

# 北半球对流层上层遥相关型的涡度源、 能量源与能量传播

耿全震

(国家气候中心, 北京 100081)

## 提 要

基于 ECMWF1980~1988 年的全球资料, 研究了北半球对流层上层两个主要遥相关型(大西洋/欧亚型与太平洋/北美型)的涡度源、能量源及能量传播路径. 结果表明, 这两个遥相关型的涡度源和能量源分别主要位于北大西洋和北太平洋地区. 遥相关型在北大西洋和北太平洋通过正压能量转换从气候平均流中吸收能量, 然后从这两个地区将能量向外传播, 以维持其水平遥相关结构.

**关键词:** 遥相关型; 涡度源; 能量源; 能量传播.

## 引 言

自从 Wallace 和 Gutzler(1981)<sup>[1]</sup>给出北半球冬季热带外地区位势高度场的 5 种明显的遥相关型之后, 许多研究都试图找出大气中遥相关型的形成和维持机制. Hoskins 和 Karoly(1981)<sup>[2]</sup>提出了二维 Rossby 波的频散理论, 按照这一理论 Horel 和 Wallace(1981)<sup>[3]</sup>把 PNA 型与大气对赤道地区的暖海温异常的定常响应联系起来. Simmons 等(1983)<sup>[4]</sup>、Wallace 和 Lau(1985)<sup>[5]</sup>、Nakamura 等(1987)<sup>[6]</sup>认为 Wallace 和 Gutzler(1981)<sup>[1]</sup>的 PNA 和 EA 型与从基本流中获取能量的正压不稳定模态有关.

尽管许多人都试图研究遥相关型的产生原因, 我们对北半球遥相关型的源地到底位于什么地方及其能量如何传播仍不清楚, 例如, PNA 型的能量是从热带向中高纬传播吗? 其源地是在热带地区吗? 另外, 虽然上述研究均表明 PNA 等遥相关型可以从基本流中获取能量, 却没人证明过遥相关型的能量是否从能量转换大值区向外传播. 本文的目的就是试图研究北半球对流层上层两个主要遥相关型(大西洋/欧亚型与太平洋/北美型)的强迫源的位置和能量传播路径. 这对理解大气中遥相关型的形成和维持机制是很重要的.

\* 国家基础性研究重大关键项目“气候动力学和气候预测理论的研究”资助.  
1995-09-26 收到, 1996-03-07 收到修改稿.

## 1 资料与方法

本文所使用的资料是 ECMWF1980~1988 年全球  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  格点的 200 hPa 风场资料. 根据 Sardeshmukh 和 Hoskins(1988)<sup>[7]</sup> 的研究, 对流层上层异常的涡度源可以写为

$$S' = -\bar{\vec{V}}_x \cdot \nabla \xi' - \vec{V}'_x \cdot \nabla (\xi + f) - (\xi + f)D' - \xi' \bar{D} \quad (1)$$

其中  $\bar{\vec{V}}_x$  和  $\vec{V}'_x$  分别为时间平均和异常的辐散风,  $\xi$  和  $\xi'$  分别为时间平均和异常的相对涡度,  $\bar{D}$  和  $D'$  分别为时间平均和异常的散度.  $S'$  可由环流场本身诊断出来, 它代表了异常环流的强迫源.

我们采用 Plumb(1985)<sup>[8]</sup> 给出的球面上准地转的准定常波的波活动通量来表示波动能量的传播方向, 其表达式为

$$\vec{F}_s = p \cos \varphi \begin{bmatrix} v^{*2} - \frac{1}{2a \cos \varphi} \frac{\partial (v^* \psi^*)}{\partial \lambda} \\ -u^* v^* + \frac{1}{2a \cos \varphi} \frac{\partial (u^* \psi^*)}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (2)$$

( $*$ ) 表示与纬向和时间平均的偏差, ( $u^*$ ,  $v^*$ ) 为旋转风速,  $a$  为地球半径,  $\lambda$ ,  $\varphi$  为经度和纬度,  $p = P/P_0$ ,  $P$  为气压, 其它为常用符号.  $\vec{F}_s$  可表示波活动的传播, 它的方向与波动能量的传播方向一致.

下面讨论准定常波的能量传播方向与能量场本身的关系, 考虑准定常波方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi^* + [U] \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi^* + \beta \frac{\partial \psi^*}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

如果考虑到准定常波的群速度关系和  $\psi^*$  的准定常性(即时间缓变性), 根据 Hoskins 和 Karoly(1981)<sup>[2]</sup> 的研究, 则能量传播路径应该满足方程:

$$dy/dx = C_{gy}/C_{gx} = l/k \quad (4)$$

若其流函数  $\psi^*$  可以简单地表示为

$$\psi^*(x, y, t) = A \cos(kx + ly - \omega t) \quad (5)$$

且假定  $k$  和  $l$  只是  $(x, y)$  的缓变函数, 准定常波的动能则可写为

$$K^* = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \psi^*}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi^*}{\partial y} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} A^2 (k^2 + l^2) \sin^2(kx + ly - \omega t) \quad (6)$$

那么波动动能的最大值的长轴应该满足方程

$$kx + ly - \omega t = \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (7)$$

如果  $k$  和  $l$  只是  $x, y$  的缓变函数, 则

$$dy/dx = -k/l \quad (8)$$

由式(4)和式(8)可以看出, 准定常波波动能量的传播方向近似与波动动能的最大值的长轴垂直, 所以准定常行星波的能量场可以很好地显示波动能量的传播. 在下一节中, 我们将根据本节的方法和简单理论来诊断大西洋/欧亚型和太平洋/北美型的涡度源及其与能量传播的关系.

## 2 遥相关型的涡度源异常和能量传播

首先,对纬向风月平均异常用主成分分析(PCA)方法求出其主要的异常型.如图1a所示,对应第二个异常型(解释方差的8.5%)的合成流函数异常为一个从大西洋地区伸展到欧亚大陆的具有6个异常中心的波列结构,即所谓的大西洋/欧亚型(Lau和Nath,1990)<sup>[9]</sup>.如图2a所示,对应第三个异常型(解释方差的7.1%)的合成流函数异常为一个从副热带中太平洋伸展到北美大陆的具有5个异常中心的波列结构,即所谓的太平洋/北美型(PNA型).

为了确定遥相关型的涡度源地,我们根据式(1)和式(2)计算了对应于上述两个异常型的涡度源异常和能量通量.图1a给出了对应于大西洋/欧亚型的涡度源异常和能量传

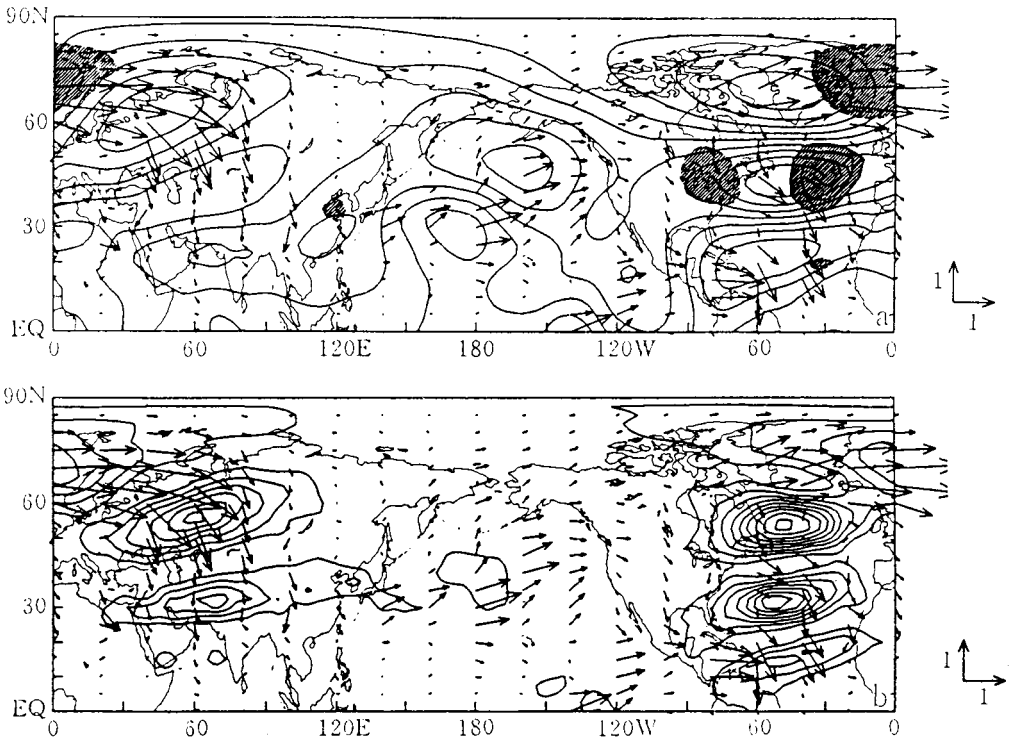


图1 对应于大西洋/欧亚型的(a)流函数异常(等值线间隔为 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )与涡度源异常(等值线间隔为 $2.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ , 阴影区表示大于3倍或小于负的3倍的等值线间隔的区域)(b)波动能量(等值线间隔为 $4.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ )和波活动通量(单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ )

Fig. 1 (a) Streamfunction anomalies(contour interval;  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) and vorticity source anomalies(contour interval;  $2.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ , shading area; vorticity source anomaly regions larger than three times or less than minus three times of the contour interval) and (b) wave kinetic energy (contour interval;  $4.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ) and wave activity fluxes(unit;  $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ ) for the Atlantic/Eurasian teleconnection pattern

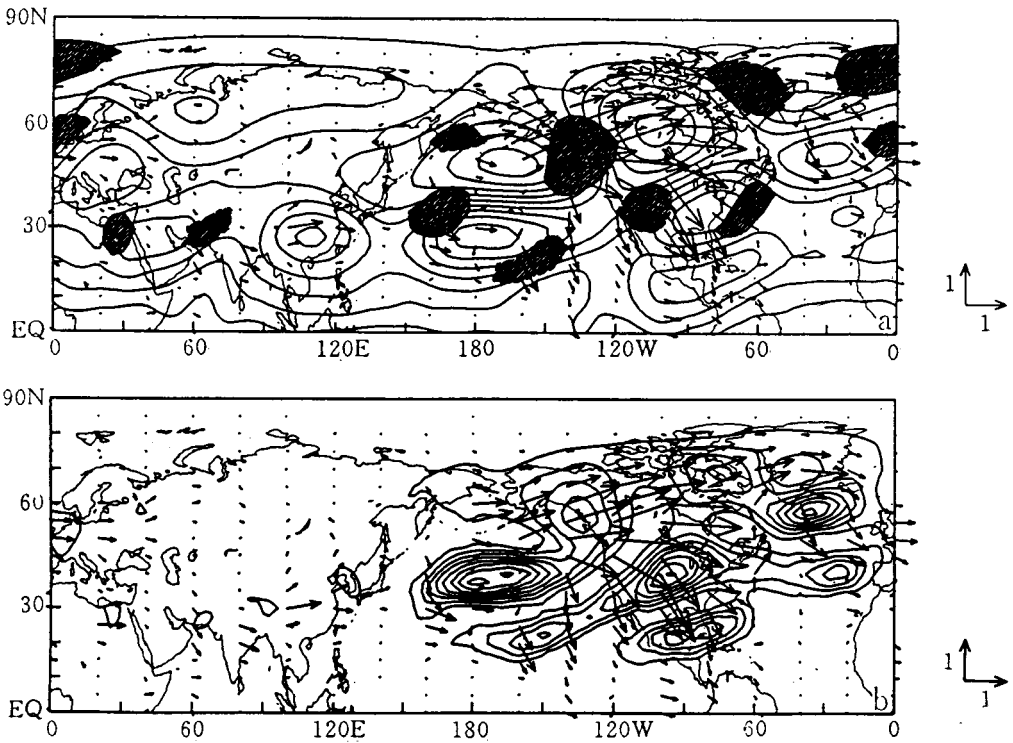


图2 同图1, 但为太平洋/北美型(流函数异常、涡度源异常和波动动能的等值线间隔分别为  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $1.2 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$  和  $3.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ )

Fig. 2 As in Fig. 1, but for the Pacific/North American teleconnection pattern (The contour intervals of streamfunction anomaly, vorticity source anomaly and wave kinetic energy are  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $1.2 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$  and  $3.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , respectively)

播特征. 可以看出在中纬度和北大西洋上有强的正涡度源异常出现, 而在北美东岸和格陵兰以东的大西洋上为负的涡度源异常. 波活动通量从中纬度和北大西洋的涡度源异常区以两支能量流的方式向外传播, 第一支自北大西洋出发向东南方向传播, 通过大西洋到达热带地区; 另一支波活动通量向东北方向传播到格陵兰和挪威海, 然后转向北欧且向东南方向传播到亚洲大陆和印度洋. 从图 1 b 可以看出波能量的传播方向近似地与波动动能的最大值的长轴垂直.

图 2 给出了太平洋/北美型的涡度源异常和波活动传播. 波活动自中纬度和东北太平洋上的涡度源异常区向东北方向传播到加拿大, 然后转向东南方向且沿着北美大陆传播; 还有一小支波活动直接从北太平洋向东南方向传播到热带太平洋地区. 与此同时位于格陵兰地区的强波源也产生了波活动.

由上面的分析可以发现, 大西洋/欧亚型和太平洋/北美型的能量并不是从热带向中高纬传播, 而是从中纬度向热带和高纬度传播. 遥相关型的波活动通量一般源自大的涡度源异常区; 能量的传播方向近似地与遥相关型动能的最大值的长轴垂直且表现为球面上大气对局地强迫响应的二维 Rossby 波频散结构.

### 3 遥相关型从气候平均流的正压能量吸收与能量传播

上节讨论了遥相关型的涡度源与能量传播的关系, 本节将研究它们的能量源与能量传播. 根据 Simmons 等(1983)<sup>[4]</sup>的研究, 由于从气候平均流向低频遥相关型的正压能量转换而引起的低频遥相关型动能的增长率可以写为

$$\partial \overline{KE} / \partial t = \vec{E} \cdot \nabla U_b \quad (9)$$

这里  $\vec{E}$  是 Eliassen-Palm 通量的水平分量且定义为

$$\vec{E} = (v'^2 - u'^2, -u'v') \quad (10)$$

$\nabla U_b$  是修正了的基本流西风动量的水平梯度, 且由下式给出

$$\nabla U_b = \left( \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial u_b}{\partial \lambda} - \frac{v_b \tan\varphi}{a}, \frac{1}{a} \frac{\partial u_b}{\partial \varphi} + \frac{u_b \tan\varphi}{a} + \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial v_b}{\partial \lambda} \right) \quad (11)$$

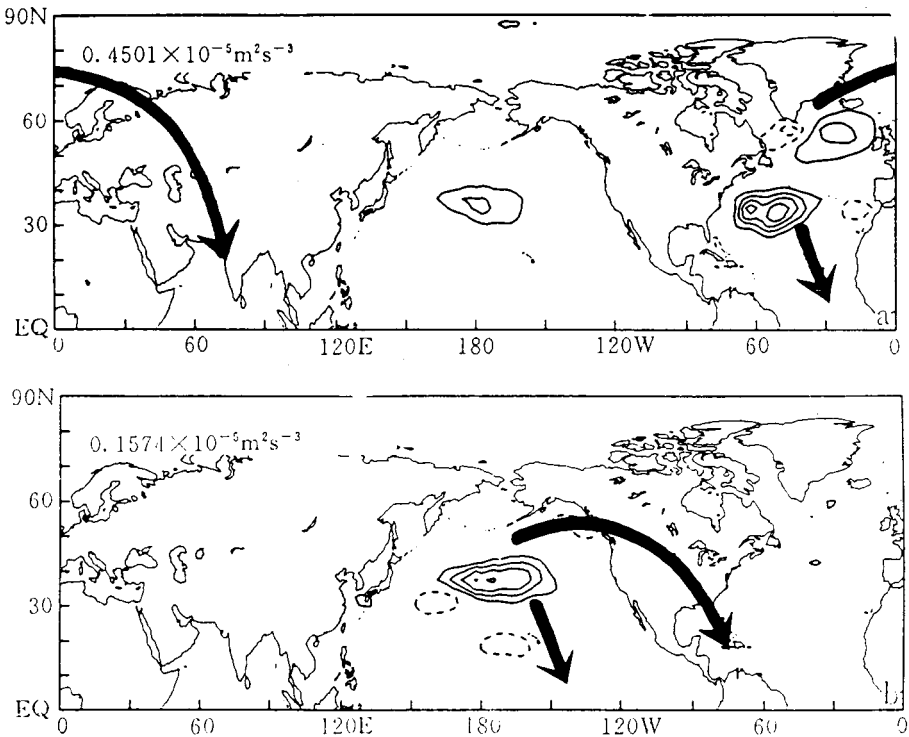


图3 从气候平均流向(a)大西洋/欧亚型和(b)太平洋/北美型的正压能量转换(等值线间隔为  $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ , 左上角的数字为半球平均值, 粗箭头表示图1和图2中两种遥相关型的能量传播方向)

Fig. 3 The barotropic energy conversions from climatological mean flow to (a) Atlantic/Eurasian pattern and (b) Pacific/North American pattern (contour interval:  $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ . Figures at the upper-left corner; hemispherically averaged values, the bold arrows: the energy propagation directions for the two teleconnection patterns)

这里  $u_b$  和  $v_b$  分别为基本流的纬向和经向风速分量.  $u'$  和  $v'$  分别为扰动风场的纬向和经向分量, 式(9)中上线“—”表示对  $\lambda$  和  $\varphi$  的全球平均.

图 3 给出了从气候平均流向大西洋/欧亚型与太平洋/北美型的正压能量转换, 能量转换分别以北大西洋和北太平洋上的正的能量转换区为主, 这构成了遥相关型的能量源. 如图中箭头所示, 能量从正压能量转换大值区向外传播, 从而维持了遥相关型的水平结构. 表示在图左上角的从气候平均流向遥相关型的正压能量转换的半球积分平均值对这两个异常型都是正的, 说明从基本流中获取动能是大西洋/欧亚型和太平洋/北美型得以维持的一个重要因素.

## 4 结 论

本文分析了北半球对流层上层两个主要遥相关型(大西洋/欧亚型和太平洋/北美型)的涡度源、能量源和能量传播路径, 可得出如下主要结论:

(1) 大西洋/欧亚型和太平洋/北美型的涡度源与能量源主要位于北太平洋和北大西洋地区.

(2) 遥相关型的波活动通量一般源自大的涡度源和能量源区; 能量的传播方向近似地与遥相关型动能的最大值的长轴垂直且表现为球面上大气对局地强迫响应的二维 Rossby 波频散结构.

(3) 大西洋/欧亚型和太平洋/北美型在北大西洋和北太平洋从气候平均流中吸收能量, 然后将能量从这两个地区向外传播, 以维持其水平结构.

## 参 考 文 献

- Wallace J M and Gutzler D S. Teleconnection patterns in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 785~812.
- 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.
- Horel J D and Wallace J M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 813~829.
- Simmons A J, Wallace J M and Branstator G W. Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1363~1392.
- Wallace J M and Lau N C. On the role of barotropic energy conversions in the general circulation. *Atmospheric and Oceanic Modelling. Advances in Geophysics*, 1985, **28**: 33~74.
- Nakamura M, Tanaka M and Wallace J M. Horizontal structure and energetics of Northern Hemisphere wintertime teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 373~390.
- Sardeshmukh P D and Hoskins B J. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1228~1251.
- Plumb R A. On the three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 217~229.
- Lau N C and Nath M J. A general circulation model study of the atmospheric response to extratropical SST anomalies observed in 1950-1979. *J. Clim.*, 1990, **3**: 965~989.

**VORTICITY SOURCE, ENERGY SOURCE AND ENERGY  
PROPAGATION OF THE TELECONNECTION  
PATTERNS IN THE UPPER TROPOSPHERE  
OF NORTHERN HEMISPHERE**

Geng Quanzhen

*(National Climate Center, Beijing 100081)*

**Abstract**

The vorticity source, energy source and energy propagations of the two major teleconnection patterns (the Atlantic/Eurasian pattern and Pacific/North American pattern) are studied with ECMWF data of 1980~1988, respectively. It is found that the vorticity source and energy source of these two teleconnection patterns were mainly concentrated in the North Atlantic and North Pacific regions, respectively. They obtained energy from climatologically mean flow through barotropic energy conversions in the North Atlantic and North Pacific regions, respectively, and propagate the energy outside from these two regions, so as to maintain their horizontal teleconnection structures.

**Key words:** Teleconnection pattern; Vorticity source; Energy source; Energy propagation.