

# 2020年JRA55、ERA5大气驱动场和潮汐对黑潮热输送能力影响的数值模拟研究

尹路婷<sup>1</sup>, 孙晓磊<sup>2</sup>, 张宇<sup>3\*</sup>, 于杰<sup>1</sup>, 樊嘉璐<sup>4</sup>

(1. 长白山气象与气候变化吉林省重点实验室&中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062; 2. 天津海洋中心气象台, 天津 300074; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 4. 吉林省气象灾害防御技术中心, 吉林 长春 130062)

**摘要:** 利用妈祖·海流海洋数值模式(MaCOM)构建了一个水平分辨率为 $1/48^\circ$ 的西太平洋数值模拟系统, 使用该系统开展了3个数值模拟敏感性试验, 分析了有无潮汐、更换大气驱动场对黑潮流系上7个关键断面热输送数值模拟能力的影响。分析结果表明潮汐对于黑潮热输送的影响力约是更换大气强迫场的两倍。台风对所经过的黑潮断面热输送能力有显著的影响, 但仅局限于中心附近海域和台风经过期间, 未发现类似近惯性振荡波在时空上的延续。在高纬和浅海区域, 体积输送的演变规律和热输送之间存在一定差异, 热输送的季节变化略平缓。MaCOM模拟的黑潮主流热输送年均值与季节变化趋势和再分析数据以及前人的研究基本一致。

**关键词:** 黑潮; 台风; 数值模拟; 热输送; 妈祖·海流

**中图分类号:** P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0044-09

## 0 引言

黑潮是位于北太平洋的一支西边界流, 两侧常年存在着逆流区和许多涡旋。黑潮具有高温、高盐、流幅窄、流速快、流量大等特征<sup>[1]</sup>, 不易准确开展数值模拟。黑潮是影响中国海域环流、热盐输送和多尺度过程相互作用的关键因子, 其季节和年际变化也对我国的气候有着巨大影响。国内外针对黑潮的数值模拟已开展了许多相关研究<sup>[2]</sup>。

海温是驱动大气环流的重要热量来源, 而黑潮流系作为中国东部相关海域海温的重要影响因子, 其热输送能力对中国东部天气和气候变化乃至大气和海洋环流都有重要影响<sup>[3-10]</sup>。

按照研究方法可将黑潮热输送能力研究分为两类: 一类是利用观测数据或再分析数据开展客观统计分析, 另一类是利用海洋模式或海气耦合模式

开展数值模拟敏感性研究。后一种方法可以充分考虑海气间的相互作用, 是黑潮数值模拟研究领域的主流方向, 但是海气间的相互反馈作用和分量模式本身存在的误差使得界定物理海洋现象的影响因子较为困难。此外, 很多海气耦合类研究为了提升计算效率, 未考虑潮汐或仅考虑了潮汐的混合效应, 这有可能对西边界流的准确模拟产生不利影响<sup>[11]</sup>。

为此, 本研究设计了一系列高分辨率敏感性数值模拟实验, 通过更换不同的大气驱动场, 模拟海-气耦合系统中大气分量模式的不确定性对黑潮热输送能力产生的影响。此外, 还通过开关潮汐来分析潮汐对黑潮热输送能力的影响。所有敏感性实验结果均参照再分析数据以及控制实验开展对比分析, 尝试定量给出黑潮热输送对大气驱动场和潮汐的敏感程度, 为海气耦合研究、海洋延伸期预报

收稿日期: 2023-04-17。

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20170101087JC); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202111)。

作者简介: 尹路婷(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事天气预报技术及数值预报释用研究。E-mail: 174757546@qq.com

\*通信作者: 张宇(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大气海洋数值模式技术方面研究。E-mail: zhangy@nmefc.cn

提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 模式简介

海洋数值模式妈祖·海流(Mass Conservation Ocean Model, MaCOM)是由国家海洋环境预报中心自主研发的新一代海洋数值模式,以压力坐标下的质量守恒和支持高效节能的图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)计算为主要特色。以MaCOM为核心的一套 $1/12^\circ$ 全球海洋动力环境数值预报系统已经在国家海洋环境预报中心建立并转入业务化正式运行。模式采用正斜压显式分离和向量不变形式计算动力过程,1.0版本可支持经纬、三极坐标、球面立方体等多种正交网格,垂向湍流参数化方案为支持浪致混合和Langmuir环流效应的二阶 $k-\xi$ 方案,水平温盐平流采用三阶带通量修正的非线性方案。此外,模式亦具备区域海洋数值模拟能力和潮汐数值模拟能力,非常适合作为本文的数值试验模式。本研究的所有数值模拟试验均在国家海洋环境预报中心GPU计算服务器上完成,充分发挥了模式高效节能的特性。模式详细介绍参见网站<http://macom.oceanguide.org.cn/>。

### 1.2 数据介绍

数值模拟试验所需初始场和侧边界场均插值自法国麦卡托海洋中心发布的 $1/12^\circ$ 海洋再分析数据(Global Ocean Reanalyses, GLORYS)<sup>[12]</sup>。选用变量为海洋温度、盐度、海表面高度、经向和纬向流场。

大气驱动场分别取自日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)发布的JRA55-do(the Japanese 55-year Reanalysis for use in driving ocean) $1/3^\circ$ 大气再分析数据<sup>[13]</sup>和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的ERA5(ECMWF Reanalysis v5, ERA5) $1/4^\circ$ 大气再分析数据<sup>[14]</sup>。选用变量为海表面2 m温度场、2 m绝对湿度(JRA55-do)、2 m露点(ERA5)、10 m风场、海表面气压、海面向下短波辐射、向下长波辐射、海表面降水、降雪,主要河流径流输入。

侧边界潮汐调和常数使用俄勒冈州立大学

(OSU)的潮汐预报软件(OSU Tidal Prediction Software, OTPS)从TPX09-atlas<sup>[15]</sup>全球 $1/30^\circ$ 正压潮融合数据集中提取,共使用8个主要分潮:M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1。由于模拟区域较大,在含潮汐试验中,模式本身也开启相同分潮的天体引潮势。

### 1.3 试验方案

数值模拟试验区域设置见图1。为尽可能地减少边界数据对黑潮模拟的直接影响,本系列试验选取的模拟范围较大,除包含中国渤海、黄海、东海、南海外,还包括了日本海、日本周边海域、菲律宾周边海域和印度尼西亚贯穿流相关海域。模拟区域从赤道流衔接至黑潮延伸体,完整覆盖了整个黑潮流系。模拟采用 $1/48^\circ$ 经纬网格,为保持网格正形赤道处经纬方向均为 $1/48^\circ$ ,向南北边界处经向网格分辨率高于 $1/48^\circ$ 以尽可能保持物理空间与纬向网格分辨率一致。

数值试验主要物理方案设置包括:二阶垂向湍流、三阶非线性平流、侧向网格距和流切变依赖的湍流混合参数化。MaCOM默认为压力垂直坐标下的质量守恒模态,也支持高度垂直坐标系下的体积守恒模态。考虑到初始场和侧边界场采用的再分析数据是以NEMO(Nucleus for European Modeling of the Ocean)模式为基础制作的,而NEMO模式为高度坐标下的体积守恒模式,故本文试验均采用

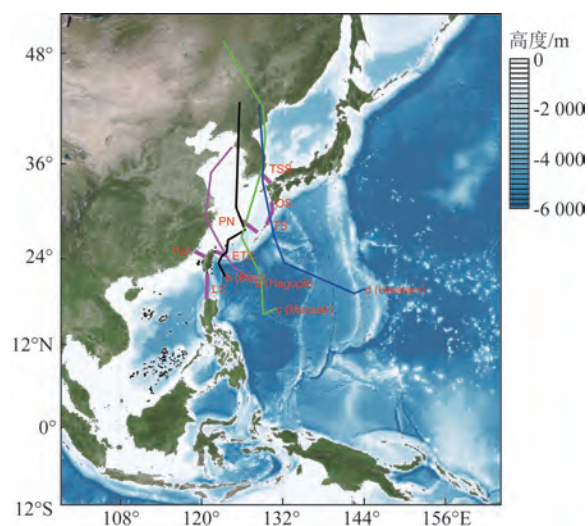


图1 数值模拟试验海域范围

Fig.1 The numerical simulation area



MaCOM的体积守恒模态,以尽可能地保持侧边界场和模式本身的相容。

厘清海气耦合模式中单一分量模式不确定性对其他分量模式的影响是了解海气相互作用机理、提升模式模拟性能的重要手段,如利用随机扰动大气强迫来观察海洋分量模式的响应过程。但随机扰动难以代表大气模式的真实动力机制,如随机强化风场后,实际气压场、辐射场、降水场可能都会随之改变,但随机扰动很难再现这种协同变化。不同的大气再分析场均由完整的大气模式实现,都能较好地反映模式的真实物理过程,是一种自身各要素都协调的数据。事实上不同的大气强迫场由于分辨率、数理方法存在显著差异,足以作为扰动来源。如图2所示,ERA5的时间分辨率为1 h,空

间分辨率为 $1/4^\circ$ ,JRA55-do的时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $1/3^\circ$ ,在描述强台风天气系统时,ERA5相对于JRA55-do的中心气压更低、风场更强、降水更多,完全可以作为敏感性试验的扰动方式之一。

本试验分别采用ERA5和JRA55-do作为大气强迫场,考察在两个不同的“协调的”物理体系下大气模式间的差异对海洋模式数值模拟的影响。此外以ERA5强迫试验设置为基准,去除模式内的潮汐过程另设数值试验ERA5 NOTIDE,以考察潮汐对MaCOM黑潮数值模拟能力的影响。以上3个试验均从2015年开始积分,经过5 a的spinup以尽可能消除初始调整期对模拟结果的干扰,并对第六年(2020年)的数值积分结果展开分析讨论。

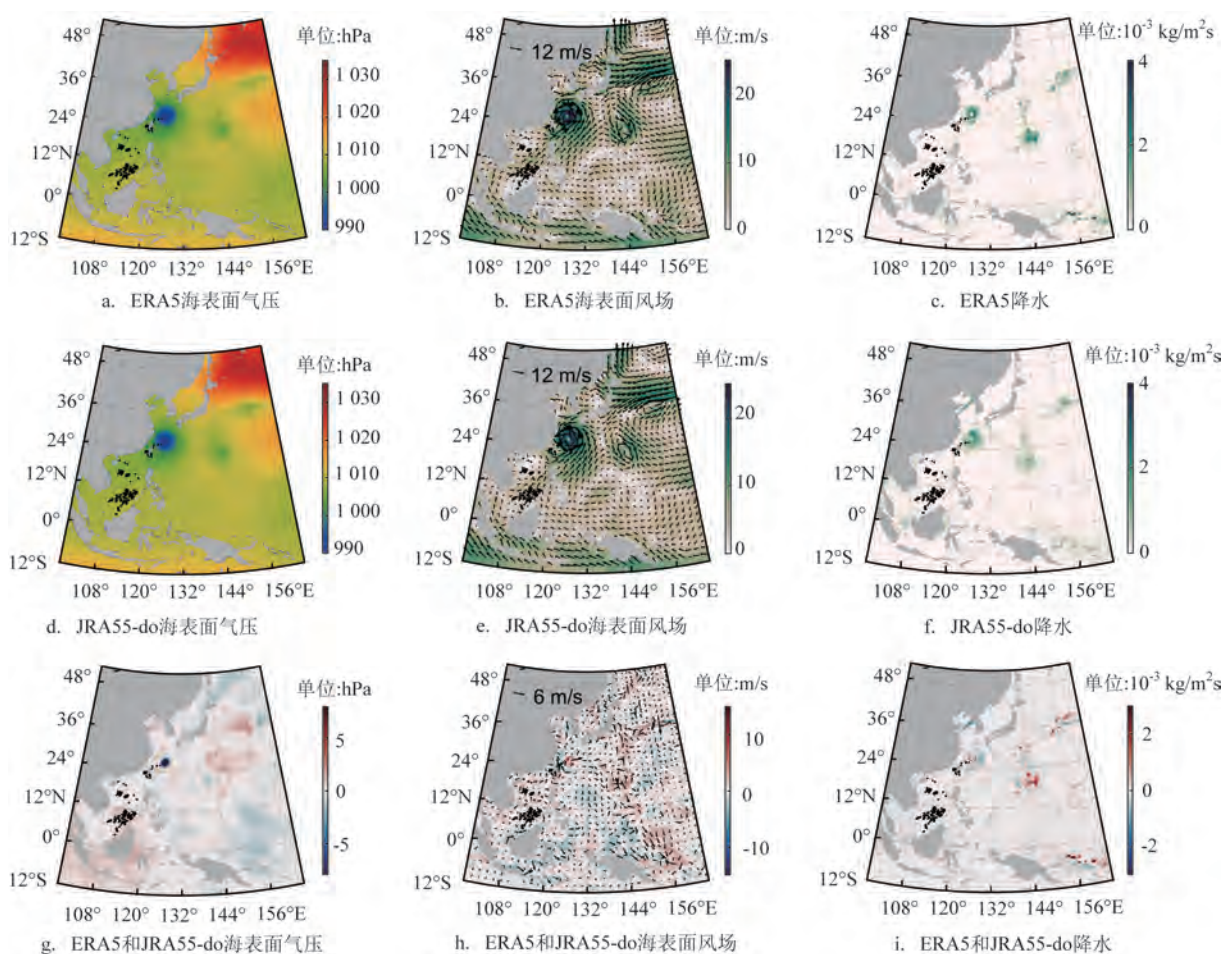


图2 2020年9月1日台风“美莎克”和台风“海神”期间ERA5和JRA55-do大气强迫场主要变量差异对比

Fig.2 Comparison of the main atmospheric forcing variables of Typhoon "Maysak" and Typhoon "Haishen" under ERA5 and JRA55-do on September 1, 2020

## 2 试验结果及分析

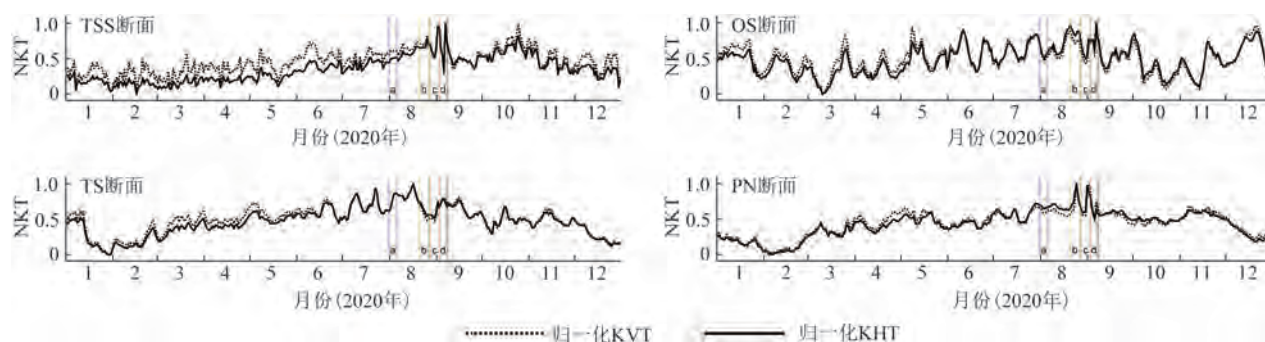
黑潮断面位置的确定是分析黑潮热输送能力的先决条件,本文沿用陈毓敏等<sup>[16]</sup>的研究方案,选取与其相同的6个断面(LS、ETC、TW、TSS、OS、TS),额外增加其没有的PN断面,分析断面上体积输送量和热输送量,断面位置分布见图1。

按位置可将这7个断面分为:①黑潮北部断面群(TSS、OS、TS、PN),分别代表黑潮对日本海的影响(TSS)、对日本近岸的影响和弯曲程度(OS、TS)、黑潮典型流量(PN);②黑潮南部断面群(TW、ETC、LS),分别代表黑潮对台湾海峡的影响(TW)、黑潮起始区典型流量(ETC)、对南海的影响(LS)。

黑潮热输送(Kuroshio Heat Transport, KHT)和黑潮体积输送(Kuroshio Volume Transport, KVT)之间存在较强的相关,以往的研究往往使用平均KVT

和平均温度简单计算出KHT,这在深海黑潮主流区一般是合理的。ZHANG等<sup>[17]</sup>认为PN断面上KVT和KHT的相关度达99%,SEO等<sup>[18]</sup>的研究结果也表明浅海区域如TSS、OS、TW断面附近依然存在很高的相关度。本文使用GLORYS数据,采用更精确的TEOS-10 (Thermodynamic Equation of SeaWater 2010)软件包计算海水热含量等相关参数,并结合体积输送更精确地计算KHT,归一化黑潮输送(Normalized Kuroshio Transport, NKT)的计算结果见图3和图4。图中a、b、c、d标记的竖线分别为台风“Hagupit”、“Bayi”、“Maysak”、“Haishen”过程的时间区间,这4个台风的路径都穿过了黑潮(台风具体路径见图1),对黑潮流系存在不同程度的影响。

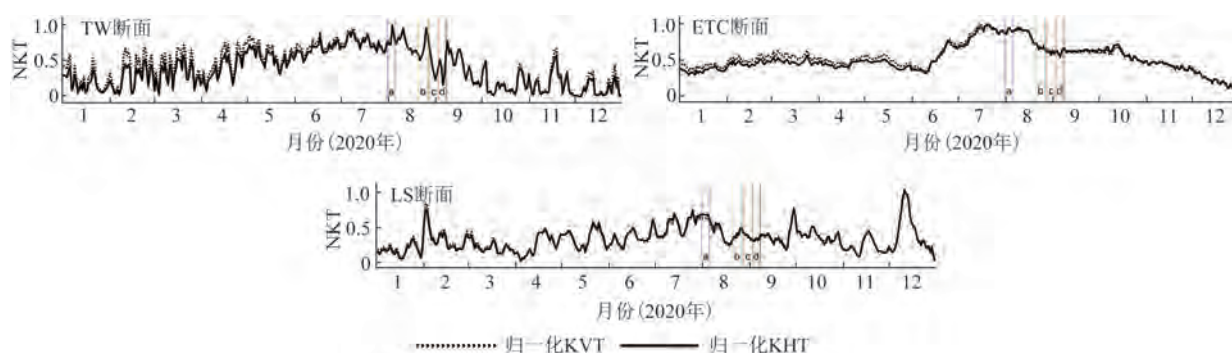
图3和图4为归一化的KVT和KHT对比结果,经过归一化可消除单位和数量级的干扰,更直观地对比二者之间的差异和演变关系。首先可以明显



注:a、b、c、d标记的竖线分别为台风“Hagupit”、“Bayi”、“Maysak”、“Haishen”过程的时间区间

图3 黑潮北部4个断面断面归一化流量(KVT)和热量(KHT)输送差异

Fig.3 Normalized flow (KVT) and heat (KHT) transport differences of four sections in the northern Kuroshio Current



注:a、b、c、d标记的竖线分别为台风“Hagupit”、“Bayi”、“Maysak”、“Haishen”过程的时间区间

图4 黑潮南部3个断面归一化流量(KVT)和热量(KHT)输送差异

Fig.4 Normalized flow (KVT) and heat (KHT) transport differences of three sections in the southern Kuroshio Current

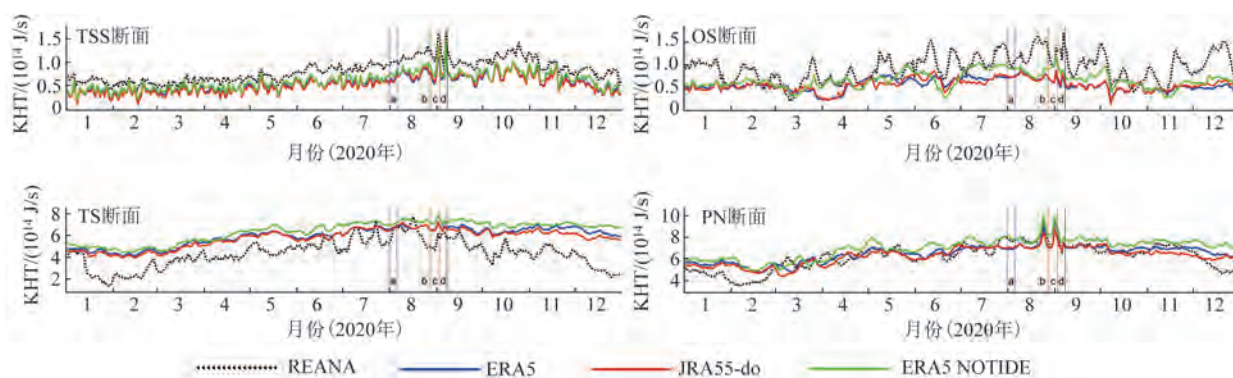


看出归一化的KVT和KHT之间存在相同的增减协同变化,因此不难得出二者具有较强的相关关系。但是,二者之间仍存在振幅上的差异,总体来说KHT的变化比KVT更缓和,特别是在TSS断面上更为明显,仅当直接经过该断面的台风“Maysak”(c)、“Haishen”(d)影响期间KHT和KVT的振幅才完全一致。

表1定量给出了归一化KHT相对于KVT的年均方根差异和季节均方根差异(流热差异)。年均方根差异表现出两个特征:①浅海断面(TSS、OS、TW)高于深海断面(TS、PN、ETC、LS);②高纬断面大于低纬断面(TSS和OS大于TW,TS和PN大于ETC和LS)。结合KHT变化更缓和的特征,说明在浅海和中高纬等海温季节性变化明显的区域,海温

对体积输运存在一定程度的补偿作用。不同断面归一化KHT和KVT最大值和最小值差异出现的季节各有不同,例如OS断面秋季的差异明显低于其他季节,同为高纬浅海的TSS断面则夏季差异最大,其他季节差异相当。TW、LS和ETC断面都是夏秋季节差异最小,而PN则是夏秋季节差异最大。较强的季节差异的不确定性说明季节变化还需要通过更长时间序列的研究以厘清基本规律。

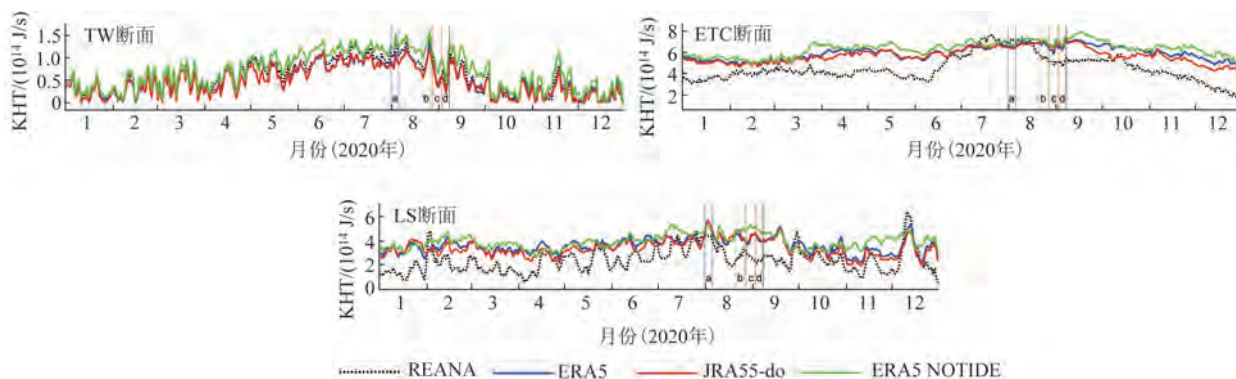
图5和图6为7个断面再分析数据(REANA)、控制试验(ERA5)、敏感性试验(JRA55-do和ERA5 NOTIDE)的日均KHT时间序列。由图可知,相对于再分析数据,LS、TS、OS断面数值试验结果的日均变化更小,而对应的再分析数据则存在周期约为15~30 d的振荡,其他断面的日均值变率则和再分



注:a、b、c、d标记的竖线分别为台风“Hagupit”、“Bayi”、“Maysak”、“Haishen”过程的时间区间

图5 黑潮北部4个断面热量输送的敏感性试验和再分析数据

Fig.5 Sensitivity experiment and reanalysis data for heat (KHT) transport in the four sections of the northern Kuroshio Current



注:a、b、c、d标记的竖线分别为台风“Hagupit”、“Bayi”、“Maysak”、“Haishen”过程的时间区间

图6 黑潮南部3个断面热量输送的敏感性试验和再分析数据

Fig.6 Sensitivity experiment and reanalysis data of heat transport (KHT) at three sections in the southern part of the Kuroshio Current

析数据基本一致。目前大部分针对黑潮运输的文献记录都聚焦于月尺度以上的变化,尚未见到此类半月尺度周期变率的相关研究分析。结合表1可知,TW和PN断面上数值实验的KHT结果和再分析数据基本一致,TSS和OS断面上再分析数据的结果比数值实验高约40%,TS、ETC和LS断面上数值实验的结果则比再分析数据高约20%~30%。考虑到PN断面上KHT的结果大致为TSS、OS和TS断面之和,说明模式在九州岛南部黑潮转向区域流向更偏南。ETC和PN断面KHT再分析数据差异更大,说明在黑潮中段有更强、更多的西向中尺度涡旋融入黑潮以补充其热量和流量。大部分断面上数值实验和再分析数据结果都表现出了明显的季节变率,一般夏秋季节的热输送高于冬春季节,这

一点在北部断面的KHT结果上更为显著,这与海洋热容量大、增暖期滞后的基本特征是吻合的。

本文用敏感性试验相对于控制试验的均方根差异表征KHT对大气强迫和潮汐的敏感程度。从表1中数据可得出,几乎所有断面的KHT都表现出对潮汐更加敏感,特别是在位于浅海的TSS、OS和TW断面上,KHT对潮汐的敏感度约为大气强迫的2~3倍。深海断面则表现不一,PN和TS断面上KHT对潮汐的敏感度仍显著高于大气强迫;ETC断面上KHT则对大气强迫更加敏感;受内潮的影响,LS断面的KHT也对潮汐更加敏感。在所有断面上,潮汐的缺失都会带来更强的KHT,说明潮汐的存在对黑潮有一定的削弱和耗散作用。由表1可估算出,OS和TW断面上潮汐对KHT的影响度超过

表1 黑潮热输送试验统计表

Tab.1 Statistical table of Kuroshio Current heat transport experiments

断面	时间	流热差异	平均KHT/( $10^{14}$ J/s)				敏感度/( $10^{14}$ J/s)	
			REANA	ERA5	JRA55-do	ERA5 NOTIDE	JRA55-do	ERA5 NOTIDE
TSS	年	<b>0.068</b>	<b>0.819</b>	<b>0.543</b>	<b>0.527</b>	<b>0.600</b>	<b>0.027</b>	<b>0.040</b>
	春	0.047	0.626	0.432	0.402	0.480	0.012	0.028
	夏	0.060	0.956	0.621	0.611	0.688	0.029	0.048
	秋	0.047	1.047	0.720	0.718	0.781	0.030	0.042
	冬	0.055	0.650	0.401	0.378	0.452	0.022	0.037
OS	年	<b>0.066</b>	<b>0.912</b>	<b>0.538</b>	<b>0.542</b>	<b>0.646</b>	<b>0.064</b>	<b>0.139</b>
	春	0.043	0.717	0.496	0.482	0.591	0.079	0.177
	夏	0.042	1.140	0.679	0.670	0.793	0.078	0.164
	秋	0.023	0.877	0.478	0.492	0.606	0.027	0.126
	冬	0.043	0.914	0.498	0.522	0.595	0.050	0.057
TS	年	<b>0.040</b>	<b>4.403</b>	<b>5.953</b>	<b>5.773</b>	<b>6.398</b>	<b>0.167</b>	<b>0.219</b>
	春	0.029	4.135	5.602	5.455	5.896	0.095	0.197
	夏	0.030	5.686	6.433	6.411	7.013	0.095	0.159
	秋	0.021	4.861	6.624	6.368	7.127	0.145	0.203
	冬	0.028	2.920	5.154	4.854	5.555	0.164	0.201
PN	年	<b>0.043</b>	<b>6.255</b>	<b>6.510</b>	<b>6.319</b>	<b>7.025</b>	<b>0.254</b>	<b>0.320</b>
	春	0.031	6.130	6.145	5.919	6.485	0.274	0.388
	夏	0.042	7.105	6.993	6.940	7.668	0.208	0.302
	秋	0.042	7.047	7.083	6.864	7.684	0.250	0.147
	冬	0.017	4.729	5.819	5.551	6.261	0.227	0.282

续表 1

断面	时间	流热差异	平均 KHT/(10 <sup>14</sup> J/s)				敏感度/(10 <sup>14</sup> J/s)	
			REANA	ERA5	JRA55-do	ERA5 NOTIDE	JRA55-do	ERA5 NOTIDE
TW	年	<b>0.049</b>	<b>0.557</b>	<b>0.496</b>	<b>0.484</b>	<b>0.708</b>	<b>0.030</b>	<b>0.118</b>
	春	0.039	0.596	0.495	0.481	0.688	0.026	0.091
	夏	0.023	1.014	0.891	0.890	1.209	0.030	0.069
	秋	0.026	0.361	0.353	0.333	0.586	0.028	0.119
	冬	0.056	0.250	0.241	0.229	0.342	0.032	0.066
ETC	年	<b>0.033</b>	<b>4.573</b>	<b>5.966</b>	<b>5.748</b>	<b>6.382</b>	<b>0.296</b>	<b>0.247</b>
	春	0.017	4.181	5.851	5.667	6.329	0.203	0.314
	夏	0.017	5.911	6.362	6.388	6.781	0.130	0.128
	秋	0.017	4.778	6.425	6.009	6.830	0.362	0.278
	冬	0.027	3.410	5.221	4.923	5.583	0.240	0.218
LS	年	<b>0.023</b>	<b>2.415</b>	<b>3.612</b>	<b>3.407</b>	<b>3.959</b>	<b>0.252</b>	<b>0.492</b>
	春	0.020	2.048	3.420	3.145	3.563	0.194	0.381
	夏	0.014	3.071	4.121	4.016	4.499	0.243	0.453
	秋	0.011	2.335	3.465	3.181	3.871	0.206	0.576
	冬	0.018	2.203	3.438	3.283	3.901	0.304	0.485

25% (敏感度/平均 KHT×100%),LS 断面上潮汐对 KHT 的影响度超过 10%。值得注意的是,尽管在 TSS 断面上潮汐比大气强迫扰动影响更显著,但影响度仍只有约 8%。

仔细分析图 5 和图 6 可以发现,相较于浅海区断面(TSS、OS、TW),深海区断面(PN、TS、ETC、LS)对大气强迫扰动更敏感。如果说 KHT 对大气扰动敏感度不高有可能是因为 JRA55-do 和 ERA5 的差异不足导致的,那么在台风 a、b、c、d 期间两种强迫场之间的显著差异应当会带来相对于非台风期间更明显的 KHT 差异,但实际图中所有断面在台风期间 KHT 的变化和量级几乎完全一致。此外,尽管在台风作用下 KHT 存在短期剧烈振荡(如 PN 断面在台风 b、c 期间的剧烈振荡),但只要台风过程结束,KHT 变率几乎立刻恢复常态;且台风对 KHT 的影响似乎仅局限在较小的范围内,例如对 PN 断面影响较大的台风 b、c 对同时期上下游的 ETC 和 TS 断面几乎毫无影响。需要指出的是,在 OS、TS、ETC 和 LS 断面上,台风本身引起的 KHT 振荡幅度尚不及潮汐对 KHT 的削弱作用。同为浅海断面,

OS 断面对台风的敏感度远不如 TW 和 TSS 断面。TADA 等<sup>[19]</sup>利用区域海洋模型(Regional Ocean Modeling System,ROMS)开展数值模拟试验,分析了 2014 年台风“巴蓬”和“黄蜂”在过境期间对黑潮和四国岛周边海峡通道的影响,该研究结果除了表明台风在作用期间会对黑潮流量产生显著影响,在台风期外还存在持续近一周的近惯性振荡,这一点在本研究中并未出现。

### 3 结论

本文利用 MaCOM 模式模拟了 2020 年完整的黑潮热输送(KHT)变化。通过对 7 个断面上 KHT 再分析数据和 3 个数值试验数据的分析,探讨了 KHT 和 KVT 之间的关系,以及 KHT 对大气强迫变化和潮汐的敏感度,并从热输运的角度评估了 MaCOM 对黑潮的数值模拟能力。主要结论如下:

①MaCOM 对 KHT 具备较好的数值模拟再现能力,与再分析数据具有一致的量级和季节变化规律,其中 PN 断面和 TW 断面的 KHT 结果与再分析

数据几乎完全一致。

②KHT和KVT存在高度相关,但KHT变化比KVT更缓和,而且在高纬和浅海区域KHT与KVT存在不可忽视的差异。因此,在这些区域仅从KVT的角度评估KHT需要考虑其合理性。

③相对于大气强迫场的变化,KHT明显对潮汐更加敏感。无论在浅海还是深海,潮汐对KHT都存在显著影响,最强影响区域出现在TW断面,影响度超过25%。鉴于黑潮对高纬-低纬间热量交换的重要作用,本文认为无论是在全球还是区域范围,单独的海洋数值模拟和耦合数值研究都不应忽略潮汐过程。

④更换大气强迫对KHT的影响并不显著,即使在大气强迫场存在较大差异的台风期间亦是如此。由此可知,黑潮虽然是大洋西侧的局部现象,但却是整个大洋海盆海洋环流累加效应的结果,区域性的大气扰动并不能对其造成实质性影响,即使是强如台风的天气过程,也仅能在有限的时空范围内对黑潮产生影响。

## 参考文献:

- [1] 伍伯瑜. 黑潮流系——Ⅱ黑潮流系的水文特征[J]. 海洋通报, 1985, 4(6): 59-66.  
WU B Y. Kuroshio current system - II hydrological characteristics of the Kuroshio current system[J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(6): 59-66.
- [2] ANDO K, LIN X P, VILLANOY C, et al. Half-Century of scientific advancements since the cooperative study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK) programme - Need for a new Kuroshio Research[J]. Progress in Oceanography, 2021, 193: 102513.
- [3] 赵焯, 徐海明, 徐蜜蜜, 等. 春季中国东海黑潮区大气热源异常对中国东部降水的影响[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 263-275.  
ZHAO X, XU H M, XU M M, et al. The spring atmospheric heat source over the East China Sea Kuroshio area and its impact on precipitation in Eastern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(2): 263-275.
- [4] 翁学传, 张启龙, 杨玉玲, 等. 东海黑潮热输送及其与黄淮平原区汛期降水的关系[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(3): 237-245.  
WENG X C, ZHANG Q L, YANG Y L, et al. The Kuroshio heat transport in the East China Sea and its relation to the precipitation in the rainy season in the Huanghuai plain area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(3): 237-245.
- [5] 王闪闪, 管玉平, LI Z J, 等. 黑潮及其延伸区海表温度变化特征与大气环流相关性的初步分析[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 169201.  
WANG S S, GUAN Y P, LI Z J, et al. Preliminary analyses on characteristics of sea surface temperatures in Kuroshio and its extension and relations to atmospheric circulations[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(16): 169201.
- [6] 丁良模. 黑潮关键区的海面放热量对长江地区梅雨降水的影响[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 47-54.  
DING L M. The impact of sea surface heat release in the key area of the Kuroshio Current on the plum rain precipitation in the Yangtze River region[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(3): 47-54.
- [7] 张琪, 龙景超. 东中国海海温在增暖停滞期的变化特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(1): 80-86.  
ZHANG Q, LONG J C. The characteristics and causes of sea surface temperature variations in the warming hiatus period over the eastern China seas[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(1): 80-86.
- [8] 令聪婧, 刘磊, 何伟, 等. 一次台风过程对西北太平洋西边界流系源区影响的数值模拟研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 24-34.  
LING C J, LIU L, HE W, et al. Impact of a typhoon process on the source region of Northwest Pacific western boundary current system[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(5): 24-34.
- [9] 易香好, 董文杰, 李劭怡, 等. 中国东海黑潮海温变化特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(3): 38-51.  
YI X Y, DONG W J, LI S Y, et al. The characteristics of sea temperature variation in the Kuroshio area in the East China Sea and its causes[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(3): 38-51.
- [10] 邢霄波, 徐永生, 贾永君, 等. 关于黑潮延伸体海域水体的三维热结构时空变化特征研究[J]. 海洋预报, 2021, 38(1): 67-77.  
XING X B, XU Y S, JIA Y J, et al. Study on the spatial-temporal variability of three-dimensional thermal structure of Kuroshio extension[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(1): 67-77.
- [11] XUE P F, MALANOTTE-RIZZOLI P, WEI J, et al. Coupled ocean-atmosphere modeling over the maritime continent: a review [J]. JGR Oceans, 2020, 125(6): e2019JC014978.
- [12] JEAN-MICHEL L, ERIC G, ROMAIN B B, et al. The copernicus global 1 / 12° oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 698876.
- [13] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2015, 93(1): 5-48.
- [14] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [EB/OL]. [2023-05-07]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.adbb2d47?tab=overview>.
- [15] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [16] 陈毓敏, 项杰, 杜华栋, 等. 基于拉格朗日方法对黑潮路径的数值模拟[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 22-28.  
CHEN Y M, XIANG J, DU H D, et al. Numerical simulation of



- Kuroshio path based on Lagrangian method[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 22-28.
- [17] ZHANG Q L, HOU Y J, YAN T Z. Inter-annual and inter-decadal variability of Kuroshio heat transport in the East China Sea[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(4): 481-488.
- [18] SEO G H, CHO Y K, CHOI B J. Variations of heat transport in the northwestern Pacific marginal seas inferred from high-resolution reanalysis[J]. Progress in Oceanography, 2014, 121: 98-108.
- [19] TADA H, UCHIYAMA Y, MASUNAGA E. Impacts of two super typhoons on the Kuroshio and marginal seas on the Pacific coast of Japan[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2018, 132: 80-93.

## Numerical simulation study on the influence of atmospheric driving field and tide of JRA55 and ERA5 on the heat transport capacity of Kuroshio Current in 2020

YIN Luting<sup>1</sup>, SUN Xiaolei<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>3\*</sup>, YU Jie<sup>1</sup>, FAN Jialu<sup>4</sup>

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology and Climate Change & Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation Systems and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China; 2. Tianjin Ocean Center Meteorological Station, Tianjin 300074, China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 4. Center for Meteorological Disaster Prevention Technology of Jilin Province, Changchun 130062, China)

**Abstract:** Using the Mass Conservation Ocean Model (MaCOM), a numerical simulation system with a horizontal resolution of  $1/48^\circ$  was constructed in the western Pacific. Three sensitivity experiments were carried out using this system to analyze the effect of tides and different atmospheric driving fields on the heat transport on seven key sections of the Kuroshio Current. The analysis results show that the influence of tides on the heat transport of the Kuroshio Current is about twice that of the replacement of atmospheric forcing fields. Typhoons have a significant impact on the heat transport capacity of the Kuroshio Current section where they pass through, but its impact only limited to the central area and during the passage period. No features analogous to near-inertial oscillation waves were found. There are some differences between the evolution of volume transport and heat transport in high-latitude and shallow sea areas. However, the seasonal variation of heat transport is slightly flat. The annual average and seasonal variation of the main stream heat transport of the Kuroshio Current simulated by MaCOM are basically consistent with reanalysis data and previous studies.

**Key words:** Kuroshio Current; typhoon; numerical simulation; heat transfer; MaCOM