

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 03

河流交汇口河床地貌演变研究进展

何 保¹, 燕亚东¹, 余 苇¹, 刘起源²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中煤昔阳能源有限责任公司黄岩汇煤矿, 山西 晋中 030600)

摘要:综述了 20 世纪 80 年代以来河流交汇口河床地貌演变研究取得的主要成果,总结了不同类型交汇口水流特性以及地貌特征。影响交汇口河床地貌的主要因素为干、支流交汇角与干、支流汇流比,已取得的研究成果主要是基于数值模拟和水槽试验的理论研究,应加强对天然交汇口河床地貌演变的研究,尤其是加强河流生态修复、河流水污染治理和河道疏浚等应用性研究工作。

关键词:河流交汇口;河床;地貌演变;水槽模拟

中图分类号:TV147⁺.4;P931.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)06 - 0017 - 07

Research progress of riverbed landform evolution in river junctions

HE Bao¹, YAN Yadong¹, YU Wei¹, LIU Qiyuan²

(1. Minging College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. Huangyanhui Coal Mine, China Coal Xiyang Energy Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: The main study achievements in the evolution of riverbed landforms in river junctions since 1980s are reviewed. The characteristics of flow and landforms in different types of river junction are summarized. The main factors affecting the riverbed landforms are intersection angle and confluence ratio of dry and tributary flow, the achieved outcomes until now are theoretical researches mainly based on numerical simulation and water tank test, it is should strengthen the study on the evolution of natural confluence riverbed landforms, especially the study on the applied researches about river ecological restoration, river pollution control and river dredging.

Key words: river junction; riverbed; landforms evolution; water tank simulation

河流交汇口是水网系统中的重要节点,由于支流水体汇入干流之中,导致交汇口内水流特性发生显著变化,并打破原有河相关系,促使河床地貌做出相应调整^[1]。关于交汇口的最早记录可追溯到 Lyell 等^[2]和 Playfair^[3]的研究,传统交汇口河床地貌划分主要依据干、支流河床平面形态分为对称式交汇口(又称“Y”形交汇口)和斜接形交汇口。随着对交汇口认识程度的加深,部分学者发现交汇的干、支流河床在剖面上常存在高程差,因此又将河床是否存在高程差作为分类标准分为平齐交汇口和悬垂交汇口^[4]。由于不同地区基岩类型、构造活动、水流特性以及河岸抗侵蚀能力往往存在差异,因此同一水系中不同位置交

汇口可呈现不同的几何形态,张强等^[5]针对这一问题以长江上游山区河流交汇口为研究对象,根据交汇口邻区干流河形特征将山区河流交汇口重新划分为弯曲干流型汇流口、顺直干流型汇流口以及分汊干流型汇流口 3 种类型。Callaway^[6]指出曲流河支流从外凸一侧入汇干流,Robert 等^[7]指出上游河道的弯曲可能导致流体结构发生变化。

无论何种类型的交汇口,干、支流交汇后的相互扰动会引起水流特性发生显著改变,并且改变溶解物质、悬浮物质以及污染物的沉积和搬运作用,故而充分认识交汇口水流结构有助于了解交汇口沉积物质的搬运路径以及河床地貌演变。此外,河流交汇口水

基金项目:国家自然科学基金(41272159,41572099)
作者简介:何保(1963—),男,副教授,博士,主要从事盆地分析与矿产评价等研究。E-mail:641935476@qq.com

流流态、碎屑物质及沉积物粒度分布的多样性为河床地貌多样性提供了基础,多样性的地貌环境为生物多样性提供了栖息地条件,交汇口也因此可能成为水系网络中生物的热点聚集场所^[8-9]。近 30 年来,大量水槽模拟研究以及野外考察表明,河流交汇口河床地貌演变的研究对航道整治、河流污染物治理、建筑设计、城市化建设、重矿物分布位置预测、河流生态修复^[10-11]等问题具有显著的意义。

1 天然河流交汇口河床地貌演变

1.1 河流交汇口水流特性

自 Taylor^[12]通过理论分析及水槽模拟两种方法初步研究交汇口水流特性以来,后人已从各个方面对交汇口水流特性展开了大量研究工作,并建立了二维、三维水流结构模型^[13-20]。Best^[13]利用固定边界的水槽装置首次对交汇口水流特性进行了系统研究,并根据交汇口各位置水力学差异将其划分为 6 个独立区域(图 1,图中 v 为水流流速, b 为河流宽度):滞流区、分离区、偏离区、最大流速区、流动复原区以及剪切层,这为交汇口的相关研究鉴定了理论基础。水槽试验以及野外考察均发现在滞流区和分离区内存在局部环流,这种环流是在水体偏转产生的压力差作用下形成的,环流强度受控于交汇角度以及干、支流流量比。除此之外,Ashmore^[14]发现在“Y”形交汇口中还存在螺旋环流,表现为表层水体从干、支流河口向河道中心侵入,在河道底部发生分离。早期观点认为该螺旋环流的成因与曲流河横向环流成因相同,均与离心力和压力梯度有关,然而 Ashmore 等^[21-24]研究表明,交汇口螺旋环流成因与水平方向上水流进入交汇口而形成的分离涡流有关。为了弥补以往研究缺少大型河流交汇口的不足,Parsons 等^[25]对阿根廷巴拉那河之上的一交汇口进行了研究(该交汇口宽深比约 200),建立了三维水体结构模型,同时发现河床糙度以及底形形态会对水流特性造成影响。

1.2 平齐交汇口河床地貌特征

Smith^[26]在考察加拿大 Saskatchewan 河时发现交汇口存在显著的冲沟,并对其地貌特征进行了描述,指出冲刷作用可能破坏桥梁、水下隧道等建筑物的稳定性,但并未讨论影响冲沟发育的因素。Shen 等^[27-28]分析了桥墩及排水渠前方冲刷作用的影响,但是对交汇口冲沟形成的控制因素缺乏系统研究。鉴于此,Mosely^[29-30]利用水槽试验分别讨论了交汇角和汇流比对“Y”形交汇口与斜接形交汇口河床地貌演变的影响,值得注意的是 Mosley^[29]利用水槽装置对“Y”形交汇口的试验结果表明,交汇处水体的偏转将会侵蚀干流河岸,促使河床迁移,并且在洪水期可能成为洪涝灾害易发段。

自 Mosely^[29-30]利用水槽模拟对平齐交汇口进行研究之后,众多学者分别以干、支流河床高程相同的“Y”形交汇口与斜接形交汇口作为研究对象,主要通过水槽试验研究了交汇口河床地貌。如 Ashmore 等^[31]利用水槽试验研究了辫状河交汇口的河床地貌特征,Bristow 等^[32]则充分研究了两种交汇口的河床地貌特征,他们发现交汇处存在冲沟、支流河口沙坝、分离区沙坝以及位于下游的中央沙坝,唯一不同的是 Ashmore 等^[31]发现在干、支流交汇节点还存在一沉积区,该沉积区与后来 Best^[13]提出的滞流区相对应。

交汇口河床地貌单元的划分为研究地貌演变提供了先决条件,由于干、支流流经不同区域,其河床比降往往存在显著差异,同时洪水期流量变化均可对交汇口河床地貌演变造成显著影响,比如洪水期河口沙洲向交汇口中心的推进导致冲蚀坑被充填、枯水期分离区沙洲出露水面等。Best 等^[33-34]对天然交汇口洪、枯水期碎屑物质的搬运路径进行了研究,结果表明,干、支流汇流比的变化将会影响到交汇口的冲淤特性。因此,初步认为影响滞流区沉积体发育的因素主要是干、支流汇流比以及携沙量。

出于工程设计以及古环境恢复的需要,长期以来

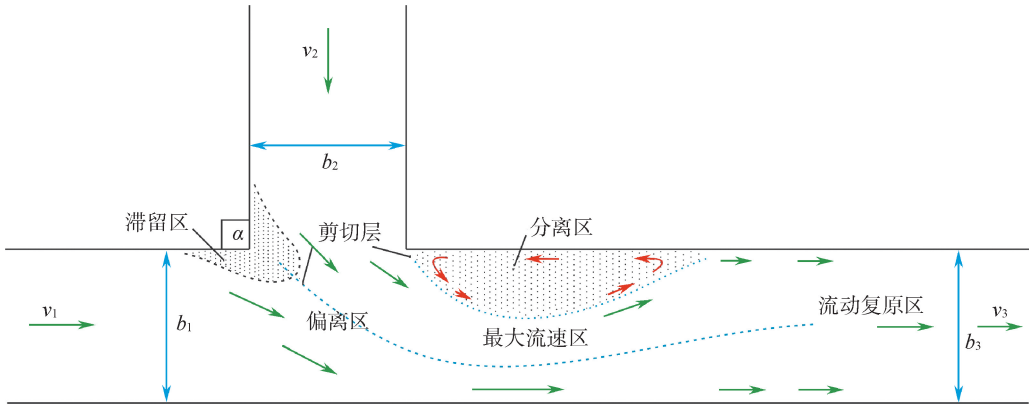


图 1 河流交汇口水流特性分区^[13]

众多学者主要针对交汇口冲蚀坑形成的影响因素进行了深入研究。Mosely^[29]研究表明冲蚀坑平面形态呈现为凸透镜状,同时提出冲蚀坑深度随着交汇角增大而增大,在交汇角增大至 100°时,冲蚀坑深度基本趋于稳定,但是随着入汇河流携沙量增大冲蚀坑深度降低,这是大量的碎屑物质在入汇水体相互扰动作用下卸载沉积,从而导致支流河口沙坎向着冲蚀坑推进,并使其被充填的结果。在交汇角一定的情况下,冲蚀坑深度随干、支流汇流比而发生变化,如 Best^[23]发现冲蚀深度响应了汇流比和交汇角的变化。虽然冲蚀坑是平齐交汇口的一显著地貌特征,但是其位置并非固定不变。Roy 等^[34]提出在交汇口除了交汇角以外,河床糙度也可能影响冲蚀坑的发育程度。de Serres 等^[35-36]研究表明,在冲蚀坑的形成以及保存问题上,相比于以往提出的二次流观点,沿着混合层产生的湍流可能更加重要。与 Mosely^[29]观点不同,de Serres^[35]并未将交汇口形成的螺旋涡流作为冲蚀坑的诱因,相反认为正是冲蚀坑对沿程水体的调节作用促使螺旋涡流的形成。Bryan 等^[37]对小型河流交汇口的研究发现,相比于交汇角,干、支流平面形态具有重要影响。虽然对冲蚀坑的相关问题采用水槽模拟试验进行了详细研究,但是在自然条件下,交汇口很难呈现理想的平面形态。正如 Callaway^[6]指出的大多数支流从弯曲河段的外侧汇入干流,同时交汇前干、支流平面形态的差异将改变水流特性,从而改变冲蚀坑平面形态。Robert 等^[7]提出交汇口上游河道的弯曲可导致水流结构发生改变,同时指出在给定的交汇角以及汇流比情况下,相比于上游直线形河道,弯曲河道所产生的冲蚀坑规模较小。除此以外,由于受水力几何形态变化的影响,交汇口下游河道宽度也会随之做出相应调整^[38-41]。

干、支流交汇之后存在水体间的相互顶托作用,除了造成局部的水体壅塞之外,还将会导致交汇水流发生扰动,进而破坏原有的河相关系,导致交汇水体出现显著的能量损失,使交汇处水体冲蚀特性发生显著变化。Webber 等^[19]在考虑阻力影响的情况下,利用保角映射的方法提出了入汇区域的理论水流模式,同时提出了估计断面相对能量损失的方法。Yevjevich^[42]指出交汇口能量损失是关于汇流比的幂函数。Lin 等^[43]通过水槽模拟试验对交汇口水体进行了一维分析,结果表明交汇口水体的能量损失主要有边界摩擦损失以及湍流混合损失两种方式。近年来,国内外学者出于提高汇流管路系统以及设备运行经济性的目的,针对汇流管路系统的能量损失问题展开了系统研究。Miller^[44]根据前人研究成果得出圆形管道汇流口局部能量损失与流量比的关系曲线,并

认为该结果同样适用于矩形断面流;茅泽育等^[45]通过理论分析和试验研究,提出了分离区收缩系数以及能量损失系数的理论表达式;茅泽育等^[46]提出管道汇流中局部能量损失随干、支流流量比的增大而增大,随面积比的增大而减小,随交汇角增大而增大。

1.3 悬垂交汇口河床地貌特征

自 20 世纪 80 年代以来平齐交汇口河床地貌特征已得到深入研究,但是在自然界中由于受外界因素的影响,并非所有交汇口干、支流河床高程均一致。正如 Morisawa^[16]指出的近代构造运动可能导致交汇口干、支流河床存在高程差;Kennedy^[4]在对马拉维、法国、马来西亚西部以及新西兰等地的河流进行考察后发现,在天然河流交汇口还存在另一种地貌特征的交汇口,即悬垂河流交汇口。与平齐交汇口不同,悬垂交汇口主要表现为剖面上干、支流河床存在高程差,对于此种高程差的成因,Kennedy^[4]通过大量野外考察指出,交汇口干、支流河床高程差的控制因素主要有底床及河岸的抗侵蚀能力与碎屑载荷的平均粒径。与 Morisawa^[16]提出的观点不同,Kennedy^[4]认为构造作用以及侵蚀基准面的变化对其影响不明显。

长期以来,众多学者除了对无高程差的平齐交汇口水流特性进行研究以外,还对存在高程差的悬垂交汇口水流特性展开了深入研究,大量的野外考察结果表明,河床高程差引起的涌升流导致剪切层发生横向扰动^[15,24,36,47-49],同时还会显著增强交汇口湍流强度以及能量转换。此外,剪切应力变化将影响沉积物质的搬运进而改变河床地貌形态^[50-53]。Gaudet 等^[49]则对交汇口河床地貌对干、支流水体完成充分混合距离的影响进行了分析,结果表明河床高程差将会显著增强混合速率。由此可见悬垂交汇口河床地貌形态的不同使其水流特性不同于平齐交汇口,水流特性的差异反过来又制约了悬垂交汇口河床地貌的发展。

Best^[23]研究了悬垂交汇口床底地貌特征以及颗粒粒度分布特征,结果表明由于该类交汇口滞流区水体滞留导致滞流区内沉积物粒度降低,而在冲蚀坑底部粒度相对较粗,分离区内粒度逐渐增大。Roy 等^[54]将一条床底为粗颗粒的天然河流作为试验场所研究了交汇口水流质点运动轨迹以及碎屑颗粒搬运轨迹;Best 等^[24]发现悬垂交汇口中沿混合层形成的涡流可能影响碎屑物质的搬运轨迹,进而对河床地貌形态的演变造成影响,同时还发现悬垂交汇口水流特性也发生显著改变,表现为干、支流河床高程差的存在导致较深干流水体向支流河口上涌而

成涌升流。虽然 Best^[23] 对悬垂交汇口粒度分布进行了初步研究,但是长期以来缺少对交汇口沉积相模式的系统认识。

为了增强对悬垂交汇口河床地貌特征的系统认识,建立类似于平齐交汇口的地貌模型,Biron 等^[55] 基于悬垂交汇口地貌特征以及河床地貌、表面沉积物性质和流体力学三者之间的关系,对干、支流分别流经森林区和农业区的天然河流交汇口进行了研究,同时解释了交汇口沉积物中所保留的沉积构造成因,并描述了交汇口地貌随时间的演变规律。不同于平齐交汇口方面 Ashmore 等^[31] 和 Bristow 等^[32] 提出的观点,Biron 等^[55] 通过观察高水位至低水位期间悬垂交汇口河床地貌演变,发现悬垂交汇口河床地貌主要有两个特征:在支流河口会形成拦截门沙坎,在分离区内会形成沙坝。Boyer 等^[56] 野外考察了天然河流交汇口干、支流水位变化期间河床地貌形态的演变,随着干、支流动量比的波动,支流河口沙坎前方崩落面的位置相对于交汇口发生推进或者后退,并且崩落面的坡度也会做出相应的调整,而这一点也正好与 Biron 等^[55] 对交汇口沉积体中交错层理的解释相吻合;除了崩落面随动量比发生变化以外,河床底部沉积、侵蚀作用及其位置也随着动量比波动所引起的剪切层扰动而发生相应变化。

综上所述,悬垂交汇口河床地貌特征以及沉积粒度分布主要表现为会形成 3 个不同区域:靠近交汇口上游的沉积区,在该处沉积物粒度较细;具有较粗颗粒分布的冲刷区;交汇口下游节点的沉积区,其沉积物粒度较细,同时粒度分布存在明显的横向变化。

2 人为影响下河流交汇口河床地貌演变

2.1 库区交汇口河床地貌演变

库区内常见支流入汇的现象,通常将这种交汇口称为库区交汇口。虽然水库的修建在防洪、灌溉、城市供水等生产和经济生活中发挥了重要作用,但同时也打破了本地区原有河流在天然条件下的冲淤平衡,导致泥沙在库区内淤积,从而对河流体系造成不利影响^[57]。交汇口水流特性变化复杂,在该点所受影响尤为突出:一方面是库区河流交汇口河床地貌转变,另一方面表现为对河流生态系统的破坏。因此,合理评价水库建成后对河流系统的影响是至关重要的。水库修建对上游交汇口河床地貌特征的不利影响主要是由库区水位上升而造成河流水力条件降低所引起的,表现为水库建成后由于水位上升促使河道水流流速降低,输沙能力相应降低,从而

导致河流沙体卸载沉积。杨武学等^[57] 通过对比三门峡水库建成前、后上游黄、渭、洛河交汇口的河床特征,发现水库建成后上游河床发生显著变化,不仅使河流改道,同时还使原来的冲刷区发生大量沉积。Petts 等^[58] 指出这一特征在受监控的卵石质河床中更为明显。

近年来,为了弥补对库区交汇河段研究的不足,部分学者对库区交汇口冲淤特性以及水流特性进行了研究。陈力等^[59] 对库区交汇口冲淤特性研究发现,位于库区的交汇流河段,在来沙量、交汇角和干、支流洪水遭遇几率相同的情况下,其淤积幅度远大于位于变动回水区的交汇流河段。Ribeiro 等^[60] 研究了水库修建以后对交汇口河床地貌演变的影响,结果表明干流上游水坝的修建降低了河流挟沙量,从而导致交汇口河床地貌形态发生变化。闫涛等^[61-62] 对库区交汇口沿程水动力条件以及变化规律进行了试验性研究,结果表明:坝前水位升高时,交汇区内流速绝对值减小,沿程变化率减小,主流线弯曲程度加大,回流区范围增大。水流由干、支流向交汇区下游运行过程中,断面平均流速与水流挟沙力均存在由增到减的转折点,转折点位于干流交汇区内;当汇流比大于 0.56 时,从支流河道到交汇区下游挟沙力出现了骤降,不均匀变化的水流挟沙力导致了干流淤积成沙坝。

2.2 河道拓宽对河流交汇口河床地貌的影响

随着环境问题日益突出,自 20 世纪末以来,河流生态修复已成为环境专业人员讨论的热点问题^[63-64]。交汇口水流流态以及河床地貌的多变性造成了生物栖息地的多样性,研究河流交汇口河床地貌演变对河流生态修复具有重要意义。近年来在交汇口实施了河道修复工作,其中河道拓宽是一种常见措施。为了评价支流河道拓宽对交汇口河床地貌多样性的影响,部分学者对此进行了相应的水槽试验研究^[9,65-66]。

为了评价支流河道拓宽后对河流生态修复的有效性,Rohed 等^[67] 研究后发现河道拓宽的结果主要表现在水体分散后流速降低促使泥沙卸载沉积,形成多样性河床地貌,从而形成多样化的生态栖息地。关于交汇口支流河道拓宽后水流特性问题,Rieiro 等^[9] 已结合水槽模拟进行了深入研究,结果表明,当支流拓宽以后,受支流入汇的影响,交汇口表层水流向干流对岸运动,而干流河道形成环流;在河床地貌形态方面,支流河道拓宽前后河床地貌存在显著差异,主要表现在水体进入拓宽区域之后由于弥散而导致在拓宽区入口两侧出现流体滞流区,同时由于支流入汇主流导致最大冲蚀坑区沿对侧河岸形

成,但是冲蚀坑深度降低;交汇口下游流体分离区内大量堆积分选极好的沉积物质;交汇口上游滞流区相对扩大,同时在该区域内由于河道拓宽形成环流,且水体深度相对较小,在低水位期可能出露地表。

3 研究展望

自 19 世纪以来,对交汇口河床地貌形态演变已开展了大量的研究工作,已对各类型交汇口河床地貌形态特征有了系统的认识。近 20 年来,随着计算流体力学以及数值模拟的快速发展,在三维水流结构研究方面取得了很大的进展,但是在河流交汇口河床地貌演变方面的研究还存在许多不足,比如滞流区内是否会发生沉积物大量堆积、悬浮物质在交汇口的搬运轨迹、重矿物分布等。今后关于交汇口的工作应当更加注重河流生态修复、污水治理以及防洪减灾方面的研究。

河流交汇口河床地貌形态的多样性造就了其生物多样性,但由于人类活动扰动导致交汇口生物栖息地遭受严重破坏,因此从生态修复的角度出发,对河流交汇口河床地貌演变的预测有利于评价河流生态修复措施的有效性。

随着工业化发展,大量工业废水、生活用水等通过排污管道被直接注入河流,导致河流严重污染,这不仅降低了河流原有水质,同时还对河流生态系统造成严重破坏。交汇口水力学特征复杂多变,了解其河床地貌的演变有助于了解水力学特征的变化和污染物质的富集和扩散,从而对河流采取有效的治理措施。

出于防洪减灾以及可持续发展的需要,近年来大量水利工程的实施使得大量天然河流受到人类活动的影响。水利工程的实施改变了河流原有水流特性,而交汇口作为水流特性变化多样的特殊位置,受水利工程的影响尤为显著。回顾以往发展历程,在该方面的研究工作尚少,对库区交汇河段的河床地貌演变存在不足,这不仅对水库的长期合理利用构成威胁,同时还会影响对河流地貌演变的正确认识,且库区交汇河段可能会成为洪水泛滥的潜在位置。因此要加强对河流交汇口的研究力度,理清河流交汇口河床地貌的演变进程,争取人与自然和谐发展。

参考文献:

[1] 龚松柏,高爱国,倪冠韬,等. 中国部分河口及其近海水域缺氧现象研究[J]. 水资源保护,2017,33(4):62-69. (GONG Songbai,GAO Aiguo,NI Guantao,et al. Progress in research of hypoxia in estuaries and coastal areas in China[J]. Water Resources Protection,2017,33(4):62-

69. (in Chinese))
[2] LYELL C S,RUDWICK M J S. Principles of geology[M]. Chicago:University of Chicago Press,1975:80-81
[3] PLAYFAIR J. Illustrations of the huttonian theory of the earth[M]. London: Cambridge University Press, 1956: 102.
[4] KENNEDY B A. On playfair's law of accordant junctions [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1984,9(2): 153-173.
[5] 张强,王平义,刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分[J]. 重庆交通大学学报,2010,29(3):458-460. (ZHANG Qiang, WANG Pingyi, LIU Qianying. Re-division of confluence patterns of main stream and tributaries of rivers at mountainous area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2010,29(3):458-460. (in Chinese))
[6] CALLAWAY C. On a cause of river curves[J]. Geological Magazine,1902,9(10):450-455.
[7] ROBERT M L, TAYLOR M V. Flow dynamics at open channel confluent-meander bends [J]. Water Resources Research,2004,29(12):13-23.
[8] BENDA L, POFF N L, Miller D, et al. The network dynamics hypothesis: how channel networks structure riverine habitats[J]. BioScience,2004,54(5):413-427.
[9] RIEIRO M L, WAMPFLER S, Blanckaert K, et al. Influence of the widening of a tributary on confluence morphology:preliminary results[J]. Hydraulic Structures, 2008:29(18)195-202.
[10] RICE S P,KIFFNEY P,GREENE C,et al. Theecological importance of tributaries and confluences[M]. Trenton: John Wiley & Sons,2008:209-242.
[11] 张晶,赵进勇,刘业森,等. 扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施[J]. 水资源保护,2018,34(5):34-40. (ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, LIU Yeseng, et al. Quantitative evaluation and improvement measures of water connectivity in main urban area of Yangzhou[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):34-40. (in Chinese))
[12] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1944,109(1):893-902.
[13] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology [M]. Wiley:Wiley Press Room,1987:27-35.
[14] ASHMORE P E. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1982,7(3):201-225.
[15] BIRON P M, RAMAMURTHY A S, HAN S. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004, 130(3):243-253.

- [16] MORISAWA M. Development of drainage systems on an upraised lake floor [J]. American Journal of Science, 1964,262(3):340-354.
- [17] RHOADS B L,SUKHODOLOV A N. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences; 1. thermal mixing and time-averaged velocities[J]. Water Resources Research,2001,37(9):2393-2410.
- [18] RICE S P, ROY A G, RHOADS B L, et al. River confluences, tributaries and the fluvial network [M]. Chicago:Water Resources Publications,2008:17-23.
- [19] WEBBER N B,GREATED C A. An investigation of flow behaviour at the junction of rectangular channels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers,1966,34(3):321-334.
- [20] WEBER L J,SCHUMATE E D,MAWER N. Experiments on flow at a 90 open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2001,127(5):340-350.
- [21] ASHMORE P E,FERGUSON R I,PRETEGAARD K L,et al. Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream [J]. Earth Surface Processes & Landforms,1992,17(3):299-311.
- [22] BEST J L. The morphology of river channel confluences [J]. Progress in Physical Geography,1986,10(2):157-174.
- [23] BEST J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences [J]. Sedimentology,1988,35(3):481-498.
- [24] BEST J L, ROY A G. Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth [J]. Nature,1991,350(63):411-413.
- [25] PARSONS D R, JAMES L, BEST J L, et al. Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Rio Paraná, Argentina [J]. Earth Surface Processes & Landforms,2007,32(1):155-162.
- [26] SMITH D G. Aggradation of the Alexandra-North Saskatchewan River, Banff Park, Alberta [J]. Fluvial Geomorphology,1973,201(19):155-168.
- [27] SHEN H W. Scour near piers[J]. River Mechanics,1971(2):1-23.
- [28] SIMONS D B, STEVENS M A. Scour control in rock basins at culvert outlets[J]. River Mechanics,1972(2):25-32.
- [29] MOSLEY M P. An experimental study of channel confluences[J]. The Journal of Geology,1976,84(5):535-562.
- [30] MOSLEY M P. Experimental study of rill erosion [J]. Transactions of the ASAE,1974,17(5):909-9913.
- [31] ASHMORE P, PARKER G. Confluence scour in coarse braided streams[J]. Water Resources Research,1983,19(2):392-402.
- [32] BRISTOW C S, BEST J L, ROY A G. Morphology and facies models of channel confluences [M]. Houston: Blackwell Publishing Ltd. ,1993:89-100.
- [33] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1984,110(11):1588-1594.
- [34] ROY A G, DE SERRES B. Morphologie du lit et dynamique des confluent de cours d'eau[J]. Bulletin de la Societe Geographique de Liege,1989,25:113-127.
- [35] DE SERRES B. Dynamique des écoulements et du transport à une confluence de cours d'eau naturels à lit sablonneux[J]. Geomorphology,1993,8(2/3):115-129.
- [36] DE SERRES B, ROY A G, BIRON P M, et al. Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channels with discordant beds[J]. Geomorphology,1999,26(4):313-335.
- [37] BRYAN R B, KUHN N J. Hydraulic conditions in experimental rill confluences and scour in erodible soils [J]. Water Resources Research,2002,38(5):27-36.
- [38] GIPPELL C. Changes in stream channel morphology at tributary junctions, Lower Hunter Valley, New South Wales [J]. Australian Geographical Studies,1985,23(2):291-307.
- [39] MILLER J P. High mountain streams:effects of geology on channel characteristics and bed material [M]. Mexico City: New Mexico Institute of Mining and Technology,1958:1-53.
- [40] RICHARDS K S. A note on changes in channel geometry at tributary junctions [J]. Water Resources Research,1980,16(1):241-244.
- [41] ROY A G, ROY R, BERGERON N. Hydraulic geometry and changes in flow velocity at a river confluence with coarse bed material [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1988,13(7):583-598.
- [42] YEYJEVICH V M. Systems approach to hydrology [M]. Trenton:Water Resources Publications,1971:669-704.
- [43] LIN J D, SOONG H K. Junction losses in open channel flows[J]. Water Resources Research,1979,15(2):414-418.
- [44] MILLER D S. Internal flow system[M]. 2nd ed. Houston: Gulf Publishing,1990:216-202.
- [45] 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,2005,16(1):7-12. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, LUO Sheng, et al. Study on the separation zone in openchannel junction[J]. Advances in Water Science,2005,16(1):7-12. (in Chinese))
- [46] 茅泽育,罗昇,赵璇,等. 矩形断面压力管道汇流口局部能量损失 [J]. 水利水电科技进展,2006,26(3):62-66. (MAO Zeyu, LUO Sheng, ZHAO Xuan, et al. Local energy loss at junction of pressurized pipes with rectangular cross section[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2006,26(3):62-66. (in Chinese))

- [47] BIRON P, BEST J L, ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 676-682.
- [48] BRADBROOK K F, BIRON P M, LANE S N, et al. Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(8): 1371-1396.
- [49] GAUDET J M, ROY A G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences[J]. Nature, 1995, 373(78): 138-139.
- [50] HEATHERSHAW A D, THOME P D. Sea-bed noises reveal role of turbulent bursting phenomenon in sediment transport by tidal currents [J]. Nature, 1985, 316: 339-342.
- [51] THOME P D, WILLIAMS J J, HEATHERSHAW A D. In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport[J]. Sedimentology, 1989, 36(1): 61-74.
- [52] WILLIAMS J J, THOME P D, HEATHERSHAW A D. Measurements of turbulence in the benthic boundary layer over a gravel bed[J]. Sedimentology, 1989, 36(6): 959-971.
- [53] WILLIAMS J J, THOME P D, HEATHERSHAW A D. Comparisons between acoustic measurements and predictions of the bedload transport of marine gravels[J]. Sedimentology, 1989, 36(6): 973-979.
- [54] ROY A G, BERGERON N. Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material [J]. Geomorphology, 1990, 3(2): 99-112.
- [55] BIRON P, ROY A G, BEST J L, et al. Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels [J]. Geomorphology, 1993, 8(2): 115-129.
- [56] 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): 1-22.
- [57] 杨武学, 唐先海, 石长伟. 黄渭洛河汇流区河势演变及其带来的影响[J]. 泥沙研究, 2002(4): 35-41. (YANG Wuxue, TANG Xianhai, SHI Changwei. Changes of channel configuration and its influences on confluence area of the Yellow River, the Weihe and Beiluohe Rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2002(4): 35-41. (in Chinese))
- [58] PETTS G E, THOMS M C. Morphology and sedimentology of a tributary confluence bar in a regulated river: North Tyne, U. K. [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1987, 12(4): 433-440.
- [59] 陈立, 段涛, 闫涛, 等. 库区交汇河段泥沙淤积特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(3): 57-62. (CHEN Li, DUAN Tao, YAN Tao, et al. Study on sediment deposition characteristics at river confluence in reservoir area [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(3): 57-62. (in Chinese))
- [60] RIBEIRO M L, WAMPFLER S, SCHLEISS A J. Morphodynamic changes in a natural river confluence due to a hydropower modified flow regime [J]. Apley and Solomon's Concise System of Orthopaedics and Trauma, 2014, 76(9): 178-191.
- [61] 闫涛, 陈立, 徐敏, 等. 库区交汇河段水动力特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 60-65. (YAN Tao, CHEN Li, XU Min, et al. Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 60-65. (in Chinese))
- [62] 闫涛, 陈立, 黄杰. 库区交汇河段淤积沙坝形成的水动力试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 123-126. (YAN Tao, CHEN Li, HUANG Jie. Experiment study on formative hydrodynamic of silt bar in confluence in reservoir [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015(8): 123-126. (in Chinese))
- [63] REICHERT P, BORSUK M, HOSTMANN M, et al. Concepts of decision support for river rehabilitation [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(2): 188-201.
- [64] KONDOLF G M. Five elements for effective evaluation of stream restoration [J]. Restoration Ecology, 1995, 3(2): 133-136.
- [65] RIBEIRO M L, BOILLAT J L, SCHLEISS A, et al. Experimental study on a widening tributary channel and its influence on the confluence morphology [J]. River Flow, 2010, 38(9): 961-968.
- [66] RIBEIRO M L, BLANCKAERT K, SCHLEISS A J. Local tributary widening for river rehabilitation [J]. Ecohydrology, 2016, 9(2): 204-217.
- [67] ROHED S, SCHITZ M, KIENAST F, et al. River widening: an approach to restoring riparian habitats and plant species [J]. River Research & Applications, 2005, 21(10): 1075-1094.

(收稿日期: 2017-11-11 编辑: 熊水斌)

