

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.003

中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考

李致家¹,朱跃龙²,刘志雨^{1,3},张珂¹,包红军⁴,周国良³,
刘艳丽⁵,何秉顺⁶,万定生²,李巧玲¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100;
3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心), 北京 100053;
4. 国家气象中心, 北京 100081; 5. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
6. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038)

摘要: 在总结国内外洪水防控与应急管理关键技术问题研究成果的基础上, 针对中国中小河流众多、洪水频发、灾害严重等特点, 讨论了高时空分辨率雨量场构建与短临精准预报、精细与智能洪水预报、洪水实时风险评估与应急处置、水文气象数据质量控制、云平台构建及多重情景仿真等关键技术问题, 探讨关键科学问题, 为中小河流洪水防控与应急管理提供思路。
关键词: 中小河流; 洪水防控; 应急管理; 洪水预报; 云平台; 情景仿真
中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)01-0013-06

Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers

LI Zhijia¹, ZHU Yuelong², LIU Zhiyu^{1,3}, ZHANG Ke¹, BAO Hongjun⁴, ZHOU Guoliang³, LIU Yanli⁵,
HE Bingshun⁶, WAN Dingsheng², LI Qiaoling¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;
3. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), MWR, Beijing 100053, China;
4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;
5. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
6. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A summary is firstly made on the research achievements of key technical issues in the flood prevention and the emergency management at home and abroad. In view of the characteristics of small and medium-sized rivers such as large quantities, frequent floods, and severe disasters in China, this study discusses the construction of high spatial-temporal resolution rainfall field and short-impending accurate forecasting, the fine and intelligent flood forecasting, the real-time flood risk assessment and emergency disposal, the quality control of hydrometeorological data, the cloud platform construction and so on. Through the discussion of key scientific problems, a train of thought can be provided on key technologies of flood prevention and emergency management.
Key words: small and medium-sized rivers; flood prevention and control; emergency management; flood forecasting; cloud platform; scene simulation

洪水作业预报常态化工作正在我国稳步推进,洪水预警发布社会化服务也在稳步推进,但目前存在成果可读性差、服务针对性弱、缺少影响评估等问题。据统计,我国流域面积 200 ~ 3 000 km² 的中小河流超过 8 600 多条。我国的中小河流众多,洪水频发,灾害严重,是当前洪水防控重点薄弱环节。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508104,2018YFC1508100)
作者简介: 李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com
引用本文: 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18.
LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1): 13-18.

近年来,水文站网建设不断加大,水文站、水位站、雨量站、水质站、墒情站点增加,水雨情时空信息迅猛增长。高程、植被、土地利用与土壤类型等基于网格的基础数据,中国、欧洲、日本等较高时空分辨率的数值天气预报产品、雷达测雨、卫星遥感等天地一体的高分辨遥感遥测数据愈加丰富,可为流域洪水防控与应急处置提供重要数据支撑。

虽然水文数据日益丰富,但中小河流水文资料依旧匮乏,大多数中小水库塘坝没有流量监测资料。同时,气候变化和人类活动改变了天然产汇流规律,对中小河流影响尤为凸显,预报预警的精度和预见期亟待提高。基于防洪阈值的传统预警对灾害风险的评估与防控能力不足,应急处置研究薄弱。开展中小水库塘坝的水雨情监测预报,结合多源降水融合与预报进行精细与智能洪水预报,基于影响预报的动态风险分析和应急处置等研究,对提升我国中小河流洪水灾害防控能力、保障人民生命财产安全具有重要意义。

1 中小河流洪水防控管理现状与存在的问题

1.1 水文模型与洪水预报

水文模型是洪水预报的基本工具。自 20 世纪 30 年代起,欧美相继提出 Sherman 单位线、Horton 产流、Dunne 产流、山坡水文学^[1-3]等理论,60 年代赵人俊^[4]提出蓄满产流理论,70 年代产生美国的 Sacramento 模型^[5]和我国的新安江模型等水文模型,80 年代起建立了美国洪水预报系统 AHPS、中国洪水预报系统和欧洲洪水预警系统 EFAS。

目前我国洪水预报业务主要应用在大江大河,湿润区预报效果较好,干旱半干旱区超渗产流理论和预报模型尚有不足^[6]。国际上洪水防控呈现从大尺度概念性模型应用预报向精细化预报预警发展趋势^[7],20 世纪 90 年代意大利提出具有物理基础的分布式水文模型 TOPKAPI,并在多国洪水预报中应用;2014 年美国开始研发新一代国家水文模型,将水文模型精细化并与水力学模型耦合,以期可预测街道尺度洪水淹没情况^[8]。中小河流尤其干旱半干旱地区非均质特征显著,地形地貌、土地利用复杂(山丘、平原、城市),中小水库塘坝的拦蓄与调节作用明显^[9],产汇流特性复杂,许多中型水库及小型水库塘坝没有洪水预报方案,亟需开展精细预报方法研究。

1.2 定量降水预报和多源降水融合

降水是决定洪水预报精度和预见期的关键因素。20 世纪 80 年代兴起的雷达和卫星测雨技术为降水监测提供了新手段。90 年代起美国和英国建成了各自的天气雷达观测网,1997 年和 2014 年美国和日本联合建立了 TRMM、GPM 全球卫星降水观测系统,得到广泛应用^[10-12]。1998 年起我国建立了新一代天气雷达网,2008 年开始发射了风云系列卫星,形成了天空地观测体系。数值天气预报是定量降水预报的主要手段^[13],形成了欧洲 ECMWF、美国 GFS 和 WRF、日本 JMA、我国 GRAPES 等主流模式。目前多源降水融合与数值预报结合是提高短临预报精度的有效手段和研究前沿^[14-16]。

1.3 影响预报与风险管理

20 世纪 80 年代起,欧美先后提出水文模型不确定性分析的综合似然方法、基于贝叶斯理论的不确定性分析及概率预报,为风险评估打下基础。国内外洪水风险评估与管理经历由定性/半定性研究向定量研究、宏观尺度灾害析因统计向微观尺度实时动态情景分析的转变^[17-18]。近年来,世界气象组织提出并推广“影响预报、风险预警”的防控理念。基于风险预报预警的中小河流洪水防控和应急处置技术亟待研究^[19-22]。

2 开展中小河流洪水防控工作需要解决的技术难题

2.1 高时空分辨率雨量场构建与短临精准预报技术

中小河流洪水预报预警中降水预报存在时空分辨率和精准度不够的问题,地面观测数据难以满足中小河流洪水预报预警的要求。近年来,中国、欧洲、日本等具有较高时空分辨率的数值天气预报产品、雷达测雨、卫星遥感等天地一体的高分辨遥感遥测数据愈加丰富,借助卫星、雷达测雨等多源降水数据是提高降水时空分辨率和精准度的重要途径。

在地面观测基础上,结合地理信息系统,研究不同水文气象分区短历时降水特性与高分辨率地形降水订正技术,建立与卫星、雷达测雨的尺度匹配与融合方法,可有效提高实况降水精度与时空分辨率;在天气雷达网基础上,采用机器学习回归模型研究分雨型雷达回波-降水映射关系,建立雷达智能外推临近预报模

型,提升临近(0~2 h)定量降水预报精度;将基于 WRF 的数值预报快速同化系统与雷达智能外推技术动态订正融合,可有效提高短时(2~12 h)定量降水预报精度。

2.2 基于环境感知的模型重配置技术

流域气象条件与下垫面条件共同决定了预报断面的洪峰、洪量及洪水过程。我国幅员辽阔,水文气象与下垫面条件复杂,现阶段中小河流洪水预报业务中采用的固化预报模型结构不能满足不同水文气象分区和下垫面条件下产汇流过程精细预报的需求,需要灵活架构模型,以适应不同的信息条件和流域初始状态。

需要研究不同水文气象分区内考虑库塘闸坝、地下水超采等影响的模型精细化方法。基于下垫面遥感信息构建模型运行的环境空间,研究国内外代表性模型在华北、西北、华东和西南等地典型流域的适应性,挖掘产汇流模拟模块与水文气候特征、地形地貌、土地覆盖、土壤类型等环境要素的响应关系,建立基于环境感知的模型重配置技术,对于缩短作业预报时间,提高预报精度具有重要价值。例如,在实时预报中,在蓄满产流为主的流域,久旱之后下了一场雨强很大、历时不长、总雨量也不大的暴雨,可以灵活配置地面下渗能力模块,及时把超渗地面径流分割出来,进行精准计算。

2.3 基于暴雨洪水特征模式的中小河流智能预报技术

中小河流洪水陡涨陡落、洪水过程不平稳,在实时预报过程中能够学习的雨水情信息有限,人工神经网络与支持向量机等传统数据驱动模型难以使用。基于聚类、符号化等技术的模式挖掘方法,可以对典型流域历次洪水的降雨时空分布、流域状态、洪水过程、洪水情势与下垫面地理特性等进行模式提取,构建暴雨洪水特征模式库。

针对中小河流洪水变化趋势难以把握、预报结果不确定性大,研究基于初始建模-情势优化-形状控制的三阶段智能预报方法。首先通过相似洪水过程簇训练,采用基于时序偏互信息的变量选择方法,优化时间加权径向基函数神经网络结构;然后利用实测雨水情、土壤含水量、河道与库塘坝蓄水等信息智能修正模型状态,建立基于集合卡尔曼滤波与径向基函数神经网络融合的智能预报方法;最后从模式库中匹配相似历史洪水特征模式进行实时反馈,建立基于过程形状控制的洪峰预报校正方法,解决非平稳水文过程的预报不确定性问题。

2.4 不同信息条件下考虑库塘闸坝蓄泄的作业预报技术

中小河流的中小型水库、水塘和淤地坝数量多,大都缺乏实测水文资料和无闸门控制,如何在作业预报中考虑库塘闸坝蓄泄影响是中小河流洪水预报面临的重要问题。需要基于水利普查与卫星遥感等信息,估算库塘闸坝的蓄水容量特性,提出无水文资料库塘坝入库洪水预报方法。研究库塘闸坝蓄水量的动态计算方法,基于库塘坝蓄量动态变化和容量特性,研发无闸门控制库塘坝的泄流预报方法。基于库塘闸坝空间拓扑结构确定产汇流计算的阻断节点,在实时洪水预报中,动态进行库塘闸坝蓄泄预报,可以更加精确地进行中小河流的洪水预报。

每场洪水的初始条件、边界条件与状态变量不相同,因此中小河流作业预报通常会面临不同的信息条件。需要根据不同的降雨条件、流域初始状态及状态变化快速自动适配预报方案,目前作业预报中多采用人工方法进行优选。中小河流水雨情信息变化快,作业预报的不同阶段需要读取的信息也不同,初始预报阶段更关注降雨预报信息与流域初始状态,预报过程中还要关注降雨的时空动态变化与流域工况等状态的变化。

2.5 中小河流库塘闸坝蓄泄影响下防洪联合智能调度技术

中小河流洪水陡涨陡落、局部因素影响大,调控对象组合复杂、调度信息不完备,如何快速生成库塘闸坝蓄泄影响下的防洪优化调度方案是中小河流洪水防控面临的重要问题。针对中小河流防洪调度不确定性、快速响应和自动决策问题,需要通过中小河流库塘闸坝蓄泄情景模拟分析中小河流水利工程运行对河道行洪的作用,研究库塘闸坝蓄泄影响洪水特征量的时空分布规律和联动效应;分析中小河流流域内承灾体的类型及承灾能力;在此基础上建立中小河流洪水孕灾保障防洪安全和中小河流洪水致灾减小洪灾损失两类情势下的中小河流防洪调度目标函数和约束条件集;运用知识驱动和数据驱动相耦合的方法建立中小河流库塘闸坝蓄泄影响下水库群多目标多约束条件防洪联合智能调度技术;研究满足有闸控制库塘闸坝预蓄预泄调度、水库动态联调和溃坝应急调度等需求的调度预案库构造技术;形成基于智能搜索的调度方案快速自动匹配技术和基于计算智能的调度方案自动干预技术。

2.6 中小河流洪水实时风险评估方法与应急处置技术

中小河流洪水灾害突发性强、发展速度快,需要基于网格化模拟技术和动态分析方法,提出流域精细化洪水风险动态预警技术,基于网格化模拟技术实现洪水实时和预设情景风险的精细化分析与评估,揭示洪水风险链迁移变化特征,提高风险评估的前瞻性和时空展布精细度。研究风险因子快速智能辨识方法,建立“水文-水动力-调度-影响”时序过程推演的洪水影响评估模型,绘制流域洪水动态风险图,实现从水文要素预报向灾害影响预报的转变,从阈值预警向风险预警的转变。

针对中小河流洪水应急处置技术时效性要求高、现有技术体系不系统的问题,需设定中小河流洪水应急处置体系定量最优目标,梳理、提炼、研发中小河流洪水监测预警、库坝调度、人员转移、抢险处置等关键环节的适用技术,凝练形成技术体系。

2.7 基于水文机理和关联分析的中小河流水文气象数据质量控制技术

中小河流水文气象数据常存在缺失、异常以及资料系列短等问题。针对缺失数据,需研究多元线性回归、BP 神经网络及深度学习等算法对缺失水文气象数据插补的适用性,建立基于机器学习的数据插补模型,开展有效性验证;针对异常数据,结合水文气象数据自身统计分布规律,研究基于关联分析、滑动窗口等方法的异常数据检测模型;针对出现的异常数据片段,需要研究基于概率后缀树的水文气象数据异常模式发现方法;对于中小河流流量资料短或只有实测水位的情况,结合水文机理,挖掘水位-流量关系;分析历史水文气象数据,研究基于权重-多规则的水文气象数据质量评估模型,基于深度学习算法构建数据质量控制方法,用于实时水文气象数据的质量控制。

针对卫星、雷达、实测雨量等多源数据的质量问题,提出基于机器学习及关联分析的数据质量分析方法,建立自主溯源等技术,解决数据的缺失、异常等问题。构建基于雨量场-流域状态场关联关系图的数据质量规则描述模型,解决劣质数据自动识别、智能修复及容错近似查询处理问题,建立中小河流水文气象数据质量控制体系。

2.8 多层次按需服务云平台构建及多重情景仿真技术

中小河流洪水防控与应急管理涉及多源数据处理、模型构建与配置、作业预报与调度、影响预报与风险评估、应急处置等多个环节,需要分析中小河流洪水防控与应急管理多业务协同关系,提出针对“情景-仿真-应对”模式的可视化技术,为实现预报预警和应急处置的快速动态展示提供技术保障;研发云环境下具有状态和交互特征的模型封装服务技术,实现不同时空尺度中小河流预报预警、风险评估、智能调度等模型耦合集成,提供数据、算法和模型多层次按需服务;开展示范流域防洪能力与灾害的数据调查,建立示范流域防洪能力与灾害数据库;研究洪水淹没区快速生成算法,在三维 GIS 环境下实现虚拟现实仿真技术以及动态淹没分析方法,实现影响预报、风险预警、应急处置的可视化技术,提供不同层次的中小河流洪水预警的数字产品和服务。研究云平台构建技术,研制中小河流洪水预警预报智能调度决策支持平台,依据洪水防控与应急处置目标,实时制作发布洪水影响预报结果,实现提高洪水预报精度和延长预见期的目标。

3 关键科学问题讨论

3.1 不同水文气象区产流模式时空组合机制与下垫面变化下产汇流响应机理

我国中小河流众多、分布区域广,气候和下垫面条件各异,洪水形成时间短,对下垫面空间变异性十分敏感,具有复杂的产汇流规律;水利工程和地下水超采等人类活动影响进一步改变了天然产汇流规律。中小河流产汇流机制,尤其在北方流域,亟待进一步研究。

蓄满产流和超渗产流是主要的产流模式,两种模式在同一流域的不同空间区域和不同洪水阶段交叉发生,其时空动态转换规律尚未研究清楚。库塘闸坝蓄水改变了流域产流过程并阻滞洪水运动,其泄水又扰动了洪水运动的自然规律。地下水超采导致包气带增厚、产流减少和河道渗漏等现象,造成流域的产汇流规律变异。喀斯特地区土层薄且持水能力差,表层岩溶带及由溶隙和管道等多重介质构成的地下河系统发达,形成地表水入渗和地下水储存与汇流的通道,对产汇流过程影响大。研究不同条件下的中小河流产汇流规律对于中小河流洪水精准预报预警至关重要。

为此,采用水文机理分析与大数据技术,研究不同水文气象分区中小河流产流模式及其时空组合与变化机制,揭示库塘闸坝蓄泄、地下水超采引起包气带增厚和喀斯特地质条件对产汇流过程的影响机制,可为发

展适用不同水文气象和下垫面条件下中小河流洪水预报模型和方法打下理论基础。

3.2 中小河流产汇流过程空间相似理论与参数推衍方法

水文资料匮乏是制约中小河流洪水预报预警的重要因素,将有资料地区的预报方法和模型参数有效地移植到资料匮乏区是提高洪水预报预警精度的重要手段。基于统计相似性、自相似性及动态相似性理论,探明中小河流产汇流过程空间相似的成因;研究产流和汇流过程相似的机理,提出高维异质特征空间产流相似区辨识方法;对比分析相似流域的产流、汇流和特征因子的非线性关系,建立空间相似度非线性映射关系,对于形成产汇流空间相似理论具有重要价值。

针对精细化模型参数空间分布的推衍难题,选取不同水文气象分区和下垫面中小河流,基于高分辨率地形特征、土壤类型及土地覆盖等数据,通过理论推导和聚类分析等数据挖掘技术,建立模型物理参数与下垫面环境要素的定量关系;利用实测资料和土壤含水量等动态分布信息,采用客观优选和自动优化相结合的方法率定模型过程参数,基于主成分分析与半参数回归等技术,建立过程参数的区域化方法;构建不同水文气象分区和下垫面重配置模型的多参数集合,探明参数地理规律。基于中小河流产汇流过程空间相似性辨识相似流域,在相似流域间进行参数移植与交叉验证,针对移植精度相对较低情况进行分析,挖掘影响空间移植精度的主要因素,研究进一步提高参数移植精度的方法,在此基础上建立适用于不同水文气象分区与下垫面的参数移植方法。

4 结 语

洪涝灾害是自然界严重的自然灾害,近年来在中小河流频发。中小河流洪水陡涨陡落、局部因素影响大、洪水灾害突发性强、发展速度快,加强中小河流洪水防控的理论基础研究、构建中小河流精细与智能实用预报模型及预警预报智能调度决策支持平台,对于提升中小河流的洪水防控能力与流域应急管理水平具有重要的科学和工程应用推广价值。

根据洪水防御、洪水调度工作的需要,研究能用于中小流域洪水预报的精细与智能实用水文模型;结合多源降水融合数据与流域地形地貌、土地利用、库塘闸坝情况等,编制中小河流洪水预报方案。分析雨型、暴雨中心、降雨过程形势等实时及预报降雨特征,研判降雨形势与流域状态趋势,选配合适的模型及参数,实现智能识别预报方案,进而可制定中小河流洪水作业预报规程。

利用精细与智能实用预报模型和高时空分辨率雨量场构建与短临精准预报技术,可有效提高中小河流洪水预报精度与预见期;通过风险分析与应急处置技术体系,可有效延长应急响应与逃生避险的时间;通过中小河流洪水预警预报智能调度决策支持平台发布预报预警信息,可有效提高中小河流洪水防控与应急管理能力,大大减少人员伤亡与财产损失,对保障人民群众生命财产安全与社会稳定健康发展方面具有重要意义。

参考文献:

[1] SHERMAN L K. Streamflow from rainfall by unit-graph method[J]. Engineering News-Record, 1932, 108: 501-505.
[2] ROBERT E H. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1933, 14(1): 446-460.
[3] DUNNE T, BLACK R. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed [J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1296-1311.
[4] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
[5] BURNASH R J C, FERRAL R L, MCGUIRE R A. A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers[R]. Sacramento: Joint Federal and State River Forecast Center, US National Weather Service and California Department of Water Resources, 1973.
[6] 李致家, 霍文博, 张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 385-391. (in Chinese))
[7] 李致家, 姚成, 张珂, 等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall

runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6):471-480. (in Chinese))

[8] COHEN S, PRASKIEVICZ S, MAIDMENT D R. Featured collection introduction: national water model[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2018, 54(4): 767-769.

[9] 孙新国. 水利工程影响下的洪水预报及历史暴雨洪水重现研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.

[10] MOHAMMAD S K K, SEYED A M, ROBERT C, et al. Evaluation of the TRMM 3B42 product for extreme precipitation analysis over southwestern Iran[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(9): 2094-2112.

[11] PRAKASH S, MITRA A K, AGHAKOUCHAK A, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region[J]. Journal of Hydrology, 2016, 556: 865-876.

[12] LI Weiyue, HE Xiaogang, SUN Weiwei, et al. Evaluating three satellite-based precipitation products of different spatial resolutions in Shanghai based on upscaling of rain gauge[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40 (15): 5875-5891.

[13] 毕宝贵, 代刊, 王毅, 等. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5):534-549. (BI Baogui, DAI Kan, WANG Yi, et al. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5):534-549. (in Chinese))

[14] RAN Qihua, FU Wang, LIU Yan, et al. Evaluation of quantitative precipitation predictions by ECMWF, CMA, and UKMO for flood forecasting: application to two basins in China [J]. Natural Hazards Review, 2018, 19(2): 05018003.

[15] MING Xiaodong, LIANG Qihua, XIA Xilin, et al. Real-time flood forecasting based on a high-performance 2-D hydrodynamic model and numerical weather predictions [J]. Water Resources Research, 2020, 56: e2019WR025583.

[16] SILVESTRO F, ROSSI L, CAMPO L, et al. Impact-based flash-flood forecasting system: sensitivity to high resolution numerical weather prediction systems and soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 388-402.

[17] 侯静雯, 叶爱中, 甘衍军, 等. 洪水灾害危险性评价方法的研究与改进[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 57-62, 107. (HOU Jingwen, YE Aizhong, GAN Yanjun, et al. Research and improvement on assessment method of flood hazard[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 57-62, 107. (in Chinese))

[18] 刘瑞. 基于贝叶斯网络的洪水灾害风险评估与建模研究[D]. 上海:华东师范大学, 2016.

[19] 刘志雨. 水资源预测技术的研究进展与前景展望[J]. 中国水利, 2013(13):90,92,94. (LIU Zhiyu. Research progress and prospect of water resources prediction technology [J]. China Water Resources, 2013(13):90,92,94. (in Chinese))

[20] 刘志雨, 侯爱中. 洪水影响预报和风险预警理念与业务实践[J]. 水文, 2020, 40(1):1-6. (LIU Zhiyu, HOU Aizhong. Concept and practice of impact-based flood forecasting and risk-based flood warning [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40 (1):1-6. (in Chinese))

[21] BISCHINIOTIS K, MOEL H, HOMBERG M, et al. A framework for comparing permanent and forecast-based flood risk-reduction strategies[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720: 137572.

[22] TARCHIANI V, MASSAZZA G, ROSSO M, et al. Community and impact based early warning system for flood risk preparedness: the experience of the Sirba River in Niger [J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1802.

(收稿日期:2020 - 11 - 20 编辑:张志琴)