

季风流管动力学特征研究

徐祥德 尹树新 吴效华 朱复成 刘玳

(南京气象学院)

在我国夏季风盛行时期,大陆在副高北侧往往有一条东西走向的切变线或准静止锋降水带,沿着降水带上有上升运动,而在切变线或准静止锋雨带南面是东西走向的副高脊线,沿脊线上有下沉运动。在这两者间出现了北面为上升运动,南面为下沉运动的经向环流圈,这个东西方向长达 1 千多公里的次级垂直环流圈结构就象“东西走向的管子”。本文将夏季中国大陆上沿着副高北侧东西向切变线或准静止锋云雨带构成的管状次级经向垂直环流圈称为“季风流管”。它的特征反映了东亚季风区东西风急流、副高等系统的配置关系及其相互影响。

本文探讨了上述次级经向垂直环流圈结构特征与非绝热因子、高原地形以及行星尺度环流系统的相关关系,进而揭示季风流管形成与维持的物理机制。

1. 次级经向垂直环流圈的动力系统

为了研究构成季风流管的次级经向环流动力系统,本文引入了 x, y 分量高度方程,描述绕水平轴旋转的涡旋特征,探讨影响上述次级经向环流动力系统的因素。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} = \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + f \frac{\partial v}{\partial z} + \zeta \frac{\partial v}{\partial z} + \bar{\zeta} \frac{\partial v}{\partial x} - \tilde{f} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \eta \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + f \frac{\partial u}{\partial z} + \tilde{f} \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial \tilde{f}}{\partial y} + \eta \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{\partial u}{\partial z} - \zeta \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中 $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, $\eta = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$, $\bar{\zeta} = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$, $f = 2 \Omega \sin \varphi$, $\tilde{f} = 2 \Omega \cos \varphi$,

采用状态方程,变换(1)、(2)式力管项,且考虑季风环流背景对此次级经向垂直环流系统的激发作用,经量级分析,将(2)、(3)式的一级简化形式进行线性化,引入动力、热力基本场,若暂不计平流项,可写为:

$$\frac{\partial \eta'}{\partial t} - \left(B'_y + f \frac{\partial v'}{\partial z} \right) + \zeta' \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \bar{\zeta}' \frac{\partial v'}{\partial z} + \bar{\zeta}' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{\zeta}' \frac{\partial v'}{\partial x} - \eta' \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \bar{\eta}' \left(\frac{\partial w'}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} = \left(B'_z + f \frac{\partial u'}{\partial z} \right) + \xi' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \bar{\xi} \frac{\partial u'}{\partial z} + \eta' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{\eta} \frac{\partial v'}{\partial y} - \xi' \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \bar{\xi} \left(\frac{\partial w'}{\partial z} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\text{式中} \begin{pmatrix} B'_z \\ B'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R}{\bar{p}} \left(\frac{\partial T'}{\partial z} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial T'}{\partial y} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial z} \right) \\ \frac{R}{\bar{p}} \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{\partial T'}{\partial z} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \frac{\partial p'}{\partial x} \right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

2. 数值分析与诊断

图 1 a, b 为 1982 年 7 月 7 日、8 日 115°E 垂直剖面图次级经向环流位置、强度变化, 图 1 a, b

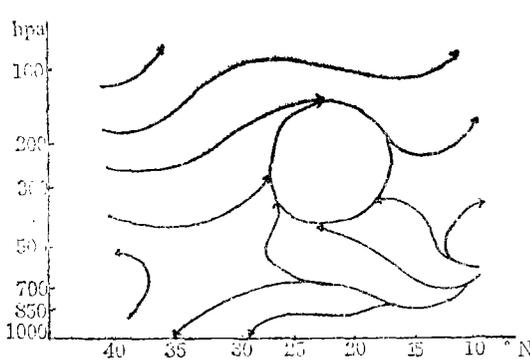


图 1a 1982 年 7 月 7 日 20 时 115°E 垂直剖面图次级经向环流圈位置

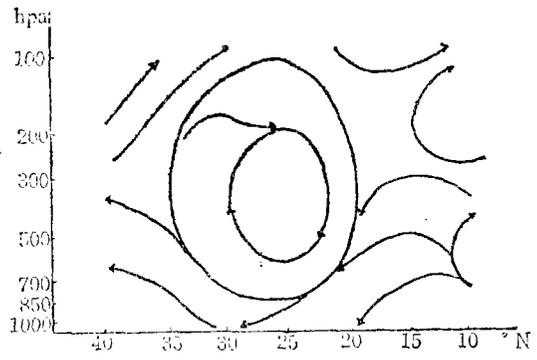


图 1b 1982 年 7 月 8 日 20 时 115°E 垂直剖面图次级经向环流圈位置

表明, 垂直环流圈有北移, 且自高层向中、低层发展趋势。

图 1c 为 7 月 8 日 120°E 垂直剖面上“流管”切面图。由图 1b 与 c 可知, 500 hPa 高度附近 25°N 位置与雨带相对应次级经向垂直环流圈构成了一近似于“东西向管状系统”, 相应的云雨带位于长江中、下游地区。值得注意的是, 由于次级经向环流圈在对流层中、低层的加强, 随后, 相应雨带也明显发展, 长江中、下游出现大雨, 亦呈东西向带状。这反映了次级经向垂直环流圈与雨带的相关特征。

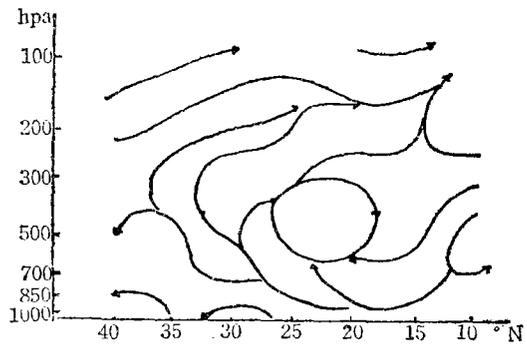


图 1c 1982 年 7 月 8 日 20 时 120°E 垂直剖面图次级经向环流圈位置

本文采用 1982 年 7 月 7 日资料, 利用变形原始方程, 计算经向风垂直切变时间变率 $\left(\frac{\partial \partial v}{\partial t \partial p} \right)$ 。数值计算结果表明, $\frac{\partial \partial v}{\partial t \partial p}$ 场分布特征与后一天垂直环流圈位置、强度相关。如图 2 a, b 所示, $\frac{\partial \partial v}{\partial t \partial p}$ 的相对高值区恰与后一天实况次级垂直环流系统对应。这一结果可启发我们考虑, 采用变形原始方程或 x, y 分量涡度方程时间变率量的计算来推测季风流管的位移、发展, 进而预报季风雨带的未来变化及降水强度, 以便建立新的预报工具或研究季风雨带动力机制的方法。

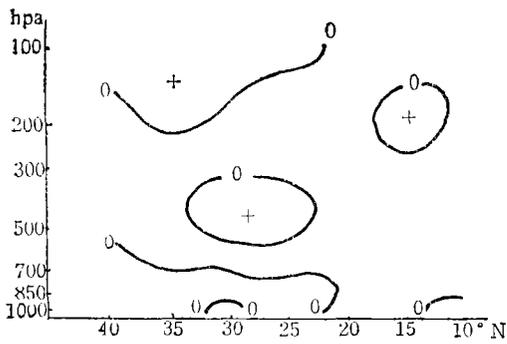


图 2a 1982年7月8日20时115°E垂直剖面 $\frac{\partial}{\partial t}(\frac{\partial v}{\partial p})$ 的时间变率特征量

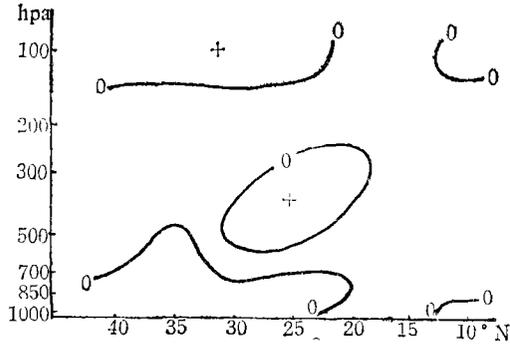


图 2b 1982年7月8日20时120°E垂直剖面 $\frac{\partial}{\partial t}(\frac{\partial v}{\partial p})$ 的时间变率特征量

根据本文数值分析，可将计算经向风垂直切变时间变率各项贡献大小列表 1。

表 1 $\frac{\partial}{\partial t}(\frac{\partial v}{\partial p})$ 方程各项 500hPa 各项贡献的经向分布

各 项 数 值 纬度	$\frac{R}{P} \frac{\partial T}{\partial y}$	$-f \frac{\partial u}{\partial p}$	$-\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x}$	$-u \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial v}{\partial p})$	$-\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y}$
40	-1.1	1.4	0.0	0.0	-2.2
35	-7.4	5.1	-0.5	0.2	0.3
30	-5.1	11.5	-0.7	1.4	1.7
25	3.4	5.1	0.1	0.3	0.9
20	13.4	-17.8	-1.1	-0.7	-0.0
15	14.9	-23.5	-2.1	-0.2	0.1
10	8.0	-21.8	0.0	0.0	-0.1

各 项 数 值 纬度	$-v \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\partial v}{\partial p})$	$(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) \frac{\partial v}{\partial p}$	$-w \frac{\partial^2 v}{\partial p^2}$	$\frac{\partial}{\partial t} (\frac{\partial v}{\partial p})$
40	0.5	2.2	0.2	0.9
35	-0.2	-0.2	0.2	-2.5
30	0.5	-0.3	-0.5	8.5
25	-0.6	-0.9	0.0	8.4
20	-0.4	-0.1	-0.0	-6.8
15	-0.0	0.0	0.0	-10.7
10	-0.1	0.1	-0.0	-13.9

3. 非地转斜压力管以及非绝热强迫效应

由上节表 1 可知，斜压项与风场垂直切变构成了 x 方向涡度方程的两大项，且两者是非平衡的，而其它项低于此两项约一个量级，这一数值分析结论与尺度分析相符，对于纬向、经向垂直环流激发

过程以及非平衡特征，由方程(4)、(5)可得如下式子：

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \eta'}{\partial t} \\ \frac{\partial \xi'}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}'_y \\ \mathbf{B}'_x \end{pmatrix} + f \begin{pmatrix} \frac{\partial v'}{\partial z} \\ \frac{\partial u'}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (7)$$

由于大气压在 $y-z$ 平面具有最强的斜压性，因此上述斜压矢量分量中 \mathbf{B}'_x 影响较大， \mathbf{B}'_x 与 $-f \frac{\partial u'}{\partial z}$ 项的不平衡可激发出 $y-z$ 垂直面上环流系统，尤其对于副高北侧边缘，温度场与气压场梯度特征可能导致 \mathbf{B}'_x 项呈带状分布，因而经向垂直环流圈分布构成了类似“管状”结构。

由 x 分量涡度方程(5)与(6)、(7)可得：

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} \propto \frac{R}{\bar{p}} \left(\frac{\partial T'}{\partial z} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial T'}{\partial y} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial z} \right) \quad (8)$$

入夏后，大陆迅速增热，季风流管升支发生在副热带高压北侧的切变线区，降支出现在副高脊线附近。对于西风带平均状况， $\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} < 0$ ，平均大气层结和温度经向分布， $\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} < 0$ ， $\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} < 0$ ，以及 $\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} < 0$ ，若考虑副热带高压北缘，存在低空暖湿气流与较强气压梯度的温、压物背景，即 $\frac{\partial T'}{\partial z} < 0$ ， $\frac{\partial T'}{\partial y} > 0$ ，以及 $\frac{\partial p'}{\partial y} < 0$ ， $\frac{\partial p'}{\partial z} < 0$ 。

由上述条件，对照(8)式右端各项的正负符号，可发现，副高北侧边缘暖湿气流控制区域，易激发出瞬变天气尺度经向环流，且沿副高边缘构成“管状”系统， $\frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0$ 。

这反映了季风流管的维持与加强，与东亚季风区行星尺度环流背景的相关关系，且若副高北跳，次级经向垂直环流圈组成的“环流管”亦北移。

章基嘉等^[3]曾指出，当北方雨季开始，季风流管向北凸出，形成“季风流管”变化的重要特征，如图3所示。

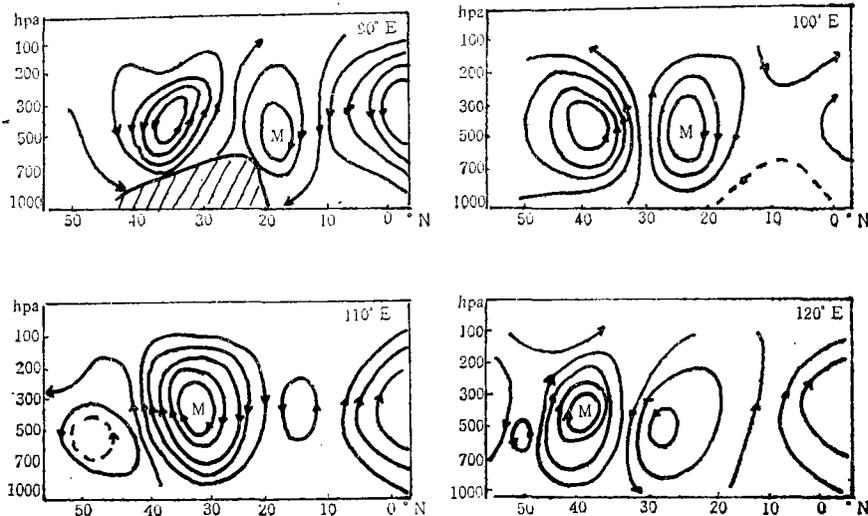


图3 1979年7月26日90—120°E各经圈剖面的季风环流圈
(M 季风环流圈)

另外，次级经向垂直环流圈构成“环流管”形变、中断、分裂往往与西风槽东移、副高形变有关。西风槽后冷空气堆南移，引起副高北缘切变线、准静止锋某段出现生消现象，即“环流管”某段 $\frac{\partial p'}{\partial y} > 0$ ， $\frac{\partial T'}{\partial y}$

<0 。由(8)式可见,引起 $\frac{\partial \xi'}{\partial t} < 0$, 垂直环流方向出现反向旋转。此段“环流管”中断,若西风槽东移入海,副高北侧西南气流、切变线重新活跃,次级垂直环流圈重新加强,且维持东西走向“环流管”。

非绝热强迫因素对于上述垂直环流的形成、维持也起了重要作用。图4 a, b 分别为 120°E 垂直剖面次级环流上升支、下沉支区域的 Q_1 (除辐射加热外的其它非绝热加热)、 Q_2 (水汽净收支引起的加热源)与 ω 垂直分布廓线。图4表明,次级经向垂直环流上升支区非绝热 Q_2 、 Q_1 分布特征:加热主要在500 hPa以下层次,且下沉支 Q_2 、 Q_1 总和很小或负值,这类非绝热加热结构可能引起副高北侧边缘地区 $\frac{\partial T'}{\partial y} > 0$, $\frac{\partial T'}{\partial z} < 0$ (这里 T' 为非绝热加热引起温度场扰动部分); 这类加热效应加上平均气压场条件,即 $\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} < 0$, $\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} < 0$, 由(8)式可知,这些条件将有利于副高北缘雨带以及次级经向垂直环流圈的加强, $\frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0$ 。副高北侧上述“环流管”的加强也引起了季风雨带降水的增强,上述凝结加热与次级经向环流圈演变的“反馈效应”与 CISK 机制相类似。

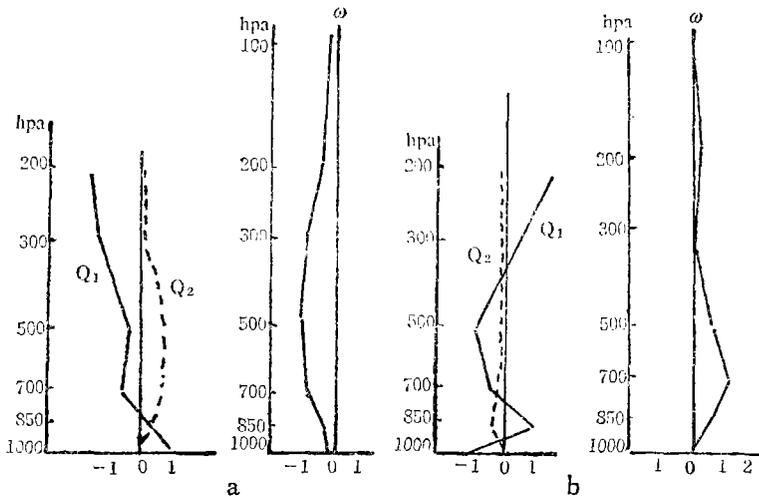


图4 1979年6月24日20时 120°E 上升支(a)和下沉支(b)区域的 Q_1 、 Q_2 和 ω 的垂直分布廓线
(Q_1 、 Q_2 的单位是 $4186.8 \times 10^{-7} \text{Jg}^{-1} \text{s}^{-1}$, ω 的单位是 $10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$)

4. 次级经向环流圈与盛行风带结构的相关

入夏后,西风带北移,在亚洲南部对流层为强热带东风,其下是盛行的夏季风(西南、东南季风)。由图5可见,经向垂直环流圈位于西风、东风急流下方,且偏于高层东风急流与低层西风(西南风)之间。

根据(5)式,可将“环流管”形成的大尺度流场背景动力因子与垂直环流之间的关系式写为

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} \propto \frac{\partial v'}{\partial x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial w'}{\partial x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (9)$$

根据图5风场分布特征可知,次级经向环流圈正处于基本气流切变为 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} > 0$, $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} < 0$ 条件区

域,而对于副高西北侧西南气流区域,可存在 $\frac{\partial v'}{\partial x} < 0$, $\frac{\partial w'}{\partial x} < 0$ 条件,这有利于次级经向环流加强,

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0.$$

由此可知，“季风流管”形成、维持与行星尺度流场背景条件有关，即与亚洲季风主要成员（盛行风带、副高等系统）分布特征、配置关系有密切联系。

5. 次级经向垂直环流圈形成的大地形因素

观测事实表明，东西向“环流管”的建立与夏季东亚大陆增温密切相关，尤其青藏高原的增热对它的构成影响很大。夏季大陆强烈增温，往往大陆温度高于南面海洋温度，若选择拉萨、昌都两个站 3—6

月平均气温代表高原热力状况，可发现，高原春季、初夏气温为正距平时，西南季风爆发早，经向垂直环流强，反之垂直环流弱。上述相关事实也由(8)式得到解释：高原加热条件可导致东亚副高西北边缘地区温度扰动，即 $\frac{\partial T'}{\partial y} > 0$, $\frac{\partial T'}{\partial z} < 0$ (T' 为非绝热加热温度变化部分)；这类加热条件加上平均气压场状况，即 $\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} < 0$, $\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} < 0$ ，由(8)式可知，将激发出瞬变天气尺度的垂直环流系统， $\frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0$ 。这反映了高原热力状况对“季风流管”形成、加强的影响效应。

有关文献 [1]、[6] 指出，在青藏高原所在 30°N 和 35°N 纬圈剖面内，由于湍流摩擦的影响在高原东侧形成纬向涡旋及其脱离东移是东亚夏季副热带西风带中一重要现象，如图 6 所示。

关于高原加热效应，本文已从斜压项给予讨论，下面着重对高原大地形动力作用进行分析，根据方程(5)、(4)可得：

$$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial \eta'}{\partial t} \\ \frac{\partial \xi'}{\partial t} \end{array} \right) \propto - \left(\begin{array}{c} \eta' \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \\ \xi' \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \end{array} \right) \quad (10)$$

图 6 a, b 反映经圈、纬圈环流与大地形相互配置关系，它们分别位于高原南-北、东-西两侧，呈两对方向相反的环流偶，它们共同特征是均发生在高原附近垂直运动(上升、下沉)的较强区域。考虑固定大地形引起的强迫上升(下沉)运动，且加入地形坡度与 w 的相关关系，可将(10)式写为：

$$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial \eta'}{\partial t} \\ \frac{\partial \xi'}{\partial t} \end{array} \right) \propto \left(\begin{array}{c} -\frac{\bar{u}}{\Delta z} \frac{\partial w'}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\bar{v}}{\Delta z} \frac{\partial w'}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \end{array} \right) \quad (11)$$

根据(11)式可知，纬圈、经圈环流加强与减弱和大地形高度、大尺度基本气流等因子相关，两对环流偶如图 7 a, b 所示。高原地形对于垂直环流的强迫效应分布特征可写为以下表达式：

$$\left. \begin{array}{l} \text{两对环流偶} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{高原} \\ \text{高原} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{西侧} \\ \text{东侧} \\ \text{南侧} \\ \text{北侧} \end{array} \right. \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\partial w'}{\partial x} > 0, \frac{\partial h}{\partial x} > 0 \text{ 则 } \frac{\partial \eta'}{\partial t} < 0 \\ \frac{\partial w'}{\partial x} > 0, \frac{\partial h}{\partial x} < 0 \text{ 则 } \frac{\partial \eta'}{\partial t} > 0 \\ \frac{\partial w'}{\partial y} > 0, \frac{\partial h}{\partial y} > 0 \text{ 则 } \frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0 \\ \frac{\partial w'}{\partial y} > 0, \frac{\partial h}{\partial y} < 0 \text{ 则 } \frac{\partial \xi'}{\partial t} < 0 \end{array} \quad (12)$$

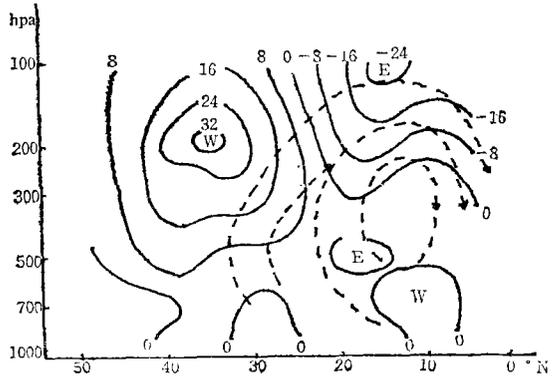


图 5 1979 年 6 月 27 日 20 时沿 100°E 纬向风垂直剖面
(实线为等风速线，虚线为“季风流管”沿 100°E 剖面的流线)

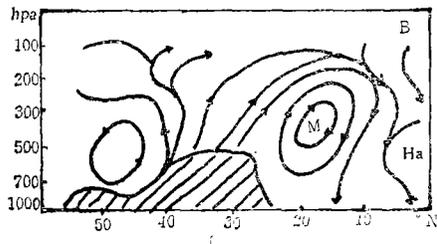
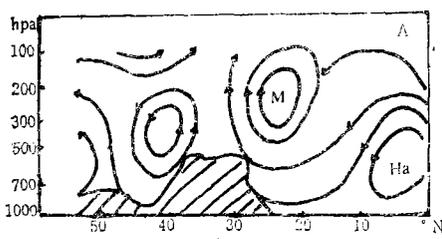


图 6a 1979年夏季 90°E剖面上
经圈环流的季节变化
(A为6月9日, B为6月28日; M是季风
环流圈, H.为哈得莱环流圈)

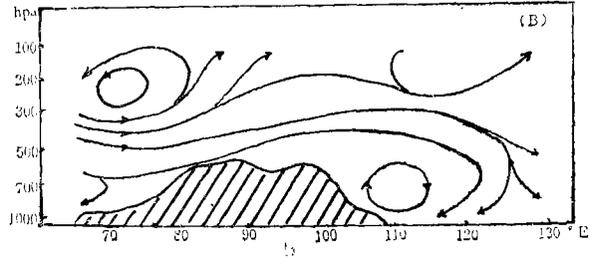
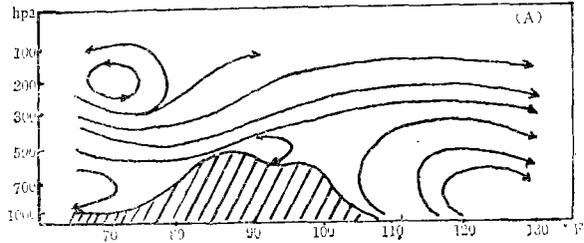


图 6b 1979年夏季 30°N剖面上纬圈环
流的季节变化
(A为6月26—30日 B为7月1—5日的5
天平均纬圈环流)

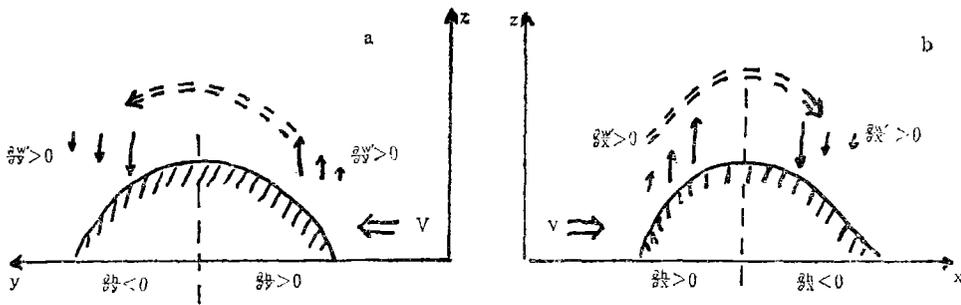


图 7 大地形作用引起垂直运动分布示意图

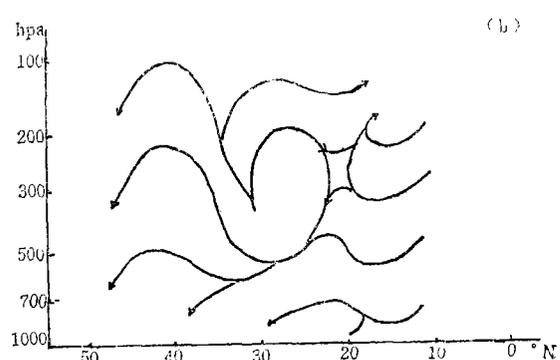
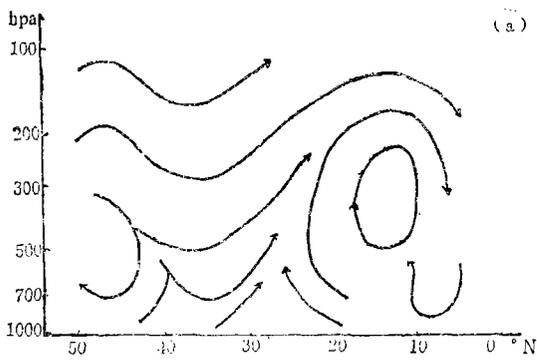


图 8 1979年6月27日20时横切“季风流管”垂直剖面图
(a为100°E, b为140°E)

实际资料分析也发现,季风流管入口处($90^{\circ}-100^{\circ}\text{E}$)流场有辐合特征,季风流管出口处(140°E)流场有显著辐散趋势,由(5)式可写为

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} \propto -\bar{\xi} \left(\frac{\partial w'}{\partial z} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) - \xi' \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad (13)$$

根据夏季气候特征,青藏高原东侧西风急流与副高西侧偏南气流汇合处位于中纬($90^{\circ}-100^{\circ}\text{E}$),此区域基本流场的汇合特征为 $-\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} < 0$,另外,加上高原动力效应,将有利于 $-\frac{\partial \xi'}{\partial t} > 0$,即在($90^{\circ}-100^{\circ}\text{E}$)附近产生“管状环流”,且构成“环流管”入口处辐合特征,反之,在西风急流的出口处效果将相反,“环流管”出口处呈辐散特征。上述“环流管”辐合、辐散特征与环境基本流场特点密切相关,如图8所示。

参 考 文 献

- [1] 章基嘉、彭永清等,1979年初夏北半球大气环流季节性变化的研究,青藏高原气象科学实验文集(二),121—131,科学出版社,1984。
- [2] 尹树新、陶崇莹等,初夏东亚上空季风流管的活动,青藏高原气象科学实验文集(二),172—181,科学出版社,1984。
- [3] 章基嘉、彭永清等,1979年夏季东亚经圈环流的演变及其数值诊断分析,青藏高原气象科学实验文集(三),93—107,科学出版社,1987。
- [4] 朱福康,青藏高原“环流与季风”研究的进展,气象,第10期,5—7,1983。
- [5] 高由禧、李慈等,1979年南亚地区大气能量分析与春夏季节变化,青藏高原气象科学实验文集(一),99—111,科学出版社,1984。
- [6] 罗四维、姚兰昌,1979年青藏高原地区由春入夏的季节转变,青藏高原气象科学实验文集(一),193—202,科学出版社,1984。

A STUDY ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF “MONSOON CIRCULATION TUBE”

Xu Xiangde Yin Shuxin Wu Xiaohua

Zhu Fucheng Liu Dai

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

There is always a meridionally secondary vertical circulation system over the rain belt of a meiyu front (or a shear line) in Chinese continent during summer season. Authors call the system “monsoon circulation tube”. The physical mechanisms of formation and maintenance of the “monsoon circulation tube” are then investigated from the relationships between it and diabatic heating and also thermal and dynamic effects of plateau topography. It is also discussed that the spatial relations between the “monsoon circulation tube” and planetary scale systems, such as the westerly, the easterly and the subtropic high, and their effects on the “monsoon circulation tube”.