

## MODIS 数据反演地表温度的传感器视角校正研究

高懋芳<sup>1,2</sup>, 覃志豪<sup>1,2</sup>, 高明文<sup>3</sup>, 张彩枝<sup>3</sup>, 色布力马<sup>3</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

3. 内蒙古阿鲁科尔沁旗草原工作站, 内蒙古 阿鲁科尔沁 025550)

**摘要:**提出了 MODIS 数据传感器视角的计算方法, 并分析了视角的变化对大气透过率以及地表温度反演的影响。选取渤海地区一景影像进行实验研究, 结果表明 MODIS 数据边缘的传感器视角可达  $55.02^\circ$ , 由此引起的大气透过率降低近 0.086, 引起的地表温度误差最高可达  $3.64^\circ\text{C}$ 。

**关键词:**MODIS; 地表温度; 视角校正; 大气透过率

**中图分类号:**TP 732 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2007)03-0433-05

## 1 引言

中分辨率成像光谱仪(MODIS)最先载于 Terra 卫星上于 1999 年 12 月发射成功, 是 NASA 对地观测系统计划(EOS)重点研究的一部分。MODIS 数据有 36 个波段, 分布在  $0.4\sim 14.4\ \mu\text{m}$  的波段范围内, 影像空间分辨率为 250 m、500 m、1 km, 可以对大气、陆地、海洋进行综合的观测。相比于 NOAA/AVHRR 数据, MODIS 在多波段、高回访率、高精度、相对较高的空间分辨率和数据共享等方面都有着很大的优势, 自投入应用以来, 已经在地表参数反演、资源调查、大气以及海洋遥感等多方面有很广泛的研究和应用, 是目前备受关注的一种卫星遥感数据资料<sup>[1]</sup>。

由于 MODIS 传感器扫描带宽为 2 330 km, 卫星飞行高度为 705 km, 边缘区域的视角与星下点视角差别比较大, 最大视角可达  $55^\circ$ , 边缘处的像元宽度是星下点处的 3 倍, 因此在 MODIS 卫星遥感数据的应用中, 尤其是地表参数的定量反演中, 视角变化带来的影响成为一个不可忽略的因素。视角增大会延长光线在大气中的传播路径(如图 1 所示), 增大了大气对电磁波的削弱作用, 从而对大气透过率产生很大的影响。在地表温度反演中, 大气透过率是算法中的一个重要参数<sup>[2]</sup>, 为获得更高的地表温度

反演结果, 有必要对视角问题进行深入研究, 并在一定程度上减轻视角变化对温度反演结果的影响。

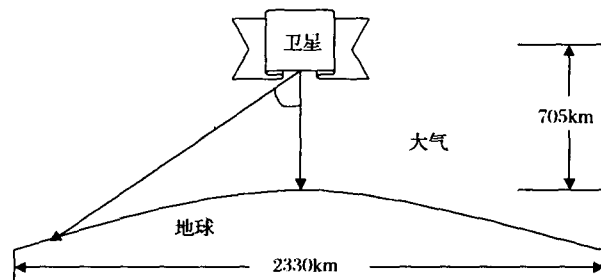


图 1 卫星扫描示意图

Fig. 1 MODIS flight altitude and scanning width

## 2 求视角大小的方法

在传感器的扫描过程中, 每增加一行, 视角就会有相应的变化, 越往两侧视角越大。为更深入研究扫描过程中视角变化特点, 本文采用两种方法计算每一扫描行的视角, 并加以比较。第一种方法为根据列号累加法, 即根据每一列的列号与星下点像元列号差来计算视角, 由图 1 所示的几何关系, 可用如下公式来估算每一列的视角:

$$\text{tg}(\theta_i) = \frac{|D_0 - D_i|}{H} \quad (1)$$

其中:  $\text{tg}(\theta_i)$  是像元  $i$  的天顶视角  $\theta_i$  的正切函数;  $H$

收稿日期: 2006-08-22; 修订日期: 2007-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571078, 40471096); 科研院所社会公益研究专项(2005DIA3J03, 2003DIA7J047); MODIS 数据产品开发、验证与应用示范项目(2003DKA1T006)。

作者简介: 高懋芳(1980-), 女, 研究员, 主要从事热红外遥感应用, 农业灾害的遥感监测与 GIS 应用等方面的研究。

是 MODIS 卫星高度(km),  $H=705$  km;  $D_0$  是星下像元所在的列号;  $D_i$  是像元  $i$  所在的列号。因为 MODIS 一共有 1 354 个扫描行, 也就是说星下点两侧各有 677 个扫描行, 而卫星飞行高度是 705 km, 因此我们可以近似地用列号的差与卫星高度的比值来作为像元  $i$  的天顶视角的  $\theta_i$  正切。这种近似对于要求不是太高的应用来说是合理的, 但是由于越往边缘扫描的区域越大, 而该方法是用同样的距离来计算, 因此, 到边缘就会产生一定的误差, 用该方法计算出来的边缘最大视角为  $43.84^\circ$ 。

第二种方法称为角度累加法, 即算出星下点扫描行的瞬时视场角  $I_0$ , 往两边每增加一行, 视角就增加  $I_0$ , 计算公式如下所示:

$$\theta_i = I_0 * |D_0 - D_i| \quad (2)$$

其中:  $\theta_i$  是像元  $i$  的天顶视角;  $I_0$  是 MODIS 卫星高度的星下点像元视角, 根据 MODIS 卫星高度为 705 km 和星下像元尺度为 1 km 计算得  $I_0 = 0.0812706^\circ$ ;  $D_0$  是星下像元所在的列号;  $D_i$  是像元  $i$  所在的列号。用这种方法计算每一像元的视角时, 以视角的增加来累计, 避免了第一种方法所出现的问题, 计算出的边缘最大视角为  $55.02^\circ$ 。在该研究中, 我们以第二种方法为例来计算视角变化对地表温度反演的影响。

### 3 视角对透过率的影响

视角的增大延长了电磁波在大气中的传播路程, 从而加强了大气的散射、吸收等作用, 直接影响到大气透过率的大小, 而大气透过率是利用劈窗算法从 MODIS 数据中反演地表温度的关键参数<sup>[3,4]</sup>。MODIS 地表温度反演的参数敏感性分析中证明<sup>[5]</sup>, 在其它条件不变的情况下, 31 波段大气透过率有 0.05 的误差就会引起大约 0.6 C 的地表温度误差, 当 31、32 两个波段大气透过率同时有误差时, 温度的误差会减小, 大约在 0.2~0.3 C 左右, 但这对于地表温度的反演精度来说也是很关键的。因此我们在计算大气透过率参数时, 需要进行遥感器的视角校正<sup>[6,7]</sup>, 校正函数如下:

$$\delta\tau_{31}(\theta) = -0.00247 + (2.3652 \times 10^{-5})\theta^2 \quad (3)$$

$$\delta\tau_{32}(\theta) = -0.00322 + (3.0967 \times 10^{-5})\theta^2 \quad (4)$$

其中:  $\delta\tau_{31}(\theta)$ 、 $\delta\tau_{32}(\theta)$  分别是 31、32 两个波段的大气透过率视角校正值;  $\theta$  是 MODIS 遥感器的天顶视角, 单位是度。根据 MODIS 最大扫描宽为 1354 列

计算, 边缘像元的视角可达  $55.02^\circ$ , 由此可引起大气透过率降低近 0.09。

## 4 实例分析

### 4.1 研究区介绍

下面以渤海湾及其周边地区为例, 反演地表真实温度, 分析视角变化对透过率的影响, 以及对最终得到的地表温度的影响。所选图像成像时间为 2004 年 4 月 4 日上午 10:46, 研究区彩色合成如图 2 所示, 图上大多数地区为无云区域, 但是辽东半岛及朝鲜半岛地区有部分云覆盖, 另外在渤海湾沿岸及江苏东部沿海有薄云雾存在, 对大气透过率也会有一定的影响。该区位于中国东部, 纬度适中, 包括陆地和海洋两种地表形态。而且成像时间正处于春季, 地表温度异常变化小, 对于研究视角变化对地表温度反演的影响比较有代表性。



图 2 研究区彩色合成图(MODIS7,5,4 波段)

Fig. 2 MODIS images with bands 754 as RGB showing the study region

### 4.2 算法简介

MODIS 数据有 8 个热红外波段, 其中 31、32 两个波段最适合地表温度反演, 因此选用覃志豪<sup>[4]</sup>等提出的适用于 MODIS 数据的劈窗算法来反演地表温度, 该算法计算简便, 只需要两个基本参数, 即大气透过率和地表比辐射率, 而且这两个参数均可以由同一景 MODIS 数据的可见光近红外波段计算得到, 算法保持较高的精度。

首先, 根据算法需要, 选取 MODIS 数据的第 1、2、19 波段, 分别计算反射亮度值, 选取 31、32 两个波段, 分别计算辐射亮度值。对于 31、32 两个波段, 把得到的辐射亮度值代入普朗克公式求出亮度温度。选取 MODIS 的 1、2 波段来对地表进行初分类,

得到地表物质的结构信息,根据 MODIS 数据的波段特点得到与 31、32 两波段对应的地表比辐射率<sup>[8]</sup>。根据 MODIS 的第 2、19 波段数据计算得到大气水汽含量<sup>[9]</sup>,然后用大气辐射传输模型 MODTRAN 4 模拟出 31、32 两个波段范围内大气水汽含量与大气透过率的关系,得到的大气透过率  $\tau_{31}$ 、 $\tau_{32}$ 。

在该研究中,为增加对比分析,分别采用两种方法反演地表温度。第一种方法是不对大气透过率进行视角校正,即根据上面的方法得到的参数直接代入劈窗算法公式得到的地表温度,表示为  $T_1$ ;第二种方法是先利用角度累加的方法计算得到每个像元的传感器视角  $\theta$ ,根据公式(3)、(4)所示的视角校正函数计算大气透过率的校正值  $\delta\tau_{31}(\theta)$ 和  $\delta\tau_{32}(\theta)$ ,然

后计算得到经过传感器视角校正的大气透过率  $\tau_{31}(\theta)$ 、 $\tau_{32}(\theta)$ ,计算公式如下:

$$\tau_{31}(\theta) = \tau_{31} - \delta\tau_{31}(\theta) \quad (5)$$

$$\tau_{32}(\theta) = \tau_{32} - \delta\tau_{32}(\theta) \quad (6)$$

对大气透过率用上面所述的方法进行校正后,连同估计出的地表比辐射率一起代入劈窗算法得到的地表温度,表示为  $T_\theta$ 。

#### 4.3 结果分析

根据上面的方法计算 31、32 两波段大气透过率,并与传感器视角校正后的透过率进行比较。为便于分析,在如图 2 所示的位置做一横剖面,比较分析结果如图 3、4 所示。从图上可以看出,视角变化对 31、32 两个波段透过率的影响趋势基本一致,随着视

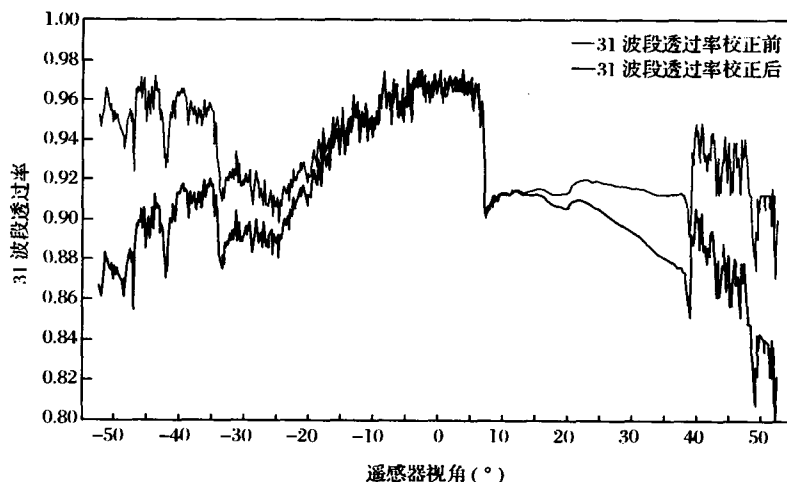


图 3 传感器视角对 31 波段透过率的影响

Fig. 3 Transmittance variations in band 31 with different view angle

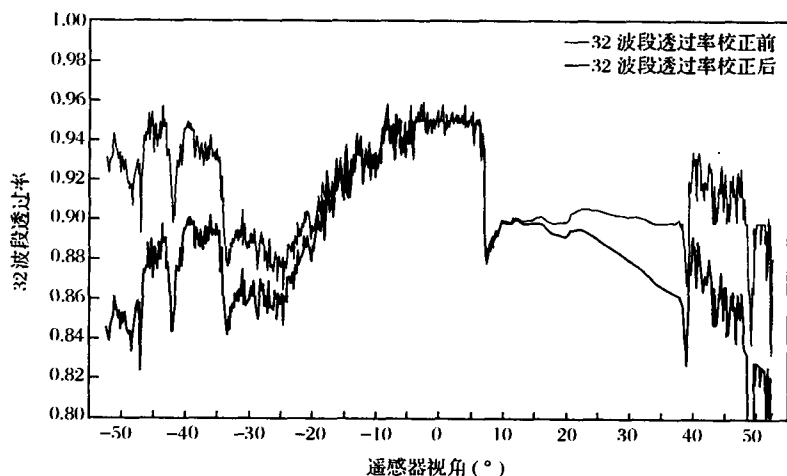


图 4 传感器视角对 32 波段透过率的影响

Fig. 4 Transmittance variations in band 32 with different view angle

角的增大,引起的透过率降低也迅速增大。当传感器视角达到 20°左右时,引起的透过率误差为 0.01;当

视角达到 27°时,透过率误差增加到 0.02;视角为 40°时,就可以引起 0.05 的透过率误差,最大可达

0.086。地表温度反演的参数敏感性分析表明<sup>[5]</sup>,当 31 波段透过率有 0.086 的估计误差时,可以引起的地表温度误差为 3~4℃。另外,图上中间部分有一个透过率的突变值,右侧的透过率明显比左侧低,这是因为左侧部分为陆地,右侧部分为海洋,海洋上空的水汽含量高,透过率相对比较低。

在基于 MODIS 数据的地表温度反演中,大气透过率是一个关键参数,透过率的估计对地表温度反演结果的影响非常大,图 5 是视角校正前后反演

得到的地表温度对比。图上可以看出,只有在中间视角较小的区域温度差别不大,当视角大于 20°时,温度差别就很明显了。为了增强对比的直观性,选取图像左侧视角大于 28°的区域分析如图 6 所示。当视角大于 28°时,温度误差平均值为 1.18℃,最大值可达 3.64℃,这对于地表温度反演来说是相当大的误差,严重影响了地表温度的应用。因此,地表温度反演中,遥感器的视角校正非常必要。总的来说,考虑不同视角影响的平均效果,反演地表温度中进行视角

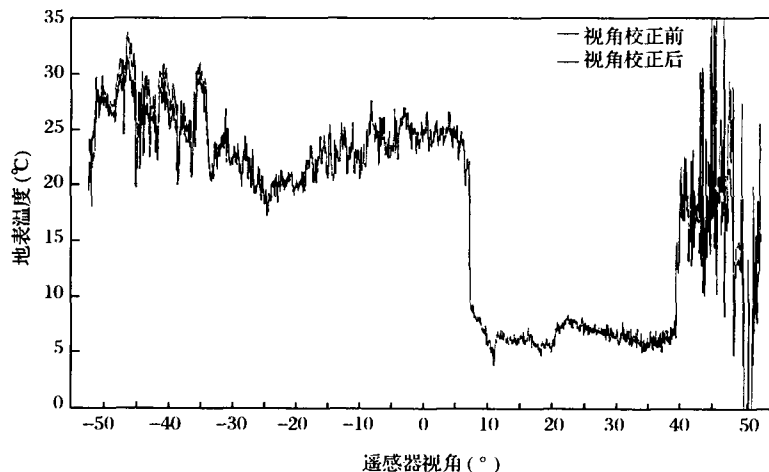


图 5 遥感器视角对地表温度的影响

Fig. 5 Land surface temperature variations with different view angle

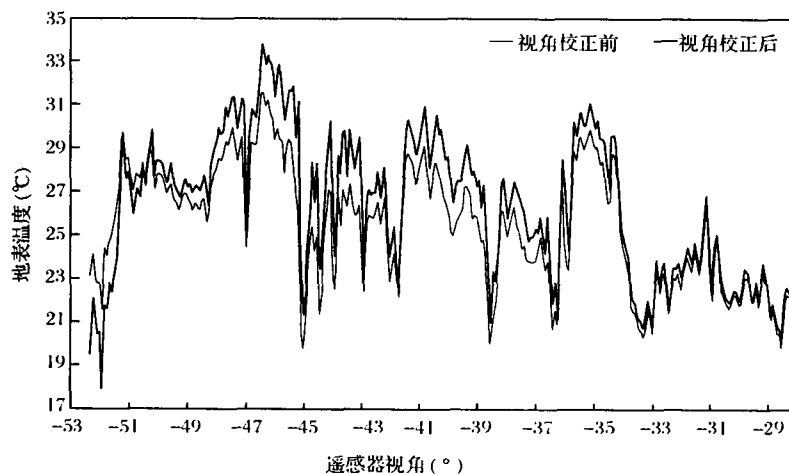


图 6 遥感器视角在图像边缘地区对地表温度的影响

Fig. 6 Land surface temperature variations with comparatively big view angle between 28° and 53°

校正可以提高温度反演的精度约为 0.3~0.6℃。

## 5 结 语

MODIS 数据是地球观测系统中很有特色的数据,波段涉及陆地、大气、海洋等综合信息,可用于观测地表温度、海洋水色、叶绿素、植被、火灾、雪盖、云等。MODIS 数据扫描带宽 2330 km,每 1~2 d 就可

以获得全球地表数据,对于区域性的全球资源环境研究有非常重要的意义。但是由于扫描带宽,星下点视角与边缘区的视角相差很大,视角的增大便延长了光线经过大气的路径长度,对大气透过率有非常大的影响。在地表温度反演中,大气透过率是一个关键参数,如果不进行遥感器视角的校正,就会对最终得到的地表温度产生较大的误差。实例分析证明,由

于扫描带宽的影响,视角增大引起的大气透过率降低可达 0.086,最大可以引起 3~4℃的地表温度误差,因此在 MODIS 地表温度反演中,传感器视角的影响不可忽视。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Qin Z G, Dall' Olmo, Karnieli A, *et al.* Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-AVHRR Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001a, 106 (D19): 22655-22670.
- [3] 覃志豪, Zhang Ming hua. 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, 48: 33-42.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wan Z, Dozier J. A Generalized Split-windows Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Space[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, 34: 892-905.
- [7] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric Correction for Land Surface Temperature Using NOAA-11 AVHRR Channels 4 and 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38: 19-34.
- [8] Sobrino J A, Raissouni N, Zhao Liang-Li. A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(2): 256-266.
- [9] Kaufman Y J, Gao B C. Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 871-884.

## Calibration of View Angle for Retrieving Land Surface Temperature from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

GAO Mao-fang<sup>1,2</sup>, QIN Zhi-hao<sup>1,2</sup>, GAO Ming-wen<sup>3</sup>,  
ZHANG Cai-zhi<sup>3</sup>, SEBU Li-ma<sup>3</sup>

(1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093 China*; 3. *Grass Workstation, Alukerqin county, Inner Mongolia, 025500 China*)

**Abstract:** This paper proposed the calibration of view angle when retrieving land surface temperature using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. MODIS instrument provides high radiometric sensitivity in 36 spectral bands ranging in wavelength from 0.4  $\mu\text{m}$  to 14.4  $\mu\text{m}$  with resolution of 250 m, 500 m, and 1 km at nadir. Two MODIS instruments integrated on Terra and Aqua provide global coverage every one to two days. These MODIS instruments offer a look at terrestrial, atmospheric, and ocean phenomenology for a wide and diverse community of users throughout the world. The view angle can reach  $\pm 55^\circ$  with a 2 330 km swath at the EOS orbit of 705 km. The transmittance path will be great different with the view angle from  $0\sim 55^\circ$  which will cause a big impact on the accuracy of land surface temperature retrieval. The impact of view angle to atmosphere transmittance and land surface temperature is discussed in detail. An example of bohai region indicate that the maximum view angle of MODIS data on the image edge can reach  $55.02^\circ$ , which can bring to the error of 0.086 for the atmosphere transmittance and 3.64 C for the land surface temperature.

**Key words:** MODIS, Land surface temperature (LST), Calibration of view angle, Atmospheric transmittance