

覃卫坚, 寿绍文, 高守亭等. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1039~1049, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 05. 004

Qin W J, Shou S W, Gao S T, et al. Numerical study of the dynamical mechanism of inertial gravity waves in hail storm process. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(5): 1039~1049, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 05. 004

# 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟

覃卫坚<sup>1,2</sup>, 寿绍文<sup>2</sup>, 高守亭<sup>3</sup>, 李启泰<sup>4</sup>

1 广西区气候中心, 南宁 530022

2 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 大气科学学院, 南京 210044

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 贵州省环境科学院, 贵阳 550002

**摘 要** 使用高灵敏度的电容式微压波传感器对 1998 年 4 月 11 日 16 时发生在贵州省普定县的一次降冰雹过程的重力波进行观测, 利用 WRF(Weather Research and Forecast) 中尺度模式对这一过程进行数值模拟, 使用 Morlet 小波方法对模拟结果进行分析, 得出这一过程中惯性重力波的分布和变化规律, 并分析急流、地形及切变线对惯性重力波的影响. 观测发现: 在降冰雹前, 每隔 1~4 小时出现一次短周期重力波阵性增强的现象. 数值模拟结果显示: 在低空降冰雹前几个小时有强的短周期重力波出现, 其中周期较长的出现早、存在时间长, 周期较短的出现晚、存在时间短; 强的低空急流和风速垂直切变触发对流或湍流的发生和加强, 对流或湍流又激发了 80~200 min 的短周期重力波; 短周期重力波更容易向垂直方向传播, 而长周期重力波倾向于水平方向传播. 长周期重力波在降冰雹后周期有明显变短现象, 随高度越加明显. 由地形形成的重力波在最高山峰上空振幅最大.

**关键词** 惯性重力波, 重力波观测, 数值模拟, 小波分析

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 05. 004

中图分类号 P421

收稿日期 2009-02-07, 2009-05-28 收修定稿

## Numerical study of the dynamical mechanism of inertial gravity waves in hail storm process

QIN Wei-Jian<sup>1,2</sup>, SHOU Shao-Wen<sup>2</sup>, GAO Shou-Ting<sup>3</sup>, LI Qi-Tai<sup>4</sup>

1 Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Key Lab of Disaster Weather, College of Atmospheric Science, Nanjing 210044, China

3 Institute of Atmospheric Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 Guizhou Institute of Environmental Science, Guiyang 550002, China

**Abstract** Gravity waves were observed in a hail storm process on 11 April 1998 in Puding County of Guizhou Province by using very sensitive microbarovariograph. And this process is simulated by using the mesoscale numerical model of WRF and the results of the simulation are analyzed by using Morlet wavelet method. The result shows the characteristics of the spatial-temporal distribution of Inertial Gravity Waves (IGWs). In addition, the factors influencing IGWs and weather system, and the dynamic mechanism of IGWs are studied in this paper. The IGWs with short period are strengthened in each 1~4 hour before the hail storm. The results of the simulation show that some IGWs with short period are generated before near the hail storm below

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40775033, 40405009, 40575022, 40205008); 江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050201); 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418301)和江苏省自然科学基金项目(BK2005141)资助.

**作者简介** 覃卫坚, 男, 1971 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气气候动力学研究. E-mail: qinweijian2008@126.com

the 3 km altitude. In them the long ones are generated early and last longer, and the others are later and last shorter. At the low altitude, the turbulent convection is generated and strengthened by the strong low jets and shears, and the new IGWs with 80~200 min period are excited by the turbulent convection. The IGWs with short period are easier to propagate vertically, while the long ones tend to propagate horizontally. The period of IGWs with long period is obviously shortened after the hail storm and the IGWs are strengthened along with the altitude. The IGWs over the highest mountain usually are the strongest.

**Keywords** IGWs, Observation of IGWs, Numerical simulation, Wavelet analysis

## 1 引言

对流层大气重力波研究最大的困难是如何得到更多的重力波信息,只有对重力波的分布和变化规律有更多的了解,才能更好地对其动力学机制进一步的研究.在重力波研究中使用的资料主要有两种,一种是利用现有的气象分析资料,使用直观图来表示重力波过程,例如:有的以在 700、850 hPa 高度的散度场上存在着辐合辐散交替出现的链式分布确定为一个重力波的过程<sup>[1~3]</sup>;有的使用散度剖面图中辐合辐散交替、位温剖面图中等值线的波动和垂直运动来表征惯性重力波<sup>[4]</sup>.另一种是使用精密的仪器观测而得到的重力波资料.重力波观测方法主要有:微压计、空间遥感观测、无线电探空、激光雷达和雷达探测、飞机观测等<sup>[5,6]</sup>.本文采用观测和数值模拟的方法对重力波进行研究,使用的观测仪器为微压计,它是早年观测重力波的主要工具,现代观测中微压计仍是主要仪器之一.如:Gossard 等<sup>[7]</sup>(1976 年)使用微压计在地面观测气压变化并结合风速脉动资料来研究大气重力波波谱和波的频散. Einaudi 等<sup>[8]</sup>(1987 年)利用微压计和雷达观测资料来研究大气重力波和对流系统的相互关系.本文利用 1998 年 4 月 11 日发生在贵州省普定县一次降冰雹过程的重力波观测资料,分析得到重力波在这一过程中的发生发展规律.利用 WRF 中尺度模式对这一过程进行模拟,使用 Morlet 小波方法对模拟结果进行计算分析,得到了在各高度层惯性重力波分布和变化规律,分析研究地形、急流、切变线或锋面对重力波的发生发展的影响.

## 2 重力波观测事实

### 2.1 观测方法

李启泰等<sup>[9]</sup>研制了一套观测重力波的仪器和方

法,使用的仪器为高灵敏度的电容式微压波传感器,微气压感应灵敏度为  $10^{-2}$  Pa,输出精度为  $10^{-1}$  Pa/mV,大气压力数据采样频率为 15 次/min.使用 3 个探头分别放在 3 个相互之间有一定距离的地方,布置成三角形阵列,根据同一波阵面到达各阵点(探头)的时间差及各阵点参数计算出重力波的来向及水平波速、波长等参数.采样过程为连续的过程,每一分钟进行一次不同波周期(2~180 min)的傅里叶分析,计算出在该时间到达的重力波振幅和周期,计算所使用的数据是从当前时刻起向前取 4200 个微气压值,每分钟计算并显示一条波周期-振幅谱线,经过连续计算即得大气重力波的动态谱.

### 2.2 观测结果分析

图 1 为 1998 年 4 月 11 日普定县(105.75°E, 26.33°N)观测到的一次降冰雹过程的大气重力波动态谱图.从图中可看出降雹前的时间里,每隔 1~4 小时出现一次周期为 20~70 Pa 的重力波阵性增强现象,这些强的重力波出现具体时间为:01:00~02:00 出现强重力波周期为 20~60 min;05:20~06:20 出现强重力波周期为 20~70 min;07:30~08:00 出现强重力波周期为 20~40 min;08:10~08:30 出现周期范围比较大的强重力波,周期为 20~320 min;10:00~10:20 出现强重力波周期为 30~70 min;13:50~14:00 出现强重力波周期为 30~40 min;14:20~15:20 出现周期范围比较大的强重力波,周期为 40~320 min.这些观测事实证实了黄荣辉等<sup>[10]</sup>(2002 年)提出的地转偏差使惯性重力波激发在地转适应过程开始到 3 h 前最为强烈的观点.

16:10 普定开始降冰雹,16:20 左右结束.从图 1 中可看出降冰雹后重力波的强度明显加强,强重力波的周期范围变宽.16:10~17:20 出现了振幅大于 150 Pa 的超强重力波过程,周期范围为 20~320 min,其中 45~80 min 周期的重力波最强,在 16:30 振幅达到了最大值 400~500 Pa.这可能是

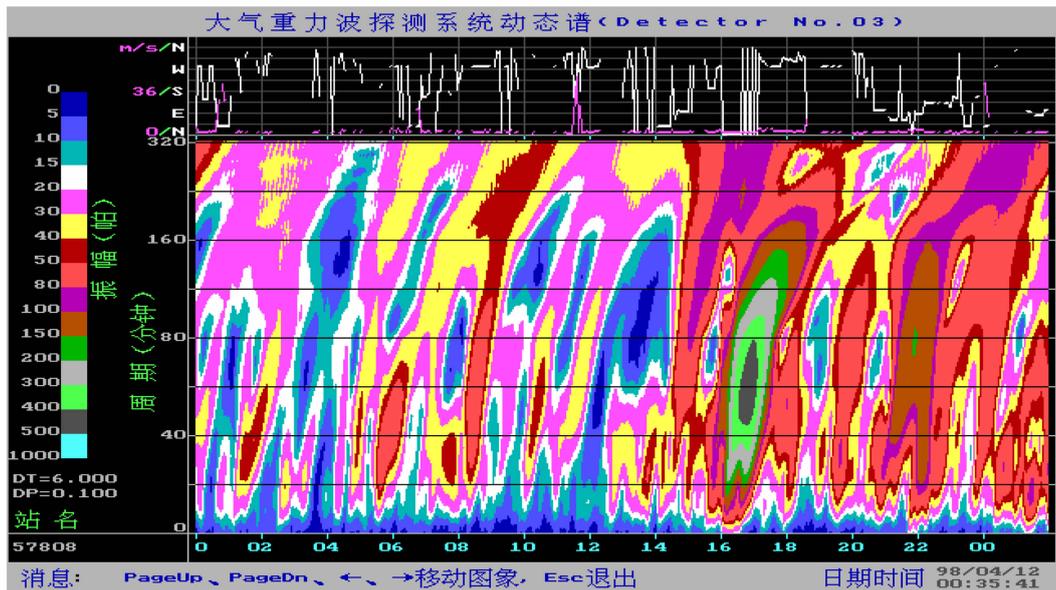


图1 1998年4月11日在普定县探测到的大气重力波探测系统动态谱

Fig. 1 A dynamic spectrum of IGWs during the hail storm process on 11 April 1998 in Puding County

强烈发展的雹云在很短的时间里激发了很强的浮力振荡,产生向下传播的重力波所致。16:30之后重力波振幅略减,但还是比降冰雹前强,出现的较强重力波分别如下:17:20~18:00出现一次强的重力波,振幅为40~80 Pa,周期为30~240 min;19:10~20:00出现一次强的重力波,振幅为40~80 Pa,周期为20~160 min;20:30~22:50出现一次强的重力波,振幅为40~150 Pa,周期为20~240 min。

通过观测分析还发现,在相同强度而周期不同的重力波中,短周期重力波的出现和消亡相对于长周期重力波在时间上来得稍早。在地面观测到的大气重力波基本上都是从西边和北边方向传来的。

### 3 惯性重力波的数值模拟方案设计

#### 3.1 中尺度模式模拟方案设计

本模拟采用的是WRF模式,它是由美国国家大气研究中心(NCAR)中小尺度气象处、国家环境预报中心(NCEP)环境模拟中心、预报系统实验室(FSL)的预报研究处和奥克拉荷马大学的风暴分析预报中心联合开发的新一代高分辨率中尺度气象研究和预报的数值模式及同化系统<sup>[11]</sup>。它采用高度模块化、并行化和分层设计技术,集成了迄今为止最新的中尺度气象研究成果,拥有多重区域、多分辨率、多重嵌套网格以及三维变分同化等功能,最近几年广泛运用于我国气象研究和天气预报业务中,并取得良好的效果<sup>[12,13]</sup>。

这次数值模拟采用两重双向嵌套网格技术(D01, D02),D01、D02网格中心均为(26°N,105°E),D01水平网格数为90×90,格距为30 km,D02水平网格数为91×79,格距为10 km,垂直方向层数为27层。模式采用全可压、非静力学方程,选用欧拉质量坐标和Rung-Kutta 3阶时间积分方案,微物理过程采用WSM 3-class simple冰方案,长波辐射采用了RRTM方案,短波辐射采用了Dudhia方案,近地面层采用Monin-Obukhove方案,陆面过程采用了热量扩散方案,边界层采用YSU方案,积云对流参数化方案采用Kain-Fritsch(new Eta)方案。模式的初始条件和侧边界条件均采用NCEP每6 h一次的全局再分析资料,模拟积分时间长度为48 h,从1998年4月10日08时~14日08时(北京时间,以下相同),细网格的模拟每10 min输出结果一次。

#### 3.2 惯性重力波周期的提取

本文利用小波分析对数值模拟结果进行周期分析,提取出惯性重力波。小波分析的思想来源于Fourier分析,并在其基础上发展起来的,具有分辨时间序列在局部时段频率信息的功能。采用的Morlet基小波为<sup>[14,15]</sup>

$$\varphi(t) = e^{i2\pi t} e^{-\left(\frac{2\pi}{k_\varphi}\right)^2 \frac{t^2}{2}}, \quad (1)$$

其中 $k_\varphi = 10$ ,分析小波为

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} e^{2\pi i \left(\frac{t-b}{a}\right)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{k_\varphi}\right)^2 \left(\frac{t-b}{a}\right)^2}, \quad a > 0, b \in \mathbf{R} \quad (2)$$

其中 $a$ 为尺度参数, $b$ 为平移参数。

当所要分析的对象 $y(t)$ 为平方可积时,即满

足:  $\int_{-\infty}^{+\infty} y^2(t) dt < \infty, y(t) \in L^2$ , 它的连续小波变换为

$$w(a, b) = \langle y, \varphi_{a,b} \rangle = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3)$$

符号  $\langle, \rangle$  表示内积运算符, 定义为:  $\langle x, y \rangle \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y^*(t) dt$ ,  $*$  表示共轭运算符.

## 4 数值模拟结果分析

### 4.1 实况天气形势分析

4月11日08时天气形势如图2所示, 从500 hPa高度场来看有一个高空槽东移影响我国, 分为北支槽和南支槽, 南支槽底位于我国西南地区, 我国东北地区 and 朝鲜半岛处于高压脊控制, 副热带高压中心位于南海以及菲律宾群岛附近, 副高边缘西伸到了我国海南岛和台湾岛的东岸沿海. 700 hPa有切变线位于贵州省和四川省的交界处, 贵州省境内并伴有急流的发生. 850 hPa风场有东北—西南向切变

线穿过贵州省境内, 普定县西部出现了大于20 m/s的风速. 从1000 hPa高度场来看我国西北高原地区是一个冷高压, 贵州、广西、湖南、湖北为一个低压带, 贵州省地面气压增压较大. 在高空槽的引导下, 地面冷空气南下和切变线向南移动影响贵州. 因此贵州省普定县的这一次降冰雹过程是受高空槽、切变线和低空急流共同影响造成的.

### 4.2 数值模拟效果检验

对这一次降雹过程的模拟结果和实况进行比较: 粗网格域 D01 中的模拟流场和位置高度场(图略)较好地再现客观分析的大尺度环流特征(图略). 图3a为1998年4月11日08时700 hPa的实况风场矢量图, 从图中可看出中国的西南部有个东北—西南向的低槽东移, 贵州省普定县处于槽区, 从风场来看贵州北部风速略小, 南部风速较大并出现了急流. 同时细网格 D02 模拟结果, 如图3b为1998年4月11日08时贵州省上空700 hPa风场矢量图, 可看出北部风速小南部风速大, 普定县处于槽区和急流控制, 和实况图相比很相似. 从西风风速经向剖面实况图(图3c)来看, 在普定的上空200 hPa处存在

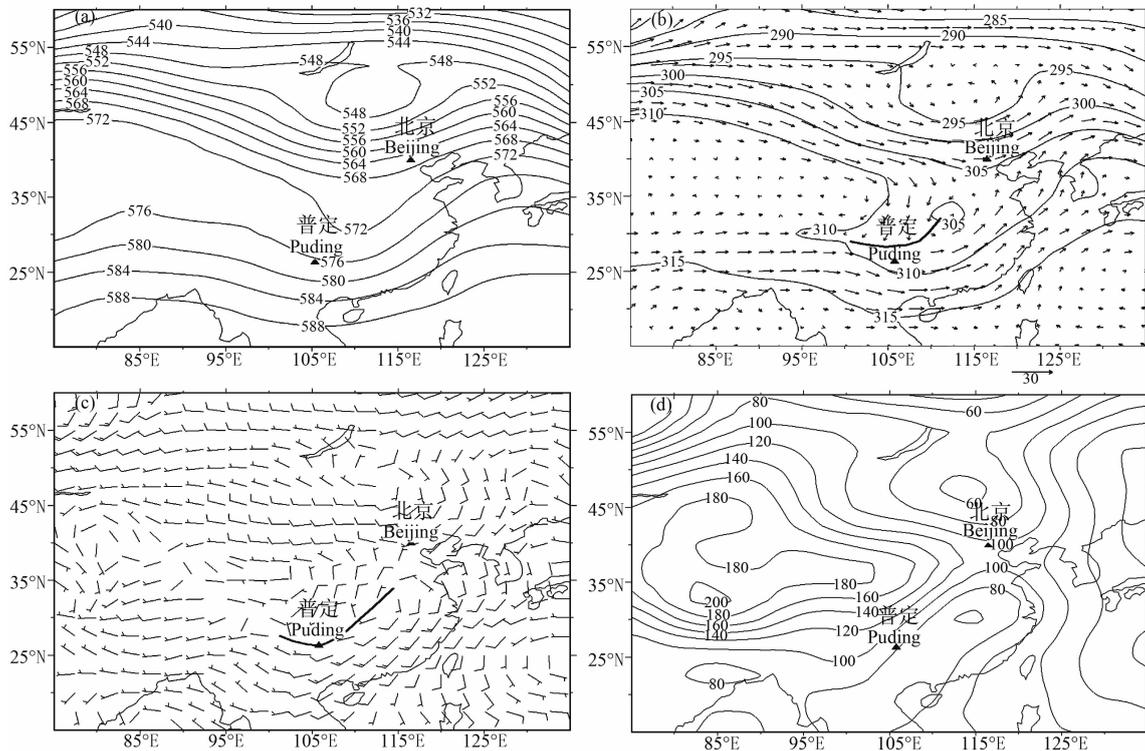


图2 1998年4月11日08时500 hPa高度场(单位: dgpm)(a)、700 hPa流场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )(b)、850 hPa风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )(c)、1000 hPa高度场(单位: dgpm)(d)的实况图

Fig. 2 The observation of (a) the geopotential height (dgpm) of 500 hPa, (b) the stream field ( $m \cdot s^{-1}$ ) of 700 hPa, (c) the wind velocity ( $m \cdot s^{-1}$ ) of 850 hPa, and (d) the geopotential height (dgpm) of 1000 hPa at 08:00 on 11 April 1998

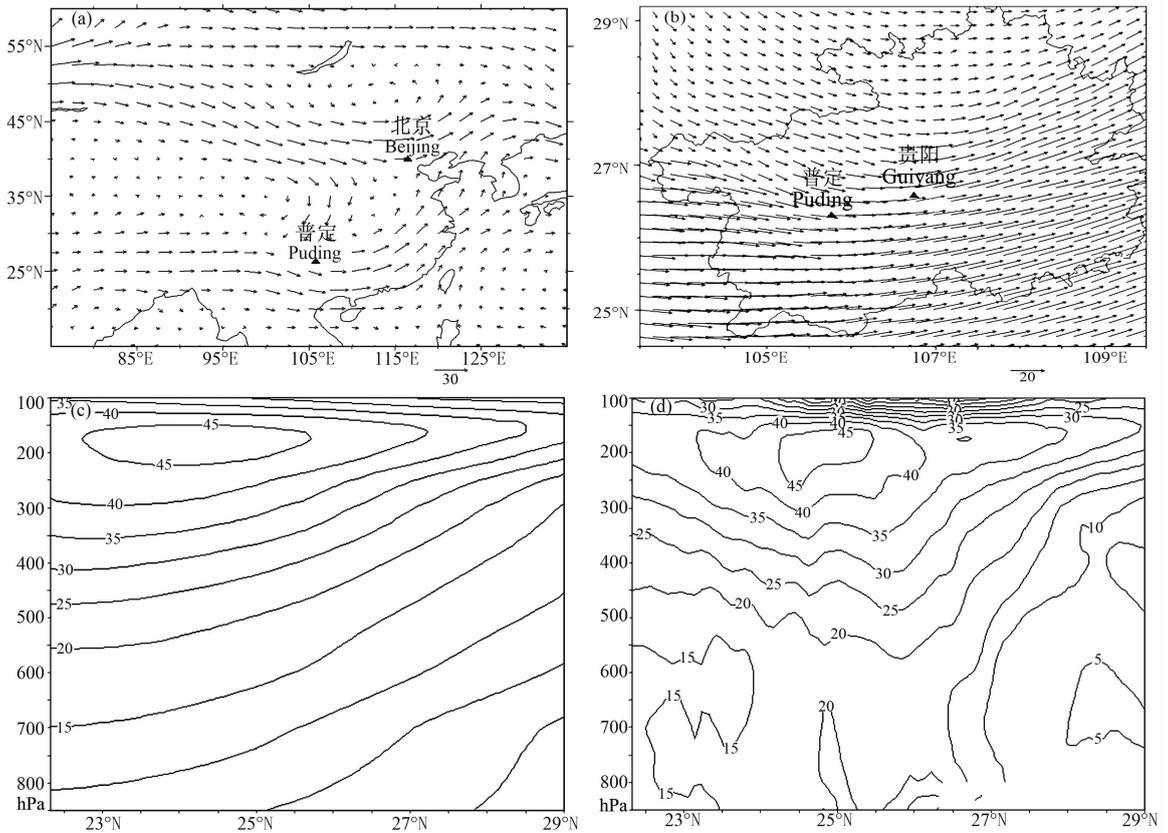


图 3 实况天气形势和模拟对比

1998 年 4 月 11 日 08 时 700 hPa 流场(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 实况图和 (b) 模拟图;  
西风(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 经向剖面图: (c) 实况和 (d) 模拟。

Fig. 3 The comparison of synoptic situation between the observed and the simulated  
Observed (a) and simulated (b) stream field ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of 700 hPa, observed (c) and  
simulated (d) vertical cross-section of the  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 08:00 on 11 April 1998.

最大的西风风速,中心风速大于  $45 \text{ m/s}$  以上,700 hPa 以上高度风速也达到了  $15 \text{ m/s}$  以上;模拟结果(图 3d)同样在 200 hPa 高度有最大西风风速中心,与实况相比只是中心位置稍偏北,但总体上还是很好地再现了实际情况.因此这一次模拟较好地再现了客观分析的环流特征,模拟结果还是令人满意的.

### 4.3 惯性重力波的数值模拟结果

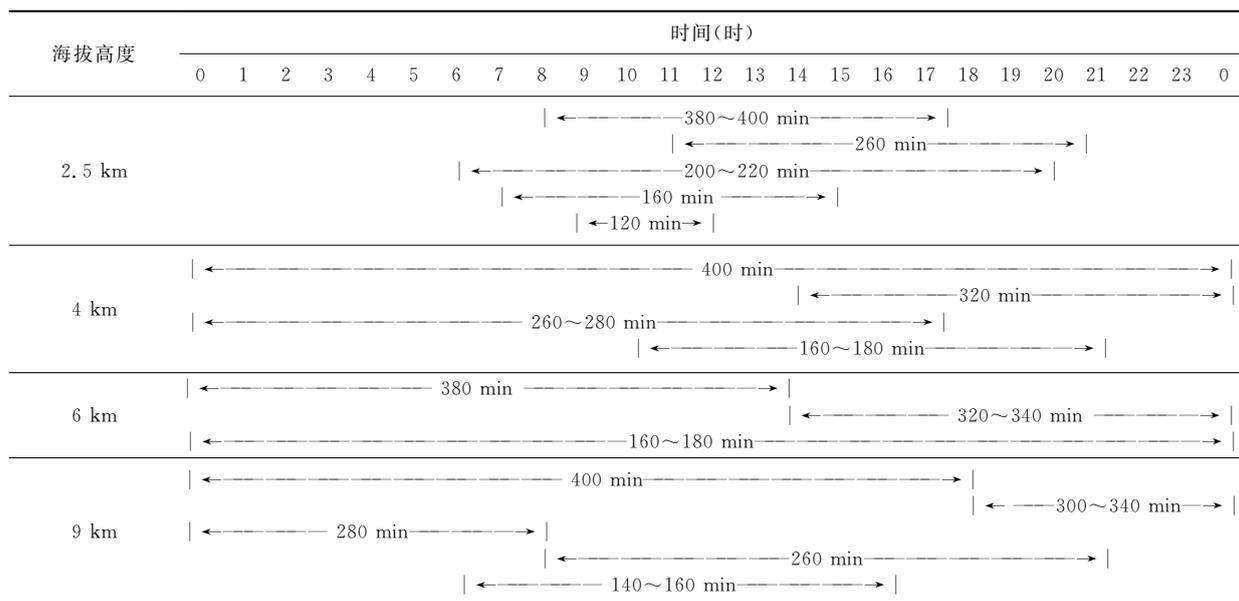
#### 4.3.1 贵州省普定县上空各高度层重力波发生发展情况

惯性重力波模拟结果如表 1 所示,贵州省普定县(海拔高度为 1250 m)上空在海拔 2.5 km 处,降冰雹前 380~400、260、200~220、160、120 min 的重力波比较强,降冰雹后主要为 260、200 min 的重力波;在海拔 4 km 处,降冰雹前主要有 400、260~280、140 min 强的重力波,降冰雹后主要为 400、320、160~180 min 强的重力波;在海拔 6 km 处,降冰雹前主要为 380、160~180 min 强的重力波,降冰雹后主要为 320~340、160~180 min 强的重力波;

在海拔 9 km 处,降冰雹前主要有 400、280、260、140~160 min 强的重力波,降冰雹后为 400、300~340、260、140~160 min 周期的重力波.以上强的重力波均通过 0.05 的信度检验,它们具体出现和消亡时间如表 1 所示.

由小波分析的实部图(图略)和能量谱图(图 5)可见,这次降冰雹过程中,除了近地面层存在短周期重力波比长周期重力波强以外,长周期重力波一般强于短周期重力波,长周期出现时间早、持续的时间长,短周期出现时间晚、持续的时间短.近地面层在降冰雹前几个小时有强的短周期重力波出现,这可能跟降冰雹前强对流酝酿前期引起的大气的扰动有关,特别是雹云发展和雹块增长中存在上升气流的多次起伏及其平稳间歇期,强对流过程间歇性增强的这一特征在重力波信息里得到了表现,这可能是重力波产生的根源之一.各高度层都出现长周期重力波在降冰雹以后周期明显变短的现象,且随高度越发明显.在海拔 4 km 以上各高度层,降冰雹前后

表 1 1998 年 4 月 11 日贵州省普定县上空各高度层较强的重力波分布  
Table 1 Distribution of strong IGWs over Puding County in Guizhou on 11 April 1998



周期在 120 min 以上的重力波有明显增强的现象,这是因为降冰雹过程是一次能量释放过程,对流扰动激发和加强了重力波,并通过重力波传播和耗散能量。

#### 4.3.2 贵州省普定县上空重力波垂直传播情况

小波能量谱数值越大表示重力波的强度越强,图 4a 为 20 min 周期重力波的小波能量谱剖面图,最强中心位于海拔高度 6 km 处,呈垂直分布形状,强度由最强中心向各方向衰减,到达地面就很小了,因此在地面观测到的 20 min 周期重力波强度很弱。图 4b 为 120 min 周期重力波的小波能量谱剖面图,在降冰雹前几个小时近地面层有一个重力波最强中心,从图上看它随时间缓慢向上移动,直到冰雹发生。这类 120 min 左右周期的重力波可能是由于地形影响产生的,产生后向上传播并触发冰雹的产生。图 4c 为 280 min 周期重力波小波能量谱,其最强中心位于海拔高度 4.5 km,出现在降冰雹之后,持续时间比较长;降冰雹前,海拔高度 2.5 km 还存在重力波的次强中心。图 4d 为 360 min 周期重力波小波能量谱,降冰雹前海拔高度 7 km 处存在着最强中心;降冰雹后海拔高度 3 km 上存在着次强中心。从以上分析说明了在降冰雹前后短周期重力波有明显的垂直方向传播,而长周期重力波更倾向于水平方向传播,这和在地面观测到的重力波情况是一致的。

## 5 惯性重力波发生发展的动力学分析

前面两节通过观测和数值模拟得到的重力波发

生发展和传播规律,下面利用模拟结果对它们的动力机制进行分析。一般认为惯性重力波的波源有:急流、地形、低层大气切变不稳定、天气过程扰动(如低压系统和中小尺度强对流)、湿度不连续的“干线”、火山爆发、海啸、地震、日食、大气层核爆炸等<sup>[17~21]</sup>,其中急流、地形、切变不稳定尤为重要,下面分析它们对重力波的影响。

### 5.1 急流

急流和重力波的发生发展有密切的关系,覃卫坚等<sup>[22]</sup>研究发现惯性重力波随风速垂直切变增大而增强,急流是最重要的惯性重力波波源,急流下方是激发惯性重力波最强的地方。通过数值模拟和分析得到普定县上空急流和风速切变变化图(图 5a),由图看出 10 日 16 时有低空急流和一个强风速垂直切变区东移,在普定的上空离地面 1 km 高度的区域受低空急流和强风速垂直切变区控制,一直持续到 11 日 08 时,从各高度层的能量谱图(图 5b, 5c, 5d)来看,这期间短周期重力波很弱,普定上空的低空急流和强风速垂直切变区 11 日 08 时东移,移出了普定县的上空后,此时在普定县的低空出现了强度较强、周期约为 80~200 min 的短周期重力波,该重力波存在到 16 时普定县发生降冰雹,降冰雹后低空的短周期重力波减弱。在高空,由于急流激发作用降冰雹前后 120 min 以上周期的重力波有明显增强的现象。

### 5.2 地形

当风速随高度增加时,气流流过山脉受到阻挡

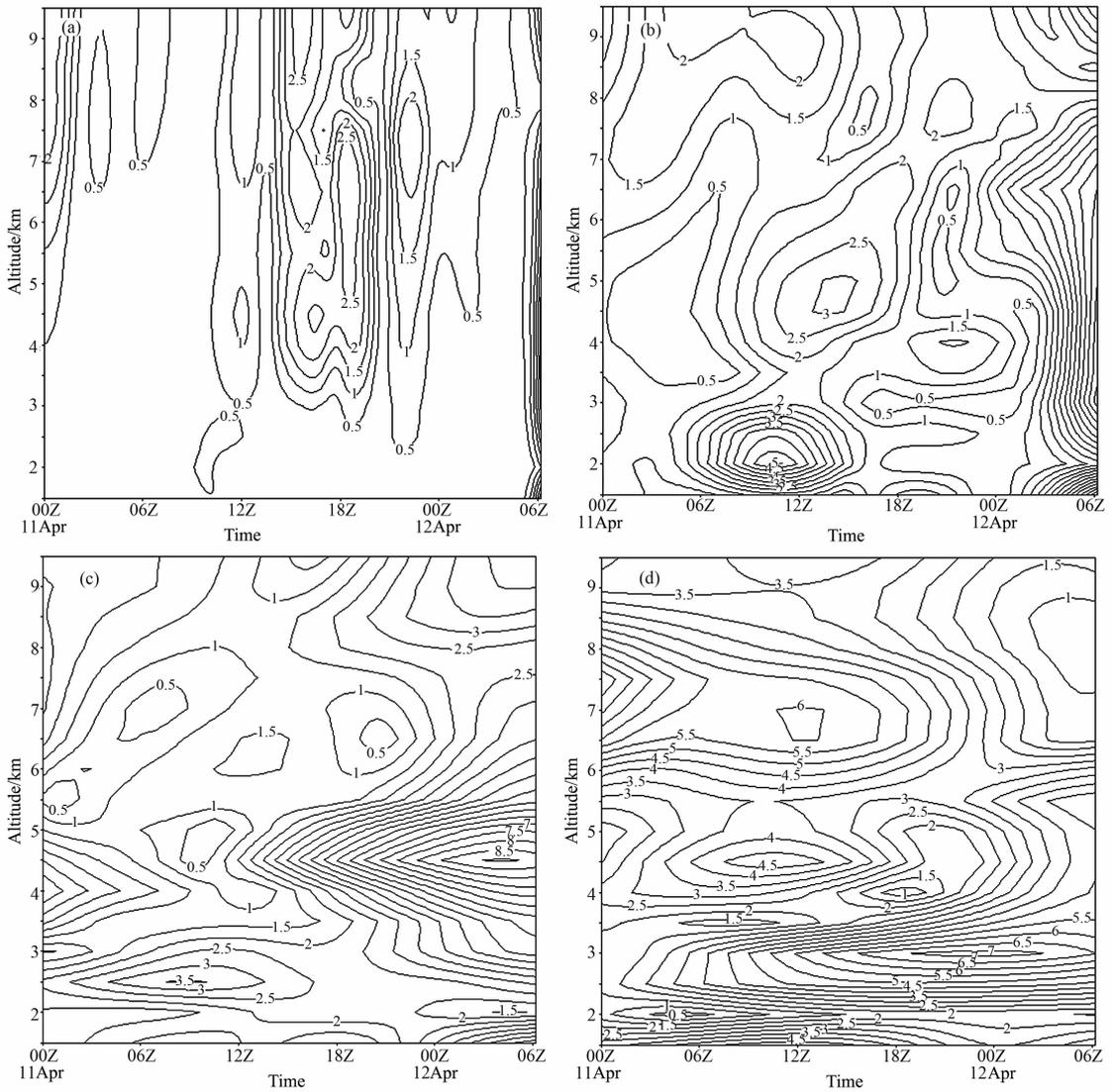


图4 普定县上空位温变化的 Morlet 小波能量谱(单位:  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ )的垂直剖面图

(a)20 min;(b)120 min;(c)280 min;(d)360 min.

Fig. 4 The vertical cross-section of the power spectrum ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ) of wavelet analysis over Puding County

发生强迫上升运动,引起的气流波动,这叫背风波,也是重力波的一种,是一种与地形有关的固定发生源的重力波<sup>[23]</sup>.有关地形对重力波的影响,国内外有很多的研究,如桑建国等<sup>[24,25]</sup>把地形引起的波动分为过山波和背风波.贵州省普定县城海拔高度为1250 m,西北面有海拔为2689 m的乌蒙山最高峰,南部有岑王老山,这种四面环山的地形非常有利于大气重力波发生发展.

根据数值模拟结果,沿着贵州省普定县所处纬度 $26^{\circ}19'N$ 的位温剖面图(图6)可看出,在 $103^{\circ}30'E$ 左右存在着最高山峰,山顶的上空在整个过程中一直维持着一个波动,振幅最大,这应该是桑建国等所称的过山波,它是沿着水平方向衰减,看起来波的位相近似于静止状态,只是波的振幅在不同的风速条件下

有所变化,随着西风增大而增大,与南北向风速相关小.当经一段平缓地形后有下坡时也会使波振幅增大,且地形坡度越陡振幅越大,重力波倾斜向上传播,这样的地形和急流切变风相结合可能是图4b中在近地面强重力波产生和传播的原因.在地势平缓的地方由地形产生的重力波振幅最小.

### 5.3 切变线或锋面

切变线或锋面也是惯性重力波形成的一个重要因子,发生切变的风区往往是非地转运动最强的地方,大气的适应过程就是非地转运动向地转运动转变的过程,它的物理机制一般为重力波的能量频散. Zack等<sup>[26]</sup>利用非线性平衡方程(NBE)来进行运动不平衡的定量诊断,作为气流不平衡的定量指标,诊断有无可能产生大振幅的中尺度重力波.不均匀风

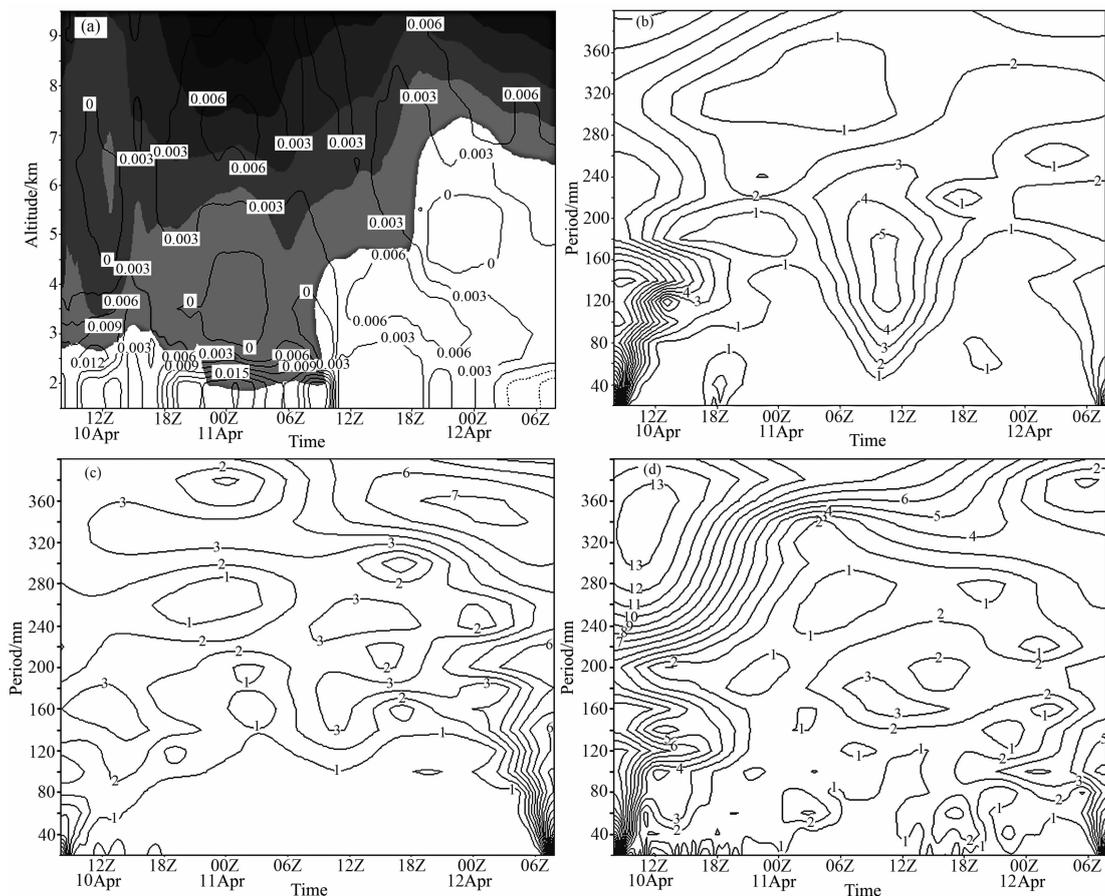


图5 贵州省普定县上空的急流(阴影,  $u \geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )及风速垂直切变(等值线,  $\frac{\partial u}{\partial z}$ , 单位:  $\text{s}^{-1}$ )

时间剖面图(a), 海拔 2 km 处(b)、海拔 3 km 处(c)、海拔 7 km 处(d)的小波能量谱(单位:  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig. 5 The vertical cross-section of jets (shaded contour,  $u \geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the vertical shear (solid line,  $\frac{\partial u}{\partial z}$ , unit:  $\text{s}^{-1}$ )(a), The power spectrum ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ) of wavelet analysis at (b) 2 km, (c) 3 km, (d) 7 km altitude over Puding County

场不仅会影响重力波的结构和强度,还会影响到重力波传播方向<sup>[27,28]</sup>.

这一次降冰雹过程中,有切变线自西北向东南方向移动影响贵州,表现为偏南风 and 偏北风切变(图6).4月10日20时在普定的西面、 $100^\circ\text{E}$ 左右的高空开始出现北风,其他都在吹南风.11日02时切变线移到 $102^\circ\text{E}$ ,08时在低空切变线移到了普定县,切变线由低层到高层为向西倾斜.16时降冰雹时切变线已移到普定县城的东面,切变线以西都吹北风,以东都吹南风,普定县城西面的重力波振幅有明显的减弱.这一次切变线移速基本上是匀速的,整体是由西北向东南移动,这和我们观测到的重力波的来向是相同的,可以推断切变线是重力波的重要波源.

## 6 结 论

(1)地面重力波观测发现:降冰雹前,每隔1~4小时出现一次短周期重力波阵性增强的现象,雹云发展和雹块增长中存在上升气流的多次起伏及其平稳间歇期可能是造成这种现象的根源.降冰雹过程中有超强的重力波出现,强度可增强到十倍以上.降冰雹后重力波强度比降冰雹前明显增强,强重力波周期范围也相应变宽了.

(2)数值模拟分析显示:重力波强度随高度增强.在低空降冰雹前几个小时有强的短周期重力波出现,且强度很强,其中周期稍长的出现早、存在时间

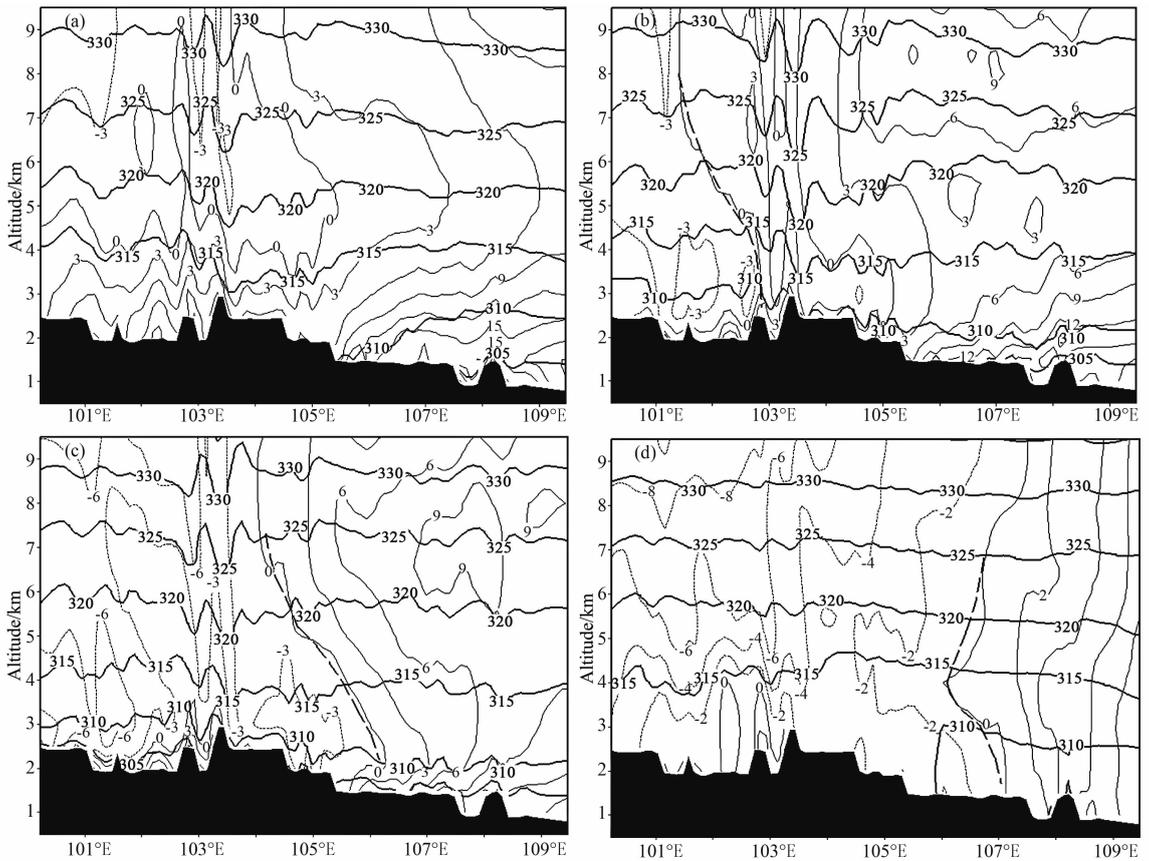


图 6 沿  $26.33^{\circ}\text{N}$  位温和经向风速垂直剖面图(普定县位于  $105^{\circ}45'\text{E}$ )

(a)10 日 20 时;(b)11 日 02 时;(c)11 日 08 时;(d)11 日 16 时.粗实线为位温,单位:K;细虚线为北风,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;细实线为南风,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;粗长虚线为切变线.

Fig. 6 The vertical cross-section along  $26.33^{\circ}\text{N}$  of potential temperature and the  $v$  at (a)20:00 on 10, (b)02:00 on 11, (c)08:00 on 11, and (d)16:00 on 11

The thick solid lines denote the potential temperature(K), the thin dotted lines denote the boreas ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), the thin solid lines denote the notes ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), the thick dashed lines denote the shear line.

长,周期稍短的出现晚、存在时间短.在高空降冰雹前后周期在 120 min 以上的重力波有明显增强的现象.

(3)数值模拟中还得到了重力波垂直方向传播的特征,由于大气耗散的作用造成不同周期重力波传播的差异,短周期重力波更容易向垂直方向传播,而长周期重力波倾向于水平方向传播,而且维持时间较长.这可能就是降冰雹前我们在地面观测到每 1~4 小时出现一次短周期重力波阵性增强的原因,为短周期重力波垂直传播的结果.

(4)强的低空急流和风速垂直切变触发对流系统或湍流的发生和加强,对流或湍流又激发产生周期为 80~200 min 的短周期重力波.高空长周期重力波在降冰雹后周期有明显变短的现象,随高度变化越发明显.

(5)由地形形成的重力波在最高山峰上空振幅最大,不断向东频散出重力波,当经过一段平缓地形

后有下坡时会使波振幅增大,且地形坡度越陡振幅越大,这样的地形和急流及风速垂直切变相结合激发产生了 120 min 左右周期的重力波,该重力波倾斜向上传播,对降冰雹对流过程起到触发机制作用.

本研究的重力波观测是在地面上进行的,由于下垫面很复杂,虽然在观测中已针对这方面做了滤波处理,但还缺乏在不同的下垫面和高度层进行对比观测,要了解重力波与冰雹过程的相互影响机理还需进一步深入的研究.

#### 参考文献(References)

- [1] 许小峰,孙照渤.非地转平衡流激发的重力惯性波对梅雨锋暴雨影响的动力学研究.气象学报,2003,61(6):655~665  
Xu X F, Sun Z B. Dynamic study on influence of gravity wave induced by unbalanced flow on Meiyu front heavy rain. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61(6): 655~665
- [2] 周淑玲,吴增茂.山东半岛一次中 $\beta$ 尺度暴雨的数值模拟分

- 析. 中国海洋大学学报, 2005, **35**(6): 900~906  
Zhou S L, Wu Z M. Numerical simulation analysis of a meso- $\beta$  scale heavy rainfall in the Shandong peninsula. *Journal of Ocean University of China* (in Chinese), 2005, **35**(6): 900~906
- [3] 林曲凤, 吴增茂, 梁玉海. 山东半岛一次强冷流降雪过程的中尺度特征分析. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(6): 908~914  
Lin Q F, Wu Z M, Liang Y H. Mesoscale features analysis of a cold-air outbreak snow storm event in Shandong peninsula. *Journal of Ocean University of China* (in Chinese), 2006, **36**(6): 908~914
- [4] 龚俐利, 吴增茂, 傅刚. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析. 大气科学, 2005, **29**(3): 453~464  
Gong D L, Wu Z M, Fu G. Analysis of the mesoscale characteristics about a severe thunderstorm in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**(3): 453~464
- [5] 卜建春, 陈洪滨, 吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特征. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, **34**(8): 748~756  
Bian J C, Chen H B, Lü D R. Analysis of the characteristics of gravity waves under stratosphere by using the high-resolution data of radiosonde observation. *Science in China Ser. D Earth Sciences* (in Chinese), 2004, **34**(8): 748~756
- [6] 吕洪方, 易帆. 利用瑞利激光雷达和无线电探空仪观测数据对武汉上空重力波特性的研究. 地球物理学报, 2006, **49**(6): 1582~1587  
Lü H F, Yi F. Gravity wave characteristics observed by lidar and radiosonde in Wuhan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1582~1587
- [7] Gossard E E, Sweezy W B. Dispersion and spectra of gravity waves in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1973, **31**: 1540~1548
- [8] Einaudi F, Clark L W, Fua D, et al. Gravity waves and convection in Colorado during July 1983. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**(11): 1534~1553
- [9] 李启泰, 李诗明, 赵彩. 大气重力波布阵探测灾害性冰雹过程的研究. 贵州地质, 2001, **18**(2): 73~78  
Li Q T, Li S M, Zhao C. A study of array detection of atmospheric gravity waves on severe hailstorm process. *Gui Zhou Geology* (in Chinese), 2001, **18**(2): 73~78
- [10] 黄荣辉, 陈金中. 平流层球面大气地转适应过程和惯性重力波的激发. 大气科学, 2002, **26**(3): 289~306  
Huang R H, Chen J Z. Geostrophic adaptation process and excitement of inertial-gravity waves in the stratospheric spherical atmosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**(3): 289~306
- [11] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景. 气象, 2007, **30**(12): 27~31  
Zhang G C. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2007, **30**(12): 27~31
- [12] 冀春晓, 陈联寿, 赵放. 登陆台风 Matsa 维持机理的数值研究. 气象学报, 2007, **65**(6): 888~895  
Ji C X, Chen L S, Zhao F. A numerical study on sustaining of landfalling typhoon Matsa. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2007, **65**(6): 888~895
- [13] 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛等. 一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值模拟. 气象学报, 2007, **65**(4): 561~577  
Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N, et al. A diagnostic and numerical study on a rainstorm in South China triggered by northward-moving tropical system. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2007, **65**(4): 561~577
- [14] 廖雪萍, 覃卫坚, 唐炳莉等. 广西近 50 年暴雨日数变化的小波分析. 气象, 2007, **33**(12): 39~45  
Liao X P, Qin W J, Tang B L, et al. Wavelet analysis of variation of rainstorm days in Guangxi in recent 50 years. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2007, **33**(12): 39~45
- [15] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社, 2005. 208~244  
Wu H B, Wu L. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2005. 208~244
- [16] Gokhale N R. Hailstorms and Hailstone Growth. Albany: State University of New York Press, 1975
- [17] 李启泰, 谢金来, 杨训仁. 灾害性冰雹过程的重力波演变特征. 气象学报, 1993, **51**(3): 361~367  
Li Q T, Xie J L, Yang X R. The dynamic characteristics of gravity waves during severe hailstorm process. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1993, **51**(3): 361~367
- [18] Fritts D C, Luo Z. Gravity wave excitation by geostrophic adjustment of the jet stream. Part I: Two-dimensional forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 681~697
- [19] Scinocca J F, Ford R. The nonlinear forcing of large-scale internal gravity waves by stratified shear instability. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 653~672
- [20] Todd P Lane, Robert D Sharman, Terry L Clark, et al. An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1297~1321
- [21] In-Sun Song, Hye-Yeong Chun, Todd P Lane. Generation mechanisms of convectively forced internal gravity waves and their propagation to the stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1960~1980
- [22] 覃卫坚, 寿绍文, 李启泰等. 影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究. 高原气象, 2007, **26**(3): 519~524  
Qin W J, Shou S W, Li Q T, et al. Research on the dynamics factors influencing development of inertial gravity waves. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26**(3): 519~524
- [23] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 2003. 50~71  
Shou S W, Li S S, Yao X P. Mesoscale Meteorology (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2003. 50~71
- [24] 桑建国, 李启泰. 小尺度地形引起的切变重力波. 气象学报, 1992, **50**(2): 227~231

- Sang J G, Li Q T. Gravity waves induced by small scale terrain. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1992, **50** (2):227~231
- [25] 姜瑜君, 桑建国, 刘辉志等. 夜间稳定边界层中小尺度地形激发的形式阻力和波动阻力. *地球物理学报*, 2007, **50**(1):43~50  
Jiang Y J, Sang J G, Liu H Z, et al. Wave drag and form drag induced by small scale terrain in the nocturnal stable boundary layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50** (1):43~50
- [26] Zack J W, Kaplan M L. Numerical simulation of the subsynoptic features associated with the AVE-SESAME I Case. Part I: The preconvective environment. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**:2367~2393
- [27] 丁 锋, 万卫星, 袁 洪. 耗散大气中水平不均匀风场对内重力波传播的影响. *地球物理学报*, 2001, **44**(5):589~595  
Ding F, Wan W X, Yuan H. The effect of inhomogeneous winds on internal gravity wave propagation in a dissipative atmosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5):589~595
- [28] 王 贇, 谈哲敏. 旋转流体中的二维惯性重力波-涡相互作用. *地球物理学报*, 2007, **50**(4):1040~1052  
Wang Y, Tan Z M. Inertia gravity waves-vortex interaction in two-dimensional rotating fluid. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(4):1040~1052

(本文编辑 何 燕)