

# 1977年出梅时期副高北跳过程的 动力学分析

林本达 缪锦海\*

(北京大学地球物理系)

## 提 要

本文根据热成风适应原理分析了1977年7月西太平洋副热带高压北跳的物理过程。根据这种原理，大气长波的斜压不稳定发展及其向下游的传播是由增长的温度场(或垂直切变风场)扰动和增长的垂直平均风场扰动之间的相互作用所引起的，我们仔细讨论了这种机制。

分析发现，长波不稳定发展向下游的传播在副高北跳过程中起着重要的作用，并且亚洲东岸建立的加热中心可以通过热成风适应过程对副高的北跳起促进作用。还发现，在副高北跳之前，平均经圈环流先发生显著的变化。

## 一、概 况

西太平洋副热带高压的季节性北跳与我国广大地区的雨季直接相关，是我国气象工作者十分关心的一个问题。七十年代初人们发现，夏季副高的北跳与100毫巴副热带流型的转换有密切的联系。关于夏季副热带流型的转换，有些研究比较强调热力因子的作用<sup>[1]</sup>，认为加热中心的东西移动与流型的转换密切相关。还有一些研究则比较强调动力因子的作用<sup>[2]</sup>，认为100毫巴流型的转换是副热带急流上长波调整的结果，不过过去这方面研究主要着眼于温压场形势的定性分析，并未进行过相应的动力学计算。究竟在副

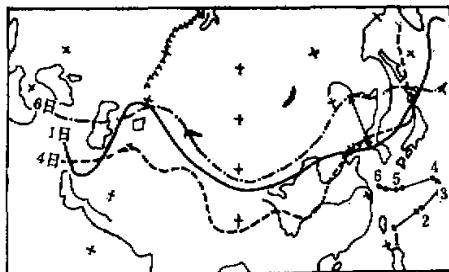


图1 500mb 580线和副高中心的变化

1979年4月6日收到修改稿。

\* 中期预报进修班的高义金、钱幼娴、赵冬如、曹玉梅、杨麟洲、王桂田和刘金才等同志参加了资料准备和部分计算工作。

高北跳的流型转换过程中,热力和动力因子起着怎样的作用,它们之间有何联系?由于没有对同一个例同时进行两方面的计算和比较,因此还未能得出较明确的认识。

本文对1977年出梅时期的副高北跳过程进行了动力学分析,试图对热力和动力因子所起的作用做一综合的讨论。

这次副高北跳发生于1977年7月上旬。图1是这次过程前、中、后期三天的580等高线形状和副高中心位置的演变图。在7月1日,亚洲东岸(125°E附近)为长波槽,与此相应,副高中心比较偏南(在25°N以南)。此后随着扰动的发展,这里的槽逐渐衰变成脊,到5—6日这个新脊显著地增长,导致了副高的明显西伸北跳(30°以北)。

图2是1日和6日的100毫巴流型示意图。由图看到,这次副高北跳在100毫巴图上明显地表现为南亚高压中心在大陆东部(115°E附近)建立的流型转换过程。

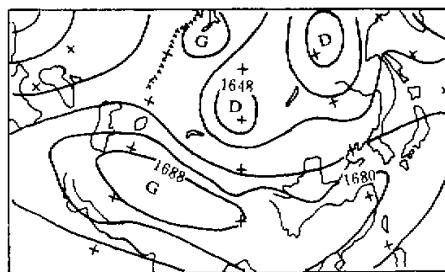


图2a 1977年7月1日100 mb流型

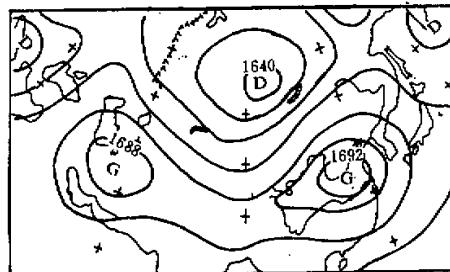


图2b 1977年7月6日100mb流型

## 二、动力学分析的方法

根据热成风适应原理<sup>[2]</sup>,可以把大气的发展过程看成是热成风平衡的不断破坏又不断重建的过程。根据这种原理,只要分析造成热成风平衡破坏的因子,就可以定性地估计通过适应过程所可能导致的发展。本文即根据这个原理来做动力学分析。

根据[3],造成正压(或垂直平均)地转风平衡破坏和斜压热成风平衡破坏的因子可以用如下方程表示

$$\partial \xi / \partial t = -\hat{\nabla} \cdot \nabla \xi \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta_T}{\partial t} = \hat{V} \cdot \nabla \xi + \frac{R_d}{2fC_p} \Delta Q \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\hat{V} \cdot \nabla \zeta \quad (3)$$

其中  $\xi$ ,  $\zeta$  和  $\zeta_T$  分别表示正压涡度以及流场和温度场的热成风涡度,  $\hat{V}$  为热成风,  $Q$  为加热场。 (2) 和 (3) 式说明, 非绝热加热和热成风对正压涡度的平流可以造成热成风平衡的破坏。对于  $L > L_0$  ( $L_0$  为适应尺度, 见 [3]) 的大尺度运动, 适应的结果主要是流场向温度场调整, 因而适应所造成的  $\partial \xi / \partial t$  应与  $\partial \zeta_T / \partial t$  同符号, 也就是说  $\partial \xi / \partial t$  和  $\partial \zeta_T / \partial t$  的符号都由 (2) 式决定。这样, 根据 (1) 和 (2) 式即可以讨论适应的结果。(1) 和 (2) 式右边第一项表示正压涡度和斜压涡度之间的转换效应, 不稳定发展向下游的传播就是这两项的相互激发过程, 本文所说的动力因子就是指这两项。

我们利用该过程逐日 08 时的 100、300、500、700 毫巴及地面的风场资料、500 和 300 毫巴的温度场资料以及本站气压资料分别计算了加热场和动力因子, 还计算了大型扰动对感热的南北输送和平均经圈环流。计算的区域范围为  $55^{\circ}\text{--}145^{\circ}\text{E}$ ,  $20^{\circ}\text{--}55^{\circ}\text{N}$ 。采用球坐标的经纬线网格, 格距取  $2.5^{\circ}$ 。(1) 和 (2) 式中热成风的涡度平流项可由风场资料直接计算, 加热场则采用倒算法由风场和温度场来间接地计算, 其中垂直运动, 我们采用根据连续方程用上下边界条件加以订正的修改运动学方法<sup>[4]</sup>作计算, 在下边界考虑了地形的效应。

### 三、加热场与副高北跳的关系

为了考察热力因子对副高北跳的作用, 我们把求得的加热场对高原所在的纬度取纬度平均, 作出加热场的时间经度剖面图, 如图 3 所示。由图可以看到, 1 日在高原西部 ( $60^{\circ}\text{--}65^{\circ}\text{E}$ ) 有一个加热中心(与图 2a 中该处的高压中心相对应), 以后这个加热中心分裂出一部分东移, 5 日移到大陆东部, 这与 100 毫巴高压中心在大陆东部建立的时间比较一致, 这个加热中心的东移对 100 毫巴高压中心在大陆东部的建立和副高的北跳起着促进作用。

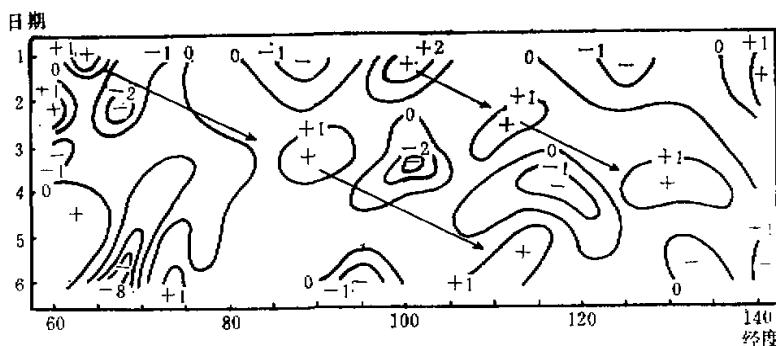


图 3  $22.5^{\circ}\text{--}37.5^{\circ}\text{N}$  加热场的时间经度剖面图(单位:  $10^{-4}$  度·秒 $^{-1}$ )

关于加热中心对 100 毫巴高压中心的建立所起的作用，可以根据热成风适应原理来作解释，根据公式(2)，当有加热中心移到大陆东部时，将破坏这里原有的热成风平衡，由于与加热中心相对应  $\Delta Q < 0$ ，因此加热中心将产生负值的  $\partial \zeta_r / \partial t$ ，适应的结果将产生  $\zeta_r < 0$  及  $\zeta < 0$  的形势，即有利于温度场暖脊和流场高层反气旋式环流、低层气旋式环流的建立，因而有利于 100 毫巴高压中心在大陆东部的建立。可见，加热场的热力效应是可以通过适应的动力过程对流型的转换和副高的北跳起作用的。因此，从加热场的演变来考察流型的转换和副高的北跳是一个值得进一步探索的途径。

由图 3 我们也看到一些不能完全由加热场加以解释的现象。例如，7 月 2—3 日在大陆东部也曾出现过加热中心，但是这时大陆东部并不出现 100 毫巴高压中心（图略），副高也没有明显北跳。这个事实说明，在讨论流型转换和副高北跳时，不能只着眼于加热场的演变，还应重视动力因子的作用，这一点，我们将在下一节仔细讨论。

#### 四、上游效应对副高北跳的作用

在天气预报实践中，人们很早就发现上游地区的发展会相继地引起下游地区发展的现象，这种现象也被称为“上游效应”。陈秋士<sup>[3]</sup>曾根据热成风适应原理，指出这种现象实质上是不稳定发展向下游的传播，并且分析了产生这种现象的温压场条件。后来有人运用这种观点分析了夏季 100 毫巴青藏高压的东西振荡过程<sup>[2]</sup>，指出在夏季副热带流型的调整过程中也存在上游效应。我们对这次副高北跳过程所做的动力学计算和分析，进一步证实了上游效应对夏季副热带流型的调整和副高北跳的作用。

##### 1. 不确定发展向下游传播与流型的调整

这次副高北跳是北半球一次大范围长波调整过程的结果。实际上早在约两周之前在其很远的上游地区就已有不稳定发展的征兆。图 4 是 6 月 21 日到 7 月 8 日沿 40°N 500 毫巴高度的时间经度剖面图。可以看到，6 月 23 日在美洲东岸 ( $60^{\circ}\text{W}$ ) 先有低槽发展，之后随着上游不稳定发展的下传相继引起了大西洋高脊 ( $20^{\circ}\text{W}$ ) 发展 → 黑海西面低槽 ( $30^{\circ}\text{E}$ ) 加深 → 咸海高脊 ( $60^{\circ}\text{E}$ ) 发展 → 新疆低槽 ( $90^{\circ}\text{E}$ ) 加深 → 西太平洋副高脊明显加强和北跳。由于我们动力学计算的经度范围所限，这里只讨论上述后几个不稳定发展的传播过程。

这次副高北跳过程中，在  $60^{\circ}\text{E}$  和  $90^{\circ}\text{E}$  处，前后期的形势变化不大，都分别为高脊和低槽所控制，只是强度有变化。但是在远东地区，长波形势则发生了重大的变化，长波调整的结果造成鄂海高脊 ( $160^{\circ}\text{E}$ ) 的衰减及其后部  $125^{\circ}\text{E}$  处新脊的建立和发展，这就是所谓的“长波不连续后退”现象。

这次长波调整的发生，实际上从 7 月 1 日的长波配置（见图 1 或图 4）就可以得到一定的启示。我们看到，7 月 1 日在咸海和鄂海两高脊之间为一宽槽区，这种过长的波长 ( $100^{\circ}$  经度) 与该纬度带稳定波长的长波尺度 ( $60^{\circ}$  经度左右) 是不相适应的。这意味着，未来将要发生长波调整，导致在宽槽的某处有新脊的建立和发展（使波长缩短）。至于调整后的形势，则与下游的原波系和上游不稳定发展下传所要求建立的新波系位相是否一致直接相关（见 [3]）。当上游的不稳定发展于 6 月 30 日传到  $60^{\circ}\text{E}$  引起咸海高脊发展后，可

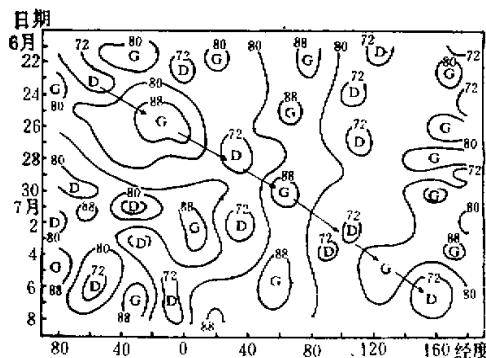


图 4 6月21日—7月8日沿40°N500毫巴高度的时间经度剖面图

以预计,这里不稳定发展的下传将引起其下游半个波长(90°E附近)有低槽发展,而这里原先为新疆低槽,与不稳定发展下传产生的新波系位相一致,因而造成了3—4日新疆低槽的显著加深。这里不稳定发展的下传则将引起其下游半个波长(120°E附近)有高脊发展,而这里原先是长波槽,与不稳定发展下传所要建立的新波系位相不一致,因而这里原先的长波槽将衰减而代之有新脊的建立和发展,正是这个大陆东部新脊的显著发展导致了5日副高的明显北跳。这个新脊发展的下传又将引起其下游半个波长(150°E附近)有低槽发展,而这里原先是鄂海高脊,与不稳定发展下传所要建立的新波系位相又不一致,因而将导致鄂海高脊的衰减,由图4或图1可以看到,到6日这里已变成低槽区。

总之,由上面的分析可以看到,上游效应对这次副高北跳的流型调整有相当明显的作用。这次副高北跳过程中远东地区所显示的“长波不连续后退”现象,实际上正是不稳定发展向下游传播所经常可以导致的一种结果。

## 2. 产生不稳定发展向下游传播条件的分析

根据热成风适应原理,不稳定发展向下游传播是斜压发展与正压发展(或者温度场扰动发展与垂直平均流场扰动发展)之间的相互激发过程。要产生这种过程,在上游必须存在温度场扰动落后于流场扰动的位相配置,在下游则要求存在足够强度的斜压性。现在就来分析这些条件。

图5是沿40°N 500毫巴温度场和高度场的时间经度剖面图,在这个图上,温度场扰

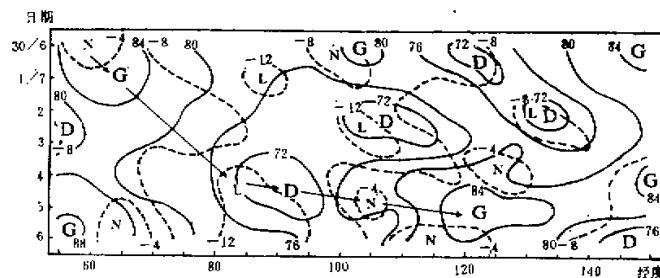


图 5 沿40°N500毫巴温度和高度的时间经度剖面图

动落后于流场扰动的位相配置以及在这种条件下所引起的暖→高→冷→低→暖……依次向下游传播的现象可以看得相当清楚。这种现象正是温度场扰动的斜压发展与流场扰动的正压发展相互激发地向下游传播的一般特征。

为了说明这种机制，我们计算了导致这种斜压发展与正压发展相互激发的热成风两种平流过程，亦即公式(1)和(2)中的 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 项（也称为斜压向正压的涡度转换项）和 $\hat{V} \cdot \nabla \zeta$ 项（也称为正压向斜压的涡度转换项）。图6和图7是它们的时间经度剖面图。根据理论，在这种图上不稳定发展的形势表现为 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 的正负中心落后于 $\hat{V} \cdot \nabla \zeta$ ，反之，若前者超前于后者则对应于不稳定衰减的形势。为了考察这种配置，我们把它们的正负中心和零线描在同一张图上，如图8所示。我们看到，7月1—2日在60°E附近这两项各有一对数值较大的正负值中心， $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 的负值中心落后于 $\hat{V} \cdot \nabla \zeta$ ，而正值中心超前于 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ ，因此这里应对应有暖高脊的不稳定发展，这与前期咸海地区的暖高脊发展相对应。到4日，在其下游90°E附近出现 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 的正值中心落后于 $\hat{V} \cdot \nabla \zeta$ ，而负值中心超前于 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 的形势，这种配置导致了新疆冷低槽的不稳定发展。到5日在其前部120°E附近又出现数值较大的 $\hat{V} \cdot \nabla \xi$ 负值中心落后于 $\hat{V} \cdot \nabla \zeta$ ，而正值中心超

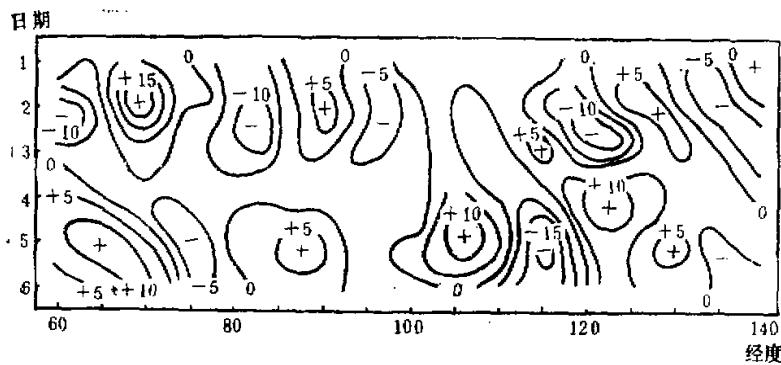


图6 中纬平均  $\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的时间经度剖面图(单位:  $10^{-10}$ 秒 $^{-1}$ )

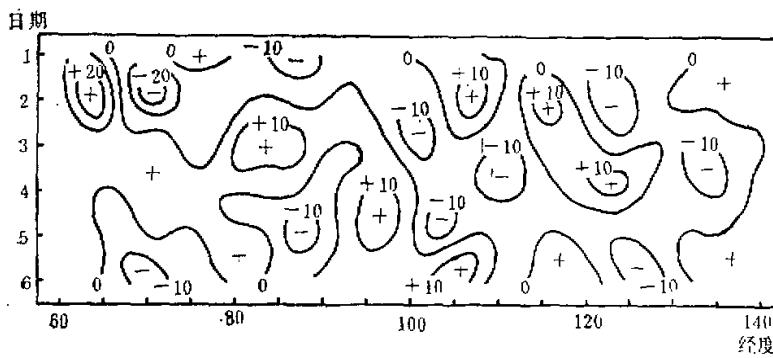
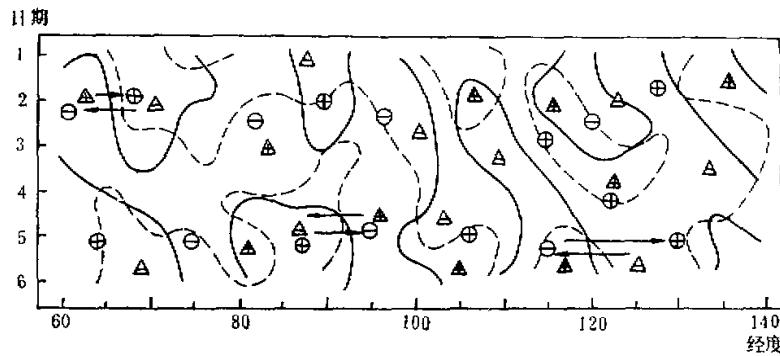


图7 中纬平均  $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的时间经度剖面图(单位:  $10^{-10}$ 秒 $^{-1}$ )

图 8  $\hat{V} \cdot \nabla \xi$  与  $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的配置图

○—— $\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的正负中心, △—— $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的正负中心  
实线—— $\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的零线, 虚线—— $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的零线

前于  $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的形势, 造成了这里暖高脊的不稳定发展。与上一节加热场的演变相对照, 这时间这个地区正好出现加热中心, 根据公式(1)和(2), 这时在大陆东部热力因子与动力因子的作用一致, 产生负值的  $\partial \zeta_t / \partial t$  和  $\partial \zeta_t / \partial t$ , 因此在它们的共同作用下, 造成这里暖高脊的强烈发展, 使流型发生转换, 副高明显北跳。我们注意到, 3日以后不稳定发展向下游的传播有明显的加快(见图5或图8), 这是由于3日之后纬向平均热成风  $\bar{U}$  比前期有明显增大之故(见表1)。因为根据[3], 不稳定发展向下游传播的速度是由  $\bar{U}$  所决定。

梅雨期由于潜热的释放, 大陆东部还是可能较经常出现加热中心的, 可是并不一定都伴有副高的北跳, 如上一节所指出, 在7月2—3日就曾出现过这种情况。这种现象单从加热场就不好解释, 但是如果分析一下动力因子(见图8)就会发现, 7月2—3日在大陆东部出现  $\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的正负中心近于与  $-\hat{V} \cdot \nabla \xi$  的重合的形势, 而且  $115^{\circ}\text{E}$  对应于这两项的正值区, 其作用正好与加热效应相反, 因而不利于暖高脊的不稳定发展和副高的北跳。

不稳定发展向下游的传播还要求下游存在足够强度的斜压性, 因为根据公式(1)和(2), 斜压发展与正压发展的强度都与热成风  $\bar{U}$  成正比。从能量观点来说, 下游斜压性愈强, 有效位能的储存就愈大, 这样在上游不稳定发展下传的激发下可能转变成的扰动能就愈大, 下游的不稳定发展就愈强烈。现在就来讨论这种条件。表1是这次过程逐日的西风急流强度和垂直西风切变(即热成风  $\bar{U}$ )值, 它们可以表征斜压性的强弱。由表1可以看到, 3日以后西风急流和垂直风速切变比前期都有显著的增强, 这种强的斜压性为3日以后上游不稳定发展向大陆东部的传播准备了有利的条件, 使由上游下传的不稳定发展在这里能得到强烈的响应。

根据以上分析, 我们认为, 在考察夏季副热带流型转换和副高北跳时, 上游效应的作用是值得重视的, 特别是, 这种效应对中期的形势预报具有较大的实际意义。

表 1 急流强度和垂直西风切变

日 期	1	2	3	4	5	6
$\bar{U}_{max}$ (米/秒)	17.3	20.0	24.5	22.7	20.6	18.0
$\bar{U}_{500} - \bar{U}_{100}$	11.1	15.4	18.6	17.4	17.9	17.1

## 五、平均经圈环流的演变与副高的北跳

我们还计算了 57.5—142.5°E 的平均经圈环流，发现它的演变与副高的北跳有一定联系。

图 9 是这次过程前、中、后期三天的垂直环流示意图。我们看到，这次过程中在 25°N 附近一直都存在一个与高原的热力性质密切相关的季风环流圈<sup>[4]</sup>，但是在 3 日以前在其北面相当宽的纬度带 (30°—50°N) 内部盛行上升运动，这与这个时期该纬度带内与斜压性

相联的动力因子较弱，高原的热力作用占主导有关。到 3 日随着斜压性的增强，不稳定发展的动力效应在原先季风环流圈的北面 35°N 附近又强迫出一个北部上升南部下沉的垂直环流，之后几天这里一直都存在这种动力效应所致的反环流。这种现象也可以用带状平均流的热成风适应原理来作解释<sup>[6]</sup>。由这次过程大型扰动对感热的南北输送值的变化（见表 2）可以看到，3 日之后，随着斜压性的增强，中纬大型扰动向北的感热输送明显增大，其结果使南北温度梯度减弱，造成纬圈平均热成风平衡的破坏，伴随着必然要产生热成风调整以阻止这种不平衡的进一步发展，因而适应的结果将造成北部上升（冷却），南部下沉（增暖）的垂直环流（其效果是阻止南北温度梯度的进一步减小）。这种垂直环流的出现也是扰动不稳定发展所伴随的一种必然结果。

由丁海由

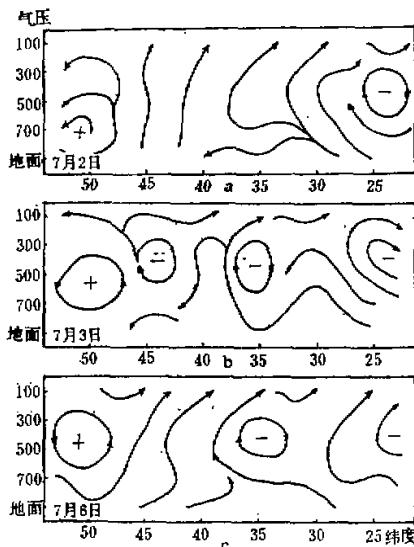


图 9 57.5—142.5°E 平均经圈环流的演化

这次副高北跳过程中，平均经圈环流在 3 日已开始发生变化，而副高到 5 日才明显北跳，也就是说平均经圈剖面上垂直环流的变化相对于副高的北跳有提前的倾向，这种提前对预报副高的北跳可能有一定的启示。

表 2 中纬平均 500mb 大型扰动对感热的南北输送(单位:  $10^3$  卡·毫巴 $^{-1}$ ·秒 $^{-1}$ )

日 期	1	2	3	4	5	6
输 送 值	+0.3	+0.6	+0.3	+1.2	+1.0	+1.4

## 六、结语

根据以上的分析，可以得到如下几点认识：

1. 副高北跳从100毫巴流型看，明显地表现为南亚高压中心在大陆东部建立的过程，从100毫巴南亚高压的流型转换来考察副高的北跳是一个值得进一步探索的途径。
2. 夏季青藏高原的加热作用对南亚高压的形成和活动有重要的作用，考察流型转换和副高的北跳时要注意加热场的演变，大陆东部加热中心的建立有利于其上层反气旋环流的增强和副高的北跳。
3. 与副高北跳相联的流型转换是北半球大范围的长波调整过程。考察副高北跳时除了要注意加热场的演变外，更要重视上游不稳定发展的动力效应，应分析是否存在上游不稳定发展下传的条件以及这种传播将会在大陆东部造成怎样的动力效应（是造成暖高脊还是冷低槽的不稳定发展，或是不稳定衰减），还要分析这种动力效应与加热场的作用是否一致，只有把热力和动力两种因子结合起来考虑才能做出较正确的判断。
4. 副高北跳过程中，平均经圈环流的变化有先于副高北跳的倾向，这种提前对预报副高北跳可能有一定参考价值。

最后应该指出，本文只是对个例的计算和分析，因而这些认识也是初步的，有待于作更多的计算和分析来进一步充实。

本文承蒙朱抱真和陈秋士同志提出宝贵意见，在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 兰州高原大气物理研究所，100mb青藏高压流型转换的个例分析，青藏高原气象论文集，172—187，1977。
- [2] 四川省气象局科研所，100mb青藏高压东西振荡过程的研究，同上，158—165。
- [3] 陈秋士，中纬度大尺度系统发生发展的物理过程，数值预报和数理统计预报会议文集，76—109，1974。
- [4] O'Brien, J., Alternative solution to the classical vertical velocity problem, *J. App. Met.*, 9, 197—203, 1970.
- [5] 陈秋士等，1958年7月亚洲东南部西南季风区和太平洋信风区平均流场和平均经圈环流，气象学报，34, 51—61, 1964。
- [6] 陈秋士，简单斜压大气中热成风的建立和破坏(二)，气象学报，33, 153—162, 1963。

# THE DYNAMIC ANALYSES OF THE SUDDEN NORTHWARD SHIFT OF SUBTROPICAL HIGH AT THE END OF MAI-YU IN 1977

Lin Ben-da Miao Jin-hai

(*Department of Geophysics, Beijing University*)

## Abstract

In this paper, the physical process of the sudden northward shift of the western Pacific subtropical high in July, 1977 has been analysed by the use of the principle of the thermal wind adjustment. According to this principle, the baroclinic unstable developing of the long wave and its downstream propagating are caused by the interactions between the amplified temperature field (or the vertical shear wind field) disturbance and the amplified vertical mean wind field disturbance. The mechanism is discussed in detail.

It is found that the downstream propagating of the unstable developing of the long wave plays an important role in this northward shift process, and that the heating center formed on the eastern coast of Asia might promote the northward shift of the subtropical high by means of the adjusting process of the thermal wind. It is also found that the mean meridional circulation precedes a remarkable change before the sudden northward shift of the subtropical high.