

南海-西北太平洋季风槽及其与热带气旋的关系: 不同再分析资料对比

邢彩盈^{1,2}, 吴胜安^{1,2}, 朱晶晶^{1,2}, 胡德强^{1,2}

(1. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203; 2. 海南省气候中心, 海南海口 570203)

摘 要: 利用1981—2020年中国气象局(CMA)热带气旋最佳路径数据集、CMA大气再分析资料(CMA-RA)、欧洲中期天气预报中心再分析资料(ERA5)及NCEP/NCAR再分析资料(NCEP-I), 对比CMA-RA与ERA5、NCEP-I对南海-西北太平洋季风槽及其与南海热带气旋活动关系的表现能力, 探讨CMA-RA的适用性。结果表明: 不同资料均表征出南海和西北太平洋西段槽区低层气旋式涡旋明显、东段均匀的特征, CMA-RA和ERA5对低层涡度场描述的差异较小。两两资料间得到的季风槽强度的相关性较高, 且为CMA-RA>ERA5>NCEP-I, 对南海槽区的描述差异最大; 对东伸点的刻画具有较高一致性, CMA-RA较ERA5和NCEP-I偏西; 但对南北位置的刻画一致性较差, 其中CMA-RA与ERA5的差异较小。所有资料均刻画出季风槽区中、低层强辐合、高层强辐散的结构, 沿105°~160°E平均的涡度垂直剖面差异以CMA-RA与ERA5最小、CMA-RA与NCEP-I最大。CMA-RA季风槽与热带气旋频数关系最密切, ERA5次之, ERA5季风槽强度与热带气旋强度关系最密切, ERA5和CMA-RA季风槽东伸点与热带气旋强度关系较NCEP-I密切。总体来看, CMA-RA对季风槽及其与南海热带气旋活动关系的刻画具有与ERA5和NCEP-I相当的表现能力, 且与ERA5的一致性高。

关键词: 南海-西北太平洋季风槽; 再分析资料; CMA-RA; 热带气旋活动; 对比分析

中图分类号: P732.3; P425.4⁺2 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2023)06-0078-12

0 引言

季风槽是指对流层低层西南季风与东南信风辐合形成的大尺度环流系统, 它提供了热带气旋(Tropical Cyclone, TC)生成所需要的热力和动力条件^[1-2], 全球约75%以上的TC生成于季风槽。南海和西北太平洋上空是TC生成最活跃的区域^[3], 这与南海-西北太平洋季风槽的活动密切相关^[4], 西北太平洋上空生成的TC中有80%以上是在季风槽中生成^[5]。随着数值模式的快速发展, 从20世纪90年代中期开始, 美国、欧洲和日本等先后实施了全球大气资料再分析计划, 并研制出一系列全球大气再分

析产品。基于大气再分析资料表征季风槽特征及其与TC活动的关系方面已有大量的成果。研究表明, 西北太平洋上空对流层低层有利于TC生成的5类大尺度环流型中, 有3类都与季风槽有关^[6-7]。季风槽是南海-西北太平洋影响TC活动最主要的支配因素, 这与其所提供的强低层气旋式涡度、充足的中低层水汽、较小的垂直风切变以及强高层辐散等大尺度环境因子的变化有关^[5, 8-9]。季风槽可能通过与先兆扰动的相互作用或自身发生多次断裂的方式为TC的生成提供所需的初始扰动^[10-11], 也可能通过季风槽内低层辐合和气旋式涡度的加强而形成TC^[12-13], 与季风槽有关的正压转换过程也是热带

收稿日期: 2022-09-06。

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(423QN319); 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-103); 海南省气象局技术提升项目(hnqx SJ202106)。

作者简介: 邢彩盈(1987-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事气候统计和预测研究工作。E-mail: 18876777858@163.com

扰动加强的主要能量源^[14]。南海-西北太平洋季风槽强度、位置等都存在明显的年际、年代际变化特征^[15-16]和季节内振荡特征^[17],这些特征对TC的生成位置、频数、强度、路径等都具有很大的影响^[18-20]。总体上,季风槽东扩并与西北太平洋东南部暖海温区相连时,TC的生成位置偏东、偏南,强度更大,并易于在130°E转向;而当季风槽位置偏西、偏北时,西北太平洋上空TC的生成位置和移动路径以偏西、偏北为主,易于影响中国东南沿海地区。

2013年11月中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)成功研制了中国第一代全球大气/陆面再分析系统和产品(CMA's Global Atmospheric/Land Reanalysis, CMA-RA),打破了相关业务、科研对国外再分析产品依赖的局面^[21]。CMA-RA融合了更多东亚地区的常规观测数据和卫星数据,对研究东亚天气气候具有重要的价值^[22],多家单位综合评估显示该产品质量总体上优于国际第一、二代全球大气再分析产品,与国际第三代大气再分析产品质量相当^[23]。目前有不少研究对比评估了CMA-RA气象要素产品在中国的适用性。总体来看,CMA-RA资料能很好反映中国陆地气温、降水的时空分布特征,其月降水产品在中国的适用性最高,整体明显优于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第5版大气再分析资料(the Fifth Generation Reanalysis, ERA5)和美国国家环境预测中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的气候预测系统再分析(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)资料^[24],而且CMA-RA的极端降水总量模拟与观测值的偏差更小,变化趋势更相似^[25];在青藏高原地表气温变化特征方面的表现也优于ERA-interim资料^[26]。CMA-RA也能较好地描述出中国地表相对湿度的长期变化特征^[27],对北方不同季节土壤湿度的模拟总体上与观测值的相关性最好^[28];其总云量产品在中国东北、华北及江淮地区与地面观测偏差较小^[29]。另外,也有少数研究评估了CMA-RA对东亚地区大气环流特征的刻画能力,指出由于其同化了东亚地区更多观测数据,因此对亚洲副热带西风急流的刻画更为可靠,并具有与ERA5和CFSR相当的表现能力^[30]。

目前尚未有研究评估CMA-RA在季风槽中的适用性,由于所用数值模式、同化方法、质量控制方法不同,不同再分析资料间存在一定差异,亟需了解它们的优点和局限性。因此,本文旨在深入把握南海-西北太平洋季风槽特征及其与南海TC活动的关系,同时通过对比评估CMA-RA与ERA5、NCEP和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的再分析资料(NCEP-I)对季风槽的表现能力,探讨CMA-RA的适用性和应用效果,为相关研究工作提供可替换的、高质量的大气再分析数据集。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料包括:①TC资料来源于CMA上海台风研究所的CMA-STI热带气旋最佳路径数据集^[31],该数据集包含TC每6 h的中心经纬度、强度标记、近中心最大风速、中心最低气压等要素。②CMA-RA全球逐月大气再分析资料,来源于国家气象信息中心,它是基于NCEP全球预报系统的全球系统模型和GSI(Gridpoint Statistical Interpolation)三维变分同化系统研制的,与其他大气再分析资料相比,它同化了更多常规观测数据和风云卫星资料,尤其在东亚地区。③ERA5全球大气再分析资料。④NCEP-I全球大气逐月再分析资料。各再分析资料的简要介绍见表1。

研究序列为1981—2020年,时段为每年7—10月,即南海TC活动活跃期,以1991—2020年表示常

表1 不同再分析数据集基本参数介绍

Tab.1 Brief introduction of the basic parameters of different reanalysis datasets

数据集	数据来源	时间分辨率/h	水平分辨率	垂直层次	起止时间
CMA-RA	CMA	6	34 km × 34 km	64	1979年至今
ERA5	ECMWF	1	0.25° × 0.25°	137	1950年至今
NCEP-I	NCEP/ NCAR	6	2.5° × 2.5°	28	1948年至今

年气候平均态。为保证资料对比分析的一致性,利用双线性插值方法将不同再分析资料插值至 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 水平分辨率。

1.2 季风槽指数定义

参考高建芸等^[17]关于南海-西北太平洋季风槽及不同区域的界定,将其分为南海槽区($105^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$)、西北太平洋槽区($120^\circ \sim 160^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$),其中西北太平洋槽区又分为西段($120^\circ \sim 140^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$)和东段($140^\circ \sim 160^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$)。定义季风槽强度指数为界定区域内850 hPa正相对涡度值的平均值。季风槽东伸点指数为($105^\circ \sim 160^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$)范围内850 hPa层上槽线(东西风交界线)最东边所在经度。季风槽南北位置指数为($105^\circ \sim 160^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$)范围内各个经度上正相对涡度最大值所在纬度的平均值。

1.3 TC相关定义

定义影响南海TC频数为TC中心进入南海TC影响区域(海南省陆地和所管辖海域)^[32]达2个时次的TC数量累加,包括热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风;影响海南岛TC频数为TC中心进入($106^\circ \sim 114^\circ \text{E}$, $15^\circ \sim 23^\circ \text{N}$)范围达2个时次的TC数量累加。

TC累积动能(Accumulated Cyclone Energy, ACE)是一个量化表征整个影响期间TC活动强度的物理量,本文以ACE表征影响区域内TC的活动强度。单个TC的ACE定义为进入影响区域后强度达热带风暴或以上等级(风速 $\geq 17.2 \text{ m/s}$)的TC,其持续时间内每6 h最大风速平方和的累积。为避免TC频次的总体下降趋势以及由于多个弱TC的影响造成ACE偏大等的情况,定义影响区域的ACE为某年某时段进入影响区域内强度达到热带风暴或以上等级的所有TC的ACE平均值。公式为:

$$ACE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^T V_{ij}^2$$

式中: N 为某年某时段进入影响区域的TC频数, T 为某个TC在影响区域内最大风速 $\geq 17.2 \text{ m/s}$ 的观测数, V_{ij} 为影响区域内某个TC不同时刻的最大风速, i 和 j 分别为观测数和TC频数的数据编号。

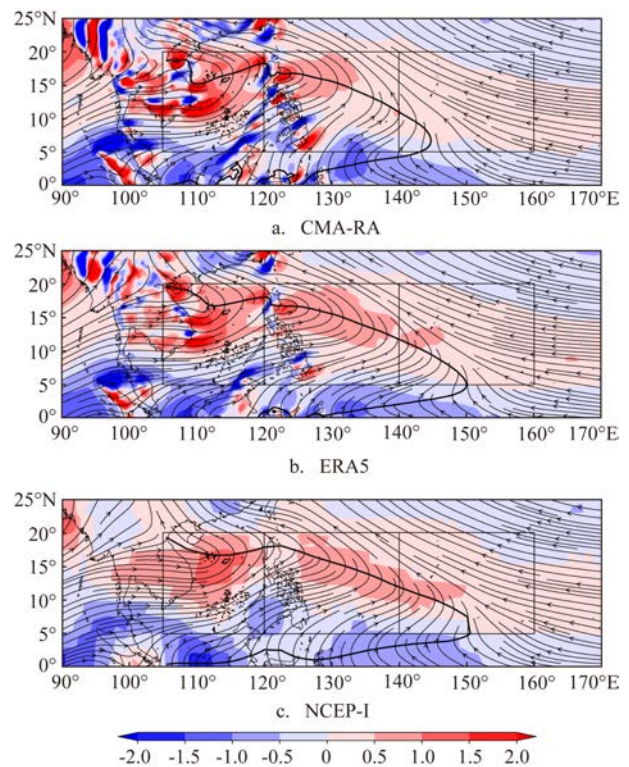
利用空间相关系数、Pearson时间相关系数、均

方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、差值等统计检验参数定量评估不同资料表征季风槽特征的性能。

2 结果分析

2.1 季风槽空间分布特征

从不同资料7—10月南海-西北太平洋季风槽的常年气候态分布(见图1)可看出,它们都揭示出南海-西北太平洋季风槽的基本空间分布特征。南海—西北太平洋地区存在一个东西带状的气旋式涡旋流场,其中南海和西北太平洋西段的气旋式涡旋特征较明显,在南海中部和东部海域、菲律宾以东海域存在正相对涡度的相对高值区,西北太平洋东段低层相对涡度分布较均匀;常年0 m/s纬向风线东伸至西北太平洋东段区域。不同之处在于,



注:方框为季风槽不同区域范围,粗实线为0 m/s的850 hPa纬向风气候态

图1 常年7—10月平均850 hPa流场(流线,单位:m/s)和850 hPa相对涡度场(阴影,单位: $10^{-5}/\text{s}$)的对比

Fig.1 Comparisons of climatological 850 hPa flow field (stream lines, unit: m/s) and 850 hPa relative vorticity field (shaded area, unit: $10^{-5}/\text{s}$) from July to October

CMA-RA 和 ERA5 的南海槽区和西北太平洋西段槽区气旋式涡旋特征较 NCEP-I 明显,南海中部和东部海域、菲律宾以东海域两个正相对涡度高值区的中心值明显大于 NCEP-I,北部湾附近也存在明显的正涡度高值区,但在 NCEP-I 环流场上并未体现出这一特征;CMA-RA 资料 0 m/s 纬向风线东伸点大致位于 145°E 附近,而 ERA5 和 NCEP 均东伸至 150°E 附近,较 CMA-RA 偏东约 5 个经度。

从不同资料常年 850 hPa 风场的差值场来看(见图 2a、2c、2e),整个区域上不同资料两两之间 850 hPa 纬向风场的空间相关系数大于 0.98,850 hPa 经向风场的空间相关性有所下降,CMA-RA 与 ERA5 较高(相关系数为 0.95),CMA-RA、ERA5 与 NCEP-I 的空间相关系数均为 0.84;它们在差值场上超过 1 m/s 的区域主要集中在菲律宾南部及以南海域、赤道以南地区和中南半岛附近,总体上 CMA-RA 与 ERA5 差

异较小。在季风槽区内,两两之间 850 hPa 纬向风场的空间相关系数均大于 0.98,但经向风场差异较大,其中 CMA-RA 与 ERA5 的空间相关系数(0.89)最大。CMA-RA 与 ERA5 的差值大部分处于 ± 1 m/s 之间, RMSE 为 0.52 m/s;CMA-RA 与 NC-EP-I 的差异较大, RMSE 为 0.63 m/s;ERA5 与 NCEP-I 的差值最小, RMSE 仅为 0.45 m/s。

从不同资料 850 hPa 相对涡度差值场来看(见图 2b、2d、2f),无论是整个区域还是季风槽范围,CMA-RA 与 ERA5 的差异最小、CMA-RA 与 NCEP-I 的差异最大,差异大值区主要集中在中南半岛、印尼—澳大利亚北部的海陆分界处附近。在季风槽范围内,CMA-RA 与 ERA5 的 850 hPa 相对涡度场的空间相关系数为 0.86,大部分地区差值处于 $\pm 1 \times 10^{-5}/s$ 之间, RMSE 为 $0.38 \times 10^{-5}/s$;CMA-RA、ERA5 与 NCEP-I 的空间相关系数分别为 0.51、0.64,较

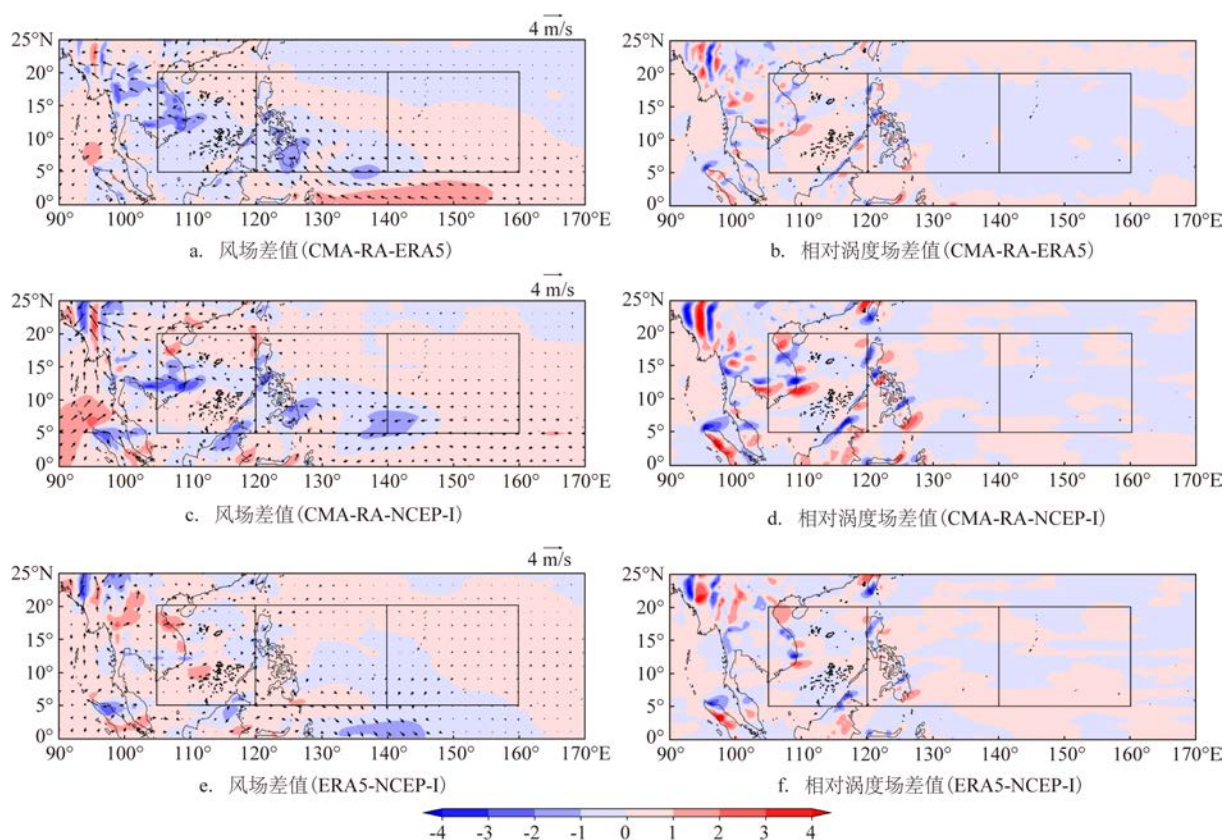


图2 不同资料间常年7—10月850 hPa风场(风矢量:箭头,风速差值:阴影,单位:m/s)、850 hPa相对涡度场(单位: $10^{-5}/s$)的差值场

Fig.2 Deviations in climatological 850 hPa wind field (wind vector: arrow, wind speed difference: shaded area, unit: m/s) and 850 hPa relative vorticity field (unit: $10^{-5}/s$) from July to October among different datasets

CMA-RA 与 ERA5 的空间相关系数明显偏小, RMSE 分别为 $0.63 \times 10^{-5}/s$ 、 $0.44 \times 10^{-5}/s$ 。

2.2 季风槽指数变化特征

为了进一步客观比较不同资料在表征南海-西北太平洋季风槽主要特征方面的能力,给出不同季风槽区各个特征指数之间相关系数和均方根误差的对比(见表2),时间相关系数均通过0.05的显著性水平检验。

2.2.1 季风槽强度

从南海-西北太平洋季风槽强度指数的逐年变化来看(见图3a),不同资料都呈现出相似的年际波动变化特征。资料两两之间的时间相关系数相差不大,均大于0.92,且通过0.05的显著性水平检验;其强度呈现出 $CMA-RA > ERA5 > NCEP-I$ 的分布特征,ERA5 与 NCEP-I 较接近,二者 RMSE 为 $0.06 \times 10^{-5}/s$; CMA-RA 与 NCEP-I 差异较大, RMSE 达 $0.14 \times 10^{-5}/s$ 。

表2 不同资料7—10月南海-西北太平洋季风槽各项特征指数之间关系的对比

Tab.2 Comparisons of the characteristic indices of the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough from July to October among different datasets

区域	特征指数	相关系数/均方根误差		
		CMA-RA&ERA5	CMA-RA&NCEP-I	ERA5&NCEP-I
南海-西北太平洋	强度	0.93/0.09	0.92/0.14	0.94/0.06
	东伸点	0.98/3.10	0.95/4.80	0.97/2.90
	南北位置	0.85/0.50	0.53/1.00	0.64/0.80
南海	强度	0.94/0.18	0.87/0.35	0.93/0.18
西北太平洋	强度	0.96/0.05	0.95/0.06	0.96/0.05

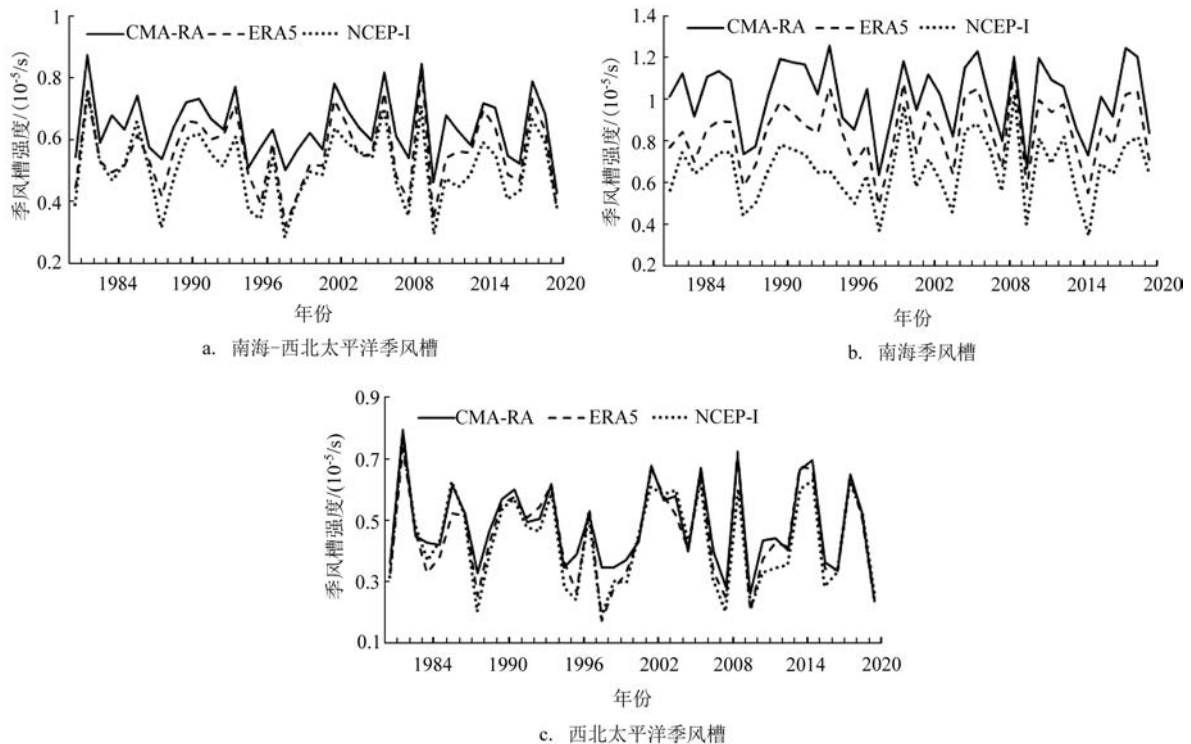


图3 不同资料7—10月南海-西北太平洋季风槽强度逐年变化的对比

Fig.3 Comparisons of annual intensity of the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough from July to October among different datasets

分区域来看,不同资料反映出的南海季风槽强度呈相似的演变特征,但各个资料之间差值较大。两两之间的时间相关系数均通过0.05的显著性水平检验,其中CMA-RA与ERA5、ERA5与NCEP-I的时间相关系数较大,均大于0.93,CMA-RA与NCEP-I的时间相关系数相对较小,仅为0.87;南海季风槽强度也呈现出CMA-RA>ERA5>NCEP-I的特征,且两两之间RMSE值较大,CMA-RA与NCEP-I的差异最大,RMSE高达 $0.35 \times 10^{-5}/s$ 。相比之下,不同资料反映的西北太平洋季风槽强度指数的变化特征具有较高的一致性,两两之间的时间相关系数大于0.95,均通过0.05的显著性水平检验;它们之间RMSE值相差不大,较南海季风槽强度差值明显偏小。另外,两两之间反映的南海季风槽强度的差异随时间总体呈减小的变化特征,即不同资料对南海季风槽强度的刻画呈趋于接近的年代际变化特征。

2.2.2 季风槽东伸点

从1981—2020年7—10月南海-西北太平洋季风槽东伸点的逐年变化来看(见图4a),不同资料所表征的季风槽东伸点随时间的变化特征具有较高的一致性,两两之间的时间相关系数大于0.95,均通过0.05的显著性水平检验,CMA-RA与ERA5的相关性最高(相关系数达0.98);它们之间的RMSE不超过 4.8° ,其中ERA5和NCEP-I的差异最小,RMSE仅为 2.9° ,CMA-RA与NCEP-I的差异较大,RMSE达 4.8° 。CMA-RA逐年季风槽东伸点总体较ERA5和NCEP-I略偏西,在常年低层0 m/s纬向风速线的

空间分布上也表现出这个特征。与南海季风槽强度类似,不同资料之间季风槽东伸点的差异也呈减小的年代际变化特征。

2.2.3 季风槽南北位置

相对于季风槽强度和东伸点,不同资料刻画的南海-西北太平洋季风槽南北位置随时间的变化特征的一致性相对较差(见图4b)。CMA-RA与ERA5季风槽南北位置随时间呈明显波动变化特征,二者的时间相关系数为0.85,通过0.05的显著性水平检验。CMA-RA总体较ERA5偏南,RMSE为 0.5° 。NCEP-I描述的季风槽南北位置随时间的波动幅度较小,它与CMA-RA和ERA5刻画的南北位置差异较大,与CMA-RA、ERA5的时间相关系数分别为0.53、0.64,均通过0.05的显著性水平检验。总体上NCEP-I所刻画的季风槽较CMA-RA、ERA5偏北,其RMSE均超过 0.8° 。

2.3 季风槽垂直结构

从常年7—10月相对涡度沿 $5^\circ \sim 20^\circ N$ 平均的经向-高度剖面图来看(见图5a),南海-西北太平洋上空500 hPa以下的对流层中、低层以正相对涡度为主,对应季风槽区上空中、低层强的气旋式辐合,正相对涡度大值区集中在700 hPa以下,两个正相对涡度高值区($\geq 0.6 \times 10^{-5}/s$)主要分布在 $110^\circ E$ 和 $125^\circ E$ 附近,仅在 $120^\circ E$ 附近狭小区存在负相对涡度区;500 hPa以上的对流层高层为负相对涡度,对应于季风槽区高层强的辐散。从相对涡度沿 $105^\circ \sim 160^\circ E$ 平均的纬向-高度剖面图来看(见图5b),对流

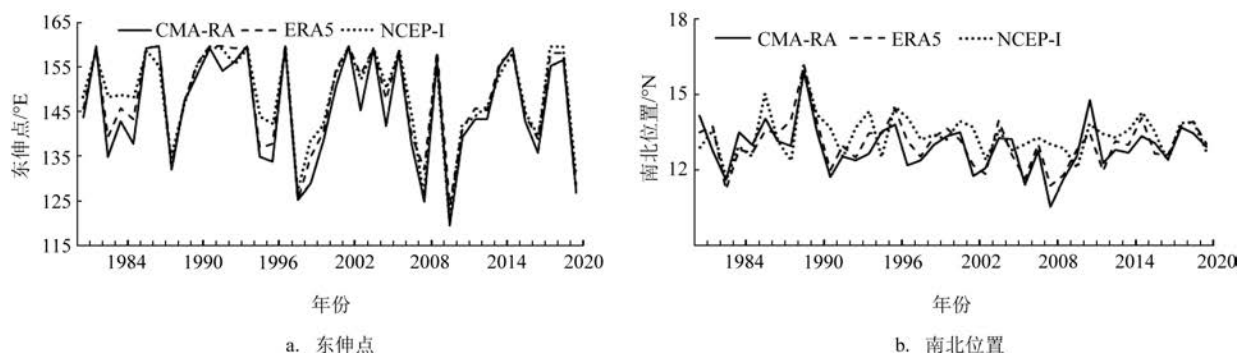


图4 不同资料7—10月南海—西北太平洋季风槽东伸点和南北位置逐年变化的对比

Fig.4 Comparisons of annual east ridge point and north-south position of the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough from July to October among different datasets

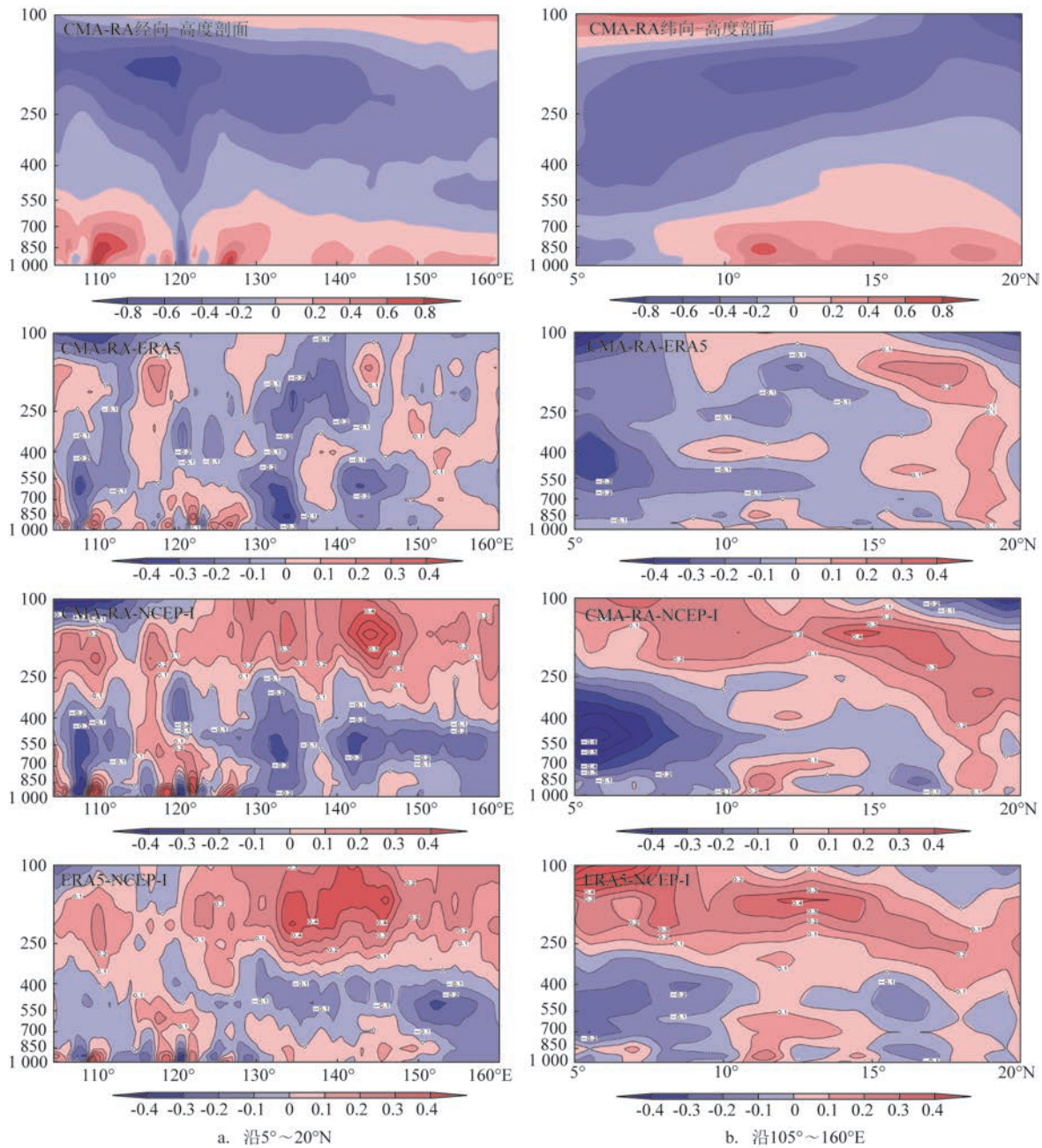


图5 常年7—10月CMA-RA相对涡度平均的垂直剖面及不同资料间垂直剖面的差值场(单位: $10^{-5}/s$)

Fig.5 The mean vertical cross sections of relative vorticity from July to October from CMA-RA and its deviations between different datasets (unit: $10^{-5}/s$)

层中、低层的正相对涡度区集中在 $8^{\circ} \sim 20^{\circ}N$, 正相对涡度 $\geq 0.4 \times 10^{-5}/s$ 的区域主要分布在 $10^{\circ} \sim 17^{\circ}N$ 。CMA-RA 表征出季风槽区对流层中、低层辐合、高层辐散的分布特征, ERA5、NCEP-I 也呈类似的垂直分布特征(图略)。

从不同资料之间相对涡度沿 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}N$ 平均的

经向-高度剖面差值场可看出(见图5a), 不同资料之间的差值绝对值以小于 $0.3 \times 10^{-5}/s$ 为主。对于对流层中、低层, CMA-RA 与 ERA5 的差值绝对值大于 $0.4 \times 10^{-5}/s$ 的区域主要分布在 $134^{\circ}E$ 附近, CMA-RA 与 NCEP-I 的差值绝对值大区集中在南海槽区和 $134^{\circ}E$ 附近; 对于高层, CMA-RA、ERA5 与 NCEP-I

差值绝对值大于 $0.4 \times 10^{-5}/s$ 的区域主要分布在 250 hPa 以上高层,其中心数值从大到小依次为 ERA5、CMA-RA、NCEP-I;另外,对流层低层的两个正相对涡度高值区总体呈 CMA-RA>ERA5>NCEP-I 的特征。从不同资料之间相对涡度沿 $105^{\circ} \sim 160^{\circ}E$ 平均的纬向-高度剖面差值场可看出(见图 5b),不同资料对对流层中、低层 $8^{\circ} \sim 20^{\circ}N$ 正相对涡度分布的刻画较接近,两两之间的差值绝对值以小于 $0.1 \times 10^{-5}/s$ 为主;总体上 CMA-RA 与 ERA5 的差值最小、CMA-RA 与 NCEP-I 的差值最大。

2.4 与 TC 活动的关系对比

研究表明,南海-西北太平洋季风槽与 TC 活动具有密切关系。下面将客观评估不同资料对两者关系的表征能力,对比分析季风槽不同特征指数与影响南海、海南岛 TC 活动的关系。

2.4.1 与 TC 频数的关系

通过分析不同区域季风槽强度与 7—10 月影响南海、海南岛 TC 活动频数的相关关系(见表 3,表中仅给出通过显著性检验的特征指数情况)发现,不同资料刻画的西北太平洋季风槽强度尤其是东段槽强度及季风槽东伸点与影响南海、海南岛的 TC 频数均呈显著的负相关关系。即季风槽偏弱时,其往往向西收缩至 $135^{\circ}E$ 附近的对流层低层上空,强对流活动主要分布在南海—西北太平洋西侧上空^[19],使得西北太平洋 TC 主要生成于西北太平洋偏西、偏北侧上空,南海、海南岛地区的 TC 活动较活跃。

从表 3 可看出,CMA-RA 西北太平洋季风槽及其东段的强度与影响南海、海南岛 TC 频数的时间

相关系数均大于 ERA5 和 NCEP-I,并通过显著性检验;ERA5 和 NCEP-I 季风槽强度与影响南海、海南岛 TC 频数的相关关系表现不一。CMA-RA 和 ERA5 季风槽东伸点与影响南海、海南岛 TC 频数的关系较密切,其时间相关系数极接近,并通过显著性检验,而 NCEP-I 季风槽东伸点与 TC 频数的相关关系均未通过显著性检验。可见,CMA-RA 所刻画的季风槽特征与 TC 频数的关系最密切。

2.4.2 与 TC 活动强度的关系

从季风槽各特征指数与影响南海、海南岛 TC 活动强度的相关关系可以看出(见表 4),南海 TC 活动强度主要与西北太平洋季风槽、西段槽的强度呈显著的正相关关系;影响海南岛防区的 TC 活动强度与整个南海-西北太平洋季风槽强度、东伸点也呈显著的正相关关系,其中与西北太平洋季风槽强度的关系最密切。当西北太平洋季风槽偏强时,槽区内对流层中、低层偏强的气旋式相对涡度有利于该区域内 TC 的发展,对应地影响南海、海南岛的 TC 活动强度往往偏强。研究也表明强季风槽型式下热带扰动的发展强度比弱季风槽更大^[20]。

不同资料总体上都刻画出与影响南海、海南岛 TC 活动强度密切相关的季风槽异常变化特征。ERA5 对季风槽强度与影响南海、海南岛 TC 活动强度正相关关系的刻画较优;对于不同的影响区域,CMA-RA 与 NCEP-I 对这种正相关关系的刻画不同,NCEP-I 季风槽强度与南海 TC 强度的关系较 CMA-RA 密切,而 CMA-RA 季风槽强度与影响海南岛 TC 强度的关系较 NCEP-I 密切;ERA5 与 CMA-RA 对季风槽东伸点与 TC 活动强度关系的刻画能

表 3 不同资料 7—10 月南海-西北太平洋季风槽特征指数与影响南海和海南岛 TC 频数关系的比较

Tab.3 Comparisons of the characteristic indices of the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough and TC frequency affecting the South China Sea, Hainan Island from July to October among different datasets

特征指数	南海			海南岛	
	西北太平洋季风槽强度	西北太平洋季风槽东段强度	南海-西北太平洋季风槽东伸点	西北太平洋季风槽东段强度	南海-西北太平洋季风槽东伸点
CMA-RA	-0.31**	-0.38**	-0.37**	-0.33**	-0.29*
ERA5	-0.28*	-0.34**	-0.36**	-0.31**	-0.29*
NCEP-I	-0.30*	-0.30*	-0.25	-0.33**	-0.23

注:*为通过 0.1 的显著性水平检验,**为通过 0.05 的显著性水平检验。

表 4 不同资料 7—10 月南海—西北太平洋季风槽特征指数与影响南海和海南岛 TC 活动强度关系的比较

Tab.4 Comparisons of the characteristic indices of the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough and TC activity intensity affecting the South China Sea, Hainan Island from July to October among different datasets

特征指数	南海		海南岛				
	西北太平洋 季风槽强度	西北太平洋 西段槽强度	南海—西北太平洋 季风槽强度	西北太平洋季 风槽强度	西北太平洋西 段槽强度	西北太平洋东 段槽强度	南海—西北太平 洋季风槽东伸点
CMA-RA	0.28*	0.29*	0.26*	0.33**	0.31**	0.29*	0.27*
ERA5	0.30*	0.32**	0.33*	0.37**	0.33**	0.33**	0.27*
NCEP-I	0.28*	0.32**	0.27*	0.32**	0.28*	0.28*	0.20

注：*为通过 0.1 的显著性水平检验，**为通过 0.05 的显著性水平检验。

力明显高于 NCEP-I。

3 结论

本文利用 1981—2020 年 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集、CMA-RA、ERA5 及 NCEP-I 逐月大气再分析资料,对比分析不同资料对南海—西北太平洋季风槽及其与南海 TC 活动关系的表现能力,探讨 CMA-RA 的应用效果。结论如下:

①不同资料都揭示了相似的南海—西北太平洋季风槽空间分布特征,南海—西北太平洋上空存在带状气旋式涡旋场,南海和西北太平洋西段涡旋特征明显,东段分布均匀。CMA-RA 和 ERA5 对低层涡度场的描述差异较小,空间相关系数为 0.86, RMSE 为 $0.38 \times 10^{-5}/s$,它们的低层正涡度均较 NCEP-I 偏大。

②不同资料都表征出相似的季风槽年际变化特征。两两之间季风槽强度的时间相关系数几乎都超过 0.92,强度呈 CMA-RA>ERA5>NCEP-I 特征,对南海季风槽强度的刻画差异最大;对东伸点演变特征的刻画具有较高一致性,两两之间东伸点的时间相关系数大于 0.95, CMA-RA 东伸点较 ERA5 和 NCEP-I 均偏西;对南北位置的刻画一致性较差, CMA-RA 与 ERA5 的差异较小,时间相关系数达 0.86。不同资料之间反映出的南海季风槽强度、东伸点的差异呈减小的年代际变化特征。

③不同资料都刻画出季风槽区对流层中、低层强辐合、高层强辐散的垂直结构。两两之间相对涡度沿 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}N$ 平均的经向—高度剖面的差值绝对值

以小于 $0.3 \times 10^{-5}/s$ 为主,低层两个正相对涡度高值区数值呈 CMA-RA>ERA5>NCEP-I 的特征;相对涡度沿 $105^{\circ} \sim 160^{\circ}E$ 平均的纬向—高度剖面差异以 CMA-RA 与 ERA5 最小、CMA-RA 与 NCEP-I 最大。

④不同资料基本刻画出不同区域季风槽强度、东伸点与影响南海、海南岛 TC 活动的关系。CMA-RA 对季风槽与 TC 频数关系的刻画最密切, ERA5 次之; ERA5 对季风槽强度与 TC 活动强度关系的刻画最优, ERA5 与 CMA-RA 对季风槽东伸点与 TC 活动强度关系的刻画明显优于 NCEP-I。

总体上, CMA-RA 较好地表征出季风槽的特征及其与南海 TC 活动的关系,具有与 ERA5 和 NCEP-I 相当的表现能力,并且与 ERA5 一致性高,可为相关工作提供可替换的、高质量的大气再分析数据集。下一步有必要对不同资料之间季风槽差异的年代际变化特征及其可能原因进行全面、深入的分析。

参考文献:

- [1] GALL J S, FRANK W M. The role of equatorial Rossby waves in tropical cyclogenesis. Part II: Idealized simulations in a monsoon trough environment[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4): 1383-1398.
 - [2] GUO B Y, GE X Y. Monsoon trough influences on multiple tropical cyclones events in the western North Pacific[J]. Atmospheric Science Letters, 2018, 19(9): e851.
 - [3] 钟剑, 周庆, 顾沈旦, 等. 西北太平洋热带气旋生成在不同最佳路径集资料中的差异特征分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(3): 37-46.
- ZHONG J, ZHOU Q, GU S D, et al. Analysis of the different characteristics of tropical cyclogenesis among different best track

- data in the northwest Pacific[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(3): 37-46.
- [4] MOLINARI J, VOLLARO D. A subtropical cyclonic gyre associated with interactions of the MJO and the midlatitude jet[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 343-357.
- [5] FENG T, CHEN G H, HUANG R H, et al. Large-scale circulation patterns favourable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversions[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(1): 216-227.
- [6] 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 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*, 2013, 37(2): 364-382.
- FENG T, HUANG R H, CHEN G H, et al. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 364-382.
- [7] 周伟灿, 张小雨, 赵海坤, 等. 西北太平洋热带气旋频数异常与五类主要大尺度环流型的关系[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(1): 30-39.
- ZHOU W C, ZHANG X Y, ZHAO H K, et al. Relationship between the anomalous frequency of tropical cyclone genesis over the western North Pacific and five major large-scale circulation patterns[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(1): 30-39.
- [8] 邓小花, 周群, 张润宇, 等. RITC活跃年份的气候特征及个例研究[J]. *海洋预报*, 2019, 36(2): 45-56.
- DENG X H, ZHOU Q, ZHANG R Y, et al. Climatic characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones and a case study[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(2): 45-56.
- [9] 周群, 黄焕卿, 张润宇, 等. 2019年11月西北太平洋热带气旋生成频数异常偏多的成因分析[J]. *海洋预报*, 2021, 38(1): 18-25.
- ZHOU Q, HUANG H Q, ZHANG R Y, et al. Study of the causation of anomaly higher tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific in November 2019[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(1): 18-25.
- [10] HUANG Q J, GUO B Y, GE X Y. Simulations on multiple tropical cyclones event associated with monsoon trough over the western North Pacific[J]. *Meteorological Applications*, 2022, 29(6): e2104.
- [11] SCHRECK C J, MOLINARI J, AIYYER A. A global view of equatorial waves and tropical cyclogenesis[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(3): 774-788.
- [12] WU L, WEN Z P, WU R G. Influence of the monsoon trough on westward-propagating tropical waves over the Western North Pacific. Part I: Observations[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(18): 7108-7127.
- [13] 曹西, 陈光华, 黄荣辉, 等. 夏季西北太平洋热带辐合带的强度变化特征及其对热带气旋的影响[J]. *热带气象学报*, 2013, 29(2): 198-206.
- CAO X, CHEN G H, HUANG R H, et al. The intensity variation of the summer intertropical convergence zone in Western North Pacific and its impact on tropical cyclones[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013, 29(2): 198-206.
- [14] WU L, WEN Z P, WU R G. Influence of the monsoon trough on westward-propagating tropical waves over the Western North Pacific. Part II: Energetics and numerical experiments[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(23): 9332-9349.
- [15] HUO L W, GUO P W. Impact of convection over the South China Sea on tropical cyclone motion over the western North Pacific during summer monsoon[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 23(1): 58-67.
- [16] FENG X F, WU L G. Roles of interdecadal variability of the western North Pacific monsoon trough in shifting tropical cyclone formation[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58(1-2): 87-95.
- [17] 高建芸, 吕心艳, 张秀芝, 等. 南海-西北太平洋季风槽中热带气旋群发的研究 II. 影响机制研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33(3): 28-37.
- GAO J Y, LV X Y, ZHANG X Z, et al. Research on the cluster of tropical cyclogenesis in the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough II. Mechanism of the influence[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(3): 28-37.
- [18] 曾瑾瑜, 林金淦, 余洋, 等. 2109号台风“卢碧”路径和强度特征及预报偏差分析[J]. *海洋预报*, 2022, 39(3): 10-24.
- ZENG J Y, LIN J G, YU Y, et al. An analysis on the track and intensity characteristics and forecast deviation of typhoon 2109 "Lupit" [J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(3): 10-24.
- [19] 冯涛, 黄荣辉, 杨修群, 等. 2004年与2006年7-9月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 157-175.
- FENG T, HUANG R H, YANG X Q, et al. Differences between the large-scale circulations and synoptic-scale waves in July - September 2004 and those in 2006 and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(1): 157-175.
- [20] CAO X, WU R G. Simulations of development of tropical disturbances associated with the monsoon trough over the western North Pacific[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2018, 19(2): e801.
- [21] 王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 等. 我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 158-163.
- WANG M Y, YAO S, JIANG L P, et al. Collection and pre-processing of satellite remote-sensing data in CRA-40 (CMA's Global Atmospheric Reanalysis) [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 158-163.
- [22] 尹金方, 梁旭东, 陈锋, 等. 东亚区域大气再分析技术研究及资料集建设[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 79-84.
- YIN J F, LIANG X D, CHEN F, et al. Development of atmospheric data assimilation techniques and regional reanalysis datasets in the East Asia[J]. *Advances in Meteorological Science*

- and Technology, 2018, 8(1): 79-84.
- [23] 周自江, 曹丽娟, 廖捷, 等. 水文气象信息概述: 观测、融合与再分析[J]. 气象, 2022, 48(3): 272-283.
- ZHOU Z J, CAO L J, LIAO J, et al. Overview of hydrometeorological information: Observation, data fusion and reanalysis[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(3): 272-283.
- [24] 王彩霞, 黄安宁, 郑鹏, 等. 中国第一代全球陆面再分析(CRA40/Land)气温和降水产品在中国大陆的适用性评估[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1325-1334.
- WANG C X, HUANG A N, ZHENG P, et al. Applicability evaluation of China's first generation of global land surface reanalysis (CRA40 / Land) air temperature and precipitation products in China mainland[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1325-1334.
- [25] LI C X, ZHAO T B, SHI C X, et al. Evaluation of daily precipitation product in China from the CMA global atmospheric interim reanalysis[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(1): 117-136.
- [26] YANG J X, HUANG M T, ZHAI P M. Performance of the CRA-40/Land, CMFD, and ERA-Interim datasets in reflecting changes in surface air temperature over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(4): 663-672.
- [27] ZHANG J P, ZHAO T B, LI Z, et al. Evaluation of surface relative humidity in China from the CRA-40 and current reanalyses[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(11): 1958-1976.
- [28] 刘维成, 徐丽丽, 朱姜韬, 等. 再分析资料和陆面数据同化资料土壤湿度产品在中国北方地区的适用性评估[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 616-629.
- LIU W C, XU L L, ZHU J T, et al. Evaluation of reanalysis and LDAS soil moisture products over northern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(4): 616-629.
- [29] 张德杰, 师春香, 张涛, 等. 多种资料的总云量产品在中国区域的对比分析[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 803-813.
- ZHANG D J, SHI C X, ZHANG T, et al. Comparative analysis of the total cloud cover products of various data in China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3): 803-813.
- [30] YU X J, ZHANG L X, ZHOU T J, et al. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: comparative assessment[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 46-63.
- [31] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [32] 邢彩盈, 吴慧, 胡德强, 等. CFSv2模式产品在汛期海南热带气旋频数预测模型中的应用[J]. 气象科学, 2017, 37(5): 666-672.
- XING C Y, WU H, HU D Q, et al. Application of CFSv2 products in tropical cyclone frequency prediction model in Hainan during flood season[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(5): 666-672.

Monsoon trough of the South China Sea-Western North Pacific and its relationship with tropical cyclone activity: a comparison of different reanalysis datasets

XING Caiying^{1,2}, WU Sheng'an^{1,2}, ZHU Jingjing^{1,2}, HU Deqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 2. Hainan Province Climate Center, Haikou 570203, China)

Abstract: Based on the 1981—2020 data of the tropical cyclone best track data of China Meteorological Administration (CMA), CMA atmospheric reanalysis data (CMA-RA), the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis dataset (ERA5) and the first generation NCEP/NCAR atmospheric monthly reanalysis dataset (NCEP-I), the performance and applicability of CMA-RA in describing the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough and its relationship with tropical cyclone activity in the South China Sea are analyzed, with respect to the ERA5 and NCEP-I data. The results show that : Different datasets consistently represent the characteristics of obvious low level cyclonic vortex feature in the South China Sea and western Northwest Pacific, and uniform distribution in the eastern Northwest Pacific, CMA-RA and ERA5 have a little difference in describing the low-level vorticity. Different datasets have a high correlation in monsoon trough intensity, the overall intensity pattern is CMA-RA>ERA5>NCEP-I, and the intensity of the South China Sea monsoon trough

varies greatly; The depictions of the eastern extension point have a high consistency, where that of CMA-RA is further west than those of ERA5 and NCEP-I; The descriptions of the north-south position have a lower consistency, the difference of CMA-RA and ERA5 is relatively small. All the datasets depict the vertical structure of strong convergence in the middle and lower layers and strong divergence in the upper layers of the monsoon trough region, and the difference between CMA-RA and ERA5 is the smallest, CMA-RA and NCEP-I is the largest in the vertical cross section of vorticity averaged over $105^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$. The monsoon trough of CMA-RA is most closely related to tropical cyclone frequency, followed by ERA5, the monsoon trough intensity of ERA5 is most closely related to tropical cyclone activity intensity, and the monsoon trough eastern extension point of ERA5 and CMA-RA have closer relationship with tropical cyclone activity intensity than that of NCEP-I. As a whole, CMA-RA has comparable performance with ERA5 and NCEP-I in characterizing the monsoon trough and its relationship with tropical cyclone activity in the South China Sea, and it's highly consistent with ERA5.

Key words: the South China Sea-Western North Pacific monsoon trough; reanalysis datasets; CMA-RA; tropical cyclone activity; comparative analysis