

水云宽带长波光学性质参数化*

汪宏七** 赵高祥

中国科学院大气物理研究所,北京 100029

摘要 在3种窄带云光学性质参数化方案的基础上,建立了相应的宽带云光学性质参数化模式,考察了不同的参数化方案和不同的宽波段划分对水云长波辐射性质的影响,并对云滴散射作用在有云大气中对长波辐射通量和冷却率的影响进行了分析.

关键词 云 宽带 光学性质 辐射 参数化

云的辐射作用影响到大气运动状态和地球气候,在决定云自身的生消、结构和分布中也起着重要的作用.对太阳辐射,云有冷却地气系统的“反照率效应”;对地球长波辐射,则有加热地气系统的“温室效应”,云的这两种作用的不平衡在气候变化中有非常重要的影响,它将决定云在大气中温室气体增加可能引起的气候变化中起增强还是抵消的作用.因此,在环流模式中正确处理云的辐射作用具有十分重要的意义.在窄带云光学性质参数化的基础上^[1],通过分析不同的宽波段划分、不同的参数化方案和云滴散射作用在有云大气中对长波辐射通量和冷却率的影响,建立了适用于环流模式中辐射传输计算的宽带云光学性质参数化模式.

1 宽带云光学性质参数化

在窄带云光学性质参数化中,3.333~1000 μm 的长波区域被划分为206个波段^[1],由于波段数目多,所需的计算时间长,仍不适合在环流模式中应用,必须进一步减少波段数目.在宽带云光学性质参数化中,波段的划分分为2种,一种是考虑到云光学性质随波长的变化,将长波区域分为8个波段,依次为(1) 3000.0~1900.0 cm^{-1} , (2) 1900.0~1380.0 cm^{-1} , (3) 1380.0~1100.0 cm^{-1} , (4) 1100.0~980.0 cm^{-1} , (5) 980.0~800.0 cm^{-1} , (6) 800.0~540.0 cm^{-1} , (7) 540.0~340.0 cm^{-1} 和(8) 340.0~10.0 cm^{-1} ;另一种是将整个长波区域作为一个波段来考虑,在所有波长上,云的光学性质都相同,用整个长波区域的平均值来表示^[2].考虑到长波辐射随波长的变化,在求不同云滴谱的宽带云光学参数时,先用Mie方法^[3]计算206个窄带的云消光系数 $\beta_e(i)$,单次散射反照率 $\omega_0(i)$ 和不对称因子 $g(i)$,再用Planck函数对窄带云光学参数进行加权,得到各个宽带的云消光系数 β_e ,单次散射反照率 ω_0 和不对称因子 g ,即

2001-01-02 收稿,2001-04-06 收修改稿

* NKBRF Project (G1999043400)和国家自然科学基金项目(批准号:49675248)资助

** E-mail: hqwang@ast590.tea.ac.cn

$$\beta_e = \sum_i \beta_e(i) w(i), \quad \omega_0 = \sum_i \omega_0(i) \beta_e(i) w(i) / \sum_i \beta_e(i) w(i),$$

$$g = \sum_i g(i) \omega_0(i) \beta_e(i) w(i) / \sum_i \omega_0(i) \beta_e(i) w(i),$$

$$w(i) = \int_{\delta\nu_i} B(\nu, T) d\nu / \int_{\Delta\nu} B(\nu, T) d\nu.$$

式中的求和是对某一个宽波段 $\Delta\nu$ 中所有的窄波段 $\delta\nu_i$ 进行的, $w(i)$ 为第 i 个窄波段在它所在的宽波段中的 Planck 辐射能量的权重, ν 为波数, T 为温度. 在此基础上, 建立了与窄带云光学性质参数化形式相同的 3 种宽带云光学性质参数化方案, 即

单参数线性方案

$$\frac{\beta_e}{LWC} = a_1 + b_1/r_e, \quad (1)$$

$$1 - \omega_0 = a_2 r_e + b_2, \quad (2)$$

$$g = a_3 r_e + b_3; \quad (3)$$

单参数非线性方案

$$\frac{\beta_e}{LWC} = a_1 r_e + b_1 + c_1/r_e + d_1/r_e^2, \quad (4)$$

$$1 - \omega_0 = a_2 r_e + b_2 + c_2/r_e + d_2/r_e^2, \quad (5)$$

$$g = a_3 r_e + b_3 + c_3/r_e + d_3/r_e^2; \quad (6)$$

双参数方案

$$\frac{\beta_e}{LWC} = a_1 r_e + b_1 + c_1/r_e + d_1/r_e^2 + e_1 r_m + f_1 r_m/r_e, \quad (7)$$

$$1 - \omega_0 = a_2 r_e + b_2 + c_2/r_e + d_2/r_e^2 + e_2 r_m + f_2 r_m/r_e, \quad (8)$$

$$g = a_3 r_e + b_3 + c_3/r_e + d_3/r_e^2 + e_3 r_m + f_3 r_m/r_e. \quad (9)$$

在上面的表达式中, r_e 和 r_m 分别为水滴谱的有效半径和平均半径, LWC 为云水含量, a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 和 f_1 等为回归系数. 窄带时, 这些系数由最小二乘法确定, 宽带模式的系数则通过用窄带 Planck 能量的权重对窄带模式系数加权平均直接得到. 表 1 给出了对 124 个不同的云滴谱分布, 用 1 波段和 8 波段宽带参数化方案计算得到的不同波段的云光学性质的均方根误差. 与窄带云光学性质参数化的情况相似, 单参数线性方案的偏差较大, 单参数非线性方案精度较好, 双参数方案精度更好.

2 不同宽波段划分和不同参数化方法对云辐射性质的影响

对表 2 所示的垂直方向分成 4 层的不均匀层云, 不计大气影响, 分别用 Mie 散射理论计算整个长波区域分为 206 个窄波段、8 个宽波段和 1 个波段时各层云的光学参数, 再用 4 流的离散坐标法计算假定地表发射率为 0 和云层温度为 275 K 时, 云中的长波辐射通量和各层云中吸收的辐射, 结果在表 3 中给出. 表中的 F^\uparrow , F^\downarrow 和 ΔF 分别表示云中不同高度的向上、向下辐射通量和 4 层云中吸收的辐射. 可以看到, 在整个长波区域分成 8 个宽波段时计算得到的

云中的辐射量,与分成 206 个窄波段时得到的辐射量差别很小,但把长波区域作为 1 个波段来处理时,计算得到的辐射通量和云层中的吸收都有较大的偏差.

表 1 用宽带参数化模式计算得到的不同波段的云光学性质的均方根误差(%)

模式	公式	1 波段	8 波段							
			波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 6	波段 7	波段 8
单参数线性	(1)	6.97	0.32	8.27	11.61	9.32	5.29	5.46	7.56	5.82
	(2)	2.79	4.04	2.97	4.75	5.88	3.47	2.46	3.06	3.40
	(3)	1.90	0.93	0.52	1.22	1.82	2.53	3.98	5.98	9.67
单参数非线性	(4)	2.32	3.40	2.96	3.28	2.97	1.95	1.88	2.48	2.23
	(5)	0.60	2.95	2.25	2.07	1.54	0.70	0.55	0.63	0.78
	(6)	0.39	0.46	0.25	0.27	0.37	0.42	0.79	1.92	5.50
双参数	(7)	0.70	3.44	1.26	1.81	1.56	0.61	0.40	0.82	0.99
	(8)	0.32	1.48	1.18	1.50	0.92	0.29	0.22	0.34	0.33
	(9)	0.23	0.44	0.16	0.23	0.24	0.26	0.51	1.03	1.48

表 2 垂直方向分成 4 层的不均匀层云

层	液态水含量/ gm^{-3}	云厚/km	云的类型 ^{a)}	$r_e/\mu\text{m}$	$r_m/\mu\text{m}$
1	0.352	0.04	层云顶	11.29	8.19
2	0.435	0.12	层云顶	11.29	8.19
3	0.289	0.13	层云底	7.33	5.57
4	0.023	0.05	层云底	7.33	5.57

a) 云滴谱分布取自文献[4]

表 3 整个长波区域的波段划分不同时计算得到的云中的辐射量(Wm^{-2})

高度/km	206 个窄带			宽带 8 波段			宽带 1 波段		
	F^\downarrow	F^\uparrow	ΔF	F^\downarrow	F^\uparrow	ΔF	F^\downarrow	F^\uparrow	ΔF
1.20	0.000	313.686	-254.229	0.000	313.853	-254.912	0.000	314.058	-257.934
1.16	263.309	322.766	-61.215	264.017	322.958	-60.193	267.042	323.166	-56.573
1.04	323.498	321.740	-242.067	323.745	322.493	-242.630	324.067	323.619	-243.541
0.91	315.078	71.253	-67.348	315.304	71.422	-67.495	316.240	72.251	-68.199
0.86	311.173	0.000	—	311.377	0.000	—	312.189	0.000	—

在整个长波区域分为 206 个窄带、8 个宽带和作为 1 个波段的 3 种情况下,分别用单参数线性方案、单参数非线性方案和双参数方案,计算出表 2 所示的不均匀层云的光学参数,再用离散坐标法计算云中的长波辐射通量和各层云中吸收的辐射,与表 3 中 206 个窄带时的结果相比,在云的光学性质用双参数方案计算时,对 206 个窄带和 8 个宽带得到的云中辐射通量和云层辐射吸收都有较好的精度,用单参数非线性方案次之,而用单参数线性方案得出的云的辐射性质误差较大;在 1 个宽波段的情况下,用 3 种参数化方案得到的云中的辐射量都有较大误差.

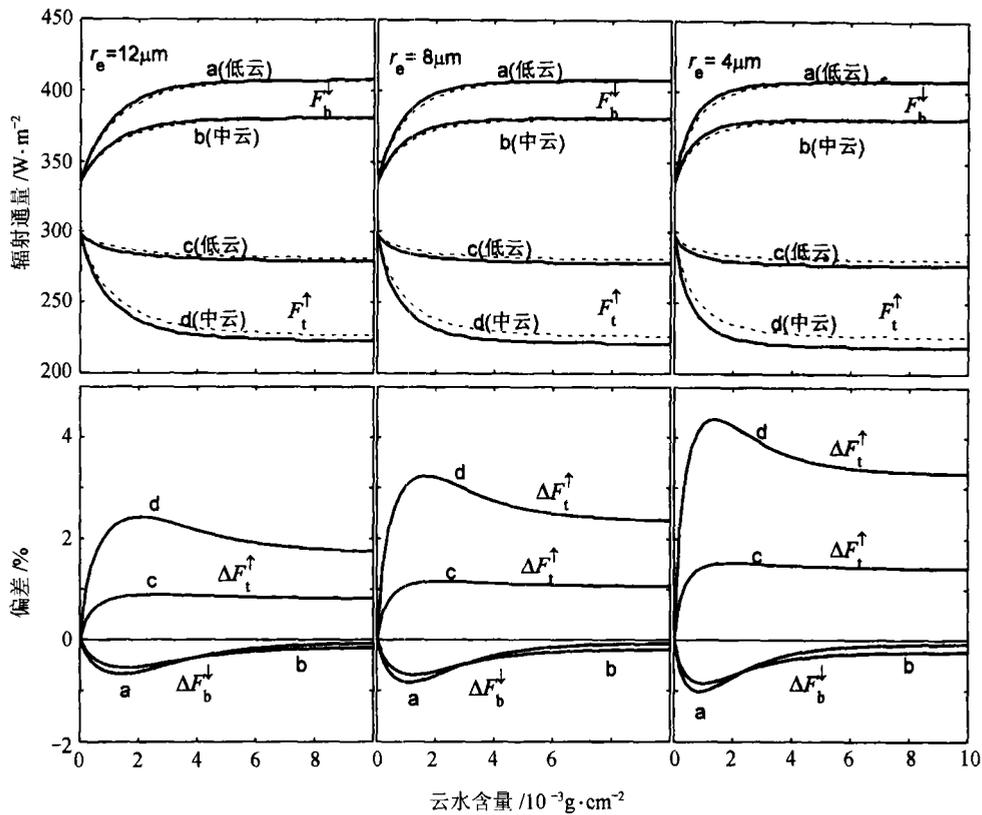


图 1 宽带 8 波段情况
(a), (c) 为大气中有低云时; (b), (d) 为有中云时

3 云滴散射作用对长波辐射的影响

在长波波段, 气体和云都有很强的吸收, 因此, 在很多气候模式中, 对有云大气的长波辐射计算只考虑云的吸收而不计散射, Chou 等在他们的工作中则指出在长波区域考虑云散射的重要性^[5]. 由 Mie 理论对不同云滴谱计算得到的云光学性质可以看到, 在辐射能量较大的波段, 云的单次散射反照率仍较大. 这意味着不考虑云的散射作用可能对有云大气辐射传输计算的精度有影响. 为了考察云滴散射作用对长波辐射传输的影响, 对中纬度夏季大气, 在 1~2 km 高度上存在云滴有效半径分别为 4, 8 和 12 μm, 整层云水含量在 0~0.01 g·cm⁻² 范围的各种低云的情况下, 计算了大气中的长波辐射通量和冷却率; 对在 5~6 km 高度上存在各种中云的情况, 也作了类似的计算. 计算时, 大气共分 70 层, 在 13 km 以下, 每 0.25 km 为一层, 在 13~25 km 之间, 每 1 km 为一层, 在 25~50 km 之间, 每 5 km 为一层. 计算中考虑了水汽和 CO₂ 的吸收, 气体吸收用 K 分布方法计算^[2], 辐射计算用离散坐标法, 流数取为 4 流, 云的光学性质用宽带 8 波段或 1 波段的单参数非线性方案计算.

图 1 为宽带 8 波段的情况, 曲线 a 和 c 表示大气中有低云时的结果, 曲线 b 和 d 为有中云

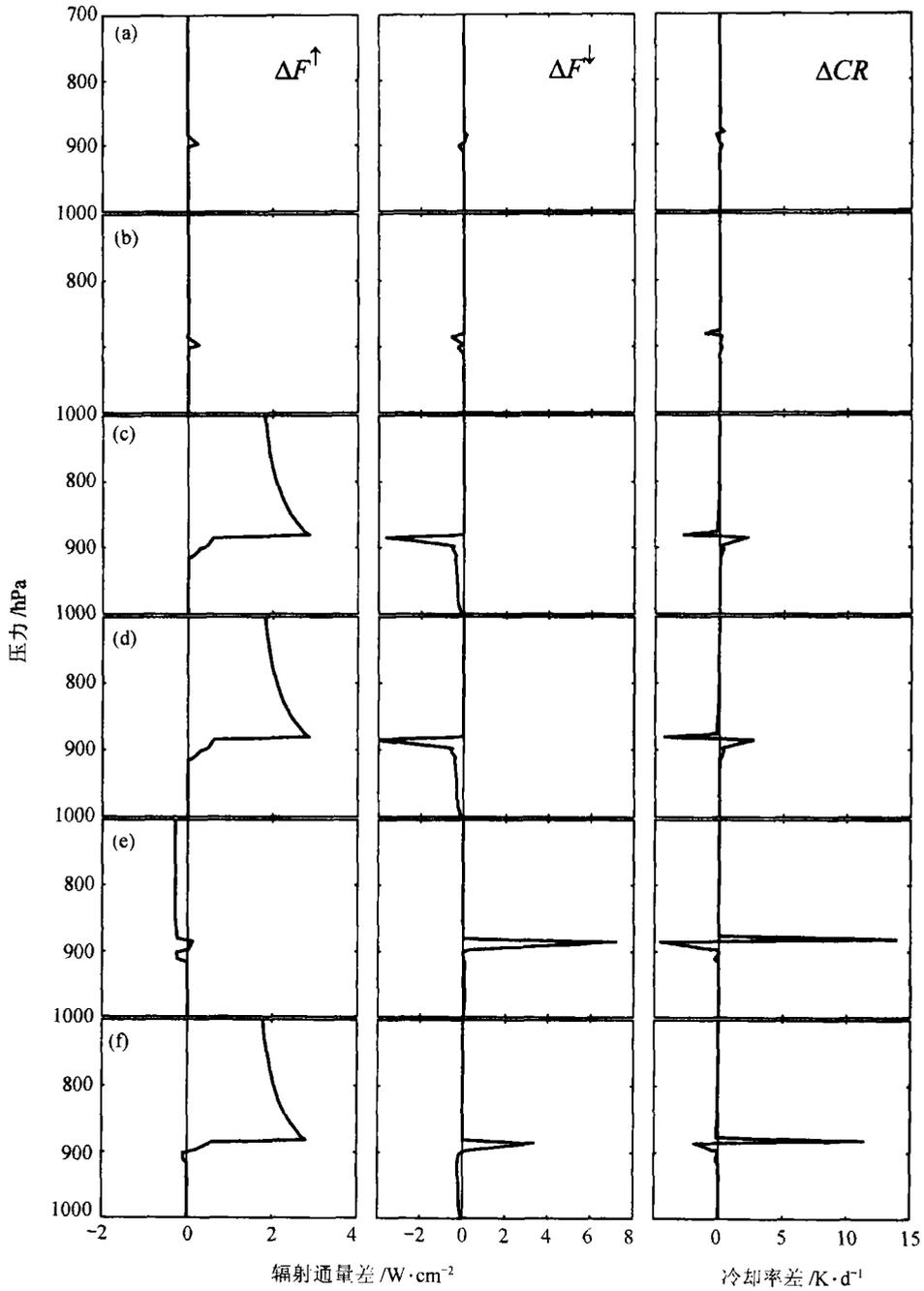


图 2 云光学性质计算方案不同造成的大气中长波辐射通量和冷却率计算的偏差
 (a) 8 波段和双参数云光学性质参数化计算方案; (b) 8 波段和单参数非线性方案; (c) 与(a)相同,但不考虑云滴散射; (d) 与(b)相同,但不考虑云滴散射; (e) 1 波段和单参数非线性方案; (f) 与(e)相同,但不考虑云滴散射

时的结果。 F_t^\uparrow 和 F_b^\downarrow 分别为大气顶向上长波辐射通量和到达地面的向下长波辐射通量,实线

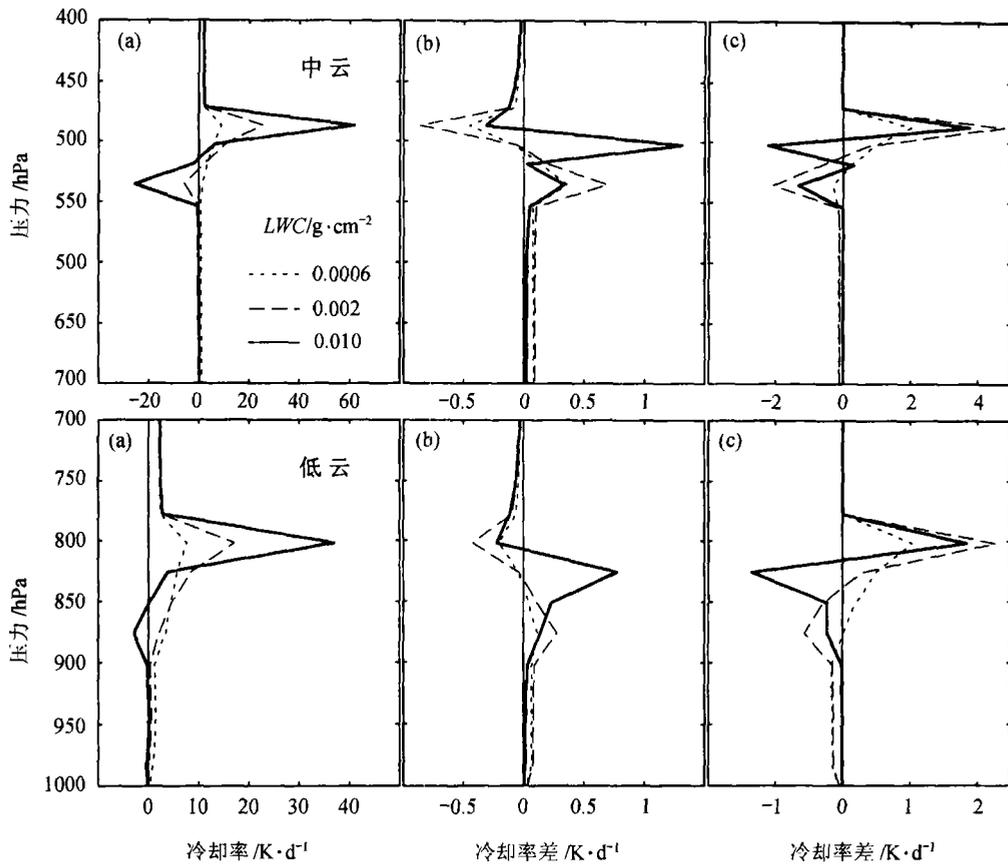


图 3 中纬度夏季模式大气中分别有各种不同云液态水含量的中云和低云时,用 8 波段计算得到的大气中的长波辐射冷却率(a)和不考虑云滴散射引起的冷却率的偏差(b),以及用 1 波段时的冷却率偏差(c)

是计入云滴散射作用的结果,虚线为不计云滴散射的结果, ΔF_t^\uparrow 和 ΔF_b^\downarrow 分别为不计入散射与计入散射作用时辐射通量的相对差别,由图可见,不计云的散射使到达地面的向下辐射减少,使大气顶的向上辐射增加,云滴谱的有效半径较小,差别较大。

在中纬度夏季模式大气中有云顶高度在 1.2 km 的不均匀层云时,与相应于 8 个波段,云的光学性质用 Mie 散射理论计算,得到的大气和云中向上、向下长波辐射通量和冷却率相比,当云的光学性质用不同的参数化方案计算,应用的波段数目不同,或不考虑云滴散射时,得到的向上和向下辐射通量差 ΔF^\uparrow 和 ΔF^\downarrow ,以及长波辐射冷却率的差别 ΔCR 在图 2 中给出。由图 2 可以看到,对 8 个波段,考虑云滴散射作用,应用双参数或单参数非线性方案得到的长波辐射通量和冷却率都有很好的精度;当不考虑散射时,则可出现明显的误差,如图 2 中(c)、(d)和(f)所示;情况(e)则表明,在 1 个波段和考虑云滴散射时,虽然大气中无云处的辐射通量差并不很明显,但云中的向下辐射通量和冷却率都有很大差别。用单参数非线性方案,考虑云滴散射作用,在 8 波段时得到的分别有中云和低云的大气中的长波辐射冷却率在图 3(a)中给出,不同的曲线分别对应各种不同云液态水含量的情况;不计云散射造成的冷却率的偏差在图 3

(b)中给出;图 3(c)则是考虑云散射作用时,对 1 波段得到的大气中的冷却率与 8 波段时的差别. 图 3 表明,不计云散射作用,或只用一个宽波段,不考虑云光学性质随波长的变化,都可引起云中冷却率计算的显著误差.

4 结论

由上面的结果可以看到:(1)在宽带云光学性质参数化中,单参数线性模式误差较大,单参数非线性模式和双参数模式精度较好;(2)不考虑云滴散射作用可造成高估有云大气时大气顶的向上长波辐射通量和低估到达地面的向下长波辐射通量,以及大气中和云中明显的的辐射通量和冷却率的计算误差;(3)在考虑云滴散射作用的情况下,用一个波段,不计云光学性质随波长的变化可造成云中向下长波辐射通量和冷却率计算有显著的误差. 因此,在有云大气长波辐射传输计算中,应考虑云光学性质随波长的变化和云的散射作用. 对 8 个宽波段,应用双参数或单参数非线性方案进行宽带云光学性质的计算,可以得到较高精度的长波辐射通量和冷却率的计算结果.

参 考 文 献

- 1 Wang H Q, et al. Parameterization for narrow band optical properties of water clouds. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 204
- 2 Chou M D, et al. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Tech Memo 104606*, 1994, Vol 3
- 3 Wiscombe W. *Mie Scattering Calculations*. NCAR Tech Note, TN-140 + STR, NCAR 1979
- 4 Welch R M, et al. *Solar Radiation and Clouds*. American Meteorological Society, Boston, MA 02108, *Meteorological Monographs*, 1980, Vol. 17, No 39
- 5 Chou M D, et al. Parameterization for cloud longwave scattering for use in atmospheric models. *J Climate*, 1999, 12: 159