

基于雷达和智能技术的暴雨风险-效益评估与调控

左其亭¹, 李英睿^{1,2,3}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;
3. 河南省智慧水利工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 面对暴雨预报模拟及潜在暴雨风险-效益评估体系不完善的双重挑战, 应用雷达和智能技术开展暴雨-径流-洪水智能预报、暴雨风险-效益评估与调控具有重要意义。本文提出了“智能预报-分析评估-和谐调控”三位一体的系统决策思路, 构建面向流域或区域的暴雨风险-效益评估与调控研究框架, 主要包括: ①智能预报。总结降雨、径流与洪水预报模拟的主要方法与智能模型, 提出基于雷达和智能技术的降雨-径流-洪水一体化智能预报体系。②分析评估。提出暴雨风险-效益双层评估思路, 系统梳理风险与效益的评估方法, 耦合经济、社会、生态等多维视角, 形成结合智能模型与和谐论方法的暴雨风险-效益评估体系。③和谐调控。提出以和谐调控理论为基础的暴雨风险-效益联合调控思路, 构建面向暴雨风险-效益联合优化的和谐调控模型。该框架以基于雷达的降雨-径流-洪水一体化智能预报为驱动, 融合智能技术与和谐论方法, 系统评估潜在暴雨风险-效益, 进而开展面向暴雨风险-效益的和谐调控研究, 可为流域或区域暴雨灾害管理提供系统解决方案与研究范式。

关键词: 雷达; 智能技术; 暴雨风险-效益; 分析评估; 和谐调控

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)05-0022-11

Rainstorm risk-benefit assessment and regulation based on radar and intelligent technologies // ZUO Qiting¹, LI Yingrui^{1,2,3} (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Engineering Research Center of Smart Water Conservancy, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Addressing the dual challenges of inadequate simulation for torrential rainfall forecasting and incomplete risk-benefit assessment system, it is of great significance to carry out intelligent forecasting, risk-benefit evaluation and regulation based on radar and intelligent technology. This paper proposes a systematic decision-making idea of “intelligent forecasting-analytical assessment-harmony regulation”, and constructs a research framework for storm risk-benefit assessment and regulation of in river basins or regions. The framework consists of three main components: ① Intelligent forecasting: The main methods and intelligent models of rainfall, runoff and flood forecasting simulation are summarized, and the integrated intelligent forecasting system of rainfall-off-flood based on radar and intelligent technology is proposed. ② Analytical assessment: The risk-benefit two-layer evaluation idea is proposed, and the evaluation methods of risk and benefit are systematically sorted out, coupled economic, social, ecological and other multi-dimensional perspectives, forming a risk-benefit assessment system combining intelligent models and harmony theory methods. ③ Harmony regulation: This component proposes a joint risk-benefit regulation strategy based on harmonious regulation theory, by developing a harmonious regulation model aimed at optimizing the balance between the risks and benefits of torrential rainfall. Driven by the integrated intelligent prediction of rainfall-runoff-flood based on radar, this framework integrates intelligent technology and the method of harmony theory to systematically evaluate the potential risks and benefits associated with torrential rainfall events, conducting research on harmonious regulation based on the risk-benefit of torrential rain can provide systematic solutions and research paradigms for the management of torrent rain disasters in basins or regions.

Key words: radar; intelligent technology; rainstorm risk-benefit; analytical assessment; harmony regulation

在全球气候变化与人类活动加剧影响下, 极端降水事件呈现频发、广域、突发等特征^[1], 由其引发

的暴雨-洪水链式灾害已成为威胁区域安全的重要风险源。24 h 内降水量超过 50 mm 的降雨过程统称

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3211301); 黄河水利科学研究院基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2024-10)。

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

通信作者: 李英睿(1995—), 女, 工程师, 博士研究生, 主要从事水利信息化研究。E-mail: liyingrui@163.com

为暴雨^[2]。目前,我国已成为全球暴雨洪涝灾害最严重的国家之一^[3]。然而,传统以灾后应急为主的被动防控模式难以适应动态演变的灾害风险格局。在此背景下,急需构建融合现代感知技术和智能技术的暴雨风险-效益评估体系,发展兼顾“防灾减灾”与“雨洪资源利用”的和谐调控方法,对实现暴雨风险治理从灾后被动处置向灾前智能防控转变具有重要意义。

当前研究在暴雨致灾机理、径流过程模拟及暴雨洪涝风险评估方面已形成较为完善的研究成果。然而,面对气候变化背景下暴雨时空异质性增强、下垫面条件复杂化的新挑战,传统方法在突发性暴雨事件的实时预警与动态调控方面仍存在局限,如,基于物理机制的分布式水文模型虽能解析降雨-径流非线性关系,但其参数敏感性高、计算复杂度大的缺陷导致在复杂下垫面场景中适用性受限^[4-5];水文模型和水动力学模型方法可用于暴雨事件预测及风险评估,然而受限于地形数据精度不足、过度简化假设条件以及对下垫面异质性刻画不足等问题,可能影响其在复杂场景下的模拟精度^[6-7]。

新一代天气雷达、水利测雨雷达与智能模型的融合应用为解决上述瓶颈问题提供了新路径,雷达的分钟级高精度监测能力可有效弥补传统雨量站网时空分辨率不足的局限^[8];机器学习框架下,深度学习模型凭借强大的高维非线性特征提取能力,为洪水预报^[9]、暴雨洪水耦合模拟模型的构建提供了新方法^[10];而基于机器学习的智能优化算法,则为多目标风险-效益的动态博弈与优化调控决策提供了新的研究视角^[11]。总体而言,各类暴雨、径流、洪水预报模型虽然在水文领域有较好的适用性,但模拟精度和实时数据的处理能力仍有待提高。洪水风险评估多依赖静态模型和灾后统计分析,尽管已建

成较为完善的“四预”(预报、预警、预演、预案)应用系统,但对雷达数据的有效融合以及风险动态评估方面仍显不足,难以准确反映洪水风险的实时变化特征。暴雨对人类社会影响具有双重性,既伴随显著风险,也带来效益,如何评估暴雨风险-效益的多重影响,尤其如何通过调控措施有效规避消极风险和最大化积极效益,亟须加强研究。

本文旨在集成多源动态监测、智能预报模拟与多目标优化调控技术,建立基于暴雨的“智能预报-分析评估-和谐调控”全链条分析方法研究框架,包括:①建立降雨-径流-洪水的智能预报体系,提升复杂流域或区域洪水模拟精度;②建立考虑内在禀赋与暴雨影响的风险-效益评估方法,量化暴雨的双重性影响;③建立考虑基础设施韧性、经济社会影响的暴雨风险-效益和谐调控模型,实现风险管控与效益提升的协同决策。

1 研究框架及关键问题

1.1 总体研究思路

基于气象学、水文学、灾害学与人水和谐论,聚焦暴雨风险-效益双层属性,按照“智能预报-分析评估-和谐调控”三位一体的系统决策思路,开展基于雷达和智能技术的暴雨风险-效益评估与调控研究。主要内容和步骤有:①建立基于智能模型的雷达-降雨预报、降雨-径流预报、洪水模拟与预报的全链条智能预报体系;②基于预报结果分析暴雨对经济、社会、生态的多维度影响,确定风险-效益双层评估指标体系和评估方法,开展暴雨风险-效益联合评估;③构建暴雨风险-效益和谐调控模型,通过模型智能求解确定形成暴雨风险-效益和谐调控方案。研究思路如图 1 所示。

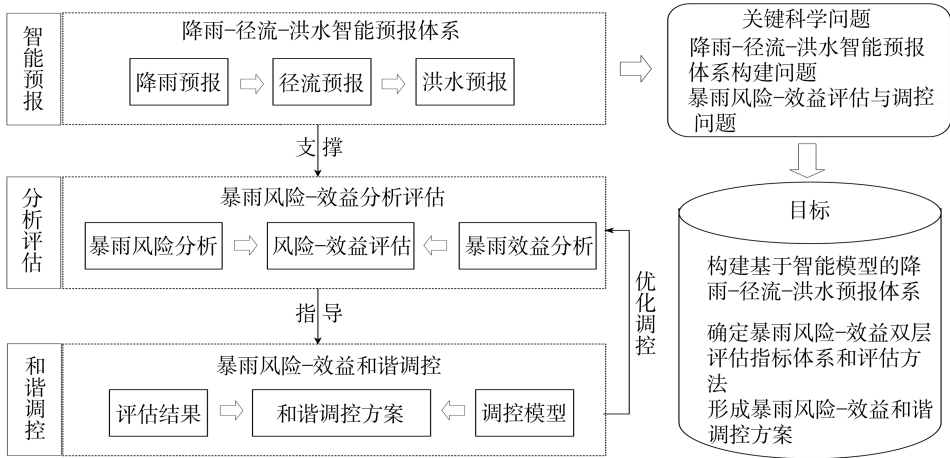


图 1 暴雨风险-效益评估与调控研究思路

Fig. 1 Research approach for rainstorm risk-benefit assessment and regulation

1.2 研究框架

基于 1.1 节研究思路,构建暴雨风险-效益评估与调控研究框架,如图 2 所示。该框架包括 3 部分:①基础理论。融合水循环理论解析水文过程耦合机制,依托雷达气象学实现降雨精准预报,运用灾害学揭示致灾因子、孕灾环境、承灾体互馈规律,以人水和谐论指导多目标调控策略优化。②多源数据。涉及多源异构数据,涵盖历史调查资料、监测数据、经济社会数据与地理空间数据等。③三大内容。一是降雨-径流-洪水预报,基于数值预报、智能模型提升降雨预报精度,采用水文模型、水动力学模型、智能模型实现径流及洪水模拟与预报;二是暴雨风险-效益分析评估,综合评估内在禀赋与暴雨对经济、社会和生态风险-效益的双层影响,融合智能预报结果,构

建二者耦合的指标体系,全面评估暴雨产生的多维影响及其相互作用;三是暴雨风险-效益和谐调控,构建暴雨风险-效益和谐调控模型,基于分析评估结果动态优化经济、社会 and 生态等多维度的风险与效益,制定兼顾防洪安全、资源利用和生态保护的优化策略。

1.3 关键问题

本文基于“空天地”多源数据,形成动态监测、智能模拟与多目标优化调控的技术体系,构建暴雨风险-效益的“智能预报-分析评估-和谐调控”全链条分析方法,主要解决以下 3 个关键问题:

a. 降雨-径流-洪水智能预报体系构建问题。多时空尺度下空中雨-落地水-河道径流系统间存在动态非线性相互作用,构建降雨、径流与洪水模拟预报的智能模型,是气象水文动态耦合预报体系构建的

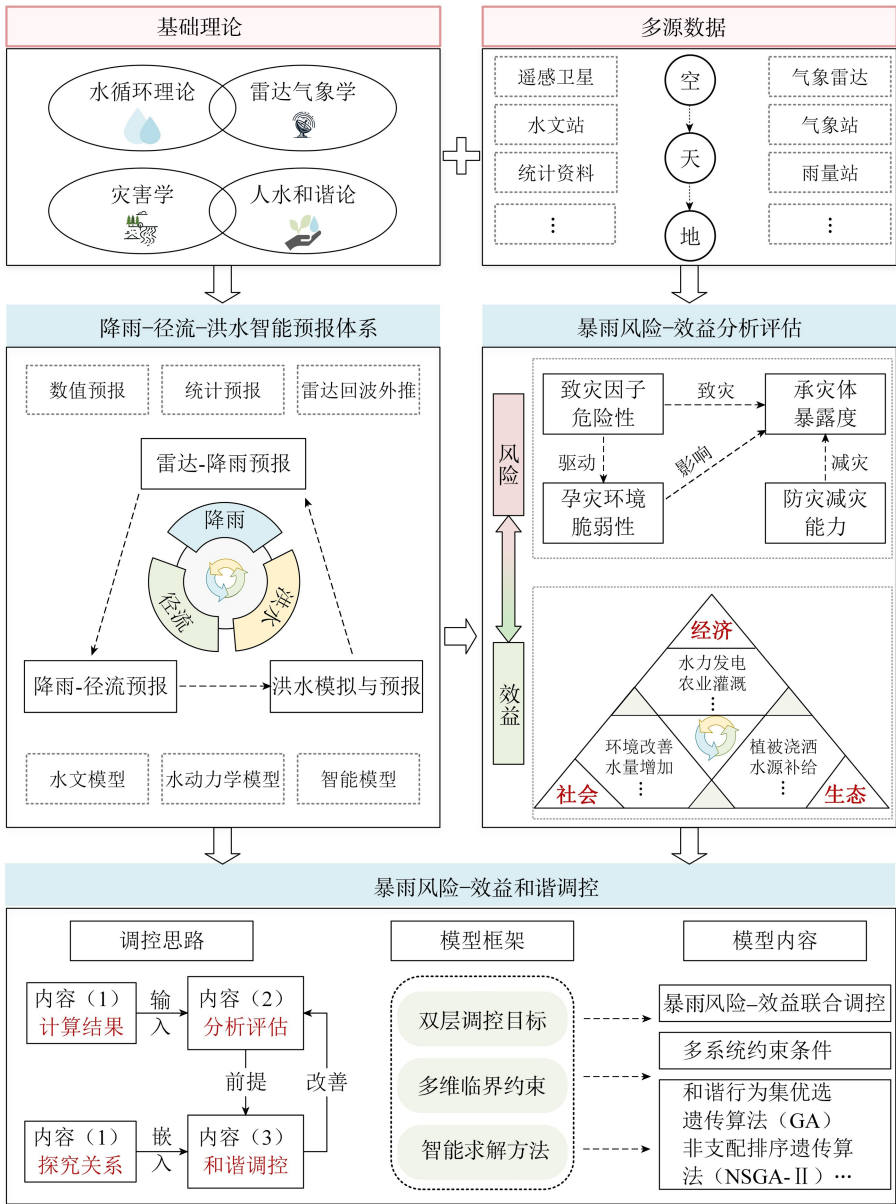


图 2 暴雨风险-效益评估与调控研究框架及技术路线

Fig. 2 The research framework and technical route for rainstorm risk-benefit assessment and regulation

基础,也是实现水资源高效利用与灾害防控协同优化亟待突破的关键科学问题。

b. 暴雨风险-效益分析与评估问题。基于风险-效益互馈关系,考虑暴雨对经济、社会、生态等系统产生何种作用,揭示暴雨对复杂系统的双层影响;如何结合定性分析与定量分析,构建风险-效益耦合协同的评估指标体系,描述暴雨对经济、社会和生态系统的影响,是本研究的关键科学问题。

c. 暴雨风险-效益和谐调控问题。在多维度评估的基础上,如何表征目标函数、调控变量及约束条件的内在关系,如何量化暴雨的风险-效益和谐程度,建立适应性的多情景调控策略,是开展风险-效益和谐调控的前提和亟待解决的关键问题。

2 降雨-径流-洪水智能预报体系研究方法及应用需求

暴雨作为引发洪涝灾害、山体滑坡等自然灾害的关键致灾因子,具有突发性强、空间分布广的特征,严重威胁经济社会发展与公共安全,因此对实时精准预报预警和全域覆盖的应急响应体系提出更高要求。

2.1 降雨预报

降雨预报侧重于预报降水量、降雨强度、降雨分布及其时空变化,降雨预报方法主要包括数值预报法、统计预报法和基于雷达回波的外推方法。数值预报法基于复杂的物理规律建立数学物理模型,对初始条件敏感且计算复杂度高^[12],主要包括欧洲中心 ECMWF (european Centre for medium-range weather forecasts) 模式、美国 GFS (global forecast system) 模式和中国 GRAPES (global/regional assimilation and prediction system) 模式等^[13-15];统计预报法通过分析历史气象数据和统计规律,利用多元统计和时间序列分析,构建预报模型实现降雨预报,包括岭回归、Logistic 判别和自回归求和滑动平均模型等;基于雷达回波的外推方法是根据当前时刻观测结果,推测雷达回波在未来时刻的位置和强度,实现跟踪预报,包括质心跟踪法、交叉相关法、光流法以及智能模型法^[16-18]。

2.2 径流预报

径流预报侧重于预报径流量的变化,涵盖降水、蒸发、土壤湿度等因素对水文过程的影响,径流预报模型主要包括集总式模型、分布式模型、半分布式模型和智能模型。传统水文模型以结构性强、物理意义明确的数学方程及参数表述降雨-径流过程。集总式水文模型属于概念性水文模型的范畴,将流域或区域作为整体,简化降雨与径流关系,主要包括水

箱模型、SCS-CN 模型以及新安江模型^[19-20]等。分布式水文模型考虑气候因素(如降雨、蒸散发等)和下垫面条件(如地形、土壤类型、植被覆盖与土地利用等)空间不均匀性对水文模拟的影响,主要包括 MIKE-SHE (system hydrological european) 模型、SWAT(soil and water assessment tool) 模型等^[21-23];半分布式水文模型是一种介于集总式水文模型和分布式水文模型之间的模型,结构简单且具有一定的物理水文过程,最具代表性的是 TOPMODEL (topography based hydrological model) 水文模型^[24]。智能模型不受实际水文过程的概化与假设的限制,以数据驱动的方式挖掘输入与输出数据间的复杂非线性关系,包括人工神经网络 (artificial neural network , ANN)、长短时记忆网络 (long short term memory , LSTM)、Transformer 等多种模型^[25-26]。

2.3 洪水模拟与预报

洪水模拟与预报侧重于洪峰流量(水位)、洪峰出现时间、洪量(径流量)、洪水过程以及淹没模拟等方面,主要包括水文模型、水动力学模型以及智能模型。水文模型将具有时空变化特征的水文参数和变量作为模型的内部参数,通过栅格或网格数据来描述流域或区域中水文特性的时空变化,主要包括 HEC-HMS (the hydrologic engineering center's hydrologic modeling system) 模型、TOPKAPI (topographic kinematic approximation and integration) 模型等^[27-28];水动力学模型通过求解物理方程组精细模拟水流运动,包括洪水演进过程、淹没范围以及局部水深流速,主要包括 MIKE 11、MIKE 21、Flow3D 模型等^[29-31];基于智能算法构建的洪水预报模型不受水文过程概化与假设的限制,有效挖掘产汇流规律,实现高效快速计算,显著提升洪水预报的时效性,主要包括随机森林 (random forest , RF)、支持向量机 (support vector machine , SVM)、卷积神经网络 (convolutional neural networks , CNN) 模型等^[32-34]。降雨、径流与洪水预报模拟方法对比如表 1 所示。

基于以上研究基础,以气象学与水文学耦合理论为核心,基于雷达、雨量站及水文站观测数据,系统解析“空中雨-落地水-河道径流”的多尺度互馈机制,建立如图 3 所示的降雨-径流-洪水智能预报体系,重点研究:①雷达驱动的智能降雨预报。针对降雨过程的短时突变性与多尺度复杂性,聚焦雷达回波生消与移动演变特征,构建动态响应的智能降雨预报模型;解析雷达反射率因子与地面降雨强度、落区分布间的非线性映射关系,从空中雨-落地水角度提升降雨事件的预报精度。②基于智能模型的径流预报。立足于水文循环过程,综合考虑降雨强度、时

表 1 降雨、径流和洪水预报方法对比分析

Table 1 Comparison and analysis of rainfall, runoff, and flood forecasting methods

方向	方法类别	方法名称	具体描述	研究展望
降雨 预报	数值预报	ECMWF 模式、GFS 模式、GRAPES 模式等	优势:基于物理方程模拟大气动力过程,综合考虑多气象要素间(风速、气压、湿度)的相互作用 不足:模型复杂度高,需高性能计算资源,对初始场和边界条件较为敏感	将智能方法与数值预报相结合,开展基于物理约束下的模型优化,推动 NWP+AI 的新模式;研究基于物理约束的智能模型,增强模型的可解释性和稳定性
	统计预报	多元统计分析(回归分析、判别分析、相关分析等)、时间序列模型等	优势:模型结构简单,易于快速部署,适合历史规律稳定的降雨预报 不足:不具有物理约束,对突发性强降雨事件的捕捉能力有限	
	回波外推法	光流法、质心跟踪法、交叉相关法	优势:具有一定的物理机制,计算效率高 不足:难以捕捉复杂天气过程的生消变化过程,适用性有限	
		智能模型(CNN、ConvLSTM、PredRNN 等)	优势:能够学习时空特征,在短临预报中表现较好 不足:需要大量数据,模型可解释性弱,算力要求高	
径流 预报	集总式模型	水箱模型、SCS-CN 模型、新安江水文模型等	优势:参数少,计算快,适用范围广 不足:依赖基本假设与经验公式,忽略空间异质性,无法模拟动态产汇流过程	融合气象、遥感水文等多源数据,增强预报输入信息的多维性;研究基于物理机制的数据驱动模型,增强智能模型的可解释性,应对复杂的水文系统变化
	分布式模型	SHE、SWAT 等	优势:物理过程清晰,适用范围广 不足:数据需求高,模型较复杂,计算资源消耗大	
	半分布式模型	TOPMODEL 等	优势:模型结构简单,参数少,包含一定物理水文过程 不足:对空间异质性考虑不足	
	智能模型	ANN、LSTM、Transformer 等	优势:能够学习降雨-径流非线性关系 不足:需要大量数据,缺乏物理约束	
洪水 模拟 与 预报	水文模型	HEC-HMS、TOPKAPI 模型等	优势:结构简单,计算速度快 不足:忽略部分水动力细节	基于高分辨率数据,提升短时强降雨下洪水预报及动态模拟精度;研究物理机制与数据驱动的混合模型,增强智能模型的可解释性
	水动力学模型	MIKE 21、MIKE 11、Flow3D 等	优势:能够高精度模拟洪水演进过程及复杂地形下的淹没深度与流速分布 不足:需要高精度 DEM 数据,计算时间长、资源要求高	
	智能模型	RF、SVM、CNN 等	优势:可捕捉多变量之间复杂且非线性的关系 不足:需大量标注数据,模型可解释性弱,算力要求高	

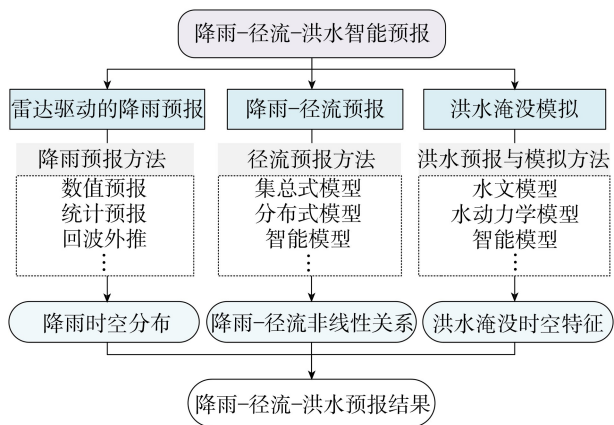


图 3 基于雷达和智能模型的降雨-径流-洪水智能预报体系
Fig. 3 Radar and intelligent model-based rainfall-runoff-flood intelligent forecasting system

空分布特征及水文响应单元的复杂性,揭示降雨-径流非线性关系,深入解析降雨强度与径流响应的时效性和空间异质性,融合智能预报结果进一步优化预报精度。③基于智能模型的洪水淹没模拟。基于地形、土地利用及历史洪水数据,结合智能模型挖掘洪水淹没范围与气象、水文、地理要素间的复杂非线性关联,揭示洪水淹没的时空特征;通过遥感与智能

技术的结合,分析降雨强度、地形、植被和土壤等对洪水淹没范围的影响,模拟洪水在不同降水事件下的扩展与演变。

3 暴雨风险-效益分析评估研究方法及应用需求

3.1 暴雨风险-效益分析

暴雨的发生不仅对经济、社会、生态系统多个层面产生直接后果,还可能引发一系列连锁反应,暴雨强度、历时及空间分布决定了产生影响程度及分异格局。

开展暴雨风险与效益的定性分析,全面揭示暴雨带来的多维度效应。从风险角度看,主要考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力 4 个方面。暴雨可能引发洪水、泥石流、滑坡和城市内涝等次生灾害,灾害的发生与致灾因子的强度、持续时间及地形等因素有关,通常从危险性、暴露度和脆弱性来分析。危险性是识别洪涝发生的区域及强度,包括淹没范围、深度、流速和时间等;暴露度指暴露在灾害影响范围内的人类活动、建筑以及经济活动等因素,暴露度高的区域通常风险更大,且暴露度与区

域的基础设施建设水平、经济社会状况密切相关^[35],如高人口密度、经济活动集中的工业区和基础设施脆弱的农业区均具有较高的暴露度;脆弱性则反映了暴雨灾害中承灾体的易损性和应对能力,基础设施薄弱、经济社会条件不足或应急能力欠缺的区域更易遭受严重损失。从效益角度看,暴雨可为水力发电创造资源条件,通过调峰蓄能提升区域能源结构稳定性,为清洁能源供给提供支撑;可补充水资源,缓解区域供水压力并保障农业灌溉;能改善土壤墒情,促进植被生长与土壤结构优化;通过补给湿地和地下水系统,为生态修复提供持续水源。暴雨在经济、社会、生态 3 个维度可能引起的风险及效益如表 2、表 3 所示。

基于灾害系统理论及经济学理论,结合气象、水文与地理信息数据,系统研究暴雨的多维度影响机

制,如图 4 所示。重点研究:①暴雨风险分析。主要由致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力的相互作用构成,基于“H(危险性)-E(暴露度)-V(脆弱性)”框架,从经济、社会、生态等多个层面入手定性分析暴雨引发的风险。②暴雨效益分析。暴雨具有“双刃剑”效应,从资源供给、生态调节等多个维度深入解析暴雨的正向作用机制,揭示暴雨资源化利用与灾害防控之间的协同关系,为流域或区域系统的可持续发展提供理论支持。

3.2 暴雨风险-效益评估

暴雨是引发洪涝风险的主要致灾因子,当前研究多聚焦于风险单维度评估分析(如危险性、脆弱性)。风险评估方法主要包括综合评估法、仿真模拟法、地理信息系统法和多种智能方法。综合评估法^[36-37]通过指标体系构建,融合致灾因子危险性、

表 2 暴雨风险分析
Table 2 Rainstorm risk analysis

风险维度	风险类型	具体描述
经济风险	工业停摆	工厂停产、供应链断裂,影响产业生产效率
	农业减产	农田内涝、作物根系腐烂或倒伏,造成直接的农作物减产或绝收
	交通受阻	暴雨可能引起交通堵塞/中断,影响商业流通
社会风险	设施受损	道路、桥梁、电力系统等基础设施受损,导致长时间的停运或失效
	生命安全	引发山洪、泥石流等次生灾害及城市内涝,导致人员伤亡、疾病传播风险
	日常生活	居民用水、用电、出行困难,影响日常生活
生态风险	水土流失	土壤侵蚀、水资源流失,破坏农业用地、山地森林及自然景观
	污染扩散	城市污水、化学品、垃圾等污染物进入水体,造成河流、地下水系统污染
	湿地破坏	破坏湿地生态系统,导致生物多样性减少及生态调节功能衰退

表 3 暴雨效益分析
Table 3 Rainstorm benefit analysis

效益维度	效益类型	具体描述
经济效益	能源增效	正效益:水库蓄水提升发电能力,动态调整汛限水位优化调度效率,降低能源成本 负效益:引发溢洪风险,损毁发电设施,增加维修成本
	灌溉保障	正效益:补充灌溉水源,保障农作物需水量,稳定粮食产量并减少旱灾损失 负效益:引发水土流失,增加土壤修复及灌溉系统维护成本
	工业生产	正效益:补充地表水资源量,增加区域可用水量,为工业生产提供补充水源 负效益:损毁工业设备,导致生产中断,造成直接经济损失
	水产养殖	正效益:促进浮游生物繁殖,优化水体环境,提高鱼类生长效率及养殖收益 负效益:引发水质污染,增加水产死亡率,导致经济损失
社会效益	设施升级	正效益:推动堤防、排水管网等设施的升级,提升区域防洪能力及气象服务效益 负效益:引发堤防溃决及排水系统损毁,增加修复成本
	景观修复	正效益:补充湿地与河流水量,推动自然景观恢复,增强生态旅游价值与居民休闲体验 负效益:破坏景观与湿地,延缓生态恢复进程,增加修复费用
	用水保障	正效益:可作为应急水源,保障干旱期居民生活用水需求,增加居民生活可用水量,维持社会稳定与公共健康 负效益:引发水源污染与水质恶化,提高净水成本
生态效益	植被恢复	正效益:提供植物生长必需水分,促进森林、草地植被恢复,增强固碳能力及水土保持功能 负效益:植被根系受损,增加植被恢复难度及修复成本
	土壤健康	正效益:渗透改善土壤墒情,增加有机质含量,促进养分循环 负效益:引发土壤侵蚀,导致有机质流失及结构破坏,增加修复及农业生产成本
	湿地修复	正效益:补充湿地水源,恢复栖息地环境,保护濒危物种及生物多样性 负效益:湿地栖息地受损,增加生态恢复成本
	地下水补给	正效益:通过径流、下渗补充河流、湖泊及深层地下水,维持含水层储量及区域水循环平衡 负效益:地下水补给失衡,补给成本增加

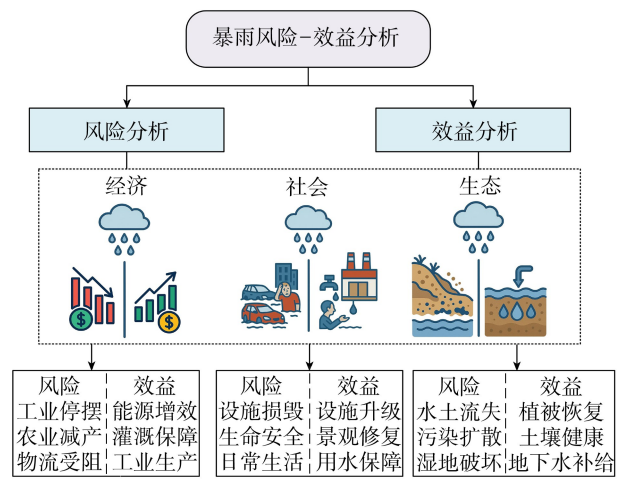


图 4 暴雨风险-效益分析

Fig. 4 Rainstorm risk and benefit analysis

承灾体脆弱性及防灾减灾能力等维度参数实现风险分级评估;仿真模拟法^[38]基于水动力学模型模拟洪水演进过程、淹没范围及时空分布;地理信息系统

法^[39]依托空间叠加实现洪涝风险区的可视化;基于数据驱动的智能模型^[40],通过挖掘多源异构数据时空关联,预测灾害概率与空间分布。

针对暴雨产生的效益目前研究较少。本文考虑“正效益”和“负效益”两个层面,“正效益”主要为工业供水、农业灌溉和发电效益等方面产生的经济效益以及植被生长、土壤健康等生态层面的非经济效益;“负效益”主要为暴雨引起洪涝导致的直接、间接的经济损失以及生命安全影响、政治社会影响等无法用经济指标衡量的损失。目前,已有较为成熟的效益评估方法包括陈述偏好法、经济学法、统计学法和智能方法。陈述偏好法^[41]侧重于采集公众或利益相关方的主观认知;经济学法^[42]借助模型量化投入与产出的关系;统计学法^[43]通过数理计算进行快速评估;智能模型^[44]可有效提取复杂数据中的隐含特征并揭示其内在规律。风险、效益评估的相关方法总结如表 4 所示。

表 4 暴雨风险-效益评估方法

Table 4 Rainstorm risk-benefit assessment methods

项目	方法类别	方法名称	具体描述	研究展望
风险 评估	综合评估法	层次分析法、和谐评估法、TOPSIS 法等多准则决策分析法	优势:综合考虑多个准则或目标,适用于复杂决策场景,支持多目标权衡 不足:权重赋值具有主观因素	结合智能模型与物理模型,融合地理信息系统,优化动态模拟、实时预测和空间评估的效率;融合多源风险与效益评估指标,通过数据挖掘与模式识别,增强复杂区域的风险-效益协同评估能力
		频率比法、信息值法、逻辑回归等统计方法	优势:基于概率与统计理论,模型可解释性强 不足:难以捕捉复杂的非线性关系	
	仿真模拟法	HEC-HMS、MIKE、InVEST 模型等多模型模拟法	优势:动态模拟时空演变特征,量化复杂系统间的交互 不足:计算资源消耗大,耗时长,需高精度数据	
	地理信息系统法	空间展布法	优势:空间可视化能力强,直观展示多源数据分布 不足:难以处理非线性或动态变化关系	
效益 评估	智能模型	CNN、LSTM 等	优势:挖掘数据间非线性关系与内在规律,适应复杂情景 不足:依赖大量数据,模型可解释性不足	
	陈述偏好法	问卷调查、实地考察等	优势:灵活性强,适用于社会、生态效益等非量化价值 不足:受样本代表性影响大,工作量大,时效性低	
	经济学法	成本效益分析法、投入产出模型法、C-D 生产函数法等	优势:以经济指标为核心,系统衡量直接和间接经济效益 不足:难以衡量生态、社会效益,参数敏感性高	
	统计学法	分摊系数法、比例系数法等	优势:计算简单,可快速估算效益 不足:难以刻画复杂关系,数据依赖性强	
	智能模型	SVM、RF 等	优势:挖掘海量数据中的隐性模式,适应复杂非线性关系与实时动态优化 不足:依赖大量数据,模型可解释性不足	

基于灾害系统理论与人水和谐论,融合降雨径流预报结果,统筹内在禀赋与外部影响,考虑风险与效益两个层面,定量解析风险与效益的相互作用关系,系统评估暴雨的“双层”影响,评估思路见图 5,重点研究:①暴雨风险-效益评估指标体系构建。基于多维度的影响分析,从定量评估方面将风险因素与效益目标进行融合,构建风险-效益评估体系。②耦合内在禀赋与暴雨影响的风险-效益评估。基于和谐量化方法与风险-效益量化方法,考虑自身固有属性与外部暴雨影响,结合地区自身和谐度与风险-效益系数,开展风险-效益和谐评估研究。

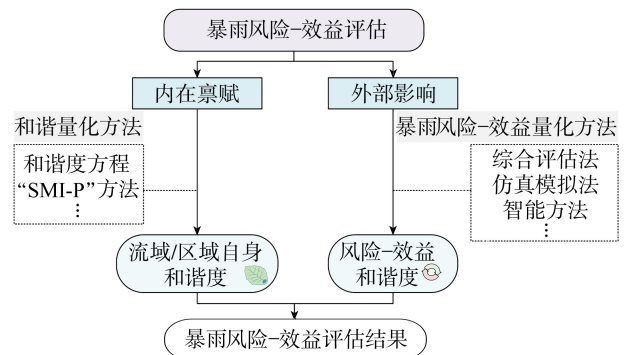


图 5 暴雨风险-效益双层评估体系

Fig. 5 Rainstorm risk-benefit dual-layer assessment system

4 暴雨风险-效益和谐调控研究方法及应用需求

暴雨带来的风险和效益对地区的自然环境、经济社会和生态系统具有一定影响。传统的暴雨管理主要聚焦于风险控制,易忽视暴雨作为自然水文循环载体的生态服务价值及二者之间的复杂关系。因此,有必要对暴雨风险-效益进行综合调控。

水资源调控是在特定区域范围内通过工程与非

工程措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行调配,支撑社会稳定、经济发展和生态保护^[45]。通过构建调控模型,有效地管理水资源的分配、使用和保护,优化资源配置确保各方面需求平衡。特别是在应对突发事件、气候变化或人口增长等不确定性因素时,调控模型能够在有限资源的约束下作出科学合理的决策。根据系统优化目标的维度差异,调控模型可分为单目标优化模型和多目标协同优化模型两类,如表 5 所示。

表 5 暴雨风险-效益调控方法

Table 5 Rainstorm risk-benefit regulation methods

方法类别	方法名称	具体描述	研究展望
单目标调控	线性规划	优势:目标函数单一,模型简单、求解高效,适用于快速决策 不足:无法处理非线性关系,对数据的误差较为敏感	将含有物理意义的约束条件与智能模型进行融合,提升非线性规划的全局搜索能力,辅助多目标优化决策
	非线性规划	优势:能够处理多目标函数或约束条件中的非线性关系,灵活性强 不足:计算复杂度高,易陷入局部最优解	
	动态规划	优势:能够将多阶段决策问题分解优化 不足:时间复杂度高,且计算资源要求较高	
多目标调控	多目标优化算法	优势:通过帕累托解集,提供多种权衡方案 不足:计算复杂度高,难以评估单一的“最优解”	
	博弈论模型	优势:能够有效模拟多个决策者(参与者)之间的互动与竞争 不足:计算复杂度高,依赖假设条件	
	和谐调控方法	优势:实现水资源系统与社会、经济、生态子系统间多方利益平衡 不足:量化难度高,实现较为复杂	

和谐调控(harmony regulation)是在和谐评估的基础上,采取一些调控措施提高和谐程度,使和谐参与者朝着和谐的方向发展^[46-47]。通过和谐调控,可在一定程度上提高和谐度,优化人水关系^[48-50]。本文引入和谐调控方法,考虑水资源、经济社会、生态环境等多方面约束,以构建暴雨风险-效益和谐调控模型为核心,具体调控思路如图 6 所示,重点研究:①暴雨风险-效益和谐调控模型构建。借鉴人水和谐论思想,引入暴雨风险-效益和谐机制,基于暴雨多维度风险-效益评估结果,将暴雨引发的风险与效益纳入调控模型,识别制约“风险-效益”和谐目标实

现的关键因素;综合考虑工程措施和非工程措施,确定调控准则、表征指标、目标函数及约束条件等,构建面向“弱风险-优效益”双目标的“预报-调控”协同模型。②暴雨风险-效益调控模型求解及效果评价。以调控模型为基础,结合和谐调控方法、多目标优化算法与智能模型,确定调控参数的最优组合,研究风险-效益和谐的最优解集,模拟评估不同暴雨情景下的调控效果,提出暴雨调控策略。③暴雨风险-效益调控保障体系。从流域水安全的全局视角出发,研究面向暴雨防控的风险-效益调控保障体系,考虑工程措施、政策法规、制度安排及技术创新等多个方面,保障风险-效益调控方案的顺利实施。

5 结 语

本文以流域或区域系统为分析单元,突破传统单要素研究范式,构建了暴雨风险-效益评估与调控框架。通过定性分析与定量模拟相结合的研究路径,系统揭示了暴雨事件对经济生产、社会运行及生态系统的风险-效益影响,提出暴雨风险-效益动态评估与协同调控框架。该框架的应用成果可为提升防洪安全与优化雨洪资源化利用提供支持,对推进韧性区域/流域建设具有重要理论价值。但是,本文只是初步的研究设计和思路拟定,是“暴雨风险-效益评估与调控”研究课题的总体框架介绍,更进一

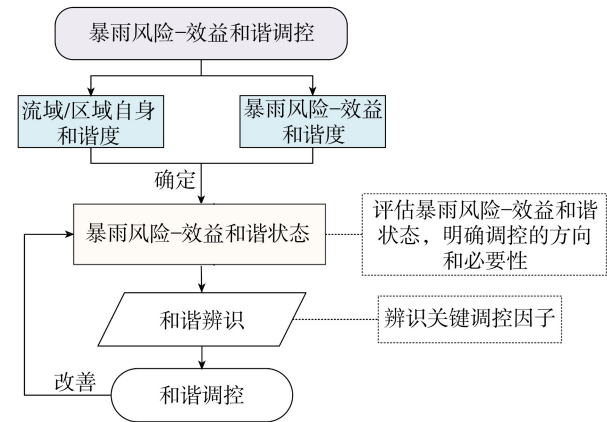


图 6 暴雨风险-效益和谐调控思路

Fig. 6 Rainstorm risk-benefit harmonious regulation approach

步的降雨-径流-洪水耦合机理研究、多维度定量评估以及和谐调控模型应用研究成果将在后续发表,期待更多学者开展暴雨风险-效益评估与调控的研究,共同推进智能预报-优化调控技术研发与跨部门协同保障体系建设。

参考文献:

[1] NASHWAN M S, SHAHID S, ABD RAHIM N. Unidirectional trends in annual and seasonal climate and extremes in Egypt [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136: 457-473.

[2] 薛媛,薛晓萍. 极端降水与干旱同步频发的研究进展 [J]. 海洋气象学报, 2022, 42 (1): 61-73. (XUE Yuan, XUE Xiaoping. Research advances in simultaneous frequency of extreme precipitation and drought [J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42 (1): 61-73. (in Chinese))

[3] ZHU Y, LIU Y, ZHU L, et al. Natural or man-made disaster? Lessons from the extreme rain and flood disaster in Zhengzhou, China on “ 2021. 7. 20 ” [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 118: 105999.

[4] LI J, LI L, ZHANG T, et al. How does high resolution topography affect flood simulation at watershed scale: A case study in a small watershed based on tilt photography [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c, 2023, 131: 103443.

[5] XIANG X, GUO S, LI C, et al. Deep learning model for flood probabilistic forecasting considering spatiotemporal rainfall distribution and hydrologic uncertainty [J]. Journal of Hydrology, 2025, 655: 132879.

[6] 周聂,侯精明,陈光照,等. 基于机器学习的山洪灾害快速预报方法 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (2): 32-40. (ZHOU Nie, Hou Jingming, CHEN Guangzhao, et al. A rapid forecasting method for mountain flood disaster based on machine learning algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (2): 32-40. (in Chinese))

[7] 曾文颖,徐明庆,宋松柏,等. 基于 R-Vine Copula 函数的极端降水联合分布模型及风险识别 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 96-103. (ZENG Wenying, XU Mingqing, SONG Songbai, et al. Joint probability distribution and risk identification of extreme precipitation based on R-Vine Copula function [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 96-103. (in Chinese))

[8] LIU J, XU L, CHEN N. A spatiotemporal deep learning model ST-LSTM-SA for hourly rainfall forecasting using radar echo images [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127748.

[9] 叶可佳,梁忠民,陈红雨,等. 区域化长短期记忆神经网络 (LSTM) 洪水预报模型研究 [J]. 湖泊科学, 2025, 37 (2): 651-659. (YE Kejia, LIANG Zhongmin, CHEN

Hongyu, et al. Research on regional long short term memory neural network (LSTM) flood forecasting model [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37 (2): 651-659. (in Chinese))

[10] JANG S D, YOO J H, LEE Y S, et al. Flood prediction in urban areas based on machine learning considering the statistical characteristics of rainfall [J]. Progress in Disaster Science, 2025: 100415.

[11] WEI Q, ZHANG H, CHEN Y, et al. City scale urban flooding risk assessment using multi-source data and machine learning approach [J]. Journal of Hydrology, 2025, 651: 132626.

[12] REN X, SHAO A, LIU W, et al. Improvements on short-term precipitation forecast in Northwest China based on regionally optimized moisture adjustment scheme for convective-scale NWP [J]. Atmospheric Research, 2022, 273: 106167.

[13] LI W, ZHANG J, SUN R, et al. Evaluation of Tianji and ECMWF high-resolution precipitation forecasts for extreme rainfall event in Henan in July 2021 [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16 (2): 122-131.

[14] MADHULATHA A, DAS A K, BHAN S C, et al. Feasibility of model output statistics (MOS) for improving the quantitative precipitation forecasts of IMD GFS model [J]. Journal of Hydrology, 2025, 649: 132454.

[15] 马雅楠,陈静,徐致真,等. GRAPES 对流尺度集合预报模式中不同尺度初始扰动能量的演变特征 [J]. 大气科学, 2023, 47 (5): 1541-1556. (MA Yanan, CHEN Jing, et al. Evolution Characteristics of Initial Perturbation Energy at Different Scales in Convection-Permitting Ensemble Prediction of GRAPES [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47 (5): 1541-1556. (in Chinese))

[16] RINEHART R E, GARVEY E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar [J]. Nature, 1978, 273 (5660): 287-289.

[17] 魏凡,田刚,徐卫立,等. 光流法雷达外推产品在突发强降水预报中的应用 [J]. 人民长江, 2024, 55 (1): 97-104. (WEI Fan, TIAN Gang, XU Weili, et al. Research progress on landslide engineering reinforcement and ecological slope protection measures in Three Gorges Reservoir area [J]. Yangtze River, 2024, 55 (1): 97-104. (in Chinese))

[18] 曾康,闵锦忠,庄潇然,等. 基于生成对抗网络的强对流临近预报方法及其在中国东部地区的应用评估 [J]. 大气科学, 2024, 48 (6): 2316-2328. (ZENG Kang, MIN Jinzhong, ZHUANG Xiaoran, et al. Severe Convection Nowcasting Method Based on a Generative Adversarial Network and Its Application Evaluation in Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48 (6): 2316-2328. (in Chinese))

- [19] WANG Q,ZHAO X,LI F,et al. Optimized parameters for SCS-CN model in runoff prediction in ridge-furrow rainwater harvesting in semiarid regions of China [J]. Agricultural Water Management,2025,310:109363.
- [20] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护,2023,39(4):19-25. (SHI Peng,LU Meixia,WU Hongshi,et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin' anjiang mode [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):19-25. (in Chinese))
- [21] GUO X,WU Z,FU G,et al. A multi-variable calibration framework at the grid scale for integrating streamflow with evapotranspiration data to improve the simulation of distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2024,55:101944.
- [22] GUO C,LIU T,HUANG Y,et al. Sustainable groundwater regulation in typical irrigation areas of inland river basins based on ecological indicators and the MIKE-SHE hydrological model [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2024,56:102000.
- [23] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护,2023,39(2):17-24. (FENG Ping,ZHANG Libin,LI Jianzhu,et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 17-24. (in Chinese))
- [24] 郭方,刘新仁,任立良. 以地形为基础的流域水文模型: TOPMODEL 及其拓宽应用[J]. 水科学进展,2000(3): 296-301. (GUO Fang, LIU Xinren, REN Liliang. A Topography Based Hydrological Model: TOPMODEL and Its Widened Application [J]. Advances in Water Science, 2000(3):296-301. (in Chinese))
- [25] MAO G, WANG M, LIU J, et al. Comprehensive comparison of artificial neural networks and long short-term memory networks for rainfall-runoff simulation [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c, 2021, 123;103026.
- [26] YIN H, ZHAO X, ZHANG X, et al. Multi-step regional rainfall-runoff modeling using pyramidal transformer [J]. Journal of Hydrology, 2025, 656;132935.
- [27] 杨子菁,刘攀,王起峰,等. HEC-HMS 模型在不同水文气象分区中的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(2):26-34. (YANG Zijing, LIU Pan, WANG Qifeng,et al. Application of HEC-HMS model in different hydrometeorological regions [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51 (2): 26-34. (in Chinese))
- [28] 汤岭,王海军,李致家,等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):21-28. (TANG Ling,WANG Haijun, LI Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52 (1): 21-28. (in Chinese))
- [29] DHOTE P R, JOSHI Y, RAJIB A, et al. Evaluating topography-based approaches for fast floodplain mapping in data-scarce complex-terrain regions: Findings from a Himalayan basin [J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129309.
- [30] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):81-88. (LUAN Zhenyu,JIN Qiu,ZHAO Siyuan,et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 81-88. (in Chinese))
- [31] 蒋卫威,鱼京善,陈寅生,等. 基于 FLOW3D 的梅溪洪涝段桥梁雍水三维数值模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):776-785. (JIANG Weiwei,YU Jingshan,CHEN Yansheng,et al. Numerical simulation of Meixi River bridge backwater based on 3D hydrodynamic model FLOW3D in Honglai Town [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19 (4): 776-785. (in Chinese))
- [32] TAN X Z, LI Y, WU X X, et al. Identification of the key driving factors of flash flood based on different feature selection techniques coupled with random forest method [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101624.
- [33] ZIYA O,SAFAIE A. Probabilistic modeling framework for flood risk assessment: A case study of Poldokhtar city [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101393.
- [34] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 28-35. (in Chinese))
- [35] 张会,李钺,程炯,等. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展,2019,38(2):175-190. (ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability [J]. Progress in Geography, 2019, 38 (2): 175-190. (in Chinese))
- [36] 王晟,张珂,晁丽君,等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护,2023,39(6):70-76. (WANG Sheng, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Assessment of food and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 70-76. (in Chinese))

- [37] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
- [38] LAZZARIN T, VIERO D P, MOLINARI D, et al. A new framework for flood damage assessment considering the within-event time evolution of hazard, exposure, and vulnerability [J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128687.
- [39] MAMEN A R, MUSTAFA A, KAREEM D A, et al. Mapping of flood-prone areas utilizing GIS techniques and remote sensing: a case study of Duhok, Kurdistan Region of Iraq[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4):1102.
- [40] 高玉琴,徐诺,汪键,等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(2):115-122. (Gao Yuqin, XU Nuo, WANG Jian, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2):115-122. (in Chinese))
- [41] DAVIS R K. Recreation planning as an economic problem [J]. Natural Resources Journal, 1963, 3:239.
- [42] 刘远,李莹,王国复,等. 河南省“21·7”极端暴雨灾害多区域间接经济损失评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4):45-51. (LIU Yuan, LI Ying, WANG Guofu, et al. Multi-Regional Indirect Economic Loss Assessment of “21·7” Extreme Rainstorm in Henan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4):45-51. (in Chinese))
- [43] AKAY H. Flood hazards susceptibility mapping using statistical, fuzzy logic, and MCDM methods [J]. Soft Computing, 2021, 25(14):9325-9346.
- [44] 孟庆帅,巩钰,刘小燕,等. 水资源-社会经济-生态环境耦合协调度关系研究及预测:以黄河流域内蒙古段为例[J]. 干旱区研究, 2025. (MENG Qingshuai, GONG Yu, LIU Xiaoyan, et al. Research and prediction of the degree of coupling coordination of water resources, socioeconomic development, and the ecological environment: A case of the Inner Mongolia section in the Yellow River Basin [J]. Arid Zone Research, 2025. (in Chinese))
- [45] 王煜,彭少明,武见,等. 黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J]. 水利学报, 2020, 51(1):44-55. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1):44-55. (in Chinese))
- [46] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1):135-144. (ZUO Qiting. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1):135-144. (in Chinese))
- [47] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):1-6. (in Chinese))
- [48] 董怡,邹磊,夏军,等. 武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别[J]. 水资源保护, 2023, 39(6):87-94. (DONG Yi, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan City and identification of obstacle factors [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6):87-94. (in Chinese))
- [49] 左其亭,李佳伟,于磊. 黄河流域人水关系作用机理及和谐调控[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2):1-8. (ZUO Qiting, LI Jiawei, YU Lei. Mechanism and harmony regulation of human-water relationship in Yellow River basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2):1-8. (in Chinese))
- [50] 左其亭. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5):1-12. (ZUO Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5):1-12. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-28 编辑:彭桃英)

