

文章编号:1001-9014(2007)02-0107-05

# MODIS 近红外水汽产品的检验、改进及初步应用 —以黑河流域金塔绿洲为例

孟宪红, 吕世华, 张堂堂

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**利用野外观测资料检验 MODIS 近红外水汽产品表明,该产品精度较低,不适合研究区大气水汽含量分析研究.考虑误差产生的原因,调整空间分辨率并引入地表覆盖类型信息进行反演,结果表明,反演的平均相对误差为 4.47%,绝对误差为 0.0456g/cm<sup>2</sup>,说明改进后结果有较大改善,精度较高.同时使用 MODTRAN 模拟出大气水汽含量与透过率存在较好的负相关关系,并据此计算大气透过率,为下一步计算地表温度及能量平衡中的各分量奠定基础.

**关键词:**遥感;反演;MODIS;大气透过率;大气水汽含量

**中图分类号:**P407 **文献标识码:**A

## TESTING, IMPROVEMENT AND APPLICATION OF MODIS NEAR INFRARED WATER VAPOR PRODUCTS—TAKING JINTA OASIS IN HEIHE RIVER BASIN AS A CASE STUDY

MENG Xian-Hong, LÜ Shi-Hua, ZHANG Tang-Tang

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** MODIS near infrared water vapor products were tested by using the field observations which indicated that the precision of products should be improved and the products were not fit for application over the region. Considering the reasons inducing the error, we improved the algorithm and retrieved water vapor content by adjusting the spatial resolution and using the information of land use type. Our results show that the average relative error is 4.47%, and the average absolute error is only 0.0456 g/cm<sup>2</sup>, which indicates that the retrievals are much better than the products. By using MODTRAN to analyse, we find good negative correlative relationship between water vapor content and transmittance. According to the relationship, the transmittance was obtained which would be helpful to calculate the surface temperature and other energy parameters.

**Key words:** remote sensing; retrievals; MODIS; transmittance; water vapor content

### 引言

大气水汽含量及其变化是天气和气候的主要驱动力<sup>[1]</sup>,是预测降雨、中小尺度恶劣天气以及全球气候变化的一个非常重要的物理量.水汽含量分布的时空差异,不仅影响着天气和气候变化,也是研究大气辐射和吸收以及全球热量输送的一个重要参量<sup>[2]</sup>.由于计算整层大气水汽含量需要探空资料,而在许多地区,特别是边远地区往往缺乏这些资料,

因此使用遥感手段获取大气水汽含量成为一个十分重要的研究内容.气象卫星发射以来,许多学者就致力于利用卫星资料获取大气中的水汽信息,包括水汽的垂直和水平分布及其随时间变化<sup>[3-5]</sup>.MODIS是搭载于 EOS-AM1/TERRA 和 EOS-PM1/AQUA 太阳同步极地轨道系列卫星的主要传感器,可以覆盖全球并免费接收.上午星 TERRA 发射于 1999 年 12 月 18 日,大约当地时间上午 10:30h 上行飞过赤道;下午星 AQUA 发射于 2002 年 5 月 4 日,大约当地时

收稿日期:2006-06-05,修回日期:2006-11-06

基金项目:国家自然科学基金重点(40633014)资助项目

作者简介:孟宪红(1980-),女,吉林通化人,博士生,主要从事定量遥感反演及干旱气候数值模拟研究.

Received date: 2006-06-05, revised date: 2006-11-06

间下午 1:30h 下行飞过赤道. MODIS 有 36 个波段, 拥有 250m、500m 和 1000m 3 种空间分辨率, 能提供全球所有表面阳光反射和日夜热辐射的较高辐射分辨率图像数据. 36 个光谱波段, 其位置和带宽的选择, 分别针对陆地、海洋、水汽、气溶胶等设计, 保证对地面或大气程序的最佳条件. 同时提供大气、海洋和陆地等领域的 40 多种产品, 其中大气水汽含量产品目前应用还较少, 特别是该产品在中国西北干旱区的检验和应用目前几乎处于空白. 因此本文使用 MODIS 水汽产品结合野外观测资料进行检验, 并对算法初步改进, 以期获得适于本文研究区的大气水汽含量估算方法, 并对结果初步应用.

## 1 MODIS 水汽产品介绍

MOD05 是 MODIS 水汽产品<sup>[6]</sup>, 空间分辨率为 1km, 有红外和近红外 2 种产品. 由于红外水汽产品在很大程度上依赖于最初选择的温湿廓线, 并且当地面温度和边界层温度比较接近时, 结果有很大的误差, 因此近红外水汽产品应用更广泛一些. 该产品主要是利用地表或云在 MODIS 近红外太阳反射辐射通道的测量值反演气柱水汽含量.

### 1.1 理论和依据

MODIS 近红外水汽产品反演方法的物理基础是利用反射的太阳辐射检测水汽对辐射吸收的大小. 总水汽量可用水汽的吸收通道和非吸收通道间反射的太阳辐射差值获得. 资料来源于中心波长位于 0.865、0.905、0.936、0.940 和 1.24 $\mu\text{m}$  的 MODIS 探测通道数据. 选择水汽吸收通道 (0.905、0.936、0.940 $\mu\text{m}$ ) 与大气窗区通道 (0.865 和 1.24 $\mu\text{m}$ ) 的比值法作为反演方法. 比值法的采用可以部分消除由于地表反射率随波长变化对大气中水汽透射率的影响. 水汽柱含水量用在辐射传输方程计算值及观测值间建立相应查照表的方法进行反演.

### 1.2 计算方法

近红外遥感估算大气水汽含量的物理基础是通过探测水汽对反射太阳辐射在大气中传输时的吸收, 利用大气吸收波段和大气窗口波段的反射太阳辐射之比来近似计算. 具体有以下几种算法<sup>[7]</sup>:

$$T_w(17/2) = \rho_{17}^*/\rho_2^* \quad (1)$$

$$T_w(18/2) = \rho_{18}^*/\rho_2^* \quad (2)$$

$$T_w(19/2) = \rho_{19}^*/\rho_2^* \quad (3)$$

其中  $\rho_{17}^*$ 、 $\rho_{18}^*$ 、 $\rho_{19}^*$  和  $\rho_2^*$  分别是 17 (0.905 $\mu\text{m}$ )、18 (0.936 $\mu\text{m}$ )、19 (0.940 $\mu\text{m}$ ) 和 2 (0.865 $\mu\text{m}$ ) 波段的表观反射率, 可以通过对 MODIS1B 数据辐射定标得

到. Kaufman 等<sup>[7]</sup>用式(3)计算得

$$T_w(19/2) = \exp(\alpha - \beta\sqrt{w}), R^2 = 0.999 \quad (4)$$

$$w = (\alpha - \ln T_w(19/2)/\beta)^2 \quad (5)$$

其中,  $R$  为相关系数; 对于混合型地表,  $\alpha = 0.020$ ,  $\beta = 0.651$ ; 对于植被覆盖地表,  $\alpha = 0.012$ ,  $\beta = 0.651$ ; 对于裸土的情况,  $\alpha = -0.040$ ,  $\beta = 0.651$ .

## 2 水汽产品验证

### 2.1 观测数据介绍

本文所用资料来自国家自然科学基金重点项目“绿洲系统能量与水分循环过程观测与数值研究”于 2004 年 6~8 月期间在金塔绿洲开展了为期 2 个多月的“绿洲能量水分循环过程”观测实验, 简称“金塔实验”<sup>[8,9]</sup>. 文中所用的观测资料是小球探空资料, 该资料包括风速、风向、温度、相对湿度和气压等多个气象要素, 探空小球一般可以到达气压为 400~450hpa 左右的高度. 因为高空 300hpa 以上, 大气中水汽含量非常少, 所以实际计算中, 以地面到 300hpa 的水汽含量代表整层大气水汽含量. 因此 400hpa 以上的资料采用线性拟合得到. 探空观测场设在金塔绿洲中部 (98.85°E、40.13°N), 海拔高度为 1234.9m, 地面平均气压 869.8hpa, 实验场地为绿洲农田, 以棉花、小麦、辣椒为主, 植被覆盖度较好. 本文使用如下公式计算探空站点处整层大气水汽含量<sup>[10]</sup>

$$w = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q(P) dP \quad (6)$$

式中  $w$  为整层大气水汽含量,  $P_s$ 、 $P_t$  分别为地面气压和大气顶部气压.

### 2.2 产品验证

考虑到观测和卫星过境保持同步及天气状况等

表 1 MODIS 水汽产品和改进算法后的反演结果与实测对比

Table 1 Comparisons of the MODIS water vapor products and retrievals after the algorithms being improved with the observations

序号	观测值 (g/cm <sup>2</sup> )	产品 (g/cm <sup>2</sup> )	产品 绝对误差 (g/cm <sup>2</sup> )	产品 相对误差 (%)	反演值 (g/cm <sup>2</sup> )	反演 绝对误差 (g/cm <sup>2</sup> )	反演 相对误差 (%)
1	0.86	1.0080	0.148	17.2	0.8824	0.0224	2.60
2	1.198	1.3930	0.195	16.28	1.1019	0.0961	8.02
3	1.05	1.2679	0.2179	20.75	0.9898	0.0602	5.73
4	1.31	1.2546	0.0554	4.22	1.3465	0.0365	2.79
5	0.89	1.1727	0.2827	31.76	0.8838	0.0062	0.70
6	0.75	0.9129	0.1629	21.72	0.8024	0.0524	7.0

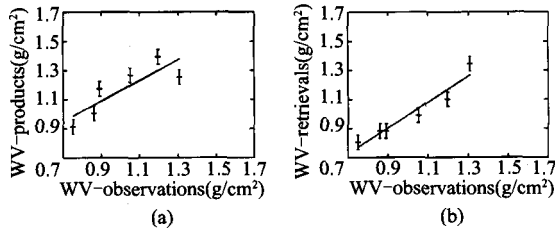


图1 MODIS 水汽产品和改进算法后的反演结果与实测对比误差棒图(a:产品;b:反演结果)

Fig. 1 Error-plot of comparisons of the MODIS water vapor products and retrievals after the algorithms being improved with the observeds(a:products; b:retrievals)

原因,选取2004年7月2日、3日、4日、5日、9日和10日6次观测与卫星数据.表1是产品与观测值对比结果.由于观测站点较少,每幅图像选取与探空位置相同的像元处大气水汽含量进行验证.由表1可见,产品最大相对误差为31.76%,平均相对误差为18.66%,说明该结果误差较大;图1(a)同样说明误差较大,有待改进.

### 3 算法改进及结果分析

#### 3.1 方法改进

Kaufman 等<sup>[7]</sup>指出利用MODIS反演水汽可能引入的误差来源,认为如果考虑混和像元、下垫面类型和霾总量,水汽的反演误差会降低很多.因为MODIS水汽产品分辨率是1km,因此很难避免计算时引入混合像元信息,同时未考虑地表类型,导致其产品误差较大.所以,首先提高分辨率以减小混合像元的影响,将19波段数据1km空间分辨率重采样至250m,结合2波段进行几何校正、辐射定标,然后参考金塔县土地利用/覆盖特征结合监督分类最大似然法对研究区地表进行分类(见图2),结合式(5)通过IDL语言计算得到金塔地区大气水汽含量如表1、图1和图3(图3仅为7月2日结果对比,其他时段结果类似)所示.

#### 3.2 结果分析

图3表明,算法改进后结果有较大变化,对于MODIS水汽产品,水汽含量主要集中在1.2 g/cm<sup>2</sup> ~ 1.8 g/cm<sup>2</sup>之间;改进算法后,水汽含量则主要介于0.6 g/cm<sup>2</sup> ~ 1.8 g/cm<sup>2</sup>之间,以1.0 g/cm<sup>2</sup>居多,说明改进算法之后,水汽含量值发生明显变化,分析其原因,主要由于调整了分辨率之后,每个像元由1km × 1km变成了250m × 250m,像元对应的辐射值有一定的变化,使得反演结果产生变化.那么,这个结果是否合理呢?由表1可见,改进算法后,平均相

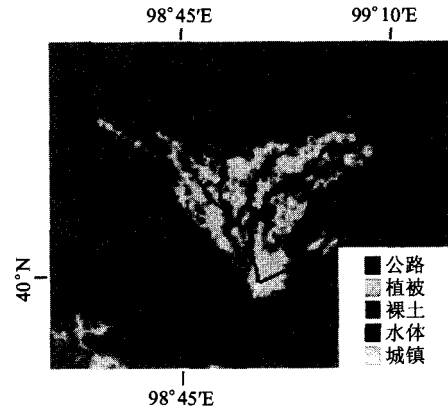


图2 金塔地区土地利用分类  
Fig. 2 Land type classification in Jinta area

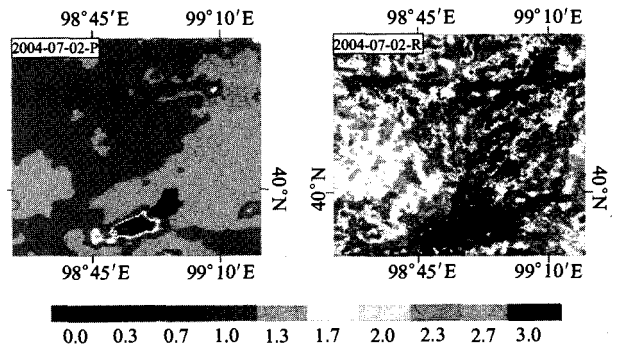


图3 金塔地区MODIS水汽产品及反演的水汽含量分布图(a:产品(-P);b:反演(-R))

Fig. 3 Contribution of atmospheric water vapor content from MODIS products and retrievals over Jinta Oasis (a:from MODIS products(-P);b:from retrievals(-R))

对误差为4.47%,最小绝对误差仅为0.0062g/cm<sup>2</sup>,可以认为这是相对准确的.图1(b)同样显示反演结果误差较小,较为可信.另外,由于观测点设在绿洲农田中,夏季因生产需要不断对农田进行灌溉,因此绿洲内水分蒸发相对大,绿洲内水汽含量相对较多,表1中观测值显示,探空站上空实测水汽含量均为1.0 g/cm<sup>2</sup>左右,而探空站位于绿洲植被密集区,因此可以认为整个研究区比较干旱,水汽含量为1.0 g/cm<sup>2</sup>左右,所以,从量级上看,改进算法后的结果好于产品.从分布上看,尽管产品显示出水汽含量有一定的区域差异,但是从反演结果图上可以明显看到整个绿洲上空水汽分布有较大的差异,沙漠上空水汽含量低于绿洲上空;绿洲内部,水汽含量也有很大差别,这与实地考察结果一致;在戈壁荒漠中,感觉很干燥,而在绿洲农田里,则很湿润.但是,由图(b)也看到了另外一个现象,即7月2日、3日,沙漠戈壁上空水汽含量甚至和绿洲上空水汽含量相当或者

更大一些,而5日、9日、10日等天气非常晴朗风很小的情况下则不然,这与张强等<sup>[11]</sup>的研究结果一致,即输送到沙漠或戈壁的湿空气由于处在较不稳定(白天)或稳定性较弱(夜间)的大气层结中,其湍流垂直输送远比绿洲强,低层水汽总是很快向上输送,造成在较高层沙漠或戈壁空气比绿洲更湿润.同时我们可以看到改进算法后,绿洲内部有公路或者水渠(本研究区公路的旁边就是水渠)通过的地方,水汽含量出现极低值,甚至在5日、10日接近零值,这也进一步证实绿洲上存在 Van Bavel<sup>[12]</sup>和胡隐樵等<sup>[13]</sup>所指出的“晒衣绳效应”,即:在绿洲的边缘或通过沙漠的窄长护林带、河流或者水渠,其周围环境非常干热,大量热量通过平流输送给它们蒸散消耗,其后果是加强蒸散率并迅速消耗植物根部土壤或河流或水渠的水分.因此,无论从与实测对比、从水汽分布等角度都说明对算法的改进是可行的,取得了较好的结果.

#### 4 初步应用

大气透过率是影响红外辐射传输的重要因素.某特定地区上空大气透过率受气象影响很大,在较短时间内,大气的压强、湿度、气体密度可发生明显的变化.透过率会因此而发生较大程度的改变.同时,透过率的测量和计算也是比较困难的,因此,很多人尝试使用辐射传输模型计算大气透过率. MODTRAN<sup>[14]</sup>是众多辐射传输模型中应用较广泛的一个,充分考虑了各种大气成分、气溶胶及云雾对辐射传输的吸收、散射作用,在热红外波段有着较好的

应用.覃志豪等<sup>[15]</sup>针对 TM 影像用 MODTRAN 模拟出大气水汽含量与透过率存在较好的相关关系,本文采用 MODTRAN 模拟针对 MODIS 影像的大气水汽含量与透过率之间的关系.选择输入大气条件是:中纬度夏季大气模式、模型选用单次散射,卫星高度 705km,大气水汽含量取研究区域值即:0.2 g/cm<sup>2</sup> ~ 4.0 g/cm<sup>2</sup>,模拟结果经拟合分析如下:

$$tr31 = -0.1141 * wv + 0.9551, R^2 = 0.9866$$

$$tr32 = -0.1432 * wv + 0.9462, R^2 = 0.9955$$

其中  $tr31$ 、 $tr32$  分别是 31、32 波段大气透过率,  $wv$  是大气水汽含量,  $R$  为相关系数.因此,可以用这种关系来计算研究区的大气透过率,计算得到的大气透过率频率分布如图 4 所示,可见,大气透过率均在 0.7~1.0 之间,7月2日、3日大气透过率频率分布对于 31、32 波段有较大的差异,而7月4日、5日、9日和10日则差异不大.大气透过率的获取对于下一步计算地表温度,进而估算能量平衡中的各个分量有着重要意义.

#### 5 结语

虽然 MODIS 水汽产品具有一定的精度,但用于分析研究还不够,通过对算法改进,得到了较好的结果,说明这种改进是行之有效的.但由于观测站点较少,每次卫星过境只有一次观测,因此,这种改进的合理性还有待进一步检验.同时,因为探空气球达到的高度有限,一般均在 400hpa 左右,没有资料的部分,本文通过拟合得到,虽然 400hpa 至 300hpa 这一层大气水汽含量相对较少,但难免产生一定的误差,

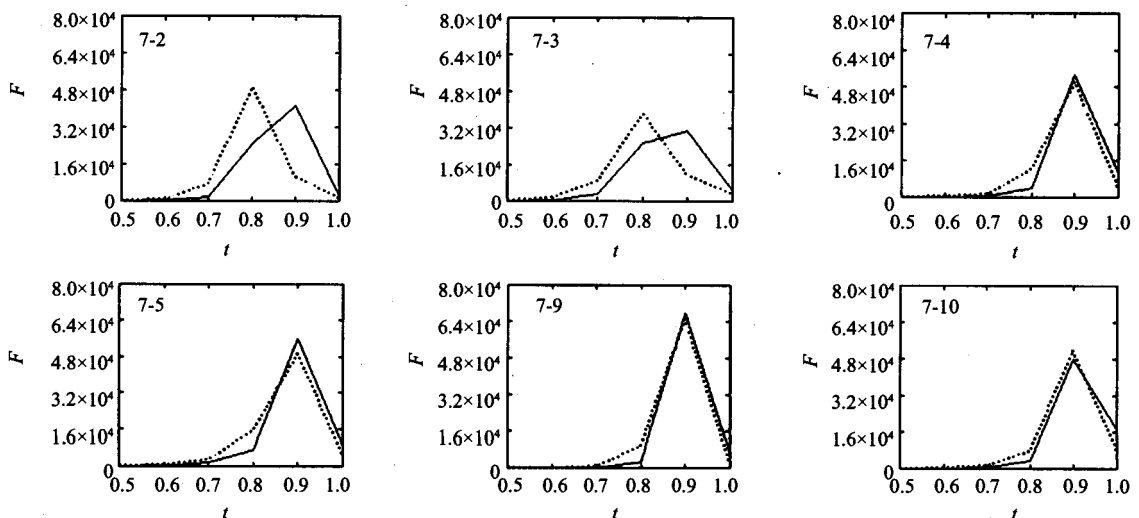


图 4 大气透过率(t)频率(F)分布图(实线-31 波段;虚线-32 波段)  
Fig.4 Frequency(F) of atmosphere transmittance(t) (solid line-band31; dash line-band32)

这也是以后野外实验中应逐步完善的地方. 根据 MODTRAN 辐射传输模式模拟出大气水汽含量与透过率之间存在较好的负相关性, 因此, 本文也计算了大气透过率, 为下一步研究地表热特征及其他参数提供依据.

## REFERENCES

- [1] LI Guo-Ping, HUANG Ding-Fa. Reviews and prospects of researches on remote sensing of regional atmospheric water vapor using ground-based GPS[J]. *Meteorological Science and Technology*(李国平, 黄丁发. GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望. *气象科技*), 2004, 32(4): 201—205.
- [2] YANG Jing-Mei, QIU Jin-Huan. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究. *大气科学*), 2002, 26(1): 9—22.
- [3] SHI Chun-Xiang, XIE Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels' infrared data[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(师春香, 谢正辉. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 304—308.
- [4] MA Gang, QIU Chong-Jian, LI Guang-Qing, et al. Study of simulation on radiance from infrared and water vapor channel of FY-2B by a fast forward model-RTTOV7[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(马刚, 邱崇践. 利用 RTTOV7 快速辐射传输模式模拟风云二号红外和水汽成像通道辐射率的研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 37—40.
- [5] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. Calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(戎志国, 张玉香, 王玉花, 等. 风云二号 B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 357—365.
- [6] LIU Yu-Jie, YANG Zhong-Dong. *The Theories and Algorithms for MODIS Data Processing*[M]. Beijing: Science Press(刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社), 2001, 66—74.
- [7] Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(5): 871—884.
- [8] HU Ze-Yong, LÜ Shi-Hua, GAO Hong-Chun, et al. Oasis desert wind structure air temperature and humidity characteristics[J]. *Plateau Meteorology*(胡泽勇, 吕世华, 高洪春, 等. 夏季金塔绿洲及邻近沙漠地面风场、气温和湿度场特性的对比分析. *高原气象*), 2005, 24(4): 522—526.
- [9] ZHANG Yu, LÜ Shi-Hua, CHEN Shi-Qiang, et al. On the edge of oasis microclimate characteristics radiation and energy balance[J]. *Plateau Meteorology*(张宇, 吕世华, 陈世强, 等. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析. *高原气象*), 2005, 24(4): 527—533.
- [10] WANG Xiu-Rong, XU Xiang-De, MIAO Qiu-Ju. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China[J]. *Climatic and Environmental Research*(王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征. *气候与环境研究*), 2003, 8(1): 35—42.
- [11] ZHANG Qiang, WEI Guo-An, HUANG Rong-Hui. Impact of oasis on the atmosphere hydrological cycle over desert or Gobi near it—a study by Dunhuang experiment [J]. *Progress in Natural Sciences*(张强, 卫国安, 黄荣辉. 绿洲对其邻近荒漠大气水分循环的影响—敦煌试验数据分析. *自然科学进展*), 2002, 12(2): 170—175.
- [12] Van Bavel C H, Fritschen L J, Reeves W E. Transpiration by sudangrass as an externally controlled process[J]. *Science*, 1967, 141: 269—270.
- [13] HU Yin-Qiao, ZUO Hong-Chao. Forming mechanism of oasis environment and building countermeasure of ecological environment in arid area[J]. *Plateau Meteorology*(胡隐樵, 左洪超. 绿洲环境形成机制和干旱区生态环境建设对策. *高原气象*), 2003, 22(6): 537—544.
- [14] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 USER'S MANUAL. Hanscom AFB: Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, 2000, MA 01731—3010, 97.
- [15] QIN Zhi-Hao, LI Wen-Juan, ZHANG Ming-Hua, et al. Estimation of the essential atmosphere parameters of mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*(覃志豪, 李文娟, 张明华, 等. 单窗算法的大气参数估计方法. *国土资源遥感*), 2003, 56(2): 37—43.