

大气环流模式中非对流云的尺度分析^{*}

王必正

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 利用曾庆存的球面泛函空间方法, 进行了非对流云的尺度分析, 结果是: (1) 对于高云, 局地变化项、凝结项、平流项和垂直湍流项都是重要的; (2) 对于中云除垂直平流比水平平流重要之外, 其余结果与高云一样; (3) 对于雨层云, 凝结与局地变化是重要的; (4) 对于海性层云和层积云, 局地变化和垂直湍流项是重要的。以上结果对于设计大气环流模式很有参考价值。

关键词 非对流云 球面泛函空间 尺度分析

1 引言

在大气环流模式中, 非对流云的处理是很重要又是很复杂的。因为非对流云的形成、维持和消亡, 与行星尺度和天气尺度的大气运动过程有密切联系。例如, 中高纬度的非对流云, 其形成主要与中高纬度大气的大尺度上升运动有关, 形成以后, 又在中高纬度的大尺度大气的平流作用下, 在水平方向和垂直方向运动。如果移到饱和区, 则非对流云的云水和云冰将增加, 而在非饱和区, 非对流云的云水和云冰将因蒸发而减少, 直至消亡。由赤道辐合带积云对流所致的高空卷云, 在高空风作用下, 也有同样的平流过程所产生的云的维持和消亡过程。至于形成于副热带冷海水区上空的层云和层积云, 也与 Hadley 环流的下沉支有关。此外, 还与湍流过程和非对流云的微物理过程有关。因此, 在大气环流模式中处理非对流云的形成、维持和消亡, 有必要估计各项的相对重要性。

本文假设大气的大尺度流场是非对流云云场(云水与云冰)的背景场, 非对流云云场在这个背景场中形成、维持和消亡。诚然, 非对流云云场形成、维持和消亡过程, 通过凝结(释放潜热)、蒸发(冷却)和辐射过程, 要对大尺度大气动力过程产生反作用。但由于该反作用过程不仅复杂, 而且缺乏资料, 对此尚缺乏深入了解。因此在本文中, 在尺度分析时段内, 将不计该反作用过程, 认为非对流云云场是受大气的大尺度流场所控制。

由于非对流云云场的分布不够光滑, 因此, 常用的摄动法不能用于非对流云的尺度分析。为此, 本文将采用曾庆存^[1]的球面泛函空间方法, 对宏观非对流云方程进行尺度分析, 其目的是为了比较平流、湍流交换和微物理过程在云的形成、维持和消亡过程中的相对重要性。本文的顺序如下: 在第2节, 给出微物理过程的量级表达式。在第3

1997-11-04收到, 1997-12-20收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论的研究”, 国家攀登项目“气候动力学和气候预测理论研究”以及国家自然科学基金资助项目 49805005 和 49805005 共同资助

节, 将引进球面泛函空间的特征尺度, 得到非对流云各相水方程的无量纲方程。然后根据无量纲方程, 在第 4 节分别对高层、中层和低层的各类非对流云进行尺度分析, 得到一些有意义的结果。最后, 在第 5 节将用尺度分析所得到的一些结论, 研讨在大气环流模式中如何考虑非对流云各过程的相对重要性, 并用以指导大气环流模式的设计。

2 非对流云微物理过程的量级表达式

为了不致于过分复杂, 我们认为高云为冰云, 中云为混合相云, 低云为水云 (并且, 由于云雨和云雪在重力场中有明显下降, 是一个太快的过程, 不便作尺度分析, 故不讨论)。预报方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} q_x + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} q_x + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} q_x + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma} q_x = P + F_h + F_v, \quad (1)$$

式中 $x = c, i, m$ 分别表示云水、云冰、三相云, P 表示微物理项, F_h 和 F_v 表示水平湍流项和垂直湍流项。

本节先讨论微物理项的表示问题。

非对流云的形成过程, 有凝结 (华) 过程, 碰并和碰撞过程, 自动转化过程, 降水 (雪) 过程等。对于水平分辨率为 400 km 左右的大气环流模式, 考虑这些复杂的微物理过程是不可能的。注意到, 如果没有水汽凝结 (凝华), 则非对流云就根本不能形成。而非对流云形成的凝结或凝华, 需要实际水汽大于饱和水汽压, 对于积云对流所致的高空卷云, 要求大气湿不稳定。因此, 采用最简单的参数化公式表示:

$$P = \frac{q - q_s}{T_1}, \quad (2)$$

式中 q 、 q_s 、 T_1 分别表示大气的水汽、饱和水汽、时间转换率。

当大气过饱和时, 有 $q \geq q_s$, 表示有非对流云的微物理过程导致新的非对流云形成, 如果记大气的过饱和度为 s , 则有

$$q = q_s(1 + s). \quad (3)$$

从式(2)和(3)有

$$P = \frac{sq_s}{T_1}. \quad (4)$$

又根据文献[2], 知

$$q_s = cq_x. \quad (5)$$

式中 c 是经验系数, 约为 10~100 之间, 故有

$$P = \frac{scq_x}{T_1} = \frac{q_x}{\tau}, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{T_1}{sc}, \quad (7)$$

式 (6) 表示非对流云的量与微物理形成项的关系, τ 的量纲为时间, 实际上为饱和水

汽通过凝结或凝华或三相过程变成云水、云冰和混合相云的特征时间尺度。

如果大气不饱和, 则云中各相水就要蒸发, 计算公式为

$$P = -\frac{q_x}{\tau}. \quad (8)$$

因此, 对于微物理过程, 用于量级近似的 P 用式(6)和(8)来表示, 方程(1)改写成下式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} q_x + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} q_x + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} q_x + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma} q_x \\ & = \pm \frac{q_x}{\tau} + \frac{k_h}{a^2 \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \right] q_x + \frac{k_v}{(\Delta Z)^2} \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} q_x, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 k_h 和 k_v 分别为水平和垂直湍流交换系数, $\Delta z = p_s / \rho g$ 。

3 泛函空间中的特征尺度与无量纲方程

首先, q_v 、 q_c 、 q_i 和 q_m 本身是无量纲的, 但并不接近于 1, 而是介于 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ kg/kg}$ 之间。因此, 在作尺度分析时要特别小心。

其次, 大尺度非对流云场, 是在大尺度流场作为背景场下形成、维持和消亡的, 因此速度场的特征尺度分别如下:

v_θ, v_λ 的特征水平速度为 U , 并记

$$v_\theta = U v_1, \quad v_\lambda = U v_2. \quad (10)$$

垂直速度 $\dot{\sigma}$ 为

$$\dot{\sigma} = \frac{d}{dt} \frac{p - p_t}{p_s - p_t} = \frac{1}{p_s - p_t} \frac{dp}{dt} - \frac{p - p_t}{(p_s - p_t)^2} \frac{d}{dt} p_s. \quad (11)$$

在地形不过分陡地区, 取第一项, 并用 $(dp/dt) \approx -\rho g w$ 得

$$\dot{\sigma} \approx \frac{1}{p_s - p_t} (-\rho g w), \quad (12)$$

$\dot{\sigma}$ 负值表示上升运动。取 W 为 $\dot{\sigma}$ 的特征垂直速度, 则

$$\dot{\sigma} = W \dot{\sigma}_1, \quad (13)$$

式中, $W = 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $|\dot{\sigma}_1| \approx 1.0$ 。

由于水物质在大尺度的光滑程度不高, 甚至会出现不连续, 故关于水物质的导数尺度估计, 本文将采用曾庆存^[1]的泛函空间中的特征量方法, 来讨论水物质的特征量。与一般大气动力学不同, 非对流云是一个变化区域问题, 因此定义一个比非对流云存在的区域和非对流云将平流到的区域之并集还要大一些的区域 Ω ,

$$\Omega = \{(\theta, \lambda, \sigma): \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_1 + \Delta \sigma\}, \quad (14)$$

Ω 肯定比一般动力学的全球区域小。

特征时间尺度定义为

$$T = \frac{\|q_x\|}{\left\|\frac{\partial}{\partial t} q_x\right\|}, \quad (15)$$

式中 $\|q_x\|$ 定义为

$$\|q_x\|^2 = \frac{1}{V(\Omega)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_1 + \Delta\sigma} q_x^2(\theta, \lambda, \sigma, t) a^2 \sin\theta d\theta d\lambda d\sigma, \quad (16)$$

式中 $V(\Omega)$ 为 Ω 的体积。

一阶空间微差定义特征水平尺度 L 和特征垂直尺度 H 为

$$L = \frac{\|q_x\|}{\left\|\frac{1}{2a} \nabla_2 q_x\right\|}, \quad (17)$$

$$H = \frac{\|q_x\|}{\|(\partial q_x / \partial \sigma)\|}, \quad (18)$$

式中 H 为 $\Delta\sigma$ 的量级, 不是几何尺度。

同样, 二阶空间微差可定义另外两个特征量, 即特征水平尺度 L_1 和特征垂直尺度 H_1 , 它们分别为

$$L_1^2 = \frac{\|q_x\|}{\|a^{-2} \Delta_2 q_x\|}, \quad (19)$$

$$H_1^2 = \frac{\|q_x\|}{\|(\partial^2 / \partial \sigma^2) q_x\|}, \quad (20)$$

不失一般性, 取 $L_1 \approx L$, $H_1 \approx H$ 。

如令

$$\left\{ \begin{array}{ll} t = T t_1, & q_x = \|q_x\| q_{x,1}, \\ \frac{1}{a} \frac{\partial q_x}{\partial \theta} = \frac{1}{L} \|q_x\| \frac{\partial}{\partial \theta} q_{x,1}, & \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial q_x}{\partial \lambda} = \frac{1}{L} \|q_x\| \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial q_{x,1}}{\partial \lambda}, \\ \frac{\partial}{\partial t} q_x = \frac{\|q_x\|}{T} \frac{\partial q_{x,1}}{\partial t_1}, & \\ \frac{\partial}{\partial \sigma} q_x = \frac{\|q_x\|}{H} \frac{\partial q_{x,1}}{\partial \sigma_1}, & \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} q_x = \frac{\|q_x\|}{H^2} \frac{\partial^2 q_{x,1}}{\partial \sigma_1^2}, \\ \frac{1}{a^2} \Delta_2 q_x = \frac{\|q_x\|}{L_1^2} \Delta_2 q_{x,1}. & \end{array} \right. \quad (21)$$

则式 (21) 中各无量纲系数分别为

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\partial q_{x,1}}{\partial \theta} \right\| &= \|q_x\|^{-1} L \left\| \frac{1}{a} \frac{\partial q_x}{\partial \theta} \right\| \leq L \left\| \frac{1}{a} \nabla_2 q_x \right\| \cdot \|q_x\|^{-1} = 1 \\ \left\| \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial q_{x,1}}{\partial \lambda} \right\| &\leq 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\|\frac{\partial q_{x,1}}{\partial t_1}\| &= T\|q_x\|^{-1}\|\frac{\partial}{\partial t}q_x\| = 1, \\ \|\frac{\partial q_{x,1}}{\partial \sigma_1}\| &= H\|q_x\|^{-1}\|\frac{\partial}{\partial \sigma}q_x\| = 1, \\ \|\frac{\partial^2 q_{x,1}}{\partial \sigma_1^2}\| &= H^2\|q_x\|^{-1}\|\frac{\partial^2}{\partial \sigma^2}q_x\| = 1, \\ \|\Delta_2 q_{x,1}\| &= L_1^2\|q_x\|^{-1}\|\frac{1}{a^2}\Delta_2 q_x\| = 1, \\ \|q_{x,1}\| &= 1.\end{aligned}$$

由此得

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t_1}q_{x,1} + \frac{UT}{L}\left(v_1\frac{\partial}{\partial \theta}q_{x,1} + v_2\frac{\partial}{\partial \lambda}q_{x,1}\right) + \frac{WT}{H}\frac{\partial}{\partial \sigma_1}q_{x,1} \\ &= \pm \frac{T}{\tau}q_{x,1} + \frac{k_h T}{L^2}\Delta_2 q_{x,1} + \frac{k_v T}{D^2}\frac{\partial^2}{\partial \sigma_1^2}q_{x,1},\end{aligned}\quad (22)$$

式中 D 为垂直几何尺度, 并有如下关系:

$$D = \Delta z H = H p_s / \rho g = 10^3 \text{ m}, \quad (23)$$

而 H 为 $\Delta \sigma$ 的特征值, 是非对流云厚度的特征值, $H=0.1$ (相当于云厚 1 000 m), L 为非对流云所占水平范围的水平特征尺度, T 为非对流云局地变化的时间特征值。并注意式 (22) 中每一项, 不计无量纲数组成的系数, 其范数的量级为 1 或接近于 1。因此, 各项前面的系数的大小, 可决定各项的相对重要性。这些系数组成的无量纲数, 有明显的物理意义。各项的意义为:

UT/L 和 WT/H 反映了非对流云的水平移动与云本身特征水平尺度, 垂直移动与云的垂直特征尺度相对重要性;

T/τ 反映了非对流云局地变化项与其形成、维持和消亡的相对重要性;

$k_h T/L^2$ 反映了非对流云局地变化项与其水平湍流交换项的相对重要性;

$k_v T/D^2$ 反映了非对流云局地变化项与其垂直湍流交换项的相对重要性。

注意, 一个物理方程至少有 2 项大项。从观测事实可知, 非对流云的形成是微物理过程所引起的, 并且非对流云的形成, 也表现为局地的增加, 所以, 方程 (22) 中至少微物理项和局地变化项是大项。同样, 非对流云的消亡过程, 主要是蒸发 (和升华) 过程, 因此, 微物理项使得非对流云减少, 并表现为局地减少。为此, 假设

$$T = \tau. \quad (24)$$

这是一个基本假设, 下文直接采用。

4 各相非对流云的尺度分析

4.1 中高纬度高云 (卷云和卷层云) 的尺度分析

由于冰面上饱和水汽压总比同一温度下过冷水水面上饱和水汽压小, 因此, 如果高

空中有一些过冷水存在, 或者即使没有过冷水存在, 但由于高空卷云处温度很低, 相应的饱和水汽压小, 致使高云形成以后, 一般能维持较长时间, 其蒸发也较慢。所以, 对于高云可以取

$$T = \tau = 3.6 \times 10^4 \text{ s}, \quad L = 1.0 \times 10^6 \text{ m}, \quad U = 30 \text{ m s}^{-1}, \quad W = 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}, \\ k_h = 0.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad k_v = 1.0 \times 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad D = 1000 \text{ m}.$$

利用上面的数值, 可知有

$$\frac{UT}{L} \sim 1.0, \quad \frac{WT}{H} \sim 1.0, \quad \frac{T}{\tau} = 1.0, \quad \frac{k_h T}{L^2} = 1.8 \times 10^{-2}, \quad \frac{k_v T}{D^2} = 0.36. \quad (25)$$

从式(25)可知: 首先, 对于中高纬度高云, 除水平湍流交换项为小项外, 其他各项相对而言都较重要。尤其是高云的水平平流项与垂直平流项, 与凝华和升华项是同一量级。这意味着对于高云而言, 无论高云移到新的饱和区还是移到不饱和区, 平流过程都是十分重要的。其次, 由于高云形成以后, 云下及云层间就会形成边界层, 因此, 垂直湍流交换项也是重要的。但要注意, 水平湍流交换项尽管是小项, 但它对保证计算稳定性是重要的。

因此, 从上可知, 云的特征平流尺度为: 水平平流尺度 $UT = 1080 \text{ km}$, 垂直平流尺度 $WT = 1.08$ (相当于 1000 m), 高云的水平平流达 1080 km , 与观测事实相吻合。

4.2 中云(高积云和高层云)的尺度分析

一般中云(高积云和高层云), 是由锋面对应的整层潮湿空气系统抬升绝热冷却所形成, 通常出现在中高纬度, 是混合相云。为了简洁, 同样取成云的特征时间 = 非饱和区云的蒸发(升华)特征时间, 并且在混合相云的无量纲方程中, “+”号代表饱和时区的凝结, “-”代表中云在非饱和区的蒸发和升华过程, 即

$$T = \tau = 3.6 \times 10^4 \text{ s}, \quad L = 1.0 \times 10^6 \text{ s}, \quad D = 10^3 \text{ m}, \\ W = 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}, \quad k_h = 0.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad k_v = 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}.$$

但中云的高度一般在 $500 \sim 600 \text{ hPa}$ 为特征高度, 故

$$U = 15 \text{ m s}^{-1},$$

可知有

$$\frac{UT}{L} \sim 0.5, \quad \frac{WT}{H} = 1.0, \quad \frac{T}{\tau} = 1.0, \quad \frac{k_h T}{L^2} \sim 1.8 \times 10^{-2}, \quad \frac{k_v T}{D^2} \sim 0.36. \quad (26)$$

从式(26)可知, 对于中云而言, 局地云水(冰)变化项与垂直平流项和凝结(凝华)[和蒸发(升华)]平衡, 这表明了中云的垂直平流比水平平流重要, 这与云观测的经验事实(即高积云和高层云通常是垂直平流所致的加厚过程)相符合。但是, 垂直湍流交换项相对也是重要的。

从上可知, 云的特征平流尺度为: 水平平流尺度 $UT = 500 \text{ km}$, 垂直平流尺度 $WT \approx 1000 \text{ m}$ 。

4.3 低云的尺度分析

4.3.1 雨层云的尺度分析

雨层云通常产生较强的降水, 下部一般为水云, 上部可能是三相的, 而且往往是由

于锋面抬升使得潮湿空气系统上升所形成。为了分析简单, 假设雨层云是水云, 其特征时间尺度为 $T = \tau = 3 \text{ h} = 1.08 \times 10^4 \text{ s}$, 其他特征值为

$$L = 1.0 \times 10^6 \text{ m}, \quad D = 10^3 \text{ m}, \quad U = 10 \text{ m s}^{-1}, \quad W = 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}, \\ k_h = 5.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad k_v = 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad D = 1000 \text{ m}.$$

可知:

$$\left. \begin{aligned} \frac{UT}{L} &\sim 1.0^{-1}, & \frac{WT}{H} &\sim 3.2 \times 10^{-1}, & \frac{T}{\tau} &= 1, \\ \frac{k_h T}{L^2} &= 0.54 \times 10^{-2}, & \frac{k_v T}{D^2} &= 10^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

雨层云本身在零级近似时是局地现象, 其平衡关系是凝结(或蒸发)与局地云水变化项平衡。到了一级近似, 水平平流、垂直平流和垂直湍流才重要。

从上可知, 雨层云的特征平流尺度为: 水平平流尺度 $UT = 100.8 \text{ km}$, 垂直平流尺度 $WT = 320 \text{ m}$ 。

4.3.2 海洋上层云和层积云的尺度分析

形成于副热带冷海水区上空的海洋性层云和层积云, 处于大范围海洋上面大气边界层内, 因此垂直湍流系数可取为 $k_v = 10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。又由于处于副热带 Hadley 环流下沉支, 故 $U = 5 \text{ m s}^{-1}$, $W = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。其余如 4.3.1 节, 于是有

$$\left. \begin{aligned} \frac{UT}{L} &\sim 5.0 \times 10^{-2}, & \frac{WT}{H} &\sim 1.0^{-1}, & \frac{T}{\tau} &= 1, \\ \frac{k_h T}{L^2} &= 0.54 \times 10^{-2}, & \frac{k_v T}{D^2} &= 1.0. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

在目前条件下的零级近似, 云水的源汇项与局地变化项这两项与垂直湍流项平衡, 因此, 对于海洋性层云和层积云, 垂直湍流项十分重要, 与观测事实符合, 并且平流作用不明显。实际上, 水平平流的特征尺度 $UT \approx 50 \text{ km}$, 垂直平流 $WT = 108 \text{ m}$ 。

一级近似时, 还须考虑海洋性层云和层积云的垂直平流, 可以不计水平平流。这也与观测事实一致, 即海洋性层云和层积云可以仅考虑垂直一维的, 并与所给的概念性模型一致。

5 小结与讨论

先小结一下上文的结论: (1) 就高云(卷云和卷层云)和中云(高积云和高层云)而言, 云本身的水平平流和垂直平流过程都是重要的。低云(雨层云、层积云和层云)的水平平流不重要, 但对于雨层云垂直平流是相对重要的。对于形成高云和中云而言, 凝结项与蒸发项(凝华和升华)对水汽方程不重要。(2) 对于水汽、高云、中云和低云, 水平湍流交换都不重要, 但相对而言, 垂直湍流交换较重要, 尤其是对海洋性层云和层积云更为重要。以上两点, 对于大气环流模式的设计, 有重要的参考价值。

根据以上结论, 对大气环流模式中非对流云的处理提出如下几点看法。

(1) 水平平流。高云的水平平流尺度为 1080 km, 中云的水平平流尺度为 500 km, 雨层云的水平平流尺度为 100.8 km, 而海洋性层云和层积云的水平平流尺度为 50 km。对于一般的大气环流模式, 水平分辨率一般为 $5^\circ \times 4^\circ$, 即分辨率均为 $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ (45°N)。因此, 对于高云和中云, 大气环流模式的网格能够分辨。所以, 对于高云和中云, 一定要设计显式方案, 计算它们的水平平流过程; 对于低云, 可以不考虑水平平流。

(2) 垂直平流。高云和中云的垂直平流为 1000 m, 雨层云的垂直平流尺度为 320 m, 海洋性层云和层积云的垂直平流尺度为 108 m。因此, 新一代大气环流模式, 如果要分辨非对流云, 垂直方向至少应在 18 层 (或更多层)。不过这个分辨率对于海洋性层云和层积云还不够, 还需对它作参数化处理, 或者进一步增加模式的垂直分辨率。

(3) 垂直湍流项问题。经典的大气动力学将大气分为大气边界层和自由大气, 然后仅在大气边界层中考虑湍流过程, 到了自由大气就不考虑了。但对于非对流云的形成、维持, 就未必是这样了。事实上, 由于非对流云的云上是稳定的, 云中和云下有湍流交换, 高云、中云和低云都是这样。尺度分析结果表明, 垂直湍流交换项是十分重要的。因此, 无论从观测事实、物理分析都表明在研究非对流云时, 必须重视垂直湍流过程。

致谢: 本文是在曾庆存院士的指导下完成的, 谨表衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 曾庆存, 1979, 数值天气预报的数学物理基础, 第一卷, 北京: 科学出版社。
- 2 Heymsfield, A. J., 1993, *Aerosol-Cloud-Climate*, Academic Press, 97~121,

Scale Analysis of Non-Convective Clouds in General Circulation Model

Wang Bizheng

(Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract By means of the method of Zeng's spherical functional space, scale analysis of non-convective clouds and water vapour is carried out. The results show that: (1) For high clouds, local change, condensation, advection and vertical turbulence are important. (2) For middle clouds, the vertical advection is more important than the horizontal advection. (3) For Ns, condensation and local change are important. (4) For marine St and Sc, local changes and vertical turbulences are important. The above results are very referable to the designing of GCMs.

Key words non-convective clouds spherical functional space scale analysis