

不同海拔地区红外大气透过率的计算和测量

王飞翔¹, 郭杰^{1*}, 许方宇^{2*}, 张雨辰², 陈双远²,

肖建国³, 贾钰超³, 罗宏³, 赵志军^{2,4}

(1. 云南师范大学 云南省光电信息技术重点实验室, 云南 昆明 650216;

2. 中国科学院 云南天文台, 云南 昆明 650216;

3. 云南北方驰宏光电有限公司, 云南 昆明 650217;

4. 河南师范大学 物理与材料科学学院, 河南 新乡 453000)

摘要: 为了得到不同海拔地区的大气透过率, 探索大气透过率随海拔高度的变化规律, 利用数值模拟、软件计算和实地测量方法分别对阿里(5 km)、德令哈(3 km)和怀柔(0 km)3个不同海拔地区在4.605~4.755 μm波段25 km以下的大气透过率进行了计算和测量。结果表明: 红外大气透过率随海拔高度增加而增加; 采用数值模拟计算得到3个地方的大气透过率分别为0.709、0.572和0.555; 采用软件计算得到的透过率分别为0.849、0.766和0.596; 采用实测方法得到的透过率分别为0.805、0.766和0.673; 阿里地区海拔较高, 相对湿度较低, 能见度高, 大气透过率最好。该结论对国内天文红外观测及空间红外目标辐射特性测量具有重要的借鉴意义。

关键词: 中波红外; 大气透过率; 数值模拟; 海拔高度; 能见度; 辐射测量

中图分类号: O434.3; TN215; P422.6+1 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20191204.0843

Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes

WANG Fei-xiang¹, GUO Jie^{1*}, XU Fang-yu^{2*}, ZHANG Yu-chen², CHEN Shuang-yuan²,

XIAO Jian-guo³, JIA Yu-chao³, Luo Hong³, ZHAO Zhi-jun^{2,4}

(1. *Yunnan Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology,*

Yunnan Normal University, Kunming 650216, China;

2. *Yunnan Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;*

3. *Yunnan KIRO-CH Photonics Co. Ltd, Kunming 650217, China;*

4. *College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China)*

* *Corresponding author, E-mail: ynnugj@sohu.com*

Abstract: In order to obtain atmospheric transmittance and study its variation with different altitudes, using methods of mathematical models, software simulations, and actual measurement, we calculate and measure the

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11803089)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11803089)

atmospheric transmittance in the range of 4.605 ~ 4.755 μm wavelengths at Ali(5 km), Delingha(3 km) and Huairou(0 km), three different altitudes below 25 km. Results indicate that the infrared atmospheric transmittance increases with altitude. With mathematical model the calculated atmospheric transmittances are 0.709, 0.572 and 0.555, respectively. With software simulations the calculated atmospheric transmittances are 0.849, 0.766 and 0.596, respectively. With actual measurement the obtained atmospheric transmittances are 0.805, 0.766 and 0.673. Due to higher altitude, lower relative humidity, high visibility, the atmospheric transmittance at Ali is the highest one. This conclusion has important reference significance for domestic astronomical infrared observation and spatial infrared target radiation characteristics measurement.

Key words: mid-wavelength infrared; atmospheric transmittance; numerical simulation; altitude; visibility; radiation measurement

1 引言

大气透过率是影响空间红外目标探测的重要因素,目标的辐射强度与透过率共同决定到达探测系统的信号强度。军事领域中,飞机、导弹等对红外目标的跟踪、警戒、搜索都受大气透过率的影响,而且大气透过率往往为决定性因素;天文红外观测中,大气透过率影响天文目标测量的准确度;在遥感影像中,大气透过率是大气校正的主要参数。通常,获得大气透过率的方法有数值模拟、软件计算和实地测量3种。数值模拟方法一般是利用经验公式计算。路远等人提出一种红外辐射大气透过率的简易计算方法^[1]。他们利用实验数据得到了大气中水蒸气和二氧化碳的光谱吸收系数,从而计算透过率。在计算透过率的过程中,可降水量容易测得^[2],所以利用数值模拟可以方便快捷地获取当地红外波段平均大气透过率。数值模拟计算大气透过率精度稍差,对精度要求不高的工作中可使用此方法。对于软件计算,国内外关于模拟大气透过率的软件有很多,国外有LOWTRAN、MODTRAN和FASCODE等软件;国内,魏合理等人研制了一套通用中分辨率大气传输计算软件(Combined Atmospheric Radiative Transfer, CART)。该软件的大气透过率相对误差在10%~15%之间^[3]。大气透过率软件计算的精度依赖于当地探空气象数据的完整性。我国幅员辽阔,地形复杂,探空站点密度较低,探空数据完整性不足,而高精度计算要施放探空气球获取气象数据^[4],并且无法探究红外大气透过率随时

间的变化规律。对于实际测量,王浩等人利用Langley法标定太阳/恒星辐射强度,得到532 nm和1 064 nm波长处的整层大气透过率^[5];J. C. Bhattacharyya等人通过在不同天顶角下测量红外标准星经过大气后的辐亮度,进而得到大气透过率^[6-7]。赵志军、许方宇等人发展了不依赖标准星的红外大气透过率测量方法,通过他们发明的红外辐射测量装置对大气透过率进行了实测^[8-9]。大气透过率实测法能够反映大气透过率在一段时间的变化规律,但是无法探究是何种因素导致大气透过率的不同。基于分层大气,本文建立了红外波段平均大气透过率的数值模型,分析了不同海拔高度处,可降水量和二氧化碳含量等对大气透过率的贡献,并将大气透过率数值模拟结果同MODTRAN软件计算结果以及西藏阿里、青海德令哈和北京怀柔三地实测的大气透过率数据进行了对比。不仅获得了3个观测站的红外大气透过率,而且验证了3种方法的准确性;更重要的是,通过对比能够很清晰地看出大气中哪些因素对红外大气透过率的影响是主导性的;也可以看到在哪些波长位置大气红外透过率更高,帮助人们更加立体地掌握红外大气透过率的规律。

2 大气透过率数值模拟

影响大气透过率的主要因素是大气分子吸收和大气散射。学者们把大气在垂直方向上分成 N 层^[10],每层厚度为 Δh ,假设每层内部温度是相同的、且分子处于热平衡状态,若已知每一小段路径的大气透过率,那么总的大气透过率就为每小段

透过率的乘积:

$$\tau(\lambda) = \prod_{i=1}^n \tau_i(\lambda), \quad (1)$$

其中, $\tau_i(\lambda)$ 表示第 i 层的大气透过率, 最靠近地面的这一层定义为第一层。

实际大气透过率测量通常是在一个波长范围内进行的, 本文所涉及的大气透过率均是 4.605 ~ 4.755 μm 波段内的平均透过率。对于吸收引起的衰减, 25 km 以下部分主要由水蒸气和二氧化

碳的吸收引起衰减, 用 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ 表示水蒸气吸收透过率, τ_{CO_2} 表示二氧化碳吸收透过率, τ_{sc} 表示散射透过率, 则总的透过率可以用式(2)表示:

$$\tau = \tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \tau_{\text{CO}_2} \cdot \tau_{\text{sc}}. \quad (2)$$

2.1 吸收透过率计算方法

水蒸气对红外辐射的吸收能力用可降水量 w 来表示。下面给出了 4.6 ~ 4.8 μm 处海平面路径上水蒸气含量和平均大气透过率表。

表1 海平面水汽含量与平均大气透过率的关系(4.6 ~ 4.8 μm 处)^[11]

Tab.1 The relationship between the water vapor content in the sea level and the average atmosphere transmittance (from 4.6 ~ 4.8 μm)^[11]

$\lambda/\mu\text{m}$	Water vapor content/mm						
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
4.6	0.996	0.992	0.983	0.969	0.946	0.893	0.830
4.7	0.992	0.985	0.970	0.949	0.916	0.845	0.760
4.8	0.975	0.959	0.926	0.889	0.837	0.733	0.621

这里以 4.6 μm 为例将表1的数据用 $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = Aw^B + C$ 的形式进行拟合^[12], 得到了可降水量 w 和大气透过率的拟合函数, 通过此函数就能得到 4.6 μm 波长任意可降水量下的大气透过率:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = -0.03701 \times w^{0.6765} + 1.005. \quad (3)$$

拟合均方根误差 RMSE 为 0.001482。为了确保可降水量 $w = 0$ 时, 透过率等于 1, 令 $C = 1$, 即把拟合函数形式改成了 $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = Aw^B + 1$, 式(4)是重新拟合后的函数, 图1是重新拟合后的函数图

像。

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = -0.03198 \times w^{0.7301} + 1. \quad (4)$$

对于海平面大气, 可以用下列公式计算可降水量 w :

$$w = H_r \times H_a \cdot \Delta h, \quad (5)$$

其中, H_r 表示的是相对湿度, 可通过探空数据得到, H_a 表示饱和水蒸气含量(0海拔, 100%相对湿度, 每千米的水蒸气含量; 与温度相关)可通过查表得到^[13], Δh 是辐射在该层内的传输距离, 天顶角为零时即为该层的厚度。

当海拔升高时, 水蒸气的压强和温度都会降低, 为了得到海拔高度 h 下传输路程 Δh 的等效值(等效海平面路程); 把 Δh 乘上一个修正系数:

$$\Delta h_0 = \Delta h \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{0.25}, \quad (6)$$

其中, p 为高度 h 处的大气压强, p_0 为海平面上的大气压强, T_0 是海平面处的温度, T 是高度为 h 处的温度。 p 和 T 均用探空卫星数据经插值细化得到。根据以上对水蒸气的修正, 式(5)就变成了

$$w = H_r(h) \times H_a \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{0.25}. \quad (7)$$

将式(7)带入式(4)可得到不同海拔高度, 由水蒸气吸收引起的大气透过率:

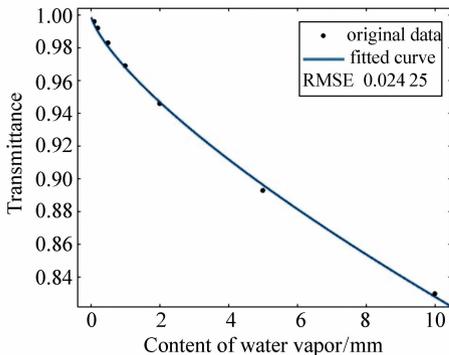


图1 波长为 4.6 μm 时水汽含量和平均大气透过率拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of the relationship between the content of water vapor and average atmosphere transmittance (when λ is 4.6 μm)

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} - 0.03198 \times [H_r(h) \times H_a \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{0.25}]^{0.7301} + 1. \quad (8)$$

大气中的二氧化碳浓度比较稳定,基本不随

时间、空间位置变化,因此在某一高度处,透过率基本由传播距离决定。下面给出了 4.6 ~ 4.8 μm 处海平面路径上二氧化碳平均透过率表, τ_{CO_2} 表示二氧化碳的吸收透过率。

表 2 海平面二氧化碳含量与大气平均透过率的关系(4.6 ~ 4.8 μm 处)^[14]

Table 2 The relationship between the content of Carbon dioxide in the sea level and the average atmosphere transmittance(from 4.6 ~ 4.8 μm)^[14]

λ/nm	Path length/km									
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	
4.6	1	1	0.999	0.998	0.996	0.991	0.982	0.969	0.939	
4.7	1	0.999	0.996	0.991	0.982	0.955	0.917	0.855	0.719	
4.8	0.990	0.981	0.956	0.920	0.865	0.754	0.634	0.486	0.261	

同样地,以 4.6 μm 为例,对表 2 的数据用 $T = A(\Delta h)^B + C$ 的形式进行拟合; (Δh) = 0 时理论上透过率应当等于 1,因此把拟合函数形式改成了 $T = A(\Delta h)^B + 1$,式(9)是拟合后的函数。

$$\tau_{\text{CO}_2} = -0.002804 \times (\Delta h)^{0.7362} + 1, \quad (9)$$

图 2 则是拟合函数的图像。

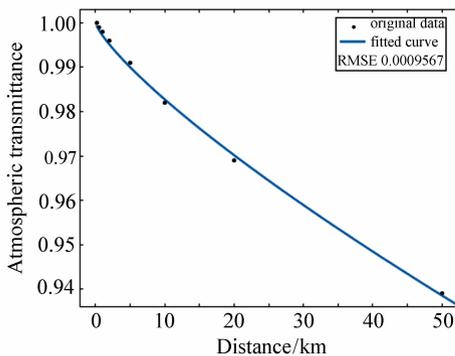


图 2 波长为 4.6 μm 时二氧化碳含量和大气透过率拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of the relationship between carbon dioxide content and atmosphere transmittance (when λ is 4.6 μm)

二氧化碳的吸收也会受到压强和温度的影响,温度影响相对小,可以忽略,二氧化碳的等效距离 Δh_0 则可以表示为:

$$\Delta h_0 = \Delta h \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1.5}. \quad (10)$$

将式(10)带入式(9)可以得到不同海拔高度下由二氧化碳吸收引起的透过率:

$$\tau_{\text{CO}_2} = -0.003427 \times \left[\Delta h \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1.5}\right]^{0.7362} + 1. \quad (11)$$

同样,大气压力 p 可用探空卫星的不同海拔高度下的数据插值细化得到。

2.2 散射透过率计算方法

大气的散射主要是由于分子和悬浮粒子的散射造成的。由 Gail Lambert's law 可知:

$$\tau_{\text{SC0}} = \exp\left[-\frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \times \Delta h\right], \quad (12)$$

其中, τ_{SC0} 是海平面处的散射透过率,由于大气中散射影响因素较为复杂,这里用大气能见度来表征大气中颗粒的散射衰减系数, V 是大气能见度, q 是常数,当能见度在 6 ~ 50 km 时取 1.3(本文实验都属于这种情况)。

散射粒子浓度也随着高度的改变而变化,因此也需要修正。公式(13)给出了海拔高度为 h 时的计算方法:

$$\tau_{\text{SC}}(h) = \tau_{\text{SC0}}^{\exp(-h/h_\sigma)}, \quad (13)$$

其中, h_σ 称为特征高度,一般 $h_\sigma = 1.2$ km。那么不同海拔高度下的由散射引起的透过率可以表示为:

$$\tau_{\text{SC}} = \left\{ \exp\left[-\frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{1.3} \times \Delta h\right] \right\}^{\exp(-h/1.2)}. \quad (14)$$

2.3 数值模拟计算结果

当某一地点各海拔高度下的温度、压强、相对湿度和能见度确定了,就可以通过式(8)、式

(11)、式(14)来计算透过率。由于阿里、德令哈、怀柔没有气象站,因此选取了离这 3 地相对最近,且气候条件较为近似的站点数据来替代:阿里用拉萨气象数据近似,青海德令哈用青海都兰县数据替代,怀柔则用北京的数据来表示。图 3(a)是实地测量时拉萨、都兰县、北京的温度随高度变化的探空数据,图 3(b)是相对湿度随高度变化的探

空数据,图 3(c)是压强随高度变化的探空数据。当气象数据间隔大于计算需求时,中间数据采取插值法得到。本文只计算了 25 km 以下的部分。分别用 τ_a 、 τ_b 、 τ_c 表示阿里、德令哈和怀柔的透过率,把大气每 20 m 分为一层,假设每层处于热平衡状态,粒子分布均匀,取每小段中间处的温度、湿度、压强代表该层的情况。

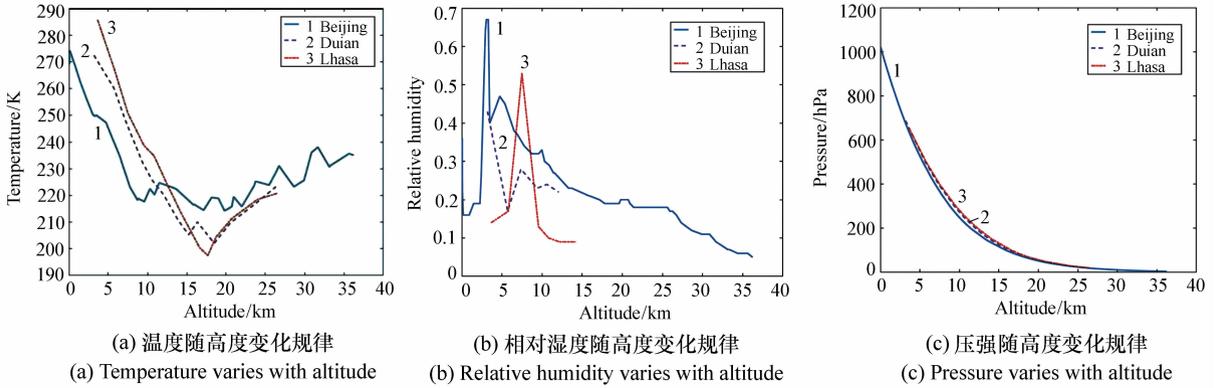


图 3 拉萨、都兰县、北京探空数据

Fig. 3 The sounding data of Lhasa, Dulan and Beijing

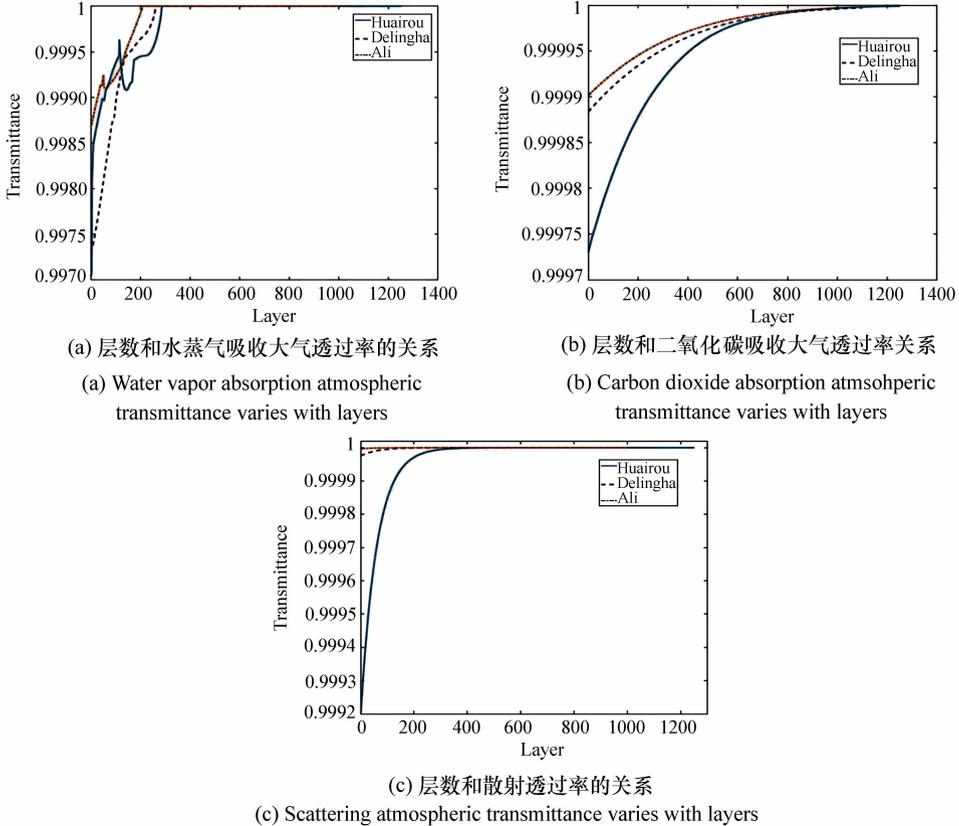


图 4 3 个地区层数和透过率关系

Fig. 4 Relationship between layers and atmospheric transmittance in three regions

通过图 3(a)、3(b)、3(c) 以及式(8)、式(11)和式(1)即可得到由水蒸气、二氧化碳吸收引起的大气透过率。图 4(a)、4(b)是阿里、德令哈和怀柔在 4.6 μm 处每一层由吸收引起的透过率。使用同样的方法计算出了 4.7 μm 以及 4.8 μm 处的二氧化碳透过率,结果见表 3。

计算散射透过率时,采取和吸收同样的分层,需要测试 4.605 ~ 4.755 μm 波段内的散射透

率。由于这个波段较窄,本文用 $\lambda = 4.680 \mu\text{m}$ 来替代这一波段内的平均情况。测试时,阿里的大气能见度为 20 km,德令哈的大气能见度为 15 km,怀柔的大气能见度为 6 km。通过式(14)可分别算出每层的散射透过率,图 4(c)是 3 个地方每一层的散射透过率的情况。通过式(1)将 3 个地方的散射透过率汇总于表 3。

表 3 3 个地区大气透过率数值模拟计算结果

Tab. 3 Calculation results of atmospheric transmittance in three regions with mathematical models

地点	波长/ μm	$\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	τ_{CO_2}	τ_{sc}	τ	τ_{av}
Ali	4.6	0.872	0.982	0.9998	0.857	0.709
	4.7	0.743	0.913	0.9998	0.678	
	4.8	0.291	0.028	0.9998	0.008	
Delingha	4.6	0.770	0.978	0.9985	0.752	0.572
	4.7	0.582	0.894	0.9985	0.519	
	4.8	0.128	0.016	0.9985	0.002	
Huairou	4.6	0.804	0.966	0.953	0.740	0.555
	4.7	0.625	0.839	0.953	0.500	
	4.8	0.148	0.003	0.953	0.0005	

得到了大气中的吸收透过率和散射透过率后,由式(2)可得总的大气透过率。本文对 4.6 ~ 6.8 μm 的大气透过率做了加权平均处理,得到阿里地区、德令哈和怀柔 4.605 ~ 4.755 μm 波段内的平均透过率见表 3。

通过数值模拟发现,红外大气透过率随波长起伏剧烈,在 4.6 μm 处透过率高,在 4.8 μm 处低,这是由于水蒸气和二氧化碳在 4.8 μm 处有吸收峰。表中数据显示,阿里观测站的大气透过率是这 3 个站点里最高的,怀柔观测站则最低。原因是阿里观测站的海拔高达 5 km,且较干燥,大气中的水汽含量低,辐射经过二氧化碳的路径短,因此吸收较小,导致阿里观测站透过率高,其次由于阿里观测站能见度是这 3 个站点中最高的,散射对透过率的影响降低。综合看来,海拔的高低会影响温度的高低进而影响空气中水蒸气的含量,同时海拔高的地方二氧化碳吸收就少,这也

是造成透过率高的原因之一。

3 大气透过率的软件计算

本文用 MODTRAN 对怀柔、德令哈、阿里地区的大气透过率进行了模拟,波长范围是 4.605 ~ 4.755 μm ,大气模型为中纬度冬季,分别得到了 3 地的大气透过率,如图 5 所示。图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)分别是 3 个地方水蒸气吸收、二氧化碳吸收、散射所引起的大气透过率和总大气透过率曲线。

软件计算表明:随着海拔的升高,吸收透过率和散射透过率增大,总透过率同计算结果呈现的规律相似,阿里地区 5 km 处的平均透过率最高为 0.849;德令哈 3 km 处平均透过率为 0.766;怀柔 0 km 处的平均透过率为 0.596。

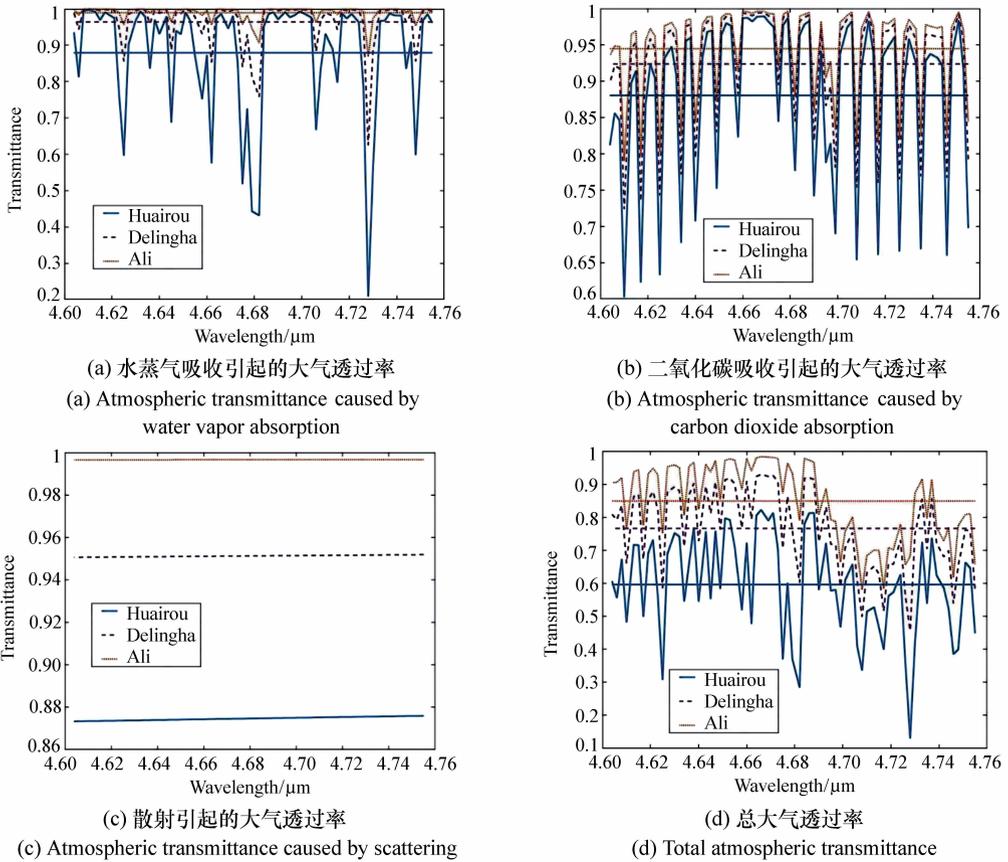


图 5 MODTRAN 模拟 3 地大气透过率结果

Fig. 5 Simulation results of atmospheric transmittances in three regions by MODTRAN

4 大气透过率的实际测量

4.1 仪器定标

本实验使用文献[15]的三元定标模型对仪器进行定标, 仪器输出值与信号间的关系为:

$$DN = 487\,546.142\,5 \times L_{\text{signal}} \times t + 8\,489.284\,8 \times L_{\text{amb}} \times t + 2.549\,2 \times t + 707.004\,7, \quad (15)$$

其中, DN 是仪器读数, t 是仪器积分时间; L_{signal} 在定标时是黑体积分辐亮度, 测量时是其信号的积分辐亮度; L_{amb} 是随环境温度变化的仪器辐射信号。等式右边第一项表示测量系统对目标辐射信号的响应; 第二项表示随环境温度而变化的仪器辐射随积分时间的变化; 第三项仅随着积分时间增涨, 它表示不随环境温度变化的仪器辐射、探测器暗电流等项随积分时间的变化; 第四项为截距项。

文献[16]指出仪器读数 DN 与天顶平均光学厚度 $\bar{\beta}$ 以及天顶角 θ 的关系:

$$DN = a(1 - e^{-\bar{\beta} \cdot \sec\theta}) + b = a[1 - (\bar{\tau}^{\sec\theta})] + b, \quad (16)$$

其中, a, b 是常数, 可以拟合得到, 天顶平均光学厚度 $\bar{\beta}$, 大气透过率 $\bar{\tau}$ 均可由观测数据直接拟合得到。

4.2 测量结果及数据处理

观测设备采用自己研制的红外大气辐射测量设备, 由于目前该设备只有一台, 因此采用轮测的方法于 2017 年 10 月 25 日、2017 年 11 月 10 日、2017 年 11 月 22 日分别对阿里 (5 km)、德令哈 (3 km) 以及怀柔 (0 km) 3 个观测站的大气透过率进行了实测。测量条件皆为晴天且无云, 在每个观测站均测量 10 组。每一组在很短的时间内测得不同天顶角的红外辐射。再通过式 (16) 拟合出每个地点的大气透过率。

具体实验步骤为:开机并等待仪器降温,待仪器读数稳定后开始测量,需在十几秒时间里对天

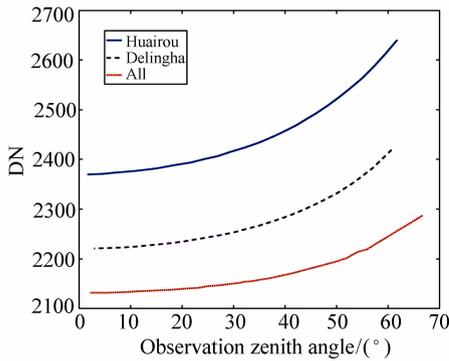


图 6 仪器读数随角度变化

Fig. 6 Variance of instrument effective readings with zenith angle

顶角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的天空进行“扫描”,测量多个位置的红外天空亮度;天顶角间隔约为 3° ,每个位置稍停留并记录多帧亮度数据。处理数据时,对每帧图像的各像元平均,然后把每个天顶角采集到的多帧数据进行平均,以降低随机噪声的影响。对所得数据再利用式(16)进行最小二乘拟合,即可得到 3 地的平均光学厚度和平均大气透过率。

通过对全部实测数据统计,得到阿里地区的平均大气透过率为 0.805;德令哈地区的平均大气透过率为 0.766 怀柔的平均大气透过率为 0.673。

5 对比与分析

把通过 3 种方法分别得到阿里、德令哈、怀柔 3 地之间的大气透过率汇总于表 4。

表 4 3 个地方大气透过率结果对照表

Tab. 4 Comparison of atmospheric transmittance results in three regions

	mathematical model	software simulation	actual measurement
Ali	0.709	0.849	0.805
Delingha	0.572	0.766	0.766
Huairou	0.555	0.596	0.673

通过对比 3 个地方的大气透过率发现,海拔高度对红外大气透过率具有显著影响。海拔 5 km 的阿里地区,因为其海拔较高,相对湿度较低,辐射经过的二氧化碳等分子的路径短,且能见度高,因此不管用哪种方法得到的结果中阿里地区的大气透过率都最好,其大气透过率能达到 0.8 以上。而 0 km 处的怀柔由于其海拔最低,其温度和湿度相对较高,辐射经过的二氧化碳等分子的路径最长,而且其能见度不如阿里地区和德令哈,发生散射的几率比较大,所以此处的大气透过率是这 3 个地方最低的,透过率约为 0.6。德令哈由于海拔位于两者之间,因此德令哈的大气透过率较怀柔高较阿里低,其值在 0.7 ~ 0.8 之间。就 3 地而言,对红外波段,怀柔透过率相对较低但是比较稳定,德令哈透过率好但是起伏却比较显著,其透过率的起伏接近其均值的一半。

6 结 论

本文分别利用数值模拟、软件计算和实地测量 3 种方法分析了西藏阿里、青海德令哈、北京怀柔 3 个地方的大气透过率情况。通过对比发现,数值模拟容易区分每一种因素对透过率的贡献;软件计算可以得到任意波长处的透过率;而实测是最直接的方法,可实时获得任意时刻任意地点的透过率。

此外,还发现,海拔对大气透过率的影响是间接的,高海拔通常对应着较低的水汽和二氧化碳含量,在 $4.605 \sim 4.755 \mu\text{m}$,阿里地区透过率最高,3 种方法得到的结果分别为:0.709、0.849、0.805;而德令哈次之,结果分别为 0.572、0.766、0.766;海拔最低的怀柔则透过率最低,分别为:0.555、0.596、0.673。

就3地总体而言,对红外4.605~4.755 μm 波段,对透过率影响最大的因素是大气积分水汽,二氧化碳的贡献较其要低一个数量级,散射的贡献又要再低一个数量级。另外,在这个相对比较狭窄的波段内,不同波长处透过率差异竟然很大:例如北京,4.67 μm 和4.69 μm 的大气透过率达到0.8,4.73 μm 处的大气透过率很低,只有0.1。因此讨论红外波段的大气透过率一定要明确波长位置与波段区间。还有一个值得注意的问题是,

同一地点大气红外透过率也可能随时间变化有明显起伏,起伏与透过率本身的数值关系不大,透过率高的地方也可能有大的变化。

无论是数值模拟还是软件计算,想要得到准确的大气透过率均依赖完整气象参数,而完整气象参数绝大多数时间、地点均是较难获取的。而实测方法无需掌握气象参数,可以相对方便地获得任意时间地点处的大气红外透过率,是唯一能够实时测量、分析透过率及其变化的方法。

参考文献:

- [1] 路远,凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. 红外技术,2003,25(5):45-49.
LU Y, LING Y SH. The simple method to calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*,2003,25(5):45-49. (in Chinese)
- [2] 宋腾飞,刘顺庆,张雪飞. 利用日晕光度计反演大气水汽含量[J]. 气象科技,2013,41(1):46-50.
SONG T F, LIU SH Q, ZHANG X F. Measurement of total precipitable water in atmosphere with sky brightness monitor [J]. *Meteorological Science and Technology*,2013,41(1):46-50. (in Chinese)
- [3] 魏合理,陈秀红,饶瑞中. 通用大气辐射传输软件(CART)介绍[J]. 大气与环境光学学报,2007,2(6):446-450.
WEI H L, CHEN X H, RAO R ZH. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*,2007,2(6):446-450. (in Chinese)
- [4] WALDEN V P, TOWN M S, HALTER B, et al. First measurements of the infrared sky brightness at dome C, antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*,2005,117(829):300-308.
- [5] 王浩,何枫,靖旭,等. 昼夜观测恒星整层大气透过率测量研究[EB/OL]. (2018-10-30) [2018. 11. 20] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20181029.0846.014.html>.
WANG H, HE F, JING X, et al. Study on measurement of total atmospheric transmittance in daytime and night observation stars [EB/OL]. (2018-10-30) [2018. 11. 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20181029.0846.014.html>. (in Chinese)
- [6] BHATTACHARYYA J C, SCARIAKK, SINGH J, et al. Atmospheric extinction measurements at Leh in near infrared bands [J]. *Bulletin of the Astronomical Society of India*,1990,18(18):1-6.
- [7] LIOUKN, BOHRENC. An introduction to atmospheric radiation[J]. *Physics Today*,1981,34(7):66-67.
- [8] 赵志军,许方宇,魏超群,等. 红外整层大气透过率测量方法研究[J]. 红外技术,2018,40(7):718-722.
ZHAO ZH J, XU F Y, WEI CH Q, et al. Study on measurement method for total infrared atmospheric transmittance[J]. *Infrared Technology*,2018,4(7):718-722. (in Chinese)
- [9] 陈双远,许方宇,王飞翔,等. 中红外大气背景辐射测量设备及误差分析[J]. 光学学报,2019,39(3):0301001.
CHEN SH Y, XU F Y, WANG F X, et al. Measurement equipment and error analysis of mid-infrared atmospheric background radiation[J]. *Acta Optica Sinica*,2019,39(3). (in Chinese)
- [10] 康大勇,成斌,高俊光. 地空红外探测距离推算方法探讨[J]. 光电技术应用,2009,24(1):29-32.
KANG D Y, CHENG B, GAO J G. Differentiation algorithm method of ground-air infrared detection range[J]. *Electro-Optic Technology Application*,2009,24(1):29-32. (in Chinese)
- [11] 刘林华,董士奎,余其铮,等. 红外1~14 μm 波长间隔0.1 μm 上大气平均透过率(Ⅱ)水蒸汽的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报,1999,31(6):75-78.
LIU L H, DONG SH K, YU Q ZH, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval 0.1 μm from infrared 1 to 14 μm , (Ⅱ) transmittance of water vapor[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,1999,31(6):75-78. (in Chinese)

- [12] ZHANG Y C, CHEN Y M, FU X B, *et al.*. The research on the effect of atmospheric transmittance for the measuring accuracy of infrared thermal imager[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77:375-381. (in Chinese)
- [13] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
ZHANG J Q, FANG X P. *Infrared Physics*[M]. Xian: Xidian University Press, 2007. (in Chinese)
- [14] 刘林华, 董士奎, 余其铮, 等. 红外 1~14 μm 波长间隔 0.1 μm 上大气平均透过率(I)二氧化碳的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(5):8-12.
LIU L H, DONG SH K, YU Q ZH, *et al.*. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval 0.1 μm from infrared 1 to 14 μm , (I) transmittance of carbon dioxide[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(5):8-12. (in Chinese)
- [15] 赵志军, 许方宇, 高玲, 等. 3~5 μm 红外天空亮度测量的多元定标模型[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10):1004004.
ZHAO ZH J, XU F Y, GAO L, *et al.*. Multivariate calibration model for measurement of 3-5 μm infrared sky brightness [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10):1004004. (in Chinese)
- [16] 赵志军, 许方宇, 徐世春, 等. 大气红外辐射及消光特性实测研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4):0401004-4-5.
ZHAO ZH J, XU F Y, XU SH CH, *et al.*. Measurement of atmospheric infrared radiance and extinction characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4):0401004-4-5. (in Chinese)

作者简介:



王飞翔(1995—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事红外辐射方面的研究。E-mail:77902374@qq.com.



郭杰(1979—),男,云南昆明人,博士,副教授,主要从事红外探测技术的研究。E-mail:yynnugj@sohu.com



许方宇(1972—),男,云南昆明人,博士,副研究员,2001年、2006年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事红外天文技术方面的研究。E-mail:xu_fangyu@yao.ac.cn