王慧, 张博, 吕心艳, 等. 2019. 2018年一次温带气旋入海爆发性增强时期的集合预报对比分析 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 741−754. WANG Hui, ZHANG Bo, LÜ Xinyan, et al. 2019. Comparative Investigation of Ensemble Forecast of Explosive Cyclone Entering Southern Yellow Sea in Spring 2018 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 741−754. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19085

2018年一次温带气旋入海爆发性增强时期的集合预报对比分析

王慧[1] 张博[1] 吕心艳[1] 曹越男[1] 郑飞[2]

1 国家气象中心，北京 100081
2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心，北京 100029

摘 要 基于实况观测资料、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Forecast, ECMWF)0.5°（纬度）×0.5°（经度）水平分辨率的再分析数据和集合预报数据，对2018年2月一次入海爆发性气旋在黄海南部的爆发性增强时期的动力和热力因子进行了对比分析。根据气旋路径、强度和海面风的检验结果挑选出两组集合成员——好成员组和坏成员组。通过组间对比分析得到如下主要结论：1）在气旋入海之后爆发性增强时，500 hPa高空槽和850 hPa中低层低涡迅速加强，同时低层和高层的西南急流均明显加大，中高层系统快速增强，上述因子均为气旋出现爆发性发展提供有利条件。2）气旋入海之后上升运动快速增强，这加剧了低层辐合与高层辐散，有利于地面降压，促使地面气旋的爆发性发展。水汽在中低层辐合后随气流上升发生凝结并释放潜热，这加强了高层辐散、低层辐合以及上升运动，促使气旋进一步爆发性发展。与此同时，对流层顶的高值位涡下传增强，低层大气斜压性受气旋上空冷暖平流的增强而增大，导致垂直稳定度减小，地面气旋性涡度增强，也有利于气旋爆发性发展。最终此次气旋快速增强并达到中等爆发性气旋的强度。3）虽然集合预报两组成员的平均场均比分析场弱，但是好成员组抓住了气旋上空中高层天气系统的快速增强过程，以及垂直运动、温度平流、水汽条件、位涡等预报因子和物理量的快速增强过程，其预报效果在气旋强度和路径等方面均显著优于坏成员组。

关键词 爆发性气旋 集合预报对比分析 关键物理因子

文章编号 1006-9585(2019)06-0741-14 **中图分类号** P443 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19085

Comparative Investigation of Ensemble Forecast of Explosive Cyclone Entering Southern Yellow Sea in Spring 2018

WANG Hui[1], ZHANG Bo[1], LÜ Xinyan[1], CAO Yuenan[1], and ZHENG Fei[2]

1 *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081
2 *International Center for Climate and Environment Science*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract Observations and European Centre for Medium-Range Forecast (ECMWF) reanalysis data were used to compare the ability of ensemble forecast members [with a horizontal resolution of 0.5º(latitude) ×0.5º(longitude)] to provide dynamic and thermodynamic factors relating to a cyclone that exploded over the southern Yellow Sea in February

收稿日期 2019-06-03；**网络预出版日期** 2019-09-24

作者简介 王慧，女，1979年出生，主要从事海洋天气预报和研究工作。E-mail: wangh1@cma.gov.cn

通讯作者 郑飞，E-mail: zhengfei@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家气象中心预报员专项Y201708，中国气象局预报员专项CMAYBY2019-141

Funded by Forecaster Special Project of National Meteorological Center (Grant Y201708), Forecaster Special Project of China Meteorological Administration (Grant CMAYBY2019-141)

2018. According to validation results for the track and strength of the cyclone and surface wind, two sets of ensemble forecast members were selected as good and bad forecast members, respectively, and the main conclusions were subsequently obtained from a comparative investigation between them as follows: 1) When the cyclone had explosively developed, the trough and vortex at 500 hPa and 850 hPa, respectively, strengthened rapidly, and the southwest jet streams at lower and upper levels simultaneously increased rapidly in association with the rapid strengthening of synoptic systems; this provided a favorable condition for explosive cyclone development. 2) With the rapid strengthening of ascending motion after the cyclone had entered the Yellow Sea, convergence and divergence at lower and upper levels were respectively intensified; this promoted a pressure reduction and the cyclone then explosively developed. Following convergence of water vapor at a mid-low level, latent heat was released under the ascending motion, which promoted divergence and convergence at upper and lower levels, respectively, and then enhanced ascending motion. Therefore, the rapid strengthening of water vapor flux convergence caused the cyclone to explosively develop. The downward transmission of the high potential vorticity (PV) and baroclinicity at a lower level were strengthened, the degree of stability weakened, and cyclonic vorticity was enhanced. These factors were beneficial for explosive cyclone development, and it finally increased to a medium-strength explosive cyclone. 3) Although the forecast fields from the two ensemble sets were both weaker than those of analysis data, the good ensemble members caught the rapid strengthening of the synoptic system at a mid-upper level over the cyclone and the rapid developing processes of these key factors and physical quantities (such as vertical motion, PV, temperature advection, and water vapor). Therefore, the ability of the good members to track the strengthening cyclone was found to be superior to that of bad members.

Keywords Explosive cyclone, Comparative investigation of ensemble forecast, Key physical factor

1 引言

温带气旋一般指在温带形成和活动的锋面气旋，西太平洋爆发性气旋的初始扰动一半左右来源于中国江淮、黄淮地区和渤海、黄海、东海海区（仪清菊和丁一汇，1993）。根据 Sanders and Gyakum（1980）定义，一个温带气旋在60°纬度，24 h取其平均中心气压降低率至少为1 hPa/1h时，则此温带气旋为气象炸弹或爆发性发展气旋。因其发展速度很快，在短时间内地面中心气压会急剧下降，因此对其的准确预报存在很大难度。与此同时，温带爆发性气旋发展过程中，其强度的突然增强所引起的大风、降雨往往会给海上交通运输、石油平台作业、渔业养殖等造成威胁，产生巨大的经济损失。

近年来，诸多学者对爆发性气旋发生发展的物理因子进行了深入的研究和探讨，主要包括了：涡度平流、温度平流、潜热加热、高空急流、摩擦作用、斜压不稳定以及黑潮影响等。李长青和丁一汇（1989）通过对26个西北太平洋爆发性气旋的统计研究得到，不稳定的大气层结、副高西侧暖湿气流输送、急流出口区的动力辐散和温度平流等均为气旋爆发性发展的有利条件。仪清菊和丁一汇（1996）对黄渤海地区的温带气旋个例进行诊断分析，认为温度平流和涡度平流、沿岸锋生及高空急流的动力作用对气旋爆发性发展有重要贡献。吕筱英和孙淑清（1996）强调高层大值位涡的出现与加强是气旋爆发性发展的一个十分重要的物理条件，当强位涡区不断向下延伸，上下大值区呈相接形势时，气旋就会猛烈地发展。黄立文等（1999）研究两个西北太平洋温带爆发性气旋得出，热力强迫对爆发性气旋发展起主要控制作用，当温度平流、积云对流和湍流加热为主的热力强迫共同作用使地转相对涡度急剧增长时，气旋便可出现爆发性发展。尹尽勇等（2011）针对2007年3月造成黄渤海地区严重海洋灾害的一次入海气旋发生与发展过程进行诊断研究，分析了低层锋区和斜压性、高低层涡度平流差异、南北西风槽合并对气旋发展的影响。黄彬等（2013）通过分析一次渤海入海的黄河气旋的发生、发展过程，认为气旋的强烈发展与温度平流、高空槽前涡度平流、大气斜压性、高低空急流耦合等因素有关。熊秋芬等（2016）基于涡度场演变特征研究气旋发生发展机制，强调在地面气旋初生和发展阶段，高低层涡度中心及正涡度区呈后倾结构，而当高低层涡度中心及正涡度区几乎垂直重合时，地面气旋则会停止发展。以上研究表明，诸多物理因子均对爆发性气旋的发生和发展起到了一定的促进作用，但是每个因子在气旋的不同发展时

期所发挥的作用不尽相同。Fu et al.(2014, 2018)、姜立智等(2019)通过分片位涡反演对爆发气旋的诊断得到爆发性气旋快速发展的主导因子是对流层顶褶皱对应的平流层大值位涡下传和降水凝结潜热过程造成的正位涡异常。Hirata et al.(2015)通过高分辨率海气耦合模式模拟温带气旋过程，发现冷输送带传输的干空气团从黑潮暖流获得大量的水汽，从而使黑潮在气旋快速发展的过程中发挥很大的作用。

除却对温带气旋个例分析外，一些研究还针对强、弱温带气旋进行了对比分析。仪清菊等（1992）通过对比爆发性发展和非爆发性发展的两类气旋分析得到，无论是温度和气压等基本要素场，还是物理诊断量，两者均表现出明显的差异，其中两类气旋在涡度、位势涡度、扰动动能和总动能之间的差异最大。丁治英等（2001）通过对 16 个太平洋和大西洋爆发性气旋合成分析，对比诊断强、弱爆发性气旋得到，非纬向型高空急流为爆发性气旋提供了强的辐散、斜压性、斜压不稳定、重力惯性波能量发展的有利形势，低层的暖湿气流为气旋的爆发提供了不稳定能量。

为了明晰温带气旋出现爆发性发展的原因，就必须对爆发性发展过程进行细致的物理分析，找出可供预报员参考的关键物理因子，了解其在气旋爆发性发展阶段的变化和作用。本文针对 2018 年 2 月 27 日至 3 月 4 日影响我国近海的一次入海爆发性气旋过程进行了对比分析。通过对集合预报场进行好坏成员组的划分，利用对比分析发现垂直速度和散度、温度平流、位涡、水汽通量散度等物理量的快速增强是影响气旋出现爆发性发展的敏感因子。

2 数据及气旋追踪方法

本文利用地面实况观测、欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Forecast，ECMWF）0.5°（纬度）×0.5°（经度）再分析场（ERA-Interim）及其全球集合预报（EC ENS）数据等资料，对 2018 年 2 月 27 日至 3 月 4 日这次温带气旋进入黄海的爆发性发展过程进行诊断分析。欧洲中心集合预报系统共有 51 个成员，包括 1 个控制成员和 50 个扰动成员。本文将从集合预报的角度对比分析模式的一个预报时次对该次气旋的路径和强度的预报结果，分析均采用 2018 年 2 月 25 日 12:00（协调世界时，下同）起报的预报结果。

很多学者采用了不同的气旋识别方法对温带气旋进行了研究(Hoskins and Mcintyre, 2002; Allen et al., 2010; 张颖娴等, 2015)。在本文中所选取的方法简单直观，适合日常天气预报中直接使用。主要基于数值模式的客观识别方法，主要判断原则如下：1）气旋中心气压小于周围 8 个临近点的气压；2）气旋中心最低气压小于 1010 hPa；3）气旋中心周围 4°（纬度）×4°（经度）范围内气压的拉普拉斯平均值大于 0.5；4）至少有一条闭合等压线（等压线间隔 1 hPa）；5）相邻时刻温带气旋相距小于 110 km。文中基于分析场和集合预报场的温带气旋识别均采用此方法。

3 温带气旋过程概况

该温带气旋于 2018 年 2 月 27 日 12:00 在湖南境内生成，中心气压 1010 hPa。随着中层 500 hPa 高空槽开始发展，西南急流逐渐加大，地面低压系统发展并向东北方向移动，途径江西、安徽、浙江和江苏，最后在 28 日 00:00 之前从江苏南部进入黄海南部海域，入海之后气旋的中心气压迅速下降。为了更好地分析气旋短时间内快速加强的现象，本文采用 Yoshida and Asuma(2004)的公式计算 12 h 气旋加深率

$$\mathrm{DR}=\left[\frac{p(t-6)-p(t+6)}{12}\right]\times\left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin\frac{\phi(t-6)+\phi(t+6)}{2}}\right], \quad (1)$$

其中，t 代表时间（单位：h），p 是气旋中心的海平面气压（单位：hPa），ϕ 是气旋中心所在的纬度。

从图 1 可以看到，该气旋在刚入海之后的 28 日 00:00 中心气压下降到 1004 hPa，气旋加深率达到 1.77 Bergeron（贝吉龙，气旋加深率单位），按照 Sanders（1986）的研究，达到了中等爆发强度，随后气旋继续快速加强，28 日 06:00 气旋加深率达到 1.81 Bergeron，此时是气旋生命史中最强加深率，达到了强爆发的强度。3 月 1 日，气旋穿过朝鲜半岛进入日本海加深率再一次加大，但是强度刚

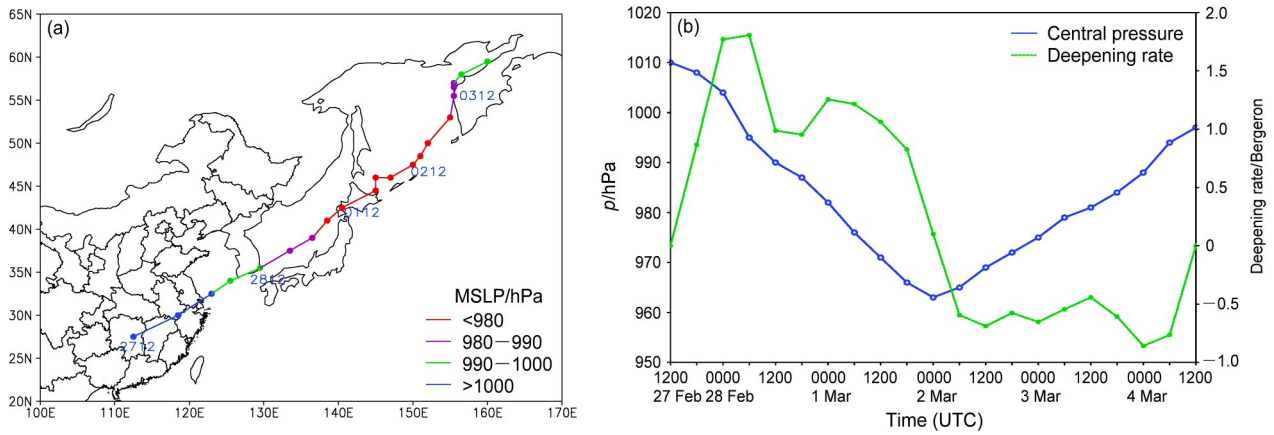

图1 2018年2月27日12:00至3月4日12:00（a）气旋路径（“2712”表示27日12:00，以此类推，图例中“MSLP”表示气旋中心气压值）和（b）气旋中心气压及气旋加深率

Fig. 1 (a) Cyclone track (“2712” indicates 1200 UTC 27 Feb, and so on; “MSLP” indicates the central pressure of cyclone) and (b) central pressure with cyclone deepening rates from 1200 UTC 27 Feb to 1200 UTC 4 Mar 2018

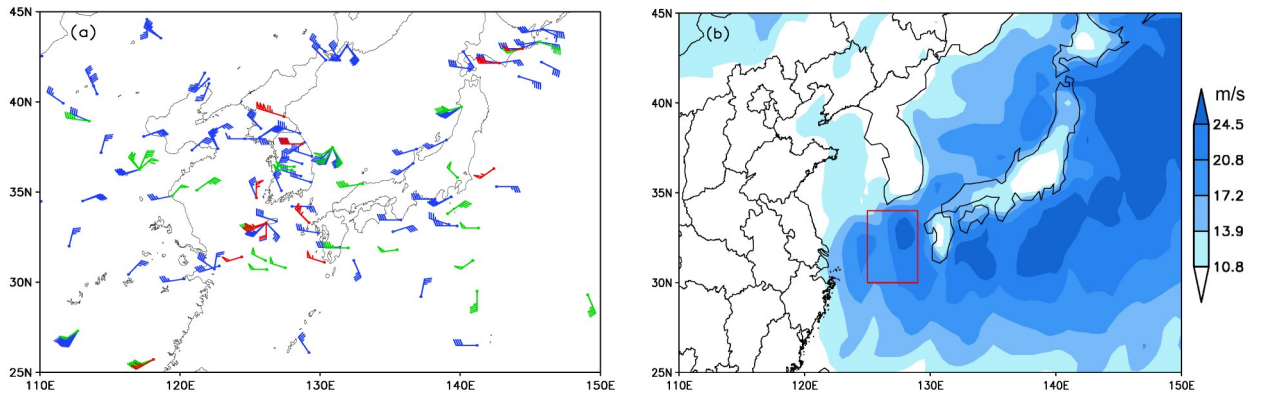

图2 2018年2月27日00:00至3月4日12:00大风过程：（a）地面实况观测[蓝色风向杆为7级，绿色风向杆为8级，红色风向杆为9级及以上，其中风杆短杆、长杆、小旗子分别代表2、4、20 m/s（下同）]；（b）欧洲中心再分析资料10 m高度风速

Fig. 2 Gale process from 0000 UTC on 27 Feb to 1200 UTC on 4 Mar 2018 from (a) observational data at the surface (blue, green, and red barbs represent winds speed greater than 7, 8, and 9 Beaufort, respectively, where it is of note that all wind barbs half bar, full bar, and flag denote 2, 4, and 20 m/s, respectively, the same below) and (b) ECMWF reanalysis data (shading: wind speed at 10-m height)

达到中等强度爆发标准。之后加深率缓慢减小，在3月2日00:00气旋达到最强，中心气压为963 hPa。之后气旋加深率变为负值，强度开始减弱，并继续向东北方向移动，最终于3月4日在鄂霍次克海东部减弱消失。

受该爆发性气旋的影响，2018年2月27日至3月4日，黄海、东海、朝鲜海峡、日本海、日本以南洋面以及日本以东洋面出现了7～9级大风（如图2所示）。大风过程从28日凌晨开始，随着气旋入海加强并向东北方向移动，大风范围也逐渐向东北方向移动，针对此次大风过程中央气象台发布了海上大风黄色预警。

4 集合预报对比分析方法

为了更好地对比分析影响入海气旋爆发性发展的预报因子，参考Lamberson et al.(2016)、代刊等(2018)的组间差异分析方法。2月28日00:00至3月1日00:00是气旋影响东海的关键时期，追踪集合预报每个成员的气旋路径和强度预报，与分析场对比，按照路径和强度的误差排序（表1前5列），为了均衡路径和强度误差，把路径和强度的误差的排序相加，得到综合排序（表1第6～7列），排序越靠前越接近分析场。气旋入海之后，每个集合成员对气旋带来的海上大风的预报能力也不同，因此还要综合考虑海上大风预报误差。气旋

对近海产生大风的时间主要在 2 月 28 日 12:00，因此选取该时刻实况分析场大风关键区域（见图 2b 红色方框）做检验，检验方法采用区域平均的绝对误差对比（表 1 第 8～9 列）。在路径和强度综合排名中，选取 10 m 风速绝对误差小于 1.5 m/s 的前五名成员和 10 m 风速绝对误差大于 2.5 m/s 的后五名成员。因此最终确定综合排名前五名成员为 17、44、8、1、37，称为好成员组。综合排名后五名的成员为 45、40、24、30、22，称为坏成员组。本文将重点分析气旋入海之后第一次出现爆发性发展时期的天气形势和诊断分析场，因为此时是气旋最强爆发阶段，也是对我国近海影响最大的时段。

图 3 给出分析路径和不同分组的预报路径。可以看到：好成员组的 5 个成员，从气旋定位开始，一直到日本海，路径均位于实况路径以北，但预报风场更接近实况。坏成员组成员的路径基本位于实况路径以南，预报风力偏小。

表 1　集合成员误差排序（仅列举排名靠前的成员）

Table 1　Error sorting of ensemble members (only the members of top ranking are listed)

	路径误差		强度误差		路径强度		风速误差	
排名	成员序号	误差值/km	成员序号	误差值/hPa	成员序号	综合排名	成员序号	误差值/m s^{-1}
1	46	66.37	17	0.00	17	3	13	1.08
2	17	71.62	31	0.00	46	8	8	1.13
3	44	80.55	37	0.00	44	17	44	1.18
4	10	82.82	8	0.17	47	18	15	1.20
5	36	84.29	27	0.17	27	21	49	1.21
6	28	91.41	41	0.17	33	21	25	1.26
7	34	93.13	46	0.17	36	21	18	1.33
8	33	99.46	47	0.17	8	25	17	1.35
9	42	101.06	3	0.33	1	25	1	1.39
10	47	103.11	21	0.33	37	27	50	1.39
11	38	105.74	1	0.33	28	29	5	1.40
12	20	106.80	9	0.33	31	30	37	1.42

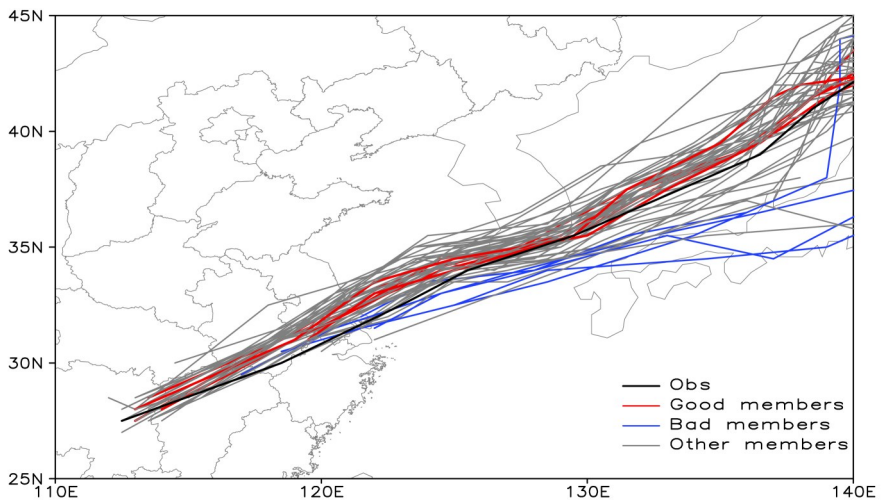

图 3　ECMWF 集合预报模式 2018 年 2 月 25 日 12:00 起报的 2 月 27 日至 3 月 1 日温带气旋路径预报。黑色线是分析路径，红色线是好成员组预报路径，蓝色是坏成员组预报路径，灰色是其余成员预报路径

Fig. 3　ECMWF ensemble model forecast of cyclone track from 27 Feb to 1 Mar, initiated at 1200 UTC 25 Feb 2018. Black, red, blue, and grey tracks denote reanalysis, good members, bad members, and others, respectively

5 大气环流背景场

在对比分析集合预报好成员组和坏成员组的预报差异之前，首先需要认识此次爆发性气旋生成发展的大气环流形势演变特征。在气旋发展初始时期，在200 hPa高空的30ºN附近就存在一支急流带，急流核位于西北太平洋洋面上，急流中心最大风速在80 m/s以上。气旋生成源地上游，急流入口处后方高空槽前的辐散中心开始发展，强的高空辐散导致对流层下层出现补偿性辐合，增加了气旋内部的上升运动，有利于地面降压，为气旋生成提供基础条件。在2月27日12:00（图4a），地面气旋形成时，其上空的辐散中心达4×10^{-5} s^{-1}以上。随着高空槽向东偏北方向移动，西风急流逐渐东移，地面气旋也伴随着高空辐散区向东北方向移动发展。到28日06:00，地面气旋中心已移到北太平洋西风急流的北侧和日本海急流中心入口区南侧，此处正是高空槽前辐散最强处，辐散中心增强到12×10^{-5} s^{-1}以上，此时也是气旋加深率最强的时期。随后，高空辐散的强度开始减弱，伴随着气旋加深率也减弱。

与此同时，从500 hPa环流形式可以看到，25° N以南有一南支槽，在其东北侧有一北支槽，随着南北两支槽东移发展，南北两支槽在27日00:00叠加并继续向东偏北方向发展加强。27日12:00地面气旋生成，位于槽前的西南急流最大风速有32 m/s。随着高空槽的不断加深，非常有利于槽前正涡度区的气旋的发展加强。28日06:00，高空槽北段已经移入黄海，槽前西南急流快速发展，急流中心最大风速可达43 m/s。气旋形成初期（图4e），850 hPa上的气旋环流中心超前于地面气旋中心，气旋移动方向前方有暖平流，气旋后部有弱冷平流。气旋前部的西南急流最强有20 m/s。随着高空槽的东移发展，850 hPa低涡中心也逐渐形成并加强，在28日06:00，低涡中心前部的西南风增大到36 m/s，后部的西北风也加强到28 m/s，冷暖平流均显著增强。这种冷暖空气的相互作用，使得锋区的斜压性明显增强，导致气旋的爆发性发展。

气旋在入海爆发性发展之后，继续向东北方向移动，经过朝鲜半岛并于2月28日夜间进入日本海。在3月1日00:00气旋第二次爆发性发展之后，气旋中心逐渐远离高空急流入口区和高空辐散中心向东北移动，在3月2日00:00气旋达到最强，中心气压为963 hPa。之后气旋开始减弱，并继续向东北方向移动，中低层的冷平流逐渐侵入气旋中心，大气的斜压性减弱，对气旋发展不利，最终于3月4日在鄂霍次克海东部减弱消失。

6 气旋入海之后爆发性发展阶段集合预报诊断结果对比分析

6.1 集合预报成员组间形势场差异分析

第5节给出了基于分析场的大气环流形势演变过程，本节将对比分析集合预报好成员组和坏成员组之间对形势场预报的差异性。图5是气旋爆发性发展最强时期的500 hPa高度场和风场、850 hPa高度场和风场以及海平面气压和10 m风场的好成员组和坏成员组组间对比分析图。在气旋生成之前，与分析场相比，好成员组和坏成员组的500 hPa高空槽的强度相差不大，但是500 hPa槽前西南风的风速均低于分析场。随着气旋的生成并发展，高空槽强度的差异越来越大，虽然两组成员槽的强度均比分析场弱，但是好成员组的优势越来越明显。气旋入海之后，高空槽快速加强，在28日06:00（图5a–5c），分析场中500 hPa槽前西南风和槽后西北风风速最大均超过39 m/s，好成员组槽前西南风最大可达39 m/s以上，但是大风范围明显偏小。而坏成员组中槽的强度明显偏弱，槽前西南风最大仅有36 m/s以上。好成员组更接近分析场，但是强度低于分析场。虽然500 hPa高空槽两组的强度不同，但是位相相差不大。随着气旋向东北方向继续移动，对比的结论类似。

在气旋形成初期阶段，850 hPa的气旋生成源地附近的西南急流较弱，最大风速有18 m/s以上。好成员组同分析场更相近，西南急流风速中心比分析场强，最大可达21 m/s以上，而坏成员组的西南急流偏弱且位置偏西。随着气旋东移发展，在27日18:00，好成员组的气旋环流中心比分析场略强，西南急流中心也强于分析场，坏成员组明显偏弱。但是在气旋入海之后的28日00:00，分析场的低涡中心迅速发展加强，低涡前部西南急流中心达到30 m/s以上，强度强于好成员组。到了28日06:00（图5d–5f），低涡中心进一步快速加强，中心强度降低8 dagpm，西南急流加强到33 m/s，好成员组强度比分析场弱，坏成员组更是明显偏弱。这也说明850 hPa低涡的快速加强能够造成地面气旋的爆

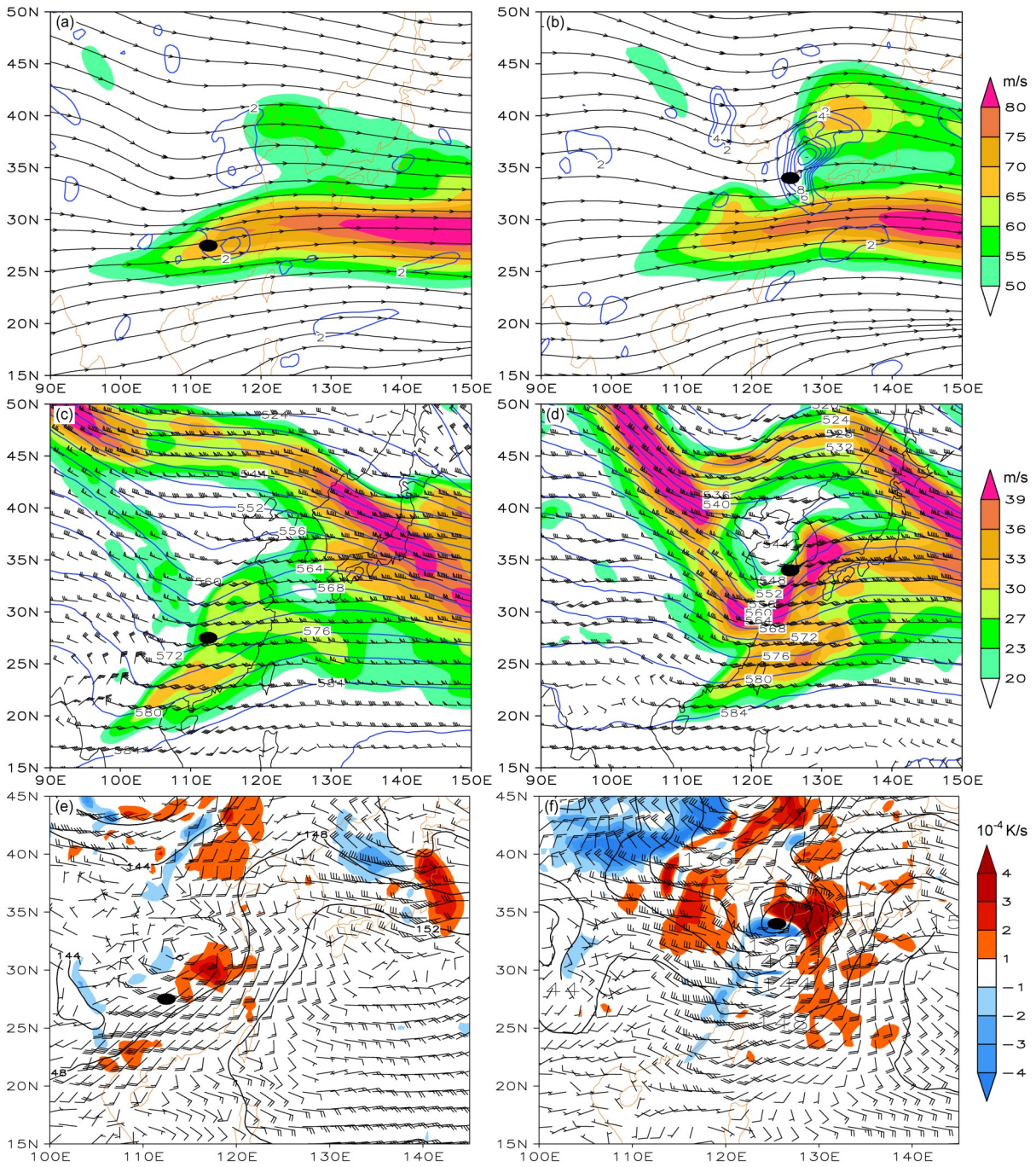

图4　2018 年 2 月 27 日 12:00（左列）和 28 日 06:00（右列）（a、b）200 hPa 流线（黑色线）、高空急流（填色）和散度场（蓝色等值线，单位：10^{-5} s^{-1}），（c、d）500 hPa 高度场（蓝色等值线，单位：dagpm）、风场（风向杆）和急流（填色），（e、f）850 hPa 高度场（黑色等值线，单位：dagpm）、温度平流（填色）和风场（风向杆）。图中黑色圆点为地面气旋相应位置（下同）

Fig. 4　(a, b) Stream line (black lines), upper level jet (shaded) and divergence (blue lines, units: 10^{-5} s^{-1}) at 200 hPa, (c, d) the geopotential height (blue lines, units: dagpm) , winds (barbs) and jet (shaded) at 500 hPa, (e, f) the geopotential height (black lines, units: dagpm), the advection temperature (shaded) and the winds (barbs) at 850 hPa. Black pots denote the locations of cyclone center (the following is the same) at 1200 UTC 27 Feb 2018 (left column) and 0600 UTC 28 Feb 2018 (right column)

发性发展。从地面形势可以看到，在气旋形成初期的源地附近，坏成员组比分析场和好成员组的气压高，也导致气旋生成偏晚。

气旋在生成之后，好成员组的气旋的强度比分析场强，27 日 18:00，好成员组的气旋中心气压为 1007 hPa，分析场为 1008 hPa。气旋入海之后的 28

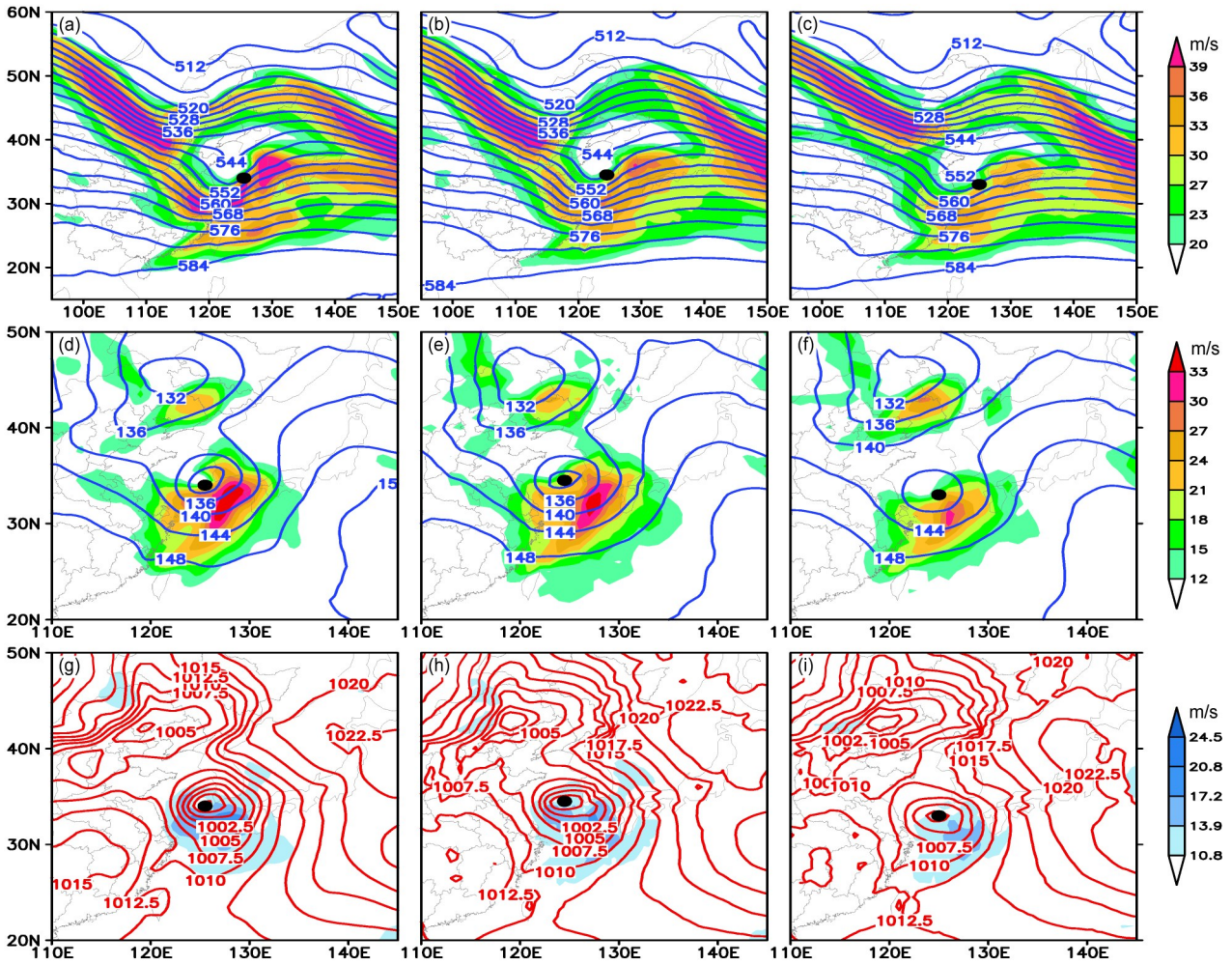

图5 ECMWF集合预报2018年2月28日06:00分析场（左列）、好成员组（中列）和坏成员组（右列）形势场对比：（a、b、c）500 hPa高度场（等值线，单位：dagpm）和风速（填色）；（d、e、f）850 hPa高度（等值线，单位：dagpm）和风速（填色）；（g、h、i）海平面气压场（等值线，单位：hPa）和10 m风速（填色）

Fig. 5 Comparison between situation fields of analysis (first column), good members (second column), and bad members (third column) at 0600 UTC on 28 Feb 2018: (a)–(c) Geopotential height (blue lines, units:dagpm) and wind speed (shaded) at 500 hPa; (d)–(f) geopotential height (blue lines, units:dagpm) and wind speed (shaded) at 850 hPa; (g)–(i) mean sea level pressure (red lines, units:hPa) and wind speed (shaded)

日00:00，分析场和好成员组的气旋中心气压均为1004 hPa，坏成员组气旋的中心气压为1010 hPa，明显偏弱。6 h后（图5g–5i），分析场、好成员组和坏成员组的气旋中心分别为995 hPa、997 hPa和1003 hPa，此时气旋加深率达到最大，分析场中气旋加强速度最快。总之，在500 hPa高空槽的演变中，分析场中槽的强度始终强于集合预报两组平均，而在气旋入海快速发展之前，分析场中850 hPa低涡的强度略弱于好成员组，造成地面气旋强度弱于好成员组，但是气旋入海之后，850 hPa低涡快速加强并强于好成员组，导致地面气旋爆发性发展，气旋强度超过好成员组，并明显强于坏成员组。因此可以看到，850 hPa低涡的演变对地面气旋强度的变化影响显著。

6.2 集合预报成员组间垂直运动差异分析

图6是分析场、集合预报好成员组和坏成员组沿各自气旋中心的垂直速度和散度剖面图。气旋形成初期高空槽前有弱的上升运动，在27日18:00最大垂直速度中心出现在700 hPa附近，中心值为−2 Pa/s。低空900 hPa附近的辐合中心也是垂直上升运动起始的高度，上升运动一直向上延伸到300 hPa附近。气旋上空的辐散中心位于600～700 hPa

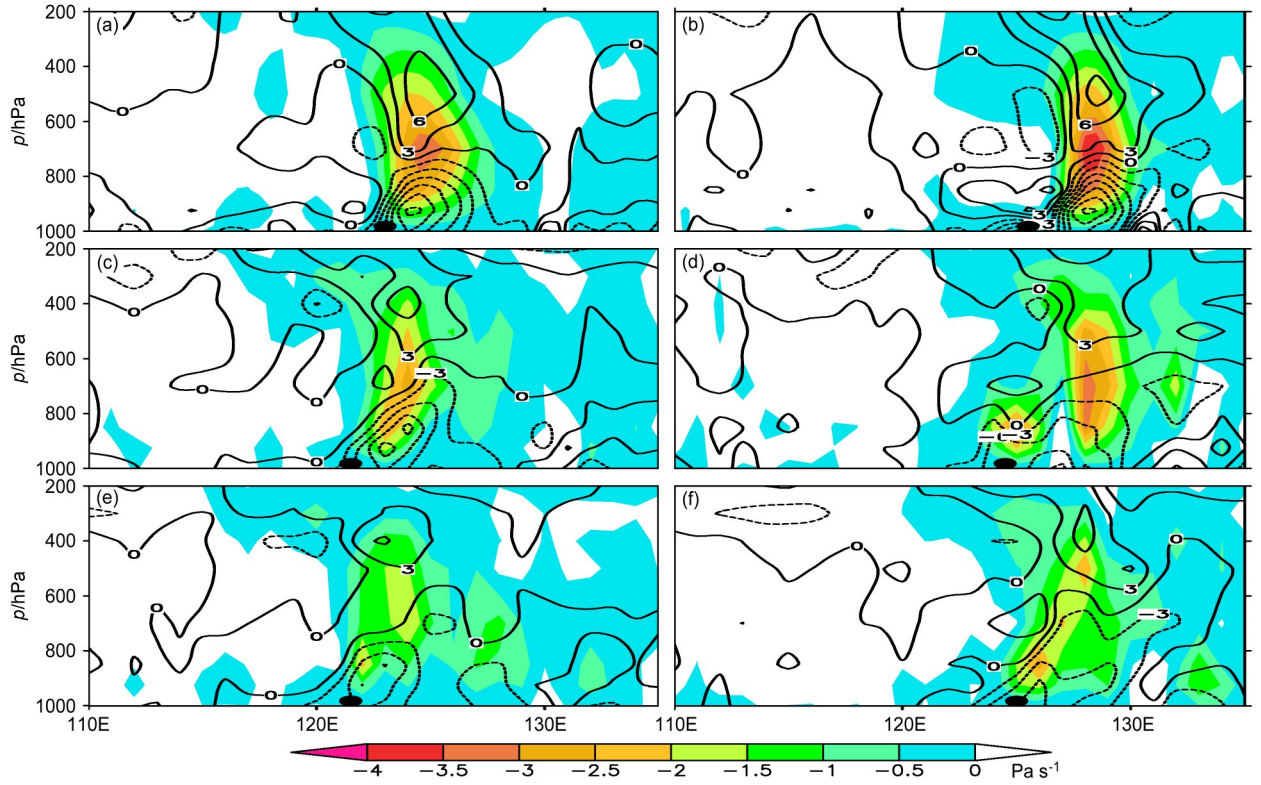

图6　2018年2月28日00:00（左列）和28日06:00（右列）沿气旋中心的垂直速度（填色）和散度（等值线，单位：10^{-5} s^{-1}）纬向剖面：（a、b）分析场；（c、d）好成员组；（e、f）坏成员组

Fig. 6　Cross sections of vertical velocity (shaded) and divergence (isolines, units: 10^{-5} s^{-1}) at cyclone center at 0000 UTC (left panel) and 0600 UTC (right panel) on 28 Feb 2018: (a, b) Analysis field; (c, d) good members; (e, f) bad members

之间，这种低空辐合、高空辐散的配置，是有利于气旋内部上升运动的发展，有利于地面降压，促使气旋加强。随着气旋进入黄海之后，垂直上升运动明显增强，28日06:00气旋加深率达到最大，6 h气压降低了9 hPa，最大垂直速度中心值可达−4 Pa/s，上升运动的快速增强加剧了低层辐合，有利于地面降压，促使地面气旋的爆发性发展。到28日12:00，虽然气旋强度在持续增强，但是加深率明显减小，垂直上升运动也明显减弱，也使得低层辐合高空辐散快速减弱，气旋的发展进入平稳增强时期。对比集合预报好成员组和坏成员组发现，气旋生成之后垂直上升运动均为逐渐发展加强的趋势，好成员组的垂直上升运动比坏成员强，也造成好成员的低空辐合比坏成员更强。因此也就说明好成员组有更强的高空辐散和低层的补偿性辐合，更有利于气旋的发展加强，也是导致好成员组的气旋比坏成员组的气旋更强的原因之一。但是相比较于分析场，好成员组的上升运动的强度比分析场弱，造成低空辐合偏弱，不利于气旋强度的发展，使得气旋的中心强度比分析场弱。

6.3　集合预报成员组间位涡差异分析

位涡是综合表征大气动力和热力特征的物理量，在静力平衡条件下，位涡为绝对涡度与位温梯度的乘积(吕筱英和孙淑清, 1996; 白乐生, 1988; 寿绍文, 2010, 2016; 寿绍文等, 2012)。Uccellini et al. (1985)、Hoskins et al.(1985)应用位涡理论研究其对爆发性气旋影响的研究中指出，对流层顶或平流层的高值位涡下传到对流层下部，且上下层位涡高值区连通时，最有利于地面气旋的爆发性发展。在等压坐标系下，绝热无摩擦的情况下，位涡（单位：PVU，1PVU = 10^{-6} m^2 K s^{-1} kg^{-1}）是守恒的，可表示为

$$\mathrm{MPV} = -g(\xi + f)\frac{\partial \theta}{\partial p} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta}{\partial y}\right), \quad (2)$$

其中，第一项为正压项，与大气稳定度有关；第二项为斜压项，与风速垂直切变和位温的水平梯度相关；ξ为相对涡度，f为地球牵连涡度，θ为位温，g为重力加速度，u为纬向风，v为经向风，p为气压。

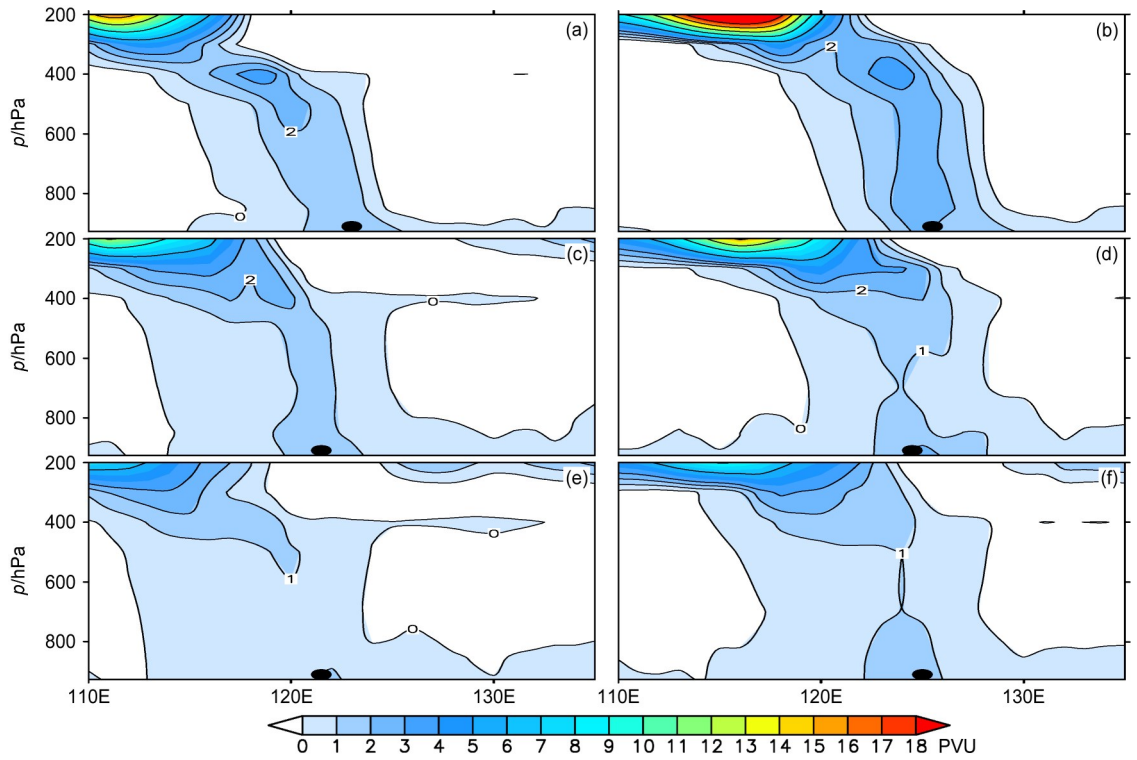

图7 同图6，但为位涡纬向剖面

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for potential vorticity (PV) cross sections

2018年2月27日12:00气旋刚生成时期，地面气旋西侧的对流层上层有大范围的正位涡区向偏东方向的地面气旋处伸展，正位涡区向下伸展到650 hPa附近。27日18:00，对流层中高层正位涡区下传至对流层低层，地面气旋上空出现正位涡区中心为1 PVU，并与高空正位涡区联成一片，400 hPa附近中心位涡值最大为2.5 PVU。28日00:00，在气旋快速发展阶段，气旋上空位涡强度继续加强，400 hPa附近中心位涡值增大到3.5 PVU。高层位涡的2 PVU大值区向下延伸至600 hPa，气旋上空低层位涡值也达到1.5 PVU。到28日06:00，高层位涡大值区持续下传并加强，地面气旋上空低层位涡可达2.5 PVU，此时也是气旋爆发性发展最强的时期。28日12:00，气旋进入缓慢加强阶段，气旋上空的位涡强度开始减弱。随着气旋由生成到爆发性发展的阶段，高空正位涡不断下传至对流层低层，高层正位涡中心也由偏西位置发展到气旋垂直上空，使得低层大气斜压性增大，稳定度减小，导致地面气旋性涡度加强，利于气旋爆发性发展。

通过对比集合预报的好成员组和坏成员组的位涡发现，在气旋形成初期，无论是好成员组还是坏成员组，高空正位涡均有向低层伸展，而且好成员组在27日12:00在气旋上空低层正位涡已经同高层正位涡联成一片。随着气旋的发展，28日00:00，好成员组预报的正位涡发展的更强，2 PVU的位涡大值区向下伸展到425 hPa附近，坏成员组的2 PVU大值区向下伸展到360 hPa附近，好成员组的1 PVU正位涡区已经打通整个气旋上空，坏成员组更弱。好成员组和坏成员组的位涡强度均比分析场偏弱，但好成员组更接近分析场。28日06:00，气旋爆发性发展最强的时候，好成员组和坏成员组的高层位涡下传均有增强，好成员组略好于坏成员组。随着气旋发展速度变缓，位涡也逐渐开始减弱，高层正位涡和低层正位涡区逐渐开始分离。总之，对流层顶的高值位涡下传到对流层下部，且上下层位涡高值区连通时，正位涡下传的强度越强，越有利于地面气旋的爆发性发展。集合预报的两组成员均对高空位涡下传预报偏弱，也是导致地面气旋偏弱的原因之一。但好成员组对高层位涡下传的预报同分析场更接近。

6.4 集合预报成员组间温度平流差异分析

温度平流是气旋发展的一个重要物理因子。在气旋发展的初期到强烈发展期，温度平流起主要作用（彭公炳，1965；李长青和丁一汇，1989）。气

旋初期是一个弱而浅薄的斜压系统，对流层低层有强的辐合和上升运动，此时温度平流对垂直运动有重要的贡献(Rogers and Bosart, 1986)。通过经过气旋中心的温度平流的纬向剖面图可以看出，27 日 12:00 在气旋生成初期，气旋上空低层仅有微弱的暖平流，没有冷平流存在，到了 28 日 00:00，对流层高层的冷平流下传到低层，冷暖平流均比较深厚，冷暖平流的分界线随高度向冷区倾斜，冷平流中心位于 500 hPa 附近，中心强度为 -7×10^{-4} K/s，东部的暖平流中心在 700 hPa 附近，强度同冷平流相近。到 28 日 06:00（图 8a），冷平流进一步向低层渗透，气旋中心附近的冷平流更强，达 -4×10^{-4} K/s。低层 900 hPa 附近出现强的暖平流中心，中心值达到 9×10^{-4} K/s，锋区的斜压性明显增强，而此时正是气旋爆发性发展最强的时期。28 日 12:00，气旋的爆发性发展速度放缓，低层冷暖平流中心也减弱。可以看出，低层的冷暖平流在气旋的爆发性发展阶段起重要作用，强的冷暖温度平流有利于斜压性增强，气旋快速加强。

集合预报的好成员组和坏成员组的温度平流演变同分析场相似，气旋形成初期气旋上空低层主要受暖平流控制，随着气旋的发展，冷平流从高层不断向低层渗透。同分析场不同的是，集合预报的冷平流强度比分析场弱，接近地面气旋中心的冷平流偏弱，暖平流的强度也偏弱。坏成员组预报的平流比好成员组的预报更弱。这也证明了温度平流在气旋爆发性发展时期的重要作用，温度平流越强，气旋爆发的强度越强，集合预报温度平流的预报偏弱，导致气旋强度的预报也偏弱。

6.5　集合预报成员组间水汽条件差异分析

在气旋的发展过程中，水汽的作用不可忽视。水汽在中低层辐合之后在上升运动作用下冷却凝结释放潜热，释放的潜热可使得对流层中层和上层不断增暖，高层气压升高，产生辐散（朱乾根等，2007），而高层辐散又促使低层产生辐合，进一步加强上升运动，从而使气旋发展加强。气旋刚生成初期，800 hPa 以下低层有弱的水汽通量辐合，随着气旋的发展，27 日 18:00 在 900～950 hPa 之间生成一个水汽通量辐合中心，中心值有 -8×10^{-5} g s^{-1} cm^{-2} hPa^{-1}。随着气旋入海加强，水汽通量辐合出现快速增强，28 日 00:00 最大值中心增大到 -18×10^{-5} g s^{-1} cm^{-2} hPa^{-1}，水汽层也在向上层伸展。到 28 日 06:00（图 9），气旋爆发性发展最强时期，低层水汽通量辐合也达到最强，中心最大值为 -20×10^{-5} g s^{-1} cm^{-2} hPa^{-1}，水汽通量辐合层也接近 700 hPa 的高度。气旋爆发性增强之后进入缓慢增强时期，水汽通量辐合的强度也开始减弱。水汽通量辐合在气旋爆发性发展最强的时期亦达到最强。

好成员组的最强水汽通量辐合在 28 日 00:00 达到最强，坏成员组的最强水汽通量辐合在 28 日 06:00 达到最强，这主要是因为好成员组的 5 个成员中有 4 个成员的气旋加深率最大出现在 28 日 00:00，坏成员组中有 4 个成员的气旋加深率在 28 日 06:00 最大。这也表明，水汽通量辐合最强的时期同气旋爆发性发展的时期非常同步，水汽通量辐合越强，气旋爆发性发展的强度越强。集合预报的水汽通量辐合偏弱，则气旋的强度也偏弱。

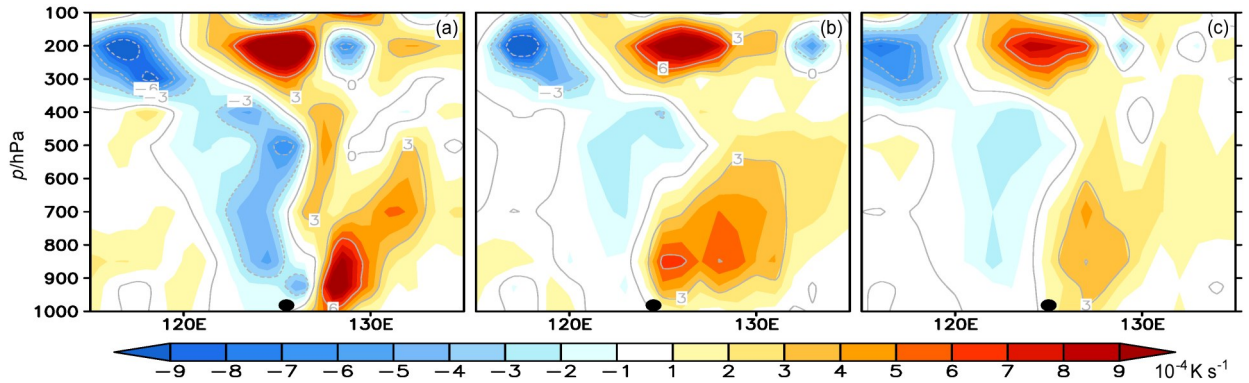

图 8　2018 年 2 月 28 日 06:00 沿气旋中心的温度平流纬向剖面：（a）分析场；（b）好成员组；（c）坏成员组

Fig. 8　Cross sections of temperature advection at cyclone center at 0600 UTC on 28 Feb 2018: (a) Analysis field; (b) good members; (c) bad members

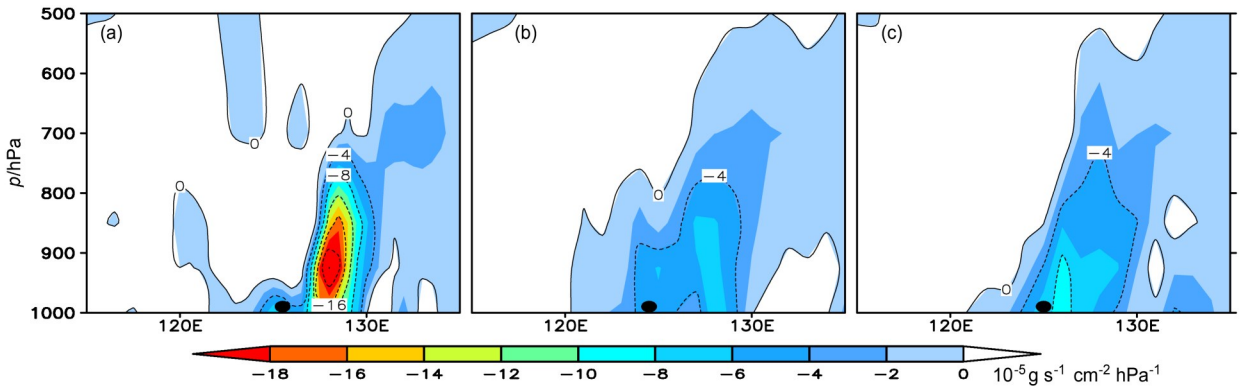

图9 同图8，但为水汽通量散度纬向剖面

Fig. 9 Same as in Fig. 8, but for the cross sections of water vapor divergence

7 结论与讨论

本文针对2018年2月底发生在我国东南地区、黄海及日本海的一次入海爆发性气旋，基于ECMWF集合预报产品，通过对温带气旋的强度和路径、海面风场的检验，挑选出对入海气旋预报效果好和差的两个成员组，从高低空形势场、垂直运动、位涡、温度平流、水汽条件等动力和热力因子方面组间对比分析了气旋入海后爆发性发展时期各预报因子和物理量，得到如下主要结论：

（1）在温带气旋入海之后爆发性发展时，200 hPa急流入口区附近的高层辐散中心也出现快速发展，同时伴随着500 hPa高空槽、850 hPa低涡的迅速加强，高空槽前和低涡前部的西南急流均明显加大，气旋上空高低层系统的快速加强，上述因子均为气旋出现爆发性发展提供有利的条件。从对比分析结果看出，气旋路径和位置更接近实况分析场的好成员组的高低空形势场的预报表现出更好的预报效果，这也是好成员组预报效果好的原因之一。

（2）气旋入海之后上升运动快速增强，这加剧了低层辐合高层辐散，有利于地面降压，促使地面气旋出现爆发性发展。水汽在中低层辐合后随气流上升发生凝结并释放潜热，这加强了高层辐散、低层辐合以及上升运动，促使气旋进一步爆发性发展。

（3）对流层顶的高值位涡下传增强，在上下层位涡高值区连通时，低层大气斜压性受气旋上空冷暖平流的增强而增大，导致垂直稳定度减小，地面气旋性涡度增强，也有利于气旋爆发性发展。最终此次气旋快速增强并达到中等爆发性气旋的强度。

（4）通过集合预报好坏两组成员对比分析可以得到，虽然两组成员的平均场均比分析场弱，但是好成员组更好的抓住了气旋上空中高层天气系统的快速加强过程，以及垂直运动、位涡、温度平流、水汽条件等因子及物理量的快速增强过程，其预报效果在气旋强度和路径、以及海表面风场等方面均显著优于坏成员组。

本文通过对入海气旋爆发性增强机理的研究，加深了对爆发性气旋运动规律的认识，了解到垂直运动、温度平流等动力和热力因子能够对气旋爆发性增强产生显著的影响，这些结论可以对预报员在对气旋爆发性发展的预报中提供重要的参考。但是这些敏感预报因子及物理量的作用，还不具有普适性，需要进一步针对更多的个例进行统计分析及数值模拟研究，以及深入系统的开展入海爆发性气旋的气候学特征和发展机理，进一步提高应用和学术价值。

参考文献（References）

Allen J T, Pezza A B, Black M T. 2010. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalyses [J]. J. Climate, 23: 6468−6484.

白乐生. 1988. 准地转 $\boldsymbol{Q}$ 矢量分析及其在短期天气预报中的应用 [J]. 气象, 14(8): 25−30. Bai Lesheng. 1988. Quasi-geostraphic $\boldsymbol{Q}$-vector analysis and its application in short-range forecasting [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 14(8): 25−30.

代刊, 毕宝贵, 朱跃建. 2018. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析 [J]. 科学通报, 63(3): 340−355. Dai Kan, Bi Baogui, Zhu Yuejian. 2018. Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19−20, 2016 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 63(3): 340−355. doi:10.1360/N972017-00889

丁治英, 王劲松, 翟兆锋. 2001. 爆发性气旋的合成诊断及形成机制研究 [J]. 应用气象学报, 12(1): 30−40. Ding Zhiying, Wang Jinsong, Zhai zhaofeng. 2001. The reserch for explosive cyclones on composite diagnosis and mechanics [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12(1): 30−40. doi: 10.3969/j. issn. 1001-7313.2001.01.004

Fu S, Sun J, Sun J. 2014. Accelerating two-stage explosive development of an extratropical cyclone over the northwestern Pacific Ocean: A piecewise potential vorticity diagnosis [J]. Tellus A, 66: 23210.

Fu S, Sun J, Li W, et al. 2018. Investigating the mechanisms associated with the evolutions of twin extratropical cyclones over the Northwest Pacific Ocean in mid-January 2011 [J]. J. Geophys. Res., 123: 4088−4109.

Hirata H, Kawamura R, Kato M, et al. 2015. Influential role of moisture supply from the Kuroshio/Kuroshio Extension in the rapid development of an extratropical cyclone [J]. Mon. Wea. Rev., 143 (10): 4126−4144. doi:10.1175/MWR-D-15-0016.1

Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. J. Atmos. Sci., 59(6): 1041−1061.

Hoskins B J, Mcintyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111(470): 877−946. doi:10.1002/qj.49711147002

黄彬, 代刊, 钱奇峰, 等. 2013. 引发黄渤海大风的黄河气旋诊断研究 [J]. 气象, 39(3): 302−312. Huang Bin, Dai Kan, Qian Qifeng, et al. 2013. Diagnosis of Yellow River cyclone induced strong winds over Yellow and Bohai seas [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (3): 302−312. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.03.004

黄立文, 仪清菊, 秦曾灏, 等. 1999. 西北太平洋温带气旋爆发性发展的热力—动力学分析 [J]. 气象学报, 57(5): 581−593. Huang Liwen, Yi Qingju, Qin Zenghao, et al. 1999. Dynamics/thermdynamics diagnosis of explosive development of extratropical cyclones over the northwestern Pacific Ocean [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 57(5): 581−593.

姜立智, 傅慎明, 孙建华, 等. 2019. 2014年11月上旬西北太平洋一次极端强度爆发气旋的数值模拟和分片位涡反演分析 [J]. 气候与环境研究, 24(2): 152−168. Jiang Lizhi, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2019. Numerical simulation and piecewise potential vorticity inversion analysis of an extreme explosive cyclone over the northwest Pacific Ocean in early November of 2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(2): 152−168.

Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al. 2016. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim [J]. Weather and Forecasting, 31(4): 1197−1214. doi:10.1175/WAF-D-16-0026.1

李长青, 丁一汇. 1989. 西北太平洋爆发性气旋的诊断分析 [J]. 气象学报, 47(2): 180−190. Li Changqing, Ding Yihui. 1989. A diagnostic study of an explosively deepening oceanic cyclone over the northwest Pacific Ocean [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 47(2): 180−190.

吕筱英, 孙淑清. 1996. 气旋爆发性发展过程的动力特征及能量学研究 [J]. 大气科学, 20(1): 90−100. Lü Xiaoying, Sun Shuqing. 1996. A study on the dynamic features and energy conversion of the development of explosive cyclones [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 20(1): 90−100.

彭公炳. 1965. 东海低压和东北低压发生发展的天气气候研究 [C]. 地理集刊, 北京: 科学出版社, 9: 128−138. Peng Gongbing. 1965. A study on the Weather and Climate of the Occurrence and Development of the East China Sea low and the Northeast low [C]. Geographical collection, Beijing: Science Press, 9: 128−138.

Rogers E, Bosart L F. 1986. An investigation of explosively deepening oceanic cyclones [J]. Monthly Weather Review, 114(4): 702−718. doi:10.1175/1520-0493(1986)114<0702:AIOEDO>2.0.CO;2

Sanders F. 1986. Explosive cyclogenesis in the west−central North Atlantic Ocean 1981−84. Part I: Composite Structure and Mean Behavior [J]. Mon. Wea. Rev, 114: 1781−1793.

Sanders F, Gyakum J R. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the "Bomb" [J]. Mon. Wea. Rev, 108(10): 1589−1606. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<1589:SDCOT>2.0.CO;2

寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用 [J]. 气象, 36(3): 9−18. Shou Shaowen. 2010. Theory and application of potential vorticity [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(3): 9−18.

寿绍文, 岳彩军, 寿亦萱, 等. 2012. 现代天气学方法 [M]. 北京: 气象出版社, 240. Shou Shaowen, Yue Caijun, Shou Yixuan, et al. 2012. Modern Synoptic Method (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 240.

寿绍文. 2016. 天气学基本原理 [M]. 北京: 气象出版社, 173−179. Shou Shaowen. 2016. Fundamental of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 173−179.

Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. 1985. The Presidents' Day cyclone of 18−19 February 1979: Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis [J]. Mon. Wea. Rev., 113(6): 962−988. doi: 10.1175/1520-0493(1985)113<0962:tpdcof>2.0.co;2

熊秋芬, 张昕, 陶祖钰. 2016. 一次温带气旋涡度场演变特征及气旋发生发展机制分析 [J]. 气象, 42(3): 294−304. Xiong Qiufen, Zhang Xin, Tao Zuyu. 2016. An analysis of vorticity evolution and physics mechanism on an extratropical cyclone [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(3): 294−304. doi: 10.7519/j. issn. 1000-0526.2016.3.004

仪清菊, 陈文玉, 魏进武. 1992. 爆发性与非爆发性海洋温带气旋 [J]. 气象, 18(3): 3−7. Yi Qingju, Chen Wenyu, Wei Jinwu. 1992. Comparison and analysis of explosive and unexplosive development of marine extratropical cyclones [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 18(3): 3−7.

仪清菊, 丁一汇. 1993. 东亚和西太平洋爆发性温带气旋发生的气候学研究 [J]. 大气科学, 17(3): 302−309. Yi Qingju, Ding Yihui. 1993. Climatology of the explosive cyclogenesis over East Asia and West Pacific [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 17(3): 302−309.

仪清菊, 丁一汇. 1996. 黄、渤海气旋暴发性发展的个例分析 [J]. 应

用气象学报, 7(4): 483−490. Yi Qingju, Ding Yihui. 1996. An analysis of the explosive cyclone over Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7(4): 483−490.

尹尽勇, 曹越男, 赵伟, 等. 2011. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析 [J]. 气象, 37(12): 1526−1533. Yin Jinyong, Cao Yuenan, Zhao Wei, et al. 2011. A diagnostic study of an intense developing extratropical cyclone over the Bohai and Yellow Sea [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37(12): 1526−1533.

Yoshida A, Asuma Y. 2004. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region [J]. Mon. Wea. Rev., 132(5): 1121−1142. doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1121:saeoed>2.0.co;2

张颖娴, 丁一汇. 2015. 北半球温带气旋客观研究方法及模拟和预估的研究进展 [J]. 气象科技进展, (1): 6−17. Zhang Yingxian, Ding Yihui. 2015. A review of the research on objective method and simulation and projection of extratropical cyclone over the Northern Hemisphere [J]. Advances Meteorological Science and Technology (in Chinese), (1): 6−17. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2015.01.001

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法（4版） [M]. 北京: 气象出版社, 320−323. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. Synoptic Principles and Methods (4th Ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 320−323.