

## 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

龚绍琦<sup>1,2</sup>, 孙海波<sup>1</sup>, 王少峰<sup>3</sup>, 国文哲<sup>1</sup>, 李云梅<sup>2</sup>

- (1. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 江苏 南京 210044;
2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046;
3. 中国人民解放军 73608 部队, 江苏 南京 210028)

**摘要:** 大气透过率是热红外遥感中的一个重要参数。通过辐射传输模型 MODTRAN 模拟热红外波段的大气透过率, 构建了基于大气模型、气溶胶模型、水汽量、能见度和观测天顶角等 5 个因素的大气透过率查找表, 分析了不同参数对热红外大气透过率光谱曲线的影响, 通过方差分析确定了影响大气透过率的关键因子, 针对不同类型的气溶胶模型, 构建了基于水汽量、能见度和观测天顶角的常用卫星传感器热红外通道的大气透过率经验模式, 解决了卫星热红外遥感中大气透过率精确计算的问题。

**关键词:** 大气透过率; 热红外遥感; MODTRAN 模型; 模式

**中图分类号:** P237; TP79   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1692-07

## Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing(I): derivation of atmospheric transmittance model

Gong Shaoqi<sup>1,2</sup>, Sun Haibo<sup>1</sup>, Wang Shaofeng<sup>3</sup>, Guo Wenzhe<sup>1</sup>, Li Yunmei<sup>2</sup>

- (1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Key Lab of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;
3. No.73608 of the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** Atmospheric transmittance is an important parameter in the thermal infrared remote sensing. A multi-variable lookup table of atmospheric transmittance which includes atmospheric model, aerosol model, water vapor content, visibility and view zenith angle was constructed based on the radiation transfer model MODTRAN, effect of different parameters on thermal infrared atmospheric transmittance spectrums was analyzed, the key variables of atmospheric transmittance were determined by the analysis of variance. According to different types of aerosol model, the multi-variable linear regression models of atmospheric transmittance models were deduced based on the water vapor content, visibility and view zenith angle for common thermal infrared sensor channels, which will solve the problem on calculating accurately the atmospheric transmittance for the thermal infrared remote sensing by satellite.

**Key words:** atmospheric transmittance; thermal infrared remote sensing; MODTRAN; model

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(40801145); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室开放基金资助项目; 2012 年度国家级大学生实践创新训练计划(201210300008); 2013 年度江苏省大学生实践创新训练计划(201310300063Y)

作者简介: 龚绍琦(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事资源与环境遥感方面的研究。Email: shaoqigong@163.com

## 0 引言

任何温度超过绝对零度的物体都会发射红外能量,热红外遥感是利用传感器接收地表物体在大气窗口 8~14  $\mu\text{m}$  波段范围的红外辐射信息进行地表特征的探测<sup>[1]</sup>。热红外遥感技术在地表温度、地表能量平衡、城市热岛效应、森林火灾、旱灾、矿藏、地热等方面都有很广泛的应用<sup>[1]</sup>。

根据热辐射传输方程,卫星传感器接收到的热辐射亮度由 3 部分组成:地表发射的热辐射亮度、大气下行和大气上行发射的辐亮度。其中前两者都要穿过大气层后才被卫星传感器所接收,辐射亮度会发生衰减,大气透过率是反映红外辐射衰减的一个物理量,同时也是卫星热红外遥感反演地表温度的一个重要参数。当物体的红外辐射在大气中传输时,一方面会受到大气分子,如水汽、二氧化碳、臭氧、甲烷、氧化氮等气体的吸收<sup>[2]</sup>,另外还受大气分子以及液态和固态的分散颗粒物,如云、雾、烟等气溶胶物质的散射,造成物体红外辐射在大气中的衰减<sup>[3]</sup>。目前,热红外辐射大气透过率主要是通过辐射传输模型模拟<sup>[4-7]</sup>、仪器观测<sup>[8-10]</sup>、基于气象资料的计算<sup>[11-13]</sup>和经验公式的估算<sup>[14-15]</sup>等方法确定。由于模型参数复杂度、观测条件和资料的完整性、公式估算精度等因素,这些方法会影响热红外遥感的结果。该研究将利用辐射传输模型 MODTRAN 模拟热红外波段的大气透过率,通过设置模型的不同输入参数,构建大气透过率多维查找表;分析不同输入参数对大气透过率光谱曲线的影响;利用方差分析方法来确定影响大气透过率的关键参数,最终构建出常用卫星传感器热红外通道的大气透过率经验回归模型,以期解决卫星热红外遥感中大气透过率精确计算的问题。

## 1 数据处理与方法

### 1.1 热红外波段大气透过率查找表的构建

MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 是美国空军研究实验室在LOWTRAN 的基础上改进的中分辨率大气辐射传输软件,光谱分辨率为 2  $\text{cm}^{-1}$ ,对辐射传输的大气模型、几何路径、气溶胶模型、运行模式提供了多个选择,引入了多次散射计算方法,使得精度得以提高,对大气、气

溶胶、云的光学特性以及遥感大气校正研究提供了很好的工具<sup>[16]</sup>。文中的热红外波段大气透过率将利用辐射传输模型 MODTRAN 来模拟,模型需要输入的主要参数有:大气模型、气溶胶模型、水汽含量、能见度和观测天顶角,其他参数则选择 MODTRAN 模型的默认值。由于卫星热红外遥感的大气窗口主要在波长 10.25~12.5  $\mu\text{m}$ (波数为 800~975  $\text{cm}^{-1}$ )范围,因此根据表 1 中各参数的取值构建了热红外波段大气透过率查找表。

表 1 利用 MODTRAN 模型建立大气透过率查找表所用的参数

Tab.1 Parameters of atmospheric transmittance look-up table based on MODTRAN

Variables	Number	Values
Atmospheric model	6	1: Tropical Atmosphere, 2: Mid-Latitude Summer, 3: Mid-Latitude Winter, 4: Sub-Arctic Summer, 5: Sub-Arctic Winter, 6: 1976 U.S. Standard Atmosphere
Aerosol model	6	1: Rural, 4: Maritime, 5: Urban, 6: Tropospheric, 8: Advective Fog, 9: Radiative Fog
Water vapor / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	19	0.01, 0.25, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 3.50, 4.00, 4.5, 0.5, 0.0, 5.50, 6.00, 6.50
Visibility/km	14	0.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Zenith angle	18	0~75°, 5° interval

### 1.2 大气透过率影响因素的方差分析法

方差分析(Analysis of Variance, ANOVA),是英国统计学家 R. A. Fisher 发明的,用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验。该方法从观测变量的方差入手,研究诸多控制变量中哪些变量是对观测变量有显著影响。其基本思想是:通过分析研究不同来源的变异对总变异的贡献大小,从而确定可控因素对研究结果影响力的大小<sup>[17]</sup>。文中将以大气透过率查找表中的大气模型、水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角为 5 个控制变量,某个典型波段的透过率为观测变量,进行多因素的方差分析,检验

5个变量对大气透过率是否存在显著性的差异,确定影响透过率的关键因素。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同参数对热红外波段大气透过率光谱曲线的影响

为了分析大气模型、水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角5个变量对热红外波段大气透过率光谱曲线的影响,这里将逐一考察每个变量对大气透过率的影响,当考察某个变量时,其他4个变量的参数保持一致。不失一般性,大气模型设为中纬度夏季、水汽量为 $1.25\text{ g/cm}^2$ 、气溶胶模型为城市型、能见度为 $25\text{ km}$ 、观测天顶角为 $45^\circ$ ,图1是不同变量影响下的波数为 $800\sim 975\text{ cm}^{-1}$ 范围的大气透过率光谱曲线。

从图1可见,5个变量的不同取值并不改变大气透过率光谱曲线的形状,只改变光谱值的大小,光谱曲线上异常的谷值主要是由大气中水汽、 $\text{CO}_2$ 等气体的吸收造成。图1(a)是不同大气模型的透过率光谱曲线,当其他4个变量不变时,6种大气模型得到的大气透过率是一样的。这是因为大气水汽量不变、 $\text{CO}_2$ 体积混合比、 $\text{O}_3$ 含量等大气组分浓度均为MODTRAN默认值,即不同大气模型中大气分子各组分浓度都一致,对热辐射的吸收和散射作用相同,故大气透过率光谱曲线也一样。图1(b)显示了不同水汽量的大气透过率光谱,水汽量从 $0.01\text{ g/cm}^2$ 增加到 $6.5\text{ g/cm}^2$ 时,大气透过率逐渐减小,水汽量与大气透过率呈显著的负相关。图1(c)是不同气溶胶模型作用下的大气透过率光谱曲线,气溶胶主要集中在 $2\text{ km}$ 以下大气边界层,热辐射在该层受气溶胶的衰减作用较大,不同气溶胶模型反映了气溶胶类型以及颗粒形状和大小的差异。在6种气溶胶模型中,对流层模式的大气透过率最大、平流雾模式的透过率最小,乡村型大于海洋型大于城市型大于辐射雾。其原因是平流层模式主要应用于高海拔地区,其大气稀薄、气溶胶颗粒浓度低,大气对热辐射的衰减作用较小;对于乡村和海洋,一般离城市较远,受工业污染、建设施工等影响小,大气中颗粒物浓度小,大气透过率较大;雾是在大气水汽充足、大气层结稳定、相对湿度达到100%的条件下形成的,是由悬浮在大气中微小液滴构成的气溶胶,由于水对辐射有很强

的吸收作用,导致了辐射雾和平流雾模式下的大气

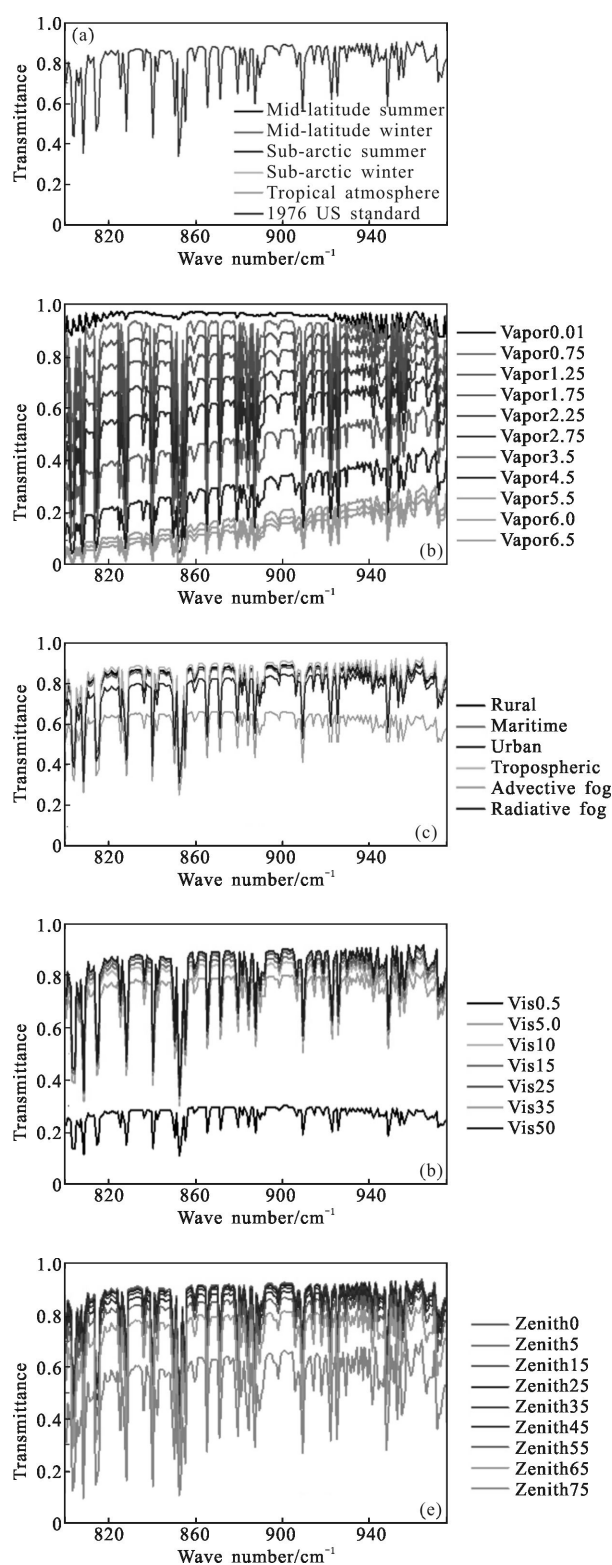


图1 不同变量对大气透过率光谱曲线的影响

Fig.1 Effect of different variables on atmospheric transmittance spectrums curves

透过率很小。需要指出的是,文中没有考虑沙漠型气溶胶对大气透过率的影响,这是因为尽管在沙漠型气溶胶模式作用下,能见度受风速决定,但当其他条件相同时,沙漠型和乡村型的衰减效果是一致的。图1(d)是不同能见度的大气透过率光谱曲线,由于能见度是反映大气透明度的一个指标,当出现降雨、雾、霾、沙尘暴等天气过程时,大气透明度降低、能见度会变差。能见度与气溶胶消光系数存在一定的定量关系,间接反映了气溶胶颗粒浓度的大小。从图上可见,当能见度从0.5 km增加到50 km时,大气透过率也随之增加,两者呈现一定的正相关。图1(e)是不同观测天顶角的大气透过率光谱曲线,反映了不同大气斜程下的衰减程度。可以看出:天顶角从0°~75°变化时,大气透过率逐渐减小,与天顶角的余弦成正相关。

2.2 热红外波段大气透过率影响变量的方差分析

为了进一步研究5个变量对大气透过率的影响,不失一般性,以11.576 μm的大气透过率为应变变量,将大气模型、水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角作为固定因子进行方差分析,结果如表2所示。

表2 热红外波段大气透过率的关键因子的方差分析表

Tab.2 Key factors for atmospheric transmittance at thermal infrared waveband by variance analysis

Variables	Sum of squares	Degree freedom	Mean square	F value	P value
Atmospheric model	0.001	5	0.000	0.026	1.000
Aerosol model	9 453.832	19	497.570	48 108.853	0.000
Water vapor	1 092.396	5	218.479	21 124.232	0.000
Visibility	1 666.739	13	128.211	12 396.379	0.000
Zenith angle	1 756.590	15	117.106	11 322.699	0.000

从表2可以看出,大气模型的相伴概率大于0.05,说明它对大气透过率的影响不显著,而其余4个变量的相伴概率均小于0.01,说明这4个变量对大气透过率影响达到极显著水平。对于这4个变量,水汽量的F值最大,气溶胶模型次之,能见度较小,而观测天顶角最小,说明这4个变量对大气透过率的影响程度由大到小依次为水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角;大气模型对大气透过率的影响可以忽略。

2.3 常用卫星传感器热红外通道大气透过率模式的构建

由前面方差分析得到,影响热红外波段大气透过率的关键因子为水汽量W、气溶胶模型、能见度V和观测天顶角θ。因此,针对不同类型的气溶胶模型,利用大气透过率查找表的数据,构建基于水汽含量、能见度和观测天顶角的常用卫星传感器热红外通道大气透过率经验模式。常用的卫星传感器有:我国极轨气象卫星FY3的传感器MERSI和VIRR、环境减灾卫星HJ-1的红外相机IRS、海洋水色卫星HY-1B的水温水色扫描仪COCTS,美国极轨气象卫星NOAA的AVHRR、陆地资源卫星Landsat-7/ETM+和Landsat-8/TIRS、TERRA和AQUA卫星的MODIS。通过回归分析建立各传感器热红外通道的大气透过率多元线性回归模型,其一般形式可表示为:

$$\tau = a + b \cdot W + c \cdot V + d \cdot \cos(\theta)$$

式中:τ为大气透过率;W为大气水汽量,单位为g/cm<sup>2</sup>;θ为观测天顶角;a、b、c和d为模型的系数,不同气溶胶模型下常用传感器大气透过率模型的系数见表3。建模的样本数为40 320,经回归方程的显著性F检验,以大气透过率为应变变量与3个自变量之间的关系都达到0.01的极显著水平,说明所建的模型能很好地描述大气透过率与3个变量的线性关系。从表3可见,针对不同气溶胶模型所建的传感器热红外通道的大气透过率回归模型中,大气透过率与水汽量呈负相关、与能见度和观测天顶角余弦呈正相关;对流层模式模型的决定系数最高,达到0.945、辐射雾模式模型的决定系数相对较低,在0.770以上。说明所建的模型能很好地描述大气透过率与3个变量的线性关系,模型具有较高的精度。

表 3 不同气溶胶模型的常用卫星传感器大气透过率模式

Tab.3 Atmospheric transmittance models of common satellite sensors for different aerosol models

Sensor	Chan- nel No.	Central wave- length	Rural					Maritime					Urban				
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$
FY3/ MERSI	5	11.250	0.5873	-0.1310	0.00351	0.3806	0.872	0.5215	-0.1256	0.00467	0.3862	0.831	0.5682	-0.1294	0.00385	0.3825	0.859
FY3/ VIRR	4	10.829	0.5818	-0.1263	0.00374	0.3819	0.859	0.5226	-0.1217	0.00479	0.3873	0.822	0.5672	-0.1252	0.00401	0.3834	0.849
HJ-1B/ IRS	5	12.045	0.6041	-0.1448	0.00315	0.3663	0.890	0.5156	-0.1366	0.00465	0.3728	0.840	0.5763	-0.1423	0.00363	0.3688	0.873
HJ-1B/ IRS	4	11.576	0.5960	-0.1373	0.00332	0.3755	0.883	0.5210	-0.1309	0.00462	0.3815	0.837	0.5729	-0.1354	0.00373	0.3776	0.868
HY/ COCTS	9	10.850	0.5347	-0.1301	0.00329	0.3966	0.882	0.4802	-0.1253	0.00426	0.3995	0.846	0.5198	-0.1288	0.00356	0.3976	0.872
COCTS	10	11.950	0.6083	-0.1436	0.00321	0.3663	0.888	0.5219	-0.1358	0.00468	0.3730	0.839	0.5813	-0.1412	0.00368	0.3688	0.872
NOAA/ AVHR	4	10.770	0.5818	-0.1236	0.00382	0.3815	0.852	0.5223	-0.1192	0.00488	0.3872	0.815	0.5675	-0.1226	0.00408	0.3830	0.843
R	5	11.980	0.6024	-0.1441	0.00316	0.3675	0.890	0.5161	-0.1361	0.00463	0.3738	0.840	0.5753	-0.1417	0.00363	0.3698	0.873
TER- RA/ AQUA/ MODIS	31	11.091	0.5956	-0.1296	0.00363	0.3770	0.866	0.5320	-0.1246	0.00474	0.3829	0.826	0.5777	-0.1283	0.00394	0.3788	0.854
AQUA/ MODIS	32	12.032	0.6054	-0.1448	0.00315	0.3659	0.890	0.5172	-0.1366	0.00465	0.3724	0.840	0.5777	-0.1423	0.00363	0.3684	0.873
Land- sat-7/ ETM+	6	11.457	0.6014	-0.1358	0.00340	0.3740	0.879	0.5289	-0.1298	0.00467	0.3803	0.834	0.5794	-0.1340	0.00379	0.3762	0.865
Land- sat-8/ TIRS	10	10.900	0.5757	-0.1249	0.00370	0.3853	0.860	0.5161	-0.1203	0.00476	0.3906	0.821	0.5602	-0.1237	0.00398	0.3868	0.849
TIRS	11	12.000	0.6094	-0.1444	0.00319	0.3651	0.889	0.5212	-0.1363	0.00469	0.3719	0.839	0.5817	-0.1420	0.00367	0.3676	0.872

Sensor	Chan- nel No.	Central wave- length	Tropospheric					Advective fog					Radiative fog				
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$
FY3/ MERSI	5	11.250	0.7380	-0.1419	0.00085	0.3544	0.955	0.0448	-0.0760	0.01039	0.3987	0.807	0.3683	-0.1121	0.00705	0.3982	0.781
FY3/ VIRR	4	10.829	0.7421	-0.1375	0.00089	0.3536	0.953	0.0212	-0.0713	0.01075	0.4013	0.813	0.3918	-0.1108	0.00688	0.3984	0.776
FY3/ VIRR	5	12.045	0.7348	-0.1556	0.00091	0.3453	0.953	0.0793	-0.0851	0.00962	0.3789	0.797	0.3187	-0.1162	0.00741	0.3860	0.792
HJ-1B/ IRS	4	11.576	0.7369	-0.1482	0.00086	0.3517	0.956	0.0661	-0.0810	0.01001	0.3918	0.802	0.3479	-0.1145	0.00721	0.3941	0.787
HY/ COCTS	9	10.850	0.6763	-0.1412	0.00076	0.3766	0.960	0.0344	-0.0750	0.00966	0.3906	0.805	0.3529	-0.1133	0.00630	0.4046	0.796
COCTS	10	11.950	0.7424	-0.1545	0.00090	0.3441	0.953	0.0776	-0.0845	0.00977	0.3819	0.799	0.3282	-0.1162	0.00742	0.3870	0.790
NOAA/ AVHR	4	10.770	0.7445	-0.1346	0.00091	0.3522	0.950	0.0143	-0.0694	0.01092	0.4037	0.815	0.3932	-0.1087	0.00695	0.3988	0.770
R	5	11.980	0.7342	-0.1550	0.00089	0.3463	0.953	0.0782	-0.0848	0.00964	0.3800	0.798	0.3234	-0.1163	0.00735	0.3867	0.792
TER- RA/ AQUA/ MODIS	31	11.091	0.7524	-0.1407	0.00085	0.3486	0.953	0.0391	-0.0746	0.01063	0.4003	0.809	0.3834	-0.1119	0.00707	0.3959	0.777
AQUA/ MODIS	32	12.032	0.7366	-0.1557	0.00090	0.3447	0.953	0.0796	-0.0851	0.00964	0.3791	0.797	0.3206	-0.1163	0.00741	0.3858	0.792
Land- sat-7/ ETM+	6	11.457	0.7469	-0.1468	0.00086	0.3486	0.955	0.0627	-0.0799	0.01021	0.3944	0.804	0.3601	-0.1142	0.00721	0.3937	0.784
Land- sat-8/ TIRS	10	10.900	0.7340	-0.1359	0.00087	0.3575	0.953	0.0219	-0.0710	0.01070	0.4033	0.812	0.3808	-0.1091	0.00692	0.4016	0.774
TIRS	11	12.000	0.7423	-0.1553	0.00091	0.3432	0.953	0.0790	-0.0849	0.00973	0.3805	0.798	0.3246	-0.1163	0.00745	0.3861	0.791

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

通过以上分析,得出以下结论:

(1) 利用 MODTRAN 模型,并对模型中的主要参数(大气模型、水汽含量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角)设置不同的值,构建了热红外波段大气透过率查找表;利用查找表的数据,分析了这 5 个参数对大气透过率光谱曲线的影响,结果表明:在相同条件下,不同大气模型对大气透过率没有影响;随着水汽量的增加,大气透过率逐渐减小,水汽量与大气透过率呈显著的负相关;不同气溶胶模型对大气透过率的影响由大到小依次为:对流层模式、乡村型、海洋型、城市型、辐射雾模式、平流雾模式;随着能见度的增加,大气透过率也随之增加,两者呈现一定的正相关;当观测天顶角在  $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$  变化时,大气透过率逐渐减小,与天顶角的余弦成正相关。

(2) 以任意一个波段的大气透过率为应变量、5 个参数为自变量进行了方差分析,结果表明:大气模型对大气透过率影响不显著,水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角对大气透过率具有极显著的影响;这 4 个变量对大气透过率的影响程度由大到小依次是水汽量、气溶胶模型、能见度和观测天顶角。

(3) 针对 6 种不同的气溶胶模型,构建了常用卫星传感器热红外通道的大气透过率与水汽含量、能见度和观测天顶角的多元线性回归模型。所有模型都通过了 F 显著性检验,决定系数均在 0.770 以上,说明所建的模型能很好地描述大气透过率与 3 个变量的线性关系。

#### 3.2 讨论

大气透过率是热红外遥感的关键参数,文中基于辐射传输模型 MODTRAN,构建了大气透过率查找表,分析了影响大气透过率的关键因子,建立了常用卫星传感器热红外通道大气透过率的多元线性回归模型,具有较高的精度。在以往的大气透过率经验模型<sup>[14-15]</sup>中,影响大气透过率的主要变量是水汽量,而文中的研究表明:气溶胶的类型、形状、大小(气溶胶模型)、浓度(能见度)、大气斜程(观测天顶角)都会对热红外波段大气透过率造成显著的影响,因此,针对不同气溶胶模型构建的大气透过率多元线性回归模型具有很好的适用性。由于文中缺乏实测大气透

过率资料,没有对所建的大气透过率模式进行直接的验证,这是论文的不足之处,希望在以后的研究中加以完善和补充,不断提高大气透过率模式的精度。

#### 参考文献:

- [1] Tian Guoliang. Thermal Infrared Remote Sensing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)  
田国良. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [2] Wei Heli, Song Zhengfang. The calculation of infrared atmospheric transmittance [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1995, 14(2): 159-160. (in Chinese)  
魏合理, 宋正方. 红外辐射大气透射率的计算 [J]. 红外与毫米波学报, 1995, 14(2): 159-160
- [3] Yang Manzhong, Song Jinsong, Yin Jian. Method research on the calculation ratio of atmospheric transmission of infrared radiation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 601-603. (in Chinese)  
杨满忠, 宋劲松, 尹健. 红外辐射的大气透过率计算方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(2): 601-603.
- [4] Meng Fanbin, Zheng Li. LOWTRAN7 -based calculation method of IR transmittance in the atmosphere [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2009, 24(3): 29-33. (in Chinese)  
孟凡斌, 郑丽. 基于 LOWTRAN 7 的红外大气透过率计算方法[J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 29-33.
- [5] Gu Xiaoping, Meng Weiliang, Yu Fei, et al. Estimation of atmospheric transmittance in thermal infrared in Guiyang band from Landsat on MODTRAN 4[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 148-152. (in Chinese)  
谷晓平, 孟维亮, 于飞, 等. 基于 MODTRAN 4 的贵阳市 Landsat 热红外波段大气透过率估计 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 148-152.
- [6] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)  
陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.
- [7] Liu Dandan, Huang Yinbo, Dai Congming, et al. Effect of changes of HITRAN database on transmittance calculation in mid-infrared region along vertical uplink [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1776-1782. (in Chinese)  
刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 不同版本 HITRAN 数据库中红外波段上行传输透过率的计算 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1776-1782.

- [8] Zhang Guangshun, Zhang Yu xiang, Wu Chengquan, et al. the atmospheric transmissivity measurement in infrared window region[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1993, 4(2): 212–217. (in Chinese)  
张广顺, 张玉香, 吴承权, 等. 红外窗区大气透过率的测量[J]. *应用气象学报*, 1993, 4(2): 212–217.
- [9] Wu Chengquan, Wang Baohua, Wang Guanghua, et al. Measurement of atmospheric transmittance in infrared window region in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1996, 4: 47–55. (in Chinese)  
吴承权, 王保华, 王光华, 等. 北京红外窗区大气透过率观测[J]. *气象科技*, 1996, 4: 47–55.
- [10] Zang Shouhong, Bai Yunta, Ouyang Yi. Research on atmospheric transmittance measuring method [J]. *Infrared*, 2009, 3: 26–29. (in Chinese)  
臧寿洪, 白云塔, 欧阳艺. 大气透过率测量方法的研究[J]. *红外*, 2009, 3: 26–29.
- [11] Lu Yuan. Simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation on slanting route [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 423–426. (in Chinese)  
路远. 斜程红外辐射大气透射率的简易计算[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 423–426.
- [12] Zhou Guohui, Liu Xiangwei, Xu Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331–334. (in Chinese)  
周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. *红外技术*, 2008, 30(6): 331–334.
- [13] Song Wei, Shao Li, Wang Yafu. Calculation of atmospheric infrared absorption transmittance in different vertical heights [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(3): 14–17. (in Chinese)  
宋伟, 邵立, 汪亚夫. 不同垂直高程大气红外吸收透过率的计算[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(3): 14–17.
- [14] Qin Z, Olmo G D, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA –advanced very high resolution radiometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D19): 22655–22670.
- [15] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (18): 3719–3746.
- [16] Kneizys F X, Robertson D C, Abreu L W, et al. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model [R]. F19628–91–C–0132, 1996: 1–261.
- [17] Song Sufang, Qin Haorong, Zhao Pin. Biostatistics [M]. Beijing: Publishing House of China Agriculture University, 2008. (in Chinese)  
宋素芳, 秦豪荣, 赵聘. *生物统计学* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.