

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2026.02.002

中国南海与西北太平洋热带气旋初始尺度分布差异： BSISO 的调制作用

吴小涵¹, 王山村², 仇欣^{1*}

(1. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023;
2. 福建省武夷山市气象局, 武夷山, 354300)

摘要: 考察了 1981—2017 年 7—10 月西北太平洋(WNP)和中国南海(SCS)热带气旋(TC)初始尺度的分布差异。发现 WNP 和 SCS 的 TC 初始尺度中值无明显差异, 但 WNP TC 的尺度方差更大, 呈现右偏分布, 而 SCS TC 的初始尺度更接近正态分布。进一步分析表明, 在北半球夏季季节内振荡(BSISO)的非对流相位期间, 两区域 TC 的初始尺度中值差异不显著; 在对流相位, WNP TC 的尺度显著增大, SCS TC 的尺度增幅则相对有限。环境场方面, SCS 虽具有更优的低层相对涡度及湿度条件, 但在更强的垂直风切变下 TC 对流结构呈现明显的一波非对称性。在 BSISO 对流相位, WNP 区域的低层相对涡度、湿度等环境因子显著改善, TC 对流活动系统性增强, 角动量向内输送更有效, 有利于大尺度 TC 生成。而 SCS 区域垂直风切变未明显减弱, 其一波非对称结构加剧; TC 环流和中心对流未能实现整体增强, 尺度响应较弱。研究结果表明, BSISO 对流相位对于 WNP 和 SCS 区域环境场及 TC 初始结构的不同调制作用, 是导致两地 TC 初始尺度分布差异的重要原因。

关键词: 中国南海, 西北太平洋, 热带气旋, 初始尺度, 次季节振荡

中图分类号: P444

文献标志码: A

Differences in the initial size distribution of tropical cyclones over South China Sea and Western North Pacific: The modulating role of BSISO

Wu Xiaohan¹, Wang Shancun², Qiu Xin^{1*}

(1. State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;
2. Wuyishan Meteorological Bureau, Wuyishan, Fujian Province, 354300, China)

Abstract: This study investigates the differences in the initial size distribution of tropical cyclones (TCs) generated over Western North Pacific (WNP) and South China Sea (SCS) from July to October during 1981—2017. Results show that although the median initial sizes of TC in the two basins are similar, the WNP exhibits greater variance with a right-skewed distribution, while SCS TC sizes follow a distribution closer to normal. Further analysis indicates that during the non-convective phase of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), the median initial TC sizes in both regions do not differ significantly. However, during the convective phase, WNP experiences a pronounced increase in TC size, whereas SCS shows only limited growth. In terms of environment conditions, although SCS has stronger low-level relative vorticity and humidity, its higher vertical wind shear leads to a marked wavenumber-1 asymmetry in TC convective structure. During the BSISO convective phase, environmental factors such as low-level vorticity and humidity are significantly improved over

基金项目: 灾害天气科学与技术全国重点实验室自主选题项目, 国家自然科学基金(42175062)

收稿日期: 2026-01-23

* 通信联系人, E-mail: xqiu@nju.edu.cn

WNP, resulting in systematically enhanced TC convection and more efficient inward transport of angular momentum, favoring the formation of larger TCs. In contrast, SCS sees no substantial weakening in vertical wind shear, and its asymmetric structure becomes more pronounced. The overall TC circulation and central convection do not exhibit significant strengthening, leading to a weaker response of TC size. These findings highlight that the modulation of environmental conditions and TC structure by the BSISO convective phase contributes importantly to the differences in initial TC size distribution between the WNP and SCS.

Keywords: South China Sea, Western North Pacific, tropical cyclone, initial size, intraseasonal oscillation

西北太平洋(Western North Pacific, WNP)是全球热带气旋(Tropical Cyclone, TC)活动最活跃的洋盆,TC的登陆常伴随着严重灾害. TC致灾能力不仅取决于强度,也与其尺度密切相关. 尺度越大的TC,引发的大风、暴雨、风暴潮等灾害影响范围越广,造成的经济损失通常呈几何级数增长^[1-4]. 在目前的研究与业务预报中,基于风场特征定义的TC尺度参量如 $15\sim 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风圈半径(即七级风圈半径)被广泛使用^[5-8].

TC的尺度在空间分布上存在显著差异. 尽管不同研究对尺度的定义方式各异,但普遍认为北半球TC的平均尺度大于南半球,其中WNP TC的尺度最大,且其变幅(标准差)也最显著^[9-12]. 即使在WNP内部,不同生成区域的TC尺度也存在明显分化:大尺度TC多出现于路径转向区($15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$),而小尺度TC主要分布于WNP东南部($5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$)、 15°N 以南以及中国南海(South China Sea, SCS)区域^[13-16].

TC成熟期的尺度在很大程度上由其初始尺度决定^[7-8, 17-18]. Lee et al^[7]基于WNP 73个TC样本的研究表明,大多数TC在从热带风暴(Tropical Storm, TS)增强为台风(Typhoon, 缩写为“TY”)的过程中,其尺度所属分组基本保持不变. 角动量向内输入是TC尺度变化的核心物理过程,受外部强迫和内部对流活动共同影响^[9, 19-20]. 一方面,初始尺度较大的TC具备更广的水平风场范围和更强的外围风速,有利于角动量积累^[17];另一方面,大尺度TC通常伴有更活跃的对流雨带,可通过增强次级环流进一步促进角动量向内输送^[18].

北半球夏季季节内振荡(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)是调控TC生成、

路径与强度的关键次季节信号,其特征为行星尺度的西北-东南向对流条带并向东北传播,周期约为 $30\sim 60\text{ d}$ ^[21-24]. BSISO对季风活动具有显著调制作用,表现为对流相位在季风槽区域出现气旋式环流异常,抑制相位则为反气旋式异常. 在对流相位, 150°E 以西的低层涡度、相对湿度及高层散度等环境因子呈现正异常,使得TC生成频数增加,且生成位置更偏向WNP西侧;在抑制相位,TC生成偏少,位置则偏向约 140°E 以东, 16°N 以北的东北象限^[23, 25-27]. 路径方面,伴随季风槽加强与副热带高压东退,BSISO对流相位中生成的TC更倾向以西北路径登陆我国华东地区;在抑制相位中,生成于WNP东北部的TC则多北行影响日本东南海域,登陆个例较少^[28-29]. BSISO对TC强度的直接调制作用不明显,各相位中TY及以上强度TC与其余强度TC的比例稳定在约3:2,但受生成频数影响,对流相位的每日累计气旋能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE)显著高于抑制相位^[23, 30].

与生成于 120°E 以东的WNP TC相比,SCS TC的活动具有其独特性. SCS TC在生成时间上表现出明显的季节集中性,约40%的个例出现于8-9月,该时段内登陆我国的TC比例更高;WNP TC在活动盛期各月间的生成频数差异更小^[31-32]. 受较强垂直风切变制约,SCS TC更难生成和发展,其年均生成数少于WNP TC,平均强度更弱、生命期更短^[13-14]. 然而,这并不意味着SCS TC的致灾能力较低. 相反,SCS TC对于夏季风的增强作用更为显著,并对中国华南地区夏季降水的增加具有重要贡献^[33-34].

综上所述,现有研究多聚焦于WNP与SCS TC在生成、路径和强度方面的特征差异,而对两者在TC尺度,尤其是初始尺度方面的对比分析

尚显不足.由此自然引出以下问题:(1)WNP与SCS TC的初始尺度分布是否存在差异?这种差异与两区域的环境特征有何联系?(2)BSISO对此有什么贡献?对上述问题的探讨,有助于深化对TC尺度时空变化及其机制的理解.

1 数据与方法

基于1981—2017年7—10月生成的TC样本展开分析.TC的中心经纬度与最大风速资料来自美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)发布的最佳路径数据集,R34尺度数据来源于Zhuo and Tan^[35]开发的DeepTC-Size数据集.DeepTCSize采用物理信息增强的卷积神经网络(DeepTCNet)^[36],结合迁移学习技术,基于红外卫星图像反演WNP TC的尺度,其结果与高质量分析数据具有良好的可比性,是一套客观、一致且可靠的TC尺度数据集.研究选取生成于100°~180°E和0°~30°N,且生命期内最大风速能达到34 kt的命名TC作为分析样本.TC生成时刻定义为其中心最大风速首次达到34 kt的时间点,该时刻对应的R34尺度被视为其初

始尺度.根据TC生成时的中心位置,将全部样本划分为两类,即SCS TC(100°~120°E,0°~30°N)和WNP TC(120°~180°E,0°~30°N),两类样本的数量分别是90个和512个.

用于划分BSISO相位的逐日对外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)数据来自美国国家海洋和大气管理局,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$.本文沿用以往研究的常用方法,对OLR异常施加25~70 d Butterworth带通滤波^[37-39],并进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解,以捕捉BSISO的主导模态及传播特征^[23,25,40].BSISO在亚洲季风区表现出相似的空间结构与传播行为,其信号源区一般认为是季节内变率最显著的孟加拉湾(5°S~10°N,80°~100°E)^[41-42],因此,EOF分解区域选择为0°~30°N,80°~180°E.基于前两个主成分,进一步计算每日的BSISO振幅与相位^[43],将振幅大于“1”的时期判定为BSISO活跃期,反之则为不活跃期.在BSISO第1~2相位,OLR负异常覆盖整个WNP热带区域(图1),本研究将其定义为WNP的对流相位,其余第3~8相位以及不活跃

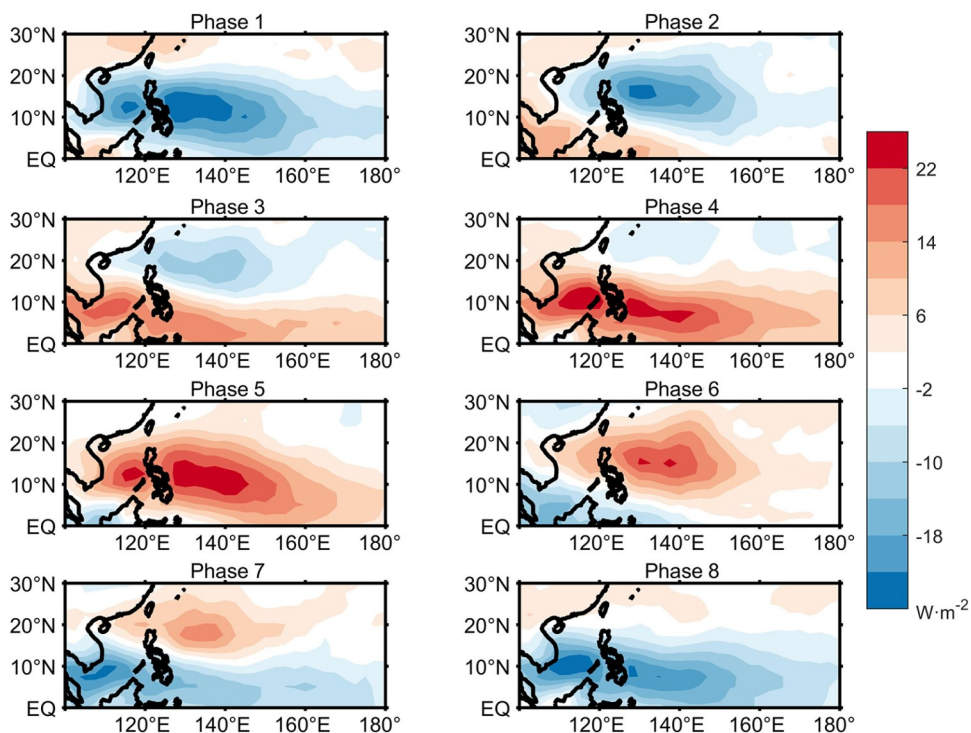


图1 经25~70 d滤波后的OLR异常在BSISO不同相位的合成

Fig. 1 Composites of 25~70 d filtered OLR anomalies for different BSISO phases

期均归为非对流相位. 考虑到 SCS 区域 TC 样本偏少, 为增强统计稳定性, 将同样受 OLR 负异常主导的第 8 相位也纳入 SCS 的对流相位, 因此, SCS 的对流相位包括第 8、第 1 和第 2 相位, 其余相位及不活跃期则定义为非对流相位.

本研究使用第五代欧洲中期天气预报中心再分析(ERA5)的逐 6 h 数据来分析大尺度环境场, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. 所用变量包括水平风速、相对涡度、相对湿度、散度、总降水和 OLR. 在提取 TC 环境场时, 采用改进的 Kurihara 滤波方案^[44-45]以剔除 TC 信号; 对于多 TC 共存的情形, 则按其生成时间依次滤除. 该方法能有效地去除环境场中的 TC 信号, 同时保留基本背景环流. 考虑到 ERA5 与 JTWC 最佳路径资料中 TC 中心位置存在差异, 本文在确定 ERA5 中的 TC 中心时, 结合了 850 hPa 的风场和位势高度信息. 首先在 JTWC TC 中心 $6^\circ \times 6^\circ$ 范围内识别位势高度最小值点, 随后在该最小值点周边 $4^\circ \times 4^\circ$ 区域内定位风速最小值, 最终将其定义为 ERA5 中的 TC 中心.

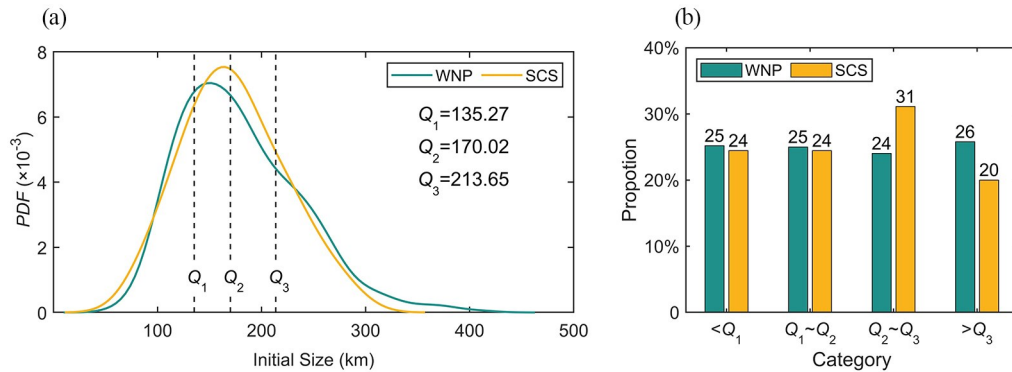
本文使用的统计检验方法如下. (1) 针对 TC 尺度的统计特征, 使用非参数 Wilcoxon 秩和检验比较其中值差异, 并采用 Levene 检验评估其方差差异. 由于 TC 尺度通常不服从正态分布, 且样本量在不同类别间可能存在差异, 上述非参数检验方法不依赖严格的正态性假设, 因而更为稳健.

(2) 对于大尺度环境场的组间差异, 使用双样本 t 检验进行显著性评估.

2 结果与分析

2.1 初始尺度的分布特征 WNP 和 SCS TC 的初始尺度中值分别为 169.48 km 和 170.47 km, 两者无显著差异(秩和检验 $p=0.60$), 但 WNP TC 的初始尺度方差显著大于 SCS TC (Levene 方差检验 $p<0.05$). 图 2a 展示了两者的初始尺度的概率密度分布(Probability Density Function, PDF). 可以看出, SCS TC 的初始尺度分布接近正态分布, 偏度系数为 0.28; WNP TC 呈右偏分布, 偏度系数更大(0.81). 具体地, SCS TC 的初始尺度更多集中在 150~250 km, 而 WNP TC 在大于 250 km 的范围中出现的概率更高.

将 WNP 和 SCS 的 TC 样本合并后, 依据总体样本的下四分位数($Q_1=135.27$ km)、中值($Q_2=170.02$ km)和上四分位数($Q_3=213.65$ km)划分为四个尺度类别, 依次为小尺度、中小尺度、中大尺度和大尺度 TC. 图 2b 展示了 WNP 和 SCS 的 TC 在各尺度类别中的占比. 由于 WNP 样本占整体的 85%, 其在各尺度类别中的占比均接近 25%. 在中小和小尺度类别中, SCS 与 WNP 的 TC 占比无显著差异, 但在中大尺度和大尺度类别中, 两者差异明显, SCS TC 在中大尺度中占比更高(31%), 而在大尺度中占比更低(20%). 进



Q_1 refers to the 25th percentile of the distribution of all samples' initial size (units: km), Q_2 corresponds to the 50th percentile, and Q_3 represents the 75th percentile of the distribution.

图 2 (a) WNP TC 和 SCS TC 初始尺度的概率密度分布, (b) WNP TC 和 SCS TC 在不同尺度区间的占比

Fig. 2 (a) The probability density function of WNP TC and SCS TC at initial size, (b) the proportion of WNP TC and SCS TC at different size category

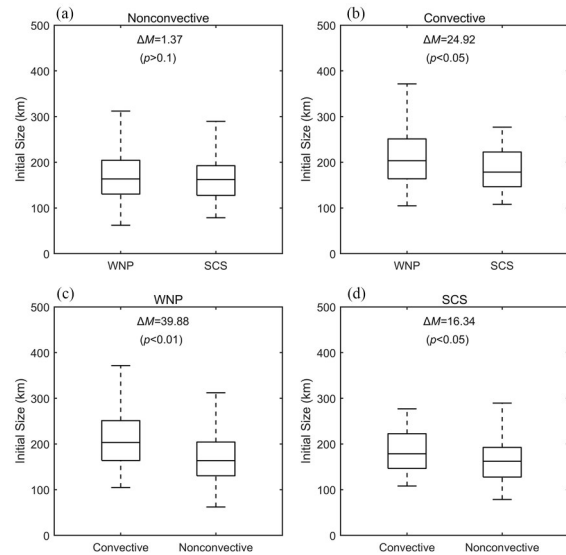
一步计算中大及以上尺度TC的中值,发现WNP TC(215.39 km)显著大于SCS TC(205.79 km),该差异通过95%置信水平的秩和检验.以上结果表明,WNP区域更容易生成大尺度TC.

为了探讨该现象与BSISO的联系,将TC按其生成时BSISO是否处于对流相位分为两类.在BSISO非对流相位生成的TC,WNP和SCS的初始尺度中值无显著差异(秩和检验 $p=0.54$,图3a);在对流相位中,WNP TC的初始尺度中值较SCS TC大24.92 km,差异通过95%置信水平的秩和检验(图3b).图3c和图3d进一步比较了在BSISO对流相位和非对流相位下TC初始尺度的分布差异.在WNP区域,BSISO对流相位对TC初始尺度有明显的促进作用.两类相位下的中值差为39.88 km(通过99%置信水平的秩和检验).BSISO对SCS TC初始尺度也有促进作用,但幅度较小,中值差为16.34 km,通过95%置信水平的秩和检验.

综合图2与图3结果,BSISO对流相位对WNP TC初始尺度的促进作用更明显,这可能是WNP更易生成大尺度TC的主要原因.下文将首先分析WNP和SCS之间大尺度环境及TC生成环境的差异,进而探讨BSISO对WNP和SCS环境因子及TC初始结构的不同调制作用.

2.2 平均大尺度环境与TC环境 图4给出了1981—2017年7—10月平均的环境场,包括850 hPa相对涡度、低层相对湿度(850~600 hPa)、高层相对湿度(400~200 hPa)、整层垂直风切变(850~200 hPa)、中高层垂直风切变(500~200 hPa)以及中低层垂直风切变(850~500 hPa).为了表征TC生成的大尺度环境,选取WNP和SCS TC的主要生成区域,即 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ (WNP)和 $13^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ (SCS),其范围如图4a中蓝色框所示.表1进一步比较了这两个区域中各环境场的平均值.

夏季季风槽自SCS向东延伸至约 150°E ,该区域对应正相对涡度和较大的中低层相对湿度,但其数值均自西向东逐渐递减(图4a和图4c).因此,WNP TC主要生成区域的平均相对涡度和中低层相对湿度显著小于SCS,差异均通过了99%置信水平的 t 检验(表1).然而,中高层相对湿度



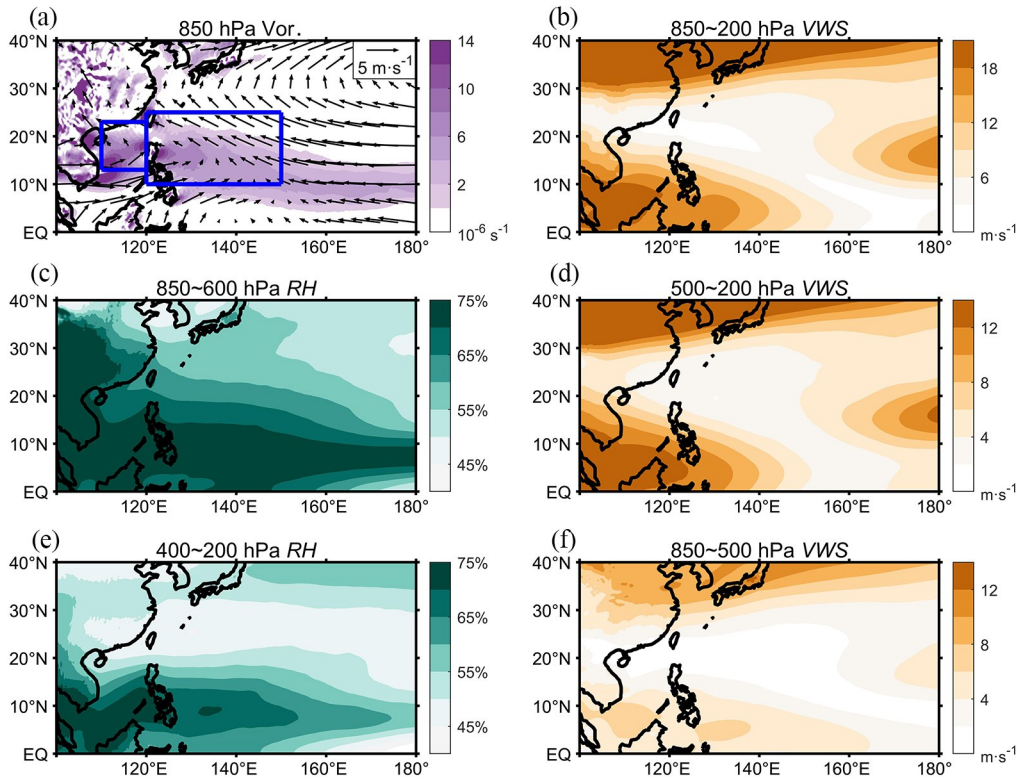
ΔM refers to the difference of median and p -value refers to result of significance testing (using Wilcoxon rank-sum test).

图3 (a)非对流相位和(b)对流相位时WNP TC和SCS TC初始尺度的箱形图,(c)WNP TC和(d)SCS TC在对流相位与非对流相位的箱形图

Fig. 3 Boxplots of WNP TC and SCS TC initial size for (a) non-convective phase and (b) convective phase, and boxplots of convective phase and non-convective phase for (c) WNP TC and (d) SCS TC

的大值区主要位于 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, 13°N 以南,两个TC主要生成区域之间并未呈现显著差异(图4c和表1).从整层和分层垂直风切变的分布来看(图4b, d, f),整层垂直风切变主要来自中高层. 140°E 以西的低纬地区,季风槽南侧低层的偏西风气流和高层的偏东风气流共同作用形成了较强的风切变.由于季风槽呈西北-东南走向,SCS TC主要生成区域平均的整层和中高层垂直风切变显著强于WNP,差异均通过99%置信水平的 t 检验.此外,风切变方向在两区域也存在差异,如WNP为北东北方向,而SCS为东东北方向(图未给出).低层风切变的分布与高层类似,但量值明显较小(图4f),WNP和SCS的TC主要生成区域之间的平均值无统计学差异.鉴于整层风切变的区域差异主要来自中高层贡献,下文重点关注中高层垂直风切变.

为了更全面地比较TC生成时的周围环境,以每个TC中心为原点,选取 $16^{\circ}\times 16^{\circ}$ 范围的区



Blue boxes refer to WNP and SCS TC main generation region respectively.

图 4 1981-2017 年 7-10 月平均的 (a) 850 hPa 相对涡度及风场, (c) 850-600 hPa 和 (e) 400-200 hPa 的相对湿度以及 (b) 850-200 hPa, (d) 500-200 hPa 和 (f) 850-500 hPa 的垂直风切变

Fig. 4 The average of (a) relative vorticity and wind field at 850 hPa, relative humidity (RH) at (c) 850-600 hPa and (e) 400-200 hPa, and vertical wind shear (VWS) at (b) 850-200 hPa, (d) 500-200 hPa and (f) 850-500 hPa from July to October during 1981-2017

表 1 WNP 和 SCS 的 TC 主要生成区域的气候态环境场的区域平均及其差异 (WNP 减 SCS)

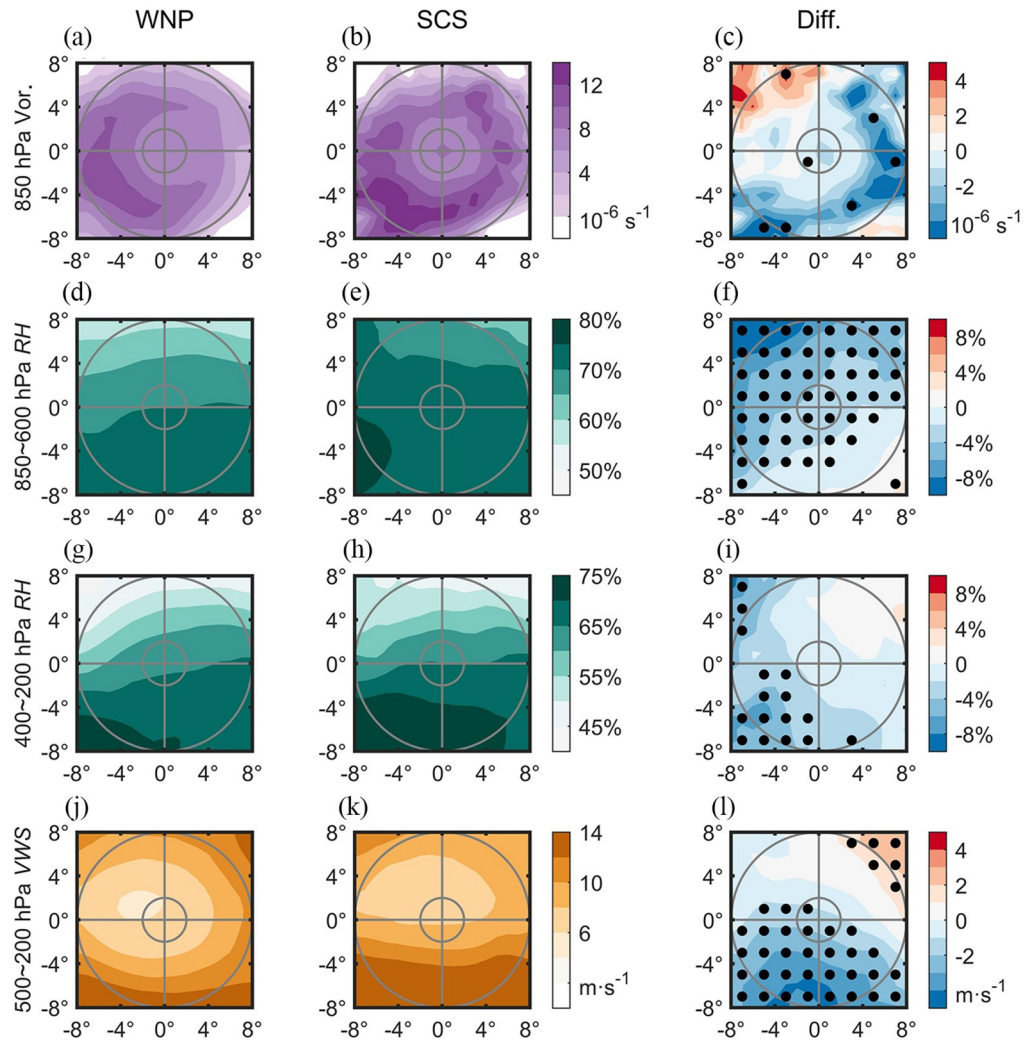
Table 1 Regional average of climatic environmental fields of WNP and SCS TC main generation region with their difference (WNP minus SCS)

	850 hPa Vorticity (10^{-6} s^{-1})	400~200 hPa RH	850~600 hPa RH	850~200 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	500~200 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	850~500 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
WNP	2.35	57.02%	66.41%	5.27	4.53	1.20
SCS	4.98	56.29%	68.40%	6.61	5.39	1.27
差异	-2.63**	0.73%	-1.99%**	-1.34**	-0.86**	-0.07

*表示通过 95% 置信水平的 t 检验; **表示通过 99% 置信水平的 t 检验

域,对滤除 TC 信号后的背景环境场进行了合成分析(图 5). 为了进一步量化环境特征,表 2 同时列出了距离 TC 中心 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 圆环区域内各环境场变量的平均值. 在 850 hPa 相对涡度方面,WNP 和 SCS 的 TC 均呈现出一波非对称结构,最大背景相对涡度出现在西南象限(图 5a 和图 5b). 从统计结果来看,WNP TC 生成时 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 圆环区域内

的平均背景相对涡度显著小于 SCS TC,该差异通过 99% 置信水平的 t 检验(图 5c 和表 2). 在低层背景相对湿度方面,WNP TC 表现出明显的南北梯度,而 SCS TC 此特征不明显(图 5d 和图 5e). 整体上,WNP TC 的低层背景相对湿度在全区域内均明显低于 SCS TC,差异亦通过 99% 置信水平的 t 检验(图 5f 和表 2). 对于高层背景相



The left column is WNP TC, the middle is SCS TC, and the right column is the average of WNP TC minus the average of SCS TC. The stippled areas indicate where the difference exceeds the 90% confidence level. The radii of grey circles are 2° and 8°, respectively.

图5 TC生成时刻,以TC为中点16°×16°范围内合成的(a~c)850 hPa相对涡度,(d~f)850~600 hPa相对湿度,(g~i)400~200 hPa相对湿度和(j~l)500~200 hPa垂直风切变

Fig. 5 At the time of TC formation, the (a~c) 850 hPa relative vorticity, (d~f) 850~600 hPa relative humidity, (g~i) 400~200 hPa relative humidity and (j~l) 500~200 hPa vertical wind shear synthesized within a range of 16°×16° with TC as the center

对湿度,WNP和SCS的TC均显示出清晰的南北梯度(图5g和图5h).两者仅在西南象限存在较明显差异,而在2°~8°圆环区域内的平均值未呈现统计学上的显著差异(图5i和表2).在中高层垂直风切变方面,WNP和SCS的TC南侧均表现为背景风切变的大值区(图5j和图5k).WNP TC在南侧的背景中高层风切变明显更小,其2°~8°圆环区域内的平均值也显著低于SCS TC,差异通

过99%置信水平的*t*检验(图5l和表2).

综上所述,TC生成时的局地环境差异与两大主要生成区域的气候态平均环境差异结果一致.平均而言,SCS TC生成时所处的低层相对湿度及湿度条件优于WNP TC.然而,SCS区域显著偏高的垂直风切变对TC对流的组织化和持续发展具有抑制作用,这可能是限制其生成大尺度TC的关键环境约束.

表 2 类似表 1,但是 WNP 和 SCS 的 TC 生成时刻以 TC 位置为原点,2°~8°圆环内的环境场及其差异
Table 2 Similar to Table 1, but for the environmental field and their difference in the circle of 2°~8°
with TC as the center at the time of WNP and SCS TC formation

	850 hPa Vorticity (10^{-6} s^{-1})	400~200 hPa RH	850~600 hPa RH	850~200 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	500~200 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	850~500 hPa VWS ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
WNP	7.53	61.81%	68.54%	7.75	6.17	2.93
SCS	8.67	63.65%	72.09%	9.60	7.70	3.08
差异	-1.14*	-1.84%	-3.55%**	-1.86**	-1.53**	-0.15

*表示通过 95% 置信水平的 t 检验;**表示通过 99% 置信水平的 t 检验

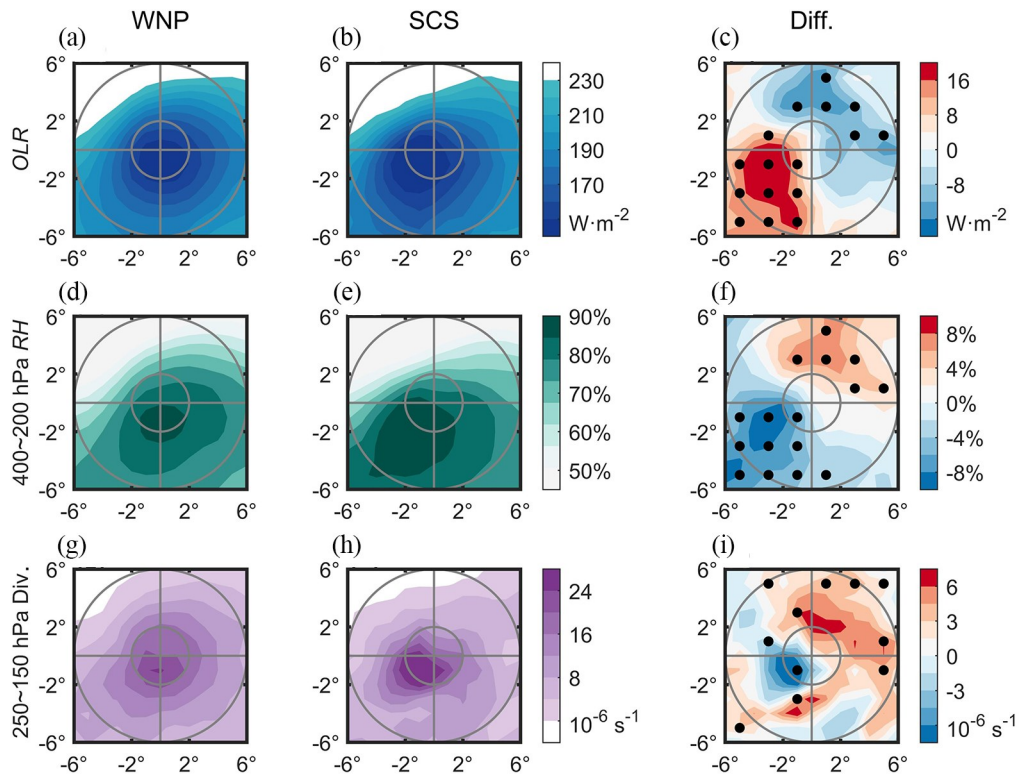
受显著偏高的垂直风切变影响,SCS TC 初 1 始涡旋的对流结构与 WNP TC 存在明显差异. 图 6 展示了 WNP 和 SCS 的 TC 未经滤波的 OLR 、高层相对湿度和 250~150 hPa 高层散度的合成分布及其差异. 从 OLR 和高层相对湿度来看, WNP TC 的对流中心更接近 TC 中心,而 SCS TC 的对流中心明显偏向西南方向,即沿切变方向分布(图 6a 和图 6b,图 6d 和图 6e). OLR 和高层相对湿度的差异场显示,相较于 WNP 和 SCS TC 的深对流在顺切变方向更强,在逆切变方向明显偏弱,呈现出更为显著的一波非对称结构(图 6c 和图 6f). 高层散度的差异场也表现与对流特征相似的非对称分布. 不同的是,SCS TC 在距离中心 2° 以外的区域整体辐散强度更弱(图 6g~i).

SCS TC 的显著一波非对称结构意味着其内核深对流在垂直方向上的倾斜,导致凝结潜热释放所驱动的最大非绝热加热区与低层的辐合中心产生空间上的错位,干冷的环境空气易从下风侧低层入侵,削弱暖心的同时抑制深对流的进一步发展,不利于涡旋中心的对流组织化^[46-47].

2.3 BSISO 对环境场及 TC 结构的影响 BSISO 是影响 WNP 和 SCS 区域最主要的次季节信号,能够对大尺度环境场产生显著调制作用^[23,25-26]. 图 7 展示了对流相位和非对流相位期间 TC 生成时大尺度环境场的差异,考察的环境变量包括 200 hPa 散度、整层相对湿度、850 hPa 相对涡度和中高层垂直风切变. 低层相对湿度、高层相对湿度异常的空间模态与整层相对湿度类似(图未给出). 相对于非对流相位,在对流相位期间,WNP 上空出现显著的高层散度与相对湿度正异常,大值区位于菲律宾以东海域并延伸至约 150°E,几乎覆盖整个 WNP TC 主要生成区域;在 SCS 区

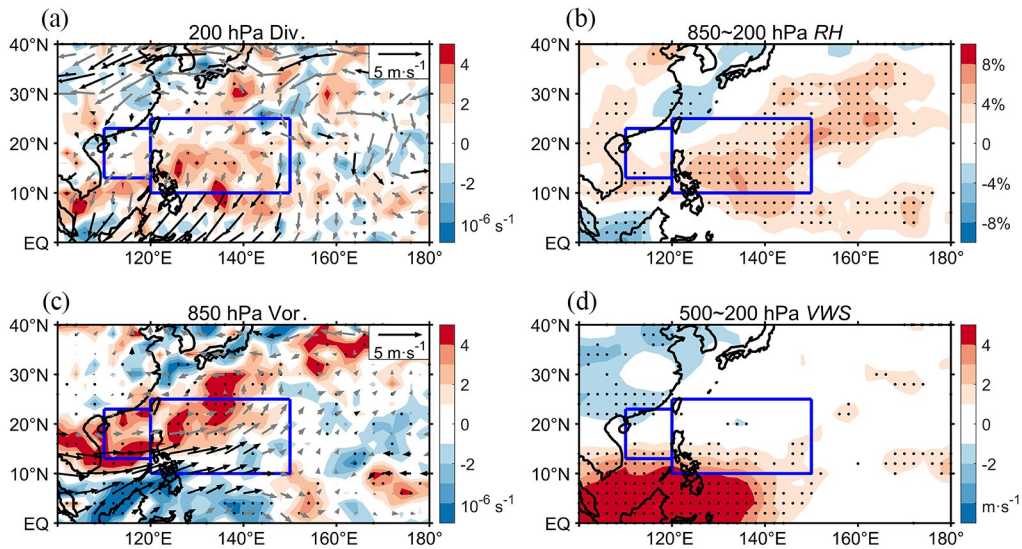
域,正异常主要局限于 13°N 以南,其 TC 主要生成区域内基本无正异常出现(图 7a 和图 7b). 在 850 hPa 风场与相对涡度方面,140°E 以西的 10°N 附近存在明显的西风异常,导致 100°~140°E 出现大范围相对涡度正异常. WNP TC 主要生成区域的相对涡度普遍显著增强,而 SCS TC 主要生成区域内的涡度增幅较小,通过 90% 置信水平 t 检验的范围明显小于 WNP(图 7c). 与其他环境场异常的空间形态不同,中高层垂直风切变在对流相位下于 10°N 以南的热带地区显著增强(图 7d),但对 WNP 和 SCS 的 TC 主要生成区域的影响均较弱. 因此,BSISO 对流相位有效改善了 WNP 原本低于 SCS 的低层涡度与湿度条件,而在中高层垂直风切变方面,BSISO 对两个主要 TC 生成区域均未产生明显调制作用.

BSISO 对大尺度环境的调制也会进一步反映在 TC 初始涡旋结构的变化上. 与图 6 类似,图 8 展示了 BSISO 对流相位和非对流相位期间未经 TC 滤波的变量合成差异,包括 OLR 、250~150 hPa 高层散度和 850~600 hPa 相对涡度. 在对流结构方面,WNP TC 整体加强,西南象限尤为突出;SCS TC 则表现为一波非对称结构进一步加剧,整体未见显著增强(图 8a 和图 8b). 在高层散度方面,WNP 和 SCS 的 TC 在距中心 2° 以外的散度差异较气候态进一步扩大(对比图 6i、图 8c 和图 8d). 图 9 进一步给出了 TC 降水随半径的分布特征. 总体而言,WNP TC 在距中心 2° 以外的降水强度高于 SCS TC(图 9 实线),这与 WNP TC 在该区域更旺盛的对流活动相一致(图 6). 在 BSISO 对流相位的影响下,WNP TC 的对流活动进一步增强,导致距中心 2° 以外与 SCS TC 的降水差异更为显著(图 9 虚线).



The stippled areas indicate where the difference exceeds the 90% confidence level. The radii of grey circles are 2° and 6° respectively.

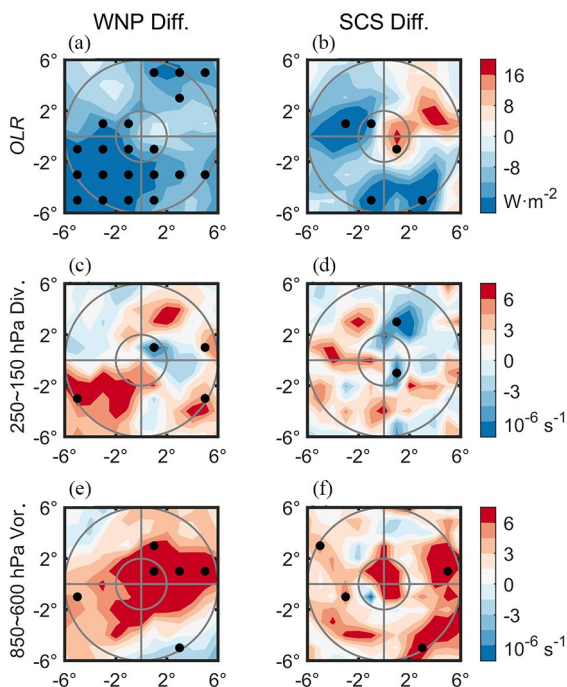
图6 与图5同,但TC信号未滤除:(a-c)对外长波辐射,(d-f) 400~200 hPa相对湿度和(g-i) 250~150 hPa散度
Fig. 6 Similar to Fig. 5, but TC signal is not filtered: (a~c) outgoing long-wave radiation, (d~f) 400~200 hPa relative humidity and (g~i) 250~150 hPa divergence



The stippled areas and black arrows indicate where the difference exceeds the 90% confidence level.

图7 对流相位的所有TC与非对流相位的所有TC之间的(a) 200 hPa散度及风场,(b) 850~200 hPa相对湿度,(c) 850 hPa相对涡度及风场和(d) 500~200 hPa垂直风切变差异

Fig. 7 Differences of (a) 200 hPa divergence and wind field, (b) 850~200 hPa relative humidity, (c) 850 hPa relative vorticity and wind field, and (d) 500~200 hPa vertical wind shear between all convective TC and all non-convective TC



The stippled areas indicate where the difference exceeds the 90% confidence level. The radii of grey circles are 2° and 6° respectively.

图 8 类似图 6,但是对流相位 WNP TC 减去非对流相位 WNP TC(左列)和对流相位 SCS TC 减去非对流相位 SCS TC(右列):(a~b) OLR, (c~d) 250~150 hPa 散度和 (e~f) 850~600 hPa 相对涡度

Fig. 8 Similar to Fig. 6, but convective WNP TC minus non - convective WNP TC (left column) and convective SCS TC minus non - convective SCS TC (right column): (a~b) outgoing long - wave radiation, (c~d) 250~150 hPa divergence and (e~f) 850~600 hPa relative vorticity

角动量的径向输送是涡旋风场扩张的重要机制^[5,20,48]. 活跃的深对流伴随持续的非绝热加热(表现为降水),有利于激发并维持次级环流(即低层流入—上升运动—高层流出),从而促进低层角动量向内输送,导致 TC 外围风场和相对涡度的增加. 在 BSISO 对流相位期间,一方面,WNP TC 主要生成区域的高层散度及相对湿度正异常为对流发展提供了有利条件,促使 TC 涡旋的对流活动系统性增强;另一方面,BSISO 对流相位也提升了背景涡度,在更强对流的配合下,角动量向内输送更为显著. 因此,WNP TC 的低层相对涡度在 BSISO 对流相位期间整体显著增强;SCS TC 仅在距中心 2°以内及 4°~6°区域内出现相对

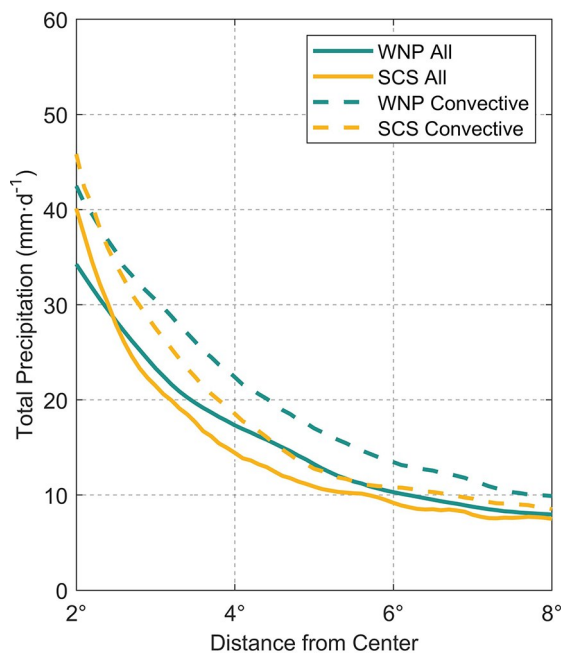


图 9 所有 WNP TC/SCS TC(实线)和对流相位 WNP TC/SCS TC(虚线)在生成时刻降水随 TC 半径的分布

Fig. 9 Precipitation distribution with TC radius at the formation time of all WNP TC/SCS TC (solid line) and convective phase WNP TC/SCS TC (dashed line)

涡度的增加,且大部分区域未通过 90% 置信水平的 *t* 检验(图 8e 和图 8f).

3 结论

本研究利用 1981—2017 年 7—10 月间的 JT-WC 热带气旋最佳路径资料和 DeepTCSize 的尺度数据集,系统比较了 WNP 和 SCS 两个洋盆 TC 初始尺度的统计分布差异,并从平均环境场和 BSISO 对环境的调制作用两方面探讨了其成因.

WNP 与 SCS 的 TC 初始尺度中值相近,无显著统计差异,但其概率分布形态与方差存在明显区别. WNP TC 的初始尺度方差更大,呈明显右偏分布,初始尺度大于 250 km 的 TC 出现概率更高;SCS TC 初始尺度更接近正态分布,集中在中值附近. BSISO 对流相位对两个区域 TC 初始尺度的促进作用存在显著差异,是导致上述分布特征的主要原因,对流相位下 WNP TC 初始尺度较非对流相位显著增加约 40 km,而 SCS 区域的增幅仅约 16 km. 这表明 BSISO 对 TC 初始尺度的

促进作用在 WNP 区域更为显著,从而更有利于大尺度 TC 的生成.

从气候态环境场与 TC 生成环境来看,WNP 与 SCS 存在系统性差异. SCS TC 主要生成区域具有更强的低层相对涡度与更好的湿度条件,但同时也伴随着更强烈的垂直风切变,不利于对流在涡旋中心附近的组织化. 合成分析显示,在强风切变环境下,SCS TC 的对流结构呈现出明显的一波非对称特征,对流中心偏向西南象限(顺切变方向),且距中心 2° 以外的高层辐散整体偏弱. 相比之下,WNP 区域虽然平均涡度和湿度条件相对不利,但其较弱的风切变更有利于中心对流组织化.

作为关键的次季节信号,BSISO 对上述环境要素及 TC 初始结构具有显著调制作用,进而差异化地影响了两个区域的 TC 初始尺度. 在 BSISO 对流相位期间,WNP TC 主要生成区域呈现出大范围的高层辐散、整层相对湿度及低层相对涡度正异常,显著改善了 WNP 区域气候态的不利条件,共同构成有利于 TC 对流发展和尺度扩张的大气环境. 在此背景下,WNP 的 TC 表现出整体增强的对流活动、更强的外围降水以及显著增强的低层相对涡度,有利于角动量向内输送和尺度扩张. 而 SCS 区域,BSISO 对流相位带来的环境改善有限:高层辐散与湿度正异常主要局限于 13°N 以南,未能有效覆盖其 TC 主要生成区域. 更为关键的是,制约 TC 发展的主导因子——垂直风切变未出现显著减弱. 因此,SCS TC 在 BSISO 对流相位下一波非对称结构进一步加剧,且 TC 环流与对流并未得到整体性增强,导致其尺度响应弱于 WNP.

综上,WNP 与 SCS 在 TC 初始尺度分布,尤其是大尺度 TC 生成概率方面的差异主要源于 BSISO 对流相位对两个区域环境场及 TC 结构的差异化调制. WNP 区域在 BSISO 对流相位可获得全面有利的环境配置,更易生成大尺度 TC;SCS 区域受持续强风切变及其引发的不对称结构制约,即使在 BSISO 对流相位也难以实现尺度的显著增长. 研究结果加深了对 WNP 和 SCS 的 TC 初始尺度差异及其原因的理解,对未来研究次季节信号影响 TC 尺度的物理机制具有启示意义.

参考文献

- [1] Powell M D, Reinhold T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 513–526.
- [2] Irish J L, Resio D T, Ratcliff J J. The influence of storm size on hurricane surge. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(9): 2003–2013.
- [3] Matyas C J. Associations between the size of hurricane rain fields at landfall and their surrounding environments. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2010, 106(3): 135–148.
- [4] Zhai A R, Jiang J H. Dependence of US hurricane economic loss on maximum wind speed and storm size. *Environment Research Letters*, 2014, 9(6): 064019.
- [5] Chan K T F, Chan J C L. The outer-core wind structure of tropical cyclones. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser. II*, 2018, 96(4): 297–315.
- [6] Knaff J A, Sampson C R, Kucas M E, et al. Estimating tropical cyclone surface winds: Current status, emerging technologies, historical evolution, and a look to the future. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2021, 10(3): 125–150.
- [7] Lee C S, Cheung K K W, Fang W T, et al. Initial maintenance of tropical cyclone size in the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(8): 3207–3223.
- [8] Cocks S B, Gray W M. Variability of the outer wind profiles of western North Pacific typhoons classifications and techniques for analysis and forecasting. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(8): 1989–2005.
- [9] Merrill R T. A comparison of large and small tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(7): 1408–1418.
- [10] Liu K S, Chan J C L. Size of tropical cyclones as inferred from ERS-1 and ERS-2 data. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(12): 2992–3001.
- [11] Chan K T F, Chan J C L. Global climatology of tropical cyclone size as inferred from QuikSCAT data. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(15): 4843–4848.
- [12] Chavas D R, Lin N, Dong W H, et al. Observed

- tropical cyclone size revisited. *Journal of Climate*, 2016, 29(8):2923–2939.
- [13] Yuan J N, Wang D X, Liu C X, et al. The characteristic differences of tropical cyclones forming over the Western North Pacific and the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 26(4):29–43.
- [14] Yuan J N, Wang D X, Wan Q L, et al. A 28-year climatological analysis of size parameters for Northwestern Pacific tropical cyclones. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1):24–34.
- [15] Lu X Q, Yu H, Lei X T. Statistics for size and radial wind profile of tropical cyclones in the western North Pacific. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 25(1):104–112.
- [16] Chan K T F, Chan J C L. Size and strength of tropical cyclones as inferred from QuikSCAT data. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(3):811–824.
- [17] Chan K T F, Chan J C L. Impacts of initial vortex size and planetary vorticity on tropical cyclone size. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(684):2235–2248.
- [18] Xu J, Wang Y Q. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(11):4135–4157.
- [19] Shen Z Q, Nie G Z, Qiu X, et al. Outer size distribution of landfalling tropical cyclones over China changes in the recent decades. *Journal of Climate*, 2023, 36(18):6427–6445.
- [20] Fudeyasu H, Wang Y Q. Balanced contribution to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer-core spin up process. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68(3):430–449.
- [21] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(5):702–708.
- [22] Kikuchi K. The boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO): A review. *Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser. II*, 2021, 99(4):933–972.
- [23] Li R C Y, Zhou W. Modulation of western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. Part I : genesis and intensity. *Journal of Climate*, 2012, 26(9):2904–2918.
- [24] Zhao H K, Jiang X N, Wu L G. Modulation of Northwest Pacific tropical cyclone genesis by the intraseasonal variability. *Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser. II*, 2015, 93(1):81–97.
- [25] Kim J H, Ho C H, Kim H S, et al. Systematic variation of summertime tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*, 2008, 21(6):1171–1191.
- [26] Zhao H K, Yoshida R, Raga G B. Impact of the Madden-Julian oscillation on western North Pacific tropical cyclogenesis associated with large-scale patterns. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(7):1413–1429.
- [27] Zhang S F, Zhao H K, Klotzbach P J, et al. Interannual variability in the boreal summer intraseasonal oscillation modulates the meridional migration of western North Pacific tropical cyclone genesis. *Journal of Climate*, 2023, 36(13):4543–4558.
- [28] Li R C Y, Zhou W. Modulation of western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO.Part II : Tracks and landfalls. *Journal of Climate*, 2012, 26(9):2919–2930.
- [29] Chen T C, Wang S Y, Yen M C, et al. Impact of the intraseasonal variability of the western North Pacific large-scale circulation on tropical cyclone tracks. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(3):646–666.
- [30] Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden Julian oscillation. *Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser. II*, 1994, 72(3):401–412.
- [31] Huang X Y, He L, Zhao H S, et al. Characteristics of tropical cyclones generated in South China Sea and their landfalls over China and Vietnam. *Natural Hazards*, 2017, 88(2):1043–1057.
- [32] Wang G H, Su J L, Ding Y H, et al. Tropical cyclone genesis over the South China sea. *Journal of Marine Systems*, 2007, 68(3/4):318–326.
- [33] Ling Z, Wang G H, Wang C Z, et al. Different effects of tropical cyclones generated in the South China Sea and the Northwest Pacific on the summer South China Sea circulation. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(3):347–355.

- [34] Chen J P, Wu R G, Wen Z P. Contribution of South China Sea tropical cyclones to an increase in southern China summer rainfall around 1993. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(3):585—598.
- [35] Zhuo J Y, Tan Z M. A deep-learning reconstruction of tropical cyclone size metrics 1981—2017: Examining trends. *Journal of Climate*, 2023, 36(15): 5103—5123.
- [36] Zhuo J Y, Tan Z M. Physics - augmented deep learning to improve tropical cyclone intensity and size estimation from satellite imagery. *Monthly Weather Review*, 2021, 149(7):2097—2113.
- [37] Gao J Y, Li T. Factors controlling multiple tropical cyclone events in the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(3):885—894.
- [38] Kikuchi K, Wang B, Kajikawa Y. Bimodal representation of the tropical intraseasonal oscillation. *Climate Dynamics*, 2012, 38(9):1989—2000.
- [39] Chen W Z, Ho C H, Yang S, et al. Modulations of Madden - Julian oscillation and quasi - biweekly oscillation on early summer tropical cyclone genesis over the bay of Bengal and South China Sea. *Journal of Climate*, 2024, 37(6):1951—1964.
- [40] Ling Z, Wang Y Q, Wang G H, et al. Impact of intraseasonal oscillations on the activity of tropical cyclones in summer over the South China Sea. Part I: local tropical cyclones. *Journal of Climate*, 2016, 29(2):855—868.
- [41] Wang B, Webster P, Kikuchi K, et al. Boreal summer quasi - monthly oscillation in the global tropics. *Climate Dynamics*, 2006, 27(7):661—675.
- [42] Fu X H, Wang B. The boreal-summer intraseasonal oscillations simulated in a hybrid coupled atmosphere-ocean model. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(11):2628—2649.
- [43] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(8):1917—1932.
- [44] Kurihara Y, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of Hurricane models by vortex specification. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(7):2030—2045.
- [45] Van Nguyen H, Chen Y L. High - resolution initialization and simulations of typhoon Morakot (2009). *Monthly Weather Review*, 2011, 139(5): 1463—1491.
- [46] Gu J F, Tan Z M, Qiu X. The evolution of vortex tilt and vertical motion of tropical cyclones in directional shear flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(10):3565—3578.
- [47] Gu J F, Tan Z M, Qiu X. Intensification variability of tropical cyclones in directional shear flows: vortex tilt-convection coupling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 76(6):1827—1844.
- [48] Kilroy G, Smith R K. The effects of initial vortex size on tropical cyclogenesis and intensification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(708):2832—2845.

(责任编辑 杨贞)