



中国水利水电科学研究院 主编: 孟志敏  
责编: 张诚 郭重汕 张洪斌 李文洋 张晓蕾 马强

### 全球近期洪涝灾害资讯及洪水管理经验



## 序言

当前,全球约20亿人面临洪水风险,其中有近6亿人生活在贫困之中。根据联合国减灾办公室(UNDRR)发布报告称,2000-2019年二十年间,全球已通报的洪灾事件共3254起,在各类自然灾害中发生频次最高,占全部灾害的44%。共有16.5亿人受到洪灾影响,约10万人被夺走了生命,全球经济损失高达6510亿美元。比利时灾难传染病学研究中心(CRED)统计发现,相较于过去20年,2020年全球洪涝灾害的发生频次提升了23%,共201起,致约6200人丧生,西欧、东非、南亚和中国受到较大程度影响。

在过去的几年中,气候变化导致洪水频率和严重程度不断增加,但洪水风险被低估,造成了巨大的人员伤亡和财产损失,政府应采取韧性方式应对洪灾的策略,不断强化洪水管理理念。

为进一步梳理近年全球极端洪涝灾害发生的情况,提出应对策略,中国水科院联合挂靠的国际洪水管理大会(ICFM)秘书处以及与法国蔚蓝海岸大学共同发起的“国际山洪计划(FFP)”,开展多场全球线上学术研讨会。围绕“全球典型山洪事件”、“冰凌洪水”、“流域洪水事件与经验”、“城市洪水预警预报”和“洪水的韧性管理”等内容,邀请全球知名专家展开研讨交流,分享各国洪水管理经验做法。

本报告在系统梳理全球近年极端洪涝灾害典型事件的基础上,凝练研讨会专家报告成果,为行业相关部门提供国际视野,为我国防汛工作提供科技支撑。

编写组  
2021年11月

# 执行摘要

## 近期的山洪灾害:全球的挑战与经验

随着山丘区人口的不断增长及气候变化导致的山丘区局地强降雨频次和强度的增加,山洪灾害日渐成为防洪减灾的短板,相关研究日渐受到国际社会的高度重视。在全球气候变化的大背景下,极端暴雨洪水灾害事件频发,造成巨大的人口及财产损失,山洪灾害防治面临着新的挑战。在“近期的山洪灾害:全球的挑战与经验”章节,来自法国、日本、中国和德国的研究人员分享了近期的山洪灾害及应对措施。

来自日本的两位专家分别介绍了2020年日本九州洪水事件和2021年夏季遭受极端洪水及泥石流灾害的原因,他们认为有效的洪水管理措施及风险沟通是重要的手段,监测是重要的措施之一,需要通过协同合作的方式加强与水有关的抗灾能力。来自德国的专家回顾2021年夏季德国的三起山洪灾害事件,他认为降雨是灾害发生的诱因,降雨强度、降雨时空分布和不同地区地形条件的综合作用是主导因素,建议有针对性地提高预报准确性,并建立行蓄洪区、水库等措施减少灾害损失,并通过制定政策来提高公众对洪水灾害的意识。

来自中国的专家回顾了我国2020年典型的极端暴雨洪水事件,从城市洪水及山洪灾害两个层面分析了灾害的降雨、量级、损失及诱因,重点分享了我国基于社区的山洪灾害基层群测群防体系建设经验,并提出在我国不断深化实施的监测预警系统、预报预警体系建设的基础上,加强基层山洪灾害群测群防能力建设,提高受山洪威胁人员的意识及应对能力,是政策层面未来的工作重点之一。

随着全球气候变化及城市化进程的快速发展,暴雨洪水的损失将越来越大,预防超标准洪水引发的“黑天鹅”事件是各个国家今后工作的重点,应加快推动山洪灾害风险循环管理,巩固拓展山洪灾害防御手段,持续提高山洪灾害防御社会参与度,推进社区防灾减灾体系建设,最大程度减少人员伤亡和财产损失,有效避免群死群伤,更好地应对各种极端暴雨洪水事件。

## 冰凌洪水风险管理

受冬春季低气温的影响,北半球高纬度地区60%的河流会面临流凌、冰塞和冰坝等引起的洪水风险,冰凌洪水会严重威胁河道两岸居民的生命财产安全和流域生态生境系统。例如加拿大圣约翰河常发生自上而下

的链式冰塞壅水,给冬季凌汛防治带来严重挑战;中国黄河和黑龙江每年都有多个月的凌汛期,常需借助爆破等手段除冰避免洪水风险;2011年日本海啸引起的冰凌洪水倒灌,造成大面积堤防溃决和土工建筑物破坏等。在“

冰凌洪水风险管理”章节,来自加拿大、波兰和中国的专家探讨了各国的冰凌洪水产生机理和防治方法,分享了国内外应对凌汛的先进技术与经验。

冰凌可能对工程和环境方面均造成一定影响,涉及水工工程、水文设施、土木工程、船舶设计和生态系统等多个领域,包括冰凌防治、近海设施的冰冻破坏应对、桥梁和桥墩的冰荷载分析、冰塞河流的泥沙输送、破冰机械设计、寒冷地区生态环境改善和河流修复等。来自波兰的专家介绍了在河冰形成、解冻时形成冰塞的两种不同情况,分享了目前普遍应用于波兰及大多数北半球国家的冰凌洪水防治措施,包括人工除冰方法以及建造拦冰工程设施等。

来自中国的专家分享了目前河冰水力学研究的进展,伴随“失热—产冰—封河—消融—开河”时间轴,50年来国内外河冰水力学理论主要集中在7个领域,同时

在冰情预测预报、冰情观测和防治技术装备、冰凌灾害的防治等多方面已形成较为完备的技术体系。对于冰坝预报研究,更多集中在开河和冰坝形成前的冰情预报及冰坝形成后的洪水预报等方面,亟待在进一步探明冰坝演变机理基础上提出新的预报方法。对于未来的研究方向,首先是河冰水力学基本理论的拓展,其次是对变化环境下冰情预报及趋势的推演,同时还要加强冰凌灾害全过程监测预警与协同防控技术装备的研发。

以加拿大阿萨斯卡河的冰塞事件为例,来自加拿大的专家模拟了疏浚、人工破冰和建造堤岸这三种措施的防治效果,其结果显示人工破冰法效果显著,可以将完整的冰面破坏,从而避免了冰塞的形成;建造堤岸则可以有效保护居民区免受冰塞威胁。Monte-Carlo是一种可分析冰塞的算法,可用于洪水风险图的绘制、凌汛发生概率的测算、以及财产年预期损失的估算。

## 流域洪水典型事件与管理经验

洪水是一种具有不确定性的自然现象,气候变化、土地利用和地表覆盖的变化均会改变洪水事件的时空分布,如何制定变化环境下尤其是全球气候变化影响下的流域防洪策略,是新时代防洪减灾面对的重大课题。“流域洪水典型事件与管理经验”章节通过对流域洪水典型事件的回顾,总结梳理相关管理经验,从而进一步完善流域防洪策略。

在防御流域洪水方面,需要将工程措施与非工程措施相结合,从流域整体着眼,树立系统观念,把握洪水发生和演进规律,进一步优化水库、堤防、蓄滞洪区等防洪工程布局,以流域为单元构建现代化防洪工程体系。同时,进一步提高洪水预报精度与效率,完善流域防洪调度科学智能决策。两位来自中国的院士,以2020年中国大洪水为例,阐述了工程与非工程措施相结合在洪灾应对中起到的重要作用。在淮河流域,2020年7月,气象及水文预报显示了淮河将遭遇较常年同期更严重的暴雨,相关防汛部门和地方政府提前转移了居住在蒙洼蓄洪区内

的2万多名群众,此后王家坝闸开闸向蒙洼蓄洪区分洪,上游、中游、下游协同配合,确保了该流域内民众的生命安全,防洪工作成效显著。在长江流域,一方面精细化实施以三峡水库为核心的水库群联合调度,一方面加强预报系统和决策支持系统的相互协作。2020年汛期的五次洪水过程的洪峰均被明显坦化,有效避免了荆江蓄滞洪区的启动,也保障了下游城市的安全。

在流域洪水应急响应方面,需紧密加强各部门之间的联系,做到灾前灾中灾后全方位响应。灾前,制定应急预案方案,准备应急物资,组织应急队伍演练;灾中,发布预警及灾情信息、组织民众积极响应;灾后,快速恢复影响区域的正常生产生活秩序。两位来自美国的专家以美国密歇根州2020年溃坝事件作为研究对象,深入事件细节,从预警过程、发布灾情信息、民众响应三个方面介绍了成功应对洪灾的经验,强调建立多方协调联动、信息即时更新、防灾演练和制定转移计划的重要性。一个叫做NIXLE的本地警报和预警系统在此次应急响应中发

挥了重要的作用,它能够提供简短频繁的信息更新,每条信息包含事件发生的地点和民众需要采取的措施。另外,社交媒体在应急响应过程中也加速了信息的传播,并

提供视频和链接帮助那些需要核实洪灾信息的民众,甚至提供“地图定位”功能来帮助民众确定自己与洪水淹没范围的距离以进一步决定是否需要撤离。

## 城市洪水实时预报:现状和未来的挑战

受多种气候变化因素的影响,近年来全球洪涝灾害发生频次呈现明显的上升趋势。同时,全球城镇人口在总人口中的占比也不断升高,城市防洪面临的挑战日趋严峻。为了应对洪涝灾害对城镇活动的影响,大部分的城市均采取工程与非工程措施相结合的方式来提升城市防洪能力。作为非工程措施的核心之一,“城市洪水实时预报”越来越受到市政及水文部门的关注,其精度及准确性的提升将有助于应对新时期城市防洪的挑战。在“城市洪水实时预报:现状和未来的挑战”章节,来自印度、中国的专家分享了各国的经验。

印度地处亚洲南部,在针对洪水进行预报时,需要考虑如气温、海洋及局部地貌等多种因素。来自印度理工学院的专家分享其在印度钦奈市城市洪水实时预报系统建设中的研究成果。提出了将气象学中的“理想气体定律”引入极端降雨预报中的新思路。通过研究,在众多城市洪水模型中,确定“多城市冠层洪水模型”可以作为城市洪水预报中的主要模型工具之一。同时开展了不同时间尺度下的气温-降雨关系研究,发现:(1)在以小时为单位的时间尺度下,发生降雨之前的气温变化可以作为降雨的预兆,(2)当气温较高时,产生极端降雨天气需要较大的空气湿度,因此会发生小时尺度的极端降雨,但不会发生日尺度的极端降雨。

来自印度热带气象研究所的专家则从气候变化的背景出发,讨论了复合型洪水对城市带来的风险和挑。通过对比分析2021年5月印度东、西海岸遭受的气旋“亚斯”和“陶特”对当地的影响,指出由低风速的“亚斯”造成洪涝灾害影响超过“陶特”的原因主要是同时受到风暴潮、降雨、河水上涨、海平面上升和涨潮的影响而形成的复合型洪水更具破坏力。他提出,从长时间尺度来看,气候变化及海平面上升是一个长期存在、逐渐发展的过程,但是从短时间尺度来看,极端洪水事件通常只持续几小时到几天,严重性及破坏性非常巨大。因此需要以综合性的眼光应对复合型的极端事件和风险进行分析评估。

我国作为全球受洪水影响最严重的国家之一,在应对城市洪涝灾害中积累的丰富的经验。海绵城市的建设、多源数据的融合、洪涝模型的研发、人工智能AI等新技术的应用等都已作为重要的非工程措施集成于城市尤其是沿海城市的防洪工作体系之中,并取得了较好的效果。同时,随着“四预”数字孪生流域的提出,多学科技术交叉应用,优势互补更助于解决洪涝难题。

## 增强韧性,降低风险

在“增强韧性<sup>1</sup>,降低风险”章节,来自美国和荷兰的专家介绍了美国和荷兰在降低洪水风险,开展韧性建设方面的经验。

美国洪水主要分布在海岸和城市区域,随着海平面上升,气温升高,美国海岸线地区的洪水风险暴露风险不断增加,海岸洪水对地区人口和经济造成巨大影响,过去十年间洪水灾害给美国各州造成的财产损失已累计高达1300亿美元。作为洪水风险管理中脆弱性的重要维度,社会脆弱性的确定对于识别风险事件特征和脆弱人群十分重要,需要通过建立指标体系和各种统计分析方法衡量社会脆弱性程度。美国团队构建的社会脆弱性模型和指数特别强调反映人口和社会经济属性特征的相关要素,通过绘制社会脆弱性可视化图,可进一步指导区域和地方制定风险干预和减缓措施,缓解洪水灾害的不均衡现象。

韧性与洪水风险管理密切相关,需从规划入手,降低洪水风险。美国FEMA发布了地区风险评估工具-国家风险指数,评估18种自然灾害的风险;美国国家适应气候变化战略正在不断推进,已覆盖大部分沿海沿湖地区;同时,美国政府正在向不同群体提供国家洪水保险,也会向弱势群体提供经济补贴。

来自荷兰的专家分享了韧性建设的经验。目前洪水风险管理应从适应缓慢气候变化的气候条件、预防单一的极端事件向预测突变和造成群发或连锁极端事件的趋势适度转移,同时需进一步扩大城市洪水风险管理的时间范围。

在空间方面,荷兰政府实施40年的“还地于河”工程从单一防范到注重水系河流空间的变化,同时重点考虑了气候变化和水文条件变化等长期问题。在时间方面,埃及亚历山大港吸取了2015年的洪灾经验,扩大了预警时间,顺利度过了2020年的大水。在备灾方面,荷兰多德雷赫特市积极开展韧性建设,在地势较高的地区建造新型住宅,同时将洪水备灾应急纳入计划之中,使该区域在洪水来临时有能力容纳6万人的紧急转移人口。

未来趋势方面,由于极端事件强度和频率变化加快,需要结合更长期的视野进行风险管理,应对传统的概率方法进行创新突破,将防灾和备灾两者充分结合,尽快完善国家防洪体系。

---

<sup>1</sup> 政府间气候变化专门委员会(IPCC)对韧性的定义是“系统及其组成部分能够及时有效地抵抗、吸收、适应并从灾害破坏的影响中恢复过来的能力,包括保护、恢复或改进其基本结构和功能的能力”。

# 全球近期 洪涝灾害事件回顾

气候变化导致极端天气事件的频率和严重程度增加,过去50年间,极端天气事件已经夺去了数百万人的生命。政府间气候变化专门委员会在2021年8月份发布的第六次评估报告指出,人类活动毫

无疑问造成了气候变化,需要持续减少温室气体排放,减少气候变化导致的极端气象灾害带来的影响。本文梳理了2020-2021年全球范围内的极端洪涝灾害典型事件。

### 2020-2021年全球极端洪涝灾害典型事件分布图



📍 2020年全球极端洪涝灾害事件

📍 2021年全球极端洪涝灾害事件

# 2020年 :::::



## 1 雅加达发生山洪灾害

2020年1月,破纪录强降雨(337mm/24h)引发的洪水造成印尼首都雅加达至少66人死亡。雅加达近40%的土地位于海平面以下,本次持续降雨导致数万居民流离失所。



## 2 伊朗遭遇特大洪水

2020年1月13日,伊朗锡斯坦-俾路支斯坦省遭遇洪水侵袭,洪水淹没了达什蒂阿里村。暴雨导致整个地区被洪水围困,近900条道路被封,877个村庄断电,房屋和灌溉渠系被冲毁。20多万人受到洪水直接影响,公共设施和农业损失达1亿美元。



## 3 西班牙遭遇风暴“格洛丽亚”

2020年1月,风暴“格洛丽亚”切断了西班牙的公路和铁路交通网,同时带来时速超过60 mph的强风、暴雪、冻雨以及巨浪,洪水涌入海滨长廊并冲毁商铺和餐厅,造成至少22万户居民房屋断电和至少4人死亡。



图片来源于网络: DOUGLAS MAGNO/Getty Images

#### 4 巴西遭遇强降雨、山体滑坡和洪涝灾害

2020年1月28日,在巴西米纳斯吉拉斯州贝洛哈里桑塔Raposos大都市区,暴雨导致Da Prata河河堤决口。当地民防官员称,巴西东南部连续数天的暴雨和洪水造成死亡人数达59人,受伤人数12人。图为当地居民试图清理洪水消退后留下的碎石。



图片来源于网络: Christopher Furlong/Getty Images

#### 5 英国遭遇风暴“丹尼斯”

2020年2月15日,风暴“丹尼斯”以每小时91英里(约146公里/每小时)的时速横扫英国境内,多地发出红色天气预警和洪水警报,部分地区遭遇洪水。同时,芬兰、法国等地也受到此次风暴影响,致使几万户居民住宅断电,170班次航班被迫停飞,至少5人在此次风暴中遇难。风暴“丹尼斯”是英格兰2020年继风暴“西亚拉”后遭遇的第2个命名风暴,为英国带来了持续一周的极端天气。



图片来源于网络: DIBYANGSHU SARKAR/Getty Images

#### 6 气旋“安攀”重创印度和孟加拉国

2020年5月20日,气旋“安攀”在印度东部登陆,吹袭印度东部西孟加拉邦一带及邻国孟加拉国,造成102人死亡,490万人流离失所。受气旋登陆的影响,孟加拉国以及印度东部西孟加拉邦和奥里萨邦等多个地区出现大风和强降水天气。当地多地的树木被拔起,农作物及果园受损,交通、电力供应以及通信设施也受到严重影响,造成了130亿美元的经济损失。气旋“安攀”逼近孟加拉国和印度东部,引发了极端风暴潮灾害,是数十年来登陆孟加拉湾最猛烈的飓风。



图片来源于网络: STR/Getty Images

### 7 日本遭遇洪水和山体滑坡

2020年7月,日本九州地区遭遇强降水天气,7县中有14条河流发生洪水,其中熊本县和鹿儿岛出现河水泛滥、山体滑坡、泥石流等灾害,导致熊本县6000多户住宅停电,球磨川出现11处溃堤。此次洪灾在日本九州地区造成77人死亡,1.5万多栋建筑被毁或损坏。



图片来源于网络: Chung Sung-Jun/Getty Images

### 8 韩国遭遇极端洪水

2020年8月,韩国中部出现连续降雨,梅雨季长达46天,是自2013年以来的最长雨季。持续强降雨已造成至少26人死亡,1000多人流离失所。图为8月4日韩国首尔暴雨过后被洪水淹没的汉江公园。



图片来源于网络: Mahmoud Hjj/Getty Images

### 9 苏丹遭遇大规模洪水

2020年9月8日,苏丹首都遭遇强降水,引发洪水。这场洪水造成至少100人死亡,约11万多座房屋冲毁,受影响人数超过65万人,并导致尼罗河及其部分支流的水位上升至过去一个世纪从未达到的高度,尼罗河最高水位达57英尺(17.4米),创历史新高。图为苏丹喀土穆遭暴雨侵袭后,孩子们在被洪水淹没的街道上避难。



图片来源于网络: PEDRO PARDO/AFP // Getty Images

### 10 墨西哥湾沿岸地区遭遇飓风“德尔塔”

2020年10月9日美国东部时间下午7点,飓风“德尔塔”在路易斯安那州克里奥尔登陆,风力达到每小时110英里(175公里/小时),造成了7亿至12亿美元的风损和风暴潮保险损失,以及8亿至15亿美元的近海建筑损失。这是六周内路易斯安那州登陆的第2个飓风,上一个为八月末的飓风“劳拉”。

# 2021年 :::::



图片来源于网络：Pablo Blazquez Dominguez/Getty Images

## 1 西班牙马德里遭遇破纪录降雪天气

2021年伊始，“菲洛梅娜”风暴 (Storm Filomena) 就给马德里带来了破纪录的降雪，由于气温骤降，西班牙的老年人被警告必须待在家中。据欧洲新闻电视台报道，这场50年来最严重的降雪事件使得马德里的交通陷入“瘫痪”。《纽约时报》称，这场暴雪造成了约14亿欧元的损失。



图片来源于网络：Tan Forsyth/Getty Images

## 2 英国遭遇风暴“克里斯托夫”

据英国气象局称，2021年1月18日至20日，威尔士北部和英格兰西北部遭遇了“有记录以来最潮湿的三天”。柴郡的房屋被淹，曼彻斯特和默西塞德郡的居民被迫从家中撤离。风暴“克里斯托夫”过后，大量降雪导致道路结冰封路，人们出行被迫中断。



图片来源于网络：Leon Lord/AFP via Getty Images

## 3 斐济遭遇热带气旋“安娜”

据《卫报》报道称，就在五级飓风“亚萨”袭击斐济北部岛屿一个月之后，热带气旋“安娜”于2021年1月底再次登陆斐济，导致全国1万多人318个疏散中心避难。



图片来源于网络: Scott Olson/Getty Images

#### 4 美国德州遭遇风暴天气

《美国周刊》报道称,2021年2月份,美国得克萨斯州遭遇极端风暴天气,部分地区的气温降至零下13°C,有350万家企业和住户出现断电。全州范围内的断电使得许多弱势群体陷入极端寒冷的环境。据《卫报》报道,将全州电网崩溃造成的死亡人数纳入最终统计后,截止2021年7月的总死亡人数达210人。



图片来源于网络: Jenny Evans/Getty Images

#### 5 澳大利亚新南威尔士州遭遇洪水灾害

2021年3月,澳大利亚东南部新南威尔士州遭遇50年来最严重的洪水。自3月18日起,暴雨导致河流泛滥、大坝面临风险,约1.8万名新南威尔士州居民被迫从家中撤离。



图片来源于网络: Alfred Ike Wurin/AFP via Getty Images

#### 6 印尼遭遇热带气旋“赛洛亚”

据气候之家新闻网(Climate Home News)报道称,2021年4月份,热带气旋“赛洛亚”袭击了一个偏远群岛,导致当地160人丧生,山体滑坡和山洪灾害造成至少2万人流离失所。



图片来源于网络：Christof Stache/AFP/Getty Images

## 7 德国西部遭遇洪水侵袭

据CNN报道，2021年7月份，德国遭遇百年不遇洪水，降雨持续近14个小时，暴雨中心1小时最大雨量23.7毫米，24小时最大雨量162毫米，造成100亿欧元损失，181人遇难。洪水摧毁了德国阿尔河沿岸的房屋、桥梁和道路等公共设施。据欧洲新闻网报道，德国内阁已经承诺迅速采取行动重建受灾区，受灾者将获得政府批准的4亿欧元灾后恢复计划的支持。



图片来源于网络：STR/AFP/Getty Images

## 8 中国遭遇极端暴雨灾害

据中国河南省郑州市气象服务中心发布的消息，2021年7月18日18时至21时，郑州市出现大暴雨、局部特大暴雨，累积平均降水量449毫米，最大降水量突破了当地历史记录。10月初，“十年九旱”的山西省也罕见地遭遇连续强降雨，共59个国家气象观测站日降水量突破建站以来同期历史极值，63个国家气象观测站过程降水量超过同期历史极值。



图片来源于网络：Scott Olson/Getty Images

## 9 美国遭遇飓风“艾达”

2021年8月29日，在“卡特里娜”飓风登陆16周年之日，飓风“艾达”登陆美国南部的路易斯安那州和密西西比州，超过100万户居民和企业断电。飓风“艾达”登陆时的最大持续风速为150英里/小时（240公里/小时）。该飓风后降为热带低气压，并从四级风暴转为一级风暴并沿着美国东北部海岸移动。受“艾达”影响，纽约地铁站和道路被淹，至少有9人在此次风暴中丧生。



图片来源于网络：CNN

### 10 意大利遭遇热带气旋

据CNN报道，意大利西北部于2021年10月4日前后受到热带气旋袭击，12小时累计降雨量超过742毫米，打破欧洲有气象记录以来的极值。由于这场降雨持续时间短量级大，当地多处发生洪水及泥石流灾害。



图片来源于网络：CNN

### 11 热带气旋“沙欣”致阿曼沙漠洪水

2021年7月，位于塔克拉玛干沙漠北部的中国石化西北油田玉奇片区遭遇罕见沙漠洪水侵袭，其淹水面积高达300多平方公里，导致油区道路多处冲堤溃坝，电线杆倾倒，近50辆勘探车辆、3万套设备被洪水淹没；其主要诱因为7月下旬以来轮台县天山山脉迪娜尔山段一带出现暴雨天气，加之夏季高温导致的天山冰雪融水。



图片来源于网络：CNN

### 12 塔克拉玛干沙漠遭洪水侵袭

2021年7月，位于塔克拉玛干沙漠北部的中国石化西北油田玉奇片区遭遇罕见沙漠洪水侵袭，其淹水面积高达300多平方公里，导致油区道路多处冲堤溃坝，电线杆倾倒，近50辆勘探车辆、3万套设备被洪水淹没；其主要诱因为7月下旬以来轮台县天山山脉迪娜尔山段一带出现暴雨天气，加之夏季高温导致的天山冰雪融水。



## 近期的山洪灾害： 全球的挑战与经验



**Philippe  
Gourbesville**

亚洲水理事会副主席  
法国蔚蓝大学教授

### 全球极端暴雨下山洪防治面临新的挑战

Philippe Gourbesville教授表示，国际山洪计划自启动以来一直关注全球极端暴雨洪水事件，持续探索并积极分享世界各国山洪灾害防治的新技术、新方法。在刚刚过去的水文年中，全球洪水灾害频发，世界各国都面临着新的挑战。为了更好的认识这种挑战，并从中吸取经验和教训，国际山洪计划组织召开了学术研讨会，分享日本、中国和德国近期的洪水灾害及应对措施。

Gourbesville教授首先回顾了2020年10月法国地中海沿岸亚历克斯(Alex)风暴灾害事件。他介绍说，此次暴雨持续时间短(不足24个小时)，但短时降雨强度大，750平方公里流域的8h累计降雨量超500mm。这次暴雨造成了河水暴涨，并引发山洪及泥石流等次生灾害，导致9人死亡，直接经济损失超过15亿欧元。导致本次灾害的主因之一是覆盖法国全境的冷空气气旋。由于法国南部地中海沿岸地区10月气温较高，冷热空气交汇造成了局部山区的暴雨，部分观测站日降雨量破法国全国历史记录。虽然基于现有的模型系统法国相关部门准确预测了此次灾害可能发生的地点，并在灾害发生之前对该地区及时发布了预警信息。但是预报降雨量(约300mm)远低于实际的降雨量，使得当地居民没有对灾害的量级产生清晰的认识。当超预期的洪水携带大量泥沙快速从山坡流下，沿河的水利工程及建筑受冲击而被摧毁，造成了较大的伤亡及损失。同时，在灾害发生过程中由于道路及通信设施的损坏，无法及时进行救援也在一定程度上加剧了灾害的影响。通过此次案例，Gourbesville教授指出，现有的预报预警系统在针对超标洪水量级的预测上仍存在不足，在短期内这种差距很难被弥补。因此，针对极端洪水，他建议当地政府一方面要加强监测预警技术水平的提升，另一方面也应该重视对当地居民救灾避灾能力的教育和培训。



**Toshio Koike**

日本国际水灾害  
与风险管理中心  
(ICHARM) 主任

## 2020年日本九州洪水事件及应对措施

Toshio Koike教授首先介绍了2020年日本九州洪水成因和特点。针对洪水成灾原因方面，他对比了2020年九州洪水、2018年日本西部洪水和1985年的台风洪涝的降雨量，发现水汽自1958年以来由中国南海和太平洋逐步向日本聚集，水汽含量增大直接导致了日本强降雨频发。7月3日和4日上午9:00的气象图、卫星影像和雷达降雨图显示，由线状雨带形成的局部暴雨袭击了九州岛中部地区，导致球磨川流域成为洪灾损失最为严重的区域。该流域面积为1880km<sup>2</sup>，上游为山区河道，中下游段位于峡谷地带，流域出口为平原河道。强降雨导致上游山区洪水来势凶猛，但在峡谷的壅水作用下洪水不能快速顺畅地排泄至平原区，导致河道出口口至峡谷地区的盆地地带成为了受洪灾影响最为严重的区域。Koike教授列举了历史上该区域发生的几次严重洪水灾害。1965年7月的洪水，洪峰流量为5700m<sup>3</sup>/s；1982年7月的洪水，洪峰流量为5500m<sup>3</sup>/s。1965年7月洪水的24小时降雨量为161.9mm，而2020年洪水的24小时降雨量是410mm，是1965年的2倍多；1965年的河道最高洪水水位为5.05m，而今年的最高洪水水位为7.25m，比过去50年的历史平均最高洪水水位要高。由此，Koike教授总结道，“2020年九州地区的洪水形势十分严峻”。

强降雨引发的洪灾给九州地区造成了巨大损失。通过航拍和SNS采集影像数据，在GIS图上绘制了这场洪水的淹没水深及范围，Kuma河道两岸最大淹没水深近10m。这场洪水对熊本县造成了巨大损失，因灾失踪或死亡67人，冲毁房屋630间，水浸房屋5746栋，洪水溢堤2处，桥梁损坏13座。

针对“在当前新型冠状病毒大流行的形势下，如何应对洪水灾害”的提问，Koike教授介绍道，2020年年初，为应对汛期洪水和台风洪涝灾害，日本公共卫生和灾害护理机构联合洪水管理研究机构制定了“新型冠状病毒疫情期间洪涝灾害应对措施指南”，用于指导个人、社区和地方政府来制定应急疏散计划，管理避险场所。除此之外，日本土木研究所和国际水灾害与风险管理中心联合印发了在新冠肺炎大流行背景下的“洪灾应急响应中的紧急情况汇总”报告。这份报告涵盖了地方政府在洪灾和新冠肺炎疫情双重危机下采取应急响应措施中可能遇到的疑问或进退两难的危急情况。报告包括初始响应、指挥部管理、政府机构组成、信息搜集、与利益相关者协调合作、发布疏散公告、发布相关信息、避险场所八个章节。例如，当面对“撤离人员中似乎有一名感染者，但难以确定密切接触者是谁”这一紧急情况时，地方政府可参考报告开展如下应对措施：首先，统计应急避险人员名单；其次，在指定的避险点接待处区分疑似感染者，疑似感染者需填个人申报单，并实施避险场所分区管理，在个人申报单中需填写所在分区和其健康状况，以便快速追踪其密接人员；第三，如果避险时间较长，人员的健康状况也会有所改变，应储备非接触式体温计，对避险人员的健康状况进行监测；最后，增强避险人员关注并记录其健康状况的意识，尤其是在他们出现体温升高时需及时汇报。

自2013年起，日本经历了多次洪水灾害。针对频发的洪水，日本总结经验教训，逐步完善洪水管理措施。日本于2015年5月修订了《洪水风险管理法》，提出了可开展救援的最大降雨量。之后，相继提出了“由国家直管的A级河流”和“由地方政府管理的B

级河流”等政策,在提高公众防洪意识、保护伤残人员、促进经济发展等方面起到了积极作用。2017年5月,进一步修订了《洪水风险管理法》,成立巨灾洪水管理委员会、开展应急避险疏散和残障人士无障碍转移演练。

最后, Koike教授提出,要通过协同合作的方式加强与水有关的抗灾能力,促进可持续发展。具体从“重建社会洪水风险意识”、“耦合气候模型计算设计洪水”和“开展流域尺度的洪水管理”三方面实施。在设计洪水方面,国土交通省结合降尺度的气候模型,修订了洪水管理计划,出台了新的设计洪水过程线,用于基础设施的防洪设计。在流域尺度的洪水管理方面,提倡相关企业和居民等所有利益相关者共同存蓄雨水和延缓雨水汇集;对于洪泛区来说,结合最新的堤防布设来确定淹没区,引导城市住宅向低风险区发展,从而降低经济损失。在已有工程措施的基础上,防洪减灾还需结合非工程措施。例如,根据早期预警来开展灾前准备和应急撤离,以降低洪灾对经济社会的影响;引导公众支持,当地政府可快速开展灾前准备和应急疏散;开展气候变化影响评估,指导灾后快速重建;开展社区结合安全疏散演练,实现相互支持和自救。加强利益相关者之间的协调合作、提升社区韧性是让人们在洪水中得以生存的关键所在。



**Daisuke  
Nohara**

日本鹿岛技术研  
究所可持续社会  
研究室研究员

## 活跃锋面系统引发的暴雨泥石流灾害防治的经验与教训

Daisuke Nohara研究员对日本2021年夏季遭受的极端洪水及泥石流灾害进行了分析,并分享了相关防治方案。他首先总结:2021年日本夏季西风带锋面系统活跃,由此导致了日本西部和中部地区的持续强降雨,并诱发了洪水和泥石流等灾害。本次强降雨属于非季节性天气,主要由受气候变化影响的西风带导致。他介绍道,日本政府已对部分流域实施了一定程度的防洪措施,可以有效的降低洪水的影响与危害。但是在应对极端洪水灾害上,仍有努力的空间,包括为风险区进行分区,同时加强对高风险地形的监测是进一步提升极端洪水防御能力的有效措施。

Nohara研究员详细介绍了日本2021年夏天遭受的3起洪水和泥石流灾害,包括7月3日在热海(Atami)发生的泥石流灾害,7月10日在千代川(Sendai River)流域发生的洪水灾害,以及8月13-16日覆盖日本6个流域的洪水区域性灾害。他指出了这几次洪水和泥石流灾害背后的天气原因:锋面雨水系统在日本上空停留时间相比以往有所延长,且本次锋面系统与鄂霍次克海(Sea of Okhotsk)上空的高压系统同时出现(这通常为6月至7月中旬的梅雨季节末期的典型气压分布情况),但该系统移动异常缓慢甚至接近静止,由此造成极端天气。

7月3日发生在伊豆热海的泥石流灾害始于蓝染川(Aizome River),造成严重影响。截至8月31日,26人死亡、1人失踪、131处房屋倒塌或受到损害,道路封闭持续26天,1100户家庭水源断供,165名当地居民仍滞留避难所中。Nohara研究员对该泥石流

流的特征进行了详细分析:泥石流发生源头处海拔达390米,中途流经2km的狭窄河谷(蓝染川)后入海,地域坡度达11°;且灾害发生4天前,该地区总降雨量达500mm,泥石流发生期间更是达到20-30mm/h,造成洪流含水量高达31-36%,流速达到8-11m/s,且反复发生十余次灾害。由此,他总结了此次灾害成因:比以往持续时间更长的暴雨天气和灾害发生地区土地利用条件的变化,如2011年当地政府填埋山谷已形成住宅用地,使得裸露土地增多,导致水土流失加剧(本次灾害中土壤流失总量达55,500m<sup>3</sup>),形成泥石流灾害;同时疏散撤离命令决策下达不及时,如本次灾害中,由于降雨持续时间长,但最大降水量仅为25-30mm/h,因此泥石流发生35分钟后当地政府才发出5级疏散命令,由此也加剧了灾害影响。Nohara研究员建议对该地区进行风险分区和更精细的监测,通过安装拦水坝、加强风险管理、以数据支持灾害应对决策等工程及非工程措施,提升该地区应急处置能力。

针对7月10日千代川流域的洪灾。Nohara研究员认为,在千代川流域观测到的极端降雨远超该流域防洪设施设计能力,其中游形成了相对静止的对流系统,二者在季节性梅雨锋面系统的影响下形成了洪水。得益于2006年特大洪水后加强了防洪措施建设,如疏浚河床、建设上下游防洪通道等,这次暴雨事件没有出现主要河流的洪水泛滥。且由于流域内的大坝经过升级改造,防洪能力得到了加强。同时,暴雨持续时间较短、降雨空间分布广,利于位于中游的鹤田水库(Tsuruda Reservoir)进行蓄水,因此造成的伤亡远低于2006年同期灾害。但他同时也强调,如果降雨单独集中在上流或下流流域,情况也可能会严重恶化。

对于8月13-16日发生的覆盖日本6个流域的洪水灾害,Nohara研究员也进行了简略分析与总结。他表示,出现在日本西部和中部的长时间强降雨是由日本上空的非季节性静止锋面系统引起。而得益于流域防洪工程的实施,在此次灾害中,六角川(Rokkaku River)流域洪水造成的影响较小。

最后,针对极端天气的判断标准的确定,Nohara研究员认为在自然环境中,这一标准应当根据该特点环境的自我适应能力来制定;而在城市等社会环境中,则应当根据人类活动的承受能力给出相应标准。当超过该标准时,就需要采取防洪措施。关于如何通过预警和疏散民众来达到最大限度减少伤亡,Nohara研究员认为,由于灾害持续时间短,在灾中进行通知已经为时已晚,在灾前进行预警和疏散才是有效做法。因此必须有计划地对高风险区域的相应预警参数进行更有效的实时监控以便及时发布预警信息。关于预防洪灾最重要的步骤,Nohara研究员认为,我们不能囿于过去的经验,而要认识到气候变化的影响,由此采取更符合当前条件的措施应对洪灾。他表示,除了加强工程措施建设外,还应当提升人们的防洪防灾意识等。



张晓蕾

中国水科院  
高级工程师

## 中国极端暴雨洪水防治与应对

针对2019及2020年中国发生的典型暴雨洪水灾害事件,中国水科院高级工程师张晓蕾从城市内涝及山洪灾害两个部分出发,分析了灾害的降雨过程、洪水量级、灾害损失以及灾害诱因等。

她首先分享了中国城市暴雨洪水的典型案例。2019年6-7月,江南、华南等地持续发生强降雨,6月6-13日,福建、广东中东部、广西北部等地累计降雨量为100-250mm,其中广西桂林降雨量达832mm。7月3日至10日,华南北部再次出现强降雨过程,累计降雨量超过100mm,其中福建北部等地为250-400mm。强降雨叠加效应导致福建、广东、广西等地遭受洪涝、风雹、滑坡、泥石流等灾害。灾害共造成浙江、福建、江西、湖南、广东、广西、重庆、贵州8省49个城市受灾,直接经济损失133.5亿元。

2020年6-7月,中国南方地区发生多轮强降雨过程,降雨区域覆盖云南、四川、湖南、湖北等15个省(区、市)。降雨量大于100mm、50mm的雨区面积分别达29和69万 $\text{km}^2$ 。安徽中南部、湖北东部、江苏南部超过200mm;最大日降雨量为湖北黄冈岐亭的325mm/d,此次降雨引发多地发生较重洪涝灾害。灾害共造成江西、安徽、湖北、湖南、重庆、贵州等24省(区、市)受灾,直接经济损失643.9亿元。

从这两场典型案例,可以分析出:中国的城镇化率比以往任何时候都高,20世纪50年代至今,城镇化率从11.2%攀升至55.0%,这也就意味着在面临洪水灾害时,城镇的经济损失比农村更大。

城市洪涝灾害根据地理位置不同也略有区别,洪涝灾害在沿海城市通常是由风暴、台风、热带气旋形成的;在南方城市则是通常来自江河过境洪水或局部溃坝;对于一些北方内陆城市来说,洪涝灾害往往会造成城市内陆淹没。

张晓蕾高工也分享了中国近年来比较典型的山洪灾害案例。首先是发生在2020年6月12日贵州省遵义市的严重山洪灾害事件。正安县碧峰镇每小时最大降雨量为163.3mm/h,超过500年一遇。灾害造成农作物受灾面积819公顷,直接经济损失9380万元。同年6月26日发生在四川省冕宁县北部的山洪灾害事件,其中义海镇每小时最大降雨量74mm/h,为50年一遇的洪水量级。灾害共造成面积高达1661公顷的农作物受灾,部分堤坝、通信电缆、电力线、桥梁等基础设施均受到影响,造成直接经济损失共7.4亿元。同年8月6日陕西省洛南县的遭受山洪灾害,期间3小时最大降雨量为127.2mm,6小时最大降雨量为184mm,超500年一遇。灾难共造成2738公顷农作物受灾,直接经济损失达19.3亿元。

她指出,中国山洪灾害具有突发性强、破坏力大、难以预测等特点。针对这些情况,中国建立了基于社区的山洪灾害基层群测群防体系,主要包括责任制体系、简易监测预警预报体系、宣传、培训、演练等。中国独有的基于社区的预防和响应系统——责任制体系,分为省级、县级、乡级、村级四个级别。以县级为例,通常由县级行政长官总负责,县级政府负责引导乡、村两级人员开展社区编制和应急响应,监测降雨和水位,利用县级监测预警平台发布预警信息。中国的责任制体系要求每年每个村庄按需开展“建立1套责任制体系、编制1个防御预案、安装1个简易雨量报警器、配置1套预警设备、

每年组织1次培训、开展1次演练、每个危险区对应确定1处临时避险点、制作1个宣传栏、设置1组警示牌、每户发放1张明白卡”等“十个一”标准化建设。制定村组(社区)群测群防建设数量和质量标准,发放大量群测群防的各种材料样本范例,使群测群防工作开展有依据、有样本,确保了体系建设的数量和质量。

她介绍,经过多年山洪灾害防治建设,宣传媒介逐渐丰富且形式多样,如利用短视频软件、书籍、电影新媒体进行山洪灾害宣传。通过近20年的非工程措施的中国山洪灾害防治宣传,伤亡人数缩减了67%,是“生命安全的避难所”,也是“惠及全体人民的慈善项目”。目前,随着城市化进程的快速发展,暴雨洪水的损失将越来越大,以社区为基础的群测群防体系已被证明在中国山丘区行之有效,更应当被广泛推广;预防超标准洪水引发的“黑天鹅”事件是今后工作的重点,更要充分调动基层的积极性,持续强化群测群防体系建设,以更好地应对各种极端暴雨洪水事件。

在会后的讨论中,针对如何通过预警和疏散民众来达到最大限度减少伤亡的问题,张晓蕾高工认为洪水灾害防御的关键环节是监测预警和基层责任制体系,通过对重点部位降雨和重点河段水位的监测,充分利用县级监测预警平台发布预警信息,可以有效提升受灾地区灾害应急处置能力。同时,定期加强对当地居民的宣传教育,也是有效应对极端灾害的重要措施之一。关于预防洪灾最重要的步骤,她表示预防洪水灾害一个非常重要的方面就是提升预报预警技术水平,使用气象数据、雷达等进行洪水灾害预报。另一方面就是更深入地进行风险识别和风险管理,加强教育及演习力度,从意识层面提高当地居民的洪水灾害防御能力。最后,她认为对年轻一代加强洪水灾害的紧急避险教育,增强人们对高危险性区域的认知是提升山洪灾害防御的重要工作之一。

## 2021年度德国山洪灾害分析

科特布斯勃兰登堡工业大学Frank Molkenhth教授从案例出发,详细介绍了2021年夏季德国发生的三起山洪事件,并为未来应对极端洪水灾害提出了建议。

Molkenhth教授指出,德国今年夏季发生的多起山洪在灾害特点上有一定的相似性。首先,它们都是由大面积的低压气流向欧洲中部移动所诱发,比如风暴“泽罗”(Xero)和低气压“伯恩德”(Bernd);随后带来短时的降雨雨强较大,地表下渗较小,造成大量地表径流。由于不同地区地形地貌的差异,积聚的雨水引发了山洪。Molkenhth教授通过具体的数据从持续时长、受灾范围、灾害模式、人员/经济损失几个方面对比了三场山洪事件;其中,发生在埃菲尔地区的极端洪水规模最大,降雨持续近14个小时,造成100亿欧元损失,181人遇难。

随后,Molkenhth教授回顾了三场山洪灾害。兰茨胡特市坐落在伊萨尔河(River Isar)的山谷上,山谷的宽度为5km,高于海平面400-500m。为了保护沿河的旧城区免受洪水风险,当地政府修建了排洪渠作为主要的防洪手段,数据证明伊萨尔河在近些



**Frank Molkenhth**  
德国科特布斯  
工程大学教授

年的确没有发生泛滥。但在2021年6月29日,风暴“泽罗”从法国沿东北方向移动至德国,在市区内造成百年一遇的短时强降雨。根据兰茨胡特市中心附近的雨量观测站数据,局部地区1小时内的降雨量达到了58mm,引发城市山洪。Molkenthin教授指出,此次兰茨胡特洪水是比较典型的城市洪水,降雨量并不是灾害的主导因素。其主因是受城市不渗水路面和建筑物阻水的影响,局部雨水难以及时排出造成城市内涝。此外,由于兰茨胡特市历史悠久,老城区有大量需要保护的历史建筑和道路,难以实行如排水系统改造及绿色屋顶修建等措施,使其防洪能力备受挑战。

另一场洪水灾害发生在贝希特斯加登镇,该镇四面环山,海拔高度600-2700m。7月21日,低气压“伯恩德”沿东北向西南方向移动,由于贝希特斯加登镇地形原因,部分云层被山脉阻挡,在傍晚温度较低的山区引发了夏季雷暴,4小时的降雨量为65mm。然而,其降雨的强度同样不是导致洪水的主要原因。导致此次灾害主要诱因为暴雨长时间集中于该地的山丘区,产生了大量的地面径流,使镇内河道漫溢。同时,在陡峭山坡形成的山洪带来了泥石流并造成了山体滑坡,毁坏了镇内房屋和多处设施。Molkenthin教授总结,贝希特斯加登镇的洪灾是典型的山区山洪,前期较小强度的降雨和特殊的地质环境使表层土壤饱和,因此当之后的大雨来临时,下垫面吸水能力不足,造成地表产流量激增;同时,降雨集中在地形较为陡峭的圈状山脉,且持续时间较长,因此导致了山洪的发生。贝希特斯加登地区防洪的难点在于其复杂的地形结构,在过去十几年中,在洪水风险较大的区域建设基础设施也增加了灾害破坏的强度。

2021年7月13-14日发生在西部埃菲尔地区的特大洪灾是德国今年遭遇的最严重的自然灾害。埃菲尔位于德国中部的丘陵地区,面积约为5000km<sup>2</sup>,海拔高度100-500m,有深而窄的山谷。埃菲尔地区同样受到低气压“伯恩德”的影响,局部24小时内的总降雨量打破了70年以来的记录,约达153.5mm。通过数据对比,Molkenthin教授指出,今年德国西部的洪灾与1910年洪水的量级类似。在埃尔夫特施塔特地区,洪水对基础设施造成了很大程度的破坏,比如排水和电力系统,使得灾后重建工作尤为艰巨。修建于1934-1936年的斯坦巴赫大坝(Steinbachtalsperre)位于科隆附近,在上游洪水发生后,大量被冲毁的房屋碎片、树木以及各种漂浮物将大坝的泄洪道堵塞,使之水位不断上涨,且大坝多处出现管涌,一旦坍塌,会对1万5千名居民造成风险;当地政府花费了五天时间才得以稳定险情。

Molkenthin教授总结了三起灾害的共性:其一,强降雨是这三场洪灾的诱因,但主导因素是降雨强度、降雨时空分布和不同地区地形条件的综合作用;其二,气候变化和人类活动对洪灾事件的频率和破坏程度起到了一定影响。最后,他建议有关专家有针对性地提高预报准确性、建立一系列行蓄洪区、水库等工程措施最大限度地减少灾害损失,同时建议政策制定者及媒体能够提高人们针对洪水灾害的警惕性,并采取应对气候变化行动、增强环保意识,以便更好地应对外来可能发生的极端洪水灾害。

在开放讨论中,就Philippe教授提出的关于极端天气的判断标准,Molkenthin教授认为关于极端洪水事件的判断标准大约为降雨量50-60mm/h,但还需要根据不同地形、时间:如城市、或者山区的不同环境、降雨持续时间等进行更精细的定义。所以对于德国本土来说,每小时降雨量50-70mm是定义极端洪水事件的标准。针对今年暑期德国发生的百年一遇的洪水事件造成重大人员伤亡的问题,Molkenthin教授表

示,一方面政府的预警系统过于复杂。原则上应由欧盟首先发布预警,再之后才是德国发布天气警报,接着传到州一级,州一级再传到县一级,层层递进。理论上这种工作流程是有效的,但经过层层传递,信息的传播速度得到了阻碍,导致了预警发布的延迟。另一方面,大部分当地居民认为留守在自己房屋中才是安全的应对洪水措施。但当第一波洪水位退去,第二波洪峰到来时,当地居民被困家中无法及时撤离。造成这种错误认识的主要原因是当地历史上从未遭受过本次洪水量级的灾害,因此对洪水灾害量级的认识不足,这才导致了当地居民错误的避险处置,造成了巨大伤亡与损失。关于预防洪灾最重要的步骤,Molkenthin教授认为人们不仅要重视风险区域防洪基础设施的建设,而且要提高当地居民的风险意识,加强风险管理。

Toshio Koike教授的内容已发表于《中国防汛抗旱》,2020,30(12)  
文章其余内容已被《中国防汛抗旱》杂志录用



## 冰凌洪水风险管理



**Slobodan P.  
Simonovic**

ICFM 主席  
加拿大工程院院士  
加拿大皇家学会院士  
韦仕敦大学教授

### 冰凌洪水风险管理

Simonovic 教授介绍了2020年4月加拿大阿萨巴斯卡河 (Athabasca River) 发生的冰坝事件。他介绍说, 春季阿萨巴斯卡河上游河段开始解冻, 冰块堆积形成冰坝, 造成了长达25 km的河流堵塞, 水位大幅上涨, 导致附近约7万人口的城市——艾伯塔省的麦克默里堡 (Fort McMurray) 多处被洪水淹没, 1.3万多居民被迫撤离。据加拿大保险局的数据显示, 该次冰凌洪水造成的经济损失达2.3亿美元。因此, 作为严重威胁人类生命财产安全的一种季节性洪水, 冰凌洪水必须引起足够重视并给予科学管理。

Simonovic教授指出, 在冰凌防治过程中应注重其成本与洪水损失之间的平衡。还要充分了解冰凌洪水的特殊性, 注意区分一般性洪水与冰凌洪水的洪泛区, 并同时考虑两者的风险。



**Tomasz  
Kolerski**

波兰格但斯克  
工业大学副教授

## 冰凌洪水防治方法

Tomasz Kolerski副教授首先介绍了冰凌可能导致的工程和环境问题。凌汛造成的影响涉及水工工程、水文设施、土木工程、船舶设计和生态系统等多个领域,包括冰凌防治、近海设施的冰冻破坏应对、桥梁和桥墩的冰荷载分析、冰塞河流的泥沙输送、破冰机械设计、寒冷地区生态环境改善和河流修复等。

Kolerski副教授介绍了河冰形成和解冻的过程,以及造成冰塞的两种情况。在高纬度地区或部分地区的冬季,当气温下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时,河水会出现结冰甚至封冻现象。这一过程通常在两种情况下发生:在河流较为平缓的情况下,从水面开始形成冰晶体,聚集形成松散易碎的薄冰(skim ice),这是河冰形成的初期状态,通常发生在冬天温度较高的地区。由于河岸处河水流速较小,冰晶易在岸边形成岸冰(border ice);若气温继续保持在冰点以下,岸冰会逐渐增厚并向河道中间发展,冻结形成“静力冰盖”(static cover),这一现象也常在水库或湖面上被观测到。河流较为湍急的情况下,由于较强的紊流扰动,结冰现象不仅仅发生在河面,还存在于整个水体。河水内低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的过冷却水会形成水内冰(frazil ice),水内冰或悬浮于水中,形成“冰花”(suspended frazil),或附着于河底,形成“锚冰”(anchor ice)。部分水内冰漂浮至水面,形成“饼状冰”(pancake ice)。在遇到冰盖、河道急弯或其他障碍物时,这类饼状浮冰会不断堆积、紧密相连,最终形成并置冰盖(Juxtaposed ice cover)或导致封冻期的冰塞问题。针对河流在春季的融冰过程,Kolerski副教授提及了两种解冻形式:一种是在流量变化较小的情况下,水流作用力不强,冰盖在热力作用下自然融化,很少会产生冰塞或冰坝;另一种是在流量大幅增加的情况下,冰盖还未充分消融,在水流和风的作用下断裂解冻,造成冰塞或冰坝,从而导致冰凌洪水,影响船舶的正常航行、使海岸线遭受侵蚀等。

针对冰塞或冰坝引发的洪涝灾害等一系列问题,Kolerski副教授介绍了冰凌防治的非工程措施和工程措施。非工程措施的主要方法是人工除冰,主要包括:①爆破。这是很多国家和地区长期以来的凌汛管理手段之一,分为春季开河期、冰坝形成前的冰盖爆破和冰塞形成中后期的炸药爆破;②机械除冰。目前常用的机械设备有船载挖掘机、水陆两用破冰机等。加拿大研制的Amphibex水陆两用破冰机,可通过反铲,将自身牵引至冰层,利用自身的重量进行破冰;③破冰船。其主要优势在于除冰速度较快且作业距离较长,但对水深有一定要求。工程措施通常通过提前估测冰塞可能发生的位置和长度,在河流中安装拦冰结构和设施,起到拦阻和控制冰凌范围的作用。Kolerski副教授主要介绍了拦冰排(icebooms)和美国纽约格拉斯河(Grasse River)正在使用的一种墩式拦冰栅(pier-type ice control structure)。其中,拦冰排是应用最广的拦冰结构物,可漂浮在水面,有效阻断浮冰的运动,其拦冰的效果主要取决于以下3个因素:冰盖的Fr数(Fr数又称弗劳德数。当模拟具有自由液面的液体流动时,如水面船舶运动、明渠流动等,Fr数是必须考虑的相似准则数)、冰块对拦冰工程的侵蚀速度以及拦冰排所受冰块的负载。

**郭新蕾**中国水科院  
正高级工程师

## 中国河冰水力学的研究进展以及未来研究方向

郭新蕾教授首先介绍了河冰问题的背景和需求。全球较高纬度的地区约有60%以上河流在冬季会出现冰凌过程,冰塞冰坝是北方寒冷地区江河渠库中较常出现的冰情现象,极易导致凌汛洪涝灾害。与此同时,冰凌灾害还严重威胁大型引调水工程的安全运行。河渠冰期的安全及减灾是水旱灾害防御领域和相关部门迫切需要解决的重大问题,总结凝练现有河冰水力学研究成果及当前科学研究和工程应用研究中存在的难题,对于解决上述问题具有重要指导意义。

在河冰水力学研究主要进展方面,郭新蕾教授表示,伴随“失热—产冰—封河—消融—开河”时间轴,50年来国内外河冰水力学理论主要集中在水热循环机理、流冰形成输移扩散、锚冰岸冰形成发展、封河冰塞机理、开河冰坝机理、水工建筑物冰塞过程、水冰沙互馈作用等7个主要方面。相对而言,国外起步较早,在前4个方面成果丰富,而国内在实践需求牵引下,借鉴前述成果并围绕后3个方面的基本理论和难点开展研究,也实现了部分并跑和引领。在冰情预测预报方面,郭新蕾教授介绍了当前应用最为广泛的河冰过程一维模拟模型、准二维模拟模型、二维精细模拟模型和冰情水文预报模型。而对于冰坝预报研究更多集中在开河和冰坝形成前的冰情预报及冰坝形成后的洪水预报等方面,对冰坝形成的判断和预报主要局限在经验公式或者特定指标方法,亟待进一步探明冰坝演变机理基础上提出新的预报方法。在冰情观测和防治技术装备方面,郭新蕾教授介绍了目前已形成的冰情观测技术装备体系,装备类型有20余种,观测参数有数十个,观测参数包括冰厚、水深、冰花浓度、水温、冰面冰封率、流冰速度、水温、冰温、冰压力等,基本满足了一般性防凌减灾需要。对于冰凌灾害的防治,他介绍了可采用的破冰方法,包括传统的破冰船、开凿机和爆破作业等。他还介绍了中国水利水电科学研究院河冰水力学创新团队近年来在河冰监测、预报模拟、调控3个方面的工作,以及冰塞冰坝风险原因、位置、时间和应对方式等凌汛防治最关心的几个问题。

最后,郭新蕾教授对河冰水力学的研究作了总结和展望。首先是河冰水力学基本理论的拓展,在现有河冰理论框架下,考虑河床热通量和地下水补给的热源汇入,进一步研究水内冰生长、絮凝、运动和分布规律及河流锚冰生长和释放引起流量和水位的变化,并开展水冰、水沙联合研究,丰富和拓展河冰水力学研究范畴。其次是对变化环境下冰情预报及趋势的推演,基于气候变化周期内气象和水文演变特征,结合北方河流变化趋势,研究揭示变化环境下黄河中上游冰情多年演变规律,在此基础上针对性提出冰情预报方法和技术,尤其是不同尺度区域、中长期、精准化水文—水动力预测预报模型技术,并借此预报未来变化条件下冰情的发展趋势。另外,还要加强冰凌灾害全过程监测预警与协同防控技术装备的研发。郭新蕾教授认为,有必要研究创建不同尺度冰塞冰坝连续监测原理和新方法,研制相应的监测关键传感器,形成多参数立体监测装备,研发凌汛灾害影响监测与灾情信息获取技术与装备,为构建冰凌灾害智能预报、预警和防控一体的平台提供监测手段和数据支撑。关于高原冰湖冰川相关研究的探索,他指出冰湖溃决产生的溃决洪水往往会下游生命财产和

基础设施带来极大破坏。冰湖溃决过程复杂、影响因素多。有必要加强对冰湖溃决机制、影响因素以及预测预报的研究,注重开展低温条件下冰湖溃口演化的机理试验探索,尤其是研究水流冲蚀溃口冰碛土下切和坍塌过程等物理机制,为冰湖灾害的预判、模拟提供理论支持和决策依据。



**Karl-Erich  
Lindenschmidt**

加拿大沙斯卡  
曲湾大学副教授

## 洪水危险与风险评估、风险图及防治措施

Lindenschmidt 副教授以加拿大温尼伯市 (Winnipeg) 的冰塞为例,介绍了加拿大河流冰塞通常形成的过程——上游的碎冰在下游完整的冰层前缘处堆积,阻挡水流,形成冰塞。不断堆积的碎冰导致冰塞逐渐增厚,同时碎冰的粗糙表面也增加了冰塞对水体的摩擦力,导致冰塞体上游的水位逐渐壅高。值得注意的是,当其他因素均保持不变时,即使冰塞底部仅仅向下游移动一小段距离,都会导致上游回水和冰塞形状发生变化,因此对冰塞的预测很难进行,可能需要采用随机法或蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 算法。

Lindenschmidt副教授接着介绍了一种洪水风险研究方法,该方法同时考虑了洪灾危险性和洪灾区在面临洪水时的脆弱性。洪灾危险性关注的是当上游壅水水位升高时洪灾区发生大型洪灾的可能性和灾害程度;而脆弱性则相对关注洪灾区的财产(如基础设施、建筑物等)对洪水的暴露度和易受灾的程度。其中,描述易受灾程度的一种方式:当壅水升高到一定水位时,就可能发生某种程度的灾害。将以上两方面结合起来,就可以预估可能的灾害程度以及受灾后的恢复期。

Lindenschmidt 副教授以加拿大阿萨巴斯卡河 (Athabasca River) 的冰塞事件为例,模拟了3类主要应对措施的防治效果,包括疏浚、人工破冰和建造堤岸,并分析了其可能存在的潜在风险。疏浚工作主要是采集并排出河床沉积物,人工破冰则利用Amphibex水陆两用挖掘机、人工破冰船等手段进行破冰;建造堤岸是在人口较为密集、易受洪灾影响的居民区修建堤岸。模拟结果显示:疏浚可以将河道加深,增大下方水体通过的横截面积,同时也可以降低上游壅水的水位;人工破冰法效果显著,可以将完整的冰面破坏,避免来自上游的碎冰在此堆积,从而避免了冰塞的形成;建造堤岸则可以有效保护居民区免受冰塞威胁。

Lindenschmidt副教授介绍了用于分析冰塞的Monte-Carlo算法。该算法可用于制作洪水淹没风险图,测算基于某种措施下的凌汛发生概率等。在结合重要财产对洪水的脆弱性(建筑类型、受损曲线等)分析时,该算法还可以估算财产的年预期损失 (annual expected damaging)。Lindenschmidt副教授的研究团队还对各种防治方法的有效性进行了评估:一种方式是仅从洪水危险性角度评估每种防治措施实施后的平均洪水水位;另一种方式则是从洪水风险的角度评估措施实施后的平均年度受灾情况。两种评估均表明疏浚和人工破冰是较为有效的方式。

针对加拿大人工破冰时间问题, Lindenschmidt副教授认为每个地区的最佳破冰时间都不同, 取决于每年河冰消融的时间。对于加拿大中部的较长河道(如红河, 河道长达25 km), 破冰开始较早, 通常在冰层消融之前的2个月左右(如2月份); 对于较短的河道, 破冰则稍晚开始。

针对团队所用洪水风险模拟与风险图编制等新方法, 与常规的利用水流状态的洪泛区风险图编制方法进行比较或结合, Lindenschmidt副教授介绍道, 此前进行过一个针对河冰参数、边界条件以及数字高程模型(DEM)分辨率的敏感度分析, 结果发现模拟结果对DEM分辨率十分敏感, 因此在未来的模拟中, 需要分辨率较高的DEM以获得最好的结果。他还补充说, 还有一类应对措施是将洪灾区的建筑进行分区, 并避免在高风险地区建设基础设施。其团队下一步将对这种应对措施的防治效果进行模拟分析。

最后, Lindenschmidt副教授再次强调, 评估洪水风险的重点在于不能仅仅关注洪水危险性, 而要同时考虑洪水危险性和脆弱性, 从而最终决定采用哪种防洪措施。

文章已发表于《中国防汛抗旱》, 2021, 31(04)



# 流域洪水典型事件与管理经验



**Slobodan P.  
Simonovic**

ICFM 主席  
加拿大工程院院士  
加拿大皇家学会院士  
韦仕敦大学教授

## 流域洪水典型事件与管理经验

Simonovic教授介绍：“2020年全球范围内的洪灾形势十分严峻。从8月以来，几乎每个大洲都不同程度地遭受了洪水的侵袭。加之2020年新冠肺炎疫情对经济社会的冲击，防洪工作面临双重压力。”

面对更为复杂的危机情景，Simonovic教授指出，为降低受灾群众的损失，需要从三个方面着手：第一，政府需要增强其风险与应急管理的能力，确保并落实灾害损失预防工作；其次，要加强城市建筑的韧性建设，使之与非工程防洪措施相结合，提高洪涝灾害防御水平；第三，以往的经验证明，短期的规划已无法满足需求，实施长期且具有前瞻性的防洪及市政规划十分有必要，比如完善洪水风险图的编制、增强洪泛区的管理等，不断更新传统模式下的防洪规划，将各级政府与利益相关者结合起来，并调动他们参与其中。

Simonovic教授还指出，对近期各国重大洪灾事件的探讨促进了第一手洪水管理经验的共享。通过对全球防洪措施的回顾，能够帮助专家和决策者认清防汛形势，从2020年的众多洪水事件中汲取经验教训。

谈及多水库联合调度在实际防洪中的运用，Simonovic教授认为，水库在洪水管理中发挥了关键的作用，而大多起到防洪作用的水库沿用的还是修建时的设计标准，受各种因素影响，这些标准在不断变化，对现有水库及其蓄水能力进行重新审查就变得至关重要。面对新的气候条件和防洪形势，基于过去数据的水库蓄洪是否能满足现在的防洪需求是在很多讨论中常被疏忽的问题。



夏军

中国科学院院士  
武汉大学教授

## 2020年中国南方大洪水

针对“2020年中国南方发生了何等量级的洪水与灾害”的问题,夏军院士介绍了2020年中国南方的洪灾情况。2020年,中国南方尤其长江、淮河、鄱阳湖及太湖等大江大河大湖多次发生洪水。根据国务院新闻办公室发布的数据及国家气象局数据,2020年,长江中下游地区梅雨期持续时间较常年偏长23 d,平均降雨量753.9 mm,比常年偏多168%,为1961年以来最多。截至8月13日统计,全国共有634条河流发生超警戒水位以上洪水,洪涝灾害造成6346万人次受灾(比前5年均值偏多12.7%)、直接经济损失1789.6亿元(比前5年均值偏多15.5%),因洪灾死亡失踪219人(比前5年均值减少54.8%),倒塌房屋5.4万间(比前5年均值减少65.3%)。

针对“在应对新冠肺炎疫情的严峻形势下,中国如何同时做到防御特大洪水”的问题,夏军院士认为:2020年对于中国及全球来说都是十分艰难的一年。年初中国武汉市疫情危急时刻,中国政府和人民同舟共济,通过全国“一盘棋”的科学决策和有效的隔离与防疫,在短短的两个半月内迅速控制住疫情,避开了5月进入汛期洪水的压力。特别是自长江入梅进入汛期以来,中国政府超前谋划、周密部署,确保做到疫情防控和防汛备战“两不误”。在防控疫情方面,实施了病人救治、人群核酸检测、佩戴口罩和健康码等有效措施;在防汛备战方面,坚持防洪预案和工程措施与非工程措施相结合。尽管一直面对不断变化的环境带来的新的挑战,但中国人民汲取历史经验,从防洪规划、工程措施与非工程措施的使用中取得了宝贵经验。

夏军院士以我国应对2020年淮河流域大洪水为例,介绍了淮河防洪工程体系。淮河地处南北方分界处,水旱灾害频发。淮河流域面积约为27万km<sup>2</sup>,人口约1.65亿,人口密度居各大江河流域之首。经过多年淮河治理,业已形成了“上拦、中蓄、下排”的流域防洪工程体系。2020年7月,气象及水文预报显示了淮河将遭遇较常年同期更严重的暴雨。相关防汛部门和地方政府提前转移了居住在蒙洼蓄洪区内的2万名群众。7月20日,王家坝闸开闸向蒙洼蓄洪区分洪,上游、中游、下游协同配合,确保了该流域内民众的生命安全,防洪工作成效显著。

夏军院士还介绍了2020年长江流域的防汛情况。自5月入梅后,先后形成了长江2020年第1号、第2号、第3号编号洪水,其主要暴雨落区在长江中下游地区,鄱阳湖等区域受灾严重。8月11—17日,长江上游发生强降雨过程,又形成了长江2020年第4号、第5号编号洪水。一方面,在仍受疫情影响和防疫需求下,武汉市政府组织了近千万人进行核酸检测,以查明可能的感染源和巩固疫情防控成果;另一方面,在严峻的汛情形势下,专业防汛队伍和人民子弟兵战斗在抗洪抢险第一线,加上三峡工程在拦蓄洪水中发挥的重要作用,成功抵御了三峡水库建成以来最大入库流量,防汛工作取得了显著成效。

最后,针对“今年中国南方洪水给人的启示与经验教训”提问,夏军院士表示:中国长江、黄河、淮河等七大流域地处东部季风区,人口占全国的95%。无论是过去还是未来,都面临洪水灾害的影响与威胁。因此,长江流域经济社会的发展历史也是一部中华民族与洪水灾害不断斗争、适应与管理的历史。经历了无数次大洪水,中国人民也取得了抗洪的宝贵经验与教训:首先,洪水是一种具有不确定性的自然现象,气

候变化、土地利用和地表覆盖的变化均会改变洪水事件的时空分布,如何考虑变化环境下尤其是全球气候变化影响下的流域防洪策略,是新时代防洪减灾面对的重大课题,需要积极开展相关应用基础研究与应对措施;其次,洪水具有很强的社会属性,与人类的生存和发展息息相关,通过工程措施防洪非常重要,但并不是唯一措施,需要与非工程措施(预警预报与调度)以及科学的洪水管理措施结合。例如,分蓄洪区的科学运用和通过洪水保险的适应性管理,最大限度减少洪水灾害的损失与风险。2020年淮河的防洪及蒙洼蓄洪区居民转移的案例证明了其必要性。最后,我们应该学会如何与洪水共生存。随着经济社会发展,洪泛区人口数量在增加,中国南方洪泛区管理和城市洪涝方面将会面临更多挑战。尽管2020年长江洪水的最大洪峰流量不及1998大洪水记录,水位却异常偏高,充分说明了河道洲滩变化和分蓄洪区变化的影响,需要反思如何处理好与洪水共生存的管理问题,理清河流治理的思路。另外,不同的国家、不同的气候带以及不同的社会经济背景下,如何做到科学防洪减灾,需要从自身条件和环境实际出发,制定最合理的适应性管理对策。因此,需进一步加强国际合作交流,互相学习借鉴,相得益彰。



张建云

中国工程院院士

## 2020年长江洪涝灾害应对——工程与非工程措施

来自中国工程院的张建云院士针对2020年长江流域的特大洪水,阐述了工程与非工程手段相结合在洪灾应对中起到的重要作用。

张建云院士首先概述了我国洪水的特点及气候变化下的洪水发展态势。根据《国家防洪计划》(National Flood Defense Plan),全国约有三分之二的地区面临洪水风险,约400个城市经历了某种形式的洪水。从资料显示,20世纪洪水事件数量比19世纪多了122%。同时由于全球气候变化带来的海平面上升,导致沿海地区的洪水风险更高。近年来,气候变化成为洪水管理中的热点问题。世界气象组织报告指出,2020年全球平均气温继续上升,比1850-1990年的平均气温高出1.2℃,这将增加风暴事件的数量,并带来洪水风险。此外,海平面上升也带来了额外的挑战。1980年至2019年间,中国周围的海平面每年上升3.4毫米,这意味着沿海地区遭遇洪水风险的概率更高。综上,洪水是中国历史上最严重的自然灾害之一。未来,在全球气候变化的影响下,我们将面临更大的洪灾风险,洪水管理任务刻不容缓。

张建云院士以长江2020年洪水为例,系统地介绍了长江流域的基本情况和防洪应对的手段。长江长约6300公里,是亚洲最长、世界第三长的长江,集水区约180万平方公里,拥有中国40%以上的人口和GDP,生产中国三分之一以上的淡水和食品。长江经济带是我国经济的重要动力源,但是在典型的季风气候下,该区域遭受洪水的风险非常高。

长江2020年洪水具有以下突出的特点:一是降水量大。6月至8月期间,该流域的平均降水量为635毫米,比多年平均值多30%。中下游地区的降雨量甚至更多,是多

年平均值的两倍多。例如,下游安徽省在6月至7月间的降雨量为856毫米,是多年平均降雨量的2.1倍,也是有记录以来的最高降雨量。其中一个测量站记录了高达2179毫米的极端值。二是形成的流量大。7月至8月期间,共出现了5次洪水,三峡水库达到运行以来的最大入库流量。同时打破了鄱阳湖流域洪水纪录,以及下游150公里处南京附近的水位记录。可以说,2020年的洪水是流域尺度事件,是自1998年洪水以来最严重的一次。在抗击2020年洪水中,对支流堤防5000多个破坏点采取了应急措施,紧急使用了892个蓄滞洪区。虽然此次洪水比往年要严重得多,但是相比1998年的洪灾损失,无论是经济损失还是人员伤亡都要少,其直接经济损失约为1998年的一半,伤亡人数仅为1998年的十分之一。

张建云院士分析指出,在此次防洪中,两个方面发挥了重要的作用。第一,从工程方面,精细化实施水库群联合调度。长江防洪工程系统由若干水库、堤防和蓄滞洪区组成。以三峡水库为核心的41座上游水库联合运行,总计提供了884亿立方米的蓄水空间,为30多个城市和1亿多人口提供了保护。第二,从非工程方面,预报系统和决策支持系统的相互协作。其中,预报系统中广泛应用的模型之一是新安江模型。张院士详细阐述了预报模型与水库群调度在抗击洪灾中的协同作用。该模型的输入数据包括降水、蒸发和上游流量等。汇流计算采用的是单位线法(UH)或那什线性水库法(Nash Linear Reservoirs)。河道流量是由马斯京根法(Muskingum method)进行演算的。在2020年长江流域洪水的预报中得到了成功验证。将不考虑三峡上游水库群拦蓄情况下的入库流量与实测入库流量进行比较,可以看出上游水库拦蓄洪水246亿立方米,明显降低了三峡水库入库流量。而以三峡水库为核心的41座水库联合调度,共拦蓄洪水500亿立方米,在第五次洪水时,水位从46.8米降低至43.24米,三峡水库的出库流量从 $88000\text{s}/\text{m}^3$ 降低到 $75000\text{s}/\text{m}^3$ 。由于水库群的拦蓄作用,五次洪水过程的洪峰均被明显坦化,同时确保了沙市站水位在45米(激活蓄洪区警戒水位)以下,有效避免了荆江蓄滞洪区的启动,挽回了60万人口的家园,保护土地224万平方公里,避免了重大的经济损失,也保障了下游城市安全,例如长江中游湖北省会城市武汉的安全。由于三峡水库群的拦蓄,长江流域水位一直维持在保证水位以下。

张建云院士总结到,2020年长江流域洪水治理产生了巨大的经济和社会效益。一是及时准确的预报,为决策运行提供了强有力的依据;二是三峡水库和另外40个上游水库组成的防洪工程系统对防洪工作的成功至关重要;三是工程措施与非工程措施相结合,在防洪管理中发挥着不可或缺的作用。



**Molly Finster**

美国能源部阿贡  
国家实验室  
灾害韧性专家

## 美国密歇根州2020年溃坝事件研究 I

美国阿贡国家实验室的两位灾害韧性专家针对2020年5月美国密歇根州发生的溃坝事件进行了介绍和分析。

Molly Finster博士在介绍溃坝事件的整体情况及重要的时间节点之前,简单介绍了“密歇根大坝安全项目”,该项目由美国联邦应急管理署的国家大坝安全项目以及美国国家集成中心共同资助。其目标在于:1.通过监测本次密歇根州大坝的损坏程度,了解事件发生的情况;2.将淹没模型计算结果与实际洪水数据进行对比研究;3.研究溃坝事件发生后,洪泛区的水文及水力特征;4.从风险社区的快速撤离过程获得启发。

据Finster博士介绍,在密歇根州Gladwin县和Midland县境内分布着六座水库,这些水库均建于1912年至1925年之间,距今有100年左右的历史。Tittabawassee河上的四座大坝Secord大坝、Smallwood大坝、Edenville大坝和Sanford大坝由同一家公司掌管和运营,另外两座位大坝(Chappel大坝和Beaverton大坝)位于上游的Cedar河和Tobacco河上,分别为县管大坝和市管大坝。这些大坝最初是为了水力发电而建,并不是以防洪为目的。

Finster博士表示,一个停滞的低压系统和锋面边界横跨了大湖区的南部,造成了密歇根州东南部的强降雨,从5月17日早晨开始,一直持续到5月19日下午,降雨量达到10-20厘米。

由于强降雨的影响,在溃坝事件发生的前一天,也就是5月18日,该地区的几条河流已经遭受了严重的洪水,尤其是Midland县的Tittabawassee河经历了历史最大洪水。因此,5月18日,该地区所有大坝均开闸敞泄。值得注意的是,上游Cedar河上的Chappel大坝,在主坝一侧的发电机房附近发生了漫顶,但幸运的是经过大坝运维人员和工程师们努力奋战,缓解了事态,化解了危机。

5月19日是溃坝事件发生的当天。在0点30分,大坝运维人员意识到问题的严重性,并且事态还在持续恶化,因此对Tittabawassee河沿岸四座大坝启动了紧急行动计划程序,以便迅速发出警报。由于持续高水位运行,凌晨3点30分,Smallwood大坝开始发出警报。从早上到下午,州政府官员、安全办公室官员和大坝工程师们都在Edenville大坝现场全力缓解大坝安全问题。然而,在下午5点45分,洪水最终从坝体最东侧的部分冲破大坝,导致了密歇根州历史上最严重的洪水溃坝事件。洪水最终在晚上8点前抵达下游的Sanford大坝,这座大坝同样采取了敞泄的措施,但由于从Edenville大坝下泄的洪水引起了库区水位快速上涨,因而发生了漫顶和溃决。

Tittabawassee河的最高水位在雨停之后的第二天(5月20日)才出现,达10.68m。直到5月22日,在卫星上依然可以看到这场洪水的淹没情况。据Molly Finster博士介绍,这场洪水打破了Tittabawassee河沿岸城市的历史洪水记录,造成了建筑、道路、桥梁等基础设施的严重损毁。约11000位当地居民被安全撤离,值得庆幸的是没有人员伤亡。

最后,Finster博士就基础设施老化问题进行了说明。从大坝安全的角度来看,业主和运营者都清楚老化基础设施的脆弱性以及与之相关的风险。不仅需要制定规

划和维护升级,以修复或减轻这些问题,还要将这些风险传达给周围的社区。同时,制定防灾演练方案也很重要,可以加强各部门之间的联系,从而在溃坝事件发生时做出快速响应。Molly Finster博士还表示,在大坝重建过程中,要考虑采取相关措施来增加其抵御洪水的韧性。



**Carol Freeman**  
美国能源部阿贡国家实验室应急备灾与韧性高级研究员

## 美国密歇根州2020年溃坝事件研究 II

Carol Freeman博士深入事件细节,从预警过程、发布灾情信息、民众响应三个方面介绍了成功转移的经验,强调建立多方协调联动、信息即时更新、防灾演练和制定转移计划的重要性。

对于本案例,阿贡国家实验室参考了美国陆军工程师兵团发布的《大坝和堤防紧急情况下公众警报和预警指南》,该指南主要围绕民众如何接收预警以迅速采取行动撤离等展开。

Freeman博士关注上述指南的三个部分分别是:1.从监测出威胁到向民众发出预警的过程中所花费的时间;2.从发出预警到民众接收到预警所需要的时间;3.民众收到预警后所做出的响应以及是否采取了适当的行动。

Freeman博士以Midland县为例阐述了成功撤离的全过程。她表示,撤离过程中的一个重要因素就是受灾地区政府与各相关机构之间的“关系”,包括与上游Gladwin县的关系,与国家气象局的关系,与大坝公司 Boyce Hydro水电公司的关系,甚至与当地化工厂的关系。在此次事件期间,除了正式的官方通知之外,各机构之间通过电话和短信的方式进行了大量的非正式交流。

Midland县多次使用了NIXLE系统,这是一个本地警报和预警系统,当地调度人员非常熟悉该系统,可用于包括交通事故在内的多种事故的应急警报。Freeman博士从公众的角度介绍了NIXLE系统。她表示,许多社区购买了NIXLE警报和预警服务,尽管消息没有预制脚本,但是发布消息的人员非常熟悉如何执行此项操作。因此,他们能够提供简短频繁的更新,每条信息包含事件发生的地点和民众需要采取的措施,而这些信息更新确实传达出了形势的紧迫性,让民众了解大坝即将溃塌。NIXLE系统鼓励民众加入,在911网站上设有订阅链接,注册简单,并可通过县市的官网链接到注册界面,提供英语和西班牙语双语种警报。

除此以外,Midland县还首次使用了无线应急警报系统。美国拥有一个集成的公共警报和预警系统,无线应急警报是其中非常重要的部分。预警信息直接传送到信号塔覆盖范围内所有民众的手机上,字符数上限为90个字符,不受带宽的限制,民众也不必选择定制加入。由于是第一次使用这个系统,民众需在事件发生前进行多次演练以达到更好的效果。

Freeman博士强调信息的一致性很重要,并指出Midland县在控制警报发布上做了很好的示范。5月16日, Midland县在几乎没有在网上发布任何讯息。但到了5月18日,持续的雨水引发了人们对大坝安全的担忧, Midland县开始向社区发出警报,同时通过Twitter和Facebook发布相关信息,扩大警报范围。5月19日,再次发出多次警报。在此期间,有25条警报通过Twitter和Facebook 广为扩散。随着民众的撤离,警报数量也有所下降。与此同时,社交媒体在应急响应过程中也进行了井喷式发帖,从而加速了信息的传播,部分民众及时更新信息以抢占Twitter和Facebook的头条位置,他们还提供视频和链接帮助那些需要核实洪灾信息的民众,甚至提供“地图定位”功能来帮助民众确定自己与洪水淹没范围的距离以进一步决定是否需要撤离。

Freeman博士总结了此次应急撤离过程中的民众响应,此次事件共有约11000位民众被提前转移,避免了夜间的摸黑涉水转移。有了2017年洪水的经历,民众对洪水风险的认识也有所提高。此外,基础设施老化、大坝的安全可靠性和日常维护也引起了社区范围内的广泛关注。

张建云院士的内容已被《中国防汛抗旱》杂志录用  
文章其余内容已发表于《中国防汛抗旱》, 2020, 30 (12)



# 城市洪水实时预报： 现状和未来的挑战



**Slobodan P.  
Simonovic**

ICFM 主席  
加拿大工程院院士  
加拿大皇家学会院士  
韦仕敦大学教授

## 城市洪水实时预报

Slobodan P. Simonovic教授表示，目前全球约有55%的人口居住在城市里，而该比例仍在持续上升，预计在2050年之前可能上升到60%~70%左右。全球有很多大城市位于海岸地区，因此容易受到多种气候变化因素的影响，易遭受洪水灾害。为了减小洪灾的破坏，全球范围内采取了多种工程措施和非工程措施，其中“城市洪水实时预报”这一非工程措施受到更多关注。各国已经意识到要为洪水预报提供更充足且准确的数据支持以提升洪水预报的准确性，进而应对城市洪涝灾害的挑战。本次线上会议将围绕“城市洪水实时预报”展开讨论，对广义的洪水风险管理研究十分有意义。

**Subimal Ghosh**

印度理工学院  
(孟买分校)  
土木工程系教授

## 城市气象与洪水预报

来自印度理工学院的Subimal Ghosh教授介绍了城市气象学与洪水预报的相关内容。他引入气象学中重要的理想气体定律(Clausius Clapeyron Theory):气温每升高1°C时,大气中水蒸气容量随之上升7.5%,这一现象在极端降雨情况下表现最为显著。联合国政府间气候变化委员会(IPCC)报告显示,全球发生极端降雨和极端干旱天气的地区数量均有所增加,其中发生极端降雨的地区增加得更多。未来,预计全球范围内发生极端降雨的频率可能会继续上升,尤其是高纬度及热带地区。

Ghosh教授简要介绍了其团队的研究成果,概述了亚洲中部和南部的温度、降水等参数的尺度分析结果。研究结果表明,印度近年来的极端降雨天气有所增加,并且极端降雨天气呈现空间分布不均,总体来看在印度中部增加较多。Ghosh教授还概述了影响降雨天气的重要陆地因素,包括城镇化、土地利用和植物覆盖面积改变、陆地上的水资源管理、大气气溶胶和尘土等;并总结了城镇化对降雨的影响,主要包括温度和湿度升高、城市热岛效应、大气气溶胶增多、气流和涡旋的改变等。对不同规模流域受短时强降雨影响的分析显示,小型( $\leq 1000\text{km}^2$ )和大型( $>1000\text{km}^2$ )流域受到日极端降雨的影响差异不大,而对于时间尺度更短的3h极端降雨事件,小型流域比大型流域受到的影响更大,受灾通常更严重。

随后Ghosh教授讲解了城市洪水的3类模型:①无城市冠层模型(without urban canopy model, WRF-NoUCM);②单层城市冠层耦合模型(coupled with a single-layer urban canopy model, WRF-SUCM);③多层城市冠层耦合模型(coupled with a multi-layer urban canopy model, WRF-MUCM)。其中,多层城市冠层耦合模型所模拟的降雨量数据与实际观测到的降雨量数据较为接近。

Ghosh教授重点讲解了印度在钦奈市建立的首个城市洪水实时预报系统。该预报系统所需的数据包括历史降雨量、海岸环境条件、水文条件、地貌条件等,将以上数据通过数据处理、模型整合、预测分析等步骤,最终形成可以向大众发布的洪水实时预报结果。其中,构建洪水模型、模型率定验证、建立洪水数据库等相关内容都是提升该系统预报精度的重要环节。为了实现不同时间尺度的洪水预报,洪水数据库的数据来源应包括不同时间尺度的案例(几年至几百年不等)、风暴持续时间(几小时至几天不等)、潮汐状态、历史气候条件等。

关于印度城市洪水实时预报系统的主要负责机构,以及该系统的数据来源,Ghosh教授表示,天气预报模型由印度的科学部(Ministry of Science)负责并提供数据,海岸模型由海岸中心(Coastal Center)负责并提供数据,水文模型的数据来源于位于钦奈市上游多个地区的传感器;其余数据来源于雷达监测、市民调查以及每5年更新一次的数字高程模型(DEM)等。

针对短时间尺度的气温—降水关系,Ghosh教授提出了两种观点:①在以小时为单位的时间尺度下,发生降雨之前的气温变化可以作为降雨的预兆;降雨之后的气温通常也会发生变化(由于降雨效应、云层效应等原因),但这一温度变化不一定能够作为未来可能发生极端降雨天气的判断依据;②当气温较高时(如超过34°C时),产生极

端降雨天气需要较大的空气湿度,但水蒸气来源常常只能持续3~4h,因此,会发生小时尺度的极端降雨,但不会发生日尺度的极端降雨。

Ghosh教授最后总结,全球和局部的气候变化因素均会影响极端降雨天气及洪水模式,因此预报预警系统需要综合考虑多种因素。



**徐宗学**

北京师范大学水科学  
研究院特聘教授  
城市水循环与海绵城  
市技术北京市重点  
实验室主任

## 沿海地区城市洪水实时调度与预报系统

徐宗学教授首先介绍了近些年来城市洪涝灾害的发生背景。他指出,城市化与气候变化对水文过程产生了较大影响。根据IPCC第5次评估报告,全球变暖、极端降水和洪涝灾害已变得更为频繁,气候变化引起的全球性风险大多集中在城市。尤其是中国,近20多年来进入城市化快速发展阶段,城镇化率从2000年的30%增长至2018年的59.6%,使得城市的热岛效应及雨岛效应增强。中国的城市化建设还引发了更加频繁的洪涝灾害、城市缺水、城市水生态环境破坏等一系列问题。徐宗学教授回顾了中国在2012年7月首次面临的重大城市内涝事件——“7.21北京特大暴雨”,以及2020年广州地铁区域性淹水、景德镇暴雨致街道涨水、四川巴中洪灾等一系列城市洪涝灾害。

海绵城市的建设是中国政府在应对城市洪涝灾害方面所开展的积极尝试,目前已在30多个重点城市开展试点。海绵城市是指城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对自然灾害方面具有良好的韧性,下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时“释放”储存的水并加以利用。在海绵城市的建设中,应考虑到自然降水、地表水和地下水系统,协调供水、排水等水循环利用环节,并兼顾其复杂性和长期性。通常,海绵城市配套设施包括透水路面、雨水花园、绿色屋顶、下沉式绿地、生物滞留池、渗透沟等。

徐宗学教授认为城市暴雨内涝模型是海绵城市建设的重要技术保障,可以从模型层面构建实时的洪水调度和预报系统,进行更好的城市洪水管理。徐宗学教授介绍了其团队针对城市内涝的水文水动力耦合模型的研究进展,并分别介绍了目前水文模型和水动力模型的计算方法和应用领域。相较于天然流域水文水动力模拟,针对城市内涝的模拟更为复杂,其主要原因在于城市地表不透水面与透水面空间分布较为复杂、排水系统立体式分层结构显著,需要同时考虑地表径流、街道径流、管道径流和河道径流。例如,采用动力波方程描述排水管网的汇流过程,采用二维浅水模型分析城市街道的洪水演进过程等。

在构建城市洪水实时预报系统的数据层面,徐宗学教授表示要采用多源数据融合的方法,分析来自卫星遥感测雨、雨量站观测和雷达等的多源信息。其中,遥感技术已被广泛应用于城市内涝管理,包括洪涝监测、洪水灾害范围统计、遥感影像解译技术等。徐宗学教授强调,模型仍是研发城市洪水实时预报系统的关键,现如今已有更多的气文水动力和机器学习耦合模型被应用到了城市内涝的实时预测中,有助于更好地模拟城市复杂的水文过程。此外,他还提及了机器深度学习、数据挖掘、并行计算技术在洪水监测和预报的应用。

徐宗学教授最后以福州市为例介绍了其城市内涝预警及防治机制。由于福州市特殊的地理位置, 每年7-9月, 台风、暴雨接踵而至, 其受内涝问题困扰已久。为加强城市内涝防治和水系的综合管理, 福州市政府研发部署了城区水系科学调度系统, 搭建了城市智慧水务平台, 实现了城市水系“眼”(利用物联网、AI、AR、VR技术的监测体系)、“脑”(利用大数据、人工智能和云计算的数据分析体系)、“手”(利用信息化技术的自动化控制系统)的联动调度。徐宗学教授重点阐述了其团队参与的模型开发过程, 分为数据预处理、城市内涝模拟、重点水工结构调度、水质模拟预测、洪水预报预警几个阶段。福州市城区水系科学调度系统主要的四大功能包括: ①降雨、台风、内涝、水位的查询和监测; ②调度方案的生成与优化; ③城市洪水实时模拟和结果分析; ④实时调度系统。

最后, 徐宗学教授总结, 水文水动力学模型是洪涝实时预报系统的核心, 要研发集成的、精确的、高效的水文水动力学模型。同时, 多学科交叉有助于解决洪涝难题, 要结合水文、水动力、遥感、人工智能等多领域、多学科, 优势互补, 建立完善的数据—模型—预测—指挥一体化智慧管理系统。



**Roxy Mathew Koll**

印度热带气象研究所气候变化研究中心地球系统科学与气候高级培训中心专家

## 气候变化影响下复合型洪水日益增强的风险与挑战

印度热带气象研究所专家Roxy Mathew Koll从气候变化的背景出发, 讨论了复合型洪水(compound flood)对城市带来的风险和挑战。在气候变化的形势下, 自然灾害往往不再以单一形式出现, 全球各地的许多城市(尤其是沿海城市)会面临由强降雨、热带气旋、风暴潮、海平面上升等多重极端气象条件相叠加引发的复合型洪水, 加剧了其风险及灾害损失。

2000年, 全球海岸带低海拔城市人口中有30%居住在“百年一遇”洪泛区, 约1.89亿人。这一数字在2030年将增至约2.68~2.86亿人, 到2060年, 预计有4.11亿人口可能受到极端洪水事件的影响。其中, 亚洲洪泛区人口数最多, 预计2060年达到2.32~3.10亿人。

Roxy对比分析了2021年5月印度东海岸遭受的气旋“亚斯”(Cyclone Yaas)和西海岸遭受的气旋“陶特”(Cyclone Tauktae)。两场热带气旋均在东西部海岸引发大风和暴雨, 孟买等许多沿海城市都遭受了有记录以来最强降雨。虽然气旋“亚斯”(约110Km/h)的风速仅为气旋“陶特”(约220Km/h)的一半, 但其影响范围更广, 使得印度东部更多地区被洪水淹没, 其原因之一在于该场洪水更具复合性, 同时受到风暴潮、降雨、河水上涨、海平面上升和涨潮的影响。

Roxy阐述了近几年气候变化对印度产生的影响。印度阿拉伯海遭遇的热带气旋在逐年增多, 季风前后的平均降雨量也在近20年呈增长趋势。虽然1950—2010年印度季风性降雨的总量在减少, 但极端降雨事件(超过150mm/d)的数量在增加。同时, 如

果无法减少温室气体排放量,海平面上升的速度将会是原来的两倍多;到2025年,许多低洼的沿海城市和小岛每年都将面临洪水的侵袭,尤其是那些缺乏一定适应能力的地区。因此,许多沿海城市及其周边地区正面临海平面上升、风暴潮、暴雨、河水泛滥等多项风险叠加的洪水威胁。Roxy还特别提到了沿海城市人口增长这一研究者时常忽略的因素,人口的增加加剧了沿海地区应对气候变化的脆弱程度。

Roxy指出,未来印度洋将会继续变暖,印度西海岸将会发生更多气旋和洪水。灾害来临时,我们可以撤离受灾的居民,但却难以挽救被破坏的生态系统、基础设施、房屋和汽车等。因此我们需要以长远的眼光应对复合型的极端事件和风险,并进行沿海风险评估。为了更好地监测并预测各项变化,印度政府需要加强相关的资金支持,并巩固与印度洋沿岸国家的合作伙伴关系,共同促进数据共享、分享实践和经验。

谈及降雨和海平面上升哪个因素对于未来洪水事件更为重要时, Roxy表示从长时间尺度来看,海平面上升是一个长期存在、逐渐发展的过程,无论气旋是否产生,海平面上升都是一个固有的影响因素,并且低于海平面的沿岸城市受影响尤为严重,一旦发生洪水,很难将多余的水量排入海中;气旋性降雨等天气事件虽然发生频率并不高,通常只持续几小时到几天,而且也不一定会影响到城市及居民,但是一旦出现了洪水事件,在短时间尺度内其严重性及破坏性就非常大。

文章已发表于《中国防汛抗旱》, 2021, 31 (08)



## 增强韧性，降低风险



**Slobodan P. Simonovic**

ICFM 主席  
加拿大工程院院士  
加拿大皇家学会院士  
韦仕敦大学教授

### 增强韧性，降低风险

Slobodan P. Simonovic教授表示，目前全球有20亿人面临洪水风险，其中有近6亿生活在贫困之中。在过去的几年中，由于气候变化导致洪水频率和严重程度不断增加，洪水风险被低估，造成了巨大的人员伤亡和财产损失，带来许多负面的社会影响，政府应采取以韧性方式应对洪灾的策略，不断强化洪水防御措施。本次线上会议围绕“增强韧性，降低风险”展开讨论，对研究全球洪水管理中的新挑战和新问题十分有意义。



**吕娟**

中国水科院减灾  
中心主任

中国水科院专家吕娟教高表示，在气候变化和城镇化发展的双重压力下，全球极端天气事件频繁发生，并且呈现由单一灾种向复合灾种转变的趋势，未来存在发生更大风险的可能，洪水风险管理策略也应做出相应的调整。



Susan L.  
Cutter

美国南卡罗莱纳  
大学教授  
灾害及脆弱性  
研究所主任

## 美洲的洪水风险、脆弱度和韧性

来自美国南卡罗莱纳大学的Susan L. Cutter教授介绍了美洲的洪水风险、脆弱度和韧性。由于气候变化,今年从北美地区到中部的墨西哥、哥伦比亚,再到南美地区,美洲洪水频率和严重程度显著增加,2021年7月美洲连续暴发多起洪涝灾害,造成人员伤亡和不同程度的经济损失。在全球范围内,极端恶劣天气频频出现,洪水风险变得更加复杂和动态化,扩展风险评估框架对于洪水风险管理变得至关重要。

Cutter教授介绍了联合国减灾办公室建立的最新全球风险评估框架(GRAF, Global Risk Assessment Framework)。GRAF的目标是在所有时空尺度上提高对当前和未来风险的认识和管理能力,力求揭示多个风险和行为体在系统之间的相互联系和依赖关系,降低灾害风险。Cutter教授从全球风险评估框架中的灾害事件、洪水风险暴露程度和脆弱性三部分出发,阐述了美国现在面临的洪水问题。美国洪水主要分布在海岸和城市区域。随着全球气候变暖现象加剧,海平面上升,美国海岸线地区的洪水暴露风险不断上升,海岸洪水对地区人口和经济造成巨大影响。由于降雨量持续增加,美国强降水事件时有发生,直接提高了因暴雨导致的洪涝风险。对于一些相对干旱的州,这些地区对飓风、台风带来的强降雨抵抗力较弱;对于那些地势相对低洼的城市,难以快速排涝也是其同样面临着较高的内涝风险。

Cutter教授讲解了脆弱性的定义和社会脆弱性的内涵。社会脆弱性是脆弱性的维度之一,用于分析人口和社会的脆弱性,揭示风险暴露度和社会敏感性之间的关系,对于确定风险事件特征和识别脆弱人群十分重要。通过建立指标体系和各种统计分析方法可以衡量社会脆弱性程度,Cutter教授介绍了她的团队在建立区域社会脆弱性模型和指数(SoVI, Social Vulnerability Index)的研究成果。脆弱性评估研究中由于指标众多,并且指标之间存在一定的相关性,从而导致指标数据反应的信息在一定程度上有所重叠。Cutter教授采用主成分分析法,采用数理方法对脆弱性指标降维,将42个脆弱性变量减少为11个独立因子,累计方差贡献率为76%,即可以解释所有指标76%的信息,并通过一个可加性的模型来不赋权地相加,所计算出的比例值就是社会脆弱性指数,再用GIS(地理信息系统)表示出不同地区的这一脆弱性指标。Cutter教授通过构建社会脆弱性指数复合指标体系对美国县级社会脆弱性进行了评估。构建社会脆弱性指数复合指标体系的过程包括:一,确定社会脆弱性因子。按照社会脆弱性的概念逻辑,即尽管所有处于灾害和风险地区的人都将暴露于脆弱状态中,但灾害的影响并不均衡,弱势群体通常更加脆弱。因此,社会脆弱性模型和指数特别强调反映人口和社会经济属性特征的相关要素,影响脆弱性的因子包括年龄、民族、特殊人群、社会经济地位、资源可获得途径、居住房屋(住房密度、类型等)和建成环境(基础设施密度、城市化水平、经济增长率和经济活力水平)等。二,确定社会脆弱因子所对应的变量。为准确描述因子,需要选取适合的变量,用以细化因子并以数据的方式表述因子,并通过数据的计算发现地区间的差异,实现社会脆弱性的量化。三,社会脆弱性因子的标准化计算。采用0-1标准化方法(0代表高脆弱性,1代表低脆弱性),对各个变量进行标准化计算。然后对变量的重要程度予以区分,赋予其不同的权重,得到社会脆弱性指标综合得分,建立复合指标体系,绘制社会脆弱性可视化图,可进一步指导区域和地方制定风险干预和减缓措施。

暴露程度和脆弱性的分析是风险评估的重要方法和手段,分析暴露程度和脆弱性的时空特征是灾害风险评估与管理的重要内容,能够为灾害的预报预警以及实施防灾减灾工作提供理论依据。Cutter教授认为,社会脆弱性的本质为潜在的损失,研究重点为①易受极端自然事件影响的人类或地区—潜在暴露度;②社会对于自然灾害的抵御或恢复能力—社会恢复力;③对特定地区的潜在暴露度和社会恢复力的整合。潜在暴露度是指社会系统在显著的气候变化中的暴露程度,在洪水社会脆弱性研究中,人类的暴露程度常用在潜在灾害区域中直接或间接受灾害影响的人口比例表示。社会恢复力是指社会系统应对自然灾害时的反应及恢复能力,包括行政单元内部社会经济地位、产业结构、人口密度、人口变化、城镇化水平、教育、职业构成、家庭结构、居住条件、年龄、医疗条件及失业率等。以美国海岸地区为例,虽然这些区域易受自然灾害的影响,但城市化程度高,人口密集,人类活动频繁,社会系统对于自然灾害的应对及恢复能力较高。然而作为易受自然灾害影响的敏感地带,在面对自然灾害时,由于人口潜在暴露度高,其社会自身的恢复能力不足以解决灾害带来的各种问题及损失,所以社会脆弱性也处于较高水平。

Cutter教授指出,韧性与洪水风险管理密切相关。应以规划手段减少或防范洪水,降低遭受洪灾损失的风险。过去十年间洪水灾害给美国各州造成的财产损失已累计高达1300亿美元。根据2021年FEMA公布的数据结果,美国已有大部分州实施或通过了地方减灾规划。美国全球变化研究计划(USGCRP, U.S. Global Change Research Plan) 2018年公布的结果显示,国家适应气候变化战略也正在不断推进,已经覆盖大部分沿海沿湖地区。在灾后经济救助方面,美国政府不仅向业主、租户与企业提供国家洪水保险(NFIP, National Flood Insurance Program),也会向无力购买保险的低收入受灾人群提供一定的经济补助。然而,目前一些洪灾造成的实际损失仍会被低估。如果灾害被认为没有达到“国家级”的严重程度,受灾者就只能获得州层面的政府救助,但这种补助往往不足以真正改善他们的困境。FEMA还发布了地区风险评估工具——国家风险指数(NRI, National Risk Index)。这个在线制图工具可以基于18种自然灾害,及其每年预期造成的损失、社会脆弱性和社区恢复力,生成自然灾害风险指数的可视化图。除灾害发生频率外,该指数还受到灾后人口财产损失、当地人口结构的脆弱程度以及当地自我恢复能力的影响,能够综合反映地区灾害风险情况,提醒房主、租户和社区对自然灾害保持警惕。例如,大城市的风险普遍较高,因为这些地区贫困人口更多,有昂贵的房地产,可能没有做好应对大灾难的准备,所以即便洪灾发生的频率较低,但可能一次事件就会造成严重后果。

Cutter教授在报告最后强调,从单一的极端洪水事件到连续的洪水事件,系统性风险不断增加,洪涝灾害风险的不均衡现象也在持续加剧,了解洪水灾害风险的性质,健全防洪风险措施,才能更好地应对洪水灾害带来的影响和降低洪水灾害造成的损失。



## Chris Zevenbergen

荷兰国际水利环境工程  
学院水工程学院  
代尔夫特理工大学教授

## 扩大城市洪水风险管理的时间范围

来自荷兰国际水利环境工程学院、代尔夫特大学的Chris Zevenbergen教授围绕城市洪水风险管理的时间尺度调整,探讨了制定防洪战略时涉及的三个时间域(time domains)以及不同时间尺度下长短期策略的选择。他认为目前洪水风险管理应从适应缓慢变化的气候条件、预防单一的极端事件向预测突变和造成群发或连锁极端事件的趋势适度转移。这需要兼顾基于几日内的天气预报以及针对未来几十年的预测和情景分析。同时应充分考虑大型防洪措施的建设周期(lead time)和预警时间(warning time)进而调整干预措施,亟需创新方法跳出原有的适应性策略的局限。

Zevenbergen 教授回顾了2021年欧洲重大洪灾事件,他认为目前欧洲的大多数防洪工程还不足以应对这一级别的洪水灾害。他进一步介绍了这次洪水事件凸显出的荷兰经验。拥有斯凯尔河、马斯河和莱茵河的入海口,境内四分之一的土地都低于海平面的荷兰在这次洪水事件中凭借有效的防洪措施树立了典范。通过荷兰政府主导的“还地于河”(Room for the river)项目,Zevenbergen 教授从5个方面归纳了荷兰洪水风险管理的特点:①“还地于河”项目建设周期长达40年,这一过程伴随着该国的洪水管理模式实现了从单一防范到同时注重水系河流空间的转变;②政府从长远视角出发,在制定防洪策略时重点考虑了气候变化和水文条件变化等长期问题,防洪系统也因此更具韧性,可有效应对洪水带来的风险;③追求安全和空间品质(spatial quality)双重目标。“还地于河”项目的建设在最大程度上保障沿岸城市安全的同时,大力提升空间品质,发挥河流供水、休闲、美化城市等多重功效,实现长远收益;④利益相关者和多层级政府的充分有效参与以及财政资金支持为这一庞大工程的建设解决了后顾之忧;⑤当地政府具有长远眼光,充分认识到防洪建设不能一蹴而就,项目于2015年正式完工,长达40年的建设周期保证了荷兰国家防洪建设的规模和质量。

根据此次极端洪水事件,Zevenbergen 教授总结出几点经验:极端事件的强度和频率变化加快,不可预测性也不断增大;亟需在传统的概率方法上进行创新突破,适应目前新的挑战。在备灾层面,尽管欧洲有着先进的洪水预报预警系统,在本次洪水事件4天前就发布了预警,但由于通讯不畅导致地方没有接收到有效信息,这也是本次事件中暴露出的弊端。一些国家的防洪设施不足以应对这一级别的洪水,需要尽快完善升级国家防洪设施;同时还需兼顾设施的维护、升级和更新工作,随时做好准备应对灾害的发生。总的来说,在洪水风险管理方面需要将防灾和备灾两者充分结合,发挥协同效用。

Zevenbergen 教授强调应扩大洪水风险管理的时间范围。纵观洪水风险管理的发展,从最开始灾害后的被动反应到提前做好准备迎接灾害,再到如今希望通过防洪规划以期适应缓慢变化的气候条件。然而,这次的灾害却给人类敲响了警钟:未来将面临更加极端、更频繁、更不确定的气候条件。气候变化加剧,针对适应缓慢气候变化的战略已不再适用。Zevenbergen 教授指出,目前有三类时间窗口:天、年和几十年。以天为单位的洪水风险管理主要是依靠已经较为完善的预报机制;在以年为时间的管理范围里,目前可以通过预测掌握水位变化、海平面上升等信息;如果再将时间延长至几十年的管理周期,那么以往的概率方法效用不再凸显。选择长期的

防洪战略比如建设周期长达40年的“还地于河”项目时,对未来几十年里气候条件的预测十分必要,而这种长期战略也是应对未来气候灾害的重要手段。相比之下,短期的决策(如搭建暂时的屏障或维护关键基础设施等干预措施)的效益成本比更高。同时,可以预期未来预警时间会不断延长,届时短期响应措施的选择就越广,备灾就越充分。Zevenbergen 教授借助埃及亚历山大港的防洪建设进行了进一步说明。2015年当地发生了破纪录的洪水事件,这座城市当时没有做好应对措施,房屋被淹,还造成了人员伤亡。在此事件之后,城市部署了早期预警系统。2020年再次应对洪水来袭时,将城市附近的河流水位降低以承接洪水,下水道提前清理,救援队也严阵以待。在预警系统的作用下,亚历山大港顺利度过了这一次洪水灾害。然而着眼未来几十年时,就需要进行投资建设大规模的工程。这样一来,建设周期会延长,预警时间和建设周期的比率降低,复杂性和不确定性增加。因此在目前普遍的适应性策略中的调整大多都是基于短期的小幅度变动,政府对出台大规模的投资决策慎之又慎。据此,Zevenbergen 教授抛出问题:在充足时间的情况下,该如何考虑洪水管理的时间范围?通过荷兰多德雷赫特防洪韧性建设的例子,教授给出了答案。

由于海平面不断上升,维持目前的海岸防御系统成本过高,荷兰计划采取长期战略缩短境内的海岸线。这一举措可以算得上是变革性的改变,预计需要几十年慢慢实现。然而城市是否等得起呢?位于荷兰西南部港口城市多德雷赫特实施的防洪韧性建设项目是将防灾和备灾两者有效结合的成功实践。多德雷赫特地势较低,常年面临洪水泛滥的威胁。当地计划在地势相对较高的地区进行重新开发,建造新型住宅,提升城市的宜居性。同时该城市也将洪水备灾应急纳入计划之中,使该区域在洪水来临时有能力容纳6万紧急转移人口,可以说这项计划将备灾与城市发展有机结合。评估显示,投资建设城市防洪韧性之后,当极端洪水事件发生时,经济损失会大大降低,伤亡人数也会大幅减少。由此可见,备灾作为洪水风险管理的手段应与预警一样引起同等重视。

最后,Zevenbergen 教授提出了两方面的思考。一是,在气候变化带来洪水等灾害风险急剧变化的当下,不确定性加剧,需要结合更长期的视野进行风险管理,往往大规模的干预措施是有必要的。二是,寻求机会在如城市发展等领域将洪水防灾和备灾有机结合。科技的进步将会提前预警的时间,也就随之扩大了短期响应决策的选择范围。然而目前在备灾层面上还有很大提升的空间,如不加以完善,便会在决策的选择上受限。

文章已被《中国防汛抗旱》录用



欢迎关注中国水科院微信公众号  
地址:北京市海淀区复兴路甲一号  
本刊联系方式:中国水科院国际合作处  
联系邮箱:dic@iwahr.com