

# 地形对斜压流体多流态影响的实验研究

李 国 庆

(中国科学院大气物理研究所,北京)

龚 钊 R. L. Pfeffer

(美国佛罗里达州大学)

## 摘 要

使用热趋动斜压旋转流体,作无地形及有地形强迫的对比实验,研究地形对流动状态的影响。在无地形强迫时,流型是对称分布的6波。流型不随时间变化。在实验条件完全相同但有地形强迫时,斜压波的波数和波幅周期地振荡。地形对斜压流体运动起调制作用,造成流动在时间和空间的不均匀性。至少有两种流动状态,即纬向型和经向型流动。斜压波振荡和多流态的原因是地形的强迫作用。

## 一、引 言

Namias<sup>[1]</sup>的研究表明,在北半球中纬带,特别在冬季,大气环流变化于两种状态之间,一种以较强的绕极西风为特征。另一种是带有大振幅槽脊的经向型环流。从一个强的纬向环流态到弱的纬向环流态,再变回到强的纬向环流态,这一转换称为“指数循环”。

至今尚不明指数循环的原因,也没有令人信服的理论说明大气环流中诸如阻塞等异常环流一再出现和持续的原因。Rossby<sup>[2]</sup>提出过一种解释,认为阻塞类似水利学中的跃变现象。当水的流速超过临界值时出现跃变。当西风流速超过其临界值时,发生流场崩溃并导致纬向速度减少。但是, Rossby 理论不能解释为什么阻塞环流经常出现在某些特定的地理区域。既然它发生在一定的地理位置,那么,阻塞环流的机制应当和地形有关。

地形是影响大气环流状态的重要因子。Egger<sup>[3]</sup>指出,在有利的条件下,慢行自由波和强迫波的非线性相互作用可以导致阻塞的发展。Charney 和 Devore<sup>[4]</sup>试图说明大振幅流异常持续的原因。他们指出,由于地形的存在,在斜压流体中出现地形拖曳不稳定性。由于斜压波与地形的非线性作用,在纬向非对称强迫和外趋动不变的大气中可能存在多平衡态。Tung 和 Lindzen<sup>[5]</sup>用 Rossby-Hawrwitz 波受地形及地面加热强迫共振的观点,研究了阻塞机制。

上述研究使用数值方法或理论分析方法。本工作用热趋动的斜压旋转流体,研究其流动状态。对比有地形及无地形实验,讨论地形对流动状态的影响。

## 二、实验装置和方法

本实验使用的转槽与 Pfeffer<sup>[6,7,8]</sup> 使用的装置类似, 实验装置如图 1(a) 所示. 实验区 B 是粘度 5c St (厘沩), 深 10cm 的硅油. A 区及 C 区充满热水及冷水, 用以制造 B 中的斜压流场. 硅油的深度从地形的谷底量起. 圆槽内壁的外径是 15cm, 内外壁之间的距离是 15cm. 用循环水维持内外壁之间的温差. 温度可精确地控制在 0.01℃. 转台旋转周期的相对误差小于 0.001.

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烯小粒子作示踪物质. 用氩激光器 E 的光束照明示踪粒子. 经过透镜组聚焦后, 激光束被装在微电机 M 上的转镜 J 反射, 展开成为厚 1mm 的水平片光. 用照相机 K 拍摄流体的水平流场. 测量在暴光时段内粒子的位移和移动方向, 可求得流体的水平速度. 用图数转换器分析流场照片, 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运算和分析. P 为地形.

图 1(b) 是实验地形的示意图. 地形有两个山脊和两个山谷, 其形状可用下式描述:

$$h = H \sin 2\lambda, \quad (1)$$

$h$  是地形表面某点的高度.  $H = 1.75\text{cm}$  是山顶高度,  $\lambda$  是方位角, 地形高度沿经线方向保持不变. 其纵剖面如图 1(c) 所示.

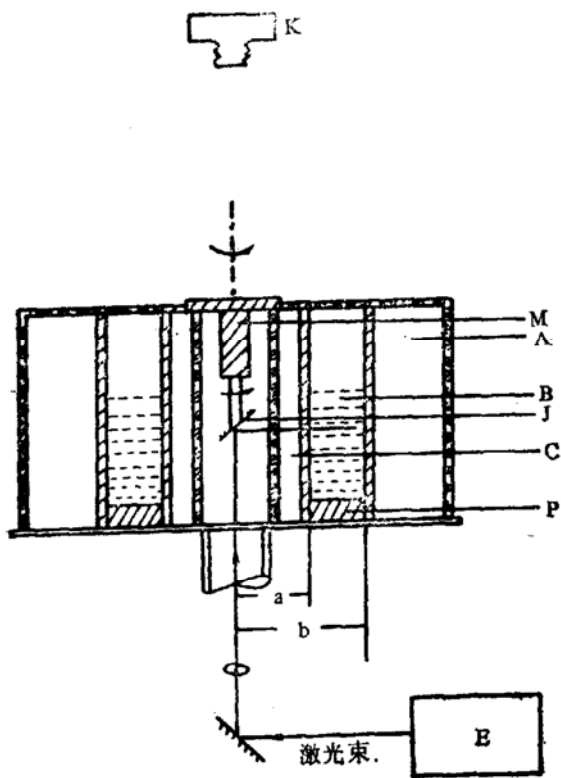


图 1(a) 实验装置示意图

(A—暖水浴, B—实验区, C—冷水浴, E—氩激光器, J—转镜, K—照相机, M—微电机, P—地形, a 是转槽的内径, b 是外径)

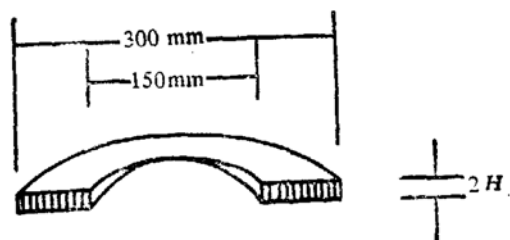


图 1(b) 实验地形示意图

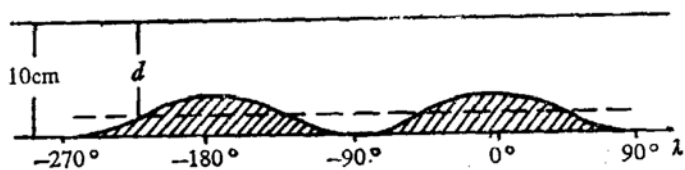


图 1(c) 圆槽通道的截面示意图 (通道被截断、拉直)

### 三、在 $R_0$ 及 $T_a$ 参数空间的波动状态分布

做了两组实验,有地形的实验和无地形的实验.除地形以外,两组实验的参数完全相同.流体深度都是 10cm.在有地形实验中,流体深度从地形的谷底量起.

图 2 给出斜压波波数在  $R_0$  及  $T_a$  参数空间的分布. Rossby 数  $R_0$  和 Taylor 数  $T_a$  可由以下表示:

$$R_0 = g d \alpha \Delta T / \Omega^2 (b - a)^2, \tag{2}$$

$$T_a = 4 \Omega^2 (b - a)^4 / \nu^2, \tag{3}$$

式中  $g$  是重力加速度,  $d$  是实验流体的深度,  $\alpha = 1.05 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$  是流体的热膨胀系数,  $\nu = 5c \text{ St}$  是粘滞系数,  $\Omega$  是转台的旋转速度.在无地形实验中(图 2(a)),流态分布与文献[9]的实验结果接近.在有地形实验中(图 2(b)),根据流型特征可划分 4 个区域: I 是轴对称纬向流型区; II 是地形引起的振荡区; III 是地形引起的强振荡区; IV 是波数 4 的驻波区.

决定流态的最重要参数是 Rossby 数.当 Rossby 数大于 2.0 时,流型是轴对称纬向流.当 Rossby 数在 0.2 至 2.0 区间时,流型是随时间振荡的斜压波.随着 Rossby 数减小,波动的振荡加剧,斜压波的波形周期性地振荡.当 Rossby 数在 0.2 至 0.06 之间时,斜压波剧烈地振荡,波幅和波数都随时间变化.本文将分析这种由地形强迫引起的斜压波的强烈振荡.

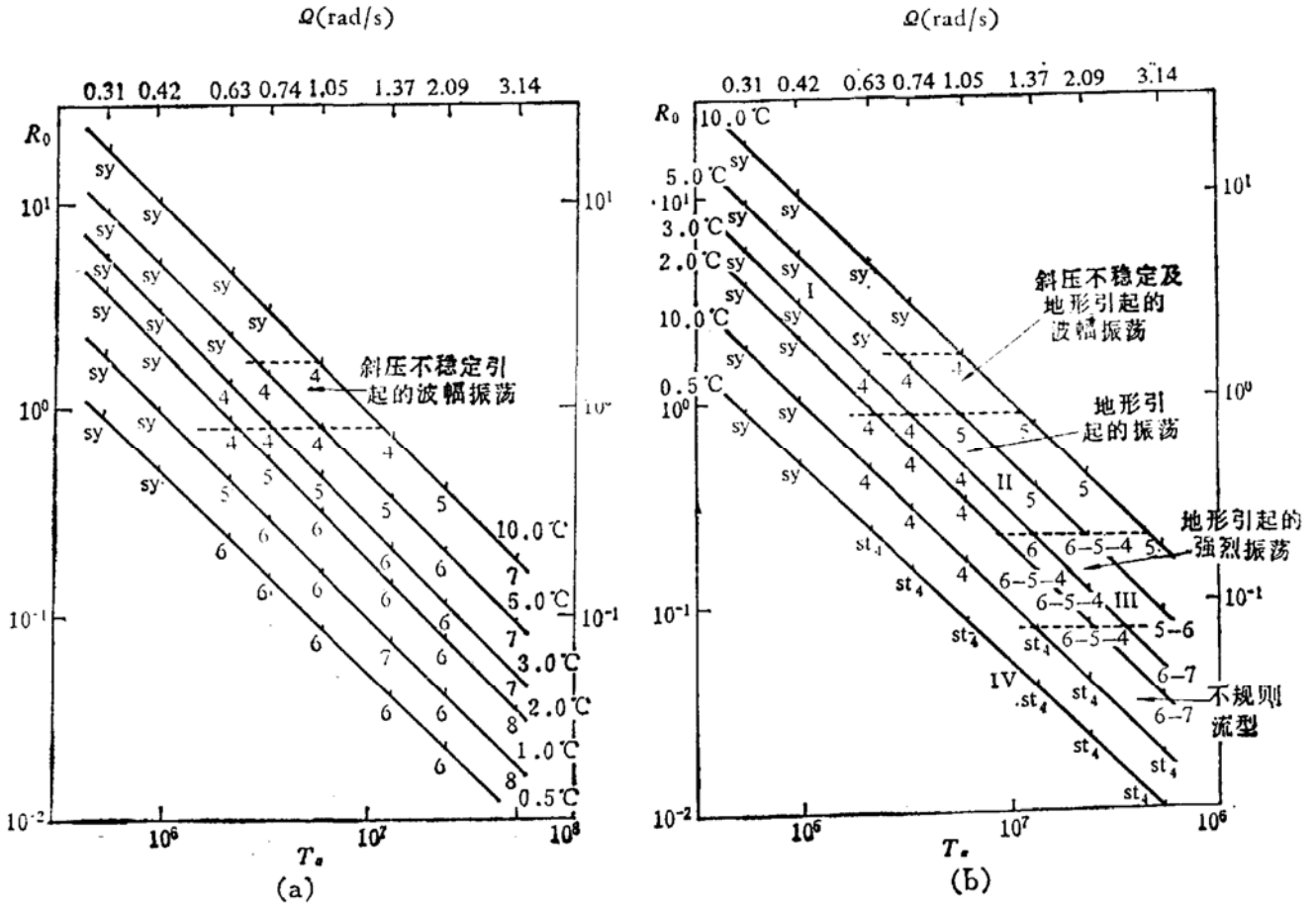


图 2 实验流体的流型

((a) 无地形实验, (b) 有地形实验, 斜线为等温差线, 数字表示斜压波的主导波数. 其它符号表示:  $st_4$ ——波数 4 的驻波流;  $sy$ ——轴对称的纬向流)

#### 四、地形强迫引起的斜压波强烈振荡

现用傅氏级数表达流速的纬向分量  $u$  及经向分量  $v$ 。以  $u$  分量为例，将纬圈均分  $2N$  份，可写出下式：

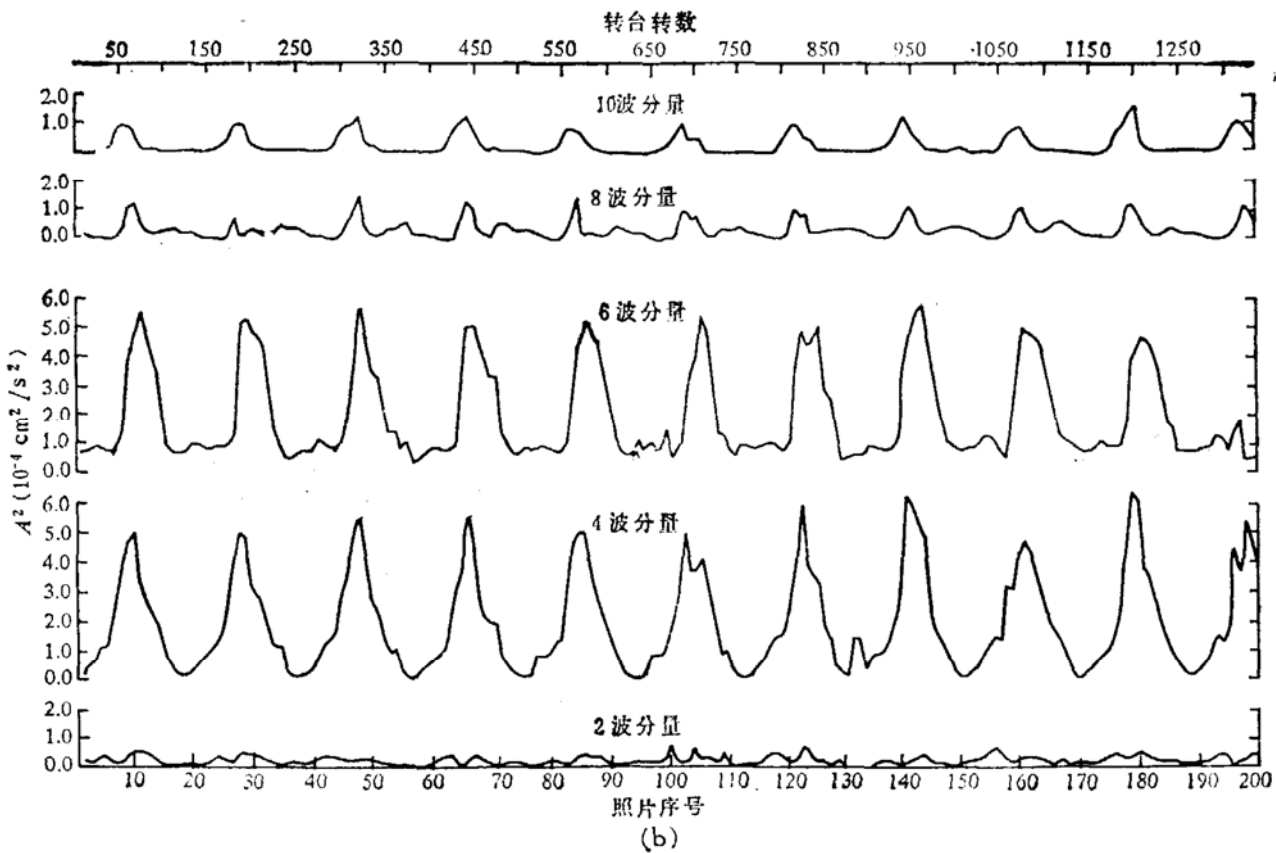
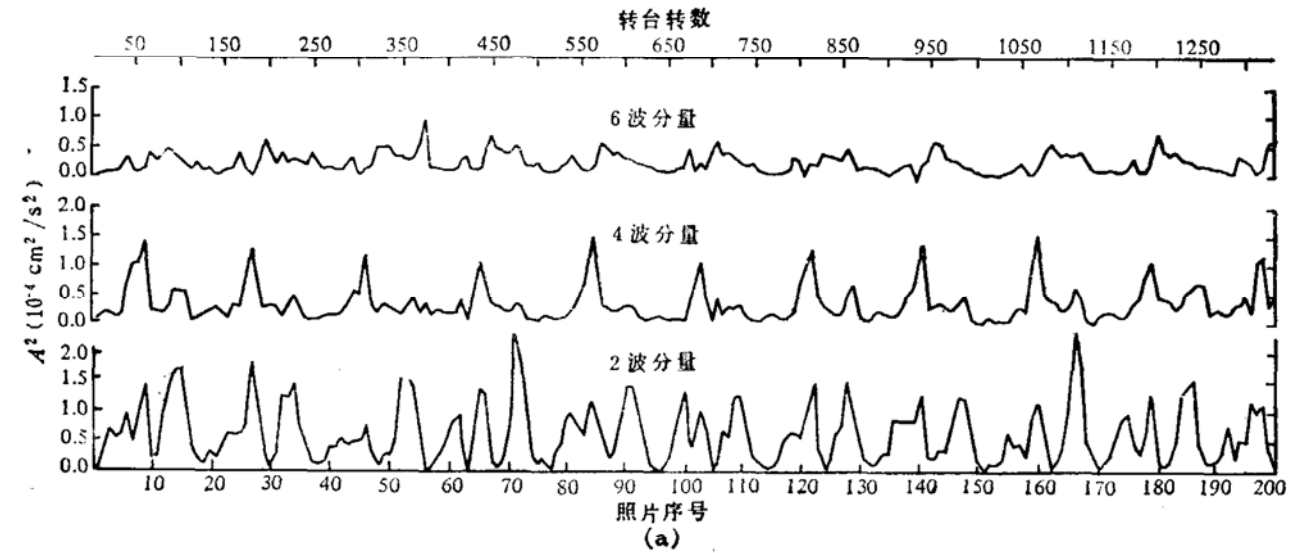


图3 2波、4波、6波的  $u$  分量波幅随时间的变化(a); 2波、4波、6波、8波及10波  $v$  分量的波幅随时间的变化 (b)

(横坐标是时间,上方的数字是从取资料时开始的台转数,下方的数字是实验序列的照片号数. 实验条件: 内外壁温差  $\Delta T = 2.0^\circ\text{C}$ , 转台的旋转周期是  $3s$ ,  $R_0 = 0.05$ )

$$u_i = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{N-1} A_n \sin(n\lambda_i + \varphi_n), \quad (4)$$

式中

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n},$$

$$a_n = \frac{1}{N} \sum_{i=-N}^N u_i \cos n\lambda_i,$$

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{i=-N}^N u_i \sin n\lambda_i,$$

$$\lambda_i = 2\pi i/2N, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N.$$

$A_n$ 代表波数为  $n$ ,  $u$  分量变化的幅度,  $\varphi_n$  是相角. 同样, 也可用傅氏级数表达  $v$  分量.

图 3(a) 给出波数 2, 4, 6 的  $u$  分量的  $A_n^2$  随时间的变化. 图 3(b) 给出波数 2, 4, 6, 8, 10 的  $v$  分量的  $A_n^2$  随时间的变化. 由图 3 可见:

1. 受地形影响, 斜压波随时间强烈地振荡. 相反, 在条件相同但无地形的实验中, 波数 6 的斜压波, 均匀地向前移动, 没有振荡现象(图略).

实验表明, 波数 2 对  $u$  分量的振荡贡献最大, 波数 4 的  $u$  分量对振荡的贡献较小, 波数 6 的  $u$  分量对振荡的贡献更小. 在本实验中, 地形的波数是 2. 波数 4 是波数 6 和波数 2 的差. 波数 6 是在条件相同但无地形时的波数. 这说明斜压波的振荡是地形造成的. 此外, 奇数波  $u$  的变化很小, 这也说明地形强迫是造成斜压波振荡的原因. 与此相同, 图 3(b) 也表明偶数波分量对斜压波的振荡贡献大. 贡献最大的是波数 4 和波数 6. 波数 8 和波数 10 贡献较小.

2. 在  $u$  和  $v$  的振荡中有 127 台转的周期. 实验表明, 这一周期等于一个波移走而被移来的新波置换所需要的时间. 可以把这种振荡看成地形强迫波与斜压波相互作用的共振现象.

## 五、流场结构的振荡

将测得的流速的纬向分量沿纬圈作平均, 将速度经向分量沿经线作平均, 即

$$\bar{u} = \frac{1}{2N} \sum_{-N}^N u_i, \quad (5)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} v_i. \quad (6)$$

据此, 绘出  $\bar{u}$  沿经线方向的廓线随时间的变化(图 4(a)) 及  $\bar{v}$  沿纬线方向的廓线随时间的变化(图 4(b)). 图 4(a) 及图 4(b) 表示流场从纬向型(1, 2, 3)转化为经向型(4, 5, 6, 7), 再转化为纬向型(8, 9, 10)一个周期的变化过程. 在纬向流型盛行阶段,  $\bar{u}$  的数值较大,  $\bar{v}$  的数值较小. 相反, 在经向流盛行阶段,  $\bar{u}$  的数值较小,  $\bar{v}$  的数值较大.

图 4(c) 给出实验条件相同但无地形的  $\bar{u}$  廓线的时间序列. 图 4(d) 给出无地形实验  $\bar{v}$  廓线的时间序列. 由图 4(c) 及 4(d) 可见, 在无地形的实验中, 流动是分布均匀、波数为 6 的斜压波. 波幅和波的结构不随时间变化, 无振荡现象.

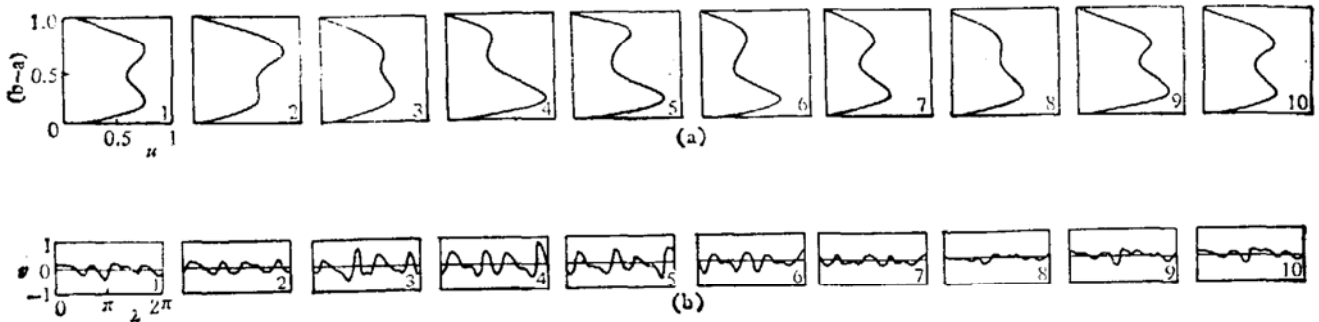


图4(a),(b)  $\bar{u}$  廓线(a)及  $\bar{v}$  廓线(b)的一个周期振荡

((a)的横坐标是纬向速度  $\bar{u}$ , 纵坐标是圆槽内外壁之间的距离.(b)的横坐标是圆槽的方位角(反时针方向为正). 纵坐标是径向速度  $\bar{v}_0$ . 实验条件: 圆槽内外壁温差  $\Delta T=2.0^\circ\text{C}$ , 转台的旋转周期为  $3\text{s}$ ,  $R_0 = 0.08$ )

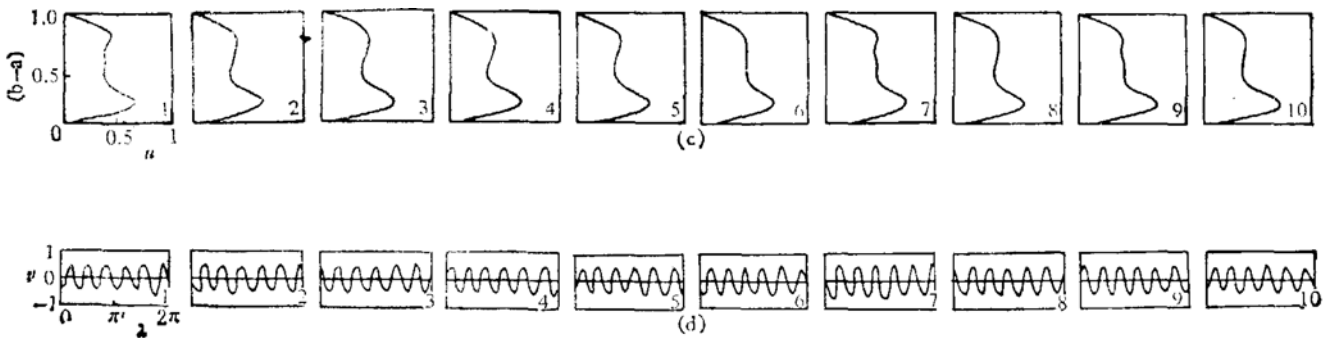


图 4 (c),(d) 无地形实验的  $\bar{u}$  廓线(c)和无地形实验的  $\bar{v}$  廓线(d)

(说明同图 4(a),(b))

### 六、实验结果及其在气象学中的含义

#### 1. 地形强迫造成环流指数循环

在气象学中,把  $35^\circ$  到  $55^\circ$  纬圈间的西风强度称为环流指数.高指数对应强西风分量,低指数对应弱西风分量.图 5 给出实际大气环流指数的准周期变化.

对实验转盘流体,定义  $I$  为环流指数:

$$I = \int_0^{16} u dr, \quad (7)$$

它表示流体的总动量矩.根据对实验全过程的流场测量,求出  $\bar{u}$  廓线与纵坐标所夹的面积(见图 4(a)),即可求出环流指数(图 6).由图 6 可见,有地形实验的转盘流体,其环流指数周期性振荡.

#### 2. 斜压波的多流态

图 7 是大气环流流型振荡的示意图.图 7(a)表示纬向型环流.图 7(b)表示长波的波幅增加了.图 7(c)表示环流发展成经向型环流.图 7(d)表示,环流的进一步发展,形成阻塞形势,大振幅波被切断.环流继续发展,又恢复为纬向型环流.

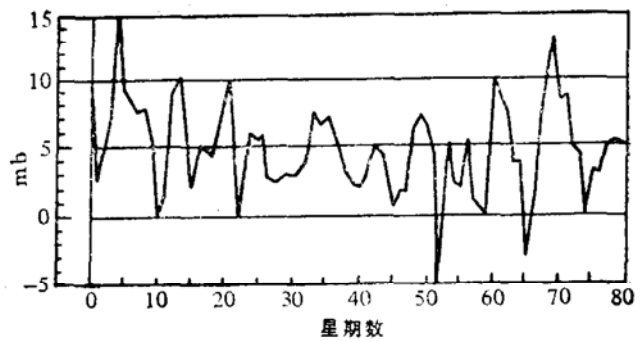


图 5 大气环流指数变化 (引自 Namais and Clapp)

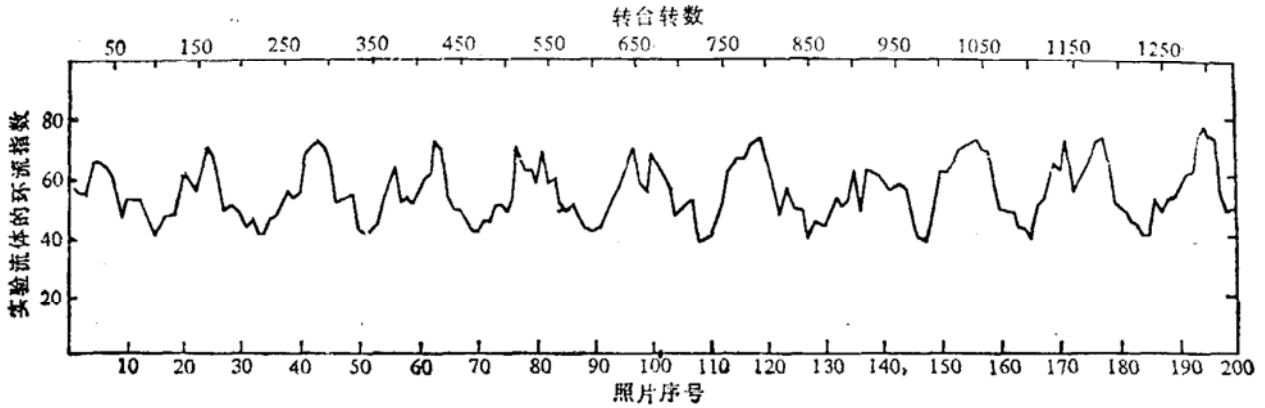


图 6 地形实验的环流指数变化

(横坐标为时间,上方的数字表示转台转动圈数,下方的数字表示实验照片序号,纵坐标为实验流体的环流指数)

图 8 是根据实验结果计算求得的流线序列图。其做法是,首先根据测量的  $u$  和  $v$  计算涡度的垂直分量  $\zeta$ :

度的垂直分量  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{\partial ru}{\partial r} \right). \quad (8)$$

再根据下式计算流函数  $\phi$ ,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial R^2} = r^2 \zeta. \quad (9)$$

这里  $R = \ln r$ 。为了对比,给出无地形实验流线图 8A 及有地形实验的流线图 8B。由图 8 可见,在无地形实验中,流线是分布均匀、匀速移动的 6 波。流型随时间没有变化。相反,在有地形的实验

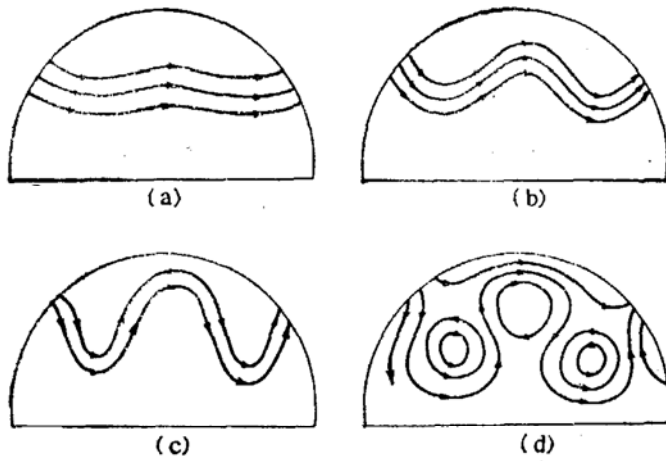


图 7 大气环流流型振荡示意图

中,波形随时间振荡。斜压波在行进中有波数变化,也有波幅变化。流型从纬向型变为经向型,再变为纬向型。在纬向型流盛行期,槽脊发展较弱。弱脊位于地形的迎风坡,较深的槽出现在地形的谷区(图中箭头指示地形脊位置,箭头的反方向是另一地形脊位置)。当经向型流盛行时,地形迎风坡的脊及背风坡的槽增强,在背风坡槽的内部甚至出现闭合气旋性涡旋。在经向型流的后期,在地形的谷区出现类似于阻塞的反气旋涡旋,它们几乎“切断”了纬向流。在“阻塞”以后,流动又转化为纬向型。应当指出,在振荡的特定阶段产生的“阻塞”涡旋,出现于特定的地理位置,这不同于因流体斜压不稳定而生成振荡。

### 七、结 论

1. 实验表明,地形对斜压流体大尺度运动起调制作用。造成流动在时间和空间的不均匀性。地形影响与 Rossby 数有关。随着 Rossby 数减少,地形的影响增强。当 Rossby 数足够低时( $0.06 \leq R_0 \leq 0.2$ ),受地形强迫的斜压流剧烈地振荡。

2. 在振荡中至少有两种流态,即纬向型和经向型。与大气环流的振荡类似,在振荡的特定阶段及特定的地理位置有“阻塞”涡旋产生,类似于大气中的阻塞形势。

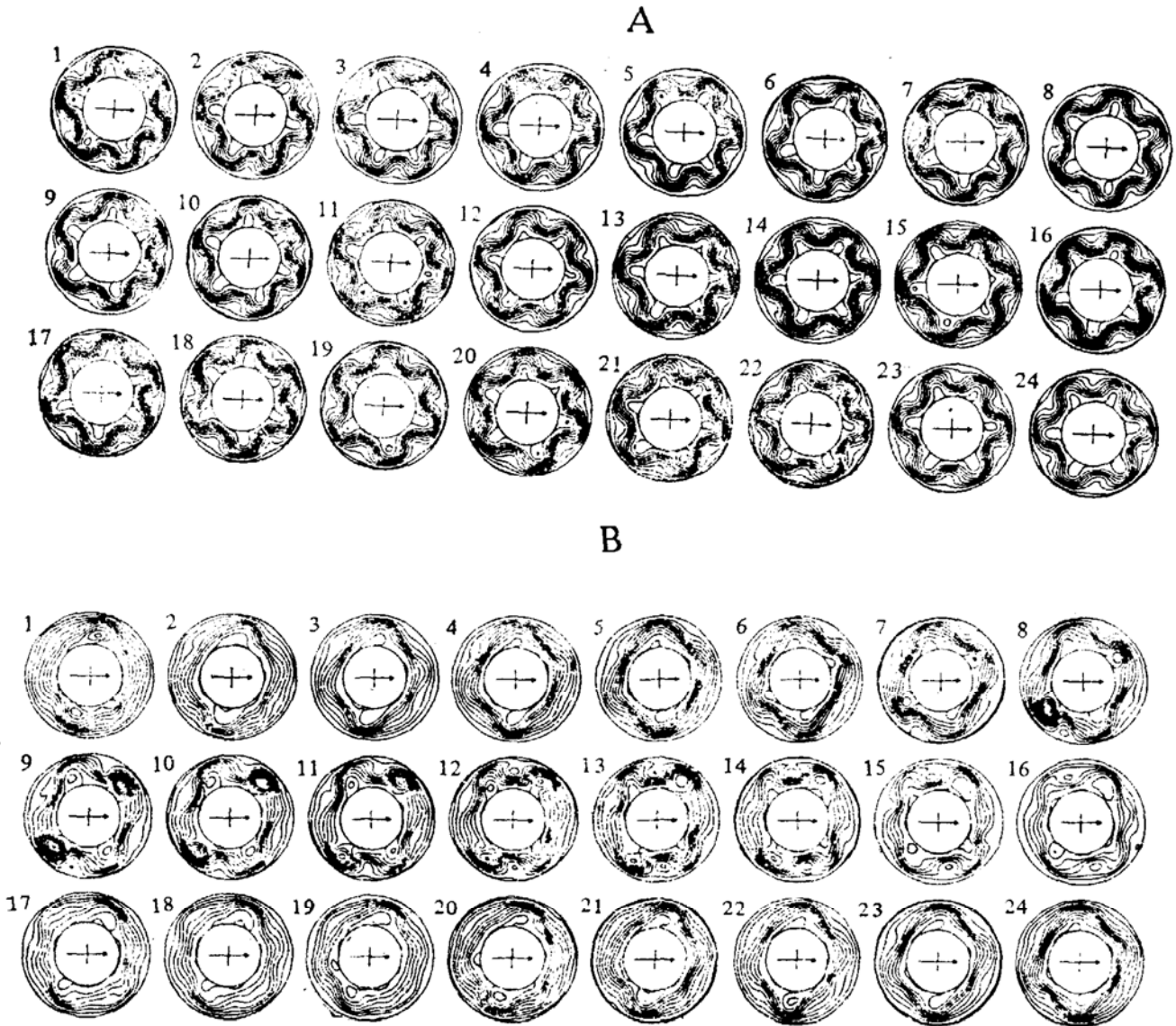


图 8 斜压波实验流线序列图  
(顺序给出的数字为实验照片的序号。等值线的间距为  $0.05\text{cm}^2/\text{s}$ )

3. 实验表明,斜压波振荡及出现多流态的原因是地形的强迫作用。

本工作承 Rene Arbogast, Warren 及 James Zarichny 先生们协助程序设计及分析图表,对 ONR N00014-77-c-0265 协助惠予提供 CDC Cyber 760 的机时,作者谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Namias, J., *J. Meteorol.*, 7(1950), 130—139.
- [ 2 ] Rossby, G. G., *J. Chinese Geophys. Soc.*, 2(1950), 1—13.
- [ 3 ] Egger, J., *J. Atmos. Sci.*, 35(1978), 1788—1801.
- [ 4 ] Charney, J. G. and Devore, J. G., *ibid.*, 36(1979), 1205—1216.
- [ 5 ] Tung, K. K. and Lindzen, R. S., *Mon. Wea. Rev.*, 107(1979), 714—734.
- [ 6 ] Pfeffer, R. L., Buzyna, G. and Fowles, W. W., *J. Atmos. Sci.*, 31(1974), 622—645.
- [ 7 ] Pfeffer, R. L., Buzyna, G. and Kung, R., *ibid.*, 37(1980), 2129—2149.
- [ 8 ] Pfeffer, R. L., Buzyna, G. and Kung, R., *ibid.*, 37(1980), 2577—2599.
- [ 9 ] Hide, R. and Mason, P. J., *Adv. Phys.*, 24(1975), 47—100.