

尾矿库工程地质灾害易损性评价研究

——以滇东南云镍尾矿库为例

杨良权¹, 陈爱兵², 高焕芝³, 徐鹏², 吴广平¹, 冯鹏宇²

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 2. 昆明理工大学

国土资源工程学院, 云南 昆明 65009; 3. 中国有色金属学会, 北京 100814)

摘要:以滇东南云镍尾矿库工程项目为依托,根据西南山区特有的地质环境条件,并针对尾矿库自身工程特点,选取了人口、资产、资源作为地质灾害易损性的 I 级评价指标,采用德尔菲法、层次分析法确定评价指标的权重值,建立广义目标数学模型。采用计算机 C++ 程序语言,结合 GIS 系统开发平台进行地质灾害易损性定量评价,得到地质灾害易损性分级分区图。云镍尾矿库地质灾害易损性分为易损性极高、易损性高、易损性中等、易损性低 4 个区。研究成果可以为其他类似尾矿库的地质灾害易损性研究提供参考,亦可为政府区域规划、建设适宜性评价等提供科学依据。

关键词:尾矿库; 地质灾害; 易损性; 指标体系; 评价模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0290-06

中图分类号: P694

Vulnerability Assessment of Geological Disasters in Tailing Pond Engineering

—A Case Study of Yun Nickel Tailing Pond in Southeast Yunnan Province

YANG Liang-quan¹, CHEN Ai-bing², GAO Huan-zhi³, XU Peng², WU Guang-ping¹, FENG Peng-yu²

(1. *Beijing Institute of Hydraulic Engineering Planning and Design, Beijing 10048, China;*

2. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming, Yunnan 650093, China; 3. The Nonferrous Metals Society of China, Beijing 100814, China)

Abstract: According to the geological environment conditions of the study area and the characteristics of the Yun nickel tailing pond, population, assets and resources are selected as the evaluation indexes of geological disaster vulnerability. Delphi method and analytic hierarchy process(AHP) are used to determine the weight value of evaluation indexes and establish a generalized mathematical model. Using computer programming language C++, combined with GIS system development platform for quantitative evaluation of vulnerability of geological disasters, this article gets graded partition map of geological disasters vulnerability. Geological disaster vulnerability of the Yun nickel tailing pond may be divided into the four grades of extreme vulnerability, high vulnerability, moderate vulnerability and low vulnerability. The research results not only provide a reference for studies of geological disaster vulnerability in other similar tailings, but also provide a scientific basis for regional planning and construction suitability evaluation by governments.

Keywords: tailing ponds; geological disaster; vulnerability assessment; index system; evaluation model

目前,中国拥有世界上数量最多的尾矿库,但大多数尾矿库规模小、安全环保投入普遍不足,隐患重重。因此,尾矿库工程地质灾害风险性的评价与风险预防越来越受到国内许多学者的重视。然而地质灾害风险性评价研究的前提是对其易损性进行准确的评价,易损性评价对地质灾害评估体系的完整构建和评价结果的科学性与明确性起着举足轻重的作用。关于灾害易损性的评价国内外学者一直在不断研

究^[1-9],但是关于地质灾害易损性评价方面的研究很有限,评价的方法多属于定性或半定量分析,还没有严格的数学模型解决这类问题,而且评价方法多数适应于区域性的评价研究,对小范围的易损性研究具有很大的局限性。

更重要的是,关于尾矿库工程的地质灾害方面研究更是少之甚少,所以进行尾矿库工程的地质灾害易损性评价研究具有很重要的现实意义。

收稿日期:2013-04-19

修回日期:2013-05-03

作者简介:杨良权(1986—),男(汉族),河北省玉田县人,硕士,主要从事自然灾害、地质灾害评价预测与防治研究。E-mail: yangliang-quan1986@126.com。

本文以云南省山区特有的地质环境条件为背景,对尾矿库工程地质灾害易损性评价进行深入研究。地质灾害易损性评价研究的成果具有广泛的应用价值,可以为政府部门的区域规划发展提供基础资料,可以用作建设项目场地的适宜性评价并为基础设施的布置提供科学依据,还可以为地质灾害综合防治措施的设计提供地质资料,直接为防灾减灾工程服务等。

1 研究区概况

研究区位于云南省文山州麻栗坡县境内,距云南省昆明市约 450 km。研究区位于云贵高原南缘地带,受构造切割营力作用,属于侵蚀中山峡谷地貌,地形坡度 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$,海拔高程在 980~760 m,相对高差约 220 m,地形地貌复杂。研究区内出露地层为三叠系斜长角闪岩,第四系主要有耕植土(Q^{pd})、冲洪积成因(Q^{al+pl})的含黏性土砂卵石层、残坡积成因(Q^{el+dl})的含风化残余基岩碎石、角砾粉质黏土层;不良地质作用主要为冲沟、岩体风化及岩体卸载。整体看研究区内的工程地质条件中等复杂,研究区内发育有滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,灾害典型,所以对该尾矿库的研究具有很大意义。

2 尾矿库工程地质灾害易损性评价指标体系

2.1 尾矿库地质灾害破坏效应

国内学者认为对地质灾害破坏效应的分析,是为了界定承灾体范围、划分承灾体类型,更是地质灾害易损性分析的基础。尾矿库工程是建设项目中较为特殊的一种工程建设,更异于水利水电工程,尾矿库工程地质灾害承灾体种类很多,不同的地质灾害(如崩塌、滑坡、泥石流等)会对不同承灾体造成不同的破坏效应。

(1) 破坏尾矿库建设工程。主要导致成灾的灾害有崩塌、滑坡、泥石流等,这些灾害可以使大坝、截洪沟、排水沟等设施变形、淤埋、冲毁等,此类灾害不但能造成直接损失,有时更会造成严重的间接损失。

(2) 造成人员伤亡。主要导致成灾的灾害有崩塌、滑坡、泥石流等,因这些灾害具有很强的爆发性和灾害性,在施工期间会对其下方的施工人员造成很大的伤害,有时会造成一定的人员伤亡。同时,尾矿库漫坝、溃坝时形成的泥石流也对下方的居民造成一定的人员伤亡。例如 2008 年 9 月 8 日发生在山西省临汾市襄汾县新塔矿业有限公司尾矿库“9·8”特别重大溃坝事故,造成重大人员伤亡,损失惨重。

(3) 破坏厂区内公路,威胁交通安全。主要导致成灾的有崩塌、滑坡、泥石流等灾害,可使区内公路遭到变形、位移、开裂等破坏。在施工期间会增加相应的修复费用和施工费用,同时还会延长工期,造成更大的经济损失。对于区内存在的永久性公路的破坏,则会使尾矿不能顺利运送到尾矿库内,导致尾矿库后期无法正常运行,使企业造成严重的经济损失。

(4) 破坏建筑物及设施。主要导致成灾的灾害有滑坡、泥石流等。位于斜坡上的管理房及施工时的临时建筑等可能遭到滑坡、泥石流的破坏,可能会导致变形、开裂,甚至冲毁等,有时甚至造成一定的人员伤亡。

(5) 破坏水源资源。水是人类及一切生物赖以生存必不可少的重要物质之一,水同时也是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的宝贵自然资源。对水资源造成的破坏主要来自尾矿所含的有毒成分(如砷等),可使水资源遭到污染,尤其是对地下水的污染,人畜饮用后可能死亡,同时也会使下游的池塘、河流、湖泊等遭到污染。

(6) 破坏土地资源。主要导致成灾的灾害有泥石流等。因漫坝、溃坝形成的泥石流,因其具有很强的突发性和破坏性,可将下游的耕地冲毁或淤埋,导致耕地无法耕种,甚至失去可利用的价值。

(7) 破坏“生命线工程”。主要导致成灾的灾害有泥石流等,泥石流可使下游的“生命线工程”,如供水系统工程、供电系统工程、供气系统工程、通信系统工程等遭到淤埋或者冲毁,造成直接的经济损失,此类破坏还会严重影响人民生活和工农业的生产等,间接造成严重破坏。

(8) 破坏农作物、森林、树木。主要导致成灾的灾害有泥石流等。可使下游的农作物、森林、树木等遭到冲毁或淤埋,使作物减产,植被遭到破坏,造成一定的经济损失。尤其是尾矿库溃坝形成的泥石流,具有很强的摧毁能力,甚至能将下游的农田等夷为平地。

2.2 地质灾害易损性评价指标体系

地质灾害易损性评价指标体系的选取与建立是地质灾害易损性评价与区划的关键,决定了评价结果是否能够全面反映承灾体的易损性特征,是否符合实际的易损性区划,所以建立正确的易损性评价指标体系至关重要。然而,易损性评价指标的建立非常复杂,需将一切的承灾体划入指标体系内,但此种想法仅仅是理论上的建立,实际中并无法完成,因此需要采用定性和定量的分析方法建立切合实际的评价指标体系。

将受地质灾害影响较大且具有代表性的承灾体归入指标体系,而且要保证其数据精准、易于量化和具有可操作性,这样建立的易损性评价指标体系更符合实际,区划更加准确。

2.2.1 尾矿库工程地质灾害承灾体 尾矿库工程是建设项目中特征较为特殊的一种,其地质灾害承灾体的种类多样特殊,所以在灾害评价中只能将其统计分析、整理归类,划分若干类型,然后进行评价,获得所需要的易损性参数。本文仅针对云镍尾矿库工程的承灾体进行分析研究。

(1) 人口。在尾矿库建设项目评价范围内的人口应包括两个方面,一是工程建设施工阶段的施工人员,二是尾矿库下游库岸两侧常住居民,这些均被称为人口承灾体。在云镍尾矿库施工区内的施工人员多为成年男性,由于长期从事工业与民用建筑的施工工作,所以风险观念及自我安全保护意识较强,在面对灾害突发来临的反应相对于库区村民而言较敏感迅速。从这个角度来说,施工区内的人口易损性相对较低,并且施工单位的组织机构也很重视灾害风险意识的宣传,提高施工人员的防灾减灾避灾的意识,这方面的加强能够减少一定的伤害。但是施工区内的地质灾害较为集中,有崩塌、滑坡、泥石流等,如此高的危险性会造成一定的人员伤害,从这个角度分析,施工区内的人口易损性又相对较高。经实地调查,对本研究区评价范围内及其下游库岸两侧无居住人口,本次评价不予考虑。

(2) 资产。尾矿库建设项目评价范围内的资产包括两个方面,一是工程区内的主要工程建筑,如大坝、截洪坝、排水系统、管理所、公路及施工阶段的临时建筑等,二是尾矿库库区下游的居民房屋及屋内财产、交通设施和设备及其他基础设施等,均为资产范畴。因为本文研究的云镍尾矿库的地势有一定特殊性,且工程级别相对较小,所以其主要的工程建筑物相对较少,主要包括拦矿大坝、截水沟、排水沟、排渗设施、公路及施工期间的临时建筑等。工程建筑物中的拦矿大坝最为重要,其损毁而溃坝带来的严重后果不堪设想,所以大坝易损性是本文研究的重点。因研究区内及其评价范围内的库岸下游两侧并无村镇、企业及交通设施、基础设施等,所以本次评价不予考虑。

(3) 资源。土地和水源等都属于资源的范畴,均是人类赖以生存和发展的基础。在尾矿库地质灾害易损性评价中,土地资源和水资源是评价的重点。根据云镍集团提供的初设报告,可知本文研究的云镍尾矿库中的尾矿属于无害矿,对地表水和地下水污染的可能性极小,所以关于水资源易损性评价的研究在本

次评价并无太大意义,故不予考虑。本次研究中主要通过土地利用类型划分来进行易损性评价。

2.2.2 尾矿库地质灾害易损性指标体系 地质灾害易损性指标包括诸多因素,国际上并无统一标准,在国内学术界则通常认为地质灾害易损性指标分为人口指标、物质指标、资源指标、经济指标 4 大类。每一类指标又可分为若干亚类指标,其中人口指标可分为人口总数量,人口平均密度,年龄结构,人口构成因素等;物质指标可分为房屋建筑,交通建筑,供水供电设施等基础设施设备;资源指标又可分为土地资源,水资源,生物资源等。

在地质灾害易损性评价中,数据收集的充分与否是决定能否正确建立指标评价体系的关键问题之一,中国学者在做此方面研究时也会时常遇到,如黄润秋在对东川地区泥石流易损性评价时就遇到了这方面的问题,学者们则是利用统计数据结合遥感解译的方法解决此类问题。本文研究也未能全部收集指标数据,为了较准确地评价尾矿库的地质灾害易损性,通过到麻栗坡相关政府部门借调资料和现场实际收集,并结合云镍集团提供的基础资料进行统计研究,同时根据地质灾害易损性评价原则和尾矿库的承灾体类型,构建了云镍尾矿库地质灾害易损性评价指标体系。

(1) 人口易损性。包括工程区内的人口易损性和库区下游的人口易损性,根据实际调查,在研究的范围内库区下游并无人口,故本文仅对工程区内的人口易损性进行研究。通常人口这个 I 级指标可以分为 3 个 II 级指标,一是人口分布密度,二是年龄构成,三是受教育程度,如果人口分布密集,且人员都是一些年龄较长的,受教育的程度较低,那么面对突发的灾害时反应速度就相对较慢,不能及时作出正确判断,较容易受到危害。其中人口分布密度的结果是通过工程区的人口总数除以土地面积得到,年龄结构系数通过 50~60 岁施工人口除以施工总人口得到,受教育程度系数是通过文盲和小学学历的施工人口总数除以施工总人口得到(表 1)。

(2) 资产易损性。尾矿库地质灾害资产易损性评价应包含工程区内的建筑物资产和库区下游的房屋、交通设施、基础设施等资产两个方面,由于本次研究区范围的下游无村镇等,所以资产易损性评价也仅针对工程区内的资产进行评价,主要包括拦矿坝、排水沟、截洪沟、排渗设施、区内公路等。尾矿库建设项目共计投资 740.74 万元,其中建筑工程 569.63 万元,工程预备费 96.62 万元,其他费用 74.49 万元。

表 1 云锦尾矿库地质工程易损性评价指标体系

I 级指标	II 级指标	III 级指标	赋值
人口	人口分布密度	≥ 3 人/ km^2	0.7
		1~3 人/ km^2	0.3
		0	0
	年龄结构	18 岁以下人口数	0.3
		18~60 岁人口数	0.2
		60 岁以上人口数	0.5
受教育程度	文盲、半文盲人口数	0.5	
	小学文化人口数	0.4	
资产	研究区内资产	中学及以上人口数	0.1
		拦矿坝所占比	0.5
		截洪沟所占比	0.1
		排水沟所占比	0.1
		排渗设施所占比	0.1
		公路所占比	0.2
资源	土地资源	耕地所占比	0.5
		林地所占比	0.4
		荒地所占比	0.1

(3) 资源易损性。资源包括土地资源、水资源、生物资源、环境资源等,结合本研究的实际情况,资源易损性评价只针对土地资源,土地的利用类型可分为耕地、林地、荒地等,其计算方法是各土地利用类型的面积除以评价区内的总面积。

然后对各个评价指标进行赋值,其赋值范围均为 0~1,0 代表的是指标的实际贡献值小,1 代表的是实际贡献值大,例如表 1 中的“人口”I 级评价指标下的 III 级评价指标“18 岁以下人口所占比例”赋值为 0.3,“18~60 岁人口所占比例”赋值为 0.2,“60 岁以上人口所占比例”赋值为 0.5。

尾矿库工程不同于其他建设项目,其自身为一个高度危险源,因此选择易损性评价指标时要以人为本。首先,选择人口作为评价指标,而且更要重视尾矿库运营后期对下游居民的危害。其次,要选择资产这一指标,尾矿库工程不同于其他场地建设项目,尾矿库溃坝危害的影响范围很广,破坏后的资产难以挽回。这两个评价指标是易损性评价的重点,但因云锦尾矿库下游无村民居住,故本文未对该部分作讨论,但根据尾矿库鲜明的自身特点,在其他地区的尾矿库易损性评价必须重视这两要点。

3 尾矿库工程地质灾害易损性评价模型及方法

3.1 地质灾害易损性评价模型

国内外学者提出了多种地质灾害易损性评价模型,大体有基于历史记录的评价模型,物元综合评价模

型,人工神经网络模型及核算承灾体价值模型等^[10-19]。

基于历史记录评价模型是指以详细的地质灾害历史记录为基础,进行统计并分析灾害发生时的特征及其后果,从而得到地质灾害易损性的分布规律,确立评价模型。这种评价模型和方法在中国香港地区和外国地区使用较多,因为这些地方对地质灾害的风险管理做得比较成熟,有非常详细的地质灾害历史记录。中国缺乏详细的历史资料和数据,此类模型不太适用。

物元综合评价模型最后只能得到评判等级,因此对于地质灾害易损性的预测评价精度是不够的,加之其评判等级及范围的确定具有很强主观性,故该模型的应用有一定的局限性,实际应用中可以和其他模型相结合起来进行综合评价。

人工神经网络模型通过样本区标准样本的学习建立相应的评价(预测)网络,从而推广到研究区进行评价。此类模型对神经网络样本的选择要求相当高,样本的训练数量也十分重要。在解决实际问题时,要选择一个包容性大且有代表性的典型样本难度较大,可操作性也不太强。

核算承灾体价值模型没有考虑承灾体发生某一级别破坏的概率和承灾体的损失率,亦是认为灾害发生时承灾体为完全损毁。此类模型有一定的局限性,有时与实际情况会有相对较大偏差,因此,该类模型适合区域性的易损性评价,简单、直观。

模糊综合评价模型是指通过构造等级模糊子集把被评价单元的模糊指标进行量化,然后利用模糊变换的原理对各个指标进行综合的模型。主要是通过选定评价因子、划分评价等级、确定模糊矩阵和因子的权重值,最后进行综合评价,模糊综合评价模型一般是针对城市的地质灾害易损性进行评价,适用对象有限,对于本文的研究范围不太适合。

综上所述,国内外虽然已有一些关于地质灾害易损性评价模型、方法,但由于不同地区的地质条件不同,承灾体所处的自然和社会环境不同,这些方法在西南山区地质灾害易损性评价中的适用性和可操作性较差。本文选取能将地质灾害易损性评价体系中各级指标有机结合起来广义目标函数作为评价模型^[7],不仅能够全面考虑西南山区地质灾害易损性影响因素,又能够体现出各因素的相对重要性。

广义目标函数公式如下:

$$\sum_{i=1}^n Z_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \sum_{L=1}^S K_{i00} \times K_{ij0} \times K_{ijL} \times K_{ijLS} \quad (1)$$

式中: Z_i ——I 级评价指标中 i 个因素的总值; i ——I 级评价指标个数; J ——I 级指标中第 i 因素的 II 级指标的第 j 子因素; L ——II 级指标下的 III 级指标

的第 L 子因素; K_i ——I 级指标第 i 项影响因素的个数; K_{i0} ——I 级指标第 i 子因素的权重; K_{ij0} ——II 级指标第 j 子因素的权重; K_{ijL} ——III 级指标第 L 子因素的权重; K_{ijLS} ——III 级指标第 L 因素“实际贡献率”。

3.2 地质灾害易损性评价方法及权重的选取

3.2.1 评价方法 在确定评价模型后需要确定评价方法,本文采用的是在 ArcGIS 软件中的多重标准的评价方法。利用 GIS 系统的二次开发平台,将收集的基础数据导入系统内,通过程序计算得出易损性评价的分级分区图。

3.2.2 易损性评价指标权重的选取 目前国内外关于地质灾害易损性权重值的确定基本上采用德尔菲法、层次分析法和模糊数学法。国内基本采用德尔菲法和层次分析法,而国外习惯采用层次分析法和模糊

数学法。德尔菲法的优点是能够充分挖掘了专家的知识,汇集专家的综合优势,能把专家的知识变为数字语言表达,缺点主要是主观赋权值较重,较容易缺乏客观性。而层次分析法的优点则是在建立不同的目标层基础之上,比较每个目标层的评价因子作用,明确什么条件下各种评价因子的作用最明显,缺点主要是评价目标层的建设中存在人为因素作用,会导致权重缺乏可靠性。模糊数学法的优点则是能够将不同的评价因子按等级划分建立模糊集合,对评价因子进行优化处理后得到各个评价因子的权重,缺点主要是个人主观判别的准确性容易影响计算权重的可靠性,而且计算过程相当繁琐。本文则是按照国内计算的习惯,采用德尔菲法和层次分析法来确定云镍尾矿库地质灾害易损性评价指标的权重值。具体取值如表 2 所示。

表 2 地质灾害易损性评价指标及其权重值

I 级指标(权重)	II 级指标(权重)	III 级指标(权重)
人口(0.21)	人口分布密度(0.35)	≥ 3 人/ km^2 (0.75)
		1~3 人/ km^2 (0.20)
		0 人/ km^2 (0.05)
	年龄结构(0.40)	18 岁以下人口数(0.45)
		18~60 岁人口所数(0.10)
		60 岁以上人口数(0.45)
受教育程度(0.25)	文盲、半文盲人口数(0.76)	
	小学文化人口数(0.19)	
	中学及以上人口数(0.05)	
资产(0.54)	研究区内资产(1.00)	拦矿坝所占比(0.1)
		截洪沟所占比(0.2)
		排水沟所占比(0.2)
		排渗设施所占比(0.25)
		公路所占比(0.25)
资源(0.15)	土地资源(1.00)	耕地所占比(0.15)
		林地所占比(0.24)
		荒地所占比(0.61)

4 尾矿库地质灾害易损性评价结果

根据选取的尾矿库地质灾害易损性的指标体系、模型、方法,应用 ArcGIS 软件对云镍尾矿库的研究区进行地质灾害易损性评价,评价结果如下。

通过查阅相关文献并根据研究区内的实际情况,将尾矿库地质灾害易损性进行等级划分,如表 3 所示。尾矿库地质灾害易损性分级评价结果如图 1 所示。

表 3 地质灾害易损性等级划分

易损性等级	极高	高	中等	低
易损性指数	1~0.75	0.75~0.5	0.5~0.25	0.25~0

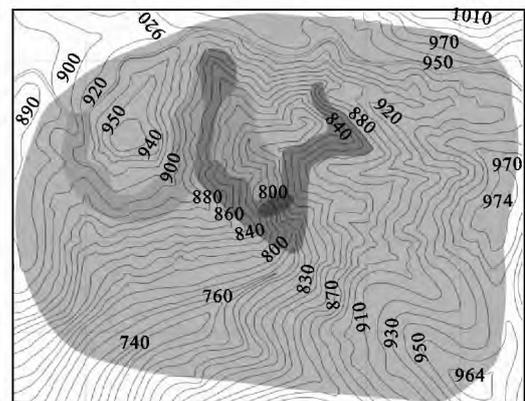


图 1 云镍尾矿库工程地质灾害易损性分级评价

(1) 地质灾害易损性极高区。主要集中在主体工程区内,拦矿坝所在位置附近,主要发育泥石流灾害。该区内施工人员分布较密集,且投资成本大,亦是地质灾害危险性高度区,所以地质灾害易损性极高,地质灾害易损极高区分布较小,面积约为 0.0022 km^2 ,约占研究区总面积的 0.28% 。

(2) 地质灾害易损性高区。主要集中在主体工程区内,左右坝肩处,左右岸截洪沟及排水沟的分布位置,该区内的施工人员较多,投资成本较高,且地质灾害危险性相对较高,所以易损性也相对高。易损性高区面积约为 0.0521 km^2 ,约占总面积的 6.71% 。

(3) 地质灾害易损性中等区。尾矿库的地质灾害易损性中等区主要分布在拟建道路所在位置,主要是一些林地,工作人员分布相对较稀松。地质灾害易损性中等区的面积约为 0.06886 km^2 ,约占研究区总面积的 8.86% 。

(4) 地质灾害易损性低区。该区主要集中在主体工程外围,区内主要分布林地、荒地等,无建筑设施分布且施工人员很少活动,所以易损性相对低。地质灾害易损性低区的面积为 0.6536 km^2 ,约占研究区总面积的 74.15% 。

5 结论

(1) 针对尾矿库工程特性,根据西南山地特有的地质环境,以云镍尾矿库为例,对地质灾害易损性评价指标体系、模型和方法进行深入研究,得到了易损性极高、易损性高、易损性中等及易损性低 4 个等级,评价真实可靠,可以为其他尾矿工程的易损性研究提供参考,也可为政府的区域规划、场地适宜性评价等提供科学依据。

(2) 关于尾矿库工程地质灾害易损性评价指标的选取,笔者认为在今后的研究中可以考虑不同地质灾害种类的影响,这样会使评价体系更全面和科学。但是在易损性评价指标体系中如何考虑灾害点对承灾体的影响,需要更深一步探讨与研究。同时,关于指标的权重值需要根据不同尾矿库所处的不同地质环境条件而重新确定,否则会导致评价失真。

致谢:本文在写作过程中得到昆明理工大学李波、伍波、王思学、乔爽等人的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Uitto J I. The geography of disaster vulnerability in megacities[J]. Applied Geograpy, 1998,18(1):7-16.
- [2] 蒋永军,况明生. 区域易损性分析、评估及易损度区划[J]. 灾害学,2001,16(3):59-64.
- [3] 刘希林,莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究, 2002,21(5):569-577.
- [4] 汪洋,郭跃,赵纯勇,等. 基于 3S 技术的地质灾害易损性面评价研究[J]. 灾害学,2003,18(4):17-23.
- [5] 王薇,徐志胜. 小城镇灾害易损性分析与评估[J]. 中国安全科学学报,2004,14(7):3-5.
- [6] 张桂荣,殷坤龙. 浙江省永嘉县区域滑坡灾害人口易损性评价和伤亡风险预测[J]. 地质科技情报,2007,26(4):70-75.
- [7] 许强,张一凡,陈伟. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法:以四川省丹巴县城为例[J]. 地质通报,2010,29(5):729-738.
- [8] 张艳,刘丹强,周璐红. 地质灾害土地资源易损性评价定量探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010,27(3):122-127.
- [9] 梅海,张纪勋. 兰州市地质灾害易损性评价[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(2):103-106.
- [10] 刘厚成,谷秀芝. 基于可拓层次分析法的泥石流危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(3):61-66.
- [11] 张伟,张莉. 层次分析法在西气东输工程地质灾害风险评估中的应用[J]. 石油工程建设,2008,36(4):4-9.
- [12] 姚玉增,任群智,李仁峰,等. 层次分析法在山地地质灾害危险性评价中的应用:以辽宁凌源地区为例[J]. 水文地质工程地质,2010,37(2):131-136.
- [13] 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001,28(1):89-92.
- [14] 刘娇玲,肖盛燮. 基于 BP 人工神经网络的滑坡预测分析[J]. 道路工程,2012(1):11-14.
- [15] 吕远强,林杜军,罗伟强. 基于人工神经网络的区域地质灾害危险性预测评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):95-99.
- [16] 郭万铭,焦金鱼. 基于模糊综合评判法分析的岷县洮河流域单沟泥石流危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(2):15-18.
- [17] 王乐华,王家成,邓华锋. 基于模糊数学方法的巴东斜坡稳定性研究[J]. 人民长江,2011,42(5):18-21.
- [18] 王硕楠,余宏明,刘运涛. 基于灰关联度的地质灾害易损性区划研究[J]. 安全与环境工程,2011,18(2):10-13.
- [19] 毛新虎,刘占魁,李秀青. 灰色聚类法在矿山地质灾害危险性分区评价中的应用[J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2008,34(3):545-551.