第28卷第6期 水资源与水工程学报 Vol.28 No.6
2017年 12月 Journal of Water Resources & Water Engineering Dec.,2017

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.24

河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟研究进展

李春辉，徐国宾，苑希民，田福昌
（天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300350）

摘　要：基于目前河道与蓄滞洪区联合防洪过程中存在的问题，本文通过对河道与蓄滞洪区联合防洪过程中洪水演进数值模拟的一维模型、耦合模型、全二维模型的优缺点和适用性进行系统化的分析，揭示了未来防洪数值模拟的发展方向。研究结果可为洪水风险图绘制、洪水预警预报提供重要依据，对防洪减灾决策具有重要指导意义。

关键词：河道；蓄滞洪区；联合防洪；洪水演进；数值模拟
中图分类号：TV131.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2017)06-0139-06

Research progress on numerical simulation of joint flood control in river and flood detention area

LI Chunhui, XU Guobin, YUAN Ximin, TIAN Fuchang
(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300350, *China*)

Abstract: Based on the existing problems in the process of flood control in the river and flood detention areas, this paper conducts a systematic analysis of the advantages, disadvantages and applicability of the one-dimensional model, the coupling model and the two-dimensional model of the numerical simulation of the flood control in the flood control process, and reveals the future development of numerical simulation of flood control. The results can provide important basis for flood risk mapping and flood warning and forecasting, which is of great significance to the decision of flood control and disaster reduction.

Key words: river channel; flood detention area; joint flood control; flood evolution; numerical simulation

水利部最新修订的国家蓄滞洪区名录中显示，我国现有蓄滞洪区98处，其中长江流域44处，海河流域28处，淮河流域21处，黄河流域2处，松花江流域2处，珠江流域1处[1]。大洪水爆发后，当洪峰流量超过河段的安全泄量时，合理地启用蓄滞洪区，能够有效地削减洪峰，减轻河道的行洪压力，延缓洪水到达下游城市的时间，从而减小河道洪水的影响及淹没损失。由于中国洪涝灾害频发，河道防洪能力有限，这些蓄滞洪区作为流域防洪减灾体系中的重要组成部分，在防御历次流域大洪水中都发挥了不可替代的作用，是流域防洪减灾的重要手段[2-6]。因此，在防洪过程中对河道与蓄滞洪区进行联合调度是非常必要的。

洪水演进的数值模拟是河道与蓄滞洪区联合防洪中非工程措施的重要组成部分，也是绘制洪水风险图、洪水预警预报等的重要依据[7-11]。数值模拟可以实现对洪水演进的实时模拟，并获得淹没面积、淹没水深、洪水到达时间、最大流速、淹没历时等信息，进而选择合理的洪水调度方案，确定蓄滞洪区的使用时机和相应的分洪量，正确引导洪水，帮助居民防洪避险，为防洪减灾提供决策支持并最大限度地减少洪灾损失[12]。目前蓄滞洪区洪水演进计算的主要模型有水文模型和水力学模型，其中水文模型包括经验性河道演进模型、滞后演算模型、马斯京根模型和脉冲与修正脉冲演算预报[8]；水力学洪水演进模型包括水面曲线模型、一维圣维南方程组模型和二维圣维南方程组模型。水力学模型可得到较多的信息，如淹没范围、水深、持续时间、流速上涨速率以及推进速度等。其数值计算方法有有限差分法、有限元法、有限体积法等，是蓄滞洪区洪水演进数值模拟常用的模型[13]。

随着计算机技术和数值模拟的发展，流域河网

收稿日期：2017-07-08；　**修回日期**：2017-08-21
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0405601)；高等学校学科创新引智计划项目(B14012)
作者简介：李春辉(1992-)，女，辽宁朝阳人，在读硕士研究生，研究方向为水动力及其数值模拟。
通讯作者：徐国宾(1956-)，男，河北石家庄人，博士，教授，博士生导师，研究方向为河流动力学及河床演变。

水流数值模拟的一维模型已经有大量的研究,技术趋于成熟,一、二维耦合模型也有较多研究,同时对全二维的水流数值模拟也提出了新的要求。本文主要总结了河道与蓄滞洪区联合防洪中洪水演进数值模型的发展历程,分析了一维模型、耦合模型、全二维模型的优缺点和适用性,并根据目前存在的问题和不足提出了未来洪水演进数值模拟的发展方向。

1 河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟的一维模型研究

大多数地区河网交错复杂,覆盖范围较大。合理地进行河道概化,并采用数值方法进行模拟,是河网计算中最常用的方法。由于蓄洪区主要起分洪作用,内部流速较小,水面几乎没有比降,在全一维的河网模型中,可当做汊点处理。基于此,王船海等[14](1995)利用水量平衡原理模拟了只起蓄洪作用的蓄洪区,将其概化为零维模型并纳入到一维河网中,对淮河下游流域进行了洪水还原计算;何用等[15](2005)将干流河道和行洪区都简化为河道型河段,二者通过堰流型河段相连,并将蓄洪区概化为汊点,建立了淮河中游行蓄洪区洪水调度的全一维水动力模型,较好地模拟行蓄洪区的洪水演进;于丽丽[16](2005)采用一维非恒定流模型中的节点-河道模型研究了天津市北系河网中黄庄洼、大黄铺洼、西七里海和淀北分洪区4个蓄滞洪区在几种不同上游来水工况下的蓄水情况;刘云等[17]和李义天[18-19](2010)在研究洞庭湖分蓄洪区的调度运用时也将蓄滞洪区概化为河网中可以蓄水的汊点,并将其纳入河网中形成蓄滞洪区洪水调度模型,成功将河网方程转化为只含有水位增量的汊点方程组;除将蓄洪区概化为汊点的方法外,Jang等[20](2016)运用一维的HEC-RAS水力模型模拟了溃坝水流在河道及周围泛区的洪水演进过程,并成功预测了溃坝水流的持续时间。

基于以上的研究,采用一维模型具有计算速度较快、可节省大量时间、计算稳定、精度高和可靠性强等特点,可以较快计算复杂的大型河网,但是由于其忽略了水流垂向和横向的变化,因此无法模拟出二维漫流的情境,对水流形态变化明显的行洪区是不适用的,所以对全一维模型的应用较少。而且蓄滞洪区的运用规则是非常复杂的,由于行洪前行洪区内多为干河床,在洪水演进的模拟中,需考虑行洪前后是否将其纳入计算范围,那么就需要改变汊点的数目和删减河段,从而改变了河网结构,增加了模拟的复杂性;如果直接将所有蓄滞洪区都纳入到河网结构中,就必须进行一定的处理。因此,河道与蓄滞洪区联合防洪中洪水演进数值模拟的一维河网结构模型的适用性具有很大的局限性。

2 河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟的一、二维耦合模型研究

由于蓄滞洪区面积比较大,水平空间尺度远大于垂直空间尺度,水流的运动已具有二维性质,一维模型不能满足计算要求,故采用二维模型更为合理。河道与蓄滞洪区通过堰闸、口门和漫溃堤进行连接,这种一、二维耦合的模型可以突出对河道与蓄滞洪区之间水流连接及水量交换的描述,但是在一、二维模型的连接处常发生水力条件不相容的情况,例如连接断面处水位流量不相等、时间步长的选取不一致。为了合理描述模型间的水力传递关系,针对河道与蓄滞洪区这种侧向联解的耦合方式,通常采用基于水位流量关系的耦合法和基于堰流公式的水量守恒法。

2.1 基于水位流量关系的耦合法

梅亚东等[21-22](1995-1996)将分洪道和泄洪道中的水流作为一维流处理,将蓄滞洪区划分为若干相互连通的蓄水单元并采用拟二维流模型来描述水流运动,通过水量平衡方程和水面线方程这两个相容条件实现了分洪道-调蓄区-泄洪道之间的水流连接,成功模拟了汉江下游杜家台分蓄洪区的洪水演进过程并得到验证;胡四一等[23](2002)采用隐式差分格式求解一维河网模块,有限体积格式求解二维湖泊系统(系统中包括长江下游的分蓄洪区),一、二维模型显式链接,对长江中下游河湖洪水演进进行了数值模拟,高精度的模拟结果证实了模型的合理性和有效性;赵明登等[24](2003)以河道一维洪水和洪泛区二维洪水为对象,将一维模型的计算结果作为二维模型的边界条件,进行了4种洪水频率下一、二维嵌套非恒定流的计算,实现了河道和洪泛区洪水演进的动态演示;徐祖信等[25](2004)、陈珺[26](2005)根据连接断面处水位、流量相等的条件,通过T字形过渡单元连接实现了一、二维模型的耦合,成功模拟了黄浦江流域洪水演进过程;李云等[27](2005)将淠河支流和颍河支流概化为一维水流数学模型,将淮河主干流及各行洪区概化为平面二维水流数学模型,并通过支流入淮河口处的水位与流量关系建立了一、二维洪水演进的嵌套数学模型;王晓玲等[28](2005)建立了由干流、支流和蓄滞

洪区组成的复杂河网一、二维洪水演进数值仿真模型,较好地模拟了永定河分洪区的洪水演进过程;Huang 等[29](2007)使用准二维建模方法,其中蓄滞洪区被表示为由一维河道相互连接的一组储水单元实现了一、二维模型的耦合,该方法仍在一维模型中计算动力波,但在二维计算单元中进行离散,更好地表示了圩区内的水流运动,减少了额外的数据预处理和计算时间;Förster 等[30-31](2008)应用了一种完全动态的 1D-2D 耦合模型,用于模拟蓄滞洪区的运行机制;李大鸣等[32-34](2009-2011)将一、二维的河道模型嵌套于二维蓄滞洪区中,将水位相等、流量连续的传递关系作为衔接处的边界条件,实现了大清河五洼滞洪区的实时洪水调度分析;刘薇等[35](2010)利用在一、二维模型的链接断面处节点的流量守恒条件,实现了一维和二维模型的耦合;王智勇等[36](2011)基于链接断面处水位、流量相等的条件建立了一、二维耦合的河湖系统整体水动力模型,并对耦合边界处水位进行预测和矫正,该模型在洞庭湖水流数值模拟中得到较好的应用;Vorogushyn 等[37](2012)采用一维河道-溃堤-二维洪泛区模型实现了溃堤洪水在蓄滞洪区内的演进模拟,这 3 个模型交互耦合的并嵌入到蒙特卡罗模拟框架中处理洪水水位变化和溃堤的随机过程,对德国 Elbe 河蓄滞洪区内的洪灾损失作出评估;徐林春等[38](2012)以溃口作为链接点,且计算出每时刻链接点处的水位和流量作为内边界条件,实现了一维河道和二维淹没区的耦合计算;付成威等[39](2013)通过对耦合节点处的水位流量关系进行耦合,建立了一、二维实时动态耦合模型,模拟了谷堆圩蓄滞洪区溃堤洪水的演进情况;Liu Qiang 等[40](2015)通过计算河道的流量,并将其作为蓄滞洪区的边界条件,有效地建立了一维-二维耦合模型,该模型能够较好地反映出耦合链接处的水力条件,并得到较好验证。

2.2　基于堰流公式的水量守恒法

王船海等[14](1995)采用一维水流方程模拟河道水流,采用二维浅水运动方程来模拟行洪区水流,并通过堰流公式将一、二维模型进行耦合,该模型在淮河中下游段的洪水还原计算中得到了较好的结果;范子武等[41](2000)采用宽顶堰公式模拟河槽内外的水流交换,成功建立了河道与蓄滞洪区联合防洪的一、二维耦合模型;范玉[42](2006)基于堰流公式建立了河道与大清河滞洪区洪水演进的耦合模型;Lin Binliang 等[43](2007)运用 DLL(动态链接库)技术实现了一维河道模型和二维洪泛区模型的链接,分析了两种链接模式,侧向链接在河流中部通过堰流方式满溢到洪泛区,纵向链接是二维计算域链接在河道的末端,并成功验证了两种模式的可行性,与实际结果吻合良好;张大伟等[44](2010)采用 Preissmann 格式离散求解一维水流模型,基于非结构网格的 Roe 格式离散求解二维水流模型,在链接断面处采用宽顶堰流公式进行链接,建立了一、二维耦合模型来模拟松花江哈尔滨段松北分洪区的溃堤洪水,结果与实际吻合良好;姜晓明等[45](2012)基于黎曼近似解建立了溃堤洪水的一、二维耦合模型,并采用宽顶堰流公式计算溃口流量,对松花江干流和胖头泡蓄滞洪区的洪水淹没过程进行了模拟,验证了模型的稳定性与可靠性;刘海娇[46](2012)由宽顶堰堰流公式,通过交界面处的链接条件实现了一、二维模型的耦合,并模拟了谷堆圩保护区的洪水演进;陈文龙等[47](2014)通过宽顶堰流公式实现了一维河网模型和二维浅水模型的耦合,通过构造并求解黎曼问题,成功克服了堰流公式中流量系数不确定的问题,并采用时间步长自适应匹配方法,解决了一、二维模型时间步长不一致的困难;李大鸣等[48](2016)基于分洪口门处河道旁侧出流流量等于蓄滞洪区入流流量、由水位差确定堰流流量的衔接模式,成功将一维河道嵌套于二维分洪区中,模拟了永定河蓄滞洪区的洪水演进过程;苑希民等[49](2016)在耦合位置采用宽顶堰公式对一、二维模型进行链接,建立了珠江三角洲流域一维河网和二维保护区的耦合模型,在耦合链接处实现了河道和保护区内洪水实时交互,并分析了多溃口条件下洪水在防洪保护内的演进过程。

一、二维耦合模型可以突出对河道与蓄滞洪区之间水流衔接及水量交换的描述,发挥各自的优势,通过对两者内部链接关系进行耦合,既可以利用一维模型计算经济的优点,满足长时期、长河段计算要求,又发挥了二维模型能够细致模拟的特点,可以对重点区域进行细部研究,提高模拟精度和可靠性,具有更大的实用价值。

3　河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟的全二维模型研究

随着计算机技术的发展,人们对河道水流的模拟不再仅仅局限在一、二维模型。曾贤敏[50](2007)对河道二维水流模拟的高精度算法进行了研究,提出了利用外推、算子迭代和并行计算等方法来提高河道二维数值模拟的效率;王船海等[51](2007)、向

小华等[52](2008)借用一维河网求解水位节点方程组的思想,构建了流域型二维河网模拟河道洪水演进,计算结果与实际吻合良好;沈锐燕等[53](2013)通过加密网格、热启动等方法,对遂宁城区河段水流进行了二维数值模拟。这些研究都得到了精度较高的结果,能够满足实际工程的需要。

采用整个计算区域的全二维模型无疑会获得更好的模拟效果,因此很多学者考虑建立河道和蓄滞洪区洪水演进数值模拟的全二维水动力模型。田福昌[54](2014)将河道和蓄滞洪区作为两个独立的区域,通过堤防将其串联,建立了河道-泛区二维水动力动态耦合模型,模型中考虑了漫、溃堤处水流形态的复杂变化,弥补了一、二维耦合模型的不足,在黄河宁夏段、内蒙古段及下游防洪保护区漫滩洪水演进中得到很好地应用;苑希民等[55-56](2015)由全二维气相色谱理论提出了全二维的水动力模型的概念,建立了模拟河道和灌区洪水演进的漫溃堤洪水联算全二维水动力模型,该模型在河道和灌区的洪水耦合计算中精度较高;王秀杰等[57](2015)针对一、二维耦合模型只能实现固定时间步长内的水流定量交换的问题,建立了河道与防洪保护区的二维动态耦合(时间耦合、空间耦合、动态分流)模型,实现了宽浅河道与防洪区的无缝衔接,较好地模拟了水流流态的变化。

全二维模型适用于宽浅河道与蓄滞洪区的联合防洪数值模拟,用于河道与蓄滞洪区尺度相差较大的模型计算则不经济。可通过加密网格提高计算精度,模拟效果良好,但计算量大、耗时长,对计算机CPU要求高,达不到实时预报的目的;且需要较高分辨率的地形数据支持,由于河道分叉口、溃口的模拟精度对整个计算范围至关重要,而二维模型难以模拟其复杂的水流状态,所以全二维的模型还需要进一步研究。

4 洪水演进数值模拟发展趋势

基于以上的研究可见,数值模拟已成为研究洪水演进的主要途径和方法,所以建立更加符合实际、满足工程需要、高效率高精度高保真的洪水演进计算模型,将为蓄滞洪区防洪减灾提供有效的支撑。虽然对该问题的研究已有大量的成果,但仍存在一些尚未解决的问题,未来的研究必然会朝着解决这些问题的方向发展。

4.1 洪水演进数值模拟的高精度和高效化

目前,水流数值模拟从一维发展到二维,从单一河道发展到河网、流域模拟,要求计算技术从单一计算单元向迭代、并行这些分布式计算发展,计算机架构也向超线程、多CPU、多核方向发展。未来开发出编程简单、计算省时且高效率、高精度的模型是主要的发展趋势。

4.2 河道与蓄滞洪区联合防洪优化调度规则的精细化

从数值模拟中获得精准的洪水风险信息,就可以制定更加精细的调度方案,从而合理地启用蓄滞洪区,确定最优调度规则,与河道进行联合防洪,使损失达到最小。

4.3 实时防洪决策的精准化

对洪水演进的数值模拟,需要大量的实测资料,但多数地区历史洪水实际淹没资料有限,甚至缺失,给模型的率定和验证都带来一定困难。未来可以考虑结合RS、GIS等技术,对缺少实测资料的蓄滞洪区,提供必要的支持资料,以获得更精准的洪水风险信息,为防洪决策提供支撑。

5 结 论

本文对河道与蓄滞洪区联合防洪过程中洪水演进数值模拟的一维模型、耦合模型、全二维模型的优缺点和适用性进行了系统化的分析,并根据目前的研究现状提出未来洪水演进数值模拟的发展趋势,得到如下结论:

(1)一维模型虽然计算速度快,但无法模拟二维漫流的情景,故应用较少;

(2)全二维模型计算精度高,但用于河道与蓄滞洪区尺度相差较大的模型计算则不经济,且耗时长,达不到实时预报的目的,也未得到广泛应用;

(3)一、二维耦合模型既可以利用一维模型计算经济的优点,满足长时期、长河段的计算要求,又发挥了二维模型能够细致模拟的特点,具有更大的实用价值。

数值模拟技术已成为目前研究洪水演进的主要手段,对模型的合理构建应结合研究区域的实际情况,以便提高计算效率,得到较好的模拟效果。本文的研究结果可为洪水风险图绘制、洪水预警预报等提供依据,对防洪减灾决策具有参考意义。

参考文献:

[1] 周 勇. 河南省蓄滞洪区和谐发展研究[D]. 郑州:郑州大学, 2011.

[2] 夏成宁. 淮河蓄滞洪区洪水风险分析的认识[J]. 中国

水利,2005(17):22 - 24.

[3] 陈爱萍, 徐 静. 国内蓄滞洪区研究文献综述[J]. 中国科技信息, 2009(22):22 - 23.

[4] 王章立. 浅谈蓄滞洪区在防洪减灾中的作用[J]. 水利管理技术,1998,18(4):13 - 16.

[5] 周静静,叶继业,张 华. 浅议白寺坡蓄滞洪区对卫河流域防洪安全的作用[J]. 建筑工程技术与设计,2014(19):666.

[6] 黄焕坤. 北江潖江蓄滞洪区与飞来峡水利枢纽蓄洪库区联合调度问题的研究[J]. 广东水利水电,2011(9):4 - 5 + 31.

[7] 肖玉红,李大鸣,白 玲,等. 蓄滞洪区洪水演进过程数值模拟及洪灾损失分析[J]. 中国农村水利水电,2012(12):143 - 147 + 149.

[8] 冯民权,周孝德,王克平. 蓄滞洪区洪水模拟研究综述[J]. 西北水力发电,2002,18(1):5 - 8 + 23.

[9] 刘树坤, 李小佩,李士功,等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟[J]. 水科学进展,1991,2(3):188 - 193.

[10] 王新宏,张 强,杨方社. Preissmann 隐式差分格式在渭河下游洪水演进计算中的应用[J]. 西北水力发电,2003,19(1):1 - 4.

[11] 徐祖信,卢士强. 平原感潮河网水动力模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2003,18(2):176 - 181.

[12] 谢作涛,张小峰,谈广鸣,等. 一维洪水演进数学模型研究及应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(1):69 - 72 + 99.

[13] 马治人. 国内外蓄滞洪区现状与特点[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(6):90 - 91.

[14] 王船海,李光炽. 行蓄洪区型流域洪水模拟[J]. 成都科技大学学报,1995(2):6 - 14.

[15] 何 用,李义天,要 威,等. 淮河中游行蓄洪区洪水调度水动力学模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2005,20(3):386 - 392.

[16] 于丽丽. 天津市北系河网洪水资源化蓄滞洪区蓄水研究[D]. 天津:天津大学,2005.

[17] 刘 云,李义天,谈广鸣,等. 蓄滞洪区洪水调度优化研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(7):22 - 25 + 30.

[18] 李义天. 洞庭湖分蓄洪区调度运用数学模型研究报告[R]. 武汉:武汉水利电力大学,1997.

[19] Li Yitian. A junctions group method for unsteady flow in multiply connected networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997 (3): 49 - 57.

[20] Jang S H, Jung S W. Flood routing simulation for dam failure time estimation[C]//International Conference on Systems and Informatics IEEE, 2012:167 - 169.

[21] 梅亚东,冯尚友. 蓄滞洪区利用与减灾研究[J]. 水科学进展,1995,6(2):145 - 149.

[22] 梅亚东,冯尚友. 蓄滞洪区洪水演进模拟[J]. 水利学报,1996(2):63 - 67 + 89.

[23] 胡四一,施 勇,王银堂,等. 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟[J]. 水科学进展,2002,13(3):278 - 286.

[24] 赵明登,张长江,童汉毅,等. 渭河下游河道及洪泛区洪水演进的数值仿真(Ⅱ) - 成果分析及可视化[J]. 武汉大学学报(工学版),2003,36(5):14 - 17.

[25] 徐祖信,尹海龙. 平原感潮河网地区一维、二维水动力耦合模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2004,19(6):744 - 752.

[26] 陈 珺. 蓄滞洪区水流数值模拟技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005.

[27] 李 云,范子武,吴时强,等. 大型行蓄洪区洪水演进数值模拟与三维可视化技术[J]. 水利学报,2005,36(10):1158 - 1164.

[28] 王晓玲,李明超,周潮洪,等. 复杂河网中洪水演进二维数值仿真及其应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2005,38(5):416 - 421.

[29] Huang S, Rauberg J, Apel H, et al. The effectiveness of polder systems on peak discharge capping of floods along the middle reaches of the Elbe River in Germany[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2007, 4(1):1391 - 1401.

[30] Förster S, Chatterjee C, Bronstert A. Hydrodynamic simulation of the operational management of a proposed flood emergency storage area at the Middle Elbe River[J]. River Research & Applications, 2008, 24(7):900 - 913.

[31] Förster S, Kuhlmann B, Lindenschmidt K E, et al. Assessing flood risk for a rural detention area[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences & Discussions, 2008, 8(2):311 - 322.

[32] 李大鸣,林 毅,徐亚男,等. 河道、滞洪区洪水演进数学模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2009,42(1):47 - 55.

[33] 李大鸣,林 毅,周志华. 蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在洼淀联合调度中的应用[J]. 中国工程科学,2010,12(3):82 - 89.

[34] 李大鸣,管永宽,李玲玲,等. 蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J]. 水利水运工程学报,2011(3):27 - 35.

[35] 刘 薇,彭新德,张小兵. 一、二维耦合水流数值模拟在防洪评价中的应用[J]. 中国水运(下半月),2010,10(6): 112 - 113.

[36] 王智勇,陈永灿,朱德军,等. 一维 - 二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J]. 水科学进展,2011,22(4):516 - 522.

[37] Vorogushyn S, Lindenschmidt K E, Kreibich H, et al. Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel - dike - floodplain sys-

tem along the river Elbe, Germany[J]. Journal of Hydrology, 2012,436－437(3):120－131.

[38] 徐林春,郑 泳,黄 东,等. 乐昌峡水利枢纽工程一、二维水流洪水演进数值模拟研究[J]. 广东水利水电, 2012 (1): 51－55.

[39] 付成威,苑希民,杨 敏. 实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用[J]. 水利水运工程学报,2013(5):32－38.

[40] Liu Qiang, Qin Yi, Zhang Yiang, et al. A coupled 1D－2D hydrodynamic model for flood simulation in flood detention basin[J]. Natural Hazards, 2015,75(2):1303－1325.

[41] 范子武, 姜树海. 蓄、滞洪区的洪水演进数值模拟与风险分析[J]. 水利水运工程学报, 2000(2):1－6.

[42] 范 玉. 河道、滞洪区一二维洪水演进数学模型的研究与应用[D]. 天津:天津大学, 2006.

[43] Lin Binliang, Falconer R A, Liang D. Linking one－ and two－dimensional models for free surface flows[J]. Water Management, 2007, 160(3):145－151.

[44] 张大伟,李丹勋,陈稚聪,等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用[J]. 水力发电学报,2010,29(2):149－154.

[45] 姜晓明,李丹勋,王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维－二维耦合数学模型[J]. 水科学进展,2012,23(2):214－221.

[46] 刘海娇. 基于一维、二维水力学耦合计算模型的洪水风险分析研究[D]. 天津:天津大学,2012.

[47] 陈文龙,宋利祥,邢领航,等. 一维－二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展,2014,25(6):848－855.

[48] 李大鸣,王志超,李杨杨,等. 驾驭式洪水演进模型在蓄滞洪区联合防洪中的研究与应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1084－1092.

[49] 苑希民,庞金龙,田福昌,等. 多溃口河网耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):128－135.

[50] 曾贤敏. 河道二维水流模拟高精度算法研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[51] 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.

[52] 向小华,苏长城,吴晓玲,等. 环状河道二维浅水流动的全隐数值求解方法[J]. 水科学进展. 2008,19(6):807－813.

[53] 沈锐燕, 周晓泉, 赵建兴. 复杂地形河道的二维数值模拟及问题处理[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 62－64.

[54] 田福昌. 河道－泛区二维水动力耦合数值模拟及其在洪水风险分析中的应用[D]. 天津:天津大学,2014.

[55] 苑希民,田福昌,王丽娜. 漫溃堤洪水联算全二维水动力模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(1):83－90.

[56] 苑希民,田福昌,冯国娜,等. 溃堤洪水的二维水动力模型及其应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):225－230.

[57] 王秀杰,王丽娜,田福昌,等. 基于时空动态耦合的漫滩、溃堤与防洪保护区洪水联算二维模型[J]. 自然灾害学报,2015,24(6):57－63.