

滑坡泥石流风险评估框架体系

胡凯衡^{1,2}, 丁明涛³

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:滑坡泥石流灾害风险评估目前没有一个统一的概念体系和理论框架。从滑坡泥石流风险评估的基本概念出发, 综合分析不确定性与灾害以及灾害与风险之间的关系, 明确区分了“灾害体”、“灾害事件”和“灾害现象”三种含义, 界定了灾害易发性、危险性和风险性的内涵。然后从这些明确的概念出发, 提出了危险性和易损性的数学表达形式, 由此构建了滑坡泥石流风险评估的理论框架, 以期能够为今后的滑坡泥石流风险研究工作提供参考。

关键词:滑坡; 泥石流; 风险评估; 理论框架; 体系

文章编号:1003-8035(2013)02-0026-05

中图分类号:P642.22; P642.23

文献标识码:A

0 引言

滑坡泥石流风险评估是减轻滑坡泥石流灾害危害的有效方法和重要手段之一, 在灾害预警、工程评估、应急处置、避灾预案、灾情评估和土地利用等方面得到大量的应用^[1-10]。但是, 众多的滑坡泥石流风险评估理论和方法中, 存在定义比较混乱、概念不统一、采用的指标和方法不规范等问题。比如, “危险性”这个概念, 有些研究认为是针对泥石流流域或滑坡体而言, 部分研究认为是和泥石流或滑坡现象相关联的, 甚至有些认为是针对受泥石流滑坡威胁的对象而言的。造成这种情况的原因是目前缺乏一个概念明确、兼容性强的灾害风险评估理论框架, 因而无法在同一个体系里对不同的风险评估结果进行阐述、比较和验证。为了厘清这个当前灾害风险研究中亟需解决的问题, 促进滑坡泥石流风险研究的进一步发展, 本文从滑坡泥石流风险评估已有的基本概念、研究内容、指标方法出发, 归纳提出一套清晰规范、切实可行的滑坡泥石流风险评估体系, 为灾害风险评估提供一个初步的理论框架。

1 灾害的概念框架

灾害风险评估的方法、指标和内容与灾害指代的具体含义有密切的关系。所谓的自然灾害概念有三个方面的含义: 第一是指可能发生灾害的空间单元体; 第二是指所发生与灾害有关的自然现象或物理过程; 第三是指发生的灾害事件。比如“泥石流”, 有时指某天发生的泥石流事件或泥石流现象本身, 有时又指发生泥石流的流域; “滑坡”可能指滑坡体, 或者指

滑坡灾害事件, 有时也指一种块体运动的过程。因应灾害的不同含义, 分别用“灾害体”、“灾害现象”和“灾害事件”来明确表示。灾害体的特征参数主要是一些空间地学属性, 例如位置、流域面积、坡度、滑动面、岩性、构造等。描述灾害现象主要有速度、流量、物质总量、颗粒组成、形成条件、激发条件等, 为物理属性。描述灾害事件的主要有发生时间、频率、规模、危害范围、人员伤亡、经济损失等, 为灾害的社会属性(图1)。

风险评估首先需要对空间单元体进行判别分类。根据发生灾害的可能性, 空间或地学单元体, 例如一个边坡或者流域, 可分为四种类型。第一种是, 单元体不具备灾害形成或发生所必需的条件, 即物理上不可能发生灾害。那么, 这个单元体就是无灾体。第二种是, 单元体在物理上具备了灾害发生的条件, 以前没有发生过, 或至少没有发生过灾害的痕迹, 但将来可能发生灾害。那么, 这个单元体就是潜在的灾害体。第三种是, 单元体在物理上具备了灾害发生的条件, 有灾害发生的迹象或者记录, 但长时间(例如100年内)没有发生过灾害, 那么称之为潜伏的灾害体。第四种是, 单元体在物理上具备了灾害发生的条件,

收稿日期:2012-09-26; **修订日期:**2013-03-11

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-Q03-5); 国家重点基础研究发展计划资助(2011CB409902); 中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目(110900k235)

作者简介:胡凯衡(1975—), 男, 江西瑞金人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事泥石流研究。

E-mail: khhu@imde.ac.cn

在最近的时间内发生过灾害或者灾害一直在发展,相应地称为活跃的灾害体(图1)。为了方便起见,无灾体视为发生概率等于0的灾害体。

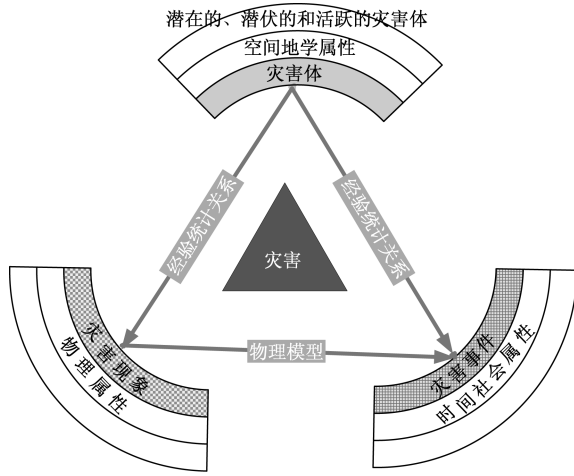


图1 灾害的概念框架

Fig.1 Schematic diagram of natural hazard concepts

灾害的风险评估是基于灾害的属性值来进行的。灾害体的特征属性值容易获取。灾害现象和事件的属性值根据灾害体类型不同,获取的难易程度也不同。潜在的、潜伏的灾害体发生灾害的条件、模式和时间难于预测,难以获得灾害现象和事件值。而活跃的灾害体是高频事件,灾害现象和事件的属性值可通过以往的危害事件来获得。但大多数情况下,灾害事件和现象的信息缺失或者数据太少。这时,灾害事件和现象的属性可通过与灾害体属性值的一些经验统计关系来获得(图1)。

2 灾害和风险

滑坡泥石流的形成和发生受许多因素的影响,目前还无法准确预测灾害发生的时间和地点。正是由于滑坡泥石流在时间和空间上的不确定性,才有灾害风险的概念。灾害风险有两个要件:一是与灾害体概念相对的承灾体;二是灾害不确定性的度量。承灾体是指在灾害的影响范围内可能遭受危害的人和价值物。如果灾害发生在无人区,也没有危害到具有一定价值的物体。那么,这类灾害就没有风险。由于灾害的影响范围是很难事先确定的。所以,承灾体是一个动态的概念。许多村庄或者道路往往处于小规模灾害事件的危害范围之外,这时它们不是承灾体。一旦大规模的灾害事件发生,它们又在危害范围之内,受到破坏,成为承灾体。在实践中确定承灾体的时候,

一般是以一个行政功能体所辖制的范围来规定的。当然,也可以设定一个足够大的灾害影响范围,将这个范围之内的人和价值物都作为承灾体。

2.1 灾害易发性评估

最低层次的风险评估,是针对灾害体开展的,即评估空间位置上发生某种灾害的可能性或大小程度。这种风险评估称为易发性或敏感性评估。以泥石流滑坡为例,高山峡谷区比丘陵区发生的可能性大,丘陵区又比平原区发生的可能性大。地震带和构造运动活跃的地区比地质构造稳定的区域发生灾害的可能性大。那么,前者的易发性就高于后者。易发性评价给出某个空间位置或单元体发生灾害的可能性大小或容易度大小,以离散量来表示,一般从高到低共分为5个等级一极高(5)、高(4)、中等(3)、低(2)、极低(1),也可以用0到1之间的连续量来表示。易发性为0的空间单元体就是无灾体。当然,根据不同的目的和用途,也可以调整易发性的等级。因为易发性不是一个确定的物理量。所以,不同区域、不同方法所得到的易发性评价结果并不具有可比较性。

2.2 灾害危险性评估

第二个层次的风险评估,称之为危险性评估,是针对灾害事件和现象来开展的,即评估在某一发生频率条件下灾害可能具有的危险性。灾害的危险性可以用不同的特征量来表征,经常采用的指标为灾害的发生频率和对应的规模。一般来说,同等频率条件下,灾害规模越大,危险性也就越大。另一方面,同等规模的灾害发生的频率越高,危险性也就越大。例如,同样是百年一遇的频率下, $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡比 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡危险性大,而十年发生一次的 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 泥石流灾害比百年一次的 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 泥石流危险性大得多。除了灾害规模外,也可以通过其他的特征量来表征灾害的危险性。例如,滑坡体的最大总方量、最大冲出距离,泥石流的最大规模、冲击力等。确定这些特征量的值可以直接通过野外调查、监测、室内模拟实验等方法,更多的是借助统计回归的方法,从已有的灾害数据库中,间接建立灾害体与这些特征量的经验关系。危险性评估是基于灾害的物理特征量的,因而不同的评估结果之间可以直接比较^[11]。

综上所述,灾害的危险性有两个要素:灾害的危险特征量,例如规模、冲击力和流速等;危险特征量的概率分布。以 H 表示灾害的危险性,那么危险性可

以写成:

$$H = g(\{h\}, \{p(h)\}) \quad (1)$$

其中, h 为危险特征量, $p(h)$ 为危险特征量的概率分布函数, $\{, \}$ 表示多个量的集合, $g(,)$ 就称为危险性函数。如果灾害的危险性涉及到多个危险特征量, 那么就需要知道多个特征量的联合概率分布。单变量的危险性函数可以写为 $H = g(h, p(h))$ 。由于危险特征量的概率分布在通常情况下难以确定。所以, 实际中常用一个综合量化指标即危险度来表示危险性的程度或高低。

2.3 灾害风险性评估

第三个层次的风险评估, 称之为灾前损失评估, 也就是通常所说的风险评估, 是指评估灾害可能造成的人员伤亡和经济损失。灾害可能造成的损失与灾害的危险性和承灾体的受灾响应密切相关, 需要综合考虑这两方面的因素。影响灾害损失的因素是非常多的。一方面, 灾害的发生规模、破坏方式、发生时间、物质组成等都对灾损有严重的影响。另一方面, 承灾体的结构、类型、质量、方向和位置等都在不同程度上影响着灾害对其造成的损失或破坏。例如, 在其他条件都相同的情况下, 一栋钢筋混凝土结构的楼房比砖混结构的房屋更能抵抗灾害的破坏, 受到的损害也较小。承灾体对灾害的响应可以用易损性函数来表征。假设承灾体受灾前的总价值为 M , 受灾后的残留价值为 m 。则易损性 v 定义为 $(1-m/M)$ 。易损性的影响因素很多, 如承灾体的质量、结构和方位、灾害的各种物理量的时空分布等, 大致可归结为两个方面: 承灾体本身的属性和灾害的属性。因此, 可将易损性用如下形式表示:

$$v = f(\{H\}, \{O\}) \quad (2)$$

其中, $\{H\}$ 表示灾害危险性的集合, $\{O\}$ 表示承灾体属性集合。对于某个固定的承灾体, 其属性值是不变的, 易损性只是灾害属性的函数。为了便于计算, 往往将同一类型承灾体的易损性函数简化为单变量, 如泥石流的冲击力、流深等的函数。单变量的易损性函数可以表示为某一危险特征量的函数 $v = f(h)$ 。比如, Fuchs 等 (2007)^[12]、Akbas 等 (2009)^[13] 和 Quan Luna (2011)^[14] 给出了建筑物易损性随泥石流流深的变化曲线, Wilhelm (1998)^[15]、Barbollini 等 (2004)^[16] 和 Quan Luna (2011)^[14] 给出了建筑物易损性随泥石流冲击力的变化曲线。

所谓的风险可分为广义的和狭义的两种。广义

的风险是指在一定条件下和一定时期内, 由于滑坡泥石流发生的不确定性而导致承灾体遭受损失的大小以及这种损失发生可能性的大小。狭义的风险, 根据 UNDHA 1991 年^[17] 和 1992 年^[18] 的定义, 是指在一定区域和给定时段内, 由于某一灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值。简而言之, 广义的风险是指损失的概率分布, 而狭义的风险是指损失的期望。狭义的风险是一个确定的量。对于一个固定的承灾体, 例如一栋建筑物, 假设造成其损失的决定性因素为冲击力 F , 用 $v = f(F)$ 表示其易损性函数, 用 $p(F)$ 表示在这个建筑物所在位置冲击力的概率分布函数。那么, 这栋建筑物遭受损失的概率分布为 $p(f^{-1}(v))$, 而期望即狭义风险 R 为:

$$R = \int_p f^{-1}(v) p(f^{-1}(v)) dv \quad (3)$$

这就是单承灾体单变量的风险评估模型。不同的承灾体需要具体分析选择不同的影响变量, 例如对于水库、农田这类承灾体, 可能泥石流的流深、物质总量对损失的影响比较大。这时就需要选择流深或总方量作为危险特征量。

2.4 风险评估的理论框架

但是, 即使是在考虑固定承灾体和单个影响变量的情况下, 确定易损性函数和风险损失概率分布函数也是非常困难的。实际的灾害风险评估中常采用半定量模型, 即分别用三个综合量化指标危险度、易损度和风险度来表征灾害危险性、易损性和风险性的程度。根据 UNDHA 对自然灾害风险的定义及其数学表达式^[15-16], 灾害的风险度与危险度和易损度之间的关系为:

$$\bar{R}(\text{风险度}) = \bar{H}(\text{危险度}) \times \bar{V}(\text{易损度}) \quad (4)$$

灾害风险度只是灾害风险的非常粗糙的一种度量, 是对灾害与承灾体相互作用这个复杂过程所可能产生的结果的综合表征。危险度可以通过大量的灾害统计数据, 使用统计方法建立与灾害体指标值的经验关系来计算, 也可以由危险性函数进行综合平均得到; 易损度与危险度类似, 既可以通过与承灾体指标值之间的经验统计关系来计算, 也可以由易损性函数进行综合平均得到。具体实践中, 一方面, 危险性函数和易损性函数难以确定; 另一方面, 如果知道了危险性函数和易损性函数就可以直接计算风险性, 没有必要再去综合平均计算风险度。所以, 往往使用统计关系来计算危险度和易损度。

根据前面所述的灾害与风险关系,滑坡泥石流风险评估的理论模型可用图2来表示。风险评估理论的核心在于确定危险性函数和易损性函数,建立风险性定量评估模型。目前的研究还只停留在单承灾体单变量风险定量评估阶段。所以,模型框图中只列出了单承灾体单变量的易损性和风险性函数。相比定量评估模型,半定量模型比较成熟,评估的方法也比较多。例如,多元统计分析法,神经网络法,聚类分析法等等。半定量模型可以给出一个风险的粗略评价,但是应用的范围有限。

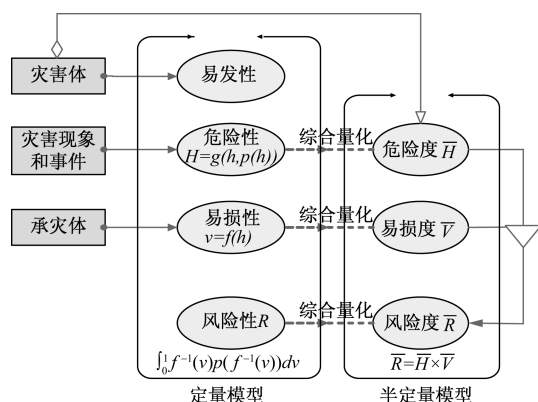


图2 滑坡泥石流风险评估的理论框架

Fig. 2 Theoretical framework of landslide and debris-flow risk assessment

3 结论与讨论

目前国内外滑坡泥石流灾害风险评估的方法很多。但是没有一个规范的概念和方法体系以及一个统一的理论框架。如何科学界定滑坡泥石流风险评估的基本概念和研究内容,建立一个一致的理论框架是风险评估研究进一步发展的迫切要求。通过分析和归纳现有风险评估方法和理论,得到以下结论:

(1) 提出了灾害的概念框架,将其分为“灾害体”、“灾害事件”和“灾害现象”三个基本对象,然后结合灾害风险两个要件(承灾体和不确定性)的表示,明确界定了灾害易发性、危险性和风险性的内涵。

(2) 提出了危险性和易损性的数学表达形式,根据单变量危险性函数和固定承灾体单变量易损性函数,推导了单变量风险的概率表达式,由此建立了滑坡泥石流风险评估的理论模型。通常的危险度、易损度和风险度视为危险性、易损性和风险性的综合量化指标。

本文提出的灾害风险评估理论框架为灾害风险

理论研究和规范的编写提供了一致的基础。但是,定量和半定量模型中危险性、易损性等的具体函数形式需要通过大量的灾害样本数据、模型实验数据等来确定。不同的灾害类型需要采用不同的危险特征量,同一灾害对不同的承灾体破坏作用差别也很大。因此,这方面的研究还需要长期的工作才能达到一个比较成熟规范的水平。

参考文献:

- [1] 唐川,刘希林,朱静. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用[J]. 自然灾害学报, 1993, 4(2): 79-84.
TANG Chuan, LIU Xilin, ZHU Jing. The evaluation and application of risk degree for debris flow inundation on alluvial fans [J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 4(2): 79-84.
- [2] 韦方强,谢洪,钟敦伦. 四川省泥石流危险度区划[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 59-63.
WEI Fangqiang, XIE Hong, ZHONG Dunlun. Risk factors zoning of debris flow in Sichuan province [J]. Journal of soil water conservation, 2000, 14(1): 59-63.
- [3] Wei F, Hu K, Lopez J L, et al. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 594-598.
- [4] 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 Cunhua, et al. Vulnerability assessment of urban debris flow hazard [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(2): 11-17.
- [5] 刘希林,王全才,孔纪名,等. 都(江堰)汶(川)公路泥石流危险性评价及活动趋势[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 41-46.
LIU Xilin, WANG Quancai, KONG Jiming, et al. Hazard assessment of debris flows and their developing Trend along Dujiangyan-Wenchuan highway [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 41-46.
- [6] Kienholz H, Krummenacher B, Kipfer A, Perret S: Aspects of integral risk management in practice-considerations with respect to mountain hazards in Switzerland, Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 2004, 56: 43-50.
- [7] Fausto G, Paola R, Francesca A, et al. Estimating the quality of landslide susceptibility models [J]. Geomorphology, 2006, 81(1): 166-184.

- [8] John C D, Chang J C, Gregory C O. Two models for evaluating landslide hazards [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32 (8): 1120 – 1127.
- [9] 白利平,孙佳丽,张亮,等. 基于 GIS 的北京地区泥石流危险度区划[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):12 – 15.
BAI Liping, SUN Jiali, ZHANG Liang, et al. GIS-based risk factors zoning of debris flow in Beijing Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and control, 2008, 19(2): 12 – 15.
- [10] 乔建平,吴彩燕. 滑坡本底因子贡献率与权重转换研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(3):13 – 16.
QIAO Jianping, WU Caiyan. Study on conversion between the contribution rate and weight of the controlling factors for landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and control, 2008, 19(3): 13 – 16.
- [11] Fangqiang Wei, Zhang Yu, Hu Kaiheng. The model and method of debris flow risk zoning based on momentum analysis [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11 (4), 835 – 839.
- [12] S Fuchs, K Heiss, and J Hübl. Vulnerability function for debris flow risk assessment [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007 (7): 495 – 506.
- [13] Akbas S O, Blahut J, Sterlacchini S. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. In: Malet JP, Remaitre A, Bogaard T (eds) Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling. Strasbourg, France, 2009: 229 – 233.
- [14] B Quan Luna, J Blahut, C J vanWesten1, et al. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11: 1 – 14,
- [15] Wilhelm C, (Ed.), Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects. In: Proceedings of the 25 Years of Snow Avalanche Research, Oslo, Norway, 1998: 288 – 293.
- [16] M Barbolini, F Cappabianca, F Savi. Risk assessment in avalanche-prone areas [J]. Annals of Glaciology, 2004 (38): 115 – 122.
- [17] UNDHA. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management [M]. Geneva, 1991.
- [18] UNDHA. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management [M]. Geneva, 1992.

Discussion on framework of landslide and debris-flow risk assessments

HU Kai-heng^{1,2}, Ding Ming-tao³

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, 610041, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010, China)

Abstract: The lack of a unified concept system and theoretical framework is a key problem for the further development of landslide and debris-flow risk assessments. By investigating of the basic concepts of risk assessment and analyzing the relationships between uncertainty and hazard as well as hazard and risk, the connotation of susceptibility, hazard and risk are defined clearly. According to these definitions of the concepts, mathematical expressions of hazard and vulnerability are proposed, and the methods for different scales and categories of risk assessments are discussed. A quantitative and semi-quantitative theoretical framework is constructed with the concepts, definitions, and mathematical expressions, and can be served as a basis for the risk assessment of landslide and debris flow.

Key words: debris flow; landslide; risk assessment; theoretical framework; index system