

南海及周边海域融合海表温度产品的验证与互较

胡晓悦^{1,2,3,4}, 张彩云^{1,2}, 商少凌¹

1. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005;
2. 福建省海陆界面生态环境重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005;
3. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071;
4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用 2008 年—2009 年 Argo、Argos 现场观测海表面温度 SST, 对 OSTIA、MISST、MWSST 以及 NGSST4 种融合 SST 产品在南海及其周边海域的适用性进行评估。验证结果表明 4 种融合 SST 产品在外海的均方根误差 RMS 介于 0.3—1.0 °C, bias 介于 -0.1—0.6 °C; 除了 NGSST 在近岸出现明显暖偏外, 其他 3 种融合 SST 与现场 SST 基本一致, OSTIA 与现场 SST 的偏差为最小。对 4 种融合 SST 产品彼此间的互较也表明, 它们在水深大于 80 m 的海区没有显著性差异, 但彼此间的偏差会随水深变浅而增大。此外, 各产品间偏差在冬季最大, 夏季最小。本文为具有高时空覆盖度的融合 SST 产品在南海及其周边海域的应用提供了一个可靠的依据。

关键词: 融合 SST, 验证, 互较, 遥感, 南海

中图分类号: TP79 文献标志码: A

引用格式: 胡晓悦, 张彩云, 商少凌. 2015. 南海及周边海域融合海表温度产品的验证与互较. 遥感学报, 19(2): 328—338

Hu X Y, Zhang C Y and Shang S L. 2015. Validation and inter-comparison of multi-satellite merged sea surface temperature products in the South China Sea and its adjacent waters. *Journal of Remote Sensing*, 19(2): 328—338

[DOI: 10.11834/jrs.20153307]

1 引言

海表面温度 SST 是反映海洋及大气系统特性的基础参数, 在海—气相互作用以及气候变动中扮演着关键角色, 也是影响生物地球循环、赤潮、生物活动等多种过程的重要因子 (Hu 等, 2005; Shang 等, 2005; Hong 等, 2009)。目前 SST 资料的获取主要有现场观测和卫星遥感两种主要手段。现场观测已有 150 多年历史 (Rayner 等, 2003), 但受制于海况、仪器、船只和人员等多种因素, 数据量有限、覆盖范围小、过程较为复杂; 卫星遥感 SST 起始于 20 世纪 70 年代, 因覆盖度广、分辨率高, 同时具有良好同步性和长期重复观测等特点, 已成为海洋观测中广泛应用的重要手段, 并以微波和红外观测方式最为常见。但受限于传感器类型、观测平台、采

样方式、分辨率和天气等多种影响因素, 不同观测方式获取的 SST 各有优缺点 (Zhang 等, 2011)。因此, 结合多源融合遥感观测 SST 资料, 通过客观分析方法建立一套有效、无云、高时空分辨率、全球覆盖、可满足业务化运行的 SST 时序列资料在近年来备受关注, 这也是全球海洋同化实验 (global ocean data assimilation experiment, GODAE) 计划的首要目标, 为此专门成立了高分辨率遥感 SST 融合小组 GHRSSST-PP (the GODAE high-resolution sea surface temperature pilot project) (Donlon 等, 2007)。近十年来, GHRSSST 已成功发布了 Operational SST and sea ice analysis (OSTIA), Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNOC), Remote Sensing Systems-Microwave optimally interpolated SST (RSS_MWSST), Microwave + Infrared optimally interpolated

收稿日期: 2013-11-26; 修订日期: 2014-03-12; 优先数字出版日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: U1305231, 40706041); 福建省自然科学基金 (编号: 2011J01278); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放基金资助项目 (编号: MATHAB20100313)

第一作者简介: 胡晓悦 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋学。E-mail: huxiaoyue12@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 张彩云 (1972—), 女, 副教授, 主要研究领域为海洋遥感应用。E-mail: cyzhang@xmu.edu.cn

SST (RSS-MISST), the Real-Time Global High-Resolution (RTG) 等不同时空分辨率的融合 SST 产品, 以满足不同用户的需求 (Martin 等 2012)。与传统

单一传感器遥感资料如 MODIS、AVHRR 等相比, 融合 SST (如 OSTIA 等) 在空间覆盖度具有相当明显的优势 (图 1)。

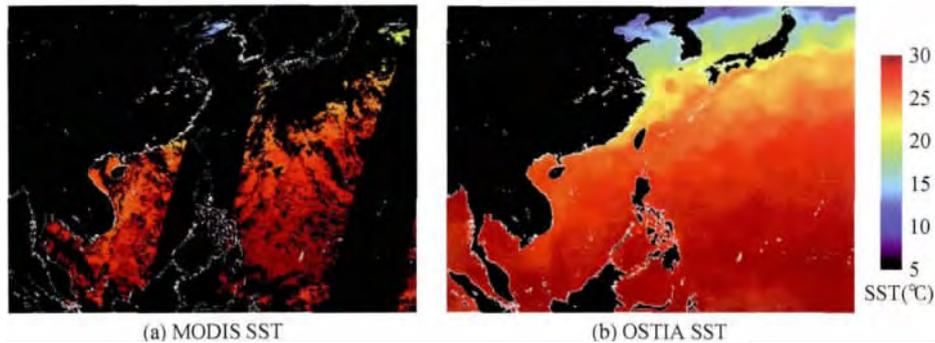


图 1 2009 年 11 月 11 日 MODIS SST 与 OSTIA SST 分布图

Fig. 1 Distribution of MODIS SST and OSTIA SST on November 11, 2009

在各融合 SST 产品的生成过程中, 因研究目的不同, 各数据中心所使用的融合数据源不完全一致, 同时所使用的数据源 (包括红外、微波遥感 SST 以及现场 SST) 的格式、时空分辨率、云检测方法、质量控制流程也不尽相同; 此外, 各产品的融合优化算法、SST 初始场、对海陆界面以及冰覆盖处理方式也不太一致, 从而导致各产品存在不同程度的差异 (Dash 等 2012)。为了确保各融合 SST 产品的精度并满足各种用户需求, GHRSSST 成立了产品互较技术顾问小组 (the inter-comparison technical advisory group, IC-TAG), 并建立了 GHRSSST multi-product ensemble (GMPE) (Martin 等, 2012)、level-4 SST quality monitor (L4-SQUAM) (Dash 等, 2012) 以及 high-resolution diagnostic data set (HR-DDS) (Donlon

等 2009) 3 个网络平台, 通过现场比对、产品互较等方式对 GHRSSST 发布的主要 L4 融合产品进行定期评估。这些 L4 产品包括澳大利亚、加拿大、美国、日本和英国相关研究结构开发的 SST 融合产品 (表 1)。与 Argo 浮标的比对结果表明, 这些 L4 产品的标准差在全球范围、北大西洋、热带太平洋及北太平洋均小于 0.7°C , 其中 OSTIA 小于 0.5°C ; 除了 NAVO K10、FNMOC、RTG、MWSST 外, 大部分产品的偏差 (bias) 为 $0.02\text{--}0.04^{\circ}\text{C}$ 。Reynolds 和 Chelton (2010) 对包含 OISST、OSTIA、MISST 以及 RTG 在内的 6 种 SST 产品的定量分析结果表明, MISST 在水动力复杂的海区 (如湾流流经海域) 图像质量较差, 与浮标的比对结果仍以 OSTIA 的精度为最好。

表 1 GHRSSST 发布的 L4 SST 融合产品

Table 1 Summary of the various GHRSSST L4 merged SST products

产品名称	国家/机构	NRT [#] 数据起始时间	空间分辨率	参与融合的 SST 数据
CMC	加拿大气象中心	2008 年 4 月	0.2°	现场 + AASTR + AVHRR + AMSR-E
FNMOC	美国舰队气象海洋数值中心	2005 年	9 km	现场 + AVHRR + GOES
GAMSSA	澳大利亚气象局	2008 年 10 月	0.25°	现场 + AASTR + AVHRR + AMSR-E
MGDSST	日本气象厅	2002 年 9 月	0.25°	现场 + AVHRR + AMSR-E
NAVO K10	美国海军海洋局	2004 年 7 月	10 km	AVHRR + AMSR-E + GOES
OISST_v2	美国国家气候数据中心	2008 年 11 月	0.25°	现场 + AVHRR + AMSR-E
OSTIA [*]	英国气象办公室	2006 年 11 月	0.05°	现场 + AASTR + AVHRR + AMSR-E + TMI + SEVIRI
POES/GOES	美国国家环境卫星资料信息局	2007 年 6 月	0.1°	现场 + AASTR + AMSR-E + SEVIRI + GOES + MTSAT-2
MWSST [*] , MISST [*]	美国遥感系统	2007 年	25 km, 9.76 km	AMSR-E + TMI, MODIS + TMI + AMSR-E
RTG	美国国家气象局	2005 年 9 月	$1/12^{\circ}$	现场 + AVHRR

注: * 表示本研究涉及的产品; NRT[#]表示准实时。

南海作为西太平洋最大的陆架边缘海,主要受东亚季风系统影响,环流结构复杂多变,且是各种中尺度海洋现象频发的海区,涡旋、锋面、升降流等时有发生(李立 2002)。为了更好地认识这些海洋过程在不同时空尺度下的变动规律,一套高时空覆盖度、高精度的 SST 数据集是必不可少的;而 GHRSSST-PP 推出的融合 SST 数据产品正好符合这一需求。近年来,融合 SST 在该海域已有一些应用:杨晓霞和唐丹玲(2010)利用 MWSST 分析了台风引起海表面降温的位置变化特征;Pi 和 Hu(2010)基于 New Generation SST(NGSST) 时序列资料提取了台湾海峡温度锋;Shu 等人(2011)在南海近海模型中同化了 OSTIA SST 产品。不过这些融合 SST 产品在南海及其周边海域的精度以及彼此间的差异如何,尚不清楚。已有的检验结果多针对单一传感器反演的 SST(李娜 2006;孙凤琴等 2007;Qiu 等 2009)。Xie 等人(2008)在东海陆架海域利用船测、表层漂流浮标资料对 OSTIA、OISST、FSTIA、MGDSST 和 NGSST 5 种融合 SST 产品进行真实性检验,结果表明在水深大于 80 m 的海域融合 SST 产品可独立使用,但在近岸则需进一步修正。这一研究虽然得到一定结论,但对融合 SST 季节性的差异缺乏细致的比较,且所研究海域并不包括南海。因此,本文选择南海及其周边海域作为研究海区,使

用 Argo 及漂流浮标 Argos 实测资料,对在研究海区已有应用且具有不同空间分辨率的 3 种典型全球融合 SST 产品(OSITA、MWSST 以及 MISST) 以及一种区域性产品(NGSST) 开展现场验证和比对,研究成果不仅可确保各种不同融合 SST 产品在中国近海的有效应用,同时对于提升区域海洋环境监测与预报能力也具有十分重要的意义。

2 数据源与方法

2.1 数据源

(1) 融合 SST 数据。本文使用的 3 种覆盖全球的融合 SST 产品有英国 Met Office 发布的 OSTIA、美国 Remote Sensing Systems(RSS) 提供的微波+红外 SST 融合数据(MISST) 及微波遥感 SST 融合数据(MWSST), 它们的空间分辨率分别为 5 km、9 km 和 25 km。日本东北大学提供的 New Generation SST 数据(简称 NGSST) 为区域性产品,覆盖范围为 116°E—166°E, 13°N—63°N, 参与融合的 SST 数据源有 AVHRR、MODIS 以及 AMSRE。表 2 列给出了这些数据的基本介绍。各产品的验证与比对选取的时间跨度为 2008-01-01 至 2009-12-31(其中 MISST 为 2008-07-16 至 2009-12-31), 空间范围为 5°N—30°N, 105°E—130°E。

表 2 4 种融合遥感 SST 产品简介

Table 2 Summary of the four kinds of merged SST products used in this study

	空间分辨率/km	空间覆盖度	下载网址
NGSST	5	13°N—63°N, 116°E—166°E	[2013-09-26] ftp://www.ocean.caos.tohoku.ac.jp/pub/mergedsst_binary
MWSST	25	全球	[2013-09-26] ftp://www.ssmi.com/sst/daily/l4/tmi_amsre
MISST	9	全球	[2013-09-26] ftp://www.ssmi.com/sst/daily/l4/mw_ir
OSTIA	5	全球	[2013-09-26] ftp://podaac.jpl.nasa.gov/GHRSSST/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA

(2) 实测数据。本文选用 Argo、Argos 浮标测量的 SST 数据对 4 种融合 SST 产品进行验证。Argo 浮标 SST 源自中国 Argo 资料中心([2013-09-26] http://www.argo.org.cn/index.html), 时间范围为 2008-01 至 2009-12, 空间范围为 5°N—30°N, 105°E—130°E。Argo 浮标每隔 10 d 返回一组剖面数据, 其采集温度的最浅水深是 4—5 m, 0 m 层数据很少, 因此为获得足够的表层温度资料, 参考 Marcello 等人(2004)的做法, 选取 4—5 m 层的温度作为验证的实测数据。

由浮标匹配资料分布图(图 2) 可以看出, Argo 资料多分布于深水区, 近岸海域(水深 < 200 m) 尤其是台湾海峡的数据几乎没有。因此以表面漂流浮标(Argos) 测量的 SST 数据为替代, 在台湾海峡对 4 种融合 SST 产品进行验证, 该数据下载自加拿大海洋渔业署([2013-09-26] http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/drib-bder/svp-vecs/index-eng.asp) 时间跨度为 2009-01 至 2009-12, 数据采集频率为 2—8 h。

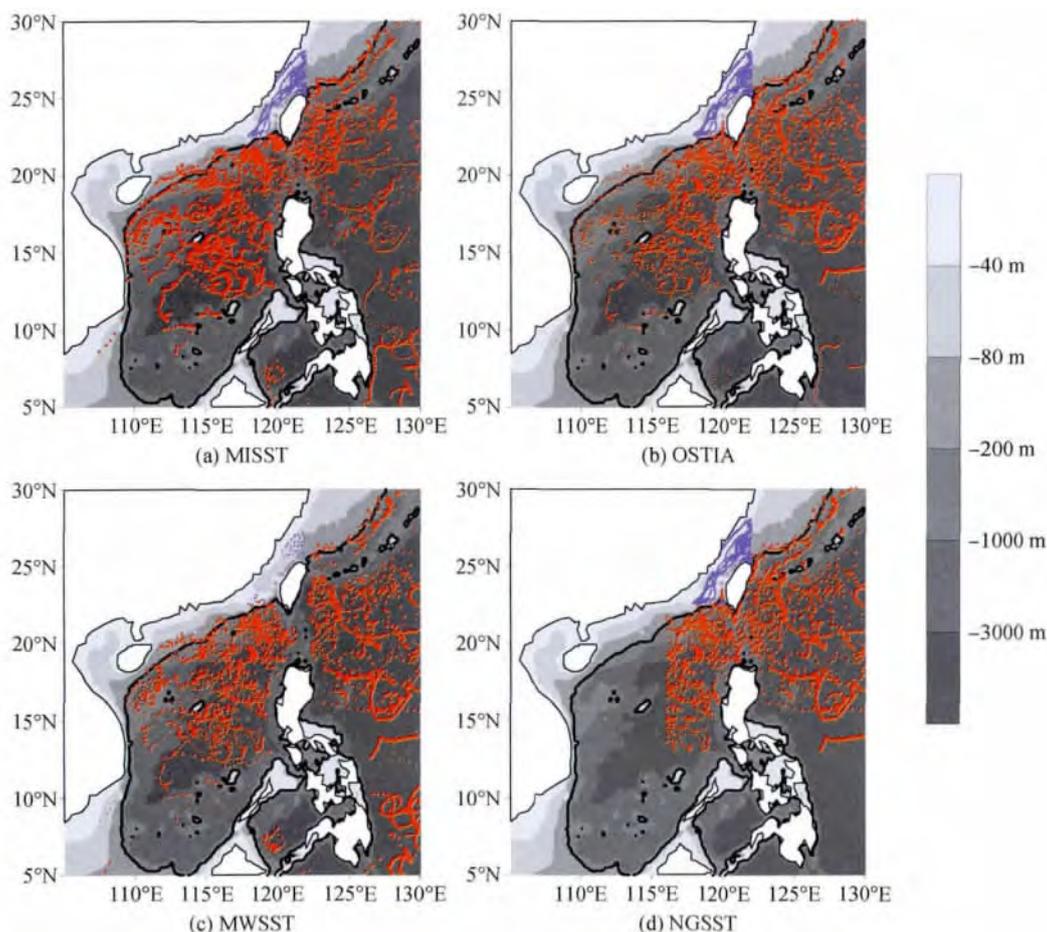


图2 与各融合 SST 对比的 Argo(红色)和 Argos(蓝色)匹配数据分布图
(叠加的阴影区表示地形,黑色等值线为 200 m 等深线)

Fig. 2 Location of the math-up data between the Argo (red) and Argos (blue) SST and the various merged SST products. (The shaded area indicated the topography and the black contour present the isobathymetry of 200 m)

2.2 数据处理方法

(1) 融合 SST 数据的处理。下载的融合 SST 产品多为全球覆盖,需将研究区域内的数据从中切割出来。同时,这些产品的空间分辨率各不相同(表 2),为了便于各融合 SST 产品间的互较,本文以分辨率适中的 MISST(9 km)为准,通过最邻近重采样法,将其他融合 SST 产品的空间分辨率也处理成 9 km。

(2) 匹配数据集的生成与验证。理论上进行验证的匹配数据集在时空尺度上必须同步或基本一致,但事实上很难做到。本文使用的 4 种融合遥感 SST 产品均为无云、覆盖全海域的逐日数据,Argo 所测 SST 则为某一时刻的单点数据。因 Argo 浮标的位置并非固定不变,所以我们首先取 2008 年—2009 年两年内所有 Argo 数据的位置,并以天为单位记录

该位置的时间,然后以 Argo 数据的日期为准,找出对应该时间的 SST 融合产品;在空间上,以 Argo 测量点坐标为准,融合产品取与之最近的网格点的 SST 值(如:2008-01-31,19.426°N、125.130°E 的 Argo 数据,则取 2008-01-31,19.425°N、125.125°E 的 OSTIA 数据值与之匹配)。最终获得 OSTIA 匹配数据集共 4180 组, MWSST 共 3676 组, MISST 共 3463 组, NGSST 共 2661 组。Argos 资料的匹配方法同上,获得 OSTIA 匹配数据集共 1163 组, MWSST 共 48 组, MISST 共 574 组, NGSST 共 1182 组。各匹配数据集位置分布如图 2 所示。

将匹配数据集分成 4 个季节(3—5 月为春季,以下简称 MAM;6—8 月为夏季,简称 JJA;9—11 月为秋季,简称 SON;12—2 月为冬季,简称 DJF),同时采用以下公式分别计算融合 SST 与 Argo SST 之间的均方根误差 RMS 和平均偏差 bias:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n-1}} \quad \text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{n}$$

式中 x_i 为多源遥感融合 SST, y_i 为 Argo 或 Argos SST, n 为匹配数据点数。

3 结果与讨论

3.1 多源遥感融合 SST 数据的验证

4 种融合 SST 产品与 Argo SST 的比较结果如表 3 和图 3 所示。从图 3 可以看出,除了 NGSST 的相关性为 0.93—0.94 以外,其他 3 种产品均可达到 0.95 以上,其中 OSTIA 和 MWSST 的结果较为理想,两年均超过 0.97,而且没有存在年际上的显著差异。从表 3 也可以看出 OSTIA 验证后的 bias 最小,不超过 0.01 °C,而 NGSST 最大,为 0.4—0.5 °C;

MWSST 的 RMS 最小,为 0.3—0.4 °C,NGSST 最大,为 0.8—0.9 °C。

表 3 4 种融合 SST 与 Argo SST 的比较
Table 3 Comparison between the merged SST products and Argo SST

	年份	匹配点总数 n	RMS	bias	相关系数 R
OSTIA	2008	1962	0.381	-0.009	0.977
	2009	2218	0.412	0.008	0.978
NGSST	2008	1329	0.835	0.452	0.935
	2009	1332	0.984	0.566	0.938
MISST	2008	1252	0.402	-0.022	0.957
	2009	2211	0.458	-0.092	0.974
MWSST	2008	1730	0.374	-0.017	0.975
	2009	1946	0.401	-0.062	0.979

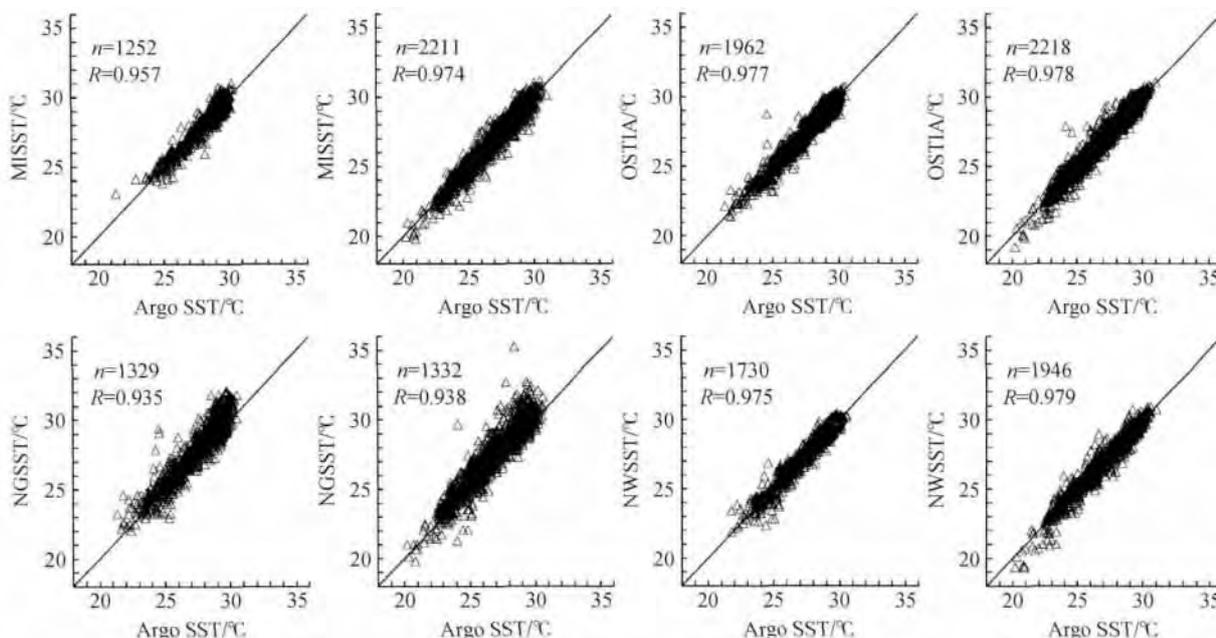


图 3 2008 年和 2009 年 4 种融合 SST 与 Argo SST 的比较

Fig. 3 Comparison of the four merged SST products and Argo SST in year 2008 and 2009

图 4 表示各融合 SST 与现场 SST 验证的 RMS 及 bias 的季节性变化。很明显,无论是 bias 还是 RMS,各季节均以 NGSST 为最大,且都是正偏差。秋季的偏差最大,bias 超过 0.8 °C,RMS 也是秋季最大(约 1.2 °C)。与 NGSST 的 bias 相比,MISST、MWSST 和 OSTIA 要小得多,4 个季节 bias 均在 ± 0.1 °C 内,OSTIA 在春夏季会出现弱的暖偏差,秋冬季则为弱的冷偏差;MISST、MWSST 和 OSTIA 三者的 RMS 无明显的季节性差异。Donlon 等人

(2012) 曾指出参与融合的 SST 数据源在空间覆盖率上会存在明显的季节性差异,尤其是受云以及雾霾等天气影响较为显著的热红外 SST。这些差异可能是导致融合 SST 产品验证结果出现季节性差异的主要原因,其影响效果有待于进一步研究。

在台湾海峡(水深 < 200 m) 4 种融合 SST 产品与 Argos SST 的比较结果如表 4 和图 5 所示。与外海相比,除 OSTIA 之外,其余 3 种融合 SST 比较结果的 RMS 均增加了 0.3—0.5 °C 左右,其中 NGSST

最大,为 1.5 °C,OSTIA 最小,为 0.387 °C; bias 绝对值大部分集中在 0.07—0.9 °C,较外海有明显

增加。NGSST 最大,为 0.939 °C, MISST 最小,为 -0.07 °C。

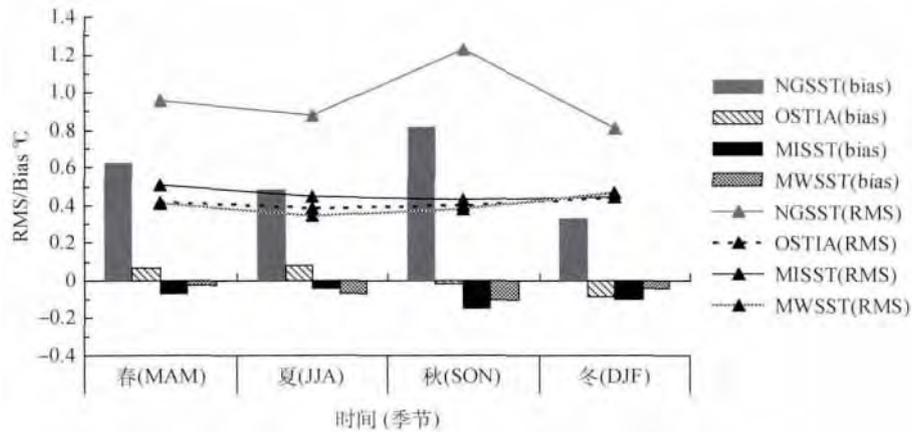


图 4 4 种融合 SST 与 Argo SST 比较的 RMS 和 bias 的季节分布图

Fig. 4 Seasonal distribution of the RMS and bias between the merged SST products and Argo SST

表 4 4 种融合 SST 与 Argo SST 的比较

Table 4 Comparison between the merged SST products and Argo SST

	匹配点总数 <i>n</i>	RMS	bias	相关系数 <i>R</i>
OSTIA	1163	0.387	-0.071	0.992
NGSST	1182	1.500	0.939	0.917
MISST	574	0.762	-0.070	0.968
MWSST	48	0.779	0.269	0.978

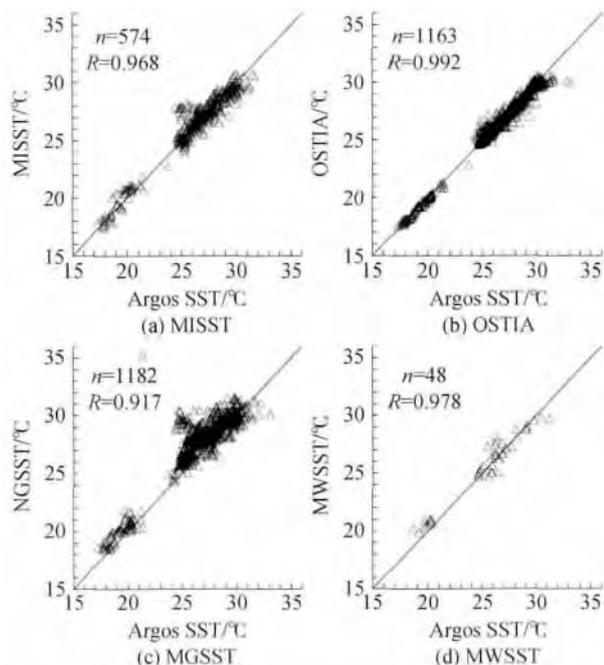


图 5 4 种融合 SST 与 Argo SST 的比较

Fig. 5 Comparison of the four merged SST products and Argo SST

遥感融合 SST 和浮标 SST 比对时出现的这些差异,与它们观测深度以及观测时间不匹配有一定

关系。遥感 SST 所测温度一般为海表微米—毫米量级的温度,浮标 SST 测量的是水深 1 m 左右的温度;融合 SST 计算得到的是日平均温度,而浮标测量的是瞬时动力学温度,这些因素使得二者对比时会出现一定偏差。

在南海及台湾海峡 4 种融合 SST 产品的验证结果中 OSTIA 产品最好,外海的 bias 几乎为 0, RMS < 0.5 °C; 其次是 MISST 和 MWSST; 偏差最大的是 NGSST, bias 超过 0.5, RMS 达 1.5 °C, 且表现为明显的暖偏,尤其是在近海台湾海峡区域。NGSST 出现较大的暖偏差可能是因为参与融合的遥感数据源未能有效消除海表面日增温(sea surface diurnal warming)效应(Guan 和 Kawamura, 2004; Kawai 等, 2006)。研究表明,若不考虑日增温效应会导致融合 SST 出现较显著的偏差(Martin 等, 2012)。RSS 提供的 MISST 及 MWSST 使用 Gentemann 等人(2003)提出的经验算法剔除数据源的日增温效应以减小 SST 日变化的影响; OSTIA 则以当风速 < 6 m/s 时,白天 SST 的日增温效应最为显著(Donlon 和 Robinson, 1997)为标准对参与融合白天 SST 进行严格的质量控制,所使用的 SST 初始场亦已消除了日增温的影响。该融合产品的遥感数据源种类在 4 种融合 SST 中最多(表 2),且在融合过程中加入了现场观测资料,并采用多种方式进行优化调整使其融合误差达到最小(Donlon 等, 2012)。本研究的验证表明 OSTIA 与现场观测的偏差最小(表 3、4,图 3—5),其数据质量明显优于其他 3 种融合产品,这与在东海陆架上开展的多种融

合 SST 产品比较所得的结论基本一致 (Xie 等, 2008)。

表 5 还总结了研究海区单一传感器反演 SST 的验证结果及其与融合 SST 产品验证的比较。可以看出除了 NGSST 外, 其余 3 种融合 SST 产品的验证结果均比单一传感器 SST 的验证结果有所改善。即使在近岸区域, OSTIA 产品的 bias 和 RMS 也相对

较小, 可以说与现场 SST 有很好的一致性。此外, 受卫星轨道、云等因素影响, 单一传感器数据的可获取率较低, 如 AVHRR、TMI 在南海北部的年平均获取率只有 50%—70% (孙凤琴等 2007), 而融合 SST 产品每天都有图像, 且每张图像的数据基本上能覆盖全海区。这些优势显然使得融合 SST 产品可很好地满足模型同化或业务化应用的需求。

表 5 研究海域内融合 SST 与单一传感器 SST 验证结果的比较

Table 5 Comparison of the validation results from the merged and single sensor derived SST products in the study region

遥感 SST	验证海区	现场 SST	bias	RMS	来源
AVHRR	台湾海峡	走航	0.11	0.97	(李娜等 2006)
TMI	南海北部	Argos	0—0.07	0.76—0.79	(Qiu 等 2009)
AVHRR	南海北部	Argos	-0.33—0.43	0.97—1.11	(Qiu 等 2009)
MODIS	台湾海峡	浮标	-0.02	0.51	(李雪丁 2011)
AVHRR	台湾周边	CTD	0—0.256	0.64—0.801	(Lee 等 2005)
AVHRR/TMI/MODIS	西北太平洋	Argo	-0.2—0.2	0.6—0.9	(孙凤琴等 2007)
OSTIA	南海	Argo, Argos	-0.07—0.01	0.38—0.42	本文
NGSST	南海	Argo, Argos	0.45—0.94	0.83—1.5	本文
MISST	南海	Argo, Argos	-0.1—-0.02	0.4—0.77	本文
MWSST	南海	Argo, Argos	-0.07—0.3	0.37—0.78	本文

3.2 4 种融合 SST 产品的比对

根据以上结论, OSTIA 与现场 SST 的偏差最小, 因此以它为基准, 比较 NGSST、MWSST 和 MISST 与其在南海海域的时空差异。各融合 SST 与 OSTIA 差值的年平均分布见图 6。显然, 与 OSTIA 相比,

NGSST 有明显的暖偏差, 暖偏最大值出现在沿岸海域, 可超过 2 °C; MWSST 在大部分海域和 OSTIA 吻合较好, 只在台湾海峡南北两端出现暖偏差、浙江沿岸有冷偏差, 且差值都不超过 0.5 °C; MISST 除了在浙江沿岸有约 0.4 °C 的暖偏差之外, 在其他区域都和 OSTIA 无太大差异。

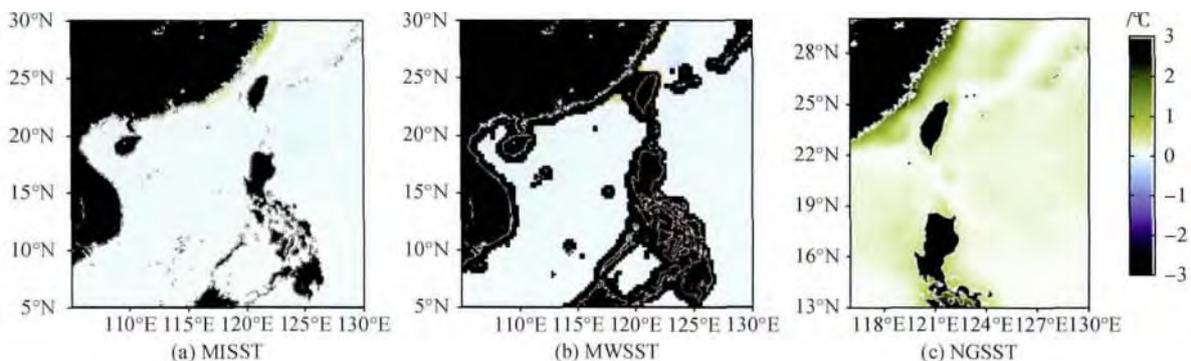


图 6 MISST、MWSST、NGSST 与 OSTIA 差值的年平均分布图

Fig. 6 Annual average of the differences between MISST, MWSST, NGSST and OSTIA

近岸灰尘、气溶胶等污染物分布有很大的空间变异, 对卫星传感器接收到的海面辐射的影响程度并不相同, 会给遥感产品的准确性带来一定误差。Xie 等人 (2008) 发现在水深小于 200 m 的东海陆架

海域, GHRSSST 产品之间的偏差随水深减小迅速增大, 且存在 40 m 和 80 m 两个较大斜率拐点。因此我们以水深 40 m、80 m 为界将研究区域划分为水深小于 40 m、40—80 m 和大于 80 m 3 个子区, 计算并

分析 2008 年—2009 年各子区差值的日平均值,其时间序列如图 7 所示。可以看出,偏差随着水深的增加而减小:在水深大于 80 m 海域,3 种融合 SST 产品与 OSTIA 的差值大部分在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;40—80 m 海域,差值有所增加;浅于 40 m 的近岸,NGSST 与 OSTIA 的差值甚至可以接近 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无论哪个子区,NGSST 均比其他两种产品较 OSTIA 要大得多,且以暖偏为主,趋势与图 6 基本一致。对于 MWSST 和 MISST,在浅水区(黑色和灰色曲线)以正偏差为主,深水(黑色柱)以负偏差为主,总体上 MWSST 和 MISST 与 OSTIA 的差值基本集中在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,绝对值最大值约为 $0.6\text{—}0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,吻合程

度明显好于 NGSST。总之,在开阔外海($>80\text{ m}$)各融合 SST 产品之间的差别不大,但在近岸水深较小的区域存在一定的差异,尤其是 NGSST,与其他产品的差异最为显著。近岸海区因水体泥沙、沉积物等含量较多,水汽、气溶胶等大气条件较为复杂,加上各种复杂海洋动力因素如波浪破碎、上升流等会影响到海面辐射。同时,参与融合的微波遥感分辨率较粗(约 25 km),加上受陆地辐射的影响,近岸数据相对缺乏,以上因素都会在一定程度上影响到遥感 SST 的观测与反演(Xie 等 2008),从而导致最终融合后的 SST 产品在近岸海区出现较差的数据质量。

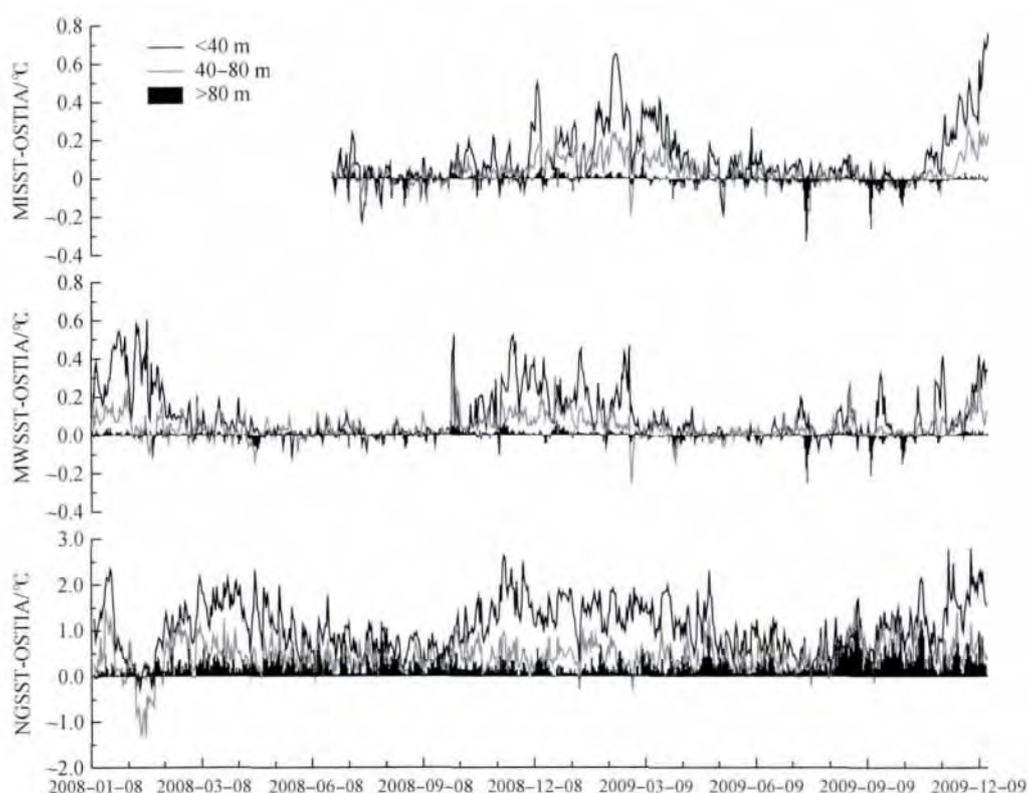


图 7 不同水深区域 MISST、MWSST、NGSST 与 OSTIA 差值的比较

Fig. 7 Differences between MISST, MWSST, NGSST and OSTIA at different depths

以 2009 年为例,进一步分析了 3 种融合 SST 产品与 OSTIA 差值的季节差异,如图 8 所示。图中线段端点表示该组数据的最大值和最小值,线段中间的方框表示集中在该组数据中间位置的部分数据,且占总数的 50%,方框中的横线表示中位数。可以看出,几乎所有季节 3 种融合 SST 与 OSTIA 的平均偏差均大于 0。同时如前所述,NGSST 与 OSTIA 的差值最大,尤其是在冬季,最大差值可达 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。MWSST、MISST 与 OSTIA 的差值季节性差异不大,

平均偏差基本小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬春季略大于夏秋季。总之,无论是哪一种融合 SST,出现最大差值的季节均为冬季,最小则在夏季。冬季出现较大偏差可能与该季节研究区域容易出现阴霾或多云天气有关,而这些复杂的天气状况会明显影响到红外遥感 SST 的反演精度或导致其数据出现缺失。红外遥感 SST 是 MISST 和 NGSST 以及 OSTIA 重要的融合数据源(表 2),所以他们彼此间的偏差均比只以微波 SST 为数据源的 MWSST 的差值大(图 8)。

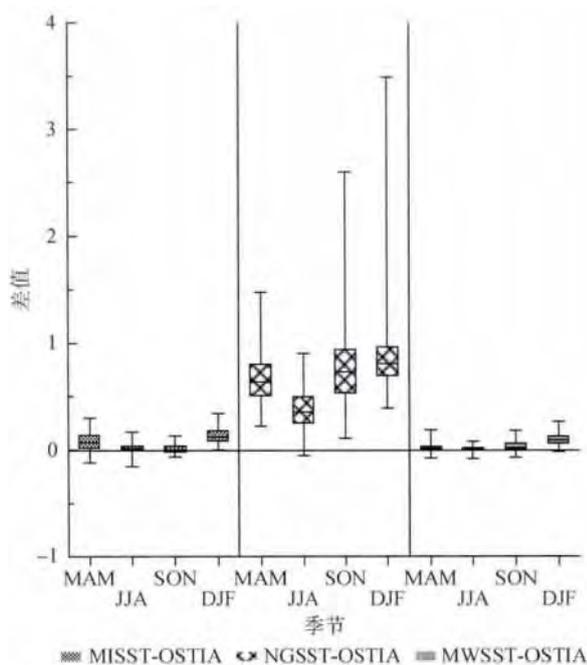


图8 2009年MISST、MWSST、NGSST与OSTIA差值的季节分布盒须图

Fig. 8 Box-plot of differences between MISST, MWSST, NGSST and OSTIA in 2009

4 结论

(1) 利用2008年—2009年Argo、Argos现场观测SST,对OSTIA、MISST、MWSST以及NGSST 4种融合SST产品在南海的适用性进行评估。分析结果表明:在外海4种融合SST与Argo SST总体上的bias为 $-0.1\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,RMS为 $0.3\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,且不存在显著的季节性差异;而在台湾海峡($<200\text{ m}$),各产品的bias和RMS均有所增加,尤其是NGSST,出现明显的暖偏差,RMS高达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无论是外海还是近海4种产品以OSTIA与现场观测的偏差为最小,其次是MISST和MWSST,而且这3种产品的验证结果都优于单一传感器反演SST的结果。NGSST出现明显的暖偏差可能与其融合数据源没有有效去除日增温效应有关。

(2) 以OSTIA为基准,对4种融合SST产品彼此间的差异进行了互较。结果表明各产品间的差异大小与水深、季节有一定的关系。MISST、MWSST和NGSST与OSTIA的偏差随着水深的增加而减小,当水深大于 80 m 时,各产品间的差值基本在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;而当水深小于 40 m 时,以NGSST的差值增加最为显著,而且是正偏差。各个季节不同产品间的差值中NGSST最大,尤其是在冬季。而

MWSST和MISST与OSTIA的差值季节性差异并不大,平均偏差基本小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

总之,除了在近岸NGSST出现明显暖偏差外,基本可认为4种融合SST产品在南海能有效地反映真实海表层温度的变化趋势,其中OSTIA产品最优。由于融合SST产品具有相当高的时空覆盖度,因此有望在模型同化、区域海洋学、业务化应用等领域成为非常重要的数据源。但应用在浅海时仍需注意到这些产品所存在的误差,以获得更加理想的结果。

参考文献(References)

- Dash P, Ignatov A, Martin M, Donlon C, Brasnett B, Reynolds R W, Banzon V, Beggs H, Cayula J, Chao Y, Grumbine R, Maturi E, Harris A, Mittaz J, Sapper J, Chin T M, Vazquez-Cuervo J, Armstrong E M, Gentemann C, Cummings J, Piollé J, Autret E, Roberts-Jones J, Ishizaki S, Høyer J L and Poulter D. 2012. Group for high resolution sea surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part 2: Near real time web-based level 4 SST Quality Monitor (L4-SQUAM). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77 - 80: 31 - 43 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.04.002]
- Donlon C, Rayner N, Robinson I, Poulter D J S, Casey K S, Vazquez-Cuervo J, Armstrong E, Bingham A, Arino O, Gentemann C, May D, LeBorgne P, Piollé J, Barton I, Beggs H, Merchant C J, Heinz S, Harris A, Wick G, Emery B, Minnett P, Evans R, Llewellyn-Jones D, Mutlow C, Reynolds R W and Kawamura H. 2007. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(8): 1197 - 1213 [DOI: 10.1175/BAMS - 88 - 8 - 1197]
- Donlon C J, Casey K S, Robinson I S, Gentemann C L, Reynolds R W, Barton I, Arino O, Stark J, Rayner N, LeBorgne P, Poulter D, Vazquez-Cuervo J, Armstrong E, Beggs H, Llewellyn-Jones D, Minnett P J, Merchant C J and Evans R. 2009. The GODAE high-resolution sea surface temperature pilot project. *Oceanography*, 22 (3): 34 - 45 [DOI: 10.5670/oceanog.2009.64]
- Donlon C J, Martin M, Stark J, Roberts-Jones J, Fiedler E and Wimmer W. 2012. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 116: 140 - 158 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.017]
- Donlon C J and Robinson I S. 1997. Observations of the oceanic thermal skin in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C8): 18585 - 18606 [DOI: 10.1029/97JC00468]
- Gentemann C L, Donlon C J, Stuart-Menteth A and Wentz F J. 2003. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements. *Geophysical Research Letters*, 30 (3): 1140 [DOI: 10.1029/2002GL016291]
- Guan L and Kawamura H. 2004. Merging satellite infrared and micro-

- wave SSTs: methodology and evaluation of the new SST. *Journal of Oceanography*, 60(5): 905–912 [DOI: 10.1007/s10872-005-5782-5]
- Hong H S, Zhang C Y, Shang S L, Huang B Q, Li Y H, Li X D and Zhang S M. 2009. Interannual variability of summer coastal upwelling in the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 29(2): 479–484 [DOI: 10.1016/j.csr.2008.11.007]
- Hu C M, Muller-Karger F E, Taylor C, Carder K L, Kelble C, Johns E and Heil C A. 2005. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 97(3): 311–321 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.013]
- Kawai Y, Kawamura H, Takahashi S, Hosoda K, Murakami H, Kachi M and Guan L. 2006. Satellite-based high-resolution global optimum interpolation sea surface temperature data. *Journal of Geophysical Research*, 111: C06016 [DOI: 10.1029/2005JC003313]
- Lee M A, Chang Y, Sakaida F, Kawamura H, Cheng C H, Chan J W and Huang I. 2005. Validation of satellite-derived sea surface temperatures for waters around Taiwan. *Tropical Atmosphere Ocean*, 16(5): 1189–1204
- Li L. 2002. A review on mesoscale oceanographical phenomena in the South China Sea. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 21(2): 265–274 (李立. 2002. 南海中尺度海洋现象研究概述. *台湾海峡*, 21(2): 265–274)
- Li N, Sun F Q, Zhang C Y, Shang S L and Hong H S. 2006. A primary validation of remote AVHRR SST in Taiwan Strait and its vicinity. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 45(3): 383–387 (李娜, 孙凤琴, 张彩云, 商少凌, 洪华生. 2006. 台湾海峡及其邻近海域 AVHRR 遥感 SST 的初步验证. *厦门大学学报: 自然科学版*, 45(3): 383–387)
- Li X D. 2011. Primary validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sea surface temperature in the Taiwan Strait. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 30(3): 336–340 (李雪丁. 2011. 台湾海峡 MODIS 遥感 SST 的初步验证. *台湾海峡*, 30(3): 336–340)
- Marcello J, Eugenio F and Hernandez A. 2004. Validation of MODIS and AVHRR/3 sea surface temperature retrieval algorithms // Proceedings of the 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK: IEEE, 2: 839–842 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368535]
- Martin M, Dash P, Ignatov A, Banzon V, Beggs H, Brasnett B, Cayula J, Cummings J, Donlon C, Gentemann C, Grumbine R, Ishizaki S, Maturi E, Reynolds R W and Roberts-Jones J. 2012. Group for high resolution sea surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: A GHRSSST multi-product ensemble (GMPE). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77–80: 21–30 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.04.013]
- Pi Q L and Hu J Y. 2010. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method. *Science China Earth Sciences*, 53(7): 1008–1016 [DOI: 10.1007/s11430-010-3060-x]
- Qiu C H, Wang D X, Kawamura H, Guan L and Qin H L. 2009. Validation of AVHRR and TMI-derived sea surface temperature in the northern South China Sea. *Continental Shelf Research*, 29(20): 2358–2366 [DOI: 10.1016/j.csr.2009.10.009]
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, Folland C K, Alexander L V, Rowell D P, Kent E C and Kaplan A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14): 4407 [DOI: 10.1029/2002JD002670]
- Reynolds R W and Chelton D B. 2010. Comparisons of daily sea surface temperature analyses for 2007–08. *Journal of Climate*, 23(13): 3545–3562 [DOI: 10.1175/2010JCLI3294.1]
- Shang S L, Zhang C Y, Hong H S, Liu Q, Wong G T F, Hu C M and Huang B Q. 2005. Hydrographic and biological changes in the Taiwan Strait during the 1997–1998 El Niño winter. *Geophysical Research Letters*, 32(11): L11601 [DOI: 10.1029/2005GL022578]
- Shu Y Q, Zhu J, Wang D X and Xiao X J. 2011. Assimilating remote sensing and in situ observations into a coastal model of northern South China Sea using ensemble Kalman filter. *Continental Shelf Research*, 31(6 Suppl): S24–S36 [DOI: 10.1016/j.csr.2011.01.017]
- Sun F Q, Zhang C Y, Shang S P and Shang S L. 2007. Primary validation of AVHRR/MODIS/TMI SST for part of the Northwest Pacific. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 46(S1): 1–5 (孙凤琴, 张彩云, 商少平, 商少凌. 2007. 西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证. *厦门大学学报: 自然科学版*, 46(S1): 1–5)
- Xie J P, Zhu J and Li Y. 2008. Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China. *Continental Shelf Research*, 28(10–11): 1286–1293 [DOI: 10.1016/j.csr.2008.02.020]
- Yang X X and Tang D L. 2010. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(4): 26–31 (杨晓霞, 唐丹玲. 2010. 台风引起南海海表面降温的位置变化特征. *热带海洋学报*, 29(4): 26–31)
- Zhang C Y, Hong H S and Shang S L. 2011. Merging and validation of multi-sensor remote sensing sea surface temperature in the China Sea // Proceeding of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing: IEEE: 4156–4159 [DOI: 10.1109/RSETE.2011.5965229]

Validation and inter-comparison of multi-satellite merged sea surface temperature products in the South China Sea and its adjacent waters

HU Xiaoyue^{1 2 3 4}, ZHANG Caiyun^{1 2}, SHANG Shaoling¹

1. College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, and Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
4. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Sea Surface Temperature (SST) is a basic parameter in characterizing the ocean-atmosphere system and serves an important function in climate change. Many types of cloud-free, high-spatial, and temporal coverage merged SST products have been generated by the Group for High Resolution Sea Surface Temperature. These products provide important data sources that can be used in a wide variety of operational and scientific applications. However, differences are existed among these products, due to their specific research requirements, different blending algorithms, different satellite SST sources for blending, and quality control methods. Therefore, monitoring the quality of these products is necessary, particularly at shelf and coastal seas around China, which are characterized by complex atmospheric conditions and hydrodynamics. This study compares four types of merged SST products in the South China Sea and adjacent waters in the years 2008 and 2009.

Four multi-satellite merged SST products—the Operational SST and Sea Ice Analysis (OSTIA), microwave/infrared optimally interpolated SST, microwave optimally interpolated SST, and new generation SST (NGSST)—are validated with the Argo SST in the shelf sea and Argo SST in the shallow coast. The match-up data are collected on the same day and location. The Root Mean Square (RMS), bias, and correlation coefficients are calculated and used to quantify the errors. These products are projected into the same grid of NGSST using the nearest-neighbor sampling method for comparison. OSTIA is selected as the basis, and the relative differences between OSTIA and the other three products are computed and visualized using maps, box-plot, and time series plots.

The statistical results show that the RMS between the merged SSTs and Argo temperature ranged between 0.3 °C and 1.0 °C, whereas the bias ranged between -0.1 °C and 0.6 °C in the shelf sea (water depth >80 m). The other three merged SSTs were consistent with the in situ data in the coastal area, except for NGSST, which had a significantly warm bias (-1 °C) and the largest RMS (-1.5 °C). The bias and RMS of OSTIA were the smallest. An inter-comparison indicates no significant differences among the four merged SST products in the shelf sea. Their biases were within ±0.3 °C. However, the deviation increases in shallow water. The largest bias was found in winter because of the poor weather conditions, whereas the smallest bias was found in summer.

In summary, the four merged SST products were consistent with in situ data in the study region, except for the NGSST in the shallow coastal sea and the OSTIA product exhibited the best performance. This study has provided a reliable basis for the effective application of these merged SSTs with high spatial and temporal coverage in the South China Sea and its adjacent waters.

Key words: merged SST, validation, inter-comparison, remote sensing, South China Sea