

2003 年淮河大水期间亚洲北部阻塞高压的形成特征

李峰¹ 丁一汇² 鲍媛媛¹

¹ 国家气象中心, 北京 100081

² 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用观测资料和 NCEP 再分析资料分析 2003 年淮河大水期间亚洲北部阻塞高压的形成维持机制, 结果表明, 2003 年淮河梅汛期亚洲中高纬地区阻塞高压的异常活动中, 波流作用十分显著。6 月上旬, 阻高建立前期和维持过程中, 上游地区天气尺度波动活跃, 欧洲斜压区不断有瞬变动能生成, 并在阻塞区向阻高平均流转化。从瞬变涡动的作用来看, 上传传播而来的瞬变波不断将较低纬度的低位涡空气向阻塞区输送, 有利于阻塞高压的建立维持; 平均流则使位涡呈相反形势发展, 引导阻塞高压向东频散, 削弱了扰动位涡输送的作用, 对阻高的维持起到耗散作用。阻高建立前, 瞬变涡位涡输送作用强于平均流位涡平流, 造成阻塞区位涡降低, 有利于阻高生成; 阻高维持期间, 瞬变涡位涡输送与平均流位涡平流输送量相当; 6 月 25~30 日, 阻塞高压明显西退, 该阶段瞬变涡动明显强于平均耗散作用, 引导低位涡场向西移动。研究表明, 大气内部的波波作用对阻高的建立维持也十分重要。1 波与 5 波在一定范围内的共同作用可能是阻高建立维持的决定因素, 而天气尺度波动扰动则对阻塞高压的建立、维持和崩溃起到重要的作用。波波作用表明, 2003 年 6 月份阻塞高压建立、维持时, 尺度较长的波一般从平均动能得到扰动动能的转化, 尤其 5 波, 斜压能的转换不但是其能量的来源, 同时非线性作用也使得尺度更小或更长的波向其提供能量; 阻高衰退时, 5 波则通过非线性作用向其他波动输送能量, 同时也存在斜压耗散, 能量逐渐失去。

关键词 淮河大水 阻塞高压 形成机制

文章编号 1006-9895(2008)03-0469-12

中图分类号 P424

文献标识码 A

A Study of the Forming Characteristics of Blocking High in Northern Asia during the Flood Period of the Huaihe River Basin in 2003

LI Feng¹, DING Yi-Hui², and BAO Yuan-Yuan¹

¹ National Meteorological Center, Beijing 100081

² National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Summer blocking anticyclones are studied to probe into their activity mechanism by using NCEP daily re-analysis dataset and observation data during the flood period of the Huaihe River basin in 2003. The energy and dynamical diagnosis along with some statistic methods such as spectrum decompose, filter are widely used to investigate this subject. Especially, spectrum energy equation is introduced into this work. The results show that interaction of wave and flow is remarkable for the establishment and maintenance of the northern Asia blocking high during 2003 Meiyu period. Synoptic-scale waves are active over the upriver region, transient eddy kinetic energy is generated ceaselessly in European baroclinic zone, and it transforms into blocking mean flow energy in some preferred area in earlier June in more detail, transient eddy transport low potential vorticity (PV) air from low latitudes to blocking

收稿日期 2006-11-14, 2007-05-09 收修定稿

资助项目 国家气象中心自筹基金项目

作者简介 李峰, 男, 1974 年出生, 高级工程师, 理学博士, 主要从事中短期天气预报和灾害性天气机理研究。

E-mail: lifl04@cma.gov.cn

area continuously, which is propitious to blocking event. By contraries, mean flow weakens disturbed eddy PV function, which dissipates the blocking stream foundation and maintenance. In fact transient eddy is stronger than mean flow in the prophase that the blocking high forms according to study. The two are equivalent during the maintenance of the blocking high, and the transient eddy gets stronger than mean flow and it shifts westward, which leads low PV to evolve westward, thus the blocking body moves westward in the sixth pentad of June. Properly, wave-wave interaction is also important for the blocking high activity. It is considered as a key factor of the establishment and maintenance of the blocking high during 2003 Mei-yu period that wavenumber-1 and wavenumber-5 interacted in some area according to this research. Synchronously, synoptic-scale waves were also crucial. The interaction among the waves indicates that the longer waves got disturbance kinetic energy from mean kinetic energy transformation when blocking anticyclone began to establish and maintain in June 2003, especially, wavenumber-5 may attained energy not only by baroclinic energy transform, but also by nonlinear effect that some shorter or longer waves provided energy for it. The process is very complex and it is reverse while the blocking high trends to decay.

In conclusion, the blocking activities mechanism is complicated, which includes wave-wave interaction and wave-flow interaction, in 2003, wavenumber-5 and wavenumber-1 interacted evidently, the synoptic-scale wave worked as a trigger, but it is not aptotic, perhaps other wavenumbers are more important in other cases, further work will be continued.

Key words the Huaihe River basin flood, blocking high, activity mechanism

1 引言

长期以来,阻塞高压的形成维持机制一直是气象学界研究的热点和难点问题。经过近几十年的努力,目前对发生在西风带这一特殊现象的解释已经形成了多种理论^[1~4]。亚洲阻高的活动有其特殊的环境和条件,因此,气象学者对亚洲阻高的研究就更为关注。前人研究^[5,6]表明,下垫面大地形作用及非绝热加热作为缓慢变化的外强迫是亚洲阻高形成的最根本的原因,在过去的几十年里,许多实验都证明了在模式中强调地形的作用会得到近似实际的阻塞流型^[7,8]。但是仍然没有人能够回答在亚洲大陆下垫面条件不变的情况下,阻塞高压为什么会形势多样,并出现在多种不同的地区?为了给出科学的解释,气象学家将目光投向大气内部的作用机制。Green^[9]在研究 1976 年夏季英国干旱的成因工作中揭示了瞬变涡对阻塞形成的贡献后,越来越多的工作^[10,11]证实了波流相互作用在阻高形成过程中的作用。这种观点符合一定的观测事实,又便于从天气学角度来解释,因此越来越被更多人接受。20 世纪 90 年代起,国内大批学者开始关注大气内部波流、波波相互作用对阻高形成的作用机制。毕慕莹和丁一汇^[12]在研究 1980 年夏季中国华北干旱时期的东亚阻塞形势时指出,上游涡动对位涡的输送使阻塞区维持异常低的平均位涡,阻止了阻塞高

压向下游平流;不但初步揭示了瞬变涡动对阻塞维持的积极作用,也提出了影响中国天气气候异常的东亚阻塞形势维持机制的特殊性,即青藏高原的作用。此后,吴国雄等^[13]在研究同样的个例时指出,天气尺度系统维持着急流轴南侧的反气旋式平均位涡和北侧的气旋式平均位涡,并在急流分流区下游激发出高纬强烈的反气旋涡度增长和相应的正变高。同时,他们还发现,源自欧洲斜压带上的天气尺度扰动在东传过程中出现动能转化,并且这种转化满足双向法则。1995 年,刘辉等^[14,15]再次提出,瞬变扰动的位涡输送与平均流的相互作用存在着明显的地域性差异。在大西洋和东亚阻高个例中,平均流的位涡平流使低位涡向东移动,瞬变扰动的位涡输送则有抵消平均流的作用,有利于位涡低值区在原地稳定维持。另外,在研究大气内部动力过程对阻高形成的作用时,行星尺度波作用及共振理论^[16~18]也引起大批学者的关注和支持,高守亭等^[4]和陆日宇等^[19]的研究结果都确认了行星尺度的波动对平均纬向气流的扰动贡献确实有某种积极的效应,但对于不同波域的贡献大小也还存在不同的观点。尤其在亚洲地区,地形效应与不同波数的超长波的作用是有差异的^[20]。另外,还有一些学者^[21,22]将亚洲阻高现象通过遥相关与全球大气活动联系起来,提出了更为开放的观点,但这些理论都还存在有待商榷之处。由此可见,亚洲阻高的形

成维持机制十分复杂, 对此研究还存在许多未解之问题, 需要更多的个例来深入探讨。

2003 年, 梅汛期淮河流域爆发了继 1991 年后的全流域持续性暴雨和大洪水, 该年梅汛期雨期长, 降水显著偏多, 造成了极大的人员财产损失。研究表明, 造成淮河大水的主要原因除了低纬度系统和副热带高压的异常活动外, 亚洲北部阻塞高压的建立和长期维持是重要的因素^[23, 24]。因此, 以该典型年份为个例研究亚洲阻高的形成及活动机制, 不但有利于揭示 2003 年淮河大水的成因, 而且可以探讨亚洲地区阻高的形成维持机制的特殊性。

2 淮河大水期阻高活动概况

2003 年整个梅汛期期间, 亚欧中高纬地区阻塞高压活动显著, 大致可划分为三个阶段(图 1)。第一阶段为 6 月 1~16 日, 该阶段阻高初步建立, 形势不够稳定[该阶段平均形势场和降水分布见图 1a (文后彩图)]。6 月 6 日前, 阻塞高压尚未建立, 亚洲中高纬度环流较平直, 长波活动以移动性为主; 7~12 日, 在贝加尔湖西部 80°E 附近, 阻塞高压建立并维持; 13~16 日为调整期, 贝加尔湖西部的阻塞形势逐渐衰减。第二阶段从 6 月 17 日~7 月 7 日, 亚洲北部再次经历一次阻塞建立发展衰减过程, 该阶段阻塞形势发展成熟, 活动显著[该阶段平均形势场和降水分布见图 1b (文后彩图)]。17~21 日, 贝加尔湖西部 (70°N, 85°E) 阻塞高压重新建立, 阻高和阻高东部的低槽逐渐发展为曳式, 亚洲北部环流经向度明显增大。23~26 日为逐渐成熟期, 阻高南落至 (62°N, 85°E) 附近, 中心正距平强度达到 72.5 gpm (图略), 阻高前部仍维持为曳式横槽。6 月 27 日~7 月 1 日, 形势有大的调整, 贝加尔湖西部的阻塞高压逐渐向西移动至 (59°N, 65°E) 附近, 鄂霍次克海地区有高压脊发展, 并有阻塞形势建立。7 月 2~7 日为衰减期, 中高纬地区形势变成两脊一槽, 原位于贝加尔湖西部的阻塞高压减弱成高压脊, 鄂霍次克海地区的高压发展较强盛。该阶段江淮地区经历入梅, 主雨带由华南、江南北抬至江淮一带, 持续性暴雨不断, 是造成淮河大水的主雨期。第三阶段, 7 月 7 日至月末, 欧亚中高纬地区环流形势复杂, 欧洲、乌拉尔山西部、贝加尔湖东部及鄂霍次克海地区都先后有阻高发

展, 形成三阻形势(该阶段平均形势场和降水分布图略)。

逐日形势分析表明, 2003 年梅汛期亚洲北部阻高活动的前两次过程(6 月 1~15 日和 6 月 17 日~7 月 7 日)具有明显差别。第一次阻高建立过程是发生在大气环流凸现明显变化, 由高指数向低指数转变阶段。该次阻高活动不够稳定成熟, 其维持阶段实际上仍处于环流调整期, 也是下一次阻高建立的酝酿期。第二次阻高活动过程不同, 从环流形势演变本质来看, 它是第一次阻高形势调整的再次爆发, 是低指数环流的延续。本文主要针对该两个阶段不同阻高活动过程分析 2003 年梅汛期阻高建立维持的机制。

3 阻高形成维持机制分析

3.1 波流相互作用

3.1.1 波流作用中的能量转换

根据吴国雄等^[13]的研究, 天气尺度系统自欧洲向东传的过程中, 水平尺度显著减小, 天气尺度系统与阻塞尺度系统之间的能量转化关系满足:

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{K}}{dt} &= -C(\bar{K} \rightarrow K_e) + O(t), \\ \frac{dK_e}{dt} &= -C(\bar{K} \rightarrow K_e) + O'(t), \\ C(\bar{K} \rightarrow K_e) &= \frac{\overline{u'v'}}{a} \left[\cos\varphi \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{\bar{u}}{\cos\varphi} + \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\lambda} \right) \right] - \\ &\quad \frac{1}{a} (\overline{v'^2} - \overline{u'^2}) \left(\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\lambda} - \text{tg}\varphi \cdot \bar{v} \right),\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\bar{K}$ 和 K_e 分别表示平均动能和扰动动能, $-C(\bar{K} \rightarrow K_e)$ 表示平均动能向扰动动能的转化项, $O(t)$ 和 $O'(t)$ 表示其他项; u' 、 v' 和 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别表示扰动风和平均风, φ 和 λ 为纬度和经度。

由 (1) 式计算了 2003 年 6 月上中旬贝加尔湖至巴尔喀什湖地区阻塞的建立过程中 $C(\bar{K} \rightarrow K_e)$ 的空间分布(结果如图 2)。在阻塞形势建立前, 20°E~40°E 间欧洲中纬度地区有明显瞬变动能生成, 对应逐日天气图显示, 该地区天气系统非常活跃, 气旋反气旋系统不断生成东移。在高压脊附近存在天气系统的瞬变动能向阻塞系统的平均动能转化, 然而, 此时在高压系统西部分流区及向东北分支区这种转化还不明显。阻塞高压建立后, 即成熟维持阶段, 欧洲斜压区天气系统更加活跃, 瞬变动能转化比阻塞建立前更加明显, 阻塞西部的分流区

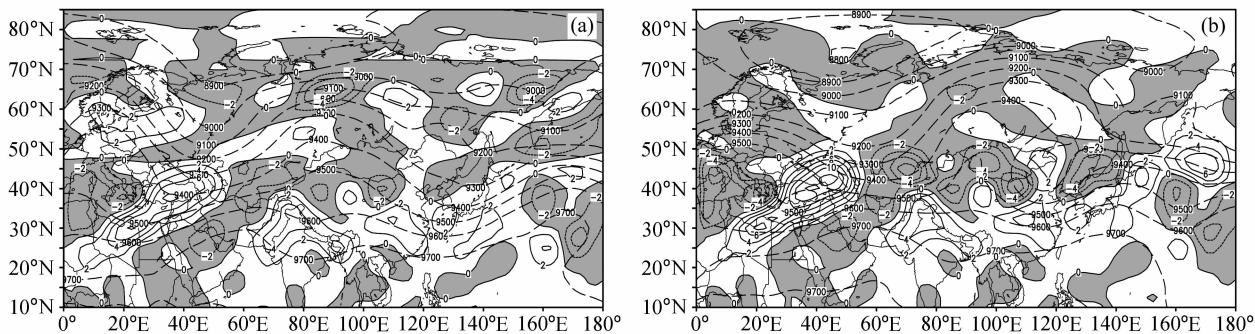


图2 2003年6月亚欧中高纬地区第一次阻高活动期间300 hPa上天气系统瞬变动能与阻塞系统的平均动能转化 $C(K - K_e)$ 的分布 (单位: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$): (a) 形成期 (1~7 日); (b) 维持期 (8~14 日)。阴影为 $C(K - K_e)$ 负值区, 长虚线为位势高度

Fig. 2 Distribution of energy transform $C(K - K_e)$ from the synoptic-scale eddy kinetic energy to the blocking mean kinetic during the first blocking high activity period in the Eurasian mid-high latitudes at 300 hPa in Jun 2003 (units: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$): (a) For generate phase (1 - 7 Jun); (b) for maintain phase (8 - 14 Jun). Shading: $C(K - K_e) < 0$; long dashed line: geopotential height (gpm)

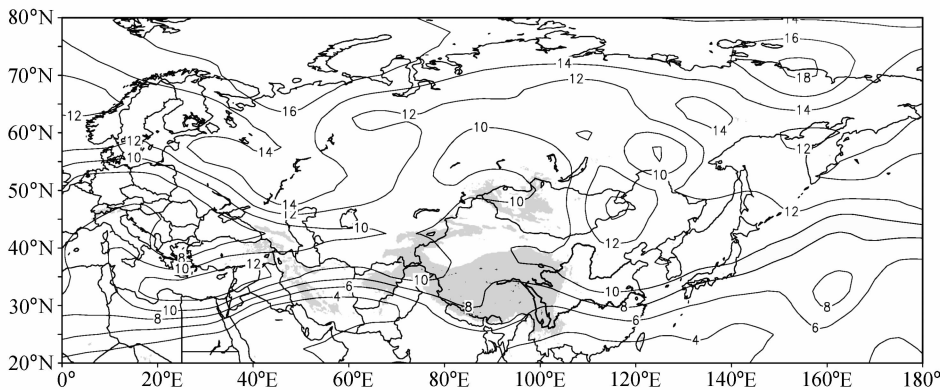


图3 2003年6月1~16日300 hPa平均准地转位涡分布 (单位: 10^{-5} s^{-1})。阴影为超过2000 m的地形高度

Fig. 3 Distribution of mean quasi-geostrophic potential vorticity (PV, units: 10^{-5} s^{-1}) at 300 hPa during 1 - 16 Jun 2003. Regions with terrain height $> 2000 \text{ m}$ are shaded

及高压主体都出现瞬变动能向阻塞系统平均动能的转化。分析6月17~7月7日第二次阻高活动过程, 其建立维持阶段能量转化形势也极其相似 (图略)。由此看来, 在阻塞形势建立维持期间, 欧洲斜压区确实不断有平均动能向瞬变动能的转化, 从而激发天气系统不断生成, 而在天气系统东移的过程中, 瞬变动能又向阻塞系统的平均动能转化, 这样有利于阻高的建立维持。该结论与吴国雄等的观点^[13]基本一致。

3.1.2 位涡输送与阻高形成

前人研究^[10~12]表明, 位涡守恒常用于大尺度系统的研究, 并取得令人满意的结果。位涡优于涡度在于它为涡度提供了一种约束关系, 并且可以用于斜压大气研究。由文献^[12]可知, 平均位涡方程为

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \bar{q} = -\nabla \cdot \overline{\mathbf{v} q'} + \bar{s}, \quad (2)$$

即等压面上时间平均准地转位涡 ($\bar{q}$) 的维持来自时间平均流位涡平流 ($\mathbf{v} \cdot \nabla \bar{q}$)、瞬变扰动位涡输送 ($-\nabla \cdot \overline{\mathbf{v} q'}$) 以及涡源 ($\bar{s}$) 三项, 假设大气为绝热无摩擦, 则位涡是守恒的。下文将针对6月1~16日、6月17日~7月7日两个时段不同阻塞发展过程, 利用位涡方程来诊断2003年梅汛期亚洲北部阻塞形势的发展情况。

首先, 图3给出了6月1~16日300 hPa平均位涡分布, 由图可见, 贝加尔湖西部维持一个位涡低值中心, 对应着图1a中阻高系统, 它向南与高原北侧的低值区联通, 向西和欧洲中纬地区的低位涡区相联系; 新地岛附近为准地转高位涡区, 且向偏南伸展至巴尔喀什湖地区。上述位涡分布表明, 在

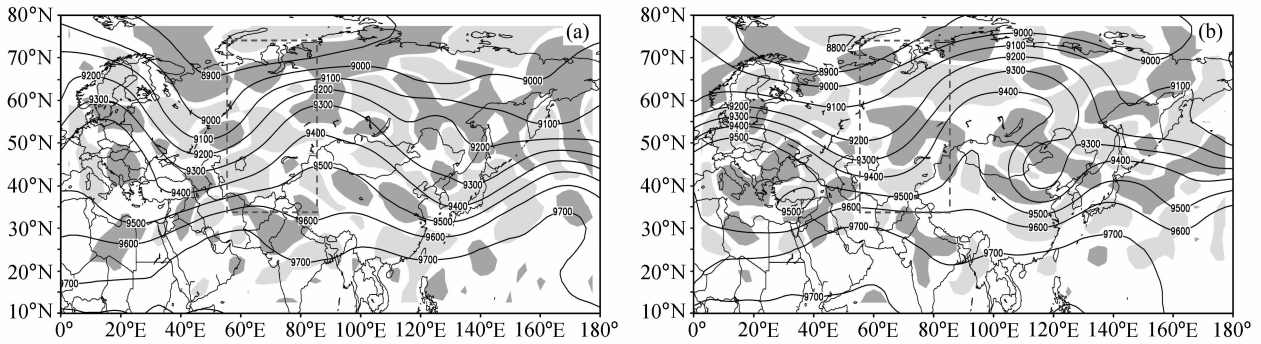


图4 2003年6月份亚欧中高纬地区第一次阻塞高压活动形成期(a, 6月1~7日)和维持期(b, 6月8~14日)300 hPa瞬变位涡散度 D 分布(阴影, 单位: 10^{-10} s^{-2})。等值线: 位势高度场; 深阴影区为 $D \geq 2$ 区域, 浅阴影区为 $D \leq -2$ 区域

Fig. 4 Distribution of eddy PV divergence D (shading, units: 10^{-10} s^{-2}) during (a) blocking generate phase (1-7 Jun) and (b) maintain phase (8-14 Jun) of the first blocking high activity in the Eurasian mid-high latitudes. Contour: geopotential height (gpm), dark shading: $D \geq 2$, light shading: $D \leq -2$

此期间有大量的高位涡空气从高纬地区向东南方向输送, 使得巴尔喀什湖及阻高南侧维持低值或低涡系统; 同时来自高原北侧和欧洲较低纬度地区的低位涡空气的向北输送则是贝加尔湖西部阻高得以维持的原因。那么, 这种形势是如何形成和维持的? 下文将回答这一问题。

在分析瞬变位涡输送与阻高的关系前, 首先根据位涡表达式 $q = \nabla^2 \phi + f - \gamma^2 \phi$ 和位涡方程($\frac{dq}{dt} = -D + \text{其他项}$), 可以导出位势高度场 ϕ 与瞬变位涡散度 D 的关系^[14]如下:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (\nabla^2 - \gamma^2)^{-1} (-D) + \text{其他项}, \quad (3)$$

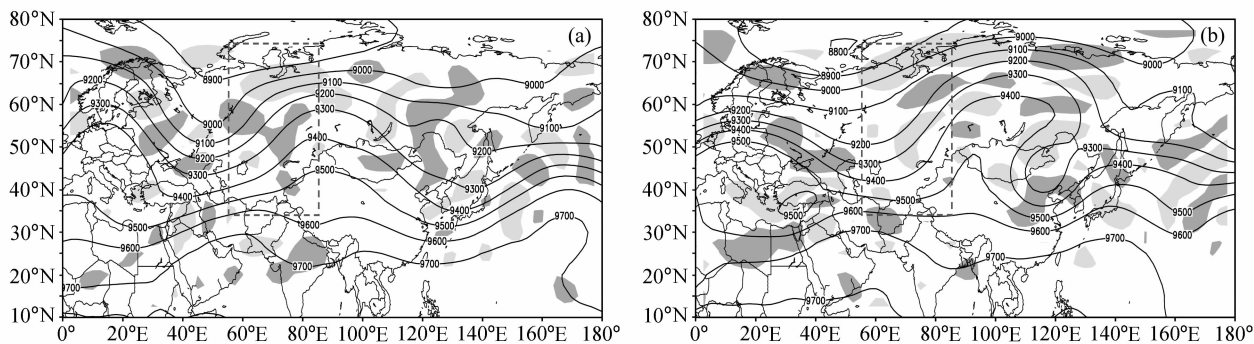
其中, $\gamma^2 = f^2 (gH)^{-1}$, 为变形半径 R^2 的倒数。由(3)式可见, 在 $D > 0$ 的地方将会产生正变高, $D < 0$ 将产生负变高。

图4给出了第一次阻高活动阶段(6月1~16日)瞬变位涡的散度项 $D = \nabla \cdot \overline{\mathbf{v}q'}$ 的分布形势, 如图所示, 阻塞高压建立前(图4a), 在欧洲斜压带(40°E~60°E)偏北的位置(50°N附近) $D > 0$, 其南北侧为 $D < 0$, 这样相应位置的空气质块分别获得负、正位涡, 同时, 由(3)式可知, $D > 0$ 的区域将会产生正变高, $D < 0$ 的区域将产生负变高, 由地转关系, 正、负变高又将产生地转偏差风, 因此, 高纬地区(60°N附近)西风急流增强, 而中纬度地区(40°N附近)西风减弱, 在中、高纬度地区之间进一步产生了正的经向风切变偏差, 最终有利于气块进一步产生反气旋涡度, 负涡度发展为阻塞高压的建立创造条件。另外, 从图上看, 在高压脊区也

有明显的 $D > 0$ 存在, 这也将使得高压脊进一步发展。而在阻塞高压维持期瞬变涡动的作用则更为显著, 如图4b所示, 6月8~14日, 欧洲区(20°E~40°E)从北向南 D 呈“+—+”分布, 有利于下游的长波槽发展, 而在阻高西侧从北向南 D 呈“—+—”分布, 与阻高形成阶段的形势一样, 但更强更清楚, 同时还呈西南-东北走向, 这样产生的经向风切变则更为明显, 且有利于产生偏北气流, 对阻高的维持更为有利, 且高压主体及脊线上的 $D > 0$ 也有利于气块取得反气旋涡度。

为了研究平均流和瞬变涡的关系, 根据(2)式计算了同样时段内平均流位涡输送项 $P = \mathbf{v} \cdot \nabla q$ 的分布情况(如图5所示)。由图5可见, 在阻塞形势形成和维持过程中平均流对位涡的输送项 P 的形势与扰动涡动散度 D 基本呈相反分布。阻高建立期(图5a), 在90°E附近的高压脊区 P 为负, 脊前 P 为正, 而在欧洲斜压区 P 与 D 也基本呈相反分布; 这种情况在阻塞维持期更为清楚(图5b), 在高压西部的西南气流中, P 自北向南呈“—+—+”分布, 相对应气块得到或失去位涡, 这样40°N~60°N间就产生经向风的反切变偏差, 削弱了扰动位涡输送的作用, 气块流经阻高西部及脊线时, 反气旋涡度增长减弱。

由上述分析可见, 在阻塞高压的建立和维持过程中瞬变位涡输送是有利的, 平均流位涡输送则起相反作用, 造成高压区位涡和涡度增加, 削弱了阻塞形势。这两者效应在第二次阻高活动阶段更加明显。6月21~25日, 亚欧北部阻塞高压再次发展并

图5 同图4, 但为平均流位涡平流 P 分布Fig. 5 Same as Fig. 4, but for mean flow PV advection (P)

成熟, 最为明显的是在高压主体处为显著的正 D 区, 中心最大值位于高压南部, 并且自高压中心向西形成“+—+”分布, 同时高压南侧为负 D 区, 这样不但有利于形成北高南低的偶极结构, 而且高压中心有向南向西移动的趋势。与之相反, 平均流位涡输送 P 自高压中心向西形成“—+—”分布, 且强度与瞬变位涡散度 D 相当, 其耗散作用则促使阻高在高纬地区得以维持 (图略)。

6月26~30日, 原位于贝加尔湖与乌拉尔山地区之间的阻高迅速向西移动至乌拉尔山地区。在这一阶段存在明显的正的天气波扰动位涡散度 D 从新地岛西部向阻塞高压区输送, 同时在中纬度有负 D 生成; 平均流位涡输送 P 仍然起到削弱 D 的作用, 但强度明显不如扰动位涡, 因此阻高西部的气块不断获得反气旋位涡, 促使高压中心向西移动。7月初, 在高压脊区扰动位涡 D 及平均流位涡输送 P 皆转变为负值 (图略), 因此气块基本上获得气旋性涡度, 该地区产生负变高, 阻高衰减。

由上述研究表明, 2003年6~7月亚洲中高纬地区阻塞高压的异常活动中, 波流作用十分显著。2003年6月份, 阻高建立前期和维持过程中, 上游地区天气尺度波动活跃, 欧洲斜压区不断有瞬变动能生成, 并在阻塞区向阻高平均流转化。从瞬变涡动的作用来看, 上传传播而来的瞬变波不断将较低纬度的低位涡空气向阻塞区输送, 有利于阻塞高压的建立维持; 平均流则使得位涡变化呈相反形势发展, 引导阻塞高压向东频散, 削弱了扰动位涡输送的作用, 对阻高的维持起到耗散作用。阻高建立前, 瞬变涡位涡输送作用强于平均流位涡平流, 有利于阻高生成; 阻高维持期间, 瞬变涡与平均流两者势力相当; 6月6日, 阻塞高压明显西退, 该阶

段瞬变涡动明显强于平均耗散作用, 低位涡场向西移动。

3.2 阻塞活动中波波相互作用

3.2.1 阻塞活动中的波特征

观测事实表明, 2003年淮河洪水期间, 中高纬度西风带一般盛行5或6波, 其中5波分量最为显著。图6是2003年6~7月亚欧中高纬度阻高中心与60°N地区5波振幅位置的纬向变化, 图中实线为阻塞高压中心经度, 虚线为5波最大振幅所在经度 (为分析阻高系统的连续变化和影响, 图上阻高中心的位置包括阻高减弱后高压坝所在的经度)。由图6可见, 阻高首先以单一中阻的形式存在, 6月底, 逐渐演变成东西双阻型, 其活动的地区附近一般对应着5波最大振幅, 同时阻塞高压的东西进退及形成、消亡与5波活动在趋势上存在着一致性, 这说明两者之间存在着某种必然的联系。最近, Ding等^[25]研究指出, 北半球大气夏季盛行一种循环环绕遥相关型, 其主要为5波结构, 且空间位相相对锁定于一些固定经度, 并能造成某些区域的降水温度异常, 其中包括东亚地区。从本文分析的2003年淮河大水期中高纬度5波活动特征来看与Ding等的研究^[25]有一定印证性。

从5波能量的变化中可以看到, 在6月6日、17日、23日阻塞高压建立和加强期5波动能明显增长, 纬向动能的峰值一般处于阻塞高压的南侧, 在阻塞高压建立日尤其明显; 经向动能基本与阻塞高压中心的位置一致。从量值来看, 纬向动能是主要的, 但从时间演变看, 经向动能似乎更为重要, 一旦经向动能突增, 则对应着阻塞高压的建立或加强 (图7)。

2003年淮河大水期, 在亚洲中高纬地区大气

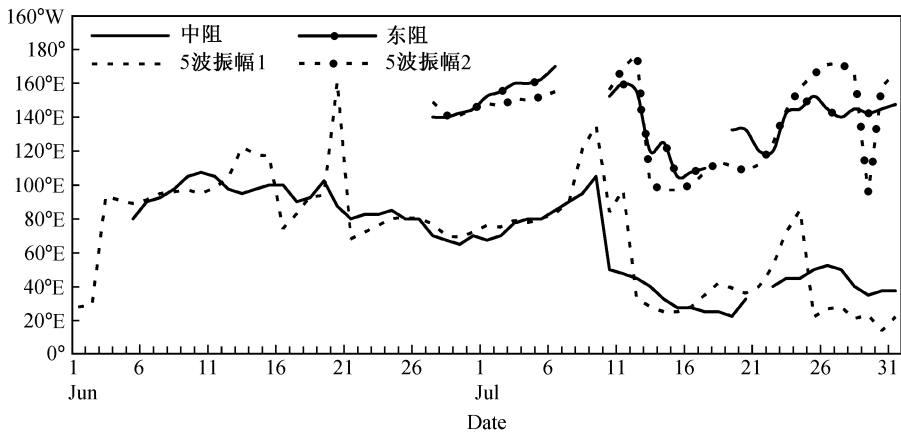


图 6 2003 年 6~7 月欧亚中高纬度阻塞高压中心 (实线) 与 5 波最大振幅位置 (虚线) 的纬向变化
Fig. 6 Zonal variation of the blocking high center in the Eurasian mid-high latitudes (solid line) and the strongest swing location for wave number 5 (dashed line) during Jun–Jul 2003

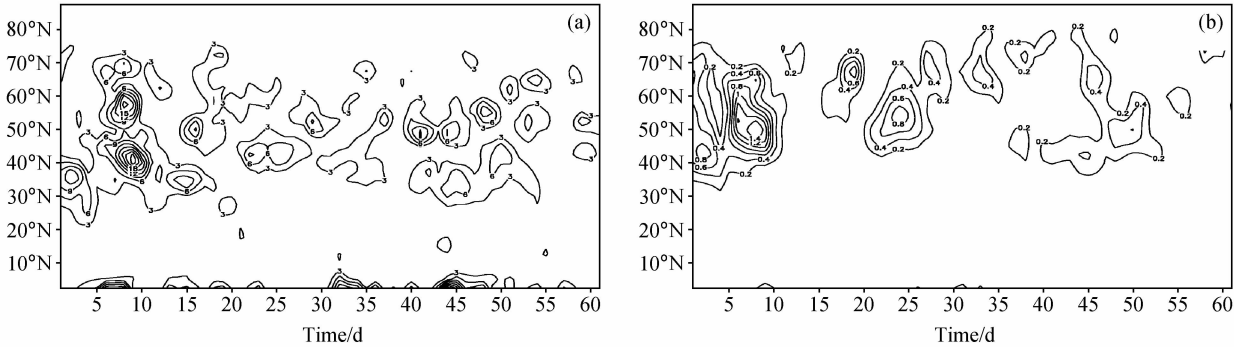


图 7 2003 年 6~7 月北半球 60°N 附近 500 hPa 上大气内部 5 波纬向 (a)、经向 (b) 动能谱时间-纬度分布。横坐标为时间, 从 6 月 1 日~7 日 31 日共 61 天
Fig. 7 Time–latitude cross sections of longitudinal (a) and latitudinal (b) kinetic energy for wave number 5 at 500 hPa about 60°N. Time for x-axis is from 1 Jun to 31 Jul (61 days)

内部不仅盛行 5 波, 超长波 1 波的活动也很显著。从 60°N 地区 1 波最大振幅及阻高中心强度值的时间演变曲线 (图略) 来看, 1 波振幅存在明显的周期震荡, 1 波增幅阶段一般对应着阻高中心强度增加, 减幅阶段则阻高中心强度减弱。另外, 超长波 1 波振幅存在着明显的高度变化, 在对流层高层约 300 hPa 处达到最大, 这一高度也正是阻塞高压振幅达到最强的层次。进一步研究还发现, 超长波 1 波不仅在振幅变化上与阻塞高压强度表现出很好的对应关系, 它们的位置关系也很密切。2003 年 6~7 月, 1 波出现了 4 次明显的东西向传播。6 月 3~6 日, 1 波最大振幅从子午线附近迅速向东传播至 100°E 附近, 与此同时, 阻塞形势在贝加尔湖西部建立。6 月 26 日~7 月 1 日, 1 波最大振幅从 80°E

向西移动至 40°E 以西, 在此期间, 贝加尔湖西部的阻塞高压也西退到乌拉尔山以西。6 月 11~15 日, 1 波再次西传, 此时, 在欧洲上空建立了阻塞形势, 同时东北亚鄂霍次克海地区的阻高也向西退至 120°E 附近。20 日以后, 1 波最大振幅越过子午线, 再次传播至东亚地区, 这一阶段, 亚洲北部仍有阻高维持。从整个过程来看, 6 月 11 日~7 月 20 日, 超长波 1 波最大振幅一直在东半球活动, 在其演变过程中, 其最大振幅所在位置的±20 经度内, 经常有阻塞形势的建立和维持, 同时随之西退东移, 尤其 6 月 21~25 日超长波迅速西传, 该时段位于贝加尔湖西部的阻高也相应西退到乌拉尔山一带。

因此, 由上述研究推断超长波 1 波在阻塞高压

的活动中一定也起到非常重要作用,两者关系密切,这一点推论也符合 Harald 等^[18]的统计结果。

3.2.2 波波相互作用

前人的研究表明,超长波的强度往往达不到阻塞形势建立的标准,它一般与尺度更短的波发生共振关系从而诱导大气中阻塞流的建立。前面的观测资料分析表明,在 2003 年梅汛期期间,超长波 1 波最大振幅移动的过程中,其附近通常也存在着 5 波的最大振幅,两者之间变化趋势非常一致,尤其在阻塞高压活跃阶段,它们基本处于同一经度,因而易于达到共振。从振幅强度上看,在 6 月 7 日、20 日前后,1 波和 5 波都处于强振幅阶段,此时间也是阻塞形势建立阶段。为了进一步验证两者在阻高活动中作用,本文利用波谱分析重建了 1 波和 5 波的变化图像[图 8 (见文后彩图)]。从图 8 上看,1 波在 6 月 5 日前,振幅很弱,且快速移动,7 日振幅突然增大,最大振幅移至 120°E 附近,然后继续西进,在 80°E 附近维持,14 日前后振幅明显减弱;17 日再次加强,然后减弱并东西摆动,23 日增强,25 日向西移动。与此同时,从 6 月 1~7 日,5 波振幅呈逐渐增长趋势,7 日达到最大,且最大振幅稳定于 80°E 附近,7 日后减弱,15 日呈反位相分布,17 日再次增强,23 日达到最大,29 日西移至 60°E 附近,这与前面观测分析的结果一致,同时也与阻塞高压的活动相对应。利用 1 波和 5 波两分量合成重建的波谱图像能够更好地反映阻塞形势建立、发展、衰减的整个过程(图略)。这再次证明在阻塞形势的建立、维持影响因子中,长波、超长波的作用是非常重要的,两者往往共同影响阻塞高压的活动。

从另外一个角度,利用带通滤波器将 2003 年 6~7 月 500 hPa 高度场滤出了 30~40 天的低频部分和 3~10 天天气尺度系统。从低频部分来看,30~40 天的低频振荡很好地揭示了中高纬度大型流场的演变,这种变化完全与阻塞高压的变化一致。与此同时,3~10 天振荡的天气波不断自西向东传播,这种波主要来自欧洲斜压区,当反气旋扰动汇入低频反气旋区(7 日),正是阻塞建立加强的阶段,反之,气旋扰动汇入低频反气旋区(13 日),则造成低频反气旋强度减弱,阻塞崩溃(图略)。进一步分析 30~40 天低频振荡大气中主要成分就是超长波和长波,尤其 5 波的贡献最为突出,而 3~10 天的天气扰动中主要是由 7~8 波构成,尤

其在阻高活跃的时段内,7~8 波活动最为明显。由此可见,在 2003 年淮河大水期,亚洲中高纬地区大气低频振荡与天气扰动的作用其实也就是超长波、长波与天气尺度波动的相互作用,也反映的是基本气流与天气系统的相互作用,最终决定了阻高系统的发展变化,这也与前面利用位涡分析的观点一致。

为了进一步揭示阻高活动中的波波作用机制,本文引入文献[26]中的方法,从波能量学角度对本次阻塞活动过程中 5 波的作用机制进行深入分析。根据文献[26],波数域内动能方程的谱函数形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}K(n) = -M(n) + L(n) + C(n) - D(n) + B_K(n),$$

其中,方程左边 $\partial K(n)/\partial t$ 表示 n 波的动能变化项,右边第 1 项 $M(n)$ 表示波流相互作用项,即 n 波向纬圈平均气流输送动能的速率;第 2 项 $L(n)$ 表示波波非线性相互作用项,即其他波数的波向 n 波输送动能的速率;第 3 项 $C(n)$ 表示斜压作用项,即 n 波有效位能向 n 波涡动动能转换率;第 4 项 $D(n)$ 表示 n 波动能的粘性耗损率;第 5 项 $B_K(n)$ 表示 n 波的位能净边界通量,其中,该项主要包含由波波非线性相互作用而引起的净边界通量 $B_{L1}(n)$ 。具体计算公式见文献[26]。

图 9 给出了 2003 年 6~7 月北半球 55°N~65°N 范围内动能方程各项的时间演变的情况,从图上看,在 6 月 7 日阻塞高压初次建立前 1~3 天, $M(5)$ 项迅速减小,表示纬向平均运动对 5 波有明显的正贡献,纬向平均动能大量的向 5 波涡动转换;同时,斜压项 $C(5)$ 也是 5 波的能量来源;1~5 日,其他波数波的非线性相互作用对 5 波提供了正输送,而这种能量主要来自比 5 波短的 6~8 波;由于非线性作用而引起的边界输送在阻塞建立时达到最大,约 $280 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^3$,在此项贡献中超长波 1、3 波的作用明显。此次阻高建立后并不稳定成熟,形势场进行着调整,仍然处于酝酿阶段。纬向平均运动在向 5 波提供了 3 天的能量后,其作用迅速减弱, $M(5)$ 接近于零,波流作用不明显了。斜压项作用继续向 5 波提供能量,15 日后也作用减弱;该阶段 5 波通过非线性波与波相互作用向其他波输送,同时边界输送作用不重要了。由图 9 可看到,15 日

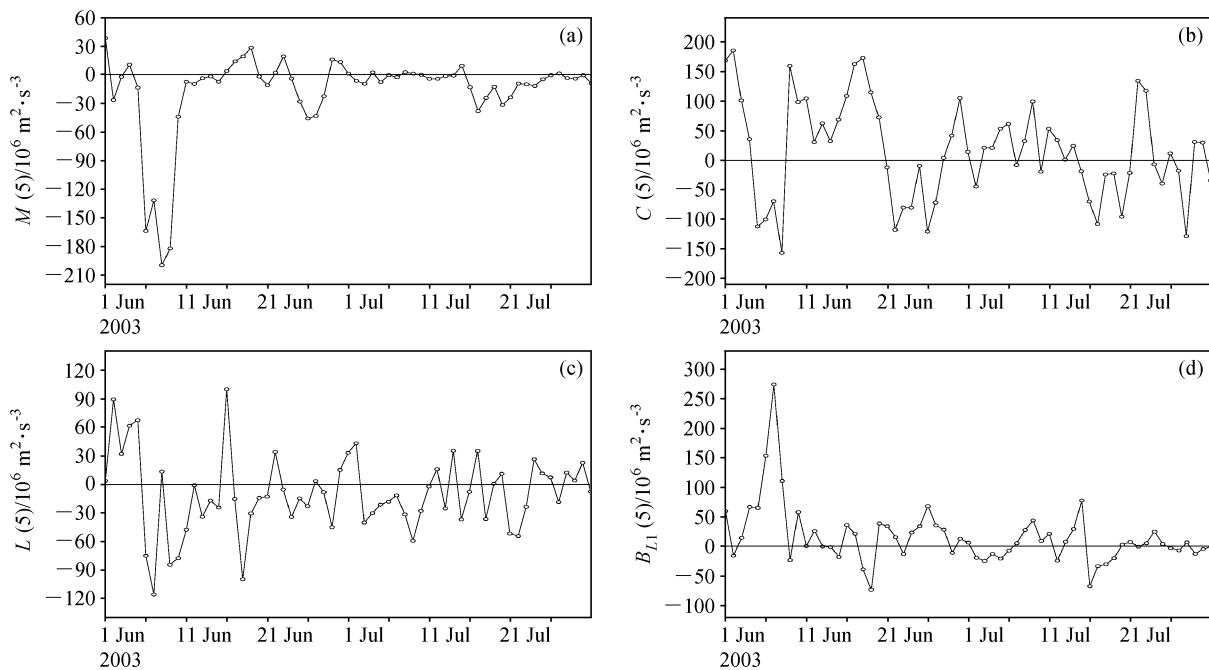


图9 2003年6~7月北半球60°N地区500 hPa高度上大气5波波数域谱形式动能方程中各项演变(单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}^3$): (a) $M(5)$ 项; (b) $C(5)$ 项; (c) $L(5)$ 项; (d) $B_{L1}(5)$ 项

Fig. 9 Time evolutions of different terms of wave number 5 spectrum kinetic energy equation at 500 hPa about 60°N during Jun–Jul 2003 (units: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}^3$): (a) $M(5)$; (b) $C(5)$; (c) $L(5)$; (d) $B_{L1}(5)$

前后, 各项值作用都很小, 表明无论是平均纬向运动、斜压作用及波波非线性等各种作用对5波的支持都已经很弱, 于是阻塞高压衰退。

6月17日~7月3日在亚洲北部再次出现了阻塞形势, 前面已述该次过程与前次不同, 那么大气内部波波相互作用是否有变化? 从图9上看, 在6月16~21日阻塞高压的形成阶段, 纬向平均运动及斜压作用表现与6月上旬阻塞第一次建立的形势基本一致, 5波涡动从纬向平均运动中汲取能量, 同时有效位能向涡动动能转换。在这里, 斜压作用的贡献强度与前次过程幅度相当, 但纬向平均运动的作用要明显弱。波与波非线性相互作用仍然表现为从峰值向负值的衰变, 这种贡献主要来自于超长波的作用而不是更短的波, 这种现象在 B_{L1} 项中也表现的十分明显。这说明虽然第二次阻塞高压要强于第一次, 但其建立过程处于第一次过程酝酿之后, 大气环流调整到位的条件下, 其中的各种作用机制与第一次有所不同, 具体表现在波流相互作用较弱, 波与波非线性相互作用中波长更长的波贡献是主要的, 短波的作用相对较弱。而在稳定维持阶段(6月21~26日): $M(5)$ 主要为负值增长, 表示

由纬向平均运动向5波输送能量; $C(5)$ 为负值, 则斜压过程起到耗散作用; 波与波非线性项 $L(5)$ 为负值, 则5波能量通过非线性作用向其他波长的波转换; 通过边界非线性作用产生的 $B_{L1}(5)$ 处于正变化阶段, 说明5波波动还是可以通过边界获得支持。从量级来看, 斜压耗散项与其他各项的和基本维持平衡, 这样有利于阻塞形势的稳定维持。移动性阶段(6月27~30日), 纬向平均运动作用是由向5波输出转向输入; 斜压正转换过程, 即位能向动能转换; 非线性边界输入作用减弱, 但其他波趋向于向5波输送能量。衰退阶段(7月1~3日): 总体而言, 阻塞高压衰退阶段, $M(5)$ 、 $C(5)$ 、 $L(5)$ 和 $B_{L1}(5)$ 项作用都很弱, 具体来看, $C(5)$ 、 $L(5)$ 出现负变化, 表明5波通过非线性作用主要向其他波动输送能量, 同时也存在斜压耗散, 另外, 在边界输送方面也是负的贡献。这样总的结果, 5波的能量逐渐失去, 不利于阻高维持。

4 结论

(1) 2003年淮河梅汛期亚洲中高纬地区阻塞高压的异常活动中, 波流作用十分显著。从瞬变涡

动的作用来看,上游传播而来的瞬变波不断将较低纬度的低位涡空气向阻塞区输送,有利于阻塞高压的建立维持,或向西发展;平均流向东输送位涡平流则使得位涡呈相反形势发展,造成阻塞区位涡不断增长,引导阻塞高压向东频散,削弱了扰动位涡输送的作用,对阻高的维持起到耗散作用。

(2) 2003 年淮河梅汛期亚洲中高纬地区阻塞高压活动有明显的阶段性,经历了建立衰退、重建以及西移过程,这都是大气内部波流和波波相互作用共同造成的结果。6 月上旬阻高建立前,瞬变波位涡输送强于平均流位涡平流,有利于阻高生成;阻高维持期间,瞬变波位涡输送作用与平均流位涡平流作用势力相当,则阻塞区位涡相对稳定;6 月 25~30 日,阻塞高压明显西退,该阶段瞬变波动位涡输送明显强于平均耗散作用,引导低位涡场向西移动。

(3) 研究表明,在梅汛期阻高建立维持过程中,大气内部的波波作用也十分重要。2003 年 6 月份,亚洲北部阻塞高压活动期间,大气内部超长 1 波和长波 5 波活跃。1 波与 5 波在一定范围内的共同作用是该期间阻高建立维持的决定因素,而天气尺度波动扰动则对阻塞高压的建立、维持和崩溃起到重要的促发作用。而这种大气内部波波之间相互作用的机制复杂,尺度较长的波一般从平均动能得到扰动动能的转化,尤其 5 波,斜压能的转换不但是其能量的来源,同时非线性作用也使得尺度更小或更长的波向其提供能量,有利于阻高的建立和维持;阻高衰退时 5 波则通过非线性作用向其他波动输送能量,同时也存在斜压耗散,能量逐渐失去。

参考文献 (References)

- [1] 叶笃正,陶诗言,朱抱真,等.北半球冬季阻塞形势的研究.北京:科学出版社,1962. 1~2
Ye Duzheng, Tao Shiyang, Zhu Baozhen, et al. *A Study of Winter Blocking High in Northern Hemisphere* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1962. 1~2
- [2] 丁一汇.高等天气学.北京:气象出版社,1991. 792pp
Ding Yihui. *Advanced Synoptic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 792pp
- [3] 李大山,丁一汇.阻塞高压的研究.北京:气象出版社,1991. 232pp
Li Dashan, Ding Yihui. *A Study of Blocking High* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 232pp
- [4] 徐祥德,冉令坤.波流相互作用与波动传播模态.大气科学,

- 2007, **31** (6): 1237~1250
Xu Xiangde, Ran Lingkun. Wave - flow interaction and wave-propagation modes. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, **31** (6): 1237~1250
- [5] 朱正心,朱抱真.纬向不对称热力强迫下超长波的非线性平衡态与阻塞形势.中国科学(B),1982, **12**: 361~371
Zhu Zhengxin, Zhu Baozhen. Equilibrium states of ultra-long waves driven by non-adiabatic heating and blocking situation *Sciences in China* (B) (in Chinese), 1982, **12**: 361~371
- [6] 吕克利.大尺度加热与东西风带中不稳定扰动的激发.气象学报,1982, **42** (2): 149~157
Lü Keli. Large-scale heating and excitation of unstable disturbances in the westerly and easterly current. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, **42** (2): 149~157
- [7] Grose W L, Hoskins B J. On the influence of orography on large-scale atmospheric flow. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 223~234
- [8] Ji L R, Tibaldi S. Numerical simulations of a case of blocking: The effects of orography and land-sea contrast. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 2068~2086
- [9] Green J S A. The weather during July 1976: Some dynamical consideration of the drought. *Weather*, 1977, **32**: 120~126
- [10] Illari L. A diagnostic study of the potential vorticity in a warm blocking anticyclone. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41** (24): 3518~3526
- [11] Trenberth K E. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43** (19): 2070~2087
- [12] 毕慕莹,丁一汇.1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析.应用气象学报,1992, **3**: 145~156
Bi Muying, Di Yihui. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980. *Quarterly Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1992, **3**: 145~156
- [13] 吴国雄,刘辉,陈飞,等.时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏中国的持续异常天气.气象学报,1994, **52** (3): 308~320
Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. Transient eddy transfer and formation of blocking high—On the persistently abnormal weather in the summer of 1980. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (3): 308~320
- [14] 刘辉,吴国雄,曾庆存.北半球阻塞高压的维持 I: 准地转和 Ertel 位涡分析.气象学报,1995, **53** (2): 177~185
Liu Hui, Wu Guoxiong, Zeng Qingcun. On maintenance of blocking anticyclones of Northern Hemisphere. Part 1: Quasi-geostrophic and Ertel potential vorticity analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (2): 177~185
- [15] 刘辉,曾庆存,吴国雄.北半球阻塞高压的维持 II: 瞬变扰动强迫和平均流位涡平流的形成.气象学报,1995, **53** (3):

- 337~348
- Liu Hui, Zeng Qingcun, Wu Guoxiong. On maintenance of blocking anticyclones of Northern Hemisphere. Part 2: Mechanism of eddy forcing and PV advection by mean flow. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (3): 337~348
- [16] Tung K K, Lindzen R. A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107** (6): 714~734
- [17] Charney J G, Straus D M. Form-drag instability, multiple equilibria and propagating planetary waves in baroclinic, orographically forced, planetary wave systems. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 1157~1176
- [18] Lejenäs H, Madden R A. Traveling planetary-scale waves and blocking. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 2821~2830
- [19] 陆日宇, 黄荣辉. 夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响. *大气科学*, 1999, **23** (5): 533~542
- Lu Riyu, Huang Ronghui. Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the blocking highs over the northeastern Asia in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 533~542
- [20] 陆维松. 正压大气中地形波与自由 Rossby 波的四波准共振. *气象科学*, 1994, **14** (2): 127~135
- Lu Weisong. Four-wave quasi-resonance among mountain wave and free Rossby waves in barotropic atmosphere. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **14** (2): 127~135
- [21] Wang Y, Yasunari T. A diagnostic analysis of the wave train propagating from high-latitudes to low-latitudes in early summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1994, **72** (2): 269~279
- [22] 陆日宇, 黄荣辉. 东亚-太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响. *大气科学*, 1998, **22** (5): 727~734
- Lu Riyu, Huang Ronghui. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the Northeastern Asia in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1998, **22** (5): 727~734
- [23] 矫梅艳, 姚学祥, 杨克明, 等. 2003 年淮河大水的成因分析. 北京: 气象出版社, 2004. 212pp
- Jiao Meiyan, Yao Xuexiang, Yang Keming, et al. *A Analysis on Cause of Formation of Huaihe River Basin Flood in 2003*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 212pp
- [24] 李峰, 林建, 何立富. 西风带系统的异常活动对 2003 年淮河暴雨的作用机制研究. *应用气象学报*, 2006, **17** (3): 303~309
- Li Feng, Lin Jian, He Lifu. The abnormal activity of the westerlies system and its impacts on 2003 summer heavy rainfall over Huaihe basins. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2006, **17** (3): 303~309
- [25] Ding Q H, Wang B. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, 2005, **18**: 3483~3505
- [26] 仇永炎. 中期天气预报. 北京: 气象出版社, 1985. 52~70
- Qiu Yongyan. *Mid-Range Weather Forecast* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1985. 52~70

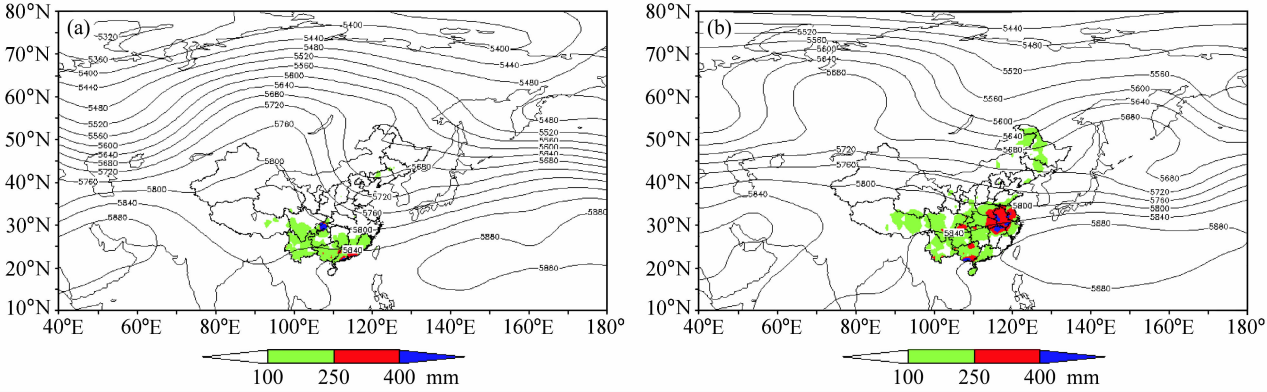


图 1 2003 年 6~7 月欧亚中高纬地区两次阻塞高压活动过程期间的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 形势及我国降雨分布 (阴影): (a) 6 月 1~16 日; (b) 6 月 17 日~7 月 7 日
Fig. 1 Mean 500-hPa geopotential height (gpm) pattern during two blocking high activity processes of (a) 1 – 16 Jun and (b) 17 Jun – 7 Jul in 2003 and the corresponding rainfall distribution (shading)

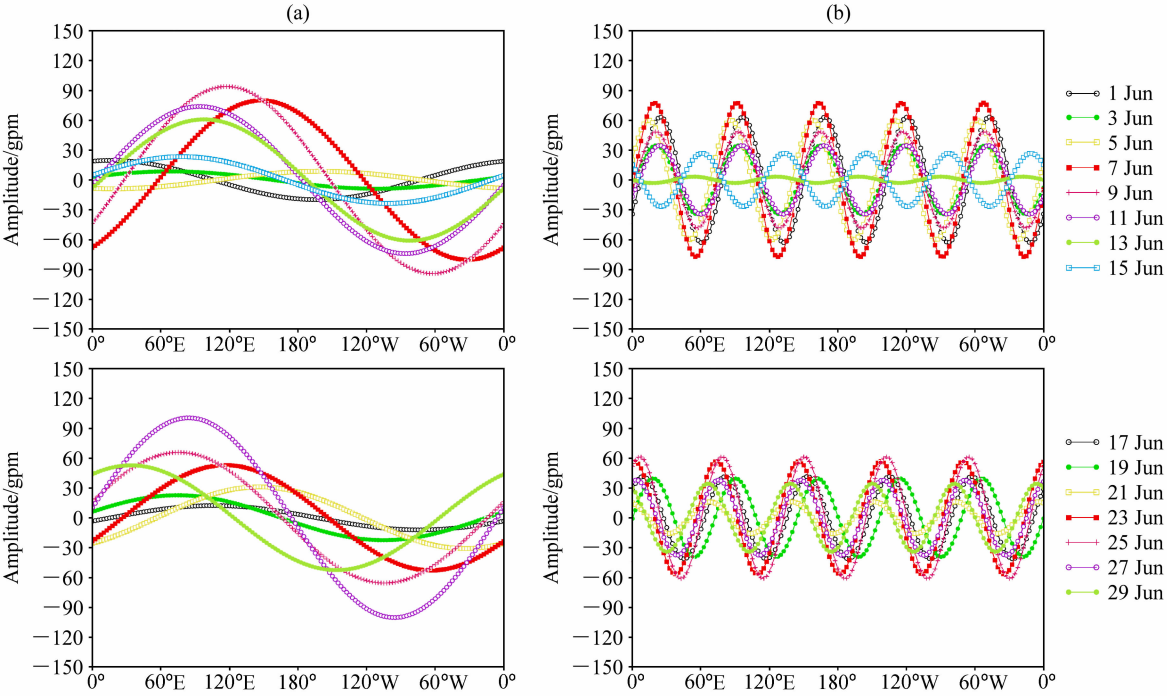


图 8 2003 年 6 月北半球 55°N~65°N 纬带平均 500 hPa 位势场 1 波 (a) 和 5 波 (b) 的演变
Fig. 8 Time evolutions of wave number 1 (a) and wave number 5 (b) of 500-hPa potential height averaged over 55°N – 65°N in Jun 2003