

# 最敏感扰动的演变与夏季乌拉尔地区的持续性异常环流\*

杨 燕 李志锦 纪立人

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

## 摘 要

通过数值实验对初始扰动不稳定发展建立异常环流型的过程进行了分析。选择了东亚夏季风异常的 1991 年和 1985 年两个典型年份的平均环流作为基流, 以共轭敏感性分析得到的最敏感扰动作为初始扰动, 分析其在不同的环流背景下的发展情况。结果说明, 1991 年欧亚地区的基流不稳定性较强, 且初始扰动结构有利扰动发展, 因而通过能量频散在乌拉尔地区激发扰动并强烈发展, 建立起阻塞形势。而 1985 年的扰动在乌拉尔地区形成正涡度距平, 不利于阳高的建立。从而导致 1991 年和 1985 年夏季乌拉尔地区几乎相反的异常环流。一系列对比实验说明, 异常环流型的建立, 不仅依靠能量的频散, 更依靠扰动通过正压不稳定过程从基流吸收能量而发展。它既有赖于基流自身的不稳定, 又取决于初始扰动的结构以及相对于基流的位置。基流选择了具有特定结构的初始扰动型, 只要在有利位置上给予扰动, 就能够激发出扰动波列, 建立强的持续异常环流型。不论初始波列的位相在一定范围内如何改变, 扰动总是倾向于在基流的特定不稳定区域发展。

关键词: 最敏感扰动, 正压不稳定, 持续异常环流。

## 1 引 言

东亚夏季风属副热带季风, 其活动既受热带环流系统的影响, 又在很大程度上受中高纬环流的制约。例如江淮梅雨期的旱涝与乌拉尔地区的阻塞高压的活动有密切的关系。因此认识这些持续异常的建立和演变机制, 无疑是揭示旱涝灾害的成因, 提高其中长期预报水平的关键所在。本文选取 1991 年典型涝年和 1985 年典型旱年作为强、弱季风年梅雨降水异常的个例, 分析初始扰动发展导致阻塞高压建立的过程及与基流的关系。

阻塞等持续异常环流系统往往是由前期的小扰动发展而成的。以前的工作中<sup>[1,2]</sup>, 已用共轭敏感性分析方法分析了东亚季风的几个主要系统——乌拉尔阻塞高压, 东亚鄂霍次克海偶极型阻塞高压和副热带高压各自的最敏感扰动(OSP), 由此分析了它们各自最重要的影响因子和影响区域。但是这些初始扰动的演变情况以及它们对于各个系统的影响的具体物理过程仅用共轭模式是无法得到的, 而必须以这些 OSP 为初值, 用原来的模式进行数值积分, 来分析小扰动的不稳定发展情况。

\* 初稿时间: 1996 年 11 月 25 日; 修改稿时间: 1997 年 2 月 23 日。

资助课题: 国家自然科学基金 49775261 和 49505068 共同资助。

在对扰动发展和遥相关型建立机制的研究中,曾提出了球面 Rossby 波频散与正压不稳定等理论<sup>[3-6]</sup>。但它们都只能部分地解释低频遥相关型的建立机制。李志锦、纪立人<sup>[7,8]</sup>则指出,这两个过程是不能割裂开的。只有那些在传播过程中能够从基流有效地吸收能量的扰动才有可能发展成符合实际的遥相关型。这些具有相对于基流的特定位置和特殊结构的扰动——有利发展扰动,就决定了能量的频散路径。本工作着重讨论乌拉尔阻塞高压的建立过程,并将说明,OSP 的确具有有利发展扰动的结构特征,它能够从基流吸收动能而发展,建立起异常环流型。对比实验还说明,扰动发展过程与初始扰动的结构及与基流的配置都有很大关系。这导致了 1991 年和 1985 年扰动发展过程以及最终建立的距平形势的极大差异。

初始扰动的不稳定的研究,不仅有助于搞清大气中持续异常和遥相关型建立的物理机制,而且在数值预报的初始误差增长的分析中有重要的意义。

下面将分析初始 OSP 的发展情况,并通过一系列实验说明扰动发展与基流的关系。

## 2 环流背景分析

1991 年和 1985 年分别是典型的强、弱季风年,环流形势极不相同。图 1a, b 分别为 1991 年和 1985 年 6 月份平均的 500hPa 位势高度场距平。这里的气候场来自欧洲中期天气预报中心 1980~1989 年的 10 a 平均值,1991 年和 1985 年的资料分别取自中国国家气象中心和欧洲中期天气预报中心的观测分析场。就中高纬来说,1991 年乌拉尔地区为正距平控制,维持稳定的阻塞形势,与鄂霍次克海地区的偶极子型阻塞共同作用,使得东亚地区环流异常稳定,造成江淮流域持续性洪涝。而 1985 年夏季欧亚中高纬盛行纬向型环流,乌拉尔和鄂霍次克海地区为持续的负距平,无明显的阻塞形势,环流不稳定,江淮流域无明显的梅雨期降水。

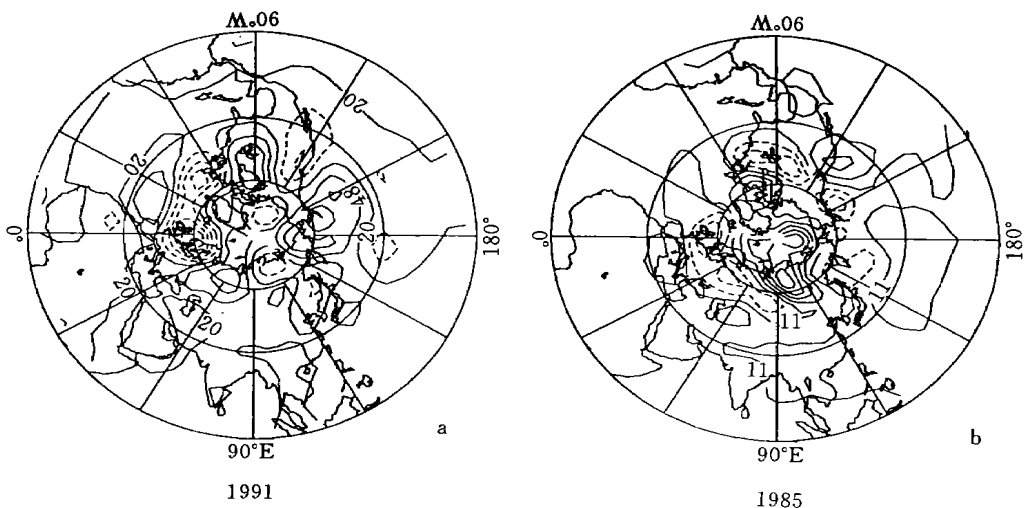


图 1 6 月份平均的 500 hPa 高度场距平

(a. 1991 年; b. 1985 年。等值线间隔: 28 gpm, 实线为正, 虚线为负。单位: gpm;)

图 2a, b, c 分别是 1991 年和 1985 年以及气候平均的 6 月份 500 hPa 纬向风的等风速线分布。1991 年北大西洋的急流中心较气候场上的位置明显偏东, 强度也大得多。而 1985 年大西洋的急流中心分成了东西两个, 分别位于北美大陆东岸及欧亚大陆西岸, 强度较 1991 年的明显偏弱。1991 年在里海以北至乌拉尔地区还有一个次中心, 而在 1985 年此中心位置较偏东, 且分成了几个更小的中心。

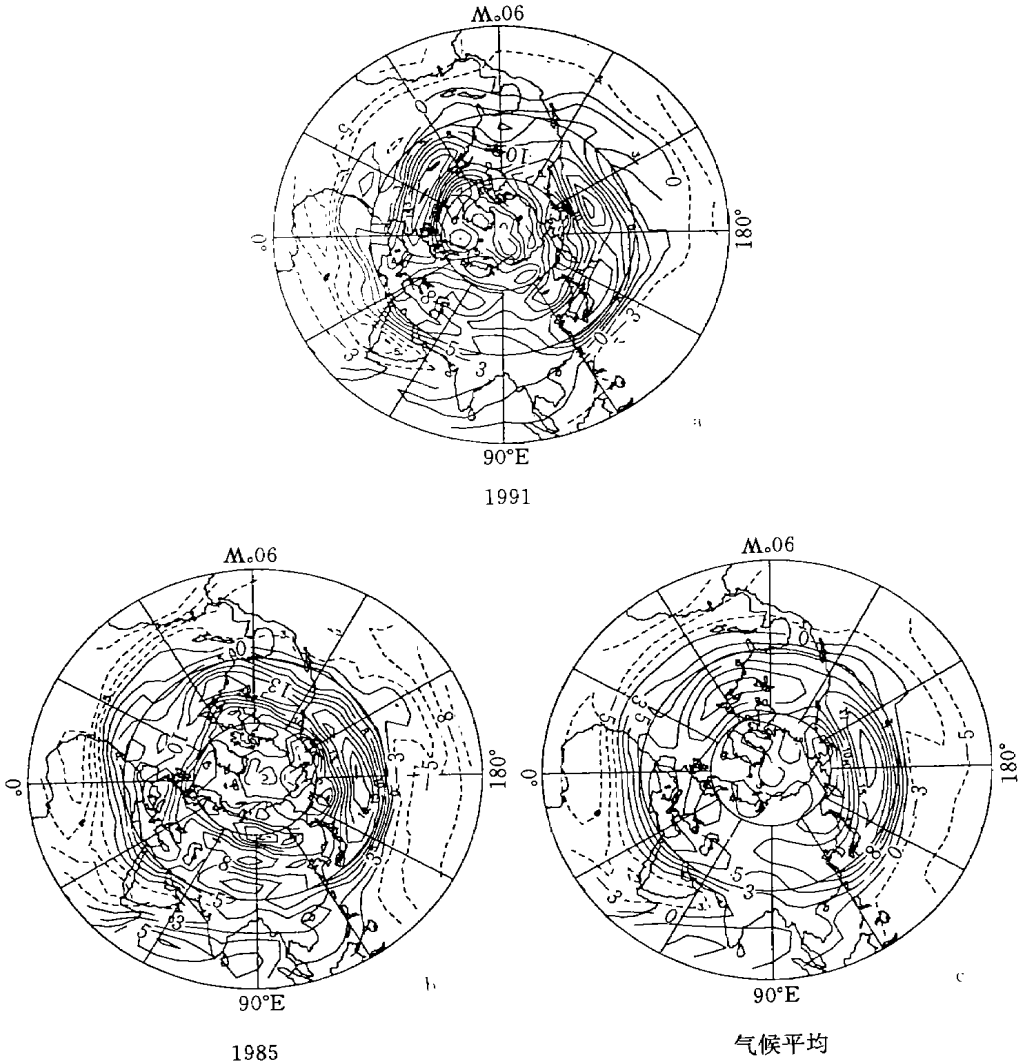


图 2 6 月份平均的 500 hPa 纬向风等风速线

(a. 1991 年; b. 1985 年; c. 气候场。实线为西风, 虚线为东风。单位: m/s;)

### 3 最敏感扰动(OSP)的演变

所谓 OSP, 在这里指在一定时段中, 能引起某个特定地区的环流系统, 发生最大变化的初始扰动, 具体地首先定义一个反映所研究的系统特征的响应函数, 然后由原始方程模

式导出相应于一定的基本流场线性化的小扰动方程模式,再写出其共轭模式,以给定的响应函数的导数作为强迫,从某一 $t = T$ 时刻反向积分至 $t = 0$ 时刻得到一个分布型,它代表了此响应函数相对于初值变化的梯度。具有同样结构的初始扰动使响应函数产生的变化最大,则被称为最敏感扰动(OSP)。分别取基流为1991年,1985年和气候平均的6月份位势高度场和风场,得到了相应的各年的乌拉尔地区异常环流的OSP扰动型。它们就是对于乌拉尔阻塞高压的发展过程贡献最大的初始扰动分布。使用的是正压原始方程全球谱模式,取 $T = 8 \text{ d}$ 。具体方法请参见文献[1]和[2]。

现分别以气候场、1991年和1985年6月平均的基流作为基本场,以对应年份的OSP为初值,积分线性方程,考查扰动在不同基流下的发展情况。同时也对比了非线性方程的积分结果,就是将OSP加在基本流上,用原来的非线性模式进行积分,再减去基本场。结果表明,在上述所考查的时段内,线性和非线性的演变过程差别很小。因此,这里只给出线性模式的结果。

图3,4,5分别是气候场、1991年及1985年基流下的OSP涡度场的演变。比较图3a,4a和5a可看出这三者的OSP有很大差别。气候场与1985年的OSP结构较为相似,但位相几乎完全相反。它们都表现为两支经向波列,一支从大西洋东部及非洲北部向东北方向传播至乌拉尔西部,另一支则从阿拉伯半岛直接向北传至乌拉尔地区。1985年后者比气候场上更明显。1991年则是一个纬向的波列状扰动从大西洋西部一直伸展到中心区的上游。

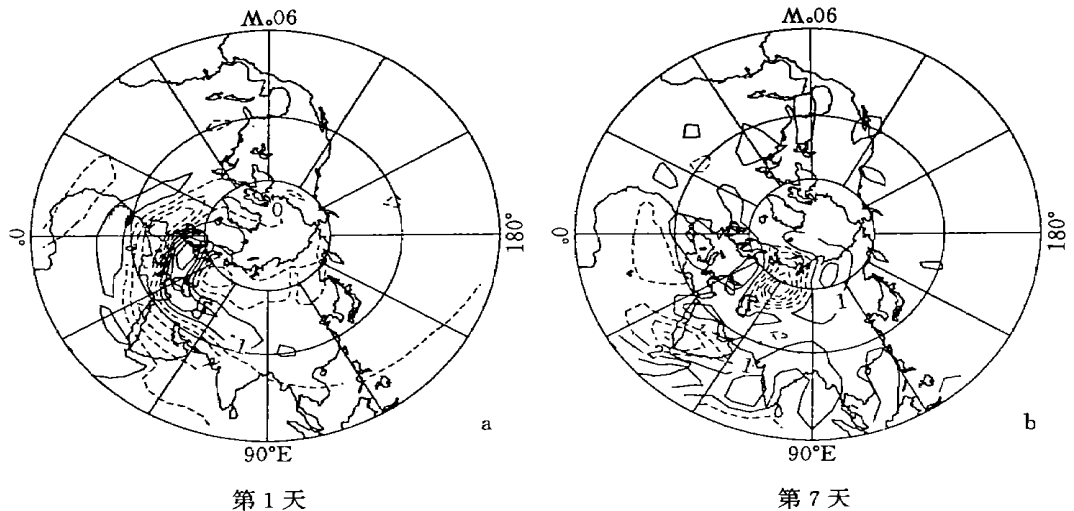


图3 涡度场上气候平均流的OSP初始扰动的演变

(a. 初始场; b. 第7天。等值线间隔:  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 所给为相对大小, 依初始扰动取值而定。实线为正, 虚线为负)

这几个扰动以后的发展很不相同。图3的气候场上, 西部的一个扰动波列中距乌拉尔较远的中心迅速衰减, 而靠近乌拉尔的一个负中心很快增强。这些中心的位置少变, 主要是强度的变化, 表现为能量向东北方向频散。与此同时, 在乌拉尔南部的经向波列先是有

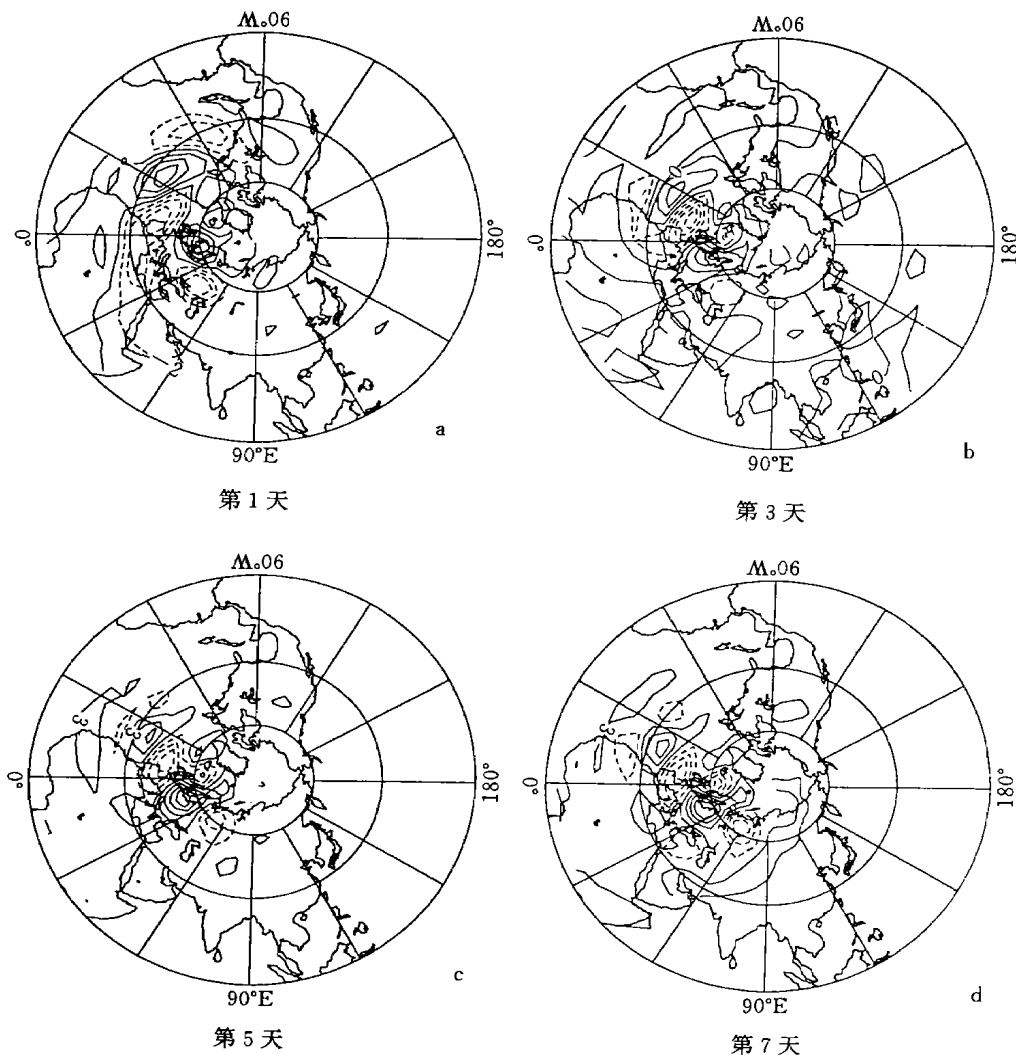


图4 1991年基流下OSP涡度场的演变

(a. 初始场; b. 第3天; c. 第5天; d. 第7天。说明同图3)

所增强, 然后副热带和中纬的中心衰减, 到第7天(图3b), 在乌拉尔地区建立起较强的负涡度中心, 在高度场上(图略)则是一个正位势高度中心, 其东、西部为负中心, 阻塞形势建立。相反1985年初始场上(图5a)靠近乌拉尔地区是一正涡度中心, 随着两支经向波列的减弱, 此中心也有所增强, 并稍向东移, 到第7天(图5b)在乌拉尔地区建立起正涡度中心, 高度场上则为负中心, 强度较弱。第8天的形势与第7天很相似(图略)。1991年(图4)则是上游的扰动波列中的各个中心依次先增强后衰减, 表现为能量向下游频散的性质。但在第5~7天乌拉尔附近的两个中心局地增幅很快, 向下游的频散很弱。到第7, 8天(图4d), 在乌拉尔地区建立了一对纬向的正、负中心。相应地在高度场上(图6)也是一对很强的正、负高度距平中心, 与1991年6月份500 hPa高度场距平(图1)比较, 在0~90°E的

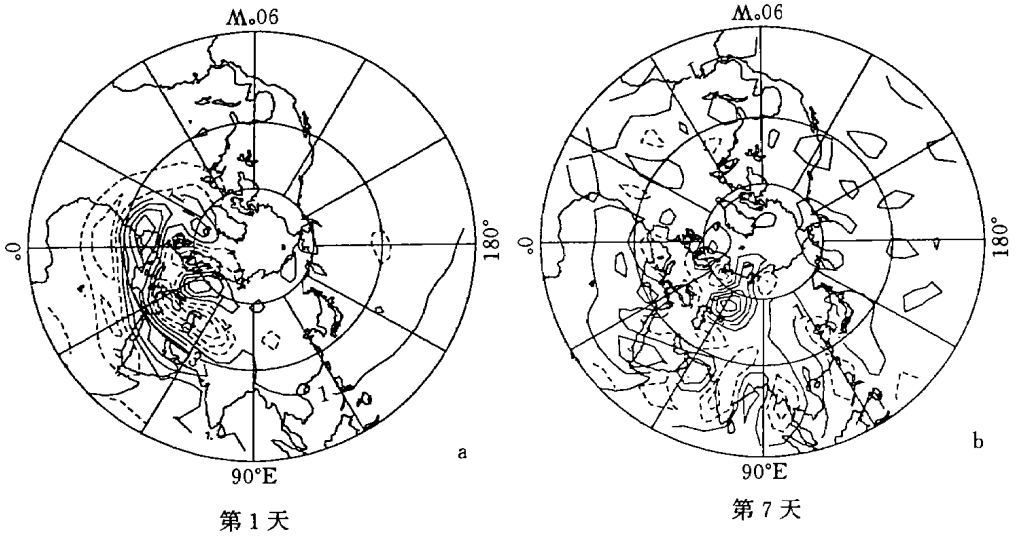


图5 1985年基流下的OSP涡度场的演变

(a. 初始场; b. 第7天。说明同图3)

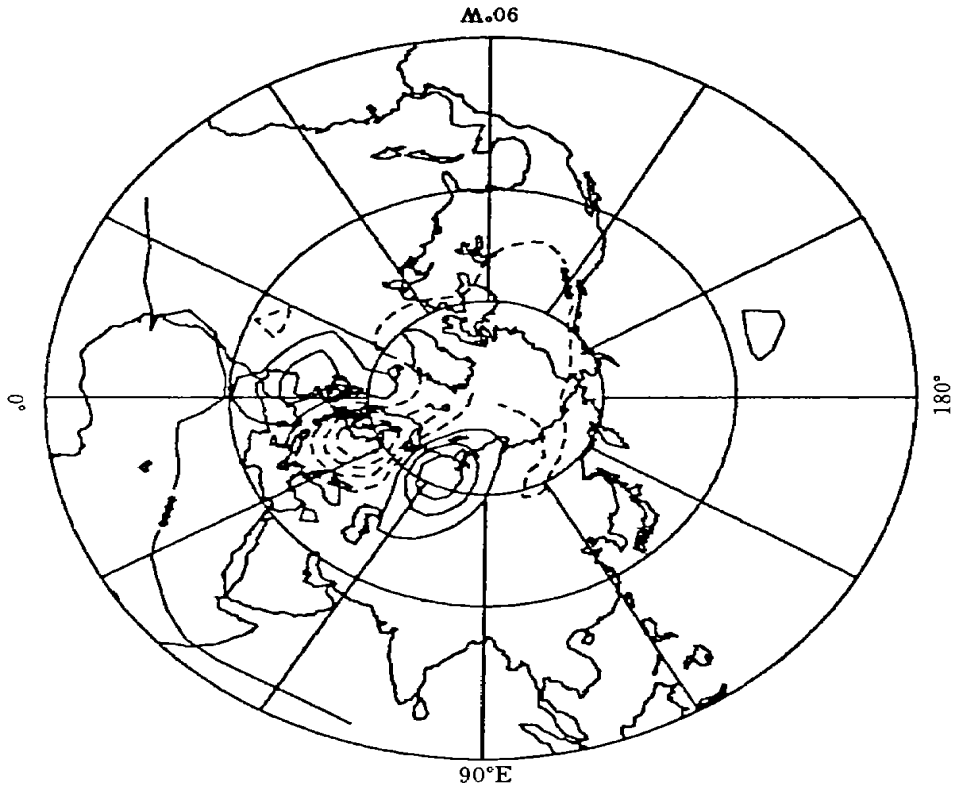


图6 1991年基流下扰动发展到第7天的高度(gpm)场

区域内相当一致。说明初始的OSP的确对以后的乌拉尔地区的阻塞及其西部的低涡中心的建立有重要影响。这验证了的共轭敏感性分析的结论。

## 4 扰动发展的能量学分析

曾庆存等<sup>[9, 10]</sup>发展的波包理论表明, 扰动是从基流吸收能量而发展还是被基流吸收而消亡, 取决于它的结构及相对于基流的位置。Simmons 等<sup>[5]</sup>从正压涡度方程推导出小扰动的能量方程:

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = CK_x + CK_y \quad (1)$$

其中,  $K_E$  是扰动动能,

$$CK_x = - \frac{1}{a} (u^2 - v^2) \left[ \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial u_b}{\partial \lambda} - v_b \tan \theta \right]$$

$$CK_y = - \frac{1}{a} (uv) \left[ \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{u_b}{\cos \theta} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial v_b}{\partial \lambda} \right]$$

其中,  $u_b$  和  $v_b$  分别是基流的纬向和经向分量,  $u$  和  $v$  分别是相应的扰动量,  $a$  是地球半径, 横线代表沿经度  $\theta$  和纬度  $\lambda$  的积分。取局地直角坐标

$$x = (a \cos \theta) \lambda \quad y = a \theta$$

则式(1)近似地化为:

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = - (u^2 - v^2) \frac{\partial u_b}{\partial x} - uv \frac{\partial u_b}{\partial y} \quad (2)$$

此式右端两项分别代表由于基流的纬向梯度(辐散或辐合)以及经向切变所造成的与扰动之间的能量转换。作为局地对全球积分的贡献, 在急流轴的南侧  $\frac{\partial u_b}{\partial y} > 0$ , 因而轴线呈西北—东南向倾斜的导式波列<sup>[9]</sup> ( $uv < 0$ ) 使得  $\frac{\partial K_E}{\partial t} > 0$ , 即扰动能量增长。而在急流的出口区, 有较强的纬向风辐合, 即  $\frac{\partial u_b}{\partial x} < 0$ , 则纬向伸展的涡旋 ( $u^2 - v^2 > 0$ ) 使得  $\frac{\partial K_E}{\partial t} > 0$ 。而在急流轴的后部,  $\frac{\partial u_b}{\partial x} > 0$ , 则经向伸展的涡旋 ( $u^2 - v^2 < 0$ ) 也使得  $\frac{\partial K_E}{\partial t} > 0$ 。

下面具体分析各年的扰动发展与基流的关系。

图 4a 的 1991 年初始场与图 2a 的基流对照, 大西洋上的扰动波列正是沿着急流轴南侧分布, 轴线呈西北—东南向倾斜。正如前面分析, 这种结构有利于扰动从基流吸收能量而发展, 属不稳定扰动。而且轴线的倾斜方向有利于波动能量向下游频散。在较靠近乌拉尔的  $0 \sim 60^\circ \text{E}$  的高纬地区还有两个中心, 位于急流轴的出口处, 这里也是容易产生不稳定的区域。因此扰动波列在逐渐将能量向下游频散的同时, 还在基流的不稳定区域吸收能量而增长, 使得乌拉尔附近的中心迅速增强, 最终建立起阻塞形势。还注意到, 初始阶段扰动具有一定的纬向伸长的结构, 在急流轴的前部这是有利于扰动发展的结构。在后期则逐渐变成对称甚至经向伸长的结构, 这种结构不利于扰动发展。

图 5a 与图 2b 对照表明 1985 年的欧亚大陆西部的急流中心与扰动发展关系较密切。这年的扰动波列较为偏东, 且呈经向分布。一支位于此中心的西南, 它的轴线几乎是东西

向,不是有利发展扰动的那种结构,因此发展得不很强。另一支扰动波列位于急流轴前部,中心呈纬向伸长结构,属不稳定扰动。由于初始扰动在乌拉尔西部是一个正涡度中心,它的发展使得乌拉尔地区由正涡度和负高度距平控制,不能建立阻塞形势。

气候场下的 OSP(图 3a) 也位于大西洋北部急流轴的下游出口区(与图 2c 比较),等值线明显地纬向伸长,有利于扰动吸收能量而发展,到第 7, 8 天时最终建立起阻塞形势。此时扰动结构也变得比较对称。

总之,最敏感扰动的发展与急流的关系很密切。它们一般位于急流轴的南侧及下游出口区,正是这些区域基流的正压不稳定最强。当扰动的结构和位置使其能够有效地从基流吸收能量时(如 1991 年的扰动),它就可以迅速发展,建立强的异常环流型。这就是 OSP 之所以对特定的环流系统的发展影响最大的原因。从这里可以看出,异常环流型的发展,既有赖于波动的能量频散,又有赖于扰动通过正压不稳定过程有效地从基流吸收能量。

## 5 不同区域的小扰动发展

上面分析的初始 OSP 并非限于局地,而是呈现多个波列的分布,反映出对乌拉尔阻塞有不同的影响源地。为搞清它们各自产生的影响,并更清楚地分析小扰动是如何发展的,下面将这些中心分别孤立作为初值,考查其演变。

对于 1991 年的扰动,先取出图 4a 中在(60°N, 15°E)附近的正中心。图 7a, b 分别是扰动发展到第 4 和第 7 天在涡度场上的分布。初始的正涡度中心很快在其下游乌拉尔附近激发出一个负涡度中心,并且迅速增强,而原来的正中心则很快衰减。结果在第 7, 8 天乌拉尔地区建立起一个负涡度和正位势高度中心。图 7b 与图 4d 相比,乌拉尔地区的阻塞中心已很相似,但其西部没有产生负涡度中心。说明原来靠近中心区的扰动对乌拉尔阻塞的建立起了重要作用,但对其西部的低涡中心没有贡献。

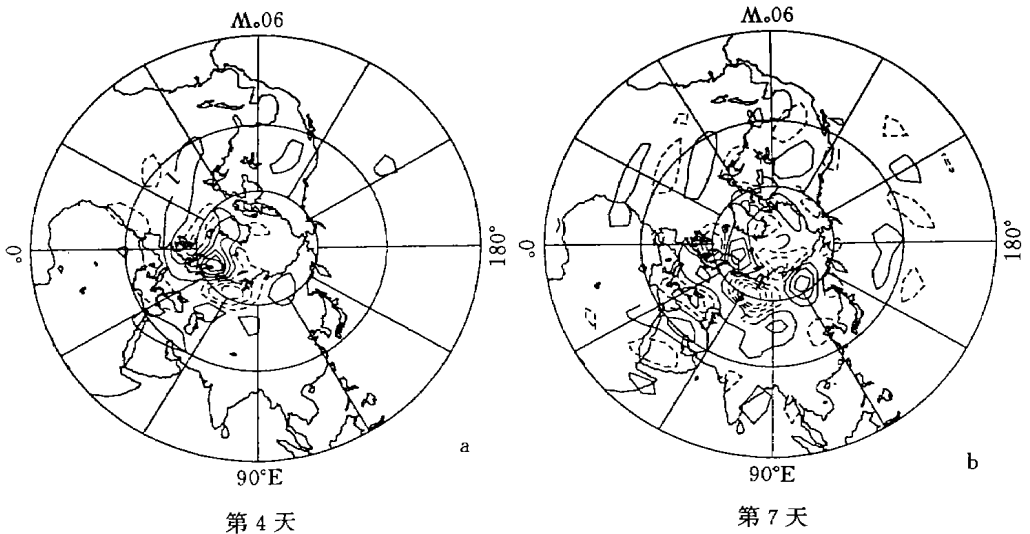


图 7 1991 年涡度场上正涡度中心(60°N, 15°E)的演变

(a. 第 4 天; b. 第 7 天。说明同图 3)



考查图 4a 中最东面的那个负涡度中心的作用。结果只在乌拉尔附近发展出了一片很弱的负涡度区,而在其南部却有一个相对较强的正涡度和负高度中心(图略)。这说明此中心对乌拉尔阻塞作用不大。

考查 1991 年大西洋的扰动波列的作用。先看最西面的(30°N, 60°W)附近的中心。图 8a, b 分别是这个实验的第 4、第 7 天的扰动涡度场。可以清楚地看到,此中心最开始时轴线呈西北—东南向倾斜,是发展扰动的结构。它不断在下游依次激发出新的扰动中心,到第 4 天时(图 8a)已建立起一个西南—东北向的扰动波列,此波列上游的中心轴线逐渐变为纬向并衰减,到第 7 天(图 8b)在乌拉尔附近建立了一个很弱的负涡度中心,而其上游有一很强的正中心。在高度场上则是一对极性相反的中心(图略)。这说明大西洋西部的这个中心对乌拉尔阻塞的作用不大,但对其上游的低涡的建立却有很大贡献。

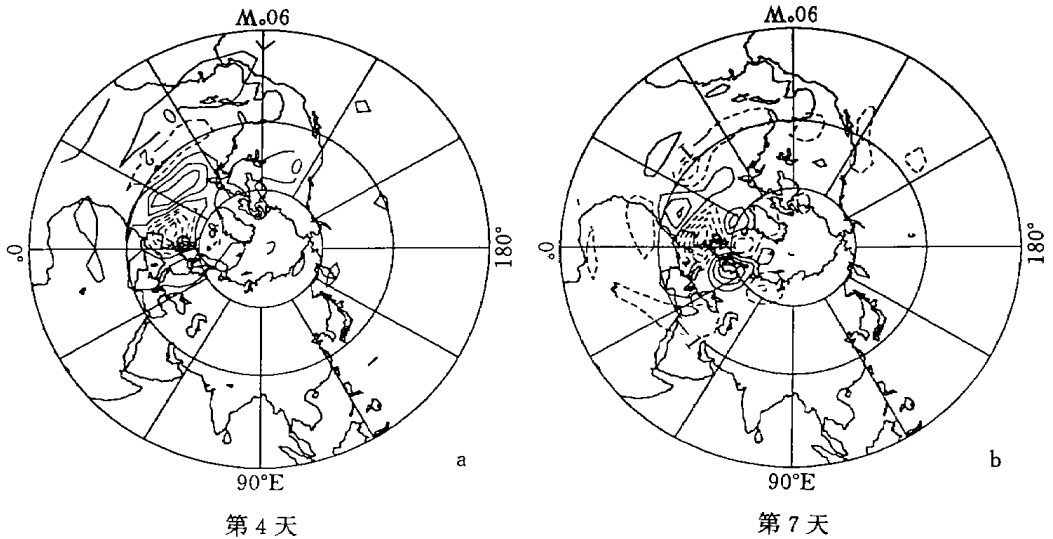


图 8 1991 年涡度场上负涡度中心(30°N, 60°W)的演变

(a. 第 4 天; b. 第 7 天。说明同图 3)

在(35°N, 35°W)附近的扰动中心的发展(图略)与前述的那个中心非常相似。它也是先在下游激发出一个扰动波列,通过能量的频散使得乌拉尔以西建立起一个很强的正涡度中心,而乌拉尔附近的负涡度中心则很弱。

有意思的是,(30°N, 60°W)的中心发展到第 7 天的波列(图 8b)与原来整个扰动波列发展到第 5 天时的结构(图 4c)非常相似,也与原在(35°N, 35°W)的中心发展到第 6 天的结构很相似。这说明大气中的有利发展扰动具有其固有的结构以及相对于急流的位置,在某一有利位置上给予初始扰动,就可以激发出这个扰动波列。在某一基流的不稳定区域,扰动可以吸收基流的能量而强烈发展,最终建立起持续异常环流型。这种激发的过程是通过依次在下游建立新的扰动中心而实现的。与此同时,上游的扰动则从有利发展的结构变为衰减的结构。对 1991 年的基流来说,初始 OSP 场中靠近乌拉尔区域的扰动对于乌拉尔阻塞的建立起了重要作用,而上游较远的中心则造成了其西部低涡的发展。

将 1985 年的扰动也分成几个小区域。图 9 是图 5 中赤道附近的一支经向波列的发展

情况。图 9a 和 9b 分别是第 4 和第 7 天的涡度场。可以看出随着能量由西南向东北方向频散, 到第 4 天, 低纬的中心减弱而乌拉尔附近发展起一个正涡度中心。但从第 5 至第 7 天此中心又减弱, 下游的中心依次增强, 而图 5 中则不同, 这个中心在局地迅速发展, 向下游的能量频散较弱。再考查图 5 中沿 50°E 的另一支经向波列, 它将能量向北频散, 在乌拉尔附近激发出一个正涡度扰动中心(图略)。此中心虽然也不强, 但与前面所述波列迭加的结果却使乌拉尔地区为正涡度控制, 不利于阻塞形势的建立。

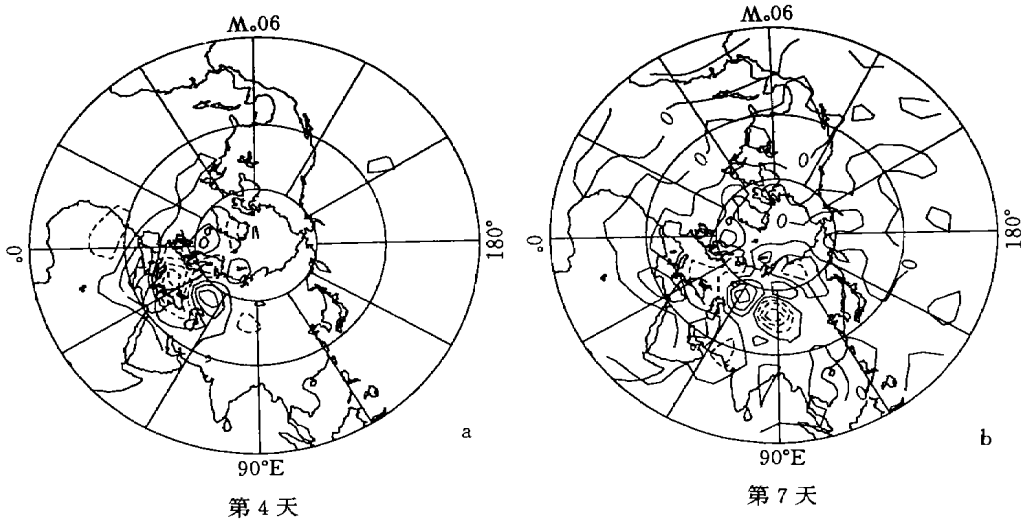


图 9 1985 年涡度场上赤道附近波列的演变  
(a. 第 4 天; b. 第 7 天。说明同图 3)

将图 5a 中(60°N, 30°E)附近的一个中心作为孤立的初始扰动。它的发展使得青藏高原以北形成一个正涡度和负高度扰动中心, 乌拉尔地区的扰动却非常弱(图略), 说明它对这里的异常形势贡献不大。

以上结果说明, 1985 年乌拉尔地区的阻塞形势不能建立, 是由于来自非洲北部向东北传播以及来自阿拉伯半岛向北传播的两个扰动波列共同作用, 使得这一带维持负的高度距平的结果。

## 6 扰动与基流的配置

为考查扰动波列相对于急流轴位置的重要性, 现将 1991 年的基流以及图 4a 中初始 OSP 波列的结构保持不变, 但将此波列向上游移动了约半个波长(约 30 个经度)的距离进行实验。图 10a 是发展到第 7 天的涡度场。演变的基本过程仍是能量向下游频散, 而且仍是在乌拉尔附近扰动强烈发展。与图 4a 中不同的是, 由于初始扰动的极性几乎相反, 发展结果使得乌拉尔以西建立一个强的负中心, 其东部是一个较弱的正中心。这与图 4d 中也几乎完全相反。

再将图 4a 的扰动波列向下游移动约半个波长进行实验。图 10b 是第 7 天的扰动涡度场。此时欧亚大陆中部在涡度场和高度场上都形成了一对正、负中心的结构。它们的位置

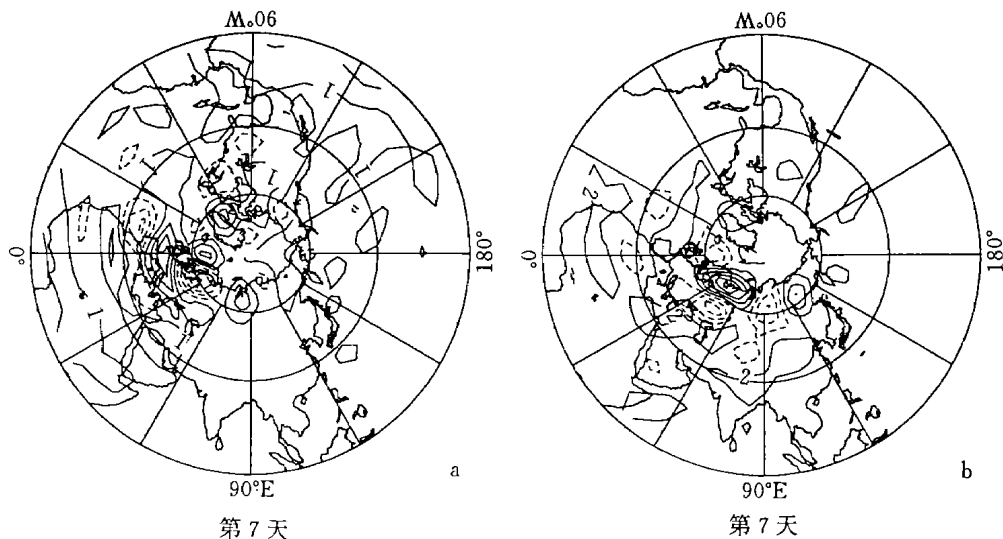


图 10 改变 1991 年初始扰动波列的位置, 发展到第 7 天的结果

(a. 向上游移动; b. 向下游移动。说明同图 3)

比图 4d 中也向东移动了约 30 个经度, 只是正中心较偏北。注意此时仍是乌拉尔附近的正中心发展很强, 而下游的负涡度中心则很弱。

由以上两个实验结果说明, 在一定基流下, 随着初始扰动位相的变化, 最终建立的异常型的位相和极性也会相应变化, 但扰动总是倾向于在特定的不稳定区域发展, 最强的距平中心位置不会有很大改变。这从一个方面说明为何距平遥相关型总是在特定的地理区域重复出现。

为考查不同的基流对扰动发展的影响。先将 1991 年的 OSP 加在 1985 年的基流(图 2b)上。初始场同图 4a。前 4 天左右的演变情况与 1991 年基流下差别不大(图略), 扰动能量仍向下游频散。约 5 天以后差别逐渐明显。第 5 天时(图略)在乌拉尔地区也发展起一对正、负涡度中心。与图 4c 相比, 此时扰动传播范围更大, 在  $30^{\circ}\text{W} \sim 60^{\circ}\text{E}$  的区域以外也有明显扰动。图 11a 是第 7 天的扰动涡度场分布。图 4d 中, 扰动在乌拉尔地区迅速增幅, 负中心增强且区域扩大, 而向下游的能量频散较弱。但在图 11a 中, 扰动明显向下游频散, 在青藏高原北部发展出一个正中心。到第 8 天(图略), 它下游的负中心又有所增强, 乌拉尔附近的负涡度扰动却进一步减弱。

对照图 4a 与图 2b,  $0 \sim 60^{\circ}\text{E}$  高纬度的两个中心不再位于急流的出口区, 而是分别位于两个较弱的急流中心的北部和后部。因此 1991 年 OSP 与 1985 年基流的配置关系不利于扰动吸收能量而发展。而 1985 年之所以在乌拉尔地区产生低涡扰动, 主要是两个经向波列能量频散的结果。这个实验说明, 持续异常环流的建立, 不仅有赖于波动能量的频散, 更重要的是有赖于扰动的结构以及它与基流的配置关系能否使得扰动有效地从基流吸收能量, 并在某一特定区域发展起来。

此外, 还试验了 1991 年的扰动在气候基流下的发展。结果表明, 扰动除了在乌拉尔附近发展起了一个负中心外, 还在大西洋东岸  $45^{\circ}\text{N}$  左右发展起了一个更强的负涡度中心

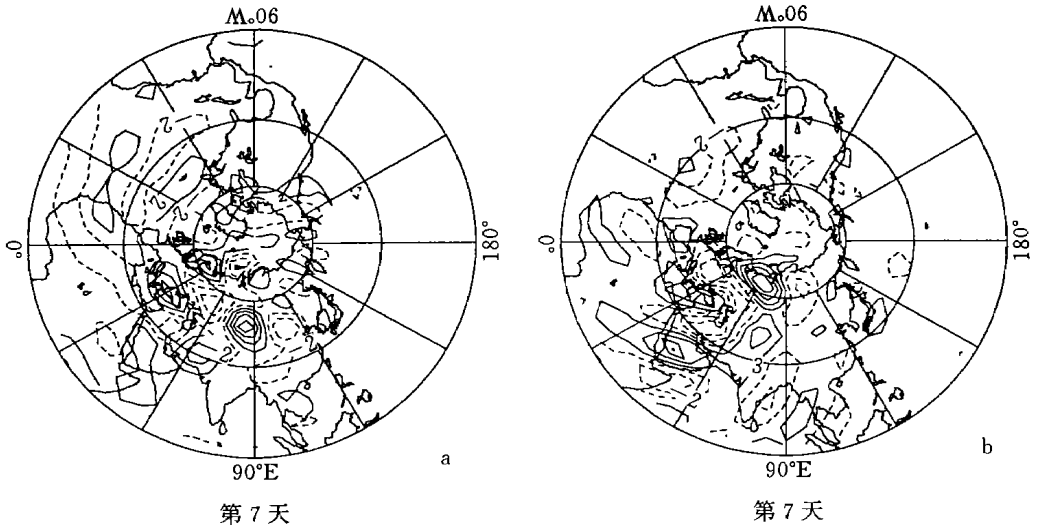


图 11 不同基流下的扰动发展至第 7 天的结果

(a. 1991 年的 OSP 置于 1985 年基流中; b. 1985 年的 OSP 置于 1991 年基流中。说明同图 3)

及正高度中心(图略)。注意此处正是气候场上大西洋地区基流的出口区, 不稳定较强, 有利于扰动发展。但是原来在乌拉尔西部发展较强的低涡在此实验中是先发展后又衰减。

再将 1985 年的 OSP 扰动放在 1991 年的背景场(图 2a)中。初始场同图 5a。初始几天的发展与在 1985 年基流下很相似(参看图 5b), 4, 5 天以后表现出一定差别。图 11b 是此实验第 7 天的涡度场。在乌拉尔附近也发展起了一个低涡中心, 但比图 5 中偏北。在它以南维持经向的扰动波列, 这与图 5 中不同。

这几个实验表明, 扰动的发展对基流是很敏感的。由以上结果可以分析乌拉尔地区 1991 年和 1985 年异常发展显著不同的原因。一方面, 1991 年的基流不稳定有利于乌拉尔地区的扰动发展。由于初始扰动结构的不同, 它可以发展出负涡度和正高度中心(1991 年), 也可以发展出正涡度和低压中心(1985 年)。而 1985 年的 OSP 发展所建立的负高度距平较弱, 1991 年的 OSP 初值在此基流下局地不稳定发展也很弱, 主要是能量向下游频散, 说明 1985 年的基流不利于扰动局地发展。另一方面, 初始扰动结构的不同也导致以后发展过程的差异。1991 年大西洋的扰动波列结构有利于它从基流吸收能量而发展, 在下游乌拉尔地区建立阻塞形势。而 1985 年来自低纬的两支经向波列的结构及其位相决定了它只能在乌拉尔地区发展起负高度距平, 不利于阻塞形势的建立。因此这两年环流在乌拉尔地区的距平几乎相反, 进而导致了梅雨的异常。

应指出, 这里的初始扰动是在特定的环流背景下的最敏感扰动, 它本身就是由基流决定的, 即在一定的基流下, 这样的初始扰动的发展结果, 对所考虑的环流系统(这里是乌拉尔阻塞)的演变将产生最大影响。就是说, 这种扰动是由基流选择了的, 其结构使得它能够在特定区域有最强的发展。1991 年是 El Niño 年, 而 1985 年则是 La Niña 年, 可能正是由于这两年的海温异常导致了东亚平均环流的异常, 进而制约了扰动的发展过程, 最终建立了极不相同的持续异常型。强弱季风年与 ENSO 循环的关系还需进一步的工作验证。

## 7 小结及讨论

通过数值实验对初始扰动不稳定发展而建立异常环流型的过程进行了分析。与以往的工作不同, 首先选择了东亚夏季风异常的两个典型年份, 即江淮流域大涝的 1991 年和干旱的 1985 年的 6 月份平均环流为基本流场, 讨论扰动在不同的环流背景下的发展, 从一个角度说明了造成这两年环流异常的原因。另一方面, 所用的初始扰动是由共轭敏感性分析得出的在特定基流下对乌拉尔地区异常发展影响最大的初始扰动, 即最敏感扰动 (OSP)。因而其发展过程的研究就更有意义。

这里看到, 初始 OSP 的分布与基流的关系非常密切。1991 年和 1985 年基流和初始扰动的结构不同, 导致其随后的发展过程也有很大不同。1991 年大西洋区域的扰动波列位于急流轴的南侧及出口区, 这里基流的不稳定性较强, 扰动的结构又有利于它从基流吸收能量, 因而扰动在将能量向下游频散的同时在乌拉尔附近强烈发展起来, 建立起了较强的阻塞形势。模式的结果在欧亚大陆区域内的扰动分布与实际观测的 500hPa 距平分布很相似。将各个扰动中心分别作为孤立的初始扰动进行积分的结果说明, 初始场中位于乌拉尔以西的一个正涡度中心对阻塞的建立起了重要作用, 而大西洋上的扰动波列的发展除了加强乌拉尔阻塞高压外, 还导致了其西部的低涡中心的建立。实验结果还说明, 有利发展扰动具有相应于某一基流的固有结构, 在某个有利的位置给予扰动, 能够很快激发出整个扰动波列, 并发展出异常中心。而 1985 年则是来自非洲北部及阿拉伯半岛的两支经向波列的能量频散, 使得乌拉尔地区建立起正涡度扰动, 不利于阻塞形势的建立和发展。气候背景场下的初始 OSP 与 1985 年的结构较为相似, 但中心极性相反, 它在乌拉尔地区建立起了阻塞型的正高度距平中心。以上数值积分的结果与能量分析的结果一致。

另外, 还进一步分析了扰动与基流配置对于其发展的重要性。改变 1991 年的初始扰动波列相对于急流的位置, 扰动仍然是在乌拉尔附近的基流不稳定区域发展, 最强的距平中心位置改变不大。这从一个方面说明了为何距平遥相关型具有确定的空间结构, 并倾向于在特定的地理区域重复出现。

将 1991 年的 OSP 加在 1985 年的基流上, 则它主要表现为能量向下游的频散, 而没有在乌拉尔附近强烈发展, 建立的异常中心较弱。说明 1985 年的基流不利于扰动的局地增幅。相反 1985 年的扰动在 1991 年基流下仍可在乌拉尔附近发展, 但建立的是低涡中心。几个实验结果的对比说明, 导致 1991 年和 1985 年夏季乌拉尔地区几乎相反的异常环流的原因是基流的稳定性不同以及前期扰动的结构和位置不同。只有扰动与基流的配置使得它能够在特定的不稳定区域发展, 才能建立强的持续异常环流型。

由此得出结论: 异常环流型的建立, 能量频散与正压不稳定过程都非常重要。它既有赖于基流自身的不稳定, 又取决于初始扰动的结构以及相对于基流的位置关系能否使它有效地吸收能量而发展。

李志锦等的研究<sup>[7, 8]</sup>指出, 最有利发展扰动可以通过大气内部的正压不稳定过程发展出低频变化的距平遥相关型。他们指出, 基流的特征, 包括其经向和纬向变化在大气强迫的发展过程中都具有非常重要的作用。遥相关型路径的建立, 不仅依赖于 Rossby 波的能量频散, 更重要的是取决于大气响应能否有效地从基流吸收动能而发展。这里的结果支持这一结论。所不同的是, 他们得到的有利发展扰动是全球能量内积意义下的增长最大的

模,因而虽然各个模有不同的结构和分布特征,但都具有一定的全球性,而且随时间发展成全球尺度的遥相关型。而这里的响应函数是针对局地的某一阻塞系统,所得到的 OSP 与他们的最有利发展扰动相比,更具有局地性,其发展的结果是在特定的地理区域建立异常环流型。但这里的结论与他们得到的在定性上是一致的。

致谢:朱抱真先生对本文的工作提出过许多宝贵意见,在此深表感谢!

## 参考文献

- 1 Yang Yan, Li Zhijin and Ji Liren. Adjoint sensitivity analyses on the anomalous circulation features in East Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(1): 111 ~ 123
- 2 杨燕,李志锦,纪立人. 1991 年夏季持续性异常环流的共轭敏感性分析. *大气科学*, 1998, 22(1): 69 ~ 82
- 3 Hoskins B J and Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 1179 ~ 1196
- 4 Hoskins B J and Ambrizzi T. Rossby wave propagation on a realistic longitudinal varying flow. *J Atmos Sci*, 1993, 50: 1661 ~ 1676
- 5 Simmons A J, Wallace J M and Branstator G W. Barotropic wave propagation, instability and atmospheric teleconnection patterns. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1263 ~ 1392
- 6 Branstator G W. Analysis of general circulation model sea surface temperature anomaly simulations using a linear model. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 2225 ~ 2254
- 7 李志锦,纪立人. 正压大气有利强迫模及其响应与遥相关型. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25: 532 ~ 539
- 8 Li Zhijin and Ji Liren. Internal dynamics of the generation of atmospheric teleconnection patterns. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13: 20 ~ 32
- 9 Zeng Qingcun. On the evolution and interaction of disturbances and zonal flow in rotation barotropic atmosphere. *J Meteor Soc Japan*, 1982, 60: 24 ~ 31
- 10 Zeng Qingcun, et al. Evolution of large-scale disturbance and their interaction with mean flow in a rotating barotropic atmosphere— part . *Adv Atmos Sci*, 1986, 3: 172 ~ 188

# THE EVOLUTION OF OPTIMAL SENSITIVITY PERTURBATION AND THE PERSISTENT ANOMALOUS CIRCULATION AT URAL IN SUMMER

Yang Yan Li Zhijin Ji Liren

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing, 100029*)

## Abstract

In this work, the process of the set up of anomalous circulation patterns through unstable development of initial disturbances was investigated by numerical experiments. We chose as basic flow the mean circulation of two typical anomalous East Asian summer monsoon years of 1991 and 1985, and as initial disturbances the optimal sensitivity perturbations obtained from adjoint sensitivity analyses. The development of these disturbances in different circulation background has been analyzed.

The result shows that, the instability of the 1991 basic flow in Eurasia region is stronger, and the initial perturbation possesses the structure of preferred growing perturbation. Therefore the disturbances are excited near Ural area through energy dispersion, then grow very rapidly and develop the blocking circulation. Whereas the disturbances in 1985 developed into a positive vorticity anomaly and is not favorable for the setup of blocking high. This lead to the almost opposite anomalous circulation patterns in Ural area in 1991 and 1985. A series of experiments indicate that the development of anomalous circulation is due to the growth of disturbances by extracting energy from basic flow through barotropic instability as well as energy dispersion. This depends not only on the instability of the basic flow itself but also the structure of the initial disturbance and its position with respect to the basic flow. The basic flow selects the initial disturbance with specific structure. When there is a disturbance at certain favorable position, it can excite the whole wave train and develop into a strong anomalous pattern. No matter how the phase distribution of the initial wave train changes within certain range, the disturbances tends to develop in the same unstable area of the basic flow.

**Key words:** Optimal sensitivity perturbation, Barotropic instability, Persistent anomalous circulation.