

北半球阻塞高压的维持 I: 准地转和 Ertel 位涡分析*

刘辉 吴国雄 曾庆存

(LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100080)

摘 要

从北半球不同地区的4个阻塞高压个例,研究了阻塞高压维持机制及其地域性差异。对阻塞高压区域300hPa时间平均准地转位涡低值区的维持机制的分析表明,该位涡低值区的维持机制存在显著的地域性差异。其中,在2个太平洋阻高个例中,时间平均流的位涡平流使低位涡向阻高西北部输送,从而有利于位涡低值区经向度的维持;时变扰动的位涡输送则有抵消平均流作用的倾向,从而对位涡低值区的维持起耗散作用。在大西洋和东亚阻高个例中,平均流的位涡平流使低位涡区向东移动,而时变扰动的位涡输送则有抵消平均流位涡平流的作用,从而有利于位涡低值区在原地稳定维持。以上主要是相对涡度输送的差异所致。等熵面 Ertel 位涡分析表明,阻高区域330K时间平均等熵位涡低值区的维持机制与300hPa时间平均准地转位涡低值区的维持机制十分相似,从而表明以上等压面准地转位涡分析可以近似用来代表等熵 Ertel 位涡分析。

关键词: 阻塞高压,位涡,北半球。

1 引言

阻塞高压一般是指对流层中高纬度地区移动缓慢、持续时间较长(1—2周)的大尺度高压。在北半球,它多出现于欧洲和北美洲的西海岸附近地区。对于它的形成和维持,已提出了一些可能的机制。其中之一是强调天气尺度斜压不稳定扰动的局地强迫作用在阻塞高压建立与维持中的作用。早在1940年代、1950年代,就注意到阻塞高压的建立与其上游斜压不稳定扰动的发展有关,例如 Berggren 等^[1], Bodurtha^[2], 顾震潮等^[3], 叶笃正等^[4]和 Namias^[5]等等。其中,叶笃正等指出的尽管不同地区阻塞高压的具体形成过程有一定差异,但是在阻塞高压发展之前,它的上游几乎都有斜压不稳定扰动的发展,并且其槽前的暖平流的作用使得阻高发展起来这一观点,为最近的一些研究所证实(如 Colucci^[6], Blackman 等^[7], Konrad 等^[8], 以及 Nakamura 等^[9])。

自1970年代后期以来,人们开始注意到天气尺度斜压不稳定扰动的涡度输送在阻塞高压维持中的作用。Green(1977)^[10]在分析了1976年7月欧洲沿岸阻高期间时变扰动西风动量的南北输送 $u'v'$ 的特点以后指出,时变扰动的动量输送有加强时间平均阻塞环流的作用。Illari(1984)^[11]在分析了这一个例300hPa时间平均准地转位涡的维持情况后也指出,时变扰动的位涡输送有显著抵消时间平均流位涡平流引起的阻高东移的作用,从而

* 1993年6月15日收到原稿,1993年9月9日收到修改稿。本研究得到国家基础性研究重大关键项目“气候动力学及气候预测理论研究”及中国科学院“灾害性气候预测及其对农业年景和水资源调配的影响”项目的支持。

有利于阻高在原地稳定维持。Holopainen 等(1987)^[12]在分析了 1979 年 2 月 16—25 日欧洲阻高期间高频(2.5—6d)时变扰动的作用后指出,时变扰动的涡度输送也有加强时间平均阻高环流的作用,并且还有显著减少阻高区域地表摩擦耗散的作用。在东亚阻高中也有类似情形(毕慕莹等^[13],吴国雄等^[14])。

但是,一些研究也表明,在太平洋阻塞高压的维持中,时变扰动的涡度输送的强迫作用可能较弱。Mullen(1987)^[15]用合成法分析了 1962—1982 年间 20 个冬季中的 17 个大西洋北部阻高个例和 12 个太平洋北部阻高个例期间高频时变扰动涡度输送的作用。结果表明,在大西洋阻高中,时变扰动的反气旋涡度强迫区($\nabla \cdot \vec{v}'\zeta > 0$)位于阻高上游约 $\pi/2$ 处;但在太平洋阻高中,它位于更靠近阻高中心处,且它的强度也远弱于大西洋阻高。Metz^[16]曾利用正压准地转涡度方程模型研究了行星尺度扰动对实际天气尺度扰动涡度强迫的响应,指出在 1967/1968 至 1977/1978 年的 11 个冬季期间,大西洋地区所得到的阻塞流型与实际情形相近;但太平洋地区却远弱于实际情形。由此看来,在大西洋地区,时变扰动的涡度强迫作用的确是阻塞高压维持的一个重要机制;但在太平洋地区,这种强迫作用的贡献则相对较小。因此,北半球阻塞高压的维持机制很可能存在地域性差异。

另外,纪立人等^[17]的一些研究表明,地形和下垫面热源强迫对于阻塞高压的形成和维持十分重要。这更增加了阻塞高压维持机制存在地域性差异的可能性。

为进一步了解北半球阻塞高压维持机制的地域性差异,本文的第一部分将着重分析不同地区的 4 个阻塞高压期间时间平均准地转位涡低值区的维持机制。然后,将对其中的 2 个个例进行等熵位涡分析,以检查准地转位涡分析的准确性。

在本文的第二部分(另文),将分析大西洋和东亚阻高中时变扰动涡度输送强迫的形成过程以及太平洋阻高的维持机制,并由此探讨阻高维持机制地域性差异的形成机理。

2 准地转位涡低值区的维持

2.1 基本方程

考虑到大气的大尺度运动具有准地转运动的特征,本文将讨论在准地转情形阻塞高压的维持情况。气压坐标中准地转位涡方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{v}_h \cdot \nabla q = S \quad (1)$$

式中准地转位涡

$$q = f + \zeta + f \frac{\partial}{\partial p} (\theta' / \frac{d\theta_0}{dp})$$

\vec{v}_h 为沿等压面的地转风, $f = 2\Omega \sin\varphi$, $\zeta = \vec{k} \cdot \nabla \times \vec{v}_h$, $\theta' = \theta - \theta_0(p)$, $\theta_0(p)$ 为标准位温分布, $d\theta_0/dp$ 为静力稳定度, S 为位涡源、汇项。

阻高期间时间平均位涡方程为

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{\vec{v}}_h \cdot \nabla \bar{q} = - \nabla \cdot \overline{\vec{v}_h q'} + \bar{S} \quad (2)$$

式中,“—”代表时间平均,“'”代表相对该平均的时变扰动。

因此等压面上时间平均准地转位涡的维持是由沿等压面的时间平均流位涡平流,时

变扰动位涡输送的辐散(合)以及源汇项所决定。本文将着重分析前两者的作用。

由于平均流的位涡平流和时变扰动的位涡输送含有较强的小尺度分量,为便于分析,作如下变换(\vec{v}_h 的下标已略去)

$$\psi_m = \nabla^{-2}(-\overline{\vec{v}\nabla q})$$

$$\psi_{fb} = \nabla^{-2}(-\nabla\overline{\vec{v}\zeta'}) \tag{3}$$

ψ_{fb} 等的物理意义为对时间平均“高度场”倾向的强迫。

在实际计算准地转位涡和位涡输送时,水平风场和温度场均用实测值,而不按准地转关系由位势高度求得。计算时,水平和垂直方向的差分均用中央差。为探讨其上游区域对阻高区域的影响,计算范围均为 20°N—82.5°N 的北半球区域。静力稳定度也由上述区域平均求得。在南、北边界,取 $\psi_m = \psi_{fb} = 0$ 。

使用的资料是 ECMWF 的逐日初始化格点资料,包括每日 12 时的等压面高度、水平风速和温度,水平格距为 $2.5 \times 2.5^\circ$,垂直方向共分 7 层,即 1000, 850, 700, 500, 300, 200 和 100hPa。

本节分析将在 300hPa 进行,这主要是因为阻高为相当正压分布,并且在该层附近,时间平均流和时变扰动的位涡输送相对其它层次较强。

2.2 个例概况

本文中阻塞高压定义为:(a) 50°N 以北存在闭合的高压中心(等值线间隔为 60gpm 时), (b) 高压中心持续时间在 10d 以上, (c) 该中心呈准静止状态, 1d 内, 纬圈方向的移动速度不超过 5 个经距。该定义的一个显著特点是, 阻高持续时间较长。

根据上述标准, 从 1979—1983 年 500hPa 图上, 得到了 4 次阻塞高压过程, 它们是, 1980 年 2 月 5—17 日和 1983 年 12 月 17—29 日的两次太平洋东北部阻高过程, 1983 年 2 月 5—20 日大西洋东北部阻高过程和 1982 年 6 月 19 日—30 日的东亚沿岸鄂霍次克海阻高过程。

图 1a—d 分别是以上 4 个阻塞高压期

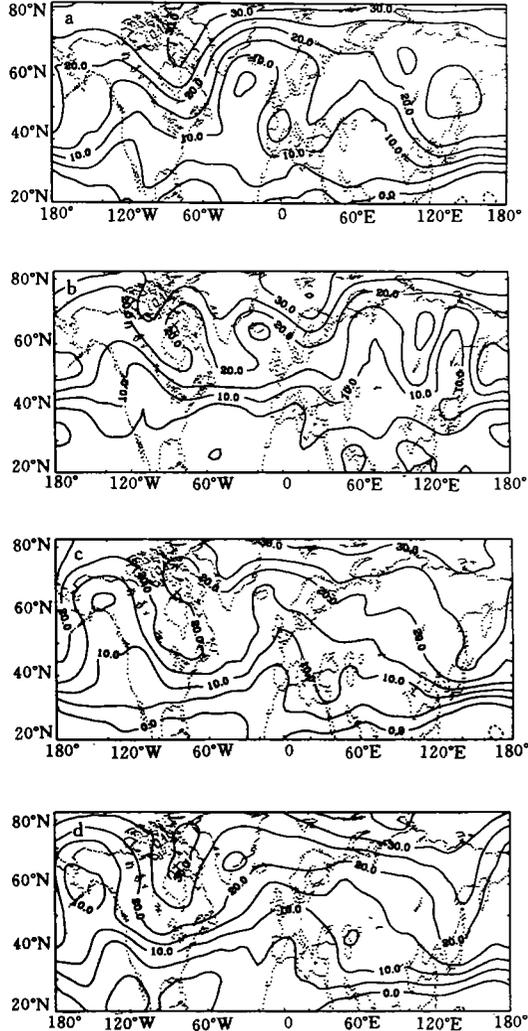


图 1 阻塞高压期间平均的 300hPa 准地转位涡分布 (a. 1983 年 2 月 5—20 日大西洋阻高, b. 1982 年 6 月 19—30 日东亚阻高, c. 1980 年 2 月 5—17 日太平洋阻高, d. 1983 年 12 月 17—29 日太平洋阻高, 等值线间隔为: $5.0 \times 10^{-5} s^{-1}$)

间平均的 300hPa 位势涡度分布。由图可见,在北大西洋,东亚沿岸以及北太平洋阻高区域均为位涡极小值。不同的是,北大西洋和东亚沿岸高压区域位涡低值区呈明显的 NE—SW 倾斜;而两个太平洋高压区域位涡低值区则呈明显 NW—SE 倾斜。以下,我们将着重讨论这些位涡低值区的维持机制。

2.3 大西洋与东亚阻高个例

图 2a 是 1983 年 2 月 5—20 日大西洋阻高期间的时间平均流的位涡平流 ($\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}$) 的分布。由图中可以看出,阻塞高压东部为大范围的正值区,3 个中心分别位于 (75°N, 10°E), (65°N, 20°W) 和 (45°N, 5°W) 附近,强度为 10.0×10^{-10} , 6.0×10^{-10} 和 $4.0 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ 。脊西部为负值区,3 个中心分别位于 (75°N, 30°W), (62°N, 50°W), (47.5°N, 45°W) 处,强度与东部正值中心相当。因此,平均流的位涡平流将使得低位涡场东移。这一现象在 ψ_m (图 2b) 上更为清楚: ψ_m 在脊东部为正变高,西部为负变高。由此看来,平均流的位涡平流不利于位涡低中心的稳定维持。

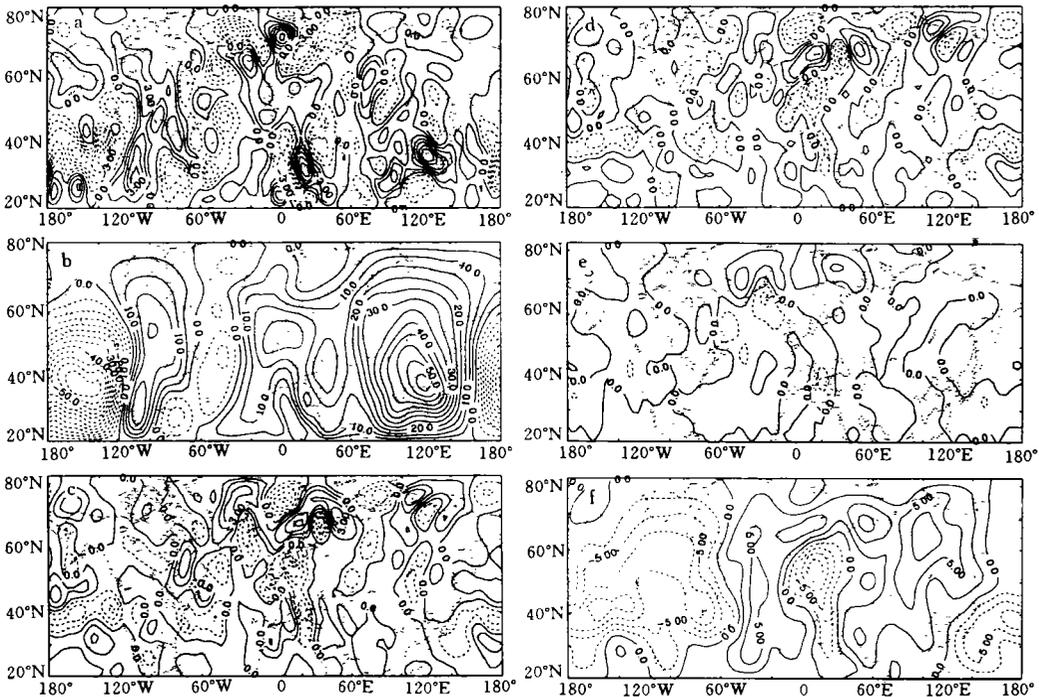


图 2 大西洋阻高期间时间平均 300hPa 平均流位涡平流(a), ψ_m (b), 时变扰动位涡输送散度(c),

扰动相对涡度输送散度(d), 扰动差动热量输送散度 ($\nabla \vec{v}'b$, $b = f \frac{\partial}{\partial p} (\theta' / \frac{d\theta_0}{dp})$)(e), ψ_{fa} (f)

(图中等值线间隔: a, c, d, e, 为 $1.5 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$, b, 为 $5.0 \times 10 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$, f, 为 $2.5 \times 10 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$.)

图 2c 是 300hPa 时变扰动位涡输送的散度分布。一个显著的特点是,它与平均流的位涡平流有很好的相互抵消作用,因此,时变扰动的位涡输送有利于位涡低中心在原地稳定维持。这与以前人们对其它大西洋阻塞个例的分析结果是一致的。

图 2d 和 e 是时变扰动位涡输送的两个分量(涡度输送和热量输送)的分布。可以看出,时变扰动位涡输送的上述作用主要是由于其涡度输送所致。从图 2f 还可以看出, ψ_{fb}

在阻高区域为一显著正变高区,其中心位于阻高中心偏西处。这表明,时变扰动的涡度输送使阻高西移,并可部分抵消平均流所引起的阻高东移。

东亚阻高与大西洋阻高相似。图 3a 是 300hPa 平均流位涡平流分布。在阻高西部,有两个很强的负中心,分别位于(130°E,69°N)和(110°E,48°N)处,强度为 6.0×10^{-10} 和 $4.0 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ 。该脊东部则有两个较强正中心,分别位于(145°E,45°N)和(180°E,60°N)处。 ψ_m 图上(图 3b)则相应表现为脊西部有两个负变高中心,东部有一很强的正变高中心。因此,本例中平均流位涡平流也使位涡低值区东移。

图 3c 是 300hPa 时变扰动位涡输送散度分布。它有显著抵消平均流位涡平流的作用,尤其是在阻脊北部。这与大西洋阻高也是相似的。

此例中,扰动位涡输送的作用主要也是由相对涡度输送所致,热量输送的作用则相对较小(图略)。

综上所述,在大西洋与东亚阻塞高压个例中,时变扰动位涡输送的作用可以显著抵消时间平均流的位涡平流所引起的位涡低值区和东移,从而有利于位涡低值区在原地稳定维持。

2.4 太平洋阻高情形

1980 年 2 月 5—17 日太平洋阻高期间 300hPa 时间平均流的位涡平流示于图 4a。可见,阻高北部有一个大范围正值区,3 个正中心分别位于(60°W,70°N),(120°W,65°N)和(180°,65°N),在此区域南侧,即阻高的中部和东南部,有两个强度与之相当的负中心。因此,以上位涡平流将使阻高北部位涡减小,南部位涡增大,亦即将使低位涡区向北移动,这将有助于阻高经向度加大,从而有利于阻高维持。

时变扰动的位涡输送的作用正好与平均流位涡平流的作用相反(图 4b),它使阻高北部及中心地区的位涡增大,从而对阻高维持起耗散作用。显然,这与大西洋和东亚阻高个例的情况正好相反。

图 4c 是平均流的位涡平流的相对涡度平流的分布。对比前图可以看出,位涡平流的作用主要是通过其相对涡度平流实现的。

1983 年 12 月 17—29 日的太平洋阻高个例的情况与上例十分相似。从 300hPa 平均流的位涡平流分布(图 5a)来看,该例一个显著的特征是阻高西北部有一个很强的正值区,中心位于(165°W,68°N)处,中心强度为 $12.0 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ 。另外,阻高北部(140°W,75°N)处还有一个较强的正中心。与之相反的是阻高区域内负值区不明显。因此,平均流位

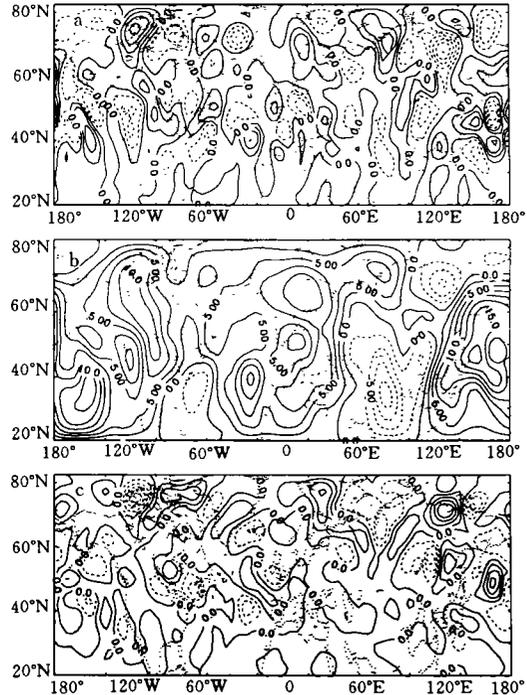


图 3 东亚阻高情形,余同图 2a—c
(等值线间隔 a, c. 为 $1.5 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$,
b. 为 $5.0 \times 10 \text{m}^2/\text{s}^{-2}$)

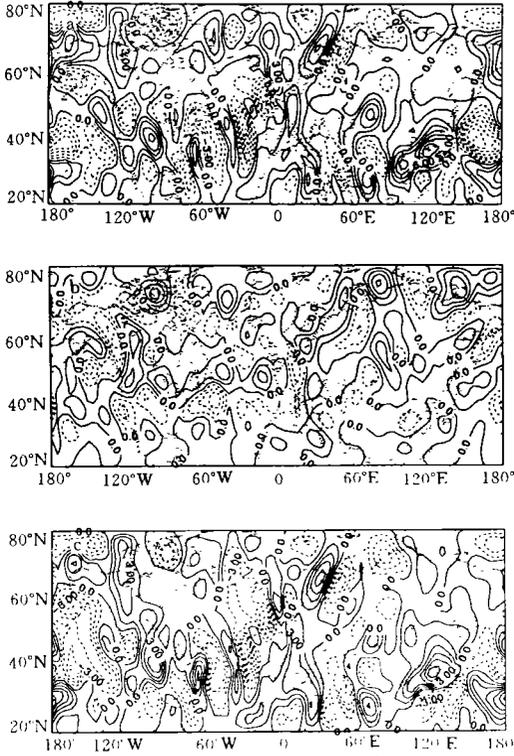


图4 1980年2月5—17日太平洋阻高期间300hPa上的平均流的位涡平流(a),时变扰动位涡输送的散度(b),平均流的相对涡度平流(c)
(等值线间隔为: $1.5 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$)

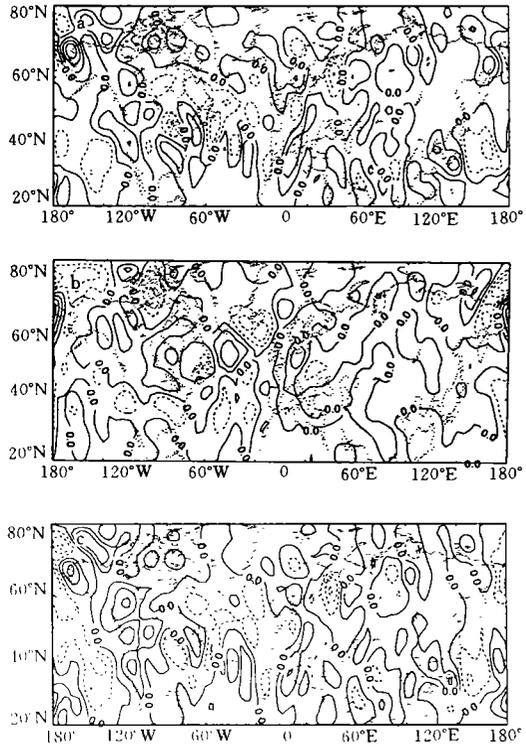


图5 1983年12月17—29日太平洋阻高情形(余同图4)
(等值线间隔为: $3.0 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$)

涡平流将使阻高西北部位涡减小,从而低位涡区将向阻高西北部移动。这与前一个太平洋阻高相似。不过,在阻高南部,平均流位涡平流仍有使位涡场东移的作用。

扰动位涡输送的作用主要是使阻高北部位涡增大(图5b),从而也有抵消平均流位涡平流的作用。

平均流位涡平流的作用主要也是通过相对涡度平流实现的(图5c)。

总之,在这两个太平洋阻塞高压个例中,阻高区域位涡低值区的维持是通过时间平均流的位涡平流(其中主要是相对涡度平流)实现的,时变扰动的位涡输送则对位涡低值区的维持起耗散作用。这与大西洋和东亚沿岸阻塞高压的情形正好相反。

3 等熵 Ertel 位涡场的维持

以上从准地转位涡维持的角度研究了北半球不同地区阻塞高压的维持机制,然而,准地转理论在这里的应用有一些不足之处,如没有考虑静力稳定度在水平方向的变化和穿越等压面垂直运动的影响。等熵面上的 Ertel 位涡分析则可以避免上述问题,在这一节中,将分析 1980 年 2 月 5—17 日太平洋阻高和 1983 年 2 月 5—20 日大西洋阻高期间时间平均等熵 Ertel 位涡场的维持,以检查准地转位涡分析结果的准确性。

3.1 诊断方程

时间平均 Ertel 位涡方程可写为(参见 Hoskins 等)^[18]

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{v}_\theta \cdot \nabla \bar{p} = -\nabla \cdot (\bar{v}_\theta p') + \bar{S}_\theta \quad (4)$$

式中 Ertel 位涡

$$P = -g(f + \zeta_\theta) / \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

$\zeta_\theta = \hat{k} \cdot \nabla_\theta \times \vec{v}$, θ 为位温, ∇_θ 为 θ 坐标中的三维梯度算子, \vec{v} 为等 θ 面的水平风速, \hat{k} 为垂直于 θ 面的单位矢量。可以看出, 时间平均 Ertel 位涡的局地变化是由平均流 Ertel 位涡平流, 时变扰动 Ertel 位涡输送的散度, 以及源汇项决定的。下面将着重分析 330K 等熵面上时间平均 Ertel 位涡场的维持情况, 因为该等熵面在高纬度与 300hPa 位置较为接近。

3.2 太平洋阻高个例

图 6a 是 1980 年 2 月 5—17 日太平洋阻高期间的时间平均等熵位涡和风的分布。可见, 阻高区域为 Ertel 位涡低值区, 其分布与 300hPa 准地转位涡的分布大致相似。图 6b、c 是该例平均流 Ertel 位涡平流和扰动 Ertel 位涡输送辐散(合)的分布。可以看出, 平均流的作用使得位涡低值区向北移动, 而扰动的作用则与之相反。这与准地转情形十分相似。这表明对大尺度阻高系统而言, 可以用 300hPa 等压面的位涡分析去近似地表示 330K 等熵面上的 Ertel 位涡分析。

3.3 大西洋阻高个例

该例时间平均位涡场、平均流位涡平流及扰动位涡输送的辐散(合)示于图 7a、b、c。由图可见, 阻脊区域也为 Ertel 位涡低值区, 平均流的作用使该低值区东移, 而扰动的作用则使得位涡低值区西移, 这与准地转情形也很相似。

因此, 从以上两个阻高个例来看, 等压面上准地转位涡分析可以近似地代表等熵 Ertel 位涡分析。

4 结论

对北半球不同地区的 4 个阻塞高压个例的分析表明, 阻高区域时间平均准地转和

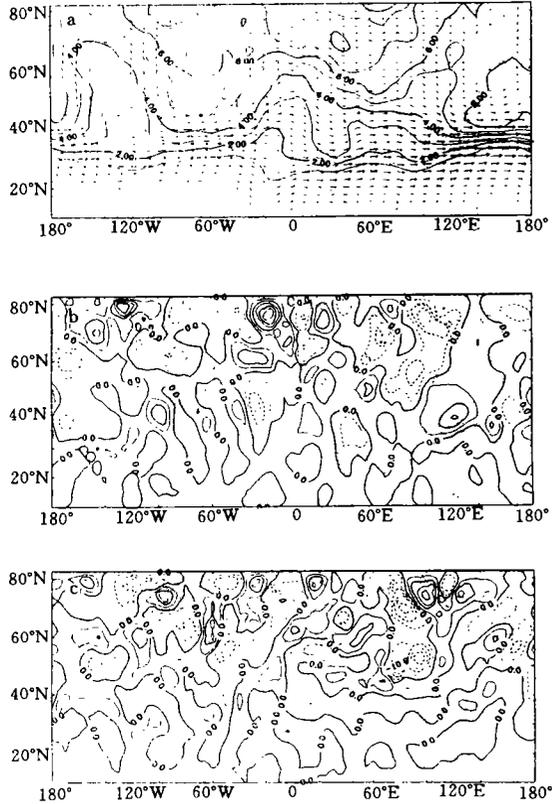


图 6 1980 年 2 月 5—17 日太平洋阻高期间 330K 等熵面上时间平均 Ertel 位涡及风速分布(a). 平均流 Ertel 位涡平流(b). 时变扰动 Ertel 位涡输送的散度(c)

(等值线间隔为:a, $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{Kkg}^{-1}$,
b, $10.0 \times 10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{Kkg}^{-1}$, c, $5.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

Ertel 位涡的维持机制存在显著的地域性差异,其中,在大西洋和东亚阻高个例中,位涡低值区是由时变扰动的位涡输送维持的;在太平洋阻高中,低位涡区则是由时间平均流的位涡输送维持的。由此看来,北半球阻塞高压的维持确实存在显著的地域性差异。

参考文献

- [1] Berggren R. Bolin B and Rossby C G. An aerological study of local motion, its perturbations and breakdown. *Tellus*. 1949, 1: 14—37.
- [2] Bodurtha F T. An investigation of anticyclonogenesis in Alaska. *J. Meteor.* 1952, 9: 118—125.
- [3] 顾震潮, 翟章, 巢纪平. 准地转三层模式天气数值预报方法的试验研究. *气象学报*. 1957, 28: 141—156.
- [4] 叶笃正, 陶诗言, 朱抱真, 杨钟监初, 陈隆勋. 北半球冬季阻塞形势的研究. 北京: 科学出版社. 1962.
- [5] Namias J. Seasonal persistence and recurrence of European blocking during 1958—1960. *Tellus*. 1964, 16: 394—407.
- [6] Cloucci S J. Explosive cyclogenesis and large scale circulation changes: implications for atmospheric blocking. *J Atmos. Sci.* 1985, 41: 981—991.
- [7] Blackman M L et al. The climatology of blocking events in a perpetual January Simulation of a spectral GCM. *J Atmos Sci.* 1986, 43: 1379—1405.
- [8] Konrad C E and Colucci S J. Synoptic climatology of large scale circulation changes during explosive cyclogenesis. *Mon Wea Rev.* 1988, 116: 1431—1443.
- [9] Nakamura H and Wallace J M. Observed changes in baroclinic wave activity during the life cycles of low frequency circulation anomalies. *J Atmos Sci.* 1990, 47: 1100—1116.
- [10] Green J S A. The weather during July 1976: Some dynamical consideration of the drought. *Weather*. 1977, 32: 120—126.
- [11] Illari L. Diagnostic study of the potential vorticity in a warm blocking anticyclone. *J Atmos Sci.* 1984, 41: 2232—2242.
- [12] Holopainen E O and Fortelius C. High frequency transient eddies and blocking. *J Atmos Sci.* 1987, 44: 1632—1645.
- [13] 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(2): 145—156.
- [14] 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 赵宇澄, 卢莹. 时变扰动涡动输送和阻高形成—1980年夏我国的持续异常天气. *气象学报*. 1994, 52: 308—320.
- [15] Mullen S L. Transient eddy forcing of blocking flows. *J Atmos Sci.* 1987, 44: 3—22.
- [16] Metz W. Transient cyclone scale vorticity forcing of blocking highs. *J Atmos Sci.* 1986, 43: 1467—1483.

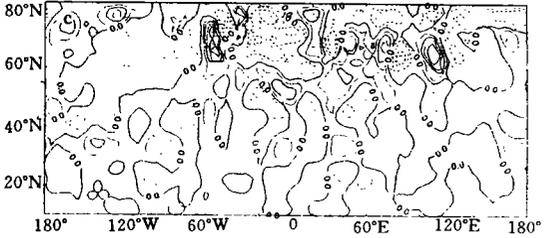
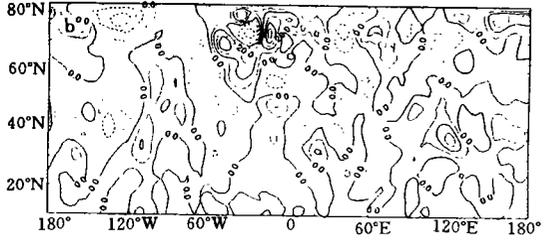
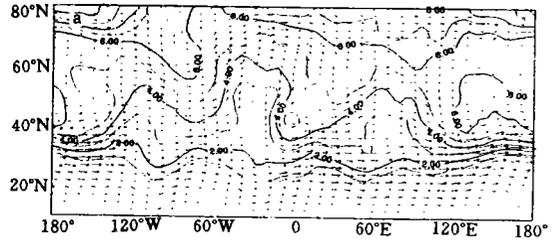


图7 1983年2月5—20日大西洋阻高情形
(余同图6)

- [17] Ji L R and Tibaldi S. Numerical simulation of a case of blocking : The effect of orography and land-sea contrast. *Mon Wea Rev.* 1983. 111:2068—2086.
- [18] Hoskins B T et al. On the significance of isentropic potential vorticity maps. *Q J R Met Soc.* 1985. 111: 877—946.

ON MAINTENANCE OF BLOCKING ANTICYCLONES OF NORTHERN HEMISPHERE PART 1: QUASI-STROPHIC AND ERTEL POTENTIAL VORTICITY ANALYSIS

Liu Hui Wu Guoxiong Zeng Qingcun

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

Abstract

In this paper, maintenance of blocking anticyclones are investigated with four observed blocking anticyclones in different regions of Northern Hemisphere. It has been shown that there exists distinct region-dependent differences in the maintenance of time-mean quasi-strophic potential vorticity (PV) low in 300hPa within the blocking regions. In the two Pacific blocking cases, the PV advection by time-mean flow tends to flow the low PV to north western part of the blocking highs and thus is benefit to the maintenance of the blockings' strength. The PV transfer by eddy tends to cancel the PV advection by mean flow. In the Atlantic and Asia blocking cases, however, the advection by mean flow tends to flow the low PV pattern eastward. The PV transfer by eddy has a tendency to advect low PV to western part of the ridges and to balance the advection by mean flow. Therefore, in these two cases it is the eddy that is benefit to the blockings' maintenance at quasi-stationary state.

Very similar results are obtained with respect to maintenance of the time-mean Ertel PV in 330K surface. Therefore, in the blocking cases, the quasi-geostrophic PV analyses can be used to represent the Ertel PV analyses.

Key words: Blocking anticyclone, Potential vorticity (PV), Northern Hemisphere.