

# 我国水库大坝风险评价与决策研究

彭雪辉<sup>1</sup>, 盛金保<sup>1</sup>, 李雷<sup>1</sup>, 张士辰<sup>1</sup>, 刘来红<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210032)

**摘要:** 对水库大坝风险进行了分类和分区, 分析了成文法和不成文法两类不同法律体系下的风险标准特点, 提出将我国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。在基于风险评价一般原则基础上, 分析了ALARP原则在不成文法国家及我国的内涵, 阐述了成本效益法和失衡法在ALARP原则中的作用及使用方法, 提出了水库大坝风险决策原则, 为我国水库大坝风险标准的制定提供了理论依据。

**关键词:** 大坝风险; 风险分类和分区; 风险评价; ALARP原则; 风险决策

**中图分类号:** TV698

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2014)03-0049-06

我国现有水库大坝8.7万余座<sup>[1]</sup>, 是当今拥有水库大坝数量最多的国家, 也是病险水库大坝数量最多的国家。传统的大坝安全管理是以工程安全为目标, 按工程是否存在安全隐患来决定是否需要工程进行除险。而大坝风险管理以降低大坝风险为目标, 按风险是否可以接受来决定是否需要工程进行除险。随着经济社会进一步发展, 大坝风险已经成为全社会关注的焦点, 风险管理理念已经受到我国各级水行政主管部门的高度关注。大坝风险管理的核心是如何对大坝风险进行评估和处理, 即大坝风险评价与决策问题。

本文在对水库大坝进行分类和分区的基础上, 分析不同区域风险之间的区别和联系, 研究两类不同法律体系国家中风险标准的差异, 分析风险评价一般原则及ALARP原则内涵和表现形式, 为我国风险标准的制定及风险决策提供理论依据。

## 1 水库大坝风险分类

风险是指人们从事的某项活动中, 在一定时间内给人类带来的危害<sup>[2]</sup>。这种危害不仅取决于事件发生的概率, 而且与事件发生后造成的后果大小有关, 所以通常把风险定义为风险事件发生的概率和事件后果的乘积。

水库大坝的风险, 是以水库大坝存在的安全隐患可能对下游经济发展、人民生命财产造成的损失来衡量, 按照澳大利亚大坝委员会ANCOLD及国际大坝委员会ICOLD的定义<sup>[3-4]</sup>, 风险是指对生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性的度量, 是溃坝可能性和产生后果的乘积。

根据上述定义, 水库大坝风险可根据溃坝后果分类。溃坝后果主要包括生命损失、经济损失、社会与环境影响, 大坝风险可相应分为生命风险、经济风险、社会与环境风险等3类, 生命风险又分为个体生命风险和群体生命风险。

收稿日期: 2013-11-19

基金项目: 十一五国家科技支撑计划项目(2006BAC14B07); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201051)

作者简介: 彭雪辉(1971-), 男, 湖南双峰人, 高级工程师, 博士, 主要从事大坝安全与风险评估研究。

E-mail: xhpeng@nhri.cn

## 2 水库大坝风险分区

### 2.1 国外风险分区分析

根据英国健康和安委会 HSE 2001 年提出的风险的容忍性框架<sup>[5]</sup>(见图 1), HSE 将风险分为不可接受风险、可容忍风险和广泛可接受风险。

不可接受风险位于三角形顶部, 这个区域的风险是无论如何都不能接受的, 必须采取强制性的措施把风险降低到不可接受风险区域以下。广泛可接受风险位于三角形的底部, 这个区域的风险是完全可以控制的, 一般情况下不需要采取任何措施来降低风险。可容忍风险位于不可接受风险区和广泛可接受风险区之间, 这个区域的风险是人们为了取得某种效益和利润而准备容忍的。当然, 这种容忍是有条件的, 即需要满足以下 4 个条件: ①取得某种净收益; ②

风险可控; ③定期复核, 采用传统的大坝安全鉴定办法复核大坝是否安全, 包括大坝安全监测, 定期巡视检查, 定期大坝安全鉴定; ④降低风险直到满足 ALARP 原则, 通过工程和非工程措施, 包括提高大坝安全管理水平, 把大坝风险降低到满足 ALARP 原则为止。

美国 Utah 州立大学 D. S. Bowles 教授认为在不可接受风险区之下的风险不一定是可容忍风险, 如果这一风险不满足可容忍风险的所有 4 个条件, 那么这一风险是不可容忍风险。也就是说, 不可接受风险的对立面包括 3 种可能性: 不可容忍风险, 可容忍风险和广泛可接受风险。因此 Bowles 建议将图 1 中的可容忍风险区分为不可容忍风险和可容忍风险 2 个区<sup>[6]</sup>。

可见, 风险有 4 种, 分别为可接受风险、可容忍风险、不可容忍风险和不可接受风险。采用“目标线”区分可接受风险和可容忍风险, “容许线”区分可容忍风险和不可容忍风险, “不可接受线”区分不可容忍风险和不可接受风险。但是, 这 4 种风险在各国应用中有点混乱。如同是不成文法国家的澳大利亚和英国, 并没有采纳“不可接受线”这一概念, 而是采纳“容许线”这一概念, 但是澳大利亚大坝委员会 ANCOLD 在容许线之上应用的是“不可容忍风险”这一概念<sup>[3]</sup>, 而英国健康和安委会 HSE 在容许线之上应用的是“不可接受风险”这一概念<sup>[5]</sup>。

### 2.2 两类不同法律体系国家中风险标准的差异

目前, 世界各国沿用的法律体系基本上可分为两类: 大陆法系和英美法系<sup>[7]</sup>。大陆法系为成文法, 欧洲大陆上的法、德、意、荷兰、西班牙、葡萄牙等国和拉丁美洲、亚洲的许多国家(包括中国内地)的法律都属于大陆法系。英美法系为不成文法, 英、美、澳大利亚、新西兰、中国香港等国家和地区的法律制度均属于英美法系。

B. J. M. Ale<sup>[8]</sup>对英国和荷兰的风险法规进行了比较: “英国和荷兰采用的风险标准看起来非常相似。两国的个人容许风险都取上限, 生命风险都采用 F-N 曲线。甚至两国的风险值差别也不大。但是, 两国风险的含意差别很大。在荷兰, 风险标准是讨论的终点; 而在英国, 风险标准是讨论的起点”。

也就是说, 在荷兰等成文法国家中, 大坝业主减少大坝风险的目的仅仅是为了满足风险目标线, 并使上级主管部门相信他确实这样做了, 即大坝业主确保在他的法律责任范围内降低风险就可以了。

相比之下, 在英国等不成文法国家中, 容许线是大坝业主必须满足的一个必要但非充分条件, 即大坝业主必须满足容许线, 但仅仅满足容许线是不够的, 还必须满足 ALARP 原则。因此, 大坝业主必须使风险水平低于容许线, 并继续降低风险直至满足 ALARP。可见, 在不成文法体系中, 不存在管理部门提供对未来绝对保护的法规, 而在成文法体系中这样的保护原则上是存在的。

### 2.3 我国风险区域的划分

在欧美不成文法国家, 风险区域的划分仅仅是将风险以不可接受线(或容许线)划分为不可接受风险区

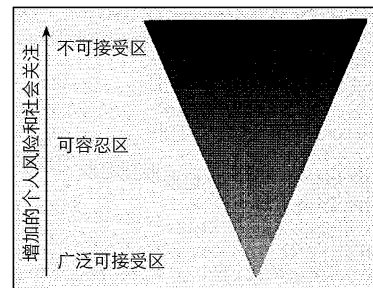


图 1 风险的容忍性框架

Fig. 1 Framework for the tolerability of risk

(或不可容忍风险区)和依据 ALARP 原则需要不断降低风险的区域。根据这一原则,在成文法国家规定的目标线以下的风险,依然需要降低风险,这需要有强大的经济能力作为支撑。

我国是发展中国家,经济实力有限,如果按不成文法国家的风险区域划分,经济实力难以支撑。作为成文法国家,构建风险区域,一方面需要满足成文法法律体系的要求,另一方面也要和世界接轨,并考虑自身的实际情况。

在我国,风险区域的划分可以兼顾这两种法律体系。从大坝风险决策的角度考虑,大坝风险处于可接受风险区域时,是不需要降低大坝风险的,即大坝是不需要加固的;大坝风险处于不可容忍风险区域和不可接受风险区域时,必须降低大坝风险,可以采取加固大坝或转移下游风险人口等方式来降低大坝风险;大坝风险处于可容忍风险区域时,需根据我国的 ALARP 评价标准来决策是否需要降低大坝风险。因此,从大坝风险决策的角度考虑,区分不可容忍风险和不可接受风险是没有实际意义的。故可将这两种风险归为一类,统称为不可接受风险。这样,我国大坝风险和 HSE 划分是一样的,分为可接受风险、可容忍风险和不可接受风险,但和 HSE 的内涵是不一样的,我国的不可接受风险包含了不可容忍风险。仍用“容许线”区分我国大坝不可接受风险和可容忍风险,“目标线”区分可容忍风险和可接受风险。

在我国,《国家突发公共事件总体应急预案》将预警级别分为四级,为与该预警级别相衔接,将高于容许线一个数量级以上的风险定义为极高风险,容许线以上、极高风险以下的风险仍定义为不可接受风险,并用一条虚线来区分极高风险和不可接受风险,这条虚线命名为高风险线。

### 3 风险评价原则

#### 3.1 一般原则

制订风险标准需要考虑公平原则和效率原则<sup>[4]</sup>。M. G. Morgan 和 M. Henrion 把风险标准分为 3 类<sup>[9]</sup>:基于权利的标准、基于效用的标准和基于技术的标准。英国健康和安全管理委员会 HSE(2001)把它们作为纯理论标准,并把基于权利的标准重新命名为基于公平的标准。国际大坝委员会 ICOLD(2005)采纳了这一分类方法<sup>[4]</sup>。

(1)基于公平标准。基于公平标准的前提是所有个体无条件拥有受到某种程度保护的权利。实际上,这种被保护权利可以通过设定一个最高风险值来确定,所有个体都不会暴露于比这设定风险值更高的风险区。如果通过风险评估计算得到的风险超过设定最高风险值,而不采取措施降低这一风险的话,这一风险是无论如何都不可接受的。

(2)基于效用标准。基于效用标准包含成本效益的比较,成本是指采取工程和非工程措施的费用,效益是指采取降低风险措施后的增量效益。成本和效益都采用货币来表示,当投入(即成本)和产出(即效益)之间失衡到一定程度时,可不采取降低风险的措施。

(3)基于技术标准。任何情况下都应使用最先进的管理措施控制风险,使风险控制在令人满意的水平,包括使用新技术和先进管理方法等。

实用风险标准一般都是以上几种纯理论标准的组合。在我国,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,分别用目标线、容许线和高风险线来区分。极高风险区是相对固定的,根据不可接受风险区来确定。在不可接受风险区可采用基于公平标准,通过设定一个最高风险值,超过这一风险值的风险是不可接受的。在可容忍风险区,采用基于效用标准,根据我国的 ALARP 评价标准来决策是否需要降低大坝风险。在可接受风险区,采用基于公平标准设定一个风险值,低于这一风险值的风险是可接受的。不可接受风险区和可接受风险区即容许线和目标线可通过我国已溃坝资料统计分析确定,详见作者另一篇论文“我国水库大坝风险标准制定研究”。

#### 3.2 ALARP 原则及评价方法

ALARP 原则即在合理、可行前提下使风险尽可能降低原则,有两层含义<sup>[5]</sup>,一是当无法降低风险,或降

低风险的费用与取得的效益严重失衡时,无需降低风险;二是当无法进一步降低风险,或需采取的措施与风险的降低在时间、难度和付出的努力上严重失衡时,剩余风险无需降低。ALARP 原则适用范围在不成文法国家中为容许线以下的风险,在我国则为位于可容忍风险区域的风险。

ALARP 评价方法有成本效益法或失衡法<sup>[10]</sup>。

**3.2.1 成本效益法** 成本效益法是通过计算成本效益比来确定可容忍风险等级,从而决定是否需要采取措施降低风险。成本效益比  $R_L$  可按式(1)和(2)计算。

$$R_L = \begin{cases} (c_1 - b_L)/r_L & , c_1 > b_L \\ 0 & , c_1 = b_L \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} c_1 = rc_2 \\ b_L = NV_L(P_b - P_a) \\ r_L = N(P_b - P_a) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c_1$  为每年为降低风险而采取措施所需要的成本(万元/年); $r$  为贴现率; $c_2$  为降低风险而采取措施所需投入(万元); $b_L$  为每年因采取措施降低生命风险而取得的效益(万元/年); $r_L$  为采取措施后每年降低的生命损失(人/年); $N$  为溃坝生命损失(人); $V_L$  为当时生命价值; $P_b$  为采取措施前溃坝概率; $P_a$  为采取措施后溃坝概率。

根据《生产安全事故报告和调查处理条例》<sup>[11]</sup>,1 人死亡事故相当于 300 多万元的直接经济损失事故,故成本效益比  $R_L$  可以 300 万元/人为分界线。成本效益比  $R_L$  的评价标准和相应决策见表 1。

表 1 成本效益比评价标准

Tab. 1 Evaluation criteria of cost effectiveness

成本效益比 $R_L$ (万元/人)	等级	决策
[0,300]	1	采取降低风险的措施是必要和合适的
(300,1 000]	2	采取降低风险的措施是比较必要和合适的
(1 000,10 000]	3	采取降低风险的措施基本上是不必要和不合适的
(10 000,∞)	4	采取降低风险的措施是不必要和不合适的

**3.2.2 失衡法** 失衡法是通过计算失衡系数来确定降低风险措施的失衡程度,从而决定是否需要采取该项措施来降低风险。失衡系数  $R$  可采用式(3)~(5)计算。

$$R = \begin{cases} (c_1 - b_L)/b_L & , c_1 > b_L \\ 0 & , c_1 = b_L \end{cases} \quad (3)$$

$$b_L = V_L \times N \times (P_b - P_a) \quad (4)$$

$$R = \frac{R_L}{V_L} \quad (5)$$

式中符号意义同式(1)和(2)。

根据《国务院关于进一步加强对企业安全生产工作的通知》<sup>[12]</sup>,从 2011 年 1 月 1 日起,对因生产安全事故造成的职工死亡,一次性工亡补助金标准调整为按全国上一年度城镇居民人均可支配收入的 20 倍。按 2009 年度全国平均城镇居民人均可支配收入 17 175 元的水平,全国平均一次性工亡补助金为 34.35 万元。加上同时实行的丧葬补助金和供养亲属抚恤金(按供养 2 位亲属测算),三项合计约为 61.8 万元。因此新的标准实施后,生命价值  $V_L$  可按 60 万元/人计算。则失衡系数  $R$  的评价标准和相应决策可用表 2 表示。

表2 失衡法评价标准

Tab.2 Evaluation criteria of disproportionality ratio

失衡系数 $R$	等级	决策
$[0, 5.0]$	1	采取降低风险的措施是必要和合适的
$(5.0 \sim 16.7]$	2	采取降低风险的措施是比较必要和合适的
$(16.7 \sim 167.0]$	3	采取降低风险的措施基本上是不必要和不合适的
$(167.0, \infty)$	4	采取降低风险的措施是不必要和不合适的

## 4 水库大坝风险决策

将大坝风险计算结果与大坝风险标准进行比较,评估风险是否极高、不可接受、可容忍或可接受,并作为大坝风险决策的依据。大坝风险决策原则如下:①当大坝风险位于极高风险区域时,应立即采取强制措施降低风险;②当大坝风险位于不可接受风险区域时,应尽快采取措施降低风险;③当大坝风险位于可容忍风险区域时,应根据 ALARP 原则确定是否需要进一步处理。ALARP 评价方法有成本效益法或失衡法,我国 ALARP 评价标准见表 1 或表 2。④当大坝风险位于可接受风险区域时,可不对风险进行处理。

若需对大坝风险进行处理,应综合工程措施和非工程措施对大坝风险进行处理,包括降低风险、转移风险、规避风险和保留风险。

采取工程措施与非工程措施对大坝风险进行处理后,尚应对风险处理效果进行后评估:①若剩余风险已经降至可接受风险区域,不应再对大坝风险进行处理;②若剩余风险位于可容忍风险区域,应按 ALARP 原则处理;③若剩余风险仍位于极高风险或不可接受风险区域,应继续采取措施降低大坝风险。

## 5 结 语

(1)根据溃坝后果将大坝风险分为生命风险、经济风险、社会与环境风险,其中生命风险又分为个体生命风险和群体生命风险。

(2)分析了成文法和不成文法两类不同法律体系下的风险标准特点,为我国风险标准的制定奠定了法律依据。

(3)提出将我国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,用目标线、容许线和高风险线区分。

(4)分析了进行风险决策的风险标准制定依据,提出在不同风险区采用不同的理论标准,在不可接受风险区采用基于公平标准,通过设定一个最高风险值,超过这一风险值的风险是不可接受的;在可容忍风险区,采用基于效用标准,根据我国的 ALARP 评价标准来决策是否需要降低大坝风险;在可接受风险区,采用基于公平标准设定一个风险值,低于这一风险值的风险是可接受的。

(5)分析了 ALARP 原则在不成文法国家及我国的内涵,阐述了成本效益法和失衡法在 ALARP 原则中的作用及使用方法。在不成文法国家,大坝业主必须使风险水平低于容许线,并继续降低风险直至满足 ALARP;在我国,对可容忍风险区域的风险应用 ALARP,决定是否需要进一步对可容忍风险采取工程和非工程措施。

(6)提出了水库大坝风险决策原则。当大坝风险位于极高风险区域时,应立即采取强制措施降低风险;当大坝风险位于不可接受风险区域时,应尽快采取措施降低风险;当大坝风险位于可容忍风险区域时,应根据我国 ALARP 评价标准确定是否需要进一步处理;当大坝风险位于可接受风险区域时,可不对风险进行处理。

### 参 考 文 献:

- [1] 《中国水利年鉴》编纂委员会. 中国水利年鉴 2010[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010: 436-438. (Compilation

- Committee of China Water Conservancy Yearbook. China water conservancy yearbook(2010) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010; 436-438. (in Chinese))
- [2] 余建星. 工程项目风险管理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2006. (SHE Jian-xing. Engineering project risk management [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2006. (in Chinese))
- [3] ANCOLD(Australian National Committee on Large Dams). Guidelines on risk assessment[R]. Sydney: ANCOLD, 2003.
- [4] ICOLD (International Commission on Large Dams). Risk assessment in dam safety management [R]. ICOLD bulletin 130, ICOLD, 2005.
- [5] HSE (Health and Safety Executive, United Kingdom). Reducing risks, protecting people[R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 2001.
- [6] BOWLES D S. Tolerable risk for dams; How safe is safe enough? [C]//Proceedings of USSD(United States Society on Dams) 27th Annual Conference. Philadelphia, PA(US), 2007.
- [7] 吴德春. 大陆法系和英美法系的比较研究[J]. 华人时刊, 2013(8): 145. (WU De-chun. Comparative study of continental law system and common law system[J]. Chinese Journal, 2013(8): 145. (in Chinese))
- [8] ALE B J M. Tolerable or acceptable: A comparison of risk regulation in the United Kingdom and in the Netherlands[J]. Risk Analysis, 2005, 25(2): 231-241.
- [9] MORGAN M G, HENRION M. Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis Cambridge[M]. New York: Cambridge University Press, 1990.
- [10] BOWLES D S. ALARP evaluation; using effectiveness and disproportionality to justify risk reduction[C]//ANCOLD 2003 Conference on Dams. 2003: 1-17.
- [11] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例[EB/OL]. [2013-10-15] [http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content\\_632082.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_632082.htm). (The PRC State Council. Byelaw governing reporting, investigation and handling of production safety accidents[EB/OL]. [2013-10-15] [http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content\\_632082.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_632082.htm). (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国国务院. 国务院关于进一步加强的企业安全生产工作的通知[EB/OL]. [2013-10-15]. [http://www.gov.cn/zwjk/2010-07/23/content\\_1662499.htm](http://www.gov.cn/zwjk/2010-07/23/content_1662499.htm). (The PRC State Council. State Council on further strengthening the work of safety in production [EB/OL]. [2013-10-15]. [http://www.gov.cn/zwjk/2010-07/23/content\\_1662499.htm](http://www.gov.cn/zwjk/2010-07/23/content_1662499.htm). (in Chinese))

## Dam risk evaluation and decision-making research of China

PENG Xue-hui<sup>1</sup>, SHENG Jin-bao<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, ZHANG Shi-chen<sup>1</sup>, LIU Lai-hong<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing Nari Group Corporation, Nanjing 210032, China)

**Abstract:** The classification and subregion of reservoir dam risk degree have been given in the study. By analyzing the features of the risk criteria in the civil code of law and the common law systems, it is suggested that the domestic dam risks can be classified into four regions: acceptable risk, tolerable risk, unacceptable risk and extremely high risk. Based on general principles of the risk evaluation, the implications of ALARP principle both in the countries with the common law and in our country are analyzed, and effects and applications of cost effectiveness method and disproportionality ratio method in ALARP principle are stated in this paper. Finally, the principles of dam risk decision-making are established on a scientific analysis base, which will provide a sound theoretical basis for further research on dam risk and the formulation of dam risk criteria in China.

**Key words:** dam risk; risk classification and subregion; risk evaluation; ALARP principle; risk decision-making