

傅刚,陈莅佳,李鹏远,等,2021.爆发性气旋的前世今生[J].气象,47(3):261-273. Fu G, Chen L J, Li P Y, et al, 2021. Explosive cyclones: past, present, and future[J]. Meteor Mon, 47(3): 261-273 (in Chinese).

爆发性气旋的前世今生^{*}

傅 刚¹ 陈莅佳¹ 李鹏远¹ 庞华基² 张树钦³

¹ 中国海洋大学海洋气象学系, 青岛 266100

² 青岛市气象局, 青岛 266003

³ 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东湛江 524088

提 要: 温带气旋是中纬度地区每日天气舞台上最重要的“演员”。在秋冬季节的中高纬度海洋上有一类快速发展的温带气旋——“爆发性气旋”, 尚未受到公众的广泛关注。文章围绕这一主题, 首先回顾了温带气旋研究的历史, 介绍了“爆发性气旋”这一术语产生的渊源, 并对多位学者给出的爆发性气旋定义进行了系统梳理, 重点介绍了一个考虑风速影响的、修正的爆发性气旋定义, 还总结了爆发性气旋的研究现状, 最后对其未来数十年的研究前景进行了阐述展望。

关键词: 爆发性气旋, 挪威气旋模型, 发展机制, 未来前景

中图分类号: P447, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.001

Explosive Cyclones: Past, Present, and Future

FU Gang¹ CHEN Lijia¹ LI Pengyuan¹ PANG Huaji² ZHANG Shuqin³

¹ Department of Marine Meteorology, Ocean University of China, Qingdao 266100

² Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003

³ College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088

Abstract: Extratropical cyclones are the most important “actors” in the daily weather stage in mid-latitude region. In autumn-winter season, a great number of rapidly intensifying extratropical cyclones occur over the mid- and high-latitude oceans, termed as “explosive cyclones”, which have received less public attention. Regarding to the theme “explosive cyclone”, this paper firstly reviews the historical background of researching extratropical cyclone, and then introduces the origin of the term “explosive cyclone”. The definitions of explosive cyclones given by several scholars are systematically analyzed. A modified definition of explosive cyclone considering the influence of strong winds is emphatically introduced. In addition, the current research status of explosive cyclones is summarized systematically. Finally, the future outlook of explosive cyclone study in next few decades is prospected.

Key words: explosive cyclone, Norwegian cyclone model, intensifying mechanism, future outlook

引 言

自 20 世纪初 Bjerknes(1919)提出了极锋理论/气旋模型以来, 温带气旋(extratropical cyclone)已

经受到了一个多世纪的广泛关注。2019 年, 为纪念挪威卑尔根学派(Bergen School of Meteorology in Norway)创建温带气旋模型 100 周年, 及美国气象学会(American Meteorology Society)诞生 100 周年, 英国曼彻斯特大学的 David M. Schultz 教授和

^{*} 国家自然科学基金项目(41775042)资助

2021 年 2 月 1 日收稿; 2021 年 3 月 2 日收修定稿

第一作者: 傅刚, 主要从事海洋气象学教学和研究工作. E-mail: fugang@ouc.edu.cn

美国纽约州立大学阿尔巴尼分校的 Lance F. Bosart 教授等 11 位国际著名学者,联名为庆祝美国气象学会百年华诞的专辑 (*Meteorological Monographs*) 撰写了文章 (Schultz et al, 2019), 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。

地球是人类已知的唯一拥有液态水的行星,海洋则是人类已知地球上承载的最大水体,其面积约占 71% 的地球表面积。海洋不但是生命的摇篮,更是风雨的故乡。2021 年世界气象日的主题是“海洋,我们的气候和天气”(The Ocean, Our Climate and Weather),这一主题充分体现了海洋对地球气候变化和天气系统影响的重要性。

海洋不仅与大气之间有动量、热量和水汽的交换,而且还是各种尺度的大气涡旋系统的诞生地。温带气旋是中纬度每日天气舞台上最重要的“演员”(Čampa and Wernli, 2012),且与世界气象组织倡导的天气、气候、水、海洋以及环境 (Weather, Climate, Water, Ocean and Environment Related Services and Application)¹ 的服务与应用等诸方面都有密切的关系。本文将重点介绍一类尚未被广泛关注的、在秋冬季中高纬度海洋上频繁发生的、快速发展的温带气旋系统——“爆发性气旋”(亦被称为“炸弹气旋”)的前世今生。

随着我国经济的高速发展,各个大洋上的物资运输日趋繁忙,特别需要对爆发性气旋做出精准预报。因此深入、系统地开展对大洋上爆发性气旋发展机理的研究,对于保障海上活动安全、提高对海上爆发性气旋的认识水平具有重要的意义。

本文由以下 5 部分组成:1. 历史背景;2. 爆发性气旋的定义;3. 研究现状;4. 未来展望;5. 结论与讨论。期盼本文能为提高人们对海上爆发性气旋这类危险天气系统的认识水平做出贡献。

1 历史背景

1918 年 10 月,不足 21 岁的 Jacob(也被拼写为 Jakob)Bjerknes 把论文“On the Structure of Moving Cyclones”投稿到 *Monthly Weather Review* (Bjerknes, 1919)。1919 年 2 月 1 日,该刊在第 47 卷第 2 期发表了此文。1918 年 11 月 5 日, Jacob Bjerknes 还把同名论文投到了挪威的 *Geofysiske*

Publikasjoner 杂志,后刊载于 1919 年的 1 卷第 2 期。为什么同一篇论文同时于 1919 年在两个不同期刊上发表? 这是一个谜。按照 Schultz et al (2019) 的看法,当时 Jacob 很年轻,很可能是他父亲 Vilhelm Bjerknes 选择了以上两个杂志。Vilhelm Bjerknes 很清楚地意识到,需要尽快发表这些新的研究成果。*Geofysiske Publikationer* 是一本新的学术期刊,这个新期刊作为突破性研究工具的能力尚未得到证实。Vilhelm Bjerknes 认识到 *Monthly Weather Review* 是最值得信赖的,因为这个杂志相对受第一次世界大战的影响较小,对德国人和奥地利人而言也可能不具挑衅性。因此, Vilhelm Bjerknes 要 Jacob 把该文投给了 *Monthly Weather Review*。

在该文中, Jacob Bjerknes 首次提出了锋面气旋概念模型(图 1),该气旋模型被后人广泛称为“挪威气旋模型”(Norwegian cyclone model)。虽然从各个方面来看“挪威气旋模型”很完美,但这个概念模型存在重大缺陷。Shapiro and Keyser (1990) 把现场观测资料和数值模拟结果相结合,提出了一个关于海洋上温带锋面气旋的新概念模型(图 2)。该模型是从沿着一个连续的广阔锋区的“初始旋生”(incipient cyclogenesis)开始(第 I 阶段)。在“旋生”作用的初始阶段,原先连续的锋面发生了断裂,不连续的“冷锋”和“暖锋”的温度梯度发生收缩(第 II 阶段)。“暖锋”随后向西发展,进入低压后面的北方气流, Shapiro and Keyser (1990) 将其称为“后弯暖锋”(bent-back warm front),暖区(warm sector)变窄,导致明显的锋面“T 型”(T-bone)结构(第 III 阶段)。最终围绕低压中心形成了冷空气和“后弯暖锋”的“暖核隔离”(warm-core seclusion)(第 IV 阶段)。这个被修正的气旋模型也被称为“Shapiro-Keyser 气旋模型”(Shapiro-Keyser Cyclone Model) (Shapiro and Keyser, 1990)。按照 Schultz and Vaughan (2011) 的观点,“Shapiro-Keyser 气旋模型”改写了“挪威气旋模型”中冷暖锋的运动机制,挪威经典模型认为锋面运动是冷锋追赶暖锋的过程,最终形成锢囚。而现代研究认为,锋面锢囚过程不是追赶机制,而是热波卷裹机制。另外在“挪威气旋模型”中,锢囚是指气旋加深阶段的结束,因为暖空气从低压中心离开,意味着气旋不再有可用的储存在暖区的势能。但观测发现,一些气旋在锢囚后继续加深。

1. <https://public.wmo.int/en/governance-reform/services-commission> (2021 年 2 月 1 日访问)。

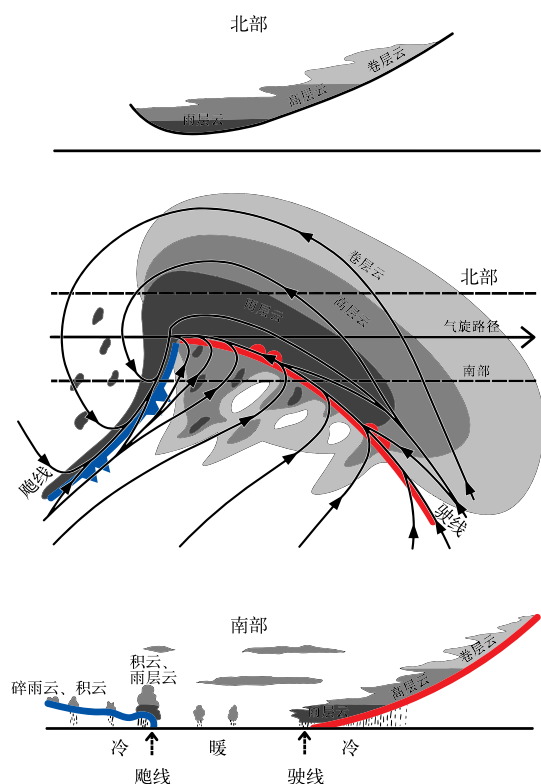


图1 Jacob Bjerknes 于1919年首次提出的温带气旋概念模型

[本图引自 Bjerknes(1919), 陈莅佳重绘]

Fig. 1 Extratropical cyclone model firstly put forward by Jacob Bjerknes in 1919

[from Bjerknes(1919), redrawn by Chen L J]

有关锋面气旋概念模型发展的历史,可参阅陶祖钊和闻新宇(2016)。

在各种温带气旋中,有一类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。1979年8月10—13日,英国皇家海洋竞赛俱乐部举办了第28届Fastnet帆船赛(图3),12—13日的比赛遇到了该海域历史上最严重的风暴(图4),这个“致命的风暴”导致18人死亡(15名帆船选手和3名救援人员),造成了巨大的人员和财产损失。在出发的303艘帆船中,只有85艘(也有媒体报道是86艘)完成了全程比赛。其余的帆船中有194艘退出比赛,24艘被遗弃,至少有75艘帆船倾覆,5艘没有留下任何痕迹。大约4000人参与了营救,救援行动甚至动用了英国皇家海军的军舰、救生艇、直升机(图5),以及荷兰皇家海军的驱逐舰等救援力量,共搜救出80艘帆船和136名水手,成为和平时期最大的救援行动。2019年10月,“1979年法斯特奈特事件爱尔兰幸存者联盟”还在爱尔兰举行40周年纪念

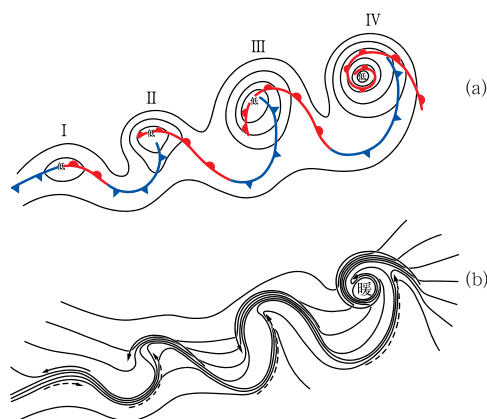


图2 Shapiro and Keyser(1990)提出的海洋上温带锋面气旋模型,初始锋面气旋(第I阶段),锋面收缩(第II阶段),后弯暖锋(第III阶段),暖核隔离(第IV阶段)

(a)海平面气压(实线)、锋面(粗线),
(b)气温(实线)、冷暖气流(实线和虚线箭头)

[本图引自 Schultz et al(2019), 陈莅佳重绘]

Fig. 2 The life cycle of the marine extratropical frontal cyclone following the Shapiro-Keyser cyclone model; incipient frontal cyclone (label I), frontal fracture (label II), bent-back warm front and frontal T-bone (label III), and warm-core seclusion (label IV)
(a) sea level pressure (solid lines), fronts (thick lines);
(b) temperature (solid lines), and cold and warm air currents (solid and dashed arrows, respectively)

[from Schultz et al (2019), redrawn by Chen L J]

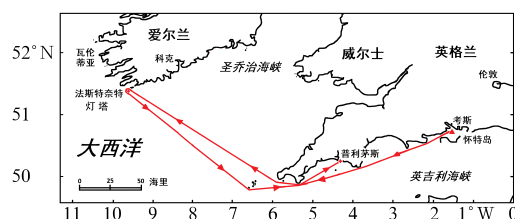


图3 1979年8月英国皇家海洋竞赛俱乐部帆船赛比赛路线图(红线)

[出发点是英格兰的考斯(▲),帆船向西行驶到爱尔兰南部的法斯特奈特岩石(Fastnet Rock)

(●)后向东折返,比赛终点是英格兰的普利茅斯(+)]

Fig. 3 The route map of the Yacht Race (red line) held by Royal Ocean Racing Club in August 1979

[The starting point is Cowes of England (▲);

the sailboat went westward to the Fastnet Rock (●)

in south of Ireland and then turned back eastward; the

finish end of the Yacht Race is Plymouth of England (+)]

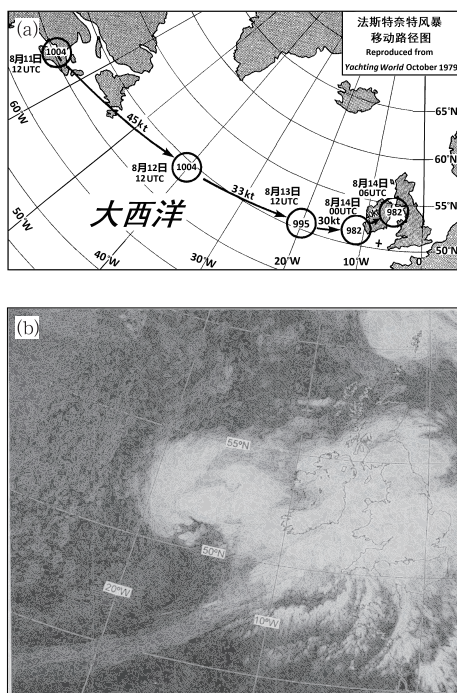


图 4 (a)1979 年 8 月风暴 Fastnet 移动路径, (b)1979 年 8 月 13 日 15:37 UTC 的 NOAA-5 卫星红外云图
Fig. 4 (a) The moving track of the Fastnet Storm during the International Fastnet Yacht Race in August 1979, (b) NOAA-5 satellite infrared image at 15:37 UTC 13 August 1979

Tracking a killer storm

By Robert B. Rice

Severe storms can be found raging over the earth's surface nearly every day. Usually their development, movement, and strength can be predicted in advance, allowing people to take the steps necessary to protect life and property. From time to time, though, a severe storm develops quickly and attains a place in history.

Such a storm developed late Monday, August 13, 1979, and continued into Tuesday, August 14, exploding almost without warning in the midst of the Fastnet fleet.

The strongest winds caught the fleet strung out across the Irish Sea. As British meteorologist Alan Watts observed, "There is no kind of shelter in that box of waters between southwest England and southern Ireland. The weather is worse than oceanic because of the interaction of Atlantic wave-making processes with the developing shallows of the land masses."

Rapidly developing storm systems are common over the waters surrounding the United Kingdom, and races in these waters are often plagued by gales and steep seas. The 1979 Fastnet storm developed

a central pressure of about 980 millibars, which, although notable, is not uncommon. Many races held within the past 30 years have seen storms of this intensity rip through the fleet. (Heavy Weather Sailing, by K. Adlard Coles, is filled with tales of these storms.)

The story began across the Atlantic on Thursday, August 9, as a weak disturbance moved eastward across the United States into the Gulf of Maine on August 10. Although the storm system was small and relatively weak at this point, it had already begun its history of death and destruction by spawning tornadoes and severe thunderstorms across the Ohio Valley on Thursday, and over southern New England on Friday (killing two people in Massachusetts and sucking the 124 world's off Newport, Rhode Island, with winds up to 35 knots).

As a preceding storm system became stationary southwest of Iceland, the weak storm raced eastward across the Atlantic over the weekend, reaching a position near 48°N, 19°W by 1200 Greenwich Mean Time (GMT), Monday, August 13, with a central pressure of about 1007 millibars (Fig. 1).

At this time, the system gave only subtle hints of what was to happen in the next 12 hours. The only tangible clues were the vast amount of cold air in the associated upper-level low-pressure trough and the storm's climatologically dangerous surface position. Also, the air temperature was on the order of -25° to -30°C, which is comparable to winter normals. It is this presence of cold air over warm, moist surface air that often feeds storm development.

Climatologically, all waves or minor storm systems approaching these waters around the edge of a depression in the Icelandic region must be viewed with suspicion. Even so, there is nothing in the 1200 GMT reports to warrant a forecast for conditions as severe as those that were experienced.

During the six hours from 1200 to 1800 GMT, the storm began to intensify and move rapidly east-northeast. By 1800, the central pressure had dropped to about 995 millibars, and the storm center was near 51°N, 13°W (Fig. 2). It was between 1500 and 1800 GMT Monday that questions about the storm's potential development were



图 5 英国皇家海军的直升飞机在救助遇险的帆船比赛选手

[照片来自 <https://keyassets.timeincuk.net/inspirewp/live/wp-content/uploads/sites/21/2019/07/fastnet-race-1979-camargue-helicopter-rescue-credit-ppl-royal-navy.jpg> (2021 年 2 月 1 日访问)]

Fig. 5 A Royal Navy helicopter rescued the crew after the disastrous Yacht Race

(This photo was got on 1 February 2021 from <https://keyassets.timeincuk.net/inspirewp/live/wp-content/uploads/sites/21/2019/07/fastnet-race-1979-camargue-helicopter-rescue-credit-ppl-royal-navy.jpg>)

仪式²,悼念不幸死去的人。由此可见该风暴对国际帆船运动的影响有多么深远。

在悲剧发生不到两个月后,1979 年 10 月,Rice (1979)在国际帆船运动的专业杂志 *Sail* 上(图6)发

answered. The development rate of two millibars per hour, although not extreme, indicated that the rapid development just beginning would be likely to continue. The combination of development rate and forward speed were giving barometric falls of up to three millibars per hour at locations just ahead of the storm.

At 1625 GMT the Meteorological Office issued a Force 8 gale warning for Plymouth, Fastnet, and the Irish Sea, which was broadcast on the 1650 BBC shipping forecast. Soon thereafter, at 1705 GMT, the warning was upgraded to "Southwest gale Force 8 increasing severe gale Force 9 imminent." (The term "imminent" in British forecasts means "within six hours.")

The weather map for 2100 GMT (Fig. 3) shows the truly explosive development that was under way within the decelerating storm system. Valenta, on the southwest Irish coast, reported a pressure of 989 millibars and winds gusting to 48 knots. The rapidly developing pressure gradient suggests that gusts of 50 or 60 knots were already being felt over the water south of Ireland, eastward to around 7°W. These higher winds generally occur ahead of a developing storm in the region of maximum pressure falls, and again behind the storm and its associated cold front in the rapidly rising pressures. The latter region is apt to provide the strongest pressure gradient along with a wind shift, and this feature later became important in the storm's life cycle.

At 2145 GMT, as the wind really began to freshen on the coast, the Meteorological Office issued a new warning: "Southwest gale Force 9 increasing to Force 10 imminent." Although the leaders (including the overall winner, Ternation), had already rounded Fastnet Rock and had the wind abeam, most of the fleet was still spread out behind, struggling to beat into a rising wind and sea.

By midnight GMT (Fig. 4) the storm center was off Galway Bay with a central pressure near 980 millibars, which then held fairly steady for the next six hours. The associated cold front had moved to a position just east of Fastnet Rock, where the rapidly rising pressure gradient created Force 10 and higher winds from the west-southwest.

At 0200 GMT Tuesday, the Meteorological Office issued a further warning that the strongest winds were yet to come—Force 8 locally gusting to Force 10 veering westerly over the next six hours.

Just over three hours later, at 0500 GMT, the storm center had moved to a position near London-derry, while its attendant cold front had whipped eastward into the coastal sections of Scotland and England. As often happens, the front had accelerated out of the principal low-pressure trough, which extended across eastern

Ireland and out to sea east of Fastnet. The rapidly rising pressures behind this trough created what Alan Watts calls "the most potent feature of the tragedy." As the principal trough sped east, Watts says it created a wickedly confused seaway as the Force 9-10 winds ahead of it were suddenly replaced by an almost right-angled shift to the northwest. It is this feature, perhaps more than the wind strength, that had so many craft in terrible trouble. "Reports of rogue seas of 50 feet and wind gusts to 80 knots can therefore be accepted as realistic, despite the relatively short duration and fetch of the wind."

By 1200 GMT Tuesday, the storm had moved on to the Moray Firth off northern Scotland, heading for the Shetland Islands (Fig. 6). The squares to the north of the storm center in Figure 6 represent the continued six-hour plots as the storm moved on toward the Norwegian Sea. This retreat from the scene allowed sea conditions to subside over the area, which permitted the widespread deployment of air sea rescue units to aid the stricken yachts. Had the storm lingered on for several days, the toll would very likely have been even more staggering.

Robert B. Rice is Chief Meteorologist for Weather Services Corporation, a private weather forecasting and meteorological consulting firm.

Figure 1: 1200 GMT Monday—storm center 1007 millibars

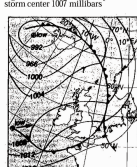


Figure 2: 1800 GMT Monday—storm center 996 millibars

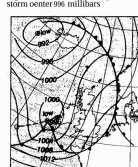


Figure 3: 2100 GMT Monday—storm center 981 millibars

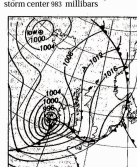


Figure 4: 0000 GMT Tuesday—storm center 979 millibars

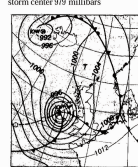


Figure 5: 0800 GMT Tuesday—storm center 963 millibars

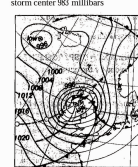


Figure 6: 1200 GMT Tuesday—storm center 950 millibars

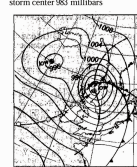


图 6 1979 年 10 月 Robert B. Rice 在国际帆船运动的专业杂志 *Sail* 上发表了论文 Tracking a Killer Storm 全文 (图中框线标识为“truly explosive development”的出处)

Fig. 6 In October 1979, Robert B. Rice published a two-page paper named as "Tracking a Killer Storm" in *Sail*, a professional international sailing journal

(The line in the figure highlights the source of "truly explosive development")

2. <https://afloat.ie/sail/events/fastnet-race/item/44323-fastnet-1979-irish-survivors-reunion-remembers-those-who-died-pays-tribute-to-rescue-agencies> (2021 年 2 月 1 日访问)。

表了一篇只有两页的论文。在这篇论文中他不经意使用了单词“explosive”,为后来 Sanders and Gyakum (1980)创造的一个著名的气象术语“气象炸弹”创造了机会(图7),因为只有“炸弹”才会具有“explosive”的特性。“法斯特奈特风暴”事件不但在国际帆船比赛历史上留下了“浓彩重笔”,而且也促使国际气象界开启了研究“爆发性气旋”之进程。

也还是从这篇小论文里,美国麻省理工学院气象系教授 erick Sanders 和他的博士研究生 J. R. Gyakum 敏锐地认识到这种天气系统的危险性,把它命名为“气象炸弹”或“爆发性气旋”。Sanders and Gyakum(1980)发表了论文“Synoptic-Dynamic Climatology of the ‘Bomb’”。至此之后,国际气象界对这种快速发展的气旋系统进行了广泛深入的研究,每年发表的论文呈“雪崩”式增长。这篇具有里程

碑意义的论文,也彰显了 erick Sanders 教授洞察海洋上危险天气现象的敏锐眼光及其学术功力。

2 爆发性气旋的定义

Bergeron(1954)注意到了气旋的快速发展现象,他在文中不仅讨论了热带气旋的“快速发展”,还专门探讨了夏季和秋季波罗的海、斯堪的纳维亚南部地区、荷兰和德国北部地区发生的5个飓风的“快速加深”现象,即:1882年7月10—11日的“波罗的海夏季飓风”;1912年10月1—2日“波罗的海副热带飓风”;1921年10月22—23日“斯堪的纳维亚南部副热带飓风”;1929年7月7—8日的“波罗的海夏季飓风”;1950年7月25—30日“斯堪的纳维亚低压”。他在讨论1921年10月23日在斯堪的纳维亚南部的一个气旋时,提到了中心气压每小时下降1 hPa 的现象。Bergeron(1954)虽然发现了气旋的爆发现象,但他并没有明确给出爆发性气旋的定义。

Sanders and Gyakum(1980)首次明确给出了爆发性气旋的定义:若气旋中心海面气压在24 h内经过地转调整到 60°N 后下降到24 hPa以上,即气旋中心气压加深率大于 $1\text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$,该气旋就被称为爆发性气旋。取 60°N 是因为挪威学派所在的卑尔根市纬度大约是 60°N 。该定义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,因此在纬度高的地球两极附近,气旋中心气压24 h需下降28 hPa以上才能被称为爆发性气旋;而在纬度较低的 $25^{\circ}\text{S}/^{\circ}\text{N}$ 附近只要达到12 hPa以上就可被定义为爆发性气旋(Sanders and Gyakum,1980)。

2.1 地转调整纬度的修正

Sanders and Gyakum(1980)对北半球1976—1979年冷季(9月至次年5月)发生的爆发性气旋进行了统计,发现北半球的爆发性气旋多位于 60°N 以南,集中分布于 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$,只有2例发生于 60°N 以北。Roebber(1984)、Gyakum et al(1989)、Chen et al(1992)、Wang and Rogers(2001)和 Yoshida and Asuma(2004)采用 Sanders and Gyakum(1980)的爆发性气旋定义,对不同区域的爆发性气旋开展了统计分析,结果均显示爆发性气旋多发生于中纬度地区($30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)。由此可见,Sanders and Gyakum(1980)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

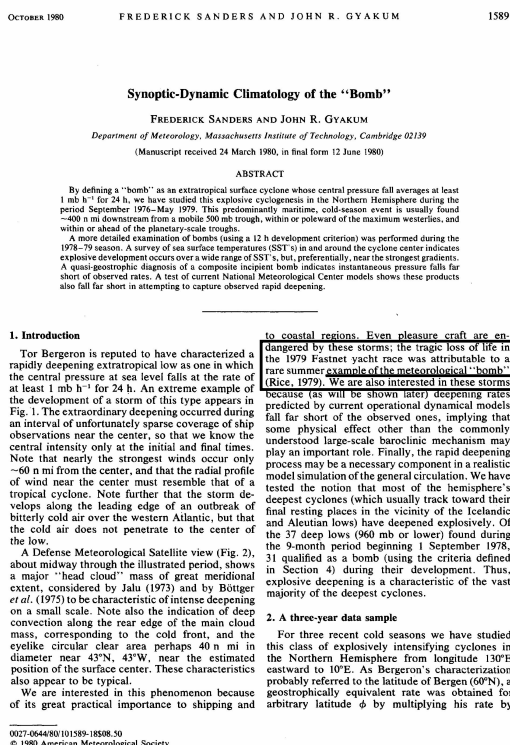


图7 美国麻省理工学院 Sanders and Gyakum(1980)

在 *Monthly Weather Review* 上发表的论文首页

(图中框线标识为“example of the meteorological ‘bomb’”的出处)

Fig. 7 The first page of “Synoptic-Dynamic Climatology of the ‘bomb’” (Sanders and Gyakum, 1980)

(The line in the figure highlights the source of “example of the meteorological ‘bomb’”)

Sanders and Gyakum(1980)的定义基础上,一些学者对其爆发性气旋定义中的地转调整纬度进行了修正。

Roebber(1984)把地转调整纬度选在 42.5°N , 气旋的中心气压加深率 R 为:

$$R = \left(\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right) \left(\frac{\sin 42.5^{\circ}}{\sin \varphi} \right) \quad (1)$$

式中: P 为气旋的中心气压, φ 为气旋中心的纬度, 下标 $t-12$ 和 $t+12$ 分别表示 12 h 前后变量。

而 Gyakum et al(1989)把地转调整纬度选为 45°N , 气旋的中心气压加深率 R 为:

$$R = \left(\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right) \left(\frac{\sin 45^{\circ}}{\sin \varphi} \right) \quad (2)$$

相对于 Sanders and Gyakum(1980), Roebber(1984)和 Gyakum et al(1989)选择了较低的地转调整纬度,即气旋中心的 24 h 降压值要大于 Sanders and Gyakum(1980)定义中的值,才能符合爆发性气旋的定义。在 Roebber(1984)和 Gyakum et al(1989)定义的 1 Bergeron 大约与 Sanders and Gyakum(1980)定义的 1.2 Bergeron 相当。

2.2 降压时间间隔的修正

由于过去一些资料的时间间隔多为 12 h,故学者们多采用 24 h 时间间隔来定义爆发性气旋(Sanders and Gyakum, 1980; Roebber, 1984; Chen et al, 1992; Wang and Rogers, 2001)。随着资料时间分辨率由 12 h 提高到 6 h,一些学者对 Sanders and Gyakum(1980)的爆发性气旋定义中的时间间隔进行了修正。

为了能够刻画一些发展迅速的气旋, Yoshida and Asuma(2004)计算 12 h 内气旋中心气压的变化,但地转调整纬度仍然为 60°N , 气旋中心气压加深率 R 为:

$$R = \left(\frac{P_{t-6} - P_{t+6}}{12} \right) \left(\frac{\sin 60^{\circ}}{\sin \frac{\varphi_{t-6} + \varphi_{t+6}}{2}} \right) \quad (3)$$

为了分析研究时间尺度更短的快速发展的气旋, Petty and Miller(1995)甚至把 6 h 内中心气压降低 10 hPa 的气旋就定义为爆发性气旋。

2.3 考虑风速影响的修正

Sanders and Gyakum(1980)、Roebber(1984)、Gyakum et al(1989)、Yoshida and Asuma(2004)等学者对“爆发性气旋”的定义中都强调气旋中心气压

的快速下降,然而这些定义都没有考虑风速的影响。为了更深刻、清晰地理解“爆发性气旋”的定义, Fu et al(2020)通过对大量的爆发性气旋个例分析,总结出爆发性气旋有以下四个主要特征:(1)中心气压快速下降,(2)快速气旋生成,(3)强风,(4)暴雨/雪。以上特征通常不是孤立的,而是相互关联的,在这些特征中,强风是伴随气旋爆发性发展最重要的因素,它会像热带气旋一样造成严重的破坏。因此应该与热带气旋的定义类似,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 et al(2020)利用北半球 1979—2016 年 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,有的最大风速甚至只有 $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于海上爆发性气旋对船舶航行安全最大威胁是强风,世界气象组织也建议,当蒲氏风力大于 8 级($17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时应发布海上大风预警,因此修正后的爆发性气旋定义中选择 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速作为阈值是合理的。修正后的爆发性气旋定义,不仅应考虑气旋中心海表面气压要在 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 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Fu et al(2020)的研究指出,利用 1979 年 1 月到 2016 年 12 月的 ERA-Interim 资料分析发现,共有 6 392 个温带气旋满足“爆发性气旋”的定义,但其中有 1 112 个气旋的最大风速小于 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,应该被剔除。

3 研究现状

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,如傅刚等(2017)。以下结合 2017 年后的有关论文,系统总结爆发性气旋的研究现状。

3.1 分类

研究发现,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有明显差异,因此需要在强度上和区域上对爆发性气旋进行分类,以便更加深入、细致地研究爆发性气旋。

3.1.1 强度分类

Sanders(1986)根据爆发性气旋中心气压最大加深率的大小,把 1981 年 1 月至 1984 年 11 月发生在北大西洋中西部的爆发性气旋分为三类,分别为

“强气旋”(>1.8 Bergeron)、“中等气旋”(1.3~1.8 Bergeron)、“弱气旋”(1.0~1.2 Bergeron)。Wang and Rogers(2001)统计分析了1985年1月至1996年3月发生在北半球($15^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$)的爆发性气旋,依据爆发性气旋中心气压最大加深率的大小将其划分为三类,分别为“强气旋”(≥ 1.80 Bergeron)、“中等气旋”(1.40~1.79 Bergeron)和“弱气旋”(1.00~1.39 Bergeron)。Wang and Rogers(2001)与Sanders(1986)的分类标准没有显著差异,但在“中等气旋”和“弱气旋”的分界上有微小差别。另外十分遗憾,他们都没有给出三类气旋划分的理由和依据。

Zhang et al(2017)利用美国国家环境预报中心的再分析资料(FNL),分析了北太平洋2000—2015年期间每年10月至次年4月的爆发性气旋,指出把爆发性气旋分为四类更为合理,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)。孙雅文等(2018)利用FNL资料,对2000—2015年冷季(10月至次年4月)北大西洋上的爆发性气旋进行了分析,发现按中心气压加深率可将其分为四类,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)。

3.1.2 区域分布

Wang and Rogers(2001)分析了北大西洋爆发性气旋最大加深率时刻气旋中心位置的空间分布,发现有三个高频中心,根据其分布位置可将其划分为三类:NWA(the northwest Atlantic)、NCA(the north-central Atlantic)和NEA(the extreme north-east Atlantic)类爆发性气旋。Yoshida and Asuma(2004)统计分析了西北太平洋上的爆发性气旋,根据其生成和爆发地点的地理分布可划分成三类,第一类是在大陆上生成、在鄂霍次克海-日本海发展的爆发性气旋(the Okhotsk-Japan Sea type, OJ cyclone);第二类是在大陆上生成、在太平洋发展的爆发性气旋(the Pacific Ocean-land type, PO-L cyclone);第三类是在太平洋西部生成、中部发展的爆发性气旋(the Pacific Ocean-ocean type, PO-O cyclone)。Wang and Rogers(2001)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 and Asuma(2004)是根据

爆发性气旋生成和爆发地点位置,对西北太平洋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,但都将爆发地点作为分类的重要依据。

Zhang et al(2017)研究指出,根据爆发性气旋中心气压最大加深率位置的空间分布,可以把整个北太平洋爆发性气旋划分成五类,即:日本-鄂霍次克海(the Japan-Okhotsk Sea, JOS)、西北太平洋(the northwestern Pacific, NWP)、中西太平洋(the west-central Pacific, WCP)、中东太平洋(the east-central Pacific, ECP)、东北太平洋(the northeastern Pacific, NEP)类爆发性气旋。

孙雅文等(2018)分析发现,北大西洋爆发性气旋主要发生在4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。整个北大西洋区爆发性气旋个数随海表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。

3.2 气候学特征

3.2.1 区域分布特征

Sanders and Gyakum(1980)分析了1977—1979年冷季北半球爆发性气旋的气候学特征,指出爆发性气旋多发生在太平洋和大西洋的西北部。Roebber(1984)和Rogers and Bosart(1986)统计分析也指出,西北太平洋和西北大西洋是爆发性气旋的频繁发生地。Lim and Simmonds(2002)指出,西北太平洋是全球爆发性气旋发生最密集的海域之一。

由于西北太平洋是重要的海上运输航道,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(1989)统计分析了1984年8月至1985年8月发生在西北太平洋的爆发性气旋,发现大部分爆发性气旋集中发生在 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 的海域。Chen et al(1992)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 and Asuma(2004)分析认为,西北太平洋地区爆发性气旋的发生区域主要集中在 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 的洋面上。虽然学者们使用的资料和研究区域有所不同,爆发性气旋的空间分布特征存在一定差异,但都指出西北太平洋是爆发性气旋频繁发生的海域。

3.2.2 季节变化特征

科学家们发现爆发性气旋主要在冷季发生

(Sanders and Gyakum, 1980; Carleton, 1981; Physick, 1981; Roebber, 1984; Gyakum et al, 1989; Chen et al, 1992; Yoshida and Asuma, 2004), 冷季爆发性气旋发生频率远大于暖季 (Roebber, 1984; Chen et al, 1992)。Chen et al (1992) 统计分析了 1958—1987 年东亚地区发生的爆发性气旋, 发现 363 例爆发性气旋中只有 13 例发生在暖季, 其余的 350 例均发生在冷季。同时还发现, 冷季爆发性气旋的发生频数有明显的月际变化特征。

Sanders and Gyakum (1980) 发现, 北半球冷季爆发性气旋发生频数的峰值在 1 月, 平均每 3 天就会有 2 例爆发性气旋, 且 11 月、12 月和 2 月均有较多的爆发性气旋发生, 但 9 月、10 月、3 月和 4 月爆发性气旋的个例较少。Chen et al (1992) 分析了东亚地区爆发性气旋发生频数的季节变化特征, 发现其发生频数的峰值分别在 1 月和 3 月, 爆发性气旋主要发生在 12 月至次年 3 月, 其他月份个例较少。Yoshida and Asuma (2004) 分析了西北太平洋三类爆发性气旋发生频数的季节变化特征, 发现其季节变化特征有明显差异, OJ 型爆发性气旋发生频数的峰值在 11 月, PO-L 型爆发性气旋发生频数的峰值在 12 月和 2 月, PO-O 型爆发性气旋发生频数的峰值在 1 月。

3.2.3 有利于气旋快速发展的环境要素

(1) 大气斜压性

爆发性气旋是中高纬度地区快速发展的温带气旋, 该地区中低层大气的斜压性较强, 为爆发性气旋的快速发展提供了有利的环境背景场。有研究表明, 爆发性气旋的急剧发展是由大气的斜压性所驱动 (Sanders, 1986; Manobianco, 1989; Wash et al, 1992)。李长青和丁一汇 (1989) 分析指出, 大气中低层的斜压性是西北太平洋爆发性气旋爆急剧发展的有利因素。Yoshida and Asuma (2004) 合成分析了西北太平洋三类爆发性气旋, 发现欧亚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。Iwao et al (2012) 分析了冬季西北太平洋上 30 年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由于低层大气斜压性增强所致。

(2) 高空槽及涡度场

Sanders and Gyakum (1980) 发现, 北半球爆发性气旋发展的有利天气形势有以下三种: 高空槽追上地面气旋中心、地面低涡与高空槽相遇、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, 地面气旋中心位于高空槽的下游是有利的高低空天气形势配置。Sanders (1986) 对爆发性气旋的涡度场进行分析发现, 正涡度中心从气旋中心的东部快速移近气旋中心促进了爆发性气旋的快速发展, 上层的气旋式涡度平流强度与其爆发性发展强度呈现正相关的关系。

(3) 高空急流

Sanders and Gyakum (1980) 分析发现, 爆发性气旋易发生在西风带上或其北部。Wash et al (1988) 认为, 高空急流出口区的正涡度切变与地面气旋中心的叠加有利于爆发性气旋快速发展。李长青和丁一汇 (1989) 发现, 高空急流出口区的北侧适宜于爆发性气旋的快速发展。大量研究 (Uccellini and Kocin, 1987; Wash et al, 1988; Cammas and Ramond, 1989; Nakamura, 1993) 表明, 高空急流出口区左侧存在的强辐散场、正涡度平流场和上升运动场为爆发性气旋的快速发展提供了高层动力强迫。Yoshida and Asuma (2004) 指出, 三类爆发性气旋的高空均存在较强的急流区。

(4) 海洋暖流和强海表面温度 (SST) 梯度区

分析发现, 西北太平洋爆发性气旋多发生于黑潮暖流区附近 (Sanders and Gyakum, 1980; Roebber, 1984; Gyakum et al, 1989; Chen et al, 1992; Yoshida and Asuma, 2004)。Sanders and Gyakum (1980) 发现, 海上爆发性气旋发生地的 SST 分布范围比较大, 但更容易发生在强 SST 梯度区附近。Sanders (1986) 研究表明, 强爆发性气旋在经过暖流区时的移动距离比“弱气旋”和“中等气旋”的移动距离长。Hanson and Long (1985) 和 Sanders (1987) 发现, 爆发性气旋的快速发展与气旋横穿强 SST 梯度区有显著的统计相关性。Chen et al (1992) 分析发现, 爆发性气旋随着其强度的增加逐渐集中于黑潮及黑潮延伸体区域。Ueda et al (2011) 指出, SST 在爆发性气旋快速发展的过程中对大气垂直运动有重要影响。Liberato et al (2013) 在分析强风暴 Xynthia 时发现, 副热带海域 SST 对风暴 Xynthia 爆发性发展有显著贡献。Davis and Emanuel (1988)、Kuwana-Yoshida and Asuma (2008)、Kuwano-Yoshida and Enomoto (2013) 指出, 爆发性气旋在经过温暖的洋流区时, 暖洋面既为大气输送了感热和潜热, 又降低了低层大气的稳定性, 可促进气旋的快速发展。

3.3 发展机制

3.3.1 斜压不稳定

Anthes et al (1983) 诊断分析了 1978 年的 Queen Elizabeth-II 爆发性气旋指出,低层大气斜压性是导致其爆发性发展的重要因子。Roebber (1984)、Rogers and Bosart(1986)、仪清菊和丁一汇(1992)均指出,大气斜压性对爆发性气旋的快速发展有重要作用。赵其庚等(1994)对西北太平洋上一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爆发性加深过程中起重要作用。黄立文等(1999)利用广义 Z-O(Zwack-Okossi) 发展方程对发生在西北太平洋上的两个温带爆发性气旋进行诊断分析发现,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迅速增长时,气旋便会出现中心气压剧烈下降的现象。Kouroutzoglou et al(2013)对多个影响气旋发展的参数进行了分析,指出较强的大气斜压性在爆发性旋生期间起决定作用。

3.3.2 潜热释放

有学者认为,潜热释放在爆发性气旋发展的初期起到了重要作用(Gyakum, 1983; Kuo et al, 1991)。丁一汇和朱彤(1993)认为,潜热释放导致气旋式环流加速会引发气旋中心气压的急剧降低。周毅等(1998)研究发现,凝结潜热释放对气旋爆发阶段对低层气旋式环流增强有重要影响。多位学者(Kuo et al, 1990; Bosart and Lackmann, 1995; Gyakum and Danielson, 2000)研究认为, SST 的升高会使得感热通量和潜热释放增加,促进气旋的爆发性发展。

3.3.3 正涡度平流

李长青和丁一汇(1989)、Wash et al(1988)指出北半球高空急流出口区左侧的正涡度平流场为爆发性气旋的快速发展提供了有利条件。王劲松等(1999)利用 MM4 模式模拟结果,对 1981 年 12 月 20—21 日发生在西北太平洋上的一个爆发性气旋进行数值试验和 Z-O 方程诊断分析发现,正涡度平流对气旋发展贡献最大。Yoshida and Asuma (2004)认为,涡度平流、温度平流和湿度平流等是影响气旋爆发性发展的主要因子。

3.3.4 高层位涡下传

Bosart and Lin(1984)、Uccellini et al(1985)、Zehnder and Keyser(1991)、Reader and Moore

(1995)、吕筱英和孙淑清(1996)认为,具有较大位涡数值的平流层空气下伸是气旋快速发展的一个重要条件。寿绍文和李耀辉(2001)、吴海英和寿绍文(2002)认为,具有较大湿位涡数值的高层冷空气在沿着等熵面快速下降过程中绝对涡度的增加可导致气旋的发展加强。尹尽勇等(2011)认为高层位涡下传激发的气旋性环流导致了地面气旋的爆发性发展。Cordeira and Bosart(2011)发现,温带气旋的爆发性加深是气旋的低层位涡异常与高层位涡扰动耦合引发的。赵兵科等(2008)认为,高低层大值位涡通过垂直平流耦合在一起会促使气旋迅速发展。

3.3.5 对流层顶折叠

Bleck(1974)、Uccellini et al(1985; 1987)、Hoskins et al(1985)、Lupo et al(1992)认为,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。

3.3.6 动力强迫

Uccellini and Johnson(1979)指出,在高空急流出口区左侧非地转风产生的质量调整有利于该区域下方气旋的发展。吕梅等(1998)认为,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 et al(2010)在对 1999 年 12 月 24—26 日的冬季风暴 Lothar 进行数值模式敏感性试验中发现,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,高空急流动力强迫对其迅速发展有重要促进作用。

3.3.7 综合多因子

有学者认为,气旋的爆发性发展是多因子综合作用的结果。Rausch and Smith(1996)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多因子共同作用的结果。仪清菊和丁一汇(1996)对黄、渤海海域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发展有重要贡献。谢甲子等(2009)认为气旋的爆发性发展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(2010)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、显热和潜热通量等多个因素有关。

4 未来展望

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温带气旋这种地球大气中最常见的天气系统探究的步伐。未来数十年,预期关于爆发性气旋的研究将在以下三个方面取得重要进展。

4.1 发现更多事实

由于搭载许多新型探测仪器的多个观测卫星的相继发射,使得从空中“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及化学成分水平分布和垂直结构的知识。如欧洲的 Metop (Meteorological Operational Satellite)³ 卫星、美国 NASA 的 NPP (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project)⁴ 卫星和 VIIRS⁵ 观测数据、中国的风云系列 FY-4A 卫星⁶、云海二号卫星(2018 年 12 月 29 日发射)、高分十三号卫星(2020 年 10 月 12 日发射)等,加之以前就有的 CALIPSO 和 CloudSat 资料。

4.2 提高认识水平

高时空分辨率资料与强大功能绘图软件(Rautenhaus, 2015; Rautenhaus et al, 2015)的结合可大大提高人们对温带气旋等各种天气系统的认识水平,发现新现象,甚至更新温带气旋模型概念的可能性也被提高。由于气象资料时空分辨率的迅速提升,如 ERA5 资料⁷,以及计算机绘图软件,如 Met. 3D 软件⁸,使得三维绘图功能的日益强大,人们可借助计算机更加形象地、便利地理解温带气旋的三维空间结构和时间演变特征,因此发现新现象

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“New Synoptic Meteorology”。国际上研究爆发性气旋的著名学者、美国威斯康星大学麦迪逊分校大气和海洋科学系的 Jonathan E. Martin 教授⁹ 非常赞成笔者的以上观点(2019 年 10 月 3 日在德国巴伐利亚州 Kloster Seeon 举办的 19 Cyclone Workshop 上两人私人交流)。

4.3 评估变化趋势

有数值模拟研究结果表明(Sun et al, 2017),在全球变暖的影响下,热带气旋将变得更强、更大、更具破坏性。同理,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是一个悬而未决的问题。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,研究全球气候变暖背景下爆发性气旋的变化趋势与海面温度升高趋势之间的关系。在爆发性气旋变化趋势研究方面,可借鉴关于热带气旋的研究方法和研究手段,有望获得重要进展。

5 结论与讨论

本文首先回顾了温带气旋研究的历史背景,介绍了“爆发性气旋”这一术语产生的过程,并对 Sanders and Gyakum(1980)、Roebber(1984)、Gyakum et al (1989)、Yoshida and Asuma(2004)、Fu et al(2020)等给出的爆发性气旋定义进行了系统分析。指出,修正后的爆发性气旋定义,不仅应考虑气旋中心海表面气压要在 24 h 内下降达到 24 hPa 以上,而且海表面

3. <https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series>, <https://www.eumetsat.int/metop> (2021 年 2 月 1 日访问此两个网站)。

4. <http://nppcm.gsfc.nasa.gov/ccr/npp> (2021 年 2 月 1 日访问)。

5. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/> (2021 年 2 月 1 日访问)。

6. “风云四号”卫星(FY-4, 2016 年 12 月 11 日发射)主要探测仪器为 10 通道二维扫描成像仪、干涉型大气垂直探测器、闪电成像仪、CCD 相机和地球辐射收支仪,地球圆盘图成像时间为 15 min。

7. ERA5 资料是 ECMWF 提供的全球范围的关于大气、陆地和海洋变量的逐小时再分析资料,其水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,垂直方向从地表到高空 80 km 分为 137 个层。详细说明可访问 <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (2021 年 2 月 1 日访问)。

8. Met. 3D 绘图软件是一款可高效率分析中尺度天气系统的三维绘图软件,详细功能可访问网站: <https://www.rrz.uni-hamburg.de/ueber-uns/personen/3-mcc/rautenhaus.html> 或 <https://met3d.wavestoweather.de/met-3d.html> (2021 年 2 月 1 日访问)。

9. Jonathan E. Martin 教授的邮箱 jon@meteor.wisc.edu。

10 m 高度上的最大风速要大于 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外还系统总结了爆发性气旋的研究现状,对学者们在从强度和区域上对爆发性气旋的分类进行了回顾。还对爆发性气旋发展提供有利环境要素的诸物理因子,如大气斜压性、正涡度平流、高空急流、海洋暖流等逐一进行了分析,并对爆发性气旋发展机制进行了概括:斜压不稳定、潜热释放、正涡度平流、高层位涡下传、对流层顶折叠、上层动力强迫、综合多因子等。最后对未来数十年爆发性气旋的研究从观测事实、认识水平、预报精度三个方面进行了展望。

最后,把本文作者之一傅刚在2019年7月13日完成的“爆发性气旋”小诗稍作修正摘录于此,用以结束“爆发性气旋的前世今生”的故事。

爆发性气旋

纤柔低涡立槽前,
冲天一吼似爆弹。
疾风狂扫千尺雪,
惊涛怒卷万仞澜。
源源平流输涡度,
湍湍加热送温暖。
上下反馈传能量,
摧枯拉朽震宇寰。

参考文献

- 丁一汇,朱彤,1993. 陆地气旋爆发性发展的动力学分析和数值试验[J]. 中国科学(B辑),23(11):1226-1232. Ding Y H, Zhu T, 1993. Numerical experiment on explosive development of marine extratropical cyclones[J]. Sci China (Series B), 23(11):1226-1232 (in Chinese).
- 傅刚,张树钦,庞华基,等,2017. 爆发性气旋研究的回顾[J]. 海洋气象学报,37(1):10-19. Fu G, Zhang S Q, Pang H J, et al, 2017. Review of researches on explosive cyclones[J]. J Mar Meteor, 37(1):10-19 (in Chinese).
- 黄立文,秦曾源,吴秀恒,等,1999. 海洋温带气旋爆发性发展数值试验[J]. 气象学报,57(4):410-428. Huang L W, Qin Z H, Wu X H, et al, 1999. Numerical experiment on explosive development of marine extratropical cyclones[J]. Acta Meteor Sin, 57(4):410-428 (in Chinese).
- 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 C Q, Ding Y H, 1989. Diagnostic analyses of explosive cyclones over the northwest Pacific Ocean[J]. Acta Meteor Sin, 47(2):180-190 (in Chinese).
- 吕梅,周毅,陆汉城,1998. 气旋快速发展的机制分析[J]. 气象科学,18(4):348-354. Lv M, Zhou Y, Lu H C, 1998. Mechanism analysis of rapidly developing cyclone[J]. Sci Meteor Sin, 18(4):348-354 (in Chinese).
- 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. Lv X Y, Sun S Q, 1996. A study on the dynamic features and energy conversion of the development of explosive cyclones[J]. Sci Atmos Sin, 20(1):90-100 (in Chinese).
- 寿绍文,李耀辉,2001. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析[J]. 气象学报,59(6):560-568. Shou S W, Li Y H, 2001. Isentropic potential analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process[J]. Sci Meteor Sin, 59(6):560-568 (in Chinese).
- 孙雅文,傅刚,张树钦,2018. 北大西洋爆发性气旋的统计特征[J]. 气象学报,76(2):169-181. Sun Y W, Fu G, Zhang S Q, 2018. Statistical characteristics of explosive cyclones over the Northern Atlantic[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):169-181 (in Chinese).
- 陶祖钰,闻新宇,2016. 锋面气旋概念的缘起、发展和社会实践的关系[J]. 气象科技进展,6(3):155-159. Tao Z Y, Wen X Y, 2016. A study on the evolution of front cyclone theory and its relations with weather forecast practice[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):155-159 (in Chinese).
- 王劲松,丁治英,何金海,等,1999. 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,22(2):180-188. Wang J S, Ding Z Y, He J H, et al, 1999. Diagnosis of an explosive cyclone with Zwack-Okossi equation[J]. J Nanjing Inst Meteor, 22(2):180-188 (in Chinese).
- 吴海英,寿绍文,2002. 位涡扰动与气旋的发展[J]. 南京气象学院学报,25(4):509-517. Wu H Y, Shou S W, 2002. Potential vorticity disturbance and cyclone development[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(4):509-517 (in Chinese).
- 谢甲子,寇正,王勇,2009. 西北太平洋地区一次爆发性气旋的诊断分析[J]. 暴雨灾害,28(3):251-254, 276. Xie J Z, Kou Z, Wang Y, 2009. Diagnostic analysis of an explosive cyclone over Northwest Pacific area[J]. Torr Rain Dis, 28(3):251-254, 276 (in Chinese).
- 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 Q J, Ding Y H, 1996. An analysis of the explosive cyclone over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Quart J Appl Meteor, 7(4):483-490 (in Chinese).
- 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 J Y, Cao Y N, Zhao W, et al, 2011. A diagnostic study of an intense developing extra-tropical cyclone over the Bohai and Yellow Sea[J]. Meteor Mon, 37(12):1526-1533 (in Chinese).
- 赵兵科,吴国雄,姚秀萍,2008. 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,32(6):1241-1255. Zhao B K, Wu G X, Yao X P, 2008. A diagnostic analysis of potential vorticity associated with development of a strong cyclone during the Meiyu period of 2003[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1241-1255 (in Chinese).
- 赵其庚,仪清菊,丁一汇,1994. 一个温带海洋气旋爆发性发展的动力学分析[J]. 海洋学报,16(1):30-37. Zhao Q G, Yi Q J, Ding Y H, 1994. Dynamic analysis of explosive development of an extra-tropical ocean cyclone[J]. Acta Oceanol Sin, 16(1):30-37 (in Chinese).
- 周毅,寇正,王云锋,1998. 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,18(4):355-360. Zhou Y, Kou Z, Wang Y

- F, 1998. Potential vorticity invertibility diagnostic about the importance of latent heat in the cyclone rapid development process[J]. *Sci Meteor Sin*, 18(4): 355-360 (in Chinese).
- Anthes R A, Kuo Y H, Gyakum J R, 1983. Numerical simulations of a case of explosive marine cyclogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 111(6): 1174-1188.
- Bergeron T, 1954. Reviews of modern meteorology-12: the problem of tropical hurricanes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 80(344): 131-164.
- Bjerknes J, 1919. On the structure of moving cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 47(2): 95-99. [Also published as Bjerknes J, 1919. On the structure of moving cyclones[J]. *Geophys Publ*, 1(2): 1-8. http://www.ngf-web.no/docs/NGF_GP_Vol01_no2.pdf.]
- Bleck R, 1974. Short-range prediction in isentropic coordinates with filtered and unfiltered numerical models[J]. *Mon Wea Rev*, 102(12): 813-829.
- Bosart L F, Lackmann G M, 1995. Postlandfall tropical cyclone reintensification in a weakly baroclinic environment: a case study of hurricane David (September 1979)[J]. *Mon Wea Rev*, 123(11): 3268-3291.
- Bosart L F, Lin S C, 1984. A diagnostic analysis of the Presidents' Day Storm of February 1979[J]. *Mon Wea Rev*, 112(11): 2148-2177.
- Cammas J-P, Ramond D, 1989. Analysis and diagnosis of the composite of ageostrophic circulations in jet-front systems[J]. *Mon. Wea. Rev*, 117(11): 2447-2462.
- Carleton A M, 1981. Monthly variability of satellite derived cyclonic activity for the Southern Hemisphere winter[J]. *J Climatol*, 1(1): 21-38.
- Campa J, Wernli H, 2012. A PV perspective on the vertical structure of mature midlatitude cyclones in the Northern Hemisphere[J]. *J Atmos Sci*, 69(2): 725-740.
- Chen S, Kuo Y, Zhang P, et al, 1992. Climatology of explosive cyclones off the East Asian coast[J]. *Mon Wea Rev*, 120(12): 3029-3035.
- Cordeira J M, Bosart L F, 2011. Cyclone interactions and evolutions during the "Perfect Storms" of late October and early November 1991[J]. *Mon Wea Rev*, 139(6): 1683-1707.
- Davis C A, Emanuel K A, 1988. Observational evidence for the influence of surface heat fluxes on rapid maritime cyclogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 116(12): 2649-2659.
- Fu G, Sun Y, Sun J, et al, 2020. A 38-Year climatology of explosive cyclones over the Northern Hemisphere[J]. *Adv Atmos Sci*, 37(2): 143-159.
- Gyakum J R, 1983. On the evolution of the QE II storm. I: synoptic aspects [J]. *Mon Wea Rev*, 111(6): 1137-1155.
- Gyakum J R, Anderson J R, Grumm R H, et al, 1989. North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975-1983[J]. *Mon Wea Rev*, 117(6): 1141-1155.
- Gyakum J R, Danielson R E, 2000. Analysis of meteorological precursors to ordinary and explosive cyclogenesis in the Western North Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 128(3): 851-863.
- Hanson H P, Long B, 1985. Climatology of cyclogenesis over the East China Sea[J]. *Mon Wea Rev*, 113(5): 697-707.
- 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.
- Iwao K, Inatsu M, Kimoto M, 2012. Recent changes in explosively developing extratropical cyclones over the winter Northwestern Pacific[J]. *J Climate*, 25(20): 7282-7296.
- Kouroutzoglou J, Flocas H A, Hatzaki M, et al, 2013. On the dynamics of mediterranean explosive cyclogenesis[M]//Helmis C G, Nastos P T. *Advances in Meteorology, Climatology Atmospheric Physics*. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Kuo Y-H, Low-Nam S, 1990. Prediction of nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a regional model[J]. *Mon Wea Rev*, 118(1): 3-25.
- Kuo Y-H, Low-Nam S, Reed R J, 1991. 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*, 119(2): 457-476.
- Kuwano-Yoshida A, Asuma Y, 2008. Numerical study of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific region[J]. *Mon Wea Rev*, 136(2): 712-740.
- Kuwano-Yoshida A, Enomoto T, 2013. Predictability of explosive cyclogenesis over the Northwestern Pacific region using ensemble reanalysis[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11): 3769-3785.
- Liberato M L R, Pinto J G, Trigo R M, et al, 2013. Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean [J]. *Nat Hazards Earth Sys Sci*, 13(9): 2239-2251.
- Lim E P, Simmonds I, 2002. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events [J]. *Mon Wea Rev*, 130(9): 2188-2209.
- Lupo A R, Smith P J, Zwack P, 1992. A diagnosis of the explosive development of two extratropical cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 120(8): 1490-1523.
- Manobianco J, 1989. Explosive east coast cyclogenesis over the west-central North Atlantic Ocean: a composite study derived from ECMWF operational analyses[J]. *Mon Wea Rev*, 117(11): 2365-2383.
- Nakamura H, 1993. Horizontal divergence associated with zonally isolated jet steams[J]. *J Atmos Sci*, 50(14): 2310-2313.
- Nesterov E S, 2010. Explosive cyclogenesis in the Northeastern part of the Atlantic Ocean[J]. *Russ Meteor Hydrol*, 35(10): 680-686.
- Petty G W, Miller D K, 1995. Satellite microwave observations of precipitation correlated with intensification rate in extratropical oceanic cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 123(6): 1904-1911.
- Physick W L, 1981. Winter depression tracks and climatological jet streams in the Southern Hemisphere during the FGGE Year[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 107(454): 883-898.
- Rausch R L M, Smith P J, 1996. A diagnosis of a model-simulated explosively developing extratropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev*, 124(5): 875-904.
- Rautenhaus M, 2015. Interactive 3D visualization of ensemble weather forecasts[D]. Munich: Technical University of Munich, 195pp.
- Rautenhaus M, Kern M, Schäfler A, et al, 2015. Three-dimensional visualization of ensemble weather forecasts-Part 1: the visualization tool Met. 3D (version 1.0)[J]. *Geosci Model Dev*, 8(7): 2329-2353.

- Reader M C, Moore G K, 1995. Stratosphere-troposphere interactions associated with a case of explosive cyclogenesis in the Labrador Sea[J]. *Tellus A*, 47(5):849-863.
- Rice R B, 1979. Tracking a killer storm[J]. *Sail*, 10:106-107.
- Rivière G, Arbogast P, Maynard K, et al, 2010. The essential ingredients leading to the explosive growth stage of the European wind storm Lothar of Christmas 1999[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(648):638-652.
- Roebber P J, 1984. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 112(8):1577-1589.
- Rogers E, Bosart L F, 1986. An investigation of explosively deepening oceanic cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 114(4):702-718.
- 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(10):1781-1794.
- Sanders F, 1987. Skill of NMC operational dynamical models in prediction of explosive cyclogenesis[J]. *Wea Forecasting*, 2(4):322-336.
- Sanders F, Gyakum J R, 1980. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb"[J]. *Mon Wea Rev*, 108(10):1589-1606.
- Schultz D M, Bosart L F, Colle B A, et al, 2019. Extratropical cyclones: A century of research on meteorology's centerpiece [J]. *Meteor Monogr*, 59:16. 1-16. 56.
- Schultz D M, Vaughan G, 2011. Occluded fronts and the occlusion process: a fresh look at conventional wisdom[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 92(4):443-466.
- Shapiro M A, Keyser D, 1990. Fronts, jet streams, and the tropopause[M] // Newton C W, Halopainen E O. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*. Amer Meteor Soc:167-191.
- Sun Y, Zhong Z, Li T, et al, 2017. Impact of ocean warming on tropical cyclone size and its destructiveness[J]. *Sci Rep*, 7:8154.
- Uccellini L W, Johnson D R, 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms[J]. *Mon Wea Rev*, 107(6):682-703.
- 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.
- Uccellini L W, Kocin P J, 1987. The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the east coast of the United States [J]. *Wea Forecasting*, 2(4):289-308.
- Ueda A, Yamamoto M, Hirose N, 2011. 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 Sci*, 5(1):1-10.
- Wang C, Rogers J C, 2001. A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: cyclone structure and evolution[J]. *Mon Wea Rev*, 129(6):1481-1499.
- Wash C H, Hale R A, Dobos P H, et al, 1992. Study of explosive and non-explosive cyclogenesis during FGGE[J]. *Mon Wea Rev*, 120(1):40-51.
- Wash C H, Peak J E, Calland W E, et al, 1988. Diagnostic study of explosive cyclogenesis during FGGE[J]. *Mon Wea Rev*, 116(2):431-451.
- 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.
- Zehnder J A, Keyser D, 1991. The influence of interior gradients of potential vorticity on rapid cyclogenesis[J]. *Tellus A*, 43(3):198-212.
- Zhang S, Fu G, Lu C, et al, 2017. Characteristics of explosive cyclones over the Northern Pacific[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(12):3187-3210.