

# 一次冷锋后飑线的大振幅重力波特性分析\*

陆汉城 吕梅 何齐强

(空军气象学院)

## 提 要

本文用较密集的观测资料分析江淮地区一次冷锋后的飑线过程。分析表明飑线的生成和发展与中尺度冷涌活动有关,它具有大振幅重力波的特征。重力波在传播过程中于大别山东侧形成边缘锋,边缘锋的传播更类似于沿岸 Kelvin 波,大振幅重力波在边界层特征更明显。这类被地形拦截的大振幅重力波是江淮地区冷锋后飑线的一种可能激发机制。

## 一、引 言

飑线是一类中尺度强对流天气系统,人们对飑线发生环境场条件及飑线演变的结构模式已做了大量研究<sup>[1]</sup>,这为动力分析和数值模拟奠定了物理基础。我们曾用华东中尺度天气试验及尽可能收集的资料分析了一类副热带暖区飑线的结构特征,并给出了江淮暖区飑线的三维中尺度天气学概念模式<sup>[2]</sup>。对于华东地区冷锋后飑线结构及演变的分析也已作了研究,关于这一类飑线形成和发展的机制,有多方面的解释。边界层过程对飑线前的辐合形成显然有重要作用。例如,干线认为是飑线形成的可能机制,这是因为干线是边界层中干暖和冷湿气团间的界面,根据 Rhea(1966)<sup>[3]</sup>的分析,美国 1959—1962 年间春季中 60% 的新的雷达回波出现在干线 200 哩区域内,干线后来发展为飑线;美国的干线与有关的飑线是近乎静止的。虽然干线不经常和地面最大辐合带一致,但对对流运动有重要影响。积云带常出现在干线地区,并离开干线向前传播,然后又在线附近发展新的积云带,干线起着对流活动扰动源的作用,这与 Schaeffer(1974)<sup>[4]</sup>测得的与重力波传播有关的飑线不同。

本文对华东中尺度天气试验期 1983 年 4 月 28 日一次冷锋后飑线过程进行观测研究,它具有较好的时空分辨率资料(飑线活动期 90km 空间距、3 小时时间距的探空资料,1 小时时间距、30~40km 空间距的地面探测报告),特别还有 0~1500m(垂直间距 300m)的边界层资料,又收集了试验区各测站地面天气报告及 50 多个站的温、压、湿、风的自记

本文 1990 年 8 月 8 日收到,10 月 23 日收到修改稿。

\* 本文是国家自然科学基金资助项目。

录,为分析边界层物理过程提供了基础。

## 二、干线及边缘锋的形成

### 1. 干线的形成

1983年4月28日13时冷锋移入江淮流域,以大约50km/h的速度向东南方移动。这条东北—西南向的冷锋东段移动快,西段受大别山等地形阻挡移速减慢,锋后冷空气受到拦截。图1是冷锋13、16、19时的位置,主冷锋后,在34°N附近又有新的副冷锋形成,它在边界层表现为:锋后露点温度陡降,锋区以露点梯度为主并伴有弱的温度梯度,它具有干线特征,用逐时滑动差表示露点和温度的变化,干线后露点逐时滑动差最大值11K,而温度差为6.4K,干线附近的露点梯度达10K/50km。干线形成后,有两个露点差值中心,并均以50km/h的速度分别从河南省向偏东、偏东南方向移动。从图1可以看出干线向东南方向移动时受到山脉的拦截,这表现在13时、14时干线呈舌状伸向大别山东侧,以后,干线呈南北向沿黄山山脉北坡向东传播,图中强对流雷达回波带分别与主冷锋飚线对应,干线几乎与主冷锋垂直,沿锋后低空气流的方向向东传播。

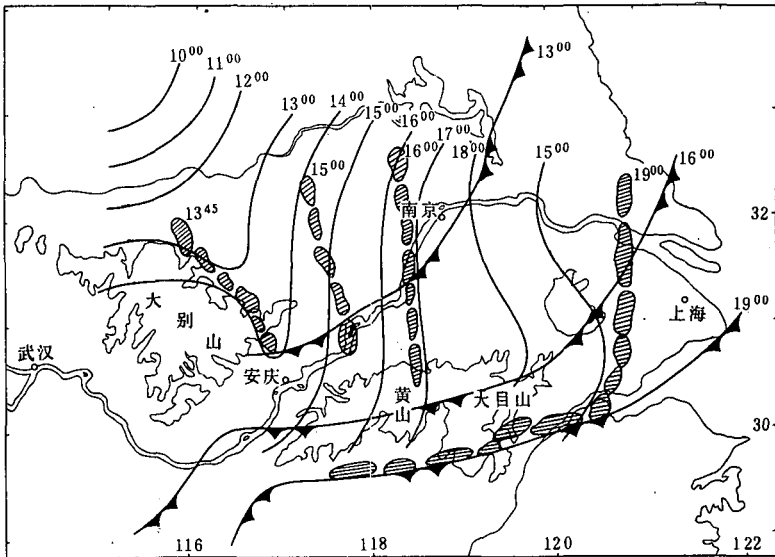


图1 冷锋和干线动态图(1983年4月28日)

(细实线为干线,阴影区为雷达回波)

### 2. 边缘锋的形成

由于主冷锋及干线受到地形阻挡,它们后部的冷空气被迫沿地形边缘流动,冷空气活动具有冷涌特征,它在沿山坡反时针移动时与沿长江河谷的西南暖湿气流在山坡东侧汇合形成很强温度梯度(5K/100km)的边缘锋,锋区的露点梯度十分明显(10K/100km)。

### 三、被地形拦截的冷涌及边缘锋结构

#### 1. 冷涌的温、压、湿特征

中尺度冷涌除参照一般的定义外,还考虑中尺度运动特点,引入这样的要求:即冷涌有两个发展阶段。(i)第一阶段应有气压的涌升,有类似于重力波的活动;(ii)伴随着锋面过境有露点温度的下降。

我们用冷锋和干线移动路径上合肥、芜湖、溧水、苏州四站的要素逐时滑动差考察冷涌特征。图2给出冷涌过合肥时,地面温、压、湿、风的变化。(i)有2—3次气压涌升,1小时涌升值为2~4hPa;(ii)气压涌升伴有温度和露点温度的陡降,1小时变温1~6K和变露点值达6K以上;(iii)地面及边界层内,出现几次偏北大风,风速达17m/s以上。温、压、湿的峰谷与大风出现时间有位相差,但每次气压涌升与大风的位相差并不相同,少则几十分钟,长的为1小时左右。由此可见,锋和干线后的冷空气具有明显的冷涌特征。

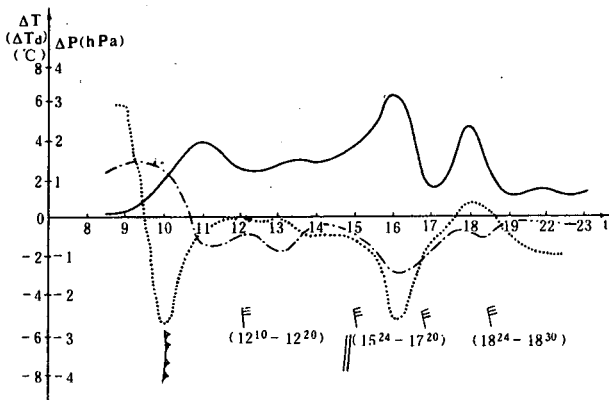


图2 冷涌移过合肥站的气象要素演变曲线图  
(双竖线为干线)

#### 2. 冷涌的风场特征

图3是冷涌移过合肥站风廓线。在冷空气到达之前,沿大别山东侧至黄山南侧有一股边界层西南气流带(急流轴位于900—1200m,风速为25m/s),冷涌到达合肥是13时,以后边界层转为西北风,随着冷涌的推进,最大风速中心从1000m抬升到1500m,风速增大到29m/s。冷涌在15—16时移到芜湖等地时,具有相同的变化;16—19时,溧阳站1000m高度上的西北风达30m/s。

#### 3. 冷涌的重力流特征

风廓线变化上可见冷空气推进的鼻状结构十分明显。曾庆存<sup>[5]</sup>(1979)从理论上指出快波的消长与环境风的垂直切变有关。图4是相对于冷涌运动的边界层时空剖面图,在冷

涌前部重力流结构很显著,其前部凸起的鼻状最前端位于 600m 高度上,冷空气顶约在 1200—1500m,冷空气头前暖空气侧的上升运动达 16cm/s,在冷空气头的后部,变成较弱的下沉运动,由于重力流中层结稳定(边界层内  $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} > 0$ ),并且具有强的风垂直切变(边界层内风切变达 30m/s · km 以上),这就十分有利于重力波的活动。

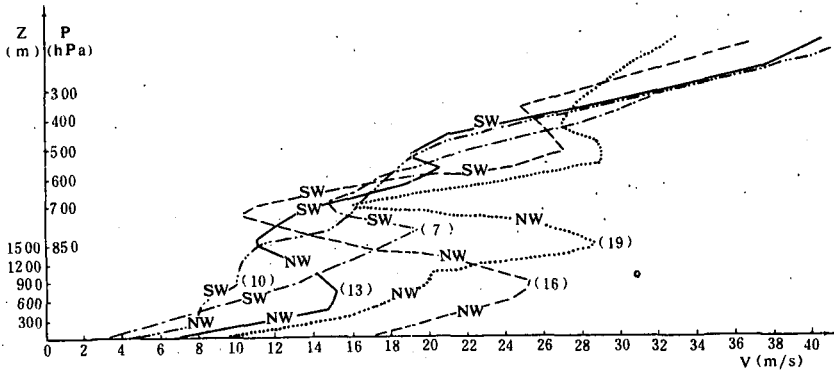


图 3 合肥站的风廓线(字母是风向,数字是时间)

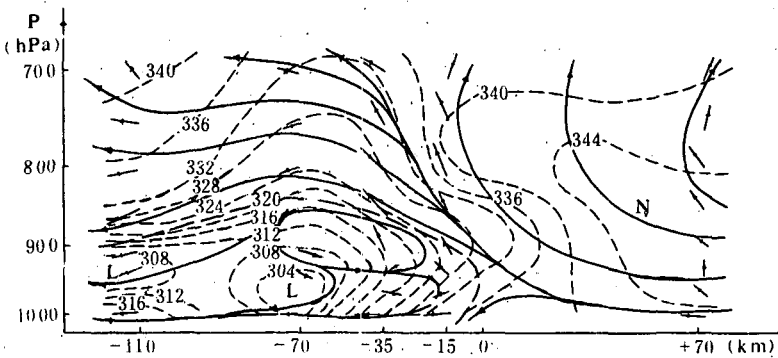


图 4 冷涌前部重力流边界层结构(虚线是等  $\theta_{se}$  线,箭矢线为流线)

#### 4. 边缘锋水平场

边缘锋可由滤波后的 900m 高度上扰动风场及海平面气压场变化所描述。由图 5 可见,13 时一个中尺度高压移近大别山东北侧,替换该位置上原来的中低压,该中高压伴有中气旋,其前沿的偏北风被地形阻挡,明显的冷舌伸向山脉东侧。边缘锋是冷锋在边界层的表现,当后部不断有冷空气移到大别山时与前述锋后冷空气沿基本相同的路径以涌浪形式类似于 Kelvin 波传播,显然,这是中尺度的重力波。16 时(图略)边缘锋和中高压及中气旋沿黄山山脉北侧东移,边缘锋后的几次冷涌叠加,水平温度梯度方向几乎与山脉走向平行,因此边缘锋成南北向,锋区温度梯度增大到 10K/100km 以上。在边缘锋初生的 13 时沿大别山东部有一条明显的对流带,16 时对流带发展为飚线。

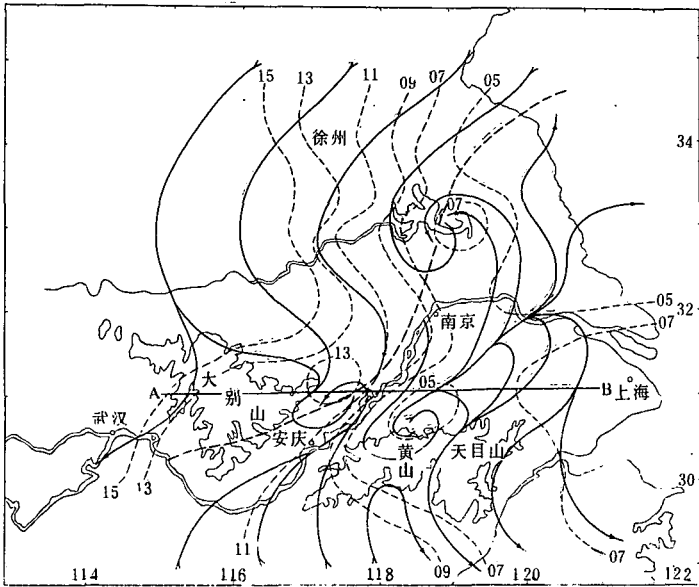


图5 边缘锋形成、传播时的流场和气压场  
(虚线是海平面等压线, 箭矢线为流线)

## 5. 边缘锋锋区特征

由垂直于边缘锋移动方向的垂直剖面图(沿图5中的AB直线)上可见,边缘锋形成阶段(图6a)较强冷空气厚度在1500m以下,水平尺度约为100km,强的冷空气没有延伸到山脉东侧以外的地区,在山的东侧有强的湿位温( $\theta_{se}$ )梯度(10K/100km以上),它对应于边缘锋。下沉运动在边缘锋后100km处,中心扰动值为 $-3\text{cm/s}^*$ 几乎与冷中心重合。锋区附近上升运动的速度在边界层内随高度增加而增加,最大扰动上升速度在1500m高度上为5cm/s。这种很强的非地转运动是对流运动的重要原因,在暖空气侧垂直运动相对弱一些,扰动上升速度为2cm/s,边缘锋前的下沉运动,扰动速度为 $-3\text{cm/s}$ ,该时刻的对流活动带已由雷达回波所证实。边缘锋的传播阶段(图6b),冷空气伸展高度已超过了1500m,水平尺度扩展到200km左右,表明冷空气厚度增加,且已延伸到山脉东侧,冷空气强度加大,该时刻的干线即边缘锋,是飑线发生的扰动源,边缘锋前1200—1500m高度上有很强的 $\theta_{se}$ 增值区,使锋区的 $\theta_{se}$ 梯度加大到15K/100km以上。此时,锋区最大上升运动扰动值为6~8m/s,锋后下沉运动仍与冷中心配合,扰动值达 $-3\text{cm/s}$ ,强对流区与后面分析的非地转风大值区一致,显然,由于边缘锋附近中尺度环流的增强激发了飑线。

\* 本文的垂直速度计算采用o'brien方法,扰动值用扰动的速度场计算。

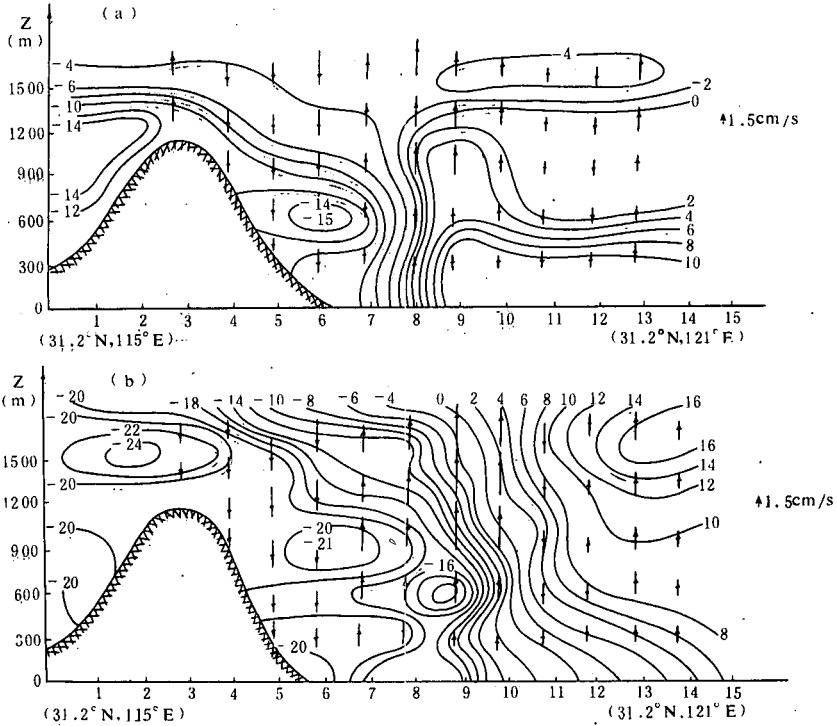


图 6 冷涌移动路径上的垂直剖面图

(a)13 时 (b)16 时

(细实线是  $\Delta\theta_e$  线; 箭矢线代表垂直运动; 图中箭矢线长短代表大小, 单位为 cm/s)

### 四、大振幅重力波传播特征

#### 1. 大风传播特征

前面已经用单站风压场变化说明了冷涌的大振幅重力波性质, 现进一步用水平风场演变描述这类波的传播特征。

利用江淮地区数百个测站地面测风记录, 看到冷涌和干线过境时, 不少测站有数次大风出现, 风的阵发性很强。标出各测点大风 ( $>17\text{m/s}$ ) 的出现和终止时间, 分析大风等时线, 以此为重力波推进的标志。如图 7 所示, 发现至少有 3 个波列自西向东传, 它对应冷涌侵入华东地区, 第一波列 13 时始在河南, 后自西北向东南移, 平均移速  $60\text{km/h}$ ; 第二、三波列分别源自大别山东侧和西侧, 均开始于 12 时并向东传播, 平均移速为  $50\text{km/h}$ , 因此测站有 3 次以上的大风记录。

#### 2. 气压扰动等的传播特征

第一波列在推进时受到大别山拦截, 沿该波列推进路径上, 我们分析中尺度气压场和其它物理量变化。用滤波法提取大振幅重力波有较大的任意性。滤波后的扰动是各种中

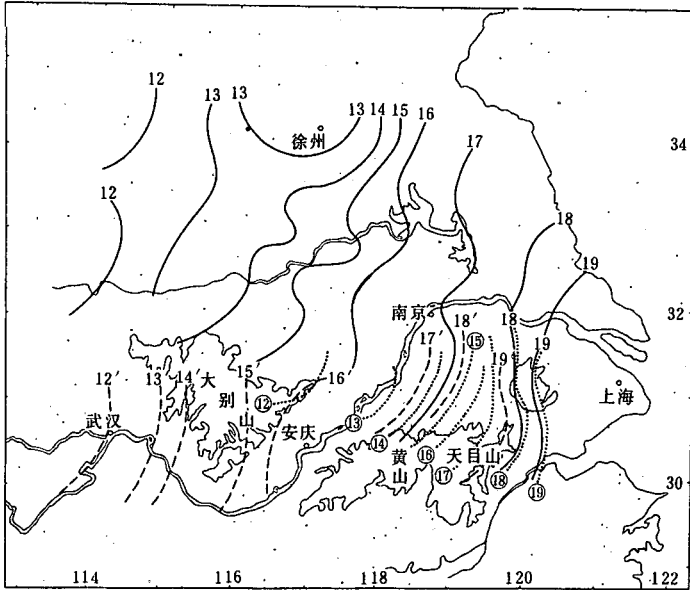


图7 大风等时线推进动态图(线旁数字是时间)  
(实线为第一波列,虚线为第二波列,点线为第三波列)

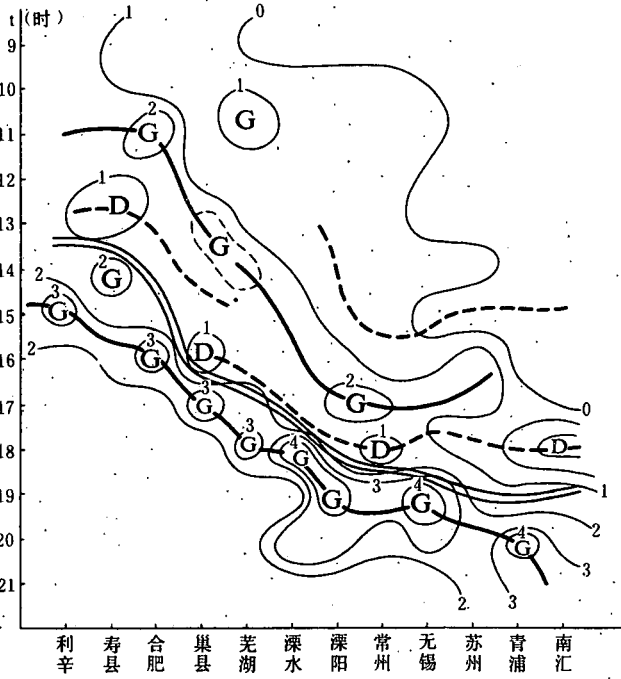


图8 沿第一波列传播方向上测站地面气压场时间剖面图  
(细实线为等压线,粗实线是脊线,虚线是槽线,双实线是辐合线)

小尺度波的集合,不一定要研究的某一单波。人为截断一类波长,有时会模糊某些波的特征,所以我们采用 Yu<sup>[6]</sup>(1988)方法,只在气压序列中滤去日变化的影响,这对生命史一天以内的短波是可行的。又考虑冷锋后气压呈上升趋势,但变化不均匀,因而将去掉日变化的气压序列用滑动时差(即一阶变量)来表示其演变,由此得到第一波列推进方向的时空剖面图(图 8)。由图可以清楚地看到高、低压相间的扰动由利辛向溧阳、南汇移动。图中二条气压脊线,其一与主冷锋后的冷空气推进有关,另一条则与干线后冷空气联系。脊线间的低压槽线也很清楚,强对流带(伴有大风、雷暴、降水的区域)发生在槽后略近于脊区的位置上。分析地面散度的分布(图略),发现沿气压波动亦有正负散度相间,自西北向东南传播,辐合线大致位于脊前槽后,这是大振幅重力波传播的标志。

## 五、大振幅重力波的不稳定和飑线的激发

### 1. 非地转特性

各种非地转因素导致的地转适应过程总伴有重力波产生。边界层大风演变时,有很强的穿越等压线的偏北风出现在冷涌前的边缘锋区,如大别山东北侧的桐城站地面最大偏北风达 35m/s,阵性大风的( $>17\text{m/s}$ )持续时间 6 小时,当冷空气沿山脉边缘传播时,大风中心亦随之传播。比较大风传播方向上各测站的非地转风和实测风,可以见到在边缘锋形成时,锋后只有一个大风中心(19m/s),位于 600m 高度上。边缘锋前边界层暖湿急流核(风速大于 18m/s)位于 1000m 高度。此时非地转风很强的区域在大别山东侧约 900—1200m 的高度上,非地转风速为 18m/s,这样强的超地转运动是边缘锋附近强对流的重要动力条件。在边缘锋传播阶段,实测风大风速中心有 3 个,第 1 个大风核 6 小时东移近 300km,位于 600m 高度;而第 2、3 个大风核分别位于 900m、1500m 高度上,呈阶梯型分布,风速达 28m/s,而此时的非地转风达 30m/s。这种非地转风的加强是与变压风有关的。根据  $\vec{v}' = -\frac{\alpha}{f} \nabla_H \frac{\partial p}{\partial t}$  的估算,16 时左右在地形边缘产生强变压梯度可提供  $>10\text{m/s}$  以上的非地转风。

### 2. 非地转风下的两种不稳定

文献[5]指出非线性项及外源是重力波和地转偏差的源,在特定条件下,重力波出现不稳定。本文分析的大振幅重力波开始移近大别山时,沿山脉东侧向南移,与西风基流近于垂直。由于地形的作用,大别山东北侧有一中尺度气旋,这个区域满足重力波发展条件,这是一类惯性不稳定的重力波。而当波动沿黄山北侧东传时,扰动与西风基流近于平行。此时重力波波速  $c_0 \cong \sqrt{g^* H}$ ,在边界层内取  $g^* = 0.4\text{m/s}^2$ ,  $H = 1\text{km}$ ,则  $c_0 \cong 20\text{m/s}$ ,因而基流满足  $|U| \gg c$ 。此时,波长在合适范围内的扰动将是不稳定的,而且这种扰动具有很强的地转偏差,这是又一类激发快波及非地转风的一种机理,称之为超高速不稳定。此时发展波要求  $u$  扰动超前  $\phi$  (高度)位相,  $v$  的扰动超前  $v_r$  位相。比较理论上的发展波位相图和实测资料计算的重力波位相图(图略)十分吻合,因而重力波将发展,它是飑线激发的



原因。除了动力不稳定使得重力波发展外,热力不稳定也是对流驱动的原因。

## 六、结 论

1. 飑线的形成和发展与冷锋及干线后的冷涌活动有关。干线不仅起着对流活动扰动源的作用,而且随着冷空气的推进向前传播。传播时,伴有阵性大风。

2. 边界层内冷涌活动受到地形拦截形成边缘锋,它是形成大别山东侧初始对流的源。飑线在边缘锋传播时得到发展。

3. 边缘锋的垂直结构具有重力流特征,有利于大振幅重力波发展和传播。这类大振幅重力波受地形影响,具有很强的非地转风,使得波动不稳定,它是江淮冷区飑线一种可能的激发机制。这种激发的飑线不同于仅因干线为扰动源、又区别于仅由重力波激发的飑线,是具有双重特征的重力波系统。

致谢:本文得到陶诗言和丁一汇两位教授的热情指导,表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 丁一汇等,我国飑线发生条件的研究,大气科学,6,1,1982.
- [2] 何齐强、陆汉城、张铭,江淮暖区飑线的中尺度分析,气象学报,(待发表)
- [3] Rhea, J. O., A study of thunderstorm formation along dry lines, *J. Appl. Met.*, 5, 58—63, 1966.
- [4] Schaeffer, J. T., A Simulative model of dry line motion, *J. Atmos. Sci.*, 31, 956—964, 1974.
- [5] 曾庆存,数值天气预报的数学物理基础,科学出版社,460—471,1979年。
- [6] Yu Zhihao, Lu Hanchen, An observational study of the meso- $\beta$  scale moving system in the meiyu front, *Acta Met. Sinica*, 2, 436—449, 1988.

## CHARACTERISTICS OF LARGE AMPLITUDE GRAVITY WAVE OF SQUALL LINE BEHIND THE COLD FRONT

Lu Hancheng Lü Mei He Qiqiang

(Airforce Institute Meteorology)

### Abstract

In this paper, a squall process occurring behind the cold front in Chang Jiang—Huai He area is analysed with the help of the enhanced observational data. The analysis shows the genesis and development of squall are related to the mesoscale cold surge activities. The cold surge is characterized by the large amplitude gravity wave. The gravity wave is trapped by Dabie Shan Mountain in the process of propagation and the edge front is formed at the east side of Dabie Shan Mountain. The propagation of edge front shows the feature similar to Kelvin wave. The character of large amplitude gravity wave in the boundary layer is very obvious. This kind of large amplitude gravity wave trapped by the mountain may be a trigger mechanism of the squall line behind the cold front.