

一种基于 TMI 观测结果的海表温度反演算法^{*1}

王 雨^{1,2,3} 傅云飞^{1,3} 刘 奇¹ 刘国胜⁴ 刘显通¹ 程 静⁵

WANG Yu^{1,2,3} FU Yunfei^{1,3} LIU Qi¹ LIU Guosheng⁴ LIU Xiantong¹ CHENG Jing⁵

1. 中国科学技术大学,地球与空间科学学院,卫星遥感和气候环境实验室,合肥,230026
2. 中国科学院大气物理研究所,大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京,100029
3. 中国气象科学研究院,灾害天气国家重点实验室,北京,100081
4. 美国佛罗里达州立大学,气象系,塔拉哈西
5. 上海市气象信息传媒中心,上海,200030

1. *Laboratory of Satellite Remote Sensing and Climate Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China*
2. *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
3. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
4. *Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA*
5. *Shanghai Meteorology Media Center, Shanghai 200030, China*

2009-02-18 收稿,2010-01-10 改回.

Wang Yu, Fu Yunfei, Liu Qi, Liu Guosheng, Liu Xiantong, Cheng Jing. 2011. An algorithm for sea surface temperature retrieval based on TMI measurements. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(1):149-160

Abstract Based on the observations of the microwave instruments on satellites, sea surface temperature (SST) can be accurately obtained regardless of clouds, which is helpful to globally monitor changes in SSTs under any conditions. In this study, a new, as well as simple and accurate, algorithm is proposed for retrieving SSTs in the absence of rain by using the Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager (TMI) measurements. Applying a log-linear relationship between the brightness temperatures and the main environmental parameters and based on the data from the selected five channels, this algorithm, as a semistatistical technique, was actualized through the radiative transfer model simulations. The unique advantage of this algorithm is that the retrieved SST is able to refrain from the influence by the other environmental parameters, due to the appropriate 5-channel log-linear combination. In order to verify the accuracy of the current algorithm, some validations are made in this study. First, the results of case analysis show that there are no unreasonable SST distributions, no matter whether clouds are present or not. On the other hand, the retrievals are also compared against the in-situ buoy observations, which showed a good agreement with a bias of 0.116 K and a root mean square error (RMSE) of about 0.665 K. For the different wind speeds, wind directions and or sky conditions, there are high correlation coefficients exceeding 0.95 between these two with, the low bias less than 0.2 K and RMSE of about 0.65 K. Additionally, comparison is also made with the SST retrieved from the Remote Sensing Systems (RSS) products, which showed that there are more than half grids whose differences lower than 1 K, and the variation of the bias between them is not dramatic with changes in other environmental parameters. It is worth noticing that the departure can hold 0.5 K with increasing cloud liquid water path, which implies the influence of clouds can be well eliminated by the current algorithm. However,

* 资助课题:国家重点基础研究专项(2010CB428601)、国家公益性行业支撑项目(GYHY200906002)、国家科技基础性工作专项(2007FY110700)、中国科学院科技创新项目(KZCX2-YW-Q11-04 和 KJCX2-YW-N25)、国家自然科学基金重点项目(40730950)和青年项目(40805008)。

作者简介:王雨,从事云和降水卫星遥感研究。E-mail:wangyu09@ustc.edu.cn

通讯作者:傅云飞,主要从事卫星遥感分析和反演及其在天气气候领域的应用研究。E-mail:fyf@ustc.edu.cn

when high wind speeds the departure is extremely large because of the limitation of the microwave theory on high wind speeds which can produce SST uncertainties not only in the current algorithm, but also in the RSS products. Finally, the similarity of SST global distributions based on this algorithm to those from the other SST data (e. g. the OISST) is shown with the difference less than 1 K in most of the globe, except for few regions having high wind speed related to the error in the current algorithm, or high water vapor content associated with the error in the OISST products. Generally, the above results suggest that this SST algorithm can be well applied to the real-time retrievals, as well as the climatology investigations.

Key words SST, Retrieval, TMI, Semistatistical algorithm

摘 要 基于星载微波仪器观测结果反演海表温度,能很好地克服云对反演结果的干扰,实现对海表温度全天候的监测。文中利用热带测雨卫星所搭载的微波成像仪的观测结果,建立了一种新的适用于非降水条件下的海表温度反演算法。作为一种半经验统计算法,它以辐射传输方程为基础,通过理论模拟计算,建立海表温度与微波成像仪多通道亮温之间的关系,较好地反演海表温度。该算法最大的特点是选择了合适的 5 个微波成像仪通道,并通过这 5 个通道亮温的对数线性组合方式提取海表温度信息,从而有效地避开了其他环境参数对反演结果的影响。海表温度的反演结果与地基浮标观测结果的比较表明,二者间的均值相差 0.116 K、均方根误差为 0.665 K。在不同的风速、风向及天空状态(有无云)情况下,二者的相关系数均在 0.95 以上,均值差异小于 0.2 K,均方根误差在 0.65 K 左右。在全球尺度上海表温度的反演结果与现有海表温度产品的比较显示,二者的差异一般不超过 1 K,且差异不随其他环境参数发生明显变化;与多年月平均海表温度产品对比研究结果表明,本算法反演获得的海表温度在全球大部分地区(除高风速高水汽区外)与其他海表温度资料的差异在 1 K 范围以内。上述结果表明,该反演算法不仅适用于实时反演,亦能用于气候尺度研究。

关键词 海表温度,反演,微波成像仪,半经验统计算法

中图法分类号 P423.7

1 引 言

海洋表面温度(SST)作为指示全球气候系统状态变化的重要参数之一,直接与海气之间的能量和水汽交换相联系(巢纪平等,2003)。因此,获得全球准确的 SST 信息,可以改善气候预测。早期对 SST 的观测主要以航船和浮标为主,但其覆盖率明显不能满足大范围天气和气候研究的需要。近 30 年来,随着卫星技术的不断发展,星载遥感手段已被广泛应用于 SST 的全球观测。

卫星监测 SST 主要有红外(IR)和被动微波(PWV)遥感两种方式。对于 IR 方法(Emery, et al, 1994; Guan, et al, 2003),尽管具有分辨率高,能够识别海温剧烈变化区域的优势,但其反演精度却受太阳辐射日变化、水汽及气溶胶等条件的影响,更为严重的是当有云时无法进行反演,故该方法一般仅适用于晴空条件下 SST 的反演(李万彪等, 1997);而 PWV 方法虽然受较低分辨率和海表粗糙度变化(主要由大风速引起)的影响,但能克服 IR 方法的上述局限性,从而实现全天候的观测,故在海洋和气候研究中有更广泛的应用(Stammer, et al, 2003)。

虽然从第一颗星载被动微波探测仪器—Seasat 升空以来,基于 PWV 方法的 SST 反演就一直被广泛研究(Wilheit, et al, 1980; Wentz, 1997; Wentz, et al, 1998; 李乐乐等,2006),但直到 1997 年,随着热带测雨卫星(TRMM)的升空,被动微波定量反演 SST 才成为真正意义上的可能(Stammer, et al, 2003),因为 TRMM 搭载的微波成像仪(TMI)拥有了对大气参数并不敏感的较低频率通道(10.65 GHz),而在这之前的星载微波探测仪器频率都相对较高(>12 GHz),这些频率通道所接收的辐射信号(亮温值)主要并不是来自 SST 的贡献,而是水汽、云水含量(LWP)、云温等大气参数的综合贡献(Chelton, et al, 2005; Wentz, et al, 2000)。目前,精确反演 SST 的算法研究主要存在如下两方面问题。首先是反演算法中微波通道的选择问题。尽管对于低频亮温,大气参数的贡献率不大(仅有几个百分点),却不能忽略,加之它对风速也有较高的敏感性,故单一的低频通道并不能完成对 SST 的反演;而采用多通道组合的方式来消除其他环境参数(包括风速和大气参数)对 SST 反演的影响时,不合适的通道组合有可能造成更大的偏差。其次是各种算法(包括统计算法和半经验统计算法)的适用性问

题。对于统计算法而言,它仅依据地基观测结果和微波亮温之间统计关系,因此反演表达式简单、计算简便,但它缺乏对其他环境参数的物理约束,故此类算法一般仅适用于地基观测所在地区,而不能被推广到环境参数变化大的全球海域(Pulvirenti, et al, 2006);对于基于辐射传输模式模拟结果的半经验统计算法而言(Wentz, 1997; Wentz, et al, 1998),它能够细致地考虑各种环境参数对微波信号的贡献,故在任意海域这一方法均有较高的精度,进而成为全球 SST 反演的主流算法,但由于此类算法表达式复杂,且需采用迭代计算实现对 SST、风速、水汽和 LWP 等多参数的反演,计算量大,因此它仍有一定的局限性。

针对上述 PWV 方法的局限性,本文介绍一种简单而准确、适用于非降水云条件下全球 SST 反演的半经验统计算法。该算法是以辐射传输方程为基础,通过模式模拟计算,及合理的 TMI 通道选择,从而建立 SST 与 TMI 组合通道亮温之间关系,由此实现对 SST 的准确反演。

2 资料与处理

本文中用于反演 SST 的 TMI 标准产品资料 1B11 包含有经过标定后的 TMI 各通道探测亮温数据。TMI 接收的微波信号频率包括 10.65、19.35、21.3、37.0 和 85.5 GHz(以下简称 10、19、21、37 和 85 GHz)(Kummerow, et al, 1998)。其中,除 21 GHz 频率是单一垂直极化(V)通道外,其余 4 个频率均为水平(H)和垂直极化双通道。

除 TMI 外,TRMM 上搭载的另外两种准同步观测仪器——可见/红外扫描仪(VIRS)和测雨雷达(PR)探测结果的结合,常可用于降水云与非降水云的区分(傅云飞等,2007;Liu, et al, 2008)。因降水粒子引起的微波散射效应会对 SST 反演结果产生较大影响,故首先将利用 PR 对降水的观测,剔除含降水的 TMI 像素。由于 PR 的轨道扫描宽度(215 km)要小于 TMI 的扫描宽度(758.5 km),所以本文中仅对在 PR 轨道内的 TMI 像素进行逐像素的 SST 反演(SST_{RET})。其次,根据 Ricciardulli 等(2004)的方法,文中利用 VIRS 的 5 个通道(0.63、1.61、3.75、10.8 和 12.0 μm)观测结果,将每个被

反演的 TMI 像素分为“晴空”或“有云”像素,用于检验不同天空状况(“晴空”或“有云”)下的反演效果。由于 TRMM 上搭载的仪器针对热带和副热带地区(南北纬 40 度之间),本文仅对这一范围的 SST 进行反演。

本文还分别利用热带大气海洋浮标观测数据(Tropical Atmosphere Ocean, TAO)(McPhaden, et al, 1998)和 TMI 探测结果的反演数据集——RSS(the Remote Sensing Systems)产品,来验证本反演算法的准确性。TAO 数据包含有热带太平洋地区(10°S — 10°N , 137°E — 95°W)近 70 个浮标探测的海温(SST_{TAO})、风速和风向等结果,其时间分辨率为 1 h。由于该数据集有较高的精度和时空分辨率,故常用于热带地区海表参数反演结果的校验(Gentemann, et al, 2004)。RSS 为逐日格点(0.25°)产品资料,其范围在 40°S — 40°N ,它由一套海洋标准微波算法(the Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm, UMORA)(Wentz, 1997; Wentz, et al, 1998)反演产生,反演结果有海温(SST_{RSS})、风速(U_{RSS})、水汽(CWV_{RSS})、LWP(LWP_{RSS})和降水率等,其中 SST_{RSS} 具有一定的准确性(Gentemann, et al, 2004; Ricciardulli, et al, 2004)。

考虑到 TAO 及 RSS 产品与 TMI 的 1B11 资料有不同的时空分辨率,为便于比较,采取不同的数据匹配方式对其进行匹配。对任一单点数据—— SST_{TAO} 观测值,选择与其观测时空间隔在 0.2 h 和 0.2° (经纬度)内,且最接近此浮标位置的单一 TMI 像素进行匹配(Parekh, et al, 2007)。而对于格点数据 RSS,首先对反演的 SST_{RET} 进行逐日平均,得到热带和副热带范围内与 RSS 同样格点(0.25°)上的值,然后对匹配的格点进行筛选,排除有可能被降水干扰的相应格点。除了被 PR 探测到降水率大于 0.1 mm/h 格点外, RSS 产品中反演的降水率大于 0.1 mm/h 或 LWP 高于 0.2 kg/m^2 的格点亦被定义为降水格点。

此外,为了探讨反演结果在气候应用中的可能性,将反演的 SST_{RET} 与雷诺德最优内插海温数据(Optimum Interpolation SST, OISST)(Reynolds, et al, 1994, 2002)进行了多年月平均全球分布的比较。因为 OISST(SST_{OI})是一个融合了卫星红外反演和浮标观测校正的综合性 SST 产品,具有

较高的准确性,常用于气候监测预报及其他 SST 反演算法的气候验证(Chelton, et al, 2005)。

3 反演算法

3.1 反演基本原理

基于微波在地-气系统中的辐射传输原理, Wang 等(2009)指出,在洋面非降水条件下,星载微波仪器所接收到的亮温与 SST、风速、水汽、LWP 及云温等 5 个环境参数之间均存在如下对数线性关系

$$\ln\left(\frac{288 - T_B^{ip}}{288}\right) = \gamma_0^i + \gamma_1^i q + \gamma_2^i Q_c + \gamma_3^i T_c Q_c + \gamma_4^i T_s + \gamma_5^i U \quad (1)$$

其中 T_B 表示某一通道亮温值, q 、 Q_c 、 T_c 、 T_s 和 U 分别表示水汽、云水含量、云温、海温和风速; γ_i ($i = 0, 1 \cdots 5$) 是相应的系数,或可称之为敏感性因子,其大小反映了相应微波通道亮温对某一环境参数的敏感性程度;公式中上标 i 和 p 分别表示不同的频率和极化性。因此,反转该关系,即可利用微波成像仪的 5 个通道亮温之对数线性组合方法,来实现对 SST 的反演,相应的算法表达式为

$$T_s = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \ln\left(\frac{288 - T_{Bi}}{288}\right) \quad (2)$$

式中 T_{Bi} ($i = 1, 2 \cdots 5$) 表示算法所选取的不同极化通道亮温, a_i ($i = 0, 1 \cdots 5$) 是相应的系数。

3.2 反演通道及系数的确定

由式(2)知,为进行 SST 的反演,需使用 TMI (或其他微波仪器)的 5 个通道观测值。而据 Sohn 等(2003)的研究结果,对一基于多通道组合方式的反演算法,若不正确地选择通道,就有可能造成无法克服的误差。如算法中缺乏高频通道(如 37 GHz),将导致云水的影响无法消除;如缺乏低频通道(如 10 GHz),可造成对地表辐射贡献估计的不足。因此,如何选择适合的 5 个通道进行组合,是获取算法中未知系数 a_i ($i = 0, 1 \cdots 5$),并实现消除其他环境参数对反演 SST 影响的关键。

从数学上看,因式(2)是由式(1)逆矩阵转置得到,所以我们的目的就是要将非奇异敏感性因子 (γ_i) 矩阵转置到算法系数 (a_i) 矩阵,并使得转置后的结果尽可能准确。如果我们将某一通道敏感性因子的集合(即, $\gamma_0, \gamma_1 \cdots \gamma_5$) 看作一矢量 $\mathbf{Y}$, 则为达到上述目的, $\mathbf{Y}$ 必须满足两个条件:一是被选择的不同

通道所对应的 $\mathbf{Y}$ 应尽可能线性无关;二是不同通道的 $\mathbf{Y}$ 中,至少有一个分量(即某一 γ_i) 要显著高于其他分量。根据这一数学原理,在实际反演中就要求选择的微波通道须具备:(1)所选择的各个 TMI 通道对同一环境参数有不同的敏感性,由式(1)知道所选通道应尽可能为不同频率;(2)所选通道应至少对某一环境参数有较高的敏感性(这一观点与 Sohn 等(2003)的观点一致)。因此,在反演过程中除选择对反演参数 SST 有较高敏感性的通道外,还必须选择对其他环境参数有较高敏感性的通道,这样通过多通道组合的方式就能最大限度地消除其他环境参数对反演结果的影响。必须指出 Sohn 等(2003)仅通过模拟响应的分析获得这一观点,而本文是通过理论推导得到式(1),从而从理论上证实了这一观点的正确性。基于上述两方面的要求,我们将利用平面平行微波辐射传输模式(MWRT) (Liu, 1998; 2004),通过模拟方法分析 TMI 各微波通道对不同环境参数的响应特点,进而选择适合的通道。

为研究洋面非降水云条件下 TMI 各通道亮温与环境参数之间的关系,首先由 MWRT 模拟计算出一组典型环境参数条件下各通道亮温(T_{B0}),具体设定分别为 295 K 的海温、4 m/s 的风速、40 kg/m² 的水汽、0.2 kg/m² 的 LWP 以及 2 km 的云高(等同于云温,下同);随后在此基础上,仅改变某一输入参数取值(例如取 SST 从 283 到 305 K,每间隔 1 K 变化)、保持其他输入参数不变,得到相应 MWRT 模拟亮温;进而通过分析该亮温与 T_{B0} 之间的差异,了解此参数对 TMI 各微波通道的影响程度。此外,由式(1)可知,不同环境参数对亮温的影响是相互独立的。故无论其他环境参数取何值(如本文取典型值),由上述模拟方法均将获得某一参数对 TMI 通道亮温的敏感性。

从不同参数变化时模拟的各通道亮温与 T_{B0} 的差异变化情况(图 1)可以看出,除了 SST 外,其他参数对 TMI 水平极化通道的影响程度更大。所以,根据条件 2 的要求,反演中将主要选择水平极化通道来反映环境参数变化。结合条件 1 的要求,选择 10、19 和 37 GHz 的水平通道(10、19 和 37 H),并辅之以对 SST 有高敏感性的 10 GHz 垂直通道(10 V)及对水汽有较高敏感性的 21 GHz 垂直通道(21 V)来完成 SST 的反演。须注意这里未选取对 LWP 和 T_c 也有较高敏感性的高频 85 GHz 通道,这

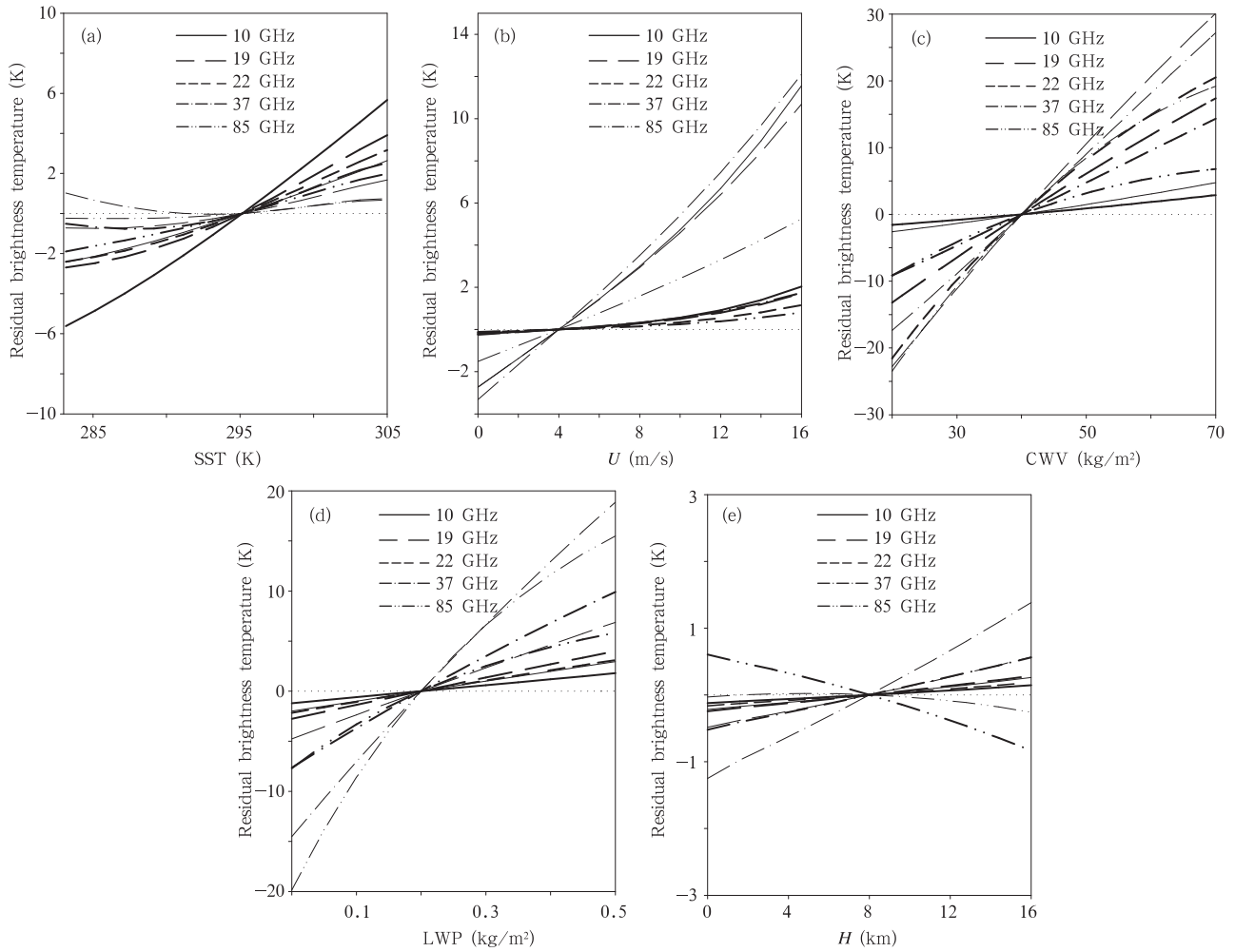


图 1 MWRT 取不同环境参数模拟的各通道亮温(粗线为垂直通道;细线为水平通道)与典型参数条件亮温(T_{B0})的差值分布
(a. T_s , b. U , c. q , d. Q_c , e. 云高)

Fig. 1 Residual error between the brightness temperatures on TMI channels (Thick and thin lines are for the vertical and horizontal polarization channel, respectively) as the function of the environmental parameters ((a) T_s ; (b) U ; (c) q ; (d) Q_c and (e) cloud height) and those under the representative condition (T_{B0})

是因为当 LWP 较高时,该通道亮温将出现饱和现象(王雨等,2006),易造成反演的不确定性。综上所述,最终 SST 的反演算法表达式为

$$T_s = a_0 + a_1 \ln\left(\frac{288 - T_B^{10V}}{288}\right) + a_2 \ln\left(\frac{288 - T_B^{10H}}{288}\right) + a_3 \ln\left(\frac{288 - T_B^{19H}}{288}\right) + a_4 \ln\left(\frac{288 - T_B^{22V}}{288}\right) + a_5 \ln\left(\frac{288 - T_B^{37H}}{288}\right)$$

对于系数 a_i ($i=0,1\cdots 5$),利用 MWRT,通过设定不同的环境参数作为输入值,对上述 5 个通道亮温进行模拟,随后采取多元线性回归方法进行计算

得到的反演算法系数 $a_0, a_1 \cdots a_5$ 分别为 123.950、-222.537、25.332、-2.044、1.566、17.448。在模拟计算过程中,为模式提供的参数如下(Shao, et al,2004):洋面背景、标准热带大气湿廓线、SST 从 283 变化至 303 K(间隔 1 K)、风速从 0 变化到 20 m/s(间隔 1 m/s)、非降水云 LWP 从 0 变化至 0.5 kg/m²(间隔 0.02 kg/m²)、云高范围从 1 到 3 km(间隔 0.2 km)、水汽从 10 到 70 kg/m² 变化(间隔 3 kg/m²)。这样总共得到样本数为 2648646 个(21×21×26×11×21)。因为上述模式输入参数基本涵盖其实际变化范围,故由此获得的 SST 反演算

法,可应用于实际大气条件下的 SST 反演计算。此外,多元线性回归的统计结果表明,相应调整复相关系数(可决系数)高达 0.996,且回归方程能通过显著性检验(F 检验)。

4 反演结果验证

4.1 个例分析

为说明 SST 反演算法的合理性,我们首先对两个非降水个例进行了反演计算和分析,图 2b、d、f、h 所示为晴空个例,发生在 2000 年 7 月 11 日的洋面区域(23° — 27° N, 127° — 130° E),相应轨道号为 15078;图 2a、c、e、g 所示为非降水云个例,发生在 2000 年 7 月 3 日的洋面区域(32° — 36° N, 122° — 125° E),轨道号为 14956。根据同步的 VIRS 观测,如简单地可见光反射率大于 0.3 的像素作为有云像素(Shao, et al, 2004),则图 2 清楚地显示了非降水云个例中绝大部分区域均被云覆盖(图 2a),而晴空个例基本无云(图 2b)。

TMI 的观测和反演结果表明,在晴空个例中,对海温更为敏感的 10 V 通道亮温与 SST 反演值的分布比较一致(图 2d 和 2h),即呈西南高东北低的梯度变化;在图中(23° — 24° N, 127° — 128° E)区域,两者均有一个明显的高值区;反演的平均 SST 为 298.7 K、标准差为 1 K、最高与最低 SST 相差约 3 K。在非降水云个例中,反演的平均 SST 为 296.9 K、标准差为 1 K, SST 分布较平缓(图 2g),反演的最高与最低 SST 相差在 2 K 之内;虽然 10 V 通道亮温存在明显的数个高值中心区(接近 173 K, 图 2c),但它与对云水更为敏感的 37 H 通道亮温分布基本一致(图 2e),从而说明 10 V 和 37 H 通道亮温的高值是由云水的发射贡献所造成,而非高海温贡献。此外,反演的晴空个例 SST 较有云个例 SST 高出 2 K 左右,因为晴空个例位于 26° N 以南,而有云个例位于 32° N 以北地区。

总之,不论有云还是晴空状况,反演的 SST 分布未出现不合理的突变,而是以合理的平缓梯度分布;当有云存在,本反演算法能消除云的影响,这也是微波反演 SST 的优点;本反演算法还能很好地反映不同纬度地区的 SST 温度差异,故个例分析表明反演结果合理。

4.2 与 TAO 数据比较

为进一步验证反演结果的合理性,我们分别对

1998—2000 年 1 和 7 月共 6 个月 TMI 探测的像素和 TAO 观测值进行了匹配,并对匹配后的 TMI 像素进行了 SST 的反演。图 3 给出了反演的 SST_{RET} 和相应 SST_{TAO} 的散点分布,可注意到无论晴空或有云状况下的点,基本均沿对角线分布,说明 SST_{RET} 与 SST_{TAO} 具有很好的一致性。

除此之外,图 3 中也可以看到 SST_{RET} 与 SST_{TAO} 存在较大差异的样本(图中三角点),它们占总样本的 5%(共计 66 个)。造成这种较大差异的原因如下:(1)微波和地基观测的 SST 深度差异。微波探测只能反映海表以下 1 mm 左右的表层海温,而浮标测量的是海表下几米深的平均海温,故两者间会存在一定的差异(Ricciardulli, et al, 2004)。(2)太阳辐射作用。白天由于太阳辐射的加热作用,海表温度较高,故微波测得的 SST 要高于浮标观测值,而夜晚辐射冷却效应则导致相反结果,这种差异在晴空尤为明显。(3)风速作用。当风速较小时,海水上翻较弱,海表与次表层的温度差异大,故 SST_{RET} 与 SST_{TAO} 差异也就大;反之,海表与次表层混合充分, SST_{RET} 与 SST_{TAO} 差异则小。(4)微波探测和浮标观测的范围存在差异。相比于浮标的单点观测,微波观测的是一个像素(约 $16\text{ km} \times 9\text{ km}$)范围内的平均 SST,若 SST 在该范围内存在较大梯度变化时,则 SST_{RET} 与 SST_{TAO} 必有一定差异。(5)可能部分样本受弱降水的干扰,导致反演结果的正偏差。虽然在反演 SST 之前已利用 PR 对降水进行探测,剔除了有降水的 TMI 像素,但毛毛雨之类的弱降水无法被 PR 探测到,而此类降水却能被微波信号很好地反映出来(Seo, et al, 2007; Shao, et al, 2004),故会对基于非降水假定的反演算法造成影响。对此,我们进行了追踪,发现图 3 中最大正偏差样本均出现在高 SST 海区,一般而言,高 SST 海区的海表水汽多,因此更易产生弱降水。

由以上分析可知,高偏差样本不能真实地反映 SST_{RET} 和 SST_{TAO} 之间的比较结果。故按照 Grody 等(2001)的做法,在对匹配样本进行更细致统计分析时,剔除了占总样本数中 5% 的最大偏差样本(图 3 中三角形点),而其余 95% 的样本统计结果如表 3 所示。它表明 SST_{RET} 和 SST_{TAO} 之间具有较高的一致性,0.116 K 的均值偏差及 0.665 K 的均方根误差(RMS)可比拟其他 SST 算法和地基观测的统计比较结果(Reynolds, et al, 1994; Gentemann, et al,

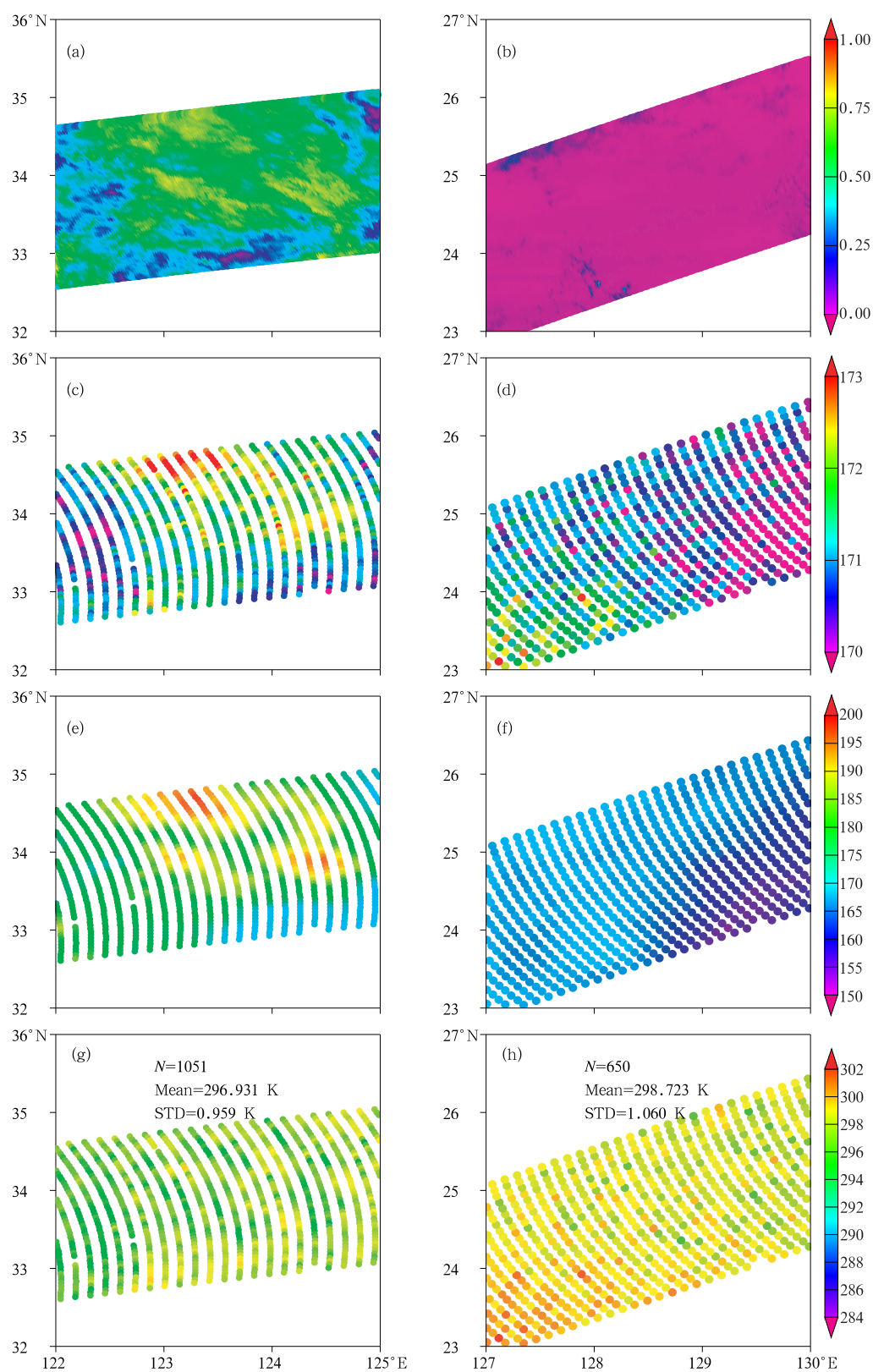


图2 非降水云个例(a,c,e,g)和晴空个例(b,d,f,h)探测结果(a,b为 VIRS $0.63 \mu\text{m}$ 可见光通道,c,d为 10 V 通道,e,f 为 37 H 通道)与反演的 SST(g,h;统计量 N,Mean 和 STD 分别表示像素总数、平均值和标准差)
Fig. 2 Distributions of the VIRS $0.63 \mu\text{m}$ reflectance, the T_B at 10 V, the T_B at 37 H and the SST_{RET} (from top to bottom) for the “non-precipitation cloudy sky” case (a,c,e,g) and the “clear sky” case (b,d,f,h)

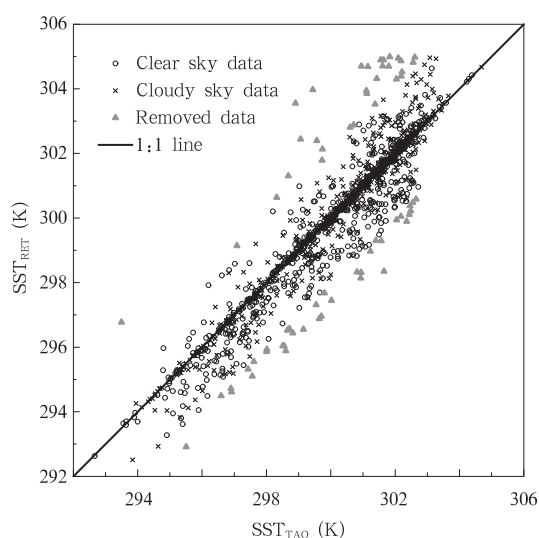


图3 SST_{RET} 和 SST_{TAO} 的比较
(圆圈和叉点分别表示 SST_{RET} 所对应的像素为“晴空”和“有云”;三角形表示占总样本 5% 的最大偏差散点;实线为对角线)

Fig. 3 SST_{RET} versus SST_{TAO} (The circles and crosses indicate the samples corresponding to clear sky and cloudy sky, respectively. The triangles indicate the worst 5% samples. The solid line is the diagonal)

表1 不同分类条件(风速、风向和天空状况)下 SST_{RET} 和 SST_{TAO} 的差异

Table 1 The difference between SST_{RET} and SST_{TAO} in the different conditions (wind velocity, wind direction and sky condition)

分类项目	分类级别	样本总数	均值偏差(K)	相关系数	均方根误差(K)
全部		1268	0.116	0.963	0.665
风速	低风速(<5 m/s)	367	0.149	0.977	0.631
	中风速(5—10 m/s)	883	0.110	0.953	0.674
	高风速(>10 m/s)	18	-0.271	0.971	0.499
风向(正北为0°)	I (0°—90°)	68	-0.124	0.945	0.651
	II (90°—180°)	53	0.015	0.963	0.656
	III (180°—270°)	463	0.109	0.951	0.640
	IV (270°—360°)	644	0.167	0.965	0.645
天空状况	晴空	689	0.215	0.959	0.682
	有云	579	-0.003	0.971	0.601

种分类的比较结果均显示 SST_{RET} 和 SST_{TAO} 有高达 0.95 以上的相关系数,同时偏差大致都在 0.2 K 以下, RMS 维持在 0.65 K 左右。这些统计结果说明了其他环境参数对使用该算法反演的 SST 不会造成太大的影响。

4.3 与 RSS 数据比较

为了解本算法的反演结果与国际现有产品的差异,我们反演了 2000 年 7 月逐日逐轨 SST_{RET} , 并生成格点(0.25°)资料,然后与 TMI 格点(0.25°)产品数据集(即 RSS 产品) SST_{RSS} 进行了匹配和统计比较,样本总数共计 2640209 个。 SST_{RSS} 与 SST_{RET} 之差的概率分布函数(图 4)表现为准正态分布(中值为 0.147 K, 方差为 1.539 K),这反映了它们之间较

2004)。此外,为了检验在其它环境参数影响下 SST 反演结果的准确性,除了与图 3 一致的按天空状况(有无云)对样本进行分类外,表 1 还分别给出了按不同的风速和风向(由 TAO 资料决定)分类的统计比较。结果表明,对风速而言,中等风速较低风速有更小的平均偏差,这与上文对高偏差样本产生原因的分析一致,即较高风速更有利于海水混合,从而使得微波和浮标测得的 SST 差异更小。但是,我们也注意到高风速时偏差最大,除受该风速段样本数较少的因素影响外,伴随高风速产生的海表发射率异常也是造成反演不确定性增加的原因之一,这一点将在下文中进行进一步阐述。对风向而言,因其对微波亮温的影响不超过 1 K (Pulvirenti, et al, 2006),所以此算法未考虑微波信号对风向的响应,而统计结果也显示风向对 SST 反演结果的影响并不大,即使当东南风(IV 型)时有最高的偏差,也不超过 0.17 K。另一方面,相比于晴空 0.215 K 的偏差,有云时极小的偏差(-0.003 K)也定量表明了云对反演结果的影响被很好地消除。总体而言,各

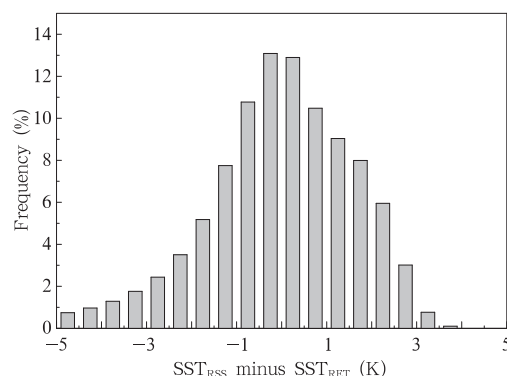
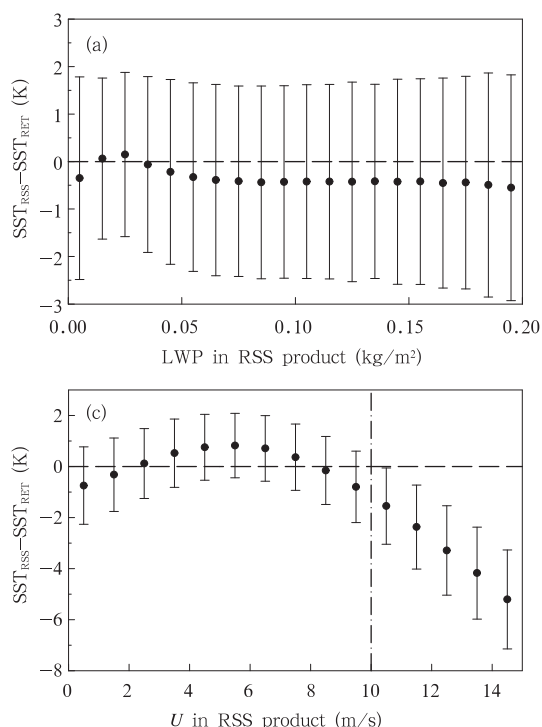


图4 2000 年 7 月全球逐日格点(0.25°) SST_{RSS} 和 SST_{RET} 差异的概率函数分布(0.5 K 为间隔)
Fig. 4 Probability distribution function (PDF) of the difference (SST_{RSS} minus SST_{RET}) for all the grids of the resolution of 0.25° in July 2000 over the global in the interval of 0.5 K

好的一致性,并且差异小于 ± 1 K 的样本占到总样本数的 55% 以上。

为了进一步探讨其他环境参数对 SST_{RET} 和 SST_{RSS} 一致性的影响,可利用 RSS 产品中其他几个反演量(LWP_{RSS} 、 CWV_{RSS} 和 U_{RSS}) 分别对相应格点的 SST 进行了分类比较研究。图 5 分别给出了不同 LWP_{RSS} 、 CWV_{RSS} 和 U_{RSS} 条件下 SST_{RET} 与 SST_{RSS} 的偏差及相应 RMS 变化情况。由图 5 知,对不同的 LWP_{RSS} , SST_{RET} 与 SST_{RSS} 的偏差变化最小(图 5a),保持为 -0.5 K 左右的系统偏差; CWV_{RSS} 变化造成 SST_{RET} 与 SST_{RSS} 的偏差也不超过 1 K(图 5b)。由此说明该算法能很好地消除云水和水汽对反演结果的干扰。



但是,图 5c 表明风速会对反演结果造成较大的影响。当风速小于 10 m/s 时, SST_{RET} 与 SST_{RSS} 的偏差小于 1 K;但风速大于 10 m/s 后,两者的偏差急剧增加,如风速在 15 m/s 时, SST_{RET} 比 SST_{RSS} 小 5 K 以上。这是因为随着风速的增大,海表粗糙度增加,洋面发射率相应增大;此外,随高风速产生的海洋泡沫也会增加发射率(Wilheit, et al, 1980)。因此,在海表高风速条件下, SST 与亮温之间的关系复杂,如何反演这种情况下的 SST 仍是目前国际上微波算法的难点之一, RSS 产品中的 SST 同样存在这一不足(Ricciardulli, et al, 2004)。但海表风速低于 10 m/s 时,本反演算法有效。

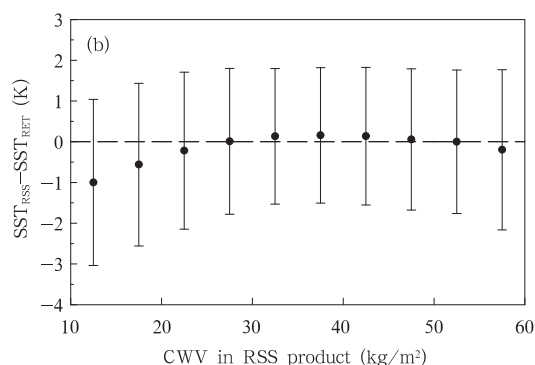


图 5 SST_{RSS} 与 SST_{RET} 的均值偏差(圆点)及均方根误差(RMSE, 竖线)随 RSS 产品中云水(a)、水汽(b)和风速(c)的变化
Fig. 5 Variation of the difference between the mean SST_{RSS} and the mean SST_{RET} as well as its RMSE with the LWP (a), the CWV (b) and the U (c) in the RSS products

5 热带和副热带 SST 分布

上述的验证工作表明,由于本算法合理地选择了 TMI 5 个通道,并采用对数线性组合,使得算法能很好地克服其他环境参数对 SST 反演的影响,从而保证了结果的准确性。为此,这里给出基于本反演算法的多年月平均的热带和副热带 SST 分布,并讨论该算法应用于气候研究的可能性。

图 6 分别给出了 1998—2000 年夏季(7 月)和冬季(1 月) SST_{RET} 热带和副热带分布。首先,我们注意到无论夏季还是冬季,在陆地边缘地区 SST_{RET} 都存在一个大的变化梯度,这表明陆地(或

海岸)的强发射性质会对微波信号造成污染,进而导致反演结果的正偏差。其次,在夏季(图 6a), SST 高值区(>302 K)集中在印度洋北部、西太平洋暖池以及墨西哥湾周边地区, SST 低值区(<292 K)大多出现在南半球高纬带;而在冬季(图 6b), SST 高值区向南移至中南太平洋及赤道以南印度洋附近,同时 SST 低值区北移至 $40^{\circ}N$ 附近高纬带。对比两个季节的分布,夏季北半球 SST 要普遍高于冬季 SST ,如赤道辐合带的 SST 高值区,及北美西海岸 SST 低值区;相反,冬季南半球 SST 要普遍高于夏季,如赤道以南印度洋和中南太平洋地区及 $40^{\circ}S$ 附近的地区。这样的 SST 分布特征与实际情

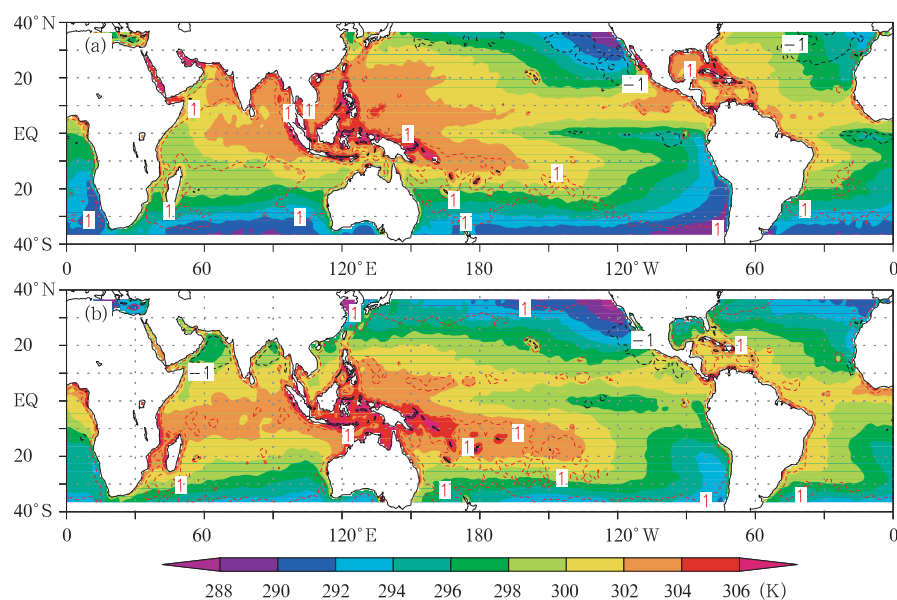


图 6 3 年(1998—2000 年)平均的 7 月(a)和 1 月(b)的热带和副热带 SST_{RET} ($40^{\circ}S-40^{\circ}N$) 水平分布(填色图)及与 SST_{OI} 差异($SST_{RET} - SST_{OI}$)分布(等值线, 仅标出大于 1 K(红虚线)和小于 -1 K(黑虚线)的区域)
Fig. 6 Global averaged monthly distribution ($40^{\circ}S-40^{\circ}N$) of CWV (Shaded) and its difference with the SST_{OI} (Contour, red and black dash line indicates the difference larger than 1 K and -1 K, respectively) for (a) July and (b) January over three years (1998 - 2000)

况基本一致。

为进一步定量说明本反演算法在气候尺度上的适用性, 我们计算了同时期热带和副热带海域 SST_{OI} 和 SST_{RET} 的差异分布($SST_{RET} - SST_{OI}$), 如图 6 中等值线所示(仅标出差大于 ± 1 K 的区域)。除了有较高偏差的海岸地区外, 夏季最大的正偏差(一般在 2—3 K 范围内)出现在阿拉伯海、南印度洋和 $40^{\circ}S$ 附近的高纬地区。实际上这 3 个区域分别对应着索马里急流、马斯克林冷高压及极锋边缘所在地, 故均为高风速地区(图略)。因此, 高风速是造成这些区域 SST 正偏差较大的主要原因。同样地, 冬季最大的正偏差出现在 $40^{\circ}N$ 的锋面活跃地区, 这里的海表风速大, 同样易引起反演误差; 而此时索马里急流和马斯克林高压地区的海表风速较弱, SST_{OI} 和 SST_{RET} 的差异变得不明显。此外, 冬季另一个较大的正偏差区域位于南太平洋中部地区, 这是因为该季节这一区域存在较高的水汽含量(图略), OISST 产品所采用的 IR 算法对水汽有过度的校正(Kumar, et al, 2003), 从而造成 SST_{OI} 偏低。总体上, 无论夏季或冬季, 热带和副热带大部分区域

的 SST_{OI} 和 SST_{RET} 的偏差均在 ± 1 K 之内, 考虑到微波和 IR 算法的本质差别(如引言所述), 这一偏差可以接受(Ricciardulli, et al, 2004)。由此表明, 基于本算法的 SST 反演结果可用于气候研究。

6 结 论

本文研究了一种在无降水条件下, 利用 TMI 5 个通道亮温反演 SST 的新算法, 它属于半经验统计算法。首先, 通过辐射传输方程得到微波亮温与环境参数之间的对数线性关系, 由此获取基本的反演表达式; 然后, 利用辐射传输模式对微波亮温的模拟结果, 进行多元线性回归确定相应系数。本反演算法最大的特点是合理地选取了 5 个分别对不同环境参数具有较高敏感性的微波通道, 来进行对数线性组合, 使得 SST 的反演计算能很好地避开其他环境参数的影响。

为了解本算法在实际反演中的表现, 我们通过多种手段对反演结果进行了验证。首先, 个例研究的结果定性地表明了算法的合理性。进一步地, 为定量验证算法的准确性, 我们分别利用地基观测数

据和一种基于 TMI 观测结果的现有 SST 产品与反演结果进行了对比。其中,与赤道地区 TAO 观测结果的比较表明,二者之间仅有 0.116 K 的均值偏差及 0.665 K 的均方根误差;在全球尺度上,与 RSS 逐日产品的格点间(0.25°)差异统计特征也表现为中值为 0 K 左右的准正态分布,且超过半数的格点仅有 1 K 以下的差异。以上结果均较好地证明了该算法的正确性。并且,为了定量研究 SST 反演结果受其他环境参数的影响程度,在上述比较过程中也按环境参数的不同对相应 SST 进行了分类统计研究。结果显示,对于各种天空状态、风速和风向, SST_{RET} 和 SST_{TAO} 的相关系数均高达 0.95 以上,同时均值偏差大致都在 0.2 K 以下,均方根误差也维持在 0.65 K 左右;而对于不同的水汽、LWP 和风速(<10 m/s), SST_{RET} 和 SST_{RSS} 的平均差异均在 1 K 以下。由此可知算法能很好地克服其他环境变量(除高风速外)对 SST 反演的影响。

此外,为了讨论本算法在气候研究中的适用性,我们也对全球 SST 的月平均分布情况进行了研究。结果显示,多年夏季(7 月)和冬季(1 月)的 SST_{RET} 全球水平分布与实际情况基本相符。与基于 IR 算法的 OISST 资料相比,除一些高风速高水汽地区外, SST_{RET} 和 SST_{OI} 偏差基本上都小于 ± 1 K,故表明本算法的反演结果亦可应用于全球气候研究。

综上所述,虽然本算法计算简单,却很好地克服了各种环境参数对 SST 反演结果的影响,从而保证了结果的准确性,且能满足全球尺度气候研究的需要。但是,我们也注意到该算法仍存在着与其他微波反演算法类似的局限性,如降水对微波信号的影响不容忽视;陆地的干扰导致海岸地区 SST 偏高;高风速时(>10 m/s)微波信号响应的复杂性易造成 SST 反演的误差。因此,如何做相应的修正以减小或消除上述不确定性,是微波反演算法进一步发展的关键。

致谢: 非常感谢审稿人提出的宝贵意见。感谢美国国家航空航天局(NASA)和日本国家空间发展署(JAXA)地球观测研究中心(EORC)提供 TRMM TMI、VIRS 及 PR 标准资料;感谢美国国家浮标数据中心提供赤道大气海洋浮标观测数据;感谢美国遥感系统(RSS)提供 RSS 产品资料;感谢美国国家海洋和大气局(NOAA)提供雷诺德最优内插海温数据。

参考文献

- 巢纪平,袁绍宇,蔡怡. 2003. 热带印度洋的大尺度海气相互作用事件. 气象学报, 61(2): 251-256
- 傅云飞,刘栋,王雨等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征. 气象学报, 63(3): 316-328
- 李乐乐,管磊,陈锐. 2006. 基于星载微波辐射计的海洋大气参数反演算法研究. 中国海洋大学学报, 36(2): 205-211
- 李万彪,朱元竞,赵柏林. 1997. 气象卫星遥感西北太平洋海温的研究. 气象学报, 55(1): 43-54
- 王雨,傅云飞,刘国胜. 2006. 热带测雨卫星 TMI 探测结果对非降水云液态水路径的反演方案研究. 气象学报, 64(4): 443-452
- Chelton D B, Wentz F J. 2005. Global microwave satellite observations of sea surface temperature for numerical weather prediction and climate research. B Am Meteorol Soc, 86: 1097-1115
- Emery W J, Yu Y, Wick G A, et al. 1994. Correcting infrared satellite estimates of sea-surface temperature for atmospheric water-vapor attenuation. J Geophys Res, 99: 5219-5236
- Gentemann C L, Wentz F J, Mears C A. et al. 2004. In situ validation of Tropical Rainfall Measuring Mission microwave sea surface temperatures. J Geophys Res, 109: doi: 10. 1029/2003JC002092
- Grody N, Zhao J, Ferraro R, et al. 2001. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit. J Geophys Res, 106: 2943-2953
- Guan L, Kawamura H, Murakami H. 2003. Retrieval of sea surface temperature from TRMM VIRS. J Oceanogr, 59: 245-249
- Kumar A, Minnett P J, Podesta G, et al. 2003. Error characteristics of the atmospheric correction algorithms used in retrieval of sea surface temperatures from infrared satellite measurements: Global and regional aspects. J Atmos Sci, 60: 575-585
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. J Atmos Ocean Tech, 15: 809-817
- Liu G S. 1998. A fast and accurate model for microwave radiance calculations. J Meteor Soc Japan, 76: 335-343
- Liu G S. 2004. Approximation of single scattering properties of ice and snow particles for high microwave frequencies. J Atmos Sci, 61: 2441-2456
- Liu Q, Fu Y, Yu R. Et al. 2008. A new satellite-based census of precipitating and non-precipitating clouds over the tropics and subtropics. Geophys Res Lett, 35, doi:10. 1029/2008GL033208
- McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R. et al. 1998. The tropical ocean global atmosphere observing system: A decade of progress. J Geophys Res, 103: 14169-14240
- Parekh A, Sharma R, Sarkar A. 2007. A comparative assessment of surface wind speed and sea surface temperature over the Indian ocean by TMI, MSMR, and ERA-40. J Atmos Ocean Tech, 24: 1131-1142

- Pulvirenti L, Pierdicca N. 2006. Retrieval of atmospheric and surface parameters from satellite microwave radiometers over the Mediterranean Sea. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44: 90-101
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 15: 1609-1625
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved Global Sea-Surface Temperature Analyses Using Optimum Interpolation. *J Climate*, 7: 929-948
- Ricciardulli L, Wentz F J. 2004. Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: Comparison of microwave and infrared observations from TRMM. *J Geophys Res.*, 109; doi: 10.1029/2003JC002247
- Seo E K, Sohn B J, Liu G S. 2007. How TRMM precipitation radar and microwave imager retrieved rain rates differ. *Geophys Res Lett*, 34; doi: 10.1029/2007GL032331
- Shao H F, Liu G S. 2004. Detecting drizzle in marine warm clouds using combined visible, infrared, and microwave satellite data. *J Geophys Res*, 109; doi: . 10.1029/2003JD004286
- Sohn B J, Smith E A. 2003. Explaining sources of discrepancy in SSM/I water vapor algorithms. *J Climate*, 16: 3229-3255
- Stammer D, Wentz F J, Gentemann C. 2003. Validation of microwave sea surface temperature measurements for climate purposes. *J Climate*, 16: 73-87
- Wang Y, Fu Y, Liu G, et al. 2009. A new water vapor algorithm for TMI measurements based on a log-linear relationship. *J Geophys Res*, 114, doi:10.1029/2008JD011057
- Wentz F J. 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *J Geophys Res*, 102: 8703-8718
- Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288: 847-850
- Wentz F J, Spencer R W. 1998. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm. *J Atmos Sci*, 55: 1613-1627
- Wilheit T T, Chang A T C. 1980. An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR). *Radio Science*, 15: 525-544