

波状扰动激发的重力波波包在中层大气中 能量传播和转换特性的数值研究^{*}

黄春明 张绍东 易帆

(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘 要

采用谱配置方法对具有高斯分布的波状扰动激发重力波过程中的能量传播和转换特性进行数值研究. 模拟结果表明: 初始时刻单一的水平风、垂直风、密度或温度的波状扰动都可以激发出两支重力波波包, 其中一支向上传播, 而另一支则向下传播; 在相同的波参数下, 4 种波状扰动所激发的重力波波包的能量传播路径几乎完全一致, 与线性理论给出的射线路径却有些差异. 进一步的数值分析则表明: 4 种波状扰动转化为波动的特征时间基本相等, 约为 2 个波动周期, 但是在这个转换过程中, 不同扰动的能量转换效率却差别很大.

关键词 扰动; 重力波波包; 能量

1 引言

重力波是中、高层大气中最主要的扰动形式之一, 被认为是引起中、高层大气风场和温度场中、小尺度变化的主要原因, 对局部地区大气环流和结构会产生显著的影响. 事实上, 中、高层大气中的许多动力学过程都与重力波密切相关: 重力波引起的风场和温度场起伏会产生湍流, 进而影响大气的湍流耗散效应; 重力波在中、高层大气中的传播会导致大气能量、动量和质量在这一层区的传输和重新分配; 重力波和背景风场的非线性相互作用会直接影响中、高层大气的动力学暂态结构. 因而, 要发展中、高层大气动力学过程的研究, 必须对重力波的产生机制、传播和演变特性有更深入的理解. 20 世纪 60 年代以来, 许多卓有成效的理论分析使我们对重力波的线性基本特性有了充分的认识, 而雷达的长期观测资料^{[1],[2]}又使我们对中层大气中重力波的传播参数有了比较深入的了解, 这使得我们能够通过数值方法来研究与重力波有关的动力学问题.

一般认为, 传播在中层大气中的重力波的源在对流层或中间层的底部, 目前人们普遍接受的重力波激发机制主要有: 地形强迫^[3]、对流^[4]、锋^[5]、风场剪切^{[6],[7]}、急流^[8]和地转调节^[9]. 这些激发机制虽然各不相同, 但从物理本质上看, 对流、锋、风场剪切和急流都可看作风速扰动, 而地形强迫和地转调节可看作压力扰动, 也即温度和密度扰动. 而迄今为止, 人们对这些扰动激发重力波过程中的能量传播和转换特性还缺乏深入和定量的了解. 黄春明等^[10]对温度扰动激发重力波的过程中能量传播和转换特性进行了定量的

^{*} 国家自然科学基金重大项目 (49990450), 国家自然科学基金青年项目 (49904009) 共同资助
2002-07-08 收到原稿, 2002-12-05 收到修定稿

数值研究, 本文是这一工作的深入, 旨在全面研究不同扰动 (风速扰动和密度扰动) 激发重力波过程中的能量传播和转换的基本特性, 并将研究结果与文献 [10] 进行了定量比较.

2 数值模式

2.1 控制方程

从二维可压大气的基本运动方程出发, 忽略分子粘性与热传导等耗散过程, 并将压力用温度和密度表示, 控制方程有如下形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - R \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{RT}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - g - R \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{RT}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x} - \rho \frac{\partial w}{\partial z} - u \frac{\partial \rho}{\partial x} - w \frac{\partial \rho}{\partial z}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{RT}{c_V} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{RT}{c_V} \frac{\partial w}{\partial z}. \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 和 z 分别为水平和垂直方向 (向上为正) 的坐标. u, w 分别为水平风速和垂直风速; ρ, T 分别为密度和温度; R 为普适气体常数 ($R = 286.9821 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$); c_V 为定容比热; g 为重力加速度 ($g = 9.80225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

2.2 初始背景

设初始背景大气为等温、流体静力学平衡大气, 并假定水平均匀. 取水平风速为 10 m/s , 垂直风速为 0 m/s , 即

$$T_0 = T_c, \rho_0 = \rho_c e^{-\frac{g}{RT_c} z}, u_0 = 10 \text{ m/s}, w_0 = 0 \text{ m/s}.$$

式中, T_c 和 ρ_c 为常数.

2.3 初始扰动

假定一个向上传播的高斯型重力波波包扰动, 其水平扰动速度具有如下的形式:

$$u'(x, z, 0) = u_c e^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(z-z_c)^2}{2\sigma_z^2}} \sin[k_x(x-x_c) + k_z(z-z_c)].$$

式中, u_c, x_c, z_c 为常数, $u_c = 1 \text{ m/s}$, $x_c = 1200 \text{ km}$, $z_c = 64 \text{ km}$. k_x, k_z 分别为重力波的水平 and 垂直波数, σ_x 和 σ_z 为波包的半宽. 根据中层的观测, 取水平波长 $\lambda_x = 200 \text{ km}$, 垂直波长 $\lambda_z = 10 \text{ km}$, $\sigma_x = \lambda_x$, $\sigma_z = \lambda_z$.

该波包的其他扰动分量 $w'(x, z, 0)$, $\rho'(x, z, 0)$ 和 $T'(x, z, 0)$ 可由重力波的线性偏振关系求出. 由重力波的色散关系, 可以算出波动的本征频率为 $9.056 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 周期为 1.43 h . 考虑到本文的目的是研究单个变量 (水平风速、垂直风速、密度或温度) 扰动的传播和演变特性, 我们分别选取下列 4 种初始扰动 (见图 1). (1) 只保留水平风速扰动作为初始扰动, 而将其余的初始扰动分量 ($w'(x, z, 0)$, $\rho'(x, z, 0)$ 和 $T'(x, z, 0)$) 置为零. (2) 只保留垂直风速扰动作为初始扰动, 而将其余的初始扰动分量 ($u'(x, z, 0)$, $\rho'(x, z, 0)$ 和 $T'(x, z, 0)$) 置为零. (3) 只保留密度扰动作为初始扰动, 而将其余的初始扰动分量 ($u'(x, z, 0)$, $w'(x, z, 0)$

和 $T'(x, z, 0)$ 置为零. (4) 只保留温度扰动作为初始扰动, 而将其余的初始扰动分量 ($u'(x, z, 0)$, $w'(x, z, 0)$ 和 $\rho'(x, z, 0)$) 置为零. 其中第 4 种扰动的数值计算结果在文献 [10] 中已有详细报道, 在此列出只是为了与本文中的计算结果进行比较. 我们将初始扰动和初始背景的代数和作为 (1) 式的初值进行数值计算. 水平和垂直方向上的空间步长分别取为 20 km 和 1 km, 计算区域为 $0 \text{ km} \leq x \leq 3200 \text{ km}$ 以及 $10 \text{ km} \leq z \leq 160 \text{ km}$.

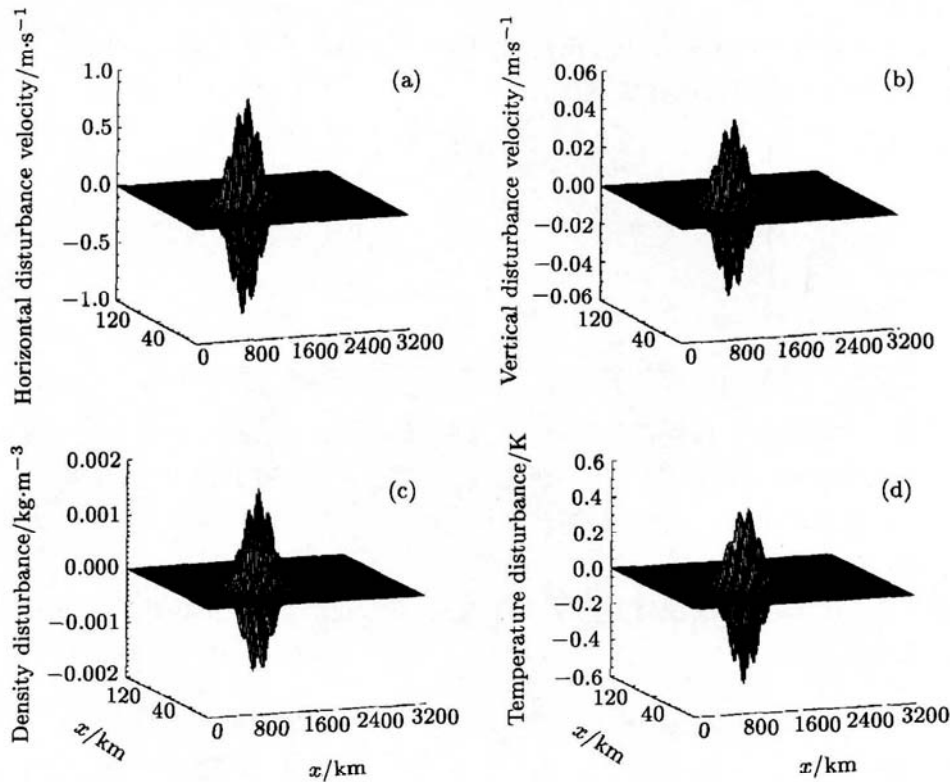


图 1 初始高斯型波状扰动

Fig.1 Initially given Gaussian wave-like disturbance. (a) horizontal velocity disturbance, (b) vertical velocity disturbance, (c) density disturbance, (d) temperature disturbance

3 计算结果和分析

我们的数值计算结果表明, 尽管初始扰动不同, 但是它们都会激发出两支传播方向相反的重力波波包. 为了分析能量的传输过程, 我们采用文献 [11] 中的方法对平均波能量密度 $\langle \epsilon_w \rangle$ 进行计算. 由于每种扰动下两支重力波波包的平均波能密度的演变除了扰动幅度的差异之外几乎完全相同, 图 2 只给出了水平风速扰动下平均波能密度在不同时刻的空间分布. 从图中可以观察到: 在 2 h 之后, 波包清晰地分为两支, 一支向上传播能量, 另一支则向下传播能量. 但向上传播的重力波波包的能量密度峰值始终略大于向下传播的波包的能量密度峰值. 这与文献 [10] 中的结果非常一致.

为了细致地研究扰动激发重力波的能量传输过程, 我们给出 4 种扰动所激发的 2 支

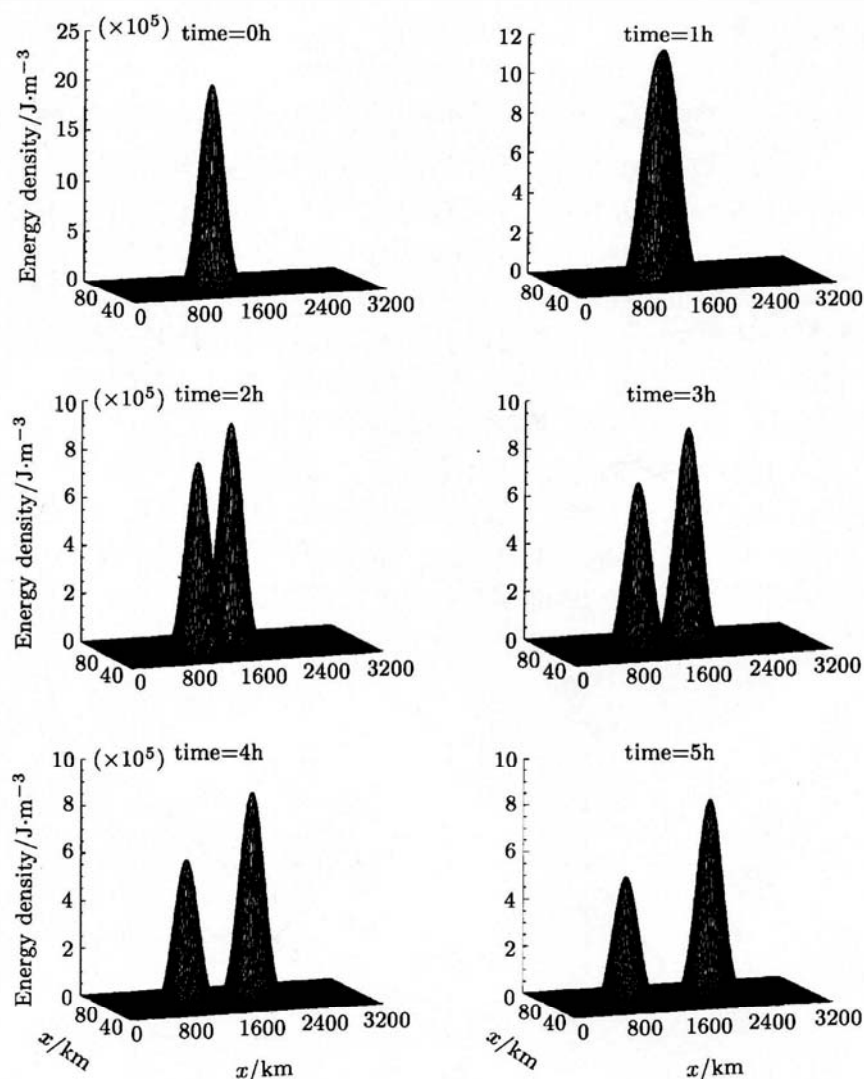


图 2 水平风速扰动所激发重力波波包平均波能量密度随时间的变化
Fig.2 Temporal variations of averaged wave-associated energy density of the gravity waves
excited by a horizontal velocity disturbance

重力波波包的能量传播路径(图 3). 图 3 中实线是通过重力波的线性理论得到的射线路径, 虚线代表计算得到的重力波波包的能量传播路径. 虚线上的符号代表不同时刻波包能量密度峰值的位置: “ Δ ”代表两支波包还未清晰分开之前的波能密度峰值位置, “+”代表上行重力波波包的波能密度峰值位置, “*”代表下行重力波波包的波能密度峰值位置. 从图中可见, 在相同的波参数下, 水平风速、密度和温度扰动所激发的重力波波包的能量传播路径完全一致, 而垂直风速扰动的传播路径却与它们有些差别. 通过与射线路径进行比较, 可以看出它们都与线性射线理论的预言略有差异. 经计算我们得到水平风速、密度和温度扰动激发的上行波包和下行波包的平均水平能量传播速度分别为 42.86 和 23.81 m/s, 都大于线性射线理论给出的群速度(分别为 38.76 和 18.76 m/s), 但是却小于垂直风速扰动的传播速度(44.44 和 24.44 m/s); 上行波包和下行波包的平均垂直能量传播速

度都为 1.11 m/s , 明显小于线性理论的计算结果 1.43 m/s , 也小于垂直风速扰动的传播速度 (1.28 m/s).

图 4 是重力波波包平均能量随时间的变化. 图中点线为平均扰动位能; 虚线为平均扰动动能; 实线为平均扰动总能量, 即平均位能和平均动能之和. 图中 “*” 和 “+” 分别代表平均扰动动能和平均扰动位能在不同时刻的数据. 当初始扰动为风速扰动时, 初始时刻平均扰动位能为零, 平均扰动能量全部来自于平均扰动动能; 当初始扰动为状态 (密度或温度) 扰动时, 初始时刻平均扰动动能为零, 平均扰动能量全部来自于平均扰动位能. 在随后的过程中, 由于大气不同参量之间由大气基本运动方程约束的耦合关系, 初始给定的扰动开始激发出重力波波包, 相应的, 波相关能量在位能和动能之间进行交换. 经过了 2.9 h 后, 平均扰动位能和平均扰动动能基本上不再有明显变化, 我们定义这个时间为一个类波扰动完全转换为波动的特征时间. 从图 4 可以清楚地看到, 4 种扰动转化为波动的特征时间几乎完全相等, 约为两个波动周期 (2.86 h). 如果定义扰动转化为波动后的波动能量与初始扰动能量之比为扰动转化为波动的能量转换效率, 则各种扰动下的能量转换效率差别很大: 水平风速扰动的能量转换效率为 92% , 即 $(12.82 \times 10^5 \text{ J}) / (13.90 \times 10^5 \text{ J})$, 垂直风速扰动的能量转换效率为 0.3% , 即 $(0.0001 \times 10^5 \text{ J}) / (0.034 \times 10^5 \text{ J})$, 密度扰动的能量

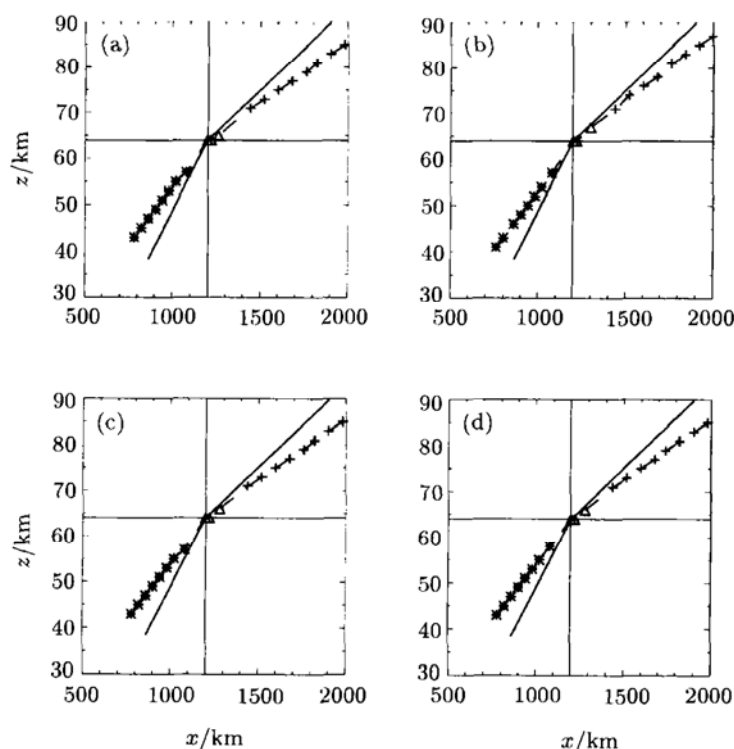


图 3 扰动的能量传播路径

Fig.3 Energy propagation paths of disturbances. (a) horizontal velocity disturbance, (b) vertical velocity disturbance, (c) density disturbance, (d) temperature disturbance

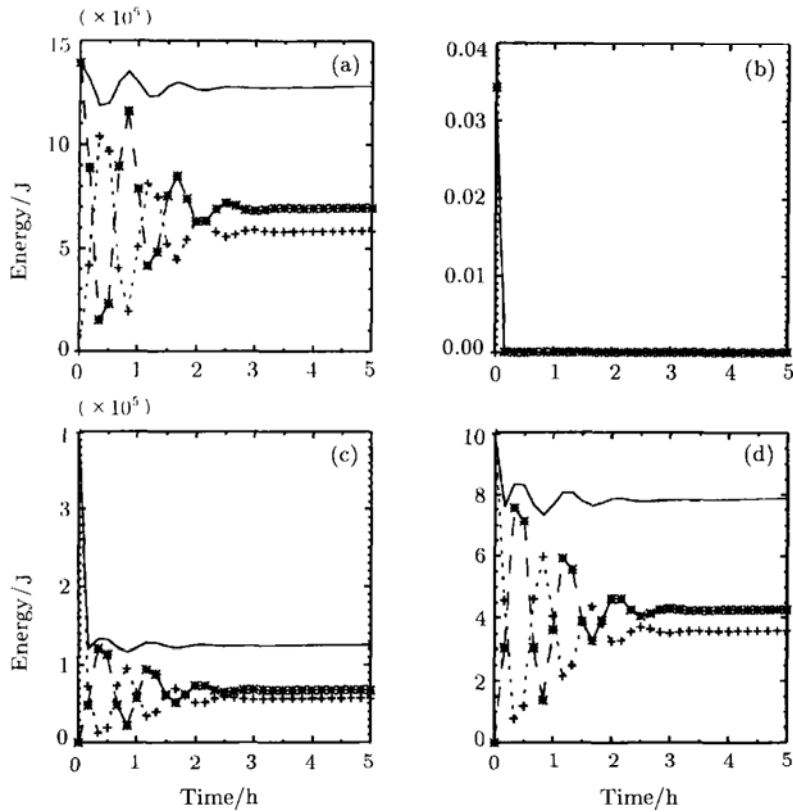


图 4 重力波波包能量随时间的变化

Fig.4 Wave-associated energy of gravity wave packet varied with time. (a) horizontal velocity disturbance, (b) vertical velocity disturbance, (c) density disturbance, (d) temperature disturbance

量转换效率为 31%, 即 $(1.25 \times 10^5 \text{ J}) / (3.98 \times 10^5 \text{ J})$, 温度扰动的能量转换效率为 79%, 即 $(7.87 \times 10^5 \text{ J}) / (9.96 \times 10^5 \text{ J})$.

4 结论

本文采用谱方法对具有高斯分布的单一变量(水平风速、垂直风速、密度或温度)的波状扰动在可压大气中的演变和传播过程进行数值模拟, 对扰动激发重力波波包过程中能量传播和转换特性进行了详细的数值分析, 得到以下结论.

(1) 任意一个单个变量的波状扰动都会激发出两支传播方向相反的重力波波包, 一支向上传播, 而另一支向下传播.

(2) 2 支波包的能量传播路径与线性射线理论的预言略有差异; 水平风速、密度和温度扰动所激发的重力波波包的能量传播路径完全一致, 而垂直风速情况下与前 3 种情况有些微小的差别. 经计算我们得到水平风速、密度和温度扰动激发的上行波包和下行波包的平均水平能量传播速度分别为 42.86 和 23.81 m/s, 都大于线性射线理论给出的群速度(分别为 38.76 和 18.76 m/s), 但是却小于垂直风速扰动的传播速度(44.44 和 24.44 m/s); 上行波包和下行波包的平均垂直能量传播速度都为 1.11 m/s, 明显小于线性理论的计算结果

1.43 m/s, 也小于垂直风速扰动的传播速度 (1.28 m/s).

(3) 4种扰动转化为波动的特征时间几乎完全相等, 约为两个波动周期 (2.9 h); 但各种扰动下能量转换的效率不同: 水平风速扰动、垂直风速扰动、密度扰动和温度扰动的能量转换效率分别为 92%, 0.3%, 31% 和 79%.

参 考 文 献

- [1] Yamamoto M, Tsuda T, Kato S. Gravity waves observed by the Kyoto meteor radar in 1983—1985. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **48**:597—603
- [2] Vincent R A. Gravity-wave motions in the mesosphere and lower thermosphere observed at Mawson, Antarctica. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**:593—602
- [3] Mcfarlane N A. The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**:1775—1785
- [4] Fovell R, Durran D, Holton J R. Numerical simulations of convectively generated stratospheric gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**(16):1427—1442
- [5] Gall R L, Williams R T, Clark T L. Gravity waves generated during frontogenesis. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**(15):2204—2219
- [6] Lalas D P. On the characteristics of gravity waves generated by atmospheric shear layers. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**:1248—1259
- [7] Fritts D C. Shear excitation of atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**(4):1936—1952
- [8] Mastrantonio G, Einaudi F, Fua D. Generation of gravity waves by jet streams in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**:1730—1738
- [9] Zhu X, Holton J R. Mean fields induced by local gravity-wave forcing in the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **44**:620—630
- [10] Huang Chunming, Zhang Shaodong, Yi Fan. A numerical study on the nonlinear propagation of gravity-wave packets excited by temperature disturbance, *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(4):338—344. in Chinese (黄春明, 张绍东, 易帆. 温度扰动激发的重力波波包非线性传播过程的数值研究. 空间科学学报, 2002, **22**(4):338—344)
- [11] Zhang S D, Yi F. A numerical study of nonlinear propagation of a gravity-wave packet in compressible atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D6):14261—14270
- [12] Zhang Shaodong, Yi Fan. The nonlinear propagation of gravity wave packets in compressible atmosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 1998, **18**(1):39—51. in Chinese (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)
- [13] Zhang Shaodong, Yi Fan, Wang Jingfang. Effects of nonlinearity on the characteristics of gravity waves. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(4):321—326. in Chinese (张绍东, 易帆, 王敬芳. 非线性效应对重力波特性的影响. 空间科学学报, 1999, **19**(4):321—326)
- [14] Zhang Shaodong, Yi Fan, Xiong Donghui. A numerical TEC model based on the propagation characteristics of gravity-wave packets in real atmosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):36—43. in Chinese (张绍东, 易帆, 熊东辉. 重力波波包在真实大气中传播特性的数值研究. 空间科学学报, 2002, **22**(1):36—43)

A NUMERICAL STUDY ON THE ENERGY PROPAGATION AND CONVERSION OF GRAVITY-WAVE PACKETS EXCITED BY WAVE-LIKE DISTURBANCE IN THE MESOSPHERE

HUANG Chunming ZHANG Shaodong YI Fan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract

By using the spectral allocation method, the characteristics of the energy propagation and conversion in the excitation of gravity wave by an initially given Gaussian wave-like disturbance is numerically studied. The simulation results show that any single wave-like disturbance component (horizontal wind, vertical wind, density or temperature) can independently excite two gravity-wave packets, one propagates upward and another propagates downward. With the same wave parameters, the energy propagation paths of the packets under the above mentioned four kinds of disturbances are almost identical with each other and slightly different from the ray paths derived by the linear theory. A further numerical analysis indicates that the characteristic time of the energy conversion from a disturbance to a wave is almost identical for those different disturbances, equal to two times of wave period. However, the energy conversion efficiencies for different disturbances depart significantly from each other.

Key words Disturbance, Gravity-wave packet, Energy