

张堂堂,文 军,Rogier van der Velde 等. 利用 ENVISAT/AATSR 资料反演黄土高原陇东地区地表温度. 地球物理学报, 2009, **52**(4):911~918, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.007

Zhang T T, Wen J, Rogier van der Velde, *et al.* Land surface temperature retrieval using ENVISAT/AATSR data over east Gansu of Loess Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4):911~918, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.007

## 利用 ENVISAT/AATSR 资料反演 黄土高原陇东地区地表温度

张堂堂<sup>1</sup>,文 军<sup>1\*</sup>,Rogier van der Velde<sup>2</sup>,刘 蓉<sup>1</sup>,刘远永<sup>1</sup>

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候与环境灾害实验室,兰州 730000

2 International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), 7500 AA Enschede, the Netherlands

**摘 要** 由于 ENVISAT/AATSR 资料不同角度热辐射亮度值之间存在较高的相关性从而导致较大误差的产生,本文尝试避开这种误差源,只选取天底观测数据对黄土高原陇东地区整层大气水汽含量及地表温度进行反演,与 MODIS 整层大气水汽含量产品对比验证表明,本文结果与 MODIS 产品有一定差异,但是可以直接用于大气透过率的估算.结合野外观测数据对地表温度反演结果的检验表明,最大绝对误差为 4.0 °C,平均相对误差为 5.0%,因此,该算法在黄土高原陇东地区应用比较成功.

**关键词** 地表温度, AATSR, 反演, MODIS, 黄土高原

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.007

中图分类号 P407

收稿日期 2008-09-25, 2008-11-06 收修定稿

### Land surface temperature retrieval using ENVISAT/AATSR data over east Gansu of Loess Plateau

ZHANG Tang-Tang<sup>1</sup>, WEN Jun<sup>1\*</sup>, Rogier van der Velde<sup>2</sup>, LIU Rong<sup>1</sup>, LIU Yuan-Yong<sup>1</sup>

1 Laboratory for Climate Environment and Disasters of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), 7500 AA Enschede, the Netherlands

**Abstract** As the high correlation among the multi-angle thermal radiances can result in large errors, in this paper, only ENVISAT/AATSR nadir data are used to estimate total atmospheric water vapor content and land surface temperature over east Gansu of Loess Plateau instead of using both nadir and forward data. Comparing the result of the retrievals with MODIS total atmospheric water vapor content products, a little difference was found between the AATSR retrievals and MODIS products, but the retrieval of water vapor content is acceptable and can be directly used in deriving atmospheric transmittance. Land surface temperature retrievals are also validated by using the ground measurements, the maximal absolute error is 4.0 °C, the average relative error is 5.0%, which indicates that the estimation is successful in the Loess Plateau.

**Keywords** Land surface temperature, AATSR, Retrievals, MODIS, the Loess Plateau

**基金项目** 中国科学院百人计划项目(2004406)和野外台站基金项目(O520611001)共同资助.

**作者简介** 张堂堂,男,1977年生,博士,研究方向为热红外与微波遥感. E-mail:ttzhang@lzb.ac.cn

\* 通讯作者 文 军, E-mail:jwen@lzb.ac.cn

## 1 引言

地表温度是控制陆面水分和能量平衡的一个重要参数,是重要的气候与生态控制因子,影响着大气、海洋、陆地的显热和潜热交换,是研究地气系统能量平衡、地-气相互作用的基本物理量<sup>[1,2]</sup>。在气候模式中,通过对地表温度等参数的定量反演模型求解可以获得农作物、生态环境与全球变化等生物物理量和环境物理参数。同时,地表温度还是一个重要的环境变量,在环境遥感研究及地球资源应用过程中具有广泛而深入的需求,也是评价城市热岛效应研究的关键因子之一。地表温度时间序列可以提供关于气候变化研究非常有用的信息。到目前为止,热红外卫星遥感是大尺度测定地表温度很有效的方法,其中以劈窗算法和单窗算法最为成功。

随着遥感技术的发展,多种卫星数据均用于地表温度的反演研究,以 TM、AVHRR、GMS、ASTER、MODIS 等传感器最为常用<sup>[1,3~6]</sup>。欧洲环境卫星(ENVISAT)是欧空局(ESA)2002年3月发射用于环境遥感监测的新一代极轨卫星,是欧洲迄今为止研制过最先进的地球观测卫星之一。卫星上载有10种传感器,分别使用先进的红外和微波技术来获得有云和晴空条件下大气和地表的观测结果。AATSR(Advanced Along Track Scanning Radiometer)是继 ATSR-1(Along Track Scanning Radiometer-1)和 ATSR-2 之后,搭载在 ENVISAT 上用来提供实时 TIR(Thermal Infrared Radiation)测量的传感器。事实上,ATSR 系列传感器是欧洲遥感卫星(ERS)平台上安装的目前惟一设计用来提供实时 TIR 测量的传感器。迄今为止,ENVISAT 卫星数据还很少应用于中国领域。2005年,中国科学院遥感地面站与欧空局拓展了合作关系,建成了 ERS-2 LBR 数据的接收和处理系统,开始了中低分辨率的对地球和大气层的监测,弥补了我国以往这一领域卫星数据缺乏的空白。作为尝试卫星遥感数据共享举措的第一步,地面站于2005年开展了 ENVISAT ASAR 数据共享的尝试。尽管如此,ENVISAT 卫星携带的其他传感器在国内应用仍然比较少。2005年7月,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候与环境灾害实验室与荷兰 ITC(International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation)联合,在甘肃省平凉地区进行了为期两个月的黄土高原陆面过程野外

试验(LOPEX05),收集了同步的 ENVISAT 传感器数据,包括 ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar)、AATSR、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)。本文的目的就是利用 AATSR 数据研究黄土高原陇东地区的地表温度,为研究黄土高原塬区能量水分循环过程奠定一些基础。

## 2 研究区概况

黄土高原陇东地区位于六盘山与子午岭之间,地处甘肃省东部,东、北分别与陕西省和宁夏回族自治区为邻,西、南分别与本省的定西、天水两地区接壤。地理范围大致  $106^{\circ}20'E \sim 108^{\circ}45'E$ ,  $35^{\circ}15'N \sim 37^{\circ}10'N$  之间,如图 1 所示。该区域年平均降水为  $400 \sim 700$  mm,气候属于半湿润向半干旱过渡类型<sup>[7]</sup>。本文主要将研究区分为农田、草地、森林三种类型,见图 1。图 1 中森林密集区就是六盘山地区,北部主要为农业用地。陇东地区是整个黄土高原黄土堆积与侵蚀地貌最典型地区之一,生态环境具有典型的“不稳定性与抗干扰能力差”的特点<sup>[8]</sup>,关于该区景观、生态、气候等方面的研究越来越受到重视。所以,区域地表温度的反演研究也显得尤为重要。

## 3 试验介绍

### 3.1 黄土高原陆面过程试验(LOPEX05)介绍

2005年6~8月,以中国科学院寒区旱区环境与工程研究所平凉雷电与雹暴试验站为依托,选择该站所在的陇东黄土高原典型下垫面(见图1)进行了黄土高原陆面过程试验,简称 LOPEX05(Loess Plateau Experiment 2005)。试验期间分别选择玉米地、小麦地和平坦裸地等典型下垫面作为观测点,利用自动气象站和涡动相关系统对研究区基本气象要素(包括气温、气压、相对湿度、地表温度等)及地表能量平衡进行观测,同时安装 TDR(美国 Campbell 科学仪器公司的 CS616 体积含水量反射计)探针观测土壤湿度,详细情况请参考 Wen 等<sup>[9,10]</sup>和韦志刚等<sup>[11]</sup>的研究。本文所用的资料主要是自动气象站观测的地表温度数据。

### 3.2 AATSR 资料介绍

AATSR 即 Advanced ATSR,是专门设计用来反演海面温度的传感器,其通道设计与 AVHRR 十

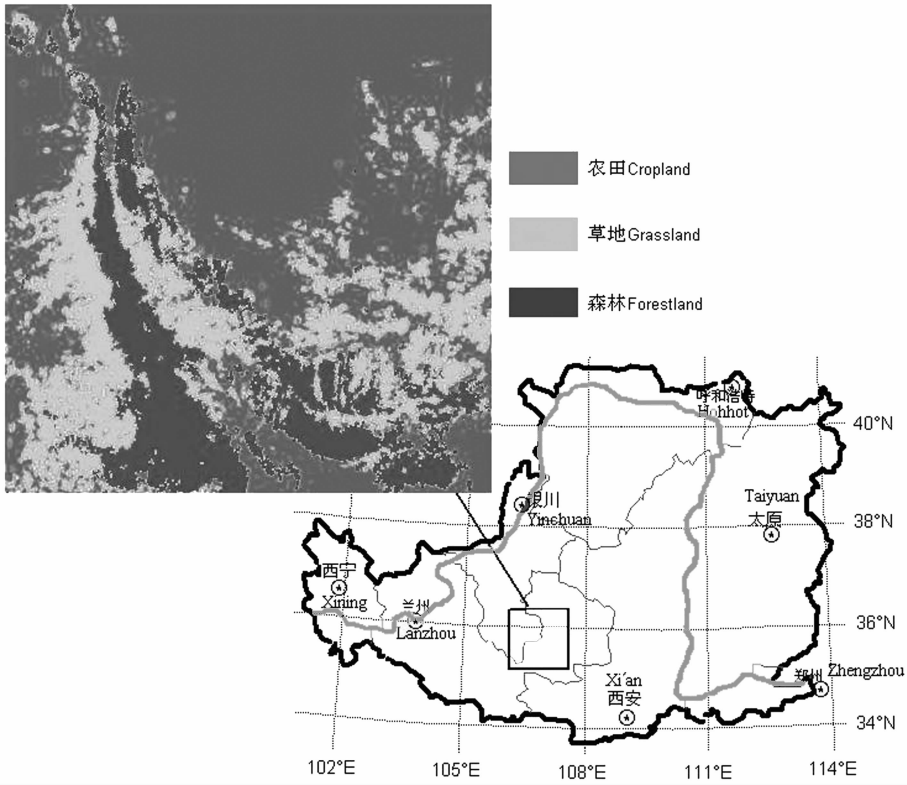


图1 黄土高原陇东地区概况图

Fig. 1 Location of east Gansu over the Loess Plateau

分相似,中心波段分别为 0.555、0.659、0.865、1.6、3.7、11、12  $\mu\text{m}$ . AATSR 中红外辐射计的一个新技术特点是对同一地区的两个视角的观测,一个是近垂直于地面的路径(底向),另一个在星下点前向约  $55^\circ$  的倾斜路径(前向),其空间分辨率在底向和前向分别是  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  和  $1.5\text{ km} \times 2\text{ km}$ . 这两条路径在沿轨方向距离为 900 km,两视角观测范围都为 500 km,无论是对前向沿轨迹像元点还是底向像元点,每一个均包括三个波段的测量值,并且几乎是同时测量(时间相差 2 min)<sup>[12]</sup>. 以往研究地表温度总是由于 AATSR 具有多角度观测而采用前向观测和天底观测相结合的方法,徐希孺等<sup>[13]</sup>指出,多角度热辐射亮度值之间存在较高的相关性,不利于温度的反演研究,要减小这种相关性,最好的方法就是使扫描方向与垄向相互垂直,然而这对于星载热红外多角度遥感而言是非常困难的. 因此,为了减小多角度遥感带来的误差,并尽量简化算法,本文采用一种简单的劈窗算法<sup>[14]</sup>研究黄土高原试验区的地表温度,该算法对于 AVHRR<sup>[14]</sup> 及 MODIS<sup>[6]</sup> 数据应用均比较成功,因此本文尝试用 AATSR 天底观测数据检验该算法的适用性并获取黄土高原陇东地区地表温度.

## 4 理论与方法介绍

### 4.1 理论基础

由辐射传输方程可知,对于热红外遥感<sup>[15]</sup>:

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta) [\epsilon_i B_i(T_s) + (1 - \epsilon_i) I_i^\downarrow] + I_i^\uparrow, \quad (1)$$

其中,  $T_s$  是地表温度,  $T_i$  是  $i$  通道传感器的亮温,  $\tau_i(\theta)$  是  $\theta$  观测角下  $i$  通道的大气透过率,  $\epsilon_i$  是  $i$  通道地表比辐射率.  $B_i(T_i)$  是传感器接收到的辐射,  $B_i(T_s)$  是地表辐射,  $I_i^\downarrow$  和  $I_i^\uparrow$  分别是大气下行上行辐射. 根据覃志豪<sup>[14]</sup>的假设和推算, (1)式可写成:

$$B_i(T_i) = \epsilon_i \tau_i(\theta) B_i(T_s) + [1 - \tau_i(\theta)] \times [1 + (1 - \epsilon_i) \tau_i(\theta)] B_i(T_a), \quad (2)$$

其中,  $T_a$  是大气平均作用温度. 由下式求出:  $T_a = 16.0110 + 0.92621 T_0$ ,  $T_0$  是近地面气温. 对于 AATSR 数据, (2)式可以写成:

$$\begin{aligned} B_{11}(T_{11}) &= \epsilon_{11} \tau_{11}(\theta) B_{11}(T_s) + [1 - \tau_{11}(\theta)] \\ &\quad \times [1 + (1 - \epsilon_{11}) \tau_{11}(\theta)] B_{11}(T_a), \\ B_{12}(T_{12}) &= \epsilon_{12} \tau_{12}(\theta) B_{12}(T_s) + [1 - \tau_{12}(\theta)] \\ &\quad \times [1 + (1 - \epsilon_{12}) \tau_{12}(\theta)] B_{12}(T_a). \end{aligned}$$

(3)

对(3)式进行简化,求解方程组则可求得地表温度. 根据 Taylor 展开并忽略高次项可得:

$$B_i(T_\varphi) = B_i(T) + (T_\varphi - T) \frac{\partial B_i(T)}{\partial T}, \quad (4)$$

其中,  $i$  对应 AATSR 数据 11、12 通道,  $T_\varphi$  对应地表温度 ( $\varphi = s$ ) 和气温 ( $\varphi = a$ ). 假设  $\Lambda_i = B_i(T) / [\partial B_i(T) / \partial T]$ , 则(4)式可写成:

$$B_i(T_\varphi) = (\Lambda_i + T_\varphi - T) \frac{\partial B_i(T)}{\partial T}. \quad (5)$$

参考覃志豪等<sup>[14]</sup>的研究可知,  $\Lambda_i$  和  $B_i(T_\varphi)$  均随着温度的变化线性变化, 并且有

$$B_i(T_\varphi) = \alpha_i + \beta_i \cdot T_\varphi. \quad (6)$$

通过 MODTRAN<sup>[16]</sup> 模拟可知, 对于 AATSR 数据热辐射与温度之间存在如下关系(见图 2):

$$\begin{aligned} B_{11}(T_\varphi) &= 0.0782T_\varphi - 13.48, & R^2 &= 0.9973, \\ B_{12}(T_\varphi) &= 0.0477T_\varphi - 4.9638, & R^2 &= 0.9981. \end{aligned} \quad (7)$$

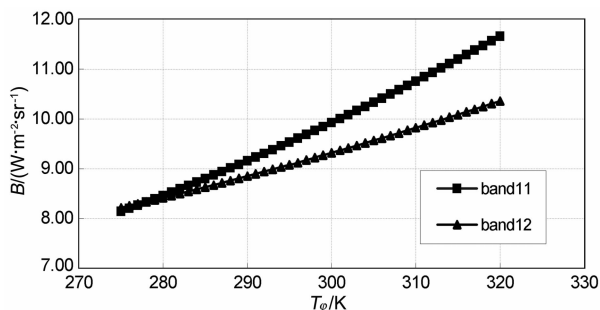


图 2 MODTRAN 模拟 AATSR 热通道辐射随温度变化曲线图

Fig. 2 Changes of radiance observed by AATSR thermal bands with temperature modelled by MODTRAN

## 4.2 大气透过率的计算

大气透过率是热红外遥感中影响大气纠正精确性的重要因素之一. 研究表明<sup>[17]</sup> 整层大气水汽含量与热红外波段大气透过率存在较好的相关性, 可由辐射传输模型 MODTRAN<sup>[16]</sup> 模拟得到. 本文采用 MODTRAN4.0 模拟针对 AATSR 影像热红外通道大气透过率与大气水汽含量之间的关系, 选择输入以下大气条件: 中纬度夏季大气模式, 散射模型选取单次散射, 卫星高度 800 km, 大气水汽含量域值取 0.2~4.0 g/cm<sup>2</sup>. 模拟结果经拟合如下所示(见图 3):

$$\begin{aligned} \tau_{11} &= -0.1134wv + 0.9553, & R^2 &= 0.9898, \\ \tau_{12} &= -0.1397wv + 0.24, & R^2 &= 0.9985, \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $wv$  是整层大气水汽含量 (g/cm<sup>2</sup>),  $\tau_{11}$ 、 $\tau_{12}$  分别为 11、12 通道大气透过率.

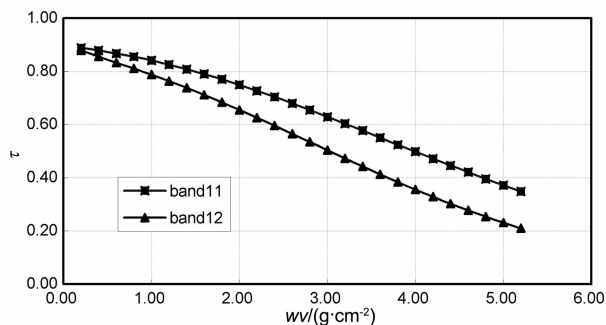


图 3 MODTRAN 模拟 AATSR 热波段大气透过率随整层大气水汽含量变化曲线图

Fig. 3 Changes of atmospheric transmittance of AATSR thermal bands with total atmospheric water vapor content modelled by MODTRAN

## 4.3 大气水汽含量的计算

由 4.2 节可知, 为了较准确地估算大气透过率, 必须先获取整层大气水汽含量. 目前整层大气水汽含量的研究很多<sup>[18~20]</sup>. 对于 EOS/MODIS 数据, 由于专门设计了大气水汽含量反演通道, 计算相对简单. 而 AATSR 传感器没有相应的通道, Li 等<sup>[20]</sup> 针对 AATSR (ATSR) 数据特点, 发展了 SWCVR (Split-Window Covariance-Variance Ratio) 算法. 对于 AATSR 数据天底观测有以下关系:

$$wv = 13.73 - 13.622\tau_{12}/\tau_{11}, \quad R^2 = 0.987 \quad (9)$$

其中,  $\frac{\tau_j}{\tau_i} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_j} R_{ji}$ ,

$$R_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{i,k} - \bar{T}_i)(T_{j,k} - \bar{T}_j)}{\sum_{k=1}^N (T_{i,k} - \bar{T}_i)^2}, \quad (10)$$

式中  $\tau$  和  $\epsilon$  分别是对应波段的大气透过率和地表比辐射率. 对于大多数混合地表类型, 假设  $\epsilon_i/\epsilon_j \approx 1$  是合理的, 则

$$wv = 13.73 - 13.622R_{12}/R_{11}. \quad (11)$$

为获取每个像元的  $R_{ji}$ , 将原来的图像分成多个  $n \cdot n$  的像元, 对每个  $n \cdot n$  像元的亮温求中位数, 得到  $\bar{T}_i$ 、 $\bar{T}_j$ , 进一步得到研究区整层大气水汽含量. 本文选取  $n=5$ . 计算后对图像重采样得到每个像元的大气水汽含量, 结果见图 4.

## 4.4 地表比辐射率

地表比辐射率是热红外遥感研究中的一个关键参数, 影响因素很多, 对它的测量与计算至今尚未找到完善的数值解法和模型<sup>[21]</sup>. 地球表面不同区域的地表结构虽然很复杂, 但从卫星像元的尺度来看, 可以大体视作由 3 种类型构成: 水面、城镇和自然表

面. 水面结构简单; 城镇包括城市和村庄, 主要由道路、各种建筑和房屋组成; 自然表面主要是指各种天然陆地表面、林地和农田等. 对于地表温度反演来说, 自然表面通常占图像比例最大, 因而也是我们考虑的重点. 研究表明<sup>[22]</sup> 地表比辐射率可表示成:

$$\epsilon_i = \epsilon_{iw} f_w + \epsilon_{iv} f_v R_v + \epsilon_{is} (1 - f_v - f_w) R_s, \quad (12)$$

其中 w、v、s 分别代表水体、植被和裸土在该波段的地表比辐射率, 可由光谱响应函数结合光谱地表比辐射率得到. 即:

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{\int_{\lambda_i^l}^{\lambda_i^u} \psi_i(\lambda) \epsilon_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_i^l}^{\lambda_i^u} \psi_i(\lambda) d\lambda},$$

其中 u、l 分别代表波段的上下限. 对于 AATSR 传感器, 参考 ASTER Spectral Library<sup>[23]</sup> 地表比辐射率及 AATSR 光谱响应函数<sup>[24]</sup> 计算可得:  $\epsilon_{11w} = 0.9909$ ;  $\epsilon_{11v} = 0.9832$ ;  $\epsilon_{11s} = 0.9777$ ;  $\epsilon_{12w} = 0.9854$ ;  $\epsilon_{12v} = 0.9886$ ;  $\epsilon_{12s} = 0.9782$ .  $f_v$  是植被覆盖度, 由 NDVI 计算得到<sup>[25]</sup>. 由于研究区水体较少, 因此 (12) 式简化为

$$\epsilon_i = \epsilon_{iv} f_v R_v + \epsilon_{is} (1 - f_v - f_w) R_s. \quad (13)$$

#### 4.5 地表温度算法推导

(1) 式中  $I_i^\downarrow$  和  $I_i^\uparrow$  可以写成:

$$I_i^\downarrow = (1 - \tau_i) B_i(T_s^\downarrow); \quad I_i^\uparrow = (1 - \tau_i) B_i(T_a), \quad (14)$$

$T_a$  为大气向上辐射的平均作用温度,  $T_s^\downarrow$  为大气向下辐射的平均作用温度. 考虑到二者差异不大, 所以  $T_a$  可以代替  $T_s^\downarrow$ , 将 (14) 式代入 (1) 式得:

$$B_i(T_i) = \tau_i \epsilon_i B_i(T_s) + (1 - \tau_i) \times [1 + (1 - \epsilon_i) \tau_i] B_i(T_a). \quad (15)$$

对于 AATSR 来说, (15) 式可写成:

$$\begin{aligned} B_{11}(T_{11}) &= \tau_{11} \epsilon_{11} B_{11}(T_s) + (1 - \tau_{11}) \\ &\times [1 + (1 - \epsilon_{11}) \tau_{11}] B_{11}(T_a), \\ B_{12}(T_{12}) &= \tau_{12} \epsilon_{12} B_{12}(T_s) + (1 - \tau_{12}) \\ &\times [1 + (1 - \epsilon_{12}) \tau_{12}] B_{12}(T_a). \end{aligned} \quad (16)$$

将 (7) 式代入 (16) 式得:

$$\begin{aligned} 0.0782 \epsilon_{11} \tau_{11} T_s &= 0.0782 T_{11} + 13.48 \epsilon_{11} \tau_{11} - (1 - \tau_{11}) \\ &\times [1 + (1 - \epsilon_{11}) \tau_{11}] (0.0782 T_a - 13.48) - 13.48, \\ 0.0477 \epsilon_{12} \tau_{12} T_s &= 0.0477 T_{12} + 4.96 \epsilon_{12} \tau_{12} - (1 - \tau_{12}) \\ &\times [1 + (1 - \epsilon_{12}) \tau_{12}] (0.0477 T_a - 4.96). \end{aligned} \quad (17)$$

求解上述方程组, 若令:

$$\begin{aligned} A_{11} &= 0.0782 \epsilon_{11} \tau_{11}, \\ B_{11} &= 0.0782 T_{11} + 13.48 \epsilon_{11} \tau_{11} - 13.48, \\ C_{11} &= (1 - \tau_{11}) [1 + (1 - \epsilon_{11}) \tau_{11}] 0.0782, \\ D_{11} &= (1 - \tau_{11}) [1 + (1 - \epsilon_{11}) \tau_{11}] 13.48, \\ A_{12} &= 0.0477 \epsilon_{12} \tau_{12}, \\ B_{12} &= 0.0477 T_{12} + 4.96 \epsilon_{12} \tau_{12} - 4.96, \\ C_{12} &= (1 - \tau_{12}) [1 + (1 - \epsilon_{12}) \tau_{12}] 0.0477, \\ D_{12} &= (1 - \tau_{12}) [1 + (1 - \epsilon_{12}) \tau_{12}] 4.96, \end{aligned}$$

则有

$$T_s = [C_{12}(b_{11} + D_{11}) - C_{11}(b_{12} + D_{12})] / (C_{12}A_{11} - C_{11}A_{12}). \quad (18)$$

## 5 结果分析

### 5.1 整层大气水汽含量的分析

图 4 是由 AATSR 得到的陇东地区整层大气水汽含量分布图. 由图可见, 整个陇东地区大气水汽含量较少, 部分地区甚至小于  $0.5 \text{ g/cm}^2$ , 最大值也不过  $3.0 \text{ g/cm}^2$  左右, 这符合研究区的实际情况, 陇东地区地处中国西北, 总体来说降水少, 蒸发大, 气候干旱, 因此该区域整层大气水汽含量始终少. 由于探空数据很难获取, 因此选取 MODIS 大气水汽含量产品对 AATSR 数据反演得到的大气水汽含量进行验证. 结果表明, 二者之间有一定的相关性, 但仍然存在一定的误差, 这是由于 MODIS 卫星过境时间为北京时间 11:35, 与 AATSR 传感器过境时间相差十几分钟, 因此, 整层大气水汽含量有一定的差别是比较合理的. 另外, 我们也对比了 AATSR 获取的水汽含量和 MODIS 产品在整个研究区分布特征 (图略), 同样是南多北少的特点, 量级主要集中在  $1.0 \sim 3.0 \text{ g/cm}^2$  之间. 因此, 可以认为由 AATSR 数据反演的整层大气水汽含量基本可信, 可以用来做后续研究.

### 5.2 地表温度验证

根据以上所述方法, 对黄土高原陇东地区地表温度进行反演, 图 5 是陇东地区地表温度分布图 (三角形标注为测点所在位置). 为验证反演结果, 我们使用自动气象站观测的地表温度数据对其进行检验. 由于在分布图上较难确定观测点的精确位置, 所以取分布图上地面观测点坐标附近  $5 \times 5$  个像元点矩形面上的平均值与地面实测值作比较. 本文选取与卫星过境时刻同步的地表温度观测资料进行验证, 验证结果见图 6. 由图 6 可见, 最大绝对误差为  $4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最大相对误差为  $11.8\%$ , 平均相对误差为

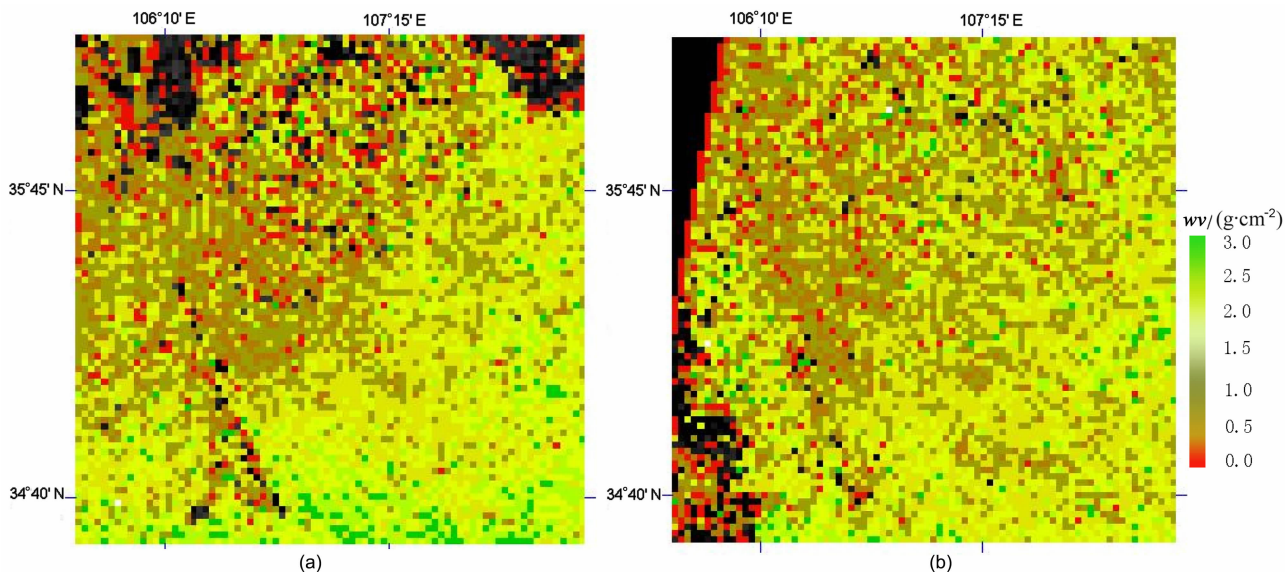


图 4 黄土高原陇东地区整层大气水汽含量分布图  
(a) 6月27日;(b) 7月13日.

Fig. 4 Distribution of total atmospheric water vapor content over east Gansu of the Loess Plateau

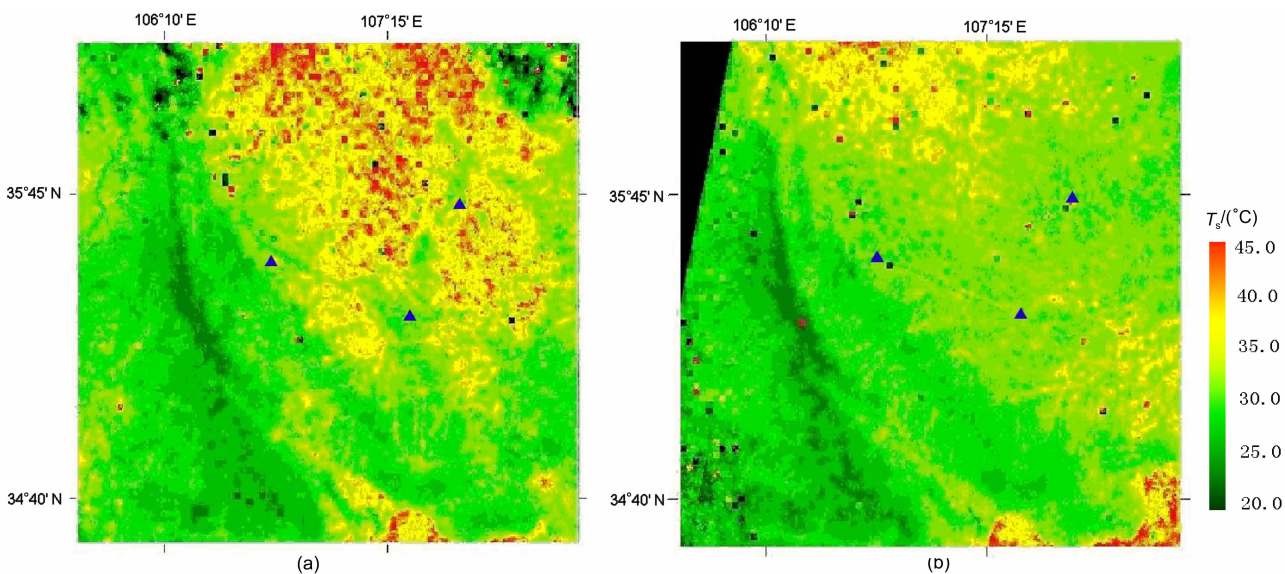


图 5 黄土高原陇东地区地表温度分布图  
(a) 6月27日;(b) 7月13日.

Fig. 5 Distribution of land surface temperature over east Gansu of the Loess Plateau

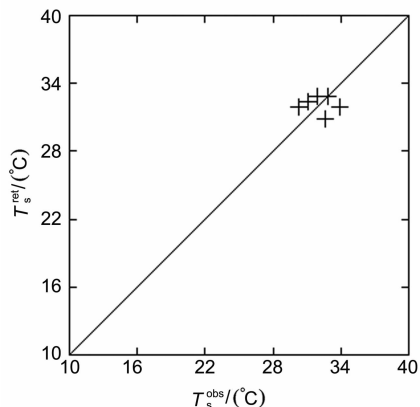


图 6 地表温度(LST)反演值与观测值对比图  
Fig. 6 Comparison of land surface temperature (LST) between observations and retrievals

5.0%,表明反演结果基本接近观测值.结合图1中地表覆盖类型,从图5上可以明显看出,六盘山森林覆盖密集地区地表温度较低,介于10~20℃之间,周围草地覆盖的区域,地表温度也比较低,介于20~30℃之间,而对于研究区北部,也就是农田比较集中的地区则温度较高,介于20~40℃,这也和研究区的实际情况一致,北部农田集中,也是主要的居住区,同时这个季节小麦已经基本成熟,有些地方已经收割,有大量的裸地,所以地表温度相对较高.因此,从分布上看,反演结果比较合理.综上所述,认为反演结果可以接受,该算法在黄土高原的应用比较成功.

## 6 结论和讨论

本文利用 ENVISAT/AATSR 天底观测数据结合劈窗算法得到了黄土高原陇东地区非均匀下垫面上的整层大气水汽含量及地表温度,在黄土高原地区是首次应用该数据和该方法.由于缺乏实际观测资料,因此使用 MODIS 大气水汽含量产品验证 AATSR 估算值,结果表明,虽然反演结果存在一定的误差,但总体来说比较可信,可以用于下一步研究.利用 AATSR 热红外波段天底观测数据反演地表温度并与实际观测对比,最大绝对误差为  $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均相对误差为  $5.0\%$ ,表明所得结果可信.这为下一步求取试验区地表能量通量分布奠定了良好的基础.同时,该算法及 ENVISAT/AATSR 数据的应用,也为利用 AATSR 反演地表温度提供了一种新算法,并为 ENVISAT/AATSR 数据在中国地区的使用开展了一次较为成功的尝试.但是,由于 AATSR 数据为  $1\text{ km}$  的分辨率,并且在计算整层大气水汽含量时将空间分辨率降低,导致混合像元影响很大,因此,反演的地表温度分布图上将裸地、城镇居民用地及农田混合在一起,以致对这部分地区估算值总体略微偏高.另外,该算法对于地表比辐射率敏感性很高,本文采用的地表比辐射率算法虽然有较好的物理意义,但是由于 ASTER 比辐射率数据库并不一定完全代表本文研究区的地表覆盖类型,因此会给研究结果带来一定的误差,这也是以后工作中需要不断改进的地方.

## 参考文献(References)

[1] 王浸燕,吕达仁. GMS5 资料反演地表温度的一个修正算法. 地球物理学报, 2005, **48**(5): 1034~1044  
Wang W Y, Lü D R. An improved algorithm to retrieve land surface temperature by GMS5 data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(5): 1034~1044

[2] 江 灏,程国栋,王可丽. 青藏高原地表温度的比较分析. 地球物理学报, 2006, **49**(2): 391~397  
Jiang H, Cheng G D, Wang K L. Analyzing and measuring the surface temperature of Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 391~397

[3] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *Int. J. Remote Sens.*, 2001, **22**(18): 3719~3746

[4] 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

[5] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1113~1126

[6] Mao K B, Qin Z H, Shi J C, et al. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *Int. J. Remote Sens.*, 2005, **26**(15): 3181~3204

[7] 赵跃龙. 脆弱生态环境评价方法的研究. 地理科学进展, 1998, **17**(1): 67~72  
Zhao Y L. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment. *Progress in Geography* (in Chinese), 1998, **17**(1): 67~72

[8] 赵跃龙. 中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治. 北京: 中国环境出版社, 1999. 13~19  
Zhao Y L. Distribution and Compositive Renovation of Fragile Environment in China (in Chinese). Beijing: China Environment Press, 1999. 13~19

[9] Wen J. An overview of the Loess Plateau mesa region land surface process field experiment 2005(LOPEX05). ISPMSRS Conference Proceeding, 2005. 402~404

[10] Wen J, Wei Z G, Lü S H, et al. The characteristics of land surface energy and water exchange over the Loess Plateau mesa in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24**(2): 1~10

[11] 韦志刚,文 军,吕世华等. 黄土高原陆-气相互作用预试验及其晴天地表能量特征分析. 高原气象, 2005, **24**(4): 545~555  
Wei Z G, Wen J, Lü S H, et al. A primary field experiment of land-atmosphere interaction over the Loess Plateau and its ground surface energy in clear day. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24**(4): 545~555

[12] Li Z L, Zhang R H. On the separate retrieval of soil and vegetation temperatures from ATSR data. *Science in China Series E*, 2001, **44**(2): 97~111

[13] 徐希孺,陈良富. 关于热红外多角度遥感扫描方向的选取问题. 北京大学学报(自然科学版), 2002, **38**(1): 98~103  
Xu X R, Chen L F. The choice of scanning direction of multi-angle thermal infrared remote sensing. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2002, **38**(1): 98~103

[14] 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. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D19): 22655~22670

[15] Otlé C, Stoll M. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity on the determination of land surface temperature from infrared satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 1993, **14**: 2025~2037

- [16] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C, Modtran: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Technical Report GL-TR-89-0122, Geophys. Lab, Bedford, MA, 1989
- [17] 覃志豪, 李文娟, 张明华. 单窗算法的大气参数估计方法. 国土资源遥感, 2003, **56**(2): 37~43  
Qin Z H, Li W J, Zhang M H. Estimating of the essential atmospheric parameters of mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from LANDSAT TM6. *Remote Sensing of Land & Resources* (in Chinese), 2003, **56**(2): 37~43
- [18] 毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳等. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大气水汽总量. 地球物理学报, 2006, **49**(2): 335~342  
Bi Y M, Mao J T, Liu X Y, et al. Remote sensing of the amount of water vapor along the slant path using the ground-base GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 335~342
- [19] 王鑫, 吕达仁, 薛震刚. GNSS 掩星中大气水汽的非线性反演. 地球物理学报, 2005, **48**(1): 32~38  
Wang X, Lü D R, Xue Z G. A non-linear inversion method for retrieval of water vapour from radio occultation measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1): 32~38
- [20] Li Z L, Jia L, Su Z, et al. A new approach for retrieving precipitable water from ATSR2 split-window channel data over land area. *Int. J. Remote Sens.*, 2003, **24**(24): 5095~5117
- [21] 赵英时等. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003. 372~394  
Zhao Y S, et al. Principle and Method of Remote Sensing Application (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 372~394
- [22] 覃志豪, 李文娟, 徐斌等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. 国土资源遥感, 2004, **61**(3): 28~42  
Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for LANDSAT TM6. *Remote Sensing of Land & Resources* (in Chinese), 2004, **61**(3): 28~42
- [23] <http://speclib.jpl.nasa.gov/reference/summary/index.htm>
- [24] <http://www.atrs.rl.ac.uk/documentation/docs/filterfunctions/index.shtml>
- [25] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **62**(3): 241~252

(本文编辑 何燕)