

# 可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究

范伟<sup>1</sup> 王毅<sup>2</sup> 饶瑞中<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家 863 计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 南京大学大气科学系, 南京 210093)

**摘要** 利用太阳光谱辐射计进行了可见到近红外波段整层大气连续光谱透过率的测量研究. 在对太阳辐射计可靠定标的条件下, 通过测量太阳直射光谱, 运用 Langley 方法推算到达大气层顶的太阳辐射, 最终获得了该波段范围内的连续大气光谱透过率及特殊波长上的透过率的实际变化情况. 通过分析晴天无云大气条件下不同时间、不同气溶胶含量、不同季节、不同气溶胶模式下的大气透过率特征, 初步获得了其变化规律, 为大气层外目标探测提供了一些基础.

**关键词** 太阳辐射计; 大气透过率; 太阳光谱; 连续光谱

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

## 0 引言

整层大气光谱透过率是反映大气辐射传输性质的重要参量, 在大气辐射、地球资源遥感、空气质量监测等领域, 都需要对透过率进行详细地研究<sup>[1,2]</sup>. 太阳辐射计可用于同时测量不同波长的太阳直接辐射和天空散射辐射, 由测量的太阳直接辐射结果可计算得到各个波长的大气光学厚度或透过率; 而通过测得的太阳直接辐射和天空散射光谱特性, 可以了解大气中气溶胶粒子的光学特性, 计算出水汽、臭氧以及氮氧化物等污染气体分子在整个大气层中的总含量<sup>[3]</sup>, 因此太阳辐射计被广泛运用于大气光学、气象研究和空气污染监测、探测等领域<sup>[2,4~6]</sup>.

但是通常所用的太阳辐射计测量得到的透过率谱特征都是分波长的, 采用干涉滤光片不能反映光谱特征, 结果仅仅局限于几个分立波长上的细节. 由于空间目标亮度的准确测量受到大气的影响, 大气层外目标反射的太阳辐射构成了目标亮度主要来源<sup>[7]</sup>. 空间目标亮度传播到地面时由于受到大气的衰减, 一般明显小于目标固有亮度. 根据利用光谱特征选择波段进行大气外目标探测的研究需要<sup>[7]</sup>, 需要对透过率的光学特性进行详细地了解, 才能获得准确的空间目标辐射亮度. 为此利用连续波长的太阳辐射计对整层大气光谱透过率进行了测量研究. 通过太阳辐射计的测量结果, 在可靠定标的基础上, 推算出实际大气模式下的大气透过率光谱特征, 分析了透过率的实际变化规律.

## 1 太阳辐射计的定标结果及透过率的计算

使用的光谱太阳辐射计是日本 PREDE 公司制造的自动跟踪太阳辐射计 PGS-100, 视场角是 1°, 波

长范围 350~1050 nm. 光谱分辨率是 3.6 nm, 探测器使用的是 Si-CCD, 它具有线性范围宽、响应速度快和噪音小等特点, 适用于辐射强度探测<sup>[3]</sup>. 从 350~1050 nm 的所有波长均用 Langley 方法<sup>[8,9]</sup>进行定标, 相关系数高于 0.99.

实际标定在一个晴天无云, 且地面水平能见度较高(约有 20 km)的一天进行(2003 年 11 月 25 日), 通过定标得到的到达天顶的太阳辐射对应的仪器测量值随波长的变化如图 1, 定标因子 C 如图 2.

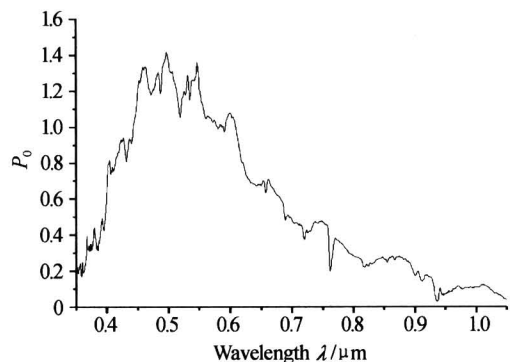


图 1 定标得到的到达天顶太阳辐射对应的仪器测量值随波长的变化

Fig. 1 The relation between the measured solar irradiance arriving at the top of the atmosphere and wavelength

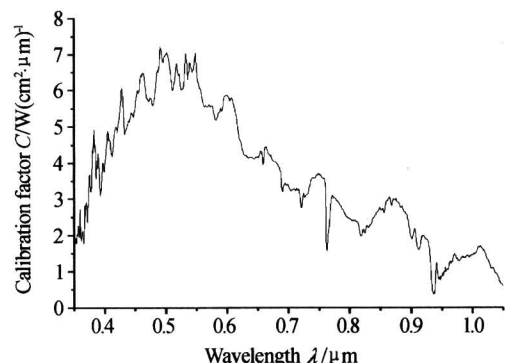


图 2 仪器定标因子随波长的变化

Fig. 2 The relation between the instrument calibration factor and wavelength

由太阳辐射计测量得到的大气斜程透过率 $t(\lambda)$ 为

$$t(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \quad (1)$$

式中 $P(\lambda)$ 是地面实测太阳辐射, $P_0(\lambda)$ 是通过Langley方法得到的天顶太阳辐射. 而 $t(\lambda) = \exp(-\tau m)$ , 其中 $\tau$ 是大气垂直光学厚度, $m$ 是大气质量

$$\tau = -\ln(t)/m \quad (2)$$

定义 $T(\lambda)$ 是大气垂直透过率,也就是从地面垂直到天顶的大气透过率,其计算表达式为

$$T = \exp(-\tau) \quad (3)$$

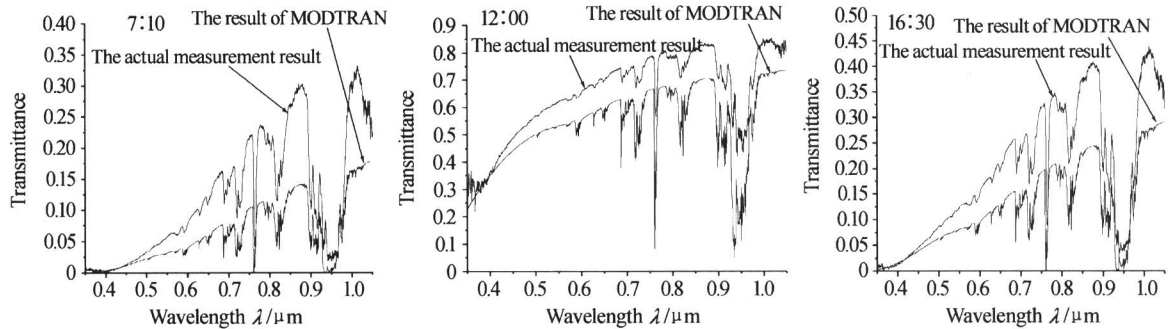


图3 早晨、中午和下午大气斜程透过率变化

Fig. 3 The relation between wavelength and transmittance at morning, noon and afternoon

和普遍认可的 MODTRAN 模拟计算得到的大气透过率结果进行比较,来验证结果的可靠性. 同时选择中纬度冬季大气模式,在早晨、中午和下午这三个时间段利用 MODTRAN 计算相应的斜程透过率,将它们与实验测量结果相比较.

从图中可以看出,实测的大气斜程透过率和 MODTRAN 计算结果有着非常相似的光谱特征,从而证明了实验得到的透过率光谱的正确性. 二者绝对值的差别主要在于 MODTRAN 的参量选择.

大气斜程透过率的光谱特征是:在可见光的短波区域,变化平缓,随着波长的增加呈缓慢增大趋势. 在近红外波段,有若干吸收峰. 在整个波段内,早上和下午与中午相比,当太阳高度很低时,总的太阳光谱能量会降低,整个透过率光谱分布会朝红区漂移<sup>[3]</sup>. 由此可见,早上和下午的短波太阳辐射被大气散射的部分更多,使得在接收到的太阳辐射中,长波辐射比例增加. 所以一天中当太阳天顶角相差较大时,可以从透过率光谱图中定性验证瑞利散射理论.

在可见光波段范围内,由于透过率光谱变化比较平缓,说明在此波段大气对太阳辐射基本上是透明的,没有强吸收. 可见光波段的 $0.685 \mu\text{m}$ 至 $0.705 \mu\text{m}$ , $0.73 \mu\text{m}$ 至 $0.755 \mu\text{m}$ ,红外波段的 $0.83 \mu\text{m}$ 至 $0.89 \mu\text{m}$ , $0.99 \mu\text{m}$ 至 $1.05 \mu\text{m}$ ,大气斜程透过率数值出现极大值,是比较理想的大气窗口.

在可见到近红外波段,主要吸收气体是氧气和水汽. 水汽主要集中在对流层下部,其含量与气温及天气形势有密切关系,随时间、地点有非常大的变化. 所以涉及到水汽吸收时,应考虑当时具体条件.

## 2 整层大气连续光谱透过率计算结果与分析

### 2.1 不同时刻对应于太阳方向的大气斜程透过率分析

选择冬季定标实验日,早晨7:10,中午12:00及下午16:30对应于太阳方向的大气透过率如图3. 由于这种能够得到连续波长的太阳光谱仪器很少在文献中出现,将得到的斜程大气透过率结果

图3中,在 $0.83 \mu\text{m}$ 和 $0.94 \mu\text{m}$ 附近的吸收峰主要是由水汽造成的;而均匀混合气体在可见光波段的吸收主要是氧气造成的,在 $0.68 \mu\text{m}$ 、 $0.73 \mu\text{m}$ 和 $0.76 \mu\text{m}$ 附近就是氧气的吸收峰. 需特别指出的是,在中午时分,氧气的吸收峰( $0.76 \mu\text{m}$ )的数值大约是大气窗口最大峰值的四分之三,水汽的吸收峰( $0.94 \mu\text{m}$ )大约是大气窗口最大峰值的二分之一;在早上和下午时分,这两处的吸收峰值基本上都已经到了极小值,其它的吸收峰的数值相比也显著地减少了. 也就是说,早晨和下午的吸收比中午更加强烈. 因此,当太阳天顶角逐渐增大时,越来越多的吸收峰附近的太阳光谱能量被主要是氧气和水汽等气体分子吸收.

在进行大气外目标探测时,需要对观测路径上整层的连续光谱透过率进行详细地研究,才能选择理想的波段对目标进行探测. 通过以上对不同时间段的从 $350 \sim 1050 \text{ nm}$ 连续透过率光谱地分析,可知从 $0.685 \mu\text{m}$ 至 $0.705 \mu\text{m}$ , $0.73 \mu\text{m}$ 至 $0.755 \mu\text{m}$ , $0.83 \mu\text{m}$ 至 $0.89 \mu\text{m}$ 以及从 $0.99 \mu\text{m}$ 至 $1.05 \mu\text{m}$ 这四个波段内,大气透过率起伏较小,变化平缓,平均数值较大,是比较理想的大气窗口. 选择以上波段作为目标探测的参考窗口,可以做到提高接收目标辐射强度以及增大探测器对目标的探测距离的效果,大大增加对目标的探测概率.

### 2.2 大陆型和海洋型天气系统下(不同纬度)相对于太阳方向的大气斜程透过率比较分析

2.1节给出的透过率光谱是选择在沿海地区进行测量所得到的结果. 又选择在内地进行实验. 实

验当天冷空气刚过,天气干燥,万里无云.选择中午和下午的实验结果与2.1节中同一测量时间的实验结果进行比较(中午和下午),如图4,横坐标是波长,单位是 $\mu\text{m}$ ,纵坐标是大气斜程透过率.

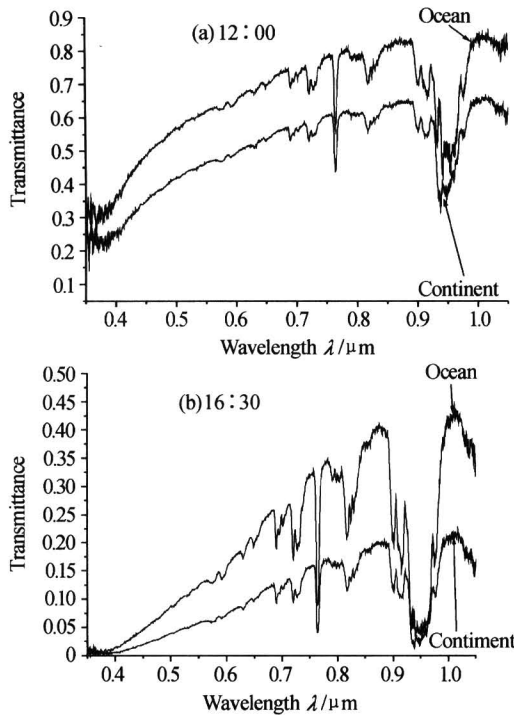


图4 大陆和沿海地区斜程透过率比较分析  
Fig. 4 The comparison between the transmittance of oceanic area and continental area

可见,在不同测量地区,即使测量时间很相近(仅相隔3周),但是由于纬度相差较大(沿海实验靠近热带地区,内地实验接近中纬度地区),从光谱的连续性可以看到两者的幅值相差明显,沿海地区得到的大气斜程透过率数值超过了内地得到的大气斜程透过率数值.

而且还可以看到,在沿海地区,整层连续大气透过率的水汽吸收峰( $0.94\ \mu\text{m}$ )明显地比在内陆测量的要强.主要原因是由沿海地区大气中相对较高的水汽含量造成的<sup>[10]</sup>.两地不同测量日期(日期相距很近),同一测量时间(中午和下午时刻),得到的最大峰值所在的波长均保持不变<sup>[10]</sup>, $\lambda=1020\ \text{nm}$ ,说明在天气晴朗、气溶胶含量很少的情况下,大陆性气溶胶模式和海洋性气溶胶模式对太阳光谱最大值对应的波长影响不大.

### 2.3 晴天不同气溶胶含量下实测的透过率比较

以上是选择天气条件非常好的定标的日子进行分析所得到的透过率结果,而对于气溶胶含量较多的晴天无云天气系统,还需要进行进一步地分析.因此选择冬季沿海地区进行实测,结果如图5.在图5(a)中,曲线1是天气系统很好的实验定标日上午8:00时对应于太阳方向的大气透过率,曲线2是天气系统较差的次日同一时间对应于太阳方向的

大气透过率,当天天空灰蒙蒙的,能见度较低.图5(b)中的曲线1和曲线2,分别是这两天中午12:00时相应的大气透过率.

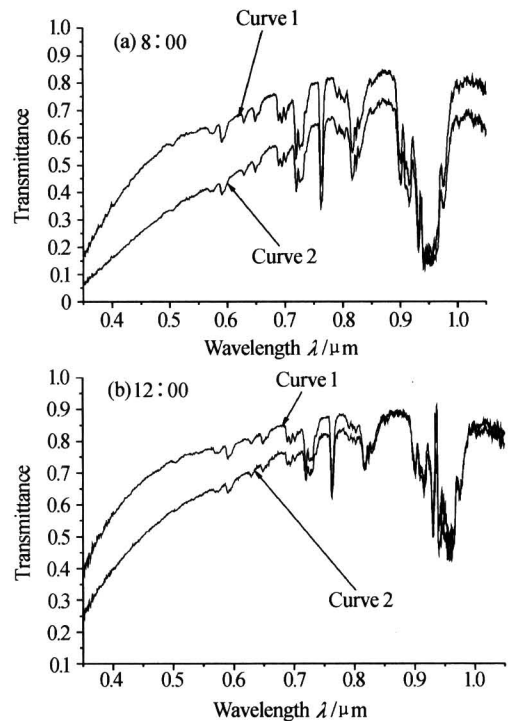


图5 晴天不同气溶胶含量下透过率的比较  
Fig. 5 The comparison of transmittance of different aerosol contents in the sunny day

图5(a)和(b)中,曲线1对应的大气透过率数值明显地高于曲线2对应的透过率数值.这是因为定标日天气稳定,空气质量较好,基本无污染.而对于气溶胶含量较高的实验日,实验当天水平能见度明显较差,天空灰蒙蒙.太阳辐射在穿透大气到达地面时,被气溶胶散射的更多,导致大气透过率明显下降.由此可见,将测量当日和定标实验日的连续光谱透过率的幅值相比较,可以用来监测当日空气质量的好坏.图中四条光谱的谱特征变化趋势基本一致,说明气溶胶浓度并不对光谱形状产生太大的影响.

由于大气对太阳辐射散射能力的强弱取决于波长的长短,太阳辐射的波长越短,大气对其散射能力越强.因此,在图5(a)和图5(b)中,波长越向短波方向,曲线1和曲线2对应的透过率数值相差越明显,到了紫光及紫外区域,曲线2的数值只有曲线1的二分之一左右.

在长波区域,图5(a)(上午)两条曲线之间的差别比图5(b)(中午)两条曲线之间的差别明显,图5(b)(中午)两曲线基本上已经重合在一起了.主要原因是中午时分太阳天顶角减少,导致太阳从天顶直射到地面的路径减少,所以被大气散射的长波辐射也减少,虽然图5(b)中曲线2对应的气溶胶含量相比曲线1增加了,但是路径的减少导致两条曲线

的长波部分相比图 5(a)更接近。

在吸收峰位置,对于图 5(a)和图 5(b),特别在 0.94 μm 的水汽较强吸收带附近,两曲线基本重叠在一起,说明在此吸收带附近,气溶胶含量变化基本上不影响大气对太阳光谱的吸收。而在 0.73 μm 和 0.76 μm 处的氧气弱吸收带,两者的谱线还是有一定的区别,说明在此吸收带附近,气溶胶含量变化较明显地影响着大气对太阳光谱的吸收。当气溶胶增加时,大气对氧气较弱吸收带处的太阳光谱吸收更强烈。

### 2.4 冬季和夏季的晴天透过率的比较

以上实验选择的都是冬季,为了研究不同季节的透过率谱线,又在夏季进行了测量。图 6 中,图 6(a)和图 6(b)均为同一沿海地点冬季和夏季测量得到的对应于太阳方向的透过率光谱。图 6(a)是上午 10:00 时分不同季节的测量结果;图 6(b)是中午 12:00 时分不同季节的测量结果。这两个季节均选择的是定标实验日,且当地地面水平能见度基本上相同。

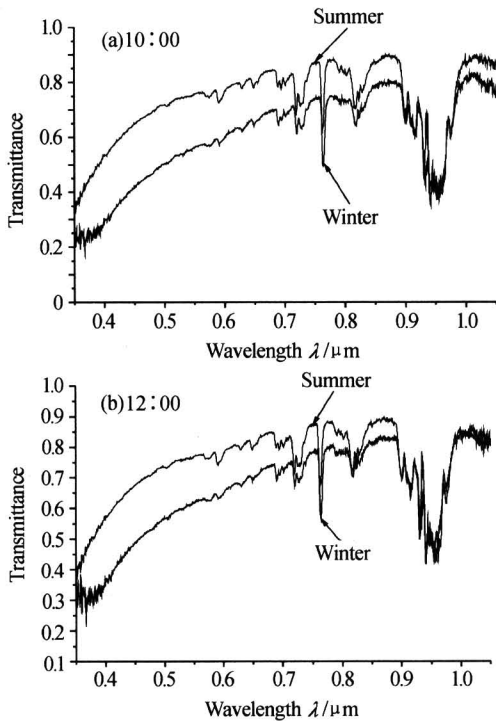


图 6 冬季和夏季透过率的比较  
Fig. 6 The comparison of transmittance of winter and summer seasons

由图 6 可知,冬季(11 月)相比夏季(8 月),光谱数值有明显地下降,更主要的是在 0.65 μm 波长之前,两者之间的差别更明显。而在长波直至近红外波段区域,冬季和夏季实测的透过率光谱相差不大,在水汽的吸收带 0.94 μm 附近,基本上达到重合。

夏季的透过率光谱相比冬季的透过率光谱,短波含量明显的高出许多,这说明冬季太阳光谱的短波含量较少,夏季则短波含量较多,越接近短波区别

越明显。

一般来说,在同样的观测者天顶角情况下,冬季测得的大气斜程透过率要高于夏季测得的结果<sup>[11]</sup>。这是因为冬季相比夏季,整个大气层高度有所下降,导致冬季相对于夏季在同一天顶角下太阳从天顶直射到地面的斜程路径减少,被大气吸收和散射的光谱能量也就随之减少。但是从图 6 中可以看到,冬季测得的透过率数值一般明显地小于夏季测得的透过率数值。这是因为同一时间不同季节测得的太阳光谱,天顶角并不一样,冬季时分的太阳天顶角明显地大于夏季同时间的太阳天顶角,所以即使冬季大气层高度下降,相比夏季,同一观察时间的冬季太阳天顶角有较大增加,斜程路径也随之增大,其经过的斜程路径比夏季经过的要多,因此被大气散射的太阳辐射就更多,特别是易被散射的短波辐射,所以在冬季测得的大气透过率明显地比夏季的要少,而且越接近短波区域区别越明显。

以上虽然是在不同地点、不同季节以及不同气溶胶含量实验日进行的测量,但是得到的大气斜程透过率光谱分布却极为相似,经分析其结果是可靠的,具有广泛实用性。

## 3 大气透过率数值分析

### 3.1 典型波长上的垂直透过率在一天内的变化分析

选择定标实验日,以 0.473 μm(蓝光)、0.532 μm(绿光)、0.671 μm(红光)和 1.000 μm 四个典型波长进行垂直大气透过率分析。

在图 7 中,这四个波长在一天之内随时间变化的趋势非常相近。因为这一天在实验记录中天气系统非常好,所以图中大气垂直透过率变化的幅度很小;随着这四个典型波长的依次增大,四条透过率光谱对应的数值呈现逐步增大的变化,而这四个波长在斜程透过率光谱图中(见图 3~图 6)对应透过率数值也是呈现逐步递增的。主要原因是大气分子对太阳辐射波长较短的散射能力较太阳辐射波长较长的散射能力更强。

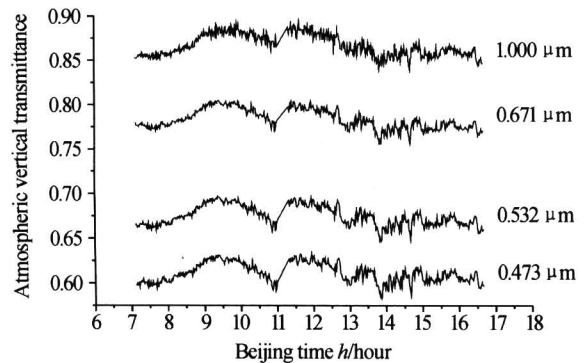


图 7 四个典型波长对应的大气垂直透过率在一天内的变化  
Fig. 7 The relation between the four special wavelength bands and atmospheric vertical transmittance

### 3.2 0.55 $\mu\text{m}$ 处大气垂直透过率的日变化分析

以上是选择天气非常好的定标日子测量的数据进行分析,而对于某一波长在几天内的变化情况反映并不明显,因而又针对 0.55  $\mu\text{m}$  波长的透过率进行分析,选择 11 月 24 日、11 月 25 日、11 月 27 日、12 月 3 日和 12 月 6 日,这几天都有较长时间段的数据,且测量过程中无测量中断. 如图 8. 从整体上

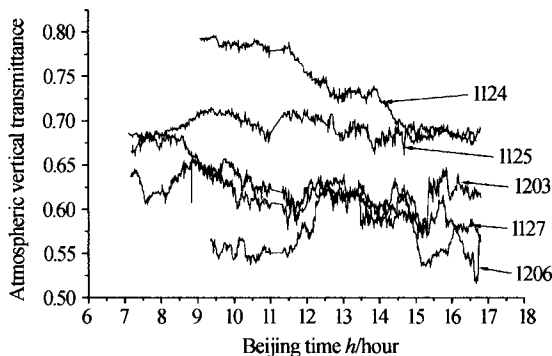


图 8 大气垂直透过率的日变化  
Fig. 8 The daytime variable of atmospheric vertical transmittance

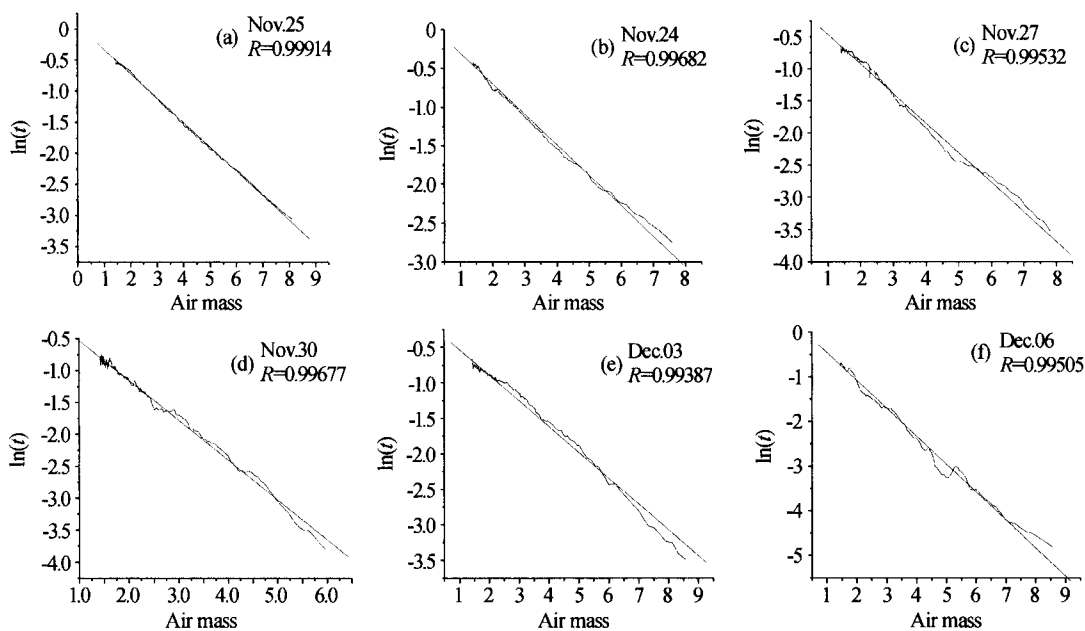


图 9 0.55  $\mu\text{m}$  大气斜程透过率处理结果和拟合曲线随波长变化  
Fig. 9 The relation between the process results of transmittance and their fitting results at 0.55  $\mu\text{m}$  and wavelength

0.99914, 因此拟合的直线可信度很高, 可以代表实际测量的大气透过率数据处理结果随大气质量的变化趋势. 由拟合函数得到大气透过率  $t = \exp(0.06211 - 0.39156m) = \exp(0.06211) * \exp(-0.39156m)$ . 由于  $\exp(0.06211) \approx 1.06$ , 在误差范围内可以将其略去, 得到  $t = \exp(-0.39156m)$ . 这与从平行平面大气层推导出来的大气斜程透过率的理论公式  $t = \exp(-\tau m)$  是一致的, 也就是说实际测量得出的数值能够推出可靠的理论公式; 对其它几张图的结果进行分析, 同样可以进行线性拟合, 且拟合的相关系

看, 11 月 25 日整日天气较好, 垂直透过率变化平缓, 其余几天大气垂直透过率日变化较大. 这说明在一般情况下, 大气垂直透过率在短时间内有较大变化, 基本上无规律可寻, 需要大量的时间进行测量研究, 才能了解一个地区的统计特征.

在 11 月 24 日和 11 月 27 日下午, 大气垂直透过率明显减小, 根据现场实验记录, 这两天下午风速比上午突然增大. 实验地点临海, 这种现象的出现可能是因为较大的风速将海面的飞沫大量吹起, 导致气溶胶光学厚度增大, 使得大气垂直光学厚度随之增大, 最终大气垂直透过率变小.

### 3.3 大气斜程透过率随大气质量日变化分析

选择 11 月 24 日、11 月 25 日、11 月 27 日、11 月 30 日、12 月 3 日和 12 月 6 日, 对 0.55  $\mu\text{m}$  大气斜程透过率的数值取对数, 所得的结果与大气质量的关系如图 9. 图中变化较复杂的曲线是实测的大气斜程透过率的处理结果, 另一条直线是对其进行线性拟合的结果, 拟合的相关系数如图 9.

对图 9(b) 进行详细分析, 经线性拟合得到的函数为  $\ln(t) = 0.06211 - 0.39156m$ , 相关系数  $R =$

数均在 0.99 以上, 这说明在无云晴天大气模式下, 大气斜程透过率的对数结果与大气质量之间存在线性关系, 由此可以证明, 计算时假设大气层是平行平面的假说是成立的, 在此基础上得到的计算结果是可靠的.

## 4 结论

利用地基太阳辐射计对可见到近红外波段太阳直射光谱的测量结果, 对太阳辐射计进行了可靠定标, 并由此计算和初步分析了大气斜程透过率随波

长以及太阳天顶角和大气质量的变化关系,还得到了大气垂直透过率在一天和几天内的变化规律。

可以看到,在不同大气条件及模式下,连续光谱透过率随波长分布趋势基本相同,随着波长的增加,连续光谱透过率的数值逐渐变大,这主要是瑞利散射的原因,即大气分子对太阳辐射波长较短的散射能力较波长较长的太阳辐射的散射能力更强。在太阳辐射的可见光波段,基本没有在此范围内的强吸收气体,所以透过率变化表现平缓。而在长波波段内,多次出现吸收峰,这是由几种特殊的气体(主要是水汽和氧气)在此波长处的强吸收造成的。

通过这些统计分析,得到了实际天气系统下的大气透过率参量的变化情况。而且由于光谱的连续性,使得透过率随波长的变化规律更加明朗,得出了大气透过率在不同条件下的变化规律,从而对实际天气系统下的大气辐射性质的重要参量-整层大气光谱透过率有了清楚的认识和理解。该结论对于大气辐射传输,环境污染监测,气候改变的研究等,具有重要的理论指导作用,特别是可以用来矫正污染地区由于大气影响在可见光波段内卫星数据<sup>[2]</sup>,同时为大气层外目标探测的可能性提供了一些基础。

#### 参考文献

- 1 路远,凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算. 红外技术,2003,25(5):45~49  
Lu Y, Lin Y S. *Infrared Technology*, 2003, 25(5): 45~49
- 2 Kambezidis H D, Vera D-P, Adamopoulos A D. Radiative transfer. I. Atmospheric transmission monitoring with modeling and ground-based multispectral measurements.

*App Opt*, 1997, 36(27): 6976~6982

- 3 谢伟. 太阳辐射计技术分析. 红外, 2003, 3: 9~15  
Xie W. *Infrared*, 2003, 3: 9~15
- 4 Kindel B C, Qu Z, Goetz A F H. Direct solar spectral irradiance and transmittance measurements from 350 to 2500 nm. *App Opt*, 2001, 40(21): 3483~3494
- 5 Ingold T. Sun Photometer measurements 1992-2000 performed by the IAP 18 channel instrument. Research Report No. 00-8, 2000, November, Institute of Applied Physics, Switzerland
- 6 张工力, 白永林, White J D, 等. 一种高透过率光纤探针的制作. 光子学报, 1999, 28(5): 436~439  
Zhang G L, Bai Y L, White J D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(5): 436~439
- 7 范伟, 王毅, 饶瑞中. 根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 177~182  
Fan W, Wang Y, Rao R Z. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 177~182
- 8 Liou K N. An introduction to atmospheric radiation. New York: Academic Press, 1980. 43~46
- 9 Schmid B, Spyak P R, Biggar S F, et al. Evaluation of the applicability of solar and lamp radiometric calibrations of a precision Sun photometer operating between 300 and 1025 nm. *App Opt*, 1998, 37(18): 3923~3941
- 10 Lorente J, Reda NO A, CABO X D. Influence of aerosol on spectral solar irradiance. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 406~415
- 11 王毅, 范伟, 饶瑞中. 大气、地表条件对目标-背景对比度的影响分析. 量子电子学报, 2004, 21(1): 92~97  
Fan W, Wang Y, Rao R Z. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21(1): 92~97

## Measurement of the Atmospheric Transmittance from Visible to Near Infrared Bands

Fan Wei<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>2</sup>, Rao Ruizhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Atmospheric Optics Laboratory, National 863 Program, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

<sup>2</sup> Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210039

Received date: 2005-01-06

**Abstract** Continuous spectra transmittance is measured and studied from visible to near infrared bands using sun photometer. The atmospheric transmittance is obtained with the solar spectra measured by the accurate calibration sun photometer by Langley method to calculate the irradiance arrive at the top of the atmosphere. From the analyses of different time, aerosol contents, seasons and models, the characters of the atmospheric transmittance are achieved in the sunny, cloud free atmospheric condition. The results can provide the base for target detection out of the atmosphere.

**Keywords** Sun photometer; Atmospheric transmittance; Solar spectrum; Continuous spectra



**Fan Wei** was born in April, 1977, Hefei, Anhui Province. He received his M. S. degree from Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics of CAS. Now He is a doctor graduate in Optical Department, Atmospheric Optics center of Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics of CAS. His current researches concentrate primarily on atmospheric radiative transfer, information process and target detection.