

大地形背风波的转槽实验研究^{*}

高守亭 陈 辉

(大气边界层物理和大气化学国家重点实验室中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

文中利用转槽在相似定律及动力无量纲数的控制下, 对旋转层结流越过大地形产生的背风波做了一系列的实验。实验及分析结果表明, 无量纲数中 Froude 数是最重要的参数, 发现在层结适当时背风波同旋涡结构在山的下风方向同时出现。在无旋转情况下, 在 Froude 数适当时仍然存在着明显的背风波, 但旋转的作用能增加背风波的波动幅度, 特别是起着引发下坡流的作用。文中最后还讨论了背风波在季风区内对低层涡旋发展的驱动作用及有待进一步研究的问题。

关键词: 旋转层结流, 转槽实验, 背风坡与背风涡旋。

1 引 言

对气流过山的背风波及背风气旋的研究已有几十年的历史, 也是一个非常经典的问题, 曾受到许多气象及海洋学家的关注并从事了多方面的研究。早在 1940 年代, 1950 年代气象及流体力学家们^[1~3]就初步建立了背风波的线性小振幅波动理论及有限振幅理论。1960 年代和 1970 年代, Drazin^[4]和 Smith^[5]进一步研究了大气及海洋中小 Froude 数 ($Fr \ll 1$) 的势流型理论及地形波阻等问题。1980 年代到 1990 年代初期, 关于背风波问题进行了不少的实验室实验和数值模拟^[6,7], 他们主要研究了旋转水槽中层结流体流过一个障碍物的现象。由于计算机的迅速发展, 数值模拟研究已发展成一个主要的研究手段。Smolarkiewicz 和 Rotunno(后简称 SR)^[8~10]用数值模拟的方式较系统地研究了中等 Froude 数下的气流经过一个铃形山脉的背风波及背风气旋问题, 并进一步验证了 Smith^[11,12]的关于气流过山脉的线性理论。Xue 等^[13]模拟了背风波的垂直传播。

Boyer^[14]及中国转盘实验学家 Chen Ruirong 和 Li Guoqing^[15]等利用相似原理研究了气流绕过青藏高原的效应以及气流越过落矶山脉的背风波问题。最近桑建国^[16]利用两层模式讨论了稳定层结下大气的内船舶波。刘辉志^[17]又从水槽实验和数值模拟两方面研究了中小尺度地形波及波动阻力的问题, 诸如这些研究都从不同的角度和侧面对背风波及背风气旋的形成、结构及传输特征进行了有科学意义的探讨和剖析。

尽管几十年来对背风波有着众多的研究, 但主要是限于小地形, 对大地形背风波的研

^{*} 初稿时间: 1999 年 1 月 12 日, 修改稿时间: 1999 年 5 月 13 日。
资助课题: 国家自然科学基金资助(项目批准号: 49705060)。

究极少,中国气象学家主要用转盘实验研究了气流对青藏高原大地形的绕流现象及其高原本身的动力、热力效应对大气环流的影响。而在大地形对背风波的生成关系方面并没有做系统的研究,国际上对大地形的背风波研究也几乎没有涉及。所以本文的研究焦点集中在大地形(高度完全可以同青藏高原相比拟,但形状又不同于青藏高原)的铃形山的背风波问题以有别于其它众多研究。所以这里的研究特点是:

- 1) 用旋转的转槽来研究槽内大铃形山山后的背风波。
- 2) 研究了非旋转及强旋转两种较极端情况下层结流体的背风波。
- 3) 研究了不同 Froude 数条件下的背风波。

整个实验设计是要突出地球的旋转效应和大气的层结效应对背风波形成作用的特性,所以两者相结合后的综合效应在实验模拟中必须较好地考虑进去。通过无量纲分析和相似原理以及对比分析找出了背风波形成及演变的一些规律,为这类及其有关的天气现象的预测和预报提供了可靠的科学依据和线索。

2 实验设计

首先,对于 Boussinesq 近似的具有不变稳定度 N 及入流速度 U 的无粘流体,伯努力方程可以被写为^[12]

$$u^2 = \frac{2}{\rho_0} \left[-p^* - \frac{1}{2} \rho_0 N^2 h^2 \right] + U^2 \quad (1)$$

其中 p^* 是气流移近地形时引起的同其离地形较远的上游同一水平面上的气压偏差。如果 $p^* = 0$, 即在大地形的迎风面会形成驻点,即 $u = 0$ 。 h 是气流爬升高度。因为从方程(1)而知,驻点形成时有 $h_m = \frac{U}{N}$, 所以这时 Froude 数 $F_{rm} = \frac{U}{Nh} = \frac{U}{Nh_m}$ 。可见 $F_r = F_{rm} = 1$ 是一个关键值。若假定 $p^* = 0$, 从本质上就是把气流遇到大地形的问题归结到气流是否具有足够的能量来爬过大地形,还是因没有足够的能量而只能绕流。

另一方面即使对滞弹性近似的流体,伯努力方程可以写为^[9]

$$1 - V^2 = 2\Phi^* + \frac{\eta^2}{F_r^2} \quad (2)$$

这里 V 是水平风速, Φ^* 是同一平面上的上游气压值的偏差, η 是质点偏离其上游基准面的垂直位移。在 (V, η) 相空间中,方程(2)实际上是具有轴长为 1 和 F_r 的椭圆。如果我们假定在式(2)中气压偏差可以忽略,那么对于驻点发生的条件,应当是质点的最大垂直位移 η_{\max} 应满足 $\eta_{\max} = F_r$ 。当 $F_r < 1$, 对 $Z = 1 - F_r$ 的那些质点必然要停驻在 $Z = 1$ 的高度之下,所以是不可能爬过大地形。

以上分析的约束关系即 $\eta_{\max} = F_r$ 及 $F_r = 1$ 对研究气流经过大地形的背风波问题是至关重要的。在实验室实验设计方案中,必须首先要考虑到这样重要的问题。在背风波研究中,如果既要考虑以上约束关系而又要想体现非线性效应对背风波结构的影响,我们必须考虑 $F_r < 1$ 的情况(理由见下面),但也不能使 F_r 太小,因为由以上分析而知, $F_r = 1$ 时会出现驻点,气流极易在驻点分流而出现对地形的绕流而不是爬升。所以 $F_r < 1$ 是必要的,但又由于质点因地形引起的垂直位移 $\eta_{\max} = F_r$, 所以若 F_r 太小,质点也不易爬过山脉。

正因为 $F_r < 1$ 是必要的,所以在实验设计方面应细心地选择 F_r 的值。根据 SR^[9] 的研

究而知 $F_r = 0.5$ 是一个很重要的值。所以在设计旋槽实验时能使 F_r 达到 0.5 的值是十分有意义的。正是为了如此,我们在转槽实验中特设计了 F_r 的变动范围从 0.04 到 0.51,整个涵盖了对实际有意义的 F_r 的情况。

在以往的研究中,很多研究者都采用铃形山作为运动流体的障碍物^[8~11]。为了便于同以往的研究结果相比较,我们在转槽实验中也采用了铃形山的分布结构,即山形满足如下的分布

$$h(r) = h_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{D}\right) \quad (3)$$

这里 h_0 是山顶的高度取为常数, D 是山底的直径。

在具体考虑了以上的约束关系之后,有如下的具体实验装置设计:所有实验都是在一个具有长 215 cm,宽 50 cm,深 10 cm 的旋转槽内进行的。在槽的中心放有一个铃形山模型,山高为 6.4 cm,底面半宽度 3 为 6 cm,同槽内总深度相比,山高占了大半,所以是大地形。其分布形状由公式(3)决定。山是放在槽底可以被计算机控制的移动皮带上,通过槽底皮带的移动而带动山的移动以迎来入流的运动。槽内液体是用盐水和淡水结合的办法进行层化,并在其内放有示踪物,通过槽侧面及槽上面的细长光束,可以把示踪物的运动清楚的显示出来。并通过由计算机控制同转槽一起旋转的照相机来拍摄不同时刻不同位置及不同角度的示踪物的流型。在这种基本装备下,根据相似原理通过无量纲参数 R_0 及 F_r 的控制,即可研究层结旋转大气中,气流过山的背风波问题。并且实验是在一个广泛的外参数变动范围内进行的,比如槽内流体过山速度是从 0.7 ~ 6.2 cm/s 范围内变化,流体总深度为 10 cm,层结由弱到强,水槽由非旋转到旋转。内参数如 Froude 数、Rossby 数以及 Ekman 数都有不同变动范围的设置,以便最有效地涵盖背风波研究所需内外参数。

因为整个实验是在转槽内进行的,如果把实验结果用于讨论大气中的背风波现象,涉及到一个相似的问题,为此,这里做如下简单的相似原理分析。就相似来说,有两个方面:一是几何相似,二是动力相似。就几何相似来说,主要是转槽的几何尺寸是否可与大气的区域性环境相对应,槽内山的几何尺寸是否可同大地形相对应。实验使用的转槽长 215 cm,而槽内山的底部直径为 12 cm,山宽仅为槽长的 $\frac{1}{18}$ 。而中国的青藏高原主体西起 75°E 东至 95°E,也是占整个经圈的 $\frac{1}{18}$ 。再从南北方向看,转槽的宽度为 50 cm,山的底部直径不到槽宽的 $\frac{1}{4}$ 。而青藏高原的南北跨度近 20 个纬度,也是不足径向纬圈的 $\frac{1}{4}$ 。在垂直方向上,转槽的几何高度为 10 cm,而山的高度为 6.4 cm,其比值为 0.64。实际大气中对流层顶的平均高度为 12 km,而在偏低的中低纬度实际平均高度为 12 ~ 14 km 左右,而青藏高原上的喜马拉雅山海拔达 8 km 之多,所以山高在对流层内占的比例也大致为 0.64 ~ 0.66,所以转槽实验的几何设置相似于对流层内大地形情况下的几何尺寸(但转槽中的山形并不是对应青藏高原,所以实验结果只能是大地形下的背风波结果)。

就动力相似而言,在非旋转情况下,主要涉及 Froude 数的变动范围是否能同大气的情况相吻合。实际上,实验中的 Froude 数的变动范围是从 0.04 ~ 0.51,而在大气中层结 N 的典型值在对流层内为 1×10^{-2} ,而大气标高 H 为 8 km,基本风速 U 的取值范围从 10

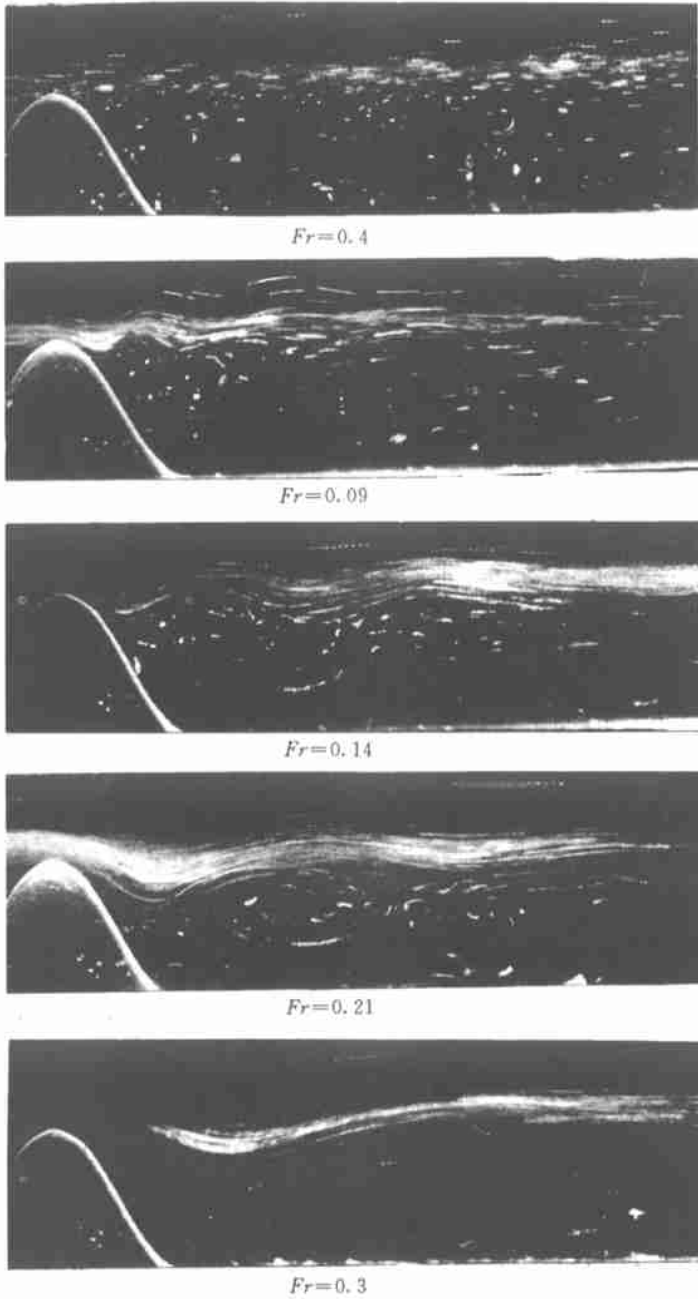


图 1 在非旋转强层流中背风波波型随 Fr 的分布

$\sim 40 \text{ ms}^{-1}$, 有 Froude 数的表达式 $Fr = \frac{U}{NH}$ 而知, Froude 数的变动范围为 $0.125 \sim 0.5$, 所以实验中设计的 Froude 数的变动范围同对流层内的 Froude 数的变动范围是对应的。再者, 在有旋转的情况下, 实验中的 Rossby 数 R_0 的变动范围为 $0.14 \sim 0.72$ 。而在实际大气

中科氏参数 f 的典型值为 10^{-4} , 而大地形引起的水平特征波长为 10^6 , 所以 Rossby 数 $Ro = \frac{U}{fL}$ 的变动范围为 $0.1 \sim 0.4$ 。可见实验中的 Rossby 数的变动范围也基本包括了大气中 Rossby 数的变动范围, 所以决定大气同实验动力相似的最重要的两个参数 Froude 数 Fr 和 Rossby 数 Ro 是吻合的。正是如此, 转槽内的实验结果完全可以用于讨论对流层内大地形背风波问题。

3 旋转情况下的背风波研究

我们首先对非旋转情况的层结流体进行了实验。目的有二: 其一是要探讨非旋转流体本身的背风波特征及其演变规律; 其二是为了进一步同旋转情况作对比。正是如此, 对非旋转情况下强弱层结分布不同的流体进行了一系列的转槽实验。因为是非旋转的, 所以实验中不涉及 Rossby 数, 而主要涉及到 Froude 数。对强层结的情况(图 1)主要实验了 Froude 数从 0.04 到 0.3 变动范围内的背风波形成问题。通过对 Froude 数 ($0.3 < Fr < 0.7$) 范围的实验研究证明, 在 Froude 数 $Fr = 0.3$ 时, 在波长上没有多大变化而主要波的振幅上有所不同。所以 $Fr = 0.3$ 已足以代表相当跨度范围的 ($0.3 < Fr < 0.7$) Froude 数的情况。

同时还必须指出, 图 1 中的实验结果是在强层结下进行的 ($N^2 = g \frac{\rho}{\rho H} = 8.7 \times 10^{-4}$)。加之地形是大地形(因为山高 h 对应大气中 6.4 km), 所以在地形迎风气流速度很小的情况下, Froude 数必然很小, 看不到明显的波动。随着 Froude 数的加大, 从 $0.09 \sim 0.3$, 过山气流的背风波就逐渐形成。但不同的 Froude 数对应的波的形状并不相同。但总的规律是 Froude 数越大波的形状也就越规则, 波状结构也就越清楚, 且波长也就越长, 振幅也就越大。更令人感兴趣的是自 $Fr = 0.3$ 之后, 山后表现出一个规则的背风波, 而离山更远处的下风方并不出现波动(图 1)。出现这种现象的真正原因还不清楚。但初步估计, 是因为过山气流速度加大时, 背风波后的惯性效应较大, 运动很快表现为水平的。但在 Froude 数较小时 ($0.09 < Fr < 0.3$) 可以看出, 背风波状起伏, 有一个向下游延伸的过程。但 $Fr = 0.3$ 之后这种现象就不出现了。这是一个值得进一步研究的现象。通过对图 1 的分析, 和我们连续对强层结情况变动 Froude 数的实验, 我们得到两个 Froude 数阀门: 一是 $Fr = 0.05$, 即在 $Fr = 0.05$ 时流体过山不会出现背风波, 这是因为太小而不允许有较多的流体质点上爬越过山脉, 而主要是表现为绕流; 二是 $Fr = 0.3$, 即在 $Fr = 0.3$ 时, 过山后的气流会形成一个明显的背风波且其后没有明显的波延续。

图 2 是在弱层结下 ($N^2 = 1.3 \times 10^{-4}$) 实验的背风波结果。从图中可以看出, 在相应 Froude 数情况下, 整个波的振幅都较强层结情况下为小。这主要是因为层结弱, 过山后质点的正负恢复力都较小, 所以质点离开其平衡位置的位移也就较小, 结果造成波的振幅较小。可见层结对波振幅大小的影响是重要的。

4 旋转层结流下的背风波

在旋转情况下, 对 Rossby 数变动范围为 $0.14 < Ro < 0.72$, 且层结分布分为弱 ($N^2 = 1.3 \times 10^{-4}$)、中 ($N^2 = 2.9 \times 10^{-4}$)、强 ($N^2 = 8.7 \times 10^{-4}$) 3 种类型进行了多次的转槽实验, 将实验结果分别讨论如下:

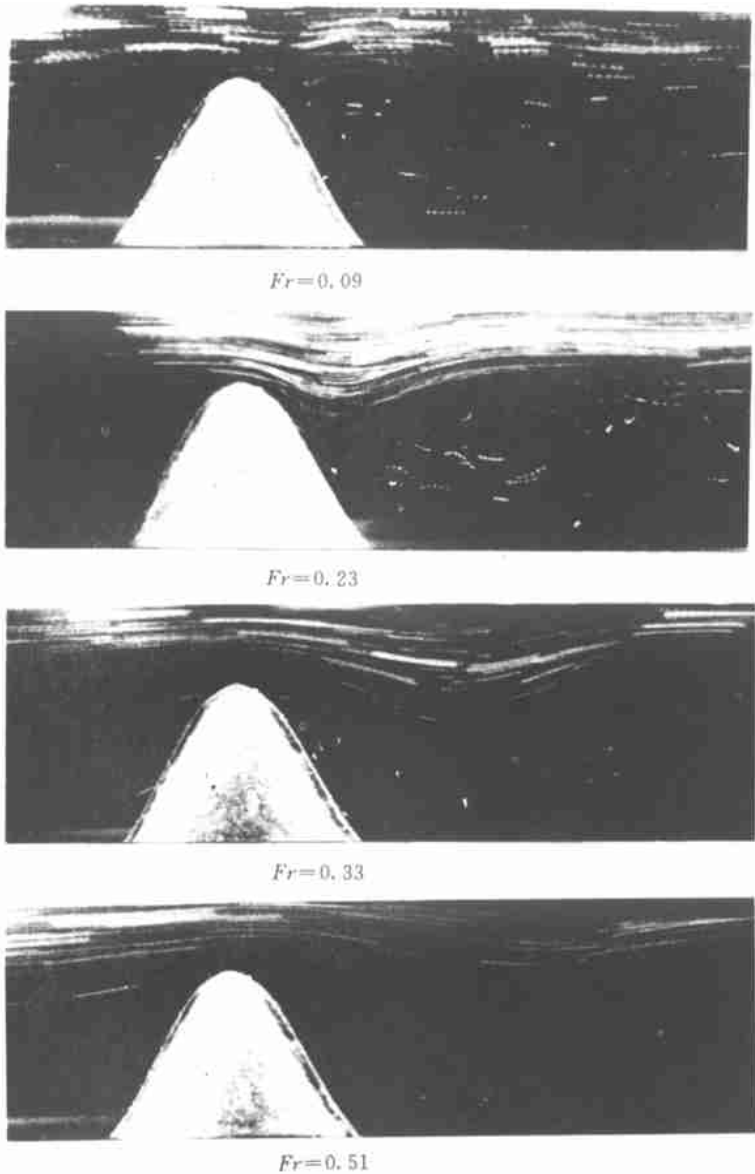


图 2 非旋转弱层结流中背风波型随 Fr 的分布
($N^2 = 1.3 \times 10^{-4}$)

图 3a, c 是弱层结下 ($N^2 = 1.3 \times 10^{-4}$) 的旋转转槽实验。很有意思的现象是, 在 Rossby 数和 Froude 都比较小时(图 3a), 山后出现深厚的既有下坡性质又有波动性质的气流, 且波动被下坡气流运载着向下风方向扩散出去。但随着 Rossby 数及 Froude 数的增大, 波动现象越来越不清楚, 到 $R_0 = 0.72$, $Fr = 0.51$ 时, 山后的波动现象就完全不存在了, 而变成了明显的下坡风。可见旋转效应从总体上起着稳定的作用, 所以旋转流同非旋转流的背风波有一个很大的不同, 就是在旋转流中表现出明显的气流下坡现象。特别在惯性力增大时, 气流过山后表现出相当的稳定, 以下坡风的形式流向远离山的下风方。

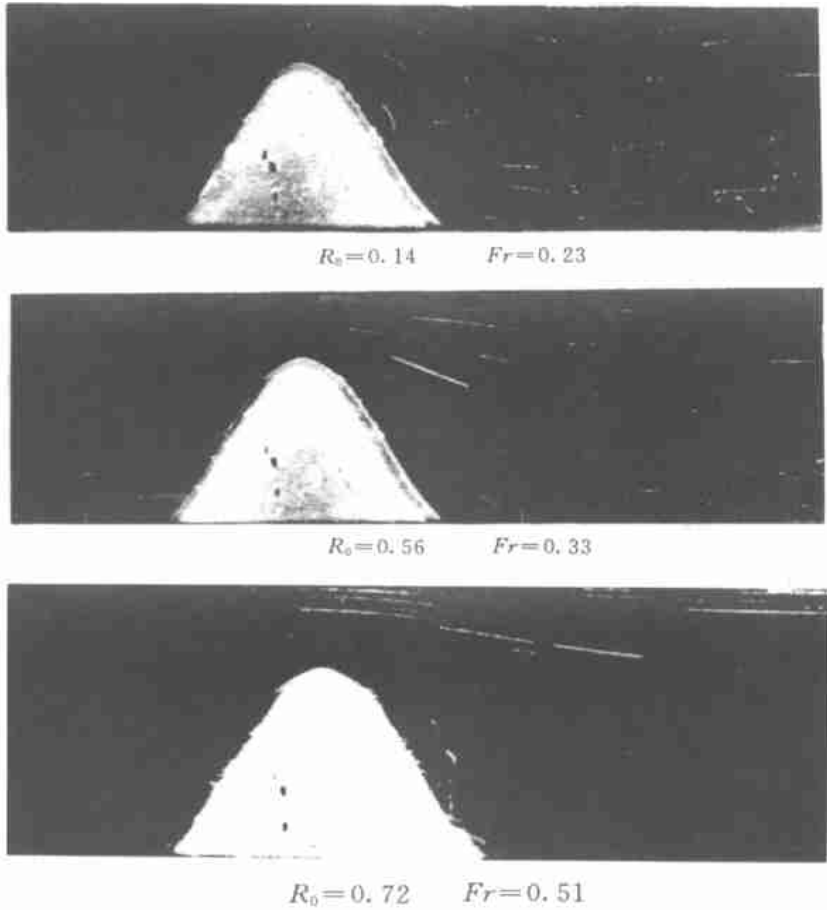


图3 旋转弱层结下,背风波波型随 R_0 及 Fr 的分布
($N^2 = 1.3 \times 10^{-4}$)

但在中性层结下($N^2 = 2.9 \times 10^{-4}$) (图4)又出现了新的情况,即在山的背风面不仅出现了波,而且还有涡的形成。图片中表现出在山后一定距离处出现示踪物的集中堆积,这说明那里有旋转的涡旋(这在数值实验中得到了进一步证实,见另文)。这种现象在旋转弱层结及非旋转的实验中都没有发现。可见在旋转系中层结适当是形成涡旋的一个重要前提条件。

图5是在强层结($N^2 = 8.7 \times 10^{-4}$)旋转流下的背风波实验。从图中可以看出,在Froude数为0.04的情况下,即使有旋转,也看不到背风波的形成,流体质点主要表现为绕流。可在 $R_0 = 0.56$ 及 $Fr = 0.14$ 时(图5b),过山气流在山后不仅出现了背风波而且还出现了同背风波相联系的滚动型涡旋。这种现象的出现是因为有三方面的原因,第一是由于旋转的稳定效应,促使过山流有下坡风运动成分;第二是因层结强,山后背风波效应也明显;第三是因层结强,山后的流体层很稳定,过山流形成的重力波及下滑流造成背风波谷处因流速较快而产生减压,结果使山后出现逆压梯度而使流体产生在低层向近山方向回流,这正好同其上重力波耦合而形成滚动型涡旋。可见不同程度的层结和旋转效应的结



$$R_0 = 0.16$$

$$Fr = 0.06$$



$$R_0 = 0.56$$

$$Fr = 0.22$$

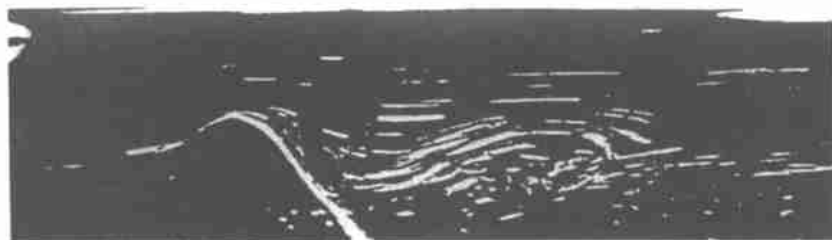
图4 旋转中性层结下,背风波波型随 R_0 及 Fr 的分布

$$(N^2 = 2.9 \times 10^{-4})$$



$$R_0 = 0.16$$

$$Fr = 0.04$$



$$R_0 = 0.56$$

$$Fr = 0.14$$

图5 旋转层结下,背风波波型随 R_0 及 Fr 的分布

$$(N^2 = 8.7 \times 10^{-4})$$

合描绘出不同的流动形态。

关于山后涡旋的形成,是一个较为复杂的问题,因为还有一种可能性,那就是因为在层结适当时(比如层结相对较强时),在靠近山的底半部的流体是要绕过山而出现绕流,绕流在山后汇合时会形成一条不稳定的切变线,在这条切变线或说汇合线上,极易产生不稳定而形成涡旋。在旋转配合下,这种涡旋会出现脱落或以波的形式表现出来,这就是外国学者通常称为的“Shedding”现象。通过以上实验图形分析,我们可以清楚地看到旋转的一个显著作用是促使山后气流下滑的稳定作用及背风涡旋的形成。

5 非旋转和旋转两种情况下的背风波结构的比较

为了清楚地看出旋转效应,这里对非旋转和旋转两种不同条件下的背风波结构进行了比较。在图6中比较了两种情况下(前提是都存在波动时),波振幅随Froude数的变化。从图中可以十分清楚地看出,随着 F_r 的增加,两者的振幅都在增大,但旋转情况下的波振幅比非旋转情况下的波振幅要大得多,平均大了一倍。可见旋转引起的气流下坡效应是十分明显的。

图7显示了背风波波长同Froude数的关系。从图中可以清楚地看出无论旋转或非旋转情况,若两者都存在波时,波长随Froude数的变化都是比较一致的。即同量级的随 F_r 的增大而增大,在这方面两者没有太大的差别。

图8绘制了两种情况下若都出现背风波时,背风波的初始位置同山顶之间的水平距离随Froude数变化的情况。图中明确显示,两者变化相当一致,都是随 F_r 的增加而增大。可见在这方面两者没有任何不同。

6 背风波对中国长江流域天气的影响

长江流域恰处青藏高原大地形的下风方,在西风带盛行的冬半年,西风气流越过高原,必然在高原的下风方造成背风波,这就是像很早有些气象学者所认为的,东亚大槽的加深与高原下风方的背风波有关。所以在冬季高原后的背风波对东亚大槽的稳定起着相当的作用。而在夏季7,8月份,由于高原的热力作用,使其上空出现强大的南亚高压,高原

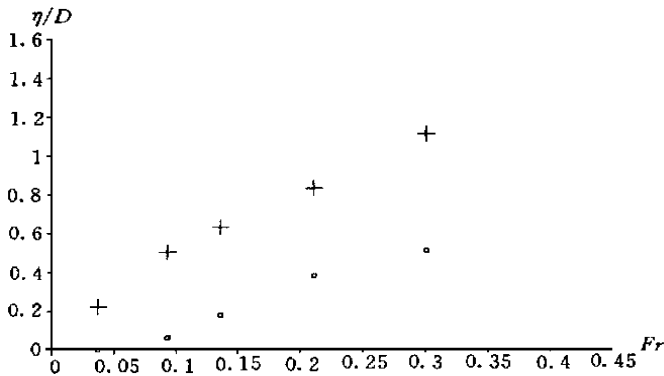


图6 波的无量纲振幅 η/D 随 F_r 的分布

(η 是波振幅, D 是山宽,“+”表示有旋转的情况;“o”表示无旋转的情况)

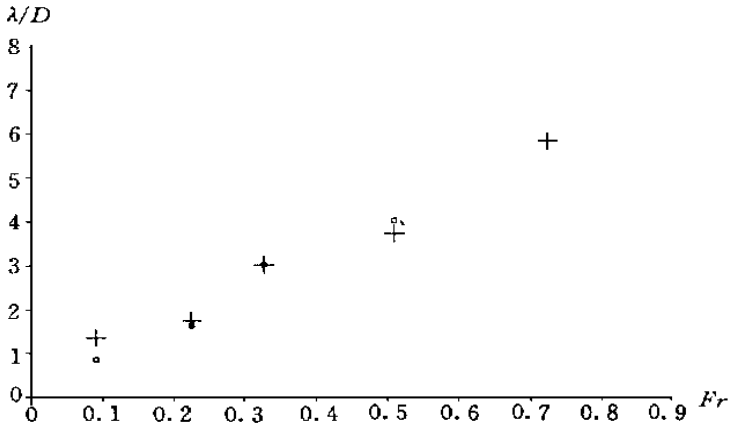


图7 元量纲波长 λ/D 随 Fr 的分布

(λ 是波长, D 是山宽, “+” 表示有旋转的情况; “o” 表示无旋转的情况)

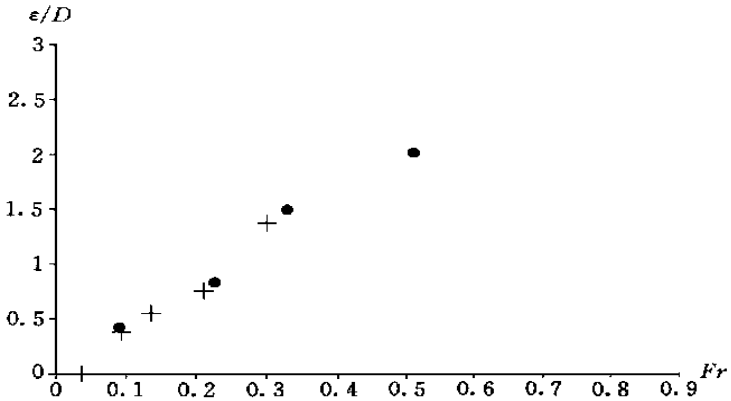


图8 离山顶最近的背风波谷中心的无量纲距离 ϵ/D 随 Fr 的分布

(ϵ 是各波到山顶的距离, D 是山宽, “+” 表示有旋转的情况; “o” 表示无旋转的情况)

低层总的是一个热力低压, 所以层结效应很弱, 有时甚至是不稳定的, 再加之, 南亚高压的偏北部分才有西风分量, 所以正对高原下风方的背风波不易形成。即使有, 其位置也相当偏北, 所以对长江以南的天气不应有直接的影响。所以 7, 8 月份, 高原对江南天气的影响主要是由热力效应所造成, 而不是由动力效应引起的背风波。

4, 5 月份是东亚大气环流季节转换时期, 西风带急流开始减弱北退, 而且急流中心向偏西北方向移动, 东亚大槽明显减弱, 处于南海季风爆发前夕, 西南气流及偏南气流在中、低层开始控制中国江南大部分地区, 但地面及 500 hPa 以上的高空仍有冷空气及偏西气流活动。所以大气低层在长江流域常维持着一条切变线, 而在 500 hPa 及其以上, 由于层结相对稳定, 越过高原的西风气流产生背风波。这种背风波槽前的正涡度平流同低层切变线上的扰动一旦耦合, 就会使扰动发展形成切变线上的低涡系统。可见高原下风方背风波的存在, 对季风区内切变线上的低值系统的发展起着重要的驱动作用。这就使得江南天气变得相当复杂。

在6月份,江南夏季风普遍爆发,江南地区大气中低层总体处于热力不稳定状态。正是如此,江南进入梅雨期,但对流层上层层结仍然是较稳定的,所以在稳定区仍存在着背风波。一方面背风波槽前的正涡度平流同低层切变线上的扰动仍存在着耦合的作用,另一方面由于这时副热带高压正在西伸北挺,副高西边缘的西南气流常同背风波槽前的西南气流相遇,特别当槽逼近副高边缘时,槽前及副高边缘之间的西南气流明显加强,表现为一种狭管效应,结果造成槽的底部及其之前邻近地区产生明显辐散,起着抽吸的作用,这可能是长江口气旋波明显发展的一个重要原因。可见大地形背风波效应同季风区内中低层不同天气系统的耦合极有利于切变线上低值系统的发展及气旋波的形成。所以这是一个十分令人兴奋的研究课题。

7 讨论与结论

这里对山波的性质在线性化条件下(实际实验中没有线性化条件限制)作一个简单地讨论。目的只是用于说明实验中出现的山波的性质而并不详细给出数学推导,因为本文主要是转槽实验结果,重点在物理现象而不是数学推导。依据 Richard S. Scorer^[18]的最新论证,气流遇山的扰动方程可写为

$$(1 - F^2)w + (F^2\alpha + iF\alpha)w + \left[\frac{g\beta}{U^2} - \frac{U}{U} - k^2 - iF\left(\alpha\alpha - \frac{V}{U}\right) \right] w = 0$$

在 $F \ll 1$ 时,得如下关系:

$$w + \left[\frac{g\beta}{U^2} - \frac{U}{U} - k^2 \right] w = 0$$

或写为

$$w + (l^2 - k^2)w = 0$$

在忽略基本风速垂直切变的前提下,并在层结大气中 $L^2 = \frac{N^2}{U^2}$ 。则 l 称为 Scorer 数。那么垂直波数 n^2 可表示为

$$n^2 = l^2 - k^2$$

如果 $l^2 > k^2$, 则 $n = \pm (l^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}$ 。但因为由山引起的波的能量是在底部,所以只有向上传播的群速度才有物理意义,这种向上传播的山波称为辐射波(就是通常所谓的非拦截山波)。

在 $l^2 < k^2$ 时, $n = \pm ia$, 且 $a = (k^2 - l^2)$, 则山波振幅包括了一个随指数高度衰减的因子 e^{-a} , 所以这时山波称为背风波(即通常所谓的拦截波)。在转槽实验的结果中,对弱层结情况典型的 N^2 值为 1.3×10^{-4} , 而典型的入流速度 U 为 3 cm/s , 所以对应的 Scorer 数为 $l^2 = \frac{N^2}{U^2} = 1.44 \times 10^{-5}$, 而转槽内因山的半宽度为 6 cm , 则对应的波长 L 为 24 cm , 所以地形波的水平波数 $k^2 = \frac{1}{L} = 4.17 \times 10^{-2}$, 可见 $l^2 - k^2 < 0$ 。由以上讨论而知,由山造成的地形波必定是被拦截的,即形成背风波。即使在强层结情况下, $N^2 = 8.7 \times 10^{-4}$, 甚至把典型的入流速度 U 取值为 1 cm/s , 得出的 Scorer 数 $l^2 = \frac{N^2}{U^2} = 8.7 \times 10^{-4}$, 也远小于 k^2 , 所以如果山后出现波,也只能是背风波。

由以上的转槽实验结果及对实验结果的分析,我们可以明确地得出:虽然大地形背风

波是由地形造成的,但是在不同的 Rossby 数及 Froude 数的控制下,特别是这两参数的结合,可产生出几种不同的波结构,甚至会形成低层涡旋。但总的说来,旋转效应主要是加强波的振幅而不是波长。在适当层结下,特别是层结较强时,在背风波的下游极易形成涡旋。而在季风区内青藏高原背风波对切变线上低涡及气旋波的发展起着重要作用。

从实验中还发现,非旋转情况下背风波的结构比旋转情况下要简单的多。无论是旋转或是非旋转,Froude 数都是一个关键参数,因为不仅振幅和波长随着 Froude 数的增大而增加,而且存在着两个关键的 Froude 数控制阀门。同时实验告诉我们,波的结构又主要依赖于层结和入流速度。因此,在大气中弱层结时,背风波的结构相对是简单的,但对中等及较强的层结,背风波同涡旋结合在一起产生了明显的复杂结构,这方面还待进一步研究。

致谢:因为许多实验是利用英国 Dundee 大学工程系的实验设备来完成的,特别是 P. A. Davies 教授作了很具体的指导帮助和支持,作者在此表示感谢!

参考文献

- 1 Queney P. The problem of airflow over mountains: A summary of theoretical studies. *Bull Amer Meteor Soc*, 1948, 9, 16- 26
- 2 Long R R. Some aspects of the flow of stratified fluids I: A theoretical investigation. *Tellus*, 1953, 5, 28- 42
- 3 Crapper G D. A three- dimensional solution for waves in the lee of mountains. *Luid Mech J F*, 1959, 6, 51- 76
- 4 Draizn P G. On the steady flow of a fluid of variable density past an obstacle. *Tellus*, 1961, 13, 239 ~ 251
- 5 Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere. *Adv In Geophys*, 1979, 21, 87- 230
- 6 Castro I P, Snyder W H, March G L. Stratified flow over three- dimensional ridges. *J Fluid Mech*, 1983, 135, 261 - 282
- 7 Davies P A, Boyer D L. Quasi- geostrophic flow past isolated obstacle. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 1984, V. XLIII- N. 1/ 2/ 3/ 4, 265- 275
- 8 Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Low Froude number flow past three- dimensional obstacles Part1: Baroclinically Generated lee Vortices. *Atmos J Sci*, 1989, 46, 1154 ~ 1164
- 9 Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Low Froude number flow past three- dimensional obstacles Part2: Up wind flow Reversal zone. *Atmos J Sci*, 1990, 47- 1489- 1511
- 10 Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Further results on lee vortices in low- Froude- number flow. *Atmos J Sci*, 1991, 48, 2204- 2211
- 11 Smith R B. Linear theory of hydrostatic flow over an isolated mountain. *Tellus*, 1980, 32, 348- 364
- 12 Smith R B. Linear theory of hydrostatic flow over an isolated mountain in isosteric coordinates. *Atmos J Sci*, 1988, 45, 3889- 3896
- 13 Ming Xue, Thorpe A J. A mesoscale numerical model using the nonhydrostatic pressure- based sigma- coordinate equations: model experiments with dry mountain flows. *Mon Wea Rev*, 1991, 119, 1168- 1185
- 14 Boyer D L, Chen R. Laboratory Simulation of mountain effects on large- scale atmospheric mountain system: the Rocky Mountains. *Atmos J Sci*, 1987, 44, 23- 42
- 15 Chen Ruirong, Li Guoqing. An experimental Simulation on the mechanical effect of Tibetan plateau on zonal circulation of stratified atmosphere. *Scientia Sinica(B)*, 1982, 25, 1091- 1102
- 16 桑建国. 大气中的内船舶波. *中国科学 B*, 1997, 27(6): 560 ~ 565
- 17 刘辉志. 中小尺度地形波及波的阻力的研究: [学位论文]. 北京: 北京大学地球物理系. 1998, 1 ~ 135
- 18 Scorer R S. *Dynamics of meteorology and climate*. Praxis Publishing Ltd, 1997. 148- 152

THE STUDIES OF LEE WAVES OVER A BIG TOPOGRAPHY THROUGH THE ROTATING TANK EXPERIMENTS

Gao Shouting Chen Hui

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer physics and Atmospheric Chemistry Institute Atmospheric physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

Abstract

Under the control of similarity theorem and non-dimensional parameters, a series of experiments about lee waves over a big topography in the rotating and stratified flow have been done. The results of experiment analyses show that Froude number is the most important parameter in the parameter space. It is found that both lee waves and eddy structures simultaneously occur in the downstream side of the big topography. For the non-rotating case, there still exist lee waves under the proper Froude number condition. The rotation plays an important role in increasing amplitude of lee waves, especially, in leading to downslope flow. Meanwhile, in the final of this paper, the driving effect of lee waves on eddy generation in the monsoon region and some problems to be further studied are discussed.

Key Words: Rotating and stratified flow, Rotating experiments, Lee wave and lee eddies.

征订启事

2000年我编辑部编辑出版1期增刊,内容为国家科委“九五”重中之中项目(96-908-02-05)“ENSO年际变化预测模式的研制”专题9篇文章和国家科技攻关项目96-020-01-06专题13篇文章,共205页。内容比较丰富,欢迎广大读者来函订阅,数量有限,金额:25元/本。

银行转帐:

户名:中国气象学会

开户银行:工商银行紫竹院分理处

帐号:144688—90

邮局汇款:

收款地址:北京市白石桥路46号中国气象学会

收款人:《气象学报》编辑部

邮编:100081