

# 交汇河道水沙运动与河床响应研究进展

王春美

(江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 汇流是平原河网常见的河道形态, 河网交汇处伴随着水流、含沙量、地形、水温、生态和环境等的突变, 是控制水、沙、污染物输移的重要节点, 因此了解汇流处水、沙等物质输移和特殊床面形态对日益恶化的河网水环境的综合治理有非常重要的理论和实际意义。笔者主要从交汇河道的特殊水流结构、泥沙运动规律以及河床对水沙运动的响应分别进行概述和总结, 提出了目前交汇河道研究中存在的一些问题, 并对交汇河道水沙运动与河床响应研究的研究方向提出了展望。

**关键词:** 汇流; 水流结构; 泥沙运动; 河床; 平原河网; 水沙运动

**中图分类号:** TV142      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2016) 08-0038-04

Research progress on riverbed adjustment by flow and sediment transport at channel confluences

WANG Chunmei

(Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, Jiangsu)

**Abstract:** Channel confluence is one of the usual patterns in river networks. It is the important location to control the transport of flow, sediment and pollution, since the sudden changes of flow, sediment concentration, topography, water temperature, ecology and environment occur here. It is crucial for the comprehensive treatment of river networks to understand the flow, sediment transport and special riverbed in confluent zone. Studies on special flow structure, sediment transport and riverbed adjustments at channel confluences are summarized and some problems are proposed. Some suggestions for research directions are put forward.

**Key words:** channel confluence; flow structure; sediment transport; riverbed; plain river network; flow and sediment transport

汇流是平原河网常见的河道形态, 是河网中水、沙及其他物质输移的重要控制节点。分汇区具有复杂的水力特性, 受流量、水位、河形、地形、输沙量等众多因素影响, 该区水沙及其他物质输移规律非常复杂。早先的研究主要利用动量方程研究简单的基于一系列假定的一维汇流水力特性, 没有考虑物质掺混, 无法揭示汇流高度三维的水流结构和物质输移特性。随着过去三十年内流动测试技术以及三维流体动力学模型的发展, 交汇处复杂的三维流动、泥沙运动过程、物质掺混与分离等河网特殊规律得到了更进一步的认识。

## 1 汇流区水力特性

Best 对汇流口水流结构定义了六个不同分区<sup>[1-2]</sup>, 即位于上游交汇口的水流停滞区、支流汇入时的水流偏转区、位于下游交汇角后方的分离区、最大流速区、分离区下游的流速恢复区、伴随着漩涡发展的剪切层(或掺混层)。一般认为, 汇流角和汇流比对这些区域的水流形态起主导控制作用。Best 等<sup>[3]</sup>、Yang 等<sup>[4]</sup>实验研究了汇流角和汇流比对分离区尺寸的影响, 发现随着汇流角或汇流比的增大, 分离区宽度越大, 对整个汇流区的水流结构

收稿日期: 2016-06-26

作者简介: 王春美(1981-), 女, 工程师, 主要从事河流动力学方面研究。

影响也越大<sup>[3-4]</sup>。剪切层对研究汇流口的物质掺混和床面形态等有重要影响<sup>[5-8]</sup>。Best 明确指出了剪切层的重要性<sup>[1]</sup>: 剪切层最明显的特性就是它的形成是由于两支水流汇合后在两支水流之间形成了强烈的立轴涡流, 在两支水流进入汇流区导致流速增大的同时, 剪切层能够增加床面切应力, 从而引起明显的床面冲刷。Rhoads 等分析了交汇口剪切层两侧的物质通量<sup>[9]</sup>。交汇河道两汉河床高程不一致会导致剪切层的倾斜, 加速物质的掺混<sup>[6]</sup>。支汉大流量汇入也会导致剪切层的倾斜, Yuan 等对其特殊的水流结构进行了系统的分析<sup>[10]</sup>。普遍的观点认为, 汇流水流结构的主要组成是两股螺旋流, 它们在水流表面汇聚, 在近床面分离。通过现场观测和数值模拟发现, 这两股水流会逐步形成一股河宽尺度的螺旋流<sup>[7-11, 12]</sup>。

目前, 对于天然汇流河道水流结构尤其是剪切层的研究很少。对于天然汇流河道的研究, Leclair 等发现在水流流速较小时剪切层范围会变宽<sup>[13]</sup>, Roy 等通过结合使用可视化 and 流速时间序列分析研究了混合区漩涡的水力特性<sup>[14]</sup>。Rhoads 等精细观测了汇流口剪切层的水流结构, 他们对汇流口三维流速进行了时间序列分析和波谱分析, 得到了一些与实验室研究成果不同的结论<sup>[8]</sup>。但目前这样的定量现场实验很少, 可视化分析是掺混层复杂过程现场观测的主要手段。最理想的情况就是来流之间存在颜色的差异或者水温的差异<sup>[14]</sup>, 也可以通过添加染料确认掺混层的性质<sup>[15]</sup>。

## 2 汇流区河床响应

目前, 对于汇流河道床面形态响应的研究主要基于不同尺度天然汇流河道地形的测量以及实验室水槽实验。一般认为, 汇流河道床面形态的五大特征地形包括河中间的冲坑、分离区沙垄、支流口的沙垄、位于汇合后的河道中间位置河中沙垄、靠近上游汇流角会形成细沙堆积区域。

在对称或非对称型汇流河道研究中都发现河道中间存在一个冲坑, 其深泓线大致平分汇流角<sup>[2]</sup>。Best 发现冲坑深泓线的走向与支流之间的汇流比有关, 当支流流量增大, 即汇流比增大时, 冲刷也相应地加剧<sup>[2]</sup>。Bryan 等在关于细沟交汇流的冲坑试验中发现, 相比于汇流角, 交汇前两汉河道的形状对冲坑的影响更大<sup>[16]</sup>。非对称汇流河道的冲坑更为复杂, 支流对对岸的冲刷会增大汇流角,

使非对称河道向对称型河道演化。非对称汇流口的冲坑走向会随着分离区下方沙垄的成长以及随后的河岸冲刷而发生变化。如果干支流床面存在高差, 冲坑可能会很小, 甚至消失<sup>[17]</sup>。目前, 对于深坑的成因存在不少争议, 有认为剪切层的高速强紊是深坑的主要成因, 也有学者认为, 螺旋流引起的最大流速区的下沉或下降水流的强剪切是导致冲坑形成的主要成因。

对于矩形交汇河道的实验表明, 在分离区可能会形成沙垄并且沙垄位于下游交汇角处, 很多研究中也与此类似的发现。这种沙垄也被称为“分离区沙垄”或“河岸接触式沙垄”, Best 认为它起源于分离区前段, 由比相邻河道更细的沙组成, 并且可以造成低流速区域<sup>[2]</sup>。然而, 很明显这些沙垄可能仅形成于流速减弱的区域而非分离区。通过对天然汇流河道观测发现, 在高汇流比情况下, 分离区沙垄不断发展并且与支流口沙垄相接, 使其伸入汇流区的部分更加复杂<sup>[18]</sup>。Mosher 等对这个特征进行研究发现在交汇角沙垄上有粗颗粒泥沙存在, 这也表明, 沙垄相连过程中, 推移质向下游活动<sup>[19]</sup>。Best 研究了在分离区沙垄上游头部的粗沙<sup>[2]</sup>, 他们发现了英国北泰恩河中分离区沙垄下游床面的粗化, 并且发现正对着旁边冲坑的沙垄中间部位, 泥沙颗粒最粗。然而, Best 在研究英国尤尔河时发现床沙颗粒大小在向沙垄中部方向越来越细, 再向尾部发展则颗粒越来越粗<sup>[2]</sup>。显然, 交汇角沙垄的泥沙淤积很复杂, 并且交汇角流场以及来沙对该区域的沙垄形态及床面颗粒粗细的影响巨大, 但目前相关研究还很缺乏。

## 3 汇流区泥沙运动

目前, 对汇流区泥沙运动的研究非常少。Best 通过实验室水槽研究和现场观测发现, 在冲坑的两边推移质的输移出现了明显的分离, 冲坑处很少有泥沙通过<sup>[2]</sup>。Rhoads 发现在冲坑的区域也出现了分离现象, 尽管推移质泥沙在冲坑下游不远处似乎会出现掺混<sup>[20]</sup>。在沙砾床面的汇流中, 通过对运动沙砾进行追踪标记发现了不同的模式, 从两汉来的颗粒在冲坑处出现了聚集, 而并没有出现分离<sup>[21]</sup>。Boyer 等通过观察天然汇流中细沙床面推移质输沙率的横向分布, 发现推移质输沙率在剪切层的边缘出现最大值, 平均雷诺应力与推移质输沙率之间还没有建立清晰的相关性, 但

是水平垂直交叉应力却与推移质输沙率有关<sup>[17]</sup>。Boyer 等认为高推移质输运通道与螺旋流的存在无关,而是与剪切层区有关,高紊动强度在泥沙的输移中扮演了很重要的角色<sup>[17]</sup>。Roy 等也在剪切层区观察到高紊动强度与高推移质输沙率相联系<sup>[13]</sup>。

汇流口的悬移质很少被单独定量分析,更多是以与汇流口悬移质或污染物等物质掺混的方式开展研究。一般认为,汇流区悬移质在下游完全混合的距离是河宽的 100 倍<sup>[22]</sup>。Jirka 通过现场观测点源污染的交汇河流发现,垂直方向完全混合是一个比较快速的过程,最大需要几十米;而横向的完全混合需要很长的距离,一般需要 100 至 1000 倍河宽<sup>[23]</sup>。但是,当两交汇河道床面存在高程差时,横向混合过程也会加速,Gaudet 等观测结果显示汇流口下游的完全混合距离只有大约 25 倍河宽<sup>[24]</sup>。两汉河流物质混合速率主要与河流宽深比有关,与河流尺度关系不大<sup>[25]</sup>。

#### 4 结语与展望

本文主要从交汇河道的特殊水流结构、泥沙运动规律以及河床对水沙运动的响应分别进行总结和概述,阐述交汇河道水沙运动与河床响应的研究进展及目前尚未解决的问题,笔者认为,以下四方面将是今后研究的重点:

(1) 野外观测研究缺乏。目前,对于天然交汇河道水流结构、泥沙输移等的观测研究非常有限,很多实验室的假定与现场实际并不一定相符,需要加强实验室研究成果与现场观测结果的相互验证。

(2) 汇流口三维水流结构有待完善。目前对汇流口的水流结构描述是基于 Best 的二维水流结构模型,而实际汇流口是非常复杂的三维结构,尤其是对两流物质掺混意义重大的剪切层,目前对其描述的开尔文-亥姆霍兹不稳定性特征也是基于室内实验。如何对其进行更准确的三维水流结构描述是今后研究的一个重要方向。

(3) 需要深入研究深坑的成因。深坑的发生、发展和预测有重要的理论意义,同时对穿河隧道等工程的建设有非常重要的实际意义。但目前对于深坑的成因存在流速、紊动、螺旋流、水流剪切力等各种猜测,需要进一步开展深入研究,最终实现深坑的合理预测。

(4) 泥沙输移,尤其是推移质输移,是水流结构与床面形态之间的联系之处。目前,关于汇流区推移质输移的研究较少,研究成果存在不少矛盾,这方面将是今后研究的重要方向。

#### 参考文献:

- [1] Best, J.L., 1987. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M.D. (Eds.), Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Spec. Publ. SEPM Soc. Sediment. Geol. 39. pp. 27-35.
- [2] Best, J.L., 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology* 35, 481-498.
- [3] Best, J.L., Reid, I., 1984. Separation zone at open-channel junctions. *J. Hydraul. Eng.* 110 (11), 1588-1594.
- [4] Yang, Q., Wang, X., Lu, W., Wang, X., 2009. Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers. *J. Hydrol. Eng.* 14 (2), 166-171.
- [5] Biron, P., De Serres, B., Roy, A.G., Best, J.L., 1993a. Shear layer turbulence at an unequal depth channel confluence. In: Clifford, N.J., French, J.R., Hardisty, J. (Eds.), *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. John Wiley, Chichester, UK, pp.197-213.
- [6] De Serres, B., Roy, A.G., Biron, P., Best, J.L., 1999. Three-dimensional flow structure at a river channel confluence with discordant beds. *Geomorphology* 26, 313-335.
- [7] Rhoads, B.L., Sukhodolov, A.N., 2001. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: part I. Thermal mixing and time-averaged velocities. *Water Resour. Res.* 37, 2393-2410.
- [8] Rhoads, B.L., Sukhodolov, A.N., 2004. Spatial and temporal structure of shear-layer turbulence at a stream confluence. *Water Resour. Res.* 40, 2393-2410.
- [9] Rhoads, B.L., Sukhodolov, A.N., 2008. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow with in a confluence mixing interface. *Water Resour. Res.* 44, W08440.
- [10] Yuan S., Tang H., Xiao Y., Qiu X., Zhang H., and Yu D., 2016. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: Accounting for the distortion of the shear layer. *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 12, 130-147.
- [11] Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., 2000a.

- Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resour. Res.* 36 (9), 2731–2746.
- [12] Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P., Roy, A.G., 2000b. Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *J. Hydraul. Eng.* 38 (3), 207–215.
- [13] Leclair S F, Roy A G. Variability of bed morphology and sedimentary structures at a discordant river confluence during low flows.[ J ]. *Geographie physique et Quaternaire*. 1997, 51 (2) : 125–139.
- [14] Roy A E G, Biron P M, Buffin-B E Langer T, et al. Combined visual and quantitative techniques in the study of natural turbulent flows[ J ]. *Water Resources Research*. 1999, 35 (3) : 871–877.
- [15] Sukhodolov A N, Rhoads B L. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 2. Turbulence[ J ]. *Water Resources Research*. 2001, 37 (9): 2411–2424.
- [16] Bryan R B, Kuhn N J. Hydraulic conditions in experimental rill confluences and scour in erodible soils[ J ]. *Water resources research*. 2002, 38 (5) .
- [17] Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A.G., Schleiss, A.J., 2012. Flow and sediment dynamics in channel confluences. *J. Geophys. Res.* 117, F01035.
- [18] Boyer C, Roy A G, Best J L. Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology[ J ]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2006, 111 (F4) .
- [19] Mosher S J, Martini P. Coarse-grained flood bars formed at the confluence of two subarctic rivers affected by hydroelectric dams, ontario, canada[ J ]. *Flood and Megaflood Processes and Deposits: Recent and Ancient Examples (Special Publication 32 of the IAS)* . 2009, 17: 213.
- [20] Rhoads B L. Mean structure of transport-effective flows at an asymmetrical confluence when the main stream is dominant[ J ]. *Coherent Flow Structures in Open Channels*. 1996: 491–517.
- [21] Roy A, Bergeron N. Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material[ J ]. *Geomorphology*. 1990, 3 (2) : 99–112.
- [22] Mackay J R. Lateral mixing of the liard and mackenzie rivers downstream from their confluence[ J ]. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1970, 7 (1) : 111–124.
- [23] Jirka G. Mixing and dispersion in rivers in river flow 2004, [ J ]. Greco M, Carravetta A, Della Morte R (eds) . 2004: 13–27.
- [24] Gaudet J M, Roy A E G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences[ J ]. 1995.
- [25] Chu V H, Babarutsi S. Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers[ J ]. *Journal of hydraulic engineering*. 1988, 114 (10) : 1257–1274.
- [26] Guyot J L, Filizola N, Guimaraes V. Amazon suspended sediment yield measurements using an acoustic doppler current profiler (adcp) : first results[ J ]. *IAHS PUBLICATION*. 1998: 109–116.
- [27] Laraque A, Guyot J L, Filizola N. Mixing processes in the amazon river at the confluences of the negro and solimoes rivers, encontro das aguas, manaus, brazil[ J ]. *Hydrological processes*. 2009, 23 (22) : 3131.