

全球气候变暖对西北太平洋热带气旋活动的影响

傅民君 陈冬冬 冯启金 张涛

92880 部队

DOI:10.12238/eep.v7i8.2191

[摘要] 全球气候变暖对热带气旋(TC)潜在破坏力的影响是一个悬而未决的问题,过去的一些研究忽略了TC尺度的影响,导致TC潜在破坏力被严重低估。本文利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式对2001–2010年间西北太平洋热带气旋进行了一系列海表温度(SST)敏感性数值试验,揭示了西北太平洋SST增暖对TC活动的影响,结果表明:在全球气候变暖的背景下,随着西北太平洋海域SST增暖,TC频数、持续时间、强度和尺度都有所增加,其中TC强度和尺度更是呈现出指数型增长的趋势,此外研究还发现TC尺度对于TC潜在破坏力有着较为明显的贡献。

[关键词] 热带气旋; 海洋增暖; 潜在破坏力; 尺度

中图分类号: P75 文献标识码: A

Effects of global warming on tropical cyclone activity in the Northwest Pacific Ocean

Minjun Fu Dongdong Chen Qijin Feng Tao Zhang

Unit 92880

[Abstract] The impact of global warming on the potential destructive power of tropical cyclones (TC) is an open question. Some studies in the past have ignored the impact of TC scale, leading to the potential destructive power of TC being seriously underestimated. In this paper, a series of sea surface temperature (SST) sensitivity numerical tests in northwest Pacific tropical cyclones during 2001–2010 using WRF (Weather Research and Forecasting) mode, Uncovers the effect of Northwest Pacific SST warming on TC activity, The results show that, in the context of global warming, As the SST warms up in the Pacific Northwest, TC frequency, duration, intensity, and scale, Among them, the TC strength and scale show a trend of exponential growth, In addition, it is also found that TC scale has a significant contribution to the potential destruction of TC.

[Key words] tropical cyclone; ocean warming; potential damage; scale

引言

西北太平洋海域是全球TC发生最频繁的海域之一,平均每年生成约26个,且有6–7个在我国东南沿海登陆^[1–2],极易对我国沿海地区造成巨大的人员伤亡和经济损失。在过去几十年时间里,随着观测资料收集分析能力的提升和预报模型的改进完善,数值模式对TC路径的预报水平逐渐提高^[3]。但由于TC的易变性和发展的不稳定性,对TC强度的预测预报仍具有较大不确定性。

二十世纪以来,大气中温室气体含量日趋增多,全球气温已升高了约0.5℃,并呈现出持续上升的趋势,与之对应的是全球海洋增暖(IPCC 2007)^[4]。海洋作为TC发展的能量供应源之一,其环境变化可以极大地促进TC活动(源地、频数、持续时间、强度和尺度)的变化。马丽萍等(2006)^[5]指出全球气候变暖通过影响大气环流、海气相互作用、海表温度和温盐环流等方面对TC活动产生作用,雷小途等(2009)^[6]进一步指出气候

变暖通过使SST升高,为TC发展提供了能量,导致TC强度更大、破坏力更强。

由于过去观测手段的局限性,导致TC历史资料中缺乏尺度信息,以至于过去研究大多集中在TC频数、强度和持久性上,对TC破坏力估算也往往在一个假定的尺度上开展,而这在Sun等(2017)^[7]研究中指出是不可靠的,由于TC尺度对SST变化的敏感性较高,忽略尺度变化的影响会导致TC破坏力被严重低估。本文在上述研究的基础上,利用WRF模式设计了几组敏感性试验,进一步研究气候变暖尤其是海洋增暖对TC活动的影响。

1 数据来源和试验设计

1.1 数据来源

本文中使用的WRF模式初、边界条件的数据为FNL(Final Operational Global Analysis)数据,是美国国家环境预报中心(NECP)提供的全球再分析资料,空间精度为1°×1°,时间分辨率为6小时。由于NCEP–FNL分析产品通过吸收多种观测数据来保

证数据的可靠性, 目前该产品中的数据已被广泛应用在大气研究工作中, 可在研究数据档案馆 (<http://rda.ucar.edu>) 获得, 数据集编号为ds083. 2。

1. 2 试验设计

本文进行气候模拟的模型为20km空间分辨率的WRF模型3. 3版 (WRF-ARW, 来源于<http://www.wrf-model.org>), 模拟区域选定在西北太平洋海域 (100-180° E, 0-60° N), 通过控制相同的大气初始和侧向边界条件, 模拟时间为2001-2010年间的整个台风季 (5-10月), 通过4组SST型组合数值试验 (1组控制试验, 3组敏感性试验), 重点分析在气候变暖下由于海洋增暖会给TC活动带来什么样的影响。在控制试验 (CTRL试验) 中, SST保持不变;

在敏感性试验中, 共设置了3组试验 (分别为 E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验): E_{DBC02} 试验的设置与Lau等 (2016)^[8]类似, 将双倍CO₂试验中33个耦合模式比对项目 (CMIP5, 详见<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) 预估的多模式SST异常平均叠加到CTRL试验中的SST场上, 以得到 E_{DBC02} 试验的未来SST场, 根据Sun等 (2017)^[7]的计算, 在双倍CO₂环境下西北太平洋海域SST升高约1. 86°C; $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验则是在CTRL试验SST场的基础上分别均匀增加1°C和2°C。由于数值模拟的局限性, 模拟的TC活动可能会与实际观测值有所差异, 但本研究主要是基于控制试验和敏感性试验的对比, 而较少地依赖绝对精确的模拟结果, 因此不会影响研究的可靠性。

2 TC活动对SST的敏感性分析

Emanuel (2005)^[9]利用美国联合飓风预警中心 (Joint Typhoon Warning Center) 的TC最佳路径资料集和英国气象局哈德利中心 (Hadley Centre) 的海温资料定义了用以表征TC的活动特征的能量耗散指数PDI (Potential Dissipation Index), 并将其作为衡量TC潜在破坏力的指标。其中, TC潜在破坏力指数PDI又被定义为该TC在其持续时间内最大风速的三次方的总和, 具体计算公式由下式给出:

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{\text{max}}^3 dt \quad (1)$$

式中 V_{max} 为10米处最大风速、 τ 为TC持续时间。此外, 根据Emanuel (2007)^[10]提出的方法, 可以得到年度PDI以及TC强度、持续时间对PDI贡献度的计算公式:

$$PDI = N \cdot I \cdot L \quad (2)$$

$$L_i = \frac{\int_0^{\tau} V_{\text{max}} dt}{V_{\text{smax}}}, L = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N L_i \quad (3)$$

$$I = \frac{\sum_1^N \int_0^{\tau} V_{\text{max}}^3 dt}{\sum_1^N L_i} \quad (4)$$

式中N为TC年频数; I为TC年平均强度; L为TC年平均持续时间; V_{smax} 为TC的峰值强度。

但最近研究表明, 气候变暖引起的海洋增暖导致TC尺度变化也不可忽视^[7-8]。基于此, Sun等 (2017)^[7]提出了由TC核心附近大风 (>17 m·s⁻¹) 面积和TC持续时间计算的TC潜在破坏力指数PDS, 具体计算公式由下式给出:

$$PDS = \int_0^{\tau} \int_0^{A_0} C_D \rho |V|^3 dAdt \quad (5)$$

式中 ρ 为空气密度, C_D 为地表阻力系数, $|V|$ 为10米处风速, A_0 为大风面积, τ 是TC持续时间。年度PDS及TC尺度对PDS贡献度的计算公式如下:

$$PDS = N \cdot I \cdot L \cdot S \quad (6)$$

式中S为TC年平均尺度, 具体计算公式如下:

$$S = \frac{PDS}{N \cdot I \cdot L} = \frac{\sum_1^N \int_0^{\tau} \int_0^{A_0} C_D \rho |V|^3 dAdt}{N \cdot I \cdot L} \quad (7)$$

综上, TC潜在破坏力主要影响因子为TC频数、持续时间、强度以及尺度, 通过对不同SST下上述因子的敏感性分析, 有助于更好地了解海洋增暖对TC活动的影响。

2. 1 TC频数对SST的敏感性分析

图1显示了气候模拟中TC频数对SST变化的敏感性响应。通过计算4组试验2001-2010年间TC频数的十年平均, 其中 E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验的TC频数相较于CTRL试验分别增加了57. 7%、44. 1%和45. 7%。通过对比CTRL、 E_{DBC02} 、

$E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 4组试验, 结果显示高SST环境有利于TC频数增加, 0-1°C Δ SST 下TC频数增长快, 1-2°C Δ SST 下无明显增长趋势, 双倍CO₂环境下TC频数增长率大于1-2°C Δ SST 下频数增长率, 小于0-1°C Δ SST 下频数增长率。分析表明, 0-1°C Δ SST 下TC频数受SST影响显著, 1-2°C Δ SST 下SST影响较小, 此外大气环流、海气相互作用等对频数影响也不能忽视。

2. 2 TC持续时间对SST的敏感性分析

图2显示了气候模拟中TC持续时间对SST变化的敏感性响应。通过计算4组试验2001-2010年间TC持续时间的十年平均, 其中 E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验的TC持续时间相较于

CTRL试验分别增加了36.1%、25.2%和48.9%。通过对比CTRL、 E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 4组试验,结果显示高SST环境更有利于TC存活,0-2℃ ΔSST 下TC持续时间基本呈线性增长趋势,双倍 CO_2 环境下TC持续时间增长率略小于0-2℃ ΔSST 下持续时间增长率。分析表明,0-2℃ ΔSST 下有利于TC持续时间延长,而大气环流、海气相互作用等对TC持续时间影响不大或略有抑制作用。

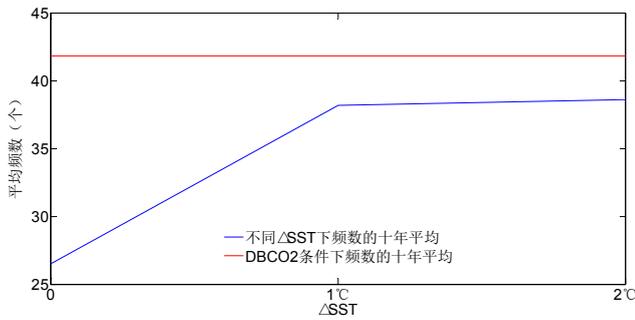


图1 不同SST下TC频数的变化

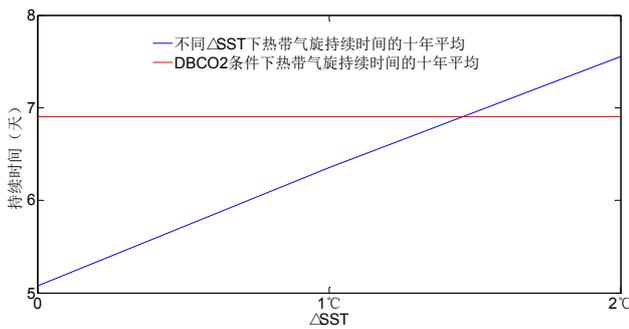


图2 不同SST下TC持续时间的变化

2.3 TC强度对SST的敏感性分析

由于TC强度无法直接观测,实际研究中一般以中心最低气压和中心附近最大风速来表征,强度变化也可用两者变化来表示,其中强度与中心最低气压呈负相关,与中心附近最大风速呈正相关^[11]。本文以TC中心附近最大风速进行分析。

图3显示了气候模拟中TC强度对SST变化的敏感性响应。通过计算4组试验2001-2010年间TC强度的十年平均,其中

E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验的TC强度相较于CTRL试验分别增加了18.7%、11.5%和33.2%。通过对比CTRL、 E_{DBC02} 、

$E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 4组试验,结果显示高SST环境更有利于TC增强,0-2℃ ΔSST 下TC强度呈现出弱指数型增长趋势,双倍 CO_2 环境下TC强度增长率与0-1℃ ΔSST 下强度增长率接近,小于1-2℃ ΔSST 下强度增长率。分析表明,0-2℃ ΔSST 下有利于TC强度增强,而大气环流、海气相互作用等对TC强度反而有一定的抑制作用。

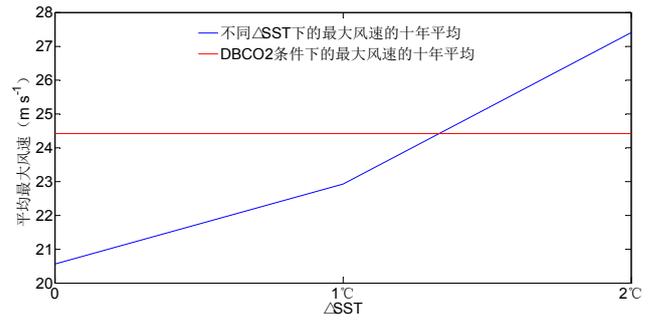


图3 不同SST下TC强度的变化

2.4 TC尺度对SST的敏感性分析

图4显示了气候模拟中TC尺度对SST变化的敏感性响应。通过计算4组试验2001-2010年间TC尺度的十年平均,其中

E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验的TC尺度相较于CTRL试验分别增加了168.9%、47.8%和431.5%。通过对比CTRL、 E_{DBC02} 、

$E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 4组试验,结果显示高SST对TC发展有很强的促进作用,0-2℃ ΔSST 下TC尺度呈现出指数型爆发增长趋势,双倍 CO_2 环境下TC尺度增长率大于0-1℃ ΔSST 下强度增长率,远小于1-2℃ ΔSST 下强度增长率。分析表明,0-2℃ ΔSST 下有利于TC尺度增大,而大气环流、海气相互作用等对TC尺度有一定的抑制作用。

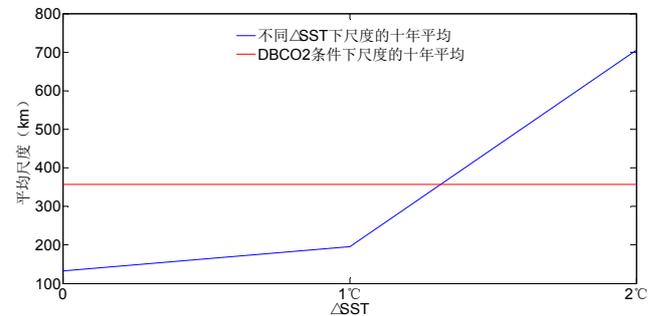


图4 不同SST下TC尺度的变化

3 TC潜在破坏力分析

3.1 PDI和PDS对SST的敏感性分析

图5显示了气候模拟中PDI和PDS对SST变化的敏感性响应。通过计算4组试验2001-2010年间PDI和PDS的十年平均,其中

E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、 $E_{\text{SST+2}}$ 试验的PDI相较于CTRL试验分别增加了301.6%、180.6%和448.6%,PDS则分别增加了901.6%、366.5%和1944.8%。通过对比CTRL、 E_{DBC02} 、 $E_{\text{SST+1}}$ 、

$E_{\text{SST+2}}$ 4组试验,结果显示0-2℃ ΔSST 下PDI和PDS都呈现出增长趋势,其中PDI呈线性增长,PDS呈指数型增长,说明PDS对SST

的响应要比PDI更为剧烈。

此外,对于PDI,双倍CO₂环境下PDI增长率小于0-1℃、1-2℃下PDI增长率;对于PDS,双倍CO₂环境下PDS增长率大于0-1℃下PDS增长率小于1-2℃ΔSST下PDS增长率。分析表明,0-2℃ΔSST下有利于TC破坏力增大,而大气环流、海气相互作用等对破坏力增强有一定的抑制作用。

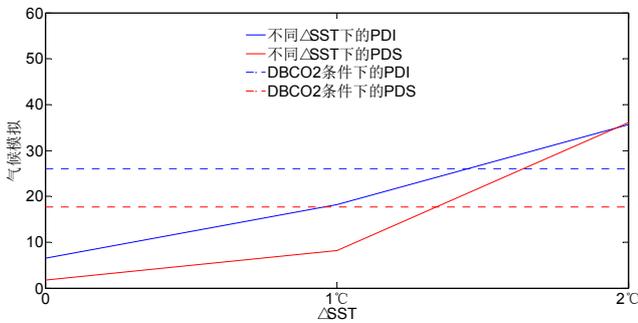


图5 不同SST下PDI ($1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$)、PDS ($1 \times 10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)的变化

3.2 TC频数、强度、持续时间和尺度对潜在破坏力的贡献度分析

本文利用Emanuel (2007)^[10]提出的相对贡献计算方法分别计算了PDI、PDS中各项贡献度大小(表1)。结果表明,对于PDI,TC强度是主要贡献因子,频数、持续时间为次要因子,进一步对比发现,在0-2℃ΔSST下,强度、持续时间对PDI的贡献呈增加趋势,而频数的贡献有明显减弱趋势;对于PDS,TC尺度和强度的贡献均较大,为主要贡献因子,进一步对比发现,在0-2℃ΔSST下,尺度对PDS的贡献呈增加趋势,强度、持续时间的贡献变化不大,而频数的贡献仍保持明显的减弱趋势,可以预料的是,在更高的SST下,TC尺度将对PDS起主导作用。

表1 不同SST下TC频数、强度、持续时间、尺度分别对PDI、PDS的贡献度

	PDI			PDS		
	E _{DBC02}	E _{SST+1}	E _{SST+2}	E _{DBC02}	E _{SST+1}	E _{SST+2}
N(%)	32.86	35.40	22.76	19.21	23.22	12.41
L(%)	13.41	13.10	16.81	7.84	8.59	9.16
I(%)	52.65	50.89	58.93	30.77	33.38	32.13
S(%)				36.66	31.95	38.51

4 总结和讨论

本文通过设置1组控制试验和3组敏感性试验来研究未来气候变暖和海洋增暖条件下TC活动(TC频数、强度、持续时间和尺度)的变化,并进一步分析了其对TC破坏力的影响。结果表明:

(1)随着海洋增暖,西北太平洋TC活动总体呈现增强的趋势,尤

其是高SST环境对TC强度、尺度增加有着较为显著的作用,而TC频数、持续时间对SST变化的响应要稍弱;(2)气候变暖主要是通过促进海洋增暖来影响TC活动,但要注意的是,气候变暖条件下大气环流、海气相互作用等改变对TC活动也会带来不同程度的影响;(3)PDI、PDS与SST变化具有正相关性,且PDS对SST变化的响应相较于PDI要更为敏感;(4)TC尺度是TC破坏力的重要贡献项。

本研究主要通过WRF模式来模拟未来气候变暖、海洋增暖条件下TC活动的变化,但由于设计的试验组有限,仅仅在0-2℃的SST变化区间内进行初步研究,试验设置的精度还不够高。此外,虽然我们在试验中设置了双倍CO₂环境下的敏感性试验,但是对于该环境下如何通过海洋增暖、大气环流以及海气相互作用等机制实现对TC活动强弱的影响,在本次研究中还未进行深入,这将在我们未来的工作中进一步研究。

[参考文献]

[1]陈光华,黄荣辉.西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题的研究[J].地球科学进展,2006,21(6):610-616.
 [2]张娇艳.中国台风降水和灾害气候分析[D].南京信息工程大学,2011.
 [3]王雨星,钟中,孙源,等.边界层参数化方案对热带气旋Megi(2010)路径模拟的影响机理分析[C].中国气象学会年会s1灾害天气监测、分析与预报.2016.
 [4]IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis (eds Solomon, S. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2007).
 [5]马丽萍,陈联寿,徐祥德.全球热带气旋活动与全球气候变化相关特征[J].热带气象学报,2006,22(2):147-154.
 [6]雷小途,徐明,任福民.全球变暖对台风活动影响的研究进展[J].气象学报,2009,67(5):679-688.
 [7]Sun Y, Zhong Z, Li T, et al. Impact of Ocean Warming on Tropical Cyclone Size and Its Destructiveness[J]. Sci Rep, 2017, 7(1):8154.
 [8]Lau, W. K. M., Shi, J. J., Tao, W. K. & Kim, K. M. What would happen to Superstorm Sandy under the influence of a substantially warmer Atlantic Ocean? Geophys. Res. Lett. 43, 802-811 (2016).
 [9]Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. [J]. Nature, 2005, 436(7051):686-8.
 [10]Emanuel, K. A. Environmental Factors Affecting Tropical Cyclone Power Dissipation. J. Clim. 20, 5497-5509 (2007).
 [11]余晖,端义宏.西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征[J].气象学报,2002,60(6):680-687.

作者简介:

傅民君(1996--),男,汉族,浙江省浦江县人,大学本科,助理工程师,水文气象,92880部队。