

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.004

# 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述

刘永志<sup>1,2</sup>, 唐雯雯<sup>3</sup>, 张文婷<sup>3,4</sup>, 张行南<sup>3,4</sup>, 牛 帅<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 2. 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 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**从灾害链的视角对洪涝灾害进行研究,可对洪涝灾害的形成机制、时空分布规律以及洪灾损失有一个更加全面的认知,以系统探讨洪涝灾害以及衍生灾害的应对策略。梳理国内外学者对灾害链的定义,总结了洪涝灾害链的含义,重点阐述了灾害链的研究内容和研究方法,概括了目前针对洪涝灾害链研究的断链减灾措施,认为目前国内外学者对于洪涝灾害链的研究尚未成熟,需要进一步结合其他领域技术对洪涝灾害链风险分析开展进一步深入研究。

**关键词:**灾害链;洪涝灾害;断链减灾;风险分析;综述

**中图分类号:**TV213.4;P33 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0020-08

**Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain**//LIU Yongzhi<sup>1,2</sup>, TANG Wenwen<sup>3</sup>, ZHANG Wenting<sup>3,4</sup>, ZHANG Xingnan<sup>3,4</sup>, NIU Shuai<sup>1</sup> (1. *Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** From the perspective of disaster chain, the study of flood disaster can achieve a more comprehensive understanding of the formation mechanism, temporal and spatial distribution of flood disaster and flood losses, and can systematically study the response strategies of flood disaster and derivative disaster. This paper summarizes the meaning of flood disaster chain by combing the definition of disaster chain by scholars at home and abroad. The paper focuses on the research content and research method of disaster chain and summarizes the chain scission and disaster mitigation measures in current researches of flood disaster chain. It is concluded that at present, the research on flood disaster chain by domestic and foreign scholars is not mature, which needs further in-depth research combined with other field technology in the risk analysis of flood disaster chain.

**Key words:** disaster chain; flood disaster; chain scission and disaster mitigation; risk analysis; review

洪涝灾害自古以来就是频繁发生且影响广泛的自然灾害之一。随着城市化进程的不断加快,生态圈中各要素之间的关联性越来越大。自然灾害复杂的形成机理及自然灾害之间的相互关联性,导致很多次生灾害发生,形成链式效应。链式效应导致的损失远远超过单一灾害造成的损失,由重大自然灾害产生的衍生灾害也成为防灾减灾的重点对象。随着自然灾害发生频率越来越高,影响越来越大,很多学者已经认识到自然灾害带来的损失往往不是单一

灾害造成的,而是多种灾害形成的链式灾害效应,不能从单一灾害角度去分析灾害损失。从灾害链的角度,寻找一种有效的灾害推测预测机制,有效表达灾害之间的规律与关联<sup>[1]</sup>,由此制定防灾减灾政策,才能降低灾害链式效应带来的损失。

洪涝灾害号称“百害之首”,是很多自然灾害发生过程中链式效应中造成巨大损失的重要一环。如,1933年四川茂县7.5级地震后导致山崩,岷江断流,堵坝溃决,造成洪灾<sup>[2]</sup>;2005年,美国卡特里

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC0409000);国家自然科学基金面上项目(41471427);中央高校基本科研业务费专项(2019B10714);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y517018)

作者简介:刘永志(1982—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事洪水模拟及风险评估等研究。E-mail: yzliu@nhri.cn

娜飓风引起了大规模降雨与风暴,洪水消退后,严重污染和瘟疫相继而来;2008年四川汶川发生8.0级地震,由此引发山体滑坡、泥石流及堰塞湖等多种灾害,损失惨重<sup>[3-4]</sup>;2012年7月21日,北京因特大暴雨引发的内涝灾害导致79人死亡、95条道路中断,地面交通陷入瘫痪,并且引发两场泥石流灾害,对社会经济以及居民生产生活都造成了严重的破坏;2018年8月29日,深圳连续两日出现了大暴雨、局部特大暴雨,造成了内涝积水、河堤坍塌、山体滑坡、围墙倒塌,洪涝灾害链式效应凸显;2019年,日本强降雨引发泥石流、山体滑坡,导致多人死亡。上述灾害都与洪涝密切相关,因为链式效应的存在,导致了比单一灾害更为严重的灾害损失。引入灾害链相关理论开展洪涝灾害相关研究,可以从新的视角分析洪涝灾害的形成机制、致灾原理、时空分布规律以及洪灾损失,为系统研究洪涝灾害以及衍生灾害提供技术手段。

## 1 灾害链

### 1.1 灾害链的定义

20世纪80年代,郭增建等<sup>[5]</sup>认为灾害链是一系列灾害相继发生的现象,并根据其相互关系提出4种类型的灾害链。史培军<sup>[6]</sup>认为灾害链是一个自然灾害发生而引发一系列自然灾害发生的现象,并将灾害链分为并发性灾害链与串发性灾害链。文传甲<sup>[7]</sup>从功能、结构、本质3个方面给出了灾害链的定义,并且揭示了灾种之间的共性与个性。《地球科学大辞典》<sup>[8]</sup>对灾害链进行了明确的定义:由原生灾害及其引起的一系列次生灾害所形成的灾害系列。2006年肖盛燮<sup>[9]</sup>用“链式关系”和“链式效应”来概括灾害的演化过程。Kappes等<sup>[10]</sup>认为灾害链是灾害事件间的相互作用、环环相扣的结果,是一种灾害引发另一种灾害而形成的多米诺现象。Helbing<sup>[11]</sup>于2013年提出了关于灾害链的新见解:灾害之间通常具有因果关系,这使得灾害系统的复杂性大大加深。

除上述观点以外,国内外很多学者还提出了连锁效应、诱发效应、级联效应等一系列与灾害链有关的名词,解释由一种灾害引发一系列灾害的现象。对于灾害链,尽管不同学者从自己的知识背景以及研究领域出发提出了不同的见解,但是对于灾害链所造成的严重影响认识较为一致。灾害链是由两种或两种以上自然灾害构成,且相互之间存在一定的时空关联性。更为重要的是,灾害链对灾害系统中各单一灾种的破坏程度和损失情况会产生放大作用。

### 1.2 灾害链的构成

灾害链主要是由3个因素构成:致灾因子、孕灾环境和承灾体<sup>[12]</sup>。致灾因子往往是指自然环境中对人类造成不良影响的极端事件,是灾害发生的起因;孕灾环境是指受灾区域的综合地理条件,它能放大或制约灾害影响的严重程度;承灾体是指受灾区域内的主要受灾对象。致灾因子的危害性、孕灾环境的稳定性和承灾体的脆弱性都是灾害损失影响的重要因素。它们之间错综复杂的耦合关系以及与生态环境之间的物质、能量、信息交换,形成了复杂的灾情反馈机制<sup>[13]</sup>。灾害链<sup>[14]</sup>可以表达为

$$D = \{E, H, S, R\} \quad (1)$$

式中: $D$ 为灾害链系统; $E$ 为致灾因子; $H$ 为孕灾环境; $S$ 为承灾体; $R$ 为三者之间复杂的耦合作用。

从灾害链构成的角度来说,洪涝灾害链就是由其致灾因子(洪水、暴雨等)在一定孕灾环境(地形、气候、下垫面等)下对承灾体(生命、财产、基础设施等)造成损失及影响,并且诱发或者导致其他衍生灾害发生,对承灾体造成更为复杂影响的过程。灾害链过程中各个因子在时间和空间具备关联性。

## 2 洪涝灾害链的主要研究内容

洪涝灾害链是一种复杂的灾害系统,目前国内外学者对于洪涝灾害链的研究多集中于洪涝灾害链形成机制、洪涝态势估计与致灾态势推演、洪涝灾害链事件应急决策以及洪涝灾害链风险与损失评估等方面。

### 2.1 洪涝灾害链形成机制

洪涝灾害链形成机制是从洪涝灾害链的形成角度,对灾害之间的物质、能量交换过程进行探索,对它们之间的关系进行深入的研究,分析洪涝灾害链的致灾因子、成灾规律与灾害链特征等。目前,很多学者对于洪涝灾害链形成机制的研究尚停留在理论分析和定性描述阶段,缺乏基于数学、物理模型的洪涝灾害链形成机制分析。只有少部分学者建立了概念模型,分析研究洪涝灾害链的内部联系。

毛德华等<sup>[15]</sup>依据历史文献资料和器测资料建立洪涝灾害序列,通过概念模型和定量机制对洞庭湖区洪涝区域联系机制进行分析,认为该地区洪涝灾害形成的内在机制在于厄尔尼诺事件导致的全球气候变化,洪涝灾害发生的根本原因是大气环流异常。李发文等<sup>[16]</sup>通过分析文安洼蓄滞洪区灾害链的特征,确定了该蓄滞洪区的灾害链类型属于雨-洪灾害链,并依据洪水灾害发生特征对其进行了阶段划分,进而为防灾减灾提供依据。杨洋等<sup>[17]</sup>立足于重庆市的地形条件和洪涝现状,分析了重庆市旱涝

特点及形成机制,认为洪涝灾害形成的最主要原因是大气环流。而 Wan 等<sup>[18]</sup>将移动平均、累积异常和小波分析等方法应用于洪涝灾害链形成机制研究中,对 1368—1911 年宝鸡地区旱涝灾害异常情况进行了分析,认为 1368—1911 年宝鸡市旱涝灾害链的相继出现是对全球气候变化的响应。上述研究中,学者根据现有地形、降雨、历史洪水等资料,对洪涝灾害链的致灾因子进行分析,进而得出洪涝灾害链形成机制,多侧重利用现有资料进行宏观分析,同时也结合典型区域进行具体分析,但较少利用数学分析方法。

## 2.2 洪涝态势估计与致灾态势推演

洪涝灾害是一个不断变化、不断演进的动态过程,洪涝灾害的影响也具有不确定性。虽然堤防、闸坝、水库、蓄滞洪区等防洪体系不断完善,但气候、下垫面变化使得洪涝灾害的变化规律更加复杂,因此,利用信息化手段开展洪涝灾害链的防洪调度实时决策和应急响应研究具有重要的现实意义。为了厘清洪涝灾害链的发展过程及洪水态势演化,不少国内外学者致力于洪涝态势估计及态势演进研究。

GIS 技术因其管理、存取地理信息数据以及空间数据的统计分析功能,在我国防灾减灾领域应用广泛。陆晨星<sup>[19]</sup>研究 GIS 在洪涝灾害链应急响应方面的应用,结合三峡的世纪应急环境和拟定的突发事件,对三峡区域洪水的态势演进信息做了充分的分析研究,在此基础上开发了基于 GIS 的洪水应急与态势信息管理系统。黄亭亭<sup>[20]</sup>通过 D-S 证据理论和贝叶斯网络对水电工程洪水灾害链突发性事件进行建模,从灾害因素中提炼出态势情景构建的关键信息,分析了灾害链的态势信息融合和态势推演,构建了基于灾害链的应急态势推演模型,但是该模型仅考虑了洪水灾害链条件下的单一灾害事件。目前的方法多注重单一风险的分析,缺少综合系统的方法对多风险过程之间的相互关系进行研究。对冰川湖暴发洪水过程链作为一个连续体进行动态建模,进行多风险过程洪水态势估计的初步探索。Somos-Valenzuela 等<sup>[21]</sup>在 Wormi 等<sup>[22]</sup>的基础上,通过构建冰川湖灾害过程链模型,分别利用 RAMMS 模型、FLOW3D 模型、BASEMENT 模型、FLO2D 模型对雪崩到淹没的过程链,冰川融化引起的次生灾害(包括洪灾)以及水文过程、洪水过程、溃坝过程进行精确模拟,还原了灾害链的演进过程,为预警提供了依据。态势信息监测与态势信息融合是洪涝灾害灾情估计的基础。态势推演是在态势信息融合的基础上,对高度不确定性的洪涝灾害环境进行动态模拟和仿真,还原洪涝灾害链的演进过程。目前针对

洪涝灾害链的态势信息监测和态势推演多集中于灾害链引发的单一灾害事件的研究,对于多灾害之间的相互级联关系的研究仍处于初步探索阶段,应当进一步加强对过程的监测和对过程链的建模。

## 2.3 洪涝灾害链事件应急决策

洪涝灾害事件是充满不确定性的突发性事件,决策者对当前灾害事件给出的决策信息会随着洪涝灾害事件演进过程而不断变化。针对类似于洪涝灾害事件的态势复杂的突发性事件,国内外学者认为该种事件的决策过程具有动态性和多阶段性<sup>[23]</sup>。因此,对于洪涝灾害链事件的发生、发展、蔓延态势的掌握显得尤为重要,决策者根据洪涝灾害事件一系列复杂的演变过程,不断调整应急态势动态决策方案,以寻找适合当前洪涝态势的最佳决策方案。

钱立香<sup>[24]</sup>立足现有灾害应急救援基础,运用应急救援管理、决策支持系统、地理信息系统相关知识,对基于 WebGIS 技术的安徽省洪涝灾害应急救援决策支持系统进行了研究,提出将洪涝灾害管理纳入应急决策支持系统当中,并对核心功能模块进行了设计分析。而徐磊<sup>[25]</sup>根据历史洪涝灾害的演化规律,建立了基于贝叶斯网络的洪涝灾害应急决策支持模型,将数值方法融入应急决策中,大大提高了突发事件应急决策的计算效率。黄亭亭<sup>[20]</sup>在态势情景推演的基础上,同样利用数学方法,采用了考虑到原生灾害和次生灾害的多属性效用函数,建立了水电工程洪涝灾害链的动态决策模型。而 Dale 等<sup>[26]</sup>则是从经济学角度构建效益-成本激励框架提前监测潜在洪水事件,可以通过多种洪水事件管理措施将其用于各种洪水环境。上述研究将洪涝灾害应急决策研究拓展到洪涝灾害链应急决策研究,拓展了洪涝灾害应急决策分析涉及的范围,同时结合了动态、高效的决策模型理论,从经济学、灾害学、数值分析等角度进行分析,丰富了研究手段。

## 2.4 洪涝灾害链风险与损失评估

洪涝灾害链风险与损失评估是人类防范洪涝灾害,降低洪涝灾害链损失的重要研究内容。目前,对于洪涝灾害的风险损失评估多从单一灾种入手,如王贺等<sup>[27]</sup>评价了极端雨洪情况下城市洪水风险,建立了基于正态云模型的极端雨洪下城市洪水风险综合评价模型。石晓静等<sup>[28]</sup>应用熵权法计算选取指标的权重,基于云模型的方法评价了安康市典型年份洪灾风险。陈军飞等<sup>[29]</sup>研究了基于随机森林算法的洪水灾害风险评估,并与支持向量机模型进行了验证和对比分析研究。但是,多种自然灾害发生的关联性、复杂性、协同性使得对单一灾种的风险损失评估已经不能满足自然灾害链式效应大环境下的

风险损失评估需求。周洪建等<sup>[30]</sup>以半干旱区为例,构建了基于多元信息的极端强降雨灾害链损失快速评估方法,对甘肃岷县“5·10”山洪泥石流灾害进行灾害链损失实物量损失评估,以 GIS 空间分析为重要研究手段,与一般洪涝灾害损失评估方法基本相同。杜姗姗<sup>[31]</sup>着眼于区域灾害系统理论,从灾害链的角度构建了地震-洪涝灾害链综合损失评估体系,同时,结合空间计量理论建立了综合损失评估模型,从致灾因子危险性和承灾体脆弱性两个角度分析地震-洪涝灾害链的损失影响因素。而叶金玉<sup>[32]</sup>则从灾害系统的角度,构建基于致灾因子、孕灾环境、承灾体 3 个方面的指标体系,提出了基于多维矩阵的台风灾害链综合风险评估模型,克服了传统方法仅从致灾因子角度分析洪涝灾害链的不足,真正从灾害链系统角度实现了风险评估。Duhametin 等<sup>[33]</sup>则是将洪涝灾害链损失分析应用于防洪决策中去,通过量化不同参数下德国易北河流域 Mulde 集水区的经济损失,来分析洪涝灾害链系统中不同组成部分对洪水风险影响的敏感性,进而对洪水风险敏感薄弱环节采取相应措施。通过上述研究,洪涝灾害链的风险评估是从致灾因子、孕灾环境和承灾体这 3 个方面构建洪涝灾害链风险损失评估指标体系,选择不同指标对其进行危险性分析,进而构建精准有效的洪涝灾害链损失综合评估模型,对灾害损失实现定量表达,同时选取典型案例数据进行验证,以分析模型的精确性及适用性。目前,对于洪涝灾害链的风险与损失评估已经能够从灾害系统的角度对区域洪涝灾害链进行有效评估与合理应用。

### 3 洪涝灾害链风险分析中常用方法

灾害链因为其形成机制复杂、预报难度大、危害性强等特点,近年来获得了国内外广大学者的关注。但是,他们的研究多集中在山区地质灾害方面,对于灾害链在洪涝灾害方面的研究尚处于起步阶段,缺乏系统性的研究。目前国内学者从不同角度对洪涝灾害链的形成机制、致灾机理、危害程度、时空演变特征进行分析,研究方法主要有案例透析法、周期分析法、模糊数学法、数学建模法。

#### 3.1 案例透析法

案例透析法是目前灾害链领域研究分析常用的一种方法,多用于洪涝、干旱、沙尘暴灾害分析。案例透析法通过典型案例对研究对象进行系统的理论分析,通过对典型洪涝灾害链案例进行分析得到洪涝灾害链一般的、普遍的规律,从而针对分析结果对不同地区制定不同的防御对策。李景保等<sup>[34]</sup>依据灾害系统理论和暴雨径流形成规律,对湖南省暴雨

洪涝灾害链的形成条件、致灾能量与灾情进行系统研究,得出暴雨径流型灾害链与自然界其他单一灾害一样具有自然属性、社会属性和灾害学属性 3 种基本属性,在形成过程中呈现明显的突发性、多发性、渐发性和正反馈性等特征,为暴雨径流型灾害链的研究提供了参考。王萌等<sup>[35]</sup>通过对陕西省暴雨灾害链的演变过程进行分析,着重分析了降雨、地质地貌和人类活动这 3 种成灾机制,根据致灾因素,建立了综合减灾管理体系,提出了一系列关于暴雨灾害链的减灾措施。叶丽梅等<sup>[13]</sup>通过对 2012 年 8 月湖北省鄂西北地区典型洪涝案例进行分析,从灾害系统论的角度出发,结合湖北省灾害特征,分析了湖北省的致灾成灾机制。通过对灾害过程的归纳总结,提出基于典型案例的灾害链形成机制,构建暴雨洪涝灾害链的断链减灾框架,为洪涝灾害的预测和防洪减灾决策的制定提供依据。这种方法通过选取典型案例进行分析,从个例中得出一般的、普遍的规律,简单易行、可操作性强、结果相对可靠,但是从单一案例得出的结论难免过于片面,不能反映事物普遍的规律,只能应用于自然环境或洪水特征相近区域中,仍有一定的局限性。

#### 3.2 周期分析法

通过对流域历史洪水发生频率和洪水特征进行分析,能够发现洪水发生有迹可循,有一定的共性<sup>[36-37]</sup>。周期分析法有很多种,包括方差分析、谐波分析和功率谱分析等。在周期分析法基础上,结合灾害链系统理论和洪涝灾害形成规律,系统地研究流域的洪涝灾害链特征及规律,为洪涝灾害的预测、预防提供依据。杨谨菲等<sup>[38]</sup>根据 1956—2007 年山西省运城市太阳黑子活动资料和降水资料,通过 Z 指数分析得到运城市的旱涝年,分析其与太阳黑子活动的相关关系,从而得到洪灾与旱灾发生年份与太阳黑子极值年的关系。李发文等<sup>[39]</sup>采用谐波周期分析法分析阜平流域的洪峰序列和次洪序列规律,进一步验证了洪涝灾害的发生与太阳黑子活动的关系,并且认为人类活动的作用不可忽视。刘沛林<sup>[40]</sup>则从周期地理学的角度,研究长江流域历史洪水的近日点日月交食年、太阳黑子活动和历史气候周期等 3 个因素与洪涝灾害周期的关系,发现长江流域洪涝灾害链与以上 3 个因素密切相关,而且肯定了人类活动对洪涝灾害链周期影响极大,能够扰乱历史洪水原有周期规律。Wan 等<sup>[18]</sup>根据宝鸡地区 1368—1911 年的历史资料,通过移动平均、小波分析方法得到宝鸡地区旱涝灾害链的时空分布规律,探讨了灾害链对气候变化的响应机制。周期分析法通过分析历史洪水的特征与规律,探讨其与太

阳黑子活动、人类活动、气候变化等因素之间的关系,从而得到洪涝灾害链的周期规律,为旱涝灾害等自然灾害的预测预警以及相关防洪决策的制定提供依据。但是这种方法需要丰富的历史资料,且与人类活动、气候变化等不可预测的因素密切相关。

### 3.3 模糊数学法

模糊数学法是在模糊数学的基础上对洪涝灾害进行综合评价的一种方法,它将定性评价转换为定量评价,对不确定性的问题进行量化,最终确定洪涝灾害的风险等级。

丁燕等<sup>[41]</sup>从灾害系统角度出发,根据致灾因子强度和承灾体易损度,分析台风致灾因子的时空变异强度以及承载体易损性,构建了台风灾害模糊风险评估模型,对广东省 14 个市区台风灾害链风险进行评估。随着时间改变,空间具有很大的变异性,Ahmad 等<sup>[42]</sup>在时空基础上将局部水害灾害概念扩展到三维,解决了由时空变异性和模糊性引起的不确定性,在更详细地了解时间的基础上协助洪水管理决策风险的空间变异性。Liao 等<sup>[43]</sup>则从自然过程和风险链的角度对灾害进行研究,通过构建基于海洋灾害洪涝风险的目标指标体系,对青岛市的洪涝灾害风险进行量化并且分析其影响因素,认为自然因素在灾害过程中起着重要的作用,人为控制作用对其影响相对较小。模糊数学评估模型能够通过模糊数学评价方法综合评估流域洪涝灾害风险,但是由于指标体系方法的局限性,使得模型的不确定性无法预测,因此必须综合和量化各种自然和人为可控因素,从而为沿海地区防灾减灾提供一定的技术支持。

### 3.4 数学建模法

为了对洪涝灾害链有一个直观的认识,很多学者采用数学模型对洪涝灾害链的本质及内在特性进行概化,对致灾因子、孕灾环境、承灾体和灾害链式传播规律展开研究,构建洪涝灾害链式演化模型,评估洪涝灾害风险,为灾害链领域相关概念的表达提供了一种统一的描述,为相关断链减灾措施的制定提供了可靠的依据。

目前,国内外学者研究成果大多集中在洪涝灾害事件的静态信息表现,不足以呈现洪涝灾害事件的复杂性。Duhametin 等<sup>[33]</sup>构建了区域气象模型、降雨径流模型、区域洪水模型、洪水损失估算模型等一系列模型来描述洪涝灾害链的过程,分析不同参数对洪水风险影响的敏感性,提出了断链减灾的有效措施。通过构建灾害链相关模型,实现对洪涝灾害链相关关键致灾因子的概化,分析洪涝灾害的危险性,评估风险等级,通过相关历史洪灾案例对模型

进行验证,保证灾害链模型的精度,是洪涝灾害链领域研究中十分重要的方法。陈泽强等<sup>[44]</sup>从观测角度出发,基于 MOF(meta object facility)框架从实例层、模型层、元模型层建立了洪涝灾害事件元模型,兼顾了洪涝灾害事件阶段,实现洪涝灾害事件的动态建模。但是目前仍然缺乏洪涝灾害链式结构的统一表达机制。杜志强等<sup>[45]</sup>提出了一种灾害链领域本体构建方法,以实现对洪涝灾害链式效应的统一描述与表达,采用贝叶斯网络构建灾害链模型,分析暴雨洪涝灾害链。杜志强等<sup>[46]</sup>在此基础上从致灾因子、孕灾环境、承灾体等角度进行分析,构建灾害链的统一描述模型,借助时序分析模型分析异常降雨,将异常降雨作为致灾因子实现了对暴雨型洪涝的短期临灾预警,为短期暴雨型洪涝的临时预警提供了一种新的思路。灾害链式效应引发了多种灾害,往往单一的模型不足以解决这个问题。但是,目前数学建模法对各个模型评估因子的数据源时空尺度难以统一,对灾害链的分析还停留在 GIS 叠置分析和专家打分的基础之上。

## 4 断链减灾模式在洪涝灾害链减灾中的应用

洪涝灾害以及链式反应导致的灾害会造成巨大的损失,破坏基础设施,威胁人民生命安全和财产安全等,因此,对洪涝灾害链的发生过程、形成机理进行深入的研究,从致灾因子、孕灾环境和承灾体三要素对灾害发生的作用及影响,找出断链的最佳环节,减轻链式效应或者避免洪涝灾害链式灾害发生,从而达到防灾减灾的目的。

### 4.1 基于致灾因子的断链减灾措施

导致我国洪涝灾害的致灾因子众多,可概括为以下几大类:流域洪水(江河漫溢或溃堤)、水库洪水(水库泄洪或溃坝)、蓄滞洪区洪水(人工分洪)、城市洪水(多致灾源,暴雨洪涝为主)以及凌汛和风暴潮洪水。归根结底,还是由气象因素主导,如超标准暴雨导致的雨洪灾害,台风导致的暴雨和风暴潮等。当前,通过人为方法直接作用于气象的手段有限,只能通过环境保护、生态改善等系列措施减少极端天气的发生频率。

### 4.2 基于孕灾环境的断链减灾措施

人类对于洪涝灾害链孕灾环境的断链减灾还是大有可为的。在这个方面,当前开展的工作涉及以下几个方面:对山洪沟、易涝点、行洪能力较差的河流开展风险普查,进行敏感性及流域汇水分析,识别出雨洪高风险区;在保留原有蓄洪调洪的自然功能的同时,对雨洪高风险区采取填洼、疏浚、排水管网建设等工程措施;推进海绵城市建设,构建城市雨洪

廊道体系。在保证自然生态的同时,减少雨洪灾害对生态的破坏,提高城市的承灾能力。

#### 4.3 基于承灾体的断链减灾措施

强化适灾能力是防范风险的核心。加强洪涝灾害及其衍生灾害的预警预报服务,构建高精度的水文水力学模型,可以为洪涝灾害链预判和决策提供指导。强化基础设施建设,加快堤防达标工程建设,划分洪涝危险区、安置区<sup>[47]</sup>,在灾害来临前及时预警转移受威胁人员,可以减少生命财产损失。总之,采取工程措施与非工程措施相结合的方法,对洪涝灾害及其衍生灾害做出防范措施,是行之有效的断链减灾措施。

### 5 研究展望

目前,洪涝灾害链的研究已经取得了一些进展,但是仍处于起步阶段,今后应着手于灾害链的统一表达机制,更加关注灾害链的动态过程,结合信息化手段,提高模型精度。

a. 目前通过构建数学、物理模型进行洪涝灾害链形成机制分析的研究缺乏。应当建立有关洪涝灾害链的统一描述与表达机制,实现大量灾害系统领域知识的共享与重复使用。同时,应当加紧对洪涝灾害链的定量分析,通过构建高精度的数学、物理模型来分析洪涝灾害链。

b. 当前研究侧重分析几类灾种之间的链式关系及形成机理,但是对于损失评估等方面,通常只对最后一种灾种进行损失评估及计算,而其他灾害只用来分析灾害链的发展过程,这样忽略了灾害链各个环节造成的损失,导致损失评估结论可能失真。在今后的研究中,在利用单一灾种研究成果的基础上,应当注重过程之间的级联关系,加强对过程的理解和过程链的建模。

c. 大数据时代,对于洪涝灾害链的研究必然会逐渐由定性研究向定量研究发展,由静态研究向动态实时转变,由传统的统计分析向数值模拟过渡。在此同时,应当利用好3S技术,并且加强对极端天气条件下数据的获取、收集、整理、分析,对灾害链过程模型进行校准,提高洪涝灾害链预测和模拟的精度,为洪涝灾害链断链减灾措施的制定提供更有力的依据。

#### 参考文献:

[1] 顾捷晔. 暴雨洪涝灾害链本体构建与推理方法[D]. 武汉:武汉大学,2017.  
[2] 门可佩,高建国. 重大灾害链及其防御[J]. 地球物理学进展,2008(1):270-275. (MEN Kepei, GAO Jianguo.

Severe disaster chain and its defense [J]. Progress in Geophysics,2008(1):270-275. (in Chinese))

[3] YUE Ge, GU Yongtao, DENG Wugong. Evaluating China's national post-disaster plans: the 2008 Wenchuan earthquake's recovery and reconstruction planning [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2010, 1(2):17-27.  
[4] 罗辉,邓创,赵高文. 2008—2017年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(1):17-24. (in Chinese))  
[5] 郭增建,秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学,1987(2):25-33. (GUO Zengjian, QIN Baoyan. A brief discussion on disaster physics [J]. Journal of Catastrophology,1987(2):25-33. (in Chinese))  
[6] 史培军. 灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报,1991(11):37-42. (SHI Peijun. Theory and practice of disaster research [J]. Journal of Nanjing University, 1991(11):37-42. (in Chinese))  
[7] 文传甲. 论大气灾害链[J]. 灾害学,1994(3):1-6. (WEN Chuanjia. On the chain of atmospheric disasters [J]. Journal of Catastrophology,1994(3):1-6. (in Chinese))  
[8] 《地球科学大辞典》编辑委员会. 地球科学大辞典:应用学科卷[M]. 北京:地质出版社,2005.  
[9] 肖盛燮. 生态环境灾变链式理论原创结构梗概[J]. 岩石力学与工程学报,2006(增刊1):2593-2602. (XIAO Shengxie. Originality structure sketch on chain-styled theory of disaster in eco-environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(Sup1):2593-2602. (in Chinese))  
[10] KAPPES M S, KEILER M, ELVERFELDT K V, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review [J]. Natural Hazards,2012,64(2):1925-1958.  
[11] HELBING D. Globally networked risks and how to respond [J]. Nature,2013,497:51-59.  
[12] 金菊良,宋占智,周玉良,等. 水旱灾害风险评估方法体系及其实证研究[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):142-151. (JIN Juliang, SONG Zhanzhi, ZHOU Yuliang, et al. Risk assessment method system for flood and drought disasters and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):142-151. (in Chinese))  
[13] 叶丽梅,周月华,周悦,等. 暴雨洪涝灾害链实例分析及断链减灾框架构建[J]. 灾害学,2018,33(1):65-70. (YE Limei, ZHOU Yuehua, ZHOU Yue, et al. Instance analysis of rainstorm floods chain and chain-cutting disaster mitigation building [J]. Journal of Catastrophology,2018,33(1):65-70. (in Chinese))

- [14] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7. (in Chinese))
- [15] 毛德华, 夏军. 洞庭湖区洪涝灾害的形成机制分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005(2): 199-203. (MAO Dehua, XIA Jun. Causing mechanism analysis of flood and waterlogged disaster in Dongting Lake region[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 2005(2): 199-203. (in Chinese))
- [16] 李发文, 张行行, 宫爱玺, 等. 蓄滞洪区洪水灾害链式类型特征及防御措施研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 252-255. (LI Fawen, ZHANG Xingxing, GONG Aixi, et al. On the characteristic features of flood chain and preventive-defensive measures in flooding-water storing and detention zones [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(5): 252-255. (in Chinese))
- [17] 杨洋, 杨斌, 戴文胜, 等. 重庆市旱灾及洪涝灾害特点及形成机制分析[C]//重庆市水利学会. 重庆市水利学会“加快城市防洪抗旱减灾体系建设”专题研讨会论文汇编. 重庆: 重庆市水利学会, 2012: 8.
- [18] WAN Honglian, SONG Hailong, ZHU Chanchan, et al. Spatio-temporal evolution of drought and flood disaster chains in Baoji area from 1368 to 1911 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(3): 337-350.
- [19] 陆晨星. 基于 GIS 的洪水应急环境与态势信息管理系统设计与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [20] 黄亭亭. 水电工程洪水灾害链态势推演和应急决策的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [21] SOMOS-VALENZUELA M A, CHISOLM R E, RIVAS D S, et al. Modeling a glacial lake outburst flood process chain; the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(6): 2519.
- [22] WORN I R, HUGGEL C, CLAGUE, et al. Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: a modeling perspective[J]. Geomorphology, 2014, 224: 161-176.
- [23] HOLLENBECK J R, ILGEN D R, PHILLIPS J M, et al. Decision risk in dynamic two-stage contexts: beyond the status quo [J]. Journal of Applied Psychology, 1994, 79(4): 592.
- [24] 钱立香. 基于 WebGIS 的安徽省洪涝灾害应急救援决策支持系统研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- [25] 徐磊. 基于贝叶斯网络的突发事件应急决策信息分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [26] DALE M, WICKS J, MYLNE K, et al. Probabilistic flood forecasting and decision-making: an innovative risk-based approach [J]. Natural Hazards, 2014, 70(1): 159-172.
- [27] 王贺, 刘高峰, 王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. 水利经济, 2014(2): 15-18. (WANG He, LIU Gaofeng, WANG Huimin. Risk assessment of urban extreme rain and flood disaster based on cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014(2): 15-18(in Chinese))
- [28] 石晓静, 查小春, 刘嘉慧, 等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 29-34. (SHI Xiaojing, ZHA Xiaochun, LIU Jiahui, et al. Cloud model-based risk assessment of flood disasters in Ankang City on upper reaches of Hanjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 29-34. (in Chinese))
- [29] 陈军飞, 董然. 基于随机森林算法的洪水灾害风险评估研究 [J]. 水利经济, 2019, 37(3): 55-61. (CHEN Junfei, DONG Ran. Risk assessment of flood disasters based on random forests [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(3): 55-61. (in Chinese))
- [30] 周洪建, 王曦, 袁艺, 等. 半干旱区极端强降雨灾害链损失快速评估方法: 以甘肃岷县“5·10”特大山洪泥石流灾害为例 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 440-445. (ZHOU Hongjian, WANG Xi, YUAN Yi, et al. Rapid-assessing methods of loss in extremely heavy rainfall disaster chain in semiarid region: a case study on a flash flood debris flow in Mianxian County, Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 440-445. (in Chinese))
- [31] 杜姗姗. 基于动态空间面板的区域地震-洪涝灾害综合损失评估研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [32] 叶金玉. 基于多维矩阵的台风灾害链综合风险评估模型及其信息图谱表达[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [33] DUHAMETIN A, APEL H, DUNG NGUYEN V, et al. How do changes along the risk chain affect flood risk? [J]. Natural Hazards Earth System Science, 2018, 18: 3089-3108.
- [34] 李景保, 肖洪, 王克林, 等. 基于流域系统的暴雨径流型灾害链: 以湖南省为例 [J]. 自然灾害学报, 2005(4): 30-38. (LI Jingbao, XIAO Hong, WANG Kelin, et al. Valley system-based storm-run off-typed disaster chains: taking Hunan Province as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2005(4): 30-38. (in Chinese))
- [35] 王萌, 田伟平, 崔英强. 陕西省暴雨灾害链实例分析及综合减灾对策 [J]. 交通企业管理, 2011, 26(7): 69-71. (WANG Meng, TIAN Weiping, CUI Yingqiang. Case analysis of rainstorm disaster chain in Shaanxi Province and comprehensive disaster reduction measures [J]. Transportation Enterprise Management, 2011, 26(7): 69-71. (in Chinese))
- [36] 李致家, 梁世强, 霍文博, 等. 淮河上中游复杂流域洪水预报 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 1-6. (LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 1-6. (in

- Chinese))
- [37] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))
- [38] 杨谨菲,延军平,王新华. 运城市旱涝灾害与太阳黑子周期关系分析[J]. 江西农业学报,2010,22(5):90-92. (YANG Jinfei,YAN Junping,WANG Xinhua. Analysis of relationship between sunspot cycle and drought and flood of Yuncheng City[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2010,22(5):90-92. (in Chinese))
- [39] 李发文,冯平,刘超. 基于谐波周期法的洪水灾害链分析[J]. 天津大学学报,2011,44(1):46-50. (LI Fawen,FENG Ping,LIU Chao. Analysis of flood disaster chain based on harmonic wave methods[J]. Journal of Tianjin University,2011,44(1):46-50. (in Chinese))
- [40] 刘沛林. 长江流域历史洪水的周期地理学研究[J]. 地球科学进展,2000(5):503-508. (LIU Peilin. The cyclic geography study on the historical floods in the Yangtze River[J]. Advance in Earth Sciences,2000(5):503-508. (in Chinese))
- [41] 丁燕,史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报,2002(1):34-43. (DING Yan,SHI Peijun. Fuzzy risk assessment model of typhoon hazard [J]. Journal of Natural Diasters,2002(1):34-43. (in Chinese))
- [42] AHMAD S S,SIMONOVIC S P. A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis[J]. Journal of Flood Risk Management,2015,4(1):53-74.
- [43] LIAO Qi,YU Ge,JIANG Wensheng,et al. Research on the risk assessment of Qingdao marine disaster based on flooding[J]. Sustainability,2019,11(2):468.
- [44] 陈泽强,陈能成,杜文英,等. 一种洪涝灾害事件信息建模方法[J]. 地球信息科学学报,2015,17(6):644-652. (CHEN Zeqiang,CHEN Nengcheng,DU Wenyong,et al. A method of modelling flood event [J]. Journal of Geo-information Science,2015,17(6):644-652. (in Chinese))
- [45] 杜志强,顾捷晔. 灾害链领域本体构建方法:以暴雨洪涝灾害链为例[J]. 地理信息世界,2016,23(4):7-13. (DU Zhiqiang,GU Jieye. A domain on tology construction method of disaster chain: case study of rainstorm flood disaster chain[J]. Geomatics World,2016,23(4):7-13. (in Chinese))
- [46] 杜志强,王叁,张叶廷. 接入实时降雨数据的暴雨型洪涝灾害临灾预警方法[J]. 地理信息世界,2017,24(1):97-102. (DU Zhiqiang,WANG San,ZHANG Yeting. Temporary precaution method for rainstorm-type flood disaster with real-time rainfall data[J]. Geomatics World,2017,24(1):97-102. (in Chinese))
- [47] 何生兵,朱运亮. 极端气候变化背景下灾害移民的社会适应策略探析[J]. 水利经济,2019,37(5):73-76. (HE Shengbing,ZHU Yunliang. Social adaptation strategy of disaster-forced migration under extreme climate change [J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(5):73-76. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-03-15 编辑:彭桃英)

(上接第 19 页)

- [21] BAKI S, KOUTIVA I, MAKROPOULOS C. A hybrid artificial intelligence modelling framework for the simulation of the complete, socio-technical, urban water system[C]//SEPPELT R, VOINOV A A, LANGE S, et al. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software. Leipzig: Leipzig Publishing House,2012:3125-3133.
- [22] HALE R L, ARMSTRONG A, BAKER M A, et al. ISAW: integrating structure, actors, and water to study socio-hydro-ecological systems[J]. Earth's Future,2015,3(3):110-132.
- [23] ZHANG Xiang, WEI Fangliang, MENG Yu, et al. Linking water, society and ecology in a system dynamics framework; case study of Huainan City[J]. Water Science and Technology:Water Supply,2019(8):2400-2409.
- [24] 夏军,王纲胜,谈戈,等. 水文非线性系统与分布式时变增益模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学,2004,34(11):1062-1071. (XIA Jun, WANG Gangsheng, TAN Ge, et al. Hydrological nonlinear system and distributed time-varying gain model [J]. Science in China: Ser. D Earth Sciences,2004,34(11):1062-1071. (in Chinese))
- [25] 邵益生. 城市水系统控制与规划原理[J]. 城市规划,2004(10):62-67. (SHAO Yisheng. Control and plan of city water system [J]. City Planning Review,2004,28(10):62-67. (in Chinese))
- [26] 李树平,余蔚茗. 城市水量平衡模型分析与计算[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(12):1767-1771. (LI Shuping, YU Weiming. Urban water balance model analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2010,38(12):1767-1771. (in Chinese))
- [27] 陈庆秋,薛建枫,周永章. 城市水系统环境可持续性评价框架[J]. 中国水利,2004(3):6-10. (CHEN Qingqiu, XUE Jianfeng, ZHOU Yongzhang. Evaluation framework for environmental sustainability of urban water system[J]. China Water Resources,2004(3):6-10. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-07-18 编辑:熊水斌)