

南海海表温度日变化特征及其影响因素研究

罗嘉琪, 李响*, 张蕴斐, 史珍

(国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用国家海洋环境预报中心的逐时海表温度(SST)数据和欧洲中期数值预报中心的ERA5数据集研究了南海海表温度日变化(DSST)的特征及其影响因素。研究表明:南海区域的DSST平均为0.56℃,总体呈纬向分布,近岸海域DSST幅度较大,但超过1.5℃的日增暖事件发生频次较少;南海DSST具有显著的季节变化特征,总体表现为春季最大(约0.7℃),冬季最小(约0.2~0.3℃);净辐射通量日变化和风速的季节变化是影响南海DSST季节变化的主要原因,南海月平均DSST与净辐射通量日变化的季节变化具有很好的一致性,DSST随着净辐射通量日变化的增加而增大,但DSST与风速的变化关系则相反;南海季风对南海DSST的季节变化也有着重要影响;南海SST具有明显的日循环特征,通常在每日16时到达峰值,08时到达谷值;影响南海SST日循环的主要因素为净辐射通量的日循环,风速日循环的影响相对较小。

关键词: 海表温度;日变化;净辐射通量日变化;风速;季风

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0031-11

0 引言

海表温度(Sea Surface Temperature, SST)是表征海气相互作用的重要因子,是两者相互作用的结果体现,同时也是影响气候系统变化的重要参数。海表是大气的下边界,许多海洋与大气之间的物质、能量交换都发生在海表,交换过程对海洋表面的温度及其变化十分敏感。海表温度日变化(Diurnal Sea Surface Temperature, DSST)定义为每日最高和最低海表温度之间的差值^[1-2]。DSST通过改变热量和气体通量、大气环流和大气边界层高度来影响海气相互作用^[3]。

DSST的首次观测记载于20世纪40年代,当时的DSST数据大多来源于船舶的原位观测^[4]。20世纪70年代,首次出现了大范围海温日变暖事件的相关记录,CLAYSON等^[5-6]观测到非洲西北部出现了DSST超过1℃的现象。早期研究表明,中低纬DSST幅度平均为0.2~0.6℃,在晴朗无风的情况下

可达1.5℃左右^[1],极端情况下甚至可以达到6℃^[7]。即使在北极,也会发生明显的海温日变化事件^[8]。KARAGALI等^[9]使用卫星遥感数据研究了大西洋、地中海等地SST日循环的变化特征,认为高纬度地区DSST比低纬度地区更加剧烈,因为热带地区的海洋洋面具有温暖稳定的水温、持续的信风及较高的降水率,导致热带地区DSST信号较弱。MORAK-BOZZO等^[10]使用浮标数据研究了10°纬度带的SST日循环,显示其峰值出现在当地时间15时左右,并存在向赤道方向有振幅增加和季节性减弱的现象。KAWAMURA等^[11]研究了印度洋-太平洋暖池在发生热事件时的DSST,结果表明每日SST最大值出现在当地时间15时,海温最小值出现在当地时间07时。林鹏飞等^[12]用12a的卫星观测资料验证了气候系统海洋环流模式模拟的东太平洋冷舌区SST日变化特征,并指出该区域SST日变化主要受太阳辐射和垂直混合的影响。SHENOI等^[13]用19a的观测资料指出北印度洋DSST在春季最大,其中75%~

收稿日期: 2023-02-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1408004);国家自然科学基金青年基金(42205064)。

作者简介: 罗嘉琪(1999-),女,硕士在读,主要从事海气相互作用研究。E-mail: ljg604749921@163.com

*通信作者: 李响(1986-),男,副研究员,博士,主要从事海气相互作用机理研究、耦合模式研究。E-mail: lixiang@nmefc.cn

80%的观测报告显示DSST小于0.5℃。王剑等^[14]用30a的浮标观测资料研究了中低纬DSST的特征分布,结论表明北半球的平均DSST高于南半球,DSST具有明显的季节变化特征。LI等^[15]研究发现在所有的海盆中都存在明显的DSST现象,大西洋和太平洋的DSST受日照变化向南北向发展,而印度洋海盆的季风变化是DSST的主要影响因素。PRICE等^[16]在马尼拉海发现海温昼夜变化取决于表面加热和风应力。YANG等^[17]通过对孟加拉湾和赤道以南地区DSST的分析,证实了一年最大的DSST发生在季风过渡期,且会出现两个高峰(3—4月和10月)。

DSST在影响海气通量交换的同时,也会对长时间尺度的大气过程产生影响^[2],由于低纬度地区的自然气候波动对SST的变化非常敏感^[11],因此这种影响在热带地区和副热带地区尤为明显。DSST被证明与热带季节内震荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)和厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)现象有着不可忽视的联系。KAWAI等^[18]利用4a的卫星遥感数据研究了西太平洋DSST的时空变化,指出DSST不能直接对MJO作出响应但受MJO影响。BERNIE等^[19]指出DSST会影响西太平洋暖池上空的大气,SST的昼夜变化受MJO调节,因此增加了对MJO不同阶段的季节内SST响应。杨洋等^[20]利用7a的浮标观测数据采用合成分析的方法研究了MJO对DSST特征的影响,指出DSST与MJO对流呈直接反位相关关系,即对流活动强时DSST弱,对流活动弱时DSST强,受MJO的影响印度洋DSST具有显著的季节内变化特征。GE等^[21]的模拟结果表明DSST分辨率的改善有利于热带MJO的观测和模拟。WELLER等^[22]研究了阿拉伯海上层海洋对季风的响应,西南季风期间较强的风强迫使DSST有所减小。SALISBURY等^[23]认为DSST及其昼夜周期变化调节了界面处的海气交换,理解这种变化可以对上层海洋和大气状态的预测产生积极影响。CLAYSON等^[5, 24]认为在估算海表热量时使用省略DSST信号的SST数据会产生很大的误差,不包含DSST的海洋模型可能会高估因混合引起的冷却效应和SST的东西梯度差异,从而影响对ENSO的判断。TIAN等^[25]通过模拟SST的日变化发现厄尔尼诺期间的DSST通常比拉

尼娜期间更强。

目前,关于DSST的研究大多集中在热带和副热带地区,尤其是天气系统频发的太平洋和季风现象明显的印度洋,且数据的时间跨度多局限在10a左右,少有长时间尺度的相关研究。南海作为我国近海中唯一处于热带的海域,有着明显的DSST现象,但针对南海DSST变化的相关研究却十分有限。受东亚季风影响,强烈的水汽输送和海气耦合使南海的海气相互作用活跃,导致南海DSST具有明显的时空分布特征^[26]。臧楠^[27]利用观测数据分析了南海季风前后DSST的特征变化,指出夏季风爆发前SST存在规则的日变化趋势,季风爆发后SST日变化曲线变得不规则。TU等^[28]制作了南海地区4a的SST数据集并对DSST做了简单分析,得出南海地区SST呈类似正弦波的日循环周期,春季海温日变化现象明显。林锐等^[29]简单分析了南海DSST的时空特征,认为其在时间分布上冬季最小、春季最大,在空间分布上南高北低、东高西低。南海受西南夏季风控制,YAN等^[30]的研究表明在西南夏季风期间,由于季风在建立过程中被越南地区的山脉遮挡,南海西部山脉背风处的DSST相对较大。除上述特征外,YAN等^[31]还发现南海DSST存在着年周期和半年周期,与DSST年周期的振幅相比,半年周期振幅以17°N为分界,17°N以北的半年周期振幅小得多。

综上所述,受限于长时间序列高覆盖率的高频SST数据的缺失,目前针对南海地区DSST的研究还比较少,且研究结论也存在一定的不确定性。本文将采用国家海洋环境预报中心时间跨度为38a的长时间序列高分辨率逐时SST数据和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5(The Fifth Generation ECMWF Reanalysis for the Global Climate and Weather, ERA5)再分析数据集,对南海海域DSST的时空变化特征进行研究,并探讨其影响因素。

1 数据介绍

本文使用的数据包括国家海洋环境预报中心制作的全球高分辨率逐小时SST数据以及ECMWF

的ERA5再分析数据集。

高分辨率逐小时 SST 数据为国家海洋环境预报中心研制的 MLSST (Mixed-Layer Model Sea Surface Temperature, MLSST)^[15] 数据。该数据水平分辨率为 $0.3125^{\circ} \times 0.3125^{\circ}$, 时间分辨率为逐小时, 数据覆盖全球范围。MLSST 数据由国家海洋环境预报中心开发的上层海洋混合层模式计算得到, 其在天气和气候尺度上均具有较好的刻画能力, 与浮标观测数据对比, 平均偏差为 $-0.26 \sim 0.40^{\circ}\text{C}$ 。本研究中, 该数据的使用时段为 1982—2019 年, 共计 38 a, 用于分析南海区域 DSST 的时空变化特征。

ERA5 再分析数据是 ECMWF 的第五代全球气候和天气的再分析数据, 也是最新一代再分析数据。ERA5 数据覆盖全球, 具有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率、37 层标准气压层的垂直分辨率和逐时分辨率^[32]。ERA5 产品比之前推出的 ERA-Interim 等产品有着更高的水平和垂直分辨率, 还提供了更多参量以供研究^[33]。本文使用的海表风场、短波辐射通量、长波辐射通量、潜热通量及感热通量数据资料均来自 ERA5 逐小时再分析资料, 时间长度与 MLSST 一致 (1982—2019 年), 该数据用于分析南海区域 DSST 特征的影响因子。

2 结果与讨论

2.1 气候平均态

图 1 为 1982—2019 年南海区域 ($105^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$) DSST 日变化幅度的气候平均态。该区域 DSST 平均为 0.56°C , 随纬度总体呈明显的北低南高的分布型态, 且大值区分布在沿岸近海和 10°N 以南地区, 开阔海域及 10°N 以北地区的 DSST 相对较小。 10°N 以南地区的 DSST 气候态大多在 0.6°C 及以上, 以北地区多为 $0.4 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 。沿岸近海地区的 DSST 气候态通常可达到 0.6°C 甚至更高, 开阔海洋处的 DSST 约为 0.5°C 。

已有研究表明, 中低纬海域的 DSST 幅度通常不超过 1°C , DSST 大于 1.5°C 的日增暖现象在中低纬并不常见^[14]。图 2 分别统计了 1982—2019 年南海 DSST 幅度超过 0.5°C 、 1.0°C 、 1.5°C 的事件发生频率的空间分布, 结果表明不同空间范围的发生频次略有差异, 但共同点是离岸开阔洋面的 DSST 更稳

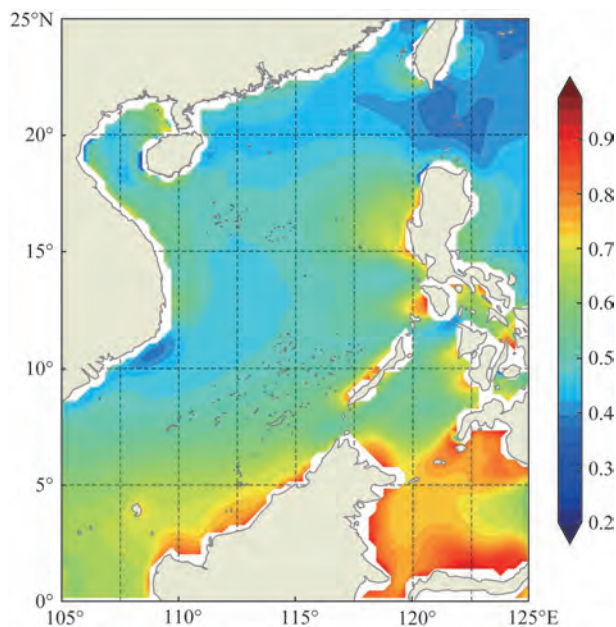


图1 1982—2019年南海海表温度日变化气候平均态(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.1 Climatological mean state of DSST in the South China Sea during 1982—2019 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

定。南海具有广阔的洋面, SST 变化相对稳定, 仅有约 30% 的 DSST $> 0.5^{\circ}\text{C}$ 。在 10°N 以南海域, DSST $> 0.5^{\circ}\text{C}$ 的事件发生更加频繁, 与我国大陆南部近岸沿海地区的发生频次相近, 几乎达到了 35% 以上。DSST $> 1.0^{\circ}\text{C}$ 的现象并不少见, 10°N 以南海域大约有至少 10% 的发生概率。DSST $> 1.5^{\circ}\text{C}$ 的现象相对减少, 空间分布显示其与 DSST $> 1.0^{\circ}\text{C}$ 和 DSST $> 0.5^{\circ}\text{C}$ 的统计结果相似, 近岸沿海处 DSST 比开阔海洋变化更剧烈。

2.2 季节变化

图 3 为南海 DSST 多年平均逐月的空间分布。从图中可以看出, 南海 DSST 呈现显著的季节变化特征, 总体表现为 DSST 在春季达到峰值, 冬季达到谷值。南海冬季 DSST 为一年的最低值, 约为 $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$, 其后缓慢增强, 3 月进入春季后 DSST 迅速增强, 并在 4 月达到一年之中的最大值 (0.7°C 左右), 而后夏季一直稳定在 0.5°C 左右且随月份增加有缓慢的减弱趋势, 但在 9 月入秋后有小幅回升, 10 月开始持续呈减弱趋势直至 12 月。冬季, 沿岸近海的 DSST 与离岸开阔海洋差别不大, 但在另外三季, 由

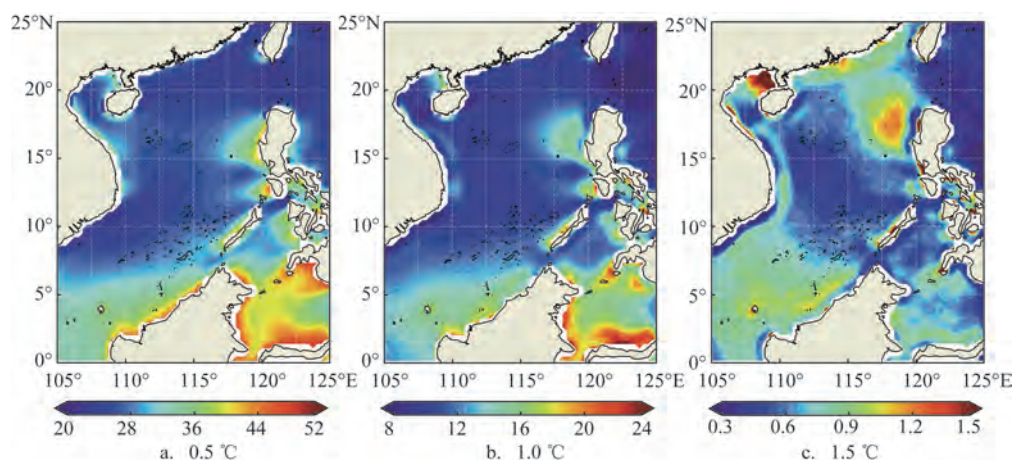


图2 1982—2019年南海海表温度日变化超过不同温度的事件发生频率的空间分布(单位: %)

Fig.2 Spatial distribution of the frequency of events with DSST exceeding different temperature in the South China Sea during 1982—2019 (unit: %)

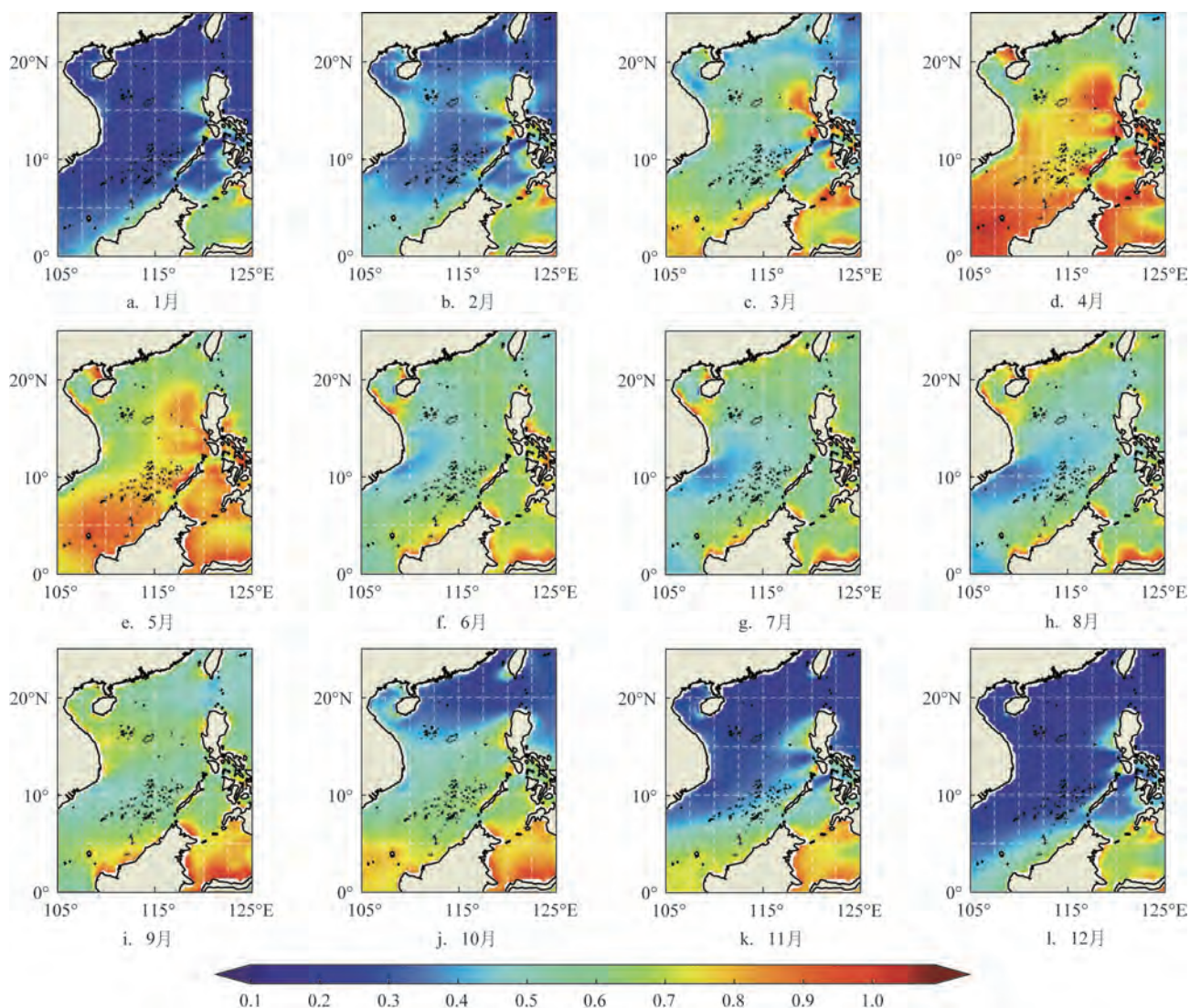


图3 1982—2019年南海海表温度日变化逐月分布(单位: °C)

Fig.3 Monthly DSST in the South China Sea during 1982—2019 (unit: °C)

于大陆和海洋之间存在热力差异,沿岸近海和离岸远海的 DSST 不同,其中春季 DSST 在离岸开阔洋面处比沿岸近海更大,夏季和秋季沿岸近海处的 DSST 明显高于离岸开阔海洋。

YANG 等^[17]通过敏感性试验,验证了 6 种强迫场对孟加拉湾 DSST 变化的影响,发现短波辐射通量的日变化和风应力是影响 DSST 的主要因素,长波辐射通量、感热通量、潜热通量对 DSST 也存在着不可忽视的影响。由于夜间不存在短波辐射,因此只需考虑综合辐射通量对海温日变化的影响。本文在考察南海区域 DSST 季节变化的影响因子时除了考虑海表风速外,还将短波辐射通量、长波辐射

通量、感热通量和潜热通量的作用效果叠加为净辐射通量进行分析。

高辐射、低风速可以使热量尽可能地聚集在海表^[2],高辐射持续对海表进行加热,低风速导致的弱湍流混合抑制了从海面向下的热量传输^[34],故 SST 在海表风弱且辐射变化强时变化更大。图 4 和图 5 分别为 1982—2019 年南海净辐射通量日变化和平均海面风速的季节变化。从图中可以看出,净辐射通量日变化的季节变化特征与南海 DSST 的季节变化特征具有一致的变化趋势,最大值都出现在春季的 4 月,最小值出现在冬季;而平均海面风速的季节变化特征则呈现相反的变化趋势,最小值出现在春

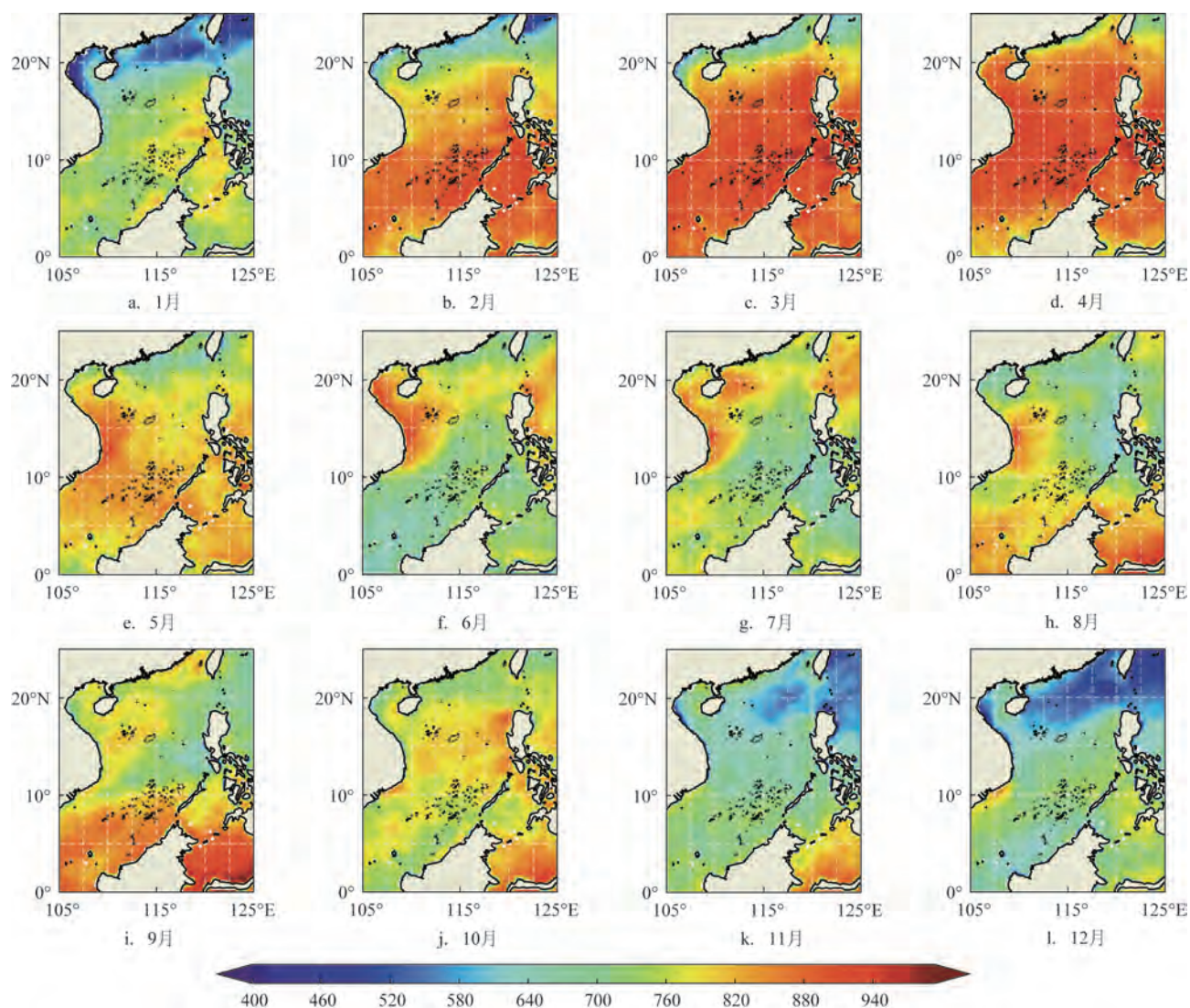


图4 1982—2019年南海海表净辐射通量日变化逐月分布(单位: W/m^2)

Fig.4 Monthly diurnal variation of net radiation flux in the South China Sea during 1982—2019 (unit: W/m^2)

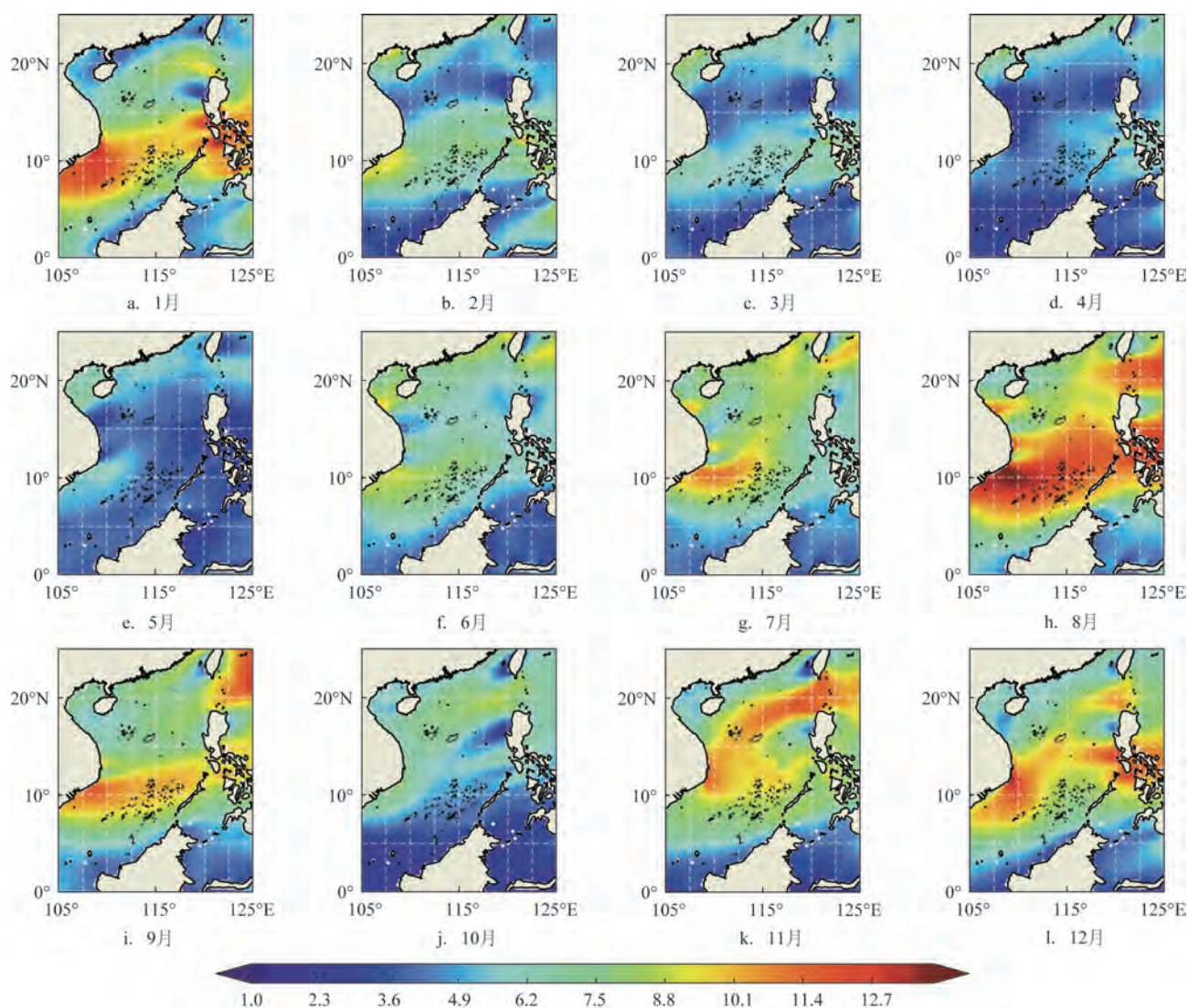


图5 1982—2019年南海海表风速逐月分布(单位:m/s)

Fig.5 Monthly distribution of sea surface wind speed over the South China Sea from 1982 to 2019 (unit: m/s)

季,大值区域出现在夏季和冬季。南海季风在风速影响南海 DSST 的过程中起重要作用,在季风建立期间,南海上方的平均纬向风由东风转为稳定的西风,海表面风速变弱,此时南海 DSST 达到全年最高值。上述结果表明,春季是一年中净辐射通量日变化幅度最大但风速最小的季节,这导致南海区域 DSST 在春季最大;冬季则相反,由于冬季南海海表的净辐射通量日变化最低,而强风又加剧了海表的热损失,进而抑制了 DSST^[4],这是南海 DSST 最小值发生在冬季的原因。

南海位于季风区,夏季风对南海区域的天气和气候变化具有重要影响。采用张莉萍等^[35]对南海夏

季风建立与结束日期的定义,计算了 1982—2019 年南海夏季风建立和结束的时间序列距平(见图 6)。从图中可以看出,南海夏季风的爆发时间平均在每年的第 28.29 候,即五月,而结束平均在每年的第 52.89 候,即九月,季风爆发的时间前后浮动通常不超过 6 候(一个月)。南海的夏季有着一年中最长的日照时间和最强烈的短波辐射,但是由于夏季风为南海上方带来了对流降雨和强烈的表面风,引起了强烈的水汽输送^[36],导致到达海表面的短波辐射较少,进而导致南海 DSST 的幅度在夏季反而不大。季风结束时间的前后浮动比建立时间偏小,通常不会超过 4 候,因此从 9 月开始,风速逐渐减小,南海

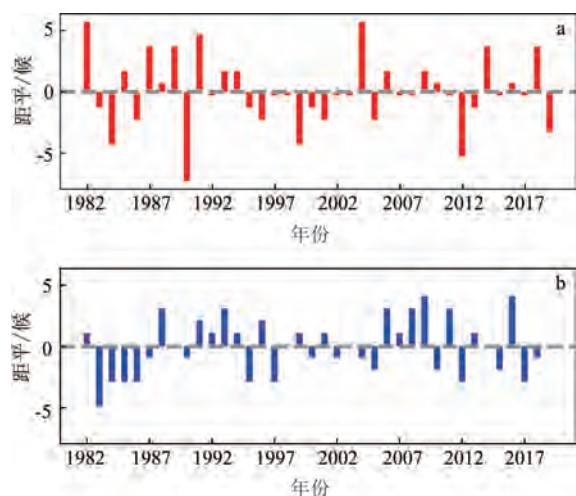


图6 1982—2019年南海季风爆发(a)和结束(b)的时间序列距平

Fig.6 Time series anomalies of the onset (a) and the offset (b) of monsoon in the South China Sea during 1982—2019

上方的平均纬向风由西风逐渐重新转为东风,随着季风逐渐结束,南海 DSST 在逐渐降低的过程中有回升现象。

2.3 日变化

南海区域 SST 呈现显著的日循环特征(见图7),即平均在08时(北京时,下同)左右达到一天中的谷值,而在16时左右达到峰值,其中DJF代表12月一次年2月,MAM代表3—5月,JJA代表6—8月,SON代表9—11月。SST日循环还表征出季节

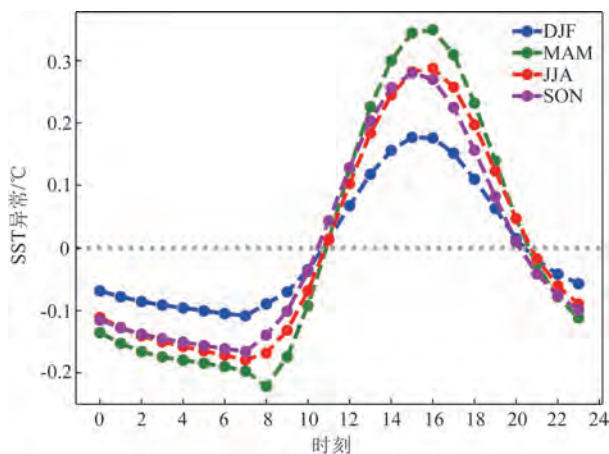


图7 1982—2019年南海海表温度日循环

Fig.7 Diurnal cycle of sea surface temperature in the South China Sea during 1982—2019

差异性,春季 DSST 相对剧烈,幅度最大,而冬季 DSST 相对稳定,幅度最小。

为了探究影响南海区域 SST 日变化的成因,分别分析了南海区域平均海表净辐射通量日循环(见图8)和海表风速日循环(见图9)变化。

南海区域平均海表净辐射通量具有明显的日变化特征。18时—次日08时海表一直向外散发热量,08—18时海表向内吸收热量,且在每日14时左右达到峰值,由于海洋的热容较大,SST对净辐射通量的响应存在1~2 h的延迟。从日出开始,海表开始吸收来自太阳的短波辐射,来自外界的辐射持续对海表进行加热,使 SST 持续升高;午后,净辐射通

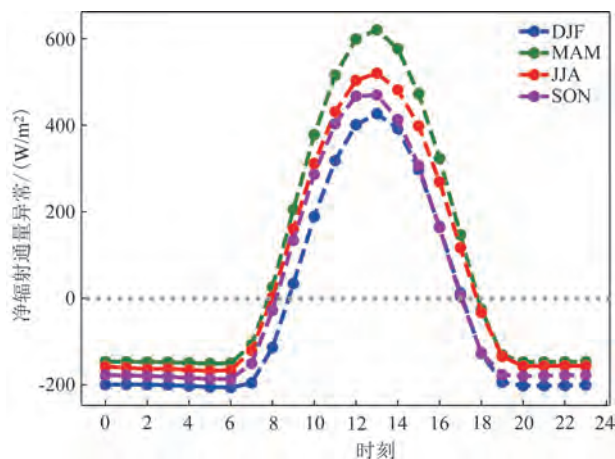


图8 1982—2019年南海净辐射通量日循环

Fig.8 Daily cycle of net radiation flux over the South China Sea during 1982—2019

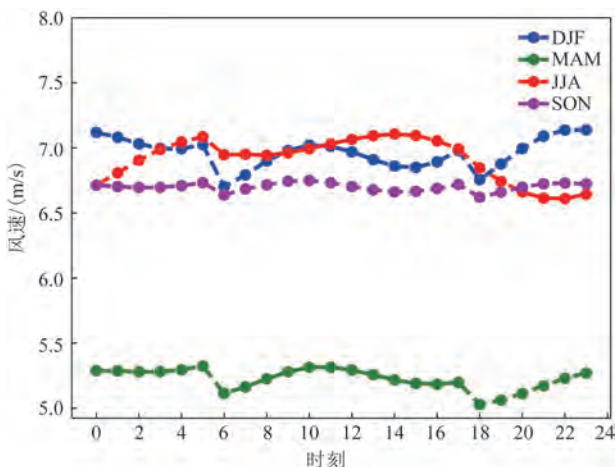


图9 1982—2019年南海海表风速日循环

Fig.9 Diurnal circulation of sea surface wind speed over the South China Sea from 1982 to 2019

量达到一天中的最大值,随后开始逐渐减小,但由于海表还未将吸收的热量全部转化为自身的热能,故此时海表仍处于升温状态;随着地球自转导致的净辐射通量逐渐减小,海表也开始随之降温;日落短波辐射加热消失,海面上的大气持续净热损失使 SST 持续下降,夜间下降的幅度小于白天。

南海海面风速在一天中的变化较小,对 SST 日循环的影响也相对较小。结合净辐射通量日循环特征的季节变化来看,春季风速低、辐射强的特征再次得到证明,因此南海在春季具有最大的 DSST;冬季的风速虽然与夏季相差不大,但净辐射通量日变化比其他两个季节小的多;秋季受季风转向的影响,风速比夏季和冬季小,但比春季大得多。这表

明风速对 DSST 的影响是长期持续的,短期内很难有所体现。

图 10 统计了南海 SST 到达每日峰值和谷值时间的空间分布。与海表净辐射通量和海表风速日循环的结果一致,SST 的峰值出现在 16 时左右,谷值出现在 08 时左右。SST 的峰值与谷值在东西经向上都存在时间变化,西部到达每日峰值和谷值的时间比东部晚 1 h 左右,这是由于地球自转引起经度每 15° 相差 1 h 导致的;南北纬向上的差异不是很明显。由于大陆和海洋之间存在热力差异,在由于短波辐射不足使得开阔海洋迅速作出响应并开始呈现降温趋势的同时,大陆仍在加热近岸沿海处的海洋;早晨在开阔海洋已经开始吸收短波辐射而升温

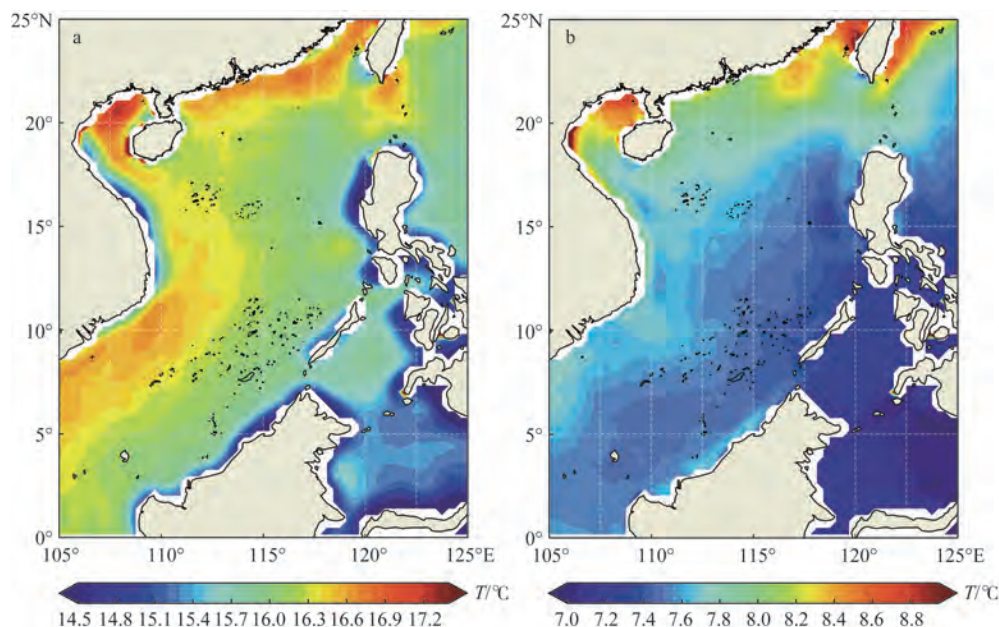


图 10 1982—2019 年南海海表温度到达日最大值(a)和最小值(b)的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of daily maximum (a) and minimum (b) sea surface temperature in the South China Sea during 1982—2019

时,大陆仍在吸收来自沿岸近海的热量,因此沿岸近海 SST 到达峰值(谷值)的时间比开阔海洋要晚。

3 结论与展望

本文利用国家海洋环境预报中心的高分辨率长时间逐时 SST 数据研究了南海区域 SST 日变化的时空分布特征,并使用与 ECMWF 同时段的 ERA5

再分析数据探讨了 SST 日变化特征的影响因素。主要结论如下:

①南海 DSST 平均为 0.56°C , 总体呈现南高北低的纬向分布特征,DSST 高于 1.0°C 的事件时有发生,但是高于 1.5°C 的事件则相对较少。

②南海海域的 DSST 存在显著的季节变化特征,通常在春季(4 月)达到峰值,而在冬季(12 月、1 月)达到谷值。DSST 的季节变化主要受净辐射通

量日变化和海面风速的季节变化影响,其与前者的季节变化呈现一致性,而与后者的季节变化则相反。南海季风在DSST的季节变化中也扮演着重要的角色。

③南海海域SST具有显著的日循环特征,平均在08时左右达到一天中的谷值,而在16时左右达到峰值。SST的日循环主要受海表净辐射通量日循环的影响,海表风速的日循环对其影响相对较小。

本文仅从净辐射通量日变化、海表风速和南海夏季风几个方面研究了其对南海DSST的影响。有研究表明其他影响因素诸如降水、云量、海水的浑浊度等^[9, 17-18]对DSST的影响效果虽然不如净辐射和海表风速,但可能也是不可忽略的,未来将进一步深入开展此方面的研究。另外,除了DSST的时空变化特征外,其长期趋势及其对区域天气和气候的影响也是非常重要的问题,这些研究将在今后的工作中进一步开展,以便更全面地理解南海DSST在区域天气和气候中的重要作用。

参考文献:

- [1] KAWAI Y, WADA A. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: a review[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(5): 721-744.
- [2] WIRASATRIYA A, HOSODA K, SETIAWAN J D, et al. Variability of diurnal sea surface temperature during short term and high SST event in the western equatorial pacific as revealed by satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3230.
- [3] TU Q G, PAN D L, HAO Z Z, et al. Observations of SST diurnal variability in the South China Sea[C]//*Proceedings of SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. Toulouse: SPIE, 2015.
- [4] LI J. SST diurnal variability in the climate forecast system and its influence on low frequency variability[M]. Fairfax: George Mason University, 2011.
- [5] CLAYSON C A, WEITLICH D. Diurnal warming in the tropical Pacific and its interannual variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21604.
- [6] STUART-MENTETH A C, ROBINSON I S, CHALLENGOR P G. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C5): 3155.
- [7] FLAMENT P, FIRING J, SAWYER M, et al. Amplitude and horizontal structure of a large diurnal sea surface temperature event during the coastal ocean dynamics experiment[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(1): 124-139.
- [8] EASTWOOD S, LE BORGNE P, PÉRÉ S, et al. Diurnal variability in sea surface temperature in the Arctic[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2594-2602.
- [9] KARAGALI I, HØYER J L. Characterisation and quantification of regional diurnal SST cycles from SEVIRI[J]. *Ocean Science*, 2014, 10(5): 745-758.
- [10] MORAK-BOZZO S, MERCHANT C J, KENT E C, et al. Climatological diurnal variability in sea surface temperature characterized from drifting buoy data[J]. *Geoscience Data Journal*, 2016, 3(1): 20-28.
- [11] KAWAMURA H, QIN H L, ANDO K. In-situ diurnal sea surface temperature variations and near-surface thermal structure in the tropical hot event of the Indo-Pacific warm pool[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(6): 847-857.
- [12] 林鹏飞, 刘海龙, 章丽娜, 等. 东太平洋冷舌区海表面温度日变化特征的模拟研究[J]. *大气科学*, 2012, 36(2): 259-270.
LIN P F, LIU H L, ZHANG L N, et al. The simulation study of the features of diurnal variation of sea surface temperature in the eastern Pacific cold tongue[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(2): 259-270.
- [13] SHENOI S S C, NASNODKAR N, RAJESH G, et al. On the diurnal ranges of Sea Surface Temperature (SST) in the north Indian Ocean[J]. *Journal of Earth System Science*, 2009, 118(5): 483-496.
- [14] 王剑, 凌铁军, 韩雪. 中低纬度海表面温度日变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2017, 34(6): 1-7.
WANG J, LING T J, HAN X. Diurnal variabilities of sea surface temperature in the low-and mid-latitudes[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(6): 1-7.
- [15] LI X, LING T J, ZHANG Y F, et al. A 31-year global diurnal sea surface temperature dataset created by an ocean mixed-layer model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(12): 1443-1454.
- [16] PRICE J F, WELLER R A, BOWERS C M, et al. Diurnal response of sea surface temperature observed at the long-term upper ocean study (34°N, 70°W) in the Sargasso Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C13): 14480-14490.
- [17] YANG Y, LI T, LI K P, et al. What controls seasonal variations of the diurnal cycle of sea surface temperature in the eastern tropical Indian Ocean?[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(21): 8466-8485.
- [18] KAWAI Y, KAWAMURA H. Spatial and temporal variations of model-derived diurnal amplitude of sea surface temperature in the western Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C8): C08012.
- [19] BERNIE D J, GUILYARDI E, MADEC G, et al. Impact of resolving the diurnal cycle in an ocean - atmosphere GCM. Part 2: a diurnally coupled CGCM[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(7-8): 909-925.
- [20] 杨洋, 于卫东, 孙即霖, 等. 热带印度洋季节内振荡对海表温度

- 日变化的影响[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(3): 351-359.
- YANG Y, YU W D, SUN J L, et al. Impact of madden-julian oscillation on diurnal variation of sea surface temperature in the tropical Indian Ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(3): 351-359.
- [21] GE X Y, WANG W Q, KUMAR A, et al. Importance of the vertical resolution in simulating SST diurnal and intraseasonal variability in an oceanic general circulation model[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(11): 3963-3978.
- [22] WELLER R A, FISCHER A S, RUDNICK D L, et al. Moored observations of upper-ocean response to the monsoons in the Arabian Sea during 1994 – 1995[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(12): 2195-2230.
- [23] SALISBURY D, MOGENSEN K, BALSAMO G. Use of in situ observations to verify the diurnal cycle of sea surface temperature in ECMWF coupled model forecasts[R]. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2018.
- [24] CLAYSON C A, BOGDANOFF A S. The effect of diurnal sea surface temperature warming on climatological air – sea fluxes[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(8): 2546-2556.
- [25] TIAN F X, VON STORCH J S, HERTWIG E. Impact of SST diurnal cycle on ENSO asymmetry[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(3-4): 2399-2411.
- [26] 闫运伟. 南海海温日变化的时空分布特征、机制及其对海温气候态的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- YAN Y W. Spatial-temporal distribution characteristics of diurnal warming and its impacts on temperature climatology in the South China Sea[D]. Ocean University of China, 2015.
- [27] 臧楠. 南海 SST 日变化特征及夏季风爆发对 SST 日变化的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- ZANG N. Diurnal cycle of SST in South China sea and the effect of summer monsoon onset[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [28] TU Q G, PAN D L, HAO Z Z, et al. SST diurnal warming in the China seas and northwestern Pacific Ocean using MTSAT satellite observations[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(12): 12-18.
- [29] 林锐, 张彩云, 李炎. 卫星遥感南海海面日增温的时空变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(2): 17-27.
- LIN R, ZHANG C Y, LI Y. Satellite observation of the temporal and spatial variation of sea surface diurnal warming in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(2): 17-27.
- [30] YAN Y W, CHEN C L, LING Z. Warm water wake off northeast Vietnam in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 55-63.
- [31] YAN Y W, WANG G H, CHEN C L, et al. Annual and semiannual cycles of diurnal warming of sea surface temperature in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(8): 5797-5807.
- [32] 姚小娟, 张海燕, 李希茜. 2020年夏秋季北部湾 SST 异常特征及可能成因分析[J]. *海洋预报*, 2022, 39(4): 79-90.
- YAO X J, ZHANG H Y, LI X X. Analysis of the characteristics and potential causes of the sea surface temperature anomaly in Beibu Gulf in the summer and autumn of 2020[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(4): 79-90.
- [33] 耿姗姗, 韩春花, 徐珊珊, 等. ERA5 海面气压和风速再分析资料在渤海和北黄海适用性分析[J]. *海洋通报*, 2023, 42(2): 159-168.
- GENG S S, HAN C H, XU S S, et al. Applicability analysis of the sea surface pressure and wind speed of ERA5 reanalysis data in the Bohai Sea and the northern Huanghai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(2): 159-168.
- [34] NOH Y, LEE E, KIM D H, et al. Prediction of the diurnal warming of sea surface temperature using an atmosphere-ocean mixed layer coupled model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C11): C11023.
- [35] 张莉萍, 李栋梁, 李潇. 气候变暖背景下南海夏季风建立和结束日期及与其强度的关系[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(6): 1037-1047.
- ZHANG L P, LI D L, LI X. Definition of onset and retreat date of the South China Sea summer monsoon and the relation with its strength under the background of climate warming[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(6): 1037-1047.
- [36] 周倩, 凌铁军, 李响, 等. 中国周边海域海面温度日变化对区域气候的影响[J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(2): 214-226.
- ZHOU Q, LING T J, LI X, et al. Influence of diurnal variation of SST on the regional climate over coastal waters of China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(2): 214-226.

Diurnal variation of sea surface temperature in the South China Sea and its influencing factors

LUO Jiaqi, LI Xiang*, ZHANG Yunfei, SHI Zhen

(Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the hourly sea surface temperature (SST) data from National Marine Environment

Forecasting Center and ERA5 datasets from European Center for Medium Weather Forecasting, the characteristics and influencing factors of diurnal variation of sea surface temperature (DSST) over the South China Sea are studied in this article. The results show that the climatology of DSST exhibits a zonal variation with a mean value of about 0.56°C . Also, the amplitude of DSST in offshore areas is larger while the frequency of warming events of DSST exceeding 1.5°C is rare. The DSST shows significant seasonal variation characteristics with peak in spring (about 0.7°C) and valley in winter (about $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$). This is mainly due to the seasonal variations of diurnal variation of net radiation flux and the wind speed over the South China Sea. Totally, the seasonal DSST increases along with the increase of diurnal variation of net radiation flux and the decrease of mean wind speed. Meanwhile, the South China Sea monsoon also plays an important role in the seasonal variation of DSST. The SST in the South China Sea also has an obvious diurnal cycle, which commonly reaches the peak at 16 p.m. and the valley at 8 a.m. The main factor affecting SST diurnal cycle in the South China Sea is the diurnal cycle of net radiation flux, while the influence of wind speed is relatively small.

Key words: sea surface temperature; diurnal variation; net radiation flux; wind speed; monsoon