



# 有支流分流影响下 河道盐水上溯特性试验研究\*

王艳萍, 廖江花, 许克勤, 张鹏, 杨胜发

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为阐明流入速度和盐水浓度变化情况下, 盐水上溯距离及运动速度随之产生的变化, 对青年库区河道内盐水上溯特性进行研究, 分析河道来流条件及盐度变化对盐水上溯过程的影响。通过在小型概化水槽中模拟青年水库盐水沿河道上溯的过程, 进行试验研究。结果表明, 在上游来流的限制下, 盐水的上溯距离在径流作用下保持稳定, 上溯过程受到支流分流的显著影响。由于支流口处来流对盐水的冲击, 大部分盐水被冲散并从支流口处流出, 少量盐水保持稳定并继续延左岸上溯。随着水深增加, 盐水上溯距离对浓度变化的敏感度减小。在相同水深条件下, 浓度提高会加快盐水上溯速度, 上溯所需的时间越短; 而在相同浓度下, 水深的增加同样能显著提升盐水的上溯速度。

**关键词:** 概化模型试验; 盐水上溯; 流速影响; 浓度影响

**中图分类号:** U612; P746

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2025)08-0146-08

## Experiment on characteristics of saltwater intrusion in river channels affected by branch river diversion

WANG Yanping, LIAO Jianghua, XU Keqin, ZHANG Peng, YANG Shengfa

(The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to clarify the changes in the intrusion distance and movement speed of saltwater as the flow velocity and salt concentration change, we carry out a study on the saltwater intrusion characteristics in the riverbed of Qingnian reservoir area, and analyze the influence of river inflow conditions and salinity changes on the saltwater intrusion process. We conduct experimental research by simulating the process of saltwater intrusion along the riverbed in Qingnian reservoir area in a small generalized flume. The results show that under the restriction of upstream flow, the intrusion distance of saltwater remains stable under the action of runoff, and the intrusion process is significantly affected by the tributary diversion. Due to the impact of the upstream flow on saltwater at the branch point, most of the saltwater is dispersed and flows out of the branch point, while a small amount of saltwater remains stable and continues to intrusion along the left bank. As the water depth increases, the sensitivity of the intrusion distance to the concentration change decreases. Under the same water depth condition, the increase in salt concentration will accelerate the intrusion velocity, and the shorter the intrusion time required; under the same concentration condition, the increase in water depth can significantly improve the intrusion velocity of saltwater.

**Keywords:** conceptual model experiment; saltwater intrusion; flow velocity influence; concentration influence

收稿日期: 2024-11-12

\*基金项目: 重庆市教委基金项目(52209080)

作者简介: 王艳萍(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为航道整治。

通信作者: 杨胜发(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学、生态航道、航道整治工程技术等。

E-mail: ysf777@163.com

河口地区盐水入侵现象由径流、潮汐等相关动力因子综合作用形成<sup>[1]</sup>。盐水入侵导致河流盐浓度改变,对工业、农业以及生活用水有不良影响<sup>[2]</sup>;致使生物的死亡迁移减少生物多样性及改变原有的生态结构<sup>[3]</sup>。20世纪50年代,国际上对盐水入侵的系统研究主要集中在河口盐水入侵的基本理论方面,得出经典的河口环流和盐度平衡关系,根据河口纵向环流形成的动力机制,推导出河口盐水入侵长度的解析解;我国盐水入侵研究始于20世纪80年代,主要集中在长江口和珠江口盐水入侵相关模型方面,研究结果表明径流是影响河口盐水入侵的主要动力因子<sup>[4]</sup>。平陆运河工程实施后青年枢纽船闸下游引航道与茅尾海连通性提高,青年库区盐水条件将发生变化<sup>[5-6]</sup>。

由于青年船闸与茅尾海直接贯通,海水上溯并入侵至青年闸下,再由青年库区继续沿河道上溯,危害库区及其周边的水资源,存在用水安全的风险。但青年船闸距海洋较远,闸下盐度一般为2.5‰左右,引航道盐度低于0.23‰<sup>[7]</sup>,低浓度盐水会经过船闸向淡水内河入侵<sup>[8]</sup>。低浓度盐水会沿河道向内继续入侵,其上溯的距离及运动过程将会影响到河道两岸用水。其中关于低浓度盐水运动特性研究较少,对于低浓度盐水的运动特性还不明确<sup>[9]</sup>。张文武<sup>[10]</sup>对钦江河口盐水入侵的数值模拟研究表明,径流与盐水上溯距离呈幂函数关系,盐水上溯距离与径流呈负相关。李达宏<sup>[11]</sup>提出平陆运河的河口地区在枯水期盐水入侵严重;中水期盐水入侵减弱,盐度相较于枯水期有所降低;洪水期盐水入侵程度最弱。李若华等<sup>[12]</sup>采用偏相关分析法研究月时间尺度下七堡、仓前、盐官3个观测站的含氯度与影响因素之间的相关关系,结果表明各站的含氯度与径流量呈负相关。Bowden等<sup>[13]</sup>对默西河口海峡的洋流和盐度进行观

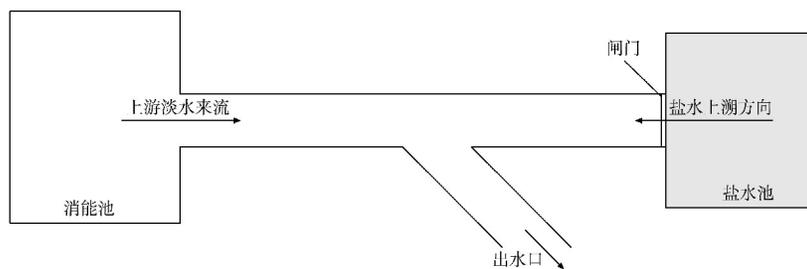
测,发现盐度分布特性与河流径流之间存在高度相关性,盐度随着流量的增加而降低。综上可见,盐水入侵过程中影响盐水浓度决定性因素是径流及潮汐<sup>[14]</sup>。尽管盐水入侵的研究已经取得了一系列进展,但在有支流分流的情况下相关研究仍显不足。因此,开展关于有支流分流影响下盐水入侵的过程研究显得尤为必要。

由于支流分流影响下河道盐水上溯特性研究较少,本文开展来流情况下支流分流影响的低浓度盐水入侵物理模型试验研究,利用改变来流流速及盐度边界测试支流影响条件下盐水入侵运动特性的情况。依据试验数据的对比,探讨盐水入侵过程中的运动规律以及时空分布。

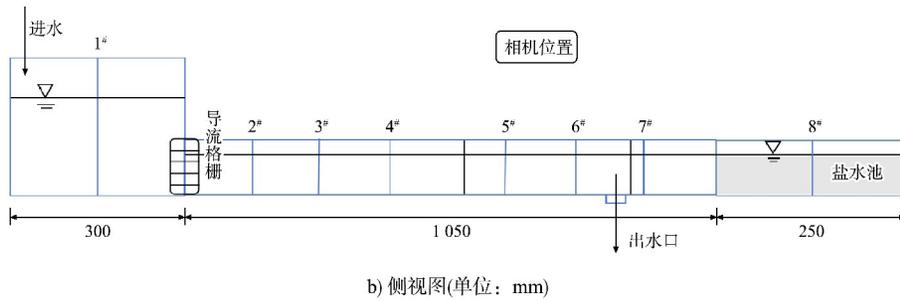
## 1 试验设置

### 1.1 试验设计

试验在长1350 mm、宽80 mm、高80 mm的有支流出水口的长方体透明水槽中进行,见图1a)。水槽的长宽比为13,确保能够清晰观察盐水沿来流方向流动行为。试验水槽底坡的坡度为0。使用无机染料高锰酸钾染色剂为盐水着色,0.2 g高锰酸钾溶于水后的溶液密度非常接近纯水密度(1.0 g/cm<sup>3</sup>),故高锰酸钾溶于水后不影响水体原本状态,也不影响盐水入侵过程,并且能够清晰地观察到模拟的盐水流动过程。水槽的下游装入按盐水浓度配制好的着色盐水,上游侧为流动无色自来水。在水槽侧面处布置8个水位测量截面(1#~8#),每个截面垂直于底板,便于控制水位以及实时观察水位高度,见图1b)。水槽右侧的盐水区出水口配置厚3 cm的高密度挡水泡沫板模拟闸门控制试验,用以控制盐淡水的分隔。待闸门两侧水体静止后,匀速提起闸门,盐水沿水槽底部呈楔形向左侧扩散。



a) 俯视图



b) 侧视图(单位: mm)

图 1 试验水槽

Fig. 1 Experimental flume

1.2 特征参数和试验工况

开展 3 组不同水深条件下低浓度盐水入侵试验, 盐水浓度  $S$  分别选取 1.0‰、2.0‰和 2.5‰, 底坡为 0, 试验组的命名方式基于水深和盐度的组合。例如, 当水深为 60 mm 且盐度边界为 1.0‰时, 命名为  $h6S1$ 。这种命名方法涵盖了不同的试验条件变量, 有助于揭示各变量对试验结果的影响, 并便于对试验条件进行有效比较。在研究盐

水与淡水相互作用的过程中, 可以看出流体之间的密度差是产生盐淡水之间流动的根本原因, 采用密度梯度力描述盐淡水密度差, 以  $\sqrt{g'h}$  表示密度梯度力, 其中:

$$g' = g(\rho_{\text{盐水}} - \rho_{\text{淡水}}) / \rho_{\text{淡水}} \quad (1)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $\rho_{\text{盐水}}$ 、 $\rho_{\text{淡水}}$  分别为盐水和淡水的密度<sup>[15]</sup>。

试验工况及参数设置见表 1。

表 1 试验工况及相应参数

Tab. 1 Experimental conditions and corresponding parameters

试验组	水深 $h/\text{mm}$	盐度 $S/\text{‰}$	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	径流平均流速 $v_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弗劳德数 $Fr$	雷诺数 $Re$	$\sqrt{g'h}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
$h6S1$	60	1.0	0.40	0.026 5	0.066 3	1 599	0.024 251
$h6S2$	60	2.0	0.39	0.025 8	0.066 3	1 548	0.034 293
$h6S2.5$	60	2.5	0.40	0.026 5	0.066 3	1 599	0.038 341
$h5S1$	50	1.0	0.42	0.033 3	0.083 1	1 665	0.022 136
$h5S2$	50	2.0	0.40	0.031 7	0.080 0	1 585	0.031 305
$h5S2.5$	50	2.5	0.41	0.032 5	0.080 7	1 625	0.035 000
$h4S1$	40	1.0	0.41	0.040 7	0.096 0	1 628	0.019 799
$h4S2$	40	2.0	0.40	0.039 7	0.095 3	1 588	0.028 000
$h4S2.5$	40	2.5	0.41	0.040 7	0.096 0	1 628	0.031 305

2 试验结果与分析

2.1 有支流分流影响下盐水上溯运动特征

闸门开启后, 盐水开始由下游端向上游流动, 盐水在底部以楔形方式推进。盐水入侵分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 可以清晰地观察到, 低浓度盐水形成的异重流从底部以楔形入侵至淡水区, 淡水在上层向盐水区域流动; 第 2 阶段, 盐水的楔形前端逐渐向淡水区推进, 当楔形的前端接触到支流口时, 楔体开始被上游来流冲散一部分盐水随淡水从支流口排出, 少部分着色盐水继续延右岸向前入侵, 同时盐水和淡水在支流口水道内进

行振荡; 第 3 阶段, 水槽内最终达到平衡状态, 有明显的分层现象, 见图 2。



图 2 平衡后盐淡水不充分掺混现象

Fig. 2 Inadequate mixing of salt and fresh water after equilibrium

盐水上溯运动到支流口处被上流来水冲散的演变过程见图 3, 其中大部分盐水从支流口处排出, 小部分盐水继续向前入侵。在支流口, 来自上游的水流向下游冲击盐水, 使其在冲击力的作用下大部分被冲散并从支流口处排出。剩余一小部分盐水在水槽中仍然保持着相对稳定, 继续向上游进行侵袭, 该演变过程反映了盐水在水流交汇时复杂的相互作用。

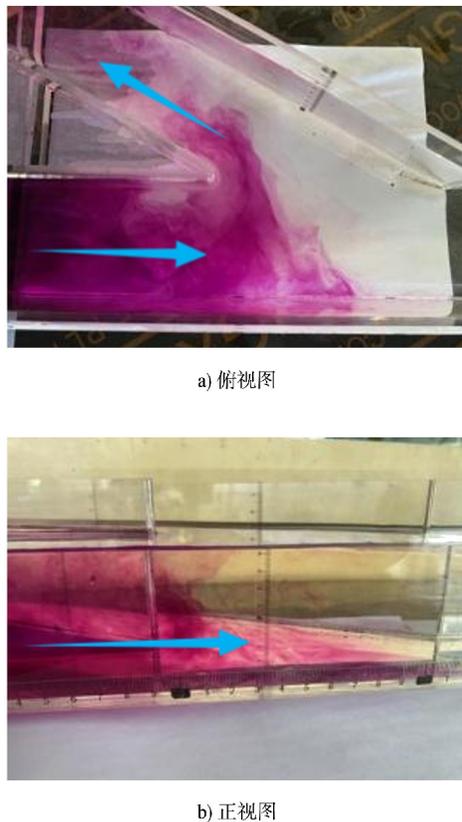


图 3 支流口盐水运动状态

Fig. 3 Motion state of saltwater at fork

闸门匀速提起 10 s 时, 盐水沿着水槽的下边界进入淡水层, 此阶段盐水流动速度相对较快, 见图 4a)。此时盐水的浓度较高、水体颜色较深, 呈现出较为完整的盐水楔形状。盐水位于水槽底部, 淡水在上方, 淡水对盐水上溯形成了一定的限制。随着时间推移至 20 s, 盐水的前缘逐渐深入淡水层。在这个阶段, 盐水和淡水之间的密度差异继续推动盐水的上溯运动, 上溯速度相较第 1 阶段时缓慢, 盐水楔颜色逐渐变淡, 楔头高度变小, 呈现更加尖锐的形状, 见图 4b)。在 30~60 s, 盐水和淡水交替形成的浓度带展现出更加复杂的特征,

盐水楔前端形态受到冲击破坏, 见图 4c); 之后盐水在水槽中以薄层的方式向上游扩展, 形成盐水楔的结构状态不明显, 盐水的纵向混合与横向混合相互作用, 盐淡水交界面形成湍流运动形态, 见图 4d)、e)。上溯至 80 s 的过程中, 盐水在淡水层的上溯达到稳定, 形成相对稳定的盐水分布。此时, 淡水仍在向下游流动盐水的上溯运动逐渐停止, 运动速度趋于 0, 上溯距离稳定, 而由于上游来水作用盐水楔形态不断被冲散, 见图 4f)。综上, 10~80 s 的盐水上溯过程体现了盐水运动与流动淡水之间的复杂交互作用, 盐水运动的整体概化形态见图 5。



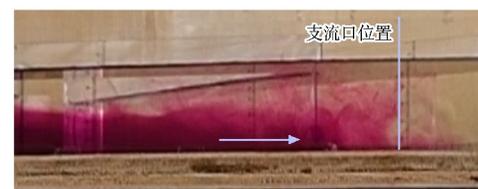
a) 10 s 时



b) 20 s 时



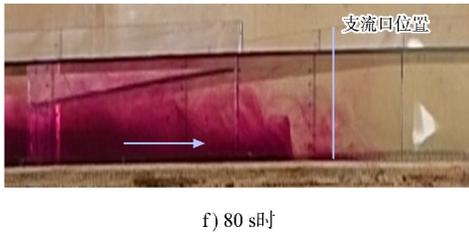
c) 30 s 时



d) 40 s 时



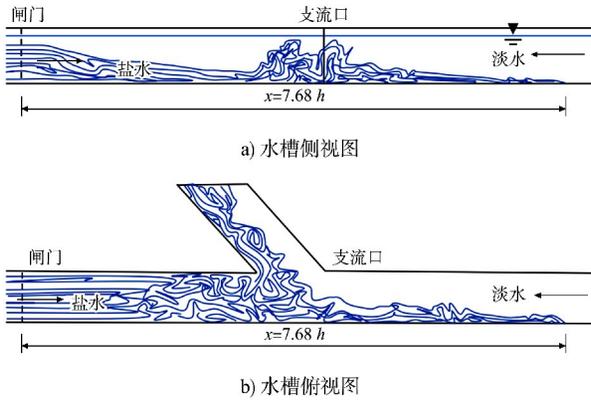
e) 50 s 时



f) 80 s时

图 4 试验组 h6S1 在不同时间下盐水上溯状态

Fig. 4 Saline upwelling state of h6S1 in experimental group at different time



a) 水槽侧视图

b) 水槽俯视图

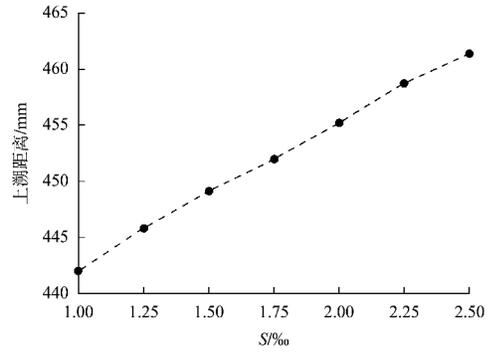
图 5 试验组 h6S1 盐水运动整体概化形态

Fig. 5 Overall generalization form of saline motion of h6S1 in experimental group

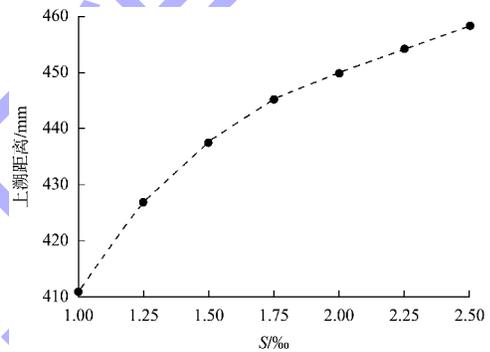
### 2.2 有支流分流影响下盐水上溯距离与浓度的关系

Schultz 等<sup>[16]</sup>对密西西比河西南通道的高度分层河口进行研究后发现,盐水上溯的距离是稳定的。盐水上溯距离与浓度关系见图 6。当闸门开启后,浓度越高,盐水运动可以上溯的距离越长,但由于上游有来流进行干扰,盐水不能够无限地向上游推进。对比试验组可知,随盐水浓度的增加盐水上溯的距离不会产生显著增长,最终上溯距离都维稳在 460 mm 左右。水深 40 mm 时上溯距离是水深的 11 倍左右;水深 50 mm 时上溯距离是水深的 9 倍左右;水深 60 mm 时上溯距离是水深的 7 倍左右。盐水浓度增大,上溯的距离也越长,因为浓度更高的盐水具有更高的密度会会造成更大的密度差异,使得盐水头部在进入淡水后能够获得更强的推进力。浓度越大的盐水在与淡水混合过程中,由于密度差异增大导致的驱动力增强,有助于盐水头部在上溯时克服阻力,最终使盐水

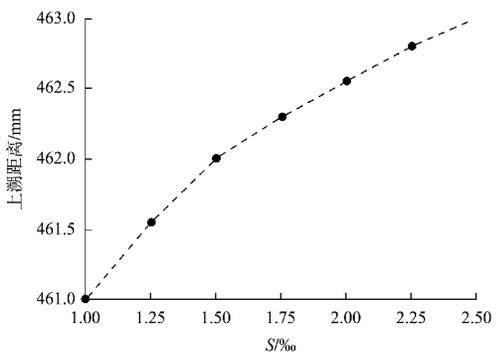
在淡水中的上溯距离变得更长。可以看出,同一水深情况下,浓度越大盐水上溯距离越大;同一浓度情况下,水深越大盐水上溯距离越大。



a) 水深 40 mm



b) 水深 50 mm



c) 水深 60 mm

图 6 盐水上溯距离与浓度的相关性

Fig. 6 Correlation between saltwater instrument distance and concentration

随着水深的增加来流流速减小,盐水前进距离对浓度变化的敏感度逐渐减小。水深为 40 mm 时,上溯距离变化范围为 443~462 mm;水深增至 50 mm 时,盐水的上溯距离从 410 mm 增加到 458 mm;水深 60 mm 时,上溯距离几乎保持在 461~463 mm,变化幅度显著缩小。总体来看,随

着水深的增大, 不同浓度条件下的运动距离变化趋于减小, 这表明在较深的水体中, 盐水运动上溯的距离对浓度的变化更加稳定。

定义  $R$  为盐水上溯距离与水深的比值, 即  $R = x/h$ 。各盐度下不同水深对应的  $R$  值见表 2。可以看出, 在水深固定时,  $R$  值大致相等, 其不受盐水浓度影响; 在盐度稳定不变的情况下  $R$  随着  $h$  增加逐渐减小, 且这种变化趋势在 3 种不同浓度下依然成立; 水深 60 mm 时  $R$  值最小, 水深 40 mm 时  $R$  值最大。

表 2 各盐度下不同水深对应的  $R$  值  
Tab. 2 The  $R$  values corresponding to different water depths under various salinities

$S/\text{‰}$	不同水深的 $R$ 值		
	$h=40$ mm	$h=50$ mm	$h=60$ mm
1.0	11.05	8.23	7.68
2.0	11.38	8.89	7.70
2.5	11.53	9.16	7.71

在 MATLAB 软件中进行多元线性拟合, 创建水深  $h$ 、浓度  $S$  和比值  $R$  的矩阵。将水深和浓度合并为一个自变量矩阵  $X$ 。使用 regress 函数进行多元线性拟合通过该函数, 可以估计每个自变量的回归系数, 并得到模型的拟合优度, 计算决定系数  $R^2$  值,  $R^2$  计算公式见式(2),  $R^2$  越接近 1, 表示模型越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_i)^2} \quad (2)$$

式中:  $R^2$  为决定系数;  $R_i$  为实际观测值, 即每个数据点的真实观测值;  $\hat{R}_i$  为预测值或拟合值, 即通过模型预测得到的对应数据点的值;  $\bar{R}_i$  为实际观测值的均值;  $n$  为数据点的总数。

得到的拟合公式见式(3), 拟合优度  $R^2 = 0.93$ , 表明模型能解释 93% 的因变量变异。回归拟合结果见图 7, 良好的拟合效果进一步验证了模型的适用性。

$$R = 17.726 2 - 1.811 7h + 0.322 4S \quad (3)$$

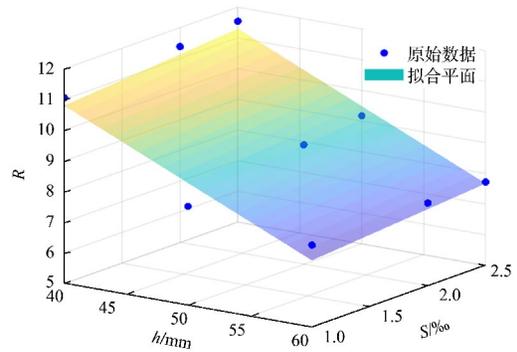
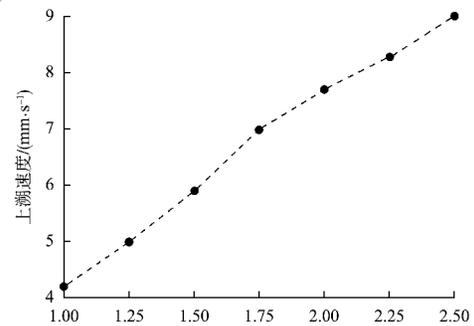


图 7  $R$  的回归拟合模型

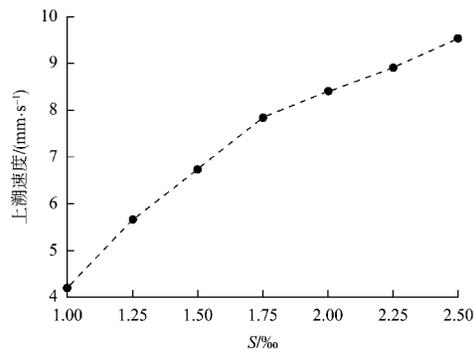
Fig. 7 Regression fitting model of  $R$

### 2.3 有支流分流影响下盐水头部运动速度与浓度的关系

盐水头部运动速度与浓度的关系见图 8。可以看出, 盐水的运动速度会受到浓度的影响。对比 9 个试验组可知, 浓度越大, 盐水头部上溯速度越大; 水深越大、盐水浓度越大, 上溯速度的变化越小。



a) 水深 40 mm



b) 水深 50 mm

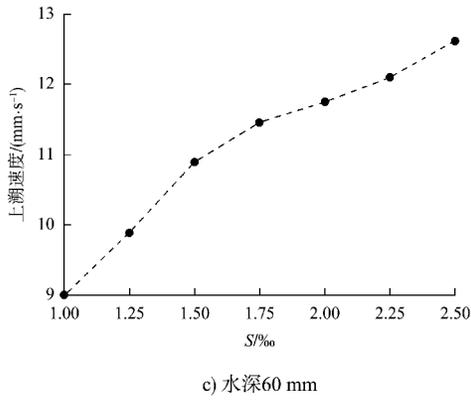


图 8 盐水头部上溯速度与浓度的相关性  
Fig. 8 Correlation between saline head intrusion velocity and concentration

保持水深不变的条件下，盐水的浓度越高，其头部上溯速度也越快。相对而言，当盐水浓度保持恒定时，水深的增加会导致盐水头部上溯速度的显著提升。并且，水深为 60 mm 的情况下，盐水浓度增加对入侵速度的影响相较于水深为 40 和 50 mm 的试验组表现出较小变化幅度，且变化速度较为缓慢。然而，水深为 60 mm 的试验中，盐水的上溯速度数值仍高于其他水深的试验组。综上所述，当水深增加时，盐水浓度对入侵速度的影响逐渐减小。

定义  $n$  为盐水头部上溯速度  $v$  与径流平均流速  $v_1$  的比值，即  $n = v/v_1$ 。各盐度下不同水深对应的  $n$  值见表 3。可以看出，当水深固定时随着盐度的增大  $n$  增大，在浓度稳定不变的情况下  $n$  随着  $h$  增加逐渐增大，这种变化趋势在 3 种不同浓度下依然成立。相同盐水浓度下水深 60 mm 时相较于其他水深  $n$  值最大，水深 40 mm 时相对值最小。故可得出，随着盐水浓度增大  $n$  值越大，即盐水头部的相对运动速度随盐水浓度增加而增大。

表 3 各盐度下不同水深对应的  $n$  值  
Tab. 3 The  $n$  values corresponding to different water depths under various salinities

S/‰	不同水深的 $n$ 值		
	$h = 40$ mm	$h = 50$ mm	$h = 60$ mm
1.0	0.106	0.133	0.339
2.0	0.193	0.264	0.443
2.5	0.226	0.300	0.476

最终的拟合公式见式 (4)，模型的拟合优度  $R^2 = 0.94$ ，表明模型能解释 94% 的因变量变异。回归拟合模型见图 9，优异的拟合效果进一步验证了模型的适用性。

$$n = -0.5115 + 0.1222h + 0.0961S \quad (4)$$

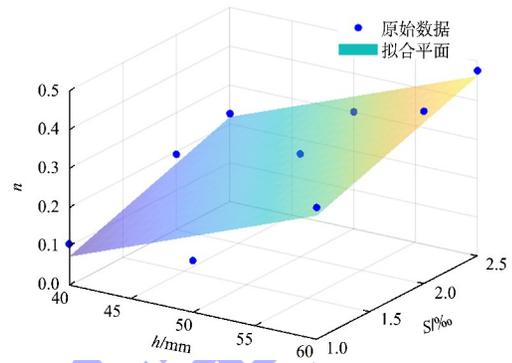


图 9  $n$  的回归拟合模型  
Fig. 9 Regression fitting model of  $n$

### 3 结论

1) 试验结果表明，低浓度的盐水在淡水中具有上溯能力，在有上游来流限制下，盐水上溯过程在径流作用下上溯距离稳定，受支流分流影响明显。

2) 观测断面底层水体着色程度显著大于水体中层和表层，现象表明盐水集中在底床输移，最下面水体的盐度大于表层水体。盐水的密度比淡水大，开始时倾向于集中在底床运动。在支流口处上游水流对盐水进行干扰，大部分盐水被冲散并从支流口排出，小部分盐水保持稳定继续上溯。

3) 随着水深的增加，盐水在淡水中的前进距离对浓度变化的敏感度逐渐减小。在浓度保持不变的情况下，水深的增加会导致  $R$  值逐渐减小。这个趋势在不同浓度的盐水中均表现一致，反映出水深对盐水上溯行为的普遍影响。

4) 盐水的浓度对其上溯行为有显著影响。盐水浓度越高，上溯所需的时间越短，整个过程也变得更加迅速。在相同水深条件下，盐水浓度越高，其上溯头部的速度越快；而在相同浓度下，水深的增加则会显著提升盐水的上溯速度。

## 参考文献:

- [1] 肖毅,李达宏,邓敬宏,等. 钦江河口盐水入侵距离预测模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 32-37, 45.  
XIAO Y, LI D H, DENG J H, et al. Prediction model of saltwater intrusion distance in the Qinjiang River estuary[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural sciences), 2024, 43(5): 32-37, 45.
- [2] 杨斌,潘海涛,苏川. 平陆运河综合开发模式研究[J]. 水运工程, 2024(7): 6-10.  
YANG B, PAN H T, SU C. Comprehensive development model of Pinglu Canal[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 6-10.
- [3] 闫睿冰,胡敏杰,吴辉,等. 模拟盐水入侵对河口湿地土壤磷形态、磷酸酶活性及功能基因群落的短期影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(11): 328-337.  
YAN R B, HU M J, WU H, et al. Short-term effects of simulated saltwater intrusion on soil phosphorus forms, phosphatase activity, and the functional gene community in estuarine wetlands [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2023, 43(11): 328-337.
- [4] 丁磊,褚明华,朱建荣,等. 变化条件下长江口防洪御潮及供水保障研究进展与展望[J]. 中国水利, 2024(14): 18-26.  
DING L, CHU M H, ZHU J R, et al. Research progress and prospect on flood and tide prevention and water supply safeguarding in the Yangtze River estuary under changing conditions[J]. China water resources, 2024(14): 18-26.
- [5] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.  
LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.
- [6] 吴欢欢. 盐水入侵对平陆运河青年库区水质影响的模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.  
WU H H. Simulation study on the impact of saltwater intrusion on water quality in the Youth Reservoir area of the Pinglu Canal [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [7] 叶海鹏,胡江,许媛媛,等. 河口船闸集咸坑深度对防咸效果的影响[J]. 水运工程, 2024(9): 105-112, 116.  
YE H P, HU J, XU Y Y, et al. Influence of salt collecting pit depth of estuarine ship lock on effect of mitigation salt intrusion[J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 105-112, 116.
- [8] 叶海鹏,胡江,许媛媛,等. 低浓度盐水异重流运动规律试验研究[J]. 水运工程, 2024(6): 12-17, 31.  
YE H P, HU J, XU Y Y, et al. Experimental study on movement characters of low concentration saline density current[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 12-17, 31.
- [9] INCOM W G. Ship behaviour in locks and lock approaches [R]. Brussels: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2015.
- [10] 张文武. 钦江河口盐水入侵数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.  
ZHANG W W. Numerical simulation of saline intrusion in Qinjiang River estuary [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [11] 李达宏. 平陆运河盐水上溯机制及减盐措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.  
LI D H. Study on the mechanism of saltwater intrusion and mitigation measures in the Pinglu Canal [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [12] 李若华,马继侠. 钱塘江河口盐水入侵与影响因素的相关关系研究[J]. 浙江水利科技, 2024, 52(1): 13-20.  
LI R H, MA J X. Study on the correlation between saltwater intrusion and influencing factors in Qiantang River estuary [J]. Zhejiang hydrotechnics, 2024, 52(1): 13-20.
- [13] BOWDEN K F, SHARAF EL DIN SH. Circulation, salinity and river discharge in the Mersey Estuary [J]. Geophysical journal of the Royal Astronomical Society, 1966, 10(4): 383-399.
- [14] CHEN W, CHEN K, KUANG C P, et al. Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary, China [J]. Applied ocean research, 2016, 54: 12-25.
- [15] 张朋. 径流和潮汐作用下的河口盐水入侵机理实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.  
ZHANG P. Experimental study on the mechanism of saltwater intrusion in estuary with runoff and tide [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [16] SCHULTZ E A, SIMMONS H B. Fresh water, salt water density currents: a major cause of siltation in estuaries [R]. Vicksburg: Committee on Tidal Hydraulics, Corps of Engineers, U. S. Army, 1957. (本文编辑 王璁)