

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2015. 04. 11

引用格式: 王亚维,宋小宁,唐伯惠,等. 基于 FY-2C 数据的地表温度反演验证——以黄河源区玛曲为例[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 68-72. (Wang Y W, Song X N, Tang B H, et al. Validation of FY-2C derived land surface temperature over the source region of the Yellow River: A case study of Maqu County[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 68-72.)

基于 FY-2C 数据的地表温度反演验证

——以黄河源区玛曲为例

王亚维¹, 宋小宁¹, 唐伯惠², 李召良^{3,4}, 冷佩¹

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081;
4. 法国斯特拉斯堡大学 ICube 实验室, 斯特拉斯堡 67412)

摘要: 地表温度是气候、水文和生态等研究领域的基本参数, 在地表水量和能量平衡的研究和应用中发挥着十分重要的作用。强烈的异质性是地表温度反演精度不高的主要原因之一。该文以黄河源区玛曲为研究区, 评估 FY-2C 数据的地表温度反演精度, 为将来温度反演算法和产品的进一步发展提供依据。首先, 以与 FY-2C 相同空间分辨率的 MODIS 地表温度产品 (MOD11B1) 为地表温度真值, 对反演的地表温度进行了验证; 然后, 利用研究区内 20 个采样点的土壤温度 (5 cm) 实测数据对反演结果进行验证。结果表明, FY-2C 地表温度与 MODIS 温度产品具有较好的相关性, 相关系数在 0.72~0.95 之间, 均方根误差在 0.44~3.87 K 之间, 平均均方根误差为 1.90 K; 反演结果和实测数据的相关系数为 0.69。

关键词: 地表温度; FY-2C; 劈窗算法; MODIS

中图法分类号: TP 751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2015)04-0068-05

0 引言

随着卫星数据质量的不断提高, 利用气象卫星资料 (如 NOAA-AVHRR 和 GMS 等) 获取地表温度的技术逐渐趋于成熟^[1-4]。Becker^[5] 基于 AVHRR 第 4 和 5 通道的地表反射率之差对地表温度反演的影响, 从理论上证明了用劈窗技术反演地表温度的可行性; Vidal 对比了 3 种反演地表温度的方法, 即使用实测数据回归反演系数 (误差为 1.75 K)、单独使用 NOAA 数据 (误差为 2.84 K) 及由大气辐射传输模型推导的 SST 反常算法 (误差为 2.9 K)^[6-7]; 柳钦火等^[8] 提出了双温度双通道相邻像元的概念, 用于地表比辐射率和地表温度的同时解算, 采用迭代算法求解, 10 368 个样本的均方差为 0.42 K; Qin 等^[9] 基于 NOAA-AVHRR 热通道数据采用劈窗算法反演地表温度, 误差小于 0.25°。

对于给定的像元, 静止气象卫星具有固定的观测角度, 且 1 d 能够提供 48~96 个时相的数据, 利

用静止气象卫星反演的地表参数可以为陆表能量和水量平衡的研究带来新思路。基于此, 学者们采用静止气象卫星数据进行地表温度反演研究^[10-13]; Trigo 等^[12-13] 基于 MSG-SEVIRI 数据生成了 MSG-SEVIRI 地表温度产品; Tang 等^[14] 基于我国静止气象卫星 FY-2C 数据, 采用劈窗算法反演了中国区域的地表温度; 张霄羽等^[15] 基于 FY-2D 对地表温度进行反演, 与 MODIS 地表温度产品进行对比, 相关系数达 0.5, 均方根误差为 4.4 K。目前, 对地表异质性较强地区的反演研究较少, 并且缺乏对风云卫星数据的地表温度产品的验证研究。

本文基于 FY-2C 数据采用劈窗算法得到地表温度产品, 以与 FY-2C 相同空间分辨率的 MOD11B1 地表温度产品为地表温度真值, 对同步反演的 FY-2C 地表温度进行了验证; 另外, 利用研究区内 20 个采样点的土壤温度 (5 cm) 观测数据对反演结果进行了验证分析。本研究可为提高异质性地表温度反演精度, 以及风云卫星数据地表温度产品的发展提供依据。

收稿日期: 2014-05-27; 修订日期: 2014-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于静止气象卫星数据的区域尺度土壤水分反演方法研究”(编号: 41271379) 和中国科学院重点部署项目“黄河源区冻土变化的水文效应”(编号: KZZD-EW-13) 共同资助。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

以黄河源区玛曲为研究区(图1),其位于甘肃省甘南藏族自治州西南部,青藏高原东端,甘、青、川三省交界处,黄河第一弯曲部。在 N33°06' ~ 34°23', E100°45' ~ 102°29' 之间,地势西高东低,由西北向东南倾斜,海拔在 3 300 ~ 4 806 m 之间,属于高寒湿润型气候,年均气温 1.1℃,年降水量 615.5 mm。

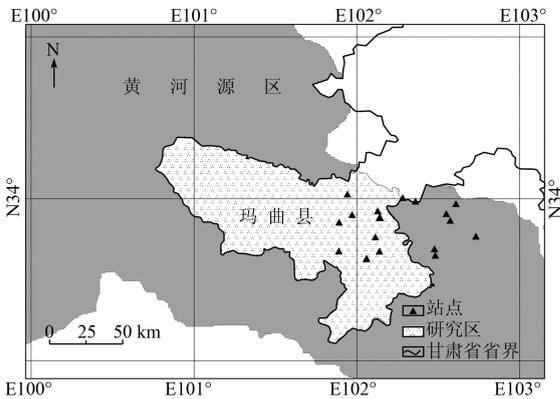


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 FY-2C 数据

风云二号(FY-2)是我国自主研制的静止气象业务卫星系列。C星(FY-2C)于2004年10月19日发射成功,卫星定点于E105°赤道上空^[16]。FY-2C可实现每1h获取经纬度从N60°~S60°,E45°~165°的1幅完整影像;汛期每间隔30min可获取1幅影像。FY-2C卫星主要有效载荷为红外和可见光自旋扫描辐射器VISSR^[16],其技术指标如表1所示。

表1 VISSR的主要技术指标

Tab.1 Main technical indicators of VISSR

通道	波段范围/ μm	星下点分 辨率/km	识别的主要地物
可见光	0.55 ~ 0.90	1.25	白天的云、雪及水体
红外1	10.3 ~ 11.3	5.00	昼夜云、下垫面温度、云及雪
红外2	11.5 ~ 12.5	5.00	昼夜云
红外3	6.3 ~ 7.6	5.00	半透明卷云的云顶温度、中高层水汽
红外4	3.5 ~ 4.0	5.00	昼夜云、高温目标

1.3 MODIS 数据

MODIS覆盖光谱范围较宽,从可见光到热红外共分36个波段^[17]。MODIS采用的是HDF分层数据格式,由遥感软件可以直接识别^[17]。MODIS Terra星的5km每日地表温度产品(MOD11B1)以2种方式(SWATH和GRID)提供,包含每个像元的发射率值和地表温度的全球数据产品^[17]。MOD11B1温度产品的投影为正弦曲线投影,空间分辨率为5km,时间分辨率为1d。本文采用2008年7、8月每日的MOD11B1温度产品白天地表温度数据,并进行重投影,与FY-2C地表温度产品数据保持一致。

1.4 实测数据

在2008年7、8月间,在研究区选取了20个采样点(玛曲站点连续原位土壤水分与土壤温度的实测数据),如图1所示。每天每隔15min获取1次土壤温度(5cm)观测数据。由于FY-2C地表温度产品只有每天整点的数据,因此选取同样对应时刻的实测数据进行验证分析。

2 基于FY-2C数据的地表温度反演

Tang等^[14]基于通用分裂窗算法^[18],提出了针对FY-2C数据的地表温度 T_s 反演方法,表达式为

$$T_s = a_0 + (a_1 + a_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_3 \frac{\delta\epsilon}{\epsilon^2}) \frac{T_i + T_j}{2} + (a_4 + a_5 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_6 \frac{\delta\epsilon}{\epsilon^2}) \frac{T_i - T_j}{2}, \quad (1)$$

式中: T_i 和 T_j 分别为在通道 i (11.0 μm)和通道 j (12.0 μm)的大气顶层亮度温度,K; ϵ 为平均比辐射率; $\delta\epsilon$ 为通道31(11 μm)和通道32(12 μm)的比辐射率差值; a_0, a_1, \dots, a_6 为模型参数。

地表比辐射率由MODIS的地表温度产品MOD11B1提供的通道31和通道32的比辐射率数据计算得到^[14]

$$\epsilon_{IR1} = -0.0611 + 1.0614\epsilon_{31}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{IR2} = -0.0210 + 1.0199\epsilon_{32}, \quad (3)$$

式中: ϵ_{IR1} 和 ϵ_{IR2} 分别为S-VISSR通道IR1和通道IR2的比辐射率; ϵ_{31} 和 ϵ_{32} 分别为MODIS通道31和

通道32的比辐射率。

3 结果分析

3.1 反演结果与MODIS温度产品的对照分析

为了检验FY-2C数据反演地表温度结果的准确性,将其与MODIS温度产品进行对比分析。以与FY-2C相同空间分辨率的MOD11B1地表温度产品为地表温度真值,对2008年7月和8月50个晴天利用FY-2C数据同步反演的地表温度进行验证,选取二者均为非零的数据,计算得到均方根误差和相关系数,如图2所示。

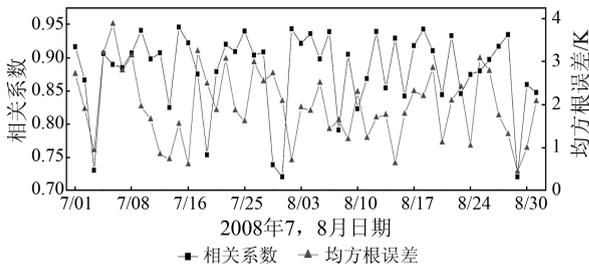


图2 2008年7,8月的相关系数与均方根误差散点图
Fig.2 Scatter diagram of the correlation coefficient and RMSE in the July and August, 2008

由图2可以看出, FY-2C数据反演结果与MODIS得到的地表温度相关性较好, 相关系数在0.72~0.95之间; 均方根误差在0.44~3.87 K之间, 其平均值为1.90 K。

分别选取7和8月每个月的上、中、下旬各1 d, 计算FY-2C数据反演的地表温度 T_{FY} 减去MODIS温度产品数据 T_{MODIS} 的绝对值, 得到二者的温度差值图(图3)。结果表明, FY-2C数据反演的地表温度精度尚好。

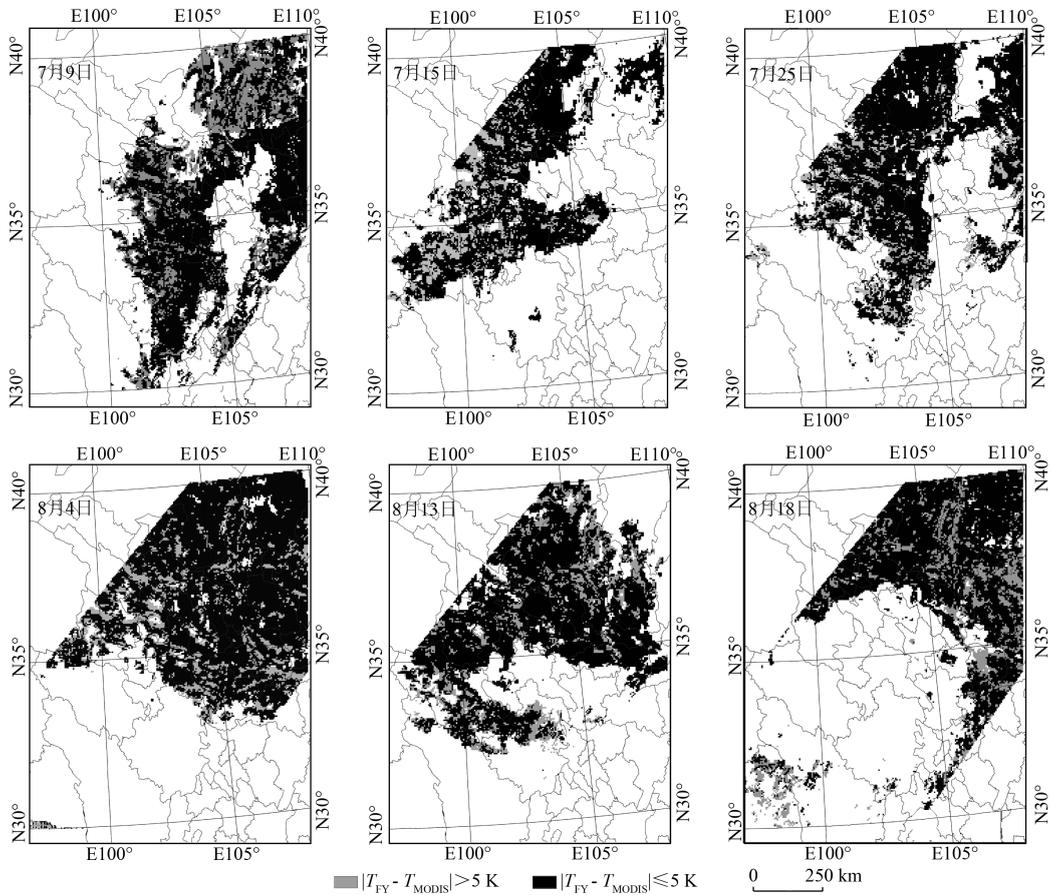


图3 FY-2C反演地表温度 T_{FY} 与MODIS温度产品数据 T_{MODIS} 差值图

Fig.3 Land surface temperature inversions based on FY-2C data minus the temperature of MODIS products

3.2 反演结果与实测数据的对照分析

为了进一步验证反演结果的精确性, 将每天每个整点的实测数据与同一时刻的FY-2C地表温度反演结果进行对照分析。因为FY-2C数据空间分辨率为5 km, 且若取20个站点对应位置的FY-2C数据(有部分空值)的实测温度值是点数据, 像元反演的地表温度是面数据, 点数据与面数据直接对比会带来一定的问题, 所以需换取空间内的平均值来对比分析。首先, 计算20个站点每天每个整点的平均温度; 然后, 计算以这20个站点为基准的最小矩形的FY-2C反演结果的平均值, 将这2组数据进行比较, 如图4所示。

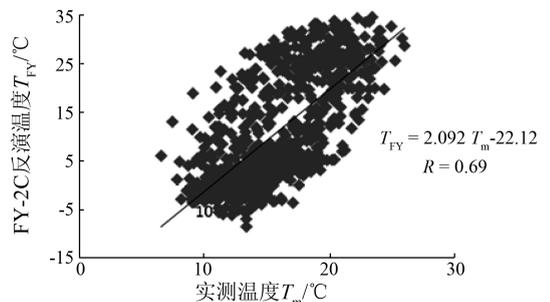


图4 实测温度与FY-2C数据估算地表温度比较
Fig.4 Comparison between the measured data and the land surface temperature inversions based on FY-2C data

由图4可以看出, 地面观测的温度值与FY-2C反演的地表温度具有较好的相关性, 二者的趋势基

本一致,相关系数为0.69,但还具有一定的误差。

误差产生的主要原因是:①研究区海拔在3 300~4 806 m之间,高程落差大,地形崎岖不平,地表粗糙度较大,同时景观多样性指数和空间缀块性较大,因而此地区的空间异质性较为强烈,对遥感地表温度反演的精度影响较大,造成了FY-2C反演地表温度的不准确性。②风云卫星数据本身的信噪比较低,从而导致其反演精度偏低。③在异质性较强的研究区,仅用有限的样点观测值通过取平均来表征整个区域平均值,也会导致不确定性变大。④交叉验证中FY-2C和MODIS的观测角度会产生误差,Lagouarde等^[19-20]研究表明,垂直方向上和倾斜方向上的裸土温度差可高达5 K、城市地表温度差可高达10 K。事实上,MODIS和FY-2C不同的像元温度对应着不同的观测角度,观测角度的不同必定使得反演的地表温度存在一定的角度效应。在Ren等^[21]的研究中也表明角度纠正后的地表温度与原有MODIS地表温度产品相差1~3 K。⑤交叉验证中,本文所选数据的时间差也会产生一定误差,FY-2C数据选取的是北京时间11:00的数据,而MOD11B1在玛曲的观测时间为北京时间10:30至11:30,该时间差也会产生误差。充分考虑并解决角度效应和时间差造成的影响,是后续研究中必不可少的环节。因此,在异质性较强的地区,当前利用FY-2C反演得到的地表温度精度尚有限,需要继续提高反演精度。

4 结论

1)本文基于FY-2C数据采用劈窗算法得到的地表温度,选取黄河源区玛曲为研究区,以与FY-2C相同空间分辨率的MODIS地表温度产品(MOD11B1)为地表温度真值,对50个晴天同步反演的FY-2C地表温度进行验证。FY-2C数据估算地表温度结果与MODIS相关性较好,相关系数在0.72~0.95之间,平均相关系数均值为0.85;均方根误差在0.44~3.87 K之间,其平均值为1.90 K。

2)对研究区20个5 cm深处土壤温度观测数据取平均值,对区域平均FY-2C地表温度进行验证与误差分析。FY-2C反演的地表温度具有较好的相关性,二者的趋势比较一致,相关系数为0.69。造成误差的主要原因有:研究区地表异质性强、风云卫星数据本身的信噪比偏低、用有限的样点观测值通过取平均来表征区域平均值导致不确定性变大、交叉验证中FY-2C和MODIS的观测角度和时间差也加大了误差。因此,在异质性较强的地区,当

前利用FY-2C反演得到的地表温度精度有限,需要充分考虑并解决角度效应和时间差造成的影响,进一步提高反演精度。

志谢: 荷兰 Wageningen 大学 Su Z B 教授提供了黄河源区玛曲采样点的土壤温度实测数据, LAADS 网站 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>) 提供了 MODIS 地表温度产品数据, 在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 徐希孺,柳钦火,陈家宜. 遥感陆地温度[J]. 北京大学学报:自然科学版,1998,34(2/3):248-253.
Xu X R, Liu Q H, Chen J Y. Remote sensing of land surface temperature[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(2/3):248-253.
- [2] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA7/AVHRR[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(D5):7231-7237.
- [3] 祝善友,张桂欣,尹球. 地表温度热红外遥感反演的研究现状及其发展趋势[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(5):420-425.
Zhu S Y, Zhang G X, Yin Q. Actualities and development trends of the study on land surface temperature retrieving from thermal infrared remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(5):420-425.
- [4] 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, 18(1):6-11. doi:10.6046/gtzyg.2006.01.02.
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 and Resources, 2006(1):6-11. doi:10.6046/gtzyg.2006.01.02.
- [5] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(10):1509-1522.
- [6] 李健. 长白山地区地表温度反演研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.
Li J. A Study of Land Surface Temperature Retrieval for the Region of Changbai Mountain of China[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [7] Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements of satellite data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(12):2449-2460.
- [8] 柳钦火,徐希孺,陈家宜. 遥测地表温度与比辐射率的迭代反演方法——理论推导与数值模拟[J]. 遥感学报, 1998, 2(1):1-9.
Liu Q H, Xu X R, Chen J Y. The retrieval of land surface temperature and emissivity by remote sensing data: Theory and digital simulation[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(1):1-9.
- [9] Qin Z H, Karnieli A. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA - AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(12):2367-

- 2393.
- [10] Gao C X, Tang B H, Wu H, et al. A generalized split - window algorithm for land surface temperature estimation from MSG - 2/SEVIRI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34 (12):4182 - 4199.
- [11] Qian Y G, Qiu S, Wang N, et al. Land surface temperature and emissivity retrieval from time - series mid - infrared and thermal infrared data of SVISSR/FY - 2C[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6 (3):1552 - 1563.
- [12] Trigo I F, Monteiro I T, Olesen F, et al. An Assessment of remotely sensed land surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 2008, 113 (D17):D17108.
- [13] Trigo I F, Peres L F, DaCamara C C, et al. Thermal land surface emissivity retrieved from SEVIRI/Meteosat[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2):307 - 315.
- [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] 张霄羽, 王 娇. 基于静止气象卫星数据的地表温度遥感估算[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(1):12 - 17.
Zhang X Y, Wang J. Estimation of land surface temperature using geostationary meteorological satellite data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(1):12 - 17.
- [16] 国家卫星气象中心. 风云卫星遥感数据服务网[EB/OL]. [2014 - 05 - 04]. <http://www.nsmc.cma.gov.cn/NSMC/Home/Index.html>.
National Satellite Meteorological Center. FENGYUN Satellite Data Center[EB/OL]. [2014 - 05 - 04]. <http://www.nsmc.cma.gov.cn/NSMC/Home/Index.html>.
- [17] 胡菊阳. 风云卫星地表温度反演算法研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
Hu J Y. The Study of Algorithms for Land Surface Temperature Retrieval from Feng Yun Satellite Data[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2012.
- [18] 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, 34(4):892 - 905.
- [19] Lagouarde J P, Dayau S, Moreau P, et al. Directional anisotropy of brightness surface temperature over vineyards: Case study over the medoc region (SW France) [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(2):574 - 578.
- [20] Lagouarde J P, Hénon A, Kurz B, et al. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1):87 - 105.
- [21] Ren H Z, Yan G J, Chen L, et al. Angular effect of MODIS emissivity products and its application to the split - window algorithm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66 (4):498 - 507.

Validation of FY - 2C derived land surface temperature over the source region of the Yellow River: A case study of Maqu County

WANG Yawei¹, SONG Xiaoning¹, TANG Bohui², LI Zhaoliang^{3,4}, LENG Pei¹

(1. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 3. *Key Laboratory of Agri - Informatics, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China*; 4. *ICube of Université de Strasbourg, Strasbourg 67412, France*)

Abstract: Land surface temperature (LST) is an essential parameter in such fields of research as climate, hydrology and ecology, and it plays a significant role in the understanding of the water and energy balance of the Earth's surface. Because the heterogeneity of the underlying surface is most likely a main source of the uncertainties of the satellite derived LST, this paper aims to evaluate the accuracy of the FY - 2C derived LST over the heterogeneous area of Maqu County in the source region of the Yellow River and subsequently to provide solid basis for the future development of the LST inversion algorithm and product. MODIS LST product (MOD11B1) was primarily conducted to verify the FY - 2C derived LST over the study area. In addition to the MODIS data, soil temperature measurements from 20 soil samples of the study area were also implemented to validate the FY - 2C derived LST. The results indicate that a significant correlation exists between the two datasets, with the coefficient of correlation, varying from 0.72 to 0.95, root mean square error (RMSE) ranging from 0.44 to 3.87 K, and the average RMSE being 1.90 K. The FY - 2C derived LST exhibits a consistent variation with the measured soil temperature, and the coefficient of correlation reaches 0.69.

Keywords: land surface temperature; FY - 2C; split - window algorithm; MODIS

第一作者简介: 王亚维(1991 -), 女, 硕士研究生, 主要从事定量遥感方面的研究。Email: wangyawei13@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 宋小宁(1975 -), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事定量遥感方面的研究。Email: songxn@ucas.ac.cn。

(责任编辑: 邢 宇)