,对流层低层的显著辐合、较强的低层和高层垂直风切及强烈的上升气流,也为雷暴大风的生成发展提供了较好的动力条件。

③区域中尺度模式 CMA-MESO 较准确地预报了本次渤海强风过程,雷达组合反射率和低层垂直风切等诊断量可以提前 2~3 天给出指示。但受数值模式系统初始场、资料同化技术、物理参数化方案等不确定性的限制,目前区域中尺度模式对雷暴大风的极值预报难度仍较大,未来可考虑利用深度学习技术、融合临近实况观测数据进一步订正数值模式的预报结果。

致谢:中国气象局地球系统数值预报中心提供了 CMA-MESO 区域模式预报产品,中国气象局气象探测中心提供了天气雷达组网拼图产品,所有地面观测数据、雷达产品和数值模式业务预报资料均可在国家气象信息中心的中国气象数据网获取(<http://data.cma.cn/>);欧洲中期数值天气预报中心提供了 ERA5 再分析资料的在线下载服务(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/>);文中插图使用 NCL (<http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5>) 和 Python 软件绘制。谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 毕成成. “双碳”背景下我国港口海铁联运发展现状及对策——以天津港为例[J]. 中国港口, 2023(1): 26-31.
BI C C. Development situation and countermeasures of sea-rail intermodal transport in port of China under carbon peaking and carbon neutrality goals background-taking Tianjin port as an example[J]. China Ports, 2023(1): 26-31.
- [2] ZHANG Y, LAM J S L. Estimating the economic losses of port disruption due to extreme wind events[J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 116: 300-310.
- [3] 于文金, 苏荣, 谢涛. 极端灾害天气对港口锚地的影响研究——以河北秦皇岛港为例[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 17-21.
YU W J, SU R, XIE T. Study on the influence of extreme weather

- disasters on harbor anchorages-taking Hebei Qinhuangdao port as an example[J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(4): 17-21.
- [4] VERSCHUUR J, KOKS E E, HALL J W. Systemic risks from climate-related disruptions at ports[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(8): 804-806.
- [5] 陈小雷, 景华, 李延江. 渤海海上大风引发的船舶海难事故初步分析[J]. *科技风*, 2019(3): 224.
CHEN X L, JING H, LI Y J. Initial analysis of marine accidents caused by strong winds in the Bohai Sea[J]. *Technology Wind*, 2019(3): 224.
- [6] 臧公涛. 大型集装箱船靠泊港口期间遭遇大风的防范和应对[J]. *航海技术*, 2017(6): 1-4.
ZANG G T. Precaution and response to strong winds during port calls of large container ships[J]. *Marine Technology*, 2017(6): 1-4.
- [7] 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 东北冷涡持续活动时期的北半球500 hPa环流特征分析[J]. *大气科学*, 2002, 26(3): 361-372.
LIU Z X, LIAN Y, GAO Z T, et al. Analyses of the northern hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(3): 361-372.
- [8] 苏永玲, 何立富, 巩远发, 等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. *气象*, 2011, 37(2): 177-184.
SU Y L, HE L F, GONG Y F, et al. A study of temporal-spatial distribution and synoptic characteristics of severe convective weather in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(2): 177-184.
- [9] 朱宇宁, 孟智勇, 雷蕾, 等. 中国东北冷涡背景下连续发生的中尺度对流系统的组织演变特征个例分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(3): 421-433.
ZHU Y N, MENG Z Y, LEI L, et al. A case study on organization features of successive mesoscale convective systems in the environment of northeast China cold vortex[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, 58(3): 421-433.
- [10] 王亚男, 刘一玮, 易笑园. 渤海西部雷雨大风统计特征及对流参数指标分析[J]. *气象*, 2020, 46(3): 325-335.
WANG Y N, LIU Y W, YI X Y. Statistical characteristics and convection indexes of thunderstorm and gale over western Bohai Sea[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(3): 325-335.
- [11] 吕爱民, 杨柳妮, 黄彬, 等. 中国近海大风的天气学分型[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(1): 43-50.
LYU A M, YANG L N, HUANG B, et al. Classification of synoptic patterns for China offshore gales[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 43-50.
- [12] 左涛, 王科, 孙晓磊, 等. 2018—2021年渤海中西部海域雷暴大风时空分布特征[J]. *气象与环境学报*, 2024, 40(2): 86-95.
ZUO T, WANG K, SUN X L, et al. Spatiotemporal distribution of thunderstorm gust in the central and western Bohai sea from 2018 to 2021[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2024, 40(2): 86-95.
- [13] 孙晓磊, 黄彬, 易笑园, 等. 渤海中南部突发性大风成因分析及预报思考[J]. *海洋预报*, 2018, 35(4): 47-57.
SUN X L, HUANG B, YI X Y, et al. Mechanism study on the sudden gale occurred in the middle and southern Bohai Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(4): 47-57.
- [14] 吴姗姗, 龚堯, 傅娜, 等. 一次海上冷涡引起的强对流过程及海上大风成因分析[J]. *海洋预报*, 2022, 39(3): 56-65.
WU S S, GONG Y, FU N, et al. Analysis of the strong convection process caused by a cold vortex at sea and the cause of sea surface gale[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(3): 56-65.
- [15] 曹艳察, 郑永光, 孙继松, 等. 东北冷涡背景下三类区域性强对流天气过程时空分布和环境特征对比分析[J]. *气象学报*, 2024, 82(1): 22-36.
CAO Y C, ZHENG Y G, SUN J S, et al. Spatiotemporal distributions and environmental characteristics of three types of regional severe convective weather processes associated with the northeast China cold vortex[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2024, 82(1): 22-36.
- [16] LIAN Y, SHEN B Z, LI S F, et al. Mechanisms for the formation of Northeast China cold vortex and its activities and impacts: an overview[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2016, 30(6): 881-896.
- [17] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 391-418.
YU X D, ZHENG Y G. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 391-418.
- [18] 尹尽勇, 刘涛, 张增海, 等. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计分析[J]. *气象*, 2009, 35(6): 90-95.
YIN J Y, LIU T, ZHANG Z H, et al. Statistical analysis of the weather system types causing strong winds and fishery boat windage loss accidents in Bohai Sea and Yellow Sea in winter[J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(6): 90-95.
- [19] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [20] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_MesoV4.0主要技术改进和预报效果检验[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 25-37.
HUANG L P, CHEN D H, DENG L T, et al. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(1): 25-37.
- [21] 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等. CMA-MESO关键技术集成及应用[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(6): 641-654.
HUANG L P, DENG L T, WANG R C, et al. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(6): 641-654.
- [22] 于志明, 王骊鹂, 马冬亮. 渤海海洋气象灾害天气分型与预报指标研究[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(1): 106-111.
YU Z M, WANG S Y, MA D L. Study on weather classification

and forecasting index of marine meteorological disasters in the Bohai Sea[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(1): 106-111.

[23] 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.

XU A H, SUN J S, XU D B, et al. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(4): 400-411.

Analysis of the causes and forecasting service difficulties of a severe thunderstorm gale event in the Bohai Sea

JIE Jiangtao¹, DOU Huimin², WANG Jiayi³, SUN Siyuan^{4,5*}

(1. Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061001, China; 2. Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou 325000, China; 3. The North China Air Traffic Management Bureau of CAAC, Beijing 100641, China; 4. CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 5. Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150000, China)

Abstract: Using observational data from automatic weather stations, the ERA5 hourly reanalysis data, radar composite reflectivity mosaic data, and the China Meteorological Administration Regional High-Resolution Mesoscale Model (CMA-MESO) forecasting products, the causes of a severe thunderstorm gale event over the Bohai Sea during 13—14 June, 2024 are analyzed, and the difficulties in forecasting service are discussed. The results show that an upper troposphere cold vortex at 500 hPa originated near Lake Baikal began to develop and slowly moved eastward 2 to 3 days before this event, entered the northeastern China on 13 June. The cold air at the cold vortex rear moved southward along with a lower troposphere shear system with warm and humid conditions, a mesoscale convection system was triggered in the afternoon of 13 June, moved to the Bohai Sea at 19 to 20 BJT resulting in a local maximum wind force of 10~12 levels. At Huanghua Port Bonded Logistics Zone (B2776), the wind convergence in the lower troposphere supported a strong upward motion, and the unstable upper cold-lower warm stratification was conducive to triggering the release of unstable energy, which in turn stimulated the development of the squall line and thunderstorm winds. The vertical temperature gradient decided the relative large K-index of this event, which had a good correspondence with the evolution of humidity in the lower troposphere at 700 hPa. The conducive thermal and dynamic conditions serve as the foundation of this thunderstorm. Despite some limitations existing in the extreme wind peak value forecasts, the CMA-MESO provided an early forecast of the strong wind event over the Bohai Sea 2 to 3 days in advance, which is useful for port meteorological services.

Key words: Bohai Sea; atmospheric circulation; numerical prediction; port meteorological service