第 17 卷第 6 期 大 气 科 学 Vol.17, No.6
1993 年 11 月 SCIENTIA ATMOSPHERICA SINICA Nov. 1993

夏季副热带中—中间尺度系统发展的一种机制

陈忠明

(成都高原气象研究所，成都 610071)

提 要

本文研究了夏季副热带中—中间尺度天气系统的发展问题，结果表明，在潮湿不稳定大气中，扰动与凝结释热之间的正反馈过程是系统初期发展的一种机制，非线性作用将抑制系统的无限发展，使之发展到一定强度后即处于稳定状态。

关键词：中间尺度系统；非线性作用；正反馈过程.

一、引 言

在夏季副热带地区，中—中间尺度系统是一种比较常见的天气系统，它的发展与暴雨和其他强对流天气密切相关．因此，中—中间尺度系统的发生、发展及其预测问题一直受到气象工作者的重视．但由于这类尺度系统的发展演变受大、小两种尺度系统的制约和反馈，加之系统发展强烈时的非线性影响，因此对这一问题尚没有取得比较一致的认识，有待作进一步研究．

本文在以往工作的基础上，考虑中间尺度和积云尺度降水释放的潜热作用，用惯性重力内波的不稳定发展研究了中间尺度天气系统发展的物理机制，得出了一些有益的结果．

二、数 学 模 型

在无摩擦条件下，考虑潜热作用的大气运动方程可写为

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+\omega\dfrac{\partial u}{\partial p}-fv=-\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}, & (1)\\[2ex]
\dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+\omega\dfrac{\partial v}{\partial p}+fu=-\dfrac{\partial \varphi}{\partial y}, & (2)\\[2ex]
\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial \omega}{\partial p}=0, & (3)\\[2ex]
\dfrac{\partial}{\partial t}\left(\dfrac{\partial \varphi}{\partial p}\right)+u\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{\partial \varphi}{\partial p}\right)+v\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial \varphi}{\partial p}\right)+\sigma\omega=-\dfrac{R}{c_p p}Q, & (4)
\end{cases}
$$

1990 年 11 月 6 日收到，1991 年 8 月 2 日收到再改稿.

式中 $\sigma=-(\alpha/\theta)\partial\theta/\partial p$ 为大气静力稳定度，Q 为单位质量大气的凝结加热率.

为了分析方便，仿文[1]，我们取极对称坐标 (x, p)，将

$$u=\bar{u}+u'(x, p, t), \qquad v=v'(x, p, t),$$
$$\omega=\omega'(x, p, t), \qquad \varphi=-f\bar{u}y+\varphi'(x, p, t)$$

代入(1)—(4)式得

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u'}{\partial t}+(\bar{u}+u')\dfrac{\partial u'}{\partial x}+\omega'\dfrac{\partial u'}{\partial p}-fv'=-\dfrac{\partial \varphi'}{\partial x}, & (5) \\ \dfrac{\partial v'}{\partial t}+(\bar{u}+u')\dfrac{\partial v'}{\partial x}+\omega'\dfrac{\partial v'}{\partial p}+fu'=0, & (6) \\ \dfrac{\partial u'}{\partial x}+\dfrac{\partial \omega'}{\partial p}=0, & (7) \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\dfrac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+(\bar{u}+u')\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+\sigma\omega'=-\dfrac{R}{c_p p}Q. & (8) \end{cases}$$

观测结果表明，在中—中间尺度系统区域内有较强的对流活动[2]. 那么，凝结加热 Q 应包含由中—中间尺度扰动降水和积云降水产生的两部分潜热之和，即

$$Q=-L_c\frac{\partial q_s}{\partial p}\omega'+Q_c, \tag{9}$$

式中 L_c 为潜热系数，q_s 为饱和比湿，Q_c 为小尺度积云对流释热率.

对流凝结加热是一个比较复杂的物理过程，一般均采用参数化形式予以表述. 为了分析方便，本文采用文[3]的形式：

$$Q_c=-\mu\omega', \qquad (\mu>0) \tag{10}$$

其中 μ 为积云加热参数.

将(9)、(10)两式代入(8)式得

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+(\bar{u}+u')\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+\left(\sigma-\frac{RL_c}{c_p\bar{p}}\frac{\partial q_s}{\partial p}-\frac{R}{c_p\bar{p}}\mu\right)\omega'=0, \tag{11}$$

式中 $\bar{p}$ 为对流层中—中间尺度扰动的特征气压值.

因为

$$\sigma-\frac{RL_c}{c_p\bar{p}}\frac{\partial q_s}{\partial p}\approx-\frac{\alpha}{\theta_{se}}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}=\sigma_m, \tag{12}$$

可见，中—中间尺度扰动降水释放的潜热已被隐含在 σ_m 之中. 故(11)式可写为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+(\bar{u}+u')\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \varphi'}{\partial p}\right)+\left(\sigma_m-\frac{R}{c_p\bar{p}}\mu\right)\omega'=0. \tag{13}$$

设 $u'=U(\theta)$，$v'=V(\theta)$，$\omega'=\Omega(\theta)$，$\varphi'=\Phi(\theta)$，$\theta=kx+lp-kct$．将其代入(5)、(6)、(7)、(13)式得

$$\begin{cases} kl(\overline{u}-c)U''+klUU''+l^2\Omega U''-flV'=-kl\Phi'' , & (14) \\ k(\overline{u}-c)V'+kUV'+l\Omega V'+fU=0 , & (15) \\ kU'+l\Omega'=0 , & (16) \\ kl(\overline{u}-c+U)\Phi''+(\sigma_m-\dfrac{R}{c_p\overline{p}}\mu)\Omega=0 . & (17) \end{cases}$$

类似于文[4]，对(16)式积分一次，并取积分常数为零得

$$kU+l\Omega=0 . \tag{18}$$

将上式代入(14)、(15)式消去 V 得

$$k^2l(\overline{u}-c)U''+f^2lU=-k^2l(\overline{u}-c)\Phi''. \tag{19}$$

在 $\overline{u}-c+U\neq 0$ 的情况下，由(17)、(19)式消去 Φ 得

$$k^2l(\overline{u}-c)^2U''+f^2lU=\frac{k(\overline{u}-c)\sigma_m}{(\overline{u}-c+U)}\Omega-\frac{k(\overline{u}-c)\lambda}{(\overline{u}-c+U)}\Omega , \tag{20}$$

式中 $\lambda=\dfrac{R}{c_p\overline{p}}\mu$.

令 $r=\overline{u}-c\neq 0$，由(18)、(20)式消去 U 得

$$\Omega''=\frac{\lambda-\sigma_m}{l^2r^2}\frac{\Omega}{(1-\dfrac{l}{kr}\Omega)}-\frac{f^2}{k^2r^2}\Omega . \tag{21}$$

(21)式是一个非线性方程，它反映了大气层结特征 σ_m、积云对流释热 λ 和非线性作用等对中—中间尺度系统的影响.

三、定性分析

对于非线性方程(21)：

$$\Omega''=\frac{\lambda-\sigma_m}{l^2r^2}\frac{\Omega}{(1-\dfrac{l}{kr}\Omega)}-\frac{f^2}{k^2r^2}\Omega=F(\Omega) ,$$

其平衡解为 $\Omega_1=0$ 和 $\Omega_2=-\dfrac{kr}{l}(\dfrac{\lambda-\sigma_m}{l^2}\cdot\dfrac{k^2}{f^2}-1)$. 由非线性方程理论[5]可知,

其平衡解的性质由下式决定：

$$\left.\frac{\partial F}{\partial \Omega}\right|_{\Omega_i} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \qquad \begin{matrix} \text{不稳定}, \\ \text{稳　定}, \end{matrix} \tag{22}$$

即

$$\left[\frac{\lambda-\sigma_m}{l^2}\ \frac{1}{\left(1-\dfrac{l}{kr}\Omega\right)^2}-\frac{f^2}{k^2}\right]_{\Omega_i} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \qquad \begin{matrix} \text{不稳定}, \\ \text{稳　定}. \end{matrix} \tag{23}$$

式中 Ω_i 取 Ω_1 或 Ω_2.

对于 $\Omega_1=0$ 的平衡解，其稳定性判据为

$$\frac{\lambda}{l^2}-\frac{\sigma_m}{l^2}-\frac{f^2}{k^2} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \qquad \begin{matrix} \text{不稳定}, \\ \text{稳　定}. \end{matrix} \tag{24}$$

该式反映了当中—中间尺度扰动被激发以后，大气层结 σ_m、积云对流释放的潜热是否有利于扰动发展. 当积云对流释放的潜热与层结特征的共同作用使 $[(\lambda-\sigma_m)/l^2]-(f^2/k^2)>0$ 时，中—中间尺度系统将得到发展. 反之，则系统减弱.

对于中—中间尺度系统的初期发展（对应平衡解为 $\Omega_1=0$ 时的扰动），因此时扰动的垂直运动较弱，即 ω' 十分小，则 $(1-l\Omega/kr)\rightarrow 1$，(21)式可简化为

$$\Omega''=\left(\frac{\lambda-\sigma_m}{l^2r^2}-\frac{f^2}{k^2r^2}\right)\Omega, \tag{25}$$

这是一个线性方程，其平衡解的稳定性与(24)式相同. 这说明，对于扰动的初期发展，非线性扰动与线性扰动的稳定性是一致的，应用线性理论可以揭示出扰动发展的物理本质.

由方程(25)，我们可以确定出扰动初期发展的增长率为

$$\eta=\frac{f}{r}\sqrt{L_0^2-L^2}, \tag{26}$$

式中 $L_0^2=(\lambda-\sigma_m)\overline{P}^2/f^2$，$L$ 为中—中间尺度扰动的水平特征尺度. (26)式表明，扰动不稳定发展的增长率 η 对扰动的水平尺度 L 有明显的选择性. 图1显示了扰动水平尺度 L 与增长率 η 的关系，扰动的优势增长尺度为 $L\leqslant 0.866L_0$（$\eta\geqslant 0.5\eta_0$，η_0 为 $L\rightarrow 0$ 的扰动增长率）. 若考虑积云对流的潜热反馈作用与层结作用相当，即 $\lambda\approx-\sigma_m$，则 $L_0^2=(-2\overline{\sigma_m}\overline{P}^2)/f^2$. 对于副热带中纬度地区，在弱不稳定大气中，取 $f=7.3\times10^{-5}\mathrm{s}^{-1}$，

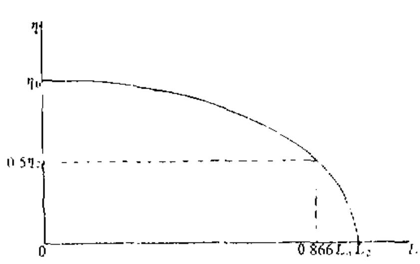

图1　扰动增长率与水平尺度的关系

$\gamma-\gamma_m=0.04\mathrm{K}/100\mathrm{m}$，$\overline{T}=280\mathrm{K}$，则 $L_0\approx588$ (km). 故扰动的优势增长尺度为 $L\leqslant$ 510 (km)，这与我国夏季副热带地区（江淮流域）多 300 — 500 km 的中— 中间尺度涡旋系统活动的事实相符.

对于 $\Omega_2=-kr[(\lambda-\sigma_m)k^2/l^2f^2-1]/l$ 的平衡解，其稳定性判据为

$$\frac{f^2}{k^2}\,\frac{l^2}{(\lambda-\sigma_m)}-1\ \begin{matrix}>\\<\end{matrix}\ 0\qquad\begin{matrix}\text{不稳定},\\\text{稳 定}.\end{matrix}\tag{27}$$

由于本文讨论的对象是中间尺度低值系统，则必有 $\omega'<0$，即 $\Omega<0$. 因此，下面仅分析平衡解 $\Omega_2<0$ 的情形.

对于 $\Omega_2<0$ 的平衡解，显然有

$$\frac{f^2}{k^2}\cdot\frac{l^2}{(\lambda-\sigma_m)}-1<0\,,\tag{28}$$

扰动是稳定的. 这相当于中— 中间尺度低值系统发展到一定强度之后，尽管系统仍处于层结不稳定的环境条件下，且系统内仍有较强的积云对流活动，但层结和积云对流的反馈作用均不能使系统再维持原有的不稳定发展状态. 这与实际大气中天气系统的发展过程是一致的.

为了便于理解上述结果，现利用非线性方程(21)予以说明. 当系统发展到一定强度之后，系统内的上升气流已达较大值，则 $-\dfrac{l}{kr}\Omega\gg1$ (若取中间尺度天气系统的水平尺度 $L\sim$ 500 km，垂直尺度为 5 km，$r=5\mathrm{m/s}$，则 $-\dfrac{l}{kr}\Omega\gg1$，相当于 $|\omega|\gg5\times10^{-2}\,\mathrm{m/s}$，这对发展到一定强度后的中间尺度天气系统而言，是完全能达到的），即 $1-l\Omega/kr\approx-l\Omega/kr$. 则 (21)式被简化为

$$\Omega''=-\frac{k(\lambda-\sigma_m)}{l^3r}-\frac{f^2}{k^2r^2}\Omega\,,\tag{29}$$

很显然，(29)式描述的运动是稳定的. 这说明，大气运动中的非线性作用将抑制天气系统的无限发展，使天气系统发展到一定强度后处于稳定状态. 这是线性运动与非线性运动存在的本质差别.

四、结 语

通过上述分析，我们发现，在夏季潮湿不稳定大气中，扰动与凝结释热之间的正反馈过程是中— 中间尺度系统发展的一种机制. 在扰动的初期发展过程中，扰动的不稳定增长率对扰动的水平尺度有明显的选择性，扰动发展的优势增长尺度与副热带中— 中间尺度天气系统的尺度相符. 此外，大气运动的非线性作用将抑制中— 中间尺度天气系统的无限发展. 当系统发展到一定强度后，不论系统处于多强的层结不稳定环境大气中，

也不管系统内对流活动有多强，系统将不再发展而处于稳定状态．这是线性与非线性运动的本质差别．

参 考 文 献

[1] 李崇银，1982，论江淮气旋生成的一种机制，大气科学，Vol. 6，No. 3，258 — 263.

[2] 陶诗言等著，1980，中国之暴雨，科学出版社，25 — 34.

[3] 李崇银，1987，对流凝结加热与垂直风切变对行星波垂直传播的影响，热带气象，No. 3，191 — 196.

[4] 刘式达、刘式适等，1986，斜压 Rossby 波稳定性的线性和非线性问题，中国科学（B 辑），No. 11，1055 — 1062.

[5] A. 科恩、M. 科恩，1987，数学手册，工人出版社，210 — 217.

A Mechanism of Development of Meso－Medium Scale System over the Subtropical Belt in Summer

Chen Zhongming

(Chengdu Research Institute of Plateau Meteorology, Chengdu 610071)

Abstract

In this paper, the development of meso－medium scale systems over the subtropical belt in summer is studied. Results show that: in a wet unstable atmosphere, the positive feedback between disturbance and condensation latent heat is the mechanism resulting in the development of this system. Nonlinear actions suppress the unlimited development of the systems.

Key Words: Meso－scale system; Nonlinear action; Positive feedback.