

通用劈窗算法的NOAA-18(N)AVHRR/3数据 地表温度遥感反演与验证

孙志伟^{1,2}, 唐伯惠^{2*}, 吴 骅², 程耀东¹

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统
国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 本文以NOAA-18(N)AVHRR/3数据, 运用通用劈窗技术获得地表温度。首先, 利用MODTRAN 4模拟不同地表和大气状况下热红外通道(Ch4, 10.3~11.3 μm 和Ch5, 11.5~12.5 μm)的星上亮温, 并建立模拟数据库。其次, 按照地表温度、大气可降水汽含量、地表比辐射率和观测天顶角, 对模拟数据库分组, 确定出各分组的通用劈窗算法系数。然后, 将构建的地表温度反演模型应用到NOAA-18(N)AVHRR/3数据, 模型所需的地表比辐射率由NDVI阈值法确定, 大气可降水汽含量是利用Li等(2003)提出的一种劈窗的协方差与方差比的方法来估算。反演结果表明: 在观测天顶角小于30°或者大气可降水汽含量小于3.5 g/cm²时, 地表温度反演的均方根误差小于1.0K; 在观测天顶角小于45°并且大气可降水汽含量小于5.5g/cm²情况下, 均方根误差小于1.5K。最后, 利用美国通量站的实测数据对地表温度反演结果进行了验证, 结果表明均方根误差小于1.8K。

关键词: 通用劈窗算法; AVHRR/3; NOAA-18(N); 地表温度

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00431

1 引言

地表温度(LST, Land Surface Temperature)是描述地-气系统相互作用中物质和能量交换结果的重要物理参量。在干旱、高温、城市热环境、林火、冻土分布、水文、植被、地震的监测中, 都需提取LST参量信息。地表温度既可作为地表过程等模型的输入参数, 又可用于验证模型的输出结果, 国际地圈生物圈计划(IGBP)将地表温度列为优先测定的参数之一^[1-10]。

劈窗算法是以大气水汽对两个相邻热红外通道吸收的差异性来获取地表温度^[2]。1975年, Mc-Millin(1975)用辐射传输方程首次提出了劈窗算法, 并在海面温度的反演中取得较好的结果^[5]。此后, Price(1984)将劈窗算法用于反演陆面温度^[9]。对此, 很多学者提出了多种形式的陆面温度反演的改进劈窗算法^[1-4]。Wan等(1996)提出通用劈窗算

法(GSW, General Split-window Algorithm)^[1], 因其反演精度高、效率好、容易实现等优点而被广泛采用。

NOAA-18(N)AVHRR/3包含6个通道, 各通道的具体信息见表1。

2 地表温度反演方法

2.1 辐射传输方程

辐射传输理论, 在无云大气条件下, 根据热力学能量平衡原理, 卫星传感器在热红外通道测量的大气顶端(TOA, Top of Atmosphere)的辐射亮度 $B_i(T_i)$ ^[7]可以表示为:

$$B_i(T_i) = \varepsilon_i B(T_s) \tau_i + R_{\text{atm}_i}^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_i) R_{\text{atm}_i}^{\downarrow} \tau_i \quad (1)$$

式中, B_i 是普朗克函数; T_i 是第 i 通道大气层顶观测到的亮温; T_s 是地表温度; ε_i 是地表比辐射

收稿日期: 2012-12-04; 修回日期: 2013-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171287); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050109)。

作者简介: 孙志伟(1988-), 男, 山东临沂人, 硕士生, 研究方向为地表参数的遥感定量反演、GIS应用及开发。

E-mail: sunzw@lreis.ac.cn

*通讯作者: 唐伯惠(1973-), 男, 湖南永州人, 博士, 副研究员, 研究方向为地表参数的遥感定量反演, 以及地表净辐射、蒸散发和土壤水分的遥感估算方法研究。E-mail: tangbh@igsrr.ac.cn

表1 AVHRR/3 传感器各通道特征及主要用途
Tab.1 Characteristics and applications of AVHRR/3 sensor

通道名	波长范围(μm)	空间分辨率(km)	主要用途
Ch ₁	0.58~0.68	1.10	白天图像、植被、冰雪、气候…
Ch ₂	0.725~1.0	1.10	白天图像、植被、水/陆边界、农业估产、土地利用调查…
Ch3a	1.58~1.64	1.10	白天图像、土壤湿度、云雪判释、干旱监测、云雪区分…
Ch3b	3.55~3.93	1.10	下垫面高温点、夜间云图、森林火灾、火山活动
Ch ₄	10.3~11.3	1.10	昼夜图像、海表和地表温度、土壤湿度
Ch ₅	11.5~12.5	1.10	昼夜图像、海表和地表温度、土壤湿度

率; τ_i 是大气透过率; $R_{atm_i}^{\uparrow}$ 是大气上行辐亮度; $R_{atm_i}^{\downarrow}$ 是大气下行辐亮度。

式(1)右边有3项:第一项描述的是地表发射辐射经过大气衰减后的辐射量;第二项是大气上行辐射量;第三项是大气下行辐射经过地表反射后传感器获取的辐射量。

2.2 通用劈窗算法

大气参数(透过率和大气上、下行辐射量)因时间和空间变异大,不易获取卫星同步大气参数。所以,学者们利用大气窗口内两个相邻热红外通道对水汽吸收的差异性,拓展出劈窗算法反演地表温度。通用劈窗算法在地表比辐射率已知的情况下可以反演出地表温度^[9-11],Wan 等对通用劈窗算法的数学描述^[1]如下。

$$T_s = C + \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_4 + T_5}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_4 - T_5}{2} \quad (2)$$

式中, T_4 和 T_5 对应于 AVHRR/3 传感器 Ch4、Ch5 大气顶端亮度温度; ε 是两相邻通道比辐射率 ε_4 、 ε_5 的均值 ($\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$); $\Delta\varepsilon$ 是两相邻通道比辐射率的差值 ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$); C 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 是劈窗算法的系数。

通用劈窗算法是地表温度与地表比辐射率、观测天顶角(VZA, Viewing Zenith Angle)及大气可降水汽含量的线性表达,但各参数与地表温度之间是一种非线性关系。为了更好地逼近线性表达、减少由非线性程度引起的误差,通用劈窗算法采用分组的方式确定出多组系数,以达到提高精度的目的。

地表温度的反演:首先,用温度不分组时的系数反演得到一个初始的地表温度;其次,将初始温度作为选择温度分组时的系数条件,用选定的系数反演地表温度,通用劈窗算法反演地表温度的流程详见图1。

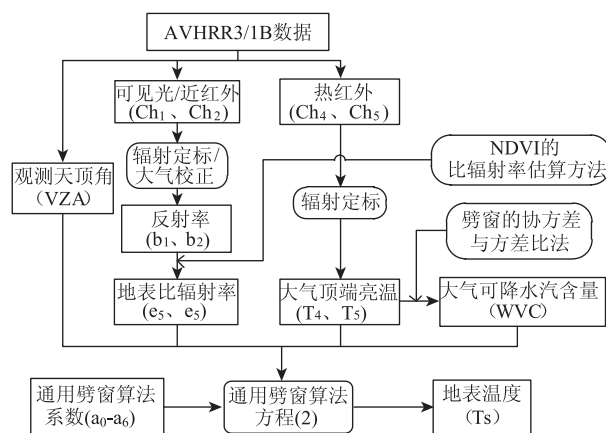


图1 通用劈窗算法反演地表温度流程图

Fig.1 Flow chart of retrieval of land surface temperature using general split-window algorithm

由上述可知,通用劈窗算法系数、地表比辐射率和大气可降水汽含量(WVC)各量是通用劈窗算法的必需参数,下面我们将具体描述各参数的确定方法。

2.2.1 模拟数据库的建立

由于无法获取大量的地表温度及同步星上亮温观测数据,因此,这些系数通常利用模拟数据来确定。我们利用大气辐射传输模型 MODTRAN 4^[12]模拟不同大气和地表状况下的星上亮温。选择 TIGR2000^[13] (Thermodynamic Initial Guess Retrieval 2000)大气廓线数据库作为 MODTRAN 4模型的大气状况输入。TIGR2000 包含了 2311 条大气廓线,含有新增典型廓线 872 条、中纬度夏季 388 条、中纬度冬季 354 条、极地夏季 104 条和极地冬季 593 条,每条大气廓线含有 40 层温压高湿信息。由于热红外地表温度反演仅限无云条件下进行,因此,我们首先从 TIGR2000 数据库中挑选出无云的大气廓线。假如某一层廓线的相对湿度值高于 90%或者连续两层相对湿度超过 85%,那么这条大气廓线被视为有云廓线^[1]。根据上述规则,最终挑选出 946

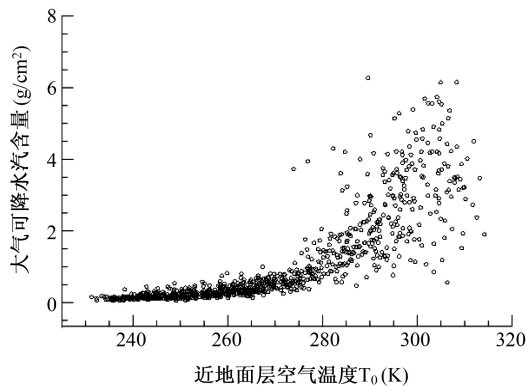


图2 大气可降水汽含量与近地面层空气温度的关系

Fig.2 The scatterplot of atmospheric water vapor content (WVC) with ground layer air temperature

条无云廓线数据。无云大气廓线中水汽含量(WVC, Atmospheric Water Vapor Content)的变化范围为0.1~6.5 g/cm²,大气水汽含量随近地面层空气温度 T_0 的增高而变大,如图2所示。

由图2可知,TIGR2000数据库946条无云大气廓线中偏冷廓线较多,温暖廓线数量较少。为了使模拟数据更具有代表性,我们对大气廓线数据做了加密处理: T_0 小于290K,地表温度变化范围为 $[T_0-5K, T_0+5K]$,变化步长为5K; T_0 大于290K,地表温度变化范围为 $[T_0-5K, T_0+15K]$,变化步长也为5K。

将TIGR2000数据库946条无云大气廓线数据(气压、高程、水汽含量、地表温度)、地表反射率、通道响应函数和观测天顶角输入到MODTRAN 4模型中,总共模拟了890 928种情况。

2.2.2 通用劈窗算法系数的确定

在确定通用劈窗算法系数时,观测天顶角分为6种情况:0.0°, 33.56°, 44.42°, 51.32°, 56.25°和60.0°;大气水汽含量(g/cm²)6组:[0~1.5], [1.0~2.5], [2.0~3.5], [3.0~4.5], [4.0~5.5]和[5.0~6.5];地表温度(k)5组: $T_s \leq 280$, $275 \leq T_s \leq 280$, $290 \leq T_s \leq 310$, $305 \leq T_s \leq 325$ 和 $T_s \geq 325$;平均地表比辐射率2组:低比辐射率组[0.90~0.96],高比辐射率组[0.94~1.0]。按照上述分组,在温度不分组即不考虑温度非线性误差时,存在6种角度情况、6个水汽分组和2个比辐射率分组,6×6×2=72组,即可以回归出72组系数;在温度分组时考虑6个分组,6×6×6×2=360组。在各种情况小组中,均采用最小二乘法回归就可得到各情况通用劈窗算法的系数,其工作流程见图3。各分组情况反演温度的均方根误差见图4。

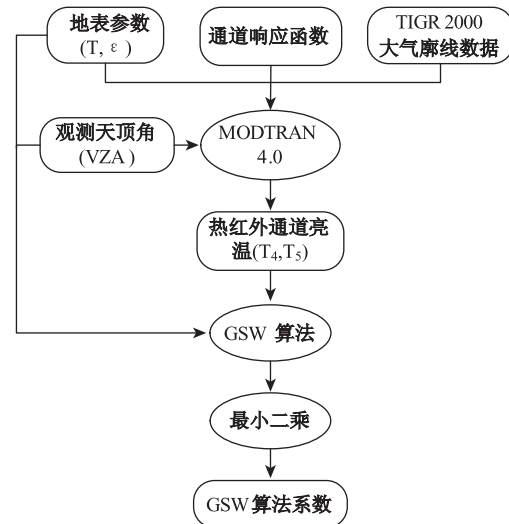


图3 确定通用劈窗算法系数的流程图

Fig.3 Flow chart of coefficients determination

2.2.3 模型反演精度

图4显示了各分组反演温度的均方根误差变化,在观测天顶角小于30°或者在水汽含量小于3.5g/cm²时,均方根误差小于1.0K;在观测天顶角小于45°并且大气可降水汽含量小于5.5 g/cm²情况下,均方根误差小于1.5K。温度分组时的均方根误差小于温度不分组时;低比辐射率组对应的均方根误差小于高比辐射率组;均方根误差随大气可降水汽含量增大而明显增大,大气可降水汽含量较小时均方根误差很小;均方根误差随观测天顶角的增大而明显增大。对于温度分组情况,总体来看,地表温度反演精度远高于温度不分组;比辐射率、大气可降水汽含量和观测天顶角对均方根误差影响的变化趋势和温度不分组时保持一致。各种情况对应均方根误差的变化趋势与Tang等(2008)的模拟结果一致^[14]。

用模拟数据库可验证模拟系数的准确性。将各分组系数分别用于不同的分组模拟值,得到模拟地表温度值,其与模拟所用大气廓线中的实际地表温度值之差的直方图和实际地表温度与模拟值的散点图见图5,并可得到系数的均方根误差0.45K和偏差-0.01K。

2.3 地表比辐射率的确定

Sobrino等(2008)提出利用NDVI阈值法^[15]估算地表比辐射率,对于全球尺度范围区分裸土和浓密植被的NDVI阈值分别为:0.2和0.5。该方法具有较高的可操作性,地表比辐射率的估算精度可以满

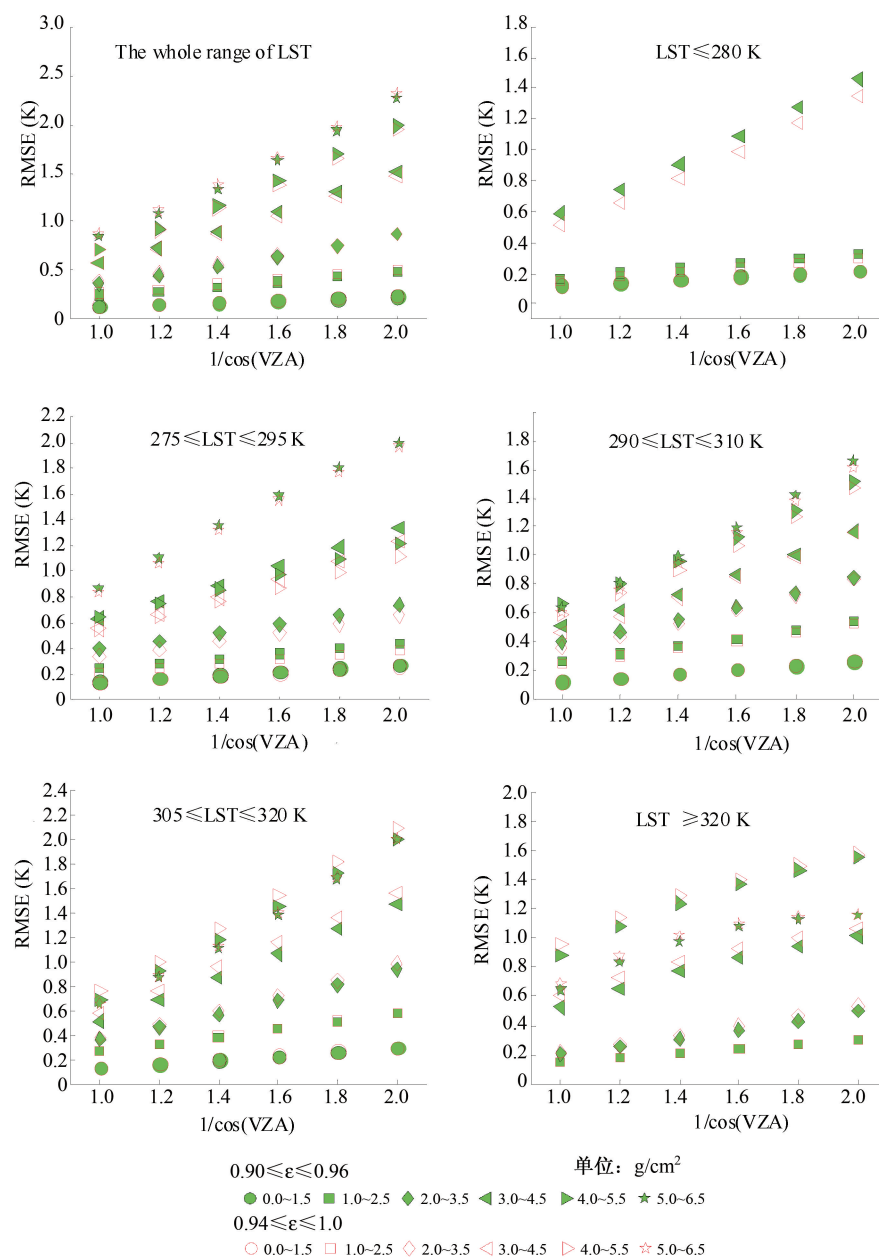


图4 各分组情况的均方根误差(RMSE)变化图

Fig.4 The variation of RMSE under different conditions

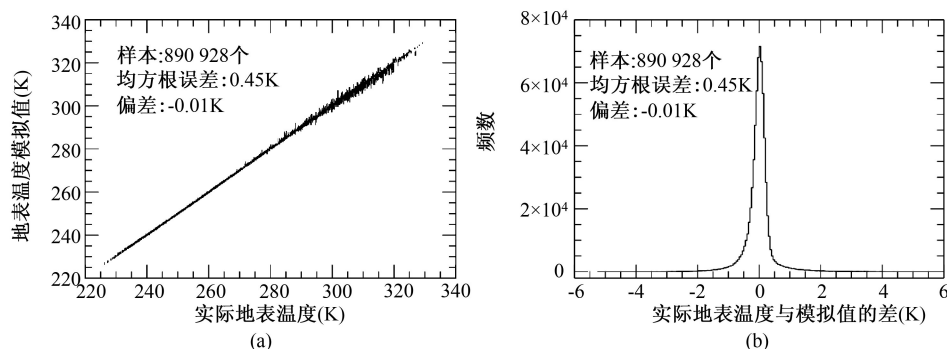


图5 计算与实际的地表温度关系图(a:散点图;b:差值直方图)

Fig.5 The relation between calculation and actual LST (a: scatter diagram; b: histogram of differences)

足实用需求。我们首先根据 MOD12Q1 地表分类产品将地表分为水体、冰/雪、植被/裸土区 3 个不同区域,

建立了 NDVI 阈值法适用于 AVHRR/3 传感器的地表比辐射率的反演模型,其工作流程如图 6 所示。

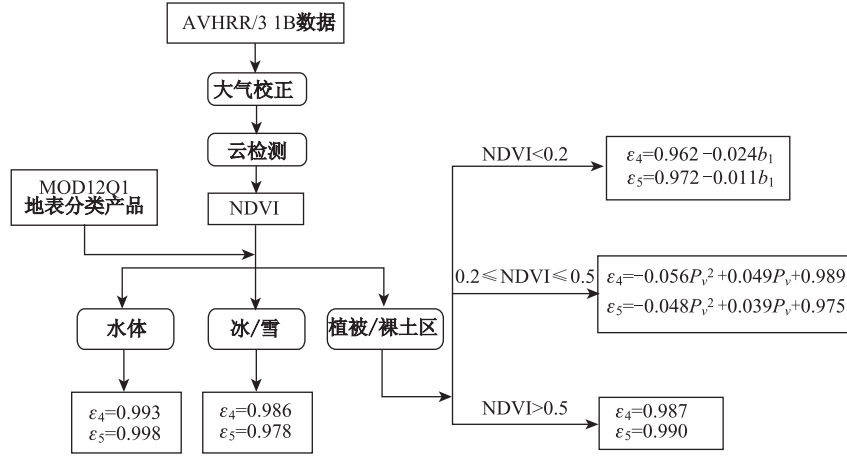


图 6 NDVI 阈值法的地表比辐射率反演流程图

Fig.6 Flow chart of estimation of LSE using NDVI thresholds method

2.3.1 水体和冰/雪的地表比辐射率

对于水体,由于波段内比辐射率都比较高,且在 10.5~12.0μm 之间变异性小,所以,根据 ASTER 波谱库设定 AVHRR/3 Ch₄和 Ch₅波段的比辐射率分别为 0.993 和 0.988。同理,冰/雪在 AVHRR/3 Ch₄和 Ch₅波段的比辐射率分别设置为 0.986 和 0.978。水体和冰/雪在 AVHRR/3 Ch₄和 Ch₅通道范围内的比辐射率变化情况,如图 7 所示。

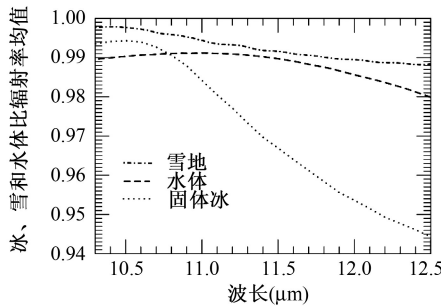


图 7 AVHRR/3 Ch₄和 Ch₅通道范围内冰、雪和水体的比辐射率均值随波长的变化图

Fig.7 The variation of LSE mean values of ice, snow, water in the range of Ch4 and Ch5.

2.3.2 植被/裸土区地表比辐射率

(1) 对裸土像元 ($NDVI < 0.2$), Sobrino 等 (2008) 利用通道比辐射率与红光波段地表反射率建立关系来获取^[16]。在 ASTER 波谱库中选取 Ch₄和 Ch₅热红外通道对应的裸土比辐射率和 Ch₁红光波段对应的裸土反射率 (b_1), 运用回归分析的方法

建立线性关系。通过分析,我们得到它们之间的线性模型如下:

$$\begin{aligned}\varepsilon_4 &= 0.962 - 0.024b_1 \\ \varepsilon_5 &= 0.972 - 0.011b_1\end{aligned}\quad (3)$$

(2) 对于浓密植被覆盖区像元, 即 $NDVI > 0.5$ 时, Sobrino 和 Raissouni (2000) 将比辐射率设定为一个常数^[16]。因为植被有一定的高度, 会受到比辐射率腔体效应影响。对于浓密植被覆盖区, 地表比辐射率设置为植被比辐射率和腔体效应的和, 见式 (4):

$$\begin{aligned}\varepsilon_4 &= 0.982 + <d\varepsilon_4> \\ \varepsilon_5 &= 0.984 + <d\varepsilon_5>\end{aligned}\quad (4)$$

其中, $<d\varepsilon_4>$ 和 $<d\varepsilon_5>$ 是考虑比辐射率腔体效应后比辐射率的增量。参考 Peres 等 (2005) 的研究^[17], 选取了 IGBP 16 种下垫面中植被下垫面的比辐射率腔体效应均值, 对于 AVHRR/3 Ch₄和 Ch₅通道分别取值为 0.007 和 0.006。

(3) 对于植被和裸土覆盖的混合区域 ($0.2 \leq NDVI \leq 0.5$), 采用比辐射率和植被覆盖度建立关系的混合像元法, 其算式:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \varepsilon_{vi}P_v + \varepsilon_{si}(1 - P_v) + d\varepsilon_i \\ P_v &= \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \\ d\varepsilon_i &= 4(1 - P_v)P_v < d\varepsilon_i >\end{aligned}\quad (5)$$

其中, P_v 是植被覆盖度, 由 NDVI 估算而来, 最小 NDVI 取值 0.2, 最大 NDVI 取值 0.5; ε_{vi} 和 ε_{si} 分别为植被和裸土所对应的地表比辐射率。在 AS-

TER波谱库中选取对应通道比辐射率值,将比辐射率值与通道响应函数加权,计算出AVHRR/3 Ch₄和Ch₅波段植被比辐射率值分别为0.982和0.985;土壤比辐射率分别为0.967和0.975。 $d\epsilon_i$ 是比辐射率的腔体效应增量; $\langle d\epsilon_i \rangle$ 是平均的腔体效应值,参考Peres等(2005)的研究^[17],选取了IGBP 16种下垫面中植被、裸土下垫面的比辐射率腔体效应均值,分别取0.004和0.005。对式(5)化简,得到AVHRR/3 Ch₄和Ch₅波段的比辐射率与植被覆盖度(P_v)之间的关系模型:

$$\begin{aligned}\epsilon_4 &= -0.056P_v^2 + 0.049P_v + 0.989 \\ \epsilon_5 &= -0.048P_v^2 + 0.039P_v + 0.975\end{aligned}\quad (6)$$

2.4 大气可降水汽含量的反演

在通用劈窗算法中,大气可降水汽含量(WVC)作为温度反演分组的参数之一,对于提高地表温度反演的精度将起到极其重要的作用。Li等(2003)提出了劈窗的协方差与方差比的方法(Transmittance Ratio of Split Window Channels)来反演大气可降水汽含量(WVC)^[18],公式为:

$$WVC = C_1 + C_2 \times \frac{\tau_5}{\tau_4} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \frac{\tau_5}{\tau_4} = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{4,k} - \bar{T}_4)(T_{5,k} - \bar{T}_5)}{\sum_{k=1}^N (T_{4,k} - \bar{T}_4)^2};$$

C_1 、 C_2 是未知系数, τ_4 、 τ_5 分别是AVHRR/3传感器Ch₄、Ch₅通道的大气透过率。 τ_5/τ_4 是Ch₅与Ch₄通道大气透过率的比值,其中, $N(N=n \times m)$ 是计算时开窗区域的大小; T_4 、 T_5 分别对应Ch₄和Ch₅通道的亮温, \bar{T}_4 、 \bar{T}_5 是开窗区域有效亮温的均值。

根据式(7)可知,要想获得大气水汽含量须知算法系数 C_1 、 C_2 。按照模拟通用劈窗系数的相同方法,利用MODTRAN 4模拟建立透过率、水汽及观测天顶角3个参数组成数据库,运用最小二乘回归法拟合出大气可降水汽含量和透过率比值的线性关系,即可获得系数 C_1 、 C_2 。再根据 C_1 、 C_2 和对应的观测天顶角(VZA)建立出对应的经验关系,见式(8):

$$\begin{aligned}C_1 &= 28.097 - 15.674 \sec(vza) + 3.392 \sec^2(vza) \\ C_2 &= -28.487 + 16.144 \sec(vza) - 3.501 \sec^2(vza)\end{aligned}\quad (8)$$

真实大气可降水汽含量和反演大气可降水汽含量的均方根误差为0.06g/cm²,可作为确定通用劈窗算法分组系数,以提高地表温度反演精度,图8给出大气可降水汽反演系数和观测天顶角正割值的关系。

3 AVHRR/3数据的地表温度反演与验证

3.1 地表温度的遥感反演

根据AVHRR/3卫星数据提供的校正文档,对遥感影像做辐射校正和几何校正,获取Ch₄、Ch₅通道亮温和观测天顶角(VZA)。通用劈窗算法需要的地表比辐射率、大气可降水汽含量分别通过NDVI阈值法的地表比辐射率反演方法和劈窗的协方差与方差比的方法来确定。

选取美国五大湖地区2010年10月7号无云影像反演得到地表温度,见图9。

从图9可知,地表温度的空间分布合理:裸土的温度高于植被的温度,水体的温度最低。为了说明不同地表类型下的星上亮温、地表比辐射率、大气

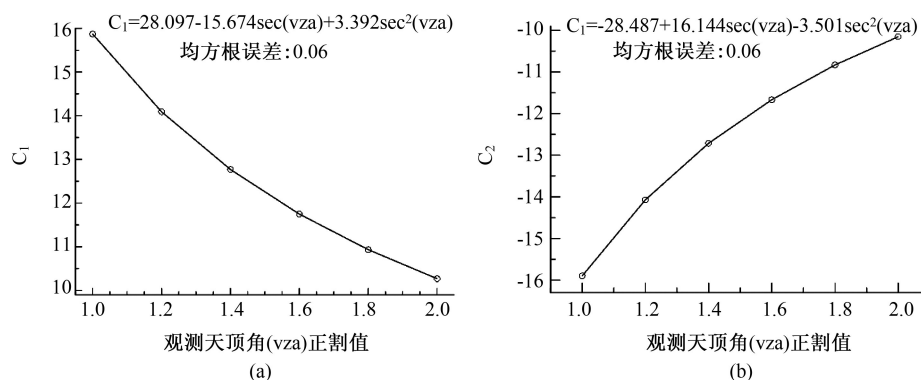


图8 大气可降水汽反演系数和观测天顶角正割值的关系图(a: C_1 ; b: C_2)

Fig.8 The relation between WVC's coefficients and VZA's secant value (a: C_1 ; b: C_2)

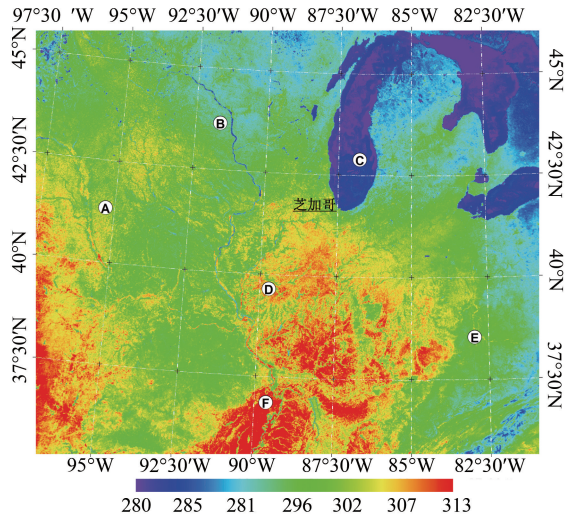


图9 美国五大湖地区遥感反演地表温度图
(2010年10月7日13:50<地方时>)

Fig.9 The LST in the Great Lakes Region
(at 13:50 Oct 7 2010<Local time>)

可降水汽含量和地表温度反演的具体对照关系,按照 MOD12Q1 地表分类产品,在遥感影像中选取 6 种地表类型作为样本分析,ABCDEF 依次为:疏林地、灌丛、水体、农田、阔叶林、农作物斑块,6 类样本的详细描述列于表 2。

3.2 地表温度反演结果验证

利用 2010 年的美国通量站 (US_AR1, US_WJS, US_SKR) 地表长波辐射通量数据对地表温度反演结果进行验证。这 3 个通道的有效信息列于表 3。

通过斯特藩-波尔兹曼定律计算出地表温度,如式(9)、(10):

$$Longwr = \varepsilon \times \sigma \times T_s^4 \quad (9)$$

$$Longwr = Rglout - Rgl \times (1 - \varepsilon) \quad (10)$$

其中, $Longwr$ 是地表长波辐射数据; Rgl 是入射

表2 地表温度图像中各个样本的详细描述

Tab.2 The information of the samples

	A	B	C	D	E	F
地表类型	疏林地	灌丛	水体	农田	阔叶林	农作物斑块
纬度(°)	41.38N	43.35N	42.85N	39.68N	38.66N	37.24N
经度(°)	95.71W	91.86W	86.69W	89.79W	83.25W	89.90W
高程(m)	354	314	86	185	307	172
观测角度(°)	27.48	1.57	23.68	0.46	39.27	4.80
Ch ₄ 亮温(k)	300.14	293.95	288.06	303.62	295.45	302.78
Ch ₅ 亮温(k)	299.21	293.82	287.34	302.49	294.42	301.04
水汽含量(g/cm ²)	1.825	2.241	4.716	1.293	1.757	2.419
Ch ₄ 比辐射率	0.987	0.989	0.992	0.988	0.989	0.985
Ch ₅ 比辐射率	0.989	0.990	0.987	0.990	0.991	0.988
地表温度(k)	302.63	294.91	288.19	306.64	298.19	306.62

表3 通量站点信息的详细描述

Fig.3 The information of US-Flux stations

站点名	经纬度(°)	海拔(m)	地表类型
US_AR1	36.43N,99.42W	611	草地
US_WJS	34.43N,105.86W	1926	低矮灌丛
US_SKR	25.36N,81.08W	0	阔叶林、水体

长波辐射; $Rglout$ 是出射长波辐射(包含一部分反射的长波辐射); ε 是全波段范围内地表比辐射率; 斯特藩-波尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$ 。利用 MODIS 3 个通道的比辐射率计算出宽波段比辐射率 $\varepsilon_{3-\infty}$ ^[19], 见式(11):

$$\varepsilon_{3-\infty} = 0.0127 + 0.7852 \times \varepsilon_{29} - 0.0151 \times \varepsilon_{31} + 0.2139 \times \varepsilon_{32} \quad (11)$$

NOAA-18(N)为太阳同步轨道卫星,每天同一地区可被观测2次即可获取2幅遥感影像。遥感影像观测时间和长波辐射测量时间最接近的数据,视为同一时间观测。图10给出了经云检测后的无云情况下的图像景数和遥感反演温度与长波辐射计算温度的对比结果:这3个站点的最大均方根误差为1.8K,最小均方根误差为0.96K。站点US_AR1地表类型为草地,无云数据量为128景、均方根误差为1.68K、偏差为0.73K;US_WJS地表类型为低矮灌丛,无云数据量154景、均方根误差为1.8K、偏差-0.85K;US_SKR地表类型为阔叶林、水体,无云数据量119景、均方根误差为0.96K、偏差0.26K。

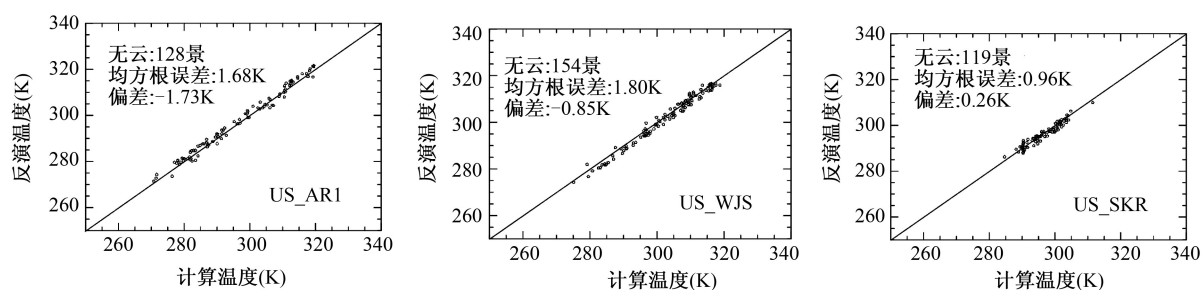


图10 站点遥感反演温度与长波辐射计算温度散点图(2010年全年数据量)

Fig.10 Comparison of LST retrieved from remote sensing data and long wave radiance data

4 结论

本文以辐射传输理论对NOAA-18(N)AVHRR/3无云数据,运用通用劈窗技术获得地表温度。

我们利用MODTRAN 4模拟不同地表类型,大气状况下的热红外通道(CH_4 , 10.3~11.3 μm ; CH_5 , 11.5~12.5 μm)的星上亮温,并建立模拟数据库。按照地表温度、大气可降水汽含量、地表比辐射率和观测天顶角对模拟数据库分组,确定出各分组的通用劈窗算法系数。结果表明:在观测天顶角小于 30° 或者在水汽含量小于 3.5 g/cm^2 时,地表温度反演的均方根误差小于 1.0K ;在观测天顶角小于 45° 并且大气可降水汽含量小于 5.5 g/cm^2 情况下,均方根误差小于 1.5K 。

根据NDVI阈值法估算地表比辐射率,利用劈窗的协方差和方差比的方法,可获取大气可降水汽含量。为了验证地表反演结果的精度,选取美国通量站(US_AR1, US_WJS, US_SKR)的地表长波通量数据作为验证数据。根据斯特藩-波尔兹曼定律利用长波通量数据计算出地表温度。验证结果表明:地表温度反演均方根误差小于 1.8K ,偏差小于 0.85K 。

参考文献:

- [1] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996,4(34):892-905.
- [2] Becker F, Li Z L. Toward a local split-window method over land surface[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990(3):369-393.
- [3] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995,12(3-4):225-253.
- [4] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric corrections for land surface temperature using AVHRR channel 4 and 5 [J]. *Remote Sensing Environment*, 1991(38):19-34.
- [5] Mcmillin L M. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975,80(36): 80-82.
- [6] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社, 2003.
- [7] 田国良.热红外遥感[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [8] 梁顺林,范闻捷.定量遥感[M].北京:科学出版社,2009.
- [9] Price J C. Land surface temperature measurements from the split-window channels of the NOAA 7 AVHRR[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984,89(5):7231-7237.
- [10] 覃志豪, Zhang M H, Arnon Karnieli, 等. 用NOAA-AVHRR热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. *国土资源遥感*, 2001(2):33-42.
- [11] Galve J M, Coll C, Caselles V, Valor E. An atmospheric radiosounding database for generating land surface temperature algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,46(5):1547-1557.
- [12] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, *et al.* MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVHRRIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998 (65):367-375.
- [13] <http://ara.lmd.polytechnique.fr/htdocs-public/products/TI-GR/TIGR.html>
- [14] Tang B H, Bi Y 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.
- [15] Sobrino J A, Jimenez J C, Soria G, *et al.* Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,46(2):316-327.
- [16] Sobrino J A, Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco[J]. *International Journal of Remote Sensing*,

- 2000, 21(2):353-366.
- [17] Peres L F, DaCamara C C. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(43):1834-1844.
- [18] Li Z L, Jia L, Su Z B, *et al.* A new approach for retrieving perceptible water from ATSR2 split-window channel data over land area[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(24):5095-5117.
- [19] Tang B H, Wu H, Li C R, *et al.* Estimation of broadband surface emissivity from narrowband emissivities. Optics Express, 2011, 19(1):185-192.

Retrieval and Validation of Land Surface Temperature with General Split-window Algorithm from NOAA-18(N) AVHRR/3 Data

SUN Zhiwei^{1,2}, TANG Bohui^{2*}, WU Hua² and CHENG Yaodong¹

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: On the basis of the atmospheric radiative transfer theory, land surface temperature (LST) was retrieved from NOAA - 18 (N) AVHRR/3 cloud-free data using a general split-window (GSW) algorithm. A simulated database including the thermal infra-red channels (Channel 4 with spectral range 10.3-11.3 μm and Channel 5 with spectral range 11.5-12.5 μm) radiance observed at the satellite level was established with the atmospheric radiative transfer model MODTRAN 4. It covers various land surface types and atmospheric conditions. Then the coefficients of the GSW were determined by grouping the LST, the atmospheric water vapor content (WVC), the land surface emissivity (LSE), and the viewing zenith angle (VZA) by several sub-ranges. Results showed that the root mean square error (RMSE) between the estimated and actual LST is less than 1.0K when the VZA is less than 30° or the WVC is less than 3.5 g/cm². The RMSE is less than 1.5K when the VZA is less than 45° and the WVC is less than 5.5 g/cm². In addition, the proposed algorithm was applied to the NOAA - 18 (N) AVHRR/3 data to retrieve LSTs. The LSE was determined by using the NDVI thresholds method, and the WVC was estimated with the transmittance ratio method proposed by Li et al. (2003). Finally, the field measured data of the US-Flux stations were used to validate the retrieved LST. The results showed that the RMSE is less than 1.8K.

Key words: general split-window algorithm; AVHRR/3; NOAA-18(N); land surface temperature

*Corresponding author: TANG Bohui, E-mail: tangbh@igsnr.ac.cn