流域梯级水库群风险分析研究进展

李炎隆^{1*}, 王胜乐¹, 王琳¹, 杜效鹄², 周兴波²

1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120

* E-mail: liyanlong@xaut.edu.cn

收稿日期: 2020-08-25; 接受日期: 2020-10-15; 网络版发表日期: 2021-06-02

国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(批准号: 51722907)和陕西省自然科学基金基础研究计划项目(编号: 2019JQ-577)资助

摘要 我国水电建设正处于流域梯级开发的高峰期, 目前已建成和规划了一系列梯级水库群. 因流域内各个梯级的库区地质条件、风险设计标准、运行老化程度不同, 且不同梯级之间相互影响, 使得梯级水库群存在的风险高于单一水库, 开展流域梯级水库群风险分析, 关系到工程安全和社会公共安全. 本文在阐述我国流域梯级开发建设和库群风险特点基础上, 对失事风险概率、风险损失评估、风险标准、梯级连溃风险、梯级库群风险处置等方面的研究进展进行了综述, 提出流域系统下多源复合风险的组合研究、特定风险组合下的梯级连溃模式和系统失效概率研究、库群联合调度及风险处置措施研究、水库群安全标准的制定等方面将是未来重点研究方向, 以期对流域梯级水库的滚动开发、安全运行管理以及风险应急处置提供有价值参考.

关键词 梯级水库群, 风险分析, 连锁溃坝, 风险处置

1 引言

随着我国水电开发技术的成熟和能源需求的不断扩大, 我国水电建设正向流域开发、梯级建库的模式发展. 在我国规划建设的十三大水电基地, 尤其是水能集中的西南地区, 已初步形成了连续分布、首尾衔接、呈阶梯状分布的梯级水库群, 如已初步建成的猫跳河梯级、红水河梯级和乌江干流梯级以及在建的金沙江干流梯级、大渡河干流梯级等. 与单一梯级(单个水库)相比, 流域梯级水库群(采用串联或并联方式、上下游存在联系的水库群)面临的施工运行条件更加多样, 系统内的风险源更加复杂, 灾害传导链也更长,

多个梯级之间的风险往往存在叠加和传递效应. 流域梯级水库群主要存在以下特性: (1) 高坝大库多; (2) 失事后果严重; (3) 调度原则差异大; (4) 风险不确定性高. 随着运行时间增长, 各梯级将面临结构功能老化和自然灾害双重风险, 一旦失事将造成公共安全灾难, 需要及时进行分析风险和处置^[1,2]. 1975年, 河南板桥和石漫滩等62座水库连锁溃坝, 给下游带来了灾难性后果, 产生的损失超过国内外其他单一水坝溃决产生的总和. 2020年5月, 美国密歇根州伊登维尔、桑福德两座梯级大坝发生连锁溃决, 上万居民被迫撤离, 给下游工农业生产造成巨大损失和危害.

我国西南地区, 河流多处于断裂构造发育的高山

引用格式: 李炎隆, 王胜乐, 王琳, 等. 流域梯级水库群风险分析研究进展. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1362–1381

Li Y L, Wang S L, Wang L, et al. Research progress on risk analysis of cascade reservoirs in river basin (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1362–1381, doi: 10.1360/SST-2020-0360

峡谷之中,地质条件复杂,且地震频发,属于强地震带,存在多种风险因素.而在这一地区所建成和规划的梯级水库群以高坝大库居多,风险势能极高,且不同梯级间分布密集,开发主体和目标不一,联合应急调度机制不完善,增加了流域系统风险.在各类风险因素作用下,流域梯级水库群中的薄弱梯级极易发生溃决失事,并造成下游梯级发生连锁溃决,产生特大洪水,对流域沿岸人民的生命财产安全造成极大威胁^[3].随着流域梯级的滚动开发和公众自我防护意识的增强,流域梯级水库群的风险问题已经上升为公共安全問題,亟需对梯级库群进行全流域、全生命周期的风险分析,以提高流域安全性.

目前,国内外针对单一大坝风险分析开展了较为深入的理论研究、模型试验及数值仿真,对涉及多个梯级的风险分析研究做了初步探索,研究成果可为多个系列的梯级水库的除险和安全管理提供指导^[2].例如,大渡河流域的双江口水库及巴拉、达维、卜寺沟、双江口等上游梯级风险分析,牛栏江梯级水库风险分析,唐家山、红石岩堰塞湖风险应急处置等.但是,流域梯级间风险的诱发、演化、传导过程不明确,其风险问题具有规模大、变量多、工况和失效模式复杂等特点^[4].梯级水库群风险分析同单一梯级相比存在较大差异,但单一梯级风险分析是其基本单位和基础:首先对单一梯级计算风险概率,才能分析梯级整体失效概率.因此,如何进行系统性的风险分析是当前面临的新挑战.

本文通过总结国内外关于流域梯级水库群风险分析的大量研究成果,归纳出该研究方向的四个研究重点:(1)梯级水库群风险评估研究,该研究方向主要包括梯级失效概率的计算和风险损失的评价;(2)梯级水库群风险标准研究,该研究方向以流域为单位,建立包含多个梯级的整体风险标准,为梯级水库群的设计和运维提供参考;(3)梯级水库群连锁风险分析,该研究方向在单一大坝溃决风险分析的基础上,探讨多个梯级串联情况下的连锁风险;(4)流域系统内的风险处置研究,该研究方向通过对流域内多源风险的提前识别,以在梯级全生命周期不同阶段采用不同的风险防控措施.根据上述不同研究类别分别对梯级水库群风险分析的研究进展进行评述并指出未来研究重点,为下一步研究提供思路 and 方向.

2 梯级水库群风险的分类

2.1 风险的定义与表示

风险的概念很早就被提出,涉及各行各业,因此有着不同的定义.其中,比较具有代表性的由国际地质科学联合会(IUGS)滑坡研究组风险评价委员会提出:风险为对生命健康、财产资源和社会环境的危害事件的发生概率及后果损失的严重性,用发生概率与可能后果的乘积来表示^[5].工程领域内,学者们普遍认为风险应当包含三个方面的内容:(1)某项工程在其运行过程中可能发生事故的类型;(2)发生该事故的概率大小;(3)该事故发生后对生命、经济、社会环境造成的后果损失.通常将风险表示为

$$R = P_f \cdot C_f^n, \quad (1)$$

式中, R 为风险, P_f 为事件失效的概率, C_f^n 为事后的损失, n 为指数,对于经济分析,一般取为1.

2.2 梯级水库群风险分类

与单一梯级相比,流域梯级水库群风险往往存在叠加和传递效果,系统风险源种类更多,识别更加复杂,灾害链更长,影响范围也更大^[6].根据风险的特征以及不同的承担对象等差别,可以将梯级水库群风险按风险源、产生的后果及承担的对象分为不同类别(图1)^[3].

与传统单一大坝相比,梯级水库群是由多个单一大坝组合而成,按照风险来源可以将风险分为如下几类.(1)自然风险,如超强降雨、特大地震、流域内不良地质灾害等;(2)工程风险,如挡水建筑物发生渗流、渗透破坏,泄水建筑物发生冲蚀、冲刷破坏以及引水发电系统造成泥沙淤积等;(3)人为风险,具体表现为在梯级水库群的设计、建造、管理维护中的缺陷和疏忽等技术风险,此外,战争因素导致的人为破坏也是一个重要风险^[1].按照失事造成的损失后果来看,风险可分为生命风险、经济风险以及环境破坏风险.生命风险主要为在各梯级建设、运行过程中,流域内梯级水库群对上下游一定区域的居民的生命构成潜在危险;经济风险包括个人财产、公共基础设施、农业耕地以及水库自身损坏等直接经济损失^[7,8]和工、农、运输、通信、电力等行业收入、应急抢险费用、灾后重建投入等间接经济损失,环境破坏风险指梯级溃决

图 1 梯级水库群风险分类^[2]

Figure 1 Risk classification of cascade reservoirs [2].

后对农、林、渔等产业、生态圈以及人文环境等构成的极大风险。按照承担对象不同可以分为个人风险和社会风险，个人风险是在流域梯级系统中，个人在无防护措施下由于梯级大坝失事人身安全受到威胁的风险，社会风险则指在流域梯级系统中，梯级失事对社会群体的人身安全发生损害以及引发社会局势不安舆论的风险^[2]。通过对梯级水库群风险的分类，我们才能对风险进行更为全面、及时、准确的识别和预警，并制定对应相关标准和处置措施，减少风险带来的损失。

3 梯级水库群风险评估研究

对梯级水库群风险分类、识别后，需要对实际存在的风险进行全面评估，以此为风险标准的制定提供参考，判断实际存在的风险是否可接受，最后为风险处置和安全管理提供指导。梯级水库群风险主要由洪水对流域内各梯级水库库岸的淹没、冲刷和对挡水、泄水建筑物的冲刷、渗透造成的危害构成，是大坝失事概率和梯级溃决后造成损失的综合^[3]。因此，梯级水库群风险评估主要是确定流域梯级溃决概率及溃决后造成的损失。

3.1 梯级水库群失事风险率分析

目前，学者对单一梯级失事风险率的研究较为深入，在此基础上分析多个梯级失事概率。对于梯级溃决概率的计算分析，常用的方法有历史经验估计法、概率分析法、可靠度指标法等，其核心是不确定性分析。其中，经验估计法主要指研究领域内的专家通过历史上相似事件的发生概率，结合自身工作经验，计算大坝溃决失事各环节的概率，最后将对各环节的定性描述转为定量的概率描述。但流域中梯级大坝失事

过程非常复杂，专家往往无法把控所有可能的因素，且不能总保证客观合理，赋值标准的一致性也难以统一，有时不利于风险的连续、定量分析。概率分析则是以梯级系统中各种水工建筑物为研究对象，基于洪水、地震等诱发梯级溃决因素的发生概率，以概率分析方法分析其可能的破坏形式及失效的概率。常用方法有故障树法、事件树法、风险熵法、层次分析、贝叶斯网络等方法，对于故障树模型可采用直接分布算法，利用最小割集、最小径集、首项近似法等进行计算^[2]。任青文等人^[9]在计算单个水库漫顶失效概率的基础上，运用层次分析法建立了梯级库群失效的层次分析模型，通过构造判断矩阵计算流域中各梯级综合权重，得到含权重因子的梯级库群系统的整体失效概率，为梯级库群的安全分析及优化设计提供参考。张锐^[4]采用随机模拟与数值分析相结合的方法估计库群系统承担的综合风险，分析归纳了库群受上游多水库多区间等复杂条件影响的联合失事风险率的数学计算通式，在定量研究方面做出进步。梯级水库群系统的失效概率取决于各单元水库失效模式间的关联程度及各单元水库的失效概率，因此系统内各部分的失效相关性不容忽视。概率分析方法可以充分将多元信息进行融合，更好地反映变量间的不确定性关系，但数学性较强，概率的计算仍需要专家评价和历史资料。可靠度指标建立在概率分析基础上，与失效概率存在一一对应的关系，可靠度指标的计算可采用一次二阶矩法、JC法、蒙特卡罗法、Harr点估计法、Rosenblueth点估计法、重要抽样法和拉丁超立方抽样等。也有学者从可靠度方面对库群失事风险进行研究，周建平等人^[10]从梯级连溃分析角度，提出相对安全率概念，为安全系数与可靠性指标之间换算建立纽带；蔡文君^[11]采用蒙特卡罗随机模拟，对梯级库群不同建设阶段进

行分析,并结合控制梯级和薄弱梯级特点,建立了基于贝叶斯网络的梯级系统失效风险率模型,为梯级水库群系统整体的失效风险评估提供了新思路(图2)。

梯级水库群不同梯级间多进行联合调度,其库岸边坡稳定性在库水位变化时受水压力、渗透力等因素影响很大,特别是遇到极端水位骤降情况,库岸边坡由于水压力减小、渗透力增大,其稳定性分析变得尤为重要。吴浩^[12]考虑库水位变化影响因素,对梯级水库库岸边坡进行安全评价,并进一步分等级,提出了库岸边坡的年计失效概率和可靠指标,从新的角度对梯级水库失事风险率进行分析;陈玺等人^[13]通过离散坝前水位变化来模拟洪水作用,并根据条件概率考虑上游梯级溃坝洪水和地震发生的概率,提出了同时考虑上游溃坝洪水和地震情况下坝坡稳定的计算方法,为梯级水库设计中土石坝坝坡稳定分析提供参考。失事风险率的计算仍然存在较大不确定性,且梯级库群失事案例极少,可以提供的参考资料有限,因此现有研究多建立在单一梯级失事基础上,且涉及梯级数目较少,对流域梯级库群的整体失事风险率的研究仍需要进一步深入。

3.2 梯级水库群风险损失研究

梯级水库一旦失事,产生的洪水将造成大范围淹没,给流域内生产生活造成大量损失。按损失类别不同,风险后果损失分为生命损失、经济损失和环境影响损失三个类别^[2,14]。

3.2.1 生命损失评价

流域内生活居民的生命安全是损失评价最为重要的部分,也是风险防控中最重要的保护对象。生命损失的评价过程较为复杂,涉及因素众多,李雷等人^[14]将

图2 基于贝叶斯网络模型的梯级水库群简易系统^[11]

Figure 2 The simple mode of connection reservoirs based on Bayesian network model [11].

风险人口、溃坝洪水的严重程度、警报时间及公众对事件严重性的理解程度等作为其中较为关键的影响因素。

国外在生命损失估算领域开展研究较早,这些研究均是基于历史统计资料,归纳得出经验计算公式,如表1^[15-20]所示。DeKay等人^[16]考虑水库洪水严重程度,建立了溃坝生命损失评价估算模型;Graham^[18]基于历史溃坝生命损失与淹没区域风险人口分布情况,提出了由风险人口和生命损失率综合的估算生命损失的经验系数法;芬兰RESCDAM计划^[19]根据人群、房屋等在溃坝水流淹没区的稳定性及机动性,得到不同水力学参数下人群、房屋等的损失评价标准。针对以往生命损失估算方法具有较强的经验性,美国犹他州立大学的Abocelata和Bowles^[20]精细化考虑了洪水动力过程,建立了集合多个模块的系统生命估算的LIFESim模型。随着工程规模的不断扩大,风险管理评价日趋重要,我国学者也开展了大量关于大坝失事生命损失评价的研究。根据损失评估的方法的不同,这些研究大致可分为定量评估和半定量评估。范子武和姜树海^[21]通过分析防洪工程漫顶失事过程,提出了定量计算防洪风险率的方法,并引入了预测生命损失的经验公式:

$$LOL = \frac{PAR}{1 + 13.277PAR^{0.44} \cdot \exp(0.759WT - 3.790FC + 2.223WT \cdot FC)}, \quad (2)$$

式中,LOL为生命损失数,PAR为处于风险区的人口总数,WT为预警时间,FC为洪水风险特征。

基于堰塞坝几何参数、河道三维地形信息和人口分布数据,石振明等人^[22]提出一种堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法,实现了对堰塞坝突发区域内的溃坝、洪水演进和生命损失分析(图3)。

通过考虑影响溃坝生命损失的不同因素,建立不同的生命损失评价模型,进而实现对生命损失的评价。宋明瑞^[23]将洪水灾害、风险人口暴露性及暴露人口易损性进行综合评估,探讨了溃坝生命损失参数对风险评估结果的影响。基于发生重大生命损失的已溃大坝资料,李雷和周克发^[24]分析归纳了影响生命损失的

表 1 生命损失估计方法

Table 1 The estimation methods of life loss

名称	估算公式	参数说明
Brown和Graham ^[15] (1988)	$LOL = \begin{cases} 0.5PAR, & WT < 0.25 h, \\ 0.06PAR, & 0.25 h < WT < 1.5 h, \\ 0.0002PAR, & WT > 1.5 h, \end{cases}$	LOL 为生命损失; PAR 为风险人口; WT 为预警时间; F为洪水强度, (高洪灾风险区F=1, 低洪灾风险区F=0); f为损失伤亡率; i为洪灾严重程度影响系数; c为修正系数
Dekay和McClelland ^[16] (1993)	$LOL = 0.075PAR^{0.56} \times \exp[-0.759WT + (3.790 - 2.223WT) \times F]$	
Assaf ^[17] (1997)	$LOL_u = PAR_u \times (1 - P_r)$	
Graham ^[18] (1999)	$LOL = PAR \times f$	
芬兰RESCDAM ^[19]	$LOL = PAR \times f \times i \times c$	
美国犹他州立大学 ^[20]	LIFESim模型

图 3 生命损失快速风险评估模块^[22]

Figure 3 Rapid loss of life risk assessment module^[22].

主要因素和规律, 为制定适合国情的生命损失评价模型提供了指导. 另外, 不少学者应用概率分析模型进行生命损失评价, 提高了评价的效率和准确性. Peng和Zhang^[25,26]通过分析洪水路径等不确定因素, 构建了基于贝叶斯网络的生命损失分析模型, 并将其应用于唐家山堰塞湖的风险损失评价(图4). 王志军等人^[27]提出了指数平滑法与模糊物元结合应用的生命损失计算方法. 邹强等人^[28]将属性区间识别模型应用到风险损失后果评价中, 为后果损失评价提供了一种新途径. 李巍等人^[29]采用对数变换和边界约束对可变模糊相对隶属度模型改进, 建立了溃坝生命损失风险后果改进评价模型. 王晓航等人^[30]、杨胜梅等人^[31]还引入GIS空间信息技术、数字高程模型等对溃坝生命损失进行估算, 并从地域性上对后果损失进行划分.

上述研究成果多为对单一梯级的生命损失评价, 是流域梯级水库群生命损失评价的基础, 也有学者尝试进行流域系统性的生命损失评价研究. 蔡文君^[11]在

水库失效风险率基础上, 对流域各梯级河段上的生命损失风险度进行评估, 并以此作为评判梯级水库风险大小的依据. 王冰等人^[32]对梯级水库不同应急调度下的洪灾生命损失进行评估, 优化了梯级水库洪灾来临时的调度模式, 以最大限度的减轻洪灾损失. 生命损失带来的间接损失主要为人口减少带来的社会问题, 如社会劳动力短缺、人民幸福感降低、子女教育、老人赡养问题等.

3.2.2 经济损失评价

在流域梯级系统中, 由洪水带来的经济损失包括直接经济损失和间接经济损失. 直接经济损失可通过损失率、破坏面积、产业停工时间、个人综合损失等指标评价, 间接经济损失可通过经验系数折算和直接估算法来进行评价^[2], 其中, 损失率估算的方法应用最为广泛.

早期的经济损失评价主要通过现场统计、调查来实现, 需要动员大量人力物力, 并不具备好的时效性, 随着计算机技术的发展, 各类系列软件和评价模型开始应用于溃坝经济损失评价^[33]. 如丹麦的MIKE系列软件、美国陆军工程师团的HEC系列软件中的1FDAP模块等都可模拟评估洪水造成的经济损失. 另外, 国内外学者也对流域梯级溃决经济损失评价进行了研究, 研究多集中在建立和改进评价模型、提出评估新方法、提高评估合理性和精度等方面. 在国外, 澳大利亚的Taylor等人^[34]为了评估洪水中工商业和个人的财产损失, 开发了ANUFLOOD模型. 英国选用ESTDAM模型评估洪水中的经济损失^[35]. Aboelata等人^[36]开发了

图 4 生命损失评估模型的HURAM贝叶斯网络^[25,26]

Figure 4 HURAM Bayesian network of life loss assessment model ^[25,26].

一种模块化的地理信息系统(GIS)模型, 可通过降低梯级溃决失事的概率或提高应急处置效率来减少生命损失. 该模型系统包括以下模块: (1) 避难所可靠性, 包括对建筑物结构性能的预测; (2) 警报和疏散; (3) 基于历史经验统计的生命损失估算模块. 荷兰的Wind等人^[37]评估了默兹河20世纪90年代两次洪水经济损失大小, 并分析了两次损失不同的原因. Booi^[38]采用FLOCODS DSS模型评估和不确定分析了元江-红河流域洪水带来的经济损失, 该模型环境的主要优点是具有时空特性、内置功能、灵活性以及可构建适合模型用户的界面. 他发现评估过程中存在较大的不确定性, 这些不确定性主要来自原始统计资料和经济损失率的偏差. 因此, 不同学者采用不同模型评估梯级失事造成的经济损失, 得到的结果可能不尽相同.

我国对于经济损失评价比较重视, 也开展了不少梯级溃决经济损失的研究, 并取得一定成果. 由于不同地区经济损失风险承受能力不同且随时间变化, 使得经济损失难以确定, Ge等人^[39]从潜在经济损失角度出发, 采用等效经济规模作为建立大坝经济损失风险的基本指标, 提出了一种建立经济损失风险标准的新方法, 以此可以作为建立梯级大坝的参考:

$$L = \text{EAR} \times L_R, \quad (3)$$

式中, L 为经济损失, EAR 为处于风险中的经济总量, L_R 为损失率.

王志军等人^[40]通过物元模型划分溃坝淹没区, 得到不同区域的财产损失率, 简化了溃坝经济损失评估计算方法, 如图5所示.

间接经济损失主要为因梯级水库群失事而导致各产业停产带来的收入影响, 以及应急抢险和灾后重建的费用, 可通过分析淹没范围进行直接估算. 也可在流域中进行抽样调查, 利用系数法进行间接经济损失的确定. 施国庆等人^[41]按照洪水中水库损毁部位的不同划分溃坝经济损失, 对于间接损失评价提出了系数法, 寻找间接经济损失评价与直接损失之间的关系:

$$s_{li} = k_i s_{Di} + b_i, \quad (4)$$

式中, s_{li} 为溃坝给第 i 部门或事业造成的间接损失, s_{Di} 为溃坝给第 i 部门或事业造成的直接损失; k_i , b_i 为系数.

空间信息技术的发展和经济数据库的建立和丰富, 为梯级洪灾经济损失评价提供了新的工具, 不少学者将网格与GIS/RS技术结合进行洪灾损失评估研究, 使得洪灾损失评价在地域分布、准确度和时效上都取得了很大的进步^[42]. 张成才等人^[43]较早地将GIS和RS引入洪灾风险损失评估研究中, 之后李纪人等人^[44]利用GIS遥感技术将社会经济数据库进行空间展布, 开展了流域内洪灾损失监测与评估.

近年来, 国内外学者将新技术、新理论应用到溃坝经济损失评价中, 较具代表性的有模糊数学、人工智能、支持向量机、灰度理论等, 这些新方法的出现

图5 梯级溃坝经济损失评估方法和步骤^[40]

Figure 5 Evaluation method and steps of economic loss of cascade dam break [40].

为梯级水库群风险损失评价提供了新的思路和方法, 未来需要进一步完善。

3.2.3 环境影响损失评价

环境影响损失评价作为流域梯级开发规划的重要环节, 决定着开发的效益和成败, 同时也是后果损失的重要组成部分, 越来越受到专家学者重视。水电梯级开发一般包含多个梯级, 不同梯级间往往存在叠加效应, 梯级失事对整个流域的环境与社会将产生累积效应^[45], 且影响涉及面广而复杂^[2]。

关于环境影响评价的研究, 目前针对单个水库的较多, 且主要应用于尾矿坝, 对常规水库大坝的适用性还有待验证^[46]。流域梯级水库开发对环境的累积影响主要体现在水环境、生态环境及社会环境等方面。其中, 水环境包括对河流径流、泥沙、水温 and 水质等的影响, 生态环境影响是指对生态面积、水土流失和生物种群的影响, 社会环境影响则为经济和产业结构的变化^[47]。

在国外, 以水库群为单位的环境影响损失评价研究开展较少, 多集中于生态影响分析。dos Santos等人^[45]通过变量划分分析, 估计了梯级库群环境和空间预测因子的相对作用, 研究了梯级连通性和库区水质水量对库区不同生态群落的影响, 强调了不同梯级建设应保持纵向连通性。Hecht等人^[48]考虑汇流和不同流域间转移等因素, 评估了澜沧江-湄公河流域梯级水

库群对下游流量变化的影响, 建议在梯级建设过程中应考虑生态流量的保证和过鱼设施的建设。这些研究发现河流因梯级修建而导致连通性变差、下游生态流量的减小以及洄游道路的阻断, 进而导致生态群落规模减小, 给河流生物多样性带来一定损失。

国内学者关于梯级库群对环境与社会影响也进行了不少探索, 主要集中在对河流水流理化性质、生物群落影响等方面, 且目前对环境损失评估多限于定性分析, 系统的定量评价较少。梯级水库的修建使河流流动减缓, 河水挟带溶质的能力出现一定程度下降, 并且梯级间的下泄流量减少。这些同样使得各梯级库区内出现泥沙淤积、河床抬高等问题, 带来库容减小、水质下降、生物种群濒危的损失。Huang等人^[49]基于对溃坝洪水的分析, 采用一维水质模型评估了梯级下游河流的水质, 实现了对流域洪灾环境风险的定量评估; Wang等人^[50]采用长时间序列建立了水量-水质耦合模型, 模拟了梯级水库对汉江下游水量和水质的影响, 发现调水工程和梯级水库的建设运行将使汉江中下游水量减少, 水质出现一定程度下降; Wang等人^[51]基于SWAT模拟, 研究了长江上游梯级水库对河道生态流量的影响, 发现生态流量出现不同程度的减少, 分析结果为梯级水库的生态运行和恢复河流生态提供了指导。水温对河流的生态平衡和灌溉功能具有重要影响, 梯级水库的建设往往对水温存在累积影响。周孝德等人^[52]基于水库与河道水温资料, 研

究了流域梯级水电开发的水温累积影响规律. 钟姗姗^[53]从累积影响角度对梯级开发造成的环境影响进行评价. 张士杰等人^[54]采用库水温度模型, 分析了单库规模、梯级电站布置、梯级开发时序等变化引起的水温累积影响改变. 生态流量的减小以及河流水温水质的变化影响下游农作物的灌溉和生长, 给农业生产带来了一定损失.

另外, 从全流域生态系统完整性方面分析环境风险及评价体系的研究还较少, 且理论和方法还不够完善. Zhai等人^[55]以澜沧江-湄公河、怒江-萨尔温江、元江-红河三条国际河流流域为例, 分析了梯级大坝建设与河流生态系统完整性的关系, 建立了梯级水电站建设中的河流生态完整性模型, 预测了REI(河流生态系统完整性)指数的变化(图6以澜沧江为例). 胡德秀^[56]以黄河上游梯级开发为研究对象, 分别从水量、水质、泥沙、水温四个方面评估生态与环境风险, 并分别建立了可行的评价模型. 还有学者将新的数学方法应用到环境与社会损失评估中来. 李雷等人^[14]利用风险指数法, 综合估算风险人口、城市重要度、河道形状、景观设施、环境生态等因素的权重, 基于赋分制提出了社会与环境影响指数的概念及计算方法. 付雅琴^[57]将复杂系统分析与仿真建模引入到生态环境影响评价中, 提出可通过电站布局、开发顺序、联合调度优化等环节实现对梯级开发生态环境的影响控制. 何晓燕等人^[58]将模糊数学理论应用到梯级溃决环境影响评价中.

总的来说, 现有成果较多局限于概念性损失评价, 在环境累积影响的准确预测、定量计算以及多个影响指标耦合上还缺少相应的研究. 现实中, 流域梯级水库群失事产生的后果损失往往是综合性的, 因此对于三种损失的综合评价, 建立相关的评价标准和方法将更加具有实际意义.

4 梯级水库群风险标准研究

梯级水库群由多个单一梯级构成, 针对单一梯级大坝, 西方发达国家的大坝安全管理部门制定了基于F-N曲线法、以年计失效概率为基础的大坝风险标准^[1], 如图7所示.

对于单个大坝, 只要满足自身风险标准即可认为是安全的, 而梯级水库群风险标准则应为具有系统

图6 (网络版彩图)澜沧江梯级施工期REI值的预测变化曲线^[55]

Figure 6 (Color online) Predictive change curves of REI index values at different construction periods of Lancang Cascade^[55].

性、整体性的某一社会可接受(容忍)且相对合理的失事风险指标^[59]. 彭雪辉等人^[60]将大坝风险分为可接受风险、可容忍风险、不可接受风险和极高风险4个区域, 为梯级系统风险标准的制定提供了理论依据. 梯级水库风险标准的确定, 既要考虑失效概率和风险损失, 还要考虑梯级之间的相互作用, 从而使得梯级系统风险合理分配至每一个梯级, 达到整个流域梯级系统风险可控^[2]. 与单一大坝相比, 流域中各梯级之间由于工程地位不同, 其抵抗风险水平也不同, 甚至差异很大, 根据风险特征, 周建平等人^[1]将各梯级划分为“薄弱梯级、关键梯级、控制梯级”三类梯级, 其中梯级水库群整体的风险标准一般取决于控制梯级的风险水平. 梯级水库群风险标准的确定原则包括ALARP准则、生命平等原则、影响可控原则、投资-风险-效益平衡原则、风险协调一致以及截断性原则^[2]. 现阶段我国在单一梯级基础上建立了不少风险标准, 梯级水库风险标准的建立还未完善, 相关研究多聚焦在防洪风险标准、梯级水库溃坝风险、风险设计标准等方面.

在流域开发的背景下, 梯级水库群从单一梯级转变为多个梯级, 大坝也向高坝以及特高坝发展, 传统的安全设计标准和防洪标准多在单一大坝基础上建立, 已经不再完全适用于梯级水库群的规划设计, 需要综合考虑各种风险因素, 以流域为单位, 制定新的防洪和安全设计标准. 基于公共安全风险的可接受性、历

图7 一些国家的大坝风险标准^[1]. (a) 澳大利亚大坝风险标准; (b) 美国大坝风险标准; (c) 加拿大大坝风险标准

Figure 7 Dam risk criteria in some countries [1]. (a) Australian dam risk criteria; (b) American dam risk criteria; (c) Canadian dam risk criteria.

史溃坝统计资料及现有工程设计安全标准, 周兴波等人^[61]、周建平等人^[10]在现有工程等级及设计安全标准基础上提出了特等工程特级建筑物, 给出了特等工程的风险标准建议值(表2), 并以此作为流域梯级水库群的风险标准。杜效鹄等人^[62]引入“相对安全率”的概念, 并在此基础上提出了新的高土石坝坝坡安全系数标准。周建平等人^[10]从公共安全和梯级连溃风险的角度, 分析提出了特高坝和梯级水库群高风险土石坝的风险控制标准, 建立了“年失效概率-可靠指标-安全系数”为一体的设计安全标准指标体系。

以上风险标准的研究均为在现有的风险标准基础上加以改进, 适当地提高库群的风险标准。此外, 不少学者还从不同角度对梯级系统风险标准进行改进完善。从溃坝风险角度, 林鹏智等人^[63]基于贝叶斯网络, 以梯级水库群漫坝风险作为研究对象, 计算分析了国内某流域两个相邻梯级的风险标准, 用概率方法定量判断梯级系统的风险标准。从风险损失角度, 徐佳成等人^[64]通过设计案例以风险分析的方法探讨了梯级水库的安全, 认为可通过单坝和系统的风险损失指数的计算结果进行比较得出增加大坝节点的合理性。从薄弱性工程识别角度, 蔡文君^[11]将梯级水库群系统整体作为一个研究对象, 通过风险识别方法判别出限制梯级系统安全性的薄弱性工程, 为梯级水库系统风险标准制定提供参考。从社会与环境风险角度, 王仁钟等人^[65]对我国社会与环境因素进行量化, 并采用F-N线法建立了适用于大坝风险标准的社会与环境风险标

准, 这一标准同样可用于梯级水库群风险标准确定过程。

在梯级风险标准建设方面, 目前有水利部颁布的SL483-2017《洪水风险图编制导则》、SL/T164-2019《溃坝洪水模拟技术规程》、SL602-2013《防洪风险评价导则》以及SL/Z720-2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》^[59]。2017年, 水电水利规划设计总院还牵头编制了《梯级水库群风险防控导则》和《梯级水库群全生命周期风险管理研究》, 为我国梯级水库风险分析和管理提供了规范与技术支持。

5 梯级水库群连溃风险分析研究

5.1 单一梯级(土石坝)溃坝风险研究

流域梯级开发形成库群, 单一梯级是基本组成单位, 也是研究梯级水库风险的基础, 其中, 溃坝是风险中的最高等级, 也是最坏情况, 因此受到国内外学者的广泛重视。而根据全国已溃大坝的统计资料, 土石坝占到溃坝总数的95%以上, 其中土坝高达93%, 成为主要的溃坝坝型^[2], 见表3。在流域梯级水库群风险分析中, 应以土石坝为主要研究对象, 故本节主要介绍单一梯级(土石坝)的溃坝风险研究。

目前, 针对单一梯级土石坝的溃坝风险分析, 国内外学者分别从溃坝风险模型、数值模拟仿真、溃坝模型试验等角度对溃坝机理、过程及洪水演进等开展研究。

表 2 特级土石坝风险控制标准建议值^[10]

Table 2 Recommended value of risk control standard for super earth-rock dam [10]

建筑物级别	分类	描述	年计失效概率	目标可靠指标	最小安全系数
特1级	坝高超200 m	高度在250 m以上, 库容大于10亿m ³	1×10 ⁻⁸	4.70	1.7
	梯级水库群土石坝	大坝溃决后导致下游1级大坝在预警有效情况下仍发生溃决			
特2级	坝高超200 m	高度在200~250 m之间, 库容大于10亿m ³	5×10 ⁻⁸	4.45	1.6
	土石坝	大坝溃决后导致下游1级大坝在预警有效情况下不发生连溃灾害, 但预警失效时会发生连溃			

表 3 溃坝中各坝型占比^[2]

Table 3 The percentage of dam types [2]

序号	分类	溃坝数 (座)	百分比 (%)
1	混凝土坝	12	0.34
2	浆砌石坝	35	0.99
3	土坝	3287	93.17
4	堆石坝	32	0.91
5	其他	0	0.00
6	不详	162	4.59

有效地降低了模型试验的不确定性。王秋生等人^[69]基于自主研发的封闭式循环供水模型试验装置, 进行了土石坝加筋漫坝模型试验, 分析了加筋对于漫顶溃坝的影响, 并给出削减洪峰的加筋有效埋置深度。关于溃坝模型试验, 类似的相关研究还有很多, 但总体可分为对漫顶溃坝和管涌溃坝两种溃坝模式进行的试验研究, 这些研究从模型尺度上可分为大小两种, 也有学者另辟蹊径, 开展离心模型试验来代替大尺度模型试验并取得好的效果, 试验成果为连溃风险分析提供了参考和理论支撑。

5.1.1 单一梯级溃坝风险分析方法

现阶段溃坝风险分析方法主要以数值仿真和模型试验研究为主。数值仿真在风险分析中的应用, 可以更加直观地模拟溃坝过程并进行风险的预警及评价, 不少学者在这些方面进行了积极的探索。李明超等人^[66]分析了影响土石坝安全的各种内外部因素, 提出了面向结构图的大坝安全风险数值仿真分析方法。王立辉^[67]重点考虑溃坝的水动力学, 并结合数值计算方法, 建立了描述土石坝溃坝水流运动的数值模型。马福恒等人^[68]结合大坝失事统计资料, 分析了影响土石坝安全的主要因素, 建立了土石坝的风险预警指标体系。此外, 国内外还开发了大量溃坝仿真分析程序, 如 MIKE11 DB模型、DB IWHR模型、BREACH模型、HEC-RAS模型等。

溃坝模型试验是研究单一梯级(土石坝)溃坝机理、提出并验证计算模型的重要手段, 为进行梯级溃决风险分析提供了理论基础^[69]。众多学者进行了大量试验探索, 在土石坝溃决成因、溃决机理、溃坝过程等方面取得了一系列成果。陈生水等人^[70]针对溃坝离心模型试验的问题, 制作了伺服水阀流量控制装置,

5.1.2 不同溃决破坏类型的单一梯级风险分析

根据溃决破坏类型不同, 单一梯级土石坝溃决风险主要可分为洪水导致的漫坝风险、渗透破坏风险、坝坡失稳风险分析、地震损伤风险等方面。

漫坝风险分析主要包括漫顶溃决的试验模拟、漫坝数学模型的改进及漫坝洪水演进等方面。黄灵芝等人^[71]基于模糊数学理论, 将可靠度理论运用到土石坝漫顶破坏分析, 建立了基于模糊集合论的土石坝漫顶破坏风险分析模型, 量化了漫坝失事的坝前水位区间:

$$P = P\{Z - Z_f - H_w \leq \varepsilon\}, \quad (5)$$

式中, P 为漫顶失效概率; Z 表示坝顶高程, m; Z_f 为坝前最高水位, m; H_w 为风浪爬高, m; ε 表示系统从可靠状态变化到失事状态的模糊过渡区间。

吕弯弯等人^[72]对土石坝洪水漫顶的风险因素进行分析, 详细介绍了运用蒙特卡罗法计算土石坝洪水漫顶风险率的模型:

$$P(H > Z) = \frac{k}{n \times m \times j}, \quad (6)$$

式中, P 为漫顶风险概率, H 表示由洪水引起的坝前最

高水位, Z 表示坝顶高程, k 为水位漫顶次数, n 表示洪水场数, j 代表符合瑞利分布的波浪爬高随机值个数。

基于黏土心墙坝漫顶溃决原理, 钟启明等人^[73]提出了考虑水土耦合的可模拟漫坝溃决过程的数学模型, 并给出了对应的数值计算方法, 研究成果为黏土心墙坝漫顶溃决致灾后果损失风险评价提供了理论支撑。张锐等人^[74]考虑上游溃坝洪水作用, 采用直角梯形模糊数来描述水库漫坝失事的风险指标, 提高了风险分析的准确性。

防渗作为土石坝安全运行的薄弱环节, 渗透破坏构成了土石坝溃坝的重要风险因素。Chen等人^[75]通过对渗流通道中的土颗粒进行受力分析, 发现随着渗流通道的增大, 通道上部坝体楔体将发生坍塌, 这将直接导致大坝发生漫顶破坏, 渗透通道上部坝体发生坍塌的条件为

$$W > 2\tau_f L y_c, \quad (7)$$

式中, W 表示坍塌土体重量, τ_f 表示崩塌楔形体两侧的抗剪强度, L 为渗透通道长度, y_c 为崩塌楔形体垂向尺寸, 即坝顶与通道顶部高程之差。

土石坝主体由散粒材料筑成, 坝坡的失稳将直接导致大坝面临极高的溃决风险, 为此相关学者对该问题进行了专门的研究。在边坡稳定分析原理方面, Chen等人^[76]在上限解方法基础上加以改进, 提出了二元速度场概念, 借助速度场和功能平衡方程对可用于坝体滑坡风险分析的三维边坡失稳安全系数进行了求解。李清富和龙少江^[77]基于坝坡稳定功能函数, 探讨了土坝坝坡失稳风险模型中各相关参数的取值及随机变量的统计分析问题。坝体滑动力矩 S , 抗滑力矩 R , 当 $S > R$ 时, 坝坡失稳, 功能函数为

$$Z = g(R, S) = R - S, \quad (8)$$

则坝坡失效概率为

$$P_f = P\{Z < 0\} = P\{(R - s) < 0\} = \iint_{r < s} f(r, s) dr ds, \quad (9)$$

式中, $f(r, s)$ 为 (R, S) 的联合概率密度函数。

土石坝地震风险分析是对库区运行期内遭受地震作用或发生地震灾害和后果损失概率的研究, 主要由地震危险性分析、地震易损性分析和地震灾害损失评估三部分组成^[78]。王笃波等人^[78]以坝顶相对沉降为评价指标, 提出了一种土石坝地震风险分析方法, 从技术和经济上对土石坝地震破损风险进行分析计算。之后,

他又加入土石坝材料参数及地震动输入不确定性因素的影响, 提出了基于形变的土石坝地震易损性分析方法^[79], 地震风险可采用式(10)分析:

$$R = HFL, \quad (10)$$

式中, R 为土石坝地震风险, H 为地震危险性, 代表给定场地在某一时期内不同强度的地震发生的概率; F 为土石坝地震易损性, 代表在给定强度的地震作用下, 土石坝达到或超过某种破坏状态时的条件失效概率; L 为地震损失, 包括直接、间接经济损失和人员伤亡损失。

针对高山峡谷中存在高边坡的高坝, 贾超等人^[80]将地震造成的涌浪作用和地震效应叠加, 分析了坝体的抗滑稳定安全性, 可为高坝地震风险控制提供借鉴。

总地来看, 现有成果主要集中在单一梯级的土石坝, 研究内容从理论方法到过程模拟再到风险评价, 形成较为完整的体系, 为多个梯级组成的库群风险分析研究提供了大量依据。

5.2 梯级水库群连溃风险分析研究

对于由多个单一梯级组成的库群系统, 各个梯级之间相互影响, 成为一个整体, 一旦某一梯级发生溃坝或漫顶, 可能使得下游梯级发生连锁溃坝, 导致整个流域系统存在极大风险^[81]。目前, 国内外学者针对梯级水库群连溃风险分析开展了较多研究, 成果主要集中在梯级连溃分析方法和模型研究以及连溃过程的试验模拟和规律探索等方面。

5.2.1 梯级库群连溃分析方法和模型研究

在国外, 美国犹他州州立大学教授Bowles^[82]首次提出并定义了库群风险分析的概念。后续很多国家采用风险指数来度量连溃分析中的梯级风险度。美国陆军工程师团Hagen^[83]基于专家打分法, 采用相对风险指数判别梯级大坝的相对风险度, 获得相对风险指数。葡萄牙工程师综合考虑环境、结构及溃坝损失等因素, 将各项因素评分计算总和并加权平均作为水库群综合风险指数^[3]。目前, 澳大利亚的风险分析与管理技术处于国际领先水平, 群坝风险分析评价也已应用于几个梯级库群中, 取得了较好的效果。

国内方面, 也有不少专家学者针对梯级水库连溃问题进行了探索, 并取得了一些成果。由于目前有关梯级连溃的案例相当少, 因此, 大量研究都是基于数

值方法进行模拟,有着直观的优点,但是存在因素考虑不够全面和准确分析结果与实际相差较大的问题.周兴波等人^[61]通过对冲刷模型、泄流渠水深计算方法等方面的改进,提出一种数值分析稳定、参数敏感性低的溃坝分析方法,并应用到三级连溃分析中. Hu等人^[84]将上下游水库的水力特征洪水路径模拟与洪水调节计算结合起来,建立了涵盖梯级水库溃决模拟全过程的数值模型,实现了输入较少地质参数就可进行梯级水库溃坝的数值模拟和风险评估的功能(图8). 蔡启富等人^[85]基于矢量通量分裂理论,借助数值方法对有底坡和摩擦的梯级水库同时溃坝和相继溃坝的溃坝波传播进行了模拟,并分析了各种因素对溃坝波的作用. 黄卫等人^[86]基于一维浅水动力学模型,进行了梯级溃坝洪水的系统数值模拟,发现与单坝相比梯级间存在渐进增强机制. 杨忠勇等人^[87]采用数值计算方法,讨论分析了某流域内4座梯级水库在多种连溃模式下对下游城市的淹没特征.

关于梯级连溃分析的方法较多,除了数值方法外,近年来新的方法和模型也不断被提出并成功应用,例如贝叶斯网络、集对分析等. 李平等人^[88]采用贝叶斯网络方法,构建了洪水作用下双库连溃的贝叶斯网络模型,直观、简便地分析了多风险源下的梯级漫坝连溃风险. Li和Liang^[89]采用贝叶斯网络和蒙特卡罗随机模拟方法,计算了洪水和滑坡涌浪联合作用下单坝和梯级漫顶溃决的概率及风险大小,发现水库初始水位越高,滑坡涌浪导致大坝溃决的概率越大. 林鹏智和陈宇^[63]同样基于贝叶斯网络理论,将超标洪水、上游溃坝洪水和强地震作为关键风险因素,分别建立了单库、梯级系统漫坝贝叶斯网络风险分析模型. 在连溃分析模型的建立方面,杨印等人^[90]考虑梯级水库间的传递失效性,并引入集对分析的联系度概念,建立了梯级库群系统的连锁失效模型.

$$p_i = p_i^s / (1 - e), \quad (11)$$

式中,下标*i*表示第*i*个梯级;*e*表示了下游梯级失效概率中受上游梯级影响的比例,为梯级库群系统中上下游水库之间的联系度. p_i^s 可以通过单个工程的结构可靠度计算得到.

胡良明等人^[91]采用DB-IWHR溃坝模型分析了土石坝溃坝过程,通过调洪将上下游梯级进行关联,建立了梯级土石坝连溃数学模型,给出了降低连溃风险的建议. 基于对单个梯级溃决分析方法的改进, Zhou等人^[92]建立了适用于梯级溃决的定量和实用的风险分析模型DAMSBREACH,该模型同时包含了梯级调度和风险预警模块,对于梯级水库群失事应急救援和防洪减灾具有较实用的价值.

5.2.2 梯级库群连溃过程模拟和规律研究

现阶段连溃模型均为基于梯级上下游间的影响关系所建立,因此对于梯级之间的相互影响规律,不少学者进行了专门研究. Guo等人^[93]采用数学模型概括计算了四种不同工况下溃坝洪水的路径,并分析了同一库群上游梯级发生瞬时溃决时传导至下游梯级的溃坝洪水特点,认为水库提前放空可降低梯级连溃的风险. Yang等人^[94]基于系统工程理论建立了梯级水库系统风险分析框架,并结合层次分析法和熵权法计算了梯级单元的重要度,提出将脆性风险熵作为衡量梯级库群系统失效不确定性的性能指标,并对其大小进行了预测. 陈玺等人^[13]同时考虑上游梯级溃坝洪水以及地震作用,对梯级库群中的坝坡稳定进行了可靠度风险分析. 张锐^[4]应用系统工程理论,分析了梯级系统自上而下各梯级安全性的映射关系,给出了工程建设期梯级水库联合风险的计算公式.

此外,还有学者采用水槽模型试验对水库群连续溃决过程进行模拟,并对连溃过程中各溃决参数反映的规律进行了研究,进一步完善了梯级水库风险分析的理论. 许唯临等人^[95]采用水槽试验对梯级水库群连

图8 (网络版彩图)梯级水库上下游关联结构^[84]
Figure 8 (Color online) Fundamental cascade reservoir [84].

续溃决从试验现象分析和规律总结的角度进行了探索性的研究. Xue等人^[96]进行了一系列模拟陡峭河床边坡的水槽梯级溃坝试验, 比较了梯级大坝瞬时溃决和完全溃决情况下大坝溃决洪水的特征, 认为多个梯级与单个梯级间溃坝水流的不同主要是由下游库区的回水引起, 与梯级间距相关度不大. Zhang等人^[97]基于梯级库群中间大坝完好直立情况, 采用水槽试验模拟研究了库群中间完整坝对溃坝水流的阻滞作用, 发现其主要受中间完整坝前水深与坝高之比的影响, 为梯级库群的设计提供了参考. Cao等人^[3]基于梯级连溃时大坝间距和相对坝高两个变量, 提出了一种浅水动力学模型, 发现库群梯级大坝与单坝相比, 发生连溃时存在下游洪峰升高和洪峰提前风险, 并且这一风险取决于梯级间距和水库初始水深等因素. 李炎隆等人^[98]基于正交试验法, 对梯级土石坝连溃模型中参数的敏感性进行分析, 为连溃模型参数取值和反演分析提供了参考(图9).

淤地坝是黄河流域中以拦泥淤地为目的修建的挡水建筑物, 兼顾防洪和淤地的作用, 随着数目增加形成了小流域的淤地坝系. 一旦遭遇特大洪水, 淤地坝系各库形成蓄水, 带来的风险相当于梯级水库群, 其安全性关系到黄河沿岸黄土高原地区人民的生命财产安全, 近年来再次受到重视, 有关其连溃风险的评价和规律研究也已初步开展. 王丹等人^[99]结合改进层次分析法, 提出了一种相对完整的适用于小流域淤地坝单坝和坝系运行风险的评价指标, 为小流域串联式淤地坝的连溃分析提供风险值参考. 针对小流域淤地坝系, 张幸幸和陈祖煜^[100]给出了坝系自动分级的规则, 并提出了一套模拟暴雨条件下淤地坝坝系连溃过程的方法, 但在分析过程中忽略了区间流域内的产流、汇流过程, 以及上、下游淤地坝之间的洪水演进过程. 淤地坝系中各梯级虽然均为中低坝型, 但多数梯级大坝运行时间长久, 存在多种风险因素, 在遭遇暴雨蓄水后极易发生连续溃决, 因此, 还需进一步开展更加精细的淤地坝梯级水库群连溃过程模拟和规律的探索研究.

6 梯级水库群系统风险处置

流域梯级系统中的梯级工程从规划设计到退役, 全生命周期过程都需要进行风险的评估和处置, 且不同阶段的风险处置措施有所侧重. 在规划阶段, 加强

图9 梯级水库连溃示意图^[98]

Figure 9 The sketch of cascade dam break [98].

风险因素的识别, 避让风险; 设计阶段加强风险分析与研究, 防范风险; 在建设阶段, 以控制风险为主, 重点进行风险评估; 运行阶段加强风险监测, 制定相应预案; 最后, 在退役阶段对工程进行长期的风险管理^[101]. 根据不同阶段的风险分析特点, 按照寿命阶段总结归纳了国内外风险处置的研究成果, 以供实际应急处置中参考.

(1) 规划阶段. 在保证流域梯级建设合理性和成本不显著增加前提下, 对于规划河段内的重大地质风险和地震灾害风险, 首选完全规避措施, 不能完全规避的, 可采取工程措施, 工程措施无法完全消除的, 则可采取控制、转移及自留方式管理风险. 从工程、非工程两个方面分析风险管理措施的技术可行性, 进一步降低风险.

(2) 设计阶段. 可从流域梯级布置设计、梯级枢纽布置设计、各梯级主要建筑物设计、各梯级关键单元设计和生命线通道设计等层面进行风险的防控.

(3) 建设阶段. 在梯级水库工程中, 建立以质量为中心的全过程施工体系, 是合理处理施工缺陷, 降低施工质量风险的有效手段. 同时, 对工程结构的材料性能、施工工艺和质量、使用和维护等提出相应的要求, 进行相应的控制. 做好工程区隐患的排查和预警, 制定超标准的洪水预案^[102].

(4) 运行阶段. 包括对风险的常规监测和应急监测两方面, 以识别运行期内的风险因子, 并采取修补加固措施, 以便及时排除风险, 减少灾害损失. 常规监测是基于梯级的正常运行, 是常规的一种举措, 如加强对各梯级关键单元(防浪墙、闸门、防渗面板等), 挡水、

泄水等主要建筑物, 流域内库岸边坡等的持续安全监测和定期检查, 及时除险加固. 应急监测是对应急设施进行风险监测, 确保正常工作, 如对流域梯级内公路桥梁的监测防控, 保证畅通, 为应急条件下人员撤离提供保障^[103].

(5) 退役阶段. 包括对退役工程的维护和管理. 对于流域内退役后的水库大坝, 制定长期的维护和管理预案. 可将警示牌、栅栏等警示、拦护设施布置在群众可能活动区域, 可定期对未完全拆除水库的内的水量、水质、淤积物、生物群落等进行长期监测, 并定期清理淤积物.

7 未来研究重点

在总结流域内梯级水库群风险分析研究的基础上, 本文归纳并提出了该研究领域未来的4个研究重点.

(1) 流域系统内多源复合风险的组合研究. 例如单一梯级下, 洪水和地震以极小概率同时出现, 是接近独立无关的两种作用. 但在梯级水库群系统中, 不同梯级抗震风险能力不同, 强震后薄弱梯级或支流小型工程发生溃决, 产生的洪水演进到下游, 下游梯级将同时遭受余震风险和入库洪水作用, 产生非常危险的风险组合. 若梯级在主震中未发生溃决, 采取紧急泄洪或放空水库, 则下游梯级同样极可能同时遭受洪水与余震两种风险作用. 然而在实际运行中, 风险源组合比上述情况复杂, 类型多, 且具有时空差异. 多源风险的组合研究是风险识别评价的前提, 也是准确预测失事概率的依据, 因此是一个未来需要重点研究的方向.

(2) 单一梯级向流域库群特定风险组合下的连锁分析. 溃坝是工程运行中的最高风险等级, 也是较为罕见的设计状况. 现有研究多集中在单一梯级溃坝机理及溃坝模式, 对多个梯级在不同风险组合下的连锁研究较少, 且多为溃口设定条件下溃坝流量的计算. 但在特定风险组合工况下, 考虑梯级系统挡水建筑物溃决的最终形态及洪水演进的累积效应, 获得的溃坝流量才符合实际工程需要. 而现实可能的溃坝模式研究是确定溃坝流量的基础, 也是梯级连锁风险分析的重要内容. 因此, 流域特定风险组合下的连锁溃坝模式及系统整体失事概率的研究将是未来探索的关键问题之一.

(3) 梯级水库群联合调度及应急处置研究. 梯级水

库群全生命周期内存在各种风险, 可在规划设计及施工阶段采取措施对风险加以规避或消除, 但流域开发完成投入运行后, 风险往往仍然存在, 对水库群进行合理的调度, 采取相应的应急处置措施, 切断风险传导, 是确保工程持续安全的关键. 目前关于水库群联合调度的研究多集中在防洪、蓄防水及发电调度运行等方面, 对于梯级面临自然灾害或人为事故产生紧急风险情况下的应急联合调度研究, 其深度和准确度还不够. 有关流域单位内的水库群联合调度和应急措施的研究和制定, 对于减小库群风险、保障下游群众人身和财产安全具有重要意义, 对此方面的进一步探索将是未来库群风险分析的研究趋势之一.

(4) 流域内水库群新安全标准的确定. 国内外水电开发逐步向大流域、特高坝、多梯级方向发展, 针对于传统工程的安全标准, 包括设计、防洪、环保等, 已逐渐难以适应工程需要, 新标准、新规范的制定和研究将是未来发展的重点, 但目前基于风险理论来建立新的安全标准仍存在着较大争议, 争议主要来源于风险分析中存在的不确定性. 因此, 关于如何建立适用的安全标准的研究, 对于流域梯级水库风险分析具有重要的工程意义.

8 总结与展望

本文综述了国内外流域梯级水库群风险分析的研究成果, 从风险分析的不同方面归纳了该领域的研究现状和难点, 并提出了未来仍需深入研究的4个关键问题: 多源复合风险组合下的风险分析、特定风险下连锁溃坝模式和机理研究、流域范围内库群联合调度及应急处置、新的库群设计和风险标准的建立. 梯级水库群的风险评估和连锁分析, 是流域风险分析的主要内容. 现阶段国内外学者已在单坝风险分析的基础上对梯级库群开展了富有成果的研究, 但流域梯级水库群风险分析具有体系庞大、关联复杂、高度不确定性等突出特点, 且尚未有可供参考的库群数据库, 梯级库群风险因子的诱发、识别和传导不明晰, 尚无法准确评估梯级失事对流域内影响范围和程度, 梯级水库群风险标准和风险等级仍未达成共识, 未来均需要进一步探索完善. 因此, 开展流域梯级库群风险分析, 对于揭示库群失效机理, 完善风险应急处置, 合理设计和规划梯级建设具有重要意义.

致谢 感谢国家973项目“梯级水库群全生命周期风险孕育机制与安全防控理论”对本工作的大力支持,同时也感谢中国科学院院士陈祖煜、中国电力建设集团有限公司总工程师周建平的指导。

参考文献

- 1 Zhou J P, Zhou X B, Du X H, et al. Research on design of dam-break risks control for cascade reservoirs (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2018, 37: 1–10 [周建平, 周兴波, 杜效鹤, 等. 梯级水库群大坝风险防控设计研究. 水力发电学报, 2018, 37: 1–10]
- 2 Zhou X B. Reliability and dam break based risk analysis of cascade reservoirs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015. 25–64 [周兴波. 建立在可靠度与溃坝计算基础上的梯级水库群风险分析. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学, 2015. 25–64]
- 3 Cao Z, Huang W, Pender G, et al. Even more destructive: Cascade dam break floods. *J Flood Risk Manage*, 2014, 7: 357–373
- 4 Zhang R. Analysis of the overtopping failure probability in cascade reservoirs and its emergency response strategies (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. 3–57 [张锐. 梯级水库群漫坝失事风险分析及其应急处置研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2016. 3–57]
- 5 IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment. Quantitative risk assessment for slopes and landslides—the State of the Art. Cruden D, Fell R. *Landslide Risk Assessment*. Rotterdam: Balkema, 1997. 3–12
- 6 Sheng J B, Li D D, Cai Q, et al. Research progress and its practice of key techniques for dam risk assessment and management (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 1057–1067 [盛金保, 厉丹丹, 蔡蓁, 等. 大坝风险评估与管理关键技术研究进展. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1057–1067]
- 7 Dutta D, Herath S, Musiak K. A mathematical model for flood loss estimation. *J Hydrol*, 2003, 277: 24–49
- 8 Scawthorn C, Flores P, Blais N, et al. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment. *Nat Hazards Rev*, 2006, 7: 72–81
- 9 Ren Q W, Yang Y, Tian Y. Research on the overall failure probability based on the Analytic Hierarchy Process in cascade reservoirs (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2014, 45: 296–303 [任青文, 杨印, 田英. 基于层次分析法的梯级库群失效概率研究. 水利学报, 2014, 45: 296–303]
- 10 Zhou J P, Wang H, Chen Z Y, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I: Fundamentals and criteria (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 505–514 [周建平, 王浩, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准. 水利学报, 2015, 46: 505–514]
- 11 Cai W J. Research on theory and method in cascade reservoirs flood risk analyze (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. 8–11 [蔡文君. 梯级水库洪灾风险分析理论方法研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2015. 8–11]
- 12 Wu H. Research on evaluation of safety for slope close to the dam and reservoir (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015. 41–72 [吴浩. 近坝库岸边坡安全性评价研究. 硕士学位论文. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. 41–72]
- 13 Chen X, Sun P, Li S Y, et al. Analysis method for the slope stability of earth-rock fill dam considering the effect of concurrent earthquake and dam-break flood (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2017, 48: 1499–1505 [陈玺, 孙平, 李守义, 等. 考虑地震与溃坝洪水共同作用的土石坝坝坡稳定分析方法. 水利学报, 2017, 48: 1499–1505]
- 14 Li L, Wang R Z, Sheng J B, et al. Dam Risk Assessment and Risk Management (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2006. 102–140 [李雷, 王仁钟, 盛金保, 等. 大坝风险评价与风险管理. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 102–140]
- 15 Brown C A, Graham W J. Assessing the threat to life from dam failure. *J Am Water Resources Assoc*, 1988, 24: 1303–1309
- 16 DeKay M L, McClelland G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood. *Risk Anal*, 1993, 13: 193–205
- 17 Assaf H, Hartford D N D, Cattanch J D. Estimating dam breach flood survival probabilities. *Ancold Bulletin*, 1997, 107: 23–42
- 18 Graham W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1999
- 19 Karvonen R A, Hepojoki A, Huhta H K, et al. The use of physical models in dam break flood analysis. RESCDAM Final Report. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000. 57

- 20 Aboelata M, Bowles D S. LIFESim: A tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures. In: Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials "Dam Safety 2008" Conference. Indian Wells, 2008
- 21 Fan Z W, Jiang S H. Application of tolerance risk analysis method in decision-making of flood prevention (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2005, 36: 618–623 [范子武, 姜树海. 允许风险分析方法在防洪安全决策中的应用. *水利学报*, 2005, 36: 618–623]
- 22 Shi Z M, Xiong Y F, Peng M, et al. An efficient risk assessment method for landslide dam breach: Taking the Hongshiyan Landslide Dam formed by the 2014 Ludian Earthquake as an example (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 742–751 [石振明, 熊永峰, 彭铭, 等. 堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法——以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例. *水利学报*, 2016, 47: 742–751]
- 23 Song M R. Research on loss of life due to dam-break based on the numerical simulation (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Tianjin: Tianjin University, 2016. 12–51 [宋明瑞. 基于数值模拟的溃坝生命损失研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2016. 12–51]
- 24 Li L, Zhou K F. Methods for evaluation of life loss induced by dam failure (in Chinese). *Adv in Sci Tech Water Res*, 2006, 26: 76–80 [李雷, 周克发. 大坝溃决导致的生命损失估算方法研究现状. *水利水电科技进步*, 2006, 26: 76–80]
- 25 Peng M, Zhang L M. Analysis of human risks due to dam-break floods—Part 1: A new model based on Bayesian networks. *Nat Hazards*, 2012, 64: 903–933
- 26 Peng M, Zhang L M. Analysis of human risks due to dam break floods—Part 2: Application to Tangjiashan landslide dam failure. *Nat Hazards*, 2012, 64: 1899–1923
- 27 Wang Z J, Gu C S, Liu H C. Estimation of loss-of-life caused by dam break based on fuzzy matter-element and exponential smoothing method (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Ins*, 2009, 26: 25–28 [王志军, 顾冲时, 刘红彩. 基于模糊物元与指数平滑法的溃坝生命损失估算. *长江科学院院报*, 2009, 26: 25–28]
- 28 Zou Q, Zhou J Z, Yang X L, et al. A comprehensive assessment model for severity degree of dam failure impact based on attribute interval recognition theory (in Chinese). *J Sichuan Univ (Eng Sci Ed)*, 2011, 43: 45–50 [邹强, 周建中, 杨小玲, 等. 属性区间识别模型在溃坝后果综合评价中的应用. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43: 45–50]
- 29 Li W, Li Z K, Ge W, et al. Improved variable fuzzy set method and its application in life loss assessment of dam break (in Chinese). *J Tianjin Univ (Sci Tech)*, 2020, 53: 419–425 [李巍, 李宗坤, 葛巍, 等. 基于改进可变模糊集法的溃坝生命损失评价及其应用. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53: 419–425]
- 30 Wang X H, Sheng J B, Zhang X N, et al. Study on pre-alarming model of loss of lives due to dam break based on GIS (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2011, 30: 72–78 [王晓航, 盛金保, 张行南, 等. 基于GIS技术的溃坝生命损失预警综合评价模型研究. *水力发电学报*, 2011, 30: 72–78]
- 31 Yang S M, Huang Y F, Li S T, et al. Quantitative assessment on dam break loss based on spatial information technology (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2013, 30: 105–108 [杨胜梅, 黄艳芳, 李申亭, 等. 基于空间信息技术的溃坝洪灾损失定量评估研究. *长江科学院院报*, 2013, 30: 105–108]
- 32 Wang B, Feng P. Emergency operation model for cascade reservoirs and its risk evaluation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2011, 42: 218–225 [王冰, 冯平. 梯级水库联合防洪应急调度模式及其风险评估. *水利学报*, 2011, 42: 218–225]
- 33 Shen Z W, Tong Y B, Xu Y P, et al. Advances in assessing economic loss for dam failure flood (in Chinese). *J Wenzhou Univ (Nat Sci)*, 2012, 33: 25–31 [沈照伟, 童杨斌, 许月萍, 等. 溃坝洪水经济损失评估研究进展. *温州大学学报(自然科学版)*, 2012, 33: 25–31]
- 34 Taylor J A, Smith D I, Greenaway M A. ANUFLOOD, programmer's guide and user's manual. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University: ANUTECH Pty Limited, 1983
- 35 Chatterton J B, Penning-Rowsell E C. Computer modeling of flood alleviation benefits. *J Water Res Plann Manage*, 1981, 107: 533–547
- 36 Aboelata M, Bowles D S, McClelland D M. GIS model for estimating dam failure life loss. In: Proceedings of the 10th Engineering Foundation Conference on Risk-Based Decision Making in Water Resources: Protection of the Homeland's Water Resources Systems. Santa Barbara, 2002. 126–145
- 37 Wind H G, Nierop T M, De Blois C J, et al. Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 meuse floods. *Water Res Res*, 1999, 35: 3459–3465
- 38 Booiij M J. Decision support system for flood control and ecosystem upgrading in the Red River basin. In: Blöschl G, Franks S, Kumagai M, et al, eds. *Water Resources Systems Hydrological Risk, Management and Development*. In: Proceedings of the Symposium HS02b at IUGG 2003. Sapporo, 2003. 115–122
- 39 Ge W, Sun H, Zhang H, et al. Economic risk criteria for dams considering the relative level of economy and industrial economic contribution.

- Sci Total Environ, 2020, 725: 138139
- 40 Wang Z J, Song W T, Ma X T. A method of estimating economic loss caused by dam-break (in Chinese). J Yangtze River Sci Res Inst, 2014, 31: 30–34 [王志军, 宋文婷, 马小童. 溃坝经济损失评估方法研究. 长江科学院院报, 2014, 31: 30–34]
- 41 Shi G Q, Zhu H N, Xun H P, et al. Study on reservoir dam-break loss and its calculation methods (in Chinese). J Catastrophology, 1998, 13: 28–33 [施国庆, 朱淮宁, 荀厚平, 等. 水库溃坝损失及其计算方法研究. 灾害学, 1998, 13: 28–33]
- 42 Li J R, Huang S F. Spatial information technology application in modernization of flood control and hazard mitigation (in Chinese). J China Inst Water Res Hydropower Res, 2004, 2: 66–72 [李纪人, 黄诗峰. 空间信息技术与防洪减灾现代化. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2: 66–72]
- 43 Zhang C C, Chen X W, Guo H L. Calculation method of flood disaster losses based on GIS (in Chinese). Eng J Wuhan Univ, 2004, 37: 55–58 [张成才, 陈秀万, 郭恒亮. 基于GIS的洪灾淹没损失计算方法. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37: 55–58]
- 44 Li J R, Ding Z X, Huang S F, et al. Research of flood and waterlogging loss assessment model based on spatial distribution social-economic database (in Chinese). J China Inst Water Res and Hydropower Res, 2003, 1: 104–110 [李纪人, 丁志雄, 黄诗峰, 等. 基于空间展布式社会经济数据库的洪涝灾害损失评估模型研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1: 104–110]
- 45 dos Santos N C L, García-Berthou E, Dias J D, et al. Cumulative ecological effects of a neotropical reservoir cascade across multiple assemblages. Hydrobiologia, 2018, 819: 77–91
- 46 Ge W, Jiao Y T, Li Z K, et al. Status and development trend of research on risk consequences caused by dam breach (in Chinese). Adv in Water Sci, 2020, 31: 143–151 [葛巍, 焦余铁, 李宗坤, 等. 溃坝风险后果研究现状与发展趋势. 水科学进展, 2020, 31: 143–151]
- 47 Ji D B, Long L H, Xu H, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment (in Chinese). Adv Sci Tech Water Res, 2017, 37: 7–14 [纪道斌, 龙良红, 徐慧, 等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展. 水利水电科技进展, 2017, 37: 7–14]
- 48 Hecht J S, Lacombe G, Arias M E, et al. Hydropower dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts. J Hydrol, 2019, 568: 285–300
- 49 Huang L, Sun Y F, Wang X L, et al. Environmental risk evaluation based on dam-break flood numerical simulation. In: Proceedings of the 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. IEEE, 2009. 1–4
- 50 Wang Y, Zhang W, Zhao Y, et al. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the middle-lower Hanjiang River. J Hydrol, 2016, 541: 1348–1362
- 51 Wang Y, Zhang N, Wang D, et al. Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China. Sci Total Environ, 2018, 624: 1187–1194
- 52 Zhou X D, Song C, Tang W. Cumulative effects of cascade reservoirs on water temperature from Longyang Gorge to Liujia Gorge in the Yellow River upstream (in Chinese). J Xi'an Univ Tech, 2012, 28: 1–7 [周孝德, 宋策, 唐旺. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段梯级水库群水温累积影响研究. 西安理工大学学报, 2012, 28: 1–7]
- 53 Zhong S S. Study on cumulative environmental impact's mechanism and evaluation method for watershed hydropower cascade development project (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: Central South University, 2013. 83–92 [钟姗姗. 流域水电梯级开发项目累积环境影响作用机制及评价研究. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 2013. 83–92]
- 54 Zhang S J, Yan J P, Li G Q. Cumulative effects of cascade development project adjustment on water temperature (in Chinese). J Hydraul Eng, 2014, 45: 1336–1343 [张士杰, 闫俊平, 李国强. 流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究. 水利学报, 2014, 45: 1336–1343]
- 55 Zhai H, Cui B, Hu B, et al. Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China. Ecol Eng, 2010, 36: 361–372
- 56 Hu D X. Ecological and environmental risk analysis on the upper reaches cascade development of the Yellow River (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009, 36–112 [胡德秀. 黄河上游梯级开发的生态与环境风险分析方法研究. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学, 2009, 36–112]
- 57 Fu Y Q. Study on the assessment of eco-environmental impacts for cascade hydropower development based on the complex system theories (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong Institute of Technology, 2009. 38–55 [付雅琴. 基于复杂系统理论的梯级水电开发生态环境影响评价研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2009. 38–55]
- 58 He X Y, Sun D D, Huang J C. Assessment on social and environmental impacts of dam break (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2008, 30: 1752–1757 [何晓燕, 孙丹丹, 黄金池. 大坝溃决社会及环境影响评价. 岩土工程学报, 2008, 30: 1752–1757]

- 59 Gu C S, Su H Z, Li H Z. Review on service risk analysis of dam engineering (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2018, 49: 26–35 [顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评. 水利学报, 2018, 49: 26–35]
- 60 Peng X H, Sheng J B, Li L, et al. Research on dam risk criteria of China (in Chinese). *Hydro-Sci Eng*, 2014, 4: 13 [彭雪辉, 盛金保, 李雷, 等. 我国水库大坝风险标准制定研究. 水利水电工程学报, 2014, 4: 13]
- 61 Zhou X B, Chen Z Y, Huang Y F, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part III: Risk analysis of embankment break in cascade (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 765–772 [周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究III: 梯级土石坝连锁风险分析. 水利学报, 2015, 46: 765–772.]
- 62 Du X H, Li B, Chen Z Y, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part II: Slope stability of embankment dams (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 640–649 [杜效鹄, 李斌, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究II: 高土石坝坝坡稳定安全系数标准. 水利学报, 2015, 46: 640–649]
- 63 Lin P Z, Chen Y. Risk Analysis of dam overtopping for cascade reservoirs based on Bayesian network (in Chinese). *Adv Eng Sci*, 2018, 50: 46–53 [林鹏智, 陈宇. 基于贝叶斯网络的梯级水库群漫坝风险分析. 工程科学与技术, 2018, 50: 46–53]
- 64 Xu J C, Du J C, Zhou J C. Risk analysis for dam group of cascade reservoirs based on current hydropower industry standards (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2014, 33: 72–76 [徐佳成, 杜景灿, 周家骥. 现行水电行业标准隐存的梯级水库大坝群风险分析. 水力发电学报, 2014, 33: 72–76]
- 65 Wang R Z, Li Lei, Sheng J B. On criterion of social and environmental risk of reservoir dams (in Chinese). *J Safety Environ*, 2006, 6: 8–11 [王仁钟, 李雷, 盛金保. 水库大坝的社会与环境风险标准研究. 安全与环境学报, 2006, 6: 8–11]
- 66 Li M C, Liu F, Chen W G. Block diagram simulation and analysis approach to dam safety under multiple factors influences (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2011, 42: 1355–1360 [李明超, 刘菲, 陈卫国. 多因素作用下大坝安全响应结构图仿真与分析. 水利学报, 2011, 42: 1355–1360]
- 67 Wang L H. Study on dam-break flow numerical simulation and dam-break risk analysis (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. 48–76 [王立辉. 溃坝水流数值模拟与溃坝风险分析研究. 博士学位论文. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. 48–76]
- 68 Ma F H, He X W, Wu G Y. Risk early-warning index system for earth and rockfill dams (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2008, 30: 1734–1737 [马福恒, 何心望, 吴光耀. 土石坝风险预警指标体系研究. 岩土工程学报, 2008, 30: 1734–1737]
- 69 Wang Q S, Wang H Y, Su R L. Experimental study on overtopping of geotextile-reinforced noncohesive embankments (in Chinese). *J China Inst Water Res Hydropower Res*, 2017, 15: 263–271 [王秋生, 王洪洋, 苏瑞林. 加筋无黏性土石坝漫顶溃坝试验研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15: 263–271]
- 70 Chen S S, Xu G M, Gu X W, et al. Flow control and measurement in centrifugal model tests for earth-rock dam breaching (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2018, 49: 901–906 [陈生水, 徐光明, 顾行文, 等. 土石坝溃坝离心模型试验中水流控制与测量. 水利学报, 2018, 49: 901–906]
- 71 Huang L Z, Yun J, Si Z, et al. Analysis on overtopping failure risk of earth-rock dam based on random-fuzziness of reservoir inflow flood (in Chinese). *Eng J Wuhan Univ*, 2020, 53: 766–772 [黄灵芝, 云甲, 司政, 等. 基于入库洪水随机-模糊性的土石坝漫顶失事风险分析. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53: 766–772]
- 72 Lv W W, Gu S P, He L, et al. Calculation and sensitivity analysis of risk probability of earth-rock dam overtopping caused by floods based on Monte-Carlo method (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2015, 32: 48–52, 56 [吕弯弯, 顾圣平, 何蕾, 等. 基于蒙特卡罗法的土石坝洪水漫顶风险率计算及其敏感性分析. 长江科学院院报, 2015, 32: 48–52, 56]
- 73 Zhong Q M, Chen S S, Cao W, et al. Numerical model for clay core dam breach process due to overtopping considering different failure modes of core wall (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2017, 47: 992–1000 [钟启明, 陈生水, 曹伟, 等. 考虑心墙不同破坏模式的黏土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 992–1000]
- 74 Zhang R, Zhang S H, Wang B D, et al. Analysis of the dam overtopping failure fuzzy risk under consideration of the upstream dam-break flood (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 509–517 [张锐, 张双虎, 王本德, 等. 考虑上游溃坝洪水的水库漫坝失事模糊风险分析. 水利学报, 2016, 47: 509–517]
- 75 Chen S S, Zhong Q M, Cao W. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 1757–1764
- 76 Chen Z Y, Sun P, Wang Y J, et al. 3-dimensional slope stability analyses using non-associative stress-strain relationships. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 2517–2527

- 77 Li Q F, Long S J. Analysis on risk from instability of earth-fill dam slope (in Chinese). *Water Res Hydropower Eng*, 2006, 37: 41–44 [李清富, 龙少江. 土坝坝坡失稳风险分析. *水利水电技术*, 2006, 37: 41–44]
- 78 Wang D B, Liu H L, Yu T. Seismic risk analysis of earth-rock dam based on deformation (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2012, 33: 1479–1484 [王笃波, 刘汉龙, 于陶. 基于变形的土石坝地震风险分析. *岩土力学*, 2012, 33: 1479–1484]
- 79 Wang D B, Liu H L, Yu T, et al. Seismic fragility analysis for earth-rockfill dams based on deformation (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2013, 35: 814–819 [王笃波, 刘汉龙, 于陶, 等. 基于变形的土石坝地震易损性分析. *岩土工程学报*, 2013, 35: 814–819]
- 80 Jia C, Wang Z P, Gao F, et al. High-dam risk analysis considering secondary disaster of earthquake (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2011, 30: 34–39 [贾超, 王志鹏, 高凤, 等. 地震次生灾害作用下高坝风险分析研究. *水力发电学报*, 2011, 30: 34–39]
- 81 Guo X L, Zhou X B, Xia Q F, et al. Safety analysis of flood discharge structures of the control cascade reservoir under extreme operating condition (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2017, 48: 1157–1166 [郭新蕾, 周兴波, 夏庆福, 等. 梯级水库群控制梯级极端工况泄洪安全分析. *水利学报*, 2017, 48: 1157–1166]
- 82 Bowles D S, Anderson L R, Glover T F, et al. Portfolio risk assessment: A tool for dam safety risk management. In: *Proceedings of USCOLD 1998 Annual Lecture*. Buffalo, New York, 1998
- 83 Hagen V K. Re-evaluation of design floods and dam safety. In: *Proceedings of 14th Congress of International Commission on Large Dams*. Rio de Janeiro, 1982
- 84 Hu L, Yang X, Li Q, et al. Numerical simulation and risk assessment of cascade reservoir dam-break. *Water*, 2020, 12: 1730
- 85 Cai Q F, Zheng B M. Discontinuous water wave propagation in the cascade reservoirs (in Chinese). *Adv Water Sci*, 1997, 8: 41–45 [蔡启富, 郑邦民. 间断水波在梯级水库中的传播. *水科学进展*, 1997, 8: 41–45]
- 86 Huang W, Cao Z X. Numerical simulation of flood reinforcement due to cascade dam break (in Chinese). *Eng J Wuhan Univ*, 2014, 47: 160–164 [黄卫, 曹志先. 梯级大坝溃决洪水渐进增强机制数值模拟. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47: 160–164]
- 87 Yang Z Y, Guo H M, Cao G C. Inundation process of downstream cities by dam break flood from cascade reservoirs (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2017, 34: 47–51, 78 [杨忠勇, 郭红民, 曹光春. 梯级水库溃坝洪水对下游城市的淹没过程分析. *长江科学院院报*, 2017, 34: 47–51, 78]
- 88 Li P, Huang Y F, Li B. Risk of cascade reservoirs collapse based on Bayesian network (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2018, 29: 677–684 [李平, 黄跃飞, 李兵. 基于贝叶斯网络的梯级水库连锁风险. *水科学进展*, 2018, 29: 677–684]
- 89 Li P, Liang C. Risk analysis for cascade reservoirs collapse based on bayesian networks under the combined action of flood and landslide surge. *Math Problems Eng*, 2016, 2016: 1–13
- 90 Yang Y, Ren Q W, Wang D M, et al. Establishment and application of cascading failure model based on connection degree of cascade reservoirs system (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 1442–1448 [杨印, 任青文, 王冬梅, 等. 基于联系度的梯级库群系统连锁失效模型的建立与应用. *水利学报*, 2016, 47: 1442–1448]
- 91 Hu L M, Zhang Z F, Li Q, et al. Sequential dam break simulation and risk analysis of earth-rock dams of cascade reservoirs (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2018, 37: 65–73 [胡良明, 张志飞, 李仟, 等. 梯级水库土石坝连溃模拟及风险分析. *水力发电学报*, 2018, 37: 65–73]
- 92 Zhou X, Chen Z, Zhou J, et al. A quantitative risk analysis model for cascade reservoirs overtopping: Principle and application. *Nat Hazards*, 2020, 104: 249–277
- 93 Guo H, Yao L, Ren Y, et al. Flood routing in cascade reservoir caused by instantaneous dam break events. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*. IEEE, 2010. 1–4
- 94 Yang Y, Ren Q W, Tian Y, et al. Risk analysis for a cascade reservoir system using the brittle risk entropy method. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 882–887
- 95 Xu W L, Chen H Y, Xue Y, et al. The Chain of Dam Break in Cascade Reservoirs (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2013. 172–231 [许唯临, 陈华勇, 薛阳, 等. 梯级库群的连锁溃决. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 172–231]
- 96 Xue Y, Xu W, Luo S, et al. Experimental study of dam-break flow in cascade reservoirs with steep bottom slope. *J Hydrodyn*, 2011, 23: 491–497
- 97 Zhang Y, Xu W. Retarding effects of an intermediate intact dam on the dam-break flow in cascade reservoirs. *J Hydraulic Res*, 2017, 55: 438–444
- 98 Li Y L, She L, Zhou X B, et al. Parameters sensitivity analysis of successive dam break model for cascade reservoir based on the orthogonal test method (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2018, 49: 823–830 [李炎隆, 余磊, 周兴波, 等. 基于正交试验法的梯级水库连锁分析模型参数敏感性

分析. 水利学报, 2018, 49: 823–830]

- 99 Wang D, Ha Y L, Li Z B, et al. Evaluation on the operation risk of dam system in the typical watersheds of Ningxia (in Chinese). *Sci Soil Water Conser*, 2017, 15: 17–25 [王丹, 哈玉玲, 李占斌, 等. 宁夏典型流域淤地坝系运行风险评价. *中国水土保持科学*, 2017, 15: 17–25]
- 100 Zhang X X, Chen Z Y. Breach flood analysis of warping dam system in small watersheds (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 1845–1853 [张幸幸, 陈祖煜. 小流域淤地坝系的溃决洪水分析. *岩土工程学报*, 2019, 41: 1845–1853]
- 101 Fan Q X. Multi-dimensional safety management framework and major challenges for cascade water conservancy projects (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2686–2697 [樊启祥. 梯级水利枢纽多维安全管理框架与重大挑战. *科学通报*, 2018, 63: 2686–2697]
- 102 Fan Q X, Qiang M S, Jin H P, et al. Intelligent management of large-scale construction projects (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2017, 36: 112–120 [樊启祥, 强茂山, 金和平, 等. 大型工程建设项目智能化管理. *水力发电学报*, 2017, 36: 112–120]
- 103 Fan Q X, Jin H P, Weng W L, et al. Architecture design and application of cascade hydropower project management system based on digital river basin (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2016, 35: 136–145 [樊启祥, 金和平, 翁文林, 等. 基于数字流域的梯级水电工程管理系统设计与应用实践. *水力发电学报*, 2016, 35: 136–145]

Research progress on risk analysis of cascade reservoirs in river basin

LI YanLong¹, WANG ShengLe¹, WANG Lin¹, DU XiaoHu² & ZHOU XingBo²

¹ State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

² China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China

Hydropower construction in China is at the peak concerning the development of cascade reservoirs in river basins. A series of cascade reservoirs have been planned and constructed. However, due to different geological conditions, risk design standards, operational-aging degrees of each cascade in the river basin, and the interaction among different cascades, the risks associated with cascade reservoirs are higher than in a single reservoir. Risk analysis of cascade reservoirs in a river basin is related to engineering safety and social public safety. Based on descriptions of the development, construction status, and risk characteristics of cascade reservoirs in China's river basins, this paper summarizes the research progress in the risk analysis of cascade reservoirs such as risk/loss assessment, the probability risk of dam failure, risk standards, cascade failure risk, and the overall risk management of cascade reservoirs. The paper posits that the combination of multisource and compound risks in a watershed system, cascade failure mode, system failure probability under specific risk combinations, the joint operation of reservoirs and risk disposal measures, and the formulation of safety standards for cascade reservoirs will be the key research directions in the future. The research results are expected to provide valuable reference for the rolling development, safe operations management, and risk emergency disposal of cascade reservoirs in river basins.

cascade reservoirs, risk analysis, dam break in cascade, risk response

doi: [10.1360/SST-2020-0360](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0360)