

文章编号: 1001-3806(2009)02-0176-04

相关 k 分布法在水汽强吸收带计算中的应用

周建波^{1,2}, 魏合理^{1*}, 陈秀红¹, 徐青山¹

(1. 中国科学院 大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了快速计算水汽强吸收带光学透过率, 采用相关 k 分布的方法, 对它们在计算水汽强吸收带大气透过率中的应用进行了理论分析和实验验证, 设计并开发了相应的计算程序, 分别用 6 种大气模式进行检验, 取得了较好的实验数据。并对相关 k 分布法中求积网格点的选取、非均匀大气吸收系数的插值作了讨论。结果表明, 相关 k 分布法用于宽带强吸收大气透过率计算具有精度高、速度快的优点。这一结果对于将相关 k 分布法快速高效地用于实际应用是有帮助的。

关键词: 大气与海洋光学; 相关 k 分布法; 水汽强吸收带; 计算

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Application of the CkD method in the strong water vapor absorption bands

ZHOU Jian-bo^{1,2}, WEI He-li¹, CHEN Xiu-hong¹, XU Qing-shan¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to calculate the optical transmittance of water vapor in the strong absorption bands fleetly, the application of the correlated k -distribution (CkD) method in the calculation of the optical transmittance of water vapor in the strong absorption bands was studied, and the corresponding program was designed and developed. The technical details in the CkD method, including the chose of integration grid points, the interpolation of the absorption coefficients in the inhomogeneous atmosphere was also discussed. Tested on the six standard atmospheric models, good results were obtained. The results indicate that the CkD algorithm is accurate and efficient in the calculation of atmospheric transmittance of water vapor in the strong absorption bands, and the CkD practical in actual application.

Key words: atmospheric and ocean optics; correlated k -distribution; strong absorption bands of water vapor; calculation

引言

k 分布法 (k -distribution, k D) 是近年来发展的一种先进的计算大气分子吸收或消光的处理方法之一^[1], 它把随波长迅速变化的大气分子吸收离散成有限项 (通常是十几项或几十项) 的赝单色吸收, 通过对这些有限项的积分可以得到与逐线积分法 (line-by-line integration, LBLI) 非常接近的精度, 大大提高了计算效率; 同时, 因为使用赝单色计算, k 分布法或相关 k 分布法 (correlated k -distribution, CkD) 可以直接用于对散射的处理, 而传统的带模式法不能直接用于散射处理, 必须作一定的近似。 k 分布法相对于传统的带模式法在计算精度和速度方面都有很大的优势, 在大气辐射

学的研究中得到了广泛的应用。

逐线积分法能精确地计算大气的透过率, 但用传统的逐线积分法来计算水汽等气体在强吸收带的光学厚度或者透过率时, 将会耗费大量的计算资源, 不能满足实际工作中一些实时应用的需要。对于强吸收带, 由于吸收气体的谱线十分丰富, 逐线积分法的计算量就显得更大。因此, 有必要发展一种能用于实时计算强吸收带气体光学厚度或透过率的计算方法。国内外为此已开展了大量的工作^[2-9], 本文中选取若干标准格点, 快速计算出水汽强吸收带的吸收系数, 采用相关 k 分布法计算水汽强吸收波段 (以 $2.7\mu\text{m}$ 为中心的强吸收带, 覆盖 $3300\text{cm}^{-1} \sim 4100\text{cm}^{-1}$ 范围) 的光学厚度或透过率。通过使用相关 k 分布法, 计算机时大大缩减, 而且精度也能满足实际应用中大部分情况下的要求。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40775028)

作者简介: 周建波 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事大气辐射特性研究。

* 通讯联系人。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2008-01-04; 收到修改稿日期: 2008-04-17

1 k 分布法和相关 k 分布法简介^[10]

1.1 k 分布法简介

k 分布法计算大气分子吸收是基于按吸收系数 k_r ,

对气体谱透射比进行分组计算的方法。在均质大气中,光谱透射比与给定谱区间内吸收系数 k_ν 的波数位置无关。把吸收系数按从小到大的顺序排列,见图 1a

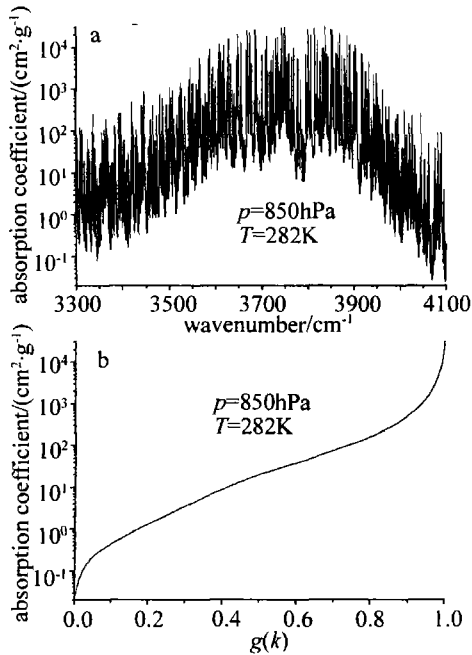


Fig. 1 Variation of water vapor absorption coefficient with wavenumber and cumulative probability

和图 1b,显然,图 1a 和图 1b 曲线下的积分面积相同,因此波数积分和吸收系数累积概率积分完全相同,即:

$$\bar{T}(u) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp(-k_\nu u) d\nu = \int_0^1 \exp[-k(g)u] dg(k) \quad (1)$$

式中, $\bar{T}(u)$ 为谱透射比, u 为均质路径, k_ν 为吸收系数, ν 表示波数, $\Delta\nu$ 为谱间隔, $k(g)$ 是一个在 g 空间的平滑函数, $g(k)$ 是一个在 k 空间内单调上升的平滑函数。累积概率函数 $g(k)$ 定义为:

$$g(k) = \int_0^k f(k) dk \quad (2)$$

且有:

$$dg(k) = f(k) dk \quad (3)$$

式中, $f(k)$ 为吸收系数 k_ν 的概率分布函数。

因为 $g(k)$ 是吸收系数 k_ν 的光滑函数(见图 1b),而 k_ν 是波数的剧变函数,所以在波数空间需要成千上百万项的积分,在 k 空间只要很少项的高斯求积就可以达到同样的精度。即谱透射比可写为:

$$\bar{T}(u) = \int_0^1 \exp[-k(g)u] dg \approx \sum_{j=1}^M \exp[-k(g_j)u] \Delta g_j \quad (4)$$

1.2 相关 k 分布法简介

在实际大气中,吸收系数随气压和温度变化很大,即吸收系数在光传播路径上是变化的。假定吸收系数重排后,不同温度、气压下的 k 分布函数是相关的,即如下关系近似成立:

$$\bar{T}(u) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp(-\int_u k_\nu du) d\nu \approx$$

$$\int_0^1 \exp[-\int_u k_u(g) du] dg \quad (5)$$

这种假定两者相当的方法称为相关 k 分布法。在该假定下, k 分布法才能用于非均匀大气的计算。从既有的讨论表明,相关 k 分布法对于单谱线和周期谱线是精确的,同时对于弱线和强线极限近似也是精确的^[6]。在绝大多数情况下,这种假定是满足要求的。因此, k 分布法能广泛应用于实际大气的辐射传输计算。

2 算法实现

2.1 水平均匀路径和非均质路径下气压与温度格点的选取

在利用(4)式计算水平均匀大气透过率时,通过选取适当的 g 值点和积分区间,使得用较少的求积点就能达到逐线积分法的计算精度。以计算水汽 $2.7\mu\text{m}$ 为中心的吸收带为例,具体波数区间为 $3300\text{cm}^{-1} \sim 4100\text{cm}^{-1}$, 800 个波数间隔范围内的吸收线,由于考虑到吸收带两侧的过渡带,所以较多地选取了 91 个求积点,在选取求积点的时候,主要基于以下几点:(1)在起始和结束阶段,由于 $k-g$ 曲线斜率变化比较大,所以选取的求积点较为密集,中间部分的求积点分布较为稀疏;(2)在通常水汽含量浓度下,由于最后阶段的吸收系数较大,所计算结果的透过率几乎为 0,而起始阶段的吸收系数较小,对最终结果而言,透过率的贡献主要是起始阶段,所以起始阶段的求积点分布比较密集;(3)在保证计算精度的前提下,尽量减少求积点的个数。

图 2 中比较的是两种气压下用逐线积分法和 k 分

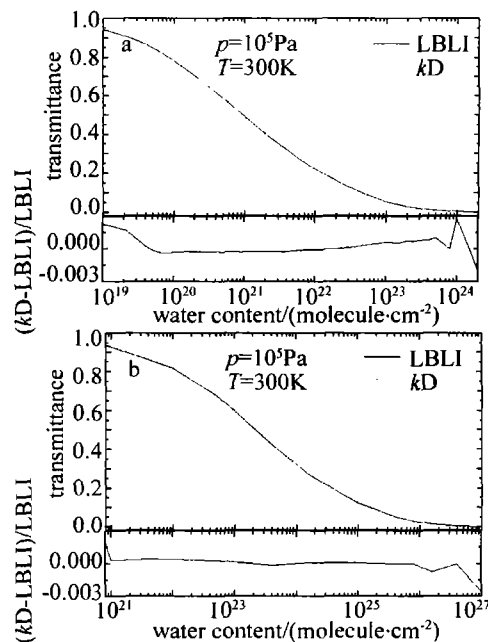


Fig. 2 Comparison between the calculated results by kD and those by LBLI for homogenous path

布法计算大气透过率随路经上总量变化的水汽。由以上两图可以看出,均质情况下, k 分布法计算的结果与逐线积分法计算结果非常一致,当水汽总量变化6个量级时, k 分布方法的误差在0.3%以内,能够满足计算精度的要求。

以上已经选取了均质路径情况下 g 值点和积分区间,下面将要考虑非均质情形下,作为标准的气压和温度格点的选取,和用来对吸收系数进行插值的函数选取。

由于所选波段覆盖800个波数范围,且考虑到过渡吸收带有很多不吸收的谱线的情况,所以此处选取了大气中温度和气压变化范围内的 9×9 个网格点,9个气压格点值是: $1.025 \times 10^5 \text{ Pa}$, $8.500 \times 10^4 \text{ Pa}$, $7.000 \times 10^4 \text{ Pa}$, $5.750 \times 10^4 \text{ Pa}$, $4.500 \times 10^4 \text{ Pa}$, $3.500 \times 10^4 \text{ Pa}$, $2.500 \times 10^4 \text{ Pa}$, $5.000 \times 10^3 \text{ Pa}$, 5.000 Pa , 9个温度格点值是: 313K, 295K, 282K, 269K, 256K, 243K, 230K, 217K, 193K, 考虑到水汽主要分布在10km以下的大气中,所以在10km以下的范围中,气压格点分布比较密集,10km以上气压格点分布比较稀疏;对于温度格点的选取,基本上趋近均匀分布。上述网格点基本上覆盖了大气中温度和气压的变化范围。

图3是不同温度、不同气压下的吸收系数概率密度分布函数,由图可以看出,在这个带范围内是满足相

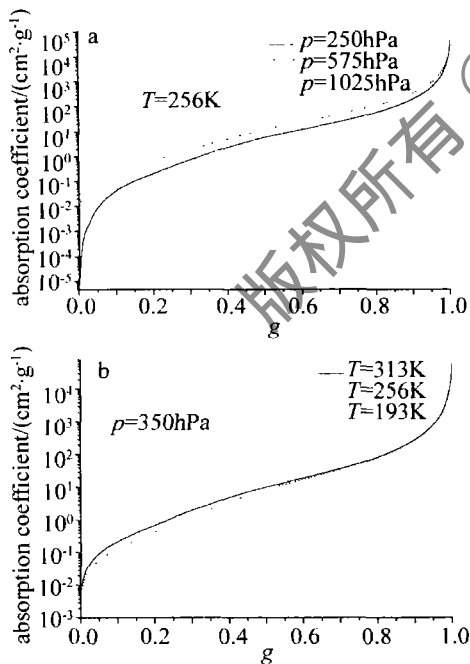


Fig. 3 The various absorption coefficient as a function of the cumulative probability g for the water vapor within $3300\text{cm}^{-1} \sim 4100\text{cm}^{-1}$ spectral region

关 k 分布假设的,因此可以使用(5)式计算非均匀斜程大气透过率。

分别用逐线积分法预先计算这些网格点在

$3300\text{cm}^{-1} \sim 4100\text{cm}^{-1}$ 范围内的吸收系数,重排后得到吸收系数的概率密度分布,选取出该点处 g 值点的值,从而对所需要计算的任意气压、温度下的吸收系数进行插值。

在上节的91个质单色求积点上,对每一个 g 值,吸收系数是温度和气压的2维函数,图4是一个 $g(0.107)$ 值点上重排后的吸收系数随温度和气压的变化。

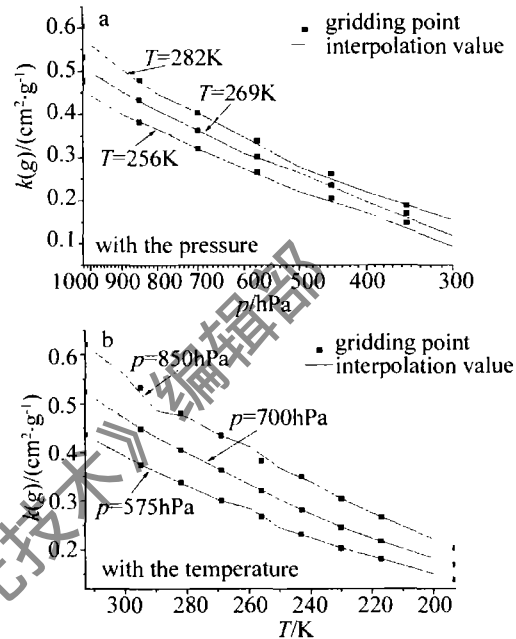


Fig. 4 The absorption coefficients at the grid points and the interpolated value for $g = 0.107$

2.2 非均匀情况下对应 $g(k)$ 的吸收系数的插值

编写了一个快速插值程序,对任意给定的温度和气压可以快速插值得到给定 g 值的吸收系数 $k_r(g)$,从而可以根据(5)式快速计算斜程非均匀路径的大气平均透过率。把这种方法应用到6个标准大气模式中,分别计算从大气顶到某一高度在 $3300\text{cm}^{-1} \sim 4100\text{cm}^{-1}$ 范围内的平均透过率。所得到的结果见图5。图5a~图5f分别表示在热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚极圈夏季、亚极圈冬季和美国标准大气6种大气模式下,用相关 k 分布法计算的从100km高度到低空13km高度以下(每隔0.5km取一个点)的透过率与用逐线积分法计算结果的比较,从以上几图可以看出,用相关 k 分布法计算的从100km高度到低层大气的透过率误差均在1%以内,能够满足实际应用中大多数情况下的需要。计算6种模式的透过率总共花费了几秒钟的时间,与传统的逐线积分法相比,时间缩短了几个量级,大大提高了计算效率。

误差分析:(1)所取波带较宽,分成几个小的吸收带来计算,效果应该会更好;(2)通过对吸收系数的插值函数作适当的优化和调整,在一定程度上亦能提高精度。

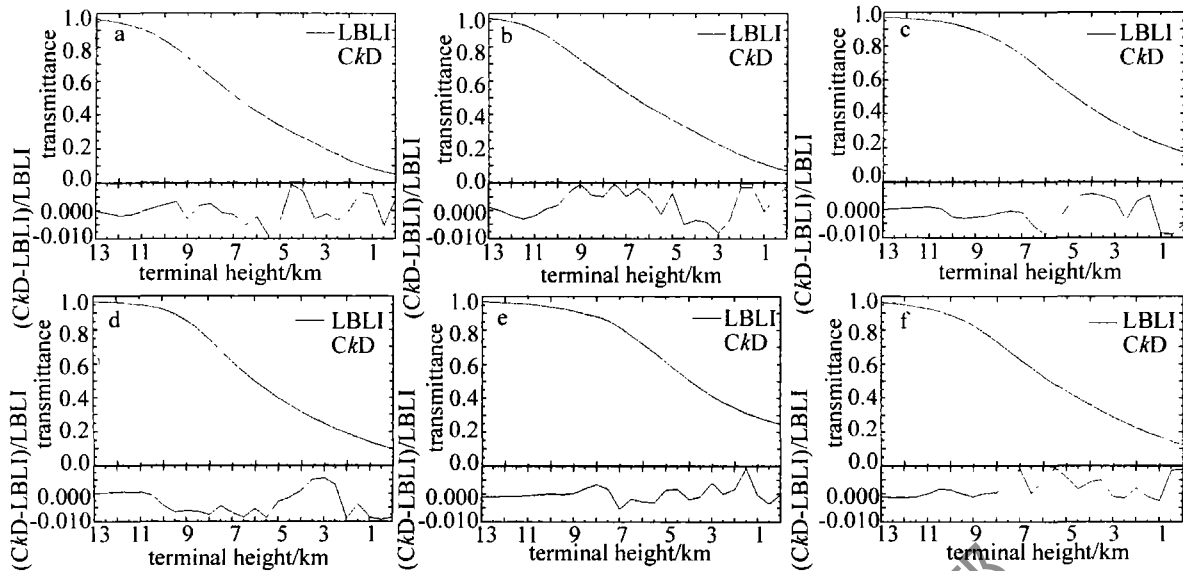


Fig. 5 The comparison between the results by CkD and those by LBLI on the six standard atmospheric models

3 小结

先在均质路径下选取出适当的 g 值点和积分区间,再选取适当的温度和气压点作为标准格点,对非均质情况下,任意温度和气压下的 g 值点的吸收系数进行插值,开发了一套能用于实际水汽 $2.7\mu\text{m}$ 强吸收带大气透过率计算的实用程序,经用6种大气模式检验,效果比较理想,能够达到实际使用所需的要求。作者计划把该方法用到强吸收带卷云的散射特性计算中。

参考文献

- [1] YANG Zh, LI Q, SUN S D. Study about atmosphere extinction coefficient based on 1064nm Mie-scattering lidar [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 170-173 (in Chinese).
- [2] SHI G Y. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents [D]. Tohoku University of Japan, 1981: 191.
- [3] GOODY R, WEST R, CHEN L, *et al.* The correlated- k method for radiation calculations in nonhomogeneous atmospheres [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1989, 42(6): 539-550.

- [4] LACIS A A, OINAS V. A description of the correlated k -distribution method for modeling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(D5): 9027-9063.
- [5] RIVIERE P, SOUFIANI A, TAINE J. Correlated- k and fictitious gas methods for H_2O near $2.7\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, 48(2): 187-203.
- [6] FU Q, LIU K N. On the correlated k -distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmosphere [J]. *Journal of the Atmosphere Sciences*, 1992, 49(22): 2139-2156.
- [7] RIVIERE P, SOUFIANI A, TAINE J. Correlated- k fictitious gas model for H_2O infrared radiation in the voigt regime [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1995, 53(3): 335-346.
- [8] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated Correlated- k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [9] TVOROGOV S D, RODIMOVA O B, NESMELOVA L I. On the correlated k -distribution approximation in atmospheric calculations [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(7): 071202, 1-10.
- [10] LIU K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. 2nd ed. San Diego: Elsevier Science Press, 2002: 133-137.

(上接第175页)

- [5] DUAN Y F, HUANG B C, ZHANG P, *et al.* All-fiber laser pulse amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(10): 1379-1382 (in Chinese).
- [6] LOU Q H, ZHOU J, KONG L F, *et al.* Recent progress of high power pulsed double cladding fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 510-515 (in Chinese).
- [7] WANG Y. Optimization of pulse amplification in ytterbium-doped

double-clad fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2139-2147.

- [8] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [9] LIU G H, LIU D M. Numerical analysis of Raman effects in high power fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 298-300 (in Chinese).