

长江上游暴雨的边界层动力诊断研究

李跃清

(成都高原气象研究所, 成都 610072)

摘 要 本文应用诊断分析方法研究了大气边界层动力特征与长江上游暴雨天气的关系。结果表明: 大气边界层对暴雨天气有重要影响, 成都边界层风场分量 $u, v < 0$ 时, 对应暴雨天气, $u, v > 0$ 时, 无降水天气; 边界层内正涡度、辐合、上升运动的出现、增强、减弱与暴雨的发生、发展、结束相联系; 与青藏高原东部边缘东北-西南走向地势相关的边界层动力激发作用是长江上游暴雨产生的一种物理机制。

关键词 暴雨 大气边界层 动力诊断

1 引言

研究表明, 行星边界层作为大气中一个主要能量源, 在大气动量、热量、水汽的垂直交换过程中起着极为重要的作用, 是自由大气中天气系统发生、发展、演变、消亡的重要原因之一^[1,2]。但对于行星边界层与暴雨天气相互联系还缺乏系统的研究, 已有的工作^[3~5]表明, 进一步研究行星边界层对暴雨的作用具有重要意义。

本文在诊断分析的基础上, 较系统地分析了1982~1986年5~9月长江上游(以四川为代表)区域性暴雨天气的行星边界层动力特征, 得到一些新的结果, 加深了对暴雨的认识。

2 资料与方法

根据四川盆地大气边界层气象资料数据系统^[6], 应用1982~1986年5~9月逐日07和19时测站0、300、600、900 m高度的风场资料。

由有限元方法^[7], 对成都、重庆、达县构成的位于四川盆地中部的三角形有限元(见图1), 三个顶点的风场分量表示为

$$\begin{cases} u_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i \\ v_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 y_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中 x_i, y_i 是第 i 个顶点位置坐标, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 和 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 是系数。于是, 此三角形上的散度 D 、涡度 ζ 为

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_1 + \beta_2$$

$$= \frac{(u_1 - u_2)(y_2 - y_3) - (u_2 - u_3)(y_1 - y_2) - (v_1 - v_2)(x_2 - x_3) + (v_2 - v_3)(x_1 - x_2)}{(x_1 - x_2)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \beta_1 - \alpha_2$$

$$= \frac{(v_1 - v_2)(y_2 - y_3) - (v_2 - v_3)(y_1 - y_2) + (u_1 - u_2)(x_2 - x_3) - (u_2 - u_3)(x_1 - x_2)}{(x_1 - x_2)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)}$$

然后, 通过连续方程可得垂直速度 W 。

因此, 通过风场资料, 计算了边界层 0、300、600、900 m 高度 07、19 时的涡度、散度和垂直速度。

3 暴雨边界层动力特征

1982~1986 年 5~9 月长江上游共发生 20 多次区域性暴雨过程, 其中重要的有: 1982 年 7 月 15~17 日、26~29 日、1983 年 7 月 27~31 日、1985 年 8 月 17~20 日长江上游区域性强暴雨过程, 下面进行具体讨论。

3.1 边界层风场特征

分析发现, 四川盆地边界层风场变化具有明显的规律性, 其中成都边界层 u 、

v 风场基本呈同步、同位相变化, 主要表现为东北风 ($u < 0$ 、 $v < 0$) 和西南风 ($u > 0$ 、 $v > 0$) 的交替出现。并且, 对比表明: 当成都边界层为东北风时, 长江上游出现暴雨天气, 当为西南风时, 无降水天气, 两者间具有非常密切的对应关系。风场变化超前于暴雨天气几小时到一天左右, 具有一定的非同步性。

图 2 给出了长江上游四次著名的区域性强暴雨过程前后 07 时成都边界层四层平均 u 、 v 风场, 19 时与此类似。由图可知, 1982 年 7 月 14 日、25 日, 1983 年 7 月 25 日, 1985 年 8 月 16 日成都边界层 u 、 v 风场已先后转为小于 0, 开始吹东北风, 并且振幅显著增大, 几小时到 40 多小时后出现暴雨; 对应边界层风场 u 、 $v < 0$ 、东北风时段, 正是 1982 年 7 月 15~17 日、26~29 日, 1983 年 7 月 27~31 日, 1985 年 8 月 17~20 日长江上游强暴雨过程; 1982 年 7 月 17 日、30 日, 1983 年 7 月 31 日, 1985 年 8 月 20 日 u 、 v 风场又开始转为大于 0、西南风, 暴雨结束。

3.2 边界层涡散场

分析表明, 边界层平均风涡度、散度变化与长江上游暴雨天气有密切对应关系。暴雨天气发生于边界层内正涡度、辐合的有利环境中, 并且, 散度和涡度的大小达到了自由大气中的强度。当边界层涡散场转为不利的配置时, 暴雨天气结束。另外, 边界层涡散场的变化具有几小时到一天左右的超前性。

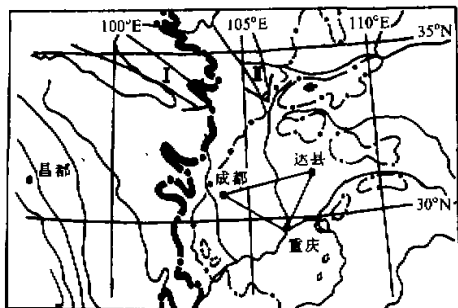


图 1 长江上游成都、重庆和达县构成的三角形有限元分布
高原山地和东部平原分界线:
粗点划线——3000 m 等高线,
细点划线——1000 m 等高线
夏季进入四川盆地冷空气主要路径:
箭头 I——西方路径, 箭头 II——西北路径

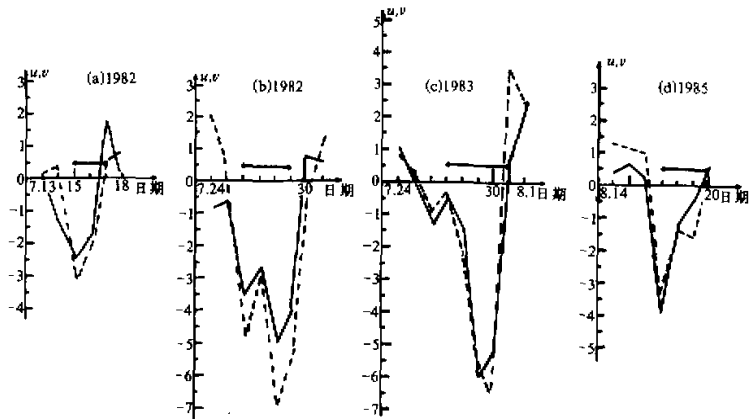


图 2 长江上游四次强暴雨过程前后 07 时成都边界层平均 u , v 风场变化
实线: u 分量; 虚线: v 分量. 单位: m/s . 箭头线段代表暴雨时段(下同)

图 3 给出了长江上游四次区域性强暴雨过程前后 07 时成都、重庆、达县三角形上边界层平均风涡散场, 19 时与此类似。由图可知, 当边界层涡散场先后转为正涡度、辐合的有利配置时, 暴雨开始产生。1982 年 7 月 15~18 日、26~30 日、1983 年 7 月 26~31 日、1985 年 8 月 16~20 日边界层同时处于正涡度、辐合的有利配置, 并且, 涡散场强度显著增强, 正好对应暴雨过程; 当边界层涡散场减弱, 转为不利的配置时, 暴雨也随之结束。同样, 涡散场变化也表现出一天左右的超前性。而且, 散度场变化比涡度场具有更长的超前性。

3.3 边界层顶动力特征

行星边界层上界高度一般在 1~1.5 km 之间。这里, 以 900 m 高度近似代表行星边界层顶, 讨论其动力特征与暴雨的关系。

分析表明, 与边界层平均风涡散场一致, 暴雨天气过程对应边界层顶正涡度、辐合、上升运动的有利环境, 暴雨的发展与明显的正涡度、显著的辐合、强烈的上升运动相联系, 当这种配置破坏时, 降水结束。并且, 涡散场、垂直速度场具有一天左右的超前性。

图 4 给出了长江上游四次区域性强暴雨过程前后 07 时成都、重庆、达县三角形上边界层顶涡散场和垂直速度场, 19 时与此类似。由图可知, 1982 年 7 月 15~18 日、26~30 日、1983 年 7 月 25~31 日、1985 年 8 月 16~20 日边界层顶处于正涡度、辐合、上升运动的有利配置, 并且, 强度大大增强, 正好对应暴雨天气过程; 而暴雨开始前、结束后边界层顶涡度、散度、垂直速度强度较弱, 都处于不利的配置。同样, 涡散场、垂直速度场具有一定超前性。

需要指出的是, 分析表明 1982~1986 年 5~9 月长江上游其它区域性暴雨过程与边界层风场、涡散场、边界层顶动力特征具有同样密切的关系 (图略), 可得出与上述类似的结论。

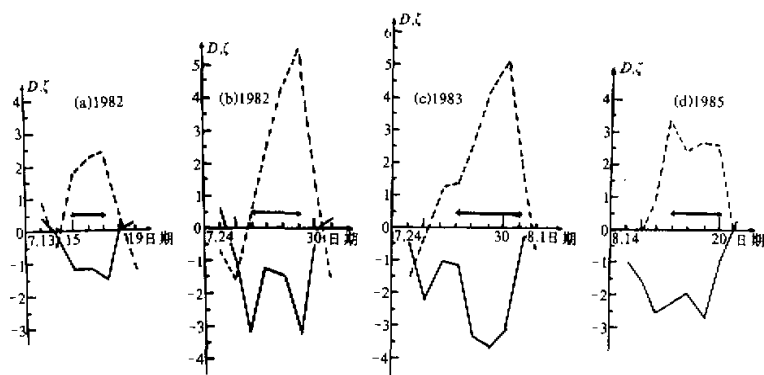


图 3 长江上游四次强暴雨过程前后 07 时成都、重庆、达县
三角形上边界层平均风散度、涡度变化
实线：散度；虚线：涡度。单位： s^{-1} ；量级： 10^{-5}

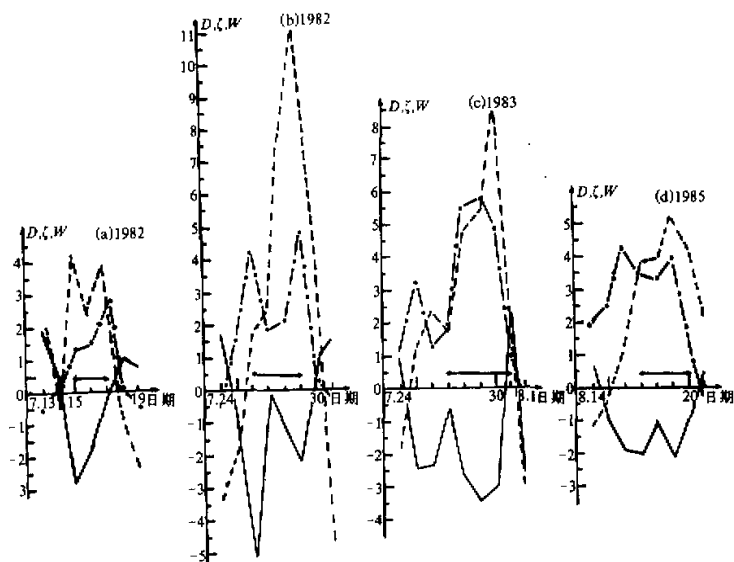


图 4 长江上游四次强暴雨过程前后 07 时成都、重庆、达县三角形上边界层 900 m 高度涡度、
散度（单位： s^{-1} ；量级： 10^{-5} ）和垂直速度（单位： cm/s ）变化
实线：散度；虚线：涡度；点划线：垂直速度

4 分析与讨论

以上对 1982~1986 年 5~9 月四川盆地边界层与长江上游暴雨天气的逐日对比分析表明，两者具有非常密切的关系，大气边界层动力作用对暴雨发生发展有重要影响。

长期实践表明：成都单站自由大气层（850 hPa 以上）的风场变化对四川盆地暴雨

预报具有重要指示意义,成都自由大气层一定强度的偏南风是暴雨预报模式和方法中的基本因子^[8]。这里表明,成都边界层风场具有同样重要的作用,代表了产生暴雨天气的另一侧面,反映了大气边界层的物理特征同自由大气一样,对暴雨有显著影响。我们认为其原因与四川特有的地形特征相联系。成都位于四川盆地西部的川西平原,西邻川西山地和青藏高原,高原山地与川西平原分界线呈东北-西南走向,成都正好位于这一分界线右侧(见图1)。由此可知,成都边界层 u 、 v 风场基本呈同位相变化,即盛行风为东北风或西南风,这种交替变化的规律正是成都特定地理环境的产物,反映了大地形与大气环流的相互作用。并且,由于夏季副热带环流位置北移,四川盆地常受夏季风影响,高温高湿,层结也易不稳定,因而,四川盆地夏季降水与冷空气活动极为密切,尤其是暴雨过程,多数有冷空气的直接影响^[8]。分析表明,侵入四川盆地的冷空气主要有两条路径(见图1),即冷空气进入南疆经青海由四川西北部进入盆地的西方路径——这是夏季入侵四川的冷空气主要路径,以及冷空气自北疆经河西走廊再翻越秦岭到达四川盆地的西北路径^[8]。因此,当成都边界层为东北风时,可能表明高纬冷空气沿青藏高原东部边缘南下,由边界层经川西平原侵入四川盆地,激发暴雨天气过程;当边界层为西南风时,表明四川盆地从边界层到自由大气受单一性质的气团控制,高纬无冷空气南下影响,四川盆地为无降水晴好天气。当然,成都边界层为东北风,也可能表明盆地气旋曲度发展,低涡产生降水。关于这种在青藏高原东部特殊地形背景下,成都边界层东北风激发长江上游暴雨发生发展的具体图象,还需作深入的研究。

行星边界层是大气的一个重要部分,表现出明显的湍流性和非地转性等特点,是整个大气一个主要的能量源。因此,在其内发生的物理过程对大气具有特殊的作用,大气边界层正涡度、辐合、上升运动的有利配置,将热量、水汽持续不断地输向自由大气,维持暴雨天气,这种动力条件的产生、增强、减弱,制约着暴雨的发生、发展、消亡。并且,在动力作用的强度上,大气边界层涡度、散度、垂直速度都达到了自由大气中的强度,表明边界层动力特征对暴雨具有重要影响。

5 结论

(1) 西邻青藏高原的成都是长江上游暴雨预报的关键信息点,其边界层风场主要表现为东北风和西南风的交替变化,这种规律性是地形与环流相互作用的结果。

(2) 当成都边界层为东北风时,对应长江上游暴雨天气;为西南风时,对应无降水天气。与青藏高原东部边缘东北-西南走向地势相关的成都,在其边界层东北风作用下,长江上游暴雨天气将发生、发展。这种边界层动力激发作用是长江上游强暴雨产生的基本机制之一。

(3) 大气边界层明显正涡度、显著辐合、强烈上升运动维持着暴雨天气,其变化制约着暴雨的发生、发展、消亡。并且,边界层涡度、散度、垂直速度达到了自由大气中的强度,表明边界层动力特征对暴雨的重要作用。

(4) 行星边界层风场、涡度场、散度场和垂直运动场的变化超前于暴雨天气数小时到一天左右,具有明显的预报意义。

另外,进一步研究行星边界层热力、动力特征对暴雨的影响及其边界层与自由大气

的相互联系,是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 伍荣生、党人庆等, 1983, 动力气象学, 上海科学技术出版社, 115~146.
- 2 吴辉锭、张兴旺等, 1984, 大气边界层的数值模式, 气象学报, 42, No.3, 290~300.
- 3 杨大升, 1978, 行星边界层对低涡降水过程的作用, 暴雨文集, 吉林人民出版社, 47~57.
- 4 陶诗言、丁一汇等, 1979, 暴雨和强对流天气的研究, 大气科学, 3, No.3, 227~238.
- 5 赵思雄、周晓平等, 1982, 中尺度低压系统形成和维持的数值实验, 大气科学, 6, No.2, 109~117.
- 6 刘建西、但尚铨等, 1992, 四川盆地大气边界层气象资料数据系统, 成都气象学院学报, 7, No.4, 45~50.
- 7 丁一汇, 1989, 天气动力学中的诊断分析方法, 科学出版社, 11~33.
- 8 刘富明等, 1986, 四川的暴雨及其预报, 四川省短期天气预报手册 (下册), 四川省气象局, 28~104.

The PBL Dynamic Diagnosis of Heavy Rain over the Upper Reaches of the Changjiang River

Li Yueqing

(Chengdu Institute of Plateau Meteorology, Chengdu 610072)

Abstract In this paper, characteristics of the planetary boundary layer (PBL) and its relations with heavy rains in the upper reaches of the Changjiang River are studied by the diagnostic analysis method. The result shows that the PBL has important influence on heavy rains. Heavy rains happen when u , v components in the PBL in Chengdu are negative and it will be clear when the u , v components are positive. The appearance, strengthening and weakening of positive vorticity, convergence and ascending motion in the PBL are connected with the occurrence, development and end of heavy rains. Dynamical trigger in the PBL relating to the topography in the northeast-southwest direction at the eastern edge of Tibetan Plateau is one kind of physical mechanism for heavy rains in the upper reaches of the Changjiang River.

Key words heavy rain planetary boundary layer dynamic diagnosis