

· 综合 ·



# 低浓度盐水异重流运动规律试验研究

叶海鹏，胡江，许媛媛，许克勤，李瑶，廖江花

(重庆交通大学，国家内河航道整治工程技术研究中心，重庆 400074)

**摘要：**船舶通过河口船闸将导致盐水潜入闸室继而侵入淡水河道造成水质恶化。既有研究集中于海船闸高浓度盐水入侵(浓度 20‰~30‰)，但对于河口船闸低浓度盐水(浓度 2.23‰~4.17‰)入侵过程及规律尚不清楚。基于室内大尺度水槽试验，研究了低浓度盐水的运动特性，探讨低浓度盐水运动形态的演变过程、盐度分布与盐水运动形态的关系、盐水头部运动速度以及密度弗劳德数与浓度的关系。结果表明，受密度梯度力驱动，低浓度盐水仍然作异重流运动并集中在底部输移；低浓度盐水异重流运动形态的转化距离相比高浓度盐水更远，其运动状态受底床阻力影响分为滑塌阶段和自相似阶段，密度弗劳德数在滑塌阶段为常数( $Fr_H = 0.32$ )、自相似阶段随时间线性递减(斜率为 -0.01)。

**关键词：**低浓度盐水；盐水运动特性；盐水运动速度；密度弗劳德数

中图分类号：U641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)06-0012-06

## Experimental study on movement characters of low concentration saline density current

YE Haipeng, HU Jiang, XU Yuanyuan, XU Keqin, LI Yao, LIAO Jianghua

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Ships passing through estuarine locks will cause salt water to sneak into the lock chamber and then invade the freshwater channel, causing water quality deterioration. Previous researches focused on the invasion of high concentration salt water (concentration 20‰~30‰) in sea locks, but the invasion process and characters of low concentration salt water intrusion (concentration 2.23‰~4.17‰) in estuarine locks are still unclear. Based on the large-scale water tank experiments, this paper studies the motion characteristics of low concentration salt water and discusses the evolution process of low concentration salt water motion form, the relationship between salinity distribution and motion form, the motion velocity of salt water head, and the relationship between density Froude number and concentration. The results show that, driven by the density gradient force, the low concentration salt water still moves as a heterogeneous flow and concentrates at the bottom. The transformation distance of the heterogeneous flow form of low concentration salt water is farther compared with that of high concentration salt water, and its kinematic state can be divided into the sliding stage and self-similarity stage effected by the bottom-bed drag force. The density Froude number is constant in the sliding stage ( $Fr_H = 0.32$ ), and decreases linearly with time in the self-similarity stage (slope of -0.01).

**Keywords:** low concentration salt water; salt water kinematic properties; salt water kinematic velocity; density Froude number

河流或内陆河道与沿海海洋的交界处常发生盐水入侵淡水水体现象，盐水入侵可以到达离海

岸线很远的地方<sup>[1]</sup>，对饮用水、农业、工业生产带来负面影响，控制盐水侵入内河已成为很多学

收稿日期：2023-10-13

作者简介：叶海鹏（1998—），男，硕士，从事水利工程、生态航道研究。

者重点关注的问题。平陆运河直接连通西江和钦江水系, 南下进入北部湾钦州港出海, 是一条通江达海的水运通道。青年船闸与茅尾海直接贯通, 平陆运河疏浚工程存在盐水入侵至青年闸下继而上溯至青年库区从而危害库区水资源与环境的风险。因此, 开展低浓度盐水运动特性试验研究, 探明盐水运动特性与浓度的关系, 可为平陆运河工程建设提供强有力的技术支撑。

驱动盐水入侵的影响因素很复杂, 取决于河道形状、流动方向、底部坡度和浓度(盐水、低浓度盐水、接近淡水)<sup>[2]</sup>。茅尾海盐水主要通过船闸启闭间接入侵平陆运河, 船闸盐水入侵发生在船舶过闸期间, 进出船闸时的水平环流和闸门打开时的密度交换流将导致盐水经过船闸入侵至内河。由于交换流通常是引起盐水入侵的主导因素, 大多数防咸措施都集中于限制交换流的发展<sup>[3]</sup>, 利用盐水密度比淡水高的特性在河道底部选择性回收, 而这一措施主要针对高浓度盐水, 例如荷兰三角洲船闸<sup>[4]</sup>和巴拿马船闸<sup>[5]</sup>的闸下盐度均达到35‰以上, 文献中有许多关于高浓度盐水运动特性的研究成果及防咸措施综述<sup>[6-7]</sup>。

青年船闸距海洋较远, 闸下盐度一般为2.5‰左右, 极端情况下最多达到10‰~15‰, 船闸面临低浓度盐水入侵问题, 低浓度盐水会经过船闸向淡水内河入侵。尤其是运河疏浚导致航道宽度和水深增加引起水流交换加剧, 意味着更多的盐水与淡水发生交换; 同时, 青年船闸投入运行后, 船只进出闸室将会导致水位调平时的水头差入侵以及闸门开启后的密度交换流入侵。2014年, Seiffert等<sup>[8]</sup>基于北海南部平均盐度分布数学模型探明了易北河口低浓度盐水入侵的典型位置; 荷兰学者基于Volkerak船闸的运行资料研究了潮汐

对低浓度盐水入侵的影响。当前研究关于低浓度盐水运动特性的研究较少, 学者对于低浓度盐水的运动特性尚不清楚<sup>[9]</sup>。

本文开展低浓度盐水异重流运动特性物理模型试验, 利用盐度在线监测设备测量各断面水体盐度。依据盐度数据对不同浓度条件下的盐水入侵运动特性参数进行对比分析, 探讨低浓度盐水运动过程中的盐度时空分布和异重流运动特性, 旨在为河口大型船闸运行和进一步发展高效防咸措施提供重要的理论支持。

## 1 试验设置

### 1.1 试验设计

低浓度盐水运动规律试验在重庆交通大学教育部水利水运重点实验室尺寸为54 m×1 m×2 m(长×宽×高)的长方体透明玻璃水槽中进行, 水槽长宽比为54, 水槽高度可以保证清晰观察到盐水运动情况。利用无机染料对盐水着色模拟盐水入侵过程。试验水槽的左侧为着色盐水(密度为 $\rho_1$ ), 右侧为无色淡水(密度为 $\rho_0$ ), 试验水位 $H=1.4\text{ m}$ 。水槽中部设置电动闸门分隔盐水与淡水, 电动闸门由调速电机控制, 能够消除人工启闭造成的扰动和偶然误差影响。待闸门两侧水体静止后匀速升起闸门, 盐水沿着水槽底部向右侧入侵。试验中使用尼康摄像机从侧面记录盐水运动全过程, 在水槽中轴线处布置6个测量断面, 每个测量断面均垂直于底板, 并按照距离底板0.2 $H$ 、0.5 $H$ 、0.8 $H$ 布置S80传感器, 见图1。如图2所示, 传感器外径19.05 mm, 长254 mm, 其工作原理为利用膜电势差测量水体盐度, 采集频率为10 s/次, 精度为2%; 利用电缆将传感器连接至LQ800数据采集仪即可实时记录S80传感器的盐度数据。

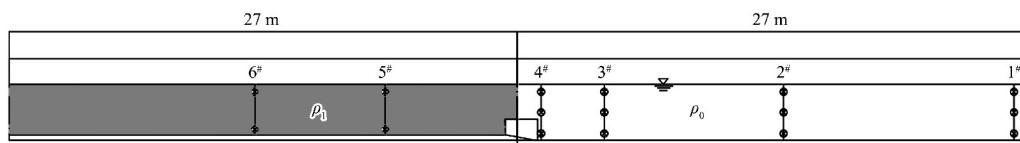


图1 船闸低浓度盐水入侵水槽试验



图 2 试验设备

## 1.2 特征参数和试验工况

流体之间的密度差是产生异重流运动的根本原因，采用有效重力加速度  $g'$  描述盐淡水密度差异及构造其他参数<sup>[10]</sup>，定义为：

$$g' = g \left( \frac{\rho_1 - \rho_0}{t_c} \right) \quad (1)$$

式中： $g$  为重力加速度， $t_c$  为特征时间。

为保证试验结果的可比性，以水槽宽度  $x_0 = 1 \text{ m}$ ，特征时间  $t_c = x_0 / (g' x_0)^{1/2}$  为参量，对盐水楔头部位置  $x$  和运动时间  $t$  进行无量纲化：

$$x^* = x/x_0 \quad (2)$$

$$t^* = t/t_c \quad (3)$$

异重流的运动特性主要取决于重力、阻力与惯性力，弗劳德数的物理意义为惯性力与重力的对比关系，可以描述异重流运动特性<sup>[11]</sup>。弗劳德数  $Fr_b$  的定义为：

$$Fr_b = u_{ave} / \sqrt{g' h_{ave}} \quad (4)$$

式中： $u_{ave}$  为异重流平均速度； $h_{ave}$  为异重流平均高度； $v$  为清水的运动黏滞系数，取  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

开展 2 组低浓度盐水入侵试验，盐水浓度  $S$  分别为  $2.23\%$  和  $4.17\%$ ，并采用张朋<sup>[11]</sup>得到的

2 组试验数据作为高浓度对照组，试验工况及参数见表 1。

表 1 试验工况及相应参数

试验组	$H/\text{m}$	$\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$S/\%$	$g'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$u_{ave}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$Fr_b$	数据来源
1	1.4	1 001.6	2.23	0.02	0.04	0.49	实测
2	1.4	1 003.6	4.17	0.04	0.08	0.52	实测
3	1.4	1 007.7	10.00	0.08	0.12	0.51	对照
4	1.4	1 011.5	15.00	0.11	0.18	0.58	对照

## 2 试验结果与分析

### 2.1 低浓度盐水异重流运动形态演变特性

试验组 1 ( $S = 2.23\%$ ) 中盐水楔的运动形态如图 3 所示，闸门突然提起后，低浓度盐水开始运动，运动过程中盐水和淡水水体的交界面分明，分层清晰，低浓度盐水在底层呈楔形前进。图 3 显示出低浓度盐水的运动形态演变分为 3 个阶段：如图 3a) 所示，低浓度盐水形成的异重流呈楔形从底部入侵至淡水侧，淡水于顶层向盐水侧运动；如图 3b) 所示，盐水异重流头部随时间逐渐向淡水侧运动，当盐水楔头部运动至水槽壁时，楔体向上爬高，盐、淡水在水槽中做往复振荡运动；如图 3c) 所示，最终达到淡水在上层、盐水在底层的平衡状态。试验结果表明，低浓度盐水运动形态与高浓度盐水异重流运动形态的演变过程一致，表明低浓度盐水仍然为异重流运动。



a) 盐水上溯



b) 盐水爬升

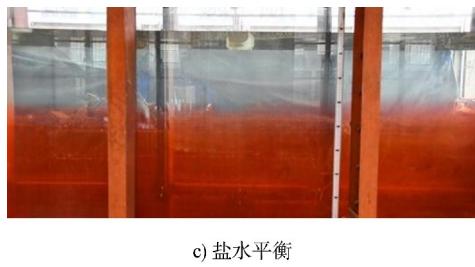
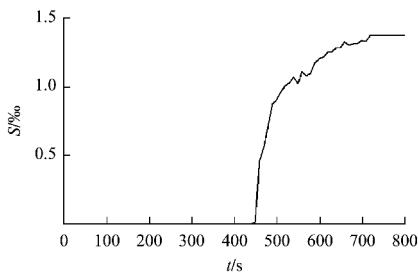
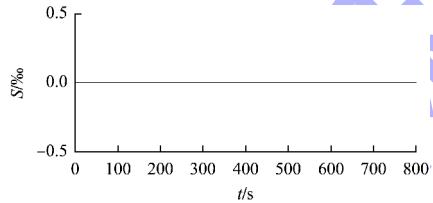


图3 低浓度盐水运动形态

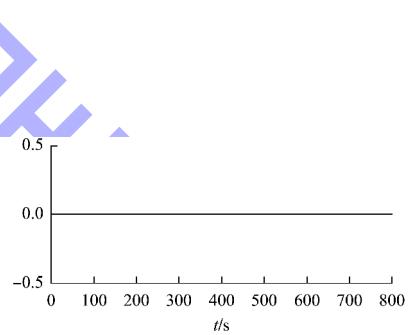
为了进一步定量分析低浓度盐水的运动特性, 以试验组1为例分析各测量断面垂向的盐度分布, 监测结果见图4~6。1<sup>#</sup>断面距离盐水入侵起点闸门最远, 盐水从底部依次入侵到3<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>断面。



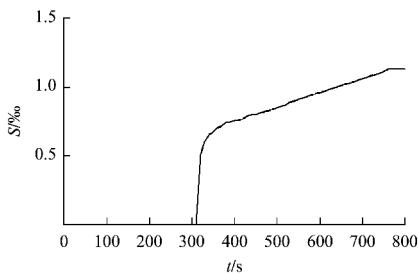
a) 底层



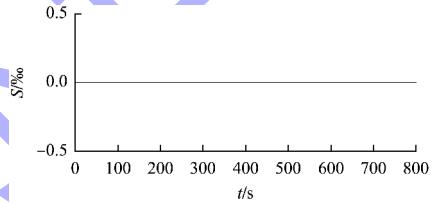
b) 中层



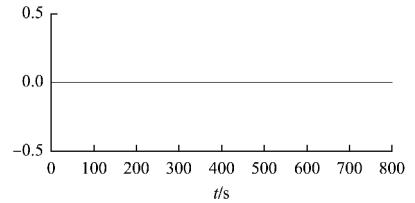
c) 表层

图4 1<sup>#</sup>断面盐度分布

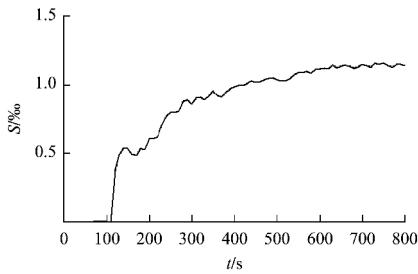
a) 底层



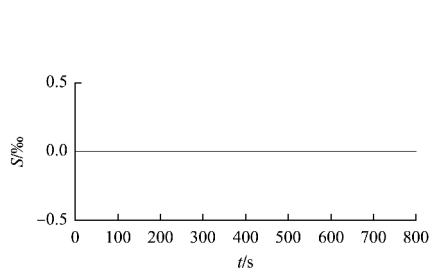
b) 中层



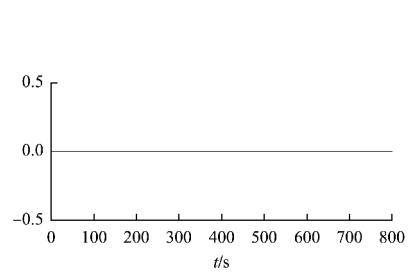
c) 表层

图5 2<sup>#</sup>断面盐度分布

a) 底层



b) 中层



c) 表层

图6 3<sup>#</sup>断面盐度分布

## 2.2 盐水头部运动速度与浓度的关系

异重流的头部运动速度是反映异重流运动

$t = 200$  s时, 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>断面底层水体盐度为0‰, 3<sup>#</sup>断面底层水体盐度为0.52‰;  $t = 400$  s时, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>断面底层水体盐度分别为0‰、0.61‰、0.98‰;  $t = 600$  s时, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>断面底层水体盐度分别为1.21‰、0.95‰、1.09‰;  $t = 800$  s时, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>断面底层水体盐度分别为1.25‰、1.09‰、1.14‰。在低浓度盐水运动过程中, 3个断面中层和表层的水体盐度均为0‰, 表明低浓度盐水集中在底层运动, 并未扩散到中层和表层水体, 从定量角度进一步证明了低浓度盐水仍为异重流运动。

图4 1<sup>#</sup>断面盐度分布

特性的参数之一, 为了进一步揭示低浓度盐水的运动规律, 分析盐水异重流的头部运动速度

与浓度的关系。Rottman 等<sup>[12]</sup>的研究成果从理论和实验两方面证实了异重流的运动会先后经历 2 个阶段：1) 滑塌阶段从闸门打开开始，该阶段异重流的头部位移随时间线性增长；2) 自相似阶段的惯性力与浮力处于平衡阶段，头部位移与时间成非线性关系。滑塌阶段和自相似阶段的转化位置通过最小二乘法对  $x^*$  线性回归得到，见图 7。

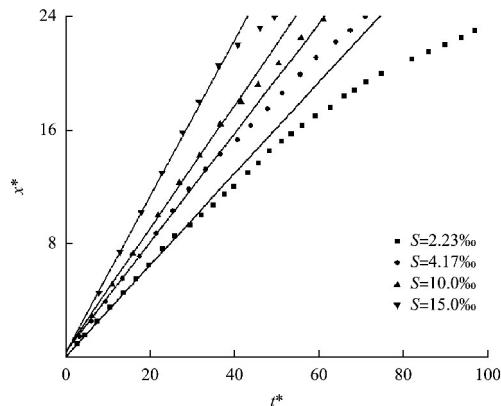


图 7 盐水头部位置与时间的关系

低浓度 ( $S$  为 2.23‰~4.17‰) 与高浓度 ( $S$  为 10‰~15‰) 盐水运动过程中的主要参数对比见表 2。滑塌阶段通过  $x^* = kt$  表示盐水异重流头部位移与运动时间的线性关系，自相似阶段则通过公式  $x^* = a(t^*)^b$  表示， $a$ 、 $b$  通过非线性拟合得到。试验组 1 ( $S=2.23\%$ ) 低浓度盐水运动形态的转化位置  $x_{fl}^*=21.0$ ，试验组 2 ( $S=4.17\%$ ) 低浓度盐水运动形态的转化位置  $x_{fl}^*=19.6$ ，试验组 3 ( $S=10\%$ ) 高浓度盐水运动形态的转化位置  $x_{fl}^*=18.0$ ，试验组 4 ( $S=15\%$ ) 高浓度盐水运动形态的转化位置  $x_{fl}^*=15.0$ 。表明固定水深条件下，低浓度盐水在滑塌阶段的运动距离相较于高浓度盐水更长。造成该现象的原因是高浓度盐水异重流的有效重力加速度大于低浓度盐水，其入侵的驱动力更大，受到环境阻力的影响更小，因此线性阶段运动距离越远。对于低浓度盐水异重流运动，虽然其受到环境阻力的影响更显著，但只要存在密度梯度力，其头部仍然会不断向前入侵。

表 2 低浓度与高浓度盐水异重流运动过程主要参数对比

试验 编号	转化位置 $x_{fl}^*$	$u_{fl}^*$	滑塌阶段		拟合优度 $r^2$	自相似阶段		
			头部运动速度 $u_{fl}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$k$		$a$	$b$	拟合优度 $r^2$
1	21.0	0.29	0.05	0.323	0.999	0.374	0.964	0.999
2	19.6	0.33	0.08	0.392	0.999	0.476	0.951	0.999
3	18.0	0.36	0.09	0.442	0.999	0.534	0.950	0.999
4	15.0	0.38	0.12	0.558	0.999	0.643	0.960	0.999

盐水异重流头部运动速度与浓度的关系如图 8 所示，对比试验组 1~4 可知，浓度越大，盐水头部运动速度越大；当闸门升起后，盐水头部运动速度先迅速增大至最大速度，在滑塌阶段几乎趋于匀速运动，底床阻力导致低浓度盐水运动速度的减小幅度相比高浓度盐水更小。造成该现象的原因为：1) 低浓度盐水异重流的有效重力加速度小于高浓度盐水，致使低浓度盐水入侵的驱动力相对较小，运动初始速度更低；同时，运动阻力与运动速度成正比，致使低浓度盐水运动受到底床阻力的影响较小，速度下降幅度相对更小。2) 随着盐水头部与淡水的不断掺混，盐水头部密度不断减小，

有效重力加速度减小，驱动力也随之减小；同时，盐水头部与周围水体的掺混也会产生浮力损失，当底床摩擦和掺混作用造成的阻力大于驱动力时，盐水头部运动速度开始减小。

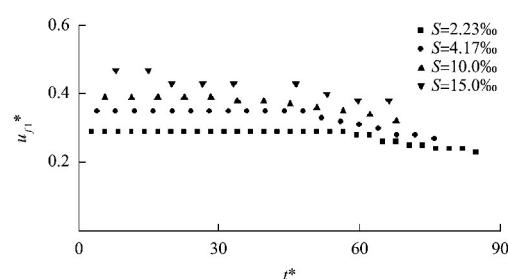


图 8 盐水异重流头部运动速度与浓度的关系

### 2.3 密度弗劳德数与浓度的关系

盐水异重流的密度弗劳德数定义为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} Fr_{Hf} = \frac{u_f}{\sqrt{g'H}} \\ Fr_H = \frac{u}{\sqrt{g'H}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Fr_{Hf}$  为盐水异重流密度弗劳德数的理论值;  $u_f$  为盐水异重流头部速度的理论值;  $Fr_H$  为盐水异重流密度弗劳德数的试验值;  $u$  为盐水异重流头部速度试验值,  $u = \xi \sqrt{g'H}$ ,  $\xi$  为速度系数。

Benjamin<sup>[14]</sup>根据水平矩形明渠中稳定传播的重力流能量守恒理论提出头部速度计算公式为  $u = 0.50 \sqrt{g'H}$ ; Turner<sup>[15]</sup>给出了带自由液面的考虑黏性效应的盐水头部速度计算公式  $u = 0.47 \sqrt{g'H}$ 。对各试验组的盐水头部速度分别除以对应的  $\sqrt{g'H}$  进行无量纲化, 得到各组对应的弗劳德数。

图 9 为盐水异重流密度弗劳德数与浓度的关系, 由图可知,  $Fr_H$  从滑塌阶段到自相似阶段会发生明显变化,  $Fr_H$  在滑塌阶段几乎趋于定值, 而在自相似阶段会随着头部位置增高逐渐减小。滑塌阶段低浓度盐水  $Fr_H$  范围为 0.29~0.35, 平均值为 0.32; 滑塌阶段高浓度盐水  $Fr_H$  范围为 0.39~0.48, 平均值为 0.44。与 Benjamin 理论值相比偏小, 但较为接近 Turner 的经验值。一方面认为水槽尺度效应造成实测速度偏小; 另一方面说明 Turner 经验公式更适用于高浓度盐水头部速度计算, 而  $\xi=0.32$  时, 经验公式更能准确计算低浓度盐水的头部速度。

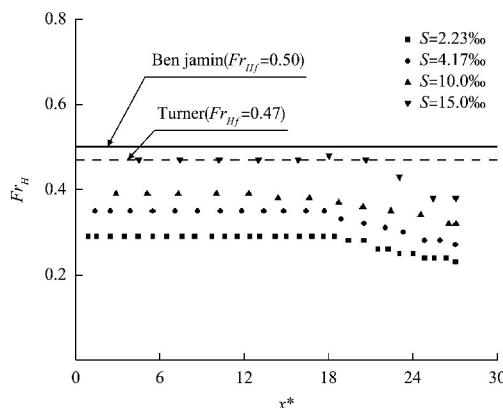


图 9 盐水异重流弗劳德数与浓度的关系

从图 9 可以看出,  $Fr_H$  在自相似阶段随着头部位置向前运动而逐渐递减。其中低浓度盐水  $Fr_H$  在自相似阶段的变化范围为 0.26~0.31, 递减斜率为 -0.01, 最大差异比例为 16.13%; 而高浓度盐水  $Fr_H$  在自相似阶段的变化范围为 0.32~0.48, 递减斜率为 -0.02, 最大差异比例为 33.33%。可以发现, 自相似阶段高浓度盐水相比低浓度盐水  $Fr_H$  变化幅度更大, 这是因为高浓度盐水头部运动速度更大, 受到的底床阻力以及头部与环境水体的加强掺混作用更为显著, 致使盐楔头部速度下降幅度更大; 而低浓度盐水头部运动速度更小, 受到的底床阻力更小, 盐楔头部速度下降幅度更低, 因此密度弗劳德数在自相似阶段的递减斜率更小。

### 3 结论

1) 低浓度盐水运动性质仍为异重流运动, 驱动力为密度差引起的密度梯度力; 低浓度盐水以盐水楔潜入环境水体(淡水)中, 若没有后边界限制, 盐水异重流仍会在密度梯度力作用下入侵至无穷远。

2) 各测量断面底层水体盐度显著大于中层和表层水体盐度(趋近于 0), 表明低浓度盐水异重流集中在底床输移, 盐水异重流头部与环境水体发生掺混, 但这部分盐水并未扩散至中、表层水体中。

3) 低浓度盐水的运动状态分为滑塌阶段和自相似阶段, 处于滑塌阶段时, 盐水异重流做匀速运动, 无量纲化速度  $u_{fl}^* = 0.31 \pm 0.02$ ; 当底床阻力大于驱动力, 运动状态由滑塌阶段转化为自相似阶段, 转化位置  $x_{fl}^* = 20.3 \pm 0.7$ , 此阶段运动速度随时间递减。当盐度为 15‰时, 盐水异重流最早进入自相似阶段( $x_{fl}^* = 15.0$ ), 自相似阶段指数为 0.960。

4) 低浓度盐水密度弗劳德数在滑塌阶段为 0.32, 在自相似阶段线性递减且斜率为 -0.01, 最大差异比例为 16.13%; 而高浓度盐水弗劳德数在滑塌阶段为 0.44, 在自相似阶段线性递减且斜率为 -0.02, 最大差异比例为 33.33%。当速度系数为 0.32 时, 经验公式能够准确计算低浓度盐水头部运动速度。

(下转第 31 页)