

河道型水库洪水演进研究进展及存在的问题

芦云峰

(长江科学院 空间信息技术应用研究所, 武汉 430010)

摘要:河道型水库调度需要综合考虑入库洪水、人工调控和库区河道地形等因素对洪水演进传播过程的影响。通过分析总结河道型水库洪水波特征和动库容特性方面的研究成果,明确了河道型水库需要采用水文水力模型耦合方法进行动库容调洪,但需要关注人工调控对坝址水位流量关系的干扰。随后分析总结了水库河道糙率特性方面的研究,指出水库洪水演进计算需要考虑水流流动型态对糙率的影响。进一步总结了近坝区水流特性的现有成果,指出近坝区水流三维流动特征显著,把坝前区域断面作为边界条件,计算时可能会引起系统性误差,明确了今后应该深入开展人工调控对近坝区断面过流能力的影响和糙率率定方面的研究,以提高洪水演进模型精度。

关键词:河道型水库;洪水波;动库容;调洪方法;糙率;近坝区水流特性;洪水演进

中图分类号:TV697.11

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2019)10-0122-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flood Routing in River-Reservoir System: Research Advances and Existing Problems

LU Yun-feng

(Spatial Information Technology Application Department, Yangtze River Scientific Research Institute,
Wuhan 430010, China)

Abstract: In the scheduling of river-type reservoir, the impact of inflow flood, artificial regulation, and river basin topography on the flood routing process should be considered. By summarizing the research findings of flood wave features and dynamic reservoir capacity, we made it clear that the scheduling of river-type reservoir should be accomplished by coupling hydrologic and hydrodynamic models, and meanwhile that attention should be paid to the disturbance of artificial scheduling on the stage-discharge relation at dam site. We summarized that the effect of water flow structure on riverbed roughness should be taken into consideration in the calculation of reservoir flood routing. Furthermore, we reviewed the research achievements up to now of the flow characteristics near dam and pointed out that the three-dimensional flow characteristics near dam are remarkable. Taking the cross-section near dam as the boundary condition may cause systematic errors in calculation. In order to improve the accuracy of flood routing model, in future we should conduct in-depth research on the influence of manual regulation on the conveyance capacity of the cross-section near dam and roughness calibration.

Key words: river-reservoir system; flood wave; dynamic storage; flood regulation method; roughness; flow characteristics near dam; flood routing

1 研究背景

河道型水库是调控水资源时空分布、优化水资源配置的重要工程措施,也是江河防洪工程体系的

重要组成部分。受坝前水位、出库流量和入库流量影响,河道型水库沿程水面线往往存在一定的附加比降,形成一个附加动库容的楔形水体。动库容对库区水面线及洪水演进影响较大^[1],在水库实时调度中,需要结合流域水雨情数据进行入库洪水预报,

分析洪水的形成和传播特性,预测洪水的形成和发展过程,并根据预报的结果,科学制定水库调度方案,合理调配水库来水量。这是有效发挥水库调蓄能力,充分发挥水库综合效益的关键。

本文拟通过总结河道型水库洪水演进问题研究现状,探讨现有研究的不足之处,为今后继续深入研究河道型水库洪水演进问题提供一些参考。

2 河道型水库洪水演进问题研究进展

自 20 世纪 60 年代以来,诸多专家学者围绕河道型水库洪水演进问题开展了大量的研究,并在大藤峡、水口、柘溪等水库开展了实践应用和试验研究^[2-4],取得了丰硕的成果。近 20 a 来,随着三峡、溪洛渡、向家坝等一批库容大、调节性能好的水库陆续建成,河道型水库洪水演进问题又成为研究热点,受到广泛关注。这些研究多聚焦于河道型水库洪水波特征、动库容特性、动库容调洪方法、水库中糙率分布及变化特性和近坝区水流特性等问题,并得到了一些非常有价值的结论。

2.1 洪水波特征分析

河道洪水演进的物理过程可以用圣维南方程组描述,对洪水波特征进行理论分析是建立合理的洪水演算方法的基础,洪水演算方法就是随着人们对洪水波特性的深入揭示而不断进步的^[5]。Ponce^[6]采用小扰动分析方法,基于圣维南方程组动量方程的各项对比关系进行洪水波分类,通过忽略动量方程中的部分项,得到了圣维南方程组的各种简化形式,即运动波、扩散波、准恒定动力波、惯性波和动力波。简化的洪水波模型也能够较好地描述洪水波的演进过程,运动波方程适合于模拟坡面流和缓慢上涨的洪水波,扩散波方程适合于天然河道缓流的模拟,惯性波方程被应用于惯性项起主要作用的洪水波演进^[7]。

徐正凡^[8]采用理论分析和水槽试验,研究发现:河道型水库洪水波不属于弹性波,闸门启闭不会从根本上改变洪水波的传播特性,仍然属于重力波范畴,可以看作明渠非恒定流进行模拟;在平水区,当通过人工调控长时间维持坝前水位微小变动时,可能会发生波的共振现象,在震荡过程中,长距离河段水位同升同降。Tsai 等^[9]采用小扰动分析方法研究了不同类型水面线的洪水波对流加速或减速对洪水波传播机制的影响,从水体黏性和河道阻力作用、重力作用、波的传播和衰减机制、回水效应在波的传输过程中的作用等方面,分析了存在回水效应下的洪水波动力特

性,认为采用完全圣维南方程组形式的动力波方程可以更好地模拟河道型水库洪水波的传播过程。武周虎等^[10]通过水槽试验分析了安康水库洪水波传播特性,发现洪水波在水库中的传播速度主要受惯性波速控制,洪水波传播时间与水库平水区水深及回水末端以下的河道长度有关。陈力等^[11]基于 MIKE11 模拟分析了三峡库区内不同库段在多种来水条件下的洪水波特性以及变化规律。

2.2 河道型水库动库容特性

河道型水库库区水面线存在一定的比降,形成一个附加动库容的楔形水体,动库容大小直接与水面比降相关,受坝前水位、出库流量和入库流量影响呈动态变化,水库总库容与坝前水位不再具有单一关系。

袁秀娟等^[4]系统性地总结了不同坝前水位、出库流量和入库流量条件组合下的河道型水库动库容特性,并进一步指出:动库容的大小及沿程分布还与库区地形有很大关系,对于库尾地形开阔的水库,动库容所占比重往往较大;涨水时动库容增大,部分洪水作为动库容滞蓄在库尾或库中部;退水时,受入库流量减小影响,动库容逐渐向坝前移动,库水位上升,动库容减少,原滞蓄在水库后部的水量逐渐向坝前转移。

基于对三峡水库动库容特性的分析,张俊等^[12]认为在枯水期,三峡水库动库容所占比重较小,采用常规静库容调洪演算方法制定调度方案是可行的;而在洪水期,三峡水库动库容所占比重较大,要提高水库演算的精度,需要考虑解决水库的动库容影响。周建军等^[13]通过分析三峡水库动库容特征发现:短期调度或大流量泄流时改变坝前水位不能带动离坝较远的库区水位变化,在短期内降低坝前水位需要的弃水量远小于相应的静态库容。利用坝前水位变化的灵敏性,采用动态汛限水位调度方法,根据未来洪水预报的情况,适时地调整汛限水位,有利于提高三峡防洪能力和发电效益^[14]。

2.3 动库容调洪方法

河道型水库的调洪演算需要考虑动库容影响,动库容调洪演算方法一般可分为以下 2 类:对动量方程进行概化处理的简化非恒定流计算方法(以下称简化方法)和采用水力学模型的非恒定流计算方法。

简化方法依据对动库容曲线的处理方式不同,又可分为化算流量法^[15-16]和沿程分段变量流法^[4]两类。简化方法是 20 世纪 70—80 年代主要使用的方法,简单易行,但精度有限。

当前河道型水库汛期调度主要采用水文预报模

型和一维水动力模型耦合方法进行洪水演进计算制定调度方案^[17]。入库洪水预报模型为水动力学模型提供水库周边汇入水流边界条件,水动力学模型结合历史洪水过程对区间入流量进行反演,为洪水预报模型提供模型精度评估和参数调整依据^[18-19],二者之间存在密不可分的耦合关系。水动力学模型的模拟精度直接受边界条件制约,入库洪水预报尤其是区间入流的预报精度也直接制约着各种调度方案下水动力学模型的精度,提高水动力学模型的模拟精度可以直接改善水文水动力耦合模型的精度。

李光炽等^[20]提出附加调蓄量的概念,采用附加滩地断面积的方法模拟附加调蓄量,使河道水流系统的蓄量等价于水库的实际蓄量,并通过反演方法确定区间入流过程,采用具有附加滩地的河道水流系统模拟水库调洪系统,在水口水库的洪水演进模拟中得到成功应用。

左广巍^[21]在清江隔河岩水库洪水演进计算中,发现对于人为干扰较大的河道(如库区的河道),其流量与水位往往不是单值对应关系(如大坝处的流量除与水位有关外,还与闸门的开度情况有关),当对库区河道进行演算时,需要根据演算时刻的闸门情况计算水位-流量关系,即把流量-水位关系作为动态变化的关系进行处理。王妮等^[22]在考虑中下游地区洪水易受变动回水顶托影响的基础上,提出了动态处理水位流量关系下边界的方法,在资水流域水动力洪水预报模型中的应用表明,该方法预报精度较高。

2.4 水库中糙率分布及变化特性

在明渠水流的水力计算中,糙率系数是一个非常重要且敏感的参数。明渠糙率系数不仅表征壁面粗糙程度,还受流量、水深等水力要素及其他水流特性的影响,是一个综合水力摩阻系数^[23-25]。对于均匀流,何建京^[26]的试验研究表明,在一定底坡下,糙率系数随水深、流量以及断面平均流速的增加而减小,而对于不同的底坡,糙率系数与水深的关系是不同的。Nirjharini^[27]对复式断面糙率进行了试验研究,研究表明水流漫滩后,滩地的糙率随着水深的增大而增大,综合糙率随着滩槽糙率比值的增大而增大。

河道型水库中水流为 M1 型水面线明渠非均匀缓流,其水深沿程变化,水力特性不同于均匀流的水力特性,糙率的变化规律也有所不同。Simons 等^[28]和 Hey^[29]研究了大尺度粗糙明渠的阻力特性,比较了大尺度粗糙壁面和光滑壁面阻力系数的不同计算方法,发现:在相同底坡、相同流量条件下,大尺度颗

粒层在空隙间可流水工况与空隙被细小沙子填满情况下具有完全不同的流动特性。前者水深是后者水深的 2 倍,相应地,前者的断面平均流速是后者的断面平均流速的一半,两者的糙率系数相差近一倍。这一现象表明水流流动型态对曼宁糙率系数也有较大影响。Depue 等^[30]通过水槽试验,研究了回水曲线对曼宁糙率系数的影响,试验结果显示,在发生 M1 型水面线的非均匀流时,糙率系数的相对变化量达到 23%。何建京等^[31]通过对 M1 型水面线中非均匀流糙率系数的研究,得出非均匀流糙率系数随水深、水力坡度的增大而增大的规律,拟合得到了相对糙率系数与相对水深及相对水力坡度之间的经验关系,提出了 2 步计算糙率的方法。张小峰等^[32]采用数值模拟的方法对光滑壁面明渠非均匀流糙率进行了研究,发现壅水情况下,非均匀流能量损失沿程减小,但糙率系数却是沿程增大的;然后根据数值计算结果,拟合得到了较为实用的壅水情况下明渠非均匀流糙率的计算式,并通过算例表明,采用非均匀流糙率进行水库回水水面线计算是必要的。纪诗闻^[33]采用数值模拟的方法,利用 FLUENT 中提供的三维标准湍流 $k-\epsilon$ 模型,研究了弗劳德数、渠底坡度、宽深比等水力要素对明渠均匀流糙率系数的影响,以及非均匀流糙率系数随相对水深的变化规律,发现:明渠非均匀流糙率系数受沿程断面水深的影响,雍水时糙率系数会随沿程断面水深的增加而增大,相对糙率系数与相对水深之间呈幂函数相关。

2.5 河道型水库近坝区水流特性

河道型水库坝前水位和出库流量是水库实时调度中非常重要的决策指标。在洪水演进模拟中,坝前区域断面常被作为内边界或直接被作为下边界条件使用,因此,河道型水库近坝区水流特性在洪水演进研究中应该受到重点关注。

近坝区水流受复杂地形边界、大坝雍水和水库调度运行影响,水流结构复杂多变,三维流特征显著^[34]。多年来开展的模型试验和数值模拟研究成果对河道型水库近坝区的水流特性有了一定的了解,得到了一些有价值的认识,主要内容可概括如下:①水流进入库区宽阔水域后,受大坝孔口泄流牵引形成一定范围的主流区^[35],在邻近坝前段,主流区逐渐从四周向孔口区域收缩,由明渠流过渡为孔口出流,该河段被称为冲刷漏斗区^[36];在孔口顶至自由水面存在一定范围的横轴环流结构,冲刷漏斗区的近底水流受底坡坡降引起的流场分离影响,可能存在一定范围的底涡^[37-38]。②主流区以外的范围受复杂地形边界和大坝雍水影响形成较大范围的

滞流区和回流区^[34]。③主流区与邻近范围的各种环流结构之间存在流速梯度相对较大的剪切掺混层,不停地进行着水体质量、动量和能量的交换。④水流运动受大坝机组闸门启闭影响,呈现显著的非恒定性^[39]。

3 存在的问题及展望

3.1 水库调度对近坝区水流结构和断面过流能力的影响

一般水库坝前区域水深较大,从数值量级上看,较小的水位变幅往往对应着较大的流量变幅,分析坝前水位流量关系会发现:同一水位值往往对应多个流量值,反之亦然,这种复杂动态变化的水位流量关系反映了人工调控对库区洪水传播造成的影响。在明渠缓流数值模型中,下边界条件起着控制断面的重要作用。在水库实时调度过程中,由于要考虑下游防洪控制点对出库流量的约束,有时必须按指定出库流量过程进行控制,这时上下边界条件均为流量过程,在这种工况下,虽然模型预测水位与实测水位过程相位较接近,但是随着预测时段的延长,模拟坝前水位与实测坝前水位偏差一直较大^[18,21,40]。当前河道型水库调度方案的制定多借助水文水动力耦合的洪水演进模型计算,坝前区域断面被作为内边界或直接被作为下边界条件使用,这种模型概化方式忽略了坝前区域水流从明渠流向孔口出流过渡的特性,把出库流量作为下边界流量来推算坝前水位,可能会引起系统性误差,进而导致坝前水位预测的错判。

近年来,围绕河道型水库近坝区泥沙淤积问题、水温分层问题和水质问题开展了很多研究,但是不同水位与出库流量条件下,河道型水库近坝区水流结构和横断面过流能力变化规律尚有待深入研究。

随着现代测流技术的发展,采用声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)的测流技术已经在长江口^[41]、水库雍水区^[42-43]、大型深水库^[44]等复杂的天然水域得到成功应用。搭载 ADCP 测流速、多波束测水下地形等多种测量设备的智能控制测量无人船也已研发成功,并可在大型船只无法到达的水域或危险水域开展测量工作^[45],该设备为开展汛期水库近坝区主流区水流测速提供了必要的技术支撑。随着计算机技术和三维紊流数值模拟软件技术的发展,一些专家学者已开始采用三维紊流数值模型研究天然河道水动力学问题,并用于解决一些实际工程问题^[38,41,46-47]。

水库运行调度受调度规程、调度目标和来水条

件的约束,在一定来水条件下,为达到特定的调度目标制定出库流量过程,按照调度规程和机组闸门工况拟定机组和闸门开启个数和时长。对于一个运行多年的水库来说,积累了大量的历史运行调度数据资料,从中可以总结出特定来水条件和调度目标下的典型水库调度模式,研究这些典型水库调度模式下水库近坝区水流特性,总结断面过流能力变化规律,有助于提高洪水演进模型模拟预测精度。

3.2 库区糙率率定问题

河道型水库回水区水流属于雍水下的非均匀缓流,糙率系数与天然河道的糙率系数不同,雍水下的非均匀流能量损失沿程减小,但糙率系数却是沿程增大的,如何确定断面各分区局部阻力系数随水深变化规律是将来要解决的另一个关键问题。

目前,河道糙率一般采用实测水文资料进行推算。随着空间信息技术的发展,遥感在内陆地表水监测中开始日益发挥其重要的作用,所获取的不同时间和空间分辨率的可用数据日趋丰富,数据精度也有望得到较大幅度的提升^[48]。通过遥感获取的数据为空间信息密集的面域数据,它可有效地验证水流在空间上的分布特征,可以用于糙率参数的率定^[49-50]。利用无人机群可得到较短时间间隔的近坝区高分辨率(厘米级)的正射遥感影像,提取影像水面范围可用于模型糙率参数率定,这将为库区河道糙率推算提供一种新的数据源。

4 结 语

河道型水库在流域防洪工程体系中具有重要作用,通过总结分析国内外在河道型水库洪水演进问题研究中所取得的重要成果,讨论了现有研究的不足之处,提出了在相关领域需要进一步研究的关键问题,为以后继续深入研究河道型水库洪水演进问题提供参考。

参考文献:

- [1] 仲志余,李文俊,安有贵. 三峡水库动库容研究及防洪能力分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 36-38.
- [2] 唐友一,刘一辛. 《入库洪水及库区洪水演进》专题讨论会在长沙召开[J]. 水文, 1986, 6(2): 63.
- [3] 郭一兵,杨远东. 入库洪水分析及计算[J]. 人民长江, 1980, 11(5): 56-63.
- [4] 袁秀娟,欧玉英. 对动库调洪若干问题的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1987(5): 84-93.
- [5] 芮孝芳,姜广斌. 洪水演算理论与计算方法的若干进展与评论[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 78-84.
- [6] PONCE V M. Shallow Wave Propagation in Open Chan-

- nel Flow[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1977, 103(12):1461-1476.
- [7] TSAI C W S. Applicability of Approximate Flood Wave Models to Unsteady Flow Modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(8): 613-627.
- [8] 徐正凡. 论水库中洪水波的传播特性[J]. 人民长江, 1987(9):15-20.
- [9] TSAI C W S. YEN B C. Linear Analysis of Shallow Water Wave Propagation in Open Channels[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(5): 459-472.
- [10] 武周虎, 张宗孝. 安康水库洪水传播特性水槽试验研究[J]. 水利学报, 1997(5):7-14.
- [11] 陈力, 段唯鑫. 三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析[J]. 水文, 2014, 34(1):30-34.
- [12] 张俊, 闵要武, 陈新国. 三峡水库动库容特性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(6):90-93.
- [13] 周建军, 程根伟, 袁杰, 等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用: 1. 库水位调控制的灵敏性[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1):163-167.
- [14] 周建军, 程根伟, 袁杰, 等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用: 2. 动态汛限水位调度方法[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1):168-173.
- [15] 李瑞琼. 水库动库容调洪计算—化算流量法的探讨[J]. 人民长江, 1981, 12(6):70-75.
- [16] 刘其发. 水库调洪化算流量法中权系数的确定[J]. 人民长江, 1999, 30(3):35-36, 41.
- [17] 郭延祥, 金勇. 水文水动力学耦合模型在三峡梯级调度中的应用[J]. 人民长江, 2010, 41(7):15-18.
- [18] 吴天蛟. 三峡区间入流对库区洪水影响研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [19] 闵要武, 王俊, 陈力. 三峡水库入库流量计算及调洪演算方法探讨[J]. 人民长江, 2011, 42(6):49-52.
- [20] 李光炽, 周晶晏. 河道型水库动库容分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(5):13-15, 71.
- [21] 左广巍. 河道洪水演算方法的研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2004.
- [22] 王妮, 王船海, 杜世鹏, 等. 基于动态水位流量关系的水动力洪水预报模型研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4):68-72.
- [23] 李榕. 关于影响曼宁粗糙系数 n 值的水力因素探讨[J]. 水利学报, 1989(12):62-66.
- [24] 惠遇甲, 胡春宏. 矩形明槽宽深比和边壁糙率对于流速分布和阻力影响的实验研究[J]. 水科学进展, 1991, 2(1):22-31.
- [25] 万兆惠, 华景生. 引黄渠道的糙率[J]. 泥沙研究, 1990(1):47-54.
- [26] 何建京. 明渠非均匀流糙率系数及水力特性研究[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [27] NIRJHARINI S. Effect of Differential Roughness on Flow Characteristics in a Compound Open Channel[D]. India: National Institute of Technology, Rourkela, 2012.
- [28] SIMONS D B, LI R M, ALSHAIKHALI K S. Flow Resistance in Cobble and Boulder Riverbeds[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(5):477-488.
- [29] HEY R D. Flow Resistance in Gravel-bed rivers[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(5):365-379.
- [30] DEPUE P M, SOONG T W. The Effects of Water Surface Profiles on Manning's Roughness Coefficient[C]//ASCE. North American Water & Environment Congress. Anaheim, California, United States, June 22-28, 1996: 21-29.
- [31] 何建京, 王惠民. 流动型态对曼宁糙率系数的影响研究[J]. 水文, 2002, 22(6):22-24.
- [32] 张小峰, 杨雯婷, 陈建良, 等. 壅水情况下非均匀流糙率系数研究[J]. 泥沙研究, 2014(5):65-72.
- [33] 纪诗闻. 水力因素对明渠糙率影响的三维数值模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [34] 假冬冬, 邵学军, 张幸农, 等. 三峡水库蓄水初期近坝区淤积形态成因初步分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(4):539-545.
- [35] 李志勤. 水库水动力学特性及污染物运动研究与应用[D]. 成都:四川大学, 2005.
- [36] 万兆惠. 峡谷水电站排沙底孔的作用及其计算[J]. 泥沙研究, 1986(4):64-72.
- [37] 金腊华. 有压进水口前冲刷漏斗形态与水流运动特性的研究[D]. 武汉:武汉水利电力学院, 1990.
- [38] 胡德超. 三维水沙运动及河床变形数学模型研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [39] 张华庆, 金生. 回流区水流运动三维数值模拟[J]. 水道港口, 2004, 25(2):64-68.
- [40] 闵要武, 陈忠贤. MIKE11 模型在长江三峡水库预报调度中的应用[C]//第四届亚太地区 DHI 软件技术论坛. 上海:丹华水利环境技术(上海)有限公司, 2006:95-100.
- [41] 于东生. 基于 ADCP 的长江口水沙运动分析及三维水流数学模型[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [42] 徐珊珊, 冯弋珉, 孔斌. 受壅水影响的二水文站两种 ADCP 流速比测分析[J]. 江西水利科技, 2018, 44(4):270-274.
- [43] 肖林. 组合式流量在线监测系统在变动回水断面的应用[J]. 水文, 2018, 38(3):69-72, 61.
- [44] 陆宝宏, 祁昌军, 胡震云, 等. 大型深水库流速比测方法研究及比测结果相关性分析[J]. 水利学报, 2007(增刊1):360-364.
- [45] 徐平, 赵登忠, 许继军, 等. 长江科学院圆满完成 2015 年江源科学考察[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9):2.
- [46] 陆永军, 窦国仁, 韩龙喜, 等. 三维紊流悬沙数学模型及应用[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2004, 34(3):311-328.
- [47] 陆俊卿, 张小峰, 董炳江, 等. 水库冲刷漏斗三维数学模型及其应用研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(6):43-50.
- [48] ALSDORF D, MOGNARD N, RODRIGUEZ E. WatER: The Proposed Water Elevation Recovery Satellite Mission[C]//American Geophysical Union. AGU Fall Meeting Abstracts, California, USA, 2005:13-30.
- [49] 俞云利, 赖锡军. 二维平面非恒定流数学模型的遥感水位数据同化[J]. 水科学进展, 2008, 19(2):224-231.
- [50] SCHUMANN G, BATES P D, HORRITT M S, et al. Progress in Integration of Remote Sensing Derived Flood Extent and Stage Data and Hydraulic Models[J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(4):1-20.