

1822号台风“山竹”引起的南海北部热异常

钟天任^{1,2}, 章鑫^{1,2*}, 邓志辉^{1,2}, 严兴^{1,2}

(1. 广东省地震局, 广东 广州 510070; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080)

摘 要: 1822号台风“山竹”是2018年登陆华南沿海的最强台风,给华南地区带来了强风暴雨等严重灾害。本文采用了欧洲中期天气预报中心海表温度(Sea Surface Temperature, SST)日值产品和中国风云系列卫星的热红外亮温数据,对数据进行均值残差处理、小波分析和相对功率谱(Relative Power Spectrum, RPS)估计,得到台风发展过程的SST变化以及亮温RPS信息。对SST和亮温RPS的综合分析结果表明:台风生成前和活动期间在南海北部引起了SST增温异常和过境后的冷迹,也出现了21 d和16 d特征周期的热辐射异常;异常过程反映了台风与海洋的热交换过程,即热交换开始于台风生成之前,促使台风向南海北部移动,台风过境后大幅度降温;台风产生的热异常集中在南海北部,但主要分布在台风路径南侧的海面范围,这可能与台风过程中的海-陆、海-气热交换密切相关。

关键词: 台风“山竹”;南海北部;海表温度;相对功率谱

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)02-0011-11

0 引言

热红外遥感是风云系列气象卫星的通道之一^[1]。由于电磁波红外波段具有穿透能力,因此热红外遥感是可见光遥感的有效补充。热红外遥感的基本原理为自然界的物体在温度高于热力学温度绝对零度(约-273.15℃)时会向外不断地辐射电磁波,这种电磁波的波谱主要处于红外频段,具有热效应,其辐射能量的强度和波谱分布位置依赖于物体表面状态,是物质结构组成和温度的函数,称之为“热辐射”^[2]。这种辐射不因外界因素的改变而变化,属于内因决定行为。因此,如果能够实时监测海洋热辐射变化,可以判断台风运移过程中的热辐射变化和热异常的空间分布。

在南海区域,海气热交换具有明显的季节性变化,可能导致台风的发生具有季节性。南海地区的季风和海气界面各通量都存在明显的季节循环。

春季,潜热通量、感热通量和海面蒸发最弱,海洋净短波辐射最多,净热量通量强度也最强;夏季,海洋向大气释放的净长波辐射最小;秋季,南海季风和海气界面各通量处于从夏季到冬季的过渡阶段;冬季,海洋向大气净输送热量^[3-4]。此外,南海地区的感热通量存在区域性差异,南北表现不太一致,南海北部呈单峰型变化特征,南海南部全年变化较小。王丽娟等^[5]分析了潜热通量对西南季风爆发及强度的影响,指出了季风爆发的早年和晚年,南海潜热通量表现出明显的季节和地区差异,春季、夏季、秋季南海潜热通量正距平持续时间短(长),则季风强度偏弱(强),南海北部的潜热通量和季风强度隔季正相关。

台风的产生与发展离不开海洋对其系统的热量传输,海表温度(Sea Surface Temperature, SST)是影响海气相互作用的重要因素之一^[6-7]。台风在过境时会吸收海洋热量,导致SST下降,台风路径也

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-06-27。

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311022010);地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2018B06);广东省科技计划协同创新与平台环境建设重点项目(2019B020208014)。

作者简介: 钟天任(1984-),女,工程师,学士,主要从事地震地下流体、卫星遥感数据分析研究。E-mail: tcbychung@163.com

*通信作者: 章鑫(1987-),男,副研究员,硕士,主要从事地球电磁学数据分析研究。E-mail: zxdqwl@163.com

会发生改变,台风强度减弱^[8-9]。HOYOS等^[9]针对1974—2004年全球范围内的超强台风,分析了影响台风变化的多种变量,结果认为台风增多主要与SST有关;吴迪生等^[10]对南海季节性热交换的研究表明,秋冬季节海洋对大气的加热现象得到加强,在秋季的台风环流内,潜热等的增强与海面有效反射热辐射的趋势一致,在一定程度上预示台风使热辐射增强。例如,1986年5月23日南海台风系统的感热出现正值,海洋主要向大气输送热量,潜热热量处于主导地位^[10-11]。海气热交换过程可能预示台风多发,但更容易改变台风路径,关系到台风是否登陆并造成灾害。

热带气旋是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋,是一种强大而深厚的热带天气系统,台风是热带气旋的一种。海洋是大气的重要热源,海洋与大气之间频繁输送热量,包括辐射热、感热和潜热;同时,大气通过风将大量的动能传输给海洋,海洋的上层海流通过海气界面的边界摩擦被驱动,是台风环流的主要驱动力^[13-14],台风产生的强海面风应力和风应力涡度,对海洋上层的热交换也有很大影响。左涛等^[15]分析了亚印太区域海气热通量的变化与南海夏季风爆发之间的关系,结果表明西太平洋海气热通量具有明显的季节性和地域分布特征,西太平洋暖池区域的感热和潜热通量存在一定的差异。海气热交换状态在富含水汽的台风过程中是否发生改变,对于研究台风生长和消亡的热过程以及台风热辐射的趋势和区域是关键。台风在热交换过程中引起的热红外亮温功率谱的异常,是台风海气热交换的表现形式之一。在台风生成和移动的过程中,海气界面热量交换涉及的复杂的大气物理和海洋物理结构变化过程,往往导致南海台风路径发生突变^[10],研究台风路径附近的海气热交换以及海面温度和亮温功率谱的变化,有助于判断台风运移方向^[16]。本文对1822号台风“山竹”在发展、登陆及消亡过程中的热红外亮温功率谱展开探讨,对热辐射显著增强的区域、模式和可能因素开展研究。

1 台风背景和数据处理

台风“山竹”(Mangkhut)为2018年太平洋台风季第22个被命名的热带气旋。台风于2018年9月

7日20时(北京时,下同)在西北太平洋生成;9月15日,台风从菲律宾北部登陆,造成了严重的灾害损失^[17-18];9月16日17时,台风在广东台山海宴镇登陆,登陆时中心附近最大风力为14级,中心最低气压为955 hPa;9月17日晚20时,台风“山竹”的环流中心逐步消失,中央气象台停止对其编号。

本文的研究区域为 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$,包含了华南沿海的广东、广西沿海和海南岛,以及中国南海的大部分区域。选取区域时考虑到台风“山竹”对中国华南近海的影响,台风的大部分路径经过了南海和广东省大部分地区(见图1)。

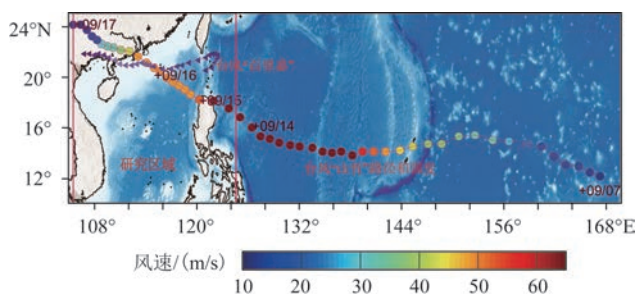


图1 研究区域内台风“山竹”移动路径和台风底层中心附近最大风速

Fig.1 Moving path and the maximum wind speed near the bottom center of typhoon "Mangkhut" in the study area

文中 SST 数据来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的 SST 日值产品,数据空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。对 SST 数据作进一步处理,计算 SST 与无台风时段 SST 均值的残差,反映的是 SST 相对于平静时段的差值。此外,还使用了中国静止气象卫星“风云二号”(FY-2C/E/G)中红外通道(波长 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$)的亮温小时数据产品,空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,精度为 1 K,包含了2018年1月1日—10月8日的亮温数据。

为了避免太阳直射影响,只选取每日01—05时的数据。对这5个时次的数据先求均值,然后用补窗法进行“数据置换”去云处理,即首先通过整个图像的均值判断出有云干扰的低值,然后用补窗法将有云干扰的低值替换成无云时段的值,从而得到亮温日值数据。

对已经去云处理的亮温数据进行小波变换,舍弃小波低阶模态以去除长周期气候因素的影响,判别不同模态下的时序特点,通过计算功率谱来展示台风环流引起的能量聚集效应。以下是小波变换和功率谱估计法具体流程。有限时间序列的小波变换公式如下^[2,19]:

$$W_{\psi}f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为原始信号; $W_{\psi}f(a,b)$ 为小波变换后的各频段分量; a 为尺度因子,控制小波函数的伸缩,对应于变量的频率; b 为时间平移因子,控制小波函数的平移; $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波母函数,文中以Daubecheies小波系中的dB8小波基函数对原始亮温数据进行小波变换处理。

功率谱估计分为经典谱估计和现代谱估计,其中经典谱估计主要有周期图和自相关两种方法。本文中的功率谱估计参考了Welch算法,它是在周期图法的基础上改进而来的。先将 N 长度的数据分为 L 段,每段为 M 点,再对每一段的数据加窗求傅里叶变换,最后计算各段功率谱的平均值。计算公式为^[11]:

$$\overline{P_x(w)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{MU} \left| \sum_{N=0}^{M-1} x_i(n) w(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, L$

式中: $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)$ 为归一化因子; $x(n)$ 为处理后的亮温数据; $w(n)$ 为窗函数; $e^{-j\omega n}$ 指变换频域; $\overline{P_x(w)}$ 为最后计算结果。

利用上述经过小波变换及去除影响因素之后的数据计算功率谱,以 $n=64$ d为窗长, $m=1$ d为滑动窗长作傅里叶变换。时间约定为窗内数据的最新时间,每个像元的时程数据滑动一次可得一组功率谱,总共获得6组功率谱值,以1B—6B表示组别。从结果来看,5B—6B为低频段的功率谱,1B—2B为高频段的功率谱,3B—4B为中等频段的功率谱。为了对比台风前后功率谱的异同,对其幅值进行处理,最后得到各像元($0.05^\circ \times 0.05^\circ$)的相对功率谱(Relative Power Spectrum, RPS)值,数值是功率谱值相对于背景值(无台风时段功率谱值)的倍数。

2 台风过程中的 SST

台风“山竹”于2018年9月7日在西太平洋(155°E)生成,在其生成和发展过程中,SST由北向南增加。选取2016—2018年9月下旬无台风时段连续10 d的SST值进行平均,得到正常夏季的SST。结果表明(见图2b),南海SST为南部高、北部低(见图2b),靠近海岸线处的SST略低,深海处的日均SST高于浅海处。

通过对研究区域SST的时空变化过程分析可以发现,在台风移动时,移动路径周围的SST会发

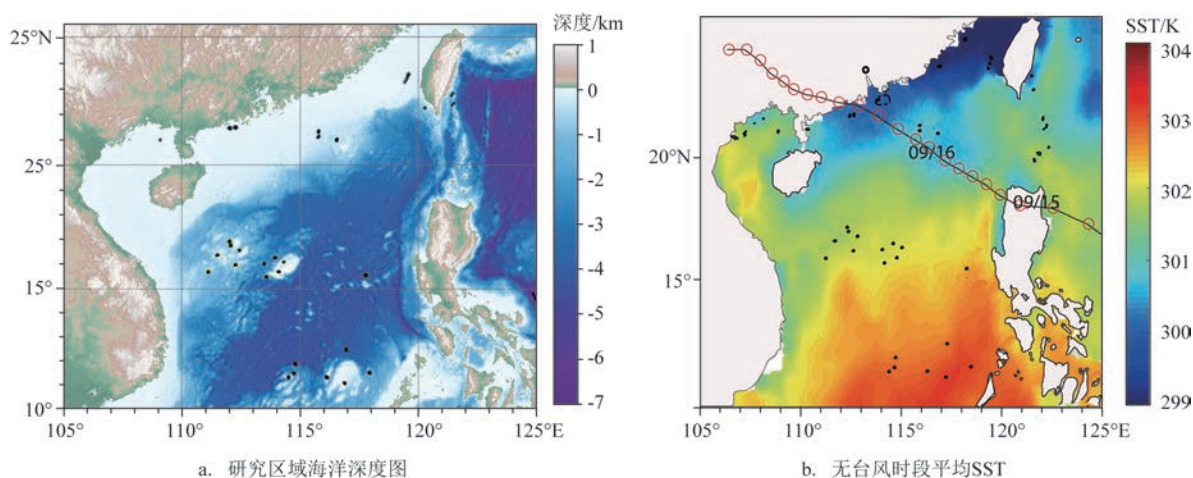


图2 研究区域及2016—2018年9月下旬无台风时段平均SST分布

Fig.2 The study area and average SST distribution during the typhoon-free period in late September from 2016 to 2018

生显著的异常变化。在台风形成前(见图3a),8月28日南海北部局部区域的SST呈高值异常,高于无台风时段的平均SST(见图2b),直至9月3日这些高值异常区域依然呈现散乱的分布现象,未能连成一片(见图3b)。9月6—14日(见图3c—f),台风在西太平洋生成和发展(但未进入南海区域),南海北部的SST高值异常连接成片,主要高值区域分布在台风路径南侧,SST最高值约为304 K,比往年无台风时段均值高4 K左右;相反南海南部以及马尼拉海沟等地处于SST低值异常区域,SST比往年无台

风时段均值偏低4 K左右。9月16日后台风过境南海,SST高值异常区域逐步南移(见图3g),原SST高值区逐渐恢复,即台风过境后SST异常大面积消失,直到9月底基本恢复到无台风时SST的正常分布状态(见图3i)。在整个台风过程中,SST高值异常基本处于台风路径偏南侧:台风生成初期,SST高值区域覆盖整个台风路径;9月16日,台风中心仍处于南海海面,增温异常区域全部南移到台风路径南侧,菲律宾北部等区域出现SST低值;台风过境后,台风路径两侧出现大面积降温,SST

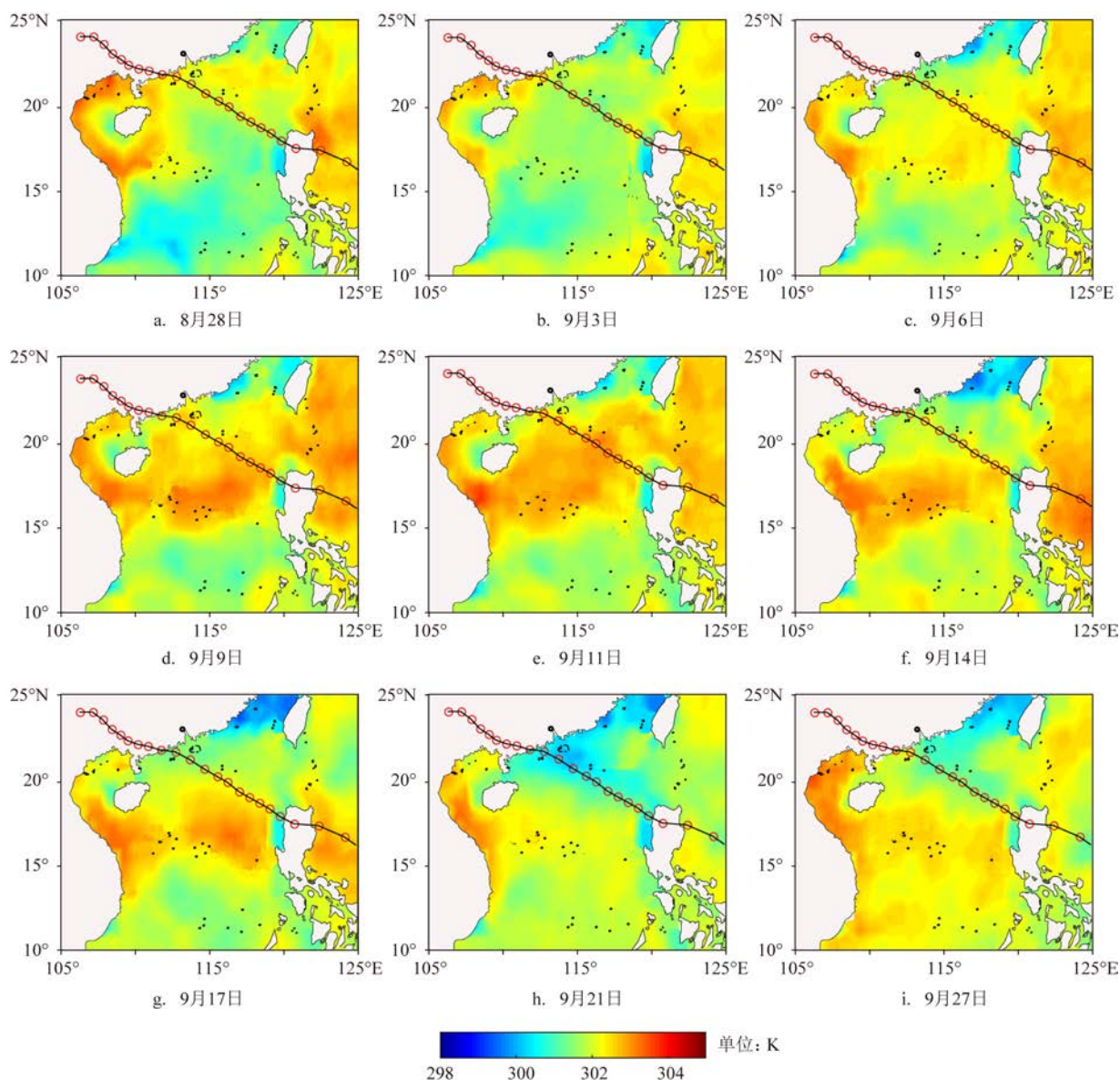


图3 台风“山竹”活动过程中SST的变化

Fig.3 Variation of SST when typhoon "Mangkhut" is active

与台风过境前相比下降3~4 K,最大降温区域出现在路径北侧。

图4为台风经过时的SST与无台风时段SST均值比较后的残差(Δ SST)。残差是指正常日均值数据与夏季均值的差值,因夏季均值作为一个新的基准线,按照新基准线求差值得出的值是相对于夏季某一个值的残差。此处均值选取2016—2018年(8月22日—9月21日)无台风时段连续10 d的SST平均值。均值残差的SST高值异常也出现在南海北部,最大值与最小值的差为4~5 K,与原始SST的高值异常相一致。此外值得注意的是,在台风过境后,残差值也出现了与台风路径一致的滞后冷迹, Δ SST比过境前低3~4 K,体现了台风过程的热交换和海面热损失。综合来看,台风过境前,在台风路径附近出现大面积SST增温异常, Δ SST比无台风时段均值高约4 K;台风过境后的1~2 d在路径北侧开始出现冷迹, Δ SST比过境前低3~4 K。台风引起的降温从台风过境后才开始,出现冷迹的时

间比预想的要晚。

3 相对功率谱热异常

通过计算热红外亮温数据的相对功率谱,我们发现随着台风的生成和临近,南海北部开始出现较大范围的亮温RPS值增强异常,指示了向上升的热辐射增强。图5为2018年的RPS时序曲线,除5B(特征周期为8 d)外,3B(特征周期为32 d)和4B(特征周期为16 d)的亮温RPS都在九月初出现大幅度上升,9月中下旬达到峰值(台风登陆日为9月15日),这种现象持续到9月底。3B的亮温RPS从九月初开始上升,在9月10日附近达到最大,最高值为背景值的8倍左右,此后亮温RPS开始下降,9月20日下降到背景值5倍以内。

与3B类似,4B的亮温RPS开始上升的时间同为九月初,但是其峰值出现在台风登陆后的9月下旬,峰值相对于背景值的倍数也大于3B,阳江区域

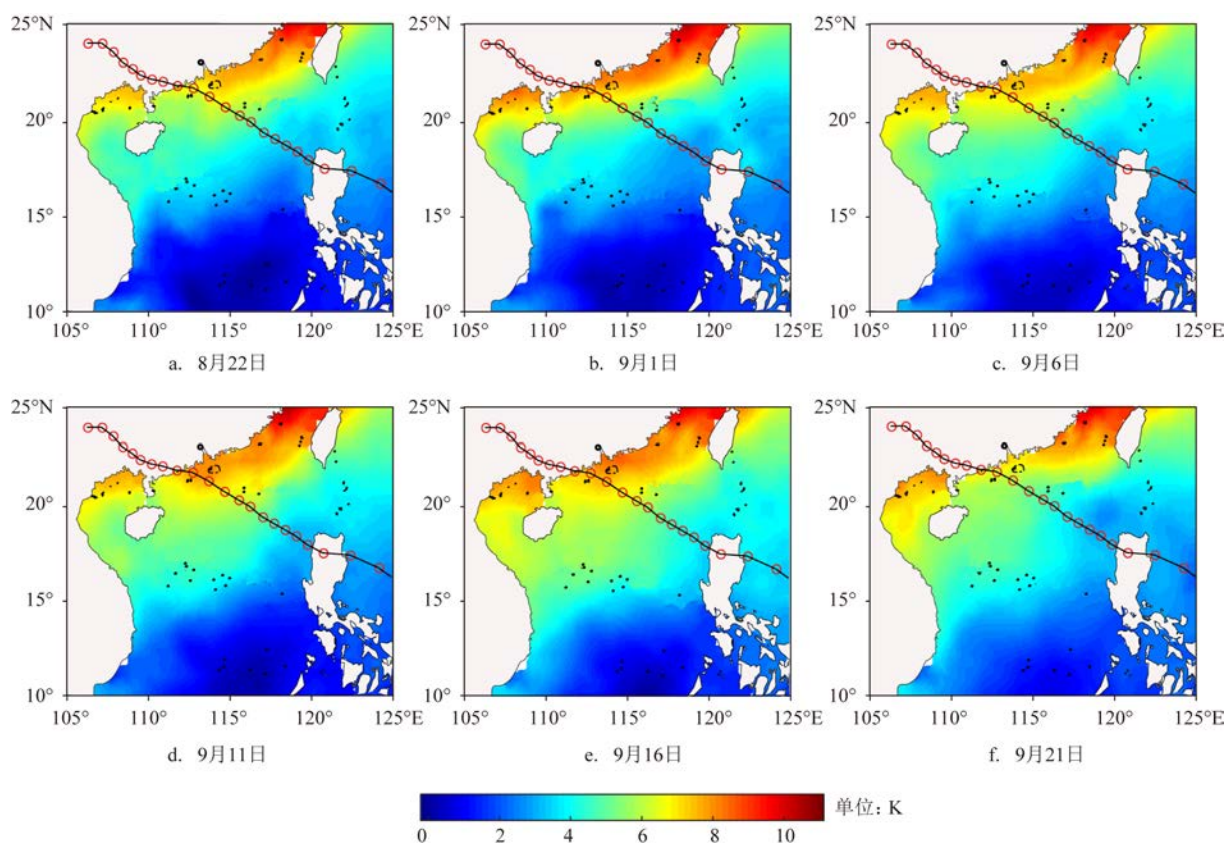


图4 SST均值残差

Fig.4 The mean residual of SST

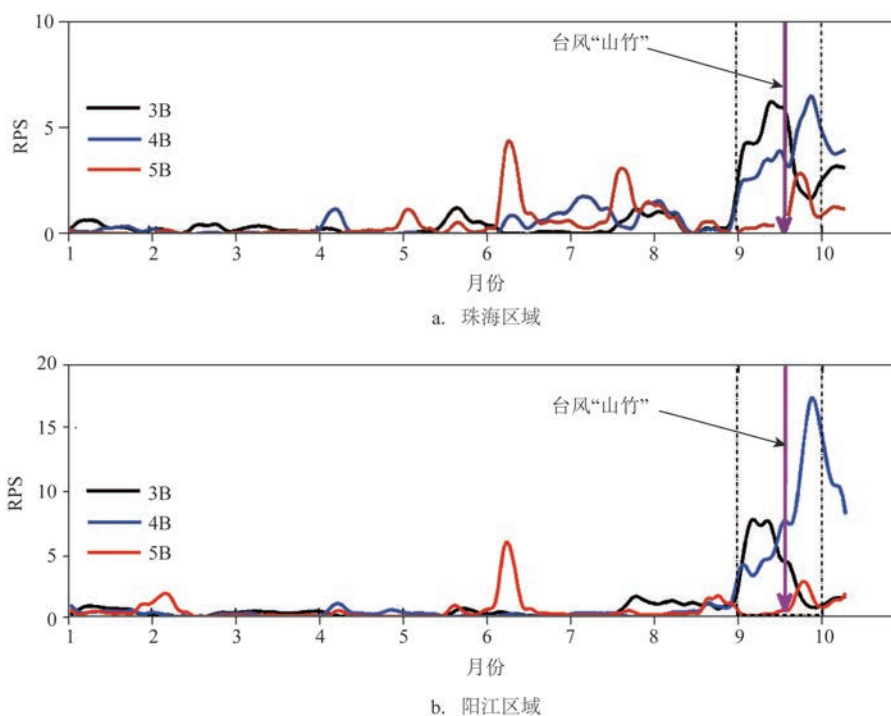


图5 两个小区域2018年1—10月亮温RPS时序曲线

Fig.5 Time series of relative power spectrum in two small regions from January to October, 2018

甚至达到背景值的15倍以上,直到10月初才下降到5倍以内。此外,4B的亮温RPS曲线的上升分为两个阶段:一个阶段为台风登陆以后,亮温RPS升高幅度大且平滑;另一个阶段为9月初—中旬(台风登陆期间),这一阶段亮温RPS的变化幅度小,上升趋势出现多次转折,这可能是由于在台风“山竹”登陆前,另一个台风“百里嘉”掠过广东沿海形成的。

从珠海和阳江两个区域的RPS时序曲线对比来看(见图5),两者亮温RPS增强趋势的一致性较好,但增强幅度有较小差别。一方面由于两个地区距离较近,地面和海面热辐射相差无几;另一方面,台风“山竹”影响范围非常大,小区域内受到台风环流影响的差异不会很大。实际上,对于4B来说,阳江区域的RPS峰值大得多,我们认为该区域对海洋热辐射变化的响应更加敏感。

在台风过程中,亮温RPS的增加区域大范围分布在海面,且在台风登陆当日并未出现热辐射的极大值。图6为3B的亮温RPS增加序列。从9月1—21日具有代表性的6幅子图中可见,亮温RPS的增强区域大都在海岸线以南且主要分布在台风路径南侧,也就是说亮温RPS的增强几乎都出现在海洋

上。从时间上看,亮温RPS的增强出现于9月1日前,9月10日左右达到最大范围和最大强度,亮温RPS最强为背景值的9.5倍,9月13日后亮温RPS强度开始下降,增强范围缩小,9月21日后增强区域逐步消失。

此外,亮温RPS增强区域与台风移动路径有一定的联系,增强区域大部分出现在台风路径左侧。图6中增温区域都出现在台风路径附近,图7中台风过境后亮温RPS的增加区域几乎覆盖了台风的移动路径,但大部分位于左侧。这在一定程度上说明台风过境前亮温RPS的增加处于3B的较长周期,台风过境后亮温RPS的增加过程更显著,且发生在4B的较短周期。换言之,由台风引起的热辐射在台风过境前体现为长周期亮温RPS增强,台风过境后为短周期亮温RPS增强,且后者的增强更显著。

对于4B的较短周期亮温RPS,它的增强区域也主要分布在海洋,且比3B的分布范围大,亮温RPS的最高强度约为背景值的10倍。4B亮温RPS的增强也是开始于9月1日前,但直到台风“山竹”登陆的9月15日,覆盖范围并没有明显增大,强度变化也不大。在台风登陆台山后,亮温RPS增强区域在

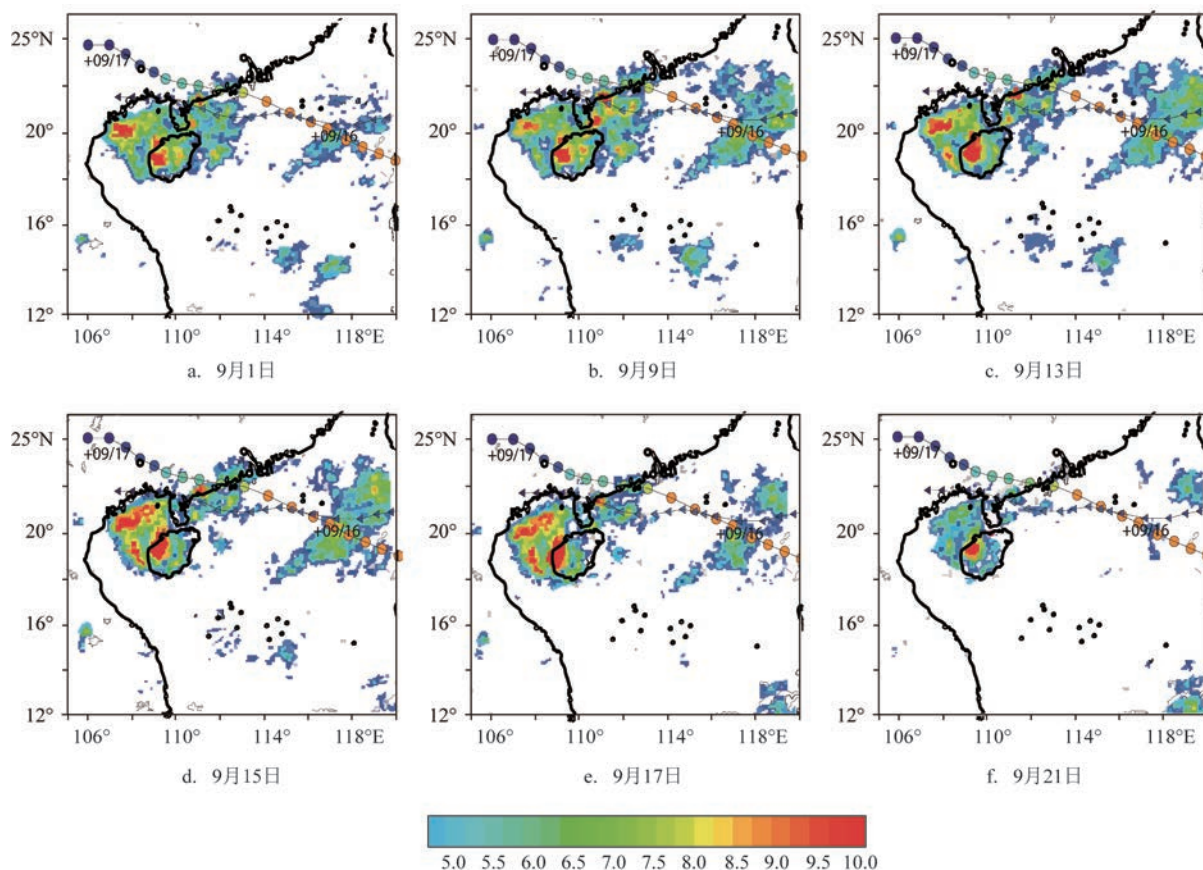


图6 3B频段亮温RPS的空间分布

Fig.6 The spatial distribution of relative power spectrum in 3B band

海面上的范围逐渐变大,强度增加,尤其是在9月19日后,亮温RPS强度逐渐增加,范围也逐渐扩大,9月23日范围达到最大,基本覆盖了整个南海北部和海南岛,9月29日后亮温RPS增强趋势逐步减弱然后消失。亮温RPS的增强基本只出现在海洋区域内,且主要在台风路径的左侧,进一步说明台风“山竹”的热辐射活跃区域主要出现在海洋上且在台风路径南侧。

4 讨论

台风“山竹”过程的热异常主要有两方面特点。第一,南海北部的SST高值异常出现在台风生成之前,可能诱导了台风向南海北部移动;在台风过境南海北部前,台风路径南侧SST上升,比无台风时的均值高4~5 K,且空间范围较大;在台风过境之后的1~3 d,台风路径附近出现SST降低的冷迹,低

于正常3~4 K。第二,不同频率的亮温RPS的发展过程不同,分布范围和极大值出现的时间存在差异。亮温RPS所反映的热辐射区域基本处于南海北部海面区域,与SST高值异常的范围吻合,多位于台风路径偏南一侧。结合前人对台风状态下SST冷迹因素的探索结果,可以推断台风“山竹”在从生成到消亡的过程中都从海洋表面吸热或进行热量交换,对上层大气的热辐射增强。

分析SST的变化是研究海气热状态的基本方式^[3-6]。一方面海气温度差异可能导致台风生成,另一方面台风在过境时吸收了海洋热量会导致SST下降,从而使得台风路径发生改变,进一步的热交换也会使台风强度减弱。台风在经过海洋时,通常会在海洋上层形成路径附近温度降低的冷迹。杨晓霞等^[20]统计了1998—2009年经过中国南海的92个台风的遥感SST数据,结果显示64个台风(69.6%)引起了海洋上层的明显降温(降温 $\geq 2^{\circ}\text{C}$);

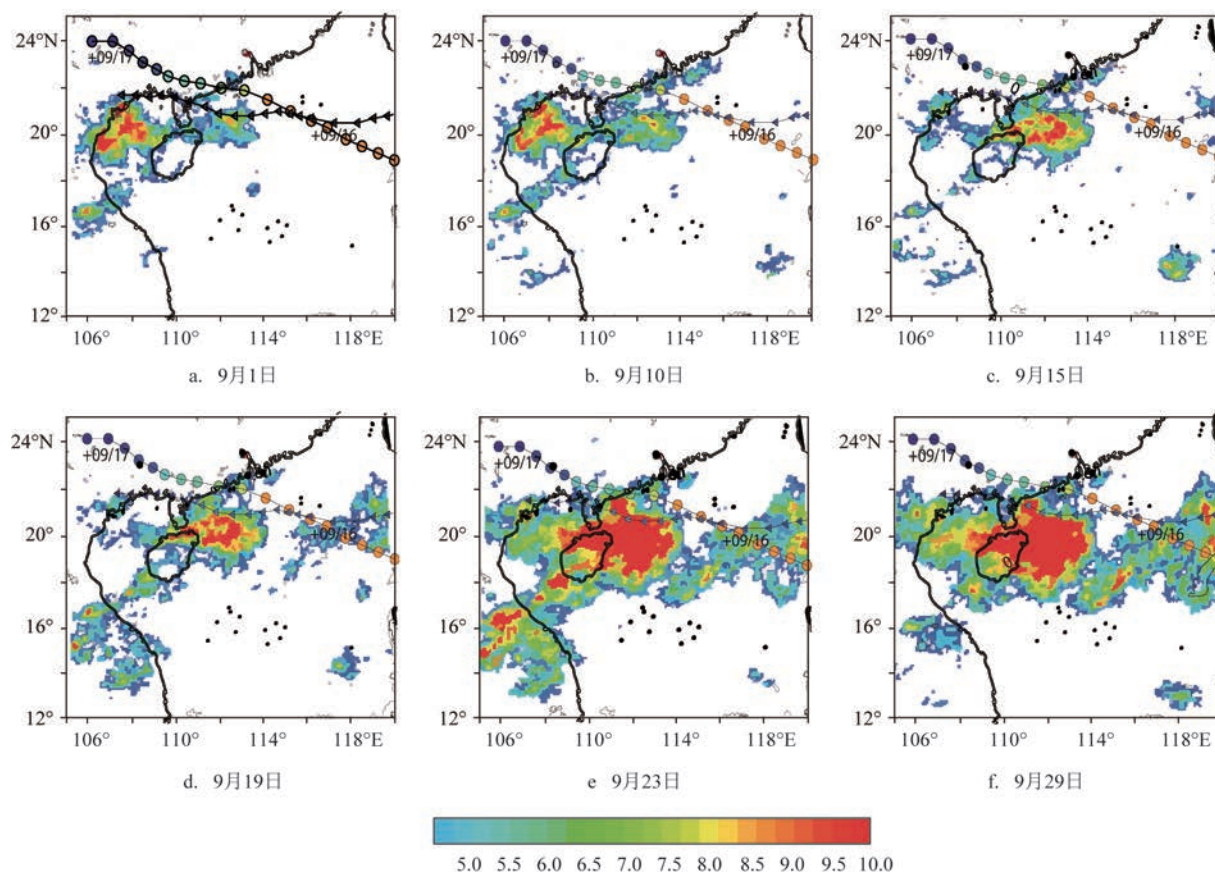


图7 4B频段亮温RPS的空间分布

Fig.7 The spatial distribution of relative power spectrum in 4B band

而台风冷迹导致的最大降温主要集中在路径左右两侧 100 km 内,其中 43 个台风(46.7%)冷迹位于台风路径右侧,13 个台风(14.1%)冷迹出现在路径附近,8 个台风(8.7%)冷迹位于路径左侧。本文结果显示的台风“山竹”热辐射发生在台风路径的左侧,且热辐射范围和强度较大,与大部分台风冷迹出现的空间位置相反。相对于台风冷迹在南海北部的分布范围,本文得出的热辐射增长范围也大致处于 100 km 尺度上。台风“山竹”过境后,路径两侧出现大面积降温,与台风过境前相比 SST 下降 3~4 K,但最大降温区域在台风路径的北侧。杨晓霞等^[20]认为中尺度冷涡先于台风存在于上层海洋,冷涡在台风引起 SST 降温的幅度和位置的分布中起着重要的作用。台风“山竹”的冷涡中心位于路径右侧,因此台风过后引起的降温将会出现在路径右侧。

此外,热力条件是影响台风生成和发展的重要因素。热辐射的机制可能与台风潜热、水汽聚集等

造成的温室效应有关,台风产生的热辐射亮温增强的本质可能是温室效应^[21]。台风的生成和发展严重依赖水汽源的供给,台风环流将大量的水汽卷入台风中心,使台风获得继续发展的能量^[20],一方面在登陆后形成强降雨,另一方面使温室效应增强、热辐射持续。BOISVERT 等^[22]的研究表明,水汽混合和高云量聚集是温室效应加强的重要因素,而台风形成前一段时间的持续低气压和高水汽聚集也促成了这样的效果。全球变暖, SST 随之升高, EMANUEL^[23]研究认为 1974—2004 年台风和全球温室效应导致海温升高的相关系数达到 0.74,这反映了台风过程与热辐射关联密切,也证明了本文热力辐射的观点。另外,也有研究认为这种热异常来自于 CO₂ 超限排放所产生的温室效应。HENDERSON-SELLERS 等^[24]的研究认为,当 CO₂ 含量倍增时,台风强度增加近 10%~20%。另外,台风轨迹的模拟结果表明,温室气体引起的气候变化对

台风路径会产生较为复杂的影响^[24-25]。

台风过境对于海陆交界区域的热辐射起到调制滤波作用,导致台风“山竹”热辐射的频率出现在3B和4B。台风引起的地表(海洋表面)热辐射具有方向性^[8,26],从而导致本文中不同频率亮温RPS的效果相差较大。陈云浩等^[27]认为地表各方向热辐射差异性的成因可归纳为3点:地球表面的真实地物并不是黑体,其本身的发射率具有方向异性;多次散射的影响,其影响主要来自于地表的复杂性导致某些方向的辐射能增加,以及目标地物与传感器之间介质的散射作用;地表组分差异导致的辐射能差异。上述因素也是本文中3B和4B分布和强度差异的主要原因。本文的结果表明台风“山竹”的热辐射主要出现在靠近陆地的海洋上,其原因可能是在台风环流的影响下海洋和陆地的热辐射相差较大。台风环流会产生大量的上升热辐射^[28-29],辐射过程开始于1822号台风“山竹”生成之前,促进了台风向南海北部移动,同时在自身热量不均匀的条件下也生成了1823号台风“百里嘉”;辐射过程结束于台风“山竹”过境之后,台风带走热量后在海洋表层出现冷迹(见图3)。

上述模式说明台风过程会吸收大量的海面热量,热量通过台风环流被带入大气上方,并混合水汽等形成温室效应,导致亮温RPS及SST热辐射增加。一些学者的模拟结果较好地支持了这一结论。王琳艳等^[30]对台风“杜鹃”开展模拟,结果认为台风中心附近SST的差异会导致大气风场产生差异,从而使台风对SST有比较快速且明显的响应,不同的SST对台风的影响主要通过改变海气潜热通量来实现^[5-6]。本文中SST异常在台风过境前出现在台风路径左侧,过境后出现在路径右侧,可能与上层海洋的中尺度冷涡分布在路径右侧有关。台风“山竹”在南海北部驻留时,“风云四号A”(FY-4A)卫星发现其上升环流南侧的热对流更甚^[27],北侧略弱,这一现象佐证了本文中SST高值异常和亮温RPS都出现在台风路径左侧的结论。

5 结论

1822号台风“山竹”的热异常主要出现在南海北部,体现了在台风的影响下海洋和陆地的热辐射

差异,热辐射与台风过程中的海-陆、海-气热交换密切相关。结论如下:

①在台风“山竹”形成前,南海北部首先出现了强烈的SST高值异常,比无台风阶段均值高4~5 K;在台风“山竹”活动期间,SST高值异常逐步加强并连成一片,出现在台风路径的左侧;在台风“山竹”过后1~3 d,台风路径附近产生了低SST区域,比均值低3~4 K,并且出现在路径右侧,与上层海洋的中尺度冷涡分布在路径右侧有关。

②台风“山竹”产生的亮温RPS热辐射集中在南海北部,超过5倍背景值的亮温RPS直径约为100 km,台风“山竹”的热辐射活跃区域主要出现在海洋上且在台风路径南侧,与2015年台风“莲花”和2017年台风“天鸽”相似,RPS异常沿台风路径两侧分布,最强值分布在路径左侧。

③南海北部SST增温异常导致了西太平洋台风“山竹”向南海北部移动,台风引起的热辐射增强及台风过后的冷迹现象可能与海面热辐射经台风环流后上升有关,进一步形成了RPS辐射异常。

参考文献:

- [1] 张元生, 郭晓, 钟美娇, 等. 汶川地震卫星热红外亮温变化[J]. 科学通报, 2010, 55(10): 904-910.
ZHANG Y S, GUO X, ZHONG M J, et al. Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(10): 904-910.
- [2] 郭晓, 张元生, 钟美娇, 等. 提取地震热异常信息的功率谱相对变化法及震例分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2688-2695.
GUO X, ZHANG Y S, ZHONG M J, et al. Variation characteristics of OLR for the Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2688-2695.
- [3] 白莉娜, 王元. 南海源地热带气旋生成和登陆频数的气候变异[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 757-768.
BAI L N, WANG Y. Climatic variation of the occurring and landing frequencies of tropical cyclones initiated from South China Sea[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2009, 45 (6): 757-768.
- [4] 胡耀辉. SST对台风影响的数值试验分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
HU Y H. Numerical experiment for the impact of SST to Typhoon [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [5] 王丽娟, 王辉, 闫俊岳, 等. 南海海气界面潜热通量的分布特征及其对西南季风爆发影响的初步分析[J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 20-30.
WANG L J, WANG H, YAN J Y, et al. A preliminary analysis on the distribution characteristics of the air-sea latent heat flux over

- the SCS and its impact on the onset of southwest monsoon[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(1): 20-30.
- [6] MANDAL M, MOHANTY U C, SINHA P, et al. Impact of sea surface temperature in modulating movement and intensity of tropical cyclones[J]. *Natural Hazards*, 2007, 41(3): 413-427.
- [7] 邱婷, 左军成, 王鼎琦, 等. 南海海表温度气候变异及对局地台风的影响[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 32-39.
- QIU T, ZUO J C, WANG D Q, et al. Variation of climatological sea surface temperature and its effect on local typhoon activities in the south China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(1): 32-39.
- [8] 杨元建, 冼桃, 孙亮, 等. 连续台风对海表温度和海表高度的影响[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 71-78.
- YANG Y J, XIAN T, SUN L, et al. Impacts of sequential typhoons on sea surface temperature and sea surface height in September 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 71-78.
- [9] HOYOS C D, AGUDELO P A, WEBSTER P J, et al. Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity[J]. *Science*, 2006, 312(5770): 94-77.
- [10] 吴迪生, 邓文珍, 张俊峰, 等. 南海台风状况下海气界面热量交换研究[J]. *大气科学*, 2001, 25(3): 329-341.
- WU D S, DENG W Z, ZHANG J F, et al. A research on air-sea interface heat exchange under the typhoon over the south China Sea[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(3): 329-341.
- [11] 刘宝洲. 周期图法功率谱估计及其改进算法的研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(5): 76-79.
- LIU B Z. Research on power spectrum estimation and improved algorithm of periodic graph method[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(5): 76-79.
- [12] WU L G, WANG B. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(8): 1686-1698.
- [13] 朱亚芬, 杨大升. 1983年埃尔尼诺期间海气热交换分析[J]. *海洋学报*, 1990, 12(2): 167-178.
- ZHU Y F, YANG D S. The analysis of air-sea interaction during El Nino in 1983[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(2): 167-178.
- [14] 彭永清, 严绍瑾. 海气热交换过程中海温涨落的随机效应的初步研究[J]. *南京气象学院学报*, 1987, 10(3): 285-295.
- PENG Y Q, YAN S J. A study on the stochastic effect of fluctuation of sea surface temperature on the thermal exchange between ocean and atmosphere[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1987, 10(3): 285-295.
- [15] 左涛, 陈锦年, 王宏娜. 西太平洋暖池区域热通量变化及其与南海夏季风爆发的关系[J]. *海洋学研究*, 2012, 30(2): 5-13.
- ZUO T, CHEN J N, WANG H N. Variation of air-sea heat fluxes over the western Pacific warm pool area and its relations with the onset of the South China Sea summer monsoon[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2012, 30(2): 5-13.
- [16] 章鑫, 陈明玉. 台风登陆广东沿海前后亮温相对功率谱的变化特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(6): 29-40.
- ZHANG X, CHEN M Y. Analysis of characteristics of brightness temperature relative power spectrum before and after typhoon landfall in Guangdong coastal area[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(6): 29-40.
- [17] 赵林, 杨绪南, 方根深, 等. 超强台风“山竹”近地层外围风速剖面演变特性现场实测[J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(1): 43-54.
- ZHAO L, YANG X N, FANG G S, et al. Observation-based study for the evolution of vertical wind profiles in the boundary layer during super typhoon Mangkhut[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2019, 37(1): 43-54.
- [18] 陈淑琴, 李英, 范悦敏, 等. 台风“山竹”(2018)远距离暴雨的成因分析[J]. *大气科学*, 2021, 45(3): 573-587.
- CHEN S Q, LI Y, FAN Y M, et al. Analysis of long-distance heavy rainfall caused by typhoon Mangosteen (2018)[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(3): 573-587.
- [19] 张丽峰, 郭晓, 张璇, 等. 强震中波红外异常特征研究[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(6): 977-984.
- ZHANG L F, GUO X, ZHANG X, et al. Anomaly characteristics of medium-wave infrared data prior to strong earthquakes[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(6): 977-984.
- [20] 杨晓霞, 唐丹玲. 台风引起南海海表面降温的位置变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 26-31.
- YANG X X, TANG D L. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 26-31.
- [21] CAO Y F, LIANG S L, CHEN X N, et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 8462.
- [22] BOISVERT L N, STROEVE J C. The arctic is becoming warmer and wetter as revealed by the atmospheric infrared sounder[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4439-4446.
- [23] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [24] HENDERSON-SELLERS A, ZHANG H, BERZ G, et al. Tropical cyclones and global climate change: a post-IPCC assessment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 19-38.
- [25] YING Y, ZHANG Q H. A modeling study on tropical cyclone structural changes in response to ambient moisture variations[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2012, 90(5): 755-770.
- [26] 张庆红, 韦青, 陈联寿. 登陆中国大陆台风影响力研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(7): 941-946.
- ZHANG Q H, WEI Q, CHEN L S. Impact of Landfalling tropical cyclones in mainland China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(10): 1559-1564.

- [27] 陈云浩, 吴佳桐, 王丹丹. 广义地表热辐射方向性计算机模拟研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 555-567.
CHEN Y H, WU J T, WANG D D. Review of the study on generalized computer simulation of land surface thermal anisotropy[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 555-567.
- [28] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 969-986.
DUAN Y H, CHEN L S, LIANG J Y, et al. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 969-986.
- [29] 蒋建莹, 廖蜜. 风云气象卫星监测图像展示台风“山竹”的演变过程[J]. 卫星应用, 2019(1): 46-49.
JIANG J Y, LIAO M. Fengyun meteorological satellite monitoring image shows the evolution process of Typhoon Mangkhut[J]. Satellite Application, 2019(1): 46-49.
- [30] 王琳艳, 郁诚成, 吴克俭. 南海 SST 对台风过程响应分析[J]. 海洋湖沼通报, 2017(6): 67-74.
WANG L Y, YU C C, WU K J. Response of sea surface temperature to typhoon in south China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(6): 67-74.

Thermal anomaly caused by typhoon "Mangkhut" (No. 1822) in the northern South China Sea

ZHONG Tianren^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2*}, DENG Zhihui^{1,2}, YAN Xing^{1,2}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: Typhoon "Mangkhut" (No. 1822) was the strongest typhoon that landed on the coast of South China in 2018 and caused severe disasters such as heavy storms and rains. In this paper, the daily sea surface temperature (SST) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts and the thermal infrared brightness temperature data of China's FY-E satellites are processed by using mean residual processing, wavelet analysis and relative power spectrum estimation, and the SST variation and relative power spectrum (RPS) during the typhoon development process are obtained. The results of comprehensive analysis of SST and RPS show that SST is anomaly warm both before the typhoon generates and when the typhoon is active, while the SST decreases after the typhoon passes through the northern South China Sea. Moreover, there shows thermal radiation anomaly with characteristic periods of 21 days and 16 days. The abnormal processes reflect the heat exchange between typhoon and the ocean surface, which starts before the formation of typhoon and promotes typhoon to move to the northern South China Sea. It causes a significant cold drop in temperature after the typhoon passes through. The thermal anomaly caused by the typhoon is concentrated in the northern part of the South China Sea, especially over the sea surface on the south side of the typhoon path, which may be closely related to the sea-land and sea-air heat exchange during the typhoon process.

Key words: typhoon "Mangkhut"; northern South China Sea; sea surface temperature; relative power spectrum