

对流层上传重力波的非线性演化

王咏梅 徐寄遥 王英鉴

(中国科学院空间中心空间天气开放实验室, 北京 100080)

[摘 要] 利用二维全隐欧拉格式对重力波在可压、非等温大气中的非线性传播过程进行了数值模拟和分析. 分析结果表明, 从对流层顶激发的重力波能稳定地经平流层传到中层顶, 从而将能量和动量从一个区域带到另一个区域; 在向上传播过程中, 重力波经历了发展、位温翻转、对流直至最终破碎的演变; 重力波的破碎是对流和小尺度波动的重要的源, 对流不稳定和翻转是非线性现象的一个基本特征. 计算还显示, 扰动源的大小直接影响着重力波的非线性传播过程, 当扰动源足够小时, 重力波能稳定传播, 而大振幅扰动可以加速重力波的破碎.

[关键词] 数值模拟, 非线性, 重力波, 破碎.

1 引 言

自从 1960 年 Hines^[1] 将所观测到的不规则运动归功于重力波以来, 人们对重力波的观测和理论研究就没有停止过. 大量观测和研究表明, 重力波在中高层大气中无处不在, 重力波是中高层大气中最重要的波动过程之一, 它的能量和动量的传输在中高层大气与上、下层大气之间的耦合以及全球大气能量收支平衡中起着重要的作用^[2-4].

六七十年代, 人们用线性理论对重力波进行了广泛的研究, 得到了许多极有价值的结论, 但随着实验观测的增多, 人们发现许多观测结果很难从线性重力波理论中得到合理的解释. 由于大气密度随高度指数减小, 波的扰动速度随高度指数增长, 因此, 非线性过程对重力波在中高层大气中传播影响不容忽视. 从 80 年代开始, 随着计算机技术的发展, 数值模拟方法被广泛用于研究重力波的非线性传播. Prusa^[5] 利用非弹性近似和 semi-Lagrangian 方法模拟了二维等温、可压大气情况下, 底部边界激发的高斯型波包在中高层大气中的传播和破碎过程, 分析了不同尺度重力波波包的破碎区域. Walterschied 等^[6] 采用两步 Lax-Wendroff 方法模拟了以单色波形式向上传播的重力波演化过程, 其结果表明了非线性过程在重力波饱和及随后破碎变成湍流的过程中起着十分重要的作用, 他们的模拟结果支持了 Lindzen^[7] 的线性饱和理论, 但他们的模式是针对等温大气而言. 然而, 根据张绍东等^[8,9] 对高斯型重力波波包在不同大气背景下的非线性传播进行的一系列研究以及和线性理论进行比较的结果指出, 背景温度场的非均匀性会加速波破碎的发生,

[收稿日期] 2000- 04- 05 收到, 2000- 08- 01 收到修定稿.

[基金项目] 中国科学院空间中心所长基金资助项目(972009).

[作者简介] 王咏梅, 女, 副研究员, 1967 年生, 1996 年于中国科学院空间科学与应用研究中心获空间物理硕士学位, 现从事中高层大气光化动力学方面的研究. E-mail: wym@center.cssar.ac.cn

WKB 近似下的线性重力波理论的结果和非等温大气非线性重力波模拟结果有明显的差异,说明背景温度的非均匀性对重力波传播有着不可低估的作用. 本文主要是从大气基本运动方程出发,采用全隐欧拉格式建立一个有关重力波扰动传播的数值模式,本文着重分析讨论了重力波在可压、非等温大气中的非线性传播和演化过程.

2 计算方法

从运动学方程出发,考虑二维可压、非等温大气情况下的重力波,其控制方程如下

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} + g\rho = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(Tu)}{\partial x} + \frac{\partial(Tw)}{\partial z} + T \left[1 - \frac{R}{C_v} \right] \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \\ P = \rho RT, \end{cases} \quad (1)$$

其中 P 、 ρ 和 T 分别为气压、密度和温度, u 和 w 为水平和垂直速度, R 为比气体常数, C_v 为定容比热.

计算模式采用 Hu 等^[10]提出的 FICE 方法,抓住气压场这个关键桥梁进行隐式处理,得到有关气压场的泊松方程;同时,为避免棋盘误差并提高计算精度,差分格式采用均匀交错网格. 研究区域为水平范围 $0\text{km} \leq x \leq 300\text{km}$, 垂直范围 $10\text{km} \leq z \leq 150\text{km}$, 有效计算高度 $10\text{km} \leq z \leq 130\text{km}$. 左、右侧边界取周期性边界,由于我们所采用的是可压大气,方程中不仅含有所研究的重力波,还包含了声波之类的快波,为避免边界反射和吸收快波,在上边界需采用 20km 宽的海绵层. 在整个数值计算过程中,下边界加上一个水平波长 300km , 垂直波长约 12km , 周期为 2h 的对流层强迫,其具体形式为

$$w = A \sin(\omega t - k_x x), \quad (2)$$

这里 A 为扰动的振幅, ω 是扰动的圆频率, k_x 为水平波数. 其余物理量则由背景给定.

初始温度取自 1976 年美国标准大气,且背景大气满足静力平衡,则由大气状态方程和静力平衡关系可求得大气压强和密度的初始分布,同时,假定背景大气为静止大气. 计算中取水平和垂直步长为 1km , 时间步长为 0.5s

3 模拟结果与分析

从(2)式可以发现,对流层强迫的振幅是可变的,其目的就是为了测试扰动的强弱对重力波的发展至破碎整个过程的影响. 当振幅 A 足够小,如 $A = 1 \times 10^{-5}\text{m/s}$,从计算到时间为 $5 \times 10^4\text{s}$ 的情况来看,下边界向上传播的重力波能稳定地穿过计算区域,却没有引起波的破碎,其结论与线性重力波理论基本一致.

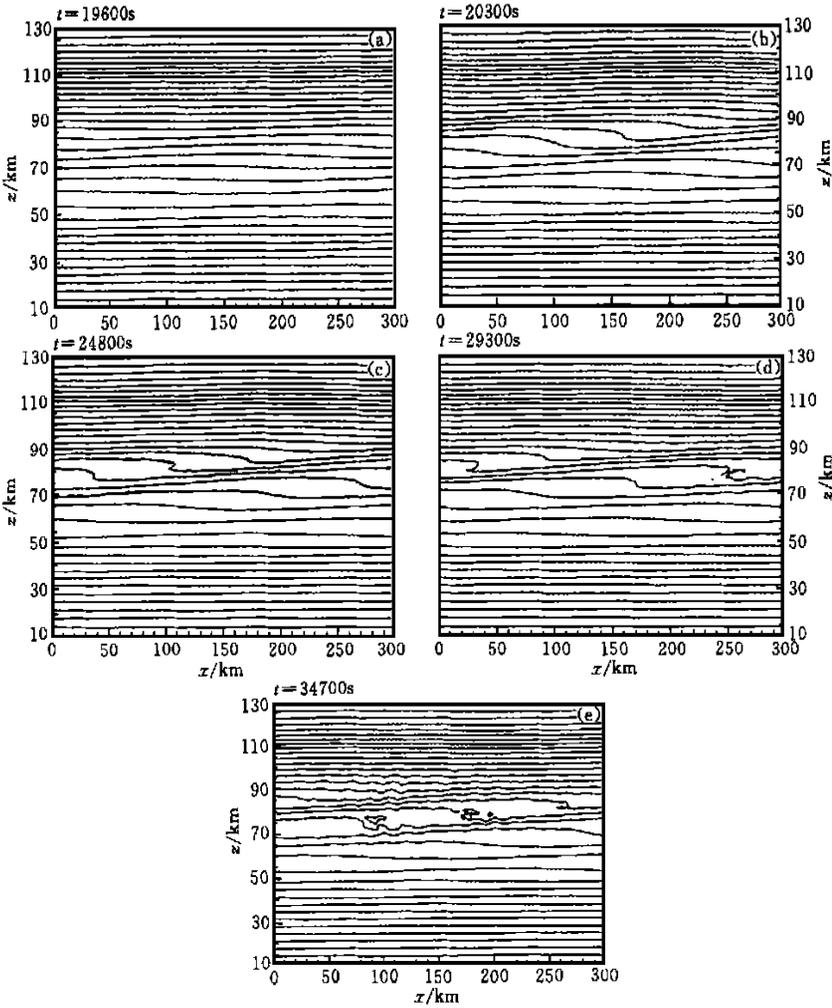


图 1 当 $A = 0.05\text{m/s}$ 时,重力波的位温 $P_T(\log_{10}(\theta))$ 在几个时段的等值线分布图

Fig. 1 Potential temperature ($\log_{10}(\theta)$) at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.05\text{m/s}$

$A = 0.05\text{m/s}$ 时,图 1—3 表示从对流层顶 10km 处上传重力波的位温 $P_T(\log_{10}(\theta))$ 、垂直速度和水平速度在几个特殊时段的等值线分布情况。由于所研究的过程是一个绝热过程,位温具有保守性,因此从图 1 位温在不同时段的等值线分布可以很清楚地看到重力波向上传播、发展、翻转、对流至破碎的过程,图 1(a) 是重力波稳定传播时位温的典型分布;当传播到 20300s(图 1b) 时,在 70—80km 开始出现翻转,此时总的水平速度为 45.1m/s,超过了水平相速度(41.7m/s),根据 Orlandi 等^[11] 的理论,当水平速度大于水平相速度时,向上传播的重力波将变得对流不稳定,表现在位温上就是翻转的出现,可见对流不稳定和翻转是非线性现象的一个基本特征;随着时间的增加,翻转越来越明显(图 1c, d),直至 34700s 时(图 1e),完全破碎。

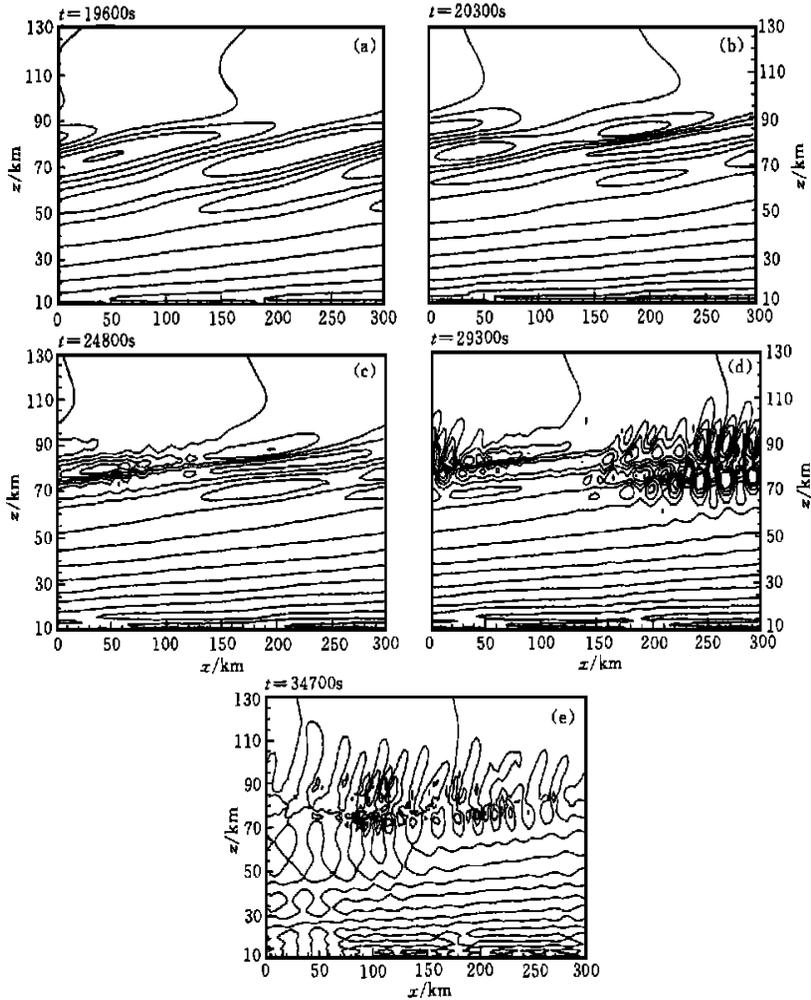


图2 当 $A = 0.05\text{m/s}$ 时,重力波的垂直速度 w 在几个时段的等值线分布图

Fig.2 Vertical velocity at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.05\text{m/s}$

从图2与图3的垂直和水平速度场的等值线分布来看,等值线的倾斜向上表明了重力波的向上传播.图2(a)和图3(a)显示,经过19600s,重力波能稳定地从对流层顶10km一直传到中间层约80km处,其平均群速度约为 3.58m/s ,明显大于用WKB近似条件下的计算结果(约 2.1m/s),这个差异是由温度的非均匀性和非线性影响所造成的.当传播24800s(图2c),也就是翻转出现4500s后,在70—90km这个不稳定区,位温等值线变得更为陡峭,垂直速度场开始出现对流,而同一时刻在水平速度场上却依然很稳定;当重力波传播29300s时(图3d),水平速度场也开始出现小尺度运动,到了34700s(图2e, 3e),速度场完全破碎,演变为对流和一些小尺度波动,表明了重力波的破碎是对流和小尺度波动

的重要的源.

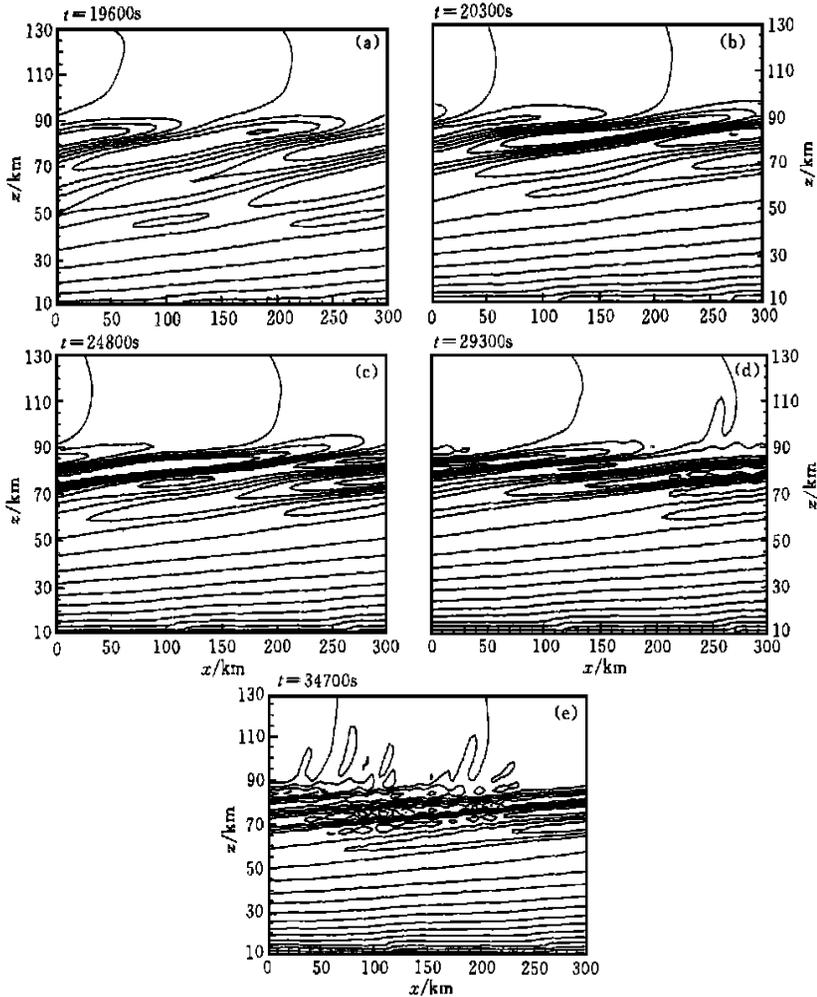


图3 当 $A = 0.05\text{m/s}$ 时,重力波的水平速度 u 在几个时段的等值线分布图

Fig. 3 Horizontal velocity at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.05\text{m/s}$

当扰动振幅 A 增大一倍,即 $A = 0.1\text{m/s}$ 时,从对流层顶上传的重力波同样也经历了发展、翻转、对流和破碎的过程,但与 $A = 0.05\text{m/s}$ 时明显不同的是其整个过程较强烈,翻转及对流、破碎所需时间相对较短,从图4可知,重力波传播14500s后即有位温翻转现象出现,之后仅不到1h的时间,垂直速度场就开始产生对流和小尺度运动(图5c);到了19600s,水平速度场有明显的对流出出现(图6d),当传播24100s后,重力波已经完全破碎了,位温和速度场表现为明显的强对流和小尺度波动(图4e、5e、6e),可见扰动的强弱直接影响到重力波的非线性演化过程. 将本模式的结果与Walterschied等^[6]的结果相比,一个

最明显的差异就是,重力波发生翻转、对流和破碎过程所需时间均比后者的要短,这与张绍东等^[9]得到的背景温度场非均匀性会加速波破碎的结论相一致.

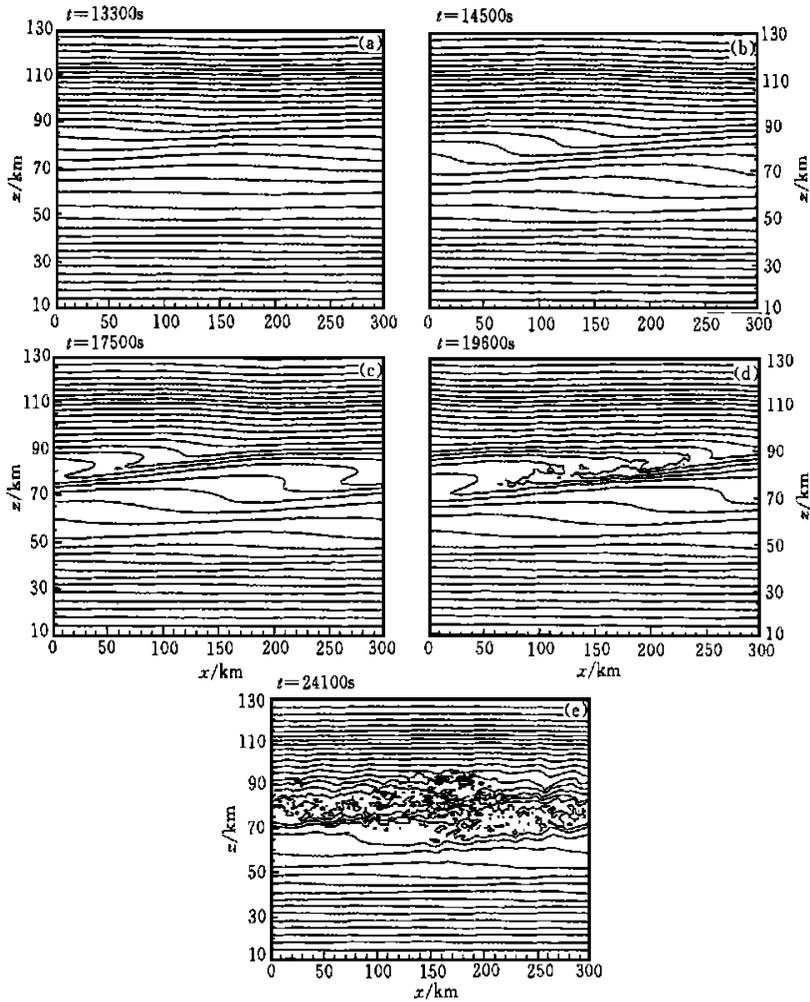


图 4 当 $A = 0.1\text{m/s}$ 时,重力波的位温 $P_T(\log_{10}(\theta))$ 在几个时段的等值线分布图

Fig. 4 Potential temperature ($\log_{10}(\theta)$) at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.1\text{m/s}$

图 7 为 $A = 0.05\text{m/s}$ 时重力波传播过程中有效位能 P' 、扰动动能 K' 、平动动能 \bar{K} 和总动能 K 在 $50-100\text{km}$ 高度内的积分能量 E_1 随传播时间的变化. 可以看出,在位温发生翻转之前,平动动能很小,扰动动能和有效位能及总动能之间差值较小;当位温发生翻转之后,随着对流不稳定的出现,它们之间的差值越来越大. 同时,还可看出,对流产生以后,有效位能和扰动动能几乎不变,而平动动能却迅速增大,说明发生了明显的波-流相互作用,平流得到了加强.

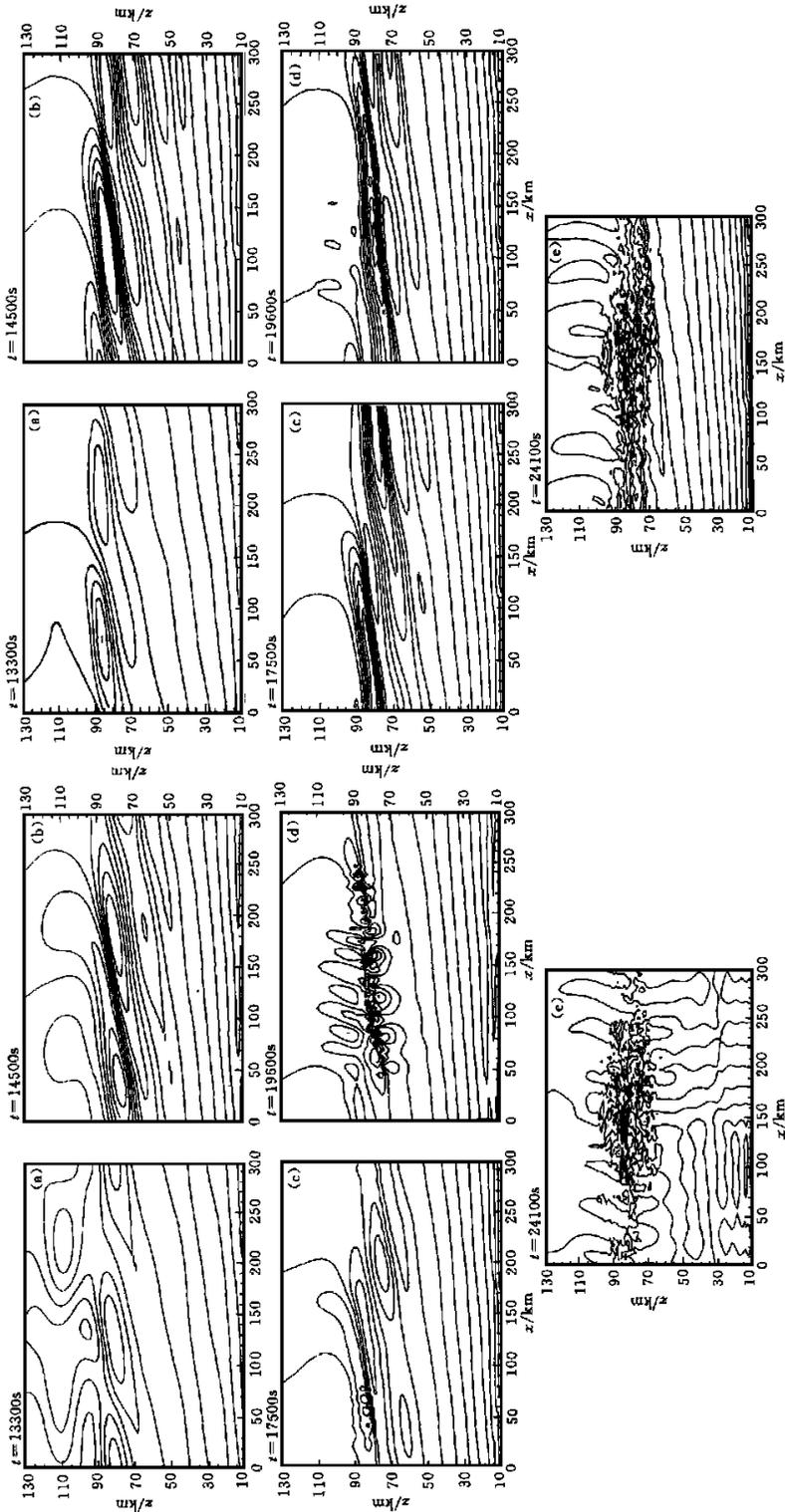


图5 当 $A = 0.1\text{m/s}$ 时,重力波的垂直速度 w 在几个时段的等值线分布图
Fig.5 Vertical velocity at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.1\text{m/s}$

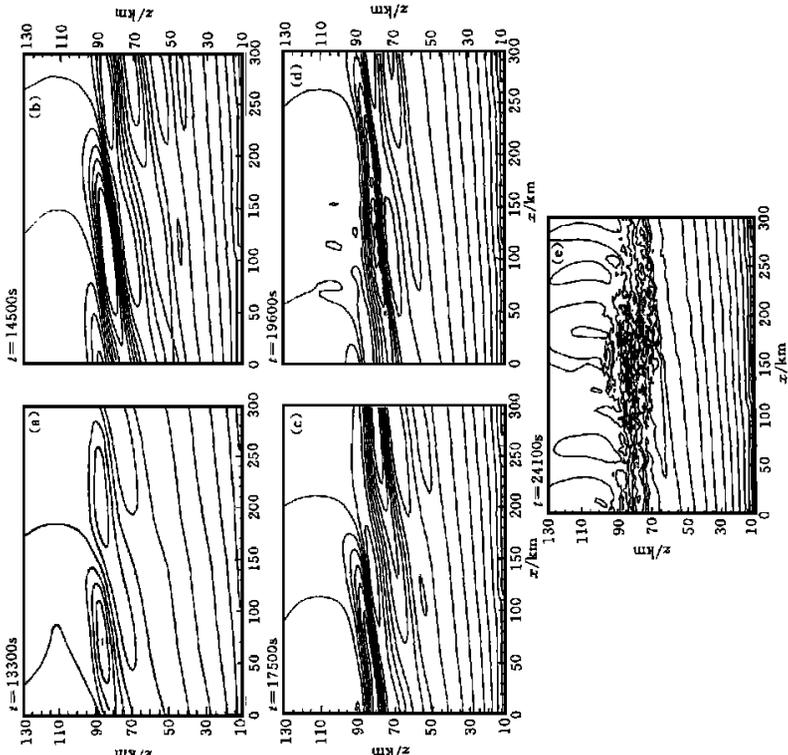


图6 当 $A = 0.1\text{m/s}$ 时,重力波的水平速度 u 在几个时段的等值线分布图
Fig.6 Horizontal velocity at selected times during the propagation of gravity wave in $A = 0.1\text{m/s}$

4 结 论

本文采用 FICE 方法对二维可压、非等温大气条件下重力波非线性传播进行了数值模拟。结果表明, 从对流层顶激发的重力波能稳定地经平流层传到中层, 从而将能量和动量从大气的一个区域传到另一个区域, 可见重力波在上下层大气耦合中扮演着重要角色。当重力波传到中间层顶附近时, 位温图上可以看到明显的翻转, 随后强对流出现在速度场上。扰动源的强弱直接影响到重力波的非线性演化过程, 大振幅扰动可以加速重力波的破碎。

中高层大气是光化过程和动力学过程相互耦合的复杂体系, 动力学波动过程通过温度的变化和输运作用影响大气成分, 特别是微量成分的变化, 重力波在中层顶附近的破碎对中高层大气的动力学结构产生了很大影响^[3], 进一步影响大气微量成分的分布。有关这方面的分析将另文给出。

研究中得到了武汉大学的张绍东博士和易帆研究员的帮助, 在此表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] Hines C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, 1960, **38**(6): 1441—1481.
- [2] Houghton J T. The stratosphere and mesosphere. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1978, **104**: 1—29.
- [3] Holton J R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 2497—2507.
- [4] Tao X. and Gardner C S. Heat flux observation in the mesopause region above Haleakala. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**: 2829—2832.
- [5] Prusa J M. Propagation and breaking at high altitudes of gravity waves excited by tropospheric forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**(15): 2186—2216.
- [6] Walterscheid R L., Schubert G., Nonlinear of an Upward Propagation Gravity Wave: Overturning, Convection, Transience and Turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**(1): 101—125.
- [7] Lindzen R S. Turbulence and stress due to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, 1981, **88**: 9707—9714.
- [8] 张绍东, 易帆. 重力波波包在可压大气中的非线性传播. *空间科学学报*, 1998, **18**(1): 39—51.
ZHANG Shao Dong, YI Fan. The nonlinear propagation of gravity wave packets in a compressible atmosphere. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 1998, **18**(1): 39—51.
- [9] 张绍东, 易帆. 重力波波包在非等温可压大气中的非线性传播. *空间科学学报*, 1998, **18**(3): 213—221.

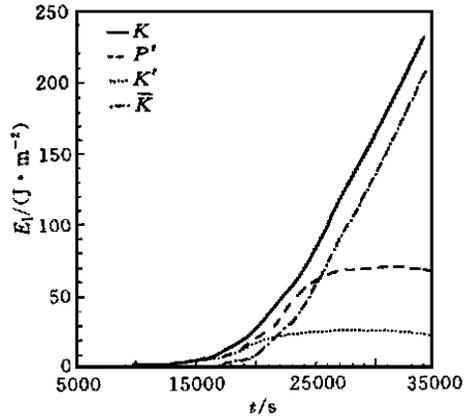


图 7 $A = 0.05 \text{ m/s}$ 时重力波有效位能 P' 、扰动动能 K' 、平动动能 \bar{K} 和总动能 K 在 50—100km 高度内的积分能量 E_1 随传播时间的变化

Fig. 7 Integrated value of total available potential energy P' , the perturbation kinetic energy K' , the horizontal averaged kinetic energy \bar{K} and the total kinetic energy K between 50—100km varied with time

- ZHANG Shaο Dong, YI Fan. The nonlinear propagation of gravity wave packets in a nonisothermal and compressible atmosphere. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 1998, **18**(3): 213—221.
- [10] Hu Y Q, Wu S T. A Full Implicit Continuous Eulerian (FICE) scheme for multidimensional transient magnetohydrodynamic (MHD). *J. Comput. Phys.*, 1984, **55**(1): 33—64.
- [11] Orlandi I. And Bryan K., Formation of the thermocline step structure by large amplitude internal gravity waves. *J. Geophys. Res.*, 1969, **74**: 6975—6983.

NONLINEAR EVOLUTION OF A GRAVITY WAVE PROPAGATING FROM THE TROPOPAUSE

WANG YONG-MEI XU JI-YAO WANG YING-JIAN

(*Lab. of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

[Abstract] By using a Full Implicit Continuous Eulerian (FICE) scheme, a two-dimensional numerical model for describing nonlinear propagation of a gravity wave in the compressible and nonisothermal atmosphere is established. The result shows that gravity wave excited by the tropopause forcing can propagate stably to the mesosphere through the stratosphere so that the energy and momentum can be transferred from a region to another. In the propagation, gravity wave undergoes growth, overturning, convection and breaking. The breaking of gravity wave is the important source of convection and smallscale waves, and convective instability and overturn are the character of nonlinear phenomenon. It can be inferred that the size of the perturbing source affects directly the propagation of nonlinear gravity wave. When the source is sufficiently small gravity wave can propagate stably, and large amplitude forcing can accelerate the breaking of gravity wave.

[Key words] Numerical simulation, Nonlinear, Gravity wave, Breaking.