

综述

爆发性气旋研究进展*

傅刚^{1,2}, 鄢坤³, 倪晶¹, 李鹏远¹, 陈莅佳⁴

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院海洋气象学系, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科技中心 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 4. 青岛海洋气象研究院, 山东 青岛 266000)

摘要: 温带气旋是在副热带地区形成的低压天气系统,与热带气旋不同,温带气旋常伴有锋面系统,被认为是中纬度地区日常天气变化舞台上最重要的“演员”,与强风、暴雨和暴雪等极端天气关系密切。在北半球和南半球,它们分别呈逆时针和顺时针方向旋转,在秋冬季节中高纬度海域上空经常出现大量快速增强的温带气旋,被称为“爆发性气旋”。本文是在2017年《爆发性气旋研究的回顾》一文的基础上,综述了2017年以后国内外在爆发性气旋研究领域的最新进展,并对未来研究方向进行了展望。

关键词: 温带气旋; 爆发性气旋; 逆时针旋转; 顺时针旋转

中图分类号: P443

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2024)10-001-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20240269

引用格式: 傅刚, 鄢坤, 倪晶, 等. 爆发性气旋研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(10): 1-12.

Fu Gang, Yan Shen, Ni Jing, et al. Recent advance of explosive cyclone researches[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(10): 1-12.

温带气旋(Extratropical cyclone)是在副热带地区形成的低压天气系统,与在热带地区形成的热带气旋(飓风或台风)不同,它通常伴有锋面。温带气旋在全球许多地区都可发生,特别是在中纬度地区,常伴随强风、暴雨、降雪等恶劣天气。在北半球,温带气旋以逆时针方向旋转,而在南半球则以顺时针方向旋转。Campa和Wernli^[1]指出温带气旋是中纬度每日天气舞台上最重要的“演员”。

1919年,挪威卑尔根学派的重要成员Jacob Bjerknes提出温带气旋模型^[2],这一模型对于理解温带气旋的形成、演变和动力过程具有重要意义。2019年,为纪念温带气旋模型创建100周年及美国气象学会(American meteorology society)诞生100周年,Schultz等^[3]对100多年来人类对温带气旋的研究成果进行了系统回顾与总结。这些成果不仅加深了人们对温带气旋的认识,也为天气预报和气候预测提供了重要的理论支撑。

有一类温带气旋在其快速发展过程中会带来不亚于热带气旋的破坏效果,被称为“爆发性气旋”(Explo-

sive cyclone)^[4]。随着中国经济的高速发展,系统地开展爆发性气旋的研究对于保障海上各种活动的安全越来越具有重要意义。本文在文献[5]的基础上,进一步对此后的爆发性气旋研究进展做重点介绍,并对未来研究方向做出展望。

1 2017年后研究成果概述

1980年,美国麻省理工学院Sanders教授首次给出了爆发性气旋的定义^[4]:若气旋中心海平面气压在24 h内下降24 hPa以上(地转调整到60°N后),即气旋海平面中心气压加深率大于1 hPa/h(定义为1 Bergeron),则该气旋就可被称为“爆发性气旋”。气旋中心海平面气压加深率的 R 计算公式如下:

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

式中: P 为气旋中心海平面气压;“ $t-12$ ”和“ $t+12$ ”分别表示12小时前和后。

虽然学者们给出的“爆发性气旋”定义都强调气旋中心海平面气压的快速下降,如多采用12 h间隔来计

* 基金项目:国家重点研究发展计划项目“全球海洋气象灾害监测预报预警技术及示范应用”(2022YFC3004200);国家自然科学基金面上项目“西北太平洋上空爆发性气旋风场特征的研究”(42275001)资助

Supported by the National Key Research and Development Program of China “Monitoring, Forecasting and Early Warning Technology and Application for Global Marine Meteorological Disaster”(2022YFC3004200); the National Natural Science Foundation of China “Characteristics of Wind Fields Associated with Explosive Cyclones over the Northwestern Pacific”(42275001)

收稿日期:2024-07-01; 修订日期:2024-07-30

作者简介:傅刚(1963—),男,博士,教授,主要研究领域为海洋气象学。E-mail: fugang@ouc.edu.cn

算爆发性气旋中心气压下降率,然而这些定义都没有考虑风速的影响。Fu等^[6]通过对大量爆发性气旋个例的分析,指出爆发性气旋有以下4个主要特征:(1)中心气压快速下降;(2)快速气旋生成;(3)强风;(4)伴随暴雨或暴雪。以上4个特征通常是相互关联的,4个特征中强风是伴随气旋爆发性发展最重要的因素。因此风速作为一个重要因素在爆发性气旋的定义中应予以考虑。Fu等^[6]利用北半球1979—2016年共38 a的ERA-Interim资料,对海面10 m高度上温带气旋风速进行了详细分析,结果表明,虽然部分温带气旋的中心气压加深速率大于1 Bergeron,但有时风速很弱,有的个例的最大风速甚至只有8.2 m/s。修正后的爆发性气旋定义不仅应考虑气旋中心海平面气压要在24 h内下降达到24 hPa以上,而且海面10 m高度上的最大风速要大于17.2 m/s。

傅刚等对2017年前爆发性气旋的研究成果进行了系统总结^[5],这里不再赘述。本文只对2017年后爆发性气旋的研究成果进行回顾。

1.1 国外学者研究成果概况

2012年12月2—3日,黑海和罗马尼亚东海岸受到迅速加深的地中海气旋的影响,气旋形成“后弯”锋面,气旋中心向赤道方向观测到瞬时风速达38 m/s的强风。2019年,Brâncuș等^[7]采用中尺度模式模拟分析了风场的演变过程,探讨了造成强风及其加速的物理过程,并探讨了大气边界层稳定性对强风的相对重要性。气旋中心向赤道方向最大风区空气的来源有两个:第一个与“刺状射流”(Sting jet, SJ)有关,这是一股来自云系中层和“暖输送带”(Warm conveyor belt, WCB)气旋分支下部的下降气流, SJ开始在气旋中心以西下降,结束后弯锋的锋裂尖端;第二个是与“冷输送带”(Cold conveyor belt, CCB)有关的低空气流,起源于气旋中心东北方向,沿着“后弯”锋的冷侧在900 hPa以下移动,最终在冷锋后结束。两股气流都受到气压梯度力的加速,在进入近地面强风区之前, SJ得到的加速度最大。感热通量使大气边界层不稳定,在气旋中心以南接近中性的条件下,有利于向下混合,使下降的空气到达地面。中尺度不稳定性在 SJ 形成中似乎不重要。

2021年, Kang和Son^[8]提出了一种定量评价温带气旋发展过程的新方法,并将其应用于冷季(10月至翌年4月)西北太平洋上空的爆发性气旋。通过对位势涡度(Potential vorticity, PV)趋势方程的反演,量化了不同层次的动力和热力学过程对爆发性气旋发展的贡献。850 hPa地转涡度趋势是气旋发展的量化指标,表明气旋爆发性发展的主导因素是平均纬向流引起的高空PV平流和潜热产生的PV。然而爆发性气旋也会受

到垂直和经向PV平流的阻碍。从数值上看潜热、垂直PV平流和地表温度趋势的热力贡献总和比水平平流的PV再分布对爆发性气旋增强的影响大1.6倍左右。这一结果证实了热力学过程在西北太平洋上空爆发性气旋发展中起主导作用。

水汽源及其对应的温度和湿度变化所伴随的潜热过程对爆发性气旋发展具有重要意义。为了阐明爆发性气旋中的水汽来源和水汽输送过程,2021年, Li等^[9]利用区域谱模式模拟了2014年11月30日一次横跨日本海向极地迁移的爆发性气旋。在气旋的中心区域,在气旋发展过程中发生了水汽源的置换。在初始阶段, WCB将大量来自黑潮的水汽输送到气旋内部区域。在加深阶段, CCB和干侵入分别从西北太平洋和日本海输送了更多的水汽。与局地水汽贡献相比,远距离输送水汽在气旋中心区域内占主导地位。对于加深阶段的锋面系统内的水汽凝结来源,暖锋的水汽凝结主要来自以CCB输送为主的西北太平洋水汽,其贡献了水汽总量的约35.5%。在冷锋和暖锋的水汽凝结中,由西侧副热带输送的黑潮水汽约占32.4%。此外,来自日本海的水汽凝结主要发生在日本西海岸和气旋中心附近。

2022年, Kuwano-Yoshida^[10]利用全球大气再分析数据,研究了冬季北太平洋上空爆发性气旋活动的长期变化。指出1月份的爆发性气旋在1987年前后在中纬度北太平洋中部迅速增加。一些爆发性气旋在中国东海上空形成,然后沿着日本南部海岸移动,后在北太平洋中部爆发性发展。气旋活动的增强伴随着副热带西太平洋和南海、东海在季风北风减弱背景下的快速增暖和湿润,导致对流层下层的大气斜压不稳定增长率和相当位温梯度的增大,为北太平洋风暴路径上游地区的气旋形成创造了有利条件。

2024年, Hans von Storch等^[11]研究指出:风暴(气旋)是影响沿岸人类生活最重要的天气系统,对沿海地区的社会和经济活动产生重要影响。不仅自然科学家在研究风暴(气旋),社会科学家也在研究风暴(气旋)。前者研究风暴的气候学、动力学机制,也研究识别不同类型风暴,如副热带气旋(Subtropical cyclone)、爆发性气旋(Explosive cyclone)、热带气旋(Tropical cyclone)、极地低压(Polar low)、地中海气旋(Medicane)、“豆芽状”气旋(Vb cyclone)和澳大利亚东海岸风暴(Australian east coast low)等。这些风暴(气旋)往往会造成重大物理影响,尤其体现在海浪和风暴潮方面。无论是过去和现在,它们都会造成巨大的生命和财产损失。后者研究风暴造成的社会影响及造成的损失。不同的文化背景和时代,人们对风暴(气旋)的认识是不同的。在21世纪初,气候变化将影响风暴

(气旋)的位置和强度,对社会产生重要影响。在此论文中,作者从风暴(气旋)的名称、类型、演化历史、文化、造成损害、气候学特征、动力学机制、全球范围的地理分布、移动路径、著名历史个例、经济影响等多个角度进行了评述和回顾。

1.2 国内学者研究成果概况

2017年,Zhang等^[12]分析了2000—2015年冷季(10月至翌年4月)北太平洋上空的爆发性气旋,指出把爆发性气旋分为四类更合理,即:“弱气旋”(1.00~1.29 Bergeron)、“中等气旋”(1.30~1.69 Bergeron)、“强气旋”(1.70~2.29 Bergeron)、“超强气旋”(≥2.30 Bergeron)。根据爆发性气旋中心气压最大加深率、位置的地理分布,可把北太平洋上空爆发性气旋划分成五个类型,即:日本-鄂霍茨克海(Japan-Okhotsk Sea, JOS)型、西北太平洋(Northwestern Pacific, NWP)型、中西太平洋(West-Central Pacific, WCP)型、中东太平洋(East-Central Pacific, ECP)型、东北太平洋(Northeastern Pacific, NEP)型爆发性气旋。在北太平洋不同地区,爆发性气旋发生频率有明显的季节变化。NWP型气旋多发生在冬季和早春,WCP和ECP型气旋多发生在冬季,JOS和NEP型气旋多发生在秋季和早春。除了JOS型气旋外,北太平洋上空爆发性气旋发生频率、中心气压平均最大加深速率、发展时长和爆发时长均呈向东减少的趋势,与高空急流、中层正涡度和低层大气斜压性的气候分布相一致。在季节尺度上,爆发性气旋的发生频率和地理分布与高空急流的强度和位置密切相关,也与中层正涡度和低层大气斜压性密切相关。

2017年,Pang和Fu^[13]利用ERA-Interim资料分析了东亚地区上空三个爆发性气旋对流层上层位涡的形态特征,它们的共同特征是在地面气旋中心的南部和东部有一个逆时针旋转的“钩状”高PV带,而在北部缠绕着一个弧形的高PV“钩”,“钩状”高PV“舌”与相对涡度和大气静力稳定度最大值中心相重合。分析表明,当这些气旋发生爆发性发展时,在地面气旋中心上方有一个PV“塔”(Tower)。对流层上层的高PV来源于极地平流层PV库,与对流层“褶皱”(Folding)过程有关。然而对流层下层的高PV值与潜热释放有关,在对流层下层近70%~90%的高PV值区域位于降水量最大区域。

2017年,戴晶等^[14]利用美国国家环境预报中心(National centers for environmental prediction, NCEP)再分析资料和杂合单粒子拉格朗日积分轨迹(Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)模式,对2012年1月1—10日发生在北太平洋上空的一个爆发性“气旋族”进行了研

究,并对“气旋族”的两个主要成员“父气旋”A和“子气旋”B的演变过程和时空结构进行了详细分析,结果表明,在气旋A和气旋B的爆发性发展阶段,200 hPa高空的辐散区向气旋输送正涡度,气旋处于500 hPa大槽前部,系统轴线西倾,低层有强冷平流向气旋中心输送并与锋面结合,温度梯度较大。气旋西侧较强北风携带的冷空气与冷锋前来的暖湿空气相遇,为气旋的发展提供有利条件。从天气形势场看,气旋B爆发性发展主要是依靠气旋A的环流背景场。气旋A在高空为气旋B提供正涡度平流,在低空通过环流将冷空气输送到气旋B内部,使气旋B低层斜压性增加。在气旋A和气旋B向东移动和“互旋”过程中,两者之间水汽输送通道逐步建立。东移过程中,气旋A不断向气旋B输送水汽,使得气旋B系统内部水汽含量增加,为气旋的发展提供能量。利用后向追踪法对气旋B中心附近的空气进行追踪发现,在1000 m以下,来自气旋A的空气占到空气总量的一半以上,故可认为气旋A是气旋B低层水汽来源的主要提供者之一。

2018年,孙雅文等^[15]对2000—2015年冷季(10月至翌年4月)北大西洋上空的爆发性气旋进行了分析,发现北大西洋上空爆发性气旋按中心气压加深率可分为四类,即:“弱气旋”(1.00~1.44 Bergeron)、“中等气旋”(1.45~1.74 Bergeron)、“强气旋”(1.75~2.14 Bergeron)、“超强气旋”(≥2.15 Bergeron)四种类型,这四类爆发性气旋的中心气压加深率数值界限与Zhang等^[12]的结果稍微不同。北大西洋上空爆发性气旋主要发生在四个区域,即:北美大陆区、西北大西洋区、北大西洋中央区和东北大西洋区。整个北大西洋区上空爆发性气旋个数随气旋海平面中心气压最大加深率增大而减少,自西向东气旋强度增强,气旋移动路径呈西南-东北向。

2018年,井苗苗^[16]利用美国NCEP的最终分析(Final analysis, FNL)资料、怀俄明大学网站上的高空气象历史观测资料、全球电信系统(Global telecommunications system)的地面气象历史观测资料以及WRF(Weather research and forecast)-3.5数值模式,对2013年11月日本海上空一个爆发性气旋进行了观测分析与数值模拟研究,详细刻画了该气旋生成时的大尺度环境、发展阶段的机制和成熟时的结构特征。该爆发性气旋于2013年11月9日18 UTC在日本海上空(138°E, 44°N)附近生成,此后向东北方向移动,经过北海道移至鄂霍次克海上空。10日06 UTC,该气旋的海平面中心气压加深率达到2.4 Bergeron。10日12 UTC,气旋中心海平面气压值降到959.8 hPa,此后,气旋在鄂霍次克海上空逐渐衰亡。通过分析红外卫星云图、天气图、测站资料以及PV、 \vec{Q} 矢量、高低空急流和

水汽通量的诊断分析可知,高低空环流形势、PV 分布、 \vec{Q} 矢量分布、高低空急流配置、水汽输送等诸多因素对气旋爆发性发展有重要作用。利用 WRF 模式模拟结果对 PV 倾向方程各项进行了诊断分析,结果表明,PV 水平平流项为正值,且在气旋发展过程中与 PV 局地时间变化趋势一致,对 PV 发展起主要的促进作用。PV 垂直对流项在气旋发展过程中一直为负值,对 PV 发展起抑制作用。非绝热加热项为正值,相对于 PV 的水平平流项数值较小,但在气旋最大加深率时数值增大。

2018 年,陈莅佳等^[17]利用 NCEP 的 FNL 资料、NCEP 气候预报系统第二版(Climat e forecast system version 2, CFSv2)格点资料、以及气象卫星合作研究所(Cooperative institute for meteorological satellite studies, CIMSS)的红外卫星云图资料,对 2015 年 1 月发生在西北太平洋上空的一个爆发性气旋进行了研究,对其演变过程及环流形势进行了分析,并利用卫星云图资料对该气旋发展过程中形成的类似“盘蜷的蛇”状分布的“眼”区结构进行了分析,结果表明,气旋在发展过程中,地面气旋中心位于 500 hPa 槽前,较强的正涡度平流和大气斜压性使得气旋爆发性发展。高空急流的辐散和低空水汽输送也在气旋爆发性发展过程中起到了重要的作用。该气旋在发展过程中出现了与热带气旋相类似的“眼”状结构,在眼区内有“暖心”结构和下沉运动区。在气旋达到成熟前 6 h,卫星云图上在气旋中心出现了轮廓清晰且未闭合的“眼”;在气旋成熟时,云团在“眼”的内部向内旋转数圈形成一个“盘蜷的蛇”状分布,在达到成熟后 10 h 内,350 hPa 上的涡度和位势涡度都出现了与卫星云图相类似的结构。而卫星云图上云系的这种分布可能与高空气旋中心的位势涡度的水平分布有关,也即云系是高空位势涡度的动力学作用的反映。

2018 年,孙柏堂等^[18]利用 NCEP 的 FNL 资料和 WRF 模式,对 2012 年 1 月 11—13 日发生在西北太平洋上空的一个爆发性气旋进行诊断分析和数值模拟研究。气旋于 1 月 11—12 日在日本以东海域上空爆发性发展,经历两次转向后于 13 日在堪察加半岛附近减弱。分析表明,该气旋发展中有明显的锋面结构,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 18 UTC 至 13 日 00 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,但对气旋移动路径影响较小。

2019 年,李昱薇等^[19]利用 NCEP 的 FNL 资料、日本气象厅的多功能运输卫星(Multi-functional transport satellites-1R)红外波段云顶亮温资料、以及 HYS-

PLIT 模式,对 2014 年 12 月 15—18 日发生在西北太平洋上空的一个“气旋对”的演变过程和相互作用进行分析。该“气旋对”由两个气旋 A1 和 B1 组成^①,气旋 A1 在 15 日 00 UTC 生成且在“气旋对”发展初期占主导地位,并为 12 h 后生成的气旋 B1 发展创造有利条件。气旋 B1 生成后发展迅速,后期占据主导地位直至气旋 A1 衰亡。两气旋相互影响,在向东北方向移动的过程中围绕共同中心“互旋”,两者相互吸引靠近,其中心连线逐渐由南北向转为东西向。天气形势分析表明,气旋 A1 在高空为气旋 B1 的发展提供了有利的背景涡度场,在低空通过环流将冷平流输送到气旋 B1 内部,使气旋 B1 的低层斜压性增加,有利于气旋 B1 发展迅速。利用前向轨迹追踪的方法证明在中低层两者之间存在动能传输通道,空气微团从气旋 B1 向气旋 A1 传递,湿焔沿动能通道从南到北向气旋 A1、B1 中心传递。在中后期,两气旋中低层的涡旋强度反向变化,即气旋 A1 的涡度逐渐减小,而气旋 B1 的涡度逐渐增大。经过气旋 A1、B1 中心连线的垂直剖面分析表明,气旋 A1 有利于气旋 B1 发展加强。

2020 年,李昱薇^[20]利用欧洲中期天气预报中心(European center for mediumrange weather forecasts, ECMWF)的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 ERA-Interim 再分析资料, CIMSS 的地球同步运行环境卫星(Geostationary operational environment satellite, GOES)-East 红外卫星云图以及 WRF 模式模拟结果,对 2018 年 1 月 3—6 日发生在北大西洋上空一个具有“T 型”(T-bone)锋面结构的超强爆发性气旋进行分析,结果发现,该爆发性气旋在较暖的湾流上空生成,沿海表面温度大值区向东北方向快速发展,生成后 6 h 内爆发,24 h 中心气压降低 48.7 hPa。高空槽加深、涡度平流加强和低层较强的大气斜压性为气旋快速发展提供了有利的环流背景场。该爆发性气旋属于典型的 Shapiro-Keyser 气旋模型,其冷锋锋面和暖锋锋面断裂,逐渐形成相互垂直的“T-型”结构。由于气旋发展迅速,低层相对涡度迅速增大,低压中心南部,来自西北方向的干冷空气随气旋式环流快速向东推进,与东南暖湿气流汇合,锋生作用较强,冷锋锋区与暖锋锋区逐渐形成相互垂直“T 型”结构。Zwack-Okossi 方程诊断分析表明,非绝热加热、温度平流和正涡度平流是该爆发性气旋发展的主要影响因素。气旋初始阶段,西北冷空气进入温暖的洋面,海洋对位于其上空的大气感热输送和潜热释放较强,非绝热加热对气旋快速发展有较大贡献。气旋进一步发展,冷暖平流作用加强,“T-型”锋面结构显著,温度平流对气旋发展有重要作用。随着气旋继续加深发展,

① 原文中这两个气旋分别标记为 A 和 B。In the original paper the two cyclones were labeled A and B.

平流项对地转涡度倾向的贡献超过非绝热加热项。

2020 年, 张雪贝^[21]利用 ECMWF 的 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的 ERA-Interim 再分析数据、美国国家航空航天局(National aeronautics and space administration, NASA)的对地观测系统的数据信息系统(EOSDIS)极轨卫星云图、CIMSS 的 GOES-East 红外卫星云图等资料以及 WRF 模式模拟结果, 对 2003 年 3 月北大西洋上空两个爆发性气旋(标记为气旋 A2 和气旋 B2)^①“吞并”过程及发展机制进行分析。气旋 B2 吞并 A2 过程经历三个阶段: 吞并前阶段、吞并初始阶段、吞并完成阶段。在吞并过程中, 与气旋 A2 和气旋 B2 相伴随的锋面系统合并, 冷暖锋呈垂直“T-型”形态, 在中心位置形成“暖核隔离”。气旋 A2 和气旋 B2 之间建立水汽输送通道, 水汽从气旋 A2 向气旋 B2 输送。利用 WRF 模式模拟结果分析可知, 高层 PV 大值区呈气旋式的“钩状”分布, 而低层 PV 大值区始终存在于地面气旋中心上空。利用 ω 方程诊断分析发现, 在气旋 B2 吞并气旋 A2 的过程中气旋的快速发展主要由于暖平流作用。

2020 年, 孙柏堂等^[22]利用 FNL 资料、中分辨率成像光谱仪(Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)可见光云图和 CloudSat 卫星数据, 对 2012 年 1 月 10—13 日发生于西北太平洋上空的一个爆发性气旋进行了研究, 并分析了该爆发性气旋在 12 日 02 UTC 的云微物理属性的垂直结构, 结果表明, 该爆发性气旋中心附近的云为深厚宽广的深对流云, 云系向上伸展到 9 km 左右, 云中冰粒子有效半径大小随高度增加而减小, 其大值集中在冰云下部, 而冰粒子数浓度随高度增加而增加, 其大值集中在冰云上部。云中冰水含量随高度变化不明显, 其大值集中在云的中下部。冰粒子有效半径、冰粒子数浓度和冰水含量大值区在气旋中心南侧的高度比北侧更高, 气温高值区和比湿大值区也集中于气旋中心南侧, 这可能与冷暖空气的空间配置及气旋中心南侧有更显著的潜热释放有关。据此可以推测云系在气旋中心南北侧有明显差异可能与云的不同发展机制有关。

2021 年, 倪晶等^[23]利用 ECMWF 的 ERA5 资料、CIMSS 的红外卫星云图资料, 对 2006 年 6 月 14—20 日发生在北大西洋上空的一个爆发性气旋进行分析。该气旋是由经热带风暴阿尔贝托(Tropical storm alberto)变性后发展而来, 是 2000—2016 年的 17 个夏季发生在北大西洋上空的中心气压加深率数值最大的爆发性气旋个例。该气旋的演变过程可划分为初始、发展、成熟和衰亡四个阶段。该文分析了气旋演变过程中的云系特点、气旋爆发前后的高低空环流形势和高低空相互作用, 结果显示, 低层强烈的温度平流导致的大气斜压性是有利于气旋发展的重要环境条件, 500 hPa 槽前

的正涡度平流可为气旋发展提供动力强迫, 高层异常 PV 的下传对气旋发展有促进作用。潜热释放主要发生在对流层中低层, 有利于气旋发展。利用 Zwack-Okossi 方程进行诊断分析表明, 该气旋发展过程中绝对涡度平流项和非绝热项的贡献为正, 且非绝热加热对气旋快速发展的贡献最大, 而温度平流项和绝热项对气旋发展起阻碍作用。

2021 年, 孙柏堂等^[24]利用 FNL 资料, 对西北太平洋上空三个爆发性气旋进行了分析, 即 2007 年 11 月 18—21 日的 OJ(Okhotsk-Japan Sea Type)型, 2012 年 1 月 10—13 日的 PO-O(Pacific Ocean-Ocean Type)型, 以及 2014 年 3 月 28—31 日的 PO-L(Pacific Ocean-Land Type)型, 结果表明, 不同类型气旋由于其发生、发展位置不同使得气旋的水平结构和垂直结构存在差异。利用 WRF 模式的非绝热加热试验表明, 潜热释放和表面热通量对不同类型爆发性气旋个例的贡献不同, 对 PO-O 型和 PO-L 型气旋个例潜热释放的贡献更大, 而对 OJ 型气旋个例表面热通量的贡献更大。海温敏感性试验表明, 海温升高或降低对气旋移动路径影响较小, 海温升高使气旋进一步加深, 而海温降低使气旋相对减弱。

2021 年, 彭永茂等^[25]利用 CloudSat 卫星数据处理中心(CloudSat data processing center, CloudSat DPC)的 CloudSat 卫星数据、ECMWF 的 ERA5 资料、NASA 的 Aqua 卫星可见光云图, 对冬春季发生在大西洋上空 4 个爆发性气旋个例的云微物理参量垂直分布特征进行了分析, 结果表明: 爆发性气旋中心云系多为层积云或积云, 中心外围云系以雨层云为主, 雨层云外部往往伴随着相似高度的高层云, 气旋冷锋云带内以雨层云、高层云和高积云为主, 冰粒子出现的最低高度与 0°C 等温线高度几乎重合。冰粒子有效半径随高度的增加而减小, 而冰粒子数浓度随高度增加而增大。冰水含量大值区主要位于雨层云中上部。液态水主要分布在高层云和层积云底部, 冬季爆发性气旋个例内的液态水含量大于春季。

2021 年, 李燕等^[26]利用常规和加密气象观测资料、NCEP 再分析资料、卫星云图等资料, 对 2010—2019 年春季影响大连温带气旋特征及爆发性气旋造成的极端天气进行分析, 结果表明, 爆发性气旋多发生在春季, 进入到渤海、黄海北部的气旋平均每月有 2.4 个, 气旋一般先进入黄海, 进入黄海和经渤海进入黄海的温带气旋总计有 84.5% 进入黄海北部, 进入黄渤海的约 73% 的气旋会给大连地区带来大风或降水天气, 影响大连东部沿海的几率远高于其他地区。爆发性气

① 原文中这两个气旋分别标记为 A 和 B。In the original paper the two cyclones were labeled A and B.

旋的移动路径基本是由西南向东北方向移动,其发展一般从低层开始,具有较强的锋区和斜压性,爆发阶段位于正涡度平流最大的高空急流出口区,位于低空急流左前方辐合区。较强的冷、暖温度平流是造成极端降水和大风天气的主要因素。暴雨的形成主要是温带气旋带来的暖湿气流持续输送,并伴有较强上升运动促使的水汽垂直输送,整层水汽充沛。当低空急流发展和冷、暖空气交汇时,发生了锋区上的强降水。而当北路强冷空气与黄渤海上空爆发性发展的温带气旋形成较强的气压梯度是出现大风的主要原因。

2021年,宋佳凝^[27]利用拉格朗日气旋追踪方法、ERA5再分析资料、海气耦合模式比较项目第6阶段(CMIP6)的12个全球气候模式(1981—2014年)的模拟结果,分析了北极上空气旋的时空变化特征。通过对比分析12个全球气候模式模拟结果和ERA5资料,评估了气候模式对北极上空气旋的模拟能力,在此基础上,对未来北极上空气旋的变化特征进行了展望,主要结论是:(1)1981—2019年北极内部生成地气旋个数大于外来气旋的个数,北极上空气旋个数在7月份最少,12月份最多,全年北极上空气旋个数有减少趋势。在阿拉斯加湾和大西洋一侧,冬季气旋轨迹密度大于夏季,夏季,北极上空气旋生成的高频区域位于科雷马低地和落基山脉附近。冬季和夏季,北极上空气旋轨迹密度空间分布的差异主要是在格陵兰岛和北冰洋附近。北极上空气旋冬季比夏季的更强、半径更小、移速更快。分析还表明,北极上空气旋个数与北极气温呈负相关关系,在夏季不明显;与海冰面积呈正相关关系,在春季不明显。北极上空气旋个数与大西洋涛动(Atlantic oscillation, AO)、北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)的活动有关。(2)模式评估分析表明,12个全球气候模式及其集合平均能较好地模拟北极上空气旋轨迹密度的空间分布特征。所模拟的冬季北极上空气旋轨迹密度空间分布偏差与全年空间分布偏差相关系数为0.75左右,夏季的空间分布偏差与全年空间分布偏差的相关系数为0.5左右。在冬季,格陵兰岛、北大西洋上空偏差比夏季大。中等分辨率模式通常在模拟北极上空气旋轨迹密度的空间分布特征方面表现更好。对于不同类型的北极上空气旋,模拟外来气旋的效果优于北极内部生成的气旋。(3)对北极上空气旋未来预估分析表明,21世纪末期北极上空气旋个数有减少的可能性。在SSP5-8.5温室气体排放情景下,气旋个数减少可能大于SSP1-2.6温室气体排放情景。在冬季不同排放情景下,北极内部生成气旋和外来气旋个数都有减少的可能性。

2022年3月,傅刚等在《爆发性气旋》一书中首先介绍了爆发性气旋的定义,回顾了爆发性气旋的研究

历史,给出了考虑风速影响的爆发性气旋的新定义。并对1978年发生在北大西洋上空的7个著名的爆发性气旋个例进行了简要介绍;之后以半球为空间尺度,分别介绍了发生在北半球和南半球上空的爆发性气旋空间分布、时间变化、移动路径等统计特征;后以洋盆为空间尺度,分别介绍了发生在北太平洋和北大西洋上空的爆发性气旋的分类、季节变化等特征;最后聚焦到西北太平洋海域,分别介绍了发生在渤海、日本海—鄂霍次克海上空的爆发性气旋典型个例的研究成果^[28]。

2022年,Chen等^[29]利用北极系统再分析-2(Arctic System Reanalysis-2)资料,从两个气旋合并的角度,研究了2012年8月北极地区上空一个著名的“大气旋”(简称AC2)的演变过程。AC2的演变受低层已存在的北极上空气旋(简称AC1)合并过程和两个对流层顶“极地涡旋”(分别记为TPV1和TPV2)的影响。AC2在合并前期(8月5日00 UTC前)发展缓慢,后期(8月5日00 UTC后)发展迅速。利用Zwack-Okossi方程诊断结果表明,在合并前期(两个TPV尚未合并),尽管AC2的增强得益于正涡度平流,但支持AC2发展的暖平流被TPV2阻挡了。受TPV2下方的冷平流和低层气旋环流的共同影响,AC2减弱。在合并后期,由于受到TPV上方的暖平流和暖锋附近低层斜压性增强的共同影响,AC2迅速增强。上下层锋面附近的非绝热加热对AC2发展也起到了重要推动作用。

2022年,倪晶^[30]利用ERA5再分析资料,使用诊断分析与合成分析方法,从个例分析和合成分析的角度出发,探究了大西洋上空具有多种PV形态特征的爆发性气旋的发展机理。以1990年1月27日08时—30日10时发生在北大西洋上空一个爆发性气旋为研究对象,对其进行基本特征分析和诊断分析。结果表明,该气旋发展过程中,高空PV呈现明显的“带”(Streamer)状、“钩”(Hook)状及“高音谱号”(Treble clef)状三种形态依次演变的特征,其海平面中心气压最低值为939.3 hPa,中心气压最大加深率为3.15 Bergeron,该气旋属于“Shapiro-Keyser气旋”模型中的“超强型”爆发性气旋。海洋和大气环境背景场分析表明,海洋暖流、大气斜压性、暖平流及正涡度平流为气旋快速发展提供有利的环境背景,西南低空急流输送的水汽配合上升运动释放凝结潜热促使气旋加强,高空急流为气旋发展提供有利的动力强迫。PV倾向方程诊断分析表明,300 hPa层上,PV水平平流项对PV局地时间变化项起促进作用且占主导地位,PV垂直对流项起阻碍作用,非绝热加热项起较弱的促进作用。850 hPa层上,PV水平平流项起促进作用,在气旋快速发展阶段前期,PV垂直对流项和非绝热加热项起促进作用,在气

旋快速发展阶段后期及成熟阶段, PV 垂直对流项起阻碍作用, 非绝热加热项影响很小。从区域平均的 PV 倾向方程各项的时间-高度剖面来看, PV 局地时间变化项正值区在 700 hPa 以上, PV 水平平流项在 700 hPa 以上为正值, 主要起促进作用, PV 垂直对流项在 400 hPa 以上为负值, 主要起阻碍作用。非绝热加热项在 850 hPa 以下为正值, 主要起促进作用。Zwack-Okossi 方程诊断分析表明, 在气旋快速发展阶段的前期, 绝对涡度平流项和非绝热项促进气旋发展, 温度平流项和绝热项阻碍气旋发展。在气旋快速发展阶段的后期, 温度平流项和非绝热项促进气旋发展, 绝对涡度平流项和绝热项阻碍气旋发展。在气旋的成熟阶段, 绝对涡度平流项、温度平流项和非绝热项均有利于气旋发展, 绝热项仍阻碍气旋发展。另外为揭示高空 PV 具有相似形态演变特征的爆发性气旋的天气形势、结构和发展机制, 对大西洋上 134 个高空 PV 有明显的从 Streamer 到 Hook、再到 Treble Clef 三种形态演变特征的爆发性气旋进行统计, 从中筛选出 48 个爆发性气旋进行合成分析, 结果表明气旋发展初期, 高空 PV 呈“带”状, 气旋快速发展时, 高空 PV 呈“钩”状, 当气旋发展成熟时, 高空 PV 呈“高音谱号”状。PV 倾向方程分析表明, 300 hPa 层上, PV 水平平流项对 PV 局地时间变化项起促进作用, PV 垂直对流项起阻碍作用, 非绝热加热项起较弱的阻碍作用。850 hPa 层上, PV 水平平流项和 PV 垂直对流项起促进作用, 非绝热加热项在气旋快速发展时起促进作用, 当气旋发展成熟时该项较弱。分析区域平均的 PV 倾向方程各项的垂直分布可知, 在对流层高层, PV 水平平流项对 PV 局地时间变化项起促进作用, PV 垂直对流项起阻碍作用, 非绝热加热项的阻碍作用较弱。在对流层中层, PV 垂直对流项起促进作用, 非绝热加热项起阻碍作用, PV 水平平流项的影响较弱。在对流层低层, 非绝热加热项起促进作用, PV 水平平流项和 PV 垂直对流项起阻碍作用。

2022 年, 傅刚等^[31] 利用 ECMWF 的 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 的 ERA-Interim 再分析资料、NASA 的 MODIS 可见光云图、CIMSS 的 GOES-East 红外卫星云图等资料以及 WRF 数值模式模拟结果, 对 2003 年 3 月北大西洋上空一个爆发性气旋 B3 吞并另一个气旋 A3 后快速发展机制进行了分析^①。气旋 A3 和 B3 均生成于美国东部, 气旋 A3 于 2003 年 3 月 5 日 06 UTC 生成, 气旋 B3 于 6 日 00 UTC 生成, 且比气旋 A3 向东北方向移动得更快, 7 日 18 UTC 达到中心气压最大加深率为 3.27 Bergeron。在北大西洋中部地区, 从 8 日 00 UTC 开始, 气旋 B3 吞并气旋 A3 后形成气旋 C3, 8 日 12 UTC 气旋 C3 中心气压达到最小值 938.3 hPa。高空急流、低空水汽输送和潜热释放为气旋 A3 和气旋 B3

的快速发展提供了有利的环流背景场。气旋 B3 吞并气旋 A3 的过程经历三个阶段: 前期阶段、吞并阶段、完成阶段。利用 WRF 模式模拟结果分析表明, 气旋 A3 和 B3 之间建立水汽输运通道, 水汽从气旋 A3 向气旋 B3 输送。气旋 B3 吞并气旋 A3 后形成气旋 C3 快速发展的主要原因是暖平流的作用。

2022 年, 何立富等^[32] 利用地面逐 3 h 常规观测资料、区域自动气象站逐小时观测和人工加密积雪观测资料、FY-4A 气象卫星逐小时分辨率水汽图像以及 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 ERA5 再分析资料, 分析了 2021 年 11 月 7—8 日造成东北极端暴雪的温带气旋结构特征及爆发性发展机制, 结果表明, 温带气旋发生在高空冷涡背景下, 地面气旋在黄海形成后出现爆发性快速增强并沿东北地区东部北上。地面降雪区主要分布在气旋西侧, 且降雪强度与气旋的发生发展密切相关。地面气旋在爆发性发展后由叶状云系演变为逗点涡旋云系, 并表现出明显的锋面断裂和暖锋包卷。其垂直结构也先后出现高空锋区断裂、干暖核形成和中性锢囚锋区加强。

2022 年, 王宁等^[33] 利用 NCEP 再分析资料和 GDAS 的再分析资料、地面观测资料, 运用天气学分析、等熵位涡、物理量诊断和水汽来源追踪等方法, 对 2016 年 5 月 2—4 日一次爆发性气旋发展导致的东北地区暴雨天气过程进行了分析, 结果表明, 位于 40°N 附近的黄淮气旋北上加强, 2 日 14 时—3 日 14 时气旋中心气压下降 24 hPa, 符合爆发性气旋的定义标准。500 hPa 高空槽快速加强发展成为闭合低涡, 低空切变线加强发展为低空低涡, 其东部形成明显的低空急流, 为暴雨提供水汽和热量, 为东北地区典型的暖式切变降水。等熵位涡自 320 K 高层向 305 K 低层输送下传, 并逐步向南向东移动, 高空正位涡的下传促使地面气旋快速发展。水汽主要来源于东海、黄海及西北太平洋。暴雨区与 850 hPa 水汽通量散度的负值区、700 hPa 垂直速度和 850 hPa 绝对涡度大值区较为一致, 强降水区与 850 hPa 相当位温密集带和暖区锋生区相对应。

2022 年, 鄢坤^[34] 利用 CloudSat 卫星资料、MODIS 可见光云图、GOES 红外卫星云图、以及 ERA5 再分析资料, 对 2006 年 12 月 23—26 日发生在东北太平洋上空的冬季爆发性气旋个例 EC1、2013 年 3 月 31—4 月 2 日发生在西北太平洋上空的春季爆发性气旋个例 EC2、2015 年 10 月 24—26 日发生在东北太平洋上空的秋季爆发性气旋个例 EC3 的云的宏观及微物理特性进行分析, 主要结果是: (1) 在气旋爆发性发展阶段, EC1 和 EC2 的云系均出现大面积的深对流云, 云系内

① 原文中这三个气旋分别标记为 A、B 和 C。In the original paper the three cyclones were labeled A, B and C.

有大面积的雷达反射率大值区,云内冰粒子可以上升到更高高度,并在云系顶部聚集,不同水凝物的含量大于其成熟阶段的含量。在气旋成熟阶段,EC1、EC2 和 EC3 云系均呈现逆时针旋转的“螺旋”状分布,且气旋中心有清晰的“眼”状结构。“眼”区附近云系高度要小于其外围云带的高度,“眼”区云系主要为雨层云、积云和层积云,云内有狭窄的雷达反射率大值区,表明“眼”区云系内有对流。外围云带主要为大面积的雨层云,雨层云内有雷达反射率大值区,冰粒子数浓度在云系内部出现大值区,但二者的数值小于爆发性发展阶段深对流云和雨层云内部的数值。(2)对于较高云系的冰相水凝物,CloudSat 卫星观测数据与 ERA5 数据给出的结果较为相似,但 CloudSat 观测数据可以描述云微物理特性的更多细节(如狭窄的对流区)。而对于液相水凝物,CloudSat 观测数据和 ERA5 数据差别较大。对于“眼”区范围较小的云系仅有 CloudSat 可以观测到其内部水凝物含量的分布特征。(3)在 EC1 和 EC2 爆发性发展阶段,低空急流将暖湿空气不断输送到气旋中心,垂直运动将低空辐合的水汽不断抬升到更高高度,上升气流将冰粒子不断向高层输送,使其在高空聚集,为产生雪水、雨水提供充足的条件。高空急流附近较强的辐散与低空急流附近较强的辐合相互配合增强了气旋内部的垂直运动,促进了深对流云和雨层云的产生。同时,根据云系内不同水凝物的垂直分布特征可知,在爆发性发展阶段,云系内不同区域的微物理过程及其分布差异有利于潜热释放,对促进爆发性气旋的发展及后续形成“眼”状结构具有重要作用。

2023 年,吕润清等^[35]利用 ECMWF 的 ERA5 再分析数据,对比分析了 2020 年 7 月淮河上游地区的两次江淮气旋过程,并利用海洋-大气-波浪-泥沙耦合模式(Coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport modeling system)进行敏感性试验,探讨同一气候尺度背景下高低频大气环流形势和海气耦合作用对江淮气旋的影响,结果表明,低空大气环流形势的高频变化和表温度的升高对气旋发展有重要影响。低空环流中存在“气旋-反气旋-气旋”环流天气尺度波列,易造成气旋大风叠加增强。海气交界面的海表温度加热作用导致的感热和潜热释放通过气旋北部弯曲锋面伴随的较强上升运动为气旋发展提供能量,使气旋入海后爆发性发展。

2023 年,王彬等^[36]利用再分析资料和 WRF 模式,对 2020 年 7 月 22—24 日发生在黄海海域上空的一个爆发性气旋进行了研究,并对其演变过程和发展机制进行了详细分析。该气旋 22 日 12 UTC 在山东南部生成,入海后开始爆发性发展,中心气压最大加深率达到 1.2 Bergeron,23 日在黄海中部气压降至 990 hPa 左

右,24 日在韩国登陆。高空强辐散、低层的暖舌结构、水汽输送和下垫面热通量的变化增强了大气斜压性,使其迅速发展。利用 WRF 模式对该气旋进行数值模拟,涡度诊断分析表明,大气低层强斜压性主要通过涡度方程的散度项对气旋发展起作用,对流项在涡度发展旺盛的时刻也有一定影响。敏感性海温试验表明,海温变化对气旋移动路径和中心气压影响明显。

2023 年,陈莅佳^[37]利用 ECMWF 的 ERA5 再分析数据、NCEP 的地面观测资料、NASA 的 MODIS 观测数据、以及 NOAA 的 GOES 卫星观测数据,对 1979—2016 年共 38 a 的冷季(10 月翌年 3 月)北半球的爆发性气旋场结构进行了系统分析。在北半球的冷季,爆发性气旋频繁发生在大洋上空。利用 ERA5 再分析数据对北大西洋(90°W—45°E,20°N—80°N)和北太平洋(115°E—110°W,20°N—80°N)上空的爆发性气旋进行统计,发现 38 a 的冷季两大洋上空共发生了 4 652 个爆发性气旋,其中在北大西洋上空有 1 926 个,在北太平洋上空有 2 726 个。对爆发性气旋引起的近表面大风事件进行统计分析,讨论了两大洋上空大风事件的时空分布特征,结果表明,在所有天气系统引起的近表面大风事件中,爆发性气旋引起的近表面大风事件比例在两大洋上均达到了 30% 以上。在北大西洋上空大风事件主要集中于北美大陆以东和格陵兰岛东南部海域。在北太平洋上空大风事件则主要集中在北太平洋中部海域。在两大洋上空,大风事件的主要风向具有相似的特征:在大洋中部的大风事件以西风为主,在大洋的北部以东风、东南风为主,在大洋的西部以北风、西北风为主,在大洋的东部以南风、西南风为主。两大洋上空的大风事件在进入冷季后数量逐月增多,在 12、1 月份大风事件数量达到最多后逐月减少。在年际尺度上,两大洋上空的大风事件均有逐年增多的趋势,且北太平洋上空的大风事件有 1.2 和 2.3 a 的显著周期。

陈莅佳^[37]对爆发性气旋生命演化过程中的 6 个关键时刻的物理量进行合成分析,结果表明,在气旋快速发展的前期,在爆发性气旋中心附近有两个主要大风区:一个位于气旋中心的东南侧,气旋的冷锋前、暖锋后的暖湿空气中,并伴有较强的上升运动;该大风区由 WCB 造成,从对流层中层向下延伸至近表面,且在近表面形成了大风区;另一个大风区位于气旋中心的西侧、后弯锋的南端。该大风区由 CCB 造成,位于对流层低层 800 hPa 以下,也在近表面形成了大风区。在气旋快速发展的后期,对流层低层 CCB 的风速逐渐增强,在气旋中心西南侧近表面引起了较强的大风。此时在后弯锋南端的锋消区,在对流层低层相对湿度较大的气旋云系内出现了显著的下沉运动,表明在此处可能有 SJ,该气流在 CCB 的前部下沉到近表面形成大风。

陈莅佳^[37]利用 ERA5 再分析数据分析了 2011 年 2 月和 2014 年 2 月北大西洋上的两个爆发性气旋中心附近的环流结构, 采用轨迹追踪方法成功识别出了 SJ, 证实了 ERA5 数据可以较好地刻画中尺度气流 SJ。对造成近表面大风的气流进行统计的结果表明, 由 CCB 单独造成近表面大风的爆发性气旋大约占 71.1%, 其次为 CCB 和 WCB 联合造成近表面大风的气旋(约占 21.4%)。对不同等级的爆发性气旋分别统计发现, CCB 在 WCB 和 SJ 三支气流联合作用下形成的近表面风速更大。

陈莅佳^[37]还指出, 爆发性气旋快速发展过程对近表面大风形成起到了重要作用。WCB 通过在气旋中心东北侧的暖锋处引发暖平流, 输送暖湿水汽在气旋中心北侧抬升并释放潜热, 促使气旋中心气压快速降低, 并在气旋中心的西北侧形成了气压梯度大值区。CCB 在经过此处时, 受到气压梯度力的影响而加速, 在气旋中心的西南侧形成近表面大风。同时气压梯度力也使得位于气旋云系内的 SJ 在下沉过程中加速, 当其到达近表面时在 CCB 前端形成大风。

2023 年, 凡曦等^[38]利用 CloudSat 卫星数据处理中心(CloudSat data processing center, CloudSat DPC)的 CloudSat 卫星资料、ECMWF 的 ERA5 再分析资料、NASA 的 Aqua 卫星可见光云图, 对 2019 年 2 月 28—3 月 5 日发生在西北太平洋上空一个爆发性气旋个例在四个阶段云系的宏观形态和微物理学特征进行了分析, 结果表明, 自爆发性气旋的发生至消亡阶段, 云的宏观形态先从不规则形状发展成紧凑的螺旋状, 随后云系面积逐渐扩大直至消散。爆发性气旋在不同阶段, 云的微物理学特性的水平分布特征较为一致, 但其他方面却存在较大差异。在气旋成熟阶段, 在其中心北部云的冰水路径和雪水路径有一个大值中心, 与“暖核”位置相对应, 但液态水路径无大值中心, 云的雨水路径的大值则主要分布于气旋南部和东部。爆发性气旋在不同阶段, 云的微物理学特性垂直分布有如下特征: 云的冰水含量分布呈“三层模型”分布, 但云的其他微物理量随高度增加逐渐减小。总体而言, 爆发性气旋在不同阶段的云系呈现“零散”至“规则”再到“零散”的分布特征。

2024 年, Zhang 等^[39]研究了 1979—2020 年共 42 a 的冷季(10 月至翌年 4 月)黑潮/黑潮延伸区上空的爆发性气旋, 揭示了不同阶段关键因子的变化规律。爆发性发展初期, 低空大气斜压性弱, 中层气旋涡度平流强, 低空水汽辐合强。在最大加深速率阶段, 低层大气斜压性和中层气旋涡度平流显著增加。利用 Zwack-Okossi 方程分析表明, 非绝热加热是该 EC 初始快速强化的主要贡献者。气旋涡度平流和暖空气平流在对

流层中高层快速增强, 并对最大快速增强有贡献, 而对流层中低层的非绝热加热略有减弱。由于其他因素(气旋涡度平流和暖空气平流)的增强, 非绝热加热的相对贡献从爆发性发展初期到最大加深速率阶段逐渐减小。此外随着爆发性发展阶段的不同, 导致这种爆发性发展物理因素也有所不同。

2024 年, 彭永茂^[40]利用 ECMWF 的 ERA5 客观再分析资料、NASA 的 MERRA-2(The modern-era retrospective analysis for research and applications-version 2)再分析资料、MODIS 卫星云图以及全球降水测量计划(Global precipitation measurement, GPM)的降水数据, 对 2016 年 1—2022 年 12 月的各年冷季(10 月至翌年 3 月)在北太平洋(110°E—100°W、20°N—65°N)上空发生的与爆发性气旋相关联的“大气河”(Atmospheric river)特征进行了分析。结果发现, 共有 118 个与爆发性气旋相关联的“大气河”发生, 其中“强(1.70~2.29 Bergeron)”爆发性气旋和“超强(>2.30 Bergeron)”爆发性气旋占比约为 77.1%, 无“弱(1.00~1.29 Bergeron)”爆发性气旋, 表明“大气河”的存在往往会导致气旋更快速地发展。研究还发现, “大气河”主要发生在西北太平洋附近上空, 对东亚沿岸和附近海域造成严重影响。对 118 个与爆发性气旋相关联的“大气河”合成后的结构和特征进行分析, 结果显示, “大气河”主要位于 600 hPa 以下的对流层低层, 与冷锋前的低空急流位置几乎重合。在系统演变过程中, “大气河”始终位于气旋中心的东南侧, 但伴随系统发展, “大气河”中心与气旋中心逐渐分离, 即, “大气河”向东南方向移动, 逐渐远离气旋中心, 后气旋与“大气河”都逐渐开始减弱直至消亡。在气旋中心气压加深率最大时刻, “大气河”内水汽输送强烈, 气旋中心和“大气河”内部上升运动明显, 并伴随强烈潜热释放。“大气河”为潜热释放提供充足的水汽条件, 而锋面系统提供抬升条件, 可使得气旋在短时间内快速发展。为进一步探究“大气河”结构及其与气旋爆发性发展的联系, 研究还对 2020 年 12 月一个与爆发性气旋相关联的“大气河”个例进行诊断分析, 结果显示与高空槽相关的涡度平流、高层位涡下传和潜热释放等对气旋爆发性发展都有着积极作用。其中低层辐合和高空辐散引起的上升运动及其在 600 hPa 附近导致的强烈潜热释放可能是气旋爆发性发展的重要因素。最后利用 WRF 模式和 WRF-WVTs 水汽标记工具, 定量分析了在该“大气河”个例中“热带水汽”对“大气河”形成的贡献以及“大气河”对“热带水汽”的输送情况。

2 总结与讨论

虽然挪威卑尔根学派提出的温带气旋模型已经过

去一百多年了,但人们一刻也没有停止对这类气旋,特别是对爆发性气旋探究的步伐。本文在首先介绍了“爆发性气旋”这一术语产生的历史背景后,综述了2017年以来国内外学者对爆发性气旋的研究成果,探讨了物理过程、水汽来源等对气旋发展的影响,介绍了国外学者分析地中海气旋强风机制、提出量化温带气旋发展的新方法等,评述了国内学者对北太平洋爆发性气旋的4种分类,研究其时空分布特征及其与大气环境的关系,分析指出其地理分布与高空急流、中层正涡度和低层大气斜压性有密切相关性。此外还介绍了学者们利用多种数据和方法对东亚地区爆发性气旋的位涡特征进行的分析。这些研究为理解和预测爆发性气旋活动提供了重要参考。

未来数十年,关于爆发性气旋的研究有望在以下三个方面取得重要进展:

(1)发现更多观测事实。随着搭载许多新型探测仪器的多颗观测卫星的相继发射,使得人们从空中观测爆发性气旋、发现更多观测事实成为可能。这必将使人们获得更多的、更丰富多彩的关于温带气旋多物理量和化学成分水平分布和垂直结构的知识。如欧洲的气象业务卫星(Meteorological operational satellite)、美国NASA的国家极轨运行环境卫星系统筹备工程(National polar-orbiting operational environmental satellite system preparatory project)卫星和VIIRS观测数据、中国的风云系列FY-4A卫星、云海二号卫星、高分十三号卫星等,加之以前就有的CALIPSO和CloudSat资料。

(2)认识水平进一步提高。高时空分辨率资料与人工智能(AI)技术相结合,可极大地提高人们对各种天气系统的认识水平,发现新现象的可能性被大大提高,温带气旋的概念模型被更新的可能性也被提高,甚至有可能产生所谓的“新天气学(New Synoptic Meteorology)”。

(3)利用更多技术手段研究爆发性气旋。有研究表明,在全球变暖背景下,热带气旋将变得更强、更大、更具破坏性。在全球气候变化的大背景下,爆发性气旋的强度、数量、移动路径将呈现怎样的变化趋势也是一个重要问题。未来研究人员不但会利用考虑了各种物理过程和物理方案的大气数值模式以及快速更新循环的四维变分同化(4DVar)技术,大大提高对温带气旋数值模拟和预报的精度,而且还会利用各种气候模式以及各种海-陆-气-冰耦合模式,研究全球气候变化背景下爆发性气旋的变化趋势,这方面的研究可借鉴研究热带气旋等其他天气系统的研究方法和手段,有望获得重要研究进展。

参考文献:

- [1] Campa J, Wernli H. A PV perspective on the vertical structure of mature midlatitude cyclones in the northern hemisphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(2): 725-740.
- [2] Bjerknes J. On the structure of moving cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 1919, 47(2): 95-99.
- [3] Schultz D M, Bosart L F, Colle B A, et al. Extratropical cyclones: A century of research on meteorology's centerpiece[J]. *Meteorological Monographs*, 2019, 59: 1-16.
- [4] Sanders F, Gyakum J R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb"[J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(10): 1589-1606.
- [5] 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 G, Zhang S Q, Pang H J, et al. Review of researches on explosive cyclones[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, 37(1): 10-19.
- [6] Fu G, Sun Y W, Sun J L, et al. A 38-year climatology of explosive cyclones over the northern hemisphere[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(2): 143-159.
- [7] Brăncuș M, Schultz D M, Antonescu B, et al. Origin of strong winds in an explosive Mediterranean extratropical cyclone[J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(10): 3649-3671.
- [8] Kang J M, Son S N. Development processes of the explosive cyclones over the northwest Pacific: Potential vorticity tendency inversion[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78(6): 1913-1930.
- [9] Li X, Kawamura R, Sugimoto A, et al. Estimation of water origins within an explosive cyclone over the Sea of Japan using an isotopic regional spectral model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 22(11): 2825-2841.
- [10] Kuwano-Yoshida A, Okajima S, Nakamura H. Rapid increase of explosive cyclone activity over the midwinter north Pacific in the late 1980s[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(3): 1113-1133.
- [11] von Storch H, Feser F, Blender R, et al. Storms as forming and threatening factors for coasts[J]. *Oxford University Press Research Encyclopedia on Climate Change*, 2024, DOI: 10. 1093/acrefore/9780190228620. 013. 853.
- [12] Zhang S Q, Fu G, Lu C G, et al. Characteristics of explosive cyclones over the northern Pacific[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(12): 3187-3210.
- [13] Pang H J, Fu G. Case study of potential vorticity tower in three explosive cyclones over eastern Asia[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(5): 1445-1454.
- [14] 戴晶, 傅刚, 张树钦, 等. 北太平洋上一个爆发性气旋族的结构分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1): 17-25.
Dai J, Fu G, Zhang S Q, et al. Analyses of a family of explosive cyclones over the Northern Pacific[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(1): 17-25.
- [15] 孙雅文, 傅刚, 张树钦. 北大西洋上空爆发性气旋的统计特征[J]. *气象学报*, 2018, 76(2): 169-181.
Sun Y W, Fu G, Zhang S Q. Statistical characteristics of explosive cyclones over the Northern Atlantic[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(2): 169-181.

- [16] 井苗苗. 2013 年 11 月一个日本海上空爆发性气旋的观测与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.
Jing M M. Observational Analyses and Numerical Simulation of an Explosive Cyclone over the Japan Sea in November 2013[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018.
- [17] 陈莅佳, 傅刚. 2015 年 1 月西北太平洋上一个爆发性气旋“眼”的结构分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(12): 7-14.
Chen L J, Fu G. Analyses of “eye” of an explosive cyclone over the Northwestern Pacific in January 2015[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(12): 7-14.
- [18] 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 B T, Wang G L, Li P Y, et al. Diagnostic analysis and sensitivity test of an explosive cyclone over Northwestern Pacific[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 34-42.
- [19] 李昱薇, 傅刚. 2014 年 12 月西北太平洋上一爆发性“气旋对”的分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 7-15.
Li Y W, Fu G. Analyses of a pair of explosive cyclones over the Northwestern Pacific in December 2014[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(1): 7-15.
- [20] 李昱薇. 2018 年 1 月北大西洋上一个具有“T-型”锋面结构的超强爆发性气旋的分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.
Li Y W. Analyses of a Super Explosive Cyclone with Frontal “T-bone” Structure over the Northern Atlantic in January 2018[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.
- [21] 张雪贝. 2003 年 3 月北大西洋上两个爆发性气旋“吞并”过程及发展机制分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.
Zhang X B. Analyses of Swallowing Process and Development Mechanism of Two Explosive Cyclones over the Northern Atlantic in March 2003[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.
- [22] 孙柏堂, 李鹏远, 傅刚. 2012 年 1 月西北太平洋上一个爆发性气旋的云微物理属性垂直结构分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 11-18.
Sun B T, Li P Y, Fu G. Vertical structure of cloud microphysical properties of an explosive cyclone over the Northwest Pacific in January 2012[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(5): 11-18.
- [23] 倪晶, 傅刚. 2006 年 6 月北大西洋上热带风暴 Alberto 变性后爆发性发展机理分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 8-23.
Ni J, Fu G. Analyses of the explosive development of tropical storm Alberto after its extratropical transition over the Northern Atlantic in June 2006[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(3): 8-23.
- [24] 孙柏堂, 李鹏远, 时晓曦. 西北太平洋上三个爆发性气旋的对比分析和数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(7): 18-33.
Sun B T, Li P Y, Shi X M. Comparative analyses and numerical modeling study of three explosive extratropical cyclones over the Northwestern Pacific[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(7): 18-33.
- [25] 彭永茂, 傅刚, 鄢坤, 等. 大西洋上四个爆发性气旋的云微物理参量垂直分布特征分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(3): 24-39.
Peng Y M, Fu G, Yan S, et al. Vertical distribution characteristics of cloud microphysical parameters associated with four explosive cyclones over the Atlantic Ocean[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(3): 24-39.
- [26] 李燕, 赛瀚, 黄艇, 等. 2010—2019 年春季影响大连的温带气旋特征及爆发性气旋成因分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(6): 53-61.
Li Y, Sai H, Huang T, et al. Characteristics of extratropical cyclones affecting Dalian and causes of outbreak cyclones in spring during 2010 to 2019[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(6): 53-61.
- [27] 宋佳凝. 全球变暖背景下北极气旋变化特征及未来趋势预估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2021.
Song J N. Characteristics of Arctic Cyclone Changes and the Projection of Their Future Trends under the Global Warming[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2021.
- [28] 傅刚, 张树钦, 孙雅文, 等. 爆发性气旋[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Fu G, Zhang S Q, Sun Y W, et al. Explosive Cyclone[M]. Beijing: China Science Press, 2022.
- [29] Chen L J, Fu G, Li P Y. A new perspective on the development of the great Arctic cyclone in August 2012[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127: e2022JD036818.
- [30] 倪晶. 大西洋上具有多种涡旋形态特征的爆发性气旋的发展机理[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2022.
Ni J. Development Mechanism of Explosive Cyclones with Various Morphological Features of Upper-Level Potential Vorticity over the Atlantic Ocean[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2022.
- [31] 傅刚, 张雪贝, 孙柏堂, 等. 2003 年 3 月北大西洋上两个爆发性气旋的“吞并”过程及发展机制分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 8-27.
Fu G, Zhang X B, Sun B T, et al. Analyses of swallowing process of two explosive cyclones over the Northern Atlantic in March 2003[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(3): 8-27.
- [32] 何立富, 齐道日娜, 余文. 引发东北极端暴雪的黄渤海气旋爆发性发展机制[J]. 应用气象学报, 2022, 33(4): 385-399.
He L F, Chyi D, Yu W. Development mechanisms of the Yellow Sea and Bohai Sea cyclone causing extreme snowstorm in Northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(4): 385-399.
- [33] 王宁, 马梁臣, 霍也. 一次爆发性气旋引发东北地区暴雨成因分析[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(3): 19-28.
Wang N, Ma L C, Huo Y. Analysis of rainstorm caused by an explosive cyclone in Northeast China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2022, 38(3): 19-28.
- [34] 鄢坤. 北太平洋上爆发性气旋云的微物理特性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2022.
Yan S. Microphysical Features of Clouds associated with Explosive Cyclones over the Northern Pacific Ocean[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2022.
- [35] 吕润清, 陈小宇, 韩桂荣, 等. 2020 年 7 月两次入海江淮气旋爆发性与非爆发性发展特征对比分析[J]. 气象科学, 2023, 43(5): 612-623.
Lü R, Chen X Y, Han G R, et al. Comparing the explosive and

- non-explosive developing characters of two Jiang-huai cyclones entering the sea in July 2020[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2023, 43(5): 612-623.
- [36] 王彬, 孙雅文, 陈胜舰, 等. 一次黄海爆发性气旋的观测分析和数值模拟研究[J]. *海洋通报*, 2023, 42(5): 517-526.
Wang B, Sun Y W, Chen S J, et al. Observational analyses and WRF numerical modeling of an explosive cyclone over the Huang-hai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(5): 517-526.
- [37] 陈莅佳. 北半球爆发性气旋的风场结构及其强度分级[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2023.
Chen L J. Wind Structures Associated with Explosive Cyclones over the Northern Hemisphere and Their Intensity Grading[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2023.
- [38] 凡曦, 赵雅楠, 邓云馨, 等. 西北太平洋上一个爆发性气旋的云系特征分析[J]. *气候变化研究快报*, 2023, 12(6): 1089-1106.
Fan X, Zhao Y N, Deng Y X, et al. Characteristics of clouds associated with an explosive cyclone over the northwestern Pacific Ocean[J]. *Climate Change Research Letters*, 2023, 12(6): 1089-1106.
- [39] Zhang S Q, Liao Q, Liu C. et al. Diagnostic study of an extreme explosive cyclone over the Kuroshio/Kuroshio extension region [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2024, 23: 605-617.
- [40] 彭永茂. 北太平洋上空与爆发性气旋相关联的“大气河”特征分析和数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2024.
Peng Y M. Analyses and Numerical Modeling Study of Atmospheric Rivers Associated with Explosive Extratropical Cyclones over the Northern Pacific Ocean[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2024.

Recent Advance of Explosive Cyclone Researches

Fu Gang^{1,2}, Yan Shen³, Ni Jing¹, Li Pengyuan¹, Chen Lijia⁴

(1. Department of Marine Meteorology, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 3. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 4. Qingdao Joint Institute of Marine Meteorology, Qingdao 266000, China)

Abstract: Extratropical cyclones are low-pressure systems formed in the Earth's atmosphere in subtropical regions. Unlike tropical cyclones, extratropical cyclones are often accompanied with frontal systems, and are regarded as the most important “actors” on the daily weather stage in the mid-latitude regions. They are usually linked with extreme weathers such as strong winds, heavy rainfalls and snowfalls. In the northern and southern hemispheres, they rotate in counterclockwise and clockwise directions, respectively. In autumn-winter season, there usually occurred a great number of rapidly-intensifying extratropical cyclones over the middle- high-latitude oceans. They were termed as “explosive cyclones” with less public attention. Following the paper “Review of Researches on Explosive Cyclones” in 2017, this paper focuses on the recent advance of explosive cyclone researches after 2017. Finally, we look forward the future prospects of explosive cyclone research.

Key words: extratropical cyclones; explosive cyclones; counterclockwise rotation; clockwise rotation

责任编辑 庞旻