

1981-1982年冬半年大气行星波的传播特征*

耿全震**

(北京大学地球物理系)

提 要

利用 ECMWF 15 天平均资料计算了定常波的 EP 通量以及波动动能和有效位能的三维分布。发现了大气中某些新的遥相关型，特别是从中纬度传播到热带地区的波列在那里发生路径转向和透射的现象。指出对流层低层向上传播的有效位能可能对维持高空定常波有一定作用。同时讨论了大气中的三维遥相关特征。

一、引 言

近年来，对大气中行星波传播特征的研究无论在理论上还是在观测事实上都有重大进展。Hoskins 等^[1], Grose 和 Hoskins^[2], Hoskins 和 Karoly^[3], Karoly 和 Hoskins^[4], Karoly^[5] 等逐渐建立和发展起来的“射线路径跟踪”理论研究了准定常行星波的球面传播。Bland^[6]、Tung^[7] 等从理论上探讨了波动在临界风速线附近的吸收和反射现象。Webster 和 Holton^[8]的工作表明中纬度强迫的波动在赤道西风区可以传播到另一半球。Branster^[9]用数值试验方法研究了上述两个问题。

大气中的观测事实部分地证实了上述一系列理论成果。Wallace 和 Gutzler^[10]的五种遥相关型，Dole^[11]的三个主要持续异常的形式，均表现为球面上行星尺度的波列。Murakami 和 Unninayer^[8]的计算表明扰动动能大值区与平均赤道西风区相重合。但是，正如 Held^[12,13]所指出的，我们还没有能够显示在对流层中有反射存在的观测研究，强烈的反射临界层的现实性对定常波理论来说仍是一个主要的根本的问题。如图 1 为他预言的青藏高原激发的 Rossby 波列传播到热带的示意图，象这样类似于反射的波型是否存在仍不清楚。

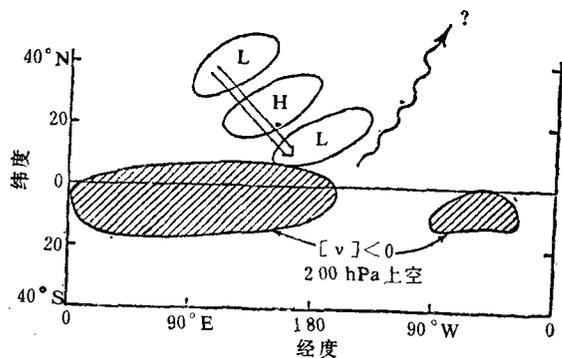


图 1 青藏高原激发的 Rossby 波列传播到热带地区的示意图 (Held, 1983)^[12]

* 本文于 1988 年 9 月 6 日收到，1989 年 3 月 3 日收到修改稿。

** 叶谦同志提供资料解码程序。

行星波在垂直方向传播的研究也很多。Matsuno^[14], Karoly 和 Hoskins^[4] 用折射指数法; Andrews 和 McIntyre^[15]、Edmon 等^[16] 用 E-P 通量法研究了波动能量从对流层向平流层的传播。Plumb^[17] 研究指出, 定常波的产生并不与纯地形强迫一致, 更重要的过程可能是非绝热加热。这里我们将说明, 对流层低层的有效位能会向上传播而维持高空的定常波, 同时从三维角度讨论了这种维持作用对大气环流变化的影响。

二、资料与方法

根据 Plumb^[17], 在对数压力坐标下, 球面上准地转近似的定常波活动通量可以写为:

$$\mathbf{F}_s = p \cos \phi \begin{bmatrix} v^{*2} - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\phi} \frac{\partial(v^* \Phi^*)}{\partial \lambda} \\ -u^* v^* + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\phi} \frac{\partial(u^* \Phi^*)}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \phi}{S} \left(v^* T^* - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\phi} \frac{\partial(T^* \Phi^*)}{\partial \lambda} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里 $S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial Z} + \frac{k \hat{T}}{H}$ 为静力稳定度; “ \wedge ”表示 20°N 以北的面积平均; () * 表示与时间和纬向平均的偏差。 a 和 Ω 为地球半径和地球自转角速度。 (λ, ϕ) 为经度和纬度, $Z = -H \ln p$, $p = P/P_0$, P 为气压, 而 H 为一常数高度尺度, 其它为气象上常用的符号。

\mathbf{F}_s 能很好地表示定常波的三维传播特征, 其方向与波动能量传播方向一致。对定常波有:

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_s = C_s \quad (2)$$

而

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{C}_s A_s \quad (3)$$

其中 $A_s = A + pE/\bar{U}$, $A = \frac{1}{2} p q^* \frac{\partial Q}{\partial y}$, $E = \frac{1}{2} \left(u^{*2} + v^{*2} + \frac{R p^* Q^{*2}}{H \partial \Theta / \partial z} \right)$, q^* 为定常波的位势涡度, $\frac{\partial Q}{\partial y}$ 为纬向平均位势的经向梯度, Θ 为一标准位温分布, C_s 为源项。

所用资料为 ECMWF 1981 年 12 月—1982 年 5 月 15 天平均的全球 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格资料。分别计算了每个 15 天平均的 \mathbf{F}_s 场及能量场和季节平均的冬季和春季各场。

三、大气中行星波的水平传播特征

从计算的 1981 年冬至 1982 年春 12 个 15 天平均定常波 EP 通量场可以发现两种新的明显的行星波遥相关型。如图 2, 第一个就是自中纬度西大西洋的波动动能源地发出一支向东南方向传播的波列, 跨越大西洋而到达热带非洲东部或印度洋西岸的大约 (10°N , $20-60^\circ \text{E}$) 的地方发生路径转向, 转向后波动向东北方向的东亚地区传播; 或者源自中纬度西大西洋的波列传播到赤道大西洋中东部, 这形成了中低纬度相互作用的一个通道。第二个就是源自中纬度西太平洋的波列向东南方向传播, 到达 (10°N , 180°E) 左

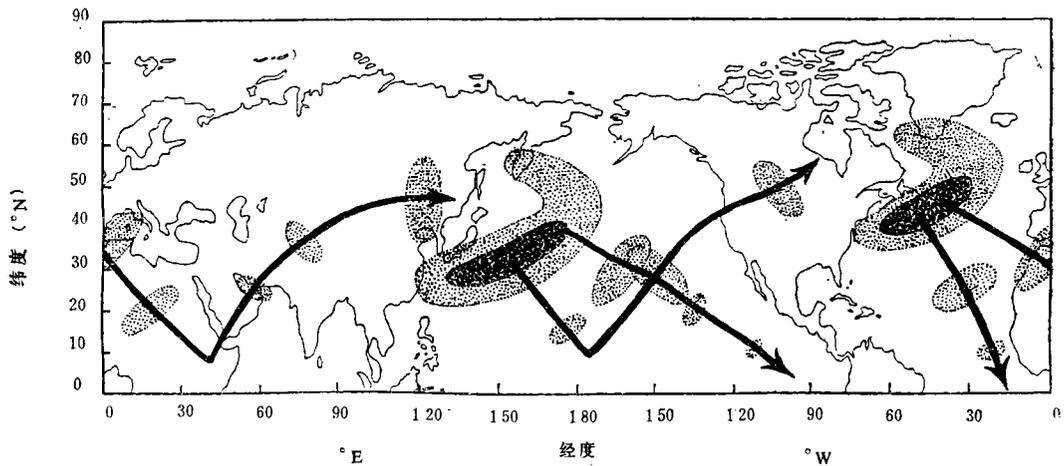


图 2 北半球 500 hPa 定常波波动动能传播路径集合示意图
(重阴影区为定常波动能源地, 轻阴影区为从源地传播出来的动能)

右的热带太平洋地区发生路径转向, 转向后波列向北美方向传播; 源自中纬度西太平洋的波列向东南方向也可传播到赤道东太平洋地区, 甚至可穿越赤道而到达另一半球。第一种波型比第二种波型发生的次数多而且明显。这种遥相关现象多发生在冬季, 4—5 月份几乎没有此现象发生。

图 3 a 为 1982 年 1 月下半月 500 hPa 位势高度场, 矢量为 F 。通量, 这是上述遥相关型的一个较为典型的例子。可以看出, 从北美东岸大槽分裂出来的南支波动, 槽脊线为东北西南走向, 因而代表 $l < 0$ (l 代表经向波数) 的向东南方向传播能量的波列, 但当其传播到非洲热带地区的东部大约 (10°N , $20^{\circ}\text{—}40^{\circ}\text{E}$) 的地方时, 槽脊线的方向便转而成为西北东南向, 能量也开始向东北方向传播。同样的现象也发生在从东亚大槽传出的南支波列上。这就是在环流场上看到的上述遥相关型, 这种波型与图 1 很相似。从能量场 (图 3 b) 与 F 的辐散场 (图 3 c) 能更清楚地看出这种波型的存在。我们认为源自中纬度大西洋和太平洋西部的波列分别在热带非洲东部和热带太平洋中东部的传播路径转向现象可能是波反射的表现, 因为首先这些波型很象波列在热带发生反射的波型; 再者, 在波转向点处也满足波发生反射的条件之一, 即 $\bar{U}^{-1} \frac{\partial Q}{\partial y} < 0^{[9]}$ 。到底是反射还是由其他因素引起的波列突然转向还需进一步研究。

自中纬度向赤道方向传播的波列可达热带和赤道地区, 甚至可以穿过赤道传播到另一半球, 这对中低纬度及南北半球相互作用问题的研究是很重要的。我们的计算表明有两个地区似乎是波动能量向赤道地区或南半球传播的潜在通道。它们分别是热带或赤道太平洋东部和赤道大西洋中东部。由图 4 a 可以清楚地看到能量从中纬度源地向此两地区的连续传播序列。为了更进一步说明上述传播通道, 我们选了两个波动在赤道中东太平洋上穿越赤道传播到另一半球的例子。如图 4 b, 4 c, 从这两张图上可以清晰地看出源自中纬度西太平洋上的行星尺度的波列可以穿过赤道而到达南半球; 源自南半球澳大利亚以东地区的波动也可以在赤道中东太平洋上穿过赤道到达北半球。象这样的例子在大西洋上也可以发现, 只不过强度弱得多, 且发生频率也小。

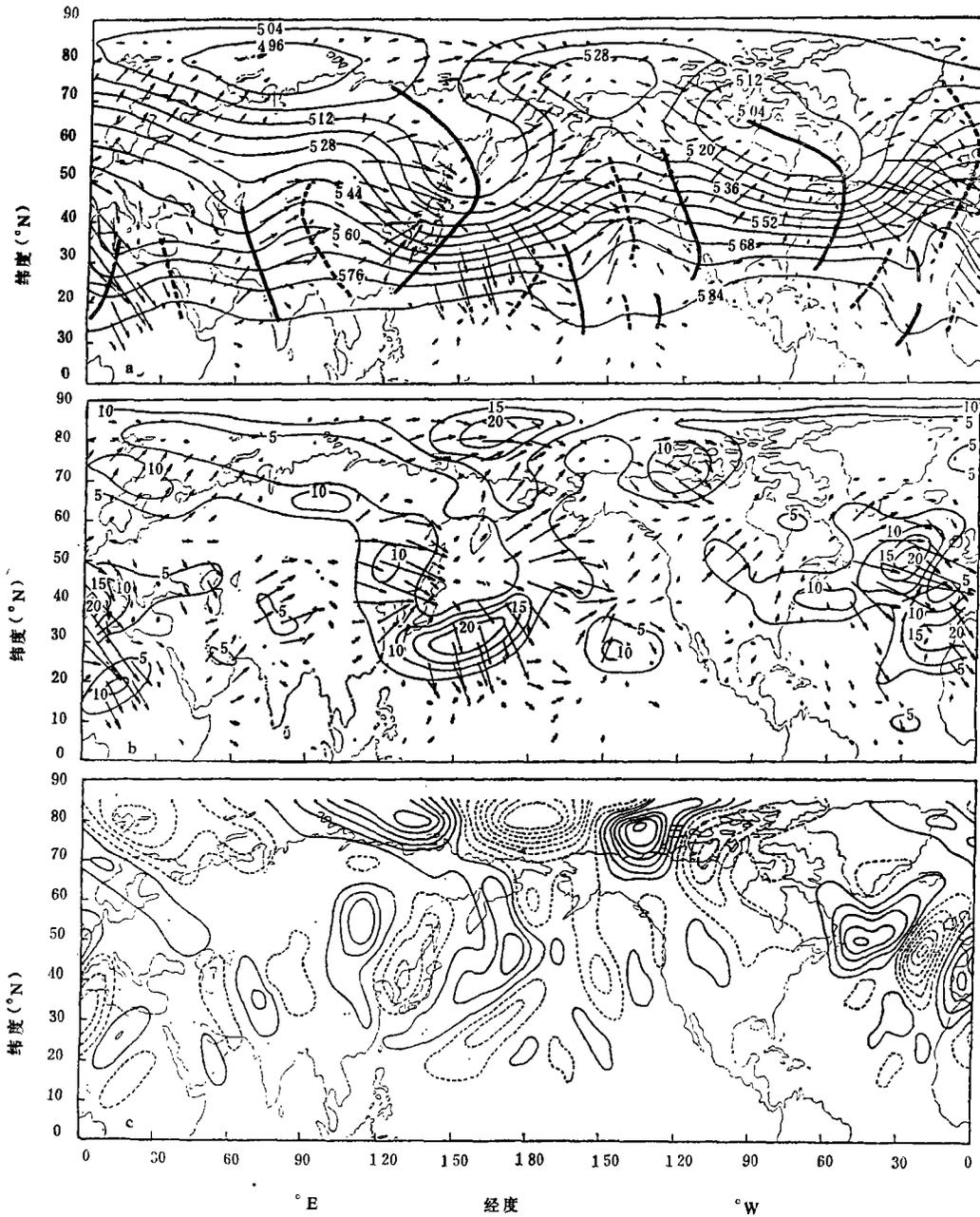


图3 北半球500 hPa 1982年1月16-31日期间的 F 场, $|F|$ 的最大值在 $(50^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{W})$ 为 $247.6 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$; (a) 位势高度场, 单位: gpm; (b) 波动动能场, 单位: $\times 10 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$; (c) $\nabla \cdot F$ 场, 正、负值分别用实线和虚线表示, 零线没画

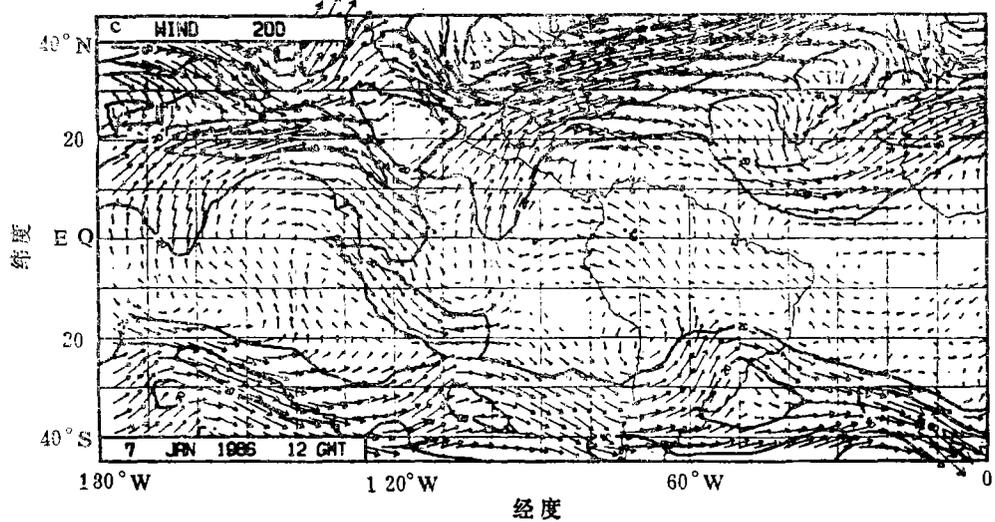
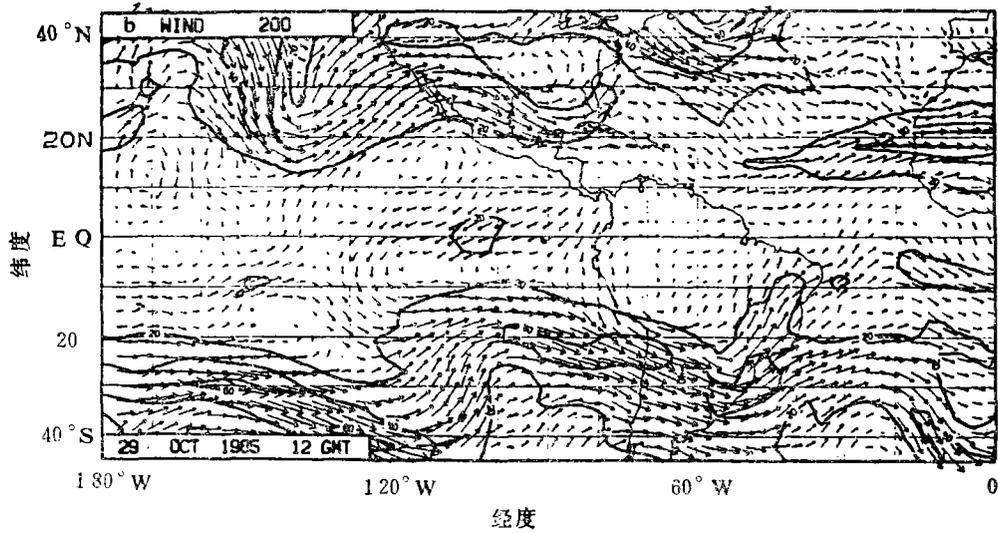
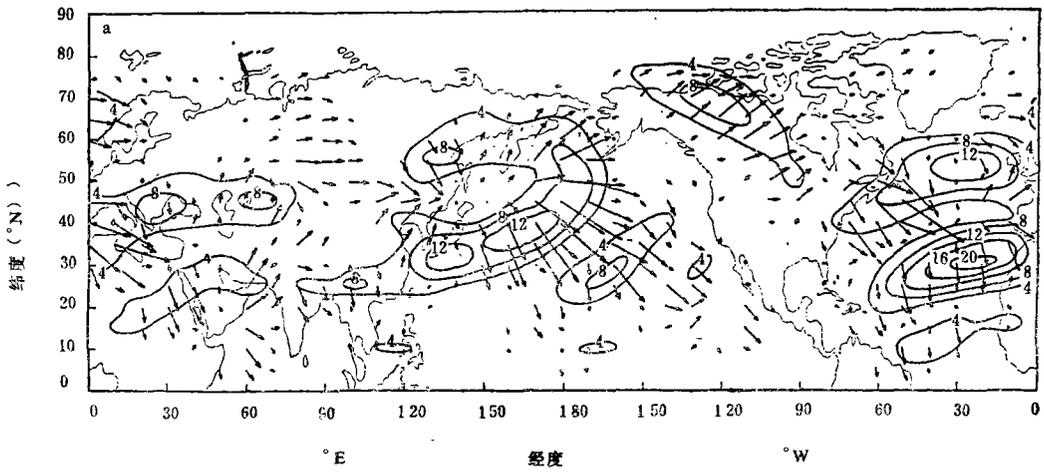


图 4 (a) 北半球 500 hPa 1982 年 3 月 1—15 日期间的 F_1 和波动能量场, $|F_1|$ 最大值在 $(45^\circ\text{N}, 50^\circ\text{W})$ 处为 $126.9\text{m}^2\text{s}^{-2}$, 能量单位: $\times 10\text{m}^2\text{s}^{-2}$; (b) (c) 分别为 1985 年 10 月 29 日和 1986 年 1 月 7 日的 200 hPa 风场, 等值线为等风速线

季节平均的波列一般与半月平均的波列类型相差不大，但强度大为减弱。这说明这些波型在季节时间尺度上也仍是大气环流的重要组成部分。

四、行星波的垂直传播特征

1981年冬季的定常波特征非常类似于多年平均的定常波特征。图5为1981年冬季

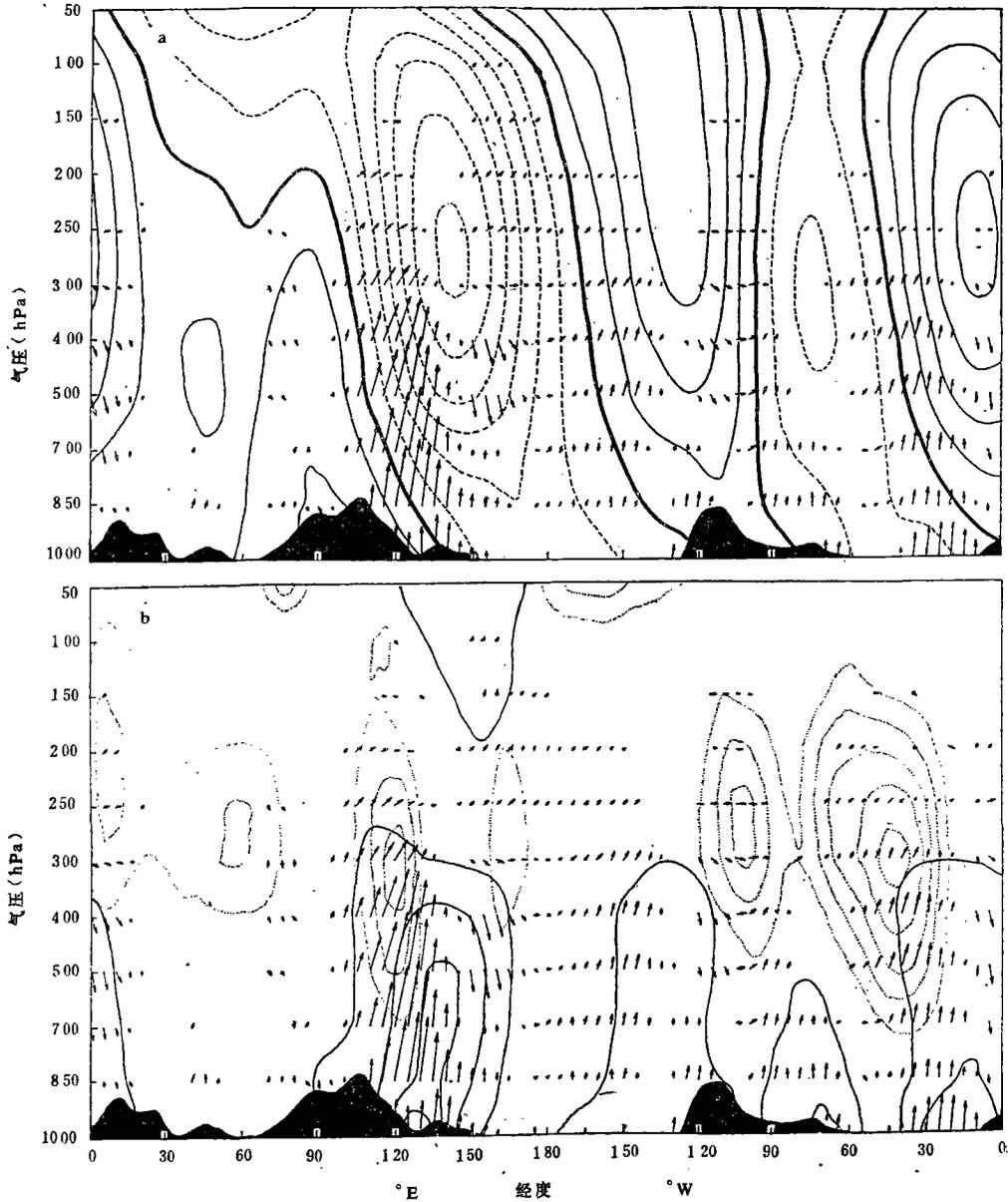


图5 1981年冬季沿 45°N F_1 的纬向-高度剖面图；(a)定常波位势高度场，等值线间隔为50 gpm，零线为粗线；(b)有效位能(实线)和波动能(虚线)，黑影表示沿 45°N 的地形

沿 45°N 的定常波位势高度场、有效位能和波动动能与 F_0 通量的配合图。如图 5 b, 有效位能的两个主要大值区分别位于东亚 130°E 和大西洋上 20°W 的地方, 前者比后者为强。有效位能特别集中在 700 hPa 以下的低层, 从那里有效位能向高空波动动能的大值区传播能量, 以维持那里经常存在的东亚大槽和北美槽。在图 5 a 中表现为能量向高度梯度极大的地方传播。这说明东亚大槽和北美槽并不是主要由地形强迫而形成的。非绝热加热对维持这些定常波场可能是非常重要的。但这并不是说大地形就不重要, 很可能这种温度场本身的形成就受到了地形强迫环流的影响。在 60°N 垂直剖面图上(图略)还可以看到从低层向上传播的能量可达平流层内阿留申高压的波动动能大值区, 这说明低层加热场对平流层定常波系统也起了作用。

五、结 语

通过分析定常波的 EP 通量场、环流场及能量场的特征, 发现了两个相似于在热带地区发生反射的新的定常波遥相关型, 这两个波型说明了东亚和北美大槽在全球大气环流中的作用, 指出了东亚和北美上空大气环流相互影响和制约的机制; 同时发现了中低纬度和南北半球间行星波列传播的两个潜在通道, 即赤道太平洋东部和赤道大西洋中部地区。

从三维行星波传播的角度分析, 对流层低层有效位能对高空定常波的维持作用在全球大气环流变化中将扮演重要的角色。低层加热场变化会通过有效位能的上传而使得高空定常波变化, 从而通过行星尺度的遥相关波列而影响到全球其它地区的大气环流。这说明局地的加热场变化很可能是全球环流异常的触发因子, 同时也说明大气中行星波三维遥相关的重要性。

参 考 文 献

- [1] Hoskins, B. J., A. J. Simmons and D. G. Andrews, Energy dispersion in a barotropic atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **103**, 553—576, 1977.
- [2] Grose, W. L., and B. J. Hoskins, On the influence of orography on large-scale atmospheric flow, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 223—234, 1979.
- [3] Hoskins, B. J., and D. J. Karoly, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179—1196, 1981.
- [4] Karoly, D. J., and B. J. Hoskins, Three dimensional propagation of planetary waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 109, 109—122, 1982.
- [5] Karoly, D. J., Rossby wave propagation in a barotropic atmosphere, *Dyn. Atmos. Ocean*, **7**, 111—125, 1983.
- [6] Bland, M., Numerical study of the nonlinear Rossby wave critical level development in a barotropic zonal flow, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2065—2078, 1976.
- [7] Tung, K. K., A theory of stationary long waves, Part III: Quasi-normal modes in a singular waveguide, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 751—774, 1979.
- [8] Webster, P. J., and J. R. Holton, Cross equatorial response to middle latitude forcing in a zonally varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 722—733, 1982.
- [9] Branster, G., Horizontal energy propagation in a barotropic atmosphere with meridional and zonal structure, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1689—1708, 1983.
- [10] Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 785—812, 1981.

- [11] Dole, R. M., Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation, Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere, 1983, B. J. Hoskins and R. P. Pearce, Eds., Academic Press, 1983.
- [12] Held, I. M., Stationary and quasi-stationary eddies in the extratropical troposphere: theory, large-scale dynamical processes in the atmosphere, 1983, B. J. Hoskins and R. P. Pearce, Eds., Academic Press, 1983.
- [13] Held, I. M., and B. J. Hoskins. Large-scale eddies and the general circulation, Advances in Geophysics, 28, 1985, Issues in Atmospheric and Oceanic Modelling, Part A: Climate Dynamics, Edited by B. Saltzman, Academic Press, 1985.
- [14] Matsuno, T., Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871—883, 1970.
- [15] Andrews, D. G., and M. E. McIntyre. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2031—2048, 1976.
- [16] Edmon, H. J., B. J. Hoskins and M. E. McIntyre, Eliassen-Palm cross-sections for the troposphere, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2600—2616, 1976.
- [17] Plumb, R. A., On the three dimensional propagation of stationary waves, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217—229, 1985.

PROPAGATION OF PLANETARY WAVES IN THE ATMOSPHERE DURING THE WINTER OF 1981—1982

Geng Quanzhen

(*Department of Geophysics, Peking University*)

Abstract

To investigate three-dimensional propagations of planetary waves in the atmosphere, 15-day averaged ECMWF Climate Data was used to calculate three-dimensional F-Flux and distributions of kinetic energy and available potential energy. Some new teleconnection patterns of the planetary wave propagations were discovered, especially the route turnings and transmissions of equatorward propagating Rossby waves in the tropics. It is pointed out that upward propagations of available potential energy from the lower troposphere seem to make some contributions to the maintainences of the upper troposphere and stratosphere stationary waves. Meanwhile, three-dimensional teleconnection patterns in the atmosphere were discussed.