

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.027

弯道水流运动及床面变形数值模拟研究进展

戴文鸿^{1,2,3}, 苗伟波², 高嵩⁴, 张松⁴, 房树财⁵

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;
3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098;
4. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007; 5. 云南大唐国际李仙江流域水电开发有限公司, 云南 普洱 665000)

摘要: 弯曲河道中的水流运动和床面变形较顺直河道更为复杂, 是河流动力学研究的热点之一。近年来, 随着计算机软硬件的迅速发展和高效数值计算方法的出现, 弯道水沙运动在数值模拟方面得到不断发展。系统梳理了国内外在弯曲河道的水流特性(水面横比降、横向环流、纵向垂线平均流速、床面剪切力等)、泥沙运动基本特性方面的研究, 以及弯道水流二维、三维数值水流模型和河床演变模型研究进展, 指出了目前弯曲河道水沙运动数值模拟中存在的问题, 并对其今后可能的研究方向提出了建议。

关键词: 弯曲河道; 水流运动; 床面变形; 数值模拟

中图分类号: TV131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0121-06

Development of Study on Numerical Simulation of Meandering River Flow and Bed Deformation

DAI Wen hong^{1,2,3}, MIAO Wei bo², GAO Song⁴, ZHANG Song⁴, FANG Shu cai⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Yangzhou Survey Design Research Institute Company Limited, Yangzhou 225007, China;
5. Yunnan Lixianjiang Hydropower Development Company Limited of Datang Groups, Puer 665000, China)

Abstract: River flow and bed deformation in meandering streams are more complex than those in straight rivers, which is one of the main subjects in river dynamics. In recent years, with the rapid development of computer hardware and software and the appearance of efficient numerical methods as well, numerical simulation of meandering river flow and sediment transport develops with greater progress. This paper summarized the properties of meandering flow, such as the lateral slope of water surface, transverse circulation, average velocity along vertical line, and bed shear stress, and the basic characteristics of sediment transport. In addition, the research progress on the two dimensional and three dimensional flow models and bed evolution models in meandering streams were reviewed. The existing problems of current numerical simulation on meandering river flow and sediment transport were pointed out and some possible solutions for future research in meandering river flow and bed deformation were proposed.

Key words: meandering streams; river flow; bed deformation; numerical simulation

弯曲河道是天然河流中最常见的河型之一, 在我国分布较广, 因此研究弯道中的水流运动和床面变形特征, 对河流治理、引水排沙及河流生态修复等具有重要的意义, 同时也是认识弯曲河流动力学的研究基础。

弯道边界条件与顺直河道不同, 其水沙运动特性和运动规律十分复杂。近年来, 随着计算科学和流体力学的迅速发展, 关于弯道水流和河床演变的数值模型层出不穷, 国内外学者取得了大量研究成果。

收稿日期: 2013-11-01 修回日期: 2014-04-03 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.027.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金(基础研究计划)面上项目(BK2012808); 中央高校科研项目(2009B02214); 江苏高校优势学科建设工程项目(YS11001)

作者简介: 戴文鸿(1966), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事河流泥沙运动、河流演变与模拟、河流泥沙工程等方面研究工作。Email: wdai@hhu.edu.cn

1 弯道水流运动及床面变形特征

弯道水流运动特性研究通常包括水面横比降、横向环流、纵向流速分布、床面剪切力分布等,床面变形特征的研究旨在描述河床在纵向及横向的冲淤态势和河湾平面几何形态的演变规律。

1.1 弯道水面横比降

水流经过弯道时,为适应曲线运动所需的向心力要求,凸岸水面降低,凹岸水面升高,形成水面横比降。不同学者基于不同的理论知识得到大量经验公式,如张红武公式^[1]、孙东坡等公式^[2];而在工程中应用较多的是由罗索夫斯基依据对数公式和马卡维耶夫基于抛物线公式导出的两个横比降公式^[1]。大量实测资料检验结果表明,上述四个公式与实际基本相符,其中张红武公式在光滑和粗糙床面上的计算结果比实测资料略微偏大或偏小,而工程中采用较多的两个横比降公式则在粗糙情况下的计算值较实测值略有偏小^[3]。需要指出的是,上述公式求得的水面横比降均为沿程中的最大值,而实际观测表明水面横比降在弯道中是沿程变化的,且最大横比降出现的断面也是随水位变化的,水位越高,则水流量越大,横比降也越大^[4]。为得到横比降在全弯道中的沿程变化,刘焕芳^[5]基于弯道夹角建立了横比降在全弯道上的分布公式,并指出横比降与弯道中所处的断面位置相关联。

1.2 弯道横向环流

横向环流是弯道水流特有的运动状态。由于弯道横断面上的离心惯性力随水深逐渐减小,净压力随水深不发生变化,故横断面“上层流体”流向凹岸,“下层流体”流向凸岸,从而在横断面上形成环流(图1),而横向环流与纵向流速相结合则引起流体的螺旋运动。许多学者采用不同的流速分布公式、连续条件和边界条件,通过各种途径导出了大量经验公式,如波达波夫公式、Engelund公式、张红武公式等。国内学者哈岸英等^[3]借助经典实验数据对各个环流公式进行了检验,结果表明关于环流流速的垂线分布,在光滑床面上罗索夫斯基、张红武及罗氏修正公式等与实测数据较吻合,在粗糙床面上罗氏修正公式和张红武公式与实测数据相符合;对于环流衰减规律,张红武公式与实际最为相符,且能表现出表层环流较底层环流衰减更慢的真实性。

需要注意1941年Matthes基于对Mississippi河的观测发现“从凹岸冲刷进入河道的泥沙会沉积在下游同一侧的凸岸,而只有一小部分横越河道”,从而指出“环流仅出现在变态物理模型或宽深比较小的天然河道中”;这一论断与Makaveyev^[6]在1975年得到的“横向环流在大型天然河流中的影响是次要的”这一事实是相符的。由于在实际物理模型试验中,宽深比通常较原型小数倍,因此这可能过分夸大了环流作用,但关于这一问题还需进行深入研究。

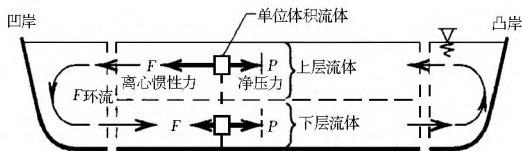


图1 横向环流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross circulation

1.3 弯道纵向流速分布

弯道模型实验表明,弯段之前的顺直河段内纵向垂线平均流速沿河宽呈对称形分布;入弯后凸岸流速有所增加而凹岸流速有所减小;至弯段某断面后,出现相反的调整,流速分布趋于均匀,随之最大流速又逐渐向凹岸转移;出弯后,在相当长一段顺直河段内,最大流速仍靠近外侧河岸。为得到纵向流速分布表达式,曾有学者采用有势涡旋假定或视水流为强制旋体,试图采用一种曲线来描述实际分布,然而这是十分困难的。为此,张红武等^[1]采用分段处理的办法进行解决,并根据大量室内试验成果将纵向垂线平均流速表达式进行概括,以使其具有较强的适用性。卡日尼科夫基于紊流理论且假设不存在环流,得出的流速公式只适用于流速沿垂线不发生变化的情形,这与实际不符。罗索夫斯基^[7]进行三维弯道水流的研究时未考虑能量损失的影响而使其公式仅能适用于较短距离。黄河水利科学研究院^[8]通过大型河湾模型试验观测发现弯道纵向流速分布与来水条件和边界条件有关。刘焕芳^[5]依据弯道水流运动的边界条件和连续性方程得到的流速公式在一定程度上考虑了自由水面变形和横向水流对纵向流速的影响,但在边界条件沿程发生变化方面受到限制。

1.4 弯道床面剪切力分布特征

弯道的剪切力分布(图2)大都是在水槽试验中量测的,对于天然弯曲河流,剪切力的量测目前仍有一定难度,通常采用间接计算方法得到:一种是利用水面比降来确定,另一种是依据纵向流速的垂向分布,采用对数流速分布公式确定。Bridge和Jarvis^[4]的实测结果表明,用流速分布计算的剪切力,在高水位时较水面比降计算的剪切力大,而在低水位时,则较比降法求得的剪切力小。关于床面剪切力分布,大多水槽试验均表明在弯道水流中,剪切力分布与纵向流速分布基本保持一致,即剪切力最大处即为流速最大处。童思陈^[9]通过弯道水流概化模型试验和理论分析推导了床面剪切力分布公式,并给出了不同参数对床面剪切力分布的影响,为进一步探讨弯道水流特征奠定了基础。

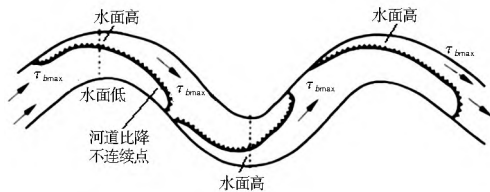


图2 连续弯道床面剪切力分布^[10]

Fig. 2 Distribution of bed shear stress in consecutive curves

1.5 弯道泥沙运动特性及床面变形

弯道中的泥沙运动方向在近底处同螺旋流的底部流向相一致,即运动方向表现出由凹岸斜指向凸岸。大量研究表明,推移质的横向输沙在弯道中表现出同岸输移和异岸输移两种方式。张瑞瑾等^[10]的试验(图3)表明:异岸输移的规模随流量的增加而减小,且一般不超过同岸输移;异岸输移与同岸输移的泥沙表现出不同的运动轨迹。推移质运动在弯道中的分布并非占据整个河宽,而是集中成输沙带向下游移动,有时呈两个输沙带向弯道下游推移。如Leopold^[11]在Colorado河上对环流结构进行观测时,指出这种输沙带主要位于弯道凸岸边滩一侧。此外,横向环流有时也致使悬移质的横向输移,即螺旋流将弯道表层含沙量小且泥沙颗粒较细

的水体带到凹岸,遇边壁后向下指向河底进行泥沙的攫取,然后将河底含沙量大且泥沙颗粒较粗的水体带向凸岸边滩,从而形成弯道中横向输沙不平衡。

对于弯道横向输沙的计算,黄河水利科学研究院推导了含沙量分布的函数关系式,用于求解单位水体宽度上的横向输沙率及输沙量分布,对于弯道横向变形及演变规律研究具有重要意义^[8]。

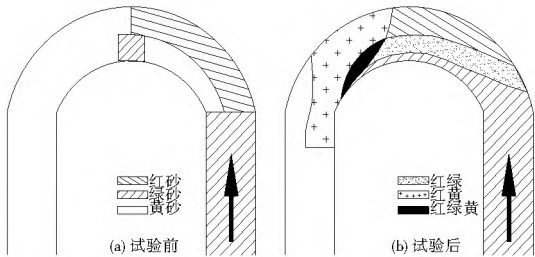


图3 弯道不同部位的色沙在运动后的分布情况

Fig. 3 Distribution of color sands in different parts of meandering channel after transport

由于弯道中水流和泥沙运动的复杂性,使得河流床面无论在纵向还是横向均呈现侵蚀和淤积区域分布的复杂性(图4)。对于床面最大冲深计算,目前均采用经验性公式,如毛佩郁公式、王木兰公式、Fargue 公式等^[12]。

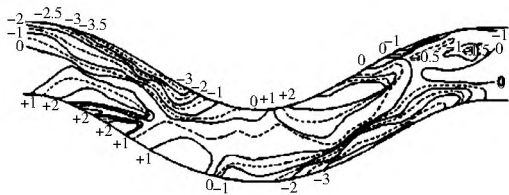


图4 实测平衡河床地形^[37]

Fig. 4 Measured equilibrium bed topography

2 弯道水流运动及床面变形数值模拟研究

近十多年来,随着计算机软硬件和高效数值计算方法(包含商业CFD软件)的快速发展,数值模拟在研究弯道水流和河床演变上表现出耗时短、效率高及可重复性等诸多优点,且取得了丰硕成果。

2.1 弯道水流二维数值模拟

基于垂向平均的平面二维数学模型,通常用于模拟弯道水流的水面形态和流速分布状态,在实际工程中应用较广。如李大鸣^[13]等建立的冲积河流平面二维水流模型,可用于求解断面形态不规则的天然弯道水流的流场,但是由于未考虑弯道环流对纵向平均流速的影响,因此其对于宽深比小、曲率大的弯道的模拟精度不高。为了克服此缺陷,Lien^[14]、方春明^[15]等考虑环流影响的条件下建立的平面二维水流模型,可对形态规则和形态复杂的天然弯曲河流进行准确模拟。然而,弯道断面出现两个反向环流时情况会更加复杂。刘玉玲等^[16]通过对曲线坐标系下的二维浅水方程进行修正,考虑二次流对流线弯曲的复杂水力特性的影响,并以已有的连续弯道模型试验结果对该模型进行验证,证明了该模型具有一定的实用性和可靠性。

2.2 弯道水流三维数值模拟

弯道中的水流结构在曲率大、宽深比小及复式断面的弯道中较为复杂,采用二维数学模型难以准确地描述。随着计算科学的快速发展,三维数值模拟成为弯道水流运动研究的重要方法。弯道中的水流大都为湍流运动,其模拟方法主要包括直接数值模拟和间接数值模拟(包含大涡模拟法、Reynolds 平均法和统计平均法)两大类。其中,直接数值模拟方法无需对湍流流动做任何近似或简化,直接用瞬时的N-S方程对湍流进行求解,理论上可达到较为准确的结果,但对计算机的内存和计算速度要求较高,目前还处于不断地探索中^[17];大涡模拟法主要采用瞬时的N-S方程直接模拟大尺度的涡,对于小尺度的涡则采用近似模型,该方法不仅要求计算区域的尺寸足以包含湍流运动中的最大涡,而且要求计算网格的尺寸足以分辨最小涡的运动^[18];Reynolds 平均法包括 Reynolds 应力模型和黏粘模型两大类,前者工作量较大,实际工程计算较困难,而后者在国内应用较广。

与二维数值模型相比,三维湍流数值模型在网格剖分、湍流模型选取、壁面边界处理等方面面临的问题更加复杂。近年来,关于弯道水流三维数值模拟取得了较大进步,尤其是以SIMPLE算法结合k-ε湍流模型的发展比较成熟。如吴修广^[19]、Shao^[20]、许栋^[21]、王博^[22]等学者应用标准k-ε湍流模型对弯道三维分层水流进行了模拟,并且进行过理论和实践验证。由于标准k-ε湍流模型是基于各向同性紊动黏性和紊动扩散理论建立的,而弯道湍流是各向异性的,故对弯道水流运动的模拟精度可能存在一定争议,尤其是对强旋流、弯曲壁面流动、小尺度流动等的模拟会产生一定的失真^[23]。为了弥补k-ε湍流模型的不足,更好地模拟弯道水流中水面线变化及固壁边界引起的各向异性特征,李琳琳^[24]、Zhang^[25]等学者对k-ε湍流模型进行了修正。比如RNG k-ε模型,通过修正后的黏度项和大尺度运动来体现小尺度运动的影响,从而将小尺度运动从控制方程中去除。与标准k-ε湍流模型相比,RNG k-ε模型不仅考虑了平均流动中的旋流情况,且在ε方程中增加了反映主流时均应变项,便于处理流线弯曲程度较大的水流。此外,弯道水流三维数值模拟中,自由水面变化的处理一直是个难题,华祖林^[26]、Leschziner^[27]等学者在早期研究中常采用“静水压力分布假定”和“刚盖假定”,但是其对岸线曲折、地形复杂的强湾河段中的流场计算存在较大偏差。其后,吴修广^[19]、Rodriguez^[28]、杨燕华^[29]等分别将“改进的刚盖假定”、标高函数法及流体体积法(Volume of Fluid, VOF)等应用到弯道水流模拟中,逐渐缩小了这种偏差。黄筱云^[30]则采用快速粒子Level Set追踪自由表面,提出一种新型三维水流数学模型,其不需重构界面,捕捉的界面整体效果较好,且拓扑描述能力强;虽然在模拟尖锐界面效果不如VOF法,但界面形状却比VOF法光滑,整体效果好,可以尝试将其应用于弯道三维水流运动模拟。丁全林等^[31]为进一步研究弯道水流运动规律,把一种新的流体模拟技术,即格子玻尔兹曼应用到三维带自由表面的湍流研究中,并针对不同流量下的U型弯道水流进行模拟,效果较好。

2.3 弯道床面变形数值模拟

弯道床面变形的数值模型通常包括水动力和泥沙输移两大模块,其中水动力模块主要包括水流连续方程、动量方程和湍流封闭方程,泥沙输移模块则包括悬沙质和推移质不平衡输沙方程、河床变形方程、床沙级配调整方程及其他辅助方程等。河流泥沙数学模型按其维数可划分为一维、二维和三维数学模型。

2.3.1 一维泥沙数学模型

一维泥沙数学模型发展最早、最成熟,通常用于模拟长河段长系列的水沙运动及床面冲淤情况,并能够提供断面平均的水沙要素和河床冲淤情况,如国内谢鉴衡^[32]和杨国录^[33]的一维泥沙输移模型,国外应用较多的是美国陆军工程兵团开发的 HEG RAS 模型,丹麦水利所开发的 MIKE11 模型等。由于一维数学模型不能反映水沙要素沿河宽方向上的变化,所以对床面沿河宽变化剧烈的河湾的模拟结果可信度较低。

2.3.2 二维泥沙数学模型

一般地,天然弯道垂向上的尺度比水平方向小,所以在弯道床面变形研究中应用广泛的是沿水深积分平均后的平面二维泥沙模型。如陆永军^[34]建立的非均匀沙的平面二维全沙动床模型,在研究平面河床变形问题时,综合考虑了非均匀推移质输移、悬沙质不饱输移及床沙级配的调整;Nargata^[35]假定从河岸移走的泥沙颗粒几乎全部沉积在床面上,建立了非黏性河岸的二维河床变形数值模拟;方春明^[5]建立了弯道环流影响的平面二维水沙模型,可适用于天然复杂弯道的水沙数值模拟;钟德钰^[36]分析了弯道环流横向输沙效应,对其水沙模型的推移质、悬移质和床面变形过程进行了扩展,借助土力学中边坡稳定性原理中的圆弧滑动法,并引入多权树搜索方法建立了河岸崩塌变形模型,用于模拟环流横向输沙及其引起的床面冲淤和河岸变形,其计算结果与已有的认识是一致的。需要提及的是,DAI^[37]综合考虑了各种弯道的冲淤演变规律,得出描述弯道床面冲淤态势的一般适用表达式和模型,使得水沙运动模拟研究既可基于平整床面,又可直接基于任何演变时段的真实河床床面,用于冲积弯曲河流床面形态平衡调整模拟与预测。该模型的不足之处是忽略了环流引起的横向输沙,且只考虑推移质的影响。今后可尝试对其进行完善,以便更真实地模拟弯道床面形态的冲淤演变趋势。

2.3.3 三维泥沙数学模型

由于平面二维泥沙数学模型只能反映泥沙在垂向上的平均运动情况,对于弯道中水沙运动三维性较强的状况,其应用受到一定限制。因此在实际工程中三维泥沙数学模型逐步得到应用。如 Demuren^[38]最初采用 $k-\epsilon$ 湍流模型对弯道中的示踪物进行模拟,后来将其拓展为推移质输移模型;Shimizu^[39]建立的三维全沙动床数学模型,用于计算弯道中悬移质和推移质运动引起的河床变形;陆永军^[40]从湍流运动机理出发,建立了三维泥沙数值模型,并将该模型应用于三峡工程坝区泥沙冲淤问题研究;刘诚^[41]建立了曲线坐标系下的三维水流泥沙湍流模型,用于模拟弯道内布置不同水生植被后的水流结构和河床变形,数值结果较好地再现了试

验规律。此外,值得注意的是,Wu^[42]建立了明渠中水流和河床变形的三维数值模型,未利用水流阻力系数,而是采用 $k-\epsilon$ 模型来求解,尽管忽略了河道的平面形状和几何形态的影响,特征参数的计算结果与实验结果仍相符合。虽然上述数学模型对弯道水沙运动的模拟结果与实验结果大致相符,但由于把水流和泥沙作为一个整体来考虑,故与天然状态存在一定的差异。为此,沈永明^[43]建立了曲线坐标系下的三维 $k-\epsilon-k_p$ 固液两相湍流模型,对实验室 120 度弯道内水沙两相流的流速、泥沙运动和床面变形进行模拟,与单相流数值结果对比发现,双相流模型能更好地模拟弯道内的床面变化,因此双相流模型将成为今后发展的趋势。此外,在研究河床演变过程中也出现了诸如元胞自动机^[44]、人工神经网络模糊逻辑^[45]、最小能耗理论及混沌理论^[46]等相关模化方式,为替代泥沙输移提供了较为简洁的方法,但还需完善。

3 结语与展望

由于弯道中的水沙运动较复杂,故对其进行准确的模拟,仍需对以下几方面的问题进一步深入研究。

(1) 弯道水流运动数值模拟的关键是对水面形态和流速分布的精确模拟,随着计算科学和紊流理论的快速发展,对其进行三维数值模拟已成为可能;但对于水流-河床-泥沙-污染物之间的耦合作用机理、模型研究较少,目前处于初步发展阶段。

(2) 弯道河床变形数值模拟中,关于河床冲淤态势的研究成果较多,模型也较成熟;但关于河岸横向变形的成果却较少,模拟方法也不很完善。未来需考虑土力学中有关边坡稳定的理论知识,建立河岸崩塌数值模型,将横向河岸展宽与垂向河床变形统筹考虑,对弯道发育特性进行准确模拟。

(3) 目前的弯道水流和泥沙运动的数值模拟,大都为单相流模型,难以得到较为理想的结果。因此,建立固、液两相流或多相流水沙模型将是未来主攻方向之一。

(4) 弯道的演变过程不能只考虑水流和泥沙的运动,今后还应考虑人为因素、生态因素及自然因素,如河岸物质组成、土体含水率、床沙组成、污染物成分、植被等因素对同水沙条件下的水流运动及河床演变规律的影响。

参考文献(References):

- [1] 张红武,吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社,1993. (ZHANG Hong-wu, LU Xin. Bend Channel Hydraulics[M]. Beijing: Water power and Electric Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 孙东坡,朱歧武,张耀先,等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展, 2006, 1(1): 61-66. (SUN Dong-po, ZHU Qi-wu, ZHANG Yao-xian, et al. Study of Circulating Velocity Profile and Lateral Sediment Transport in Curved Channels[J]. Advance in Water Science, 2006, 1(1): 61-66. (in Chinese))
- [3] 哈岸英,刘磊. 明渠弯道水流运动规律研究现状[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1462-1469. (HA An-ying, LIU Lei. Research Situation of Water Flow in Bend Open Channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42, (12): 1462-1469. (in Chinese))
- [4] Bridge J S, Jarvis J. Flow and Sedimentary Processes in the Meandering River South Esk, Glen Clova, Scotland[J]. Earth Surface Processes, 1976, 1: 303-336.

- [5] 刘焕芳. 弯道自由水面形状的研究[J]. 水力学报, 1990, 4(4): 46-50. (LIU Huarfang. Study on the Free Surface Shape of the Curve[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 4(4): 46-50. (in Chinese))
- [6] Makaveyev N I. River Bed and Erosion in Its Basin[M]. The Academy of Science of the USSR, 1975.
- [7] 罗索夫斯基. 弯道水流研究[J]. 尹学良译. 泥沙研究, 1958, 3(1): 83-95. (Rosovsky. Study on the Meandering River Flow [J]. YIN Xue liang Translation. Journal of Sediment Research, 1958, 3(1): 83-95. (in Chinese))
- [8] 张耀先, 焦爱萍. 弯曲型河道挟沙水流运动规律研究进展[J]. 泥沙研究, 2002, (2): 53-58. (ZHANG Yaoxian, JIAO Aiping. Development of Sediment-laden Flow Movement Law Research in the River Bend[J]. Journal of Sediment Research, 2002, (2): 53-58. (in Chinese))
- [9] 童思陈, 许光祥, 钟亮. 弯道床面切应力的研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 609-613. (TONG Sichen, XU Guangxiang, ZHONG Liang. Bed Shear Stress in Curved Conduit Flow [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(3): 609-613. (in Chinese))
- [10] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. (ZHANG Ruijin, XIE Jianheng, CHEN Wenbiao. River Mechanics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese))
- [11] Leopold L B. Water Surface Topography in River Channels and Implications for Meander Development [J]. University of California, Berkeley, USA, 1982: 359-388.
- [12] 刘月琴. 弯曲型河流基本特性研究进展[J]. 人民珠江, 2003, (2): 1-4. (LIU Yueqin. Development of Research on Essential Characteristics of Meandering Rivers [J]. Pearl River, 2003, (2): 1-4. (in Chinese))
- [13] 李大鸣, 焦润红, 吕小海. 蜿蜒河道水流数值模拟及其应用[J]. 天津大学学报, 2004, 37(1): 54-59. (LI Daming, JIAO Runhong, LU Xiaohai. Flow Mathematical Simulation and Its Application in Channel Bends[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(1): 54-59. (in Chinese))
- [14] Lien H C, Hsieh T Y, Yang J C, et al. Bend Flow Simulation Using 2D Depth Averaged Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(10): 1097-1108.
- [15] 方春明. 考虑弯道环流影响的平面二维水流泥沙数学模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 190-193. (FANG Chunming. Simulation of Bend Secondary Flow Effect in A Planar 2D Depth Averaged Model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(3): 190-193. (in Chinese))
- [16] 刘玉玲, 刘哲. 弯道水流数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 310-312. (LIU Yuling, LIU Zhe. Numerical Simulation to Flows in Curved Channels [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 310-312. (in Chinese))
- [17] Piller M, Nobile E, Thomas J. DNS Study of Turbulent Transport of Flow Around Low-numbers in A Channel Flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, (458): 419-441.
- [18] Marshall J S, Beninati M L. Analysis of Subgrid Scale Torque for Large eddy Simulation of Turbulence [J]. AIAA Journal, 2003, 41(10): 1875-1881.
- [19] 吴修广, 沈永明, 潘存鸿. 天然弯曲河流的三维数值模拟[J]. 力学学报, 2005, 37(6): 689-696. (WU Xiuguang, SHEN Yongming, PAN Cunchong. Three Dimensional Numerical Simulation of Nature Curved River [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(6): 689-696. (in Chinese))
- [20] Shao X J, Wang H, Chen Z. Numerical Simulation of Turbulent Flow in Helically Coiled Open channels with Compound Cross sections [J]. Science in China Series E Technological Science, 2004, 47(1): 97-111.
- [21] 许栋, 刘召平, 乾爱国, 等. 弯曲河道中水流运动的三维数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1423-1431. (XU Dong, LIU Shaoping, QIAN Aiguo, et al. Three dimensional Numerical Simulation of Flow in River Bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1423-1431. (in Chinese))
- [22] 王博. 连续弯道水流及床面变形的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (WANG Bo. Experiments of Water Flow and Bed Deformation in A Flume with Consecutive Curves [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [23] 窦身堂. 弯道水沙输移特性及其数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009. (DOU Shentang. Research on Hydrodynamic Characteristics and Mathematical Simulation of Curved Channel [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese))
- [24] 李琳琳, 徐锡平. 连续弯道内水流运动的特点[J]. 水运工程, 2009, (11): 138-142. (LI Linyin, XU Xiping. Flow Movement Characteristics within Successive Bends [J]. Port & Waterway Engineering, 2009, (11): 138-142. (in Chinese))
- [25] Zhang M L, Shen Y M. Three dimensional Simulation of Meandering River Based on 3D RNG Turbulence Model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(4): 448-455.
- [26] 华祖林. 拟合曲线坐标下弯曲河段水流三维数学模型[J]. 水利学报, 2000, (1): 1-8. (HUA Zulin. 3D Mathematical Model for Flow in River Bend in Body-fitted Curvilinear System [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (1): 1-8. (in Chinese))
- [27] Leschziner M A, Rodi W. Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow [J]. Journal of Hydraulics Division, 1979, 105(10): 1297-1314.
- [28] Rodriguez J F, Bombardelli F A, Garcia M H, et al. High resolution Numerical Simulation of Flow Through A Highly Sinuous River Reach [J]. Water Resources Management, 2004, 18(4): 177-199.
- [29] 杨燕华, 白玉川. 连续弯道水流运动的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2011, (6): 46-49. (YANG Yanhua, BAI Yuchuan. Three dimensional Numerical Simulation of Flow in Successive Bends [J]. Journal of Sediment Research, 2011, (6): 46-49. (in Chinese))
- [30] 黄筱云, 李绍武, 夏波. 一种新型三维水流数值模型[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 167-173. (HUANG Xiaoyun, LI Shaowu, XIA Bo. A New Three dimensional Numerical Model for Stream [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(6): 167-173. (in Chinese))
- [31] 丁全林, 王玲玲, 汪德耀, 等. 基于多松弛格子玻尔兹曼的弯道水流三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 523-528. (DING Quanlin, WANG Lingling, WANG Deguan, et al. Three dimensional Numerical Simulation of Bend Flow Based on the Multi-relaxation Times Lattice Boltzmann Method [J]. Advance in Water Science, 2012, 23(4): 523-528. (in Chinese))

- [32] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (XIE Jianheng. River Simulation[M]. Beijing: Waterpower and Electric Press, 1990. (in Chinese))
- [33] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (YANG Guo lu. Mathematical Model of River[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. (in Chinese))
- [34] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(3): 273-284. (LU Yongjun, ZHANG Qinghua. Numerical Simulation of 2-D River bed Deformation[J]. Journal of Hydrodynamics, 1993, 8(3): 273-284. (in Chinese))
- [35] Nagata N, Hosoda T, Muramoto Y. Numerical Analysis of River Channel Processes with Bank Erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(4): 243-252.
- [36] 钟德钰, 张红武. 考虑环流横向输沙及河岸变形的平面二维扩展数学模型[J]. 水利学报, 2004(7): 14-20. (ZHONG Deyu, ZHANG Hongwu. Extended 2-D Numerical Model for Alluvial River Considering Transverse Transport of Sediment and Bank Erosion Due to Secondary Flow in River Bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 14-20. (in Chinese))
- [37] DAI Werrhong. On the Simulation and Prediction of Bed Morphological Adjustments of Equilibrium in Alluvial Meandering Streams[D]. Kingston, Canada: Queen's University, 2008.
- [38] Demuren A O. Development of A Mathematical Model for Sediment Transport in Meandering Rivers[M]. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany, 1989.
- [39] Shimizu Y, Yamaguchi H, Itakura T. Three Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(9): 1090-1108.
- [40] 陆永军. 三维紊流泥沙数学模型及其应用[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2002. (LU Yongjun. Three dimensional Mathematical Model of Turbulent Flow and Sediment Transport and Its Applications[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002. (in Chinese))
- [41] 刘诚, 沈永明. 曲线坐标系下考虑植被影响的三维水沙数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(5): 551-561. (LIU Cheng, SHEN Yongming. A Three dimensional Water sediment Turbulence Model with the Effect of Vegetation in Curvilinear Coordinates[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 551-561. (in Chinese))
- [42] WU Weiming, Rodi W, Wenka T. 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(1): 4-15.
- [43] 沈永明, 刘诚. 弯曲河床中底沙运动和河床变形的三维p-两相湍流模型[J]. 中国科学, 2008, 38(7): 1118-1130. (SHEN Yongming, LIU Cheng. A Three Dimensional p-Two phase Turbulence Model on Meandering River Bedload Movement and Bed Deformation[J]. Science China, 2008, 38(7): 1118-1130. (in Chinese))
- [44] Coulthard T J, Hicks D M, Van De Wiel M J. Cellular Modeling of River Catchments and Reaches: Advantages, Limitations and Prospects[J]. Geomorphology, 2007, 90: 192-207.
- [45] Bhattacharya B, Price R K, Solomatine D P. Machine Learning Approach to Modeling Sediment Transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(4): 440-450.
- [46] 徐国宾, 杨志达. 基于最小熵产生与耗散结构和混沌理论的河床演变分析[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 948-956. (XU Guobin, YANG Zhi Ted. Analysis of River Bed Changes Based on the Theories of Minimum Entropy Production Dissipative Structure and Chaos[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 948-956. (in Chinese))

(上接第111页)

- [4] 李长俊, 曾自强, 江茂泽, 等. 天然气在管道系统中不稳定流动的分析[J]. 天然气工业, 1994, (6). (LI Changjun, ZENG Ziqiang, JIANG Maoze, et al. Instability Flow Analysis on Natural Gas in the Systems of Pipe[J]. Industry of Natural Gas, 1994, (6). (in Chinese))
- [5] J J Guy. Computation of unsteady Gas Flow in Pipe Networks [C]. In: Chem. E. Symp. Ser, 1967.
- [6] G Lappus, Gschmidt. Supervision And Control Gas Transportation And Distribution Systems[C]. In 6th IFA/IFIP Conference on Digital Computer Application to Process Control, Dusseldorf, Germany, 1980.
- [7] S L Ke, H C Ti. Transient Analysis of Isothermal Gas Flow in Pipeline Network[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 76(2): 169-177.
- [8] W O Tao, H C Ti. Transient Analysis of Gas Pipeline Network [J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 69(3): 47-52.
- [9] Andrzej J. Osiadacz, Maciej Chaczykowski. Comparison of Isothermal and Non-Isothermal Pipeline Gas Flow Models[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1.3): 41-51.
- [10] 隋元春, 薛世达. 沿途有分输的长输燃气管道不稳定流计算[J]. 燃气与热力, 1988, (4). (SUI Yuan chun, XIE Shi da. Instability Flow Calculation on Long Distance Transportation Gas Pipe of Being Respectively Transportation Along the Road[J]. Gas and Thermal, 1988, (4). (in Chinese))
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Furjun. Analysis of Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 江帆, 黄鹏. FLUET 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (JIANG Fan, HUANG Peng. Advanced Applications and Practical Example Analysis on Fluent[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [13] W. Rodi. Turbulence Models and Their Applications in Hydraulic A State of the Art Review, IAHR, Delft, The Netherlands, 1980.
- [14] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (ZHANG Zixiong, DONG Zengnan. Viscous Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [15] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Wiley, New York, 1995.