

基于生态服务价值的中国分区域溃坝环境风险标准研究

李巍^{1,2}, 衣建妮¹, 张贺祥², 焦余铁²

(1.河南省轨道交通智能安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;

2.郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 溃坝风险标准是大坝管理者进行风险决策的基础, 然而溃坝环境风险作为溃坝风险标准的重要内容之一, 目前尚没有统一的标准。借鉴生态经济学中关于生态系统服务价值和当量因子法的研究思路, 对环境价值进行量化, 利用 ALARP 准则和 $F-N$ 曲线将溃坝环境风险标准与现有标准进行有效衔接; 考虑我国不同区域环境和经济的差异, 构建风险偏好矩阵以确定各区域风险偏好情况, 进而提出了我国溃坝环境风险标准, 并以河南省陆浑水库为例进行了应用说明。

关键词: 溃坝; 环境风险标准; 当量因子法; 风险偏好

中图分类号: TV698 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1000-1379.2024.04.023

引用格式: 李巍, 衣建妮, 张贺祥, 等. 基于生态服务价值的中国分区域溃坝环境风险标准研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(4): 135-141.

Study on Environmental Standards for Dam Break in Different Regions of China Based on Ecosystem Service Value

LI Wei^{1,2}, YI Jianni¹, ZHANG Hexiang², JIAO Yutie²

(1.Henan Rail Transit Intelligent Safety Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450001, China;

2.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Dam-break risk standards are the basis for dam managers to make risk decisions. However, as one of the important contents of dam break risk standard, there is no unified environmental risk standard at present. This paper used the research ideas of ecosystem service value and equivalent factor method in ecological economics for reference, and quantified the environmental value. ALARP criterion and $F-N$ curve were used to effectively link environmental standards with existing standards. Considering the differences of environment and economy in different regions of China, the risk preference matrix was built, and the risk preference of each region was determined, so as to formulate the environmental risk standard in China. Taking Lulun Reservoir in Henan Province as an example, the application of this method was illustrated.

Key words: dam break; environmental risk standard; equivalent factor method; risk preference

近年来极端气象事件频发, 超标准洪水发生频率不断提高, 我国部分水库大坝设计存在缺陷、建设质量差和运行管理不善等导致溃坝时有发生^[1]。溃坝环境风险标准是进行环境风险评估和决策的依据, 制定合理的生态环境风险标准不仅有利于帮助决策者全面认识大坝的风险水平, 做出更科学的风险决策, 完善溃坝风险后果评价体系及大坝风险管理理论, 而且对于建设生态美好中国具有重要的意义^[2-3]。

目前尚没有统一的溃坝环境风险标准^[4]。因为溃坝环境涉及范围广, 具有影响因素繁多和量纲不统一等特点, 所以难以对环境价值进行量化。相较于溃坝造成的生命损失和经济损失, 以往研究对溃坝环境影响的关注度较低, 因此导致目前多数研究成果集中于溃坝环境指标体系的构建及数学方法分析上。如: 王仁钟等^[5]认为常见的环境影响是指开发行为可能引起的环境条件的改变或新的环境条件的形成, 影响主要体现在河道形态的变化、生物及其栖息地的丧失、人文景观的破坏, 以及易受影响、造成重大环境影响或污染的工业影响等, 并定义了一个影响指数来评价风

险大小; 何晓燕等^[6]认为环境影响是指由水库溃坝引发的区域环境条件的变化, 具体体现在水、土、生态和人居环境等方面, 并应用层次分析法和模糊数学法来评价风险大小; MENDOZA F 等^[7]认为环境风险主要与大坝下垫面的侵蚀、渗滤液量以及污染负荷等有关, 并定义了大坝环境安全指数来计算环境风险; 程莉等^[8]认为环境影响是指人类活动包括经济活动和社会活动对环境的作用和导致的环境变化, 以及由此引起的对人类社会和经济的效应, 并基于现有研究成果

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079127, 52179144, U2040224, 51234567); 国家重点基础研究发展计划项目(2016CB000000); 河南省科技攻关项目(202102310394); 河南省高校科技创新人才计划项目(22HASTIT011); 河南省青年人才支持项目(2021HYTP024); 国家大坝安全工程技术研究中心 2021 年开放研究基金项目(CX2021B01); 河南省教委科技发展计划项目(202102310394)

作者简介: 李巍(1983—), 男, 河南郑州人, 副教授, 博士, 主要从事水工建筑物等工程的风险评价研究工作

通信作者: 张贺祥(1984—), 男, 河南郑州人, 讲师, 博士, 研究方向为水利工程风险评价标准

E-mail: 21872168@qq.com

选择河道形态、水环境、土壤环境、植被覆盖、生物多样性、人文环境及污染工业等7个溃坝环境影响因素,应用模糊数学理论进行了环境风险评价;Xu等^[9]考虑土地承载力、水质、水库淤积、下游河床侵蚀及地震地质灾害等因素对环境的影响进行分析;李宗坤等^[10]基于集对分析-可变模糊集耦合模型,构建并细化了溃坝环境影响评价指标体系和评价等级标准。这类方法可有效用于溃坝环境影响严重程度排序,但是并不能给出评价结果具体表示什么后果(通常将评价结果分为一般、严重、极其严重等3~5个等级,仅能表示风险的相对大小),属于半定量评价,评价结果往往不具有通用性^[1],因此不适合用来制定风险标准。为了实现溃坝环境风险的定量表征,张莹^[11]将能值足迹法引入溃坝环境影响风险评估中。能值足迹法是生态环评领域常用方法之一,然而该方法的能量折算系数和能值转换率取值科学性和准确性还有待进一步提高^[11]。基于当量因子法量化的生态服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)应用广泛,直观易用,数据需求少,特别适用于区域或全球尺度环境价值评估^[12]。因此,本文在采用当量因子法量化环境价值的基础上,借助ALARP准则、F-N曲线法和风险矩阵,初步探究构建我国分区域溃坝环境风险标准,为后续研究提供借鉴。

1 溃坝环境影响的定义及环境价值的估算

1.1 溃坝环境影响的定义

虽然各个学者对溃坝环境影响的具体定义有所差异,尚没有形成统一的定义^[1],但是其本质是水库溃坝引发水库附近自然环境和生态环境条件的变化^[13-14]。而自然环境和生态环境均属由生物和非生物组成的自然生态系统。人类生存所需要的水、土、空气、食物、药材、木材和煤炭等原料都是自然生态系统直接提供的。自然生态系统具有很多重要的功能来保证人类的健康发展,如调节气候、净化水体和空气、分解废物、涵养水土、缓解旱涝灾害、保护生物多样性等^[15-16]。自然生态系统通过其功能不断为人类提供环境条件和物质基础,创造着服务价值(类似由人类劳动创造的价值GDP),因此从人类角度来看,可以将广义的溃坝造成的环境影响定义为:溃坝破坏使得自然生态服务供给稀缺,导致ESV产出减少。

1.2 环境价值的估算

当量因子法是谢高地等^[17]在Costanza等研究的基础上构建的一种基于专家知识的ESV量化方法,其将1个标准单位生态系统服务价值当量因子(以下简称标准当量)定义为1hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值,以衡量生态系统对生态服务贡献相对大小的潜在能力。农田生态系统的服务价

值体现在粮食生产,粮食产量价值主要依据稻谷、小麦和玉米三大粮食作物计算,其计算公式为

$$D = S_r F_r + S_w F_w + S_c F_c \quad (1)$$

式中: D 为1个标准当量的生态环境价值量; S_r 、 S_w 、 S_c 分别为2019年稻谷、小麦和玉米的播种面积占3种作物播种总面积的比例; F_r 、 F_w 、 F_c 分别为全国稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润。

参考2017年、2018年和2019年《中国统计年鉴》^[18-20]及《全国农产品成本收益资料汇编》^[21-23],确定一个标准当量(D)大小为1482.67元/hm²。谢高地^[17]等基于已有研究成果,参考相关统计年鉴及各类统计文献资料,使用基于改进的CASA模型、NPP数据,结合专家经验,确定了不同类型生态系统单位面积各类服务功能年均价值当量(以下简称基础当量),见表1。

表1 单位面积生态系统服务基础当量

生态系统分类		供给服务			调节服务				支持服务			文化服务(美学景观)	合计
一级	二级	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性		
农田	旱地	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06	4.01
	水田	1.36	0.09	-2.63	1.11	0.57	0.17	2.72	0.01	0.19	0.21	0.09	3.89
森林	针叶	0.22	0.52	0.27	1.70	5.07	1.49	3.34	2.06	0.16	1.88	0.82	17.53
	针阔混交	0.31	0.71	0.37	2.35	7.03	1.99	3.51	2.86	0.22	2.60	1.14	23.09
	阔叶	0.29	0.66	0.34	2.17	6.50	1.93	4.74	2.65	0.20	2.41	1.06	22.95
	灌木	0.19	0.43	0.22	1.41	4.23	1.28	3.35	1.72	0.13	1.57	0.69	15.22
草地	草原	0.10	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56	0.25	5.07
	灌草	0.38	0.56	0.31	1.97	5.21	1.72	3.82	2.40	0.18	2.18	0.96	19.69
	草甸	0.22	0.33	0.18	1.14	3.02	1.00	2.21	1.39	0.11	1.27	0.56	11.43
湿地	湿地	0.51	0.50	2.59	1.90	3.60	3.60	24.23	2.31	0.18	7.87	4.73	52.02
荒漠	荒漠	0.01	0.03	0.02	0.11	0.10	0.31	0.21	0.13	0.01	0.12	0.05	1.10
	裸地	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.20
水域	水系	0.80	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89	125.61
	冰川积雪	0.00	0.00	2.16	0.18	0.54	0.16	7.13	0.00	0.00	0.01	0.09	10.27

本文使用土地利用遥感数据,以耕地对应农田生态系统、沼泽对应湿地生态系统。取森林、草地、水域和荒漠的生态系统二级分类的基础当量平均值分别作为遥感数据中林地、草地、水域和未利用土地(除沼泽地以外)的计算因子,根据表1计算得到2020年全国各地区ESV,如图1所示。

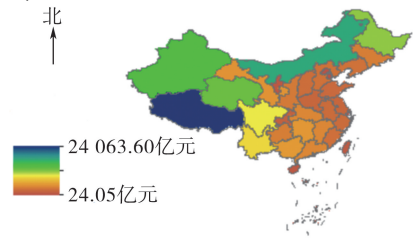


图1 各省ESV计算结果

2 溃坝环境风险标准构建方法

2.1 风险标准构建原则

由于不同国家的政治、经济、文化等可能存在较大差异^[24-25],因此不能将国外风险标准直接套用于我国^[26-27]。一些发达国家开展大坝风险管理研究较早,其成果在实际应用中得到不断发展与完善。因此,可参考借鉴他们在制定大坝风险标准的过程中所考虑的主要因素及处理关键问题的方法,来制定适用于我国的水库大坝环境风险标准。结合国内外相关成果和我国国情,根据以下原则构建我国大坝的风险标准^[28-29]:

1)符合我国大坝的安全状况。我国现役水库大坝很多修建于20世纪50—70年代,受限于当时的经济和技术水平,大量大坝存在安全隐患。若将标准定得太严格,会导致许多水库被划归为“病险”状态。在当前除险加固资金相对紧缺的情况下,会造成很多水库得不到及时的除险加固,被迫改变运行条件或者停止运行,恶化当地经济发展环境,也不利于对“病险”水库的病险程度进行有效区分。

2)与当前的安全标准有效衔接。我国水库大坝目前处于从安全管理向风险管理转变的过渡期,为了避免安全标准与风险标准之间的差距太大,导致不能发挥有效作用,可将基于风险分析的大坝安全决策作为安全标准的补充,实现与当前安全标准有效衔接。

3)符合社会对于风险的接受意愿。随着人民对美好生活需要的日益增长、风险意识的不断提高,发生同样严重的事故,群众对于事故会更加关注。因此,在制定风险标准时,不仅要针对工程本身,而且应考虑群众对风险的接受意愿。

2.2 ALARP 准则

任何事物都不可能彻底消除风险,只能通过预防措施来降低风险。虽然风险越低意味着越安全,但是随着风险水平的不断降低,要进一步降低风险的难度就越大,甚至需要花费的成本和努力呈指数曲线上升。结合我国经济、社会发展水平及群众对于风险接受意愿的实际情况,可在系统的风险水平和成本之间进行折中,因此选择ALARP(As Low As Reasonably Practicable)准则来构建我国的风险标准。

ALARP 准则即最低合理可行准则,它将风险划分为不可容忍区域、最低合理可行区域以及广泛可接受区域。当风险位于不同区域时,采取的措施不同。在不可容忍区域,必须采取措施降低风险;在最低合理可行区域,决策者根据获得的收益与降低风险的成本来决定是否采取措施;在广泛可接受区域,可不采取风险

控制措施。ALARP 准则如图2所示^[30]。

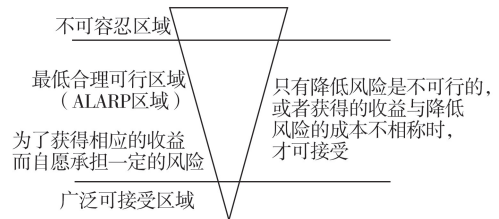


图2 ALARP 准则

2.3 F-N 曲线法

目前对于可接受风险的定量研究方法主要有成本效益法、生活质量指数法、问卷调查法和F-N曲线法等。成本效益法认为风险由一个最大值和最小值组成,位于两者之间的区域,风险管理者须对成本与效益进行决策分析,一般以实现净效益(收益-成本)最大为决策依据;生活质量指数法用人均年国民生产总值、延续人的寿命以及人们能享受到的健康生活的有效时间来刻画生活质量,是符合伦理和道德标准的风险管理指标;问卷调查法是通过了解公众面对灾害风险时的避灾意愿,让群众真正参与到风险决策中,进而制定行之有效的管理措施;F-N曲线是基于概率论提出的允许各种事故发生的限制曲线,它考虑了当前所处的风险状态以及人们对风险的厌恶程度。

在以上方法中,成本效益法很难量化投入成本与从环境获得收益之间的关系;生活质量指数法不适用于环境风险标准制定;问卷调查法受地域范围的影响,涉及每个区域的难度大,不适合大区域范围的环境风险标准制定;而F-N曲线法以概率分析和期望效益为基础,科学性和通用性强。因此,本研究选择F-N曲线法来定量刻画环境风险标准。

F-N曲线由Farmer在1967年建立,其先在核电站的风险管理领域得到了应用,而后被广泛应用在大坝风险管理领域社会生命风险标准的制定中^[31],其表达式如下:

$$1 - F_N(x) < C/x^n \quad (2)$$

式中: $F_N(x)$ 为年死亡率分布函数,表示死亡人数为x的概率; $1 - F_N(x)$ 为死亡人数不大于N的概率;C为常数,决定了风险控制线的起始位置;n为斜率,n越大意味着对风险越厌恶,风险越不能被接受。

文献[4]根据国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》,按照1人对应400万元的比例,将生命损失的风险标准转换为经济损失风险标准,还提出了对于社会和环境的影响,为了避免标准过于复杂,可将其简化为弥补上述风险而需要投入的资金,从经济角度进行分析。因此,可在生命风险和经济风险标准的基

础上构建溃坝环境风险标准,以 $F-N$ 曲线表示环境价值损失与其超过概率之间的关系,对此可将式(2)中 $F_N(x)$ 理解为弥补生态环境风险而需要投入的资金小于 x 的概率分布函数, C 为常数, n 为标准线的斜率。

3 溃坝环境风险标准的构建

3.1 C 值的确定

C 决定了标准线的起始位置。部分国家或机构对可容忍风险 C 的取值见表 2[其中包括了核电站、危险化学品、工厂、各类房屋(医院、学校和住宅等)、边坡和大坝等多种应用类别]。由表 2 可知, C 多采用 10^{-3} 。考虑到危险化学品、工厂和房屋等发生事故主要是人为因素引起的,而水库大坝施工、运行过程中不受人为控制的自然因素(如暴雨洪水等)是事故发生的重要因素,因此根据李宗坤等^[4]的建议适当降低其标准,取 $C=10^{-2}$,可接受风险标准可取其低一个数量级,即 $C=10^{-3}$ 。

表 2 部分国家或机构可容忍风险 C 值

国家/地区/机构	C 值	国家/地区/机构	C 值
中国香港(GEO)	10^{-3}	巴西(里约热内卢)	10^{-2}
英国(HSE)	10^{-2}	巴西(圣保罗)	10^{-3}
澳大利亚(AGS)	新建 10^{-4}	荷兰(VROM)	10^{-3}
	现有 10^{-3}	美国(圣巴巴拉)	10^{-3}
澳大利亚(维多利亚)	10^{-2}	加拿大(CDA)	10^{-3}
澳大利亚(新南威尔士)	3×10^{-3}	丹麦	10^{-2}

3.2 n 值的确定

n 值代表着风险偏好程度。考虑到我国疆土辽阔,不同地区之间经济发展水平、生态环境质量、社会和文化背景等存在较大差异,因此不同地区对风险偏好程度理应是不同的,进而引入风险偏好矩阵判断各地区的风险偏好。风险偏好矩阵方法于 20 世纪 90 年代提出,最早被应用于美国军方武器系统研制项目中,经过几十年的应用和发展,目前已成为判断项目风险重要性的一种结构性方法,被广泛应用于风险评定和管理研究领域^[32]。

在一般情况下,一个区域人均 GDP 越高,人们对生活质量要求越高,越注重周围的生态环境,越厌恶风险;生态环境质量越高,灾害发生时造成的环境损失越高,越厌恶风险。单位面积平均生态环境价值和人均生态环境价值从不同角度反映了区域生态环境情况。人均 ESV 越高,区域可持续发展能力越强,但是并不能说明灾害发生后造成的生态环境损失越严重。例如在一些贫瘠的土地上发生洪灾,虽然并不会造成很严重的生态环境损失,但是由于人口稀少,人均 ESV 反而不低,因此使用人均 ESV 并不合适。单位面积平均 ESV 则可以很好反映出该区域内生态环境的重要程

度,单位面积平均 ESV 越高,发生洪灾造成的损失往往越大。因此,本文选择人均 GDP 和单位面积平均 ESV 来构建风险偏好矩阵。根据国家统计局发布的统计数据,2020 年各省(区)人均 GDP 和单位面积平均 ESV 见表 3。

表 3 2020 年各省(区)人均 GDP 与单位面积平均 ESV

省(区)	人口(常驻)/万人	人均 GDP/万元	ESV/亿元	面积(陆地)/ km^2	单位面积平均 ESV/(元/ m^2)
安徽	6 102.72	6.34	2 282.98	140 100	1.63
澳门	68.32	24.63	0.38	33	1.15
北京	2 189.31	16.49	295.51	16 410	1.80
重庆	3 205.42	7.80	1 451.82	82 402	1.76
福建	3 973.00	10.57	2 742.24	124 000	2.21
甘肃	2 501.98	3.60	4 797.57	425 800	1.13
广东	12 601.25	8.79	4 059.66	179 725	2.26
广西	5 012.68	4.42	5 308.27	237 600	2.23
贵州	3 622.95	4.62	3 678.02	176 167	2.09
江苏	8 474.80	12.12	1 969.40	107 200	1.84
海南	1 008.12	5.49	704.38	35 400	1.99
河北	7 461.02	4.85	2 794.48	188 800	1.48
河南	9 936.55	5.53	1 974.39	167 000	1.18
黑龙江	3 185.01	4.30	11 614.27	473 000	2.46
湖北	5 775.00	7.52	4 057.06	185 900	2.18
湖南	6 644.48	6.29	4 997.21	211 800	2.36
吉林	2 690.73	5.11	3 670.75	187 400	1.96
江西	4 518.86	5.69	4 109.97	166 900	2.46
辽宁	4 259.14	5.90	2 874.17	148 600	1.93
内蒙古	2 404.92	7.22	17 678.74	1 183 000	1.49
宁夏	720.27	5.44	711.47	66 400	1.07
青海	592.40	5.07	13 065.77	722 300	1.81
山东	10 152.75	7.20	2 039.32	157 900	1.29
山西	3 491.56	5.06	2 554.02	156 700	1.63
陕西	3 952.90	6.22	3 360.46	205 600	1.63
上海	2 487.09	15.56	137.54	6 341	2.17
四川	8 367.49	5.81	9 464.28	486 000	1.95
台湾	2 356.12	18.20	946.47	36 014	2.63
天津	1 386.60	10.16	246.62	11 966	2.06
西藏	364.81	5.22	24 063.58	1 228 400	1.96
香港	747.42	32.30	24.05	1 107	2.17
新疆	2 585.23	5.34	14 638.28	1 660 000	0.88
云南	4 858.30	5.19	8 584.68	394 100	2.18
浙江	6 456.76	10.01	2 362.88	105 500	2.24

根据 2020 年世界银行对收入的分类标准^[33],我国大部分省份每年人均收入位于中高收入区间(4 046~12 535 美元),少数省份人均收入位于高收入区间(>12 535 美元)。为了更细致区分各省(区)人均 GDP 收入,将中高收入区间平均划分为 2 个区间,则人均 GDP 划分标准为[2.58, 5.29]万元、(5.29, 8.00]万元和>8.00 万元。将各省份单位面积平均 ESV 最高值和最低值分别设为区间上下限,将区间划分为[0.88, 1.46]元、(1.46, 2.05]元和(2.05, 2.63]元。最终构建的

风险矩阵见表4。

表4 风险偏好矩阵

人均 GDP/万元	单位面积平均 ESV/(元/m ²)		
	[0.88,1.46]	(1.46,2.05]	(2.05,2.63]
[2.58,5.29]	X	X	Y
(5.29,8.00]	X	Y	Y
>8.00	Y	Y	Z

当风险偏好为 Z 时,可取 $n=2.0$,为风险厌恶型;当风险偏好为 Y 时,可取 $n=1.5$,为风险轻微厌恶型;当风险偏好为 X 时,可取 $n=1.0$,为风险中立型。由此根据 2020 年各省(区)人均 GDP 和单位面积平均 ESV,依据风险偏好矩阵判断各省(区)风险偏好,如图 3 所示。

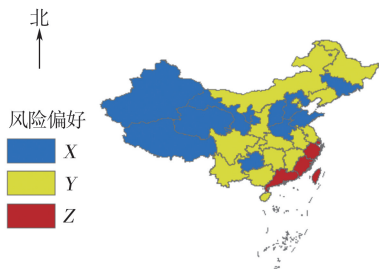


图3 各省(区)风险偏好

由图 3 可知,风险偏好为 X 的地区主要包括我国西部省份和中部省份以及吉林省。西部地区如新疆、西藏、青海、甘肃和宁夏,经济发展比较落后,较生态环境而言,人们会更注重经济的发展,因此风险偏好为 X。中部省份如河北、河南、山西、山东,虽然经济总量较大,但是人口众多,人均 GDP 偏小,因此风险偏好也为 X。东北三省中只有吉林省的风险偏好为 X,经对比发现,虽然吉林省的人均 GDP 高于黑龙江省的,但是黑龙江省有大兴安岭和小兴安岭等重要的生态保护区,其生态价值较高,对风险容忍度较低,因此东北三省中仅吉林省风险偏好为 X。

我国大多数省(区)的风险偏好为 Y,其中一些省份虽然经济比较落后,但是生态环境质量较高(如黑龙江、辽宁、云南、广西和江西等);一些省份经济较发达,然而生态环境质量一般(如北京、天津、澳门和江苏等);还有一些省份经济总体发展不错,生态环境质量也较好(如湖南、湖北、四川和重庆等),然而人口较多导致人均 GDP 没有迈入高收入区间,因而风险偏好为 Y。

我国仅有上海、香港、广东、福建、浙江和台湾风险偏好为 Z。这些区域集中在我国东南部沿海,特点是经济发达,生态环境质量较高,因此对风险的容忍程度较低。以上风险偏好的分布划分较为科学客观地反映

了我国各省(区)的实际情况。

3.3 极值线的确定

大部分国家或地区的风险标准设定了极值线,极值线有概率极值线和事故极值线两种类型。澳大利亚等国家或地区认为事故概率小于某值则无须考虑事故后果,这种类型的极值线称为概率极值线;我国香港和一些国家认为事故损失大于某值则无须考虑事故概率,这种类型称为事故极值线。考虑到我国大坝安全状况、管理水平及经济、社会发展水平,设置事故极值线在当前并不可行^[4],因此根据以下两点,可考虑设置概率极值线。

1)我国大坝事故概率。根据文献[34-35],可容忍风险的极值可取年均溃坝概率的 10%,可接受风险一般比可容忍风险低一个数量级,因此可接受风险的极值可取年均溃坝概率的 1%。1954—2018 年,我国发生了 3 541 起溃坝事件,其中大中型水库溃坝 132 座,年均溃坝率 2.34×10^{-5} ,因此可容忍和可接受的极值分别为 2.34×10^{-5} 和 2.34×10^{-6} ;小型水库溃坝 3 409 座,年均溃坝率 6.05×10^{-4} ,因此可容忍和可接受的极值分别为 6.05×10^{-4} 和 6.05×10^{-5} 。

2)我国的可靠度标准。假设可靠度功能函数 Z 符合正态分布,则失事概率 $P_f = 1 - \Phi(\beta)$ 。文献[36]规定了我国可靠指标 β 的取值:大(1)型水库可取 4.2,大(2)型和中型水库可取 3.7,小型水库可取 3.2。

我国当前的可靠度标准与大坝安全情况较为一致,因此也可取 P_f 的 10% 和 1% 分别作为可容忍风险和可接受风险的极值。考虑到人们对于溃坝造成的环境损失(生态环境受到损害、服务功能丧失导致的损失)关注程度明显低于生命损失和经济损失,且在 1981—2018 年共计 564 座溃坝中,无大型水库,有 13 座中型水库,其余为小型水库^[37],因此可适当降低要求,大型水库和中型水库采用一样的标准,以避免标准过于复杂。对于大中型水库,其可容忍和可接受的风险概率极值分别为 1.08×10^{-5} 和 1.08×10^{-6} ,小型水库可容忍和可接受的风险概率极值分别为 7.00×10^{-5} 和 7.00×10^{-6} 。

为同时满足根据大坝安全水平和当前可靠度标准确定的极值线,取其较小值作为风险标准。最终确定大中型水库的可容忍和可接受风险概率极值分别为 1.08×10^{-5} 和 1.08×10^{-6} ,小型水库的可容忍和可接受风险概率极值分别为 6.05×10^{-5} 和 6.05×10^{-6} 。

综上所述,我国水库大坝环境风险标准如图 4 和

图5所示。

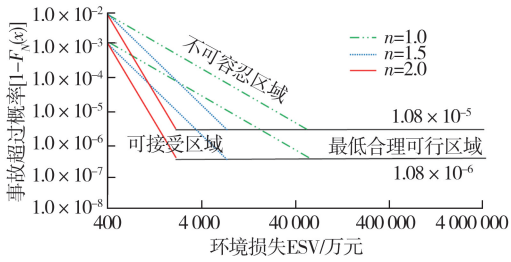


图4 大中型水库溃坝环境风险标准

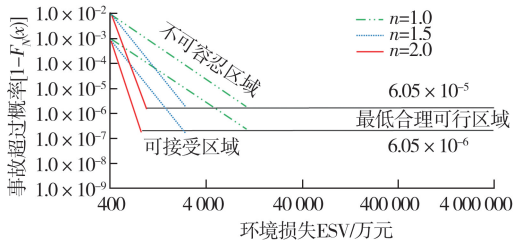


图5 小型水库溃坝环境风险标准

4 实例分析

根据风险标准判断具体水库的环境损失是否可接受或容忍,需要对其失事概率和环境损失进行定量计算。一般失事概率可通过事故树等方法进行分析;环境损失量化可结合溃坝洪水演进模拟,分析不同类型土地在溃坝洪水下的损失率,进而确定ESV的损失大小。受限于具体资料的缺乏,本文以陆浑水库为例仅进行大致计算。

陆浑水库位于河南省洛阳市嵩县境内,是一座以防洪为主,兼具灌溉、发电、养殖、供水和旅游功能的大(1)型水库。参考文献[38]取该水库的事故超过概率为 1.79×10^{-4} 。根据洪水演进模拟结果得到下游潜在淹没范围的土地利用情况,如图6所示;文献[39]给出了各类型土地在不同淹没水深下的损失率,见表5;基于GIS统计得到各类型土地在不同淹没水深下的面积,见表6;最终计算得到ESV的损失大小,见表7。

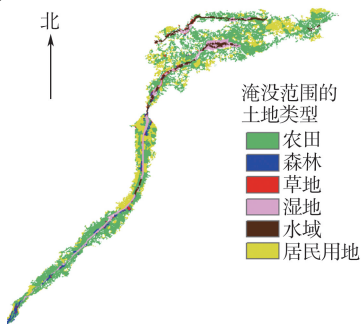


图6 潜在淹没范围的土地利用情况

表5 各类型土地在不同淹没水深下的损失率 %

土地类型	水深[0, 0.5] m	水深(0.5, 1.0] m	水深(1.0, 2.0] m	水深(2.0, 3.0] m	水深>3.0 m
农田	77	85	95	100	100
森林	0	5	10	25	40
草地	0	8	25	45	70
湿地和水域	30	70	80	100	100

表6 各类型土地在不同淹没水深下的面积 hm²

土地类型	水深 0~0.5 m	水深 0.5~1.0 m	水深 1.0~2.0 m	水深 2.0~3.0 m	水深>3.0 m
农田	369.00	350.91	714.24	752.04	75.69
森林	7.47	7.11	14.04	15.57	25.74
草地	7.92	3.78	12.69	14.85	29.70
湿地	16.11	18.54	39.24	45.45	9.54
水域	13.23	17.82	37.26	47.16	5.22

表7 环境损失ESV计算结果

土地类型	基础当量	ESV 损失/元	合计ESV 损失/万元
农田	3.95	12 232 343.20	
森林	19.70	465 818.74	
草地	12.06	553 370.47	34 110
湿地	52.02	2 488 734.59	
水域	125.61	18 368 857.80	

注:一个标准当量大小为1 482.67元/hm²。

陆浑水库位于河南省,河南省对环境的风险偏好为中立型,因此取 $n=1$ 。当ESV损失为34 110万元、事故超过概率为 1.79×10^{-4} 时,其溃坝环境损失风险如图7所示。可见,其位于最低合理可行区域,管理决策者可根据降低风险的成本与所获得的收益来决定是否采取风险控制措施。

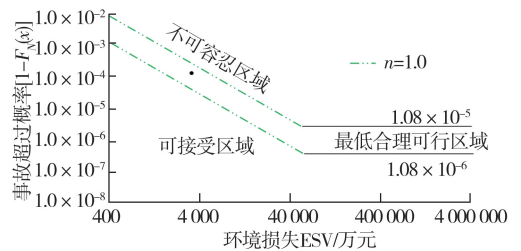


图7 陆浑水库溃坝环境风险

5 结论

合理的溃坝风险标准是准确进行风险评价与管理的基础与关键。本文引入ESV且针对我国不同省(区)的差异,分区域分特点进行了划分,对环境风险标准的确定提出了实际且具有可操作性的方法。利用风险矩阵确定了不同区域的风险标准,建立了更有针对性的环境风险标准,并以河南省陆浑水库为例进行了分析。研究成果可帮助决策者全面认识大坝风险管理水平,为后续溃坝环境风险研究提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 葛巍,焦余铁,李宗坤,等.溃坝风险后果研究现状与发展趋势[J].水科学进展,2020,31(1):143-151.
- [2] 吴舜泽,张凌杰,申宇,等.习近平生态文明思想研究述评[J].环境与可持续发展,2020,45(6):37-42.
- [3] 顾冲时,苏怀智,刘何稚.大坝服役风险分析与管理研究述评[J].水利学报,2018,49(1):26-35.
- [4] 李宗坤,葛巍,王娟,等.中国水库大坝风险标准与应用研究[J].水利学报,2015,46(5):567-573,583.
- [5] 王仁钟,李雷,盛金保.水库大坝的社会与环境风险标准研究[J].安全与环境学报,2006,6(1):8-11.
- [6] 何晓燕,孙丹丹,黄金池.大坝溃决社会及环境影响评价[J].岩土工程学报,2008,30(11):1752-1757.
- [7] MENDOZA F, IZQUIERDO A. Environmental Risk Index: A Tool to Assess the Safety of Dams for Leachate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(1):1-9.
- [8] 程莉,周晶.基于模糊数学理论的溃坝环境影响分析[J].价值工程,2013,32(15):290-292.
- [9] XU Xibao, TAN Yan, YANG Guishan. Environmental Impact Assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and Interventions[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 124: 115-125.
- [10] 李宗坤,李巍,葛巍,等.基于集对分析-可变模糊集耦合方法的溃坝环境影响评价[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(3):269-276.
- [11] 张莹.基于能值足迹法的溃坝环境、生态损失评价[D].南京:南京水利科学研究院,2010:3.
- [12] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [13] 葛巍,秦玉盼,李宗坤,等.基于集对分析与三角模糊数耦合的溃坝环境影响评价[J].水利水运工程学报,2022(3):108-114.
- [14] 李巍.基于云模型及改进可变模糊集合的中国溃坝风险后果评价[D].郑州:郑州大学,2019:10.
- [15] 柳敏,赵少华,王亚婷,等.中原城市群生态系统服务价值时空变化研究[J].人民黄河,2021,43(11):17-22,28.
- [16] 徐辉,丁祖栋,武玲玲.黄河下游沿黄城市生态系统健康评价[J].人民黄河,2022,44(2):12-15,20.
- [17] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [18] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴:2017[M].北京:中国统计出版社,2017:1.
- [19] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018:1.
- [20] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴:2019[M].北京:中国统计出版社,2019:1.
- [21] 国家发展计划委员会.全国农产品成本收益资料汇编,2017[M].北京:中国物价出版社,2017:1.
- [22] 国家发展计划委员会.全国农产品成本收益资料汇编:2018[M].北京:中国物价出版社,2018:1.
- [23] 国家发展计划委员会.全国农产品成本收益资料汇编:2019[M].北京:中国物价出版社,2019:1.
- [24] 李宗坤,李奇,葛巍,等.基于集对分析的大坝风险后果综合评价[J].人民黄河,2016,38(9):111-114.
- [25] LI Zongkun, LI Wei, GE Wei. Weight Analysis of Influencing Factors of Dam Break Risk Consequences[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(12):3355-3362.
- [26] 常向前,汪自力,何鲜峰.新时代建立堤防风险标准的哲学思考[J].人民黄河,2020,42(9):71-75.
- [27] 王小兵,章青,夏晓舟.堤防工程安全运行风险分析研究进展[J].人民黄河,2020,42(8):25-31,35.
- [28] GE W, QIN Y P, LI Z K, et al. An Innovative Methodology for Establishing Societal Life Risk Criteria for Dams: A Case Study to Reservoir Dam Failure Events in China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 49:101663.
- [29] GE W, SUN H Q, ZHANG H X, et al. Economic Risk Criteria for Dams Considering the Relative Level of Economy and Industrial Economic Contribution[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725:138139.
- [30] 王昭升,盛金保.基于风险理论的大坝安全评价研究[J].人民黄河,2011,33(3):104-106.
- [31] 刘旭峰,李静,黄晨,等.油气管道风险可接受标准与应用评述[J].中国安全科学学报,2011,21(12):134-142.
- [32] 金菊良,董涛,郦建强,等.区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):46-50.
- [33] 孙源,章昌平,商容轩,等.数字营商环境:从世界银行评价标准到中国方案[J].学海,2021(4):151-159.
- [34] 彭雪辉,盛金保,李雷,等.我国水库大坝风险标准制定研究[J].水利水运工程学报,2014(4):7-13.
- [35] 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[J].水利学报,2005,36(5):618-623.
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.水利水电工程结构可靠性设计统一标准:GB 50199—2013[S].北京:中国计划出版社,2013:1.
- [37] 李宏恩,马桂珍,王芳,等.2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策[J].水利水运工程学报,2021(5):101-111.
- [38] ZHANG J, YANG Z, JIANG J. An Analysis on Laws of Reservoir Dam Defects and Breaches in China[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2017, 7(12):1313-1320.
- [39] 王健.基于生态系统服务价值分析的溃坝洪水生态风险评价[D].郑州:郑州大学,2021:6.

【责任编辑 张华岩】