

文章编号:1672-3031(2018)05-0362-11

防洪减灾研究进展

向立云^{1,2}, 张大伟^{1,2}, 何晓燕^{1,2}, 李娜^{1,2}, 刘舒^{1,2}, 孙东亚^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 中国水利水电科学研究院的防洪减灾系统化研究始于1990年代。30年来, 在跟踪国际相关科技发展前沿的同时, 结合中国实际和防洪减灾工作需求, 建立了洪水风险管理理论体系, 为中国防洪减灾策略的战略调整提供了理论支撑, 并持续开展了洪水分析、洪水预报、洪水调度、洪水损失评估、工程安全分析、情景分析、信息分析及表达、防洪决策支持等理论和方法研究, 开发了相应的技术、模型和产品, 不断推动其实际应用, 引领了中国防洪减灾领域科技的进步, 为中国防洪减灾事业的发展提供支撑与保障。

关键词: 防洪; 减灾; 研究进展

中图分类号: TV122

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.005

1 引言

1987年12月, 联合国大会通过决议, 将1990—2000年定为“国际减轻自然灾害十年(IDNDR)”, 旨在推进各成员国提高防灾减灾国家能力, 并加强国际合作, 协调一致, 努力减少发展中国家因自然灾害造成的生命财产损失、经济破坏和社会混乱。

中国水利水电科学研究院(以下简称“中国水科院”)积极响应“国际减灾十年”倡议, 1988年向水利部提出以中国水科院为实体, 组建“水利部减灾研究中心”, 为水利部“国际减灾十年”工作提供科技支撑的建议, 1990年水利部同意中国水科院成立“水利部减灾研究中心筹备处”开展相关工作。期间“筹备处”配合水利部科教司编制完成了《全国防洪科技发展规划(1990—2000)》, 1990年水利部筹资100万元, 由“筹备处”组织全国相关研究单位开展防洪减灾战略、洪水预报模型改进、洪水风险图编制、超标准洪水防御等方面的研究工作。

2001年中国水科院整合全院水旱灾害研究力量, 组建防洪减灾研究所。2002年, 为推动水利部减灾研究工作, 水利部决定以中国水科院为依托、中国水科院减灾研究所为实体成立“水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心”(以下简称减灾中心)。2013年, 水利史所、遥感所并入该中心, 减灾中心进入新的发展阶段。

2 防洪减灾宏观研究的发展

1991年江淮大水引发了中国水科院关于中国防洪减灾方略的较为全面的讨论, 1998年洪水将防洪减灾方略的研究进一步引向深入, 确立了以洪水风险管理理论为基石的防洪减灾宏观研究方法, 推动了水利部“由控制洪水向洪水管理转变”防洪减灾新思路的形成。

2.1 防洪减灾理念与方略 关于防洪减灾理念与方略研究主要集中在洪水与洪水灾害的特性、防洪标准、防洪减灾策略与政策等方面。

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502703); 国家自然科学基金项目(51509263); 中国水科院基本科研业务费项目(JZ0145B772017)

作者简介: 向立云(1962-), 男, 四川宜汉人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事洪水风险管理研究。

E-mail: xiangly@iwhr.com

2.1.1 洪水与洪水灾害的特性 在以往的概念中,多强调洪水为害的一面,实际上,洪水具有塑造洪泛平原、提供水资源、补充地下水、滋养耕地、维持生物多样性等功效,可见洪水有利害两重性,因此需要在防洪的同时,有意识地维持或发挥洪水兴利的特性^[1-3]。

洪水本身是一种自然现象,当其造成生命财产损失、危及人类健康、冲击正常的社会经济活动时则成为灾害,因此洪水灾害具有自然和社会“双重属性”^[4-5],由此可见,减轻洪水灾害应从工程防洪和调整社会以适应洪水两方面入手。“双重属性”对洪水灾害特性的揭示在一定程度上反映了“洪水风险”概念的本质。

随着技术的进步,人类曾一度认为可以通过工程措施消除洪水和洪水灾害。1990年代后,认识到防洪工程受自然、经济、安全、生态及洪涝转化等因素的制约,洪水灾害不可能消除的概念逐步成为社会共识^[1,6-7]。

2.1.2 防洪标准 1991年大水后,周魁一通过国内外比较或直观判断,认为中国流域和城市有必要进一步提高防洪标准^[8];1998年大水后,刘树坤基于中国经济实力、经济效益和流域整体防洪效果的分析,认为堤防防洪标准应根据流域防洪要求,明确保护对象,按其重要性确定^[9],程晓陶建议建设标准适度、功能合理、安全可靠的防洪工程体系,充分发挥水利工程体系的综合效益^[10]。2002年在中国水科院承担的《全国防洪规划》专题研究项目“防洪标准研究”中,向立云等进一步提出了基于洪水风险分析技术,通过洪水年期望损失减少值与防洪工程投入年费用的比较,确定适宜的流域、区域和局地防洪标准的方法^[11]。

2.1.3 防洪减灾策略与政策 在1990年代连续发生的几场大洪水(1991年江淮洪水,1996年长江洪水,1998年长江、嫩江、珠江洪水,1999年太湖洪水等)、国际减灾十年活动的推进以及对洪水、洪水灾害特性、洪水风险和防洪减灾措施认识深化的背景下,中国水科院相关研究人员意识到中国防洪减灾策略和政策已进入战略调整期。

刘树坤在分析中国以工程为主导的防洪策略得失的基础上,提出了以实现可持续发展为目标,综合考虑社会、经济、生态、环境、资源等因素,以流域为单元,推行洪水风险管理的防洪减灾策略^[12-14],认为强化和扩展流域管理机构的职能是实现全流域洪水风险管理的体制保障^[15],防洪减灾工作的重点应由农村向城市转移^[16]。周魁一认为中国防洪工程体系虽然规模不断扩大、标准逐步提高,但水灾损失依然增加的主要原因是社会经济发展,包括无序发展造成的,单一的工程措施难以应对,建议深入认识洪水灾害的“双重属性(自然属性与社会属性)”,将防洪减灾方针由工程防洪向工程与非工程措施相结合转变,重点发展非工程防洪措施,调整社会、适应洪水,同时建立与之相适应的法规体系、社会化减灾体系和防洪减灾领导体制^[8,11,17-19]。程晓陶建议,在深入细致把握中国各流域水系洪水风险特性与演变趋向的基础上,因地制宜,将工程与非工程措施有机地结合起来,以法律、行政、经济、科技、教育等非工程措施来推动更加有利于全局与长远利益、标准适度的工程措施,辅以风险分担与风险补偿政策,形成与洪水共存的治水方略^[10]。向立云在中国洪水灾害特性变化分析、洪水风险总体分析评价、洪水管理约束分析的基础上,提出了由控制洪水转向洪水管理的防洪减灾政策建议^[20-22],认为中国洪水管理策略的重点方向是维持现有防洪工程体系,强化洪水风险区管理,提升内涝尤其是城市内涝治理能力,推行山洪风险区划、规避山洪风险等^[23]。

上述策略与政策研究,为2003年水利部“由控制洪水向洪水管理转变”的防洪减灾新思路的提出提供了有力支撑。

2.2 洪水风险与洪水风险管理 风险指自然事件或人类活动可能造成的负面后果或损失,洪水风险指洪水事件对人类社会或人类生存环境可能造成的负面后果或损失^[23-25],可见洪水风险反映的是洪水为害的一面。构成洪水风险需具备三个要素,缺一不可:某区域有发生洪水的可能性、该区域内有暴露于洪水之中的承灾体(人、资产、人类活动、人类生存环境)和在洪水作用下承灾体会出现损伤、破坏或功能失常,常简称为危险性、暴露度和脆弱性^[26]。由于洪水为随机事件,因此通常采用期望损失和极端损失定量表达洪水风险的程度^[20,27]。

由构成洪水风险的三要素可见,洪水风险管理措施包括减少洪水发生可能性的措施,减少承灾

体暴露性的措施和降低承灾体脆弱性的措施,前者需改变洪水运动特性,基本为工程措施,后两者需改变、调整和引导人的行为,属于非工程措施^[28-29]。

洪水风险分析,即风险识别、风险评估(评估危险性、暴露度和脆弱性)和风险评价(什么是可接受风险),为解决洪水管理决策者的困境和难题,确定适宜的措施提供了有效的方法和手段。因此,洪水风险管理是指在洪水风险分析的基础上,政府以公平的方式,采取综合措施管理洪水和人的行为,改进效率,保障生命安全的过程^[23,25,28]。

3 防洪减灾技术发展

3.1 洪水分析方法与数学模型 中国水科院的洪水分析方法研究源起于林秉南先生^[30-31],自1980年代起,随着计算机技术的进步,洪水分析方法和洪水模拟数学模型进入快速发展阶段,刘树坤在国内率先开发了规则网格的二维洪水模拟模型,龚正赢、陆吉康等研究了溃坝洪水分析方法,开发了一维溃坝洪水模拟模型。1990年代,程晓陶等研发了无结构不规则网格二维水沙运动仿真模型,有效模拟出黄河下游洪水淤滩刷槽、滩槽水沙交换、洪峰传播变形的特征,达到国际领先水平^[32-34];同一时期开发完成了高含沙水流和多沙河流的数学模型^[35-37]。程晓陶、仇近卫、李娜、陆吉康等针对城市地貌、地物的特点做了相关的研究,相继发展和完善了原有模型^[38-40],在深圳、广州、北京、天津、上海等十多个城市应用^[41-42]。马建明和陆吉康研发了地形自适应的网格剖分技术^[43]。黄金池等开发完成了统一的二维溃坝洪水分析模型和堰塞坝漫顶溃决流量过程模拟模型,分析了相关参数的敏感性,并在丹江口、温泉水库等多个水库溃决案例中应用^[44-45]。张大伟等对上述模型进行升级改造,使其能用于多库连溃的洪水模拟中^[46]。以上模型针对不同模拟对象进行了适当的概化处理,在保证计算稳定性和计算效率的同时,又能满足良好的精度,在技术上处于同时期国内外相关模型的领先水平。

进入21世纪,数值算法的改进与计算机技术的快速发展,为精准、高效的洪水分析模拟提供了条件。在二维模型方面,采用完整的二维浅水方程组进行非结构离散,采用具有激波捕捉能力的高分辨率计算格式开发了新的二维模型,能够自动适应流态变化,捕捉激波,在溃坝、溃堤等洪水类型的模拟中具有独特的优势^[47-49]。张大伟等基于溃坝的物理模型试验,研发了一种具有物理机制的概念性溃口模型^[50]。在一维模型方面,使用高分辨率的计算格式开发完成能够进行激波捕捉的溃坝洪水分析模型^[51-52],不仅能应用到平原河网地区,也适用于坡度较陡峭的山丘区^[53]。在城市管网水流计算模型方面,对国际主流的SWMM模型进行了改造,使其便于与地表一维、二维模型耦合。为扩大模型的适用范围,完成了一维河网模型与二维模型的耦合,除较常使用的侧向耦合和垂向耦合外,还创新地提出了在二维网格边上直接进行一维计算的耦合方式,进一步提升整体的计算效率。相关模型达到了国际先进水平,并在全国范围内得到了广泛应用,经过了大量实践算例的检验^[54]。

3.2 洪水预报预警技术 中国水科院减灾中心自1990年代起,陆续开展了一系列洪水预报研究工作。中心依托全国山洪灾害防治项目,开展了山洪预警预报、风险指标确定、预警预报导则编制等研究,构建了覆盖全国范围的山洪预警预报指标体系。对于大江大河洪水预报,中心开展了江西省洪水预报的研究与应用,为洪水预报与水库调度双向耦合奠定了理论、方法和数据基础^[55]。针对中小河流和干旱半干旱流域洪水预报,中心基于概念性水文模型和经验方法开展了大量模型构建、参数率定和实时预报的研究与实践,在陕西省多个干旱半干旱流域率先实现了基于超渗产流和混合产流水文模型的洪水预报,取得了良好的应用效果^[56]。对于精细洪水预报,基于分布式水文模拟技术,构建了具有较强物理基础的分布式洪水预报模型^[57]。针对无资料地区洪水预报难题,利用遥感产品等多源数据,研发了基于水热平衡的新型分布式水文模型,为解决无资料地区洪水预报问题提供了全新的研究思路。对于模型参数率定方面,基于物理基础方法和最优化方法开展了模型参数先验估计与自动率定研究,显著提升了洪水预报模型的可靠性和精度^[58]。

高新技术跨学科交叉研究与应用方面,利用人工智能技术,开展了基于数据驱动模型的洪水预

报研究,具有精度高、灵活性好的优势。基于高性能CPU+GPU异构并行计算技术开展了水文模型模拟和参数率定加速方面的研究,相对传统CPU串行计算,并行软件取得了几十倍的加速效果,显著提升了计算效率^[59]。

3.3 洪水调度技术 洪水调度技术主要利用一系列相互具有水文、水力、水利联系的水库及相关工程设施(如堤防、滞洪区、分蓄洪区等)进行统一的协调调度,在保证防洪设施自身安全的前提下,提高流域整体防洪能力,尽量减轻流域洪水影响与损失^[60-61]。

中心先后以松花江、嫩江、淮河等流域以及广东、江西、河南、陕西、河北、湖南、辽宁、云南、北京、上海等省市的防洪工程体系为对象,开展了防洪联合调度算法与模型研究,并在此基础上,研发了基于CPU和GPU异构并行加速技术,将原有模型的计算速度提高到百倍以上^[62-63]。将下山搜索策略引入到粒子群智能算法中,提出了改进的粒子群算法并应用于水库群防洪优化调度模型求解中,为水库优化调度模型求解提供了新的途径;采用自适应遗传算法和广度变异模块相结合的分层收敛算法,应用于水库防洪调度中,在一定程度上避免了自适应遗传算法陷入局部最优的缺陷,实现了水库联合防洪优化调度^[64]。

在实际应用方面,针对赣江、抚河、信江、饶河、修河和鄱阳湖区(“五河一湖”),编制了洪水预报与防洪调度方案,研制了统一的洪水预报子系统与防洪调度子系统,开发了包括气象产品应用、实时汛情监视、洪灾评估、防汛管理及三维仿真等子系统的防汛辅助支持系统,实现了“五河一湖”的洪水预报调度与防汛辅助支持的全方位协同应用,作为全国第一个真正意义上的集预报、调度和辅助决策于一体的防汛决策支持系统已运行多个汛期^[65],全面提升了洪水调度技术水平;在调度展示方面,建立了三维场景构建、仿真模型和三维高程分层设色图,实现了流域、水系、地形地貌、主要城市、水库、堤防、蓄滞洪区等地理要素、社会经济要素、重要水利工程要素等信息的直观仿真表达^[66-67]。

3.4 水库汛期水位动态控制方法与技术 中国大多数水库兴建于1950—1970年代,受当时的认识水平、技术条件、水文设计资料系列短缺的限制,许多水库未能结合当地暴雨洪水的季节性变化规律,对汛期进行合理划分,水库在整个汛期采用固定的汛限制水位度汛,往往造成水库汛期不敢蓄水且弃水较多、汛后却难以蓄满的问题,这种现象在北方地区尤为普遍。

2001年中国水科院结合国家防办水库汛限水位设计与运用重大课题研究,初步形成了中国水库汛期分期与分期洪水设计方法、洪水预报调度规划设计方法、分期汛限水位确定、汛限水位实时动态调度运用技术等。

基于上述研究成果,何晓燕等陆续开展了河南板桥水库、山西漳泽水库、广西岩滩水电站、甘肃碧口水电站的汛限水位动态控制研究^[68-71],进一步完善了汛期水位动态控制方法与技术。任明磊等在洪水预报信息、降雨预报信息的可利用性及其在动态控制实时调度中的应用等方面进行了针对性研究^[72-73]。

针对汛期水位动态控制风险问题,2007年水利部设立了“汛限水位调整风险评估与控制研究”项目,何晓燕等提出汛期水位动态控制风险指的是由于水库调度过程中自然、人为等不确定因素的影响,水库系统在实施汛期水位动态控制前后的风险变化,系统提出了水库汛限水位调整风险因子分类与辨识理论和方法^[74];任明磊等利用java、jsp、flex技术、hibernate数据库访问技术、ssh系统架构、extjs等计算机技术及建立了水库汛限水位调整综合风险评估指标体系和评估模型,设计开发了通用的水库汛限水位调整风险评估系统^[75]。

为规范水库汛期水位动态控制方案的技术管理,支撑《水库汛期水位动态控制方案编制技术导则》的编制,中国水科院开展了“水库汛期水位动态控制风险评估指标及可接受风险研究”,何晓燕等在以往水库汛期水位动态控制风险概念基础上,提出了汛期水位动态控制风险评估指标体系以及能够综合多种风险因素的风险评估方法,确定了水库汛期水位动态控制的可接受风险,提出了相应的风险控制措施^[76]。任明磊等提出了汛期水位动态控制效益定量评估指标体系及定量评估方法,并建立了风险效益综合评估模型^[77];何晓燕等在以往研究的基础上,结合梯级水库特点,将单库汛期水

位动态控制及其风险效益评估的理论方法推广应用在梯级水库群中^[78]。目前,汛期水位动态控制的技术基础已经基本形成,并经过了23座试点水库的应用实践。

3.5 洪水损失评估方法与技术 洪灾损失评估可为洪水影响评价、防洪效益评价、洪水应急预案的编制、防洪规划的合理性分析,防洪减灾对策措施的制定等提供重要支持,是防洪减灾研究领域的一项基础性研究工作。

中国水科院减灾中心自1990年代起,持续开展了洪涝灾害损失评估方法、技术研究,王艳艳探讨了不同尺度下的洪涝灾害损失评估模式^[79],陈浩^[80]等在调查黄河滩区历史洪涝灾害损失的基础上,建立房屋、家庭财产损失率线性函数关系,以及国家与集体财产、农作物损失率等级关系;基于广州市海珠区历史灾害损失调查,得出城市分类财产淹没水深-洪水损失率关系,同时考虑了流速和洪水到达时间对洪灾损失率的影响。王艳艳根据上海市洪涝灾害损失历史记录以及保险理赔资料分析建立了7种资产类型的淹没水深-损失率关系,对于风暴潮引起的洪水将台风风力作为洪水损失率的重要调整因素予以考虑^[81];在分析太湖流域的历史洪水灾害数据以及相关研究成果的基础上建立了太湖流域各类资产的洪灾损失率关系,并根据太湖流域1999年大水淹没情况对损失评估模型进行了验证^[82]。在《洪水风险图编制导则》中对洪水影响和损失评估的数据、流程和方法等进行了规范性的规定,用以指导全国洪水风险图编制中的洪水影响和损失评估^[83]。

陈浩等在GIS平台上基于洪水仿真模型和损失评估模型开发了“北江大堤洪水风险信息管理系统”^[84],王艳艳等结合社会经济数据库和土地利用图层,在GIS平台上建立洪灾损失评估模型^[85]。李娜等基于GIS技术建立了洪灾风险管理系统^[86],对黄河下游山东段堤防溃决的损失进行了分析。李纪人等建立了洪涝灾害遥感监测评估方法^[87],丁志雄建立了遥感与GIS技术相结合的洪涝灾害损失评估技术方法体系^[88]。

3.6 洪水情景分析技术 洪水风险管理是全面提升水安全保障水平的必然选择和发展方向^[89]。情景分析技术可为洪水风险管理策略和政策提供支持,属于未来预见研究的范畴。未来预见是探索未来社会、经济、环境、科技等的变化趋势,通过系统地识别、整合不确定性来研究未来可能发生的各种情景,为决策者提供调整现行政策、应对未来风险的决策支持信息^[90]。2001年,英国科学家首次将未来预见的理念引入到未来洪水风险预见的研究领域,并利用情景分析方法研究了英国的未来洪水风险问题^[91-93]。

在洪水情景分析研究中,程晓陶等构建了未来洪水风险情景分析技术框架,结合中国国情从洪水风险的角度,提出了洪水灾害系统概念模型,为开展太湖流域未来洪水风险情景研究奠定了基础^[94]。韩松等通过归纳分析太湖流域洪水、社会经济以及防洪措施等的特征及其发展变化,建立影响洪水风险的各因素之间的动因响应关系,并研究了各因素在未来的变化趋势^[95]。王艳艳等建立的太湖流域洪灾损失评估模型,为太湖流域未来不同洪水特性与社会经济情景下洪水灾害的风险分析提供了技术手段^[82]。胡昌伟、王静等人研发了具有自主知识产权的大尺度水力学模型,更好地反映出平原河网区多级圩堤及城镇化过程中流域洪水特性的变化^[96]。

3.7 堤基管涌分析及防治技术 围绕堤基管涌机理、动态模拟和除险合理设计等内容开展物理模型试验和数值分析研究,系统研究了管涌发展过程中的各种渗透破坏现象(包括流土、接触冲刷等)及其相互作用,分析了不同堤基条件下管涌机理的特点和差异。

丁留谦等研究发现三层堤基中下卧强透水砂砾石层对堤基管涌破坏临界水头(水力比降)的巨大影响以及与单层和双层堤基不同的管涌发展机理和破坏模式^[97],丰富了对堤基管涌机理的认识;提出了管涌发展动态模拟的概化数学模型,研究了管涌发展过程中渗流场变化的特点,给出了管涌破坏锋面渗透坡降变化的过程和特点,解释了管涌物理模型试验中直观上难以理解的现象^[98];将布莱-莱茵渗径系数方法的思想扩展应用到双层堤基的渗流控制中,提出了盖重的合理宽度和管涌抢险的合理范围,研究了双层堤基悬挂式防渗墙在控制管涌发展和提高堤基抵抗管涌破坏能力方面的作用和效果,提出了双层堤基上悬挂式防渗墙的设计理念、设计准则和设计计算方法^[99],关键技术内容已纳入中国堤防工程设计规范。孙东亚、解家毕等开展了堤坝工程失事概率分析方法及溃决模式、

事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用等研究,收集整理全国自1949年以来3498座水库溃坝案例,建立了溃坝案例库,分析了中国溃坝率高的原因及其主要溃决模式,可应用于堤坝溃决洪水分析、防汛应急预案制订和应急抢险决策^[100-102]。

3.8 崩岸治理软体排技术 针对长江崩岸治理,开发了软体排护岸技术。黄永健等通过室内模型试验,论证了传统抛石散体护岸的缺陷和软体排抛石压重整体平顺护岸的优越性,结合试验工程完善了软体排材料和结构设计以及施工工艺等^[103-105]。该技术在长江干流江西省棉船洲和安徽芜湖东梁山河段、珠海白蕉联围灯笼东3险段得到应用,多年观测结果揭示,3个崩岸治理河段均出现不同程度的淤积,河势平稳,岸坡稳定。该项技术核心内容已纳入中国堤防工程设计和施工规范。

3.9 岸坡防护生态工程技术 针对自然河道治理渠道化和硬质化等导致的自然栖息地质量下降等问题,提出了河流生态修复理论,开发了生态水利工程技术。董哲仁、孙东亚等提出河道整治工程设计应强调人与自然和谐的生态建设要求,采用与周围自然景观协调的河道岸坡防护工程结构形式,在满足工程安全的前提下,确保生态和景观的多种护岸形式,如植物纤维垫、植物梢料、生态型混凝土护坡、生态型挡土墙、土工织物扁袋、块石和植被等,为植物生长及鱼类、两栖类动物和昆虫的栖息与繁殖创造条件^[106-107]。

3.10 洪水风险信息表达技术 洪水风险信息包括洪水淹没信息、可能受洪水淹没或影响的承灾体及其脆弱性信息、洪水损失及影响信息,以及相关的水文信息、预报信息、调度信息、水利工程信息、基础地理信息等^[108],涉及GIS、三维、数据模型、虚拟仿真等技术等,程晓陶等总结了三维展示技术在防汛减灾工作中的重要作用^[109-110];李纪人等认为空间信息技术是防洪减灾现代化的基础,总结了空间信息技术在信息展示、防洪模拟等方面的作用^[111]。

黄诗峰等将GIS的空间显示功能,应用到防汛指挥决策支持系统的设计中,实现洪水相关信息及背景数据的综合展示及决策结果的可视化表达^[112];陈煜等利用GIS平台实现了洪水信息的在线表达和地图展示^[113]。2003年,中国水科院减灾中心牵头研发了全国七大流域及省级三维电子沙盘,首次实现了大尺度场景中遥感信息、防洪工程、洪水灾害等相关信息的三维可视化展示,并先后应用于汶川地震应急会商、流域防汛演习等方面^[114-115]。2013年,减灾中心主持编写了《防汛抗旱用图图式(SL73.7-2013)》,规范了相关信息的表达。徐美等利用数据模型、数据仓库等数据技术,首次将地图表达及模型驱动技术引入到洪水风险图研究中,建立水利地图数据模型、实现地图符号智能优化^[116],推动洪水风险信息表达向动态化、智慧化方向发展。当前人工智能、大数据、云计算等新技术发展迅速,为洪水风险信息的表达提供了新的方法和手段,中国水科院减灾中心开展了相应研究,包括综合BIM、GIS、VR等技术,实现专业模型支撑下的城市洪水过程的智能化虚拟仿真,采用大数据技术,实现海量多源洪水风险信息的动态化表达等^[117-118]。

3.11 防洪决策支持技术 防洪决策支持技术包括信息处理技术、洪水预报技术、洪水调度技术、洪水损失评估技术等,是水利信息化建设的主要内容之一^[119-120]。中国防洪决策支持系统建设始于1990年代,先后开展了流域、省和国家防洪决策支持系统的研究、开发和建设,2005—2011年,水利部建设完成了国家防汛抗旱指挥系统一期工程,成为水利信息化的龙头和骨干工程,并于2014年,启动二期工程建设^[121-122]。为配合各级防汛指挥系统的建设,减灾中心逐步形成了防洪决策支持技术体系^[109]。

决策支持技术涉及众多信息技术包括数据库技术、网络技术、GIS、遥感技术、洪水仿真技术、情景分析技术等。李纪人等认为空间信息技术是防洪减灾现代化的基础,将遥感、GIS、导航等技术应用到防洪决策支持工作中^[123];刘舒等利用套接字技术解决了水动力模型的网络化问题^[124];苑希民等利用三维信息技术,解决了大范围洪水信息的三维可视化问题^[114]。减灾中心先后完成了一系列不同层次的决策支持系统研发,起到了示范和引领作用。1992年开发的“淮河中游防洪决策支持系统”,首次将河网一维非恒定流实时分析模型和洪水信息动态展示技术用于防洪决策支持;在北京城市防汛应急系统预报预警调度平台中,将网格化管理应用到城市防洪突发事件的应急处置中,提高了城市防汛突发事件决策的流程化、规范化和标准化^[125];在广东省三防指挥系统二期工程决策支持业务应用系统中,首次在防汛指挥系统采用基于业务流程的功能组织方式^[126]。针对目前防洪中的城

市内涝问题、山洪灾害预警等热点难点,先后在北京市、上海市、深圳市、成都市、佛山市等城市展开研究,将水利专业模型与大数据、人工智能、虚拟现实等信息技术结合,推进城市洪涝灾害防治决策支持的智能化。

4 结语

1990年减灾中心成立以来,经过近30年的发展,防洪减灾学科体系基本形成。初步建立了以洪水风险管理理论为指导,以洪水风险分析方法和技术为核心的防洪减灾策略、政策、措施研究体系,以此为基础提出的宏观研究成果,为中国防洪减灾方略的调整与完善提供了科学依据和理论支撑;在水文分析、洪水预报预警、洪水数值分析、洪水损失评估、洪水调度、工程安全、洪水资源化、防洪减灾信息仿真展示和防洪决策支持方法、技术方面开展了持续系统的研究,建立了相应的数学模型,形成了较为完善的防洪减灾技术工具体系。在中国,上述理论、方法、技术和模型一直处于领先地位,并总体达到国际先进水平。减灾中心针对防洪减灾实际工作需求,以上述技术和模型体系为核心,建立了洪水(山洪、内涝)预报预警系统、防洪调度系统、防洪决策支持系统、洪水分析系列软件、洪水风险图编制系统等,在全国范围内陆续得到推广应用,取得了良好效果。

目前,中国防洪减灾策略仍处于战略调整期,由工程防洪向洪水风险综合管理的转变面临观念、政策、法规、体制等方面的问题与挑战,迫切需要在洪水风险管理理论框架下融合社会科学、政策科学、经济学、行政科学等,建立适合国情的应对相关问题与挑战的理论方法体系,为防洪减灾策略的合理有效地调整和相关政策的制定提供科学依据。快速发展并持续实用化的精细探测感知、大数据、超级计算、人工智能和桌面推演等技术为洪水全过程、精细化、高效率分析模拟和检验提供了有效手段和支撑,充分利用上述技术,研究洪水形成、发展、演变和致灾机理,不断提升各类模型的效能,构建满足防洪减灾应用需求的实用化工具和系统是未来防洪减灾技术发展的方向之一。社会经济发展与防洪减灾的关系、受洪水威胁的承灾体脆弱性与恢复力、洪水威胁区人类行为、降低洪水暴露度与脆弱性方法措施、极端洪水评估与应对等方面的研究十分薄弱,甚至处于空白状态,是亟待探索和拓展的研究领域。

参 考 文 献:

- [1] 刘树坤.大水过后的思考[J].科学,1991,44(1):40-44,46,64.
- [2] 向立云,姜付仁.洪水资源与洪水资源化刍议[J].中国水利水电科学研究院学报,2000(1):1-7.
- [3] 程晓陶,吴玉成,王艳艳,等.洪水管理新理念与防洪安全保障体系的研究[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [4] 周魁一,谭徐明.洪水灾害的双重属性及其实践意义[J].中国水利水电科学研究院学报,1998(1):34-39.
- [5] 周魁一.防洪减灾观念的理论进展—双重属性的概念及其哲学基础[J].自然灾害学报,2004,13(1):1-8.
- [6] 向立云.减轻洪水灾害的工程与非工程措施[J].水利工程管理技术,1990(4):15-17.
- [7] 周魁一.关于完善防洪方针的建议[J].中国科技导报,1994,12(9):46-47.
- [8] 周魁一.关于防洪方针的思考[J].科技导报,1991,9(6):39-42.
- [9] 刘树坤.灾后重建与国土整治[J].中国环境管理,1998(6):7-10.
- [10] PORTER John W,程晓陶.中国洪水管理战略研究[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [11] 中国水利水电科学研究院.基于洪水风险分析的防洪标准研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2000.
- [12] 向立云.洪水管理的基本原理[J].水利发展研究,2007,7(7):19-23.
- [13] 刘树坤.21世纪的中国大水利建设[J].水利水电科技进展,2002,20(2):6-9.
- [14] 刘树坤.水利现代化和新水利理论的形成[J].水资源保护,2003,19(2):1-5.

- [15] 刘树坤. 21 世纪的水利建设应从强化流域管理体制入手[J]. 中国水利, 2000(9): 21-22.
- [16] 刘树坤. 21 世纪的中国水问题[J]. 中国三峡建设(人文版), 2009(2): 5-11.
- [17] 周魁一. 关于防洪减灾体制的思考[J]. 科技导报, 1991, 9(8): 3-5.
- [18] 周魁一. 21 世纪中国防洪减灾战略刍议—建立全社会的综合防洪减灾体系[J]. 科技导报, 1998, 16(12): 12-15.
- [19] 周魁一. 防洪减灾战略调整与社会可持续发展[J]. 中国水利, 2002(10): 144-146.
- [20] 向立云. 洪水风险分析与近期防洪策略[J]. 灾害学, 1992(3): 79-83.
- [21] 向立云. 中国洪水风险区管理探讨[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 26-28.
- [22] 向立云. 洪水灾害特性变化分析[J]. 水利发展研究, 2002, 2(12): 44-47.
- [23] 向立云. 由控制洪水转向洪水管理的防洪减灾政策[M]//中国公共政策分析(2002 年卷). 北京: 中国社会科学出版社, 2002.
- [24] 向立云. 中国洪水管理的几个方向性问题[J]. 水利发展研究, 2003, 3(12): 4-8.
- [25] 向立云. 中小河流治理应加强政策和制度建设[J]. 中国水利, 2010(17): 9-10.
- [26] GHD 公司, 中国水利水电科学研究院. 中国洪水管理战略研究[R]. 2005.
- [27] 向立云. 洪水风险评价指标体系研究[J]. 水利发展研究, 2004, 4(8): 25-29.
- [28] 向立云. 洪水管理的经济学思考[M]//灾害经济研究(第一辑). 北京: 经济科学出版社, 2006.
- [29] 张大伟, 徐美, 王艳艳, 等. 洪水风险图编制问答[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [30] Lin Pin-Nam. Numerical Analysis of Continuous Unsteady Flow in Open Channels[J]. Trans., American Geophysical Union, 1952, 33(2): 226-234.
- [31] 林秉南. 明渠不恒定流的解法和验证[J]. 水利学报, 1956(1): 5-18.
- [32] 刘树坤, 宋玉山, 程晓陶, 等. 黄河滩区及分滞洪区风险分析和减灾对策[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [33] 程晓陶, 黄金池, 薛云鹏. 黄河下游河道水沙运动仿真模型的开发研究[J]. 水利学报, 1998(5): 12-17.
- [34] 程晓陶, 蓝虹, 李娜, 等. 黄河下游花园口~孙口河段水沙运动仿真模型开发研究[J]. 水利学报, 1999(7): 53-59.
- [35] 黄金池, 万兆惠. 多沙河流平面二维泥沙数学模型研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 253-258.
- [36] 黄金池, 万兆惠. 黄河下游河床平面变形模拟研究[J]. 水利学报, 1999(2): 13-18.
- [37] 黄金池, 万兆惠. 高含沙水流二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16(1): 92-100.
- [38] 程晓陶, 仇劲卫, 陈喜军. 深圳市洪涝灾害的数值模拟与分析[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(S1): 202-209.
- [39] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000(11): 33-42.
- [40] 李娜, 仇劲卫, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 112-118.
- [41] 张念强, 李娜, 甘泓, 等. 城市洪涝仿真模型地下排水计算方法的改进[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 526-534.
- [42] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1393-1400.
- [43] 马建明, 陆吉康. 防洪模拟中的地形自适应网格生成技术[J]. 水利学报, 2004(8): 71-75.
- [44] 黄金池, 何晓燕. 溃坝洪水的统一二维数学模型[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 222-226.
- [45] 黄金池. 堰塞坝漫顶溃口流量变化过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1235-1240.
- [46] 张大伟, 李昌志, 黄金池, 等. 多座水库同时溃决的通用性数学模型研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(7): 114-116.
- [47] 张大伟, 程晓陶, 黄金池. 大坝瞬时溃决水流数值模拟——以 Malpasset 水库为例[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 1-4.
- [48] 张大伟, 程晓陶, 黄金池, 等. 基于 Godunov 格式的溃坝水流数学模型[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 167-172.
- [49] 张大伟, 程晓陶, 黄金池. 建筑物密集城区溃堤水流二维数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 272-277.
- [50] 张大伟, 权锦, 何晓燕, 等. 堰塞坝漫顶溃决试验及相关数学模型研究[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 979-985.
- [51] 张大伟, 程晓陶, 黄金池, 等. 复杂明渠水流运动的高适用性数学模型[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 531-536.

- [52] 张大伟, 权锦, 何晓燕, 等. 基于地理信息系统的一维溃坝洪水分析系统研发及应用[J]. 水利学报, 2013, 44(12):1475-1481.
- [53] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 应用 Godunov 格式模拟复杂河网明渠水流运动[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6):1088-1096.
- [54] 马建明, 喻海军, 张大伟, 等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利, 2017(5): 17-20.
- [55] 阚光远. 数据驱动与半数据驱动模型在降雨径流模拟中的应用与比较研究[J]. 测绘学报, 2017, 46(2): 265.
- [56] KAN Guangyuan, HE Xiaoyan, DING Liuqian, et al. Study on applicability of conceptual hydrological models for flood forecasting in humid, semi-humid semi-arid and arid basins in China[J]. Water, 2017, 9(10): 1-25.
- [57] KAN Guangyuan, TANG Guoqiang, YANG Yuan, et al. An improved coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model and its verification in Ganjiang river basin, China[J]. Water, 2017, 9(12): 1-19.
- [58] KAN Guangyuan, ZHANG Mengjie, LIANG Ke, et al. Improving water quantity simulation & forecasting to solve the energy-water-food nexus issue by using heterogeneous computing accelerated global optimization method[J]. Applied Energy, 2018, 210: 420-433.
- [59] KAN Guangyuan, LEI Tianjie, LIANG Ke, et al. A multi-core CPU and many-core GPU based fast parallel shuffled complex evolution global optimization approach[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(2): 332-344.
- [60] 何晓燕, 丁留谦, 张忠波, 等. 对流域防洪联合调度的几点思考[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(4): 1-7.
- [61] 王艳艳, 陆吉康, 陈浩. 洪灾损失评估技术的应用[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 30-33.
- [62] KAN Guangyuan, HE Xiaoyan, LI Jiren, et al. Computer Aided Numerical Methods for Hydrological Model Calibration: An overview and recent development[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017: 1-25.
- [63] KAN Guangyuan, LIANG Ke, LI Jiren, et al. Accelerating the SCE-UA global optimization method based on multi-core CPU and many-core GPU[J]. Advances in Meteorology, 2016, 8483728: 1-10.
- [64] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟, 等. 水库联合调度对松澧地区防洪的影响分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(11): 113-116.
- [65] 姜晓明, 何晓燕, 丁留谦, 等. 洪水预报调度系统设计及其在江西五河一湖流域的应用[C]//第二十一届海峡两岸水利科技交流研讨会(2017). 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [66] JIANG Xiaoming, HE Xiaoyan, DING Liuqian, et al. Real-Time Flood Forecasting and Regulation System of Poyanghu Lake Basin in China [C]//Italy, Palermo: 13th International Conference on Hydroinformatics. 2018.
- [67] 刘媛媛, 刘舒, 王琦, 等. 南水北调中线工程三维展示系统建设初探[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 126-129.
- [68] 中国水利水电科学研究院. 板桥水库汛限水位动态控制研究[R]. 2010.
- [69] 中国水利水电科学研究院. 漳泽水库汛限水位动态控制研究[R]. 2012.
- [70] 中国水利水电科学研究院. 岩滩水库汛限水位动态控制研究[R]. 2017.
- [71] 中国水利水电科学研究院. 碧口水库汛限水位动态控制研究[R]. 2017.
- [72] 任明磊, 何晓燕, 黄金池, 等. 基于短期降雨预报信息的水库汛限水位实时动态控制方法研究及风险分析[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 66-72.
- [73] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 等. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1): 16-22.
- [74] 何晓燕, 黄金池. 对水库汛限水位动态控制风险分析的认识[J]. 大坝与安全, 2010(6): 27-30.
- [75] 任明磊, 何晓燕, 黄金池, 等. 水库汛限水位调整风险评估系统设计与开发[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(1): 46-51.
- [76] 何晓燕, 任明磊, 李辉, 等. 水库汛期水位动态控制风险评估指标及可接受风险研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [77] 任明磊, 何晓燕, 李辉, 等. 水库汛限水位动态控制风险效益综合评判模型 2017 年进展报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [78] 任明磊, 何晓燕, 李辉, 等. 梯级水库群汛期水位动态控制关键技术研究 2017 年进展报告[R]. 北京: 中国

- 水利水电科学研究院, 2018.
- [79] 王艳艳. 不同尺度的洪涝灾害损失评估模式述评[J]. 水利发展研究, 2002, 2(12): 66-69.
- [80] 陈浩, 陆吉康, 刘树坤. 城市洪涝灾害经济损失评估的模式与方法[C]//城市与工程减灾基础研究论文集(1996). 北京: 中国科学技术出版社, 1997.
- [81] 王艳艳, 陆吉康, 陈浩. 洪灾损失评估技术的应用[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 30-33.
- [82] 王艳艳, 韩松, 喻朝庆, 等. 太湖流域未来洪水风险及土地风险管理减灾效益评估[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 327-335.
- [83] 中国水利水电科学研究院. 洪水风险图编制导则[R]. 2017.
- [84] 陈浩, 仇劲卫, 王艳艳. 北江大堤保护范围洪水风险图的制作与应用[J]. 水利水电技术, 2000, 31(7): 38-43.
- [85] 王艳艳, 陆吉康, 郑晓阳. 上海市洪涝灾害损失评估系统开发[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 7-13.
- [86] 李娜. 基于GIS的洪灾风险管理系统[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.
- [87] 李纪人, 黄诗峰. “3S”技术水利应用指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [88] 丁志雄. 基于RS和GIS的洪涝灾害损失评估技术方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [89] 叶建春, 章杭惠. 太湖流域洪水风险管理实践与思考[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 136-141.
- [90] 穆荣平, 任中保, 王瑞祥. 技术预见历史回顾与展望[M]//中国科学院科学与技术预见系列报告之技术预见报告. 北京: 科学出版社, 2005.
- [91] Office of Science and Technology. Foresight Future Flooding Scientific Summary Volume I: Future risks and their drivers [R]. London, 2004.
- [92] Office of Science and Technology. Foresight Future Flooding Scientific Summary Volume II: Managing future risks [R]. London, 2004.
- [93] EVANS E, HALL J, PENNING-ROUSELL E, et al. Future flood risk management in the UK[J]. Water Management, 2006, 159(1): 53-61.
- [94] CHENG Xiaotao, HU Changwei, HAN Song. Scenario Analysis Technology for Future Flood Foresight in the Taihu Basin: Progress of a China/UK Scientific Cooperation Project[C]//Proceedings of the 2007 Joint Seminar Flood Disasters and Countermeasures Against Them. 2007.
- [95] 韩松, 程晓陶, 梅青, 等. 流域未来洪水风险动因响应关系定性分析方法的研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(4): 251-256.
- [96] 王静, 喻朝庆, 程晓陶, 等. 太湖流域大尺度洪水分析中对圩区影响洪涝分布的模拟[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 91-96.
- [97] 丁留谦, 姚秋玲, 孙东亚, 等. 三层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 19-22.
- [98] 丁留谦, 何秉顺, 孙东亚, 等. 不透水边界条件下双层堤基上盖重的渗流计算方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 7-12.
- [99] 丁留谦, 孙东亚, 姚秋玲, 等. 关于双层堤基上盖重设计准则的建议[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 30-35.
- [100] 孙东亚, 解家毕, 姚秋玲. 堤防工程失事概率分析方法及溃决模式研究[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(2): 25-28.
- [101] 解家毕, 孙东亚. 事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 133-137.
- [102] 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(12): 124-128.
- [103] 黄永健, 丁留谦, 赵进勇, 等. 河口软体排护岸工程的锚固结构[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 70-73.
- [104] 黄永健, 丁留谦, 孙东亚, 等. 排体护岸工程的铺排施工[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 74-77.
- [105] 黄永健, 高季章, 贾金生, 等. 崩岸整治新技术试验工程的设计与施工[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(1): 23-29.
- [106] 董哲仁, 孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [107] 孙东亚, 丁留谦, 姚秋玲. 关于改进我国堤防工程护坡设计的建议[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 46-48.
- [108] 刘树坤. 国外防洪减灾发展趋势分析[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 2-9.
- [109] 程晓陶. 防洪抗旱减灾研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(3): 191-198.

- [110] 程晓陶. 新中国防洪抗旱减灾领域科技进步随笔[J]. 中国防汛抗旱, 2009(S1): 66-72.
- [111] 李纪人, 黄诗峰. 空间信息技术是防洪减灾现代化的基础[J]. 测绘科学, 2005, 30(1): 63-65.
- [112] 黄诗峰, 李纪人. GIS支持下的防汛指挥决策支持系统的系统分析与设计[J]. 中国管理科学, 2001(6): 73-80.
- [113] 陈煜, 刘东民, 王冠华, 等. 黑龙江省防汛指挥决策支持系统集成技术研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(4): 312-318.
- [114] 苑希民, 万洪涛, 万庆, 等. 三维电子沙盘建设在防汛抗旱中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2009(2): 51-56.
- [115] 刘媛媛, 刘舒, 苑希民, 等. 广西防汛三维电子沙盘系统建设[J]. 中国防汛抗旱, 2013, 23(6): 11-13.
- [116] 徐美, 刘舒. 洪水风险图制图方法与系统[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(4): 8-13.
- [117] 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1326-1345.
- [118] 丁留谦. 防汛抗旱信息化建设与未来发展思考[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 8-10.
- [119] 程晓陶, 万洪涛, 吴兴征. 防洪减灾科技发展现状与趋势[J]. 中国水利, 2004(22): 31-33.
- [120] 胡昌伟, 苑希民, 邱沛炯. 防洪决策支持技术进展[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(4): 52-55.
- [121] 胡四一. 防洪决策支持系统的开发和应用[J]. 水利水电科技进展, 1997(6): 2-7.
- [122] 万海斌. 全国防汛抗旱指挥系统3.0架构与要求[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 4-7.
- [123] 李纪人, 黄诗峰. 空间信息技术与防洪减灾现代化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 66-72.
- [124] 刘舒, 胡昌伟, 张红萍, 等. 基于套接字技术的水动力模型的网络化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(3): 194-198.
- [125] 王毅, 刘洪伟, 刘舒, 等. 网格化管理在城市防汛减灾中的应用研究[J]. 北京水务, 2011(3): 8-11.
- [126] 王战友, 宾爱华. 广东省三防指挥系统简述[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(1): 52-55.

Research progress in flood control and disaster reduction

XIANG Liyun^{1, 2}, ZHANG Dawei^{1, 2}, HE Xiaoyan^{1, 2}, LI Na^{1, 2}, LIU Shu^{1, 2}, SUN Dongya^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research 100038, Beijing, China;

2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources 100038, Beijing, China)

Abstract: Since the 1990s, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) has carried out systematical studies on flood control and disaster reduction. Over the past 30 years, IWHR has tracked the development of the related international sciences & technologies and established flood risk management theory system considering China's real conditions and flood control & disaster reduction requirements. These studies provide theoretical support for strategic adjustment of flood control and disaster reduction strategy in China. IWHR also carries out theoretical and methodological researches on flood analysis, flood forecasting, flood regulation, flood loss assessment, engineering safety analysis, scenario analysis, information analysis & representation, flood defense decision making support, etc. IWHR develops relevant technologies, models & products, and continuously carries out real-world applications. IWHR has also provided support and guarantee for the development of the national flood control and disaster reduction.

Keywords: flood control; disaster reduction; research progress

(责任编辑: 韩 昆)