

关于阻塞形势演变过程中 波数域能量的诊断分析

陆日宇 黄荣辉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 本文对北半球冬季维持时间较长的三次阻塞形势形成前的纬向平均西风变化以及阻塞过程中波数域动能及其转换进行了诊断分析。分析结果表明: 在阻塞形势形成前, 由于波流相互作用, 使得平均流减弱, 并且波流相互作用在太平洋地区和大西洋地区有不同的特点; 分析结果还表明: 阻塞形势维持期间, 由于波波相互作用, 行星波异常增幅; 而在崩溃期间, 也主要通过波波相互作用使得行星波动能减少。

关键词 阻塞过程 平均流 行星波 波流相互作用 波波相互作用

1 引言

阻塞形势建立后, 中高纬度地区大气环流由强西风纬向环流型变成弱西风经向环流型, 即由高指数环流变成低指数环流。阻塞形势崩溃时, 情况正好相反。纬向环流和经向环流的交替出现, 即指数循环, 是大气环流变化的主要特征, 而阻塞形势作为大气环流的大范围持续性异常在指数循环中占有重要地位。此外, 阻塞形势的时间尺度为一至数周, 刚好为中期天气过程的时间尺度, 故对阻塞形势的形成、维持和崩溃的研究是中期预报的关键问题之一。对阻塞形势机制的认识可以提高中期天气预报的准确和延长预报时效。因此, 目前对阻塞形势的研究受到了广泛的重视。

维持时间较短的阻塞高压大多为局地现象, 是由局地斜压不稳定引起的扰动发展造成的, 但维持时间长的阻塞高压则常常伴随着大范围纬度带甚至整个半球环流形势的变化, 这种阻塞形势影响的地域广、时间长, 较局地现象的阻塞高压更具有研究意义。因这种阻塞形势与整个纬圈上的扰动相联系, 许多人对阻塞形势做了波数域上的诊断研究。黄荣辉等^[1]分析了 1979 年 2 月份的一次阻塞形势中各波振幅的变化, 指出阻塞形成时行星波 2 波异常增幅, 崩溃时振幅迅速减弱。Lejenas 等^[2]的统计结果表明阻塞期间高度场的定常行星波部分大于气候平均值。Austin^[3]的分析也表明阻塞期间行星波增幅, 她根据行星波之间的相干性解释了大西洋和太平洋上空的阻塞形势。这些研究结果都表明了行星波在阻塞过程中的重要性。

至于为什么阻塞形势发展时行星波会增幅, 目前有两种看法, 即波流相互作用为主要原因和波波相互作用为主要原因。黄荣辉^[1]利用变形欧拉平均方程组和 E-P 通量进

行了诊断分析,指出阻塞期间行星波 2 波得以迅速增幅的原因是因为平均流向 2 波提供了能量,波流相互作用的结果使得平均流(西风)迅速减弱,给阻塞形势的建立提供了先行条件。Chen 等^[4]对模式输出结果进行分析,也提出在阻塞形势发展时期平均流向行星波提供能量。

与上述观点有所不同,一部分学者认为天气尺度波在阻塞形势形成和维持时期向行星波提供了能量,天气尺度波或高频瞬变扰动的强迫作用是阻塞得以建立和维持的原因。Kung 等^[5]对 FGGE 年的阻塞形势进行了波数域上的能量分析,指出冬季波波相互作用向 1 波提供的动能对阻塞的维持起很强的作用,若有两个阻塞高压同时存在时,波波相互作用向 1 波和 2 波提供的动能均很强。Shutts^[6]利用准地转模式讨论了瞬变扰动的强迫作用,认为这种作用可以使阻塞得以维持。Tanaka^[7]也利用简单的非线性模式对阻塞过程进行了模拟和分析,认为 1 波的增幅造成了阻塞,而 1 波增幅的原因是由于天气尺度波通过 2 波作为媒介将能量上传给了 1 波。

综上所述,因为阻塞过程之间差别比较大,所以也难以对阻塞过程的物理机制达成一致的看法,需要对此做进一步的研究。因此,在本文中将对波流相互作用和波波相互作用在阻塞形势的形成、维持和崩溃各阶段中的不同作用进行诊断研究。

2 阻塞个例的选取及计算方案

2.1 个例选取

我们选取了发生在北半球冬季的 3 次阻塞形势过程,即,1982 年 2 月 5 日至 17 日阻塞过程、1986 年 3 月 10 日至 24 日阻塞过程和 1986 年 2 月 11 日至 26 日阻塞过程。图 1 给出了这 3 个阻塞形势维持期间平均的位势高度场。从中可以看到前两次阻塞过程分别发生在太平洋上空和大西洋上空,最后一次阻塞过程在太平洋上空和大西洋上空各有一阻塞高压。这 3 次阻塞过程的共同特点是它们的维持时间较长,均在 10 天以上。

2.2 波数域的能量计算公式

本文将利用 ECMWF 的逐日 00 时 500 hPa 等压面上的风场格点资料对上述 3 个阻塞过程进行波数域上的诊断分析。

首先对速度进行 Fourier 变换,截取 15 个波,可得下式:

$$\begin{cases} u(\lambda, \theta, t) = \sum_{n=0}^{15} [C_n^u(\theta, t) \cos n\lambda + S_n^u(\theta, t) \sin n\lambda], \\ v(\lambda, \theta, t) = \sum_{n=0}^{15} [C_n^v(\theta, t) \cos n\lambda + S_n^v(\theta, t) \sin n\lambda]. \end{cases} \quad (1)$$

这样, n 波的动能为

$$E_{kn} = \frac{1}{2} [P_n(u, u) + P_n(v, v)], \quad (2)$$

波波相互作用对 n 波动能的贡献为

$$E_{knn} = N_n(a, b'c'), \quad (3)$$

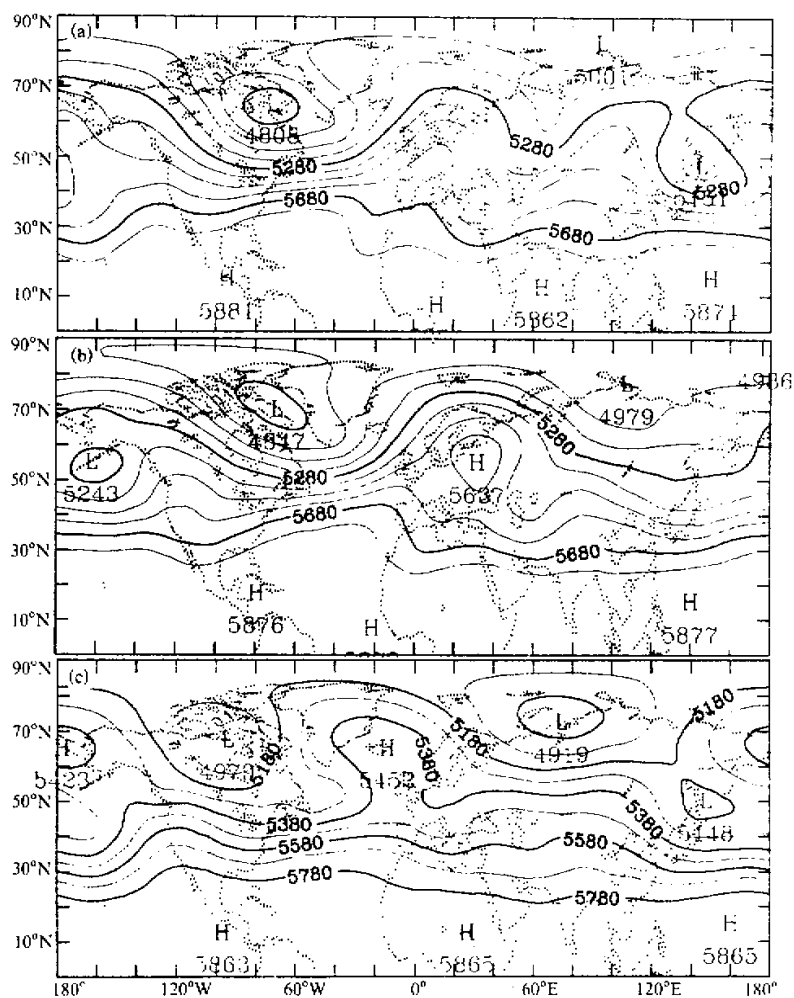


图 1 3 个阻塞形势维持期间平均的 500 hPa 位势高度场

(a) 1982 年 2 月 5 日至 17 日阻塞形势; (b) 1986 年 3 月 10 日至 24 日阻塞形势;

(c) 1986 年 2 月 11 日至 26 日阻塞形势。单位: GPM

平均流对 n 波动能的贡献为

$$E_{kon} = N_n(a, bc) - N_n(a, b'c'), \quad (4)$$

这里

$$P_n(u, v) = \frac{1}{2} (C_n^u C_n^v + S_n^u S_n^v), \quad (\text{当 } n=0 \text{ 时, 无因子 } \frac{1}{2}) \quad (5)$$

$$N_n(a, bc) = - \left[P_n \left(u, \frac{\partial uu}{\partial x} \right) + P_n \left(v, \frac{\partial uv}{\partial x} \right) \right] - \left[P_n \left(u, \frac{\partial uv}{\partial y} \right) + P_n \left(v, \frac{\partial vv}{\partial y} \right) \right] + \frac{\tan \theta}{r} [P_n(u, uv) - P_n(v, uu)], \quad (6)$$

$$N_n(a, b'c') = - \left[P_n \left(u, \frac{\partial u'u'}{\partial x} \right) + P_n \left(v, \frac{\partial u'v'}{\partial x} \right) \right] - \left[P_n \left(u, \frac{\partial u'v'}{\partial y} \right) + P_n \left(v, \frac{\partial v'v'}{\partial y} \right) \right] + \frac{\tan \theta}{r} [P_n(u, u'v') - P_n(v, u'u')], \quad (7)$$

λ 为经度, θ 为纬度, r 为地球半径, $()'$ 表示减去纬向平均后的扰动。这样, 有了 u, v 场, 利用 (1) 式可以计算出 C_n, S_n 来, 并由 (5) 式计算出 P_n ; 从而由 (6) 与 (7) 式计算出 $N_n(a, bc)$ 与 $N_n(a, b'c')$ 来, 最后由 (2) 至 (4) 式计算出 E_{kn}, E_{kmn} 与 E_{knn} 来。具体的推导过程可参见文献[8]。

3 阻塞形势发生前纬向平均气流的变化

阻塞形势发生后, 大气环流呈现低指数环流形式, 纬向平均西风减弱。黄荣辉等^[1]的分析结果表明, 阻塞形成期间由于波流相互作用, 平均流向行星波提供能量, 从而平均流本身迅速减弱, 减弱后的平均流所提供的先行条件可以使行星波 2 波迅速增幅。下面我们对阻塞形势形成前纬向平均西风的变化情况进行分析。

3.1 太平洋上空阻塞形势发生前平均流的变化

图 2 给出了发生在太平洋上空的 1982 年 2 月 5 日至 17 日阻塞形势形成前纬向平均速度的变化。从中可以看出 1 月 31 日开始纬向平均速度一直减弱, 最后在阻塞形势建立时 (2 月 5 日), 50°N 以北的西风速度低于 8 m/s 。为考察这种平均流减弱的原因,

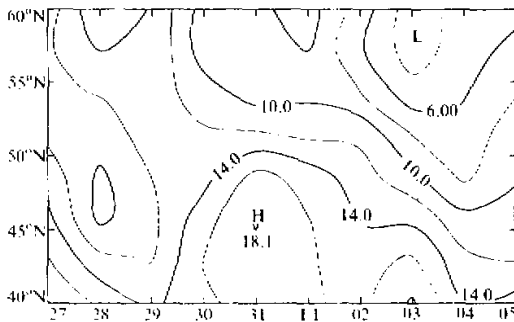


图 2 1982 年 2 月 5 日至 17 日阻塞形势形成前纬向平均速度的变化

我们分析了波流相互作用对流变化的影响 (图 3)。分析结果表明, 行星波 (1~4 波) 与流的相互作用 (图 3a) 在 1 月 29 日至 2 月 1 日使流减速, 而在 2 月 2 日以后则使流加速; 气旋波 (5~15 波) 与流的相互作用 (图 3b) 主要在 2 月 2 日、3 日使流减速; 所有的波动 (1~15 波) 与流的相互作用 (图 3c) 在 1 月 29 日至 2 月 1 日使流减速。因此, 对这个阻塞个例的分析表明阻塞形成前平均西风减

弱, 而减弱的主要原因是因为行星波与平均流的相互作用。

3.2 大西洋上空阻塞形势发生前平均流的变化

下面再对发生在大西洋上空的 1986 年 3 月 10 日至 24 日阻塞形成前纬向平均速度的变化进行分析 (图 4), 可以发现在这次阻塞形成前, 纬向平均速度自 50°N 向北逐渐

减速,到了阻塞建立时,纬向平均速度已减弱到 8 m/s 以下。对这次阻塞形势形成前波流相互作用的分析(图5)表明,行星波与流的相互作用明显没有气旋波与流的相互作用强,因此所有的波动与流的相互作用与气旋波与流的相互作用类似,自3月6日起至阻塞建立时(10日),相互作用的结果使得平均流减速。这表明大西洋上空的阻塞形势形成前同太平洋上空的阻塞形势形成前一样,平均西风也同样减速,但减速的主要原因是由于气旋波与流的相互作用。

3.3 太平洋与大西洋同时发生阻塞形势前的平均流的变化

最后,对在太平洋和大西洋上空同时有阻塞高压的1986年2月11日至26日阻塞形势形成前纬向平均速度的变化进行分析。从图6中可发现同样在这次阻塞形成前,纬向平均速度迅速减弱,甚至一度出现东风。这次流减速的原因主要是因为:2月4日到6日的行星波与流的相互作用以及9日到10日的气旋波与流相互作用的结果(图7),行星波与流的相互作用和气旋波

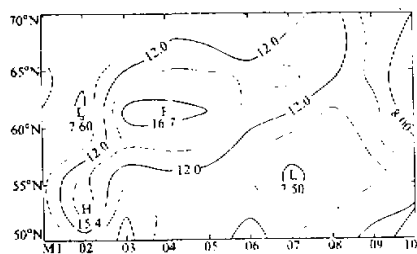


图4 1986年3月10日至24日阻塞形势形成前纬向平均速度的变化

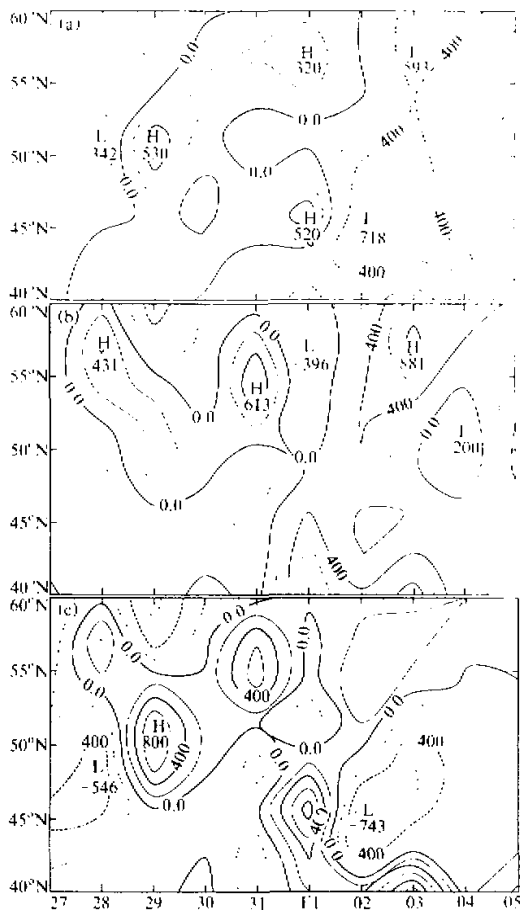


图3 1982年2月5日至17日阻塞形势形成前波流相互作用
正值表示平均流向波动提供能量。(a)行星波与流的相互作用;
(b)气旋波与流的相互作用;(c)所有的波动与流的相互作用
单位: 10^{-2} W m^{-2}

与流的相互作用均对流减速起着重要作用。

对以上3个发生在太平洋上空、大西洋上空和同时在太平洋与大西洋上空的阻塞形势形成前的纬向平均速度变化的分析表明,阻塞建立前,纬向平均速度减弱,降低至 8 m/s 以下,并在阻塞维持期间,西风速度一直较弱(图略)。流减速的主要原因在太平洋阻塞形成前为行星波

与流相互作用,而在大西洋阻塞形成前为气旋波与流相互作用。在太平洋和大西洋同时建立的阻塞形势形成前行星波与流相互作用和气旋波与流相互作用均重要。

4 阻塞过程中波数域动能及其转换的诊断分析

从上节中已经看到阻塞形成前西风减速,但对西风减速后阻塞形势如何发展的物理机制需要做进一步的研究。在本节中将对3个阻塞形势个例进行波数域动能及其转换的诊断分析。

4.1 太平洋上空阻塞形势

首先还是对发生在太平洋上空的阻塞过程进行分析。图8给出了这次阻塞过程中1波动能(图8a)及其转换(图8b),从图8a中可以看出1波动能从阻塞建立时(2月5日)开始迅速增加,至7日就已基本上达到顶峰,13日至17日阻塞崩溃时,1波动能迅速减少,1波动能在阻塞维持期间明显大于非阻塞期间。图8b表明,虽然在2月5日之前,平均流向1波

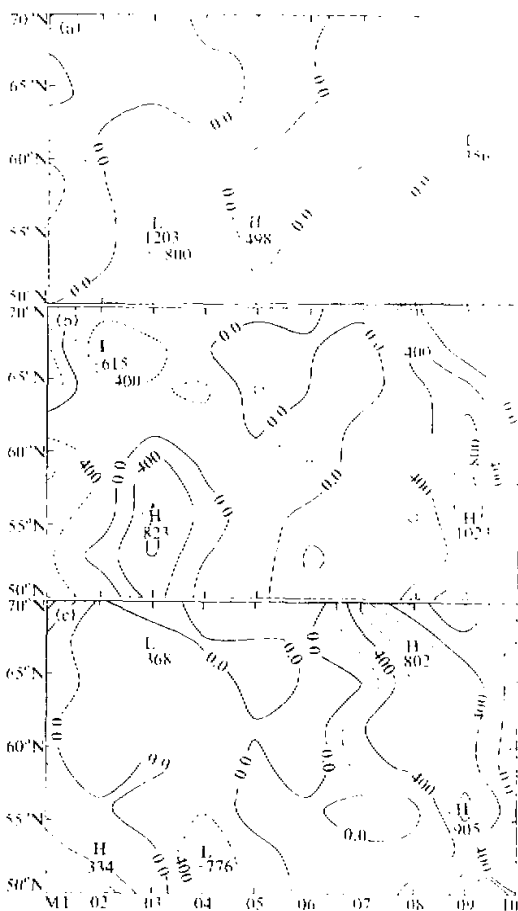


图5 1986年3月10日至24日阻塞形势形成前波流相互作用,其他同图3

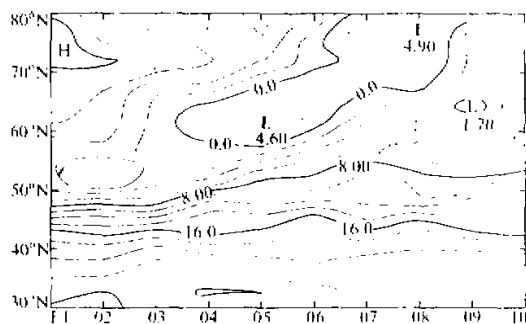


图6 1986年2月11日至26日阻塞形势形成前纬向平均速度的变化

提供了动能,但其数值很小,而且在2月5日之后,波流相互作用基本上是使1波动能减少。这次阻塞过程中1波增幅的原因是波波相互作用在维持期间向1波提供了大量的能量,阻塞崩溃时,也主要通过波波相互作用使得1波动能迅速减少。

4.2 大西洋上空阻塞形势

下面继续对1986年3月10日至24日的大西洋阻塞过程进行分

析(图 9)。这次阻塞形势的维持期间 2 波异常增幅。阻塞形成前(10 日以前), 波流相互作用和波波相互作用都不强, 没有为 2 波动能的增加做出大的贡献; 但在维持期间, 波波相互作用向 2 波提供了能量, 此时波流相互作用使 2 波动能减少, 即这次阻塞过程中 2 波动能增加的主要原因依然是波波相互作用; 同样, 阻塞崩溃时 2 波动能的减少也是通过波波相互作用。

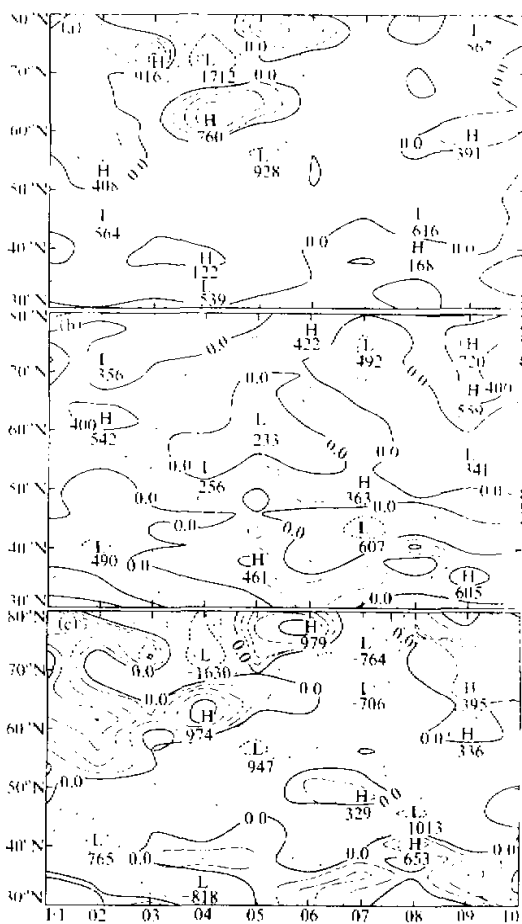
4.3 太平洋与大西洋同时出现阻塞形势

最后再对 1986 年 2 月 11 日至 26 日的阻塞形势进行分析(图 10), 这次阻塞形势在太平洋和大西洋上空各有一阻塞高压(见图 1c), 因此, 在直观上就可推测阻塞期间 2 波异常增幅。事实上正是如此, 2 波动能在阻塞期间增幅非常明显(图 10a)。阻塞形成前, 波流相互作用向 2 波提供能量, 但波波相互作用却使 2 波动能减少, 两者之和的数值较小; 到了维持期间, 波波相互作用使用得 2 波动能增加, 而波流相互作用仍然使 2 波动能减少; 在阻塞崩溃时, 波波相互作用和波流相互作用同时使 2 波动能减少, 其中波波相互作用更为明显。

对波数域动能及其转换的分析表明, 虽然存在不同之处, 但在阻塞形势的维持期间都是某一波数的行星波异常增幅, 增幅的原因都是因为波波相互作用在维持期间向该波数的行星波提供了能量, 虽然此时波流相互作用使行星波动能减少, 但两种作用之和为向行星波提供能量。崩溃期间行星波动能的减少主要是通过波波相互作用。

5 结论与讨论

为了研究阻塞形势形成、维持和崩溃的物理机制, 本文对发生在北半球冬季维持时



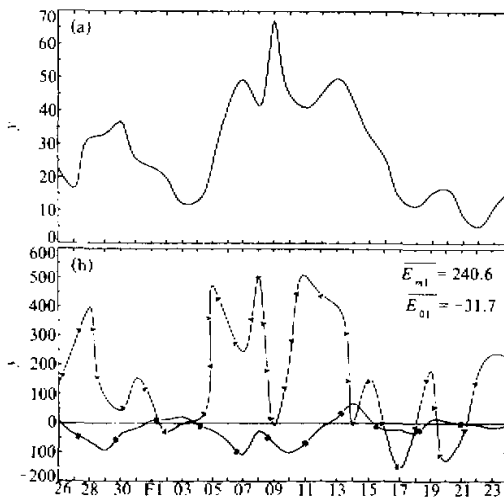


图 8 40~60°N 平均的 1982 年 2 月 5 日至 17 日阻塞

期间及其前后的 1 波动能 (a) 及其转换 (b)

动能的单位为 10^4 J m^{-2} 、转换的单位为 10^{-2} W m^{-2} 。(b)中 A 线为波波相互作用对 1 波动能的贡献, B 线为波流相互作用对 1 波动能的贡献, 图中右上角给出了维持期间平均的波波相互作用对 1 波的贡献 $\overline{E_{a1}}$ 和波流相互作用对 1 波的贡献 $\overline{E_{o1}}$

用和波波相互作用对行星波的贡献都比较弱, 即使稍强一些, 但两种作用之和的贡献也比较弱; 阻塞维持期间行星波动能增幅是通过波波相互作用引起的; 崩溃期间行星波动能的减少也主要是由波波相互作用引起。

综合上述结果, 我们可以把阻塞形势演变过程概括为: 阻塞形成前, 通过波流相互作用, 纬向平均西风减速, 这种减速给阻塞形势的建立提供了一种先行条件; 在阻塞维持期间, 已经减弱的纬向平均西风激发了波波相互作用, 通过激发后的波波相互作用向行星波持续提供能量, 致使维持期间行星波异常增幅, 到了崩溃期间, 主要由波波相互作用

间较长的 3 次阻塞形势形成前的纬向平均速度变化进行了诊断分析, 结果发现: 阻塞建立前, 纬向平均速度减速。若阻塞形势发生在太平洋上空, 平均流的减速主要是由于行星波与流的相互作用; 若阻塞形势发生在大西洋上空, 则流减弱主要是由于气旋波与流的相互作用; 若在太平洋和大西洋上空同时存在阻塞形势, 那么阻塞形成前行星波与流的相互作用和气旋波与流的相互作用都重要。这说明在太平洋地区行星波的作用比较明显, 而在大西洋地区, 气旋波的作用比较明显。

此外, 对阻塞过程中波数域动能及其转换的分析表明: 阻塞形势维持期间行星波动能异常增幅。在阻塞建立前, 波流相互作用

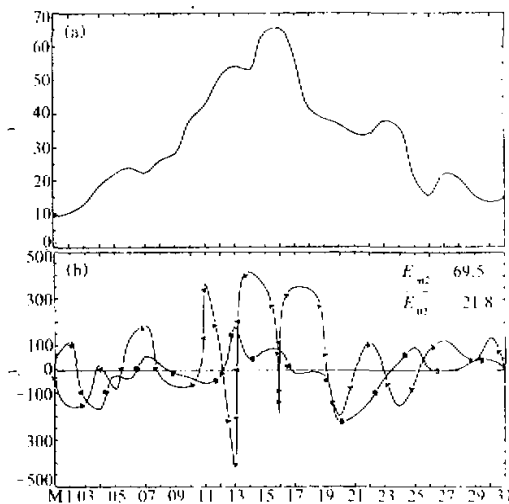


图 9 50~70°N 平均的 1986 年 3 月 10 日至 24 日阻塞期间及其前后的 2 波动能 (a) 及其转换 (b)、

其他同图 8

使行星波动能减少, 阻塞得以崩溃。这说明了在阻塞形势形成期间波流相互作用是很重要的, 而在维持与崩溃期间, 非线性过程是很重要的。

本文分析的 3 个阻塞形势都是由于某一波数的行星波增幅引起的, 事实上, 这 3 次阻塞过程中其他波数的行星波的动能并没有明显的增加 (图 11), 这说明单波可以引起阻塞形势, 这一点与黄荣辉等^[1]的结果相一致, 他们的结果表明 1979 年 2 月份的阻塞形势是由于 2 波异常增幅引起的。单波能够引起阻塞形势说明 Austin^[3]的行星波之间相干性理论不能解释所有形式的阻塞形势。

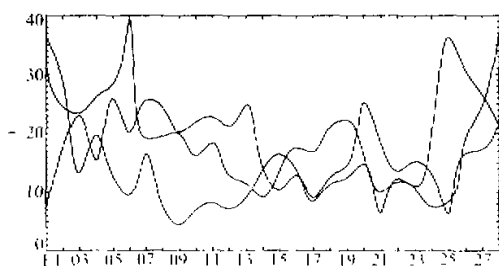


图 11 40~80°N 平均的 1986 年 2 月 11 日至 26 日阻塞期间及其前后 1 波、3 波和 4 波的动能, 其他同图 8

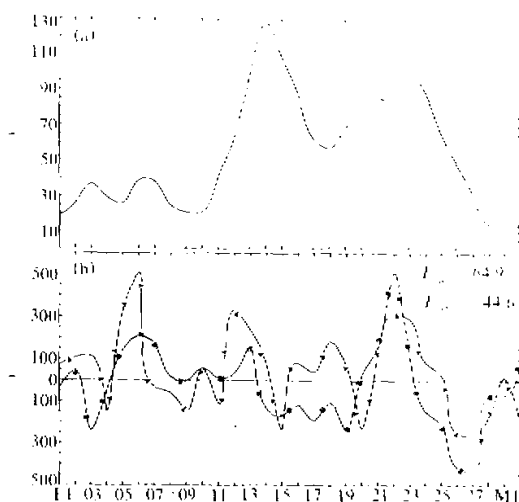


图 10 40~80°N 平均的 1986 年 2 月 11 日至 26 日阻塞期间及其前后的 2 波动能 (a) 及其转换 (b), 其他同图 8

本文在诊断分析所使用的资料只是 500 hPa 等压面上的资料, 计算过程中略去了斜压部分, 我们发现计算结果能够较好地说明阻塞形势形成前的平均气流变化和维持、崩溃期间的行星波振幅的变化, 以及产生这些变化的物理机制, 这说明了正压过程在阻塞形势中可能会占有非常重要的地位。

本文只分析了 3 个阻塞个例, 因此, 进一步的个例分析是必要的。另

外, 平均流减弱后波波相互作用的激发机制也尚待研究。

参 考 文 献

- 1 黄荣辉、邹捍, 1989, 球面斜压大气中上传行星波与纬向平均气流的相互作用, *大气科学*, **13**, 383~392.
- 2 Lejenas, H. and B.R. Doos, 1987, The behavior of the stationary and travelling planetary-scale waves during blocking—a Northern Hemisphere data study, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 709~725.
- 3 Austin, J. F., 1980, The blocking of middle latitude westerly winds by planetary waves, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 327~350.
- 4 Chen, T. C. and J. Shukla, 1983, Diagnostic analysis and spectral energetics of a blocking event in the GLAS climate model simulation, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 3~22.

- 5 Kung, E. C. and W. E. Baker, 1986. Spectral energetics of the observed and simulated Northern Hemisphere general circulation during blocking episodes, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2792~2812.
- 6 Shutts, G. J., 1983, The propagation of eddies in diffluent jet streams: Eddy vorticity forcing of blocking flow fields, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 737~761.
- 7 Tanaka, H. L., 1991, A numerical simulation of amplification of low-frequency planetary waves and blocking formations by the upscale energy cascade, *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2919~2935.
- 8 Hayashi, Y., 1980, Estimation of nonlinear energy transfer spectra by the cross-spectral method, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 299~307.

Energetics Examination of the Blocking Episodes in the Northern Hemisphere

Lu Riyu and Huang Ronghui

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, the variation of zonal mean flow before the formation of three blocking episodes in the Northern Hemisphere which maintained for a long time and the energetics of these three blocking episodes are analysed diagnostically. The analysed results show that before the occurrence of the blocking situation, the zonal wind decreases through the wave-mean flow interaction, and the interaction has different characters over the Pacific and Atlantic. The analysed results also show that the planetary waves are amplified by the wave-wave interaction at the stage of the maintenance of the blocking, and are weakened at the stage of the collapse also mainly by the wave-wave interaction.

Key words blocking episode zonal mean flow planetary waves wave-mean flow
interaction wave-wave interaction