

渤海一次强阵性雷雨大风过程的诊断分析

宋晓姜, 邢建勇, 王彰贵

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要:利用中尺度天气预报数值模式、粗网格再分析资料、地面和高空常规观测资料,对2011年8月31日渤海地区一次强阵性雷雨大风天气过程中的大气资料进行了重建。根据该资料,分析了对流有效位能、水汽输送、假相当位温和湿位涡等物理量在这次强对流过程中的演变特征。结果表明,修正的对流有效位能可以提前对强对流不稳定天气做出指示,与850 hPa假相当位温 $\theta_{se} = 340\text{ K}$ 高能暖湿气团所在的位置以及处于 $\Delta\theta_{se} < 0$ 的位势不稳定区有明显对应关系。另外,水汽通量的辐合中心与雷雨大风天气发生的区域基本一致。而700 hPa等压面上的湿位涡最大负值区的叠加位置也是雷暴发展的另一有利形势,MPV正负交界处带状区域出现了南压和东移,表明湿位涡的发展趋势对冷锋锋面移动的路径、速度有较为明确的指示意义,移动过程中,由于出现降水,同时还伴随了湿位涡负区减弱的特征。上述物理量为雷雨大风预报提供了部分客观判断依据,可作为预报员得出预报结论的辅助手段之一。

关键词:雷暴;对流有效位能;修正对流有效位能;湿位涡;水汽通量散度

中图分类号:P458 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2013)02-0022-08

1 引言

渤海是我国一片具有丰富海上油气资源和水产养殖资源的海域,同时由于它大部分被陆地包围,还承载了大量连接各个沿海城市的海上交通运输业务。但是渤海所处地形复杂,虽是海洋,但属于北温带大陆气候,影响天气系统种类复杂,如不同路径的冷空气,温带气旋(渤海、黄海气旋),甚至是北上的热带气旋,这些天气系统引发的海浪、风暴潮等海洋灾害对渤海地区的经济建设、人们的生命财产危害巨大。因此,准确的把握该海域海上灾害性天气的发生时间、持续时间、变化强度变得尤为重要。做好海洋灾害的预警预报工作,是保障诸如油气开发、水产养殖、交通运输等海上作业项目安全生产、海上作业人员生命安全的重要手段。

雷暴(Thunderstorms)也是渤海地区常发生的一种灾害性天气过程,是伴有雷击和闪电的局地对流性天气。雷雨大风是雷暴的一种形式,指在出现雷、雨天气现象时,风力达到或超过8级($\geq 17.2\text{ m/s}$)的天气现象。有时也将雷雨大风称作飑。当雷雨大风发生时,乌云滚滚,电闪雷鸣,狂风夹伴着强降水,有时伴有冰雹,对船舶、石油钻井平台作业的破坏力巨大。它涉及的范围一般只有几公里至几十公里,时间尺度也只有几个小时甚至不到一个小时,准确地把握雷暴的发生时间、持续时间、变化强度难度很大。本文针对雷雨大风天气难以准确把握这一特点,以2011年9月1日凌晨在渤海发生的雷雨大风过程为例,通过对天气形势分析以及影响对流发展若干物理量的诊断研究希望从中得到的指示对流发生、发展及消亡的前兆信号,为今后提高雷暴天气的短时预报水平提供一些理论依据。

收稿日期: 2012-08-30

基金项目: 863计划课题(2008AA09A404-02)

作者简介: 宋晓姜(1981-),女,高级工程师,从事短期海洋气象预报工作。E-mail: jgingersong1981@yahoo.com.cn

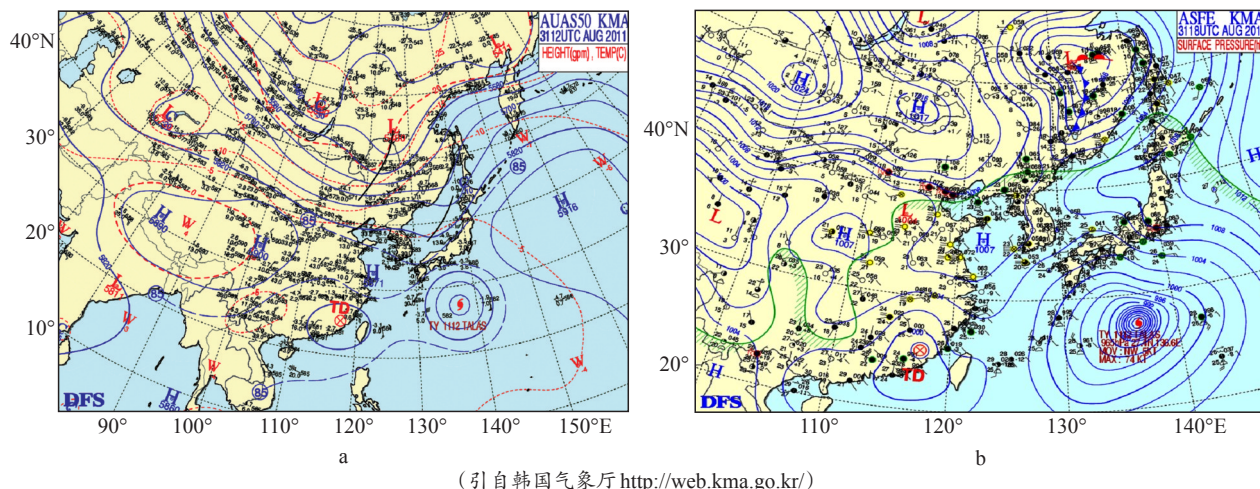


图1 a.2011年8月31日20时500 hPa位势高度图、b.9月01日02时地面天气图

2 天气学分析

2011年9月1日凌晨影响渤海的天气过程,是一股中等强度的冷空气活动。从发生时间来看,处在八、九月之交,冷空气活动开始逐渐频繁,但强度不强,绝大多数影响中国北部海区,向南扩散范围较小。8月31日晚上20时,500 hPa高空图上东亚地区中高纬度的位势高度场整体相对平直,但中国东北地区上空有一西风槽,槽底位置在 44°N 左右,槽后有弱冷平流,槽前暖平流明显(见图1a)。9月1日02时的地面图上,与高空天气系统配合的是东北上空的低压系统。受其后部冷空气的影响,渤海、黄海北部海域02时前后出现东北风6—7级,阵风8级,持续6小时左右(见图2a)。02时地面分析图显示,锋面过境期间,渤海西北部上游地区的陆地测站蓟县(54428)、大港(54645)、塘沽(54623)均出现了雷暴天气(图略),而且从渤海中南部BZ26-2石油平台(38.2°N , 119.2°E)监测的实测数据显示,此次天气过程虽然十分钟平均风速最大达到 15 m/s (风力7级),风向东北风,但是在早晨6点钟前后出现了 25 m/s (风力10级)的分钟级阵风,持续大概一个小时候,风向不稳定(见图2),且有强短时降水过程。9月1日02:30分的卫星云图(图略)显示,有一条锋面云系过境渤海上空,同时有一些亮白的对流云团集中在该海区。由于正处于夏末初秋,渤海海温的下垫面条件还比较暖,海面上空空气潮湿,与冷空气相互作用极容易产生强对流效应,既短时

雷雨大风,所以实况中出现了阵性10级大风天气的特点是持续时间短且风向不稳定。鉴于上述天气学分析,作者希望利用判断对流发生的各种物理量,对模式输出的数值产品进行分析,从大气热力和动力学角度讨论雷雨大风形成的机制。

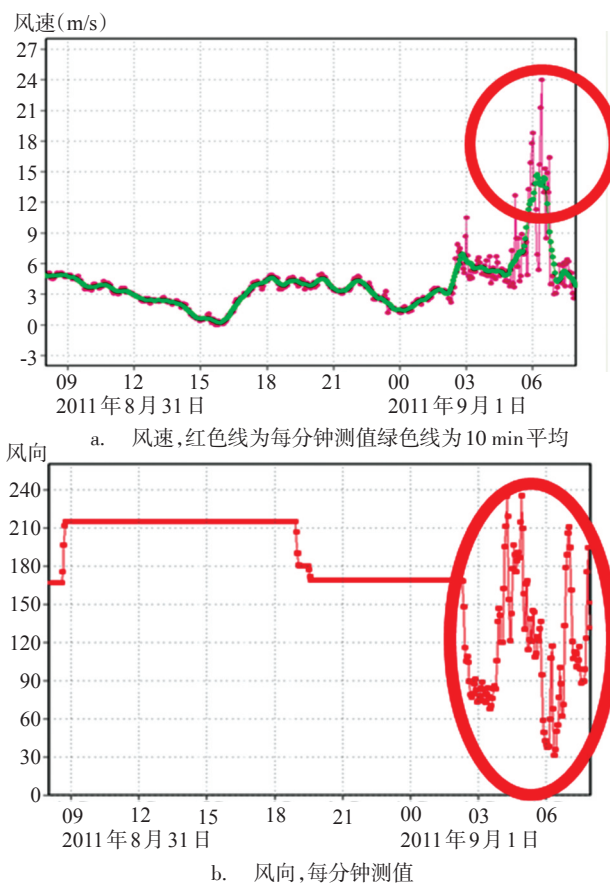


图2 8月31日—9月1日渤海海上BZ26-2石油平台实测风

3 强对流发生的诊断分析

3.1 资料的重建

目前,从NCEP和ECMWF下载的再分析资料,不论从空间和时间的分辨率,都不能满足对2011年8月31日在渤海发生的强雷雨大风天气过程的诊断分析与研究。因此,本文采用目前国际上先进的中尺度天气数值模式(WRF),基于NCEP的空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 和时间间隔为6 h的再分析资料,同化GTS观测资料,对8月31日渤海强雷雨大风天气过程进行再分析。为提高再分析资料的分辨率,模式采用双重嵌套方式,两个模拟区域中心均取为(39°N,115°E),模式的格距分别为45 km和15 km。资料同化从强对流发生前6 h开始,即8月31日20时,到9月1日08时结束,输出间隔30 min。

3.2 单站大气的不稳定分析

修正的对流有效位能和对流抑制指数是分析强对流天气过程两个常用的物理量,对预报雷暴等

强对流天气有的重要指示意义。

对流有效位能CAPE(Convective Available Potential Energy)计算公式为^[1]:

$$= g \int_{Z_f}^{Z_e} \frac{1}{\bar{T}} (T_{va} - T_{ve}) dZ$$

式中, Z_f 为自由对流高度, Z_e 为平衡高度, T_{va} 为气块虚温, T_{ve} 为环境虚温, $\bar{T}$ 为自由对流高度和平衡高度之间环境的平均虚温。

考虑了一定水汽含量的重力拖曳后的正浮力能称为修正的对流有效位能(MCAPE)^[2],其表达式为:

$$E_M = g \int_{Z_f}^{Z_e} \frac{1}{\bar{T}} [(T_{va} - T_{ve}) - w_l] dZ$$

MCAPE的概念提出后,由于液态水的含量难以确定,对其一直缺少定量的计算。本文采用高守亭等在2004年提出的计算方法^[5],假定饱和凝结或冻结产生的水物质全部保留在气块中。若水物质保留在气块中,则其不可避免地与气块有显热交换,这样,用可逆饱和和绝热过程替代假绝热过程来

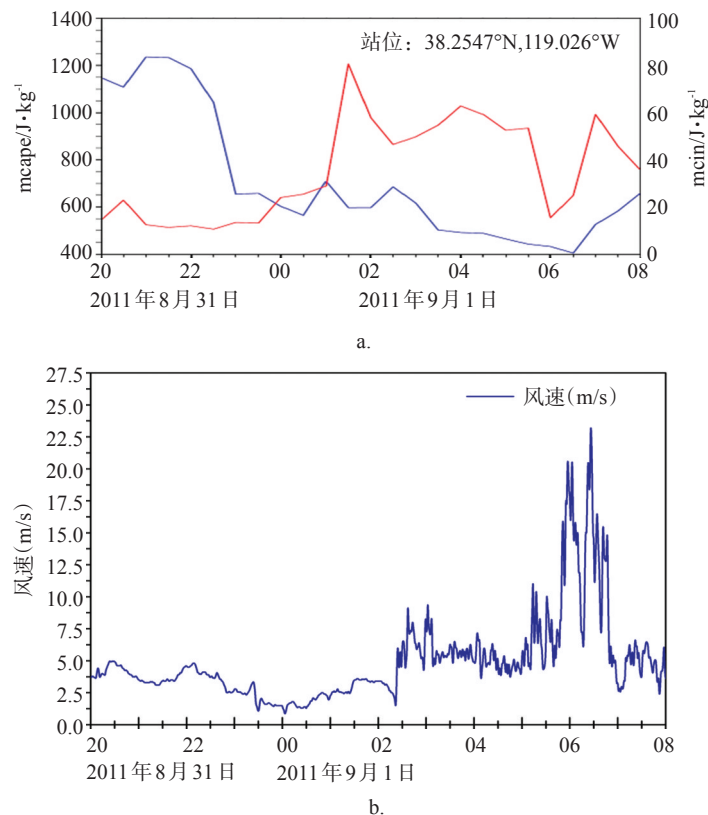


图3 渤海BZ26-2石油平台对流有效位能(a,蓝线)、对流抑制指数,红线(J/kg)和测站实况风速(m/s)

计算MCAPE应更为合理。近年来,对流有效位能作为对流发展的重要标志已经直接或间接投入业务使用。

对流抑制指数CIN (Convective Inhibition)表示处于大气底部的气块能否产生对流,就必须先期从其他途径获得一定能量,以克服CIN所表示的能量,这是对流发生的先决条件。通常对于强对流的发生CIN往往要有一较为合适的值,若太大,就起到了抑制作用,对流不易发生;若太小,能量在低层就不易聚集,从而不能达到强对流程度。归结而言CIN就是气块获得对流潜势必须超越的能量临界值^[4]。

将本文的再分析资料插值到BZ26-2石油平台所处的经纬度附近,计算的12 h修正对流有效位能和对流抑制指数变化见图3。为便于比较,图中给

出了该石油平台实测风速的演变(见图3b)。起始时间为8月31日20时,结束时间为9月1日08时。可以看到,8月31日22时MCAPE达到最大值,将近1300 J/kg,满足大气非常不稳定的条件。有研究表明(杨国祥等), $CAPE \geq 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是做为判别有无冰雹出现的必要条件,也就是当CAPE值大于此阈值时,大气已经达到不稳定的条件。而MCAPE值一般情况小于同条件下计算得出的CAPE值,可见31日晚间大气已经达到非常不稳定的条件。从实况分析,此次雷雨大风出现的时间是9月1日06时前后,持续时间一个小时候左右。MCAPE在雷雨出现前已有明显反映,可以作为较好的强雷雨预报指数。雷暴出现后,对流有效位能总体呈衰减趋势,06时以后达到12 h中的最低点400 J/kg,这说明该地区的绝大多数不稳定能量得以释放,以维持雷雨

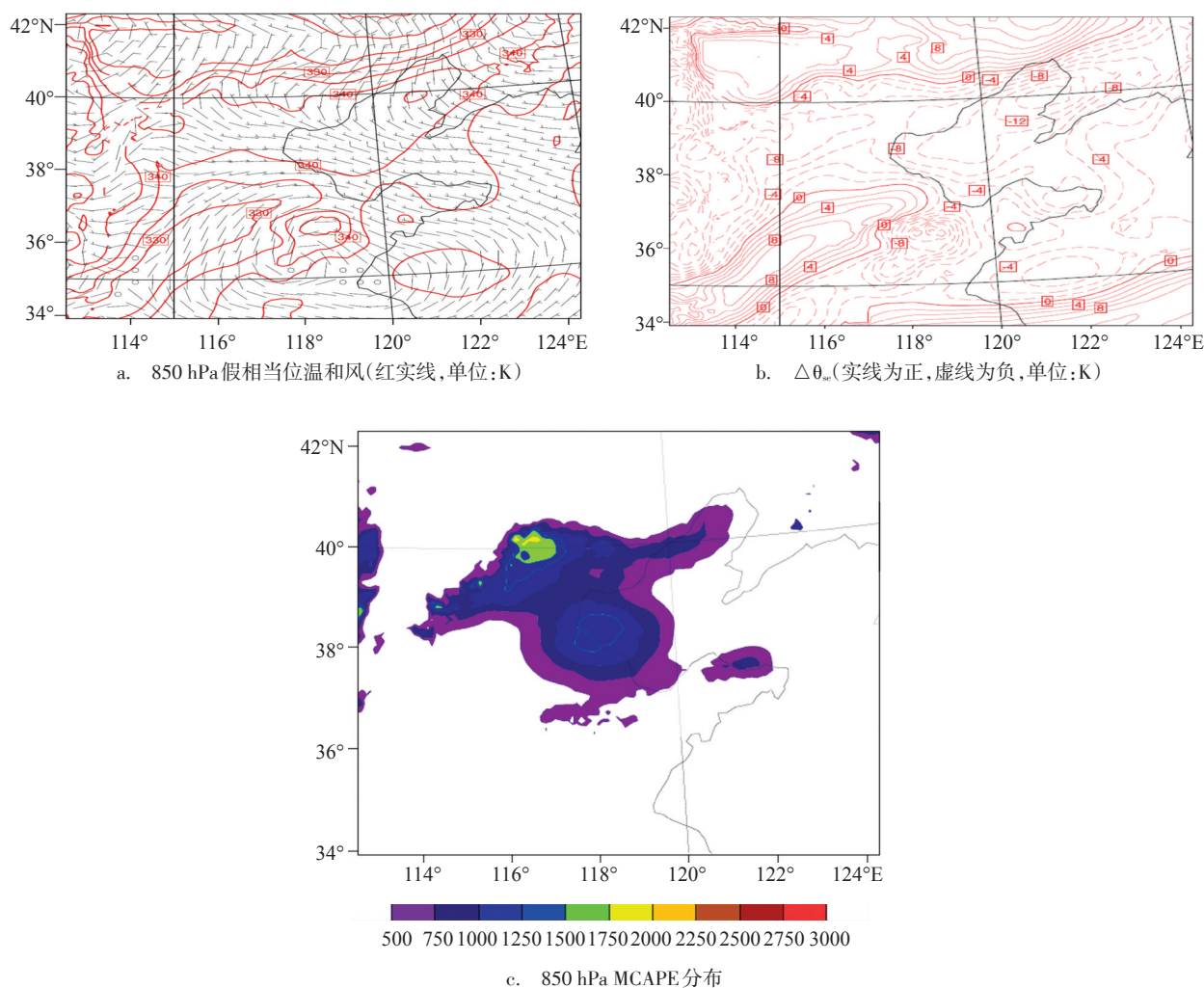


图4 2011年8月31日20时

期间所需要的中小尺度系统发生、发展所需的能量。与之相对应的是CIN随时间的变化曲线,雷暴发生时,也就是北京时间6点前后,CIN值达到了该时间点前后4 h内的波谷—16 J/kg。之前在强对流天气爆发前,CIN值的波峰曾达到80 J/kg以上,这表示有较大的抑制对流能量,以便积蓄能量,随后几小时内爆发。有研究表明^[5]MCAPE和CIN随时间变化的曲线基本是一个近似相反的变化过程也就是当MCAPE增大时,伴随着CIN的减小过程。从图中我们大致也可以看出这一趋势,这是雷暴天气形成的有利条件之一。

4 对流不稳定诊断分析

4.1 位势不稳定

通常取 $\theta_{sc}=340\text{ K}$ 为高能暖湿气团和一般气团的分界线^[6],而 $\Delta\theta_{sc}=\theta_{sc,500}-\theta_{sc,850}$ 是表征大气位势稳定度的一个参数。当 $\Delta\theta_{sc}$ 为负值时,大气处于位势不稳定状态。以8月31日20时时刻为初始场(见图4),在850 hPa高度上的假相当位温分布图中(见图4a),高温湿的能量区集中分布在渤海上空,等 θ_{sc} 线密集区,即北方大陆干冷气团与海上暖湿气团的交汇处,便是冷空气锋面过境上空切变线的位置。从图4b中看到,渤海上空主要处在 $\Delta\theta_{sc}<0$ 的位势不稳定区,负中心最大值可以到-12K,而北方干冷空气

团则处在正 $\Delta\theta_{sc}$ 分布区,位势相对稳定。从同时刻850 hPa高空风场图上(见图4a)可以看到,渤海上空有明显的北风与西到西北风的切变线,以中国东北地区为上游的冷空气已经南压至渤海北部辽东湾上空。而修正的对流有效位能(见图4c)高值区域主要集中在渤海北部至西部沿线,中心最大值可达2000 J/kg,表明渤海海域上空大气处于对流不稳定状态。

4.2 水汽输送

雷雨大风天气的发生的条件之一是充沛的水汽条件。图5给出了31日20时的850 hPa水汽通量图和水汽通量散度分布。图中看到,从渤海西北部陆地与海面交界处,存在一条中心值达 $12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{S}^{-1}$ 的水汽输送带(见图5a),渤海上空水汽通量梯度较大。伴随着冷锋锋面东移南压,到9月1日08时前后,渤海西北部的水汽通量中心也逐渐消失(图略)。

水汽输送带的前端也就是其下游地区是水汽辐合中心(见图5b),位于渤海中南部。这条水汽输送带在接下来的12 h内一直维持着,并向东南方向移动。水汽通量散度的负中心与强降水对应关系较好,这为之后几小时在渤海上空形成的强对流天气既雷雨大风天气提供了充足的水汽条件。水汽通量散度的正、负中心总是成对出现,并伴随着降

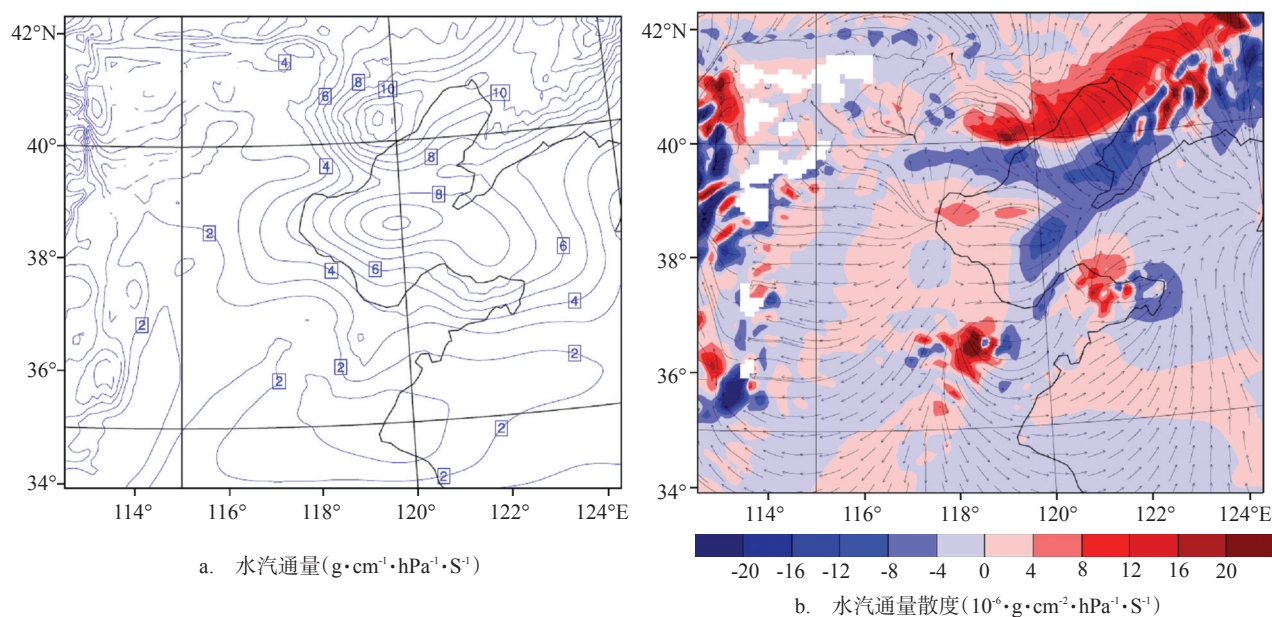


图5 2011年8月31日20时850 hPa

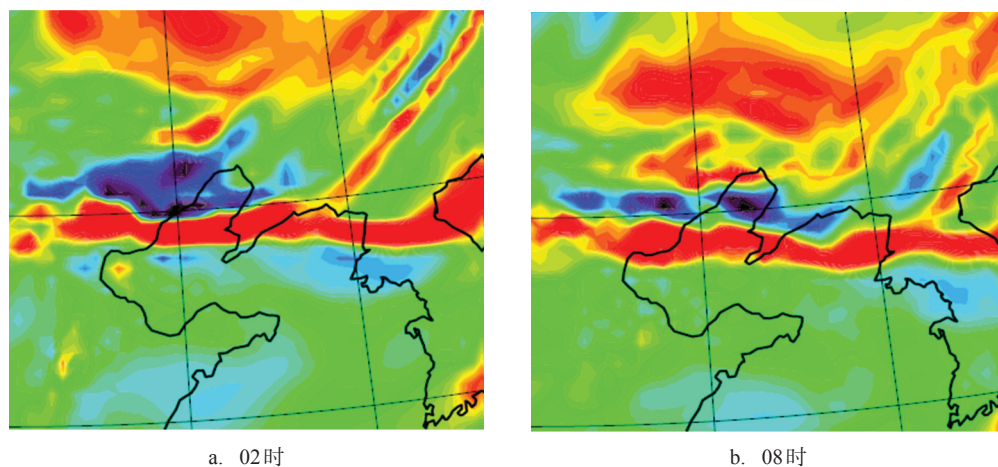


图6 2011年9月1日700 hPa上MPV在分布(单位: $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 10 PVU)

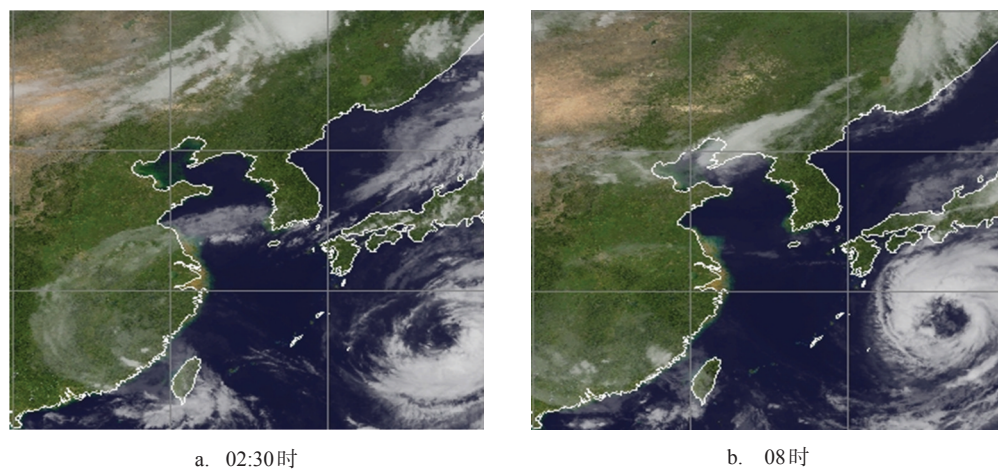


图7 2011年9月1日MTSET红外卫星云图

水系统的整个生命周期。

4.3 湿位涡

早在20世纪40年代初, Rossby^[9]就提出了位涡的概念,他指出在正压条件下,绝对涡度的垂直分量 ξ_a 与气柱的高度 h 之比值为一常数。与Rossby同一时期, Ertel^[10-11]也提出了一个位涡的另一种表达式:

$$PV = \alpha \delta_a \cdot \nabla \theta$$

式中 θ 为位温, α ($=\rho^{-1}$) 为比容, ξ_a 为绝对涡度矢量, PV 称为 Ertel 位涡, 或称为广义位涡。Rossby 提出的位涡只是 Ertel 位涡的一个特例。位涡的单位为 PVU:

$$10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{PVU}$$

在考虑降水特别是暴雨的生成机制时,必须考虑水汽的作用,从而出现了湿位涡概念。对湿大气,以相当位温 θ_e 代替位温 θ ,则可得湿位涡MPV的表达式^[12]:

$$MPV = \alpha \delta_a \cdot \nabla \theta_e$$

本次渤海雷雨大风天气过程,是在局地不稳定的条件下生成的,这在前一节已经介绍。虽然海上没有降水的实况资料,但是可以从海上石油平台观测数据推断,暴雨的大致落区就是出现大风天气的区域。从700 hPa等压面的MPV预报中看到(见图6),9月1日02时也就是雷雨天气发生前2—3 h的时刻,渤海西北部海区出现了明显的MPV负值(该区域正是BZ26-2石油平台所在范围),极值中心可

达-5PVU。随着雷雨过程的发生和结束,也就是9月1日08时开始,MPV的负值区域明显缩小,极值的绝对值也有所减小。这说明,可以从湿位涡的变化分析降水过程^[13]。另外,与同时刻卫星云图对比(见图7),在几个小时的锋面运动中,MPV正负交界处带状区域所在位置出现了明显的南压和东移,与卫星监测到的锋面移动趋势和路径是相同的。同时,移动过程中,由于出现降水和大风天气,伴随了湿位涡负区减弱的明显特征,表明湿位涡对冷锋锋面移动的趋势、速度有较为明确的指示能力。

5 结论和讨论

(1)从地面实况天气图、卫星云图和海上石油平台实况数据分析,这是一次渤海地区受冷空气影响并伴有雷暴天气的过程;

(2)随着渤海上空冷空气入侵,与海面低层暖湿气流交汇,造成大气不稳定层结,是引发渤海强对流天气发生的一个重要原因;

(3)通过对对流有效位能或修正的对流有效位能、对流抑制指数同时间序列的对比和分析,可以较好地揭示出此次雷暴的发生、发展。对流参数值在合理和恰当的范围内对于小尺度雷暴天气的预测判别有明显指示意义;

(4)关注水汽条件的变化可以从850 hPa水汽通量和水汽通量散度场来判断。首先,此次天气过程具备了有利的水汽输送条件,同时低层的辐合作用有利于暖湿空气的抬升。通过对水汽通量相关量的分析,可作为判断雷雨大风天气的判据之一;

(5)湿位涡的时空分布与雷暴天气发生的区域有很好的对应关系。在700 hPa等压面上的负MPV中心对应着未来2—3个小时后会产生雷雨大风天气的地面落区。当雷暴发生以后,负MPV中心极大值会有明显减小,负MPV区域会出现大幅收

缩。通过对MPV的分析,会为临近预报起到一定的指示作用。湿位涡中心与冷锋锋面有较好的对应关系,其中心发展情况,对冷锋移动的趋势和速度有较为明确的指示能力;

(6)将再分析资料以及模式输出结果与实况对比可以看出,对于各层的风速模拟,当遇到强天气系统时,虽然可以将大风的过程模拟出来,但是强度整体偏小,风力偏低;对温湿能方面的模拟,模式的效果还是比较理想的。

在今后对雷雨大风的预报中,可将这些模式输出并通过公式计算的诊断量综合应用至预报方法中,作为判断的客观依据,辅助预报员得出更为准确的预报结论。

参考文献:

- [1] Emanuel K A. Atmospheric Convection[M]. City of Oxford: Oxford University Press, 1994: 165-188.
- [2] Schultz D M, Schumacher P N, Doswell C A, et al. The intricacies of instabilities[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 4143-4148.
- [3] 李耀东, 高守亭, 刘建文, 等. 对流能量计算及强对流天气落区预报技术研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15: 1-10.
- [4] Frank P, Colby J. Convective inhibition as a predictor of convection during AVE-SESAME[J]. Mon Wea Rev, 1984, 112: 2239-2252.
- [5] 梁爱民. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 2006, 32: 72-80.
- [6] 叶笃正, 高有禧, 等. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-200.
- [7] 马鸿清. 2009-05-09河北短时大暴雨诊断分析[R]. 杭州: 中国气象学会, 2009: 1-150.
- [8] Rossby C G. Planetary Flow Patterns in the atmosphere [J]. Q J R M S, 1940, 66(supple): 68-87.
- [9] Ertel H. Ein Neuer gyrodynamischer Wirbelsatz[J]. Meteor. Z., 1949, 59: 277-281.
- [10] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36: 9-18.
- [11] Hoskins B J. A potential vorticity view of synoptic development[J]. Meteor Appl, 1997, 4: 325-344.
- [12] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-225.

A strong convection weather in the Bohai Sea

SONG Xiao-jiang, XING Jian-yong, WANG Zhang-gui

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: Based on the observation data, reanalysis data and model output by the Weather Research and Forecasting Model (WRF) Version 3.1, a strong intermittent thunderstorms process and dynamics of weather diagnostic in the Bohai Sea are studied. This paper mainly analyzes the convective available potential energy, water vapor transport, pseudo equivalent potential temperature, moist potential vorticity and other physical variances. The results show that, MCAPE can advance to the convective instability, and has obvious corresponding with 850 hPa potential pseudo-equivalent temperature equivalent line concentrated area. In addition, the divergence center of water vapor flux has a good consistent with the area of thunderstorms occurring, and maximum negative zone superimposed position in 700 hPa isobaric surface moist potential vorticity is favor to the development of thunderstorms. The above factors have an indicative significance on thunderstorm winds drop zone and strength.

Key words: thunderstorms; CAPE; MCAPE; MPV; moisture flux divergence