

北大西洋爆发性气旋的统计特征^{*}

孙雅文^{1,2} 傅刚^{1,2} 张树钦^{1,2}
SUN Yawen^{1,2} FU Gang^{1,2} ZHANG Shuqin^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛, 266100

2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛, 266100

1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2. *Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2017-04-21 收稿, 2017-10-16 改回.

孙雅文, 傅刚, 张树钦. 2018. 北大西洋爆发性气旋的统计特征. 气象学报, 76(2):169-181

Sun Yawen, Fu Gang, Zhang Shuqin. 2018. Statistical characteristics of explosive cyclones over the Northern Atlantic. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(2):169-181

Abstract Using the Final Analysis (FNL) data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), we investigate statistical characteristics of explosive cyclones (EC) over the northern Atlantic during the cold season (October to April) from 2000 to 2015. The definition of EC is modified after considering the meridional distribution of EC and the 10 m height wind fields associated with EC. It is found that EC mainly occur in four regions, namely the North America Continent, the Northwest Atlantic, the North-Central Atlantic, and the Northeast Atlantic, respectively, according to the spatial distribution of their maximum deepening rates of central sea level pressure (SLP). Over the whole region, EC decrease with the increase in maximum deepening rate of central SLP, the intensity of EC strengthens from west to east, and tracks of EC are basically in a southwest-northeast direction. EC over the northern Atlantic may be classified into four intensity categories according to their maximum deepening rates, which are super (≥ 2.15 Bergeron (Ber)), strong (1.75–2.14 Ber), moderate (1.45–1.74 Ber) and weak (1.00–1.44 Ber), respectively. Analyses indicate that the number of EC decreases and their duration times of explosive-deepening shorten from southwest to northeast over the northern Atlantic basin. The maximum deepening rate of EC over the Northwest Atlantic region is the largest, and the duration time of explosive-deepening is the longest. Oppositely, the maximum deepening rate of EC over the Northeast Atlantic region is the smallest, and the duration time of explosive-deepening is the shortest. EC over the Northeast Atlantic region, the North-Central Atlantic region, and the Northwest Atlantic region mainly occur in December, from December to March, and from January to February, respectively. Compared with these characteristics over the ocean, EC over the North America Continent are the least in number, the weakest in intensity, and the shortest in duration time of explosive-deepening.

Key words Northern Atlantic, Explosive cyclones, Statistical characteristics

摘 要 利用 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)提供的 Final Analysis(FNL)再分析资料,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,综合考虑气旋中心位置经向分布特征和海面 10 m 高风场对爆发性气旋的定义进行了修订。根据气旋中心海表面气压最大加深率的空间分布,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。按气旋强度等级可分为 4 类:超强($\geq$

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41775042 和 41275049)。

作者简介:孙雅文,主要从事爆发性气旋有关研究。E-mail: soh14@qq.com

通讯作者:傅刚,主要从事海洋气象学研究。E-mail: fugangouc@qq.com

2.15 Bergeron (Ber)),强(1.75—2.14 Ber)、中(1.45—1.74 Ber)、弱(1.00—1.44 Ber)爆发性气旋。在北大西洋海盆区,自西南向东北爆发性气旋的个数逐渐减少,爆发时长变短。西北大西洋区气旋中心气压加深率最大,爆发时长最长。东北大西洋区加深率最小,爆发时长最短。东北大西洋区爆发性气旋主要发生在12月,北大西洋中央区主要发生在12月—次年3月,西北大西洋区主要发生在1—2月。与海上相比,北美大陆区爆发性气旋发生个数少,强度弱,爆发时长短。

关键词 北大西洋,爆发性气旋,统计特征

中图法分类号 P466

1 引言

爆发性气旋是在短时间内迅速加强的气旋系统,多发生于中纬度洋面上。由于爆发性气旋常伴随大风、暴雨(或暴雪)等恶劣天气现象,严重威胁人们的生命财产安全,因此Rice(1979)形象地称之为“气象炸弹(meteorological bomb)”。Sanders等(1980)最早定义爆发性气旋为气旋的海表面中心气压(地转调整到 60°N)24 h下降达到24 hPa,即1 Bergeron(定义 $1\text{ hPa/h} = 1\text{ Bergeron}$,简称为Ber)。Roebber(1984)考虑了不同纬度上爆发性气旋的分布,将定义中的纬度修订为 42.5°N ,Gyakum等(1989)则选择了 45°N 。由于所使用数据时间精度的提高,Yoshida等(2004)将爆发性气旋定义中的24 h时间间隔修订为12 h。

中国学者对西北太平洋上爆发性气旋进行了系统研究,具体见傅刚等(2017),这里不再赘述。相对而言,中国学者对大西洋上爆发性气旋研究较少,部分原因可能是由于北大西洋远离欧亚大陆,那里发生的剧烈天气对中国的影响不大,另外,也存在缺乏北大西洋及沿岸的气象和海洋观测资料等原因。然而伴随全球经济一体化态势的迅猛发展,产业融合的趋势也愈来愈明显,基于以下两个理由:(1)大西洋在世界航运中处于极为重要的地位;(2)中国大陆海运企业在北大西洋上有重要的运输业务。故有必要对北大西洋爆发性气旋进行系统而深入的研究,不仅对于保障在北大西洋航线上的船舶航运安全具有重要意义,而且对于提高对爆发性气旋这类危险天气系统运动规律的认识水平,减少和防止自然灾害具有重要的学术和实践价值,同时也符合中国国家发展和改革委员会、中国气象局、国家海洋局联合印发的《海洋气象发展规划(2016年~2025年)》中“海洋气象服务能力覆盖远海和远洋”的精神。

诸多研究表明,北半球的爆发性气旋主要发生在10月至次年3月(有学者称之为冷季)(Sanders,

et al, 1980; Roebber, 1984; Wang, et al, 2001),尤其是在冬季居多(Allen, et al, 2010)。北大西洋上爆发性气旋的空间分布是沿美国东海岸向东北方向延伸(Sanders, et al, 1980; Wang, et al, 2001; Allen, et al, 2010)。由于不同学者使用的资料不同,得到北大西洋上爆发性气旋分布特征存在一定差异。Sanders等(1980)研究发现爆发性气旋的分布延伸至格陵兰岛的南部。Wang等(2001)发现格陵兰岛—冰岛地区爆发性气旋的个数比预期多且强度大,并将北大西洋爆发性气旋分为3个区域:西北大西洋、北—中大西洋和东北大西洋。Allen等(2010)利用多种再分析资料得到类似的分布:爆发性气旋向东北延伸至冰岛且有2个频发中心,分别位于东海岸近海和北大西洋中部。

Sanders(1986)和Wang等(2001)把爆发性气旋的强度分为3类,他们分类的强度界限稍有区别,Sanders(1986)的分类为强($>1.8\text{ Ber}$)、中($1.3—1.8\text{ Ber}$)、弱($1.0—1.2\text{ Ber}$);而Wang等(2001)的分类为强($\geq 1.80\text{ Ber}$)、中($1.40—1.79\text{ Ber}$)、弱($1.00—1.39\text{ Ber}$)。

前人对北大西洋爆发性气旋4个经典个例进行了研究,这些个例是:the Queen Elizabeth II storm (Gyakum, 1983a, 1983b, 1991; Manobianco, et al, 1992), the President Day's cyclone (Bosart, 1981; Bosart, et al, 1984; Uccellini, et al, 1984, 1985; Whitaker, et al, 1988), ERICA IOP-4 (Wakimoto, et al, 1992; Chang, et al, 1993, 1996)和ERICA IOP-5(Reed, et al, 1993a, 1993b; Blier, et al, 1995; Kuo, et al, 1996)。研究表明影响爆发性气旋发展的因素很多,如斜压不稳定(Sanders, 1986; Manobianco, 1989)、斜压不稳定和非绝热加热的共同作用(Gyakum, 1983b; Kuo, et al, 1991a; Reed, et al, 1993b)、高层强迫(Bosart, et al, 1984; Gyakum, 1991)、高空急流(Uccellini, et al, 1984; Manobianco, et al, 1992)、伴

随对流层顶折叠高空高位涡的干侵入(Bosart, et al, 1984; Uccellini, et al, 1985; Whitaker, et al, 1988)、表面能通量(Davis, et al, 1988; Kuo, et al, 1991b)和多因素共同作用(Rausch, et al, 1996; Nesterov, 2010)等理论。

虽然前人对北大西洋爆发性气旋进行过统计研

究,但前人使用资料的空间分辨率多为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,与现在使用的资料相比空间分辨率显得有些粗糙。本研究的主要目的是利用 2000—2015 年最近 16 个冷季(10 月至次年 4 月) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的客观再分析资料,分析北大西洋(100°W — 10°E , 20° — 80°N ,图 1)上爆发性气旋的统计特征。

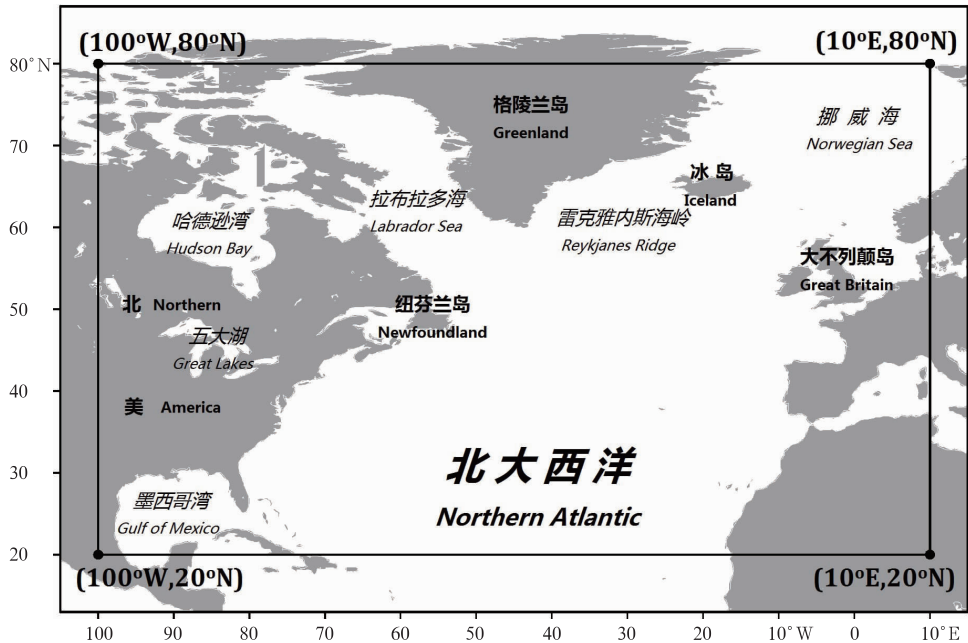


图 1 北大西洋地理示意
Fig. 1 Geographic map of the Northern Atlantic

2 资料及定义

使用的资料有:

- (1) 美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,简称 NCEP)的 Final Analysis(FNL)全球格点再分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直分为 26 层,时间分辨率为 6 h。下载地址:<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2c>。
- (2) 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,简称 NOAA)的 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI SST)格点资料。该资料分辨率有两种,分别为高分辨率(水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为日平均)和低分辨率(水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率为月平均)。文中使用的是低分辨率数据。下载地址:<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>。

gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html。
Yoshida 等(2004)给出的爆发性气旋的定义如下:

$$\text{气旋中心气压加深率} = \left(\frac{p_{t-6} - p_{t+6}}{12} \right) \times \left[\frac{\sin 60^{\circ}}{\sin \frac{\varphi_{t-6} + \varphi_{t+6}}{2}} \right]$$

式中, p 为气旋中心气压, φ 为气旋中心所在纬度,下标 $t \pm 6$ 表示当前时刻 ± 6 小时所示时刻。参考 Yoshida 等(2004)给出的定义,统计了 2000—2015 年最近 16 个冷季所有气旋的海表面中心气压加深率不小于 1 Ber 的爆发时刻位置的纬度信息(表 1),发现共有 2986 个位置,其中多数位于 40° — 45°N ,占总数的 21.57%。平均纬度为 47.78°N 。由于大部分气旋爆发位置位于中纬度,故将 Yoshida 等(2004)给出的爆发性气旋定义中的纬度由 60°N 修

订为 45°N 重新进行统计(表 1)。定义修订后的爆发时刻位置的个数减少到 1783 个,仍然是位于 40°—45°N 的个数最多,为 392 个,占总数的

21.99%。平均纬度为 47.35°N。因此有理由相信将爆发性气旋定义中的纬度修正为 45°N 是合理的。

表 1 北大西洋爆发时刻位置的经向分布
(A 为 Yoshida 等(2004)定义的结果,B 为纬度修订到 45°N 的结果,C 为纬度修订到 45°N
且气旋 10 m 高度风速最大不小于 17.2 m/s 的结果)

Table 1 Meridional distribution of explosive locations over the Northern Atlantic
(A represents the result of the definition given by Yoshida, et al (2004), B represents the result of the modified definition adjusted geostrophically to 45°N, C represents the result of the modified definition adjusted geostrophically to 45°N with the 10 m height maximum wind speed of cyclones no less than 17.2 m/s)

纬度(°N)	25—30	30—35	35—40	40—45	45—50	50—55	55—60	60—65	65—70	70—75	75—80
A 个数	14	111	499	644	593	521	333	194	47	26	4
A 频率(%)	0.47	3.72	16.71	21.57	19.86	17.45	11.15	6.50	1.57	0.83	0.13
B 个数	7	59	323	392	365	318	186	96	24	12	1
B 频率(%)	0.39	3.31	18.12	21.99	20.47	17.84	10.43	5.38	1.35	0.67	0.06
C 个数	6	56	312	375	353	312	182	94	22	12	1
C 频率(%)	0.35	3.25	18.09	21.74	20.46	18.09	10.55	5.45	1.28	0.70	0.06

在 Sanders 等(1980)和 Yoshida 等(2004)的定义中,只考虑了气旋的海表面中心气压加深率,而没有考虑海表面风速的大小。对海面 10 m 高风场资料的分析发现,有时虽然气旋的海表面中心气压加深率大于 1 Ber,但是风速较小,最小甚至只有 8.2 m/s。考虑到爆发性气旋在海上最主要的危害是大风,结合 WMO(World Meteorological Organization)蒲福风级定义的大风警报,选择 8 级风(即 17.2 m/s)作为判别爆发性气旋的一个参数,即规定气旋爆发性发展阶段至少有一个时刻不小于 17.2 m/s 的风速。这样在将爆发性气旋定义中的纬度修订为 45°N,同时考虑 10 m 高风速要达到 17.2 m/s,16 a 的统计结果显示北大西洋上共有 671 例爆发性气旋,气旋爆发时刻位置的个数减少到 1724 个,仍然是位于 40°—45°N 的个数最多,为 375 个,占总数的 21.74%。平均纬度为 47.41°N。

定义爆发性气旋为气旋的海表面气旋中心气压(地转调整到 45°N)12 h 下降达到 1 Ber 且快速降压过程中至少一个时刻气旋 10 m 高风速不小于 17.2 m/s。

文中还给出以下定义:

最大加深率时刻:爆发性气旋中心气压加深率最大的时刻。

中心气压最低时刻:爆发性气旋中心气压值最低的时刻。

爆发前移动路径:气旋从生成至气旋中心加深率不小于1 Ber 之前的移动路径。

爆发时移动路径:气旋在中心加深率不小于 1 Ber 时的移动路径。

爆发后移动路径:气旋在爆发后中心加深率小于 1 Ber 至气旋中心气压最低时刻的移动路径。

3 北大西洋爆发性气旋的分类

3.1 区域分类

根据修订的爆发性气旋定义,按照 5°×5°网格内爆发性气旋最大加深率时刻的位置进行统计,得到爆发性气旋发生个数的地理分布(图 2),可分为 4 个区域,即:Ⅰ. 北美大陆区(The North America Continent,NAC),Ⅱ. 西北大西洋区(The Northwest Atlantic,NWA),Ⅲ. 北大西洋中央区(The North-Central Atlantic,NCA),Ⅳ. 东北大西洋区(The Northeast Atlantic,NEA)。为以后表述方便,将整个北大西洋区记为 TWR(The Whole Region)。爆发性气旋个数的地理分布与 Wang 等(2001)的研究结果最相似,在北大西洋海盆上有 3 个频发中心,即北美东海岸近海、纽芬兰岛东北部和格陵兰岛—冰岛附近,但不同之处在于在北美大陆上还发现了一个爆发性气旋的频发中心,且整体上爆发性气旋个数明显增多,东海岸近海最多为 35 个。造成气旋个数增多的原因很可能是使用数据的

差异造成的。Wang 等(2001)使用的是 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)时间分辨率为 12 h、空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的格点资料,且研究的时段是 1985 年 1 月至

1996 年 3 月。从对应 16 a 冷季海表温度梯度分布(图 2)可以看出,北大西洋海盆上,爆发性气旋个数基本是与海表温度梯度大值区重合,呈带状分布。

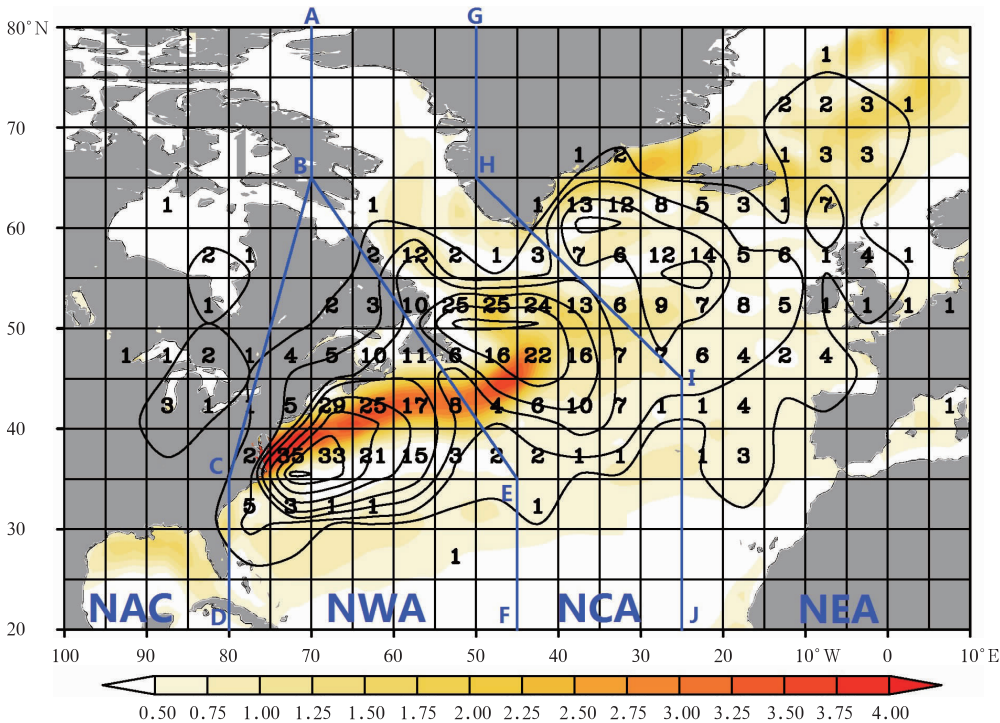


图 2 北大西洋 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 网格内最大加深率时刻爆发性气旋的个数的地理分布 (NAC, NWA, NCA 和 NEA 4 个区域由加深率最大时刻爆发性气旋确定;蓝线为区域的地理边界 A(70°W,80°N)、B(70°W,65°N)、C(80°W,35°N)、D(80°W,20°N)、E(45°W,35°N)、F(45°W,20°N)、G(50°W,80°N)、H(50°W,65°N)、I(25°W,45°N)、J(25°W,20°N);色阶为 2000—2015 年冷季平均海表温度梯度,单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

Fig. 2 Geographic distributions of the number of explosive cyclones at their maximum deepening moment, which are counted within $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ boxes over the Northern Atlantic (Four geographical regions named as NAC, NWA, NCA and NEA are used to classify explosive cyclones. Geographical region boundaries are drawn in blue lines. A(70°W,80°N), B(70°W,65°N), C(80°W,35°N), D(80°W,20°N), E(45°W,35°N), F(45°W,20°N), G(50°W,80°N), H(50°W,65°N), I(25°W,45°N), J(25°W,20°N). Shaded areas represent cold-season average SST gradient during 2000 to 2015, unit: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

3.2 强度分类

对 16 a 资料分析发现,存在一些气旋的海表面中心气压最大加深率比较大的个例(图 3)。但随着海表面中心气压最大加深率的增大,爆发性气旋个数大幅度减少,海表面中心气压最大加深率的最大值为 2.99 Ber,平均海表面中心气压最大加深率为 1.41 Ber。

采用系统聚类方法,按照海表面中心气压最大加深率的大小对爆发性气旋进行分类。这种分类方法的基本思想是先将样品各看成一类,然后计算类与类之间的距离,选择距离最小的一组合并成新的 一类,重新计算新类与其他类之间的距离,再将距离最小的两类合并,这样依次合并,直至将所有的样品分成若干类。

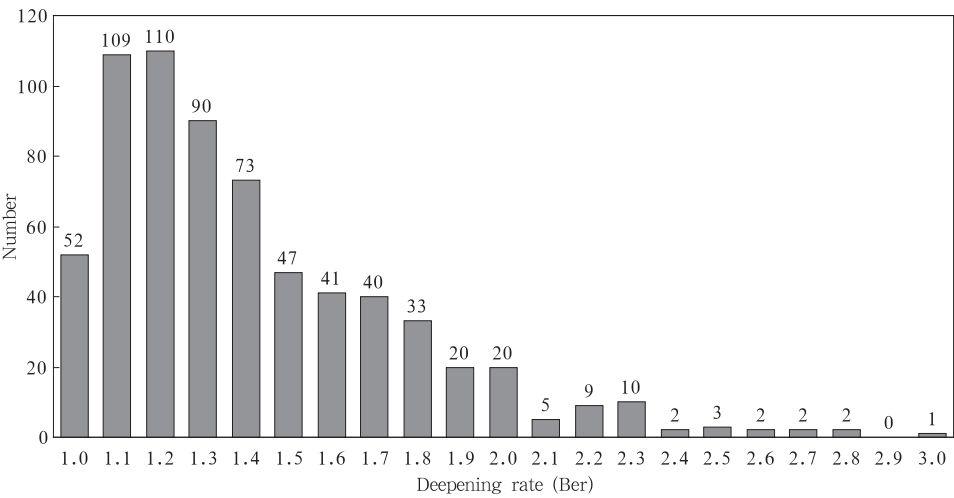


图3 整个北大西洋区爆发性气旋个数与海表面中心气压最大加深率的分布
Fig.3 Histogram of the number of explosive cyclones with their maximum deepening rates of central sea level pressure over the whole northern Atlantic

根据系统聚类法,将爆发性气旋分为了4类,即:超强爆发性气旋(≥ 2.15 Ber)、强爆发性气旋(1.75—2.14 Ber)、中爆发性气旋(1.45—1.74 Ber)和弱爆发性气旋(1.00—1.44 Ber)。

4 北大西洋爆发性气旋的统计特征

4.1 海表面中心气压最大加深率分布特征

4个区域海表面中心气压最大加深率的分布(图略)与图3类似,气旋个数随海表面中心气压最大加深率增大而减少。其中,北美大陆区爆发性气旋个数最少,仅有15例,海表面中心气压最大加深率最小,平均为1.20 Ber,最大只有1.44 Ber。北大西洋海盆上自西南向东北,平均海表面中心气压最大加深率逐渐减小。西北大西洋区和北大西洋中央区气旋海表面中心气压最大加深率较大,平均分别为1.47和1.44 Ber,同时这2个区域爆发性气旋个

数也较多,分别为236和229例,这意味着西北大西洋区和北大西洋中央区更有利于气旋的爆发性发展。虽然西北大西洋区的平均海表面中心气压最大加深率较大,但是海表面中心气压最大加深率的最大值出现在北大西洋中央区。东北大西洋区的平均海表面中心气压最大加深率为1.32 Ber,强度较弱,在所研究的时段内仅有2例超过2 Ber。

4.2 爆发性气旋的强度分类

结合不同区域爆发性气旋强度分类及个数和频率分布(表2),发现弱爆发性气旋的个数远多于其他强度的爆发性气旋,随着爆发性气旋强度的增大,气旋个数减少。北美大陆区气旋强度明显弱于其他区域,为弱爆发性气旋。西北大西洋区、北大西洋中央区和东北大西洋区的弱爆发性气旋个数相近,西北大西洋区和北大西洋中央区中等及以上强度爆发性气旋的个数相差不大,在各区域内所占爆发性气

表2 不同区域和不同强度爆发性气旋的个数和频率分布
Table 2 Numbers and relative frequencies of explosive cyclones with various intensities over different regions

类别	TWR		NAC		NWA		NCA		NEA	
	个数	频率(%)	个数	频率(%)	个数	频率(%)	个数	频率(%)	个数	频率(%)
总体	671	100	15	2.24	236	35.17	229	34.13	191	28.46
弱	434	64.58	15	100	137	58.05	138	60.26	144	75.39
中	128	19.08	0	0	48	20.34	52	22.71	28	14.66
强	78	11.62	0	0	34	14.41	27	11.79	17	8.90
超强	31	4.62	0	0	17	7.20	12	5.24	2	1.05

旋个数的比例也十分近似,而这一点在东北大西洋区明显小于西北大西洋区和北大西洋中央区。整体来看,北大西洋海盆上自西南向东北,弱爆发性气旋个数逐渐增多,中、强和超强爆发性气旋个数大幅度减少。

4.3 月际变化特征

从月际变化分布(图 4)上可以看出,整个北大西洋区爆发性气旋多发生在冬季,12、1 和 2 月分别有 132、143 和 122 例。这 3 个月发生爆发性气旋的个数占了总数的 59.17%。不同区域月份变化差异较大,北美大陆区爆发性气旋发生时间主要是 10 和 11 月,每月有 5 例,远少于其他区域且在 2 和 4 月没有爆发性气旋的发生。西北大西洋区总计有 236

例爆发性气旋,主要发生在 1—2 月,分别为 65 和 59 例,明显多于其他月份,占该区域的 52.54%,且同其他 3 个区域相比,是单月发生气旋个数较多的两个月。北大西洋中央区总计有 229 例爆发性气旋,主要发生在 12 月一次年 3 月,分别为 41、47、39 和 41 例。东北大西洋区爆发性气旋的个数有 191 例,虽然少于西北大西洋区和北大西洋中央区,但是 12 月发生个数较多,为 53 例,远多于该区域的其他月份,单月就占了该区域总数的 27.75%。其次是 11、1 和 3 月,分别为 36、29 和 26 例。在北大西洋海盆上自西南向东北爆发性气旋主要发生时间逐渐提前。

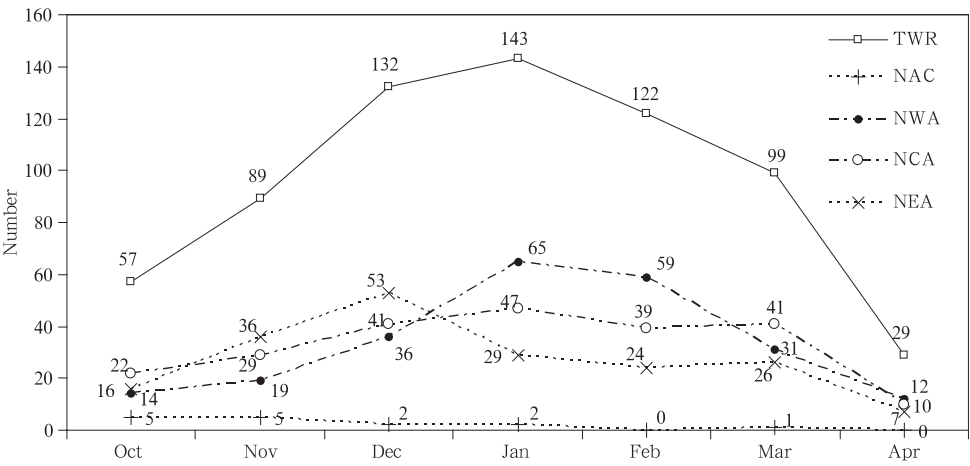


图 4 不同区域上爆发性气旋的月际变化

Fig. 4 Monthly frequencies of explosive cyclones over various regions

从不同月份气旋平均海表面中心气压最大加深率(图 5)的分布可以发现,除北美大陆区外,基本上海表面中心气压最大加深率随时间先增大后减小。对于整个北大西洋区,海表面中心气压最大加深率在 2 月达到最大,为 1.51 Ber;北美大陆区海表面中心气压最大加深率出现在 12 月,但其数值较小,为 1.35 Ber;西北大西洋区海表面中心气压最大加深率出现在 2 月,为 1.57 Ber;北大西洋中央区和东北大西洋区海表面中心气压最大加深率均出现在 1 月,分别为 1.52 和 1.45 Ber。整体上看,北美大陆区气旋海表面中心气压最大加深率最小,其次为东北大西洋区。这 2 个区域每个月的海表面中心气压最大加深率小于整个北大西洋区的平均值。西北大西洋区和北大西洋中央区每个月的海表面中心气压

最大加深率基本大于整个北大西洋区的平均值,西北大西洋区的海表面中心气压最大加深率更大。

4.4 气旋海表面中心最低气压分布特征

从整个北大西洋区气旋海表面中心最低气压分布(图 6)来看,位于 975—965 hPa 的气旋最多,有 218 例,远多于其他范围的气旋。其次是 965—955 和 955—945 hPa,分别有 185 和 123 例。这 3 个分布区间的气旋个数占了总数的 78.39%。整个北大西洋区气旋海表面中心最低气压平均为 963.9 hPa。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气旋海表面中心最低气压平均分别为 969.2、968.2、961.3 和 961.2 hPa,这表明自西向东气旋自身强度加强,东北大西洋区和北大西洋中央区气旋海表面中心最低气压平均明显低于西北大西

洋区和北美大陆区。北美大陆区、西北大西洋区和北大西洋中央区气旋海表面中心最低气压的分布均只有 1 个峰值,前两者位于 975—965 hPa,后者位于 965—955 hPa。而东北大西洋区气旋海表面中心最低气压的分布存在 2 个峰值,分别位于 975—

965 和 955—945 hPa。海表面中心气压最低的气旋出现在东北大西洋区,为 929.6 hPa,北美大陆区、西北大西洋区和北大西洋中央区海表面中心气压最低分别为 954.8、935.4 和 932.2 hPa。

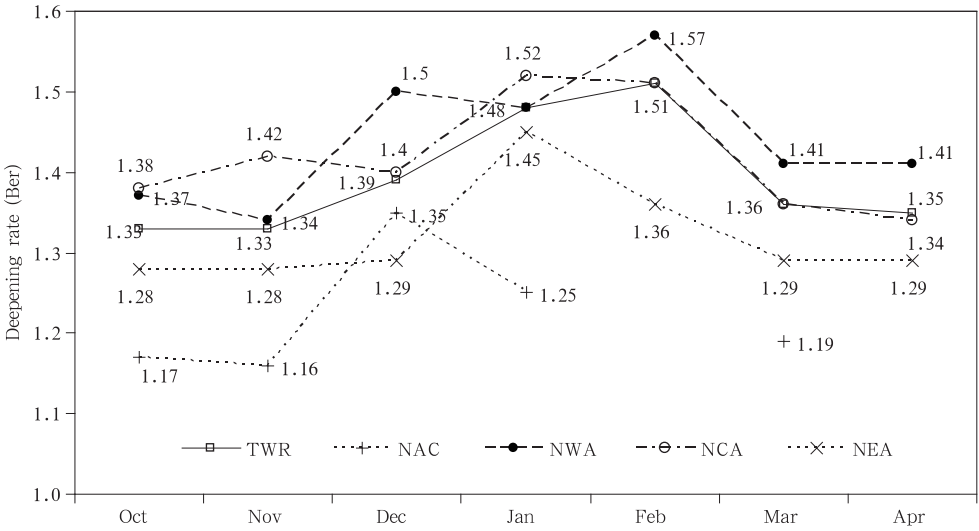


图 5 不同区域上爆发性气旋中心气压最大加深率平均值的月际变化分布
Fig. 5 Monthly variations of average maximum deepening rates of explosive cyclones over various regions

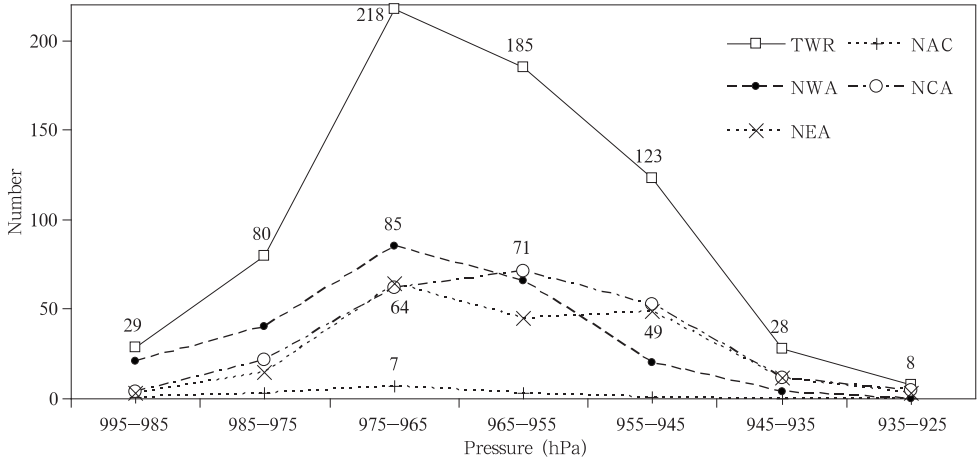


图 6 不同区域上爆发性气旋个数与海表面中心最低气压分布
Fig. 6 The number of explosive cyclones with their minimum central sea level pressure over various regions

4.5 爆发时长的分布特征

把气旋海表面中心气压加深率不小于 1 Ber 的时间长度定义为气旋的爆发时长。从爆发时长(图

7)分布可以发现,总体上整个北大西洋区和不同区域爆发性气旋个数随爆发时长增长而减少。整个北大西洋区爆发性气旋的爆发时长以 0.5 d 为最多

(195 例),其次为0.25 d (177 例)、0.75 d(131 例)和 1 d(103 例),平均值为 0.64 d。从区域分布来看,北美大陆区、西北大西洋区和北大西洋中央区爆发时长均以 0.5 d 为最多,分别为 10、64 和 61 例。不同的是北美大陆区和北大西洋中央区爆发时长次之的是 0.25 d,分别为 4 和 54 例,而西北大西洋则

是 0.75 d,为 59 例。东北大西洋区气旋个数随爆发时长单调递减,0.25 d 最多,为 80 例。从北美大陆区向东至东北大西洋区气旋爆发时长的平均值分别为 0.45、0.72、0.69 和0.51 d,表明在北大西洋海盆上平均爆发时长自西南向东北逐渐变短。

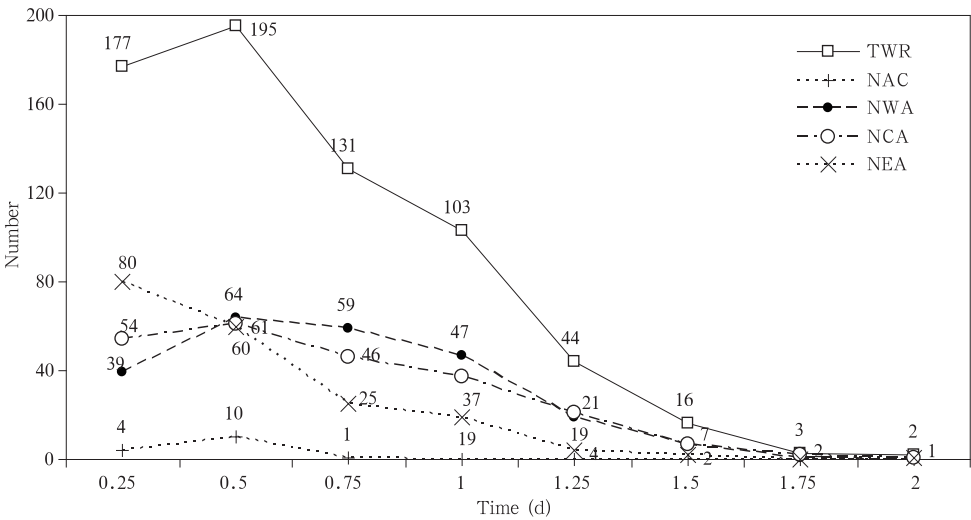


图 7 不同区域上爆发性气旋个数与气旋爆发时长的分布

Fig.7 The number of explosive cyclones with their duration time explosive-deepening over various regions

4.6 路径分布特征

整个北大西洋区爆发性气旋的移动路径呈西北—东南向,但不同区域不同强度爆发性气旋的路径分布存在一定差异。西北大西洋和北大西洋中央区的爆发性气旋主要位于海表温度梯度较大的地方。

弱爆发性气旋(图 8)数量最多,路径分布较为散乱。在北大西洋海盆上,自西南向东北爆发时气旋路径分布呈喇叭状。北美大陆区的爆发性气旋,基本位于北美大陆上,在五大湖或哈德逊湾附近得到爆发性发展。西北大西洋区的爆发性气旋大部分生成于北美大陆及其沿岸,东移入海后加强,爆发时气旋主要位于东海岸近海且路径分布呈明显的喇叭状。北大西洋中央区的爆发性气旋,路径分布比西北大西洋区的爆发性气旋分散,生成区大部分位于北美大陆,小部分来自西北大西洋,向东北方向移动后主要在纽芬兰岛以东的大洋上快速加强,部分气旋在进入到北大西洋中央区就达到爆发性气旋的标

准。东北大西洋区的爆发性气旋,路径与爆发性发展的分布位置比北大西洋海盆其他 2 个区域更为松散,整体上气旋路径移动方向仍为西南—东北向,最北到达挪威海,但位于雷克雅内斯海岭的部分气旋爆发后向北或西北方向移动。此外,这一区域也有部分气旋移动路径横跨整个北大西洋区域,气旋生成地位于北美大陆或墨西哥湾。

中爆发性气旋(图 9)个数约为弱爆发性气旋的 1/3,路径分布相对松散,爆发时自西南向东北路径分布呈带状。不同区域气旋移动路径分布与对应区域弱爆发性气旋类似,不同之处在于:西北大西洋区爆发性气旋移动路径更偏南,爆发性发展区位置更偏西南且呈带状分布;北大西洋中央区气旋的发展区除了纽芬兰岛以东,还有一部分气旋爆发后向偏北方向的拉布拉多海移动;东北大西洋区气旋的爆发性发展区主要集中在冰岛以南、大不列颠岛以西的大洋上。

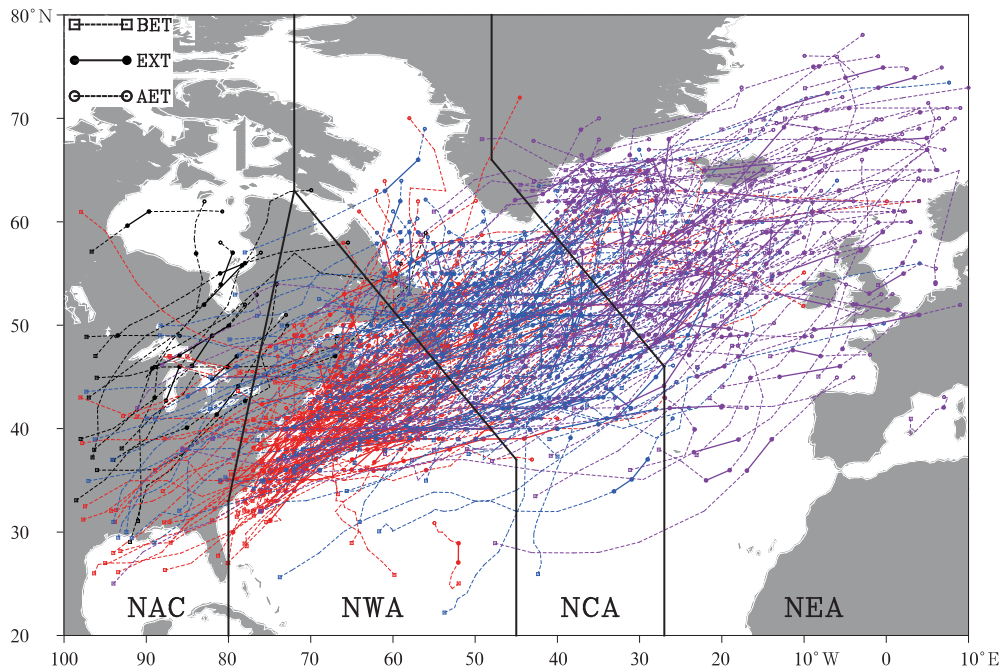


图 8 弱爆发性气旋移动路径分布

(BET、EXT 和 AET 分别为气旋爆发前、时和后的路径,黑色、红色、蓝色和紫色分别为北美大陆区、西北大西洋区、北大西洋中央区和东北大西洋区爆发性气旋的移动路径)

Fig. 8 Tracks of weak explosive cyclones

(BET, EXT and AET represent the track before, during and after explosive development of cyclones, respectively. Black, red, blue and purple represent tracks of explosive cyclones over North America Continent, over Northwest Atlantic, over North-Central Atlantic and over Northeast Atlantic, respectively)

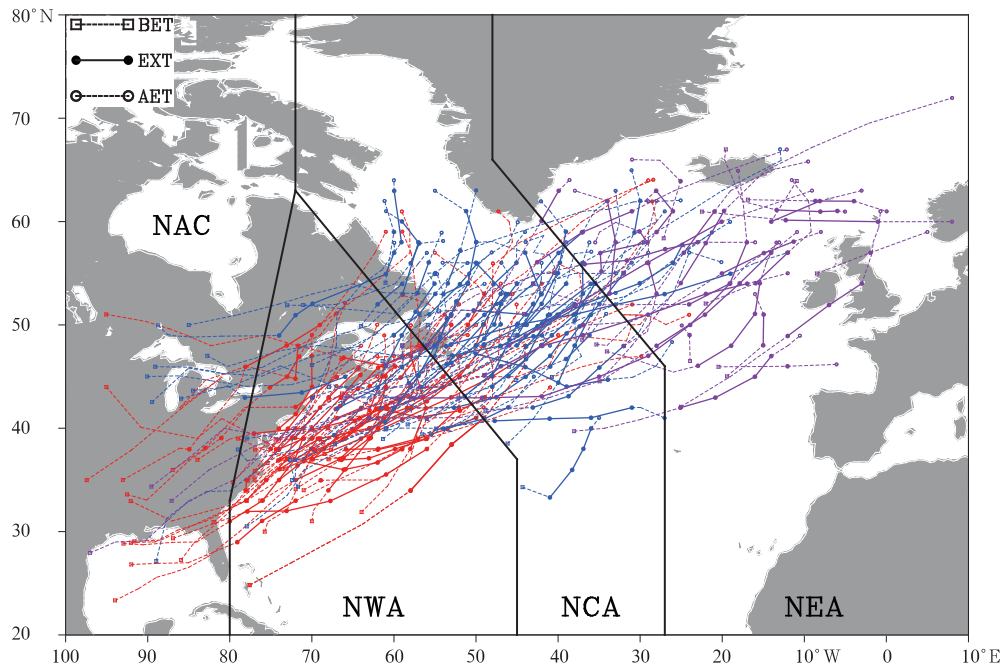


图 9 同图 8,但为中爆发性气旋

Fig. 9 Same as Fig. 8 but for moderate explosive cyclones

强爆发性气旋(图 10)爆发时气旋的移动路径与弱爆发性气旋类似,在北大西洋海盆上自西南向东北呈喇叭状分布且路径分布相比于中爆发性气旋更为集中。西北大西洋区的气旋爆发时沿东海岸近海向东北方向移动。北大西洋中央区气旋爆发时移动路径也为明显的喇叭状分布,部分气旋爆发位置

位于东海岸近海,主要的爆发区位于纽芬兰岛以东和东南部的大洋上。东北大西洋区的气旋由于个数减少,路径分布相对分散,但爆发性发展区基本还是位于冰岛以南、大不列颠岛以西的洋面上,这一区域强爆发性气旋生成地最远位于西北大西洋区的海岸线附近。

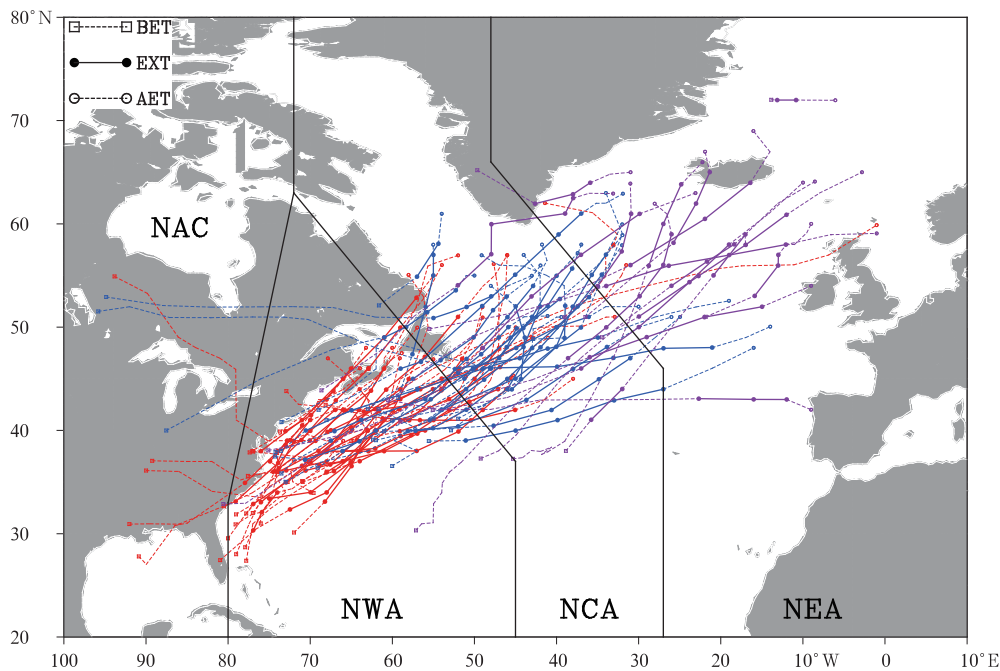


图 10 同图 8,但为强爆发性气旋
Fig. 10 Same as Fig. 8 but for strong explosive cyclones

超强爆发性气旋(图 11)虽然个数大幅度减少,但移动路径的分布却相对集中,爆发时再次呈带状分布。西北大西洋区气旋爆发时的路径分布仍为喇叭状且基本位于该区域内部。仅有一个气旋爆发后移动到东北大西洋区并在这一区域有一个时刻仍然得到爆发性加强。北大西洋中央区气旋爆发时路径呈明显的带状分布且比其他强度的气旋路径分布集中。东北大西洋区只有 2 例超强爆发性气旋且生成地均位于西北大西洋区,在北大西洋中央区爆发性加强,在东北大西洋区海表面中心气压加深率达到最大。

从不同区域气旋移动路径来看,西北大西洋区气旋生成地位于北美大陆、墨西哥湾以及东海岸近海,爆发区主要位于东海岸近海,沿海岸线移动,对应这一区域海表温度梯度绝对值最大,斜压性强,有

利于气旋的爆发性发展。北大西洋中央区气旋主要生成于北美大陆和东海岸近海,少部分生成于墨西哥湾和北大西洋中部。气旋向东北或偏东方向移动,主要爆发区位于纽芬兰岛东南及东部的大洋上,同样对应海表温度梯度较大。同时,该区域有少部分气旋爆发区位于拉布拉多海,也是海表温度梯度绝对值相对较大的区域。东北大西洋区气旋生成地最远位于北美大陆或墨西哥湾,大部分位于西北大西洋区和北大西洋中央区。气旋最北可以到达挪威海,但是随气旋强度增大,移动路径可以到达最北端位置逐渐偏南。气旋爆发区主要位于冰岛以南,大不列颠岛以西的大洋上。这一区域海表温度梯度绝对值小,斜压性弱,根据 Wang 等(2001)的研究,该区域爆发性气旋主要受高层大气强迫的影响。

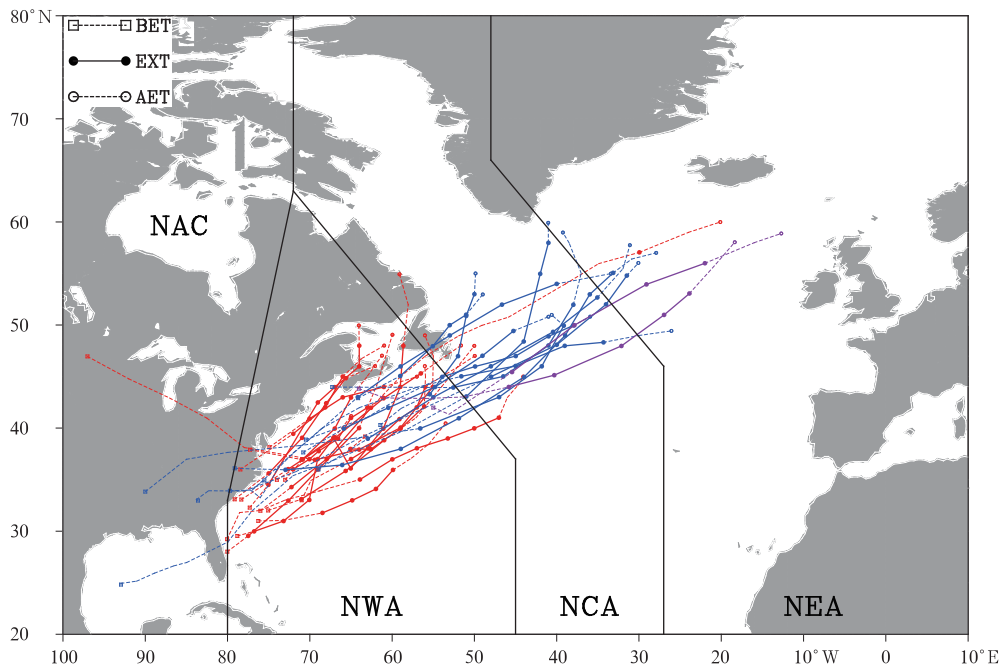


图 11 同图 8, 但为超强爆发性气旋

Fig. 11 Same as Fig. 8 but for super explosive cyclones

5 总 结

利用 NCEP 提供的 FNL 资料, 对 2000—2015 年共 16 个冷季北大西洋爆发性气旋进行了统计分析, 划分为 4 个区域(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)和 4 个强度等级(弱、中、强和超强爆发性气旋), 并发现:

- (1) 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, 气旋强度等级越强, 气旋个数越少, 自西向东气旋海表面中心气压最小值的平均值不断降低。在北大西洋海盆上, 自西南向东北爆发性气旋主要发生时间提前, 气旋海表面中心气压最大加深率的平均值随时间先增大后减小, 气旋的平均爆发时长逐渐变短。整体上, 气旋的移动路径呈西南—东北向分布。在北大西洋海盆上弱爆发性气旋和强爆发性气旋爆发时移动路径呈喇叭状, 中爆发性气旋和超强爆发性气旋爆发时移动路径呈带状。弱爆发性气旋和中爆发性气旋路径分布相对分散, 强爆发性气旋和超强爆发性气旋路径分布相对集中。
- (2) 北美大陆区爆发性气旋个数最少, 气旋强度最弱仅有弱爆发性气旋, 气旋爆发时长最短。该区域爆发性气旋多发生于 10 和 11 月。这一区域气

旋的生成地位于北美大陆, 在五大湖或哈德逊湾附近爆发性加强。

(3) 西北大西洋区爆发性气旋个数最多, 平均海表面中心气压最大加深率最大, 多发生于 1—2 月, 爆发时长最长, 但是海平面中心气压最小值的平均值弱于北大西洋海盆上的其他 2 个区域。气旋生成地主要位于北美大陆、墨西哥湾和东海岸近海, 爆发时移动路径沿东海岸近海成西南—东北向分布, 下垫面的海表温度梯度较大。

(4) 北大西洋中央区爆发性气旋同西北大西洋区气旋相比, 个数略少, 平均海表面中心气压最大加深率略小, 主要发生时间提前, 集中于 12 月—次年 3 月, 爆发时长略短。气旋生成地主要位于北美大陆和东海岸近海, 爆发时移动路径集中在纽芬兰岛东南及东部海表温度梯度较大的洋面上。

(5) 与西北大西洋区和北大西洋中央区气旋比较, 东北大西洋区爆发性气旋个数少、海表面中心气压最大加深率小, 爆发时长短, 但气旋强度最强, 主要发生在 12 月。气旋生成地主要位于西北大西洋区和北大西洋中央区, 爆发时移动路径集中在冰岛以南, 大不列颠岛以西的大洋上, 主要受高层大气强迫的影响。

参考文献

- 傅刚, 张树钦, 庞华基等. 2017. 爆发性气旋研究的回顾. 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 Mar Meteor, 37(1): 10-19 (in Chinese)
- Allen J T, Pezza A B, Black M T. 2010. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalyses. J Climate, 23(24): 6468-6484
- Blier W, Wakimoto R M. 1995. Observations of the early evolution of an explosive oceanic cyclone during ERICA IOP 5. Part I: Synoptic overview and mesoscale frontal structure. Mon Wea Rev, 123(5): 1288-1310
- Bosart L F. 1981. The Presidents' Day snowstorm of 18-19 February 1979: A subsynoptic-scale event. Mon Wea Rev, 109(7): 1542-1566
- Bosart L F, Lin S C. 1984. A diagnostic analysis of the Presidents' Day storm of February 1979. Mon Wea Rev, 112(11): 2148-2177
- Chang S W, Alliss R J, Raman S, et al. 1993. SSM/I observations of ERICA IOP 4 marine cyclone: A comparison with in situ observations and model simulation. Mon Wea Rev, 121(9): 2452-2464
- Chang S W, Holt T R, Sashegyi K D. 1996. A numerical study of the ERICA IOP 4 marine cyclone. Mon Wea Rev, 124(1): 27-46
- Davis C A, Emanuel K A. 1988. Observational evidence for the influence of surface heat fluxes on rapid maritime cyclogenesis. Mon Wea Rev, 116(12): 2649-2659
- Gyakum J R. 1983a. On the evolution of the QE II storm. I: Synoptic aspects. Mon Wea Rev, 111(6): 1137-1155
- Gyakum J R. 1983b. On the evolution of the QE II storm. II: Dynamic and thermodynamic structure. Mon Wea Rev, 111(6): 1156-1173
- Gyakum J R, Anderson J R, Grumm R H, et al. 1989. North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975-1983. Mon Wea Rev, 117(6): 1141-1155
- Gyakum J R. 1991. Meteorological precursors to the explosive intensification of the QE II Storm. Mon Wea Rev, 119(5): 1105-1131
- Kuo Y H, Shapiro M A, Donall E G. 1991a. The interaction between baroclinic and diabatic processes in a numerical simulation of a rapidly intensifying extratropical marine cyclone. Mon Wea Rev, 119(2): 368-384
- Kuo Y H, Low-Nam S, Reed R J. 1991b. Effects of surface energy fluxes during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the western Atlantic. Mon Wea Rev, 119(2): 457-476
- Kuo Y H, Reed R J, Liu Y B. 1996. The ERICA IOP 5 storm. Part III: Mesoscale cyclogenesis and precipitation parameterization. Mon Wea Rev, 124(7): 1409-1434
- Manobianco J. 1989. Explosive east coast cyclogenesis over the west-central North Atlantic Ocean: A composite study derived from ECMWF operational analyses. Mon Wea Rev, 117(11): 2365-2383
- Manobianco J, Uccellini L W, Brill K F, et al. 1992. The impact of dynamic data assimilation on the numerical simulations of the QE II cyclone and an analysis of the jet streak influencing the precyclogenetic environment. Mon Wea Rev, 120(9): 1973-1996
- Nesterov E S. 2010. Explosive cyclogenesis in the northeastern part of the Atlantic Ocean. Russ Meteor Hydrol, 35(10): 680-686
- Rausch R L M, Smith P J. 1996. A diagnosis of a model-simulated explosively developing extratropical cyclone. Mon Wea Rev, 124(5): 875-904
- Reed R J, Grell G A, Kuo Y H. 1993a. The ERICA IOP 5 storm. Part I: Analysis and simulation. Mon Wea Rev, 121(6): 1577-1594
- Reed R J, Grell G A, Kuo Y H. 1993b. The ERICA IOP 5 storm. Part II: Sensitivity tests and further diagnosis based on model output. Mon Wea Rev, 121(6): 1595-1612
- Rice R B. 1979. Tracking a killer storm. Sail, 10: 106-107
- Roebber P J. 1984. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. Mon Wea Rev, 112(8): 1577-1589
- Sanders F, Gyakum J R. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". Mon Wea Rev, 108(10): 1589-1606
- Sanders F. 1986. Explosive cyclogenesis in the west-central North Atlantic Ocean, 1981-84. Part I: Composite structure and mean behavior. Mon Wea Rev, 114(10): 1781-1794
- Uccellini L W, Kocin P J, Petersen R A, et al. 1984. The Presidents' Day cyclone of 18-19 February 1979: Synoptic overview and analysis of the subtropical jet streak influencing the pre-cyclogenetic period. Mon Wea Rev, 112(1): 31-55
- 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. Mon Wea Rev, 113(6): 962-988
- Wakimoto R M, Blier W, Liu C. 1992. The frontal structure of an explosive oceanic cyclone: Airborne radar observations of ERICA IOP 4. Mon Wea Rev, 120(7): 1135-1155
- Wang C C, Rogers J C. 2001. A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: Cyclone structure and evolution. Mon Wea Rev, 129(6): 1481-1499
- Whitaker J S, Uccellini L W, Brill K F. 1988. A model-based diagnostic study of the rapid development phase of the Presidents' Day cyclone. Mon Wea Rev, 116(11): 2337-2365
- Yoshida A, Asuma Y. 2004. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region. Mon Wea Rev, 132(5): 1121-1142