

# 明渠交汇口水动力及掺混特性研究进展

曾 诚<sup>1</sup>,周 婧<sup>1</sup>,李 凯<sup>2</sup>,付毅成<sup>3</sup>,周 婕<sup>4</sup>,蔡 雷<sup>2</sup>,王玲玲<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 宿迁市水务工程建设管理中心,江苏 宿迁 223800;

3. 河海大学河海里尔学院,江苏 常州 213200; 4. 河海大学力学与工程科学学院,江苏 南京 211100)

**摘要:**针对明渠交汇区域内水流结构的复杂情况,从明渠交汇口汇流比、交汇角度、床面高差和其他影响因素的角度,综述了明渠交汇口分离区、剪切层、二次环流等很多特有的水动力及掺混特性的研究进展,梳理了物理模型试验、数值模拟研究和实地观测成果,总结了水动力及掺混特性的研究现状。基于目前存在的主要问题,未来应重点研究人工智能算法的应用,植被、密度差、潜流带对掺混特性的影响以及挟沙水流交汇问题中的冲刷淤积影响。

**关键词:**明渠交汇口;水动力;掺混;影响因素

中图分类号:TV131.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)01-0010-08

**Research progress on hydrodynamics and mixing characteristics of open-channel confluences//ZENG Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Jing<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, FU Yicheng<sup>3</sup>, ZHOU Jie<sup>4</sup>, CAI Lei<sup>2</sup>, WANG Lingling<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suqian Water Engineering Construction and Management Center, Suqian 223800, China; 3. Institut Hohai-Lille, Hohai University, Changzhou 213200, China; 4. College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)**

**Abstract:** This paper reviews the research progress on the unique hydrodynamic and mixing characteristics in open channel confluence areas, focusing on the complex flow structures influenced by factors such as convergence ratio, intersection angle, bed elevation difference, and other parameters. Key features such as separation zones, shear layers, and secondary circulations are discussed. The paper integrates findings from physical model experiments, numerical simulations, and field observations, summarizing the current state of research on hydrodynamics and mixing characteristics. Based on existing challenges, future research should focus on the application of artificial intelligence algorithms, the effects of vegetation, density difference, and the hyporheic zone on mixing characteristics, and the impact of scouring and sedimentation in sediment-laden flow confluence issues.

**Key words:** open-channel confluence; hydrodynamics; mixing; influencing factor

水流交汇现象包括广泛存在于天然河流和水利工程中的河流交汇现象,如嘉陵江汇入长江、泾河汇入渭河、汉江汇入长江等,以及广泛存在于灌溉和输水系统中的渠道交汇现象。在明渠交汇口附近,水流运动特性发生改变,水力现象复杂,水流紊动掺混剧烈。Best等<sup>[1-2]</sup>发现汇流比和交汇角度是明渠交汇口水动力及掺混特性的重要影响因素,这些因素通过改变水流结构来影响掺混过程,进而影响床面形态的发展。明渠交汇口水流的掺混主要通过分子扩散、紊流扩散和对流扩散实现,分子扩散的影响较小,通常可忽略不计<sup>[3]</sup>。上游两条分支的水体在温度、电导率、pH值等水质特性和悬浮物特性上一般存在差异,

通过添加示踪剂可以反映水体的掺混过程。

明渠交汇口附近水动力及掺混特性的主要影响因素可以分为两类<sup>[4]</sup>:①交汇口附近渠道的局部几何形态(几何因素),如交汇口形状、尺寸、交汇角度和渠底连接情况等;②交汇来流的水力条件(来流因素),如主支流汇流比、弗劳德数、糙率和流体的物理特性等。目前,对于交汇渠道水动力及掺混特性的研究主要针对不同汇流比、交汇角度、床面高差等条件对壅水特性<sup>[5]</sup>、流速分布<sup>[6]</sup>、二次流的形成与演变<sup>[7]</sup>的影响。主要研究方法有理论研究、现场观测试验、物理模型试验、数值模拟研究等。随着量测技术与计算机技术的发展,数字粒子图像测速仪、声学

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC3202605);江苏省水利科技项目(2022061)

**作者简介:**曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:czeng@hhu.edu.cn

**通信作者:**周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail:zhoujie@hhu.edu.cn

多普勒测速仪、激光多普勒测速仪等先进的测量仪器被广泛应用于交汇流的物理模型试验中,直接数值模拟、大涡模拟、雷诺平均法等针对紊流流场的数值模拟方法也已成为现阶段的主要模拟方法。近年来,随着统计学的发展与人工智能的兴起,神经网络模型也逐步应用到明渠交汇口的仿真计算领域<sup>[8-9]</sup>。

由于支流汇入,明渠交汇口水流和泥沙运动变化剧烈,容易引起局部冲刷和淤积,影响河道过流能力,进而影响航道安全和地区的防洪排涝,同时交汇口流速分布的改变,也对污染物掺混产生影响。随着社会发展和工业化的加速推进,水环境污染问题日益加剧,已成为我国面临的重大环境问题之一。本文对明渠交汇口水动力及掺混特性的研究进展进行梳理,以期指导航道规划、城市防洪规划,保障河网水安全,并为河网水污染的综合治理提供理论基础和科学依据。

## 1 明渠交汇口水流结构

基于室内水槽试验的结果, Mosley<sup>[10]</sup> 最早建立交汇河道的水动力概化模型。Best<sup>[11]</sup> 根据不同的水流特性,将交汇口附近的交汇区分为6个区域,分别为驻点区、偏转区、分离区、收缩区、水流恢复区和剪切层,如图1<sup>[7]</sup>所示。水流进入交汇区后,在交汇区上游会出现壅水现象,由于干支流相互挤压,在上游交汇口附近产生一定程度的偏转,从而形成驻点区<sup>[12]</sup>,驻点区相对范围和区域内水流流速较小,对交汇区水流结构的改变影响也较小;支流汇入干流后对干流进行挤压,水流偏向对岸,致使交汇区下游内岸侧形成低速流动区域,即分离区<sup>[13]</sup>;由于分离区的存在,水流有效过水断面减小,在外岸侧形成收缩区,也是最大流速区,最大流速区持续的时间不长,很快还原为典型的明渠流状态;剪切层出现在干支流的交界面处<sup>[14]</sup>,该区域是主要的动量交换区域。这种二维概化分区方式受到广泛认可,并沿用至今,是研究明渠交汇流的重要理论基础。Weber等<sup>[15]</sup>进一步提出了明渠交汇口三维流动概化模型。他们提出分离区尺寸沿水深变化,呈现上层大、下层小的形态,剪切层位置受分离区上、下层尺寸大小影

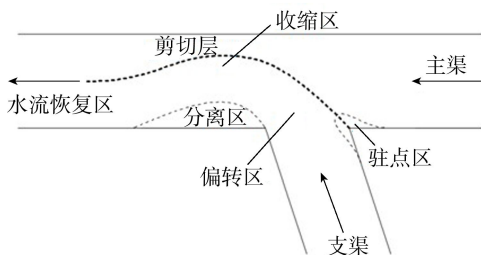


图1 明渠交汇口二维流动概化模型示意图<sup>[7]</sup>

响,表层剪切层受分离区挤压出现偏转扭曲。另外,在分离区下游支流入汇侧出现螺旋流现象,二次环流是螺旋流的三维结构在横断面的投影,该二次环流强度沿着主流方向逐渐减弱。

## 2 明渠交汇口水动力及掺混特性影响因素

由于干支流间的相互顶托影响,明渠交汇口附近水深、流速、水流结构等发生变化,形成复杂的水力特性。因此,明渠交汇口通常存在上游壅水、二次环流等水力学问题,泥沙淤积、下游河床冲刷等泥沙问题,以及污染物掺混和输运等环境问题。本节从汇流比、交汇角度、床面高差和其他影响因素的角度对明渠交汇口水动力及掺混特性的研究进展进行综述。

### 2.1 汇流比

汇流比是交汇口处主流与支流的流量比值,是影响交汇区水力特性的主要因素之一。1944年 Taylor<sup>[5]</sup>首次通过物理模型试验,采用动量分析方法得出交汇口上下游断面水深与汇流比的关系式,该关系式在交汇角度为 $45^\circ$ 时与试验数据基本吻合。在该结论的基础上, Ramamurthy等<sup>[16]</sup>运用动量分析方法,提出了交汇角度为 $90^\circ$ 的渠道上下游断面水深和汇流比的关系式,并利用 Taylor<sup>[5]</sup>的试验数据进行了验证。刘同宦等<sup>[17]</sup>通过多组水槽试验发现支流的汇入对主流上游水面有顶托作用,使交汇口附近主流断面水深不同,进一步研究<sup>[18]</sup>发现交汇角度固定时,随着汇流比的增大,掺混区域水面坡降减小,交汇口上游断面的时均流速也减小,冲刷坑深度和面积不断增大,位置由干流侧逐渐向交汇口中心位置移动<sup>[19]</sup>。在前人理论和试验研究的基础上,周苏芬等<sup>[20]</sup>以嘉陵江与长江交汇区为例,基于实测资料进行数值模拟,不仅验证了前人的结论,还指出床面切应力随汇流比的变化规律与水面坡降随汇流比的变化规律基本相同,并且床面切应力增加,泥沙起动概率增加,易对河段造成冲刷。周舟等<sup>[21]</sup>建立了等宽明渠交汇流三维数值模型,发现随着汇流比的增大,交汇口附近水面变幅减小,回流结构与二次流效应减弱,水流交汇更平顺,边壁受到的冲刷更少。茅泽育等<sup>[22]</sup>通过物理模型试验发现交汇水流存在横向分速,形成断面二次环流,这是明渠交汇河道的一个重要特征。后续研究<sup>[23]</sup>中,他们发现水流分离区尺寸随着汇流比的增大而增大,但形状基本保持不变,并且提出了分离区收缩系数及能量损失系数的理论表达式。林青炜等<sup>[24]</sup>利用粒子图像测速技术捕捉瞬时涡旋,精确确定了剪切层和分离区的位置,并且分析了汇流区水平面内涡旋结构的成因和特征,发现剪切层和分离区近水面和近底面

的涡旋密度大于水深中部的涡旋密度,支流流量增大的情况下涡旋密度均增大。

国内外学者对交汇角度为 $90^\circ$ 时不同汇流比情况下的水动力特性做了大量研究。魏文礼等<sup>[25]</sup>采用大涡模型对不同汇流比情况下明渠交汇口的水力特性进行了数值模拟,发现大涡模型结合体积函数法能更好地捕捉交汇口水流瞬时流动特性,模拟交汇口附近的水力特性分布规律。Schindfessel等<sup>[13]</sup>发现增大支流流量会提高二次流强度,当支流流量足够大时,支流会撞击对岸,在汇合处上游通道内形成再循环涡,从而引起速度分布的显著变化。王协康等<sup>[26]</sup>通过水槽物理模型试验发现分离区几何尺寸随着水深及汇流比的变化而变化。Biswal等<sup>[27]</sup>通过试验发现分离区的几何形状取决于汇流比,分离区尺寸沿垂直平面变化,在自由面附近最大,并且随着汇流比的减小,断面二次流和湍流应力会相应增强。Yuan等<sup>[28]</sup>研究发现河流平面形状和汇流比影响断面环流,而断面环流反过来又会影响沉积物的输运以及当地河床的形态。

另外,汇流比对明渠交汇口掺混特性影响的研究也受到关注。Gualtieri等<sup>[29]</sup>对巴西内格罗河和索利莫斯河交汇处的水质进行采样,发现掺混层的位置与汇流比的季节和年变化密切相关。通过数值模拟,Tang等<sup>[30]</sup>进一步发现汇流比是通过影响剪切层的位置和螺旋流的强弱来影响水流形态,进而影响污染物混合的。顾莉等<sup>[31]</sup>发现在U形弯曲交汇河道交汇区,支流入汇导致交汇断面附近污染物离散系数达到峰值,该峰值随着汇流比的增大而增大。米潭等<sup>[32]</sup>对某Y形河流交汇区进行研究,发现汇流比越大,污染物纵向浓度梯度越小,纵向扩散距离越长,出现混合均匀的位置越远离交汇口,并且污染物的横向浓度梯度越大,在交汇口的横向扩散趋势也越大。毛颂平等<sup>[33]</sup>对 $90^\circ$ 等宽顺直明渠交汇口不同汇流比情况进行数值模拟,得出表层水体污染带最大宽度在小汇流比工况下为主渠宽度,在大汇流比工况下与汇流比呈一次函数关系;中下层水体污染带最大宽度与汇流比呈二次曲线关系,并且汇流比越大,污染物混合速率越快。

综上所述,汇流比对交汇区水动力特性有显著影响,国内外学者通过物理模型试验和数值模拟等方法,研究了不同汇流比情况下水流的流场结构、涡旋特性、冲刷特性等,发现交汇水流存在横向分速和二次环流,当汇流比增大时,水面坡降和流速减小,冲刷作用增强,此外,水流分离区尺寸也增大,但形状基本不变。已有研究成果揭示了汇流比对交汇区污染物扩散距离和混合速率的影响,为河流交汇区

的水力设计和水污染综合治理提供了科学依据。

## 2.2 交汇角度

交汇角度是指上游干流和支流之间的夹角,交汇角度的改变也是影响交汇口附近水力特性一个重要因素。Hsu等<sup>[34]</sup>通过水槽试验研究了交汇角度为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 的交汇河道,发现汇流比一定时,上下游水深比与交汇角度和弗劳德数成正比。Gurram等<sup>[35]</sup>提出支流侧壁的压力校正系数与汇流比和弗劳德数无关,但会随交汇角度变化,由此对Taylor<sup>[5]</sup>的理论方程进行了修正,并给出了交汇口附近干支流水深的关系式。周舟等<sup>[7]</sup>发现同一汇流比工况下,随着交汇角度的增大,水流的偏转幅度更大,回流结构与环流现象增强,渠道边壁受到的水体冲击更大,交汇口附近上游水位逐渐增大,下游水位逐渐减小,即水面变幅增大。魏文礼等<sup>[25]</sup>对比了大涡模型和RNG  $k-\varepsilon$ 模型,发现大涡模型能更好地模拟交汇口附近水力特性分布规律。随后,他利用大涡模型发现交汇角度越大,交汇口处横断面流速不均匀系数越大,水流流速分布越不均匀<sup>[36]</sup>,当交汇角度达到 $90^\circ$ 时,流速不均匀系数达到最大。Zhou等<sup>[37]</sup>从理论分析的角度出发,探究了汇流比和交汇角度对收缩区内流速分布不均匀性的影响,发现主渠下游能量和动量修正系数随交汇角度的增大和汇流比的减小而增大。

不少学者对不同交汇角度下分离区的几何特性进行了研究。Huang等<sup>[38]</sup>提出,随着交汇角度的增大,分离区尺寸也增大,交汇角度小于 $30^\circ$ 时,分离区消失。曾诚等<sup>[39]</sup>还发现分离区平均水深随着交汇角度的增大而降低。通过水槽试验,薛博升等<sup>[40]</sup>也发现了分离区尺寸的变化规律。胥宗强等<sup>[41]</sup>通过物理模型和大涡模拟,发现随着交汇角度的增大,各水深层面的分离区长度和宽度基本呈增大趋势,分离区对称系数逐渐减小,当交汇角度达到 $105^\circ$ 时,各水深层面的分离区长度达到最大。

另外,很多学者针对交汇角度对交汇口掺混特性的影响进行了研究。徐洁如等<sup>[42]</sup>建立三维数学模型研究了等宽矩形断面明渠交汇口的掺混特性,发现随交汇角度的增大,污染带最大宽度、混合界面宽度均增大;同时,分离区及其上游污染物混合速率随交汇角度的增大而加快,流速恢复区及其下游混合速率基本不受交汇角度影响。陈凯霖等<sup>[43]</sup>发现,在非对称型交汇明渠中,交汇角度越小,支流中污染物进入主流后沿主流方向的分速度越大,在交汇口下游形成的污染带越长,混合均匀的位置越远离交汇口。魏娟等<sup>[44]</sup>对交汇区不同流量、动量和交汇角度情况进行系统研究,发现支流与干流的交汇角度

和汇流比越小,污染带越狭长,在污染带范围内污染物浓度梯度较大。刘盛赞等<sup>[45]</sup>通过水槽试验,也得出了相同的结论。赵欣欣<sup>[46]</sup>对比分析了135°大交汇角度与45°小交汇角度的交汇河道中污染物掺混规律以及横向混合系数的分布特性,发现高汇流比大交汇角度更有利于交汇河道污染物的输移扩散。

综上所述,交汇角度的改变对水流流场结构、分离区几何特性以及污染物的混合等方面有显著影响。已有研究成果表明,随着交汇角度的增大,交汇区水面变幅增大,环流现象增强,流速分布更不均匀,分离区尺寸也增大。此外,交汇角度越小,污染物混合速率越慢,下游形成的污染带越狭长,不利于污染物的输移扩散。

### 2.3 床面高差

床面高差是交汇型河道的典型特征,会对水流结构和掺混产生影响。Bradbrook等<sup>[47]</sup>利用三维数学模型分别模拟主支渠河床有无高差的交汇流,发现主支渠河床高差会强化断面二次流现象,即使高差很小也会对水流结构产生影响。Ribeiro等<sup>[12]</sup>认为如果干支流床面存在高差,河道冲刷坑可能会很小,甚至消失。对于Y形交汇口,王晓刚等<sup>[48]</sup>发现随着河床高差的增大,冲刷坑深度变化不大,面积却逐渐减小,位置由交汇口中心向干流侧移动,还发现河床高差的存在对交汇口分离区和流速加速区的影响不大,但会使支流侧水流脉动增强。Canelas等<sup>[49]</sup>通过试验数据证实了不等高河床交汇处存在二次环流,并首次对交汇口由于床面高差引起的二次环流进行了分类。Ramos等<sup>[50]</sup>基于大涡模拟技术建立三维数值模型,对4种不同床面高差的工况进行了模拟研究,结果表明,随着床面高差的增加,汇合界面处的支流流线与几何汇合角的偏差减小,分离区范围缩小,汇合处上游水深与下游水深的比值减小。以上研究证实了床面高差能更有效地将支渠汇入的侧向动量转化为主渠内的顺流向动量。

1996年,Biron等<sup>[51]</sup>通过水槽试验发现主支渠

河床高差导致交汇口床面附近分离区消失,水流紊动加强,交汇口下游拐点处出现上升水流,水流掺混更迅速。随后,Biron等<sup>[52]</sup>率先利用三维数学模型模拟得到交汇口污染物质的混合率,发现主支渠河床不等高会加速交汇口污染物混合过程,而且交汇口附近河道曲率也会影响交汇水流的混合程度。Gaudet等<sup>[53]</sup>选取3条中等大小的天然河流,测量了交汇口污染物完全混合所需要的距离,发现主支渠河床高差会提高干支流混合速率,使干支流完全混合所需要的距离缩短5~10倍。赵欣欣<sup>[46]</sup>的水槽试验结果也证实了床面高差能够促进河道交汇口位置的污染物掺混。

综上所述,河道交汇口位置的河床高差会导致断面二次流强度增加,并且随着河床高差的增大,冲刷坑面积减小甚至消失。此外,物理模型和数学模型均证实了床面高差的存在能提高混合速率,缩短混合距离。因此,可以通过调整床面高差优化水流条件,控制污染物扩散,这对明渠交汇口水力设计和水质管理具有重要意义。

### 2.4 其他因素

除上述汇流比、交汇角度和床面高差对明渠交汇口水动力及掺混特性的研究外,很多学者还对其他因素的影响进行了探索性研究,研究概况如表1所示,包括支渠宽度、主支渠宽度比、植被等。Ribeiro等<sup>[54-56]</sup>发现交汇口支流的局部加宽直接改变支流流速,进一步影响河床不协调程度和汇流后河道的河床梯度,并且保持90°交汇河道的汇流比不变、加大支渠宽度有利于污染物混合。Shakibainia等<sup>[57]</sup>研究发现,随着主支渠宽度比的减小,明渠交汇口分离区变大,收缩区变窄,水面变化越剧烈。赵欣欣<sup>[46]</sup>针对交汇口下游主河道中存在植被的情况进行了研究,发现交汇口附近纵向流速的分区特征消失,断面整体流速分布均匀。Schindfessel等<sup>[58]</sup>发现不同的渠道断面形状对分离区尺寸有显著影响。对于明渠弯道交汇水流,曾诚

表1 其他因素研究概况

影响因素	研究方法	主要结论	参考文献
支渠宽度	现场观测和物理模型试验	影响支流流速,进一步影响河床不协调程度和汇流后河道的河床梯度;加大支渠宽度有利于污染物混合	[54-56]
主支渠宽度比	三维数学模型	影响水流流速和水流结构	[57]
植被	水槽物理模型试验	植被存在时,交汇口附近纵向流速的分区特性消失,断面整体流速分布均匀	[46]
渠道断面形状	大涡模拟	横截面形状对分离带的尺寸有显著影响	[58]
弯道交汇水流宽深比和径宽比	三维数学模型	二次流强度、分离区尺寸、水流流速等随宽深比和径宽比变化	[59]
滩地高度和宽度	三维数学模型	对二次流和掺混速率产生影响	[60]
河段形状	二维数学模型	顺直河段的污染带更狭长,弯曲河段的污染带更宽	[61]
干支流密度差	三维数学模型、现场观测	随着 $Fr_d$ 取值的增加,密度差对掺混的影响先增加后减小; $Fr_d > 1$ 时,密度差对掺混的作用减弱	[62-63]

等<sup>[59]</sup>发现随着宽深比的增大或径宽比的减小, 交汇口附近水面跌落程度减弱, 且宽深比越大, 纵向流速变幅越大, 弯道处环流强度和分离区尺寸也越大。对于含滩地的交汇河道, 汪晨辉等<sup>[60]</sup>发现随着滩地高度和宽度的增加, 二次流范围和强度增大, 污染物掺混速率也加快。周富春等<sup>[61]</sup>通过研究长江与嘉陵江交汇口污染物掺混规律, 发现在两江交汇处, 顺直河段污染带更狭长, 弯曲河段的污染带更宽, 得出弯曲河段更有利于污染物混合扩散的结论。

由于干支流温度、含沙量等不同, 水流在交汇口存在密度差, 当密度不同的水流交汇时, 水流间产生的浮力会影响掺混过程, 通常采用密度弗劳德数  $Fr_d$  来衡量由密度差产生的浮力和水流惯性力之间的关系,  $Fr_d$  不同对掺混的影响程度也不同<sup>[64-65]</sup>。Ramón 等<sup>[62]</sup>通过数值模拟发现埃布罗河和赛格雷河交汇处  $Fr_d$  取值范围为 0.2~5.0, 当  $Fr_d > 1$  时, 密度差对掺混的作用减弱。Pouchoulin 等<sup>[63]</sup>通过现场观测和分析得到罗纳河和索恩河交汇处  $Fr_d$  取值范围为 1.6~5.3, 随着  $Fr_d$  的增加, 密度差对掺混的影响先增强后减弱。鞠鹏飞等<sup>[66]</sup>通过数学模型对汉江中游河段水温进行计算, 发现支流水温越高, 在纵向上水温恢复到平衡水温所需的距离越短, 而在横向上越长。在此基础上, 殷心盼等<sup>[67]</sup>研究发现交汇口水温掺混存在明显的三维分布特性, 并且交汇角度越大, 水温掺混均匀速率越快; 掺混比越大, 水温在横断面上扩散范围越大。肖洋等<sup>[68]</sup>通过探究不同水流结构对水温分布的影响机理, 发现水流剪切作用影响热掺混层的位置, 断面二次环流作用影响热掺混层的形态。

综上所述, 明渠交汇口水动力及掺混特性的其他影响因素众多, 已有研究成果为未来进一步探索交汇水流的掺混机制提供了更广阔的研究思路。

### 3 存在问题与研究展望

#### 3.1 存在问题

a. 现有研究成果大多基于平床模型, 河道断面规则且不考虑床面的变形和床沙运动, 这与人工渠道的情况类似, 与天然河道的真实情况不符。

b. 现有研究成果较少考虑交汇口位置的糙率突变现象, 例如局部挺水植被的影响。

c. 现有研究未见有全面考虑滩槽之间地表-地下水之间交互运动及潜流流量对交汇区水流结构和物质输运影响的成果。

d. 在研究明渠交汇口污染物掺混特性时, 现有研究大多只考虑了守恒物质, 但是在天然河流中污染物的吸附降解也是不能忽视的一部分。

#### 3.2 研究展望

a. 在新研究方法方面, 随着人工智能的发展, 遗传算法和人工神经网络等智能算法被逐步引入流体仿真计算中。在未来的研究中, 应考虑采用人工智能算法对明渠交汇口的流速、污染物浓度和温度分布模拟进行数据训练, 提高模拟精度和计算效率。

b. 除汇流比、交汇角度和床面高差外, 植被、密度差和潜流带对河道交汇口水动力及掺混特性的影响引起了越来越多研究者的关注, 该研究方向有助于揭示河流水系生态环境变化趋势, 有望成为研究热点。

c. 对于挟沙水流交汇问题, 在研究悬沙运动分布规律的基础上, 应进一步考虑冲刷淤积影响, 揭示交汇河流演变机制。

#### 参考文献:

- [1] BEST J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences [J]. *Sedimentology*, 1988, 35 (3): 481-498.
- [2] BEST J L, ROY A G. Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth [J]. *Nature*, 1991, 350(6317): 411-413.
- [3] RUTHERFORD J C. River mixing [M]. Chichester: Wiley, 1994.
- [4] 周晶. 明渠交汇水流三维数值模拟[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [5] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1944, 109(1): 893-902.
- [6] 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, 38(2): 1-5. (WANG Xiekang, WANG Xianye, LU Weizhen, et al. Experimental study on flow structure at open channel confluences [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(2): 1-5. (in Chinese))
- [7] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口流速分布特性数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2020(1): 32-39. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical investigation on distribution characteristics of velocities at equal-width open-channel confluences [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(1): 32-39. (in Chinese))
- [8] SUN S, YAN H X, KOUYI G L. Artificial neural network modelling in simulation of complex flow at open channel junctions based on large data sets [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 178-187.
- [9] BONAKDARI H, ZAJI A H. Open channel junction velocity prediction by using a hybrid self-neuron adjustable artificial neural network [J]. *Flow Measurement*

- and Instrumentation, 2016, 49: 46-51.
- [10] MOSLEY M P. An experimental study of channel confluences [J]. The Journal of Geology, 1976, 84 (5): 535-562.
- [11] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences; implications for sediment transport and bed morphology [M]//ETHRIDGE F G, FLORES R M, HARVEY M D. Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1987: 27-35.
- [12] RIBEIRO M L, BLANCKAERT K, ROY A G, et al. Flow and sediment dynamics in channel confluences [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117 (F1): F01035.
- [13] SCHINDFESSEL L, CREËLLE S, DE MULDER T. Flow patterns in an open channel confluence with increasingly dominant tributary inflow [J]. Water, 2015, 7 (9): 4724-4751.
- [14] MIGNOT E, VINKOVIC I, DOPPLER D, et al. Mixing layer in open-channel junction flows [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2014, 14 (5): 1027-1041.
- [15] 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.
- [16] RAMAMURTHY A S, CARBALLADA L B, TRAN D M. Combining open channel flow at right angled junctions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114 (12): 1449-1460.
- [17] 刘同宦, 郭炜, 詹磊, 等. 支流汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (3): 6-8. (LIU Tonghuan, GUO Wei, ZHAN Lei, et al. Experiment on the influence of discharge ratio of main flow of tributary on flow fluctuation characteristics in confluence area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29 (3): 6-8. (in Chinese))
- [18] 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. (LIU Tonghuan, GUO Wei, ZHAN Lei. Experimental study of the velocity profile at 90° open channel confluence [J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (4): 485-489. (in Chinese))
- [19] 郭维东, 王晓刚, 曹继文, 等. “Y”型汇流口水流水力特性试验研究 [J]. 水电能源科学, 2005, 23 (3): 53-56. (GUO Weidong, WANG Xiaogang, CAO Jiwen, et al. Research of hydraulic characteristics of “Y” shaped junction [J]. Water Resources and Power, 2005, 23 (3): 53-56. (in Chinese))
- [20] 周苏芬, 叶龙, 刘兴年, 等. 嘉陵江与长江交汇水流顶托效应特性研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2014, 46 (增刊 1): 7-11. (ZHOU Sufen, YE Long, LIU Xingnian, et al. Study on the backwater effects on flow characteristics at confluence zone between Jialing River and Yangtze River [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46 (Sup1): 7-11. (in Chinese))
- [21] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (4): 347-353. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (4): 347-353. (in Chinese))
- [22] 茅泽育, 赵升伟, 张磊, 等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究 [J]. 水利学报, 2004 (2): 1-7. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, ZHANG Lei, et al. Experimental study on 3D flow characteristics at the confluence of open channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (2): 1-7. (in Chinese))
- [23] 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 open-channel junction [J]. Advances in Water Science, 2005, 16 (1): 7-12. (in Chinese))
- [24] 林青炜, 唐洪武, 袁赛瑜, 等. 河道交汇区涡旋结构研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (4): 352-358. (LIN Qingwei, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, et al. Study on vortex structure at river confluence [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (4): 352-358. (in Chinese))
- [25] 魏文礼, 张泽伟, 邵世鹏, 等. 明渠交汇口三维水力特性大涡模拟研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2016, 49 (2): 173-179. (WEI Wenli, ZHANG Zewei, SHAO Shipeng, et al. Study of three-dimensional characteristics of flow at open-channel junctions by large eddy simulation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49 (2): 173-179. (in Chinese))
- [26] 王协康, 杨青远, 卢伟真, 等. 交汇水流分离区特征研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2008, 40 (6): 1-6. (WANG Xiekang, YANG Qingyuan, LU Weizhen, et al. Study on characteristics of separation zone in confluence river [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40 (6): 1-6. (in Chinese))
- [27] BISWAL S K, MOHAPATRA P, MURALIDHAR K. Hydraulics of combining flow in a right-angled compound open channel junction [J]. Sadhana, 2016, 41 (1): 97-110.
- [28] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56 (3): 333-350.
- [29] GUALTIERI C, IANNIRUBERTO M, FILIZOLA N. On the mixing of rivers with a difference in density; the case of

- the Negro/Solimões confluence, Brazil [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124029.
- [30] TANG Hongwu, ZHANG Huiming, YUAN Saiyu. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2018, 18(2): 443-463.
- [31] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 189-195. (in Chinese))
- [32] 米潭, 姚建. Y 型河流交汇区污染物扩散模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 9-16. (MI Tan, YAO Jian. Simulation of pollutant diffusion in Y-type river confluence [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(11): 9-16. (in Chinese))
- [33] 毛颂平, 朱海, 王玲玲, 等. 90°等宽明渠交汇水流污染物混合规律数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 64-69. (MAO Songping, ZHU Hai, WANG Lingling, et al. Numerical simulation on pollutant mixing law at a 90° open-channel confluence of equal width[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 64-69. (in Chinese))
- [34] HSU C C, LEE W J, CHANG C H. Subcritical open-channel junction flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(8): 847-855.
- [35] GURRAM S K, KARKI K S, HAGER W H. Subcritical junction flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(5): 447-455.
- [36] 魏文礼, 邵世鹏, 刘玉玲. 不同交汇角度明渠交汇口三维水力特性的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(1): 57-63. (WEI Wenli, SHAO Shipeng, LIU Yuling. Three-dimensional numerical study of hydraulic characteristics at open-channel junctions with different intersection angles by Large Eddy Simulation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(1): 57-63. (in Chinese))
- [37] ZHOU Jie, ZENG Cheng, ZHOU Zhou, et al. Energy and momentum correction coefficients within contraction zone in open-channel combining flows[J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(4): 337-344.
- [38] HUANG Jianchun, WEBER L J, LAI Y G. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(3): 268-280.
- [39] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 50-55. (ZENG Cheng, CHEN Chen, ZHOU Zhou, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 50-55. (in Chinese))
- [40] 薛博升, 魏炳乾, 王非, 等. 汇流比和入汇角对明渠交汇水流特性影响的对比研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 658-665. (XUE Bosheng, WEI Bingqian, WANG Fei, et al. A comparative study of the influence of confluence ratio and tributary angle on flow state of an open channel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(3): 658-665. (in Chinese))
- [41] 胥宗强, 魏炳乾, 薛博升, 等. 明渠交汇口分离区三维几何特性的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(1): 409-417. (XU Zongqiang, WEI Bingqian, XUE Bosheng, et al. Investigation of three-dimensional geometry of separation zone at open-channel junctions by large eddy simulation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(1): 409-417. (in Chinese))
- [42] 徐洁如, 朱海, 毛颂平, 等. 交汇角对明渠交汇口污染物输运特性影响的数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 23-31. (XU Jieru, ZHU Hai, MAO Songping, et al. Numerical simulation and analysis of pollutant transport at an open channel confluence under different junction angles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 23-31. (in Chinese))
- [43] 陈凯霖, 冯民权, 张涛, 等. 明槽交汇区污染物浓度场分布规律研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 86-100. (CHEN Kailin, FENG Minquan, ZHANG Tao, et al. Study on distribution of pollutant concentrations in intersection of open channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10): 86-100. (in Chinese))
- [44] 魏娟, 李然, 康鹏, 等. 水流交汇区污染物输移扩散特性[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 822-828. (WEI Juan, LI Ran, KANG Peng, et al. Study on transportation and diffusion characteristics of contaminants at flow confluence [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 822-828. (in Chinese))
- [45] 刘盛赞, 康鹏, 李然, 等. 水流交汇区的水动力学特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 14-18. (LIU Shengyun, KANG Peng, LI Ran, et al. A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 14-18. (in Chinese))
- [46] 赵欣欣. 反向支流汇入主河道污染物掺混特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2018.
- [47] BRADBROOK K F, LANE S N, RICHARDS K S, et al. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 351-368.
- [48] 王晓刚, 郭维东, 严忠民, 等. 河床高差对“Y”型汇流口水流水力特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2005

- (12): 16-19. (WANG Xiaogang, GUO Weidong, YAN Zhongmin, et al. Effects of bed height difference on flow dynamics at 'Y'-shaped channel confluences[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005 (12): 16-19. (in Chinese))
- [49] CANELAS O B, FERREIRA R M L, GUILLEN-LUDENÑA S, et al. Three-dimensional flow structure at fixed 70° open-channel confluence with bed discordance [J]. Journal of Hydraulic Research, 2020, 58 (3): 434-446.
- [50] RAMOS P X, SCHINDFESSEL L, PÊGO J P, et al. Influence of bed elevation discordance on flow patterns and head losses in an open-channel confluence[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(3): 235-243.
- [51] BIRON P M, 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.
- [52] 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.
- [53] GAUDET J M, ROY A G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences[J]. Nature, 1995, 373(6510): 138-139.
- [54] RIBEIRO M L, BLANCKAERT K, ROY A G, et al. Hydromorphological implications of local tributary widening for river rehabilitation [J]. Water Resources Research, 2012, 48(10): W10528.
- [55] RIBEIRO M L, BLANCKAERT K, SCHLEISS A J. Local tributary widening for river rehabilitation [J]. Ecohydrology, 2016, 9(2): 204-217.
- [56] RIBEIRO M L, BOILLAT J L, SCHLEISS A J, et al. Experimental study on a widening tributary channel and its influence on the confluence morphology [M]// DITTRICH, KOLL, ABERLE, et al. River Flow 2010. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2010: 961-968.
- [57] SHAKIBAINIA A, TABATABAI M R M, ZARRATI A R. Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37(5): 772-781.
- [58] SCHINDFESSEL L, CREËLLE S, DE MULDER T. How different cross-sectional shapes influence the separation zone of an open-channel confluence [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 04017036.
- [59] 曾诚, 尹雨然, 陈辰, 等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 9-15. (ZENG Cheng, YIN Yuran, CHEN Chen, et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 9-15. (in Chinese))
- [60] 汪晨辉, 张汇明. 含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 89-98. (WANG Chenhui, ZHANG Huiming. Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 89-98. (in Chinese))
- [61] 周富春, 陈培帅, 刘国东. 两江汇流口污染混合区变化规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 60-64. (ZHOU Fuchun, CHEN Peishuai, LIU Guodong. Analysis of variation in the pollution mixing zone at the confluence of two rivers [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(3): 60-64. (in Chinese))
- [62] RAMÓN C L, PRATS J, RUEDA F J. The influence of flow inertia, buoyancy, wind, and flow unsteadiness on mixing at the asymmetrical confluence of two large rivers [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 11-26.
- [63] POUCHOUIN S, LE COZ J, MIGNOT E, et al. Predicting transverse mixing efficiency downstream of a river confluence [J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR026367.
- [64] RAMÓN C L, ARMENGOL J, DOLZ J, et al. Mixing dynamics at the confluence of two large rivers undergoing weak density variations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(4): 2386-2402.
- [65] 徐火清, 赵红红, 吴义军. 金沙江下游主要支流对干流水温的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 22-28. (XU Huoqing, ZHAO Honghong, WU Yijun. Influence of main tributaries on water temperature of main stream in lower Jinsha River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 22-28. (in Chinese))
- [66] 鞠鹏飞, 陈青生, 陈卫. 基于支流水温对汉江干流河道水温影响的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 84-87. (JU Pengfei, CHEN Qingsheng, CHEN Wei. Numerical simulation of influence of water temperature of tributary on Hanjiang main river [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 84-87. (in Chinese))
- [67] 殷心盼, 管光华. 非等温明渠交汇流的水力-水温特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(5): 157-165. (YIN Xinpan, GUAN Guanghua. Study on hydraulic and water temperature characteristics of non isothermal open channel confluence flow [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(5): 157-165. (in Chinese))
- [68] 肖洋, 姚晨欣, 张涛涛, 等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11. (XIAO Yang, YAO Chenxin, ZHANG Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-11 编辑: 俞云利)