

论文

# TMI 反演海温与 Hadley 中心海温资料的气候尺度比较分析

王雨, 刘鹏, 李天奕, 傅云飞\*

中国科学技术大学地球和空间科学学院大气探测与气候环境实验室, 合肥 230026

\* 联系人, E-mail: fyf@ustc.edu.cn

收稿日期: 2010-04-13; 接受日期: 2010-11-09

国家重点基础研究专项(编号: 2010CB428601)、国家公益性行业支撑项目(编号: GYHY200906002, GYHY200906003)、国家科技基础性工作专项(编号: 2007FY110700)、中国科学院科技创新项目(编号: KZCX2-YW-Q11-04, KZCX2-EW-QN507, KJCX2-YW-N25)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40730950)、国家自然科学基金青年项目(批准号: 40805008)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: WK2080000002)资助

**摘要** 本文分析研究了 1998~2006 年热带及副热带 TMI 反演获得的海温资料(TMI SST)和 Hadley 中心海温资料(HadISST1)在气候尺度上的异同. 研究表明, TMI SST 和 HadISST1 均能反映热带及副热带海温的气候态分布特征, 也都能指示其海温的异常变化. 但是, 两种海温资料之间仍然存在一定的差异, 主要表现为 TMI SST 较 HadISST1 偏高. 此外, 两者差异不仅存在明显的地域性特征, 而且存在明显的季节变化: 夏季两种海温资料的差异最大, 秋季最小, 但各季均有 30%以上格点的差值在 0.3℃以上. 对两种海温资料距平场的 EOF 分析亦明确显示 HadISST1 和 TMI SST 存在差异, HadISST1 所反映的统计特征较 TMI SST 更加细致. 由于 TMI SST 的反演基于一套综合性算法, 其反演结果受到其他诸如风速、水汽、云水或降水等大气参数的干扰, 进而造成 HadISST1 和 TMI SST 的差异, 且这些因素还造成了两者偏差水平分布的地域性特征. 同时, 也正是这些因素和海温垂直结构的季节变化, 导致了两者偏差存在明显的季节变化. 此外, 在大陆近海区域, 由于 TMI 信号受到污染, 海温反演存在一定的缺陷, 导致两者的差别较大, 因此, 在近海区域 TMI SST 要慎用.

**关键词**  
海温  
HadISST1  
TMI  
EOF 分析

海表温度(Sea Surface Temperature, SST)在海-气之间的热量、动力和水汽交换中扮演着重要角色, 是海-气相互作用和气候变化的决定性因素<sup>[1-6]</sup>, 而且海表温度的变化会引起海洋营养盐结构变化, 从而影响海洋初级生产力和渔场分布<sup>[7-11]</sup>. 因此, 对海温进行长期监测, 并获得连续的海温资料, 这对海洋和气候研究都具有十分重要的意义. 但是, 由于海洋面积广阔, 故建立覆盖全球的实时监测网对海温进行直

接监测具有一定的难度. 例如早期对海温的航船观测, 就主要集中在北半球<sup>[12]</sup>. 尽管如此, 但由于此类实测数据资料时间序列较长, 不失为一些海温产品的源数据, 所以在海洋和气候研究领域仍具有不可替代的作用, 比如目前已被广泛使用的 Hadley 中心海温资料<sup>[13]</sup>(Hadley Centre Sea-ice and Sea-surface Temperature Data Set Version 1, HadISST1)和 COADS<sup>[14-16]</sup>(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data

英文引用格式: Wang Y, Liu P, Li T Y, et al. Climatologic comparison of HadISST1 and TMI sea surface temperature datasets. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54, doi: 10.1007/s11430-011-4214-1

Set)等,均是以航测海温数据为基础而建立的。

另一方面,因下行微波可穿透云层,可实现对海温的全天候观测,故星载微波遥感也是获得全球海温分布的重要方式。如美国 NASA 下属遥感系统实验室(Remote Sensing Systems, RSS)就利用热带测雨卫星<sup>[17]</sup>(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)上搭载的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)的探测结果成功地对海温进行了反演(TMI SST)。TMI的扫描宽度约 878 km (2001年8月升轨后宽度),视场为一椭圆,它所接收的微波信号频率分别为 10.65, 19.35, 21.3, 37.0 和 85.5 GHz。其中,除 21.3 GHz 仅有垂直极化通道外,其他四个频率均为双极化通道。各通道的水平分辨率从 63 km×37 km (10.65 GHz)到 7 km×5 km (85.5 GHz)不等。与以往微波仪器相比(如 SSM/I), TMI 拥有了对海温更为敏感的低频通道(10.65 GHz),自此才使得基于微波探测结果精确反演海温成为可能<sup>[1]</sup>。

除上述实测和星载微波遥感方法外,海温资料还可通过星载红外遥感和模式模拟等方式来获得。但是,由于不同来源海温资料的观测手段和处理方式不同,它们对海温的描述或多或少会存在着差异。那么,这种差异究竟有多大?特别是在进行气候分析时是否一致?这都是在使用这些海温资料进行研究时所必须考虑的问题。因此,有必要对不同海温资料进行比较分析,在此基础上为海洋和气候研究提供准确可靠的数据,从而提高海洋和气候的可预报性<sup>[18]</sup>。目前,尽管国内外学者已广泛地对各种海温资料进行了不同时空尺度的比较研究<sup>[19-29]</sup>,但就 TMI 反演获得的海温资料而言,现有的工作多着眼于较小时空尺度的分析和验证,而在大时空尺度上的比较,特别是与实测资料的差异性分析研究尚不多见。因此, TMI 探测结果反演获取的海温资料能否很好地反应海温的气候特征,仍需要细致地研究。基于此,本文将从海温气候态尺度分析角度出发,研究由 TMI 探测结果反演获得的海温资料——TMI SST 与主要源于实测的海温资料——HadISST1 在热带及副热带(40°S~40°N)分布上的异同,并探求其差异产生的可能原因。

## 1 资料和方法

1998~2006年的月平均 HadISST1 和 TMI SST 资料被用于本文研究。HadISST1 是一套由 Hadley 中心

利用 RSOI (Reduced Space Optimal Interpolation)和方差校正混合技术对实测资料(浮标和航船),以及偏差校正后的星载红外仪器(AVHRR)的海温反演结果(仅 1981年后)进行重构后所得到的一套覆盖全球、空间分辨率为 1°×1°的海冰和海温的逐月格点资料。其中,最主要的实测海温数据来源于 MDB(Met Office Marine Data Bank);此外,在 MDB 缺少数据的地方,则利用另一套实测海温资料 COADS 进行补充<sup>[13]</sup>。如前所述,本文所使用的 TMI SST 是一套由 RSS 反演发布的逐月格点(0.25°×0.25°)产品(第 4版),其范围在 40°S~40°N 之间。此外,为了分析两种海温资料差异性的可能原因,我们还用到了该实验室发布的与 TMI SST 同步反演得到的风速、水汽、云水以及降水等资料。

由于两套海温资料的空间分辨率不同,为便于比较研究,我们将 TMI SST 从原来的 0.25°×0.25°格点权重平均到与 HadISST1 一致的 1°×1°格点的空间分辨率。图 1 为 TMI SST 改变空间分辨率前后,热带及副热带多年 1 月和 7 月平均的海温概率分布(Probability Density Function (PDF),以 1°C 为一个区间进行统计)。由图 1 可见,无论 1 月,还是 7 月,1°×1°和 0.25°×0.25°空间分辨率下海温概率分布的变化都较为一致,相关系数都超过 0.99,且概率的最大偏差不超过 0.3%,这说明改变空间分辨率并没有对 TMI SST 的海温产生太大的影响,插值后的研究结果可靠。

此外,我们将每个格点逐月 TMI SST 与 HadISST1 的差值定义为各格点两者之间的逐月偏差,用  $\Delta$ SST 表示(单位:°C),其表达式如下:  $\Delta$ SST=TMI SST-HadISST1。

一般认为,在 100 km 空间范围内,天到几周的时间尺度上,误差在 0.3°C 以内精度的海温资料已经能满足海洋和气候研究的需求<sup>[30,31]</sup>。因此,我们做如下假定:“如果  $\Delta$ SST 的绝对值在 0.3°C 以内,则两种资料所描述的海温是一致的”。根据这一假定,我们规定:若  $\Delta$ SST 大于 0.3°C,则定义 HadISST1“小于”TMI SST;反之如果小于 -0.3°C,则定义 HadISST1“大于”TMI SST;而  $\Delta$ SST 介于 -0.3~0.3°C 之间,则 HadISST1“等于”TMI SST。

## 2 结果

### 2.1 气候态统计分析

多年(1998~2006年)平均的 TMI SST 海温分布如

图 2 (填色图) 所示. 由图 2 可知, TMI SST 能很好地反映热带及副热带地区海温水平分布的主要特点, 即从印度洋到西太平洋之间存在大面积的暖水区域 (>29.0°C), 高纬地区(30°以上)存在冷水区, 同时, 赤道东太平洋(70°~140°W)存在明显的冷舌.

但是,  $\Delta$ SST 的空间分布(图 2 等值线)以及对应的概率密度分布(每 0.3°C  $\Delta$ SST 间隔内的格点数与热带及副热带总格点数之比, 如图 3 所示)表明, 总体上 TMI SST 较 HadISST1 偏高( $\Delta$ SST 大于 0.3°C 的总概率密度为 20.1%). 此外, 尽管在热带及副热带的绝大部分海域(总概率密度为 73.4%), TMI SST 和 HadISST1 的差值都在 0.3°C 以内, 但在南半球部分海域, 如南太平洋、南印度洋和南大西洋等, 前者较后者要高出 0.3°C 以上. 而在北太平洋、东太平洋和 180°E 以东的赤道辐合带(ITCZ)等海域, 前者却比后者要低 0.3°C. 另一方面, 我们还注意到在大陆近海地区, TMI SST 要显著高于 HadISST1, 这是由于在此

区域微波信号受到了海陆交界的污染, 相应的微波反演海温将存在一定的不确定性<sup>[32]</sup>. 因此, TMI SST 资料在近海区域应该慎用.

同样地, 多年季节平均的 TMI SST 海温空间分布(图 4 中填色图)也能清晰描绘出海温的季节变化特征: (1) 春季(3~5), 从 10°S 到 22°N 之间的印度洋和西太平洋海域, 存在大范围的暖水区; (2) 夏季 (6~8 月)和秋季(9~11 月), 印度洋和西太平洋的暖水区面积均有所减小, 东太平洋的冷舌面积扩大, 同时, 北太平洋的冷水区域消失, 而 35°S 以南出现大面积冷水区域; (3) 冬季(12, 1, 2 月), 暖水区面积比春季小的多, 而赤道东太平洋冷舌较春季更加明显.

多年季节平均 $\Delta$ SST 的空间分布(图 4 中等值线)与图 2 较为相似, 且同样地 TMI SST 较 HadISST1 略为偏高. 此外, 还可注意到 $\Delta$ SST 存在一定的季节变化, 这一点在各季节 $\Delta$ SST 概率密度分布图(图 5, 定

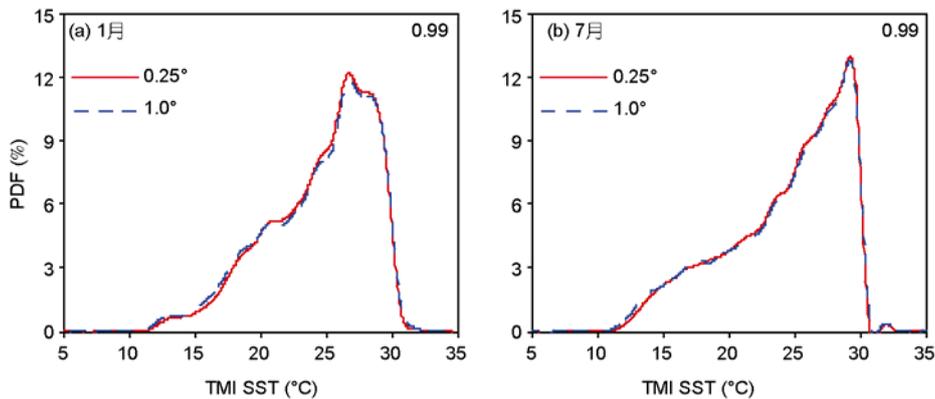


图 1 不同空间分辨率下热带及副热带多年 1 月和 7 月平均的 TMI SST 海温概率分布  
图中所示相关系数均通过 99% 的置信度检验

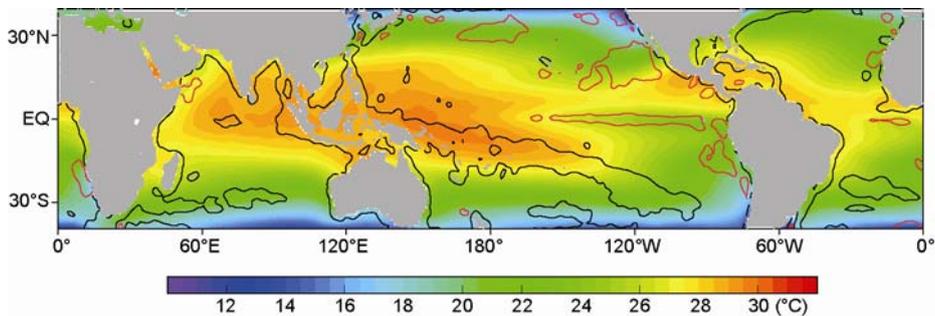


图 2 多年平均的 TMI SST 海温(填色图)和 $\Delta$ SST 的空间分布(等值线)  
黑(红)实线表示 0.3°C(-0.3°C)等值线

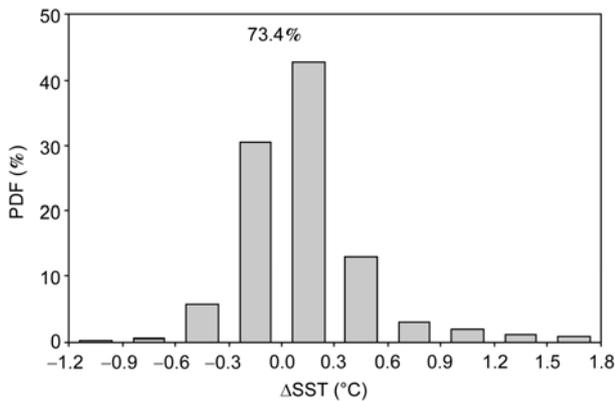


图3 多年平均的 $\Delta$ SST 概率密度分布

义见图3所述)中表现得更加清楚,即:在夏季,两种海温资料“相等”的概率最小,差值在 $-0.3\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 之间的概率为62.7%,这比两种海温资料“相等”概率最高的秋季(70.6%)要低8%左右;而春季和冬季两种资料“相等”的概率分别为68.1%和69.0%,介于夏季和秋季之间.这说明TMI SST和HadISST1所描述的海温在夏季差别最大,秋季两者的接近程度最好,而冬春两季介于夏季和秋季之间.

接下来,我们还检验了这两种资料热带及副热带海温距平值的逐月演变情况(图6).可知,两者随时间的变化基本一致(相关系数为0.92),都能指示热带及副热带地区海温的异常变化,如两套海温资料的距平值都能清晰反映1998年El Niño后期的海温异常.但可注意到,在距平值变化的振幅方面,两者之间仍然存在一定的差异.

进一步地,我们逐格点地计算了两种海温逐月

变化的相关系数,其空间分布如图7所示.从图7中可以清楚地发现,尽管在热带及副热带绝大部分(约97%,格点数之比)海域,两种海温资料的相关系数在0.8以上,但是,仍有3%左右的海域,两种海温资料的相关系数不超过0.8,部分海域甚至低于0.6(如新几内亚岛附近).这再次证明,HadISST1和TMI SST两种海温资料不论在空间分布,还是在时间演变上都存在着差异.

为更加清楚地了解两种海温资料的这种差异,我们将时空变化相结合,给出了HadISST1与TMI SST平均纬向偏差随时间的变化(图8).由图8可知,两种海温资料之间的差异确实存在明显的季节变化.这一现象在 $30^{\circ}\text{N}$ 附近显得尤为明显:冬季,TMI SST相对HadISST1呈现明显的正偏差,而夏季则反之,正负偏差随着季节改变而交替变化.在南半球海域虽然没有正负偏差随着季节改变而交替变更的现象出现,但TMI SST和HadISST1差值大小随着季节变化也有明显的改变.

最后,我们逐格点地统计了1998~2006年这两种海温资料大小关系(关系定义见第1节)的时间频数(某一格点内某种关系出现的月数与总月数之比),相应的空间分布如图9所述.由图9(b)可知,尽管大部分海域(约占总格点的45%),HadISST1和TMI SST“相等”的时间频数超过50%,但两者“相等”的时间频数超过80%的海域仅占总格点的1%左右,这表明两种海温资料仍存在不小差异.由图9(a)和9(c),我们可发现二者存在较大差异的一些具体海域:如北太平洋、北大西洋、索马里激流附近和 $30^{\circ}\text{S}$ 附近

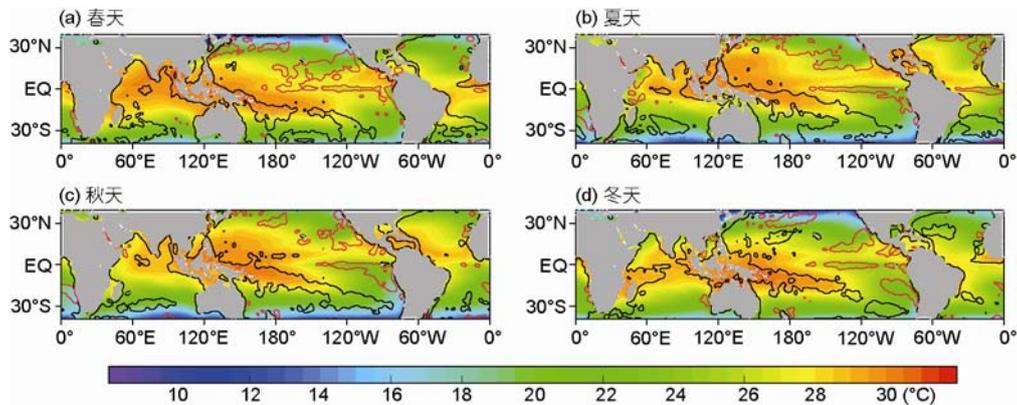


图4 多年季节平均的TMI SST海温(填色图)和 $\Delta$ SST的空间分布(等值线)

黑(红)实线表示 $0.3^{\circ}\text{C}$ ( $-0.3^{\circ}\text{C}$ )等值线

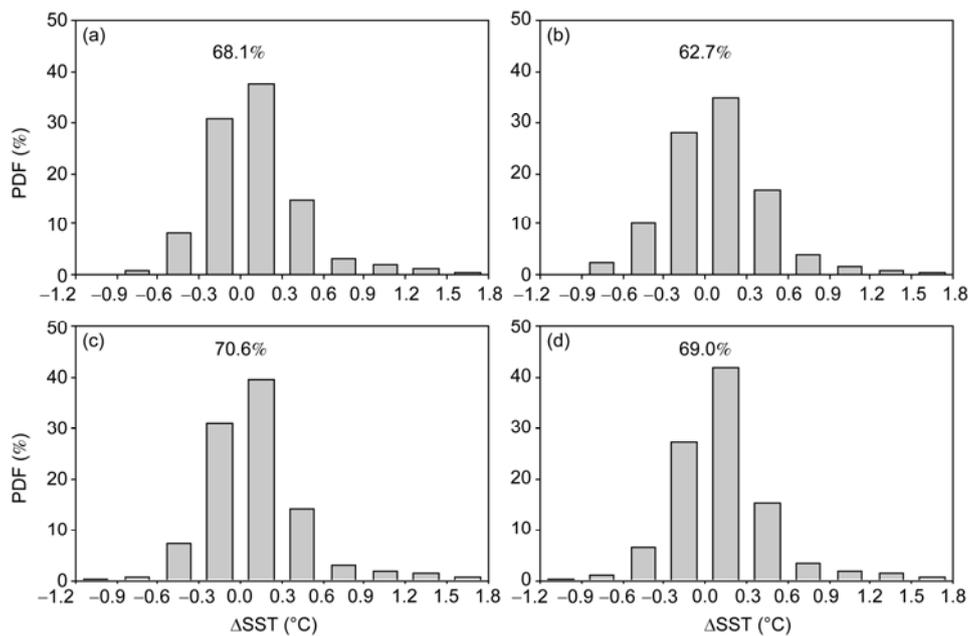


图 5 多年季节平均的 $\Delta$ SST 概率密度分布

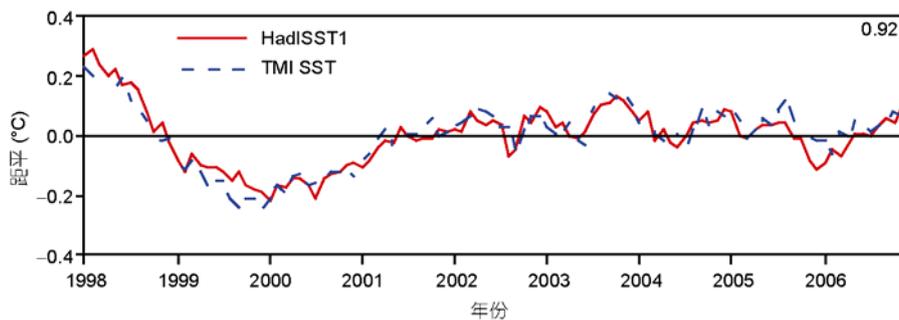


图 6 HadISST1 与 TMI SST 的热带及副热带海温距平逐月演变

图中所示相关系数均通过 99% 的置信度检验

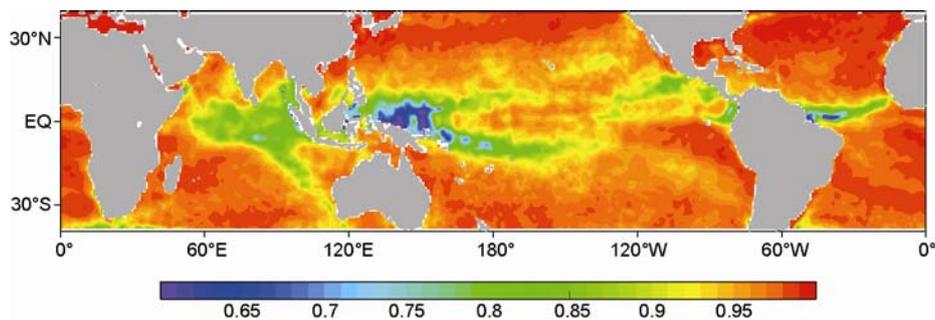


图 7 热带及副热带各格点 HadISST1 和 TMI SST 随时间演变的相关系数空间分布

通过 99% 的置信度检验

的大西洋东岸, HadISST1“大于”TMI SST 的时间频数超过 50%, TMI SST 相对于 HadISST1 存在明显的负

偏差; 而在近海区域以及印度洋、南太平洋、南大西洋的大部分海域的情形恰好相反, HadISST1“小

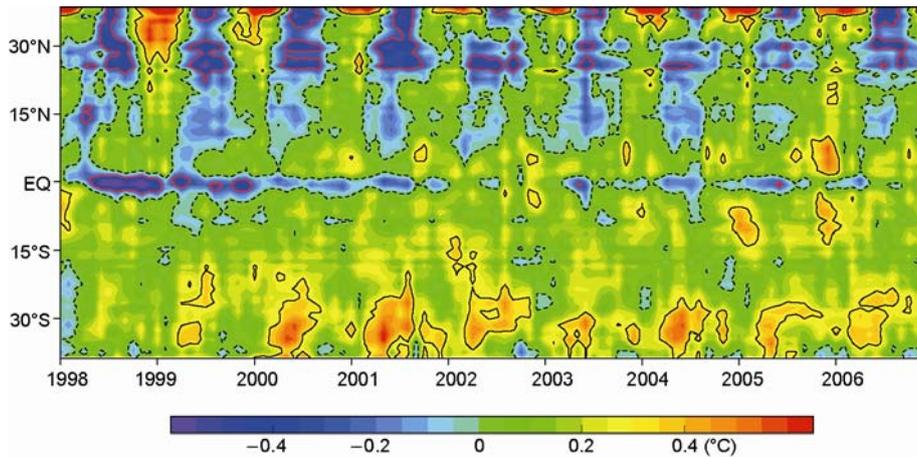


图8 纬向平均的 $\Delta$ SST 随时间的变化

黑虚线、黑实线和红实线分别表示 0, 0.3 和  $-0.3^{\circ}\text{C}$  等值线

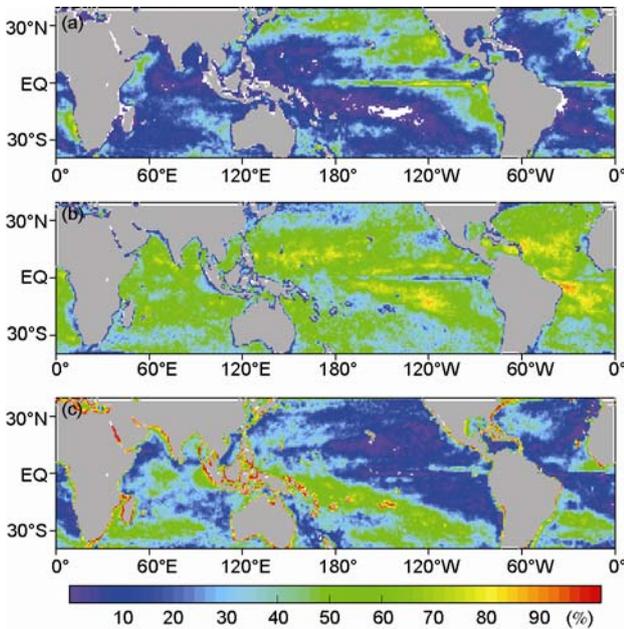


图9 HadISST1 和 TMI SST 大小关系的时间频数

(a) HadISST1 大于 TMI SST; (b) HadISST1 近似等于 TMI SST;  
(c) HadISST1 小于 TMI SST

于“TMI SST 的时间频数在 50%以上, TMI SST 相对于 HadISST1 显示出明显的正偏差. 此外, 在大陆近海区域, TMI SST“大于”HadISST1 的频数大于 90%, 再次证实了 TMI SST 在沿岸地区的不适用性.

## 2.2 气候特征分析

在前文中, 我们通过气候态统计分析已了解到,

在热带及副热带大部分海域 HadISST1 和 TMI SST 之间的多年平均差值在  $0.3^{\circ}\text{C}$  以内, 但在部分海域两者仍存在很大的差异, 且这种差异随着季节变化有明显的改变. 比如 TMI SST 相对于 HadISST1 的正偏差主要出现在南部海域, 而负偏差则主要出现在北部海域和赤道东太平洋地区. 那么, 两种海温资料的这些差异是否会对气候态特征分析结果产生影响? 在本节, 我们将利用 EOF 分析方法(the Empirical Orthogonal Function, 经验正交函数分解)对两种资料距平场的气候态特征进行分析和对比.

图 10 给出了 HadISST1 和 TMI SST 距平场 EOF 分析第一模态的空间分布和时间变化系数. 由图 10(c)可知, 该模态与 ENSO 循环相对应, 并且, 两种海温资料的时间变化系数显示出了较高的相似性, 相关系数高达 0.987. 但是, 空间分布方面却存在一定的差异, 主要体现在 TMI SST 资料第一模态正负值分布差异更加明显. 例如, 在中太平洋南北两侧及北大西洋的正值区, TMI SST 资料较 HadISST1 更高; 而在赤道中东太平洋的负值区, 前者较后者更低, 且负值区域面积更大.

此外, 两种海温资料第一模态解释的方差也有所差异, 前者解释的方差较低, 为 21.57%, 而 HadISST1 则为 33.22% (表 1). 由表 1 亦可知, 不单是第一模态, 实际上二者 EOF 分析的前三个模态解释方差均存在明显差异, 即 HadISST1 所解释的方差更大. 就距平场 EOF 分析的前十个模态总解释方差来看, HadISST1 较 TMI SST 高出 14% 左右, 这表明在对

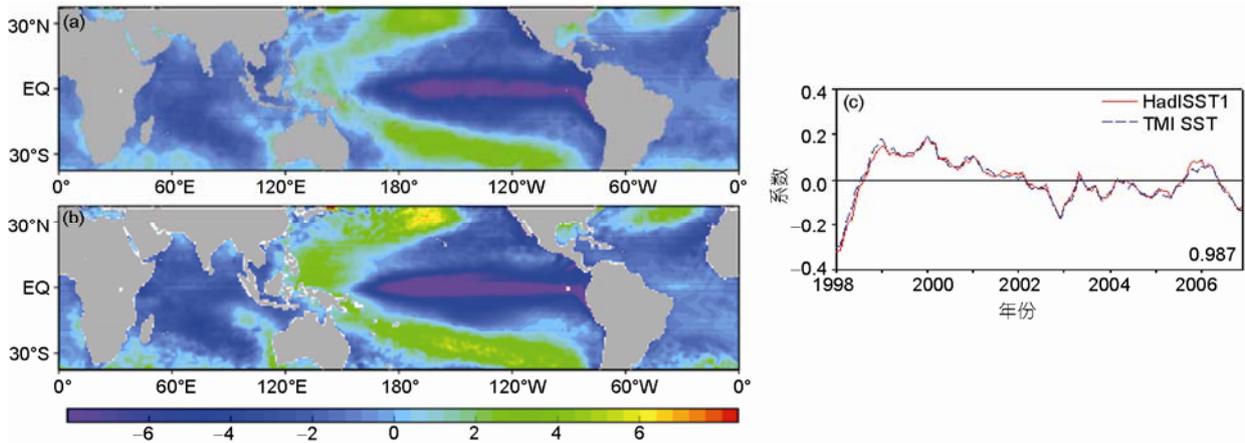


图 10 HadISST1(a)和 TMI SST(b)距平场 EOF 分析第一模态的空间分布和时间变化系数(c)

表 1 HadISST1 和 TMI SST 距平场 EOF 分析前十个模态解释的方差

模态数	HadISST1 模态(%)	TMI SST 模态(%)
1	33.22	21.57
2	12.81	9.94
3	5.45	4.98
4	4.47	4.24
5	3.77	3.74
6	3.28	3.09
7	2.91	2.89
8	2.47	2.76
9	1.95	2.67
10	1.71	2.33
合计	72.04	58.21

距平场进行 EOF 分析时, HadISST1 所反映的统计特征较 TMI SST 更加细致.

### 2.3 差异原因分析

由上文所述, 两种海温资料之间确实存在一定差异, 并且, 这种差异对相应的气候态特征也会造成一定的影响. 那么, 是什么原因导致这些差异? 在本节, 我们将主要从 TMI SST 的反演原理着手, 探求二者差异的可能原因.

TMI SST 的反演是通过一套综合性算法 UMORA<sup>[33-35]</sup>(The Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm)来完成的. 该算法基于 TMI 观测结果, 利用不同频率微波亮温与多种物理量(包括海温、风速、水汽、云水和降水)之间的函数关系, 建立相应的方程组来完成多参数的同步反演. 可注意到, 对于这种同步反演方式, 如果某一参数的反演存在误差, 有可能

会对其他物理量的反演结果造成影响. 换言之, TMI SST 的反演结果可能受到其他反演量, 如风速、水汽、云水或降水等的干扰. 因此, 我们将从由该算法同步反演得到的其他物理量的气候统计特征出发, 研究它们对两种海温资料差异的影响.

图 11 给出的是多年平均的  $\Delta$ SST 随其他反演量多年平均值变化的概率分布. 图 11 清晰的显示, 总体上二者的偏差集中在  $0.3^{\circ}\text{C}$  以内, 且 TMI SST 相对于 HadISST1 正偏差的概率较负偏差的概率大, 这再次证明了 TMI SST 比 HadISST1 略高的事实.

对风速(图 11(a))而言, 可发现中等风速( $7\text{ m s}^{-1}$ 左右)时, HadISST1 和 TMI SST 存在较大的偏差. 已有研究表明, 在这个区间段的风速反演值具有相当高的精度. 因此, 两种资料之间的差异更有可能是由它们测量海温的深度有所不同所致<sup>[22,36]</sup>. 其中, HadISST1 源数据是实测海温, 即次表层(几米深度)海温; 而 TMI SST 是微波遥感海温, 即表层(几毫米深度)海温. 所以, 海水本身的垂直梯度变化可能导致二者存在一定的偏差. 当中等风速时, 这种差异较为明显; 而当风速较大时, 海水能够充分混合, 因此二者的偏差减小. 同时, 我们也注意到, 当风速较低时, TMI SST 相对于 HadISST1 也主要体现为正偏差, 但其概率较小, 这可能是由于 TMI 的风速反演产品在低风速易被高估<sup>[26]</sup>, 进而造成海温对微波信号的贡献被低估, 相应的海温反演值偏低, 这正好部分抵消了两种不同测量方式本身所带来的偏差.

由图 11(b)知, 在弱降水区域, 两种海温资料更易出现偏差( $<0.15\text{ mm h}^{-1}$ ), 并且偏差有正有负. 这

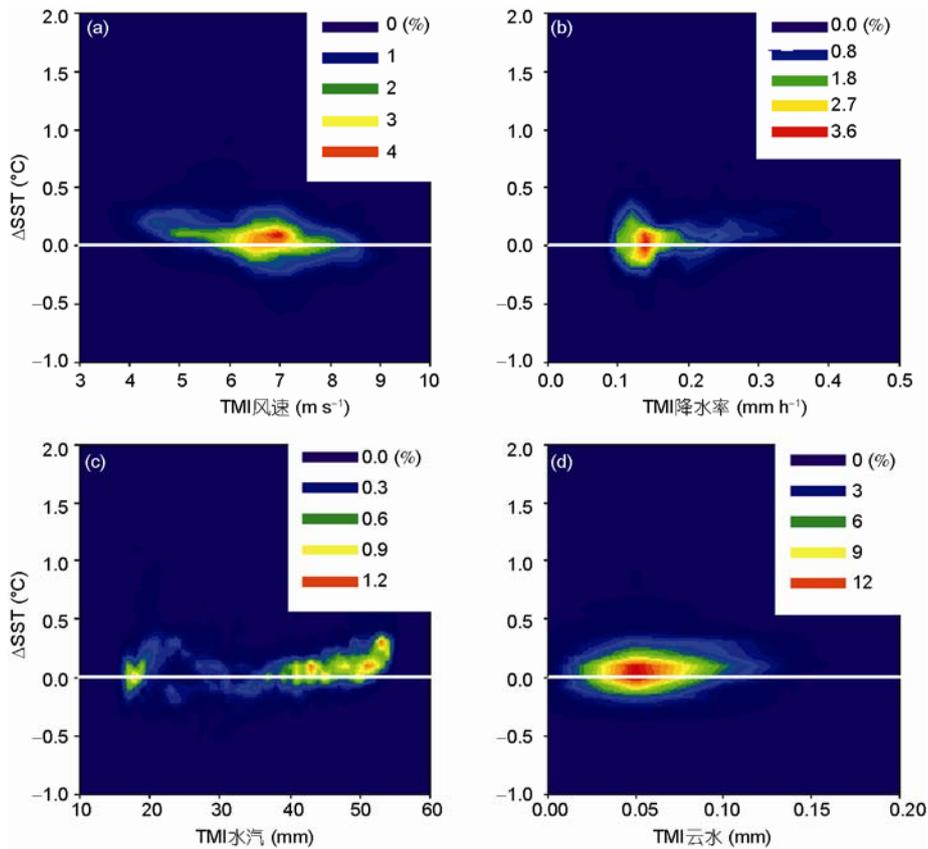


图 11  $\Delta$ SST 随风速(a)、降水率(b)、水汽(c)和云水的变化(d)  
填色区域表示出现概率

实际上与目前微波反演降水仍存在局限性有关,即不能很好地识别和反演弱降水(如毛毛雨)。一方面,这种局限性可能会将非降水云误判为弱降水,从而高估了云对微波信号的贡献,造成被低估的海温反演值。另一方面,我们注意到在 TMI 反演算法中,如出现降水,将首先对云与降水的比例进行划分<sup>[37]</sup>。这种分配方式对于强降水较适用,但对于非均匀弱降水则易出现降水比例被低估的情况(即充塞效应)。因此,有可能造成相应的微波贡献被低估,从而导致较高的海温反演值。正是由于上述两种在弱降水条件下完全相反的反演误差,造成 HadISST1 和 TMI SST 的偏差有正有负。

当水汽含量较低(<25 mm)或较高(>40 mm)时, TMI SST 更易高于 HadISST1(图 11(c))。实际上,目前很多已有的微波算法都易对高水汽含量产生低估<sup>[38]</sup>。同样地, TMI 的这套反演算法也将会低估较高的水汽<sup>[33]</sup>,进而会高估海温对微波信号的贡献,从而

造成较高的海温反演值。

如前言所述,相对于红外遥感海温方式,微波遥感的最大优势就在于有云时也可以完成对海温的监测。图 11(d)也清楚地表明,即使在有云时,微波获得的海温也不会出现较大的偏差。但是,我们也可以注意到当云水含量较低时, TMI SST 容易高于 HadISST1,这仍与 TMI 反演算法本身的缺陷有关,即在云水的反演过程中,该算法对云温进行了简化处理<sup>[33]</sup>,这种简化被认为有可能会造成云水出现 10%或更大的不确定性<sup>[39]</sup>。特别是当云水含量较低时,这种简化将造成云水的反演结果偏低,相应的微波贡献被低估,从而有可能造成较高的海温反演值。

前文气候态统计分析指出, HadISST1 和 TMI SST 偏差的空间分布存在明显的地域性特征。为了解不同区域两种海温资料偏差产生的主要原因,我们选择了二者偏差较大的四个区域,对  $\Delta$ SST 和其他反演量随时间的变化进行了分析。四个典型区域是:北

太平洋(115°~140°W, 15°~25°N)、赤道东太平洋(95°~180°W, 3°S~3°N)、南太平洋(100°~160°W, 35°~12°N)以及南大西洋(2°~36°W, 35°~20°S), 其中前两个海域 TMI SST 相对于 HadISST1 显示明显的负偏差, 后两个海域恰好相反.

我们发现, 在这四个区域, 总有其他某一反演量与  $\Delta$ SST 的相关系数能通过置信度检验, 且相关系数最大, 我们把这个反演量称为影响该区域  $\Delta$ SST 的主要反演量. 图 12 给出了这四个典型区域  $\Delta$ SST 与影响  $\Delta$ SST 主要反演量随时间的变化.

图 12(a) 给出的是赤道东太平洋海域  $\Delta$ SST 和风速随时间的变化. 该区域 HadISST1 和 TMI SST 之间的偏差主要受风速的影响, 两者之间的相关系数为 0.50. 从上面的分析我们知道, 风速对 HadISST1 和 TMI SST 之间差异的影响主要出现在中低风速( $<7 \text{ m s}^{-1}$ ), 且在中等风速正偏差的概率更大一些, 而该区域月平均风速最高仅为  $6.8 \text{ m s}^{-1}$ , 因此, 两者之间的相关系数为正值也在情理之中.

图 12(b)所示为南大西洋  $\Delta$ SST 和降水随时间的变化, 不难看出, 降水是造成该区域两种海温资料差异的主要原因. 海温差值和降水之间的相关系数为 -0.69, 说明降水对两种海温资料的影响主要出现在弱降水, 这和我们上面得出的结论一致. 对于南太平洋区域(图 12(d)), 云水和海温差值之间的相关系数也为负值(-0.46), 同样说明云对该区域两种海温资

料偏差的影响主要体现在云水含量较低的情形.

如上所述, 当水汽含量较低或较高时, TMI SST 更易高于 HadISST1, 如北太平洋海域, HadISST1 和 TMI SST 的偏差和水汽之间的相关系数就为负值(-0.32, 如图 12(c) 所示), 说明该区域二者的偏差主要受低水汽的影响(该区域平均水汽为 25 mm 左右).

须注意, 尽管不同的区域, 影响 HadISST1 和 TMI SST 差异的主要因素有所不同, 但是, 正是受不同因素的综合影响, 才形成了 HadISST1 和 TMI SST 之间偏差的水平分布特征.

气候态统计分析不仅显示 HadISST1 和 TMI SST 之间的差异具有明显的地域性特征, 还显示出这种差异存在明显的季节变化, 造成这一现象主要有以下两方面的原因. 首先, 如前所述, UMORA 是利用不同频率微波亮温与多种物理量之间的函数关系来完成多参数的同时反演, 对于这种同步反演方式, TMI SST 的反演结果会受到其他反演量, 如风速、水汽、云水或降水的干扰, 而这些量均存在明显的季节变化. 此外, 孙凤琴等<sup>[29]</sup>利用 Argo 剖面数据对海温的垂直结构进行了研究, 发现海洋表层和次表层的温度差异存在明显的季节变化. 因此, 海温垂直结构的季节变化也是造成 HadISST1 和 TMI SST 之间差异存在季节变化的一个重要原因. 这两种因素综合结果, 导致 HadISST1 与 TMI SST 的差异存在显著的季节变化.

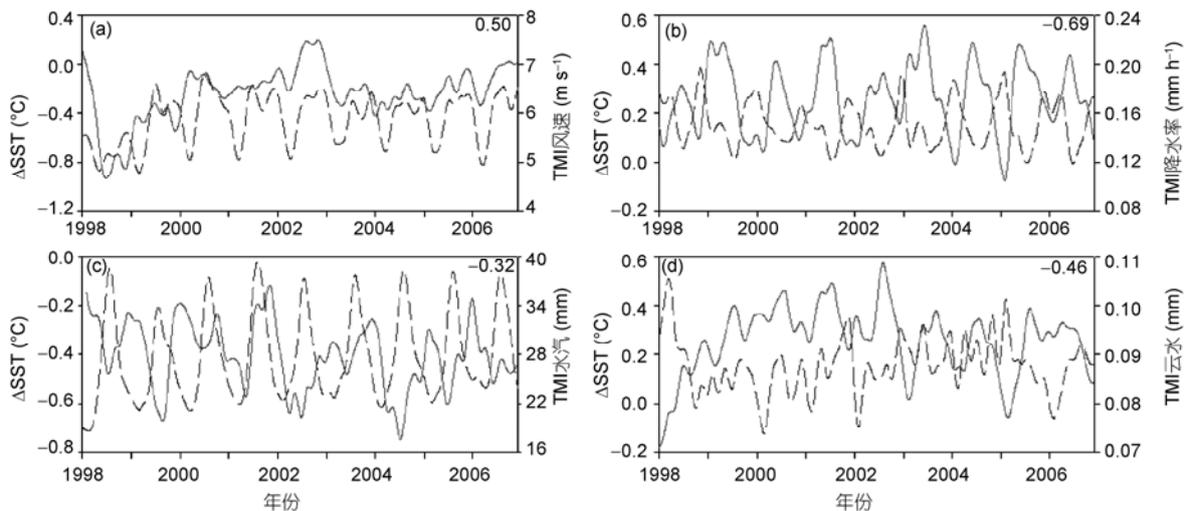


图 12 四个典型区域  $\Delta$ SST(实线)与其他反演量(虚线)随时间的变化

(a) 赤道东太平洋, 风速; (b) 南大西洋, 降水率; (c) 南太平洋, 水汽; (d) 北太平洋, 云水. 图中所示相关系数均通过 99% 的置信度检验

### 3 结论与讨论

源于实测海温数据的 HadISST1 资料在海洋和气候研究中扮演着重要角色, 而随着微波遥感和反演海温技术的发展, TMI SST 已日益成为海洋和气候研究不可或缺的海温产品, 但由于观测手段和处理方式的不同, HadISST1 和 TMI SST 之间或多或少会存在一定的差异. 文中利用 1998~2006 年的 HadISST1 和 TMI SST 海温资料, 从气候态尺度分析角度出发, 研究了这两种海温资料在热带及副热带分布上的异同, 并从 TMI SST 反演原理入手, 分析了两者差异产生的原因, 取得如下结果:

(1) HadISST1 和 TMI SST 两种海温资料均能描述多年平均和多年季节平均的海温分布, 都能反映出热带及副热带海温的气候态分布特征. 此外, HadISST1 和 TMI SST 给出的热带及副热带海温距平随时间的变化基本一致, 说明 HadISST1 和 TMI SST 逐月海温资料不但能反映热带及副热带海温的平均气候态分布, 也能指示热带及副热带海温的异常变化.

(2) 对 HadISST1 和 TMI SST 之间差异的分析表明, 约 27% 的海域, 两种海温资料多年平均差值要高于  $0.3^{\circ}\text{C}$ . 二者偏差的水平分布显示了明显的地域性: TMI SST 相对于 HadISST1 的正偏差主要位于南半球海域, 而负偏差主要位于北太平洋. 同时, 两种海温

资料的偏差存在明显的季节变化, 夏季, 两者差值高于  $0.3^{\circ}\text{C}$  的概率最大, 而秋季两者的接近程度最好, 但各季均有 30% 以上格点的差值在  $0.3^{\circ}\text{C}$  以上. 此外, 对两种海温资料距平场的 EOF 分析亦明确显示 HadISST1 和 TMI SST 存在差异, HadISST1 所反映的统计特征较 TMI SST 更加明确.

(3) 由于 TMI SST 的获得是基于一套综合性的多参数同步反演算法(UMORA), 故 SST 反演结果受到诸如风速、水汽、云水或降水等其他反演量的干扰, 这是造成 HadISST1 和 TMI SST 之间差异的一个重要原因: 由于测量深度的不同以及反演算法对低风速的高估, 致使两者在中低风速存在不小的差异; 微波遥感手段对弱降水反演的局限性导致在弱降水区域 HadISST1 与 TMI SST 存在较大的偏差; 水汽含量过低或过高均会对两种海温资料的差异产生影响; UMORA 算法对云温的简化处理, 导致在云水含量较低的情形下, HadISST1 和 TMI SST 存在一定的偏差. 这些因素的综合影响, 造成了两者差值水平分布的地域性特征. 此外, 正是这些反演量连同海温垂直结构的季节变化, 导致两种海温资料的差异也存在明显的季节变化. 另一需要注意的方面是, 在近海区域, 由于微波信号易受到污染, 基于 TMI 的海温反演存在较明显的误差, 导致 HadISST1 和 TMI SST 的差别较大, 故在近海区域后者要慎用.

**致谢** 感谢审稿人所提的修改意见. 对 Hadley 中心和美国 NASA 下属遥感系统实验室(Remote Sensing Systems)提供本研究所需数据, 表示感谢.

### 参考文献

- 1 Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. Satellite Measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 2000, 288: 847-850
- 2 傅云飞, 黄荣辉. 热带太平洋西风异常对 ENSO 事件发生的作用. *大气科学*, 1996, 20: 641-654
- 3 傅云飞, 黄荣辉. 东亚西风异常活动对热带西太平洋西风爆发及 ENSO 发生的作用. *大气科学*, 1997, 21: 485-492
- 4 严邦良. 海洋垂直平均速度影响 ENSO 事件成熟相锁定的物理过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 691-697
- 5 张东凌, 曾庆存. 5 月热带印度洋大气大洋耦合环流的统计动力分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1693-1699
- 6 曹杰, 杨若文, 尤亚磊, 等. 海温异常对西太平洋副热带高压脊面演变影响的机制研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 382-388
- 7 张甲, 苏奋振, 杜云燕. 东海区中上层鱼类资源与海表温度关系. *资源科学*, 2004, 26: 147-152
- 8 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系. *海洋学报*, 1982, 4: 103-113
- 9 杜云艳, 周成虎, 邵全琴, 等. 东海区海表温度与中上层渔获量关系时空分析. *高技术通讯*, 2001, 11: 56-61
- 10 James C. Coastal sea surface temperature and salmon production in the Pacific Northwest, USA. In: *Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. San Diego: ERIM International, 1998
- 11 Luis E H. SST charts in peruvian waters and relations with pelagic resource, Peru. In: *Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. San Diego: ERIM International, 1998

- 12 Casey K S, Cornillon P. A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies. *J Clim*, 1999, 12: 1848–1863
- 13 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine. *J Geophys Res*, 2003, 108: D14, doi: 10.1029/2002JD002670
- 14 Woodruff S D, Slutz R J, Jenne R L, et al. A comprehensive ocean-atmosphere data set. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1987, 68: 517–526
- 15 Woodruff S D, Lubker S, Wolter K, et al. Comprehensive ocean-atmosphere data set (COADS) release 1a: 1980–92. *Earth System Monitor*, 1993, 4: 1–8
- 16 Woodruff S D, Diaz H F, Elms J D, et al. COADS Release 2 data and metadata enhancements for improvements of marine surface flux fields. *Phys Chem Earth*, 1998, 23: 517–526
- 17 Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J Atmos Ocean Technol*, 1998, 15: 808–816
- 18 Donlon C, Robinson I, Casey K S. The Global Ocean Data Assimilation Experiment High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project Strategy and Implementation Plan. Ispra: Marine Environment Unit, Joint Research Centre, 2001
- 19 Stammer D, Wentz F J, Gentemann C. Validation of microwave sea surface temperature measurements for climate purposes. *J Clim*, 2003, 16: 73–87
- 20 Aumann H H, Chahine M T, Barron D. Sea Surface Temperature Measurements with AIRS: RTG. SST Comparison. *Proceedings of SPIE*, 2003. 5151
- 21 Guan L, Kawamura H. SST availabilities of satellite infrared and microwave measurements. *J Oceanography*, 2003, 59: 201–209
- 22 Gentemann C L, Wentz F J, Mears C A, et al. In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 2004, 109: C04021, doi: 10.1029/2003JC00209258
- 23 Ricciardulli L, Wentz F J. Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: Comparison of microwave and infrared observations from TRMM. *J Geophys Res*, 2004, 109: C12013, doi: 10.1029/2003JC002247
- 24 Chan P K, Gao B C. A comparison of MODIS, NCEP, and TMI sea surface temperature datasets. *IEEE Geosci Remote Sensing Lett*, 2005, 2: 270–274
- 25 Corlett G K, Barton I J, Donlon C J. The accuracy of SST retrievals from AATSR: An initial assessment through geophysical validation against in situ radiometers, buoys and other SST data sets. *Adv Space Res*, 2006, 37: 764–769
- 26 Parekh A, Sharma R, Sarkar A. A comparative assessment of surface wind speed and sea surface temperature over the Indian Ocean by TMI, MSMR, and ERA-40. *J Atmos Ocean Technol*, 2007, 24: 1131–1142
- 27 高郭平, 钱成春, 鲍献文, 等. 中国东部海域卫星遥感 PFSST 和现场观测资料的差异. *海洋学报*, 2001, 23: 121–126
- 28 李娜, 孙凤琴, 张彩云, 等. 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)*, 2006, 45: 383–387
- 29 孙凤琴, 张彩云, 商少平, 等. 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)*, 2007, 46(增刊 1): 1–5
- 30 Houghton J T. Observations of sea-surface temperature for climate research. *Philos Trans R Soc Lond*, 1983, A309(1509): 381–395
- 31 Trenberth K. TOGA and atmospheric processes. Understanding climate change. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1989, 73: 1377–1416
- 32 Donlon C, Gentemann C, Wentz F J. Measuring surface temperature with microwave sensors. *Backscatter*, 2001, 12: 37–39
- 33 Wentz F J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *J Geophys Res*, 1997, 102, 8703–8718
- 34 Wentz F J, Spencer R W. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather algorithm. *J Atmos Sci*, 1998, 55, 1613–1627
- 35 Wentz F J, Meissner T. AMSR ocean algorithm, version 2 RSS Tech Rep, 121599A-1. Remote Sensing Systems, 2000. 66
- 36 Schlüssel P, Emery W J, Grassl H, et al. On the bulk-skin temperature difference and its impact on Satellite remote sensing of sea surface temperature. *J Geophys Res*, 1990, 95: 13341–13356
- 37 Hilburn K A, Wentz F J. Intercalibrated passive microwave rain products from the Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm (UMORA). *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47: 778–794
- 38 Jackson D L, Stephens G L. A study of SSM/I-derived columnar water vapor over the global oceans. *J Atmos Sci*, 1995, 8: 2025–2038
- 39 Horvath A, Davies R. Comparison of microwave and optical cloud water path estimates from TMI, MODIS, and MISR. *J Geophys Res*, 2007, 112: D01202, doi: 10.1029/2006JD007101