

两种计算长波辐射传输的近似方法

赵高祥 汪宏七

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

在二流近似的基础上,提出了两种计算晴空大气中长波辐射传输的方法,整个长波辐射区域被分成两个宽的光谱带,它们分别对相应的宽带光学厚度和发射率作参数化处理.这两种方法,所需的计算时间很少,但有相当好的精度,因而适于在大气环流模式中进行辐射传输的计算.

关键词: 辐射传输; 辐射近似计算.

一、引 言

人类活动造成的地球大气中二氧化碳和其他一些“温室效应”气体的显著增加,观测到的南极上空臭氧量的减少,以及地球表面森林面积的减少,沙漠范围的扩大,可能已经干扰了地球-大气系统,而它们对未来地球气候可能的影响也愈益受到人们的关注.目前,利用大气环流模式来模拟气候,则是用来了解这些干扰因素对地球气候可能产生的影响的一个重要手段.由于大气中的辐射过程是驱动大气环流的一个主要物理过程,而且许多重要的气候扰动因素,最初也是通过干扰地气系统的辐射收支来对地球气候产生影响的,因此在环流模式中的辐射传输计算必须有足够好的精度;但由于计算机时的限制,计算速度要足够快,这就使得许多精确的然而十分复杂和费时间的计算方法不能用到环流模式中.目前在环流模式中所用的都是些大为简化的参数化的辐射计算方法.

在环流模式中,所关心的是总的辐射能量的传输,以及由于辐射能的辐合或辐散所造成的对地面和大气层的加热或冷却.因此,在计算长波辐射通量传输和长波辐射冷却率时,在能保持一定的精度的情况下,所用的光谱间隔的数目显然是越少越好,下面我们给出的两种晴空大气中长波辐射传输的近似计算方法,所用的光谱间隔的数目都减少到只有2个,但仍有相当好的精度.在这两种近似计算方法中,分别用多项式来近似相应的宽光谱间隔上的等效光学厚度和宽带通量发射率与大气层中的吸收气体等效含量之间的关系;考虑了对晴空大气中长波辐射能量传输起主要作用的水汽吸收带、8到12 μm 大气窗区连续吸收、二氧化碳15 μm 带和臭氧9.6 μm 带,以及不同吸收气体的吸收带相互重迭的影响.

二、辐射传输方程

对长波辐射, 可以忽略大气散射的影响, 则在辐射场与方位角无关的假定下, 对某一频率, 在平面平行大气的情况下, 由二流近似得到的辐射传输方程可以表示为

$$\mu \frac{dM^{\pm}(\delta)}{d\delta} = M^{\pm}(\delta) - B(T(\delta)), \quad (1)$$

式中 M^+ 和 M^- 分别表示向上和向下长波辐射通量, μ^+ 和 μ^- 分别表示等效的向上和向下辐射天顶角的余弦, 取 $1/\mu^{\pm} = \pm 1.66$, δ 为某一大气层中的光学厚度, B 为普朗克通量, T 为光学厚度 δ 处的温度. 假定普朗克通量 B 在某一大气层中随光学厚度是线性变化的, 即 $B = B_0 + B_1\delta$, 其中 B_0 为该大气层边界 ($\delta=0$) 处的值, $B_1 = \partial B / \partial \delta$ 为常数, 则由 (1) 式可以得到^[1]

$$M^{\pm}(\delta) = B_0 + (\delta + \mu^{\pm})B_1 + C^{\pm}e^{\delta/\mu^{\pm}}, \quad (2)$$

由 (2) 式, 在第 i 层大气的上下界的向上和向下辐射通量可分别表示为

$$M_i^+(0) = B_i + (B_{i+1} - B_i) / 1.66\delta_i + C_i^+ e^{-1.66\delta_i}, \quad (3)$$

$$M_i^-(\delta_i) = B_{i+1} - (B_{i+1} - B_i) / 1.66\delta_i + C_i^- e^{-1.66\delta_i}, \quad (4)$$

式中

$$C_i^+ = M_{i+1}^+(0) - B_{i+1} - (B_{i+1} - B_i) / 1.66\delta_i, \quad (5)$$

$$C_i^- = M_i^-(0) - B_i + (B_{i+1} - B_i) / 1.66\delta_i. \quad (6)$$

在上面的式子中, 第 i 层大气的光学厚度对向上辐射和向下辐射是不同的.

在大气顶和地面的边界条件为

$$M_1^-(0) = 0 \quad (\text{大气顶}),$$

$$M_{N1}^+(0) = \varepsilon_{N1} B_{N1} + (1 - \varepsilon_{N1}) M_{N1}^-(0) \quad (\text{地面}).$$

其中 ε_{N1} 和 B_{N1} 分别为地面发射率和普朗克辐射通量, $M_{N1}^+(0)$ 和 $M_{N1}^-(0)$ 为地面向上和向下辐射通量, $M_1^-(0)$ 为大气顶向下辐射通量. 在大气层与层之间的边界条件为

$$M_i^{\pm}(\delta_i) = M_{i+1}^{\pm}(0).$$

三、长波辐射传输的近似计算

1. 方法 1 (宽带有效光学厚度法)

上面的 (1) 到 (4) 式是对单色辐射得出的, 但在近似计算中, 仍假定这些式子可用来描

述宽光谱带上的辐射传输.这时,式中的光学厚度是与大气层的压力、温度和吸收气体密度有关的相应于宽光谱带上的等效量.在大气参数已知的情况下,只要能得到这样的等效光学厚度,则宽带向上和向下辐射通量仍可用(3)和(4)式及边界条件来得到.

某一大气层对长波辐射的吸收和发射,取决于该层的压力、温度和吸收气体密度.在近似计算中,我们所考虑的主要吸收气体是 H_2O 、 CO_2 和 O_3 , 它们在某一大气层 i 中的有效含量可以用下面的式子来计算:

$$u_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1z(i)w_{\text{H}_2\text{O}}(273/\bar{T}_i)^{0.45}(\bar{P}_i/1013.25)^{0.9},$$

$$u_{\text{CO}_2} = z(i)(w_{\text{CO}_2}/330)(273/\bar{T}_i)^{1.35}(\bar{P}_i/1013.25)^{1.75},$$

$$u_{\text{O}_3} = 46.6667z(i)w_{\text{O}_3}(\bar{P}_i/1013.25)^{0.4}.$$

式中 $z(i)$ 为大气层的厚度(km), $\bar{T}_i$ 和 $\bar{P}_i$ 为大气层的平均温度和平均压力(hPa), $w_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 w_{O_3} 为层中的平均水汽和臭氧密度(g/m^3), w_{CO_2} 为大气中二氧化碳的体积混合比(PPm).

在近似计算中,我们把从 100cm^{-1} 到 2600cm^{-1} 的红外光谱区域划分成 100 到 980cm^{-1} 和 980 到 2600cm^{-1} 二个宽的光谱带.由于对宽光谱带来说,大气层的等效光学厚度与吸收气体的有效含量之间并无明确的函数关系,而且,在上述的二个宽光谱带中,还分别有 H_2O 和 CO_2 , H_2O 和 O_3 的重迭吸收,使得情况更为复杂.为此,我们用下面的多项式来近似表示光学厚度与吸收气体有效含量之间的关系

$$\delta_i = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m (u_{i1})^{m/4} + \sum_{n=1}^N b_n u_{i2}^n \quad (7)$$

或

$$\log \delta_i = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m (\log u_{i1})^m + \sum_{n=1}^N b_n (\log U_{i2})^n \quad (8)$$

式中 u_{i1} 为水汽的有效含量, u_{i2} 在 $(100-980\text{cm}^{-1})$ 和 $(980-2600\text{cm}^{-1})$ 二个光谱带中分别表示 CO_2 和 O_3 的有效含量.在(7)和(8)式中,都近似地把某一个波段中二种吸收气体对总的光学厚度的贡献包括在内,在实际的应用中,采用(7)或(8)式则根据给定的大气垂直分层情况,通过试验选择给出较好结果的一种,一般在大气上部用(7)式可能得到较好的结果.

为了确定(7)或(8)式中的系数,首先由精确方法计算出在不同模式大气中,宽光谱间隔上的向上和向下辐射通量,然后由(3)和(4)式分别对向上和向下辐射得出各大气层中相应的光学厚度 δ_i .这样,就可以对由(7)或(8)式构成的方程组,用最小二乘法确定待定的系数.

在得出这些系数之后,就可以首先由已知的大气参数,计算吸收气体的等效含量.然后,用(7)或(8)式,计算各层上的有效光学厚度,再利用边界条件,先由(4)式自上而下得出大气各层上的向下辐射通量,再用(3)式由下而上得到向上辐射通量,进而计算出各大气层上的长波辐射加热率,在表 1 中给出在大气层的划分取为 $p/p_0 = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$

和 1.0 时, (8) 式中的系数 a 和 b , 其中 p 和 p_0 分别为大气层和地面气压. 表中与向下辐射通量 M^- 和向上辐射通量 M^+ 相应的系数是分别用来计算这些量的.

表 1 对方法 1 在大气划分成 5 层的情况下, 相应于 (8) 式中的系数 a 和 b

波段	$M^\pm$	P/P_0	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1
100—980 cm^{-1}	M^-	< 0.5	-2.37625	-2.45213	-1.08641	-1.137753	-7.38552
		> 0.5	-2.240274	0.709491	0.554125	0.186142	-1.41256
	M^+	< 0.5	1.39720	0.347877	-1.155917	-0.041362	5.31240
		> 0.5	0.806671	2.29965	2.33361	0.792637	1.03304
980—2600 cm^{-1}	M^-	< 0.5	-6.17325	-1.64332	-1.033951	-1.160149	0.319252
		> 0.5	1.03876	0.650196	0.665304	0.263398	0.695299
	M^+	< 0.5	0.309819	1.271310	0.476495	0.062808	0.058355
		> 0.5	-1.96944	1.59771	1.10484	0.285018	-1.05652

2. 方法 2(宽带通量发射率法)

在方法 1 中, 我们假定某一大气层中的普朗克通量 $B = B_0 + (\partial B / \partial \delta) \delta$, 当大气层可以看作是等温时, 有 $\partial B / \partial \delta = 0$, 这时, (3) 和 (4) 式就简化为

$$M_i^+(0) = M_{i+1}^+(0)e^{-1.66\delta_i} + B_i(1 - e^{-1.66\delta_i}),$$

$$M_{i+1}^-(0) = M_i^-(0)e^{-1.66\delta_i} + B_i(1 - e^{-1.66\delta_i}).$$

令

$$\varepsilon_i = 1 - e^{-1.66\delta_i},$$

则有

$$M_i^+(0) = M_{i+1}^+(0)(1 - \varepsilon_i^+) + \varepsilon_i^+ B_i, \quad (9)$$

$$M_{i+1}^-(0) = M_i^-(0)(1 - \varepsilon_i^-) + \varepsilon_i^- B_i, \quad (10)$$

式中 $\varepsilon_i^\pm$ 为第 i 层大气对于向上辐射和向下辐射的宽带通量发射率, (9) 和 (10) 式就是在文献 [3] 中由宽带通量发射率概念得到的向上和向下辐射通量的表式. 宽带通量发射率 $\varepsilon_i^\pm$ 与吸收气体有效含量的关系也用类似 (7) 或 (8) 式的多项式来近似 [3,4].

显然, 这一方法可看作前面一种方法在每一层大气是等温层时的特殊情况. 用 (9) 和 (10) 式进行辐射计算比用 (3) 和 (4) 式更为简单, 所需机时更省. 因而, 在大气分层较多, 以致把每一层大气作为等温层是很好的近似时, 可用宽带通量发射率近似的方法来进行辐射计算. 但当大气分层较少, 把每一层大气作等温层来处理就不太恰当, 这时, 用第一种方法可能更好, 但所需的计算时间则要多些.

3. 宽带普朗克通量的近似计算

不论是用 (3) 和 (4) 式或 (9) 和 (10) 式来计算各大气层上的辐射通量, 都需要计算不同大气温度下的宽带普朗克通量. 由于它是普朗克函数在宽的光谱段上的积分, 计算十分费时间, 加之这是一个需要经常计算的量. 因而能有一个既简单, 又足够精确的计算方法, 是很

有意义的.考虑到宽带普朗克通量随温度升高单调增加,而且变化也并不剧烈,因此,我们提出下面的多项式近似计算公式:

$$B_{\Delta\nu}(T) = B_{\Delta\nu}(T_0) + \sum_{i=1}^M a_i (T - T_0)^i, \quad (11)$$

式中, $B_{\Delta\nu}(T_0)$ 为温度 T_0 时的宽带普朗克通量.在考虑的大气温度 $T > 180\text{K}$ 的情况下,当温度 $T < 255\text{K}$ 时,取 $T_0 = 180\text{K}$; 当 $T > 255\text{K}$ 时,取 $T_0 = 255\text{K}$.(11)式中的系数 a_i 分别对这二个温度范围来确定.与 Wigner 和 Woodall^[5]的计算方法相比,当 $M=6$ 时,就可达到 6 位有效数字的精度,但我们的计算要简单得多.表 2 为当 M 取一些不同值时,宽带普朗克通量的计算精度.同时给出的还有用

$$B_{\Delta\nu}(T) = \sum_{i=0}^M a_i T^i$$

来近似计算的精度,一般要达到与(11)式同样的精度,它需要取更多的项.

表 2 对二个宽光谱带(100—980 cm^{-1} 和 980—2600 cm^{-1})

近似计算普朗克通量的均方根误差(RMS)

项数 M	RMS	
	$B_{\Delta\nu}(T) = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i T^i$	$B_{\Delta\nu}(T) = B_{\Delta\nu}(T_0) + \sum_{i=1}^M a_i (T - T_0)^i$
8	1.0E-6	
6		5.5E-7
5	3.1E-6	5.7E-7
4	1.1E-4	3.2E-6

在表 3 中给出了用(11)式计算二个宽光谱间隔上的普朗克通量所需要的量 $B_{\Delta\nu}(T_0)$ 和系数 a_i , 这时 M 的取值为 6.

表 3 相应于(11)式中的量 $B_{\Delta\nu}(T_0)$ 及系数 a_i 的值

波段	T_0	$B_{\Delta\nu}(T_0)$	a_1	a_2	a_3
100—980 cm^{-1}	180K	55.7606029	1.18011428	.824844105E-2	.127453678E-4
	255K	193.919371	2.52220143	.901377485E-2	-.353539504E-5
980—2600 cm^{-1}	180K	2.60636984	.133888555	.277053762E-2	.280313819E-4
	255K	43.9338432	1.22537029	.129904643E-1	.602773546E-4
波段	T_0	$B_{\Delta\nu}(T_0)$	a_4	a_5	a_6
100—980 cm^{-1}	180K	55.7606029	-.729374412E-7	.594059885E-10	.239216655E-12
	255K	193.919371	-.418102910E-7	.242384774E-9	-.76919987E-12
980—2600 cm^{-1}	180K	2.60636984	.129371414E-6	-.617274934E-10	-.399469039E-12
	255K	43.9338432	.659227640E-7	-.102125771E-9	-.563066064E-12

四、结果和讨论

用上述二种近似计算方法,我们对一些模式大气中的长波辐射通量及相应的加热率作了计算.表 4 是在大气分成 9 层的情况下,得到的地面向下辐射通量和大气顶向上辐射通量与精确的逐线计算^[2]结果的比较.可以看到,这两种方法的误差都不超过 2%.一般来说,在大气中间的辐射通量,出现的误差可能要大些,特别是在大气上层,向下辐射通量较小,因而会有较大的相对误差,但一般也不超过 10%,图 1 和 2 是在大气分成 16 层和 6

表 4 对一些模式大气用二种近似计算方法得到的地面向下和大气

顶向上辐射通量与逐线计算结果的比较

通量 (W/m^2)	方 法	热 带	中纬夏季	中纬冬季	副热带夏季	高纬冬季
$M_{\downarrow}$ (地面)	逐线	390.6	341.8	213.1	289.3	165.1
	方法 1	389.0	343.5	214.8	289.1	165.2
	方法 2	389.2	343.1	214.7	289.1	165.5
$M_{\uparrow}$ (大气顶)	逐线	292.5	284.0	232.3	266.0	199.3
	方法 1	295.0	284.6	228.6	261.0	199.9
	方法 2	293.7	282.0	231.4	262.7	202.8

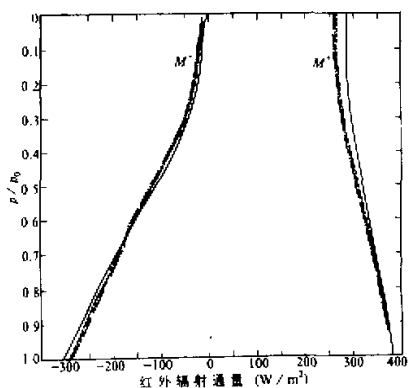


图 1 高纬夏季模式大气中的
红外辐射通量

— · — · — Scott 和 Chedin^[2],
—— Hense 等^[1],
····· 方法 2 (2 波段),
- · - · - 方法 2 (6 波段)

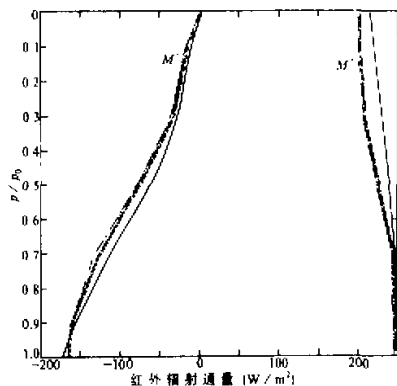


图 2 高纬度冬季模式大气中的
红外辐射通量

— · — · — Scott 和 Chedin^[2],
—— Hense 等^[1],
····· 方法 2 (2 波段),
- · - · - 方法 2 (6 波段)

层的情况下,用宽带通量发射率方法,在整个红外光谱区划分成 6 个波段^[3]和 2 个波段时,得到的向上辐射和向下辐射通量廓线与精确结果^[2]的比较,同时还给出了 Hense 等^[1]的结果.图 3 是与图 2 的辐射通量相应的高纬度冬季模式大气中的红外加热率廓线.这些图表明了用简单的宽带通量发射率的近似计算方法,得到的大气中的辐射通量和相应的加热率都有相当好的精度,同时也表明了所用的波段从 6 个减少到 2 个并没有明显地影响到近似计算的精度,但计算时间却可以进一步减少.

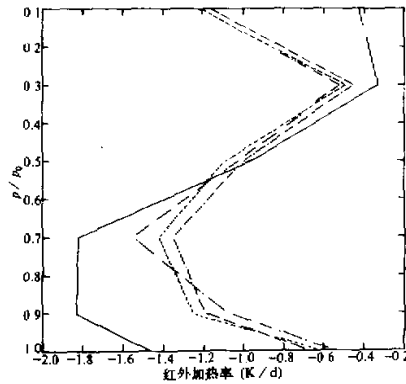


图 3 高纬度冬季模式大气中的红外加热率

— · — · — Scott 和 Chedin^[2],
 — Hense 等^[1],
 — — — 方法 2 (2 波段),
 — · — — 方法 2 (6 波段)

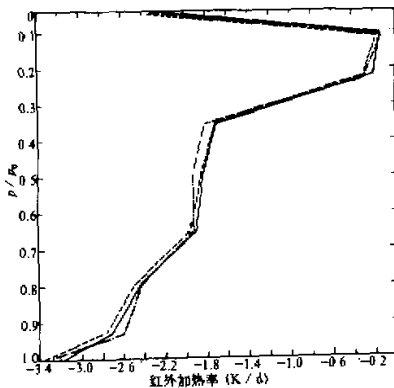


图 4 热带模式大气中的红外加热率

— · — · — Scott 和 Chedin^[2],
 — — — 方法 1 (2 波段),
 — — — 方法 2 (2 波段)

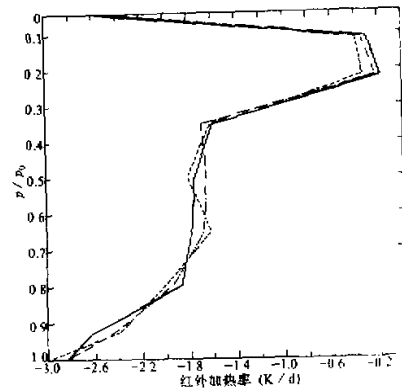


图 5 中纬度夏季模式大气中的红外加热率

— · — · — Scott 和 Chedin^[2],
 — — — 方法 1 (2 波段),
 — — — 方法 2 (2 波段)

图 4 和 5 是在 9 层大气的情况下, 用方法 1 和方法 2 计算得到的热带和中纬度夏季模式大气中的红外加热率廓线, 同时还给出了精确的逐线计算的结果^[2]. 用这两种近似计算方法得到的加热率与精确结果相当一致.

上面提出的二种长波辐射传输的近似计算方法, 适用于在环流模式中计算大气中的长波辐射通量与加热率. 它们需要的计算机时少, 但又有相当好的精度. 对不同垂直分层的大气, 这二种方法也都能用, 但相应的系数则在大气分层不同时, 需要分别加以确定. 另外, 当大气分层太少时, 近似计算的误差也可能增大. 因为这时, 这二种方法把每一层大气作为等效的均匀层或层内普朗克通量是线性变化来处理, 与实际情况可有较大的差别, 自然也就影响到近似计算的精度.

参 考 文 献

- [1] Hense, A., Kerschgens, M. and Raschke, E., 1982, An economical method for computing the radiative energy transfer in circulation models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 231—252.
- [2] Scott, N.A. and Chedin, A., 1981, A fast Line-by-Line method for atmospheric absorption computations: The automatized atmospheric absorption atlas (4A), *J. Appl. Meteor.*, **20**, 802—812.
- [3] 赵高祥, B. Rockel, E. Raschke, 1987, 大气中红外辐射传输的参数化模式, *科学通报*, **32**, 1479—1482.
- [4] 赵高祥, 汪宏七, 1988, 一个改进的红外辐射传输计算方案, *红外研究*, **7**, 225—230.
- [5] Widger, W.K. and Woodall, M.P., 1976, Integration of the Planck blackbody radiation function. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **57**, 1217—1219.

TWO APPROXIMATE CALCULATION SCHEMES OF LONG-WAVE RADIATION TRANSFER

Zhao Gaoxiang and Wang Hongqi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Based on the two-stream approximation, two approximate calculation schemes of long-wave radiation transfer in clear atmospheres are presented, the entire infrared region from 100 to 2600 cm is divided into two broad spectral intervals, and parameterization treatments for the corresponding broad-band optical depth and emissivity are made respectively. These two computation schemes are very fast and rather accurate, so that they are suitable for the calculations of IR radiative transfer in general circulation models.