异重流在层结与非层结水体中沿斜坡运动的实验研究

贺治国^①, 林挺^①, 赵亮^①, 林颖典^①, 胡鹏^①, 冉启华^{②*}, 何昊哲^①

① 浙江大学海洋学院, 杭州 310058;

② 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058

* E-mail: ranqihua@zju.edu.cn

收稿日期: 2016-01-06; 接受日期: 2016-03-01; 网络出版日期: 2016-04-15

国家自然科学基金(批准号: 41376095)和浙江省自然科学基金(批准号: LR16E090001, Y5090084)资助项目

摘要 异重流在层结环境下的运动特性是海洋、大气等学科领域重要的研究主题之一. 本研究在不同层结盐水中开展一系列实验, 对突然释放型异重流在斜坡上的发展和演变特性进行了研究. 非层结水体中异重流头部速度先迅速增大, 而后基本不变减速幅度较小; 而在层结水体中异重流头部速度先增大, 之后明显减小, 其发展主要分为加速阶段、减速阶段和分离阶段三个过程. 异重流的运动特性可以用相对层结度 S 、雷诺数 Re 和理查德森数 Ri_0 等无量纲参数描述. 采用高速相机对异重流头部位置、头部速度和剖面速度等进行了分析. 用激光粒子图像测速技术(PIV)得到异重流的速度场和涡度场, 结果表明在异重流不同位置的涡度方向存在差异, 上边界的正向开尔文-亥姆霍兹涡是产生卷吸的主要原因, 下边界的负向涡度则由边界层引起. 本文揭示了层结与非层结水体下异重流运动特性的不同影响机理和特性, 结果可在河口盐水入侵、海底浊流发展等实际领域中得到应用.

关键词 异重流, 斜坡, 层结, 边界不稳定性, 激光粒子图像测速技术, 涡度, 速度剖面

1 前言

异重流通常是指当两种或以上具有不同密度的流体相互接触时, 密度差异使得其中一种流体沿着交界面流动, 在流动过程中不与其他流体发生全局性掺混的运动现象^[1]. 异重流在自然界和实际工程中很常见, 流体力学、大气科学、海洋科学、水利工程

等不同学科均对其进行了大量的研究^[2,3]. 由于在获取异重流野外实测资料上存在一定的困难^[2,3], 进行水槽实验是异重流研究的重要手段之一, 目前国内外学者们在均匀水体中的异重流实验研究^[4-9]方面已经取得了非常成熟的研究成果. 然而, 在自然界中, 由于温度、盐度等变化所致的流体密度差异普遍存在. 因此, 异重流大多是在层结环境下形成并发展的, 如

引用格式: 贺治国, 林挺, 赵亮, 等. 异重流在层结与非层结水体中沿斜坡运动的实验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 570-578
He Z G, Lin T, Zhao L, et al. Experiments on gravity currents down a ramp in unstratified and linearly stratified salt water environments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 570-578, doi: 10.1360/N092015-00176

海洋环境中的浊流、盐水楔、冷空气前锋、火电厂热水排放等. 受层结度、界面稳定性、掺混、内波等的影响, 异重流在层结环境中的运动特性更为复杂.

弄清层结环境下异重流的运动机理和动力特性对于深入理解大气中雾霾扩散、河口盐水楔入侵、港区淤积、湖泊中污染物输移、海底浊流引起的地貌变化与海底油气沉积层形成^[10-13]等问题有着重要的科学意义与实用价值. 因此, 近年来层结环境下的异重流研究已成为了该研究领域的重要热点问题之一.^[10-13]

按产生异重流方式的不同, 异重流实验可分为连续入流型(continuously)和突然释放型(instantaneous release)^[8]. Baines^[14,15]采用连续入流的方式较为系统地开展了盐水异重流在均匀层结水槽中的实验, 对线性层结水体下盐水异重流的发展演变特性进行了研究, 结果表明在较大的坡度上, 流体发展为“羽流型”(plume-like flow), 在较小的坡度上, 流体发展为“异重流型”(gravity-current flow). 最近, Cortés等人^[10]通过实验研究, 提出了判别异重流注入两层结水体后发展变化的控制参数. Snow 和 Sutherland^[11]对层结水体下浊流沿斜坡发展的分离高度进行了研究, 但其对头部速度的匀速假定值得商榷, 也缺乏深入分析层结度对界面不稳定性的影响. 张小峰等人^[12]在室内水槽中进行了温度层结水库异重流实验, 表明中层异重流分离点深度与温跃层平均密度梯度成线性的反比关系. Guo 等人^[13]对连续入流型异重流的二维结构进行了数值模拟, 结果与 Baines^[14,15]的实验数据较为吻合.

由此可知, 异重流在层结环境中的运动特性研究已经受到重视, 但对于层结环境下的突然释放型异重流沿斜坡的演变机理, 尤其是异重流本体与周围流体掺混的微观结构, 目前还缺乏较为系统的研究. 由于层结环境下异重流运动和演变的过程较为复杂、影响因素较多, 特别是异重流在沿斜坡的运动过程中, 始终存在与环境水体的掺混和动量交换, 其界面稳定性、流场和漩涡结构非常复杂, 现有实验对其形态、形成机理和演变过程的揭示远远不够.

因此, 本文通过一系列实验, 对突然释放型异重流在不同层结与非层结环境水体中沿斜坡的演变特性进行了对比研究, 分析了不同参数对异重流形态发展的影响, 并利用了激光粒子图像测速技术(PIV)得到不同条件下的异重流速度场和涡度场, 对不同

剖面的异重流速度进行对比, 以揭示和探讨其流场变化过程、涡度内部结构及其变化特性. 本文结果可在河口盐水入侵、海底浊流发展等实际领域中得到应用.

2 实验装置及步骤

实验在一个长方体实验水槽中完成, 水槽长度 $L=280$ cm, 宽度 $W=15$ cm, 高度 $H=46$ cm, 如图 1 所示. 实验开始前, 在水槽中缓慢注入清水生成非层结水体, 或基于“双缸法”设备^[16,17], 采用精密的流量控制系统以生成稳定的线性层结盐水. 在整个注水过程中, 闸门 1 的开口高度始终保持在 4 cm, 闸门 2 始终封闭. 在闸门 2 后方的高位槽内注入盐度为定值的盐水, 并使水位与主水槽中水位等高, 当主水槽中水位上升到 34 cm, 即水深 $h=34$ cm 时, 停止注水. 当闸门 2 内的水体静止后, 匀速提拉闸门 2, 由于闸门内和水槽内液体的密度差, 在水槽中会产生异重流, 并沿斜坡向下发展. 实验过程中, 采用 PIV 高速相机(帧率 200 fps)记录异重流的运动过程.

3 实验工况和条件

3.1 实验工况与特征参数

本次实验主要在具有不同层结度的层结与非层结水体环境中进行对比研究. Ungarish^[18]研究异重流在线性层结水体中沿平坡发展时, 用相对层结度 S 来描述环境水体的层结情况:

$$S = \frac{\rho_B - \rho_{h_0}}{\rho_{c_0} - \rho_{h_0}}, \quad (1)$$

式中, ρ_B 表示水槽底部水体密度, ρ_{h_0} 为斜坡顶端处的环境水体密度, ρ_{c_0} 为初始时刻闸门 2 中的流体密度. $h_0=9$ cm 为初始异重流厚度, 即闸门 2 后方槽体内的异重流水深.

流体之间的密度差异是产生异重流的根本原因^[1],

图 1 异重流实验水槽示意图(单位: cm)

有效重力加速度可用来描述二者之间的差异情况. Baines^[14]在进行连续入流型异重流的实验研究时, 定义初始有效重力加速度 g'_0 为

$$g'_0 = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}, \quad (2)$$

式中, $\Delta\rho = \rho_{c0} - \rho_{h0}$, 表示闸门 1 出口处异重流和环境水体的密度差异, $\bar{\rho}$ 为二者平均值, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度. 理查森数 Ri_0 用来描述密度梯度与剪切速度之间的相对作用情况, 定义为^[14,19]

$$Ri_0 = g'_0 \cdot \frac{d}{U^2} \cos \theta, \quad (3)$$

式中, θ 为实验坡度, d 为异重流头部厚度, U 为异重流头部运动的平均速度. 实验中异重流头部厚度 d 是沿程变化的, 在异重流运动距离(分离情况下为斜坡顶端至分离点, 非分离情况为整个斜坡长度)的三等分点处分别测量其头部厚度, 求其平均作为 d 的取值. 在一些实验中, 异重流会从斜坡上分离, 此时 U 表示异重流从斜坡顶端至开始分离时的平均速度.

此外, 描述异重流运动特性的参数还包括雷诺数 Re ^[8]和弗汝德数 Fr :

$$Re = \frac{h_l \cdot \sqrt{g'_0 \cdot h_l}}{\nu}, \quad (4)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'_0 h_l}}, \quad (5)$$

式中, 特征高度 h_l 取为闸门 1 的开口高度. 在“开闸式”异重流中, 控制闸门高度是一个很重要的参数, 在一定程度上可以影响异重流的头部厚度及形态^[20], 在前人所做的相关研究中, 有很多研究也是用 h_l 作为相应的特征参数^[11,21]. 实验中控制开口高度均为 4 cm, ν 为水的运动黏滞系数(单位为 m^2/s). 计算表明, 所有实验的雷诺数均远大于 1000, 说明各组实验均为湍流情况. 表 1 给出了以上各参数的单位和实验工况.

表 1 中的 N 为浮力频率, 定义如下^[14]:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\bar{\rho}_0} \frac{d\rho_0(z)}{dz}}. \quad (6)$$

当 $S < 1$ 时, 异重流不从斜坡上分离, 此时不存在分离高度 H_s . 当相对层结度 $S > 1$ 时, 异重流会发生分离并水平侵入环境水体, H_s 定义为水面至分离点的垂直高度.

3.2 实验水体层结性

实验前通过缓慢的溢流方式生成线性层结水体, 水体下层密度大、上层密度小, 加上盐水分子扩散缓慢, 因此能够形成很稳定的层结水体. 在层结水体生成后, 立即采用预设的装置抽取水槽中不同深度处环境水体的盐水样本以测量密度分布, 随即进行异重流实验, 运行时间约为 1~3 min. 实验结束后用盐度计测量盐度, 得到盐度梯度分布, 再根据“状态方程”^[22]可计算相应深度的盐水密度. 结果显示所有实验盐度测量值和密度值与拟合直线间的相关系数均在 0.96 以上, 如图 2 所示. 另外, 经过实验验证, 在线性水体生成后 6 h 内测得同一深度处的盐度前后几乎无变化, 表明在实验准备过程中环境水体一直保持着很好的线性层结结构, 可忽略环境水体自身的掺混.

4 结果分析

4.1 实验现象

图 3 和 4 分别给出了环境水体为清水($S=0$)和层结盐水时的异重流运动过程的影像图, 其中时间从闸门 2 开启一瞬间($t=0$)开始算起. 实验表明, 当相对层结度 $S < 1$ 时, 异重流不会出现水平分离的现象, 而是一直运动到斜坡底端并继续沿水槽底部运动. 随着异重流不断沿斜坡运动, 其头部厚度略微增大, 呈现半椭圆形. 而在层结情况下, 异重流头部和尾部厚度均出现明显增大, 清水环境中增大区域仅局限在头部附近, 且增大程度要比层结情况下小.

表 1 实验工况及相应参数

实验编号	θ (°)	g'_0 (kg/m ³)	S	H_s (cm)	d (cm)	N (1/s)	U (cm/s)	Re	Fr	Ri_0
1	9	0.16	0.694	N.A.	5.31	0.667	5.03	2663	0.62	3.32
2	9	0.079	1.357	25.11	4.53	0.705	2.1	1873	0.38	8.05
3	9	0.041	2.691	18.2	3.13	0.686	1.75	1351	0.43	4.18
4	9	0.225	0	N.A.	5.62	0	6.38	3072	0.66	3.07

图2 盐度、密度分布图(实验1)

(a) 盐度分布; (b) 密度分布

图3 清水中异重流运动过程($S=0$, $\theta=9^\circ$, $Re=3072$)(a) 加速阶段($t=3$ s); (b) 匀速阶段 1($t=14$ s); (c) 匀速阶段 2($t=22$ s)

当相对层结度 $S>1$ 时, 异重流与周围水体发生混合, 密度发生明显变化, 到达斜坡“中性密度层”^[14]的位置时, 与斜坡分离并水平入侵到环境水体中. 将该过程分为三个阶段: 1) 加速阶段, 异重流从斜坡顶端开始, 头部速度不断增加, 直至达到最大速度; 2) 减速阶段, 头部速度达到最大值后, 会伴随着一个缓慢的速度减小的过程, 直至沿斜坡方向的速度减小至接近 0; 3) 分离阶段, 异重流开始分离, 并沿水平

图4 层结水体中异重流运动过程($S=1.4$, $\theta=9^\circ$, $Re=1873$)(a) 加速阶段($t=12$ s); (b) 减速阶段($t=30$ s); (c) 分离阶段($t=115$ s)

方向侵入环境水体, 但在惯性的影响下, 斜坡上的异重流会沿斜坡上下缓慢振荡, 将此振荡距离定义为异重流的“分离区”. 在异重流与斜坡分离前, 随着异重流不断向下运动, 头部厚度近似呈线性增大. 分离区上部的异重流内, 在不同深度处也会出现多个呈“手指状”^[11]的水平入侵体. 当水平入侵停止并等待较长的一段时间后, 由于惯性作用的逐渐消失及环境水体的掺混, “中性密度层”的位置发生改变, 水平入侵体会出现轻微的上升. 整个过程中, 异重流与环境水体的交界面上都存在明显的掺混^[11,14].

实验过程中, 清水中异重流的运动速度要明显大于层结水体情况下异重流的运动速度, 清水中的异重流速度先迅速增大, 而后基本不变至坡底. 从异重流形态来看, 层结水体下的异重流整体与环境水体均存在明显的掺混, 而清水中掺混则集中在头部附近, 尾部变化幅度较小. 这是因为在层结水体中, 异重流与存在密度梯度的环境水体不断进行掺混, 使得不同深度处的异重流密度接近相应深度处的环境水体密度, 持续出现水平入侵, 使异重流在层结水体中整体掺混现象更为明显.

4.2 异重流头部位置、速度和分离深度

图 5 给出了异重流沿斜坡运动的头部位置随时间的变化, 头部位置的起点为斜坡顶端. 从图中可知, 在固定坡度下, 相对层结度越小, 异重流水平分离前沿斜坡运动距离越远, 分离深度越大. 其中, 清水条件下($S=0$, 非层结水体)的异重流运动速度最大, 运

动距离最远。

图6为异重流头部瞬时速度的变化曲线,对比实验1,2,3和4可知, S 越小,异重流平均运动速度越大.在环境水体为清水($S=0$)时,异重流运动速度先迅速增大,而后直至坡底,速度减小幅度较小.这是由于在非层结水体中有效重力加速度随深度改变远小于层结环境中的改变.同时,由于在清水中异重流运动速度较大,致使异重流在斜坡上停留时间较短,头部掺混造成的密度改变并不明显.在环境水体为层结水体($S>0$)时,速度的变化呈先加速后明显减速的趋势,说明层结度会抑制异重流沿坡的运动.造成该现象的原因有:1)层结水体密度沿水深逐渐增大,有效重力加速度不断减小,驱动力不断减小;2)随着异重流头部与层结水体的不断掺混,会使异重流头部密度不断减小,同时也会产生浮力损失.当底床摩擦和掺混作用所造成的阻力大于驱动力时,头部速度开始减小.

对于清水环境下的异重流,其运动过程中的实测平均弗劳德数为 $F_r=0.66$,比Snow和Sutherland^[11]给出的 $F_r=0.5$ 的值略大,这可能是由于他们将Benjamin^[5]在平坡下的异重流头部速度公式直接应

用到了斜坡条件下.

在层结水体中,当 $S>1$ 时,异重流会沿斜坡产生分离. Snow 和 Sutherland^[11]给出了异重流分离深度公式:

$$\frac{\Delta H'_s}{h_0} = \left[\frac{2 \tan \theta}{ES} \right]^{1/3}, \quad (7)$$

式中, $\Delta H'_s = H'_s - h_0$, H'_s 为利用上式计算所得的分离高度值, $h_0=9\text{ cm}$ 为初始异重流厚度, $E=U_e/U$ 为卷吸系数(U_e 为卷吸速率, U 为流动速率), S 为相对层结度. 利用该公式,比较了实验实测的相对分离深度值 $\Delta H_s/h_0$ 和相应的计算值 $\Delta H'_s/h_0$,如表2所示. 其中,文献[11]假定卷吸系数 E 为常量, $E=0.05(\pm 0.005)$. 可以发现,本研究实测的相对分离深度值与相应的计算值存在一定的差值. 这是由于文献[11]在推导(7)式时,假定层结水体下异重流头部速度恒定,而这与本研究观察不一致,导致最终的计算值与实际情况存在一定的差异. 但这也为后续研究提供了进一步改进的地方.

4.3 头部速度剖面

为了进一步分析异重流在层结与非层结水体中的运动特性,对相同初始密度的异重流在层结与非层结的情况下利用了PIV分别进行了实验. 实验中PIV采用的高速相机帧率为200 fps.

图7(a)和(b)分别为PIV高速相机记录的异重流在清水环境(匀速阶段)和层结环境(减速阶段)中在相同位置处的沿斜坡运动的情况,从图中可以看出,由于环境水体的密度梯度及速度剪切的存在,异重流在清水与层结盐水中运动是界面均出现明显掺混现象. 在清水中异重流头部后方带起的尾流在很短的距离内被卷入环境水体之中,而在层结盐水中,异重流与层结环境水体的交界面上表现出了典型的开尔文-亥姆霍兹不稳定性(Kelvin-Helmholtz instability)现象,并在头部后方出现由于不稳定性导致的明显的漩涡脱落.

图8给出了异重流分别在清水与层结盐水中运动的头部核心区同一位置的速度剖面,图中给出了

图5 异重流头部位置变化图

图6 异重流头部速度变化图

表2 相对分离深度值比较

	$\Delta H'_s/h_0$	$\Delta H_s/h_0$	差值(%)
实验2	1.67	1.79	7.2
实验3	1.33	1.02	23.3

图7 异重流在清水与层结盐水中沿斜坡运动与剖面位置
(a) 清水($\theta=9^\circ$, $S=0$); (b) 层结盐水($\theta=9^\circ$, $S=1.357$)

图8 不同时刻的异重流头部同一位置断面速度分布
(a) 清水($\theta=9^\circ$, $S=0$)剖面速度分布(时间: $s_1 < s_2 < s_3$); (b) 层结盐水($\theta=9^\circ$, $S=1.357$)剖面速度分布(时间: $s_1 < s_2 < s_3$)

间隔为 0.3 s 的 3 个不同时刻的速度剖面. 图中纵坐标 z 的方向垂直于斜坡向上, 0 点为 z 轴与斜坡的交点. 从图 8(a)可知, 清水中异重流速度剖面在 $z \approx 0.7$ cm 处, 异重流头部速度达到峰值, 且不同时刻剖面之间的速度大小层次分明, 没有互相交叉. 三个不同时刻的

速度剖面随时间增加依次递增, 表明该阶段清水中异重流的运动呈现整体加速状态. 在异重流与清水交界面处, 由于掺混, 流速减小; 距离底坡壁面处由于摩擦, 流速也相应减小. 理论上, 在紧贴斜坡壁面处的黏性底层内, 断面流速应逐渐减小为 0, 但实际上由于黏性底层厚度太小, 速度变化情况难以获取, 故图中并没有表现出 z 为 0 时流速为 0 的特点.

图 8(b)为与(a)对应时刻的 3 个速度剖面. 从图可知, 在层结环境下, 异重流头部核心区及交界面上的流体运动结构比清水环境下的要更复杂. 在 $z \approx 0.7$ cm 处, 异重流头部速度达到峰值, 但不同时刻的速度随时间增加而递减, 表明该阶段层结水体中异重流处于减速阶段. 在 $z > 0.7$ cm 处, 由于异重流与环境水体在交界面不断发生掺混作用, 断面速度会出现多次较小的突变, 流速结构较为复杂, 但总体呈减小趋势. 交界面以下为异重流的主体, 由于距掺混区域较远因而受湍动不稳定性的影响较小, 在靠近底坡边界层内黏性力的作用下, 速度不断减小. 在层结盐水中, 由于异重流与存在密度梯度的环境水体不断进行掺混, 从而在不同深度处出现持续水平入侵的趋势, 使得层结情况下异重流的运动是多种不同方向上的流体运动叠加的结果, 因而会出现更为复杂的结构.

在交界面以下, 随着时间的增加, 断面速度逐渐变小, 且时刻 1 和 2 剖面之间的速度差要大于时刻 2 和 3 剖面之间的速度差, 这表明层结盐水中异重流的减速程度越来越小; 在速度极大值以上, 由于交界面不规则掺混和漩涡的影响, 不同剖面之间的速度出现了相互交叉, 变化较为不规则.

4.4 速度场和涡度场

为分析异重流与周围环境水体的掺混现象及由此引起的流场变化, 本文基于 PIV 获得的速度场, 计算了异重流运动过程中的涡度分布. 本实验研究近似二维流动, 涡度始终与 z 轴平行, 涡度计算公式为 $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{U} = (\partial U_y / \partial x - \partial U_x / \partial y) \vec{z}$. 图 9 给出了异重流在清水环境(匀速阶段)和层结环境(减速阶段)运动过程中 0.2 s(40 张照片平均)内的平均速度场和涡度场.

在异重流与环境水体交界面上涡度为正值, 而异重流与底面斜坡交界附近则表现出了负向涡度. 在出现正向涡度的区域内, 由于不规则紊动作用的

图9 异重流在0.2 s内的平均速度场和涡度场

(a) 清水($\theta=9^\circ$, $S=0$); (b) 层结盐水($\theta=9^\circ$, $S=1.36$). 涡度值以逆时针方向为正, 仅显示了涡度绝对值大于0.5的等值线

影响, 速度场内的速度大小和方向都较为散乱; 而在出现负向涡度的区域内, 速度方向比较一致, 基本与斜坡平行向下, 但速度大小存在差异. 但从整体上来看, 由于异重流在清水中有着更快的运动速度和更大的 Re , 所以导致其上、下交界层的涡度相较于层结水体下的要更大些.

在下交界面上, 由于存在无滑移边界条件, 沿斜坡表面会形成边界层, 在边界层内的黏性力作用下则产生了负向涡度. 在上边界, 一方面存在较强湍动作用引起的开尔文-亥姆霍兹涡, 另一方面, 由于流体等压面与等密度面斜交, 也会造成斜压涡度的产生. 上边界的正向漩涡是这两种涡度综合作用的结果. 开尔文-亥姆霍兹涡是异重流和环境水体发生掺混的主要原因^[19]. 当 Re 越大、 Ri_0 越小时, 开尔文-亥姆霍兹涡越大, 掺混作用也越强. 后续研究有必要将上

边界处这两种方向相同的涡度区分开来以进一步研究异重流与周围环境水体发生掺混的影响因素^[19].

5 结论

通过在线性层结盐水与非层结水体环境中进行的一系列对比实验, 对突然释放型异重流沿斜坡的发展和演变特性进行了实验研究, 主要结论如下.

1) 相对层结度 $S>1$ 时, 异重流与斜坡分离, 并水平侵入到环境水体中, 同时有多个“手指状”的入侵体; 相对层结度 $S<1$ 时, 异重流则无与斜坡明显分离的现象;

2) 与异重流在清水中的运动相比, 异重流在层结水体运动时, 头部速度先出现较短的增大阶段, 而后出现明显的逐渐变小过程.

3) 层结水体中, 异重流的剖面速度分布在界面处会出现一个明显的突变点. 突变点以上的区域由于与层结水体的掺混和漩涡的影响, 速度分布较为散乱, 总体呈较小趋势, 突变点以下的速度在峰值流速出现后随着离底坡越近而逐渐减小. 在清水中异重流流速剖面较层结情况简单, 并未出现多次较小的突变.

4) 层结情况下, 由于异重流与存在密度梯度的环境水体不断进行掺混, 密度发生明显改变, 从而在不同深度处出现持续水平入侵的趋势, 相较于清水中的异重流, 其流场更加复杂.

5) 异重流与层结水体的交界面上会出现明显的开尔文-亥姆霍兹不稳定性现象, 加大了异重流与环境水体的掺混. Re 越大、 Ri_0 越小时, 掺混作用越强. 上边界的正向涡度是开尔文-亥姆霍兹涡和斜压涡度共同作用的结果; 下边界的负向涡度的产生则是由于边界层内黏滞力的作用.

本文讨论了层结与非层结水体下异重流运动特性的不同实验特性和影响机理, 但仅考虑了一种斜坡角度下的情况, 更多坡度下的研究有待进一步开展并进行系统的理论分析, 以便将来能更好地应用于实际领域中.

参考文献

- 1 张瑞瑾. 河流泥沙动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- 2 Tokyay T E, García M H. Effect of initial excess density and discharge on constant flux gravity currents propagating on a slope. Environ

- Fluid Mech, 2014, 14: 409–429
- 3 Dorrell R M, Darby S E, Peakall J, et al. The critical role of stratification in submarine channels: Implications for channelization and long runoff of flows. *J Geophys Res*, 2014, 119: 2620–2641
 - 4 Simpson J E. *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
 - 5 Benjamin T B. Gravity currents and related phenomena. *J Fluid Mech*, 1968, 31: 209–248
 - 6 Simpson J E, Britter R E. A laboratory model of an atmospheric mesofront. *Q J R Meteorol Soc*, 1980, 106: 485–500
 - 7 范家骅. 异重流运动的实验研究. *水利学报*, 1959, 5: 30–48
 - 8 Dai A. Experiments on gravity currents propagating on different bottom slopes. *J Fluid Mech*, 2013, 731: 117–141
 - 9 Dai A. Non-Boussinesq gravity currents propagating on different bottom slopes. *J Fluid Mech*, 2014, 741: 658–680
 - 10 Cortés A, Rueda F J, Wells M G. Experimental observations of the splitting of a gravity current at a density step in a stratified water body. *J Geophys Res*, 2014, 119: 1038–1053
 - 11 Snow K, Sutherland B R. Particle-laden flow down a slope in uniform stratification. *J Fluid Mech*, 2014, 755: 251–273
 - 12 张小峰, 姚志坚, 陆俊卿. 分层水库异重流试验. *武汉大学学报: 工学版*, 2011, 44: 409–413
 - 13 Guo Y, Zhang Z, Shi B. Numerical simulation of gravity current descending a slope into a linearly stratified environment. *J Hydraul Eng*, 2014, 140: 4014061
 - 14 Baines P G. Mixing in flows down gentle slopes into stratified environments. *J Fluid Mech*, 2001, 443: 237–270
 - 15 Baines P G. Mixing regimes for the flow of dense fluid down slopes into stratified environments. *J Fluid Mech*, 2005, 538: 245–267
 - 16 Fortuin J. Theory and application of two supplementary methods of constructing density gradient columns. *J Polym Sci*, 1960, 44: 505–515
 - 17 Ghajar A J, Bang K. Experimental and analytical studies of different methods for producing stratified flows. *Energy*, 1993, 18: 323–334
 - 18 Ungarish M. On gravity currents in a linearly stratified ambient: A generalization of Benjamin's steady-state propagation results. *J Fluid Mech*, 2006, 548: 49–68
 - 19 Samothrakis P, Cotel A J. Propagation of a gravity current in a two-layer stratified environment. *J Geophys Res*, 2006, 111: C1012
 - 20 Simpson J E. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. *Annu Rev Fluid Mech*, 1982, 14: 213–234
 - 21 Shin J O, Dalziel S B, Linden P F. Gravity currents produced by lock exchange. *J Fluid Mech*, 2004, 521: 1–34
 - 22 Fofonoff N P, Millard R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Spectrochim Acta A*, 1983, 106C: 203–209

Experiments on gravity currents down a ramp in unstratified and linearly stratified salt water environments

HE ZhiGuo¹, LIN Ting¹, ZHAO Liang¹, LIN YingDian¹, HU Peng¹, RAN QiHua² & HE HaoZhe¹

¹ Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

² College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Gravity current propagation in the stratified environment is one of key research topics in atmosphere and marine sciences, etc. A series of experiments were conducted to investigate lock-release gravity currents down a ramp into different ambient environments. The front velocity of gravity currents in constant-density ambient increases rapidly at first, then stays nearly constant; the front velocity in linearly stratification environments increases firstly but then decreases gradually. This development process can be divided into three stages, namely, acceleration stage, deceleration stage and separation stage. The flow can be characterized by the relative stratification S , the Reynolds number Re and the Richardson number Ri_0 . The front location, the front velocity and the velocity profile were analyzed by high speed camera. A particle image velocimetry (PIV) technique was applied to study the velocity field and vorticity field. The result showed that the counterclockwise vortexes appearing at the upper boundary were mainly due to Kelvin-Helmholtz instability and the clockwise vortexes in the lower boundary arose from the viscous forces in the boundary layer. This paper revealed the dynamic characteristics of gravity currents in constant-density ambient and linearly stratification respectively. The result can be applied in situations such as salinity intrusion of estuary and submarine turbidity currents, etc.

gravity current, ramp, stratification, instability, PIV, vorticity, velocity profile

doi: 10.1360/N092015-00176