

梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征*

孙淑清 杜长萱

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

文章对一次江淮流域梅雨锋暴雨过程进行了研究, 分析了低层风场结构对锋区维持的作用. 通过计算变形向量, 散度风以及相应的锋生函数, 研究了它们各自对锋面的维持、扰动发展所起的作用. 对低空急流的不稳定发展进行了分析, 并研究了它与高层流场特殊的耦合关系对暴雨形成所起的动力作用.

关键词: 梅雨锋; 高低空耦合; 变形场.

引 言

夏季江淮流域持续的大范围带状雨带及暴雨区是与梅雨锋的维持及其上扰动的发展分不开的. 尽管有关的研究已取得长足的进展^{[1][2]}, 但过去人们常注意中系统在锋上的移动, 而对它的发展、维持机理尚不很清楚, 特别是对锋上扰动的发展成因还缺少研究. 比如: 低空急流的发展与梅雨锋维持及暴雨区形成的关系; 与暴雨有密切关系的中尺度扰动产生的条件等. 本文取 1991 年梅雨暴雨为个例, 通过分析梅雨锋及其上发生的暴雨, 研究它的维持机制、扰动发生条件及高低空流场耦合作用, 同时还探讨了暴雨区能量的相互转换关系, 以求加深对梅雨暴雨机理的认识.

1 梅雨锋的维持与发展

有关梅雨锋结构研究表明: 变形风场是它的基本风场^[2]. 低层狭长的变形风场与梅雨锋位置大体一致. 这里深入分析 1991 年 6 月 12~14 日梅雨锋过程中变形风场与锋区维持的关系.

1.1 梅雨锋的维持与变形风场

图 1 是 6 月 12~13 日 900hPa 的 θ_e 图. 长江北侧有一个明显的密集带, 长度近 2000km. 从 12 日 08 时开始锋区已十分清楚. 对流层低层的等比湿线在锋区密集, 水汽辐合带与锋区一致, 梅雨锋在垂直方向上是向北倾斜的. 14 日, 当它趋向消亡时, 700hPa 和

* 本文由国家自然科学基金“我国中尺度天气动力学”及国家 85-901 项目提供资助.

1994-09-01 收到, 1995-08-10 收到再改稿.

500hPa 上之锋区迅速南移至长江以南,锋面呈向南倾斜之势(图略),这时暴雨区移出江淮流域.

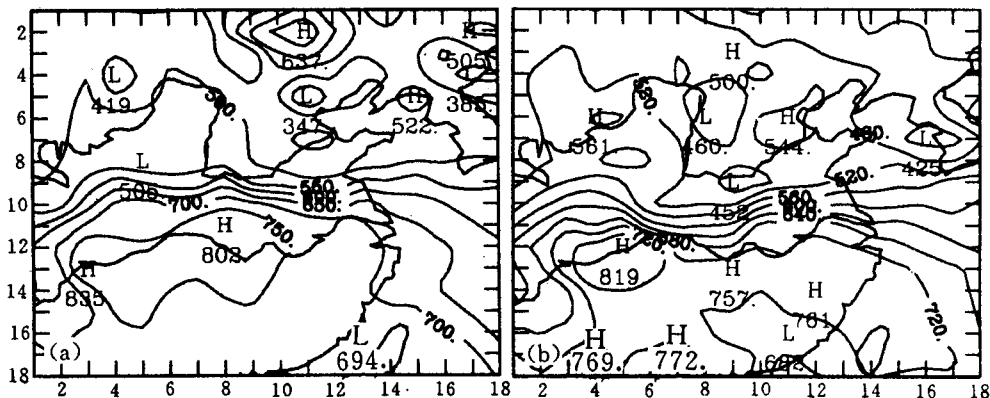


图1 1991年6月12日,13日900hPa θ_w 分布(10^{-1}°C) (a)12日08时,(b)13日08时

Fig.1 Distribution of θ_w at 900 hPa on 12,13,June 1991(10^{-1}°C) (a) 08 LMT 12 June (b) 08 LMT 13 June

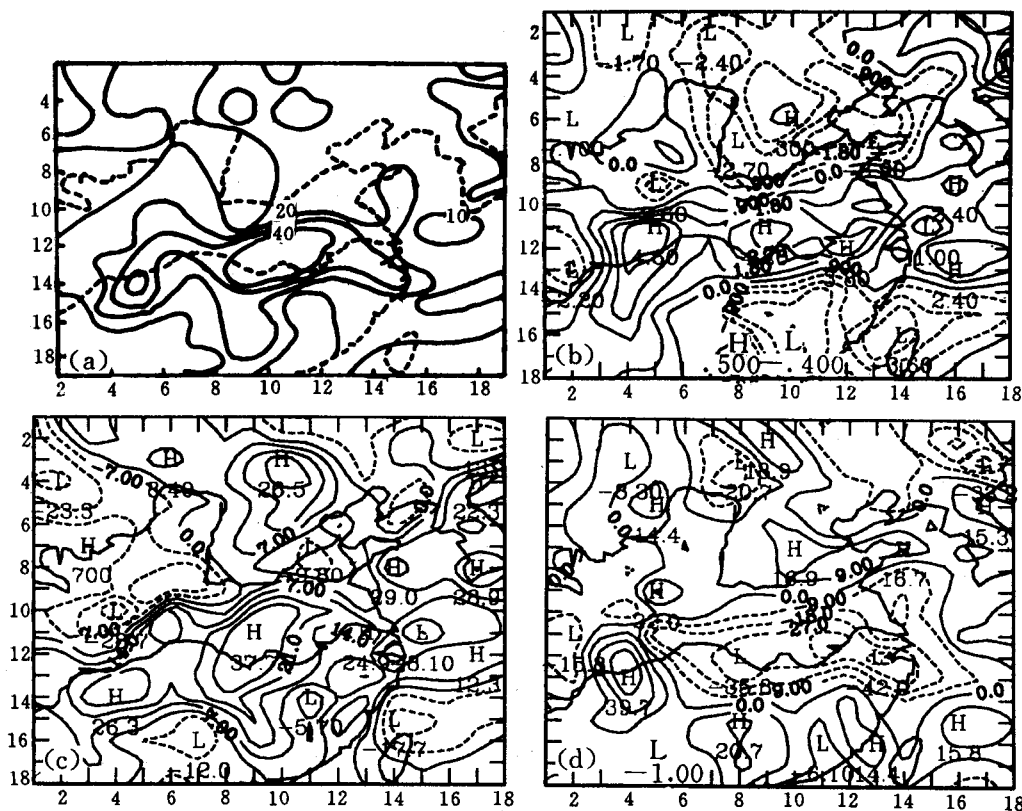


图2 1991年6月13日08时900hPa变形风场($10^{-6}/\text{s}$)

(a)变形向量 E (b)涡度($10^{-6}/\text{s}$) (c)伸长变形 A (d)切变变形 B

Fig.2 Deformation fields of 900 hPa at 08 LMT, 13, June, 1991. ($10^{-6}/\text{s}$)

(a) deformation vector E (b) vorticity ($10^{-6}/\text{s}$) (c) A component (d) B component

计算由伸长变形 A 和切变变形 B 组成的变形向量, $E=[A^2+B^2]^{1/2}$. 其中 $A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$, $B = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$. 图 2a 为 6 月 13 日 08 时 900hPa 的 E 值分布. 与同层的 θ_{se} 分布比较 (图 1b) 可见: E 的大值区与 θ_{se} 锋区几乎重合, 东西向伸展的位置也十分一致. 对比风场中的涡旋部分 (图 2b) 和散度部分, 正涡度区虽与锋区位置大体一致, 但它分成几个中心. 散度分布则更具有中尺度特征 (图略).

图 2c、d 分别为变形项的两个分量 A 和 B . 它们绝对值大值区皆与 θ_{se} 锋区一致. 而 B 项的带状结构则更为清楚. 综观 12~14 日锋面发展过程中 A 、 B 场特征: A 场大体分裂成几个中心, 而 B 则呈现带状的负值区. 分析风场可见, 在锋区南侧为低空急流的西南风, 北侧则为低层高压南沿的东北风. 这种切变风场构成了极强的 $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ 和 $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$. 前者有利于 $B < 0$, 而后者则为 $A > 0$. 胡伯威^[2] 在计算梅雨锋区切变风场时, 也给出了沿锋带的 $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ 和 $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$ 的强值区, 所不同的是 u 、 v 在锋区两侧的切变值比较接近. 总之变形风特别是风在锋区的南北向切变是梅雨锋维持的一个重要的动力条件.

1.2 锋生函数分析

为便于讨论风场各部分的作用, 我们采用 Ninomiya^[3] 的方案计算了对流层的锋生函数. 公式为:

$$\begin{aligned}
 FG \equiv \frac{d|\nabla\theta_{se}|}{dt} = & \frac{1}{|\nabla\theta_{se}|} [(\nabla\theta_{se} \cdot \nabla) \frac{d\theta_{se}}{dt}] - \frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla\theta_{se}|} (\nabla\theta_{se})^2 D \\
 & - \frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla\theta_{se}|} \left\{ \left[\left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y} \right)^2 \right] A + 2 \left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial\theta_{se}}{\partial y} \right) B \right\} \\
 & - \frac{1}{|\nabla\theta_{se}|} \left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial\theta_{se}}{\partial y} \frac{\partial\omega}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

等号右端分别为非绝热项 FG_1 , 散度项 FG_2 , 变形项 FG_3 和倾斜项 FG_4 . 为简单起见, 本文只计算后三项.

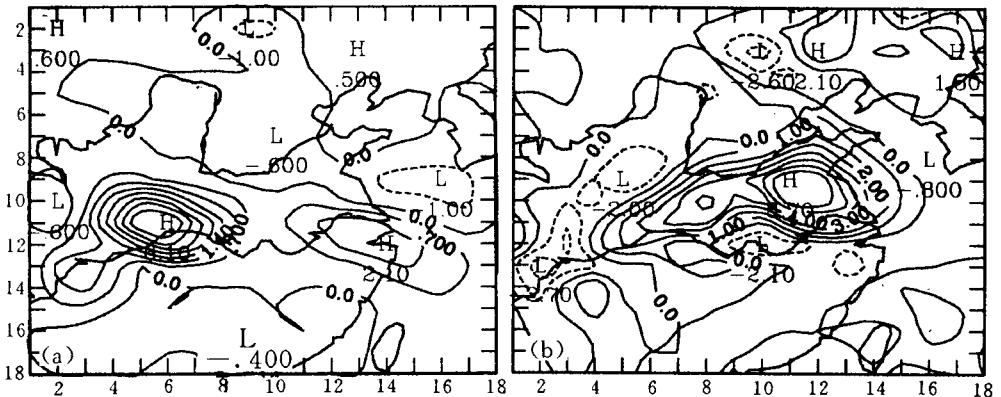


图 3 锋生函数的分布 ($10^{-10}K/m \cdot s$) (a) FG_2 (13 日 08 时) (b) FG_3 (12 日 08 时)

Fig. 3 Frontogenesis function ($10^{-10}K/m \cdot s$) (a) FG_2 (08 LMT 13 June) (b) FG_3 (08 LMT 12 June)

锋生函数的量级为 $10^{-10} \text{K/m} \cdot \text{s}$. 这与北美冷锋^[4]及 Ninomiya^[3]计算的梅雨锋的平均情况大体一致. 变形的量值要比散度项大, 而倾斜项则小, 分布也乱, 这可能与垂直速度计算不易准确有关. 图 3 给出 900hPa 散度项 FG_2 和变形项 FG_3 的分布. 该两项的正值区皆呈带状, 位置与 θ_{se} 锋区一致. FG_2 分为两个大区: 一个在长江下游, 另一个则在四川盆地. 至 14 日 08 时锋区变弱时, 长江下游对应为散度锋消区. 而西侧仍维持锋生. 这是因为在高原东侧低层经常存在辐合系统, 以致该处常保持锋生状态. 东段的情况则比较复杂, 随着环境场及影响系统的更迭而变化. 变形锋生 FG_3 相对较稳定. 最大锋生区在长江中游至江淮流域. 在锋生初期其值最强(见图 3b), 对江淮流域局地锋生起着重要作用. 14 日该项在下游地区也转为锋消.

由上述讨论可见, 变形锋生项对梅雨锋的发展与维持有重要作用. 但是对于锋区上强度的差异与变化, 散度项则有更为明显的作用. 该项的分布导致了锋生强度沿锋区的不均匀性. 这也是梅雨锋上暴雨区分布不均匀的一个重要原因.

2 梅雨锋上扰动与暴雨过程

本次过程暴雨区发生在湖北和江淮地区, 后者暴雨点更多, 持续时间也长. 锋上降水的不均匀性单从 θ_{se} 锋上是难以分辨的. 上节指出, 低层辐合中心及水汽辐合区与暴雨区相合. 梅雨锋上的这种不均匀性是由中尺度扰动造成的. 过去的工作^[1]大多认为这种中- α 尺度的扰动由上游自西向东传来, 或来自青藏高原东侧的西南涡, 或来自西风带小槽, 而忽略了由于动力或热力原因造成的局地不稳定引起扰动发展的可能性. 从本例情况看, 该时段内四川盆地的低涡并没有东移, 而西风带小槽的强度也较弱, 只是当它在与加强了的季风相互作用时才有所发展. 可见扰动的发展与局地条件关系更为密切. 下面来分析扰动发展的环境条件.

2.1 低空急流的不稳定性

本次暴雨过程与低空急流的发展有关. 6 月 12 日之前急流大风中心由香港、广州向北延伸. 13 日急流南端西移, 大风轴向西与孟加拉湾大风中心相接. 这是印度季风爆发的结果. 急流轴上的风速不断增大, 低空急流中心逐渐北进, 13~14 日在安庆附近又出现了 18m/s 的大风. 随着低空急流的发展, 非地转风也相应增大. 我们用散度风分量 \vec{V}_x 来表征非地转风. 在低空急流轴的前端, 南风分量增至 18m/s 以上(图略). 它与偏北的非地转风形成很强的散度风辐合区. 该地区的散度值远比涡度值要大, 且辐合中心与暴雨区十分一致. 可见非地转风加强、散度场发展与暴雨的发生有较好的一致性. 而这正是低空急流的不稳定性发展的一个标志.

2.2 高低空流场的耦合与季风环流的形成

从 6 月 10 日开始对流层高层青藏高压明显东移北抬, 高压轴线位于 28°N . 这时在低空急流的上空, 为高压前沿的偏北风所控制, 高低空气流正处于方向相反的迭置关系. 图 4 给出南北向切过低层急流的剖面图. 由图可以看出本地区的副热带急流位于 40°N 左右, 而低空急流则在 28°N 附近, 南北相差 10 个纬距以上. 这两支偏西风急流很难组成 Uccellini^[5]所描述的耦合关系. 而从图 4b 则可看出: 35°N ($j=10$ 格点)以南 500hPa 以下

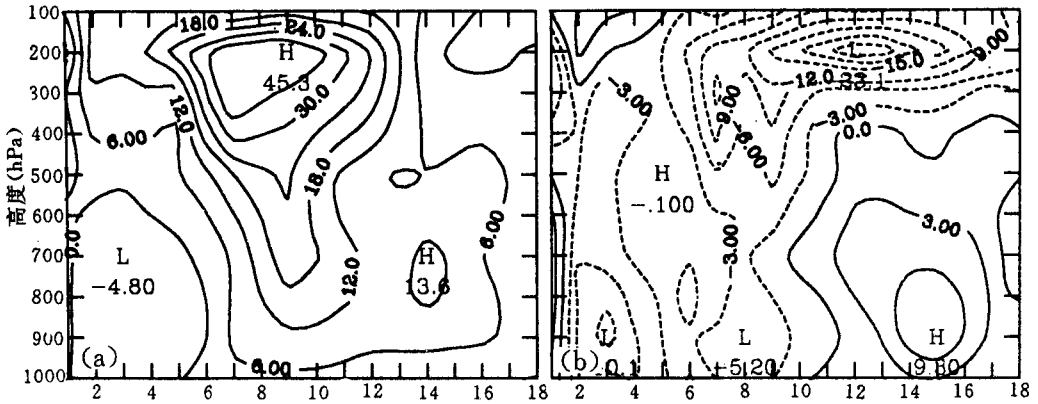


图 4 1991 年 6 月 12 日 08 时 u (a) v (b) 分量南北向剖面(m/s)

Fig. 4 Cross-section of u (a), v (b) from north to south at 08 LMT 12, June 1991

为偏南风.这正是低空急流所在位置.最大风速中心在 900hPa.而 500hPa 以上则为偏北风,最大值在 200hPa,最大的北风分量为 23.1m/s.这就是青藏高原前沿的东北风,它与低层西南风处于上下迭置的关系.高低空系统的这种耦合关系是江淮流域梅雨期暴雨所特有的.它的东北端为高空东风急流入口区及低空急流前端的上升区,而急流轴后部则为下沉区.各层垂直速度的分布(图略)证实了这一点.这种东北—西南向的次级环流是一种热力直接环流,它不同于副热带西风环流出口区的附加次级环流.这种特殊的季风环流与高空青藏高原的东移及低层低空急流的发展有关.环流圈的建立促发了其上升区暴雨及中尺度扰动的发生.从质量调整原理可知,东风的加速将在该处形成极大的散度正值区及非地转风^[1],它使该地区的低层中尺度扰动得以发展,形成暴雨发生的有利条件.

从以上的分析可以看出,本次梅雨暴雨的产生是局地的动力热力条件改变的结果.从高空条件看,青藏高原的北推东移使高空副热带东风急流也随之北抬,它的入口区正位于加强着的不稳定的低空急流之上方,构成了一个特殊的东北—西南向的季风环流圈.从锋生函数的分布也可以证实,在江淮流域,散度锋生项是锋生的主要部分.这说明该地区暴雨发生与局地动力条件的变化及扰动的发展有关.

2.3 暴雨区的能量转换关系

以下通过动、位能之间的转换关系来进一步探讨这种热力直接环流圈的存在和作用.能量转换的计算表明:梅雨锋内不论是高层或是低层都存在与锋带相一致的位能向动能转换带.为了研究散度场在扰动发展中的作用,本文计算了位能 P 与散度风动能 K_z 之间的转换函数: $C(P, K_z) = -\chi \nabla^2 \varphi$.其中 χ, φ 分别为速度势和位势高度.图 5 为 850hPa 的 $C(P, K_z)$ 值分布.可以看出正值区与锋区走向一致.这说明梅雨锋上有大量的位能向动能转换.梅雨锋区上虽然没有明显的强温度梯度,但是它仍具有一定的斜压特征.从转换函数看,高层的值更大,分布与低层一致.这说明高层的动、位能之间的转换关系同样支持了梅雨锋的维持.从图 5 还可以看到, C 值在锋上分裂成两个大值中心,下游的大值区正与暴雨区对应.

分析该中心的演变(图略)发现,它由暴雨初期的较小的值逐渐变大,13 日达到 $33.0 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$,14 日达 $59 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$.高层的这种增长更为激烈.暴雨前期它的值是

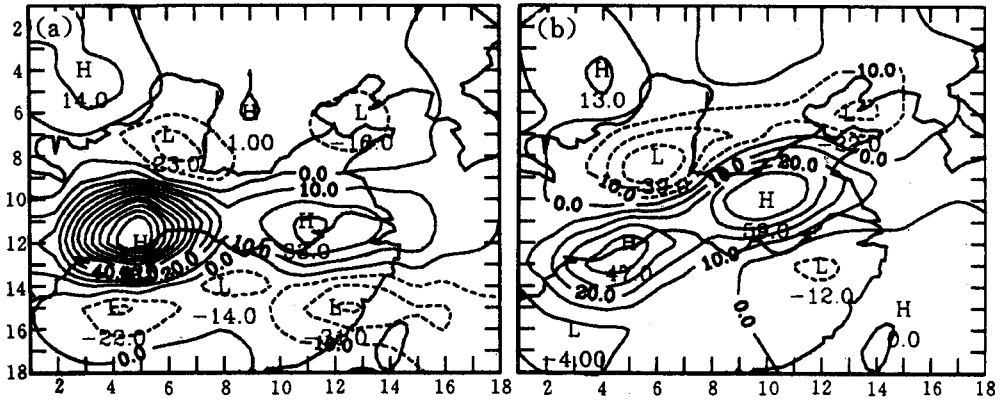


图5 850hPa $C(P, K_z) = -\chi \nabla^2 \varphi$ 分布 ($10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$) (a)13日08时 (b)14日08时

Fig. 2 Distributions of $C(P, K_z) = -\chi \nabla^2 \varphi$ at 850 hPa ($10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$) (a) 08 LMT 13 June (b) 08 LMT 14 June

$410 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$, 到暴雨盛期分别达到 $765 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$ 和 $561 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$, 降水减弱时则减小到 $201 \times 10^{-4} \text{J/s} \cdot \text{kg}$. 这个变化说明, 位能向动能的转换在暴雨区较之锋区其它部位更为强烈, 中心数值随着暴雨加强而增大. 这个计算结果与上节所讨论的高低空急流之间相互耦合所构成的热力直接环流圈是一致的. 暖湿空气在低空急流前端及高空东风急流入口区上升, 使该地区的位能得到释放. 而位能向散度风动能的转换又增强了整层散度风场, 对环流圈起到了反馈作用.

3 小 结

(1) 变形风是梅雨锋特有的一种风场结构, 它是比锋区中的涡度、散度场更重要的维持梅雨锋的动力条件. 这种风场特点与经典锋区的特征不同. 分析变形风向量的两个分量表明, u, v 分量的经向切变构成变形风的主要部分, 低空急流及北侧东北风的存在可使

$\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ 和 $\frac{\partial v}{\partial y} < 0$ 达到较高的值.

(2) 锋生函数的变形项是一个主要项, 它与锋的维持有直接的关系. 而散度锋生项则与梅雨锋上中尺度扰动及由此引起的不均匀性有关. 它的正值区与暴雨区相对应.

(3) 本次梅雨锋暴雨所对应的中尺度扰动与局地条件更为密切, 扰动的发展与低空急流加强发展有关. 高低空流场的耦合构成了特殊的季风环流圈. 它的上升支正是低空急流前端最不稳定的地区. 非地转风加强, 高低层散度增大以及散度锋生项与暴雨的一致说明了耦合关系对暴雨过程的动力效应.

(4) 锋区上空位能向动能的转换说明梅雨锋具有一定的斜压性. 在暴雨区上空这种转换更为强烈, 且随降水的强弱而增减. 这充分说明了高低空流场所组成的直接热力环流圈的作用.

参 考 文 献

- 1 丁一汇等. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京:气象出版社,1993,第四章.
- 2 Hu Bowei. On the conceptual model of the typical mei-yu front in the continent of China 1992. International Symposium on Torrential Rain and Flood. Huangshan Mt. Anhui, China. October 5~9, 1992.
- 3 Ninomiya K. Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer Northern Hemisphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 1984, **62**: 880~894.
- 4 丁一汇. 高等天气学. 北京:气象出版社,1991,第二章.
- 5 Uccellini L W and Johnson D R. The coupling of upper and lower troposphere and streaks and implications of the development of severe convective storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107**: 652~703.

THE MAINTENANCE OF MEI-YU FRONT AND DEVELOPMENT ASSOCIATED DISTURBANCE

Sun Shuqing Du Changxuan

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract

A case of mei-yu front with heavy rainfall in the Changjiang and Huaihe River valley is studied in this paper. By calculating the deformation field, divergence and their corresponding terms of frontogenesis functions, their roles on the maintenance of the front and the development of frontal turbulence are analyzed. The unstable low level jet on the south side of the front is investigated. And, a special dynamic role resulting from its coupling with upper level flow, which would construct a specific secondary circulation, is also studied.

Key words: Mei-yu front; The coupling of lower with upper circulation; Deformation field.