

文章编号: 1000-7598 (2010) 07-2153-06

隧道工程遭受泥石流灾害的工程易损性评价

徐林荣, 王 磊, 苏志满

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 以往泥石流易损性评价主要针对经济、社会、物质和环境的易损程度, 未见关于工程基础设施易损程度评价。为此, 以枝柳铁路卓福隧道遭受泥石流灾害为工程背景, 提出了工程易损性的概念, 根据隧道承灾特点和泥石流致灾特征, 系统分析了隧道的地质选址、工程设计、隧道施工、运营维护以及泥石流致灾因子对隧道工程易损程度的影响, 确定了工程易损性评价指标体系, 借助于 AHP 法和模糊综合评价法, 建立工程易损性的评估方法。并以实例验证该方法可行性, 为泥石流地区隧道工程防治等级确定和隧道承灾能力评估提供方法参考。

关 键 词: 泥石流; 工程易损性; 模糊综合评价法; 隧道工程; 承灾能力

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Assessment of engineering vulnerability of tunnel suffering from debris flow

XU Lin-rong, WANG Lei, SU Zhi-man

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The vulnerability assessment of debris flow in the past mainly aimed at the economic, social, material and the environment vulnerable degree. There is no assessment about the vulnerability of engineering either. So the concept of engineering vulnerability has been proposed in this paper. By taking Zhuofu tunnel in the Zhi-Liu railway suffering from debris flow as background, according to the characteristics of the tunnel bearing the disaster and the characteristics of debris flow to cause disaster, the paper systemically analyzes the influences of the tunnel's geological selected location, the engineering design, the construction, the operation maintenance as well as the disaster factor of debris flow, which influences the engineering vulnerable degree, determines evaluating indicator system of the engineering vulnerability. With the aid of the AHP method and the fuzzy comprehensive evaluation, the assessment method of the engineering vulnerability is established; and the serviceability of this method is confirmed by the example. The method may provide the reference for the determination of prevention rank and the assessment of the disaster-bearing capability of the tunnel.

Key words: debris flow; engineering vulnerability; fuzzy comprehensive assessment; tunnel engineering; disaster-bearing capability

1 前 言

我国是泥石流多发的国家之一, 泥石流所带来的损失巨大, 泥石流引起隧道堵塞例子不胜枚举, 如 2003 年湖南卓福隧道和 2005 年乌鲁木齐天山隧道等均在泥石流作用下而导致其严重堵塞或破坏, 给经济的发展和人民的生命安全带来了巨大的危害。我国泥石流易损性评价起步于 20 世纪 80 年代末, 泥石流易损性评价包括点评价(场地)和面评价(区域), 包含经济易损性、社会易损性、环境

易损性和物质易损性 4 类^[1], 均未能充分反映工程基础设施易损性, 因此, 该领域研究已经成为减少隧道遭受泥石流危害的关键环节, 基于此, 提出了工程易损性的概念。

国内外学者从不同角度提出了多种关于易损性的定义, Maskery^[2]认为, 易损性是由于极端事件导致损失的可能性; Deyle^[3]等将易损性解释为“人类居住地对自然灾害影响的敏感性”; 刘希林^[1, 4]等定义易损性为“给定地域和给定时间段内, 由于潜在自然灾害而可能导致的潜在总损失”; 联合国 1992

收稿日期: 2009-11-20

基金项目: 西部交通建设科技项目: 活动断裂区高速公路泥石流灾害防治技术与推广应用研究 (No. 200831800087); 四川省交通厅课题: 活动断裂区公路沿线泥石流启动机理与防治对策研究 (No. 2006A24-582); 铁道部重点项目: 既有线铁路地质灾害风险评估与防治对策研究 (No. 2005f024)。第一作者简介: 徐林荣, 男, 1964 年生, 博士后, 教授, 博导, 主要从事地质灾害防治与预警预报、特殊土路基设计理论与施工技术, 地基处理和土工合成材料在土木工程上应用研究。E-mail: wlgdw@163.com

年公布的易损性定义为“潜在损害现象可能造成的损失程度”^[5-7]。笔者在综合考虑易损性定义的基础上，将工程易损性定义为：“由于自然灾害而导致工程体可能受到的损毁程度”，它反映了工程体自身结构、材料、工程地质环境以及施工和维护不同造成在某种潜在危害作用所表现出的差异性，本文以焦柳线卓福泥石流和卓福隧道为研究对象，说明隧道的工程易损性含义。

2 隧道的工程易损性评价指标体系

2.1 评价因子选取

基于工程易损性反映了工程体自身结构、材料、工程地质环境以及施工维护不同造成在某种潜在危

害作用所表现出的差异性的认识，选取隧道选址 *B1*、设计因素 *B2*、施工因素 *B3*、运营因素 *B4* 和泥石流因素 *B5* 作为一级评价因子。其中 *B1* 主要考虑隧道与泥石流的空间关系及隧道位置处工程地质对工程易损性影响（*C1*~*C3*）；*B2* 主要研究隧道的尺寸及强度对工程易损性的影响（*C4*~*C8*）；*B3* 主要探讨施工人员素质、施工质量对工程易损性贡献（*C9*、*C10*）；*B4* 主要分析隧道工程在使用过程时维修力度及隧道服役过程中材料损伤对工程易损性影响（*C11*、*C12*）；*B5* 主要针对泥石流暴发频率、规模以及其危害耦合作用方式对工程易损性影响（*C13*~*C15*），见表 1。

表 1 隧道工程易损性基础因子取值范围^[8-14]
Table 1 The basic factors' values of the engineering vulnerability of the tunnel

因子		极高易损性 I	高度易损性 II	中度易损性 III	低度易损性 IV	轻微易损性 V
隧道走向与沟道主流向夹角/(°)	C1	0~20	20~40	40~60	60~80	80~90
隧道与泥石流沟道的位置合理性	C2	极不合理，会加剧泥石流对隧道的淤积，冲击与冲刷破坏	不合理，不利于泥石流排泄，并会导致强烈的冲击与冲刷破坏	一般合理，较利于泥石流的排泄，但会引起一定程度的泥石流破坏作用	较为合理，较利于泥石流的排泄	合理，有利于泥石流的顺利排泄
隧道处场地工程地质	C3	地形地质条件极为复杂，不良地质作用极为发育	场地稳定性差，不良地质作用较发育	场地较为稳定，有小型不良地质作用发育	地形简单，地质条件较好。	地质环境良好
围岩级别	C4	V	IV	III	II	I
隧道横断面宽/m	C5	>10.75	9.75~10.25	8.75~9.75	7.5~8.75	<7.5
隧道结构材料	C6	材料性能很差，影响整体结构性能	强度低，耐久性差	具有一定强度及耐久性	强度高且耐久性强	材料性能很好，强度耐久性很好
隧道衬砌强度/MPa	C7	<25	25~30	30~35	35~40	>40
衬砌厚度/mm	C8	<200	200~400	400~600	600~800	>800
施工人员素质	C9	很差	差	中等	高	很高
施工质量	C10	很差，没有相应监管	存在一定质量问题	一般，基本不存在质量问题	有相应的监管，质量较好	有严格的监管且严格按设计施工
隧道使用时间/设计寿命	C11	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
维修力度	C12	没有进行养护维修	灾后进行相应修补	灾后进行相应修复，但养护资金较不充裕	定期检查且养护资金较充裕。	经常检查与定期检查相结合且养护资金充裕
泥石流规模/ 10^4m^3	C13	>100	100~10	10~5	5~1	<1
泥石流频率/次/年	C14	>1	1~0.1	0.1~0.01	0.01~0.001	<0.001
泥石流危害方式	C15	冲刷、冲击作用相耦合	淤积、冲击耦合作用	冲刷作用	冲击作用	淤积作用

注：为便于计算结果的定量化，对于以上定性因子，可转化为有序尺度的变量对其进行定量化。在此采取 1~5 的有序尺度对定性指标进行定量化，即 0~1 代表极高易损性等级，如此类推，4~5 代表轻微易损性等级，量值越大，代表易损性等级越低。

2.2 构建评价指标体系

根据以上确定的因子及其相互关系，建立递阶状层次结构，如图 1。可分为 3 个层次：目标层(E)、类指标层(B)、基础指标层(C)。其中目标层是指泥石流作用下隧道的整体易损性，是整个层次分析的

最终目标；类指标层表示隧道工程体自身结构、材料、工程地质环境、施工维护以及泥石流危害特点，它是工程易损性评价的一级评价因子；针对分析影响一级评价因子的因素，细化为 15 个基础指标，以表征隧道和泥石流具体特征。

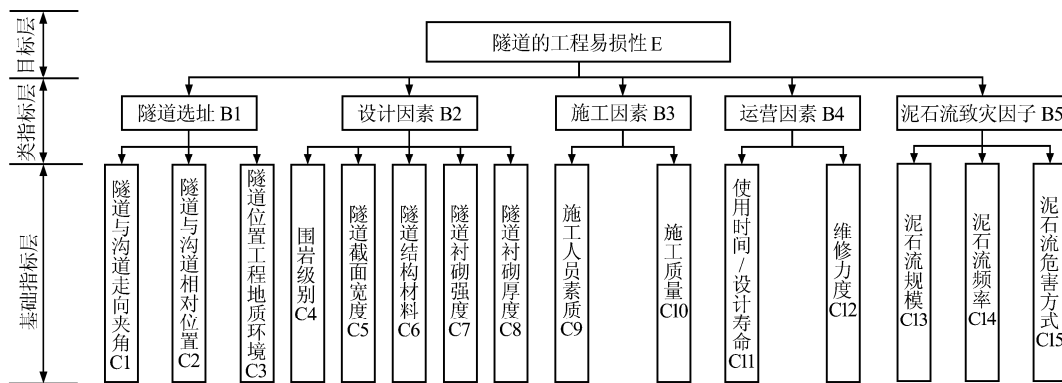


图 1 评价指标体系

Fig.1 The evaluation index system

2.3 层次分析法确定指标权重

层次分析法的重要特点就是引入适当的判断标度，将各因素用数值形式表示出来，从而构成判断矩阵，以便比较两两因素之间的重要性。最后根据 Saaty^[15]的 1—9 标度方法对各因素进行打分，建立指标因子判别矩阵，在判别矩阵的随机一致性比例合理的情况下，得到了各级指标的权重见表 2。

表 2 各级指标权重
Table 2 The weights of all levels' indices

1 级 指标	权重	2 级 指标	权重	2 级 指标	权重	2 级 指标	权重
B1	0.29	C1	0.32	C6	0.22	C11	0.5
B2	0.16	C2	0.56	C7	0.39	C12	0.5
B3	0.17	C3	0.12	C8	0.23	C13	0.57
B4	0.16	C4	0.12	C9	0.333	C14	0.29
B5	0.22	C5	0.03	C10	0.667	C15	0.14

3 工程易损性模糊综合评价方法

3.1 建立指标集

指标集是影响对象的各种指标所组成的一个普通集合，即：

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_{15}) \quad (1)$$

3.2 建立备择集

备择集是评价对象可能做出的各种总评价结果所组成的集合。通常用 V 表示，即：

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_5) \quad (2)$$

各元素 $v_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 代表各种可能的总评价结果，模糊评价的目的，就是在综合考虑所有指标的基础上，从备择集中得出最佳的评价结果，本文的评价结果为 5 个等级，即：

$$V = (\text{极高}, \text{高}, \text{中等}, \text{低}, \text{轻微}) \quad (3)$$

3.3 指标隶属度的确定

指标集 C 和备择集 V 之间的模糊关系可以用模糊关系矩阵 $R = (u_1, u_2, \dots, u_5)$ 来表示， R 代表了每个评价因子对备择集每一等级标准的隶属程度，可按式 (4) 进行计算，从而可形成模糊矩阵。

$$u_1 = \begin{cases} 0 & x < \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_4) & \frac{a_3 + a_4}{2} < x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} (x - a_4) & a_4 < x \leq \frac{a_4 + a_5}{2} \\ 1 & x > a_5 \end{cases}$$

$$u_2 = \begin{cases} 0 & x < \frac{a_2 + a_3}{2}, x \geq \frac{a_4 + a_5}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_3) & \frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_3 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_3) & a_3 < x \leq \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_4) & \frac{a_3 + a_4}{2} < x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} (x - a_4) & a_4 < x \leq \frac{a_4 + a_5}{2} \end{cases}$$

$$u_3 = \begin{cases} 0 & x < \frac{a_1 + a_2}{2}, x \geq \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_2) & \frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_2) & a_2 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_3) & \frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_3) & a_3 < x \leq \frac{a_3 + a_4}{2} \end{cases}$$

$$u_4 = \begin{cases} 0 & x < \frac{a_0 + a_1}{2}, \quad x \geq \frac{a_2 + a_3}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_1 - a_0} (x - a_0) & \frac{a_0 + a_1}{2} < x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_1) & a_1 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_2) & \frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_2) & a_2 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2} \end{cases}$$

$$u_5 = \begin{cases} 1 & x < \frac{a_0 + a_1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_1 - a_0} (x - a_0) & \frac{a_0 + a_1}{2} < x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_1) & a_1 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ 0 & x \geq \frac{a_1 + a_2}{2} \end{cases}$$

(4)

式中: $a_0, a_1, \dots, a_5$ 为基础因子分级值。

3.4 模糊综合评价

对于 2 级评价 $C_j, j=1, 2, \dots, 15$ 为其单因素调查结果, 可得 2 级评价指标的隶属度矩阵:

$$R_c = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m5} \end{bmatrix} \quad m=2, 3, 5 \quad (5)$$

由于二级评价指标权向量为 $W_c = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, $m=2, 3, 4, 5$, 则最终的模糊综合评价模型为

$$B_i = W_c R_c = (w_1, w_2, \dots, w_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m5} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$i=1, 2, \dots, 5; \quad m=2, 3, 5$

同理可得

$$E = W_B R_B = (w_1, w_2, \dots, w_5) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{51} & r_{52} & \cdots & r_{55} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据模糊集的运算方法, 可以采用小中取大原则、取最大者原则以及归一加权模型等方法确定其隶属度, 进而最终确定易损度。

4 卓福隧道的工程易损性

4.1 卓福泥石流调查

卓福泥石流沟道在焦柳铁路 K996+654.6~K996+750.4, 位于湖南省武陵山区。

(1) 地形地貌

泥石流流域山势陡峻, 呈上陡、中缓、下平的“靠椅状”, 地形见图 2, 汇水面积积达 0.085 km²。上游形成区三面环山, 山坡坡度 31°~40°, 沟谷狭窄陡峻, 呈 V 字型, 构成一面开口的谷间盆地^[8]。

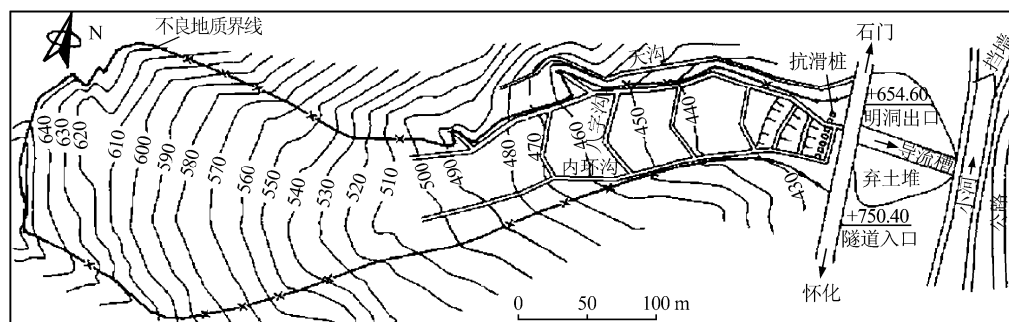


图 2 卓福泥石流沟地形图

Fig.2 The topographic map of Zhuofu debris flow

(2) 地层岩性

泥石流发生后, 在上方滑坡段进行钻探, 钻孔资料揭示表层为泥岩、页岩风化形成的第四系松散堆积层, 呈褐黄色, 碎石含量约 50%~70%, 粒径 2~11 cm, 黏粒约 30%~40%, 厚度约 13.2~22.5 m。

下部主要为深灰色页岩夹少量薄层灰岩, 页岩层节理发育, 表层风化严重, 部分破碎成碎屑或碎块状, 灰岩节理也较发育, 风化较轻。

(3) 地质构造

卓福泥石流历属花垣-大庸-慈利断裂带的东南

方，绥宁-安化-益阳加里东“拼贴带”北西之间的区域，即“扬广地体”南东边缘区。按变形特点应称之为湘西加里东期逆冲褶皱变形区。主要折皱构造有武陵山复背斜及雪峰复背斜，它们的核部地层同为“冷家溪群”、“板溪群”的为震旦系及下古生，这些复背斜又由更次级的折皱组成，多为北东或北东东方向的开阔背斜和向斜。

(4) 气象水文

离卓福泥石流源区 13.6 km 的后坪雨量站近 20 年的观测资料表明，2003 年 7 月 8 日至 7 月 10 日，特大暴雨袭击武陵山区，7 月 9 日降水量达 440 mm（见图 3），凌晨 3 时的降雨强度为 60 mm/h，是历史记录最高值。

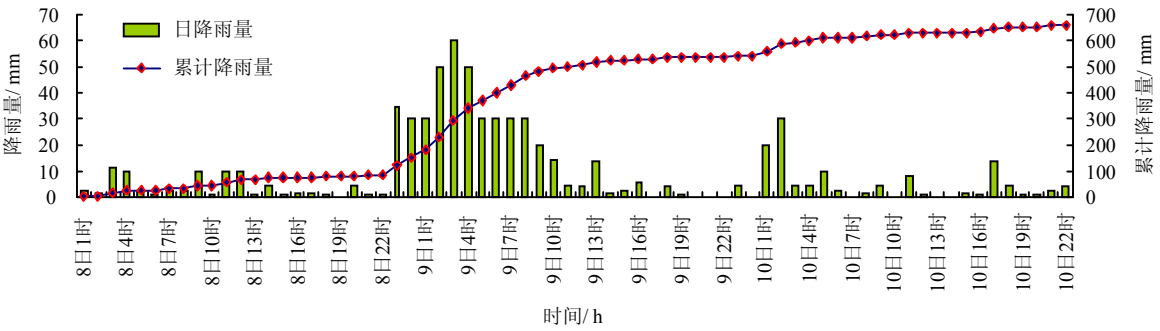


图 3 2003 年 7 月 8~10 日时降雨量和累计降雨量
Fig.3 The day rainfall and the cumulative precipitation in July 8-10, 2003

(5) 卓福泥石流对隧道工程危害

2003 年 7 月 8 日至 7 月 10 日，百年一遇的暴雨袭击武陵山区，7 月 9 日降水量达 440 mm，凌晨 3 时的降雨强度为 60 mm/h，是历史记录最高值^[8]，暴雨引起强大的泥石流，一次性冲出约为 30 万方固体物质，淹没卓福隧道明洞（如图 4、5），造成铁路通信系统中断，行车中断 173 h，38 min，造成重大损失。

综上所述可知，卓福泥石流是坡面泥石流，强暴雨是其诱发因素，其危害方式以淤积为主，泥石流与暴雨同频，可得泥石流的暴发频率为 0.01 次/年，调查结果如表 3。

4.2 卓福隧道的工程易损性计算

根据模糊集的运算方法，按式（1）~（6），计算可得隧道工程易损性的隶属度向量为 $E = (0.060,$



图 5 泥石流淤埋的卓福隧道
Fig.5 Zhuofu tunnel buried by debris flow

表 3 卓福泥石流和卓福隧道参数调查结果^[8]
Table 3 The investigation results of Zhuofu debris flow and Zhuofu tunnel

调查因素	调查结果
C1	78°
C2	不合理，不利于泥石流排泄，并会导致强烈的冲击与冲刷破坏
C3	场地稳定性差，不良地质作用较发育
C4	IV
C5	5.7 m
C6	强度高且耐久性强
C7	35 MPa
C8	700 mm
C9	中等
C10	有相应的监管，质量较好
C11	0.27
C12	经常检查与定期检查相结合且养护资金充裕
C13	30 万立方米
C14	0.01 年/次
C15	淤积



图 4 卓福泥石流暴发后地貌
Fig.4 The geomorphology after Zhuofu debris flow

0.130, 0.193, 0.514, 0.083), 隶属度向量中最大值为 0.514, 依据式 (3), 最终确定卓福隧道工程易损性易评价隶属于低度易损性, 卓福隧道实体抗击泥石流的能力较强, 调查表明, 隧道清淤后就恢复通车, 验证了评估模型的适用性。

5 结 论

(1) 本文在综合考虑易损性定义的基础上, 以枝柳线卓福隧道遭受泥石流灾害为工程背景, 提出工程易损性概念, 并将工程易损性定义为: “由于潜在自然灾害而导致工程体可能受到的损毁程度”, 它反映了工程体自身结构、材料、工程地质环境和施工工艺不同造成在潜在灾害面前所表现出的差异性。

(2) 构建了隧道的工程易损性评价指标体系。选取隧道选址、设计因素、施工因素、运营因素和泥石流致灾因子作为一级评价因子, 并细化一级评价因子, 得到 15 个主要基础评价因子, 研究确定了基础因子取值范围。并借助于 AHP 法及模糊综合评价法, 建立了隧道工程易损性的评估方法。

(3) 应用本文建立的评价方法对枝柳线卓福隧道进行评价, 评估结果表明, 卓福隧道属于低度易损, 与调查结果相符合, 表明该方法适用于泥石流场地内隧道工程易损性, 可为泥石流地区隧道工程防治等级确定和隧道承灾能力评估提供参考。

参 考 文 献

- [1] 刘希林, 莫多闻, 王小丹. 区域泥石流易损性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 7—11.
LIU Xi-lin, MO Duo-wen, WANG Xiao-dan. Regional vulnerability assessment of debris flows[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2001, 12(2): 7—11.
- [2] MASKREY A. Disaster mitigation[M]. Oxford: Oxfam, 1989: 1—100.
- [3] DEYLE R E, FRENCH S P, OLSHANSKY R B, et al. Hazard assessment: The factual basis for planning and mitigation[C]//Proceeding of Confronting Natural Hazards with Land-Use Planning for Sustainable Communities. [S. l.]: [s. n.], 1988: 119—166.
- [4] United Nations, Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[M]. Geneva: DNA, 1991: 81—92.
- [5] 赵源, 刘希林. 泥石流灾害损失评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 3: 21—24.
ZHAO Yuan, LIU Xi-lin. Assessment on debris flow disaster losses[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2005, 3: 21—24.
- [6] 蒋庆丰, 游珍, 沈吉, 等. 山坡泥石流场地易损性评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 123—127.
JIANG Qing-feng, YOU Zhen, SHEN Ji, et al. Vulnerability assessment of site with hill slope debris flow[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2006, 15(1): 123—127.
- [7] 唐川, 张军, 周春花, 等. 城市泥石流易损性评价[J]. 灾害学, 2005, 20(2): 11—17.
TANG Chuan, ZHANG Jun, ZHOU Chun-hua, et al. Vulnerability assessment of urban debris flow hazard[J]. **Journal of Catastrophology**, 2005, 20(2): 11—17.
- [8] 阮波, 肖武权. 卓福泥石流成因分析和减灾措施[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 12(4): 437—440.
RUAN Bo, XIAO Wu-quan. The cause and controlling countermeasures of Zhuofu debris flow[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2005, 12(4): 437—440.
- [9] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛, 姚京成. 基于粗糙集原理的泥石流危险度区划指标选取方法[J]. 地质力学学报, 2006, 12(2): 236—242.
KUANG Le-hong, XU Lin-rong, LIU Bao-shen. A new method for choosing zonation indicators of mudflow danger degrees based on the rough set theory[J]. **Journal of Geomechanics**, 2006, 12(2): 236—242.
- [10] 丁继新, 杨志法, 尚彦军, 等. 区域泥石流灾害的定量风险分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1071—1076.
DING Ji-xin, YANG Zhi-fa, SHANG Yan-jun, et al. Quantitative risk analysis of regional debris flow hazards[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1071—1076.
- [11] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴. 云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053—3057.
CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of internal factors for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine, Dongchuan of Yunnan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3053—3057.
- [12] 刘希林, 王小丹. 云南省泥石流风险区划[J]. 水土保持学报, 2000, 9(3): 104—106.
LIU Xi-lin, WANG Xiao-dan. Risk zonation of debris flow in Yunnan Province[J]. **Journal of Soil Water Conservation**, 2000, 9(3): 104—106.
- [13] 彭立敏, 刘小兵. 交通隧道工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 71—98.
- [14] 魏平, 陈新民, 刘莉娇. 基于整体风险分析法地震荷载作用下隧道的易损性评估[J]. 隧道建设, 2008, 28(3): 871—873.
WEI Ping, CHEN Xin-min, LIU Li-jiao. Assessment on vulnerability of tunnels to earthquake loads based on holistic risk analysis approach[J]. **Tunnel Construction**, 2008, 28(3): 871—873.
- [15] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 30—75.