南京气象学院学报
第15卷 第2期 Journal of Nanjing Institute Vol. 15 No. 2
1992年6月 of Meteorology Jun. 1992

200百帕急流区大尺度重力惯性波与暴雨

丁治英 陈久康 吕君宁
（南京气象学院）

摘要 本文发现在200百帕高空急流区存在着强烈的非地转现象，它可激发出大尺度的稳定的重力惯性波，并向周围传播。在高空急流右后方波能量最易发展加强。重力惯性波的形成、维持和移动也决定了暴雨的形成、维持和移动。

关键词 重力惯性波，非地转风，暴雨

重力惯性波是大气中经常发生的现象。70年代以来，人们越来越重视重力惯性波对天气系统的影响，并从不同角度研究大气中重力惯性波的传播、发展以及生成机制，特别是它对暴雨、强对流天气的作用一直是主要讨论的目标[1]，人们在分析中往往偏重于低层大气中的中小尺度重力惯性波对中小尺度天气的影响[2]，而高层是否存在大尺度的重力惯性波却没能引起足够的重视。

Uccellini[3]在1979年对一次高空急流出口区发生的风暴分析中指出，在200百帕高空急流中心左前方的辐散场对暴雨的形成非常重要。朱乾根[4]也指出我国暴雨往往产生于高空急流的右后方，在高空急流右后方的辐散场使低层产生变压风辐合，产生暴雨。可见高层强烈的辐散场必然伴有强烈的非地转风，从而激发出重力惯性波。由于暴雨与高层辐散场关系密切，因此高层重力惯性波的存在对暴雨的影响也非常重要。本文主要揭示在1981年6月27—29日暴雨过程中200百帕大尺度重力惯性波的形成、传播和发展对暴雨的作用。为什么200百帕会出现强烈的非地转场，它是由什么因子造成的也是本文研究的问题之一。

收稿日期：1990—12—18

1 高空急流的活动与暴雨

1981年6月27—29日我国出现了一次暴雨过程，最强暴雨发生在27日18时—28

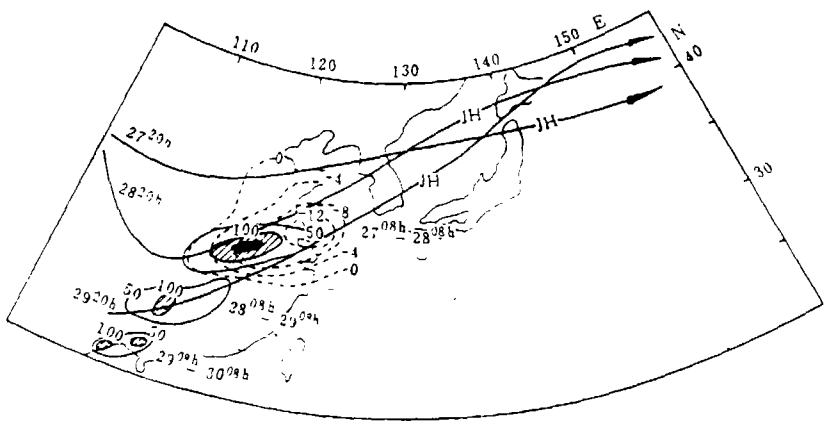

图1 高空急流轴与暴雨配置图

实线：08—08时等雨量线，○斜线区：大于100毫米●全黑区：大于200毫米，

虚线：27日20时$\frac{\partial\theta_w}{\partial p}$（500—850）（单位$10^{-3}$℃/百帕）

日08时的长江中下游地区。

26日20时200百帕上空有一高空急流处于内蒙、山西一带，最大风速中心在35°N，107.5°E，中心风速为48米/秒。这时只在苏北沿海地区个别站有局部暴雨。27日08时急流发生了较大的变化，中心东移至37.5°N、127.5°E附近。我国长江中下游已处在高空急流入口区右后方，暴雨开始。

27日20时急流中心东移至130°E、40°N附近，中心最大风速为52米/秒，范围扩大，在入口区右侧长江中下游地区24小时最大降水量为208毫米。

28日20时在我国东部的高空急流轴南移5个纬距，急流中心东移到140°E，42.5°N附近，中心风速值增至64米/秒。暴雨区也随急流入口区南移至长沙、桂林一带，最大日降水量为178毫米。

29日20时高空急流中心继续东移，我国仍处在高空急流的后部。这时急流中心右后方的风速大大减弱，暴雨的范围和强度亦随之减弱，最大日降水量为143毫米（见图1）。

从三天急流位置与暴雨的关系可见，暴雨均发生于高空急流的右后方，并随急流的变化而变化。因而这次暴雨过程与高空急流的活动关系密切。

由27日20时暴雨区与$\frac{\partial\theta_w}{\partial p}$等值线的对应关系（图1）可见，在暴雨区上空$\frac{\partial\theta_w}{\partial p}$小于零，因而暴雨区是对流稳定的，其余两天的情况与27日20时一致。文献[5]也指出，梅雨

暴雨发生在 $R_i \approx 0$ 的地区附近，因此暴雨时大气近于中性。本次暴雨过程中 $\frac{\partial \theta_w}{\partial p}$ 的量级在暴雨区为 10^{-1}℃/百帕左右，可见暴雨区也是位于弱稳定区或近于中性的地区。

2　风速平流与非地转场的关系

重力惯性波是大气地转不平衡造成的非地转场的适应过程。因此若要在急流区域产生重力惯性波，必然要有强大的非地转场存在。现主要讨论急流区是否有强大的非地转场，又是如何形成的问题。

图 2 为 27 日 20 时 200 百帕 $u-u_g$ 非地转风场图，图中 $u-u_g$ 中心值为 15.1 米/秒，位于 35°N，112.5°E。呈正圆形的≤−10 米/秒的非地转风区的直经约 10 个纬距。此非地转风场处于高空急流的中心后部，而在 300 百帕以下和 100 百帕均没有如此强大的非地转风存在。28、29 日 20 时非地转风场的情况也是如此。因此高空急流附近确实有强大的

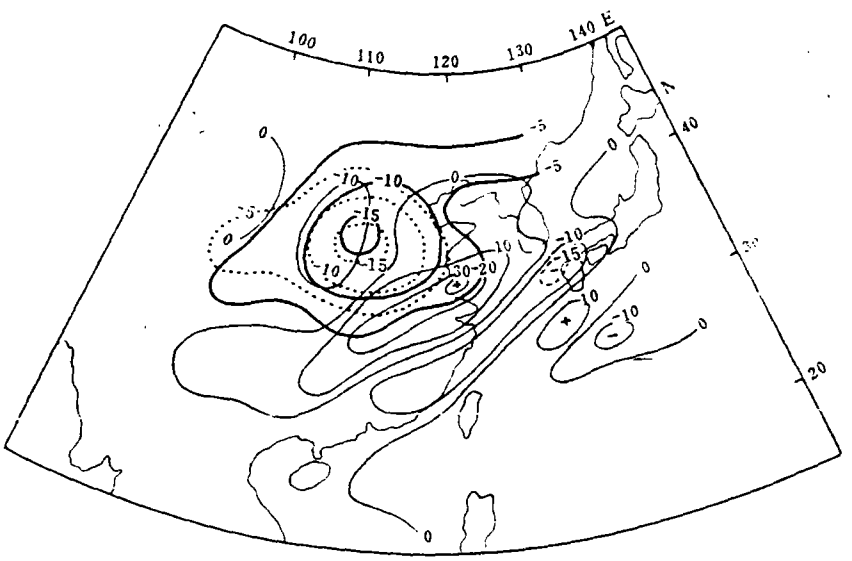

图 2　200 百帕 27 日 20 时 $u-u_g$（粗实线米/秒）、

$-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$（点线米/秒）、散度（细实线 10^{-6}/秒）配置图

非地转场存在。

表 1　35°N、112.5°E，27 日 20 时运动方程 y 方向分量实际计算值（米/秒）

$u-u_g$	$-\frac{1}{f}\frac{\partial v}{\partial t}$	$-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$	$-\frac{w}{f}\frac{\partial v}{\partial p}$	$f\vec{F}_v$
−15.1	0.60	−15.0	0.54	−1.2

由等压面坐标系中的大气动力学方程

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\vec{V}\cdot\nabla\vec{V} - \omega\frac{\partial \vec{V}}{\partial p} - f\vec{K}\wedge\vec{V} - \nabla\varphi + \vec{F} \tag{1}$$

可改写为

$$(\vec{K}\wedge\vec{V} + \frac{1}{f}\nabla\varphi) = -\frac{1}{f}\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla\vec{V} - \frac{\omega}{f}\frac{\partial \vec{V}}{\partial p} + \frac{1}{f}\vec{F} \tag{2}$$

方程左端为非地转风项，右端第一项可简写成变压风的形式[6]，为变压风的作用。由于200百帕系统变化缓慢，该项量级在高空偏小。第三项为垂直平流对非地转风的贡献，由于垂直速度量级较小，该项量级也较小。第四项为摩擦耗散因子，该项在高层量级也应较小。因此高层对非地转风贡献最大的应是风速平流项。由表1可见在200百帕风速平流较其它几项大1—2个量级。这可能与高空急流区风速较大有关。

本文利用欧洲中心2.5×2.5网格距的资料对方程(2)中各项进行了计算。将27日20时200百帕风速平流($-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$，$-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla u$)与非地转风($u-u_g$、$v-v_g$)场对应可知，两场的一一对应关系较好。图2中风速平流($-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$)的中心值、形态和位置几乎与$u-u_g$场完全一致。300百帕上$u-u_g$中心与$\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$中心基本对应，但范围相差较大，强度减弱。其它层次风速平流作用均较小。其它几项与平流项相比在200百帕作用均较小、这里不再讨论。

28日20时200百帕$-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$、$u-u_g$中心南移至30°N，115°E附近，$-\frac{1}{f}\vec{V}\cdot\nabla v$中心值为−19.7米/秒，$u-u_g$中心值为−14.1米/秒。范围由圆形变至椭圆形，两者的形态范围和中心位置一致(见图3)。在其它层次风速平流对非地转风的影响仍然较小。另外几项对200百帕$u-u_g$的作用也是如此。29日20时风速平流与$u-u_g$场对应关系与28日20时一致，但两者的中心值都在−10米/秒左右，并位于110°E，27.5°N附近。可见200百帕急流区的强非地转风主要由风速平流形成。

3 重力惯性波的形成以及传播、发展与暴雨的关系

前节主要讨论了200百帕强非地转场的成因。由斜压大气适应原理，在斜压大气中地转风关系与热成风关系是等价的。当实际风与地转风不相等(即不满足地转风关系，当然也不满足热成风关系)时，就会产生重力惯性波。重力惯性波将非地转扰动能量通过频散作用分布到更广阔的空间去，最终可建立起稳定的热成风平衡。重力惯性波通过低层辐合、高层辐散并伴有上升运动；低层辐散、高层辐合下沉的形式将能量向外传播。前节中我们讨论的高空急流区附近的强大的非地转场必然会激发出强大的重力惯性波，使能量向外频散，以达到地转平衡。

图2中27日20时200百帕 $u-u_g$ 负值中心以东为强大的辐散场，最大辐散中心位于 $u-u_g$ 中心东南方向，强度为 3.05×10^{-5}/秒。这可能是因为负 $u-u_g$ 风的方向向东，因此会在中心东部辐散、西部辐合。可见非地转风场导致了辐散场的出现。图中在最强辐散带的南侧还有三条带状的辐合、辐散区，强度向东南方向依次衰减。此辐合、辐散带宽约2.5纬距，长15纬距以上。在300－500百帕，与200百帕辐合辐散带对应的是辐散下沉以及辐合上升区。在500百帕以下，除靠近扰源的最强辐散带仍对应有辐合上升外，其它

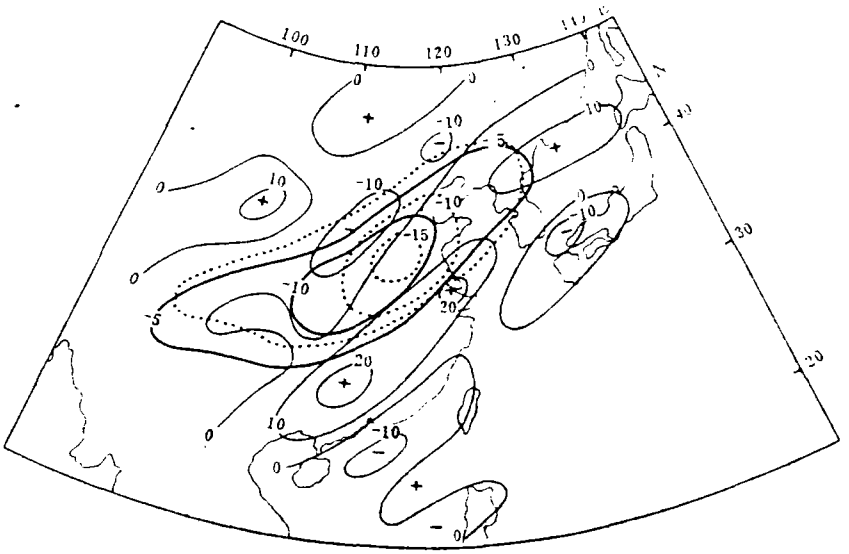

图3　200百帕28日20时 $u-u_g$ 场、$-\frac{1}{f}\vec{v}\cdot\nabla v$ 与散度场配置图（说明同图2）

几条辐合、辐散带已看不出带状传播的形式。

图4为沿带状辐合辐散区的环流剖面，图中32.5°N，122.5°N为整层上升运动区并与200百帕最强的辐散中心相对应。在125°E，30°N；27.5°N，127.5°E；25°N，130°E还有与200百帕上另外三条辐合、辐散带对应的下沉、上升区，它们均处在500－200百帕范围内。

从以上讨论的带状辐合、辐散以及与之相配合的上升、下沉运动可以较明确地看出这正是重力惯性波的频散方式。在图2和图4中还可看出重力惯性波东南方向传播较明显，且发展较强。

将200百帕强辐散场与27日08时－28日08时暴雨区对照可见，暴雨区正位于高空最强辐散带处。在强辐散场南侧的带状辐散场中，由于上升运动区较高（位于500－200百帕），因而无降水发生。

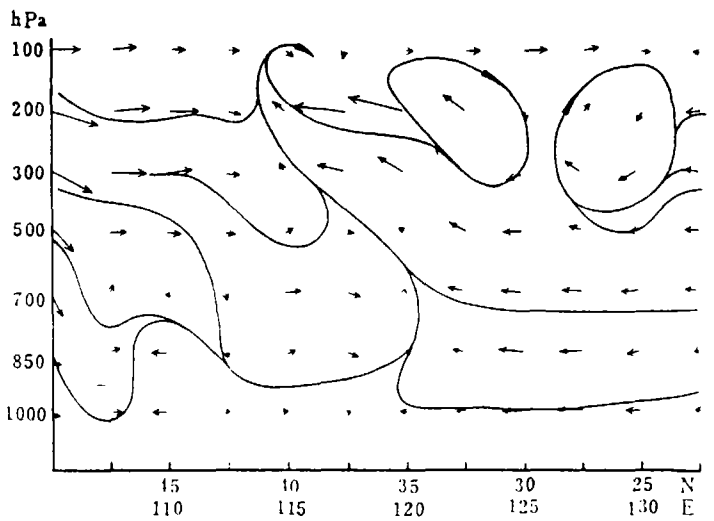

图 4　27 日 20 时沿辐合辐散带的环流剖面量为 v 与 w(扩大 100 倍)的合成

28 日 20 时 200 百帕负 $u-u_g$ 场变为椭圆形，轴线呈东北—西南向。强辐散带仍位于 $u-u_g$ 中心轴的南部，高空急流右后方(图 3)，并与暴雨区相配合。雨带中最大降水中心向西南方向移动，在其南、北侧也有相应的带状辐合、辐散区。可见随着时间的增长，重力惯性波的范围在扩大。垂直方向与 27 日 20 时情况一致。

29 日 20 时除辐合、辐散带强度有所减弱外其它情况与前两日一致。

将大气运动方程组进行 Boussinesq 近似并设基本流场为定常带状切变流，取 x 轴与基本流流向一致，且扰动与 x 无关[7]。得线性化扰动方程组

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} - \bar{\zeta}_a v + \bar{U}_z W = 0 & (3) \\ \dfrac{\partial v}{\partial t} + fu = -\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{p}{\rho_s}\right) & (4) \\ \dfrac{\partial w}{\partial t} = -\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{p}{\rho_s}\right) + g\left(\dfrac{\theta}{\theta_s}\right) & (5) \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\dfrac{\theta}{\theta_s}\right) - (f\bar{U}_z/g)v + (N^2/g)W = 0 & (6) \\ \dfrac{\partial v}{\partial y} + \dfrac{\partial w}{\partial z} = 0 & (7) \end{cases}$$

其中 N 为干或湿的静力稳定度参数，$\bar{\zeta}_a = f - \dfrac{\partial \bar{U}}{\partial y}$ 为背景流场的绝对涡度；$\bar{U}_z = \dfrac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ 为背景流场热成风且 $f\bar{U}_z = -g\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\bar{\theta}}{\theta_s}\right)$，$N^2$、$\bar{\zeta}_a$、$\bar{U}_z$ 均为缓变函数，引入缓变量

$$Y = \varepsilon y \qquad Z = \varepsilon z \qquad T = \varepsilon t \tag{8}$$

ε 为小参数，方程(3)—(7)可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p/\rho_* \\ \theta/\theta_* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ P \\ H \end{bmatrix} \exp[i(ly + mz - \omega t)] \tag{9}$$

设(9)式右端振幅为时空缓变函数，将(9)式代入(3)－(7)式作小参数展开后，取首阶近似得

$$\omega^2 = \frac{N^2l^2 + fm^2\bar{\zeta}_* + 2mfl\bar{U}_*}{K^2} \tag{10}$$

$$C_y = \left(\frac{N^2l^2 + fm^2\bar{\zeta}_* + 2mfl\bar{U}_*}{K^2l^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

其中 $K=m^2+l^2$，取 $l=\frac{2\pi}{L_y}$，$m=\frac{\pi}{L_*}$，$L_y\sim10^6$ 米，L_* 为重力惯性波在垂直方向的波长。由于重力惯性波的传播与频散发生对流稳定的区域中，而夏季暴雨前 500 百帕以下往往是对流性不稳定的，因此暴雨前重力惯性波在 500－200 百帕内传播。所以 $L_*\sim10^3$ 米、$N\sim10^{-2}$/秒。代入(11)式可得

$$C_y \sim \pm\left(\frac{N^2l^2}{K^2l^2}\right)^{\frac{1}{2}} \sim \pm\frac{10}{\pi} \sim \pm\ 10^0 \text{ 米/秒}$$

$$C_{gy} = \frac{\partial\omega}{\partial l} = \pm\frac{l(N^2-\omega^2) + fm\bar{U}_*}{\omega K^2} \sim \pm\frac{\bar{l}N^2}{\omega K^2} \sim \pm\frac{10^2}{\pi^2} \sim 10^1 \text{ 米/秒}$$

当暴雨发生后低层会出现弱对流稳定的情况，此时 $L_*\sim10^4$ 米，$N\sim10^{-3}$/秒。C_y、C_{gy}的量级与暴雨前一致。在本次过程中，26 日 20 时未发现重力惯性波存在，因此 27 日 20 时的重力惯性波发生在 26 日 20 时－27 日 20 时之间，从图 4 中可以看出重力惯性波在 24 小时内向外频散 15 个纬距以上，因此可粗略地估计出本次重力惯性波的频散速度在 18 米/秒以上。由于最强辐散带是由非地转风的辐散形成的，可将其看成扰动源，并且此扰源与暴雨带的位置一致，因此可用暴雨的移动估计扰源移动。由文献〔8〕可知扰源的移动速度即波的传播速度，所以从图 1 中雨带的移动速度可见重力惯性波的传播速度在 10 米/秒之内。理论与实际结果的一致性同时也证明了本次过程中重力惯性波是大尺度的。也反映出层结弱对流稳定和高层重力惯性波的频散，都导致重力惯性波适应速度减慢有利于暴雨产生。

由(11)、(12)式得知重力惯性波的传播与频散都有两个方向，即 y 轴的正反方向。在

本次过程中重力惯性波主要在高空急流右后方发展，下面要讨论它的发展原因。

将(3)－(7)式进行 $O(\varepsilon)$ 阶展开、求解并在波动区域 σ 上积分得

$$\frac{\partial}{\partial T}\iint_{\sigma}A^2\mathrm{d}\sigma=3\iint_{\sigma}\left(\frac{Am}{\omega K}\right)^2 fC_{xz}\frac{\partial\zeta_a}{\partial Z}\mathrm{d}\sigma-2\iint_{\sigma}\left(\frac{Am}{\omega K}\right)^2 C_{xy}\frac{\partial\bar{N}^2}{\partial Y}\mathrm{d}\sigma$$

(Ⅰ)　　(Ⅱ)

$$-\iint_{\sigma}\left(\frac{Am^2}{\omega Kl}\right)^2 fC_{xy}\frac{\partial\zeta_a}{\partial Y}\mathrm{d}\sigma-\iint_{\sigma}\left(\frac{Am}{\omega K}\right)^2 C_{xy}\frac{\partial N^2}{\partial Y}\mathrm{d}\sigma+\iint_{\sigma}\left(\frac{Al}{\omega K}\right)^2 C_{xy}\frac{\partial N^2}{\partial Z}\mathrm{d}\sigma$$

(Ⅲ)　　(Ⅳ)　　(Ⅴ)

其中 $A^2=W_0^2$ 为波动振幅，$\frac{\partial\bar{N}^2}{\partial Y}=f\frac{\partial U_x}{\partial z}=-\frac{\partial}{\partial Y}\left[g\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)\right]$

(Ⅰ)表示背景流场涡度的垂直变化对波能量的影响。在 $C_{xz}\frac{\partial\zeta_a}{\partial Z}>0$ 的情况下波能量增加。$\frac{\partial\zeta_a}{\partial Z}$ 可写为 $-\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial U}{\partial Z}\right)$ 的形式，在急流右侧沿 y 方向 U 的垂直切变应大于零。因此若要急流右侧波能量增加，则需 $C_{xz}<0$，使高层能量向下方频散。

(Ⅰ)表示背景流场热成风的垂直切变作用。在急流区域 $\frac{\partial^2U}{\partial z^2}<0$(即 $\frac{\partial\bar{N}^2}{\partial Y}>0$)，有利于急流右侧向负 y 方向传播的波发展。

(Ⅱ)为背景流场绝对涡度的水平梯度的影响。在急流轴附近 $\frac{\partial\zeta_a}{\partial Y}>0$，因而也有利于负 y 方向传播的波发展。

(Ⅳ)背景场的层结在 y 方向的分布对波动发展的贡献。由图1可见在扰源即雨区南侧 $\frac{\partial N^2}{\partial Y}>0$，北侧 $\frac{\partial N^2}{\partial Y}<0$，因此有利于负 y 方向即雨区南侧传播的波发展。有利于雨带南侧降水加大。

(Ⅴ)为垂直方向层结分布对波发展的贡献，一般情况下 $\frac{\partial N^2}{\partial Z}>0$ 不利于急流通右侧传播的波发展。若在中性层结中 $\frac{\partial N^2}{\partial Z}\sim0$，该项为零。在本次过程中层结近于中性，因此该项对波动能量的发展与减弱贡献较小。

由以上讨论可见，在高空急流右后方重力惯性波最易得到发展，这些理论分析得到的结果与本次个例中高空急流产生的大尺度重力惯性波的移动发展过程一致。通过分析使人们对大尺度稳定的重力惯性波有一个较为清晰的了解，特别是它为预报大尺度暴雨雨带未来移动和加强与否提供了较好的理论依据。

4 小　结

通过以上讨论和分析发现

1) 在200百帕风速平流场几乎与非地转风场完全一致，其它几项的作用相对较小。

因此高空急流区的风速平流决定了 200 百帕非地转风的存在。其它层次风速平流对非地转风的影响较小。

2） 200 百帕强大的非地转场可激发大尺度重力惯性波的形成。重力惯性波的频散、传播速度与垂直方向的波长以及大气的稳定度有关。在暴雨前 $L_z \sim 10^3$ 米，$N \sim 10^{-2}$/秒，并位于 500－200 百帕，得出 $C_{gy} \sim 10^1$ 米/秒，$C_y \sim 10^0$ 米/秒。暴雨中，$L_z \sim 10^4$ 米，$N \sim 10^{-3}$/秒，C_{gy}、C_y 仍与暴雨前一致。由于传播与频散速度较慢有利于重力惯性波的维持。

3） 重力惯性波形成的高层辐散、低层辐合上升在扰源区最强。在扰源以外只发生在 500－200 百帕，因此暴雨只发生在扰源区的辐散带中。重力惯性波沿 y 轴负方向发展传播（高空急流右侧）。暴雨随其右移而右移；随其加强（减弱）而加强（减弱）。

参　考　文　献

1 李麦村. 大气科学，1978；2(3)：201－209

2 李麦村等. 气象，1980；9：17－19

3 Uccellini L W and Johnson D R. Mon Wea Rev，1979；107：682－703

4 朱乾根. 南京气象学院学报，1979；1(1)：1－7

5 安徽气象科学研究所. 梅雨期暴雨的诊断预报，安徽：科学技术出版社，1986：34－36

6 朱乾根等. 天气学原理和方法，北京：气象出版社，1981：39－47

7 贺海晏等. 热带气象，1990；6(3)：203－209

8 杨大升等. 动力气象学，北京：气象出版社，1980：：258

THE RELATION BETWEEN HEAVY RAIN AND LARGE—SCALE GRAVITY—INERTIA INTERNAL WAVE IN THE 200 hPa UPPER TROPOSPHERIC JET

Ding Zhiying Chen Jiukang Lü Junning

(Nangjing Institute of Meteorology)

Abstract In this study a strong ageostrophic wind is observed in the 200 hPa upper tropospheric jet, which causes a large—scale gravity—inertia internal wave to propagate about. In the right rear of the upper—level jet the wave energy is more easily developed and strengthened. The formation, maintenance and propogation of the wave determine those of the heavy rain.

Key words gravity—inertia internal wave, ageostrophic wind, heavy rain