

旋转流体侵入型异重流实验研究

贾复 吴乃华

(中国科学院力学研究所)

张伯寅

(北京大学力学系)

提要 文中介绍了对旋转系统中侵入型异重流特征的若干实验室观察结果。在 Coriolis 力作用下,异重流取沿岸(壁)流形式,其宽度与其 Rossby 变形半径成比例,在实验的参数范围内,这种沿岸流均为不稳定的,在其演化过程中产生出气旋—反气旋涡对,乃至与岸壁分离与再附的大弯曲。本文还初步考察了波长、相对厚度与 Froude 数之间的关系。

关键词 异重流、旋转流、实验。

一、前言

在海洋、湖泊中经常出现的密度层状结构,常是由侵入型异重流 (Intrusive Gravity Current) 所致。河口或径流入口处,由于挟带着泥沙等物的人流及不同温盐特征的水体侵入另一层结的环境中,常常出现人流密度居于环境密度分布中间的情况。这时人流与环境介质重度的差异产生的浮力驱动着入流水体以侵入型异重流形式在环境流体中运动。而在大尺度范围内,异重流运动会受到地球自转所致的 Coriolis 力的影响,呈现出许多与非旋转系统中异重流不同的特征。

异重流由于其广泛地存在于自然界,至今被活跃地研究着。然而由于复杂的湍流混合在其中的重要作用,使得这种研究必然紧密地依赖于实验研究手段。

Simpson (1982)^[1] 对于近年来异重流研究情况做出了综述。关于侵入型异重流的若干特征, Britter 及 Simpson (1981)^[2] 做了实验研究,而关于 Coriolis 力对于有侧壁边界异重流的影响研究,仅仅在最近才由 Stern 等^[3]及 Griffiths 和 Hopfinger^[4]发表了他们的实验结果。

本文作者通过实验室模拟手段观察和研究了在浮力、Coriolis 力作用下的侵入型异重流(以下简称侵入流)在流入一有侧壁的层结(二层)环境时若干动力学特征。在本文中,我们简单介绍了实验装置和实验过程,给出了一些与文[4]相对应的实验结果,初步考察了旋转对于侵入流的影响。

二、实验装置和实验过程

主要实验装置为一旋转实验台及一长方形水槽。力学所地球流体力学实验室的旋转

本文于 1986 年 4 月 4 日收到。

实验台, 台面直径 1 米, 由力矩电机驱动, 用精密测速电机反馈系统控制, 可用转速范围为 0.1 圈/分—20 圈/分。有机玻璃制水槽尺寸为 200 厘米 × 18 厘米 × 25 厘米。水槽置于转台上, 并使其中心与转台中心重合。流动用染色法显示, 并使用安装在转台上方的 135 相机连续拍摄。用数字式多用计数器计时。整个实验采用闸板换水方法产生二层流体中的侵入流。

实验步骤: 首先在水槽内细心地用指定密度的盐水及清水建立两层流体系统, 尽力保持界面尖锐。插入闸板后在界面处细心注入适当密度的侵入流体(并用食品色素染色)至指定高度。然后逐渐使转台达到指定转速并稳定旋转约一小时, 使槽内水体达到整体刚性旋转。实验开始时首先平稳地撤去闸板, 同时开始计时、启动照象机拍摄俯视和侧视两个方向的流动图象, 将异重流流型、位置以及时间一同记录。侵入流头部位置、形状、宽度和后续体形状均可借染色良好地分辨出来。从而通过实验过程中连续拍摄的记录照片, 显示旋转侵入异重流的许多动力特征。

三、主要结果

图 1 所示为实验系统简图。

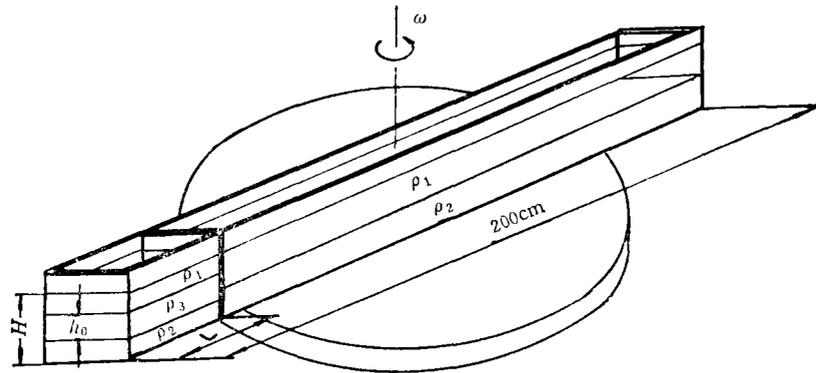


图 1 实验系统简图

相关的物理参量为: 水槽宽度 W ; 隔板距一端壁的距离 L , 二层流体上下层深度 d_1 和 d_2 (总深度 $H = d_1 + d_2$), 相应的密度为 ρ_1 和 ρ_2 , 隔板另一侧侵入流体密度 ρ_3 及厚度 h_0 , 重力加速度 g , Coriolis 参数 $f = 2\Omega$ (Ω 为转台角速度), 流体粘性系数 ν 。由于所包含的参量很多, 我们集中考察浮力及 Coriolis 力作用。在实验中恒取 $\rho_3 = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)$, $d_1 = d_2$, f 的变化范围为 0—2.06/秒, 减缩重力加速度 $g' = \frac{1}{2}g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$ 范围 0.686 厘米/秒²—10.29 厘米/秒²。流体粘性引出的两个无量纲动力参数 Reynolds 数 ($Re = (g'h)^{1/2}h/\nu$) 及 Ekman 数 (ν/fh^2) (其中 h 为异重流特征长度) 根据非旋转流体异重流实验结果^[1]及旋转流体异重流实验结果^[3]表明, 当 $Re > 10^3$ 时流动特征与 Re 数无关; 而对于侵入型异重流实验, Ekman 边界层作用可以忽略。因此, 控制流动特征的主要参

数为 Rossby 变形半径 $Ro = (g'h_0)^{1/2}/f, L, h_0$ 等, 由此我们可以组成 Froude 数 $\theta = fL^2/g'h_0$ 及相对深度 $\delta = h_0/H$ 等作为主要实验参数.

主要的实验结果可以归纳如下:

1. Coriolis 力的作用使侵入紧贴右壁

在隔板撤去后, 侵入流体在浮力作用下沿密度界面向前运动, 伴随而产生的 Coriolis 力随即作用于侵入流体. 在其前区的约一个 Rossby 变形半径尺度上侵入流就完全偏转沿着右壁(面对侵入流前进方向)行进了. 这与非旋转侵入情况非常不同. 而处于隔板后侧流体的很大一部分被约束在原处作反气旋运动, 而只有在右壁邻近处由于壁面法向速度为零造成, Coriolis 力的沿切向约束作用消失, 侵入流体才得以一定的宽度被释放出来, Coriolis 力把释放出的侵入流体紧压向右壁形成沿岸流, 其宽度与侵入流体密度、环境中两层密度差及旋转角速度等因素有关.

图 2 是从上方拍摄的照片, 可以清楚地看到侵入流体受 Coriolis 力作用而偏向右壁, 同时也可以看到隔板后侧的大部分被约束流体.

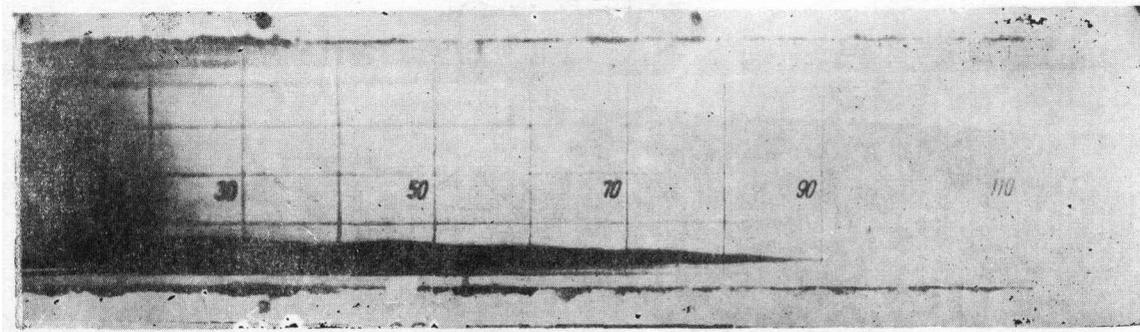


图 2 Coriolis 力使侵入偏向右壁, 并约束大部分流体释放狭窄沿岸流

侵入流沿壁(岸)以一定宽度前进. 我们把侵入宽度 l 规定为当侵入流充分发展起来但又未发生不稳定性引起的畸变之前侵入后续体的某种平均水平宽度. (实际是取第一个不稳定波波谷处流宽, 此量在沿程变化不大)图 3 表示的是实验观察到的无量纲侵入平均宽度 l/Ro 与 Froude 数的关系. 由图看到该量与 θ 无明显的关系, 因而可认为 l 正比于 Ro . 文 [3,4] 对于表面异重流得到同样结论, 文 [3] 得到的比例常数为 0.41—0.52 文 [4] 得到的是 0.6 ± 0.1 我们的情形大致为 0.7 ± 0.3 .

2. 侵入流头部速度

旋转系统内侵入流头部速度的最大特点是随距离增加而递减, 乃至头部可能在一定位置上停滞下来. 这与文 [3]、[4] 所报道的现象是一致的. 图 4 给出无量纲头部位移与时间的实验关系. 从中可以明显看出速度随前进距离下降的事实. 文 [4] 详尽讨论了速度衰减规律. 图 4 反映了同样的趋势, 预计, 同样的距离-时间指数衰减规律仍然存在, 但限于水槽长度未观察到异重流完全滞止的事实. 关于速度指数衰减的原因, 文 [4] 曾做了详细的探讨, 认为: 衰减原因是异重流通过环境流体时造成的惯性波幅射及异重流外缘处产生的涡旋向下层流体输运动量. 对于目前我们考虑的侵入型异重流而言, 外缘湍流混合由于上下密度界面的限制而小得多. 相反, 外缘处发展起来的不稳定波(或涡)却显

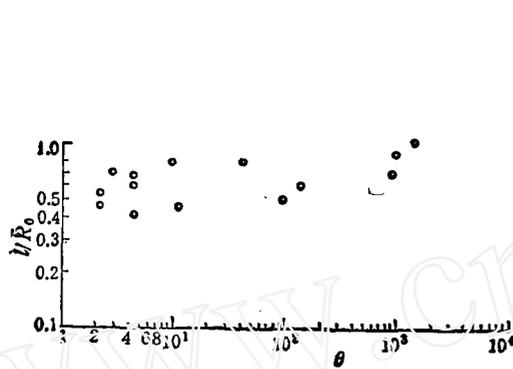


图 3 沿岸侵入异重体平均宽度与 R_0 之比
作为 θ 的函数

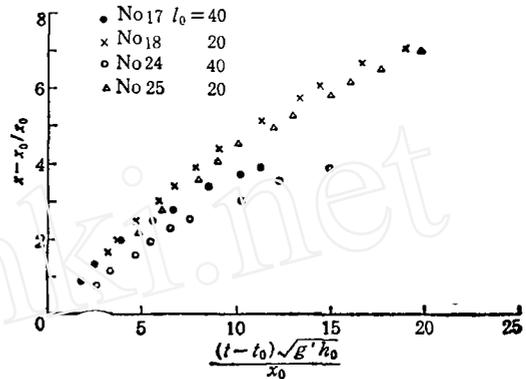


图 4 旋转侵入异重流头部位置与所经历
时间的关系

著得多,可以预料后者对于指数衰减的贡献应更为主要。

3. 关于稳定性

关于在旋转系统中浮力驱动的沿岸(垂直壁)流动 Griffiths 及 Linden^{[5][6]}, Chia, Griffiths 及 Linden^[7] 以及文 [3][4] 均进行了实验考察。其中流动的正压-斜压不稳定性及由此产生出的涡旋运动是引人注意的一大特征。文 [5][6] 对于亚、超临界情况考察了不稳定性的许多动力特征。文 [4] 中用旋转异重流方式考察了大 Reynolds 数的情形,然而在不稳定性方面未能观察到清晰的不稳定波的增长,而侧重讨论的是异重流外缘处活跃的湍流混合及不规则的涡旋运动。

对于我们目前考虑的侵入型异重流而言,则多数可以看到发展很完善的伴随涡旋运动。这是由于在相对小 Reynolds 数 (10^3) 范围,侵入流体限制在沿两层环境流体界面流动。无规则的湍流混合被限制,而侵入流体的动能及势能更多地贡献于这种旋转控制的不稳定波的增长。图版 1 照片 1 表示的是一个这种斜压涡发生发展的过程。

图版 1 照片 2 示出不同波长 λ 的不稳定波。根据迄今获得的尚不丰富的实验数据,我们把无量纲的不稳定波长作为 θ 的函数示于图 5。由图可以看出,对于 θ 值 10^0-10^3 范围内, $\lambda\delta/R_0$ 大致为与 θ 无关联的常数。量值范围约为 3 ± 1.5 , 实验结果的较大的散布原因是多样的。可能由于扰动的不确定使同一不稳定模在发展中波长值不恒定,更有可能由于一些不易控制的原因(例如初始阶段侵入流体所具有的初始涡度)使实际最速增长波为基本波的高次谐波。有趣的是,图 5 所示实验关系中表明的 δ 对于波长的影响与 Griffiths 及 Linden^[8] 对于旋转分层流体中孤立涡的不稳定研究中得到的结论定性是一致的,即随着 δ 减小,波数有减小的趋势。

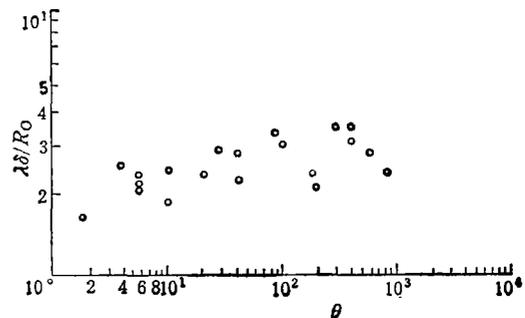


图 5 $\lambda\delta/R_0$ 作为 Froude 数 θ 的函数的实验结果。
 λ 为波长。

图版 I 照片 3 表示的情形说明,至少在一定的条件下,不稳定波是通过后前锋面首先与壁分离而后再附的过程而增长的. 文[3]的作者们观察到旋转表面异重流的这种现象,文献[4]的作者们则声称他们的大量实验中并没有观察到这种分离再附过程. 根据本实验情况看,这种分离过程是存在的,尽管我们考察的是侵入型,但动力机制应类似.

Stern^[9] 曾据理论分析预言,对于远上游位涡为零的旋转边界流,若其宽度与 Rossby 半径之比值超过某临界值(0.42),则流动可能出现“阻塞”而沿壁法向分离. 本实验考察的多数情形均满足此条件,因而观察到的分离有可能与这种“阻塞”现象有关. 当然实际初始位涡分布是复杂而难于测量的. 实验观察到的分离与实际沿岸流大弯曲的关系,其机制与 Stern 讨论的阻塞现象的关系均还需进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Simpson, J. E., Gravity Current in the laboratory, atmosphere, and ocean. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 14(1982), 213—234.
- [2] Britter, R. E., Simpson, J. E., A note on the structure of the head of an intrusive gravity current, *J. Fluid Mech.*, 112(1981), 459—466.
- [3] Stern, M. E., Whitehead, J. A., Hua, B. L., The intrusion of a density current along the coast of a rotating fluid, *J. Fluid Mech.*, 123(1982), 237—265.
- [4] Griffiths, R. W., Hopfinger, E. J., Gravity Currents moving along a laterad boundary in a rotating fluid, *J. Fluid Mech.*, 134(1983), 357—399.
- [5] Griffiths, R. W., Linden, P. F., The Stability of buoyancy driven coastal currents, *Dynam. Atmos. Oceans*, 5(1981), 281—306.
- [6] Griffiths, W. R., Linden, P. F., Laboratory experiments on fronts: Density-driven boundary currents, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 19(1982), 159—187.
- [7] Chia, F., Griffiths, R. W., Linden, P. F., Laboratory experiments on fronts: The formation of cyclonic eddies at upwelling fronts, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* 19(1982), 189—206.
- [8] Griffiths, R. W., Linden, P. F., The stability of vortices in a rotating, stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, 105(1981), 283—316.
- [9] Stern, M. E., Geostrophic fronts, bores, breaking and blocking waves, *J. Fluid Mech.*, 99(1980), 687—704.

A LABORATORY STUDY ON INTRUSIVE GRAVITY CURRENTS IN ROTATING FLUIDS

Jia Fu, Wu Naihua

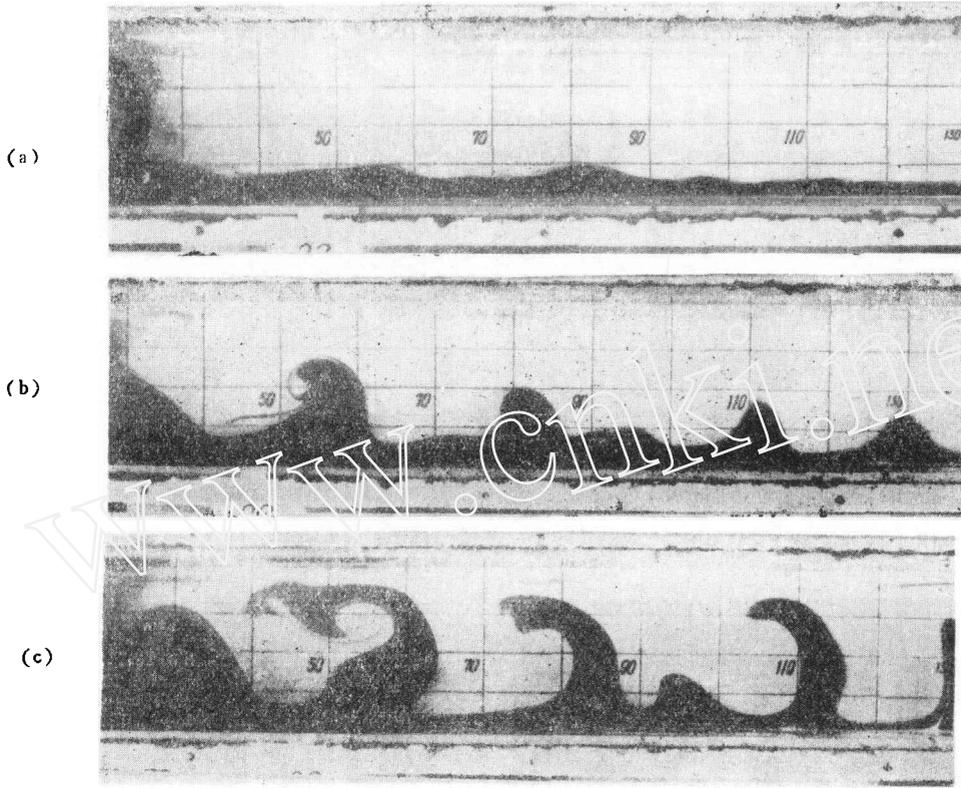
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Zhang Boyin

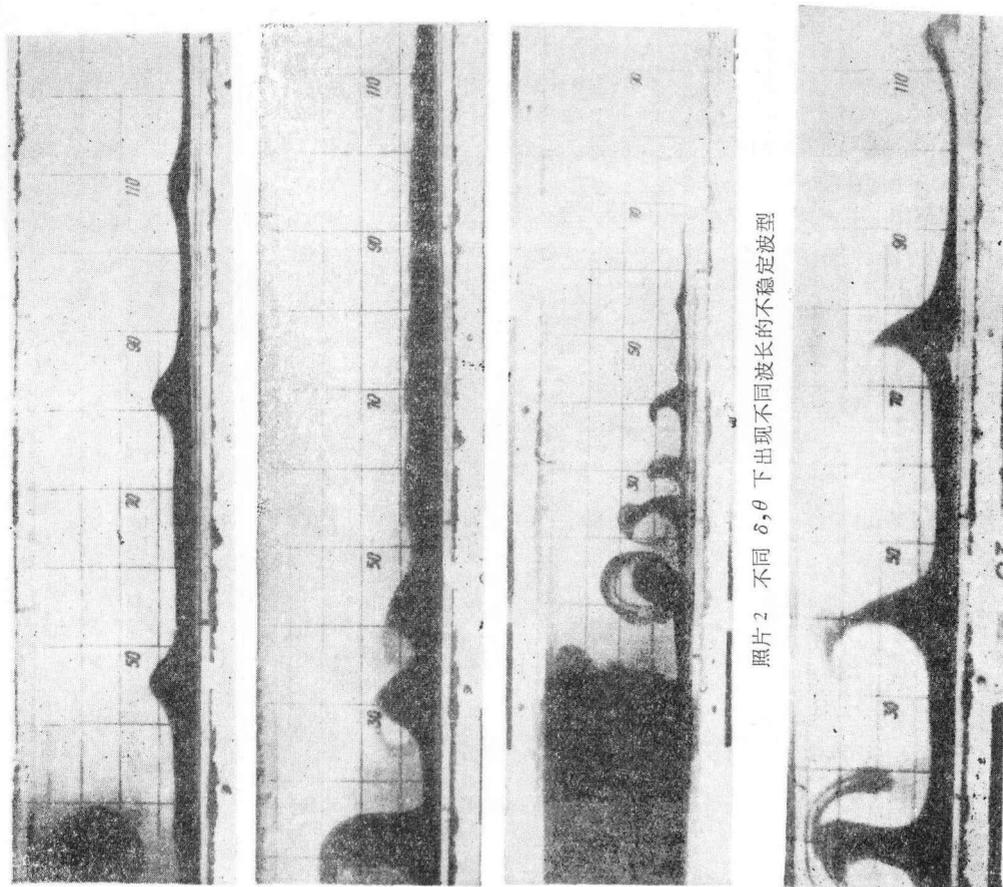
(Peking University)

Abstract Some laboratory experiments on intrusive gravity currents in rotating fluids are described. The following was observed. The currents took the form of coastal currents, whose widths were a constant fraction of corresponding Rossby deformation radii: for tested conditions, the currents were unstable producing eddy pairs and even detachment from the wall during evolution. Wave length-depth ratio-Froude number relationship was examined.

Key words gravity current, rotating fluid, laboratory experiment.



照片1 $\theta = 26, \delta = 0.75$ 时斜压涡发生发展过程示例



照片2 不同 δ, θ 下出现不同波长的不稳定波型

照片3 不稳定波通过与壁分离过程而增长的示例

(a) $\delta = 0.2, \theta = 188$

(b) $\delta = 1, \theta = 19$

(c) $\delta = 1, \theta = 494$