

• 特约稿 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800332

# 基于贝叶斯网络的梯级水库群漫坝风险分析

林鹏智, 陈 宇\*

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘 要:**为克服现有大坝风险分析方法多针对单库大坝、且不能有效考虑不确定性因素对风险评估结果的影响这一研究局限,本文选取能有效处理不确定性问题的贝叶斯网络理论对梯级水库群展开大坝失效风险研究。基于统计资料,结合专家经验调查法,将超标洪水、上游溃坝洪水和强地震确定为水库漫坝的关键风险因素,建立了三种因素单独、组合作用下的单库、梯级系统漫坝贝叶斯网络风险分析模型,并将其应用到大渡河流域上下相连的猴子岩-长河坝两座干流梯级上。结果表明风险源单独、组合作用下的梯级水库群的漫坝风险的量级都较小,其中猴子岩的上游溃坝洪水所致的漫坝风险量级最小,这与其上游双江口水库为干流控制性梯级的特性有关。两库均被识别为薄弱梯级,对其漫坝风险起主导作用的风险因素分别为超标洪水和强地震,这将作为系统风险防控措施制定的重要考量。通过实例应用,验证了文中所提模型在梯级水库群风险分析中的有效性。求解过程快速、有效,对风险因子间的相关性、系统薄弱梯级的识别直观、清晰,根据结果能及时掌握风险源单独或组合作用下的梯级水库群风险变化并制定相应的风险决策,有利于后续风险管理环节的迅速开展,为水利水电工程风险分析领域的研究提供了新的研究手段。

**关键词:**风险分析; 贝叶斯网络; 梯级水库; 漫坝; 洪水; 地震

**中图分类号:**X43

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3246(2018)03-0046-08

## Risk Analysis of Dam Overtopping for Cascade Reservoirs Based on Bayesian Network

LIN Pengzhi, CHEN Yu\*

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Existing dam risk analysis methods are suitable largely for a single reservoir/dam and the influence of uncertainty on risk assessment result is not taken into consideration. To overcome these limitations, the Bayesian network theory which can effectively deal with the uncertainty problem was adopted to study the risk of dam failure in a cascade reservoir group. In combination of statistics data and experts' experiences, extreme flood, upstream dam-break flood and strong earthquake were identified as the key risk factors of dam overtopping. Bayesian risk analysis network models of dam overtopping for a single reservoir and successive dam breaking for two cascade reservoirs under single or compound effects of extreme flood, earthquake and upstream dam-break flood were established and used to analyze dam overtopping risk of Houziyan and Changheba, two successive cascade reservoirs in the Dadu river basin, southwestern China. Results show that the overtopping risk magnitudes of cascaded reservoirs under single and compound effects of risk sources are relatively low, and the magnitude of overtopping risk caused by upstream dam-break flood of Houziyan is the least, which is correlated with characteristics of the upstream Shuangjiangkou reservoir, a control cascade in the basin. Both Houziyan and Changheba reservoirs are identified as weak cascades, and their main leading risk factors are excessive flood and strong earthquake, which can serve as an important support for formulating systemic risk prevention and control measures. Validity and practicability of the proposed model were verified through the case study. The solving process was fast and effective, and the identification of the risk factors correlation and the weak cascade reservoir was intuitive and clear. Using model analyses, risk change of cascade reservoirs under single and compound effects of risk sources can be obtained in time and corresponding risk decisions can be made, which is beneficial to rapid develop-

收稿日期:2018-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(青年科学基金)(41501554);“政府间国际科技创新合作”重点专项资助项目(2016YFE0122500);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB036401)

作者简介:林鹏智(1969—),男,教授。研究方向:水利工程;水力学及河流动力学;港口海岸及海洋工程。E-mail: cvelinpz@126.com

\* 通信联系人 E-mail: rainchen393@hotmail.com

网络出版时间:2018-05-05 19:00:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180505.1900.014.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

ment of follow-up risk management and provides a new research way for risk analysis research in hydraulic and hydropower engineering.

**Key words:** risk analysis; Bayesian network; cascade reservoirs; dam overtopping; flood; earthquake

2008年5月12日,四川省汶川发生8.0级大地震,区内产生了大量的次生地质灾害,大规模的崩塌、滑坡堵江更是形成了上百处堰塞湖,其数量分布、险情威胁和救灾处置紧迫性均创历史之最<sup>[1]</sup>。据遥感调查表明:堰塞湖沿河流成串珠状分布<sup>[2]</sup>,构成堰塞湖群,严重威胁流域上下游生命财产安全。基于堰塞湖溃坝具有突发性且难以预控的特点,需对其进行快速有效的风险评估,并据此采取有效防控措施。堰塞湖的高风险也警示水利工作者需要对地震作用下的水库群风险采取更加科学合理的分析和评估。

梯级水库作为水利水电开发的基本形式,是大规模水电开发的必然选择,如中国西南大渡河流域的干流规划梯级就是极具代表性的梯级格局开发方案。梯级系统所处环境中自然灾害事件时有发生,特别是超强地震与标准洪水等一旦发生将会对梯级系统的安全带来极大的影响。上下游梯级水库在防洪、发电、灌溉等方面联系紧密、相互影响,上游水库可通过拦蓄洪水分担下游水库的风险,也可由溃坝失事导致下游水库的连溃失事<sup>[3]</sup>。在不同风险源的组合影响下,梯级系统破坏所影响范围和程度也更大,其所承担的风险较传统的单库大坝有明显的放大和累积效应,若处置不当,其灾害具有激增效应。梯级系统中往往不乏高库大坝,其设计已超出现行规范的适用范围,需要提出新的安全标准和风险控制要求。相应地,考虑流域梯级效应的水库群安全风险分析研究也因有别于传统单库大坝风险研究而亟待开展。常用于分析水库大坝风险的方法主要有:(均值/改进)一次二阶矩法,直接积分法、事故树法等,这些方法均存在较大的不确定性。近年来,基于处理不确定性问题有效性,贝叶斯网络(Bayesian network, BN)先后被引入不同的风险领域,用于克服传统方法的不足。在大坝安全风险领域,徐智勇建立了以BN为基础的大坝群风险评价分析模型<sup>[4]</sup>; Xu等<sup>[5]</sup>、张利民等<sup>[6]</sup>基于BN确定了大坝漫顶和管涌/渗流侵蚀事件有关的土石坝风险;周建方等<sup>[7]</sup>、冯庚等<sup>[8]</sup>、廖井霞<sup>[9]</sup>应用基于事故树的BN结构来分析水库大坝的风险;王刚等将风险分析故障树(FT)模型进行转化,提出了土石坝溃决贝叶斯网络风险概率计算方法<sup>[10]</sup>;程光生等<sup>[11]</sup>基于贝叶斯网络原理研究了尾矿库的溃坝风险,并提出一种新的预警方法。然而,BN在梯级系统风险分析中的应用并不常见。

有别于传统单库大坝的风险研究,本文重点研究梯级水库群漫坝/溃坝风险;不再依托事故树,而是直接基于BN理论构建梯级水库群贝叶斯网络风险

分析(bayesian network risk analysis, BNRA)结构、确定网络节点概率和条件概率,旨在为梯级水电工程安全管理提供新思路、为大坝风险分析提供新方法。

## 1 梯级水库群贝叶斯网络风险分析法

### 1.1 BN理论基础

BN是基于概率论和图论的一种有向无环图,其中节点代表论域中的变量,其可以是任何问题的抽象,如结构构件的状况、测试值、观测现象等;有向弧代表节点间的因果关系,每个节点和有向弧都可用各自的概率和条件概率来量化。该理论的核心是英国学者Bayes于1763年提出的贝叶斯公式<sup>[12]</sup>:

$$P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \quad (1)$$

式中: $P(A)$ 和 $P(B)$ 分别为事件 $A$ 、 $B$ 发生的概率,其值均大于0; $P(B|A)$ 、 $P(A|B)$ 分别表示事件 $A$ 、 $B$ 发生条件下事件 $B$ 、 $A$ 发生的概率。

图1是一个简单的BN结构,图中 $x_1 \rightarrow x_3$ 表明两节点直接关联, $x_1$ 称为 $x_3$ 的父节点, $x_3$ 称为 $x_1$ 的子节点。

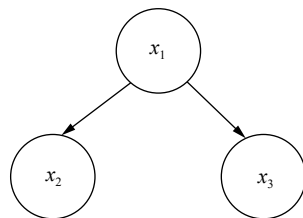


图1 BN结构示意图

Fig. 1 Sketch map of BN structure

图中所示网络的联合概率分布函数为:

$$P(x_1, x_2, x_3) = P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_1) \quad (2)$$

当BN节点数为 $n$ 时,基于BN的条件独立性假设,网络的联合概率可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i|pa(x_i)) \quad (3)$$

### 1.2 梯级水库群贝叶斯风险网络的构建

分析已有的溃坝统计资料可知,漫顶为最主要的溃坝模式,占比超过50%。而洪水引起的大坝漫顶是最主要的失事模式,其次是大坝结构的破坏、管理不当、地震等引发的失事模式<sup>[14]</sup>。其中洪水和地震是引发失事的两大自然风险源。近年来,随着流域梯级水电的高速开发,其遭受自然灾害的威胁也越来越严重。暴雨洪水和强地震使得梯级水库的荷载激增,导致大坝失稳和变形;与此同时,上游溃坝洪水也会

使得下游梯级水库荷载激增乃至在本级水库出现漫顶洪水,进而导致本级水工建筑物失稳、变形及破坏。因此,本文结合专家经验调查法,将超标洪水、上游溃坝洪水和强地震确定为水库漫坝的关键风险因素,且考虑到三种因素单独、组合作用下均有可能诱发梯级水库群发生漫顶失效,故在不考虑其他工程、人为风险源,并假设漫顶即失效的前提下,建立了三者单独、组合作用下的单库、梯级系统漫坝BNRA模型,如图2和3所示。

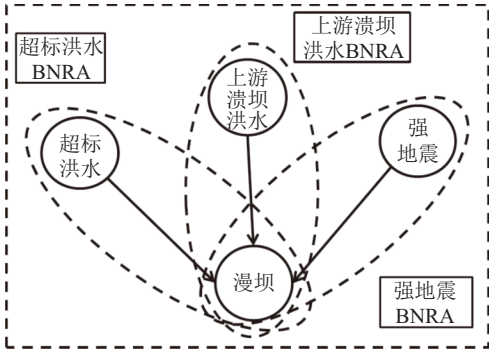


图 2 单库BNRA

Fig. 2 BNRA model for a single reservoir

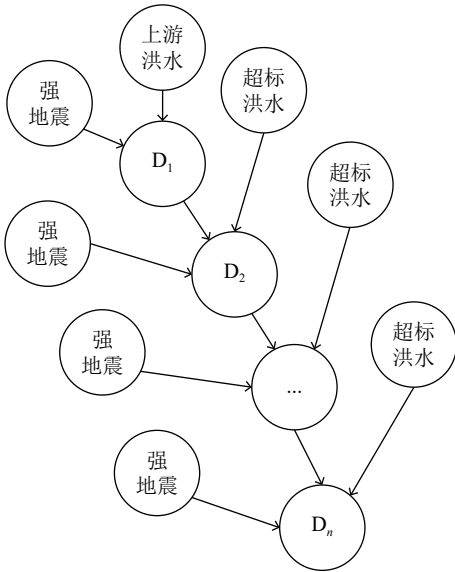


图 3 梯级水库群BNRA

Fig. 3 BNRA model for cascade reservoirs

图2包含了单一、组合风险作用下的BNRA模型,可根据实际问题选用。图3中,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\dots$ 、 $D_n$ 表示梯级水库群系统中的大坝单元,脚标 $n$ 代表实际问题中的梯级数量。

### 1.3 梯级水库群贝叶斯风险网络的量化

为了量化风险分析结果,需针对上述BNRA模型中各风险源发生的先验概率、漫坝条件概率和漫坝概率分别进行计算,以下依次简述各模型的计算推理方法。

1) 超标洪水下单库漫坝BNRA模型,如图4所示,其中超标洪水的定义为:入库洪水洪峰流量大于水库校核洪峰流量。 $P(F)$ 、 $P(O)$ 、 $P(O|F)$ 分别表示超标洪水发生的先验概率、超标洪水导致的大坝漫顶概率、超标洪水作用下的漫坝条件概率。

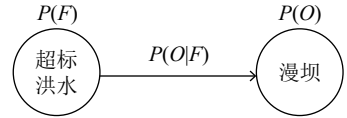


图 4 超标洪水作用下单库BNRA

Fig. 4 BNRA model for a single reservoir under extreme flood

$P(F)$ 采用水文统计学方法确定。 $P(O|F)$ 的确定则是先根据实测洪峰系列的统计参数,采用蒙特卡洛(MC)方法进行 $N$ 次随机模拟,生成 $N$ 个洪峰流量数据,再根据所选的典型入库洪水过程线放大出 $N$ 条入库洪水过程线,结合水库的库容曲线、泄流曲线、调度规则进行调洪演算,得到 $N$ 个坝前最高水位,统计其中超过坝高的个数 $m$ ,则有 $P(O|F)=m/N$ ,  $P(O)=P(F) \cdot P(O|F)$ 。

2) 上游溃坝洪水与区间超标洪水叠加作用下单库漫坝BNRA模型,如图5所示。当上游水库发生溃坝时,溃坝洪水和区间洪水有可能同时作用于下游水库,其叠加效应将极大增加下游水库的漫坝风险。两种洪水发生的先验概率分别用 $P(U)$ 、 $P(F)$ 表示;其作用下的漫坝条件概率分别用 $P(O|U)$ 、 $P(O|F)$ 表示。

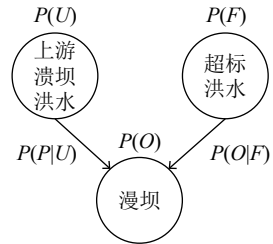


图 5 上游溃坝洪水与区间超标洪水叠加作用下单库BNRA

Fig. 5 BNRA model for a single reservoir under compound action of upstream dam-break flood and interval extreme flood

$P(U)$ 仍用水文统计学方法进行计算; $P(F)$ 、 $P(O|F)$ 的确定方法同前。漫坝概率 $P(O)=P(U) \cdot P(O|U)+P(F) \cdot P(O|F)$ 。 $P(O|U)$ 的确定按如下步骤进行:

假设上游水库瞬时全溃,用谢任之经验公式(4)计算坝址断面最大流量 $Q_m$  ( $m^3/s$ ),即上游溃坝洪水的洪峰流量,并据此推求溃坝洪水过程线,其形状与 $Q_m$ 、溃坝前的水库蓄水量 $W$ 及溃坝时的入库流量 $Q_0$ 有关,通常采用如图6所示的4次抛物线来概化推求, $T$ 为溃坝库容泄空时间, $t$ 为任一时刻<sup>[15]</sup>。式(4)中, $\lambda$ 为流量参数; $B$ 为溃坝时的溃口宽度, $m$ ;  $g$ 为重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $H_0$ 为溃坝前上游水深,  $m$ 。

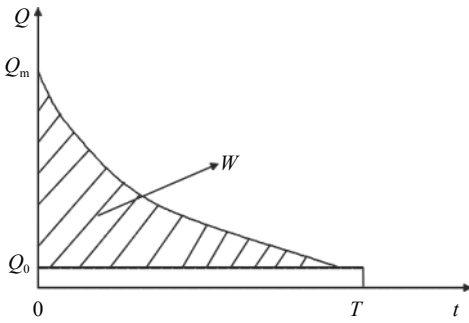


图6 溃坝坝址处流量过程线概化图

Fig. 6 Sketch map of the dam-break flood hydrograph at the dam site

$$Q_m = \lambda B \sqrt{g} H_0^{1.5} \quad (4)$$

利用水量平衡原理与河段中的水量蓄泄关系,将河段内上断面的入流过程(上游溃坝洪水)经马斯京根法演算成下断面的出流过程(下游水库的入库洪水)。根据溃坝洪峰系列的统计参数进行 $N$ 次随机模拟,根据入库溃坝洪水过程,选取典型洪水过程线进行放大,得到 $N$ 条入库洪水过程线,通过调洪演算,得到 $N$ 个坝前最高水位,统计其中超过坝高的个数 $m$ ,则有 $P(O|U) = m/N$ 。

3) 强地震下单库漫坝BNRA模型,如图7所示。 $P(E)$ 、 $P(O|E)$ 分别表示强地震发生的先验概率、强地震作用下的漫坝条件概率,在本文中均参照文献[16]中所述方法来确定。漫坝概率 $P(O) = P(E) \cdot P(O|E)$ 。

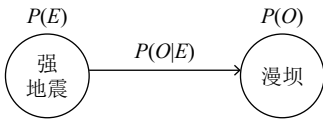


图7 强地震作用下单库BNRA

Fig. 7 BNRA model for a single reservoir under strong earthquake

4) 超标洪水和强地震组合作用下的单库漫坝BNRA模型,如图8所示。漫坝概率 $P(O) = P(F) \cdot P(O|F) + P(E) \cdot P(O|E)$ ,式中各项的确定方法上文均已提及,此处不再赘述。

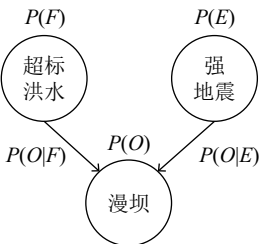


图8 超标洪水和强地震组合作用下单库BNRA

Fig. 8 BNRA model for a single reservoir under compound action of extreme flood and strong earthquake

5) 组合风险下双库连溃BNRA模型,如图9所示。设 $D_1$ 、 $D_2$ 为相邻的上下游水库大坝, $D_1$ 在超标洪水、强地震作用下一旦漫坝,会有大量的溃坝洪水泄向下游,此时 $D_1$ 对 $D_2$ 的漫坝影响风险因子被概化为上游溃坝洪水节点,与区间洪水、强地震节点一起与 $D_2$ 漫坝节点形成因果关系,使得组合风险下双库连溃的BNRA结构大为简化,方便概率的推理和计算; $D_1$ 漫坝风险概率即为 $D_2$ 的上游溃坝洪水发生的先验概率,即 $P(O_1) = P(U_2)$ 。同理,对组合风险下梯级水库群的BNRA结构也可进行类似的简化。

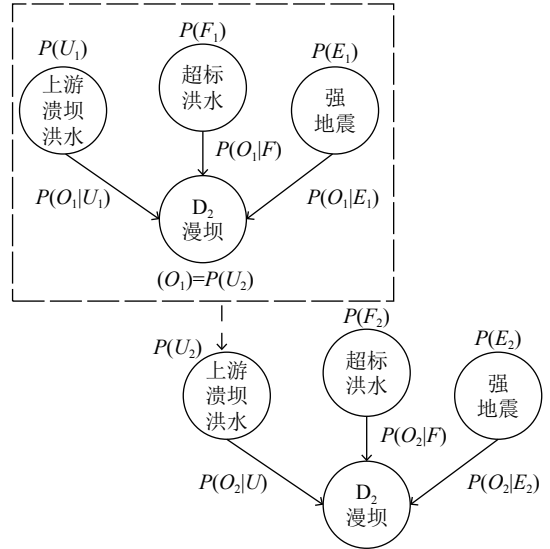


图9 组合风险下双库连溃BNRA图

Fig. 9 BNRA model of successive dam breaking for two cascade reservoirs under compound risk

## 2 大渡河流域概况

### 2.1 自然地理条件

大渡河位于中国西南部,是长江上游岷江水系最大的支流。干流全长1 062 km,全流域集水面积为77 400 km<sup>2</sup>(不含青衣江),河口多年平均流量1 500 m<sup>3</sup>/s,年径流量470 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

流域气候与地质环境复杂,是全球气候变化的敏感区和主要地质活动区,且覆盖层深厚;同时,流域干流规划中推荐以下尔呷、双江口、猴子岩、长河坝、大岗山、瀑布沟为主要梯级格局的22级梯级水库开发方案,其中超过100 m的土石坝共有17座,将是超高土石坝群的集中分布区。

### 2.2 气象水文

流域形状狭长,气候差异很大。根据河道特征及降雨特性,河段可划分为以泸定以上为上游,泸定至铜街子为中游,铜街子以下为下游。上游属川西高原气候区,寒冷干燥,年平均气温<6℃,年降雨量700 mm左右。中游属亚热带湿润气候区,四季分明,河谷地



区年平均气温为13~18℃,年降雨量在1 000 mm左右;中游西部及南部高山地带年降雨量可达1 400~1 700 mm<sup>[17]</sup>。下游年均气温17℃左右,多年平均降雨量可达1 300 mm左右。暴雨是形成大渡河流域洪水的主要来源。

2.3 地震

流域地质构造复杂,地震频繁发生,截止2013年12月31日,流域范围内及周边有确切记载面波震级大于4.5级的地震有640余次,其中最大震级达到7.5级,发生于康定—磨西之间,流域内强地震分布(震级大于4.5级)见图10。

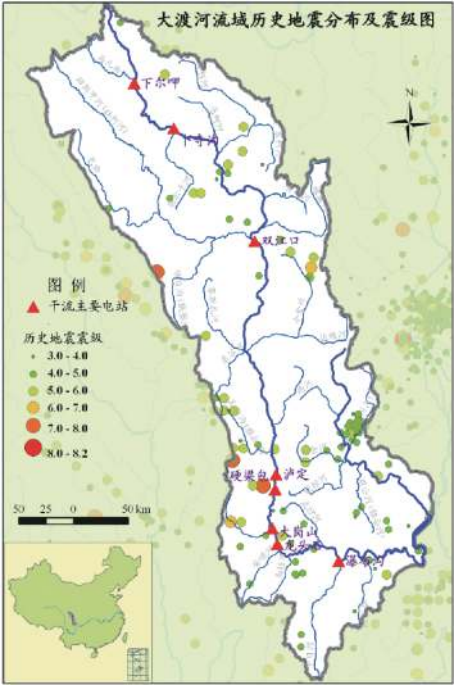


图 10 大渡河流域内历史地震分布及震级图

Fig. 10 Distribution and magnitudes of historical earthquakes in Dadu River Basin

任雪梅等<sup>[18]</sup>通过统计中国历史地震目录,发现大渡河流域自1931年以来强震活动水平较高。据调查分析,流域大多分布在地震烈度带Ⅶ度或者Ⅷ度区域,地震动峰值加速度相对较高,强震发生的可能性大、危害性高,对流域影响非常显著。流域中上游受鲜水河地震带影响最大,对坝址处影响较大的7级以上强震大多数分布其上;下游受安宁河地震带和雷波地震区影响明显,局部受龙门山地震带影响。

3 实际应用结果

选取大渡河流域干流梯级系统中两个相邻的梯级—猴子岩(D<sub>1</sub>)和长河坝(D<sub>2</sub>)为例进行研究,图11<sup>[19]</sup>、12<sup>[20]</sup>为两库大坝上下游概貌。二者均位于四川省康定县境内,是大渡河干流水电梯级开发的第9、10级,挡水建筑物分别为混凝土面板堆石坝、砾石土心墙堆石坝,坝址以上流域面积分别为54 036、55 880 km<sup>2</sup>,其特征值见表1<sup>[21]</sup>。



(a) 上游概貌



(b) 下游概貌

图 11 猴子岩水库概貌

Fig. 11 Houziyan reservoir profile



图 12 长河坝水库概貌

Fig. 12 Changheba reservoir profile

表 1 梯级水库的特征值

Tab. 1 Eigenvalues of cascade reservoirs

| 水库  | 库容/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 坝高/m  | 工程等级 | 风险标准               | 校核洪水标准 | 校核洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 地震基本烈度/度 |
|-----|--------------------------------------|-------|------|--------------------|--------|-------------------------------------------|----------|
| 猴子岩 | 7.00                                 | 233.5 | 特2   | 5×10 <sup>-8</sup> | PMF    | 9 940                                     | Ⅷ        |
| 长河坝 | 10.75                                | 238   | 特2   | 5×10 <sup>-8</sup> | PMF    | 10 400                                    | Ⅶ        |

应用梯级水库群BNRA法对 $D_1$ 、 $D_2$ 进行超标洪水、强地震、上游溃坝洪水风险源单独、组合作用下的单库漫坝、双库连溃(假设 $D_1$ 在正常蓄水位条件下发生瞬时全溃)风险分析,构建如图13所示BNRA结构,风险分析结果见表2。为便于与文献[21]中提出的风险标准进行对比,表2中所列概率值均为考虑100年设计基准年的年计概率。

从表2中所示量级来看,风险源单独、组合作用

下的梯级水库群的漫坝风险都是较小的,其中猴子岩的上游溃坝洪水所致的漫坝风险量级最小,这是因为猴子岩上游水库为双江口,它是大渡河流域干流的控制性梯级之一,其一旦溃决,梯级系统整体失效,将造成不可估量的社会经济损失,因此其规划设计标准必须保证其安全性,使其能够分担和消纳上游水库的风险,起到阻断风险的作用,由此保证了其溃坝概率非常低。

表 2 BNRA风险分析结果

Tab. 2 Risk analysis results of BNRA models

| 水库  | 超标洪水漫坝概率/ $10^{-8}$ | 上游溃坝洪水漫坝概率/ $10^{-8}$ | 强地震漫坝概率/ $10^{-8}$ | 漫坝概率/ $10^{-8}$ | 风险标准/ $10^{-8}$ | 梯级状态 |
|-----|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------|
| 猴子岩 | 21.5                | 0.7                   | 14.66              | 41.4            | 5               | 薄弱   |
| 长河坝 | 1.00                | 2.63                  | 16.53              | 6.04            | 5               | 薄弱   |

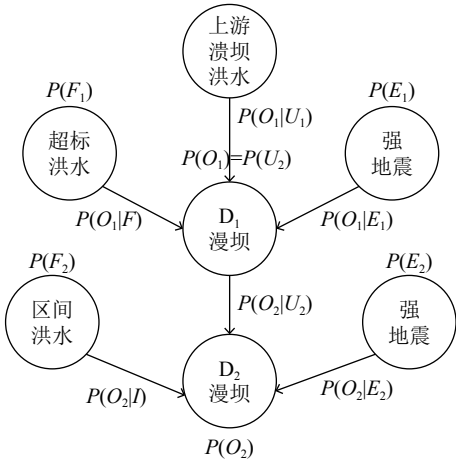


图 13 猴子岩-长河坝BNRA

Fig. 13 BNRA of  $D_1$ - $D_2$  cascade reservoirs

结合表2中结果和文献[21]中提出的特2级土石坝风险防控标准可知:猴子岩和长河坝水库均为薄弱梯级,即梯级水库群系统中的触发风险源,应作为系统风险防控措施的重点针对梯级。为了更直观地体现不同风险源的影响,图14给出了风险源概率比例图,从图中可以看出:对猴子岩、长河坝的漫坝风险起主导作用的风险源分别是超标洪水和强地震,这将作为风险措施采取和执行的简要指引。

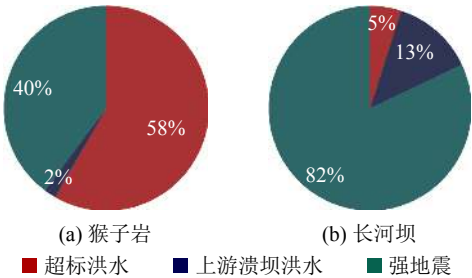


图 14 水库单一风险源概率比

Fig. 14 Probability ratio of single action of risk sources

4 结 论

梯级水库群的开发,不仅对系统工程的规划设计安全标准和风险防控提出了新要求,在与之对应的风险分析领域也亟需新举措。本文从自然灾害入手,从梯级单元-库群系统角度出发,探讨了如何基于BN理论建超标洪水、强地震、上游溃坝洪水等自然风险源单独、组合作用下的单库漫坝、双库连溃BNRA模型,并确定网络结构中各节点、有向弧的先验概率、条件概率。在此基础上,以大渡河干流规划梯级中的猴子岩、长河坝为应用实例,证明了BNRA模型在梯级水库群风险分析中的有效性。结果表明,BN用于风险分析时能够直观清晰地反映风险源之间的关联性,并据此及时掌握风险源单独或组合作用下的梯级水库群风险变化并制定相应的风险决策。

本文的风险分析过程仅考虑作用在梯级水库群上的自然风险源,而实际工程还面临工程风险源、人为风险源,基于贝叶斯网络的相关特性,本文提出的BNRA模型可根据所研究工程的实际增加相应的节点,以解决更复杂的风险问题,相关内容将另行行文讨论。

参考文献:

[1] Cao Bo,Kang Ling,Tan Debao,et al.A comparative study of the rapid of downstream flood risk induced by dammed lakes[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2015,40(3):333-340.[曹波,康玲,谭德宝,等.地震诱发堰塞湖下游淹没风险评估方法对比研究[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2015,40(3):333-340.]

[2] Cao Peng,Han Yongshun,Chen Xiaoping.Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan Earth-

- quake[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(3):35–42.[崔鹏,韩用顺,陈晓清.汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(3):35–42.]
- [3] Ma Guodong. Risk analysis of cascade reservoir overtopping under the conditions of extreme precipitation[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2015.[马国栋.极端降水条件下梯级水库漫坝风险分析[D].宜昌:三峡大学,2015.]
- [4] Xu Zhiyong. Optimal decision of dams risk based on Bayesian network[D]. Nanjing: Hohai University, 2008.[徐智勇.基于贝叶斯网络的大坝(群)风险决策优化[D].南京:河海大学,2008.]
- [5] Xu Y, Zhang L M, Jia J S. Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part II: Diagnosis of a specific distressed dam[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(11): 1645–1657.
- [6] Zhang L M, Xu Y, Jia J S, et al. Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part I: Global-level characteristics based on a dam distress database[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(11): 1630–1644.
- [7] Zhou Jianfang, Zhang Xunwei, Tang Chunyan. Dam risk analysis of Shaheji Reservoir based on Bayesian network[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2012, 40(3): 287–293.[周建方,张迅伟,唐椿炎.基于贝叶斯网络的沙河集水库大坝风险分析[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2012,40(3):287–293.]
- [8] Feng Geng, Jiang Yuhong, Fan Lu, et al. Earth dam risk analysis based on FTA and BN[J]. *Water Power*, 2013, 39(4): 34–36.[冯庚,蒋雨宏,范路,等.基于事故树分析与贝叶斯网络的土石坝风险分析[J].*水力发电*,2013,39(4):34–36.]
- [9] Liao Jingxia. Risk evaluation research of embankment dam based on the event tree and Bayesian network methods [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2013.[廖井霞.基于事件树和贝叶斯网络法的土石坝风险评价研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.]
- [10] Wang Gang, Ma Zhenyue, Qin Jingjing, et al. Risk assessment method of earth rock-fill dam break using multi-state and fuzzy basic events[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(8): 95–104.[王刚,马震岳,秦净净,等.基于多态和模糊事件的土石坝溃决风险评估[J].*水力发电学报*,2016,35(8):95–104.]
- [11] Cheng Guangsheng, Yang Yuping. Dam-break risk pre-warning based on Bayesian networks [J]. *Environmental engineering*, 2017, 35(Supp2): 664–668.[程光生,阳雨平.基于贝叶斯网络的尾矿库溃坝风险预警研究[J].*环境工程*,2017,35(增刊2):664–668.]
- [12] Bayes T. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances[J]. *Philosophical Transactions*, 1763, 53: 370–418.
- [13] Li Dianqing, Yan Lili, Shao Dongguo. Reliability evaluation of earth-rock dams using Bayesian network[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(6): 24–29.[李典庆,鄢丽丽,邵东国.基于贝叶斯网络的土石坝可靠性分析[J].*武汉大学学报*,2007,40(6):24–29.]
- [14] Yan Lei. Study on operation safety risk analysis method of dam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.[严磊.大坝运行安全风险分析方法研究[D].天津:天津大学,2011.]
- [15] Gao Siru. The disaster evaluation system of dam-break flood and the research of dam-dam disasters chain for seismic damage prediction [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2011.[高思如.震害预测中强震溃坝洪水灾害分析评估系统与坝-坝灾害链研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2011.]
- [16] Lei Jiancheng. The seismic hazard assessment for cascade hydropower station system [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2011.[雷建成.梯级电站系统的地震危险性评价方法[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2011.]
- [17] Ba Renji, Wang Li, Zheng Wanmo, et al. Characteristics and distribution of the geology disasters of the Dadu River in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(5): 529–537.[巴仁基,王丽,郑万模,等.大渡河流域地质灾害特征与分布规律[J].*成都理工大学学报(自然科学版)*,2011,38(5):529–537.]
- [18] Ren Xuemei, Gao Mengtan, Yang Yong, et al. Seismic activity in Dadu River Area[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2008, 3(2): 182–188.[任雪梅,高孟潭,杨勇,等.大渡河流域地震活动特征[J].*震灾防御技术*,2008,3(2):182–188.]



[19] 崔如,张轶超,张志广,等.四川省大渡河猴子岩水电站蓄水阶段环境保护验收调查报告[R].北京:中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,2016.

[20] 中国水力发电工程学会.四川大渡河长河坝水电站枢纽工程顺利通过蓄水安全鉴定[EB/OL].(2017-03-19) [2018-02-28].<http://www.sohu.com/a/129361077-464105.html>.

[21] Zhou Jianping,Wang Hao,Chen Zuyu,et al.Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts.Part I:Fundamentals and criteria[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(5):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[J].水利学报,2015,46(5):505-514.]



林鹏智,美国康奈尔大学博士,四川大学“长江学者”特聘教授,著名计算流体力学学者,国家杰出青年科学基金获得者,水力学与山区河流开发保护国家重点实验室副主任。国家973项目“梯级水库群风险孕育机制与动态风险评价”课题负责人,国家自然科学基金面上项目“地震涌浪的

产生与传播机理及其对土石坝安全影响的研究”“海岸植

物消浪机理与减低波浪冲高的试验”等负责人;国际海洋工程期刊《Applied Ocean Research》(应用海洋研究)主编,《Journal of Hydraulic Engineering》(水利工程期刊)(美国土木工程师协会会刊),《Journal of Hydro-environment Research》(水利环境研究期刊)(国际水利环境研究协会会刊)以及《Journal of Ocean Engineering and Marine Energy》(海洋工程与海洋能源期刊)副主编;《Journal of Earthquake and Tsunami》(地震与海啸期刊),《Coastal Engineering》(海岸工程),《Water Science and Engineering》(水科学与工程),《Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics》(计算流体力学工程应用),《工程科学与技术》、《水利水电科技进步》以及《南水北调与水利科技》等期刊编委。长期从事波浪理论及流体力学研究,培养研究生30余名,撰写了《Numerical Modeling of Water Waves》(水波数值模拟)英文专著(Taylor & Francis Co.出版),发表SCI学术论文70余篇,SCI引用超过3 000次,谷歌学术Hi指数32,2014—2017年连续登上爱思唯尔中国高被引学者榜单。1998年发表的破碎波数值模拟的论文是一篇重要的学术论文,开辟了非恒定自由面紊流模拟的新方法,单篇论文被引用863次(谷歌学术)。入选四川省百人计划,先后获得教育部自然科学一等奖,广西自然科学奖二等奖,长江航道局科技进步二等奖,中国石油和化工自动化行业优秀科技论文奖三等奖。

(编辑 张 琼)

引用格式: Lin Pengzhi,Chen Yu.Risk analysis of dam overtopping for cascade reservoirs based on bayesian network[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(3):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[J].工程科学与技术,2018,50(3):46-53.]