

# 灾害性冰雹过程的重力波演变特征\*

李 启 泰

(贵州省环境保护科学研究所, 贵阳550002)

谢金来 杨训仁

(中国科学院声学研究所, 北京100080)

## 提 要

在灾害性冰雹过程的不同阶段, 大气中有不同特征的重力波出现。使用重力波周期-振幅谱的动态分析方法, 把冰雹过程从不同的发展阶段加以考察, 发现了一些雹云发展和重力波演变特征之间的联系。它们有助于找到一种对灾害性冰雹过程作出较长时效临近预报的方法和进行深入研究的线索。

关键词: 灾害性冰雹过程, 重力波, 防雷。

## 1 引言

强对流天气过程中重力波的特征和它与强对流的关系, 是一个长期来虽受重视但却研究得不够深入的问题。本世纪初人们已注意到云场和降水场的波状结构可能与大气重力波有关。60年代以来有不少理论分析和数值模拟结果。Hung 在70年代对电离层的探测研究发现龙卷接地之前1小时有周期为10—20分的电离层重力波激发<sup>[1,2]</sup>。Koch (1985年) 指出高空急流区下面的切变不稳定气层内产生的重力波对强对流的激发有影响<sup>[3]</sup>。由于过去的研究大都是在一个长达数小时的期间对重力波加以平均的或综合的处理, 没有把强对流和重力波的关系放在一个实际上是剧烈变化的过程中进行动态考察, 从而忽略了这种关系在强对流发展的不同阶段所存在的巨大差别, 以致国际学术界长期以来对强对流过程中的重力波特征的看法很不相同。一些人认为波周期很长(1—4h), 另一些人认为波周期很短(2—30min)。所以直到80年代后期, Einaude 在一项比较深入的强对流与重力波的关系的动力学机制的研究结果中, 仍然认为无法确切地了解究竟是重力波激发了强对流还是强对流激发了重力波<sup>[4]</sup>。

雷暴到来时的地面气压波动是人们熟知的。早期探测报导过雷暴到来时, 有数百帕的气压下降<sup>[5]</sup>, 还有不少观测指出与飑线系统相伴的大多是强烈下曳冷气流在边界层内造成的气压上升<sup>[3,13]</sup>。这些是一种明显的由于强对流激发而产生的重力波, 它们一般都具有较强的振幅( $10^1$ — $10^2$  Pa)和很宽的周期范围(几分—几小时), 主要集中在几分—几十分的较短周期, 水平波速10—50m/s(在电离层为100—200m/s<sup>[11]</sup>), 水平波长50—200 km。

\* 1992年9月19日收到原稿, 1992年11月25日收到修改稿, 该文系国家自然科学基金资助项目。

70年代以来,强对流重力波的研究还集中于寻找另一种不是作为被激发的产物,而是作为激发强对流的动因的重力波机制。虽然20年来进展不大,但大多数研究结果都表明在强对流爆发性增长前,即有一种较长周期(1—4h)、振幅 $100—10^2\text{Pa}$ 的重力波出现,其水平速度为 $10—30\text{m/s}$ 、波长 $50—500\text{km}$ 。这一种波的产生源主要包括:

**地形** 高度差较大的山麓地带常是强重力波的源区,同时也是强烈灾害性风暴的发展区。世界上许多冰雹灾害严重的地区都具有这种地形特点<sup>[6]</sup>。

**高空急流** 高空急流出口区下面的气层中存在很强的风垂直切变,在理查孙数(Ri)小于0.25的切变不稳定气层中容易产生大振幅的切变重力波<sup>[7,8]</sup>。

**低压系统** 气旋、台风、锋面、切变线、辐合区等天气尺度系统在其生命期内经历的地转平衡调整过程中都有重力波产生<sup>[8,9,15]</sup>。

**中尺度强对流** 强对流风暴在其垂直发展过程中可以在具有不同稳定度的气层内激发大振幅重力波,这些重力波又可成为另一批对流系统的激发因子<sup>[10]</sup>。

此外,在湿度不连续的干线(dryline)上也有重力波激发<sup>[11]</sup>。

上述两种与强对流有关的中尺度重力波生成以后,由于频率很低,通常都在对流层内沿着某一稳定层或在波导内水平传播,也有少部分频率高于大气声学截止频率的波(例如闪电产生的次声—重力波和在平流层内对流激发的强重力波)可能垂直上传至电离层,引起电离层振荡<sup>[12]</sup>。

在本文中我们将较详细地讨论灾害性冰雹过程中,从酝酿前期到降雹的整个期间,上述两种重力波的动态谱特征。

## 2 探测及数据处理方法

采用高灵敏度( $10^{-2}\text{Pa/mv}$ )、宽频带响应( $10^{-1}—10^{-3}\text{Hz}$ )的电容式微压波探头。大气压力数据采样频率不少于5次/min。按时间每向前10分钟进行一次不同波周期(2—180min)的傅里叶分析,计算出在该时间到达的波振幅和周期,可直接从微机输出打印或在屏幕显示连续变化的重力波周期—振幅—时间三维谱,即动态谱。同时为便于现场监测,微压波信号还输入笔式记录仪,可随时观察压力—时间曲线。全部探测记录及计算都可长时间连续进行。

使用多个微压波探头布成点距1—3km的重力波探测阵,可以根据相关波列到达各测点的相位差计算波速和波源所在方向。进一步,又在相距数十公里的地方各布设一个探测阵,则可根据各个探测阵测算的波源方向定出波源位置。这一方法可连续不间断地跟踪重力波及其波源的演变。

## 3 灾害性冰雹过程中重力波的动态谱分析

我们首先讨论灾害性冰雹过程的具体个例,然后将其特点与弱冰雹过程、一般雷暴过程以及静稳天气形势的重力波活动进行比较,从而得到结论。

### 3.1 灾害性冰雹过程的重力波动态谱

1991年6月24日在河北省满城县西南方的完县境内发生的一次灾害性冰雹,受灾面积 $7500\text{ha}$ ,果树等直接经济损失数十万元。降雹层厚 $30—50\text{mm}$ ,最大雹块直径 $25\text{mm}$ 。

满城县重力波测站距降雹区约15 km,记录了这次降雹过程的重力波资料。图1是根据当日04—17时的记录计算得到的重力波动态谱。

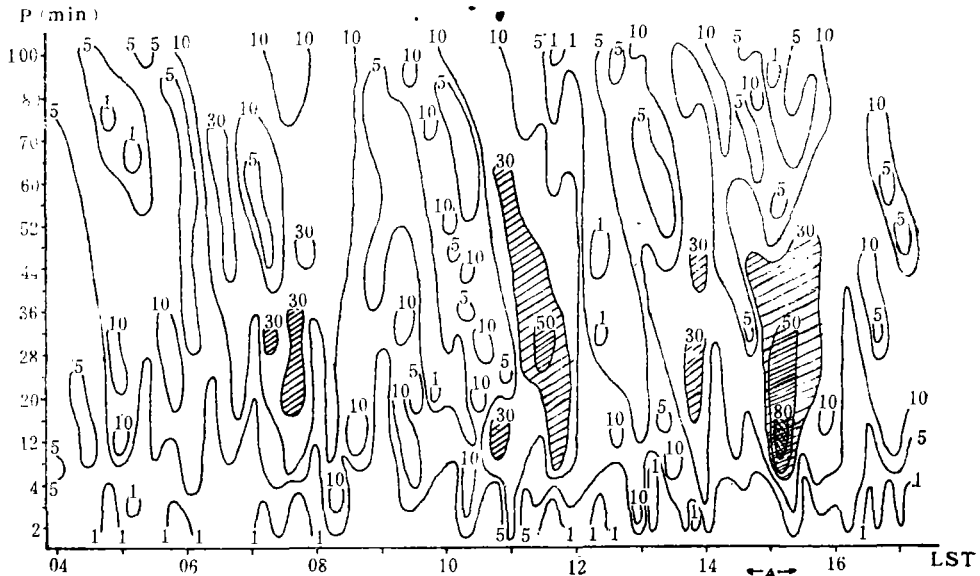


图1 1991年6月24日完县灾害性冰雹过程重力波动态谱  
(纵坐标:不等间隔的波周期(min),横坐标:波到达时间(地方标准时),  
等值线:压力振幅(Pa),“△”及箭头标记为降雹起止时间)

图1包括了一次灾害性冰雹过程的几个主要阶段中大气重力波的特征。

**3.1.1 酝酿前期** 早上07—08时,即在降雹前6小时,有振幅达30 Pa的波出现,其周期范围为20—80 min。这种波的产生可能与西面太行山区的地形有关,我们在北京、贵阳等山麓地区探测的许多强对流个例中,过程酝酿前期都有这种波出现,灾害性强冰雹过程尤其明显。

**3.1.2 对流早期** 中午11—12时,又有一次宽周期范围(8—65 min)、振幅30 Pa以上的波列,其中周期24—35 min的波振幅达50 Pa以上。当时天空中仅有少量中等发展的积状云。这种重力波超前于雹云猛烈发展3—4小时出现,可见它不是强对流发展的结果而更可能是强对流过程的早期激发因子。

**3.1.3 对流发展期** 14时已有浓积云发展,此时又出现一次主要周期为16—18 min、振幅30 Pa以上的波列。此后对流云群继续发展,重力波活动主要在长周期范围(70 min以上)。设在满城县的测雨雷达在14时10分—14时20分观测到最大雷达回波强度仅30 dBz,但14时40分即开始强烈的降雹。

**3.1.4 降雹** 14时40分—15时25分完县降雹,此时出现了整个过程中振幅最大(80 Pa以上)、中心周期10—18 min的重力波。从图1上还可看出这一时间周期3—5 min的短周期波(对流层顶以上的大气特征浮力振荡周期)振幅达到40 Pa,表明这一强烈发展的雹云在很短的时间里已进入平流层内并在其中激发了很强的浮力振荡。

Uccellini(1975)<sup>[9]</sup>曾明确指出周期为2.7—3.0 h、振幅50—250 Pa的重力波是一次产生龙卷风和冰雹的强风暴的激发因子,但由于他采用了周期为2—4 h的带通滤波,滤去了

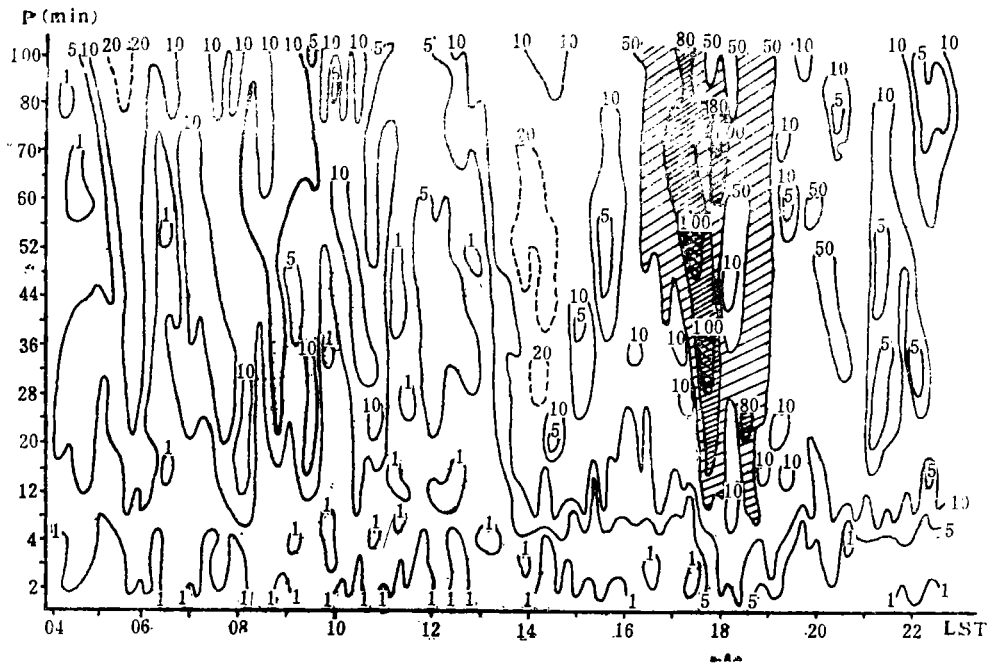


图 2 1991年 8月10日北京弱冰雹过程重力波动态谱(说明同图 1)

周期短于90min的重力波,因而未能发现这种重力波的幅度变化在强对流发展中具有的特征性意义。Koch(1985)<sup>[3]</sup>虽然也肯定了强对流激发过程中有重力波(周期2—3h,振幅60Pa)的贡献,但同样使用了频率极低的通带滤波,采样率仅为12次/h,所以也没有注意到周期为60min以下的较短周期大振幅波。从我们的结果可以发现,国外普遍认为是强对流激发因子的长周期重力波实际上很可能是间隔为1—2h的一群较短周期(10—30min)大振幅重力波的间歇发生。60年代以来,不少观测事实清楚地表明强烈冰雹云的发展是以垂直气流一次又一次地加强并达到更高的高度为特征的<sup>[14]</sup>。Gokhale特别强调上升气流的多次起伏及其间的平稳间歇期对雹云发展和大雹块增长的重要性<sup>[6]</sup>。看来,强对流过程间歇性增强的这一特征在重力波的信息中也得到表现,而且在雹云生成以前就已经出现了。

### 3.2 弱冰雹过程的重力波动态谱

弱冰雹过程指未发生明显灾害和未发现直径大于20mm雹块的降雹过程,其重力波动态谱与强冰雹过程有类似的特征,即在强对流酝酿前期、对流早期和对流发展期都有几时间隔为1—3h的大振幅重力波(周期为几分—几十分)间歇地出现。

图2是1991年8月10日北京一次弱冰雹过程的重力波动态谱,这次冰雹过程未见明显雹灾,但出现飏线,北京降雹时间为18时前后。图2表明在当天早上(07时以后)即不断有间隔为1—4h的较强重力波出现,周期范围20—70min,振幅逐渐增大,至14时达到20Pa,这已预示将有强对流发生。4h后雹云发展并出现飏线大风和冰雹。同时激发出很强的重力波,在30—90min周期范围内的波振幅达到100Pa以上。可见弱冰雹过程与灾害性冰雹过程的重力波活动存在动态的相似性,但两者在前期和对流发展期的振幅相差一倍,前者不超过20Pa,后者达30—50Pa甚至更强。

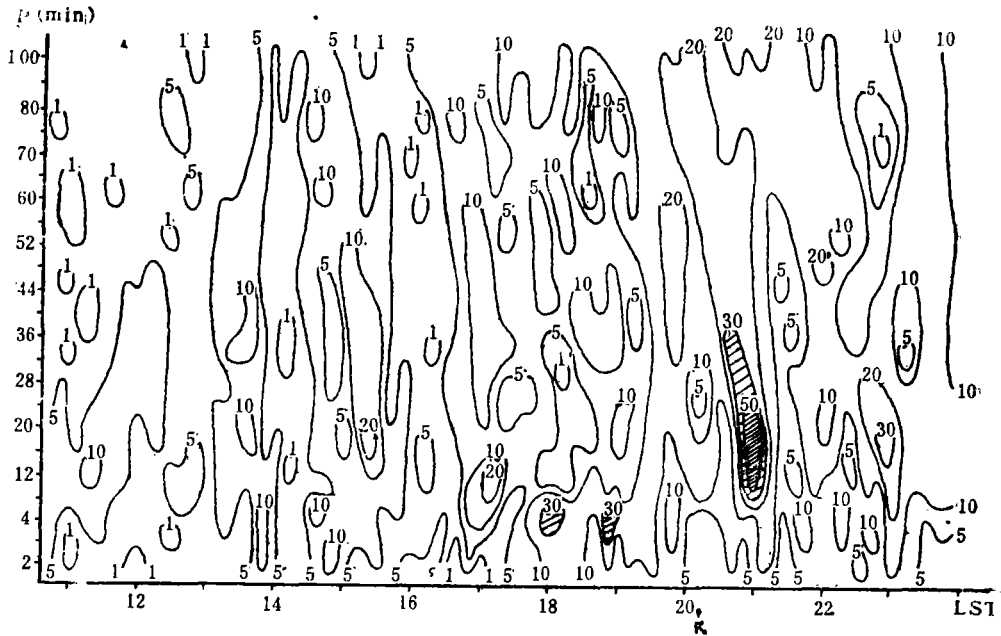


图 3 1991年6月15日满城强雷暴过程重力波动态谱  
(雷暴及箭头标记为雷暴开始时间,其它说明同图1)

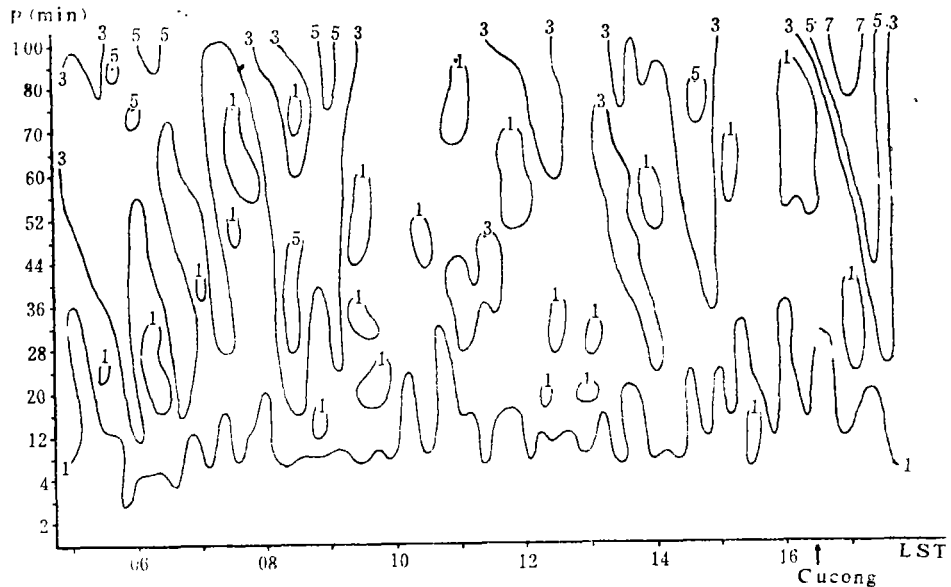


图 4 1986年10月8日贵阳弱不稳定天气的重力波动态谱  
(“Cucong”及箭头标记为浓积云发展时间,其它说明同图1)

### 3.3 一般雷暴过程的重力波动态谱

人们经常关心的是雷暴过程中是否会产生灾害性冰雹。我们发现一般雷暴过程的重力波活动特征与冰雹过程,尤其是灾害性冰雹过程是很不相同的。图3是河北省满城县一次无降雹的较强雷暴过程的重力波动态谱。

这一次强雷暴过程的重力波活动也经历了与冰雹过程类似的间歇性波列激发的过程。但这一系列波周期都较短(20min以下),振幅也较小(20 Pa以下)。值得注意的是 17 时 40 分—19 时 40 分延续近 2h 的短周期(4min 以下)大振幅波动表明强对流受到了高空强逆温的阻挡,因为实际大气中只有逆温强度达 2 K/100m 的很稳定的气层中,才能维持长时间周期小于 2min 的振荡。

### 3.4 弱不稳定天气的重力波动态谱

所谓弱不稳定天气指的是有浓积云发展但未出现雷暴的天气。图 4 表明在一般弱不稳定天气中大气重力波活动较弱。在这种较弱的背景波动中,08—09 时振幅达到 5 Pa 的波与秋季日出后边界层上部逆温层消散时的振荡有关,这一类重力波在冬半年经常出现。

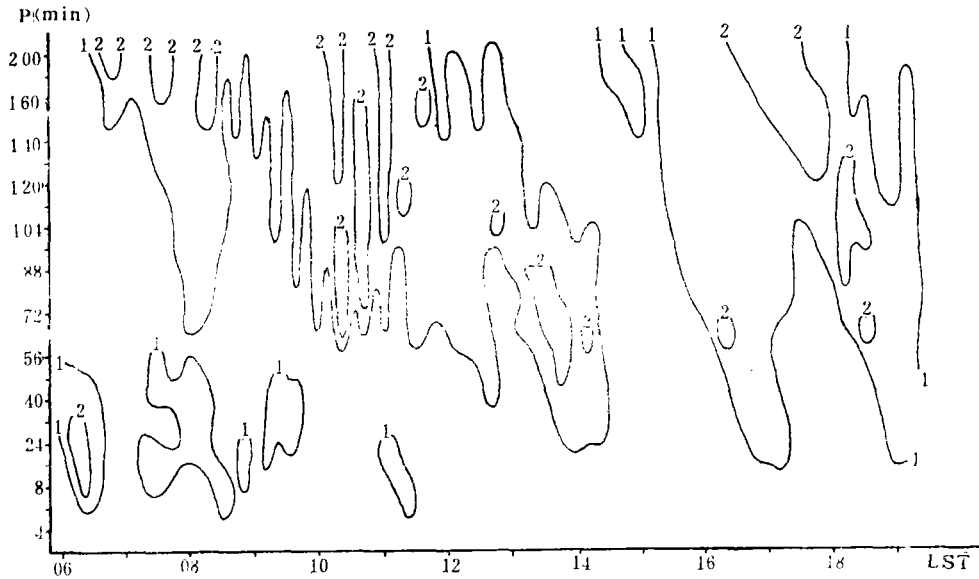


图 5 1986 年 6 月 3 日贵阳很稳定的天气的重力波动态谱  
(说明同图 1)

图 4 中从 15 时以后,80min 左右的周期范围内出现 5 Pa 的波,随之 16 时 20 分开始有浓积云发展,16 时 30 分云底出现悬球状结构,但未发生雷暴。此时图 4 上出现最大振幅仅 7 Pa 的长周期波。这说明一般浓积云发展过程中重力波活动的强度比冰雹过程小一个量级以上。

### 3.5 很稳定的天气的重力波动态谱

图 5 是夏季很稳定天气的情况。可以看出,除了日出以后和午后有一些很小的波动外,全天周期在 200min 以内的大气重力波振幅都不超过 2 Pa,这和有强对流活动的情况的区别是很明显的。

## 4 结论

灾害性冰雹是一种中尺度强对流过程,它与天气尺度过程关系密切。本文结果表明

天气尺度过程中产生的重力波可以激发中尺度强对流过程, 而一旦强对流系统进入自主发展阶段, 又激发出另一种周期较短但振幅更大的重力波。在重力波的周期-振幅动态谱上, 这种关系得到清楚的反映。灾害性冰雹过程的重力波活动特征是: 在降雹前数小时即有大振幅(30Pa以上)、宽周期谱的重力波列间歇出现, 它表明天气尺度的不稳定性对强烈雹暴有着重大影响。较弱的降雹和一般雷暴过程则没有这种强烈的前期重力波活动。这一结论对冰雹动力学研究和冰雹预报、人工防雹等应用都是有意义的。但由于灾害性冰雹探测个例不多, 本文的结论还需要继续加以验证, 而且有关研究还应该重视不同探测手段和资料的配合。

致谢: 本项研究是在国家自然科学基金资助下进行的, 并得到中国气象科学研究院人工影响天气研究所和河北省满城人工防雹指挥部的大力协助, 特此致谢。

### 参考文献

- [1] Hung R J. Ray tracing of gravity waves as a possible warning system for tornadic storms and hurricane. *J Appl Meteor*, 1978, 17:3-11.
- [2] Hung R J. Case studies of gravity waves associated with isolated tornadic storms on 13 January 1976. *J Appl Meteor*, 1979, 18:460-466.
- [3] Koch S E, et al. Observed interactions between strong convection and internal gravity waves. Preprints at the 14th Conference on Severe Local Storms, 1985, 198-201.
- [4] Einaude F, et al. Gravity waves and convection in Colorado during July 1983. *J Atmos Sci*, 1987, 44:1534-1553.
- [5] Brunk I W. The pressure pulsation of April 11, 1944. *J Meteor*, 1949, 6:395-401.
- [6] Gokhale N R. Hailstorms and Hailstone Growth. State University of New York Press, Albany, 1975.
- [7] Gossard E E, Hooke W H. Waves in the Atmosphere. Developments in Atmospheric Sciences II. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, 1975.
- [8] Koch S E. Toward operational forecasting and detection of weather-producing gravity waves. Preprints at Conference on Mesoscale Analysis and Forecasting, Canada, 1987, 387-392.
- [9] Uccellini L W. A case study of apparent gravity wave initiation of severe convective storms. *Mon Wea Rev*, 1975, 103:497-513.
- [10] Miller D A, et al. Mesoscale conditions for the severe convection of 3 April 1974 in the east-central United State. *J Atmos Sci*, 1980, 37:1041-1055.
- [11] Koch S E. Mesoscale gravity waves as a possible trigger of severe convection along a dryline. Ph. D. thesis, University of Oklahoma, Norman, 1979, 195.
- [12] Georges T M. Infrasonic from convective storms: Examining the evidence. *Rev Geophys Space Phys*, 1973, 11:571-594.
- [13] Doviak R J, et al. A thunderstorm-generated solitary wave observation compared with theory for nonlinear waves in a sheared atmosphere. *J Atmos Sci*, 1991, 48:87-111.
- [14] Battar L J. Doppler radar observations of a hailstorm. *J Appl Meteor*, 1975, 14:98-108.
- [15] Stobie J G, et al. A case study of gravity waves—convective storms interaction: 9 May 1979. *J Atmos Sci*, 1983, 40:2804-2830.

# THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GRAVITY WAVES DURING SEVERE HAILSTORM PROCESS

Li Qitai

*(Guizhou Institute of Environmental Science, Guiyang, 550002)*

Xie Jinlai Yang Xunren

*(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing, 100080)*

## Abstract

Atmospheric gravity waves with different characteristics occur frequently in different stages during a severe hailstorm process. Using the dynamic analysis method of the period-amplitude-time spectrum, some definite relations between the development of hailstorms and characteristics of atmospheric gravity waves are found. Results provided some leads for further studies of hailstorm dynamics and supplied available method and indicators to judge the hailfall occurring and its damage level in the operations of hail suppression.

**Key words:** Severe hailstorm process, Gravity wave, Hail suppression.