

文章编号: 1001-4322(2009)02-0183-07

## 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式\*

陈秀红, 魏合理, 李学彬, 徐赤东, 徐青山

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031)

**摘 要:** 建立了一种根据实测的气溶胶尺度谱分布(Junge 指数)、地面能见度、相对湿度和气溶胶衰减廓线计算空间任意两点的气溶胶衰减计算模式,光谱波段范围覆盖了从可见光到远红外(1~25 000  $\text{cm}^{-1}$ )。利用该气溶胶模式及国际上流行软件 MODTRAN 中的气溶胶模式同时和光栅太阳辐射计(pgs100)实测气溶胶衰减进行了对比,这种模式与 MODTRAN 相比,因考虑了气溶胶的实际尺度谱分布和高度分布,计算结果更接近实测值。利用所建立的气溶胶模式还分析了气溶胶衰减受各参数的影响,结果表明:气溶胶衰减受各参数影响较大,说明实测气溶胶参数在计算气溶胶衰减中起重要作用。将此气溶胶模式嵌入到我们自己研制的通用大气辐射传输软件 CART 中进行大气透过率和大气辐射传输的计算,有助于提高计算精度和增强功能。

**关键词:** 气溶胶衰减模式; Junge 指数; 地面能见度; 相对湿度; 气溶胶衰减廓线

**中图分类号:** TP41; TN21

**文献标志码:** A

工作在大气中的光学系统,如红外制导系统、热红外成像系统、跟踪系统和搜索系统等,必然受到大气的影  
响<sup>[1-2]</sup>,大气能使到达接收系统的光辐射能量减弱。获得大气衰减程度即大气透过率,可以采用仪器观测<sup>[3]</sup>或  
模式计算。仪器所能测量的波段范围有限,并且只能测量水平某一距离或整层的大气透过率。对于空间某两  
点、特定波段上的大气透过率,根据实际测量的大气参数,采用理论模式的计算是一种非常有效的手段<sup>[4]</sup>。气  
溶胶是大气中的重要组成部分,气溶胶衰减的准确的模式计算是从事光学系统研究人员所关注的一项重要内  
容。

低分辨率大气辐射传输计算软件(LOWTRAN<sup>[5]</sup>)中的气溶胶模式是一种广泛使用、比较成功的模式。其  
升级版中分辨率辐射传输计算软件(MODTRAN<sup>[6]</sup>)完全引用了 LOWTRAN 的气溶胶模块。MODTRAN  
中的近地面气溶胶衰减模式(指随光谱变化的衰减系数)仅有 8 种模式供选择,分别是乡村型(能见度 23 km)、  
乡村型(能见度 5 km)、城市型、海洋型、海军海洋型、沙漠型、平流雾型和辐射雾型,由于气溶胶衰减系数是由  
气溶胶尺度谱分布和气溶胶折射率计算而来的,因此,MODTRAN 近地面气溶胶衰减模式中只有 8 种固定的  
尺度谱分布和折射率分布。0~2 km 高度区间有能见度为 2,5,10,23 和 50 km 时的 5 个高度分布,2~10 km  
高度区间也只有 4 种:春夏季 23 km、春夏季 50 km 和秋冬季 23 km、秋冬季 50 km。然而实际的气溶胶尺度谱  
分布和高度分布与该模式中的尺度谱分布和高度分布肯定会有差异。吴北婴等<sup>[7]</sup>曾经检验 MODTRAN 气溶  
胶模式的地域适用性,指出 MODTRAN 中的气溶胶模式在低能见度下过高估计了气溶胶光学厚度约 40%,在  
高能见度下过低估计了气溶胶光学厚度约 35%。其主要原因是 LOWTRAN 的气溶胶模式对于某种类型气  
溶胶采用固定不变的尺度谱分布和高度分布,与实际气溶胶模式有差异。

本文建立了一种可以根据实际测量的气溶胶尺度谱分布(这种实测尺度谱分布仅用 Junge 指数表达)、气  
溶胶高度分布(可以是激光雷达廓线,也可以是拟合的指数分布廓线仅用一个标高来表达)、地面能见度和相对  
湿度计算气溶胶衰减的模式,该模式中另外还提供了几种污染型气溶胶复折射率分布供选择。利用建立的气  
溶胶模式,分析了气溶胶消光随气溶胶参数的变化规律。将该模式嵌入到我们研制的通用大气辐射传输软件  
(combined atmosphere radiative transfer, CART)<sup>[8-9]</sup>当中进行大气透过率和大气辐射的计算,有助于提高  
CART 软件的计算精度和扩展其功能。

### 1 根据实测参数计算气溶胶衰减原理

任意波长地面到某个高度  $H$  上的气溶胶衰减计算公式为

$$T_{\text{aer}} = (\lambda, H) = \exp\left[-\int_0^H \beta(\lambda, h) dh\right] \quad (1)$$

\* 收稿日期:2008-05-08; 修订日期:2008-10-14

基金项目:国家自然科学基金项目(40775028);中国科学院方向性创新项目(KGGX2-SW-413)

作者简介:陈秀红(1980—),硕士,主要从事大气辐射传输模式研究、云辐射传输模式研究;xhchen@aiofm.ac.cn.

式中:  $\beta(\lambda, h)$  表示任意波长  $\lambda$  和任意高度  $h$  上的气溶胶衰减系数, 它近似地由两部分组成

$$\beta(\lambda, h) \approx \beta(\lambda, 0)N(h) \quad (2)$$

式中:  $\beta(\lambda, 0)$  表示近地面气溶胶衰减系数随波长分布;  $N(h)$  表示随高度分布。

### 1.1 近地面气溶胶消光系数光谱分布

众多的实际观测表明近地面气溶胶尺度谱分布可近似为容格(Junge)谱分布<sup>[10]</sup>

$$\frac{dN}{dr} = N_0 r^{-(\nu-1)} \quad (3)$$

式中:  $N_0$  表示气溶胶粒子数密度;  $\nu$  表示 Junge 指数,  $\nu$  一般处于 2~4 之间<sup>[11]</sup>。给定气溶胶复折射率  $m$  及其随波长变化, 用 Mie 程序计算气溶胶衰减效率因子  $Q_e$ , 得到地面上(0 km)归一化到 0.55  $\mu\text{m}$  波长气溶胶的相对衰减系数  $\sigma_e^1(\lambda, 0)$  为

$$\sigma_e(\lambda, 0) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(\lambda, m) \frac{dN}{dr} dr \quad (4)$$

$$\sigma_e^1(\lambda, 0) = \frac{\sigma_e(\lambda, 0)}{\sigma_e(0.55, 0)} \quad (5)$$

0.55  $\mu\text{m}$  上的绝对衰减系数  $\beta(0.55, 0)$  直接由地面能见度  $V_{is}$  转换得到

$$\beta(0.55, 0) = \frac{3.912}{V_{is}} - \beta_m \quad (6)$$

式中: 括号中的 0 表示近地面;  $\beta_m$  表示近地面分子衰减, 在海平面一般近似取 0.001 159  $\text{km}^{-1}$ 。其它波长上的绝对气溶胶衰减系数可根据式(5)计算结果和式(6)地面能见度观测结果得到, 即

$$\beta(\lambda, 0) = \sigma_e^1(\lambda, 0)\beta(0.55, 0) \quad (7)$$

在上述近地面气溶胶计算模式中, 地面能见度可由能见度仪或激光雷达测量得到, 气溶胶 Junge 指数可由光学粒子计数器测得<sup>[12]</sup>, 对于气溶胶复折射率, 本气溶胶模式中采用一种经验公式结合已有的典型气溶胶成分的折射率计算得到。

湿气溶胶粒子的折射指数是由干粒子和凝结的液态水共同决定的, 常用等效的均匀球形粒子的折射指数  $m_e = m_{re} - im_{ie}$  表示。Hanel<sup>[13]</sup> 经过大量的实验和理论验证, 总结出了气溶胶折射指数和相对湿度之间的函数关系为

$$m_{re} = m_{rw} + (m_{r0} - m_{rw})[r(H_r)/r_0]^{-3} \quad (8)$$

$$\frac{m_{ie}}{m_{re}^2 + 2} = \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} + \left( \frac{m_{i0}}{m_{r0}^2 + 2} - \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} \right) \left[ \frac{r(H_r)}{r_0} \right]^{-3} \quad (9)$$

式中: 下标 w 和 0 分别表示水和干气溶胶粒子;  $r(H_r)/r_0$  表示湿气溶胶粒子半径与干气溶胶粒子半径之比

$$\frac{r(H_r)}{r_0} = (1 - H_r)^{-(1/d)} - (1 - 60\%)^{-(1/d)} + 1.0 \quad (10)$$

式(10)适用范围为  $60\% \leq H_r \leq 95\%$ , 常数  $d$  取 3.5。在此模式中, 当相对湿度小于 60% 时, 我们研制的这种气溶胶模式将不考虑相对湿度的影响, 而相对湿度大于 95% 时, 就取 95% 的极限值。

不同类型的气溶胶, 含有不同的干气溶胶粒子化学成分。我们考虑在不同典型地区气溶胶化学成分有所不同, 提供了沙漠型、海洋型和大陆型 3 种类型的折射率; 还考虑当前的大气污染环境有不同的污染源, 提供了煤燃烧污染型、黑炭污染型、石油/天然气燃烧污染、硫酸污染型、硝酸污染型、生铁污染型、农作物燃烧污染型和火山灰污染型 8 种类型的折射率。每种类型的干气溶胶粒子化学成分及混合比见表 1<sup>[14-15]</sup>, 其折射率分布取自文献<sup>[14, 16-19]</sup>。另外, 还提供一种自定义气溶胶折射率类型, 由用户根据实际情况输入当时的气溶胶复折射率。

按照上面介绍的计算气溶胶粒子等效折射率的方法及各种气溶胶类型干粒子成分的混合比, 我们以沙漠型、海洋型和大陆型 3 种类型气溶胶为例, 计算了在不同相对湿度下的折射率, 相对湿度分别取 60%, 70%, 80%, 90% 和 95%, 结果如图 1 所示。8 种污染型的气溶胶折射率分布则由于篇幅有限, 只把干粒子的折射率显示在图 2 中, 图上的数字代表表 1 中对应的折射率类型。因为粒子的折射率实部代表了粒子的散射特性, 而折射率虚部代表了粒子的吸收特性。从图 1 和图 2 可以看出不同的粒子和在不同的相对湿度情况下会有完全不同的散射和吸收特性。

表 1 各气溶胶成分及混合比  
Table 1 Components and their ratios of each kind of aerosols

number	types	components	ratios
1	desert	quartz	0.35
		quartz contained with 10% hematite	0.35
		carbonaceous	0.001
		water soluble	0.299
2	maritime	sea salt solution	1.0
3	continental	water soluble	0.7
		dust like	0.3
4	coal-polluted	fly ash	1.0
5	carbo-polluted	carbonaceous	1.0
6	oil/gas polluted	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.0
7	vitriol polluted	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.0
8	nitric acid polluted	HNO <sub>3</sub>	1.0
9	hematite polluted	hematite	1.0
10	crop burning polluted	organic-based	1.0
11	volcanic dust polluted	volcanic dust	1.0
12	user defined	user defined	1.0

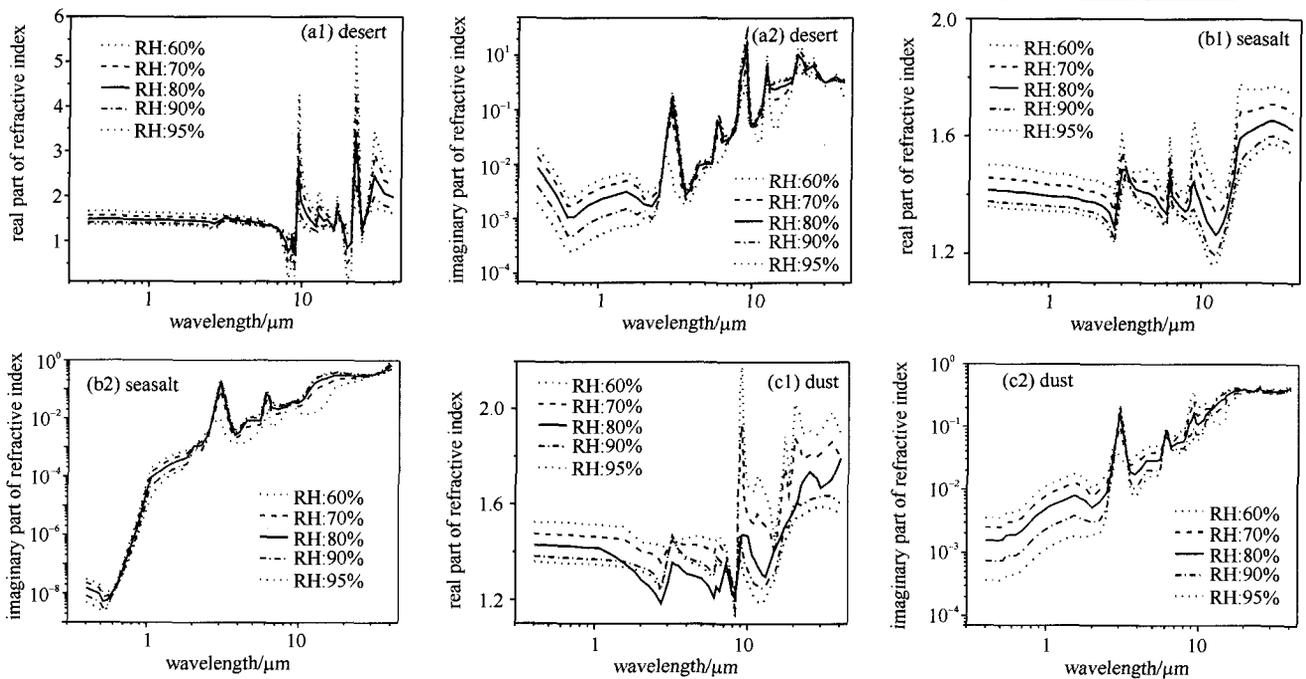


Fig. 1 Different refractive indexes of aerosol particles under different humidity

图 1 不同相对湿度下的气溶胶粒子折射率

1.2 气溶胶高度分布

我们提供了两种气溶胶高度分布。一种是 0~10 km 内气溶胶随高度近似按指数分布减小，即

$$N(h) = \exp(-h/z) \tag{11}$$

式中： $z$  指气溶胶标高。10~30 km 上的气溶胶衰减变化随时间变化不大，可直接采用 MODTRAN 中的气溶胶高度分布模式  $N(h)$ ，30 km 以上可以不考虑气溶胶的衰减。

另一种是根据激光雷达<sup>[20]</sup>测量的气溶胶消光系数廓线得到气溶胶高度分布，首先把激光雷达测得的各个高度上的消光系数，归一化到近地面的消光系数，得到地面到雷达测量高度区间各个高度上的相对消光系数  $N(h)$ 。雷达测量高度以上至 30 km，则直接用 MODTRAN 给出的高度分布，30 km 以上可以不考虑气溶胶的衰减。

最后任意波长和任意高度的消光系数为地面消光系数  $\beta(\lambda, 0)$  乘以高度分布  $N(h)$ 。

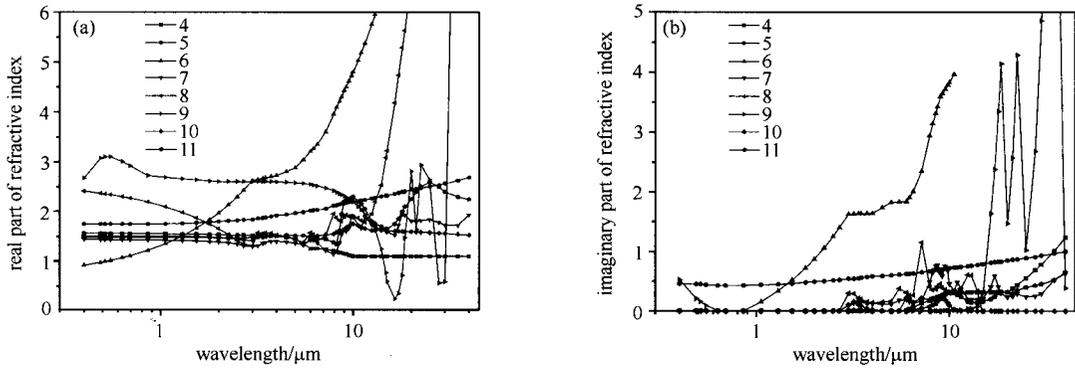


Fig. 2 Distribution of refractive index for eight types of polluted aerosols

图 2 8 种污染型气溶胶折射率分布

## 2 气溶胶衰减模式准确性和优越性验证

为了验证建立的气溶胶模式计算结果的准确性和优越性,我们把建立的模式计算值及 MODTRAN 软件计算值同时和光栅太阳辐射计(pgs100)实测值进行比较。取 2008 年 8 月 6 号 9 点 30 分在合肥地区测得的大气参数。我们建立的气溶胶模式输入参数为:大陆型气溶胶折射率,地面能见度 11.3 km, Junge 指数 3.0,相对湿度 79%, 532 nm 微脉冲激光雷达测得的气溶胶衰减廓线如图 3 所示,可以看出该时刻的气溶胶衰减主要在 1 km 以下。MODTRAN 输入参数为:大陆型气溶胶,地面能见度 11.3 km,春夏季高度分布模式,相对湿度 79%。同样时刻的整层气溶胶透过率用 pgs100 测得,pgs100 可测量可见光到近红外波段的连续太阳光谱,经定标并扣除大气分子吸收和大气分子连续吸收后得到整层并转换到垂直方向上的气溶胶透过率。图 4 为两种模式计算结果和 pgs100 实测结果的比较,可以看出我们建立的气溶胶模式计算结果与实际结果更接近一些,随光谱变化趋势非常一致,两者的绝对差别的均方根为 0.019 74,而 MODTRAN 计算气溶胶透过率值偏低(光学厚度偏大),和实际结果的绝对差别的均方根为 0.026 81。表明我们建立的模式计算结果和实测结果是符合的,且比 MODTRAN 模式有优越性。

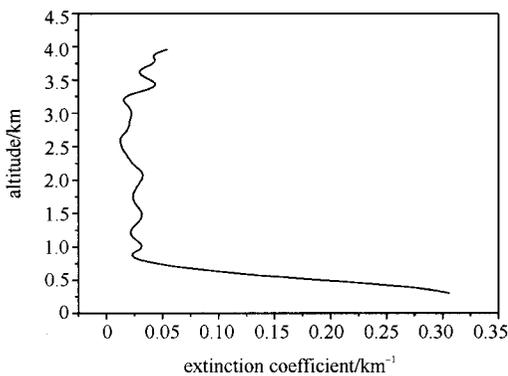


Fig. 3 Aerosol extinction profile measured by 532 nm MPL lidar

图 3 532 nm 激光雷达实测气溶胶廓线

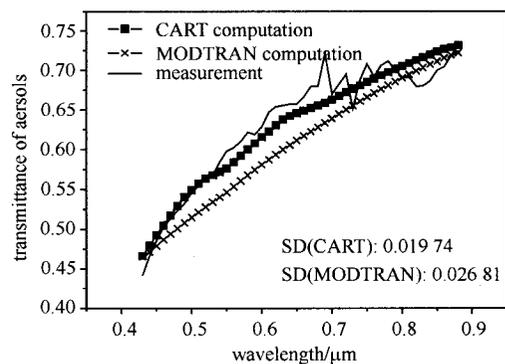


Fig. 4 Comparison of calculated results by models with measured aerosol spectral atmospheric transmittance

图 4 模式计算值和实测值比较

## 3 各参数对气溶胶衰减的影响

### 3.1 Junge 指数对近地面气溶胶消光系数的影响

利用所建立的气溶胶模式,分析了在保持地面能见度和相对湿度不变时, $\beta(\lambda, 0)$ 随 Junge 指数的变化情况,如图 5 所示。地面能见度取 10 km,相对湿度取 80%,大陆型气溶胶折射率, Junge 指数分别取 2.0, 2.5, 3.0 和 3.5。从图上可以看出, $\beta(\lambda, 0)$ 对 Junge 指数变化十分敏感,这是因为从 Junge 谱分布可以推到气溶胶光学厚度随波长变化是按指数分布的。以  $0.55 \mu\text{m}$  为分界点,长波波段  $\beta(\lambda, 0)$ 随 Junge 指数的增大而减小;短波波段刚好相反。换句话说,气溶胶 Junge 指数越小, $\beta(\lambda, 0)$ 随波长变化不明显,说明气溶胶粒子中的大粒子比较多;反之, Junge 指数越大, $\beta(\lambda, 0)$ 随波长变化很显著,说明气溶胶粒子中的小粒子居多。所以,气溶胶分布的 Junge 指数在决定气溶胶消光的波长分布中起重要作用。图 5 中还显示了用 MODTRAN 模式大陆型气

溶胶计算的气溶胶消光波长分布,从图上可以看出,该结果较接近于 Junge 指数为 3.0 的消光波长分布,但在可见光到近红外波段也有差别,这可以解释第 2 节中的结果。

### 3.2 地面能见度和相对湿度对近地面气溶胶消光系数的影响

近地面  $\beta(\lambda, 0)$  随地面能见度和相对湿度的变化情况如图 6 所示。图 6(a) 中气溶胶 Junge 指数取 3.0, 相对湿度为 60%, 大陆型气溶胶折射率, 地面能见度  $V_{is}$  分别取 5, 10, 30 和 60 km。从图上可以看出气溶胶消光系数受地面能见度的影响较大。随着地面能见度的增加, 气溶胶消光系数减小, 气溶胶消光系数随地面能见度的变化在短波段比长波段更明显, 这是因为短波段的相对消光系数较大, 而长波段的较小。图 6(b) 中气溶胶 Junge 指数取 3.0, 地面能见度取 10 km, 大陆型气溶胶折射率, 相对湿度 RH 分别取 60%, 70%, 80%, 90% 和 95%。可以看出, 大陆型气溶胶消光系数在某些波段受相对湿度的影响较明显, 说明在某些波段(如 8~22  $\mu\text{m}$ ), 气溶胶的衰减与相对湿度的关系还是较为密切的。

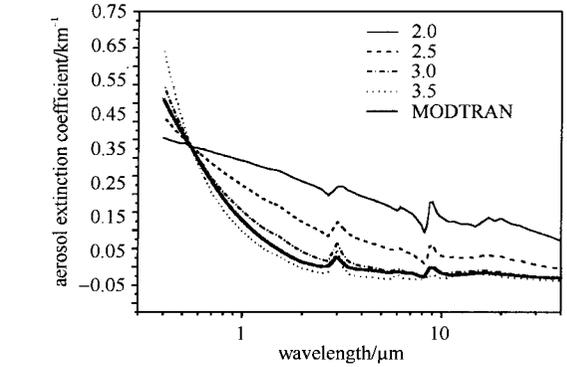
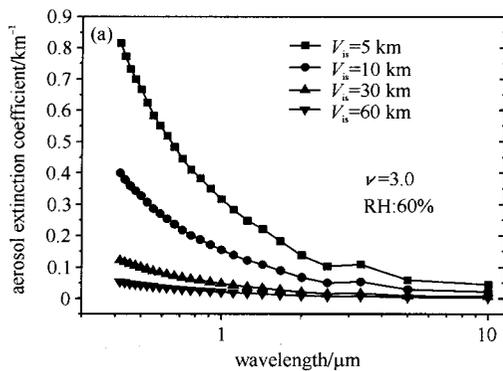


Fig. 5 Extinction coefficients of aerosol for different Junge exponents

图 5 不同 Junge 指数下的气溶胶消光系数

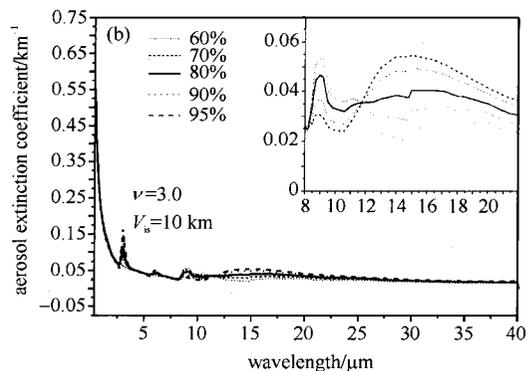


Fig. 6 Extinction coefficients of aerosol for different surface visibilities and relative humidity

图 6 不同地面能见度和相对湿度下的气溶胶消光系数

### 3.3 气溶胶标高对气溶胶衰减的影响

图 7 分析了 0.5, 4.0 和 10  $\mu\text{m}$  这 3 个波长上地面到 10 km 高度上气溶胶衰减受气溶胶标高的影响。计算参数为: 大陆型气溶胶折射率, 地面能见度为 10 km, 相对湿度为 60%, 气溶胶 Junge 指数为 3.0, 气溶胶标高变化从 0.5 到 10.5 km。气溶胶标高越小, 说明气溶胶消光系数随高度减小越慢, 反之, 气溶胶消光系数随高度减小越快。可以很明显地看出气溶胶衰减随气溶胶标高变化很大, 尤其是在短波段, 随着气溶胶标高的增大, 气溶胶透过率迅速减小, 几乎接近 0。而气溶胶标高在不同的天气和不同的地点将会有比较明显的变化, 这说明: 气溶胶衰减随高度变化简单用某种固定模式近似将会带来误差, 而如果考虑气溶胶随高度变化(如气溶胶标高, 雷达测量气溶胶廓线)会使计算结果更准确。

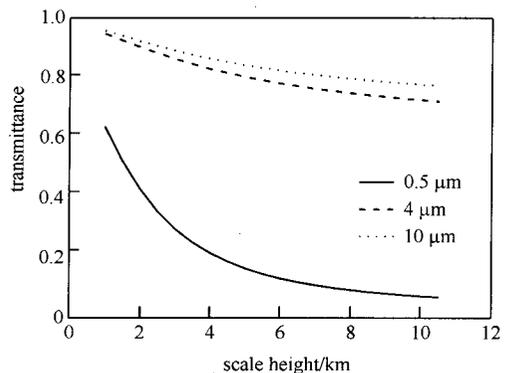


Fig. 7 Distribution of aerosol transmittance as a function of aerosol scale height

图 7 气溶胶衰减随气溶胶标高的变化

## 4 结 论

本文建立了一种根据实测尺度谱分布(Junge 指数)、地面能见度、相对湿度和气溶胶衰减廓线计算气溶胶衰减的计算模式, 并增加了几种污染型类型的气溶胶折射率分布。该模式和 MODTRAN 中气溶胶模式同时

和光栅太阳辐射计 pgs100 实测气溶胶透过率进行了对比,验证了模式计算的精度,同时也说明了此模式比 MODTRAN 计算结果更接近真实值。并用模式分析了各参数对气溶胶衰减的影响。得出:Junge 指数影响近地面气溶胶衰减系数的波长分布,Junge 指数越大,近地面气溶胶衰减系数随波长变化越明显;地面能见度对近地面气溶胶衰减影响也非常重要,它决定了绝对气溶胶衰减系数的大小,随着地面能见度的增大,气溶胶衰减逐渐减小,在短波段变化更明显;近地面气溶胶衰减在某些波段受地面相对湿度的影响也较大;气溶胶标高主要影响气溶胶衰减垂直分布,气溶胶标高越大,气溶胶衰减迅速减小。进一步说明了根据实测 Junge 指数、地面能见度、相对湿度和气溶胶衰减廓线计算气溶胶衰减有必要性,可以提高气溶胶衰减的计算精度。

目前,这种模式已被嵌入到我们自己研制的典型地区大气模式的通用大气辐射软件 CART 中进行大气透射率、大气散射辐射和热辐射的计算,这有助于提高 CART 软件的计算精度和增强其软件功能。

#### 参考文献:

- [1] 王建才,高聚忠,白修宇. 红外制导系统大气衰减影响分析[J]. 红外, 2006, **27**:9-12. (Wang Jiancai, Gao Juzhong, Bai Xiuyu. Analysis of influence of atmosphere attenuation on infrared guidance. *Infrared*, 2006, **27**:9-12)
- [2] 邢强,任海刚,陈汉平,等. 经过大气传输的红外热成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**: 43-46. (Xing Qiang, Ren Haigang, Chen Hanping, et al. Simulation of infrared thermal image through atmospheric transmission. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**: 43-46)
- [3] 范伟,王毅,饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J]. 光子学报, 2006, **35**: 402-407. (Fan Wei, Wang Yi, Rao Ruizhong. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**: 402-407)
- [4] 孙毅义,董浩,毕朝辉,等. 大气辐射传输模型的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 149-153. (Sun Yiyi, Dong Hao, Bi Zhaohui, et al. Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1):149-153)
- [5] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users guide to Lowtran 7[R]. AFGL-TR-88-0177, 1988.
- [6] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User's Manual[K]. Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command, Hanscom AFB MA, 01731-3010, 1997.
- [7] 吴北婴,李卫,陈洪滨,等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京:气象出版社, 1998. (Wu Beiyi, Li Wei, Chen Hongbin, et al. Applied arithmetic for atmospheric radiative transfer. Beijing: China Weather Publishing House, 1998)
- [8] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation[J]. *Optics Express*, 2007, **15**:8360-8370.
- [9] 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 Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software (CART). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6):446-450)
- [10] Junge C E. Atmospheric Chemistry[J]. New York:Academic Press, 1958.
- [11] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京:气象出版社, 1990. (Song Zhengfan. Applied atmospheric optics basic. Beijing: Meteorology Publishing House, 1990)
- [12] 李学彬,胡顺星,徐青山,等. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(2):207-210. (Li Xuebin, Hu Shunxing, Xu Qingshan, et al. Characteristics measurement of extinction and refractive index of aerosol particles. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2):207-210)
- [13] Hanel G. The physical chemistry of atmospheric particles[C]//Hygroscopic Aerosols. 1984:1-20.
- [14] Shettle E P, Fenn R W. Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties [R]. AFGL-TR-79-0214, 1979:1-94.
- [15] Longtin D R, Shettle E P, Hummel J R, et al. A wind dependent desert aerosol model: radiative properties[R]. AFGL-TR-88-0112, 1988:1-116.
- [16] Richwine L J, Clapp M L, Miller R E, et al. Complex refractive indices in the infrared of nitric acid trihydrate aerosols[J]. *Geo Res Lett*, 1995, **22**:2625-2628.
- [17] Sutherland R A, Khanna R K. Optical properties of organic-based aerosols produced by burning vegetation[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1991, **14**: 331-342.
- [18] 杜廷发. 烃类烟粒红外复折射率的测定与应用[J]. 应用光学, 1991, **12**(2):56-59. (Du Tingfa. Measurement and application of infrared complex refractive index of hydrocarbon smoke. *Applied Optics*, 1991, **12**(2):56-59)
- [19] 周英彪,阮立明,段权鹏,等. 不同燃尽程度下粉煤燃烧微粒的光学特性和辐射特性[J]. 电站系统工程, 1995, **11**(4):52-55. (Zhou Yingbiao, Ruan Liming, Duan Quanpeng, et al. Optics and radiation characteristics of pulverized-coal particles in the difference burn-out degree. *Power System Engineering*, 1995, **11**(4):52-55)
- [20] 张大毛,徐赤东,虞统. 扫描式微脉冲激光雷达的研制和应用[J]. 大气与环境光学学报, 2006, **1**(1): 47-52. (Zhang Damao, Xu Chidong, Yu Tong. Development of scanning micro pulse lidar and its applications. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(1): 47-52)

## Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength

Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, Xu Chidong, Xu Qingshan

*(Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)*

**Abstract:** An aerosol extinction calculating model for any path in space based on the measured aerosol size distribution (Junge exponent), surface visibility, relative humidity and aerosol extinction profile has been developed. The model covers spectral range from visible- to far infrared- wavelength ( $1\sim 25\ 000\ \text{cm}^{-1}$ ). The calculated results by this model and by the internationally popular software (MODTRAN) have been compared with the measured results of grading-sun-photometer (pgs100). Since the parameters of aerosol size distribution and height distribution are considered in the model, the computed result of the present model is more close to the real data than the result of MODTRAN. Analysis shows that the parameters have great effect on aerosol extinction, which illustrates that the measured parameters play important roles in the aerosol extinction calculating model. The model has been embedded into the combined atmospheric radiative transfer (CART) software we have developed for calculating atmospheric transmittance and radiation, which can improve the calculating precision and expand the functions of CART.

**Key words:** aerosol extinction model; Junge exponent; surface visibility; relative humidity; aerosol extinction profile