

# 混合云在 GCM 气候模拟中的重要性

孙治安\*      Keith P. Shine

(英国 READING 大学气象系)

## 提 要

文章提出了一种简单且适用于大气环流模式(GCM)的冰云辐射参数化. 利用该参数化和 UGAMP 大气环流模式研究了混合云在 GCM 气候模拟中的重要性. 结果表明, 云的相态变化及其所产生的反馈作用对模拟的气候状态有显著的影响. 在高纬地区, 云的相态变化可使地气系统净辐射增加, 而在热带则使净辐射减少.

**关键词:** 冰云; 辐射; 参数化; 混合云; 气候模拟.

## 引 言

云通过与辐射的相互作用对气候变化产生重要影响. 这种影响的强度依赖于云的宏观(云高、云量和云厚)及微观(云水含量、云粒子尺度分布和云的相态)特征. 在研究云与辐射相互作用时, 通常假设中低云为液态, 高云为冰晶态. 而实际上, 中低云也经常演化为混合云或冰晶云. 这在高纬和极地尤其如此. Rangno 和 Hobbs<sup>[1]</sup>报告过云顶低于 4 km 的极地层积云演化为冰晶云的全过程. 高云也并非全部为冰晶云. 很多观测结果表明, 即使在温度低到  $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$  的卷云里也经常有过冷水滴存在<sup>[2]</sup>. 由于冰和水的折射率不同, 冰晶和水滴的尺度、形状不同, 冰云和水云的辐射特性存在很大差异, 必须分开处理. 我们比较系统地研究了冰晶云的辐射参数化问题. 在此基础上探讨了混合云在辐射计算和气候变化中的重要性<sup>[3~4]</sup>. 本文将主要讨论混合云在 GCM 气候模拟中的重要性. 使用的模式是英国大学模式 UGCM<sup>[5]</sup>\*\*. 该模式是在欧洲中心中期天气预报(ECMWF)模式基础上改进的, 模式中原有的云辐射参数化是由 Morcrette<sup>[6]</sup>提出的. 云的液水含量取为饱和混合比的常数百分比. 云的光学厚度由云的液水含量和有效水滴半径确定. 这个参数化是根据对层积云观测资料分析得到的, 因此仅适用于水云, 而不适用于冰云. 我们对文献<sup>[4]</sup>中提出的冰云辐射参数化做了改进, 使之适用于 UGCM. 这样, 该模式就可将冰云和水云的辐射参数分开计算, 从而改善了辐射模拟.

\* 现在地址: Bureau of Meteorology Research Centre GPO BOX 1289 K, Melbourne Vic 3001 Australia  
1995-06-02 收到, 1995-12-25 收到修改稿.

\*\* UK University Global Atmospheric Modelling Programme General Circulation Model — UGAMP GCM (UGCM)

## 1 云的辐射参数化

我们提出的云辐射参数化是根据冰云观测资料建立的, 文献[4]对该参数化做了详细介绍. 由于 UGCM 所使用的短波辐射模式只有两个谱带(0.2~0.7  $\mu$  和 0.7~4.0  $\mu$ ), 文献[4]中的参数化必须适当调整, 才能适用于这两个谱带. 这里仅给出经调整后适用于 UGCM 的结果. 对于短波分量, 我们用下式计算冰云的光学厚度

$$\tau = F \cdot IWC \cdot \Delta Z / (0.0306 + 0.2548 IWC) \quad (1)$$

式中:  $IWC$  为冰水含量( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\Delta Z$  为云厚度(km),  $F$  为订正系数. 云的吸收主要集中在近红外带, 这一吸收带的单次散射反射率由下列分段函数确定.

$$\omega_1 = 0.9963 \quad 0 \leq \tau \leq 0.045 \quad (2)$$

$$\omega_1 = 0.96364 \exp(0.00153/(0.001 + \tau)) \quad 0.045 < \tau \leq 0.1 \quad (3)$$

$$\omega_1 = 0.9633 \exp(0.0015\tau) \quad \tau > 0.1 \quad (4)$$

在紫外和可见光带, 云以散射为主, 单次散射反射率固定为 0.9999. 非对称因子的计算式为

$$g_1 = F_1 \cdot 0.8522 (IWC)^{0.0162} \quad (5)$$

$$g_2 = F_2 \cdot 0.8826 (IWC)^{0.0162} \quad (6)$$

式中  $F_1$  和  $F_2$  为订正系数, 由下式确定

$$F_1 = 1 - 0.0327 (F - 1)/F \quad (7)$$

$$F_2 = 1 - 0.0418 (F - 1)/F \quad (8)$$

下标 1 代表 0.2~0.7  $\mu$  谱带, 下标 2 代表 0.7~4.0  $\mu$  谱带. 这里提到的订正系数是指对云中小粒子( $<20 \mu\text{m}$ )影响的订正. 冰云中有大量尺度小于 20  $\mu\text{m}$  的小粒子. 这些小粒子很难用现有的仪器观测出来. 它们对辐射的影响十分显著, 必须加以订正. 通过比较由观测的冰晶尺度分布函数所确定的消光系数和用遥感方法所确定的值, 得到如下订正公式

$$F = 1.047 - 9.13 \times 10^{-5} T + 2.03 \times 10^{-4} T^2 - 1.06 \times 10^{-5} T^3 \quad (9)$$

式中  $T$  为云温( $^{\circ}\text{C}$ ). 对于长波分量, 我们计算云在 11  $\mu\text{m}$  的吸收系数, 其公式为

$$\beta_a = F \times IWC / (0.0631 + 0.2659 IWC) \quad (10)$$

为了计算混合云的光学参数, 必须知道混合云中液水比例. 在文献[4]中提出一种经验方法, 即根据云温估计

$$f = 0.0059 + 0.8784 \exp(-0.005457 T^{1.7}) \quad (11)$$

式中  $f$  代表云的液水百分比,  $T$  为云温( $<0^{\circ}\text{C}$ ). GCM 模式一般可提供诊断或预报的云水含量. 如果云温低于零度, 该云水含量就假设为冰和水的总和. 再假设冰和水是均匀地混合在一起, 于是混合云的辐射参数就可按下列各式计算

$$\tau_{\text{mix}} = \tau_i + \tau_w \quad (12)$$

$$\omega_{\text{mix}} = (\omega_i \tau_i + \omega_w \tau_w) / \tau_{\text{mix}} \quad (13)$$

$$g_{\text{mix}} = (\omega_i \tau_i g_i + \omega_w \tau_w g_w) / \omega_{\text{mix}} \tau_{\text{mix}} \quad (14)$$

$$Tr_{\text{mix}} = Tr_i Tr_w \quad (15)$$

式中的新参数  $Tr$  表示云的红外透过率, 下标  $i$  表示冰,  $w$  表示水,  $\text{mix}$  表示混合云.

## 2 参数化的检验

利用英国气象局探测飞机在 1989 年国际卷云试验期间得到的云物理和辐射观测资料<sup>[7]</sup>对 UGCM 原有的云辐射参数化(称为水云模式)和新引进的参数化(称为冰云模式)进行了检验. 观测和资料分析可在文献[7]中查阅. 图 1 给出计算和观测结果的比较. 可以看出, 利用水云模式计算的反射辐射比观测值约大  $100 \text{ Wm}^{-2}$ , 而利用冰云模式的计算结果与观测值比较接近. 这一结果表明, UGCM 模式中原有的辐射参数化不适用于冰云.

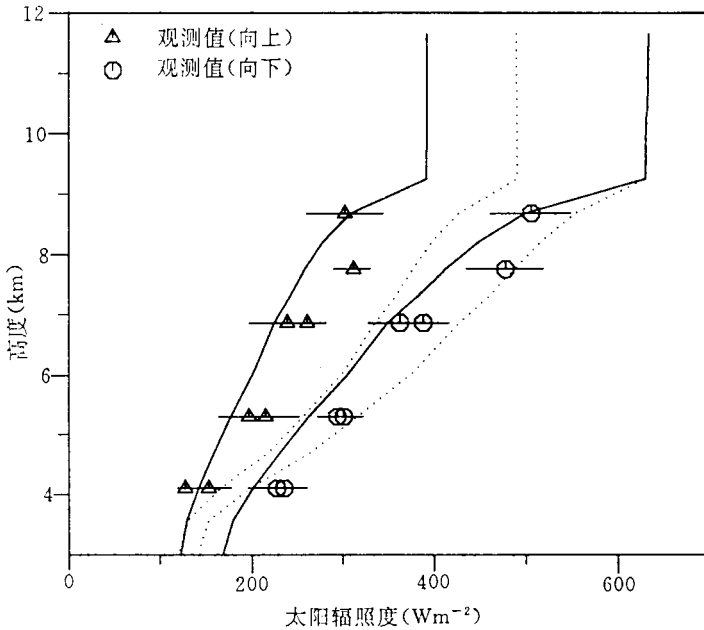


图 1 水云、冰云模式计算的太阳辐照度和观测结果(水平线段表示观测误差, 观测时的太阳天顶角为  $62^\circ$ , 实线: 冰云模式, 虚线: 水云模式)

Fig. 1 The solar irradiances calculated using both water cloud scheme (dashed line) and ice cloud scheme (solid line). (The symbols in the figure represent the observations and the horizontal bars denote the observational errors. The mean solar zenith angle during the observations is  $62$  degree)

图 2 给出由两个参数化所确定的云的辐射加热率. 冰云模式所确定的短波辐射加热率大于水云模式所确定的值. 在云顶, 最大差值可达  $9^\circ\text{C}/\text{d}$ (图 2 a). 两种模式所确定的长波冷却率都在云顶达到峰值, 但由水云模式所确定的长波冷却率绝对值比冰云的大. 辐射作用的净影响是使云顶降温, 云底增温, 从而在云内产生对流不稳定. 由图 2 c 可以看出, 水云模式所产生的对流不稳定大于冰云模式.

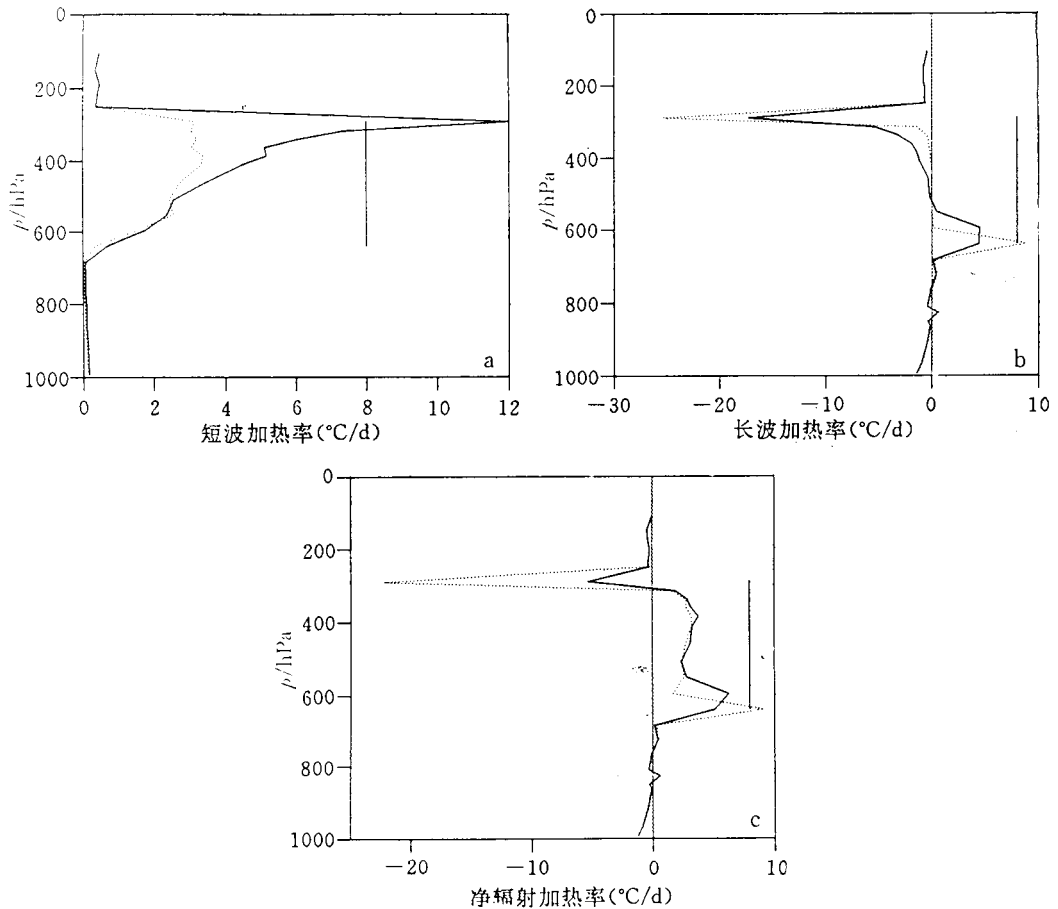


图2 水云和冰云模式计算的 (a) 短波辐射加热率 (b) 长波辐射加热率 (c) 净辐射加热率 (垂直线表示云的位置, 实线: 冰云模式, 虚线: 水云模式)

Fig. 2 The radiative heating rates calculated using both water cloud scheme (dashed line) and ice cloud scheme (solid line) (a) short wave heating rate (b) long wave heating rate (c) net heating rate (The vertical bar in each frame indicates the cloud position)

### 3 模拟结果

利用 UGCM 的积分结果来揭示混合云在气候模拟中的重要性. 计算采用  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  经纬度水平格点分辨率, 19 层垂直格点分辨率. 大气顶入射太阳辐射固定在 1 月 15 日. 海面温度取固定气候值. 两组平行模拟积分了 240 天. 第一组积分采用原有的参数化, 即水云模式. 第二组积分耦合了冰云模式, 有相变的影响. 第一组积分定义为试验 I, 第二组为试验 II. 两组积分结果之差显示出云的相变所产生的影响.

在进行第二组积分时, 只要云温低于零度, 辐射计算就包含了冰相的影响. 云的相态变化先是影响加热场, 然后进一步影响模式气候. 将积分结果从 120 天到 240 天取平

均后再计算两组积分之差. 图3给出辐射场差. 图3a为大气顶放出的长波辐射(OLR), 图3b为地气系统吸收的短波辐射(ASR). 正值表示试验Ⅱ的结果大于试验Ⅰ. 从图3a可以看出, OLR的变化以正值为主, 也有几个区域的变化为负值. OLR变化比较显著的区域是热带, 特别是印度洋和太平洋. 最大变化可超过  $80 \text{ Wm}^{-2}$ . 这基本上反映了赤道辐合带变化的影响. 比较大的正值变化还出现在南非, 南美和大西洋. 在高纬地区,

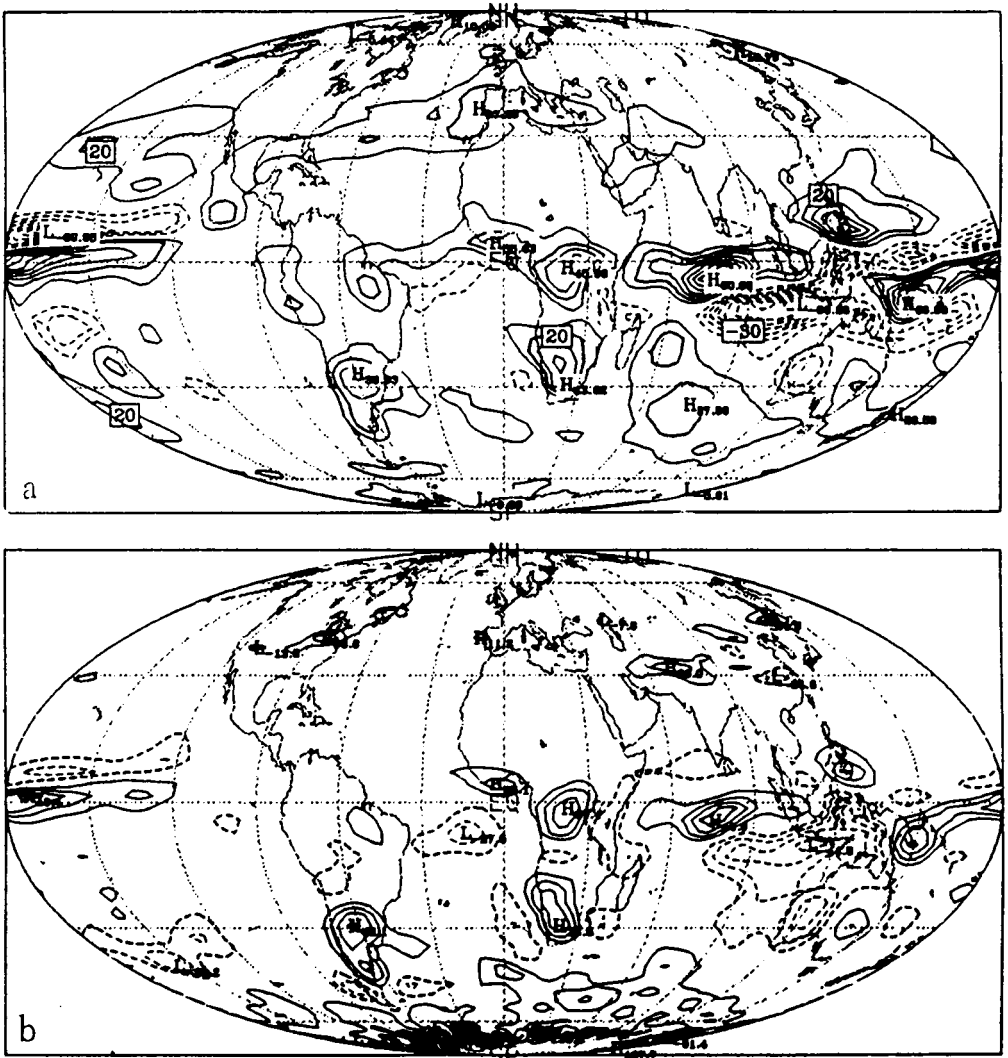


图3 利用水云模式和冰云模式所产生的辐射场之差(试验Ⅱ-试验Ⅰ)(a) OLR (b) ASR  
(图中给出从120天到240天的平均结果, 等值线间距为  $10 \text{ Wm}^{-2}$ , 实线: 正值, 虚线: 负值)

Fig. 3 Difference of radiation budget resulting from water cloud scheme and ice cloud scheme (experiment Ⅱ-experiment Ⅰ) (a) OLR (b) ASR (The results averaged over days 120 to 240 are presented. The contour interval is  $10 \text{ Wm}^{-2}$ . The negative values are shown as dashed line)

OLR 的变化较小. ASR 的变化特征与 OLR 基本相似. 区别是热带地区 ASR 变幅小于 OLR, 大约为 OLR 的一半. 而在高纬地区, ASR 的变幅要比 OLR 大得多.

除了相变影响外, 上述辐射场的变化可以用云量变化来解释. 图 4 绘出两个区域纬向平均的辐射场和 3 种云量变化的时间序列, 第一个区域(图 4 a)是热带( $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ), 第二个区域(图 4 b)是高纬( $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{S}$ ), 从图 4 可以看出辐射变化与云量变化呈负相关, 总趋势是云量减少、辐射增加. 在高纬地区 3 种云量的变幅基本相同, 而在热带, 高云变幅远大于中低云(中低云变化接近于零, 图中较难分辨).

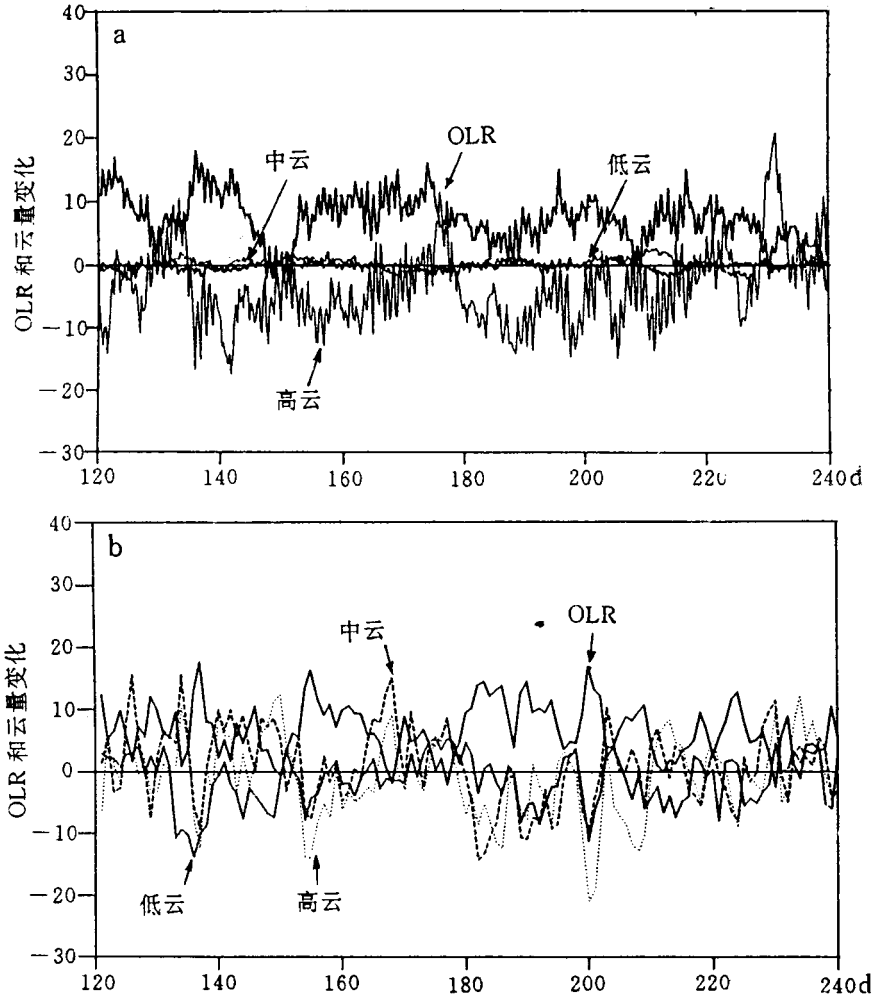


图 4 纬向平均的辐射变化和云量变化时间序列 (a) 热带( $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ) (b) 高纬( $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{S}$ )

Fig. 4 The series of zonal mean variation of radiation budget and cloud amounts (a) tropical ( $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ) (b) higher latitude ( $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{S}$ ) regions (solid line; OLR, dotted and dashed lines; cloud amounts)

射影响较大,而中低云对短波吸收辐射影响较大.这就导致高纬地区短波吸收辐射变化大于长波放出辐射,而在热带则是长波放出辐射变化大于短波吸收辐射(图略).这一结果表明由于相变所引起的云与辐射的相互作用是十分显著的.相变所引起的云量变化是多种反馈因素影响的综合结果.但云冰晶化后,其内部对流不稳定减弱可能是一个主要原因.云的相变对温度和环流场也有显著影响(结果将另文介绍).

## 4 结 论

文中提出的适用于GCM模式的冰云辐射参数化,经与观测比较,效果较好.利用该参数化和UGCM模式研究了混合云在GCM气候模拟中的重要性.结果表明,云的相态变化及其所产生的反馈作用对模拟的辐射场有显著的影响.云的相变通过影响辐射加热场有使云量减少的趋势.后者又进一步影响辐射场.在热带,相变的作用主要使高云量减少,从而使增加的长波放出辐射大于增加的短波吸收辐射,减弱云的保温效应.在高纬,相变对3种云量的影响基本相同,因而增加的短波吸收辐射大于长波放出辐射.

## 参 考 文 献

- 1 Rangno A L and Hobbs P V. Ice particle concentrations and precipitation development in small polar marine cumuliform clouds. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1991, **117**: 207~241.
- 2 Sassen K, Liou K-N, Kinne S and Griffin M. Highly supercooled cirrus cloud water: Confirmation and climatic implications. *Science*, 1985, **227**: 411~413.
- 3 Sun Z and Shine K P. Studies of the radiative properties of ice and mixed-phase clouds. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, **120**: 111~137.
- 4 Sun Z and Shine K P. Parametrization of ice cloud radiative properties and its application to the potential climate importance of mixed phase clouds. *J. Climate*, 1995, **8**: 1874~1888.
- 5 Slingo J, Blackburn K, Betts A, et al. Mean climate and transience in the tropics of the UGAMP GCM: Sensitivity to convective parametrization. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, **120**: 518, 881~922.
- 6 Morcrette J J. Description of the radiation scheme in the ECMWF model. ECMWF research department technical memorandum. 1989, No. 165.
- 7 Francis P N, Jones A, Saunders R W, et al. An observational and theoretical study of the radiative properties of cirrus: Some results from ICE'89. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, **120**: 809~848.

## THE IMPORTANCE OF MIXED-PHASE CLOUDS IN GCM CLIMATE SIMULATION

Sun Zhian      Keith P Shine

*(Dept. of Meteorology, Reading University, Reading U K)*

### Abstract

A Scheme of simple radiative parameterization of ice clouds suitable for use in GCM model is presented. The importance of mixed-phase clouds in GCM climate simulations is investigated using this scheme together with UGAMP general circulation model. It is found that the changes in cloud phase state and the effect of its feedback have a significant impact on the model climate. In the high latitude regions, the net radiation in the earth-atmosphere system could be increased due to the changes in cloud phase state, whereas the net radiation could be decreased in the tropics.

**Key words:** Ice cloud; Radiation; Parameterization; Mixed-phase clouds; Climate simulation.