

模糊层次分析法在淤地坝风险评价中的应用

官晓华, 张强, 李枫

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 淤地坝是黄土高原地区治理水土流失有效的水利工程措施,其在减少入黄泥沙、淤地造田、防洪减灾、改善生态、促进经济发展等方面发挥着重要作用。但淤地坝的水毁灾害时有发生,建立淤地坝的风险评价体系迫在眉睫。经调研分析,对淤地坝风险进行识别,建立了现状风险、管理风险、失事后果的3层次9指标的淤地坝风险层次分析模型。运用模糊层次分析法对淤地坝各风险的权重进行了计算,并且对淤地坝的安全进行了综合评价。结果表明:模糊层次分析法有效地改进了层次分析法的一致性问题,并且可以简便地对淤地坝的风险进行评价,为淤地坝的风险评价提供了一种新思路。

关键词: 淤地坝; 模糊层次分析法; 淤地坝风险; 风险评价; 模糊综合评价

中图分类号:TV64

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)05-0131-07

Application of fuzzy analytic hierarchy process to check dam risk assessment

GONG Xiaohua, ZHANG Qiang, LI Feng

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The check dam is an effective water conservancy engineering measure specifically designed to control water and soil erosion in the Loess Plateau, and it plays an important role in the reduction of sediment inflow to the Yellow River, silt land reclamation, flood control and disaster reduction, as well as ecological and economic development of the plateau. However, check dams are prone to water-damage disasters, it is imminent to establish a risk assessment system for the analysis. According to the investigation and analysis of the check dams afflicted by water-damage disasters, the risks of check dams were identified and a check dam risk hierarchy analysis model with 3 levels was established, including current risk, management risk and accident consequence, which involved in 9 indicators in total. With this model, the weight of each risk factor of the check dams was calculated and the safety status of the check dams were evaluated comprehensively using the fuzzy analytic hierarchy process. The results showed that the fuzzy analytic hierarchy process improved the consistency of the analytic hierarchy process effectively, it can provide a convenient and novice approach for the risk assessment of check dams.

Key words: check dam; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); check dam risk; risk assessment; fuzzy comprehensive assessment

1 研究背景

黄土高原地区是我国水土流失最为严重的地区,水土流失面积高达 $45.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]。淤地坝是黄土高原地区人民在长期实践中探索出的一种防止水土流失的有效水利工程措施,淤地坝通过滞洪拦沙可调节汛期高含沙量洪水,从而减少入黄泥沙^[2]。同时其在防洪减灾、改善生态、促进经济发展等方面均发挥着重要作用^[3-5]。

截至2019年11月,我国黄土高原地区共有淤地坝58 776座,淤地面积达 927.57 km^2 ^[5]。淤地坝在陕北地区发挥着非常重要的作用,但其也存在着许多问题,淤地坝大多都是由地方群众在资金、技术力量相对薄弱的情况下修建的,在设计、施工、运行管理等方面均采用了相对较低的标准。据不完全统计,陕北地区1994年7、8月之间有7 347座淤地坝被不同程度地冲毁破坏^[6]。近年来,随着气候的变化,极端降雨事件频发,淤地坝水毁灾害也越来越

收稿日期:2021-08-07; 修回日期:2022-04-23

作者简介:官晓华(1982-),女,山东莱州人,硕士,高级工程师,研究方向为水利工程风险防控。

多。2016 年 8 月,内蒙古自治区达拉特旗发生最大降雨量达 406 mm 的极端降雨,造成了当地 13 座骨干淤地坝中的 12 座发生溃决^[7]。淤地坝水毁灾害不仅给当地群众带来了经济损失,还严重制约着淤地坝的发展。

我国的大坝安全风险评价工作仍处于发展阶段,近些年,诸多学者进行了大量的研究工作。目前国内关于大坝安全风险的方法主要有 JC(International Joint Committee on Structural Safety)法、层次分析法、风险指数法、未确知网络分析法、模糊层次评价法等^[8-12],而对于淤地坝的风险评价研究还较少。王丹等^[13]采用层次分析法对淤地坝运行风险进行了研究;沈积怀等^[14]采用可靠性原理对淤地坝设计、工程安全性强制规范、风险概率控制评测等 3 项指标进行了计算,得出淤地坝类工程在设计、施工、测评方面的量化参数指标。袁水龙等^[15]通过层次分析法和 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)法对王茂沟安全体系进行了评价,建立了小流域淤地坝系安全评价体系。本文将模糊数学理论与层次分析法相结合,采用模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)对淤地坝各风险项的权重进行计算,对风险因子进行排序,并且结合土石坝的等级标准,运用模糊综合评价法对淤地坝进行系统的综合评价,为淤地坝的风险管理提供依据。

2 淤地坝风险因素分析

根据淤地坝水毁统计资料,淤地坝的水毁规模主要集中在中、小型坝,其中以坝体发生水毁为主,泄水建筑物次之^[16]。淤地坝的溃决主要有以下几方面原因:

(1)坝体年久失修,坝体结构已破坏。目前黄土高原地区有中型以上病险淤地坝 5 282 座,其中骨干坝 3 025 座、中型淤地坝 2 257 座^[17]。这些中型以上病险淤地坝大多修建于 20 世纪 60、70 年代,经过几十年的运行,坝体年久失修,存在不同程度的损毁。例如 2000 年 7 月 8 日王家沟流域坝系发生的严重水毁事件,该流域坝系本能承受 100 年一遇的特大暴雨,但当时降雨仅为 50 年一遇,该流域坝系即发生了水毁事故,后经调查发现,造成水毁的主要原因是由于该坝系蚁穴、鼠洞较多和缺乏管理维护工作所致^[18]。

(2)暴雨洪水标准超标。淤地坝水毁主要发生在汛期暴雨时段,根据资料统计^[19],1973 年 8 月 25

日延川县降雨约 112 mm,造成的淤地坝水毁率为 44%;1975 年 8 月,延长县先后发生两场暴雨,造成的淤地坝水毁率为 31%。2012 年 7 月 15 日,陕西省绥德县降雨核心区域 1 h 内最大降雨量达 75.7 mm,从而导致韭园沟流域中 24 座不同规模的淤地坝出现水毁灾害。2017 年绥德县“7·26”暴雨历时短、强度大,造成 337 座淤地坝毁坏,经计算,此次暴雨重现期约为 200 年一遇^[20]。许多淤地坝的设计标准低,泄水建筑物配套不全,且年久失修,一旦遭遇超标洪水,溃坝的风险很大。

(3)淤地坝库已基本被淤满,剩余库容较小。据统计^[21],70%的现状骨干淤地坝建成于 1980 年以后,但 69% 的中型坝和 85% 的小型坝建成于 1980 年以前。根据 2008 年淤地坝安全大检查数据对淤积量及其占总库容的比例进行分析,结果表明,有 29% 的骨干坝和 62% 的中型坝淤积库容已达到或超过设计淤积库容。由于淤地坝库被淤满,洪水直接漫坝造成淤地坝水毁的占比也很大。

(4)管理薄弱。黄土高原地区淤地坝数量众多,其管理主体不明确且缺少有效的管理措施,致使坝体损毁得不到及时的修补,排水设施被堵塞也不能被及时清理,导致排水不畅。例如,绥德县赵家坪和林家硷 2 号坝、子长县红石赤沟 3 号坝、清涧县胜天沟张家岔坝等在汛期降雨前溢洪道均已被堵塞,导致暴雨期洪水漫顶而发生溃坝^[19]。

总结上述淤地坝溃坝发生的原因,根据工程风险、人为因素和失事后果可将淤地坝风险分为 3 个部分:第 1 部分为坝体现状风险,考虑淤地坝的坝体结构及防洪能力现状,包括滞洪风险、剩余库容、泄水设施、坝体完整度;第 2 部分为管理风险,考虑事前管理和应急响应两方面,包括日常管理风险、应急风险和监测风险;第 3 部分为失事后果,包括生命损失和下游经济损失。

3 淤地坝风险的模糊层次分析模型

3.1 淤地坝风险层次模型的建立

建立淤地坝风险层次模型是进行淤地坝风险分析的基础,根据前文中淤地坝风险识别的结果,同时参考部分学者对淤地坝水毁原因的调查与分析^[7,13,15-19],将淤地坝风险指标体系分为目标层(A)、准则层(B)和指标层(C)3 个层次,目标层为淤地坝风险,准则层包括现状风险、管理风险和失事后果,指标层包括滞洪风险、剩余库容、泄水设施、坝体完整度、日常管理风险、应急风险、监测风险、生命

损失、下游经济损失。建立的淤地坝风险层次分析模型如图 1 所示。

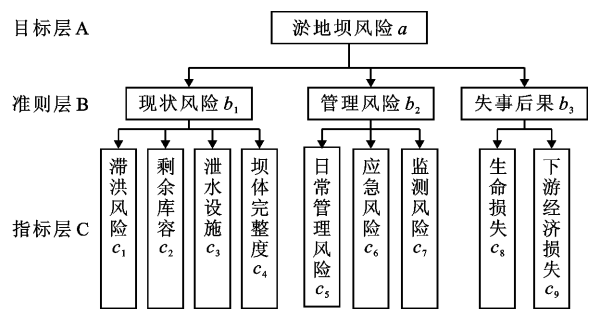


图 1 淤地坝风险层次分析模型

对图 1 中准则层所包括的各个指标及其赋值标准说明如下：

(1) 准则层现状风险(b_1) 包括 4 项指标。① 滞洪风险(c_1) : 滞洪洪水是指淤地坝控制流域内降雨径流总量与泄水建筑物下泄水量之差, 其大小决定着是否会发生漫坝。将滞洪风险定义为滞洪库容与剩余库容的比值, 当滞洪库容为 0 时, 滞洪风险取值为 0. 1, 表示该淤地坝滞洪风险很大。② 剩余库容(c_2) : 淤地坝具有拦泥减沙的效能, 剩余库容随着使用年限的增长而不断减少。剩余库容风险定义为剩余库容与设计库容的比值, 当淤地坝已被淤满时, 剩余库容风险取值为 0. 1, 表示该淤地坝剩余库容风险最大。③ 泄水设施(c_3) : 淤地坝的泄水设施包括溢洪道、竖井及卧管等, 而 20 世纪 80 年代之前修建的淤地坝基本没有配置泄水设施。由于淤地坝泄水设施中溢洪道、竖井和卧管的泄流能力不同, 对不同的泄水设施赋予不同的值。有溢洪道并且溢洪道完整无损的赋值为 1. 0; 溢洪道轻微破损的赋值为 0. 8; 溢洪道破损比较严重但基本能正常工作的赋值为 0. 6; 有竖井或卧管且可起到泄水作用的赋值为 0. 5; 竖井或卧管发生破损而出现渗漏的赋值为 0. 3; 竖井或卧管堵塞而无法泄水或无泄水设施的赋值为 0. 1。④ 坝体完整度(c_4) : 淤地坝大多修建较早, 其质量不能保证, 故坝体完整程度为淤地坝是否发生水毁的一个重要因素。坝体完整无损的赋值为 1. 0; 根据坝体表面状况, 存在微小裂纹的赋值为 0. 9; 存在少量裂缝的赋值为 0. 8; 存在非贯穿缺口的赋值为 0. 5; 存在细小洞穴的赋值为 0. 2; 存在贯穿性裂缝的赋值为 0. 1。

(2) 准则层管理风险(b_2) 包括 3 项指标, 均采用 0 ~ 1. 0 的赋值原则。① 日常管理风险(c_5) : 安排人员进行日常管理的淤地坝赋值为 1. 0; 比较偏远

无人管理的淤地坝日常管理风险较大, 赋值为 0. 1。② 应急风险(c_6) : 淤地坝有应急预案的赋值为 1. 0; 没有应急预案的赋值为 0. 1。③ 监测风险(c_7) : 监测设备齐全且能够正常使用的赋值为 1. 0, 否则赋值为 0. 1。

(3) 准则层失事后果(b_3) 包括 2 项指标。由于淤地坝下游村庄、工厂较少, 失事后果的损失相对于土石坝较小, 故淤地坝失事后果的风险相对可以适当放宽。但应以人为本, 重视生命损失的风险。① 生命损失(c_8) : 根据《生产安全事故报告和调查处理条例》^[22], 没有生命损失风险的赋值为 1. 0; 可能造成 3 人以下伤亡的赋值为 0. 5; 可能造成 3 人以上 10 人以下伤亡的赋值为 0. 2; 可能造成 10 人以上伤亡的赋值为 0. 1。② 下游经济损失(c_9) : 淤地坝主要经济附加值为农业, 故经济损失风险可适当放宽, 经济损失在 10 万元以下的赋值为 0. 9; 经济损失为 100 万元的赋值为 0. 5; 经济损失在 1 000 万元以上的赋值为 0. 1; 其他经济损失量通过插值进行赋值。

3.2 模糊一致判断矩阵的构建

建立风险因素层次分析模型后, 确立了上下隶属关系, 然后建立模糊一致判断矩阵 R , 以确定上下层元素之间的相对重要性。判断矩阵 A 如下：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在层次分析法中, 通常依据 1 ~ 9 的标度法确定各指标层次的比重, 从而获得判断矩阵, 但当判断矩阵不具有 consistency 时, 需经过多次调整判断, 其过程较为繁琐。故本文将层次分析法和模糊理论相结合, 判断矩阵的构建引用 0. 1 ~ 0. 9 九标度数量标度^[23], 如表 1 所示。表 1 给出了不同重要性比较的数量化, 根据表 1 所示的标度方法将风险因素 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 两两相互比较, 即可得到模糊判断矩阵 A 。

表 1 0. 1 ~ 0. 9 九标度数量标度说明

标度取值	说明
0. 5	两个因素重要程度相等
0. 6	一个因素相比于另一个因素略微重要
0. 7	一个因素相比于另一个因素显著重要
0. 8	一个因素相比于另一个因素重要的多
0. 9	一个因素相比于另一个因素极端重要
0. 1 ~ 0. 4	与以上标度取值为 0. 9 ~ 0. 6 的比较情况相反

通过公式(2)对模糊判断矩阵 A 的各行进行求和,并进行如公式(3)所示的转换,即可得到模糊一致判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$,再将模糊一致判断矩阵 R 归一化处理,即可得到各因素的排序向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 。文献[24]推导了求解模糊判断矩阵权重的一种通用公式,如公式(4)所示。

$$r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2(n-1)} + 0.5 \quad (3)$$

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

模糊判断矩阵 A 的重要性权重矩阵为 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$,根据定理可知,判断矩阵 A 的特征矩阵为 $W^* = (w_{ij})_{n \times n}$,其中:

$$w_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j} \quad (\forall i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

模糊判断矩阵 A 的一致性检验通常采用模糊判断矩阵和其特征矩阵的相容性指标 $I(A, W)$ 来判断,如公式(6)所示, $I(A, W)$ 为判断矩阵 A 与 W 的相容性指标。当 $I \leq \alpha$ 时(α 为决策者的态度,通常取为 0.1^[25]),则认为 A 满足一致性。

$$I(A, W) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + w_{ij} - 1| \quad (6)$$

层次单排序即由向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 的相对权重进行排序,总排序是计算所有因素相比于目标层的权重排序,每一层的总权重向量可由公式(7)计算。

$$b_j = \sum_{k=1}^m a_k b_{kj} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

3.3 各风险评价指标权重计算

本研究在参考淤地坝水毁调查与分析的相关文献[7]、[13]、[15]~[19]和部分水利、水土保持专家独立给出的指标相对重要程度的基础上,通过综合考虑,根据模糊层次分析法的原理对准则层中现状风险、管理风险和失事后果所包括的各个风险评价指标的权重进行计算。

现状风险中各风险评价指标的赋值及其权重计算结果如表2所示。由表2可知,现状风险中各风险评价指标权重排序为:滞洪风险 > 剩余库容 > 坝体完整度 > 泄水设施。

管理风险中各风险评价指标的赋值及其权重计算结果如表3所示。由表3可知,管理风险中各风险评价指标权重排序为:日常管理风险 > 监测风

险 > 应急风险。

表2 现状风险中各风险评价指标赋值及其权重计算结果

指标	滞洪 风险	剩余 库容	泄水 设施	坝体 完整度	权重值
滞洪风险	0.50	0.54	0.66	0.59	0.274
剩余库容	0.46	0.50	0.58	0.53	0.256
泄水设施	0.34	0.42	0.50	0.32	0.215
坝体完整度	0.41	0.47	0.68	0.50	0.255
检验	$I(A, W) = 0.095 < 0.1$				

表3 管理风险中各风险评价指标赋值及其权重计算结果

指标	日常管理 风险	应急 风险	监测 风险	权重值
日常管理风险	0.50	0.66	0.59	0.375
应急风险	0.34	0.50	0.45	0.298
监测风险	0.41	0.55	0.50	0.327
检验	$I(A, W) = 0.092 < 0.1$			

失事后果中各风险评价指标的赋值及其权重计算结果如表4所示。由表4可知,失事后果中各风险评价指标权重排序为:生命损失 > 下游经济损失。

表4 失事后果中各风险评价指标赋值及其权重计算结果

指标	生命损失	下游经济损失	权重值
生命损失	0.50	0.70	0.60
下游经济损失	0.30	0.50	0.40
检验	$I(A, W) = 0.075 < 0.1$		

对于淤地坝水毁事故应采取预防为主的原则,加强管理措施,减少人员的伤亡。对于准则层中的现状风险、管理风险和失事后果3个要素的赋值及其权重计算结果如表5所示。由表5可知,准则层3个要素的权重排序为:现状风险 > 管理风险 > 失事后果。

表5 准则层中3个要素的赋值及其权重计算结果

指标	现状风险	管理风险	失事后果	权重值
现状风险	0.50	0.55	0.65	0.367
管理风险	0.45	0.50	0.60	0.342
失事后果	0.35	0.40	0.50	0.292
检验	$I(A, W) = 0.060 < 0.1$			

根据以上各评价指标权重的计算结果,可以得到淤地坝风险评价指标体系的权重,如表6所示。

表 6 淤地坝风险评价指标体系的权重计算结果

目标层 (A)	准则层 (B)	权重	指标层(C)	权重	综合 权重
淤地坝 风险 (a)	现状风险 (b ₁)	0.367	滞洪风险(c ₁)	0.274	0.100
			剩余库容(c ₂)	0.256	0.093
			泄水设施(c ₃)	0.215	0.079
			坝体完整度(c ₄)	0.255	0.094
	管理风险 (b ₂)	0.342	日常管理风险(c ₅)	0.375	0.128
			应急风险(c ₆)	0.298	0.102
			监测风险(c ₇)	0.327	0.112
	损失后果 (b ₃)	0.292	生命损失(c ₈)	0.600	0.175
			下游经济损失(c ₉)	0.400	0.117

3.4 模糊综合评价

基于权重向量 W 和模糊判断矩阵 R ,即可求得淤地坝风险的模糊综合评价矩阵 $B^{[23]}$ 如下:

$$B = W \cdot R$$
$$= (w_1, w_2, \dots, w_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$
$$= (b_1, b_2, \dots, b_n) \tag{8}$$

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \tag{9}$$

式中: b_j 为隶属于第 j 等级的隶属度; w_i 为第 i 个因素指标的权重.计算时,从指标层开始,逐层向上综合计算,最后计算顶层的目标层的评价向量 B 。

根据各风险指标的权重和常用风险等级,并且参考文献[13]、[26],将淤地坝风险等级划分为 I ~ V 级,划分结果如表 7 所示。

表 7 淤地坝风险等级划分

风险等级	取值范围
I 级(极不安全状态)	[0,0.2)
II 级(较不安全状态)	[0.2,0.4)
III 级(不安全状态)	[0.4,0.6)
IV 级(安全状态)	[0.6,0.8)
V 级(较安全状态)	[0.8,1.0]

4 实例分析与讨论

4.1 实例分析

本文以王茂沟小流域淤地坝系为例,对王茂沟小流域淤地坝进行安全评价。王茂沟小流域位于陕西省绥德县境内,是韭园沟中游左岸的一条支流,流

域面积为 5.97 km²,流域平均宽度为 1.46 km,主沟长 3.75 km。王茂沟属黄土丘陵沟壑区第一副区,地面组织物质为基岩和土状堆积物,流域地表破碎,多被质地匀细、组织疏松的黄绵土覆盖。流域年均降雨量为 475.1 mm,年际变化大,年内分布极不平衡,7-9 月降雨量占全年降水量的 64.4%,且多为暴雨,历时短、强度大、灾害严重。1999 年王茂沟流域共有坝库 45 座,到 2018 年,调查数据显示只有 17 座,王茂沟流域淤地坝分布图如图 2 所示。根据调研结果和文献[15],王茂沟小流域淤地坝状况统计如表 8 所示,其中滞洪洪水为 100 年一遇暴雨洪水条件下的滞洪洪量,王茂沟小流域淤地坝安全评价结果如表 9 所示。



图 2 王茂沟流域淤地坝分布图

由表 9 中模糊层次分析法安全评价结果可以看出,王茂沟淤地坝大多得分较低,处于不安全状态。一方面,王茂沟流域淤地坝剩余库容偏小,流域内大多都是小型淤地坝,使用时间较长,淤积库容较大,导致剩余库容减小,由于淤满和水毁,淤地坝数量从 1999 年的 45 座减少到目前的 17 座,剩余库容的评分较低,另一方面,准则层日常管理风险得分也很低,但日常管理风险所占权重很大,故王茂沟流域淤地坝大多得分很低,这些淤地坝基本都缺少应急管理预案和监测设施,在发生超标准洪水时,无法采取有效措施减少损失。通过加强日常管理、增加监测设施、制定应急预案可以大幅度提高淤地坝的安全度,降低淤地坝的水毁风险。特别需要注意的是黄柏沟 2[#]坝和王塔沟 2[#]坝,这两座淤地坝的剩余库容均较小,并且没有日常管理措施,溃坝风险较大,应尽早采取工程措施进行除险加固处理。

表 8 王茂沟小流域淤地坝状况统计表

淤地坝名称	滞洪洪水/ 10 ⁴ m ³	剩余库容/ 10 ⁴ m ³	最大库容/ 10 ⁴ m ³	泄水 建筑物	坝体 完整度	日常 管理	事故 应急	监测 设施	区间 面积
王茂庄 1 [#] 坝	0.00	3.81	69.83	溢洪道	完好	有	无	有	0.264
王茂庄 2 [#] 坝	5.53	27.71	105.40	竖井	完好	有	无	无	0.625
黄柏沟 1 [#] 坝	0.42	3.48	5.55	竖井	完好	有	无	无	0.032
黄柏沟 2 [#] 坝	1.06	0.37	2.00	无	完好	无	无	无	0.026
康河沟 1 [#] 坝	0.31	0.28	2.90	无	完好	有	无	无	0.008
康河沟 2 [#] 坝	0.63	3.40	2.70	已堵	有细沟	无	无	无	0.037
埝堰沟 1 [#] 坝	1.25	2.23	8.20	卧管	完好	有	无	无	0.123
埝堰沟 2 [#] 坝	1.45	12.79	3.70	卧管	完好	无	无	无	0.140
埝堰沟 3 [#] 坝	2.23	4.85	4.20	无	完好	无	无	无	0.084
埝堰沟 4 [#] 坝	0.14	0.37	2.40	无	完好	无	无	无	0.014
麻圪凹坝	0.62	0.67	4.19	无	完好	无	无	无	0.062
何家峁坝	0.51	3.30	0.31	无	完好	无	无	无	0.091
马地嘴坝	0.65	1.84	9.87	无	完好	无	无	无	0.065
死地嘴 1 [#] 坝	1.69	4.72	20.30	竖井	有细沟	无	无	无	0.155
死地嘴 2 [#] 坝	1.66	1.92	1.20	无	完好	无	无	无	0.266
王塔沟 2 [#] 坝	1.89	0.13	0.79	无	完好	无	无	无	0.026
关地沟 2 [#] 坝	0.00	0.30	1.40	溢洪道	完好	无	无	无	0.026

表 9 王茂沟小流域淤地坝安全评价结果

淤地坝名称	滞洪 风险	剩余 库容	泄水 风险	坝体 完整度	日常 管理	事故 应急	监测 设施	生命 损失	经济 损失	综合 评价
王茂庄 1 [#] 坝	1.00	0.10	1.0	1.0	1.0	0.1	1.0	0.5	0.77	0.71
王茂庄 2 [#] 坝	0.80	0.26	0.5	1.0	1.0	0.1	0.1	0.5	0.53	0.54
黄柏沟 1 [#] 坝	0.88	0.63	0.5	1.0	1.0	0.1	0.1	0.5	0.95	0.63
黄柏沟 2 [#] 坝	0.10	0.19	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.96	0.36
康河沟 1 [#] 坝	0.10	0.10	0.1	1.0	1.0	0.1	0.1	0.5	0.99	0.47
康河沟 2 [#] 坝	0.81	1.00	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.5	0.94	0.49
埝堰沟 1 [#] 坝	0.44	0.27	0.5	1.0	1.0	0.1	0.1	0.5	0.86	0.54
埝堰沟 2 [#] 坝	0.89	1.00	0.5	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.85	0.54
埝堰沟 3 [#] 坝	0.54	1.00	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.89	0.47
埝堰沟 4 [#] 坝	0.63	0.16	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.98	0.42
麻圪凹坝	0.07	0.16	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.91	0.35
何家峁坝	0.85	1.00	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.88	0.50
马地嘴坝	0.65	0.19	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.90	0.41
死地嘴 1 [#] 坝	0.64	0.23	0.5	0.8	0.1	0.1	0.1	0.5	0.84	0.42
死地嘴 2 [#] 坝	0.14	1.00	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.77	0.42
王塔沟 2 [#] 坝	0.10	0.16	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.96	0.36
关地沟 2 [#] 坝	1.00	0.22	1.0	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.96	0.53

4.2 讨论

淤地坝广泛分布在我国黄土高原地区。近些年来,淤地坝水毁事件不断发生,给人民生命财产安全带来潜在的威胁,因此,针对淤地坝的风险评估工作日益重要。风险分析最关键的环节是风险因子的选择,本研究通过调研淤地坝水毁概况,总结了导致淤地坝水毁的因素,从淤地坝的实际工程运行情况、管理情况和淤地坝溃决后造成损失的严重性方面建立了包括现状风险、管理风险和失事后果3个要素的准则层并选取9个风险因子作为指标层的层次分析模型,通过模糊层次分析方法对各风险因子的权重进行了计算。由于各风险因子需要通过专家打分获得,而不同专家的观点具有各异性,在同一层次的多评价指标中,这些差异性会导致判断矩阵不能满足一致性要求^[23,26],为此本研究提出了模糊层次分析法,即将模糊法的思想与层次分析法相融合,结合两者的优势建立模糊一致判断矩阵,从而解决了一致性问题,使评价结果更加严谨、合理。

从王茂沟淤地坝实例风险分析结果来看,王茂庄1#坝的安全性相对较高,而其余淤地坝的安全综合评价得分普遍较低,主要是由于王茂沟淤地坝管理因素的分值低所致。淤地坝的主要作用为淤地造田,其工程风险随着使用年限的增加而增大,因此需加强对淤地坝运行期的管理^[27],以避免淤地坝水毁破坏给人民生命财产带来的威胁。

5 结论

(1)根据调研数据,淤地坝发生水毁破坏主要以坝体为主,其次是泄水建筑物。对淤地坝的风险因素进行分析后选取滞洪风险、剩余库容、泄水设施、坝体完整度等9项指标对淤地坝的风险进行综合评价,建立了淤地坝的风险层次分析模型。

(2)模糊层次分析法运用于淤地坝的风险计算是合理的,该方法通过结合模糊法与层次分析法的优势建立模糊一致判断矩阵,从而解决了一致性问题,为淤地坝风险的评价提供了一种简便的方法。

(3)由收集和现场实测的王茂沟小流域淤地坝系的相关数据可知,王茂沟小流域各淤地坝的运行时间较长,大多数小型坝的库内淤积严重,剩余库容偏小,导致淤地坝的防洪压力较大。

(4)结合风险评价指标的权重和王茂沟小流域各淤地坝的风险计算结果可以发现,现状风险和日常管理因素所占比重较大。建议加强淤地坝的日常管理,增加监测设施,制定应急预案,以降低淤地坝

的水毁破坏风险。

参考文献:

- [1] 刘晓燕,高云飞,马三保,等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(2):145-155.
- [2] 郭晖,钟凌,郭利霞,等.淤地坝对流域水沙影响模拟研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):124-134.
- [3] LI Xungui, WEI Xia, WEI Ning. Correlating check dam sedimentation and rainstorm characteristics on the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2016, 265: 84-97.
- [4] 王乃欣,王志坚,梁小卫.基于虚拟现实的淤地坝溃决模拟[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):162-167.
- [5] 陈祖煜,李占斌,王兆印.对黄土高原淤地坝建设战略定位的几点思考[J].中国水土保持,2020(9):32-38.
- [6] 陕西省水保局陕北淤地坝调查组.1994年陕北地区淤地坝水毁情况调查[J].人民黄河,1995(1):15-18.
- [7] 汪自力,张宝森,刘红珍,等.2016年达拉特旗淤地坝水毁原因及拦沙效果[J].水利水电科技进展,2019,39(4):1-6.
- [8] HE Guanjie, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Coupled model of variable fuzzy sets and the analytic hierarchy process and its application to the social and environmental impact evaluation of dam breaks[J]. Water Resources Management, 2020, 34(9): 2677-2697.
- [9] 李宗坤,叶青,李锋.基于未确知网络分析法的土石坝风险分析研究[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(1):11-15.
- [10] 刘亚莲,周翠英.土石坝安全的模糊层次综合评价及其应用[J].水力发电,2010,36(5):38-40+87.
- [11] 赵利,李昕,罗显枫,等.溃坝后果的灰色模糊综合评判研究[J].人民黄河,2010,32(1):113-115+117.
- [12] CHEN Zuyu, HUANG Xieping, YU Shu, et al. Risk analysis for clustered check dams due to heavy rainfall[J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 36(2): 291-305.
- [13] 王丹,哈玉玲,李占斌,等.宁夏典型流域淤地坝系运行风险评价[J].中国水土保持科学,2017,15(3):17-25.
- [14] 沈积怀,彭晓刚.可靠性原理在淤地坝设计与评价中的应用[J].水土保持研究,2009,16(5):278-280.
- [15] 袁水龙,张卫华,王湛.黄土丘陵区小流域淤地坝系安全评价体系研究[J].土地开发工程研究,2018,3(5):40-45+50.
- [16] 李莉,王峰,孙维营,等.黄土高原淤地坝水毁问题分析[J].中国水土保持,2014(10):20-22.
- [17] 罗西超.黄土高原淤地坝建设现状及其发展思路[J].中国水土保持,2016(9):24-25.
- [18] 聂兴山,贾志军,许国平,等.王家沟流域“7·8”暴雨水毁调查与思考[J].山西水土保持科技,2000(3):30-32.

(下转第147页)

- [22] 周光涛. 基于松花江干流河道水沙二相性及演变规律[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(4): 89-91.
- [23] 刘琦峰. 松花江干流泥沙颗粒特性分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [24] 宋小燕. 松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [25] 隋高阳, 于 莉, 隋栋梁, 等. 松花江水沙变化态势与影响因素[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 819-824.
- [26] 张幸农, 陈长英, 假冬冬. 松花江干流水沙变化与河型特征分析[J]. 泥沙研究, 2021, 46(6): 37-43.
- [27] 丁昌春, 张 磊, 郑广智, 等. 松花江哈尔滨河段水沙运动数学模型分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 157-165.
- [28] 闻 雅. 乌苏里江-鸭绿江口段界河变迁遥感研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [29] 周春旭. 黑龙江省河道防护类型及优化模式研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [30] 李贵勤. 乌苏里江、松阿察河国土防护工程建设的必要性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2011, 39(3): 263.
- [31] 孟令辉, 董玉森, 陈伟涛, 等. 东北界河河岸稳定性评价: 以乌苏里江饶河段为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(6): 214-220.
- [32] 牟金玲, 狄 娟. 黑龙江干流中上游段水文特性[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(2): 101-102.
- [33] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 黑龙江中上游径流特征分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 20-23.
- [34] 刘宇航, 张凤德, 巩宪春. 2013年黑龙江全流域大洪水降雨分析[J]. 东北水利水电, 2015, 33(9): 43-44+55.
- [35] 袁嘉琪. 黑龙江干流下游暴雨洪水分析[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- [36] 李成振, 孙万光, 范宝山, 等. 黑龙江干支流洪水叠加与演进规律[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 81-84+106.
- [37] 冷 栋, 才莉莉. 国内外防洪措施的探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(6): 41-43.
- [38] 曹 越, 李 杰, 李 洋. 黑龙江干流水面线计算方法及问题浅析[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(3): 94-95.
- [39] 刘阳明, 王化鑫, 唐永美, 等. 卡伦山水文站防汛特征水位修订分析[J]. 东北水利水电, 2014, 32(12): 5+43.
- [40] 郭立峰, 殷世平, 许佳琦, 等. 基于 FY-3A/MERSI 的 2013 年夏秋间松花江和黑龙江干流洪水遥感监测分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 75-82.
- [41] 刘 清, 吴君峰, 王 浩, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的黑龙江流域长时序常年和季节性水面提取及变化分析[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 80-88.
- [42] 假冬冬, 杨 俊, 陈长英, 等. 中国北方季节性冰冻河流岸滩崩塌数值模拟——以松花江为例[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 717-726.
- [43] 刘心岩, 魏延久, 王 南. 黑龙江干流国土防护工程设计[J]. 黑龙江水利科技, 2003(4): 15-17.
- [44] 冷 莉. 论国境界河黑龙江干流国土防护的必要性[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(1): 69-70.
- [45] 张 勇, 李鹏飞, 李 俊, 等. 黑龙江上游冬季气温变化规律及冰期过程研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 98-100.
- [46] 袁 莉. 堤防填筑冬季备料方案[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(7): 78-79.
- [47] 王黑铁, 王成才, 葛素梅. 黑龙江干流国境界河国土防护护岸工程结构型式选择[J]. 黑龙江水利科技, 2003(3): 40.
- [48] 李子晗. 高水位长期浸泡堤防工程多工况试验及数值模拟计算研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- [49] 王 兵. 堤防堵口水力特性数值模拟与抢险技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [50] 孙佳胜. 黑龙江干流同仁段江岸坍塌原因分析[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(5): 67.
- [51] 刘加海, 刘心岩, 冷 莉. 黑龙江干流低滩切割分析及防护工程布置[J]. 黑龙江水利科技, 2002(2): 50.

(上接第 137 页)

- [19] 李 靖, 张金柱, 王 晓. 20 世纪 70 年代淤地坝水毁灾害原因分析[J]. 中国水利, 2003(17): 55-56+32.
- [20] 时芳欣, 王志慧, 齐 亮, 等. 2017 年绥德“7·26”暴雨重现期分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 11-14.
- [21] 刘晓燕, 高云飞, 王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 1-5+10.
- [22] 安全法学. 生产安全事故报告和调查处理条例[J]. 林业劳动安全, 2007, 26(2): 3-6.
- [23] LI Lu, SHI Zhihua, YIN Wei, et al. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir area, China[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3439-3447.
- [24] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314.
- [25] 元云丽. 基于模糊层次分析法(FAHP)的建设工程项目风险管理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [26] 杨 瑞, 李子龙, 王 丹, 等. 黄土高原小流域淤地坝系安全评价[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 41-45.
- [27] 马 瑞, 张 富, 周 波, 等. 甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评估模型[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 139-144.