

引用格式:董雪,田静,吴骅,等.考虑土壤水分影响的比辐射率方法在地表温度反演中的应用[J].资源科学,2017,39(8):1592-1604. [Dong X, Tian J, Wu H, et al. Application of the emissivity method considering the effects of soil moisture for retrieving land surface temperature[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1592-1604.] DOI: 10.18402/resci.2017.08.15

# 考虑土壤水分影响的比辐射率方法在地表温度反演中的应用

董雪<sup>1,2</sup>, 田静<sup>1</sup>, 吴骅<sup>3</sup>, 刘素华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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:**地表比辐射率是确定地表长波能量平衡的一个关键参数,也是影响地表温度反演的主要因素,因此比辐射率的精确测定具有重要意义。地表比辐射率除了受地表覆盖类型的影响,与土壤水分含量也密切相关。本文针对MODIS通用分裂窗算法和Landsat TM/ETM+单窗算法,根据Mira等建立的土壤含水量和土壤比辐射率的经验模型,利用SMEX04试验中Arizona研究区的遥感数据和地面观测数据,探讨考虑土壤水分影响后的比辐射率信息在地表温度反演中是否能够提高其反演精度。研究结果表明:利用考虑土壤水分影响后的比辐射率所反演的地表温度平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)均低于比辐射率未考虑土壤水分影响反演的地表温度,其中通用分裂窗算法反演的地表温度ME降低了1.0~1.5K, RMSE降低了0.4~0.8K;单窗算法反演的地表温度ME降低了0.7K, RMSE降低了0.9K。因此,基于土壤比辐射率与土壤水分关系模型的比辐射率修正方法能够提高地表温度的反演精度,并且敏感性分析的结果表明目前土壤水分遥感数据 $0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 的误差对本文使用的考虑土壤水分获取地表比辐射率进而反演地表温度的方法影响不明显。

**关键词:**MODIS通用分裂窗算法; Landsat TM/ETM+单窗算法; 比辐射率; SMEX04; 地表温度; 土壤水分

DOI: 10.18402/resci.2017.08.15

## 1 引言

陆地表面温度是重要的水文、气象参数<sup>[1]</sup>,在地-气相互作用过程中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>,因此,地表温度数据的精确获取一直是众多研究应用不可缺少的内容。

目前,获取区域尺度地表温度的空间分布信息主要以遥感手段为主<sup>[3]</sup>,其中关键参数地表比辐射率的获取主要有三种方法。一是基于地表覆盖类型的比辐射率匹配法<sup>[4]</sup>,即利用不同地表覆盖类型的比辐射率查找表根据研究区的地表类型进行匹配,但由于混合像元问题,这种方法存在明显的误差。二是基于物理的温度与比辐射率分离法<sup>[5-9]</sup>,即

依靠一些先验知识或假设条件,求解不同观测通道热辐射传输方程组,从而得到不同观测通道的比辐射率值,方法中的假设条件往往是限制其精度的主要因素。三是基于NDVI加权法<sup>[10,11]</sup>,即在设定裸地和植被比辐射率的基础上,以覆盖率或NDVI作为权重加权获得整个像元的比辐射率,该算法简单且有很好的普适性,但对裸土的比辐射率赋予常数值,而现实情况是裸土比辐射率与土壤成分、含水量等都有密切关系<sup>[12]</sup>,且变化相对较大,因此赋予常数值会对算法精度有较大影响。

土壤比辐射率与土壤水分关系密切。肖青等在热红外比辐射率光谱特性研究中发现土壤比辐

收稿日期:2017-01-12; 修订日期:2017-06-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271380; 41671354)。

作者简介:董雪,女,山东德州人,硕士生,主要研究方向为定量遥感。E-mail: dongx.14s@igsnrr.ac.cn

通讯作者:田静, E-mail: tianj.04b@igsnrr.ac.cn

2017年8月

射率随含水量的增加而增加,但当含水量达到一定量值时,比辐射率的变化幅度减弱<sup>[13]</sup>。田静等在土壤水分对比辐射率影响试验中发现土壤由干变湿的过程中,MODIS的20波段和ASTER的10、11和12波段的变化幅度最大,比辐射率增幅大于0.05<sup>[12]</sup>。目前针对两者关系的研究大多是定性的分析,而定量建立两者的关系模型的研究很少。Xu等通过试验分析发现利用比辐射率光谱的一阶导数反演土壤水分的精度较高,决定系数为0.71, RMSE为3.3%<sup>[14]</sup>。Mira等对14组土壤样本进行土壤比辐射率和土壤含水量关系探究实验,并建立了这14种土壤分别在不同波段(8.0~13.0 $\mu\text{m}$ , 8.3~9.3 $\mu\text{m}$ , 10.2~11.3 $\mu\text{m}$ , 11.5~12.4 $\mu\text{m}$ )的土壤水和土壤比辐射率的关系式,决定系数大多在0.9以上<sup>[15]</sup>。Sanchez等发展了Mira的研究,在没有消除杂质、异构性以及土壤裂缝的野外条件下进行了比辐射率的观测实验,实验发现在无裂缝的情况下,野外观测的比辐射率与利用Mira建立的模型反演的比辐射率的差别在2%以内<sup>[16]</sup>。王合顺等<sup>[17]</sup>利用Mira<sup>[15]</sup>建立的土壤含水量和比辐射率公式,对黑河研究区3个土壤样点多天的ASTER比辐射率数据和实地观测的土壤含水量数据建立二者的关系模型,模型的决定系数分别为0.9429、0.7705、0.4603,由此证明了Mira提出的比辐射率-土壤含水量模型在野外的适用性。地表比辐射率的获取如果能够考虑土壤水分的影响,理论上可以提高地表温度的反演精度。

地表温度的反演算法根据所针对的传感器通道数主要分为两种,分别是单通道算法、多通道算法。Qin等<sup>[18]</sup>提出的Landsat地表温度反演的单窗算法和Wan等<sup>[19]</sup>提出的MODIS地表温度反演的通用分裂窗算法是其中比较有代表性且反演精度也比较高的算法。

为了探究基于土壤比辐射率与土壤水分模型的比辐射率修正方法能否提高地表温度的反演精度,如果能够提高精度具体提高程度如何,本文针对Qin等<sup>[18]</sup>提出的Landsat地表温度反演的单窗算法和Wan等<sup>[19]</sup>提出的MODIS地表温度反演的通用分裂窗算法,研究算法中原有的比辐射率获取方法(单窗算法基于地表构成类型比例的NDVI阈值法;通用分裂窗算法基于地表覆盖类型的比辐射率匹

配法)和比辐射率与土壤水分关系模型法在地表温度反演中的差异。并通过与地面实测地表温度的比较来分析考虑土壤水分后的土壤比辐射率信息能否提高地表温度的反演精度,具体能够提高多少。

## 2 研究方法

### 2.1 MODIS地表温度反演的通用分裂窗算法

MODIS通用分裂窗算法<sup>[19]</sup>,即MODIS 1km地表温度产品MOD11\_L2的获取算法的公式如下:

$$T_s = \left( A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left( B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} - T_{32}}{2} + C \quad (1)$$

式中 $T_{31}$ 、 $T_{32}$ 分别为MODIS 31、32波段亮度温度; $\varepsilon$ 为31、32两通道地表比辐射率平均值,即 $\varepsilon = 0.5 \times (\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$ ;  $\Delta\varepsilon$ 为两通道地表比辐射率的差值,即 $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{31} - \varepsilon_{32})$ ;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $C$ 分别为分裂窗算法系数。

该算法考虑了大气水汽含量和观测角度的变化。这些系数由不同角度、不同水汽含量、不同大气下边界温度,不同地表温度和大气下边界温度差值的样本数据独立分析拟合获得。具体应用时根据算法提供的系数查找表查找获得。

算法中的比辐射率数据基于地表覆盖类型的比辐射率匹配法<sup>[4]</sup>获得,即根据地表覆盖类型的动态和季节因素,将全球分为14种“比辐射率类型”,每种比辐射率类型在MODIS的31、32波段对应一个比辐射率值(根据自然样本观测和模型模拟获得),应用时根据影像中每个像元的地表覆盖类型确定对应的比辐射率值。在该方法中,裸地的比辐射率数据采用固定值,未考虑土壤含水量对土壤比辐射的影响。

### 2.2 Landsat地表温度反演的单窗算法

覃志豪等提出的针对Landsat第6波段(TM6)的地表温度反演单窗算法公式为<sup>[18]</sup>:

$$T_s = \frac{1}{C} [a(1-C-D) + (b(1-C-D) + C + D)T_0 - DT_a] \quad (2)$$

其中:  $C = \varepsilon\tau$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau]$$

式中  $a = -67.355\ 351$ ;  $b = 0.458\ 606$ ;  $\varepsilon$  为地表比辐射率;  $\tau$  为大气透射率, 主要通过其与大气水分含量的线性关系公式进行估算;  $T_6$  为 TM6 的星上亮温;  $T_a$  为大气平均作用温度, 由近地面 (一般为 2m) 处气温  $T_0$  (单位为 K) 线性估算。

方法中, 地表比辐射率  $\varepsilon$  的获取通过下式<sup>[20]</sup>进行估计:

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_s \varepsilon_s + d\varepsilon \quad (3)$$

其中:  $R_v = 0.933\ 2 + 0.058\ 5 P_v$

$$R_s = 0.990\ 2 + 0.106\ 8 P_v$$

$$P_v = [(NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)]^2$$

式中  $R_v$  和  $R_s$  分别是植被和裸土的温度比率, 可以通过植被覆盖率  $P_v$  估算得到,  $P_v$  由归一化植被指数 (NDVI) 估计而得; 植被比辐射率  $\varepsilon_v$  和土壤比辐射率  $\varepsilon_s$  设定为常值, 即  $\varepsilon_v = 0.986$ ,  $\varepsilon_s = 0.972$ ; 在地面相对较为平整的情况下, 通常设定  $d\varepsilon = 0$ , 在地面高低相差较大的情况下,  $d\varepsilon$  则根据植被覆盖率进行简单估计<sup>[21]</sup>。

### 2.3 考虑土壤含水量的比辐射率获取方法

如上文所述, 通用分裂窗算法和单窗算法都将土壤比辐射率设为常值而没有考虑土壤水分的影响。本研究对 Mira 等<sup>[15]</sup>建立的比辐射率与土壤水分的关系模型进行了改进。

Mira 等通过控制试验<sup>[15, 22]</sup>, 针对不同质地的 14 个土壤样本, 利用高精度 CE312 多通道 (8~13.3 $\mu\text{m}$ , 8.3~9.3 $\mu\text{m}$ , 10.2~11.3 $\mu\text{m}$ , 11.5~12.4 $\mu\text{m}$ ) 热红外辐射计, 通过双盖变换法 (the two-lid variant of the Box method) 观测了不同含水量情况下土壤比辐射率随土壤水分的变化, 得到了比辐射率与土壤含水量的

对数模型:

$$\varepsilon_i = a_i + b_i \theta_v + c_i \ln(\theta_v) \quad (4)$$

式中  $i$  为 CE312 不同的通道;  $\theta_v$  为土壤的体积含水量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为线性回归系数, Mira 给出了不同通道、不同土壤质地对应的不同系数;  $\varepsilon_i$  为通道比辐射率。

本文参考公式 (4), 给出了不同土壤质地, 不同通道的各系数值 (见表 1)。其中 MODIS 的 31、32 通道的波长范围与 CE-312 的通道 3 (10.2~11.3 $\mu\text{m}$ )、通道 2 (11.5~12.4 $\mu\text{m}$ ) 相似, TM/ETM+ 的第 6 波段的波长范围与 CE-312 的通道 1 (8.0~13.3 $\mu\text{m}$ ) 相似, 因此回归系数分别采用通道 3、通道 2 和通道 1 的回归系数。

## 3 研究区概况和数据来源

### 3.1 研究区概况

本研究基于 Soil Moisture Experiment 2004 (SMEX04) 实验开展。该实验是北美季风试验 (NAME) 的一部分, 试验区位于美国的亚利桑那州 Arizona (AZ) 和墨西哥的索诺拉 Sonora (SO)。本文选择 Arizona (AZ) 试验区 (31°25'N-32°70'N, 109°43'W-110°14'W) 为研究区。该研究区的植被覆盖相对稀疏<sup>1)</sup>, 具有较大面积裸土的稀疏灌木、稀疏草地和稀疏树林覆盖率达到 95%。因此适合研究考虑土壤水分影响的裸土比辐射率方法对地表温度反演的影响。

### 3.2 数据来源

#### 3.2.1 SMEX04 试验数据

SMEX04 试验开展时间为 2004 年 6-9 月。研究区具有实地观测的地表温度数据<sup>[23]</sup>、详细的土壤质

表 1 CE-312 不同通道、不同质地的土壤比辐射率与土壤含水量关系模型各系数值

Table 1 The regression coefficients of emissivity  $\varepsilon$  against water content  $\theta_v$  for each soil and each spectral band of the radiometer CE-312

CE-312 通道 对应传感器波段	$\varepsilon_i = a_i + b_i \theta_v + c_i \ln(\theta_v)$								
	Channel 1 (8~13.3 $\mu\text{m}$ )			Channel 2 (11.5~12.4 $\mu\text{m}$ )			Channel 3 (10.2~11.3 $\mu\text{m}$ )		
	TM/ETM+ 6			MODIS 32			MODIS 31		
	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
壤土	0.963	-	0.009	0.965	0.040	0.004	0.958	0.052	0.004
砂壤	0.987	-	0.016	0.980	0.020	0.010	0.970	0.030	0.009
粉壤	0.968	-	0.012	1.010	-0.050	0.019	1.004	-0.04	0.018
粘壤	0.970	-	0.012	1.023	-0.068	0.025	0.996	-0.034	0.016

1) [http://nsidc.org/data/amsl\\_validation/soil\\_moisture/smex04/about\\_smex04.html](http://nsidc.org/data/amsl_validation/soil_moisture/smex04/about_smex04.html).



2017年8月

地数据<sup>[24]</sup>、Polarimetric Scanning Radiometer (PSR) 航飞土壤水分数据<sup>[25]</sup>以及土地利用类型产品<sup>[26]</sup>和 NDVI 产品数据<sup>[27]</sup>。

(1) 土壤质地空间分布数据。图1为土壤质地图, 为表层 0~5cm 的土壤质地情况, 分辨率为 30m。在研究中, 用于比辐射率与土壤水分关系模型中系数的确定。

(2) 实测地表温度数据。研究区在 2004 年 6 月 23 日至 9 月 30 日利用远距点红外测温仪实地观测并经过校正获得地表温度数据, 观测时间间隔为 5min, 地表温度观测点 (Luckyhillsmet、Kendallmet、RG46、RG69、RG92、RG100) 的空间分布如图 1 黑色圆点所示。在研究中, 实测的地表温度数据用于 MODIS 和 Landsat 地表温度反演结果的验证。考虑到 MODIS 像元 1km 分辨率与地面点尺度观测存在较大的尺度差异, 为此本文对反演的地表温度进行地面验证时选择下垫面地表覆盖较为均一的观测

点作为验证点。本文以 TM 影像的 NDVI 数据的标准差作为衡量地表覆盖均一程度的标准。以地面验证点所在像元为中心, 计算 33×33 个 30m 分辨率的 NDVI 像元的标准差, 图 2 显示, 其中 4 个观测点 (Luckyhillsmet、RG46、RG92、RG100) 的 NDVI 标准差在 0.1 以内, 说明地表覆盖相对均一, 因此本文选这 4 个点作为 MODIS 地表温度反演的地面验证点。

(3) PSR 土壤水分空间分布数据。PSR 为机载微波成像辐射计, PSR/CX 通道与 Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) 的低频通道相似, 用于土壤水分含量的反演。研究区在 2004 年 8 月 5 日至 8 月 26 日期间的 9 天 (第 218 天、221 天、222 天、223 天、225 天、226 天、237 天、238 天、239 天) 里进行了航飞观测, 获取 Arizona 研究区 800m 空间分辨率的土壤水分数据。由于航飞期间所对应的 MODIS 影像数据有 3 天受云影响较大, 因此本研究选择第 221 天、222 天、223 天、226 天、238 天和 239 天共 6 天的 PSR 土壤水分数据, 用于 MODIS 和 Landsat 卫星考虑土壤水分影响的比辐射率的估算。

(4) 土地利用类型分布数据。SMEX04 试验提供了 2004 年研究区 30m 空间分辨率的土地利用类型分布数据。研究中利用该数据, 根据基于地表覆盖类型的比辐射率匹配法获取 MODIS 影像的比辐射率值, 用于与土壤水分和比辐射率的关系模型法获取的比辐射率值进行比较。

### 3.2.2 使用的 MODIS 数据

基于通用分裂窗算法, 利用 MODIS 反演地表

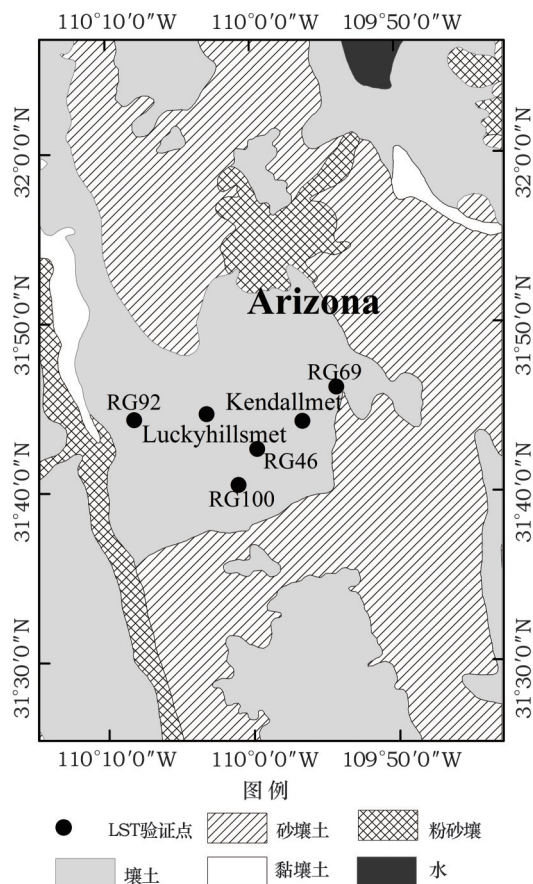


图1 研究区土壤质地与地表温度观测点

Figure 1 Soil texture and LST observation sites in study area

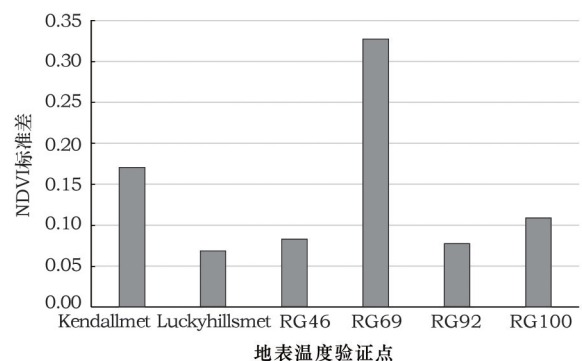


图2 研究区地表温度验证点的地表覆盖异质性

Figure 2 The land cover heterogeneity of land surface temperature sites in study area

温度使用的遥感数据主要有MOD021KM的31、32波段的辐射亮度数据,用于估算星上亮温;MOD03的传感器观测角度数据、MOD05\_L2的近红外大气水汽含量数据和MOD11\_L2的31、32波段比辐射率,用于确定公式(1)中的系数;MOD35\_L2的云掩膜数据,用于去除受云干扰的质量不好的像元;MOD13A2的NDVI数据,用于计算植被覆盖率,进而用于地表比辐射率的加权估算。在地表温度反演中,将数据统一空间分辨率为1km。

### 3.2.3 使用的 Landsat 数据

基于单窗算法,利用Landsat反演地表温度所用的数据主要有:Landsat7的ETM+第6波段辐射亮度数据;用于估算大气平均作用温度的气象站点地面2m空气温度数据<sup>[28]</sup>;SMEX04试验提供的NDVI产品数据以及大气透过率数据([http:// atmcorr.gsfc.nasa.gov/](http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/))。在地表温度反演中,通过插值或重采样统一空间分辨率为30m。

与SMEX04试验航飞观测期间相对应的云量较少的Landsat数据只有1天(第219天),因此,本研究选择这天的ETM+影像进行地表温度的反演。由于缺少219天PSR土壤水分数据,考虑到第218天-第219天期间研究区没有降水,因此研究中利用218天的PSR土壤水分数据进行土壤水分影响的比辐射率估算。

另外,Landsat卫星获取的第219天这一天的ETM+影像中,研究区的6个地表温度验证点只有3个(RG46、RG92和RG100)未受云的影响,因此选这3个点作为地表温度的验证点。

## 4 结果及分析

### 4.1 MODIS地表温度反演结果分析

为了评价考虑土壤水分对比辐射率的影响是否能够提高MODIS通用分裂窗算法地表温度的反演精度,本文利用三种不同的比辐射率获取方法通过MODIS通用分裂窗算法,反演研究区2004年第221、222、223、226、238和239天共6天的地表温度,并将三种方法反演的4个验证点的地表温度值同地面实测值(LST\_obser)进行对比分析。

这三种比辐射率获取方法分别为:

方法一(Emi\_GSW),基于地表覆盖类型的比辐射率匹配法获取比辐射率,即MOD11\_L2的比辐

射率产品的获取方法。

方法二(Emi\_Weighed),根据MOD11\_L2的基于地表覆盖类型的比辐射率匹配法获取不同地表覆盖类型对应的比辐射率值<sup>[4]</sup>,再根据植被覆盖率对植被和裸土比辐射率加权获得31、32波段的地表比辐射率,即加权法。

方法三(Emi\_addSM\_M),根据Mira等<sup>[15]</sup>提出的不同质地的土壤含水量和土壤比辐射率的经验公式获取裸土比辐射率,再根据植被覆盖率对植被和裸土比辐射率加权获得31、32波段的地表比辐射率。

研究中共反演得到6天的研究区地表温度反演结果。图3为选取的4个验证点在这6天时间中,几种方法的地表温度反演值与地面观测值的散点分布图。图中可见,考虑土壤水获取裸土比辐射率的方法三反演的地表温度(LST\_addSM\_M)较为均匀地分布在1:1对角线附近,而比辐射率未考虑土壤水分影响的方法一和方法二反演的地表温度(LST\_GSW,LST\_Weighed)大多分布在1:1对角线偏下方,可见,考虑土壤水分获取比辐射率反演的地表温度比未考虑土壤水分反演的地表温度更接近观测的真实地表温度。

表2是研究区第221、222、223、226、238和239天共6天,4个验证点地面实测地表温度与三种比

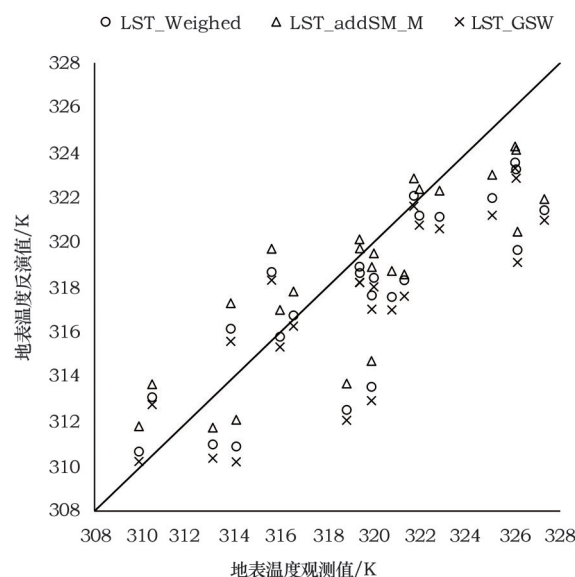


图3 研究区4个验证点6天地表温度反演值与地面观测值的散点分布

Figure 3 Scatterplots between LST retrieved from MODIS and ground LST for six days at the four sites

2017年8月

表2 三种方法获取的MODIS地表温度反演值误差统计

Table 2 Errors of land surface temperature retrieved from MODIS data with three different algorithms

时间	ME			RMSE		
	LST_GSW	LST_Weighed	LST_addSM_M	LST_GSW	LST_Weighed	LST_addSM_M
第221天	-1.81	-1.27	-0.42	2.25	1.77	1.52
第222天	-5.01	-4.50	-3.73	5.31	4.82	4.15
第223天	-0.70	-0.18	0.73	1.96	1.74	1.78
第226天	-0.71	-0.29	0.72	2.34	2.24	2.38
第238天	-4.33	-3.78	-2.62	5.24	4.77	3.91
第239天	-1.40	-0.84	0.35	2.56	2.28	2.12
Mean	-2.33	-1.81	-0.83	3.57	3.22	2.83

辐射率获取方法在MODIS通用分裂窗算法反演地表温度中的误差对比分析结果。其中,方法三反演的地表温度平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)最小,分别为-0.83K、2.83K;方法二获得的地表温度平均误差和均方根误差次之,为-1.81K、3.22K;而方法一反演的地表温度误差最大,平均误差为-2.33K,均方根误差为3.57K。可见,考虑土壤水分的比辐射率获取方法能够提高分裂窗算法地表温度的反演精度,在本研究中平均误差降低了1.0~1.5K,均方根误差降低了0.4~0.8K。

以第221天为例说明三种方法估算的比辐射率结果和地表温度结果的空间分布情况。图4为研究区在2004年第221天,利用上述几种方法获取的MODIS 31波段地表比辐射率空间分布图(白色部分为无效值)。图4显示,考虑土壤水分影响的方法

三获取的比辐射率明显低于不考虑土壤水分影响的方法一和方法二。方法二和方法三获取的比辐射率空间分布相似,但与方法一的MO11\_L2的比辐射率产品分布有较大差异,这是因为MO11\_L2的比辐射率产品只依赖于像元的地表覆盖类型,并未考虑混合像元植被覆盖率的影响。

图5为第221天由3种比辐射率获取方法反演得到的地表温度分布(白色部分为无效值)。图5显示,3种方法反演的地表温度在空间分布上相似,考虑土壤水分影响的方法三(Emi\_addSM\_M)反演的地表温度要比另两种方法反演的地表温度总体上偏高。

表3列出了文中三种比辐射率获取方法用于MODIS分裂窗算法反演第221天地表温度时,不同地表覆盖类型的比辐射率均值和地表温度均值对

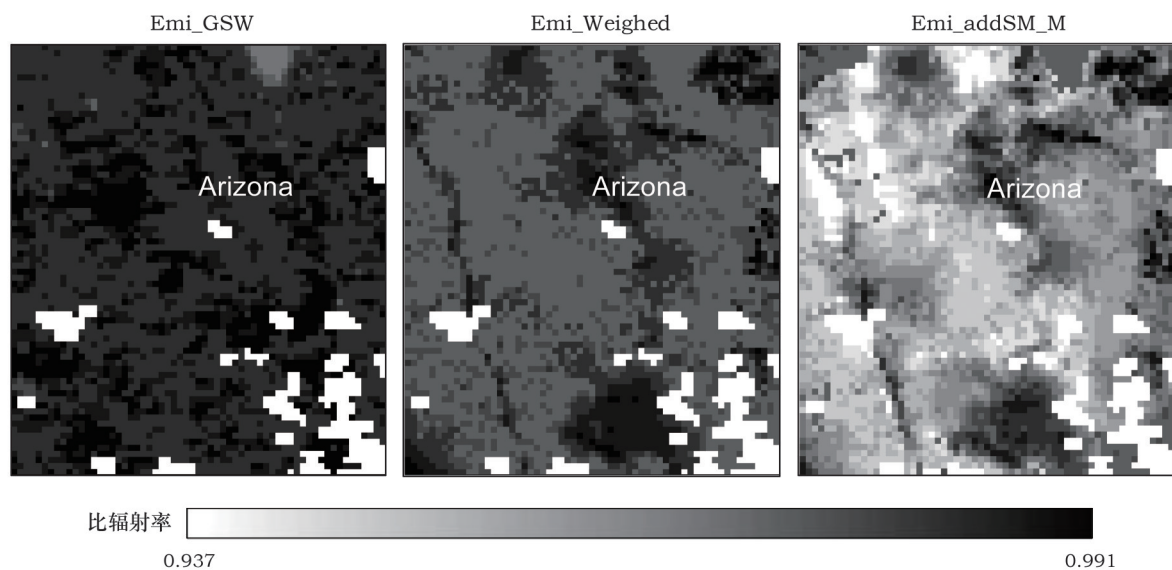


图4 2004年第221天三种方法获取的比辐射率空间分布

Figure Emissivity spatial distribution of the study area with different methods on 221th, 2004



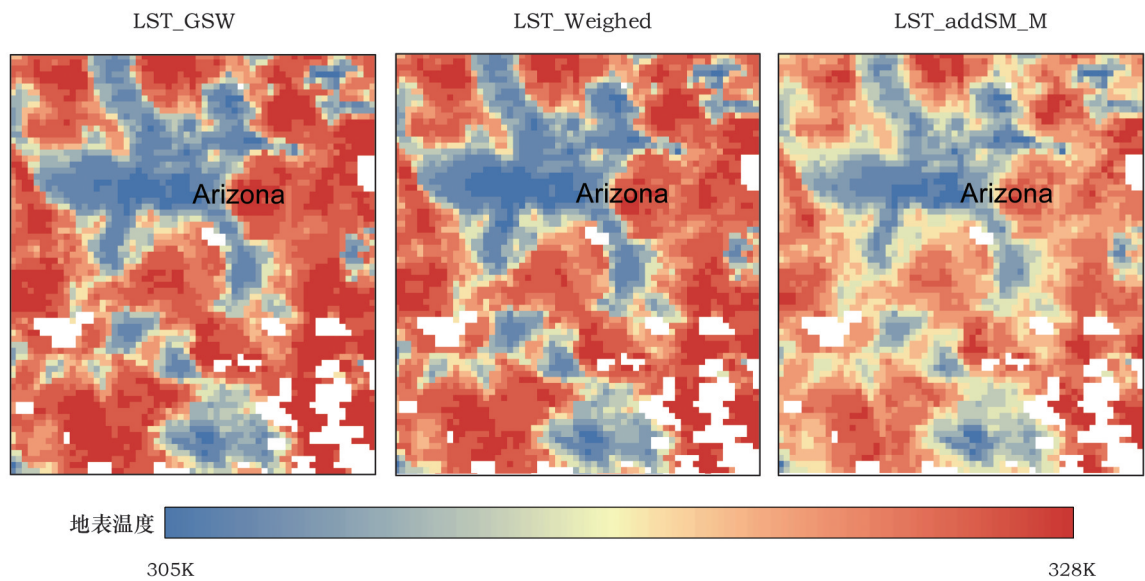


图5 2004年第221天研究区MODIS三种方法反演得到的地表温度分布

Figure 5 Land surface temperature spatial distribution of the study area retrieved from MODIS data with three different algorithms on 221th, 2004

表3 三种方法获取的研究区不同地表类型比辐射率值和地表温度值对比结果

Table 3 Comparison of emissivities and land surface temperatures retrieved in different surface types with three different methods in the study area

地表类型		裸土	灌木地	草地	稀疏林地	常绿林地
地表比辐射率	Emi_GSW	0.971	0.974	0.975	0.977	0.979
	Emi_Weighed	0.966	0.971	0.982	0.982	0.982
	Emi_addSM_M	0.950	0.969	0.980	0.979	0.978
地表温度/K	LST_GSW	319.56	314.48	314.39	314.00	311.90
	LST_Weighed	319.88	314.68	314.08	313.70	311.76
	LST_addSM_M	320.67	314.73	314.16	313.82	311.80

比情况。根据统计结果可以看出,裸土比辐射率最低,灌木地、草地和稀疏林地次之,常绿林地比辐射率最高;而地表温度是裸地最高,灌木地、草地和稀疏林地次之,常绿林地最低。比较三种方法获取的比辐射率和地表温度发现,考虑土壤水分影响获取的裸土比辐射率比另外两种方法低0.016~0.021,相应反演的地表温度却比另两种方法高0.8~1.0K;另外考虑土壤水分获取的灌木地比辐射率比另外两种方法低0.002~0.005,相应反演的地表温度比另外两种方法高0.1~0.7K。这也与空间分布图的结论一致。由此说明,方法一和方法二均高估了地表比辐射率,导致了更大的地表温度反演误差。

4.2 Landsat 地表温度反演结果分析

为了评价考虑土壤水分对比辐射率的影响是是否能够提高覃志豪 Landsat 单窗算法地表温度的反

演精度,本文采用两种不同比辐射率获取方法进行研究区 2004 年第 219 天地表温度的反演,最后将两种方法反演的三个验证点的地表温度值同地面实测值(LST\_obser)进行对比分析。

两种比辐射率获取方法分别为:

方法一(Emi\_Qin),根据覃志豪的比辐射率获取方法,将植被比辐射率、裸土比辐射率以及利用 NDVI 得到的植被覆盖率代入地表比辐射率获取公式(3),其中裸土比辐射率未考虑土壤水分的影响<sup>[20]</sup>;

方法二(Emi\_addSM\_L),在覃志豪的比辐射率获取方法基础上,根据 Mira 等<sup>[15]</sup>提出的不同质地的土壤含水量和土壤比辐射率的经验公式获取裸土比辐射率<sup>[20]</sup>。

表 4 列出了文中两种比辐射率获取方法用于 TM/ETM+单窗算法反演第 219 天地表温度时,不同

2017年8月

表4 两种方法获取的不同地表类型比辐射率值和地表温度值对比结果

Table 4 Comparison of emissivities and land surface temperatures retrieved in different surface types with two different methods

	地表类型	裸土	灌木地	草地	稀疏林地	常绿林地
地表比辐射率	Emi_Qin	0.972	0.982	0.974	0.974	0.977
	Emi_addSM_L	0.931	0.969	0.960	0.940	0.957
地表温度/K	LST_Qin	305.71	306.01	304.90	303.22	301.63
	LST_addSM_L	307.97	306.67	305.70	305.04	302.69

地表覆盖类型的比辐射率均值和地表温度均值对比情况。根据统计结果比较两种方法获取的比辐射率和地表温度发现,考虑土壤水分影响获取的裸土比辐射率比未考虑土壤水分影响获取的比辐射率低0.04,相应反演的地表温度却比另一种方法高2.2K;另外,考虑土壤水分影响的灌木地、草地和林地比辐射率比未考虑土壤水分影响获取的比辐射率低0.013~0.034,相应的反演的地表温度比另外一种方法高0.5~1.8K。

表5是第219天,3个验证点两种地表比辐射率获取方法在ETM+反演地表温度中的误差对比分析结果。结果表明,考虑土壤水分含量的比辐射率获取方法(方法二,Emi\_addSM\_L)在反演地表温度时的误差总体相对较小,平均误差为0.49K,均方根误差为1.69K;而未考虑土壤水分影响的方法一(Emi\_Qin)获取的比辐射率反演地表温度的误差总体较大,平均误差为-1.21K,均方根误差为2.52K。可见,考虑土壤水分的比辐射率获取方法能够提高单窗算法地表温度的反演精度,在本研究中平均误差降低了0.7K,均方根误差降低0.9K。由此说明,在本研究区方法一高估了地表比辐射率,导致了更大的地表温度反演误差。

上述结果表明,在植被稀疏地区,考虑土壤水

分影响获取土壤比辐射率后能够提高MODIS通用分裂窗算法和TM/ETM+单窗算法的地表温度反演精度。根据本研究的结果,考虑土壤水分影响获取比辐射率进而通过MODIS通用分裂窗算法反演的地表温度平均误差降低了1.0~1.5K,均方根误差降低了0.4~0.8K;另外,考虑土壤水分影响获取比辐射率进而通过TM/ETM+单窗算法反演的地表温度平均误差降低了0.7K,均方根误差降低了0.9K。

## 5 敏感性分析

由于本文使用的考虑土壤水分的比辐射率方法需要土壤水分数据作为输入参数,而遥感反演的土壤水分数据往往存在误差,因此有必要确定这种考虑土壤水分影响的比辐射率方法在反演地表温度时对土壤含水量数据的敏感性。若敏感性较高,则应用此方法时土壤水分数据的误差就会导致地表温度反演较大的误差;反之,则即使土壤水分有误差也不会对地表温度反演结果造成很大的影响。

针对MODIS通用分裂窗算法,以第221天的数据为例,首先提取植被覆盖率在0~20%之间的像元,这是由于考虑土壤水分影响的比辐射率方法对裸土和植被稀疏区更有针对性。然后计算每个像元点在其他输入参数( $v_{za}$ (传感器观测角度)、 $watervapor$ (大气水汽含量)、 $VFC$ (植被覆盖率)、 $T_{31}$ 和 $T_{32}$ (31和32波段亮温数据)、土壤质地)不变的情况下,土壤含水量 $\theta_v$ 在给定范围内的变化所引起的比辐射率和地表温度的变化,将图像范围内所有像元变化的平均值作为土壤含水量不确定性所带来的算法反演误差,分析结果见表6。

表6显示:如果土壤含水量变化在 $\pm 0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 以内,所引起的MODIS31、32波段比辐射率平均绝对误差在 $\pm 0.005$ 以内,地表温度平均绝对误差在 $\pm 0.3\text{K}$ 以内,影响较小;当土壤含水量变化超过 $\pm 0.2\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时,引起的MODIS31、32波段比辐射率

表5 研究区在2004年第219天两种方法获取的ETM+地表温度反演值误差

Table 5 Errors of land surface temperature retrieved at the four sites from ETM+ data with two different algorithms on 219th,

	2004 in the study area (K)		
	LST_obser	LST_Qin	LST_addSM_L
RG46	305.90	305.02	306.99
RG92	307.28	308.60	309.38
RG100	305.67	301.61	303.94
ME		-1.21	0.49
RMSE		2.52	1.69



表6 土壤含水量的变化引起的MODIS比辐射率和地表温度平均误差,以研究区2004年第221天数据为例

Table 6 The average error of emissivity and LST (MODIS)caused by the changes of soil moisture content, illustrated by the data of the study area on 221th,2004

输入参数	变化幅度	引起的MODIS第	引起的MODIS第	引起的地表温度
		31波段比辐射率	32波段比辐射率	平均误差
		平均误差	平均误差	/K
$\theta_v(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	+0.20	0.016	0.015	-0.94
	+0.16	0.014	0.013	-0.80
	+0.12	0.011	0.011	-0.64
	+0.08	0.008	0.008	-0.48
	+0.04	0.005	0.005	-0.28
	-0.04	-0.005	-0.005	0.27
	-0.08	-0.010	-0.010	0.52
	-0.12	-0.013	-0.013	0.58
	-0.16	-0.016	-0.017	0.75

平均绝对误差达到±0.016,地表温度平均绝对误差接近1.0K。目前土壤水分遥感产品的精度在±0.04 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>以内<sup>[29-31]</sup>,在此精度内本文使用的这种考虑土壤水分的比辐射率获取方法对地表温度反演的影响较小。

为了更加直观地分析土壤含水量的变化所引起的MODIS31、32波段比辐射率和地表温度的变化,随机选取第221天数据的一个像元点,控制其他输入参数固定不变(表7),而土壤含水量变化范围为(0.02~0.45)cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,通过MODIS分裂窗算法反演得到地表温度的变化。图6为MODIS31、32波段比辐射率和地表温度随土壤含水量的变化趋势。图6可以看出,随着土壤含水量的增加,MODIS31、32波段比辐射率呈上升趋势,反演的地表温度呈下降趋势。土壤含水量由0.02变化到0.45,比辐射率

表7 选取像元点的各输入参数值

Table 7 Input parameters of selected pixel

输入参数	参数值
$\theta_v/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.020~0.450
$Vza/^\circ$	26.470
$Watervapor/\text{cm}$	3.114
$T_{31}/\text{K}$	307.569
$T_{32}/\text{K}$	305.468
$VFC$	0.200
土壤质地	壤土

注:  $Vza$ 为传感器观测数据;  $Watervapor$ 为大气水汽含量。

增加了约0.025,相应地表温度下降了约2.0K,尤其在土壤含水量变化初期((0.02~0.10)cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),比辐射率增加最为明显,变化接近0.010,地表温度变化也最为显著,约为0.6K。

针对ETM+单窗算法,以研究区第219天的数

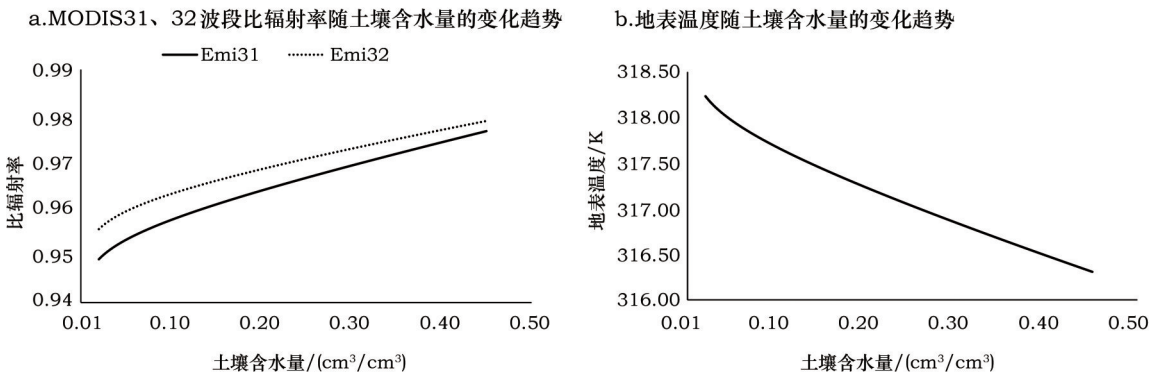


图6 MODIS31、32波段比辐射率以及地表温度随土壤含水量的变化趋势:以研究区2004年第221天数据的一个像元为例

Figure 6 The changing trend diagrams of emissivity for MODIS band 31 ,band 32 and LST with various soil moisture contents, illustrated by one pixel of the study area data on 221th,2004

2017年8月

据为例,选取地表覆盖率小于20%的像元,计算每个像元点在其他输入参数(地面2m气温数据 $T_0$ 、ETM+第6波段辐射亮温数据 $T_b$ 、地表覆盖率 $VFC$ 、大气透过率 $\tau$ 、土壤质地)不变的情况下,土壤含水量 $\theta_v$ 在给定范围内的变化所引起的比辐射率和地表温度的变化,并对变化求平均,作为土壤含水量不确定性所带来的算法反演误差,表8为分析结果。

结果显示,土壤含水量变化在 $\pm 0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以内,引起的ETM+第6波段比辐射率平均绝对误差在 $\pm 0.01$ 左右,地表温度平均绝对误差在 $\pm 0.8 \text{ K}$ 以内,在地表温度反演算法允许的范围以内;当土壤含水量变化达到 $\pm 0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,引起的ETM+第6波段比辐射率平均绝对误差在 $\pm 0.015$ 以上,地表温度平均绝对误差在 $\pm 1 \text{ K}$ 左右。

图7为第219天数据中随机选取的研究区的一个像元点,控制其他输入参数固定不变(表9),只有土壤含水量由0.02变化到0.45,通过单窗算法得到的ETM+第6波段比辐射率和地表温度随土壤含水量的变化趋势。从图7可以看出:土壤含水量由0.02变化到0.45,比辐射率增加了约0.04,相应地表温度变化了约3.0K,在土壤含水量变化初期(0.02~0.10),比辐射率增加最为明显,变化接近0.02,地表温度变化也最为显著,约为1.5K。

根据上述分析可知:无论是MODIS通用分裂窗算法还是TM/ETM+单窗算法,利用考虑土壤水分影响的比辐射率获取方法反演地表温度时,如果土壤含水量数据的误差在目前土壤水分反演精度的 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以内,其所反演的地表温度带来的

绝对误差都在1.0K以内(其中MODIS误差为0.3K,ETM+误差为0.8K),影响较小。但当土壤水分精度只能达到 $0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,这种误差对比辐射率考虑土壤水分影响的ETM+单窗算法地表温度的反演影响较大,达到1.0K;当土壤水分精度只能达到 $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,会造成比辐射率考虑土壤水分影响的MODIS通用分裂窗算法地表温度的反演1.0K的误差。

表8 土壤含水量的变化引起的ETM+比辐射率和地表温度平均误差:以研究区2004年第219天数据为例

Table 8 The average error of emissivity and LST (MODIS) caused by the changes of soil moisture content, illustrated by the data

of the study area on 219th, 2004			
输入参数	变化幅度	引起的ETM+第6波段 比辐射率平均误差	引起的地表温 度平均误差/K
$\theta_v/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	+0.12	0.020	-1.24
	+0.08	0.016	-0.97
	+0.04	0.010	-0.61
	-0.04	-0.012	0.73
	-0.08	-0.019	1.17
	-0.12	-0.021	1.30

表9 选取像元点的各输入参数值

Table 9 Input parameters of selected pixel

输入参数	变化范围
$\theta_v/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.02~0.45
$\tau$	0.61
$T_0/^\circ\text{C}$	25.00
$T_b/\text{K}$	305.05
$VFC$	0.20
土壤质地	砂壤土

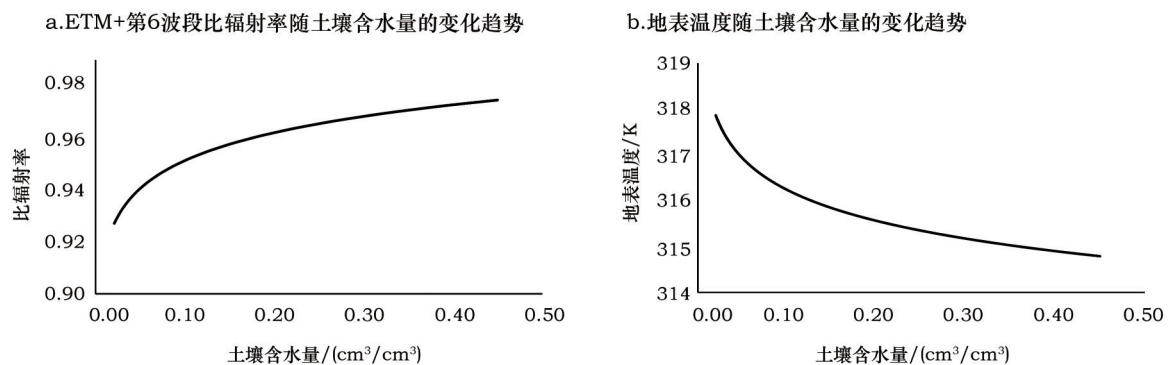


图7 ETM+第6波段比辐射率以及地表温度随土壤含水量的变化趋势:以研究区2004年第219天数据的一个像元为例

Figure 7 The changing trend diagrams of emissivity for ETM+ band 6 and LST with various soil moisture contents illustrated by one pixel of the study area data on 219th, 2004

## 6 结论与讨论

本文通过比较基于土壤比辐射率与土壤水分关系模型的比辐射率修正方法,与比辐射率匹配法和 NDVI/植被覆盖率加权法对 MODIS 通用分裂窗算法和 Landsat 单窗算法反演地表温度的影响,研究土壤比辐射率与土壤水分关系模型的比辐射率修正方法对提高地表温度反演精度的作用。结果表明:

(1)无论是 MODIS 还是 TM/ETM+, 比辐射率未考虑土壤水分影响反演地表温度的精度都低于考虑土壤水分的方法。MODIS 的两种未考虑土壤水分影响的比辐射率方法所反演的地表温度平均误差分别为-1.81K、-2.33K,均方根误差分别达到 3.22K、3.57K,ETM+比辐射率未考虑土壤水分影响所反演的地表温度平均误差和均方根误差为-1.21K、2.52K。而考虑土壤水分影响后,MODIS 地表温度反演平均误差和均方根误差分别为-0.83K、2.83K,平均误差降低了 1.0~1.5K,均方根误差降低了 0.4~0.8K;ETM+地表温度反演的平均误差和均方根误差分别为 0.49K、1.69K,平均误差降低了 0.7K,均方根误差降低了 0.9K。由此可见,基于土壤比辐射率与土壤水分关系模型的比辐射率修正方法能够提高地表温度的反演精度。

(2)研究中也针对几种不同方法获取的不同地表覆盖类型的比辐射率和温度进行对比分析,无论是 MODIS 还是 TM/ETM+,考虑土壤水分影响获取的裸土比辐射率比未考虑土壤水分影响获取的比辐射率低,相应反演的地表温度则较高,由此说明,在本研究区未考虑土壤水分影响高估了地表比辐射率,导致了更大的地表温度反演误差。

(3)通过对基于土壤比辐射率与土壤水分关系模型的比辐射率修正方法中土壤含水量数据的敏感性分析发现,如果土壤含水量数据的误差在  $0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$  以内,其对所反演的地表温度带来的绝对误差都在 1.0K 以内(其中 MODIS 误差为 0.3K,ETM+误差为 0.8K),在算法允许的误差范围内。因此,依据目前微波遥感反演土壤水分能够达到的  $0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$  的精度,土壤水分数据本身的误差对本文使用的考虑土壤水分获取地表比辐射率进而反演地表温度的方法影响不明显。

受土壤水分空间数据分辨率的限制,本文使用的考虑土壤水分的比辐射率获取方法,即土壤水分与比辐射率的关系模型法,在地表温度反演的应用中会受到限制,这是这种方法的一个局限。因此避免直接使用土壤水分空间数据,发展土壤水分间接表达方法融入至地表比辐射率的模型中是今后拟开展的工作。

## 参考文献(References):

- [1] 江东,王乃斌,杨小唤,等. 地面温度的遥感反演:理论、推导及应用[J]. 甘肃科学学报,2001,13(4):36-40. [Jiang D, Wang N B, Yang X H, et al. Retrieval of land surface temperature: Theory, deduction and application[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2001, 13(4): 36-40.]
- [2] 甘甫平,陈伟涛,张绪教,等. 热红外遥感反演陆地表面温度研究进展[J]. 国土资源遥感,2006,(1):6-11. [Gan F P, Chen W T, Zhang X J, et al. The progress in the study of thermal infrared remote sensing for retrieving land surface temperature[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006, (1): 6-11.]
- [3] 李琴,陈曦,包安明,等. 干旱/半干旱区 MODIS 地表温度反演与验证研究[J]. 遥感技术与应用,2008,23(6):643-647. [Li Q, Chen X, Bao A M, et al. Validation of land surface temperatures retrieving in arid/semi-arid regions[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(6): 643-647.]
- [4] Snyder W C, Wan Z M, Zhang Y, et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 (14): 2753-2774.
- [5] Li Z L, Petitcolin F, Zhang R H. A physically based algorithm for land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2000, 43(1): 23-33.
- [6] Peres L F, Dacamara C C. Land surface temperature and emissivity estimation based on the two-temperature method: Sensitivity analysis using simulated MSG/SEVIRI data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3-4): 377-389.
- [7] Jiang G M, Li Z L, Nerry F. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4): 326-340.
- [8] Peres L F, Dacamara C C, Trigo I F, et al. Synergistic use of the two-temperature and split-window methods for land-surface temperature retrieval[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(16): 4387-4409.



2017年8月

- [9] Wang N, Wu H, Nerry F, *et al.* Temperature and emissivity retrievals from hyperspectral thermal infrared data using linear spectral emissivity constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(4): 1291-1303.
- [10] Van De Griend A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1119-1131.
- [11] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(2): 256-266.
- [12] 田静, 米素娟, 何洪林, 等. 土壤水分及粗糙度对比辐射率的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(4): 561-569. [Tian J, Mi S J, He H L, *et al.* Effect of soil water content and soil roughness on the thermal infrared emissivity of bare soil[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(4): 561-569.]
- [13] 肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 373-378. [Xiao Q, Liu Q H, Li X W, *et al.* A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(5): 373-378.]
- [14] Xu L, Wang Q. Retrieval of soil water content in saline soils from emitted thermal infrared spectra using partial linear squares regression[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 14646-14662.
- [15] Mira M, Valor E, Caselles V, *et al.* Soil moisture effect on thermal infrared (8-13- $\mu\text{m}$ ) emissivity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2251-2260.
- [16] Sanchez J M, French A N, Mira M, *et al.* Thermal infrared emissivity dependence on soil moisture in field conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4652-4659.
- [17] Wang H S, Xiao Q, Li H, *et al.* Investigating the impact of soil moisture on thermal infrared emissivity using ASTER data[J]. *Geoscience & Remote Sensing Letters IEEE*, 2015, 12(2): 294-298.
- [18] 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[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [19] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892-905.
- [20] 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[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32. [Qin Z H, Li W J, Xu B, *et al.* The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. *Remote Sensing for Land Resources*, 2004, 16(3): 28-32.]
- [21] Sobrino J A, Jiménez- Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [22] Mira M, Valor E, Boluda R, *et al.* Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils. Implication for land surface temperature determination[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(F4): 117-131.
- [23] Keefer T, Goodrich D, Moran S. SMEX04 Surface Temperature Data: Arizona[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [24] Cosh M H, White W A. SMEX04 Soil Characteristics Data: Arizona[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [25] Jackson T J, Bindlish R, Gasiewski A J, *et al.* SMEX04 Aircraft Polarimetric Scanning Radiometer (PSR) Data[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [26] Hunt E R, Jackson T J, Yilmaz M T. SMEX04 Land Use Classification Data[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [27] Cosh M, Hunt E R, Jackson T J, *et al.* SMEX04 Landsat TM/ETM + NDVI and NDWI[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [28] Keefer T, Goodrich D, Moran S. SMEX04 Meteorological Network Data: Arizona[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 2009.
- [29] Zeng J, Chen K S, Bi H, *et al.* A preliminary evaluation of the SMAP radiometer soil moisture product over United States and Europe using ground-based measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4929-4940.
- [30] Sanchez N, Martinez-Fernandez J, Scaini A, *et al.* Validation of the SMOS L2 soil moisture data in the REMEDHUS network (Spain) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1602-1611.
- [31] Jackson T J, Bindlish R, Cosh M H, *et al.* Validation of soil moisture and ocean salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the U.S.[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1530-1543.

# Application of the emissivity method considering the effects of soil moisture for retrieving land surface temperature

DONG Xue<sup>1,2</sup>, TIAN Jing<sup>1</sup>, WU Hua<sup>3</sup>, LIU Suhua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The emissivity of natural surfaces is a major parameter determining land surface temperature (LST). In addition, the surface cover type influences emissivity and soil moisture is closely related to emissivity. Here, methods for obtaining the emissivity of bare soil using the MODIS generalized split-window algorithm and Landsat mono-window algorithm were improved. According to the empirical logarithm linear formula between soil moisture and soil emissivity, based on remote sensing data and ground observation data from the Soil Moisture Experiment 2004 (SMEX04) - Arizona study area, we discuss if the accuracy of land surface temperature retrieval can be improved when surface emissivity acquisition methods consider effects of soil moisture. We found that the accuracy of both improved algorithms considering soil moisture effects were better than algorithms not considering soil moisture effects. The mean error of LST retrieved by the improved MODIS generalized split-window algorithm reduced 1.0~1.5K, and the root mean square error reduced by 0.4~0.8K. Moreover, the mean error of LST retrieved by the improved Landsat mono-window algorithm reduced by 0.7K, and the root mean square error reduced by 0.9K. As a whole, the accuracy of land surface temperature retrieval can be improved when surface emissivity acquisition methods consider the effects of soil moisture, especially areas where vegetation coverage is less. Sensitivity analysis results show that the influence of remote sensing soil moisture data with a 0.04cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> error on LST retrieval algorithms considering soil moisture effects is not obvious.

**Key words:** MODIS generalized split-window algorithm; Landsat TM/ETM+ mono-window algorithm; emissivity; SMEX04; Land surface temperature; soil moisture