

傅刚,张树钦,庞华基,等.爆发性气旋研究的回顾[J].海洋气象学报,2017,37(1):10-19.
Fu Gang, Zhang Shuqin, Pang Huaji, et al. Review of researches on explosive cyclones[J].Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1):10-19. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.002. (in Chinese)

爆发性气旋研究的回顾

傅刚¹,张树钦¹,庞华基²,孙雅文¹

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100; 2. 青岛市气象局,山东 青岛 266003)

摘要:爆发性气旋又称“气象炸弹”,定义为在考虑地转调整到 60°N 时气旋中心气压加深率大于 1 hPa/h 的快速的气旋,具有中心气压急剧降低、强度急剧增大的特点,多发于洋面上,对海上航行安全及沿岸人民生活具有重要的影响。近几十年来,众多学者对爆发性气旋开展了广泛而深入的研究,在爆发性气旋的气候学特征、结构特征和发展机制等方面取得了较大的进展,但同时还有许多亟待解决的问题。本文结合前人对爆发性气旋的研究工作,系统地回顾和总结了爆发性气旋的研究进展,希望能够为将来对爆发性气旋的研究工作带来一些启发和思考。

关键词:爆发性气旋;定义;分类;气候学特征;发展机制

中图分类号: P447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0010-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.002

Review of researches on explosive cyclones

FU Gang¹, ZHANG Shuqin¹, PANG Huaji², SUN Yawen¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China)

Abstract Explosive cyclones, known as meteorological “bombs”, are defined as a cyclone whose central sea level pressure decrease normalized at 60°N is greater than 1 hPa per hour. They frequently occurs over the vast ocean in cold season and usually causes serious losses of life and property due to the extremely bad weather related to their rapid intensification. Many previous studies focused on the climatology, spatial-temporal structures and developing mechanisms of explosive cyclones. During the past years, many significant progresses had been made on study of explosive cyclones, but there are still some questions which were not solved. In this paper, the previous researches on explosive cyclones are reviewed and some problems unsolved are indicated, aiming to have some enlightenment for future researches on explosive cyclones.

Key words explosive cyclone; definition; classification; climatology; developing mechanism

引言

观测发现一些中纬度温带气旋能够在短时间内快速发展,即在十几小时甚至数十小时内其中心气压迅速降低,强度急剧增强。早在 20 世纪 70 年

代,Jula^[1]和 Böttger 等^[2]分别在对热带风暴(飓风)进行个例分析时就发现了快速旋生(rapid cyclogenesis)现象。Rice^[3]把给 1979 年法斯特耐特(Fastnet)帆船赛造成惨痛人员伤亡的气旋称为“气象炸弹(meteorological bomb)”。Sanders 和 Gyak-

收稿日期:2016-12-21; 修订日期:2017-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41275049)

作者简介:傅刚(1963—),男,博士,教授,主要从事海洋气象学的教学和科研工作, fugang@ouc.edu.cn。

um^[4] 将这类气旋称为爆发性气旋 (explosive extratropical cyclone), 并给出了明确的定义: 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 hPa/h 的快速发展的气旋。

爆发性气旋水平尺度约为 2 000~3 000 km, 生命周期约为 2~5 d, 具有短时间内中心气压迅速降低、气旋强度急剧增大的特点, 其风速在极短的时间内可达到 30 m·s⁻¹ 以上^[5], 由于其常常会伴随着强降水等恶劣天气、且多形成于中高纬度海洋上难以预报, 因此被认为是最危险的天气系统之一。

爆发性气旋是中纬度地区冬半年除寒潮以外影响范围最大、危害程度最严重的天气系统, 往往会给人民的生命和财产带来巨大的危害^[6-9]。如 2013 年 11 月 24 日夜, 在山东半岛东部的海面上, 一次爆发性气旋过程造成 2 艘船沉没, 26 名船员全部遇难或失踪。Sanders 和 Gyakum^[4] 对北半球爆发性气旋的气候学特征进行了分析, 结果表明, 爆发性气旋多发生于冷季, 且主要分布在太平洋和大西洋的西北部海域, Roebber^[10] 和 Gyakum 等^[11] 对爆发性气旋的统计分析中发现了类似的特征。大尺度的大气和海洋物理环境场对爆发性气旋的生成和发展具有重要影响, Sanders 和 Gyakum^[4] 统计发现, 爆发性气旋多发生于 500 hPa 高空槽的下游和高空急流出口区的左侧。大量研究表明, 太平洋和大西洋的西北部海域是爆发性气旋的频繁发生地^[4, 10-15], 西北太平洋暖洋流(黑潮)和西北大西洋暖洋流(墨西哥湾流)为爆发性气旋的发展提供了有利的海洋物理环境背景场^[16-18]。过去的研究表明, 爆发性气旋发生时, 大气和海洋环境背景场会表现出一些较为显著的特点, 而这些变化对爆发性气旋的发生起到了很强的推动作用^[19-20]。关于爆发性气旋的发展机制主要有动力不稳定或斜压不稳定机制^[10, 21-23]、以潜热加热为主的次天气尺度过程^[12, 24]、以对流层顶折叠、急流动量下传为主的强上层强迫过程^[25-29]、平流层高位涡气团入侵过程^[30-32] 等理论, 还有一类观点认为爆发性气旋的发展是各种物理因子共同作用的结果^[27, 33]。

众多国内外学者已对爆发性气旋开展了广泛而深入的研究, 本文将结合前人对爆发性气旋的研究工作, 系统回顾和总结爆发性气旋的研究进展, 并指出一些有待解决的问题, 希望能够为将来对爆发性气旋的研究工作带来一些启发和思考。本文将从以下五个方面对前人的工作进行回顾和总结:

一是爆发性气旋的定义; 二是爆发性气旋的分类; 三是爆发性气旋的气候学特征; 四是爆发性气旋的发展机制; 最后是总结和讨论, 指出在爆发性气旋研究中一些尚待解决的问题。

1 爆发性气旋的定义

1.1 Bergeron(1954)的定义

气旋的爆发性概念在 1954 年首先由 Bergeron^[34] 提出, 他在研究热带飓风时将飓风 24 h 内中心气压加深率大于 1 hPa/h 的现象定义为爆发性发展现象。Bergeron 只定义了气旋的爆发现象, 并没有明确给出爆发性气旋的定义, 这种定义法的缺点是没有考虑不同气旋中心所处地理位置纬度的差异, 不同纬度气旋的爆发程度缺乏统一的衡量标准。

1.2 Sanders 和 Gyakum(1980)的定义

Sanders 和 Gyakum^[4] 首次明确给出了爆发性气旋的定义, 考虑到气旋中心所在纬度的差异, Sanders 和 Gyakum^[4] 提出了“地转调整因子”的概念, 他们将爆发性气旋定义为气旋中心的海平面气压值地转调整到 60°N 后, 若在 24 h 内下降 24 hPa 以上, 即气旋中心气压加深率大于 1 hPa/h, 则称该气旋为爆发性气旋。需要说明的是, 取 60°N 是为了向最早提出气旋理论的卑尔根学派的前辈们致敬, 因为挪威的卑尔根市(Bergen)的纬度位于 60°N, 因此爆发性气旋中心气压加深率 R 表示为:

$$R = \left[\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right] \times \left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right] \quad (1)$$

(1)式中 P 为气旋的中心气压, φ 为气旋的中心纬度, 下标 $t-12$ 和 $t+12$ 分别表示 12 h 前和 12 h 后变量。这种定义法考虑了气旋中心所处地理位置纬度的差异。由于进行了地转调整, 因此若要维持相同气压加深率, 在 24 h 内纬度高的气压差要比纬度低的大一些, 例如在地球两极, 气旋中心气压 24 h 下降 28 hPa 以上才能被称为爆发性气旋; 而在 25°N/S, 气旋中心气压 24 h 内下降 12 hPa 以上就可被定义为爆发性气旋。

1.3 对 Sanders 和 Gyakum(1980)定义的修正

1.3.1 地转调整纬度的修正

Sanders 和 Gyakum^[4] 对北半球 1976—1979 年冷季(9 月—次年 5 月)发生的爆发性气旋进行了统计, 发现爆发性气旋多位于 60°N 以南, 集中分布于 30°N~50°N 之间, 只有 2 例发生于 60°N 以北。Roebber^[10]、Gyakum 等^[11]、Chen 等^[16]、Yoshida 和 Asuma^[15]、Wang 和 Rogers^[35] 等学者采用 Sanders 和

Gyakum^[4]的爆发性气旋定义,对不同区域的爆发性气旋开展了统计工作,结果均显示爆发性气旋多发生于中纬度地区(30°N~60°N)。由此可见,Sanders和Gyakum^[4]将爆发性气旋的中心降压值地转调整到60°N与爆发性气旋的频发纬度存在偏差。因此,在Sanders和Gyakum^[4]的爆发性气旋定义基础上,考虑到爆发性气旋多发生于中纬度地区,一些学者对爆发性气旋定义中的地转调整纬度进行了修正。

Roebber^[10]指出爆发性气旋多发生于42.5°N附近,故将地转调整纬度选择在42.5°N,其中心气压加深率 R 表示为:

$$R = \left[\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right] \times \left[\frac{\sin 42.5^\circ}{\sin \varphi} \right] \quad (2)$$

而Gyakum等^[11]将45°N作为爆发性气旋定义中的地转调整纬度,其中心气压加深率 R 表示为:

$$R = \left[\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right] \times \left[\frac{\sin 45^\circ}{\sin \varphi} \right] \quad (3)$$

相对于Sanders和Gyakum^[4]、Roebber^[10]和Gyakum等^[11]在爆发性气旋的定义中选择了较低的地转调整纬度,这要求其气旋中心的24h降压值要大于Sanders和Gyakum^[4]定义中的24h降压值,才能达到爆发性气旋的标准。Roebber^[10]和Gyakum等^[11]定义的1 Bergeron大约相当于Sanders和Gyakum^[4]定义的1.2 Bergerons。

1.3.2 时间间隔的修正

由于受资料时间分辨率的限制,过去一些学者在爆发性气旋的定义中多采用24h降压时间间隔^[4,10,16,35]。随着资料时间分辨率的提高,一些学者对Sanders和Gyakum^[4]的爆发性气旋定义中的降压时间间隔进行了修正。

Yoshida和Asuma^[15]采用了12h降压时间间隔,但仍将气旋中心所处的纬度地转调整到60°N,12h降压时间间隔能够刻画一些周期短、发展迅速的气旋,其中心气压加深率 R 为:

$$R = \left[\frac{P_{t-6} - P_{t+6}}{12} \right] \times \left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin \frac{\varphi_{t-6} + \varphi_{t+6}}{2}} \right] \quad (4)$$

为了研究发展时间更短的爆发性气旋,Petty和Miller^[36]甚至定义6h气旋中心气压降低10hPa即为爆发性气旋:

$$R = \left[\left(\frac{P_{t-6} - P_{t+6}}{12} \right) \div \left(\frac{10}{6} \right) \right] \times \left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin \bar{\varphi}_{12}} \right] \quad (5)$$

其中: $\bar{\varphi}_{12}$ 为12h气旋中心的平均纬度。

1.4 存在的问题

在过去的研究中,对爆发性气旋的定义主要有3种,一是Sanders和Gyakum^[4]的爆发性气旋定义,即地转调整纬度定为60°N和使用24h降压时间间隔^[4,16,35],但将地转调整到60°N主观性较强,缺乏依据,且较爆发性气旋的频发纬度存在偏差。二是地转调整到较低纬度(42.5°N或者45°N)和使用24h降压时间间隔^[10-11],该定义虽然修正了Sanders和Gyakum^[4]爆发性气旋定义中的地转调整纬度的影响,但24h降压时间间隔对于高时间分辨率资料显然太大,不利于细致地刻画爆发性气旋的急剧发展过程。三是地转调整到60°N和使用12h降压时间间隔^[15],修正了^[4]的爆发性气旋定义中的降压时间间隔,虽然能够满足高时间分辨率资料需求,但其地转调整到60°N与爆发性气旋频繁发生的纬度不符。因此,在将来的研究中,需要依据所使用的资料及爆发性气旋的空间分布特征对其定义进行相应修正。

2 爆发性气旋的分类

在对爆发性气旋的研究中发现,不同强度、不同区域的爆发性气旋的移动路径、生命史等特征及其爆发机制表现出明显的差异,为了对爆发性气旋开展更加深入详细的研究,一些学者开始在强度和区域上对其进行分类。

2.1 强度分类

Sanders^[37]在对1981年1月—1984年11月发生于北大西洋中西部爆发性气旋的研究中,依据爆发性气旋中心气压最大加深率的大小,在强度上将其划分为3类,分别为“strong bomb (> 1.8 Bergerons)”、“moderate bomb (1.3 ~ 1.8 Bergerons)”、“weak bomb (1.0 ~ 1.2 Bergerons)”。Wang和Rogers^[35]对1985年1月—1996年3月发生于北半球(15°N~90°N)的爆发性气旋进行了统计,依据爆发性气旋中心气压最大加深率的大小,将其划分为3类,分别为“strong (≥ 1.80 Bergerons)”、“moderate (1.40 ~ 1.79 Bergerons)”和“weak (1.00 ~ 1.39 Bergerons)”。Wang和Rogers^[35]与Sanders^[37]的分类标准稍有不同,主要是在“弱”和“中等”强度爆发性气旋的分界上存在差异,但他们均没有给出弱、中、强爆发性气旋强度界限的划分依据。统计结果显示,随着爆发性气旋爆发性发展强度的增强,其发生频率呈现减少的趋势。

2.2 区域分布

Wang 和 Rogers^[35]对北大西洋爆发性气旋最大加深点(最大加深率时刻气旋中心位置)的空间分布进行了分析,依据其3个高频中心的分布位置,在区域上将其划分为3类,分别为NWA(the northwest Atlantic)、NCA(the north-central Atlantic)和NEA(the extreme northeast Atlantic)类爆发性气旋。Yoshida 和 Asuma^[15]根据爆发性气旋生成和爆发地点位置,将西北太平洋爆发性气旋在区域上划分成3类,第1类是生成于大陆、在鄂霍次克海或日本海发展的爆发性气旋(the Okhotsk-Japan Sea type, 简称OJ型);第2类是生成于大陆、在太平洋发展的爆发性气旋(the Pacific Ocean-land type, 简称PO-L型);第3类是生成于太平洋、在太平洋发展的爆发性气旋(the Pacific Ocean-ocean type, 简称PO-O型)。Wang 和 Rogers^[35]是依据爆发性气旋最大加深点的空间分布,对北大西洋的爆发性气旋进行分类,而Yoshida 和 Asuma^[15]是根据爆发性气旋生成和爆发地点位置,对西北太平洋区域的爆发性气旋进行分类。虽然他们的分类依据存在一定的差异,但都将最大加深点作为分类的重要依据。

3 爆发性气旋的气候学特征

3.1 区域分布特征

Sanders 和 Gyakum^[4]对1977—1979年冷季北半球爆发性气旋的气候学特征进行了分析,结果表明,爆发性气旋多发生在海洋上,且频繁发生在太平洋和大西洋的西北部。Roebber^[10]、Rogers 和 Bosart^[22]在统计分析中也发现西北太平洋和西北大西洋为爆发性气旋的频繁发生地。Lim 和 Simmonds^[14]指出,西北太平洋是近年来全球爆发性气旋发生最密集的区域。由于西北太平洋是重要的海上运输航道,爆发性气旋对太平洋沿岸人民的生产生活会产生重要的影响,因此多位学者对西北太平洋爆发性气旋开展了深入的研究。

李长青和丁一汇^[12]对1984年8月—1985年8月发生于西北太平洋的爆发性气旋进行了统计分析,发现大部分气旋爆发集中在 $35^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\text{E}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 的海域。Chen 等^[16]对东亚地区的爆发性气旋进行了统计分析,指出东亚地区有两个爆发性气旋的主要生成地,一是亚洲大陆山区下游,二是东中国海和日本海。Yoshida 和 Asuma^[15]分析认为,西北太平洋地区爆发性气旋的爆发区域主要集中在 $20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 的洋面上。由于各人

所使用的资料和研究区域的不同,导致所得出的西北太平洋爆发性气旋的空间分布特征存在一定的差异,但都指出西北太平洋是爆发性气旋频繁发生的海域。

3.2 季节变化特征

Sanders 和 Gyakum^[4]、Roebber^[10]、Gyakum 等^[11]、Yoshida 和 Asuma^[15]、Chen 等^[16]、Carleton^[38]、Physick^[39]等学者们发现爆发性气旋主要发生在冷季,冷季爆发性气旋爆发频率远大于暖季^[10,16]。Chen 等^[16]对东亚地区1958年—1987年发生的爆发性气旋进行统计,共发现363例爆发性气旋,只有13例爆发性气旋发生于暖季,其余爆发性气旋均发生于冷季。冷季为爆发性气旋的频发季节,同时也发现爆发性气旋的发生频数在冷季存在明显的季节变化特征。

Sanders 和 Gyakum^[4]发现北半球冷季的爆发性气旋主要发生在1月,11月、12月和2月也有较多的爆发性气旋生成,而9月、10月、3月和4月发生个例较少。Chen 等^[16]对东亚地区爆发性气旋发生频数的季节变化特征进行了分析,发现其发生频率有两个峰值,分别在1月和3月,爆发性气旋主要发生在12月—次年3月,其他月份发生得较少。Yoshida 和 Asuma^[15]分析了西北太平洋3类爆发性气旋发生频数的季节变化特征,结果表明,各类爆发性气旋的季节变化特征存在明显的差异,OJ型爆发性气旋多发生于晚秋,频数峰值在11月;PO-L型爆发性气旋多发生于早冬和晚冬,其频数峰值分别在12月和2月;PO-O型爆发性气旋多发生于中冬,其频数峰值在1月。同样由于所使用的资料和研究区域的不同,前人统计的爆发性气旋的季节变化特征存在一定的差异,但均指出爆发性气旋多发生于冷季,并有明显的季节变化特征。

Kouroutzoglou 等^[23]发现由于研究中所用资料的精度不同,会导致爆发性气旋的特征如中心气压加深率、中心最低气压等存在显著的差异,对爆发性气旋的识别也明显不同,利用高精度资料识别的爆发性气旋数量是低精度资料的四倍多。而在前人的统计研究中,发现所使用资料的时间和空间分辨率均较低,且统计的区域多分布于西北太平洋,统计年限较短,研究的年代离现在较为久远。因此,迫切需要利用目前高时间和空间分辨率的资料,对近些年发生于北太平洋的爆发性气旋进行全面统计,以深入认识北太平洋爆发性气旋的气候学特征。

3.3 有利于爆发性气旋发生发展的环境背景场

3.3.1 大气的斜压性

爆发性气旋是温带地区快速发展的气旋,温带地区冷季冷空气较为活跃,冷暖空气在此交汇,使得该地区的大气斜压性较强,为爆发性气旋的急剧发展提供了有利的环境背景场。Yoshida 和 Asuma^[15]对西北太平洋3类爆发性气旋的合成分析表明,亚洲大陆冷空气的入侵有利于爆发性气旋的生成和发展,在爆发性气旋的中低层存在较强的斜压区。李长青和丁一汇^[12]对西北太平洋爆发性气旋大尺度环境背景场的统计分析发现,中低层的斜压性是爆发性气旋急剧发展的有利因素。Iwao 等^[40]分析了冬季西北太平洋30 a 的爆发性气旋的发展过程,发现爆发性气旋发生频率的增加是因为低层大气斜压性的增强。大量的研究表明,爆发性气旋的急剧发展是由大气的斜压性所驱动^[37,41-42]。

3.3.2 高空槽及涡度场

Sanders 和 Gyakum^[4]发现有利于北半球爆发性气旋发展的天气形势主要有以下几种:高空槽追上地面气旋中心、地面低压与高空槽相遇、极地低压与高空槽相遇,表明高空槽与爆发性气旋发生发展有显著的联系,最佳的天气形势配置是地面气旋中心位于高空槽的下游。Sanders^[37]对20个弱、16个中等、12个强爆发性气旋个例进行分析发现,高层正涡度中心在气旋中心气压加深率达到最大值前36 h 甚至提前更长时间出现,上层正涡度中心快速向东移动会促进爆发性气旋的发展,高空槽前气旋式涡度平流有利于爆发性气旋的急剧发展。

3.3.3 高空急流

Sanders 和 Gyakum^[4]发现爆发性气旋多发生于最大西风带上或其北部。Yoshida 和 Asuma^[15]指出3类爆发性气旋的高层均存在较强的高空急流。李长青和丁一汇^[12]发现高空急流出口区的左侧适宜于爆发性气旋的急剧发展。Wash 等^[43]认为高空急流出口区的正涡度切变叠加在地面气旋中心上部,促进了爆发性气旋的急剧发展。大量研究表明,高空急流出口区的左侧存在强辐散场和正涡度平流场^[27,43-45],为爆发性气旋的急剧发展提供了高层动力强迫。

3.3.4 海洋暖流

李长青和丁一汇^[12]研究表明,西北太平洋大部分爆发性气旋是由陆地弱气旋入海经历爆发性增强而形成的,而这一结论在秦曾灏等^[46]的工作中得到验证。大量统计表明西北太平洋爆发性气旋多

发生于黑潮暖流区附近^[4,10-11,15-16]。Sanders 和 Gyakum^[4]指出气旋在经过强 SST (Sea Surface Temperature) 温度梯度区域易获得急剧发展。Chen 等^[16]发现随着爆发性气旋强度的增强,爆发性气旋逐渐集中于黑潮及黑潮延伸体区域。Sanders^[37]研究表明相对于弱和中爆发性气旋,强爆发性气旋在经过暖流区时移动了较长的距离。爆发性气旋在经过暖流区时,暖洋面一方面为大气输送了大量的感热和潜热,另一方面降低了大气的稳定性,促进了气旋的急剧发展^[47-49],海洋暖流为爆发性气旋的急剧发展提供了有利的海洋环境背景场。

4 爆发性气旋的发展机制

4.1 动力不稳定或斜压不稳定机制

Anthes 等^[21]对发生在1978年著名的 Queen Elizabeth II 爆发性气旋进行了诊断分析,指出对低层低层的斜压性是导致其爆发性发展的最主要的因子。Roebber^[10]、Rogers 和 Bosart^[22]、仪清菊和丁一汇^[13]均发现大气斜压性对爆发性气旋的急剧发展起主要作用。赵其庚等^[24]对西北太平洋上1个强爆发性气旋的发展过程进行了诊断分析,指出斜压不稳定在气旋的生成和爆发性加深过程中起重要作用。黄立文等^[50]利用 Lagrangian 型广义 Zwack-Okossi 发展方程对两个发生于西北太平洋地区的温带爆发性气旋进行诊断分析,发现当温度平流、积云对流和湍流加热等反映大气斜压性的热力强迫共同作用使地转相对涡度急剧增长时,气旋便会出现中心气压急剧降低的现象。Kouroutzoglou 等^[23]分析了影响气旋发展的多个因素,表明在爆发性旋生期间强大气斜压性起了决定作用,大气的斜压性是促进爆发性气旋急剧发展的一个重要影响因素。

4.2 潜热释放的作用

Gyakum^[51]和 Kuo 等^[52]学者认为潜热释放在爆发性气旋发展的初期起到了重要作用;Chen 等^[53]的数值试验表明,潜热释放与大尺度系统斜压不稳定的相互作用是爆发性气旋急剧发展的主要原因。丁一汇和朱彤^[54]认为强烈的潜热释放导致气旋式环流加速,从而引发气旋中心气压的急剧降低。周毅等^[55]通过位涡反演发现,气旋爆发阶段凝结潜热释放对低层气旋式环流的增强有重要影响。Kuo 等^[56]、Bosart 和 Lackmann^[57]、Gyakum 和 Danielson^[58]等多位学者研究认为,气旋爆发的海域 SST 略有升高,会使得感热通量和潜热释放增加,为

气旋的爆发性发展提供了重要能量,促进了气旋的爆发性发展。

4.3 正涡度平流的作用

王劲松等^[59]利用 MM4 模式和 Zwack-Okossi 诊断方程,对 1981 年 12 月 20—21 日生成在西北太平洋的一次爆发性气旋进行了数值试验和诊断分析,发现气旋的爆发性加深主要是由正涡度平流和非地转场激发,其中涡度平流对气旋发展贡献最大。Yoshida 和 Asuma^[15]认为亚洲大陆上空的冷气团为爆发性气旋的发展提供了有利的条件,而大尺度的环流条件,例如涡度平流、温度平流以及湿度平流等是影响气旋爆发性加深的主要因素。李长青和丁一汇^[12]、Wash 等^[43]分析指出,北太平洋爆发性气旋多发生于高空急流出口区的左侧,正涡度平流场为爆发性气旋的急剧发展提供了高层动力强迫,中高层的强正涡度平流是促进爆发性气旋急剧发展的重要因素。

4.4 位涡的作用

Uccellini 等^[26]、Bosart 和 Lin^[30]、Zehnder 和 Keyser^[31]、Reader 和 Moore^[32]等多位学者认为,平流层大值位涡(PV)空气的下伸是气旋爆发性加深的一个重要条件,初生气旋逐渐向强位涡区移近并形成上下大值位涡区相接的形势,使得气旋迅速发展。寿绍文和李耀辉^[60]、吴海英和寿绍文^[61]认为具有较高湿位涡的高层冷空气在沿等熵面快速下降的过程中绝对涡度增加,导致气旋性涡旋的发展加强。尹尽勇等^[62]认为高层大值位涡下传激发了气旋性环流,造成了地面气旋的爆发性发展。还有观点认为高低层位涡耦合有利于气旋的急剧发展,Cordeira 和 Bosart^[63]发现温带气旋的爆发性加深是气旋低层的位涡异常与对流层高层位涡扰动(PV disturbance)耦合引发的。赵兵科等^[64]认为,通过垂直平流使高低层大值位涡耦合在一起,从而使气旋迅速发展。高层大值位涡下传及高低层位涡耦合是气旋爆发性发展的有利条件。

4.5 对流层顶折叠的作用

Bleck 等^[25]、Uccellini 等^[26]、Hoskins 等^[28]、Lupo 等^[29]学者认为以气旋上空动力对流层顶折叠(dynamic tropopause folding)和高空急流动量下传为主的上层强迫对气旋的爆发性发展起到重要作用。

4.6 动力强迫的作用

Uccellini 等^[65]指出在高空急流出口区左侧非地转风产生的质量调整,使其下方减压,有利于该区域下方气旋的发展。吕梅等^[66]认为高空急流核

的东传及高空动量的下传加强了低层气旋性涡度切变,使得气旋在中低层得以爆发性加深。Rivière 等^[67]运用 Météo-France Operational 模式对 1999 年 12 月 24—26 日的冬季风暴 Lothar 进行敏感性试验,发现该气旋的突然爆发阶段发生在地面气旋穿越高空急流区的时候,说明高空急流动力强迫对其急剧发展具有重要促进作用。黄彬等^[68]研究发现,气旋的强烈发展与高空急流的相对位置变化及突然增强密切相关。大量统计分析也表明,爆发性气旋多发生在高空急流出口区的左侧,高空急流的动力强迫对爆发性气旋的发展贡献较大。

4.7 SST 的作用

由于爆发性气旋多发生于海上,多位学者认为 SST 或 SST 梯度对气旋的爆发性发展有一定影响,但起重要作用还是决定性作用意见不一致。Sanders 和 Gyakum^[4]发现海上爆发性气旋易发生在强 SST 梯度附近。Hanson 等^[69]和 Sanders^[70]发现气旋的爆发性发展与气旋穿越强 SST 梯度区在统计上有较显著的相关性。Ueda 等^[71]分析发现,SST 在爆发性气旋急剧发展的整个过程中,对垂直运动和降雨有重要影响。Liberato 等^[8]在分析强风暴 Xynthia 时发现,该风暴的水汽源地主要来自一个具有异常高 SST 的海域,证实了亚热带海域 SST 对风暴 Xynthia 的爆发性发展有显著贡献。爆发性气旋多发生于海上,且频发于大西洋和太平洋西北部的暖洋流区域,较暖的洋面向大气输送较大的感热和潜热,为爆发性气旋的急剧发展提供了有利的环境背景场。

4.8 多因子综合作用

多名学者认为影响气旋爆发性加深的因子不是单一的,而是多个因子综合作用的结果。Rausch 等^[72]认为爆发性气旋的发展是对流层中高层的涡度平流、暖平流、非绝热加热、低层静力稳定度、SST 梯度、地面涡度和能量通量等因子共同作用的结果。仪清菊和丁一汇^[13]对黄、渤海区的爆发性气旋进行了诊断分析,认为温度平流、涡度平流、沿岸锋生和高空急流的动力作用对气旋爆发性加深有重要贡献。谢甲子等^[33]认为气旋的爆发性加深是高、低空急流的耦合作用、涡度平流和凝结潜热等因子共同作用的结果。Nesterov^[73]统计分析了东北大西洋 1986—1999 年的爆发性气旋,认为爆发性旋生与大气和海洋的多个因素有关,如北大西洋涛动指数、东大西洋涛动指数、气温、海温、显热和潜热通量等。

5 结论与讨论

本文回顾和总结了前人对爆发性气旋的研究进展,得到的主要结论如下:

1) Sanders 和 Gyakum^[4]首次将爆发性气旋定义为气旋中心气压值(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 hPa/h 的快速发展的气旋。随着资料时间分辨率的提高和对爆发性气旋空间分布特征认识的加深,一些学者修正了该定义中的地转调整纬度和降压时间间隔,使得爆发性气旋的定义更加趋于合理。

2) 为了对爆发性气旋开展更加深入和详细的研究,学者们在强度和区域上对爆发性气旋进行了分类。在强度上主要分为 3 类,分别为弱(1.0~1.2 Bergerons)、中(1.3~1.8 Bergerons)、强(>1.8 Bergerons)爆发性气旋^[37]。在区域分类上,主要是依据爆发性气旋最大加深点的空间分布特征。

3) 大量研究表明爆发性气旋多发生于冷季的洋面上,且频发于太平洋和大西洋的西北部海域。冷季爆发性气旋的发生频数存在明显的季节变化特征,一般是在冬季发生数量较多,而在秋季和春季发生数量较少,但不同区域爆发性气旋发生频数的季节变化特征存在明显的差异。大尺度的大气和海洋环境背景场对爆发性气旋的发生发展和分布具有重要的影响,大气斜压性、中高层正涡度平流和高空急流是有利于爆发性气旋发展的大气物理环境场,海洋暖流为爆发性气旋的发生发展提供了有利的海洋环境背景场。

4) 前人对爆发性气旋的发展机制开展了深入的研究,主要概括为:动力不稳定或斜压不稳定机制,以潜热加热为主过程,以对流层顶折叠、急流动量下传为主的上层强迫过程,平流层高位涡气团入侵过程等理论,还有一类观点认为爆发性气旋的发展是各种物理因子共同作用的结果。

前人对于爆发性气旋的研究成果已较为丰富,但还有很多相关问题没有得到解决。例如,迄今还没有学者给出既能满足高时间分辨率资料的要求、又符合爆发性气旋空间分布特征的定义;前人对北太平洋爆发性气旋的研究主要集中在西北太平洋,对发生于太平洋中部及东部的爆发性气旋研究较少,且在统计分析中使用的资料空间和时间分辨率较低,统计的年限较短,难以给出较为详细的北太平洋爆发性气旋的气候学特征;有关爆发性气旋发展机制的理论名目众多,但这些机制多是由某几个

个例分析而得,且由于研究者们受观测资料时空分辨率不足的限制,以上理论都具有某种程度的推测性。也正是由于上述原因,目前还没有提出较为系统且严谨的针对北太平洋爆发性气旋发展机制的理论。

随着中国经济的高速发展,北太平洋已成为国际航海运输必经的重要战略要地,爆发性气旋对北太平洋沿岸生产、生活和航海运输的影响与日俱增。鉴于北太平洋爆发性气旋的研究中还存在一些亟待解决的问题,因此尽快系统、深入地开展对北太平洋爆发性气旋的气候学特征及发展机理的研究,不仅对于保障海上活动安全具有重要意义,而且对于加深对海上气旋系统运动规律的认识,具有重要的学术和实践价值。

参考文献:

- [1] Jula M. Étude des perturbations cycloniques extratropicales par l'imagerie des satellites [J]. Les Satellites Meteorologiques, Centre National d'Études Spatiales, 1973, 409-422.
- [2] Böttger H, Eckardt M, Katergiannakis U. Forecasting extratropical storms with hurricane intensity using satellite information [J]. J Appl Meteor, 1975, 14(7): 1259-1265.
- [3] Rice R B. Tracking a killer storm [J]. Sail, 1979, 10: 106-107.
- [4] Sanders F, Gyakum J R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb" [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(10): 1589-1606.
- [5] Schneider R S. Large-amplitude mesoscale wave disturbances within the intense midwest extratropical cyclone of 15 December 1987 [J]. Weather and Forecasting, 1990, 5(4): 533-558.
- [6] Fink A H, Brücher T, Ermert V, et al. The European storm Kyrill in January 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2009, 9(2): 405-423.
- [7] Liberato M L R, Pinto J G, Trigo I F, et al. Klaus-an exceptional winter storm over northern Iberia and southern France [J]. Weather, 2011, 66(12): 330-334.
- [8] Liberato M L R, Pinto J G, Trigo R M, et al. Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2013, 13(9): 2239-2251.
- [9] Lamb H, Frydendahl K. Historic storms of the north sea, british isles and northwest Europe [J]. Geographical

- Review, 2005, 13(1-2):224.
- [10] Roebber P J. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112(8): 1577-1589.
- [11] Gyakum J R, Anderson J R, Grumm R H, et al. North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975-1983 [J]. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(6):1141-1155.
- [12] 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.
- [13] 仪清菊, 丁一汇. 黄渤海气旋爆发性发展的个例分析 [J]. *应用气象学报*, 1996, 7(4):483-490.
- [14] Lim E P, Simmonds I. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(9): 2188-2209.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yoshiike S, Kawamura R. Influence of wintertime large-scale circulation on the explosively developing cyclones over the Western North Pacific and their downstream effects [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114 (D13): 267-275.
- [18] 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]. *SOLAS*, 2013, 9(4):1-4.
- [19] Gyakum J R, Roebber P J, Bullock T A. The role of antecedent surface vorticity development as a conditioning process in explosive cyclone intensification [J]. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(8): 1465-1489.
- [20] Bullock T A, Gyakum J R. A diagnostic study of cyclogenesis in the western North Pacific Ocean [J]. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(1): 65-75.
- [21] Anthes R A, Kuo Y-H, Gyakum J R. Numerical simulations of a case of explosive marine cyclogenesis [J]. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(6): 1174-1188.
- [22] Rogers E, Bosart L F. An investigation of explosively deepening oceanic cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 1986, 114(4): 702-718.
- [23] Kouroutzoglou J, Flocas H A, Hatzaki M, et al. On the Dynamics of Mediterranean Explosive Cyclogenesis [M]// *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*. Springer Berlin Heidelberg, 2013:563-570.
- [24] 赵其庚, 仪清菊, 丁一汇, 等. 一个温带海洋气旋爆发性发展的动力学分析 [J]. *海洋学报*, 1994, 16(1):30-37.
- [25] Bleck R. Short-range prediction in isentropic coordinates with filtered and unfiltered numerical models [J]. *Mon Wea Rev*, 1974, 102(12): 813-829.
- [26] Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. The President's 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.
- [27] Uccellini L W, Kocin P J. The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the east coast of United States [J]. *Weather and Forecasting*, 1987, 2(4): 289-308.
- [28] 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.
- [29] Lupo A R, Smith P J, Zwack P. A diagnosis of the explosive development of two extratropical cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(8): 1490-1523.
- [30] Bosart L F, Lin S C. A diagnostic analysis of the Presidents' Day storm of February 1979 [J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112(11): 2148-2177.
- [31] Zehnder J A, Keyser D. The influence of interior gradients of potential vorticity on rapid cyclogenesis [J]. *Tellus A*, 1991, 43(3): 198-212.
- [32] Reader M C, Moore G K. Stratosphere-troposphere interactions associated with a case of explosive cyclogenesis in the Labrador Sea [J]. *Tellus A*, 1995, 47(5): 849-863.
- [33] 谢甲子, 寇正, 王勇. 西北太平洋地区一次爆发性气旋的诊断分析 [J]. *暴雨灾害*, 2009, 28(3):251-276.
- [34] Bergeron T. Reviews of modern meteorology-12: The problem of tropical hurricanes [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1954, 80(344): 131-164.
- [35] Wang C C, Rogers J C. A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: Cyclone structure and evolution [J]. *Mon Wea Rev*, 2001, 129(6): 1481-1499.
- [36] Petty G W, Miller D K. Satellite microwave observations of precipitation correlated with intensification rate in extratropical oceanic cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(6):1904-1911.
- [37] 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.
- [38] Carleton A M. Monthly variability of satellite-derived cyclonic activity for the southern hemisphere winter [J]. *International Journal of Climatology*, 1981, 1(1):21-38.

- [39] Physick W L. Winter depression tracks and climatological jet streams in the Southern Hemisphere during the FGGE year[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1981, 107: 883-898.
- [40] Iwao K, Inatsu M, Kimoto M. Recent changes in explosively developing extratropical cyclones over the winter Northwestern Pacific [J]. *J Climate*, 2012, 25(20): 7282-7296.
- [41] Manobianco J. Explosive east coast cyclogenesis over the west-central North Atlantic Ocean: A composite study derived from ECMWF operational analyses[J]. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(11): 2365-2383.
- [42] Wash C H, Hale R A, Dobos P H, et al. Study of explosive and nonexplosive cyclogenesis during FGGE [J]. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(1): 40-51.
- [43] Wash C H, Peak J E, Calland W E, et al. Diagnostic study of explosive cyclogenesis during FGGE [J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(2): 431-451.
- [44] Cammas J-P, Ramond D. Analysis and diagnosis of the composite of ageostrophic circulations in jet-front systems [J]. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(11): 2447-2462.
- [45] Nakamura H. Horizontal divergence associated with zonally isolated jet steams [J]. *J Atmos Sci*, 1993, 50(14): 2310-2313.
- [46] 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(增刊): 105-110.
- [47] Davis C A, Emanuel A. Observational evidence for the influence of surface heat fluxes on rapid maritime cyclogenesis [J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(12): 2649-2659.
- [48] Kuwano-Yoshida A, Asuma Y. Numerical study of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific region [J]. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(2): 712-740.
- [49] Kuwano-Yoshida A, Enomoto T. Predictability of explosive cyclogenesis over the Northwestern Pacific region using ensemble reanalysis [J]. *Mon Wea Rev*, 2013, 141(11): 3769-3785.
- [50] 黄立文,秦曾灏,吴秀恒,等.海洋温带气旋爆发性发展数值试验[J]. *气象学报*, 1999, 57(4): 410-428.
- [51] Gyakum J R. On the evolution of the QE II storm. I: Synoptic aspects [J]. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(6): 1137-1155.
- [52] Kuo Y H, Reed R J, Low-Nam S. Effects of surface energy fluxes during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the Western Atlantic [J]. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(2): 457-476.
- [53] Chen S J, Dell'osso L. A numerical case study of East Asian coastal cyclogenesis [J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(2): 477-487.
- [54] 丁一汇,朱彤.陆地气旋爆发性加深的动力学分析和数值试验[J]. *中国科学 B 辑*, 1993, 23(11): 1226-1232.
- [55] 周毅,寇正,王云锋,等.气旋快速发展过程中潜热释放重要性的位涡反演诊断[J]. *气象科学*, 1998, 18(4): 355-360.
- [56] Kuo Y H, Low-Nam S. Prediction of nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a regional model [J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 118(1): 3-25.
- [57] Bosart L F, Lackmann G M. Postlandfall tropical cyclone reintensification in a weakly baroclinic environment: A case study of Hurricane David (September 1979) [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(11): 3268-3291.
- [58] Gyakum J R, Danielson R E. Analysis of meteorological precursors to ordinary and explosive cyclogenesis in the Western North Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(3): 851-863.
- [59] 王劲松,丁治英,何金海,等.用 Zwack-Okossi 方程对一次爆发性气旋的诊断分析[J]. *南京气象学院学报*, 1999, 22(22): 180-188.
- [60] 寿绍文,李耀辉.暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析[J]. *气象学报*, 2001, 59(6): 560-568.
- [61] 吴海英,寿绍文.位涡扰动与气旋的发展[J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(4): 509-517.
- [62] 尹尽勇,曹越男,赵伟,等.一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析[J]. *气象*, 2011, 37(12): 1526-1533.
- [63] Cordeira J M, Bosart L F. Cyclone interactions and evolutions during the "Perfect Storms" of late October and early November 1991 [J]. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(6): 1683-1707.
- [64] 赵兵科,吴国雄,姚秀萍,等.2003年夏季梅雨期一次强气旋发展的位涡诊断分析[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1241-1255.
- [65] Uccellini L W, Johnson D R. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms [J]. *Mon Wea Rev*, 1979, 107(6): 682-703.
- [66] 吕梅,周毅,陆汉城.气旋快速发展的机制分析[J]. *气象科学*, 1998, 18(4): 348-354.
- [67] Rivière G, Arbogast P, Maynard K, et al. The essential ingredients leading to the explosive growth stage of the European wind storm Lothar of Christmas 1999 [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2010, 136(648): 638-652.
- [68] 黄彬,陈涛,康志明,等.诱发渤海风暴潮的黄河气旋动力学诊断和机制分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 901-912.

- [69] Hanson H P, Long B. Climatology of cyclogenesis over the East China Sea[J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113(5): 697-707.
- [70] Sanders F. Skill of NMC operational dynamical models in prediction of explosive cyclogenesis [J]. *Weather and Forecasting*, 1987, 2(4): 322-336.
- [71] Ueda A, Yamamoto M, Hirose N. Meteorological influences of SST anomaly over the East Asian marginal sea on subpolar and polar regions: A case of an extratropical cyclone on 5-8 November 2006 [J]. *Polar Science*, 2011, 5(1): 1-10.
- [72] Rausch R L, Smith P J. A diagnosis of a model-simulated explosively developing extratropical cyclone [J]. *Mon Wea Rev*, 1996, 124(5): 875-904.
- [73] Nesterov E S. Explosive cyclogenesis in the northeastern part of the Atlantic Ocean [J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, 35(10): 680-686.