

# 块状云的辐射性质及其 对大气辐射收支的影响\*

刘长盛      卞慧生\*\*      胡荣明\*\*\*

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

## 提 要

本文利用三维辐射传输方程讨论了块状云阵的辐射性质, 考虑了云块之间对太阳辐射的遮挡作用, 相互的辐射交换, 及地面和大气辐射的影响, 计算了云阵的反射率 $\alpha$ , 长波辐射通量 $F$ , 有效云量 $N_e$ 及云灵敏度因子 $\delta$ 随云量的变化, 并与平面平行云模式作了比较。结果表明: 平面平行云模式在云量小时给出的 $\Delta\alpha/\Delta N$ 偏大,  $\Delta F/\Delta N$ 偏小, 因而 $\delta$ 偏大; 在云量大时给出的 $\Delta\alpha/\Delta N$ 偏小,  $\Delta F/\Delta N$ 偏大,  $\delta$ 偏小。高原地区短波 $\Delta\alpha/\Delta N$ 比平原地区大。双层云出现时 $\Delta\alpha/\Delta N$ 及 $\delta$ 均变小。

关键词: 有限云块的辐射; 有效云量; 灵敏度因子。

## 一、引 言

云对大气辐射收支有着重要影响, 因而在很大程度上影响着地球的气候状况。在高纬地区层状云出现的几率较高, 而在低纬和海洋上块状云出现的几率较大。从辐射传输角度说, 层状云的辐射可用一维辐射传输方程来讨论, 而对于块状云则需用三维辐射传输方程来研究。目前在大气环流和气候模式中及在遥感应用中几乎都是采用平面平行云模式来处理云辐射的问题, 这必然会产生误差, 甚至会引出错误的结论。

块状云具有一定的侧边界, 通过云的侧面可以进行辐射能交换。通常为理论上讨论的方便常常假定云块具有简单的几何形状。Mckee 和 Cox<sup>[1]</sup>最早用 Monte-Carlo 方法模拟了孤立方块云对太阳辐射的反射与透射, 他们得到的结果是对于具有同样光学厚度的云来说, 孤立方块云较平面平行云层有较小的反射率和较大的透射率。Welche 和 Wielicki<sup>[2]</sup>用 Monte-Carlo 方法模拟了方块状、圆柱状、半球状等形状云块构成的云阵的反射与透射, 认为在大多数情况下 (云量大于 1, 小于 9) 块状云的辐射与平面平行云层的辐射差别是显著的。Schmetz<sup>[3]</sup>用 Monte-Carlo 方法模拟了破碎云块的辐射, 他采用的云模式是云厚不变而水平尺度随云量增长或云的形状不变而三个方向的尺度同时随云量增长。Davis<sup>[4]</sup>用 Eddington 近似计算了孤立方块云的反射与透射。Bradley<sup>[5]</sup>则

1993年2月1日收到, 5月22日收到修改稿。

\* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

\*\* 现在工作单位: 中国气象科学研究院。

\*\*\* 现在工作单位: 中国科学院大气物理研究所。

计入了邻近云块散射的影响,对边界条件作了相应修改,求解三维辐射传输方程,他得到的结论是邻近云块的散射作用可以增加云顶的反射率,在云量一定条件下云的水平尺度愈小这种影响愈显著。Bradley 虽然考虑了邻近云块的散射作用,但他却没有考虑邻近云块对太阳辐射的遮挡作用,这种作用在太阳高度角较小或云块的厚度大时比较显著。

在红外波段 Liou<sup>[6]</sup>和 Harshvardhan<sup>[7,8]</sup>都曾研究过块状云的辐射问题,但他们都没有考虑大气影响,在红外波段大气的影响是不可忽略的。

计算块状云的辐射要求解三维辐射传输方程,由于计算比较复杂,在实际应用中十分不便,往往是采取在一维辐射传输(平面平行云模式)计算的基础上引入某种参数,例如有效云量,来表征块状云结构对结果的修正。Harshvardhan 在漫入射假定下对于方块云构成的云阵求到了短波的有效云量与实际云量的关系。显然有效云量与太阳高度角有关,他在漫入射假定下得到的结果仅能反映平均情况。他还在云为黑体的假定下用物理模型从实验上求到了长波有效云量<sup>[8]</sup>。一般说方块云并不满足黑体假定,其辐射率小于 1<sup>[9]</sup>。

本文从三维辐射传输方程出发讨论了块状云组成的云阵的辐射性质:1)计算短波辐射时,在 Bradley 的工作基础上计及了邻近云块对太阳辐射的遮挡作用;2)在长波段考虑了地表及邻近云块的辐射同时,也考虑了大气的作用,这一点在说明高原和平原地区云的辐射作用的差别时很重要;3)计算了长、短波块状云阵的有效云量,取消了 Harshvardhan 在求有效云量时所作的限制性假定;4)计算了块状云阵的反射和长波辐射随云量的变化及灵敏度因子  $\delta$ ,并与平面平行云模式及用 Harshvardhan 有效云量参数计算的结果作了比较;5)计算了高原地区及双层云出现时的反射率和长波辐射随云量的变化与灵敏度因子,与平原地区各量作了比较。

## 二、块状云阵的辐射

讨论块状云辐射时要借助于三维辐射传输方程<sup>[10]</sup>

$$\Omega \cdot \nabla I(r, \Omega) = -\beta_e I(r, \Omega) + \frac{\beta_e \omega_0}{4\pi} \int P(\Omega, \Omega') I(r, \Omega') d\Omega' + \beta_e J_0, \quad (1)$$

其中

$$J_0 = \begin{cases} \frac{\omega_0}{4\pi} P(\Omega, \Omega_0) F_s(r, \Omega_0) & \text{短波段,} \\ (1 - \omega_0) B & \text{长波段.} \end{cases} \quad (2)$$

$I$ 为辐亮度,  $\Omega$ 为传输方向,  $P(\Omega, \Omega')$ 为散射相函数,  $F_s$ 为沿  $\Omega_0$ 方向入射到  $r$ 处的太阳辐射产生的辐照度,  $\beta_e$ 为容积减弱系数,  $B$ 为 Planck 函数。

为讨论方便采用直角坐标系并认为云块为六面体,则(1)式可写为

$$\left( \gamma \cos \Phi \frac{\partial}{\partial x} + \gamma \sin \Phi \frac{\partial}{\partial y} + \mu \frac{\partial}{\partial z} \right) I(x, y, z, \mu, \Phi) = -\beta_e I(x, y, z, \mu, \Phi) + \frac{\beta_e \omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} I(x, y, z, \mu', \Phi') P(\mu, \Phi, \mu', \Phi') d\mu' d\Phi' + \beta_e J_0, \quad (3)$$

其中  $\mu = \cos\theta$ ,  $\gamma = \sin\theta$ ,  $\theta$  为传输方向  $\Omega$  与  $Z$  轴的夹角。坐标的选取如图 1 所示。云块的尺度为  $X_0, Y_0, Z_0$ 。太阳沿  $x$  方向入射到云块上。

取 Eddington 近似,  $I$  可写为

$$\begin{aligned} I(x, y, z, \mu, \Phi) \\ = I_0(x, y, z) + I_x(x, y, z)\gamma\cos\Phi \\ + I_y(x, y, z)\gamma\sin\Phi + I_z(x, y, z)\mu. \end{aligned} \quad (4)$$

将相函数写为

$$\begin{aligned} P(\mu, \Phi, \mu', \Phi') \\ = 4\pi f \delta(\mu - \mu') \delta(\Phi - \Phi') \\ + (1-f)[1 + 3g\{\mu\mu' \\ + \gamma\gamma' \cos(\Phi - \Phi')\}], \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\delta$  表示  $\delta$  函数,  $g$  为不对称因子,  $f$  为由实际相函数定出的比例系数, 本文取为  $f = g^2$ 。

在短波段, 传输方程(3)可化为如下方程<sup>[10]</sup>

$$\nabla^2 I_0 - \lambda^2 I_0 = \frac{3\beta'\omega'}{4\pi} [g'\Omega_0 \cdot \nabla F_s - \beta'(1 - \omega'g')F_s], \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \beta' &= \beta_e(1 - \omega_0 f), \quad \omega' = \frac{\omega_0(1-f)}{1 - \omega_0 f}, \quad g' = \frac{g-f}{1-f}, \\ \lambda^2 &= 3\beta'^2(1 - \omega')(1 - \omega'g'), \quad F_s = \pi F_0 \exp(-\beta' l), \end{aligned}$$

$l$  为太阳辐射在云中穿行的距离。

设云块之间的距离为  $D$ , 当  $D - X_0 < (Z_0\gamma_0/\mu_0)$  时则会产生遮挡作用, 此时我们将云块分为三部分来处理, 即 A——顶面入射部分, B——侧面入射未受遮挡部分, C——侧面有阴影部分(图 1)。各部分相应的传输方程可写为:

A——顶面入射

$$\begin{aligned} \nabla^2 I_0 - \lambda^2 I_0 \\ = \begin{cases} -\frac{3\beta'^2\omega'}{4\pi} \cdot \pi F_0(1 + g' - \omega'g')(1 - \frac{\gamma_0 z}{\mu_0 X_0}) \exp\left(-\frac{\beta' z}{\mu_0}\right) & z \leq \frac{X_0\mu_0}{\gamma_0}, \\ 0 & z > \frac{X_0\mu_0}{\gamma_0}. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

B——侧面无阴影区

$$\begin{aligned} \nabla^2 I_0 - \lambda^2 I_0 \\ = \begin{cases} -\frac{3\beta'^2\omega'}{4\pi} \cdot F_0(1 + g' - \omega'g')\left(\frac{D - X_0}{Z_0\gamma_0}\right)\mu_0 \exp\left(-\frac{\beta' x}{\gamma_0}\right) & x \leq s, \\ -\frac{3\beta'^2\omega'}{4\pi} \cdot \pi F_0(1 + g' - \omega'g')\left(1 - \frac{\mu_0 x}{Z_0\gamma_0}\right) \exp\left(-\frac{\beta' x}{\gamma_0}\right) & s < x \leq \frac{Z_0\gamma_0}{\mu_0}, \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

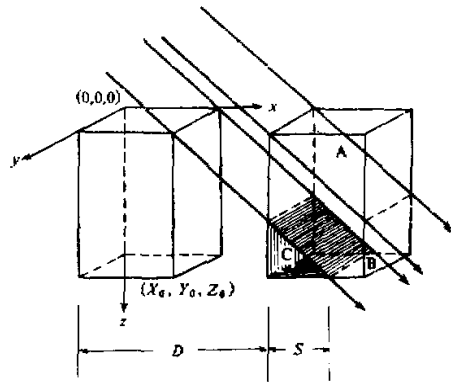


图 1 云阵中云块的排列与坐标的取法

此处  $s = \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0} - (D - X_0)$ ,  $x$  需满足  $x \leq X_0$ 。

C——阴影区

$$\nabla^2 I_0 - \lambda^2 I_0 = 0. \quad (9)$$

方程(7)与 Bradley 所用类似, 方程(7), (8), (9)的边界条件概括如下, 以 A 表示顶面入射照射区域, B 表示侧面入射照射区域, C 表示阴影区(见图 1)。

$$x = 0,$$

$$hI_0 - \frac{\partial I_0}{\partial x} = \begin{cases} hI_s, & \text{(A)} \\ -\gamma_0 G, & \text{(B)} \\ -\mu_0 G \left( \frac{D - X_0}{Z_0} \right), & \text{(C)} \end{cases}$$

$$x = X_0,$$

$$hI_0 + \frac{\partial I_0}{\partial x} = \begin{cases} hI_s, & \text{(A)} \\ \gamma_0 G \left( 1 - \frac{X_0 \mu_0}{Z_0 \gamma_0} \right) \exp \left( -\frac{\beta' X_0}{\mu_0} \right), & \text{(B) } X_0 \leq \frac{Z_0 - \gamma_0}{\mu_0}, \\ \mu_0 G \left( \frac{D - X_0}{Z_0} \right) \exp \left( -\frac{\beta' X_0}{\gamma_0} \right), & \text{(C) } s < X_0 \leq \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0}, \\ 0, & \text{(C) } X_0 \leq s, \\ 0, & \text{(B), (C) } X_0 > \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0}. \end{cases}$$

$$y = 0,$$

$$hI_0 - \frac{\partial I_0}{\partial y} = \begin{cases} hI_s, & \text{(A)} \\ 0, & \text{(B), (C)} \end{cases}$$

$$y = Y_0,$$

$$hI_0 + \frac{\partial I_0}{\partial y} = \begin{cases} hI_s, & \text{(A),} \\ 0, & \text{(B), (C)} \end{cases}$$

$$z = 0,$$

$$hI_0 - \frac{\partial I_0}{\partial z} = \begin{cases} -\mu_0 G, & \text{(A)} \\ 0, & \text{(B), (C)} \end{cases}$$

$$z = Z_0,$$

$$hI_0 + \frac{\partial I_0}{\partial z} = \begin{cases} hI_B + \mu_0 G \left( 1 - \frac{Z_0 \gamma_0}{X_0 \mu_0} \right) \exp \left( -\frac{\beta' Z_0}{\mu_0} \right), & \text{(A) } Z_0 \leq \frac{X_0 \mu_0}{\gamma_0}, \\ hI_B, & \text{(A) } Z_0 > \frac{X_0 \mu_0}{\gamma_0}, \\ 0, & \text{(B), (C)} \end{cases}$$

此处

$$h = \frac{3}{2} \beta' (1 - \omega' g'), \quad G = \frac{3}{4\pi} \beta' \omega' g' \pi F_0.$$

$$I_s = \begin{cases} \frac{NZ_0(\mu_0 X_0 + \gamma_0 Z_0)}{2\pi^2 X_0(X_0 + 2Z_0)} \pi F_0 + M \left[ 1 - \frac{X_0^2 + X_0 Z_0(\gamma_0 / \mu_0)}{D^2} \right], & \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0} \leq D - X_0, \\ \frac{NZ_0 \mu_0 D}{2\pi^2 X_0(X_0 + 2Z_0)} \pi F_0 + M \left[ 1 - \frac{X_0}{D} \right], & \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0} > D - X_0. \end{cases}$$

$$I_B = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \mu_0 \pi F_0 R_s \left( 1 - \frac{X_0^2 + X_0 Z_0(\gamma_0 / \mu_0)}{D^2} \right), & \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0} \leq D - X_0, \\ \frac{1}{\pi} \mu_0 \pi F_0 R_s \left( 1 - \frac{X_0}{D} \right), & \frac{Z_0 \gamma_0}{\mu_0} > D - X_0. \end{cases}$$

$$M = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \pi F_0 R_s \left[ 1 - \frac{2N^2 Z_0^2}{\pi(NZ_0^2 + 4X_0^2)} \right].$$

$N$  为云量,  $R_s$  为地表反照率.

在长波段传输方程及边界条件为

$$\nabla^2 I_0 - \lambda^2 I_0 = -\lambda^2 B(T_{cs}). \quad (10)$$

$$\left( I_0 - \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial x} \right)_{x=0} = \gamma_1 I_{sc} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_2) B_s,$$

$$\left( I_0 + \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial x} \right)_{x=X_0} = \gamma_1 I_{sc} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_2) B_s,$$

$$\left( I_0 - \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial y} \right)_{y=0} = \gamma_1 I_{sc} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_2) B_s,$$

$$\left( I_0 + \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial y} \right)_{y=Y_0} = \gamma_1 I_{sc} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_2) B_s,$$

$$\left( I_0 - \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial z} \right)_{z=0} = 0,$$

$$\left( I_0 + \frac{1}{h} \frac{\partial I_0}{\partial z} \right)_{z=Z_0} = B_s.$$

此处  $T_{cs}$  为云的温度,  $B_s$  为云底高度处地表和大气产生的辐照度,  $I_{sc}$  为云侧面向外的长波辐射, 近似地可取为  $B(T_{cs})$ ,  $\gamma_1$  为云侧面得到的邻近各云块的辐射的比例因子,  $\gamma_2$  为云侧面得到来自地表和云下大气辐射的比例因子,  $\gamma_1, \gamma_2$  按 Sparrow 和 Cess<sup>[11]</sup> 的角度因子方法计算.

方程(7), (8), (9), (10)可用双余弦换法求解<sup>[14]</sup>, 解出  $I_0$  后可计算出  $I_s, I_r, I_z$ , 然后由(4)可求到  $I^{[10]}$ .

### 三、云阵的短波反射率

在计算中云的单次散射反照率与不对称因子取 Stephens 云模式<sup>[12]</sup>中 Sc I 云的值,

短波段参照 Bradley 做法选取 8 个波段, 长波段取 20 个波段, 各波段大气吸收参数取自 Garand<sup>[13]</sup>的工作。假定云有相同的水平尺度, 即  $X_0 = Y_0$ , 云底高 2 km, 大气模式取 McClecheay 的中纬度夏季大气模式。将求到的各波段能量相加分别求出云阵的长波辐射。

在短波段, 通过云顶向上的辐射为

$$F_{\uparrow=0}^{\uparrow} = \frac{\pi}{h} [hI_0 - \frac{\partial I_0}{\partial z} + \frac{3\beta' \omega' g'}{4\pi} \cdot \mu_0 \pi F_0] X_0^2, \quad (11)$$

云阵的反射率为

$$R = F_{\uparrow=0}^{\uparrow} / (\mu_0 \pi F_0 X_0^2 + \gamma_0 \pi F_0 X_0 Z_0). \quad (12)$$

对于受遮挡的云块, (12)式中的分母应取为  $\mu_0 \pi F_0 X_0^2 + \mu_0 \pi F_0 X_0 (D - X_0)$ , 但为了和 Bradley 的结果相比较, 我们仍按(12)式计算反射率。图 2 为云反射率随太阳入射角的变化。图中实线为考虑了遮挡作用的结果。曲线 A 表示薄云,  $Z_0 = 0.1$  km,  $X_0 = 1$  km,  $N = X_0^2 / D^2 = 0.64$ , 曲线 B 为同样尺度孤立云块的结果。C, D 为方块云, 每边长 5 km, E, F 对应于  $Z_0 = 1$  km,  $X_0 = 9$  km, C, E 对应于  $N = 0.64$ , 考虑遮挡作用的结果, D, F 为不考虑遮挡时的结果。由图 2 可以看出: 1) 孤立云块的反射率随太阳天顶角减小而变小, 当  $\mu_0 > 0.25$  时孤立云块的反射率略小于云阵的反射率, 当  $\mu_0 < 0.25$  云阵的反射率由于遮挡作用而明显减小。2) 由于忽略了遮挡作用 Bradley 模式给出的反射率总率是偏高。3) 当云块水平尺度加大, 云阵的反射增加。

遮挡作用对于云的向阳面的反射影响尤为显著。图 3 说明了这种情况, 图中 A 为  $Z_0 = 5$  km,  $X_0 = 5$  km,  $N = 0.64$ , 考虑了遮挡作用时向阳面反射率随太阳入射角变化的情况, B 为相同尺度的云,  $N = 0.9$ , 未考虑遮挡作用时的情况。C 为  $Z_0 = 1$  km,

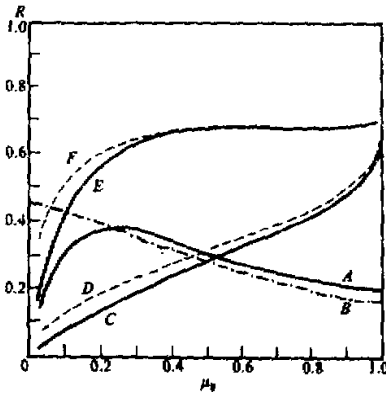


图 2 云顶反射率与  $\mu_0$  关系

- A:  $Z_0 = 0.1$  km,  $X_0 = 1$  km,  $N = 0.64$ ;  
 B: 同 A, 孤立云块;  
 C:  $Z_0 = 5$  km,  $X_0 = 5$  km,  $N = 0.64$ ;  
 D: 同 C, 无遮挡;  
 E:  $Z_0 = 1$  km,  $X_0 = 9$  km,  $N = 0.64$ ;  
 F: 同 E, 无遮挡;

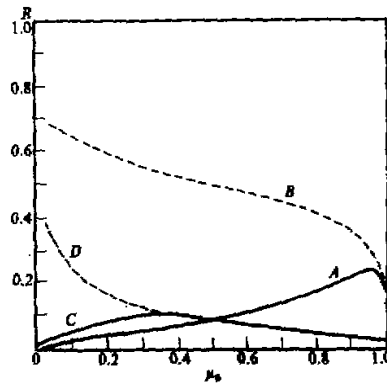


图 3 云块向阳面的反射率与  $\mu_0$  关系

- A:  $Z_0 = 5$  km,  $X_0 = 5$  km,  $N = 0.64$ ;  
 B: 同 A,  $N = 0.9$ , 无遮挡;  
 C:  $Z_0 = 1$  km,  $X_0 = 9$  km,  $N = 0.64$ ;  
 D: 同 C,  $N = 0.9$ , 无遮挡;

$X_0 = 9 \text{ km}$ ,  $N = 0.64$ , 考虑遮挡作用的结果,  $D$  为相同尺度的云,  $N = 0.9$ , 未考虑遮挡作用的结果。由图可以看出, 两者的差别是很显著的, 当云块的水平尺度很大, 或者当太阳近天顶时, 这种差别才不明显。

#### 四、有效云量

块状云阵与平面平行云层的辐射有许多不同之处, 而实用上主要关心的是云顶或云底的辐射通量, 若每次都三维传输方程来求解是非常不方便的。Harshvardhan 引进了“有效云量  $N_e$ ”这一参数后, 可以用平面平行云层的辐射通量来表示云阵相应的量, 即可用解一维传输问题来代替, 大大方便了实际应用。根据定义, 有效云量  $N_e$  与实际云量  $N$  有如下关系:

$$N_e / N = F_{3D} / F_{pp}, \quad (13)$$

其中  $F_{3D}$  为三维云阵的辐射通量,  $F_{pp}$  为平面平行云层的辐射通量。

由于云块的反射与太阳入射角有关, 有效云量  $N_e$  也是随太阳入射角而变化的。图 4 例举了  $Z_0 = 1 \text{ km}$ ,  $X_0 = 9 \text{ km}$ , 在  $\mu_0 = 0.1$  和  $\mu_0 = 0.5$  时有效云量与实际云量的关系。同样也给出了 Harshvardhan 的结果与平面平行云模式的结果。可以看出在太阳高度角较低时 Harshvardhan 的结果与实际有较大的出入。

在长波段, 由于块状云的辐射率小于 1, Harshvardhan 和 Weinman 模式<sup>[8]</sup>在云的形状因子 ( $Z_0 / X_0$ ) 较小时给出的有云量偏小, 而在形状因子较大时给出的有效云量偏大。

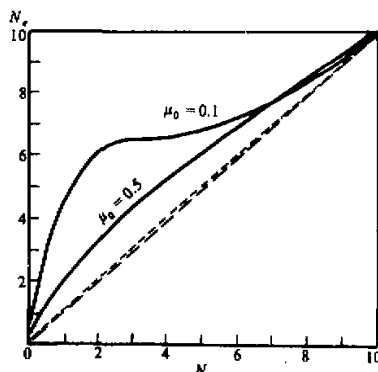


图 4 短波有效云量与实际云量的关系  
图中实线为本文结果, 长虚线为平面平行云层,  
短虚线为 Harshvardhan 的结果

#### 五、灵敏度系数

Schneider<sup>[14]</sup>引入了云灵敏度系数  $\delta$  这一参量以确定云量对大气顶净辐射的影响

$$\delta = \frac{\partial Q_0}{\partial N} - \frac{\partial F}{\partial N} = \left( -\frac{\Delta \alpha}{\Delta N} \right) Q_0 - \frac{\Delta F}{\Delta N}, \quad (14)$$

其中  $Q_0$  为到达大气顶的太阳总辐射,  $\alpha$  为有云大气的反照率,  $F$  为射出长波辐射。

我们计算了方程(14)的各项, 图 5 为  $\Delta \alpha / \Delta N$  和云量的关系, 假定云块水平尺度为  $2 \text{ km}$ , 厚度为  $1 \text{ km}$ , 云底高  $2 \text{ km}$ ,  $\mu_0 = 0.6$ , 地表反射率  $R_s = 0.15$ , 取中纬度夏季大气模式。图中实线为平原情形, 点划线为高原情况, 双点划线为双层云情况, 双层云的取法同文献[15], 虚线为平面平行模式的结果, 点线为按 Harshvardhan 有效云量公式计算的结果。图 6 为长波辐射通量随云量的变化率, 图 7 为云灵敏度因子随云量的变

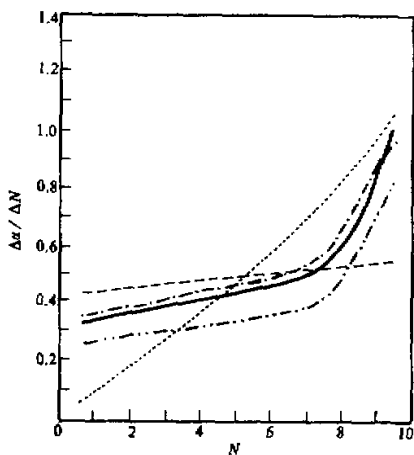


图 5 不同云量下云反射率随云量的变化率  
图中实线代表平原地区, 点划线代表高原地区,  
双点划线代表双层云情况, 虚线为平面平行云  
层, 点线为 Harshvardhan 模式的结果

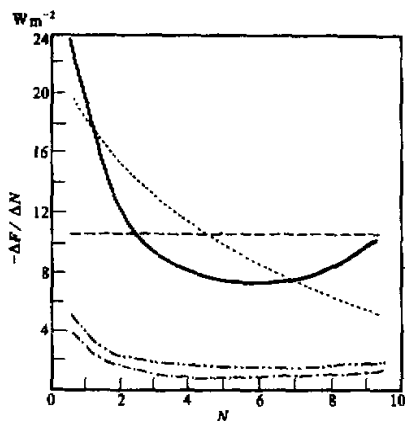


图 6 不同云量下长波辐射通量随云量的变化率  
图注同图 5

化。由图 7 可以看出在云量大于 6 时, 块状云的冷却作用总是强于平面平行云层, 双层云出现时总是减小云灵敏度因子  $\delta$  的数值, 而按照 Harshvardhan 的有效云量公式计算时, 在  $N < 5$  时给出的  $\delta$  的数值总偏小。

## 六、结 论

1) 由于邻近云块的遮挡作用, 云阵的反射率要减小, 向阳面的反射减少更多。

2) 短波有效云量与太阳高度角有关, 在云量不大时 ( $N < 6$ ), 太阳高度角愈低, 有效云量与实际云量相差愈大。

3) 尽管在云量接近 0 或 10 时, 有效云量与实际云量相近, 但  $\Delta\alpha/\Delta N$  和  $\Delta F/\Delta N$  则没有此种关系,  $\Delta\alpha/\Delta N$  在  $N$  近于 10 时达最大, 而  $\Delta F/\Delta N$  在云量近于 0 时最大。

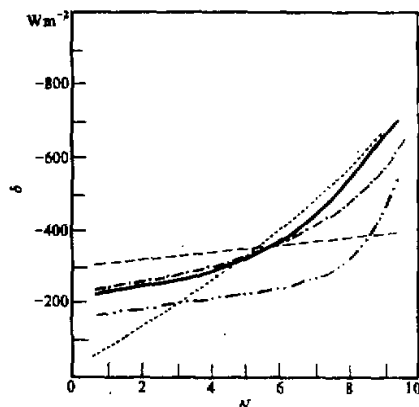


图 7 不同云量下的云敏度系数  
图注同图 5

4) 瞬时的云灵敏度因子主要取决于  $\Delta\alpha/\Delta N$ , 故在白天云反射率是支配因素。

5) 平面平行云模式在云量小时给出的  $\Delta\alpha/\Delta N$  偏大,  $\Delta F/\Delta N$  偏小, 因而  $\delta$  偏大; 在云量大时给出的  $\Delta\alpha/\Delta N$  偏小,  $\Delta F/\Delta N$  偏大, 因而  $\delta$  偏小。

6) 同样的云出现在高原时  $\Delta\alpha/\Delta N$  比平原大, 而  $\Delta F/\Delta N$  却偏小, 与平原相比在云量小时  $\delta$  值比平原大, 云量大时比平原小。

7) 双层云出现时总是减小  $\delta$  的值, 或者说是减小冷却作用。



## 参 考 文 献

- [1] McKee, T.B. and Cox, S.K., 1974, Scattering of visible radiation by finite clouds, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1885-1892.
- [2] Welch, R. M. and Wielicki, B.A., 1984, stratocumulus cloud field reflected fluxes: the effect of cloud shape, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3085-3103.
- [3] Schmetz, J., 1984, On the parameterization of the radiative properties of broken clouds, *Tellus*, **36A**, 417-432.
- [4] Davies, R., 1987, The effect of finite geometry on the three-dimensional transfer of solar irradiance in clouds, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1712-1725.
- [5] Bradley, S.G., 1981, The relation between cumulus albedo and extinction coefficient and its application to remote sensing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2243-2256.
- [6] Liou, K.N. and Ou, S.C., 1979, Infrared radiation transfer in finite cloud layers, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1985-1996.
- [7] Harshvardhan, 1982, The effect of brokenness on cloud-climate sensitivity, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1853-1861.
- [8] Harshvardhan and Weinman, J.A., 1982, Infrared radiative transfer through a regular array of cuboidal Clouds, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 431-439.
- [9] Harshvardhan, Weinman, J.A. and Davies, R., 1981, Transport of infrared radiation in cuboidal clouds, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2500-2513.
- [10] 刘长盛、刘文保, 1990, 大气辐射学, 南京大学出版社, 1-455.
- [11] Sparrow, E.M and Cess, R.D., 1978, *Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, 1-366.
- [12] Stephens, G.L., 1979, Optical properties of eight water cloud types, CSIRO Aust. Div. Atmos. Phys. Tech. Pap., No. 36, 1-35.
- [13] Garand, L., 1983, Some improvements and complements to the infrared emissivity algorithm including a parameterization of the absorption in the continuum region, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 230-244.
- [14] Schneider, S.H., 1972, Cloudiness as a global climate feedback mechanism: the effect on the radiation balance and surface temperature of variations in cloudiness, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1413-1422.
- [15] 刘长盛、叶伯明, 1991, 云层分布对辐射增热和冷却的影响, *气象学报*, **49**, No.4, 483-493.

## Radiation by Finite Cloud and Its Effect on Earth Radiation Budget

Liu Changsheng, Bian Huisheng and Hu Rongming

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

## Abstract

Three-dimensional radiative transfer equations were used to discuss the shortwave and longwave radiative fluxes of the cloud array. The cloud shading effect, radiative interactions between the clouds, and effects of the surface and the atmosphere were considered. The change rate of the reflectivity, longwave radiation fluxes, and change of the sensitivity coefficient with the cloud fraction were calculated and compared with the results of a plane parallel cloud model. We find: 1) the plane parallel model overestimates the  $\Delta\alpha/\Delta N$ , but underestimates the longwave  $\Delta F/\Delta N$  at small cloud fraction, while it underestimates the  $\Delta\alpha/\Delta N$  and overestimate the longwave  $\Delta F/\Delta N$  under nearby overcast conditions; 2) over the plateau area the shortwave  $\Delta\alpha/\Delta N$  will be larger than that over the plain area; 3) if two decks of cloud appear the sensitivity coefficient would be reduced.

**Key words:** radiation of finite clouds; effective cloud fraction; cloud sensitivity coefficient.