١

3

# 200hPa 层结的纬向非均匀性与暴雨

### 丁治英 陈久康 (南京气象学院)

摘要 通过一次暴雨过程分析发现200hPa 高空急流附近纬向层结的非均匀性对高层 重力惯性波的发展有较大贡献。当重力惯性波沿层结稳定度减小方向传播时,有利于 暴雨的发展。

关键词 非均匀层结,重力惯性波,暴雨

近年来,人们对低层重力惯性波的发展讨论较多,特别是低层非均匀层结对暴雨以及重力 惯性波的影响作过大量的分析和研究<sup>[1,2]</sup>。文献[1]指出,当某地层结由稳定变为不稳定时重力 惯性波能量将增大,当彼动由不稳定向稳定处传播,波能量将增大。最近的理论分析<sup>[3,4]</sup>又指 出,当重力惯性波向层结稳定度小值区传播,波能量发展。对于实际大气中重力惯性波如何频 散传播,未见具体的分析和讨论。实际分析<sup>[5]</sup>指出,200百帕高空急流附近的非地转场远大于低 层的非地转场,而且有大尺度重力惯性波存在。因此高层重力惯性波较低层强大。另外夏季 500hPa 以下层结往往是不稳定的,在大气低层很难发现重力惯性波频散与传播现象。500hPa 以上 0..随高度增加,层结为稳定非均匀状态。文献[6]也指出,在暴雨过程中200hPa 高空急流 产生的非地转风辐散对暴雨的维持和发展有重大影响。非地转风辐散又是产生重力惯性波的 主要原因。因此主要讨论实际大气中200hPa 附近稳定非均匀层结与重力惯性波和暴雨的关 系。

### 1 天气过程

1982年7月18—23日为一次淮河流域的切变线暴雨过程,其中最强暴雨发生在7月21—22 日,21日08—22日08时最大日雨量为330mm。18—23日200hPa 高空急流轴一直位于37.5°N 附 近,降水区处在高空急流右侧的淮河流域。雨带呈东西向分布。500hPa 副热带高压脊线在25°N 附近。中纬度环流平直,鄂木斯克附近有一冷低压。低压(850—700hPa)32°N 以南维持一支西 南风低空急流。700hPa 切变位于32°N 附近,其上有低涡活动。22日20时后鄂木斯克低压东移, 淮河流域暴雨结束。

由以上分析可知暴雨的维持和移动与大环流形势是否改变有关。低层短波系统较多,不易 看出环流形势的变化。200hpa 上空的波动基本上反映了大尺度系统的活动,因而该层次的形 势变化能准确地反映对流层大尺度环流系统的演变。

## 2 稳定非均匀层结与重力惯性波

文献[7]在假设基本气流与 x 无关的条件下得到了背景流场对重力惯性波的影响,并得出 高空急流右侧有利于重力惯性波发展的结论。在本次暴雨过程中,雨带稳定维持东西方向。故 主要讨论沿 x 方向气流切变与层结不稳定性对重力惯性波的影响。

从运动方程出发,设扰动与 y 无关。不计摩擦和非绝热加热,可得 Boussinnesq 近似下的扰动方程组,假设

$$u = u'$$
  $v = v(x,z) + v'(x,z,t)$ 

$$w = w'$$
  $p = \bar{p} + p'$   $\theta = \bar{\theta} + \theta'$ 

略去撇号,得

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - fv + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{\rho_s} \right) = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \bar{\zeta}_b u + w \bar{v}_s = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{p}{\rho_s} \right) + g \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right) + (f \bar{v}_s / g) u + (N^2 / g) w = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases}$$
(1)

其中 $(f\bar{v}_{\epsilon}/g) = u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\bar{\theta}}{\theta_{\epsilon}} \right), \bar{v}_{\epsilon} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}, \bar{\zeta}_{\delta} = f + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, N^{2} = \sqrt{\frac{g\partial \theta_{\epsilon}}{\theta_{\epsilon} \partial z}}$ 为 Brunt-Vaisala 频率,  $\rho_{\epsilon}, \theta_{\epsilon}$  为参考状态 下的  $\rho, \theta_{\circ}$ 引入缓变量 X = ex, Z = ez, T = et, e 为正的小参数,  $\bar{v}_{\epsilon}, \bar{\zeta}_{\delta}, N^{2}$ 均为缓变函数。设波动解为

$$\begin{bmatrix} u \\ u \\ w \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V \\ W \\ p/\rho_s \\ 0/\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(lx + mz - \omega t) \end{bmatrix}$$
(2)

将(2)式代入(1)式并进行首阶近似得

$$\omega^{2} = \frac{m^{2}f\bar{\zeta}_{b} + N^{2}l^{2} - 2mfl\bar{v}_{z}}{k^{2}}$$
(3)

$$\frac{\partial \omega}{\partial l} = C_{gr} = \frac{l(N^2 - \omega^2) - fm\bar{v}_z}{\omega k^2}$$
(4)

$$\frac{\partial \omega}{\partial m} = C_{ge} = \frac{m(\omega^2 - f\bar{\zeta}_b) + f\bar{l}\bar{v}_e}{\omega k^2}$$
(5)

这里U、V、W、P、H、w、l、m 均为缓变函数。

 $\vec{K} \cdot \vec{C}_{g} = lC_{gz} + mC_{gz} = 0$ (6)

即波相速方向与波频散方向垂直且

曲

$$\frac{\partial l}{\partial Z} = \frac{\partial m}{\partial X}, \quad \frac{\partial \omega}{\partial X} = -\frac{\partial l}{\partial T}, \quad \frac{\partial \omega}{\partial Z} = -\frac{\partial m}{\partial T}$$
 (7)

对(1)式求0(ε)阶近似,并利用(3)-(7)式结果可得

$$\frac{\partial E_0}{\partial T} + \nabla_2 (\vec{C}_s E_0) = 0 \tag{8}$$

这里  $E_0 = \frac{\omega k^2 W_0^2}{l^2}$ ,  $|W_0|$ 为重力惯性波垂直速度振幅的最低阶近似,又可用 A 表示。

假设 $\omega = \Omega(\vec{K}, N^2, \varsigma, \vec{V}_s)$ ,根据波射线理论和假定背景场定常条件对(8)式在波动 $\sigma$ 面上 积分得

由于(9)式右端共有 $\iint_{\sigma} \left( \frac{A}{\omega K} \right)^2 d\sigma$ ,因此仅将各项中除 $\iint_{\sigma} \left( \frac{A}{\omega K} \right)^2 d\sigma$ 之外的量进行量级分析。设 m~10<sup>-4</sup>, $\zeta_b$ ~10<sup>-5</sup>, $\Delta Z$ ~10<sup>3</sup>, $\Delta X$ ~10<sup>5</sup>,l~10<sup>-6</sup>,f~10<sup>-4</sup>, $N^2$ ~10<sup>-4</sup>,其中 $\frac{\partial \widetilde{N}^2}{\partial X} = f \frac{\partial \overline{V}_e}{\partial Z}$ 。 $C_\mu$ 、 $C_\mu$ 为 沿 X,Z 方向的重力惯性波的波速。一般情况下  $C_\mu > C_\mu$ 。

由重力惯性波波速 $\mathcal{L} = \frac{\omega}{K}$ ,则

$$C = \pm \left(\frac{m^2 f \bar{\zeta}_b + N^2 l^2 - 2m f l \bar{v}_z}{K^4}\right)^{\frac{1}{2}} \sim \pm \left(\frac{N^2 l^2}{K^4}\right)^{\frac{1}{2}} \sim \pm \left(\frac{N l}{K^2}\right) \sim \pm 10^0$$
(10)

利用(4)式, $\omega = Kc$ , $c \sim 10^{\circ}$ 则  $\omega \sim K$ 得

3

$$C_{\mu} \sim \frac{l(N^2 - K^2) - fm\bar{v}_z}{K^3} \sim 10^2$$
 (11)

由(10)与(11)式可见大尺度重力惯性波波速的量级较重力惯性波频散速度小。

假设 C<sub>n</sub>~C~10<sup>0</sup>,并将上述假设引入(9)式,可得右端5项量级分别为

I I II IV V  $<10^{-20}$   $10^{-18}$   $10^{-18}$   $10^{-17}$   $10^{-19}$ 

因此(9)式中第Ⅳ项对重力惯性波振幅贡献最大,其次是Ⅰ、Ⅱ项。对(9)式求首阶近似得

$$\frac{\partial}{\partial T} \iint_{\sigma} A^2 \mathrm{d}\sigma = - \iint_{\sigma} \left( \frac{Am}{\omega K} \right)^2 C_{\mu} \frac{\partial N^2}{\partial X} \mathrm{d}\sigma$$
(12)

即高层大尺度重力惯性波振幅变化主要由层结不均匀分布引起。当 $\frac{\partial N^2}{\partial X} > 0, C_{\mu} < 0$ 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>\mu</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 或 $\frac{\partial N^2}{\partial X} < 0, C_{\mu} < 0$ , C<sub>µ</sub> < 0 d, C<sub>µ</sub> < 0 d,

重力惯性波是由非地转风产生的。非地转风引起的辐合、辐散导致上升、下沉运动,将波能 量传播出去。由于重力惯性波频散速度较快,一般在波源附近才出现暴雨并随波源的移动而移 动(详见文献[5])。

图1为200hPa20日20时 $\frac{\partial N^2}{\partial X}$ 与散度场的配置,图中辐合、辐散场呈带状东北-西南走向,最强 辐散带位于(40°N,105°E)至(30°N,130°E)一线,辐合、辐散带交替出现。500hPa以上有与辐散、 辐合带对应的上升、下沉运动。从图1的200hPa 槽线位置可见,辐合、辐散带出现在高空槽前。 因此它与 Rossby 波形成的槽前辐散槽后辐合不同,为较典型的重力惯性波的频散形势。向西 频散的一支在(35°N,122.5°E)至(27.5°N,107.5°E)为辐散带,该辐散带处在  $\partial N^2/\partial X > 0$ 的区 域中,并有暴雨生成。由理论分析该辐散带若处于  $\partial N^2/\partial X > 0$ 的区域中,当其西移时可加强,有







图2 1982年7月20日14时—21日 14时6小时雨区活动, 为≥50mm 的降水区。

利于降水加强,东移时减弱对降水加强不利。由于资料时间跨度较大,无法在高层跟踪重力惯 性波的活动,只能从降水区的活动对其进行粗略的估计(由图1可见降水区处在 əN<sup>2</sup>/əX>0的 区域中)。图2为6小时大于或等于10mm 雨区的活动。20日14—20时雨区位于31°N,117—120°E 之间,20日20时—21日02时雨区出现在前雨区的西部,范围扩大。21日02时—08时雨区位于 115°E,32.5°N 附近,范围大大缩小。其后6小时内范围又西移扩大。可以看出在这一时期内雨 区由东部变至西部时范围扩大,西部变为东部时范围缩小。

图3为21日20时  $\partial N^2 / \partial X$  场与辐合 辐散场分布。图中40°N 以南出现了带状 辐合、辐散区,强度较20日20时加大。  $\partial N^2 / \partial X$  场也大大加强。从辐合、辐散场 强度加大可知此时重力惯性波加强。最 强辐合带位于20日20时最强辐散带西 部,(37.5°N、132.5°E),(25°N、110°E)— 线。我国东部为一较强的辐散场(处在  $\partial N^2 / \partial X > 0$ 的区域中)。由21日20时后24 小时暴雨区可见,暴雨区仍位于强辐散 带西侧,最大雨量中心为283mm。由24小 时降水量大大加强可以看出重力惯性波 的振幅在加强,即  $\frac{\partial}{\partial T} \iint A^2 d\sigma > 0$ 。因降



图3 1982年7月21日20时 oN<sup>2</sup>/oX 场、辐散场、 雨区、槽线配置(说明同图1)

水区处在 $a_X > 0$ 的区域之中,此时 $C_n$ 需小于零才可满足垂直速度随时间增加的现象。21 日20时在140°E、30°N 附近还有一较弱的辐散场(位于 $a_X^2/a_X < 0$ 的区域中)。由(12)式,此辐散 场发展,需 $C_n > 0$ ,重力惯性波向东传播。

图4为21日20时-22日20时卫星云图的演变。在21日20时-22日20时,140°E以东的云区 向东北方向移动,移速约为10经距/24h,与之相对应的200hPa辐散场也大大加强。中心最大值 由21日20时19×10<sup>-6</sup>/s增至37×10<sup>-6</sup>/s(图略)。可见该处重力惯性波在加强东移,与上段讨论 得到140°E处波动发展的条件为重力惯性波向东传播的情况一致。120°E附近,云区东移缓慢, 并在西部有大片云区发展。200h Pa的辐散场也处在 21日20时辐散场的西部,强度加强,似乎存在重力惯 性波西移加强的现象。23日20时在32.5°N以北, ə<sup>,</sup>N<sup>2</sup>/oX<0,且辐散场减弱,淮河流域暴雨结束。

由图1、图3可见当最强辐合、辐散带处在 ə.<sup>3</sup>/ əX~0的范围内,24小时后散度场绝对值将大大衰 减。如20日20时150°E,27.5°N 附近最强散度为23× 10<sup>-6</sup>/s,21日20时衰减至16×10<sup>-6</sup>/s,21日20时最强 辐合中心值为-2.3×10<sup>-6</sup>/s,22日20时衰减至-10





×10<sup>-6</sup>/s 以下。这些中心值均处于 əN<sup>2</sup>/əX~0的值区。由(12)式,当 əN<sup>2</sup>/əX~0时,  $\frac{\partial}{\partial T} \iint_{\partial T} A^2 d\sigma \sim$ 0.即 A<sup>2</sup>的局地变化达极大值。由于空间最强振幅与辐合、辐散中心对应,因此当最强辐合、辐散中心出现在 $\frac{\partial N^2}{\partial X} \sim$ 0的范围内,重力惯性波的振幅达极大值。当重力惯性波达到极值后很快衰减也符合重力惯性波的频散性质。

对比实况分析与理论结果基本相符。在 $\frac{\partial N^2}{\partial X}$ >0的区域内西传的重力惯性波加强,东传的重力惯性波衰减。在 $\frac{\partial N^2}{\partial X}$ <0区域内,东传的重力惯性波易加强。还可看出200hPa 附近稳定非均匀层结对重力惯性波发展贡献最大,当波动由稳定度大区向小区移动时重力惯性波发展。

#### 3 背景流场与重力惯性波

将(9)式作一级近似后得

 $\frac{\partial}{\partial T} \iint_{\sigma} A^2 d\sigma = 2 \iiint_{\sigma} \left( \frac{Am}{\omega K} \right)^2 C_{\mu} \frac{\partial \widetilde{N}^2}{\partial X} d\sigma + \iint_{\sigma} \left( \frac{Am}{\omega K l} \right)^2 f c_{\mu} \frac{\partial \tilde{\zeta}_b}{\partial X} d\sigma - \iint_{\sigma} \left( \frac{Am}{\omega K} \right)^2 C_{\mu} \frac{\partial N^2}{\partial X} d\sigma$ (13)

由第二节的量级分析可知,(13)式中只有当 $\frac{20N^2}{6N}$ 较小时,其余两项的作用才比较明显。

右端第一项中 $\frac{\partial \tilde{N}^2}{\partial X} = f \frac{\partial^2 \tilde{l}^2}{\partial Z^2}$ ,反映了风场的垂直切变对重力惯性波的影响。当有南风急流时, $\frac{\partial \tilde{N}^2}{\partial X} < 0$ ,有北风急流时 $\frac{\partial \tilde{N}^2}{\partial X} > 0$ 。当 $\frac{\partial^2 \tilde{l}^2}{\partial Z^2} < 0$ ,重力惯性波若要发展,必须向 X 轴反方向传播  $(C_{\mu} < 0); \stackrel{\partial^2 \tilde{l}^2}{\partial Z^2} > 0$ ,重力惯性波需向 X 的正向传播才可发展。在20-22日淮河流域暴雨区上  $2^{2} \frac{\partial^2 \tilde{l}^2}{\partial Z^2}$ 始终小于零,可见若重力惯性波西传时,该项对重力惯性波发展有利,因此该项对这一时

期重力惯性波的发展有一定的贡献。(13)式中右端 第二项为绝对涡度沿 X 方向的变化对重力惯性波 的影响, $\frac{\partial \zeta_b}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \left( f + \frac{\partial \overline{V}^2}{\partial X} \right) = \frac{\partial \overline{V}^2}{\partial X} \circ \mathfrak{g} \frac{\partial^2 \overline{V}}{\partial X^2} < 0, 有利于$  $沿 X 反向传播的重力惯性波发展,即沿 X 正向 <math>\overline{V}$ 场 的切变涡度减小,这时急流如图5b 所示。当急流如 图5a 时, $\frac{\partial^2 \overline{V}}{\partial X^2} > 0, 有利于沿 X 正向的重力惯性波传$  $播发展。在20-22日20时<math>\frac{\partial \zeta_b}{\partial X}$ 场上(图略),该项时正、



图5 重力惯性波沿 X 正向(a)、 沿 X 反向(b)传播发展的急流型

时负变化较快,因此这一时期该项对重力惯性波发展贡献较小。

#### 4 小 结

根据上述分析可以看出:

(1)层结分布的非均匀性对重力惯性波振幅贡献最大,其次是背景流场的垂直切变项 $\left(\frac{\circ \tilde{N}}{\circ X}\right)$ 和沿X方向切变涡度变化项 $\left(\frac{\circ \bar{\zeta}_{\bullet}}{\circ X}\right)$ 。

(2)在200hPa附近的稳定层结中重力惯性波由稳定度大值区向小值区传播时发展;由小值 区向大值区传播重力惯性波衰减。

(3)在重力惯性波振幅最大区域,若出现 $\frac{\partial \tilde{X}^2}{\partial X}$ ~0时,重力惯性波将迅速衰减。

#### 参考文献

1 巢纪平.大气科学,1980;4(3):230--235

2 邹美恩,陶诗言.大气科学,1984;8(2):135-142

3 赵 平,孙淑清. 气象学报,1990;48(4);397-403

4 贺海晏等.热带气象,1989;5(1):8-17

5 丁治英,陈久康等.南京气象学院学报,1992;15(2);101-110

6 斯公望等.大气科学,1982;6(2):165-170

7 贺海晏等.热带气象,1990;6(3):203-209

# RELATION OF TORRENTIAL RAIN WITH 200hPa ZONAL HETEROGEOUS STRATIFICATION

Ding Zhiying Chen Jiukang

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract Analysis of the occurrence of a torrential rain shows that the zonal heterogeneous stratification around 200hPa jet contributes greatly to the development of internal inertial gravity waves. The torrential rain will develop when the waves propagate where the degree of stability decreases.

Key words heterogeneous stratification, internal inertia gravity waves, torrential rain