

孙柏堂,王冠岚,李鹏远,等.西北太平洋一次爆发性气旋的诊断分析和敏感性试验[J].海洋气象学报,2018,38(1):34-42.
Sun Baitang, Wang Guanlan, Li Pengyuan, et al. Diagnostic analysis and sensitivity test of an explosive cyclone over northwestern Pacific[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 34-42. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.005. (in Chinese)

西北太平洋一次爆发性气旋的诊断分析和敏感性试验

孙柏堂¹, 王冠岚², 李鹏远¹, 孙雅文¹, 傅刚¹

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 利用美国国家环境预报中心(NCEP)的FNL格点资料和大气数值模式WRF,对2012年1月11—13日发生于西北太平洋上的一次爆发性气旋过程进行诊断分析和数值模拟。气旋于1月11—12日在日本以东海域爆发性发展,经历2次转向于13日在堪察加半岛附近减弱。研究表明,气旋发展中存在明显锋面结构,对流层高层的高位涡下传对气旋发展非常有利,气旋发展过程中伴随着一支低空急流的生成和发展,使辐合抬升更加明显。利用WRF模式对10日1800 UTC至13日0000 UTC气旋过程进行海温敏感性试验。结果表明,海温变化对气旋发展强度影响明显,但对气旋路径影响较小。

关键词: 西北太平洋;爆发性气旋;诊断分析;敏感性试验

中图分类号: P447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0034-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.005

Diagnostic analysis and sensitivity test of an explosive cyclone over northwestern Pacific

SUN Baitang¹, WANG Guanlan², LI Pengyuan¹, SUN Yawen¹, FU Gang¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract The FNL grid data from NCEP (National Centers for Environmental Prediction) are utilized to analyze an explosive cyclone process occurred in the northwestern Pacific Ocean from 11 to 13 January 2012. The Weather Research and Forecasting model (WRF) is employed to simulate the explosive cyclone from 1800 UTC 10 to 0000 UTC 13 January 2012. The cyclone breaks out in the east of Japan from 11 to 12 January and weakens near the Kamchatka Peninsula on 13 January after changing direction two times. Results of diagnostic analysis show that there exists a distinct frontal structure in the development of cyclone. The high potential vorticity in the upper troposphere extends downward to the surface, which is beneficial to the development of cyclone. The cyclone develops rapidly along with the formation and development of a low level jet, which leads to more distinct convergence and ascending. Results of SST sensitivity tests suggest that the change of sea surface temperature can obviously affect the development intensity of the cyclone, but it has little effect on the cyclonic path.

Key words northwestern Pacific; explosive cyclone; diagnostic analysis; sensitivity test

收稿日期:2017-11-23; 修订日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41775042,41275049)

作者简介:孙柏堂,男,硕士研究生,主要从事海上灾害性天气研究,sunbotang@stu.ouc.edu.cn。

通信作者:李鹏远,男,博士,讲师,主要从事海上灾害性天气研究,pengyuanli@ouc.edu.cn。

引言

近年来,西北太平洋爆发性气旋呈现增加态势。爆发性气旋是指气旋中心气压值(考虑地转调整到 60°N)在 24 h 内下降 24 hPa 以上,即气旋中心气压加深率大于 $1 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$ 的快速发展的气旋^[1]。统计表明,1979—1988 年平均西北太平洋近海发生的爆发性温带气旋每年至多 1 例^[2],但是近年来爆发性气旋不仅发生频率提高,发生位置也更接近陆地,对我国造成的影响也显著增加^[3],爆发性气旋带来的大风、短时强降水,给人们的生产生活造成了极大影响,因此开展爆发性气旋研究对防灾减灾有重要意义。

目前关于西北太平洋爆发性气旋的研究已取得一些成果,主要包括诊断分析和数值模拟方面。研究表明,爆发性气旋多发生在 500 hPa 高空槽前,急流区出口左侧^[1]。西北太平洋暖流——黑潮及其延伸体区为爆发性气旋提供了有利的气候背景^[4-5]。爆发性气旋的发生发展理论主要有动力不稳定或斜压不稳定理论^[6-7],以对流层顶折叠、急流动量下传为主的强上层强迫过程理论^[8-9]等。李长青和丁一汇^[10]的研究表明,爆发性气旋的形成需要一定的有利大尺度环境条件,包括海洋沿岸的位势不稳定大气层结,海上副高西侧暖湿气流输送,高空急流出口区北侧的动力辐散。Yoshida and Asuma^[11]研究发现,亚洲大陆冷空气入侵有利于爆发性气旋的发展,爆发性气旋的中低层存在较强的斜压区。秦增灏等^[12]得出了西北太平洋爆发性气旋具有连续爆发的特性,中国近海和西北太平洋爆发性气旋以 3 月最多,其次为 12 月和 1 月,最多月份可发生 7 个以上等结论。数值模拟方面,郭大梅和丁治英^[13]利用 PSU/NCAR MM5 模式,对爆发性气旋进行研究,得出潜热释放导致对流层顶和等温面抬升,气流在高层上升冷却形成扰动槽,其适应过程使高层出现惯性不稳定,惯性不稳定会导致气旋加强与降水加强,进一步使潜热释放增加,这种正反馈机制有利于气旋发展。赵洪等^[14]分别应用 MM5 和 WRF 模式对一次爆发性气旋进行模拟并对所得结果进行比较,指出 WRF 模式能更好地模拟爆发性气旋的一些特点。

根据前人经验,本文利用美国国家环境预报中心(NCEP)的 FNL 格点资料和大气数值模式 WRFV3.5 对 2012 年 1 月 10—13 日发生的一次爆发性气旋过程进行诊断分析和海温敏感性试验,研

究此次爆发性气旋的一些特性。

1 演变过程

2012 年 1 月 10 日 18 UTC 在海平面气压图上,日本以东洋面($143^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$)有风切变加强形成环流并开始出现闭合等压线,11 日 00 UTC 气旋中心气压降低率大于 $1 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,开始爆发性发展,逐渐向东北方向移动,强度逐渐加强,12 日 18 UTC 气旋中心气压降低率小于 $1 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,爆发性发展结束。气旋位置由 FNL 资料的海平面气压最小值确定,图 1 是气旋从爆发性发展开始到结束的移动路径。10 日 18 UTC 气旋位于日本本州岛以东洋面($143^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$)上,之后气旋向东北偏东方向移动,移动速度较快,并于 1 月 11 日 18 UTC 发生第一次折向,折向位置为($161^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N}$),方向变为东北偏北,移动速度略有下降,12 日 00 UTC 气旋中心气压降低率达到最大,之后速度明显减慢,12 日 06 UTC 第二次折向,位置为($164^{\circ}\text{E}, 48^{\circ}\text{N}$),方向折向西北偏北,移动缓慢,最后在堪察加半岛南侧($161^{\circ}\text{E}, 52^{\circ}\text{N}$)逐渐减弱。图 2 是中心气压及其降低率图,可以看出 11 日 00 UTC 至 11 日 12 UTC 气旋发展较为平稳,中心气压降低率约为 $1.6 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,11 日 12 UTC 后气旋进一步发展,从 11 日 12 UTC 至 12 日 00 UTC 的 12 h 内气压降低了约 26.3 hPa,整个过程气压降低了约 63.9 hPa,12 日 00 UTC 中心气压降低率达到最大的 $2.7 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,根据 Sanders^[15]对爆发性气旋强度的分类,即弱($1.0 \sim 1.2 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)、中($1.3 \sim 1.8 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)和强($\geq 1.8 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)爆发性气旋,

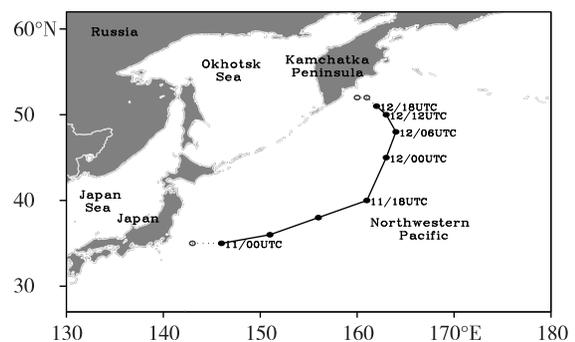


图 1 2012 年 1 月 11 日 0000 UTC—13 日 0600 UTC 气旋中心(由 FNL 海平面气压资料确定)的移动路径(实心圆为爆发过程,空心圆为未爆发过程)

Fig.1 The trajectory of cyclone center determined by the FNL sea level pressure data from 0000 UTC 11 to 0600 UTC 13 January 2012 (Solid dots represent the outbreak process, and the dashed dots represent the non-outbreak process)

此时气旋中心气压降低率大于 $1.8 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$, 为强爆发性气旋级, 且此时气旋发展最为剧烈, 本文也将着重研究这一时刻气旋的发展状况。12 日 18 UTC 气旋中心气压达到最低值 944.9 hPa , 中心气压降低率小于 $1 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$, 爆发性发展结束。

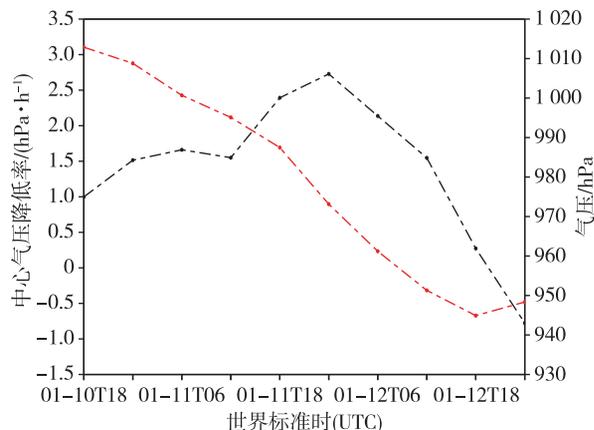


图2 气旋中心气压(红色虚线;单位:hPa)和中心气压降低率(黑色虚线;单位: $\text{hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)的时间序列

Fig.2 Time series of cyclone central pressure (red dashed line;units:hPa) and its reduction rate (black dashed line;units: $\text{hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)

2 天气分析

根据前文分析,1月11日00 UTC为气旋爆发性发展开始时刻,1月12日00 UTC气旋中心气压加深率最大,发展最旺盛时刻,1月12日18 UTC为气旋中心气压最低时刻,这三个时刻能反应气旋整个爆发过程,故选择这三个时刻对气旋过程进行分析。

1月11日00 UTC,200 hPa位势高度(图3a)气旋位于高空急流轴中心偏左,总体上利于辐散,有助于气旋的发展。500 hPa位势高度(图3b),库页岛至朝鲜以北的区域存在一个槽,槽后有冷平流,未来该槽会进一步发展,该槽发展对下游气旋发展有利。850 hPa位势高度(图3c)气旋上游有较强冷平流,对应500 hPa是高空槽前,冷平流随高度减弱有利于高空槽的发展,也有利于气旋发展。海平面气压图(图3d)上气旋式环流加强,风场有明显的辐合,抬升加强,气旋将进一步发展。1月12日00 UTC,200 hPa位势高度(图4a)气旋位于急流出口区左侧,急流区左侧一般为强辐散区,根据200 hPa辐散区图可以看出气旋中心高空正对应强辐散区,这对气旋发展十分有利。500 hPa位势高度(图4b),气旋发展十分旺盛,向上伸展到了对流层中

层,此区域对应一个大槽,槽后有冷平流,槽前是较强的暖平流,根据天气学原理,槽还会继续加深,并向着槽前负变压区移动,有利于气旋的发展。850 hPa位势高度(图4c)气旋中心对应一个低涡中心,低涡东南侧存在较强的暖舌,低涡中心对应槽的槽前仍是较强的暖平流,该结构对应底层是较强的锋面结构,等温线密集且与等高线交错,斜压性较强。海平面气压图(图4d),形成了一个深厚强大的气旋系统,冷锋前对应强西南到南风,将低纬度的暖湿气流源源不断的向气旋中心输送,为气旋的发展提供充足的能量。1月12日18 UTC,200 hPa位势高度(图5a)气旋中心远离急流出口区左侧,辐散明显减弱。500 hPa位势高度(图5b),低涡中心西侧槽后有暖平流,该槽将减弱,且东侧暖平流有减弱的趋势,随着东侧暖舌的南撤,低涡中心将受到冷平流控制,逐渐填塞减弱。850 hPa位势高度(图5c)低涡东南侧冷平流有减弱的趋势,使对应东侧高空槽的发展减弱,等温线梯度有减小的趋势,对应锋面结构有减弱的趋势。海平面气压图(图5d),中心气压值达到最低,风场辐合明显减弱,气旋长轴直径超过2500 km。爆发性气旋整个发展过程的前期在库页岛与堪察加半岛之间存在一个气旋,该气旋为爆发性气旋的生成提供了有利的西南气流背景风场与气旋性风切变,并且在后期稍有加强而影响了爆发性气旋的更进一步发展,两气旋之间风速较低产生互旋^[16],影响了爆发性气旋的前进方向,最终与将要结束的爆发性气旋合并,加速了爆发性气旋的结束。

3 垂直结构分析

为研究爆发性气旋中心温湿结构,本文选取了爆发性气旋中心气压降低率最大时刻并以爆发性气旋中心为中心,沿经向左右各跨13个经度的垂直剖面图(图4d)。主要从锋面,相当位温,位势涡度,垂直散度和风速等方面对爆发性气旋进行研究。由相当位温图(图6a)分析可得,12日00 UTC,气旋中心存在明显的暖舌,和台风中的暖心结构类似,由积云对流产生的凝结潜热释放到对流层中高层,使中高层气压升高,辐散加强,高空辐散且加热使地面气压降低,地面环流加强,有利于爆发性气旋的发展。气旋西侧的冷锋已十分接近气旋中心,呈现准垂直形态,可知锋面发展十分强烈,锋面越接近气旋中心,冷锋引起的气旋中心暖湿空气抬升越强,地面辐合增强,中心气压降低率也随之增大。

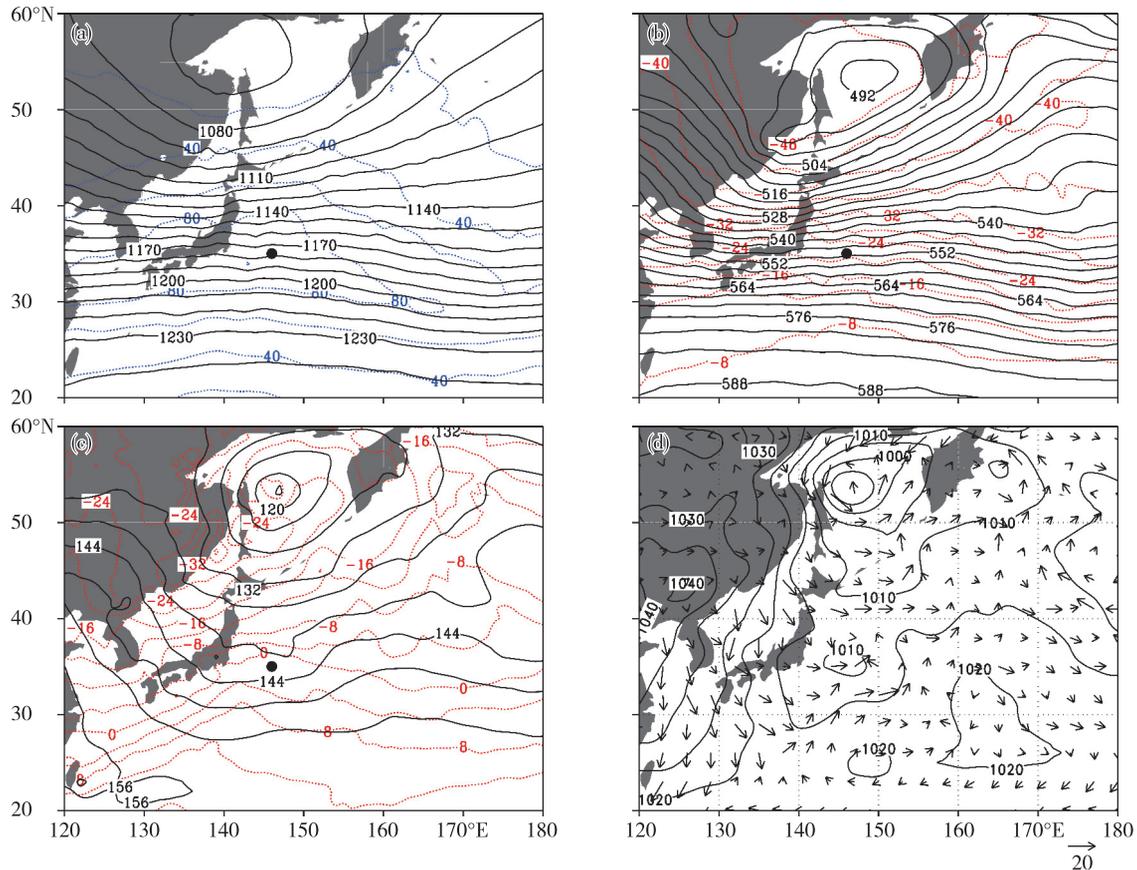


图 3 2012 年 1 月 11 日 0000 UTC 天气图(实心圆为气旋中心):(a) 200 hPa 位势高度(黑色实线;间隔 10 dagpm)和全风速(蓝色虚线;间隔 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);(b) 500 hPa 位势高度(黑色实线;间隔 4 dagpm)和气温(红色虚线;间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$);(c) 850 hPa 位势高度(黑色实线;间隔 4 dagpm)和气温(红色虚线;间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$);(d) 海平面场气压(实线;间隔 5 hPa)和风场(箭矢;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.3 Weather maps at 0000 UTC 11 January 2012 (Solid circle is the cyclone center):(a) 200 hPa geopotential height (black solid contours; 10 dagpm interval) and full wind speed (blue dashed contours; $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ interval); (b) 500 hPa geopotential height (black solid contours; 4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval); (c) 850 hPa geopotential height (black solid contours; 4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval); (d) sea level pressure (solid contours; 5 hPa interval) and surface wind (arrows; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

由位涡图(图 6b)分析可得,气旋中心上空对流层中下层出现了一个较大的位涡中心,中心涡度达到了 3 PVU 以上, Hoskins et al.^[17] 关于高层位涡下传理论指出,对流层上部或平流层的位涡扰动下传,可以引发对流层下部以及地面的气旋性发展。气旋西侧冷空气势力较强,相当位温线出现“鼻”状结构,再配合高位涡的条件,对流剧烈,水汽凝结释放潜热,促进气旋发展。由垂直散度(图 6c)分析可得,对流层中下层存在一个强辐合中心,中下层辐合中心向东倾斜向上,对流层中层 650 hPa 附近存在一个强的辐散中心。低层强辐合中心表明低层强烈的气旋式环流并且存在强上升运动,对气旋发展有利,而对流层中层的辐散中心使该层的干冷空气被吸入,冷空气能加强低层较暖湿空气的抬升。

根据风速垂直分布(图 6d)分析可以看到,12 日 00 UTC 对流层高层对应一个强辐散中心,根据达因补偿原理,高空强辐散中心对低层的辐合发展有利。同时低空有一支较强的低空急流发展,对流层低层强低空急流能增强低层的抬升,对气旋发展有利。

4 水汽分析

由 12 日 00 UTC 云水含量图(图 7a)分析可得,气旋中心东侧和北侧对应的云水含量很高,配合图 7c 可知云体发展旺盛,水汽辐合较好,比湿较大,而西南象限则是云水含量较低,比湿较低。由风速垂直分布(图 6d)可以得到,12 日 00 UTC 气旋中心东侧对流层低层有低空急流,大约在 850 hPa。根据 12 日 00 UTC 850 hPa 风速相当位温图(图 7c),气

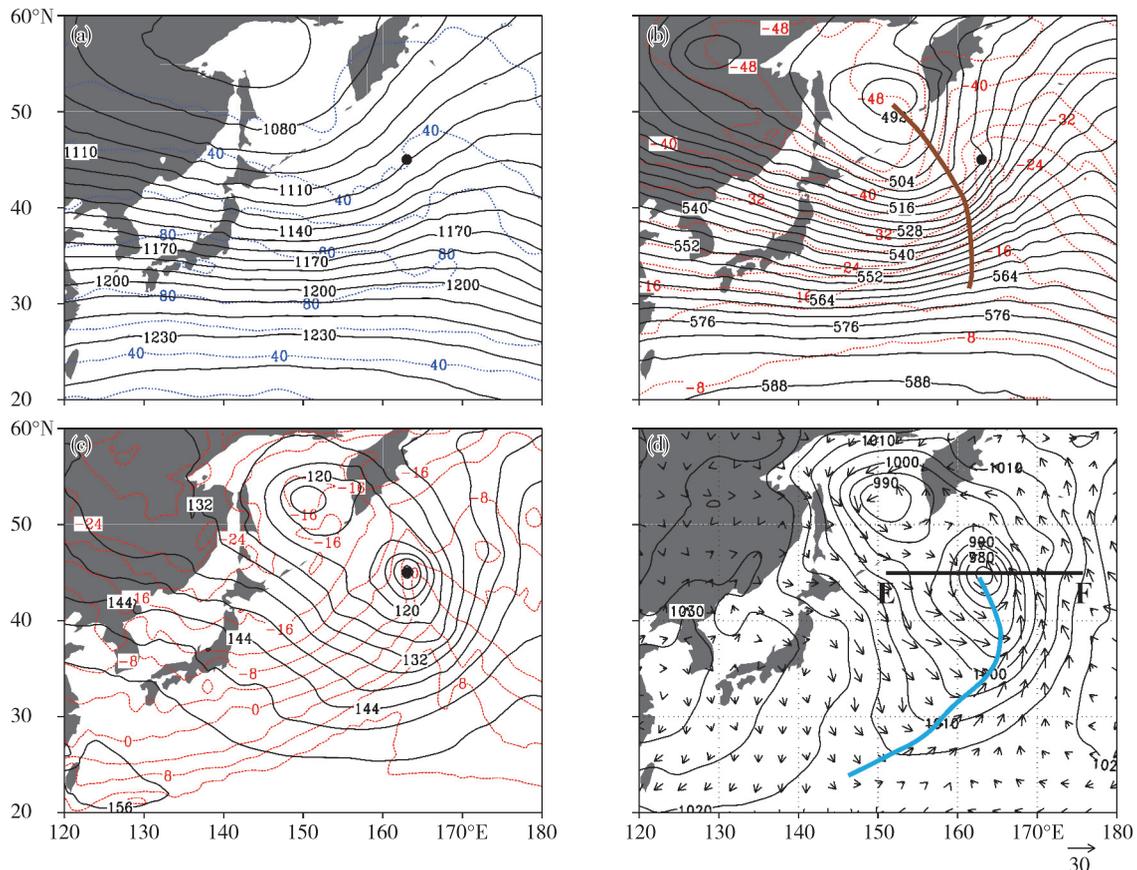


图4 2012年1月12日0000 UTC天气图(实心圆为气旋中心;图b中棕色实线表示槽线;图d中蓝色实线表示冷锋,直线EF用于垂直剖面分析):(a)200 hPa位势高度(黑色实线;间隔10 dagpm)和全风速(蓝色虚线;间隔 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);(b)500 hPa位势高度(黑色实线;间隔4 dagpm)和气温(红色虚线;间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$);(c)850 hPa位势高度(黑色实线;间隔4 dagpm)和气温(红色虚线;间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$);(d)海平面场气压(实线;间隔5 hPa)和风向(箭头;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.4 Weather maps at 0000 UTC 12 January 2012(Solid circle is the cyclone center.Brown solid line represents the trough in Fig. 4b.In Fig.4d,blue solid line represents the cold front and line EF is used for the analysis of vertical cross section):(a) 200 hPa geopotential height (black solid contours;10 dagpm interval) and full wind speed (blue dashed contours; $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ interval);(b) 500 hPa geopotential height (black solid contours;4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval);(c) 850 hPa geopotential height (black solid contours;4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval);(d) sea level pressure (solid contours;5 hPa interval) and surface wind (arrows;units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

旋东侧存在一支强而窄低空急流,风速在 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,方向为东南风,此低空急流对应强暖平流,暖舌由南向北发展于锋区上,综合850 hPa比湿图(图7b)分析,气旋东南象限的高比湿区,配合东南风为气旋中心提供源源不断的水汽与能量,爆发性气旋的螺旋结构十分明显,低纬度高水汽含量的空气被“吸入”气旋中心,有利于气旋的发展。

5 海温敏感性试验

爆发性气旋多在冬春季海上爆发,考虑到海上海温(SST)和陆地气温有较大差异,故对SST进行了敏感性试验来检验SST对爆发性气旋的影响。选择了WRF模式对此次过程进行模拟。表1为WRF

模式参数设置。FNL数据为原始过程,不改变SST为控制试验过程,将SST分别增加和降低2 K为试验过程。综合图8和图9可以看出,SST改变对气旋中心气压变化影响较大,对移动路径影响较小,相对于控制试验,SST增加2 K试验使气旋中心气压降低,SST降低2 K试验使气旋中心气压升高。控制试验和海温敏感性试验中爆发性气旋的中心气压都比FNL再分析资料分析的爆发性气旋中心气压要低,这可能与模式在插值过程产生的误差和模式本身误差有关。这些影响需要对模式本身的物理过程进行详细研究。而且SST改变对气旋中心气压改变不是线性响应,在改变相同的SST且改变幅度较小的情况下,相比于SST减少,爆发性气旋中

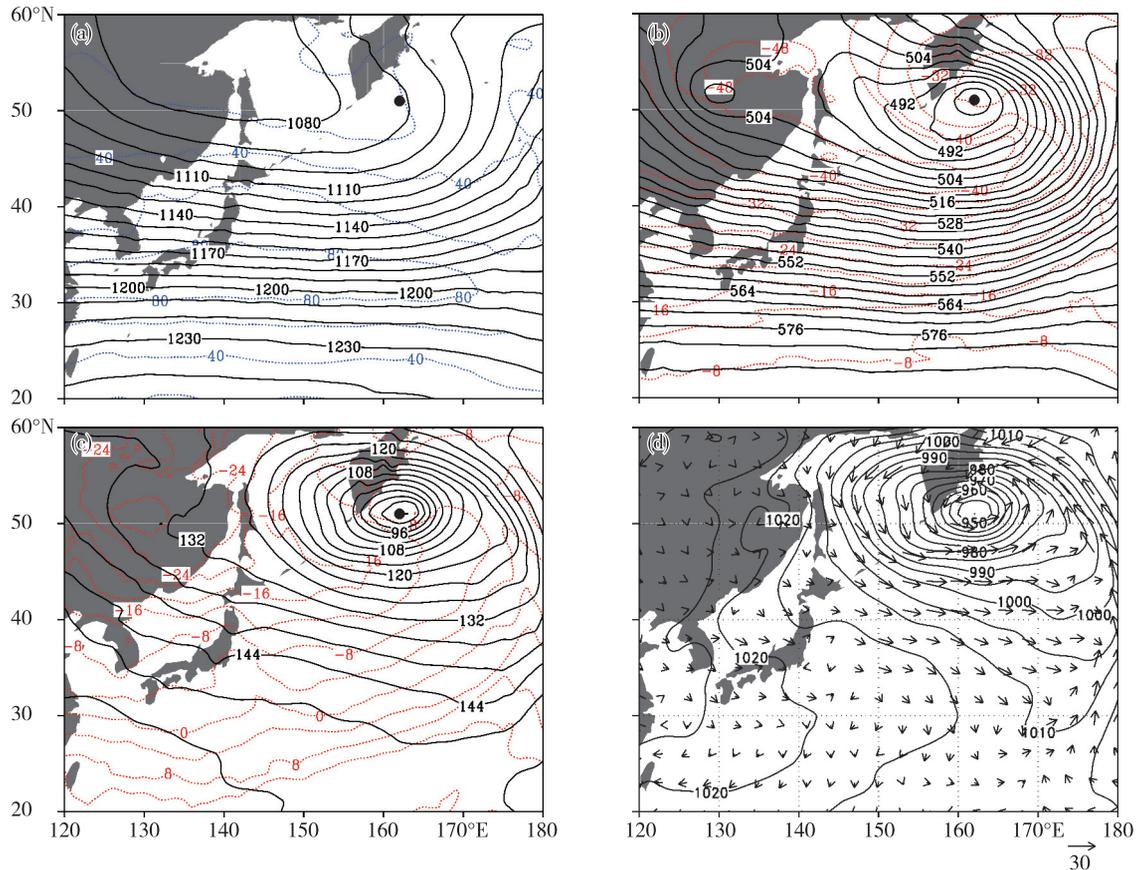


图 5 2012 年 1 月 12 日 1800 UTC 天气图 (实心圆为气旋中心): (a) 200 hPa 位势高度 (黑色实线; 间隔 10 dagpm) 和全风速 (蓝色虚线; 间隔 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 500 hPa 位势高度 (黑色实线; 间隔 4 dagpm) 和气温 (红色虚线; 间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$); (c) 850 hPa 位势高度 (黑色实线; 间隔 4 dagpm) 和气温 (红色虚线; 间隔 $4 \text{ }^\circ\text{C}$); (d) 海平面场气压 (实线; 间隔 5 hPa) 和 wind 场 (箭矢; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.5 Weather maps at 1800 UTC 12 January 2012 (Solid circle is the cyclone center): (a) 200 hPa geopotential height (black solid contours; 10 dagpm interval) and full wind speed (blue dashed contours; $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ interval); (b) 500 hPa geopotential height (black solid contours; 4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval); (c) 850 hPa geopotential height (black solid contours; 4 dagpm interval) and air temperature (red dashed contours; $4 \text{ }^\circ\text{C}$ interval); (d) sea level pressure (solid contours; 5 hPa interval) and surface wind (arrows; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

表 1 WRF 模式主要参数设置

Table 1 Setting of main parameters in WRF model

WRF 参数	设置
垂直坐标	p 坐标
地图投影	Lambert 投影
水平分辨率	45 km
格点数	150×100
辐射方案	长波辐射: Rrtm 方案 ^[18] 短波方案: Dudhia 方案 ^[19]
边界层方案	YSU 方案 ^[20]
积云对流方案	Kain-Fritsch 方案 ^[21]
微物理方案	Lin et al. 方案 ^[22]
侧边界条件	FNL 资料
积分时间/步长	54 h/ $\Delta t = 270 \text{ s}$

心气压对 SST 增加的响应更明显, 也即较高温度下气旋中心气压对海温更敏感。

6 结论

本文对 2012 年 1 月 10—13 日发生在西北太平洋的一次爆发性气旋进行了诊断分析, 并对 SST 做了敏感性试验, 主要结论如下。

气旋于 2012 年 1 月 11 日 00 UTC 在日本以东开始爆发性发展并向东北方向移动, 经历 2 次转向后在勘察加半岛南侧发展结束; 气旋发展过程中, 中心附近的强锋面结构以及暖心结构为气旋发展提供了有利动力和热力条件, 锋面结构接近气旋中心时气旋能快速发展, 当锋面远离气旋中心且逐渐锢囚后气旋会减弱; 对流层高层和平流层的高位涡

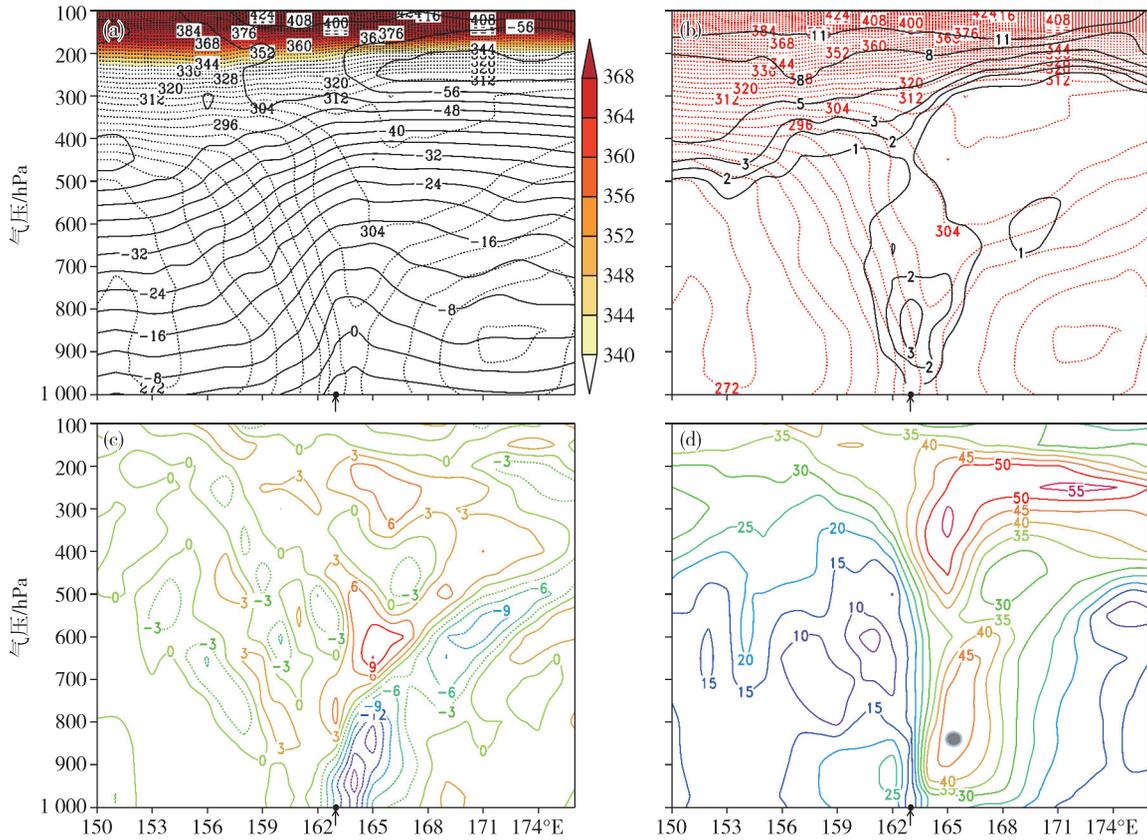


图6 2012年1月12日0000 UTC爆发性气旋的垂直结构:(a)相当位温(黑色虚线;间隔4 K)和温度(黑色实线;间隔4 °C);(b)相当位温(红色虚线;间隔4 K)和位涡(黑色实线;间隔1 PVU;1 PVU=10⁻⁶ K·Pa⁻¹·m·s⁻¹);(c)散度(单位:10⁻⁵ s⁻¹);(d)风速(间隔5 m·s⁻¹;灰色实心圆表示低空急流轴位置,黑色实心圆和箭头表示地面气旋中心位置)

Fig.6 Vertical structures of the explosive cyclone along the line *EF* at 0000 UTC 12 January 2012 (The location of the cyclone center is indicated by the black solid circle and the arrow):(a) equivalent potential temperature (black dashed contours;4 K interval) and air temperature (black solid contours;4 °C interval);(b) equivalent potential temperature (red dashed contours;4 K interval) and potential vorticity (black solid contours;1 PVU interval;1 PVU = 10⁻⁶ K · Pa⁻¹ · m · s⁻¹);(c) divergence (units:10⁻⁵ s⁻¹);(d) wind speed (5 m · s⁻¹ interval;Gray solid dot represents the potion of jet stream axis at lower troposphere)

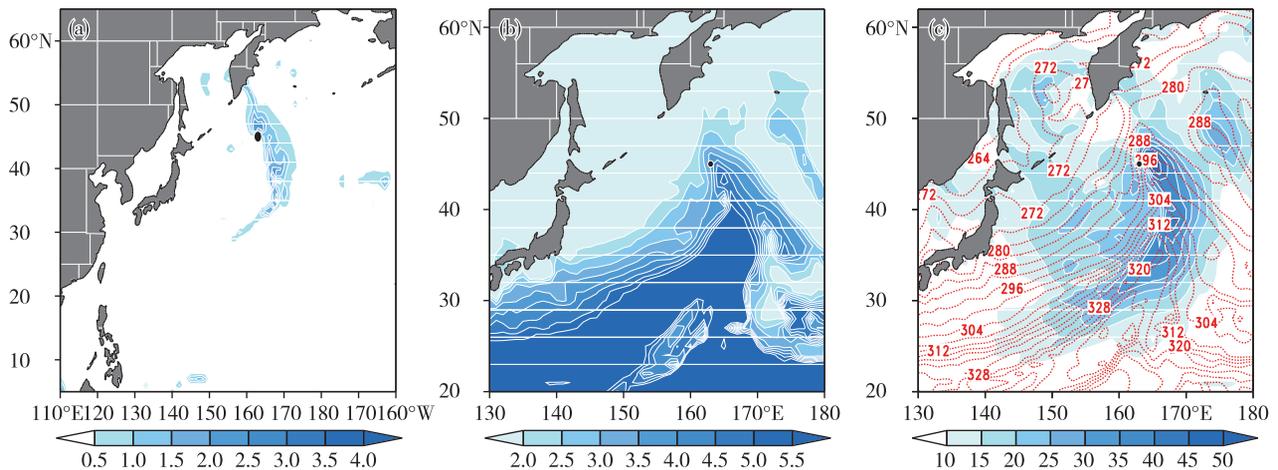


图7 2012年1月12日0000 UTC水汽分布(实心圆为气旋中心):(a)云中水含量(间隔0.5 kg·m⁻²);(b)850 hPa比湿(间隔0.5 g·kg⁻¹);(c)850 hPa水平风速(蓝色阴影;间隔5 m·s⁻¹)和相当位温(红色虚线;间隔4 °C)

Fig.7 Water vapor distributions at 0000 UTC 12 January 2012 (Solid circle is the cyclone center):(a) cloud water content (0.5 kg · m⁻² interval);(b) 850 hPa specific humidity (0.5 g · kg⁻¹ interval);(c) 850 hPa horizontal wind speed (blue shaded areas;5 m · s⁻¹ interval) and equivalent potential temperature (red dashed contours;4 K interval)

区下传对海平面的气旋式环流加强有利,进而使辐合上升增强;倾斜上升的气流使空气流入流出更加有序,气旋结构更稳定,对流层中层的干冷空气被吸入对中小尺度的垂直环流有利;低空急流使对流层中低层的不稳定加强,辐合抬升加强,并向气旋中心输送充足的水汽与能量;SST 敏感性试验表明,SST 在一定范围内变化对气旋的移动路径影响不大,对气旋中心气压降低影响较大,且气旋的爆发性发展对 SST 增加的敏感程度要大于 SST 降低。

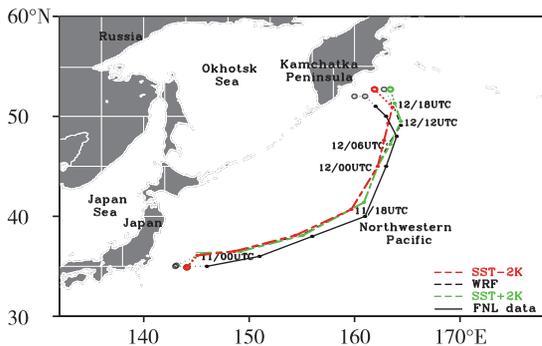


图 8 模拟与观测气旋中心移动路径的比较(黑色实线是气旋中心移动路径;红色虚线是 SST 减少 2 K,绿色虚线是 SST 增加 2 K,黑色虚线是 SST 不变;相邻点的时间间隔为 6 h;实心圆代表爆发过程,空心圆代表未爆发过程)

Fig. 8 Comparison of the trajectory of cyclone center of observations with those of simulations (Black solid line represents the trajectory of the cyclone center determined by the FNL sea level pressure data. Red dashed line represents SST minus 2 K, green dashed line represents SST plus 2 K, and black dashed line represents control test. The time interval between adjacent points is 6 h. Solid dots represent the outbreak process, and the dashed dots represent the non-outbreak process)

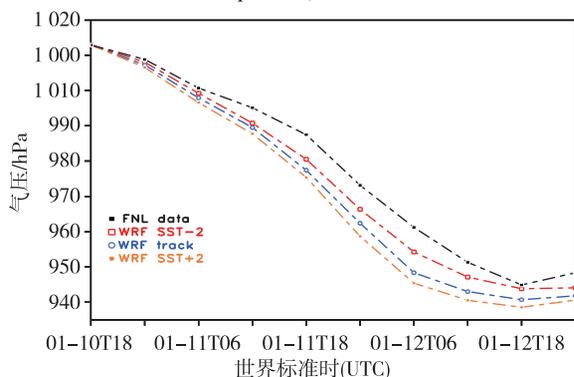


图 9 WRF 模式模拟和 FNL 资料确定的中心气压时间序列(黑线为 FNL 资料,红线为 SST 减少 2 K,橙线为 SST 增加 2 K,蓝线为 SST 不变)

Fig. 9 Time series of the central pressure determined by WRF simulations and FNL data (Black line represents FNL data. Red line represents SST minus 2 K, orange line represents SST plus 2 K, and blue line represents control test)

参考文献:

[1] Sanders F, Gyakum J R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb" [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108 (10): 1589-1606.

[2] 仪清菊, 丁一汇. 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, 1993, 17(3): 302-309.

[3] 王帅. 西北太平洋爆发性气旋观测分析和数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 1-77.

[4] Chen S J, Kuo Y H, Zhang P Z, et al. Climatology of explosive cyclones off the East Asian coast [J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(12): 3029-3035.

[5] Iizuka S, Shiota M, Kawamura R, et al. Influence of the monsoon variability and sea surface temperature front on the explosive cyclone activity in the vicinity of Japan during northern winter [J]. SOLA, 2013, 9: 1-4.

[6] Roebber P J. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones [J]. Mon Wea Rev, 1984, 112(8): 1577-1589.

[7] Rogers E, Bosart L F. An investigation of explosively deepening oceanic cyclones [J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(4): 702-718.

[8] Bleck R. Short-range prediction in isentropic coordinates with filtered and unfiltered numerical models [J]. Mon Wea Rev, 1974, 102(12): 813-829.

[9] Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. 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, 1985, 113(6): 962-988.

[10] 李长青, 丁一汇. 西北太平洋爆发性气旋的诊断分析 [J]. 气象学报, 1989, 47(2): 180-190.

[11] Yoshida A, Asuma Y. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region [J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(5): 1121-1142.

[12] 秦曾灏, 李永平, 黄立文. 中国近海和西太平洋温带气旋的气候学研究 [J]. 海洋学报, 2002, 24(S1): 105-111.

[13] 郭大梅, 丁治英. 潜热和惯性不稳定与气旋爆发性发展关系的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 794-800.

[14] 赵洪, 杨学联, 邢建勇, 等. WRF 与 MM5 对 2007 年 3 月初强冷空气数值预报结果的对比分析 [J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 1-8.

[15] Sanders F. Explosive cyclogenesis in the west-central North Atlantic Ocean, 1981 - 84. Part I: Composite structure and mean behavior [J]. Mon Wea Rev, 1986, 114

- (10):1781-1794.
- [16] Brand S. Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean[J]. *J Appl Meteor*, 1970, 9 (3):433-441.
- [17] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1985, 111(470):877-946.
- [18] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated - k model for the longwave [J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 1997, 102 (D14): 16663-16682.
- [19] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46 (20): 3077-3107.
- [20] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(9):2318-2341.
- [21] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *J Atmos Sci*, 1990, 47 (23): 2784-2802.
- [22] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22(6):1065-1092.