

## 中波红外大气透过率特性分析

赵帅阳<sup>1,2</sup>, 景欣<sup>1,2</sup>, 张飞舟<sup>1,2</sup>, 胡兴帮<sup>1,2</sup>, 贺丽琴<sup>1,2</sup>, 马蔼乃<sup>1</sup>, 晏磊<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**大气透过率是影响太阳辐射以及地表热辐射的一个重要参量。利用MODTRAN辐射传输模型,对中波红外波段(3~5 μm)处的大气透过率以及其影响因子的贡献进行了详细的分析。在此基础上,结合MODIS在该谱区设置的6个通道,分别讨论了各吸收气体对通道透过率的影响。结论表明,水汽和混合气体是造成中波红外波段大气透过率衰减最重要的影响因子。MODIS通道透过率与通道光谱响应函数的宽度和气体分子的吸收带位置有关。

**关键词:**中波红外;MODTRAN;大气透过率;MODIS

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.009

### Analysis on atmospheric transmittance characteristics in middle infrared (3 ~ 5 μm) spectrum

ZHAO Shuai-yang<sup>1,2</sup>, JING Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Fei-zhou<sup>1,2</sup>, HU Xing-bang<sup>1,2</sup>,  
HE Li-qin<sup>1,2</sup>, MA Ai-nai<sup>1</sup>, YAN Lei<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & 3S Application, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The atmospheric transmittance is an important parameter affecting the solar radiation and surface thermal radiation. Based on MODTRAN radiation transfer model, the atmospheric transmittance in middle infrared (MIR) spectrum and the influences of atmospheric molecules and aerosol particles were analyzed in detail. Combined with six channels of MODIS set in MIR, the influences of absorption gases on channel transmittance were discussed respectively. The results show that water vapor and uniformly mixed gases are the two major factors causing the atmospheric transmittance attenuation. MODIS channel transmittance is strongly related to spectral response function band width and absorption band of atmospheric molecules.

**Key words:** middle infrared; MODTRAN; atmospheric transmittance; MODIS

#### 1 引言

大气透过率是影响太阳辐射以及地表热辐射的一个重要参量,在卫星反演地表参数(地表温度、地表反射率等)中具有重要意义。当太阳辐射和地表热辐射在大气中传输时,一方面会受到大气分子如H<sub>2</sub>O、混合气体(CO<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub>)<sup>[1]</sup>、O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>

等的吸收和散射影响,同时还会受到气溶胶颗粒物的散射或吸收影响,造成太阳辐射和地表热辐射的衰减<sup>[2]</sup>。中波红外波段介于可见-近红外与热红外波段,能量在传输过程中表现出独特的过渡性,同时在此区间大气的透过特性是明显变化的。另一方面,由于遥感载荷是带通系统,载荷实际测得的能量

**基金项目:** 博士点基金项目(No. 20130001110046); 国家自然科学基金项目(No. 41371492)资助。

**作者简介:** 赵帅阳(1990-),男,博士研究生,研究方向为高光谱遥感。E-mail: syzhao@pku.edu.cn

**通讯作者:** 晏磊(1956-),男,教授,博导,研究方向为高分辨率成像与遥感定标等。E-mail: liyan@pku.edu.cn

**收稿日期:** 2016-09-01; **修订日期:** 2017-01-10

值受到通道大气透过率的影响较大<sup>[3]</sup>。因此有必要对大气总透过率和通道透过率的影响因子进行深入的分析。

中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 是“图谱合一”的光学遥感仪器,有 36 个离散光谱波段。光谱范围从 0.4  $\mu\text{m}$  (可见光) ~ 14.4  $\mu\text{m}$  (热红外),实现了全光谱覆盖<sup>[4]</sup>。唐伯惠、李召良等人对 MODIS 的中波红外通道 22(3.929 ~ 3.989  $\mu\text{m}$ )和 23(4.020 ~ 4.080  $\mu\text{m}$ )的透过率影响因素进行了分析<sup>[5]</sup>,但研究主要集中在气溶胶和水汽含量这两个影响因素,并未对大气透过率的影响因素进行分析;另外该研究只对所需的 MODIS-22 和 23 通道进行分析,忽略了其他中波红外通道。戎志国<sup>[6]</sup>、Qian Y G<sup>[7]</sup>等简要分析了中波红外光谱的大气辐射特性,并未对中波红外载荷通道的透过率进行分析。

在可见-近红外波段与热红外波段,关于大气透过率的研究文献较多且研究也成熟<sup>[8-9]</sup>。但在中波红外波段内,目前的文献<sup>[5-7]</sup>仍未对大气光谱透过率和通道透过率进行详细分析。本文利用 MODTRAN 辐射校正模型<sup>[10]</sup>对中波红外谱区的大气透过特性进行了详细分析。在此基础上,利用 MODIS 设在该谱区的 6 个通道,研究大气各气体成分对通道透过率的影响。

## 2 中波红外大气透过率分析

由图 1 可知,在中波红外波段存在两个大气窗口: 3.5 ~ 4.1  $\mu\text{m}$  和 4.7 ~ 4.9  $\mu\text{m}$ 。其中 3.5 ~ 4.1  $\mu\text{m}$

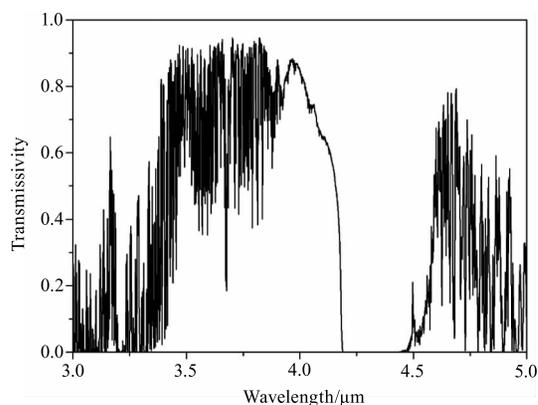


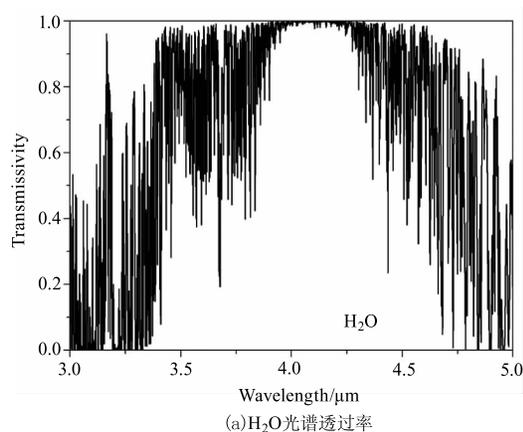
图 1 热带大气模式 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  大气总透过率  
(全部大气成分, rural vis = 23 km)

Fig. 1 Total atmospheric transmittance of 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  spectrum in tropical atmospheric model  
(All atmospheric compositions, rural vis = 23 km)

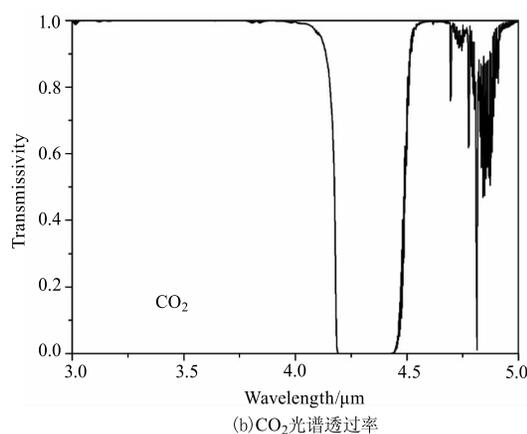
窗口区表现出高且稳定的透过性,这为中波红外波段的应用提供了可能。和其他波段一样,中波红外波段的大气透过率也受到大气分子和气溶胶的影响。本部分主要介绍中波红外波段大气吸收气体和气溶胶的光谱透过率和通道透过率,对中波红外波段整层大气透过率的衰减有清晰的认识。

### 2.1 吸收气体光谱透过率

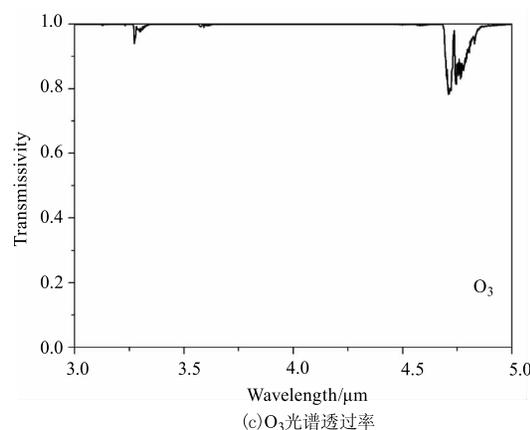
利用 MODTRAN 辐射模型,选择热带大气模式,气溶胶类型为 Rural vis = 23 km,进行地-气系统垂直大气透过率计算,获得大气吸收气体光谱透过率,如图 2 所示。



(a) H<sub>2</sub>O 光谱透过率



(b) CO<sub>2</sub> 光谱透过率



(c) O<sub>3</sub> 光谱透过率

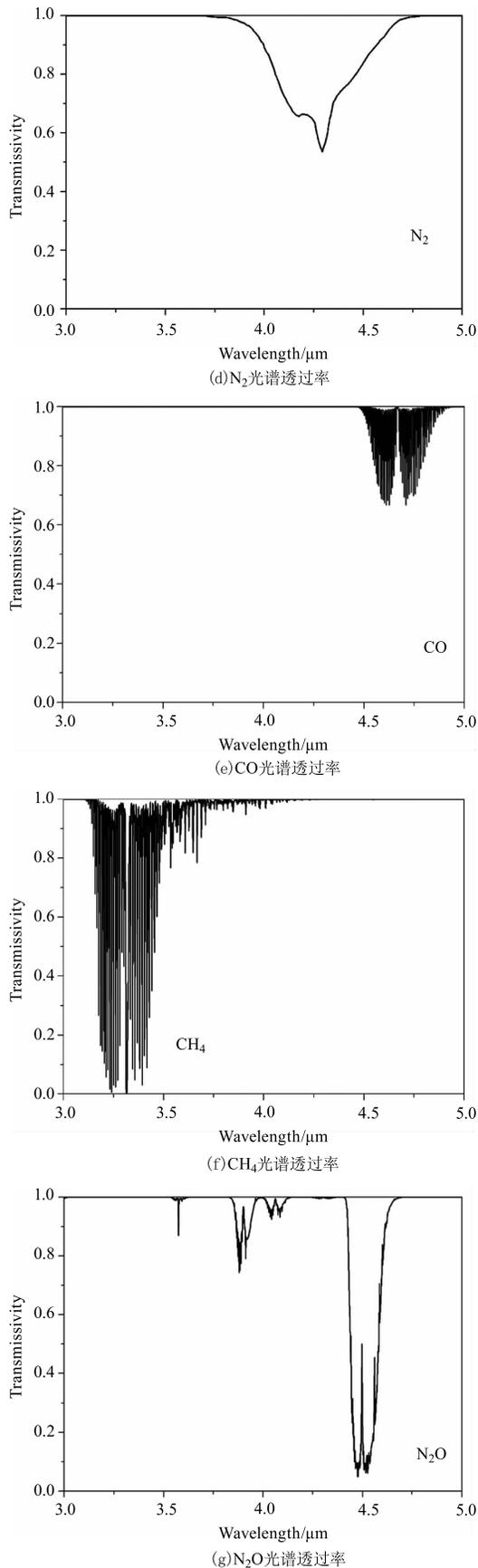
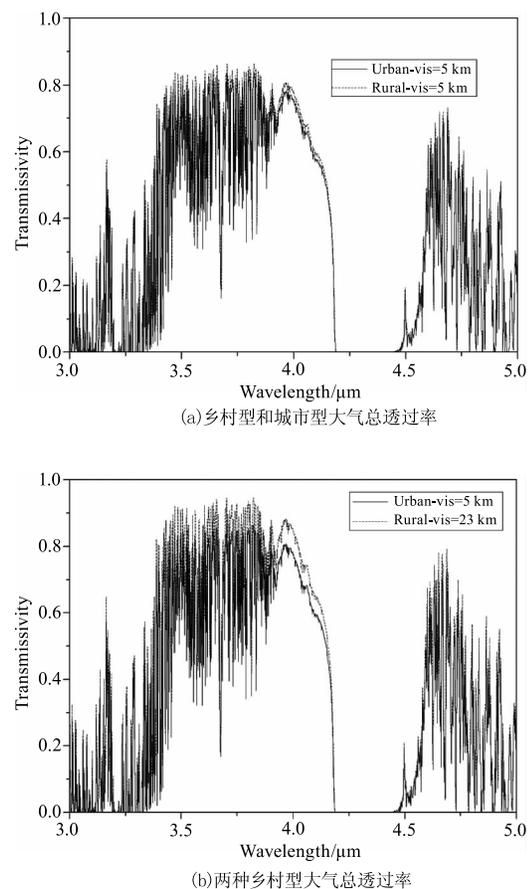


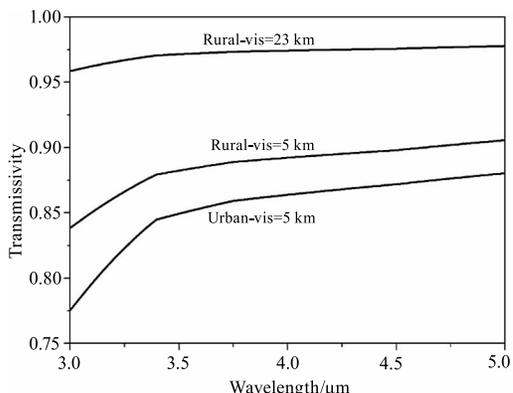
图2 整层大气几种主要吸收气体的大气透过率

Fig. 2 Atmospheric transmittance of some absorption gases in the whole atmosphere

由图2可知,  $H_2O$  在整个中波红外波段对大气透过率都有比较大的影响, 在  $4.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$  以及  $3.0 \sim 3.3 \mu\text{m}$  有比较强的吸收, 在  $4.0 \sim 4.5 \mu\text{m}$  为大气透过带。  $CO_2$  在  $4.2 \sim 4.5 \mu\text{m}$  有一个强吸收带, 大气透过率几乎为零, 探测器无法获得地表信息; 在  $4.8 \mu\text{m}$  有一个弱吸收带; 其余波谱区  $CO_2$  的大气透过率很高。  $O_3$  对大气透过率的影响比较小, 只在  $4.75 \mu\text{m}$  附近有一个比较弱的吸收, 其余波谱区的透过率都比较高。  $N_2$  在  $3.9 \sim 4.7 \mu\text{m}$  存在一个连续的吸收带, 在  $4.3 \mu\text{m}$  附近的吸收比较强。  $CO$  在  $4.6 \mu\text{m}$  附近存在一个弱吸收带, 在其他波谱区无吸收。  $CH_4$  在  $3.2 \sim 3.4 \mu\text{m}$  有一个比较强的吸收带, 在其他波谱区几乎没有吸收。  $N_2O$  在  $4.5 \mu\text{m}$  附近存在一个强吸收带, 在  $3.8 \sim 4.2 \mu\text{m}$  有一个比较弱的吸收带。

在热带大气模式下, 选择三种常见的气溶胶类型 (Rural vis = 5 km、Rural vis = 23 km、Urban vis = 5 km), 计算地 - 气系统垂直大气总透过率以及这三种气溶胶类型的大气光谱透过率, 结果如图3所示。





(c) 气溶胶粒子大气透过率

图3 含不同气溶胶粒子的整层大气总透过率和气溶胶粒子大气透过率

Fig. 3 The atmospheric transmittance of the whole atmosphere with different aerosols and atmospheric transmittance of aerosols particles

由图3(a)和3(b)可知,地-气系统的垂直大气总透过率随着气溶胶粒子的种类和能见度有微小的变化:乡村型气溶胶的大气总透过率要比城市型气溶胶的大气总透过率要好;对于同一种气溶胶类

型,能见度高的气溶胶类型的大气总透过率要比能见度低的气溶胶类型的大气总透过率要好。这在图3(c)气溶胶类型光谱透过率中也能体现出来。通过图3(c)与图2比较发现相对于吸收气体的光谱透过率,气溶胶粒子光谱透过率则相对平缓,没有吸收带。

大气总透过率在中波红外波谱区主要是受到气体分子吸收的影响,气体分子的散射影响不大(气体分子散射的大气透过率在整个中波红外谱区的透过率接近于1)。大气总透过率随着气溶胶粒子的种类和能见度有一定的变化,但相对吸收气体而言,对大气衰减的贡献要小很多。吸收气体的透过率存在一定的吸收带并且随着波长波动较大;气溶胶粒子的透过率则不存在吸收带,变化也较平缓。

2.2 通道大气透过率

MODIS在中波红外波谱区设置的6个光谱通道的波谱范围、中心波长、主要用途以及其他相关的通道参数设置如表1所示。

表1 MODIS中波红外通道设置

Tab. 1 Channels of MODIS set in middle infrared

波段	波谱范围/ $\mu\text{m}$	中心波长/ $\mu\text{m}$	光谱辐亮度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}^{-1})$	$\text{NE}\Delta T/\text{K}$	主要用途
20	3.660 ~ 3.840	3.750	0.45 (300 K)	0.05	地表/云层温度反演
21	3.929 ~ 3.989	3.959	2.38 (335 K)	2.00	
22	3.929 ~ 3.989	3.959	0.67 (300 K)	0.07	
23	4.020 ~ 4.080	4.050	0.79 (300 K)	0.07	
24	4.433 ~ 4.498	4.465	0.17 (250 K)	0.25	大气温度反演
25	4.482 ~ 4.549	4.515	0.59 (275 K)	0.25	

MODIS 6个中波红外通道的光谱响应函数函数(Spectral Response Function, SRF)如图4(a)所示。从图中可以看出,MODIS-20~23通道处于高透过率大气窗口区内,可以获得地面信息,用于陆表和云层的温度反演;MODIS-24、25通道则处于大气吸收区内,几乎探测不到地面的信息,但却可以用于大气温度的反演。

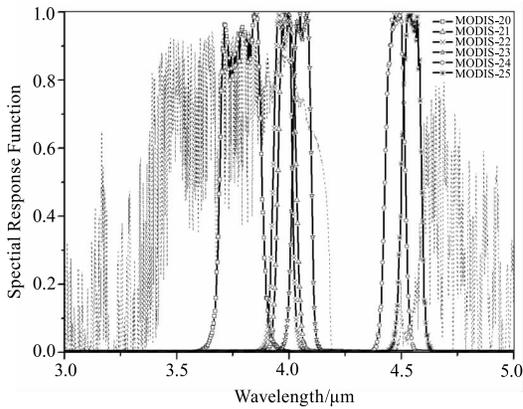
通道的平均透过率的计算公式如公式(1)所示:

$$T_{\text{channel}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} \times \text{SRF}(\lambda) \times d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{SRF}(\lambda) \times d\lambda} \quad (1)$$

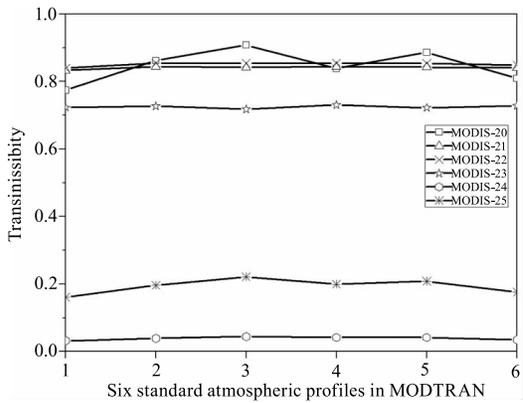
其中,  $T_{\text{channel}}$  为通道的平均透过率;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  光谱响应区间的波长下限和上线;  $\tau_{\lambda}$  为大气透过率分布函数;  $\text{SRF}(\lambda)$  为通道响应函数。图4(b)是MODIS 6个中波红外通道在6种标准大气模式下计算出的通道平均透过率。可以发现,除了MODIS-20通道由于处在水汽吸收带上且通道宽度较其他通道大,大气通道透过率受大气模式的影响出现一定的起伏变化,其余五个通道的大气通道透过率基本上不受大气模式影响。

不同标准大气模式对MODIS中波红外通道大气主要吸收气体的透过率的影响如图5所示。其中,MODIS-20,24,25通道处在水汽吸收谱区内,

不同大气模式下含水量的差异,导致这三个通道的透过率有较大变化;MODIS-21,22,23 处在水汽透过谱区内,通道的水汽透过率基本没有变化,如图 5(a)所示。MODIS-25 通道处在  $O_3$  吸收带内,该通道  $O_3$  的透过率相对其他通道来说有微小变化,如图 5(b)所示。混合气体的含量在各大气模式下是比较稳定的,因此 6 个通道混合气体的通道透过率在各大气模式下没有明显的变化,如图 5(c)所示。MODIS-23、24 两通道处在  $N_2$  吸收带内,这两个通道  $N_2$  的大气透过率较其他通道来说有一定的微小变化,如图 5(d)所示。



(a)中波红外通道响应函数

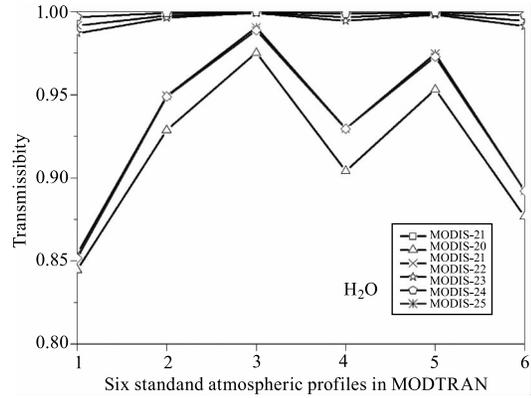


(b)不同大气模式下的通道透过率

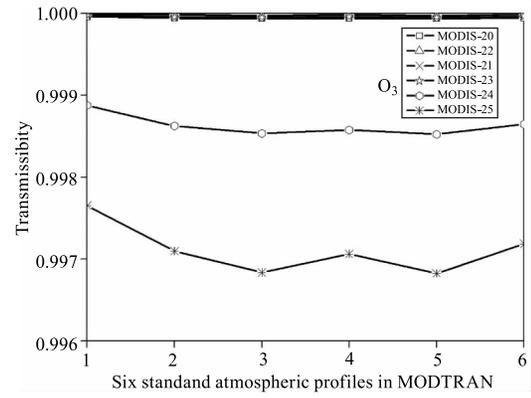
图4 MODIS 在中波红外谱区所设通道的响应函数以及不同大气模式下的通道透过率

Fig.4 Spectral response function of MODIS set in middle infrared and Channel transmittance in different atmosphere models

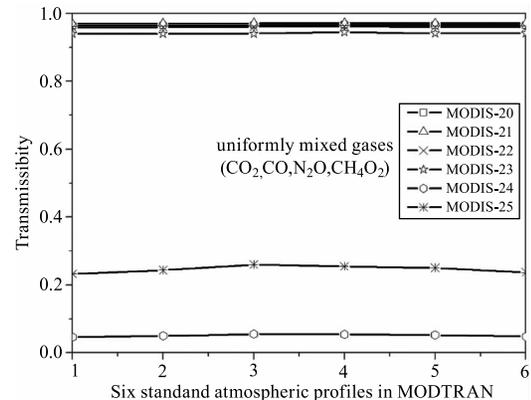
由以上分析可知,  $O_3$ 、 $N_2$ 、以及混合气体在个大气模式下的含量都比较稳定,各通道的气体透过率虽然有变化,但变化并不大。大气模式水汽含量的差异,导致处在水汽吸收带内的通道水汽透过率随大气模式出现了剧烈的变化。



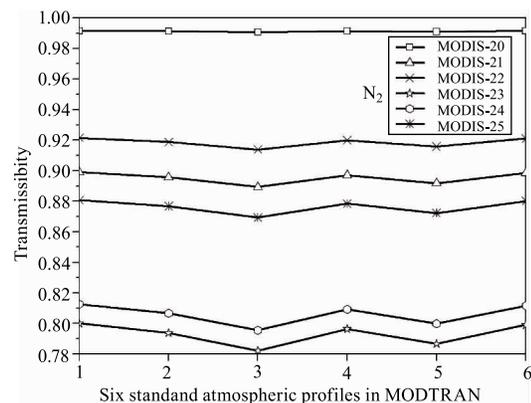
(a) $H_2O$ 通道透过率



(b) $O_3$ 通道透过率



(c)混合气体通道透过率



(d) $N_2$ 通道透过率

图5 MODIS 中波通道大气主要吸收气体的通道透过率  
Fig.5 Channel transmittance of absorption gases in MODIS

### 3 结果与讨论

中波红外光谱区在 6 种大气模式(气溶胶类型为 Rural vis = 23 km)下,整层大气的平均总透过率和大气主要吸收气体的透过率的如表 2 所示。从表

2 中我们可以看出,大气平均总透过率的衰减主要是受到水汽和混合气体的影响,其他气体虽然造成了一定的微小衰减,但基本不影响大气的平均总透过率。

表 2 不同大气模式下的大气平均透过率和大气吸收气体的平均透过率

Tab. 2 Average atmospheric transmittance of different atmosphere models and some absorption gases

大气模式	$\tau$	$\tau_{H_2O}$	$\tau_{O_3}$	$\tau_{\text{uniformly mixed gases}}$	$\tau_{N_2}$	$\tau_{\text{Water Continuum}}$
1976 US standard	0.4894	0.7565	0.9912	0.7589	0.9295	0.9546
Midlatitude Summer	0.4177	0.6748	0.9913	0.7585	0.9312	0.9033
Midlatitude Winner	0.5324	0.8059	0.9903	0.7604	0.9272	0.9718
SubArctic Summer	0.4558	0.7187	0.9908	0.7609	0.9304	0.9319
SubArctic Winner	0.5847	0.8630	0.9903	0.7620	0.9257	0.9865
Tropical Model	0.3807	0.6327	0.9929	0.7570	0.9315	0.8635

对水汽和混合气体的透过率按公式(2)进行叠加计算,可以得到水汽和混合气体的叠加透过率  $\tau'$  :

$$\tau' = \tau_{H_2O} \times \tau_{\text{uniformly mixed gases}} \quad (2)$$

对 3~5  $\mu\text{m}$  谱区内 6 种大气模式的水汽和混合气体的叠加透过率进行计算并与大气总透过率建立回归方程,得到  $\tau'$  与  $\tau$  的关系,如表 3 所示。从表中可以看出尽管在不同大气模式下,模拟得到的回归方程的斜率和截距略有差异,但大气总透过率  $\tau$  的变化趋势与对叠加透过率  $\tau'$  的变化趋势呈现一致性特点,说明水汽和混合气体是造成大气透过率衰减最重要的影响因素,这与表 2 得到的结果是一样的。

表 3 水汽和混合气体的叠加透过率  $\tau'$  与大气平均透过率  $\tau$  的关系

Tab. 3 The relationship between superposition transmittance -  $\tau'$  of water vapor and uniformly mixed gases and the average atmospheric transmittance -  $\tau$

大气模式	$\tau = a \times \tau' + b$		$R^2$
	$a$	$b$	
1976 US standard	0.9071	-0.0069	0.9701
Midlatitude Summer	0.8945	-0.0117	0.9654
Midlatitude Winner	0.9113	-0.0053	0.9680
SubArctic Summer	0.9000	-0.0096	0.9679
SubArctic Winner	0.9183	-0.0039	0.9652
Tropical Model	0.8854	-0.0138	0.9610

### 4 结论

本文对中波红外波段大气透过率的影响因素进行了详细的分析,结合 MODIS 在该谱区设置的 6 个通道,分别讨论了各吸收气体对通道透过率的影响。通过以上的分析和讨论,我们可以对中波红外大气透过率特性得出如下的结论:

(1) 气体分子的吸收对大气总透过率衰减的影响比较大,气体分子散射的影响几乎可以忽略不计;

(2) 大气总透过率随着气溶胶粒子的种类和能见度有一定的变化,但相对吸收气体而言,对大气衰减的贡献要小;

(3) 水汽和混合气体是造成大气透过率衰减最重要的影响因子。不同的大气模式下,混合气体的含量相对比较稳定,对大气透过率的影响也比较稳定;大气模式含水量的差异是造成不同大气模式大气透过率变化的主要因素;

(4)  $O_3$ 、 $N_2$ 、以及混合气体在个大气模式下的含量都比较稳定,MODIS 6 个通道气体分子的透过率虽然有变化,但变化并不大。大气模式水汽含量的差异,导致处在水汽吸收带的通道其水汽的透过率随这大气模式出现了剧烈的变化。

以往的大气透过率经验模型认为影响大气光谱透过率的主要变量是水汽含量,本文分析也证实该观点在中波红外波段同样成立。但对于通道大气透过率而言,还需要考虑通道的波段设置,以及水汽透过率吸收带的影响。在中波红外波段,水汽含量与大气透过率和处于水汽吸收带的仪器通道透过率之

间的关系模型未进行讨论和分析,这是本文的不足之处,希望在以后的研究中加以完善和补充。

#### 参考文献:

- [1] Psiloglou B E, Santamouris M, Asimakopoulos D N. Predicting the broadband transmittance of the uniformly mixed gases (CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and O<sub>2</sub>) in the atmosphere, for solar radiation models [J]. *Renewable Energy*, 1995, 6(1): 63 - 70.
- [2] GONG Shaoqi, SUN Haibo, WANG Shaofeng, et al. Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing(I): derivation of atmospheric transmittance model [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1692 - 1698. (in Chinese)  
龚绍琦, 孙海波, 王少峰, 等. 热红外遥感中大气透过率的研究(一): 大气透过率模式的构建 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1692 - 1698.
- [3] RAO Ruizhong. *Modern atmospheric sciences* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 322. (in Chinese)  
饶瑞中. *现代大气学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 322.
- [4] Justice C O, Townshend J R G, Vermote E F, et al. An overview of MODIS Land data processing and product status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1 - 2): 3 - 15.
- [5] TANG Bohui, LI Zhaoliang, WU Hua, et al. The research about surface emissivity retrieval in thermal infrared [M]. Beijing: Science Press, 2014: 72 - 75. (in Chinese)  
唐伯惠, 李召良, 吴骅, 等. 热红外地表发射率遥感反演研究 [J]. 北京: 科学出版社, 2014: 72 - 75.
- [6] RONG Zhiguo, ZHANG Yuxiang, LIU Cheng, et al. Atmospheric radiation transmission character for fire detection in medium infrared spectrum [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2009, 38(4): 589 - 593. (in Chinese)  
戎志国, 张玉香, 刘诚, 等. 中波红外火情遥感的大气辐射传输特性 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 589 - 593.
- [7] Qian Y G, Zhao E Y, Gao C, et al. Land surface temperature retrieval using nighttime mid-infrared channels data from airborne hyperspectral scanner [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 8(99): 1208 - 1216.
- [8] CHEN Xiuhong, WEI Heli, LÜ Weiyu, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 403 - 406. (in Chinese)  
陈秀红, 魏合理, 吕炜煜, 等. CART软件计算的红外大气透过率和实测值比较 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(4): 403 - 406.
- [9] LI Jinhua, WANG Zhibin, CHEN Yuanyuan. Calculation of near infrared oxygen A-band atmospheric transmittance [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1142 - 1145. (in Chinese)  
李晋华, 王志斌, 陈媛媛, 等. 近红外氧气 A 带大气透过率的计算 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1142 - 1145.
- [10] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1999, 3756: 348 - 353.