

赵晓彤,余锦华,廖桢桦,等. 北大西洋热带气旋生成频数变化对海温异常响应特征的研究[J]. 热带气象学报, 2020, 36(2):

文章编号: 1004-4965(2020)02-0208-11

北大西洋热带气旋生成频数变化对海温异常响应特征的研究

赵晓彤¹, 余锦华², 廖桢桦³, 顾人颖¹, 闻丹¹

(1. 宁波市鄞州区气象局, 浙江 宁波 315194; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 浙江省气象局, 浙江 杭州 310002)

摘 要: 利用美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)的 Best Track Data (HURDAT2)数据和美国国家预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)大气再分析资料,运用广义平衡反馈分析方法(GEFA),研究多个海盆主要海表温度异常(SSTA)模对北大西洋热带气旋生成频数(TCGN)气候变率的强迫作用。(1) 北大西洋 TCGN 的气候变率对北大西洋三极型模态(NA1)和太平洋 mega-ENSO 式模态(P1)具有显著的响应,对应的响应振幅分别为 0.45 和 -0.28, 即当 NA1(P1)的时间系数增加(减小)1 个标准差时,北大西洋 TCGN 将增加 0.45(0.28) 个。(2) TCGN 对 NA1、P1 的气候变率、年代际变率有显著响应,但对年际变率响应不显著。(3) 北大西洋 TCGN 在 1995 年前后发生异常变化,从平均 8 个增加到 12.6 个,NA1、P1 对 1995 年后的 TCGN 异常增加的贡献分别为 27%、45%。(4) NA1 对北大西洋 TC 环境场的强迫中心多集中在 20 °N 附近,而 P1 的多位于 20 °N 以南以及墨西哥湾地区,为 TC 生成提供有利的动力和热力条件。

关键词: 北大西洋热带气旋生成频数;GEFA;SSTA

中图分类号: P444

文献标志码: A

Doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.021

1 引 言

热带气旋(TC)是形成于热带或副热带温暖洋面,具有暖心低压结构的大气涡旋。虽然发生在海洋上,但其活动范围较广,破坏力强大^[1],会带来狂风、暴雨、洪水、大范围停电等事故,造成重大经济损失^[2]。北大西洋 TC 主要影响美国^[3]、墨西哥等北美国家。有研究表明,21 世纪北大西洋 TC 年均爆发次数比一个世纪前增加了 1 倍^[4],且 TC 发生频次增加与全球气候变化有关的海面温度升高和风场改变有密切关系。通常 TC 形成所需热力条件为局地海表温度(SST)达到 26 °C 以上,更有学者研究表明,全球其他海盆的海温可通过遥相

关、海气相互作用等机制影响 TC 的生成,且这部分的影响是不可忽略的^[5-8]。也有学者发现,北大西洋热带气旋生成频数(TCGN)与北大西洋局地海表温度异常(SSTA)有密切关系^[9-11]。有研究表明未来北大西洋海温的升高将引起 TC 生成位置显著东移^[12]。也有学者发现北大西洋 TC 与太平洋海温有一定的关系。Schemm 等^[13]得出当热带太平洋 SST 呈东太平洋(EP)厄尔尼诺、中太平洋(CP)厄尔尼诺和拉尼娜三种模式下时,北大西洋墨西哥湾区域热带气旋将呈现不同的特点。Klaus 等^[14]的研究也表明,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)可通过垂直风切变影响北大西洋 TC 活动,而热带大西洋 SST 作用却不显著。那么,在全球大背景下,到底哪个海域的 SST 对北大西洋 TC

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(41575083,41730961)共同资助

通讯作者: 赵晓彤,女,江苏省人,工程师,主要从事热带气旋、气候诊断等研究。E-mail: yinzhouxxt@126.com

活动影响最为显著? 这些海域 SST 的贡献到底有多大? 需要做进一步研究。

传统的多元线性回归分析是基于观测资料诊断得到的结果,只能用于论述变量间的统计联系,并不能说明变量间的物理联系,即谁影响谁的问题。广义平衡反馈分析方法(GEFA)是 Liu 等^[15] 2008 年提出的一种方法,用来分离不同海盆对大气的强迫作用。截至目前,利用 GEFA 得出的研究成果已有很多。国内外学者利用 GEFA 研究大气位势高度场、美国区域降水、中国冬季气温、夏季降水异常与全球海温强迫的关系^[15-18]。也有研究^[19-21]去除各海盆海温之间的相互作用,研究西北太平洋热带气旋频数变化对全球海温异常的响应特征,得到一系列结论,证明利用 GEFA 研究热带气旋频数与海温异常的关系(响应)是可行的。

本文将利用 GEFA 方法,研究关键海域 SSTA 对北大西洋 TCGN 气候变率的定量贡献,诊断其影响北大西洋 TCGN 变化的大气环境要素,提高对 SSTA 与北大西洋 TCGN 气候变率关联的认识。

2 资料与方法

2.1 资料

北大西洋 TC 资料为美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)的 Best Track Data (HURDAT2)数据,包括 TC 中心位置和附近最大风速、最低气压,数据时间间隔为 6 小时。文中所使用的 TC 数据,皆是以生命史上的最大强度达到热带风暴级别(TS)的热带气旋,第一次达到 35 kt 时候的数据来计算的。

环境场资料为美国国家预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析月平均资料,空间网格分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,所用要素包括海平面气压、相对湿度、风场等;海温数据为 HadISST OI 海温月平均数据,空间网格分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。所用数据时间序列为 1970—2017 年,共计 48 年。

2.2 方法

2.2.1 广义平衡反馈分析方法(GEFA)

研究 t 时刻大气变量(北大西洋 TCGN) x 和海温变量(9 个海温模态的时间系数) y 之间的关系。

y 可以表达为:

$$y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_9(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

由于可将 TCGN 看为受到整个海洋不同海区的共同作用,且这个作用由海洋反馈和大气内变化这两部分组成,因此 t 时刻 x 可以表达为:

$$x(t) = \sum_{j=1}^9 b_j y_j(t) + n(t) \quad (2)$$

其中 $n(t)$ 为大气内变化, b_j 为 TCGN 对第 j 个海温模态的响应系数,表示下垫面(海温)异常对北大西洋 TCGN 的独自贡献,即当 $y_j(t)$ 变化为 1 时 $x(t)$ 变化。

由于前期下垫面异常不受后期大气影响,因此:

$$\langle N(t), Y(t - \tau) \rangle = 0 \quad (3)$$

用超前海洋与方程(2)两边作协方差,得反馈系数阵:

$$B(\tau) = C_{xy}(\tau) C_{yy}^{-1}(\tau) \quad (4)$$

其中 $C_{xy}(\tau)$ 是 $x(t)$ 与 $y(t - \tau)$ 的协方差阵, $C_{yy}(\tau)$ 为 $y(t)$ 与 $y(t - \tau)$ 的自协方差阵。 τ 为大气对下垫面的响应时间,文中取 $\tau=1$,即使用 6—9 月海温作为超前海温。矩阵 B 即为 GEFA 的响应系数矩阵。由于使用的是月平均资料,在一个月尺度的时间尺度内,大气对海温异常的响应已达到平衡状态,所以大气与海温的联系看上去是同期的,实际上式(4)反映了大气对海温异常的响应特征。

取 9 个 EOF 模态特征代表海洋对大气的强迫场,即 $\hat{y}(t) = \sum_{j=1}^9 e_j p_j(t)$, $\{e_j\}$ 即为 EOF 空间场, $\{p_j\}$ 为主分量场。

那么式(4)则可写成:

$$\tilde{B}_e = C_{xp}(\tau) C_{pp}^{-1}(\tau) \quad (5)$$

为了考虑 SSTA 模态的作用强度,对比大气对不同 EOF 模态的敏感响应程度,引入了响应振幅这个变量,

$$BY = \tilde{b}_e \times \sigma [p_j(t)] \quad (6)$$

这里的 \tilde{b}_e 为北大西洋 TCGN x 对第 j 个 EOF 模态 e_j 的敏感响应值。 $B(\tau)$ 为 TCGN 自身对海温的响应特征,与 SSTA EOF 模态的作用强度无关。

但大气的响应振幅BY除与大气自身的响应特征有关外,还与海温的变化有关。

2.2.2 Monte Carlo 检验方法

Monte Carlo 检验方法适用于大量的、重复的计算。本文主要应用于响应系数检验:把48年的北大西洋TCGN序列随机排序1000次,将得到的1000个模拟的响应系数 b_j' 绝对值从小到大排序,当响应系数 b_j 等于 b_j' 时,其所在的累积概率即为 b_j 的显著性信度水平。

3 北大西洋TCGN气候特征

通过筛选、计算,得到1970—2017年北大西洋TCGN月变化序列(图1),发现TCGN最高的月份为9月(3.8个/年),最低为2、3月(0个/年),且夏秋两季的TCGN明显多于冬春两季。7—10月TCGN占全年TCGN的85.2%。

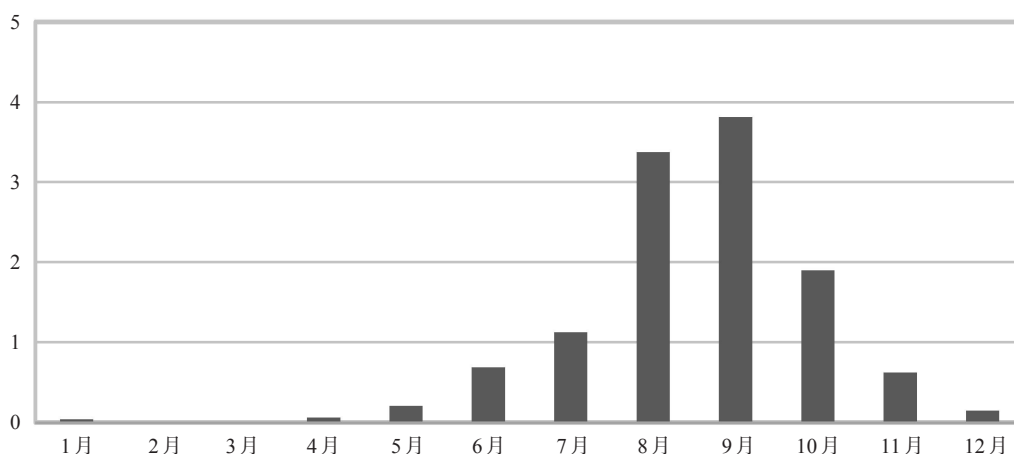


图1 1970—2017年北大西洋TCGN季节变化序列 单位:个/年。

北大西洋TC的生成位置也有明显的季节变化特征(图2,见下页)。7月TC生成位置主要分布在北大西洋西部美国东部沿岸以及墨西哥湾地区,8、9月TCGN明显增多,且除原本北大西洋西部和墨西哥湾外,在70~20°W,10~20°N区域内也形成一带状密集区域。且在10°N以南、50°N以北,无TC生成。图2b表明北大西洋7—10月TC生成集中在三部分:墨西哥湾地区、80~60°W,20~40°N、70~20°W,10~20°N。方差场和气候场特征相似(图2c)。

挑选北大西洋7—10月(JASO)热带气旋,得出其时间变化序列(图3,见下页)。北大西洋年均生成TC 10.2个,其中TCGN最多的年份为2005年(23个),其次为1995年(18个),最少的年份为1986年(仅为3个),且1995年前TC年均生成8个,1995年后达到12.6个,前后差异通过0.01显著性检验。因此1995年为北大西洋TC活跃度的转折点,1995年后进入更活跃阶段^[22-23]。另有研究表明,热带其他区域海盆海温可以通过垂直环流影

响北大西洋TCGN^[24]。

4 多海盆SSTA模对北大西洋TCGN变率的强迫作用

为了更加准确地研究北大西洋TCGN与全球SST之间的关系,分别剔除TCGN与全球SST的线性趋势,得到1970—2017年JASO四个月的TCGN与全球同期SSTA的相关分布(图4),阴影为通过0.05显著性检验的区域。图中与北大西洋TCGN有显著的负相关的地区有北大西洋中纬度、热带印度洋、中东太平洋地区,正相关地区则位于热带大西洋、北太平洋和西南太平洋。相关分析中将各个格点的SSTA看作是相互独立,然而实际上它们之间可能存在着某种联系。因此相关方法无法准确分离得出不同海区对北大西洋TCGN的各自贡献。但是相关分析的结果可以为GEFA诊断的海盆范围的选取提供依据。根据相关显著区域选取三个非重叠的子海区,分别为:太

平洋(P, 110 °E~80 °W, 40 °S~40 °N)、热带印度洋(TI, 35~110 °E, 40 °S~20 °N)、北大西洋(NA, 80 °W~0 °, 0~60 °N)。对这三个海区 JASO 四个

月 SSTA 进行 EOF 分解,将三个海盆 SSTA EOF 前三个主模态(即9个模态)作为下垫面的强迫场。

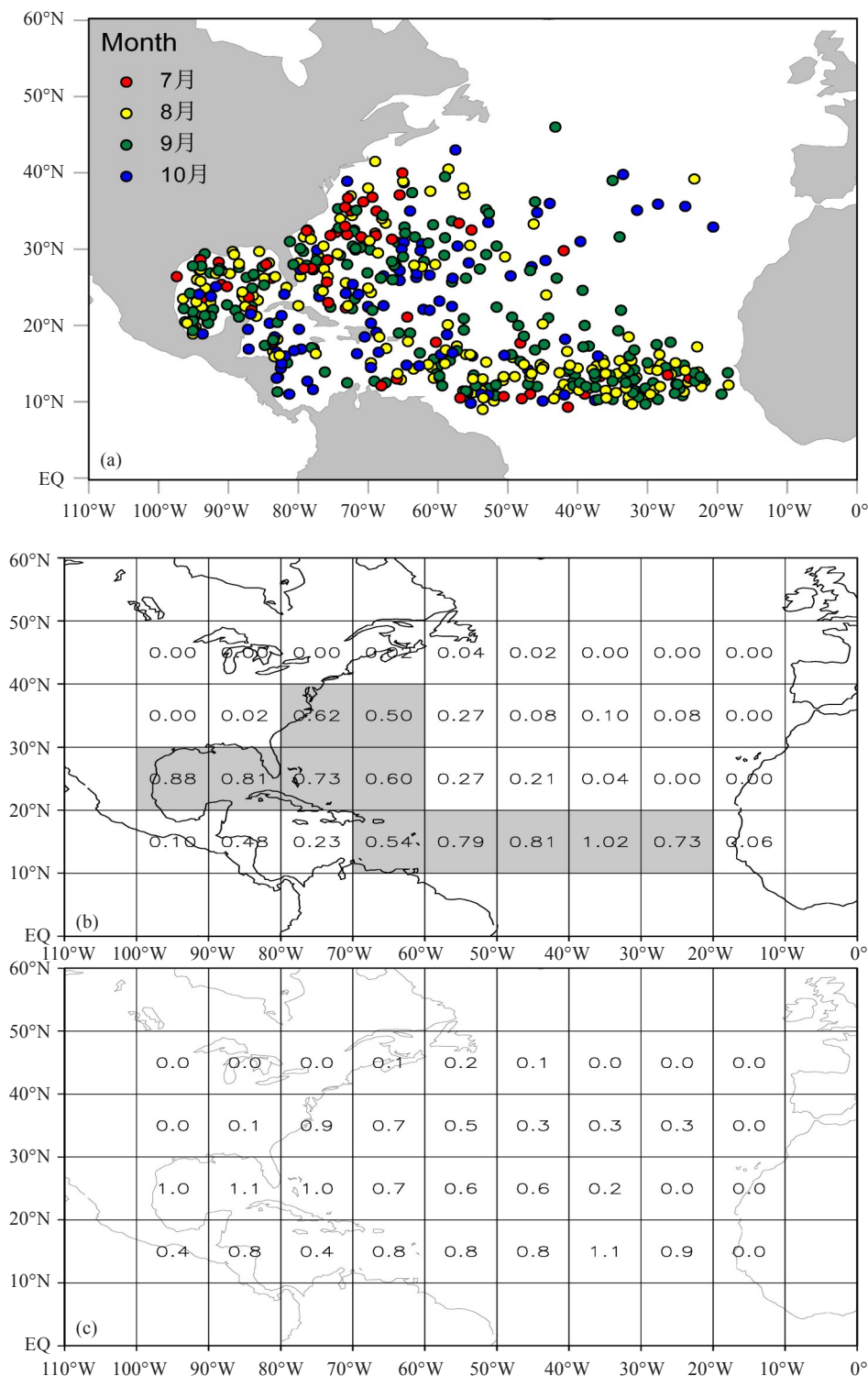


图2 a. 1970—2017年7—10月北大西洋TC生成位置分布图 红色为7月,黄色为8月,绿色为9月,蓝色为10月;
b. 北大西洋TC年生成频数的空间分布 阴影地区的TC年生成频数大于0.5个,单位:TC/年;
c. 北大西洋TC年生成频数方差的空间分布 单位:TC²/年。

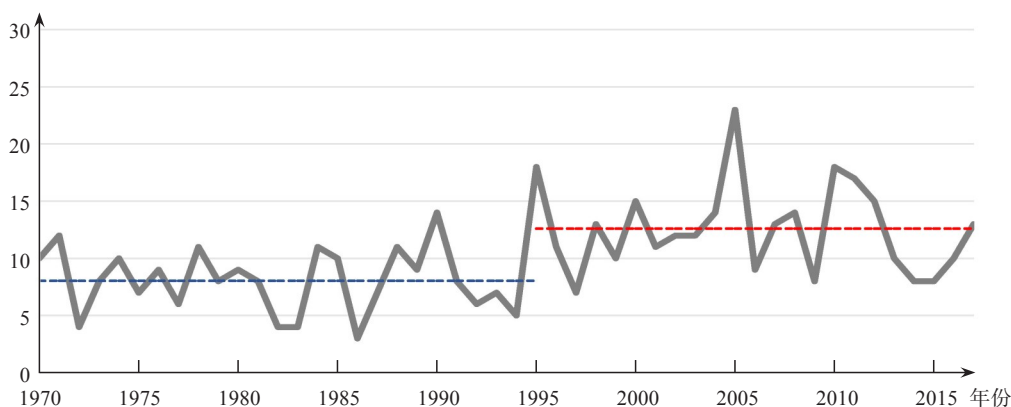


图3 1970—2017年北大西洋7—10月TCGN时间序列 单位:TC。

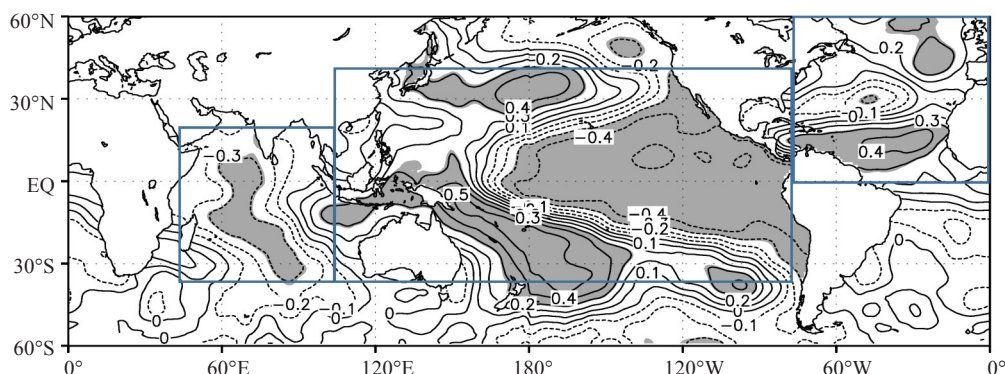


图4 1970—2017年7—10月北大西洋TCGN与同期SSTA相关分布 阴影为通过0.05显著性检验。

图5、图6给出三个海区的EOF前三模态的空间分布及其时间主分量序列,各海盆的前三模态的累计方差贡献率都超过了50%(表1),能较好地描述各个海盆的海温特征。其中太平洋第一空间模态(简称P1)中赤道中东太平洋呈现海温负距平,Wang等^[25]2013年定义了mega-ENSO指数,经计算发现P1时间系数(图6a)与该指数有较高相关性,通过0.01显著性检验,因此称P1为mega-ENSO式模态;第二模态(简称P2)的海温异常分布呈太平洋东西向偶极型,即经向模态;第三模态(简称P3)的正值区位于赤道中太平洋地区。热带印度洋第一空间模态(简称TI1)为90°E以西为大范围正值区,海温一致偏暖;第二模态(简称TI2)为海温南北向的反位相分布;第三模态(简称TI3)为海温东西向的反位相分布,对应经向模态。北大西洋第一空间模态(简称NA1)对应的是热带和中高纬度为正异常,副热带为负异常的三极型模态;第二模态(简称NA2)为偶极子型;第三模态

(简称NA3)对应北大西洋湾流区一致海温偏高。

以此9个EOF空间模态的时间系数作为各个海区的强迫场,即为 Y_i ,以1970—2017年北大西洋JASO的TCGN作为大气响应场为 X_i ,根据广义平衡反馈方法的公式计算响应系数,利用公式(4)、(6),乘以各自的标准差,得到北大西洋JASO TCGN对3个海盆、9个EOF模态的响应振幅的估计值。另外分别求出EOF空间模态对应的时间系数和北大西洋JASO TCGN的年际变率、年代际变率,分别进行GEFA分析,得到北大西洋JASO TCGN的年际变率、年代际变率对3个海盆、9个EOF模态的响应振幅的估计值,并用Monte Carlo方法检验响应的显著性。这里的气候变率为原始TCGN去除线性趋势后所得;年际时间尺度为原始TCGN去除线性趋势和年代际变率(高斯滤波去除7年以下的信号)后得到的;年代际时间尺度即由去除线性趋势的TCGN序列减去年际序列所得。SSTA序列做相同处理。

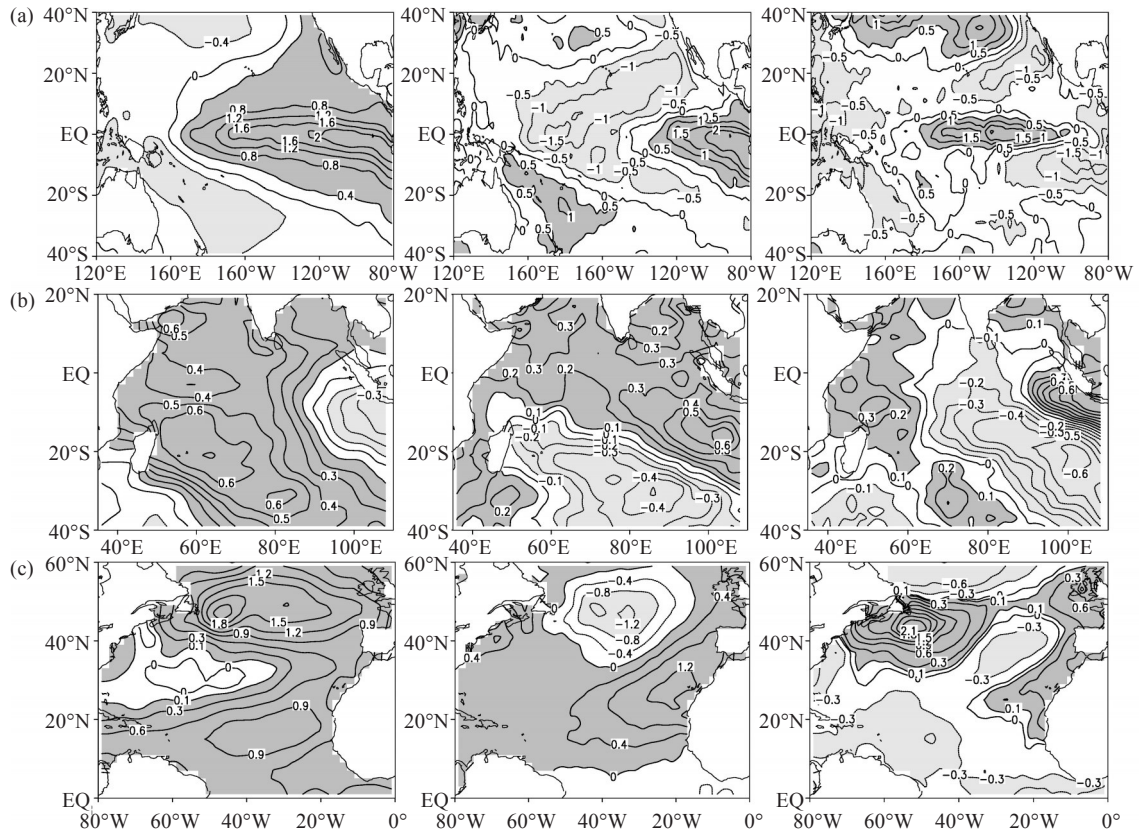


图5 1970—2017年7—10月全球SSTA的EOF分析空间模态 a. 太平洋第一模态(P1)、第二模态(P2)、第三模态(P3); b. 热带印度洋第一模态(TI1)、第二模态(TI2)、第三模态(TI3); c. 北大西洋第一模态(NA1)、第二模态(NA2)、第三模态(NA3)实线(虚线)表示正值(负值),深灰色为正值,浅灰色为负值,单位:℃。

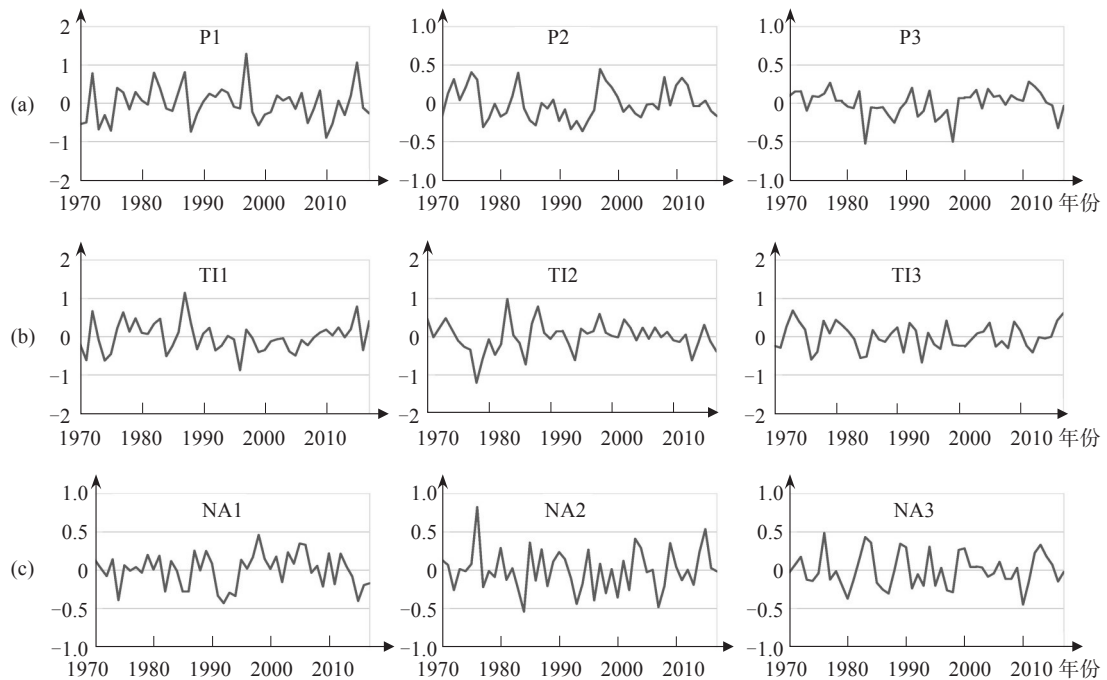


图6 1970—2017年7—10月全球SSTA的EOF分析时间主分量序列 a. 太平洋第一模态(P1)、第二模态(P2)、第三模态(P3); b. 热带印度洋第一模态(TI1)、第二模态(TI2)、第三模态(TI3); c. 北大西洋第一模态(NA1)、第二模态(NA2)、第三模态(NA3),单位:1。

表1 各海盆SST前三个模态的方差贡献率及其累积贡献率(%)

方差贡献	P	TI	NA
EOF1	51.1	28.7	25.9
EOF2	10	18.1	16.7
EOF3	7.1	11.8	10.1
EOF1+EOF2+EOF3	68.2	58.6	52.7

图7为利用GEFA计算出的北大西洋JASO TCGN气候变率、年际变率、年代际变率对9个SSTA EOF主模态(图5)的响应振幅,反映的是SSTA EOF主模态时间系数上升一个标准差时,北大西洋JASO TCGN的变化值。图7中柱状旁边标记的数值为蒙特卡洛检验值,代表信度级别。正的响应振幅表示当SSTA模态正位相时TCGN将会增加。1970—2017年北大西洋TCGN气候变率特征对NA1三极型模态和P1 mega-ENSO式模态有显著响应,分别通过0.01和0.07的Monte-Carlo检验,对应的响应振幅是0.45和-0.28,即北大西洋SSTA有NA1三极型模态正位相强迫,太平洋海温有P1 mega-ENSO式反位相强迫时,北大西洋TCGN增加。且当NA1对应的时间主分量上

升1个标准差时,北大西洋TC增加0.45个,P1对应的时间主分量上升1个标准差时,北大西洋TC减少0.28个。

表2为SSTA EOF主模态响应值对北大西洋TCGN气候变率、年际变率、年代际变率的方差贡献。对于TCGN气候变率来说,SSTA主模态响应值方差贡献最大的是NA1为23.51%(响应振幅通过0.01显著性检验,图7),其次是NA3为8.21%(响应振幅通过0.06显著性检验,图7)和P1为7.71%,北大西洋三个模态方差贡献达到31.73%,大于太平洋和热带印度洋的方差贡献。对于TCGN年代际变率来说,SSTA主模态响应值方差贡献最大的是NA1为22.94%(响应振幅通过0.01显著性检验,图7),其次是P1为14.29%(响应振幅通过0.07显著性检验,图7)。而与气候变率、年代际变率不同的是,对于年际变率,无显著响应的海盆,方差贡献最大的是NA3为7.93%。因此三个海盆海温主模态对TCGN年际变率无显著作用。且NA1、P1对1995年后的TCGN异常增加的贡献分别为27%、45%。

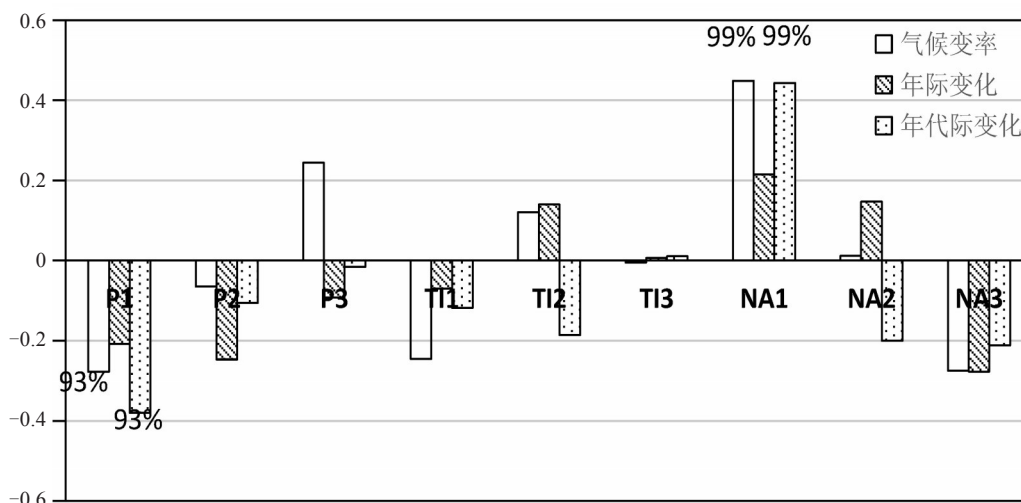


图7 北大西洋TCGN气候变率、年际变率、年代际变率对SSTA EOF主模态的响应振幅(单位:TC)所标值为Monte Carlo检验值。

表2 SSTA EOF主模态响应值对北大西洋TCGN气候变率、年际变率、年代际变率的方差贡献

主模态响应值	P1	P2	P3	TI1	TI2	TI3	NA1	NA2	NA3
气候变率	7.71%	0.66%	6.90%	5.42%	1.86%	0.03%	23.51%	0.01%	8.21%
年际	4.23%	5.83%	1.02%	0.53%	2.01%	0	5.27%	2.21%	7.93%
年代际	14.29%	1.33%	0.03%	1.39%	3.83%	0.01%	22.94%	3.54%	4.74%

5 北大西洋 TC 生成的局地环境要素场对关键 SSTA 模的响应

许多研究表明,TCGN 气候变率决定于局地环境要素的变化。局地对 TC 生成有一定的影响^[26-28]。SSTA 除了直接影响 TCGN 的变化外,还通过影响大气环境要素来调制 TC 的生成,其他海域的 SSTA 也可通过遥相关影响局地大气环境,进而调制 TC 的生成。研究已表明,850 hPa 相对涡度、200~850 hPa 的垂直风切变、600 hPa 相对湿度、500~925 hPa 假相当位温的垂直梯度等都是影响 TC 生成的环境要素^[29]。本研究从上述几个要素入手,以 9 个海温模态为强迫场,各种环境要素场为响应场进行 GEFA 分析。为利于分析,将海温位相处理为有利于 TC 生成的位相。

图 8 为 NA1 的各环境要素场响应振幅。图 8a 中 850 hPa 相对涡度对 NA1 的响应场上在美国东部沿海和墨西哥湾地区有显著正响应区。正的涡度为 TC 生成提供有利的动力条件,使地转气流更加容易辐合,从而逐渐形成强大的逆时针旋转的水平涡流。因此当 NA1 对应的时间系数上升时,会使美国东部沿海和墨西哥湾地区有正的相对涡度响应,为 TC 生成提供有利的动力因子。

图 8b 中 200~850 hPa 的垂直风切变响应对

NA1 的显著负响应区域集中在 10~20 °N。研究表明弱的垂直风切变也是热带气旋能够产生的几个条件之一。环境垂直风切变小,TC 发生密集,反之亦然。较弱的垂直风切变有利于 TC 的发生发展以及自身结构的维持^[30]。有研究表明,在全球变暖的背景下,纬向风则成为能反映 TCGN 的更有用的指标。这可能是因为支持对流的海表温度阈值已经基本达到,低空风强度的任何增强或减弱都会改变切变^[31]。与低层相对涡度不同的是,垂直风切变只对低纬度的 TC 生成起显著作用。当 NA1 对应的时间系数上升时,会使北大西洋低纬度地区的垂直风切变减小,且响应振幅最大为 1.2 m/s,这也是利于 TC 维持的动力因子。

600 hPa 相对湿度(图 8c)是影响 TC 生成的一个重要的热力因子。图中 NA1 在北大西洋中纬度地区有正值响应带。相对湿度较大时,湿润的空气将有利于深层对流的发展,利于 TC 的生成。当 NA1 对应的时间系数上升时,会使北大西洋中低纬地区相对 600 hPa 相对湿度增加。

500~925 hPa 假相当位温的垂直梯度(图 8d)可以用来表征 TC 发生区域的稳定度条件,负的位温垂直梯度有利于不稳定运动的发展,有利于 TC 的生成。NA1 的显著负响应区在 30 °N 以南,且在南美洲北侧和北非西北侧。

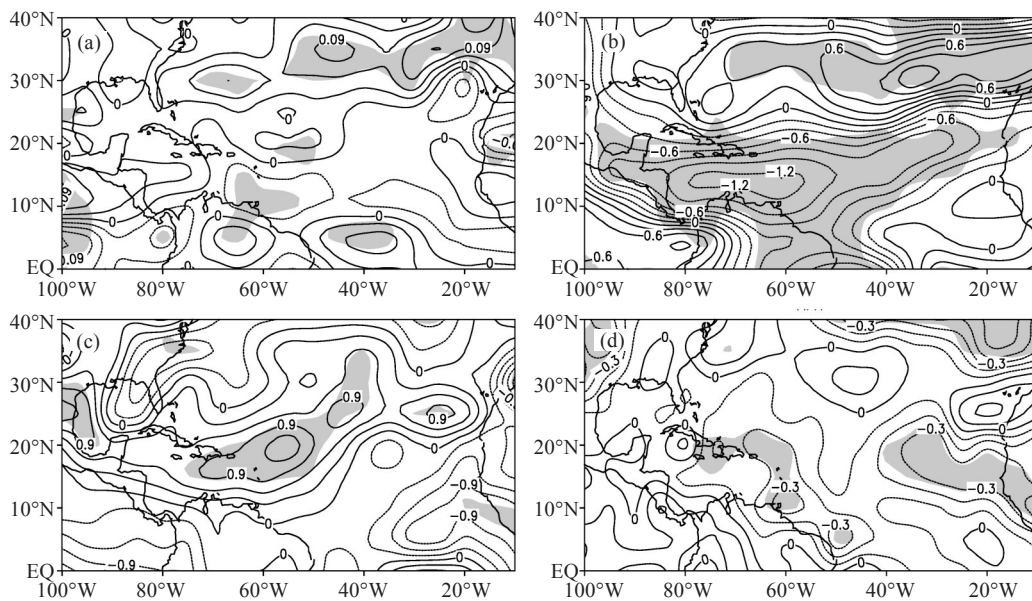


图 8 NA1 的各环境要素场响应振幅 a. 为 850 hPa 相对涡度,单位: $10^{-5}s^{-1}$; b. 为 200~850 hPa 的垂直风切变,单位: m/s; c. 为 600 hPa 相对湿度,单位: %; d. 为 500~925 hPa 假相当位温的垂直梯度,单位: $^{\circ}C/hPa$ 。阴影部分为通过 0.1 的显著性检验区域。

四个环境要素中,相比之下850 hPa相对涡度对NA1的响应作用并不是特别明显,另外三个环境要素场的显著响应区与TC生成位置高值区对应情况较好。

而各环境要素场对P1的显著作用区和NA1有着很大的不同。图9a中850 hPa相对涡度的显著正响应区位于10~20 °N之间,包括墨西哥湾地

区,皆对应TC生成位置的密集区。图9b中200~850 hPa的垂直风切变的负响应区域集中在20 °N以南地区,尤其是加勒比海地区。600 hPa相对湿度响应振幅中(图9c),显著正响应区域也位于加勒比海,且P1响应振幅(1.5%)略大于NA1(0.9%)。500~925 hPa假相当位温的垂直梯度(图9d)P1显著区域位于20 °N附近的北大西洋中部。

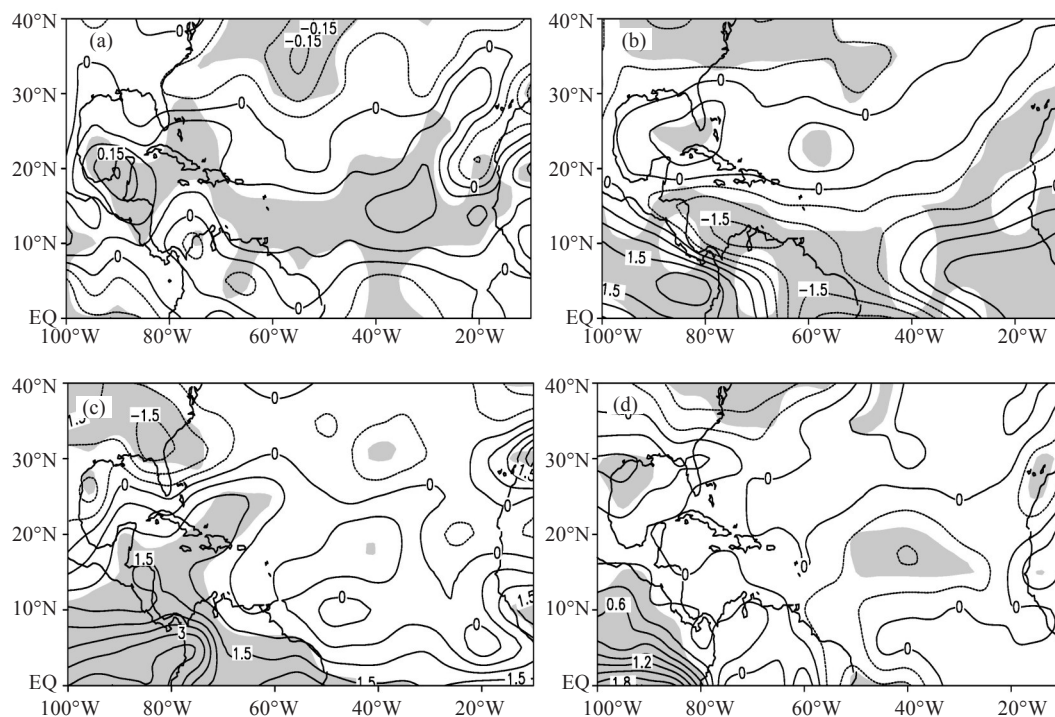


图9 P1的各环境要素场响应振幅 a.850hPa相对涡度,单位: 10^{-5}s^{-1} ;b.200~850 hPa的垂直风切变,单位:m/s;c.600hPa相对湿度,单位:%;d.500~925 hPa假相当位温的垂直梯度,单位: $^{\circ}\text{C}/\text{hPa}$ 。阴影部分为通过0.1的显著性检验区域

几个要素显著区域大多与TC生成位置高频区相对应(图2c)。因此当NA1(P1)对应的时间系数上升(下降)时,对于850 hPa相对涡度、200~850 hPa的垂直风切变、600 hPa相对湿度、500~925 hPa假相当位温垂直梯度来说,在大西洋中低纬地区会有利于TC生成的热力动力因子响应。且P1的响应显著区域偏西偏南,NA1的响应显著区域则偏北偏东。

6 结论与讨论

北大西洋TCGN有明显的年代际和季节特征。年生成个数为10.2个,1970—2017年间,TCGN最高的年份为2005年,最低的为1986年。

且1995年前后北大西洋热带气旋活跃度的转折点,9月TCGN最高,2、3月为0。生成位置也有明显季节变化特征,除10 °N以南、50 °N以北无TC生成外,且随着季节推移,生成密集区向低纬度倾斜。且TC密集区可以分为三部分:墨西哥湾地区、80~60 °W,20~40 °N、70~20 °W,10~20 °N。

GEFA结果显示:北大西洋TCGN的气候变率对北大西洋三极型模态(NA1)和太平洋mega-ENSO式模态(P1)具有显著的响应,对应的响应振幅分别为0.45和-0.28,即当NA1(P1)对应时间系数增加(下降)1个标准差时,北大西洋TC将增加0.45(0.28)个。因此,对于北大西洋TC来说,北大西洋自身的SSTA对TC生成作用最为显著,这是与西北太平洋完全不同的。

对于北大西洋 TCGN 气候变率、年际变率、年代际变率来说,NA1 和 P1 对 TCGN 气候变率和年代际变率有显著响应,且对 TCGN 的方差贡献值大于其他模态。但是三个海盆海温主模态对 TCGN 年际变率无显著作用。

局地环境场要素的 GEFA 结果显示:从量级上看,各环境要素场对 P1 的响应振幅要略大于 NA1,即说明当 P1 和 NA1 的时间系数同时变化 1 个标准差,局地环境要素场将对 P1 的响应值要大于对 NA1 的响应值。且当 NA1(P1)对应时间系数增加(下降)1 个标准差时,对于 850 hPa 相对涡

度和 200~850 hPa 垂直风切变、600 hPa 相对湿度和 500~925 hPa 假相当位温来说,可对应 TC 生成三个密集区,为 TC 生成提供有利的动力和热力场,且垂直风切变、600 hPa 相对湿度对低纬度的 TC 生成更为明显。且 P1 的响应显著区域偏西偏南,NA1 的响应显著区域则偏北偏东。

NA1 作为北大西洋局地海温强迫,对 TC 生成的影响较为直接。但是 P1 的 mega-ENSO 式是如何通过大尺度环流场影响北大西洋 TC,其机制还需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 马超,王兆隆,赵文虎,等.北大西洋热带气旋路径预报的难度变化分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2015,16(3): 273-280.
- [2] 李永平,陈晶茹.美国飓风破坏力为何如此巨大[J].生命与灾害,2012(11): 4-7.
- [3] DAILEY P S, ZUBA G, LJUNG G, et al. On the Relationship between North Atlantic sea surface temperatures and U.S. hurricane landfall risk[J]. J Appl Meteor Climat, 2009, 48(1): 111-129.
- [4] 陆奕年.近 100 年大西洋飓风发生频次加倍[J].气象科技,2007,35(5): 735-735.
- [5] 丁一汇, E.R. 莱特.影响北大西洋飓风形成的大尺度环流条件[J].海洋学报:中文版,1984,6(3): 33-45.
- [6] 龚道溢,周天军,王绍武.北大西洋涛动变率研究进展[J].地球科学进展,2001,16(3): 413-420.
- [7] CAYAN D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the Northern Oceans: The connection to monthly atmospheric circulation[J]. J Climate, 1992, 5(4): 354-370.
- [8] ELSNER J B, KOCHER B. Global tropical cyclone activity: A link to the North Atlantic Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 2000, 27(1): 129-132.
- [9] WANG R, WU L. Climate changes of Atlantic tropical cyclone formation derived from twentieth-century reanalysis[J]. J Climate, 2013, 26(22): 8 995-9 005.
- [10] VECCHI G A, KNUTSON T R. On estimates of historical North Atlantic tropical cyclone activity[J]. J Climate, 2008, 21(14): 3 580-3 600.
- [11] HOLLAND G J, WEBSTER P J. Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend?[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1 860): 2 695-2 716.
- [12] MURAKAMI H, WANG B. Future Change of North Atlantic Tropical Cyclone Tracks: Projection by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model [J]. J Climate, 2010, 23(10): 2 699-2 721.
- [13] SCHEMM S, CIASTO L M, LI C, et al. Influence of Tropical Pacific Sea Surface Temperature on the Genesis of Gulf Stream Cyclones [J]. J the Atmos Sci, 2016, 73(10): 4 203-4 214.
- [14] ARPE K, LEROY S A G. Atlantic hurricanes—Testing impacts of local SSTs, ENSO, stratospheric QBO—Implications for global warming [J]. Quaternary International, 2009, 195(1-2): 0-14.
- [15] LIU Z, WEN N, LIU Y. On the assessment of nonlocal climate feedback. Part I: The generalized equilibrium feedback assessment[J]. J Climate, 2008, 21(1): 134-148.
- [16] WEN N, LIU Z, LIU Q, et al. Observed atmospheric responses to global SST variability modes: A unified assessment using GEFA[J]. J Climate, 2010, 23(7): 1 739-1 759.
- [17] 江志红,吴燕珠,刘征宇,等.基于广义平衡反馈方法的 2009/2010 年中国冬季气温异常型的诊断[J].热带气象学报,2013,29(1): 28-36.
- [18] 李淑娟,余锦华.中国东部夏季分区降水对海温异常响应特征的研究[J].气象科学,2015,35(1): 44-51.
- [19] YU J. Contribution of major SSTA modes to the climate variability of tropical cyclone genesis frequency over the Western North Pacific [C]// AGU Fall Meeting, 2016.
- [20] 赵晓彤.西北太平洋热带气旋生成频数变化对海温异常响应特征的研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [21] 余锦华,张晨,方珂,等.海温异常模之线性相互作用及其对西北太平洋热带气旋生成频数变化的影响[J].热带气象学报,2016,32(3):

289-298.

- [22] LANDSEA C W . Downward trends in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades.[J]. *Geophys Res Lett*, 2013, 23(13): 1 697-1 700.
- [23] ELSNER J B , JAGGER T , Niu X F . Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(12): 1 743-1 746.
- [24] ZHAO H , DUAN X , RAGA G B , et al. Potential large-scale forcing mechanisms driving enhanced north Atlantic tropical cyclone activity since the mid-1990s[J]. *J Climate*, 2018, 31(4): 1 377-1 397.
- [25] WU Z , ZHANG P . Interdecadal variability of the mega-ENSO-NAO synchronization in winter[J]. *Climate Dyn*, 2015, 45(3-4): 1 117-1 128.
- [26] 余丹丹, 张韧, 李荔珊, 等. 2010年和1998年西北太平洋热带气旋频数异常与东亚夏季风系统的关联性分析[J]. *大气科学学报*, 2015, 38(1): 19-26.
- [27] 杜予罡, 储惠芸. 环境因子对西北太平洋热带气旋气候特征的影响[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2010, 46(3): 254-260.
- [28] 白莉娜, 何敏, 王元, 等. 西北太平洋风速垂直切变异常对热带气旋活动年际变化的影响[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 877-884.
- [29] PENG M S , FU B , LI T , et al. Developing versus nondeveloping disturbances for tropical cyclone formation. Part I: North Atlantic[J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(4): 1 047-1 066.
- [30] 苏丽欣, 周锁铨, 吴战平, 等. 西北太平洋热带气旋强度与环境气流切变关系的气候分析[J]. *气象科技*, 2008, 36(5): 561-566.
- [31] JONES J J , STEPHENSON T S , Taylor M A , et al. Statistical downscaling of North Atlantic tropical cyclone frequency and the amplified role of the Caribbean low-level jet in a warmer climate[J]. *J Geophys Res*, 2016, 121(8): 3 741-3 758.

CONTRIBUTION OF MAJOR SSTA MODES TO TROPICAL CYCLONE GENESIS FREQUENCY OVER THE NORTH ATLANTIC

ZHAO Xiao-tong¹, YU Jin-hua², LIAO An-hua³, GU Ren-ying¹, WEN Dan¹

(1. Ningbo Yinzhou Meteorological Bureau, Ningbo 315194, China;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310002, China)

Abstract: Contribution of major sea surface temperature anomaly (SSTA) modes to tropical cyclone genesis frequency (TCGN) over North Atlantic are analyzed based on the Best Track Data (HURDAT2) of National Hurricane Center (NHC) in 1970—2017, the monthly mean SST data of Hadley Center of sea ice and SST, NCEP/NCAR reanalysis monthly mean data and the generalized equilibrium feedback assessment (GEFA) method. The main conclusions are as follows: (1) TCGN climatic variability in North Atlantic has a significant response to NA1 and P1, the feedback intensities are 0.45 and -0.28. (2) TCGN interdecadal variability in North Atlantic has a significant response to NA1 and P1, but the response is non-significant when it comes to interannual variability. (3) The average of TCGN in 1970—1995 is 8, while it rises to 12.6 in the later period. The contributions of NA1 and P1 in the later period GEFA are 27% and 45%. (4) When it comes to the local environment, the significant response areas to NA1 are located in 20 °N. And the significant response areas to P1 are located in south of 20 °N and the gulf of Mexico.

Key words: tropical cyclone genesis frequency of North Atlantic; sea surface temperature; the generalized equilibrium feedback assessment