

大坝可接受风险标准及风险等级

岩土工程研究所 王玉杰、周兴波

1 学科方向

大坝风险学科是工程风险学与水利水电工程学的交叉学科,重点研究的对象是水库及梯级水库群对大坝下游生命和财产等造成的风险问题。从风险的定义出发,主要包括正常和非正常工况下大坝安全问题和溃坝损失,以及如何避免或降低生命损失两方面的问题。水库大坝数量的日益增多,加之老坝年久失修,如若管理不善,潜在的风险就会加大,成为重大的安全隐患。溃坝是发生概率低,破坏力度极大的小概率事件,如若大坝一旦遭到严重破坏而导致库水失控而下泄,对水库下游的生命财产造成的灾害损失将远远超出大坝自身的损失。同时,大坝安全性的提高需要大量的人力和财力的投入,过分的安全又会造成浪费。因此,大坝对下游潜在的安全问题并非单纯的安全问题,其实质是风险问题。

风险管理技术在土木水利工程的应用始于 20 世纪 60 年代,美国学者 Casagrande A. 提出,土木工程及其基础设计多种不确定性,应根据工程失事造成的损失大小来确定合适的设计安全度。1973 年美国土木工程协会(ASCE)发表采用风险分析方法对溢洪道设计进行评估的检查报告,由此,开启了水工建筑物风险分析的先河。1979 年美国颁布了联邦大坝安全导则,包含关于安全评价、大坝设计、坝址选择的风险分析。1991 年加拿大 BC Hydro 将风险分析方法引入大坝安全分析和评价中,以实现在确定水库大坝安全程度的基础上,采用最为经济的方法加固不安全的大坝。1994 年澳大利亚大坝委员会(ANCILD)颁布了《ANCILD 风险评估指南》,为大坝安全评估提供了依据,并不断对该指南进行修订。2000 年北京举办的第 20 届国际大坝会议第一次将大坝风险分析作为会议议题,标志着大坝风险分析与管理技术已经在世界范围内得到广泛的认可。此后,相关的研究在许多国家得到了迅速的发展。2005 年,国际大坝委员会发布了《大坝安全管理中的风险评价》,进一步推动了世界范围内大坝风险管理技术的推广与应用。

随着众多大坝的建成和老坝龄期的增长,大坝安全问题越来越凸显,每个大坝对下游潜在的安全问题的实质是风险问题,并非单纯的安全问题。已建和在建的水库大坝当中,每一个大坝对其下游的风险水平是不等的,每一个大坝下游区域的人和财产对风险的可接受程度和可容忍程度也是不同的,甚至同一座大坝在不同的阶段(施工期、正常运行期、非正常运行期)对下游区域的风险也是不同的。因此,大坝风险学科主要研究内容包括:(1)大坝可接受、可容忍风险标准

研究；(2) 大坝失效模式及失效概率研究；(3) 大坝风险损失的确定方法研究；(4) 大坝风险等级确定原理及方法研究；(5) 大坝风险分析技术及评价方法研究；(6) 高风险大坝风险防控理论及防控技术研究。通过以上内容的研究，针对不同风险等级的大坝，建立完善的大坝风险预警预案，提前制定针对性的风险控制措施，为决策者在紧急情况下采取避害措施提供科学依据，使得大坝更好的服务于人类社会和生态环境。

2 调研背景概述

本调研涉及近年来大坝风险学科国际国内权威学术期刊：Water Resources Research、Water Resources Management、Risk Analysis、Canadian Geotechnical Journal、Journal of Hazardous Materials、Structural Safety、Journal of Geotechnical Engineering、Journal of Hydraulic Engineering、Natural Hazards and Earth System Sciences、Natural Hazards and Earth System Science、水利学报、水力发电学报等；国内外相关规范：Guidelines on Risk Assessment (ANCOLD)、UK Health and Safety law、ICOLD EUROPEAN CLUB-Dam Legislations、Eurocode1、Eurocode7、大坝风险导则等；国际学术会议：The 23rd International conference on dam、The 35th International Conference on Water Conservancy Science 等国际会议；专业委员会报告和平台：Australian National Committee On Large Dam、International Commission on Large Dam、US Federal Emergency Management Agency、ASCE Technical Committee on Risk Assessment and Management、Federal Emergency Management Agency、Federal Energy Regulatory Committee、US Bureau of Reclamation 等机构研究报告也是信息来源的主要手段之一。根据相关论文的研究成果总结分析了当前国际大坝风险领域主要研究动向新的观点及理论研究、方法、技术和最新研究进展。

3 学科发展新动向和值得关注点

风险理论的发展，促使工程界的设计理念逐渐由“工程安全”向着“工程风险”转变，由“单一时期”向着“全生命周期”转变，由“单一工程”向着“流域系统工程”的转变。大坝安全分析和管理贯穿大坝全生命周期的整个动态管理过程，包括风险识别、风险分析、风险评价、风险决策和风险处置等内容，将大坝失效概率、溃坝后果、风险控制标准等有机结合起来综合考虑，可以较为科学地判断流域梯级水库的安全状态和群坝连溃的可能性，预测可能造成的生命损失和对社会造成的影响，将现有的工程加固财力用在风险最高的梯级，从而降低整个流域的风险水平，这是传统安全系数评价和管理方法所不能实现的。目前，学术界均认识到风险研究的重要性，但

在不同的应用领域, 风险的定义和评判标准也有所不同。由风险的客观存在性和不可抗拒性可知, 风险主要强调了其本身的不确定性和损失的不确定性, 而且风险是随着时间在动态的变化, 并非一个恒定值。在水利水电工程领域, 其风险是由其自身安全的不确定性所引起, 进而可能对下游淹没, 造成下游生命、财产、社会等巨大的损失。

3.1 水利水电工程可接受风险标准研究

由于风险具有不确定性, 在风险研究中, 有两个重要的指标, 即可接受风险和可容忍风险, 通过这两个指标, 对风险进行了界定。根据英国健康和安全管理委员会 (The Health and Safety Executive, HSE) 定义, 可接受风险是指为了工作和生活等目的, 任何承受风险影响的人在风险控制机制不变的条件下准备接受的风险。可容忍风险是为了取得某种利润或达到某种目的, 社会所能够忍受的风险, 这种风险在一定范围内不能忽略, 需要定期检查, 如果可以应该进一步减小这种风险 (HSE, 1988)。

3.1.1 可接受风险标准研究现状

国外对可接受风险标准的研究起步较早。20 世纪 60 年代, 美国科学家 Chauncey Starr 提出“多安全才安全”的问题, 引起了当时学术界对风险可接受性研究的重视, 并根据显示偏好法得出了不同风险情况下的社会可接受性 (Starr C., 1974)。到 70 年代, 风险领域的 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 准则首次在英国法律中采用, 该准则对于可接受风险的研究和合理降低风险措施的制定都具有重要意义 (UK, Health and Safety law Act 1974)。1984 年, 剑桥大学 Fischhoff 提出风险不是无条件的接受的, 可接受的风险即所获得的利益可以补偿因此而带来的风险, 也就是说可接受风险其实质是由决策产生的, 而非风险本身所具有 (Fischhoff B., 1984)。1988 年, 英国健康和安全管理委员会对可接受风险给出了明确的定义, 并通过对核电站风险调查, 他们建议主要工业灾害的典型个体可接受风险值取 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 次每年 (HSE, 1988)。1989 年, Reid 收集了美国、英国及澳大利亚等国家不同行业主动和被动承受风险者的可接受风险统计值, 据其统计结果发现自然灾害和一般风险如雷电、火车旅行的以年计的死亡概率不到 10^{-5} , 建筑、铁道等职业风险可达 10^{-4} , 危险运动如高空滑翔的风险高达 10^{-3} (Reid S G, 1989)。1993 年, Fell 主张对于被动风险接受者, 以年计的可接受风险值的应在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, 并提出了各行业可接受风险的确定方法如下式:

$$P_f = \frac{10^{-4}}{N_r} K_s N_d \quad (1)$$

式中： N_r 为受影响的人数量， N_d 为设计基准年限， K_s 为区域重要性指数，其取值按建筑物类型不同可取 0.005（大坝，人群聚居处）、0.05（办公室，商业，工业区）、0.5（桥梁）、5（塔，近海结构）(Fell R., 1994)。近年来，美国土木工程协会（ASCE）规定使用安全指标（Safe Index, SI）值作为风险可接受性准则，加拿大标准协会（CSA）规定水域海上石油对生命损失和环境污染的可接受风险为 $10^{-5}/a \sim 10^{-3}/a$ 。

在水电工程行业中，尤其是挡水大坝，美国、加拿大、澳大利亚、荷兰等国家在风险标准和风险分析方面的研究起步较早，澳大利亚等一些国家编制了相应的风险分析导则和行业规范。对于水利水电工程风险主要包括自身的失效概率和失效后的风险损失两方面，风险损失主要涉及生命损失风险、经济损失风险和环境影响风险。目前，国外大坝风险主要考虑生命风险和失效概率，通常以“ $F-N$ ”风险控制图的形式表述，其中 F 代表以年计的失效概率， N 代表受影响的人数。澳大利亚、荷兰、美国、加拿大、南非以及我国的香港，均制定了相应的风险控制图。澳大利亚大坝委员会、美国垦务局、加拿大哥伦比亚水电局所制定的 $F-N$ 曲线如图 3-1~图 3-3 所示（ANCOLD, 2003），南非针对于大坝制定的风险 $F-N$ 曲线如图 3-4 所示（Kreuzer H., 2000），荷兰水防治技术咨询委员会引入了个人意愿系数 β （数值为 0.01~10），对于主动和被动承受的风险分别作了设定，如图 3-5 所示。

国内对于风险管理及可接受风险标准的研究起步相对较晚，各个行业的研究成果差异性比较大，很多领域都还处在起步的阶段。罗云等人提出通过统计的方法得出个人风险的上下限值，针对于英美个人风险统计，得出将个人风险的上下限分别设为 10^{-3} 和 10^{-6} （罗云等，2004）。李雷、蔡跃波等人分析了我国大坝安全管理的三个阶段，认为风险理念已在我国得到广泛接受，风险管理技术也日益受到关注（李雷，蔡跃波，盛金保，2008）。姜树海给出了允许风险作为大坝防洪可接受风险的阈值范围，介绍了基于允许风险的大坝防洪标准确定方法（姜树海，1999）。马福恒在国外可接受风险标准的基础之上，建立了我国大坝的个人、社会、经济以及环境的可接受风险标准（马福恒，2006），有的建议直接采用了国外的标准，但国外的标准未必适合我国的实际情况，因此其可行性还需要进一步的探讨。杜效鹄，杨健等人，对我国水电站大坝溃坝生命风险标准进行了讨论，建议我国水电站大坝溃坝个体可容忍风险标准不低于 10^{-4} ，可接受风险标准不低于 10^{-5} （杜效鹄，杨健，2010）。陈伟、许强等人对我国地质灾害可接受水平的确定进行了研究，提出我国地质灾害可接受风险标准为 $10^{-6} \sim 10^{-7}/a$ （陈伟、许强，2012）。目前，我国仅有香港地区针对于本地区生命与社会风险制定了可接受风险的标准。

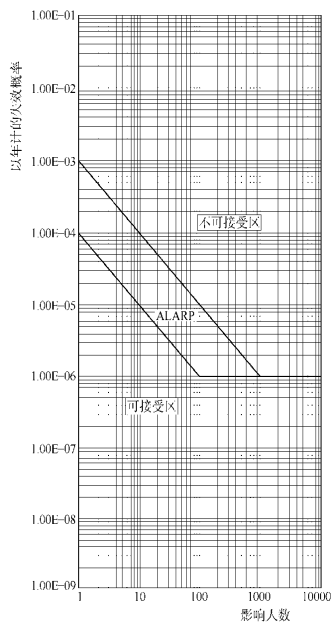


图 3-1 澳大利亚大坝委员会

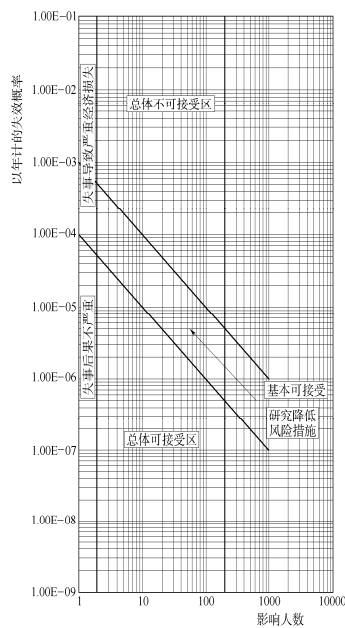


图 3-2 美国垦务局

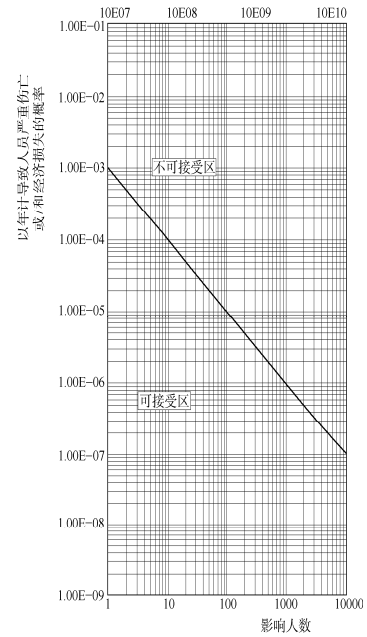


图 3-3 加拿大哥伦比亚水坝

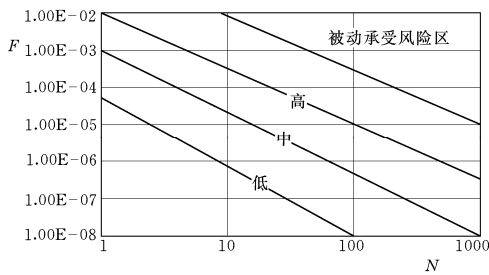


图 3-4 南非

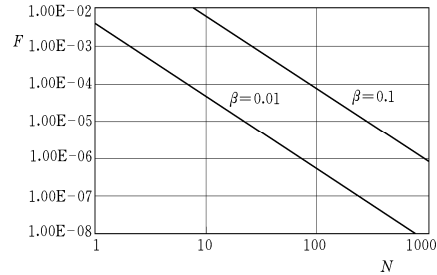


图 3-5 荷兰水防治技术咨询委员会

目前,国内可接受风险标准研究主要是参照国外的标准和确定方法,试图根据我国实际现状,借用国外方法来确定我国各行业的可接受风险标准,在可接受风险研究领域,自主创新的方法研究方面涉及较少,可接受风险标准系统性的基础理论研究较为缺乏,总之,我国对于可接受风险标准及其系统理论的研究应该引起学术界的重视。

3.1.2 确定可接受风险标准的方法

风险接受标准的确定主要受一个国家或地区的经济发展程度、人口密度及环境等因素的影响,这些因素在有的行业有时很难以量化的指标来确定,如水库垮坝对公众的影响程度,但大型水库垮坝肯定要比小型水库垮坝造成的影响大。因此风险接受标准的确定方式一般分为定性、定量和半定性半定量三种,目前,按照风险的承担者不同,可分为生命风险、社会风险、经济风险和环境影响,各种风险确定的方法和可接受性的控制标准也有所不同。

(1) 个人生命风险及其可接受性

个人生命风险是指生命个体永久处于某一区域,且未采取任何保护措施下,由危险活动而引

起意外事故，从而导致生命个体死亡的概率，一般以年为单位进行统计，故采用年计死亡概率进行衡量。个人生命风险可表达为：

$$IR = P_f P_{df} \quad (1)$$

式中， IR —个人生命风险指标； P_f —意外事故发生的概率； P_{df} —生命个体永久处于某一区域，且未采取任何保护措施，意外事故发生的条件下导致生命个体死亡的概率。

个人生命风险指标(IR)已被普遍采用(Bottelberghs P H., 2000; Bohnenblust H., 1998; Vrijling J K., 1995; Stallen P J M., Geerts R., Vrijling H K., 1996; M. Piers, 1998)，但在风险可接受性的控制方面有所不同，荷兰对于危险设施的可接受风险为 10^{-6} ，水防治技术咨询委员会(TAW)对洪水的可接受风险为 $\beta \cdot 10^{-4}$ (β 为个人意愿系数)，英国健康和安委员会将 10^{-6} 设为可接受风险与可容忍风险的界限。个人死于偶然事故的风险(10^{-4})与水库大坝失事被淹死的概率相当，由此水利水电工程个人生命可接受风险可设为(Jonkman S N., 2007)：

$$P_f \leq \beta 10^{-4} / P_{df} \quad (2)$$

式中， β —风险接受意愿系数，0.01~100； P_{df} —水库溃坝的条件下造成生命损失的概率。

(2) 社会风险及其可接受性

社会风险是指某一特定事故发生对一定范围内受伤害的人数与其事故发生的频率之间的关系(Jonkman S N., 2007)与个人生命风险相比，社会风险关注的是一定区域风险，而个人生命风险关注的生命个体，两者之间有联系，但有本质的区别。社会风险及其可接受性的确定方法研究较多，具体如表3-1所示(Jonkman S N., 2007; Laheij G M H., 2000; Carter D A.1995; Bowles D S., 2000; USBR, 1997; Hydropower & Dams, 1998)。

由表3-1可以看出，社会风险估算的方法较多，但与之相应的可接受风险标准的制定相对不足，在水利水电工程行业，美国垦务局(USBR)和加拿大BC hydro公司已率先制定了相应的标准，但其适用性还有待进一步的实践。从方法的适用性来看， $F-N$ 曲线法和预测法较适合于水利水电工程社会风险评估和可接受风险标准的确定。

(3) 经济风险及其可接受性

经济风险是指在某一特定事故发生对一定范围内财产造成的损失和事故发生概率的乘积，其定量的估算方法可采用与社会风险中 $F-N$ 曲线法类似的 $F-D$ 曲线法。

$$P(D > x) = 1 - F_D(x) = \int_x^{\infty} f_D(x) dx \quad (3)$$

$$E(D) = \int_x^{\infty} x f_D(x) dx \quad (4)$$

$$R_C = D \times P_f \quad (5)$$

式中， $F_D(x)$ —经济损失概率分布函数； $f_D(x)$ —经济损失概率密度函数；

$E(D)$ —经济损失期望； D —某一特定事故发生造成的经济损失。

由于经济风险受社会发展水平和物价水平的影响较大，可接受的经济风险还没有统一的标准，BC Hydro提出对于每个大坝 $E(D) < 10000$ 美元/年的标准（Van Dantzig D., 1956）。可接受经济风险标准的确定其实是优化的问题（NORSOK., 1998），可按照ALARP原则由成本效益分析、风险决策分析等方法来进行优化调整。

表 3-1 社会风险及其可接受性确定方法

名称	数学表达	可接受风险标准	备注
风险叠加法 (AWR)	$AWR = \iint_A IR(x,y)h(x,y)dxdy$	—	
预测法	$E(N) = \iint_A IR(x,y)m(x,y)dxdy$	—	
	$E(N) = \int_0^\infty xf_N(x)dx$	USBR: $<10^{-2}$; BC hydro : $<10^{-3}$	在计算中，除风险比例分析法采用以百年计的概率外，其余均采用以年计的概率。
风险比例分析法	$SRI = PIR_{HSE}T / A,$ $P = (n + n^2) / 2$	—	
F-N曲线法	$P(N > x) = 1 - F_N(x) = \int_x^\infty f_N(x)dx$	$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^\alpha}$	
风险积分法	$RI = \int_0^\infty x(1 - f_N(x))dx$	—	
Bohnenblust法	$R_p = \int_0^\infty x\varphi(x)f_N(x)dx$	—	
K-H 风险分析法	$R = \int_0^\infty x^\alpha f_N(x)dx$	$<10^{-2}, \alpha=2$	
全风险分析法	$TR = E(N) + k\sigma(N)$	$<\beta \cdot 100$	

(4) 环境风险及其可接受性

环境风险指某次特定事故对环境自身恢复能力的破坏程度，一般用生态系统恢复时间的超越概率来表示 (Kelly K A, Cardon N C., 1994):

$$P(T > x) = 1 - F_T(x) = \int_x^{\infty} f_T(x) dx \quad (6)$$

式中, $F_T(x)$ —生态系统恢复时间概率分布函数; $f_T(x)$ —生态系统恢复时间概率密度函数;

对于环境可接受风险, 可按公式 (8) 来进行控制(Kelly K A, Cardon N C., 1994):

$$1 - F_T(x) < \frac{0.05}{x} \quad (7)$$

3.1.3 确定可接受风险标准的原则

在风险分析中, 风险并不是越小越好, 因为风险的降低需要付出代价, 不管是通过加固措施降低失效概率, 还是通过防范措施减少风险损失, 都要投入人力、财力和物力。确定可接受风险标准其实就是解决“怎样的安全, 才被人们认为是安全的”这一问题, 因此可接受风险标准的确定应满足以下原则 (CENELEC E N. 50126, 1999; 陈国华, 2007):

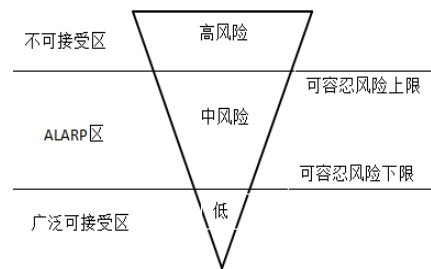


图 3-6 ALARP 准则

(1) ALARP 原则, ALARP 是 As Low As Reasonably Practicable 的缩写, 又称最低合理可行准则, 即不必要的风险可以不接受, 但合理的风险一定要接受, 对于有重大危害的风险要尽量降低。任何水电工程都具有风险, 通过任何加固预防措施都无法彻底消除风险, 当工程具有的风险小时, 降低风险的难度就越大, 其实际意义可用图 3-6 所表示。

(2) 一致性原则, 即原工程已经接受的风险和新工程的风险在度量值上要基本一致, 不能相差太大。

(3) 影响可控原则, 即新的工程不能使原有工程的风险有明显的增加, 其风险影响应控制在很小的范围内。

(4) 对于后果损失极为严重的风险, 应努力降低其失效概率。

(5) 平等原则, 生命、财产对于每个人来说都相当重要, 每个人在风险面前应该是平等的, 当风险超过某一标准, 应当无条件的降低。

在水利水电工程可接受风险标准制定中, 由于水库大坝失事是高风险低概率事件, 所以应当尽全力降低其失效概率, 对于溃坝洪水的破坏和淹没, 尽力做到影响可控, 以便在紧急时刻, 做

到人员伤亡最少。

3.2 大坝风险等级研究

3.2.1 国内外大坝风险等级研究现状

国外大坝风险分析和管理研究起步较早，在大坝安全方面的研究也较为深入。但前期的研究基本都建立在原始资料统计分析及定性分析的层面，2000年，加拿大不列颠哥伦比亚水电局代表在国际大坝委员会召开的会议上提出大坝风险分析需要可靠性和可防御性（Fischhoff B, 1984），也就是说大坝风险分析需要进行定量的计算，从而可靠度风险分析成为国外学者研究的重点方向之一。

国外许多国家对大坝风险已经以行业规范或者法律的形式进行了分级，现今采用的等级划分，不同的国家或地区根据其自身不同的实际情况有分两级、三级、四级，甚至是五级的，其中以“高风险”、“中风险”和“低风险”三级标准和“极高风险”、“高风险”、“中风险”和“低风险”四级标准较为普遍。美国80%的州根据大坝潜在的风险对各自的大坝进行了分级（Reid S G, 1989; Fell R., 1994），根据美国联邦紧急事务管理局的国家大坝安全计划，其中60%都采用了三级风险，蒙大拿州和乔治亚州采用了两级风险，加利福尼亚州、科罗拉多、新罕布什尔州、俄亥俄州、弗吉尼亚州和西佛吉尼亚州均采用了四级风险，康涅狄格州采用了五级风险（ANCOLD., 2003; Kreuzer H., 2000）。欧洲国家大坝等级的确定主要依据大坝的高度和库容（罗云等，2004；李雷，蔡跃波，盛金保，2008），一些国家也对风险进行了分级，如挪威、葡萄牙、西班牙都采用了三级风险（NVE, 2000; Portuguese Regulations for Safety of Dams, 1990; Jesus Penas, 2000），瑞典采用了四级风险（U. Norstedt, R. Andersson, H., 1998），其他国家（澳大利亚（Melbinger R., 1998）、芬兰（E. Loukola, T., 1998）、德国（Giesecke J, Glasebach H J, 2001）、意大利（M. Rogen, 1999）等）均规定需进行溃坝风险分析，并制定了相关的紧急预案。总而言之，西方发达国家在大坝对生命、经济和环境方面的风险都是普遍能够接受的，风险分析的方法，如故障树、事件数、决策树、贝叶斯网络等方法均有一些实践分析，但设计、建设和运行的安全标准大多都没采用可靠度分析的方法。

国内在大坝风险分析、评价和管理方面的研究起步较国外稍晚，2000年，第20届国际大坝会议在北京的召开，极大促进了国内学术界对大坝风险研究的重视，掀起了国内对大坝安全评价和风险分析的热潮。杜德进、张为民等人根据风险评估的理论和方法，结合丰满水电站大坝，对其进行了风险分析并据此提出了补强加固的初步建议（杜德进，张为民，张秀丽，陈昌林，2002）。

马福恒, 何心望等人针对土石坝的具体特点, 分析了影响土石坝安全的主要因素, 并建立了土石坝的风险预警指标体系 (马福恒, 何心望, 吴光耀, 2008)。姜树海, 范子武利用 Bays 方法, 将土石坝安全鉴定专家评级赋值的先验概率和实时检测信息的似然概率相结合, 实现了对土石坝安全性状更为合理的评估和预测 (姜树海, 范子武, 2008)。李雷, 王仁钟, 盛金保等人, 在国外大坝风险分析的理论和方法的基础之上, 结合我国的实际情况, 以安徽省滁州沙河集水库大坝为工程实例, 进行了系统的大坝风险分析和安全评价 (李雷等, 2006)。

国内在大坝风险等级方面的研究不多, 方卫华在计算大坝整体风险的基础之上, 建议我国大坝分为: 低风险大坝 (IV)、中风险大坝 (III)、高风险大坝 (II)、超高风险大坝 (I), 并给出了不同风险等级大坝对应的安全评价方法 (方卫华, 2006)。《水库大坝安全导则》(SL258-2000) 中, 综合大坝工程性状各专项安全性分级结果, 将水库大坝安全分为: 一类坝 (安全可靠)、二类坝 (基本安全)、三类坝 (不安全) (水库大坝安全评价导则, 2000)。《水库大坝风险评估导则》(送审稿) 对大坝风险按其严重程度分为低风险 (IV)、中风险 (III)、高风险 (II)、极高风险 (I) (水库大坝风险评估导则 (送审稿), 2012)。

3.2.2 失效模式及其失效概率的研究

(1) 失效模式

据我国 1954~2006 年溃坝统计资料 (李雷等, 2006; 解家毕, 孙东亚, 2009) 和《全国水库垮坝登记册》(1981~1990), 大坝失效的主要模式可分为五大类: 洪水漫顶、大坝质量问题、管理不当、其它和原因不详, 具体如表 3-2 所示。

由表 3-2 可知, 洪水漫顶、渗漏破坏、溢洪道与涵洞质量问题是大坝失效的最主要的模式。洪水漫顶往往是多种因素共同作用的结果, 但根据溃坝资料和理论分析, 导致洪水漫顶的主要原因为:

1) 来水超标导致漫顶。如连续降雨或上游垮坝导致来水超过大坝本身的设计洪水标准。如安徽汪洋水库 1969 年 7 月 14 日溃坝, 降雨量超过 400mm, 使得来水超过百年一遇的洪水设计标准。

2) 泄水能力不足导致漫顶。据溃坝资料统计, 在紧急情况下, 由于溢洪道、泄洪闸等无法正常泄洪导致漫顶占总溃坝的 21%, 占洪水漫顶的 75.4%, 因此, 对水利水电工程的定期安全检查、检修应在规范中明确列出。

渗透破坏, 是土石坝最主要的破坏方式之一, 从破坏机理上说, 主要包括: 管涌、流土、接触冲刷和接触流土四种破坏方式。引起渗透破坏的原因较为复杂, 根据其发生的部位大致可总结

为：

1) 坝体集中渗漏。如果土石坝工程质量差、上游防渗设施和下游排水设施不好，极易存在渗漏通道，在洪水期，库水位超过正常高水位，实际渗透坡降将会大于大坝自身的抗渗能力，从而导致大坝集中渗流而垮坝。1974年3月18日，库容 $190 \times 10^4 \text{m}^3$ 的四川江北龙井沟水库由于坝体质量差，发生集中渗流而晴天溃坝。

2) 坝基集中渗漏。坝基稳定是大坝稳定的必备条件，坝基如若处理不当、上游水平铺盖防渗能力不足或坝后覆盖层抗渗能力不足，坝基极易沿软弱夹层发生集中渗漏。

3) 坝后大面积散浸。防渗体系不达标、大坝填筑质量差，将导致坝体渗透性过大而使得坝后大面积散浸，最终而导致大坝溃决。

表 3-2 大坝失效主要模式及其所占比例和以年计的失效概率

失效模式		数量	百分比(%)	平均年计失效概率(10^{-5})	备注
洪水漫顶	超标洪水	440	12.58	8.47	洪水漫顶占 51.23%
	泄洪能力不足	1352	38.65	26.03	
大坝质量问题	渗漏破坏	903	25.81	17.39	大坝质量问题占 37.39%
	坝体质量	50	1.43	0.96	
	坝体滑坡	113	3.23	2.18	
	溢洪道、涵洞	232	6.63	4.47	
	坝基滑动或塌陷	6	0.17	0.12	
	生物洞穴	4	0.11	0.08	
管理不当		168	4.80	3.23	
其它		179	5.12	3.45	
原因不详		51	1.46	0.98	
合计		3498	100	67.35	

(2) 失效概率

确定大坝失效概率的方法有基于经验和统计资料的估计方法，基于大坝失效模式的路径分析方法，基于可靠度理论的数值求解法等。

1) 经验统计估计法

专家经验估计法是国际上比较通用的失效概率估计的方法之一，专家根据其经验确定溃坝过程中各个环节发生的概率，也可根据分析将某一事件发生的可能性转化为可能出现的定量的概率。Steven G. Vick (1992)、J. Barneich (1996)、美国垦务局 (1999) 都先后提出了定性描述与定量概率之间的转换关系表，但没有一个专家是万能的，不可能根据转换关系对所有环节都做出准确的判断，而且对定性描述与定量概率之间的转换关系的可行性还有待检验，对某一时间是否

可能发生的定性描述是否准确，也缺乏依据，不同的专家的判断可能会有比较大的差异。

经验统计估计法的另一方法就是基于失事大坝统计资料的基础之上，由于统计一般以年为单位，故通常以年计失效概率做为大坝的失效概率。对于水利水电工程以年计的失效概率可按公式

(9) 进行计算：

$$P_y = \frac{P_f}{T} \times \frac{T_d}{T} \quad (9)$$

式中： P_f — 失效概率；

P_y — 以年计失效概率；

T — 建筑物的寿命；

T_d — 建筑物的设计寿命。

基于统计的资料，水电工程以年计的平均失效概率也可按公式 (10) 进行计算：

$$P_y = \frac{N_f}{N_a \cdot T} \quad (10)$$

式中： N_f — 统计年限内大坝失效的数量；

P_y — 以年计平均失效概率；

T — 统计年限；

N_a — 大坝总数。

2) 失效路径分析法

失效路径分析方法是根据可能出现的外荷载，分析在荷载作用下，水利水电工程的挡水、输水、泄水以及附属建筑物可能出现的破坏形式，并根据破坏的先后因果关系，形成荷载—建筑物—破坏—大坝失效的路径，通过确定失效路径中每一步失效的概率，从而确定大坝失效概率，这种方法应用比较多的是事件树、故障树和贝叶斯网络分析 (M.A.福斯特等，2002；周建方等，2009；李典庆等，2007) 等方法，图 3-7 是贝叶斯网络分析法分析土石坝溃坝概率的模型图。

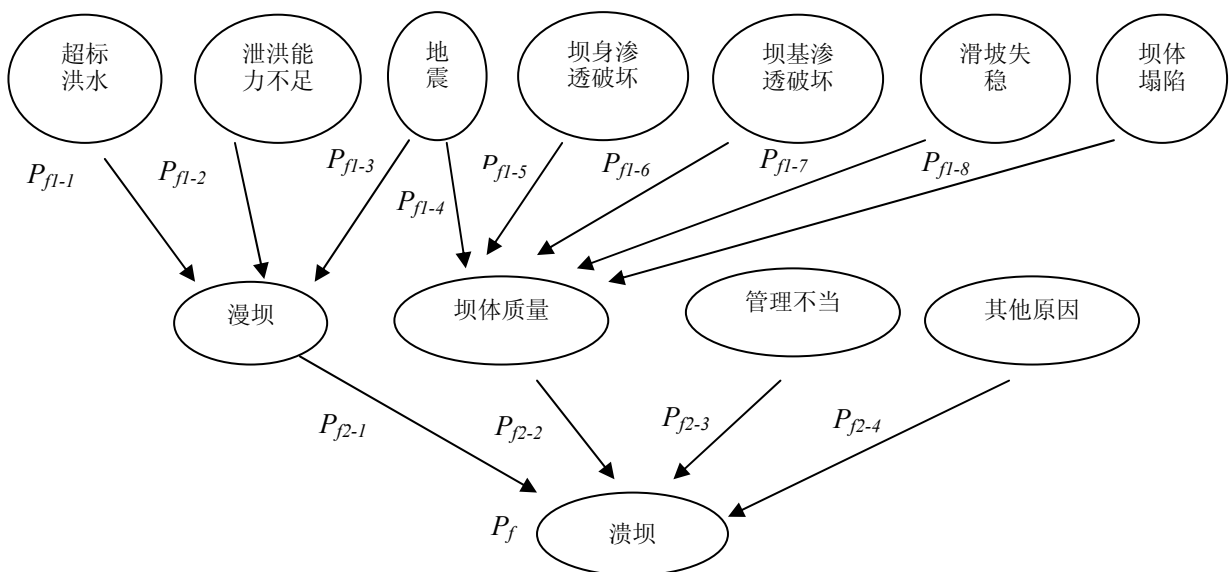


图 3-7 土石坝溃坝分析贝叶斯网络图

3) 可靠度分析法

可靠度分析方法是基于概率论与数理统计的基础之上, 国外研究起步较早, 早期主要围绕飞机失事进行研究, 国内对可靠度问题的研究稍晚 (吴世伟, 1990), 20 世纪 90 年代以后水利行业发布了《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB50199-94)。近年来, 可靠度分析方法在大坝风险分析领域有了较多的研究, 张明等人 (2002) 对土石坝边坡稳定和 design 问题进行了分析研究; 陈祖煜等 (2012) 以滑坡和建筑物抗滑稳定分析为例, 探讨了可靠度分析和分项系数设计方法在该领域解决一些困难问题的新思路和新方法; 刘志明 (2010) 等人总结了 15 年来水利标准在推广应用可靠度设计方法和风险分析过程中的经验和认识; 周建平, 杜晓鹤 (2010) 结合水电工程事故实例, 对大坝事故特征、原因和类型进行了分析, 提出了基于风险理念的大坝设计原则和基本思路; 陈祖煜等人 (2012) 等人提出可靠度方法相对安全率 η_R 的概念和公式, 并在数学上证明了该方法与传统方法的等价性, 并结合多个实例进行了验证。

3.2.3 风险损失研究

大坝风险损失主要是由于溃坝洪水对下游的淹没和冲刷所造成的危害, 从后果损失评价的角度来说, 损失可以分为生命损失、经济损失和社会与环境的影响三方面的损失。

(1) 生命损失

生命损失是大坝风险损失重最为严重的, 不仅使下游区域的部分人失去生命, 而且还给幸存者造成了极大的心理创伤, 其影响几乎难以用定量的指标来衡量。生命损失方面的研究国内较多, 国内相对较少, 但均是建立在经验和统计的基础之上。美国垦务局 Dekay 和 McClelland (1993) 在前人研究的基础之上, 根据历史统计资料, 给出了经验性的潜在生命损失公式:

$$LOL = 0.075 PAR^{0.56} \exp[-0.759W_t + (3.790 - 2.223W_t) \times F] \quad (11)$$

式中, LOL — 潜在生命损失; PAR — 风险人口数; W_t — 预警时间;
 F — 洪水强度, (高洪水风险去 $F=1$, 低洪水风险区 $F=0$)。

Graham W J. (1999) 在此基础之上, 定性的对洪水严重程度进行了区分, 并将人们对溃坝洪水严重性的理解进行了辨别, 很简洁的给出了不同洪水严重程度下的溃坝生命损失伤亡率, 给出潜在生命损失公式:

$$LOL = PAR \times f \quad (12)$$

式中, LOL — 潜在生命损失; PAR — 风险人口数; f — 损失伤亡率。

Peter Reiter 在 Graham (2001) 的基础之上, 将风险人口、洪水严重程度、警报时间等因素进

行了详细的划分和量化,并根据溃坝模式将溃坝淹没区域进行区划估算,从而得到如下修正公式:

$$LOL = PAR \times f \times i \times c \quad (13)$$

式中, LOL — 潜在生命损失; PAR — 风险人口数; f — 损失伤亡率;
 i — 洪水严重程度影响系数; c — 修正系数。

加拿大 BC Hydro 公司 Assaf 等人 (1997) 将可靠度概念应用于溃坝生命损失估算过程中,利用概率论风险分析和模拟溃坝模型来估算生命损失,并提出如下公式:

$$LOL_u = PAR_u \times (1 - P_r) \quad (14)$$

式中, LOL_u — 给定区域生命损失; PAR — 给定区域风险人口数; P_r — 生还概率。

国内在生命损失方面的研究尚处于初级阶段,姜树海、范子武 (2003) 认为溃坝洪水灾害造成的生命损失是洪水的物理特征和洪泛区社会特征的函数,并给出了一般的表达式如下:

$$L_0 = f(F, W, L, N) \quad (15)$$

式中, L_0 — 生命损失; F — 洪水特征; W — 洪水的预警和洪泛区撤离条件;
 L — 洪泛区土地利用状况和抗洪性能; N — 溃坝淹没区人口总数。

周克发,李雷等人 (2006; 2007) 将国外的生命损失估算方法引进,结合我国已溃大坝生命损失情况,通过分析,初步提出了我国生命损失评价的模型。王志军,顾冲时等人 (2008) 结合向量机算法建立溃坝生命损失评估模型,将溃坝生命损失定义为风险人口与生命损失率的乘积,分析了生命损失的评估指标。

(2) 经济损失

经济损失包括直接经济损失和间接经济损失,国内外在方面均有研究,相对来说,国内的研究可操作性较强 (王丽萍,傅湘,1999; 施国庆,李志强,1998; 范子武,姜树海,2000),具体见表 3-3 所示。

(3) 社会与环境影响

大坝失事对社会与环境的影响涉及面广而复杂,至今国际上关于社会与环境影响的风险标准还是空白,李雷等人 (2006) 借鉴国际上流行的 $F-N$ 曲线,结合我国的实际标准给出了我国社会与环境风险标准,并考虑风险人口数、城市重要性、河道形态、人文景观等因素,提出社会与环境影响指数 f ,其表达式为:

$$f = N \times C \times I \times h \times R \times l \times p \quad (16)$$

式中, f — 社会与环境影响指数, N — 风险人口系数, C — 城市重要性系数,
 I — 设施重要性系数, h — 文物古迹等系数, R — 河道形态系数,

l — 生物环境系数, L — 人文景观系数, P — 污染工业系数。

并给出了各影响系数的取值范围, 将社会与环境的影响转化为定量计算, 其操作性较强。

表 3-3 经济损失计算方法汇总表

损失类型	计算依据	计算方法	适用范围	
直接经济损失	工程损失	由工程概预算直接获取		
	淹没损失	按损失率计算	$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \beta_{ijk} W_{ijk}$ S 为经济损失, β_{ijk} 、 W_{ijk} 分别为第 i 类第 j 种财产在第 k 类风险区的损失率和价值, n 为财产类别数, m 为第 i 类财产类别数, l 为风险区类别数。	社会固定资产、流动资产
		按毁坏尺寸等指标计算	$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l A_{ijk} f_{ijk}$ S 为经济损失, A_{ijk} 、 f_{ijk} 分别为第 i 种毁坏程度下第 j 类第 k 种设施毁坏尺寸和修复费用, n 为设施类别数, m 为第 i 类设施类别数, l 为毁坏程度等级。	铁路、公路、输送管道、高压电网、水利堤坝渠道、房屋等设施
		按经济活动中断时间计算	$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l T_{ijk} S_{ijk}$ S 为经济损失, T_{ijk} 、 S_{ijk} 分别为第 i 类部门第 j 行业在第 k 类经济活动中断时间和损失价值, n 为部门类别数, m 为第 i 类行业类别数, l 为第 i 类部门第 j 行业经济活动类别数。	工业、商业、铁路、公路、航运、供电、供水等部门经济活动中断所造成的损失
		农业收益型损失计算	$S = S_0 + R_c + I_l$ S 为经济损失, S_0 为当年/季减产绝产损失, R_c 为重置恢复费用, I_l 为恢复期丧失的收入。	洪水淹没对农业造成的损失
		工程设施毁弃损失计算	$S = V_0 + V_R$ S 为经济损失, V_0 为灾前价值, V_R 为重置增加费用。	建筑、水利、市政等工程
间接经济损失	直接估算	分析溃坝洪水的淹没范围, 分类直接估算各种间接经济损失。	应急费用、企业停产减产损失等	
	系数法	$S_{ii} = k_i S_{di} + b_i$ S_{ii} 、 S_{di} 分别为溃坝给第 i 部门或事业造成的间接经济损失和直接经济损失, k_i 、 b_i 为系数。	通过不同区域的抽样调查从而确定间接经济损失。	

4 结论与建议

大坝风险分析和评价具有跨学科的特点, 西方发达国家在风险标准和风险分析技术方面研究较多, 一些国家和地区已经以法律或规范的形式制定了风险标准和风险分析方法, 并对大坝采用风险评估方法进行风险等级划分, 但目前我国大坝风险评估和分析技术应用于工程实践尚处于初级阶段, 开展大坝风险标准和风险等级确定的原理和方法研究是我国水利水电工程管理领域的迫切需要, 也是在大坝风险评估方面与国际接轨的体现。

可接受风险标准的确定在不同的行业之间有很大的区别, 在同一行业不同的工况下也有所不同, 应通过对比多种风险标准确定的方法, 进而制定出切合我国水利水电行业的实际国情, 并可

满足行业发展需求的危险标准。在危险标准确定的基础之上，开展大坝失效概率与危险损失的定量分析研究，进而确定大坝危险等级。针对于高风险等级水工建筑物，开展具有针对性的危险防控理论及危险处置措施研究，制定具有针对性的危险控制措施，从而达到保证下游区域安全的目的。

水库大坝河流梯级开发已经成为我国水电开发的主要方式，我国已初步形成以大渡河、雅砻江、澜沧江及乌江等十三大水电站梯级开发群，在单一水库大坝危险等级确定的基础上，梯级水库大坝危险等级的确定以及梯级之间危险的传递效应也需要深入研究，通过梯级水库大坝危险等级的确定，寻找整个梯级水库大坝的危险最高梯级，通过加固措施，降低其危险是保证整个流域梯级安全的必要手段。

5 大坝危险学科及行业发展的建议，未来发展思路和新兴增长点

结合我国大坝危险学科发展的具体情况，建议在以下几个方面展开研究：（1）适用于我国大坝及其水利工程的可接受危险标准研究，并以行业规范的形式颁布；（2）结合概率论与可靠度理论，加强大坝不确定性失效模式及其失效概率研究；（3）从定量的角度出发，建立大坝危险损失估算理论体系；（4）加强大坝危险等级确定原理和方法研究，提出水库大坝危险等级指标体系；（5）开展梯级水库群危险分析和评价研究；（6）开展梯级水库危险传递、叠加及放大等灾害链研究；（7）开展梯级流域水库危险规避措施及应急方案研究。

参考文献

- 1 ANCOLD. Guidelines on Risk Assessment. Tatura: Austral Jan National Committee on Large Dams, 2003
- 2 ASDSO (U.S. Association of State Dam Safety Officials)—Testimony on the Current Dam Safety Needs in the United States. Subcommittee on Economic Development, Public Buildings, & Emergency Management Committee on Transportation and Infrastructure. U.S. House of Representatives, 2006 July.
- 3 ASDSO-Compilation of Safety Procedures in the USA States, 2000 July, Lexington, Kentucky.
- 4 Assaf H. Hartford D N D. Cattanaach J D. Estimating dam breach flood survival probabilities [J]. ANCOLD BULLETIN, 1997: 23-42.
- 5 Barneich J, Majors D., Moriwaki Y., and Davidson, R.. Application of Reliability Analysis in the

- Environment Impact Report and Design of a Major Dam Project. Uncertainty '96'. ASCE. 1996
- 6 Bohnenblust H. Risk-based decision making in the transportation sector [M]//Quantified societal risk and policy making. Springer US, 1998: 132-153.
 - 7 Bottelberghs P H. Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1): 59-84.
 - 8 Bowles D S, Anderson L R, Evelyn J B, et al. Alamo dam demonstration risk assessment [J]. ANCOLD BULLETIN, 2000: 113-128.
 - 9 Carter D A. The Scaled Risk Integral—A Simple Numerical Representation of Case Societal Risk for Land Use Planning in the Vicinity of Major Accident Hazards, Loss Prevention in the Process Industries, Vol. II [J]. Vol. II, 1995: 219-224.
 - 10 CENELEC E N. 50126 (1999): Railway applications—The specification and demonstration of Reliability[J]. Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 1999.
 - 11 DeKay M L, McClelland G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood [J]. Risk Analysis, 1993, 13(2): 193-205.
 - 12 E. Loukola, T. Majjala-New Dam Safety Guidelines in Finland. Dam safety, (ed. L. Berga), Balkema, 1998 Rotterdam.
 - 13 Fell R, Bowles D S, Anderson L R, Bell G. The status of methods for estimation of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment. Symposium of International Congress on Large Dams[C]. Beijing. 2000
 - 14 Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal, 1994. 31:(2) 261-272.
 - 15 FEMA Martins — Federal Guidelines for Dam safety: Hazard Potential Classification System for Dams. National Dam Safety Program (<http://www.fema.gov/fima/damsafe/fema-333-toc.shtm>), 2004 January.
 - 16 FEMA(US Federal Emergency Management Agency)—National Dam safety Program, 1996.
 - 17 Fischhoff B, Lichtenstein S, Slovic P, etc. Acceptable Risk. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
 - 18 Giesecke J, Glasebach H J, Muller U. German Standardization in Dam Construction. [J]. Dams in Germany, 78ff, 2001.

- 19 Graham W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[M]. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Dam Safety Office, 1999.
- 20 He X Y, Wang Z Y, Huang J C. Temporal and spatial distribution of dam failure events in China [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4): 398-405.
- 21 HSE. The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations. Lofdon: Her Majesty's Stationery Office. 1988
- 22 Hydropower & Dams, Risk Based Dam Safety Evaluations, Conference Report: Part 2, Hydropower & Dams, 1998.
- 23 ICOLD EUROPEAN CLUB-Dam Legislations, 2001 February, Paris.
- 24 ICOLD. Dam failures – statistical analysis. Bulletin 99, International Commission on Large Dams (ICOLD). Paris, 1995
- 25 Jesus Penas – Spanish Legislation for Safety of Dams. Technical Meeting “Lefislacao sobre Seguranca de Barragens”, National Laboratory of Civil Engineering, LNEC, 2000Lisbon
- 26 Jonkman S N, Van Gelder P, Vrijling J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 99(1): 1-30.
- 27 Kelly K A, Cardon N C. The myth of 10^{-6} as a definition of acceptable risk [J]. EPA Watch, 1994, 3(17).
- 28 Kreuzer H. (General Report Q.76) The use of risk analysis to support dam safety decision and management. Symposium of International Congress on Large Dams. 2000
- 29 Laheij G M H, Post J G, Ale B J M. Standard methods for land-use planning to determine the effects on societal risk [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1): 269-282.
- 30 M. Piers, Methods and models for the assessment of third party risk due to aircraft accidents in the vicinity of airports and their implications for societal risk, In: R.E. Jorissen, P.J.M. Stallen (Eds.), Quantified Societal Risk and Policy Making, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998.
- 31 M. Rogen – The Regulation of Dams in Italy. High Council of Public Works, Rome.
- 32 Melbinger R. The Austrian approach to dam safety: A symbiosis of rules and engineering judgement [C]//Proc. of Int. Symp. on Dam Safety, Barcelona. 1998.
- 33 NORSOK, Risk and emergency preparedness, (Z-013 rev.1), Annex C: Methodology for establishment and use of environmental risk acceptance criteria (<http://www.nts.no/norsok/z/>),

- 1998.
- 34 NVE (The Norwegian Water Resources and Energy Directorate) – The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams, 1981/86; Regulations Governing the Safety and Supervision of Watercourse Structures, 2000, Oslo.
 - 35 P. Le Dalliou – Dam Legislations in some European Countries. Bureau d'étude Technique et de Contrôle des Grands Barrages. Dam safety, (ed. L. Berga), Balkema, 1998 Rotterdam.
 - 36 Portuguese Regulations for Safety of Dams, Decree-law nr. 11/90, 1990 January, Lisbon.
 - 37 Reid S G. Risk assessment, Research Report, No. RJ91. School of civil and mining engineering, University of Sydney. 1989.
 - 38 Reiter P. Loss of life caused by dam failure: the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki [J]. Helsinki: PR Water Consulting Ltd. 2001.
 - 39 Stallen P J M, Geerts R, Vrijling H K. Three conceptions of quantified societal risk [J]. Risk Analysis, 1996, 16(5): 635-644.
 - 40 Starr C. Social benefit versus technological risk [J]. Readings in Environmental Impact. New York MSS Information Corp, 1974: 78-92..
 - 41 Steven G.Vick. Risk in Geotechnical practice, in Geotechnique and Natural Hazards. Vancouver Geotechnical Society and Canadian Geotechnical Society. 1992:41-57
 - 42 U. Norstedt, R. Andersson, H. Eriksson, A. Lindh, L. Markland – Swedish Dam Safety Guidelines. Dam Safety, (ed.L.Berga), Balkema, 1998 Rotterdam.
 - 43 UK, Health and Safety law. Act 1974
 - 44 USBR, US Department of interior Bureau of Reclamation, Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making, 1997.
 - 45 USBR. Dam Safety Risk Analysis Methodology. Version3. 3Technical Service Center, 1999
 - 46 Van Dantzig D. Economic decision problems for flood prevention [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1956: 276-287.
 - 47 Vrijling J K, Van Hengel W, Houben R J. A framework for risk evaluation [J]. Journal of hazardous materials, 1995, 43(3): 245-261.
 - 48 2011 第一次全国水利普查公报, 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局, 北京: 中国水利水电出版社, 2013 (<http://www.mwr.gov.cn/2013pcgb/merge1.pdf>)

- 49 M.A.福斯特等,用事件树法估计土石坝失事的概率(上)[J],水利水电快报,2003.3(李季川译自《澳大利亚大坝委员会通报》2002年8月)
- 50 M.A.福斯特等,用事件树法估计土石坝失事的概率(下)[J],水利水电快报,2003.3(李季川译自《澳大利亚大坝委员会通报》2002年8月)
- 51 陈国华,工程风险学[M],北京:国防工业出版社,2007.6
- 52 陈生水等.土石坝-水库耦合系统动力学机理.南京:南京水利水电科学研究院.
- 53 陈伟,许强.地质可接受风险水平研究[J].灾害学,2012.27(1)23~25
- 54 陈祖煜,陈立宏,王玉杰,等.滑坡和建筑物抗滑稳定分析中的可靠度分析和分项系数设计方法[水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展].北京:中国水利水电出版社,2010.27-39.
- 55 陈祖煜,徐佳成,孙平,等.重力坝抗滑稳定可靠度分析(一)相对安全率方法[J].水力发电学报,2012,31(003):148-159.
- 56 杜德进,张为民,张秀丽,陈昌林,风险评估在丰满水电站大坝的应用研究[J],大坝与安全,2002.12
- 57 杜效鹤,杨健.我国水电站大坝溃坝生命风险标准讨论[J].水力发电,2010.36(5):68-70,94
- 58 范子武,姜树海.蓄滞洪区的洪水演进数值模拟与风险分析[J].水利水运科学研究,2000,2:1-6.
- 59 方卫华,大坝安全的分级评价及其方法[J],水电2006国际研讨会,2006.10
- 60 姜树海,范子武,应用Bayes方法对土石坝安全等级的动态概率评定[J],水利学报,2008.8
- 61 姜树海,范子武.大坝的允许风险及其运用研究[J].水利水运工程学报,2003,3:7-12.
- 62 姜树海,防洪设计标准和大坝的防洪安全[J],水利学报,1999
- 63 解家毕,孙东亚,全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J],水利水电技术,2009.12
- 64 李典庆,鄂羲丽,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(工学版),2007.12
- 65 李雷,蔡跃波,盛金保,中国大坝安全与风险管理的现状及其战略思考[J],岩土工程学报,2008
- 66 李雷,王仁钟,盛金保,王昭升,彭雪辉,张士辰,大坝风险评价与风险管理[M],北京:中国水利水电出版社,2006.5
- 67 刘志明,何晓燕,雷兴顺.可靠度设计方法和风险分析在水利技术标准中的应用[水利水

- 电工程风险分析及可靠度设计技术进展]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 15-26.
- 68 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 化学工业出版社安全科学与工程出版中心, 2004.
- 69 马福恒, 何心望, 吴光耀, 土石坝风险预警指标体系研究[J], 岩土工程学报, 2008.11
- 70 马福恒. 病险水库大坝风险分析与预警方法[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- 71 施国庆, 李志强. 水库溃坝损失及其计算方法研究[J]. 灾害学, 1998, 13(4): 28-33.
- 72 水利部水利管理司 1 全国水库垮坝登记册(1981~1990) [Z]119931
- 73 王丽萍, 傅湘. 洪灾风险及经济分析[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- 74 王志军, 顾冲时, 娄一青. 基于支持向量机的溃坝生命损失评估模型及应用 [J][J]. 水力发电, 2008, 34(1): 67-69.
- 75 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 人民交通出版社, 1990.
- 76 张利民, 徐耀, 贾金生. 国外溃坝数据库[J]. 中国防汛抗旱, 2007, 1.
- 77 张明, 刘金勇, 麦家焯, 土石坝边坡稳定可靠度分析与设计[J], 水力发电学报, 2002.2
- 78 中华人民共和国行业标准, 水库大坝安全评价导则(SL258-2000)[C], 北京: 中国水利水电出版社, 2001.3
- 79 中华人民共和国水利行业标准, 水库大坝风险评估导则(送审稿), 2012
- 80 周建方, 唐椿炎, 许智勇, 贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用[J], 水力发电学报, 2010.2
- 81 周建方, 唐椿炎, 许智勇, 事件树、故障树、决策树与贝斯网络[J], 河海大学学报(自然科学版), 2009.5
- 82 周建平, 杜晓鹤. 工程风险问题集大坝设计中的风险分析[水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 67-74.
- 83 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 145-149.
- 84 周克发, 李雷. 我国已溃决大坝调查及其生命损失规律初探 [J]. 大坝与安全, 2006, 5: 14-18.