第47卷 第3期 气 象 学 报 Vol. 47, No. 3
1989 年 8 月 ACTA METEOROLOGICA SINICA Aug., 1989

大气环流指数低频振荡机制的流体物理实验研究*

李 国 庆

(中国科学院大气物理所)

提 要

使用旋转的环形水槽,用热力驱动的斜压流体作模拟实验,研究地形对斜压波流动状态的影响。使用对称分布的双峰正弦波地形,测量流体中层的流场,计算流函数并作谐波分析,对比无地形及有地形强迫的大尺度流动状态。实验表明,大尺度地形的作用是,对斜压波在时间和空间进行调制,使流动在时间和空间变得不均匀,使斜压波产生 127 转台旋转周期的振荡。量纲分析表明,这一周期相当于地球自转的 26 d。这使我们认为,大气环流指数的低频振荡的原因,可能是由于近似对称分布的亚洲及美洲山系大尺度地形的作用,造成大气动量随时间的变化,即对大气流动在时间和空间进行调制造成的。

一、引 言

气象学的基本问题之一是解释大气流体的环流,解释其平均流动及其随时间的变化特征。20 世纪 40 年代的观测事实表明,北半球的大气环流,在两种不同的流态之间转换[1]。一种是以强绕极西风为特征的纬向型环流,另一种是有大振幅槽脊强烈发展的经向型环流。从纬向环流变为经向环流,再变回纬向环流的过程,称为"指数循环"。指数循环的周期约为 3 至 8 周。以后的观测表明[2,3],夏季低纬地区大气环流存在 30—50 d 的低频变化。近几年人们还发现,这种周期的大气振荡与地球自转速度的变化(日长变化)有很好的相关[4,5]。但是,对于大气环流指数低频振荡的原因及其产生机制,至今尚无一致的看法。

本文根据旋转斜压流体模拟实验,讨论大气环流指数低频振荡的产生机制。对比有地形及无地形作用的实验,讨论大尺度地形对大气环流指数低频振荡的形成作用。

二、实验装置及方法

本文所用的实验装置与文献[6]、[7]的装置相同。图 1 为实验装置的垂直剖面示意图。B 为环状槽实验区,其内径 7.5 cm,外径 15.0 cm,内装粘度 $5\times10^{-2}\mathrm{cm^2s^{-1}}$、密度0.92 $\mathrm{g/cm^3}$、深10cm的硅油,作为实验流体介质。A 是热水槽,C 是冷水槽。用循环水方法使 A 及 C 中的水保持给定的温度,以维持实验区外壁及内壁之间的恒定温差,造成 B 中的斜压流场。圆环形的实验槽放在转台上,容器的圆心与转台的旋转轴重合。在本实验中,转台的旋转速度 $\Omega=2.09$ rad/s,实验区内外壁间的温差 $\Delta T=2.00$°C。

* 本文于1988年1月3日收到,于1988年5月6日收到修改稿。

用纹理摄影技术显示流体的水平流场。用悬浮于硅油中的聚氯乙稀小粒子作为示踪物质。粒子的密度为 0.92 g/cm^3，与硅油的比重相同。球形小粒子的直径约为 0.01 cm，用氩激光器 E 的光束照明示踪粒子。经透镜组聚焦，光束被装在微电机 M 上的旋转镜 J 反射，展开成为厚 1 mm 的水平片光。用照相机 K 拍摄流体的水平流场。在暴光时段内，测量照片上示踪粒子的位移和移动方向，求得流体的水平速度 。用图数转换器处理流场照片，把流速分解为纬向分量 u 和经向分量 v，再将实验数据输入计算机进行处理和分析。

图 1 中 P 为正弦波双峰地形，它位于流体的底部，其形状可用下式描述。

$$h=H\sin 2\lambda \tag{1}$$

h 是地形表面某点的高度，$H=1.75$ cm 是地形脊的高度，$\lambda(0\leqslant\lambda\leqslant 2\pi)$是方位角(反时针方向为正)。

选取实验参数时，应考虑要使在以下线性涡度方程中达到力的平衡。

$$\frac{\partial\xi'}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial\xi'}{\partial x}+\beta V'-f\frac{\partial w'}{\partial z}=\nu\nabla^2\xi' \tag{2}$$

这里 $\beta=\dfrac{f}{D}\dfrac{\partial h_T}{\partial R}=\dfrac{2\Omega^3R}{gD}$，

h_T 是液体表面的高度。由于旋转，流体的自由表面是倾斜的。D 是流体的平均深度，u 是速度的纬向分量（反时针方向为正），V 是速度的径向分量（指向旋转轴的为正），w 是速度的垂直分量(向上为正)，$f=2\Omega$ 是柯氏参数，Ω 是转台的角速度(反时针方向为正)，ξ 是相对涡度的垂直分量，ν 是流体的运动学粘性系数，$dx=Rd\lambda$，R 是至旋转轴的距离，z 是自地形谷向上的高度，t 是时间，$\bar{u}$ 是沿纬圈的平均速度，撇表示与纬向平均值的偏差。

我们造出对称分布的 6 波斜压流，作为无地形影响实验的参考流形。

为了使实验与大气情况相符，我们需要控制 $\left|\bar{u}\dfrac{\partial\xi'}{\partial x}\right|\Big/|\beta V'|\sim\dfrac{\bar{u}}{\beta s^2}$ 的数值。对于"天气"尺度的波(波数为 6)，这个数的量级是 1，对于波数为 2 的地形尺度，其数值应小于 1。在本实验中，测得中层流体的最大流速是 0.10 cm·s^{-1}，在转槽的外壁，β 值是 0.032 cm^{-1}·s^{-1}，在转槽的内壁，β 的数值是 0.016 cm^{-1}·s^{-1}。我们取 β 的特征量为 0.025 cm^{-1}·s^{-1}。定义 s 为扰动的特征尺度，使 $\partial/\partial x\sim 1/s\sim n/R$，$n$ 是波数。对于天气尺度的波，取波数为 6，在本实验中，$s\sim R/n\sim 1.8$ cm，所以

$$\frac{\bar{u}}{\beta s^2}\sim 1.0 \qquad \text{(对于天气尺度)}$$

对于地形尺度的波（波数为 2），$s\sim 5.5$，

$$\frac{\bar{u}}{\beta s^2}\sim 0.1 \qquad \text{(对于地形尺度)}$$

此外，我们观测到，地形尺度的波是准静止的。由于方程(2)右端的粘性项在流体的内部很小，可以忽略，于是得出结论，对于实验转槽中的强迫地形波，涡度方程保持以下的平衡关系，

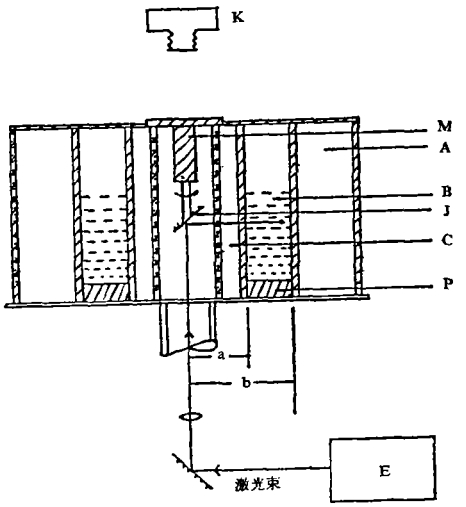


图 1　实验装置垂直剖面示意图

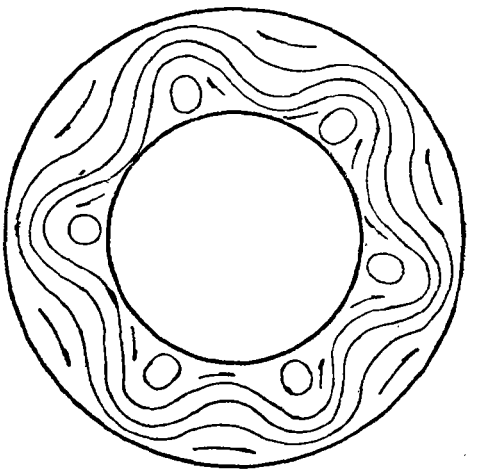


图 2　无地形影响实验的 6 波流

($\Omega=2.09$rad/s,　　$\Delta T=2.00$℃)

$$\beta V'=f\frac{\partial w'}{\partial z}$$

众所周知，这与实际大气的情况相同。

三、实验结果

做了两组实验，无地形（以下简称 N 实验）及有地形的(简称 M 实验)。对实测的速度场作流函数分析。设流函数为 Ψ，可写出：

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial\lambda^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}=R^2\zeta=R^2\left(\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{R}\frac{\partial Ru}{\partial R}\right)\tag{3}$$

这里 $r=\ln R$。由于在靠近转槽边界处，速度分量的数值及纬向变化远远小于其在流体内部的数值。所以可假定沿转槽的侧壁 $\Psi=$常数。取 $\Psi_a=0$，根据下式可求转槽外壁的 Ψ_b，

$$\Psi_b=\overline{\psi}=\int_a^b\frac{\partial\overline{\psi}}{\partial R}dR=\int_a^b\bar{u}dR\tag{4}$$

利用以上边界条件及中央差分格式，可以算出流体中层的流函数场。

图 3 N 给出无地形实验流函数场的一组时间序列。图中数字表示实验照片的序号。由图可见，在无地形影响时，斜压波均匀地向下游移动。波幅、波形及波的移动速度随时间变化很小。图 3 M 给出与其对应的有地形的时间序列。由图可见，流动随时间而演变。流形变化有 12 7转台旋转周期(每隔 19 张照片)，即转台每旋转 127 周，流体的流形重演一次。由图 3 M还可以看出流场演变的一些特征。流场从纬向型(照片 1)逐渐向经向型(照片 8)演变。由于经向流型增强，在地形脊(图中箭头及其反端所指的方向)下游 45°的地方产生最强的低压环流。在图 3 M 的第 12 张照片上，在地形脊下游约 90°的地

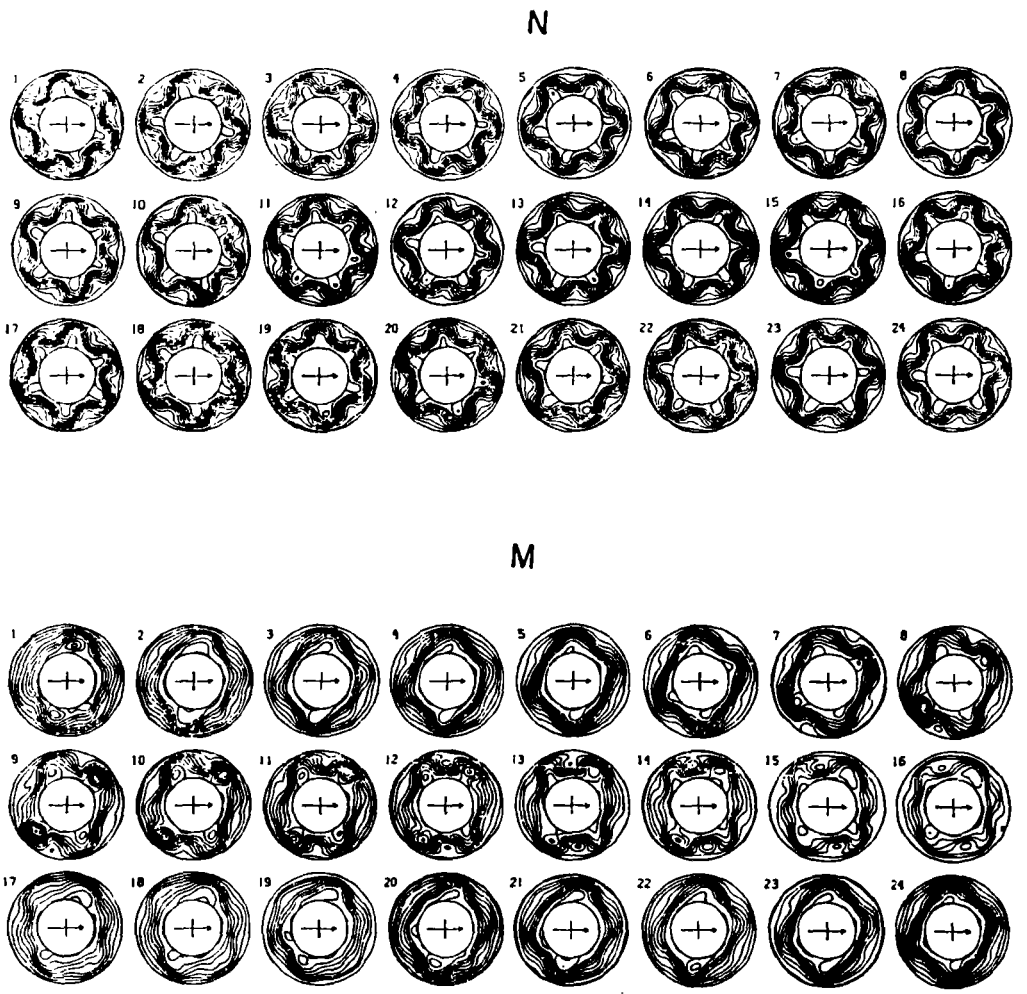


图 3 无地形(N)及有地形(M)实验的流函数图的时间序列
(等值线的间隔为0.05 cm^2s^{-1})

方，出现类似于"阻塞高压"的反气旋环流。这种"阻塞"环流形势在地形下游约90°处维持相当长时间(第12——16张照片)。然后，经向型流动减弱，纬向型环流增强，约至照片20，流场的形势变得与照片1相同。

有或无地形作用时的流形差别，也可以在图4看出。图4给出将流函数作谐波分析后，能量最大的三个波及纬向平均流函数随时间的变化。在无地形实验中(图4 N)，这些量随时间的变化非常小，而且随着实验的进行，变化在逐渐减弱。在有地形的实验中(图4 M)，对于波数0，4及6，有约127转台旋转周期的大振幅振荡。对于波数2，存在较高频率的波幅振荡。波数4的峰值比波数6的峰值出现略早，而波数0的峰值与波数6的峰值相差180°相位。波数2的高频振荡峰值对应于波数0及6的振荡。由图可见，振荡的振幅最大的是0波，即纬向平均流，其次是4波。6波及2波的振荡较小(请注意图4 M中各图纵座标的单位不同)。实验表明，在有地形的实验中，流动的振荡与行进

波相对于地形的位置有关。越过地形脊的槽，在地形的下游发展，在地形下游 45° 发展到最大强度。由此可见，地形的作用是对斜压波在空间和时间调制。

正弦波双峰地形强迫造成的斜压波振荡，与大气环流的指数循环类似。图 5 给出实际大气纬向环流指数的变化。由图可见，大气的纬向环流指数有准周期振荡，周期为 3—8 周。图 6 给出在有地形强迫实验中，斜压波流动的纬向环流指数随时间的变化。在此，斜压波流的“纬向环流指数“定义为：

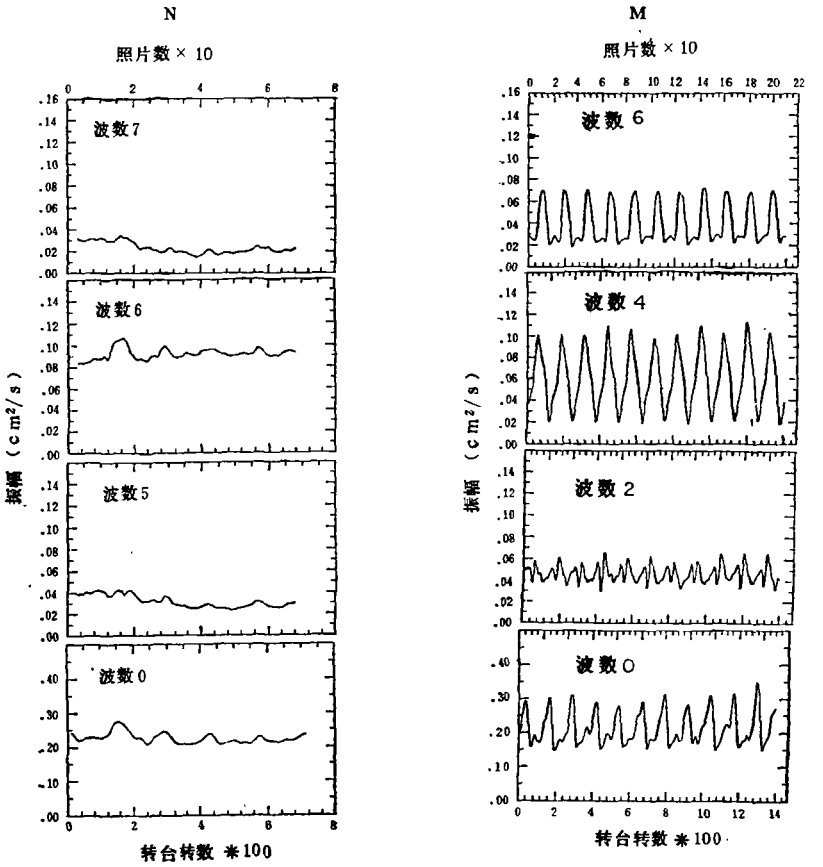


图 4　能量最大的三个波及纬向平均流(波数为 0)的流函数随时间的变化

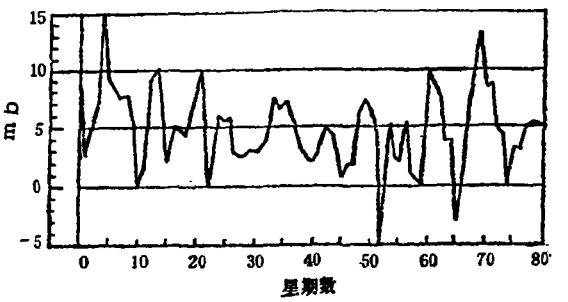


图 5　大气的纬向环流指数变化
(据 Namais 和 Clapp)

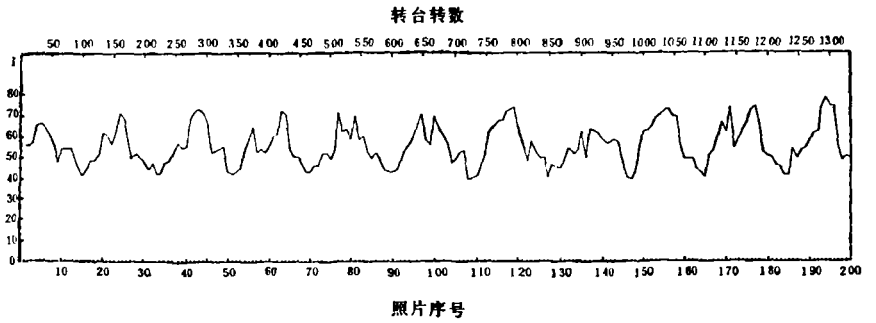


图 6 地形强迫造成的斜压波流指数振荡
（横座标是时间：图顶部的数字是转台旋转周数，下部数字是对应的实验流场照片序数）

$$I=\int_a^b \bar{u}\,dR \tag{4}$$

在实验中，求出沿纬圈平均的速度 $\bar{u}$ 及其随纬度的分布廓线，求出廓线与纵座标(转槽内外壁间的距离 ab)之间所占的面积即求得 I。将图 6 与图 3 M 对比，发现强纬向型的流动与高指数对应，而低指数对应经向型流。在 I 随时间的变化中，也明显地有 127 转台旋转周期。

四、斜压波的振荡周期

运用量纲分析及流体动力系统相似原理，将流体的振荡周期与实际地球大气系统作比较。在本实验中，给定特征长度 $R=11.0$ cm。实验测得流体的特征速度 $\bar{u}=0.1\ \mathrm{cm\cdot s^{-1}}$，于是，在本实验中流体系统的特征时间为

$$t^*=\frac{R}{\bar{u}}=110\ \mathrm{s}$$

如上所述，在地形强迫下，斜压流产生 127 转台旋转周期的振荡。转台每旋转一周的时间是 3 s，所以，斜压波流的振荡周期是

$$t=127\times 3=381\ \mathrm{s}$$

流体振荡周期的无量纲数是

$$\hat{t}=t/t^*=3.5$$

对于实际大气，给定特征长度 $R'=6300$ km，给定气流的特征速度为 $\bar{u}'=10\ \mathrm{ms^{-1}}$，于是，地球大气系统的特征时间是

$$t^{*\prime}=\frac{R'}{\bar{u}'}=6.3\times 10^5\ \mathrm{s}$$

如前节所述，实验流体系统与实际大气系统基本是相似的，所以实验流体的振荡周期相当于大气中的

$$t'=t^{*\prime}\times\hat{t}=2.2\times 10^6\mathrm{s}=26\ \mathrm{d}$$

这一振荡周期与实际大气环流的低频振荡周期相对应。本实验说明大气环流指数的低频振荡，可能是由于近似对称分布的亚洲山系和美洲山系对缓慢移动的天气尺度波的

调制而形成的。

五、结　论

1．大尺度地形对斜压波动流的作用是，在时间和空间对它调制，使流动在时间和空间变得不均匀。在本实验中（热力 Rossby 数 $R_o \approx 0.1$），波数为 6 的斜压波流受正弦波状的双峰地形的强迫，产生强烈的准周期振荡。

2．流动状态与大气环流的某些特征相似。至少有两种流态，一种是纬向型流动，另一种是经向型流动。与实际大气的纬向环流指数循环类似，在实验流体中，也有从纬向型转为经向型，再恢复为纬向型的流型变换。在经向型流发展期间，在地形脊下游约 90° 的地方，有反气旋状的闭合环流生成，其性质与大气环流中的阻塞现象类似。

3．受地形强迫的斜压波流，有 127 转台旋转周期的振荡。这一振荡周期，相当于大气环流指数的低频振荡周期。

4．在实验参数相同的条件下，在无地形强迫的实验中，斜压波均匀地移动，流形及其它流场特征随时间变化很小。而在有地形强迫的实验中，斜压波流作准周期振荡。这种周期振荡的原因是，双峰地形对缓慢移动的天气尺度的斜压波的调制。这也许说明，大气环流指数低频振荡及其相应的大气环流异常现象，是由于大尺度地形强迫，即对天气尺度的波的调制造成的。

由于技术原因，本实验未考虑热力因子对流体运动的强迫。拟在以后的实验中，研究热力因子对斜压流动的强迫问题。

参 考 文 献

[1] Namias, J., The index cycle and its role in the general circulation, *J. Meteorol.*, **7**, 2, 130—139, 1950.

[2] Madden, R. A., and P. R. Julian, Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702—708, 1971.

[3] Lau, K-M., and T. J. phillips, Coherent fluctuations of extratropical geopotential height and tropical convection in interseasonal time scales, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1164—1181, 1986.

[4] Hide, R., N. T. Birch, L. V. Morrison, D. J. Shea and A. A. White, Atmospheric angular momentum fluctuations and changes in the length of day, *Nature*, **286**, 5769, 114—117, 1980.

[5] Kim, D. B., Whysall, Raymond Hide, Michael J. Bell, Current work on the Earth's rotation at the United Kingdom Meteorological Office, Proceeding of the International Conference on Earth Rotation and the Terrestrial Reference Frame Vol. 2, 417—433, 1985.

[6] GuoQing Li, Robin Kung and Richard L. Pfeffer, An experimental study of baroclinic flows with and without two-wave bottom topography, *J. Atmos. Sci* **43**, 22, 2585—2599, 1986.

[7] GuoQing Li, Robin Kung and Richard L. Pfeffer, An experimental investigation on topographic effect on multiple regimes of baroclinic flow, *Scientia Sinica* (Series B) XXX, 1,83—95, 1987.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANISM OF THE LOW FREQUENCY OSCILLATION IN THE INDEX CYCLE OF ATMOSPHERIC CIRCULATION

Li Guoqing

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The present work using a rotating annulus with a thermally driven baroclinic fluid made a modeling investigation on the mechanism of low frequency oscillation in the index cycle of atmospheric circulation. By comparison of the experiments with and without topography, the role of topography in formation of the flow regimes is discussed. The topography used in the experiments consists of two ridges and two valleys around the annulus. Two sets of experiments have been done. One is the experiment with topography, and the other is the control experiment with no topography. The experiments show that the traveling waves strongly vacillate with time due to the topographic effects. Otherwise, in the experiments under the same imposed external conditions but with no topography, the baroclinic waves with wavenumber 6 would travel regularly with almost no vacillation. It was found that a prominent feature of experiments with topography is large amplitude vacillation of the waves with a period of approximately 127 annulus rotations, which is equivalent to approximatelly 26 days low frequency oscillation period in the Earth atmosphere. The role of topography in the experiment is to modulate the unstable baroclinic waves both in space and time. The reason that the vacillation exists in the experimental fluid is due to the forcing of the two sinusoidal wave-shape topography to the slowly moving wave flow.