

抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险评价

马萧萧¹, 朱安平¹, 余蔚青², 刘新², 李璇²

(1. 国网新源控股有限公司, 北京 100052; 2. 紫光软件系统有限公司, 北京 100084)

摘要: [目的] 对抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险进行评价, 对涉及的要素特征进行筛选分析, 为提高工程建设期绿色安全施工水平提供科学支持。[方法] 采用层次分析法结合模糊综合评价法, 从 3 个维度共选取了 8 个一级指标和 34 个二级指标进行分析评价。[结果] 构建了抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险评价模型, 并划分为 5 个风险等级, 将模型应用于安徽省绩溪抽水蓄能电站的研究表明该电站在建设期水土流失风险灾害等级为 3 级, 属一般安全等级。结合该工程建设期的实情, 验证了模型的可行性。[结论] 抽水蓄能电站选址在很大程度上决定着工程建设期水土流失及其次生灾害风险等级。采用该方法评价风险等级为 3 级及以下的工程, 可在确保工程水土保持措施按照要求落实建设的基础上, 增强建设期水土保持监测水平。应重点关注建设期弃渣堆置不合规及取弃土过程中的潜在土壤流失量, 防微杜渐, 避免水土流失及其次生灾害现象的发生。

关键词: 抽水蓄能电站; 水土流失及其次生灾害; 层次分析法; 模糊综合评价法; 综合评价模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0157-09

中图分类号: TV743, S157.1

文献参数: 马萧萧, 朱安平, 余蔚青, 等. 抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 157-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.022; Ma Xiaoxiao, Zhu Anping, Yu Weiqing, et al. Risk assessment of soil and water loss and secondary disasters during pumped storage power station construction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 157-165.

Risk Assessment of Soil and Water Loss and Secondary Disasters During Pumped Storage Power Station Construction

Ma Xiaoxiao¹, Zhu Anping¹, Yu Weiqing², Liu Xin², Li Xuan²

(1. State Grid Xinyuan Co., Ltd., Beijing 100052, China;

2. Unisplendour Software System Corporation Limited, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] The risk of soil and water loss and such secondary disasters that may exist in the construction of pumped storage power stations was evaluated to screen and analyze the characteristics of the elements involved in order to provide scientific support for improving green and safe construction during the project construction period. [Methods] The analytic hierarchy process method was used combined with the fuzzy comprehensive evaluation method to select eight primary indicators and thirty-four secondary indicators from three dimensions for analysis and assessment. [Results] A risk assessment model of soil and water loss and its secondary disasters during the construction period for a pumped storage power station was constructed, and the risk was divided into five levels. The model was applied to the Jixi pumped storage power station in Anhui Province. The risk level of soil and water loss and its secondary disasters during the construction period for this pumped storage power station was level three, which belongs to the general safety level. The feasibility of the model was verified by comparing results with actual measurements during the construction period. [Conclusion] Site selection for pumped storage power stations could largely determine the risk level of soil and water loss and secondary disasters during the project construction period. Projects with risk level

收稿日期: 2021-11-26

修回日期: 2021-12-01

资助项目: 国网新源公司 2021 年科技项目“安徽绩溪抽水蓄能电站环保水验收管理及技术体系研究与应用服务”(202103)

第一作者: 马萧萧(1984—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水电工程环境保护方面的研究。E-mail: 260333078@qq.com。

通讯作者: 余蔚青(1987—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 博士, 高级工程师, 主要从事建设项目水土保持方面的研究。Email: unis-ywq@fox-mail.com。

of grade three as evaluated by using method in this study could benefit from improved supervision frequency on the basis of learning from relevant soil and water conservation supervision and risk prevention and control measures. Such actions could avoid soil and water loss occurring from slope sliding and slag sliding as far as possible, and allow for the taking of preventive measures to completely eliminate the occurrence of soil and water loss and related secondary disasters.

Keywords: pumped storage power station; soil and water loss and secondary disasters; analytic hierarchy process method; fuzzy comprehensive evaluation method; comprehensive evaluation model

当代经济的高速发展导致对电力的需求日趋强烈,极大增加了电力系统调峰的难度,用电量达到峰值时电量极度短缺,低谷时又有电量剩余,由此抽水蓄能电站应运而生。由于运行原理及场景需要,抽水蓄能电站工程多建设于地势高差较大的山地区段,工程建设期由于土地利用方式的变化对周边固有生态环境产生的影响较大,水土流失风险及由此衍生的滑坡、泥石流等次生风险灾害也将随之增加,对周边生态环境造成一定程度的负面影响^[1];因此,评价抽水蓄能电站建设期的水土流失及其次生灾害风险对我国的抽水蓄能电站建设优化和当地发展稳定有重要意义。目前,国内外针对建设工程环境安全领域的灾害风险研究主要集中在地震、气象灾害等自然灾害^[2]、交通事故、安全生产事故等事故灾害^[3]及其风险评价^[4]、重大风险源评价等^[5]方面。Cavanagh 和 Hicky^[6]认为风险评价中从制度层面对于确保重大环境事故危险区域和周围人员安全的监管要求越来越高,也对风险评价的准确性和透明度提出更高的要求,相关方关心的不仅仅是满足法规要求,而是希望确保在最小化事故风险的社会影响方面取得更好的成效。Adi 和 Nezamoddin^[7]在此基础上提出对于灾害事故的危害性仅通过划分成个人风险和社会风险是不全面的,而应该将对社会、经济、人员、环境的损失全部折算为同一维度的标准进行衡量。McDaniels^[8]总结了评价目标在生态风险综合评价工作中的各种用途,并概述了评价目标应该具备的特点以及明确目标的过程,进而提出了风险评估目标的参考建议。石济开等^[4]通过对石化行业涉及的环境风险要素进行梳理分析,分别从突发性环境风险、非突发性环境风险和选址敏感性构建了环境风险分级指标体系,并通过案例分析加以印证。廖春芳等^[9]在郴宁高速公路建设项目中根据通用水土流失方程(universal soil loss equation, USLE)确定的水土流失影响因素,再结合实际调研资料和专家系统分析方法,确定水土流失环境风险评价指标体系,并将水土流失风险划分为 6 级。

抽水蓄能电站工程造成的水土流失主要集中在工程建设期,是因人类开发建设行为造成外营力所产

生的水土流失形式^[10]。抽水蓄能电站主体工程中上水库所处山地的地势较高,自然状态下的侵蚀类型以水力侵蚀为主,同时也涉及其他侵蚀类型,故实际复合侵蚀的区域不占少数,不同侵蚀类型相互影响、效果叠加,构成了较为复杂的土壤侵蚀系统^[11]。考虑到抽水蓄能电站工程建设周期往往较长,且具有地表扰动范围广、取弃土(渣)量大、施工临时道路、临时堆土(渣)场多、弃土(渣)堆置时间较长等特点,因而其产生水土流失的周期也较长^[12]。抽水蓄能电站工程建设过程中大面积的开挖及弃土(渣)的堆放,会对工程区原有地表植被及坡面稳定结构造成一定冲击,形成了新的水土流失源^[13],影响工程区的环境及生态平衡。更为严重的情况下,大量弃土(渣)将随径流汇入周边流域,对工程区及其周边流域的防洪和当地群众的生命、财产及生存环境构成严重威胁;同时还会引发次生的洪涝、滑坡、泥石流等灾害,使区域生态环境质量下降,影响当地旅游业乃至地区 GDP 增长^[14-16]。因此,本文针对由抽水蓄能电站建设期引起的水土流失及其次生灾害,选取抽水蓄能电站影响范围内的整体区域为研究对象,通过量化因水土流失情况对影响区域范围内造成的原生和次生灾害影响,建立抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险等级划分模型,丰富了灾害风险评价指标的角度;在此基础上,根据相关行业标准、规定确定各单项指标隶属度的核算方法,以解决抽水蓄能电站领域水土流失及其次生灾害风险分级评价的问题,旨在为提升抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害的预防及应对能力提供参考。

1 抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级模型构建

1.1 抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标体系

本研究在筛选抽水蓄能电站水土流失及其次生灾害风险等级划分指标时,除了从工程自身属性特点、岩土坡体特点及区域环境特点等 3 方面考虑水土流失风险发生的可能性潜势外,在充分考虑抽水蓄

能电站建设过程中的施工现场管理、水土流失监测管理对象、风险应急体系完备情况、地区人口层次现状、社会经济发展程度、生态环境资源等要素的基础上,结合工程建设中实际情况,遵循水土流失及其次生灾害所固有的复杂性和不确定性等风险相关原理,依据科学性、代表性、可操作性和系统性等原则,对包括依托上、下水库在内的抽水蓄能电站工程水土流失防治标准等级,水土保持组织管理、工程弃渣堆置、水土保持措施落实情况、工程水土流失状况等工程水土保持监测三色评分项,抽水蓄能电站工程水土流失及其次生灾害风险与突发事件应急管理能力,以及抽水蓄能电站所在地区人口、经济、资源等相关风险承载体易损性等不同方面进行了综合考虑,并纳入指标体系。由此选取了风险发生可能性潜势、风险监管与应急措施、风险承载体易损性等 3 个准则维度共 8 个一级指标和 34 个二级指标构建了水土流失及其次生灾害风险分级指标体系。各级指标的从属关系详见表 1。

1.2 分级指标体系的各级权重

指标评价体系中选取的不同指标对评价目标的评价角度不同,故在建立指标体系后,需要根据各指标的重要性差异对不同指标进行权重赋值,常见的赋权方法分为主成分法、熵值法等客观赋权法,以及德尔菲法、层次分析法等主观赋权法。

其中,客观赋权法需要对各项指标进行多次实测的基础上进行分析计算,在数据不足或无法实测的前提下难以应用。而主观赋权法中的德尔菲法由于过度依赖发挥专家的作用,存在随机性大的风险,且沟通时间及效率存在不确定性;考虑到层次分析法无须统计大量数据且可以对多角度指标要素进行逐层分析,大大降低了主观随机性给评价结果带来的波动^[17]。因此,本研究选择层次分析法对抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标进行赋权。

在层次分析法当中,构造相对重要性矩阵是重中之重,传统做法是沿用自 20 世纪 80 年代以来一直采用的“1—9”级标度法^[18],然而经过大量的研究分析,发现“1—9”级标度法在一些侧重管理层面或涉及多元指标维度的应用场景下存在判断差异性不明显的的问题。故本研究在经过多方比较后,选择了 Dong 等人^[19]在“1—9”级标度法基础上改进的“10/10—18/2”标度法用于本次相对重要性矩阵的构造,“10/10—18/2”标度法与“1—9”级标度法的对照及含义详见表 2。

表 1 抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标体系

准则层	一级指标	二级指标
风险发生可能性潜势 A	工程属性潜势 A ₁	电站占地范围 A ₁₁
		电站建设周期 A ₁₂
		工程弃渣总量 A ₁₃
		工程弃渣场数量 A ₁₄
	岩土坡体潜势 A ₂	土体类型 A ₂₁
		坡向与岩层倾向夹角 A ₂₂
		基覆界面倾角 A ₂₃
		最大坡面形态 A ₂₄
		最大纵坡坡度 A ₂₅
		最大坡面高差 A ₂₆
区域环境潜势 A ₃	24 h 最大降水量 A ₃₁	
	区域地震烈度 A ₃₂	
	年平均径流深 A ₃₃	
	地区林草植被覆盖率 A ₃₄	
	区域水土流失强度 A ₃₅	
风险监管与应急措施 B	水土保持监管 B ₁	工程水土流失防治标准等级 B ₁₁
		工程水土保持组织管理 B ₁₂
		工程弃渣堆置情况 B ₁₃
		工程水土保持措施落实情况 B ₁₄
	风险隐患与应急 B ₂	工程水土流失状况 B ₁₅
		工程施工安全检查评分 B ₂₁
		应急预案演习频次 B ₂₂
		应急资源利用能力 B ₂₃
风险承灾体易损性 C	人口易损性 C ₁	潜在生命损失值 C ₁₁
		个人生命风险 C ₁₂
		所在地区人口密集度 C ₁₃
		65 岁以上老人及儿童人口比重 C ₁₄
	经济易损性 C ₂	工程本体直接经济损失 C ₂₁
		周边建筑直接经济损失 C ₂₂
		基础设施工程破坏指标 C ₂₃
		所在地区人均 GDP C ₂₄
		所在地区经济密度 C ₂₅
	资源易损性 C ₃	周边土地利用类型 C ₃₁
		周边水域功能分类 C ₃₂

表 2 “10/10—18/2”标度法与“1—9”级标度法对照及含义

“1—9”级标度法 (k=1—9)	“10/10—18/2” 标度法	含义
1	10/10	同等重要
2	11/9	介于“同等重要”与“略显重要”之间
3	12/8	略显重要
4	13/7	介于“略显重要”与“明显重要”之间
5	14/6	明显重要
6	15/5	介于“明显重要”与“显著重要”之间
7	16/4	显著重要
8	17/3	介于“显著重要”与“极其重要”之间
9	18/2	极其重要

因此,通过采用“10/10—18/2”标度法构建的各一级指标相对重要性矩阵(U_i)为:

$$(U_i)_{n \times n} = \begin{pmatrix} \delta_{i1} & \cdots & \delta_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \delta_{n1} & \cdots & \delta_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: U 为准则层指标对应的符号; i 为该一级指标的序号; n 代表该一级指标下的二级指标数量。

随后,通过计算得到各判断矩阵的特征向量(X)及特征值(λ),并通过下式计算该矩阵的一致性检验指数(CR),即:

$$CR = CI/RI = \left(\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right) / RI \quad (2)$$

式中:CI为矩阵的一致性指数; λ_{\max} 为矩阵的最大特征值; n 为矩阵特征值个数;RI为矩阵的平均随机一致性指数,根据查阅相关资料,本研究采用刘守强等^[20]在基于“10/10—18/2”新标度法的改进 AHP 法中调整过的 6 阶以内矩阵的 RI 值进行一致性检验(表 3)。采取上述方法得到的各级指标权重及一致性检验指数详见表 4。各矩阵一致性校验均合格,满足可用性要求。

表 3 “10/10—18/2”标度法对应的 6 阶以下矩阵对应的 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.169 0	0.259 8	0.328 7	0.369 4

表 4 各级指标重要性矩阵及权重结果

项目	R	A	B	C	权重(W_R)	检验参数			
R	A	10/10	11/9	13/7	0.442 6	$\lambda_{\max} = 3.044 8$ $CR_R = 0.060 7$			
	B	9/11	10/10	14/6	0.364 5				
	C	7/13	6/14	10/10	0.192 9				
A— A_i	A	A_1	A_2	A_3	W_A	$\lambda_{\max} = 3.003 5$ $CR_A = 0.010 4$			
	A_1	10/10	6/14	8/12	0.204 5				
	A_2	14/6	10/10	13/7	0.506 3				
A_1 — A_{1j}	A_3	12/8	7/13	10/10	0.289 2	$\lambda_{\max} = 4.001 7$ $CR_{A1} = 0.002 2$			
	A_1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}		W_{A1}		
	A_{11}	10/10	13/7	15/5	16/4		0.470 2		
	A_{12}	7/13	10/10	12/8	14/6		0.253 5		
A_2 — A_{2j}	A_{13}	5/15	8/12	10/10	12/8	0.164 4	$\lambda_{\max} = 6.022 5$ $CR_{A2} = 0.012 2$		
	A_{14}	4/16	6/14	8/12	10/10	0.111 9			
	A_2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}		A_{26}	W_{A2}
	A_{21}	10/10	16/4	5/15	12/8	8/12		14/6	0.1513
	A_{22}	4/16	10/10	2/18	5/15	3/17		9/11	0.0417
	A_{23}	15/5	18/2	10/10	16/4	13/7		17/3	0.405 3
A_3 — A_{3j}	A_{24}	8/12	15/5	4/16	10/10	6/14	13/7	0.107 5	$\lambda_{\max} = 5.008 1$ $CR_{A3} = 0.006 2$
	A_{25}	12/8	17/3	7/13	14/6	10/10	16/4	0.233 7	
	A_{26}	6/14	11/9	3/17	7/13	4/16	10/10	0.060 4	
	A_3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	A_{35}	W_{A3}		
	A_{31}	10/10	16/4	13/7	15/5	9/11	0.295 2		
B — B_i	A_{32}	4/16	10/10	7/13	8/12	3/17	0.072 2	$\lambda_{\max} = 2.000 0$ $CR_B = 0.000 0$	
	A_{33}	7/13	13/7	10/10	12/8	6/14	0.151 5		
	A_{34}	5/15	12/8	8/12	10/10	4/16	0.100 5		
	A_{35}	11/9	17/3	14/6	16/4	10/10	0.380 6		
	B	B_1	B_2	W_B					
B_1 — B_{1j}	B_1	10/10	15/5	0.750 0	$\lambda_{\max} = 5.009 8$ $CR_{B1} = 0.007 5$				
	B_2	5/15	10/10	0.250 0					
	B_1	B_{11}	B_{12}	B_{13}		B_{14}	B_{15}	W_{B1}	
	B_{11}	10/10	17/3	14/6		13/7	18/2	0.451 7	
	B_{12}	3/17	10/10	7/13		5/15	12/8	0.083 3	
	B_{13}	6/14	13/7	10/10		8/12	15/5	0.168 4	
B_1 — B_{1j}	B_{14}	7/13	15/5	12/8	10/10	16/4	0.241 2		
	B_{15}	2/18	8/12	5/15	4/16	10/10	0.055 4		

续表 3:

项目	R	A	B	C	(权重) W_R	检验参数		
$B_2 - B_{2j}$	B_2	B_{21}	B_{22}	B_{23}	W_{B_2}			
	B_{21}	10/10	13/7	16/4	0.547 9	$\lambda_{\max} = 3.012 2$		
	B_{22}	7/13	10/10	15/5	0.329 5	$CR_{B_2} = 0.036 1$		
	B_{23}	4/16	5/15	10/10	0.122 6			
$C - C_i$	C	C_1	C_2	C_3	W_C			
	C_1	10/10	15/5	13/7	0.525 3	$\lambda_{\max} = 3.015 0$		
	C_2	5/15	10/10	6/14	0.154 9	$CR_C = 0.044 4$		
	C_3	7/13	14/6	10/10	0.319 8			
$C_1 - C_{1j}$	C_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	W_{C_1}		
	C_{11}	10/10	14/6	8/12	13/7	0.295 2	$\lambda_{\max} = 4.003 7$	
	C_{12}	6/14	10/10	5/15	9/11	0.132 3		
	C_{13}	12/8	15/5	10/10	14/6	0.407 6	$CR_{C_1} = 0.004 7$	
	C_{14}	7/13	11/9	6/14	10/10	0.164 9		
$C_2 - C_{2j}$	C_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	W_{C_2}	
	C_{21}	10/10	5/15	7/13	9/11	11/9	0.128 3	$\lambda_{\max} = 5.014 5$
	C_{22}	15/5	10/10	12/8	14/6	15/5	0.361 4	
	C_{23}	13/7	8/12	10/10	11/9	14/6	0.232 8	$CR_{C_2} = 0.004 7$
	C_{24}	11/9	6/14	9/11	10/10	13/7	0.173 3	
	C_{25}	9/11	5/15	6/14	7/13	10/10	0.104 2	
$C_3 - C_{3j}$	C_3	C_{31}	C_{32}				W_{C_3}	
	C_{31}	10/10	14/6				0.700 0	$\lambda_{\max} = 2.000 0$
	C_{32}	6/14	10/10				0.300 0	$CR_{C_3} = 0.000 0$

1.3 水土流失及其次生灾害风险分级模型

本研究根据所构建的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标体系,并基于模糊综合评价法建立由水土流失及其次生灾害水平的等级划分模型。

(1) 建立综合评价的因素集。根据构建好的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标体系,分别取一级指标作为第一层次因素、二级指标作为第二层次因素,即指标体系中的各因素集为: $A = (A_1, \dots, A_3), A_1 = (A_{11}, \dots, A_{14})$,依此类推。

(2) 建立综合评价的评价集。评价集是被评价对象可能出现的各种结果所组成的集合,通常用 V 表示,即 $V = (V_1, \dots, V_n)$,其中元素 V_n 代表第 n 种评价结果,根据实际情况的需要,用不同的评价等级来表示。本研究在参考具备可操作性的模糊综合评价模型等级数量的基础上^[21],将本次抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级模型中评价等级数确定为 5 级。

(3) 建立评价矩阵。基于依据现行水土保持法律法规、相关标准及行业研究资料中对相关指标的

级标准,确定各单项指标的等级隶属度,依此建立模糊综合评价的评价矩阵 P 。

(4) 确定因素权向量。评价工作中,各因素的重要程度有所不同,为此,给各层次因素赋予对应的权重,各因素的权重集合的模糊集即为因素权向量,用 W 表示,即: $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)$,其中 m 代表因素集的数量。权向量通过前述层次分析法的相对重要性矩阵进行构造。

(5) 建立综合评价模型。确定单因素评价矩阵 P 和因素权向量 W 后,通过模糊变化将各因素集上的模糊向量变为评价集上的模糊向量 S ,即:

$$S_A = W_{1 \times m} \circ P_{m \times n} \tag{3}$$

式中:“ \circ ”为综合评价合成算子,通常取矩阵乘法。

一级指标的综合评价结果需通过二级指标的模糊综合评价结果进行计算,二级指标模糊综合评价的评价矩阵 P_i 为:

$$P_i = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 \circ P_1 \\ W_2 \circ P_2 \\ \vdots \\ W_m \circ P_m \end{pmatrix} \tag{4}$$

进而将一级指标的评价矩阵和权重集合后,得到:

$$S = W_i \cdot P_i = W_i \cdot \begin{pmatrix} W_1 \cdot P_1 \\ W_2 \cdot P_2 \\ \vdots \\ W_m \cdot P_m \end{pmatrix} = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (5)$$

(6) 评价指标的处理。本研究在得到综合评价指标后,采用加权平均法对综合评价结果进行处理,建立对应的评价等级关系表(表 5),用于计算水土流失及其次生灾害风险等级。其中,1 级为安全级,5 级为不安全级,从 1 级到 5 级表征灾害危害水平逐级递增。

表 5 风险灾害评价等级标准对照

风险灾害等级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
标准值	0.95	0.80	0.65	0.50	0.30
范围	≥ 0.90	$[0.80, 0.90)$	$[0.60, 0.80)$	$[0.40, 0.60)$	< 0.40
安全性	安全	较安全	一般安全	较不安全	不安全

2 工程案例应用

2.1 应用工程概况

以位于我国安徽省绩溪县伏岭镇的安徽绩溪抽水蓄能电站工程为例,通过收集该工程项目的可行性研究报告、环境影响报告、水土保持方案及相关文献资料等,本文将研究构建的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级模型应用于该抽水蓄能电站,计算其水土流失及其次生灾害风险等级。该抽水蓄能电站装机容量 1 800 MW(6×300 MW),主要由上下水库、输水系统、地下厂房系统、地面开关站及下水库等建筑物组成,工程总占地面积为 361.04 hm²,建设期为 76 个月,主体工程于 2014 年底开工,至 2021 年 2 月,6 台机组已全部投产发电。

工程建设期内弃渣总量 5.15×10⁶ m³,共设置 9 处弃渣场。按照水土保持方案要求,水土流失防治标准按照建设类项目一级标准执行,下库 2[#]弃渣场堆渣量大,为永久弃渣场,将其拦挡建筑物级别按 3 级设计,其余弃渣场拦挡建筑物级别按 4 级设计;施工生产生活区截排水设施按永久场地 20 a 一遇标准、临时场地 5 a 一遇防洪标准执行。工程区周边水体布设的 9 个监测断面水质均能满足Ⅲ类标准。

2.2 风险灾害等级划分

2.2.1 构建分级评价矩阵 根据收集到的工程环境影响报告书、水土保持方案报告书、施工相关资料及水利水电、环境保护、水土保持相关行业技术规范标准、《2020 年安徽省水土保持公报》以及《2020 年绩溪县国民经济和社会发展统计公报》等资料中的相关数据,分别得到模型中各项指标值(表 6),并根据前述提出的隶属度确定原则得到各指标的单项隶属度及模糊综合评价汇总表(表 7)。

表 6 评价模型中各单项指标值及隶属度

单项指标	指标值	隶属度
电站占地范围 ^[22] A ₁₁	3.61 km ²	3 级
电站建设周期 A ₁₂	76 个月	3 级
工程弃渣总量 A ₁₃	5.15×10 ⁶ m ³	4 级
工程弃渣场数量 A ₁₄	9 个	2 级
土体类型 ^[23] A ₂₁	粉质黏土	5 级
坡向与岩层倾向夹角 ^[23] A ₂₂	90°~135°	2 级
基覆界面倾角 ^[23] A ₂₃	20°~30°	3 级
坡面形态 ^[23] A ₂₄	复合型	3 级
纵坡坡度 ^[23] A ₂₅	30°~40°	4 级
坡面高差 ^[23] A ₂₆	15~25 m	3 级
24 h 最大降水量 ^[23] A ₃₁	>100 mm/d	5 级
区域地震烈度 ^[23] A ₃₂	5~6 度	2 级
年平均径流深 ^[24] A ₃₃	800~1 000 mm	1 级
地区林草植被覆盖率 ^[24] A ₃₄	>60%	1 级
区域水土流失强度 ^[25] A ₃₅	<2 500 t/(km ² ·a)	1 级
工程水土流失防治标准等级 ^[26] B ₁₁	一级	1 级
工程水土保持组织管理 B ₁₂	13/15	1 级
工程弃渣堆置情况 B ₁₃	23.5/30	3 级
工程水土保持措施落实情况 B ₁₄	39.5/45	1 级
工程水土流失状况 B ₁₅	5/10	5 级
工程施工安全检查评分 ^[27] B ₂₁	合格	3 级
应急预案演习频次 B ₂₂	每年 1 次	1 级
应急资源利用能力 B ₂₃	3 km	2 级
潜在生命损失值 ^[3] C ₁₁	9.75×10 ⁻⁴ 人/a	3 级
个人生命风险 ^[3] C ₁₂	1×10 ⁻⁴	4 级
所在地区人口密集度 C ₁₃	人口总数>5 万	5 级
65 岁以上老人及儿童人口比重 C ₁₄	35.88%	5 级
工程本体直接经济损失 ^[28] C ₂₁	≥300 万元	4 级
周边建筑直接经济损失 C ₂₂	10~50 万元	2 级
基础设施工程破坏指标 ^[3] C ₂₃	0.094	3 级
所在地区人均 GDP C ₂₄	4~6 万元	2 级
所在地区经济密度 C ₂₅	784.19 万元/km ²	2 级
周边土地利用类型 C ₃₁	林地约 70%,耕地约 10%	4 级
周边水域功能分类 ^[29] C ₃₂	Ⅲ类	3 级

注:单项指标隶属度分级依据详见各指标后标号的参考文献

表 7 各指标单项隶属度及模糊综合评价

准则层		一级指标		二级指标		二级指标隶属度分级				
指标项	权重	指标项	权重	指标项	权重	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
A	0.442 6	A ₁	0.204 5	A ₁₁	0.470 2	0	0	1	0	0
				A ₁₂	0.253 5	0	0	1	0	0
				A ₁₃	0.164 4	0	0	0	1	0
				A ₁₄	0.111 9	0	1	0	0	0
				A ₂₁	0.151 3	0	0	0	0	1
		A ₂	0.506 3	A ₂₂	0.041 7	0	1	0	0	0
				A ₂₃	0.405 3	0	0	1	0	0
				A ₂₄	0.107 5	0	0	1	0	0
				A ₂₅	0.233 7	0	0	0	1	0
				A ₂₆	0.060 4	0	0	1	0	0
		A ₃	0.289 2	A ₃₁	0.295 2	0	0	0	0	1
				A ₃₂	0.072 2	0	1	0	0	0
				A ₃₃	0.151 5	1	0	0	0	0
				A ₃₄	0.100 5	1	0	0	0	0
				A ₃₅	0.380 6	1	0	0	0	0
B	0.364 5	B ₁	0.750 0	B ₁₁	0.451 7	1	0	0	0	0
				B ₁₂	0.083 3	1	0	0	0	0
				B ₁₃	0.168 4	0	0	1	0	0
				B ₁₄	0.241 2	1	0	0	0	0
				B ₁₅	0.055 4	0	0	0	0	1
		B ₂	0.250 0	B ₂₁	0.547 9	0	0	1	0	0
				B ₂₂	0.329 5	1	0	0	0	0
				B ₂₃	0.122 6	0	1	0	0	0
				C ₁₁	0.295 2	0	0	1	0	0
C	0.192 9	C ₁	0.525 3	C ₁₂	0.132 3	0	0	0	1	0
				C ₁₃	0.407 6	0	0	0	0	1
				C ₁₄	0.164 9	0	0	0	0	1
				C ₂₁	0.128 3	0	0	0	1	0
		C ₂	0.154 9	C ₂₂	0.361 4	0	1	0	0	0
				C ₂₃	0.232 8	0	0	1	0	0
				C ₂₄	0.173 3	0	1	0	0	0
				C ₂₅	0.104 2	0	1	0	0	0
		C ₃	0.319 8	C ₃₁	0.700 0	0	0	0	1	0
				C ₃₂	0.300 0	0	0	1	0	0

2.2.2 计算风险灾害等级 由模糊综合评价表得到

二级指标评价矩阵,分别为:

$$P_{A_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{A_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{A_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{B_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{B_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{C1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{C2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{C3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用综合评价合成算子将二级指标评价矩阵与其权向量集合,得到对应一级指标评价集为:

$$S_{A1} = (0.000\ 0, 0.111\ 9, 0.723\ 7, 0.164\ 4, 0.000\ 0)$$

$$S_{A2} = (0.000\ 0, 0.041\ 7, 0.573\ 2, 0.233\ 7, 0.151\ 3)$$

$$S_{A3} = (0.632\ 6, 0.072\ 2, 0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.295\ 2)$$

$$S_{B1} = (0.776\ 2, 0.000\ 0, 0.168\ 4, 0.000\ 0, 0.055\ 4)$$

$$S_{B2} = (0.329\ 5, 0.122\ 6, 0.547\ 9, 0.000\ 0, 0.000\ 0)$$

$$S_{C1} = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.259\ 2, 0.132\ 3, 0.572\ 5)$$

$$S_{C2} = (0.000\ 0, 0.638\ 9, 0.232\ 8, 0.128\ 3, 0.000\ 0)$$

$$S_{C3} = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.300\ 0, 0.700\ 0, 0.000\ 0)$$

进而,得到的一级指标评价矩阵为:

$$P_A = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.111\ 9 & 0.723\ 7 & 0.164\ 4 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.041\ 7 & 0.573\ 2 & 0.233\ 7 & 0.151\ 3 \\ 0.632\ 6 & 0.072\ 2 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.295\ 2 \end{bmatrix}$$

$$P_B = \begin{bmatrix} 0.776\ 2 & 0.000\ 0 & 0.168\ 4 & 0.000\ 0 & 0.055\ 4 \\ 0.329\ 5 & 0.122\ 6 & 0.547\ 9 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

$$P_C = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.259\ 2 & 0.132\ 3 & 0.572\ 5 \\ 0.000\ 0 & 0.638\ 9 & 0.232\ 8 & 0.128\ 3 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.300\ 0 & 0.700\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

同样采用综合评价合成算子将第一层次指标评价矩阵与其权向量集合,得到对应目标层评价集为:

$$S_A = (0.182\ 9, 0.064\ 9, 0.438\ 2, 0.151\ 9, 0.162\ 0)$$

$$S_B = (0.664\ 5, 0.030\ 7, 0.263\ 3, 0.000\ 0, 0.041\ 5)$$

$$S_C = (0.000\ 0, 0.099\ 0, 0.268\ 2, 0.313\ 2, 0.300\ 7)$$

同理,得到准则层评价矩阵为:

$$P_R = \begin{bmatrix} 0.182\ 9 & 0.064\ 9 & 0.438\ 2 & 0.151\ 9 & 0.162\ 0 \\ 0.664\ 5 & 0.030\ 7 & 0.263\ 3 & 0.000\ 0 & 0.041\ 5 \\ 0.000\ 0 & 0.099\ 0 & 0.268\ 2 & 0.313\ 2 & 0.300\ 7 \end{bmatrix}$$

进而得到对应目标层评价集为:

$$S_P = (0.323\ 2, 0.059\ 0, 0.341\ 7, 0.127\ 6, 0.144\ 8)$$

根据模糊综合评价结果,采用加权平均法计算该抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险模糊综合评价结果为: $0.95 \times 0.323\ 2 + 0.80 \times 0.059\ 0 + 0.65 \times 0.341\ 7 + 0.50 \times 0.127\ 6 + 0.30 \times 0.144\ 8 = 0.683\ 6$ 。

通过对照评价等级表,可得该抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险等级为 3 级,安全状况为一般安全。结合工程施工日志及施工期水土保持监测季报等资料,在建设期临时道路出现过顺坡溜渣情况,且往往伴随连续降水天气出现,建设单位及施工单位未特意提升风险防范措施等级,而是通过采取极端气候联动机制提升了工程建设期水土保持监管状态及风险控制的整体能力,并通过牢固树立水土流失事故风险意识,成功避免了本工程在建设期发生水土流失及相关灾害。这也从侧面反映了本研究构建的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险评价模型在具体工程建设过程管控方面具有一定的可操作性,且结果可信。

3 结论

本研究综合考虑了风险发生可能性潜势、风险监管与应急措施、风险载体易损性等 3 个维度因素,构建了抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级评价指标体系,包括 8 个一级指标及 34 个二级指标。

(1) 本研究建立了抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险 5 级评价模型,模型先通过层次分析法确定各层级指标的权重,且满足一致性校验要求;进一步依据现行行业法律法规、标准导则等确定各二级指标的隶属度,并采用基于加权平均法的模糊综合评价计算抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险等级,使分级评价结果更具科学性。

(2) 将建立的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级评价模型应用于实际案例,计算安徽绩溪抽水蓄能电站在建设期的水土流失及其次生灾害风险等级,各评价指标参考该项目相关文献资料,计算得出该抽水蓄能电站灾害风险等级为 3 级,属于一般安全。结合本工程在建设期末发生水土流失及相关灾害的实际情况,说明本研究构建的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险评价模型具有可行性,且评价结果可信。

(3) 考虑到应用案例工程在建设过程中出现过顺坡溜渣的情况,在后续抽水蓄能电站工程对于采用本研究的建设期水土流失及其次生灾害风险评价模型进行风险等级评估且风险等级为 3 级的工程,可借鉴该工程建设阶段所采用的相关水土保持监管及风险防范控制措施,确保工程水土保持措施按照要求落实建设,并通过引入新技术加强建设期水土保持监测水平,重点关注建设期弃渣堆置不合规及取弃土过程中的潜在土壤流失量,尽可能避免出现顺坡溜渣等水

土流失情况,降低工程在建设期的灾害风险,彻底杜绝水土流失及其次生灾害现象的出现。

4 讨论

根据本研究构建的抽水蓄能电站建设期水土流失及其次生灾害风险分级指标体系各级权重分配情况可知,工程岩土坡体状况是影响工程水土流失及其次生灾害风险潜势最大的因素,其中基覆界面倾角、最大纵坡坡度及土体类型为权重较高的二级指标,因此在选址地质勘查过程中因重点关注上述指标,从选址角度尽可能降低工程的整体风险。

在工程建设期实际管理过程中,工程水土流失防治标准等级和工程施工安全检查评分是对工程建设期水土流失及次生风险等级影响最大的因子,从监管的角度来说,抽水蓄能电站项目单位及施工单位在工程建设期应严格落实工程水土保持措施,确保实际水土流失情况达到防治标准要求,并加强施工过程的安全监督检查,提高风险防范意识。

[参 考 文 献]

[1] 王丙乾,董剑敏,关前锋,等.基于灰色关联 TOPSIS 法的抽水蓄能电站风险评价体系研究[J].南方能源建设,2020,7(S2):56-61.

[2] 冯志泽.自然灾害等级划分及灾害分级管理研究[J].灾害学,1996,1(1):34-37.

[3] 何利民,李静娜,赵雪雯.基于层次分析一模糊综合评价的油库衍生灾害分级研究[J].安全与环境学报,2021,21(1):33-41.

[4] 石济开,邵超峰,鞠美庭,等.石油化工企业环境风险分级评价指标体系研究[J].安全与环境学报,2015,15(2):324-330.

[5] Aljaroudi A, Khan F, Akinturk A, et al. Risk assessment of offshore crude oil pipeline failure [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,37(4):101-109.

[6] Cavanagh N, Hickey C A. "Triple Bottom Line" approach to QRA [J]. Chemical Engineering, 2012,26(28):164-170.

[7] Adi J, Nezamoddini Z. Evaluation of chlorine gas release hazard [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012,37(1):1-8.

[8] McDaniels T L. Creating and using objectives for ecological risk assessment and management [J]. Environmental Science & Policy, 2000,3(6):299-304.

[9] 廖春芳,周羿霖,储诚诚,等.郴宁高速公路建设项目水土流失风险评价[J].公路工程,2013,38(1):17-19,27.

[10] 赵心畅,徐洪霞.溧阳抽水蓄能电站水土流失防治措施的分析[J].水力发电,2010,36(7):22-24.

[11] 肖国年,周宁,李铮,等.宜兴抽水蓄能电站工程区降雨侵蚀力特征分析[J].人民长江,2020,51(S2):45-49.

[12] 刘权,杨跃斌,龙方,等.超大城市内大型抽水蓄能电站建设与生态环境协调发展实践[J].水力发电,2021,47(2):14-17,30.

[13] 王静,张翼,杨凯.抽水蓄能电站水土保持措施设计[J].中国水土保持,2018(1):17-19.

[14] 刘兰芬.河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J].水利学报,2002,33(8):121-128.

[15] 李文秀,张敬武,李文静,等.山区开挖对自然坡稳定性及环境影响分析[J].化工矿物与加工,2011(3):32-34.

[16] 孙金辉,谢忠胜,陈欢,等.基于层次分析法的北川县环境地质承载力评价[J].水土保持通报,2018,38(4):125-128.

[17] 王克勤,姜德文,高天天,等.基于层次分析法的生产建设项目水土保持影响综合指数研究[J].水土保持通报,2015,35(3):136-142.

[18] Harker P T, Vargas L G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process [J]. Management Science, 1987,33(11):1383-1403.

[19] Dong Sihui, Zhao Yuku, Li Min. Improvement of analytic hierarchy process and its application for coal mine safety assessment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,368/370(III):1979-1984.

[20] 刘守强,武强,曾一凡,等.基于 GIS 的改进 AHP 型脆弱性指数法[J].地球科学,2017,42(4):625-633.

[21] 潘网生,李鑫,张晓周,等. FAHP-GIS 在 FAST 台址单体滑坡危险性评价中的应用[J].水土保持通报,2020,40(4):108-115,132.

[22] 环境保护部科技标准司. HJ 19-2011 环境影响评价技术导则生态影响[S].北京:中国环境科学出版社,2011.

[23] 刘迎春,石云山,卢启春,等.基于指标评分法的单体管道地质灾害风险评价:以土质滑坡为例[J].天然气技术与经济,2015,9(3):57-61.

[24] 贺宇昊,陈勇,曾向阳,等.基于 AHP 和 FCE 的矿山开采地质灾害风险评价:以上横山钒矿区为例[J].化工矿物与加工,2015(1):36-39.

[25] 水利部水土保持司. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2007.

[26] 水利部水土保持监测中心. GB/T50434-2018 生产建设项目水土流失防治标准[S].北京:中国计划出版社,2018.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ59-2011 建筑施工安全检查标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[28] 尚志海,刘希林.基于 LQI 的泥石流灾害生命风险价值评估[J].热带地理,2010,30(3):289-293.

[29] 国家环境保护总局科技标准司. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.