

旋转流体物理实验中见到的大气 环流特征*

李 国 庆

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

Robin Kung

(Geophysical Fluid Dynamics Institute, Florida State University, Tallahassee, Florida, 32306)

Richard L. Pfeffer

(Geophysical Fluid Dynamics Institute and Department of Meteorology,
Florida State University, Tallahassee, Florida, 32306)

提 要

在合适的实验参数下(热力 Rossby 数 $R_{OT}=0.1$, Taylor 数 $T_a=2.2\times 10^7$), 在旋转斜压流中, 大尺度地形强迫造成低频振荡以及大气环流中的“阻塞”流型。这是由于地形强迫造成的准静止波与行进波的相互作用及共振引起的。地形把波数单一的流动变成多波数的流动。地形强迫使波数减少。

关键词: 旋转流体实验, 地形影响, 大气环流特征。

1 引 言

Charney 和 Eliassen^[1] 以及 Bolin^[2] 指出, 由于大尺度地形在经度方向的不均匀分布, 使得在中纬度地区存在长期平均的波。Egger^[3] 及 Tung 与 Lindzen^[4] 认为, 地形强迫造成的准静止波与缓慢移动的自由波的相互作用, 导致在对流层生成阻塞高压。Charney 和 Devore^[5] 以及 Hart^[6] 指出, 在简单的正压模式中, 由于地形引起的不稳定性, 可能出现行星波振幅的多个平衡稳定状态。另一些工作表明, 在斜压模式中, 也可能出现多平衡稳定状态^[7,8]。其中, 一个稳定的平衡状态是较强的带状流, 另一个是在经圈方向扰动强的弱带状流。这些理论工作表明, 用 β 平面代替地球球面的准地转模式, 可以模拟大气环流的许多特征。这说明, 大气环流的基本性质, 并不完全决定于地球的球几何形状以及它所独具的其它参数, 而可能对于在纬度方向有加热差异的旋转流体有普遍意义。如果确实如此, 那么, 上述现象也应当在实验室的旋转流体中出现。最近, 我们做了一系列旋转流体物理实验, 研究大尺度地形对大气环流的影响^[9-11]。本文是这一实验研究的继续。

2 实验装置及方法

图 1 是实验装置示意图。圆槽的 B 区是运动学粘性系数为 $5\times 10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 的硅油, 作

* 1991 年 10 月 21 日收到原稿, 1992 年 2 月 9 日收到修改稿。

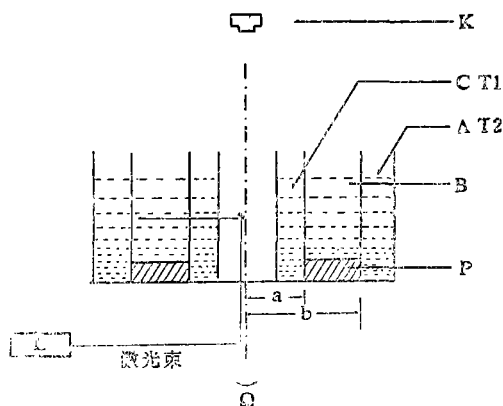


图 1 实验装置示意图
(A-温度为 T_2 的热水, C-温度为 T_1 的冷水, B-实验区, K-相机, L-激光源, P-地形, $a=7.5$ cm, $b=15.0$ cm)

为实验流体, 流体深 10 cm, 从地形的中部量起。使用 C 槽中的循环冷水及 A 槽中的循环热水, 维持 B 区内外壁间的恒定温差 $\Delta T = T_2 - T_1$ 。实验圆槽的内半径 $a = 7.5$ cm, 外半径 $b = 15$ cm。为了显示水平流场, 使用纹理摄影技术。用悬浮在流体中的白色塑料微粒作示踪物质, 用激光束照明。根据实验照片上粒子的运动轨迹长度和方向以及曝光时间长度, 可推算流体的运动速度。对实验照片作图数转置处理, 将实验照片上粒子的流速图象变为速度数值。计算流速的纬圈分量 u 及经圈分量 v , 使用 u 及 v 作傅里叶分析及主要成分分析, 研究流场特征。

使用正弦波状双峰地形, 其形状为

$$h = H \cos 2\lambda \quad (1)$$

式中, $h(\lambda)$ 是地形高度, $H = 1.75$ cm, λ 是实验槽的方位角, 从地形的一个脊量起, 反时针方向为正, $0 \leq \lambda \leq 2\pi$ 。

在先前的实验中, 实验槽底面在径向是水平的。“ β ”效应的产生, 依赖于旋转造成的流体自由面倾斜。用这种方式造成的 β 效应, 当实验台的转速小时很小, 当转速大时变大。在后来的实验中, 我们使用在纬度方向有 20° 底面倾斜的模型, 造成固定不变的 β 效应。这相当于数值模式中常用的 β 平面。用下式描述地形,

$$h = H \cos 2\lambda - (R - a) \tan \theta \quad (2)$$

式中 R 是从旋转轴至地形某点的距离, $b > R > a$, $\theta = 20^\circ$ 是底面的径向倾角。这时,

$$\beta = \frac{f}{D_0} \left(\left| \frac{\partial h_T}{\partial R} \right| + \left| \frac{\partial h_B}{\partial R} \right| \right) \quad (3)$$

式中 $\partial h_T / \partial R$ 为流体表面的坡度, 由转台旋转造成的离心力来确定, $\partial h_B / \partial R$ 为底面的径向坡度。 $D_0 = 10$ cm, 是流体的平均深度, $f = 2\Omega$ 是科氏参数, Ω 是转台的角速度。于是,

$$\beta = \frac{2\Omega^2 R}{g D_0} + \frac{2\Omega}{D_0} \tan 20^\circ \quad (4)$$

使用表 1 列出的实验特征参数, 对于不同的 Ω , 计算式 (4) 右端两项 $\beta_1 = 2\Omega^2 R / g D_0$ 及 $\beta_2 = 2\Omega \tan 20^\circ / D_0$ 的数值。由表 2 可见, β 主要决定于 β_2 , 即决定于模型的底面倾斜。用下式作无量纲计算,

$$\beta^* = \beta L^2 / v \quad (5)$$

式中 L 是水平特征长度, v 是运动的特征速度。对于实验, 取 $\beta = 0.1 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 对于地球大气, 取 $\beta' = 1.14 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 对于实验求得 $\beta^* = 1.25 \times 10^3$, 对于大气 $\beta_a^* = 0.95 \times 10^2$ 。这说明实验中的 β 大于其对应地球的数值。

表 1 与实验有关的特征参量值

地 球 大 气		实 验	
$R' = 6.37 \times 10^6 \text{m}$	地球的平均半径	$R = 1.12 \times 10^{-1} \text{m}$	流体距旋转轴的平均距离
$\Omega' = 7.29 \times 10^{-6} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	地球旋转的角速度	$\Omega = 0.31 - 3.14 \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	实验台的旋转角速度
$n' = 2$	静止波波数	$n = 2$	静止波波数
$L' = 2\pi R'/n'$ $= 2.0 \times 10^7 \text{m}$	特征长度	$L = 2\pi R/n$ $= 3.53 \times 10^{-1} \text{m}$	特征长度
$g = 9.81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	重力加速度	$g = 9.81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	重力加速度
$\nu' = 1.5 \times 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	大气涡动粘性系数	$\nu = 5 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	流体的运动学粘性系数
$H' = 1.2 \times 10^4 \text{m}$	大气对流层平均高度	$D_0 = 0.1 \text{m}$	流体平均深度

表 2 不同转速的 β 值及其分量

$\Omega \text{ s}^{-1}$	0.490	0.628	0.785	1.050	1.570	2.100	3.140
$\beta_1 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	0.027	0.114	0.222	0.531	1.780	4.520	14.20
$\beta_2 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	3.570	4.570	5.710	7.640	11.40	15.30	22.90
$\beta \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	3.600	4.680	5.930	8.170	13.20	19.60	37.10

以前的实验表明,在旋转速度及径向温差的适当组合下,流动遵循地转关系、与径向温度梯度的热成风关系,以及流体静力学关系^[12],

$$2 \Omega \mathbf{U} = \frac{\mathbf{k} \times \nabla p}{\rho_0} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial z} = \frac{\alpha g}{2 \Omega} \mathbf{k} \times \nabla T \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \quad (8)$$

式中 Ω 是实验槽的旋转速度, $\mathbf{k}$ 是沿 z 轴的单位矢量, $\mathbf{U}$ 是流体的地转速度, ∇p 是压力梯度, ∇T 是内外壁间的温度梯度, α 是流体的体膨胀系数, ρ_0 是流体的平均密度, 即可用描述大气的同一方程组对实验进行数学分析, 只是对于实验, 球坐标须代之以极柱坐标, 加热方程中的位温须代之以温度, 因为实验流体是不可压缩的, 绝热温度变化可略而不计。

在实验中, 流动的地转性决定于外加的热力 Rossby 数 R_{oT} 及 Taylor 数 T_a ,

$$\begin{cases} R_{oT} = \frac{\alpha g D_0 (T_b - T_a)}{2 \Omega^2 (b - a)^2} \\ T_a = \frac{4 \Omega^2 (b - a)^4}{\nu^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\alpha = 1.05 \times 10^{-3} (^\circ)^{-1}$ 是流体的体膨胀系数, $\nu = 5 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 是流体的运动学粘性系数。

3 受地形强迫斜压流的两种流态及低频振荡

大气环流是否有多种状态是一个重要问题。如果在大气环流中有多个状态, 那么长

时间的平均将不能代表大气状态。大气状态应由其每个状态存在期间的平均表示。

图 2 给出了在大地形强迫下流场变化的实验结果,图中绘出了流体的流线,图幅上方的数字指示流型出现的顺序。箭头指示实验槽底地形脊的位置。对比各幅流线图形,可将其分为两类。1—7 及 17—19 为第一类波型。其特征是沿纬圈方向有较强的带状流,在地形的谷区有很深的低压槽。10—16 为第二类波型,其特征是沿纬圈方向的带状流变弱,长波的波幅增大,在地形的谷区是很强的高压脊或“阻塞”型反气旋性涡旋。8 和 9 是过渡波型。

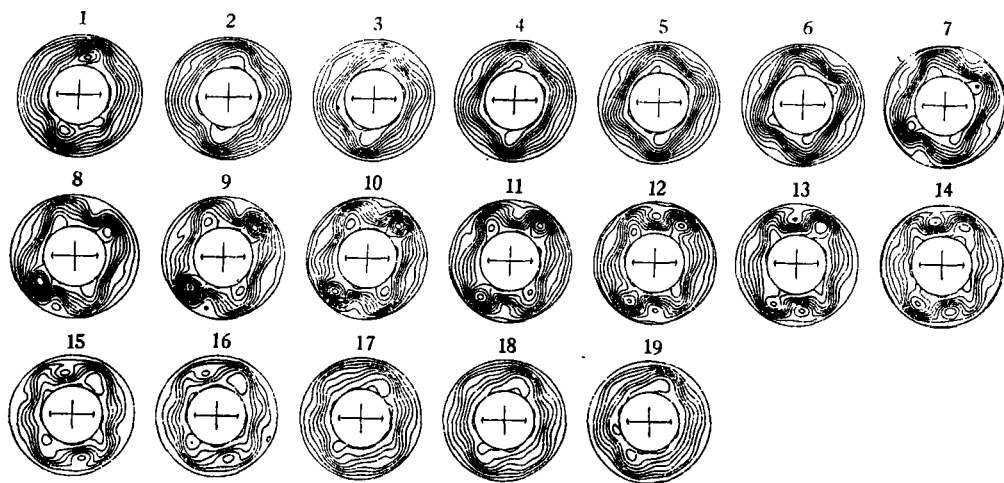


图 2 地形强迫实验的斜压波流线图

(数字表示图幅出现的顺序,流线的间距为 $0.05 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 箭头指示地形脊的位置,
 $\Omega = 2.09 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\Delta T = 2.0 \text{ K}$)

由图 2 可见,在图幅 12 中形成的“阻塞”涡旋,逐渐加强,在图幅 14 中达到成熟阶段,在 15 中减弱,在 17 中消失。“阻塞”涡旋持续了 33.4 转台旋转周期。后面将推证,这一时段大约相当于地球系统的 7 d。

实验证明,“阻塞”涡旋的产生,是地形强迫引起的。它总是在固定的地理位置发生发展。在实验参数相同、但是无地形强迫的实验中,从未观测到流动的这种振荡及“阻塞”现象。

现在,用尺度分析及实验流与大气环流相似的原理,进一步认识上述的实验事实。对于实验,根据表 1 列出的特征参数值,并根据测量,取 $u = 0.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 于是,特征时间为 $t^* = L/u = 3.53 \times 10^2 \text{ s}$ 。实验测得,从图幅 1 至图幅 19,流型演变的周期是 $t = 381 \text{ s}$ 。其无量纲值为 $\hat{t} = t/t^* = 1.08$, 对于地球大气,按表 1 取特征长度 $L' = 2.0 \times 10^7 \text{ m}$, 特征速度 $u' = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 特征时间 $t^{*'} = L'/u' = 2 \times 10^6 \text{ s}$ 。按大气环流与实验流相似考虑,实验流流型的振荡周期,相当于地球大气系统的 $t' = t^{*'} \times \hat{t} = 25 \text{ d}$ 。所以,实验流的振荡对应于地球大气环流的低频振荡。与此类似,实验流的“阻塞”涡旋维持 33.4 转台旋转周期 (100.2 s), 相当于地球系统的 6.6 d。

4 准静止波与行进波的相互作用

对实验结果作主要成分分析, 讨论地形强迫造成的准静止波与缓慢行进的自由波的相互作用。关于实验资料的主要成分分析方法, 文献[11]曾有论述。图 3 给出的曲线, 表示在给定实验槽的内外壁温差 ($\Delta T = 2.0 \text{ K}$), 在转台不同转速的实验系列中, 在实验槽的中间纬度上, 流动的三个主要成分的流函数的百分方差值分布。图 3 a 对应的是高度等于 8.4 cm 的高层流场, 图 3 b 对应的是高度等于 2.3 cm 的低层流场。数字表示流动的该主要成分的波数。由图可见, 当第一

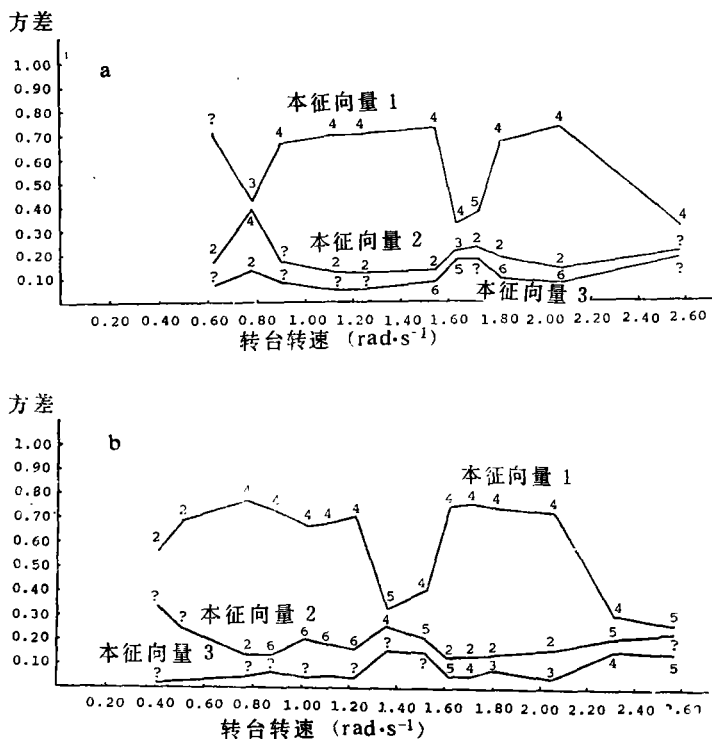


图 3 在地形强迫实验中, 在高度为 8.4 cm 的高层 (a) 及 2.3 cm 的低层 (b), 中间纬度的流函数方差百分值及波数 (数字表示波数, “?” 表示无规则波形。 $\Delta T = 2.0 \text{ K}$)

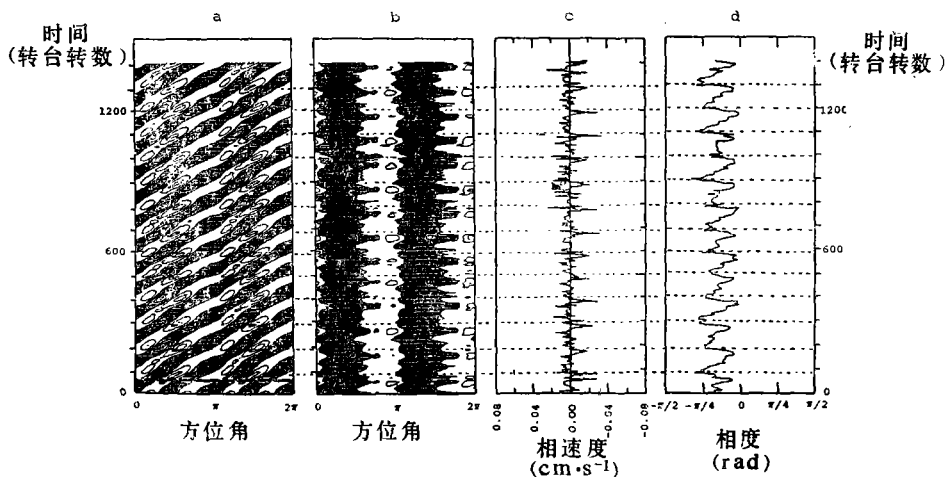


图 4 在实验槽的中间圆周 ($R = 11.25 \text{ cm}$)、中层 ($h = 5.0 \text{ cm}$) 流动的第一及第二主要成分随时间的变化 (a. 波流第一主要成分的流函数, 等值线间距 $0.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 阴影区为负; b. 第二主要成分 (准静止波 2 波) 的流函数, 阴影区为负; c. 准静止波的相速度; d. 准静止波的相位角; 实验条件: 有地形强迫, $\Delta T = 2.0 \text{ K}$, $\Omega = 2.09 \text{ s}^{-1}$)

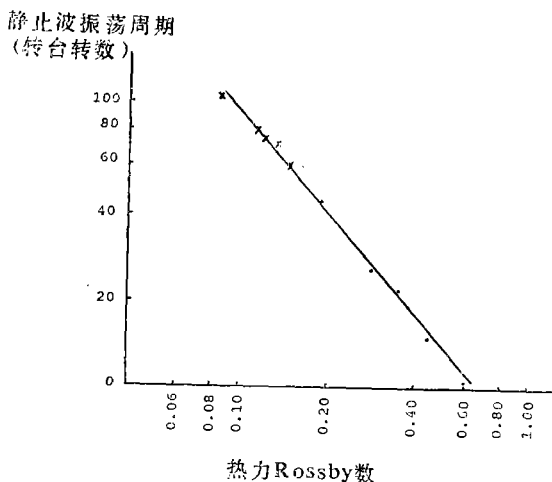


图 5 准静止波的振荡周期随热力 Rossby 数的变化
(×表示有“阻塞”出现的实验)

现在研究波流的第一及第二主要成分波形随时间的变化。图 4 a 及 4 b 给出在转槽的中间纬度($R=11.25$ cm)、中层($h=5$ cm)流函数随时间的变化。横坐标是实验槽的方位角,纵坐标是时间,用转台的转数表示。阴影区表示流函数的负值。虚直线指示在图 4 a 中流函数极大值出现的时刻。由图 4 a 及 4 b 可见,波流的第一主要成分为波数等于 4 的行进波,随时间向前移动,其流函数数值随时间振荡变化。同时,其第二主要成分波数等于 2 的准静止波,相对其平均位置($\lambda_1=3\pi/4$ 及 $\lambda_2=7\pi/4$)前后摆动。

图 4 c 及 4 d 给出准静止 2 波之一的相速度及相位角随时间的变化。由图可见,当行进波的流函数极大值(在图 4 a 中与虚直线对应的数值)出现以前,准静止波的相速出现负极大值(见图 4 c),静止波倒退至最“西”($\lambda=-\pi/4$)的位置(见图 4 d)。当行进波的流函数随时间减小时,准静止波的相位角逐渐增大(见图 4 a 及 4 d)。这显示了行进波与准静止波之间的共振变化。流动的“阻塞”正是在行进波与准静止波的共振作用下产生的。

图 5 给出准静止波的振荡周期与热力 Rossby 数之间的关系。由图可见,准静止波的振荡周期与热力 Rossby 数成反比。符号 × 表示有“阻塞”涡旋出现的实验。由图可见,阻塞仅在 $R_{OT}=10^{-1}$ 附近的狭窄区域发生。

5 大尺度地形强迫引起的流场波数变化

图 6 给出与图 3 的实验完全相同、但是无地形强迫的实验结果。图中两曲线分别表示中层($h=5.0$ cm)中间纬圈($R=11.25$ cm)流场第一及第二主要成分流函数的方差百分值变化。曲线上的数字表示流场的波数。由图可见,除 $\Omega=0.63$ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的一次实验外,其它实验的第一主要成分方差值都很大。当 $\Omega>1.0$ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, 第一主要成分的方差值大于 0.9。这意味着在无地形强迫的实验中,流动的波数组成是单一的,大部分是 6 波。流动是稳定的。

主要成分的方差值大时,流动的第一及第二主要成分是两个偶数波。相反,当第一主要成分方差值小时,第一及第二主要成分,一个是奇数波,另一个是偶数波。当波流的两个主要成分均为偶数波时,他们匹配协调,这些波是稳定的,因而流动的第一主要成分的流函数有较大的方差值。相反,当第一或第二主要成分中有一个奇数波,而另一个是偶数波,流动是不稳定的,第一主要成分的流函数方差值小。此外,由图 3 可见,在本实验中,准静止 2 波及缓慢行进的 4 波是匹配最谐调的波形(图 4 a 及 4 b 给出了这两个主要成分的波形)。

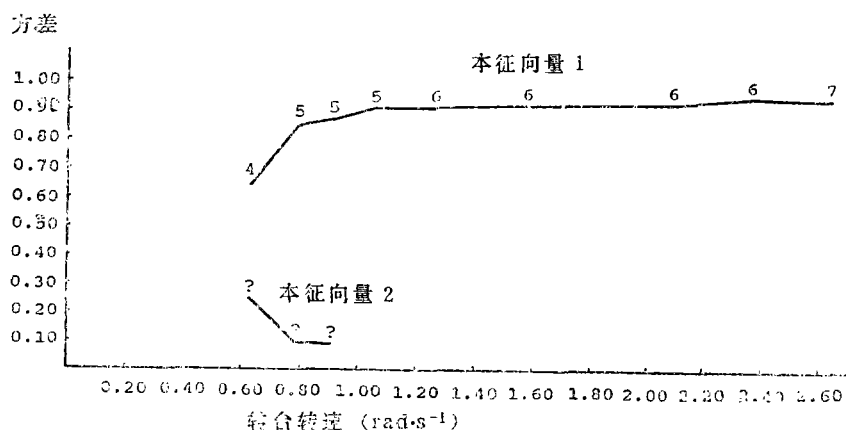


图 6 无地形强迫实验中间纬圈($R=11.25$ cm)中层($h=5.0$ cm)流场的第一及第二主要分量的流函数方差百分值及波数
(其它实验条件同图 3)

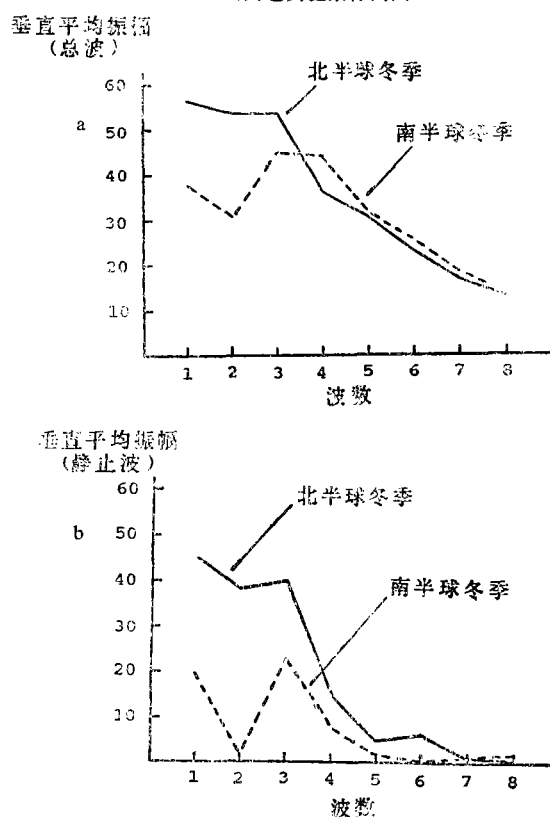


图 7 在南北两半球与经度方向的正弦波数对应的冬季垂直平均(1000—200 hPa)波分量的地球位势高度振幅
(a. 总波振幅, b. 静止波分量振幅)

比较图 3 及图 6 可见,大尺度地形强迫,使流场的第一主要成分方差值减小,第二及第三主要成分的方差值增大。同时流场第一主要成分的波数减小,变为波数为 4 的流动。大多数第二主要成分流是波数等于 2 的准静止波。与此不同,在无地形强迫的实验中,没

有静止波。可见,大尺度地形强迫使斜压波流的波数减少,低频波数成分增加。

此外,图 3 a 及 3 b 表明,由于大尺度地形强迫,在同一次实验中,在不同高度的流体层,流场的波数组成不同。

地形强迫引起斜压波波数变化的现象,也在地球的大气环流中存在。众所周知,在地球的南、北两半球,大尺度地形的数量及分布不同。地形对北半球大气环流的影响应更为显著。图 7 给出的曲线,表示对于各波数成分作垂直平均(1000—200 hPa)的地球位势振幅与经度方向正弦波波数的关系,显示冬季平均的行星波活动。图中的数据,取自文献[13]分析过的 ECMWF 1979 年 12 月 1 日至 1985 年 12 月 31 日的每日资料。波振幅是对于每个纬圈计算经度方向正弦及余弦分量平方和的平方根。图 7 a 给出冬季总的波活动。由图可见,在低波数区(波数 1, 2, 3),北半球的振幅远大于南半球。在较高的波数区(波数大于 4),南北两半球的振幅大致相同。图 7 b 表示冬季平均的静止波分量的振幅。由图可见,对于静止波,北半球的振幅大。特别是在波数较小的部分(1, 2, 3 波),两半球的差异显著。可能这些都说明,大尺度地形的强迫效应,在北半球比南半球大。

6 结 论

尽管有许多理想假定,实验室的旋转流体物理实验,可以模拟大气环流的许多重要特征。实验发现:

1. 未受地形强迫的斜压波流,状态是单一的、稳定的。受大尺度地形强迫的斜压波流有两种状态,一种是沿纬圈的强带状流,另一种是在经圈方向扰动较强的弱带状流。大尺度地形强迫引起流动的低频振荡,形成类似大气环流中的“阻塞”反气旋涡旋。

2. 地形强迫造成的准静止波与缓慢行进的自由波互相作用,导致“阻塞”涡旋的生成。但是,“阻塞”只发生在热力 Rossby 数 $R_{oT}=0.1$ 及 Taylor 数 $T_a=2.2 \times 10^7$ 附近的狭窄区域。

3. 未受地形强迫的斜压波流,其波数组成是单一的。大尺度地形强迫使流动变成多波数的。波的低频成分增加,高频成分减少。

致谢:本文蒙 René Arbogast 先生制图、G. Arnold 先生协助实验、C. Lewis 先生处理实验数据。本工作受美国 NSF ATM-8709410 及 ATM-8714674 课题支持,一并致谢。

参考文献

- [1] Charney J G, Eliassen A. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies. *Tellus*, 1949, 1:38—54.
- [2] Bolin B. On the influence of the earth's orography on the general character of the westerlies. *Tellus*, 1950, 2:184—195.
- [3] Egger J. Dynamics of blocking highs. *J Atmos Sci*, 1978, 35:1788—1801.
- [4] Tung K K, Lindzen R S. A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking. *Mon Wea Rev*, 1979, 107:714—734.
- [5] Charney J G, Devore J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J Atmos Sci*, 1979, 36:1205—1216.
- [6] Hart J E. Barotropic quasi-geostrophic flow over anisotropic mountains. *J Atmos Sci*, 1979, 36:1736—1746.
- [7] 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.
- [8] Reinhold B B, Pierrehumbert R T. Dynamics of weather regimes: Quasi-stationary waves and blocking. *Mon Wea Rev*, 1982, 110:1105—1145.
- [9] Li G Q, Kung R, Pfeffer R L. An experimental study of baroclinic flows with and without two-wave bottom topography. *J Atmos Sci*, 1986, 43:2585—2599.
- [10] Pfeffer R L, Kung R, Li G Q. Topographically-forced waves in a thermally driven rotating annulus of fluid-Experiment and linear theory. *J Atmos Sci*, 1989, 46:2331—2343.
- [11] Pfeffer R L, Ahlquist J, Kung R, Li G Q, Chang Y. A study of baroclinic wave behavior over bottom topography using complex principal component analysis of experimental data. *J Atmos Sci*, 1990, 47:67—81.
- [12] Hide R, Mason P J. Sloping convection in a rotating fluid. *Adv Physics*, 1975, 24:47—100.
- [13] Buzzi A. Low-frequency variability of atmospheric circulation: a comparison of statistical properties in both hemispheres and extreme seasons. *II Nuovo Cimento*, 11C, N. 5—6, 1988.

THE ATMOSPHERIC CIRCULATION FEATURES SEEN IN THE ROTATING FLUID PHYSICS EXPERIMENTS

Li Guoqing

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Robin Kung

(*Geophysical Fluid Dynamics Institute, Florida State University, Tallahassee,
Florida, U.S.A.*)

Richard L. Pfeffer

(*Geophysical Fluid Dynamics Institute and Department of Meteorology,
Florida State University, Tallahassee, Florida, U.S.A.*)

Abstract

Under suitable imposed experimental parameters, near thermal Rossby number $R_{oT}=0.1$ and Taylor number $T_\alpha=2.2\times 10^7$, the large-scale topography forcing produces low-frequency oscillation in the flow and rather long-lived flow pattern resembling blocking in the atmospheric circulation. The 'blocking' phenomenon is caused by interaction and resonance of travelling waves and the quasi-stationary waves formed by topography forcing.

The large-scale topography transforms wavenumber-homogeneous flows into multi-wavenumber flows, and the topography-forced flows possess less wavenumber.

Key words: The rotating fluid experimental, Topographic, effect, The atmospheric circulation features.