摩擦和非线性对斜压初始扰动发展的影响*

袁 娴 谈哲敏

(南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室/大气科学系,南京 210093)

摘 要通过一个二维非线性斜压 Eady 波模式,讨论了斜压系统中初始扰动快速发展 的动力学机制。由于斜压切变气流存在,其对扰动位涡的平流作用可引起初始扰动位涡的 "位涡非屏蔽"(potential vorticity unshielding),导致线性系统初始扰动的快速增长。摩擦 作用主要通过耗散局地扰动位涡,改变扰动位涡异常结构,特别是水平方向的位涡异常分 布,从而减弱初始扰动位涡的"位涡非屏蔽"作用,抑制系统初始扰动动能的快速增长。 非线性作用可以抑制较大振幅扰动的增长,同时引起扰动位涡异常丰富的垂直结构产生, 导致初始扰动位涡的"位涡非屏蔽"的减弱,从而抑制初始扰动的快速增长。不同的初始 扰动结构,可以产生不同的扰动位涡异常结构,相应存在不同的"位涡非屏蔽"作用,导 致初始扰动的快速增长过程不同。位涡异常水平结构为"正负正"或"负正负"分布时, 有利于初始扰动的快速增长,而上下层异号的扰动位涡异常在垂直方向间隔的距离越大, 越有利于初始扰动的快速发展,这些结果进一步深化了对"位涡非屏蔽"的理解。

关键词: 斜压扰动; 位涡非屏蔽; Eady 波模型

文章编号 1006-9895 (2004) 06-0847-17 中图分类号 P433 文献标识码 A

1 引言

中纬度天气系统是大气动力学研究中的重要问题之一,Charney^[1]和 Eady^[2]最早提出了斜压不稳定的标准模理论来解释中纬度气旋的发生与发展。

Pedlosky^[3]指出在 Eady 问题中,经典斜压不稳定标准模理论存在不完备性,指出 需要考虑包含位涡的∂函数的连续模对扰动发展的影响。Simmons 和 Hoskins^[4]讨论了 更一般性的问题,研究给出了初始斜压波扰动在空间、时间上的增长动力学过程。Farrell^[5,6]证明在 Eady 模式中在特定的初始条件下,在有限时间内可出现超过标准模的扰 动增长率。另外,Williams 和 Robinson^[7]在讨论 Ekman 层摩擦对广义 Eady 波的发展 影响作用时,指出静力稳定度、切变随高度变化都会影响经典 Eady 波的发展,对于加 入双 Ekman 层的流体会出现扰动发展的短波截断现象,而只有单 Ekman 层则没有。 Farrell^[8,9]讨论了 Charney 模式中存在阻尼条件下,扰动的快速增长过程,指出气旋生 成是一种快速的现象,并不依赖于扰动的指数增长,即使模式中加入很大的阻尼作用 也能出现扰动的快速增长,只是增长幅度较小。

Hoskins 等^[10]提出了"位涡思想"(PV thinking)理论,从位涡动力学来解释气旋

²⁰⁰³⁻⁰⁵⁻¹⁵ 收到, 2003-08-13 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40325014、40075010、40028504 和高等学校优秀青年教师教学科研奖励计 划 TRAPOYT 共同资助

生成的动力学过程,进一步推广经典斜压不稳定理论。然而,对于斜压性的初始扰动 快速增长动力学过程的认识仍然不够清楚,这个问题对于理解和预测斜压天气系统的 发展十分重要,为此 Badger 和 Hoskins^[11]用简单的二维线性准地转模式研究了斜压 Eady 波初始扰动的发展,发现非倾斜气旋性初始扰动可出现快速扰动动能增长。初始 扰动增长主要分两个阶段,一个是增长率远远超过标准模增长率的快速增长初始阶段; 一是增长率逐渐减小逼近于标准模增长率的阶段。同时,在"位涡思想"的基础上提 出了"位涡非屏蔽"理论,指出可利用"位涡非屏蔽"理论来解释初始扰动的快速增 长:在初始扰动位涡结构中的正扰动位涡区被上下层的负扰动位涡区屏蔽,随着系统 的发展,上下负扰动位涡区分别向左右平流,使中心正扰动位涡不再被屏蔽,为初始 扰动的发展撤掉了"屏障",导致扰动的快速发展。

但在文献 [11] 中只讨论了初始扰动线性情况下的快速增长,事实上,当扰动增 长到一定振幅时,非线性作用可明显增长,非线性作用如何影响初始扰动的快速增长? 另外,摩擦同样可以影响初始扰动发展。对于初始扰动发展,在文献 [11] 中仅给出 一种非倾斜气旋性初始扰动,没有讨论其他类型的初始扰动对扰动发展的影响,不同 的初始扰动具有不同的初始位涡结构,显然可以导致不同的扰动发展。本文在 Badger 和 Hoskins^[11](以下统一简称为 BH)工作的基础上,通过一个二维完全非线性 Eady 波模式,重点讨论斜压性初始扰动快速发展的更一般性动力学过程以及摩擦、非线性 和初始扰动结构对扰动快速发展的影响作用,希望更进一步加深对斜压性扰动快速发 展的动力过程的认识。

全文结构如下,第2节为数值模式和初始扰动结构;第3节着重讨论摩擦、非线 性作用对于初始扰动发展的影响作用;第4节研究不同初始扰动结构对于扰动发展的 影响;第5节通过"位涡非屏蔽"理论,探讨初始扰动快速发展的一般性动力学机制; 最后第6节为本文总结。

2 数值模式和初始扰动结构

2.1 二维斜压 Eady 波数值模式

二维非线性无量纲 Eady 波模式控制方程组为

$$\begin{cases} \frac{d'u'}{dt} = -z \frac{\partial u'}{\partial x} - w' + Ri v' - Ri \frac{\partial \varphi'}{\partial x} + \mu_x \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} + \mu_z \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2}, \\ \frac{d'v'}{dt} = -z \frac{\partial v'}{\partial x} - Ri u' + \mu_x \frac{\partial^2 v'}{\partial x^2} + \mu_z \frac{\partial^2 v'}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial \varphi'}{\partial z} = b', \\ \frac{d'b'}{dt} = -z \frac{\partial b'}{\partial x} - w' + v' + \mu_x \frac{\partial^2 b'}{\partial x^2} + \mu_z \frac{\partial^2 b'}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0, \end{cases}$$
(1)

其中, $\frac{d'}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u' \frac{\partial}{\partial x} + w' \frac{\partial}{\partial z}$, u'、v'、w'分别为x、y、z方向的的扰动风速, φ' 为 扰动位势高度, $b' = g(\theta'/\theta_0)$ 为浮力, θ' 为扰动位温, θ_0 为常值位温, 这里取为 300 K。 相应扰动位涡的无量纲表达式:

$$q' = \left(1 + \frac{1}{Ri} \frac{\partial v'}{\partial x}\right) \left(1 + \frac{\partial b'}{\partial z}\right) - \frac{1}{Ri} \frac{\partial v'}{\partial z} \frac{\partial b'}{\partial x} - \frac{1}{Ri} \frac{\partial u'}{\partial z} - 1.$$
 (2)

模式的空间差分方案选取三阶差分方案,时间积分采用阿德莫斯一巴什福恩(Ad-mas-Bashforth)格式,其中积分时步是可变的。

模式在水平方向上满足周期边界条件,垂直方向上则在上下边界层分别满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z}(u',v') = \pm \gamma(u',v'), \quad z = -\frac{1}{2}, \\ \frac{\partial b'}{\partial z} = 0, \qquad z = \frac{1}{2}, \end{cases}$$
(3)

其中,γ为无量纲拖曳系数,本文中取为0。

本文的数值计算在水平方向的范围为 16 000 km,在垂直方向的范围为 10 km。模 式水平格距取为 200 km(格点数为 81),垂直格距取为 0.2 km(格点数为 51)。此外, 无量纲参数 *Ri* 取为 5。

2.2 初始扰动结构

本文主要讨论斜压系统中初始扰动发展问题,初始扰动场均取平衡扰动,即初始 的扰动径向风场和扰动位温场满足地转平衡关系,而其他物理变量初始值均为0。为了 讨论不同初始扰动结构对系统演变的影响,给出几种不同的初始扰动结构,其中扰动 径向风场的数学表达式为

$$v' = VF(x)G(z), \qquad (4)$$

其中, v'为沿 y 方向的扰动风速, V 为扰动振幅, 可取任意常数, 本文中取为 $\pm 5 \text{ m s}^{-1}$, F(x)、G(z)分别为扰动的水平、垂直分布函数。本文重点讨论四种不同类 型的初始扰动,具体结构见表 1。

扰动类型	$V/{\rm m~s^{-1}}$	G(z)	F(x)
HP	5	$\cos^2 m (z - z_{\max}) \left(-\frac{D}{2} < z - z_{\max} < \frac{D}{2} \right)$	$\operatorname{sink} x\left(-\frac{L}{4} < x < \frac{L}{4}\right)$
HN	-5	$\cos^2 m \ (z - z_{\max}) \ \left(-\frac{D}{2} < z - z_{\max} < \frac{D}{2} \right)$	$\operatorname{sink} x\left(-\frac{L}{4} < x < \frac{L}{4}\right)$
VP	5	$\left(-\sin^2 mz - \left(-\frac{D}{2} < z \le -\frac{D}{4}\right)\right)$	$\cos^2 k (x - x_{\max})$
		$\left\langle \sin mz \qquad \left(-\frac{D}{4} < z \leq \frac{D}{4}\right)\right.$	$\left(-\frac{L}{2} < x - x_{\max} < \frac{L}{2}\right)$
		$\sin^2 mz$ $\left(\frac{D}{4} < z \leq \frac{D}{2}\right)$	
SI	5	$\cos^2 m(z - z_{\max})$	$\int \sin\left(kx + \frac{\pi}{2}\right) \left(-\frac{L}{4} \leqslant x \leqslant 0\right)$
		$\left(-\frac{D}{2} < z - z_{\max} < \frac{D}{2}\right)$	$\int \sin^2\left(kx + \frac{\pi}{2}\right) \left(0 < x \leq \frac{L}{4}\right)$

表 1 四种不同的初始扰动结构

注: L、D分别为水平、垂直方向的长度尺度。





图 1 给出了表 1 中四种不同初始扰动的结构,所有扰动的水平尺度均为 2 000 km、 垂直尺度为 4 km,扰动中心水平尺度为 $x_{max} = 0$ km,扰动中心高度为 $z_{max} = 5$ km。如 图 1 所示,扰动 HP 为扰动风场 v'在水平方向呈左负右正的结构,该扰动结构与 BH 中 讨论的初始扰动结构相类似;扰动 HN 则为扰动风场 v'呈水平的左正右负结构,与 HP 位相相反;扰动 VP 是指 v'扰动在垂直方向呈上正下负;扰动 SI 指初始位于系统中央 的单个 v'扰动。

2.3 扰动动能增长率

为了讨论初始扰动发展特征,与BH相类似,定义扰动动能为

$$K' = \iint \frac{\rho}{2} (u'^2 + v'^2) dx dz,$$
 (5)

上式在整个模式范围内积分。

相应,在t时刻扰动动能K'的增长率定义为

$$\sigma_{K'} = \frac{\ln\left(\frac{K'_{t+\Delta t}}{K'_{t-\Delta t}}\right)}{2\Delta t},\tag{6}$$

其中, Δt 是模式的时间积分步数。

3 初始扰动发展: 摩擦、非线性影响作用

3.1 初始扰动发展

图 2 为线性无摩擦、初始扰动为 HP 的条件下,扰动径向风 v'的演变。从图 2a 可 知,与初始结构(图 1a)相比,当扰动发展到 0.3 d时扰动径向风 v'的结构变化很小, 只是负 v'场和正 v'场分别开始向上边界和下边界发展,其大小并没有发生明显变化; 到 0.5 d时,初始扰动已完全发展起来,在初始扰动位置中心形成较深的气旋性系统, 并在上边界该系统的东侧和下边界该系统的西侧,分别有新系统产生,其过程分别称 之为下游和上游发展(图 2b)。到 1 d时,系统更加成熟,扰动风速更强,上下游的新 系统也在加深和发展(图 2c),这些结果与 BH 利用二维准地转模型的结果相类似。

图 3 给出了线性、有摩擦(R=0.01)、初始扰动为 HP 时,扰动径向风 v'的发展 特征。与无摩擦情况相比,初始扰动发展到 0.3 d 时,其扰动径向风结构并没有大的变 化,但由于摩擦作用,扰动径向风的速度明显减小(图 3a);到 0.5 d 时,初始扰动的 强度明显减弱,其整个系统发展比无摩擦情形时要弱得多(图 3b);到 1 d 时,系统发 展才较为成熟,在初始扰动的位置出现较强的气旋系统,并且上下游分别有新系统的 发展(图 3c)。比较图 3 与图 2 可知,摩擦作用导致扰动发展减弱,但其系统发展趋 势、相位变化与无摩擦情况相类似。

图 4 是非线性无摩擦(R=0)、初始扰动为 HP 时扰动径向风 v'的发展过程。在 0.3 d 和 0.5 d 时,扰动振幅较小,扰动非线性作用尚未体现出,初始扰动发展与线性 情形下很类似,相应扰动径向风结构、强度与线性情况差别不大(图 4a 和 b);到1 d 时,系统发展较为成熟,上下边界的扰动径向风相互连通(图 4c),但与图 2c 相比, 其风速减弱。所以,非线性系导致系统发展减弱,主要体现出非线性对扰动发展的抑 制作用。

上面分析表明,摩擦与非线性都可导致系统发展的减弱。当考虑非线性、摩擦 (R=0.01)同时作用(图略),初始扰动HP的扰动径向风v[']的发展过程与同样大小摩 擦作用下的线性情况非常类似,此时系统发展主要受摩擦作用控制,主要体现出摩擦 对初始扰动的减弱过程,但到1d时,其扰动径向风速要比线性、有摩擦情况下更弱, 明显表现出非线性作用对系统发展的抑制。由此,非线性与摩擦共同作用导致系统的 发展更加减弱。



图 2 线性无摩擦、初始扰动为 HP 时扰动径向风 v'的发展 等值线间隔为 1 m s⁻¹, (a) 0.3 d; (b) 0.5 d; (c) 1.0 d

3.2 扰动动能增长率特征

为了更详细地讨论摩擦、非线性作用对初始扰动发展的影响,下面将从扰动动能 增长率的角度来作进一步讨论。

图 5a 为线性情况下初始扰动为 HP 时,不同摩擦下扰动动能增长率随时间的变化。 由图 5a 可知在线性情况下,尽管有摩擦存在,其初始扰动增长仍然可分两个阶段:一 是扰动动能增长率快速增长初始阶段,其扰动动能增长率远远超过标准模增长率,此 阶段扰动动能以越来越快的速度增长,增长时间大约 0.5 d;另一个阶段是:当扰动动 能增长率到达最大值后,随后迅速减小,然后缓慢逼近一个稳定增长率的阶段,此阶 段中扰动动能仍在增长,但其增长速度逐渐减少,最终以一恒定的速度增长,这些结 果与 BH 的准地转、线性无摩擦结果相类似。从图 5a 中还可得知不同摩擦对线性系统



图 3 线性有摩擦 (*R*=0.01)、初始扰动为 HP 时扰动径向风 v'的发展 等值线间隔为 1 m s⁻¹, (a) 0.3 d; (b) 0.5 d; (c) 1.0 d

中扰动动能增长率的影响作用: 当摩擦增加时,系统扰动动能增长率减少,这说明摩 擦能抑制扰动的发展;但扰动发展到2d后,无论摩擦作用多大,扰动动能增长率趋近 于一个固定值,摩擦越大,其固定值越小,到达固定值的时间越早。

图 5b 为非线性情况下初始扰动为 HP 时,在不同摩擦条件下扰动动能增长率随时间的变化图。比较图 5b 与图 5a 可知,与线性系统相类似,在非线性系统中初始扰动增长基本上也可分为两个阶段:一是扰动动能增长率快速增长的初始阶段;二是增长率逐渐调整减少的阶段。但进一步分析可知,在相同摩擦作用时,非线性作用在扰动发展的第一阶段可导致扰动动能增长率的明显减小,体现了非线性对扰动发展的抑制作用。在扰动发展的第二阶段,非线性抑制作用同样存在,特别在摩擦较小情况下比较明显。随摩擦的增大,非线性抑制作用减弱,当摩擦较大时,例如 *R*=0.05,线性



图 4 非线性无摩擦、初始扰动为 HP 时扰动径向风 v'的发展 等值线间隔为 1 m s⁻¹, (a) 0.3 d; (b) 0.5 d; (c) 1.0 d

与非线性系统中的 ok 随时间变化的曲线基本一致,由此说明当摩擦增大到一定的值时,可以减弱甚至消除非线性对扰动发展的抑制作用,这主要是由于摩擦大到一定程度时, 摩擦导致扰动振幅的减小,从而导致非线性作用的减弱,此时扰动发展主要受摩擦的 控制。

4 初始扰动发展:初始扰动结构影响作用

上一节重点讨论了摩擦与非线性对初始扰动发展的影响作用,本节着重讨论不同 初始扰动结构对系统发展的影响,为此给出另外三种不同的初始扰动场,即扰动 HN、 VP 与 SI,并与上节讨论的扰动 HP 进行比较分析。





线性情况下,对于初始扰动如果只改变其符号,即只改变扰动径向风 v'风向时, 系统发展的结构也只是位相相反,相应初始扰动 HP 与 HN 在线性条件下,其动能增 长率 $\sigma_{K'}$ 随时间变化的特征完全一样。为此,在图 6a 中仅给出线性无摩擦条件 (R=0) 下,三种初始扰动 HP、VP 和 SI 的扰动动能增长率随时间变化的曲线。由图 6a 可知, 无论是哪种初始扰动场,大约到 2.5 d 时,它们的扰动动能线性增长率都固定在一个值 (约为 2.2×10⁻⁵ s⁻¹),说明在线性系统中,在此时初始扰动结构影响已经消失,扰动 增长主要以斜压不稳定的标准模增长。扰动初始结构的影响主要作用在扰动初始增长 时段,对于初始扰动 VP 和 SI,系统的扰动动能增长率分别在 0.2 d 左右达到其最大增 长率,且最大增长率远大于初始扰动 HP 的最大增长率,随后又迅速减小,在 0.5 d 后 再次增大,到达其次最大增长率,随后渐渐减小,大约到 2.0 d 左右趋近于斜压增长的

28 卷

标准模,初始扰动结构影响完全消失。事实上,初始扰动 VP 和 SI 发展到 0.4 d 时, 其扰动径向风 v[']不仅在初始位置分别向上下边界发展,而且同时在上下边界的上下游 生成新的较强的正负结构,此时扰动径向风已经与扰动 HP 发展到 1.0 d 的结构非常类 似(图略)。

与线性情况不同,如果只改变初始扰动的符号,令扰动径向风 v[′]风向相反,由于 扰动位相不同可以导致非线性作用的差异,导致在非线性情况下其结构发展将完全不 一样。图 6b 为初始扰动为 HP、HN 时,非线性、有摩擦(*R*=0.01)系统发展的扰动 动能增长率随时间的变化。由图 6b 可知,在扰动快速增长的阶段,扰动 HN 的扰动动 能增长率大于扰动 HP 的扰动动能增长率,且扰动增长率的最大值前者也要大于后者, 但两者扰动增长率达到最大值的时间相同,这说明改变初始扰动场的方向并不改变系



图 6 扰动动能增长率 oK'随时间变化

(a) 线性、无摩擦, 初始扰动 HP、VP和 SI; (b) 非线性、有摩擦(R=0.01), 初始扰动 HP和 HN

统的扰动动能增长率达到最大值的速度。到 0.8 d 左右,两者都达到一个相对固定的增 长率,且此后曲线基本保持一致。同样,改变扰动 VP 的符号,比较这两种初始扰动的 扰动动能的非线性增长率随时间变化特征,可得到同样的结果(图略)。

5 初始扰动快速增长机制:"位涡非屏蔽"讨论

从上节分析可知初始扰动的快速增长主要出现在 0.5 d 内, BH 提出用"位涡非屏 蔽"理论来解释线性无摩擦系统中的初始扰动快速增长动力学过程。图 7a 和 b 分别给 出了线性无摩擦条件下,初始扰动为 HP 时系统发展到 0 d 和 0.5 d 时扰动位涡 q'和扰 动径向风 v',图 7c 是图 7b 与图 7a 值之差。对于初始扰动为 HP 时,初始扰动位涡在



图 7 线性无摩擦、初始扰动为 HP 时的扰动拉涡 q'(粗线,等值线间隔为 0.2×10⁻⁶ m² s⁻¹ K kg⁻¹) 和扰动径向风 v'(细线,等值线间隔为 1 m s⁻¹) (a) 0 d; (b) 0.5 d; (c) 0.5 d和 0 d 的差

模式中央区域为正值,其上下分别为负值,相应中心的正扰动位涡区被上下两个负扰 动位涡区所屏蔽(图 7a)。由于纬向切变流的平流作用,上、下层的负扰动位涡区分别 向东、西平流(图 7b),相应位于中心正位涡区不再被屏蔽,分别在上下层形成了正、 负位涡异常(图 7c)。根据"位涡非屏蔽"理论^[10],正位涡异常周围可产生气旋环流, 负位涡异常周围可产生反气旋环流,由于正、负位涡异常在水平方向间隔分布,正、 负位涡异常共同作用,在其之间产生大的风场异常(图 7c),相应导致扰动动能增长率 快速增长。

在绝热无摩擦条件下,位涡是守恒的,相应位涡异常完全取决于位涡平流,但在 有摩擦作用时,位涡异常不仅取决于位涡平流,同时依赖于摩擦对扰动位涡的耗散。 图 8a、b分别给出了线性、有摩擦(*R*=0.01)的条件下,初始扰动为 HP 时系统发展 到第 0 d 和 0.5 d 时扰动位涡 q'和扰动径向风 v'分布,图 8c 为 0.5 d 扰动位涡 q'、扰动 径向风 v'与初始时刻相应变量之差的分布,即扰动位涡与扰动径向风的异常。与图 7



图 8 同图 7, 但为有摩擦 (R=0.01) 的条件下

所示的无摩擦情形相比,由于同样的初始风场扰动,初始时刻的扰动位涡完全一样 (图 8a),由于摩擦的耗散作用,到 0.5 d时扰动位涡的数值迅速减小(图 8b)。比较图 8b 与图 7b 表明,摩擦对于局地扰动位涡的耗散作用显然要强于局地扰动位涡平流作 用,导致局地扰动位涡迅速减少,相应形成如图 8c 所示的位涡异常结构。从比较图 8c 与图 7c 可知,摩擦耗散了位涡异常的水平结构,形成了水平方向单个位涡异常分布, 而这种分布不利于扰动径向风场快速增长;而且在垂直方向上由于正、负位涡异常之 间的距离很小,以至于上下层正、负位涡异常产生的环流相互抵消,大大减弱扰动径 向风场的增长,相应在有摩擦条件的扰动动能的增长率要大大减小(图 5a)。总之,摩 擦作用耗散了位涡异常的水平结构,减弱了"位涡非屏蔽"作用,导致扰动径向风快 速增长受到抑制,同时异号的位涡异常在垂直方向上相隔距离较近时,对于扰动快速 增长有不利影响。

从上节分析知道,非线性作用对于初始扰动的快速增长有抑制作用,从"位涡非 屏蔽"来分析又将如何?图9a、b分别为非线性系统中初始扰动 HP 在初始时刻与0.5 d时扰动位涡q'和扰动径向风v'分布,图9c是两个时刻值的差。由于初始时刻的扰动 振幅较小,相应初始扰动 HP 下扰动位涡q'的结构(图9a)与线性系统(图7a)中是 基本一致的。相对于线性无摩擦系统,非线性系统中位涡局地变化除了与平均切变流 产生的扰动位涡平流有关外,还与扰动流产生的扰动位涡平流有关。当系统发展到0.5 d时,在平均切变场的作用下,除了上下层的负扰动位涡区域分别向东、西方向移动 外,位于中心的正扰动位涡区以及上下层的负扰动位涡区,由于扰动流产生的扰动位 涡平流作用,可导致沿切变方向倾斜(图9b)。相应0.5 d后形成的扰动位涡异常结构 比线性系统(图7c)下的要复杂,主要表现在水平方向上有正负相间的扰动位涡异常结构 比线性系统(图7c)下的要复杂,主要表现在水平方向上有正负相间的扰动位涡异常结构 同不能。如此有效抗动径向风的快速增长,但在垂直方向上,扰动位涡异常垂直 间隔很小,相应上、下正负位涡异常产生的环流相消,导致由于线性平流产生的"位 涡非屏蔽"作用被减弱,相应扰动径向风的增长比线性情形下要弱,这也解释了上节 得到的非线性能抑制扰动增长的结论。

图 10a、b 分别为线性情形下初始扰动结构为 VP 的扰动位涡与扰动径向风场在初始时刻与 0.5 d 两者的异常分布。初始扰动为 VP 时,其初始扰动位涡结构与扰动为 HP 时情形有较大的差异,其分布为上下四层正负相间的扰动位涡区,其中最上层和最下层的扰动位涡区小于中间两层,且各扰动位涡区的位置沿水平方向垂直对称(图 10a)。在 0.5 d 后,由于纬向切变流的作用上层正负扰动位涡区均向东移,下层的则向 西移,而此时扰动径向风场已经快速地沿逆切变的方向发展起来,此时扰动位涡异常结构与扰动为 HP 情形结果不同(图 7c),主要差异为除了垂直方向上扰动位涡异常仍 为四层外,其水平结构也更加丰富,上下四层分别有"负正负"或"正负正"的位涡 异常沿水平方向排列,而且中间两层扰动位涡异常在垂直方向具有较大间隔。显然,这种"正负正"或"负正负"水平分布的扰动位涡异常可以进一步加快扰动风场的快速增长(图 10b),这解释了上节为什么初始扰动结构为 SI 的扰动位涡与扰动经向风场在 初始时刻与 0.5 d 两者的异常分布。比较图 10c 与图 8a 可知,扰动 SI 的初始扰动位涡



图 9 非线性无摩擦、初始扰动为 HP 时的扰动拉涡 q'(粗线,等值线间隔为 0.2×10⁻⁶ m² s⁻¹ K kg⁻¹) 和扰动径向风 v'(细线,等值线间隔为 1 m s⁻¹) (a) 0 d; (b) 0.5 d; (c) 0.5 d 和 0 d 的差

结构与扰动 HP 的初始扰动位涡在垂直分布上有一定相似性,但在水平方向上则完全 不一样,相应在"位涡非屏蔽"的作用下,对于扰动 SI,在水平方向上可以导致更丰 富的位涡异常结构(图 10d),出现了与扰动 VP 相类似的位涡异常结构,即上下层分 别有"负正负"或"正负正"位涡异常存在,根据"PV thinking"的原则,可知此时 扰动将快速发展,因此扰动 SI 的扰动动能的增长率要较扰动 HP 的扰动动能增长率大, 这与图 6a 中结果相一致。

从上述分析,可以进一步得出以下结论:位涡异常水平结构越丰富越有利于初始 扰动动能的快速增长,而位涡异常的垂直结构丰富却不利于初始扰动动能的增长,一 般说来,垂直方向上的位涡异常应隔开一定的距离,这样上下异号的位涡异常所产生 的环流才不至于相互抵消。



图 10 线性无摩擦、初始扰动为 VP 和 SI 时的扰动拉涡 q'(粗线,等值线间隔为 0.4×10⁻⁶ m² s⁻¹ K kg⁻¹)
和扰动径向风 v'(细线,等值线间隔为 1 m s⁻¹)
(a) VP, 0 d; (b) VP, 0.5 d 和 0 d 的差; (c) SI, 0d; (d) SI, 0.5 d 和 0 d 的差

6 小结

本文利用二维非线性斜压 Eady 波数值模式,讨论了摩擦、非线性以及不同初始扰动结构对斜压性系统中初始扰动的快速增长过程的影响作用,研究结果表明非倾斜气旋性初始扰动结构能导致扰动动能增长,增长过程主要可分为两个阶段:早期快速增长阶段和后期缓慢趋近于一个稳定值的阶段。

在线性有摩擦作用的系统中,摩擦并不能改变系统发展的结构,但它却能抑制扰 动动能的快速增长。摩擦系数越大,扰动动能初始快速增长率越小,但不论摩擦作用 多大,线性系统下扰动动能增长率在2d左右都能达到一个相对固定值,摩擦作用越 大,其固定值越小。非线性作用主要抑制较大振幅扰动的增长,相应非线性系统中扰 动动能的增长比线性系统中扰动动能增长得慢。不同的初始扰动结构可以导致不同的 扰动初始快速增长率。对于线性系统来说,初始扰动的结构影响主要集中在扰动的发 展初期,其影响在2.5d后会完全消失,但对于非线性系统,不同初始扰动结构的影响 要比线性系统大。

关于斜压系统的初始扰动发展动力学机制,都可用"位涡非屏蔽"来解释,"位涡 非屏蔽"过程是斜压系统初始扰动初期快速增长的关键。水平结构以"正负正"或 "负正负"形式分布的位涡异常有利于初始扰动的快速增长,而垂直方向上下异号的扰 动位涡异常的间隔距离越近,导致上下层异号位涡异常所产生的环流的抵消,越不利 于初始扰动的快速发展。位涡异常在垂直方向上一定的间隔也是影响扰动的初始快速 增长的一个因素。

参考文献

- 1 Charney, J. G., The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, J. Meteor., 1947, 4, 135~162.
- 2~ Eady, E. T. , Long waves and cyclone waves, Tellus, 1949, 1, 32 ${\sim}52.$
- 3 Pedlosky, J., An initial value problem in the theory of baroclinic instability, Tellus, 1964, 16, 12~17.
- 4 Simmons, A. J., and B. J. Hoskins, The downstream and upstream development of unstable baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 1979, 36, 1239~1254.
- 5 Farrell, B., The initial growth of disturbances in baroclinic flows, J. Atmos. Sci., 1982, 39, 1663~1686.
- 6 Farrell, B., Modal and non-modal baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 1984, 41, 668~673.
- 7 Williams, G. P., and J. B. Robinson, Generalized Eady waves with Ekman pumping, J. Atmos. Sci., 1974, 31, 1768~1776.
- 8 Farrell, B., Transient growth of damped baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 1985, 42, 2718~2727.
- 9 Farrell, B., Optimal excitation of baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 1989, 46, 1193~1206.
- 10 Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1985, 111, 877~946.
- 11 Badger, J., and B. J. Hoskins, Simple initial value problems and mechanisms for baroclinic growth, J. Atmos. Sci., 2001, 58, 38~49.

Influence of Friction and Nonlinear on the Initial Baroclinic Perturbation Development

Yuan Xian and Tan Zhemin

(Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

A two-dimensional nonlinear baroclinic Eady wave model is used to study the dynamical Abstract mechanisms for the rapid growth of initial balanced perturbations in the baroclinic system. The advection effect of baroclinic shear flow on perturbation potential vorticity leads to the "potential vorticity unshielding" of initial perturbation potential vorticity (PV), which induces the rapid growth of initial perturbations in the linear system. Due to dissipating the local perturbation PV, friction modifies the structures, especially the horizontal distribution, of PV anomalies, accordingly weakens PV unshielding of initial perturbation PV so as to restrain the transient growth of initial perturbation kinetic energy. Nonlinear effect induces the rich vertical structures of perturbation PV anomalies, which weakens PV unshielding of initial perturbation PV, consequently restrain the rapid growth of initial perturbations with large amplitude. Different structures of initial perturbations may cause different structures of perturbation PV anomalies, as well as different PV unshielding which leads to the different rapid growth process of initial perturbations. The "negative-positive-negative" or "positive-negative" distribution in the horizontal structure for PV anomalies is favourable for the rapid growth of initial perturbations. While the farther the vertical distance of opposite potential vorticity anomalies is, the more favorable it is for the rapid growth of initial perturbations. These results provide some new sights for PV unshielding. Key words: baroclinic perturbation; potential vorticity unshielding; Eady wave model