

NUIST 地球系统模式模拟 ENSO 对西北太平洋热带气旋活 动的的影响分析

吴启蒙¹, 吴立广², 曹剑¹

1 南京信息工程大学太平洋台风研究中心, 南京 210044

2 复旦大学大气与海洋科学系、大气科学研究院, 上海 200438

摘要 地球系统模式已经逐步成为研究热带气旋 (TC) 活动气候变化的重要工具之一, 之前的研究发现南京信息工程大学地球系统模式 (NESM) 高分辨率版本可以较好地模拟全球海温分布及 TC 活动的气候特征。本研究进一步分析了 NESM 地球系统模式模拟西北太平洋 TC 活动的年际变化, 并与 1967-2016 年观测的 TC 活动进行对比。NESM 模式高分辨率版本能够较好地模拟西北太平洋平均海温及与 ENSO 事件联系的海温异常变化特点, 对 El Niño 事件发生时西北太平洋 TC 的生成频数和路径分布的模拟较好, 也能模拟 El Niño 年 TC 生成位置比 La Niña 年偏东的特征, 但是未能模拟出 TC 平均生命周期和 NINO3.4 地区海温的相关性。并且模式模拟的 La Niña 年 TC 的生成位置偏东, 主要原因是模拟 La Niña 年季风槽平均位置偏东。研究结果有助于进一步改进 NESM 模式和利用 NESM 模式研究 TC 活动。

关键词 ENSO; 热带气旋 (TC); NUIST 地球系统模式

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2111.20248

收稿日期: 2020-12-23

网络与出版日期:

Analysis of the impact of ENSO on tropical cyclone activities in Northwest Pacific simulated by the NUIST Earth system model

Wu Qimeng¹, Wu Liguang², Cao Jian¹

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Institute of Atmospheric Sciences, Shanghai 200438, China

Abstract Earth system model has become one of the important tools in studying climate change of tropical cyclone (TC) activities. Previous studies found that the high-resolution version of NUIST Earth system model (NESM) can well simulate global SST distribution and the climate characteristics of TC activity. By compared with TC activity observed from 1967 to 2016, the study analyzed the interannual variability of TC activity in the Northwest Pacific Ocean simulated by NESM model. The results show that the high-resolution version of NESM model can well simulate the mean SST in Northwest Pacific and the SST anomaly associated with ENSO events. The model can simulate the generation frequency and the path distribution of TC in Northwest Pacific when El Niño events occur, and it can also simulate that the generation position of TC in El Niño years is easter than in La Niña years. However, the correlation between the mean life of TC and NINO3.4 SST could not be simulated. Moreover, NESM model simulated TC generation easter in La Niña years, the main reason is model simulated monsoon trough is easter. The results are helpful for further improving NESM model and using NESM model to study TC activities.

Keywords ENSO; Tropical Cyclone; NUIST Earth system model

引言

自上世纪 80 年代中期以来,不同海区热带气旋(TC)活动的年际变化已经有很多研究(Landsea, 2000),主要关注了厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)对 TC 活动的影响。研究发现:在 El Niño 年,西北太平洋 TC 的生成位置偏东,生成频数少于正常年份;而在 La Niña 年,西北太平洋地区年生成频数多于正常年份(Chan and Johnny, 1985, 2000; Wu and Lau, 1992)。Lander (1993)对这个结论提出了质疑,尽管 El Niño 期间 TC 的生成区域东移,但是西北太平洋观测到的年 TC 频数与 ENSO 指数没有显著相关。Chan et al. (1997) 用 0.5°C 作为划分 NINO3 地区海平面温度冷暖异常的标准,发现在 El Niño 年间的 6-8 月 TC 形成位置北移, 9-11 月 TC 形成位置东移,但是他们使用的资料时间长度较短,没有考虑强 ENSO 事件和弱 ENSO 事件之间的差异。Camargo and Sobel (2005) 分析了 1950-2002 年间 ENSO 对西北太平洋地区 TC 强度的影响,发现在 El Niño 年 TC 的强度比 La Niña 年更强,且 TC 的寿命更长。后来研究发现,相对湿度和涡度是 El Niño 年西北太平洋 TC 生成位置东移的主要原因(Camargo and Sobel, 2007)。

Wang et al. (2013) 将 TC 活动季节分为早期、高峰和晚期,研究了中东太平洋海温异常对西北太平洋 TC 活动的影响,发现早期 ENSO 活动对 TC 活动影响不显著;高峰期间东太平洋暖(冷)海温会导致东南象限 TC 频数、强度和生命周期增加(减少);而在晚期中太平洋暖(冷)海温会导致东南象限 TC 频数、强度和生命周期增加(减少)。Zhao et al. (2010) 模拟了 14 个 El Niño 和 14 个 La Niña 年 TC 的生成和路径,在 El Niño 年, 20°N 以南地区 TC 的活动明显增强, El Niño 事件会导致 TC 路径向西移动,而 La Niña 事件导致路径向北移动。Tao et al. (2012) 发现在 El Niño 年,菲律宾海的强 TC 生成频数较多, 中国和日本东部沿海登录的 TC 较多,而在 La Niña 年,西北太平洋强 TC 生成频数远低于正常年份。西北太平洋季风槽和赤道西风的气旋切变东移是导致 TC 频数增加和生成位置东移的主要原因。

Krishnamurthy et al. (2016) 使用 GFDL 耦合模式模拟 ENSO 对 TC 的影响,结果表明强 El Niño 事件导致西北太平洋地区 TC 生成位置东移。但 La Niña 事件对太平洋 TC 的活动影响并不明显。本世纪以来,全球大气模式已经成为研究全球气候变化对 TC 活动影响的重要工具之一(Yamada, 2010; Manganello et al., 2014; Murakami et al., 2015; Yamada et al., 2017)。例如, Oouchi et al. (2010) 利用日本气象厅 20km 分辨率的全球大气模式模拟全球变暖对台风活动的影响;利用改进的日本气象厅模式, Murakami et al. (2012) 发现 20km 分辨率模式甚至可以模拟出超强台风。随着计算资源的不断改进,近几年来人们开始利用耦合的全球气候系统模式研究全球气候变化对 TC 活动的影响。例如, Kim et al. (2014) 利用 GFDL 耦合气候模式模拟全球 TC 活动, Murakami et al. (2017) 通过数值试验发现人类活动可能增强了阿拉伯海的 TC 活动。

南京信息工程大学地球系统模式(NUIST-ESM, NESM)是南京信息工程大学研制的地球系统模式,有高分辨率和低分辨率两个版本,之前的研究(吴启蒙等, 2019)发现: NESM 模

式高分辨率版本可以较好地模拟出全球海温分布及 TC 活动的气候特征。本研究进一步分析了 NESM 地球系统模式高分辨率版本模拟西北太平洋 TC 活动的年际变化特征, 并分析模式模拟的 ENSO 事件对西北太平洋 TC 活动的影响, 此研究结果有助于进一步改进 NESM 模式和利用 NESM 模式研究台风活动。

1 资料

本研究使用的模式资料为 NUIST-ESM 高分辨率版本模式资料(Cao et al., 2015), 模式利用 ECHAM v5.3 大气环流模式、NEMO v3.4 海洋环流模式和 CICE v4.1 海冰模式, 通过 OASIS3-MCT 并行耦合器耦合而成。其中 ECHAM v5.3 大气环流模式的方案为 T159L31, 其水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 垂直层数为 31 层, 模式顶为 10hPa; NEMO v3.4 海洋模式为 NEMO ORCA2 配置, 在赤道外地区的水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 赤道地区经向分辨率加密至 0.5° , 垂直层数为 31 层; CICE v4.1 海冰模式的水平分辨率为 $1^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 本研究采用的是 CICE 模式多层热力学方案, 在垂直方向上包含有 1 层雪和 4 层冰。

为了检验耦合模式对内部变率的模拟性能, 在设计试验时, 采用固定的外部强迫条件(如温室气体、太阳常数、气溶胶、陆面状态等)来驱动模式。所有外部强迫参数的选择都是 1990 年代平均的参数, 包括气溶胶和陆面状态信息。为了高效地使模式达到准平衡状态, 海洋模式和海冰模式的初始场来自 1000 年低分辨率版本耦合模式的积分, 而大气模式的初始场来自再分析资料。经过 NESM 耦合模式调整 100 年之后, 取其随后的 50 年模拟结果作为模式资料。

本文用的 TC 观测资料是 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 的西北太平洋 TC 路径资料, 选取 1967-2016 年间达到 TS 强度或以上的 TC (最大风速达到 17.2 m/s 或以上), 与模式中达到 TS 强度或以上的 TC 涡旋进行比较。此外, 还用到了 HadISST (The Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature) 的月平均海温资料和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 风场再分析资料, 与模式模拟的海温和风场资料进行对比分析。

2 El Niño (La Niña) 事件的分类

2.1 El Niño (La Niña) 事件的分类方法

西北太平洋地区的 TC 活动与海表面温度异常有密切关系(Chan et al., 1997), 表示西北太平洋地区的海温异常主要有三个指数: NINO 3 指数、NINO 3.4 指数和 NINO 4 指数, 分别表示区域($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{W} \sim 150^{\circ}\text{W}$)、区域($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{W} \sim 170^{\circ}\text{W}$)和区域($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{W} \sim 160^{\circ}\text{E}$)的海温异常。因为对流发生与海温及海温梯度有关, 而不是海温异常本身(Graham and Barnett, 1987; Wang and Li, 1993), 所以 NINO 3.4 区域的海温异常与 TC 活动的相关性比 NINO 3 和 NINO 4 区域更好。因此, 我们使用 NINO 3.4 区域的海温异常作为标准对 El Niño (La Niña) 事件进行分类。

2.2 El Niño (La Niña) 事件的分类结果

由于不同月份的 TC 活动存在差异, 所以需要将 TC 活动分阶段进行研究。统计了西北太

平洋不同月份的 TC 生成频数，虽然西北太平洋地区在每个月份都有 TC 生成，但是大部分的 TC 在 6-11 月份之间生成，超过全年生成 TC 的 85%，这与 Lander (1994a) 研究结果相同。根据西北太平洋 TC 生成频数的月份分布，我们将研究重点放在 6-11 月，分为夏季（6-8 月）和秋季（9-11 月）两个季节。计算模拟和观测 50 年间西北太平洋夏季和秋季的 NINO 3.4 指数，画出随时间的序列分布，如图 1 所示。

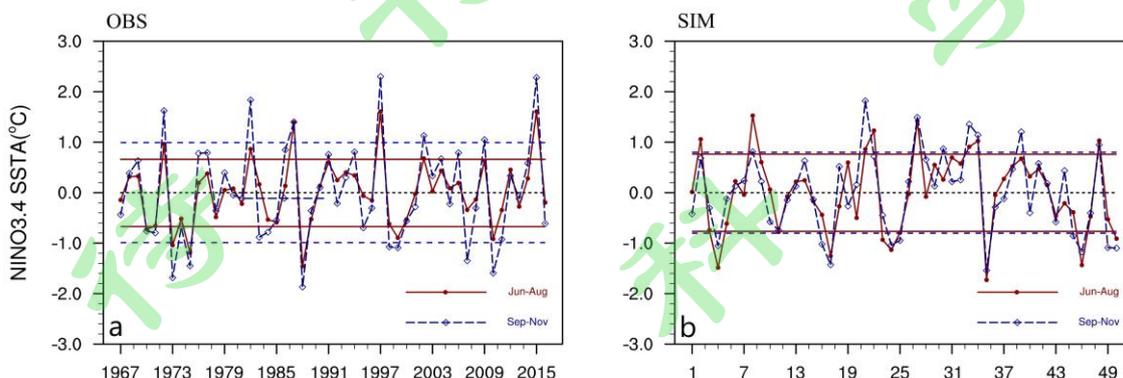


图 1 夏季和秋季 NINO3.4 指数的时间序列分布 (a)观测, (b)模拟。图中红色实线和蓝色虚线分别为夏季和秋季 NINO3.4 指数 1 和-1 倍标准差数值 (研究年份分类标准阈值)。

Fig. 1 Time series distribution of NINO3.4 index in summer and autumn (a) observation, (b) simulation. The red solid line and blue dashed line are the value of 1 and -1 standard deviation of the NINO3.4 index in summer and autumn (the threshold value of the classification standard for the study year).

从 NINO3.4 指数的时间序列图 (图 1) 和典型年分类结果 (表 1) 中可以看出: 在观测资料中, 夏季和秋季的 NINO 3.4 指数符号基本相同, 但是秋季海温异常的标准差较大, 对应图 1a 中秋季振幅偏大。而模式可以模拟出与观测类似的海温异常振荡, 但是夏季和秋季的标准差相差不大, 对应图 1b 中夏季和秋季的振幅比较接近。

根据不同台风季节 NINO3.4 指数的标准差将研究年份分为五类: 强暖年 (NINO3.4 指数大于 1 个标准差), 弱暖年 (NINO3.4 指数大于 0.5 个小于 1 个标准差), 正常年 (NINO3.4 指数在正负 0.5 个标准差之间), 弱冷年 (NINO3.4 指数大于-1 个小于-0.5 个标准差) 和强冷年 (NINO3.4 指数小于-1 个标准差), 分类结果如表 1 所示。

表 1 夏季和秋季 El Niño(La Niña)典型年的分类结果

Table 1 Classification results of El Niño (La Niña) years in summer and autumn

(a)观测

	夏季	秋季
强暖年	1972、1982、1987、1997、2002、2015	1972、1982、1987、1997、2002、2009、2015
弱暖年	1977、1991、1993、1994、2004、2009、2012	1969、1976、1977、1979、1986、1991、1994、2004、2006、2014
正常年	1967、1968、1969、1976、1979、1980、1981、1983、1986、1990、1992、1995、1996、2001、2003、2005、2006、2008、2013、2014、2016	1967、1968、1980、1981、1989、1990、1992、1993、1996、2001、2003、2005、2008、2012、2013
弱冷年	1974、1978、1984、1985、1989、1998、2000、2007、2011	1970、1971、1974、1978、1983、1984、1985、1995、2000、2011、2016
强冷年	1970、1971、1973、1975、1988、1999、2010	1973、1975、1988、1998、1999、2007、2010
标准差	0.66	0.99

(b)模拟

	夏季	秋季
强暖年	2、8、21、22、27、33、34、48	8、21、27、30、33、34、39、48
弱暖年	9、19、29、31、32、38、39、41	2、14、18、22、28、38、41、44
正常年	1、6、7、10、12、13、14、15、18、 26、28、30、36、37、40、42、44	3、5、6、7、9、12、13、15、19、 20、26、29、31、32、36、37、42
弱冷年	3、5、16、20、43、45、47、49	1、10、11、23、40、43、47
强冷年	4、11、17、23、24、25、35、46、50	4、16、17、24、25、35、45、46、49、50
标准差	0.77	0.79

从表 1 可以看出, 观测中秋季的海温异常标准差大于夏季, 但是模拟两个季节的海温异常标准差差异较小。研究发现, 在弱暖和弱冷年份, TC 的生成频数和生成位置与正常年份相似, 只有当 NINO3.4 指数较大 (大于 1 个标准差或小于 -1 个标准差) 时, 对 TC 活动的影响才比较显著(Wang and Chan, 2002)。由于两个季节强暖和强冷年的分类结果相似, 所以我们使用夏季和秋季分类结果中重复的强暖和强冷年作为 El Niño 和 La Niña 年份进行研究。其中模拟的 El Niño 年共有 6 个: 8、21、27、33、34、48; 模拟的 La Niña 年共有 7 个: 4、17、24、25、35、46、50; 观测的 El Niño 年共有 6 个: 1972、1982、1987、1997、2002、2015; 观测的 La Niña 年共有 5 个: 1973、1975、1988、1999、2010。第三节将挑选出典型年的 TC 活动进行分析, 来研究 ENSO 事件对西北太平洋 TC 活动的影响。

主要分为以下三个方面: (1) TC 生成位置 (TC 首次达到热带风暴强度的位置, 即最大风速达到 17.2m/s) 和频数; (2) TC 生命周期 (从达到热带风暴强度到下降到热带风暴强度的时间长度); (3) TC 路径分布。

3 TC 活动与赤道太平洋海温异常的关系

3.1 TC 生成位置

为了分析 TC 的生成位置分布, 将热带西北太平洋地区 ($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 分为几个子区域, 其中本文主要研究 $120^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 之间的区域。结合了前人的区域划分方法(Wang and Chan, 2002; Zhao et al., 2011), 在本研究中, 我们使用 140°E 作为划分东西两个区域的边界, 将夏季西北太平洋划分为两个区域: 东部和西部。此外, 我们使用 20°N 作为夏季西北太平洋地区南北区域的划分边界, 从而将西北太平洋地区划分成了四个区域, 即西北象限 ($120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, 20°N 以北)、东北象限 ($140^{\circ}\text{E}\sim 180$, 20°N 以北)、西南象限 ($120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, 20°N 以南) 和东南象限 ($140^{\circ}\text{E}\sim 180$, 20°N 以南)。模式中热带气旋的识别主要考虑了气压、风速、海温、暖心和涡度等条件, 具体可见文章 (吴启蒙等, 2019)。

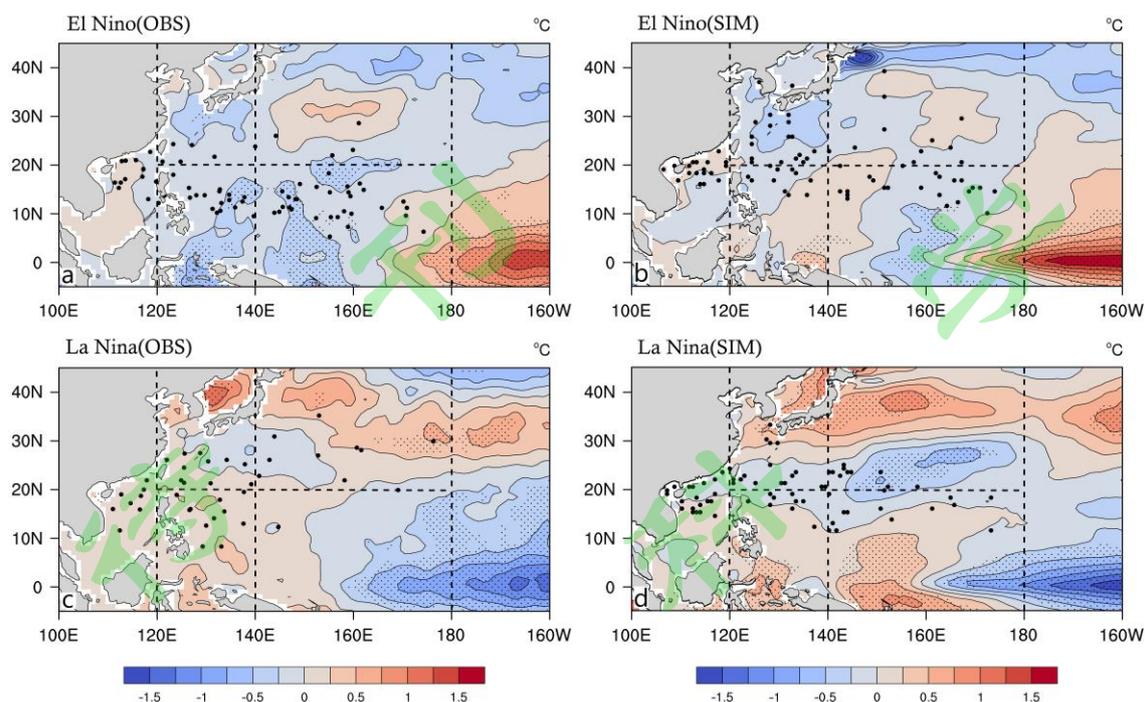


图 2 El Niño(La Niña)事件发生时西北太平洋夏季平均海温异常与 TC 的生成位置分布 (a)观测 El Niño, (b)模拟 El Niño, (c)观测 La Niña, (d)模拟 La Niña。图中阴影为平均海温异常, 黑点为 TC 的生成位置, 黑色虚线为不同区域的分界线, 点状阴影区域为通过 5% 显著性检验的区域。

Fig. 2 The summer average sea surface temperature anomaly in Northwest Pacific and the distribution of TC generation locations during the El Niño (La Niña) event (a) Observation of El Niño, (b) Simulation of El Niño, (c) Observation of La Niña, (d) Simulation of La Niña. The shaded in figure is the average sea surface temperature anomaly, the black dots are the locations where the TC is generated, the black dashed line is the dividing lines of different areas, and the dotted shaded area is the area passed 5% significance test.

图 2 为 El Niño(La Niña)事件发生时西北太平洋夏季平均海温异常与 TC 的生成位置分布图, 从图 2 中可以看出: 模式可以较好地模拟 ENSO 事件发生时西北太平洋地区夏季的海温异常分布, 在 El Niño (La Niña) 事件发生的年份, 160°E 以东赤道地区存在暖(冷)海温异常, 模拟的范围和大值中心都和观测类似, 模拟的距平极值略大于观测, 且大部分都通过显著性检验, 说明模拟 El Niño (La Niña) 年西北太平洋地区海温异常与其它年份具有显著性差异。从 TC 的生成位置上可以发现, 观测中 El Niño 年 TC 主要生成于 20°N 以南, 但生成位置的模拟效果并不好, 模拟结果主要在 20°N 附近, 而观测结果主要在 12°N 附近; 而观测中 La Niña 年东南象限仅有一个 TC 生成, 模式对 La Niña 年东南象限的模拟情况较差。

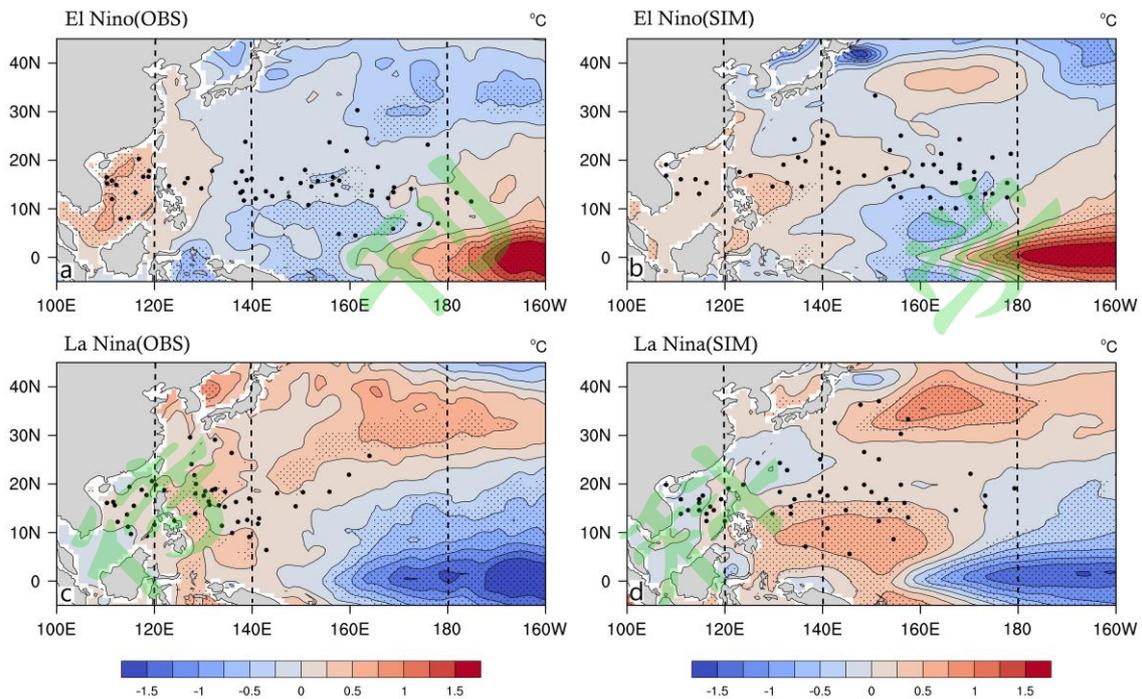


图3 与图2同，但是为秋季

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for autumn.

图3为El Niño(La Niña)事件发生时西北太平洋秋季平均海温异常与TC的生成位置分布图，从图3中可以看出：模式可以较好地模拟出ENSO事件发生时西北太平洋地区秋季的海温异常分布，在El Niño(La Niña)事件发生的年份，160°E以东赤道地区存在的暖(冷)海温异常中心，模拟的范围和大值中心都和观测类似，并具有显著性差异。和夏季相比，秋季的海温异常区域较大，极值也较强。从TC的生成位置上可以发现，观测中El Niño年份热地气旋生成主要在140°E以东，模式可以模拟出这一特征；而观测中La Niña年份TC主要生成在140°E以西，但是模拟的La Niña年TC主要生成于140°E以东。

接下来我们统计了El Niño年和La Niña年夏季和秋季西北太平洋不同子区域TC的生成频数，结果如表2所示。

表2 El Niño年和La Niña年西北太平洋不同子区域TC的生成频数

Table 2 Frequency of TC generation in different subregions of Northwest Pacific in El Niño and La Niña years

(a)夏季						
夏季		西北象限 (120°E~140°E, 20°N以北)	东北象限 (140°E~180°, 20°N以北)	西南象限 (120°E~140°E, 20°N以南)	东南象限 (140°E~180°, 20°N以南)	总数
观测	El Niño年	6	4	19	30	59
	La Niña年	11	10	11	1	33
	总数	17	14	30	31	92
模拟	El Niño年	19	11	11	23	64
	La Niña年	17	10	9	14	50
	总数	36	21	20	37	114

(b)秋季				
秋季		西部区域(120°E~140°E)	东部区域(140°E~180°)	总数
观测	El Niño年	12	33	45
	La Niña年	28	9	37
	总数	40	42	82
模拟	El Niño年	9	36	45

La Niña 年	15	27	42
总数	24	63	87

从表 2 中可以看出：在观测夏季，20°N 以北的 TC 生成东西分布较为均匀，但是 20°N 以南 TC 生成东西分布差异较大，观测 La Niña 年东南象限仅有 1 个 TC 生成，远小于 El Niño 年，虽然模式模拟的 La Niña 年东南象限 TC 生成频数也小于 El Niño 年，但是与观测比仍有偏差。在秋季，观测 El Niño 年有 33 个 TC 生成于东部区域，约为西部区域的 3 倍，模式模拟的 El Niño 年 TC 也大部分生成于东部区域；观测 La Niña 年与 El Niño 年相反，仅有 9 个 TC 生成于东部区域，约为西部区域的 1/3，而模式对于 La Niña 年的模拟与 El Niño 年模拟相似，未能模拟出 La Niña 事件对西北太平洋 TC 生成的影响。

为了量化不同年份 TC 的平均生成位置的变化，我们计算了模拟和观测 50 年每年夏季和秋季 TC 生成的平均位置，并画出空间部分图，如图 4、图 5 所示。

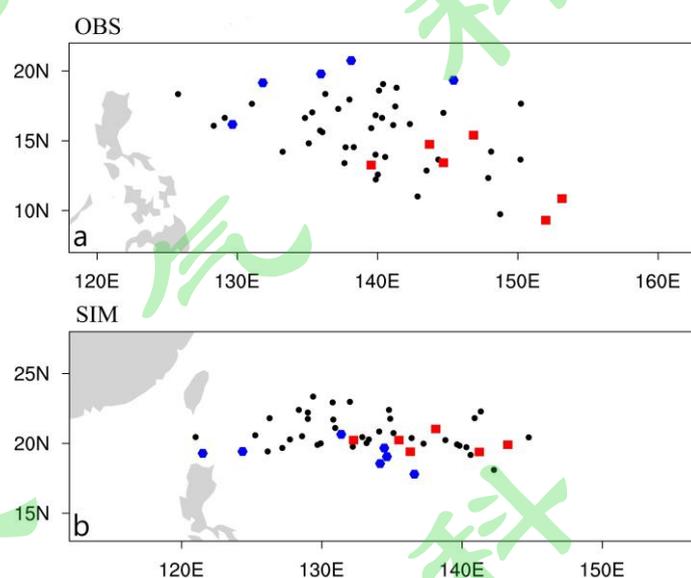


图 4 夏季 TC 的年平均生成位置 (a)观测, (b)模拟。图中红色正方形表示 El Niño 年 TC 的平均生成位置, 蓝色六边形表示 La Niña 年 TC 的平均生成位置, 黑点表示其他年份 TC 的平均生成位置。

Fig. 4 Annual average generation location of TC in summer (a) Observation, (b) Simulation. The red square in the figure represents the average generation position of TC in El Niño year, the blue hexagon represents the average generation position of TC in La Niña year, and the black dots represent the average generation position of TC in other years.

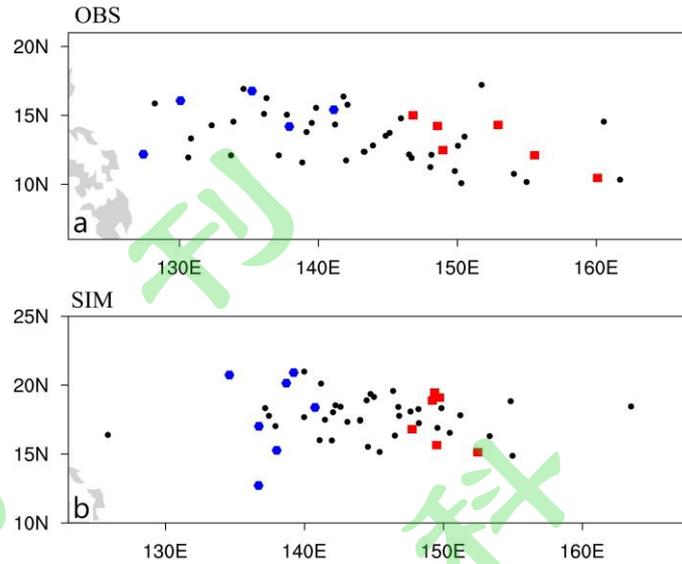


图 5 与图 4 同，但是为秋季

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for autumn.

从图 4 中可以看出：观测中可以明显的看出 El Niño 年夏季 TC 的平均生成位置偏东南，而 La Niña 年夏季 TC 的平均生成位置偏西北；模式可以模拟出 El Niño 年夏季 TC 的平均生成位置偏东的特征，但是未能模拟出南北方向的差异。从图 5 中可以看出，无论是观测还是模拟，El Niño 年秋季 TC 的平均生成位置和 La Niña 年相比都偏东。

表 3 El Niño 年和 La Niña 年 TC 平均生成位置的偏差

Table 3 The deviation of the average generation position of TC in El Niño and La Niña years

平均偏差		夏季		秋季	
		纬度	经度	纬度	经度
观测	El Niño 年	-2.6	6.7	-0.4	8.8
	La Niña 年	3.4	-3.8	1.3	-8.8
模拟	El Niño 年	-0.3	4.8	-0.3	5.3
	La Niña 年	-0.8	-2.2	0.0	-6.4

注：表格中加粗的数字表示通过 5% 显著性检验的 t 检验结果。

表 3 是 El Niño 年和 La Niña 年 TC 平均生成位置与正常年份 TC 平均生成位置的偏差值，其中正值表示纬度方向偏北或经度方向偏东，负值表示纬度方向偏南或经度方向偏西。从表 3 中可以看出：无论是夏季还是秋季，观测 El Niño 年 TC 的平均生成位置都比 La Niña 年份偏东，模式也能模拟出这一特征，但是差异比观测偏小，表格中的经度差异数据大部分通过了显著性检验，具有显著性差异。而在观测 El Niño 的夏季，TC 生成位置比 La Niña 年偏南，但是模式未能模拟出这一特征。

3.2 TC 生命周期

观测的 TC 生命周期的定义为：从 TC 从达到热带风暴强度到下降到热带风暴强度的时间长度；而模式中 TC 生命周期的定义为：识别出的 TC 开始到 TC 消失的全部时间长度。本文中对于 TC 的年平均寿命的定义为：夏季和秋季生成的所有 TC 存在的平均生命周期长度。观测中 El Niño 年的 TC 平均生命周期为 7.1 天，而 La Niña 年的 TC 的平均生命周期为 4.0 天，El Niño 年的 TC 平均生命周期明显较长。模拟中 El Niño 年的 TC 平均生命周期为 5.3 天，而

La Niña 年的 TC 的平均生命周期为 5.6 天，未能模拟出 El Niño 和 La Niña 年 TC 平均生命周期的显著差异。

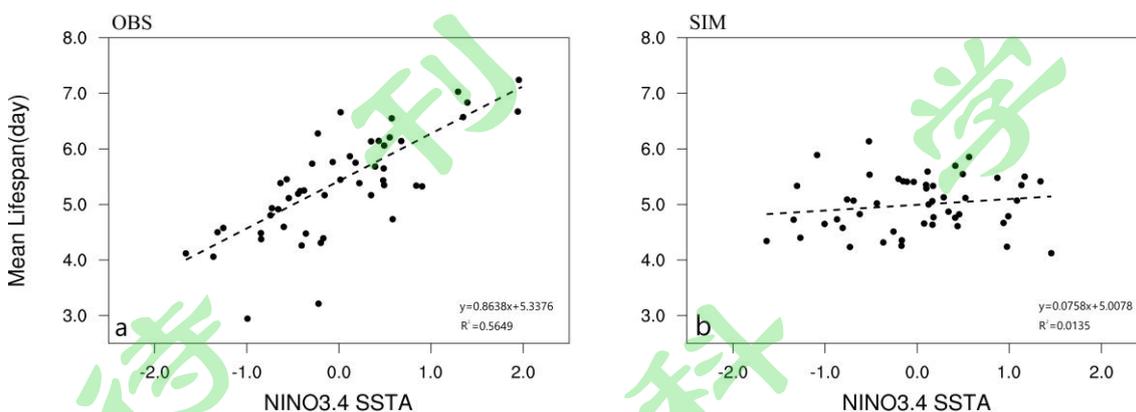


图 6 TC 平均生命周期和 NINO3.4 地区海表面温度的相关性 (a)观测, (b)模拟。图中黑点为每个年份, 虚线为一元线性回归拟合线, 方程为回归方程, 其中观测相关系数通过 5% 显著性检验。

Fig. 6 Correlation between TC average life and sea surface temperature anomaly in NINO3.4 area (a) observation, (b) simulation. The black dot in the figure represents every year, the dashed line is the one-variable linear regression line, the equation is the regression equation, the observed correlation coefficient passes the 5% significance test.

图 6 为 TC 平均生命周期和 NINO3.4 地区海表面温度的相关性, 从图 6a 中可以看出: 观测中 TC 的平均生命周期随着 Nino3.4 海表面温度异常的增加而增加, 并且通过了显著性检验, 所以较大的 Nino3.4 区域 SSTA 有利于 TC 的生成和维持。由于 El Niño 年 NINO3.4 区域的海温异常较大, 所以 El Niño 年的 TC 平均生命周期较长, 而 La Niña 年 NINO3.4 区域的海温异常较小, 所以 La Niña 年的 TC 平均生命周期较短。而模拟的 TC 的平均生命周期随着 Nino3.4 海表面温度异常的增加变化不明显, 相关系数也未能通过显著性检验, 所以模拟的 TC 生命周期较差。

3.3 TC 路径分布

将西北太平洋地区划分为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的网格点, 计算每个网格点内 TC 路径经过的次数, 作为该网格点内的 TC 路径频数, 进行九点平滑后, 画出 El Niño 年和 La Niña 年夏季和秋季 TC 的路径频数分布图, 如图 7 和图 8 所示。

对比观测图 (7a、7c 和 8a、8c) 可以看出, TC 的生命周期与 TC 的生成位置密切相关, 大多数生命周期较长的 TC 形成在西北太平洋的东南象限中。在 El Niño 年中, 东南象限中形成的 TC 在遇到大陆或较冷的中纬度海洋之前可以有更长的时间发展, 所以路径频数分布更广 (Camargo and Sobel, 2005)。

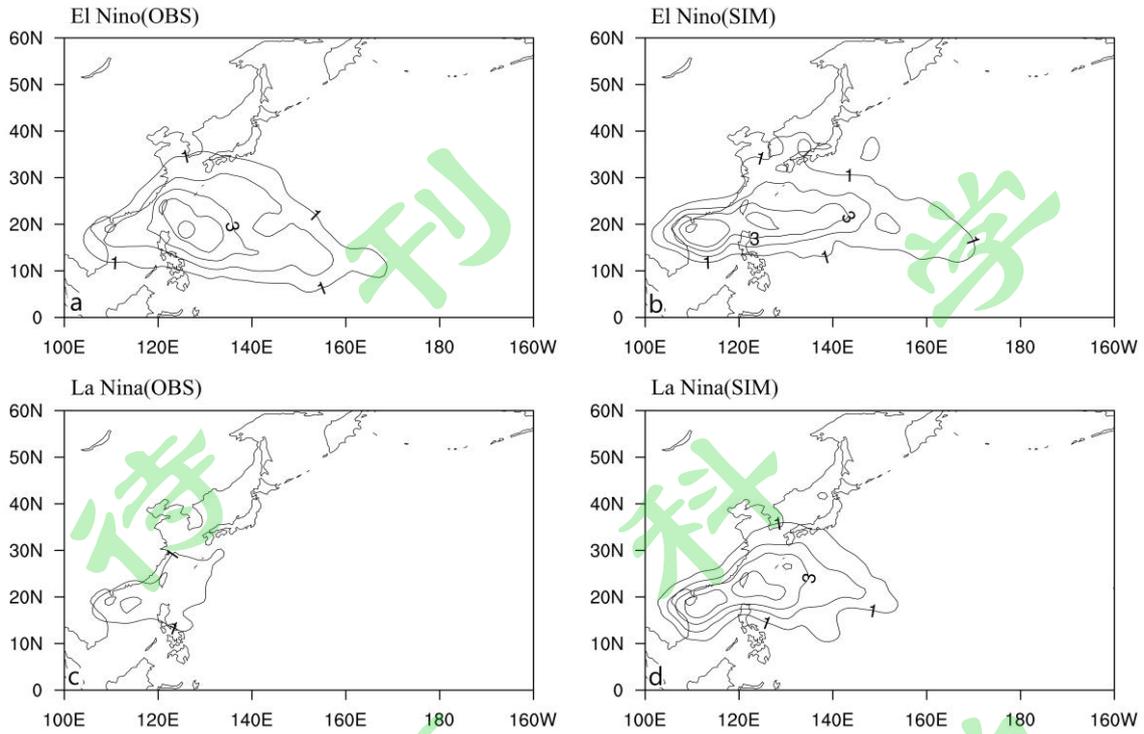


图 7 El Niño(La Niña)事件发生时西北太平洋夏季 TC 路径频数分布 (a)观测 El Niño, (b)模拟 El Niño, (c)观测 La Niña, (d)模拟 La Niña

Fig. 7 Frequency distribution of summer TC paths in Northwest Pacific during the El Niño (La Niña) event (a) Observation of El Niño, (b) Simulation of El Niño, (c) Observation of La Niña, (d) Simulation of La Niña

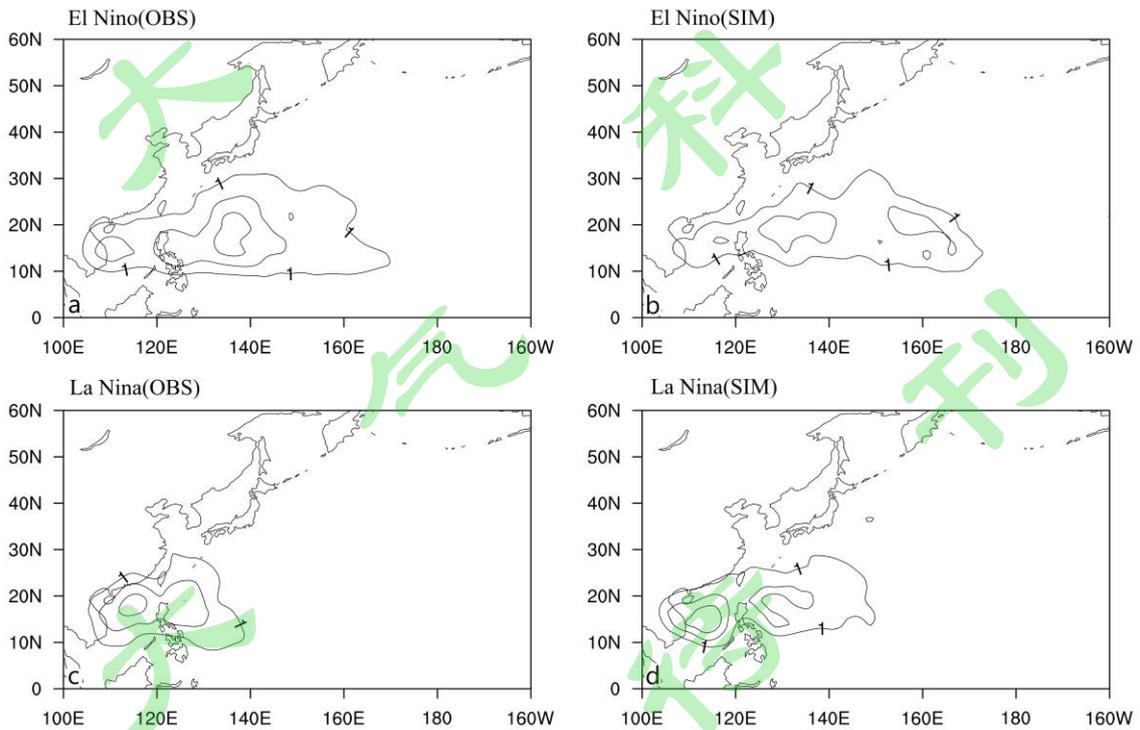


图 8 与图 7 同, 但是为秋季

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for autumn.

对比模拟和观测的路径频数分布图, 可以看出: 无论是夏季还是秋季, 模式都可以较好地

模拟出 El Niño 年西北太平洋 TC 的路径频数分布，路径频数的范围和大值中心都有较好的模拟。但是在 La Niña 年，由于生成位置的模拟差异，模式模拟的路径频数和观测相比范围较大，有向东延伸的趋势，和 El Niño 年较为接近。

4 La Niña年模拟TC活动差异原因

从图 2 和图 3 中可以看出，模式可以较好地模拟出 El Niño(La Niña)事件发生时西北太平洋夏季和秋季的海温异常分布，但是模拟的 TC 生成位置和观测还存在差异。与 El Niño 年相比，对 La Niña 年的 TC 活动模拟较差。下文将分析模式模拟 La Niña 年 TC 结果较差的原因。

前人的研究表明(Lander, 1994b; Ritchie and Holland, 1999; Chen et al., 2004)，季风槽和季风环流对西北太平洋 TC 生成起着重要作用。Wu et al.(2013)发现大部分 TC 在季风环流与反气旋之间增强的西南气流的中心和东北侧形成，Wu et al.(2012)研究了 1979-2007 年间西北太平洋地区 TC 活动与季风槽位置的关系，发现在季风槽东伸（西退）的年份，西北太平洋东南象限 TC 生成频数偏多（少），并且这种关系可以通过与季风槽运动相关的大规模环境因素（相对湿度、垂直切变、高层辐散、低层涡度）的变化来解释，所以 ENSO 与 TC 的关系可以通过季风槽以及与季风槽相关的大规模环流的变化来解释。

图 9 为 La Niña 事件发生时西北太平洋地区的 850hPa 风场分布。从图 9a 中可以看出：在北半球夏季，副热带高压控制了整个西北太平洋，菲律宾以西区域被西南季风控制，越赤道气流、西南季风以及副高南侧的偏东风在赤道辐合带附近汇合，生成西北-东南向的季风槽，为 TC 的生成提供有利的动力和热力条件(Chia and Ropelewski, 2002)，并且季风槽的活动对于 TC 移动路径也有重要影响，特别是在 ENSO 活动期间。

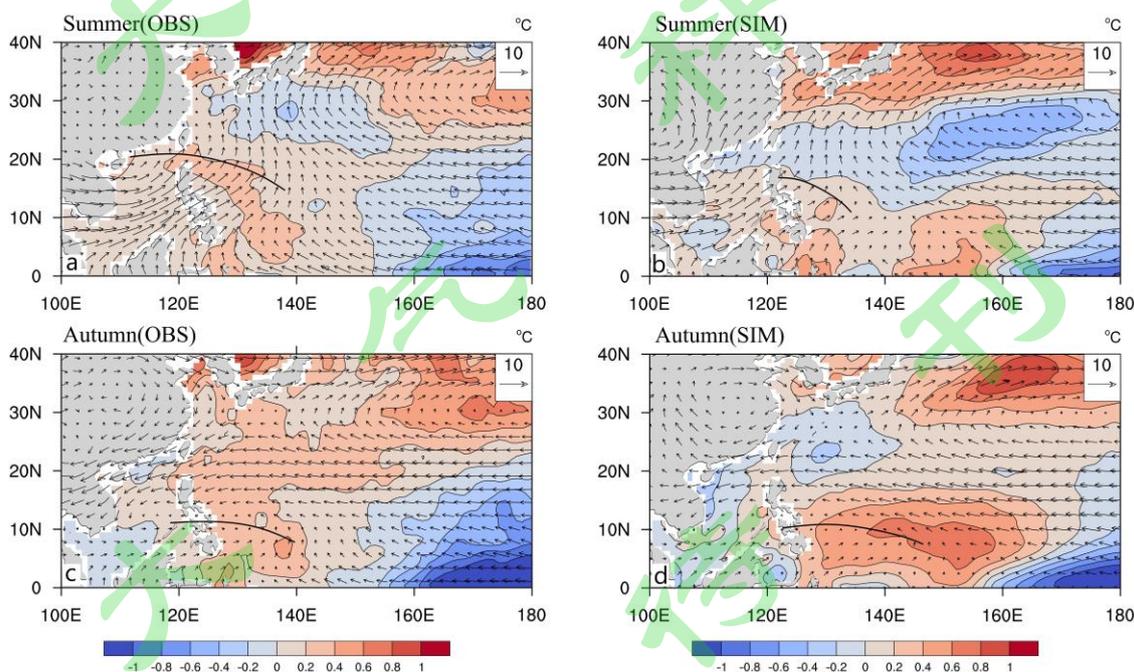


图 9 La Niña 事件发生时西北太平洋 850hPa 平均风场 (a)观测夏季, (b)模拟夏季, (c) 观测秋季, (d)模拟秋季。

图中等值线为海温距平，黑色实线为季风槽槽线

Fig. 9 The 850hPa average wind field in Northwest Pacific during the La Niña event (a) Observation in summer, (b)

Simulation in summer, (c) Observation in autumn, (d) Simulation in autumn. The contour line in figure is the sea temperature anomaly, the black solid line is the monsoon trough line.

从图 9b 中可以看出，模式对于 La Niña 事件发生时西北太平洋地区 850hPa 平均风场模拟情况较好，但是在风速和风向方面还有差异。对比图 9a 和 9b 中季风槽位置可以看出，在夏季 La Niña 事件发生时，模拟的季风槽位置偏南，这导致模式模拟的 TC 生成位置偏南的特征；对比图 9c 和 9d 可以看出，在秋季 La Niña 事件发生时，模拟的季风槽位置偏东，这导致模式模拟的 TC 生成位置偏东。这些结果也与 Wu et al.(2012)的研究结论一致。

5 结论与讨论

全球大气模式已经成为研究全球气候变化对台风活动影响的重要工具之一，之前的研究发现南京信息工程大学地球系统模式（NESM）高分辨率版本可以较好地模拟出全球海温分布及 TC 活动的气候特征。本研究进一步分析了 NESM 地球系统模式模拟西北太平洋 TC 活动的年际变化，并与 1967-2016 年观测的 TC 活动进行对比。首先定义了 NUIST 模式中 El Niño 和 La Niña 事件的识别方法，与观测资料中的 ENSO 事件对比，研究了模式是否可以模拟出 El Niño（La Niña）事件，以及模拟 El Niño（La Niña）事件对西北太平洋 TC 活动的影响，得出以下结论：

- 1、NESM 模式能够很好地模拟出西北太平洋地区的平均海温，对 El Niño（La Niña）事件发生时海温异常变化的特点也有较好地模拟。
- 2、NESM 模式对 El Niño 事件发生时西北太平洋 TC 的生成频数和路径分布的模拟较好，也能模拟出 El Niño 年西北太平洋生成位置比 La Niña 年偏东的特征。
- 3、NESM 模式未能模拟出 TC 平均生命周期和 NINO3.4 地区海表面温度的相关性。
- 4、NESM 模式模拟的 La Niña 年 TC 的生成位置和路径分布与观测相比偏东，造成模拟误差的主要原因是模式对 La Niña 年季风槽位置偏东。

在 NESM 模式可以较好地模拟全球 TC 活动的基础上，本研究进一步研究了模式是否可以模拟出 ENSO 事件与 ENSO 事件发生时西北太平洋地区 TC 的活动，结果表明：模式能够较好地模拟西北太平洋平均海温及与 ENSO 事件联系的海温异常变化特点，但是和前人的研究结果相似，在模拟 ENSO 事件对西北太平洋地区 TC 活动的影响方面还有待改进，尤其是 La Niña 事件对 TC 活动的影响。此研究结果有助于进一步改进 NESM 模式和利用 NESM 模式研究台风活动。

参考文献

- 吴启蒙, 吴立广, 曹剑. 2019. NUIST 地球系统模式模拟热带气旋活动的气候特征分析[J]. 气候变化研究进展, 15(02):5-16. Wu Q M, Wu L G, Cao J. Analysis of climate characteristics of tropical cyclone activities simulated by the NUIST Earth system model [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (2): 107-118
- Camargo S J, Sobel A H. 2005. Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO [J]. Journal of Climate, 18(15): 2996-3006.

- Camargo S J, Emanuel K A, Sobel A H. 2007. Use of a Genesis Potential Index to Diagnose ENSO Effects on Tropical Cyclone Genesis [J]. *Journal of Climate*, 20(19): 4819-4834.
- Cao J, Wang B, Xiang B, et al. 2015. Major modes of short-term climate variability in the newly developed NUIST Earth System Model (NESM) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(5): 585-600.
- Chan, Johnny C L. 1985. Tropical Cyclone Activity in the Northwest Pacific in Relation to the El Niño/Southern Oscillation Phenomenon [J]. *Monthly Weather Review*, 113(4): 599-606.
- Chan J C L, Shi J, Lam C. 1997. Seasonal Forecasting of Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific and the South China Sea [J]. *Weather & Forecasting*, 13(4): 997-1004.
- Chan, Johnny, C. L. 2000. Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific Associated with El Niño and La Niña Events. [J]. *Journal of Climate*, 13 (16): 2960-2972.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C, et al. 2004. Role of the Monsoon Gyre in the Interannual Variation of Tropical Cyclone Formation over the Western North Pacific [J]. *Weather and Forecasting*, 19(4): 776-785.
- Chia H H, Ropelewski C F. 2002. The Interannual Variability in the Genesis Location of Tropical Cyclones in the Northwest Pacific [J]. *Journal of Climate*, 15(20): 2934-2944.
- Graham N E, Barnett T P. 1987. Sea Surface Temperature, Surface Wind Divergence, and Convection over Tropical Oceans [J]. *Science*, 238(4827):657-659.
- Kim H S, Vecchi G A, Knutson T R, et al. 2014. Tropical Cyclone Simulation and Response to CO₂ Doubling in the GFDL CM2.5 High-Resolution Coupled Climate Model [J]. *Journal of Climate*, 27(21): 8034-8054.
- Krishnamurthy L, Vecchi G A, Msadek R, et al. 2016. Impact of strong ENSO on regional tropical cyclone activity in a high-resolution climate model in the North Pacific and North Atlantic Oceans [J]. *Journal of Climate*, 29(7): 2375-2394.
- Lander M A. 1993. Comments on "A GCM simulation of the relationship between tropical storm formation and ENSO" [J]. *Monthly Weather Review*, 121(7): 2137-2143.
- Lander M A. 1994. Description of a Monsoon Gyre and Its Effects on the Tropical Cyclones in the Western North Pacific during August 1991 [J]. *Weather and Forecasting*, 9(4): 640-654.
- Lander M A. 1994. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO. *Monthly Weather Review*, 122(4), 636-651.
- Landsea C W. 2000. El Niño–Southern Oscillation and the seasonal predictability of tropical cyclones. *El Niño: Impacts of Multiscale Variability on Natural Ecosystems and Society*, H. F. Diaz and V. Markgraf, Eds., 149–181.
- Murakami H, Sugi M, Kitoh A. 2012. Future changes in tropical cyclone activity in the North Indian Ocean projected by high-resolution MRI-AGCMs [J]. *Climate Dynamics*, 40(7-8): 1949-1968.
- Manganello J V, Hodges K I, Dirmeyer B, et al. 2014. Future Changes in the Western North Pacific Tropical Cyclone Activity Projected by a Multidecadal Simulation with a 16-km Global Atmospheric GCM [J]. *Journal of Climate*, 27(20): 7622-7646.
- Murakami H, Vecchi G A, Underwood S, et al. 2015. Simulation and Prediction of Category 4 and 5 Hurricanes in the High-Resolution GFDL HiFLOR Coupled Climate Model* [J]. *Journal of Climate*, 28(23): 9058-9079.

- Murakami H, Vecchi G A, Delworth T L, et al. 2017. Dominant Role of Subtropical Pacific Warming in Extreme Eastern Pacific Hurricane Seasons: 2015 and the Future [J]. *Journal of Climate*, 30(1): 243-264.
- Oouchi K, Satoh M, Yamada Y, et al. 2010. Change of Tropical Cyclone and Seasonal Climate State in a Global Warming Experiment with a Global Cloud-System-Resolving Model [M]. *Hurricanes and Climate Change*. Springer Netherlands.
- Ritchie E A, Holland G J. 1999. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 127(9), 2027–2043.
- Tao L, Wu L, Wang Y, et al. 2012. Influence of Tropical Indian Ocean Warming and ENSO on Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 90(1):127-144.
- Wang B, Li T M. 1993. A Simple Tropical Atmosphere Model of Relevance to Short-Term Climate Variations [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 50(2): 260-284.
- Wang B, Chan J C L. 2002. How Strong ENSO Events Affect Tropical Storm Activity over the Western North Pacific [J]. *Journal of Climate*, 15(13): 1643-1658.
- Wang C, Li C, Mu M, et al. 2013. Seasonal modulations of different impacts of two types of ENSO events on tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 40(11-12):2887-2902.
- Wu G, Lau N C. 1992. A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO [J]. *Monthly Weather Review*, 120(6), 958–977.
- Wu L, Wen Z, Huang R, et al. 2012 Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the Western North Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 140(1): 140-150.
- Wu L, Zong H, Liang J. 2013. Observational Analysis of Tropical Cyclone Formation Associated with Monsoon Gyres [J]. *Journals of Atmospheric Sciences*, 70(4):1023-1034.
- Yamada Y. 2010. Projection of changes in tropical cyclone activity and cloud height due to greenhouse warming: Global cloud-system-resolving approach [J]. *Geophysical Research Letters*.
- Yamada Y, Satoh M, Sugi M, et al. 2017. Response of Tropical Cyclone Activity and Structure to Global Warming in a High-Resolution Global Nonhydrostatic Model [J]. *Journal of Climate*, 30(23): 9703-9724.
- Zhao H, Wu L, Zhou W. 2010. Assessing the Influence of the ENSO on Tropical Cyclone Prevailing Tracks in the Western North Pacific [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(6):1361-1371.
- Zhao H, Wu L, Zhou W. 2011. Interannual Changes of Tropical Cyclone Intensity in the Western North Pacific [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*.