

汇流对主河道水流运动影响的研究现状

陈粤 杨以成 王宇杭 谭智中 李福荣

北方民族大学 宁夏银川 750021

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12655

[摘要] 河道汇流是天然水系中普遍存在的地貌单元,其水动力特性对主河道的流速分布、紊动结构、泥沙输移及污染物扩散等具有显著影响。本文系统综述了近年来关于汇流对主河道水流运动影响的研究进展,主要从水动力结构、紊动特性、泥沙运动与污染物混合规律等方面总结现有成果,并探讨数值模拟与物理试验方法的应用现状。结合当前研究成果,提出了未来研究的方向,包括三维流动精细化分析、非线性动力学机制探索及工程应用导向的优化设计等。

[关键词] 汇流; 水流运动; 紊流; 水流结构

引言

干支流交汇现象普遍存在于自然界中,干支流以交汇口为节点连接形成水系乃至河网,河网是地表水循环系统的重要组成部分,也是流域水流、泥沙等物质输移的重要通道^[1]。这种现象对河流的水流特性有着显著的影响,并打破原有河相关系,促使河床地貌做出相应调整^[2],如在河道交汇处,水流紊动掺混剧烈,对泥沙、污染物输移有较强的滞留作用,已成为水利、航运、环保部门重点关注区域,对河网系统的水系连通、航运、泥沙及污染物输移和河床演变等均具有重要意义^{[1][3]}。

1944年Taylor采用支流斜接汇入干流,通过实验首次研究了矩形明渠流的汇流问题^[4]。自此,学者们对交汇河道水动力特性的研究已从水动力特性发展到泥沙、污染物输运规律及对水生态的影响,研究手段从室内物理模型试验为主发展到数学模型、物理模型、野外观测等多种手段相结合,取得了较为丰富的研究成果^[1]。本文将围绕这一问题,综述国内外研究现状,分析现有主要研究成果,指出存在的问题,并展望未来研究方向,以期为水环境治理与工程规划提供理论支撑。

1 汇流对河道的影响

自然界中,因地理环境变化多样,河流中交汇的形式也存在多种形式。1988年Best^[5]第一次提出,把交汇口区分为两种类型,即支流斜接干流型交汇口和“Y”型交汇口。兰波^[6]在1998年提出将交汇口分为“非对称型”和“Y”型两种类型,通过统计分析认为山区这两种力学的交汇口数量基本相同。2010年,张强指出传统的分类方法未考虑实际的河型,不能真实的反映山区河流交汇口的特征,于是提出了新的划分方法,即弯曲干流型交汇口、顺直干流型交汇口和分汊干流交汇口。

1.1 汇流区水动力结构特征

(1) 流速分布与螺旋流现象

Taylor^[7]在1944年基于动量守恒原理研究了明渠交汇口附近的水力特性,建立了矩形平底交汇口的一维数学模型,而且采用支流斜接入干流的方式,得到了入汇角分别是45°和135°的主槽上游壅水深度、下游控制断面的水深比与泄流比的关系,并提出了交汇口分离区的存在及其重要性,为学者们进一步研究交汇区奠定了基础。Modi等^[8]在1981年基于摩擦力损失方法,分析研究了明渠汇流区的水流结构。在对称型(如Y型)与非对称型汇流区,主河道的水流结构呈

现显著的流速分离效应。研究表明,Y型汇流处因分支河道动量差异,常形成低流速区与高剪切带,并在下游产生逆时针螺旋流。例如,Liu等通过水槽试验发现,Y型汇流的螺旋流强度随流量比降低而增强,导致污染物在左分支内岸与右分支外岸富集^[9]。此外,汇流角度对螺旋流方向与强度具有调控作用,30°汇流角下横向环流在横断面上呈双向分布,且螺旋度向表层汇聚^[10]。

(2) 水流动力轴线偏移

汇流比对主河道水流动力轴线的位置也有着显著影响。试验表明,随着汇流比增大,汇流点向下游偏移,支流侧动力轴线调整幅度大于干流侧^[10]。弯道交汇条件下,动力轴线偏移进一步加剧,导致主河道凹岸冲刷风险增加。研究表明,入汇角为60°时,主河道最大流速区向凹岸迁移,环流强度提升约30%^[11]。

1.2 汇流区的紊动特性与能量耗散

汇流区的紊动能量主要集中在混合区,其纵向与垂向的紊动强度随着汇流比的增大而明显升高。研究发现,在Y型汇流中,纵向紊动强度的峰值可达平均值的2-3倍,而且水深变化对支流一侧紊动强度的影响更明显。刘同宦等利用水槽试验,研究了30°入汇角时支流斜接主流汇合口及其附近的三维水流结构,获得了不同汇流比的三维流场及其脉动特性^[12]。吴迪等对90°复式断面河道Y型交汇河口的水力特性进行了研究,分析了支流河口附近的水流流态,得出复式断面河道汇流口附近的紊动特性非常强^[13]。

2 汇流处水流结构变化研究

国外学者较早开始对汇流处水流结构进行研究。早期的研究主要集中在实验室水槽实验,通过物理模型模拟汇流过程,利用流速仪等设备测量水流速度分布。例如,Boyer等通过实验研究发现,在汇流处存在明显的剪切层,该剪切层的位置和强度受支流与主河道流量比、夹角等因素的影响。随着测量技术的发展,激光多普勒测速仪(LDV)和粒子图像测速技术(PIV)等先进测量手段被广泛应用于汇流处水流结构的研究中。这些技术能够提供更精确的二维甚至三维水流速度场信息,使得对汇流处水流结构的认识更加深入。例如,Rhoads和Kenworthy利用PIV技术研究了不同汇流角度下汇流区的水流结构,发现汇流角度对回流区的大小和形状有显著影响。

数值模拟技术在国外汇流研究中也得到了广泛应用。基于Navier-Stokes方程的CFD软件,如Fluent、CFX等,

被用于模拟汇流处的水流运动。这些数值模拟方法能够考虑复杂的边界条件和水流相互作用,对汇流处的水流结构进行详细的模拟分析。

国内在汇流处水流结构研究方面也取得了一定的成果。学者们同样开展了大量的水槽实验研究,结合先进的测量技术,对汇流处水流结构进行了深入分析。例如,曹叔尤等通过水槽实验研究了不同流量比和汇流角度下汇流区的水流特性,揭示了汇流区的流速分布规律和水流分离现象。在数值模拟方面,国内学者也进行了积极的探索。一些学者采用自主开发的数值模型或改进的商业CFD软件,对实际河流汇流情况进行模拟研究。例如,周宜林等采用有限体积法建立了二维浅水水流数学模型,对长江与嘉陵江汇流处的水流运动进行了模拟,分析了汇流处的水流结构和水位变化。

3 汇流对主河道水位与流量变化的影响研究

国外在汇流对主河道水位与流量变化的研究方面,主要采用实测资料分析和数值模拟相结合的方法。通过长期的水文观测数据,分析汇流处水位和流量的变化规律。例如,在一些大型河流的汇流区域,建立了多个水文监测站,对水位、流量等参数进行实时监测。学者们利用这些实测数据,研究了不同支流流量输入对主河道水位和流量的影响机制。同时,数值模拟技术也被用于预测汇流对主河道水位和流量的影响。

国内在这方面的研究也较为深入。一方面,对一些重要河流的汇流区域进行了长期的水文观测和分析。例如,对长江与汉江、珠江水系各支流汇流处等进行了大量的水位、流量监测,分析了汇流对主河道水位和流量的调节作用。另一方面,国内学者也开展了数值模拟研究,建立了适合我国河流特点的水动力学模型。例如,一些学者考虑了我国河流复杂的地形和边界条件,开发了三维水动力学模型,对汇流处的水位和流量变化进行了更精确的模拟。同时,国内还开展了一些关于汇流对洪水演进影响的研究,为防洪减灾提供了重要的理论依据。

4 研究中存在的问题

尽管国内外在汇流对主河道水流运动影响的研究方面取得了很多成果,但仍存在一些问题有待解决。

4.1 复杂条件下的研究不足

目前的研究大多基于理想的实验条件或简化的数值模型,对于复杂地形、多变的水流条件和非恒定流等实际情况的研究还不够深入。例如,在山区河流汇流处,地形复杂,水流湍急,现有的研究成果难以准确描述其水流运动特性。

4.2 多因素耦合作用研究较少

汇流对主河道水流运动的影响是一个多因素耦合的过程,包括水流、泥沙、地形等多种因素的相互作用。目前的研究大多侧重于单一因素的影响,对多因素耦合作用的研究较少,难以全面揭示汇流对主河道水流运动的影响机制。

4.3 生态环境影响研究不够

汇流对主河道水流运动的改变会对生态环境产生一定的影响,如影响水生生物的栖息地和生态系统的稳定性。目前关于汇流对生态环境影响的研究还相对较少,需要进一步加强。

5 结论

国内外学者在汇流对主河道水流运动影响的研究方面取得了丰富的成果,涵盖了汇流对河道的影响、水流结构变化、水位与流量变化等多个方面。通过实验研究、数值模拟和现场观测等多种方法,对汇流现象有了较为深入的认识。然而,研究中仍存在复杂条件下研究不足、多因素耦合作用研究较少和生态环境影响研究不够等问题。未来的研究应重点关注复杂条件下的研究、多因素耦合作用研究和生态环境影响研究,以进一步完善汇流对主河道水流运动影响的理论体系,为实际工程应用提供更有力的支持。

[参考文献]

- [1]刘晓东,李玲琪,童须能,等. 交汇河道水动力特性和污染物掺混规律研究综述[J]. 人民珠江, 2019, 40 (3): 77-87.
- [2]何保,燕亚东,余苇,等. 河流交汇口河床地貌演变研究进展[J]. 水资源保护, 2018, 34 (6): 17-23.
- [3]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]. 西安理工大学学位论文, 2021.
- [4]杨泽一. 干支流交汇口水力特性三维数值模拟研究[D]. 重庆交通大学学位论文, 2013.
- [5]BEST J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences [J]. Sedimentology, 1988 (35): 481-498.
- [6]兰波. 山区河流交汇河口的综合特性分析[J]. 重庆交通学院学报, 1998, 17 (4): 91-96.
- [7]Taylor E H. Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 1.
- [8]Modi P N, Dandekar M M, Ariel P D. Conformal mapping for channel junction flow [J]. Hydr. Div., ASCE, 1981, 107 (12): 1713-1733.
- [9]Xiaodong Liu, Lingqi Li, Zulin Hua, Qile Tu, Ting Yang, Yuan Zhang. Flow Dynamics and Contaminant Transport in Y-Shaped River Channel Confluences. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16, 572. DOI: 10.3390/ijerph16040572
- [10]柳小珊. “Y”型汇流区水沙运动特性初步研究[D]. 长江科学院学位论文, 2014.
- [11]贾猛. 曲线交汇条件下弯道水流水力特性试验研究[D]. 河北工程大学学位论文, 2016.
- [12]刘同宦,郭炜,王协康,王宪业. 入汇角为 30° 时交汇区水流结构试验研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 75-78.
- [13]吴迪,郭维东,刘卓也. 复式断面河道“Y”型交汇口水流水力特性[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (3): 21-23.
- 宁夏回族自治区大学生创新项目“汇流对主河道水流运动规律影响的数值模拟研究”(S202411407088) 支助。