

大坝风险综合评价 理论、方法及应用

孙玮玮 张大伟 徐建军 蔡尊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

南京水利科学研究院出版基金资助

大坝风险综合评价 理论、方法及应用

孙玮玮 张大伟 徐建军 蔡尊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书介绍了我国水库大坝风险管理现状,总结了溃坝概率计算方法,阐述了溃坝后果综合评价理论,重点介绍了线性加权综合评价法、模糊数学综合评价法、物元综合评价法、灰色关联度综合评价法、主成分分析综合评价法等五种方法及其应用效果,并给出了综合评价结果比较和每种方法的优势与局限性。全书共9章,包括绪论、溃坝概率方法分析、溃坝后果综合评价理论、线性加权综合评价方法及其应用、模糊数学综合评价方法及其应用、物元综合评价方法及其应用、灰色关联度综合评价方法及其应用、主成分分析综合评价方法及其应用、综合评价方法的比较和局限性分析。

本书可供从事水利水电工程、科学研究、教育等从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大坝风险综合评价理论、方法及应用 / 孙玮玮等著
— 北京 : 中国水利水电出版社, 2021.1
ISBN 978-7-5170-9427-2

I. ①大… II. ①孙… III. ①大坝—风险管理 IV.
①TV698

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第030881号

书 名	大坝风险综合评价理论、方法及应用 DABA FENGXIAN ZONGHE PINGJIA LILUN, FANGFA JI YINGYONG
作 者	孙玮玮 张大伟 徐建军 蔡荨 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9印张 219千字
版 次	2021年1月第1版 2021年1月第1次印刷
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国现有各类水库大坝 9.8 万多座，是世界上拥有水库大坝数量最多的国家。一方面由于绝大多数水库修建于 20 世纪 50—70 年代，受当时客观条件限制，大多数水库设计和施工质量“先天不足”，工程设施老化失修，存在大量的工程安全隐患；另一方面随着经济社会发展，一旦出现溃坝事故，下游的生命损失、经济损失、环境和社会等负面影响则越来越大。因此，必须依法对所有的病险水库实施除险加固。但是对如此众多的病险水库在某一规定的期限内完成除险加固任务，无论其技术还是资金显然是无法保证的，何况病险水库的发生和发展都是动态的。为此需要根据技术和资金的保障和可能溃坝后果的严重程度，按轻重缓急来安排除险，把有限的资金用到风险度最高的工程上。于是，对病险水库实施除险科学排序这一课题被提上了重要议事日程。除险排序实际上是一种决策，现代大坝安全的理论和世界先进国家的实践，证明了这种决策应以风险为基础，风险越大的大坝，应优先安排除险。风险是溃坝概率和溃坝后果的乘积。本书对“事件树”“可靠度”以及“脆弱度”三种常用的溃坝概率法进行了分析总结，重点考虑了如何对溃坝后果作出综合评价。溃坝后果包括生命损失、经济损失、环境影响和社会影响四个方面，溃坝后果如何评价，如何将四个方面的因素综合起来考虑，这是大坝风险研究中的一个需要解决的关键问题。

本书在国内外已取得的溃坝后果研究成果的基础上，深入开展了溃坝后果综合评价理论的研究，确立了溃坝后果主要包括生命损失、经济损失、环境影响和社会影响等因素，并通过层次分析法提

出了这四类后果的权重，进一步建立了溃坝后果计算模型；通过对线性加权综合评价法、模糊数学综合评价法、物元综合评价法、灰色关联度综合评价法、主成分分析综合评价法等五种方法的理论基础的深入分析，提出了这五种方法在进行综合评价时的关键参数，并结合溃坝后果特点，选取了较为合适的参数，构建了基于这五种方法的溃坝后果综合评价模型，完善了相应的溃坝后果评价标准，并将其应用到江西五座水库的溃坝后果评价。最终通过评价思路、评价关键技术、评价基本步骤、评价采用的权重确定方法、评价结论的含义、使用难度以及评价结果的合理性，对这五种综合评价方法进行比较，优选出操作性较强的溃坝后果综合评价方法，以此作为病险水库除险加固科学排序的依据。

本书内容的主要特点如下：

(1) 在以往研究成果基础上，将溃坝后果评价指标体系中的社会环境影响分为两个独立的指标（即环境影响和社会影响）分别考虑，并分别对两个指标的影响因素进行了改进，完善了环境影响系数、社会影响系数计算模型；运用层次分析法确立了溃坝后果生命损失、经济损失、环境影响和社会影响的权重。

(2) 根据溃坝后果以及数学函数的曲线特点，构建了在运用线性加权综合评价法时，生命损失、经济损失、环境影响和社会影响严重程度系数计算模型。提出了运用模糊数学综合评价法时，溃坝后果中应采用的隶属函数；运用物元综合评价法时，溃坝后果中应采用的关联函数；运用灰色关联度综合评价法时，溃坝后果中应采用的分辨系数；运用主成分分析综合评价法时，溃坝后果中主成分的确定方式。

(3) 深入剖析了线性加权综合评价法、模糊数学综合评价法、物元综合评价法、灰色关联度综合评价法、主成分分析综合评价法等五种方法的理论基础和特点，构建了基于这五种方法的溃坝后果

综合评价模型，完善了相应的溃坝后果评价标准，并将其应用到江西五座水库的溃坝后果评价中，通过对五种综合评价方法进行比较，最终优选出操作性较强的线性加权综合评价法和物元综合评价法两种溃坝后果综合评价方法，以此为病险水库除险加固排序提供科学的决策依据。

本书共分9章，第1章由南京水利科学研究院孙玮玮撰写，第2章由南京水利科学研究院孙玮玮、张大伟撰写，第3章由南京水利科学研究院孙玮玮、张大伟、蔡蓁撰写，第4章由南京水利科学研究院孙玮玮、张大伟、蔡蓁撰写，第5章由南京水利科学研究院孙玮玮、山东省平邑县水利局徐建军撰写，第6章由南京水利科学研究院孙玮玮、山东省平邑县水利局徐建军、山东省烟台市水利局姜晓琳撰写，第7章由南京水利科学研究院孙玮玮、山东省平邑县水利局徐建军、山东省烟台市水利局姜晓琳撰写，第8章由南京水利科学研究院孙玮玮、张大伟、蔡蓁撰写，第9章由南京水利科学研究院孙玮玮撰写。在本书编写过程中，得到了水利部大坝安全管理中心李雷、江苏省建湖县人民印刷厂孙超等的指导和帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

本书得到了国家重点研发计划课题“基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术”（2018YFC0407104）及专题“大坝安全多维多源信息的决策融合方法、大坝结构性态预测、预警自适应优化方法”（Gz719005），“十一五”国家科技支撑计划课题“水库大坝安全保障技术研究”（2006BAC14B07）、国家自然科学基金项目“极端事件下大坝的脆弱性与恢复力研究”（50909066）、国家重点研发计划课题“非常规条件下大坝极限承载能力与破坏模式”（2016YFC0401601）、南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金青年基金项目“大坝风险后果综合评价模型的优选”（Y711002），面上基金项目“溃坝风险的社会影响评价

指标和分级标准”（Y715010），重点基金项目“病险水闸除险加固后评估技术研究”（Y712006）、“小型水库除险加固后评估技术研究”（Y717004）以及南京水利科学研究院出版基金的资助。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作者

2020年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大坝风险管理与我国溃坝概况	1
1.2 风险分析与风险评价情况	3
1.3 大坝风险综合评价的基本思路	9
1.4 本书主要内容	11
第 2 章 溃坝概率方法分析	14
2.1 “事件树”法	14
2.2 “可靠度”法	17
2.3 “脆弱度”法	20
2.4 溃坝概率方法适用性分析	28
第 3 章 溃坝后果综合评价理论	30
3.1 评价体系	30
3.2 评价指标的权重	36
3.3 溃坝后果计算模型	44
第 4 章 线性加权综合评价方法及其应用	54
4.1 线性加权综合评价方法	54
4.2 基于线性加权综合评价法的溃坝后果评价标准	58
4.3 采用线性加权综合评价法对江西五座水库的溃坝后果进行评价	60
4.4 线性加权综合评价方法应用总结	65
第 5 章 模糊数学综合评价方法及其应用	66
5.1 模糊数学综合评价方法	66
5.2 基于模糊数学综合评价法的溃坝后果评价标准	75
5.3 采用模糊数学综合评价法对江西五座水库的溃坝后果进行评价	75
5.4 模糊数学综合评价方法及其应用总结	81
第 6 章 物元综合评价方法及其应用	83
6.1 物元综合评价方法	83
6.2 基于物元综合评价法的溃坝后果评价标准	93

6.3	采用物元综合评价法对江西五座水库的溃坝后果进行评价	93
6.4	物元综合评价方法及其应用总结	96
第7章	灰色关联度综合评价方法及其应用	97
7.1	灰色关联度综合评价方法	97
7.2	基于灰色关联度综合评价法的溃坝后果评价标准	107
7.3	采用灰色关联度综合评价法对江西五座水库的溃坝后果进行评价	107
7.4	灰色关联度综合评价方法及其应用总结	111
第8章	主成分分析综合评价方法及其应用	112
8.1	主成分分析综合评价方法	112
8.2	基于主成分分析综合评价法的溃坝后果评价标准	115
8.3	采用主成分分析综合评价法对江西五座水库的溃坝后果进行评价	119
8.4	主成分分析综合评价方法及其应用总结	122
第9章	综合评价方法的比较和局限性分析	124
9.1	五种评价方法的技术特点分析	124
9.2	五种综合评价方法分析结果评价	126
	参考文献	129

第 1 章 绪 论

1.1 大坝风险管理与中国溃坝概况

大坝风险管理是近年来国外发展起来的一种针对水利工程安全管理的新理念，其最大的特点就是不仅关心大坝安全，而且更加关心大坝溃决的后果。大坝风险是大坝溃决概率和溃坝后果的综合^[1]，它将我国工程界从重视“工程安全”转换到“工程风险”思路上来。事实上，“工程安全”和“工程风险”两种理念代表了两种不同的生产力发展水平的要求，生产力水平较低时，人们满足于工程的安全，随着生产力的不断发展，人们已经不仅仅关注工程是否安全，而是更加关注与自己切身利益和生存有关的社会、环境等各种威胁，这是人类社会非常可贵的一大进步。

2000 年在我国召开的第 20 届国际大坝会议对我国坝工界来说有着十分重要的意义，这次会议的第 76 专题就是大坝风险分析^[2]。会议期间，美国专家 D - Bowles 到水利部举办了群坝风险分析讲座，给我国坝工界带来了新的理念。2002 年，水利部组织了“群坝风险分析培训代表团”赴澳大利亚进行风险和风险评估技术考察。考察报告认为，引入风险评估技术对提高我国大坝安全管理水平将是非常及时的、必要的，具有十分明显的现实意义，将会大大推动我国大坝安全的法规建设和管理水平。2003 年，水利部通过“948”项目“水库风险评估和智能化大坝安全技术”引进了澳大利亚 ANCOLD 大坝风险评估技术，正式开启了风险分析在我国大坝安全管理中的应用。2006 年，盛金保^[3]对我国水库大坝风险管理进行了完善。2008 年，孙铭懋在硕士论文《大坝风险与使用寿命分析方法研究》^[4]中探讨了可接受风险标准的确定方法，基于风险分析理论，对大坝安全性、可靠性及耐久性的定量分析方法进行了研究。2010 年，陈兵在硕士论文《大坝溃决风险灰色评估理论与方法研究》^[5]中利用灰色评估理论方法对大坝风险指标进行建模，对于进一步进行大坝溃决风险评估研究具有参考价值，具有重要现实意义。2013 年，王洁在硕士论文《小型水库大坝安全的风险分析研究》^[6]中分析了我国近年来小型水库大坝失事的原因，以及现存水库的病险特点，建立风险因素集，识别影响大坝安全的主要风险因素，并参照水利部《水库大坝安全评价导则》^[7]，结合土石坝建设与管理运行的特点，建立了大坝安全风险评价指标体系。2018 年，李娟娟在硕士论文《中小型水库溃坝社会与环境影响评价》^[8]中构建了中小型水库溃坝社会与环境影响评价指标体系，根据指标选取原则，分析溃坝事故本身的危险性及其可能造成的社会、环境影响，初步识别影响因子。

溃坝后果是大坝风险分析评价的核心内容。目前,国外很多国家和地区(如美国、加拿大、澳大利亚、西欧、南非等)开展溃坝后果评估技术研究较早。在溃坝后果评估技术刚引进大坝安全领域时,大多使用的是纯经济损失评价,即将所有类型的溃坝后果(包括人员伤亡)均用经济价值来表示。如今上述方法虽已基本被淘汰,但大多还只是对生命损失和经济损失分别进行评价,而对社会与环境的影响仍未研究制定相应的定量评估方法。

截至 2019 年,我国共建成各类水库大坝 9.8 万余座,且大多数建于 20 世纪 50—70 年代。随着时间的推移,大坝出现了不同程度的老化和病害,自身安全性逐渐降低。加之台风、暴雨、地震等极端事件频发,大坝常常遭受严重破坏,导致灾难性事件时有发生^[9-12]。1949—2019 年间,我国溃坝 3500 余座,造成大量人员伤亡,溃坝事件给整个社会造成了严重影响,典型溃坝事件及其影响见表 1.1。2019 年我国未见溃坝报道,但是国外溃坝事故一度成为国际舆论热点,如 2019 年 1 月巴西发生一起大坝坍塌事故,造成至少 249 人死亡;2019 年 10 月俄罗斯某水库堤坝垮塌,造成 15 人死亡、数十人受伤。溃坝事件不仅导致大坝自身破坏而且次生灾害严重,虽发生概率小但灾难大,溃坝风险的社会影响已越来越受到社会公众群体的关注,图 1.1 为某溃坝事件后的受灾情景。

表 1.1 典型溃坝事件及其影响统计表

序号	水库名称	溃坝时间	溃坝损失及影响
1	河南板桥、石漫滩水库	1975 年 8 月	竹沟、田岗 2 座中型水库和 58 座小型水库在短短的数小时内相继垮坝溃决,驻马店地区东西 300km、南北 150km 范围内一片汪洋,受灾总人口达 1100 万人,受灾耕地 110 多万 hm ² ,死亡总人数 2.6 万人,冲毁京广铁路 102km,直接经济损失近百亿元,损失之惨重、社会影响之深远亘古未有,其造成的心理创伤至今仍未抚平
2	青海沟后水库	1993 年 8 月	造成下游 300 多人死亡,经济损失达数亿元(占海南州国民经济的 40%左右),产生了巨大的社会影响
3	吉林大河水库	2010 年 7 月	大约 400 万 m ³ 洪水一泻而下,冲毁了下游的大河村、钓鱼台屯、靠山村、小油坊、太平庄等 5 个村庄,房屋大面积倒塌,38 人死亡;受灾群众冲击常山镇镇政府的社会事件,成为网络关注的焦点事件
4	山西曲亭水库	2013 年 2 月	溃坝洪水途经曲亭镇、淹底乡、甘亭镇(重灾区)、甘亭收费站、临汾市平阳大桥,造成多条高速公路、国道、铁路停运
5	陕西清水沟水库	2017 年 7 月	导致子洲县城低洼地段全部过水、下游大理河沿岸居民和县城低洼处居民全部撤离、榆林市转移安置受灾群众 2 万多人、关闭了黄河壶口瀑布景区、各乡镇通信信号中断等,社会媒体竞相报道此次事件,引起了极大的社会影响
6	新疆射月沟水库	2018 年 8 月	造成 20 人遇难、8 人失踪,8700 多间房屋及部分农田、公路、铁路、电力和通信设施受损,引起社会极大关注



图 1.1 某溃坝事件后的受灾情景

随着经济社会发展，人类已步入高风险社会，社会风险意味着可能爆发社会危机，一旦转变为社会危机，对社会稳定和秩序都会造成灾难性的影响^[13]。随着互联网与信息技术的发展，一系列在线社会化媒体（如微信、微博、论坛及自媒体等）全面渗入人们生活^[14]。社会化媒体具有参与、公开、对话、连通性等特点，其最大的特点是赋予每个人创造并传播内容的能力^[15]。重大事件一旦发生，经过媒体迅速传播成为焦点，进而形成强大社会舆论，造成极大的社会影响^[16]。因此，必须依法对所有的病险水库实施除险加固，除险排序实际上是一种决策，那么这种决策靠什么来支持呢？这就是本书所要解决的问题，是关乎我国今后实施对大坝风险管理的一项十分重要的基础应用性研究，可为病险水库除险加固排序提供科学的决策依据，对提升大坝安全管理水平也具有十分重要的现实意义。

1.2 风险分析与风险评价情况

1.2.1 大坝风险分析

风险管理最早起源于美国，起初被应用于核电站的风险评估，自从 1976 年 Teton 坝和 1977 年 Kelly Barnes 坝相继失事后，在大坝安全管理领域美国社会各界便开始关注大坝安全风险，陆军工程师团、垦务局等机构和组织均制定了各自的风险管理办法。1987 年国际大坝委员会颁布了《大坝安全指南》（59 号通告），仍然将大坝安全定义为工程安全性态范畴^[17]。20 世纪 90 年代后该定义开始发生变化。1994 年澳大利亚发布了《大坝安全管理指南》^[18]，该指南取代了 1976 年发布的《大坝运行、维护和监测指南》，在这次修订中明确提出了下游的安全问题，即生命损失、经济损失、环境破坏等内容。1999 年加拿大大坝协会发布了大坝安全导则，定义了安全的大坝（safe dam）：“不会将不可接受的风险强加给人民和财产，能够满足政府、工程专业和公众的安全准则的大坝”^[19]，与 1987 年国际大坝委员会的定义相比，该定义增加了政府、公众、财产以及不可接受风险等重要内容。2002 年世界银行发布了《水坝安

全法律框架比较研究报告》，该报告明确提出了大坝安全包含工程安全和生命、健康、财产、环境安全的现代理念。社会风险的概念是德国社会学家贝克 1986 年在《风险社会》一书中首次提出的，并由此引发了学者对社会风险的关注和探讨^[20]。美国陆军工程师团在 2004 年 4 月发布的《大坝安全—政策与过程》中定义大坝安全为：“大坝安全是保障大坝整体性和生存能力的艺术和科学，使大坝不会对公众、财产和环境发生不可接受的风险，需要综合运用工程准则、经验和风险管理理念体系，去认识大坝是一座结构物，它的安全功能不是由原设计和施工唯一确定的。大坝安全也包括了各种措施和方法，用于确认或预测大坝的缺陷和与溃决有关的后果，并用于证实、重视、降低、消除或补救不可接受风险至合理可能的范围”^[21]。这个定义有三层含义：首先大坝安全是一种艺术和科学，要使大坝不但能够挡水，而且能够使之长期生存；其次大坝的社会影响需要在公众可接受的范围内（首次提到了大坝风险的社会影响）；再者大坝安全包括了将溃坝风险降低至可接受范围的一系列措施和办法。从近几十年大坝安全定义的发展过程可以看出，在 20 世纪 70—80 年代，美国、澳大利亚、加拿大等将大坝安全理解为工程特性，只要大坝不破坏、恶化和溃决，大坝就是安全的，这是传统的大坝安全理念；20 世纪 90 年代起，大坝安全的定义已经包括了大坝风险理念和考虑下游的影响后果，大坝安全不仅要保证工程安全，更重要的是保障下游的公共安全；进入 21 世纪，开始考虑了大坝风险的社会影响，即大坝风险的社会影响应控制在社会群体可接受范围以内。

美国各部门用于水库大坝风险评判的标准各异，风险分析方法也各异，陆军工程师团的 Hagen 在 1982 年最早提出风险的概念^[22-23]，用相对风险指数来判别大坝风险。美国垦务局是美国的大坝管理机构之一，负责管理 350 多座大坝，其推荐使用现场评分（site rating）法来衡量水库大坝的风险，它是在 Hagen 的启发下形成的，美国国家气象局（NWS）则开发了一系列溃坝模型以此进行风险分析^[24-25]。加拿大 BC Hydro（不列颠哥伦比亚省水电公司）负责管理 BC 省内 43 座水库大坝的安全，于 1991 年把风险分析方法引入大坝安全评估中^[26]。1994 年澳大利亚大坝委员会颁布了《ANCOLD 风险评估指南》，为大坝安全评估的应用提供了概念性基础，但并没有提供进行风险评价的细节指南。1995 年以来不断对指南进行修订，2003 年完成了新指南的草稿，该草稿提供了澳大利亚大坝风险管理的一般性框架，确定了风险分类、风险分析、风险评估和风险处理过程中的主要步骤^[27]。英国大坝业主的定量风险分析并未得到官方的支持和应用，也未进行可接受风险标准的应用^[28]。1999—2001 年芬兰环境研究院和农林部、内务部、西部地区环境中心联合开发了 RESCDAM 计划，并提交了《根据溃坝洪水分析开发营救行动计划 RESCDAM》总报告^[29]，该计划分为三部分：风险评价、溃坝风险分析、应急/营救行动计划。瑞典政府已经考虑建立大坝安全法规，大坝业主在 1997 年建立了 RIDAS 指南。葡萄牙工程师考虑了多达 11 个风险因素，提出了综合风险指数（ α ）法^[30]。2004 年，洪云等研究了大坝安全分析中的专家权重问题^[31]；2007 年，李亮进行了混凝土坝等的泄洪建筑物风险指标体系

的建立和泄洪风险研究并将其应用于洪江水电站^[32]；2008年，徐强进行了大坝风险分析的综合研究，将溃坝影响及后果考虑在内^[33]；顾冲时等在对我国大坝风险分析与管理研究现状进行阐述的基础上，论述了大坝风险标准的建立、风险识别、风险评估及风险处理等大坝风险分析与管理各环节的研究现状^[34]；2011年，李升在溃坝洪水数值模拟及可视化研究的基础上，研究了大坝安全风险管理的关键技术，并进行了两河口水电站的系统开发^[35]。

随着风险管理的深入发展，欧美国家在大坝建设设计阶段便考虑了安全风险分级，该分级分别考虑生命损失、经济损失、环境损失以及社会与文化损失四类，四类损失等级划分主要依靠工程师的经验和责任确定，并没有理论支撑^[36]。伊朗在Polrood大坝建设阶段，对物理化学、生物、社会和文化、健康和安全的四个方面造成的潜在影响，做了风险分析和排序^[37]。但是这些成果均没有对风险的综合影响做进一步深入研究。

我国大坝安全管理的发展主要经历了三个阶段：第一阶段是从中华人民共和国成立到1978年改革开放，以粗放式管理为特点，主要采取行政管理和事故管理模式，安全管理技术人员不足、技术不成熟，大坝安全法规基本空缺，因此20世纪60—70年代遭遇了两次溃坝高峰，仅1973年就发生了500多座大坝溃决事件。第二阶段是从改革开放到20世纪90年代末，以法规制度建设不断完善、管理水平不断提高为特征，逐步从行政管理过渡到制度管理。1991年国务院颁布了《水库大坝安全管理条例》，在此基础上一大批配套法规出台，大坝安全管理体系基本形成，大坝注册登记、安全监测、安全评价、安全论证、除险加固等各个环节不断完善，起到了大坝安全的保障作用。该阶段我国水库大坝的安全状况得到极大改善，大坝年平均溃坝率从1973—1975年的 49.13×10^{-4} 降低到1982—2000年的 2.54×10^{-4} 。第三阶段是从21世纪开始，以水利工程管理体制改革的病险水库除险加固为特征，随着我国社会经济迅速发展，经济实力大幅度提高，我国的经济社会已经发展到一个较高水平，“以人为本”的执政理念开始得到贯彻，国家采取了综合手段降低溃坝风险。一方面进行水利工程管理体制的改革，希望从根本上完善大坝安全管理良性发展的机制；另一方面国家又投入巨大资金进行大规模的除险加固，解决水库大坝病险严重的现状，降低突发事件出现概率，同时通过强调应急预案重要性，宣传主动预防的理念。该阶段我国的大坝安全管理已经开始从事故管理逐步向事故预防的方向发展，风险理念得到了逐步接受和认可，工程安全管理理念正在逐步向工程风险管理理念转化。

关于溃坝后果分析，目前国内外均开展了一些研究工作，总体上看，国外对溃坝生命损失的研究较多，而对于经济损失的研究较少。国内则相反，关于生命损失研究不多，而对经济损失研究相对较多，并提出了一些可操作性的方法。国外通常采用ANCOLD（澳大利亚大坝委员会）制定的“F-N”曲线的形式^[38-41]，将溃坝概率和生命损失人数分成可以接受、可以容忍和不能容忍3个区域，直接根据生命损失数来判别溃坝是否可以接受。同样，国外还用类似“F-N”的曲线来评价溃坝经济损失。

至于社会与环境影响，国内外均研究较少，李雷等^[42]提出通过对社会与环境影响的各主要因素予以量化，再综合成社会与环境影响指数，并结合我国国情，借鉴国际上流行的“F-N”曲线法，初步确定我国的社会与环境风险标准。

目前美国、加拿大、英国、芬兰等国家关于溃坝生命损失的估算研究已经取得不少成果，认为影响溃坝生命损失最重要的因素是水深、流速、温度、洪水输沙量以及持续时间等洪水特性参数。此外在很大程度上还取决于是否有警报系统、发出警报的决策过程、预警时间（发出警报至洪水到达之间的间隔时间）、事故发生时间（白天或夜晚）、人口密度、人口状况（特别是年龄组成）和应付溃坝事件的准备程度、撤退路线。国外生命损失估算主要有以下几种方法：美国垦务局的 Brown - Graham 法^[43]、Dekay - McClelland 法^[44-45]、Graham 法，芬兰的 RESCDAM 法^[46]、加拿大的 Assaf 法^[47]、Utah 州立大学法^[48]等。其中，前四种方法是基于对溃坝历史记录数据进行经验统计与回归分析得出的。这些方法因为其简单方便已在有些国家得到了应用，但这些估算方法很大程度上依赖于详细的历史记录数据，故公式中的参数具有不确定性，且对各个参数的量化处理也不一定得当，因而一些发达国家对这四种方法已经很少使用或只作初步估算使用。加拿大的 Assaf 法与 Utah 州立大学法则是以概率分析为基础把可靠度概念引入溃坝生命损失估算之中。

国内对溃坝生命损失的研究仍处于初级阶段，姜树海、范子武曾初步对溃坝生命损失进行了评估，李雷等^[49]综合国外各种溃坝生命损失计算方法，总结了影响生命损失估算的几个关键参数即风险人口、洪水严重程度、警报时间、公众对溃坝事件严重性的理解程度等。周克发等^[50]在总结 8 座已溃水库大坝生命损失情况调查研究成果的基础上，分析了我国已溃坝生命损失的基本规律和特点，总结了风险人口死亡率的变化范围，提出了建议参考值，在溃坝生命损失估算方面，提出了一些间接影响因素，分别是风险人口组成中青壮年所占比例、天气、溃坝发生时间、与大坝距离、应急预案实施情况、坝高、库容、大坝下游坡降及建筑物抗冲能力等，并在此基础上提出了较为适合我国溃坝生命损失实际情况的李-周模型。

对于溃坝经济损失估算，目前国内外均开展了一些研究工作，但我国的研究成果可操作性更强，可以直接采用进行估算。溃坝经济损失既包括水库工程损毁造成的损失，又包括溃坝洪水淹没造成的损失。对于水库工程损毁造成的损失计算，施国庆等^[51]根据工程实际情况提出了收益现值法、重置成本法、等效替代措施费用法、工程资产现值重估法等方法。溃坝洪水淹没造成的经济损失包括直接经济损失和间接经济损失。

环境影响评价（environment impact assessment, EIA）是指对突发性事件或事故等行为对周围环境造成的一系列潜在影响进行分析、预测和评估，针对评估的结果进行管理和决策。环境影响评价研究源于加拿大在 1964 年召开的有关国家环评会议^[52]，1969 年美国颁布了国家环境法规^[53]，在国际上第一次建立环境影响评价制度；之后荷兰、英国、澳大利亚、瑞典、日本等国家也开始对环境影响评价进行相关研究，先

后建立了环境影响评价制度^[54]，纳入到政府决策中。

20 世纪 70 年代末，环境影响评价的概念被引入我国，1981 年后颁布了多项法律法规，并多次进行了修订和完善，对评价的程序进行了初步规范。2002 年，我国颁布了《中华人民共和国环境影响评价法》^[55]（以下简称《环评法》），以法律的形式确立了环境影响评价的地位。2016 年，我国新《环评法》颁布实施，进一步彰显了环境影响评价在我国的重要性，至此，我国建立了较为标准规范的环境影响评价制度。

我国水利水电类项目环境影响评价始于 20 世纪 80 年代初，80 年代后期建立了较完善的管理程序和技术规范。国家生态环境部先后出台了《环境影响评价技术导则 水利水电工程》（HJ/T88—2003）、《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1—2011）等系列技术导则规范，阐述了水利水电类项目环境影响评价的内容、要点及要求，对开展评价工作起到了指导与规范作用。但由于项目的不同阶段在评价过程中对影响源、影响范围等的关注点不尽相同，具体的项目影响还要依据项目的特殊性来选择需要评价的内容，而该系列规范没有针对溃坝特点，系统和准确地规定评价内容。

对于水库溃坝的环境影响，李雷等^[42]也进行了初步研究，认为水库溃坝环境影响主要包括河道形态的影响，生物及其生长栖息地（包括河流、湿地、表土和植被等）的丧失，人文景观（包括公园与保护区）的破坏；易受影响或造成重大环境影响或污染的工业（包括核设施、化学储存设施、农药厂等）影响等，因而在进行水库溃坝环境影响评价时将影响因素分为河道形态、生物及其生长栖息地、人文景观和污染工业四个方面，采用系数法综合估算水库溃坝的环境影响。

社会影响是指任何公共或私人行为的后果，带来人们生活、工作、游憩活动中相互关系和组织协作方式的改变，一般广泛涉及对审美、考古、社区、文化、经济、性别、健康、原住民、基础设施、制度、政治、贫困、心理、资源等社会各个层面的影响^[18]。在溃坝社会影响评价方面，李雷等^[42]认为，在进行水库溃坝社会影响评价时将影响因素分为风险人口、重要城市、重要设施以及文物古迹、艺术珍品和稀有动植物等四个方面，采用系数法综合估算水库溃坝的社会影响。

1.2.2 综合评价方法

综合评价方法的研究始于 20 世纪 60 年代的美国，最初用于综合经济指标的衡量。第二次世界大战后，绝大多数国家都十分重视经济的发展，人均国民生产总值成了衡量、比较各国经济发展水平的一个十分重要的指标。但随着各国经济水平的提高，也出现了不少新的问题与矛盾，有一些国家出现了有增长无发展的现象，从而使人们逐渐认识到单纯追求经济增长和只用人均国民生产总值单个指标来衡量经济社会发展所带来的片面性和局限性，由此引发了从经济、社会、科技等多方面建立一套指标体系来综合反映一个国家（或地区）经济、社会、环境发展状况的需求，由此产生和发展了综合评价的理论与方法^[56]。

在社会经济管理向统计指标评价提出新要求的同时，现代科学也在发展中逐步形

成了新的学科和方法,为满足社会经济统计要求提供了新的工具。20世纪60年代,美国学者查德(L A Zadeh)创立了模糊集合理论^[57-59],很快在社会,经济、自然、科技等方面得到了应用,其中的模糊综合评判方法已成为如今最流行的综合评价方法之一。宣家骥在对多属性决策理论进行阐述的基础上,介绍了确定型多属性决策方法、定性定量相结合的决策方法和模糊多属性决策等方法,并将其应用于军队指挥自动化系统综合评价,取得了很好的效果^[60]。1993年陈晓建对系统评价的基本理论进行了讨论,介绍了系统评价的基本方法,包括经济分析法、专家咨询法和不定性评价,层次分析方法,逼近理想解的排序方法,评价相对有效性的数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法,模糊综合评判法。陈晓建利用上述方法对研究与发展、企业经营和教育管理进行了评价,解决了不少实际问题^[61]。2000年胡永宏介绍了一些较新的综合评价方法,比如主成分分析法和因子分析方法、聚类分析和判别分析方法、灰色关联分析方法、距离综合评价方法、DEA方法、模糊综合评判方法、多维标度法,同时胡永宏对于评价指标的预处理也进行了较多的讨论^[62]。2002年郭亚军出版了《综合评价理论和方法》一书,书中具体讨论了自己许多创造性的成果,比如基于“功能驱动”原理、“差异驱动”原理以及综合集成原理生成的权重系数方法、递阶综合评价方法、协商评价、群体评价、动态综合评价,集“过去”“现在”“未来”于一体的“立体”评价^[62-63];李荣钧致力于模糊多准则决策评价研究,他的最新研究成果包括模糊决策理论基础、模糊集的比较和排序、模糊多属性决策、模糊群决策、模糊多目标决策、模糊系统优化设计、模糊决策支持系统和模糊专家系统等^[64-65]。2011年钟志科开展了综合评价方法的合理性研究^[66],从系统化和公理化的角度出发,给出了综合评价函数的概念,并给出了有关判断综合评价方法合理性的判定准则;分析了常用的几种综合评价函数及其满足的合理性准则。2015年彭张林进行了综合评价过程中的相关问题及方法研究^[67],围绕指标体系的构建过程与方法的规范性,考虑主观信息和客观信息的组合赋权,确定性与不确定性信息共生环境下信息存在相互依存与反馈关系的综合评价,以及一次组合评价存在非一致性和收敛性较差的风险等相关具体科学问题展开深入的分析与研究,提出相应的解决方法,并结合案例作进一步的验证分析,以丰富和发展综合评价理论与方法体系,拓展了综合评价理论与方法解决实际应用问题的能力。

目前常用的评价方法主要有:综合指数法、灰色关联评价法、模糊综合评价法和层次分析法等。

(1) 综合指数法。综合指数法又称质量指标法,评价步骤如下:首先确定评价参数,然后将评价参数的实测值与指标值相比,进行数据归一化处理,得出一系列无量纲数;其次对评价参数赋权,将各单元参数的无量纲指数和参数权重进行加权平均,得出综合评价指数,最后将综合指数按一定间隔划分为等级。

(2) 灰色关联评价法。灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的方法,近年来广泛应用于大坝安全及岩土及结构工程安全评估中^[68]。之后灰色系统