

全球海表温度融合研究进展

徐宾 宇婧婧 张雷 师春香 周自江
(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 作为描述海洋表层热状况最为重要的参数之一, 被广泛地应用于上层海洋过程、海气热量交换、海洋大气数值模拟与预报等研究和应用中。介绍了现场实测产品、多种探测仪器的卫星反演海表温度产品、综合多种仪器探测优势的多卫星融合海表温度产品的主要发展, 着重介绍了国际上近些年发展起来的能够融合现场实测数据、卫星遥感数据、模式产品的多源海表温度融合技术及产品进展, 重点介绍了国家气象信息中心目前正在开展的全球海表温度融合进展。国家气象信息中心综合国际上多种多源海表温度融合技术优势, 开发了基于概率密度匹配订正、超级观测、多重网格三维变分融合的全球海表温度融合技术方案, 实现了船舶观测海温、卫星反演海温的偏差订正, 基于多种来源SST产品的超级观测场研发, 最后利用多重网格三维变分实现了超级观测场与模式预报场的融合。SST融合产品与国际主流SST融合产品的对比表明其精度达到国际先进水平。

关键词: 海表温度融合, 概率密度匹配订正, 超级观测, 多重网格三维变分

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.022

Research Progress of Global Sea Surface Temperature Fusion

Xu Bin, Yu Jingjing, Zhang Lei, Shi Chunxiang, Zhou Zijiang
(National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

Abstract: Sea surface temperature (SST) is one of the most important parameters of describing the thermal state of ocean surface. It is widely used in the research and application of the upper ocean process, oceanic heat exchange and marine atmospheric numerical simulation and forecasting. This paper introduces the field of observed products, satellite retrieval sea surface temperature products, multi-satellite integration of sea surface temperature products, and the main development of multi-source SST fusion technology and product which can integrate field measurement data, satellite remote sensing data, and model products. Here, we focused on the global SST fusion product approach in the China's National Meteorological Information Center. Based on the advantages of mainly sea surface temperature fusion technology, the China's National Meteorological Information Center has developed a global sea surface temperature fusion technology, We developed the PDF correction, the super observation and the STAMS to correct the bias of ship observed sea temperature, and of satellite retrieval SST, to calculate the Super Observation, then to merge Super observation and model products by using the STMAS. Comparison of our SST fusion products with that of the OISST showed that the accuracy of our SST fusion product is as same as that by the OISST.

Keywords: sea surface temperature, probability density function correction, super observation, space-time multiscale analysis

0 引言

进入地球大气的太阳辐射总量的70%左右被全球海洋所吸收, 其中的绝大部分都存储在海洋表层, 并将以感热交换、潜热和长波辐射的形式传输到大气, 并驱动大气运动。海洋表层作为海气交换的界面, 其热状况的变化对大气运动产生重要影响, 进而引起全球气候和环境的变化。海表温度 (Sea Surface

Temperature, SST) 作为描述海洋表层热状况最为重要的参数之一, 被广泛地应用于上层海洋过程、海气热量交换、海洋大气数值模拟与预报等研究和应用中。海气相互作用研究表明, 海温是影响长期天气过程的重要因素^[1-2]。海温的变化直接影响气候变化、渔场分布, 以及厄尔尼诺、台风等自然灾害的形成也与海温变化密切相关^[3]。因此掌握高精度、高覆盖率的海表温度数据, 对研究海洋环境、全球气候变化、以及防灾减灾等具有非常重要的意义。因而高精度海表温度产品的研制也就越来越得到重视。

获得海表温度主要有现场实测和卫星遥感观测这两种手段。现场实测数据主要通过海上浮标、沿岸

收稿日期: 2017年7月31日; 修回日期: 2017年12月15日
第一作者: 徐宾(1980—), Email: xubin@cma.gov.cn
资助信息: 国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”

站及船舶等常规观测系统获得，现场测温仪器的精度随着测温技术的改良已经有了很大提高，但是浮标分布数据和船舶航线非常有限，无论从空间分布的连续性，还是时间的同步性都不尽如人意。与传统的船舶、浮标数据相比，海洋卫星遥感观测具有全天候、近实时、覆盖范围广、可以长期重复进行海洋观测的优势，能更好地适应海洋现象的特点，填补现场实测数据的空白^[4]。海洋卫星遥感观测海表温度主要依靠红外传感器和微波传感器。红外传感器测量应用极为广泛，具有高时空分辨率的优势，但是容易受到云和气溶胶的影响，造成反演出的海表温度偏低；微波传感器测量具有全天时、全天候、穿透性强的优势，但其空间分辨率又相对较低。因此，可以通过将实测数据、红外数据和微波数据的优势相结合^[5]，对红外传感器和微波传感器的海表温度数据进行融合以改进海表温度数据的时间分辨率、空间分辨率，不同卫星海表温度数据与现场实测数据进行对比验证，提高不同数据源的稳定性和精度，产生高分辨率、高精度的海表温度融合分析产品，以满足各种海洋和大气的科学工作对高质量海表温度产品的迫切需求。

本文阐述了海表温度观测数据源与国内外主要的多卫星反演海温融合产品和多源海表温度融合产品的研究进展与趋势，以及介绍国家气象信息中心近年来在全球海表温度融合方面取得的进展。

1 海表温度观测数据源

获得SST的手段主要有现场实测和卫星遥感测量。现场实测为现场直接测量方式，如利用商船、“天气”测量船或其他调查船在某一地点，使用测温仪器进行海水温度观察，或是利用漂流浮标和定点锚碇浮标等进行海表面温度观测，随着技术的不断进步，测温仪器感温时间大大缩短，准确度也不断提

高。但船舶的航线是很局限的，浮标的布放数量也是很有限制的。这种方式观测的SST的覆盖率相当低，即使将几十年的资料进行统计，在全球海洋仍然有许多地方是空白。另一种观测方式是间接测量，如采用卫星遥感来反演海表面温度，其传感器有红外型的如改进型甚高分辨率辐射计（AVHRR）和沿轨道扫描辐射计（ATSR），也有微波型的多通道微波扫描辐射计（SMMR）。卫星遥感SST具有覆盖范围广，几乎遍及全球所有海（水）域，并且具有长期重复测量的特点，因而得到广泛的应用。

1.1 现场观测产品

现场观测是最为传统的SST测量方式，它主要是利用装载在调查船、商船或者浮标等平台上的测温仪器对海表温度进行观察。这种观测手段又称为直接观测（用接触式温度计观测）。近200年中海温观测经历了水桶观测、机舱引水观测、船体感应观测、浮标观测等一系列方法的演化。自20世纪70年代开始使用浮标观测海温。浮标观测精度较高，分为漂流浮标和固定浮标。

现场观测历史悠久，传统的海洋观测数据集是基于船舶、浮标等观测数据，使用多种插值方法形成的网格化数据产品（表1）。例如国际海气综合数据集（ICOADS）提供了3个世纪以来的海洋表层资料^[6]，其中 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 格点数据为1800年至今的资料，而 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 为1960年至近期的数据。这些数据和产品分布于全球范围，源于不同的观测系统。该数据集的“standard”资料仅限于船舶观测。“enhanced”产品使用了船测和其他海上平台现场观测类型数据（如漂流浮标和系泊浮标）。ICOADS数据集反映了几百年来海洋观测技术的变化，也可以说是目前最完整和最多样化的海洋现场观测数据集。

表1 国外主要实测海表温度产品列表

Table 1 Abroad main SST data sets in situ observation

资料名称	时空属性	时间	数据源	方法和技术	制作单位
ICOADS	月、 $2^{\circ}/1^{\circ}$ 、全球	1800/1960年至近期	船舶/浮标	质量控制、简单空间插值	NOAA
ERSST	月、 2° 、全球	1854年至近期	船舶/浮标 GTS、ICOADS	统计方法扩展重建ICOADS	NOAA
HadSST	月、 5° 、全球	1850年至今	船舶/浮标 GTS、ICOADS	质量控制，偏差订正，误差和不确定性分析	Met Office Hadley Center

The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) 数据集^[7]是对ICOADS资料的改进：由于ICOADS资料质量控制算法剔除了某些距平较大的正确数据，ERSST为了在观测稀疏的地区保留这些数据，对统计方法上进行了改进。ERSST用重建方法重点在现场资料稀疏的地区对ICOADS进行分析。利用ERSST资料可以开展全球、海盆尺度的长期

分析，但由于局部的短期变率已被平滑掉了，因此短期、局地的分析会有误差。相比于其他资料集，该资料空间分辨率较低，但时间序列长度从1854年1月到近期^[8]。

英国气象局哈德莱中心海表温度（HadSST）为1850年至今 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的全球逐月海表温度观测数据，海温资料来源于英国气象局海洋库（MDB）。1982年以

前还接收了全球电信系统 (GTS) 资料, 同时为加强资料覆盖, 1871—1995年, 在没有MDB数据的地方使用了ICOADS当月中间时刻的数值。HadSST海表温度是使用了一个两步约化空间最优插值处理方法重建数据, 再在重建数据上叠加高质量的格点观测, 以恢复局地详细信息。

1.2 卫星反演产品

另一种观测海表温度的方式是采用卫星遥感间接测量海表温度。从气象卫星发展之初, 海表温度就作为遥感反演的主要地表参数之一。遥感反演的是海表微米量级海水层的温度。与传统的船舶、浮标测量方式相比, 卫星遥感SST覆盖范围广, 几乎遍及全球所有海域, 能实现大面积的同步测量, 且卫星遥感SST具有较高的空间分辨率和长期重复测量的特点, 这就很大程度上弥补了现场测量的不足^[9]。当然需要注意的是, 遥感所测为海水表皮温度, 现场所测为海水表层体温, 其间存在差异。但是, 由于卫星遥感SST在时空观测频度上无可比拟的优越性, 其已成为一个不可或缺的数据源, 得到广泛的应用。海洋卫星遥感观测海表温度主要依靠红外传感器和微波传感器 (表2)。红外传感器测量应用极其广泛, 具有高时空分辨率的优势, 但是容易受到云和气溶胶的影响; 微波传感器测量具有全天时、全天候、穿透性强的优势, 但其空间分辨率相对较低。搭载于在轨卫星的可以反演SST的红外传感器主要有: 搭载于极轨卫星上的NOAA系列卫星上的AVHRR、欧空局METOP系列卫星上的AVHRR-3、Aqua和Terra卫星上的中等分辨率图像光谱辐射计 (MODIS)、环境卫星Envisat的改进型沿轨扫描辐射计 (AATSR)、风云三号 (Y-3) 系列卫星上的VIRR、海洋一号卫星 (HY-1B) 上的海洋水色扫描仪COCTS; 搭载于静止卫星上的FY-2的可见光红外自旋扫描辐射计 (VISSR)、美国GOES系列卫星的成像仪 (Imager)。可以反演SST的星载微波传感

器主要有搭载于Aqua卫星上的改进的微波辐射计—地球观测系统 (AMSR-E)、GCOM-W1卫星上的微波辐射计 (AMSR2)、用于观测中纬度和热带区域的TRMM卫星微波成像仪 (TMI) 等等。

2 海表温度融合产品发展现状

2.1 多卫星融合海表温度产品现状

卫星搭载的红外探测仪器会受到云和大气气溶胶的影响, 导致红外反演海表温度精度下降, 甚至大面积缺测。能够穿透云层探测海温的TMI、AMSR-E、AMSR-2等微波探测器虽然能够提供覆盖更全的海表温度反演产品, 但其空间分辨率低, 也会受大雨影响, 并且在沿岸区域噪音严重到无法测量。不同反演方法所得到的SST资料与现场观测的偏差和云造成大面积的资料缺测等原因, 在很大程度上影响了卫星遥感海表温度产品的实际使用。另外极轨卫星的轨道特点也导致了极轨卫星SST反演产品的空间覆盖面积随时间变化。因此综合利用多种卫星观测数据特点, 对多卫星观测数据进行比较、分析、校正、同化、融合等工作, 得到高时空分辨率的多卫星海洋要素融合产品, 也是近年来海表温度融合的主流。

全球海洋数据同化实验 (GODAE) 的 GHRSSST-PP (Group for High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project) 已形成一套受国际认可的R/GTS (Regional/ Global Task Sharing) 系统^[10]。该系统中, 全球和区域海表温度卫星数据初级产品由各区域数据集合处理中心 (RDAC) 先发布, RDAC分布在澳大利亚、日本、美国 and 欧洲。RDAC处理、接受区域和国家的卫星、实测海表温度数据, 然后近实时将数据发布给全球数据分配中心 (GDAC)。RDAC合并各种卫星数据并结合实测资料进行质量控制, 通过融合技术得到统一格式 (netCDF) 的区域海表温度数据产品, 该产品被称为L2P 数据产品; GDAC则在L2P 产品的基础上进行再分析得到无间隙的全球海表温度数据产品, 该产品被称为L4 数据产品。GHRSSST-PP 旨在研制出新一代全球覆盖的高分辨率 (分辨率高于10 km, 至少每6 h一次) 海表温度数据产品的示范系统。

此外, 欧空局的SST CCI数据集也是基于多卫星融合的海表温度产品, 这个数据集提供自1991年9月至今, 逐日, 空间分辨率为0.05°全球覆盖高分辨率海表温度产品, 主要是基于最优插值 (OI) 的方法融合了ATSR以及AVHRR的卫星遥感数据。

国内学者也很早就开始了多卫星融合工作, 主要集中在红外反演海温与微波反演海温的融合, 从而实

表2 国内外主要反演海表温度产品列表

Table 2 SST retrieval data sets produced in China and abroad

仪器名称	仪器类型	卫星	空间覆盖	时空分辨率
AATSR	红外	极轨卫星ENVISAT	全球	
AVHRR	红外	极轨卫星NOAA-18/19 MetOP-A/B	L2级轨道数据	4.6 km, 昼/夜
VIRR	红外	极轨卫星FY3A	全球	1 km, 日
		极轨卫星FY3C	全球	5 km, 昼/夜
MODIS	红外	极轨卫星Aqua	全球	5 km, 昼/夜
		极轨卫星Terra	全球	5 km, 昼/夜
AMSR	微波	极轨卫星Aqua	全球	0.25°, 昼/夜
		极轨卫星GCOM-W1	全球	0.25°, 日
TMI	微波	极轨卫星TRMM	南北纬38°之间	0.25°, 日

现红外高分辨率特征和微波高覆盖特征相结合。多种融合方法如小波变换方法^[11]、卡尔曼滤波^[12]，最优插值^[13]等，被用于AVHRR反演海温和AMSR-E反演海温的融合。前期的工作主要集中在国外卫星的融合应用上，随着国产海洋卫星、风云卫星的不断发展，国产卫星的融合工作也逐渐展开。齐亚琳等^[14]尝试利用最优插值的方法实现海洋卫星反演海温产品的融合应用。苗春生等^[15]利用NOAA的局地分析预报系统（Local Analysis Prediction System, LAPS）实现了风云极轨卫星红外反演海温、海洋卫星微波反演海温与NOAA海温融合场RTG_SST的融合，同时在融合过程中考虑了区域大气和下垫面海洋要素时空特征的协调，进一步丰富了多卫星融合算法。虽然上述国内工作均未对外发布多卫星融合产品，但在多卫星融合领域做出的诸多尝试表明了，多卫星融合的必要性与合理性。

2.2 多源融合海表温度产品现状

目前，对SST分布场的分辨率（时间和空间）和精度要求越来越高，全球海洋数据同化实验小组（GODAE）声称，同化后的SST分布场要求达到空间分辨率为10 km、准确度为0.4 °C且6 h更新一次，而对海岸或地域性海区的分辨率有更高的要求（如要求其空间分辨率达2 km）。GODAE比较了各种SST观测资料，发现没有一种能到该要求。

各种SST资料均有其优缺点，因此要得到准确、高覆盖、高分辨率的SST分布场，必须将各种SST资料融合在一起，综合各种资料的优势。融合多源海洋资料已经成为制作高精度海洋资料产品的国际趋势。随着海洋资料种类的增多和资料融合技术的发展，目前世界各国研究机构和业务部门已不断研制出融合现场观测、多卫星观测数据以及模式分析产品的高质量SST融合产品（表3）。

表3 国外主要海表温度融合产品列表
Table 3 Abroad main merged SST datasets

国家	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时空分辨率
美国	OISST	Poisson方法校正卫星资料大尺度偏差，最优插值方法融合	海表温度	全球	1981年	1°，周1°，月
	OISST V2.0	月平均资料由周资料线性插值得到该月每日值，再经累计得到	海表温度	全球	1981年	0.25°，日
	RTG-HR	二维变分方法	海表温度	全球	2005年	0.5°-1/12°，日
	MPM SST	PDF订正卫星资料误差+OI融合	海表温度	西半球	2006年	0.25°，3 h
英国	HADISST1	两步约化空间最优插值（RSOI），叠加高质量的格点观测（RDB）	海表温度 海冰覆盖度	全球	1870年	1°，月
	OSTIA	多尺度OI技术	海表温度	全球	2006年	6 km，日

国际上应用最为广泛且精度较高的海表温度融合产品有美国NOAA/NCEI的OISST V2.0产品^[16]、NOAA/NCEP的RTG-HR产品^[17]以及英国Met Office的OSTIA产品^[18]等。

OISST V2.0是利用最优插值得到的日平均0.25°×0.25°全球海表温度融合数据^[19]，并根据使用的卫星数据源不同而研制了两种数据产品：AVHRR-only和AMSR+AVHRR产品。AVHRR-only使用了实测数据（船舶和浮标）、AVHRR红外反演海表温度数据，以及模式模拟的海冰数据。AMSR+AVHRR增加了AMSR微波反演海表温度数据。制作这两种产品的算法是相同的，包括基于实测数据修正遥感数据的大尺度偏差（empirical orthogonal teleconnection, EOT方法）以及最优插值方法融合各类数据源信息。以上两种产品的最优插值算法是第二版Reynolds最优插值算法^[20]，主要增添了一些额外的时间权重处理，且优化的融合算法中SST场误差空间相关由第一版本的600~800 km精细化到150 km，可体现SST数据空间的细节特点。在处理冰面海温时，利用NCEP模式模拟

的海冰资料对海温数据进行校正，降低了高纬SST的误差^[21]。

RTG-HR使用了AVHRR数据和实测数据，但没有使用微波数据，产品最小网格距可达（1/12°）^[22]，相对于早期版本RTG_SST^[17]有了明显的提升。SST空间变化相关半径范围选为50~450 km。使用实测数据通过Poisson方法^[16]对SST遥感数据进行修正。最终采用二维变分的方法融合订正后的卫星和船舶/浮标数据。在融合过程中使用了卫星海冰数据以及气候盐度数据对冰面SST进行修正。

OSTIA 是英国气象局基于GHRSSST-PP计划提供的多卫星数据^[23]，使用了AATSR数据、SEVIRI数据、AVHRR数据、AMSR数据、TMI数据和实测数据，其网格间距为（1/20°）。所有卫星的SST数据参考并结合AATSR数据和浮标实测数据调整误差，并使用多尺度OI技术进行融合。SST二维的误差相关尺度为10和100 km，可根据地区和输入数据的变化而改变。产品已经可提供均方根误差小于0.6 °C的近实时高分辨率SST数据。

国内学者在卫星资料与现场观测数据融合领域也做了一定工作。郑金武等^[24]选用了Argo、MODIS、AVHRR、AMSRE、TMI等SST资料，应用增量变分法融合多源卫星SST资料，分析得到了中国近海高分辨率的SST分析产品。分析结果表明，多源SST融合集合了各卫星SST资料的优点，弥补了各卫星SST资料的不足，特别是在近海区域实时观测资料少，各卫星资料的精度偏低且各卫星资料数据相互独立的情况下，多卫星资料融合提高了分析结果的准确性。虽然该研究尚未形成长时间序列的海温融合产品，无法填补国内海表温度融合产品的空白，但在现场观测与卫星反演海温的融合领域做出了积极地尝试，为未来的海表温度融合工作提供了借鉴。

3 国家气象信息中心海表温度融合产品进展

目前我国已经建立了岸基、海基、天基的海洋气象观测系统，产生日益丰富的实测气象资料。但是随着我国海洋经济的不断发展，海洋气象服务提出的资料需求更趋精细化、集约化。相比欧美等发达国家通过多种来源海洋气象观测数据的融合应用提升了海洋气象资料服务能力，我国的海洋气象资料融合应用起

步晚，差距大。为了综合发挥多种来源海洋气象观测数据的优势，国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”经过充分调研提出了研制高质量海洋要素融合产品的目标任务。在此背景下，国家气象信息中心与多位海外智库专家联合，首先从海表温度融合入手，着力搭建中国气象局海洋数据融合分析系统（CMA Ocean Data Analysis System, CODAS），并于2016年7月成功完成了全球海表温度融合产品（CODAS SST）的研发。

3.1 CODAS SST 数据源及融合技术方案

CODAS SST在研发过程中充分发挥了国家气象信息中心数据收集优势，同时在深度挖掘信息中心现有数据的基础上，进一步丰富了海温数据收集的种类。目前CODAS-SST实现了全球浮标和船舶、中国浮标和船舶、ECMWF模式SST预报产品、FY-3C/VIRR反演海温、METOP-B/AVHRR反演海温、GCOM-W1/AMSR-2反演海温的实时融合。表4进一步介绍了所用海表温度数据的种类、时间段、来源、获取方式等。

CODAS-SST在充分调研了国内外海表温度融合

表4 全球海表温度融合产品数据源

Table 4 Specifications of the input data in CODAS SST

序号	资料类别	数据或产品名称	时空覆盖	数据来源	时空分辨率	获取方式
1	浮标观测SST	GTS/浮标	全球, 2015年9月至今	CIMISS	定时, 点	MUSIC
2	船舶观测SST	GTS/船舶	全球, 2015年9月至今	CIMISS	定时, 点	MUSIC
3	浮标观测SST	中国/浮标	中国近海, 2015年9月至今	CIMISS	定时, 点	MUSIC
4	船舶观测SST	中国/船舶	中国近海, 2015年9月至今	CIMISS	定时, 点	MUSIC
5	模式预报产品	ECMWF预报SST产品	全球, 2014年至今	ECMWF	0.125°, 24小时预报	信息中心实时推送 (ftp)
6	红外反演SST	极轨卫星METOP-B/AVHRR	全球, 1981年至今	OSI SAF	5 km, 1日2次	ftp://efp.ifremer.fr
7	微波反演SST	极轨卫星GCOM-W1/AMSR2	全球, 2012年5月至今	RSS	0.25°, 1日2次	ftp://ftp.ssmi.com
8	红外反演SST	极轨卫星FY-3C/VIRR	全球, 2013年9月至今	卫星中心	5 km, 1日2次	信息中心实时推送 (ftp)

技术的基础上，结合自身融合技术开发基础，开发了包含数据预处理和偏差订正的超级观测场方案和多重网格三维变分融合方案。超级观测场方案首先对数据进行了预处理，包括对船舶、浮标数据和多卫星数据的质控、订正、分辨率匹配，以及利用浮标数据对其他数据源进行偏差订正等。然后使用了国际上常用的“Super Observation”方法将浮标、船舶与多卫星遥感等多种观测资料进行有效的结合，组成“超级”观测场。由于海表温度观测种类较多，且分布非常不均匀，融合时易产生求解的“不适定问题”——即观测点靠近但观测值相差较大，求解通常为病态解，而超级观测场的方案可以有效解决这一问题。

CODAS SST为了解决最优插值（OI）和二维变分等传统融合方法对背景场误差协方差矩阵的依赖，

选用了Xie等^[25]提出的多尺度三维变分技术（space-time multiscale analysis system, STMAS）来实现超级观测场与背景场的融合。

STMAS技术中，在每一重网格上的目标泛函采用如下形式：

$$J^n = \frac{1}{2} \mathbf{X}^{(n)T} \mathbf{X}^{(n)} + \frac{1}{2} \left[\mathbf{H}^{(n)} \mathbf{X}^{(n)} - \mathbf{Y}^{(n)} \right]^T \mathbf{O}^{(n-1)}, \quad (1)$$

$$\left[\mathbf{H}^{(n)} \mathbf{X}^{(n)} - \mathbf{Y}^{(n)} \right] (n=1, 2, 3, \dots, N)$$

式中， $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{\text{obs}} - \mathbf{H}\mathbf{X}_b$ ， $\mathbf{X} = \mathbf{X}_a - \mathbf{X}_b$ 。这里 \mathbf{O} 是观测误差协方差矩阵； \mathbf{X}_b 是背景场（预报场）矢量； \mathbf{X}_a 是分析场矢量； \mathbf{Y}_{obs} 是观测常矢量； \mathbf{H} 是从模式网格到观测点的双线性插值算子； \mathbf{X} 代表相对模式背景场矢量的修正矢量，它由变分同化系统中计算出来； \mathbf{Y} 是观测场

与模式场的差值； n 表示第 n 重网格， N 为网格重数。即：

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^{(1)} = \mathbf{Y}^{\text{obs}} - \mathbf{H}^{(1)} \mathbf{X}^{\text{b}} & (n=1) \\ \mathbf{Y}^{(n)} = \mathbf{Y}^{(n-1)} - \mathbf{H}^{(n-1)} \mathbf{X}^{(n-1)} & (n=2,3,\dots,N) \end{cases} \quad (2)$$

STMAS的多尺度方法通过依次对不同尺度的观测信息进行分析，消除长波信息与短波信息之间的混淆，克服由这种由背景场误差协方差矩阵不准确引入的误差，避免了传统数据同化的关于背景误差协方差的一些不合理假设，以及节约在大尺度计算时间和详细提取小尺度信息，从而合理缩短同化过程的计算时间。STMAS在海洋要素融合中具有“较高的计算效率和较低的均方根误差”的优点以及在业务产品制作中高效、运行稳定的特点，因此我们利用多重网格三维变分(STMAS)方法实现多卫星和船舶、浮标实测数据的融合，制作全球高分辨率海表温度融合产品(图1)。图2给出了2017年8月21—23日的CODAS SST的空间分布个例，可以看出CODAS SST能够实现全球海域的覆盖，SST整体分布趋势清晰，东太平洋SST冷舌明显。

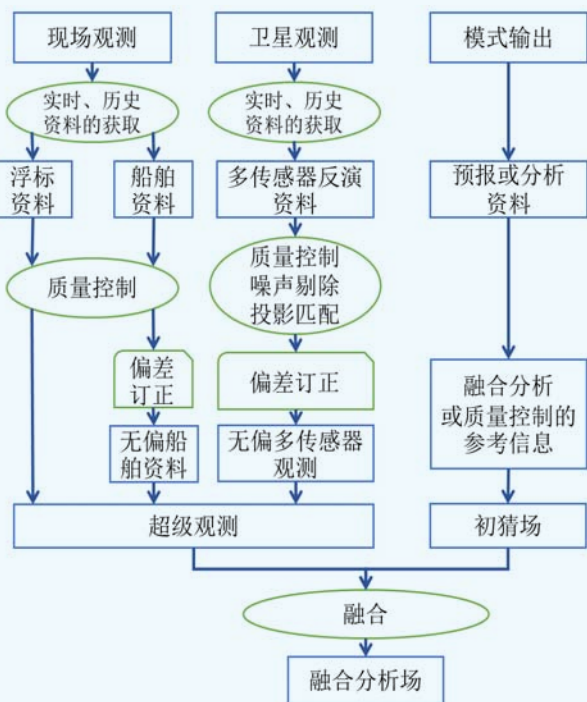


图1 CODAS SST融合技术路线
Fig. 1 The work-flow of CODAS SST

3.2 融合产品对比评估

美国NOAA/NCEI的OISST V2.0产品是目前国际上应用最为广泛且精度较高的海表温度融合产品，且时效性较高，已经成为中国气象局实时气象业务(天气预测、气候监测等)中主要应用的海表温度产品。

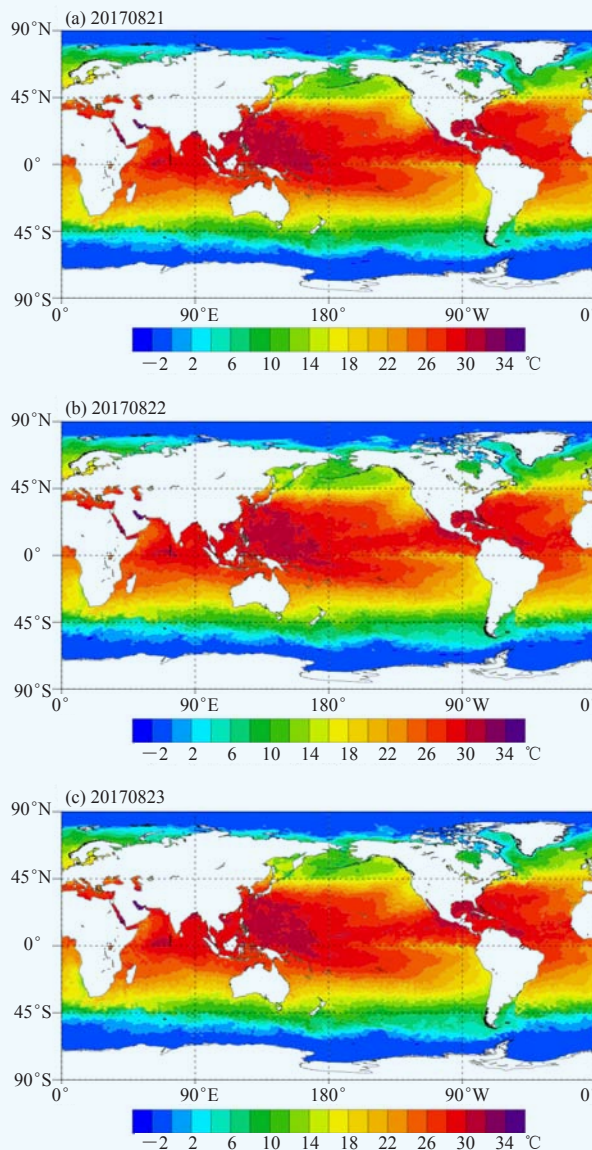


图2 2017年8月21—23日CODAS SST空间分布
Fig. 2 Map of CODAS SST for 21 – 23 August 2017

这里将对实时融合产品与OISST V2.0的差异，以此估计实时融合产品的误差。

图3给出2016年1—3月全球OISST V2.0与CODAS SST的相关系数(CC)、平均偏差(Bias)以及均方根误差(RMSE)的逐日变化，可以看出，融合产品CODAS SST与OISST V2.0相关性非常高，相关系数在0.996以上，均方根误差在0.95 K以下，两种资料的平均差异在0.03 K附近。以浮标数据为参考，比较了2016年1—3月全球OISST V2.0与CODAS SST的误差(表5)，可以看到CODAS SST全球平均偏差为-0.0542 K，略大于OISST V2的偏差，相关系数在0.98以上，均方根误差为1.3232 K，与OISST V2产品相当或略优。

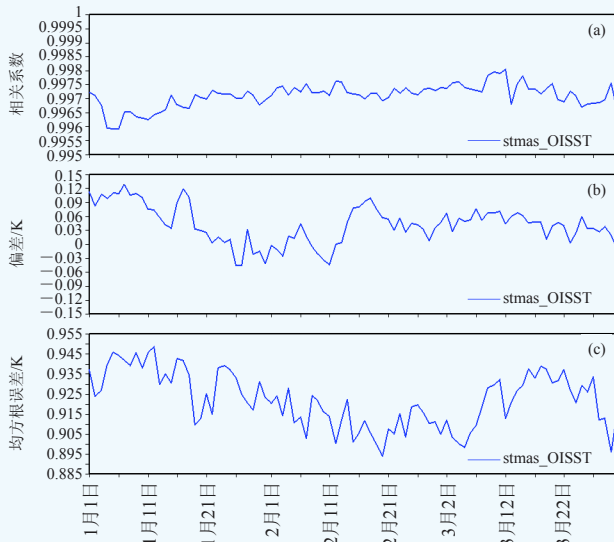


图3 全球2016年1月1日—3月31日CODAS SST与OISST V2.0的差异

(a) 相关系数; (b) 偏差; (c) 均方根误差

Fig. 3 The difference of the CODAS SST from the OISST V2.0 for 1 January – 31 March 2016

(a) correlation coefficient; (b) Bias; (c) RMSE

表5 CODAS SST与OISST V2.0质量评估对比 (以浮标数据为检验数据)

Table 5 The validation of CODAS SST and OISST V2.0 (Based on buoy observation)

	样本量	CC	RMSE/°C	Bias/°C
CODAS SST	249219	0.9896	1.3232	-0.0542
OISST	249219	0.9893	1.3391	-0.0387

4 总结

海洋观测历史悠久,传统的海洋观测数据是基于船舶、浮标等观测数据,使用多种插值方法形成的网格化数据产品。随后日益增加的卫星遥感数据源极大促进了海洋产品的研发。单一的卫星传感器数据通常不能获取到满足实际应用的全部信息,所提取的信息还存在时间和空间的不完整性。因此综合利用多种卫星观测数据特点,对多卫星观测数据进行比较、分析、校正、同化、融合等工作,得到高时空分辨率的多卫星海洋要素融合产品也是近年来海洋资料的主流。随着海洋资料种类的增多和资料融合技术的发展,目前世界各国研究机构和业务部门已不断研制出融合现场观测、多卫星观测数据以及模式分析产品的高质量的海洋融合产品。国家气象信息中心在深入调研的基础上,也在国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”提出了研制高质量海洋要素融合产品的目标任务,并已经完成了全球海表温度融合产品的研发,经检验,全球海表温度融合产品精度与国际主流产品接近。

参考文献

- [1] Gentemann C L, Donlon C J, Stuart-Menteth A, et al. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements. *J Geophys Res*, 2003, 30(3): 1140-1143.
- [2] Kawai Y, Wada A. Diurnal sea surface temperature variation and its impacts on the atmosphere and ocean: A review. *J Oceanogr*, 2007, 63: 721-744.
- [3] 杨素雨, 严华生. 冬季北太平洋南海温异常对我国汛期雨带类型的影响研究. *应用气象学报*, 2007, 18(2): 193-201.
- [4] 蒋兴伟, 林明森, 刘建强. 我国卫星海洋空间探测. *中国工程科学*, 2008, 10(6): 56-62.
- [5] Guan L, Kawamura H. Merging satellite infrared and microwave SSTs: Meteorology and evaluation of the new SST. *J Oceanogr*, 2004, 60: 905-912.
- [6] Woodruff S D, Worley S J, Lubker S J, et al. ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(7): 951-967.
- [7] Smith T M, Reynolds R W. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS 1854-1997. *Journal of Climate*, 2003, 16: 1495-1510.
- [8] Huang B, Banzon V F, Freeman E, et al. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4): Part I. Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, 2014, 28: 911-930.
- [9] Barton I J. Satellite-derived sea surface temperature: Current status. *J Geophys Res*, 1995, 100: 8777-8790.
- [10] Donlon C J, Rayner N, Robinson I, et al. The global ocean data assimilation project (GODAE) high resolution sea surface temperature pilot project (GHRSSST-PP). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(8): 1197-1213.
- [11] 张慧. 基于小波变换的AVHRR和AMSR-E卫星海表温度数据融合. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 2006.
- [12] 王艳珍, 管磊, 曲利芹. 卡尔曼滤波在卫星红外、微波海表温度数据融合中的应用. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(12): 126-130.
- [13] 奚萌. 基于最优插值算法的红外和微波遥感海表温度数据融合. 青岛: 国家海洋环境预报研究中心硕士学位论文, 2011.
- [14] 齐亚琳, 林明森. 数据融合技术在海洋二号卫星数据中的应用. *航天器工程*, 2012, 21(3): 117-123.
- [15] 苗春生, 程远, 王坚红, 等. 中国风云卫星与海洋卫星近海SST资料融合技术及应用研究. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1127-1143.
- [16] Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *J Climate*, 2007, 20: 5473-5496.
- [17] Thiebaux J, Rogers E, Wang W, et al. A new high-resolution blended real-time global sea surface temperature analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 645-656.
- [18] Donlon C J, Matthew M, John S, et al. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 116: 140-158.
- [19] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses. *J Climate*, 1994, 7: 929-948.
- [20] Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 2002, 15: 1609-1625.
- [21] Reynolds R W, Marsico D C. An improved real-time global sea surface temperature analysis. *J Climate*, 1993, 6: 114-119.
- [22] Gemmill W, Katz K, Li X. Daily real-time global sea surface temperature-high resolution analysis at NOAA/NWS/NCEP/MMAB Office Note, 2007.
- [23] Donlon C, et al. The GHRSSST-PP product user manual. International GHRSSST-PP Project Office Met Office United Kingdom, 2005.
- [24] 郑金武, 许东峰, 王俊, 等. 增量变分法融合多源SST. *海洋学研究*, 2009, 27(4): 24-32.
- [25] Xie Y, Koch S E, McGinley J A, et al. A sequential variational analysis approach for mesoscale data assimilation. 21st Conf on Weather Analysis and Forecasting, Washington, DC, Amer Meteor Soc, 2005.