甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评价模型

马 瑞[1], 张 富[1], 周 波[2], 吕彦勋[1], 王玲莉[1], 赵秀兰[1]
(1.甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: [目的] 运用淤地坝工程溃坝风险评价模型,确定淤地坝工程发生溃决可能性的大小,为淤地坝运行管理提供技术支撑。[方法] 通过调研和对溃坝风险问题的梳理,形成淤地坝工程溃坝风险评价指标体系,运用层次分析法确定指标权重,构建了甘肃省淤地坝工程溃坝风险评价模型。[结果] 该模型包含水文风险(B_1)、运行风险(B_2)、管理风险(B_3)、工程风险(B_4)4 个风险类型模块(其权重分别为0.12,0.13,0.12,0.63)及其下的 16 个具体评价指标;水面/泥面距拦泥坝高的距离(D_1)、剩余淤积库容(D_4)、有无 3 个管理负责人(D_7)、坝体变形(D_{12})分别是 4 个风险类型模块的最大权重评价指标;对各指标的评分标准作了规定,依据综合风险得分将输出的风险等级和预警等级各划分为 3 级。[结论] 淤地坝工程溃坝风险评价模型由输入、分析和输出 3 个模块组成,层次清晰,架构明确。评估模型的构建可对汛期淤地坝工程风险的评价提供实时预警数据。

关键词: 淤地坝; 溃坝风险; 指标体系; 评价模型
文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2021)04-0139-06 **中图分类号**: S157

文献参数: 马瑞, 张富, 周波, 等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评价模型[J].水土保持通报,2021,41(4):139-144.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.020; Ma Rui, Zhang Fu, Zhou Bo, et al. Risk assessment model for dam break in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):139-144.

Risk Assessment Model for Dam Break in Gansu Province

Ma Rui[1], Zhang Fu[1], Zhou Bo[2], Lü Yanxun[1], Wang Lingli[1], Zhao Xiulan[1]
(1.*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2.*Gansu Water Conservancy Research Institute, Lanzhou, Gansu* 730030, *China*)

Abstract: [Objective] By constructing risk assessment model for dam break, the possibility of dam break was determined to provide technical support for check dam operation and management. [Methods] The risk assessment index system of check dam engineering was established through investigation and analysis of dam break risk problems. The weights of indexes were determined by analytic hierarchy process and the risk assessment model of dam break in Gansu Province was constructed. [Results] The model includes hydrological risk indexes (B_1), operation risk indexes (B_2), management risk indexes (B_3), and engineering risk indexes (B_4), a total of four risk types modules (with weights of 0.12, 0.13, 0.12, 0.63, respectively) and 16 specific evaluation indexes. Distance between water surface/mud surface and the height of dam(D_1), the available silting tank volume (D_4), the presence or absence of three management directors (D_7), and the dam deformation (D_{12}) are the maximum weight indexes of the four risk index modules. The scoring standard of each index was stipulated in the study, and the output risk level as well as early warning level were divided into 3 levels according to the comprehensive risk score. [Conclusion] The risk assessment model of check dam is composed of three modules: input, analysis, and output, which has clear hierarchy and structure. The construction of the assessment model can provide real-time warning data for risk assessment of check dam before rainfall events.

Keywords: **check dam; dam break risk; index system; assessment model**

收稿日期:2021-02-18 **修回日期**:2021-04-11
资助项目:甘肃省水利科技项目"甘肃省淤地坝水沙利用与风险管控研究(甘水建管发[2021]71 号)
第一作者:马瑞(1977—),女(回族),甘肃省平凉市人,博士,副教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email:mr031103@126.com。
通讯作者:张富(1961—),男(汉族),甘肃省定西市人,博士,研究员,主要从事小流域水土保持措施对位配置研究。Email:fuzhang001@163.com。

淤地坝是黄土高原水土流失地区控制沟道侵蚀的一项重要工程措施[1]，具有拦泥保土、淤地造田、减灾、以坝代路、解决干旱缺水、优化土地利用结构、促进农村经济发展等多种作用[2-3]。淤地坝的安全运用对于滞洪排清、淤地造田、减轻汛期山洪灾害等具有非常重要的作用。然而，由于没有风险评价数据的支撑，各地在淤地坝功能的全方位发挥以及提质增效措施的实施上遇到了难题，尤其是在用水问题上，出现了生产缺水和有水不敢蓄、有水不敢用的矛盾，同时在淤地坝功能的发挥及风险规避上也缺少管理依据，因此，很有必要开展淤地坝风险诊断与评价研究，以判断淤地坝工程发生溃决可能性的大小，为淤地坝运用、风险管控及其水土资源利用提供技术支撑。淤地坝风险评价是通过分析溃坝原因，筛选出淤地坝溃坝风险影响因子，如淤积库容、滞洪库容、坝体稳定性等，借助层次分析法确定各因子权重，从而构建评价模型对淤地坝的溃坝风险进行综合评价和诊断的技术方法[4-9]。从发表文献来看，已有研究所构建的指标体系因流域差异而不尽相同，如王丹等[4]对西吉县车路沟流域坝系溃坝风险的评价采用的一级指标有工程风险、管理风险、经济风险和结构风险，而杭朋磊[5]对韭园沟流域坝系溃坝风险评价采用的一级指标则减去了结构风险，增加了环境风险。目前，以王茂沟流域淤地坝坝系为对象开展风险诊断和安全运行的研究最多，但因关注点的不同，各自建立的指标体系差异也很大，如杨瑞等[6]和袁水龙等[7]建立了漫顶溃坝、渗流破坏、失稳溃决、结构破坏、管理因素共 5 个一级指标和滞洪洪水、剩余库容等 14 个二级指标来分析坝系的安全运行情况；钟少华[8]建立了坝体病险、放水建筑物病险、溢洪道病险、剩余库容共 4 个一级指标和裂缝、滑坡坍塌等 11 个二级指标来分析坝系的溃坝风险；段茂志[9]则建立了水文风险、工程风险 2 个一级指标和基础防渗质量、坝坡稳定等 9 个二级指标来评价临发暴雨过程中的溃坝风险指数。本研究通过对甘肃省淤地坝风险状况调研，基于工程设计及现状分析对淤地坝工程溃坝评价指标和评价模型展开了进一步研究，构建了以水文风险、运行风险、管理风险和工程风险 4 个模块组成，包含 16 个具体评价指标的淤地坝工程溃坝风险评价模型，以期通过模型的应用为甘肃省淤地坝运用管理、安全行洪、蓄水利用、坝控区生态环境建设与发展等提供风险评价和风险防控基础数据。

1 淤地坝工程风险因素调查与指标体系构建

淤地坝工程风险影响因素调查通过现场调研、专家座谈及资料查阅等方式进行。于 2020 年 7 月下旬至 8 月上旬，共计现场调研了甘肃省庆阳、平凉、天水、白银、定西、临夏和兰州市共 7 个市州的 9 座淤地坝工程的风险问题。通过座谈对各市州淤地坝运行管理、除险加固、蓄水利用等情况进行了详细询问和探讨。截至 2020 年 12 月底共收回“××市(州)××县(区)淤地坝风险评价数据库”表格 926 份。对调研数据进行梳理后构建了淤地坝工程溃坝风险指标体系。

1.1 工程水文风险

经分析探讨，将工程水文风险指标确定为泥面/水面到拦泥坝高的距离(Δh)和有无溢洪道 2 个指标。

1.1.1 滞洪库容与工程水文风险 实际滞洪库容是淤地坝抵抗洪水风险能力的关键，与坝库淤泥、蓄水状况有直接关系，存在两种情景。①情景 1：汛前不蓄水。此时，当泥面在拦泥坝高以下，则实际滞洪库容＝设计滞洪库容＋剩余淤积库容；而当泥面在拦泥坝高以上，则实际滞洪库容＝设计滞洪库容—超出的淤积库容，即淤泥挤占了滞洪库容(防汛库容)，构成水文风险，高出越多，风险就越大。②情景 2：汛前蓄水。适用于存在死库容的淤地坝以及人工蓄水的淤地坝。汛前，当水位控制在拦泥坝高以下时，相当于占用了拦泥坝高以下的部分死库容而未挤占滞洪库容，这时候淤地坝按设计是相对安全的；但如果汛前水位超过拦泥坝高，则会挤占滞洪库容，此时构成不安全因素。在情景 1，2 中，设泥面/水面到拦泥坝高的距离为 Δh，Δh＝泥面高/水面高—拦泥坝高，则当 Δh 为正值时，构成工程水文风险。

1.1.2 溢洪道与工程水文风险 有溢洪道对排洪来说是双保险，可实质性降低溃坝风险；无溢洪道时，溃坝风险相对增加。

1.2 工程运行风险

工程运行风险确定为剩余淤积库容、剩余淤积年限和有无防汛道路共 3 个指标。其中，剩余淤积库容可用于衡量淤地坝实际能够多承载的洪水的量，是影响工程运行的主要风险因子。对于淤积库容来说，一般设计淤积年限为 10～20 a，但随着坡面治理，侵蚀模数可能从 5 000～8 000 t/(km^2 · a)下降到 2 000～3 000 t/(km^2 · a)，因此到设计淤积年限不一定能淤满，但是，即便原来设计 20 a 的淤积库容到了 30 a 还没淤满，保 20 a 土壤不流失的任务已完成，后面属于超期服役。就工程设计而言，越接近设计淤积年限，淤积库容越小，淤地坝运行风险也就越大。

据此,剩余淤积年限也可作为运行风险指标。防汛道路属淤地坝配套工程,保证了发生暴洪时抢险人员和设备能够及时到场,没有防汛道路时构成工程运行风险。

1.3　工程管理风险

工程管理风险指标确定为有无预警系统、有无 3 个管理责任人(行政责任人,技术责任人,管理责任人)和有无防汛预案共 3 个指标。汛期,暴雨过后,淤地坝卧管孔塞应该打开及时放水。如果前一场暴雨造成水位已经上升,应在第二场暴雨来临之前尽快排空以腾出滞洪库容。如果不排而挤占滞洪库容,则下一场暴雨来时,就会形成“人为超标洪水”。因此,在管理工作中,如果预警系统已经建立,3 个管理责任人配备到位,在汛期暴洪发生后或水位上涨时,能够及时打开卧管孔塞,正常维护,则淤地坝一般不会出问题。防汛预案是为了安全度汛,督促检查防汛措施和实施汛期应急救援工作而制定,缺少防汛预案时,构成管理风险。

1.4　工程风险

经过对已有研究的分析和探讨,认为段茂志[9]所建立的工程风险指标对淤地坝的工程风险问题覆盖全面,层次清晰,用该指标对王茂沟流域临发暴雨中的溃坝分析结果合理,经评估本研究确定直接采用这一工程指标模块,不再另行设定。该指标模块分为工程质量风险、结构安全风险和渗漏安全风险 3 个一级指标,其中工程质量包括基础防渗质量、坝体防渗质量和填筑质量 3 个具体指标;结构安全包括坝体变形和坝坡稳定性 2 个具体指标;渗漏安全包括坝基渗漏、坝肩渗漏和坝体及防渗体渗漏 3 个具体指标,具体指标分析见文献[9]。

综上所述,本研究共建立了由 2 个水文风险指标、3 个运行风险指标、3 个管理风险指标、8 个工程风险指标,共 16 个指标组成的淤地坝溃坝评价指标体系。根据 16 个风险评价指标的层级关系,建立了由目标层(A)、中间层(B 和 C)和指标层(D)组成的层次结构指标体系(图 1)。

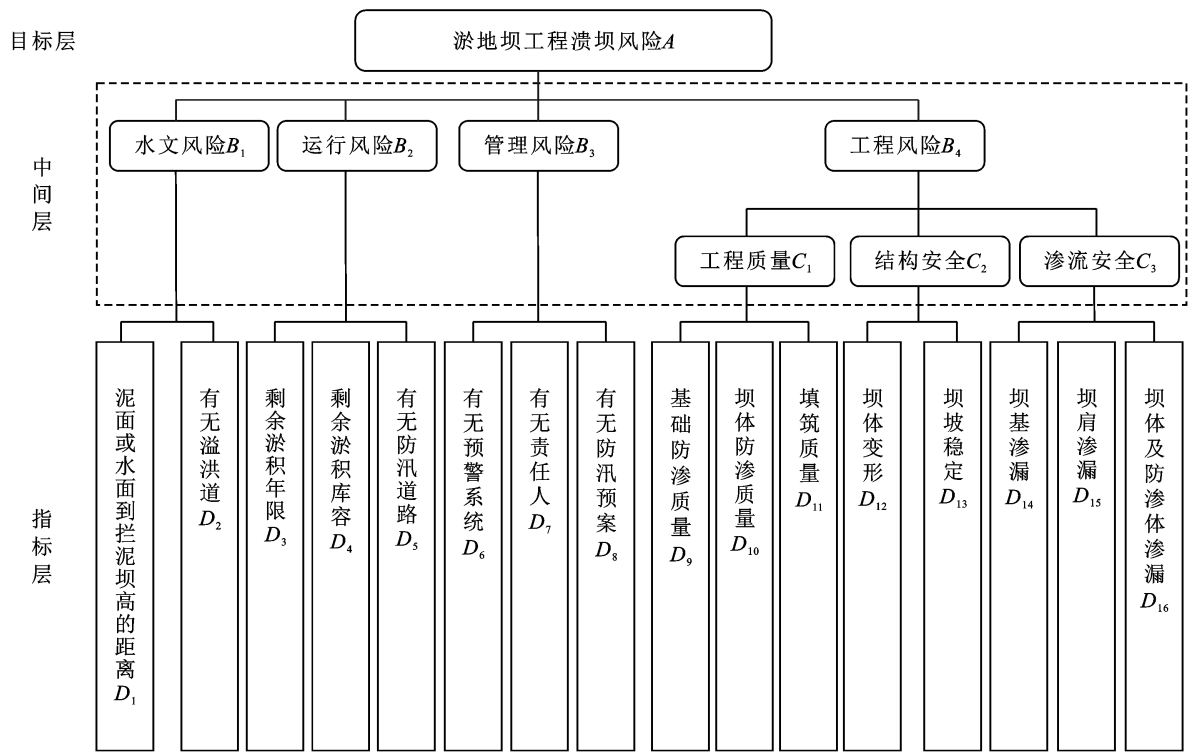


图 1　淤地坝工程溃坝风险评价指标体系

2　指标权重确定

淤地坝工程 16 个溃坝风险评价指标对淤地坝溃坝的贡献率,即权重采取专家打分及评议的方法确定。层次分析法是结合专家经验的定性和定量分析相结合的数学工具,可将复杂的决策问题作为一个系统分解成目标、准则、指标等递进的层次结构,通过专家评分对各项目进行两两矩阵判断及一致性检验,由数学方法算出各项目对于总目标的指标权重[4-9]。依据淤地坝溃坝风险评价指标体系构建评分矩阵,邀请各市州共计 30 位淤地坝专家根据经验对每一层次指标相对于它所属上一级指标的重要程度进行两两

比较，然后根据重要性等级及评分标准(表 1)进行打分。

对评分进行数据处理，对判断矩阵进行层次单排序一致性检验和层次总排序一致性检验，以确定指标间的相互关系可以定量传递。淤地坝工程溃坝风险评价指标层次总排序计算结果详见表 2。

表 1 评价系统重要性等级及参考评分标准

指标对比	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	绝对重要	介于两者中间
标度	1	3	5	7	9	2,4,6,8

表 2 淤地坝工程溃坝风险评价指标层次总排序计算结果

A 层	B 层		C 层		D 层	
	指标	权重	指标	权重	指 标	权重
淤地坝工程溃坝风险 A	水文风险 B_1	0.12	—	—	水面/泥面到拦泥坝高的距离 D_1	0.09
					有无溢洪道 D_2	0.03
	运行风险 B_2	0.13	—	—	剩余淤积年限 D_3	0.01
					剩余淤积库容 D_4	0.08
					有无防汛道路 D_5	0.04
	管理风险 B_3	0.12	—	—	有无预警系统 D_6	0.01
					有无三个管理责任人 D_7	0.07
					有无防汛预案 D_8	0.04
	工程风险 B_4	0.63	工程质量 C_1	0.21	基础防渗质量 D_9	0.03
					坝体防渗质量 D_{10}	0.09
					填筑质量 D_{11}	0.09
			结构安全 C_2	0.21	坝体变形 D_{12}	0.14
					坝坡稳定 D_{13}	0.07
			渗流安全 C_3	0.21	坝基渗漏 D_{14}	0.03
					坝肩渗漏 D_{15}	0.09
					坝体及防渗体渗漏 D_{16}	0.09

注：水文风险、运行风险、管理风险无 C 层指标。

3 模型架构

(1) 输入模块。在输入模块中输入提前运算得到的 16 个风险指标得分值 x_i 或直接输入基础数据。当选择输入基础数据时，系统需要通过简单运算得到风险指标得分值 x_i，此时在输入时需输入相应参数并定义运算法则。

(2) 分析模块。以 D 层各风险指标权重 k_i 为系数，以各指标得分值 x_i 为未知数，以淤地坝溃坝风险运算值 y 为模型输出项，构建分析模块为：

$$y=\sum_{i=1}^{16}k_ix_i$$

式中：y 表示淤地坝工程溃坝风险运算值；x_i 为风险指标 D_i 的得分；k_i 为 x_i 的系数，$i=1,2,3,\cdots,16$。

(3) 输出模块。输出模块的功能是根据淤地坝工程溃坝风险运算值 y 的大小确定淤地坝溃坝风险等级，并根据风险等级发出相应等级的预警。风险等级 3 为低风险，2 为中风险，1 为高风险。淤地坝工程溃坝风险等级划分及预警等级详见表 3。

表 3 淤地坝工程溃坝风险及预警等级划分

淤地坝溃坝风险得分	风险等级	预警等级
1～3	3	Ⅲ
3～6	2	Ⅱ
6～9	1	Ⅰ

对输入模块、分析模块和输出模块进行集成，完成模型的构建，建成的模型架构详见表 4。

4 淤地坝工程汛期风险指标评分方法

淤地坝工程汛期风险指标 D_i 的得分，即 x_i 值是对每个具体参评的淤地坝的工程现状以分值的形式给出的评价，通常采取专家打分法确定。本研究中 16 个溃坝风险指标的评分标准详见表 5，每个指标风险分的取值范围均为 1～9。其中，对水面/泥面到拦泥坝高的距离 Δh 评分时，需分两种情况作出评分：当

Δh 为负值时,也就是说蓄水/淤泥不会影响到滞洪库容时,评分直接记作 0,而当 Δh 为正值时,评分则由 Δh/(坝高—拦泥高度)的比值确定;剩余淤积年限由评价年份、建坝年份和设计淤积年限计算所得,即剩余淤积年限＝评价年份－(建坝年份＋设计淤积年限);剩余淤积库容的评分由剩余淤积库容/设计淤积库容的比值确定;其余指标根据危险级别给出评分。需特别说明的是,溢洪道、防汛道路、预警系统、3 个管理责任人的评分需要先确定有或无,有则记作 0 分,无则按表 5 评分。

表 4　淤地坝溃坝工程风险评价模型架构

风险类型			风险指标	输入	分析			输出	
A 层	B 层	C 层	(D 层)	(指标值或危险级别)	系数 k_i	指标得分 x_i	风险评分 y	风险等级	预警等级
淤地坝工程溃坝风险	水文风险		水面/泥面到拦泥坝高的距离/m		0.09				
			滞洪坝高＋安全超高						
			有无溢洪道(有/无)		0.03				
	运行风险		建坝年份		0.01				
			设计淤积年限/a						
			剩余淤积年限/a						
			剩余淤积库容/10^4 m^3		0.08				
			设计淤积库容/10^4 m^3						
			有无防汛道路(有/无)		0.04				
	管理风险		有无预警系统(有/无)		0.01				
			有无 3 个管理责任人(有/无)		0.07				
			有无防汛预案(有/无)		0.04				
	工程风险	工程质量	基础防渗质量		0.03				
			坝体防渗质量		0.09				
			填筑质量		0.09				
		结构安全	坝体变形		0.14				
			坝坡稳定		0.07				
		渗流安全	坝基渗漏		0.02				
			坝肩渗漏		0.09				
			坝体及防渗体渗漏		0.09				

注:表中“指标值或危险级别”为录入信息;“指标得分 x_i”是对“指标值或危险级别”的评分;“风险评分 y”“风险等级”和“预警等级”由分析模块运算得到。

表 5　淤地坝工程溃坝风险指标的评分标准

Δh/(滞洪坝高＋安全超高)	剩余淤积年限/a	剩余淤积库容/设计淤积库容	危险级别	风险分
＜1/9	≥8	＜1/9	基本安全	1
1/9～2/9	7	1/9～2/9	相邻级别之间	2
2/9～3/9	6	2/9～3/9	轻度危险	3
3/9～4/9	5	3/9～4/9	相邻级别之间	4
4/9～5/9	4	4/9～5/9	中度危险	5
5/9～6/9	3	5/9～6/9	相邻级别之间	6
6/9～7/9	2	6/9～7/9	重度危险	7
7/9～8/9	1	7/9～8/9	相邻级别之间	8
8/9～1	≤0	8/9～1	极端危险	9

5　讨论与结论

5.1　讨 论

淤地坝是黄土高原区小流域水土流失治理的重要工程措施,对其运用过程中的溃坝风险的识别和研究极为重要。本研究所构建的淤地坝溃坝风险评价模型由风险指标体系构建、运算法则、风险指标赋值三部分组成。其中,模型中风险指标的选择和权重的确定是决定淤地坝风险评价结果可靠性的关键。本研究采用调研、专家打分、层次分析、评议等方法建立了甘肃省淤地坝工程溃坝风险评价指标体系并确定了指标权重。16 项风险评价指标中,即有定量指标,也有依据危险级别判断结果进行量化的定性指标,如基础防渗质量、坝体防渗质量、填筑质量等。指标体系包含 4 个一级指标,这 4 个一级指标分别是对水文、运行、管理和工程质量的风险评价,涉及的风险类型全面,能够综合反映淤地坝工程的溃坝风险。

本模型既是对溃坝风险的评价,也是对蓄水利用安全性的评价。因此,所采取的水文风险指标与段茂志提出的临发暴雨中的水文风险指标[9]不同,本研

究中的泥面/水面到坝顶的距离是对汛前状态的衡量，为静态指标，其实质是通过对滞洪库容的影响来反映当发生降雨事件时坝库的蓄水及泄洪能力。几乎在所有关于淤地坝风险评价的文献中，工程风险都是占比最高的风险类别[4-9]，也就是说使淤地坝发生溃坝的最大风险因素是坝体自身的不稳固。然而，尽管各地正常运行的淤地坝都是通过验收交付使用的质量合格的坝，但在运行过程中受水力侵蚀、鼠洞、蚁穴、不均衡碾压等多种因素的影响，难免会出现侵蚀沟、洞穴、裂缝等过水通道以及严重影响坝体安全的变形问题[7,9]，而这些问题得不到及时补救则与管理有关[10-13]，因此，加强管理意识、增加管护经费、提高坝体安全是淤地坝安全运行的重要保障。

5.2 结 论

研究通过现场调研、专家打分、层次分析、专家评议等多种形式对甘肃省淤地坝工程溃坝风险指标和指标权重进行了研究，构建了甘肃省淤地坝工程溃坝风险评价模型。该模型由水文风险(B_1)、运行风险(B_2)、管理风险(B_3)、工程风险(B_4)共 4 个风险类型模块(权重分别为 0.12，0.13，0.12，0.63)组成，各模块又分别包括 2，3，3，8 共 16 个具体评价指标；水面/泥面到拦泥坝高的距离(D_1)、剩余淤积库容(D_4)、有无 3 个管理负责人(D_7)、坝体变形(D_{12})分别是 4 个风险类型模块的最大权重评价指标，分别占各自模块权重的 69.23%，61.53%，53.85%，0.22%，合计占 16 个指标总权重的 38.00%。权重在 0.09 以上的指标共计 6 个，对淤地坝工程溃坝风险起主要把控作用。本研究对各指标的评分标准作了规定，依据综合风险得分将输出的风险等级和预警等级划分为 3 级。模型由输入、分析和输出 3 个模块组成，层次清晰，架构明确，模型的构建可为汛前淤地坝工程风险的评价提供实时预警数据，使淤地坝兴农、两不误。

[参 考 文 献]

[1] 王志坚，李冰，王楠.坝系工程除险加固时标准和洪水组合问题探讨[J].中国水土保持，2019(11)：12-16.

[2] 黄河上中游管理局.黄土高原淤地坝安全运用管理探讨[J].中国水土保持，2020(10)：27-29.

[3] 惠波，惠露，郭玉梅.黄土高原地区淤地坝“淤满”情况及防治策略[J].人民黄河，2020，42(5)：108-111，115.

[4] 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.

[5] 杭朋磊.黄土高原淤地坝系洪灾溃决风险评价[D].陕西 西安：西安理工大学，2020.

[6] 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.

[7] 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].西部大开发(土地开发工程研究)，2018，3(5)：40-45，50.

[8] 钟少华.王茂沟流域淤地坝风险评价与除险方法研究[D]. 陕西 西安：西安理工大学，2020.

[9] 段茂志.淤地坝溃坝风险评价与实时预警模型设计[D]. 陕西 西安：西安理工大学，2019.

[10] 马建业，张扬，袁水龙.淤地坝系安全运行保障技术探析[J].中国水土保持，2019(5)：6-8，31.

[11] 李继忠.安定区淤地坝工程安全运用管理现状与对策[J].中国水土保持，2019(8)：18-20.

[12] 惠波，王答相，张涛.关于新时期黄土高原地区淤地坝建设管理的几点思考[J].中国水土保持，2020(2)：23-26.

[13] 杨稳新.紧抓新时代发展机遇促进陕西淤地坝高质量发展[J].中国水土保持，2020(9)：68-69，83.

(上接第 138 页)

[20] Maxwell A E，Warner T A，Fang F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing：An applied review [J]. International Journal of Remote Sensing，2018，39(9)：2784-2817.

[21] Badrinarayanan V，Kendall A，Cipolla R. Segnet：A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2017，39(12)：2481-2495.

[22] Lei Tao，Zhang Yuxiao，Lv Zhiyoug，et al. Landslide inventory mapping from Bitemporal images using deep convolutional neural networks [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters，2019，16(6)：982-986.