

文章编号: 0455-2059(2007)04-0012-06

用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演 地表温度的方法

毛克彪^{1,2,3}, 唐华俊¹, 周清波¹, 陈仲新¹, 陈佑启¹, 覃志豪¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 介绍了辐射传输方程反演地表温度理论和传统参数的获取. 针对 MODIS 波段设置特点, 从 MODIS 的某些波段来反演大气参数, 从而突破传统参数获取的局限性, 提高了辐射传输方法在地表温度反演中的实用性. 最后用环渤海地区的 MODIS 影像对该地区的地表温度进行了反演, 并对 MODIS 的第 31, 32 波段反演结果做了对比分析.

关键词: 地表温度; MODIS; 辐射传输; 透过率

中图分类号: K909; TP753

文献标识码: A

Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation

MAO Ke-biao^{1,2,3}, TANG Hua-jun¹, ZHOU Qing-bo¹,
CHEN Zhong-xin¹, CHEN You-qi¹, QIN Zhi-hao¹

(1. Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We introduced in this paper the theory of radiance transfer and of how to get the key parameter transmittance. According to the character of the MODIS, we derived the water content from the image and computed the transmittance of 31 and 32 bands by building the relationship between the water content and the transmittance. Finally we used the radiance transfer equation to retrieve the land surface temperature of Huanbohai region, and analyzed the result of the MODIS 31 and 32 to retrieve LST.

Key words: land surface temperature; MODIS; radiance transfer; transmittance

辐射传输法是地表温度反演的最基本方法, 其最大优点在于它可以用于任何热红外遥感波段. 这一方法虽然可行, 实际应用起来比较困难, 除计算过程复杂之外, 大气模拟还需要精确的、实时的(卫星过天空时)大气剖面数据, 包括不同高度的温度、气压、水蒸汽质量分数、气溶胶质量分

数、CO₂ 质量分数、O₃ 质量分数等. 对于研究区域而言, 这些实时的大气剖面资料一般都没有. 因此, 大气模拟通常使用标准大气剖面数据来代替实时数据, 或者用非实时的大气探空数据代替. 因此, 辐射传输法通常用标准大气剖面数据替代. 由于标准大气是一种平均状态, 与每天的实时大气

收稿日期: 2006-08-20. 修改稿收到日期: 2006-11-16.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金、农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放基金资助.

作者简介: 毛克彪(1977-), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究方向为微波、热红外遥感、空间数据挖掘及 GIS 应用等,

E-mail: maokebiao@126.com.

剖面数据有很大差异,并且,就一个中大尺度的区域而言,不同地区的大气剖面状态不同,因此仅仅用标准大气进行大气模拟,并据此进行地表温度的反演,误差通常较大.这使地表温度反演结果的精度有时难以得到保证^[1-2].

但随着遥感技术的发展,从卫星影像中反演大气剖面资料成为可能,例如MODIS.由于MODIS传感器的设置是针对海洋、陆地、大气综合设置的,具有高光谱特点,可以从MODIS影像中反演不同高度的温度、气压、水蒸汽质量分数、气溶胶质量分数、CO₂质量分数、O₃质量分数等.所以对于MODIS而言,可以通过某些波段来反演大气参数,从而使辐射传输方程突破以往用大气模拟求参数的限制.本文主要对辐射过程中影响最大的水汽进行反演,进而计算关键参数大气透过率.

1 大气辐射传输理论基础

在卫星高度传感器接受到的热辐射除了地表自身的热辐射外,还有来自大气的上行和下行辐射,甚至邻近像元的辐射.由于辐射过程中的各种影响因素难以确定,所以地表温度的反演实际上是一个非常复杂的过程.为了精确地反演地表温度,许多研究者针对辐射传输的特点,做了许多合理的假设和约简,简化反演过程.例如,由于地面物体性质受环境的影响,使某些性质不能确定,从而使研究变得复杂.为了便于研究,人们定义了黑体,引入了辐射理论,从而明确热辐射与相应温度的关系.对于一个黑体,其辐射强度与温度和波长有直接关系,可用Planck辐射函数来表示

$$B_{\lambda}(T) = \frac{hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1)$$

其中: $B_{\lambda}(T)$ 是黑体光谱的发射率(W/(m²·sr·μm)); λ 是波长; k 是波尔兹曼常数, $k = 1.380658 \times 10^{-23}$ J/K; c 是光速, $c = 2.992458 \times 10^8$ m/s. 实际上,黑体只是一个理想的物体,它所吸收的能量等于它所辐射的能量,即比辐射率为1,但绝大多数自然地面是灰体.因此,为了反演真正的地表温度,必须引进比辐射率.在考虑了大气和地表比辐射率的影响之后,将辐射传输方程简化如下^[3-4]:

$$B_i(T_i) = \tau_i[\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i)I_i^{\downarrow}] + I_i^{\uparrow} \quad (2)$$

其中: T_s 为地表温度; T_i 为波段 i 的亮度温度; τ_i 为大气透过率; ε_i 为地表比辐射率; $B_i(T_i)$ 为传感器所接收到的辐射强度; $B_i(T_s)$ 为地表在 i 波段区间内的实际热辐射强度,直接取决于地表温度; I_i^{\uparrow} 和 I_i^{\downarrow} 分别为大气在 i 波段区间内向上和向下的热辐射强度.

大气剖面是个连续的剖面,由于不同高度大气成分、压力、温度都不一样,所以其辐射强度不一样.在理论上,大气的向上热辐射强度通常可用式(3)积分计算^[3].但在通常计算中,为了简化计算,将其按1 km间隔离散化.

$$I_i^{\uparrow} = \int_0^z B_i(T_z) \frac{\partial \tau_i(z, Z)}{\partial z} dz \quad (3)$$

同理,大气向下辐射也是一个连续的过程.由于向下和向上的辐射影响稍有不同,其总强度一般视作来自一个半球状方向的大气热辐射之积分,因此,通常可用如下公式表示^[3,5]:

$$I_i^{\downarrow} = 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} B_i(T_z) \frac{\partial \tau_i(\theta', z, 0)}{\partial z} \cos \theta' \sin \theta' dz d\theta' \quad (4)$$

其中: θ' 为大气向下辐射的方向角; ∞ 为地球大气顶端高程; $\tau'(\theta', z, 0)$ 为从高程 z 到地表大气向下的透过率.

辐射传输方法反演地表温度主要是使用大气模型来模拟大气对地表热辐射的影响,包括估计大气对热辐射传导的吸收作用以及大气自身的向上和向下的辐射,然后把这部分大气影响从卫星传感器观测到的热辐射总量中减去,得到地表的热辐射强度,最后把这一热辐射强度转化成相对应的地表温度.即将式(2)中大气上行 I^{\uparrow} 和下行 I^{\downarrow} 辐射及透过率(τ)用大气模型软件将其模拟求算出来.从而,可以利用方程(2)将 $B_{\lambda}(T_s)$ 计算出来;然后根据式(1)将地表温度 T_s 计算出来.

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln \left[\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_{\lambda}(T)} \right) + 1 \right]} \quad (5)$$

其中: c_1, c_2 为常数, $c_1 = hc^2 = 5.95522012 \times 10^{-17}$ W·m²; $c_2 = hc/k = 1.43876869 \times 10^{-2}$ m·K.

2 大气热辐射模拟过程

用MODTRAN模拟大气热辐射传输过程.MODTRAN是在LOWTRAN基础上改进的,具有更高的光谱分辨率.它对辐射传输的几何路径、气溶胶模式以及透过率模式提供了更多选择,而且引入了多次散射计算方法^[6-9],使模拟精度得以提高.为大气、气溶胶、云以及遥感影像大气校正研究分析提供了有力帮助.对于中分辨率的遥感影像而言,MODTRAN非常适合做大气校正的大气模型软件.本文针对中国中纬度地区进行分析,利用MODTRAN中提供的大气模型对热红外波段8~12 μm的大气透过率进行模拟.模拟过程如图1所示.

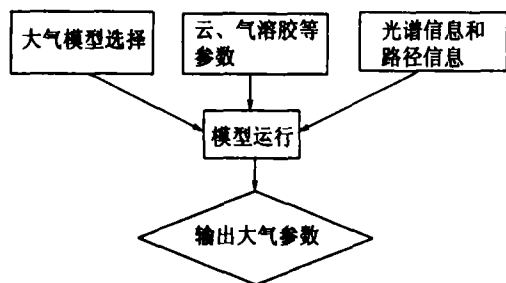


图 1 MODTRAN 求算大气参数流程图

Fig. 1 Frame map of parameter computation in MODTRAN

2.1 辐射强度与透过率模拟计算

MODTRAN4 界面提供了各种模式大气模型参数的选择输入。模式大气主要分为水平大气参数、热带大气、中纬度夏、冬季大气、极地夏、冬季大气以及美国标准大气等。大气路径选择包括水平、斜。计算时主要需要考虑的大气成分有：水汽、臭氧、甲烷、氮化物、碳氧化物等的剖面资料。另外，还要选择计算模式等。

当大气中的气溶胶质量分数达到一定程度时，其对辐射传输的影响很大。MODTRAN4 大气模型中考虑到了这一点，在输入气溶胶参数时将气溶胶分为对流层和平流层气溶胶，同时考虑季节变化的影响，对不同模式运用不同模型进行修正。对选择中纬度冬季、极地冬季模式大气时，用秋冬模型进行修正，选择热带、中纬度夏季、极地夏季和美国标准模式大气以及用户输入气溶胶参数时，采用春夏模型修正。同时考虑风速对气溶胶的影响，另外，还考虑降雨量及海拔高度的影响。对流层有 9 种模式气溶胶可选取，平流层有 8 种模式气溶胶可供选择。用户还可以选取自己的气溶胶参数数据，也可采用缺省形式给出的模式气溶胶，还可以将气溶胶消光系数转换为等效液态水质量分数形式。对不同类型气溶胶化学成分、潜分布及折射指数受湿度的影响等，具体可参考文献[9-10]，在进行辐射传输模式计算时，要考虑辐射流方向上的单次或多次散射，因此几何路径的选取也很重要。根据不同要求，可选择水平路径、两高度间的倾斜路径和射线倾斜路径以及路径长度和路径倾斜度等。同时要求用户给出所求位置的地理经纬度、海拔高度等。对太阳天顶角、方位角、地球半径和所求波段范围的选取也要考虑，散射过程还有单次散射和多次散射可供选择。由于 MODTRAN4 模式在短波波谱上分辨率较高，而短波区有几十万条吸收谱线，因此计算结果随波数起伏较大，可以采用模式提供一种平滑功能使

计算结果相对平滑。本文用中纬度地区的标准大气模拟得到部分模拟结果，如表 1。

表 1 中纬度标准大气部分模拟数据

Tab. 1 Simulation data of mid-latitude

波长	路径辐射	表面辐射	表面反射	总辐射	积分
10.707	7.89E-06	6.88E-04	7.89E-06	6.88E-04	1.96E-03
10.823	7.95E-06	6.78E-04	7.95E-06	6.78E-04	1.88E-03
10.941	7.97E-06	6.66E-04	7.97E-06	6.66E-04	1.80E-03
11.062	8.35E-06	6.82E-04	8.35E-06	6.82E-04	1.72E-03
11.186	8.51E-06	6.80E-04	8.51E-06	6.80E-04	1.64E-03
11.312	8.08E-06	6.31E-04	8.08E-06	6.31E-04	1.55E-03
11.442	8.78E-06	6.70E-04	8.78E-06	6.70E-04	1.47E-03
11.574	8.87E-06	6.62E-04	8.87E-06	6.62E-04	1.38E-03
11.710	8.74E-06	6.37E-04	8.74E-06	6.37E-04	1.30E-03
11.848	9.10E-06	6.48E-04	9.10E-06	6.48E-04	1.21E-03
11.990	9.29E-06	6.46E-04	9.29E-06	6.46E-04	1.12E-03
12.136	9.39E-06	6.38E-04	9.39E-06	6.38E-04	1.02E-03
12.285	8.62E-06	5.71E-04	8.62E-06	5.71E-04	9.31E-04
12.438	8.72E-06	5.64E-04	8.72E-06	5.64E-04	8.45E-04

2.2 针对 MODIS 数据的透过率计算方法

为提高大气透过率的估计精度，许多研究者已致力于大气水汽质量分数的遥感反演研究。他们主要利用热红外波段和微波发射波段来反演大气水汽质量分数，进而估算大气透过率。在 MODIS 的 36 个波段中，有 5 个波段是近红外，分别是 0.865 μm ，0.905 μm ，0.936 μm ，0.940 μm ，1.24 μm 。中间的 3 个波段是水汽吸收波段，而 0.865 μm ，1.24 μm 是大气窗口波段。这样设计的主要目的是为了利用 MODIS 的近红外波段来反演大气中的水汽质量分数。本文直接从遥感影像上反演大气的水汽质量分数，再进一步估计大气透过率，从而大大提高参数的精度和实时性^[11]。本文用到的 MODIS 影像摄取于 2003 年 8 月 11 日，包括了东部大部分地区。8 月份是个炎热的季节，正是夏季植被生长最繁茂之时。从影像可以看出，除环渤海地区外，影像的边缘部分变形很大，而且很多地方被云覆盖。另外，华北地区地势比较平坦，而且是中国主要的粮食产区。本文考虑到这些情况，将研究区选在环渤海地区的华北地区，既有陆地又有海洋，利于分析对比。对 MODIS 的第 2 和 19 波段进行大气水汽质量分数的反演，得到如图 2 所示的反演结果。

图 2 中右下角为坏条带，另外山东半岛和辽东半岛之间有一块云特别明显，在原始影像中可以看到。除掉这两个地方，整个水汽质量分数图的分布趋势很明显，且符合水汽分布规律。气柱水汽质

量分数区间为0.003~5.320 cm,平均气柱水汽质量分数为2.07 cm.对于气柱水汽的具体质量分数分布可以从图2中的剖面曲线分析可知,每个像元的水汽质量分数有明显差异,海洋上空水汽质量分数明显高于陆地上空.

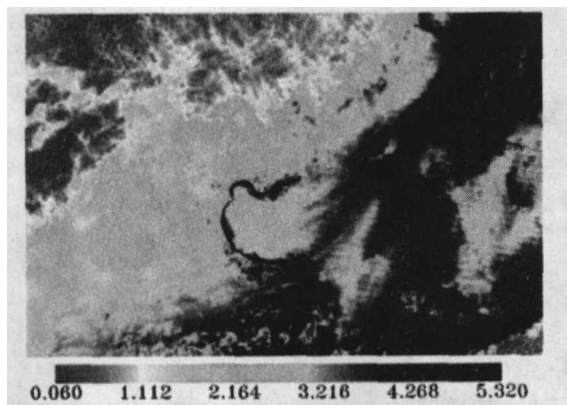


图2 环渤海地区的大气水汽质量分数遥感反演结果
Fig. 2 Atmospheric water vapor content retrieved from MODIS bands 2 and 19

大气透过率可通过MODTRAN4, LOWTRAN和6S等大气模拟软件来模拟估计.这种模拟需要大气剖面数据作为数据输入.然而实时大气剖面资料难以获取,往往用标准大气代替,再加以地面

资料修正.但天气状况变化无常,所以用标准大气模拟往往精度不高.毛克彪^[12]提出从MODIS近红外波段估计大气透过率的方法,首先用MOTRAN4来模拟大气透过率随大气水汽质量分数的变化,建立大气水汽质量分数与大气透过率的函数关系表达式,然后通过已知的大气水汽质量分数来计算大气透过率.具体推导求算参见文献^[12].对夏季的模拟数据进行线性回归,得到MODIS第31, 32波段的大气透过率与大气水汽质量分数之间的线性方程:

$$\text{第31波段: } \tau_{31} = -0.10671w + 1.04015, \quad R^2 = 0.995;$$

$$\text{第32波段: } \tau_{32} = -0.12577w + 0.99229, \quad R^2 = 0.996.$$

大气透过率与大气水汽质量分数的线性相关非常高,因此在已知大气水汽质量分数的情况下,可以用上面的表达式来近似估计大气透过率.因此,通过同一景MODIS图像,可以估计第31, 32波段的大气透过率.把这一方法应用到环渤海地区,得到第31, 32波段的大气透过率(图3).这一大气透过率的估计方法可以精确到每一个像元,从而提高了地表温度反演的精度和实时性.

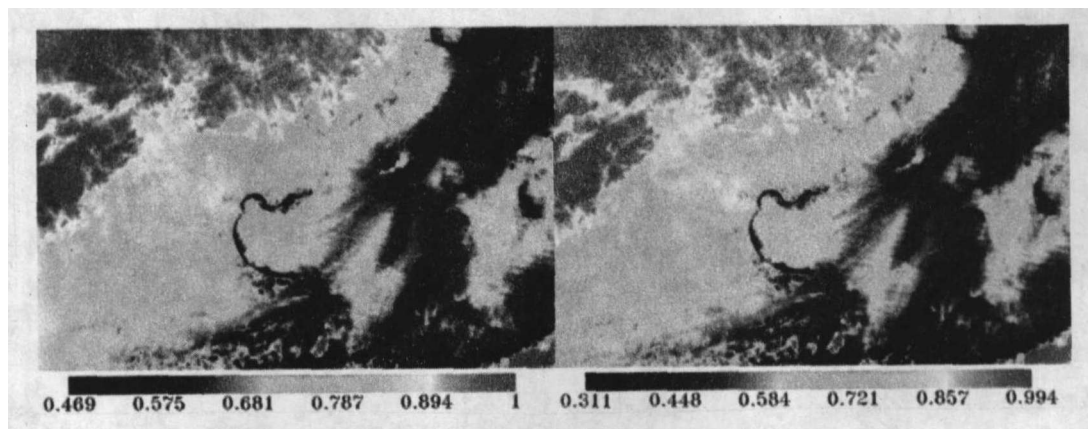


图3 MODIS的第31, 32波段大气透过率图

Fig. 3 Result of transmittance estimation for MODIS bands 31 and 32

3 算法应用

采用MODTRAN针对MODIS 31, 32波段用标准大气对环渤海地区进行模拟,将卫星上传感器接收到的热辐射值减去大气热辐射值,然后解式(2),求出地表温度.由于大气透过率是通过标准大气模拟出来的,其精度往往不高.从表1可以看出,大气向上热辐射和大气向下热辐射的地表反射相对地表热辐射的值很小,所以只考虑式(2)中的前两项.对于比辐射率的估算也是从红波段和近红外波段进行估计求算得到^[12-15].将从影像

上计算得到的大气透过率结果和比辐射率估算结果分别代入辐射传输方程(2),解方程得到地表温度的反演结果(图4).MODIS的第31, 32波段的星上亮度温度非常接近,小于1°C.第31波段的地表温度反演结果表明,环渤海地区最高地表温度为45.19°C,平均温度为22.76°C.第32波段反演的结果显示,最高温度48.55°C,平均气温25.87°C.平均温度相对夏季偏低,这主要是影像中包含了渤海地区,海上的温度相对较低,从而使平均温度与最高温度相差比较大.通过剖面分析统计,只有极少数的像元点高于44°C.从图4, 5可以看出,城

市热岛效应和海陆温度差异非常明显. 这种大面积温度分布规律在高分辨率的TM影像上体现不出来, 反映大区域的温度分布差异是MODIS影像的一个优势.

从MODIS第31, 32波段的最高温度和平均温度可以看出, 第32波段比第31波段反演的结果平均高 3°C 左右. 这主要是由于第32波段对水汽比

较敏感, 受水汽的影响比较大. 对于MODIS数据辐射传输方程、单窗、劈窗算法的地表温度反演算法评价中分析可以知道^[12], 对于单通道算法和辐射传输方程法用31通道反演的精度非常高, 与劈窗算法反演结果比较接近, 而32通道因对水汽比较敏感, 其误差比较大. 因此, 用辐射传输方程和MODIS反演地表温度采用第31波段比较合适.

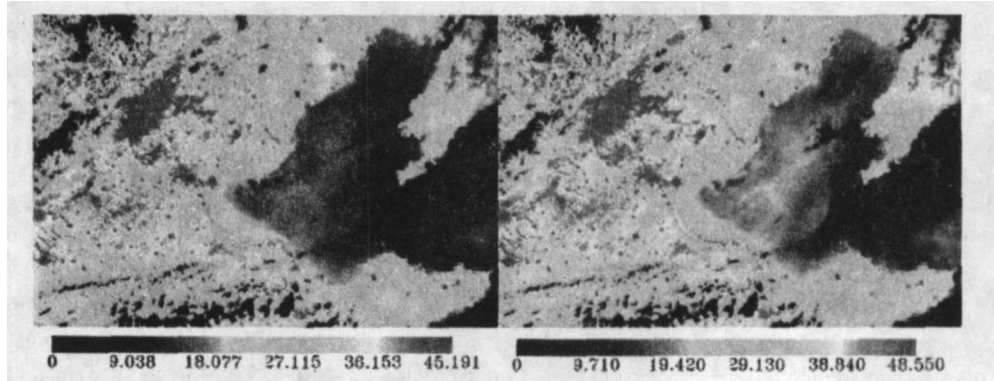


图 4 MODIS 第 31, 32 波段数据反演的环渤海地区地表温度空间分布

Fig. 4 Regional distribution of LST retrieved from MODIS bands 31 and 32 in Huanbohai Region

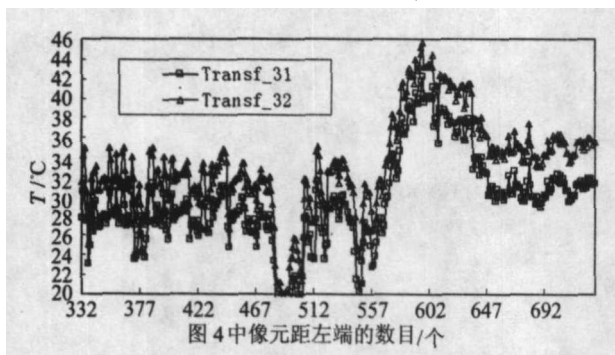


图 5 以北京为中心的地表温度剖面图

Fig. 5 Cross-section change of LST at center Beijing

4 结语

在分析热辐射传输的基础上, 深入研究了MODIS数据的地表温度反演方法及其在环渤海地区的应用. 虽然MODIS拥有8个热红外波段数据, 但对于地表温度的反演, 在大气透过率和地表比辐射率已知的情况下, 使用其中两个波段就足够了. 根据热红外辐射的大气传输特点, MODIS热红外数据的第31, 32波段最适合于用来进行地表温度的反演. 其中反演过程所需关键参数大气透过率是从MODIS的近红外波段数据反演得到大气水汽含量, 并进而根据水汽含量与大气率的关系进行估算. 由于是从同一景MODIS数据中获得大气水汽含量, 因此本研究提出的大气透过率估计方法保证了地表温度反演过程中所需大气参数的同步获取. 对于地表比辐射率的估计, 也是从同一景MODIS数据的可见光波段和近红外波

段来进行估计. 因此, 通过MODIS的可见光波段、近红外和中红外波段数据, 完全可以获得地表温度反演所需要的基本参数, 从而可以用辐射传输方程从MODIS数据的第31, 32波段来反演地表温度. 对MODIS的第31, 32波段反演结果做了对比分析. 分析表明用辐射传输方程和MODIS反演地表温度采用第31波段比较合适.

致谢 感谢美国加州圣巴巴拉分校教授施建成、万正明, 中国科学院地理所研究员李召良, NASA MODIS 研究小组成员, Vincent Chiang 等在该研究中提供的指导和资料.

参 考 文 献

- [1] 毛克彪, 施建成, 覃志豪, 等. 从MODIS数据中同时反演地表温度和比辐射率的多波段算法研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2005, 41(专辑): 49-54.
- [2] 阎福礼, 李震, 邵芸, 等. 基于NOAA/AVHRR数据的西部植被覆盖变化监测[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2003, 39(2): 90-94.
- [3] QIN Z H, ARNON KARNIELI G D O. Derivation of split window algorithm AVHRR data[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 22 655-22 670.
- [4] FRANCA G B, CRACKNELL A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in northeastern Brazil[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 15: 1 695-1 712.

- [5] KERR Y H, LAGOUARDE J P, IMBERNON J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41: 197-209.
- [6] 傅炳珊,陈渭民,马丽.利用MODTRAN3计算中国太阳直接辐射和散射辐射[J].南京气象学院学报, 2001, 24(1): 51-58.
- [7] MATTHEW Hanson. Atmospheric modeling using MODTRAN[EB/OJ]. (2003-02-10).http://www.omnium-gatherum.org.
- [8] 刘长盛,刘文保.大气辐射传输学(5)[M].南京:南京大学出版社,1990: 207-209.
- [9] 文军,王介民,何淑杰.辐射传输PCMod Win程序及应用前景评述[J].遥感技术与应用,1997, 12(4): 46-52.
- [10] BERK A, ANDERSON G, ACHARYA P, et al. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual[M]. Hanscom: Air Force Research Laboratory, 2003.
- [11] 毛克彪,覃志豪.用MODIS影像反演环渤海地区的大气水汽含量[J].遥感信息,2004, 81(4): 47-50.
- [12] 毛克彪.用于MODIS数据的地表温度反演方法研究[D].南京:南京大学城市资源学系,2004.
- [13] MAO K, QIN Z, SHI J, et al. A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26: 3 181-3 204.
- [14] 毛克彪,唐华俊,陈仲新,等.一个针对ASTER数据的劈窗算法[J].遥感信息,2006, 83(5): 7-11.
- [15] 毛克彪,施建成,覃志豪,等.一个针对ASTER数据同时反演地表温度和比辐射率的四通道算法[J].遥感学报,2006, 10(4): 593-599.

(上接第11页)

- [5] 张微,毛启明,章孝灿,等.不同高分辨率遥感图像融合技术特征比较[J].东海海洋,2002, 23(11): 23-31.
- [6] 韩玲,吴汉宁.像素级多源遥感影像信息融合的客观分析与质量评价[J].遥感信息,2005(5): 40-44.
- [7] 孙丹峰. IKONOS全色与多光谱数据融合方法的比较研究[J].遥感技术与应用,2002, 17(1): 41-45.
- [8] 黄荣峰,徐涵秋.利用Landsat ETM+影像研究土地利用/覆盖与城市热环境的关系——以福州市为例[J].遥感信息,2005(5): 36-39.
- [9] 陈建军,张树文,唐俊梅,等.基于Landsat 7 ETM+影像的大庆地区林带遥感调查[J].东北林业大学学报,2005, 31(5): 101-102.
- [10] 马荣华,戴锦芳.结合ETM和实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J].湖泊科学,2005, 17(2): 97-103.
- [11] 李存军,王纪华,刘良云,等.利用多时相Landsat近红外波段监测冬小麦和苜蓿种植面积[J].农业工程学报,2005, 21(2): 96-101.
- [12] 肖捷颖,葛京凤,沈彦俊,等.基于TM和ETM+遥感分析的石家庄市土地利用/覆被变化研究[J].地理科学,2005, 25(4): 495-500.
- [13] 杨何群,刘勇.黑河分水后额济纳绿洲生态恢复的遥感定量测算[J].兰州大学学报:自然科学版,2006, 42(4): 21-28.
- [14] 董晓峰,刘理臣,张兵,等.基于RS与GIS的兰州都市圈土地利用变化研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2005, 41(1): 8-11.
- [15] 刘咏梅,李锐,杨勤科.基于影像融合的陕北黄土丘陵沟壑区土地利用自动分类[J].中国水土保持科学,2004, 2(4): 6-10.
- [16] 周军,高鹏,田勤虎,等.新疆巴里坤ETM数据遥感地质填图的探索[J].国土资源遥感,2005(3): 57-61.
- [17] 贾永红.多源遥感影像数据融合技术[M].北京:测绘出版社,2005: 35.
- [18] 王伟智,刘乘瀚,施作霖.基于HSV空间的肿瘤免疫组化阳性目标自动提取分析[J].中国体视学与图像分析,2006, 11(1): 13-17.
- [19] 杜娟,李文锋.基于金字塔连接算法的彩色图像分割[J].武汉理工大学学报,2006, 28(1): 112-122.
- [20] 李存军,刘良云,王纪华,等.两种高保真遥感影像融合方法[J].中国图像图形学报,2004, 9(11): 1376-1385.