

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.005

平原河流水沙动力学若干研究进展与工程治理实践

唐洪武^{1,2}, 肖 洋^{1,2}, 袁赛瑜², 赵汗青²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 综述了河海大学在平原河流水沙动力学问题及河道整治技术创新与实践方面的研究成果, 包括含植物水流、沙波床面水沙运动、潜流交换、河网交汇流、桥墩防冲、闸下淤积等基础理论、复杂河网水沙运动模拟与多目标水力调控技术, 以及上述理论方法在解决长江、淮河、珠江等流域多个大中型复杂河网防洪、排涝、水运、环境等诸多实际问题中的应用, 展望了我国平原河流治理今后需重点关注的问题。

关键词: 平原河流; 水沙运动; 河流模拟; 水力调控; 河道整治; 综述

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)05-0414-010

Advances in research on hydrodynamics and sediment transport of plain rivers and its application in river treatment

TANG Hongwu^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, YUAN Saiyu², ZHAO Hanqing²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper reviews the research achievements from Hohai University in mechanics of flow and sediment transport in plain rivers and river treatment practices, including vegetated river flow, flow and sediment transport over rippled beds, hyporheic exchange, river confluences, erosion prevention around piers, sediment deposition prevention downstream of sluices, simulations of flow and sediment transport in complex river networks, and techniques for multi-objective hydraulic control. This paper describes the application of these methods to the solution of many practical problems related to flood and waterlogging control, waterway improvement, and water environment treatment of large- and medium-scale complex river networks in the Yangtze River, Huaihe River, and Pearl River basins. Important issues needed to be concerned in plain river treatment in China are pointed out.

Key words: plain rivers; flow and sediment transport; river simulation; hydraulic control; river treatment; review

水沙运动影响河道防洪、河床演变、污染物输移、生物生境及水利工程安全等, 是江河综合治理的核心问题。在我国平原地区, 河网密布、地势低洼、水流往复、涉水工程众多、人类活动频繁, 水沙运动十分复杂, 给平原河流的治理带来了极大的困难。因此, 研究平原河流水沙运动基本理论问题、水沙运动过程模拟预测方法, 以及考虑河网防洪、供水、航运、生态、环境、涉河工程安全等多目标水力调控技术, 为解决平原河流综合治理和水利工程规划设计等问题提供技术支持具有十分重要的科学意义和实际应用价值。河海大学依托“水文水资源与水利工程科学国家重点实验室”和“水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心”, 在多项国家自然科学基金、科技支撑计划、重大工程科技项目等支持下, 长期致力于平原河流水沙动力学基础问题研究、水沙运动模拟理论和方法及河道整治技术创新与实践, 取得了系列创新成果。

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(51239003, 51125034, 413230001, 51179055); 江苏高校优势学科建设工程项目(SYS1401)

作者简介: 唐洪武(1966—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学研究。E-mail: hwtang@hhu.edu.cn

1 平原河流水沙动力学基础问题

河海大学开展了植物水流、沙波床面水沙运动、潜流交换、河网交汇流、墩柱防冲、闸下防淤等平原河流水沙动力学基础问题研究,已初步形成一套较完整的平原河流水沙运动理论。

1.1 含植物河道水沙运动

植物是平原河流的重要特征之一,植物存在会对河流水沙运动、河床阻力等产生明显影响^[1]。结合激光流速仪(LDV)、声学多普勒流速仪(ADV)、粒子图像测速(PIV)等多种现代流动测试技术,通过大量的精细实验,对含植物河道流动分区、泥沙沉降、泥沙起动和植物阻力等开展了系列研究。主要成果有:将含淹没植物水流结构沿垂向分为植物内层区与植物外层区^[2],并结合植物紊流拟序结构特征,进一步把水流结构细分成3个区域,即弱猝发现象与类卡门涡街综合作用的植物内层区,壁面边界层中的猝发现象及自由混合层中大涡配对现象同时存在的植物顶部附近区,以及与自由剪切紊流类似、表现为涡体拉伸的植物外层区^[3-4]。通过在泥沙沉降阻力系数中加入植物作用项,推导出不同植物条件下的泥沙沉速公式^[5]。提出紊动扩散势的概念,分析植物区水流紊动作用对泥沙浓度分布的影响^[6-7]。提出了植物条件下泥沙起动的定义,并给出淹没/非淹没、刚性/柔性植物等条件下泥沙起动流速公式^[8-10]。基于等效水流阻力原理,提出“等效水力参数”的概念,建立含植物河道曼宁系数计算公式,为植物河道防洪规划及工程设计提供直接的计算参数^[11]。在此基础上,系统研究了含植物明渠水流阻力特性,分别对单个植物、植物整体阻力系数及阻力系数沿水深的分布进行研究,得出相应的经验公式,建立含植物的河道紊流数学模型,通过与实测含植物的河道流速分布对比,检验了3类阻力系数的适应性^[12]。

1.2 沙波床面水沙运动

平原河流床面形态复杂,与紊流结构、水流阻力和泥沙输运有密切联系^[13]。利用粒子图像测速、声学多普勒测速和图像处理技术等现代测量手段观测了沙波床面附近水流结构特性和泥沙颗粒的运动特征。如,采用图像显示技术与计算机图像处理技术相结合的全流场测试系统,研究沙波附近紊流拟序结构,发现沙波波峰以上自由紊流区内存在以喷射和清扫为主要特征的紊动猝发现象;波峰以下的沙波紊流区内发生水流分离,并在背水坡面产生旋涡^[14]。揭示了不同床面形态对紊流拟序结构的影响机理,建立了沙波的几何特征值与沙粒雷诺数的关系: $L/D_{50}=191.76Re_*^{0.3}$, $H/D_{50}=1.97Re_*^{1.3}$, $7.5 < Re_* < 14.2$ (L 为波长, D_{50} 为中值粒径, Re_* 为沙粒雷诺数, H 为波高);建立了考虑床面应力脉动的输沙率公式: $\varphi_{\text{紊流}}/\varphi_{\text{层流}}=((\tau_{\text{平均}}+\tau_{\text{脉动}})/\tau_{\text{平均}})^4$ ($\varphi_{\text{紊流}}$ 为紊流条件下的输沙率, $\varphi_{\text{层流}}$ 为层流条件下的输沙率, $\tau_{\text{平均}}$ 为平均切应力, $\tau_{\text{脉动}}$ 为脉动切应力)。在统计分析近壁区推移质泥沙时均和紊动运动规律的基础上,得出了推移质颗粒的运动速度既不是 Einstein 假定的常数 $11.6u_*$ (u_* 为摩阻流速),也不是 Bagnold 假定的比清水流速小一个 ω 值(ω 为颗粒沉降速度),而是 $10.5u_*$,比 Einstein 的假定偏小,进而提出了可应用于输沙率计算的推移质时均运动速度公式 $U_b = U_w - \omega(25/Re_*) - 0.002Re_*$ 和 $U_b = 1.55u_* Re_*^{0.5}(\rho/(\rho_s - \rho))^{0.25}$ (U_b 为推移质时均运动速度, U_w 为水流流速, ρ_s 为泥沙密度, ρ 为水的密度),描述了明渠沙波床面附近涡量场的特性,总结了床面形态对水流时均流速、紊动强度、雷诺应力、紊流动能产生项及脉动流速高阶矩分布特性的影响^[15-16]。

1.3 潜流交换机制

潜流带是河流河床内水分饱和的沉积物层,潜流交换对上覆水和孔隙水中泥沙颗粒、溶质和污染物的输移、转化起着重要作用。通过自主研发潜流交换试验装置^[17],结合地表水-地下水运动耦合数学模型,开展潜流交换机制和物质输运机理研究,发现在沙波床面上部的对流交换比较强烈,扩散作用较弱;而河床下部扩散作用占主导作用,揭示了对流与扩散对潜流交换的影响^[18]。研究还发现,即使较低的密度梯度也能够改变河床中的潜流方向和大小,揭示了低密度流能引起较大的潜流交换,改变了传统理论认为低密度流对环境的影响可以忽略不计的认识^[19]。低密度流不仅出现在潜流带,而且在很多地下水输运过程中经常出现,在密度流的作用下,污染物进入潜流带的过程速度加快,但是密度流的存在会减缓污染物从潜流带中的释放^[20]。针对突发性污染事件,利用循环水槽实验和数学模拟,系统分析在突发性污染事件发生情况下污染物在沙波河床中迁移和释放的过程,研究发现,突发事件发生后密度流加速污染物进入河床,但是阻碍进入河床中的污染物释放,从而会导致突发性污染事件发生后河水的污染物浓度出现长尾巴现象,即使这个长尾巴浓度很低,但是对于毒性很强的化学物质,对河流的生态环境影响会继续很长时间^[20]。

1.4 河网交汇流

我国平原河网河道纵横交错,交汇流是河网的主要特征。利用声学多普勒测速等测量手段观测了不同汇流比情况下的水沙运动特征和床面形态,发现入汇支流水流相对较大时可以引发汇流口剪切层倾斜,其水流结构和紊动特性包括剪切层涡旋类型、尺度和强度以及紊动能、雷诺切应力分布等均发生很大的改变^[21];泥沙冲淤形成的沙坑-沙垄复杂床面更为突出,对比了这种典型床面下的水沙运动特征,发现交汇口各断面的速度环量沿主流方向呈先减后增的趋势,而整体水流的涡旋强度随支汊流量的增大而增大^[22]。针对城市河网交汇处(尤其是急流与缓流交汇处)常出现出流不顺、易发洪灾的问题,创造性地提出在河道汇合处主干渠上修建导堤和鱼嘴等射流结构,利用急流下泄至主干渠时形成高速水流来卷吸周围水体,解决了非常有限空间范围内,侧向急流汇入干渠缓流形成自然阻隔上游水流下泄的城市防洪难题^[23]。该方法运用于香港元朗行洪道设计中,使上游水位自然降落1 m多,将香港元朗郊区河道防洪标准由10年一遇提高至50年一遇^[24]。

1.5 涉河工程冲刷防护

堤防、桥墩等涉河工程冲刷防护材料主要有抛石、铰链排、混凝土模袋等,这些均为实体防护,在防护带周围会产生二次冲刷,引起防护体的破坏^[25]。依据四面体透水框架群减速大、促淤强的特点,结合墩柱周围床面冲刷机理,提出采用四面体透水框架群防冲技术,并利用激光多普勒测速技术及粒子图像测速技术等现代测试手段,研究墩柱周围有无四面体框架群防护情况下的三维流场特性、四面体透水框架群的破坏机理及框架群布置参数(布置范围、布置密度、布置深度等)对冲刷坑的影响,得到了相对流速、相对水深、泥沙粒径、四面体透水框架群的杆件体积率等与墩柱周围局部冲刷坑深度的关系,建立抗冲系数受各因素影响的关系式: $T_g = h_s/h_{s0} = f_3(u/u_c, h_0/D, D/d_{50}, c/D, y/D, \eta)$ (T_g 为抗冲系数, h_{s0} 和 h_s 分别为河床冲刷前后的厚度, u 为水流纵向行进流速, u_c 为起动流速, h_0 为水深, D 为桥墩宽度, d_{50} 为中值粒径, c 、 y 、 η 分别为四面体透水框架群的防护范围、放置高度及杆件体积率),给出了不同条件(流速、水深、墩柱形状与尺寸、泥沙等)下透水框架群防护的优化布置参数^[26-28]。

1.6 挡潮闸闸下防淤

我国300多座河口挡潮闸中,约70%发生了严重淤积,一般采用水力冲淤、机械清淤等方式解决闸下淤积问题,但投入的人力、物力较大,且清淤后回淤量大,防淤效果短暂。结合挡潮闸闸下淤积成因分析,提出了一种适用于闸下防淤的“悬浮式旋翼水力自动防淤清淤装置”^[29],该装置巧妙地根据明渠水流速度垂线分布和泥沙含沙量沿垂线分布的特性,利用潮汐动力或调度挡潮闸闸上水体产生动力,减缓闸下河道的泥沙淤积。对于卧倒式闸门淤积问题,发明了“液压水下卧倒门闸的闸下清淤用射流管及其应用方法”^[30],该装置通过在卧倒门闸下布设多个一定角度的射流管,利用射流扰动闸下水流,带动泥沙悬浮,并结合水力冲淤将闸下泥沙带到下游,减轻闸下淤积。

2 平原河流水沙运动模拟与调控

2.1 物理模型水沙试验技术

物理模型试验是解决水利工程规划、设计和运行中重大科学技术问题的主要手段之一,而水沙运动测控技术是保障物理模型能否复演天然水沙运动和试验数据可靠性、准确性的关键。针对平原区物理模型模拟范围大、边界多、测控参数多的高精度测控需求,开发了多泵变频控制系统^[31],保证了多边界的同步控制,提出了基于相似理论、水沙运动理论与测控感知耦合互馈的方法,创建了基于相似理论、水沙运动理论与测控感知耦合互馈的高精度水沙测控系统^[28],实现了大面积多参数多点测控无线化、数据交互标准化、模型设计自动化、数据校验智能化。发明了大型物理模型表面流场及流迹线图像测试系统^[32-33],实现了大型实体模型彩色流场图像快速拼接、粒子自动匹配以及动态流迹线的实时显示。平原河流物理模型范围大,水位仪多达数十或上百台,若采用水准仪逐一标定零点则综合累积误差大,基于激光的准直特性,发明了水位仪自动标定方法^[31],构建了激光中心平面高程、水位仪读数、基准高程等参量间的关系,实现水位仪读数的自动标定。发明了泥沙颗粒通过内置液氮的搅拌分散器分散、管路输送、液氮气化、泥沙快速分散方法^[34],解决了黏性泥沙快速分散和泥沙样品快速制备的难题;发明了LED平行光源奇偶间隔照射、泥沙颗粒CCD面阵批量图像采集方法^[35],有效解决了泥沙颗粒测量中体光源照射易产生阴影、小颗粒泥沙易被淹没的问题,实现了泥沙颗粒级配、形状系数和圆度的快速准确测量;通过建立水下休止角与CCD感知的截面直径、片光间距

的关系,发明了泥沙水下休止角的自动测量方法及装置^[36];发明了利用片光-CCD 感知触发获取泥沙穿越2组平行片光的间隔时间来测量泥沙颗粒沉速方法^[37];提出了利用光学折射定律原理的激光-CCD 获取泥沙溶液折射率的方法,建立了折射率与含沙量的关系,发明了含沙量自动测量方法^[38],解决了光电含沙仪相对误差大、易受干扰的问题。

2.2 平原河网流域水动力模拟技术

平原河网外接江、海,内连湖泊、蓄滞洪区,不同区域的模拟时空尺度差异巨大,同时,水利工程种类和数量众多,流动十分复杂,模拟困难。将水流运动概化为湖泊和蓄洪区的零维模拟、河道水流的一维模拟、行洪区水流的二维模拟,提出了全流域基于节点水位的耦合求解算法^[39];在分汊河口处采用全隐式离散格式与矩阵追赶法,构建了内部水力要素与边界节点水位的函数关系^[40],解决了河网分汊口众多、流态复杂带来的计算不易收敛难题;提出了实时校正卡尔曼交替滤波算法,构建了水流校正模拟模式^[41],实现了模型的实时校正,提升了实时模拟精度;引入遗传算法、人工神经网络等智能方法,实现了糙率等模型计算参数的快速反演^[42-43];建立了流域水动力数学模型,解决了大中型河网、湖泊、行蓄洪区及水利工程等水动力耦合的模拟计算问题。

2.3 复杂河网多目标水力调控技术

近年来,随着区域经济社会的发展,水力调控目标不再单一,不同目标(防洪、排涝、供水、通航、生态环境保护等)对水动力的需求不甚协调或是矛盾的,各目标之间的关系是动态非线性变化的,使得多目标下多工程水力调控十分复杂。针对多目标动态平衡的规律是隐性的、非结构化的,无法用方程直接描述的难题,提出了机理模型与智能模型的等价原理^[44],从理论上解决了各类模型的适用性评价和统一性问题(图1)。针对多工程调控非线性变化的问题,提出了水流非线性系统辨识方法:利用神经网络高度非线性表达能力、自学习能力和泛化能力,建立了水流系统模型的神经网络辨识方法,快速确定与实际水流规律最接近的模型^[45-47]。针对传统的调控方案(枚举比选、逐步递推等)主观成分多、优化程度低、时效性差等问题,建立了具有先验知识概念和智能化特征的多目标水力调控决策方法^[48-49]。最终实现了复杂河网多目标水力智能调控,攻克了多目标动态平衡下的实时决策难题,为水安全问题综合治理、流域综合规划与管理奠定了理论基础。

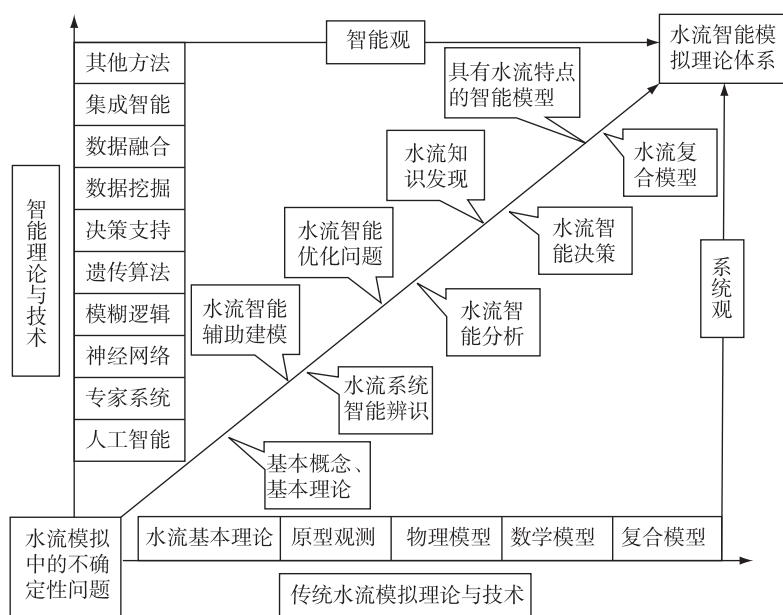


图1 水流智能模拟理论体系与框架

Fig. 1 Theoretical system and framework of intelligent flow simulation

3 平原河道整治工程技术

平原地区人口众多、经济发达、河流开发利用程度高,保障平原河流河势稳定和防洪安全对支持平原地区社会经济可持续发展具有十分重要的意义。河海大学将平原河流水沙运动机理与模拟研究成果成功应用到长江、淮河、赣江、珠江、甬江等众多平原河流整治实践,主要应用成果包括长江南京河段汊道整治工程、赣

江南昌河段整治、珠江三角洲河网整治、淮河中下游防洪安全综合整治工程行洪能力复核、平原闸站枢纽布置与优化、甬江建闸可行性论证等6个方面。

3.1 长江南京河段汉道整治工程

长江南京河段水沙运动复杂、洲滩演变剧烈,工程整治难度大。2000年以来,河海大学从“节点控导、稳定分流”的平原河网整治思路出发,提出节点控导、稳定洲滩、保持或改善汉道分流比的治理措施,研发洲头分流、洲尾汇流等河道整治技术和透水四面六边体、大型沙袋等岸坡防护技术,维持长江南京河段的汉道稳定。提出“中汉封堵+新生洲鱼嘴+新生洲洲头疏浚+新潜洲右汉进口疏浚+新洲切滩+新生洲右汉进口护底工程”的新济洲汉道综合整治方案^[50-51],通过减少河道分汉、减缓左汉萎缩、改善右汉水流条件等保障河势稳定和防洪安全。针对八卦洲汉道左汉衰退、右汉发展等问题,研究了“洲头导流堤+黄家洲切滩+马汉河疏浚”综合整治方案^[52-53],并评估典型水文年条件下整治工程对汉道防洪、河势演变、通航条件的影响,探索性研究“洲尾导流坝”和“右汉潜坝群”方案^[52]。提出在八卦洲洲头左缘和九江赤心堤段采用四面六边透水框架群进行岸坡防护的方案,促进近底流速的衰减及泥沙落淤^[54-55]。长江大胜关段近岸深槽段水深流急(水深约50 m,流速约2 m/s),岸坡防护存在防护体量大、大宗材料获取困难等难点,共同提出了沙袋深水护岸技术,单体沙袋长10 m、直径1.2 m、质量约14 t,大胜关深槽抛区范围内平均增厚3.5 m,护岸效果明显。

3.2 赣江南昌河段整治

赣江南昌段位于赣江下游,自上而下依次分布有红角洲、裘家洲、扬子洲等,赣江在裘家洲头分为东、西两河共四汉注入鄱阳湖。近十几年来,受多种因素影响,赣江南昌段河道同流量下水位下降显著^[56],中枯水时降幅超过2 m,洪水时降幅超过1 m,水位下降的主要影响因素包括上游兴建水库,鄱阳湖区水位降低等自然因素和河道采砂、航道整治、吹填造地等人类活动影响。其中大规模人为采砂是水位下降的主要影响因素,水流自然冲刷对水位下降的影响幅度有限,鄱阳湖水水位降低对水位下降有一定影响,约占水位总降幅的1.5%~11%。裘家洲东西河分流特性与流量、水位、分流角、两汉道断面面积、水面宽度及比降等诸多因素密切相关,2000年以前,西河分流比随着上游来流量的增大而减小,表现为枯水期泄流60%、洪水期泄流40%^[57-58],近年来人为采砂使西河河床下切、过水断面及水力比降增大,西河分流比逐年增加(枯水期达70%~100%、洪水期约50%~60%),可能导致东河河道萎缩以及西河防洪压力增大等严重后果。采取了部分工程整治措施,针对上述情况开展研究,发现扬子洲头分流控导工程对洪、枯水情况下汉道分流比的调整作用并不明显,表明只依靠调整分流段地形来改变分流比的效果不甚理想,宜结合东西河汉道内的地形情况来调整分流,可通过降低东河河床尤其是吉里万家等高滩卡口段高程,达到泄流通畅、吸引进流、增大分流的效果^[59-60]。

3.3 珠江三角洲河网整治

珠江三角洲河网河道整治面临水动力复杂、影响因素多、整治需求多等一系列难题。通过对近50年长期观测资料分析,发现珠江三角洲口门处海岸滩涂导致口门河道化过程趋势明显,表现为口门处潮差和潮时的显著减小趋势,而河网内由于河床下切,纳潮量增加,潮差显著增加,并通过统计学证明了潮汐动力变化与河口海岸滩涂开发及河网挖沙等活动在发生的时间上具有高度的一致性,从而阐明其相关性^[61]。河口潮汐动力的变化,又直接导致潮波变形加剧,从而引起珠江河网区极值水位变化的区域性差异,通过长期趋势分析和主成分分析法确定了珠江三角洲洪水高发区域^[62]。系统研究了珠江三角洲航道网的潮流悬沙运动特性,成功建立了大网河复杂系统和多种动力因素作用下的珠江三角洲航道网一维潮流悬沙数学模型^[63]。总结了珠江三角洲河网分汉河道、弯曲河道、交汇区河道整治技术,提出潮汐河网区以疏浚为主的河道整治思路和依据输沙及纳潮规律的潮汐河口治导线放宽率确定方法^[64],并成功应用于西江、北江、东江、潭江和洪奇沥河道整治工程实践。系统地揭示了船行波的规律及其对岸坡冲刷的影响,提出适合快速客船航行的经济合理的内河航道岸坡护岸型式^[65-66]。分析了珠江三角洲河网河道管理维护中存在的问题,总结河道管理维护的技术措施,提出基于GIS的河道管理维护信息系统,并在西江和佛山东平水道航道管理维护中得到应用。

3.4 淮河中下游防洪安全综合整治工程行洪能力复核

经过新中国60年治淮,基本建成流域防洪除涝减灾体系,淮河流域总体防洪标准得到明显提高。然而,淮河流域防洪仍面临行蓄洪区启用与生产发展矛盾突出、中游行洪不畅、下游出路不足等诸多问题,为此,2009年提出了进一步治淮38项工程,而在开展新一轮治淮之前,对淮河中下游现状行洪能力的复核是保障

新一轮治淮成效的关键。根据淮河干流、入江水道、入海水道工情及水情,建立高精度数学模型,推求不同目标组合条件下的行洪水面线及河道行洪能力,复核了淮河干流、入江、入海水道的行洪能力,评估沿线堤防的安全性^[67]。分析洪泽湖三河闸泄洪偏流的原因,比选各类可行的工程组合方案,提出了切滩-导墙相结合的优化方案^[68]。研究了淮河蚌埠段涉水工程群的行洪累积影响,精细复演了涉水工程的建设历史及其对该河段行洪能力与泄洪条件的影响,建立了涉水工程群对河流防洪累积影响评价方法和评价指标。研发一套实用的《涉河建设项目基础诊断评估及决策支持管理平台》,显著提高了水行政部门对涉水工程防洪影响行政审批效率与管理的科学性。

3.5 平原闸站枢纽布置与优化

水闸、泵站是平原地区防洪、环境和生态等多目标水力调控的主要水工控制建筑物,也是平原水利枢纽的中枢,其设计布置关系到流域全局目标能否顺利实现。经过长期的研究实践,在枢纽优化布置、低弗劳德数消能防冲措施、高淹没度泄流能力规律等方面提出了系统的水力设计理论与方法,开发了成套整流技术,为平原河流枢纽工程优化设计开拓了新思路。如,通过江苏、上海等地 10 余座闸站合建工程的物理模型试验成果分析,总结出闸站合建枢纽的平面对称布置、平面不对称布置和立面分层布置等 3 种主要布置型式,提出改善回流、螺旋流等不良流态的方法,如闸站结合部加设导流墙、泵站前池加设导流墩、潜墩;闸下设置“W 形”折线坎、“梅花形墩群”等,实现了征地小和行洪排涝多赢目标^[69-70]。常规的消力池在低弗劳德数、低水头下很难取得令人满意的消能效果,针对此提出空间水跃的共轭水深计算方法和脉动压力分布规律;了解了三维空间水跃和低弗劳德数水跃的消能特性;提出“墩群消能工”,得到墩群的布置方式、分布密度、体型尺寸对消能率的影响规律,解决了平原洪水控制枢纽建筑物水力设计的难题^[71]。基于理论分析提出了新型浮体闸在动水中沉浮的稳定性条件,突破了传统浮箱式闸门只能在静水或者流速很小水域中使用的限制,解决了平原枢纽防洪与通航之间的矛盾^[72]。

3.6 甬江建闸可行性论证

河口修建挡潮闸可以提高两岸的防潮防洪能力、增加淡水资源可利用量、解决闸上泥沙淤积和浑水景观问题、改善两岸河网水环境、提升城市品位等,综合效益巨大。然而,河口建闸将改变河口原来的自然状况,对港口航道、内河交通、生态环境、城市景观、沿江产业布局等都会带来较大影响,具有高度的敏感性和复杂性,需对各方面的利弊影响开展综合分析,全面、科学地论证其可行性。河海大学在综合平原区水闸枢纽水力设计技术、挡潮闸闸下防淤减淤技术、水闸多目标水力调控理论方法等的基础上,从闸址选择与规模、闸下淤积及其对港区影响、建闸对水资源、防洪排涝、地区航运、生态环境、水景观、产业布局、城市发展等多目标的工程效益等方面,提出了一整套河口挡潮闸可行性论证方法^[73-77],为河口建闸的科学决策提供了技术支撑,并应用于甬江、椒(灵)江河口挡潮闸的可行性论证。

4 总结与展望

结合我国当前平原河流治理工程实践中的需求及出现的治理新理念、新思路、新问题,认为今后需重点关注以下问题,供同行参考。

4.1 平原河流水沙基本问题与环境、生态学科交叉研究

水环境综合治理与水生态文明的构建是当前我国社会经济发展中关注的热点问题,也为人们的研究指明了方向。(a)含植物河道水沙运动规律。目前多局限于刚性植物的研究,植物的排列方式也相对规则,与实际河流植物情况有一定差异,含柔性植物河流水沙运动规律研究还需加强。(b)地表水与潜流带的水沙耦合运动规律。上覆水、悬沙与潜流带中孔隙水的运动时间尺度相差很大,现在的潜流交换模拟多集中在半耦合状态,如何有效地针对河床界面上下水动力和污染物迁移转化过程进行全耦合模拟,将是平原区环境治理与河床演变交叉研究方向。(c)平原河流水-沙-污染物耦合输运机理。在充分明晰平原河网水沙运动规律的基础上,进一步研究泥沙环境效应作用下河网污染物输移机制及富集规律对于河网治理具有重要的理论和实际意义。

4.2 平原河流水沙运动模拟与调控

计算技术的发展,为平原河流水沙运动模拟提供了新的手段,使模拟朝着微观和宏观 2 个尺度延伸成为可能。(a)微观尺度模拟。单颗粒泥沙的运动及泥沙表面形态对污染物吸附/解吸过程的影响是揭示泥沙运动环境效应的基础,格子波尔兹曼方法、直接数值模拟等为人们提供了一些有效的方法。(b)宏观尺度水

动力模拟。河流的整体规划与系统治理对河流模拟提出了新的要求,流域尺度二维水沙数学模型和大型河工物理模型试验技术为系统研究和解决工程问题提供了重要手段,如何提升实时模拟的精度和效率以及实现数学模型与物理模型复合模拟,是进一步研究的重点。(c)平原河流多目标水力调控。平原河网大量的水利工程为实现水动力空间均衡、水问题系统治理提供了调控手段,利用平原地区水闸、泵站、湖泊、行蓄洪区等工程体系,发展多目标水力调控理论方法和关键技术,实现水动力时空特征的再构造,是解决复杂河网地区所面临水问题的重要途径。

4.3 平原河流工程治理

平原河流水沙运动的规律十分复杂,流域工程与河流工程的实施进一步改变水沙运动规律,更增加了治理的难度。(a)工程群对河流河势、防洪的累积影响研究。随着河流中的工程逐渐增多,工程将以“群”的形式对河流系统产生影响,如何评价涉河工程群对河流水沙运动、河床演变的累积及相互影响,探寻涉河工程群对河流河势、行洪累积效应机理的影响,并研究相应的评估方法、指标体系,是防洪安全领域的一个研究重点。(b)建闸工程关键技术研究。河口建闸有挡潮蓄淡、改善水环境、航运、提升水景观等综合效益,但建闸会使流域整体格局发生重大变化,涉及城市发展、航运、防洪排涝、水环境、水生态、水景观等多个问题,如何科学论证是保障工程兴利避害的技术支撑。(c)分汊型河道整治技术。长江中下游多为分汊型河道,河势格局稳定与防洪安全对沿江经济社会的可持续发展十分重要,河流枢纽建成后,清水下泄引起新的河床变化,如何刻画新的条件对分汊河道演变的影响,探讨水沙过程变化与冲积河流河床演变的关系,是一项长期关注的研究方向。

致谢:感谢河海大学严忠民、毛野、王船海、王玲玲、陈界仁、金光球、唐立模、徐锡荣、傅宗甫、陈红、闫静、陈珺、诸裕良、张蔚、吕升奇等老师及研究生们对平原河流治理研究的贡献。

参考文献:

- [1] 唐洪武, 闫静, 吕升奇. 河流管理中含植物水流问题研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 149-156. (TANG Hongwu, YAN Jing, LU Shengqi. Advances in research on flows with vegetation in river management[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 149-156. (in Chinese))
- [2] 闫静, 唐洪武, 田志军, 等. 植物对明渠流速分布影响的实验研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 138-142. (YAN Jing, TANG Hongwu, TIAN Zhijun, et al. Experimental study on the influence of vegetation on the velocity distribution of open channel flows[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 138-142. (in Chinese))
- [3] 闫静, 戴坤, 唐洪武, 等. 植物条件下明渠紊流拟序结构的可视化研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 待刊. (YAN Jing, Dai Kun, TANG Hongwu, et al. Flow visualization experimental study on coherent structure in vegetated channel flow [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, in publish. (in Chinese))
- [4] 戴坤. 刚性植物条件下明渠紊流拟序结构的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2015.
- [5] 唐洪武, 吕升奇, 龙涧川. 刚性植物条件下静水中粗颗粒泥沙沉速研究[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1214-1220. (TANG Hongwu, LYU Shengqi, LONG Jianchuan. Settling velocity of coarse sediment particles in still water with rigid vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1214-1220. (in Chinese))
- [6] 吕升奇. 含刚性植物水流中悬移质泥沙分布规律实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [7] 吕升奇, 唐洪武, 闫静. 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 64-68. (LYU Shengqi, TANG Hongwu, YAN Jing. Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 64-68. (in Chinese))
- [8] TANG Hongwu, WANG Hao, LIANG Dongfang, et al. Incipient motion of sediment in the presence of emergent rigid vegetation [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2013, 7(3): 202-208.
- [9] WANG Hao, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, et al. An experimental study of the incipient bed shear stress partition in mobile bed channels filled with emergent rigid vegetation[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(6): 1165-1174.
- [10] WANG Hao, TANG Hongwu, ZHAO Hanqing, et al. Incipient motion of sediment in presence of submerged flexible vegetation [J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(1): 63-67.
- [11] 唐洪武, 闫静, 肖洋, 等. 含植物河道曼宁阻力系数的研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1347-1353. (TANG Hongwu, YAN Jing, XIAO Yang, et al. Manning's roughness coefficient of vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 39(11): 1347-1353. (in Chinese))
- [12] TANG Hongwu, TIAN Zhijun, YAN Jing, et al. Determining drag coefficients and their application in modeling of turbulent flow

- with submerged vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 69: 134-145.
- [13] 唐立模, 孙会东, 刘全帅. 明渠紊流与床面形态相互作用研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(2): 77-84. (TANG Limo, SUN Huidong, LIU Quanshuai. Research development of the interaction between turbulence structure and bedforms in open channel[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(2): 77-84. (in Chinese))
- [14] 毛野, 张志军, 袁新明, 等. 沙波附近紊流拟序结构特性初步研究[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2002, 30(5): 56-61. (MAO Ye, ZHANG Zhijun, YUAN Xinming, et al. Characteristics of turbulent coherent structures over sastrugi in open channels[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2002, 30(5): 56-61. (in Chinese))
- [15] TANG Limo, WANG Xingkui. Experimental study on three dimensional movements of particles I: effects of particle diameter on velocity and concentration distributions[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(4): 159-168.
- [16] TANG Limo, WANG Xingkui. Experimental study on three dimensional movements of particles II: effects of particle diameter on turbulence characteristics[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(4): 169-176.
- [17] 金光球, 徐慧宇, 唐洪武, 等. 突发污染事件下污染物迁移的实验模拟操作方法:2013107543663[P]. 2015-07-29.
- [18] JIN Guangqiu, TANG Hongwu, GIBBES B, et al. Transport of nonsorbing solutes in a streambed with periodic bedforms [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(11): 1402-1416.
- [19] JIN Guangqiu, TANG Hongwu, LI Ling, et al. Hyporheic flow under periodic bedforms influenced by low-density gradients [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L22401.
- [20] JIN Guangqiu, TANG Hongwu, LI Ling, et al. Prolonged river water pollution due to variable-density flow and solute transport in the riverbed [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 1898-1915.
- [21] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Structure of turbulent flow at a 90-degree open channel confluence: accounting for the distortion of the shear layer[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, under review.
- [22] QIU Xuehan, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, et al. Effects of discharge ratios on flow structure at a 90-degree flow confluence with degraded channel beds[C]. *IAHR, Proceedings of 36th IAHR world congress*, Netherlands 2015, in press.
- [23] 唐洪武, 袁赛瑜, 李行伟, 等. 河道交汇区急缓流平稳过渡导流系统:2013101184417[P]. 2015-08-05.
- [24] AREGA F, LEE J H W, TANG Hongwu. Hydraulic jet control for river junction design of Yuen Long Bypass Floodway, Hong Kong[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(1): 23-33.
- [25] 房世龙, 陈红, 王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(4): 84-89. (FANG Shilong, CHEN Hong, WANG Gang. Properties of protection engineering against local scouring around piers[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(4): 84-89. (in Chinese))
- [26] TANG Hongwu, DING Bin, CHIEW Y M, et al. Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(4): 385-399.
- [27] 房世龙, 唐洪武, 周宜林, 等. 桥墩附近四面体透水框架抛投防冲效果试验研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 354-358. (FANG Shilong, TANG Hongwu, ZHOU Yilin, et al. Experimental study on effect of local scour at piers and protection by tetrahedron frame[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 354-358. (in Chinese))
- [28] 李最森, 唐洪武, 戴文鸿. 透水四面体框架群防护特性及其与抛石防护的对比研究[J]. *泥沙研究*, 2011(6): 75-80. (LI Zuisen, TANG Hongwu, DAI Wenhong. Case study of protective effects of riprap or tetrahedron frame group with different densities on local scour around a pier[J]. *Journal of Sediment Research*, 2011, (6): 75-80. (in Chinese))
- [29] 唐洪武, 孙洪滨, 周和平, 等. 悬浮式旋翼水力自动防淤清淤装置:2005100945543[P]. 2011-12-07.
- [30] 唐洪武, 卢永金, 肖洋, 等. 液压水下卧倒门闸的闸下淤积用射流管及其应用方法:2010101022654[P]. 2011-08-03.
- [31] 陈红, 唐洪武, 丁赞, 等. 一种水位仪高程标定装置及标定方法:2011102831665[P]. 2013-05-08.
- [32] 唐洪武, 陈红, 陈诚, 等. 实体模型表面流场图像测试的高性能示踪粒子及制作方法:2007100217206 [P]. 2012-06-27.
- [33] CHEN Hong, TANG Hongwu, LIU Yun, et al. Measurement of particle size based on digital imaging technique[J]. *Journal of Hydrodynamics: Ser B*, 2013, 25(2): 242-248.
- [34] 陈红, 唐洪武, 唐立模, 等. 一种泥沙颗粒快速分散装置及其方法:2012100372043 [P]. 2014-01-01.
- [35] 陈红, 唐洪武, 吕升奇, 等. 一种泥沙颗粒批量图像采集装置及其方法:2012100372058[P]. 2014-03-26.
- [36] 唐洪武, 陈红, 肖洋, 等. 基于光学成像的泥沙水下休止角的测量装置及其测量方法:2013101845354[P]. 2013-10-23.
- [37] 陈红, 唐洪武, 唐立模, 等. 一种泥沙沉速的测量装置及其测量方法:201010175580X[P]. 2013-04-10.
- [38] 陈红, 唐洪武, 唐立模, 等. 一种光学泥沙溶液含沙量测量装置及其测量方法:2012101518038[P]. 2014-05-07.
- [39] 王船海, 李光炽. 流域洪水模拟[J]. *水利学报*, 1996, 27(3): 44-50. (WANG Chuanhai, LI Guangchi. The modeling of basin flood[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(3): 44-50. (in Chinese))
- [40] 王船海, 向小华. 通用河网二维水流模拟模式研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 516-522. (WANG Chuanhai, XIANG Xiaohua. Generic 2-D river network numerical model[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 516-522. (in Chinese))
- [41] WANG Chuanhai, BAI Yaoling. Algorithm for real time correction of stream flow concentration based on Kalman filter[J].

- Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(5): 290-296.
- [42] TANG Hongwu, XIN Xiaokang, DAI Wenhong, et al. Parameter identification for modeling river network using a genetic algorithm [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(2): 246-253.
- [43] 王玲玲, 钟娜, 成高峰. 基于奇异矩阵分解法的河道糙率反演计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 359-363. (WANG Lingling, ZHONG Na, CHENG Gaofeng. Inverse calculation of bed roughness based on singular value decomposition method[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 359-363. (in Chinese))
- [44] 顾正华. 水流智能模拟理论及其应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [45] TANG Hongwu, LEI Yan, LIN Binliang, et al. Artificial intelligence model for water resources management[J]. Proceedings of Institution of Civil Engineer-Water Management, 2010, 163(4): 175-187.
- [46] 顾正华, 刘贵平, 唐洪武, 等. 感潮河网调水过程的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 76-85. (GU Zhenghua, LIU Guiping, TANG Hongwu, et al. Study on numerical simulation of water transfer process in tidal river networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 76-85. (in Chinese))
- [47] 唐洪武, 雷燕, 顾正华. 河网水流智能模拟技术及应用[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 232-237. (TANG Hongwu, LEI Yan, GU Zhenghua. Intelligence simulation technique for river net flow and its application[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 232-237. (in Chinese))
- [48] 顾正华, 唐洪武, 李云, 等. 水流模拟智能化问题的探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 129-133. (GU Zhenghua, TANG Hongwu, LI Yun, et al. Discussion on problems of intelligentizing flow simulation[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 129-133. (in Chinese))
- [49] GU Zhenghua, CAO Xiaomeng, LIU Guoliang, et al. Optimizing operation rules of sluices in river networks based on knowledge-driven and data-driven mechanism[J]. Water Resources Manage, 2014, 28: 3455-3469.
- [50] 徐锡荣, 臧英平, 仲跻文, 等. 长江新济洲汉道演变与整治[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 373-377. (XU Xirong, ZANG Yingping, ZHONG Jiwen, et al. Fluvial process and regulation of Xinjizhou branched channel on Yangtze River [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 373-377. (in Chinese))
- [51] 徐锡荣, 管捷, 张少杰, 等. 长江新济洲河段河道整治与稳定分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 5-8. (XU Xirong, GUAN Jie, ZHANG Shaojie, et al. River regulation and stability analysis for Xinjizhou reach of the Yangtze River [J]. Journal of Yangtze Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 5-8. (in Chinese))
- [52] YU Pengpeng, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Effects of a diversion dyke on river flow: a case study[J]. Proceeding of the ICE-Water Management, 2015, 168(5): 210-219.
- [53] 戴文鸿, 吴书鑫, 张云, 等. 八卦洲汉道改善分流比工程措施研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 1-7. (DAI Wenhong, WU Shuxin, ZHANG Yun, et al. Preliminary studies on improvement measures to the diversion ratio of Nanjing Baguazhou branch[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 1-7. (in Chinese))
- [54] 徐锡荣, 唐洪武, 宗竞, 等. 长江南京河段护岸新技术探讨[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(4): 26-28. (XU Xirong, TANG Hongwu, ZONG Jin, et al. New technique for bank protection on Nanjing reach of Yangtze River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(4): 26-28. (in Chinese))
- [55] 唐洪武, 李福田, 肖洋, 等. 四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究[J]. 水运工程, 2002(9): 25-28. (TANG Hongwu, LI Futian, XIAO Yang, et al. Experimental study on effect of scour prevention and sedimentation promotion of bank protection of tetrahedron penetrating frame groups [J]. Port & Waterway Engineering, 2002(9): 25-28. (in Chinese))
- [56] 肖洋, 宋成成, 李开杰, 等. 赣江外洲站近 50 年水沙变化规律[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 126-130. (XIAO Yang, SONG Chengcheng, LI Kaijie, et al. Variation of runoff and sediment load at Waizhou hydrologic station in Ganjiang River in the last 50 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 126-130. (in Chinese))
- [57] 陈雄波, 唐洪武, 林军. 赣江南昌段东西河分流处河床演变与航道整治[J]. 人民长江, 2002, 33(4): 10-12. (CHEN Xiongbo, TANG Hongwu, LIN Jun. River bed evolution and navigation channel regulation for distributary stretch of the east and west rivers at Nanchang city downstream the main Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2002, 33(4): 10-12. (in Chinese))
- [58] 唐立模, 唐洪武, 周洪都, 等. 赣江东西河分流比影响因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 64-68. (TANG Limo, TANG Hongwu, ZHOU Hongdu, et al. Research on the effect factors of flow diversion ratio in Ganjiang River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 64-68. (in Chinese))
- [59] 陈界仁, 张婧, 罗春, 等. 赣江下游东西河分流比变化分析[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 40-42. (CHEN Jieren, ZHANG Jing, LUO Chun, et al. Analysis on diversion ratio for downstream of Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 40-42. (in Chinese))
- [60] 余雯, 陈界仁. 赣江南昌段东西河工程整治前后分流比变化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(3): 16-19. (YU Wen, CHEN Jieren. Research on diversion ratio of Nanchang reach of Ganjiang River after its regulation[J]. Yangtze River, 2012, 43(3): 16-19. (in Chinese))
- [61] ZHANG Wei, RUAN Xiaohong, ZHENG Jinhai, et al. Long-term change in tidal dynamics and its cause in the Pearl River

- Delta, China[J]. *Geomorphology*, 2010, 120(3/4): 209-223.
- [62] ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(1/2): 35-47.
- [63] 诸裕良,严以新,李瑞杰,等.河网海湾水动力联网数学模型[J].水科学进展, 2003, 14(2): 131-135. (ZHU Yuliang, YAN Yixin, LI Ruijie, et al. A coupled hydrodynamic numerical model for bay-river network[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(2): 131-135. (in Chinese))
- [64] 唐洪武,丁兵,杨明远.河口治导线放宽率的确定[J].水利学报, 2008, 39(1): 59-65. (TANG Hongwu, DING Bin, YANG Mingyuan. Determination of widening rate of estuarine regulation line[J]. *Shuili Xuebao*, 2008, 39(1): 59-65. (in Chinese))
- [65] 唐洪武,程健,谢凌峰,等.快速客船航行中吃水变化规律的试验研究[J].河海大学学报:自然科学版, 1997, 25(4): 100-104. (TAN Hongwu, CHENG Jian, XIE Lingfeng. Experimental study on changes of the draught of fast-speed catamarans [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 1997, 25(4): 100-104. (in Chinese))
- [66] 谢凌峰,程健,唐洪武.珠江三角洲快速客船内河航道开发研究[J].水运工程, 1997(9): 24-30. (XIE Lingfeng, CHENG Jian, TANG Hongwu. Study on waterway development for high-speed catamarans in Pearl River Delta[J]. *Port & Waterway Engineering*, 1997(9): 24-30. (in Chinese))
- [67] 董小雨,王玲玲,唐洪武,等.淮河入江水道水动力数值模拟研究[J].人民长江, 2015, 46(3): 14-17. (DONG Xiaoyu, WANG Lingling, TANG Hongwu, et al. Study of hydrodynamic numerical simulation of watercourse of Huaihe RivertoYangtze River[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(3): 14-17. (in Chinese))
- [68] 胡孜军,王玲玲,成高峰,等.三河闸泄流流态与进流纠偏数值研究[J].水利学报, 2011, 42(11): 1349-1353. (HU Zijun, WNAG Lingling, CHENG Gaofeng, et al. Numerical study on the inflow and rectification measures of the Sanhe Sluice[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1349-1353. (in Chinese))
- [69] 严忠民,周春天,阎文立,等.平原水闸泵站枢纽布置与整流措施研究[J].河海大学学报:自然科学版, 2000, 28(2): 50-53. (YAN Zhongmin, ZHOU Chuntian, YAN Wenli, et al. Study on the Layout of Combined Sluice-Pump Station Projects and Modification of Flow Pattern[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2000, 28(2): 50-53. (in Chinese))
- [70] 傅宗甫,顾美娟,严忠民.闸站合建枢纽导流墙体型及适宜长度[J].水利水电技术, 2011, 42(10): 128-131. (FU Zongfu, GU Meijuan, YAN Zhongmin. Shape and suitable length for guide wall of combined sluice-pump station project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(10): 128-131. (in Chinese))
- [71] 王海阳,傅宗甫.超低弗劳德数闸下消能试验[J].水利水电科技进展, 2007, 27(6): 73-76. (WANG Haiyang, FU Zongfu. Experiements on under sluice energy dissipation at ultra-low Froude number [J]. *Water Conservancy and Hydropower Engineering*, 2007, 27(6): 73-76. (in Chinese))
- [72] 傅宗甫,严忠民.新型浮体闸稳定性分析[J].水利学报, 2005, 36(8): 1014-1018. (FU Zongfu, YAN Zhongmin. Stability analysis on a new type of floating sluice[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(8): 1014-1018. (in Chinese))
- [73] CHEN Jun, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Hydrodynamic characteristics and sediment transport of a tidal river under influence of wading engineering groups[J]. *China Ocean Engineering*, 2013, 27(6): 829-842.
- [74] 陈珺,嵇敏,张洪记,等.甬江洪枯季水沙特性分析[J].水利水运工程学报.2012(10): 48-54. (CHEN Jun, JI Min, ZHANG Hongji, et al. Analysis of water and sediment characteristics during flood and low water period of Yong River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(10): 48-54. (in Chinese))
- [75] 陈珺,严文武,嵇敏,等.甬江建闸对闸下河段泥沙淤积影响研究[C]//河海大学.第八届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.南京:河海大学出版社, 2011: 51-56.
- [76] 河海大学水利水电学院.宁波甬江建闸关键技术问题研究[R].南京:河海大学, 2012.
- [77] 河海大学水利水电学院.椒(灵)江建闸专题研究[R].南京:河海大学, 2015.