

基于 EOS/MODIS 数据的裸土多层土温遥感反演研究——以陕西省为例

郭倩, 沈润平[☆], 荣裕良 (南京信息工程大学遥感学院, 江苏南京 210044)

摘要 以 EOS/MODIS 为数据源, 采用地表温度(LST)遥感信息模型耦合土壤温度 CERES 模型反演多层裸土土温。结果表明: 土壤温度的模拟值与实测值的变化趋势比较一致, 不同土层反演值和地面观察值的相关性均达极显著水平; 5~60 cm 土层土壤温度的平均绝对误差随土层加深逐渐降低, 40~60 cm 土层土壤温度的平均绝对误差降至 1℃ 以内, 但 80、160 cm 两层的反演精度误差则相对较大, 说明结合其他模型, 遥感能够反演一定深度土层的土壤温度, 并达到一定精度。

关键词 地表温度(LST); 土壤温度; CERES 模型

中图分类号 S127 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)20-08849-03

Inversion Study on the Bare Soil Layers Temperature Remote Sensing Based on EOS/MODIS Images

GUO Qian et al (College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

Abstract The temperature of different bare soil layers in Shaanxi was retrieved with split windows method of LST coupled with CERES Model based on EOS/MODIS images. The results showed that the change trend of predicted values and measured values of soil temperatures were relatively consistent. The relationship between the soil temperatures retrieved and the measured reached extremely significant level. The average absolute errors decreased from 5 cm to 60 cm deep in the soil. It was below 1℃ at 40 and 60 cm soil layers, but relatively higher at 80 and 160 cm layers. Therefore, the temperature of some deep soil layers could be retrieved by remote sensing coupled with other models to some extent in precision.

Key words Land surface temperature (LST); Soil temperature; Crop Environment Resource Synthesis (CERES) Model

土壤温度是农田作物管理和气象气候变化研究的重要物理参量之一。传统的土壤温度数据的获取方法是采用实地测量, 费时费力, 且难以满足应用的要求。为此, 国内外学者发展了直接由气温或土表温度反演土壤温度的多种模式, 如 McCumber 等(1981)提出的土壤温度和容积湿容量的预报方程^[1]; Dickinson(1988)总结 Deardorff(1978)的土壤温度强迫恢复法^[2]; 孙菽芬等在干燥土壤模式基础上发展起来的 5 层土壤模式^[3]; 周锁铨等在以往工作的基础上, 以 BATS 模式框架为平台, 建立一个 7 层土壤温度模拟模式^[4]; 张世熔(2002)在区域水氮研究中, 采用了 Crop Environment Resource Synthesis (CERES)模型^[5]等。这些模拟模型的研究极大地提高了土壤温度反演精度, 但由于受气象观察站点布点有限的限制, 而土壤空间变化较大的特点的影响, 以点为本的上述模型, 难以满足应用中对地理空间连续温度分布规律的需求, 为此, 笔者在借鉴前人的研究基础上, 探讨基于 MODIS 遥感图像将地表温度(LST)的定量反演模型^[6]耦合 CERES 模型^[5]来反演裸土区的土壤温度, 以期实现遥感反演深层土壤温度空间分布的目的。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 陕西省位于 E105°29'~111°15', N31°42'~39°35', 从南往北具有北亚热带湿润气候、暖温带半湿润气候和暖温带、温带半干旱气候的特征, 全省年均气温 9~16℃, 自南向北、自东向西递减。南部为秦巴山地, 气候湿润, 以森林覆盖为主; 北部为黄土高原, 遍布丘陵、沟川地, 水土流失严重, 植被稀少, 以裸土和农耕地为主; 中部为渭、泾、洛等河流冲击形成的关中平原, 土壤肥沃, 以农耕地和城镇建设用地为主。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 遥感数据选择。 为了研究与验证, 试验选择晴朗少云的天气, 且前后数天内无大面积降雨天气发生的遥感图像资料, 以便地表和土壤温度具有一定的稳定性, 试验选用了陕西省 2006 年冬季 1 月 4~8 日 12:00 前后连续 5 天 MODIS 1B HDF 格式遥感图像, 利用的 MODIS 31 (10.780~11.280 μm) 波段和 32 (11.770~12.270 μm) 波段反演地温, 同时还选用了第 1 (620~670 nm) 波段、第 2 (841~876 nm) 波段和第 19 (915~965 nm) 波段计算 NDVI 值和大气水汽含量 (w) 的值。

1.2.2 数据来源与处理。 遥感资源来源于中国卫星遥感中心服务网, 其他气象地面观测数据来源于中国气象科学数据共享服务网。笔者采用遥感图像处理软件 ENVI 4.3 提供的大气校正工具 Thermal Atm Correction 来去除大气影响, 进行大气校正; 此外, MODIS 数据产品包含了每个像元的地理坐标信息, 图像几何校正利用该软件所包含的专门用于 MODIS 数据几何校正模块 Georeference MODIS 1B, 选择坐标投影设置具体参数后完成 Bow-tie 处理和几何校正。并将 2006 年 1 月 8 日 12:00 土壤温度实测数据作为验证数据。

1.3 多层土温反演模型及方法 为反演裸土不同土壤深度的土壤温度, 首先选择土表温度遥感反演模型, 并优化参数, 反演出裸土地表温度。对于裸土来说, 由于地表没有植被影响, 此时, 地表温度可视为 0 cm 深的土壤温度, 然后, 结合热传导模型, 反演出不同土壤深度的土壤温度, 达到遥感反演多层土温的目的。

1.3.1 地表温度的反演。 目前, 分裂窗法是应用最广、最成熟的方法, 精度较高, 已公开发表的分裂窗算法有 17 种。其中, 覃志豪的算法在 6 个标准大气(热带标准大气、亚热带冬季和夏季标准大气、中纬度冬季和夏季标准大气以及美国 1976 年标准大气)情况下的地表温度反演精度均较高, 且算法较其他算法简单。为此, 笔者选用该算法进行地表温度的反演^[6]。

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121108); 江苏省“青蓝工程”和南京信息工程大学重点科研基金资助。

作者简介 郭倩(1981-), 女, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 研究方向: 陆面过程遥感与建模。☆通讯作者, 博士生导师, 教授, E-mail: rpshen@nuist.edu.cn。

收稿日期 2008-05-04

1.3.1.1 亮度温度(T_i)的计算^[6]。

$$T_i = K_{22}/\ln(1 + K_{11}/I_i) \quad (1)$$

式中, K_{11} 和 K_{22} 是常量, $K_{31,1} = 729.541636 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, $K_{31,2} = 1304.413871 \text{ K}$, $K_{32,1} = 474.684780 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, $K_{32,2} = 1196.978785 \text{ K}$; I_i 是MODIS第 i ($i = 31, 32$)波段的热辐射强度($\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), I_i 的计算可参考有关文献^[7]的辐射定标部分。

1.3.1.2 大气透过率的计算。对于MODIS数据地表温度反演,大气水汽含量可通过MODIS第2和19波段来反演,大气水汽含量的计算公式如下^[8-9]:

$$w = [(\alpha - \ln(\text{ref}19/\text{ref}2))/\beta]^2 \quad (2)$$

式中, w 是大气水汽含量(g/cm^2); α 和 β 是常量^[8-9], $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.651$; $\text{ref}19$ 和 $\text{ref}2$ 分别是MODIS第19和2波段的地面反射率。

因为大气透过率与大气水汽含量之间呈现接近线性的关系^[10-11],故可建立大气水汽含量与大气透过率 τ_i 之间的函数关系,方法参阅文献^[12]。

1.3.1.3 地表比辐射率的计算。MODIS影像的地表比辐射率的公式如下^[6,13]:

$$\varepsilon_i = P_v R_v \varepsilon_{iv} + (1 - P_v) R_s \varepsilon_{is} + d\varepsilon \quad (3)$$

式中, ε_i 是MODIS图像第 i ($i = 31, 32$)波段的地表比辐射率; ε_{iv} 和 ε_{is} ^[6,13]分别是植被和裸土在第 i 波段的地表比辐射率, P_v 是像元的植被覆盖率^[13],进行植被指数估算; R_v 和 R_s ^[6]分别是植被和裸土的辐射比率; $d\varepsilon$ 是热辐射相互作用校正,由植被和裸土之间的热辐射相互作用产生,可通过经验公式来估计^[6]:

$$d\varepsilon = 0.003796 \min(P_v, 1 - P_v) \quad (4)$$

其中,植被覆盖率的求解公式如下:

$$P_v = (NDVI - NDVI_s)/(NDVI_v - NDVI_s) \quad (5)$$

式中, $NDVI$ 是植被指数, $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别是茂密植被覆盖和完全裸土像元的 $NDVI$ 值。研究根据MODIS图像估算植被指数的数值^[15],即 $NDVI_v = NDVI_{\max} = 0.5$, $NDVI_s = NDVI_{\min} = 0.04$ 。

1.3.1.4 地表温度计算。基于MODIS数据的地表温度反演算法如下^[6]:

$$T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32} \quad (6)$$

式中, T_s 是地表温度(K), T_{31} 和 T_{32} 分别是MODIS第31和32波段的亮度温度。 A_0 、 A_1 和 A_2 均通过参数 τ_i 、 ε_i 演算获得^[6]。

1.3.2 地表温度与CERES模型的耦合。为了由气温或地表温度获得不同深度土层的温度,国内外学者开展了深入的研究,并建立了很多相关模型,其中CERES(Crop Environment Resource Synthesis)模型运算方便,参数确定相对其他模型较为简单,具有很强的实用性^[5],为此,笔者选用CERES模型耦合遥感信息模型,达到由裸土地表温度计算不同土壤深度土壤温度的目的。在CERES模型中,土壤剖面土温计算是根据气温等气象资料以及土温年变化的经验统计来估算^[5,14]。

设土壤剖面深度 z 处某天平均土温为 $T(z)$,笔者获得1月8日12:00前后时间段的平均土温,可由下式计算^[5,14]:

$$T(z) = T_{ay} + [A_{mp} \times \cos(A_{lx} + Z_d)]/2 + T_{rate} \times \exp(Z_d) \quad (7)$$

式中, T_{ay} 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); A_{mp} 是日均气温的年变幅($^{\circ}\text{C}$); Z_d 是土温随深度递减的因子; T_{rate} 为实际土表温度随时间的变率; A_{lx} 是计算日期相当于全年的弧度。

其中,土温随深度递减的因子:

$$Z_d = -Z/d_d \times 10 \quad (8)$$

式中, Z 是土层深度(cm); d_d 为土壤温度阻尼深度(cm),其计算方法见文献^[6]。

模拟计算第 K 天时的实际土表温度随时间的变率 T_{rate} 取值为计算时刻前5天(含当天)的土表实际温度(T_s)的滚动平均值与计算当天的理论土表温度(T_{nor})之差,即:

$$T_{rate}^k = (\sum_{i=k}^{k-4} T_s^i)/5 - T_{nor} \quad (9)$$

式中, T_s 为土表实际温度,由于该研究的是裸土土壤温度,没有植被的影响,土表温度可视为地表温度。所以,文中的 T_s 可利用遥感反演获得的地表温度值来估算。

在式(7)中,当土层深度为0cm时的土温即为土表温度。因 $Z = 0$, J_{date} 当天的土表理论温度(T_{nor})由式(7)得:

$$T_{nor} = T_{ay} + A_{mp} \times \cos(A_{lx})/2 \quad (10)$$

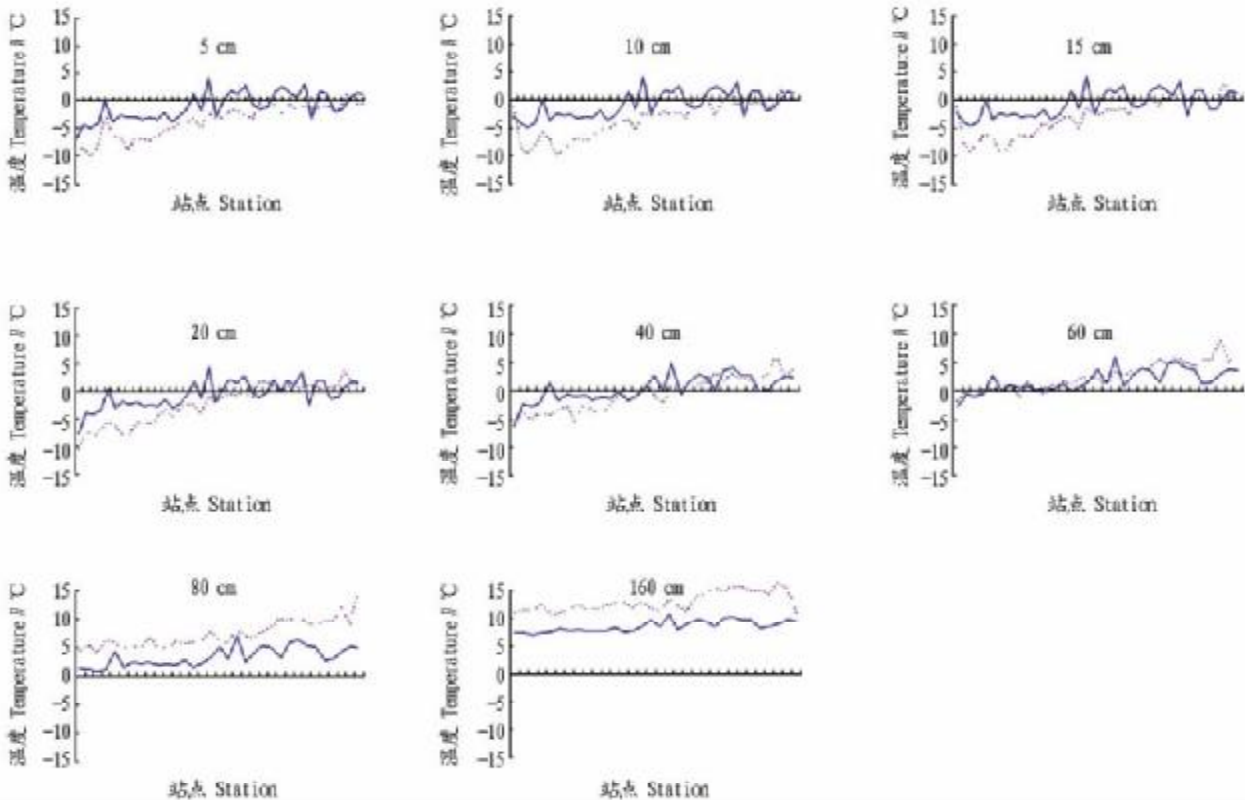
2 土壤温度的反演精度检验

研究选用陕西省冬季2006年1月4~8日连续5天MODIS遥感图像,选取NDVI在0~0.2的地区作为裸土区域,对亮温、大气透过率和比辐射率进行了计算,得出连续5天的地表温度,在此基础上耦合CERES模型反演出5、10、15、20、40、60、80和160cm不同土层的平均土壤温度。为了解土壤温度反演的精度,试验选取陕西省40个不同地点土壤不同深度观测数据进行检验。

结果表明(图1),反演值与实测值的变化趋势比较一致,且反演值与实测值的高值区和低值区基本吻合,反演结果达到一定精度。相关分析表明(表1),不同土层的土壤温度反演值与实测值差异均达极显著水平。5、10、15、20、40、60cm的土层土壤温度的平均绝对误差随土层加深逐渐降低,40和60cm土层土壤温度降至 1°C 以内,说明模型对40~60cm深的土壤温度反演精度较高,这与这些层次的土壤温度变化较为稳定、土质较为均匀有关;80和160cm深土层平均绝对误差最大,分别为 2.65 和 3.14°C ,说明模型对深度达到80cm的土层反演能力较差;5cm土层的反演误差也较大,达 2.20°C ,这可能与地表地物地形复杂,地表温度变化较大有关。

3 小结

结合CERES模型,研究利用遥感方法来获取不同深度土壤温度信息,对裸土区不同土壤的土壤温度估算进行了尝试,实现了裸土不同深度土壤温度空间分布的反演。结果表明:土壤温度的模拟值与实测值变化趋势比较一致,且反演值与实测值的高值区和低值区基本吻合;5、10、15、20、40、60cm土层的土壤温度的平均绝对误差随土层加深逐渐降低,在40和60cm土层土壤温度的平均绝对误差降至 1°C 以内,且不同土层反演值和地面观察值的相关性均达0.01的极显著水平,说明该研究所采用的遥感信息模型与CERES模型反演土壤温度具有一定的精确度。但是由于陆地表面更多的时间和地区是被植被所覆盖,因此,对于植被区的土壤温



注:实线表示反演值,虚线表示实测值。

Note: Real line stands for inversion value; dash line stands for measured value.

图 1 各层土壤温度反演值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison between inversion value and measured value of soil temperature in different layers

表 1 土壤温度反演结果与实测值之间的误差分析

Table 1 Errors analysis between inversion result and measured values of soil temperature

土壤深度 // cm	实测值平均值//°C	反演值平均值//°C	平均绝对误差//°C	相关系数
Soil depth	Average measured value	Average inversion value	Mean absolute error	Correlation coefficient
5	-1.08	-3.76	2.20	0.765**
10	-0.86	-3.55	1.93	0.646**
15	-0.64	-2.93	1.54	0.666**
20	-0.63	-2.42	1.16	0.738**
40	0.32	-0.51	0.83	0.707**
60	1.52	2.08	0.56	0.713**
80	2.79	6.03	2.65	0.648**
160	6.80	10.26	3.14	0.581**

注: * 表示为 0.05 的显著性水平, ** 表示为 0.01 极显著性水平。

Note: * and ** stand for 0.05 significant level and 0.01 extremely significant level, respectively.

度反演更为重要,另外,该研究对于 <20 cm 和 >80 cm 土层的反演精度还较低,其原因有待进一步分析,方法和模型需要进一步改善。

参考文献

[1] PIELKE R A. 中尺度气象模拟[M]. 张杏珍,译. 北京:气象出版社, 1990:208-426.
 [2] DICKINSON R E. The force-restore model for surface temperatures and its generalizations[J]. Climate, 1988, 10(11):1086-1097.
 [3] 孙毅芬,牛国跃,洪钟祥. 干旱及半干旱区土壤水热传输模式研究[J]. 大气科学, 1998, 22(1):1-10.
 [4] 周锁铨,张翠,王小宁,等. 多层土壤温度模拟及其检验[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2):200-209.
 [5] 张世榕. 基于 GIS 的区域水氮行为模拟与管理分析[D]. 北京:中国农业大学, 2002.
 [6] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4):64-71.
 [7] 刘磊. MODIS 数据地表温度反演及其在长江三角洲城市群热岛效应研究中的应用[D]. 南京:南京信息工程大学, 2007:17-18.

[8] 刘玉洁,杨忠东. MODIS 遥感信息信息处理原理与算法[M]. 北京:科学出版社, 2001.
 [9] KAUFMAN Y J, GAO B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5):871-884.
 [10] QIN Z, OLMO G D, KARNIELI A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D19):22655-22670.
 [11] 覃志豪, LI W, ZHANG W, 等. 单窗算法的基本大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2):37-43.
 [12] 丁莉东,覃志豪,毛克彪. 基于 MODIS 影像数据的劈窗算法研究及其参数确定[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2):287-289.
 [13] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. Landsat TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 61(3):28-33.
 [14] JONES C A, KINIRY J R. CERES - Maize: A simulation model of maize growth and development[M]. Texas: Texas A&M University Press, College Station, 1986.
 [15] 吴晓莉,赵纯勇,杨华. 重庆市沙坪坝区植被覆盖度的遥感估算[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2005, 23(3):323-325.