

有云大气中太阳辐射通量的参数化计算*

赵高祥 汪宏七

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

提 要

这里提出了一个建立在二流近似基础上的宽带太阳辐射传输计算模式。整个从 0.2—3.58 μm 的太阳光谱区分成三个宽光谱间隔, 各波段上的宽带等效光学厚度和单次散射反照率由已知的大气参数直接算出。在各波段上, 二种以上大气成分重迭的辐射作用也得到适当的考虑。在考虑云的辐射作用时, 云的单次散射反照率和后向散射参数是预先给定的, 而云的光学厚度则根据云中液态水含量来算出。

一、引 言

来自太阳的辐射能是地球大气运动的最终能源, 也是地气系统能量平衡中的一个基本部分。太阳辐射加热直接影响到地球的热状态和各种大气过程。因而, 大气中太阳辐射传输的计算在气候模拟、数值天气预报以及其他方面都有重要的意义。尽管有很多精确的方法可用来进行辐射传输计算, 但它们所需的机时太多, 现在还难以在大气环流模式中应用。目前在环流模式中实际应用的还是各种大为简化的参数化方法^[1-5]。我们根据大气中 O_3 , H_2O 和 CO_2 在太阳光谱区的吸收情况, 把整个太阳光谱区分成 0.2—0.39 μm , 0.39—0.71 μm 和 0.71—3.58 μm 三个波段, 在二流近似的基础上, 建立了一个适用于在大气环流模式中进行辐射传输计算的参数化模式。

二、辐射传输方程

描述平面平行散射和吸收大气中单色辐射传输的基本方程^[6]

$$\mu \frac{dI(\delta, \mu, \varphi)}{d\delta} = I(\delta, \mu, \varphi) - J(\delta, \mu, \varphi)$$

这里 $I(\delta, \mu, \varphi)$ 为大气中光学厚度 δ 处、天顶角的方向余弦为 μ 、方位角为 φ 处的散射辐射强度, $J(\delta, \mu, \varphi)$ 为源函数, 在太阳光谱区可表示为

$$\begin{aligned} J(\delta, \mu, \varphi) = & \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\delta, \mu, \varphi; \mu', \varphi') \\ & \times I(\delta, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' \\ & + \frac{\omega}{4\pi} S_0 P(\mu, \varphi; \mu_0, \varphi_0) e^{-\delta/\mu_0} \end{aligned}$$

其中 ω 为单次散射反照率, P 为散射相函数, μ' 和 φ' 为入射辐射的天顶角余弦和方位角, μ_0 和 φ_0 为入射太阳辐射的天顶角余弦和方位角, S_0 为太阳常数。

* 本文于 1990 年 8 月 2 日收到, 1991 年 3 月 26 日收到修改稿。该文是国家自然科学基金资助项目。

在漫射辐射是轴对称的假定下,分别对辐射强度在上下二个半球积分,则可以得到二流近似下关于辐射通量密度的微分方程组^[7]

$$\frac{dM^+(\delta)}{d\delta} = [1 - \omega(1 - \beta)] \frac{M^+(\delta)}{\mu} - \omega\beta \frac{M^-(\delta)}{\mu} - \omega\beta_0 S_0 e^{-\delta/\mu_0} \quad (1)$$

$$\frac{dM^-(\delta)}{d\delta} = \omega\beta \frac{M^+(\delta)}{\mu} - [1 - \omega(1 - \beta)] \frac{M^-(\delta)}{\mu} + \omega(1 - \beta_0) S_0 e^{-\delta/\mu_0} \quad (2)$$

式中 $M^+(\delta)$ 和 $M^-(\delta)$ 分别表示光学厚度 δ 处的向上和向下辐射通量密度, β 和 β_0 分别为漫射和直接太阳辐射的后向散射参数, μ 为漫射辐射的平均有效天顶角余弦。

方程组(1)和(2)的形式解可表示为

$$M_i^+(\delta) = C_{1i} e^{\tau_i \delta} + C_{2i} e^{-\tau_i \delta} + x_i S_i e^{-\delta/\mu_0} \quad (3)$$

$$M_i^-(\delta) = C_{3i} C_{3i} e^{\tau_i \delta} + C_{2i} C_{4i} e^{-\tau_i \delta} + y_i S_i e^{-\delta/\mu_0} \quad (4)$$

这里,下角码 i 表示相应的量为第 i 层大气中的量, C_{1i} 和 C_{2i} 是可由边界条件确定的常数, δ 为在第 i 层大气中的光学厚度,

$$\tau_i = \frac{1}{\mu} [1 - 2\omega(1 - \beta) + (1 - 2\beta)\omega^2]^{1/2}$$

$$C_{3i} = \omega\beta / [1 - \omega(1 - \beta) + \tau_i \mu]$$

$$C_{4i} = 1 / C_{3i}$$

$$x_i = \mu\mu_0 [\omega\beta_0(\mu - \mu_0) + \mu_0\omega^2(\beta_0 - \beta)] / (\mu^2 - \mu^2\mu_0^2\tau_i^2)$$

$$y_i = -\mu\mu_0 [\omega(1 - \beta_0)(\mu + \mu_0) + \mu_0\omega^2(\beta_0 + \beta - 1)] / (\mu^2 - \mu^2\mu_0^2\tau_i^2)$$

S_i 为到达第 i 层大气上界的直接太阳辐射通量密度,可表示为

$$S_i = S_0 e^{-\tau_i/\mu_0} \quad (5)$$

其中 τ_i 为从大气顶到 i 层大气上界的直接太阳辐射垂直消光光学厚度。

在大气顶和地面有边界条件:

$$M_1^-(0) = 0$$

$$M_{N1}^+ = \alpha_{aif} M_{N1}^- + \alpha_{dir} \mu_0 S_{N1}$$

这里, M_{N1}^- 和 M_{N1}^+ 为地面的向下和向上漫射辐射通量密度, S_{N1} 为到达地面的直接太阳辐射通量密度, α_{aif} 和 α_{dir} 分别为地面对漫射辐射和直接太阳辐射的反照率。在相邻二个大气层的边界上有边界条件,

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

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

式中 $M_i^+(\delta_i)$ 和 $M_i^-(\delta_i)$ 为第 i 层大气下界的向上和向下漫射通量密度, $M_{i+1}^+(0)$ 和 $M_{i+1}^-(0)$ 为第 $i+1$ 层大气上界的相应量, δ_i 为第 i 层大气的光学厚度。

对式(1)和(2)在某一个宽光谱间隔上积分,则宽带辐射通量密度的形式解仍可用式(3)和(4)来表示,但这时的 τ , δ , ω , β 和 β_0 都是相应的光谱间隔上的等效量。只要这些

量能给出,就可以由式(3)和(4)及边界条件计算大气中各层上的宽带辐射通量密度,进而算出大气中相应的太阳辐射加热率。我们的近似计算方案就是建立在这一基础上。

三、漫射辐射光学厚度的参数化

对上述三个宽光谱间隔,首先用 Kerschgens^[8] 等的窄带模式计算出它们在大气中的漫射和直接辐射通量密度,作为已知量,则大气中各个层上的等效漫射光学厚度 δ_i 和单次散射反照率 ω_i 可通过对方程组(3)和(4)迭代求解来得到。去掉表示层次的角码 i , 在每一层大气的上下界有

$$\langle M^+(0) \rangle = C_1 + C_2 + x \langle S \rangle \quad (6)$$

$$\langle M^-(0) \rangle = C_1 C_3 + C_2 C_4 + y \langle S \rangle \quad (7)$$

$$\langle M^+(\delta) \rangle = C_1 e^{\tau\delta} + C_2 e^{-\tau\delta} + x \langle S \rangle e^{-\delta/\mu_0} \quad (8)$$

$$\langle M^-(\delta) \rangle = C_1 C_3 e^{\tau\delta} + C_2 C_4 e^{-\tau\delta} + y \langle S \rangle e^{-\delta/\mu_0} \quad (9)$$

式中带有括号 $\langle \rangle$ 的量为已知的辐射通量密度。定义 ω 和 δ 的函数 f^+ 和 f^- 为

$$f^+ = \langle M^+(\delta) \rangle - C_1 e^{\tau\delta} - C_2 e^{-\tau\delta} - x \langle S \rangle e^{-\delta/\mu_0} \quad (10)$$

$$f^- = \langle M^-(\delta) \rangle - C_1 C_3 e^{\tau\delta} - C_2 C_4 e^{-\tau\delta} - y \langle S \rangle e^{-\delta/\mu_0} \quad (11)$$

用 f_{n+1}^+ 和 f_{n+1}^- 表示辐射通量密度的已知值与第 n 次迭代值 $M^+(\delta_n)$ 和 $M^-(\delta_n)$ 之差,同时,

$$f_{n+1}^+ = - \left(\frac{\partial f^+}{\partial \omega} \right)_n \Delta \omega_n - \left(\frac{\partial f^+}{\partial \delta} \right)_n \Delta \delta_n \quad (12)$$

$$f_{n+1}^- = - \left(\frac{\partial f^-}{\partial \omega} \right)_n \Delta \omega_n - \left(\frac{\partial f^-}{\partial \delta} \right)_n \Delta \delta_n \quad (13)$$

这样, ω 和 δ 的第 $n+1$ 次迭代值就可用矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} \omega_{n+1} \\ \delta_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_n \\ \delta_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f^+}{\partial \omega} \right)_n & \left(\frac{\partial f^+}{\partial \delta} \right)_n \\ \left(\frac{\partial f^-}{\partial \omega} \right)_n & \left(\frac{\partial f^-}{\partial \delta} \right)_n \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} f_{n+1}^+ \\ f_{n+1}^- \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中角码“-1”表示逆矩阵。

由上述迭代过程得到第 i 层大气中漫射辐射的单次散射反照率 ω 和光学厚度 δ 后, 散射光学厚度 σ_s 和吸收光学厚度 σ_a 可表示为

$$\sigma_s = \omega \delta \quad (15)$$

$$\sigma_a = (1 - \omega) \delta \quad (16)$$

而总的消光光学厚度可表示为

$$\delta = \sigma_s + \sigma_a \quad (17)$$

在图 1 中给出由所得到的三个光谱间隔上,在模式大气的一些层上的消光光学厚度和散射光学厚度。图 1 是纯分子大气的情况,在有气溶胶时^[8],类似的结果给出在图 2 中。整个大气是按 $p_i/p_{N_1} = 0.0, 0.0395, 0.109, 0.217, 0.346, 0.494, 0.642, 0.79, 0.913$ 和 1.0 划分成 9 个层,这里, p_i 为各大气层边界上的气压, p_{N_1} 为地面气压。图中的纵坐标 $\delta/\Delta Z$ 和 $\sigma_s/\Delta Z$ 分别表示各大气层中,单位层厚的消光光学厚度和散射光学厚度, ΔZ (km) 为大气层的厚度,横坐标 N 为大气层次。图中的实线就是对各大气层上得到的单位层厚上的消

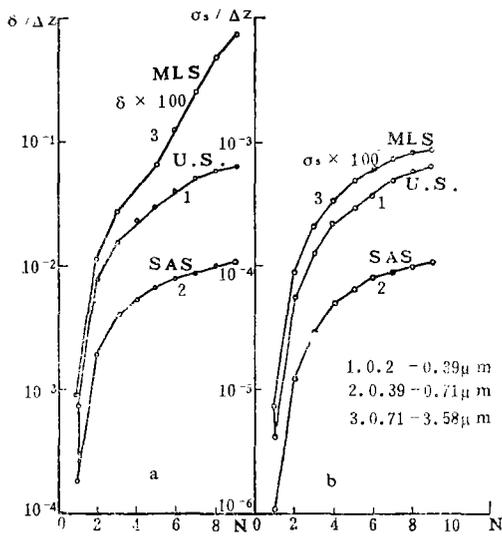


图 1 a 大气中各层上的消光光学厚度 (无气溶胶)
 (— 迭代求解结果
 ○ 近似计算结果)
 图 1 b 大气中各层上的散射光学厚度 (无气溶胶)
 (说明同 a)

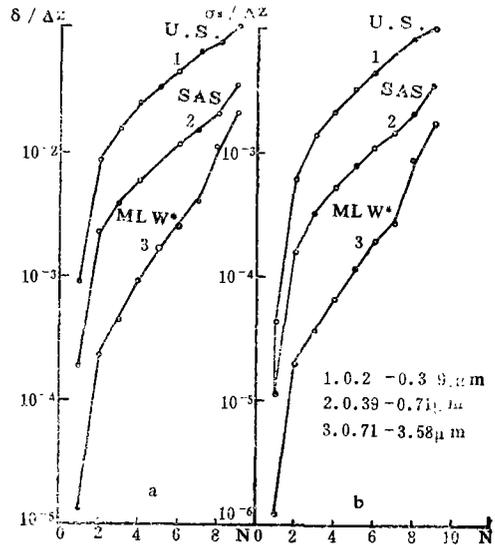


图 2 a 同图 1 a, 但有气溶胶
 图 2 b 同图 1 b, 但有气溶胶
 (说明同 1)

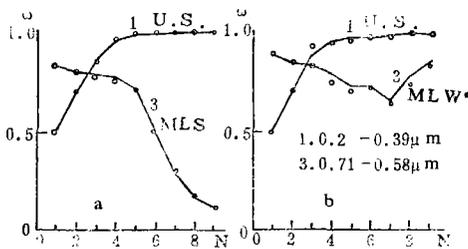


图 3 a 大气中各层上的单次散射反照率 (无气溶胶)
 图 3 b 同图 3 a 但有气溶胶 (说明同图 1)

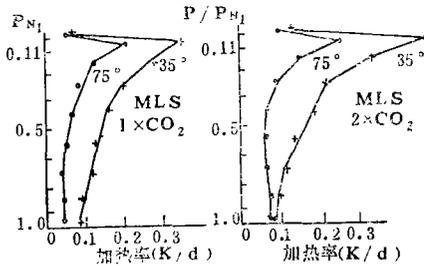


图 4 大气中 CO₂ 吸收的太阳辐射加热率

光光学厚度和散射光学厚度的连线。在图 3 中, 实线为对光谱间隔 0.2—0.39 μm 和 0.71—3.58 μm 得到的各层上单次散射反射率 ω 的连线。

在图 1—3 中, U.S. 表示 1962 年美国标准大气, SAS 为高纬度夏季模式大气, MLS 和 MLW 分别为中纬度夏和冬季模式大气, MLW* 则表示大气中的臭氧和水汽浓度为 MLW 的 75%, CO₂ 的混合比则加倍为 660 × 10⁻⁶ 的情况。

下面将考虑如何由已知的大气参数来得到大气层中的散射和吸收光学厚度。Kerschgens 等^[8] 在辐射传输计算中, 对 O₃, H₂O 和 CO₂ 在大气中的等效含量, 分别用下面

的式子来计算:

$$u_{O_3} = 46.6667 \rho_{O_3} \left(\frac{P}{P_s} \right)^{0.4} \Delta Z \quad (18)$$

$$u_{H_2O} = 0.1 \rho_{H_2O} \left(\frac{P}{P_s} \right)^{0.9} (273/T)^{0.45} \Delta Z \quad (19)$$

$$u_{CO_2} = (PCO_2/330) (P/P_s)^{1.75} (273/T)^{1.25} \Delta Z \quad (20)$$

式中 ρ_{O_3} 和 ρ_{H_2O} 分别为 O_3 和 H_2O 的密度 (g/m^3), P 和 P_s 分别为大气层的平均气压和标准状况下的大气压, T 为层平均温度 (K), ΔZ (km) 为层厚, PCO_2 为 CO_2 体积混合比 (10^{-6}).

在只有一种吸收气体的情况下, 由对各波段的吸收光学厚度 σ_a 与吸收气体等效含量 u 之间关系的分析表明, 可用多项式

$$\log \sigma_a = \sum_{j=0}^J a_j (\log u)^j \quad (21)$$

来近似 σ_a 与 u 之间的关系。式中的 σ_a 和 u , 在 $0.2-0.39 \mu m$ 和 $0.39-0.71 \mu m$ 波段时, 分别为层中总的 O_3 吸收光学厚度和等效含量; 在 $0.71-3.58 \mu m$ 波段时, 则为单位层厚度中的 H_2O 或 CO_2 的吸收光学厚度和等效含量, 式(21)中的系数 a_j 分别对各个波段和吸收气体确定。

在有散射和吸收的纯分子大气中, 各波段的散射光学厚度 σ_s 可由相应的 Rayleigh 散射光学厚度 σ_R 来计算:

$$\sigma_s = A \sigma_R^B \quad (22)$$

式中的常数 A 和 B 对各波段分别确定, σ_s 和 σ_R 都是单位大气层厚度上的量。

在实际大气中, 某一波段上可同时有二种以上的成分对吸收或散射有贡献, 这时总的散射或吸收并不等于每种贡献之和, 但可用下面的式子来近似表示这些量之间的关系:

$$\delta_{g+d} = A_1 (\delta_g + \delta_d)^{B_1} \quad (23)$$

$$\sigma_{s(g+d)} = A_2 (\sigma_{s_g} + \sigma_{s_d})^{B_2} \quad (24)$$

$$\sigma_{a(H_2O+CO_2)} = A_3 (\sigma_{aH_2O} + \sigma_{aCO_2})^{B_3} \quad (25)$$

其中 δ , σ_s 和 σ_a 分别为单位大气层厚度上的消光、散射和吸收光学厚度, 角码 g 和 d 分别表示大气气体和气溶胶单独作用的贡献, $g+d$ 为相应的总贡献; H_2O 和 CO_2 分别表示 H_2O 和 CO_2 的贡献, H_2O+CO_2 为总贡献, (A_1, B_1) , (A_2, B_2) 和 (A_3, B_3) 为由最小二乘法确定的常数。

利用上面的关系式, 就可由已知的大气参数得到大气中的散射和吸收光学厚度, 单次散射反照率和总的光学厚度。在图1, 2中的“ \circ ”即为由由此得到的模式大气中的消光和散射光学厚度, 图3中的“ \circ ”则为相应的单次散射反照率。

四、直接太阳辐射光学厚度的参数化

由式(5), 到达第 i 层大气的直接辐射光学厚度 τ_i 可表示为

$$\tau_i = -\mu_0 \ln(S_i/S_0) \quad (26)$$

在厚度为 ΔZ_i 的第 i 层大气中, 单位厚度上的光学厚度 $\Delta\tau$ 则可表示为:

$$\Delta\tau = (\tau_{i+1} - \tau_i) / \Delta Z_i$$

把 $\Delta\tau$ 看作吸收和散射光学厚度 $\Delta\tau_a$ 和 $\Delta\tau_s$ 之和, 并假定散射光学厚度在直接辐射和漫射辐射的情况下是相同的。并且, 在纯分子大气中只有一种吸收气体的情况下, 也用多项式来表示 $\Delta\tau_a$ 与吸收气体含量 u 之间的关系:

$$\log(\Delta\tau_a) = \sum_{j=0}^J b_j (\log u)^j \quad (27)$$

这里, 对臭氧吸收, $\Delta\tau_a$ 和 u 为层中的总量; 对 H_2O 或 CO_2 吸收, 则 $\Delta\tau_a$ 和 u 都为单位层厚上的量。式中的系数 b_j 是对每一种吸收气体, 对各自的波段分别确定。

对 $0.71-3.58 \mu m$ 波段 H_2O 和 CO_2 重迭吸收, 以及各波段上 气体和气溶胶同时作用的情况, 分别用类似于式(26)和(24)的近似来处理。

直接太阳辐射的光学厚度还与太阳天顶角 θ 有关, 这种关系在 θ 小于 80° 时是近似线性的^[4], 因此我们分别对 θ° 等于 35° 和 75° 的二种情况, 得到计算 光学厚度的关系式中相应的二组常数。这样, 就可由已知的大气参数计算这二个太阳天顶角时的直接辐射光学厚度, 而在其他天顶角时的光学厚度则可通过内插来得到。

五、云的辐射作用的参数化

对云的辐射作用, 我们用 Hense 等^[4]的参数化方案, 而云的光学厚度则用下面的方法来计算^[10]:

$$\log \delta_c = 0.2633 + 1.7095 \ln[\log(W)], \quad \lambda < 0.71 \mu m$$

$$\log \delta_c = 0.3492 + 1.6518 \ln[\log(W)], \quad \lambda \geq 0.71 \mu m$$

式中 δ_c 为云的光学厚度, W 为云中液态水含量(g/m^2)。在云量为 1 的情况下, 云所在的大气层的总光学厚度为云的光学厚度和晴空时该层光学厚度之和, 而在部分有云的情况下, 云所在层的等效光学厚度 δ_w 则作为晴空光学厚度 δ_{cl} , 云的光学厚度 δ_c 和云量 N_c 的函数来确定, 其值介于 δ_{cl} 与 $\delta_{cl} + \delta_c$ 之间, 在云量小于 0.1 时, 与云量有线性关系, 在云量较大时, 则随云量按指数增加, 它可表示为:

$$\delta_w = f\delta_{cc} + (1-f)N_c(\delta_c + \delta_{cl})a_\lambda + \delta_{cl} \quad (28)$$

其中 f 是与云量有关的量, 它的取值在 0 与 1 之间,

$$\delta_{cc} = (\delta_c + \delta_{cl} + b^\lambda)^{N_c} - b_\lambda e^{c_\lambda(1-N_c)} \quad (29)$$

a_λ, b_λ 和 c_λ 是与波段有关的常数, δ_w 的最大值取 $(\delta_c + \delta_{cl})$, 最小值取 δ_{cl} , 在有云情况下的单次散射反照率 ω_w 则可表示为:

$$\omega_w = (A_\lambda - B_\lambda/\delta_w)\omega_c \quad (30)$$

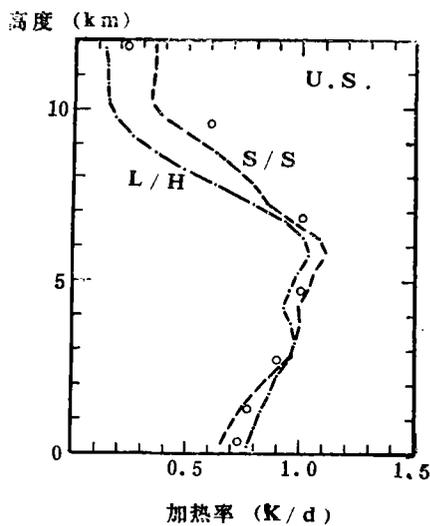
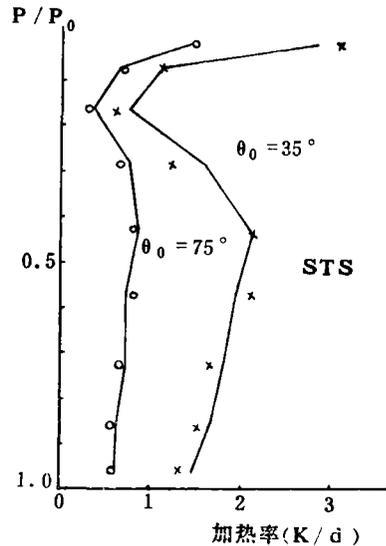
式中 ω_c 是云滴的单次散射反照率, A_λ 和 B_λ 是与波段有关的参数。

六、结 果 和 讨 论

在表 1 中列出了用上述参数化方法得到的大气中辐射通量密度的一些计算结果。表中 θ 为太阳天顶角, U.S. 和 STS 分别为 1962 年美国标准大气和副热带夏季模式大气,

表 1 大气中10个层上的向下(M^-)和向上(M^+)太阳辐射通量密度的计算值(相对值)

θ_0	U.S.				U.S.(1)				STS			
	M^-		M^+		M^-		M^+		M^-		M^+	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
35°	.819	.819	.054	.051	.819	.819	.055	.051	.819	.819	.054	.051
	.809	.809	.054	.051	.809	.809	.054	.051	.809	.809	.053	.056
	.798	.798	.052	.049	.797	.797	.052	.049	.798	.798	.051	.048
	.788	.788	.049	.045	.787	.787	.049	.045	.788	.788	.048	.045
	.773	.773	.044	.041	.772	.772	.045	.041	.770	.770	.044	.041
	.746	.745	.039	.036	.747	.746	.039	.036	.736	.735	.038	.035
	.719	.717	.033	.031	.722	.719	.033	.031	.703	.702	.032	.030
	.693	.691	.027	.026	.696	.694	.027	.026	.675	.674	.026	.025
	.674	.671	.022	.021	.678	.674	.022	.021	.654	.652	.021	.020
	.659	.656	.016	.016	.663	.660	.016	.016	.638	.636	.016	.016
75°	.259	.259	.063	.061	.259	.259	.063	.062	.259	.259	.061	.061
	.253	.253	.062	.061	.253	.253	.062	.061	.253	.253	.060	.060
	.246	.246	.060	.058	.246	.245	.060	.059	.246	.246	.058	.058
	.239	.239	.056	.055	.239	.239	.056	.055	.239	.239	.054	.054
	.229	.230	.052	.051	.230	.230	.053	.051	.228	.228	.051	.050
	.215	.216	.048	.047	.216	.216	.048	.047	.212	.212	.046	.045
	.202	.202	.043	.043	.203	.203	.044	.043	.197	.197	.042	.041
	.191	.190	.039	.039	.192	.191	.039	.039	.185	.185	.037	.037
	.181	.180	.035	.034	.182	.181	.035	.034	.174	.175	.033	.033
	.173	.173	.030	.030	.175	.174	.030	.030	.166	.166	.029	.029

图 5 太阳天顶角 $\theta_0 = 60^\circ$, 地面反照率为 0.07 时, U.S. 标准大气中水汽吸收加热率的比较图 6 太阳天顶角为 35° 和 75° 时, 副热带夏季模式大气中的太阳辐射加热率 (下垫面为海面)

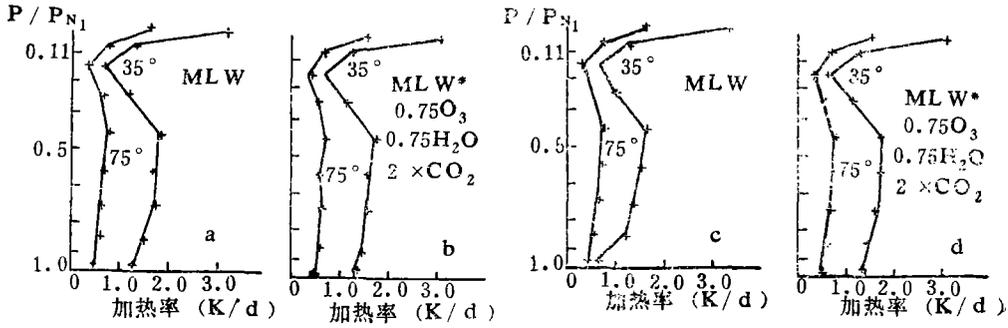


图7 大气中整个太阳光谱区域的加热率

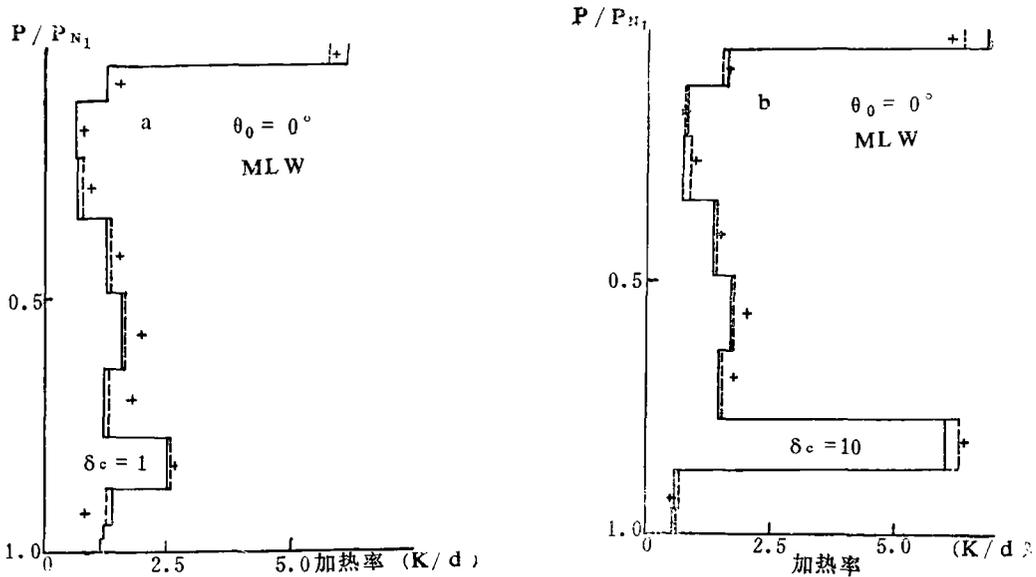


图8 中纬度冬季模式大气, 太阳天顶角 $\theta_0=0^\circ$ 时, 有云大气中的加热率

U.S.(1)为相对于U.S.大气, 水汽和臭氧浓度减少25%, CO_2 浓度则增加一倍为 660×10^{-6} 的情况。表中的a列是窄带模式^[8]计算结果, b列是现在的近似计算结果, 可以看到, 对向下辐射, 二者的差别不超过1%;对向上辐射, 偏差较大, 但也不超过10%。

对大气中的太阳辐射加热率来说, 它取决于大气层上下界的净辐射通量密度之差, 因而其计算误差可能比辐射通量密度的计算误差大, 下面给出大气中加热率计算的一些例子。图4是中纬度夏季模式大气中 CO_2 吸收造成的太阳辐射加热率, 实线为窄带模式^[8]结果, 符号“o”和“+”分别为 $\theta_0=75^\circ$ 和 35° 时近似计算的结果。左图相应于 CO_2 体积混合比为 330×10^{-6} , 右图为其浓度加倍的情况, 图5为 $\theta_0=60^\circ$ 和地面反照率0.07时, 标准大气中水汽吸收加热率计算结果的比较, 其中“o”为现在的结果, 虚线和点划线分别为 $S/S^{[11]}$ 和 $L/H^{[2]}$ 的计算结果。图6为海面上, 太阳天顶角为 35° 和 75° 时, 水汽、臭氧和二氧化碳吸收都考虑在内的副热带夏季模式大气中的加热率, 实线为现在近似计算结果, 符号($\times, 0$)为“精确”计算结果^[4]。图7为中纬度冬季模式大气中太阳辐射

加热率的情况, 实线为窄带结果^[6], 符号(+)为近似计算, 图中左面和右面分别给出没有气溶胶和有气溶胶时加热率的情况。由图 4 到图 7 的结果表明, 在晴空时, 对不同的太阳天顶角, 不同的大气, 在吸收气体浓度变化的情况下, 不论对那种吸收气体, 也不论有无气溶胶影响, 现在的近似计算结果与其他一些计算方案的结果是相当一致的。图 8 是 $\theta_0 = 0^\circ$ 时, 中纬度冬季模式大气中, 在 784 hPa 到 889 hPa 的大气层中有云时的太阳辐射加热率。图中的虚线和实线分别为文献[3]的模式计算和高分辨率计算结果, 符号(+)为现在的近似计算结果, 可以看到, 不论 $\delta_0 = 1$ 或 10, 云中的加热率相当一致, 云上和云下的加热率也基本一致。它们之间的差别除由于计算方案本身外, 还可能由大气分层稍有差别, 以及等效吸收气体含量计算不同造成的。

七、结 语

我们给出了建立在二流近似基础上的三波段太阳辐射传输的参数化方案, 它考虑了同一波段中二种以上大气成分同时对辐射传输的影响, 对大气中有云的情况也作了考虑。利用这一参数化方案, 在大气参数已知的情况下, 就可以计算出大气中各层上的光学厚度和单次散射反照率, 进而得到大气中各层上的太阳辐射通量密度和加热率。由这些量的近似计算结果与“精确”计算和其他模式计算结果的比较表明, 在晴空和有云的多种不同情况下, 都是相当一致的。因而, 这一简单、快速, 同时又具有相当好精度的参数化方案可用于在大气环流模式中进行太阳辐射传输的计算。但本方案中, 云滴的单次散射反照率和后向散射参数是预先给定的, 云的光学厚度也只根据云中液态水含量来计算, 而实际情况要复杂得多, 对不同的云可能有相当大的差别。虽然考虑到目前环流模式中所给出的云本身就有相当大的不确定性, 因而对云的辐射作用作这种处理还是可以接受的, 但对云的辐射参数化作进一步的改进仍然是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Chandrasekhar, S., Radiative Transfer, Dover, New York, 1950.
- [2] Stephens, G. L., The parameterization of radiation for numerical weather prediction and climate models, *Mon. Wea. Rev.*, 112, 826—867, 1984.
- [3] Lacis, A. A., and J. E. Hansen, A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere, *J. Atmos. sci.*, 31, 118—133, 1974.
- [4] Fouquart, Y., and B. Bonnel, Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization, *Beitr. phys. Atmos.*, 53, 35—62, 1980.
- [5] Hense, A., M. Kerschgens and E. Raschke, An economical method for computing the radiative energy transfer in circulation models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108, 231—252, 1982.
- [6] Zhao, G. X., H. Q. Wang, B. Pockel and E. Raschke, Approximate calculation of solar radiation transfer in clear atmosphere, *KEXUE TONGBAO* 34, 930—932, 1989.
- [7] Schmetz, J., On the parameterization of the radiative properties of broken clouds, *Tellus*, 36 A, 417—432, 1984.
- [8] Kerschgens, M., U. Pilz and E. Raschke, A modified two-stream approximation for computations of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere, *Tellus*, 30, 429—435, 1978.
- [9] Shettle, E. P., and R. Fenn, Models of the atmospheric aerosols and their optical properties, AGARO Conference Proceedings No. 183, 1975.
- [10] Stephens, G. L., Radiation profiles in extended water clouds, II: Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.*, 35, 2123—2132, 1978.
- [11] Slingo, A., and M. Schrecker, On the shortwave radiative properties of stratiform water clouds,

Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 108, 407—426, 1982.

PARAMETERIZATION OF SOLAR RADIATIVE FLUX CALCULATION IN THE ATMOSPHERE

Zhao Gaoxiang Wang Hongqi

(Institute of Atmospheric Physics, Academia sinica, Beijing, 100029)

Abstract

Based on the two-stream approximation a broad-band parameterization scheme for solar radiative flux calculation is presented. The whole solar spectral region from 0.2 to 4.0 μm is divided into three broad spectral intervals. The effective broad-band optical depths and single scattering albedos in the atmosphere in each spectral interval can be obtained using parameterized formulae from known atmospheric parameters. The overlapping scattering or/and absorption effects of two atmospheric constituents are considered properly. In the consideration of radiative effect of clouds in the atmosphere the single scattering albedos and back scattering parameters of clouds in each broad spectral intervals are given preliminarily and the cloud optical depths are determined according to the cloud liquid water content.