



南京大學

研究生畢業論文
(申請碩士學位)

論文題目 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究

作者姓名 毛克彪

学科、专业名称 地图学与地理信息系统

研究方向 遥感机理研究与地学应用

指导教师 覃志豪 教授

2004 年 05 月 24 日

学 号: MG0127049

论文答辩日期:

2004 年 5 月 24 日

指导教师:

覃志豪 (签字)

南京大学研究生毕业论文中文摘要首页用纸

毕业论文题目: 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究

地图学与地理信息系统 专业 2001 级硕士生姓名: 毛克彪

指导教师(姓名、职称): 覃志豪 教授

摘 要

本文在分析热红外遥感和现有的地表温度反演方法的基础上,分析了 MODIS 的波段设置特点,即虽然 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,使用其中的两个波段就足够了。根据热红外辐射在大气中传输的特点,MODIS 热红外数据的第 31 和 32 波段最适合于用来进行地表温度的反演。MODIS 的近红外波段适宜于反演大气水汽含量,而大气透过率主要是从 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来进行估算。由于是从同一景 MODIS 数据中获得大气水汽含量,因此本文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,从而形成了针对 MODIS 数据的地表温度反演方法。

从热红外遥感和地表温度的基本概念、Planck 方程简化、参数估计到算法实际应用和精度评价,得到的主要结论如下:

- (1) Planck 函数是描述热红外辐射强度与温度和波段的关系,在地表温度反演中是关键函数。本项研究探讨了 Planck 函数的线性简化方法,根据热红外辐射与温度之间的线性关系,对 MODIS 的第 31 和 32 热红外波段分别简化为:

$$B_{31}(T)=0.13834T_{31}-31.80148 ; B_{32}(T)=0.11952T_{32}-26.8045。$$

- (2) 热红外波段的大气透过率是地表温度反演的基本参数。本研究分析了大气水汽含量与近红外波段的大气透过率关系,介绍了从近红外波段大气透过率估计大气水汽含量的方法。针对 MODIS 的多波段特征,我们认为从同一景 MODIS 影像的近红外数据中反演大气水汽含量是可行的。通过反演大气水汽含量,我们进一步提出了 MODIS 热红外波段(31 和 32 波段)的大气透过率估计方法。我们用这一估计方法对环渤海地区的大气水汽含量进行了反演,反演结果表明大气水汽含量的估计方法是可行的。
- (3) 在总结现有热红外波段大气透过率与大气水汽含量之间的关系基础上,建立了 MODIS 的第 31 和 32 热红外波段大气透过率与大气水汽含量之间的关系。在夏季,MODIS 的第 31 和 32 热红外波段大气透过率可以分别估计为: $\tau_{31}=-0.10671w+1.04015$; $\tau_{32}=-0.12577w+0.99229$,其中 w 是大气水汽含量 (g/cm^2);在冬季:第 31 和 32 波段的大气透过率可以分别估计为: $\tau_{31}=-0.1041w+0.92314$; $\tau_{31}=-0.13722w+0.97686$ 。我们用这些关系式对环渤海地区的 MODIS 数据的 31 和 32 波段的大气透过率进行了估计。
- (4) 在 MODIS 热波段 1KM 的尺度下,植被、土壤和水体是 MODIS 像元的基本地表构成要素。本文用 ASTER 提供的常用地物比辐射率曲线,对这些构成要素在 MODIS 数据的第 31 和 32 波段区间的比辐射率进行了估计。通过 NDVI 我们间接地估算每个像元中的植被、土壤和水体的覆盖度。因此,从同一景 MODIS 数据中,我们完全可以获得地表温度反演所需要的地表比辐射率。我们运用这一估计方法对环渤海地区的 MODIS 数据的第 31 和 32 热红外波段的地表比辐射率进行了估算,结果表明通过这种方法来获得混合像元的地表比辐射率是合理可行的,从而为地表温度反演中的参数估计提供了新的途径。
- (5) 现有的地表温度反演方法主要有劈窗算法和单窗算法。这些算法都不是直接对 MODIS 数据推导的。本研究在分析这些算法的推导过程

的基础上，结合我们对 Planck 函数的线性简化和上述提出的大气透过率和地表比辐射率估计方法，我们获得了针对 MODIS 的地表温度反演方法，即适合于 MODIS 数据的单窗算法和劈窗算法。我们用这两种算法对环渤海地区的 MODIS 数据进行了实际应用。

- (6) 用大气模拟数据法对我们提出的适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法进行了精度评价。分析表明，单窗算法对 31 波段和劈窗算法对地表反演的精度比较高。在假定地表比辐射率已知的情况下，劈窗算法使用真实透过率和估算透过率反演的精度都在 1K 以下；对于单窗算法，使用 31 通道的精度比较高，而 32 通道相对较差。为了评价透过率变化时对地表温度反演结果的影响，我们还分别对这两种算法进行大气透过率的敏感性分析。结果表明，劈窗算法和单窗算法对大气透过率的微小变化不是非常敏感，因此，大气透过率估计的微小误差不会引起地表温度反演结果的很大变化。但是，相对而言，劈窗算法的地表温度反演精度比单窗算法的精度要高将近 1K。

关键词：亮度温度，地表温度，MODIS，辐射传输方程，单通道算法，劈窗算法，多通道算法

南京大学研究生毕业论文英文摘要首页用纸

THESIS: A Study of Methods for Land Surface Temperature Retrieval
from MODIS Data

SPECIALIZATION: Cartography & GIS

POSTGRADUATE: MAO Kaobiao

MENTOR: Professor QIN Zhihao

ABSTRACT

With rapid development of modern remote sensing technology, we can gain plenty of remote sensing data received from many satellite sensors faster than ever. In the future, the main obstacle of remote sensing applications is not in lack of data sources, but its ability to extract more useful information from the available remote sensing data. Retrieval of land surface temperature (LST) is an important aspect of these applications, and LST is an important research orientation of the remote sensing.

Land surface temperature (LST) is an important factor controlling most physical, chemical and biological processes of the Earth. Knowledge of LST is necessary for many environmental studies and management activities of the Earth's resources. So far a number of remote sensing systems with one or several thermal bands such as NOVA-AVHRR and Terra MODIS have been launched into space to monitor macro-scale change of land surface temperature. These enable us to obtain timely the spatial variation of regional even global LST dynamics through remote sensing. Moreover, the cost for the obtaining is low and the information update is quick.

With advance of remote sensing science, various algorithms for LST retrieval have been proposed. Different algorithms and methods are based on different considerations and are suitable for different conditions. However, only one algorithm on LST retrieval from MODIS data has been published. This algorithm needs to solve simultaneously the required 14 equations built from consecutive day and night MODIS images, which makes the algorithm complicated and difficult to operate in

the real world. With this consideration, one of this research's objectives is to develop a much simpler method suitable for MODIS to retrieve LST. The main conclusions of the study can be summarized as follows:

- (1) Planck's function is an important function in the course of land surface temperature retrieval. Because the Planck function is complex, linearization is necessary for algorithm development of LST retrieval. In this research, many discussions have been done to linearization of Planck's function. We propose the following methods for MODIS band 31 and 32: $B_{31}(T)=0.13834T_{31}-31.80148$ and $B_{32}(T)=0.11952T_{32}-26.8045$.
- (2) Atmospheric transmittance of thermal band is one of the main parameters in of land surface temperature retrieval. In this research, we analyze the relationship between atmospheric water vapor content and transmittance in NIR bands, and develop a method to retrieve water vapor content through NIR band data of the same MODIS image. Then according to multi-band character of MODIS, we believe that it is feasible to retrieve the water content from the NIR band of the same MODIS image. We retrieve the atmospheric water content of Huanbohai region through MODIS image.
- (3) On the summarization of the relationship between the transmittance of TIR and the atmospheric water content, we build two function expressions between water content and TIR band 31 and 32 of MODIS. In summer, the relation between atmosphere water content and transmittance of MODIS band 31 may express: $\tau_{31}=-0.10671w+1.04015$, (x is atmosphere water content); for band 32, the expression is: $\tau_{32}=-0.12577w+0.99229$. In winter, for band 31, the expression is: $\tau_{31}=-0.1041w+0.92314$; for band 32: $\tau_{31}=-0.13722w+0.97686$. We use relation expression of transmittance and TIR in summer to compute the atmosphere transmittance of MODIS band 31 and 32 in the Huanbohai region through the atmosphere water content, which is retrieved by using NIR band of the same MODIS image. The results indicate that this method is available.
- (4) After analyzing the method of emissivity estimation of land surface, we think the emissivity can be estimated through the components of one pixel at the scale of

MODIS. Vegetation, soil and water are the basic ingredients for MODIS TIR band image. We get their(vegetation, soil, water) emissivity of MODIS band 31 and 32 through using curve of emissivity provided by ASTER. If we can get the ratio of three ingredients, we can estimate the land surface emissivity. Fortunately, the ratio can be obtained by NDVI. We use this method to estimate the land surface emissivity of Huanbohai region by MODIS image. The results indicate that this method is available.

- (5) Nowadays, there are many algorithms about LST, such as split-window and mono-window, but they are not derived from MODIS. After analyzing these algorithms and utilizing the simplification function of Planck function, we propose a method that can be used to retrieve LST by using MODIS band 31 and 32. In this method, the most important is that we estimate some parameters from the same image, which is suitable for the MODIS image. We use these two methods to retrieve the LST of Huanbohai region by using MODIS image and get the spatial distribution of LST in this region.
- (6) Finally, we evaluate the accuracy of the method proposed in the study using simulation data generated by atmosphere model LOWTRAN. For split-window algorithm, when real transmittance (the simulation results) is used, average accuracy of LST retrieval can be high up to 0.46K; when the estimated transmittance through the equations established in the study, the accuracy is 0.575K. This indicates that the accuracy of transmittance estimation has great impacts on the accuracy of LST retrieval. For mono-window algorithm, when real transmittance is used, the average accuracy of LST retrieval is 0.895K for band 31 and 1.868K for band 32. The accuracy difference between the two bands is about 1K. Thus band 31 is better than band 32 for LST retrieval. When the estimated transmittance is used, the average accuracy is 1.128K for band 31 and 2.065K for band 32. In order to estimate the influence, we conduct sensitivity analysis of transmittance to LST retrieval. The results indicate that, small changes of transmittance do not have significant influence on accuracy of LST retrieval. Nevertheless, if the transmittance and transmittance can be accurately

estimated, the average accuracy of LST by split-window will be higher than that by mono-window algorithm. At the same time, it also proves that LST retrieval by two TIR bands is better than that by only TIR band.

Key words: Bright temperature; LST; Mono-window algorithm; MODIS; Transfer equation; Split-window algorithm; Multi-band algorithm

目 录

摘 要	I
目 录.....	VIII
中文图表索引	XI
英文图表索引	XIII
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目标和研究内容.....	1
1.3 国内外研究现状与进展.....	3
1.4 技术路线和创新点.....	4
1.5 论文结构.....	6
第 2 章 热红外遥感与地表温度的基本概念	7
2.1 Planck 方程与黑体辐射.....	7
2.2 比辐射率.....	8
2.3 地表温度.....	8
2.4 辐射温度.....	9
2.5 亮度温度.....	9
2.6 大气窗口与热红外遥感.....	10
2.7 热辐射传输方程.....	10
2.8 地表温度反演的常用方法与分析.....	10
2.9 本章小结.....	12
第 3 章 数据选择及研究区介绍	13
3.1 遥感数据选择.....	13
3.2 MODIS 影像选择.....	15
3.3 辐射率校正.....	15
3.4 几何校正.....	16
3.5 本章小结.....	17
第 4 章 方程简化、透过率及地表比辐射率的估计	19
4.1 Planck 方程简化.....	19

4.2 大气水汽含量与透过率关系.....	21
4.2.1 反演大气水汽含量算法介绍.....	22
4.2.2 MODIS 影像水汽反演应用.....	24
4.2.3 透过率模拟计算.....	24
4.3 比辐射率估计.....	29
4.3.1 地表比辐射率的估计方法.....	29
4.3.2 比辐射率估计方法应用.....	31
4.4 本章小结.....	34
第5章 辐射传输方程、劈窗、单窗算法的推导及应用	35
5.1 辐射传输算法.....	35
5.1.1 大气热辐射模拟过程.....	35
5.1.1.1 大气资料输入.....	36
5.1.1.2 气溶胶资料输入.....	36
5.1.1.3 几何信息和光谱信息输入.....	37
5.1.1.4 数据分析.....	38
5.1.2 算法应用.....	40
5.2 劈窗算法.....	42
5.2.1 劈窗算法的推导.....	43
5.2.2 劈窗算法的应用.....	44
5.3 单窗算法.....	45
5.3.1 单窗算法的推导.....	46
5.3.2 单窗算法的应用.....	46
5.4 三种温度反演结果对比.....	47
5.5 本章小结.....	50
第6章 算法评价	52
6.1 劈窗算法评价.....	52
6.2 单窗算法评价.....	55
6.3 本章小结.....	57
第7章 结论与展望	58

参考文献	63
致谢.....	66
硕士期间主要科研成果	67

中文图表索引

图 1.1 本项研究的技术路线示意图.....	5
表 2.1 典型地物的热力学温度和辐射温度之间的比较.....	9
表 3.1 MODIS 技术参数.....	14
图 3.1 本研究所选择的 MODIS 图像.....	15
图 3.2 MODIS 影像几何校正流程图.....	16
图 3.3 几何校正图像.....	18
图 3.4 校正后的研究区影像.....	18
表 4.1 MODIS 第 31 和 32 波段的热辐射强度随温度的变化关系.....	20
图 4.1 第 31 波段辐射强度 R 随温度的变化关系.....	20
图 4.2 第 32 波段温度与辐射率 R 的关系.....	21
图 4.3 MODTRAN 模拟水汽透过率图.....	23
图 4.4 比辐射率与大气水汽含量关系图.....	23
图 4.5 环渤海地区的大气水汽含量遥感反演结果.....	24
表 4.2 大气水汽与透过率模拟结果.....	25
图 4.6 MODIS 的第 31 和 32 波段大气透过率随大气水汽含量在夏季中纬度大气情况下的变化关系.....	26
图 4.7 MODIS 的第 31 和 32 波段大气透过率随大气水汽含量在冬季中纬度大气情况下的变化关系.....	27
图 4.8 MODIS 的第 31 波段大气透过率图.....	28
图 4.9 MODIS 的第 32 波段大气透过率图.....	28
图 4.10 MODIS 第 31 和 32 波段的大气透过率剖面图.....	29
图 4.11 植被的比辐射率随波长而变化的曲线图.....	30
图 4.12 裸土的比辐射率随波长而变化的曲线图.....	31
图 4.13 水体的比辐射率随波长而变化的曲线图.....	31
图 4.14 NDVI 分级图.....	32
图 4.15 PV.....	32
图 4.16 MODIS 第 31 波段的地表比辐射率分布图.....	33
图 4.17 MODIS 第 32 波段的地表比辐射率分布图.....	33

图 4.18 比辐射率分布剖面图.....	34
图 5.1 MODTRAN 求算大气参数流程图	36
图 5.2 MODTRAN 大气模拟的大气模型输入选择.....	36
图 5.3 气溶胶参数输入图.....	37
图 5.4 几何与光谱信息输入图.....	38
图 5.5 大气水汽的透过率.....	38
图 5.6 二氧化碳的透过率.....	39
图 5.7 臭氧透过率.....	39
图 5.8 总透过率图.....	39
表 5.1 中纬度标准大气模拟结果.....	41
图 5.9 根据 MODIS 第 31 波段数据用辐射传输法反演而得的环渤海地区地 表温度空间差异.....	41
图 5.10 根据 MODIS 第 32 波段数据用辐射传输法反演而得的环渤海地区 地表温度空间差异.....	42
图 5.11 根据 MODIS 第 31 和 32 波段数据用劈窗算法反演而得的环渤海地 区地表温度空间差异.....	45
图 5.12 第 31 波段地表温度反演结果.....	47
图 5.13 第 32 波段地表温度反演结果.....	47
图 5.14 以北京为中心的地表温度剖面图.....	48
图 5.15 以天津为中心温度剖面图.....	49
图 5.16 以北京为中心的地面温度变化剖面图.....	49
图 5.17 以北京为中心的地表温度剖面图.....	50
表 6.1 中纬度地区大气辐射模拟数据表.....	53
表 6.2 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据表.....	54
表 6.3 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据表.....	55
表 6.4 参数敏感性分析表.....	56
表 6.5 中纬度地区单窗算法地表温度反演数据表.....	56
表 6.6 中纬度地区单窗算法地表温度反演数据表.....	56

Legend of Tables and Figures

Fig 1.1 Frame Map of Retrieving of LST by MODIS.....	5
Fig 3.1 Original Image of MODIS for the Study	15
Fig 3.2 Flowing Chart of Geometric Rectification for MODIS Image	16
Fig 3.3 Resulted Image of Geometric Rectification	18
Fig 3.4 Rectified Image of the Study Area	18
Fig 4.1 Relationship of Temperature and Radiance for MODIS Band 31	20
Fig 4.2 Relationship of Temperature and Radiance for MODIS Band 32	21
Fig 4.3 Simulation of Water Transmittance by MODTRAN.....	23
Fig 4.4 Relationship of Transmittance and Water Content of Atmosphere	23
Fig 4.5 Atmospheric Water Vapor Content Retrieved from MODIS Band 2 and 19	24
Fig 4.6 Relationship of Atmospheric Transmittance and Water Vapor Content for MODIS Band 31 Under Mid-latitude Summer Atmosphere	26
Fig 4.7 Relationship of Atmospheric Transmittance and Water Vapor Content for MODIS Band 31 Under Mid-latitude Winter Atmosphere.....	27
Fig 4.8 Result of Transmittance Estimation for MODIS Band 31.....	28
Fig 4.9 Result of Transmittance Estimation for MODIS Band 32.....	28
Fig 4.10 A Cross-section Change of Atmospheric Transmittance for MODIS Band 31 and 32	29
Fig 4.11 Change of Emissivity with Wavelength for Vegetation.....	30
Fig 4.12 Change of Emissivity with Wavelength for Bare Soil	31
Fig 4.13 Change of Emissivity with Wavelength for Water	31
Fig 4.14 Map of NDVI Classification	32
Fig 4.15 Map of PV	32
Fig 4.16 Land Surface Emissivity of Huanbohai Region for MODIS band 31	33
Fig 4.17 Land Surface Emissivity of Huanbohai Region for MODIS Band 32.....	33
Fig 4.18 Cross-section Change of Land Surface Emissivity in Huanbohai Region	34
Fig 5.1 The Frame Map of MODTRAN Parameter Computation.....	36
Fig 5.2 Interface of MODTRAN Atmosphere Model Parameter Input.....	36

Fig 5.3 The Aerosol Parameter Input	37
Fig 5.4 Geometry and Spectral Parameter Input	38
Fig 5.5 The Curve of Simulation Water Transmittance	38
Fig 5.6 The Curve of Simulation of Dioxide Transmittance	39
Fig 5.7 The Curve of Simulation of Ozone Transmittance	39
Fig 5.8 The Curve of Total Transmittance	39
Fig5.9 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 31 Data	41
Fig5.10 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 32 Data	42
Fig 5.11 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 31 and 32 Data	45
Fig 5.12 Land Surface Temperature Retrieved from MODIS Band 31 by Mono-window Algorithm	47
Fig 5.13 Land Surface Temperature Retrieved from MODIS Band 32 by Mono-window Algorithm	47
Fig 5.14 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Radiance Transfer Model Method	48
Fig 5.15 Cross-section Change of LST Centering at Tianjin and Retrieved by Mono-window Method	49
Fig 5.16 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Mono-window and Split Window Methods	49
Fig 5.17 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Mono-window, Split Window and Radiance Transfer Model Methods	50
Table2.1 Comparison of Kinetic Temperature and Radiant Temperature for Typical Objects .	9
Table 3.1 MODIS Technical Specifications	14
Table 4.1 Relationship of Emission and Temperature for MODIS Bands 31 and 32.....	20
Table 4.2 The Result of Simulation Between Transmittance and Water Content.....	25
Table 5.1 The Simulation Result of Mid-latitude	40
Table 6.1 The Simulation of Atmosphere Transformation in Mid-Altitude	53
Table 6.2 The Parameters of Split Window	53
Table 6.3 The Retrieving Results by Split Window	54
Table 6.4 The Sensitivity Analysis of Parameters	55

Table 6.5 The Retrieving Results by Mono-Window in Mid-Altitude.....	56
Table 6.6 The Retrieving Results by Mono-Window in Mid-Altitude (real transmittance)...	56

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

地表能量交换信息的获取是监测区域资源环境变化的一个重要环节。地表温度是地表能量平衡的决定因素之一。因此, 获取区域地表温度空间差异, 并进而分析其对区域资源环境变化的影响, 是区域资源环境动态监测的重要内容。传统的做法是通过地面有限观测点的观测数据来推论分析区域地表温度的空间差异。这种地面观测方法不仅艰难而且非常昂贵。近 20 年来, 热红外遥感技术的飞速发展为快速地获取区域地表温度空间差异信息提供了新的途径。地表温度在区域资源环境研究中的重要性已经使热红外遥感成为遥感研究的一个重要领域, 目前已经开发了很多实用的地表温度遥感反演方法, 如热辐射传输方程法、劈窗算法、单窗算法和多通道算法。许多算法是针对具体的传感器开发的, 例如劈窗算法是用来从具有两个热红外波段的 NOAA/AVHRR 数据中反演地表温度, 而单窗算法则主要是用于只有一个热红外波段的 Landsat TM 数据。1999 年搭载 MODIS 遥感的对地观测卫星发射成功, 为全球和区域资源环境动态监测开辟了又一新的途径。MODIS 是一个拥有 36 个波段的中分辨率遥感系统, 每 1~2 天可获得一次全球观测数据, 其飞行与太阳同步, 每天同一区域至少可获得昼夜两景图像, 并且是免费接收, 因此非常适合于中大尺度的区域资源环境动态监测。在 MODIS 的 36 个波段中有 8 个是热红外波段, 因而非常合适于区域尺度的地表热量空间差异分析。但是, 目前针对 MODIS 遥感数据的地表温度反演算法还很少。现有的研究基本上是直接应用 MODIS 的星上亮度温度来进行分析。由于大气的影 响, 星上亮度温度与真正 的地表温度有很大差距。在晴空时其差距为 3~6°C; 在大气水分含量较高情况下, 这种差异可以超过 10°C。因此, 为了更准确地分析区域热量空间差异, 很有必要对 MODIS 所观测到的亮度温度进行大气校正, 反演出真正 的地表温度。本项研究将分析 MODIS 的热红外波段特征, 探讨 MODIS 热红外数据的地表温度反演方法及其参数确定, 并对环渤海地区的地表温度空间差异进行反演和分析。

1.2 研究目标和研究内容

本项研究将阐明热红外遥感的基本概念, 分析现有的地表温度反演方法(辐射传输方程法、单窗算法、劈窗算法和多通道算法), 提出适合于 MODIS

数据的地表温度反演方法，并分析影响其反演精度的基本因素：大气透过率和地表比辐射率。其次，根据 MODIS 的波段特征，利用 MODIS 的近红外波段来反演大气水汽含量，并通过大气水汽含量与热红外波段透过率的关系来求算大气透过率。MODIS 热波段数据的星下地面分辨率为 1km。在这种空间分辨率下，MODIS 图像的像元通常是混合像元，由不同比例的植被、裸地等地表类型组成。本项研究将考虑这些地表类型对地表比辐射率的影响，进而提出地表比辐射率的估计方法。最后分别利用热辐射传输方程法、劈窗算法、单窗算法来反演环渤海地区的地表温度，并分析该地区地表温度空间差异。最后，对现有的地表温度反演方法进行分析评价，并展望基于 MODIS 数据的地表温度反演及其应用发展前景。

因此，本研究的主要内容是：

(1) 热红外遥感基本概念

热红外遥感是获取地表热量空间分布状况的一种非常有效的手段。由于大气和地表的双重影响，热红外遥感观测到的不是地表的真实温度，而是混合有大气影响和地表热特征影响的亮度温度。从热红外遥感数据中反演地表真实温度，必须考虑大气的的影响和地表的热特征影响。对于前者，主要有大气热辐射和大气吸收问题。对于后者，地表比辐射率是一个非常重要的因素。因此，在探讨地表温度反演之前，需要对这些概念有一个清楚的认识。

(2) 大气透过率和地表比辐射率的估计

大气透过率和地表比辐射率是从热红外遥感数据中反演地表温度的基本参数。MODIS 传感器安装在高空卫星平台上，在探测地面光谱信息的过程中必然受到大气的的影响。在热红外波段，这种影响包括大气热辐射和大气对地表热辐射的吸收作用。大气的这种吸收作用直接决定着地表热辐射在大气中的透射程度即大气透过率。因此，如何正确地估计大气的透过率，是地表温度反演的关键。同样，地表不是一个具有完全辐射能力的黑体。它发射的热辐射比黑体在相同温度下发射的热辐射低。也就是说，传感器所探测到的地表热辐射不能真正地反映其真实的地表温度，中间还有一个比辐射率问题。如何正确地估计地表的比辐射率，也是地表温度遥感反演的关键。本项研究将根据 MODIS 数据的特征，探讨大气透过率和地表比辐射率的估计方法。

(3) 用于 MODIS 热波段的地表温度反演方法探讨

虽然地表温度遥感反演研究已经提出了许多方法,如热辐射传输方程法、单窗算法和劈窗算法。但这些方法都不是专门对 MODIS 数据提出的。因此,目前还没有一个现成的方法可以用来直接从 MODIS 热波段数据中反演出地表温度。但是,要想推导出一个全新的专门用于 MODIS 数据的地表温度反演方法,难度也相当大。值得庆幸的是,MODIS 有 8 个热红外波段,因此,完全可以通过对现有的热辐射传输方程法、单窗算法和劈窗算法进行适当的改进,使之适合于 MODIS 热红外数据,从而可以用来进行 MODIS 数据的地表温度反演。

(4) 地表温度反演精度的分析验证

虽然现有的地表温度反演方法通过适当改进之后可以用来从 MODIS 数据中反演地表温度,但这些方法毕竟不是直接针对 MODIS 热红外波段数据提出来的,因此,对这些反演方法的精度进行验证,并分析其可能的反演误差,是十分重要的。地面同步观测数据是进行这种验证的最佳数据,但这种同步观测根本不可能实现。本项研究将通过大气模拟模型的模拟数据来进行验证,并分析大气透过率和地表比辐射率估计误差可能造成的地表温度反演误差。

1.3 国内外研究现状与进展

国外热红外遥感研究比国内要早。从第一台热红外仪器算起,已经有 40 多年的历史[1]。真正的地表温度算法是从 80 年代开始的[1-2]。到目前这止,已经提出了至少有 17 个劈窗算法 [3]。这些算法的主要区别在于对各参数的计算方法不同,因此可以把这些算法归纳为四大类[4]:比辐射率模型,两基本参数模型、复杂模型、热辐射量模型和简单模型。单窗算法是覃志豪等针对只有一个热红外波段的 Landsat TM/ETM 数据提出来的地表温度反演方法[5-6]。Jiménez-Muñoz and Sobrino 在[7]提出了一个普适性单通道算法。具有代表性的多波段算法是 Wan and Li 针对 MODIS 在 [8]中提出来的,其特点是对地表温度和地表比辐射率的同时反演,但需要昼夜两景图像才能进行反演。

我国的热红外遥感研究也比较多。刘玉洁,杨忠东等在[9]中介绍了 MODIS 遥感影像在大气、陆地、海洋反演的参数的各种算法和 MODIS 数据的应用。李小文,汪骏发等在[10]主要介绍了二向性反射的几何光学模型和定量遥感的“病态”反演理论,并对非同温混合像元热辐射尺度效应模型进行了分析和验

证, 而且对多阶段目标决策反演策略的参数的不确定性和敏感性进行了分析。李小文对热红外的遥感机理做了比较深入的研究, 他在[10-11]中讨论了地表非同温像元的发射率的定义问题及对分离真实温度和发射率的影响, 同时强调了先验知识在反演中的作用。苏理宏在[12]中对非同温的混合像元和比辐射率的方向性进行了研究。徐希孺等[13-15]探讨了热红外多角度遥感问题, 认为只有当扫描方向与作物垄向相垂直时才最有利于作物叶冠和土壤温度的反演, 并提出了混合像元组分温度的反演方法。陈良富等[16-17]研究了热红外遥感中大气下行辐射的近似计算及通道间信息相异性对陆面温度反演的影响。孙毅义等[18]分析了地面发射率随观测角度而变化, 认为热红外辐射具有方向性特征。陈良富等[19]提出了非同温混合像元热辐射组分有效比辐射率的概念, 并验证该比辐射率与组分温度无关。李召良等[20]利用白天和晚上中红外和热红外的数值差异提出了一种用于提取方向比辐射率的物理方法。覃志豪也对热红外遥感原理, 特别是地表温度的反演方法做了大量的研究[2-6][21]。针对 MODIS 热红外数据的地表温度反演算法在国内还未见到发表。

1.4 技术路线和创新点

MODIS 有 8 个热红外波段, 显然我们可以既可用劈窗算法、也可用单窗算法、辐射传输方程法和多通道算法来反演地表温度。本研究将对这些算法进行改进, 使之适合于 MODIS 热红外波段数据, 以便用来进行地表温度反演。为了用这些算法来从 MODIS 数据中反演地表温度, 我们还必须进行大气透过率和地表比辐射率的估计。

因此, 本研究的研究方法和技术路线可以概括如图 1 所示。一方面是对现有的算法进行分析, 提出一个适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法, 其中关键的一点是对现有算法中的 Planck 函数线性简化方法提出一种新的途径。另一方面是探讨适合于 MODIS 数据的地表温度反演基本参数估计方法, 即大气透过率和地表比辐射率的估计, 其中关键的一点是利用 MODIS 的中红外波段数据反演大气水汽含量, 并进而估计大气透过率。最后, 我们把这些反演方法及其参数确定应用到环渤海地区的地表温度反演, 并分析该地区的地表温度和热量空间差异。

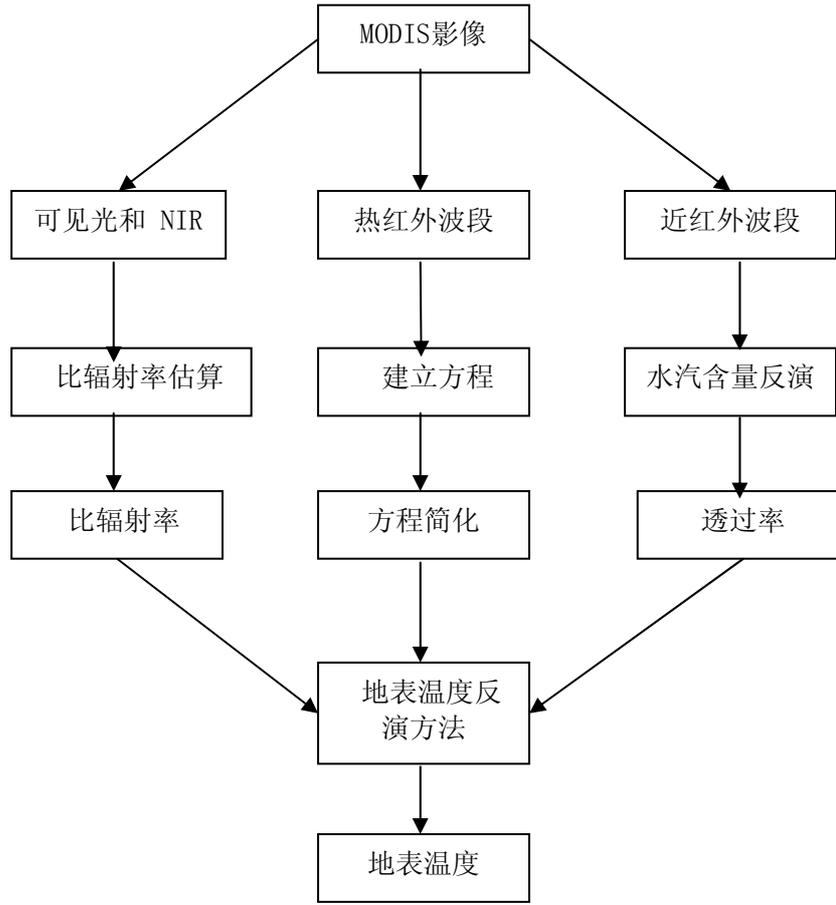


图 1.1 本项研究的技术路线示意图

Fig 1.1 Frame Map of Retrieving of LST by MODIS

本项研究的创新主要有两点：一是把现有的地表算法改进成适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法。目前还未见到比较适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法发表。现有的各种地表温度遥感反演方法又不是专门对 MODIS 数据提出来的。因此，有必要对现有的算法加以改进，以适合于 MODIS 数据特征。本项研究在这一方面做了较深入的分析研究，提出了适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法，其中最重要的改进是对 Planck 函数的线性简化方法提出了一个新的途径。

另一创新是对大气透过率的估计。大气透过率是地表遥感反演的基本参数，对地表温度反演精度有重要的影响。现有的做法大多是利用研究地区内地面气象观测点的数据来进行大气水汽含量估计，并进而估计大气透过率。由于地面气象观测是点状数据，并且观测时间与 MODIS 的成像时间难以匹配，所以

用地面气象观测数据来估计大气透过率通常有较大误差，从而影响地表温度反演精度。本项研究利用 MODIS 的近红外波段数据对大气水汽含量非常敏感的特征，提出从同一景 MODIS 影像数据中反演大气水汽含量的方法，并进而估计各像元的大气透过率，从而突破了过去地表温度反演中同一景图像只用一个大气透过率的问题，把大气透过率的估计由一个点扩大到整个图像的各个像元上，即空间差异上，使地表温度反演的参数估计更加符合实际情况。

1.5 论文结构

本文共分六章。第一章阐述论文的研究意义和研究目标、国内外研究进展、研究方法及技术路线，以及本项研究的创新点。第二章阐述热红外遥感和地表温度反演的基本概念，并分析地表温度反演中的一些难点问题。第三章讨论数据选择和研究区域，主要是对数据进行预处理。第四章提出 Planck 函数的线性简化方法，大气透过率的估计方法和地表比辐射率的估计方法。第五章分析现有的地表温度反演方法，提出适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法，并用来对环渤海地区的地表温度进行反演，以及讨论了反演的结果。第六章分析评价了针对 MODIS 数据的地表温度反演方法的精度。第七章对本文做了总结，并展望了热红外遥感和地表温度反演的发展前景。

第 2 章 热红外遥感与地表温度的基本概念

热红外遥感是获取地表热状况信息的一种非常重要的手段，从第一台红外测温仪算起，热红外遥感的研究已经有 50 多年的历史。目前许多研究者致力于热辐射与地面作用机理、地表真实温度与比辐射率分离等研究。在研究地表温度反演过程中，我们需要对热红外遥感与地表温度的基本概念和常用的反演算法有清醒的认识。

2.1 Planck 函数与黑体辐射

从理论上讲，自然界任何高于热力学温度（Kinetic temperature）的物体都不断地向外发射具有一定能量的电磁波。其辐射能量的强度和波谱分布的位置是温度的函数。随着温度的增加，总辐射能量将相应增加，辐射能量的最大波长（峰）也将逐渐变短。通常用 Planck 定律来描述这种现象。由于热辐射是随着构成物体的物质和环境条件（主要是温度）不同而变化，因而为了研究方便，需要引入黑体这个概念作为热辐射定量研究的基准。黑体被定义为完全的吸收体和发射体，即吸收和发射它所能接受的所有能量，即吸收率和发射率均为 1。但是，自然界并不存在真正的黑体，自然界的物体至少反射部分入射能。根据 Planck 定理，黑体的光谱发射特性用 Planck 函数来描述 [1-2]：

$$B_{\lambda}(T) = \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (2.1)$$

式中 $B_{\lambda}(T)$ 是黑体辐射强度，单位为 $wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ， λ 是波长， K 是波尔兹曼常数， $k = 1.380658 \times 10^{-23} JK^{-1}$ ； T 是温度，单位是 K ； C 是光速， $c = 2.992458 \times 10^8 ms^{-1}$ 。

Planck 函数给出了黑体辐射的辐射强度与温度和波长的定量关系。从 (2.1) 式可以看出，温度确定后，由 Planck 函数可以确定辐射源的能量谱分布，进而可以推算出物体的能量谱峰值的波长。反之，从物体的能量谱分布及辐射强度也可计算出物体的实际温度。这也是地表温度能被反演的理论基础。由此通过对地表辐射能量的测量或运用遥感热图像数据计算可以间接获得地物目标的温度信息。然而 Planck 函数是基于黑体的假设来建立，自然界的物体大

多数不是黑体，因此要获得物体地面真实温度(对于地面来说是地表温度)，必须考虑物体的比辐射率问题。

2.2 比辐射率

黑体是一种理想物体，自然界中并不存在这样的物体，大多数是灰体。因此地表温度的反演需要考虑比辐射率的影响。比辐射率通常用 ε 表示，定义为：物体在温度 T 、波长 λ 处的辐射强度 $B_{s\lambda}(T)$ 与同温度、同波长下的黑体辐射强度 $B_{B\lambda}(T)$ 的比值，即：

$$\varepsilon = \frac{B_{s\lambda}(T)}{B_{B\lambda}(T)} \quad (2.2)$$

比辐射率是一个比值，因此没有单位， ε 取值 0~1 之间，但比辐射率是波长 λ 的函数。对于大多数的地面物体，在波段 8~14 μm 范围内，地表比辐射率在 0.91 和 0.98 之间[1-2]。如果没有大气的影晌，地物的真实温度可以直接用(2.2)式求解。但是，地物的辐射能通常是被搭载在高空平台上观测到的。其间要受到大气的影晌，从而使得地面温度的反演变得复杂。

比辐射率是物体热辐射能力的量度。比辐射率的测量主要受物体的表面状态，如表面粗糙度等，及物理性质，介电常数、含水量、温度等因素的影响。并随着所测定的辐射能的波长，观测角度等条件的变化而变化。随着热红外遥感研究的深入，人们已积累了不同物质的比辐射率的测量经验，而且还探索地表热辐射及比辐射率各向异性的产生机理。赵英时等根据比辐射率的大小及其与波长的关系把物体的热辐射分为三类[1]：一是接近于黑体的物体。许多物质在某一特定的波长范围内的辐射如同黑体；二是比辐射率与波长无关的灰体，比辐射率小于 1；三是接近于黑体的灰体，比辐射率随波长变化的物体，称为选择性辐射体。

2.3 地表温度

地表温度通常被定义为地表的皮肤温度(Skin temperature)。一般地说，地面不是同质的，而是异质的，比如包含各种植被和土壤。对于植被茂密的地表，遥感反演所得到的地表温度是指植被叶冠的表面温度。对于稀疏的地表，地表

温度是地面、植被叶冠等温度的混合平均值。因此，地表的非同质性使地表温度的遥感反演成为一个很复杂的问题。

2.4 辐射温度

辐射温度被定义为所测量的物体的辐射能量所对应的温度。对于黑体而言，物体的辐射温度等于它的真实温度。但对于真实物体而言，热传感器所记录的辐射温度与物体的地表温度之间的关系可以近似地表示为[1]：

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} T_{kin} \quad (0 \leq \varepsilon \leq 1) \quad (2.3)$$

式中 ε 为比辐射率。由于 $\varepsilon < 1$ ，地物的辐射温度总小于它的热力学温度。因此，对于任何给定的地物，热传感器所记录的辐射温度小于它的真实温度。从(2.3)式可以看出，如果地物的比辐射率未知，则无法估算其真实温度。表 2.1 列出了 5 种典型地物的真实温度与辐射温度之间的对应关系。这 5 种地物为：黑体、植物、湿土、干土、水体。虽然真实温度相同，但因比辐射率不同，其辐射温度也各异。

表 2.1 典型地物的热力学温度和辐射温度之间的比较

Table2.1 Comparison of Kinetic Temperature and Radiant Temperature for Typical Objects

对象	发射率 ε	真实温度(K)	辐射温度(K)
黑体	1.000	303	303
植被	0.985	303	298.455
湿地	0.956	303	289.668
干燥地	0.925	303	280.275
水体	0.99	303	299.97

2.5 亮度温度

亮度温度(bright temperature)通常被定义为星上传感器获得的辐射能所对应的温度。亮度温度是衡量物体温度的一个指标，但也不是物体的真实温度。它与辐射温度是一致的。主要差别在于亮度温度是通过星上传感器获得，而辐射温度是通过地面传感器测得。

2.6 大气窗口与热红外遥感

由于热辐射传输是个很复杂的过程，有些波长的热红外波段能量没有达到传感器就已经被大气吸收。有些波段受大气影响很小，形成了一些大气窗口。热红外波段区间主要有 3~5 μm 和 8~14 μm 两个大气窗口。因此，在热红外遥感波段选择中，既要考虑地表物质温度的特性，也要考虑大气的影晌。地表温度通常在 -45~+45°C 之间，大部分地区平均为 27°C 左右。根据维恩位移定律，地面物体的热辐射峰值波长在 9.26~12.43 μm 之间，恰好位于 8~14 μm 的大气窗口内。因此这个波段区间通常被用来调查地表一般物体的热辐射特性，探测常温下的温度分布和目标的温度场，进行热制图等。随温度升高，热辐射波段峰值波长向短波方向移动。对于地表高温目标，如火燃等，其温度达 600K，热辐射波段峰值在 4.8 μm ，位于热红外波段 3~5 μm 的大气窗口内。所以为了对火灾、活火山等高温目标识别，通常把热红外遥感波段选择在这个区间内。

2.7 热辐射传输方程

由于影响热辐射的大气的变化因素不确定，例如，大气、气溶胶、云、风、水汽以及海拔等随时空变化，使得很多变量实时测定非常困难。在热辐射能的地-气辐射传输过程中，地面和大气都是热辐射源。热辐射能多次被大气吸收、散射与折射。同时地表也不黑体。因此，通过遥感影像研究地面热辐射必须考虑大气和地表的双重影响。考虑到大气和地表影响因素的复杂性和不确定性，热辐射过程可表达为：

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s)\varepsilon_{\lambda}\tau_{0\lambda} + L_{0\lambda}^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_{\lambda})L_{0\lambda}^{\downarrow}\tau_{0\lambda} \quad (2.4)$$

式中： L_{λ} 为遥感器所接受的波长 λ 的热辐射强度， $B_{\lambda}(T_s)$ 为地表黑体辐射强度， ε_{λ} 为波长 λ 的地表比辐射率， $\tau_{0\lambda}$ 为从地面到遥感器的大气透过率， $L_{0\lambda}^{\uparrow}$ 和 $L_{0\lambda}^{\downarrow}$ 分别为波长 λ 的大气上行热辐射强度和大气下行热辐射强度。

2.8 地表温度反演的常用方法与分析

从热遥感器获得的是地物的亮度温度。但是在许多热红外遥感应用研究中，我们需要的是地物的真实温度。为了获得地表温度，许多研究者已经做了许多工作并且已经取得了很大的成绩，形成了一系列的地表温度反演方法。按反演过程中所用的波段数来划分，基本上分成 4 种方法。第一种是传统的辐射传输方程法；第二种是单通道算法；第三种是两通道算法；第四是多通道算

法。另外，还有伴随着这些方法的多角度算法。这些方法是针对不同的条件和环境提出来的，各有优缺点。

辐射传输方程法是最基本的地表温度反演方法。由于这个方法考虑的影响因素最多，理论上讲是最好的方法。但其需要的大气参数比较多，而大气参数很难实时获取，一般是用大气模型模拟计算来代替，所以反演的精度很难得到保证。

单一热红外通道法最早是 Kahle 等人（1980 年）在假定比辐射率为常数和大气参数已知条件下提出的一种单通道地表温度反演算法[1]。但这种方法由于假定的条件太多，是一种非常原始的单通道算法。真正的单通道算法是覃志豪[6]针对 TM6 热红外数据提出来的单窗算法。该算法是根据辐射传输方程推导出来的，它的优点在于仅需要 3 个参数，即地表比辐射率、大气透过率和有效大气平均作用温度，就可从仅有一个热红外波段的遥感数据中反演出真正的地表温度。同时，覃志豪等提出了在大气实时资料缺乏的情况下，对大气透过率和有效大气平均作用温度估计的实用方法。

两通道算法主要是针对 NOAA 的两个热红外通道提出来的。相对而言，是一个发展得比较完善的方法。它的主要思想是利用两个通道对水汽吸收和比辐射率的差异来分别建立方程，通过解方程组获得地表温度的反演。很多研究对两通道算法做了大量的研究工作，形成了许多版本不同的反演算法。现在国际上公开发表的算法有 17 种以上。这些算法的主要区别在于参数估计和计算形式的不同。覃志豪在[4]中把这些算法归纳为四种类型：简单算法、辐射率模型、两因素模型和复杂模型。

多通道算法是利用多个热红外通道数据来反演地表温度的方法，如 Wan 和 Li 在[8]中针对 MODIS 数据提出的一个 7 通道反演方法。该方法最大的优点在于它能同时反演地表温度和比辐射率。但该方法需要建立 14 个方程，同时需要昼夜遥感影像资料，操作起来比较复杂。

地表温度的反演关键在于地表比辐射率和大气透过率这两个基本参数的获取。比辐射率订正非常的困难。因为比辐射率不仅依赖于地表物体的组成成分、物体的表面状态和物理性质，而且还和辐射能的波长、观测角度有关，从

而使得对比辐射率的精确测量难度相当大。这一直也是地表温度反演中的一个难点。影响大气透过率精确估计的主要因素是大气水汽吸收和气溶胶的实时剖面资料难以获取，往往用标准大气来模拟求解，使精度难以得到保证。本文针对 MODIS 遥感影像，将重点对这两个参数的获取进行研究。

一般来说，地表温度的遥感反演是一个“病态”的反演，因为根据遥感器的波段所能建立的方程数小于方程的未知数。所以，要想从遥感数据中求解出地表温度，必须对某些未知数进行假设，使其成为已知的参数，而这种参数的估计需要获取许多先验的知识，比如地面气象资料等，才能使其估计精度和接着进行的地表温度反演精度有所保证。

2.9 本章小结

本章论述了热红外遥感的理论基础和地表温度反演的基本概念，比如黑体、比辐射率、Planck 方程、辐射传输方程、热红外波段的选择等，分析了常用的地表温度反演方法及其关键参数估计问题。

第 3 章 数据选择及研究区介绍

地表温度的反演方法很多，但是每一种具体的反演方法几乎都是针对特定的遥感数据开发的。例如，单窗算法是针对 TM6 数据，劈窗算法是针对 NOAA/AVHRR 数据，多角度反演方法是针对多角度遥感数据。因此研究地表温度反演算法时，首先要了解遥感数据的特点和研究区的基本情况。本文的遥感数据是 MODIS 数据，研究区是环渤海地区。

3.1 遥感数据选择

MODIS 传感器于 1999 年搭载对地观测卫星升空。它包含 36 个波段，其中波段 1~19 和波段 26 在可见光和近红外波段，其它波段在 3~15 μm 的热红外波段。MODIS 各波段分别是针对陆地、海洋、大气等来设计的。每 1~2 天将提供地球上每一点的白天可见光和白天/夜间红外图像。MODIS 为全球和区域的动态监测提供了丰富的数据源。与 NOAA 卫星 AVHRR 和 TM 遥感数据相比，MODIS 数据具有更高的光谱分辨率和时间分辨率，因而更适用于中大尺度的区域动态变化监测研究。

MODIS 各波段特性如表 3.1 所示。从表 3.1 中的参数可以看出，MODIS 在若干热红外波段都有较高的校正精度。其中波段 26 可用于卷云探测，热红外波段 20、22、23、29 和 31~33 可用于大气削弱订正及反演地表比辐射率和温度反演。波段 2、5、16、18 和 19 可用于大气水汽含量监测[22-24]。大气中的水汽含量对热辐射影响最大，由此可以通过建立大气水汽含量与透过率的关系来订正大气影响。位于中红外波段的多个波段将为精确订正太阳辐射效应提供机会，以便使太阳辐射可以作为 MODIS 数据反演地表比辐射率时的热红外源。MODIS 数据可以覆盖全球，具有较合适的探测精度以及较宽的动态范围，因而可以用来探测多种地表类型。因此 MODIS 数据有利于发展地表温度 LST 产品。

表 3.1 MODIS 技术参数[22]
Table 3.1 MODIS Technical Specifications

主要应用	波段序号	波段区间	光谱辐射率	所需 S/N
陆地/云边界	1	620~670	21.8	128
	2	841~876	24.7	201
陆地/云性质	3	459~479	35.3	243
	4	545~565	29.0	228
	5	1230~1250	5.4	74
	6	1628~1652	7.3	275
	7	2105~2155	1.0	110
海洋彩色/叶绿素/ 生物化学	8	405~420	44.9	880
	9	438~448	41.9	838
	10	483~493	32.1	802
	11	526~536	27.9	754
	12	546~556	21.0	750
	13	662~672	9.5	910
	14	673~683	8.7	1087
	15	743~753	10.2	586
	16	862~877	6.2	516
大气中的水汽	17	890~920	10.0	167
	18	931~941	3.6	57
	19	915~965	15.0	250
主要用户	波段序号	波段区间	光谱辐射率	NE ΔT
地面/云温度	20	3.660~3.840	0.45	0.05
	21	3.929~3.989	2.38	2.00
	22	3.929~3.989	0.67	0.07
	23	4.020~4.080	0.79	0.07
大气汽度	24	4.433~4.498	0.17	0.25
	25	4.482~4.549	0.59	0.25
卷云水汽	26	1.360~1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535~6.895	1.16	0.25
	28	7.175~7.475	2.18	0.25
	29	8.400~8.700	9.58	0.25
臭氧	30	9.580~9.880	3.69	0.25
地面/云温度	31	10.780~11.280	9.55	0.05
	32	11.770~12.270	8.94	0.05
云顶高度	33	13.185~13.485	4.52	0.25
	34	13.485~13.785	3.76	0.25
	35	13.785~14.085	3.11	0.25
	36	14.085~14.385	2.08	0.25

SNR: 信噪比; NE ΔT : 等效噪声温差

说明: 空间分辨率: 250m(波段 1~2); 500m (波段 3~7); 1000m (波段 8~36)。各波段用户和技术性能指标: 波段 1~19 的单位为 nm; 波段 20~36 是 μm ; 光谱辐射率值的单位为 $\text{W/m}^2 \mu\text{m sr}$.

3.2 MODIS 影像选择

本文用到的 MODIS 影像摄于 2003 年 8 月上旬，如图 3.1 所示。这景 MODIS 图像包括了我国东部大部分地区。8 月份是个炎热的季节，正是夏季植被生长最繁茂之时。各种地物的热辐射差异比较明显。因此选择这个时期的遥感影像有利于对不同地物类型进行分析对比。

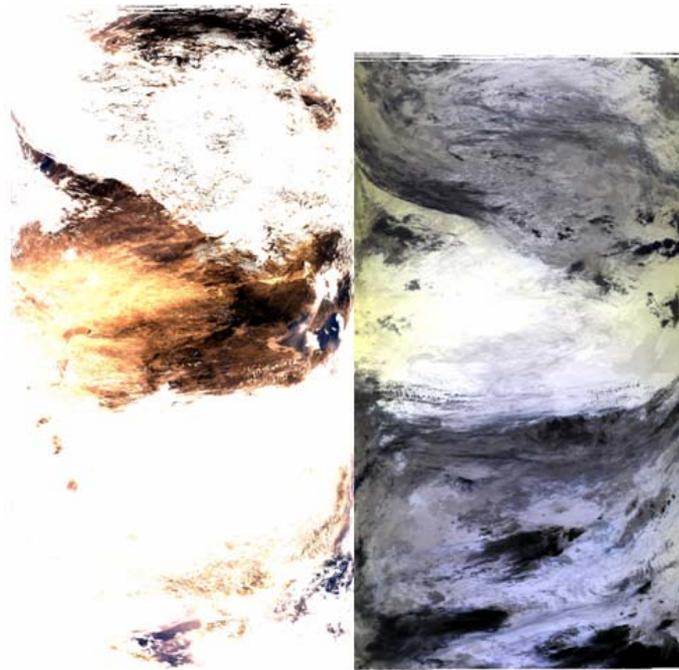


图 3.1 本研究所选择的 MODIS 图像

Fig 3.1 Original Image of MODIS for the Study

3.3 辐射率校正

MODIS 遥感器的所有波段都是用 12bit 记录，其辐射分辨率比 TM、SPOT 等影像数据都高。由于 MODIS 传感器内部设置了“冷源”和“热源”，其辐射定标精度比较高。根据 MODIS Level 1B Product User's Guide[24]，对于发射和辐射波段的辐射亮度校正公式如下：

$$\rho=R(SIB-r_offset) \quad (3.1)$$

式中 ρ 代表辐射亮度值，SIB 为对应的影像 DN 值， r_offset 是传感器在没有接受信号情况下的输出值，R 是一个常数。

3.4 几何校正

从图 3.1 可以看出，MODIS 的几何变形很大。因此，在做具体的研究时，我们需要对影像进行几何校正。MODIS 影像的几何校正与其它影像有很大的差

别。MODIS 影像本身就带有经纬度坐标，所以可以直接利用经纬度坐标文件对影像进行几何校正，其过程如图 3.2 所示。

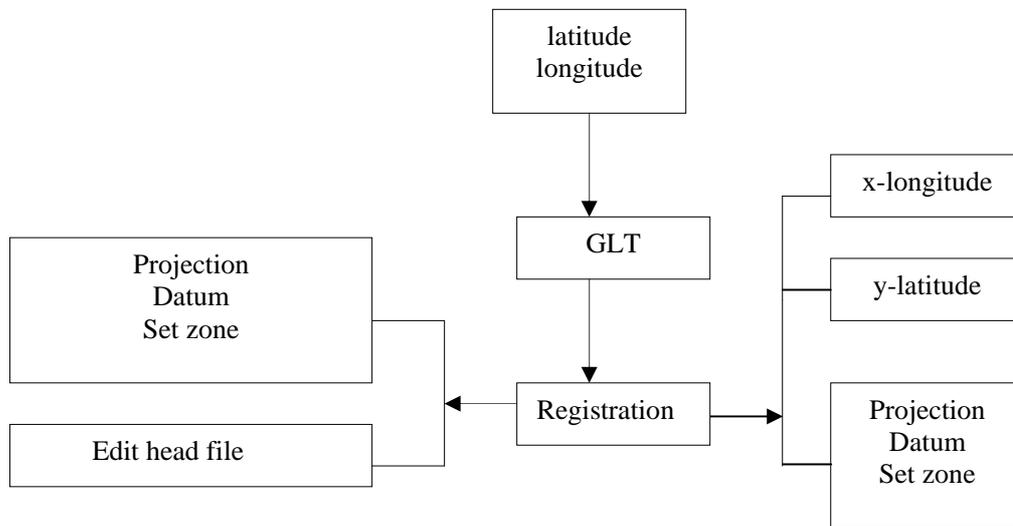


图 3.2 MODIS 影像几何校正流程图

Fig 3.2 Flowing Chart of Geometric Rectification for MODIS Image

MODIS 图像的几何校正的具体操作步骤如下：

打开图像（BSQ 形式打开，注意经纬度所对应的波段）

本文中，#3 对应 longitude ， #4 对应 latitude ， # 2 对应 影像

1 将经纬度合并为一个文件：

file / save file as / envi standard / 选择 #3 ， # 4 对应的文件 / 保存文件为 f1；

2 对影像文件进行重采样（保存为 f2 ）：

base tools / resize data / 选择 #2 对应的影像文件 / ok

在这个窗口中，把 xfac 和 yfac 都改为 0.25 （250/1000），保存为 f2 文件；

3 裁图（目的是因为影像中远离星下点的地方变形很大，而且有的地方受云的影响很大。所以需要根据实际情况，对影像进行裁取）；

4.1) basic tools / resize data / spatial subset 中，选择 f1 文件（经纬合成文件），进入下一个窗口选择 image ，结果保存为 f1-1；

4.2) basic tools / resize data / spatial subset 中, 选择 f2 文件 (影像重采样), 进入下一个窗口再次窗口中, 选择 previous , 这一点非常重要, 确保经纬度和影像位置和大小匹配结果保存为 f2-1;

5 通过经纬度文件建立 GLT (这是核心)

map / georeference from input geometry / built GLT , 进入下一窗口;

注意, x 对应经度波段, y 对应 纬度波段 , 注意修改 output pixel size : 1000 , output rotation : 0 即不旋转) 保存为 GLT。

6 用 GLT 对 f2-2 配准:

在此之前, 应对 f2-2 修改头文件, 改为 1,1 为左上角起点

map / georeference from input geometry / georeference from GLT

分别输入 GLT 文件: GLT 输入数据文件 : f2-2

通过以上步骤, 可将 MODIS 原始影像校正, 得到如图 3.3 所示的结果。从图 3.3 可以看出, 虽然影像经过了几何校正, 但除环渤海地区外, 影像的其它部分变形仍很大, 而且很多地方被云覆盖。另外, 华北地区地势比较平坦, 受地形影响小, 既有陆地又有海洋, 便于分析海陆性质差异。本文考虑到这些情况, 将研究区缩小, 选在环渤海地区。研究区裁取如图 3.4 所示的区域。从图 3.4 中可以看出, 环渤海地区的影像比较清晰, 但山东半岛和辽东半岛之间仍有少量的云。

3.5 本章小结

本章论述了 MODIS 数据的特性, 选择中国东部地区做为本文的研究区。并对所选择的 MODIS 影像进行预处理。最后根据影像的几何变形和受云的影响情况, 将研究区限制在环渤海地区。

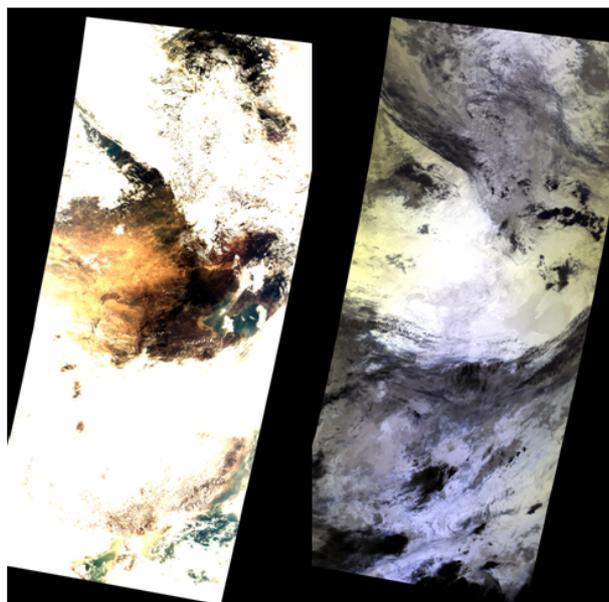


图 3.3 几何校正图像

Fig 3.3 Resulted Image of Geometric Rectification

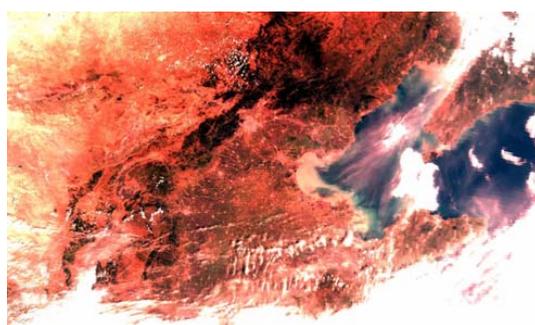


图 3.4 校正后的研究区影像

Fig 3.4 Rectified Image of the Study Area

第 4 章 Planck 函数的线性简化、大气透过率及地表比辐射率的估计

热辐射传输方程是热红外遥感和地表温度反演的基础。Planck 函数是热辐射传输方程的核心组成部分。对 Planck 函数进行线性简化，是从热辐射传输方程中推导地表温度反演方法的前提。本文通过对 MODIS 第 31 波段和 32 波段的热辐射强度和温度之间的关系进行模拟，提出了 Planck 函数的线性简化方法。大气透过率和地表比辐射率是地表温度反演的两个关键参数。许多研究者针对不同的条件，提出了不同的参数估计方法。对于大气透过率的估计，通常是使用大气模型软件（如 6S, MODTRAN, LOWTRAN 等）进行其与大气水汽含量之间的关系，建立大气水汽含量与大气透过率之间的关系方程，然后通过地面观测首先估计大气水汽含量，再运用这种关系式来估计大气透过率。本文根据近红外波段对大气水汽含量的敏感性，首先利用 MODIS 的近红外波段反演大气水汽含量，然后再进一步求算热红外波段的大气透过率。地表比辐射率主要是根据地表覆盖特征来估计。

4.1 Planck 函数的线性简化

热辐射传输方程每一项都包括了 Planck 函数。从式(2.4)可以看出，要解方程，需要对 Planck 方程进行线性简化。这一点无论是对辐射传输方程，还是劈窗算法、单窗算法和多波段算法都是关键的一步。Price[27], Franca and Cracknell[28], Coll et al.[29]和 Qin et al.[3]均通过对 Planck 函数进行泰勒展开。我认为，针对特定的波段，可将 Planck 函数简化为如下线性方程：

$$L_i = a_i + b_i T_i \quad (4.1)$$

本文分别用 Planck 函数对 MODIS 的第 31 波段（10.780~11.280 μm ）和 32 波段（11.770-12.270 μm ）的热辐射与温度在 273K-322K 区间内的变化关系进行模拟，得到如表 4.1 所示的模拟结果。

对第 31 波段做温度 T（273-322K）与辐射强度之关系的散点图(图 4.1)。如图 4.1 指出，热辐射强度随温度的变化接近于线性关系。因此，对散点图建立线性回归方程，得到： $B_{31}(T)=0.13834T_{31}-31.80148$ ， $R^2=0.9970$ 。

同理对第 32 波段的散点图 4.2 进行线性回归，得到： $B_{32}(T)=0.11952T_{32}-26.8045$ ， $R^2=0.9977$ 。

表 4.1 MODIS 第 31 和 32 波段的热辐射强度随温度的变化关系

Table 4.1 Relationship of Emission and Temperature for MODIS Bands 31 and 32

温度 (K)	31 波段 ($wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	32 波段 ($wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	温度 (K)	32 波段 (同左)	32 波段 (同左)
273	6.200647	6.00237556	298	9.298325	8.71833528
274	6.310705	6.100390554	299	9.437269	8.838378679
275	6.421911	6.199296188	300	9.577369	8.959288487
276	6.534267	6.29909202	301	9.718624	9.081063247
277	6.647774	6.399777559	302	9.861034	9.203701473
278	6.762433	6.501352264	303	10.0046	9.327201647
279	6.878244	6.603815544	304	10.14931	9.451562221
280	6.995208	6.707166763	305	10.29518	9.57678162
281	7.113327	6.811405235	306	10.4422	9.702858241
282	7.2326	6.916530231	307	10.59038	9.829790451
283	7.353029	7.022540974	308	10.7397	9.957576592
284	7.474615	7.129436644	309	10.89017	10.08621498
285	7.597356	7.237216378	310	11.04179	10.2157039
286	7.721254	7.345879269	311	11.19455	10.34604162
287	7.84631	7.455424369	312	11.34847	10.47722638
288	7.972523	7.565850687	313	11.50352	10.6092564
289	8.099894	7.677157195	314	11.65972	10.74212986
290	8.228422	7.789342821	315	11.81707	10.87584494
291	8.358108	7.902406458	316	11.97555	11.01039979
292	8.488953	8.016346958	317	12.13517	11.14579253
293	8.620955	8.131163138	318	12.29593	11.28202126
294	8.754114	8.246853778	319	12.45783	11.41908408
295	8.888431	8.363417621	320	12.62087	11.55697904
296	9.023906	8.480853375	321	12.78504	11.69570419
297	9.160537	8.599159714	322	12.95034	11.83525756

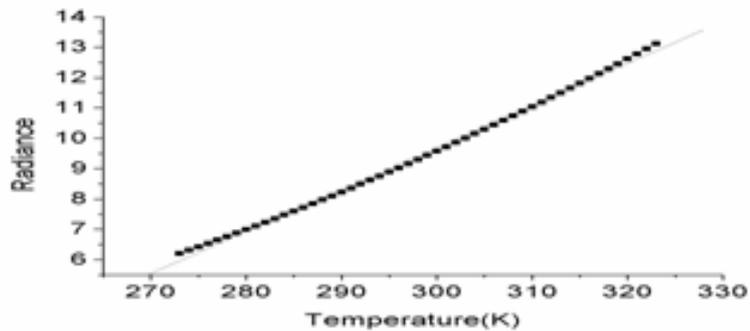


图 4.1 第 31 波段辐射强度 R 随温度的变化关系 (Radiance 单位为 $(\text{wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$)

Fig 4.1 Relationship of Temperature and Radiance for MODIS Band 31

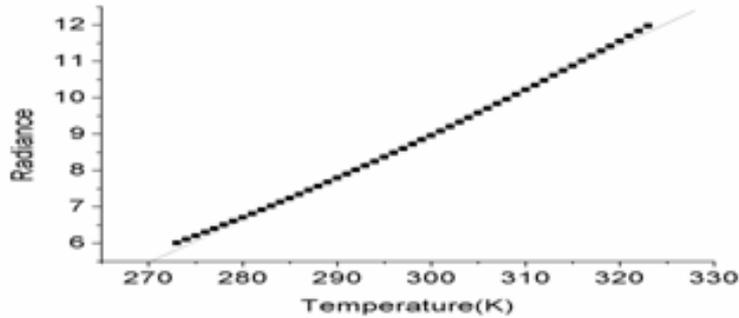


图 4.2 第 32 波段辐射强度 R 随温度的变化关系 (Radiance 单位为 $(\text{wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$)

Fig 4.2 Relationship of Temperature and Radiance for MODIS Band 32

4.2 大气水汽含量与大气透过率关系

地面的辐射能在大气传输之后才能抵达空中的遥感器。由于大气对辐射能的削弱作用，往往只有部分辐射能最后抵达遥感器。这种削弱作用一般用大气透过率 (τ) 来描述。因此大气透过率被定义为地表的辐射能 (反射能) 透过大气达到遥感器的能量与地表辐射能 (反射能) 的比值。大气中的水汽是影响大气透过率的主要因素，特别是在热红外波段，大气水汽对热辐射的吸收更加显著。同时大气本身还发射一定强度的热辐射能，与地表的热辐射能一起抵达空中的遥感器。因此，在地表反演过程中，水汽是估计大气透过率的主要考虑因素。通常的做法是通过 MODTRAN、6S 和 LOWTRAN 等大气模型软件进行模拟大气透过率与大气水汽含量之间的关系。因为实时的大气剖面资料很难获得，所以这种模拟的结果精度有时难以得到保证。

为了提高大气透过率的估计精度，许多研究者已经致力于大气水汽含量的遥感反演研究。他们主要是利用热红外波段和微波发射波段来反演大气水汽含量，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 $0.865 \mu\text{m}$ 、 $0.905 \mu\text{m}$ 、 $0.936 \mu\text{m}$ 、 $0.940 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$ 。中间的 3 个波段是水汽吸收波段，而 $0.865 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$ 是大气窗口波段。这样设计的主要目的是为了利用 MODIS 的某些波段来反演大气中的水汽含量。本文直接从遥感影像上反演大气的水汽含量，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。

4.2.1 大气水汽含量的遥感反演方法

大气水汽含量可以利用红外发射辐射波段的观测辐射值进行反演。反演的结果在很大程度上依赖于初始温度和湿度廓线的选择。在海洋上空，气柱水汽含量可用微波发射波段进行反演。

本文介绍利用近红外来反演水汽含量的两个主要算法，一是两波段比值法；一是三波段比值法。下面对这两个方法的可行性在理论上进行推导。反演水汽算法是以辐射传输方程为基础来进行推导的。为了分析方便，将辐射传输方程简化为。

$$L_s = L_{gnd} \rho T(PW) + L_{atm}(PW) \quad (4.2)$$

式中 L_s 是传感器接收到的辐射强度， L_{gnd} 是地面直接反射和散射的辐射强度， L_{atm} 是大气辐射强度， ρ 是地面反射率， T 是大气透过率。大气透过率和大气辐射强度与大气中的水汽含量有关。大气透过率可以看成是水汽含量和气溶胶等大气成分的函数。相对于水汽，其它气体的影响很小，因此可以忽略其它气体的影响。将等式两边同时除以 $L_{gnd} \rho$ 得：

$$T(PW) = L_s / (L_{gnd} \rho) - L_{atm}(PW) / (L_{gnd} \rho) \quad (4.3)$$

在天气晴朗的情况下，上式的右边 $L_{atm}(PW) / (L_{gnd} \rho)$ 相对于第一项 $L_s / (L_{gnd} \rho)$ 非常的小，可以忽略。当然也可以采用迭代法来求最优值。本文对这一项忽略。因此 (4.3) 式可以简化为：

$$T(PW) \approx L_s / (L_{gnd} \rho) \quad (4.4)$$

从式(4.4)可以看出，大气水汽的含量主要是大气水汽透过率的函数。式中 $L_{gnd} \rho$ 中 ρ 对于不同的波长，地面的反射率是不一样的。Gao 和 Kaufman 在[30]中得出对于 0.85 和 1.25um 之间的各种地物反射率基本上满足线性关系，从而可以利用大气窗口波段对 $L_{gnd} \rho$ 进行近似计算。下图为用 MODTRAN 对中纬度地区在标准大气状况下水汽透过率图。

从图 4.3 中可以看出，在 0.84-0.88um，0.99-1.07um 和 1.22-1.26um 波段区间透过率几乎为 1，而 0.88-0.99um 是大气吸收波段。Kaufman et al.做了大量的实验之后，发现利用比值法来求大气水汽含量是可行的，具体详见[30-34]。

MODIS 传感器上设计了 5 个近红外波段，其中第 17、18 和 19 波段为大气吸收波段，第 2 和 5 波段为大气窗口波段。根据 (4.4) 式和 MODIS 波段设置特点，可以推导出第 2 和 3 波段的比值法，计算公式如下：

$$T_{obs}(0.936\mu m) = \rho(0.936\mu m) / \rho(0.865\mu m) \quad (4.5)$$

$$T_{obs}(0.936\mu m) = \rho(0.936\mu m) / [C1 * \rho(0.865\mu m) + C2 * \rho(1.24\mu m)] \quad (4.6)$$

式中 C1 等于 0.8，C2 等于 0.2。这两种比值法的思想基本是一致的，都是利用大气水汽吸收波段与大气窗口波段的比值与大气水汽含量的关系来估计水汽含量。对于大气透过率与水汽含量的关系，可以通过 MODTRAN，LOWTRAN 来模拟，进而建立大气水汽含量与大气透过率之间的关系表达式。图 4.4 是 Kaufman 和 Bo-Cai Gao 利用 LOWTRAN 模拟两波段比值与水汽含量的关系图。

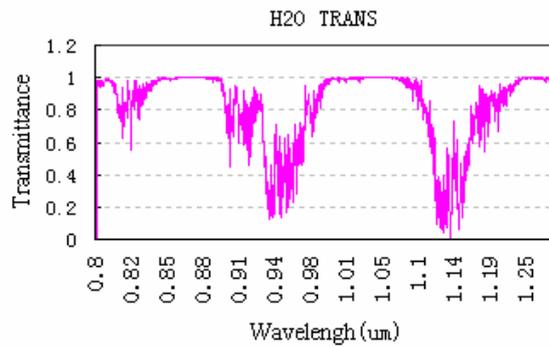


图 4.3 MODTRAN 模拟水汽透过率图

Fig 4.3 Simulation of Water Transmittance by MODTRAN

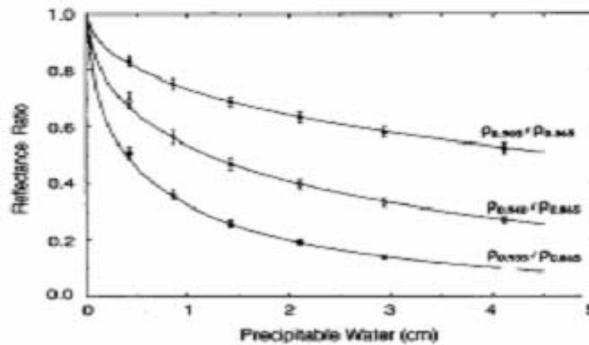


图 4.4 比辐射率与大气水汽含量关系图[34]

Fig 4.4 Relationship of Transmittance and Water Content of Atmosphere

Kaufman 和 Gao 在[34]中对图 4.4 中关系给出了如下表达式：

$$T_w(940/865) = \exp(\alpha - \beta\sqrt{w}) \quad r^2 = 0.999 \quad (4.7)$$

对于复杂地表，上式中 $\alpha = 0.02$ ， $\beta = 0.651$ ，具体请参见[30]。

公式 (4.7) 的左边 T_w 可以从影像算出，因此，对公式(4.7)求解水汽含量 w ，得到：

$$w = \left(\frac{\alpha - \ln T_w}{\beta} \right)^2 \tag{4.8}$$

4.2.2 MODIS 影像水汽反演应用

利用 MODIS 的第 2 和 19 波段进行大气水汽含量的反演，得到如图 4.5 所示的反演结果。

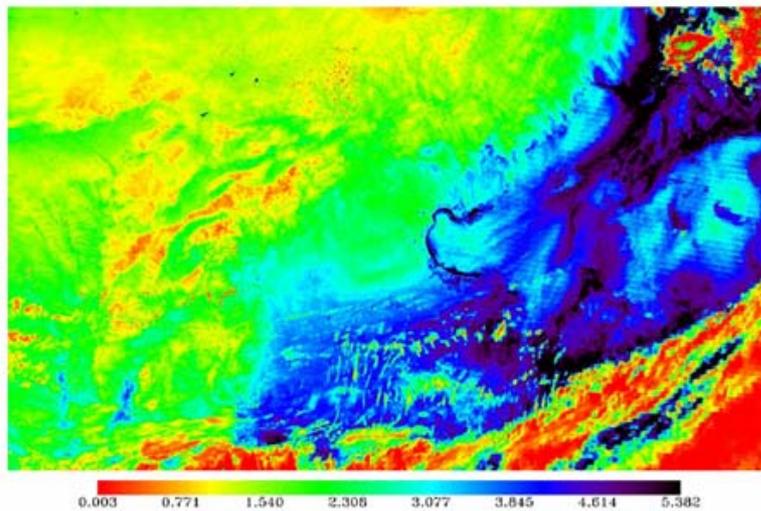


图 4.5 环渤海地区的大气水汽含量遥感反演结果

Fig 4.5 Atmospheric Water Vapor Content Retrieved from MODIS Band 2 and 19

图中右下角为坏条带，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，整个水汽含量图的分布趋势很明显，且符合水汽分布规律。气柱水汽含量区间为 0.003-5.382cm，平均气柱水汽含量为 2.07cm。对于气柱水汽的具体含量分布可以从图 4.5 中看出来，每个像元的水汽含量是有明显差异的，海洋上空水汽含量明显高于陆地上空。

4.2.3 大气透过率的模拟计算

大气透过率可通过 MODTRAN、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

表 4.2 大气水汽含量与透过率模拟结果

Table 4.2 The Result of Simulation Between Transmittance and Water Content

大气水汽含量 g/cm ²	夏季模拟		冬季模拟	
	MOD31/AV 4	MOD32/AV 5	MOD31/AV 4	MOD32/AV 5
0.4	0.951306667	0.92568	0.952006667	0.9254
0.6	0.941313333	0.908573333	0.940573333	0.906246667
0.8	0.930426667	0.890713333	0.926473333	0.883566667
1	0.91848	0.871693333	0.9132	0.862853333
1.2	0.90538	0.851373333	0.897073333	0.83824
1.4	0.891106667	0.829686667	0.87934	0.811753333
1.6	0.87568	0.806693333	0.860033333	0.783486667
1.8	0.859113333	0.782493333	0.839253333	0.753693333
2	0.84334	0.759693333	0.81714	0.72256
2.2	0.82288	0.730846667	0.793806667	0.690286667
2.4	0.803166667	0.70362	0.769306667	0.65718
2.6	0.782946667	0.67586	0.743926667	0.62354
2.8	0.761726667	0.6474	0.71736	0.5891
3	0.739906667	0.618686667	0.690726667	0.555393333
3.2	0.71738	0.589606667	0.663193333	0.5213
3.4	0.69446	0.560553333	0.635386667	0.48772
3.6	0.671106667	0.53158	0.607313333	0.454726667
3.8	0.647326667	0.502673333	0.579013333	0.422293333
4	0.623513333	0.474333333	0.55096	0.391046667
4.2	0.59926	0.44612	0.522726667	0.360513333
4.4	0.575233333	0.4188	0.495093333	0.331513333
4.6	0.550933333	0.39186	0.46752	0.303466667
4.8	0.527046667	0.366006667	0.44076	0.277126667
5	0.503326667	0.340973333	0.414586667	0.2522
5.2	0.479586667	0.31656	0.388746667	0.22844
5.4	0.45642	0.293406667	0.36396	0.20644
5.6	0.433386667	0.270993333	0.33972	0.185713333
5.8	0.411073333	0.249893333	0.316593333	0.1667
6	0.3892	0.229846667	0.29434	0.149086667
6.2	0.367726667	0.21072	0.272866667	0.132766667
6.4	0.346966667	0.192806667	0.25252	0.117926667
6.6	0.32668	0.175866667	0.23302	0.104313333
6.8	0.307186667	0.16012	0.214666667	0.092026667
7	0.288393333	0.145413333	0.197306667	0.08094
7.2	0.27014	0.13164	0.180833333	0.07086

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。覃志豪等[5]提出了大气透过率的估计方法，首先是用 LOWTRAN 来模拟大气透过率随大气水汽含量的变化，然后建立通过大气水汽含量来估计大气透过率的方法。他们是对 NOAA-AVHRR 的第 4 和 5 通道模拟的，得到的如表 4.2 所示。由于 MODIS 的第 31 和 32 波段的中心波长与

AVHRR 的第 4 和 5 通道基本相同，所以表 4.2 所示的模拟数据也可认为是适用于 MODIS 的第 31 和 32 波段的大气透过率与大气水汽含量之间的关系。

从表 4.2 可以看出，在相同的大气水汽含量下，MODIS 的第 31 和 32 波段的大气透过率有明显的差别。随着大气水汽含量的升高，这种差异更加显著。对于同一个波段，不同季节的大气透过率也有明显的不同。当大气水汽含量增多时，大气透过率明显下降。对大气透过率和大气水汽含量做散点图，得到如图 4.6 所示的结果。该图显示，大气透过率和大气水汽含量呈现负的非线性关系。

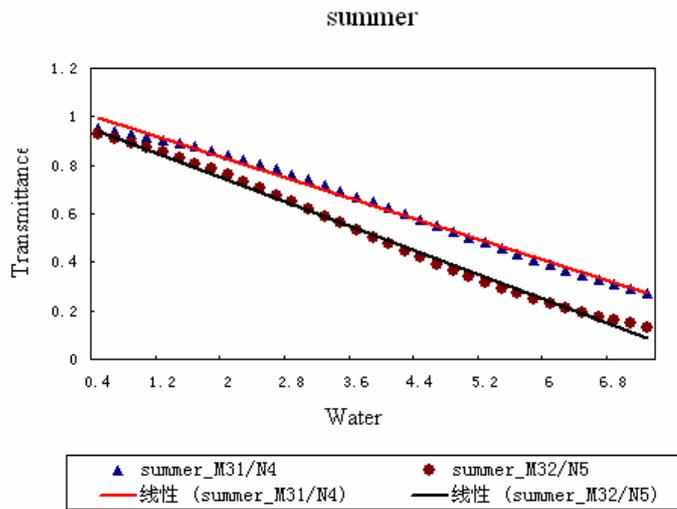


图 4.6 MODIS 的第 31 和 32 波段大气透过率随大气水汽含量在夏季中纬度大气情况下的变化关系

Fig 4.6 Relationship of Atmospheric Transmittance and Water Vapor Content for MODIS Band 31 Under Mid-latitude Summer Atmosphere

对夏季的模拟数据进行线性回归，得到 MODIS 第 31 和 32 波段的大气透过率与大气水汽含量之间的线性方程如下，

第 31 波段： $\tau_{31} = -0.10671w + 1.04015$ ， $R^2 = 0.994787$ ；

第 32 波段： $\tau_{32} = -0.12577w + 0.99229$ ， $R^2 = 0.995585$ 。

同理，在冬季中纬度大气情况下，MODIS-32/NOAA-AVHRR5 的大气透过率与大气水汽含量之间也有同样的关系(图 4.7)，因此，有

第 31 波段： $\tau_{31} = -0.1041w + 0.92314$ ， $R^2 = 0.995585$ ；

第 32 波段： $\tau_{31} = -0.13722w + 0.97686$ ， $R^2 = 0.98738$ 。

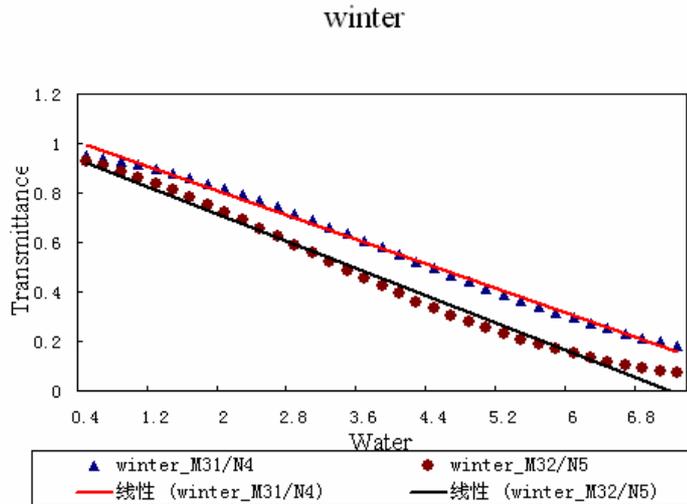


图 4.7 MODIS 的第 31 和 32 波段大气透过率随大气水汽含量在冬季中纬度大气情况下的变化关系

Fig 4.7 Relationship of Atmospheric Transmittance and Water Vapor Content for MODIS Band 31 under Mid-latitude Winter Atmosphere

大气透过率与大气水汽含量的线性相关非常高，因此在已知大气水汽含量的情况下，可以用上面的表达式来近似估计大气透过率，而大气水汽含量又可以运用上面(4.8)式求算。因此，通过同一景 MODIS 图像，我们可以估计得第 31 和 32 波段的大气透过率。把这一方法应用到环渤海地区，我们得到第 31 和 32 波段的大气透过率如图 4.8 和 4.9 所示。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。在两个波段对应相同的地方沿 X 轴方向拉了一条透过率剖面曲线，得到如图 4.10 的结果。图 4.10 指出，剖面曲线的走势基本相同。在同一个地方，第 31 波段的大气透过率要比第 32 波段的大气透过率高 0.05 左右。这和表 4.2 所显示的第 31 和 32 波段的大气透过率差异是一致的。图 4.6 也说明了 MODIS 的第 31 波段的大气透过率要比第 32 波段在大气透过率高。

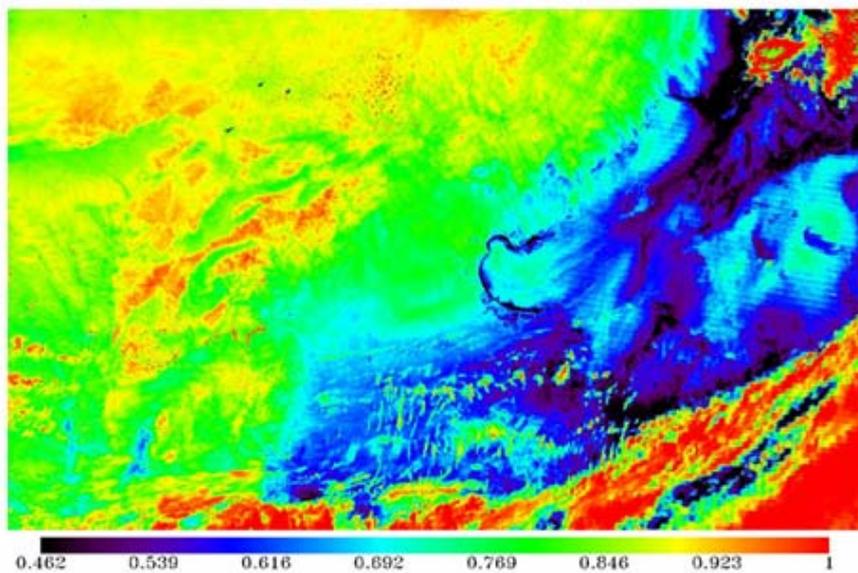


图 4.8 MODIS 的第 31 波段大气透过率图
Fig 4.8 Result of Transmittance Estimation for MODIS Band 31

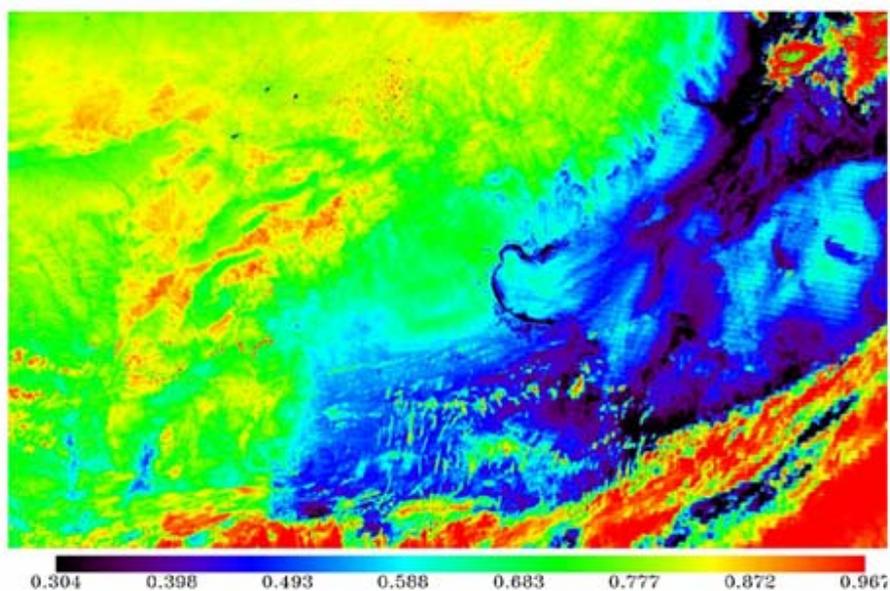


图 4.9 MODIS 的第 32 波段大气透过率图
Fig 4.9 Result of Transmittance Estimation for MODIS Band 32

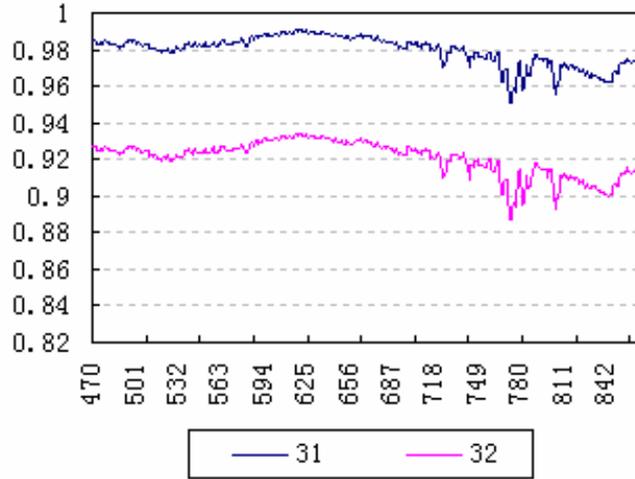


图 4.10 MODIS 第 31 和 32 波段的大气透过率剖面图

Fig 4.10 A Cross-section Change of Atmospheric Transmittance for MODIS Band 31 and 32

4.3 地表比辐射率的估计

4.3.1 地表比辐射率估计方法

Kerr et al.在[35]中和覃志豪等在[36-37]中对 TM 图像的地表比辐射率估计做了许多研究。本文利用覃志豪对 TM 图像提出的地表比辐射率估计思想，将其应用到 MODIS 影像的比辐射率估计。地表比辐射率主要取决于地表的物质结构和遥感器的波段区间。MODIS 的第 31 和 32 波段区间分别为 10.780~11.280 μm 和 11.770~12.270 μm 。地球表面不同区域的地表结构虽然很复杂，但从 MODIS 的 1KM 的尺度来看，可以大体视作由 3 种地表类型构成：水面、植被和裸土。根据这 3 种类型地表的构成，可以用式(4.9)粗略估计 MODIS 混合像元的地表比辐射率。

$$\varepsilon = P_w R_w \varepsilon_w + P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_w - P_v) R_s \varepsilon_s \quad (4.9)$$

式中 ε 为混合像元的平均比辐射率， P_v 为混合像元中植被比辐射率。 ε_w 、 ε_v 、 ε_s 为分别为水体、植被、土壤的比辐射率。 R_v 、 R_s 、 R_w 为温度比率，计算公式为 $R_i = (T_i/T)^4$ 。在[36-37]中，覃志豪给出了在 5-45 $^{\circ}\text{C}$ 范围内，这 3 种地表类型的平均温度比率分别可近似估计为 $R_v=0.99240$ ， $R_s=1.00744$ 和 $R_w=0.99565$ 。本文直接引用这 3 个值。要估计 MODIS 的地表比辐射率，必须估计地表构成比例。实际上，准确地估算像元的地表构成比例是较困难的。本文根据覃志豪[37]提出的一种简便的估计方法，就是利用 MODIS 图像的可见光和远红外波段来估计

植被覆盖率及确定水面比例。水体在可见光波段的吸收率很强，尤其是在红光和红外波段，水体的反射率一般低于 5%。因此，在 MODIS 图幅范围内，水体像元的 DN 值一般都比陆地低得多。如果图幅范围内有明显的水体，则可以取得水体的一定面积的 DN 值，并与陆地的 DN 值进行比较。小于水体最大 DN 值的像元均判作水体，并取 $P_w=1$ 。对于近海岸像元，可以用如下公式判定水体和陆地比例：

$$P_w=QDN/DNI \tag{4.10}$$

式中 QDN 为像元的 DN 值，而 DNI 则是陆地像元的最小 DN 值，从图幅上进行抽样确定。对于陆地的像元，可以计算标准差距植被系数 NDVI，公式为

$$NDVI=(B2-B1)/(B2+B1) \tag{4.11}$$

式中 B2 和 B1 分别是 MODIS 图像波段 2(近红外)和波段 1(红光)的 DN 值。用 (4.12) 公式确定各像元的植被覆盖率即植被构成比例 P_v [36]

$$P_v=(NDVI-NDVI_s)/(NDVI_v-NDVI_s) \tag{4.12}$$

式中 $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别是植被和裸土的 NDVI 值。通常可以用 $NDVI_v=0.65$ 和 $NDVI_s=0.05$ 来进行植被覆盖率的近似估计[36-37]。对于三种地物类型的比辐射率，本文用 ASTER 中提供的地物反射率光谱库，通过计算求得植被、土壤、水体的比辐射率光谱曲线，得到如图 4.11-4.13 所示的结果。

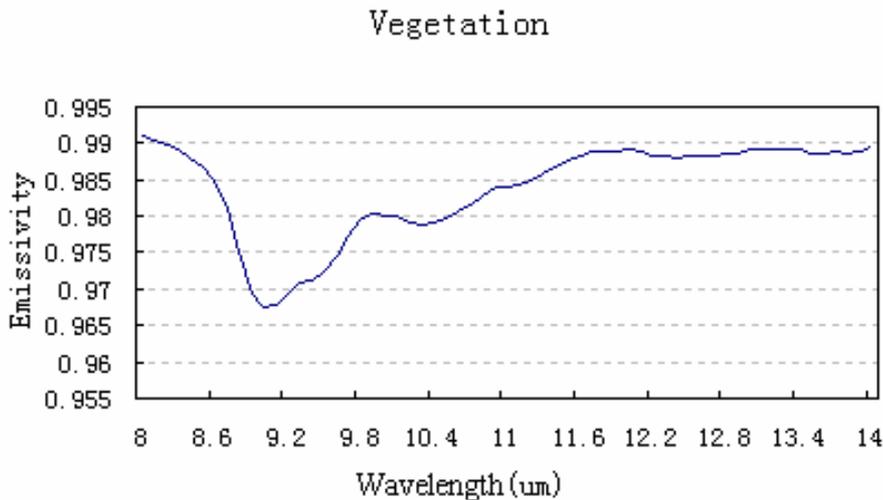


图 4.11 植被的比辐射率随波长而变化的曲线图

Fig 4.11 Change of Emissivity with Wavelength for Vegetation

从植被的比辐射率光谱曲线图上可以看到，在 8-14 μm ，比辐射率都高于 0.965。MODIS 的第 31 和 32 波段区间分别在 10.780~11.280 μm 和 11.770~12.270 μm ，因此，根据图 4.11，绿色植被在这两个波段的比辐射率可分别取值为 0.9851 和 0.9844。

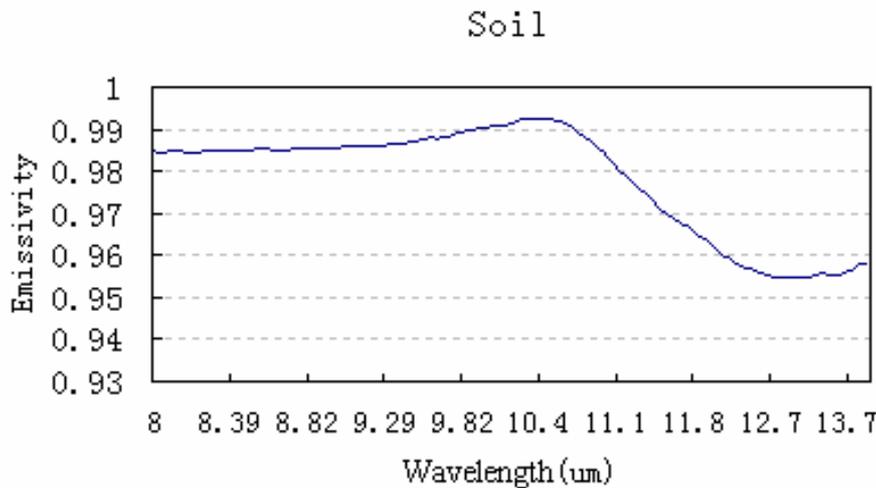


图 4.12 裸土的比辐射率随波长而变化的曲线图

Fig 4.12 Change of Emissivity with Wavelength for Bare Soil

从土壤比辐射率光谱曲线图上可以看到，在 8-14 μm ，比辐射率都高于 0.955。MODIS 的第 31 和 32 波段区间分别在 10.780~11.280 μm 和 11.770~12.270 μm ，因此，第二个波段的土壤比辐射率可分别取值为 0.9832 和 0.9731。

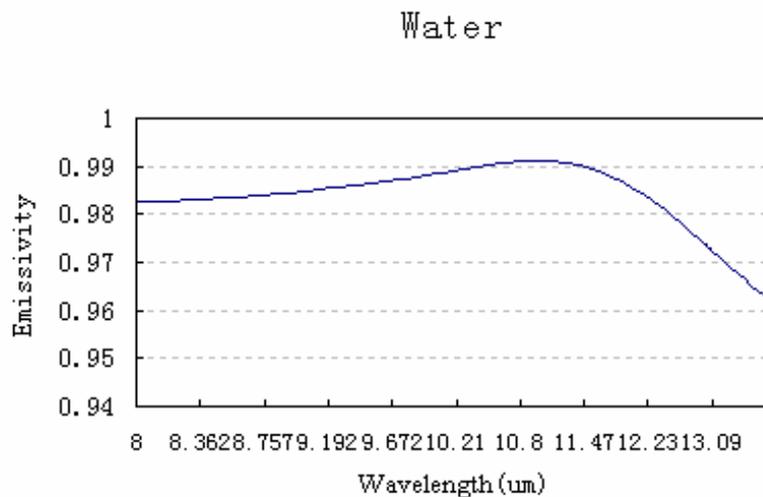


图 4.13 水体的比辐射率随波长而变化的曲线图

Fig 4.13 Change of Emissivity with Wavelength for Water

从水体比辐射率光谱曲线图上可以看到，在 8-14 μm ，比辐射率都高于 0.96。MODIS 的第 31 和 32 波段区间分别在 10.780~11.280 μm 和 11.770~12.270 μm ，因此，这两个波段的水体比辐射率分别取值为 0.992 和 0.989。

4.3.2 比辐射率估计方法应用

本文把地物分为 3 种类型，即植被、裸土、水体。运用 4.4.1 中提到的方法，利用 MODIS 的 1、2 波段求得 NDVI，得到 NDVI 分级图。如图 4.14 所示。通过公式 $P_v = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)$ 求得 PV 图如图 4.15 所示。

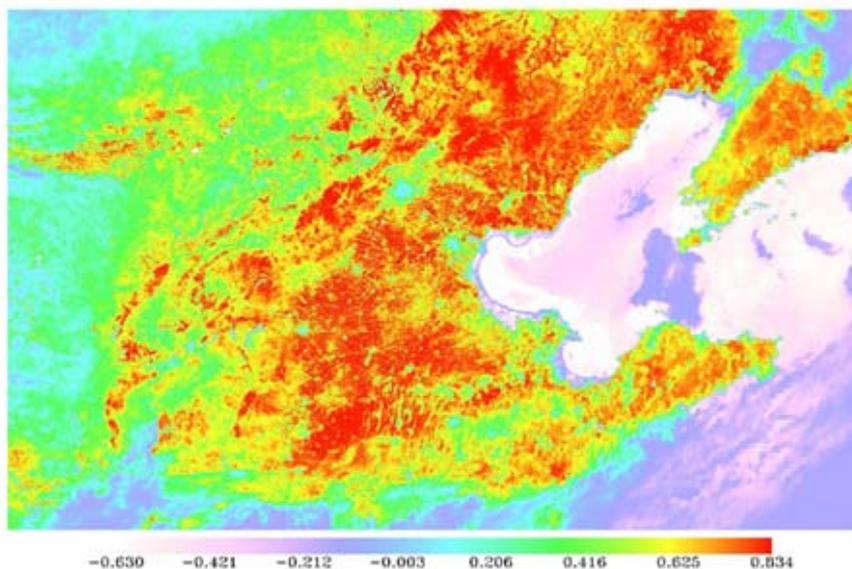


图 4.14 NDVI 分级图

Figure 4.14 Map of NDVI Classification

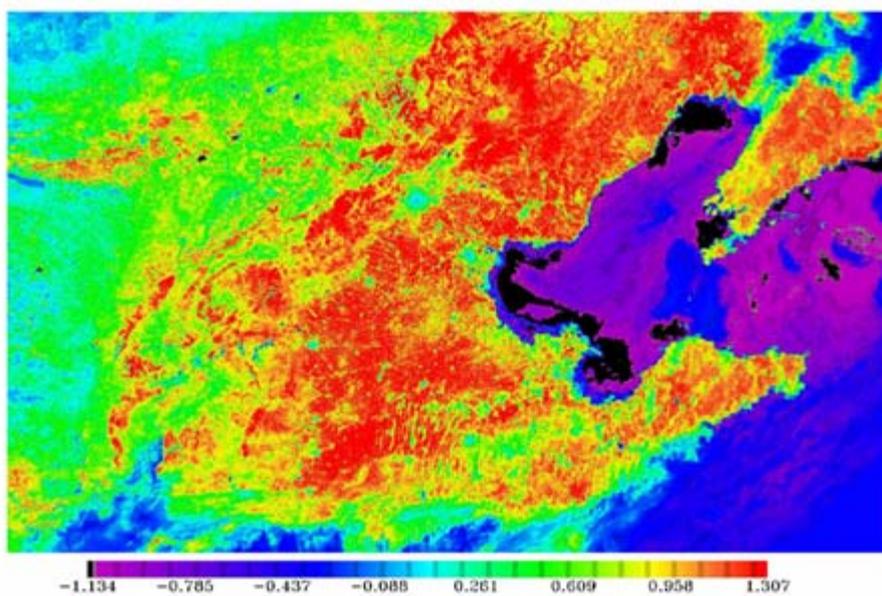


图 4.15 PV

Fig 15 Map of PV

根据 4.4.1 中分析结合环渤海地区的特点，对 31 波段的水体、植被、裸土比辐射率分别取 0.992、0.9851、0.9832，计算得 31 波段的比辐射率如图 4.16 所示；对 32 波段的水体、植被、裸土比辐射率分别取 0.989、0.9844、0.9731，计算得 32 波段的比辐射率如图 4.17 所示。

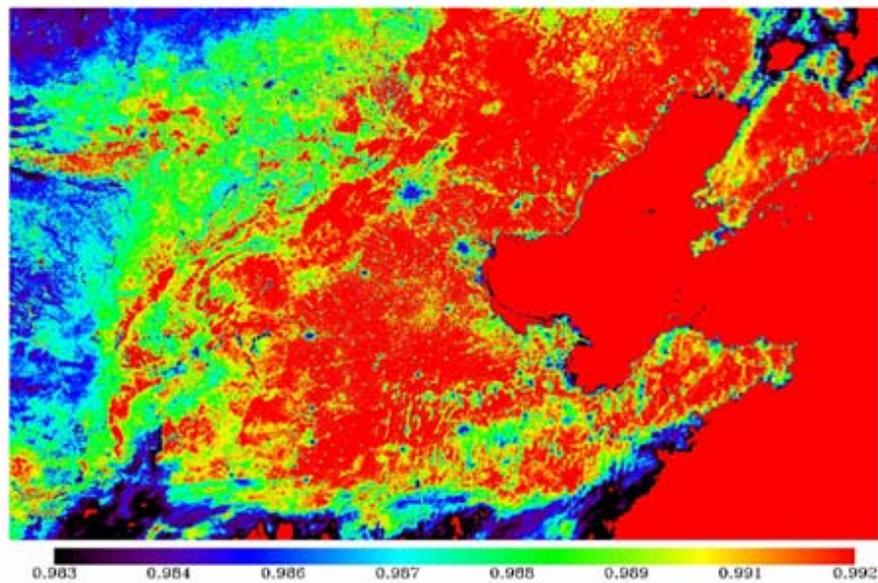


图 4.16 MODIS 第 31 波段的地表比辐射率分布图

Fig 4.16 Land Surface Emissivity of Huanbohai Region for MODIS Band 31

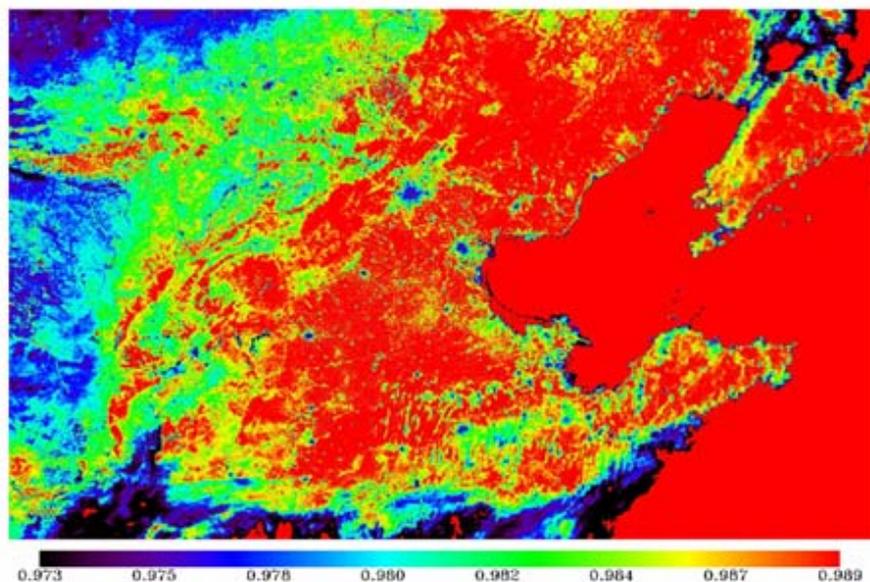


图 4.17 MODIS 第 32 波段的地表比辐射率分布图

Fig 4.17 Land Surface Emissivity of Huanbohai Region for MODIS Band 32

为了进一步分析，对环渤海地区的地表比辐射率分布拉了一个剖面，得到如图 4.18 所示的地表比辐射率在这一剖面的变化。图 4.18 指出，不同像元的地表比辐射率有微小的起伏，并且第 31 波段的地表比辐射率比第 32 波段稍高。

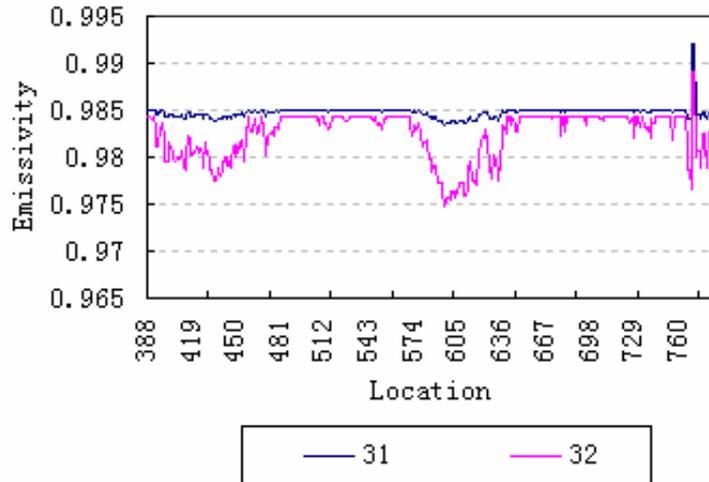


图 4.18 环渤海地区的地表比辐射率分布剖面图

Fig 4.18 Cross-section Change of Land Surface Emissivity in Huanbohai Region

4.4 本章小结

本章对 Planck 函数进行了线性简化，探讨了大气透过率与大气水汽含量之间的关系，提出了大气水汽大气含量的遥感反演方法，同时对地表温度反演方程中的两个关键参数大气透过率和地表比辐射率进行了估算，并把这些反演或估计方法应用到环渤海地区的 MODIS 第 31 和 32 波段影像中去，估计这一地区的大气透过率和地表比辐射率分布。

第 5 章 辐射传输方程、劈窗、单窗算法推导及应用

本章着重对用于地表温度反演的传输方程法、劈窗算法和单窗算法进行介绍,并结合第 4 章中对 Planck 方程的简化和参数估算方法,以提出适用于 MODIS 热波段数据的地表温度反演方法。最后,用这些方法来对第 3 章中选择的环渤海研究区进行地表温度反演,并对反演结果进行分析。

5.1 辐射传输算法

用辐射传输方法来反演地表温度,首先是使用大气模型软件(如 LOWTRAN、MODTRAN、6S)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所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 (2.4) 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出来,从而可以利用式 (2.4) 将 $B_\lambda(T_s)$ 计算出来,然后用式 (5.1) 将地表温度 T_s 计算出来。

$$T_s = \frac{C_2}{\lambda \ln \left[\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda(T)} \right) + 1 \right]} \quad (5.1)$$

式中 T_s 为地表温度,单位为 K; λ 为波长,单位为 μm ; c_1, c_2 为常数,分别为 $c_1 = hc^2 = 5.95522012 \times 10^{-17} \text{ Wm}^2$ 和 $c_2 = \frac{hc}{k} = 1.43876869 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

5.1.1 大气热辐射模拟过程

本文用 MODTRAN 来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[40-43],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的帮助。对于中分辨率的遥感影像而言,MODTRAN 是最适合于用来做大气校正的大气模型软件。本文针对我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 5.1 所示。

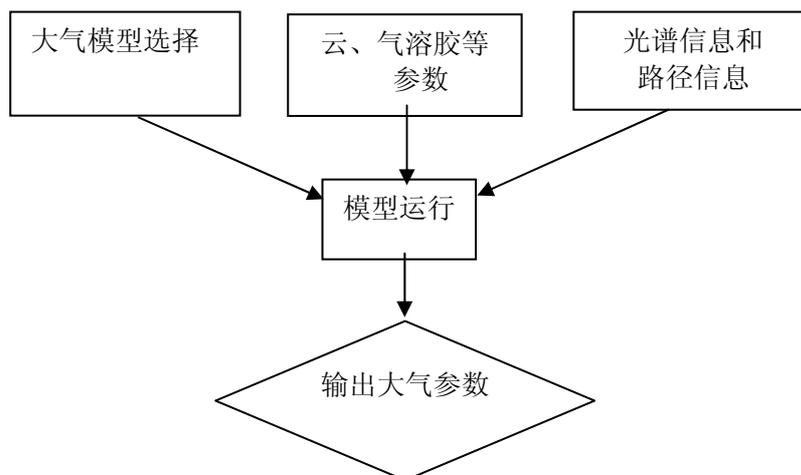


图 5.1 MODTRAN 求算大气参数流程图

Fig 5.1 The Frame Map of MODTRAN Parameter Computation

5.1.1.1 大气资料输入

MODTRAN 界面提供了各种大气模型选择输入，主要分为热带大气、中纬度冬夏季大气、极地冬夏季大气和美国标准大气等。大气路径选择包括水平、斜以及垂直路径到空中。计算时主要需要考虑的大气成分有：水汽、臭氧、甲烷、氮化物、碳氧化物的大气剖面资料。另外还要选择计算模式等。本文选择如图 5.2。

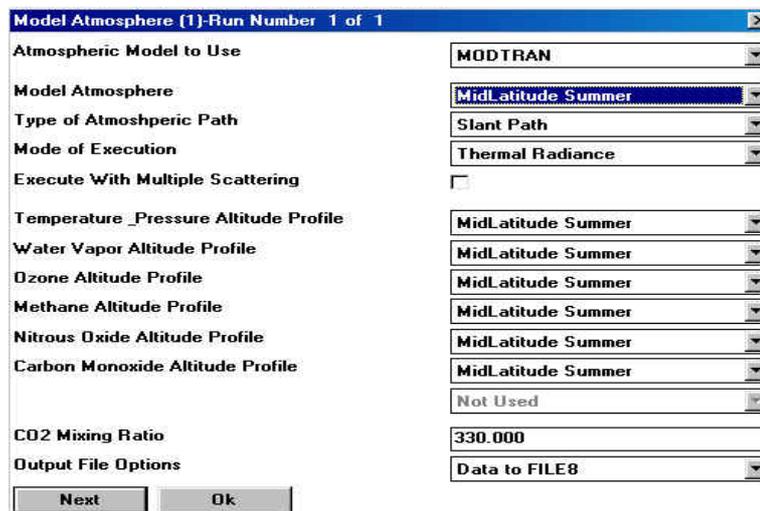


图 5.2 MODTRAN 大气模拟的大气模型输入选择

Fig 5.2 Interface of MODTRAN Atmosphere Model Parameter Input

5.1.1.2 气溶胶资料输入

当大气中的气溶胶含量达到一定的程度时，其对辐射传输的影响很大。

MODTRAN 大气模型中考虑到这一点,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。当选择中纬度冬季、极地冬季模式大气时,用秋冬模型进行修正,选择热带夏季、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 种气溶胶模式可供选择,平流层有 8 种气溶胶模式可供选择。当然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气溶胶参数模式,还可以将气溶胶消光系数转换为等效液态水含量形式。对不同类型气溶胶的化学成分、光谱分布及折射指数均受湿度的影响等,具体可参考文献[39-40],本文选择的气溶胶输入如图 5.3 所示。

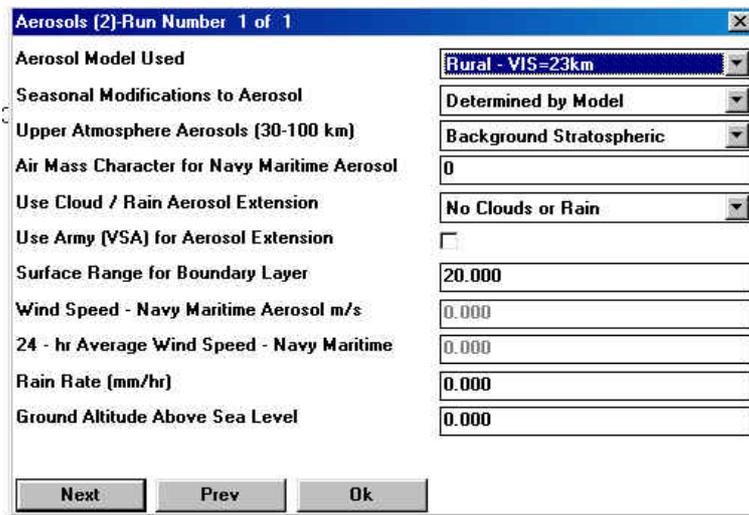


图 5.3 气溶胶参数输入图
Fig 5.3 The Aerosol Parameter Input

5.1.1.3 几何信息和光谱信息输入

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是很重要的。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、地球半径和所求波谱段范围的选取也要考虑。散射过程还要考虑单次散射和多次散射。由于 MODTRAN 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,以便于进一步分析研究。本文选择的几何和光谱参数输入如图 5.4 所示。

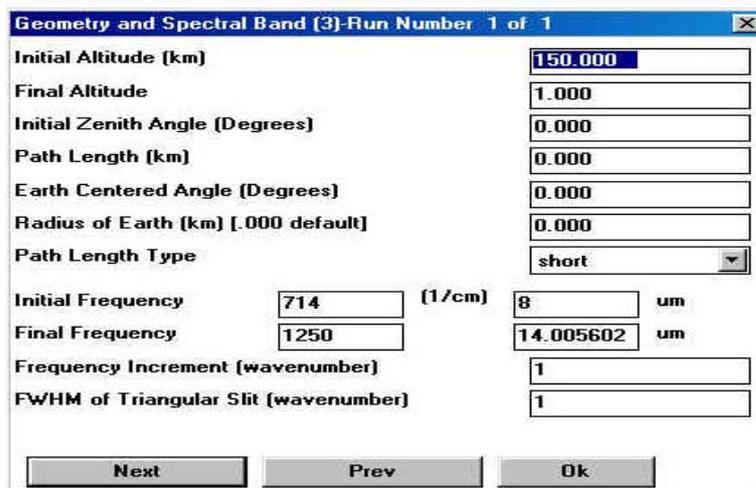


图 5.4 几何与光谱信息输入图

Fig 5.4 Geometry and Spectral Parameter Input

5.1.2.4 数据分析

将模型运行后的输出数据 modout1 导入 EXEL 软件进行分析，得到如图 5.5 所示的水汽对热辐射在大气传输的影响。

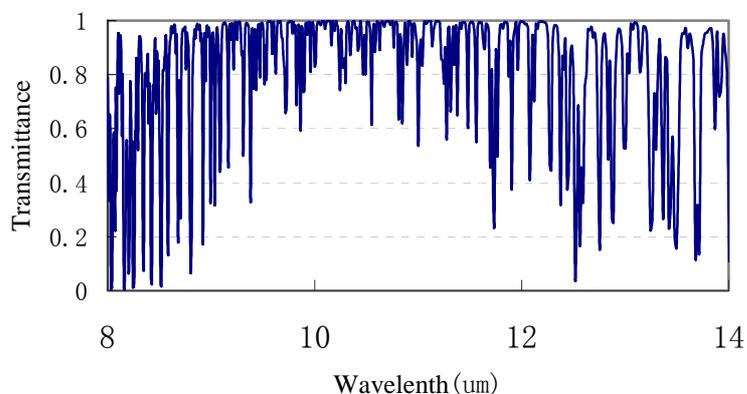


图 5.5 大气水汽的透过率

Fig 5.5 The Curve of Simulation Water Transmittance

从图 5.5 可以看出波谱分辨率比较高，水汽的吸收谱线很多，并随波长起伏很大。因此为了便于分析，需要对曲线进行平滑。

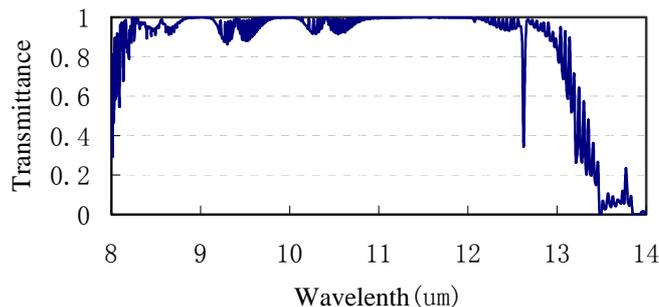


图 5.6 二氧化碳的透过率

Fig 5.6 The Curve of Simulation of Dioxide Transmittance

图 5.6 说明二氧化碳随波长增加而吸收增强，特别是在波长大于 $13\mu\text{m}$ 后，从而使大气透过率明显减小。

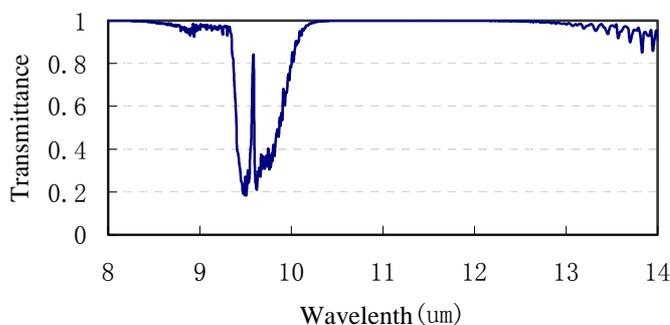


图 5.7 臭氧透过率

Fig 5.7 The Curve of Simulation of Ozone Transmittance

图 5.7 指出，臭氧在 $9\text{--}10\mu\text{m}$ 对热辐射吸收比较强，在其它波段几乎没有吸收，从而使大气透过率接近 1。

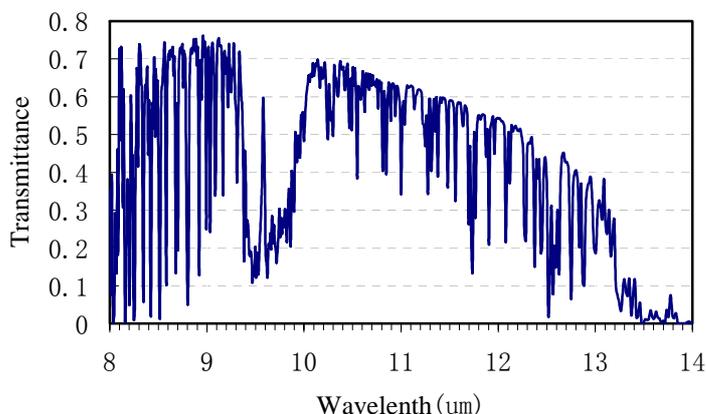


图 5.8 总透过率图

Fig 5.8 The Curve of Total Transmittance

图 5.8 显示大气的总透过率随波长而变化。大气的总透过率由公式 (5.6) 计算。

图 5.8 指出, 大气对热辐射的吸收起伏比较大, 在有的波段大气吸收比较大, 从而使大气透过率降低。所以我们在进行卫星影像分析的时候, 需要考虑这些吸收情况, 针对不同的波段进行大气校正。

5.1.2 算法应用

采用 MODTRAN 针对 MODIS 31 和 32 波段用标准大气对环渤海地区进行模拟, 部分模拟结果如表 5.1。

表 5.1 中纬度标准大气模拟结果
Table 5.1 The Simulation Result of Mid-latitude

WAVLEN (CM-1) (MIC)	PATH THERMAL (CM-1) (MICR)	RADIANCE (WATTS/CM2-STER-XXX)			INTEGRAL (CM-1)
		SURFACE EMISSI (CM-1) (MICR)	SURFACE REFLE (CM-1) (MICR)	TOTAL RADIANCE (CM-1) (MICR)	
10.06	6.89E-06	6.81E-04	6.89E-06	6.81E-04	2.36E-03
10.163	6.91E-06	6.69E-04	6.91E-06	6.69E-04	2.32E-03
10.267	7.02E-06	6.66E-04	7.02E-06	6.66E-04	2.25E-03
10.373	7.48E-06	6.95E-04	7.48E-06	6.95E-04	2.18E-03
10.482	7.55E-06	6.87E-04	7.55E-06	6.87E-04	2.11E-03
10.593	7.46E-06	6.65E-04	7.46E-06	6.65E-04	2.03E-03
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
11.71	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
11.99	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
12.594	8.72E-06	5.49E-04	8.72E-06	5.49E-04	7.58E-04
12.755	8.50E-06	5.22E-04	8.50E-06	5.22E-04	6.70E-04
12.92	9.50E-06	5.69E-04	9.50E-06	5.69E-04	5.85E-04
13.089	9.81E-06	5.73E-04	9.81E-06	5.73E-04	4.90E-04
13.263	8.62E-06	4.90E-04	8.62E-06	4.90E-04	3.92E-04
13.441	8.64E-06	4.78E-04	8.64E-06	4.78E-04	3.06E-04
13.624	8.72E-06	4.70E-04	8.72E-06	4.70E-04	2.20E-04
13.812	8.81E-06	4.62E-04	8.81E-06	4.62E-04	1.32E-04
14.006	8.86E-06	4.52E-04	8.86E-06	4.52E-04	4.43E-05

将星上遥感器接收到的热辐射值减去大气热辐射值, 然后解 (2.4) 式, 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 (5.1) 可以看出, PATH THERMAL (大气向上热辐射) 和 SURFACE REFLE (大气

向下热辐射的地表反射) 相对 SURFACE EMISSI (地表热辐射) 的值很小, 所以本文只考虑式 (2.4) 中的前两项。利用第 4 章中求取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 (2.4), 解方程得到地表温度的反演结果, 如图 5.9 和 5.10 所示。MODIS 的第 31 和 32 波段的星上亮度温度非常接近, 小于 1 度。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 45.85°C, 平均温度为 22.76°C。第 32 波段反演的结果显示, 这最高温度 49.97°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, 这是可以理解的。从图 5.10 可以看出, 城市热岛效应和海陆温度差异非常明显。

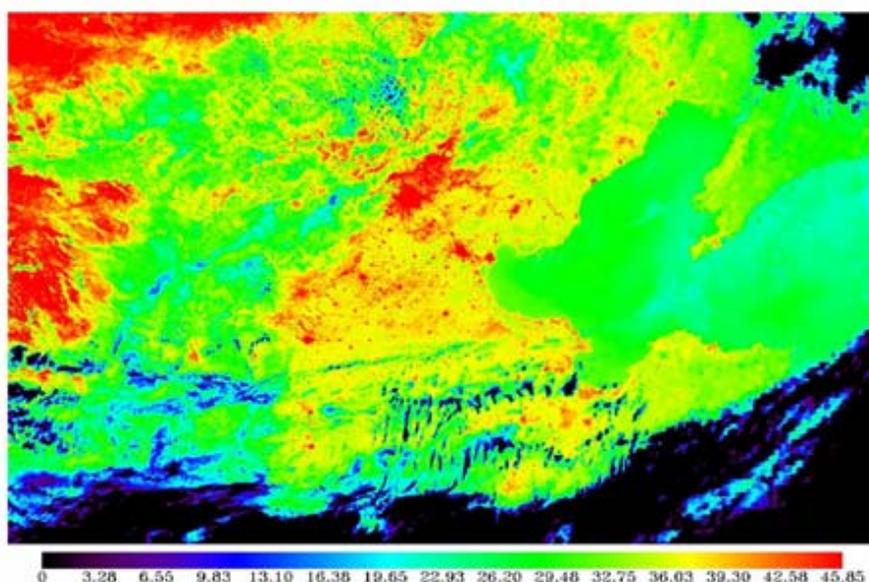


图 5.9 根据 MODIS 第 31 波段数据用辐射传输法反演而得的环渤海地区地表温度空间差异
 Fig 5.9 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 31 Data

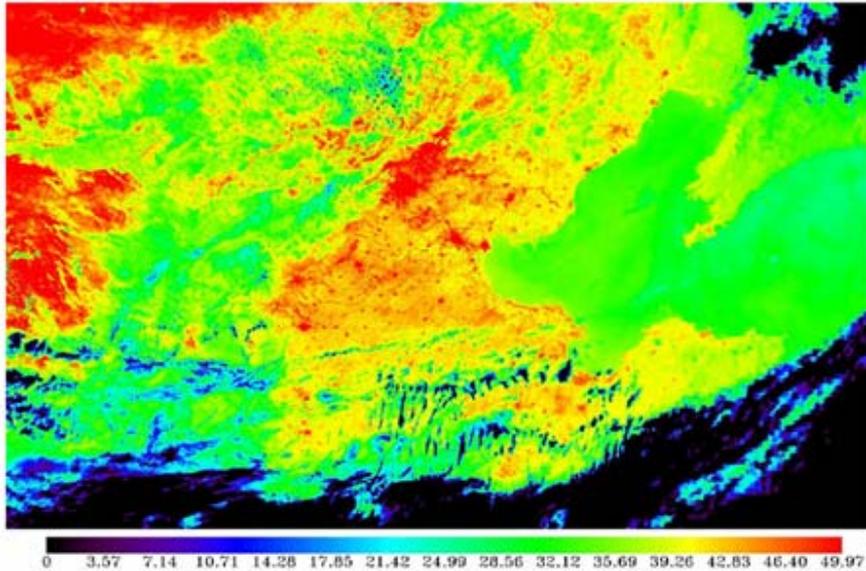


图 5.10 根据 MODIS 第 32 波段数据用辐射传输法反演而得的环渤海地区地表温度空间差异
Fig5.10 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 32 Data

5.2 劈窗算法

劈窗算法主要是针对 AVHRR 的第 4 和 5 热红外波段提出来的。这个技术开始主要用来推算海洋表面温度 (SST)，其精度可达 0.7°C。海洋表面温度 (SST) 的反演[44]为建立地面温度 (LST) 的反演方法提供了基础。但是由于大气和地表比辐射率的校正都存在一定的困难，所以要得到精确的 LST 反演结果很难。大气校正的精度受多种因素的影响，如辐射传输方法、大气中分子 (尤其是水汽) 吸收系数和气溶胶吸收/散射系数的不确定性以及作为辐射传输模式输入参数的大气廓线的不确定性。在以往的 SST 和 LST 反演算法中，通常是用 LOWTRAN、6S 或 MODTRAN 等来模拟以便获得大气参数的估计方程，但大气参数的估计还需要另外的地面观测 (大气水分含量) 才能用所建立的大气方程来实现。由于 MODIS 波段具有高光谱特点，使得从影像反演大气参数估计所需要的大气水分含量成为可能。

到目前为止，已经公开发表的劈窗算法至少有 17 种[3]。劈窗算法的一般表达式通常如下：

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \tag{5.2}$$

式中 T_s 是地表温度，A 和 B 为参数， T_4 和 T_5 分别是 AVHRR 热波段 4 和 5 的亮度温度。 T_s 、 T_4 和 T_5 的单位是绝对温度 (K)。劈窗算法的另一常用表达式为：

$$T_s = A_0 + A_1 T_4 + A_2 T_5 \quad (5.3)$$

式中 A_0 、 A_1 和 A_2 上参数。实际上，如果考虑如下关系： $A_0 = B$ ， $A_1 = 1 - A$ 和 $A_2 = A$ ，则这两种表达式之间可以相互转换。

5.2.1 劈窗算法的推导

劈窗算法的推导是基于热辐射传输方程 (2.4)，由于地面物体通常不是黑体，所以要反演真正的地表温度，必须考虑地表比辐射率。覃志豪在[2]中对 I_i^\uparrow 和 I_i^\downarrow 的求算做了详细的推导。对于 I_i^\uparrow 可以有近似解：

$$I_i^\uparrow = (1 - \tau_i) B_i(T_a) \quad (5.4)$$

$$I_i^\downarrow = (1 - \tau_i) B_i(T_a^\downarrow) \quad (5.5)$$

上式中 T_a 为大气向上平均温度， T_a^\downarrow 为大气向下的平均作用温度。将 I_i^\uparrow 和 I_i^\downarrow 代入地表的热辐射传导方程 (2.4) [2]，得式 (5.6)

$$B_i(T_s) = \tau_i \varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i)(1 - \tau_i) B_i(T_a^\downarrow) + (1 - \tau_i) B_i(T_a) \quad (5.6)$$

为了解方程 (5.6)，覃志豪在[3]中通过分析比较得出结论，用 T_a 替代 T_a^\downarrow 对方程的计算不产生实质性的影响，因而方程简化如式 (5.7)。

$$B_i(T_s) = \varepsilon_i \tau_i(\theta) B_i(T_s) + [1 - \tau_i(\theta)][1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i(\theta)] B_i(T_a) \quad (5.7)$$

对于 MODIS 的第 31 和 32 波段，方程可写成如式 (5.8)、(5.9)：

$$B_{31}(T_{31}) = \varepsilon_{31} \tau_{31}(\theta) B_{31}(T_s) + [1 - \tau_{31}(\theta)][1 + (1 - \varepsilon_{31}) \tau_{31}(\theta)] B_{31}(T_a) \quad (5.8)$$

$$B_{32}(T_{32}) = \varepsilon_{32} \tau_{32}(\theta) B_{32}(T_s) + [1 - \tau_{32}(\theta)][1 + (1 - \varepsilon_{32}) \tau_{32}(\theta)] B_{32}(T_a) \quad (5.9)$$

在方程组中，温度 T 和辐射强度 $B(T)$ 的函数关系式表达非常复杂。因此在解方程的过程中，非常的麻烦，所以必须对此进行化简。在以往的方程求解算法中，通常是对 Planck 方程进行泰勒展开，取一次项进行化简。本文用在第 4 章中对 Planck 方程的简化方法，把第 31 和 32 波段的简化方程 $B_{31}(T)=0.13834T_{31}-31.80148$ 和 $B_{32}(T)=0.11952T_{32}-26.8045$ 分别代入(5.8)和(5.9)，得到：

$$0.13834 \varepsilon_{31} \tau_{31} T_s = 0.13834 T_{31} + 31.80148 \varepsilon_{31} \tau_{31} - (1 - \tau_{31}) [1 + (1 - \varepsilon_{31}) \tau_{31}] \\ (0.13834 T_a - 31.80148) - 31.80148 \quad (5.10)$$

$$0.11952 \varepsilon_{32} \tau_{32} T_s = 0.11952 T_{32} + 26.8054 \varepsilon_{32} \tau_{32} - (1 - \tau_{32}) [1 + (1 - \varepsilon_{32}) \tau_{32}] \\ (0.11952 T_a - 26.8054) - 26.8054 \quad (5.11)$$

为了便于计算，将方程 (5.10) 和 (5.11) 中的系数分别记为：

$$A_{31}=0.13834 * \varepsilon_{31} * \tau_{31}$$

$$B_{31}=0.13834 * T_{31} + 31.80148 * \tau_{31} * \varepsilon_{31} - 31.80148$$

$$C_{31}=(1 - \tau_{31}) * (1 + (1 - \varepsilon_{31}) * \tau_{31}) * 0.13834$$

$$D_{31}=(1 - \tau_{31}) * (1 + (1 - \varepsilon_{31}) * \tau_{31}) * 31.80148$$

$$A_{32}=0.11952 * \varepsilon_{32} * \tau_{32}$$

$$B_{32}=0.11952 * T_{32} + 26.80148 * \tau_{32} * \varepsilon_{32} - 26.80148$$

$$C_{32}=(1 - \tau_{32}) * (1 + (1 - \varepsilon_{32}) * \tau_{32}) * 0.11952$$

$$D_{32}=(1 - \tau_{32}) * (1 + (1 - \varepsilon_{32}) * \tau_{32}) * 26.80148$$

从而可以使方程 (5.10) (5.11) 表示为：

$$A_{31}T_s = B_{31} - C_{31} T_a + D_{31} \tag{5.12}$$

$$A_{32}T_s = B_{32} - C_{32} T_a + D_{32} \tag{5.13}$$

解方程组 (5.12) 和 (5.13)，得地表温度计算公式

$$T_s = (C_{32}(B_{31} + D_{31}) - C_{31}(D_{32} + B_{32})) / (C_{32}A_{31} - C_{31}A_{32}) \tag{5.14}$$

要用 (5.14) 来反演地表温度，其参数 A、B、C 和 D 的估计需要大气透过率 τ 和地表比辐射率 ε 为已知。本文对这两个参数的求取是利用第 4 章中提出的从 MODIS 影像中反演大气水汽含量，然后通过水汽含量与透过率的关系求得第 31 和 32 波段的大气透过率，使对透过率的求算精确到每个像元。对于比辐射率的求算也是用第 4 章中的比辐射率的估计方法来获取。

5.2.2 劈窗算法的应用

本节用第 3 章中选择的研究区和第 4 章中计算的大气透过率及地表比辐射率估计代入我们所提出的劈窗算法 (5.14) 中，得到环渤海地区的地表温度反演结果，如图 5.11 所示。图 5.11 的反演结果指出，这一地区的最高地表温度为 46.05°C，平均温度为 22.23°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，这是可以理解的。

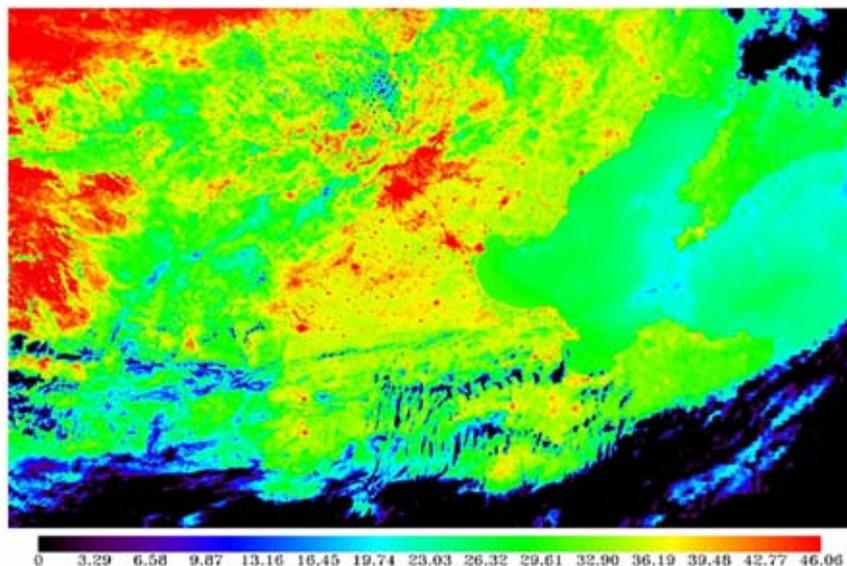


图 5.11 根据 MODIS 第 31 和 32 波段数据用劈窗算法反演而得的环渤海地区地表温度空间差异

Fig 5.11 Regional Distribution of LST Retrieved from MODIS Band 31 and 32 Data

从图 5.11 可以看出，最高气温分布在中部的丘陵地区。图中显示，环渤海地区的温度分布有些异常。在沿渤海的海岸线附近温度较高，而两侧温度都低。在鲁南也有所体现。这种现象与我们平常由陆地到海洋白天温度逐渐递减的规律不同。这可能跟环渤海地区沿岸城市和工业区以及土地盐碱化的土地变化有关。由于 MODIS 图像区域跨度大，用 MODIS 来进行大区域尺度的地表热量空间分布差异分析，是 MODIS 数据应用的一个优势。从图 5.11 还可以看出，海陆温度差异非常明显。

5.3 单窗算法

单窗算法主要是针对一个热红外波段而设计的。实际上它也是单波段算法中的一个算法。相对多波段、多角度而言，它的优点在于只需要一个热波段就可以对地面温度进行反演。这种方法的发展主要是由于有些遥感传感器只有一个热红外波段，例如 TM6。因为 TM 只有一个热波段，对它的利用早期主要是通过大气校正[6]，即用辐射传输方程来反演地表温度。在辐射传输方法中，由于实时大气剖面资料难以获取，通常使用大气模型(如 6S、LOWTRAN、MODTRAN)等来模拟大气对地表热辐射的影响，导致其适用性下降。为了充分利用 TM6 高分辨率的热波段，覃志豪[6]和 Jiménez-Muñoz[7]等对这个波段做了很多研究，分别提出了适用于 TM6 数据的单波段算法。

5.3.1 单窗算法的推导

单窗算法的推导也是基于辐射传输方程 (2.4)。其推导简化过程同 5.2.2 节中劈窗算法相类似。由于单窗算法只有一个方程, 因此对第 31 和 32 波段的地表温度计算可表述为如下 (5.15) 和 (5.16) 式。

$$T_S = (B_{31} - C_{31}T_a + D_{31}) / A_{31} \quad (5.15)$$

$$T_S = (B_{32} - C_{32}T_a + D_{32}) / A_{32} \quad (5.16)$$

从上式可以看出, 只有 ε_i 、 τ_i 和 T_a 已知, 才能进行地表温度的演算。对 ε_i 、 τ_i 计算已经在第 4 章中介绍了。下面介绍对大气平均作用温度 (T_a) 参数的估计方法。

覃志豪根据 Sobrino 等的研究在[45]提出了一个简便可行的大气平均作用温度估计方法。该方法把大气平均作用温度与大气剖面的温度和水分分布联系起来, 近似地表示为:

$$T_a = \frac{1}{w} \int_0^w T_z dw(z, Z) \quad (5.17)$$

式中 T_z 是高程为 z 处的大气温度; $w(z, Z)$ 为从高程 z 到遥感器高度 Z 的大气水汽含量。通过运算推导, 覃志豪[5]得到大气平均温度的求算公式为

$$\begin{aligned} T_a &= \sum [T_0 - R_t(z)(T_0 - 217)] R_w(z) \\ &= T_0 [\sum R_w(z) - R_t(z) R_w(z)] - \sum 217 R_t(z) R_w(z) \end{aligned} \quad (5.18)$$

式中 T_0 为地面附近气温; $R_w(z)$ 为 z 高度处大气水分含量与大气总含水量的比率; $R_t(z)$ 是气温在高度 z 处的降低率。在[21]中, 覃志豪给出了几个在平均大气状况下, 大气平均作用温度和地面附近温度的关系表达式。本文采用其中针对中纬度夏季关系表达式: $T_a = 16.0110 + 0.92621T_0$ 。根据影像的星上平均温度, 取 T_0 等于 300K。事实上, 我们可以从 MODIS 的某些波段中将大气温度廓线和大气水汽廓线反演出来, 从而可以更加准确地估计大气平均作用温度, 提高参数估计的实时性。

5.3.2 单窗算法的应用

以第 3 章中选择的研究区作为应用区域, 将第 4 章中计算的大气透过率和估算的比辐射率及本章估算的大气平均作用温度参数代入第 31 和 32 波段的单窗算法中。解方程得到环渤海地区的地表温度反演结果。比较两个波段的结果我们看

到，第 32 波段反演的结果略比第 31 波段高。第 31 波段反演的结果表明，环渤海地区的最高地表温度为 46.05°C，平均温度为 21.93°C。第 32 波段反演而得的最高地表温度 46.22°C，平均气温 20.74°C。

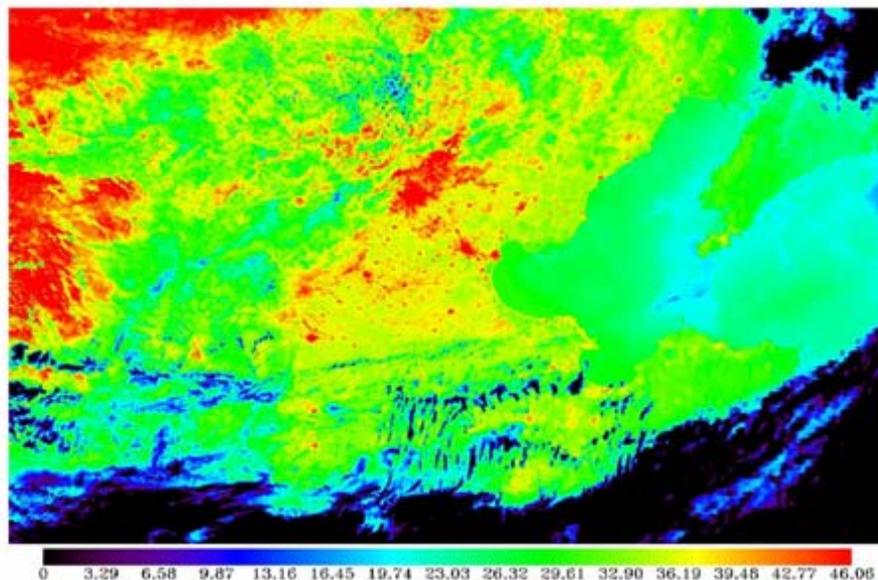


图 5.12 第 31 波段地表温度反演结果

Fig 5.12 Land Surface Temperature Retrieved from MODIS Band 31 by Mono-window Algorithm

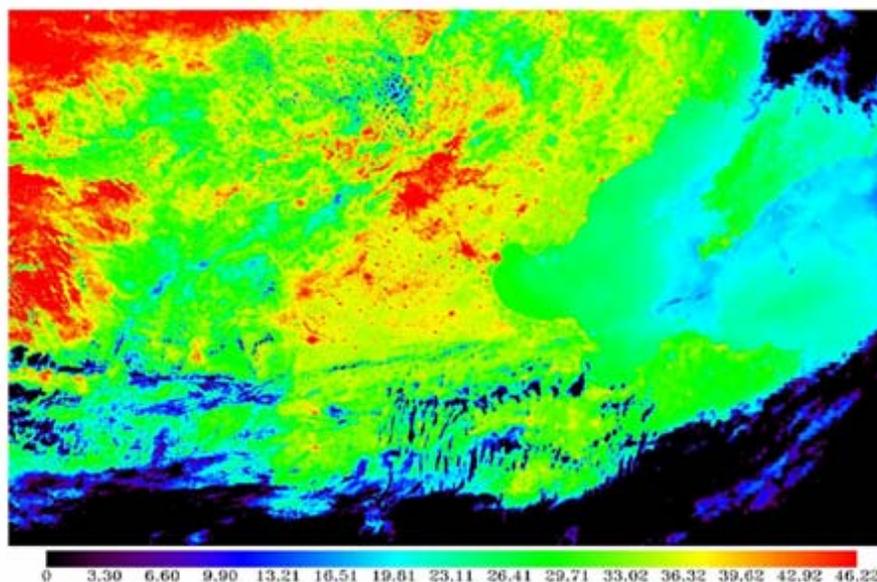


图 5.13 第 32 波段地表温度反演结果

Fig 5.13 Land Surface Temperature Retrieved from MODIS Band 32 by Mono-window Algorithm

5.4 三种方法的地表温度反演结果对比

从最高温度和平均温度来看，劈窗算法和单窗算法对 31 通道反演的结果最为接近，最高气温相同，平均相差 0.3°C；其次是单窗算法对 32 通道和辐射传输

方程的 31 通道反演的结果比较接近；反演精度最差的应该是辐射传输方程对 32 通道的反演结果，原因是它与其它反演结果相差太大，而且最高温度达 49.87，出现这种高温的情况很少（当然，只有少量的异常点）。仅仅从影像的温度分布很难看出温度的细微差别，特别是在影像中的温度很高的部分。我们通过剖面分析，发现只有极少数像元的温度高于 44°C。本节主要对上面三种算法的地表温度反演结果分别进行剖面分析。

图 5.14 是用辐射传输方程法分别对 MODIS 的第 31 和 32 波段的地表温度反演结果的剖面图。该剖面是以北京为中心，沿 X 轴拉的一个剖面。从图中可以看出：第 32 波段反演的结果比第 31 波段高 2-4°C。北京处于地表温度剖面的峰值区。在第 32 波段，其最高地表温度接近 46°C；在第 31 波段，对应的最高地表温度为 42°C。

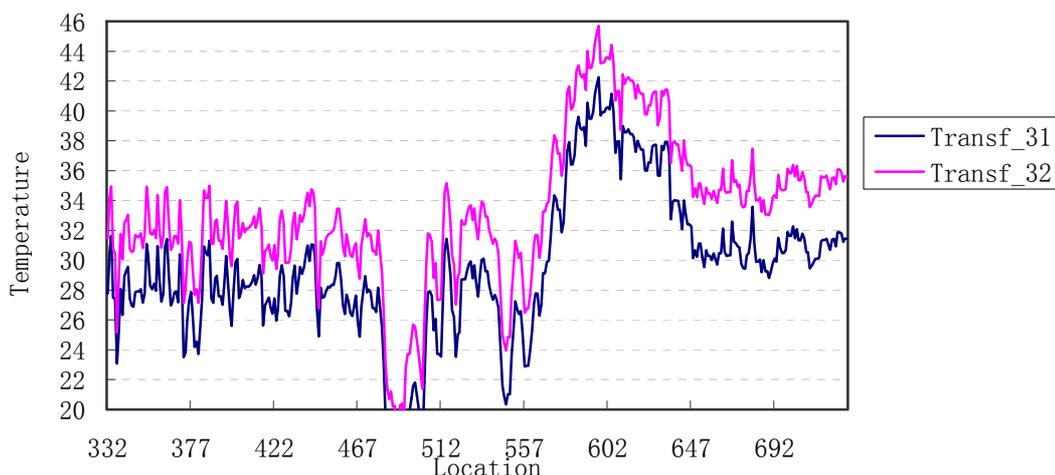


图 5.14 以北京为中心的地表温度剖面图

(注：辐射传输方法针对对第 31 和 32 波段的反演结果)

Fig 5.14 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Radiance Transfer Model Method

图 5.15 是用单窗算法分别对 MODIS 的第 31 和 32 波段的地表温度反演结果剖面图。该剖面是以天津为中心。同样天津位于地表温度剖面的峰值区。从图中可以看出，第 32 波段的地表温度反演结果比第 31 波段的结果低，大致有 1°C，但总体趋势非常接近。

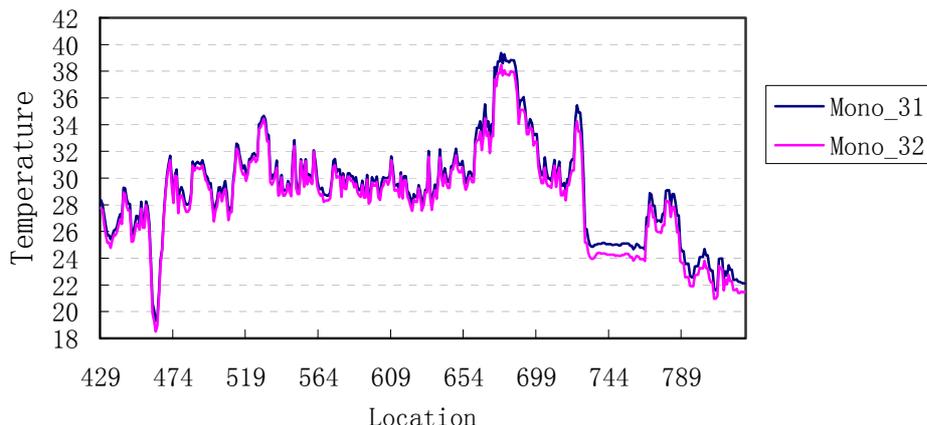


图 5.15 以天津为中心温度剖面图

(注：单窗算法针对 31 和 32 波段的反演结果)

Fig 5.15 Cross-section Change of LST Centering at Tianjin and Retrieved by Mono-window Method

图 5.16 是用辐射传输方程法和单窗算法对 31 波段以及劈窗算法的地表温度反演结果剖面图。该剖面曲线也是以北京为中心，最高地表温度为 41°C 左右。从图中可以看出，三条地表温度剖面曲线基本重合。

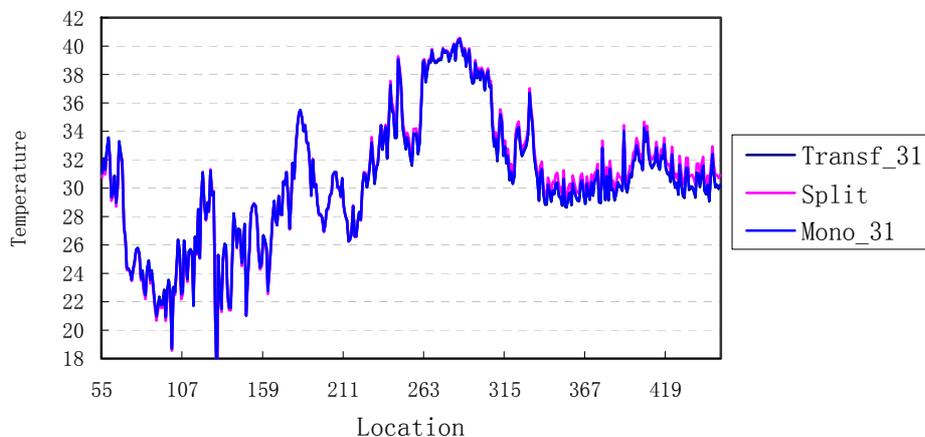


图 5.16 以北京为中心的地面温度变化剖面图

(注：分别用辐射传输方程和单窗算法对 31 波段和劈窗算法的反演结果)

Fig 5.16 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Mono-window and Split Window Methods

图 5.17 是用辐射传输方程和单窗算法对 32 波段以及劈窗算法的地表温度反演结果剖面图。该剖面曲线也是以北京为中心。从图中可以看出，辐射传输方程反演的最高温度达 46°C，比用单窗算法对 31 波段和劈窗算法反演的结果在对应地点高出 4°C 左右，而劈窗算法和单窗算法反演的结果非常的接近。

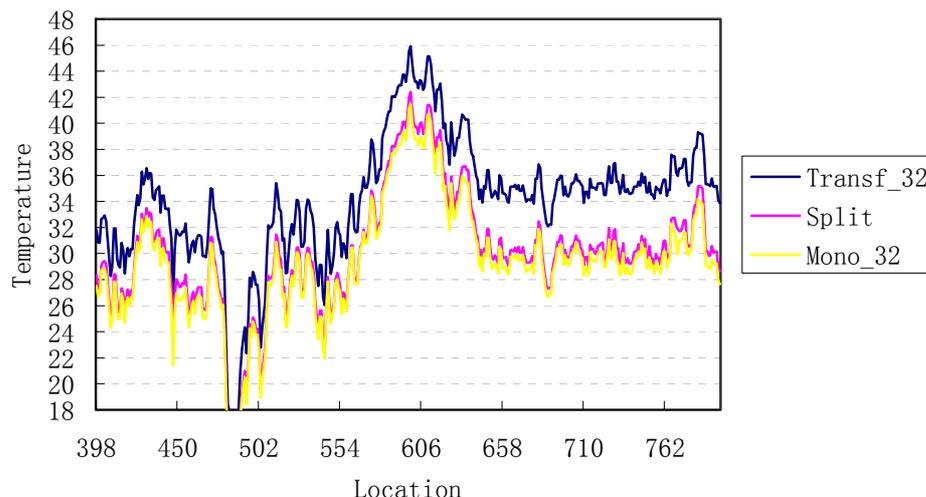


图 5.17 以北京为中心的地表温度剖面图

(注：分别用辐射传输方程和单波段算法对 32 波段和劈窗算法反演结果)

Fig 5.17 Cross-section Change of LST Centering at Beijing and Retrieved by Mono-window, Split Window and Radiance Transfer Model Methods

从以上的温度剖面图分析可知，用辐射传输方法对 32 波段进行地表温度反演所得的结果与用其它方法进行反演所得的结果偏差很大，辐射传输法所得结果比单窗算法和劈窗算法高出近 4°C 左右。在本章地表温度反演的方法中，参数最不确定的辐射传输方法，但用它对 31 通道反演的结果和劈窗算法和单窗算法的结果相差不大。其主要原因在于环渤海地区上空大气水汽含量很低，对地表的热辐射影响很小，导致热红外波段的透过率很高（具体见第 4 章），所以这 3 种方法反演结果（除辐射传输方程对第 32 通道的反演结果外相差不大是合理的。辐射传输方法的精度依赖于大气实时参数，而单窗算法反演的精度依赖于大气平均作用温度。对比之下，劈窗算法对温度反演的性能最好，精度最高。这一点在第 6 章中的算法精度评价中得到了进一步的证实。

5.5 本章小结

本章对三种地表温度反演方法（辐射传输、劈窗、单窗算法）进行了改进，使之适合于 MODIS 第 31 和 32 热红外波段数据。首先是用 MODTRAN 大气模型对中纬度地区的热辐射传输进行了分析。然后介绍单窗算法中大气平均作用温度的求解方法。最后用第 4 章中对 Planck 方程简化表达式对 3 种地表温度反演方法进行了简化和参数估计，建立适用于 MODIS 数据的地表温度反演方法，并分别应用于环渤海地区的 MODIS 影像数据进行了温度反演。结果表明，简化计算和参

数估计是可行的。根据环渤海地区的土地资源环境针和地理环境对反演结果进行了分析。反映这种大面积地表温度分布规律和空间差异是 MODIS 热红外波段数据应用的一个优势。

第6章 算法评价

对于地表温度反演算法的精度评价，通常采用两种方法[20]：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、MODTRAN 等对一定地表温度下的热辐射传导进行模拟。首先求算卫星高度观测到的热辐射，其中包括大气影响和辐射面的影响，然后用各地表温度算法反演地表温度，比较两者之间的差距可知算法的误差。因模拟过程中有关参数均已知，所以通常将这一误差代表算法的绝对精度（但由于现实情况非常复杂，绝非大气模型所能全部描述）；地面测量数据法是指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，两者比较可知其误差。但测试的同步性以及匹配等问题使得这一方法在实际应用中比较困难。大气模拟数据法是基于辐射传输方程，实际上就是用辐射传输法为基准对其它反演方法做验证。所以本章将用大气模拟数据法来对劈窗算法和单窗算法进行精度评价。

6.1 劈窗算法评价

在这里，我们采用覃志豪等在[2][6]中用 LOWTRAN 对中纬度大气辐射模拟数据对本文的地表温度反演精度进行评价。由于 NOAA/AVHRR 与 MODIS 的波长范围和中心波长基本对应，所以模拟数据适应于对 MODIS31/NOAA-AVHRR4 和 MODIS32/NOAA-AVHRR5 波段进行精度评价。表 6.1 是大气模拟的结果。表 6.1 中 water vapor 为大气水汽含量，Em31/4Ts 和 Tran31/4 分别代表在波段 M31/T4 范围的地表比辐射率和大气透过率。Em32/5Ts 和 Tran32/5 代表在波段 M32/T5 的地表辐射率和大气透过率。Ts 为地表真实温度，M31/T4 和 M32/T5 为模拟传感器高度的亮度温度。大气模拟考虑了在同一大气水汽含量下，不同的大气透过率和不同的温度状态下的辐射传输问题。同时也考虑了在不同水汽含量下，不同大气透过率以及不同温度条件下的大气辐射传输情况。因此，模拟数据具有很好的代表性。

表 6.1 中纬度地区大气辐射模拟数据表

Table 6.1 The Simulation of Atmosphere Transformation in Mid-Altitude

water vapor	Emissivity		Transmittance		LST	Brightness temperature	
	Em31/4	Em32/5	Tran31/4	Tran32/5	Ts C	M31/T4	M32/T5
1g	0.97	0.974	0.913	0.862	20	290.87	290.74
	0.97	0.974	0.9158	0.867	30	300.34	299.98
	0.97	0.974	0.9184	0.871	40	309.97	309.49
	0.97	0.974	0.920	0.875	50	319.68	319.14
2g	0.97	0.974	0.817	0.722	20	290.47	290.10
	0.97	0.974	0.830	0.741	30	299.56	298.77
	0.97	0.974	0.843	0.759	40	309.06	308.07
	0.97	0.974	0.853	0.767	50	318.72	317.52
2.5g	0.97	0.974	0.756	0.640	20	290.20	289.69
	0.97	0.974	0.774	0.665	30	299.03	298.01
	0.97	0.974	0.793	0.689	40	308.43	307.15
	0.97	0.974	0.814	0.703	50	318.14	316.53

表 6.2 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据表

Table 6.2 The Parameters of Split Window

Tras31	Tras32	A31	A32	B31	B32	Tt	Ts-273	Ts	Ts -Tt'
0.93345	0.86652	0.125	0.101	37.2	30.57	293	19.964	20	0.036
0.93345	0.86652	0.125	0.101	38.5	31.67	303	29.9879	30	0.012
0.93345	0.86652	0.125	0.101	39.9	32.81	313.1	40.0819	40	-0.08
0.93345	0.86652	0.125	0.101	41.2	33.96	323.2	50.1898	50	-0.19
0.82675	0.74075	0.111	0.086	33.9	27.21	293.2	20.178	20	-0.18
0.82675	0.74075	0.111	0.086	35.1	28.24	303.5	30.4569	30	-0.46
0.82675	0.74075	0.111	0.086	36.5	29.36	313.7	40.7193	40	-0.72
0.82675	0.74075	0.111	0.086	37.8	30.48	324.2	51.1599	50	-1.16
0.7734	0.67786	0.104	0.079	32.2	25.52	293.3	20.3348	20	-0.33
0.7734	0.67786	0.104	0.079	33.4	26.51	303.8	30.7535	30	-0.75
0.7734	0.67786	0.104	0.079	34.7	27.6	314.1	41.1033	40	-1.1
0.7734	0.67786	0.104	0.079	36.1	28.72	325	51.9729	50	-1.97

注：透过率采用本文模拟方程求算。

表 6.2 是劈窗算法利用大气辐射传输的模拟结果对地表温度进行反演的数据表。Tras31 是 Tras32 利用本文在第四章中模拟的大气水汽含量和透过率的关系表达式 ($\tau_{31}=-0.10671w+1.04015$; $\tau_{32}=-0.12577w+0.99229$)，根据大气模型大气水汽含量输入量计算得到的大气透过率；A31、A32、B31 和 B32 分别为劈窗算法系数；Tt 为劈窗算法地表温度反演结果。Ts-Tt' 为地表真实温度和反演结果之差值。我们把这个差值称之为反演方法的精度。

从表 6.2 中可以看到，随着温度和大气水汽含量的升高，地表温度反演的误差有升高的趋势，最大误差为 1.97°C，平均为误差为 0.575°C。表 6.3 是劈窗算法利用大气辐射传输的模拟结果对地表温度进行反演的数据表，其中大气透过率是使用大气模型模拟计算得到的透过率（可以看成是真实透过率）。表中的其它参数和表 6.2 相同。表 6.3 指出，地表温度反演的最大误差为 0.8°C，平均误差为 0.46°C。

表 6.3 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据表

Table 6.3 The Retrieving Results by Split Window

Tran4	Tran5	A31	A32	B31	B32	Ts	Ts-273	Ts	Ts -Tt
0.913	0.863	0.1225	0.1004	36.61	30.47	293	20.12	20	-0.1177
0.915	0.867	0.1229	0.101	38	31.69	303	30.35	30	-0.3479
0.918	0.872	0.1233	0.1015	39.41	32.94	314	40.57	40	-0.5726
0.920	0.876	0.1235	0.102	40.82	34.21	324	50.79	50	-0.7944
0.817	0.723	0.1097	0.0841	33.59	26.73	293	20.12	20	-0.1244
0.830	0.741	0.1114	0.0863	35.25	28.25	303	30.36	30	-0.3588
0.843	0.76	0.1132	0.0884	36.97	29.85	314	40.58	40	-0.5822
0.853	0.768	0.1145	0.0894	38.62	31.2	324	50.78	50	-0.7828
0.756	0.64	0.1015	0.0745	31.69	24.54	293	20.13	20	-0.1308
0.774	0.665	0.104	0.0774	33.47	26.18	303	30.37	30	-0.3703
0.793	0.69	0.1064	0.0803	35.33	27.91	314	40.59	40	-0.5948
0.814	0.704	0.1093	0.0819	37.33	29.41	324	50.78	50	-0.7808

注：透过率采用大气模型模拟计算得到的透过率。

表 6.2 和表 6.3 都是用劈窗算法反演的数据表。它们的差别在于大气透过率不一样。表 6.2 中的透过率与表 6.1 中的透过率比较可知，用本文在第四章中模拟的关系表达式求得的透过率比实际要大，从而可推知由此计算得到的地面辐射能比实际偏低，所以最后反演的地表温度比实际偏低。从表 6.3 可以看出，劈窗算法用实际透过率（大气模型求算的大气透过率）反演的温度非常接近实际温度。

表 6.4 是运用劈窗算法在大气透过率获取方式不同的情况下所引起的温度相对误差结果。从 6.4 表中数据可以看出，当大气水汽含量为 2.5g/cm²，温度为 40°C 时，使用真实透过率，劈窗算法所引起的误差为 0.59°C；使用线性模拟的透过率时，劈窗算法所引起的误差是 1.31°C，其最大相对误差 1.096°C。对于劈窗算法，当 MODIS 的第 31 和 32 波段的透过率与实际平均分别相差

0.13425 和 0.1568 时，从影像估算的透过率与用实际透过率反演的地表温度所引起的温度变化为 0.608°C。因此对于劈窗算法，透过率的微小误差不会引起温度很大的变化。所以用本文中提到的从影像中获取大气水汽含量，然后计算透过率，最后用劈窗算法反演地表温度是可行的。

表 6.4 参数敏感性分析表

Table 6.4 The Sensitivity Analysis of Parameters

线性模拟			大气模型			相对误差		
Tras31	Tras32	Tt'-Ts	Tras31'	Tras32'	Tt-Ts	Tras31- Tras31'	Tras32- Tras32'	T_Re_err
0.9975	0.9419	0.226	0.913	0.863	-0.1177	-0.0845	-0.0789	0.1471
0.9975	0.9419	0.457	0.915	0.867	-0.3479	-0.0825	-0.0749	0.3821
0.9975	0.9419	0.513	0.918	0.872	-0.5726	-0.0795	-0.0699	0.4431
0.9775	0.9419	0.498	0.92	0.876	-0.7944	-0.0562	-0.0659	0.4321
0.9762	0.9167	0.462	0.817	0.723	-0.1244	-0.1592	-0.1937	0.2683
0.9762	0.9167	0.911	0.83	0.741	-0.3588	-0.1462	-0.1757	0.7353
0.9762	0.9167	1.018	0.843	0.76	-0.5822	-0.1332	-0.1567	0.8613
0.9762	0.9167	0.955	0.853	0.768	-0.7828	-0.11255	-0.1487	0.8063
0.9656	0.9041	0.586	0.756	0.64	-0.1308	-0.20955	-0.2641	0.3219
0.9656	0.9041	1.162	0.774	0.665	-0.3703	-0.19155	-0.2391	0.9229
0.9656	0.9041	1.31	0.793	0.69	-0.5948	-0.17255	-0.2141	1.0959
0.9656	0.9041	1.082	0.814	0.704	-0.7808	-0.1835	-0.2001	0.8819

6.2 单窗算法评价

表 6.5 是单窗算法利用大气辐射传输的模拟结果对地表温度进行反演的数据表。表 6.5 中 T_s 是地表真实温度； T_a 是大气平均作用温度，本文根据覃志豪在[6]给出的中纬度大气平均作用温度计算公式求得； T_{31s} 、 T_{32s} 是利用单窗算法分别对第 31 和 32 波段反演的结果； T_s-T_{31s} 、 T_s-T_{32s} 分别是温度误差。注意：透过率也是使用本文所模拟的线性方程求算得到的，在此未列出，见表 6.2。从表中可以计算得单窗单窗算法的平均反演精度：第 31 波段为 1.127°C，第 32 波段为 2.065°C。表 6.6 是用真实大气透过率，用单窗算法反演的数据表。除透过率外，其它参数和上表一样。31 波段的平均反演精度为 0.894°C；32 波段为 1.868°C。

从表 6.5 和 6.6 可以看出，使用真实大气透过率比用从影像直接计算的透过率反演的结果精度要高。对于单窗算法，当 MODIS 的 31 和 32 波段的透过率

与实际平均相差 0.13425 和 0.1568 时，从大气水汽含量估算的透过率与用实际透过率反演的地表温度所引起的温度变化在 31 波段是 0.233°C；在 32 波段 0.197°C。虽然透过率的变化对 31 波段比 32 波段更为敏感，但是 31 波段的精度要比用 32 波段反演精度高将近 1°C。

表 6.5 中纬度地区单窗算法地表温度反演数据表

Table 6.5 The Retrieving Results by Mono-Window in Mid-Altitude(Transmittance Computed by Experience Expression)

Ts	Tk	Ta	T31s	T32s	Ts-T31s	Tk-T32s
20	293	287.3905	292.7683	292.6392	0.231698	0.360834
30	303	296.6526	302.5252	302.1044	0.474758	0.895587
40	313	305.9147	312.4614	311.8732	0.538566	1.126801
50	323	315.1768	322.4726	321.7852	0.527402	1.214779
20	293	287.3905	292.3856	291.9761	0.614439	1.023859
30	303	296.6526	301.7399	300.8001	1.260079	2.199887
40	313	305.9147	311.5342	310.3272	1.465849	2.672839
50	323	315.1768	321.499	320.0293	1.500956	2.970653
20	293	287.3905	292.1148	291.5331	0.885245	1.466917
30	303	296.6526	301.1951	299.9448	1.804852	3.055214
40	313	305.9147	310.8746	309.2887	2.125389	3.711293
50	323	315.1768	320.8981	318.9135	2.101936	4.086504

注：透过率采用本文模拟方程求算。

表 6.6 中纬度地区单窗算法地表温度反演数据表

Table 6.6 The Retrieving Results by Mono-Window in Mid-Altitude (real transmittance)

Ts C	Tk	Ta	T31s	T32s	Tk-T31s	Tk-T32s
20	293	287.3905	292.951	292.8414	0.048993	0.158581
30	303	296.6526	302.6965	302.2727	0.303451	0.727267
40	313	305.9147	312.637	312.0348	0.362967	0.965246
50	323	315.1768	322.6599	321.9509	0.340137	1.049111
20	293	287.3905	292.737	292.4661	0.263047	0.533924
30	303	296.6526	301.9784	301.0237	1.021564	1.976282
40	313	305.9147	311.7453	310.484	1.254656	2.51602
50	323	315.1768	321.7141	320.1774	1.285867	2.822604
20	293	287.3905	292.5734	292.1674	0.426573	0.832592
30	303	296.6526	301.4286	300.0383	1.571434	2.961693
40	313	305.9147	311.0539	309.2577	1.946098	3.7423
50	323	315.1768	321.0887	318.8664	1.911325	4.133586

注：透过率采用大气模型模计算得到的透过率。

6.3 本章小结

本章主要是用大气模拟数据法对第五章中提出的劈窗算法和单窗算法分别进行了验证。对用从大气水汽含量估算得到透过率和真实透过率（大气模型模拟获得）反演得到的地表温度与地表真实温度进行了比较，从以上模拟分析可知劈窗算法用真实透过率反演的平均精度为 0.46°C ；对于用通过大气水汽含量求得的透过率反演的精度为 0.575°C 。对于单窗算法，使用真实透过率时，第 31 波段反演的地表温度平均精度为 0.895°C ；第 32 波段的平均精度为 1.868°C 。用通过大气水汽含量得到的透过率反演地表温度时，第 31 波段的平均精度为 1.128°C ，第 32 波段的平均精度为 2.065°C 。当 MODIS 的第 31 和 32 波段的大气透过率与实际平均分别相差 0.1343 和 0.1568 时，对于劈窗算法，从大气水汽含量估算的透过率与用实际透过率反演的地表温度所引起的温度变化为 0.608°C ；对于单窗算法，从大气水汽含量估算的透过率与用实际透过率反演的地表温度所引起的温度变化在第 31 波段是 0.233°C ，在第 32 波段 0.197°C 。虽然透过率的变化对第 31 波段比对第 32 波段更为敏感，但是第 31 波段的反演精度要比用第 32 波段反演精度高将近 1°C 。很显然，单窗算法对大气透过率的变化更为敏感。劈窗算法的精度在 1°C 以内，单窗算法在 2°C 以内。因此，劈窗算法的精度要比单窗要高很多。实际上大气模拟数据就是用大气辐射传输法用标准大气模拟得到。所以在大气参数得到实时获取和精度得到保证的情况下，辐射传输法也是一种很好的地表温度反演方法。同时本文的对算法的分析评价也正好验证了第五章中的实际应用分析。

第7章 结论与展望

本项研究在分析热红外遥感和现有的地表温度反演方法的基础上,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,使用其中的两个波段就足够了。根据热红外辐射在大气的传输特点,MODIS 热红外数据的第 31 和 32 波段最适合于用来进行地表温度的反演。本项研究这两个热红外波段数据,研究了适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法及其基本参数(大气透过率和地表比辐射率)估计方法。大气透过率主要是从 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来进行估算。由于是从同一景 MODIS 数据中获得大气水汽含量,因此本项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 MODIS 的第 31 和 32 热红外波段数据来反演地表温度。

综上所述,本项研究的主要结论可以总结如下:

- (1) Planck 函数是描述热红外辐射强度与温度和波段的关系,在地表温度反演是关键函数。由于其表达式复杂,在地表温度反演中需要对其进行线性简化,以便对地表温度反演方法的推导。本项研究探讨了 Planck 函数的线性简化方法,根据热红外辐射与温度之间的线性关系,提出了如下简化方程:对于 MODIS 的第 31 热红外波段,Planck 函数的简化方程为: $B_{31}(T)=0.13834T_{31}-31.80148$, $R^2=0.9970$; 对于第 32 热红外波段,简化方程为: $B_{32}(T)=0.11952T_{32}-26.8045$, $R^2=0.9977$ 。
- (2) 热红外波段的大气透过率是地表温度反演的基本参数。本项研究分析了大气水汽含量与近红外波段的大气透过率关系,介绍了从近红外波段大气透过率估计大气水汽含量的方法。针对 MODIS 的多波段特征,我们认为从同一景 MODIS 影像的近红外数据中反演大气水汽含量是

可行的。通过反演大气水汽含量，我们进一步提出了 MODIS 热红外波段（31 和 32 波段）的大气透过率估计方法。以环渤海地区为例，我们用这一估计方法对这一地区的大气水汽含量进行了反演，并进而计算了热红外波段的大气透过率。反演结果表明，我们所提出为大气透过率估计方法是可行的。

- (3) 在总结现有热红外波段大气透过率与大气水汽含量之间的关系基础上，建立了 MODIS 的第 31 和 32 热红外波段大气透过率与大气水汽含量之间的关系。在夏季，MODIS 的第 31 热红外波段大气透过率可以估计为： $\tau_{31}=-0.10671w+1.04015$ ，其中 w 是大气水汽含量 (g/cm^2)；第 32 波段的大气透过率可以估计为： $\tau_{32}=-0.12577w+0.99229$ ；在冬季：第 31 波段的大气透过率可以估计为： $\tau_{31}=-0.1041w+0.92314$ ；第 32 波段的大气透过率可以估计为： $\tau_{32}=-0.13722w+0.97686$ 。我们用这些关系式对环渤海地区的 MODIS 数据的 31 和 32 波段的大气透过率进行了估计。
- (4) 通过分析现有的地表比辐射率估计方法，我们认为在 MODIS 像元尺度下，热红外波段的地表温度反演所需的地表比辐射率参数可以利用地表构成来进行估计。植被、土壤和水体是 MODIS 像元的基本地表构成要素。用 ASTER 提供的常用地物比辐射率曲线，我们可以获得这些构成要素在 MODIS 数据的第 31 和 32 波段区间的比辐射率。因此，只要我们能够估计出每个像元的这三种要素的构成比例，我们就可以利用这些要素的已知比辐射率估计地表比辐射率。通过 NDVI 我们可以间接地估算每个像元中的植被、土壤和水体的比率。因此，从同一景 MODIS 数据中，我们完全可以获得地表温度反演所需要地表比辐射率。我们运用这一估计方法对环渤海地区的 MODIS 数据的第 31 和 32 热红外波段的地表比辐射率进行了估算，结果表明通过这种方法来获得混合像元的地表比辐射率是合理可行的，从而为地表温度反演中的参数估计提供了新的途径。

- (5) 现有的地表温度反演方法主要有劈窗算法和单窗算法。这些算法都不是直接对 MODIS 数据推导的。本项研究在分析这些算法的推导过程的基础上,结合我们对 Planck 函数的线性简化,提出了合适于 MODIS 第 31 和 32 热红外波段的地表温度反演方法。其中最关键的是,我们对这些算法的参数进行了重新确定,使之适合于 MODIS 的第 31 和 32 波段数据。结合上述提出的大气透过率和地表比辐射率估计方法,我们获得了针对 MODIS 的地表温度反演方法,即适合于 MODIS 数据的单窗算法和劈窗算法。我们用这两种算法对环渤海地区的 MODIS 数据进行了实际应用,分别计算了大气透过率和地表比辐射率的空间分布差异,并进而分析了这一地区的地表温度空间分布差异。
- (6) 用大气模拟数据法对我们提出的适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法进行了精度评价。对于劈窗算法,使用真实透过率(即大气模拟所获得的数据)来进行地表温度反演,平均精度为 0.46K;用大气透过率与大气水汽含量的关系来求算大气透过率,并进而来用进行地表温度反演,平均精度为 0.575K。由此可见,大气透过率估计的精度对地表温度反演精度有一定影响。对于单窗算法,使用真实透过率来反演第 31 波段的地表温度,平均精度为 0.895K;如果是用第 32 波段来反演,其平均精度为 1.868K。两者相差近 1K,可见第 31 波段更适合于用单窗算法来反演地表温度,而第 32 波段则差一些。如果是使用大气水汽含量与大气透过率的关系式来估计大气透过率,并进而用单窗算法来反演地表温度,则第 31 波段的平均精度为 1.128K,第 32 波段的平均精度为 2.065K,这一误差表明用真实大气透过率来反演所得到的平均精度高。所以,大气透过率估计的精度对于单窗算法的地表温度反演精度有重要的影响。为了评价这一影响,我们还分别对这两种算法进行大气透过率的敏感性分析。结果表明,劈窗算法和单窗算法对大气透过率的微小变化不是非常敏感,因此,大气透过率估计的微小误差不会引起地表温度反演结果的很大变化。但是,相对而言,劈窗算法的地表温度反演精度比单窗算法的精度要高将近

1K。这进一步说明从两个热红外波段数据中反演地表温度将能比仅有一个热红外波段更加有利。

本文的创新之处主要有：

本项研究的创新主要有两点：一是把现有的地表算法改进成适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法。目前还未见到比较适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法发表。现有的各种地表温度遥感反演方法又不是专门对 MODIS 数据提出来的。因此，有必要对现有的算法加以改进，以适合于 MODIS 数据特征。本项研究在这一方面做了较深入的分析研究，提出了适合于 MODIS 数据的地表温度反演方法，其中最重要的改进是对 Planck 函数的线性简化方法提出了一个新的途径。

另一创新是对大气透过率的估计。大气透过率是地表遥感反演的基本参数，对地表温度反演精度有重要的影响。现有的做法大多是利用研究地区内地面气象观测点的数据来进行大气水汽含量估计，并进而估计大气透过率。由于地面气象观测是点状数据，并且观测时间与 MODIS 的成像时间难以匹配，所以用地面气象观测数据来估计大气透过率通常有较大误差，从而影响地表温度反演精度。本项研究利用 MODIS 中红外波段数据对大气水汽含量非常敏感的特征，提出从同一景 MODIS 影像数据中反演大气水汽含量的方法，并进而估计各像元的大气透过率，从而突破了过去地表温度反演中同一景图像只用一个大气透过率的问题，把大气透过率的估计由一个点扩大到整个图像的各个像元上，即空间差异上，使地表温度反演的参数估计更加符合实际情况。

展望

从热红外遥感数据中反演地表温度是一个很复杂的问题，要提高其反演精度，涉及到遥感过程的每个环节。首先是遥感器的波段设置和遥感器对热红外辐射的灵敏度，遥感平台的飞行高度和遥感器的对地观测角度也不同程度地影响着地表温度的遥感观测；其次是遥感数据的处理分析方法的发展，这是提高遥感热红外数据应用的时效性的关键；最后是遥感反演方法的研究，尤其是地表温度反演所需参数的估计。目前，人们对此已经有比较深入的认识，对非同温像元以及像元的尺度效应等进行了理论探讨。为了解决反演的“病态”问题，引入了先验知识理论。随着遥感技术和人们对遥感机理认识的进步，地表温度

反演的精度将会进一步提高，从而加快热红外遥感理论方法的发展和热红外遥感的实际应用。

致 谢

首先深深地感谢我的导师覃志豪对我工作、生活、学业上的指导和帮助。我的硕士论文从选题到答辩、从论文的每个章节到每一句话都无不渗透着导师的心血。他严谨的学术作风和追求科学的精神深深印在我心中。他那宽阔的胸怀、乐于助人的高尚品德和风趣的生活态度使我终身难忘。

感谢 ESSI 所长宫鹏、李满春教授教我学会做人。他们告诉我要学会包容，这样才能在生活和学习中取得更多的进步。我深深地感谢他们，因为由于他们的教诲，我和别人在一起生活得更加融洽，学到更多的东西。

感谢冯学智、张万昌、施建成、浦瑞良、田庆久、黄杏元、蒋建军等老师在学术上的指导和帮助。特别是冯老师深厚的学术功底和宽厚待人的长者风范，对我产生很大的影响。

感谢余华老师在我生活中困惑时，给我指导。感谢翁永玲、李艳老师在学习和生活上的关心。感谢王勤老师、王春成管理员对我学习的支持和帮助。感谢辅导员芮富宏和教务员顾国琴老师的关心和照顾。

感谢同门师妹秦晓敏、高懋芳，师弟丁莉东、袁成在我做硕士论文期间给予的帮助。感谢在南京大学国际地球系统科学研究所与我渡过美好时光的同学们，他们是刘仲刚博士、张东博士、吴昀昭博士、武利博士，刘三超、赵登忠、韩杰、黄清华、方秀琴、徐全芝、金震宇、惠凤鸣、李海涛、乐通潮、余均辉、朱求安、朱利、朱叶飞、夏学齐，阚明哲、骆知萌、方墨人、杜凤兰、魏建宏、王凤敏、元学勇等硕士。

感谢我早已仙逝的母亲，是她教会我勤劳勇敢。感谢我的父亲、哥哥、姐姐、姐夫、嫂子、姑父、姑妈对我生活和学业的支持。

感谢所有关心、支持、帮助过我的朋友！

毛克彪
05/20/2004

硕士期间主要科研成果:

一、科研项目

国家重点基础研究发展规划(973)项目 (2001CB309404)

二、发表的主要论文 (第一作者)

1. 毛克彪, 田庆久, 2002, 空间数据挖掘技术及应用研究, 遥感技术与应用, 4:198-204.
2. 毛克彪, 覃志豪等, 2002, 基于空间数据仓库的空间数据挖掘研究, 遥感信息, 4:19-26.
3. 毛克彪, 覃志豪, 陈晓燕等, 2003, 基于 WEBGIS 的电子商务数据挖掘研究, 测绘学院学报, 3:180-182.
4. 毛克彪, 覃志豪, 张万昌, 2003, 一种 SFOM 网络模型的遥感图象分类方法, 遥感技术与应用, 6:399-402.
5. 毛克彪, 覃志豪, 李海涛, 2004, 空间数据挖掘与 GIS 集成及应用研究, 空间与测绘, 1: 14-18.
6. 毛克彪, 覃志豪, 张万昌, 2004, 针对 ETM 基于 BP 网络模型的像元分解研究, 遥感信息, 74(2):27-30.
7. 毛克彪, 覃志豪, 2004, 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中大气透过率计算, 空间与测绘, 27(2):1-3.
8. 毛克彪, 覃志豪, 刘伟, 用 MODIS 影像和单窗算法反演环渤海地区的地表温度, 空间与测绘, 2004(6):23-25.
10. 毛克彪, 覃志豪, 用 MODIS 影像反演环渤海地区的大气水汽含量, 遥感信息, 2004(4):47-49..

获奖:

1. 2002 年获南京大学优秀奖学金
2. 2003 获工程类技术等级奖
3. 2003 年获南京大学优秀奖学金

个人信息

姓名： 毛克彪

学历： 博士

政治面貌： 党员

籍贯： 湖南

出生年月： 1977.8

电子邮箱： maokebiao@126.com

手机： 13488781199

电话： 010-82109615-108

工作单位： 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所遥感室

邮编：100081

个人网页： http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=225376



发表论文近 60 篇（第一作者 50 篇），其中第一作者发表的 SCI 论文 7 篇，EI15 篇，个人专著 1 本，申报国家发明专利 3 项，第一作者论文被引用超过 250 次。主要从事微波，热红外遥感，空间数据挖掘及 GIS 应用等方面的研究，提出了针对 MODIS 的实用劈窗算法和同时反演辐射率和地表温度的多波段算法，提出了针对 ASTER 数据的劈窗算法和用神经网络优化的同时反演地表温度和发射率的多波段算法，提出了利用先验知识从 ASTER 数据反演近地表空气温度方法，提出了针对被动微波数据 AMSR-E 反演地表温度的物理统计算法和用微波指数反演土壤水分的算法，提出了利用神经网络和多传感器以及不同分辨率遥感数据从 AMSR-E 反演地表温度，并被邀请给地球物理学报 (IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing)、地球物理研究 (Journal of Geophysical Research)、国际遥感 (international journal of remote sensing)、传感器 (Sensors)、高技术通讯、兰州大学学报、中国矿业大学学报、中国环境科学、国土资源遥感、遥感信息等期刊和国内外会议审稿。IEEE 和 JGR 的 3 篇 SCI 影响因子均高于 2，这为申请国家杰出青年基金奠定了基础。

工作和教育背景：

2007.5 ~至今

中国农业科学院农业资源与区划所农业部资源遥感重点实验室，主要从事农业遥感，地表参数

反演,数据同化等应用方面的研究;

2006.3-2006.5 在台湾中央大学做访问研究,

主要关于 MODIS 地表温度和蒸散发研究(合作导师: 陳錕山 教授)

陈錕山: <http://www.csrnr.ncu.edu.tw/chin.ver/c1/aboutus/faculty/dkschen.php>

2004.9~2007.4

中国科学院遥感应用研究所 地图学与地理信息系统 博士

主修课程:微波遥感,数字图象,遥感物理,微波遥感,地理信息系统;

主要研究方向:微波和热红外遥感的辐射机理研究,具体包括地表温度反演、土壤水分反演等,空间数据挖掘;

导师:施建成 (<http://www.slrss.cn/shi/index.html>)

2001.9~2004.7

南京大学 地图学与地理信息系统 获硕士学位

主修课程:遥感,地理信息系统,图象处理,数据挖掘,电子商务,数据库设计与开发;

主要研究方向:热红外遥感, GIS (地理信息系统), 数据挖掘;

导师:覃志豪 (http://essi.nju.edu.cn/zhihao_qin_NJU/qin_homepage.htm)

1997.9~2001.7

东北师范大学 城市规划与区域开发 获学士学位

主修课程:城市规划,区域开发

本科期间,几乎修完计算机系所有课程,

修完中国科学技术大学工商管理函授专业

并获结业证书

社会专业活动

2008.11.7-11.11 中国农业资源与区划学会年会

2008.10.23-10.24 应邀在南京大学做地表温度反演算法专题讲座

2008.9 参加了海峡两岸遥感学术研讨会,并在大会上做了专题报告

2008.5 参加了全国节水农作制度理论与技术研讨会,并在大会上做了专题报告

2007.11.15-11.17 在南京大学做热红外遥感专题讲座

2007.10 在东北师范大学做学术交流,并做了关于地表温度反演的学术报告

2007.9 全国遥感与地理信息科学研究生论坛评委及分论坛主持

2007.9 中国农业资源与区划学会年会

- 2007.8 被中国气象局气象卫星中心邀请作为专家参与风云三号卫星应用产品中期验收评估
- 2007.7-2007.8 参与环境小卫星减灾应用系统评估分系统的初步设计
- 2007.7 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium 2007(西班牙) 提交会议论文 1 篇
- 2006.10 全国博士论坛-林学及生态建设领域相关学科, 北京林业大学,
- 2006.8 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium 2006(美国) 提交会议论文 2 篇
- 2006.3-2006.5 在台湾中央大学做访问研究,
主要关于 MODIS 地表温度和蒸散发研究
- 2005.10 科技部与欧洲空间局合作的“龙计划“ 在首都师范大学培训学习
- 2005.10 International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing
提交会议论文两篇
- 2005.8 An Advanced Micro-Wave Remote Sensing (北京) 主要会务联系人
- 2005.8 台湾海峡两岸遥感学术交流会议 (昆明)
主要会务联系人 并提交论文一篇
- 2005.7 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium 2005(韩国) 提交论文
会议论文 3 篇
- 2005.7 遥感精品课程 (北京大学)
- 2000.7 大连, 青岛城市规划调研
- 2001.7 黑龙江宾县土地管理调研

荣誉

- 2002 年获南京大学优秀奖奖学金
- 2003 年获工程类技术等级奖
- 2003 年获南京大学优秀奖奖学金
- 2004-2005 年获遥感所论文单项奖 6 次
- 2005 年 硕士学位论文被评为南京大学优秀硕士学位论文,并提名为江苏省优秀硕士学位论文
- 2006 年获中国科学院三好学生
- 2006 年 获全国博士论坛会议论文二等奖
- 2007 年 获得中国科学院优秀毕业生
- 2007 年 获得中国科学院院长奖
- 2007 年 获得中国农业资源与区划学会年会论文优秀奖

2008年 获得中国农业资源与区划学会年会论文一等奖

申请的发明专利:

1. 发明人: 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 王秀峰, 王道龙, 苏胜娣: 从遥感数据 ASTER 反演地表温度和发射率的方法(申请号: 200810115624.2, 公开号: CN101295022);
2. 发明人: 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 陈佑启, 任天志, 从被动微波数据 AMSR-E 反演地表温度的方法(申请编号: 200810226669.7)。
3. 发明人: 毛克彪, 王建明, 张孟阳, 杨东凯, 王炎, 马柱国, 利用 GNSS-R 信号监测土壤水分的装置与方法, (申请号: 200910085118.8)

主持的项目:

1. 国家高技术研究发展计划(863 计划)(课题编号: GNSS 反射信号接受与应用技术研究(编号: SQ2007AA12Z339565)子课题: 基于 GNSS-R 散射信号地表参数反演方法研究: 2007.12-2009.12;
2. 国家 973 课题: 陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法(课题编号 2007CB714400)子课题: 被动微波遥感在积雪监测中的应用研究(2007-2011);
3. 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(主持), 基于热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究, (编号: 国库 628-27, 2007.4-2008.3);
4. 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(主持), 基于遥感数据的气候变化对呼伦贝尔草原生态变化影响研究, (编号: 国库 801-3, 2008.4-2009.4);
5. 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室开放课题(主持): 2008.1-2009.1;
6. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放课题(主持): (2008.4-2009.5);
7. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放基金: 针对 ASTER 数据的地表温度反演算法研究(2006.9-2007.9)(主持)。

参与的项目:

7. 国家自然科学基金重点项目 青藏高原近 20 年土壤水分及雪水当量的参数反演研究 2004.01-2007.12 (90302008/D0119);
8. 国家自然科学基金面上项目中分辨率混合像元雪填图算法研究 2006.01-2008.12 (40571101/D0118);
9. 国家重点基础研究发展规划(973)项目, 复杂自然环境时空定量信息获取与融合处理的理论与应用:(2001CB309404);
10. 国家自然科学基金: 用 MODIS 数据反演地表温度的算法及其参数确定(40471096);
11. 国家高技术研究发展计划(863 计划)(课题编号: 2006AA12Z103: 2006.12-2009.12

学位论文:

毛克彪, 针对 MODIS 地表温度反演方法研究, 硕士学位论文, 南京大学, 2004.5

毛克彪, 针对热红外和被动微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究, 博士学位论文, 中国科学院遥感应用研究所, 2007.4

发表专著和论文:

1. 毛克彪, 基于热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究, 中国农业科学技术出版社, 2007.12(专著).

第一作者 SCI:

2. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Huajun Tang, Qingbo Zhou, Zhao-liang Li, Kunshan Chen, A Neural Network Technique for the Retrieval of Land Surface Temperature From Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS Passive Microwave Data Using a Multiple-Sensor/ Multiresolution Remote Sensing Approach, Journal of Geophysical Research-atmosphere. doi:10.1029/2007JD009577, (in press) (SCI 影响因子 3.147)
3. **Kebiao Mao**, Huajun Tang, Xiufeng Wang, Qingbo Zhou, Daolong Wang, Near-Surface Air Temperature Estimation From ASTER Data Using Neural Network, International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(20): 6021-6028. (SCI 影响因子 1.041)
4. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Huajun Tang, Zhao-Liang Li, Xiufeng Wang, Kunshan Chen, A Neural Network Technique for Separating Land Surface Emissivity and Temperature from ASTER Imagery, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2008, 46(1), 200-208. (SCI 影响因子 3.157)
5. **Kebiao Mao**, J. Shi, Z. Li, and H. Tang, An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data, Journal of Geophysical Research-atmosphere, 2007, 112,D21102, 1-17. (SCI 影响因子 2.953)
6. 毛克彪, 施建成, 李召良, 覃志豪, 李满春, 徐斌, 一个针对被动微波数据 AMSRE 数据反演地表温度的物理统计算法, 中国科学 D 辑, 2006, 36(12):1170-1176.
7. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Zhaoliang Li, Zhihao Qin, Manchun Li, Bin Xu, A physics-based statistical algorithm for retrieving land surface temperature from AMSR-E passive microwave data, Science in China (Series D), 2007,7:1115-1120. (SCI 影响因子近 0.718)
8. **Kebiao Mao**, Tang H. J., Zhang L. X., Li M. C., Guo Y., Zhao D. Z., A Method for Retrieving Soil Moisture in Tibet Region By Utilizing Microwave Index from TRMM/TMI Data, International Journal of Remote Sensing, 2008, 29 (10): 2905-2925. (SCI 影响因子 1.041)
9. **Kebiao Mao**, Qin Z., Shi J., Gong P., A Practical Split-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from MODIS Data, International Journal of Remote Sensing, 2005,26:3181-3204. (SCI 影响因子 0.97)

EI 论文:

10. 毛克彪, 王建明, 张孟阳, 唐华俊, 周清波, 基于 AIEM 和实地观测数据对 GNSS-R 反演土壤水分的研究, 高技术通讯, 2009, 3 (19): 295-301. (EI)
11. 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 宫鹏, 针对 MODIS 数据的劈窗算法研究, 武汉大学学报(信息科学)

版)2005 (8): 703-708. (EI)

12. 毛克彪, 覃志豪, 宫鹏, 余琴, 劈窗算法精度评价及参数敏感性分析, 中国矿业大学学报,2005(3):318-322 . (EI)
13. 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,中国矿业大学学报(自然科学版), 2005(1):46-50. (EI)
14. 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 马柱国, 实用劈窗算法的改进及大气水汽含量对精度影响评价,武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33 (2): 116-119. (EI)

会议收录 EI 论文:

15. **Kebiao Mao**, Zhang Mengyang, Wang Jianming, Tang Huajun, Zhou Qingbo, The Study of Soil Moisture Retrieval Algorithm from GNSS-R, IITA Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS 2008), Shanghai, 2008,12,1-5.
16. **Kebiao Mao**, Wang Jianming, Zhang Mengyang, Tang Huajun, Zhou Qingbo, An AMSR-E Monitoring of Snowstorm -Disaster in South-China in 2008 Year, IITA Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS 2008), Shanghai, 2008,12,1-5.
17. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Huajun Tang, Ying Guo, Yubao Qiu, Liying Li, A neural -network technique for retrieving land surface temperature from AMSR-E passive microwave data, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS07), 23-28 July 2007, 7: 4422-4425.(EI)
18. **Kebiao Mao**, Zhihao Qin, Manchun Li, Lixin Zhang, Bin Xu, Lingmei Jiang, An Algorithm for Surface Soil Moisture Retrieval Using the Microwave Polarization Difference Index, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS06).(EI)
19. **Kebiao Mao**,Jiangcheng Shi, Zhaoliang Li, Zhihao Qin, Xiufeng Wang, Lingmei Jiang, A Multiple-Band Algorithm for Separating Land Surface Emissivity and Temperature from ASTER Imagery, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS06).(EI)
20. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Zhihao Qin, Peng Gong, Wei Liu, Lina Xu, A Multiple-band Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature and Emissivity from MODIS Data, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS05), 25-29 July 2005, 5: 3269 - 3272.(EI)
21. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi , Zhaoliang Li, Zhihao Qin, Yuanyuan Jia, Land Surface Temperature and Emissivity Retrieved From the AMSR Passive Microwave Data, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS05), 25-29 July 2005, 4: 2247 – 2249. (EI)
22. **Kebiao Mao**, Zhihao Qin, Bin Xu, Manchun Li, Jianming Wang Shengli Wu, The Influence Analysis of Water Content for the Accuracy of Practical Split-window Algorithm, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS05), 25-29 July 2005, 5: 3266 – 3268. (EI)

核心论文:

23. 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 王建明, 马柱国, 利用被动微波数据 AMSR-E 对 2008 年中国南方

- 雪灾监测分析,中国农业资源与区划, 2009, 30(1):46-50.
24. 毛克彪,唐华俊,陈仲新,王永前,一个用神经网络优化的针对 ASTER 数据反演地表温度和发射率的多波段算法,国土资源遥感, 2007, 73 (3): 18-22.
 25. 毛克彪,唐华俊,周清波,陈仲新,陈佑启,覃志豪,用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法,兰州大学学报(自然科学版), 2007,43(4):12-17.
 26. 毛克彪,唐华俊,李丽英,许丽娜,一个从 MODIS 数据同时反演地表温度和发射率的神经网络算法,遥感信息, 2007,92(4):9-15.
 27. 毛克彪,唐华俊,周清波,陈佑启,被动微波遥感土壤水分反演研究综述,遥感技术与应用, 2007,22(3):466-470.
 28. 毛克彪,唐华俊,周清波,陈仲新,陈佑启,赵登忠,AMSR-E 微波极化指数与 MODIS 植被指数关系研究,国土资源遥感, 2007, 1: 27-31.
 29. 毛克彪,唐华俊,陈仲新,邱玉宝,覃志豪,李满春,一个针对 ASTER 数据的劈窗算法,遥感信息, 2006, 5:7-11.
 30. 毛克彪,施建成,覃志豪,宫鹏,徐斌,蒋玲梅,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,遥感学报, 2006, 4: 593-599.
 31. 毛克彪,覃志豪,徐斌,被动微波土壤水分反演模型研究,测绘与空间地理信息, 2005(5):12-15
 32. 毛克彪,施建成,李召良,覃志豪,贾媛媛,用被动微波 AMSR 数据反演地表温度及发射率方法研究,国土资源遥感,2005(3):14-18
 33. 毛克彪,覃志豪,李满春,徐斌,AMSR 被动微波数据介绍及主要应用研究领域分析,遥感信息.2005,3:63-66.
 34. 毛克彪,施建成,覃志豪,宫鹏,徐斌,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,兰州大学学报(自然科学版)(专辑)2005(6): 49-55.
 35. 毛克彪,覃志豪,秦晓敏,高懋芳,中国中部地带乡镇企业发展战略研究,经济地理 2004(增刊): 286-290.
 36. 毛克彪,覃志豪等,针对 ASTER 的单窗算法研究,测绘学院学报, 2005 (1): 40-43。
 37. 毛克彪,覃志豪,王建明,武胜利,针对 MODIS 数据的大气水汽含量及 31 和 32 波段透过率计算,国土资源遥感,2005.1:26-30.
 38. 毛克彪,覃志豪,用 MODIS 影像反演环渤海地区的大气水汽含量,遥感信息,2004(4):47-49.
 39. 毛克彪,覃志豪,刘伟,用 MODIS 影像和单窗算法反演环渤海地区的地表温度,空间与测绘, 2004(6):23-25
 40. 毛克彪,覃志豪,大气辐射传输模型及 MODTRAN 中大气透过率计算,空间与测绘, 2004, 27(2):1-3.
 41. 毛克彪,覃志豪,张万昌,针对 ETM 基于 BP 网络模型的像元分解研究,遥感信息, 2004, 74(2):27-30.

42. 毛克彪, 覃志豪, 李昕, 李海涛, 空间数据挖掘与 GIS 集成及应用研究, 测绘与空间地理信息, 2004, 27(1):14-18.
43. 毛克彪, 覃志豪, 张万昌, 一个基于 SOFM 网络模型的遥感图象分类方法, 遥感技术与应用, 2003, 6:399-402.
44. 毛克彪, 覃志豪, 陈晓燕, 李昕, 基于 WEBGIS 的电子商务数据挖掘研究, 测绘学院学报, 2003, 3:180-182
45. 毛克彪, 覃志豪, 李海涛, 周若鸿, 基于空间数据仓库的空间数据挖掘研究, 遥感信息, 2002, 68(4):19-26.
46. 毛克彪, 田庆久, 空间数据挖掘技术及应用研究, 遥感技术与应用, 2002, (4):198-206.

会议论文:

47. 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 王建明, 马柱国, 利用被动微波数据 AMSR-E 对 2008 年中国南方雪灾监测分析, 中国农业资源与区划学会年会(2008.11).(获论文一等奖)
48. 毛克彪, 施建成, 唐华俊, Xiufeng Wang, 应用人工神经网络法从 ASTER1B 数据中反演地表温度、发射率和水汽含量, 海峡两岸会议, 桂林, 2008.9.
49. 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 马柱国, 针对被动微波 AMSR-E 数据的土壤水分反演算法研究, 全国节水农作制度理论与技术研讨会, 北京, 2008.5.
50. 毛克彪, 唐华俊, 覃志豪等, 昭通发展生态观光农业产业的思路 and 措施, 中国农业资源与区划学会年会(2007).(获论文优秀奖)
51. 毛克彪, 唐华俊, 陈仲新, 周清波, 覃志豪, 赵登忠, 大气水汽含量参数对实用劈窗算法 LST 的影响及精度评价, 全国博士论坛-林业及生态相关学科, 北京林业大学, 2006.10. 论文集: 890-895.(获二等奖)
52. 毛克彪, 施建成, 覃志豪, 宫鹏, 徐斌, 张钟军, 蒋玲梅, 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, 海峡两岸会议, 2005.8.
53. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Zhihao Qin, Peng Gong, An Advanced and Optimized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from ASTER Data, International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ispmsrs), 2005.10.
54. **Kebiao Mao**, Jiancheng Shi, Zhaoliang Li, Zhihao Qin, Peng Gong, A Physics Based on Statistics Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature and Soil Moisture From AMSR-E Passive Microwave Data, International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ispmsrs), 2005.10.

其它合作作者:

55. 邱玉宝, 施建成, 蒋玲梅, 毛克彪, 郭英, AMSR-E 被动微波土壤水分与降雨率时空相关性分析研究, 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 350-356.
56. 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, 遥感技术与应用, 2005, 20(2):284-289.

57. 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, 干旱区地理, 2005, 28(4):548-553.
58. 汤海鹏, **毛克彪**, 覃志豪, 吴毅, 空间数据挖掘工具浅谈, 空间与测绘. 2005(3):4-6.
59. 汤海鹏, **毛克彪**, 覃志豪, 吴毅, 遥感分析中小型地物波谱数据库系统的设计与实现, 空间与测绘, 2004(6):32-35.
60. Shengli Wu, **Kebiao Mao**, Jiangyang Du, Lina Xu, Jiangming Wang, The Potential of TRMM/PR Data to Monitor Snow in Tibetan Plateau, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS05), 25-29 July 2005, 5: 4431 -4434.(EI)
61. Xu Lina Jiancheng Shi, **Kebiao Mao**, Estimating snow albedo in Tibetan plateau using MODIS, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005.(EI)
62. Qin, Zhihao, Li Wenjuan, **Kebiao Mao**, Karnieli Arnon, Quantitative Estimation of Main Land Cover Patterns in an Arid Environmental Ecosystem Across Israel-Egypt Border Using Remote Sensing Data, Source: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS03), 2003, 3, 1879-1881.(EI)
63. Ying Guo, Jiancheng Shi, **Kebiao Mao**, Surface temperature effect on soil moisture retrieval from AMSR-E data, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS07), 23-28 July 2007, 7:1192 – 1195. (EI)
64. Yubao Qiu, Jiancheng Shi, Liangmei Jiang, **Kebiao Mao**, Study of atmospheric effects on AMSR-E microwave brightness temperature over Tibetan plateau, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS07), 23-28 July 2007, 7:1873 - 1876 (EI)

给初学遥感者建议

经过这么多年的学习，对遥感学习有一些想法，我写出来给大家参考。请大家指正。

研究和解决遥感问题思路:

1. 从物理的角度观察现象
2. 用数学方法去描述物理现象
3. 从工程的角度去解数学方程组

遥感是一个综合学科，因此要学好遥感，做好应用，必须博众家之长，针对我这些年来的学习和工作，我开了一个书单，仅供初入遥感的人参考。

遥感学习书单:

1. 遥感概论(地理系)
2. 数字图像(计算机系)
3. 遥感数字图像处理(地理系)
4. 信号处理(电子系)
5. 模式识别(电子系)
6. 数据挖掘(计算机系)
7. 大气辐射传输学(大气系)
8. 傅立叶光学(物理系)
9. 微波理论(物理或电子)
10. 微波遥感（电子或物理或地理系）