

卫星遥感南海海表面日增温的时空变化特征*

林锐^{1,2}, 张彩云¹, 李炎^{1,2}

1. 福建省海陆界面生态重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005;

2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361005

摘要: 利用搭载在 Aqua 和 Terra 卫星上的 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)、AMSR-E(advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system)传感器测量反演的昼夜海表温度(SST), 计算海表面日增温(sea surface diurnal warming), 分析南海海表面日增温的短期和年变动特征。受观测平台过境时间、传感器测量 SST 方式、反演算法等影响, MODIS/Aqua 计算的日增温幅度略大于 AMSR-E/Aqua 和 MODIS/Terra, 但在表征南海海表面日增温的时空分布特征以及变化趋势上三者并未见显著性差异。南海海表面日增温在时间分布上以冬季为最小, 春季为最大; 在空间分布上则是南部海域大于中部和北部海域, 东部海域大于西部海域。春夏之交的吕宋海峡西北部尤其容易发生日增温事件。海表面日增温与太阳辐射、风速、云量等影响有关, 其中风速与海表面日增温显著负相关。

关键词: 海表温度(SST); 海表面日增温; 时空分布; 南海; 卫星遥感

中图分类号: X87; P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)02-0017-11

Satellite observation of the temporal and spatial variation of sea surface diurnal warming in the South China Sea

LIN Rui^{1,2}, ZHANG Cai-yun¹, LI Yan^{1,2}

1. Fujian Provincial Joint Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies (Xiamen University), Xiamen 361005, China;

2. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: Satellite-derived sea surface temperature (SST) data from the MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)/Aqua, AMSR-E (advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system)/Aqua and MODIS/Terra over the past ~10 years are analyzed to investigate the sea surface diurnal warming in the South China Sea (SCS). The results reveal that sea surface diurnal warming derived by MODIS/Aqua is slightly higher than that by AMSR-E/Aqua and MODIS/Terra, due to the differences in satellite transit time, sampling manner and retrieval algorithm, among others. However, there are no significant biases in terms of spatial and temporal distributions, and of the variation of sea surface diurnal warming over the SCS. The magnitude of sea surface diurnal warming in the SCS is the weakest during winter, and the strongest during spring. The magnitude is generally larger in the southern regions than in the central and northern regions, and is larger in the eastern regions than in the western regions. Northwest of the Luzon Strait, the sea surface diurnal warming tends to appear easily from late spring to early summer. It is suggested that the seasonal variation of sea surface diurnal warming in the SCS be affected by solar radiation, wind speed and cloud amount; among them, the wind speed is the most important factor with a significant negative correlation with the diurnal warming.

Key words: sea surface temperature; sea surface diurnal warming; temporal and spatial distribution; South China Sea; satellite remote sensing

收稿日期: 2012-10-24; 修订日期: 2013-07-11。孙淑杰编辑

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2011J01278); 国家自然科学基金项目(40706041)

作者简介: 林锐(1988~), 女, 福建省龙岩市, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感应用研究。E-mail: sannoy@126.com

通信作者: 张彩云。E-mail: cyzhang@xmu.edu.cn

*感谢陈嘉伟、雷发美、魏国妹在论文编写过程所提供的关于绘图以及 IDL 编程的建议和指导。文中使用到的遥感 SST 资料和风场资料分别下载于美国航空航天局哥达德太空飞行中心以及遥感系统数据中心, 云量资料来自美国国家海洋和大气管理局, 在此一并致谢。

近年来,随着定点浮标和多平台卫星遥感对海表面温度(SST)观测的加密,SST日变动的重要性正被逐渐认识并得到广泛关注(Kawai, et al, 2007)。SST日变动不仅是准确估算海-气热量和水汽交换的重要参数(Stuart-Menteth, et al, 2003),而且是海洋上层热结构、生物种群昼夜变化、短期海温预报等的重要影响因素。在多源遥感SST全球融合产品生成过程中,SST日变动亦有着相当重要的影响(Donlon, et al, 2002)。

海表面日增温(sea surface diurnal warming)是指SST白天比晚上高的日变动现象,其变化幅度通常可以用遥感探测的海表面温度的昼夜温差来表示(Stuart-Menteth, et al, 2003)。利用10年AVHRR(advanced very high resolution radiometer)白天和晚上海表面温度资料所计算的昼夜温差,Stuart-Menteth等(2003)首次考察了全球海表面日增温的时空分布规律,指出日增温幅度变化较大的区域主要分布在热带和副热带海区,在较低风速和高太阳辐射影响的季节或海域,日增温变化幅度变得更为显著。研究也表明持续低风速会导致日增温幅度增大(Merchant, et al, 2008)。利用TMI(tropical rainfall measuring mission microwave imager)、高级微波扫描辐射计(advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system, AMSR-E)以及中等分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)/Aqua三种卫星遥感SST计算的昼夜温差,Gentemann等(2008)在北大西洋热带海域观测到变化幅度为5~7K、影响范围宽达1000km的日增温事件,他们的研究还表明基于3种传感器计算的海表面日增温幅度没有显著性差异。利用遥感和浮标资料在加利福尼亚近岸均观测到大面积的海表面日增温现象,SST昼夜温差最大值为6.6°C(Flament, et al, 1994)。倘若这些SST日变动量级没有得到有效评估的话,那么将SST作为重要变量的大多数全球气候或海洋模型的精度将会受到显著影响(臧楠, 2005)。

目前大多数与海表面日增温相关的日变动研究多是基于现场单点观测(Merchant, et al, 2008; Flament, et al, 1994)或单一传感器反演SST所计算的昼夜温差(Flament, et al, 1994; Tanahashi, et al, 2003)。卫星遥感具有高时空分辨率、大空间覆盖度、长时间序列等优势,显然可有效弥补现场单点测量空间覆盖率低的不足。但是,由于卫星遥感SST平台的过境时间、扫描幅、采样方式以及SST反演精度等的差异,基于不同卫星传感器反演SST所计算的海表面日

增温幅度显然也会存在某种程度上的差异,而对于这些差异目前在中国近海仍缺乏较细致的比较,因此需要积累利用遥感计算的昼夜温差在中国近海分析讨论海表面日增温幅度的变化特征的经验。

本文选择南海作为研究区域,该海域面积达350万km²,平均水深1800m(王桂华等, 2005),大部分海域水深大于200m(图1)。南海纵跨亚热带、热带,是东亚季风作用的典型海域,其环流结构复杂多变(Wang, et al, 2013),SST的时空变动亦相当复杂。利用多年时序列遥感SST资料,Wang等(2001b)指出南海不同区域的SST变化受到锋面的调制。混合层(Qu, et al, 2007; Wang, et al, 2001a)、障碍层(Zeng, et al, 2009a)等次表层结构变动、热带气旋引起的惯性振荡(Sun, et al, 2011; Sun, et al, 2012)、风生涡旋与上升流(Zhuang, et al, 2006)以及海表层热通量变化(Zeng, et al, 2009b; Zeng, et al, 2009c)等都与南海SST变化有一定关联。此外,降雨对于南海SST的高频变率亦有一定的影响,早晨较大的温度变率与早晨最大降雨量相一致(Li, et al, 2010)。而近岸SST的日变化多与太阳辐射、内波和潮流的影响有关,其日变化幅度约在0.1~5°C之间(肖晖等, 1988; 张学斌等, 2000)。在本研究中,我们拟充分利用卫星遥感观测的优势,选择美国对地观测系统(EOS)发射的两颗卫星Terra和Aqua所携带的MODIS和AMSR-E传感器,计算它们所反演的白天和晚上SST的昼夜温差,从短期尺度和年变化上分别比较不同传感器反演的SST在计算与分析海表面

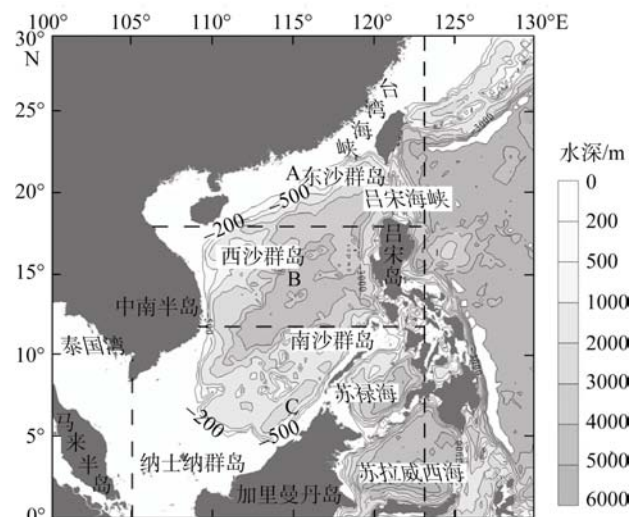


图1 南海地形图

黑色虚线框表示图2的统计区,其中A为南海北部(18°~30°N, 105°~123°E); B为南海中部(12°~18°N, 105°~123°E); C为南海南部(0°~12°N, 105°~123°E)

Fig. 1 Bathymetry in the South China Sea

日增温上的异同, 与此同时初步分析南海海表面日增温的时空变动特征。

1 数据与方法

1.1 遥感 SST、风速

作为地球观测系统的重要组成部分, 美国国家航空航天局(NASA)分别于 1999 年和 2002 年发射了 Terra 和 Aqua 两颗卫星。Terra 和 Aqua 卫星均为太阳同步轨道卫星, 一天可观测地球两次, 其中 Terra 卫星约在地方时 10: 30 和 22: 30 过境, 而 Aqua 卫星约在地方时 1: 30 和 13: 30 过境, 因此, Terra 星也被称作上午星, Aqua 星被称作下午星。两颗星上都搭载着 MODIS 传感器, 至今仍在工作中。而 AMSR-E 传感器只搭载在 Aqua 卫星上, 并于 2011 年 10 月 4 日停止运转。

MODIS 传感器的扫描宽度为 2330km, 设置有 36 个波段, 可探测大气、海洋和陆地等多种环境信息, 其中 31 和 32 波段设在 10.7~12.3 μm , 20、22 和 23 个波段设在 3.6~4.1 μm , 它们均可用以反演海表层温度(Walton, et al, 1998)。本研究选择的是基于 11 μm 和 12 μm 两个热红外波段反演的白天和晚上的 SST 产品。MODIS/Terra-SST 和 MODIS/Aqua-SST 数据均下载于美国航空航天局哥达德太空飞行中心(NASA GSFC)的数据中心(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), 选取时间跨度为 2002 年 7 月至 2010 年 12 月, 空间分辨率为 4km。NASA GSFC 数据中心提供的 Aqua 和 Terra 的 MODIS SST 根据数据质量分成 0~2 共 3 个等级, 其中 0 级 SST 为质量最好的 SST(Best SST)。本研究选用的是 0 级 SST 产品。由于热红外遥感会受到云、水汽、雾等大气影响, 因此每天的数据经常会出现缺失点。这些缺失点可能会使得遥感 SST 无法捕捉到类似温度锋的海表层动力特征, 进而导致其与现场观测间出现一定的差距(Yao, et al, 2012), 需在分析中加以注意。统计表明南海 MODIS/Aqua-SST 白天和晚上的空间覆盖率平均为 21.1% 和 15.5%, MODIS/Terra-SST 白天和晚上的空间覆盖率则分别为 21.4% 和 17.3%。

AMSR-E 传感器是一个多波段的被动微波辐射计, 扫描宽度为 1450km, 有 12 通道、6 个波段, 可用于反演 SST、水汽、云量、风速等参数。它主要利用 6.9VGHz 和 10.7VGHz 两个波段来估算海表层温度(Wentz, et al, 2000)。不同于热红外波段反演的 SST, 微波遥感 SST 基本上不受云的影响, 对目标海区可进行全天候的观测。但它的空间分辨率比较低, 且

易受陆地辐射的影响, 从而限制了它在近岸海区的应用。本研究使用的 AMSR-E SST 从遥感系统数据中心(<http://www.remss.com/>)下载, 其空间分辨率为 25km。受到扫描刈幅的影响, 南海 AMSR-E/Aqua-SST 白天和晚上的空间覆盖率平均为 31.1% 和 30.9%。与现场观测温度相比, MODIS SST 反演的均方根误差和偏差分别为 0.84K 和 0.02K, AMSR-E SST 反演的均方根误差和偏差分别为 0.86K 和 0.22K (Sakaida, et al, 2009; Hosoda, et al, 2012), 足以用来探测海表面日增温的变化特征(Kawai, et al, 2007; Gentemann, et al, 2008)。

本文采用的风速等辅助数据是从 AMSR-E/Aqua 反演所得, 云量资料取自美国国家海洋和大气管理局的综合海洋大气数据集(ICOADS)。

1.2 日增温幅度的计算

参考 Stuart-Menteth 等(2003)的做法, 在本研究中 SST 日增温表示为当天遥感 SST 的白天温度减去晚上温度, 其计算公式为:

$$\text{SST 日增温}(\Delta T) = \text{SST}_{\text{day}} - \text{SST}_{\text{night}} \quad (1)$$

因我们下载的是全球格点数据资料, 所以在计算前先要进行区域切割, 选取南海 0°~30°N、100°~130°E 范围内的 MODIS/Terra-SST、MODIS/Aqua-SST 以及 AMSR-E/Aqua-SST 数据。其次, 受云量和卫星过境轨道等影响, 白天、晚上 SST 的覆盖区域不一定匹配, 选用白天、晚上都有 SST 数据的点作为有效点, 再根据公式(1)计算每天的日增温。最后, 通过算术平均求周、月平均的 SST 日增温。统计表明, 在绝大多数时间, $\Delta T < 0$ 的数据点占有效点的比例小于 10%, 我们主要考虑海表面温度日增温的变化特征, 因此在计算各种平均时只取 $\Delta T > 0$ 的点进行时间、区域平均, 不考虑那些因算法误差或其他未知因素所导致的 $\Delta T < 0$ 的数据。为了简便起见, 下文分别用 $\Delta T-T$ 、 $\Delta T-A$ 和 $\Delta T-AM$ 来表示基于 MODIS/Terra-SST、MODIS/Aqua-SST 以及 AMSR-E/Aqua-SST 所计算的海表面日增温。

2 结果与讨论

2.1 日增温的短期变动

2.1.1 区域平均

将南海 0°~30°N、105°~123°E 分成北部(A区: 18°~30°N)、中部(B区: 12°~18°N)和南部(C区: 0°~12°N)3 个子区, 分别计算各子区 ΔT 的平均值。因 MODIS SST 在每天的图像上会出现大量的无数据点, 所以我们先进行 3 天平均后再计算区域平均值。

图2表示2009~2010年3个子区 ΔT -T、 ΔT -A和 ΔT -AM短期变动的时序图,其中 ΔT -T和 ΔT -A在分析时剔除了那些区域平均有效点小于500个的数据。

从图2可看出,A、B、C三区 ΔT 的时间变化趋势比较一致。日增温以春季、夏季较为显著,大部分位于0.5~1.5K之间;冬季则比较小, $\Delta T < 1.0K$ 。3种 ΔT 之间的差异在冬季比较小,在夏季和春季则大一些。这些差异在南海南、中部(B、C区)较为明显。

从表1中A、B、C三区 ΔT 的统计信息同样可以看出,无论哪个区域,大部分时间各传感器所计算的 ΔT 平均值主要集中在0.5~1.5K之间,平均约占有效点数的75%,最大值主要出现在C区(南海南部);由MODIS/Aqua计算的SST昼夜温差(ΔT -A)平均值大于1.0K,而且各传感器计算的 ΔT 平均值均是南部>中部>北部,应与太阳辐射的纬向差异有关。

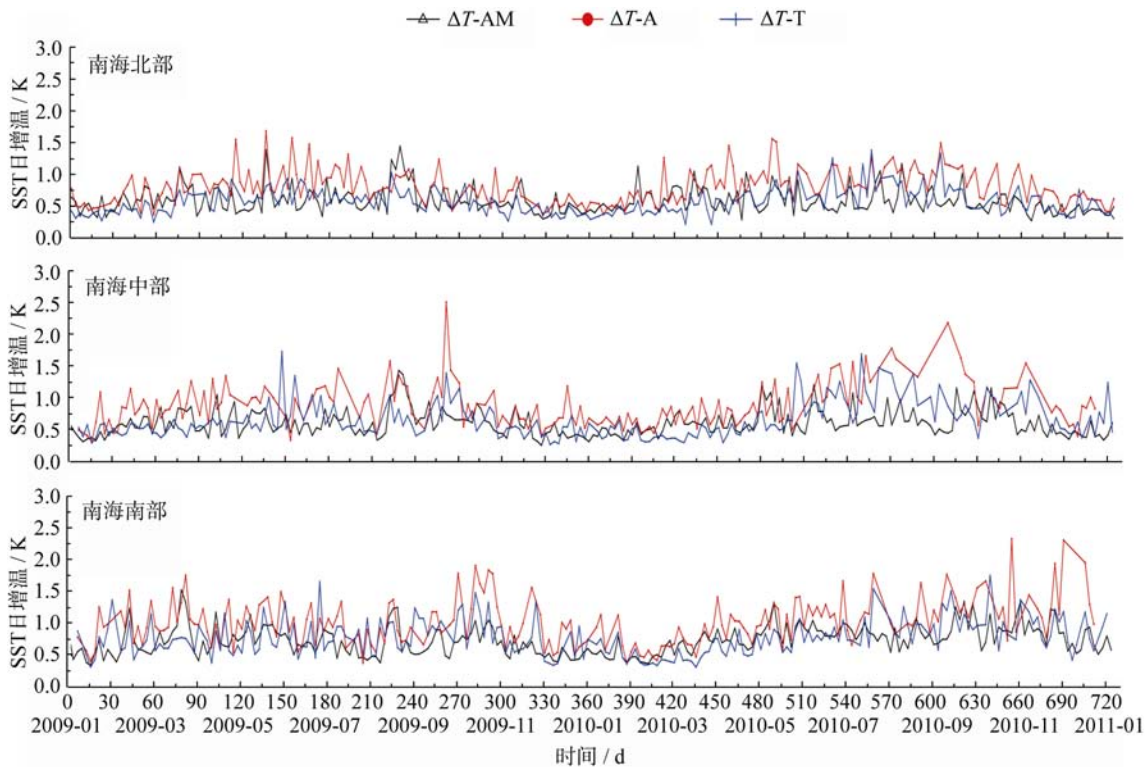


图2 2009年1月1日~2010年12月31日A、B、C三区 ΔT -T、 ΔT -A和 ΔT -AM的时间序列图

Fig. 2 Time series plots of ΔT -T, ΔT -A and ΔT -AM for sub-regions A, B, and C between 1st Jan. 2009 and 31st Dec. 2010

表1 A、B、C三区2009~2010年不同SST日增温数据源SST日增温幅度的比较

Tab. 1 Comparison of sea surface diurnal warming amplitude derived from multiple sensors in the southern, central and northern South China Sea from 2009 to 2010

	南部			中部			北部		
	ΔT -AM	ΔT -A	ΔT -T	ΔT -AM	ΔT -A	ΔT -T	ΔT -AM	ΔT -A	ΔT -T
ΔT 变化范围/K	0.35~1.5	0.37~2.33	0.32~1.76	0.26~1.43	0.31~2.50	0.27~1.73	0.27~1.44	0.37~1.68	0.21~1.38
ΔT 平均值/K	0.74	1.03	0.79	0.61	0.89	0.66	0.59	0.81	0.57
ΔT 标准偏差/K	0.226	0.360	0.279	0.204	0.344	0.286	0.203	0.266	0.197
总有效数据个数	242	202	222	242	171	213	242	215	220
ΔT 介于0.5~1.0K间的有效数据个数	180	100	143	141	105	117	130	141	124
ΔT 介于1.0~1.5K间的有效数据个数	28	75	42	13	42	26	13	42	6
$\Delta T > 1.5K$ 的有效数据个数	1	20	4	0	10	3	0	5	0

从日增温变化幅度看(图2和表1),A、B、C三区全年均是 ΔT -A略大于 ΔT -T和 ΔT -AM。 ΔT -A大于 ΔT -T显然与卫星的过境时间有关。有研究表明,SST

的日最高值一般出现在午后至傍晚,尤其在地方时14:30左右会出现显著锋值(Yokoyama, et al, 1995),与Gentemann等(2003)指出在理想条件下海表日增

温于早上8点左右开始、下午接近3点时达到峰值的规律相近。由于Aqua卫星的过境时间为地方时1:00和13:00左右,比较接近日最高水温和最低水温出现的时刻,因此观测到的 ΔT 会比Terra卫星观测到的要大。

Aqua卫星同时搭载有MODIS和AMSR-E两个传感器,可MODIS/Aqua-SST计算的日增温幅度 ΔT -A却略高于AMSR-E/Aqua-SST计算的 ΔT -AM,可能与二者测量SST的方式以及空间分辨率有关。首先,红外遥感所测温度为海表微米量级的温度,微波测量的则是海表毫米量级的温度(Donlon, et al, 2002),两种传感器从卫星到海表的大气路径不同,海表的发射率不同,导致二者在反演SST中难免会产生差异。其次,微波辐射计的测量主要是受雨、高风速的影响;而红外辐射计的测量受到云、水汽、风速和气溶胶等因素影响,其中云是红外辐射遥感SST最大的误差源。对云量的简单分析表明,当云量多时, ΔT -A和 ΔT -AM之间的差异会有所增大。最后,MODIS SST的空间分辨率为4km,而AMSR-E SST空间分辨率为25km,当空间分辨率比较低时,可能无法捕捉到部分高值区(Gentemann, et al, 2008),从而导致了 ΔT -AM比 ΔT -A要小。

2.1.2 日增温事件

春夏之交南海风速较低,容易出现持续较长的日增温事件。取2005年春季在南海北部观测到的一个日增温事件,从其发展过程以及时空变化上进一步比较 ΔT -T、 ΔT -A和 ΔT -AM之间的区别(图3)。从图3空间场分布图可以看出,3种资料所计算的 ΔT 的空间分布特征基本相似,除了在南海南部($0^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 范围内)出现大的日增温变化幅度外,在南海东北部也出现 ΔT 高值区。以南海东北部($14^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$)为例,3种传感器所计算的日增温变化幅度的区域平均值以及 $\Delta T > 1\text{K}$ 的有效点数如图4和图5所示。如上所述,在短期变化上,3种传感器可能因扫描刈幅、空间分辨率、采样方式等差异导致其计算的日增温幅度存在一定的差异。但从图4和5可以看出,由 ΔT -T、 ΔT -A和 ΔT -AM所反映的日增温事件的总体变化趋势基本上还是一致的,这个日增温事件最强发生在2005年4月22~23日,而后逐渐减弱。以 ΔT -AM $>1\text{K}$ 计算,其影响面积最大达 362500km^2 。不过,在5月初,MODIS/Auqa-SST计算的日增温幅度变化与AMSR-E/Auqa-SST计算的日增温幅度变化差异较大(图4和图5),可能是因为受扫描刈幅和天气影响,MODIS/Auqa在研究区域出

现大范围的数据缺失点(图3)。

很显然,在短期尺度上,与 ΔT -AM空间分布图相比, ΔT -T和 ΔT -A的空间分布图有相当多的“噪音”(图3)。由于AMSR-E采用微波方式探测SST,基本上不受云的影响,尽管空间分辨率较低,但每天数据能覆盖大部分海区;而MODIS采用红外方式遥感SST,数据质量受云及水汽的影响,容易出现数据缺失与算法误差,导致 ΔT -T和 ΔT -A空间分布图像显得比较杂乱。但是,由于MODIS空间分辨率较高,小区域范围内可以看出MODIS/Aqua比AMSR-E的结构更明显、细节更突出;而且在靠近岸区域,受陆地辐射影响,AMSR-E多无数据,这时只能利用MODIS进行分析。

以上分析表明,从采样时间考虑,Aqua星显然比Terra星更适合监测日增温事件。考虑到不同波段遥感测量受大气影响程度的差异,研究海表面日增温变化规律以微波传感器AMSR-E反演的SST更为合适;但AMSR-E/Aqua-SST的空间分辨率只有25km,因此在小区域范围内最好能辅以高分辨率的MODIS/Aqua数据一起判断。

2.2 年变化

我们以AMSR-E计算的日增温(ΔT -AM)为例,通过计算南海SST昼夜温差的月平均值初步分析南海海表面日增温的年变化特征,所得到的月平均时序和空间分布如图6~8所示。其中图6表示的是2002年7月至2010年12月南海 ΔT -AM的月平均变化,为了对比,也将MODIS/Terra和MODIS/Aqua计算的 ΔT -T、 ΔT -A示于图6。

从图6可以看出,和短期变动类似,3种 ΔT 月平均变化趋势也是基本一致,即每年冬季的 ΔT 比较低,春、夏、秋 ΔT 较高,尤其是春夏之交的4~5月份,可能与季风影响下混合层深度的季节差异有一定的关联(Wang, et al, 2001a)。

从图7多年(2002~2010年)平均的 ΔT -AM空间分布图可以发现,在不同季节南海日增温存在明显的空间差异,总体上来说南部 $>$ 北部、东部 $>$ 西部。冬季(12、1、2月)南海绝大部分区域的日增温幅度都比较小(约0.5K)。到了春季, 10°N 以南海域以及吕宋岛西部外海出现明显的高值区($>1\text{K}$),特别是在春夏之交的4、5月份,南海东北部、南海南部均出现大幅度的SST日增温;同时一些近封闭海域如苏禄海和苏拉威西海也出现了明显的高值区($>1\text{K}$);夏季,南海的日增温幅度有所降低,其中西南部日增温幅度降低了约11%;秋季南海北部日增温幅度明

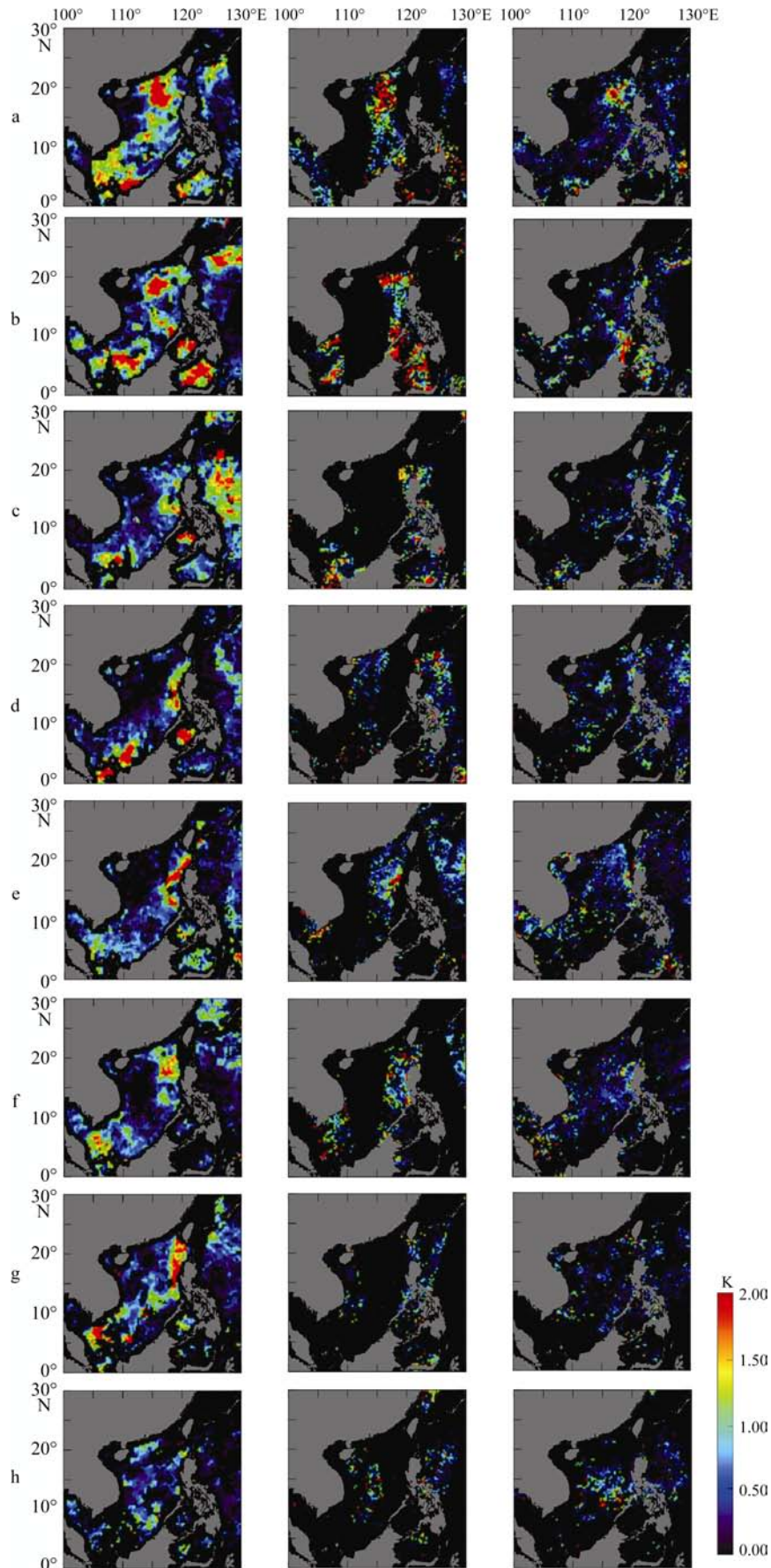


图3 2005年4~5月 ΔT -AM(左列)、 ΔT -A(中列)、 ΔT -T(右列)的空间分布图(2天平均)

(a) 04-22~04-23; (b) 04-24~04-25; (c) 04-26~04-27; (d) 04-28~04-29; (e) 04-30~05-01; (f) 05-02~05-03; (g) 05-04~05-05; (h) 05-06~05-07

Fig. 3 Spatial distribution of ΔT -AM (left), ΔT -A (middle) and ΔT -T (right) in April and May 2005 (two-day average)

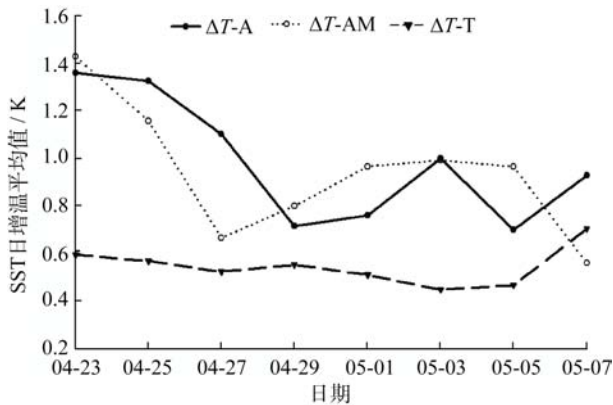


图4 2005年4~5月南海东北部SST日增温幅度(ΔT)的变化
Fig. 4 Variation of sea surface diurnal warming amplitude (ΔT) in the northeastern SCS in April and May 2005

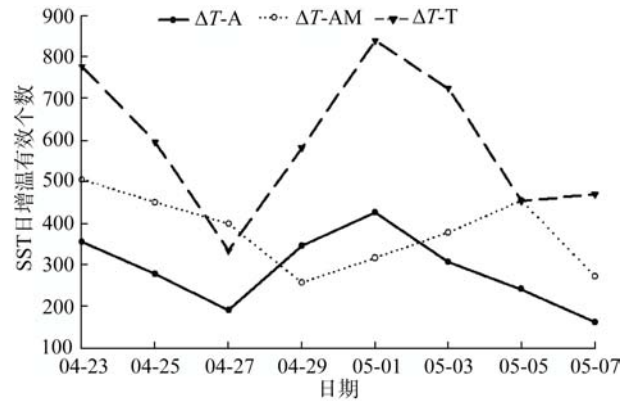


图5 2005年4~5月南海东北部各 $\Delta T > 1K$ 的有效点的变化
Fig. 5 Variation of count number of $\Delta T > 1K$ in the northeastern SCS in April and May 2005

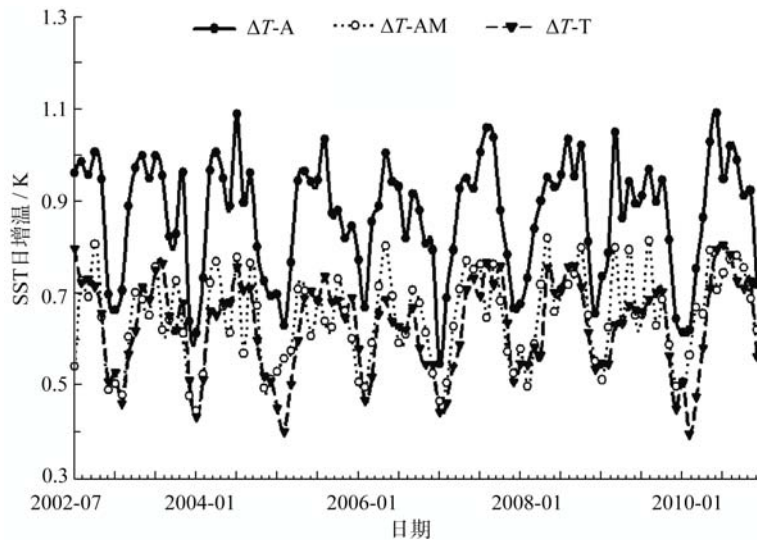


图6 2002~2010年南海海表面日增温的月变化
Fig. 6 Monthly variation of sea surface diurnal warming in the South China Sea from 2002 to 2010

显变小, 南海东北部的高值区消失, 大的日增温主要发生在东南部海域。从多年平均风速的年变化的空间分布图看, 多年平均的 ΔT -AM 空间分布与之有较好的对应关系, 风速较高的海区, ΔT -AM 较低, 反之亦然(图7、8)。进一步将2002年7月至2010年12月每月南海3个子区的海表面日增温与风速相关联(如图9所示), 可以看出3个子区的日增温与风速变化均存在显著的负相关, 其中南部子区二者的相关系数 $r=0.896$, 中部 $r=0.768$, 北部 $r=0.817$ ($p < 0.001, n=96$)。当风速较小时, 海表层容易出现热层化, 日增温变大, 反之则日增温变小(Qiu, et al, 2009)。显然, 在南海, 无论是南部、中部还是北部, 风速都是控制其海表面日增温时空变化的一个相当重要的影响因素。

图10所示为2002年7月至2010年12月多年月平均南海南部、中部和北部3个子区海表面日增

温、太阳辐射、风速、云量的时间序列。从该图可以看出, 除了冬季外, 南部海区的海表面日增温明显要大于中部和北部海区, 中部和北部海区的日增温幅度基本相当。从季节变化看, 3个海区的海表面日增温均以冬季为最小, 显然与该季节太阳辐射较弱、盛行强东北季风有关。在强风作用下, 海洋表面热交换以失热为主, 上层混合亦明显增强, 导致白天和夜晚之间SST差异明显减少。春季3个海区均出现较强的日增温, 尤其是南部, 可能与太阳辐射较强、云量较少、风速较低有关(图10)。已有研究表明日增温事件多发生在强日照、低风速条件下(Stramma, et al, 1986; Price, et al, 1986; Qiu, et al, 2009)。4~5月南海东北部海域的风速是全年最低, 云量也是全年最小, 此时太阳辐射亦明显增强, 海表层热层化明显, 从而出现如图7所示的日增温高值区(4~5月)。夏季, 受强太阳辐射的影响, 白天

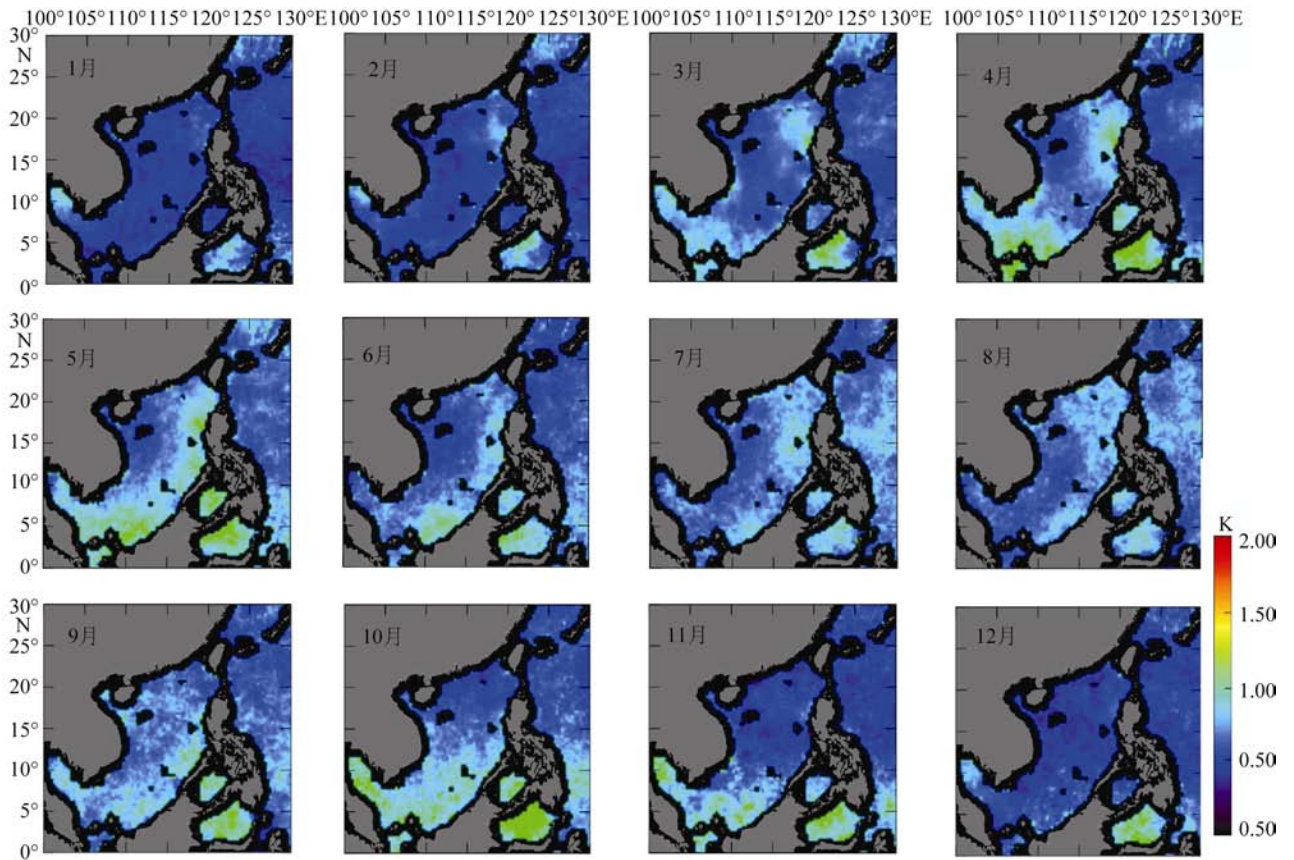


图 7 2002~2010 年多年平均海面日增温的年变化

Fig. 7 Annual variation of multi-year-mean sea surface diurnal warming between during 2002 and 2010

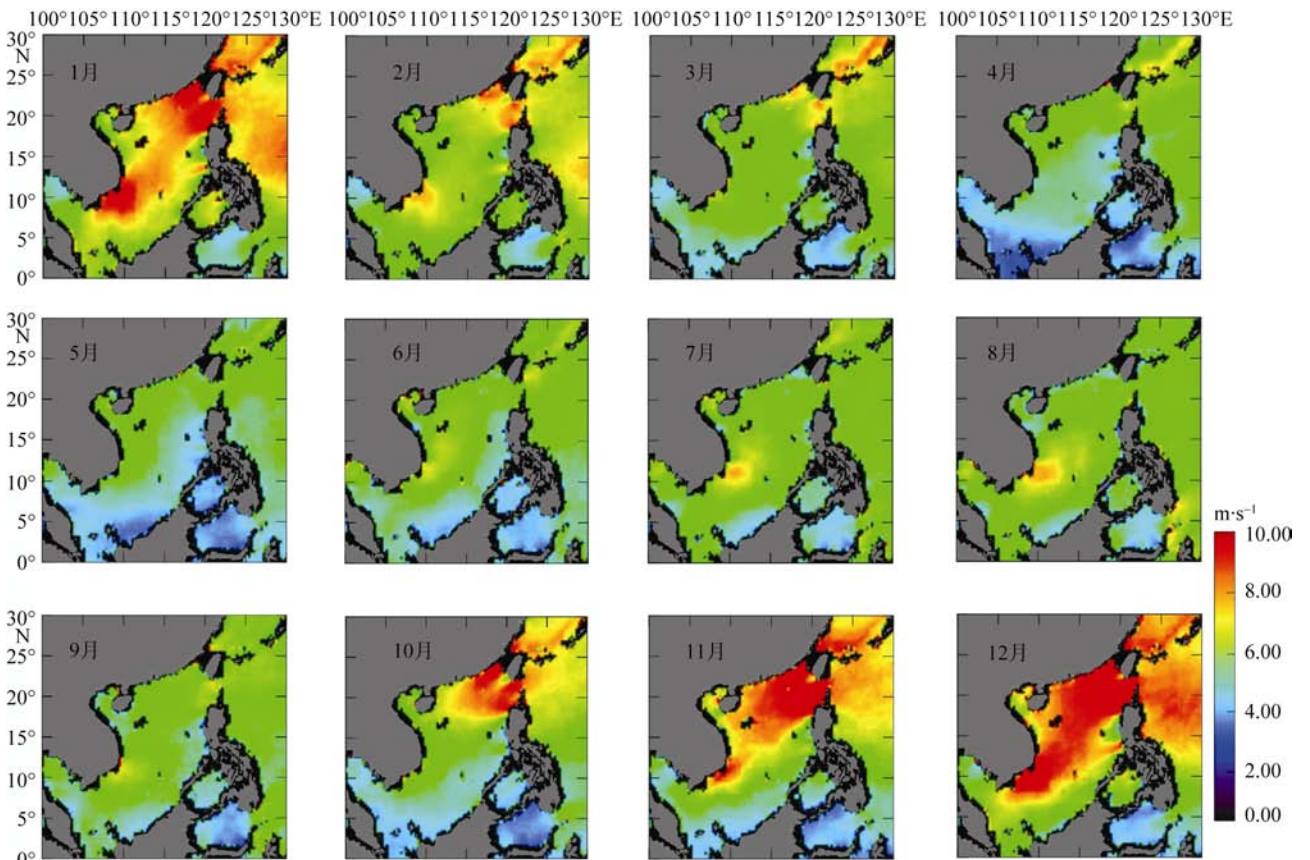


图 8 2002~2010 年多年平均风速的年变化

Fig. 8 Annual variation of multi-year-mean wind speed during 2002 and 2010

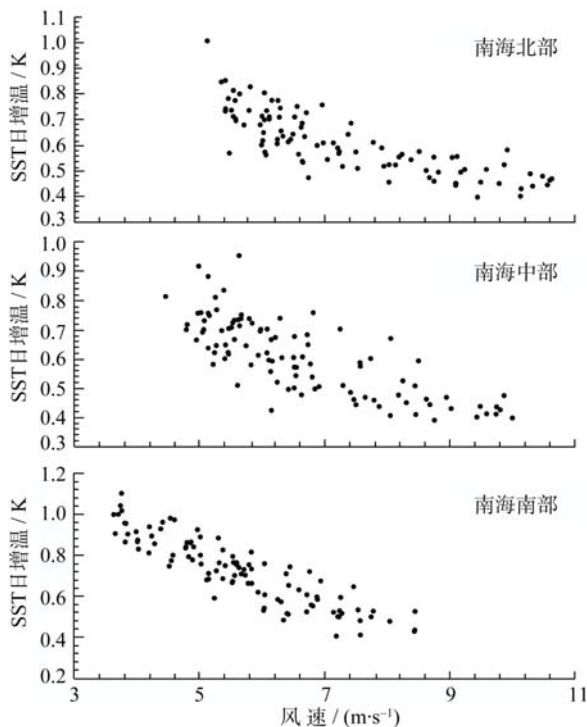


图9 南海海表面日增温幅度与风速的关联

Fig. 9 Relationship between SST diurnal warming magnitude and wind speed in the SCS

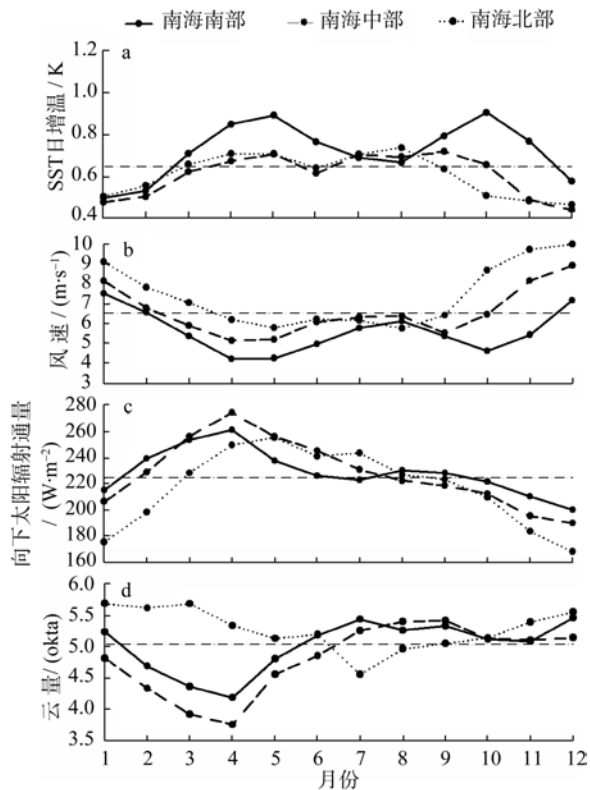


图10 2002~2010年南海各海区多年月平均海表面日增温(a)、风速(b)、向下短波太阳辐射通量(c)、云量(d)的时间序列
虚线表示各要素的南海全海区平均值

Fig. 10 Time series of multi-year-mean sea surface diurnal warming (a), wind speed (b), downward shortwave solar radiation flux (c), and cloud amount (d) in the three subregions of the SCS during 2002 and 2010

SST 升温快; 但越南外海因受中南半岛影响西南风强盛($>7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 南海中西部海域出现明显的高风速区(图8); 从图8风速变化图也可以看出, 夏季南海各个海区的风速比春、秋季要强。在强风影响下, 这些区域海表面日增温幅度小于东部和北部海域(图7)。南海夏季风爆发后, 由于对流增强、云量增多, 太阳辐射对海面的加热作用受阻, 短波辐射对SST日变化作用降低, 而因风速变大而明显增大的潜热通量对其影响明显变大(Zeng, et al, 2009c)。秋季, 太阳辐射逐渐减弱, 东北季风爆发, 在南海北部的台湾海峡和吕宋海峡出现两个高风速区。受其影响, 南海北部SST日变化明显减弱, 而东南部大部分海域的风速 $<5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 加上位处低纬太阳辐射强度仍然明显, 所以南部海域的SST日变化幅度要高于中部海域和北部海域(图7、10)。可见, 太阳辐射、云量、风场的变化都直接或间接地影响南海海表面日增温年变动的时空分布。不过从图10可以看到, 南海南部、中部和北部3个海区的海表面日增温变化与风速的季节性变化更为一致, 说明风速与南海海表面日增温大尺度的时空变化有着更为密切的关系。

3 小结

本文利用 Aqua 和 Terra 卫星携带的 MODIS、AMSR-E 传感器反演的海表层温度计算了南海海表面日增温, 在此基础上初步分析了南海海表面日增温的短期变动及其季节变化特征, 主要结论如下。

1) MODIS/Aqua、MODIS/Terra 和 AMSR-E/Aqua 三个传感器所表征的南海海表面日增温的时空分布特征以及趋势未见显著性差异, 这与 Gentemann 等(2008)在北大西洋热带海域观测到的结果相一致。

2) MODIS/Aqua 计算的日增温略大于 AMSR-E/Aqua 和 MODIS/Terra, 由 MODIS 计算的日增温分布图有较多“噪音”, 这些差异与卫星过境时间、传感器测量 SST 方式、反演算法等因素有关。由于微波传感器 AMSR-E 在测量海表 SST 时基本不受云层干扰, 所获有效数据的覆盖海域较广, 因此分析海表面日增温大尺度变化特征时以 AMSR-E 更为合适; 但 AMSR-E 的空间覆盖率只有 25km, 因此在小区域范围内最好能辅以高分辨率的 MODIS 数据一起判断。

3) 南海 SST 日变动冬季最弱, 春、夏、秋季较强, 并具有很大的空间变异, 总体上来说南部海域

大于中、北部海域, 东部海域大于西部海域。这些变化特征与太阳辐射、风场、云量等因素的影响有关, 尤其是风速, 其与日增温呈显著负相关。

由于受卫星过境每天只有2次的局限性, 本文计

算得到的海表面日增温只是代表单一时刻的昼夜温差, 可能无法全面反映SST日变化幅度(每天SST最大值与最小值之差)的变化, 未来仍需要结合更多卫星开展高频观测, 或结合现场实时数据加以深入研究。

参考文献

- 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 2005. 南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 20: 882–886.
- 肖晖, 蔡淑惠. 1988. 台湾海峡西部海域温、盐度分布特征[J]. 台湾海峡, 7: 227–234.
- 臧楠. 2005. 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: 1–65
- 张学斌, 胡建宇. 2000. 台湾浅滩南部边缘海域 1997 年 8 月温盐度的多周日变化[J]. 台湾海峡, 19: 89–94.
- DONLON C, MINNETT P, GENTEMANN C, et al. 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research [J]. *Journal of Climate*, 15(4): 353–369.
- FLAMENT P, FIRING J, SAWYER M, et al. 1994. Amplitude and horizontal structure of a large diurnal sea surface warming event during the Coastal Ocean Dynamics Experiment [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 24: 124–139.
- GENTEMANN C L, DONLON C J, STUART-MENTETH A, et al. 2003. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(3): 1140.
- GENTEMANN C L, MINNETT P J. 2008. Radiometric measurements of ocean surface thermal variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 113: C08017.
- HOSODA K, KAWAMURA H, LAN K W, et al. 2012. Temporal scale of sea surface temperature fronts revealed by microwave observations [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(1): 3–7.
- KAWAI Y, WADA A. 2007. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review [J]. *Journal of oceanography*, 63: 721–744.
- LI W B, LUO C, WANG D X, et al. 2010. Diurnal variations of precipitation over the South China Sea [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 109(1–2): 33–46.
- MERCHANT C, FILIPIAK M, LE BORGNE P, et al. 2008. Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas [J]. *Geophysical Research Letters*, 35: L04601.
- PRICE J, WELLER R, PINKEL R. 1986. Diurnal cycling: Observations and models of the upper-ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 91(C7): 8411–8427.
- QIU C H, WANG D X, KAWAMURA H, et al. 2009. Validation of AVHRR and TMI-derived sea surface temperature in the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 29(20): 2358–2366.
- QU T D, DU Y, GAN J P, et al. 2007. Mean seasonal cycle of isothermal depth in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(C2): C02020.
- SAKAIDA F, KAWAMURA H, TAKAHASHI S, et al. 2009. Research and development of the New Generation Sea Surface Temperature for Open Ocean(NGSST-O)product and its demonstration operation [J]. *Journal of Oceanography*, 65: 859–870.
- STRAMMA L, CORNILLON P, WELLER R A, et al. 1986. Large diurnal sea surface temperature variability: Satellite and in situ measurements [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 16: 827–837.
- STUART-MENTETH A C, ROBINSON I S, CHALLENGOR P G. 2003. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 108(C5): 3155.
- SUN L, ZHENG Q A, WANG D X, et al. 2011. A case study of near-inertial oscillation in the South China Sea using mooring observations and satellite altimeter data [J]. *Journal of Oceanography*, 67(6): 677–687.
- SUN L, ZHENG Q A, TANG T Y, et al. 2012. Upper ocean near-inertial response to 1998 Typhoon Faith in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(2): 25–32.
- TANAHASHI S, KAWAMURA H, TAKAHASHI T, et al. 2003. Diurnal variations of sea surface temperature over the wide-ranging ocean using VISSR on board GMS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(C7): 3216.
- WALTON C, PICHEL W, SAPPER J, et al. 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites [J]. *Journal of Geophysical Research*, 103(C12): 27999–28012.
- WANG D X, DU Y, SHI P. 2001a. Evidence for thermocline ventilation in the South China Sea in winter [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(9): 774–778.
- WANG D X, LIU Y, QI Y Q, et al. 2001b. Seasonal variability of

- thermal fronts in the northern South China Sea from satellite data [J]. *Geophysical Research Letters*, 28(20): 3963–3966.
- WANG D X, LIU Q Y, XIE Q, et al. 2013. Progress of regional oceanography study associated with western boundary current in the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(11): 1205–1215.
- WENTZ F, MEISSNER T. 2000. AMSR Ocean Algorithm, Version 2 [M]. Santa Rosa: Remote Sensing Systems: 1–66.
- YAO J L, BELKIN I, CHEN J, et al. 2012. Thermal fronts of the southern South China Sea from satellite and in situ data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(23): 7458–7468.
- YOKOYAMA R, TANBA S, SOUMA T. 1995. Sea surface effects on the sea surface temperature estimation by remote sensing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 16(2): 227–238.
- ZENG L L, DU Y, XIE S P, et al. 2009a. Barrier layer in the South China Sea during summer 2000 [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1): 38–54.
- ZENG L L, SHI P, LIU W T, et al. 2009b. Evaluation of a satellite-derived latent heat flux product in the South China Sea: A comparison with moored buoy data and various products [J]. *Atmospheric Research*, 94(1): 91–105.
- ZENG L L, WANG D X. 2009c. Intraseasonal variability of latent-heat flux in the South China Sea [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 97(1–2): 53–64.
- ZHUANG W, WANG D X, HU J Y, et al. 2006. Response of the cold water mass in the western South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(4): 1–13.