

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222608

明槽支流交汇区水动力特性 PIV 试验研究

吴菲¹, 白凤朋^{2,3}, 陈雪妮⁴, 刘瑞芬¹, 杨中华⁴, 王超^{2,3}, 尹炜^{2,3}

- (1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 长江水资源保护科学研究院, 湖北 武汉 430051;
3. 长江水利委员会湖库水源地面源污染生态调控重点实验室, 湖北 武汉 430051;
4. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对低流量比条件下明槽干支流交汇支流汇入区水流结构十分复杂的问题, 基于物理模型试验的方法, 采用 PIV 粒子图像测速技术观测不同交汇条件下明槽支流时均流速及三维流速空间分布, 分析支流流场的变化特征。结果表明, 汇流比较小时, 由于干流水体的顶托作用, 支流表层水体会出现不同程度上的回流现象, 底层水体顺流汇入干流, 且有较为明显的斜向混合界面; 随着汇流比的增大, 干流对支流左岸水流结构影响逐渐减小。在交汇角为 30°、90° 时, 靠近支流右岸的水流结构受干流水体顶托作用影响最大; 在交汇角为 150° 时, 支流基本处于回流状态, 交汇口处形成最大回流流速区。研究结果可为库区支流营养盐富集导致水华频发等研究提供理论支撑。

关键词: PIV; 干支流交汇; 流场变化; 水动力特性

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0111-05

1 引言

自然界中的天然河道、人工渠道等普遍存在干支流交汇的复杂水力现象, 特别是由于众多大型水库的修建, 库区内支流河道水位会出现节律性波动, 因此研究干支流交汇所形成的复杂水动力特征对弄清交汇区泥沙淤积^[1]、污染物滞留^[2]、干流水体倒灌导致支流表层水华频发^[3]等问题具有重大的现实意义。随着水环境问题的日益突出, 通过原位监测试验^[4]、物理模型概化^[5]、数值模拟^[6-7]等方法探究干支流交汇区水动力特性。而随着 PIV (Particle Image Velocimetry) 粒子图像技术在测定精细化流场研究上有较大的发展, 采用物理模型试验的方法, 研究明槽交汇区在不同交汇条件下水动力特征日益受到重视。如王协康等^[8]通过水槽试验观测交汇角为 30° 时干流三维水流结构, 得出干流交汇区在交汇口上游会产生一定的壅水、回流现象、分离区和二次流结构; 刘同宦等^[9]通过为 90° 水槽试验交汇角, 得出不同汇流比条件下入汇口上游断面时均流速减小,

而干流入汇口下游断面产生了明显的高、低流速带、回流分离区; 隋斌^[10]通过物理模型试验分析了在不同交汇角和较大汇流比条件下, 弯道交汇水流沿程水面纵向及横向坡降、流速分布特性、断面环流结构、紊动能、分离区特性及床面特征切应力。目前交汇区水流分区、水动力特性的研究多以数值模拟或物理模型试验为主, 基本聚焦于固定交汇角支流对干流交汇区的水流结构的影响, 而对于不同交汇角、小汇流比条件下明槽支流交汇区水动力特征尚不明晰, 干流对支流水流结构的影响需通过物理模型测定分析。为此, 本文通过 PIV 测定在 30°、90°、150° 交汇角不同汇流比的条件下, 精细化测定干支流交汇区流速矢量分布特征及三维流速时空分布特征, 定量分析交汇角、汇流比对断面时均流速、流速矢量分布的影响。

2 研究方法

基于物理模型试验方法, 通过 PIV 装置测定分析明渠干支流在不同交汇条件下的水动力特征。试验装置由集水池、水箱、供水泵、电磁流量

收稿日期: 2022-12-19, **修回日期:** 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040210)

作者简介: 吴菲(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水环境模拟, E-mail: one1367176550@126.com

通讯作者: 尹炜(1978-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水资源保护, E-mail: 2000yinwei@163.com

计、稳水装置、水槽、尾门等组成,见图1。其中,电磁流量计控制干支流水槽的来水流量,稳水装置布置于支流的前段,其内部设有鹅卵石和整流微孔挡板,以保证水流畅通后稳定流向主槽,尾门控制干流水槽水位高度。干流水槽长8 m、宽0.3 m,支流水槽长1.8 m、宽0.1 m,两水槽高度均为0.45 m,坡降比为1/1 000。PIV系统由摄像机、激光器、同步控制器和数据处理计算机四部分组成,支流上游均匀加入PIV失踪粒子,以拍摄试验区流场。

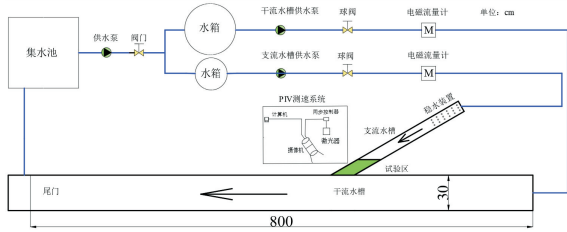


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Test device diagram

如图2(a)~(c)所示,试验区方位以交汇口上游顶部为原点 O , x 轴正向为干流顺水流方向,纵向流速为 u ; y 轴为干流槽宽方向,横向流速为 v ; z 轴为垂向朝上,垂向流速为 w 。分别选取支流右岸至左岸 $W1 \sim W4$ 共四个断面,间距为2 cm,拍摄角度与支流水槽平行。交汇角 β 定义为支流、干流水槽夹角,设置3种角度(30° 、 90° 、 150°)。以 90° 交汇角为例(图2(b)),考虑拍摄范围限制,横向拍摄范围 y 取 $-0.03 \sim -0.22$ cm,垂向拍摄范围 z 取 $1 \sim 14$ cm,(图2(d))。定义汇流比 γ 为干流流量 Q_1 与支流流量 Q_2 比值(Q_1/Q_2),将干流水槽水深 h 保持15 cm为定值,考虑3种交汇角、3种汇流比条件下共9种试验工况(表1)。

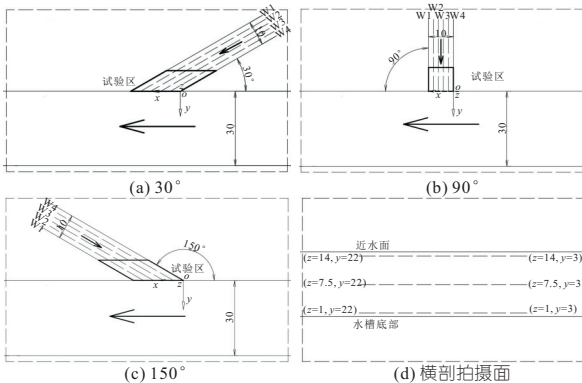


图2 PIV试验区方位示意图(单位:cm)

Fig. 2 Orientation diagram of the test area

3 结果与分析

表1 试验工况设计

Tab. 1 Test condition design

工况组次	交汇角	水深 h/cm	干流流量 Q_1 $/(L \cdot s^{-1})$	支流流量 Q_2 $/(L \cdot s^{-1})$	汇流比 $\gamma=Q_1/Q_2$
1	30°	15	10	0.50	0.050
2	30°	15	10	0.10	0.010
3	30°	15	10	0.05	0.005
4	90°	15	10	0.50	0.050
5	90°	15	10	0.10	0.010
6	90°	15	10	0.05	0.005
7	150°	15	10	0.50	0.050
8	150°	15	10	0.10	0.010
9	150°	15	10	0.05	0.005

3.1 支流交汇区均流速分析

将测量断面位置用水深 h 作无量纲化处理,即 $x'=x/h$ 、 $y'=y/h$ 、 $z'=z/h$,流速测量结果取断面垂线时均流速。分别在 $W1 \sim W4$ 四个断面上选取 $x'=-0.5$ 、 $x'=-1.0$ 两条垂线来研究支流交汇区不同位置垂向时均流速分布。

分析试验数据结果可知,在汇流比 $\gamma=0.005$ 、 0.01 时,支流的水流特性较为复杂,汇流比增大到 0.05 时,支流的水流结构较为规则,因此对汇流比 $\gamma=0.005$ 、 0.01 时支流时均流速作定量分析。图3为交汇角分别为 30° 、 90° 、 150° 时,支流交汇区不同断面垂向时均流速随相对水深的变化情况。由图3可看出,在汇流比 $\gamma=0.005$ 时,因受干流水体顶托效应的影响,三个角

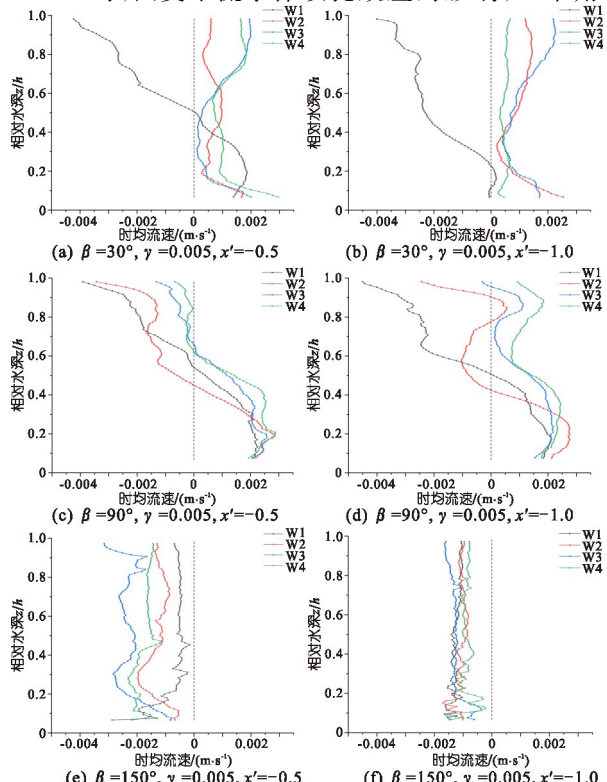


图3 $\gamma=0.005$ 时不同交汇角各断面时均流速分布

Fig. 3 When $\gamma=0.005$, the average velocity distribution of each section at different confluence angles

度的支流均有断面流速为负数,即出现水流回流现象。当 $\beta=30^\circ、90^\circ$ 时,交汇口近右岸 W1 断面出现底层水体顺流汇入干流、表层水体出现回流现象,且水位越高、回流时均流速也越大,回流现象越明显。当 β 由 30° 增加为 90° 时, W2、W3 和 W4 断面也会出现底部水体顺流汇入干流、靠近交汇口 $x'=-0.5$ 时相对水深大于 0.6 的水体均处于回流状态;而当 $x'=-1.0$ 时,只有 W1 和 W2 断面产生回流,这说明当交汇角小于 90° 时干流对支流右岸的水流结构、时均流速的影响明显大于左岸。当交汇角为 150° 时,在干流较强的顶托作用下,水流由干流流入支流,支流整体出现回流现象,回流区长度大于 15 cm,其中 W3 断面受到干流的影响最大,回流时均流速达 0.003 m/s。

图 4 为汇流比 $\gamma=0.01$ 时各断面不同位置垂线时均流速随相对水深的分布情况。由图 4 可知,对于交汇角 $\beta=30^\circ$ 时,各断面垂线上的时均流速沿水深的分布变化不大,靠近交汇口 $x'=-0.5$ 处 W1 断面为回流,其余断面均为正向顺流;当 $\beta=90^\circ$ 时,汇流比的增大对 W2、W3、W4 断面流向及时均流速有较大的影响,但不会出现底部水体顺流,上部水体回流的情况;当 $\beta=150^\circ$ 时,支流断面均为回流状态,回流区长度超过 15 cm, W2 断面的回流速度达到最大。

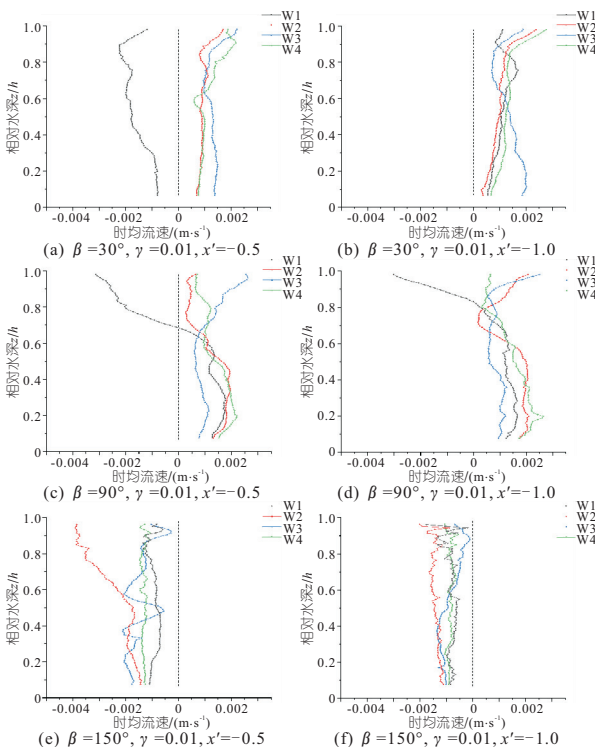


图 4 $\gamma=0.01$ 时不同交汇角各断面时均流速分布

Fig. 4 When $\gamma=0.01$, the average velocity distribution of each section at different confluence angles

综上所述,在汇流比较小($\gamma=0.005$)的情况

下,干支流水流相互顶托作用,支流交汇区会出现干流水体向支流方向挤压,使支流来流水体沿水槽底部顺流汇入干流,而靠近水面水体产生回流,从而在支流交汇区形成两股方向相反的水流。当汇流比 γ 增大至 0.01 时, 30° 交汇角下,干流顶托对近右岸的 W1 断面流速影响较大,具体表现为该断面回流流速减小,回水区长度明显缩小; 90° 交汇角下,汇流比增大对支流左岸水流结构及时均流速影响较大,表现为右岸 W1 断面的流速分布变化较小; 150° 交汇角下,当汇流比由 0.005 增至 0.01 时,受干流顶托的影响最大的断面由近左岸 W3 断面变为近右岸 W2 断面,说明汇流比的增大对支流交汇区流速分布的影响从左岸逐渐往右岸移动。

3.2 支流交汇区矢量流速分布分析

通过分析可知,当交汇角 $\beta=30^\circ、90^\circ$ 时,近右岸 W1 断面在不同汇流比条件下垂向不同水深表现出不同的流速特征,因选取 W1 为典型断面,分析其在不同交汇条件下 YZ 剖面上流速及矢量流场分布特征。

图 5 为不同交汇条件 W1 断面流速及矢量流场分布情况。由图 5 可看出,当交汇角 $\beta=30^\circ、90^\circ$ 、汇流比 $\gamma=0.005、0.01$ 时,由于干流的顶托作用,支流底部水体以较大的流速流向交汇口,形

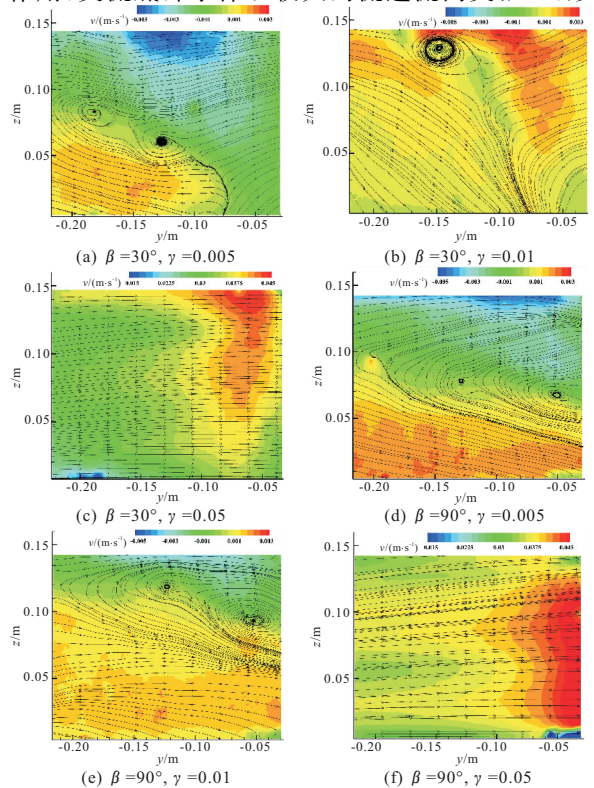


图 5 不同交汇条件 W1 断面流速分布及矢量流场

Fig. 5 Velocity distribution and vector flow field of W1 section under different confluence conditions

成最大流速区,而表层水体以较小的流速经交汇口后回流,流向相反的两股水流形成方向斜向上的混合界面,且混合界面伴有涡旋流的产生。支流的流量越小,混合界面离交汇口越远,涡旋产生的位置离水表面和交汇口越远,且涡旋流尺寸大小相对较小;当汇流比增大到 $\gamma=0.05$ 时,各断面垂线的时均流速随汇流比的增大而增大,但干流对支流的顶托作用变小,支流水流形成规则的水流结构,较为平顺地流向交汇口,在靠近交汇口附近形成高流速区。

通过分析可知,当交汇角 $\beta=150^\circ$ 时,W3 断面时均流速变化较为明显,因此选取 W3 为典型断面,分析其不同汇流比条件下流速及矢量流场分布特征。

图 6 为 $\beta=150^\circ$ 不同汇流比 W3 断面流速分布及矢量流场。由图 6 可看出,当 $\beta=150^\circ, \gamma=0.005, 0.01$ 时,整个支流均为回流状态,在干流较强的顶托作用下,支流于交汇口处回流流速达到最大,沿支流回流方向流速逐渐减小,水体表层产生不规则涡旋流结构。当汇流比增大至 $\gamma=0.05$ 时,干流水体在交汇口处发生强烈掺混,支流有较为明显的高流速区和低流速区,时均流速变化范围在 $0.005\sim 0.045$ m/s 之间,支流水流水平平滑向下流向交汇口底部。

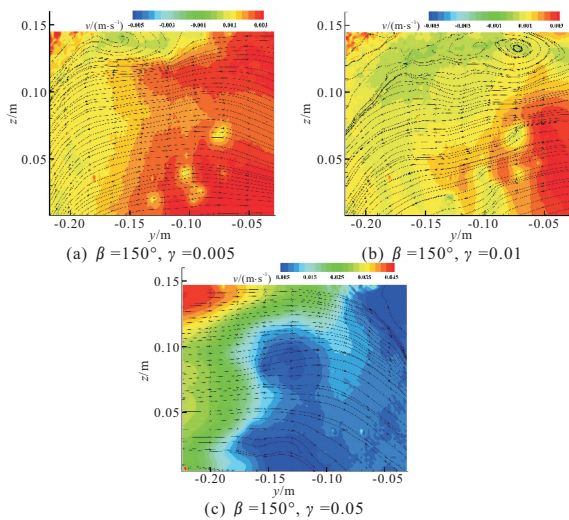


图 6 $\beta=150^\circ$ 不同汇流比 W3 断面流速分布及矢量流场
Fig. 6 When $\beta=150^\circ$, the velocity distribution and vector flow of W3 section at different confluence ratio

综上所述,不同交汇条件下,支流各断面上的流速及矢量流场分布均有较大的差异性。在汇流比较小($\gamma=0.005$ 或 0.01)、交汇角 $\beta=30^\circ, 90^\circ$ 时回流产生的混合界面为斜截面,且混合界面处均有涡旋流;交汇角 $\beta=150^\circ$ 时,支流水流回流,交汇口处回流流速最大,沿回流方向流速逐渐较小。在汇流比较大($\gamma=0.05$)、交汇角为 $30^\circ, 90^\circ$ 时,支

流靠近交汇口处形成最大流速区,交汇角为 150° ,支流靠近交汇口处形成最小流速区。

3.3 支流交汇区三维流速空间分布分析

为分析小汇流比条件下支流交汇区复杂的水流结构,选取交汇角 $\beta=90^\circ, \gamma=0.005$ 时,拍摄距支流底坡 2 cm(底层)、7.5 cm(中层)、14 cm(表层)三张 XY 平面横剖面流场图以分析支流交汇区三维流速分布。

图 7 为交汇角为 90° 时支流表中底层时均流速及三维流速空间分布。由图 7 可看出,OX 截面为干支流交汇口的纵剖面,支流水流自 Y 轴流向 O 点,干流水流自 O 点流向 X 轴正方向,表 7 中底层水动力特征差异很大,表层水体以较小的流速回流,中层水体处于紊流状态,底层水体则以较大的流速顺流流向交汇口。由于干流的顶托作用,表层水体以极小的流速回流,且在支流近右岸断面形成最大流速回流区,近左岸区域形成分离区,并伴有涡旋流的发生。中层水体水流结构较为复杂,干流水体相互掺混,形成了具有涡旋流的水流交互界面,水流流速趋近于零。底层水体支流来流与图 7 中层回流的水体相互挤压,则以高流速状态顺流流向交汇口,流速在靠近交汇口处明显减小。

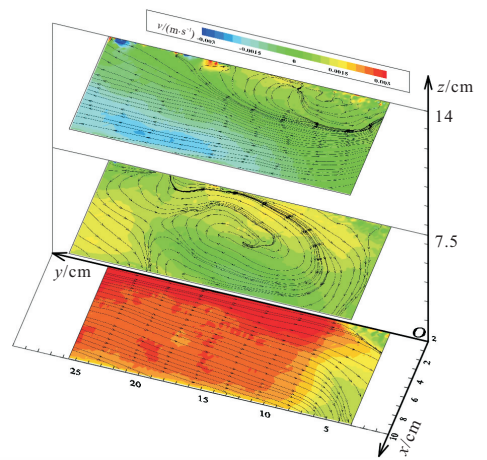


图 7 $\beta=90^\circ$ 支流三维流速分布

Fig. 7 When $\beta=90^\circ$, the flow velocity of tributaries is distributed in three dimensions

4 结论

a. 在小汇流比($\gamma=0.005$)时,支流各断面会出现不同程度的表层水体低速回流,底层水体以高流速顺流流向交汇口;随着汇流比的增大($\gamma=0.01$),支流左岸水流结构及时均流速变化较大,干流对支流左岸水流结构影响逐渐减小。

b. 交汇角为 $30^\circ, 90^\circ$ 时,支流近右岸水体受干流水体顶托作用的影响最大,越靠近支流右岸

回流现象越明显,且在近右岸形成回流最大流速区。

c. 交汇角为 150°时,干流水体强顶托作用使支流基本处于回流状态,靠近交汇口处回流流速最大,且对支流中间断面的水流结构影响最大。

参考文献:

[1] 王平, 胡恬, 郭秀吉, 等. 交汇角度对黄河上游高含沙交汇区淤堵影响的试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 44-53.

[2] 余真真, 朱海, 毛颂平, 等. 黄河干支流交汇河段污染物传输模拟研究 [J]. 人民黄河, 2022, 44(4):100-106.

[3] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展 [J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454.

[4] 张涛. 非对称型河流交汇区水流结构与污染物输运规律研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2021.

[5] YUAN S Y, TANG H W, XIAO Y, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel con-

fluence: Accounting for the distortion of the shear layer [J]. Journal of hydro-environment research, 2016, 12:130-147.

[6] CHENG Z Y, CONSTANTINESCU G. Near-and far-field structure of shallow mixing layers between parallel streams [J]. Journal of fluid mechanics, 2020, 904:A21.

[7] CHENG Z Y, CONSTANTINESCU G. Shallow mixing layers between non-parallel streams in a flat-bed wide channel [J]. Journal of fluid mechanics, 2021, 916:A41.

[8] 王协康, 王宪业, 卢伟真, 等. 明渠水流交汇区流动特征试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006(2): 1-5.

[9] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 485-489.

[10] 隋斌. 明渠弯道交汇水流水力特性的大涡模拟与实验研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Open Channel Tributary Intersection Area Based on PIV Technology

WU Fei¹, BAI Feng-peng^{2,3}, CHEN Xue-ni⁴, LIU Rui-fen¹, YANG Zhong-hua⁴, WANG Chao^{2,3}, YIN Wei^{2,3}
 (1. College of Civil Engineering and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; 3. Key Laboratory of Ecological Regulation of Non-point Source Pollution in Lake and Reservoir Water Sources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, China; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Under the condition of low flow ratio, the flow structure of the inlet area of tributaries is very complicated. Based on physical model test and PIV particle image velocimetry technology, the average velocity distribution and three-dimensional velocity spatial distribution of open channel tributaries under different intersection conditions were observed, and the variation law of the flow field of tributaries was analyzed. The results show that when the confluence is relatively small, the surface water of the tributaries will have reverse reflux phenomenon to varying degrees due to the top supporting effect of the main stream water, while the bottom water flows downstream to the main stream, and there is a relatively obvious oblique mixing interface. With the increase of the confluence ratio, the influence of the main stream on the flow structure of the left bank of the tributary decreases gradually. When the intersection angle is 30° and 90°, the water flow structure near the right bank section is most affected by the water top support of the main flow. When the intersection angle is 150°, the tributaries are basically in reverse reflux state, and the maximum reflux velocity area is formed at the intersection. The results can provide theoretical support for the study of frequent bloom caused by nutrient enrichment in tributaries of reservoir area.

Key words: PIV; confluence of main stream and tributary stream; change of flow field; hydraulic characteristics

 (上接第 110 页)

Hydrodynamic Characteristics Test of Fish Channel Under Condition of Fish Inlet Water Level Variation

HUANG Zhi-wen¹, MENG Rui², ZHOU Su-fen¹, LIU Zhi-xiong³, WANG Zhi-chao¹

(1. Poyang Lake Basin Ecological Water Conservancy Technology Innovation Center, Jiangxi Province Institute of Water Conservancy and Science, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Ganfu River Renovation Co., LTD., Nanchang 330009, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The change of hydrological situation and the operation scheduling of the downstream of the hub make the water level at the inlet and outlet of the fish channel change at all time, and the fish channel is running improperly. The insufficient inlet water depth will cause water drop and hinder the backtracking of fish. The integrated model was used to analyze the hydraulic characteristics under different water level combinations at the inlet and outlet of the fishing channel. The results show that the hydrodynamic changes of the fish tunnel tank chamber are mainly concentrated in the pool chamber near the inlet, and the greater the influence is closer to the downstream. When the inlet water level decreases, the water drops at the inlet and it is difficult for fish to trace; When the inlet water level rises, the inlet velocity slows down rapidly. In view of the design inlet flow velocity is 0.60 m/s-1.00 m/s, the maximum drop between the outlet of the fish channel and the inlet water depth is recommended to be controlled at 1.00 m. At the same time, appropriate water replenishment measures should be taken according to the water depth of the inlet to form effective lure flow rate at the inlet, and there is a good linear relationship between the supplementary water flow and the inlet water depth.

Key words: vertical slot fishway; integrated model; hydraulic characteristics; water level amplitude