



支流入汇弯曲河段水流运动特性试验研究*

李文全

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 首次对支流与弯曲型干流交汇河段的一般水力学问题进行概化模型试验研究, 初步揭示了随着干支流交汇角 α 和汇流比 λ 的变化, 汇合口河段水面几何形态和纵横比降变化特征、三维流速、水流动力轴线、床面剪切应力等的分布规律, 给出了在汇合口下游凹岸一侧出现回流分离区的条件和分离区范围与 α 和 λ 的定量关系, 并对汇合口河段推移质运动和河床冲淤部位进行了分析, 填补了国内外弯道干支流汇合口河段研究的空白, 为进一步认识和掌握该类河段水流运动特性奠定了基础。

关键词: 弯道; 干支流交汇; 水流运动特征

中图分类号: TV 81

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0062-07

Experimental research on flow characteristics of inflow of tributaries to curved reach

LI Wen-quan

(Changjiang Waterway Institute of Planning, Design and Research, Wuhan 430011, China)

Abstract: This paper studies the general hydraulics of the inflow of tributaries to the curved reach by the conceptual model, reveals the variation characteristics of surface geometry and surface slope and distribution law of 3D-velocity, hydrodynamic axis and bed shear stress under various confluence angles and various discharge ratios, presents the condition in which the recirculation zone could appear near the concave bank downstream the junction, and gives the quantitative relationship between the scale of recirculation zone and confluence angle & discharge ratio. This paper also analyzes the bed load movement and riverbed erosion and deposition site at the junction. It lays a good foundation for further study on this kind of rivers.

Key words: curved reach; inflow of tributaries to mainstreams; flow characteristics

长江作为我国第一大河流, 支流众多, 尤其是上游川江地区, “众水汇涪万, 瞿塘争一门”, 正是这一特征的写照。在这些干支流交汇地区, 自古以来依港兴城, 经济发达, 水上交通繁忙, 成为地方政治经济发展的中心和重要的物资集散地。然而, 由于汇流区特殊的水流运动特性, 强烈的紊动掺混作用, 常易导致泥沙在汇合口河段大量堆积, 形成浅滩, 严重影响航运安全和港区的正常作业, 制约着地方经济和社会的发展。随着我国西部大开发战略的实施和长江上游

干线航道治理速度的加快推进, 迫切需要对“长江上游干支流汇合口通航水流条件及整治技术”进行研究。

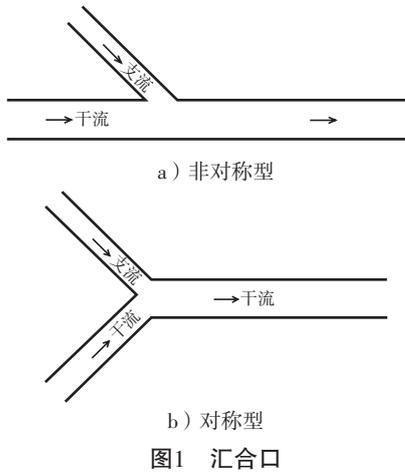
由于干支流汇合口河段水流运动的复杂性, 以往国内外对于汇合口河段水流运动特性的研究较少, 且多集中在对顺直型干支流“Y”型交汇(对称型)和斜交汇(非对称型)两种类型上(图1), 非对称型支流入汇干流情况研究得稍多, 而对支流入汇弯曲型干流的情况还基本无人问津。但从长江上游支流入汇情况来看, 实际河

收稿日期: 2012-07-26

*基金项目: 西部交通建设科技攻关项目(200832881438)

作者简介: 李文全(1966—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事航道整治研究。

道并非那么规则，且干流多呈弯曲状，支流在入汇段成顺直状，例如黄河、大溪口、永宁河、沱江、赤水河，嘉陵江等。因此，对该类汇合口河段的航道治理工程缺乏相应的理论指导和技术支撑。为此，本文以西部交通建设科技攻关项目“长江上游干支流汇合口通航水流条件及整治技术研究”中专题一“长江上游干支流汇合口通航水流条件及碍航特性”为依托，选择长江与沱江汇合口为研究对象，首次对支流在弯曲型干流弯顶附近汇入的一般水力学问题进行概化模型试验研究。



1 模型设计

参考长江与沱江汇合口河段河床形态，概化模型支流从弯道干流顶部凹岸汇入，支流断面形态为矩形，宽0.3 m，槽底坡度为1/1 250，支流与干流几何轴线的夹角可根据试验要求而变；干流弯道转角为180°，中心线半径2.0 m，槽宽1.0 m，深泓从弯道进口靠近凸岸侧逐渐过渡至汇合口下游凹岸侧，但不贴靠凹岸，凸岸为边滩，横断面形态呈偏“V”型。弯道段和支流均采用有机玻璃制作，糙率约为0.01；半圆形弯道水槽上下游与互为平行的混凝土矩形水槽相衔接，其糙率约为0.013，槽底坡度为1/2 000（图2）。

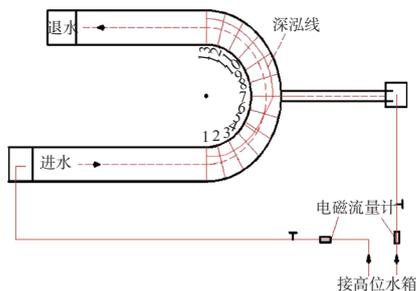


图2 弯道干支流汇合口概化模型试验系统平面布置

2 试验条件

过去一些学者通过顺直型干支流交汇河段水流运动特性的研究，对汇合口河段水流运动现象和主要影响因素有了初步认识，文献[1-2]研究成果具有一定的代表性，考虑到干支流交汇角和汇流比的变化直接影响汇合口河段水流的紊动程度和动力条件。因此，本次所做的支流入汇弯道概化模型试验，仍以交汇角 α 和汇流比 λ 作为研究汇合口河段水流运动特性的重要指标。

概化模型干支流汇流角 α 分3种情况，即30°，60°，90°，对于固定的河宽比（约1:3.3），分别按汇流比 λ 为0.03，0.1，0.3和0.6放水试验（表1）。

表1 试验条件

汇流角 α	河宽比 $B_{支}/B_{干}$	汇流比 $\lambda=Q_{支}/Q_{干}$	测速垂线径向位置/cm
		0.03	
30°, 60°, 90°	1/3.3	0.1	155, 171, 188,
		0.3	205, 222, 234, 245
		0.6	

观测断面布设：在干流弯道段共设13个测量断面，每个断面沿径向布置5个测压点，7条测速垂线，每条垂线上布置8个测点。

试验中通过对不同汇流比和汇流角下汇合口河段水面线、三维流速（采用美国SONTEK公司生产的ADV测速仪直接测量）分布、水流动力轴线变化、切应力分布等因素的观测分析，初步判断汇合口河段推移质运动特征、冲淤部位等，为该类河段航道整治规划和航道维护提供技术支撑。

3 试验成果分析

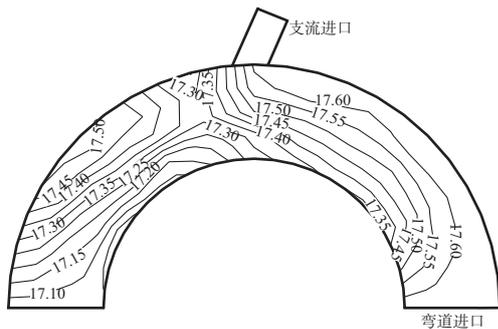
3.1 汇合口河段水面高程与比降变化特征

在有支流入汇的弯曲河段中，水流运动除受重力和离心惯性力的共同作用外，另受支流入汇的影响，其水流运动结构复杂程度远比单一型弯道水流为甚，其水面几何形态呈十分复杂的三维扭曲面。

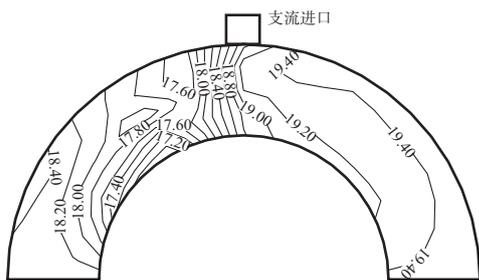
当汇流比和汇流角均较小时，支流的入汇，对干流弯道水流运动特征影响相对较小，水位沿横向呈曲线变化，凹岸一侧水位恒高于凸岸一侧，形成横比降，整个弯道凹岸一侧水面线呈上凸形式，凸岸一侧呈下凹形式。以汇合口为界，在凹岸一

侧，上游水面坡降较为平缓，下游较陡；在凸岸一侧，上半段水面高程急剧下降，过汇合口断面后，水面高程下降速度趋缓。这种水面高程变化现象与一般单一型弯道河段水面形态基本一致^[3]。

随着汇流比 λ 的增大，支流对干流的顶托或壅水作用逐渐增强，在汇合口以上，凸岸与凹岸水面高差减小，水面纵横向坡度减小，在汇合口以下，水面高程沿程下降较快，特别是在汇合口断面附近，汇流比和汇流角越大，这种现象表现的越明显，见图3。当汇流角为 90° 时，在汇合口断面(圆心角 $\phi=90^\circ$)附近，水面高程急剧跌落，纵比降 $J=dz/dl$ 陡然增大，见图4a)和b)，过了汇合口后，随着水位的上升，水面纵比降又出现急剧减小之势。大约在汇合口下游接近 120° 圆心角断面附近，水面高程沿程逐渐下降，凹凸两岸纵比降 $J_r=dz/dl$ 又有所增大。在汇合口断面，水面横比降在靠近凸岸侧随着汇流比的增大而增大，大约过了弯道中心线后，至凹岸侧则出现相反情况，甚至于当汇流比较大时出现负的横比降，见图4c)。这种现象的产生，可能与支流对干流水流挤压或阻水作用较强，以致在汇合口下游出现水流分离现象有关。

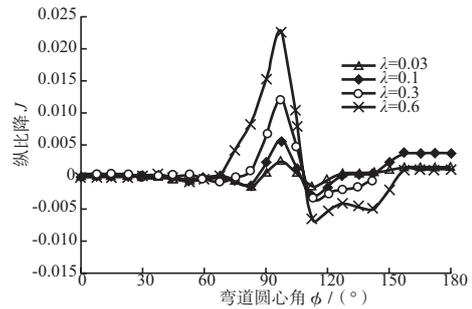


a) $\lambda=0.3, \alpha=60^\circ$

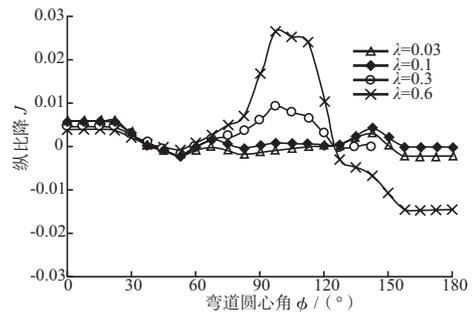


b) $\lambda=0.6, \alpha=90^\circ$

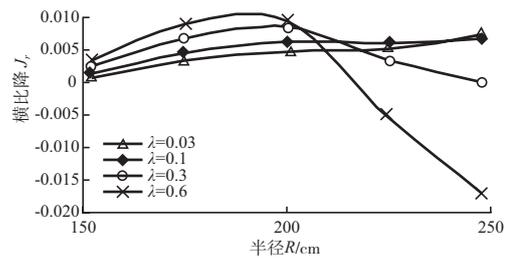
图3 汇合口水面等高线 (单位: m)



a) 弯道凹岸 ($R=2.48\text{ m}$) 的水面纵比降



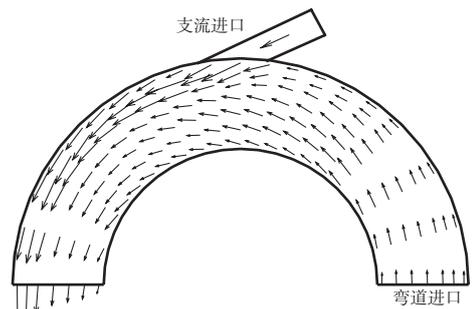
b) 弯道凸岸 ($R=1.52\text{ m}$) 的水面纵比降



c) 汇合口 90° 断面水面横比降

图4 $\alpha=90^\circ$ 时干支流交汇河段纵横比降变化情况

干支流汇合口处是否会产生水流分离现象和水流分离区范围的大小，与干支流汇流角度和汇流比的大小密切相关。当汇流角较小时，支流与干流水流衔接较为平顺，在汇合口下游基本不产生水流分离现象，加大汇流比，仅使汇合口下游靠近凹岸侧流速增大。但当汇流角增大至一定程度后，在干流汇合口下游凹岸一侧便产生水流分离现象(图5)。



a) $\alpha=30^\circ$

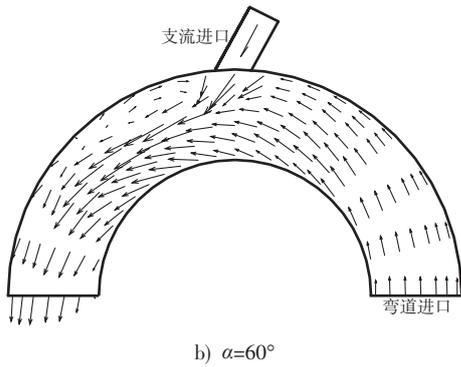


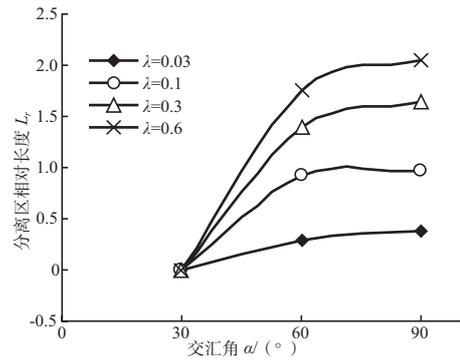
图5 汇合口表面流速矢水平投影 ($\lambda=0.6$)

设分离区的相对长度 L_r 和相对宽度 b_r 分别为：

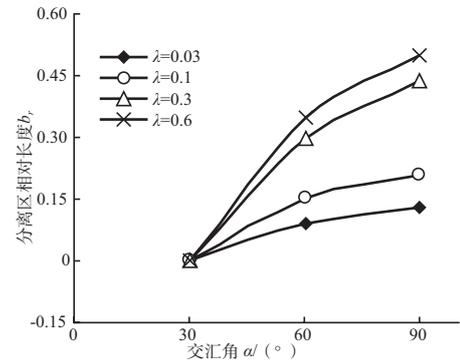
$$L_r = \frac{l}{B} \quad (1)$$

$$b_r = \frac{b}{B} \quad (2)$$

式中： l 、 b 分别代表分离区的长度和在半径方向上的宽度； B 为弯道水面宽度。由图6可见，分离区的相对长度 $L_r=f(\lambda, \alpha)$ 和相对宽度 $b_r=f(\lambda, \alpha)$ ，随汇流比 λ 和交汇角 α 的增加而增大。当交汇角 $\alpha > 60^\circ$ 后，其增大趋势变缓。在交汇角 $\alpha \leq 30^\circ$ 时，支流与干水流衔接较为平顺，汇合口下游凹岸侧基本不出现流动分离现象。

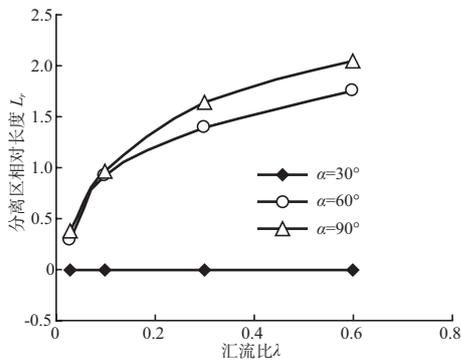


c) 分离区相对长度随交汇角的变化

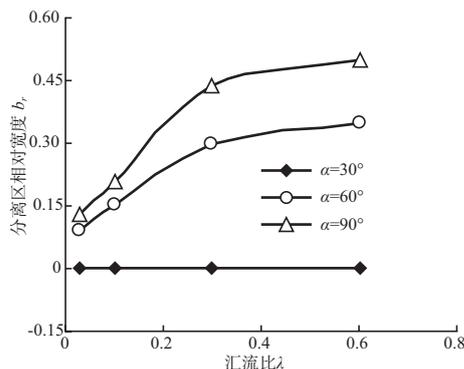


d) 分离区相对宽度随交汇角的变化

图6 汇合口下游水流分离区范围与汇流比和交汇角的关系



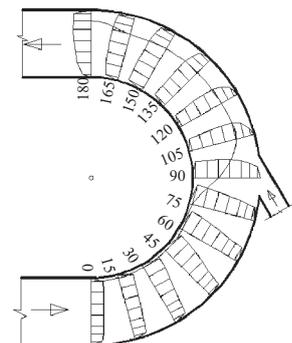
a) 分离区相对长度随汇流比的变化



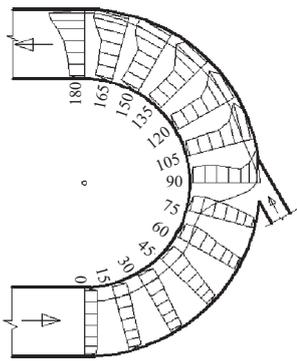
b) 分离区相对宽度随汇流比的变化

3.2 纵向垂线平均流速分布及水流动力轴线变化特征

当汇流角较小时，例如 $\alpha=30^\circ$ ，该汇合口河段水流动力轴线的变化规律与一般单一型弯道河段基本相同，在弯道前半段虽然最大流速位置仍处于凸岸侧，但随着汇流比的增大，支流对干流的壅水作用增大，水流动力轴线不再与凸岸贴近，而是离开凸岸一定距离；在汇合口断面附近，因支流入汇使汇合口下游凹岸侧流速陡然增大，水流动力轴线迅速移向凹岸，并随汇流比的增大而更加靠近凹岸（图7）。



a) 汇流比 $\lambda=0.03$



b) 汇流比 $\lambda=0.6$

图7 交汇角为 30° 时汇流比 λ 的变化对水流动力轴线的影

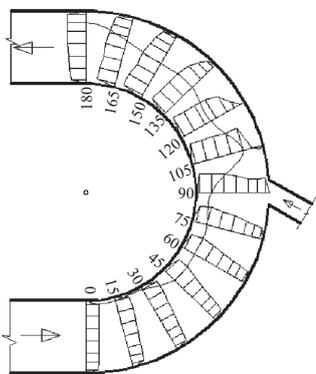
响
当干支流交汇角增大至 60° 后，支流对干流水流流态和水流动力轴线的影

响，在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 圆心角断面范围内，在汇流比较小时，水流动力轴线逐渐由凸岸过渡向凹岸，但受支流入汇的影响，在汇合口断面以下仍然出现局部水流分离现象，水流动力轴线并不贴近凹岸。随着汇流比的增大而造成支流的阻水作用增强和汇合口下游水流分离范围的增大，在汇合口断面以上，大约 $60^\circ \sim 90^\circ$ 圆心角断面范围内，水流动力轴线开始向凹岸转移时，受支流入汇的影响，至汇合口断面附近，又有被逼向凸岸之势，且受凸岸边界的影响，使汇合口断面附近及其下游区域横向流速分布发生急剧改变，产生双峰值现象，水流动力轴线分为两支，见图8b)。

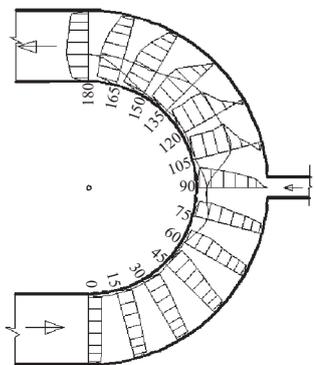
由此可见，弯道干支流交汇河段的演变主要受两个方面的影响：一是受到弯道水流运动特征的影响；二是受到支流入汇的影响。弯道干支流汇合口河段主流位置即在这两个影响因素的此消彼长作用下，在一定幅度内摆动，特别是在汇流比和汇流角均较大时，水流动力轴线位置的剧烈变化，使滩槽格局相应发生调整，航道条件难以稳定。

3.3 弯道环流结构变化

当干支流交汇角和汇流比均较小时，例如 $\alpha=30^\circ$ 和 $\lambda=0.03$ ，支流的入汇对干流水流结构影响不大，汇合口河段弯道环流运动特征与单一型弯道河段没有本质的差别，表流指向凹岸，底流指向凸岸，仅在干支流交汇局部区域内，流态稍乱，干流环流范围略受挤压；随着汇流比 λ 的增大，支流的入汇对干流水流结构的影响逐渐显现。在汇合口上游弯道前半段，环流强度减弱，在汇合口及其下游断面凹岸一侧局部区域内出现范围较小、强度较弱的反向次生环流，使汇合口下游一段距离内，主流不像单一弯道河段一样贴靠凹岸。该次生环流沿程随着干支流来水不断掺混而逐渐消失（图9）。



a) $\alpha=60^\circ$



b) $\alpha=90^\circ$

图8 $\lambda=0.3$ 时不同交汇角水流动力轴线变化

当干支流交汇角进一步增大至 90° 后，在弯道 45° 圆心角断面之前，水流动力轴线仍然贴近凸



a) $\lambda=0.03$



b) $\lambda=0.6$

图9 汇流角 $\alpha=30^\circ$ 时 120° 圆心角断面环流速度矢量

当干支流交汇角较大时，例如 $\alpha \geq 60^\circ$ 以后，如果汇流比也较大，支流的入汇对汇合口上游干流的顶托作用加强，使汇合口上游弯道环流强度降低，汇合口处流态紊乱程度加剧，汇合口下游靠近凹岸一侧出现明显水流分离现象，此处除了存在竖轴环流以外，还存在底流和表流流向与干流主环流方向相反的水平轴环次生环流，其范围和强度随着汇流角和汇流比的增大而增大。特别是当入汇角增大为 90° 时，较大的汇流比甚至于可以改变干流环流方向，在汇合口附近及其下游断面上形成复杂的水流结构，水流动力轴线分成两支，因而出现两个方向相反的环流（图10），在两环流交界面处，水流发生强烈掺混，因而，此处也会成为河床冲刷最严重区域。

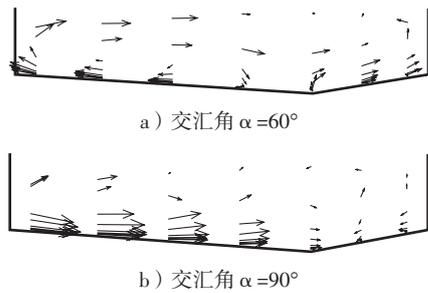


图10 汇流比 $\lambda=0.3$ 时 120° 圆心角断面环流速度矢量

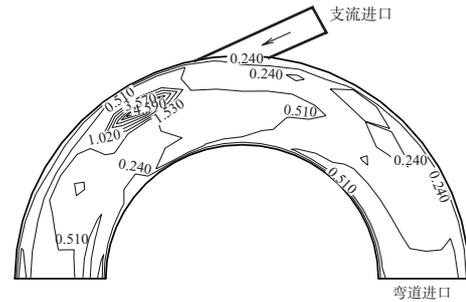
3.4 床面切应力分布特征

由于床面切力观测比较困难，常用计算方法间接确定，但本试验采用的DVD流速仪具有较高的测量精度，并能观测到河床近底流速，用之观测数据间接得出的床面剪切力，基本可以反映其随汇流比和汇流角的变化特征。

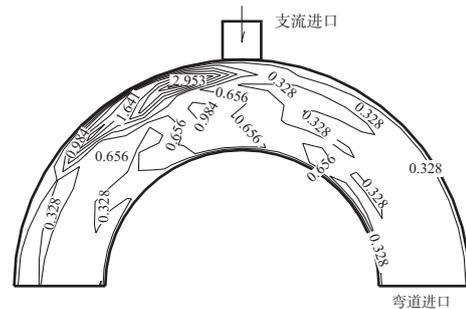
从试验结果来看，汇合口河段床面最大剪切力一般出现在汇合口附近下游的凹岸侧水流紊动强度最大处，在水流发生分离的情况下，最大剪切力一般发生在正流与副流的交界面附近，此处由于水流收缩，流速较大，流态紊乱，干支流来水剧烈掺混，横向流速梯度 du/dz 较大，河床容易冲刷。

由于弯道的形体阻力和汇流阻力的影响，在弯道前半段，一般切应力普遍小于弯道后半段的切应力，且凸岸侧的切应力大于凹岸侧的切应力；在弯道后半段，凹岸侧的切应力大于凸岸侧的切应力。在相同汇流比的情况下，床面最大切

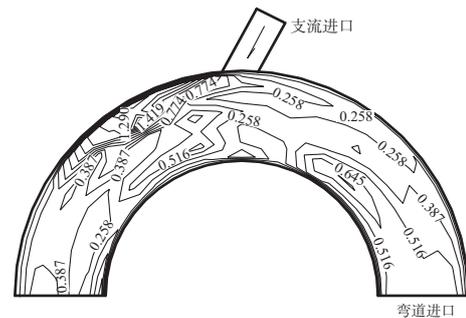
应力的位置随着汇流角的增大略向上游移动，数值相对减小，而对应靠近凸岸一侧床面切应力相对增大，见图11 a) 和b)；在相同汇流角的情况下，汇合口附近床面最大剪切力位置虽仍出现在汇合口下游靠近凹岸一侧，但随着汇流比的增大其位置产生下移，其数值略有增大，见图11c) 和d)。



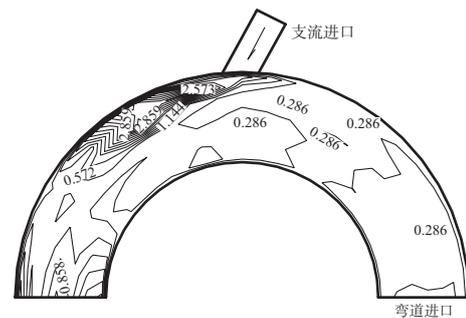
a) 入汇角 $\alpha=30^\circ$, $\lambda=0.1$



b) 入汇角 $\alpha=90^\circ$, $\lambda=0.1$



c) 入汇角 $\alpha=60^\circ$, $\lambda=0.1$



d) 入汇角 $\alpha=60^\circ$, $\lambda=0.3$

图11 汇合口河段床面切应力随汇流比和汇流角变化情况 (单位: m)

床面剪切力分布及其变化,直接关系到床面冲淤变化和推移质泥沙运动问题。推移质最大粒径和最大输沙率出现的位置,与床面最大剪切力出现的位置基本一致^[4]。弯道河段汇合口附近上述床面切应力变化特征和复杂的环流结构形式,使得在干支流交汇的弯道河段中,推移质运动既有如单一型弯道河段中向凸岸集中的趋势,形成凸岸边滩和凹岸深槽,又有支流入汇所产生的壅水作用,造成在汇合口上游靠近凹岸一侧床面剪切力减小,有可能因之而产生淤积、形成心滩或浅滩。长江上游沱江口附近金钟碛心滩的形成也可能与此有关。在汇合口下游,对于入汇角较小、或汇流比较小的情况下,干支流交汇弯道河段推移质运动和河床形态变化特征与单一型弯道河段差别不大;对于入汇角和汇流比均较大的情况下,由于汇合口附近及其下游产生水流分离现象和复杂的环流结构形式,对上游产生明显壅水作用,床面剪切力下降,汇合口上游靠近凹岸侧也会产生淤积,而在汇合口及其下游,床面最大切应力位置和最大流速位置不能贴近凹岸,使得深槽离开凹岸一定距离。所以,在航道整治中,应尽量减小支流入汇角度,有利于弯道凹岸的冲刷和凸岸边滩的发育,也有利于枯水航道条件的稳定。

4 结语

1) 弯道干支流交汇河段水流特性和河床演变特征,是生产部门迫切需要解决的问题,但由于问题的复杂性,过去除了仅有少量的原型观测资料分析成果外,尚未见有系统的理论研究成果。本次概化模型试验,首次对其水流结构有关问题进行初步探索,为进一步认识和掌握弯道干支流交汇河段水流运动特征奠定了基础。从试验结果来看,在干支流汇合口河段河道形态一定的情况下,其水流运动特征主要受干流弯道形态特征和干支流汇流比与汇流角两大因素的影响,两因素的此消彼长,直接影响汇合口河段滩槽格局和航道水流条件。

2) 当干支流交汇角或汇流比较小时,支流

的入汇对干流河段弯道水流运动特征影响不大,特别是当交汇角较小时,弯道汇合口区域表面水流运动特性与单一型弯道水流运动相似,即使加大汇流比,支流与干流水流衔接仍较为平顺,汇合口下游近岸侧基本不出现水流分离现象,水流动力轴线从弯道进口的凸岸逐渐过渡至凹岸,位置较为稳定。

3) 当干支流交流角及汇流比较大时,汇流区水流紊动掺混作用加剧,阻力增大,水面几何形态呈十分复杂的三维扭曲面。由于支流入汇产生的壅水作用,汇合口上游流速减缓,纵横比降和床面切应力减小,弯道环流作用减弱,有可能在汇合口上游靠近凹岸一侧产生泥沙淤积,形成浅区;在汇合口下游,干流凹岸一侧出现水流分离现象,形成回流淤积区,水流分离区相对长度、相对宽度随交汇角 α 和汇流比 λ 的增加而增大,水流动力轴线摆动幅度较大,弯道环流结构复杂,甚至螺旋流方向也发生了改变,流态紊乱,不利于船舶安全航行。

4) 在该类河段航道问题治理中,虽然干支流汇流比主要由流域自然地理条件和气象条件决定,但在上游修建有大型水库时,可以通过人为调度措施,减小干支流汇流比变幅,限制水流动力轴线的摆动幅度,或通过局部工程措施减小干支流入汇角度,有利于稳定深泓线位置和改善航道条件。

参考文献:

- [1] 茅泽育,赵升伟,罗昇,等.明渠交汇口水流分离区研究[J].水科学进展,2005(1):7-12.
- [2] 兰波,汪勇.干支流交汇水面形态特征分析[J].重庆交通学院学报,1997(12):109-114.
- [3] 谢鉴衡,丁君松,王运辉.河床演变及整治[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [4] Dietrich W E, Smich J D, Dunne T. Flow and sediment transport in a sand bedded meander[J]. J of Geology, 1978, 87: 305-315.

(本文编辑 武亚庆)