

引用格式: Pan Yingqi, Jia Li. Retrieval of Land Surface Temperature Using a Classified Split-window Algorithm from MTSAT-1R Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 626-637. [潘颖琪, 贾立. 基于分组分裂窗算法的 MTSAT-1R 地表温度反演[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 626-637.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0626

基于分组分裂窗算法的 MTSAT-1R 地表温度反演

潘颖琪^{1,2,3}, 贾立^{1,2}

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
2. 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以黑河流域上游和中游为研究区, 针对 MTSAT-1R 卫星数据, 运用 MODTRAN 4.0 及晴空状态下的 TIGR 大气廓线数据, 发展了根据地表比辐射率、大气水汽含量、传感器观测角度分组模拟的分裂窗算法, 进行地表温度反演。分析了传感器噪声、地表比辐射率和大气水汽含量 3 个参数对该算法的影响, 并结合模拟数据、地面观测数据及 MODIS 地表温度产品, 对反演结果进行分析评价。结果表明: 当传感器垂直观测或大气水汽含量小于 2.5 g/cm^2 时, 反演精度在 1 K 以内; 反演结果与地面观测数据对比差异较小, 在阿柔站 RMSE 为 $3.7 \text{ K(日)}/1.4 \text{ K(夜)}$, 在盈科站 RMSE 为 $2.4 \text{ K(日)}/2.0 \text{ K(夜)}$; 与 MODIS 地表温度产品比较, 空间分布呈现出一致性。总之, 分组分裂窗算法能较好地用于 MTSAT-1R 卫星数据进行地表温度反演。

关键词: MTSAT-1R; 地表温度; 分组分裂窗算法

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2015)04-0626-12

1 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)是表征地球表面热力学状态的物理参数, 是反映区域与全球尺度地表能量交换和水循环过程的关键指标^[1], 在气象、地质、水文和生态等研究领域都有广泛应用^[2-3]。热红外卫星遥感定量反演地表温度可以弥补站点观测数据的局限性, 提供时空连续的地表温度产品^[4]。

根据卫星运行轨道类型的不同, 遥感卫星主要分为极轨卫星和静止卫星两类。相对于极轨卫星, 静止卫星能提供高时间分辨率的数据, 一天每个小时都有观测, 有的静止卫星时间分辨率更是高达 15 min 完成一次观测。这不仅有利于获取地表温度

时间序列产品, 而且对地表能量平衡及陆面水循环过程的研究有着重要意义。MTSAT-1R (Multi-Functional Transport Satellite) 是日本气象厅 (Japan Meteorological Agency) 在 2005 年发射的一颗静止气象卫星, 每隔 1 h 提供一个可见光波段及 4 个红外波段的数据。

目前, 针对 MTSAT-1R 卫星数据, 许多学者开展了地表温度反演的研究工作。Takeuchi 等^[5]通过结合 MODIS 和 Advanced Visible and Near Infrared Radiometer 2 (AVNIR2) 来提高地表比辐射率的反演精度, 并采用 Sobrino 等^[6]提出的分裂窗算法对 MTSAT-1R 数据进行地表温度反演。Kei 等^[7]采用了 4 种分裂窗算法, 分别按照观测角度分了 5 种不同情况模拟分裂窗算法的系数, 利用 MT-

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91025004), 中国科学院/国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划 (KZZD-EW-TZ-09)。

作者简介: 潘颖琪 (1988—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事地表温度反演研究。E-mail: panyq@radi.ac.cn。

通讯作者: 贾立 (1965—), 女, 天津人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学定量遥感以及陆面过程、气候变化方面的研究。
E-mail: jiali@radi.ac.cn。

SAT-1R 数据反演地表温度并对结果进行了对比分析。然而,除了传感器观测角度影响以外,大气水汽含量对热红外通道的影响以及地表比辐射率估算的不确定性,都极大地制约了地表温度反演的精度^[8-9]。Wan 等^[10]提出了普适性分裂窗地表温度反演算法(Generalized Split-Window, GSW),并按照卫星观测角度、地表比辐射率、大气水汽含量以及空气温度的不同范围分组模拟 GSW 算法的系数,结果分析发现当大气水汽含量升高且卫星观测角度大于 45°时,分组模拟 GSW 算法的系数能优化该算法地表温度反演的精度。而 Tang 等^[11]在此基础上,按照地表温度的范围分组模拟了 GSW 算法的系数,并对模拟结果进行了分析,结果表明在两种情况下,反演精度能达到 1 K 以内:一是对于所有大气水汽含量的分组,传感器观测角度小于 30°;二是大气水汽含量小于 3.5 g/cm² 并且传感器观测角度小于 60°。Gao 等^[12]也采用了类似的方法,基于 Meteosat Second Generation 2 (MSG)/Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager(SEVIRI)传感器展开了地表温度反演的研究。

本文针对 MTSAT-1R 卫星数据,对地表比辐射率、大气水汽含量和传感器观测角度分组,模拟分组后的分裂窗算法的系数,分析传感器噪声、地表比辐射率和大气水汽含量这 3 个参数对该算法精度的影响。最后,结合模拟数据、地面观测数据及 MODIS 地表温度产品,对反演结果进行分析评价。

2 数据与研究区域概况

2.1 研究区域

本文以黑河流域的上游和中游作为主要研究区域,并在阿柔(100°27′52.9″E,38°2′39.8″N)和盈科(100°24′37.2″E,38°51′25.7″N)两个实验站点进行了地面观测实验。黑河流域(97°24′~102°10′E,37°41′~42°42′N)位于我国西北地区,是我国第二大内陆河。阿柔站位于黑河流域上游祁连山,海拔 3 032.8 m,主要土地覆盖类型是高原草甸。盈科站位于黑河流域中游张掖绿洲,海拔 1 519.1 m,是典型的灌溉农田,主要种植作物是玉米和小麦。

2.2 MTSAT-1R 数据

2005 年 2 月 26 日,日本气象厅成功发射了多功能卫星 MTSAT-1R。MTSAT-1R 绕地球同步轨道运行,定位于 140°E,每隔 1 h 完成一次观测,用于监测台风和天气状况。MTSAT-1R 提供 1 个可见光波段(VIS)和 4 个红外波段的数据,覆盖亚洲太

平洋地区(70°N~20°S,70°E~160°E),其波段设置如表 1 所示。

表 1 MTSAT-1R 波段特点
Table 1 Specifications of MTSAT-1R channels

波段	波长 /μm	空间分辨率 /km	噪声等效温差 (NEΔT)/输入温度
VIS	0.55~0.90	1	
IR1	10.3~11.3	5	0.15 K/300 K
IR2	11.5~12.5	5	0.18 K/300 K
IR3	6.5~7.0	5	0.18 K/300 K
IR4	3.5~4.0	5	0.18 K/300 K

2.3 验证数据

黑河综合遥感联合试验(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)^[13]是 2007~2009 年在黑河流域开展的卫星和航空遥感及地面观测互相配合的多尺度综合观测试验。本文采用阿柔和盈科两站点的辐射计观测的地表四分量辐射通量数据(包括长波上、下行辐射通量和短波上、下行辐射通量),对分组分裂窗算法应用在 MTSAT-1R 数据上的反演结果进行验证,。同时,结合 MODIS 地表温度产品 MOD11_L2 /MYD11_L2(空间分辨率 1 km)进行空间分布对比验证。

3 研究方法

3.1 分组分裂窗算法

根据晴空条件下的热红外辐射传输理论,Wan 等^[10]提出了普适性分裂窗地表温度反演算法,即:

$$T_s = C + \left(A_1 + A_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + A_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i + T_j}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + B_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i - T_j}{2} \quad (1)$$

其中: T_s 是地表温度, T_i 和 T_j 分别是 i 波段(11 μm)和 j 波段(12 μm)在大气层顶的亮度温度。 C 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 是 GSW 算法的系数。 $\Delta \epsilon$ 是两个通道比辐射率的差, ϵ 是两个通道比辐射率的平均值,即:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{11} - \epsilon_{12} \quad (2)$$

$$\epsilon = (\epsilon_{11} + \epsilon_{12}) / 2 \quad (3)$$

本文在该 GSW 模型基础上,根据不同的地表比辐射率、大气水汽含量和传感器观测角度,对系数 C 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 进行了分组,可以提高地表温度反演精度。分组情况如下:按照地表温度的范围分为 6 组(≤ 285 K、 $280 \sim 295$ K、 $290 \sim 305$ K、 $300 \sim 315$ K、 $310 \sim 325$ K、 ≥ 320 K);按照大气水汽

含量 (Water Vapor Content, WVC) 也分为 6 组 (0~1.5 g/cm²、1.0~2.5 g/cm²、2.0~3.5 g/cm²、3.0~4.5 g/cm²、4.0~5.5 g/cm²、5.0~6.5 g/cm²)；按照两热红外通道的平均比辐射率分为 2 组 (0.90~0.96 和 0.94~1.0)；按照传感器观测角 (Viewing Zenith Angle, VZA) 分为 7 组 (0°、41.2°、53.0°、60.0°、64.6°、67.9°、70.5°)。

运用 MODTRAN 4.0 大气辐射传输模型^[14] 及

MTSAT-1R 传感器通道响应函数, 利用 MODTRAN 4.0 中 6 条标准大气廓线和 1 413 条晴空状态下的 TIGR(Thermodynamic Initial Guess Retrieval data)大气廓线数据, 模拟出不同地表及大气情况下 MTSAT-1R 两个热红外通道 IR1 和 IR2 的 TOA (Top Of Atmosphere)亮度温度, 再通过线性回归得到各分组的分裂窗算法系数。MODTRAN 4.0 模拟条件如表 2 所示。

表 2 MODTRAN 4.0 模拟条件
Table 2 The simulated condition of MODTRAN 4.0

条件	范围	步长
大气廓线	选用 MODTRAN4.0 自带标准中纬度大气廓线及 1413 条 TIGR 晴空大气廓线	
地表温度 (T_0)	$T_{\text{air}} + [-5 \text{ K } 20 \text{ K}] (T_0 \geq 280 \text{ K})$ $T_{\text{air}} + [-10 \text{ K } 15 \text{ K}] (T_0 < 280 \text{ K})$	5 K
平均比辐射率 (ϵ)	[0.9 1]	0.02
比辐射率差值 ($\Delta\epsilon$)	[-0.025 0.015]	0.005
传感器观测角 (VZA)	[0°, 41.2°, 53.0°, 60.0°, 64.6°, 67.9°, 70.5°]	对应的 sec(VZA)步长为 0.33

因此, 分组分裂窗算法反演地表温度主要分为两步^[11]。首先利用式(1)通过不同范围内地表比辐射率及大气水汽含量对应的系数, 估算出地表温度的大致范围。其次, 通过式(1)及不同地表温度范围内的系数, 计算出精确的地表温度。

3.2 云检测方法

晴空无云条件是热红外辐射传输的理论基础, 本文提出的分组分裂窗算法也仅适用于无云覆盖区域地表温度的估算。针对 MTSAT 的云检测方法是在 Saunders 等^[15]提出的基于 AVHRR 云检测方法的基础上, 引入云指数法^[16]对 MTSAT 数据进行云检测。具体步骤如下:

对于夜晚的情况, 首先用 3×3 大小的窗口, 计算窗口内中心像元 11 μm 波段亮度温度 (T_{11}) 的标准差, 若标准差大于 1 K, 则认为此像元有云覆盖。再对以上检测结果为晴空的像元进一步检测 3.7 μm 和红外两波段 (11 和 12 μm) 亮度温度的关系, 若 $T_{11} - T_{3.7} < 1 \text{ K}$ 及 $T_{3.7} - T_{12} < 1.5 \text{ K}$ 同时成立, 则认为是晴空像元, 反之则认为有云覆盖。

对于白天的情况, 引入云指数法^[16]来进行云检测。云指数的定义为:

$$CDI = \frac{T_{11} - T_{3.7}}{REF}$$

(4)

其中: T_{11} 和 $T_{3.7}$ 分别是波段 11 μm 和 3.7 μm 的亮度温度, REF 是可见光波段的反射率。考虑到晴空地表在热红外通道 (IR1) 和水汽通道 (IR3) 的亮温差远大于云在这两个通道的亮温差, 而云在红外波

段具有较低的亮温, 可见光波段具有较高的反射率^[16]。根据这一特性构造云指数, 统计云指数直方图, 并进行二次指数差分平滑。对于有云覆盖的影像, 直方图表现为双峰结构。检测双峰中间的波谷位置为 $CDI_{\text{threshold}}$ 。若 $CDI < CDI_{\text{threshold}}$, 则认为有云覆盖, 反之则为晴空。

最后, 同时对白天和晚上的情况 (针对以上检测为晴空的像元) 进行检测, T_{diff} 是与观测天顶角及 T_{11} 的大小有关的阈值^[15], 通过检测 $T_{11} - T_{12}$ 与 T_{diff} 的关系, 判断是否有云。这一步能有效检测出薄云及云的边缘。

3.3 主要参数的估算

3.3.1 大气水汽含量的估算

在分组分裂窗算法中, 大气水汽含量主要用于反演时系数分组的选择, 因此准确估算大气水汽含量尤为重要。本文采用 Sobrino 等^[17] 和 Li 等^[18] 提出的分裂窗协方差一方差比率法计算整层大气柱水汽含量。在晴空无云的条件下, 整层大气柱水汽含量可以表示为两个热红外通道大气透过率的比值:

$$WVC = c_1 + c_2 \frac{\tau_i}{\tau_j}$$

(5)

其中: WVC 是整层大气柱水汽含量 (g/cm²), τ_i 和 τ_j 分别是 i 波段 (11 μm) 和 j 波段 (12 μm) 大气透过率, c_1 和 c_2 是系数。

考虑到 MTSAT 卫星观测角度的影响, 式(5)的系数 c_1 、 c_2 中引入参数 $\cos(VZA)$, 通过 MODTRAN 4.0 和 MTSAT 通道响应函数, 结合晴

空条件下的 1 413 条 TIGR 大气廓线,回归得到 c_1 和 c_2 :

$$c_1 = 22.39 - 9.79/\cos(VZA) + 1.62/\cos^2(VZA) \quad (6)$$

$$c_2 = -22.17 + 9.78/\cos(VZA) - 1.62/\cos^2(VZA) \quad (7)$$

采用式(5)~(7)估算大气柱水汽含量,均方根误差(RMSE)为 0.18 g/cm^2 , R^2 为 0.99。

3.3.2 地表比辐射率的估算

本文通过建立 MTSAT-1R 两个热红外波段 IR1($11 \mu\text{m}$)、IR2($12 \mu\text{m}$)与 MODIS 31($11 \mu\text{m}$)和 32($12 \mu\text{m}$)波段比辐射率的关系,反演地表比辐射率。选用 JHU(Jonhs Hopkins University)、UCSB(University of California—Sanata Barbara)、ASTER 这 3 个比辐射率波谱库的数据,包括土壤、植被、冰雪、水体和人工建筑等多种地物类型。根据地物的比辐射率波谱,结合各通道的通道响应函数计算通道比辐射率,通过线性回归得到两传感器的分裂窗通道的地表比辐射率关系:

$$\epsilon_{\text{IR1}} = 0.0075 + 0.9913 \times \epsilon_{31} \quad (8)$$

$$\epsilon_{\text{IR2}} = 0.0071 + 0.9919 \times \epsilon_{32} \quad (9)$$

结果表明,拟合效果较好, RMSE 分别是 0.004 和 0.002, R^2 分别为 0.97 和 0.99。

4 算法敏感性分析

Wan 等^[10]研究发现,采用 GSW 模型进行地表温度反演时,反演精度主要受传感器噪声、大气水汽含量和地表比辐射率这 3 个参数的影响。因此,本文针对这些参数分别进行敏感性分析,确定各参数的误差对 MTSAT-1R 地表温度反演结果的影响。

4.1 噪声等效温差

噪声等效温差(Noise Equivalent Delta Temperature, $\text{NE}\Delta T$)是反映红外仪器性能的一个重要指标,用于表征红外系统的温度敏感度^[19]。MTSAT-1R 两热红外通道 $\text{NE}\Delta T$ 值如表 1 所示。

为了定量描述 $\text{NE}\Delta T$,本文引入高斯随机分布误差:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

其中: x 为测量误差, $f(x)$ 是测量误差为 x 的概率。

在统计误差时,本小节采用下式进行分析^[4]:

$$\delta(T_s) = |T_s(x + \delta x) - T_s(x)| \quad (11)$$

其中: $\delta(T_s)$ 为地表温度的误差, x 为敏感性分析的参数, δx 为参数误差, $T_s(x + \delta x)$ 和 $T_s(x)$ 分别是参数包含误差和没有误差时反演的地表温度。文中

进行敏感性分析时,均采用多条大气廓线数据,因此统计时计算 $\delta(T_s)$ 的平均值作为平均误差。

为了分析 $\text{NE}\Delta T$ 对地表温度反演的误差,选用 MODTRAN 4.0 的中纬度夏季大气廓线及 TIGR 晴空大气廓线模拟数据,针对以下各参数范围模拟 MTSAT-1R 热红外通道亮度温度:地表温度范围为 $290 \sim 305 \text{ K}$,大气柱水汽含量范围为 $0.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^2$ (干燥的大气状况)及 $5.0 \sim 6.5 \text{ g/cm}^2$ (湿润的大气状况),地表比辐射率范围为 $0.94 \sim 0.99$ 。进一步地,在模拟的两热红外通道亮度温度上分别增加一个随机误差 $\text{NE}\Delta T = 0.15 \text{ K}$ 和 0.18 K ,通过式(1)估算地表温度。将估算结果与真实地表温度进行对比,其 RMSE 分别为 0.23 K (干燥的大气状况)和 0.65 K (湿润的大气状况),通过式(11)计算得到地表温度的平均误差分别为 0.18 和 0.53 K 。没有仪器误差($\text{NE}\Delta T = 0 \text{ K}$)时,干湿两种大气情况下地表温度的估算误差 RMSE 分别为 0.21 和 0.64 K ,因此仪器噪声分别对干燥和湿润两种地表温度反演精度造成 9.5% 和 1.6% 的影响。

4.2 大气水汽含量

从 3.1 小节可以看出,大气水汽含量主要用于反演时 GSW 模型系数分组的选择。在反演地表温度时,针对不同大气水汽含量的范围选择相对应的系数来反演 LST。从分组情况可以看出,相邻分组之间大气水汽含量相差 0.5 g/cm^2 。由于大气水汽含量估算的不确定性,在进行地表温度反演时,如果选择了错误的分组系数进行计算,会对反演结果造成误差。

本小节选择地表温度为 $290 \sim 305 \text{ K}$,大气水汽含量为 $1.0 \sim 2.5 \text{ g/cm}^2$,地表比辐射率为 $0.94 \sim 0.99$ 的模拟数据,分别采用 $\text{WVC} \in [0.0, 1.5]$ 及 $\text{WVC} \in [2.0, 3.5]$ 的系数估算地表温度,再与真实地表温度进行对比,分析大气水汽含量的估算误差对地表温度反演的影响。

图 1 是采用 $\text{WVC} \in [0.0, 1.5]$ 及 $\text{WVC} \in [2.0, 3.5]$ 分组系数估算的地表温度与真实地表温度的差异直方图。从图 1 可以看出,由于大气水汽含量估算的误差,错分到 $\text{WVC} \in [0.0, 1.5]$ 分组时, RMSE 为 0.51 K ,而错分到 $\text{WVC} \in [2.0, 3.5]$ 分组时, RMSE 为 0.68 K 。通过式(11)计算得到地表温度的平均误差分别为 0.39 K 和 0.55 K 。采用 $\text{WVC} \in [1.0, 2.5]$ 分组系数(即大气水汽含量估算准确)反演地表温度, RMSE 为 0.37 K 。

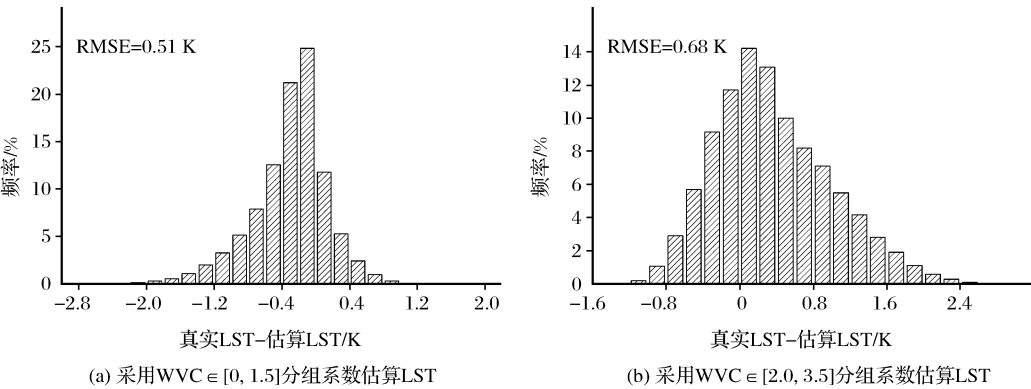


图 1 真实地表温度与估算地表温度的差异直方图

Fig. 1 Histogram of the difference between actual and estimated LST using the coefficient of $WVC \in [0.0, 1.5]$ and $WVC \in [2.0, 3.5]$

4.3 地表比辐射率

地表比辐射率是地表温度反演中的一个关键参数^[20]。从式(1)可以看出,GSW 模型中受到地表比辐射率影响的主要是 $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 这两项,引入参数 α 和 β :

$$\alpha = A_2 \frac{T_i + T_j}{2} + B_2 \frac{T_i - T_j}{2} \tag{12}$$

$$\beta = A_3 \frac{T_i + T_j}{2} + B_3 \frac{T_i - T_j}{2} \tag{13}$$

因此,由于 $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 估算不精确引起的 LST 的误差可以表示为^[10]:

$$\delta(T_s) = \sqrt{\sigma^2 \delta[(1-\epsilon)/\epsilon]^2 + \beta^2 \delta(\Delta\epsilon/\epsilon^2)^2} \tag{14}$$

其中: $\delta(T_s)$ 为地表温度的误差, $\delta[(1-\epsilon)/\epsilon]$ 和 $\delta(\Delta\epsilon/\epsilon^2)$ 分别是 $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 的误差。

选用地表温度为 290~305 K,地表比辐射率为

0.94~0.99,大气水汽含量为 0.0~1.5 g/cm² (干燥的大气状况)及 5.0~6.5 g/cm² (湿润的大气状况)的大气廓线模拟数据,分别分析了不同大气(干燥和湿润)状况下, $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 的误差对地表温度反演结果的影响。图 2 显示了干燥和湿润大气条件下, $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 以及两者共同存在误差时,反演地表温度的误差。

通过比较图 2(a)和(b)两图发现,相对于干燥的大气条件,湿润条件下地表比辐射率误差引起的地表温度误差更小。而且当 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 两参数同时存在误差时,地表温度的误差最大。对于干燥的大气状况,当存在相同的 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 误差时, $1-\epsilon/\epsilon$ 引起的地表温度误差更大,而对于湿润的大气状况下,相同的 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 误差引起的地表温度误差非常接近。

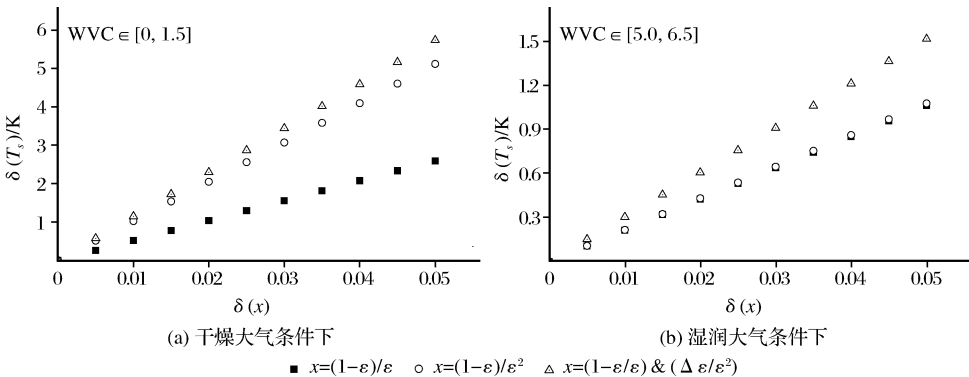


图 2 不同大气(干燥和湿润)状况下 $(1-\epsilon)/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 误差引起的地表温度的误差

Fig. 2 The LST errors caused by $(1-\epsilon)/\epsilon$ and $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ under the dry and wet atmospheric condition

4.4 总体误差分析

对于地表温度为 290~305 K,地表比辐射率为 0.94~0.99 的模拟数据,在干燥的大气状况($WVC \in [0.0, 1.5]$)下,MTSAT 两热红外通道 NE Δ T 分别为

0.15 K 和 0.18 K 引起地表温度的误差为 0.18 K。由于大气水汽含量高估导致错误分组($WVC \in [1.0, 2.5]$),引起地表温度的误差为 0.21 K。当 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 同时存在 0.01 的误差,引起地表温度的误差为

1.15 K。上述误差同时存在时,采用分组分裂窗算法反演地表温度的总体误差为 1.54 K。

在湿润的大气状况 ($WVC \in [5.0, 6.5]$) 下, MTSAT 两热红外通道 $NE\Delta T$ 分别为 0.15 K 和 0.18 K 引起地表温度的误差为 0.53 K。由于大气水汽含量低估导致错误分组 ($WVC \in [4.0, 5.5]$), 引起地表温度的误差为 2.38 K。当 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 同时存在 0.01 的误差, 引起地表温度的误差为 0.30 K。上述误差同时存在时, 采用分组分裂窗算法反演地表温度的总体误差为 3.21 K。

5 算法应用与结果分析

5.1 模拟数据验证

用 MODTRAN 4.0 大气辐射传输模型^[14] 及 MTSAT-1R 传感器通道响应函数, 结合 MODT-

RAN 4.0 中 6 条标准大气廓线和 1 413 条晴空状态下的 TIGR 大气廓线数据, 模拟不同地表及大气情况下 MTSAT-1R 两个热红外通道 TOA 亮度温度。通过分组分裂窗算法反演地表温度, 再与输入的真实温度对比分析。

图 3 是不同地表、大气及观测角度下模拟 LST 与真实 LST 之间 RMSE 比较图。从图 3 可以看出, 随着传感器观测天顶角的增大, RMSE 增大, 地表温度反演精度降低。在垂直观测 ($1/\cos(VZA) = 1$) 的情况下, RMSE 小于 1 K。同时, 大气水汽含量对地表温度反演的精度影响也非常大, 当大气水汽含量小于 2.5 g/cm^2 时, 地表温度反演误差也能保证在 1 K 以内。

在不同的地表温度范围内, 模拟的 LST 与真实 LST 之间的 RMSE 也有些差异。当地表温度大于

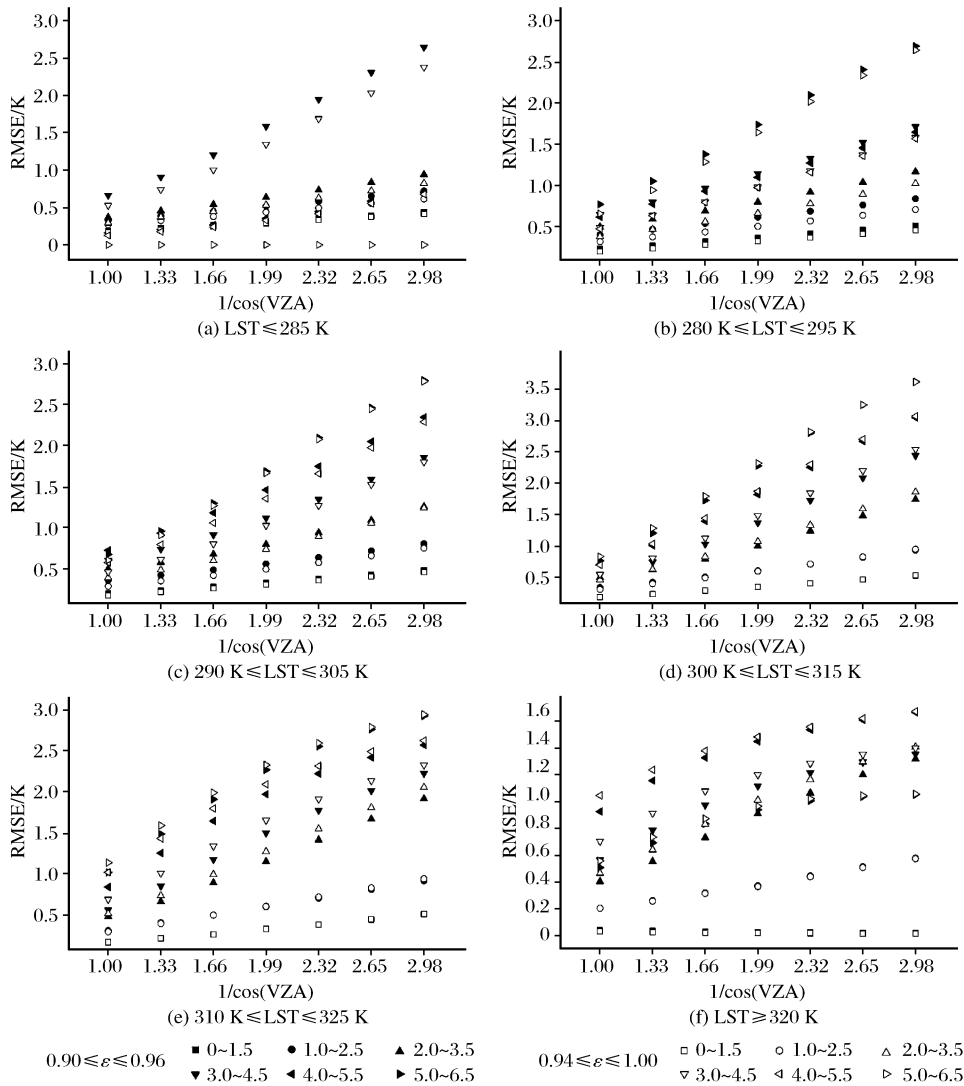


图 3 不同地表、大气水汽含量及观测角度下真实 LST 与模拟 LST 之间 RMSE 比较图 (g/cm^2)

Fig. 3 Comparison of RMSEs between the actual and estimated LST for the different land surface, WVC and VZA

320 K 时, RMSE 较小。而当 $300\text{ K} \leq \text{LST} \leq 315\text{ K}$, $5.0\text{ g/cm}^2 \leq \text{WVC} \leq 6.5\text{ g/cm}^2$ 且卫星观测天顶角为 $70.5^\circ (1/\cos(\text{VZA}) = 2.98)$ 时, RMSE 达到最大值 3.6 K。

5.2 地面观测数据验证分析

将分组分裂窗算法应用到 2009 年 5 月的 MT-SAT-1R 数据进行地表温度反演, 并将反演结果与地面观测数据对比验证。在地面观测实验中, 四分量辐射通量数据每 10 min 观测一次, 因此 MT-SAT-1R 反演结果可直接与地面观测数据进行对比验证。

地面观测的 LST 通过地面(上行)长波辐射通量和大气(下行)辐射通量通过下式计算得到:

$$T = \left(\frac{Rlu - (1 - \epsilon_b)Rld}{\epsilon_b \cdot \sigma} \right)^{1/4} \tag{15}$$

其中: ϵ_b 是宽波段(3~14 μm)地表比辐射率数据, Rlu 是地面(上行)长波辐射通量, Rld 是大气(下行)辐射通量, σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数($5.67 \times 10^{-8}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)。采用 JHU、UCSB 和 AS-TER 波谱库中地物的比辐射率波谱数据, 结合普朗克黑体辐射定律计算得到 ϵ_b , 计算公式如下:

$$\epsilon_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) \epsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) d\lambda} \tag{16}$$

其中: $B(\lambda, T)$ 为波长 λ 、亮度温度 T 时的黑体辐射,

通过普朗克黑体辐射定律计算得到。 $\epsilon(\lambda)$ 为波长 λ 时地物的比辐射率。 λ_1 和 λ_2 为通道的波长范围, 即波长的最小值和最大值。对于阿柔站, 5 月份的主要土地覆盖类型是高原草甸, 通过式(16) 计算得到的地表比辐射率为 0.97。对于盈科站, 5 月份的主要土地覆盖类型是玉米和小麦, 其地表比辐射率采用地面观测数据, 约为 0.98。

图 4 是 2009 年 5 月在阿柔和盈科两站点, 卫星反演地表温度数据(MTSAT-1R 和 MODIS)与地面观测数据昼夜比较图, 图中仅选取两颗卫星过境时间相近的数据进行比较。从图 4 可以看出, MT-SAT-1R、MODIS 地表温度产品与地面观测 LST 之间存在一定的差异。一方面, 观测角度不同可能导致这种差异。MTSAT-1R 在阿柔站和盈科站的卫星观测角度分别为 59.5° 和 60.0° , MODIS Terra/Aqua 是极轨卫星, 每一景影像卫星观测角度均不同, 在这两站点观测角度范围大约为 $10^\circ \sim 65^\circ$, 变化范围较大。然而, 地面观测辐射通量是在垂直方向下得到的。另一方面, 卫星观测与地面观测的尺度差异, 也可能造成这种差异, 地表的非均匀性越大, 由尺度不匹配导致的差异也越大。此外, 这两个站点卫星反演地表温度夜晚的比较结果均优于白天的情况。这可能是由于白天太阳对地表加热后, 地表的非均匀性导致一个像元内(MTSAT 5 km; MODIS 1 km)地表温度的异质性比夜晚更强。

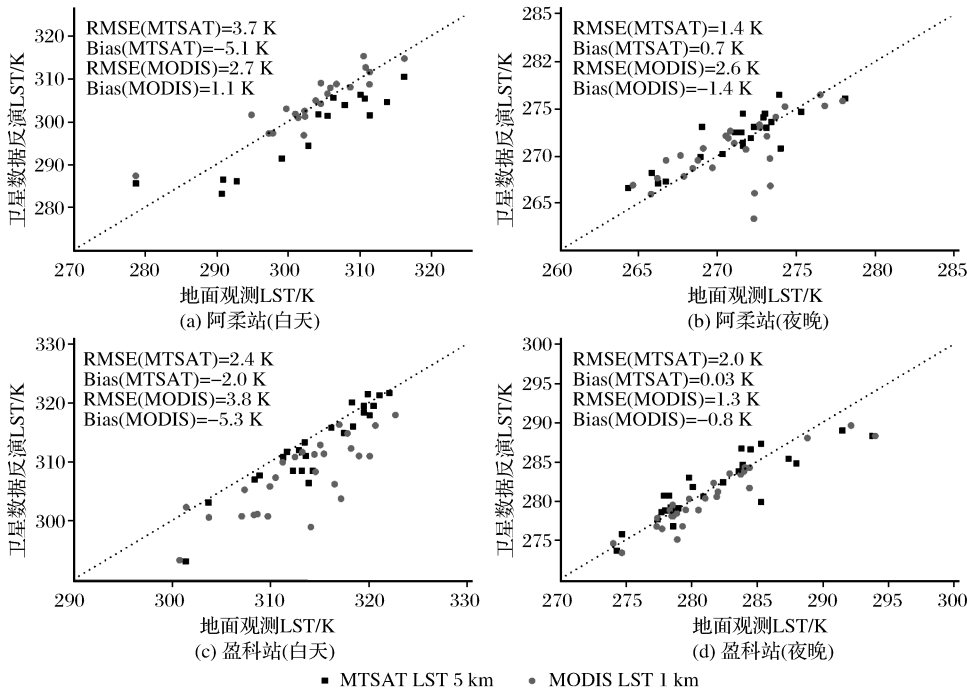


图 4 2009 年 5 月卫星反演地表温度数据与地面观测数据的比较图

Fig. 4 Comparison of LST estimated from satellites with the in-situ LST in May of 2009

对于阿柔站,MTSAT-1R反演结果与地面观测LST比较, RMSE为3.7 K(白天)/1.4 K(夜晚),而MODIS地表温度产品与地面观测LST比较, RMSE为2.7 K(白天)/2.6 K(夜晚)。阿柔站位于黑河上游的祁连山脉,其地形较为复杂,可能较大程度上影响了地表温度的反演精度。而且从图4(a)可以看出,在白天的情况下,MTSAT-1R的反演结果几乎都低于地面观测数据。而在夜晚的情况下,一些MODIS散点偏离1:1线较远,这可能是由于影像受到云检测精度的影响造成的。

对于盈科站,MTSAT-1R反演结果与地面观测LST比较, RMSE为2.4 K(白天)/2.0 K(夜晚),而MODIS地表温度产品与地面观测LST比较, RMSE为3.8 K(白天)/1.3 K(夜晚)。从图4(c)可以看出,白天MODIS的地表温度产品几乎都低于地面观测LST,MTSAT-1R的反演结果略优于MODIS地表温度产品。而在夜晚,MODIS地表温度产品与地面观测LST更加接近。

5.3 空间分布

由于MODIS地表温度产品的空间分辨率是1 km,无法直接与MTSAT-1R反演结果直接比较。本文采用双线性插值的重采样方法,将MODIS地表温度产品重采样到5 km空间分辨率,再与MTSAT-1R反演结果进行比较。

图5分别显示了不同季节黑河流域上游和中游的MTSAT-1R反演结果与MODIS地表温度产品。考虑到云的影响,图中有云覆盖的像元均被掩膜。由于两传感器过境时间与云检测方法的差异,在MTSAT-1R与MODIS地表温度反演图中,云覆盖像元存在空间分布的差异。对比图5左右两列发现,不同时间MTSAT-1R与MODIS地表温度反演图在空间分布上均呈现出一致性。从图5(a)和(b)可以明显看出,位于黑河上游的祁连山脉,地形复杂,地表温度变化大,而黑河中游是张掖绿洲,地形平坦,地表温度变化连续均匀,地表温度值比黑河上游高。比较2009年8月3日MTSAT-1R与MODIS地表温度(图5(c)和(d))发现,黑河中游区域,MODIS反演的地表温度明显高于MTSAT-1R的反演结果,而黑河上游,两传感器的反演结果非常接近。然而,在2009年10月4日的两图(图5(e)和(f))中,比较结果则正好相反。在黑河中游,MTSAT-1R与MODIS地表温度反演值很接近,而在黑河上游,MTSAT-1R的反演结果略高于MODIS地表温度产品,同时可以看到在这一天,两传感器过

境时间的差异也最大(20 min)。最后比较图5(g)和(h)可以看出,MODIS地表温度产品在黑河中游存在大量缺值情况,而在黑河上游,MTSAT-1R地表温度反演结果在空间上表现更为连续,而且反演值略高于MODIS地表温度产品。

为了更清晰地分析差异大小,采用图5中MTSAT LST减去MODIS LST,统计其差值的频率分布,结果如图6所示。2009年5月3日(图6(a))、10月4日(图6(c))及12月25日(图6(d)),MTSAT与MODIS反演结果的差异主要集中在-2~-3 K、-3~-1 K和-1~-4 K范围。在2009年8月3日(图6(b)),MTSAT与MODIS反演结果的差异主要集中在-1~-1 K和-6~-5 K范围内。计算2009年5月3日、8月3日、10月4日及12月25日MTSAT LST与MODIS LST之间的RMSE分别为5.7 K、5.6 K、5.6 K和5.9 K。导致这种差异的原因有很多。一方面,由于两颗卫星过境时间不同,可能造成地表温度的差异。另一方面,MTSAT-1R卫星在研究区域内观测角度约 $59^{\circ}\sim 63^{\circ}$,而图5(b)、(d)、(f)和(h)这4景MODIS影像的观测角度范围分别为 $18^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 、 $2^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 、 $2^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 、 $1^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。由于不同地物覆盖类型具有不同的地表温度,在不同卫星观测角度下,单个像元内的不同地物覆盖类型所占比例也不同^[9],导致热辐射具有明显的方向性^[21],因此两颗卫星反演结果的差异还可能是它们在研究区域内不同的卫星观测角度造成的。此外,两颗卫星传感器观测的尺度差异、热红外通道波段响应函数的差异以及地表温度反演算法的差异都有可能导导致两颗卫星地表温度反演结果不同。

6 结 语

本文针对MTSAT-1R卫星数据,结合MODTRAN 4.0大气辐射传输模型及MTSAT-1R传感器通道响应函数,利用MODTRAN 4.0中6条标准大气廓线和1 413条晴空状态下的TIGR大气廓线数据,对地表比辐射率、大气水汽含量、传感器观测角度分组,模拟了分组后的分裂窗算法的系数。

通过对算法中噪声等效温差 $NE\Delta T$ 、大气水汽含量和地表比辐射率3个参数进行了敏感性分析发现,两热红外波段 $NE\Delta T$ 为0.15 K和0.18 K时,分别对干燥和湿润大气状态下地表温度反演精度造成9.5%和1.6%的影响。大气水汽含量估算不准确引起LST反演结果的误差,主要是由于反演时选择错误的分组系数进行计算造成的。对于

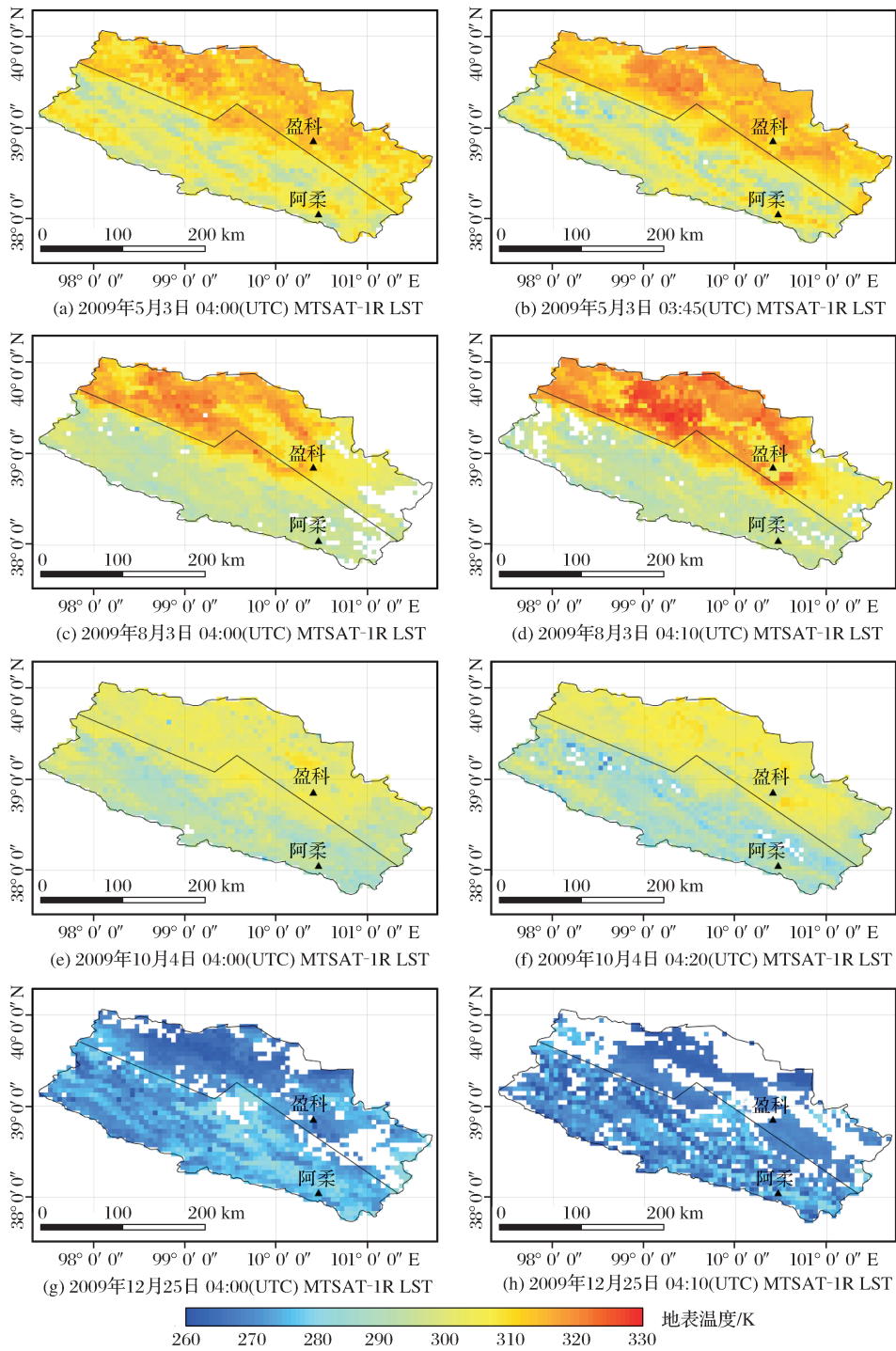


图 5 不同季节黑河上游和中游 MTSAT-1R 反演结果与 MODIS 地表温度产品对比图

Fig. 5 The comparison between estimated LST from MTSAT-1R and MODIS LST product in different seasons over the upstream and midstream region of Heihe river basin

$WVC \in [1.0, 2.5]$ 的情况,由于大气水汽含量低估错分到 $WVC \in [0.0, 1.5]$ 和 $WVC \in [2.0, 3.5]$ 时,造成反演的地表温度的误差分别为 0.39 K 和 0.55 K。对比辐射率取值对 LST 反演影响的分析发现:湿润大气条件下地表比辐射率误差引起的地表温度误差比干燥条件下更小。当 $1-\epsilon/\epsilon$ 和 $\Delta\epsilon/\epsilon^2$ 两参数

同时存在误差时,地表温度的误差最大。

最后,结合模拟数据、地面观测数据及 MODIS 地表温度产品,对反演的 MTSAT LST 的结果进行了评价分析。通过分析模拟数据结果发现,随着传感器观测天顶角的增大,地表温度反演精度降低。此外,大气水汽含量对地表温度反演的精度影响也

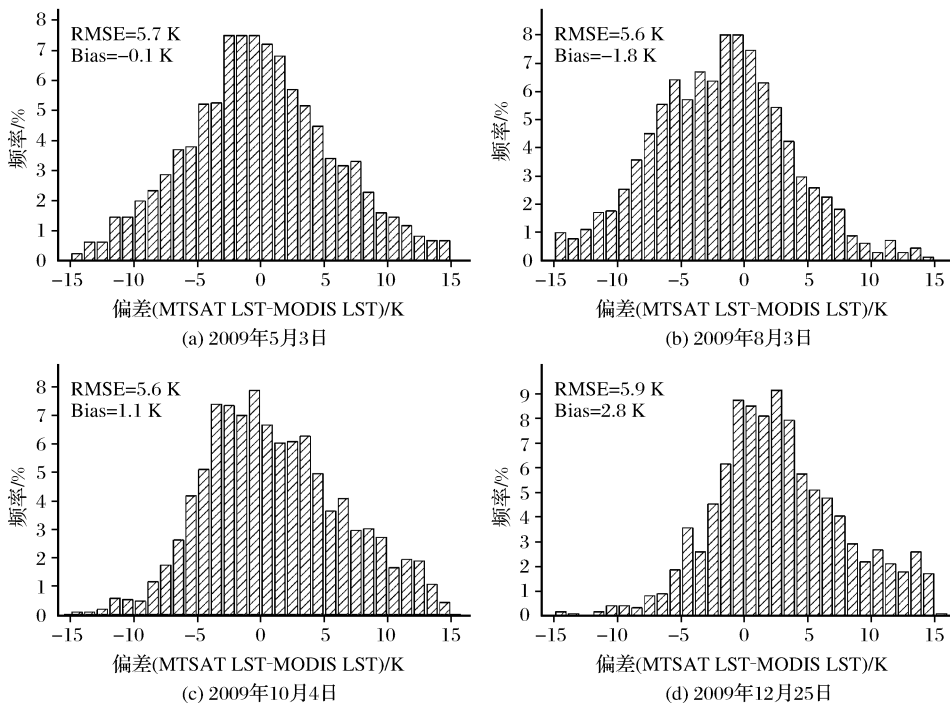


图 6 MTSAT LST-MODIS LST 差值统计直方图

Fig. 6 Histogram of difference between MTSAT LST and MODIS LST

非常大,当大气水汽含量小于 2.5 g/cm^2 时,地表温度反演误差在 1K 以内。与地面观测数据比较发现,在阿柔站,MTSAT-1R 反演结果与地面观测 LST 比较, RMSE 为 3.7 K (白天)/ 1.4 K (夜晚),由于阿柔站地形较为复杂,可能较大程度上影响了地表温度的反演精度。而且在白天的情况下 MTSAT-1R 的反演结果几乎都低于地面观测数据。在盈科站,MTSAT-1R 反演结果与地面观测 LST 比较, RMSE 为 2.4 K (白天)/ 2.0 K (夜晚),在白天 MTSAT-1R 的反演结果略优于 MODIS 地表温度产品。而在夜晚,MODIS 地表温度产品与地面观测 LST 更加接近。在空间分布方面,将 2009 年不同季节 MTSAT-1R 与 MODIS 在黑河流域上游和中游的地表温度反演结果进行对比发现,两种地表温度产品的空间分布呈现出一致性,其偏差可能是由于两颗卫星过境时间、卫星观测角度、空间分辨率尺度、热红外通道波段响应函数以及地表温度反演算法的差异造成的。

总之,分组分裂窗算法能较好地用于 MTSAT-1R 卫星数据进行地表温度反演。该地表温度反演算法在其他区域的验证将在后续工作中进一步研究。

致谢:感谢日本高知大学提供 MTSAT-1R 卫星数据,黑河综合遥感联合试验(WATER)提供地面观

测实验数据!

参考文献(References):

[1] Chen Hanyue, Niu Zheng, Bi Haibo. A Comparison of Two Split-window Algorithms for Retrieving Land Surface Temperature from MODIS Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 28(2): 174-181. [陈瀚阅, 牛铮, 毕海波. MODIS 数据地表温度反演劈窗算法比较[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 174-181.]

[2] Liu Chenchen, Cao Guangzhen, Zhang Mingwei, et al. Influence of Temporal and Variability on Estimation of Air Temperatures from MODIS Land Surface Temperatures[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 831-835. [刘晨晨, 曹广真, 张明伟, 等. 时空尺度对利用 MODIS 地表温度估算空气温度的影响研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 831-835.]

[3] Wang Binbin, Ma Yaoming, Ma Weiqiang. Estimation of Land Surface Temperature Retrieved from EOS/MODIS in Naqu Area over Tibetan Plateau[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(6): 1289-1309. [王宾宾, 马耀明, 马伟强. 青藏高原那曲地区 MODIS 地表温度估算[J]. 遥感学报, 2012, 16(6): 1289-1309.]

[4] Hu Juyang, Tang Shihao, Dong Lixin. Land Surface Temperature Retrieval from FY3A/MERSI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(4): 531-538. [胡菊阳, 唐世浩, 董立新. FY3A/MERSI 地表温度反演[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 531-538.]

[5] Wataru T, Kei O, Shin A. Super-resolution of MTSAT Land

- Surface Temperature by Blending MODIS and AVNIR2[J]. Asian Journal of Geoinformatics, 2012, 12 (2). http://webqms.iis.u-tokyo.ac.jp/pdf/mtsatsat_Lst-Superres.pdf.
- [6] Sobrino J A, Romaguera M. Land Surface Temperature Retrieval from MSG1-SEVIRI Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(2): 247-254.
- [7] Kei O, Wataru T, Masayuki T. Evaluation of the Algorithms for Land Surface Temperature Retrieval from MTSAT Data [J]. Remote Sensing and Photogrammetry, 2010, 49: 251-259.
- [8] Li Z L, Wu H, Wang N, *et al.* Land Surface Emissivity Retrieval from Satellite Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(9-10): 3084-3127.
- [9] Li Z L, Tang B, Wu H, *et al.* Satellite-derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14-37.
- [10] Wan Z, Dozier J. A Generalized Split-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34 (4): 892-905.
- [11] Tang B, Bi Y, Li Z L, *et al.* Generalized Split-window Algorithm for Estimate of Land Surface Temperature from Chinese Geostationary FengYun Meteorological Satellite(FY-2C) Data[J]. Sensors, 2008, 8(2): 933-951.
- [12] Gao C, Li Z L, Tang B, *et al.* An Improved Algorithm for Retrieving Land Surface Emissivity and Temperature from MSG-2/SEVIRI Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52: 3175-3191.
- [13] Li Xin, Li Xiaowen, Li Zengyuan, *et al.* Progresses on the Watershed Allied Telemetry Experimental Research(WATER) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5): 637-649. [李新, 李小文, 李增元, 等. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 637-649.]
- [14] Anderson G P, Berk A, Acharya P K, *et al.* MODTRAN4: Radiative Transfer Modeling for Remote Sensing[C]//International Society for Optics and Photonics Proc. SPIE, 2000: 176-183.
- [15] Saunders R W, Kriebel K T. An Improved Method for Detecting Clear Sky and Cloudy Radiances from AVHRR Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(1): 123-150.
- [16] Wen Xiongfei, Dong Xinyi, Liu Liangming. Cloud Index Method for Cloud Detection[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, (7): 838-841. [文雄飞, 董新奕, 刘良明. “云指数法”云检测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, (7): 838-841.]
- [17] Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P, *et al.* Improvements in the Split-window Technique for Land Surface Temperature Determination[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(2): 243-253.
- [18] Li Z L, Jia L, Su L, *et al.* A New Approach for Retrieving Precipitable Water from ATSR2 Split-window Channel Data over Land Area [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(24): 5095-5117.
- [19] Zeng Gehong. Principles of Infrared Systems' NEDT and Theoretical Calculations[J]. Infrared Technology, 2012, 34 (2): 63-67. [曾戈虹. 红外系统噪声等效温差机理分析与实例计算[J]. 红外技术, 2012, 34(2): 63-67.]
- [20] Li Hua. The Study of Algorithms for Land Surface Temperature Retrieval from HJ-1B/IRS and FY-3A/MERSI Data [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2010. [历华. 环境一号卫星红外相机和风云三号卫星中分辨率光谱成像仪地表温度反演算法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2010.]
- [21] Yang Jinxin, Jia Li. Retrieval of Soil and Vegetation Component Temperatures based on Dual-angular AATSR Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29 (2): 247-257. [杨锦鑫, 贾立. 基于双角度 AATSR 遥感数据的组分温度反演[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 247-257.]

Retrieval of Land Surface Temperature Using a Classified Split-window Algorithm from MTSAT-1R Data

Pan Yingqi^{1,2,3}, Jia Li^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A Classified Split-Window (C-SW) algorithm is developed to retrieve Land Surface Temperature (LST) from the thermal infrared data observed by the Multifunctional Transport Satellites-1R (MTSAT-1R) using atmospheric radiative transfer model MODTRAN 4.0 and Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR) clear-sky at-

mospheric profile data. The coefficients of the C-SW algorithm are divided into several groups according to different ranges of the three parameters, i. e. the atmospheric water vapor content, the land surface emissivity and the satellite zenith viewing angle. The method is applied to the upstream and midstream region of the Heihe river basin. The errors of the LST retrieval caused by the uncertainties of instrument noises, land surface emissivity and atmospheric water vapor content are analyzed. Finally, the retrieved LST from MTSAT-1R is compared with the simulation data, the ground observations and MODIS LST products over the whole study area and at the experimental sites. The results indicate that the accuracy of LST retrieval is less than 1 K when the sensor viewing zenith angle is close to nadir or atmospheric water vapor is less than 2.5 g/cm^2 . The comparison between the estimated LST and the in-situ measurements show that the root mean squared errors (RMSE) are 3.7 K (daytime)/1.4 K (nighttime) at Arou site and 2.4 K (daytime)/2.0 K (nighttime) at Yingke site, respectively. Moreover, the comparison with MODIS products shows consistent spatial pattern over the study area. As a conclusion, the proposed classified split-window algorithm can be successfully applied to the LST retrievals from MTSAT-1R data over the study area.

Key words: MTSAT-1R; Land surface temperature; Classified Split-Window (C-SW) algorithm

“我为无人机作代言”

——尖兵之翼征集无人机行业代言人

中国无人系统产业联盟 (Association for Unmanned Vehicle Systems of China, AUVSC) 于近日开始向广大行业内外人士征集无人机行业代言人。

本次活动是尖兵之翼中国(深圳)国际无人系统技术成果交易展览会系列活动之一,面向广大无人机产业从业者征集对无人机行业或自己从事专业、岗位的思考、感悟、成就与建议。通过本次活动,广大无人机从业者或爱好者可以自由抒发对无人机行业的整体思考,反思回顾中国无人机发展历程,展望中国无人机行业未来。本次征集活动于7月10日开始,11月15日截止。征集的对象为品牌产品、品牌活动、优秀企业、行业领袖、技术权威、金牌飞手、金笔记者、能工巧匠、热心粉丝、创客精英、创新用户、行业管理者等人员或项目。参与人员可以通过发送个人最理想的形象照片并附上20字以内的思考、感悟、成就、建议参与活动。代言人要求自信、阳光、专业,感悟文字要求避免涉及自己的品牌、产品、单位。

据悉,这次“代言”活动将会在知名大众门户网站、期刊、报纸、电视台、微信、微博、博客、高博特公司网站、高博特军工网等渠道进行同期宣传,代言结果会在今年11月17~20日的中国(深圳)国际无人系统技术成果交易展览会开幕式上进行展示。

期待着有理想、有创意、有思想、有远见的业内人士积极参与本次活动,广大无人机从业者发出自己的声音,也期待着“代言”活动引发行业内更多的思考与讨论,我们大家的努力让中国无人机事业愈加辉煌!

截止时间:2015年11月15日

联系方式:010-88587506/07

投稿邮箱:gbt@gobetter.com.cn

中国(深圳)国际无人系统技术成果交易展览会

时间:2015年11月17~20日

