

一个针对被动微波 AMSR-E 数据反演地表温度的物理统计算法*

毛克彪^{①②④**} 施建成^① 李召良^③ 覃志豪^{②⑤} 李满春^⑤ 徐 斌^②

(① 遥感科学国家重点实验室 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ② 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业生态研究室, 北京 100081; ③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ④ 中国科学院研究生院, 北京 100049; ⑤ 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要 用 MODIS 的地表温度产品和 AMSR-E 不同通道之间的亮度温度回归分析表明用 89GHzV 做地表温度反演主通道的精度最高. 用 AIEM 模型模拟表明, 土壤粗糙度和土壤水分变化引起土壤辐射率变化可以通过不同极化波段的差值得到有效的消除, 从而克服了被动微波反演地表温度中辐射率不稳定的困难. 通过回归系数分析表明, 不同的地表覆盖类型的辐射机制是不同的. 要精确地反演地表温度, 至少对地表分成三种覆盖类型, 即水覆盖的地表、雪覆盖的地表以及非雪和水覆盖的地表. 以 MODIS 地表温度产品作为评价标准, 物理统计方法的平均精度在 2~3℃.

关键词 亮度温度 地表温度 AMSR-E MODIS AIEM

地表能量交换信息是监测区域资源环境变化的一个重要参数. 地表温度是地表能量平衡的决定因素之一. 因此, 获取区域地表温度空间差异, 并进而分析其对区域资源环境变化的影响, 是区域资源环境动态监测的重要内容. 近 20 年来, 热红外遥感技术的飞速发展快速获取区域地表温度空间差异信息提供了新的途径^[1-15]. 但热红外地表温度反演算法受天气的影响非常大, 在实际应用中有时难以保证精度. 从美国宇航局(NASA)提供的温度产品分析,

可知大部分的温度产品 60% 以上的地区受到云的影响, 这对实际应用带来了很大的局限. 由于被动微波能穿透云层, 并且受大气的影响非常的小, 可以克服热红外遥感的缺点. 因此, 研究如何利用被动微波数据来反演地表温度就显得非常的迫切.

目前针对 AMSR-E 被动微波遥感数据的地表温度反演算法的研究还很少, 还没有针对 AMSR-E 数据的地表温度反演物理算法(不计辐射传输方程的迭代反演算法)公开发表. 其主要原因是对于微波的地

收稿日期: 2005-10-03; 接受日期: 2006-06-07

* 国家自然科学基金项目(批准号: 90302008, 40571101)、农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放基金项目、中国科学院遥感应用研究所和北京师范大学遥感科学国家重点实验室开放基金项目共同资助

** E-mail: maokebiao@126.com

表辐射机理研究还不成熟,而且受空间分辨率的影响,使得地面实测资料的获得非常困难. McFarland^[16]对被动微波数据的 SSM/I 反演地表温度做了一些研究,虽然受到数据获取的限制,但仍能得到许多有用的结论:对于有水存在的陆地表面,水的影响必须校正. 水的高介电常数降低了 19 GHz 的辐射率,而且由于水面的辐射是极高化的,所以陆表水的效应造成亮温减小和极化差异增加. 37 和 19 GHz 两通道亮温差异可以用来订正这一影响,同时水汽对 37 GHz 也有较大的影响,所以可用 37 和 22 GHz 垂直极化的差异来订正大气水汽的辐射影响. 虽然微波受大气的影 响很小,但地表温度的反演本身是个病态反演. 主要原因是土壤地表辐射率在微波波段并不是一个稳定的常数,而是随土壤水分的变化而变化. 地表辐射率在热红外波段变化非常的小,但受大气的影 响非常大. 热红外影像的空间分辨率要比微波高,因此微波和热红外存在一些互补性. 本研究通过 AIEM 物理模型模拟分析表明,干燥土壤的辐射率变化很小,土壤粗糙度和土壤水分变化引起辐射率的变化可以通过不同通道的辐射率(与亮温呈线性关系)之差与土壤水分含量的关系得到消除. 对地观测卫星 Aqua 同时拥有 MODIS 和 AMSR-E 传感器,相对而言,用 MODIS 的热红外波段反演地表温度的算法已经比较成熟^[10,13,15]. 我们可以用 MODIS 的地表温度产品来代替 AMSR-E 所需要的地表实测数据,通过建立 AMSR-E 各通道亮温和 MODIS 地表温度产品的关系,从而可以分析不同地表地物类型在微波波段的辐射机制,最后建立微波地表温度的反演算法. 从而克服需要测试 AMSR-E 过境的同步地表温度数据的困难,并为多传感的参数反演相互校正和传感器的综合利用提供理论依据.

1 被动微波地表温度反演的理论基础

被动微波地表温度反演以热辐射传导方程为基础,通过建立能量平衡方程来反演地表温度. 辐射传输方程描述了卫星的微波辐射计所观测到的总辐射强度,不仅有来自地表的辐射,而且还有来自大气的向上和向下的路径辐射. 这些辐射成分在穿过大气层到达遥传感器的过程中,还受到大气层的吸收影响

而削减. 因此,地表温度的演算实际上是一个复杂的求解问题. 在微波波段,热辐射平衡可以用下面的无散射的大气辐射传输方程描述:

$$B_f(T_f) = \tau_f(\theta)\varepsilon_f B_f(T_s) + [1 - \tau_f(\theta)](1 - \varepsilon_f)\tau_f(\theta)B_f(T_a^\downarrow) + [1 - \tau_i(\theta)]B_f(T_a^\uparrow), \quad (1)$$

式中 $\tau_f(\theta)$ 表示频率 f 的透过率, ε_f 表示频率 f 辐射率, $B_f(T)$ 表示星上辐射强度, T_f 星上亮度温度, $B_f(T_s)$ 表示地表辐射强度, T_s 表示地表温度, $B_f(T_a^\downarrow)$ 表示大气向下的总辐射强度, T_a^\downarrow 为大气向下平均作用温度, $B_f(T_a^\uparrow)$ 表示大气向上的总辐射强度, T_a^\uparrow 是大气平均向上作用温度. $B_f(T)$ 为 Planck 函数:

$$B_f(T_i) = \frac{2hf^3}{c^2(e^{hf/kT} - 1)}, \quad (2)$$

$B_f(T)$, 黑体谱亮度, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, h 是普朗克常数 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}$, f 单位为 Hz , k 是波尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, T 是绝对温度, 单位是 K , c 是光速, $c = 2.992458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, 根据在微波波段区间的 Ralleigh-Jeans 近似, (2)式可以简化为

$$B_f(T) = \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (3)$$

因此可将(1)式化简为

$$T_f = \tau_f \varepsilon_f T_s + (1 - \tau_f)\tau_f(1 - \varepsilon_f)T_a^\downarrow + (1 - \tau_f)T_a^\uparrow. \quad (4)$$

从上式可以看出,可以用亮温度的线性组合来建立反演方程. 很显然,对于单通道的辐射传输方程(4)至少包含了两个未知数地表温度(T_s)和地表辐射率(ε_f),另外大气的影 响(T_a)也需要消除. 而且即使增加一个通道,也会增加一个未知数,因此要反演地表温度必须消除辐射率这个未知数. 在微波波段,地表的辐射率受土壤水分影响很大,因此辐射率通常不是一个稳定的常数(辐射率对土壤水分变化敏感也是用微波反演土壤水分的主要原因). 微波的辐射率受土壤水分的影响变化很大的这种性质和热红外有很大差别,这就给地表温度反演带来了困难. 幸运的是,我们通过 AIEM 模拟发现,对于干燥土壤,不同频率的辐射率几乎是相同的,而且是稳定的. 随着土壤水

分的增加,不同频率的辐射率改变不一样. 因此反演地表温度的关键在于怎样消除土壤水分变化和其他因素(粗糙度)引起的辐射率变化.

2 从 AMSR-E 数据中反演地表温度的算法

在本研究中,首先针对对地观测卫星 Aqua 具有多传感器的优势,利用 MODIS 地表温度产品和 AMSR-E 的各亮度温度数据分析,找到最佳反演通道;然后利用地表辐射模型 AIEM 进行模拟分析,从而找到消除土壤水分以及大气水分影响的最佳途径.

2.1 MODIS LST 与 AMSR-E 亮度温度数据回归分析

因为地表温度不是均一的,而且地面测量只可能是点状测量,因此很难获得卫星过境时与像元分辨率(25 km×25 km)一致的地面数据. 另外,即使获得了实测数据,实测数据的配准仍然存在误差. 由于这些原因,使得针对被动微波数据的地表温度反演算法开发和验证变得非常困难. MODIS 的温度产品经验证^[17,18],其实验区验证精度在 1℃ 以下. 由于 MODIS 和 AMSR-E 在同一颗星上,因此如何充分利用不同传感器的优势成为遥感应用研究中的一个重要方法学. 我们将同步的 MODIS 地表温度产品作为 AMSR-E 对应的地面实测数据,从而克服了同步实测数据带来的困难. 我们选择了中国西部地区(主要是青藏高原)作为研究区,青藏高原作为世界上平均海拔最高、面积最大、地形最为复杂的高原,其能量与水分循环过程对亚洲季风、东亚大气环流及全球气候变化均有极大的影响. 准确持续地获取青藏高原地表温度数据一直是科学家研究青藏高原地气相互作用过程的努力方向之一. 选择经纬度范围:纬度 24°~40°; 经度: 75°~100°; 时间: 2004-02-02~09 和

2004-08-01~15 共 20799 个像元.

对 MODIS 温度产品和 AMSR-E 亮度温度做散点图(部分数据如图 1),对其分别做回归分析得到如表 1 所示的结果. 从表 1 中相关系数可以看出,随着频率的升高,相关性越好. 89 GHz V 的 R-Square 达到 0.88. 平均误差在 4℃ 以下. 从表 1 中可以看出,对于温度很低时,低频的数据与 MODIS 地表温度产品的关系很差. 这其中的部分原因可能是因为热红外测量的温度主要来自地球表层,而高频(89 GHz)测量得到的亮温更加接近热红外测量的温度. 对于频率越低,能量可能来自不同的表层的贡献就不一样,因此,对于 AMSR-E 数据的 89 GHz V 是最好的反演地表温度的单通道.

2.2 AIEM 模拟分析及被动微波地表温度反演算法

潮湿程度不同的土壤介电常数不同,导致辐射率不同,进而影响亮度温度,因此被动微波遥感成为估计土壤水分的最主要手段^[19]. 微波遥感模型旨在建立电磁参数与地表物理和几何参数之间的数学关系. 土壤的介电常数的变化反应了土壤水分含量的变化. 但通常遥感器不能直接测得土壤的介电常数,而是获得土壤的亮温信息. 因此要反演土壤水分就需要建立亮温信息和介电常数的关系. 为了研究方便,人们用与亮温联系紧密的辐射率来建立与介电常数的关系. 事实上,物体的散射和辐射是有直接关系的,它们之间的定量关系能够通过研究物体的散射问题来解决相应的辐射问题. 辐射率是被动微波中间接获取的参数,而它可以由粗糙表面的双站散射系数求出,因此研究微波的散射问题成为微波遥感的基础. 对于粗糙表面的散射的研究主要有几何光学模型(GO)、物理光学模型(POM)、小波绕模型(SPM)^[20]. 这些模型各有各的适应范围,其中几何光

表 1 MODIS 温度产品和 AMSR-E 亮温的关系

频率/GHz	像元数	关系方程	地表温度误差/℃	$R^{2\ a)}$
6.9V	20799	LST=49.013+0.8529×T6.9V	5.71	0.704
10.7V	20799	LST=63.677+0.80471×T10.7V	5.34	0.734
18.7V	20799	LST=76.399+0.75911T18.7V	4.61	0.805
23.8V	20799	LST=83.633+0.73353T23.8V	4.04	0.847
36.5V	20799	LST=96.7131+0.69397T36.5V	4.17	0.832
89V	20799	LST=121.63+0.59712T89V	3.7	0.876

a) 相关系数的平方

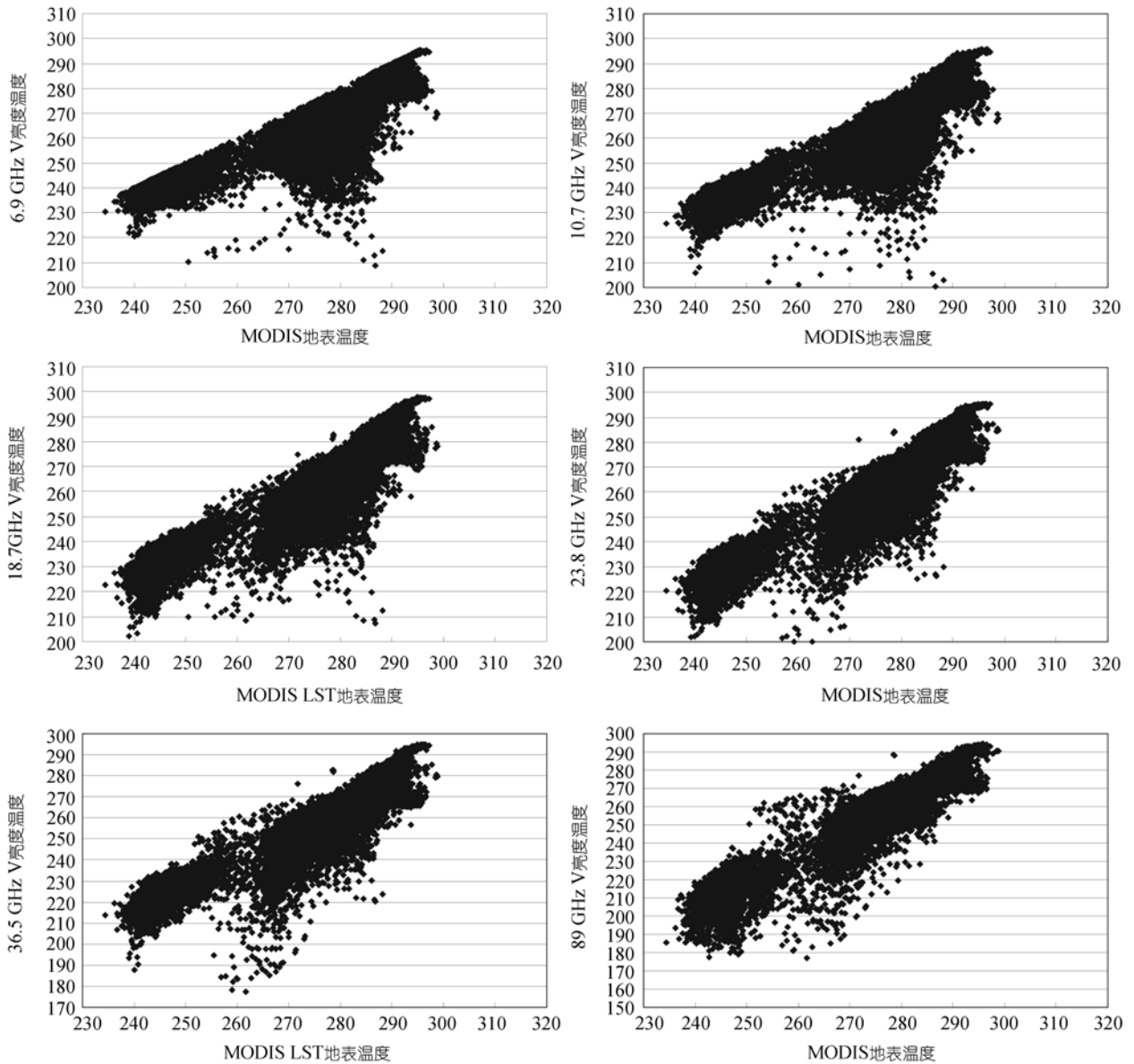


图 1 MODIS 地表温度产品和 AMSR-E 亮度温度

学模型和物理光学模型都是基于基尔霍夫模型，只是前者是在驻留相位近似下得到的，后者是在标量的近似下得到的。基尔霍夫模型要求地表相关长度大于一个电磁波波长。而小波绕模型是针对当表面相关长度小于波长时提出来的。

由于实际地表是连续的，上述模型都不能很好地描述地表的真实状态。近些年，人们意识到 SPM, POM 以及 GO 模型在粗糙度方面都有一定的局限

性^[20,21]。自然地表的真实状况超越了这些模型粗糙度的范围。为了更好的模拟地表的散射和辐射，Fung 等人^[20,21]提出了 IEM 模型(积分方程模型)，该模型是基于原始的积分方程，能够很好地模拟地表的真实状况，可以适应更广的粗糙度范围，涵盖了从 Kirchhoff 到 SPM 模型。已经被广泛地用于微波的散射和辐射模拟。Fung 等^[20,21]的研究结果表明：Kirchhoff 和 SPM 分别是 IEM 在高频和低频区域的特

例, IEM 跟 SPM 和 Kirchhoff 的结果一致. 在实际应用中, 人们针对 IEM 的某些缺陷做了修正, 已经发展成为 AIEM 模型^[22]. 该模型比 IEM 模型考虑了更多的影响因素, 能更好地模拟地表的真实状况. 由于模型推导以及公式比较复杂, 具体请参见^[20~23]. 因此本文的研究将采用 AIEM 模型作为地表辐射模型, 即用 AIEM 模型模拟土壤水分和辐射率的关系. 我们以 AMSR-E 的观测角度 55° , 相关长度(CI)为 5.5 cm, 均方根高度(Sig)为 2 cm 作为模型的输入值. 为了分析方便, 对模拟数据土壤水分和辐射率做散点图(图 2). 图 2(a)图是土壤水分和频率 6.9, 10.7, 23.8, 36.5 和 89 GHz, 在固定粗糙度情况下垂直极化辐射率与土壤水分的关系. 从图 2 中可以看到, 当土壤水分低于 2% 时候, 不同频率的辐射率几乎交于一点, 而且是一种近似的线性关系. 由于辐射率在微波波段和亮温是线性关系, 因此辐射率与土壤水分的关系实际上也反应了亮温和土壤水分的变化关系. 在文献[16]中, McFarland 用 37 和 19 GHz V 极化之差一次线性关系来消除土壤水分的影响是有一定的物理意义的. 但由于当时对于土壤辐射模型的研究还处于初步发展阶段, 从而导致这种描述不是十分准确. 在图 2(b)中, 可以看到, 将不同频率的辐射率相减与土壤水分

关系可以明显地看出, 不同频率的亮温(辐射率)之差和土壤水分之间不是严格的线性关系, 用二次关系模拟的近似精度要远远高于一次近似精度. 因此, 对于用微波的不同频率之间的亮温差来消除土壤水分, 甚至大气水分的影响应该用二次以上的关系来描述, 从而可以提高算法的精度和实用性.

对表 1 中 MODIS 地表温度产品和 AMSR-E 的各亮度温度分析可知, 89 GHz 是最适宜用来作为单通道反演地表温度的. 而且在局部分析中, 我们发现当地表温度不同时, 由于不同的地表层微波各频率的辐射稍微变化. 特别是当地表温度小于 273 K 时候, 其辐射机制有很大的差异. 因此为了更加精确的反演地表温度, 需要对反演算法进行分段处理. 如图 3 所示, 我们将地表温度基本上分为两个区间, 即大于 273 K 和小于 273 K. 算法的思想是: 先用表 1 中 89 V 的近似公式计算得到初步的地表温度; 第二将得到的温度在其所属的温度区间内进一步通过消除土壤水分和大气水分的影响来提高其精度. 对 2.1 节中的数据进行回归分析得到如表 2 所示的地表温度反演公式. 在这里, 需要说明的是当在第一步用 89 V 计算的初步地表温度时, 误差可能落在第二步分区间的边缘, 比如, 用 89 V 计算得到的地表温度是 270 K,

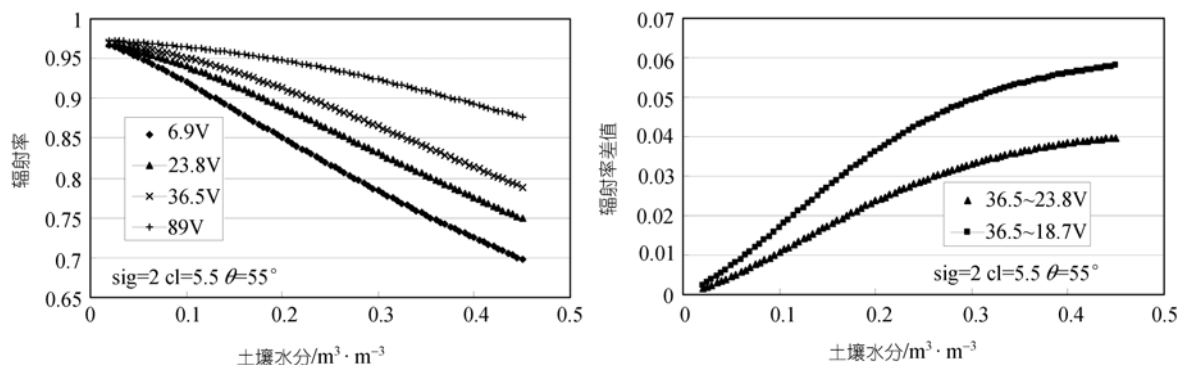


图 2 AIEM 模拟土壤水分和不同频率辐射率以及辐射率差值之间的关系

表 2 对不同温度范围的地表温度反演的计算方法

时间跨度	温度范围/K	像元数	地表温度计算方程	地表温度反演误差/ $^\circ\text{C}$
2004-02-02	<279	15563	$LST=0.63291 \times 89V - 1.93891 \times (36.5V - 23.3V) + 0.02922 \times (36.5V - 23.3V)^2 + 0.52654 \times (36.5V - 18.7V) - 0.00835 \times (36.5V - 18.7V)^2 + 106.395$	2.78
2004-08-15	>270	12520	$LST=0.50898 \times 89V + 0.31302 \times (36.5V - 23.3V) + 0.02095 \times (36.5V - 23.3V)^2 - 0.87117 \times (36.5V - 18.7V) + 0.00576 \times (36.5V - 18.7V)^2 + 142.6452$	2.61

反演误差是 4℃，实际应该用大于 273 K 区间的计算公式，而用了小于 273 K 的公式。因此在实际应用中，我们需要将这个区间的计算范围都延伸，形成边缘重叠。这样对于边缘的部分，两个公式都适用，不至于误差很大。通过分析，得到了如表 2 所示的地表温度计算公式。其近似精度在 3℃ 以下。

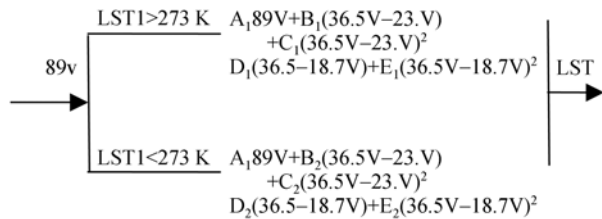


图 3 被动微波地表温度反演方法流程图

3 算法验证及应用

目前对地表温度反演算法的实际精度评价是反演方法研究中的一个难点，其主要原因在于实测数据与影像成像时的同步性问题；其次很难用地面的一个或者几个点的观测数据来代表一个像元对应的地表几公里范围的地表温度、几何配准问题和尺度效应等问题。对于热红外，国际上通常采用大气模拟数据法对反演算法进行精度评价。对于微波波段，目前还没有好的方法对地表温度反演算法进行验证。在这里，我们用 MODIS 温度产品作为微波反演地表温度算法验证所需要的地表温度实测数据，克服了同步测试数据的困难。同样我们在青藏高原采集了验证数据，采集数据信息如表 3 所示。对不同的温度区间，其验证精度相对 MODIS 温度产品分别为 2.69℃，1.89℃。结果表明，相对 MODIS 温度产品，用 AMSR-E 反演精度还是比较高的。事实上，在验证的过程中，我们去掉了少数偏差比较大像元。因为有些数据明显有些问题，比如有些通道的值为 0。另外还有两个主要的原因，一是 MODIS 地表温度产品有的地方本身精度并不高，比如像元中有部分云的影响；第二是 AMSR-E 数据的信号质量有些时候存在问题，比如有些像元的信号有些是 0 值，像元分辨率低，从而受云的影响更严重。再者算法本身还需要进一步的提高精度，比如还没有考虑被云覆盖的情况，而我们采集的样本验证数据中有些像元可

能含有部分云。相对热红外而言，微波不需要太多地表先验知识，主要原因在于微波的波长较长，除土壤水分含量和粗糙度外，受地表的影响较小，而且对大气和云有穿透作用。

表 3 AMSR-E 数据和地表温度验证数据信息表

时间跨度	温度范围 /K	像元数	相对误差变化范围/℃	相对近似精度/℃
2004-03-01	<273	10407	0~8.38	2.69
2004-06-04	>273	9702	0~17.5	1.89

为了更好地分析微波与热红外反演地表温度的机理差异，我们选择了中国西部地区的 AMSR-E 影像，该影像包含了西藏、青海、新疆和甘肃的大部分地区。通过利用上述方法反演得到地表温度(如图 4)。从图 4 可以看出，温度的分布成块状，其主要原因是 AMSR-E 的分辨率很低(本文用到是 25 km×25 km)。这种大面积温度分布规律在高分辨率的 TM 影像上体现不出来，反映大区域的全球温度分布差异是 AMSR-E 影像的一个优势。

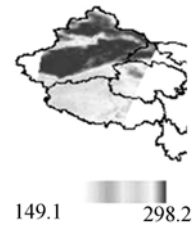


图 4 地表温度反演结果图

另外，我们对东部沿海地区的 AMSR-E 影像反演发现温度最高的地方分布在有水的边缘(海岸线和长江流域)，这是不准确的。原因在于，对于水覆盖的陆地表面，其反演方法和陆地表面相差很大，这个误差主要是由于反演算法中 2 个平方修正项引起的，这对于水面来说是不成立的。因此完整的地表温度反演算法应该至少将陆地表面分成：水覆盖的陆地，雪和冻土(0℃ 以下)覆盖的陆地以及裸土和植被。由于被动微波的分辨率比较低，对于陆地与海洋交界等过渡地带存在大量的混合像元，在这些地方反演的结果可能存在较大误差。在这些地方(混合像元)，地表温度的反演精度需要进一步提高。这也是土壤水

分反演需要集中研究的地方。

4 结语

本文在分析 Aqua 卫星多传感器特征的基础上, 利用 MODIS 的温度产品和 AMSR-E 不同通道之间的亮度温度建立反演地表温度的反演方程, 从而克服了以往需要测量同步数据的困难. 并为不同传感器之间的参数反演的相互校正和综合利用多传感器的数据提供实际应用和理论依据. 通过各通道的回归系数分析表明, 不同的地表覆盖类型的辐射机制是不同的. 要精确地反演地表温度, 至少对地表分成三种覆盖类型, 即雪覆盖的地表、非雪覆盖的地表和水覆盖的地表. 以 MODIS 地表温度产品作为评价标准, 对于验证的样本数据, 本文建立的统计方法的平均精度在 2~3°C 左右. 为了提高算法的实用性, 还需要进一步对云覆盖和不同辐射机制的地表类型的混合像元进行研究.

致谢 美国德州大学 A.K.Fung 教授, 美国加州圣巴巴拉分校万正明教授, 台湾中央大学陈昆山教授, NASA MODIS 研究小组成员 Vincent Chiang 等在该研究中提供了指导和资料; 审稿专家提出修改意见; NASA 提供 MODIS 和 AMSR-E 产品, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- Prata A J. Land surface temperatures from derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms. *J Geophys Res*, 1994, 99: 13025—13058[DOI]
- Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surface. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 369—393
- Coll C, Caselles V, Sobrino A, et al. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Int J Remote Sens*, 1994, 27: 105—122
- França G B, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in northeastern Brazil. *Int J Remote Sens*, 1994, 15: 1695—1712
- Harris A R, Mason I M. An extension to the split-window technique giving improved atmospheric correction and total water vapour. *Int J Remote Sens*, 1992, 13: 881—892
- Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric corrections for land surface temperature using AVHRR channel 4 and 5. *Remote Sens Environ*, 1991, 38: 19—34[DOI]
- Price J C. Land surface temperature measurements from the split-window channels of the NOAA-7 AVHRR. *J Geophys Res*, 1984, 79: 5039—5044
- Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sens Environ*, 1992, 41: 197—209[DOI]
- Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P, et al. Improvements in the split window technique for land surface temperature determination. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32: 243—253[DOI]
- Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1996, 34: 892—905[DOI]
- Qin Z H, Giorgio D O, Arnon K. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data. *J Geophys Res*, 2001, 105: 22655—22670[DOI]
- Li Z, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sens Environ*, 1993, 43: 67—85[DOI]
- Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 980—996[DOI]
- Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1113—1126[DOI]
- Mao K, Qin Z, Shi J, et al. A practical split window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data. *Int J Remote Sens*, 2005, 8: 3181—3204[DOI]
- Mcfarland M J, Miller R L, Christopher M. Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperature. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1990, 28: 839—845[DOI]
- Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 163—180[DOI]
- Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 261—274[DOI]
- Owe M, Richard D J, Walker J. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 1643—1654[DOI]
- Fung A K. *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Artech House Inc. 1994: 227—303
- Fung A K, Li Z, Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 356—369[DOI]
- Wu T D, Chen K S, Shi J, et al. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 2040—2050[DOI]
- Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 90—101[DOI]