

云微物理特性对云光学和 云辐射性质的影响^{*}

汪宏七 赵高祥

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

根据辐射传输理论, 计算了不同云滴谱分布时的云光学参数 β , ω_0 和 g , 考察了这些光学参数的变化对云的反射率、透过率和吸收率的影响, 以及云滴谱分布和云水含量在垂直方向的不均匀对云整体辐射性质、云中辐射通量密度和加热率的影响。

关键词: 云; 光学性质; 辐射性质; 云微物理。

引 言

云覆盖地球表面 50% 左右, 对地气系统的辐射收支有重要的调节作用。云的“反照率效应”和“温室效应”是二种相反的辐射强迫作用。它们的大小与云的类型、性质和所处环境密切相关, 云的净辐射强迫相对这二种效应是一个小量, 但它决定了云对地气系统是加热或冷却。对地球辐射收支实验 (ERBE) 资料的分析表明, 全球云的净辐射强迫可能 4 倍于 CO_2 加倍的作用^[1]。因此, 在全球尺度上云量和云特性很小的变化都可能对气候有显著的影响。云和辐射研究的一个重要目的就是确立一种能在环流模式中有效而精确地确定云辐射性质的方法。在气候变化研究中, 云的辐射性质常常被假定为固定的, 具有定常的光学性质或有给定的整体辐射性质 (如反射率、透过率和吸收率)^[2]。这样, 云对气候的影响就局限于与云量的变化有关。大量的观测事实表明, 这种预先给定的云的性质常常与观测资料或理论结果不一致^[3]。在气候变化过程中, 云的辐射性质也不可能保持不变, 因此, 代替预先给定云的辐射性质, 在一些方案中把云水含量作为决定云辐射性质的主要的独立变量^[4,5], 有的还考虑了云滴谱的有效半径^[6~8]。实际上, 影响云辐射性质的因子还要复杂得多, 云滴谱分布、云粒子的成分、相态和形状等微物理性质, 云的高度、厚度以及所处的地理位置等宏观性质都与云的辐射性质有关。我们通过辐射传输理论计算, 考察了云的微物理性质对云光学性质 (光学厚度、单次散射反照率和不对称因子) 及云辐射性质的影响, 计算中应用了对云微物理参数实际观测总结的一些云模式。

* 气候动力学及气候预测理论的研究项目和国家自然科学基金资助。

1994-08-10 收到, 1994-09-15 收到修改稿。

1 云的光学性质

云的消光系数, 单次散射反照率和不对称因子是决定云辐射性质的最重要的光学参数. 它们不仅与云滴的数密度、谱分布和云滴的形状以及成分有关, 还与云中水汽和胶体的存在有关. 对水云, 云滴常可作为球形粒子处理, 这时, 单个粒子的散射和吸收问题由 Mie 理论给出了完整的解. 对半径为 r 的粒子, 在入射辐射波长为 λ 时, 粒子的这些光学参数可用尺度参数 $x=2\pi r/\lambda$ 和粒子的复折射指数 $m_c=m_r-im_i$ 来描述, 并可用适当的递推公式计算^[9]. 而由不同大小云粒子的集合构成的云的消光、散射和吸收系数以及不对称因子, 则可根据单个粒子的相应参数对云滴谱分布积分来确定. 但由于单个粒子光学参数的 Mie 理论计算本身已十分复杂费时, 而云滴谱分布的变化又很大, 并且很难确切知道, 因此在实际计算云的光学参数时, 常采用一些近似方法, 把云的光学参数与一些重要的云微物理参数联系起来. 所以, 在研究中需要从实际观测和理论计算二方面来考察云光学性质与云微物理性质之间的关系.

大量观测表明, 即使是水云的云滴谱分布的时空变化非常大, 但对大量测量结果的分析表明, 可以用修改的 γ 谱来拟合^[10~12]:

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-\beta r^\nu) \quad (1)$$

云滴谱分布 $n(r)$ 的单位为 $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, 参数 α, β, ν 决定谱分布的形状, 参数 a 决定单位体积中云滴数.

定义云滴谱分布的众数半径 r_c 、平均半径 \bar{r} 和有效半径 r_e 为

$$\begin{aligned} \frac{dn(r)}{dr} &= 0, \text{ 当 } r = r_c \text{ 时} \\ \bar{r} &= \int_0^\infty rn(r)dr / \int_0^\infty n(r)dr \\ r_e &= \int_0^\infty r^3 n(r)dr / \int_0^\infty r^2 n(r)dr \end{aligned} \quad (2)$$

取云滴谱分布参数 $\nu = 0.5, 1.0; \alpha = 1, 2, 3, 4, 6, 8; \beta$ 的取值使有效半径 r_e 在 $1 \sim 300 \mu\text{m}$ 之间变化, 构成 90 个不同的云滴谱分布. 用 Mie 理论计算了波长为 $0.813, 1.070, 1.266, 1.443, 1.667, 1.961$ 和 $2.198 \mu\text{m}$ 各处的体积消光系数、单次散射反照率和不对称因子. 图 1 给出波长为 $1.070 \mu\text{m}$, 谱分布不同时的单位含水量消光系数和单次散射反照率. 图中每一个点相应一种云滴谱分布.

当云的谱分布形状(不同粒径的云滴数比例)确定时, 云的体积消光系数与单位体积中的云滴总数(也即云的含水量)成正比. 但云的体积消光系数不只与云含水量有关, 还与云滴谱分布有关. 当云含水量相同时, 云滴谱分布不同, 消光系数也不同, 图 1 的结果也说明了这一点. 图 1 还表明, 不仅云的单位含水量消光系数 β_e 和单次散射反照率 ω_e 随云滴谱众数半径 r_c 和平均半径 \bar{r} 的变化而不同, 当 r_c 和 \bar{r} 相同时, 也会因云滴谱的形状不同而不同; 但 β_e 和 ω_e 与有效半径 r_e 则有很好的关系, 即使云滴谱形状不同, 只要有效半径相同, β_e 和 ω_e 就可较好地确定. 因而可以用有效半径 r_e 来表征云滴谱分布, 在确定云的光学参数时, r_e 是比 r_c 和 \bar{r} 更有用的云微物理参数.

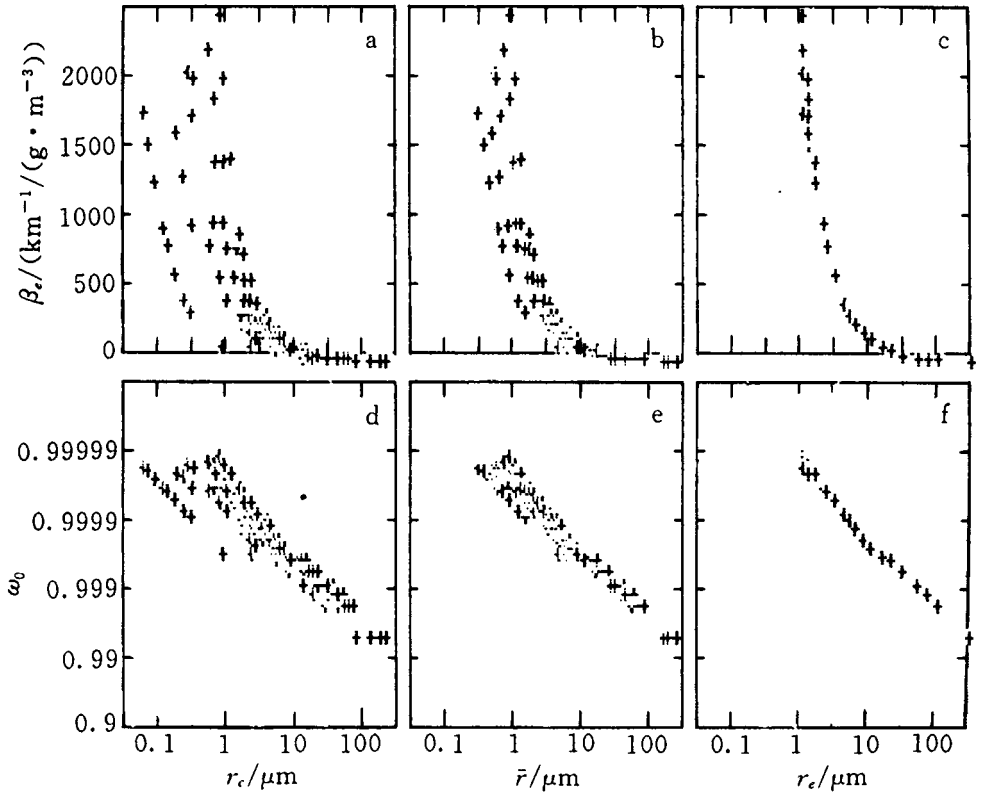


图1 不同谱分布的云的(a)(b)(c)消光系数 β_e 和(d)(e)(f)单次散射反照率 ω_0 。

Fig. 1 The extinction coefficient for unit liquid water content β_e (a, b, c), and the single scattering albedo ω_0 (d, e, f) of clouds with various droplet size distributions

图2的a、b和c分别给出了0.813, 1.070, 1.266, 1.443, 1.667, 1.961和2.198 μm 7个波长上云的单位含水量消光系数 β_e 、单次散射反照率 ω_0 和不对称因子 g 与有效半径 r_e 的关系。所选择的近红外波段的7个波长上,有的云滴折射指数虚部较大,吸收较强,有的折射指数虚部很小,吸收很弱。测量得到的云滴半径多数在几微米到几十微米,云滴有效半径通常在几微米到十几微米之间^[13,14]。由图2可见,在实际云滴谱有效半径范围内(几微米到十几微米),消光系数 β_e 与有效半径 r_e 近似有反比关系;在 r_e 相同时,云滴谱分布不同引起 β_e 的变化不大,且在吸收强弱不同的波长时,消光系数 β_e 的差别也不大,几乎与波长无关。在单位体积内云水含量不变的情况下,云滴谱的有效半径 r_e 越大,单位体积内云滴数目越少。因此,图2a还表明在单位体积内云水含量相同时,云的体积消光系数是随单位体积内云滴数目减少而减小的。

在大滴近似下, $Q_e(r) \rightarrow 2$, 消光系数 β_e 可近似表示为

$$\beta_e \approx 2 \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) dr = \frac{3}{2} \frac{W}{\rho r_e} \quad (3)$$

ρ 为云水密度, W 为单位体积内云水含量。式(3)表明在大滴近似下,单位云水含量的消光系数与 r_e 成反比,与谱分布 $n(r)$ 无关。但在 r_e 很小时,大滴近似不成立,这种反比关系也不成立,这在图2a中也清楚可见。

云的单次散射反照率 ω_0 与云滴复折射指数有关,因此与波长有关.在复折射指数虚部大的波长上,单次散射反照率 ω_0 小,这由图 2b 可见.图 2b 还表明:①对同一波长, ω_0 随

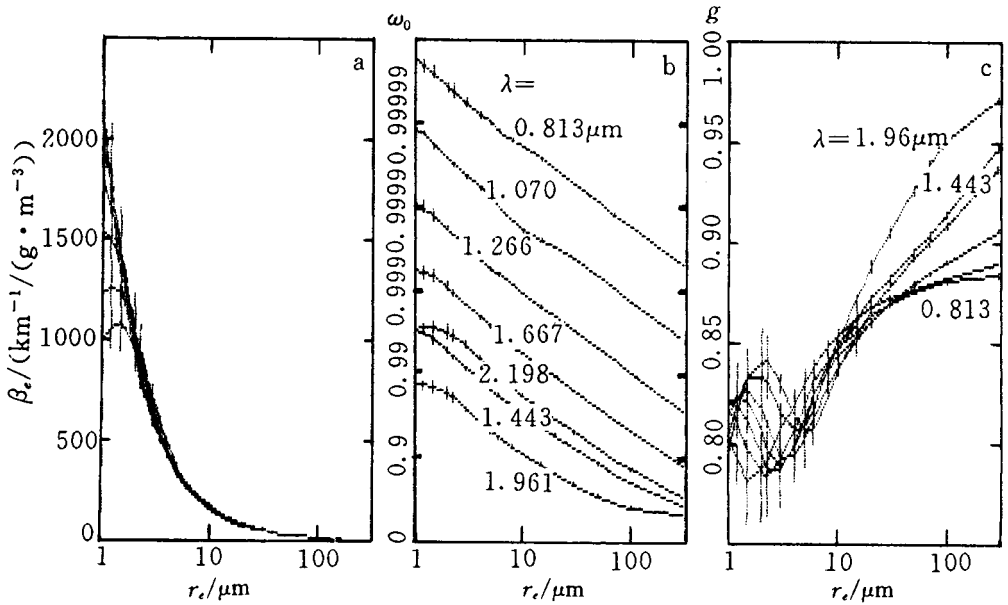


图 2 不同谱分布的云(a) β_e 、(b) ω_0 和 (c) 不对称因子 g 的平均值与 r_e 的关系(竖线:云滴谱分布不同时 β_e 、 ω_0 和 g 的变化范围)

Fig. 2 The relationships of mean values of (a) β_e , (b) ω_0 and (c) asymmetry factor g with equivalent radius r_e for various cloud droplet size distributions (vertical bars show variation ranges of β_e , ω_0 and g , due to different cloud droplet size distribution)

云滴谱有效半径 r_e 增加而减小,而且在通常的实际云滴谱有效半径范围内, ω_0 与 r_e 近似为线性关系;②云滴的吸收作用随云滴增大而增强,而由小云滴构成的云,则散射作用加强.结合图 2a 和 2b 可见,当单位体积内云水含量不变时,大滴增加,云滴数目减少,使体积消光系数减小.但 ω_0 随之减小表明散射系数减小得比消光系数更快.在总消光中,吸收作用相对增加.

图 2c 是在吸收强弱不同的波长上,云的不对称因子 g 与有效半径 r_e 的关系.一般而言,大滴有大的 g 值,前向散射大.但在 r_e 很大和较小的情况下,吸收强弱不同的波长上, g 值及其随 r_e 的变化都可有明显的不同.在 r_e 较小时,吸收强的波长较吸收弱的波长有较小的 g 值,而 r_e 大时则相反,说明吸收大的波长上 g 随 r_e 的变化更明显.在 r_e 较小时还可以看到,不仅不同波长的 g 值及其随 r_e 的变化差别明显,且在 r_e 相同时,不同的云滴谱形也可造成 g 有明显不同.但在实际的云滴谱有效半径范围内,不同波长的 g 值较为相近,且 g 值大致处在 0.80~0.87 之间,随 r_e 的增加而增加,在吸收大的波长上,大滴 g 可大于 0.9.

2 云的辐射性质

我们用离散坐标法计算云的光学厚度 τ , 单次散射反照率 ω_0 和不对称因子 g 在不同的情况下,云的反射率 R 、吸收率 A 和透过率 T ,以进一步研究云的这些光学参数对云辐

射性质的影响.

$$\begin{aligned} \text{云的光学厚度定义为} \quad \tau &= \int_0^Z \beta_v(z) dz && (\text{不均匀云层}) \\ \tau &= \beta_v Z && (\text{均匀云层}) \end{aligned}$$

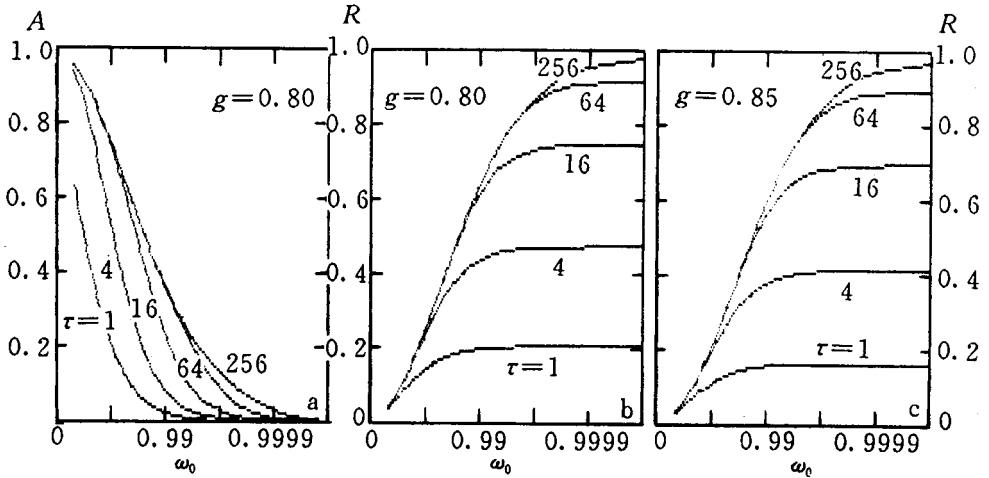


图3 不同光学性质(τ, ω_0, g)的云的吸收率 A 和反射率 R ($A_s=0.0, \theta_s=60^\circ$) (a) 和 (b) $g=0.80$ (c) $g=0.85$

Fig. 3 The absorptance A and reflectance R for clouds with different optical properties, τ, ω_0 and g ($A_s=0.0, \theta_s=60^\circ$) (a), (b) $g=0.80$ (c) $g=0.85$

这里 Z 为云的厚度, $\beta_v(z)$ 为云中离云底高度为 z 处的体积消光系数. 图3给出均匀云层在 $\tau=1, 4, 16, 64$ 和 256 时, 云的吸收率 A 和反射率 R 随 ω_0 的变化. 计算时取太阳天顶角 $\theta_s=60^\circ$, 地面反照率 $A_s=0.0$. 图3a和3b, 是 $g=0.80$ 时的情况. 由图可见, 云的吸收率 A 和反射率 R 随 ω_0 和 τ 可有很大的变化. 对一定的 τ , A 随 ω_0 增大而迅速减小, R 则随 ω_0 的增大而增大; 对一定的 ω_0 , 在 τ 增加时, 吸收率 A 和反射率 R 都增大, 当 τ 很大时, A 和 R 都趋向饱和, ω_0 越大, 达到饱和时的光学厚度 τ 也越大.

图3c和图3b类似, 但是在 $g=0.85$ 时的结果. 比较这二图可见, g 越大, 使前向辐射增加, 更多的辐射进入云中, 因此, 在 τ 和 ω_0 相同时, 云的反射率减小, 吸收率增大. 如在 $\tau=4$ 和 16 时, 对 $g=0.80$ 和 $g=0.85$, 饱和和反射率的差别分别为 14% 和 7% , 而在未达到饱和时, 反射率的差别可更大.

比较图2和图3可见, 在通常实际云滴谱有效半径 r_v 的范围内, 不对称因子 g 的变化 (约 $0.80 \sim 0.87$) 足以引起云的反射率有相当大的变化, 从而也改变了云的吸收; 而 ω_0 的影响在吸收很小的波长上 (ω_0 很大), 对云反射和吸收的影响不大, 在吸收较强的波长上 (ω_0 较小), 实际云微物理性质不同造成的 ω_0 变化可对云的吸收和反射有很大的影响; 云的消光系数与光学厚度成正比, 因而云微物理性质 (如液态水含量、云滴谱有效半径) 造成的云消光系数的变化可直接引起云辐射性质有很大不同.

3 云的垂直不均匀对云辐射性质的影响

云在垂直方向通常是不均匀的. 观测表明, 典型的云水含量分布是随离云底高度增加

而增加,在接近云顶处达到极大,随后向云顶迅速减为零.但实际云水含量的变化也可更为复杂,在云层中可出现不止一个云水含量极大的层;云滴的大小,在云上层通常观测到云滴粒径要比下层大,但不规则变化也常常见^[13].

表 1 是根据实际飞机观测结果建立的云模式,并通过对这一云模式的辐射传输计算来察看云滴大小和云水含量的垂直分布不同对云层辐射性质的影响.在波长 $1.667\mu\text{m}$ 的

表 1 云中液态水含量 W 和有效半径 r_e .

Table 1 Liquid water content W and equivalent radius r_e in a cloud

层	$W(\text{g}/\text{m}^3)$	$r_e(\mu\text{m})$	云几何厚度(km)
1	0.352	8	0.04
2	0.435	7	0.12
3	0.289	6	0.13
4	0.023	4	0.05

计算结果示于图 4, F^\uparrow 和 F^\downarrow 为云层中的向上和向下辐射通量密度, H 为云中的加热率, R 和 A 值分别为整层云的反射率和吸收率. 计算时云顶入射太阳辐射通量密度取为 $F_0 = 1 \text{ W}/\text{m}^2$, 太阳天顶角 $\theta_0 = 60^\circ$. 由图 4a 可见, 在云内太阳辐射加热主要集中在云的上层,

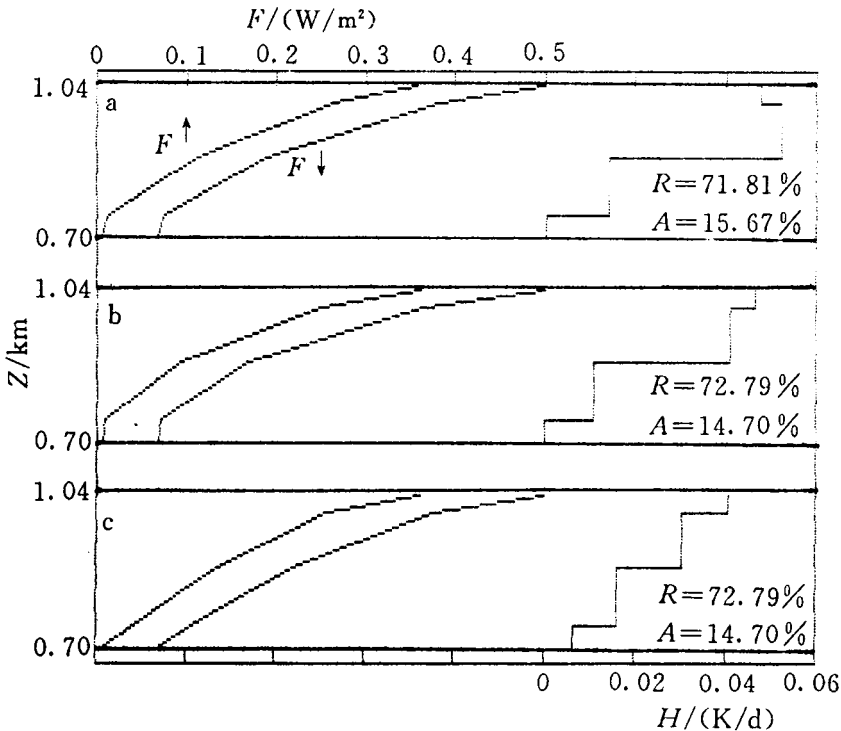


图 4 不同垂直分布的云中辐射通量密度 F 和加热率 H ($\lambda=1.667\mu\text{m}$, $F_0=1\text{W}/\text{m}^2$, $\theta=60^\circ$) ((a) W 和 r_e 如表 1 所示, (b) W 如表 1, 但 4 个云层中的 r_e 取平均值 $6.66\mu\text{m}$, (c) $W=0.3088\text{g}/\text{m}^3$ 和 $r_e=6.66\mu\text{m}$ 的均匀云)

Fig. 4 Radiative fluxes F and heating rates H in clouds with different vertical distributions ($\lambda=1.667\mu\text{m}$, $F_0=1\text{W}/\text{m}^2$, $\theta=60^\circ$) ((a) W and r_e represented as in Table 1 (b) W as in Table 1, but with a mean $r_e=6.66\mu\text{m}$ in all 4 cloud layers (c) homogeneous cloud with $W=0.3088 \text{ g}/\text{m}^3$ and $r_e=6.66\mu\text{m}$)

在云底层,加热率非常小,最大加热率出现在云上部第二层中.这是由于云上部第一层很薄,大云滴又多,前后散射强,从而大部分辐射到达第二层.而第二层的云水含量最大,造成吸收的太阳辐射能最多,加热率最大;底层的云水含量最小,到达该层的太阳辐射能已很小,因而加热率非常小.当云滴谱有效半径在云中都相同,但云水含量仍为不均匀时(图4b),整层云的反射率增大,吸收率减小.这是由于 r_e 不均匀时,云上部的大云滴有较强的前向散射,使进入云中的辐射较多,从而云吸收较多,反射较少.就云中的加热率分布来看,也有明显的变化,这时加热率最大在第一层,第二层的加热率明显减少.当进一步把云中的云水含量也看作均匀分布时(图4c),整层云的辐射性质与图4b的情况相同,但云内部的加热率则有明显的不同.由以上例子可见,云滴谱分布及云水含量的垂直不均匀对云整体辐射性质是有影响的,但这种影响相对较小,而对云内部辐射和加热率分布的影响则更为显

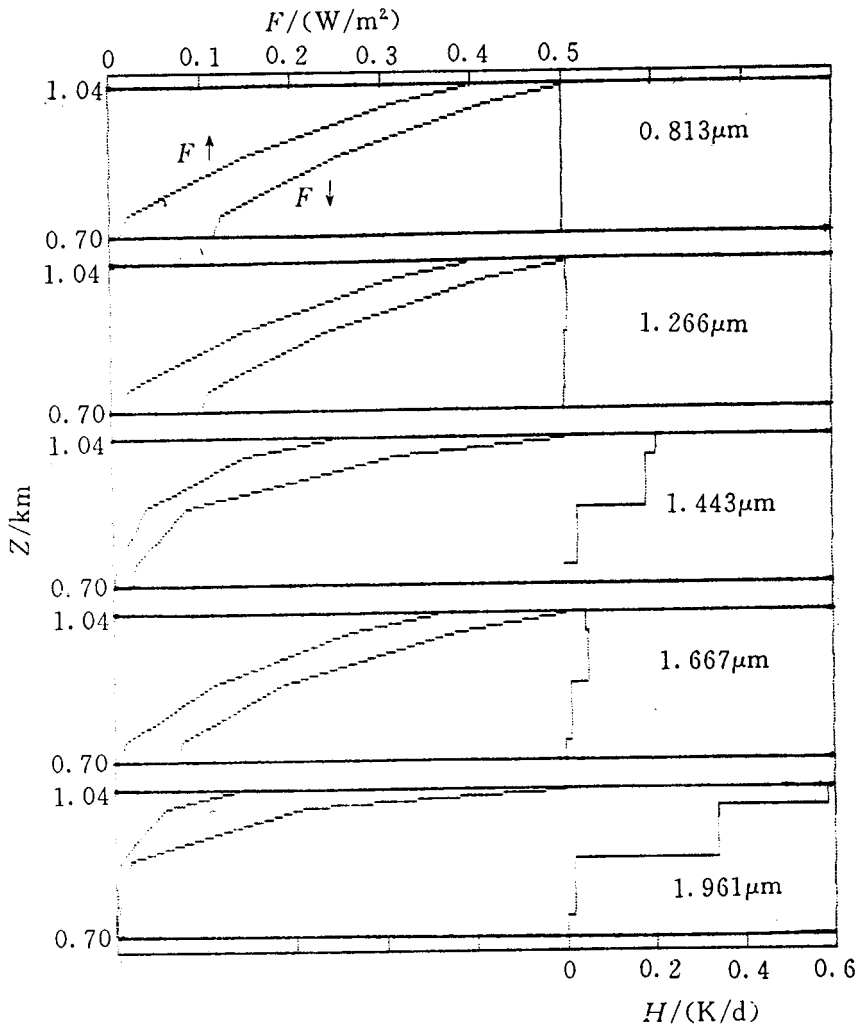


图5 垂直不均匀分布的云中不同波长辐射通量密度 F 和加热率 H ($F_0=1\text{W/m}^2, \theta_0=60^\circ$)
 Fig. 5 Radiative fluxes F and heating rates H in clouds with vertical inhomogeneous distributions for the various wave length ($F_0=1\text{W/m}^2, \theta_0=60^\circ$)

著.

在不同波长上,云的吸收特性不同,从而辐射在云中的传输情况也不同,造成的云中加热也有差别.图 5 是对表 1 的模式云, $\lambda=0.813,1.266,1.443,1.667$ 和 $1.961 \mu\text{m}$ 计算得到的云内向上和向下辐射通量密度和加热率分布.由图 5 可见,吸收强弱不同的波段,除了加热率大小不同外,云中加热率的分布也可有明显的差别.在吸收不太强的波段(如 $1.667 \mu\text{m}$),云中加热率极大值出现在含水量最大的第二层;而对吸收较强的 1.443 和 $1.961 \mu\text{m}$,云中加热率极大值则出现在云水含量较小的第一层中.吸收越强的波段,云中的加热越集中在云的上部.

4 小 结

由不同云滴谱分布情况下云光学参数的计算结果表明,云的消光系数不仅与云水含量有关,还与云滴谱分布、有效半径有关.因此,在太阳辐射波段云光学厚度的参数化中,同时考虑云水含量和有效半径^[7]比只考虑云水含量^[4]可能更合理.但当云主要由小云滴构成、有效半径 r_e 很小时,云的光学厚度还与云滴分布的形状有关,且与 r_e 的反比关系也不再适用.

不论在吸收强或弱的波长上,在通常实际云滴谱有效半径范围(几微米到十几微米)内,云单次散射反照率 ω_0 与有效半径 r_e 近似有线性关系,与云滴谱分布的具体形状关系不大.

云的不对称因子 g 与消光系数 β_e 和单次散射反照率 ω_0 相比,它随吸收强弱不同的波长变化和云滴谱分布的变化相对较小.因此,在不少云辐射参数化中把 g 作为常数,但实际上,即使在通常云滴谱的有效半径范围内, g 也有明显的变化(约 $0.80 \sim 0.87$),且大致随 r_e 增大而增大.在有效半径 r_e 更大和很小时,吸收强弱不同波长之间 g 值和 g 随 r_e 变化的差别也加大.

云滴谱分布不同造成的云光学参数 β_e , ω_0 和 g 的变化可引起云的吸收率 A 、反射率 R 和透过率 T 的显著变化,这就必须在云辐射参数化中考虑云滴谱分布的不同.而云滴谱的有效半径 r_e 是一个比众数半径 r_c 和平均半径 \bar{r} 更有用的表征云滴谱分布的参数,在实际云滴谱有效半径范围内,云滴谱的具体形状则并不重要.

云层中云水含量和有效半径的垂直不均匀性对云整体辐射性质有一定影响,对云内部的辐射场和加热率的分布则可有显著影响.

参 考 文 献

- 1 Ramanathan V, Cess R D and Harrison E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: results from the earth radiation budget experiment. *Science*, 1989, **243**: 57~63.
- 2 Wetherald R T and Manabe S. Cloud feedback processes in a general circulation model. *J. Atm. Sci.*, 1988, **45**: 1397~1415.
- 3 Feigelson E M. Flows of sun radiation and clouds. Hydrometeoizdat Press, Leningrad. 1978, p156. (in Russian)
- 4 Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds. I: parameterization schemes. *J. Atm. Sci.*, 1978, **35**:

2123~2132.

- 5 Liou K -N and Wittman G D. Parameterization of radiative properties of clouds. *J. Atm. Sci.*, 1979, **36** : 1261~1273.
- 6 Slingo A. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. *J. Atm. Sci.*, 1989, **46** : 1419~1427.
- 7 Slingo A and Schrecker H M. On the shortwave radiative properties of stratiform water clouds. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1982, **108** : 407~426.
- 8 Ackerman S and Stephens G L. The absorption of solar radiation by cloud droplets: An application of anomalous diffraction theory. *J. Atm. Sci.*, 1987, **44** : 1574~1588.
- 9 Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms. *Appl. Opt.*, 1980, **19** : 1505~1509.
- 10 Deirmendjian D. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. Am. Elsevier Publ. Co., N. Y. 1969, p290.
- 11 Tampieri F and Tomasi C. Size distribution model of fog and cloud droplets in terms of modified Gamma function. *Tellus*, 1976, **28** : 333~347.
- 12 Welch R M, Cox S K and Davis J M. Solar radiation and clouds. Am. Met. Soc. Monograph Series No. 39, Boston 1980, p93.
- 13 Herman G F and Curry J A. Observational and theoretical studies of solar radiation in arctic stratus clouds. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **23** : 5~24.
- 14 Rawlins F and Foot J S. Remotely sensed measurements of stratocumulus properties during FIRE using the C130 aircraft multi-channel radiometer. *J. Atm. Sci.*, 1990, **47** : 2488~2503.

THE INFLUENCES OF CLOUD MICROPHYSICAL PARAMETERS ON CLOUD OPTICAL AND RADIATIVE PROPERTIES

Wang Hongqi Zhao Gaoxiang

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

In the view of radiation transfer theory, the cloud optical parameters: β_e , ω_0 and g are calculated under the different cloud droplet size distributions, and their influences on cloud reflectivity, transmissivity and absorptivity are investigated. And, the effects of inhomogeneities of cloud droplet size distribution and cloud liquid water content in the vertical direction on assemble cloud radiative properties, radiative flux density and heating rate in the cloud are also estimated.

Key words: Cloud; Optical properties; Radiative properties; Cloud microphysics.