

北大西洋温带气旋的时空变化特征分析

秦昕^{1,2}, 魏立新^{1,2}, 张艺博^{1,3}, 姚宇^{1,2}, 马静^{1,2}, 张慧娟⁴

(1. 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 4. 湖北省孝感市气象局, 湖北 孝感 432000)

摘 要: 基于ECMWF 1979—2016年ERA-interim海平面气压场再分析数据, 利用气旋自动追踪算法, 建立了北半球大西洋区域温带气旋数据集。基于这套数据集, 计算了逐季节气旋的个数、强度、空间分布以及爆发性发展等气候特征。研究表明: 北大西洋区域的气旋年总数有增加趋势, 但未达到显著水平, 存在3~4 a的显著性周期; 气旋个数的季节差异不大, 冬季强气旋以及爆发性气旋所占比例均为各季节中最高, 夏季则相反。除秋季外, 爆发性气旋数量都表现出显著的增加趋势, 特别是2010年以后, 强爆发性气旋数量增加明显。气旋发生爆发性增长的区域集中分布在北大西洋的西南象限, 特别是紧邻北美东海岸区域。北大西洋气旋多于近岸生成, 包括北美东南沿海和欧洲西海岸沿岸。北大西洋气旋主要路径受西风带的影响, 以西南-东北路径从北美沿海移向东北, 进入北大西洋, 有1/5的气旋能进入北极极区, 进入极区的位置集中分布在格陵兰岛以东, 气旋的路径密度随着时间不断变化, 具有季节性和地域性。

关键词: 气旋自动识别算法; 北大西洋气旋; 爆发性气旋

中图分类号: P443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0001-11

1 引言

北大西洋海域有全球各类大小船只往来, 还有丰富的海上油气资源, 中高纬度的北大西洋东岸更是遍布了世界上的有名港口, 是欧洲航线中重要的交通枢纽区域。该区域主要的灾害性天气系统为温带气旋, 气旋过程常伴有多变天气、较多降水和低能见度等恶劣的海况。尤其在冬季, 强大的气旋风暴常常带来暴风雪, 造成海上狂风巨浪, 严重影响航运、海上渔业和石油工业生产安全。

国内外学者对气旋的研究起步较早。早期的气旋识别手段主要依靠实况天气图, 人工定位气旋的位置与强度。宋家喜^[1]通过分析1980—1982年的天气图实况, 指出北大西洋温带气旋活动受北美高空大槽的影响, 槽位置偏北, 气旋生成源地也随之偏北, 反之位置偏南; 文中同时总结了强气旋发生、发

展的几种类型。早期人工气旋统计方法工作量较大, 若统计较长时间段内的气旋将耗费大量时间, 并且具有人为主观性。随着计算机技术的发展, 人们陆续开展了多种气旋自动追踪算法的研究, 并利用这些算法从大气再分析数据中定位、追踪气旋, 由此开展气旋统计, 在此基础上研究气旋活动与大气环流和海冰变化等因子之间的关联。国外较早开展气旋追踪算法的研究者包括Hodges和Simmonds等^[2-5]。Geng等^[6]采用自动追踪气旋的方法统计了1958—1998年共40 a冬季的北大西洋温带气旋, 发现该区域冬季温带气旋无论从强度、移动速度还是数量都有着增强、增多的趋势。Gulev等^[7]利用气旋自动追踪方法, 统计了北半球冬季气旋时空特征和强度特征。Sorteberg等^[8]统计了1948—2002年中纬度进入70°N极区气旋的逐年变化特征及其与北极逐年水汽输送状况的关系, 认为北极极区的水

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-05-15。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC1402703)。

作者简介: 秦昕(1988-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事气旋自动追踪及其时空变化与海气通量相互作用研究。E-mail: tingqin_123@126.com

汽输送与该类气旋活动有显著相关,并且该类气旋有减少趋势。Gómara 等^[9]揭示了北大西洋涛动指数(North Atlantic Oscillation, NAO)以及大西洋经向翻转环流和爆发性气旋的生成发展之间有着密切关联。国内也开展了大量的气旋追踪研究工作。张颖娴等^[10]研究了北半球温带气旋的风暴轴随时间的变化,并得出西北太平洋地区的温带气旋风暴轴有北移现象。任丽媛等^[11]通过分析冬季北太平洋的温带气旋活动与前期秋季北极海冰的关系,得出秋季的海冰减少导致冬季阿留申低压区呈高压异常,西风急流北移,风暴路径向北偏移的结论。本文基于气旋追踪算法,较全面地分析北大西洋的气旋数量和空间等特征,针对气旋强度方面也做了详细统计,特别是对不同爆发性程度的气旋进行统计分析,同时分析了大西洋气旋进入极区的比例情况,这些都为以后更加深入的研究做了初步工作。

2 资料与方法

2.1 数据及研究区域

气旋追踪采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA-Interim 逐日 4 次的平均海平面气压场,基于雷丁大学(University of Reading)的气旋追踪算法计算气旋数据集。该海平面气压场的水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 。文中气旋的统计区域为 $23.5^{\circ} \sim 66.5^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \text{W} \sim 40^{\circ} \text{E}$ (见图 1)。文中统计的时间长度为 1979—2016 年,季节划分为:春季 3—5 月,夏季 6—8 月,秋季 9—11 月,冬季 12 月—次年 2 月。

2.2 气旋追踪算法

计算气旋数据集所用的气旋自动识别算法来

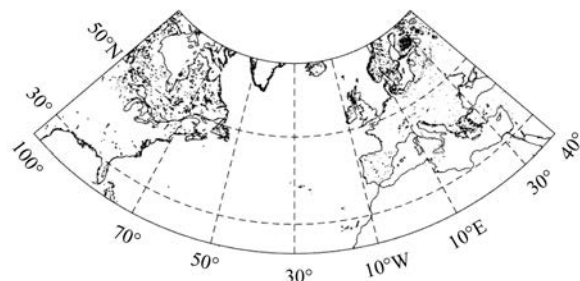


图 1 本文气旋统计区域

自雷丁大学^[2-4]。该算法被广泛应用于温带气旋的气候统计^[12-13],大量的研究统计结果都证明了该方案较好的可信度,为研究奠定了可靠的基础。气旋追踪的基本原理是从平均海平面气压场中找出气压场的极值或 850 hPa 涡度场中的涡度极值,从而追踪气旋的整个生命过程。该算法的计算过程主要分为 3 个步骤:滤波、气旋中心定位以及追踪。滤波在气旋中心识别前进行,目的是消除大尺度环流背景场的影响以挑选出感兴趣尺度的气旋,尤其是中尺度的气旋。滤波采用的计算方法是离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT),这是基于对称过程下的不连续傅里叶变换的计算方法。在滤波后的场域进行气压低值中心定位,定位方法为首先采用多运动目标的连通域进行标记,最后通过定位后的中心位置,采用最近邻的方法连接极值点,形成气旋的整体路径。具体算法可参考 Hodges 相关文献^[2-4]。

2.3 爆发性气旋

大西洋爆发性气旋活动较为频繁,这类气旋也称为“气象炸弹”,其迅速发展加深会给周围区域的天气带来灾害性的影响。20 世纪 80 年代初 Sanders^[14]首次提出爆发性气旋的定义:当某一个气旋的中心气压值在 24 h 内下降 $24 \times (\sin\phi/\sin 60^{\circ})$ hPa 以上。式中: ϕ 为气旋中心所在纬度,取 24 h 内的纬度平均值,定义 60°N 为标准纬度,1 贝吉隆(B)=24 hPa/24 h。针对更短时段内爆发的气旋, Sanders 补充了 12 h 的新标准,加深率为 $12 \times (\sin\phi/\sin 45^{\circ})$ hPa。式中: ϕ 为气旋中心 12 h 内的纬度平均值, 45°N 为标准纬度。本文也沿用了该 12 h 的新统计方法计算爆发性气旋。

3 结果与分析

3.1 气旋基本统计特征

表 1 统计了各季节气旋的数量和强度的基本情况。统计结果表明:各季节北大西洋气旋的平均个数达到 140~150,但各季节之间存在差异,春季气旋个数最多,该季节的年平均个数达到 147.2 个,夏季次之,达到 145.5 个,冬季最少,为 140.9 个。在统计的时间段内气旋出现最多的季节为 1979 年夏季,达到 166 个,各季节最少的气旋数也有 120 个以上。

表1 北大西洋气旋基本情况统计表(1979—2016年)

统计量	春季	夏季	秋季	冬季
总数/个	5 593	5 530	5 385	5 213
平均数/个	147.2	145.5	141.7	140.9
最大值/个	160	166	155	155
最大值年份	2013	1979	1995	1999
最小值/个	126	123	122	124
最小值年份	1999	1984	1996	2015
气旋个数标准偏差/个	7.2	9.2	7.2	7.3
气旋最低中心气压/hPa	927.0	958.5	925.1	912.8
爆发性气旋个数/个	1 390	605	1 420	2 230
爆发性气旋占比/%	24.9	10.9	26.4	42.8
气压低于980 hPa以下气旋平均个数/个	21	5.2	32.2	46.5
气压低于980 hPa以下气旋占比/%	14.3	3.6	22.7	33
进入极区的气旋个数/个	1 069	929	1 077	1 009
进入极区的气旋占比/%	19.1	16.8	20.0	19.4

另一方面,为了反映出该区域受气旋破坏性影响的频率,我们对强气旋数量进行统计。冬季大西洋统计区域内的气旋个数虽然少,但是气旋平均强度在各个季节中居首,曾出现过最低中心气压达到912.8 hPa的气旋,该强度堪比热带气旋中的超强台风,其给海上造成的灾害性影响不容小觑,并且该季节内爆发性气旋占总气旋的比例高达42.8%,低于980 hPa气旋的比例也高达33%。对比4个季节,夏季气旋强度最弱,38 a以来最强的气旋中心气压为958.1 hPa,爆发性气旋所占比例仅为5.2%,980 hPa以下的气旋比例也仅为3.6%。冬季与夏季强度相差较大,秋季和春季分别是气旋强度转变的过渡季节,秋季强度仅次于冬季,爆发性气旋以及强气旋所占比例都略强于春季。自南向北进入北极地区的气旋对北极的天气、气候以及海冰都有一定的影响。从大西洋进入北极的气旋将会为北极输送大量的水汽与热量,其伴随的大风对极区的海冰漂移以及冰的堆积都会产生动力作用。因此,本文统计了北大西洋进入极区的气旋比例(见表1),除夏季外其他3个季节该比例均达19%以上,夏季比例较低,为16.8%。由此可见,有将近1/5的大西洋气旋会进入极区,并对极地的大气、海洋和海冰造成直接影响。

图2为逐季节的气旋个数时间序列,图中红色虚线是时间序列的趋势变化。由图可知,春季、秋季以及冬季的气旋个数均呈现不显著的增长趋势

(在 $\alpha=0.05$ 的标准下),气旋个数的倾向率为春季1.27个/(10 a),秋季0.7个/(10 a),冬季0.5个/(10 a),夏季变化趋势不明显。年总气旋数呈现不显著的增长趋势(在 $\alpha=0.05$ 的标准下),气旋个数的倾向率为2.5个/(10 a)。

从气旋数量时间序列的变化可以看出气旋总个数的变化趋势不明显(见图2),但是年际变化趋势较强。为了进一步探讨气旋年总个数的周期性变化规律,对气旋总数进行小波分析,分析结果如图3所示。计算结果表明:气旋年总数的变化存在3~4 a的显著性变化周期(在 $\alpha=0.05$ 的标准下,阴影区域达到显著检验水平)。气旋个数的周期性随着时间尺度的增加表现得越来越弱,5 a以上的周期性变化均未达到显著。

3.2 气旋的空间活动特征

3.2.1 气旋的密度分布特征

图4与图5分别是统计区域气旋的源地数密度以及路径数密度。数密度值的高低表征了气旋生成地以及气旋移动趋势的大致分布。综合两类图能够判断气旋大致的活动区域,数密度的计算方法采用雷丁大学追踪算法中自带的核密度分布方案,其单位为:个/a \times 5°Cap(Cap为球冠单位面积)。从气旋的源地分布图可知(见图4),大洋中部气旋生成较少,气旋主要生成于近岸,主要生成地包括北大西洋西海岸(即北美的东南沿海,大致位于35°~

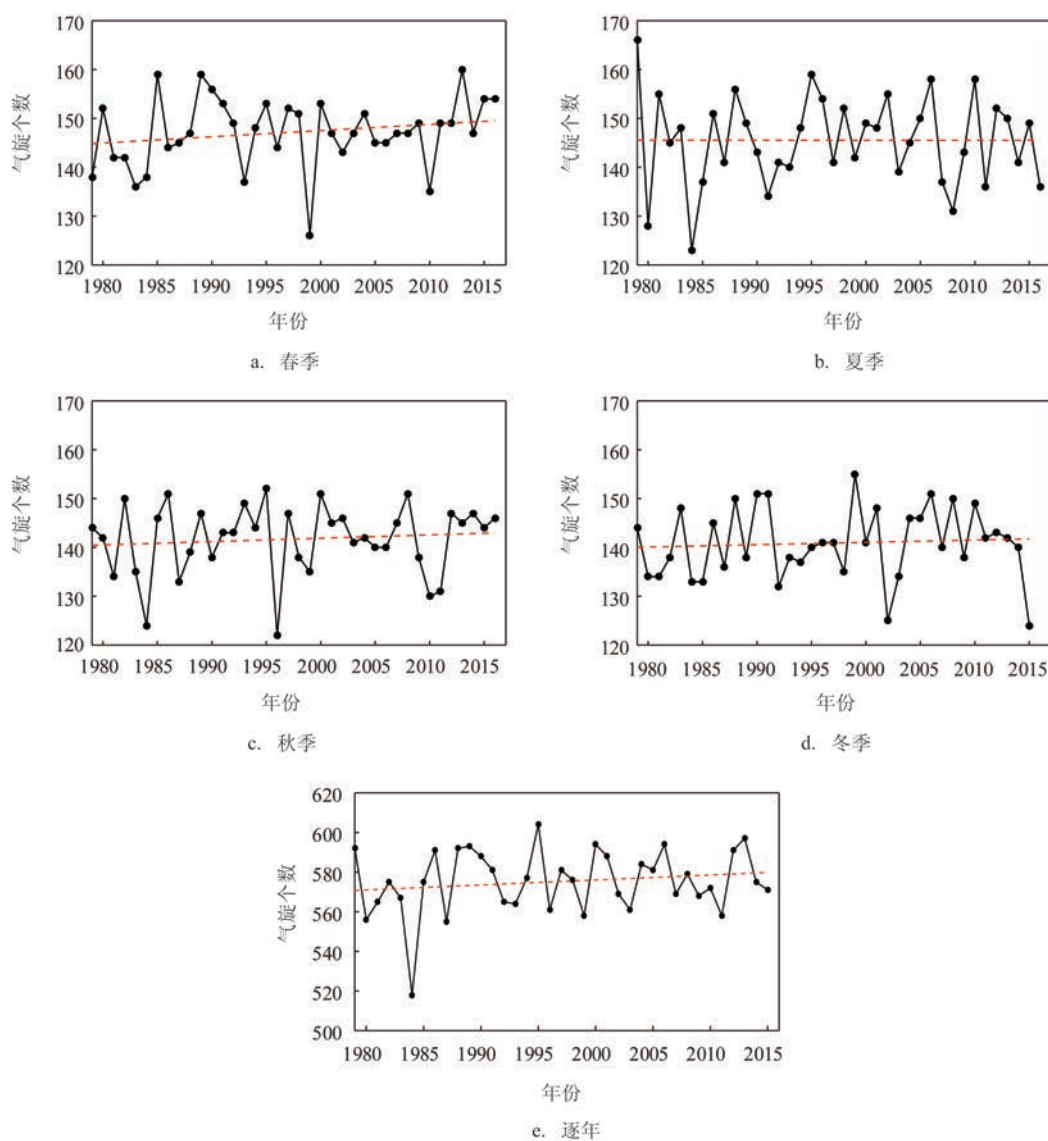


图2 北大西洋各季节气旋数量的时间序列

45°N, 70°~80°W 区域)以及北大西洋东海岸沿岸,尤其是欧洲的西南沿岸(25°~30°N, 0°~10°E)在春季、夏季和秋季3个季节都出现了气旋的密度高值区;另一个较为明显的气旋生成源地位于中高纬度格陵兰岛的东南沿岸,该区域除夏季外的3个季节都存在明显的密度高值。夏季,北美大陆东岸50°N附近的高纬度区域也有一个气旋的高密度生成区域。气旋生成后的移动可以通过图5判断,主要路径位于大西洋的西北象限,4个季节该路径的密度高值区域都非常明显,这条高密度带的形成主要是因为北美东海岸生成的气旋受西风带的影响,沿岸生成后沿西南-东北路径向大西洋中高纬度的海域

移动。欧洲西南部的气旋生成后由于西风环流背景的影响,不会向其东侧的大西洋移动,而主要移向地中海及欧洲大陆一带,影响陆地区域。

基于气旋的路径密度,进一步计算了1986—2015年共30 a逐季节内的气旋气候平均路径,以及每10 a的平均路径。该方法基于图3所得的气旋路径密度,计算所有格点的密度平均值,并以此值作为临界阈值,统计大西洋区域所有格点密度在该阈值以上的网格点;计算该类格点的平均纬度,得到气旋运动的平均路径,以此反映气旋运动的平均纬度分布,并通过对比每10 a的气旋平均路径与气候平均路径来分析气旋路径的变化趋势,计算的结果

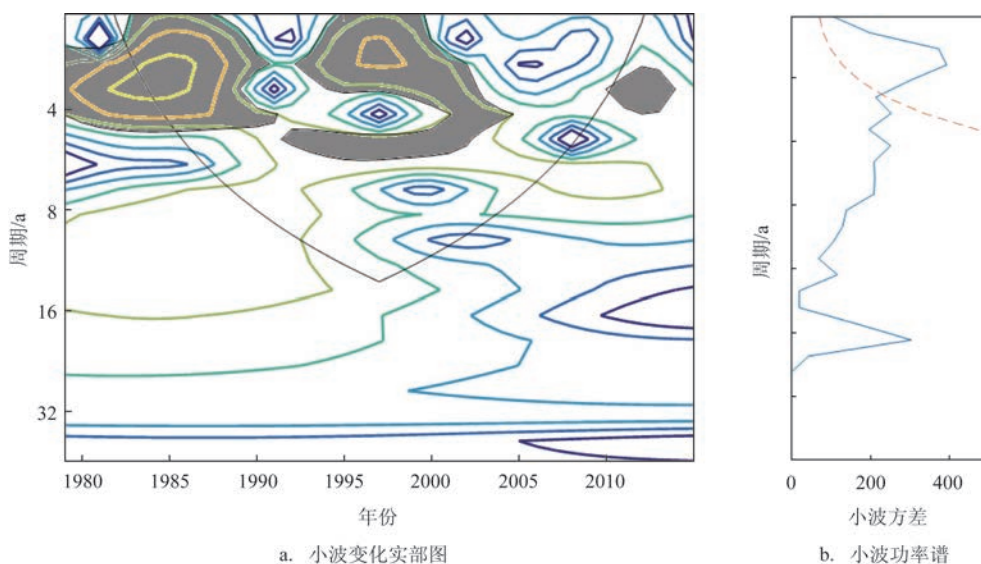


图3 北大西洋年总气旋数量的小波分析(显著性检验水平 $\alpha=0.05$)

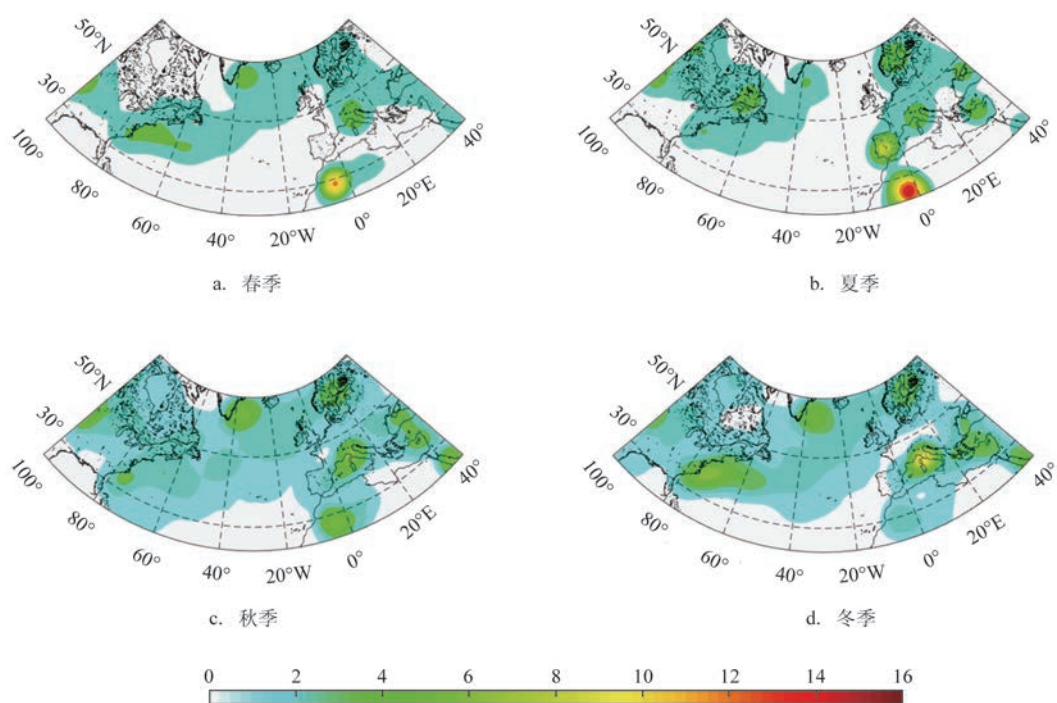


图4 北大西洋气旋源地密度(单位:个/a \times 5° Cap)

如图6所示。通过与30 a的气候平均态对比发现,1986—1995年10 a的气旋平均路径(蓝线)与气候态(黑线)在各个季节路径都比较一致。1996—2005年的气旋平均路径(黄线)与气候平均态相比,春、秋两季位于大西洋区域内的气旋路径比气候平

均路径略微偏南;冬、夏两季的路径则与气候平均路径比较一致。2006—2015年的平均路径(红色)与气候平均路径比较而言,春、秋两季较气候平均路径有向极偏移趋势,尤其是位于高纬度的格陵兰岛以东,其平均路径更加偏北,因此在春、秋季节北

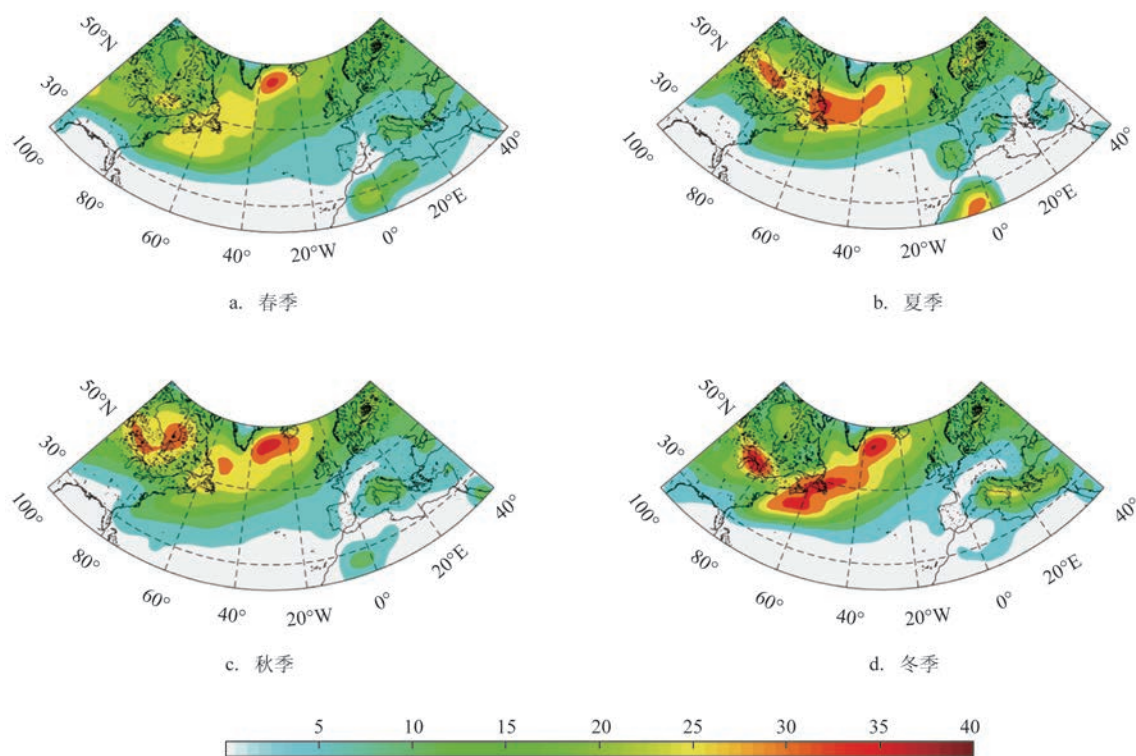


图5 北大西洋气旋路径密度(单位:个/a \times 5°Cap)

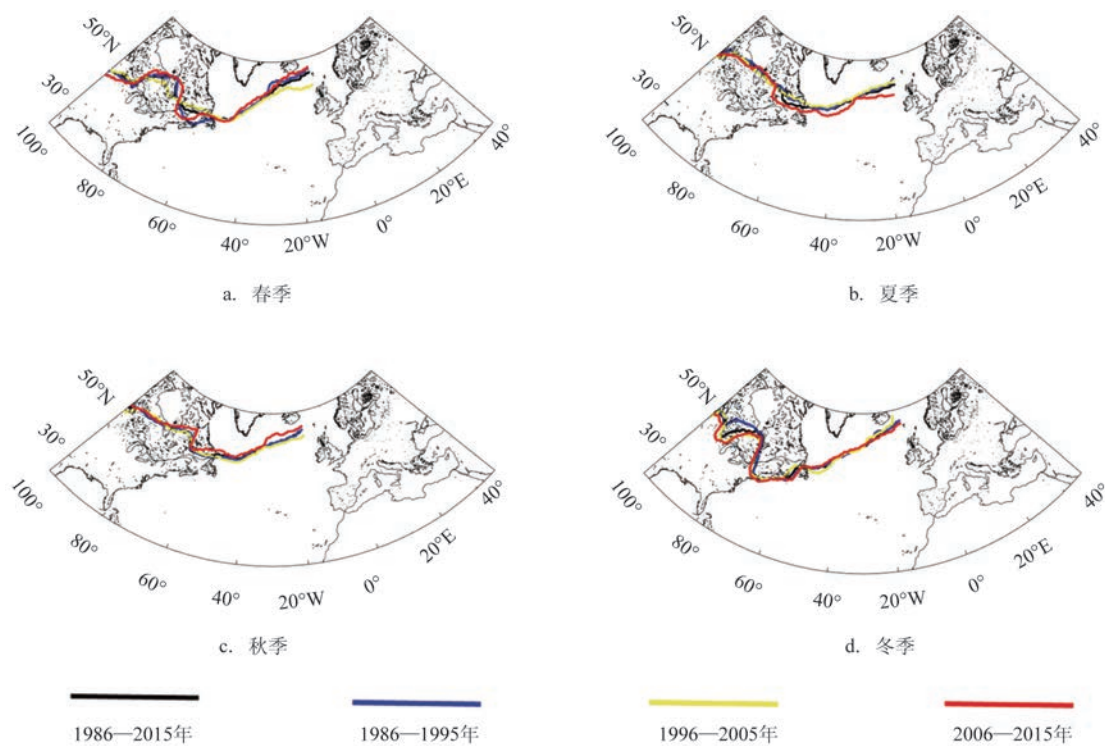


图6 北大西洋气旋平均路径分布

极海冰的外围影响也更加明显。但是这10 a的平均路径显示,夏季气旋在大西洋上的平均路径有向南偏移的趋势;相比其他3个季节,冬季路径30 a来变化不大,都比较接近气候平均路径。从平均路径还可以发现,气旋进入大西洋以后,各季节的路径都表现为西南-东北的走向,春、冬季的平均路径比夏、秋季路径的倾斜角度更加明显,气旋活动最为频繁的区域集中在 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间,这与大西洋风暴轴位置相对应。

本文统计了1979—2016年气旋路径密度的变化趋势。由图7可知,各个季节路径密度的变化趋势在大西洋区域的分布并不一致,春季大部分区域呈现出较明显的增长趋势,中高纬度海域($60^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)的增长达到了显著水平;夏季大西洋的东西两侧表现出相反的变化趋势,大洋东侧表现为显著的增长,西侧为显著的下降(在 $\alpha=0.05$ 的标准下);秋季的气旋密度纬向、经向差异明显,在大西洋的西侧北美大陆沿岸, 40°N 以南的低纬度地区主要表现为增长趋势, 40°N 以北表现为减少趋势,而东侧的欧洲大陆沿岸趋势正好相反;冬季变化趋势与秋季相反,北美大陆沿岸 40°N 以南低纬度地区气旋活动减少, 40°N 以北气旋活动增加,而欧洲

大陆的趋势相反。因此气旋活动的年代变化并不是均匀的,具有明显的季节性以及区域性特点。气旋的生消活动往往与大气环流和海气相互作用之间的关系密切。因此,北大西洋涛动作为北大西洋区域最显著的模态,其对气旋的变化将会有一定的影响,当北大西洋涛动增加,北大西洋中纬度西风增强,这时墨西哥湾暖流及拉布拉多寒流均增强,西北欧和美国东南部地区因受强暖洋流影响,气旋活动增多;反之北大西洋涛动减弱,对应气旋活动的减少。

3.2.2 进入极区的气旋分布特征

前文的统计已表明,北大西洋气旋近1/5能够进入北冰洋,气旋进入北极区域会直接造成明显的降水及大风,对极区的大气、海洋以及海冰都造成直接的影响,这部分气旋也是中高纬度与极区进行热量以及水汽交换的重要通道。因此文中统计了 $100^{\circ}\text{W}\sim 40^{\circ}\text{E}$ 范围每隔 20° 经度区间气旋进入极区的比例。通过该统计,可以掌握气旋对北极地区影响的关键海域,结果如图7所示。4个季节中气旋进入极区有两个关键的区域,位于 $20^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{E}$,覆盖了格陵兰海海域和挪威海域,在各季节中所占比例几乎都达到了20%以上;其他较多的区域分别是格

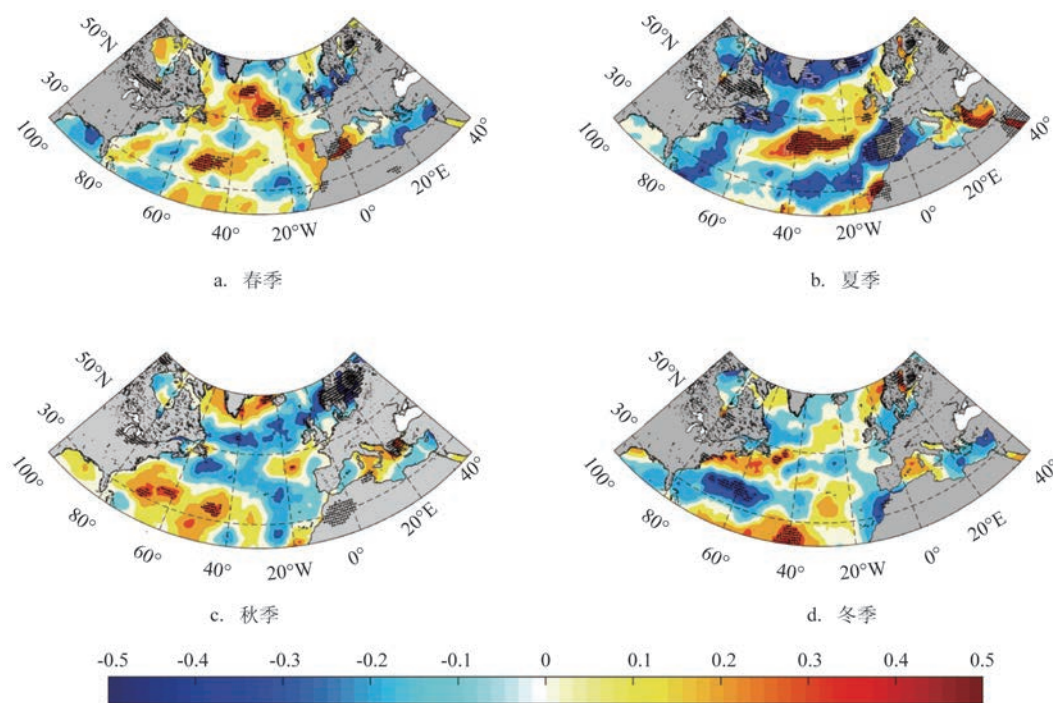


图7 北大西洋气旋路径密度变化趋势(单位:个/a $\times 5^{\circ}\text{Cap}$,黑色阴影区域为达到显著水平区域)

陵兰岛($20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$)以及 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{W}$ 巴芬岛以西的一部分群岛附近;巴伦支海以及巴芬湾都较少有气旋进入极区,因此北大西洋气旋进入极区的路径相对较集中,从平均路径也能看到其进入极区较为集中的分布位置。

3.3 爆发性气旋的分布

前文统计了各季节爆发性气旋的平均个数,为掌握爆发性气旋的空间分布,为海上船只航行提供

一定的航线参考,本文对大西洋区域活动的温带气旋爆发性增长的位置进行统计。只要气旋的增长达到爆发性的标准,其位置将被统计,结果如图9所示。统计的单位网格为 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$,不同颜色的实心点代表落入该单位网格范围内的气旋数量。结果表明:北大西洋气旋爆发性增长的位置集中分布在北大西洋的西海岸,特别是紧邻北美洲东南海岸的近海沿岸,4个季节的统计结果都明显多于其他区域;相比而言,欧洲西侧的北大西洋以东沿岸附近海域气旋的爆发性增长少,增长位置多集中在沿岸附近海域,北大西洋中部仅部分海域出现气旋的爆发性增长。气旋爆发性发展的整体纬度集中于 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 的中纬度范围, 50°N 以上的高纬度区域气旋的爆发性增长相对少,仅存在于格陵兰的东南侧。气旋的爆发性增长在冬季最频繁,夏季最弱,春季北美沿岸爆发性气旋的频次略高于秋季。北大西洋爆发性气旋集中分布在大西洋西岸的特征主要受到海洋和大气的共同作用。一方面,由于墨西哥湾暖流起源于墨西哥湾,经过佛罗里达海峡沿着美国的东部海域与加拿大纽芬兰省向北,这一途径区域正好是气旋爆发性发展的主要区域,暖流经过时提供了潜热以及感热能量,使得该区域大气的稳定度减

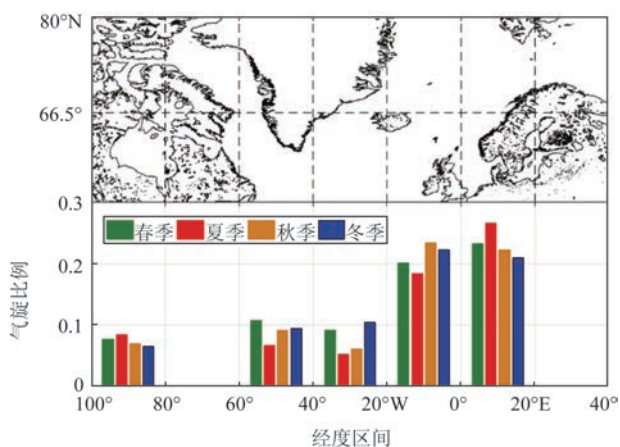


图8 气旋进入北极极区的比例分布

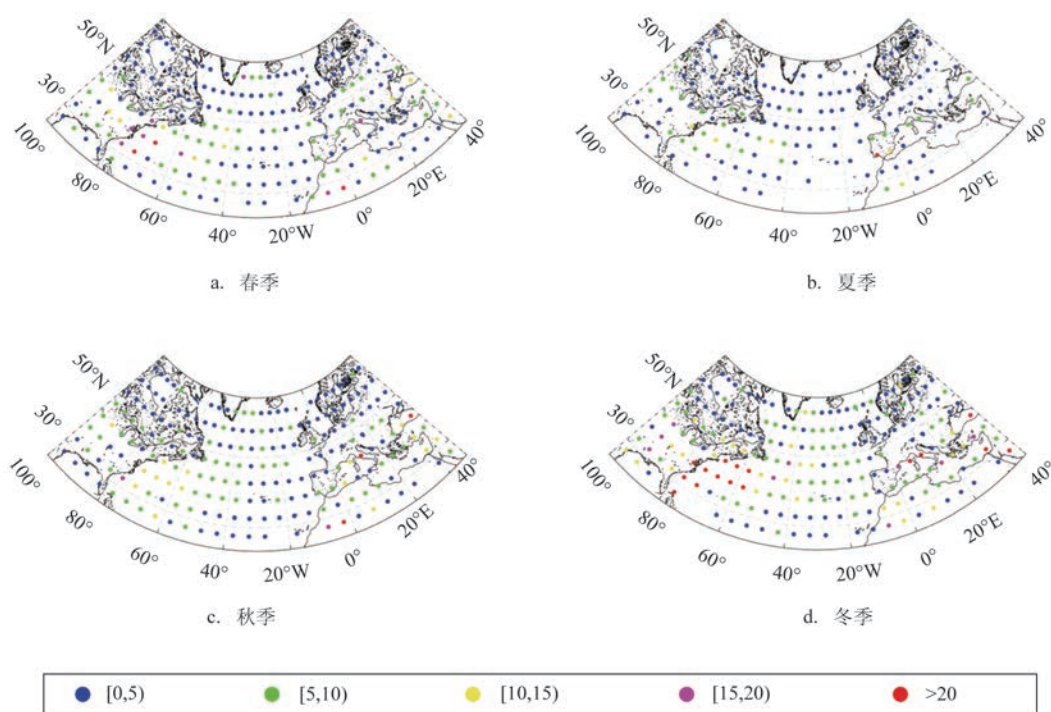


图9 北大西洋爆发性气旋分布

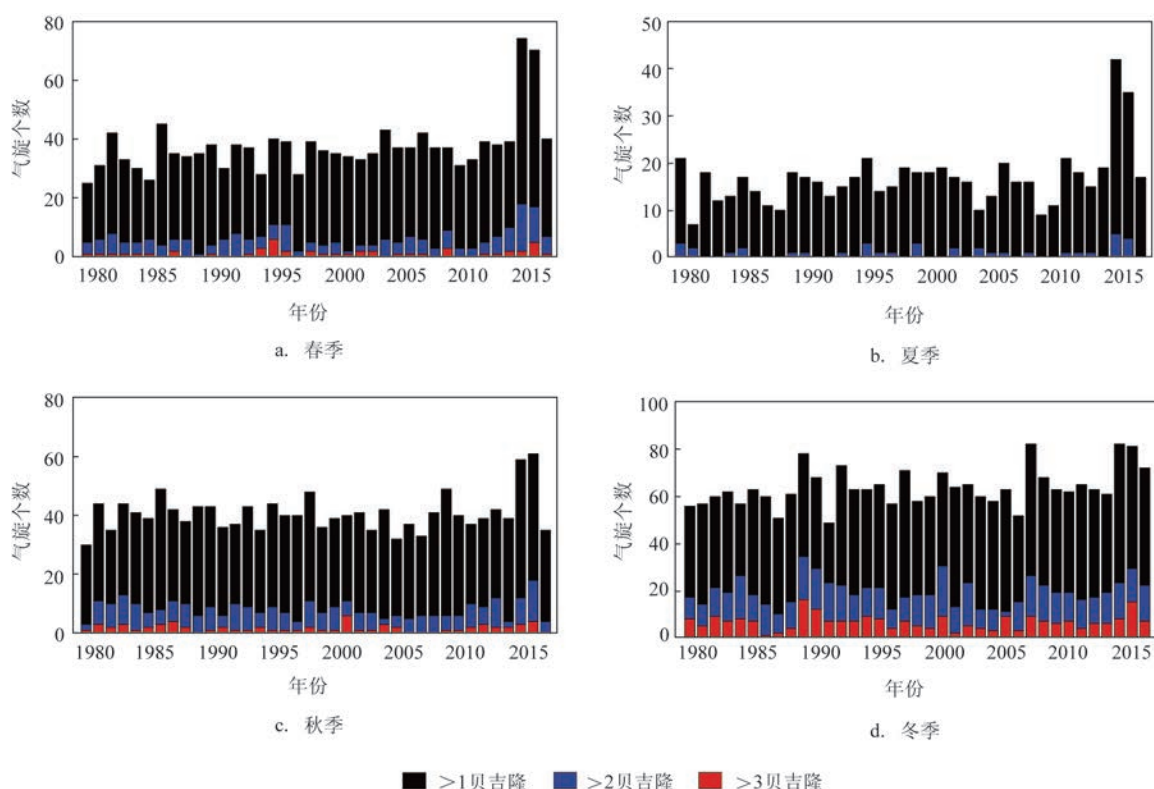


图10 不同爆发性增长程度的气旋时间序列

小,有利于气旋的爆发性增长。自动追踪计算的爆发性气旋的分布与前人通过人工统计得出的区域也一致^[13]。除了海洋热力因素,大气动力因素也不容忽视,通常高空西风槽前的正涡度平流有利于气旋的发展,北大西洋的西海岸正好位于北美大槽前部,因此该区域的气旋爆发性发展还受到大气环流的涡度平流支撑。由于海洋与大气的共同作用,使得北大西洋的西海岸成为气旋爆发性增长的主要区域。

3.4 爆发性气旋的变化特征

大西洋爆发性气旋的增长存在强弱差别,文中分别统计了1979—2016年不同强度级别的爆发性气旋在各季节的变化情况。强度级别依据贝吉隆大小进行区分,分别按1、2、3个贝吉隆的强度级别进行统计。统计的结果如图10,总的爆发性气旋(达到1个贝吉隆以上的气旋个数)的整体趋势除秋季以外都达到了显著增长的水平,气旋个数的倾向率分别为春季4.1个/(10 a)、夏季2.3个/(10 a)、秋季1.2个/(10 a)、冬季3.2个/(10 a)。2、3个贝吉隆的气

旋整体为不显著的增长趋势,但2010年以后,特别是达到2贝吉隆爆发性增长程度的气旋趋势十分明显(见图10中蓝色柱状分布)。因此,近年来迅速发展的爆发性气旋个数呈现明显的增长趋势。

4 总结与讨论

本文通过自动追踪算法,计算并建立了北大西洋1979—2016年的温带气旋数据集,通过这套数据集,对北大西洋气旋的数量、强度、位置以及爆发性气旋的活动等基本特征进行统计分析,再通过相关分析,初步讨论了不同程度爆发性气旋与北大西洋涛动、厄尔尼诺指数等大气和海洋影响因子之间的关系。结论如下:

(1)1979—2016年38 a的气旋个数统计表明,统计区域内逐季节的年总气旋个数为140~150,其中春季气旋个数最多,平均为147个,冬季气旋个数最少,平均为141个,各个季节的气旋活动都比较频繁;年总气旋个数整体表现为不显著的增加趋势;气旋的年际变化明显,气旋总个数表现出3~4 a

的主要变化周期;冬季虽然气旋个数最少,但是冬季强气旋、爆发性气旋的个数所占比例最高,秋季、春季次之,夏季的气旋强度最弱。

(2)气旋的生成区域主要有两处:一是位于北大西洋的西海岸,即北美的东南沿海,另一处位于北大西洋的东海岸,即欧洲的西南沿海。从平均气旋的路径可以看出,大西洋气旋活动最为频繁的区域集中在 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间,中高纬度的气旋活动比低纬度地区更频繁的受西风带影响。北美大陆生成的气旋主要以西南-东北路径移入北大西洋,并成为北大西洋主要的气旋路径,欧洲西南沿海生成的气旋主要移动至欧洲大陆以及地中海附近,对大西洋中部海域的影响较弱。气旋移向东北后,有将近 $1/5$ 的气旋从格陵兰岛、格陵兰海等区域进入北极,从而影响北极的天气和海冰变化。38 a以来,气旋的密度变化具有明显的季节性和局地性,变化的趋势并不是均一的。除夏季之外,气旋在其他3个季节的平均路径有北移趋势。之后我们将在气旋进入较多的北极关键海区(格陵兰海)与进入较少的跨极区域,针对降水、海冰漂移等变化做对比研究,以期更好地了解气旋活动对海冰、当地天气以及气候的影响特征。

(3)北大西洋的爆发性气旋除秋季外,其他季节都达到了显著性的增长水平,较强程度的爆发性气旋自2010年来表现出较明显的增长趋势。冬季的爆发性气旋最多,夏季最少。气旋的爆发具有明显的地域特点,主要爆发于北大西洋的西海岸,尤其是北美大陆沿岸附近;气旋爆发集中在中纬度区域,高纬度区域较少。主要原因是受到墨西哥湾暖流的热量输送导致大气的稳定度减小以及北美大槽的槽前正涡度平流的有力支撑的影响;另一方面,气旋的爆发性增长可能与北大西洋经向翻转环流的变化有关。研究发现,在现代气候背景下,北大西洋经向翻转环流减弱^[15],导致北大西洋区域低纬度向高纬度热量输送减少,同时向次表层及中深层海洋的热量输送也会减少,因此温室气体热辐射作用形成的热量更多地停留在海洋表面,使得海上的气旋能获得更多的热量,促使其爆发性的增长,文中爆发性气旋在近年来的确处于增长趋势,并且气旋爆发的位置也多位于海上。这一增长趋势与

北大西洋经向翻转环流变化之间的关系还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋家喜. 北大西洋强温带气旋活动的环流形势及其天气特征[J]. 海洋预报, 1986(2): 60-65.
- [2] Hodges K I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(11): 2573-2586.
- [3] Hodges K I. Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(12): 2914-2932.
- [4] Hoskins B J, Hodges K I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks[J]. Journal of Climate, 2005, 18(20): 4108-4129.
- [5] Simmonds I, Keay K. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis[J]. Journal of Climate, 2000, 13(5): 873-885.
- [6] Geng Q Z, Sugi M. Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEP/NCAR reanalysis data[J]. Journal of Climate, 2001, 14(18): 3863-3873.
- [7] Gulev S K, Zolina O, Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP / NCAR reanalysis data[J]. Climate Dynamics, 2001, 17(10): 795-809.
- [8] Sorteberg A, Walsh J E. Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic[J]. Tellus A, 2008, 60(3): 570-586.
- [9] Gómara I, Rodríguez-Fonseca B, Zurita-Gotor P, et al. Abrupt transitions in the NAO control of explosive North Atlantic cyclone development[J]. Climate Dynamics, 2016, 47(9-10): 3091-3111.
- [10] 张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化[J]. 大气科学, 2012, 36(5): 912-928.
- [11] 任丽媛, 刁一娜. 冬季北太平洋的温带气旋活动及其与前期秋季北极海冰的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 20-29.
- [12] Lan X, Zahn M, Hodges K I, et al. A comparison of two identification and tracking methods for polar lows[J]. Tellus A, 2012, 64(1): 17196.
- [13] Wei L X, Qin T. Characteristics of cyclone climatology and variability in the Southern Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(7): 59-67.
- [14] Sanders F. Explosive cyclogenesis in the west-central North Atlantic Ocean, 1981-84. Part I: Composite structure and mean behavior[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(10): 1781-1794.
- [15] Chen X Y, Tung K T. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation[J]. Nature, 2018, 559(7714): 387-391.

Spatial and temporal characteristics of extratropical cyclones in the North Atlantic Ocean

QIN Ting^{1,2}, WEI Li-xin^{1,2}, ZHANG Yi-bo^{1,3}, YAO Yu^{1,2}, MA Jing^{1,2}, ZHANG Hui-juan⁴

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 4. Meteorological Observatory of Xiaogan, Xiaogan 432000 China)

Abstract: An extratropical cyclone dataset is calculated for the North Atlantic based on the ECMWF ERA-Interim sea-level pressure reanalysis data from 1979 to 2016 and the cyclone automatic tracking algorithm. The dataset is used to analyze the characteristics of cyclone number, intensity and spatial distribution on seasonal scale and the explosive cyclones. It is found that the cyclone frequency shows a slightly increasing trend with a period of 3~4 years in the North Atlantic. There is little seasonal difference in the cyclone number, while the strong cyclones and explosive cyclones occur most frequently in winter and least frequently in summer. The number of explosive cyclone shows a significant increase trend throughout the year except in autumn, especially for the period after 2010. The location of explosive growth of the cyclone is concentrated in the southwestern quadrant of the North Atlantic, especially for the area by the eastern coast of North America. The cyclones in the North Atlantic usually occur near the coast including the southeastern coast of North America and the western coast of Europe. The main path of the cyclones is affected by the westerlies, and the cyclones enter the North Atlantic following a southwest-northeast direction from the North American coast. One fifth of the cyclones enter the Arctic, which is concentrated in the area east of the Greenland. The track density of the cyclones varies with time with seasonal and spatial variation.

Key words: cyclone tracking; cyclones in North Atlantic; explosive cyclones