

# 线翼截断方式对大气辐射计算的影响<sup>\*</sup>

张 华<sup>1</sup> 石广玉<sup>2</sup> 刘 毅<sup>3</sup>

1 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029

3 中国科学院大气物理研究所, 中层大气与全球环境探测实验室, 北京, 100029

## 摘 要

在大气辐射传输计算方法中, 有 3 种基本方法, 即, 逐线积分方法,  $k$ -分布方法和带模式方法。其中, 逐线积分方法是最精确的计算大气透过率的方法, 本文根据透过率计算方式的不同, 将逐线积分方法分为追线积分法和追点积分法。由于逐线积分计算需要耗费大量的计算时间, 在大气遥感和大气探测业务中使用, 必须减少计算成本, 提高计算速度。本文在追线积分法的基础上, 给出了简化的逐线积分的基本方法, 在保证同样计算精度的同时, 大大提高了计算速度。对在精确的和简化的逐线积分下, 不同线翼截断方式(CUTOFF)对吸收系数、大气透过率和冷却率的影响进行了更详细的探讨。通过数值试验发现, 对谱线线翼的截断方式是影响辐射计算精度和计算速度的重要因子。在不同压力下, 用 CUTOFF=2 计算的吸收系数误差最大; 对 CUTOFF=1, 在大多数取样点上误差都小于 2%; 对 CUTOFF=3 或 4, 对绝大多数取样点上计算的吸收系数误差都在 5% 以内, 但所用的计算时间却明显减少。大气低层的透过率对不同的计算方法和不同的线翼截断方式不敏感; 对大气高层, 无论是对精确的还是简化的逐线积分方法, 当 CUTOFF=2 时的透过率结果与其他线翼截断方式的结果差别较大。通过比较, 本文给出线翼截断的优选方案。

**关键词:** 逐线积分, 线翼截断, 吸收系数, 大气透过率, 大气冷却率。

## 1 引 言

逐线积分就是逐条计入大气气体谱线吸收贡献的一种精确的透过率计算方法。目前, 随着计算机技术的高速发展, 利用大气分子的谱线资料汇编<sup>[1]</sup>, 从理论上来说, 要进行逐线积分是毫无困难的, 问题在于计算时间。将逐线积分方法投入到大气遥感和大气探测业务中使用, 减少计算成本, 提高计算速度仍然是至关重要的。而且, 到目前为止, 即使利用世界上最先进的大型计算机, 最为精确的辐射传输计算方法—逐线积分方法, 仍然不可能直接应用于气候模式中。必须采用一些以逐线积分为基础的近似方法, 如, 带模式或  $k$ -分布模式<sup>[2]</sup>, 才能使逐线积分方法间接地应用在气候模式中<sup>[3]</sup>。所以, 逐线积

分辐射模式是应用到气候模式中的辐射方案的计算基础和最后结果的比较标准。为了减少计算时间, 最基本的积分方法是使用可变波数步长的网格点, Kunde 和 Maguire<sup>[4]</sup>所提出的方案是这类方法的一个典型。由于  $k$ -分布方法要求等间隔波数积分步长, 所以该方案不能应用到  $k$ -分布方法中。

事实上, 影响逐线积分吸收系数数值计算精度和效率的主要是以下几个问题: 第一, 积分步长和积分样点的选取; 第二, 线翼贡献的截断, 与之相联系的是所考虑的区间外的谱线贡献的截断以及弱线的忽略; 第三, 在适用于不同大气压力高度的 Lorentz, Doppler 和 Voigt 三种线型中, 目前的流行做法是一律使用 Voigt 廓线<sup>[5-6]</sup>。但是, 计算 Voigt 廓线耗费的计算时间较多, 而且在离开线中心稍远的地方,

<sup>\*</sup> 初稿时间: 2006 年 6 月 8 日; 修改稿时间: 2006 年 12 月 30 日。

资助课题: 国家科技部气溶胶 973 课题(2006CB403707)、国家自然科学基金项目(40475034 和 40475015)、国家 863 计划大气光学重点实验室开放课题(HX-863)。

作者简介: 张华, 主要从事大气辐射理论和模式、温室气体和气溶胶气候影响等方面的研究工作。E-mail: huazhang@cma.gov.cn

Voigt 廓线实际上完全蜕化为 Lorentz 廓线的翼部。因此,可以在线中心附近的某一区间使用 Voigt 函数,在其他部分就利用简化的 Lorentz 函数关系进行计算,一般来说,使用 Voigt 和 Lorentz 函数的分界点取 200 就可以满足在保证一定精度的前提下提高计算速度<sup>[7]</sup>。计算结果表明,在上述 3 种因子中,不同线翼截断方式是最重要的,积分步长如何选取只对低层大气重要<sup>[8]</sup>。

对线翼贡献的截断方法,许多研究者都采用固定波数截断的方法<sup>[5-6,9-10]</sup>,这种方法虽然处理起来简单,但对高层大气过多地计算了弱线和强线翼部的可以忽略的贡献,增加了不必要的计算成本;而对低层大气,有可能对强线翼部的贡献考虑不足。张华和石广玉<sup>[7]</sup>虽然提出了以谱线线强为基础的相对截断方式,但是,并没有给出在逐线积分方法中哪种方案为优选方法。

本文提出了等间隔波数积分步长的追线法,以此为基础,给出了简化逐线积分的基本方法,着重研究了在精确和简化两种逐线积分方法下,不同线翼截断方式对计算的大气吸收系数,透过率和冷却率的影响。并在此基础上,提出了线翼截断的优选方案。

## 2 逐线积分方法

### 2.1 精确方法

由于近年来许多学者<sup>[9-10]</sup>在逐线积分计算中,都从谱线中心开始取  $5 \text{ cm}^{-1}$ ,然后将线翼贡献截断。为了与这些工作进行比较,本文也选取固定  $5 \text{ cm}^{-1}$  的线翼贡献截断方式,并按式(1)的严格波数积分作为本文计算的比较标准。其中,对整层大气都采用 Voigt 廓线<sup>[11]</sup>。

对波数间隔  $\Delta\nu$  内的平均透过率函数  $\bar{T}(u)$ ,按照下式严格进行的波数积分称为精确的逐线积分

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

Lorentz 线型的吸收系数  $k_\nu$  为

$$k_\nu = \frac{S}{\pi} \frac{\alpha_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2} \quad (2)$$

对 Doppler 线型,  $k_\nu$  为

$$k_\nu = \frac{S}{\alpha_D \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\alpha_D}\right)^2\right] \quad (3)$$

而对混合加宽的 Voigt 线型,  $k_\nu$  为

$$k_\nu = Sf(\nu - \nu_0) =$$

$$\frac{k_0 Y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)}{Y^2 + (x-t)^2} dt \quad (4)$$

式中  $u$  是吸收物质量,  $k_0 = S/(\alpha_D \sqrt{\pi})$ ,  $x = (\nu - \nu_0)/\alpha_D$ ,  $Y = \alpha_L/\alpha_D$ 。  $S$  为谱线线强;  $\alpha_L$ 、 $\alpha_D$  分别是 Lorentz 和 Doppler 加宽的半宽度,而  $\nu_0$  为谱线中心的波数。

在按式(1)的实际数值计算中,传统的方法是用追点法进行波数(频率)积分。所谓追点法就是将波数取样点作为第一循环参量,把所考虑的波数区间内所有谱线的贡献逐一求出的方法,我们将该方法作为本文精确方法的参考标准。同时,本文提出一种新的积分方法,即追线法。追线法就是将某一谱线作为第一循环参量,把它对所考虑的波数区间内所有取样点的贡献逐一求出的方法。由于在追点法中需要反复判断有贡献的谱线范围,所以在非并行的标量运算中耗费的计算时间较多。追线法则大大提高了计算速度。

这里,需要说明的是,目前由于缺乏完整的和精确的实验室测量结果,无法判断不同逐线积分方法的最终精度。因此,逐线积分的精度比较只能在模式之间进行。我们选取这一“参考标准”,只是为了与传统的逐线积分进行比较,并不意味着它绝对是最精确的,也不意味着它是效率最好的。

### 2.2 线翼截断方法

从理论上来说,在吸收系数  $k_\nu$  的计算中,对频率的积分限应当取作无穷大。换句话说,在计算  $k_\nu$  时,应当考虑无穷远处的谱线的贡献。但是,由于谱线强度和谱线的远翼行为都存在着某种误差和不确定性,因此无限制地计及谱线远翼的贡献是没有实际意义的。

可以有 3 种方式将谱线线翼的贡献截断:

(1) 从谱线的中心波数  $\nu_0$  开始,在某一固定的波数范围内,将谱线截断。Lacis 和 Oinas<sup>[9]</sup> 以及其他作者,使用的就是这种方式,即对每条谱线都选择从其中心开始的  $5 \text{ cm}^{-1}$  的宽度作为对一条谱线的截断波数。这种做法使用起来相当简单,但是,对于大气低层的强吸收线来说,这可能过低估计线翼吸收的贡献;而对弱线,或者在大气高层,这种做法却又不必要地浪费计算时间。以  $\text{CO}_2$   $15 \mu\text{m}$   $665\text{--}675 \text{ cm}^{-1}$  为例,其多普勒半宽度  $\alpha_D = (5 \times 10^{-4}) \text{ cm}^{-1}$ ,在大气高层,由式(3)得到,

谱线吸收是按  $\exp\{-[(v-v_0)/\alpha_D]^2\}$  衰减的。如果  $v-v_0=5\text{ cm}^{-1}$ , 那么指数函数的指数部分的值将是  $-10^8$ ; 也就是说, 此时吸收系数已经变为线中心的  $e^{-100000000}$ , 早已没有必要考虑。

(2) 从谱线的中心开始, 以谱线半宽度的某一固定倍数, 将谱线截断。Shi<sup>[12]</sup> 和 Chou<sup>[13-14]</sup> 使用此种方案。可根据所考虑的光谱区间中的最小线强以及精度要求, 在离开线中心的某一波数处将线翼贡献截断。设  $v_c$  为截断波数, 并令

$$v_c = \beta\alpha_L \quad (5)$$

$\beta$  是某一整数; 为了部分地补偿截断所带来的误差, 可将线强重新校正为<sup>[7,15]</sup>

$$S' = S/[1 - 2/(\beta\pi)] \quad (6)$$

对  $\Delta v$  区间外的谱线贡献, 亦作类似处理。这种方案使用起来也比较简便, 但仍然存在对弱线线翼贡献考虑过分, 不必要地浪费计算时间, 而对强线线翼贡献又可能考虑不足。

(3) 张华和石广玉<sup>[7]</sup> 提出了两种新的线翼贡献截断方案, 均采用相对截断线翼贡献的方式。从公式形式上来说, 这 2 种方案与上述第 2 种方案类似, 但式(5)中的  $\beta$  不再是固定的, 而是根据谱线强度变化。第 1 种, 假定  $\Delta v$  区间内谱线的最小强度为  $S_{\min}$ , 如果第  $l$  条谱线的强度为  $S_l$ , 为了保持相同大小的吸收系数不被忽略, 则

$$\beta = \beta_{\min} \sqrt{S_l/S_{\min}} \quad (7)$$

$\beta_{\min}$  为某一事前指定的常数。并用式(6)对线强进行重新校正。第 2 种, 假定  $\Delta v$  区间内谱线的最大强度为  $S_{\max}$ , 则

$$\beta = \beta_{\max} / \sqrt{S_{\max}/S_l} \quad (8)$$

$\beta_{\max}$  也是事前指定的常数。并用式(6)对线强进行重新校正。

### 2.3 简化方法

在以上研究工作的基础上, 本文得到一种简化的逐线积分方法, 其特点是: (1) 利用追线法积分方程(1)。(2) 根据谱线线强, 以半宽度的不同倍数对各条谱线的线翼进行截断。(3) 根据张华和石广玉<sup>[7]</sup>, 在所有压力和温度下, 对用 Voigt 函数和 Lorentz 函数计算吸收系数的分界点  $I$ , 取  $I=200$ , 当取样点  $i < I$  时, 用 Voigt 线型计算吸收系数; 而当  $i > I$  时, 则用下述简化的 Lorentz 线型函数式(10)计算。(4) 当大气压力  $p < 100\text{ hPa}$  时, 取积分

步长  $\delta_v = \alpha_D$ ;  $p > 100\text{ hPa}$  时, 取  $\delta_v = \alpha_L$ , 然后用三次样条函数将吸收系数内插到与  $p < 100\text{ hPa}$  相同数目的积分取样点上。

假定从线中心  $v=v_0$  开始, 在波数(频率)轴上取积分步长  $\delta_v$ , 按下法选取积分取样点<sup>[8,15]</sup>,

$$M\delta_v = v - v_0 = M\alpha \quad (9)$$

其中,  $M$  为整数, 而  $\alpha$  表示 Lorentz 半宽  $\alpha_L$  或 Doppler 半宽  $\alpha_D$ 。则式(2)简化为

$$k_v = \frac{S}{\pi\alpha_L} (1+U^2)^{-1} \quad (10)$$

其中,  $U=M, M < I=200$ 。

如图 1 所示给出简化方法的谱线区间示意图。在实际计算中, 根据谱线所在位置可将  $\Delta v$  区间(左右端点分别用  $A$  和  $B$  表示)分为 7 个不同类型的子区间。其中,  $M$  是总取样点数;  $M_L$  代表各条谱线的取样点数, 可由  $M_L = v_c/\delta_v$  求得,  $\delta_v = (B-A)/M$  是积分步长,  $v_c = \beta_L\alpha$  为谱线  $L$  的截断波数; 如上所述,  $I$  为用 Voigt 函数和用简化的 Lorentz 函数式(10)计算吸收系数的分界点;  $A'$  和  $B'$  分别代表所计算区间  $[A, B]$  之外  $5\text{ cm}^{-1}$  处的两个端点。谱线  $L_1$  位于子区间  $[A', 1]$  内, 谱线  $L_2$  位于子区间  $[1, I]$  内, 谱线  $L_3$  位于子区间  $[I, M_L]$  内, 谱线  $L_4$  位于子区间  $[M_L, M-M_L]$  内, 谱线  $L_5$  位于子区间  $[M-M_L, M]$ , 谱线  $L_6$  位于子区间  $[M-I, M]$  内, 谱线  $L_7$  位于子区间  $[M, B']$  内。显然, 在计算程序编制中应当区分这 7 种不同类型的子区间。为了节约用 Voigt 函数计算吸收系数所用的计算时间, 我们只计算吸收线的左半部, 利用对称性就可得出右半部的值。

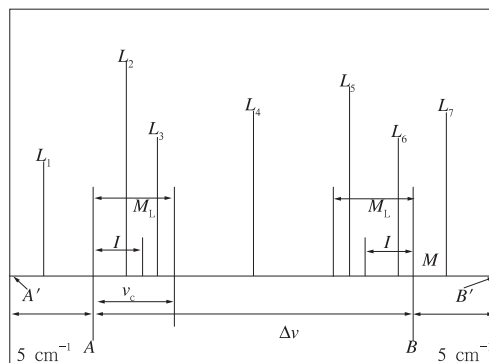


图 1 谱线区间示意图

Fig. 1 The schematic of region dividing for spectral lines

### 3 计算结果

#### 3.1 不同线翼截断方式对吸收系数的影响

在此,我们以  $\text{CO}_2$   $15 \mu\text{m}$  带的  $500\text{--}800 \text{ cm}^{-1}$  区间为例,在简化方法下,计算如下 4 种不同的线翼截断方式(用 CUTOFF 表示)对不同压力下吸收系数的影响:(1) CUTOFF 1:  $v_c = 5 \text{ cm}^{-1}$ , 追线法;(2) CUTOFF 2: 利用式(5), 其中  $\beta = 300$ ;(3) CUTOFF 3: 利用式(7), 其中  $\beta_{\min} = 1$ ;(4) CUTOFF 4: 利用式(8), 其中  $\beta_{\max} = 30000$ 。

图 2 给出在简化方法下,用以上不同线翼截断方式计算的吸收系数与精确方法下固定  $5 \text{ cm}^{-1}$  线翼截断方式计算的吸收系数逐点的百分误差。图中实线是吸收系数重排前的结果,虚线表示吸收系数重排后的结果。在此给出吸收系数重排后的结果,主要是考虑以后它们在  $k$ -分布方法<sup>[9-10,12,16]</sup>中的应用。以  $p = 10 \text{ hPa}$  为例,对 CUTOFF 1,最大百分误差为 8%,主要位于右端点处,在大多数点上的误差都小于 2%;对 CUTOFF 2,最大百分误差为 26%;对 CUTOFF 3 和 CUTOFF 4,最大百分误差

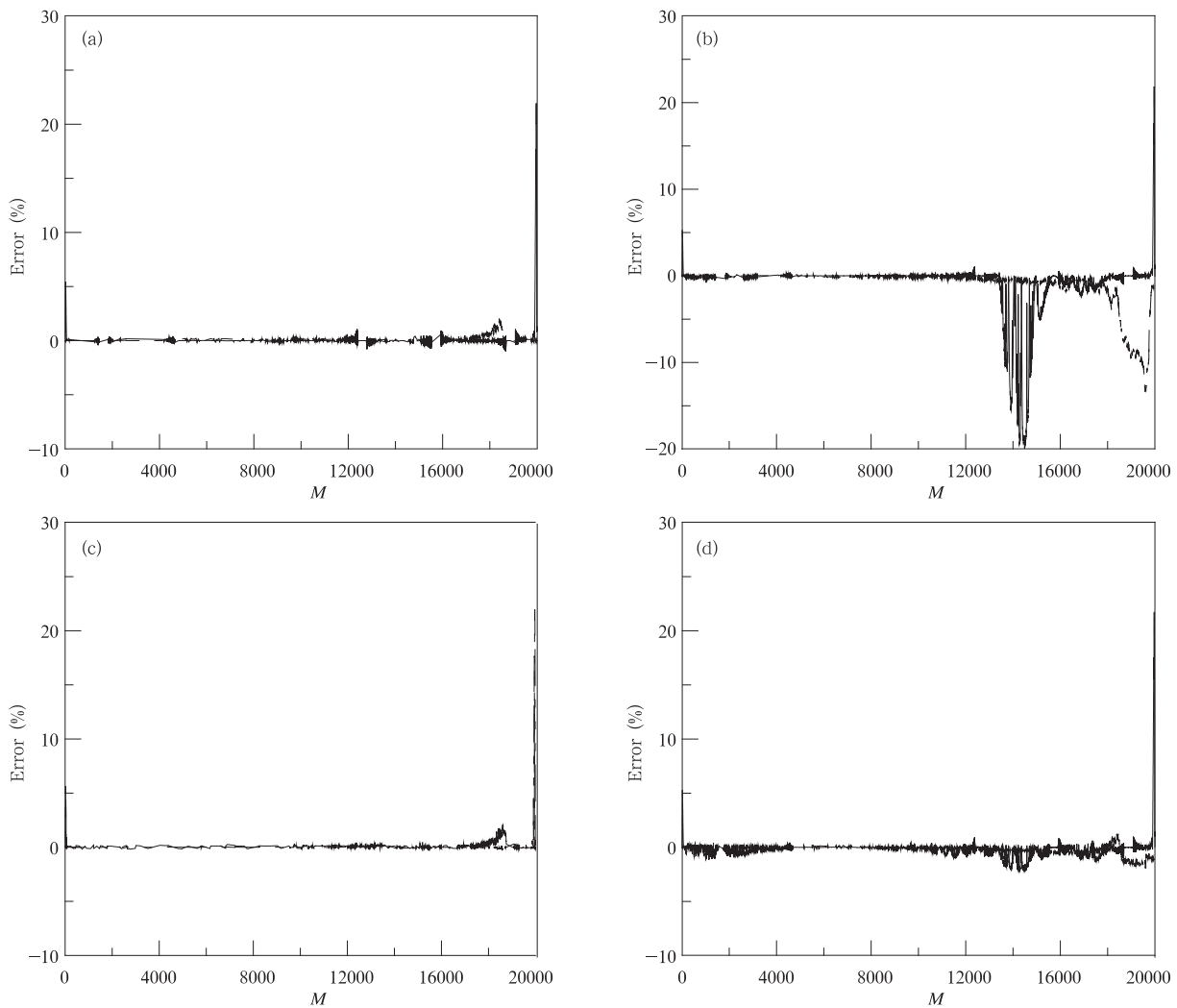


图 2 用不同线翼截断方式计算的吸收系数与精确方法固定  $5 \text{ cm}^{-1}$  线翼截断方式计算的吸收系数百分误差  
(a. CUTOFF 1; b. CUTOFF 2; c. CUTOFF 3; d. CUTOFF 4)

Fig. 2 The relative errors between absorption coefficients calculated by each of different cutoff schemes under simplified line-by-line (LBL) and those by fixed cutoff of  $5 \text{ cm}^{-1}$  under accurate LBL methods  
(a. CUTOFF 1; b. CUTOFF 2; c. CUTOFF 3; d. CUTOFF 4)

为 8%，在大多数点上误差都小于 5%。其他压力的结果与压力  $p=10$  hPa 的结果相似(图略)；在大气低层， $p>100$  hPa 时，吸收系数逐点的百分误差对不同的线翼截断方式不敏感，误差分布完全相同(图略)，这可能因为当  $p>100$  hPa 时，吸收系数进行了内插造成的。通过比较我们得出：在不同压力下，用 CUTOFF 2 计算的吸收系数误差最大，说明以往的研究者所用的方法不是优选方法；对 CUTOFF 3 或 4，对绝大多数点上计算的吸收系数百分误差都在 5% 以内，特别是对重排过的吸收系数，仅在吸收系数较小时误差较大，但用这两种方法计算吸收系数所用的计算时间明显减少。

吸收系数的检验是一个方面，最重要的是用冷却率结果来进行检验，因为较小吸收系数的较大百分误差并不一定对冷却率结果带来明显影响。

### 3.2 不同线翼截断方式对透过率及冷却率的影响

在计算冷却率时，对吸收系数的计算方法有以下 8 种选择。方法 1，精确的逐线积分，线翼截断方

式为：(1) CUTOFF 1，追点法；(2) CUTOFF 2；(3) CUTOFF 3；(4) CUTOFF 4。方法 2：简化的逐线积分，4 种线翼截断方式与方法 1 相同，但对 CUTOFF 1，用追线法积分。

图 3a、3b 给出压力  $p=10$  hPa 和温度  $T=260$  K，在上述两种不同方法下，不同的线翼截断方式对大气透过率的影响。其中，吸收物质量的选取范围使得大气透过率的数值从 0.0 变到 1.0。从计算结果上看，对大气低层，所有方法的透过率结果重叠在一起，这说明大气低层的透过率对不同的计算方法和不同的线翼截断方式不敏感，这与上述吸收系数的结果是一致的；对大气高层，无论是方法 1 还是方法 2，当 CUTOFF 2 时，透过率的结果与其他几种方法的结果差别较大，这也与吸收系数的计算一致。在此，我们应当注意的是，在实际大气中，当压力较低时，吸收物质量的变化不可能象图中给出的这样大。

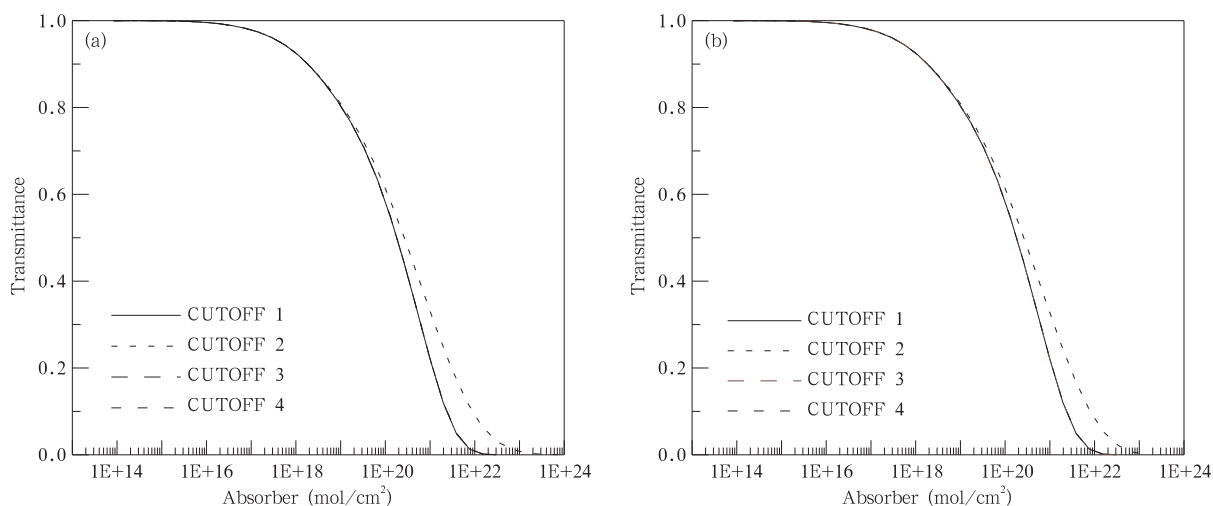


图 3 压力  $p=10$  hPa 和温度  $T=260$  K，在精确和简化方法下，不同的线翼截断方式的透过率随吸收物质量的变化  
(a. 精确方法, b. 简化方法; CUTOFF 1, 3, 4 重合)

Fig. 3 The change of transmittance of different cutoff schemes with absorber under accurate and simplified LBL methods under  $p=10$  hPa and  $T=260$  K

(a. Accurate method, b. Simplified method; Line CUTOFF 1, 3, 4 is coincide)

仍以  $\text{CO}_2$  665—675  $\text{cm}^{-1}$  区间为例，表 1 比较了两种方法下 4 种线翼截断方式的冷却率。由表 1 我们可以看到，无论是对精确的积分方法还是本文的简化方法，CUTOFF 4 的精度都很高，在所有的大气高度上，冷却率的绝对误差均小于 0.001 K/d，

而且所用的计算时间最少；对简化方法，当 CUTOFF 4 时，计算时间可以节省近两个数量级；其次是 CUTOFF 3，精度也很高，但所用的计算时间比 CUTOFF 4 高。由此得出，在计算冷却率时，线翼截断方式的优选方案是 CUTOFF 4。

表 1 不同的线翼截断方式对冷却率计算精度和 CPU 时间的影响

Table 1 The effect of different cutoff schemes on the accuracy and CPU time in cooling rate calculation

高度 (km)	方法 1(CUTOFF)				方法 2(CUTOFF)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	CPU(s)				CPU(s)			
	6808.0	2457.5	1144.8	949.2	1090.5	110.0	127.6	72.3
	C (K/d)	$\Delta C_2$ (K/d)	$\Delta C_3$ (K/d)	$\Delta C_4$ (K/d)	$\Delta C_1$ (K/d)	$\Delta C_2$ (K/d)	$\Delta C_3$ (K/d)	$\Delta C_4$ (K/d)
60.83	-1.05958	0.00537	1E-05	3E-05	0	0.00765	1E-05	5E-05
58.62	-1.28569	0.00877	2E-05	5E-05	1E-05	0.01263	3E-05	8E-05
56.34	-1.54974	0.01376	3E-05	7E-05	0	0.02001	7E-05	0.00012
54.00	-1.87365	0.02076	1E-04	1E-04	-1E-05	0.03038	0.00018	0.00018
52.81	-2.06619	0.02522	0.0002	0.0001	-1E-05	0.03699	0.00028	0.00023
50.37	-2.45157	0.03565	0.0004	0.0002	-2E-05	0.05234	0.00068	0.00034
47.90	-2.26956	0.0451	0.0005	0.0002	-1E-05	0.06477	0.00098	0.00046
46.66	-2.02612	0.04893	0.0005	0.0003	-1E-05	0.06895	0.00096	0.00051
44.23	-1.54405	0.05622	0.0004	0.0003	-1E-05	0.07602	0.00083	0.00062
41.84	-1.13488	0.06338	0.0004	0.0004	-2E-05	0.08243	0.00063	0.00072
40.67	-0.97178	0.06703	0.0003	0.0004	-3E-05	0.08584	0.00051	0.00076
38.36	-0.71808	0.07451	0.0002	0.0005	-4E-05	0.09317	0.00031	0.00085
36.10	-0.54527	0.08131	0.0001	0.0006	-6E-05	0.09338	0.00014	0.00085
34.99	-0.4856	0.08432	0.0001	0.0006	-7E-05	0.08609	3E-05	0.00071
32.81	-0.392	0.07633	5E-05	0.0005	-8E-05	0.06802	-1E-04	0.00031
30.67	-0.30959	0.05446	-1E-05	0.0003	-9E-05	0.04797	-0.0001	5E-05
28.57	-0.23268	0.03601	-3E-05	6E-05	-9E-05	0.03139	-0.0002	-0.0001
26.51	-0.16454	0.0161	-3E-05	-4E-05	-8E-05	0.01298	-0.0001	-0.0002
22.49	-0.07753	-0.00986	-2E-05	-8E-05	-2E-05	-0.0105	-5E-05	-0.0001
20.51	-0.04317	-0.01328	-1E-05	-5E-05	2E-05	-0.0131	0	-4E-05
18.56	-0.01703	-0.00997	0	-3E-05	3E-05	-0.0095	2E-05	0
16.62	-0.00595	-0.00493	0	-1E-05	2E-05	-0.0045	2E-05	1E-05
13.65	0.00304	-0.00091	0	0	0	-0.0008	0	0
11.03	-0.00135	-2E-05	0	0	0	-1E-05	0	0
9.98	-0.00118	0	0	0	0	0	0	0
7.08	-0.00046	0	0	0	0	0	0	0
5.17	-0.00023	0.00001	0	0	0	0	0	0
3.10	-0.0001	0.00001	0	0	0	-1E-05	0	0
1.01	-0.00002	0	0	0	0	0	0	0
0.00	-0.00000	0	0	0	0	0	0	0

注:表中 C(单位:K/d)表示参考标准,即方法 1,固定  $5 \text{ cm}^{-1}$  线翼截断,用追点法进行波数积分。 $\Delta C_i$  ( $i=2,3,4$  和  $i=1,2,3,4$ ) (单位:K/d) 分别表示在精确方法(方法 1)和简化方法(方法 2)下,4 种线翼截断方式的冷却率与 C 的绝对差别。

Here, C represents reference cooling rate with  $5 \text{ cm}^{-1}$  cutoff and integration with sampling point loop.  $\Delta C_i$  ( $i=2,3,4$  and  $i=1,2,3,4$ ) (unit: K/day) are differences of cooling rate between each of three cutoff schemes under accurate LBL method or each of four cutoff schemes under simplified LBL method and accurate LBL method with fixed cutoff of  $5 \text{ cm}^{-1}$ , respectively

## 4 结 论

本文分别在精确的和简化的逐线积分方法下,对各种线翼截断方式对吸收系数、大气透过率和大气冷却率的影响进行了详细的研究。通过比较我们得出:在不同压力下,用 CUTOFF 2 计算的吸收系数误差最大;对 CUTOFF 1,在大多数点上误差都小于 2%;对 CUTOFF 3 或 4,对绝大多数点上计算的吸收系数百分误差都在 5% 以内,特别是对重排

后的吸收系数,仅在吸收系数较小时误差较大,但用 CUTOFF 3 或 4 这两种方法计算吸收系数所用的计算时间明显减少。大气低层的透过率对不同的计算方法和不同的线翼截断方式不敏感;对大气高层,无论是对精确的还是简化的逐线积分方法,当 CUTOFF 2 时的透过率结果与其他线翼截断方式的透过率结果差别较大,说明以往的研究者所用的方法不是优选方案。

通过对透过率和冷却率结果的综合分析,得出:

无论对精确的逐线积分还是对简化的逐线积分,以最大谱线线强为参考标准的相对线翼截断方式(本文 CUTOFF 4)的精度最高,是优选的谱线线翼截断方法。

**致谢:**感谢南京信息工程大学的崔振雷硕士对本文的帮助。

## 参考文献

- [1] Rothman L S, Rinsland C P, Goldman A, et al. The HIT-RAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HIT-RAN Atmospheric Workstation). <http://www.hitran.com/>, Updated HITRAN2004
- [2] 沈元芳,黄丽萍,徐国强等. 长波辐射对大气变化的敏感性和在 WRF 模式中的应用检验. *气象学报*, 2004, 62(2): 213-227
- [3] 张华,石广玉,刘毅. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究. *大气科学*, 2005, 29(4): 581-594
- [4] Kunde V G, Maguire W C. Direct integration transmittance model. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1974, 14: 803-817
- [5] Clough S A, Iacono M J, Moncet J L. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15761-15785
- [6] Clough S A, Iacono M J. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates 2. Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide and the halocarbons. *J Geophys Res*, 1995, 100: 16519-16535
- [7] 张华,石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法. *大气科学*, 2000, 24(1): 111-121
- [8] 张华. 非均匀路径相关  $k$ -分布方法的研究[D]. 北京中国科学院大气物理研究所, 1999: 24-51
- [9] 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 Geophys Res*, 1991, 96: 9027-9063
- [10] Fu Q, Liou K-N. On the correlated  $k$  distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J Atmos Sci*, 1992, 49: 2139-2156
- [11] Humlicek J. Optimized computation of the Voigt and complex probability functions. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1982, 27: 437-444
- [12] Shi G Y. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents. [D], Tohoku Uni. of Japan, 1981
- [13] Chou M D, Arking A. Computation of infrared cooling rates in the water vapor bands. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 855-867
- [14] Chou M D, Arking A. An efficient method for computing the absorption of solar radiation by water vapor. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 798-807
- [15] 石广玉. 大气辐射计算的  $k$ -分布模式. *大气科学*, 1998, 22(6): 659-676
- [16] Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al. An optimal approach to overlapping bands with correlated  $k$ -distribution method and its application to radiative calculations. *J Geophys Res*, 2003, 108, D20, 4641, doi: 10.1029/2002JD003358

## THE EFFECTS OF LINE-WING CUTOFF ON RADIATIVE CALCULATIONS

Zhang Hua<sup>1</sup> Shi Guangyu<sup>2</sup> Liu Yi<sup>3</sup>

*1 Laboratory for Climate Studies (LCS), National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

*2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Beijing 100029*

*3 Laboratory for middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Beijing 100029*

### Abstract

There are three basic methods in atmospheric radiative transfer calculations, which are line-by-line (LBL) integration, correlated  $k$ -distribution method, and band model. The LBL integration is the most accurate one of all. It is divided into two approaches named as integration by lines and by sampling points in the calculated spectral regions according to different integration methods when calculating atmospheric transmissions. Because LBL integration is the most expensive of all, it is necessary and important to deduce calculation time but increase calculation speed when it is put to use in the daily operation in atmospheric remote sensing and atmospheric sounding. A simplified LBL method is given in this paper on the basis of integration by lines, which increases computational speed greatly with keeping the same accuracy. Then, it discusses the effects of different schemes of line-wing cutoff on atmospheric absorption coefficient, transmittance and cooling rate under accurate and simplified LBL methods with a great detail. It is shown by this numerical study that the way to cut spectral line-wing has a great effect on the accuracy and speed of radiative calculations. The relative errors of the calculated absorption coefficients are the largest for the method of CUTOFF 2 under different pressures, while for the method of CUTOFF 1, they are less than 2% at most of sampling points and for the method of CUTOFF 3 or 4, they are almost less than 5% in the calculated spectral region, however, the calculation time is deduced apparently. We find in this study that the transmittance at the lower atmosphere is not sensitive to the different approaches for accurate or simplified and the different cutoff methods to the line wing that given in this work. Whereas for the higher atmosphere, the differences of transmittance results between the method OF CUTOFF 2 and other three cutoff methods are the biggest of all no matter for the accurate LBL or for the simplified LBL integrations. By comparison, the best scheme of line-wing cutoff is given in this paper at last.

**Key words:** LBL integration, Line-wing cutoff, Absorption coefficient, Transmittance, Cooling rate.