

王一格, 姜大膀, 华维. 2020. 西北太平洋地区台风环境场的预估研究 [J]. 大气科学, 44(3): 552–564. WANG Yige, JIANG Dabang, HUA Wei. 2020. Projection of Typhoon-Related Environmental Fields in the Western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 552–564. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19168

西北太平洋地区台风环境场的预估研究

王一格¹ 姜大膀^{2,3} 华维¹

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 本文择优选取了国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 中 19 个气候模式的试验数据, 预估了 RCP4.5 和 RCP8.5 典型浓度路径情景下 21 世纪末 (2080~2099 年) 西北太平洋地区 (0°~40°N, 100°E~180°) 台风环境场和台风生成潜力指数 (I_{GP}) 变化。结果表明, 相对于 1986~2005 年参考时段, 21 世纪末西北太平洋海洋表面温度 (SST) 增加, 垂直风切变 (VWS) 和向外长波辐射 (OLR) 均在其与台风频数呈显著负相关的区域减少, 有利于台风生成和发展; 由大陆向南海延伸的低压系统减弱, 不利于台风活动。总体上, 在 RCP8.5 情景下台风环境场的变化较 RCP4.5 情景相对更大。利用信噪比进一步考察了模式间差异性, SST 变化的信噪比在大部分地区大于 3.0, 在低压系统控制区海平面气压变化的信噪比大于 1.0, 模式间一致性较好; 对于 VWS 和 OLR, 信噪比小于 0.6, 模式间差异较大; 但在与台风频数显著负相关的地区, 对 OLR 变化方向的模拟在模式间高度一致。与以上环境场变化相对应, 未来西北太平洋 I_{GP} 显著增加。

关键词 台风 全球变暖 西北太平洋 台风环境场

文章编号 1006-9895(2020)03-0552-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19168

Projection of Typhoon-Related Environmental Fields in the Western North Pacific

WANG Yige¹, JIANG Dabang^{2,3}, and HUA Wei¹

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract This study projects the change in environmental fields and the typhoon I_{GP} (genesis potential index) in the western North Pacific (0°–40°N and 100°E–180°) in the late 21st century (2080–2099) using outputs from the RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 and RCP8.5 experiments of CMIP5 (Phase 5 of Coupled Model Intercomparison Project), carried out using 19 climate models. These models are capable of reasonably reproducing modern typhoon-related environmental fields and are thus selected for the analysis. Compared with the reference period of 1986–2005, there appears to be an increase in SST (sea surface temperature) in the western North Pacific, a weakening of

收稿日期 2019-06-06; 网络预出版日期 2020-01-15

作者简介 王一格, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: 1320119592@qq.com

通讯作者 姜大膀, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2016YFA0602401, 国家自然科学基金项目 41421004

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0602401), National Natural Science Foundation of China (Grant 41421004)

VWS (vertical wind shear), and a decrease in OLR (outgoing long wave radiation) in the key regions where there are significantly negative correlations between these factors and the frequency of the typhoon; this is beneficial for the formation and development of the typhoon. On the contrary, the low pressure system that extends from the mainland to the South China Sea is weakened, suppressing typhoon activities. In general, changes in the typhoon environmental fields in the RCP8.5 scenario are greater than in the RCP4.5 scenario. In addition, the signal-to-noise ratio is examined to measure consistency between individual models. This ratio is found to be greater than 3.0 for SST change and greater than 1.0 for sea level pressure in regions under the low pressure system; for VWS and OLR changes, a ratio of less than 0.6 denotes a degree of disagreement between the models. However, the models agree well with the OLR change in regions associated with typhoon activities. The aforementioned changes in the typhoon's environmental fields are in line with the increase in I_{GP} in the future.

Keywords Typhoon, Global warming, Western North Pacific, Typhoon-related environmental fields

1 引言

西北太平洋是全球台风活动最活跃、生成最多、影响范围最广的地区之一, 每年平均有大约 30 个热带气旋生成, 其中 80% 的热带气旋最终发展为台风, 这给中国及周边许多国家带来诸多灾难性破坏 (黄荣辉和陈光华, 2007; 冯涛等, 2013)。工业革命以来, 温室气体浓度随着人类活动不断增加, 全球温度不断升高。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的第五次评估报告 (AR5) 指出, 1971 年以来人为排放温室气体所增加的净能量中的 60% 都储存在上层海洋, 75 m 深度以上的海水以 $0.11^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率升温 (IPCC, 2013)。在此背景下, 预估台风活动未来变化对人类应对台风灾害有重要意义。

众多学者通过数值模拟预估了全球变暖背景下西北太平洋台风活动, 其中许多研究者直接采用高分辨率模式或通过动力降尺度法得到较高分辨率输出结果, 以观测事实为定义标准, 直接追踪模式中的台风 (Stowasser et al., 2007; Emanuel et al., 2008, 2013; Murakami et al., 2011, 2012; Wu et al., 2014; Bacmeister et al., 2018), 但目前尚无一致性的预估结论 (雷小途等, 2009; 冯涛等, 2013; Tory et al., 2013)。需要指出, 西北太平洋台风活动在一定程度上取决于该地区的海气状况 (赖芬芬和江静, 2012; Zhan et al., 2013; Liu et al., 2018; Zhang et al., 2018)。例如, 西北太平洋台风生成发展的垂直风切变临界值约为 12 m s^{-1} , 弱的垂直风切变有利于台风的发展 (Zehr, 1992, 2003; 杨诗琪等, 2017); 向外长波辐射 (OLR) 在 ($0^{\circ}\sim 16^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 区域内与台风频数呈显著负相关关系 (郎咸

梅和王会军, 2008)。鉴于环境场对台风生成和发展起重要作用, 一部分研究者采用分辨率较低的全球气候模式分析了全球变暖背景下台风环境场的变化, 以期得到未来台风活动的参考信息 (Yokio and Takayabu, 2009; Zhang et al., 2010; Camargo, 2013; Park et al., 2017)。总体上, 这些工作大都利用综合了台风环境场变量的经验指数来分析未来台风状况。与之不同, 张颖和王会军 (2010) 利用国际耦合模式比较计划第三阶段 (CMIP3) 的多个模式试验, 直接预估了台风环境场, 指出全球变暖背景下西北太平洋地区的未来环境场有利于台风发展。但截至目前, 利用 CMIP 第五阶段 (CMIP5) 多排放情景、多模式试验分析西北太平洋地区有关台风活动的环境场研究还相对较少。

根据上述认识, 本文使用 CMIP5 多模式的试验数据, 集中研究了 21 世纪末 (2080~2099 年) 西北太平洋地区 ($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 海洋表面温度 (SST)、200~850 hPa 垂直风切变 (VWS)、海平面气压 (SLP) 和 OLR 四个环境变量的变化。另外, 本文还考察了一个描述台风生成可能性的经验指数在未来的变化, 并将其与预估的环境场相对比, 以探究大尺度环境场变化对台风的影响, 从而对未来台风活动的预估提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料介绍

为了对比不同排放情景下未来台风环境场变化的差异, 同时兼顾相应数值试验有足够多的模式开展, 本文选取了有代表性的中低等排放情景 RCP4.5 与高等排放情景 RCP8.5 (即到 2100 年, 温室气体浓度对应的辐射强迫分别达到 4.5 W m^{-2}

与 8.5 W m^{-2})。根据所需资料的完整性, 本文采用了 CMIP5 中 29 个气候模式输出的月平均 SST、SLP、风场、比湿、相对湿度、温度和 OLR 数据, 这些模式均开展了历史气候模拟试验、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的气候预估试验 (Taylor et al., 2012)。有关这些模式的基本信息如表 1 所示, 更详尽信息请见 [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/\[2017-08-01\]](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/[2017-08-01])。根据 IPCC 第五次评估报告, 本文取 1986~2005 年作为参考时段, 2080~2099 年作为未来预估时段。需要说明, 没有选取 2100 年是由于部分模式的试验数据截止到 2099 年。评估模式所用的资料包括来自 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center

for Atmospheric Research) 再分析资料的 1986~2005 年月平均 SLP、风场、比湿、相对湿度、温度数据 (Kalnay et al., 1996) 和来自 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的月平均 SST (Huang et al., 2015) 和 OLR 数据 (Lee, 2014)。鉴于各模式之间及其与观测和再分析资料之间的水平分辨率不同, 大多数模式的水平分辨率在 2° 左右, 本研究将模式及再分析数据统一插值到了 $2^\circ \times 2^\circ$ 的经纬度网格上。由于 6~10 月为台风活跃期, 所以仅考虑该时段的气候态变化。

2.2 分析方法

模式之间在动力框架、参数化过程和方案、大

表 1 CMIP5 中 29 个全球气候模式的基本信息

Table 1 Basic information for the 29 global climate models of CMIP5 (Phase 5 of Coupled Model Intercomparison Project)

编号	模式	所属国家	所属机构简称	大气资料水平分辨率(经向×纬向)	综合模拟较优模式
1	ACCESS1.0	澳大利亚	CSIRO-BOM	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	√
2	ACCESS1.3	澳大利亚	CSIRO-BOM	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	√
3	CanESM2	加拿大	CCCMA	$2.80^\circ \times 2.80^\circ$	√
4	CMCC-CMS	意大利	CMCC	$1.88^\circ \times 1.88^\circ$	√
5	CMCC-CM	意大利	CMCC	$0.75^\circ \times 0.75^\circ$	√
6	CNRM-CM5	法国	CNRM-CERFACS	$1.41^\circ \times 1.40^\circ$	√
7	CSIRO-Mk3.6.0	澳大利亚	CSIRO-QCCCE	$1.88^\circ \times 1.88^\circ$	
8	GFDL-CM3	美国	NOAA GFDL	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	
9	GFDL-ESM2G	美国	NOAA GFDL	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	
10	GFDL-ESM2M	美国	NOAA GFDL	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	√
11	GISS-E2-H-CC	美国	NASA GISS	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	√
12	GISS-E2-H	美国	NASA GISS	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	√
13	GISS-E2-R-CC	美国	NASA GISS	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	√
14	GISS-E2-R	美国	NASA GISS	$2.50^\circ \times 2.00^\circ$	
15	HadGEM2-AO	韩国/英国	NIMR/KMA	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	√
16	HadGEM2-CC	英国	MOHC	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	√
17	HadGEM2-ES	英国	MOHC	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	√
18	INMCM4.0	俄罗斯	INM	$2.00^\circ \times 1.50^\circ$	
19	IPSL-CM5A-LR	法国	IPSL	$3.75^\circ \times 1.88^\circ$	√
20	IPSL-CM5A-MR	法国	IPSL	$2.50^\circ \times 1.25^\circ$	√
21	IPSL-CM5B-LR	法国	IPSL	$3.75^\circ \times 1.88^\circ$	√
22	MIROC-ESM-CHEM	日本	MIROC	$2.80^\circ \times 2.80^\circ$	
23	MIROC-ESM	日本	MIROC	$2.80^\circ \times 2.80^\circ$	
24	MIROC5	日本	MIROC	$1.41^\circ \times 1.41^\circ$	
25	MPI-ESM-LR	德国	MPI-M	$1.88^\circ \times 1.88^\circ$	√
26	MPI-ESM-MR	德国	MPI-M	$1.88^\circ \times 1.88^\circ$	√
27	MRI-CGCM3	日本	MRI	$1.13^\circ \times 1.12^\circ$	√
28	NorESM1-ME	挪威	NCC	$2.50^\circ \times 1.88^\circ$	
29	NorESM1-M	挪威	NCC	$2.50^\circ \times 1.88^\circ$	

气化学过程等方面存在不同, 导致其对相同辐射强迫的响应存在不同 (Hawkins and Sutton, 2011), 这种差异性可以用信噪比来量化。信噪比 (σ) 可定义为两个时段模式集合平均变化与模式间变化标准差之比 (Min et al., 2004):

$$\sigma = \frac{\overline{\Delta X_i}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \overline{\Delta X_i})^2}}, \quad (1)$$

式中, ΔX_i 指每个模式预估的未来相对于参考时段的变化, $\overline{\Delta X_i}$ 为 ΔX_i 的多模式集合平均结果, N 表示模式个数。

选用描述台风生成可能性的经验指数为 Emanuel and Nolan (2004) 定义的台风生成潜力指数 (Genesis Potential Index, I_{GP}), 公式为

$$I_{GP} = |10^5 \eta|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{H}{50} \right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70} \right)^3 \times (1 + 0.1 V_{shear})^{-2}, \quad (2)$$

式中, η 为 850 hPa 绝对涡度, H 表示 600 hPa 相对湿度, V_{pot} 为台风最大潜在强度 (Emanuel, 1995), V_{shear} 指 200~850 hPa 的垂直风切变 (VWS)。各环境因子对 I_{GP} 的作用可用下式表达:

$$\Delta I_{GPi} = \Delta V_i \times (V_{j1} \times V_{j2} \times V_{j3}), \quad (3)$$

其中, ΔI_{GPi} 指由某个单独因子引起的未来相对于参考时段的 I_{GP} 变化, ΔV_i 为未来相对于参考时段该因子的变化, 而 $V_{j1} \sim V_{j3}$ 是参考时段的其他因子 (Zhang and Wang, 2017)。

2.3 模式能力评估与优选

气候模式能否合理模拟出西北太平洋台风活跃期环境场气候态的空间分布和幅度, 一定程度上决定了它们对未来气候模拟的可信度。为此, 定量比较了 1986~2005 年每个模式的台风环境场变量 (SST、SLP、OLR 和 VWS) 与观测场的差异。具体方法为针对西北太平洋地区 861 个格点, 计算两个气候态之间的空间相关系数、标准差之比和标准化的中心均方根误差, 相应统计值被直观地绘制在 Taylor 图 (图 1) 中 (Taylor, 2001)。

如图 1 所示, 模拟与观测的 SST、SLP、OLR 和 VWS 之间的相关系数范围依次为 0.89~0.99、0.83~0.99、0.23~0.88 和 0.17~0.97; 标准差之比分别是 0.79~1.48、0.93~1.72、0.72~1.68 和 0.63~1.50; 标准化后的中心化均方根误差分别落在 0.20~0.55、0.22~0.88、0.53~1.15 和 0.27~

1.18 中。大部分模式可以较好模拟当代西北太平洋台风活跃期环境场的空间分布和变率, 且模拟偏差较小, 对 SST 的模拟最优。其中, 部分模式对 SLP、VWS 和 OLR 的模拟性能较差, 为剔除这些模式, 按如下标准择优选取模式以用于预估研究: (1) 空间相关系数通过 99% 的信度水平检验; (2) 标准差之比在 0.5~1.5 之间; (3) 标准化后的中心化均方根误差小于 1.0。最终筛选出了 19 个模式, 如表 1 所示。针对四个环境场的模拟, 优选后模式的等权重集合平均与观测场之间的三个统计量分别为 0.89~0.99, 0.83~1.19 和 0.22~0.46, 相较于筛选前的 29 个模式集合均有一定程度的改进 (图 1)。总体上, 多模式的集合平均优于大部分单个模式, 下文据此予以了重点分析。

更进一步, 评估了上述 19 个模式集合平均对四个环境场要素量值的模拟能力 (图 2)。台风在 SST 超过 26.5°C 的暖洋面易于生成和发展, 重现观测中 SST 达到 26.5°C 的地区范围和海温强度对模式合理模拟台风活动有重要意义。多模式集合平均显示, 在西北太平洋, 模式模拟的 26.5°C 等温线较观测场平均偏南 3° (图 2a), SST 平均偏低 0.7°C (图 2b)。值得注意的是, SST 的模式偏差由赤道向极地增加, 在达到 26.5°C 的地区与观测间的差异较小 (-0.2°C)。对于 VWS, 集合平均中 12 m s⁻¹ 以下区域的范围较观测场偏小 13.6% (图 2c); 在强度上 (图 2d), 虽然模式一定程度上高估了较高纬度的 VWS, 但能较好地重现低纬地区的观测结果。关于 SLP, 模式可以合理模拟南海地区的低压系统和副热带高压的位置, 且在整个西北太平洋海域模式偏差均小于 1.5 hPa。由图 2g、h 可知, 模式对 OLR 的模拟在低纬偏高、在较高纬度偏低, 但其可以很好地重现对流活跃区 (OLR < 240 W m⁻²) 的范围。综合上述评估, 虽然模式对于西北太平洋地区的环境场变量幅度地模拟仍存在不同程度的偏差, 但总体上择优后的 19 个气候模式集合平均可以合理地刻画达到台风生成发展阈值的地区范围和相应强度大小, 为下文的预估工作奠定了基础。

3 环境场预估结果分析

3.1 海洋表面温度

根据多模式集合平均, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 21 世纪末 SST 变化的空间分布类似, 后

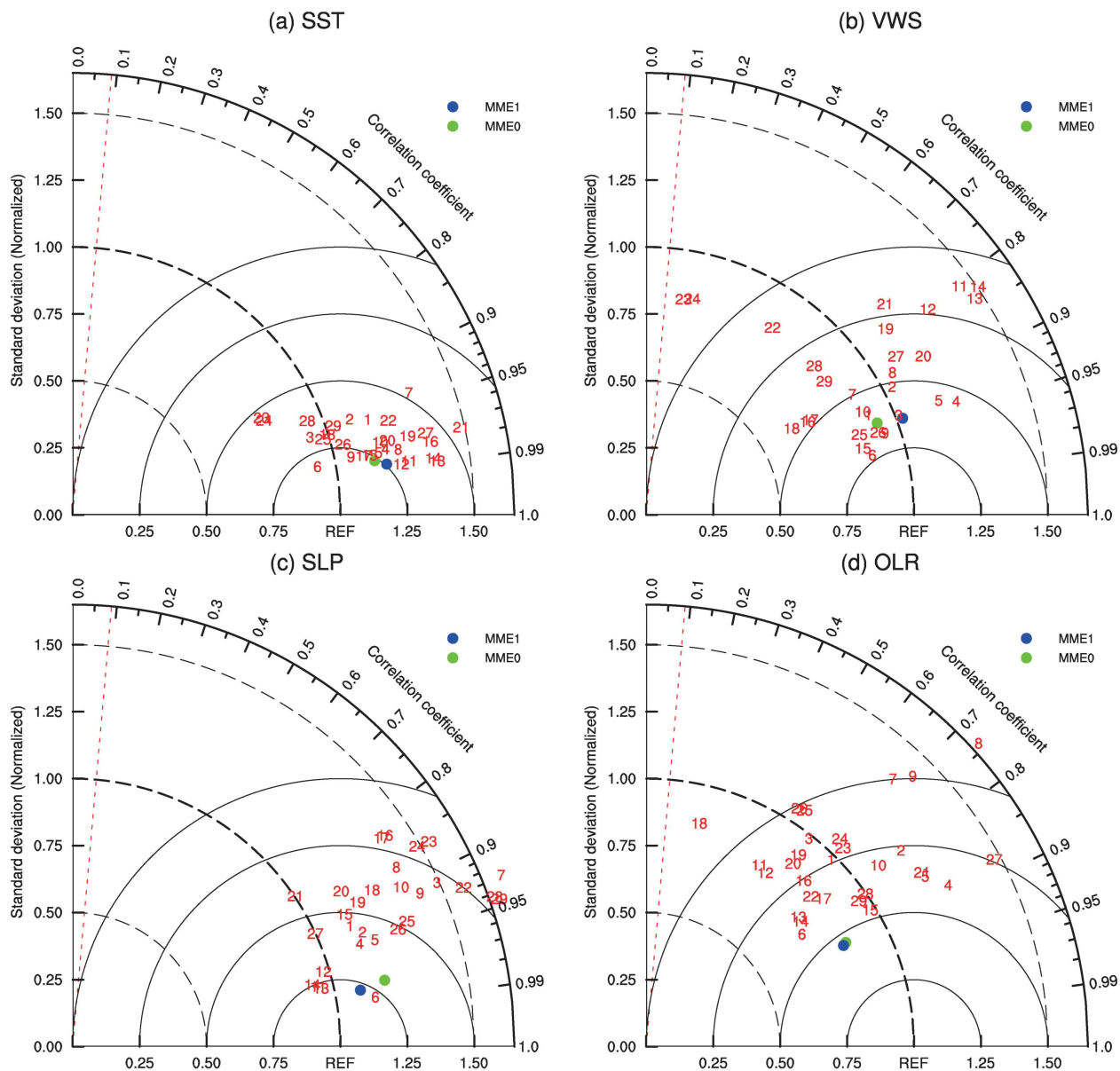


图1 1986~2005年29个模式模拟的西北太平洋6~10月平均(a) SST、(b) VWS、(c) SLP和(d) OLR气候态相对于观测场的Taylor图。图中数字对应表1中模式,绿色和蓝色圆点分别代表优选模式前后等权重集合平均,红色虚线代表空间相关系数达到99%信度水平

Fig. 1 Taylor diagram for the climatological (a) SST (sea surface temperature), (b) VWS (vertical wind shear), (c) SLP (sea level pressure), and (d) OLR (outgoing long wave radiation) in the western North Pacific between simulations from 29 models and observations from June to October for the period 1986–2005. Each number represents a model listed in Table 1. The green and blue dots represent the ensemble mean of various models without and with performance-based selection, respectively. The red dashed line indicates spatial correlation coefficient above the 99% confidence level

者变化幅度相对更大(图3a、b)。其中,西北太平洋 26.5°C 等温线位置相对于参考时段(27°N)明显北移,在RCP4.5和RCP8.5情景下向北分别平均延伸至 30°N 和 33°N ; SST在整个西北太平洋一致升高,在RCP4.5和RCP8.5情景下分别平均增温 1.7°C 和 3.1°C ,其中台风多发的高温区

($\text{SST}>26.5^{\circ}\text{C}$)分别平均升温 1.2°C 和 2.4°C ;升温幅度由赤道向极地增加。结合信噪比(图3c、d),西北太平洋大部分地区的信噪比在RCP4.5情景下大于3.0,在RCP8.5情景下大于4.0,升温幅度较小的菲律宾以东热带海域存在信噪比高值区;大部分模式模拟出西北太平洋未来一致增温的特征,

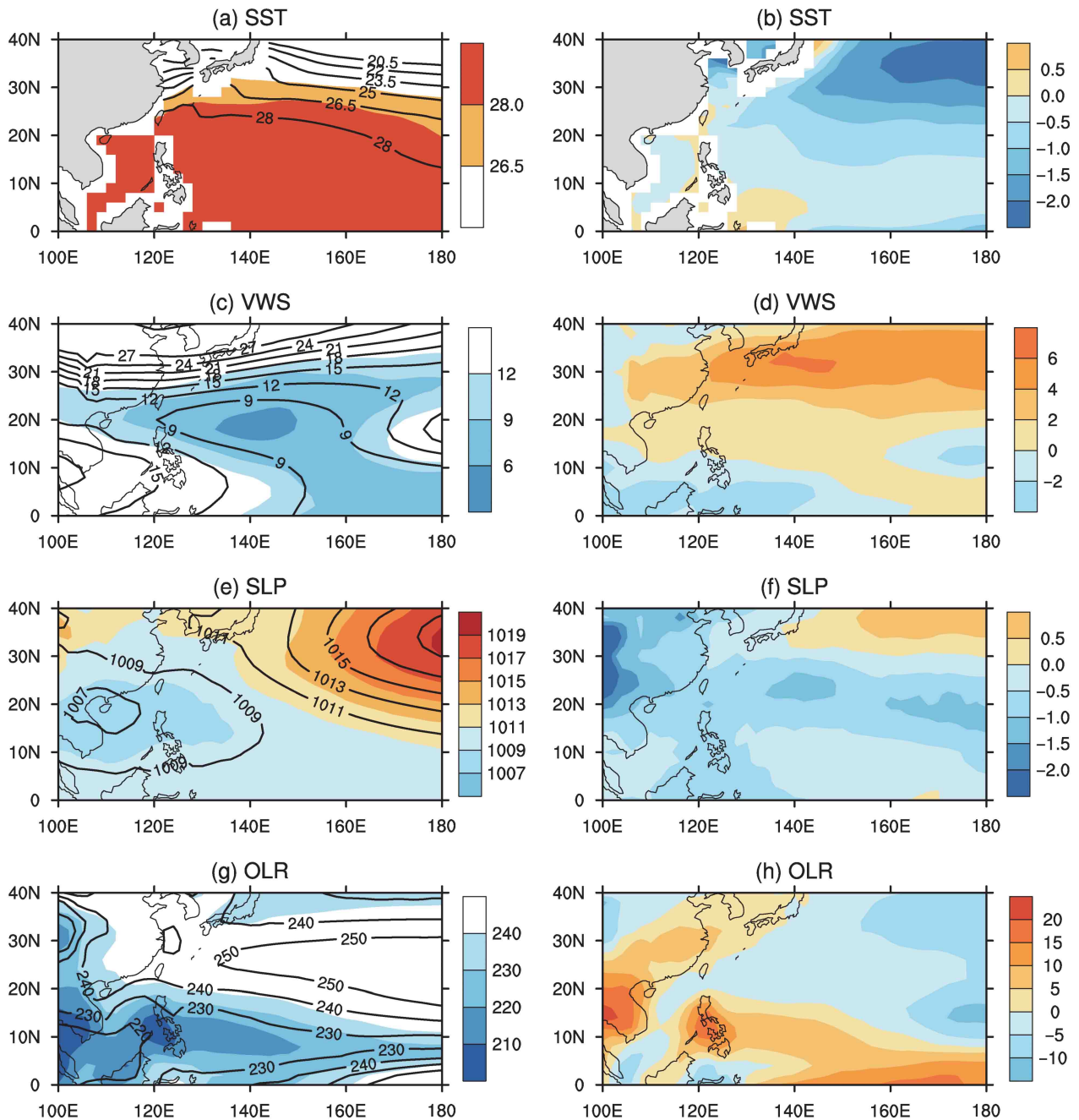


图2 1986~2005年6~10月多模式集合(左, 等值线)和观测(左, 填色)的空间分布以及二者的差值分布(右): (a、b) SST(单位: $^{\circ}\text{C}$); (c、d) VWS(单位: m s^{-1}); (e、f) SLP(单位: hPa); (g、h) OLR(单位: W m^{-2})

Fig. 2 Climatology of the ensemble mean from CMIP5 (left, contours) and observations (left, shadings) as well as their differences (right) in the western North Pacific from June to October for the period 1986–2005: (a, b) SST (units: $^{\circ}\text{C}$); (c, d) VWS (units: m s^{-1}); (e, f) SLP (units: hPa); (g, h) OLR (units: W m^{-2})

这表明 SST 变化在模式间具有很好的一致性, 且在低纬海域一致性最高。

3.2 垂直风切变

相对于参考时段, 在 RCP4.5 情景下利于台风发展的弱 VWS 区 ($\text{VWS} < 12 \text{ m s}^{-1}$) 范围扩大

3.0%, VWS 强度平均减小 0.1 m s^{-1} (图 4a)。在 RCP8.5 情景下, 弱 VWS 区向外扩张 3.8%, VWS 平均减弱 0.2 m s^{-1} (图 4b)。空间上, 除在 120°E 以东赤道附近及 30°N 以北局部海域 VWS 增强外, 大部分海域的 VWS 存在不同程度的减弱,

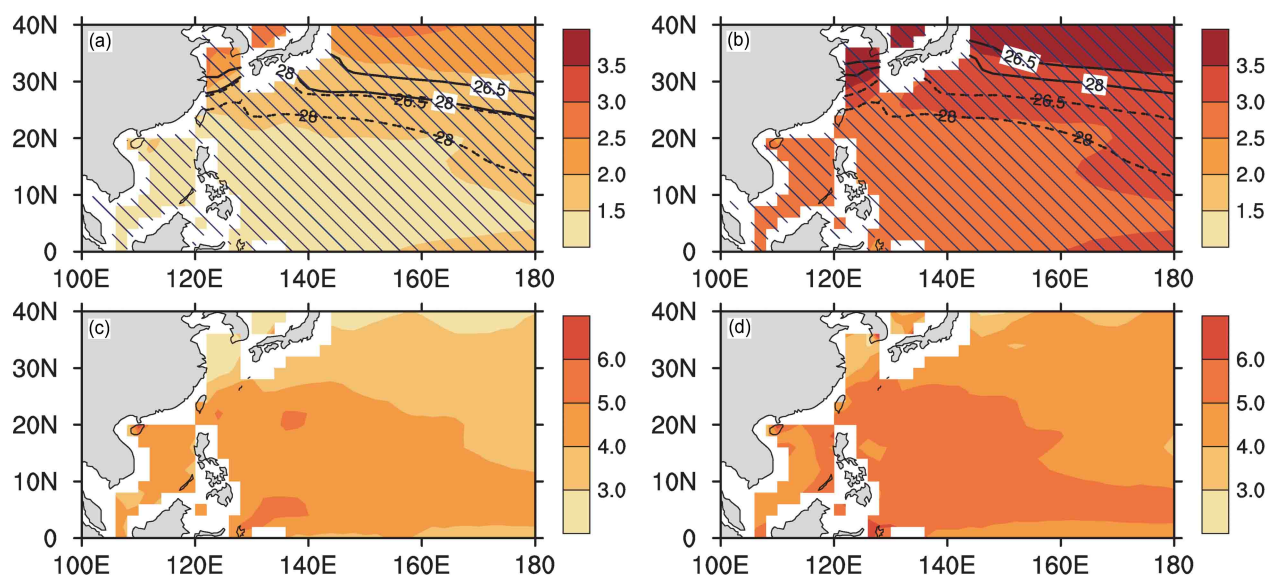


图3 在RCP4.5(左)和RCP8.5(右)情景下, 2080~2099年6~10月SST相对于参考时段1986~2005年的多模式集合的差值分布(上)以及对应的信噪比空间分布(下)。图a、b中斜线区表示每个格点上超过13个模式与多模式集合结果同号变化, 虚线和实线分别为参考时段和预估时段SST>26.5°C的间隔为1.5°C的等温线(单位: °C)

Fig. 3 The differences in SST (upper panels) and the associated signal-to-noise ratios (bottom panels) from June to October in the western North Pacific for the period 2080–2099 compared to the period 1986–2005, as derived from the average of the set of multi-models under RCP4.5 (left) and RCP8.5 (right) scenarios. In Figs. a, b, the hatched areas indicate where there are more than 13 models with the same direction of change as the ensemble mean (units: °C), and only the contours above 26.5°C are shown with an interval of 1.5°C for the period 1986–2005 (dashed line) and 2080–2099 (solid line)

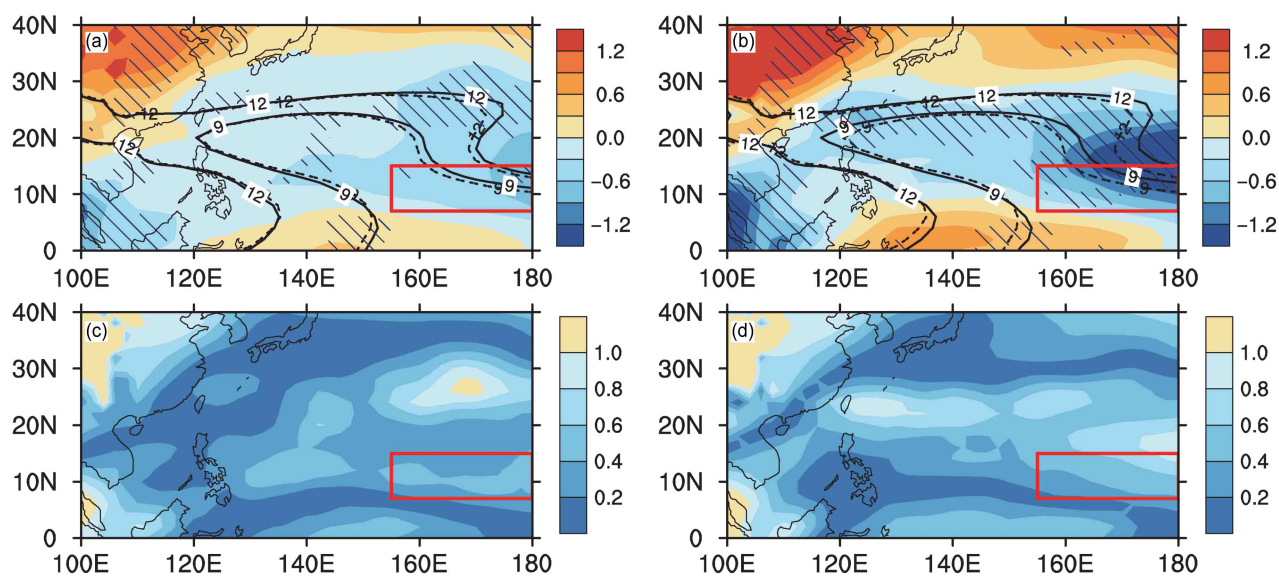


图4 同图3, 但为VWS差值分布以及对应的信噪比空间分布。红色矩形框为VWS与台风频数显著负相关区。图a、b中虚线和实线分别为参考和预估时段VWS<12 m s⁻¹的间隔为3 m s⁻¹的等值线(单位: m s⁻¹)

Fig. 4 As in Fig. 3, but for differences in VWS (units: m s⁻¹) and the associated signal-to-noise ratios. The red rectangles show the area where there are significantly negative correlations between VWS and the typhoon frequency. In Figs. a, b, the contours indicate VWS below 12 m s⁻¹ with an interval of 3 m s⁻¹ for the period 1986–2005 (dashed line) and 2080–2099 (solid line)

其中减幅大值区位于160°E以东。研究表明, 在(7°~15°N, 155°E~180°)范围内, VWS与台风

频数存在显著负相关关系(白莉娜等, 2010)。图4a、b显示在RCP4.5和RCP8.5情景下, VWS在

该区域分别平均减小了 0.5 m s^{-1} 和 1.0 m s^{-1} , 表明未来 VWS 变化有利于台风生成和发展。总体上, VWS 在 RCP8.5 情景下较 RCP4.5 情景下的变幅更大。从图 4c、d 来看, 在中南半岛附近海域信噪比大于 1.0, 与 VWS 变幅大值区对应, 模式间一致性较好。但在其他海域, 特别是 RCP4.5 情景下, 信噪比低于 0.6, 意味着 VWS 变化在模式间差异较大。

3.3 海平面气压

未来西北太平洋地区 SLP 的空间分布与参考时段类似, 主要特征为西北太平洋东北部被副热带高压控制, 而西南部由大陆向南海延伸的低压控制。相对于参考时段, 在 RCP4.5 (RCP8.5) 情景下, 21 世纪末南海地区的低压系统减弱并向西收缩, 副热带高压减弱并东退; 相应地, 20°N 以南热带海域 SLP 平均升高 0.3 hPa (0.4 hPa) (图 5a、b)。根据 CISK 机制 (第二类条件不稳定机制), 低纬地区低压系统减弱将不利于低空水汽辐合, 使得积云释放的凝结潜热减少, 抑制台风生成发展。从图 5c、d 来看, 大部分海域信噪比在 0.6 以上, 10°N 以南地区信噪比大于 1.0, 即低压区 SLP 变化的信噪比大于高压区; 相较高压区, 模式对低压区 SLP 变化方向的模拟一致性更高, 表明在未来

低压系统将减弱这一特征上, 模式之间差异小。

3.4 向外长波辐射

图 6 是 OLR 在 RCP4.5 (左) 和 RCP8.5 (右) 情景下未来相较于参考时段的变化, 并以 20°N 为界, 分别计算了未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 $\text{OLR} < 240 \text{ W m}^{-2}$ 的区域面积变化的百分比。在空间分布上, RCP4.5 情景下的对流活跃区 ($\text{OLR} < 240 \text{ W m}^{-2}$) 范围在低纬增加 3.9%, 中纬减少 16.6%; 在 RCP8.5 情景下, 低纬度强对流区面积增加 12.0%, 中纬度强对流区收缩 12.6%。强度上 (图 6a、b), 在 RCP4.5 (RCP8.5) 情景下, OLR 在中纬地区增加, 低纬减小, 特别是在 145°E 以东赤道附近降幅最大, 达 7.0 W m^{-2} (14.9 W m^{-2}); 相较而言, RCP8.5 情景下的 OLR 变幅更大。图 6c、d 显示, 仅在 145°E 以东低纬地区, 即 OLR 减小大值区, 信噪比大于 1.0, 其他地区模式间差异较大。鉴于在关键区域 ($0^{\circ} \sim 16^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$) OLR 对台风生成具有重要意义, 专门计算了 21 世纪末该区域的 OLR 变化。在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 相较参考时期关键区 OLR 分别平均减小 2.1 W m^{-2} 和 6.5 W m^{-2} , 对流活动增强, 有利于台风生成发展; 在 RCP8.5 情景下信噪比更高, 且模式对变化方向的模拟更为一致。

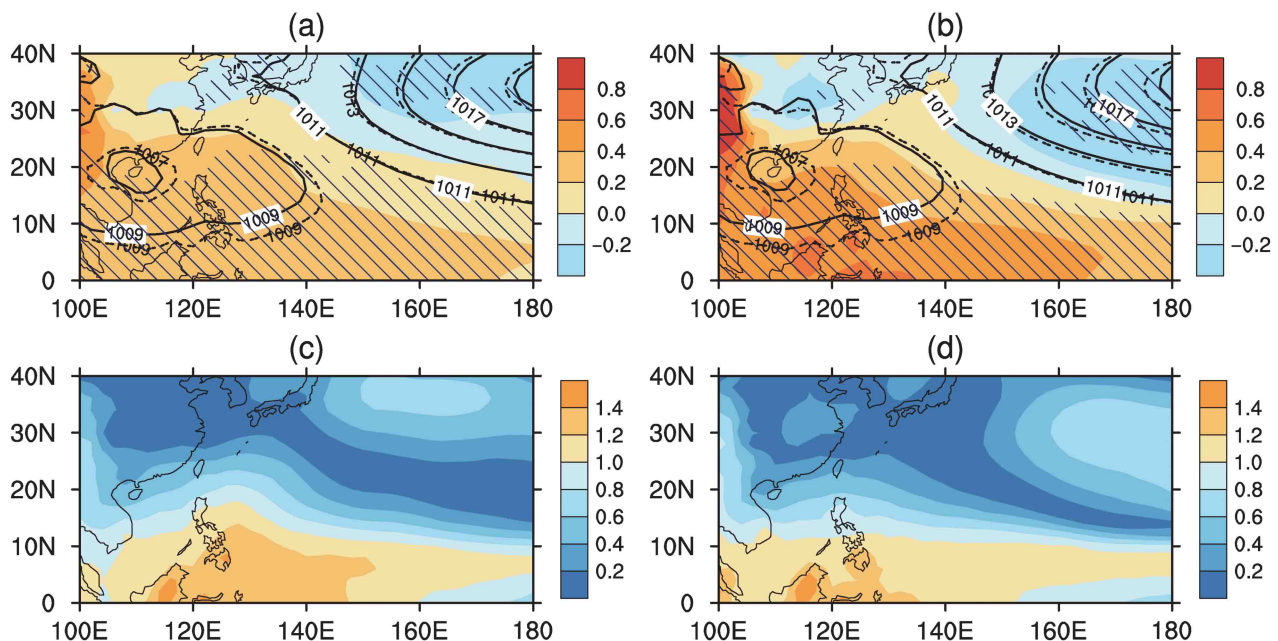


图 5 同图 3, 但为 SLP 差值分布以及对应的信噪比空间分布。图 a、b 中虚线和实线分别表示参考和预估时段间隔为 2 hPa 的等压线 (单位: hPa)

Fig. 5 As in Fig. 3, but for differences in SLP (units: hPa) and the associated signal-to-noise ratios. In Figs. a, b, the contours are SLP with an interval of 2 hPa for the period 1986–2005 (dashed line) and 2080–2099 (solid line)

综上, 尽管大部分海域模式间差异较大, 但在与台风频数显著负相关的地区, OLR 在模式间一致减弱。

4 台风生成潜力指数的预估

台风生成潜力指数 (I_{GP}) 被进一步用于研究全球变暖背景下环境场变化对台风活动的影响。图 7a 为参考时段观测和多模式集合的 I_{GP} 空间分布, 二者之间的空间相关系数为 0.88, 通过了 99% 信度水平的显著性检验, 标准化的中心化均方根误差为 1.14, 二者的标准差之比为 1.91; 相较于

观测场, 模式中 I_{GP} 大值中心略偏北。这表明尽管模式对 I_{GP} 的空间变率有所高估并存在一定的内部误差, 但它们总体上较好模拟了观测场的空间分布。图 7b 显示, 除西北太平洋东北部分海域外, 其余地区 I_{GP} 的模拟相对观测值较高, 这与前人所得结果一致, 可能是由于 NCEP/NCAR 再分析资料低估了对流层中层的相对湿度 (Bony et al., 1997; Camargo et al., 2007; Camargo, 2013; Walsh et al., 2013)。整体上, 模式对西北太平洋 I_{GP} 的模拟较为合理。

I_{GP} 的预估结果显示, 与参考时段相比, 除赤

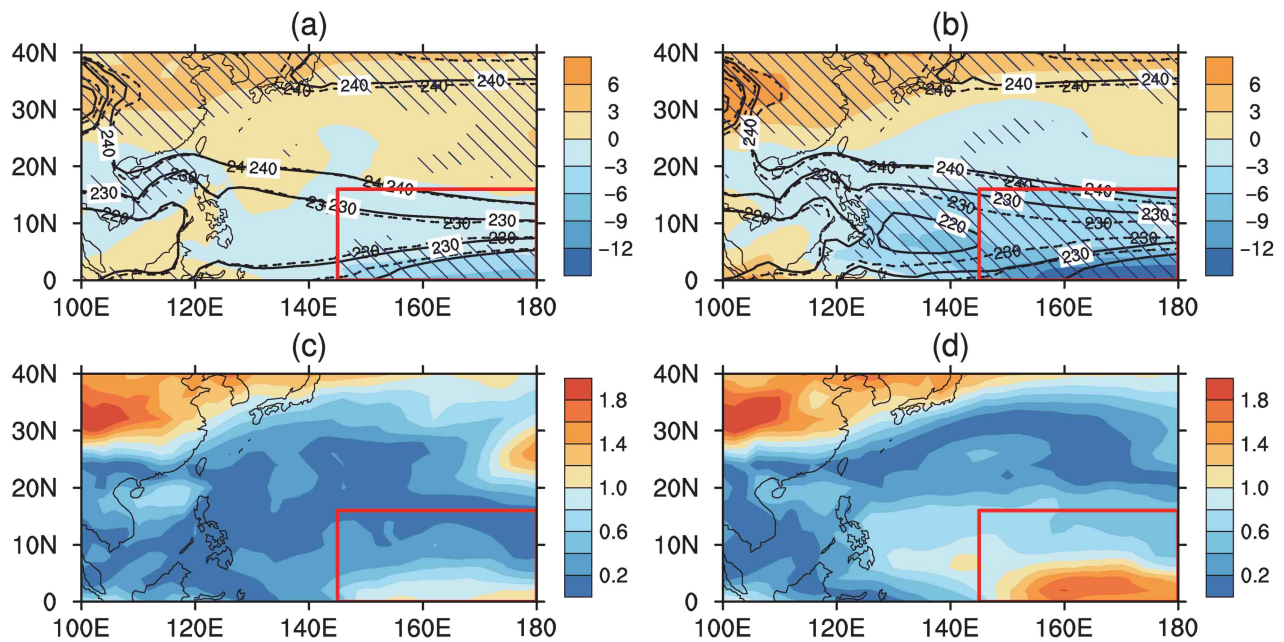


图 6 同图 3, 但为 OLR 差值分布以及对应的信噪比空间分布。红色矩形框为 OLR 与台风频数显著负相关区。图 a、b 中虚线和实线分别表示参考和预估时段 OLR $<240 \text{ W m}^{-2}$ 的间隔为 10 W m^{-2} 的等值线 (单位: 为 W m^{-2})

Fig. 6 As in Fig. 3, but for differences in OLR (units: W m^{-2}) and the associated signal-to-noise ratios. The red rectangles show the area where there are significantly negative correlations between OLR and the typhoon frequency. In Figs. a, b, the contours are OLR below 240 W m^{-2} with an interval of 10 W m^{-2} for the period 1986–2005 (dashed line) and 2080–2099 (solid line)

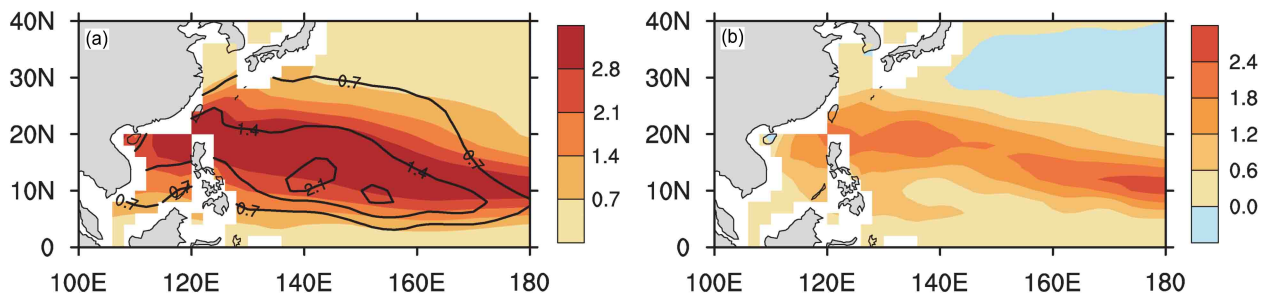


图 7 1986~2005 年 6~10 月西北太平洋地区多模式集合 (左, 填色) 和观测 (左, 等值线) 的 I_{GP} 空间分布以及二者的差值分布 (右)

Fig. 7 Climatology of the ensemble mean from CMIP5 (left, shadings) and observations (left, contours) as well as their differences (right) in I_{GP} (Genesis Potential Index) in the western North Pacific from June to October for the period 1986–2005

道附近外，未来西北太平洋地区 I_{GP} 显著升高（图 8），在 RCP4.5 情景下 I_{GP} 平均增加 0.2；相较而言，RCP8.5 情景下 I_{GP} 增幅更大，达 0.3，尤其在

$10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的海域增幅最大，且模式一致性较好。换言之，未来西北太平洋台风活动趋于增加。更进一步，还计算了低层绝对涡度、台风最大潜在强度、

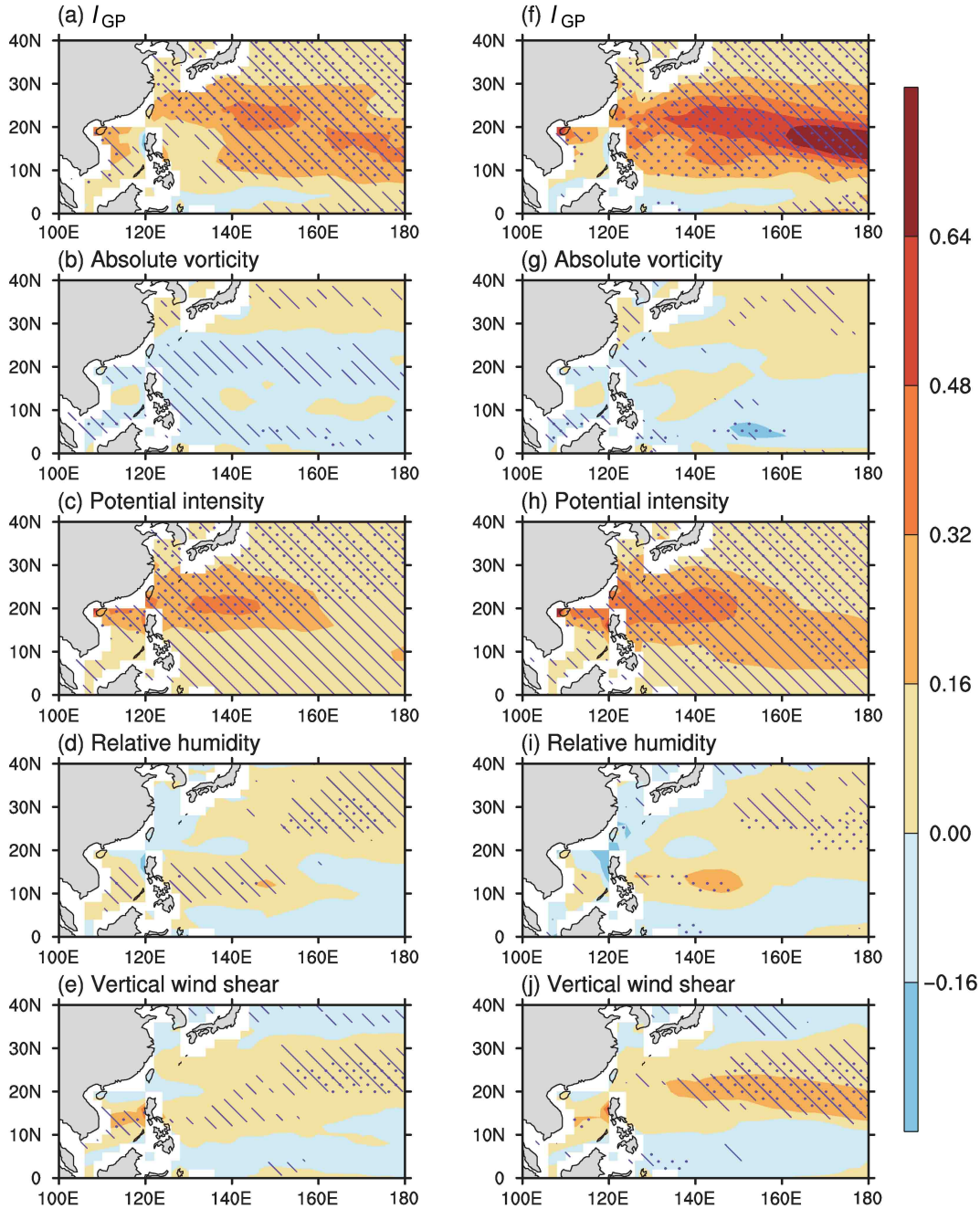


图 8 RCP4.5 (左) 和 RCP8.5 (右) 情景下，2080~2099 年 6~10 月 (a、f) I_{GP} 相对于参考时段的多模式集合的变化，以及每个单独因子引起的 I_{GP} 变化：(b、g) 850 hPa 绝对涡度；(c、h) 台风最大潜在强度；(d、i) 600 hPa 相对湿度；(e、j) 200~850 hPa 垂直风切变。点区表示通过 99% 信度水平的显著性检验，斜线区表示每个格点上超过 13 个模式与多模式集合结果同号变化

Fig. 8 (a, f) Changes in I_{GP} from June to October for 2080–2099 in the western North Pacific relative to the period 1986–2005, and changes in I_{GP} induced by each individual factor: (b, g) Absolute vorticity at 850 hPa; (c, h) maximum potential intensity of typhoon; (d, i) relative humidity at 600 hPa; (e, j) vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa, as derived from the average of the ensemble mean in the scenarios RCP4.5 (left) and RCP8.5 (right). The dotted areas indicate where the future changes are significant at the 99% confidence level, and the hatched areas indicate where there are more than 13 models with the same direction of change as the average for the ensemble mean

对流层中层相对湿度和 VWS 各因子变化对 I_{GP} 的影响。以 RCP4.5 情景为例 (图 8a-e), 大部分模式显示台风最大潜在强度引起了整个西北太平洋 I_{GP} 的增加, 在 15°N 以北尤为显著。对流层中层相对湿度和 VWS 均导致 I_{GP} 在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 东部海域显著增加。低层绝对涡度对 I_{GP} 的影响南北反向, 28°N 以北为促进作用, 以南则以抑制为主, 但这种影响并不显著。综合模式一致性来看, 除低层绝对涡度外, 相较于抑制作用, 各因子对 I_{GP} 的促进作用在模式间差异更小。相对而言, 在 RCP8.5 情景下, I_{GP} 各因子对 I_{GP} 的作用与 RCP4.5 情景的类似, 但影响范围更广、强度更大、显著区域更大。

5 结论

本文使用 CMIP5 中对西北太平洋地区台风各环境场模拟能力较好的 19 个气候模式的试验数据, 研究了在 RCP4.5 和 RCP8.5 典型浓度路径情景下, 21 世纪末 (2080~2099 年) 相对于参考时期 (1986~2005 年) 该地区台风环境场和 I_{GP} 的变化。所得主要结论如下:

(1) 相较于参考时段, RCP4.5 和 RCP8.5 情景下未来西北太平洋 SST 分别平均升温 1.7°C 和 3.1°C ; 由大陆向南海延伸的低压减弱; VWS 在大部分海域减弱, 在与台风频数显著负相关的关键区 ($7^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $155^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 平均降低 0.5 m s^{-1} (RCP4.5) 和 1.0 m s^{-1} (RCP8.5); OLR 在中纬增加, 低纬减小, 在与台风频数显著负相关的关键区 ($0^{\circ}\sim 16^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 平均降低 2.1 W m^{-2} (RCP4.5) 和 6.5 W m^{-2} (RCP8.5)。

(2) 西北太平洋 SST 变化的信噪比在大部分地区大于 3.0; SLP 变化的信噪比大于 0.6, 其中低压系统控制区信噪比在 1.0 以上; VWS 和 OLR 在西北太平洋海域信噪比小于 0.6, 模式间差异较大; 但在与台风频数显著负相关的地区, 对 OLR 变化方向的模拟在模式间高度一致。

(3) 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 未来西北太平洋地区区域平均的 I_{GP} 分别平均增加了 0.2 和 0.3。大部分地区 I_{GP} 增加源于台风最大潜在强度加大, VWS 和对流层中层相对湿度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 东部海域的变化使得该区域 I_{GP} 显著增加; 低层绝对涡度对 I_{GP} 的作用不显著。

综合而言, 未来西北太平洋地区 SST、VWS 和 OLR 在与台风活动密切相关的地区均向有利于

台风生成发展的方向变化, 与 I_{GP} 增加一致; 与此相反, 南海地区的低压系统减弱, 不利于台风活动。需要说明的是, 本研究所采用的全球气候模式水平分辨率相对粗糙, 今后有必要使用高分辨率的区域气候模式开展动力降尺度试验, 进一步研究台风环境场、路径、强度和频数, 以期加深理解全球变暖背景下台风活动变化。

参考文献 (References)

- Bacmeister J T, Reed K A, Hannay C, et al. 2018. Projected changes in tropical cyclone activity under future warming scenarios using a high-resolution climate model [J]. *Climatic Change*, 146(3-4): 547-560. doi:10.1007/s10584-016-1750-x
- 白莉娜, 何敏, 王元, 等. 2010. 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*, 68(6): 877-884. Bai L N, He M, Wang Y, et al. 2010. The influence of the vertical wind shear variation on interannual changes in the tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68(6): 877-884. doi:10.11676/qxxb2010.083
- Bony S, Sud Y, Lau K M, et al. 1997. Comparison and satellite assessment of NASA/DAO and NCEP-NCAR reanalyses over tropical ocean: Atmospheric hydrology and radiation [J]. *J. Climate*, 10(6): 1441-1462. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1441:CASAON>2.0.CO;2
- Camargo S J. 2013. Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 26(24): 9880-9902. doi:10.1175/JCLI-D-12-00549.1
- Camargo S, Sobel A H, Barnston A G, et al. 2007. Tropical cyclone genesis potential index in climate models [J]. *Tellus A*, 59(4): 428-443. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x
- Emanuel K A. 1995. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52(22): 3969-3976. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<3969:SOTCTS>2.0.CO;2
- Emanuel K A. 2013. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110(30): 12219-12224. doi:10.1073/pnas.1301293110
- Emanuel K A, Nolan D S. 2004. Tropical cyclone activity and global climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(5): 666-667.
- Emanuel K A, Sundararajan R, Williams J. 2008. Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89(3): 347-367. doi:10.1175/BAMS-89-3-347
- 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 2013. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展 [J]. *大气科学*, 37(2): 364-382. Feng T, Huang R H, Chen G H, et al. 2013. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 364-382. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307

- Hawkins E, Sutton R. 2011. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change [J]. *Climate Dyn.*, 37(1–2): 407–418. doi:10.1007/s00382-010-0810-6
- 黄荣辉, 陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究 [J]. *气象学报*, 65(5): 683–694. Huang R H, Chen G H. 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65(5): 683–694. doi:10.11676/qxxb2007.064
- Huang B Y, Banzon V F, Freeman E, et al. 2015. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4). Part I. Upgrades and intercomparisons [J]. *J. Climate*, 28(3): 911–930. doi:10.1175/JCLI-D-14-00006.1
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- 赖芬芬, 江静. 2012. 西北太平洋热带气旋强度的年际变化特征及其大气环流背景场分析 [J]. *热带气象学报*, 28(5): 609–620. Lai F F, Jiang J. 2012. The inter-annual variation characteristics of the tropical cyclone intensity in the western North Pacific and atmospheric circulation background analysis [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28(5): 609–620. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.05.001
- 郎咸梅, 王会军. 2008. 利用气候模式能够预测西北太平洋台风活动的气候背景吗? [J]. *科学通报*, 53(15): 2392–2399. Lang X M, Wang H J. 2008. Can the climate background of western North Pacific typhoon activity be predicted by climate model? [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 53(15): 2392–2399. doi:10.1007/s11434-008-0266-9
- Lee H T. 2014. Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD): Outgoing Longwave Radiation (OLR)-Daily[R]. NOAA's Climate Data Record (CDR) Program, CDRP-ATBD-0526, 46pp.
- 雷小途, 徐明, 任福民. 2009. 全球变暖对台风活动影响的研究进展 [J]. *气象学报*, 67(5): 679–688. Lei X T, Xu M, Ren F M. 2009. A review on the impacts of global warming on tropical cyclone activities [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67(5): 679–688. doi:10.11676/qxxb2009.068
- Liu Q, Li T, Zhou W C. 2018. Impact of 10-60-day low-frequency steering flows on straight northward-moving typhoon tracks over the western North Pacific [J]. *J. Meteor. Res.*, 32(3): 394–409. doi:10.1007/s13351-018-7035-8
- Min S K, Park E, Kwon W T. 2004. Future projections of East Asian climate change from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82(4): 1187–1211. doi:10.2151/jmsj.2004.1187
- Murakami H, Wang B, Kitoh A. 2011. Future change of western North Pacific typhoons: Projections by a 20-km-mesh global atmospheric model [J]. *J. Climate*, 24(4): 1154–1169. doi:10.1175/2010-JCLI3723.1
- Murakami H, Wang Y Q, Yoshimura H, et al. 2012. Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM [J]. *J. Climate*, 25(9): 3237–3260. doi:10.1175/JCLI-D-11-00415.1
- Park D S R, Ho C H, Chan J C L, et al. 2017. Asymmetric response of tropical cyclone activity to global warming over the North Atlantic and western North Pacific from CMIP5 model projections [J]. *Sci. Rep.*, 7: 41354. doi:10.1038/srep41354
- Stowasser M, Wang Y Q, Hamilton K. 2007. Tropical cyclone changes in the western North Pacific in a global warming scenario [J]. *J. Climate*, 20(11): 2378–2396. doi:10.1175/JCLI4126.1
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 106(D7): 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(4): 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Tory K J, Chand S S, McBride J L, et al. 2013. Projected changes in late-twenty-first-century tropical cyclone frequency in 13 coupled climate models from phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project [J]. *J. Climate*, 26(24): 9946–9959. doi:10.1175/JCLI-D-13-00010.1
- Walsh K, Lavender S, Scoccimarro E, et al. 2013. Resolution dependence of tropical cyclone formation in CMIP3 and finer resolution models [J]. *Climate Dyn.*, 40(3–4): 585–599. doi:10.1007/s00382-012-1298-z
- Wu L, Chou C, Chen C T, et al. 2014. Simulations of the present and late-twenty-first-century western North Pacific tropical cyclone activity using a regional model [J]. *J. Climate*, 27(9): 3405–3424. doi:10.1175/JCLI-D-12-00830.1
- 杨诗琪, 李英, 陈联寿. 2017. 西北太平洋热带气旋强度变化的若干特征 [J]. *热带气象学报*, 28(5): 666–674. Yang S Q, Li Y, Chen L S. 2017. The characteristics of tropical cyclone intensity change in western North Pacific [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28(5): 666–674. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.05.010
- Yokoi S, Takayabu Y N. 2009. Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87(3): 525–538. doi:10.2151/jmsj.87.525
- Zehr R M. 1992. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific [R]. NOAA Tech. Rep. NESDIS 61, 181pp.
- Zehr R M. 2003. Environmental vertical wind shear with hurricane Bertha (1996) [J]. *Wea. Forecasting*, 18(2): 345–356. doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0345:EVWSWH>2.0.CO;2
- Zhan R F, Wang Y Q, Wen M. 2013. The SST gradient between the southwestern Pacific and the western Pacific warm pool: A new factor controlling the northwestern Pacific tropical cyclone genesis frequency [J]. *J. Climate*, 26(7): 2408–2415. doi:10.1175/JCLI-D-12-00798.1
- 张颖, 王会军. 2010. 全球变暖情景下西北太平洋地区台风活动背景场气候变化的预估 [J]. *气象学报*, 68(4): 539–549. Zhang Y,

- Wang H J. 2010. A projection of future climate change over the western North Pacific related to typhoon activities [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68(4): 539–549. doi:10.11676/qxxb2010.052
- Zhang C X, Wang Y Q. 2017. Projected future changes of tropical cyclone activity over the western North and South Pacific in a 20-km-mesh regional climate model [J]. *J. Climate*, 30(15): 5923–5941. doi:10.1175/JCLI-D-16-0597.1
- Zhang Y, Wang H J, Sun J Q, et al. 2010. Changes in the tropical cyclone genesis potential index over the western North Pacific in the SRES A2 scenario [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27(6): 1246–1258. doi:10.1007/s00376-010-9096-1
- Zhang X C, Zhong S S, Wu Z W, et al. 2018. Seasonal prediction of the typhoon genesis frequency over the western North Pacific with a Poisson regression model [J]. *Climate Dyn.*, 51(11–12): 4585–4600. doi:10.1007/s00382-017-3654-5