

强迫二维Rossby波传播特征的数值试验*

徐祥德

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

何金海 赵天良** 朱乾根

(南京气象学院, 210044)

Bjerknes^[1]提出了大气对外界强迫响应的概念。大量研究已证明这一遥响应机制的存在, 且大气对强迫源的遥响应及其低频活动的共同特征都表现为类似大圆路径的波列, Hoskins 的理论研究揭示了这现象的实质^[2], 他把叶笃正所提出的 Rossby 波的频散理论推广到球面上^[3]。黄荣辉曾利用波折射指数平方与 EP 通量系统地研究了北半球冬夏准定常行星波的传播规律^[4]。邹晓蕾、叶笃正、吴国雄^[5]提出了中高纬的相关链、定常地形波链, 并指出北美与东亚相关型的差异与两区域地形准定常波在不同纬向流中传播的差异有关。观测分析亦表明, 青藏高原是大气低频振荡的强迫源, 且在此区域可产生向北、向南或向东、向西传播的波列^[6]。

文献[7]指出, 大地形强迫激发的波射线可呈抛物线型(大圆路径), 且此波列路径特征与大地形结构、纬向风、纬度、波数等因素有密切的相关关系。另外, 若考虑纬向西风廓线特征, 波射线轨迹可呈正弦波路径^[7]。本文采用 OSU-AGCM 简化模式, 研究二维 Rossby 波波射线特征的影响因子, 即大地形结构与西风基流因素, 海陆热力强迫的影响效应。

1 数值试验方案

本文采用 OSU-AGCM 模式动力框架^[8], 且在模式结构中加入牛顿强迫项, 其中牛顿加热项平衡, 温度分别取如下方案:

- (A) 反映行星锋区特征的纬向平均温度场, 即近似全年平均经向温度廓线分布。
- (B) 7月实际资料多年月平均温度场^[9]。
- (C) 7月实际资料多年月平均纬向均匀的经向温度廓线分布。

上述方案中(A)、(C)平衡温度反映了太阳辐射因素引起的大气纬向均匀分布的斜压特征; 方案(B)不仅包括太阳辐射因素构成的热力结构, 而且反映了海陆热力强迫的纬向差异的影响。

对于大地形结构的选取, 本文采用两种方案:

- (1) 类似青藏高原的理想椭圆型地形高度分布, 取理想地形函数为

$$H(x, y) = h_{max} \sin\left(\frac{x-x_0}{x_1-x_0}\pi\right) \sin\left(\frac{y-y_0}{y_1-y_0}\pi\right) \\ (x_0 < x < x_1; y_0 < y < y_1)$$

其中 h_{max} 为大地形顶点高度; x_0, x_1 分别为椭圆长轴两 endpoint 坐标; y_0, y_1 为短轴两 endpoint 坐标。

- (2) 南北半球实际大地形结构, 如图 1 所示, 即青藏高原, 落基山以及安第斯山等。

* 1990年7月24日收到原稿, 1991年5月10日收到最后修改稿。

** 赵天良 现在贵州省气象台。

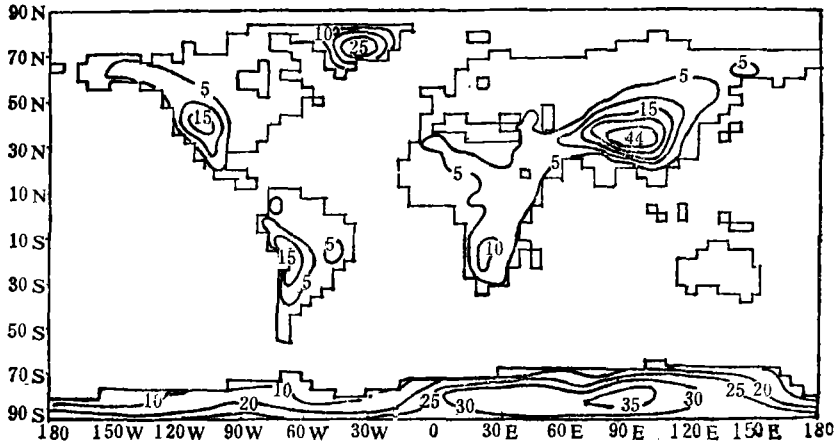


图1 OSU-AGCM $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 网格大陆轮廓线和地面高度(10^4m)

2 数值试验结果

2.1 大地形扰源激发的波列路径

落基山和青藏高原对准定常行星波的形成起十分重要的影响作用,因此大气环流槽脊系统、各遥相关型必然与大地形强迫存在一定联系。

本文首先考察理想地形函数结构,且取牛顿加热项平衡温度(A)方案,模式积分5天,模拟流场(400hPa, 800hPa)由大地形扰源出发呈一向高纬、偏东方向移动的扰动波列;模式积分10天后地形扰源东侧的扰动波列表现为一先向高纬又折向东南方向的抛物线波射线,这与东亚急流位于副热带相关,即那里存在波链的“截陷区”,对于高波数的波列在该处将被“截陷”或“反射”,只能折向低纬传播,如图2所示。

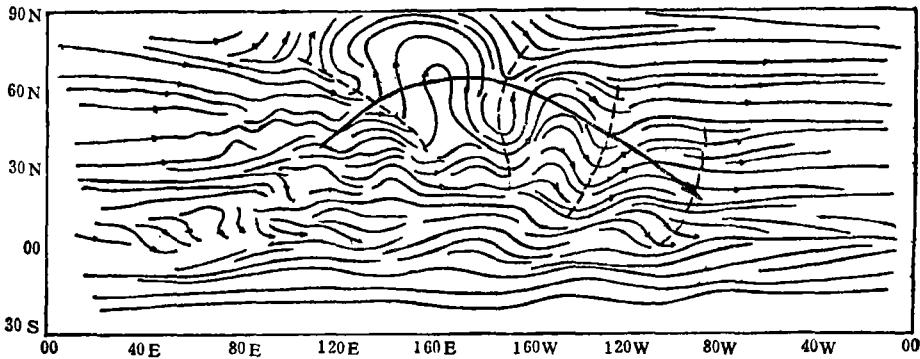


图2 试验(A)模式积分10天模拟流场(地形椭圆中心为 30°N , 90°E , $h_{\dots}=4000\text{m}$)

由图3可发现,纬向基流与地形扰源的共同作用下,波列扰动特征在垂直运动场与流场中表现了尺度范围、传播方向两方面的显著差异,即垂直运动扰动经向尺度小,纬向尺度大,且由地形扰源出发呈向南传播的经向波列。

实际上南北半球大地形结构分布复杂,青藏高原、落基山、安第斯山地理位置差异很大,且与平

均纬向风急流配置各异，例如北美急流位于较高纬度，而东亚急流强而位置偏南。为进一步认识地形

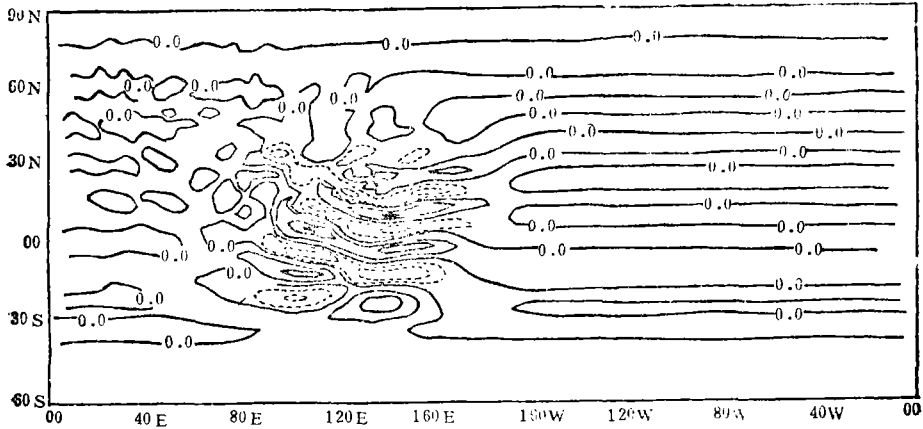


图3 试验(A)地形椭圆中心位于 30°N , 90°E ($h_{\max}=2000\text{m}$)
模式积分5天的垂直速度模拟图($10^{-7}\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{hPa}$)

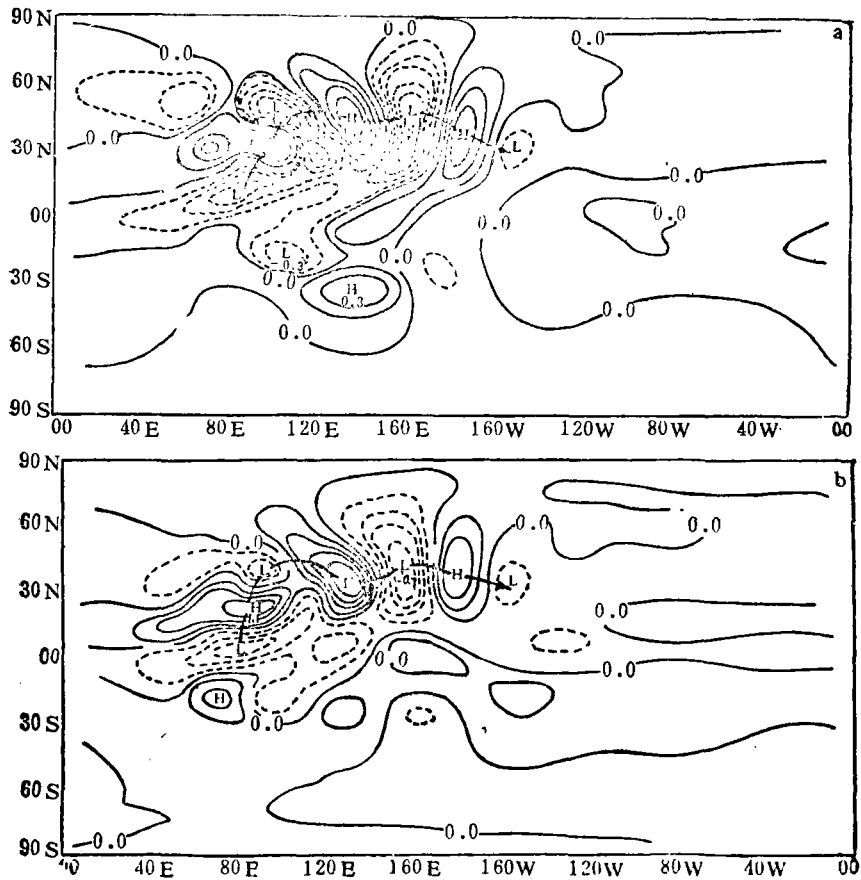


图4 试验(A)模式积分5天, 模拟涡度偏差场($\zeta_1 - \zeta_0$) (10^{-5}s^{-1})
(a) 800hPa $h_{\max}=4000\text{m}$ 地形椭圆中心为 30°N , 90°E , b) 800hPa $h_{\max}=4000\text{m}$ 地形椭圆中心为 20°N , 90°E , ζ_1 , ζ_0 分别为有、无椭圆地形条件下逐日模拟涡度场)

和纬向风因素对二维 Rossby 波传播路径的影响机制, 在同样平均纬向风条件下将椭圆形地形扰源中心分别移至 30°N , 20°N 进行数值模拟。这样的试验方案类似于 Frenzen (1955)^[10] 所讨论的问题: 一个圆型障碍物放在转动的半球形壳体中, 流型振幅与障碍物所在纬度有关。

图 4 a, b 为有、无地形扰源两者之差的涡度分量, 这里可称为地形强迫效应的偏差场, 图 4 清晰地描述了地形扰源激发的“波列”状特征, 且处于不同纬度的扰源均可构成“抛物型”波射线的波列路径。对比图 4 a, b 也可发现, 处于低纬的扰源激发的波射线从扰源至转向点距离大于处于较高纬的扰源, 这反映了 β 因子对波射线的影响。

2.2 地形强迫波列的“大圆路径”图象

很多有关 Rossby 波在球面上频散的理论解释了大气遥相关型现象及其特征。这些遥相关型波列类似于抛物射线, 即为沿着一大圆路径的轨迹, 它往往发源于热带地区而后向东转向且与某纬圈相切, 又折向低纬地区。这些波列表现出大气环流对持续性的外强迫(地形或热源)的响应特征。本文考虑中心放置在 20°N , 90°E 椭圆地形扰源所引起环流型变异的问题, 且将“有地形”扰源与“无地形”扰源模拟涡度场之差作为“地形强迫”的涡度分量(图 5)。

很多研究工作表明, 从某强迫源离开的波列路径, 可分为二支波列传播, 一支向东北朝中纬而另一支朝赤道传播。对于向低纬传播的波列而言, 存在着是否能跨越赤道影响到另一半球的问题。观测事实已揭示了这样的现象, 沿着赤道并非恒为东风, 相反存在着明显具有西风分量的区域, 且此特点全年均存在。因此在一定环流背景下, 低纬某些区域可能成为跨赤道波列的传播通道, 从而构成了两半球能量交换及其波动的传播。图 5 表明, 模拟偏差场上已出现了“地形强迫”的涡度分量波列, 即扰源东侧与南侧出现二支分别向东、向南传播的波列。

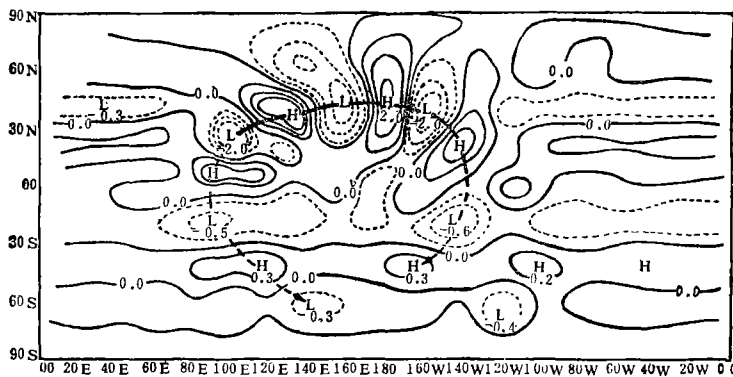


图 5 试验(A)椭圆地形(中心位于 20°N , 90°E , $h_{\max}=4000\text{m}$)涡度偏差场($\zeta_1 - \zeta_0$)(10^{-6}s^{-1})
(模式积分 14 天)

Rossby 波具有频散特性, 它可将局地能量向其它区域频散, 通过行星尺度遥相关波列影响全球环流状况。因此, 局地扰源变化可以造成全球其它地区的环流异常, 形成了两半球之间大气环流的相互影响, 即某局地扰源激发的经向传播的波列路径与行星尺度遥相关型特征有密切的联系, 可以说, 认识这类扰源强迫引起的波射线特征, 将有助于对于大气环流异常及其遥相关现象机制的研究。图 5 表明, 模式积分 14 天后, 从地形强迫扰源出发, 出现向南、向东北的两支波列, 北支波列在高纬向东转向, 然后折向低纬移动(图 5 实线波射线); 南支波列越过赤道, 以弧型路径进入南半球(图 5 虚线波射线)。很有趣的是若将上述两支波列路径(实弧线与虚弧线)“拼接”起来, 可以看到一跨赤道的“大圆路径”图象。上述数值试验结果表明, 地形强迫形成的波射线路径无论向南, 向东北的两支波列均可遵循着大圆路径的基本规律。

2.3 正弦波列路径的影响因素

有关文献^[1]指出，从计算的平均定常波 EP 通量场可以发现两种新的明显的行星波遥相关型，其中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大约(10°N, 20—60°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。若将上述源自中纬度西大西洋与西太平洋两支波列(指在低纬转向东北，且未跨越赤道的波列)视为正弦或余弦波型的某“半波”部分，则可认为两类行星波遥相关波列呈周期性正弦型波列路径。

本文模式采用南北半球实际地形(包括青藏高原、落基山、安第斯山等)，牛顿加热项中平衡温度选取多年7月纬向平均温度场((C)方案)。图6可发现，模式积分40天，在实际西风廓线条件和实际地形影响下，平均模拟涡度场出现一类似“正弦波型”的波列路径。这类波列轨迹似乎是 Hoskins 提出“大圆路径”特征的“形变”结构。模拟结果也与文献[11]有关的平均定常波 EP 通量场的两种新的行星波遥相关特征相吻合。

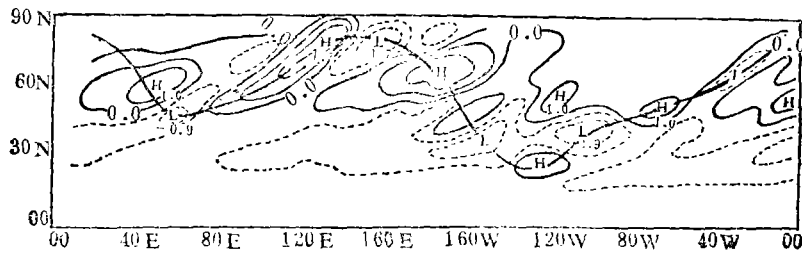


图6 试验(C)积分第21—40天平均涡度场(10⁻⁵s⁻¹)

上述“正弦波型”波列揭示了大气准定常波列路径高、低纬“反射”的现象，即实际地形扰源所激发的波射线可在高纬转向点 y_{max} 上被“反射”，又在低纬东风带重被“截陷”或“反射”。因此，形成了“正弦波型”路径。此波列路径特征也反映了纬向风分布特点及其地形强迫的共同影响效应。

动力学分析表明波射线路径“正弦波型”特征形成与西风廓线分布、 β 因素有关^[7]。

除了地形强迫效应外，纬向非均匀的海陆热力强迫也是激发大气环流经向波列的关键因素。为了突出纬向非均匀海陆热力强迫作用，本文采用模拟场分离方法，即

$$\zeta' = \bar{\zeta}_0 - \bar{\zeta} \tag{4}$$

其中 $\bar{\zeta}$ 为模式计算40天，选取21—40天模拟平均涡度场； $\bar{\zeta}_0$ 是(B)方案平衡温度条件所得模拟场； ζ' 为有、无纬向非均匀海陆热力强迫相减的涡度偏差场，且经滤波处理。

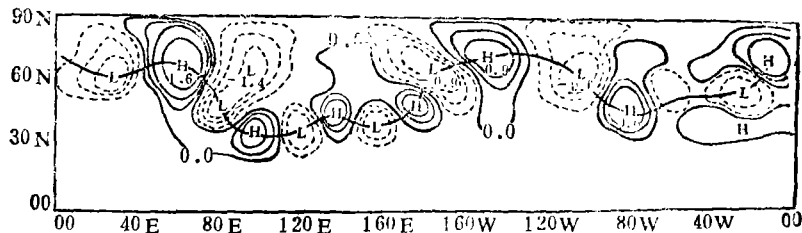


图7 试验(B)与(C)方案相减所得海陆热力强迫引起的涡度偏差场 ζ' (10⁻⁵s⁻¹)

图7表明，夏季海陆热力强迫亦可激发经向波列，其波射线路径也类似“正弦波型”，但海陆热力

强迫与实际大地形因素构成“正弦波型”振幅有所差异,相比之下,前者小于后者;另外,波射线在高、低纬临界线的“转向”、“反射”点有显著不同。

3 结 论

1) “地形强迫”涡度分量波列可向东北、向南传播;地形扰源激发的经向波列路径呈抛物型,且上述两支波列均遵循着“大圆路径”的基本规律。若在一定纬向风廓线背景下向南波列可跨过赤道进入南半球,向东北的波列分支亦可转向低纬传播与原向南波列“拼接”可构成一“大圆路径”图象。

2) 实际大地形与基流的共同影响下可形成正弦波型波列,这现象揭示了波射线在高、低纬临界风速线的“反射”、“转向”机制。

3) 海陆热力强迫引起涡度偏差分布亦呈“正弦波型”波列路径特征。

参 考 文 献

- [1] Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 1966, 18: 820—829.
- [2] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 1179—1196.
- [3] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 1—16.
- [4] 黄荣辉, 岸保助三郎. 关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究. *中国科学 B 辑*, 1983(10): 940—950.
- [5] 邹晓蕾, 叶笃正, 吴国雄. 北半球两大地形下游冬季环流的动力分析. *气象学报*, 1991, 49(2): 129—140.
- [6] 孙国武等. 青藏高原上空大气低频波的振荡及其经向传播. *大气科学*, 1988, 12: 250—256.
- [7] 徐祥德. 波射线变形及其影响因子的探讨. *气象学报*, 1991, 49(3): 288—299.
- [8] Ghan S J, Lingas J W, Schlesinger M E, Mobley R L, Gates W L. A documentation of the OSU two-level atmospheric general circulation model. Climatic research institute OSU., report No. 35, 1982.
- [9] Schultz C, Gates W L. Global climatic data for surface, 800mb, 400mb, July. A Report Prepared for Advanced Research Projects Agency, 11, 1971.
- [10] 洛伦茨 E N. [美] 大气环流的性质和理论. 北京大学地球物理系气象专业译. 科学出版社, 1976, 26—40.
- [11] 耿全震. 1981—1982年冬半年大气行星波传播特征. *气象学报*, 1991, 49(1): 3—10.

NUMERICAL EXPERIMENTS OF PROPAGATION CHARACTERS OF FORCED TWO DIMEN- SION ROSSBY WAVE

Xu Xiangde

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

He Jinhai Zhao Tianliang Zhu Qiagen

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

Factors (topograph structure, basic flow) affecting ray characters of two dimensional Rossby wave are examined in this paper by numerical experiments. The numerical experiment results show that; (1) under conditions of west basic flows and ideal topography of half ellipsoid, there is a wavetrain with a parabolic route in the east of the topography; (2) wavetrains of vertical motion disturbance may propagate southward; (3) under conditions of the real topography and westerlies, the wavetrain path shows a sine wave, and vorticity deviations forced by zonal sea-land thermal differences also show a sine wave pattern.