

水平取向对冰云辐射传输的影响*

黄润恒

廖国男

(中国科学院大气物理研究所)

(美国犹他大学气象系)

提 要

本文用分离坐标法求解辐射通过卷云的传输,该卷云由在水平面内随机取向的非球形冰晶所组成,即“二维卷云模式”。文中用零阶和二阶 Legendre 多项式的展开式来近似表示由于冰粒子水平取向所引起的散射参数随入射角的变化。散射相函数由解析的 Henyey-Greenstein 函数表示,其不对称因子也与入射天顶角有关。文中用这种模式计算了太阳短波以及地球红外热辐射通过卷云时的辐射通量传输性质以及方位平均强度的分布。将上述二维模式的计算结果与通常的三维模式(即假定冰粒子在三维空间随机分布)相比较,表明冰晶的优先取向对卷云的反照率有重要影响,两种模式的反照率可以相差 8%。另一方面,对于红外辐射而言,两个模式的向上辐射强度有显著的差别,但是冰晶的取向状况对红外辐射通量影响较小。上述结果表明,冰晶的优势取向可能是决定卷云反照率的一个重要因子,同时它对于利用红外辐射探测卷云的组成和结构来说有重要的影响。

一、引 言

卷云与太阳短波和地球红外辐射的相互作用对于地气系统的辐射平衡起重要的作用。以往对于辐射在卷云中的传输通常都假定卷云是由在三维空间随机取向的冰晶所组成(例如,参见 Liou, 1973a),因而可以用通常的辐射传输理论来处理冰晶的散射过程。但是,Weickmann (1949)、Heymsfield 和 Knollenburg (1972) 以及 Heymsfield (1975) 等人对于卷云和卷层云的微结构的研究发现,在这些云里,冰晶的形状主要是柱状、子弹状和盘状,它们的长轴远大于短轴。Jayaweera 和 Mason (1965) 研究了粘滞流体中自由下落的柱体,发现如果柱体的直径与长度之比小于 1,则这些柱体的长轴在下落过程中将趋向水平取向。Ono (1969) 的观测表明,柱状冰晶在下落过程中,其长轴平行于地面,而盘状冰晶下落时,其长轴位于水平面内。后来 Platt (1978) 用光雷达对冰晶云的测量也证实了盘状冰晶优先取向的现象。因此看来有必要研究这种在水平面内随机取向的非球形冰晶的辐射传输性质。近来,Stephens (1980) 利用 Liou (1972) 所发展的计算非球形粒子散射特性的方法,对水平取向的冰晶的传输特征作了分析。

本文将研究在水平面内随机取向以及在三维空间随机取向的两种冰晶云的辐射特征的差异。第二节给出基本方程以及有关二维随机取向冰粒子单次散射性质的若干假定,

1983年4月25日收到修改稿。

* 本文是作者在犹他大学气象系完成的。

同时扼要地介绍方程的求解步骤。第三节总结对分别代表太阳短波以及地球红外辐射两个波长的计算结果, 比较了二维平面随机取向和三维空间随机取向的冰晶云在辐射传输性质上的差异。最后在第四节给出几点主要结论。

二、辐射传输方程和单次散射模式

因为非球形粒子对光的散射不仅依赖于入射辐射和出射辐射的方向, 而且与粒子相对于入射光束的取向状况有关, 因而水平取向的非球形粒子集合的辐射传输方程与通常的三维取向的粒子或球形粒子的辐射传输方程有所不同。对于轴对称的粒子(例如圆柱状粒子), 若其长轴在水平面内随机取向, 则这种粒子集合的散射和消光截面 σ_i 、 σ_e 只依赖于入射天顶角, 而散射相函数与入射和出射天顶角有关。对于方位平均辐射强度, 基本的辐射传输方程可以表达为 (Liou, 1980):

$$\mu \frac{dI(u, \mu)}{du} = -\sigma_e(\mu)I(u, \mu) + \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \sigma_s(\mu') \bar{P}(\mu, \mu') I(u, \mu') d\mu' + S(u, \mu). \quad (1)$$

此处, 为简化计, 我们省略了表示与波长有关的下标。在方程 (1) 中, $\mu = \cos \theta$, θ 为出射天顶角, u 为垂直方向上的光程长, 其定义为:

$$u = \int_0^z n(z') dz' \quad (2)$$

其中 n 为粒子的数密度, 假定它只在 z 方向上有变化, z 坐标的原点取在云的下边界。 $S(u, \mu)$ 代表辐射源函数, 其形式为,

$$S(u, \mu) = \begin{cases} \frac{F_0}{4} \sigma_e(-\mu_0) \bar{P}(\mu, \mu_0) \exp[(u_1 - u)/\mu_0], & \text{对于太阳辐射} \\ [\sigma_e(\mu) - \sigma_s(\mu)] B(T). & \text{对于地球红外辐射} \end{cases} \quad (3)$$

其中 μ_0 为太阳天顶角 θ_0 的余弦, F_0 为在大气外界太阳通量密度, $B(T)$ 为普朗克函数。方位平均散射相函数的定义为,

$$\bar{P}(\mu, \mu') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P(\pi/2, \mu, \mu', \Delta\varphi) d\Delta\varphi \quad (4)$$

如果已知 σ_e 、 σ_s 和 $\bar{P}(\mu, \mu')$, 方程 (1) 可以用分离坐标法求解 (例如, 参见 Liou, 1973b)。但是, 从求解辐射传输方程的角度来看, 目前计算二维随机取向冰粒子散射参数的数值方法尚不完善, 因此有必要对这种粒子的单次散射参数作一些适当的假定。

Danielson 等人 (1969) 在研究可见光通过积云的传输时证明, 用 Henyey-Greenstein 相函数表征的积云, 其透过率和反射率与用 Mie 散射相函数表征的积云的透过率和反射率相同, 只要这两种相函数具有相同的不对称性因子。Henyey-Greenstein 相函数的解析表达式为,

$$P(\Theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \Theta)^{3/2}} \quad (5)$$

其中 Θ 为散射角, g 为不对称性因子。我们设想, 上述的相似性质也可以应用到非球形粒子的散射相函数上。此外, 我们假设二维随机取向冰粒子的相函数不对称性因子只是人

射天顶角余弦的函数,于是从方程(4)出发,利用(5)式便可以计算方位平均相函数。物理上散射相函数 $\bar{P}(\mu, \mu')$ 代表从 μ' 方向来的入射能量,在出射方向 μ 上的重新分配,因此它应当满足以下的归一化条件:

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{P}(\mu, \mu') d\mu = 1 \quad (6)$$

对于在水平面内随机取向的冰粒子,其消光和散射截面作为入射角的函数应当对水平面是对称的,即 $\sigma(-\mu) = \sigma(\mu)$ 。所有这些函数可以用偶阶 Legendre 多项式展开如下:

$$\sigma(\mu) = \sigma_0 + \sum_{l=2,4,6} \alpha_l P_l(\mu) \quad (7)$$

其中 σ_0 相应于在三维空间随机取向的冰粒子的散射参数, $P_l(\mu)$ 为 l 阶 Legendre 多项式, α_l 为展开系数。如果只取展开式的前两项,我们可以从 σ_0 以及相应于垂直入射情形的 σ_N 来确定 α_2 。我们应用 Cai 和 Liou (1982) 发展的射线跟踪几何光学方法分别计算六面冰柱在三维随机取向条件下以及光线垂直入射时在 0.55 微米和 10.6 微米两个波长上的散射和消光截面。六面柱体长度取 300 微米,截面直径取 120 微米,计算结果见表 1。这两个波长上冰的复折射指数分别为 1.31 和 $1.097 - 0.134i$ (Schaaf 和 Williams, 1973), 它表明冰对 0.55 微米波长是保守散射。

表 1 冰柱在两个波长上的散射参数

波长 (微米)	消光 (10^{-4} 厘米 2)			散射 (10^{-4} 厘米 2)		
	σ_0	σ_N	α_2	σ_0	σ_N	α_2
0.55	5.6527	6.8795	1.2288	5.6527	6.8795	1.2288
10.6	5.6527	6.8795	1.2288	2.9991	3.5177	0.5186

对于太阳光通过卷云传输情形,辐射边条件为,在云顶没有向下的漫射通量,而在云底没有向上的漫射通量,即

$$\begin{cases} I(u_1, -\mu) = 0 \\ I(0, \mu) = 0 \end{cases} \quad \mu > 0 \quad (8)$$

其中 u_1 为卷云整层垂直光程长。

对于地球红外辐射传输,我们假定在云与地面之间没有居间大气,且下垫面为绝对黑体,此时辐射边条件为,

$$\begin{cases} I(u_1, -\mu) = 0 \\ I(0, \mu) = B(T_s) \end{cases} \quad (9)$$

其中 T_s 为下垫面温度。利用(8)、(9)边条件可以用分离坐标法求解辐射传输方程(1), Liou (1973) 已经比较详细地讨论了求解的数学过程,此处就不再推导了。

三、结 果

首先我们讨论对太阳短波辐射通量传输的计算结果。通量透射率 $t(\mu_0)$ 和通量反射

率 $r(\mu_0)$ 的定义如下

$$\left. \begin{aligned} i(\mu_0) &= F^{\downarrow}(z_b) / \pi \mu_0 F_0 \\ r(\mu_0) &= F^{\uparrow}(z_t) / \pi \mu_0 F_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 z_b 、 z_t 分别表示云底和云顶高度, $\pi \mu_0 F_0$ 为垂直于平面平行云层的太阳光通量, $F^{\downarrow}(z_b)$ 、 $F^{\uparrow}(z_t)$ 分别是云底和云顶处的向下和向上漫射通量。参照 Stephens (1980) 的取值, 我们取三维随机取向冰粒子以及垂直入射情形的相函数的不对称因子分别为 0.9 和 0.85。

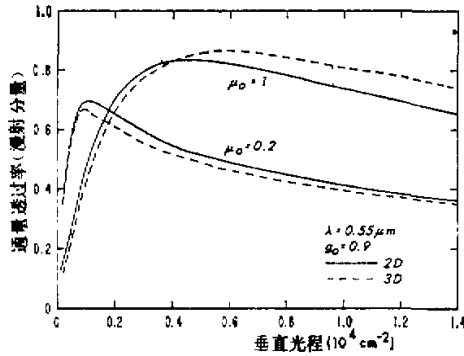


图 1 二维和三维云模式的太阳通量透过率随垂直光程长的变化

图 1 表示在两个太阳入射角情况下通量透过率随垂直光程的变化。按照垂直光程的定义, 它正比于云的几何厚度, 如果粒子数密度在垂直方向上不变。当数密度取值为 0.05 厘米^{-3} 时, 图 1 的横坐标相应于云厚范围为 $0-2.8$ 公里, 或垂直光学厚度为 $0-9.6$ 。图中比较了两种粒子取向状况下的通量透过率。由图可见, 对光学性质上薄的卷云, 两种云模式的差别不大, 但是随着垂直光程的增加, 两者的差异变得明显了。对于 $\mu_0 = 1$ 的情形, 当垂直光程小于 $0.4 \times 10^4 \text{ 厘米}^2$ 时, 二维云模式的通量透过率大于三维云模式的通量透过率, 而在较大的光程上两种透过率的相对大小发生反转。这是因为在太阳光垂直入射时 ($\mu_0 = 1$), 二维随机分布粒子的散射和消光截面大于三维情形 (参见表 1)。然而当太阳天顶角余弦 $\mu_0 = 0.2$ 时, 二维云模式的透过率一致地大于三维云模式。这是因为在我们的计算中, 当太阳天顶角的余弦超过某一临界值 $\mu^* = 1/\sqrt{3}$ 时 (它对应于二阶 Legendre 多项式的一个零点), 二维随机粒子的散射截面小于三维随机粒子。这说明太阳光通过卷云的总体传输性质受卷云的单次散射参数的制约, 因而与入射方向有关。但是随着垂直光程进一步增加, 两种云模式之间并无实质性差别, 显然这是因为在长的光程上云粒子的多次散射起作用, 因而辐射传输的方向特征变得不明显了。

图 2 表示三种太阳入射角条件下卷云的通量反射率 (即云的反照率) 随垂直光程的变化。图上各条曲线的一个共同特点是反射率随光程而增加。如上所述, 粒子的取向效应依赖于太阳天顶角。当 $\mu_0 = 1$ 时, 二维随机粒子比三维随机粒子能反射更多的太阳光。如图 2 所示, 两种云模式反射率的差别随垂直光程而单调增加。对于 2 公里厚的卷云, 两者的差值可高达 8%。当 $\mu_0 = 0.5$ 和 0.2 时, 两者的关系出现反转的趋势。值得说明

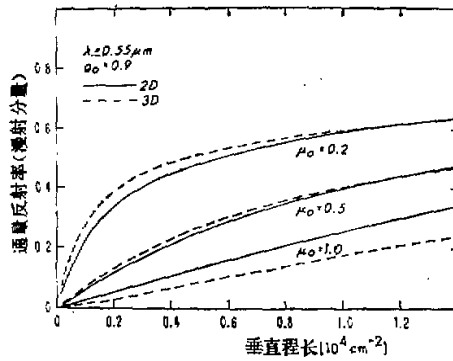


图2 二维和三维云模式的太阳通量反射率(云的反照率)随垂直程长的变化

的是,当 $\mu_0 = 1/\sqrt{3}$ 时,尽管单次散射方向上两种随机粒子的散射性质相同,但由于多次散射的作用,两种云模式最终的反射率仍然相差一个小量。

进而我们研究了二维和三维取向的冰晶对地球红外辐射传输的影响。在此情形下,地表温度取 300K,云温假定为 237K。三维随机粒子以及垂直入射相函数的不对称因子分别取为 0.8 和 0.75。

对于地球红外辐射通量传输,我们定义通量发射率和通量透过率如下,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon^i &= F^i(z_t) / \pi B(T_c) \\ J^i &= F^i_1(z_t) / F^i_1(z_b) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $F^i(z_t)$ 为从云顶射出的辐射通量,这一部分通量只归因于云本身的热发射,而与下垫面的状态无关。 $F^i_1(z_b)$ 和 $F^i_1(z_t)$ 分别为到达云底以及从云顶射出的辐射通量,这一部分通量归因于外源,与云自身的热发射无关。因为我们假定云和下垫面之间不存在居间大气,所以 $F^i_1(z_b) = \pi B(T_s)$ 。

图3比较了两种粒子随机取向下载云的红外通量透过率和发射率随垂直光程的变化。它表明两种云模式的通量透过率随光程的增加而很快衰减。对于2公里厚的卷云,通量透过率已经很小,说明红外辐射大部分被云所吸收。同时我们注意到这种情形下载云的红外通量反射率 ($R^i = 1 - \varepsilon^i - J^i$) 大约只有6%,它归因于大冰晶的散射。另一方面,如图所示卷云的通量发射率随垂直光程而单调增加,最终达到一个渐近值。渐近发射率对于二维和三维云模式分别为 0.93 和 0.96。冰晶的不同取向在卷云的红外通量传输性质方面只引起 2—3% 的微小差别。

因为对于地球红外辐射在卷云中的传输而言,不存在优势的人射方向,方位平均辐射强度能很好地表示平面平行云天大气辐射场的分布,于是方程(1)的解可以用来考察冰云粒子随机取向对红外辐射强度(辐射率)传输的影响。强度发射率和强度透过率的定义如下;

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(\mu) &= I^i_1(z_t, \mu) / B(T_c) \\ J(\mu) &= I^i_1(z_t, \mu) / I^i_1(z_b, \mu) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $I^i_1(z_t, \mu)$ 是从云顶 μ 方向射出的向上辐射强度,它归因于云自身的热发射。

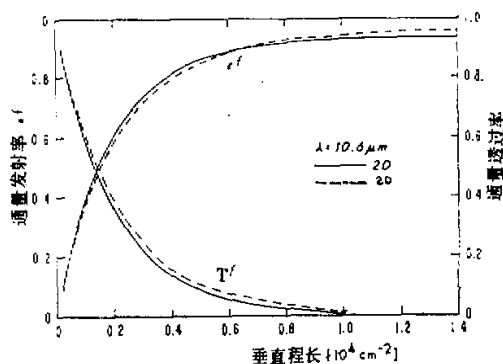


图3 二维和三维云模式的红外通量发射率和透过率随垂直程长的变化

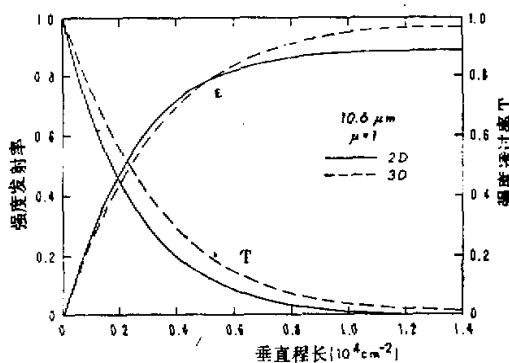


图4 二维和三维云模式在10.6微米波长上的强度发射率和透过率随垂直光程的变化

$I_1^*(z_b, \mu)$ 、 $I_2^*(z_t, \mu)$ 分别是 μ 方向到达云底和从云顶射出的辐射强度, 它们来源于外部辐射源。由 (9) 式可知, $I_1^*(z_b, \mu) = B(T_s)$

图4表示两种粒子随机取向向下强度发射率和透过率随垂直光程的变化。虽然它们的变化趋势与图3类似, 但粒子的取向状况对强度传输的影响要显著得多。在粒子两种随机取向下半透明卷云的透过率以及深厚卷云的发射率可以相差10%。显然, 它将引起向上辐射率的明显差异。根据这一研究结果可知, 冰晶的取向状况对于向上辐射强度有着重要的不可忽视的影响, 因而对于利用星载或地面测量红外辐射来探测卷云的成分和结构来说, 在参数化方案和反演方法上应该考虑冰晶的水平取向特征。

四、结 论

本文考察了在三维空间以及在水平面内随机取向的冰晶粒子的辐射传输性质。二维随机粒子的散射参数与人射辐射的天顶角有关。因此二维卷云模式的辐射传输方程与通常的情形有所不同, 本文对水平取向的冰晶的散射相函数作了一定的简化假定以后, 用分

离坐标法求解了太阳短波和地球红外辐射通过水平取向冰晶粒子的辐射传输问题,计算了均匀等温卷云的反射、透射和发射性质。结果表明,卷云粒子的取向状况对太阳短波通量传输有重要的影响。一般来说,当太阳垂直入射时,两种云模式的反照率差别最为明显,可达 8%;而对大的太阳天顶角和深厚的卷云,由于多次散射的作用,两者的差异不甚显著。对于红外辐射传输而言,冰晶的优先取向对通量传输影响不大,但对辐射强度的传输却有重要的影响。这一研究结果表明,在利用红外辐射测量探测卷云时,有必要考虑冰晶优先取向的影响。

致谢:本研究由美国国家基金会大气科学小组 ATM81—09050 研究计划资助。作者感谢夏隆·巴雷特小姐打印和整理了原稿。

参 考 文 献

- [1] Cai, Q. and K. N. Liou, Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: Theory, *Appl. Opt.*, **21**, 3569—3581, 1982.
- [2] Danielson, R. E., and D. R. Moose, The transfer of visible radiation through clouds, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1078—1087, 1969.
- [3] Heymsfield, A. J., Ice crystal terminal velocities, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1348—1357, 1972.
- [4] Heymsfield, A. J. and B. G. Knollenberg, Properties of cirrus generating cells, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1358—1366, 1972.
- [5] Heymsfield, A. J., Cirrus unicus generating cells and the evolution of cirroform clouds, Part I: Aircraft observations of the growth of the ice phase, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 799—808, 1975.
- [6] Jayaweera, D. O. and B. J. Mason, The behavior of freely falling cylinders and cones in a viscous fluid, *J. Fluid Mech.*, **22**, 709—720, 1965.
- [7] Liou, K. N., Electromagnetic scattering by arbitrarily oriented ice cylinders, *Appl. Opt.*, **11**, 667—674, 1972.
- [8] Liou, K. N., Transfer of solar irradiance through cirrus cloud layers, *J. Geophys. Res.*, **78**, 1409—1419, 1973a.
- [9] Liou, K. N., A numerical experiment on Chandrasekhar's discreteordinate method for radiative transfer: Applications to cloud and hazy atmospheres, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1303—1326, 1973b.
- [10] Liou, K. N., *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Academic Press, 392 pp, 1980.
- [11] Ono, A., The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 138—147, 1969.
- [12] Schaaf, J. W. and D. Williams, Optical constants of ice in infrared, *J. O. S. A.*, **63**, 726—732, 1973.
- [13] Stephens, G. L., Radiative transfer on a linear lattice: Application to anisotropic ice crystal cloud, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2095—2104, 1980.
- [14] Platt, C. M. R., Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates, *J. Appl. Meteor.*, **17**, 482—483, 1978.
- [15] Weickmann, H. K., Die Eispase in der Atmosphäre, *Ber. Deut. Wetterd.*, No. 6, 54 pp. 1949.

EFFECTS OF HORIZONTAL ORIENTATION ON THE RADIATIVE PROPERTIES OF ICE CLOUDS

Huang Runheng

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Liou Guonan

(Department of Meteorology, University of Utah, USA)

Abstract

Transfer of radiation through cirrus consisting of non-spherical ice crystals randomly oriented in a horizontal plane (2D model) is solved by using the discrete-ordinates method. The dependence of the scattering parameters on the incident angle caused by horizontal orientation of ice crystals is approximated by the Legendre polynomial expansion of zero and second order. The scattering phase function is represented by means of the analytic Henyey-Greenstein function with an asymmetry factor dependent on the incident zenith angle. The model is employed to determine the radiative flux properties and the intensity distribution of cirrus for both solar and thermal infrared radiation. Comparison of the 2D cloud model with the conventional 3D cloud model, i.e., randomly oriented in a three-dimensional space, shows that the preferential orientation of ice crystals has a substantial effect on the cloud solar albedo. The difference in the cloud albedo computed from the two models can be as large as 8% for a cirrus of 2 km thickness. On the thermal infrared side, the difference in the upward radiances using 2D and 3D models is also significant. However, the IR flux emission for cirrus is less affected by the orientation of ice crystals. In the light of these results, it appears that the preferential crystal orientation may be one of the dominate factors determining the solar albedo of cirrus and may have significant effects in the sounding of the cirrus composition and structure from infrared wavelengths.