

利用 MODIS 数据反演沙漠化地区 地表温度的简化模式 ——以陕西北部地区为例

霍艾迪^{1,2}, 康相武³, 刘志丽⁴, 曹馨升⁵

(1 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 西北农林科技大学 资源与环境学院,
陕西 杨凌 712100; 3 中国科学技术信息研究所, 北京 100038; 4 中国气象局
国家气象中心 北京 100081; 5 陕西省生产力促进中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用 MODIS 数据可见光波段、近红外波段和中红外波段, 获得提取地表温度所需要的 2 个基本参数: 地表比辐射率和大气透过率; 然后对热红外波段 b31、b32 运用劈窗算法提取出陕北地区地表温度; 并利用两种不同经验公式参数得出的结果与相应位置气象观测站观测的卫星过境时刻的地表气温进行比较。结果表明, 劈窗算法简化模式能获得较准确的地表温度, 符合陕北地区的实际地表状况, 印证了应用该简化模式可以在大范围内部快速实时监测地表温度。

关键词: 地表温度; MODIS; 劈窗算法; 大气透过率; 地表比辐射率

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0306-06

Simplified Split-window Algorithm Model to Retrieve Land Surface Temperature in Aeolian Desertification Area with MODIS Image Data ——Taking North Shaanxi Province as an Example

HUO Ai-di^{1,2}, KANG Xiang-wu³, LIU Zhi-li⁴, CAO Xin-sheng⁵

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100,
Shaanxi, China; 3. Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China;
4. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
5. Shaanxi Provincial Productivity Promotion Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract In this paper, two import parameters (surface emissive and atmospheric transmittance) are computed from the VIS, NIR and MIR of MODIS image data. The values of land surface temperature are calculated by means of a split-window method based on thermal infrared band (b31 and b32) of MODIS image data in North Shaanxi. Furthermore, the result from two different empirical formulas parameter is compared with the surface temperature from the corresponding position weather station observation at the time when the satellite transits. The results reveal that the simplified method can be used to acquire the reasonable values of land surface temperature and it is fit for North Shaanxi. Thus, this study provide a good manner for monitoring large-scale and real-time land surface temperature in aeolian desertification area using thermal bands of MODIS image data.

Key words: land surface temperature; MODIS; split-window algorithm; atmospheric transmittance; surface emissive

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项项目 (2005DIA3J006)

作者简介: 霍艾迪 (1971-) 男, 陕西西安人, 农学博士, 从事水土保持与荒漠化防治研究, E-mail: huoaidi@163.com

0 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)是地表热量状况的最直观的描述,从农业生产的角度来看,是农业资源区划中一个重要的热量指标。地表平均温度即使是很小的异常变化也足以对地方生态环境产生严重的影响,从而危及农业生产^[1]。准确地预测地表温度,对适时播种、作物与林木管理等农林生产活动具有重要的指导意义,对资源环境和城市热岛效应的研究也非常关键^[2-4]。获取地表温度的传统方法是采用水银温度计测量,但只代表监测点的局部温度。而地表温度具有地域性和时域性,因此利用传统方法难以宏观把握其空间变化规律与分布规律。借助热红外遥感技术,可以对地表热量的广域空间差异进行动态监测^[5]。而温度的遥感反演又是热红外遥感技术的关键环节之一,进行温度的遥感反演研究具有非常重要的现实意义。

MODIS 是一个中分辨率传感器,它包含 36 波段,分别针对陆地、海洋、水汽、气溶胶等来设计的。其中有 6 个波段是专门针对陆地温度来设计的。MODIS 与 TM 不同, TM 适合于小区域、高精度的反演,而 MODIS 则适用于反映大区域,甚至全球的温度分布规律。MODIS 数据的诸多优厚的条件,决定了其在热红外遥感地球表面温度反演方面的广泛应用。目前,基于 MODIS 影像数据反演 LST 的劈窗算法所需参数较多,计算比较复杂。

沙漠化地区具有气候干燥、晴空时间较长及日数较多、光照强烈、植被稀疏等特点,使基于 MODIS 数据反演沙漠化地区的地表温度又具有容易在地面同步监测地表气温以进行验证等优势。因此,本研究针对目前使用 MODIS 数据反演地表温度方法中存在的问题,以陕西北部的沙漠化地区作为研究靶区,对使用 MODIS 数据反演地表温度的方法的改进提高进行探索性研究,力图有所突破。

1 研究方法

针对目前反演方法中的问题,通过对相关反演方法进行分解并重新集成提出了沙漠化地区 MODIS 影像数据的地表温度分类反演的方法。

大面积遥感反演地表温度可分为两大类:经验方法和理论方法。经验方法是实测出在传感器过顶时的地表温度,建立起灰度图像和地面辐射能量值之间的回归方程来估算地表温度。但此方法存

在地区局限性、地类代表性差、反演精度低以及对地面观测数据过分依赖等诸多问题。理论方法是基于热红外辐射传输方程,根据大气和地表对遥感器所接收的热辐射强度的影响,推导出各种地表温度的反演算法^[6]。到目前为止,国内外已经发展了热辐射传输方程法、单窗算法、劈窗算法,其中发展较为完善的是劈窗算法^[7-9],即在 8~14 μm 光谱区域存在一个大气窗口,在该大气窗口大气吸收最小,通过该窗口传送的地表能量损失最小,通常利用大气窗口内 2 个相邻通道上大气的吸收作用不同,由两个通道值的各种组合来消除大气的影响。

劈窗算法主要是针对 AVHRR 的第 4、5 两个热红外波段,根据地表热辐射传导方程推导出来的。到目前为止,已经公开发表的劈窗算法有 17 个,这些算法主要区别在于计算形式和计算系数^[9]。最通用的表达式为

$$T_s = T_4 + a(T_4 - T_5) + b \tag{1}$$

式中: T_s 为地表温度(°C); T_4 、 T_5 为 AVHRR 通道 4 和 5 的亮度温度(°C); a 为与大气状态、视角、地表反射率有关的系数; b 为修正温度(°C)。由于受到大气状态参数和地表反射率的影响,所以不管各种算法的系数计算表达式的差别大小,一般只有 2 种方法:一是通过地面实际测量来校正亮度温度;二是大气辐射传输模型,通过标准大气剖面资料来模拟计算。事实上, AVHRR 的 2 个热通道 4(10.5~11.3 μm)和通道 5(11.5~12.5 μm)恰与 MODIS 的第 31 波段(10.780~11.280 μm)和 32 波段(11.770~12.270 μm)的中心波长相对应,所以可以对 MODIS 的 31 和 32 波段应用劈窗算法进行温度计算,适用温度范围是 0~50 °C^[6,10]。这里考虑大气参数的计算,选择有关专家提出的算法^[8]对研究区域的地表温度进行反演。该算法的优点是参数比较简单,而且精度比较高。该算法的表达式为

$$T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32} \tag{2}$$

式中: T_{31} 、 T_{32} 分别为 MODIS 第 31 和 32 波段的亮度温度(°C); A_0 、 A_1 、 A_2 、 E_1 、 E_2 、 A 、 E_0 、 C_i 、 D_i 都是中间变量,分别定义如下:

$$A_0 = 65.540\ 67E_2 - 62.239\ 8E_1$$

$$A_1 = 1 + A + 0.430\ 59E_1$$

$$A_2 = A + 0.465\ 85E_2$$

$$E_1 = D_{32}(1 - C_{31} - D_{31})/E_0$$

$$E_2 = D_{31}(1 - C_{32} - D_{32})/E_0$$

$$A = D_{31}/E_0$$

$$E_0 = D_{32} C_{31} - D_{31} C_{32}$$

$$C_i = \epsilon_i \tau_i$$

$$D_i = (1 - \tau_i)[1 + (1 - \epsilon_i) \tau_i]$$

式中： ϵ_i 为波段 i 的地表比辐射率； τ_i 为波段 i 从地面到遥感器的大气透过率；其他参数为中间变量。

由上式可知，求解地表温度的关键是确定亮度温度、地表比辐射率（某一物体在一定波长和温度下的发射辐射强度与理想黑体在相同波长和温度下所发射的辐射强度之比）、大气透射率和遥感器视角。亮度温度利用 Planck 方程可直接计算^[1]。对于某个特定的图像而言，遥感器的视角是已知的。

覃志豪^[8]的算法在依据地表组分估算混合像元的有效平均比辐射率方面相对比较复杂，沙漠化地区地表植被比较稀疏，这就为地表比辐射率的简化计算提供了可能。

在地温的反演中，地表辐射率是最重要的参数之一，它直接影响着反演出的地温精度。但由于地面物体不是黑体，就需要用比辐射率来修正，比辐射率随地物类型、地表粗糙度、表层含水量的变化而变化，受多种因素影响，主要取决于实际地物的物质特性与观测波段。虽然地表类型复杂多样，但在 MODIS 数据空间分辨率为 1 km 的尺度下，星下地面像元可大致看成由 3 种基本地表类型构成：水体、植被和裸地。这样可依据地表组分估算混合像元的有效平均比辐射率，有关专家在这方面做了大量的研究，得出了混合像元比辐射率的计算公式^[8]

$$\epsilon = P_w R_w \epsilon_{iw} + P_v R_v \epsilon_{iv} + (1 - P_w - P_v) R_s \epsilon_{is} \quad (3)$$

式中： ϵ 为混合像元的平均比辐射率； P_w 、 P_v 分别为水面和植被在该像元内的构成比例； ϵ_{iw} 、 ϵ_{iv} 和 ϵ_{is} 分别为水面、植被和裸土在波段 i 区间内的比辐射率； R_w 、 R_v 、 R_s 为水面、植被和裸土的温度比率，具体参见文献 [8]。

地物比辐射率的值是随光谱波段而变化的，在 MODIS 的 31、32 波段有不同的比辐射率。对于基本的地物比辐射率可根据 Wan 提出的有效比辐射率公式^[9]来计算。沙漠化地区地表分为 3 种类型：水体、植被、裸地。由于干旱缺水，植被比较稀疏，日照强烈，温差大。根据各参数的敏感性^[13]和沙漠化地区归一化植被指数 (I_{NDVI}) 的特点分为以上 3 种类型分别计算，最后得到各像元的比辐射率 ϵ 。

$$(1) I_{NDVI} < 0.2$$

$$\epsilon_{31} = 0.979 - 0.042 \rho_1 - 0.015 \rho_2$$

$$\epsilon_{32} = 0.982 - 0.042 \rho_1 + 0.015 \rho_2$$

式中： ρ_1 、 ρ_2 分别为第 1、2 波段的反射率。

$$(2) 0.2 \leq I_{NDVI} \leq 0.5$$

$$\epsilon_{31} = 0.986 + 0.021 P_z$$

$$\epsilon_{32} = 0.974 + 0.015 P_z$$

$$P_z = (I_{NDVI} - I_{NDVImin})^2 / (I_{NDVImax} - I_{NDVImin})^2 = (I_{NDVI} - 0.2)^2 / 0.09$$

式中： P_z 为中间变量。

$$(3) I_{NDVI} > 0.5$$

$$\epsilon = \epsilon_{31} = \epsilon_{32} = 0.985$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{31} - \epsilon_{32} = 0$$

式中： $\Delta\epsilon$ 为混合像元的平均比辐射率的差值。

大气的透过率是遥感器所接收到的热辐射能与地表真实辐射能的比值。热红外辐射的大气透过率随天气和高度而变，在大气透过率的诸多限制因子中，热辐射主要受大气水汽的影响。所以先根据大气水分光谱吸收特性，确定大气水分含量，进而求算大气透过率。

大气水汽含量可由下式^[13-14]得到

$$w = [(\alpha - \ln T) / \beta]^2 \quad (4)$$

式中： w 为大气水汽含量； T 为大气水汽吸收波段地面反射率与大气窗口波段地面反射率的比值（即 MODIS 第 2、19 波段的比值）； α 、 β 为参数，分别是 0.02 和 0.651。

水汽对 0.90~0.940 μm 波段具有强烈的吸收作用，但在同一波段上，不同的下垫面具有不同的反射率，不可能通过单一波段的信息获得水汽的透过率，这要借助于水汽的吸收波段和非吸收波段间反射的太阳辐射差别来获得。MODIS 数据第 2 波段 (0.865 μm) 为大气窗口波段；第 19 波段 (0.940 μm) 为水汽吸收波段，利用水汽吸收波段与窗口波段的反射率比值计算出大气水汽含量。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，故可建立求解大气透过率的公式 (表 1)^[2]。表 1 中 τ_{31} 、 τ_{32} 分别为 MODIS 第 31 波段和第 32 波段的大气透过率。

根据以上提出的反演方法设计反演的技术流程如图 1。MODIS 影像数据为分辨率为 1 km 的 MODIS 各波段 (1~36) 数据。先用 MODIS 的第 2、19 波段计算水汽含量，然后应用前文所述方法计算比辐射率和大气的透射率，再利用劈窗算法反演地表温度，叠加行政区域矢量地图，得到陕北地表温度影像图。在温度影像图上根据研究区域内气象站的坐标提取实测点对应的像元的温度反演

| 表 1 MODIS 第 31、32 波段的大气透过率估计公式 | | | | |
|--|----------------------------------|----------|------------|--|
| Tab. 1 Formulas for Atmospheric Transmissibility Estimation of MODIS 31 and 32 Bands | | | | |
| 水汽质量浓度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 大气透过率估计方程 | R^2 | F | |
| 0.4~2.0 | $\tau_{31}=0.995\,13-0.080\,82w$ | 0.991\,4 | 804.4 | |
| | $\tau_{32}=0.993\,76-0.113\,69w$ | 0.993\,2 | 1\,028.7 | |
| 2.0~4.0 | $\tau_{31}=1.086\,92-0.127\,59w$ | 0.999\,2 | 11\,553.0 | |
| | $\tau_{32}=1.079\,11-0.159\,25w$ | 0.999\,9 | 173\,498.3 | |
| 4.0~6.0 | $\tau_{31}=1.072\,68-0.125\,71w$ | 0.999\,1 | 9\,921.6 | |
| | $\tau_{32}=0.938\,21-0.126\,13w$ | 0.995\,5 | 1\,992.4 | |

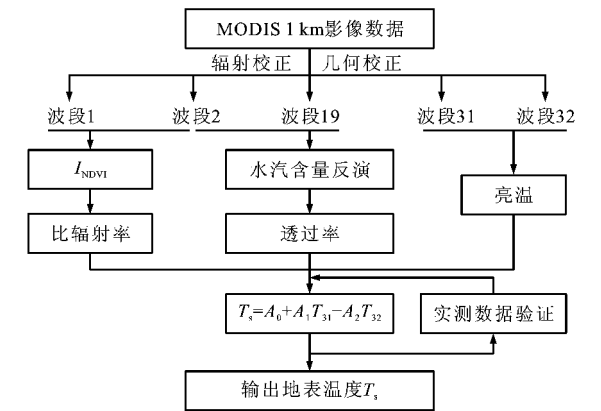


图 1 MODIS 数据的地表温度反演流程

Fig. 1 Flowchart of Land Surface Temperature Retrieval Based on MODIS Data

值后, 与相应的实测温度对比。

2 数据

2.1 研究区域

该研究区位于陕西省的北部, 东经 $107^{\circ}35' \sim 111^{\circ}29'$ 与北纬 $37^{\circ}35' \sim 39^{\circ}02'$ 之间, 总面积为 $356\,44 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。该区海拔 $800 \sim 1\,800 \text{ m}$, 横山以东地形走势由西北向东南倾斜, 横山以西南高北低。大体以长城为界, 西北部是毛乌素沙地, 地势平缓, 沙丘绵延不断, 滩地、海子散布其间; 东南部是黄土高原, 其西段为白于山, 是黄土覆盖的低山丘陵, 地面连绵起伏, 切割较弱, 坡度相对较小。东北部是以梁峁地形为主的黄土丘陵, 地面破碎, 切割强烈, 零星分布着流沙和裸露的基岩。该区属于内陆半干旱季风气候, 光照充足、热量丰富、降水稀少、蒸发强烈、冬季寒冷、夏季温热、无霜期短、大风日数多, 自然环境较为恶劣。

2.2 MODIS 数据及预处理

所用 MODIS 影像数据的获取时间为 2006 年 10 月 17 日, 且从当天的气象资料来看, 多数地方天

气晴朗, 适合地面温度的计算与分析, 基本上代表陕北地区秋季温度的空间分布状况。所用数据在接受站处理为 1 B 级, 以 HDF 格式存储。

传感器测得的地物信息是以 D_n 值的形式记录的, 所以在对影像进行各种应用处理时, 首先用公式(5)把图像数值转化为相应的反射亮度值或辐射亮度值(ρ)

$$\rho = (D_n - O_{\text{ffset}}) S_{\text{cale}} \tag{5}$$

式中: D_n 为遥感影像的亮度值; O_{ffset} 为偏移量, 在数据集中的数据项名称为 reflectance-offset 或 radiance-offset; S_{cale} 为缩放比, 数据项名称为 reflectance-scale 或 radiance-scale。

3 结果与分析

根据上述算法, 利用 ENVI 遥感图象处理软件自带 IDL (Interactive Data Language) 编程语言编程, 即可实现地表温度的反演, 图 2 为反演结果。从图 2 中可以看出, 温度的地域分布很有特点, 总体的特征是随纬度的升高地表温度逐渐增大, 从中部到北部温度依次升高。温度大致可分为 3 个区间: $<15.8^{\circ}\text{C}$ 、 $15.8 \sim 17.4^{\circ}\text{C}$ 、 $17.4 \sim 18.9^{\circ}\text{C}$ 、 $18.9 \sim 20.3^{\circ}\text{C}$ 、 $20.3 \sim 26.1^{\circ}\text{C}$ 。整个区域平均温度为 18.6°C 。最大温度超过 45°C 。有 1.58% 像元小于 5°C , 最低温度达到 -4°C , 这种低温产生的

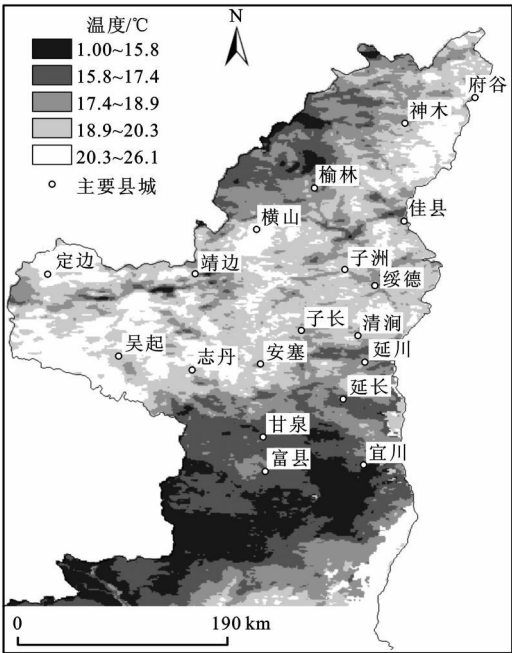


图 2 陕北地区地表温度分布

Fig. 2 Land Surface Temperature in North Shaanxi

原因主要是由一些云块引起的异常,这种现象可以从图上直接观测到。即由于较浓厚的云层遮蔽,使得传感器接受到的地面热辐射量极低,从而反演出的温度值极低。

影响地表温度的因素主要有:纬度、海拔高度和地表覆盖状况。陕北地区具有多样的地形地貌和不同的下垫面地表覆盖类型,这决定了其地表温度的空间分布格局。区域热量资源的地理分布规律一般是纬度越低热量资源越丰富。而这个地区相反,这说明受地势和下垫面的影响很大。从图 2 可以看出,在延安地区南部,植被覆盖较好,一般温度在 20 °C 左右;延安地区中部,植被覆盖相对较差,一般温度在 23 °C 左右;延安北部和榆林大部分地区,裸露地表较多,一般温度在 25 °C 左右。

4 讨论

为了提高反演温度的精度,选用 Qin 等^[15]提出的算法与上面算法进行了对比,该算法同覃志豪^[8]的算法基本一致,只是参数不一样,计算公式如下

$$T_s = A_s + A_{31} T_{31} - A_{32} T_{32} \quad (6)$$

式中: A_s 、 A_{31} 、 A_{32} 为劈窗算法的参数,分别定义如下

$$A_s = -64.603\ 63E_1 + 68.725\ 75E_2$$

$$A_{31} = 1 + A + 0.440\ 817E_1$$

$$A_{32} = -(A + 0.473\ 453E_2)$$

比较上述算法在地表温度演算中的精度,一般有两种方法可以应用:即大气模拟数据法和地面测量数据法。大气模拟数据法是用大气模型软件如 LOWTRAN 等对一定地表温度下的热辐射传导进行模拟,因模拟过程中各有关参数均已知,所以这一误差代表各算法的绝对精度。但是,现实情况非常复杂,绝非大气模型所能全部描述。所以,最佳方法是应用地面测量数据,即实地测量卫星飞过天空时的实际地表温度和相应大气条件,然后根据卫星数据用上述各算法推算地表温度,两者相比较可知其误差。这一方法虽然可行,但实际操作并非易事。当然,还有像片校正等许多问题需要考虑。由于存在这些困难,目前尚没有一个完好的地表温度数据集可以直接应用。

为了使反演结果可以与实测数据进行对比分析,同时对比该算法与覃志豪的算法的准确程度,收集了 2006 年 10 月 17 日 14 时遍布研究区的 68 个农业气象站点地表零厘米实测温度数据,与相同时相卫星反演结果进行了对比,图 3 是对比结果。

对比结果分析表明:使用覃志豪^[8]的参数计算出来的 R_{ms} (Root mean square)^[16-17] 等于 1.287, 相关系数 0.72, 使用 Qin 等^[15]的参数计算出来的 R_{ms} 等于 16.415, 相关系数 0.21。从图 3、 R_{ms} 和相关系数等结果可以看出,在各有关参数的估计相同时,覃志豪^[8]的参数地表温度演算精度较高。产生这样误差的原因应该是研究区域的差异造成的, Qin 等^[15]的算法研究区域主要是海面,基于假定整景图像具有同一性,从而仅使用一个大气透过率和地表比辐射率,缺乏像元尺度上的准确数据。覃志豪^[8]使用的参数更适宜于中国 (10~50 °C) 陆地表面温度的反演。

R_{ms} 误差由下式给出

$$R_{ms} = [\sum (T_s - T_s')^2]^{1/2} \quad (7)$$

式中: T_s 为地表实际温度(大气模拟的温度或实地测量温度); T_s' 是用上述各算法演算得到的地表温度。

由于农业气象站实测数据一般是在农田里单点测量,而遥感反演的温度是 1 km² 面上的辐射温度测量,且两者测量时间有一定的差异,所以二者往往不完全相同,但可以通过相关分析确定二者之间的相关关系。图 3 表明,反演的地表温度和农业气象站实测气温具有显著的相关关系 (R^2 为 0.909 7)。进一步说明利用 MODIS 数据反演得到的地表温度可以作为气象预报地表温度的基础数据。

5 结语

(1) 利用新型的 EOS-MODIS 遥感数据,在前人研究的基础上,提出了在沙漠化地区分类计算地表比辐射率的方法,简化了原劈窗算法所需参数的计算过程。利用本文改进的算法和参数对陕西北部地区的地表温度进行了反演,通过利用卫星过境时刻研究区域内的 68 个气象站点观测的地表气温与两种算法反演得到的地表温度的对比分析,证明覃志豪的参数反演陆地表面温度结果精度较高,反演结果符合陕北地区地温的分布规律。

(2) 反演出来的温度图显示出了陕西北部地区地表温度场的空间分布和不同的地物类型,表明该地区地表温度的分布规律是由南向北逐渐升高的,其空间变化规律是与实际地表状况的分布特征具有很强的一致性。从反演结果来看,符合沙化地区地温的分布规律,该方法可以用来快速监测大范围沙漠化地区的地表温度特征,为沙漠化地区地表特

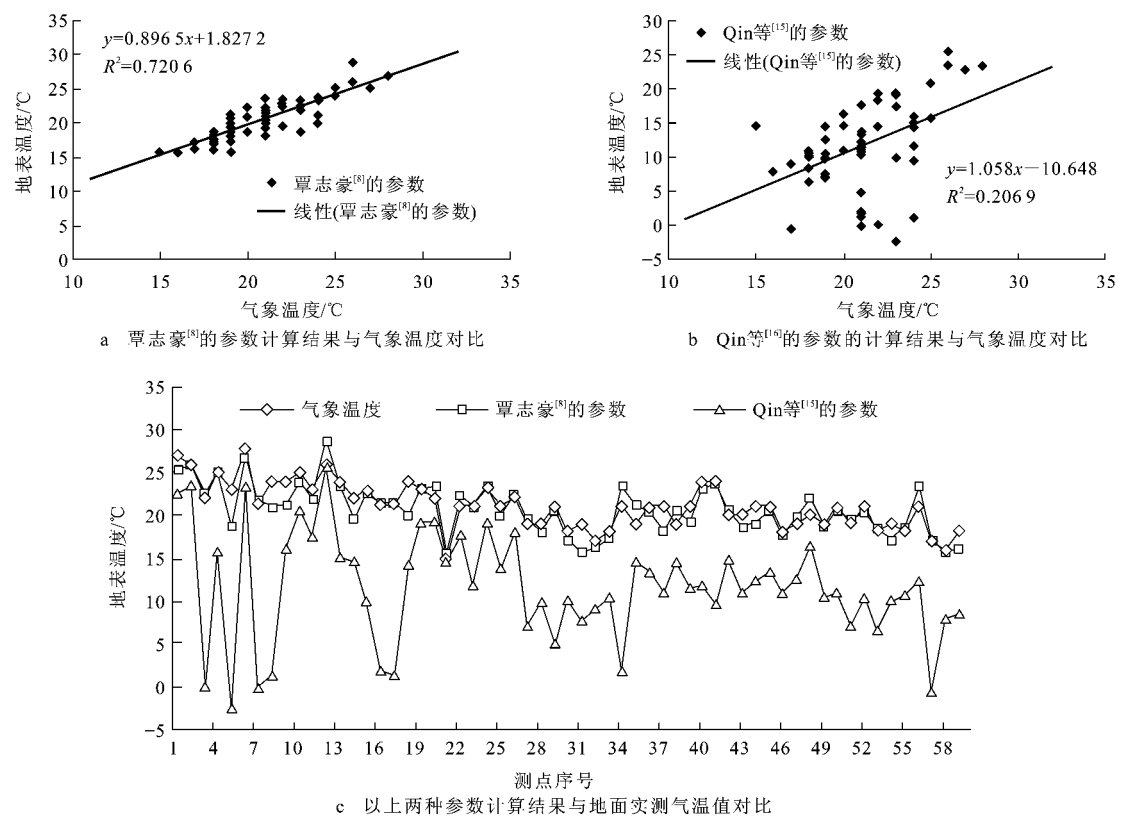


图 3 MODIS 反演地表温度与卫星过境时刻气象观测地面温度结果对比(2006 年 10 月 17 日)

Fig. 3 Comparison of MODIS LST and In-situ Measured Land Surface Temperature in Oct 17th, 2006

征动态监测提供基础数据。

参考文献:

[1] 王晓冬. 陕甘宁地区气候变化及相关影响分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 24-28.

[2] 周可法, 陈 曦, 张海波, 等. 干旱区生态资产遥感定量评估模型研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 492-497.

[3] 阎金凤, 陈 曦. 基于 GIS 的干旱区 LUCC 分析和模拟方法探讨[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 185-191.

[4] 黄妙芬, 刘素红, 朱启疆. 应用遥感方法估算区域蒸散量的制约因子分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 100-105.

[5] 秦晓敏, 覃志豪, 毛克彪. 基于 MODIS 数据的陕西省地表温度的空间分布研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 548-553.

[6] 崔彩霞, 杨 青, 杨莲梅. MODIS 资料用于塔克拉玛干沙漠地表温度计算方法初探[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 596-599.

[7] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[8] 覃志豪. 用于 NOAA-AVHRR 数据的地表温度反演方法[C] // 广西遥感学会. 广西遥感学会第四次代表大会论文集. 南宁: 广西科学技术出版社, 2004: 22-41.

[9] 毛克彪, 覃志豪, 施建成. 用 MODIS 影像和劈窗算法反演山东半岛的地表温度[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 46-50.

[10] 张树誉, 杜继稳, 景毅刚. 基于 MODIS 资料的遥感干旱监测业务化方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 1-6.

[11] 毛克彪. 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2004.

[12] 高懋芳, 覃志豪, 刘三超. MODIS 数据反演地表温度的参数敏感性分析[J]. 遥感信息, 2005(6): 3-6.

[13] 毛克彪. 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 2004.

[14] 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(3): 28-32.

[15] Qin Z, Dall G, 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.

[16] Lucht W, Hyman A H, Strahler A H, et al. A Comparison of Satellite-derived Spectral Albedos to Ground-based Broad-band Albedo Measurements Modeled to Satellite Spatial Scale for a Semidesert Landscape[J]. Remote Sensing and Environment, 2007, 74(1): 85-98.

[17] 于海洋, 张振德, 张佩民, 等. 西藏土地荒漠化遥感监测[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(3): 316-320.