

# 泥石流灾害风险评估理论与方法研究

刘光旭<sup>1,2</sup>, 戴尔阜<sup>1</sup>, 吴绍洪<sup>1</sup>, 吴文祥<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**近年来,频繁发生的泥石流灾害给中国部分地区造成了巨大的破坏。泥石流点多面广、成灾迅速,难以对其进行准确的监测预报,风险评估就显得尤为重要。本文从泥石流灾害风险的构成要素、危险性评估研究和承灾体脆弱程度评估研究等方面分析了泥石流灾害风险的研究现状。从当前的研究现状中可以发现:灾害风险公式得到广大学者普遍认同,泥石流危险性评估方法也相对比较成熟;但在泥石流灾害对承灾体的致损风险机理分析方面研究尚需深入,危险性评估中如何实现从点评价向面评价过渡还需进一步探讨,对承灾体脆弱性研究也需要引起重视。因此,在今后的评估研究中,需要加强这些方面的研究探索,进一步提高泥石流灾害风险评估结果的可信度,提高其实用性。

**关 键 词:**泥石流灾害风险;泥石流危险性;承灾体脆弱性;风险评估

## 1 引言

泥石流是山区常见的一种自然灾害,常以冲毁、淤埋的成灾方式对人类的生命安全和财产构成威胁<sup>[1]</sup>。特殊的地质背景、有利的地形条件和松散物源储备使得中国各地泥石流广泛发育。据统计,全国有灾害性泥石流沟3万余条,几乎遍布各个省市<sup>[2]</sup>。这些泥石流对中国经济和社会发展构成了巨大威胁。根据国土资源部公布的《地质灾害灾情通报》,2001-2009年,中国年均发生地质灾害多达29391起,造成1600余人伤亡,经济损失高达36亿元/年。特别是2010年8月发生在舟曲县特大泥石流灾害,造成1463人遇难,302人失踪,1417亩农田被毁,5508间房屋倒塌,损失惨重。由于泥石流灾害点多面广、成灾迅速<sup>[3]</sup>,对其进行准确的进行监测预报非常困难,因而风险评估就显得尤为重要。

灾害风险评估从导致灾害发生的孕灾环境因子入手,在研究灾害本身发生的可能性基础上,进一步考虑了承灾体本身相对于各致灾因子的脆弱性。将自然灾害的社会属性和自然属性结合起来进行的定量评估,其结果可推动社会从目前主要着

眼于救济与应急的理念向侧重于风险管理流程中所有环节相协调的理念转变,有效减少灾害损害。就泥石流灾害风险而言,中国学者在20世纪80年代末期开始对泥石流灾害风险进行了初步探索<sup>[4]</sup>。90年代以来,特别是在“国际减灾十年”会议召开以后,泥石流灾害风险评估开始突破传统的研究模式,研究水平不断提高,研究内容也日益丰富,在泥石流灾害风险识别、建模、评估等多个方面进展迅速。本文从泥石流灾害风险的构成要素、危险性评价、承灾体脆弱程度评估和风险评估方面阐述泥石流灾害风险的研究现状,在此基础上提出未来研究的重点。

## 2 泥石流灾害风险定义及构成要素

泥石流是松散土石体和水混合体在重力作用下沿自然坡面或沿压力坡面流动的一种间歇性洪流,是一种常发性自然灾害,常常与崩塌、滑坡、洪涝等在同一个地区相伴发生,危及山区的城镇、村寨、厂矿、水电工程和农田<sup>[5]</sup>。其群发性和不规则的周期性等特点使泥石流很早就引起了地学工作

收稿日期:2011-10; 修订日期:2012-02.

基金项目:国家科技支撑计划课题项目(2008BAK50B06, 2008BAK50B05); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q03-01)。

作者简介:刘光旭(1977-),男,在读博士,主要从事灾害风险与资源环境等研究。E-mail: liugx.09b@igsnrr.ac.cn

通讯作者:戴尔阜(1972-),博士,研究员,主要从事综合自然地理、气候变化对生态系统脆弱性影响、自然灾害风险评估等研究。E-mail: daief@igsnrr.ac.cn

者的注意<sup>[6]</sup>。研究人员通常从泥石流形成的地质或水文气象过程来定义泥石流,把泥石流描述为一种发生在山区、携带大量泥土和碎屑物质的间歇性洪流<sup>[7]</sup>,是固液两相流体,饱含大量泥沙石块和巨砾,呈粘性层流或稀性紊流等运动状态<sup>[8-9]</sup>。这些描述客观地揭示了泥石流的作用区域、运动过程和物质形态等自然属性特征。泥石流灾害是自然过程与人类活动相互作用的结果<sup>[10-12]</sup>,因此,在研究泥石流灾害风险时,还需考虑人文因素的影响<sup>[12]</sup>。根据国际减灾战略组织<sup>[13]</sup>的框架概念,可以把泥石流灾害风险定义为:在一定的区域范围、时间限度内,由于泥石流灾害的发生而对人的生命财产、经济活动等造成损失(如生命丧失,人员伤亡,财产、物品与生命保障系统损坏,生活与生产活动中断,环境破坏等)的可能性。这一定义把由孕灾环境、致灾因子和承灾体三者相互影响、相互作用共同组成的灾害系统抽象为两个部分:泥石流发生的危险性和承灾体受泥石流影响而潜在致损的脆弱程度。

泥石流危险性是指在一定时间内和一定范围(单沟或区域)内所存在的人和物遭到泥石流损害的可能性大小<sup>[14-15]</sup>,由泥石流发生的可能性、泥石流强度和影响范围决定。而承灾体脆弱程度(易损度)是指在一定区域和时段内,由于泥石流的发生而可能导致的该区域内所存在的人、财、物的潜在损失程度<sup>[16]</sup>,与承灾体的暴露量和其本身的脆弱性相关。所以,泥石流灾害风险研究的构成要素主要分为2个部分和3个因素,前者包括泥石流灾害的危险性、承灾体受泥石流影响而潜在致损的脆弱程度;后者包括泥石流发生可能性、承灾体本身的脆弱性及泥石流影响范围内的物理暴露量(图1)。

从图1中可以看出,泥石流灾害风险由承灾体脆弱程度和灾害危险性这两个面组成的圆柱体体积大小来度量,底面积大小表示泥石流承灾体脆弱程度的高低,受承灾体物理暴露量和本身脆弱性大小的影响。这样,泥石流灾害风险就是泥石流发生可能性、承灾体物理暴露量和承灾体脆弱性的积,用公式表示如下<sup>[13,17-20]</sup>:

$$R=H\times E\times V \tag{1}$$

式中:  $R$  (Risk)为泥石流灾害风险;  $H$  (Hazard)为泥石流发生的可能性;  $E$  (Exposure)为受泥石流灾害威胁的承灾体物理暴露量;  $V$  (Vulnerability)为承灾体脆弱性。

### 3 风险评估理论与方法

泥石流风险评估就是采用科学的方法,对泥石流发生的可能性及其可能影响的承灾体遭受的可能损失进行评价和估算的过程。评估的流程一般包括:评估范围的确定、危险性评估、脆弱性评估、风险计算4个步骤<sup>[21]</sup>,其中泥石流危险性评估和脆弱性评估是风险评估的核心环节。

#### 3.1 危险性评估

危险性是具有潜在致损力的物理事件、现象和人类活动等发生的可能性<sup>[20]</sup>,侧重于对事件本身自然属性的描述。泥石流危险性评估,早期着重通过实验、观测分析和数学建模来分析泥石流发生过程,在这一时期,宾汉粘性流模型(Bingham VISCOUS fluid model)<sup>[22]</sup>、拜格诺膨胀流模型(Bagnold dilatant fluid model)<sup>[23]</sup>、泥石流粘塑流模型(Generalized viscoplastic model)<sup>[24]</sup>、膨胀塑流模型(Dilatant plastic model)<sup>[25]</sup>和泥石流“混合流理论动量守恒方程”(Mixture theory momentum conservation equations)<sup>[26]</sup>等先后被用来定量化分析不同种类的泥石流的运动过程。随着研究的深入,泥石流和承灾体之间的相互作用受到研究者的重视<sup>[27-36]</sup>,与影响承灾体损失大小直接相关的泥石流特性成为泥石流危险性评估的重心,多位学者开始把泥石流危险性与泥石流发生的概率和发生时的规模大小关联起来<sup>[19,37-43]</sup>,用泥石流发生频次、强度等指标<sup>[20,44-45]</sup>来评估泥石流危险性。

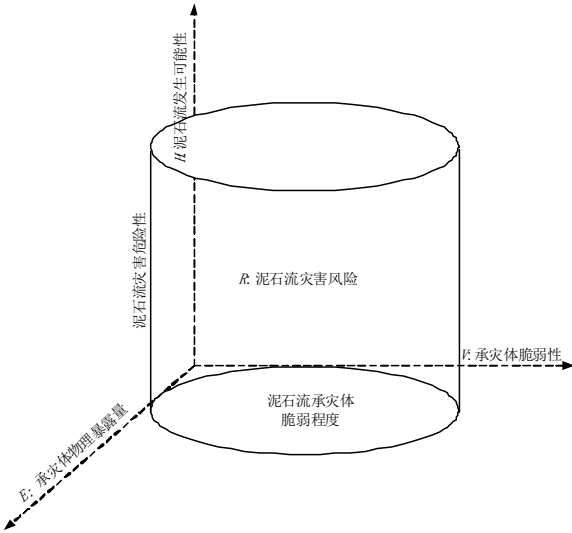


图1 泥石流灾害风险概念模型

Fig.1 Conceptual model of debris flow risk

泥石流发生的频次(或概率)是衡量泥石流致险可能性的时间尺度。国际上常依据对洪水的重现期描述来定义泥石流发生的频次,如500年一遇<sup>[44]</sup>等。野外调查、航片解译、问卷、资料收集、泥石流沉积扇槽探、放射性元素测年等<sup>[44-52]</sup>均可用来确定历史泥石流灾害发生的频次。泥石流规模是泥石流致险可能性的量的指标,其大小由泥石流冲出量、洪峰流量和淹没面积<sup>[44]</sup>等决定。泥石流冲出量定义为泥石流经过某一具体的观测点(常常是在泥石流堆积扇的顶端)所携带的无机沉淀物、有机质和水的总量,可以通过资料记录收集、地层剖面分析、泥石流堆积物或古土壤测年以及不同沟渠泥石流沉积年代对比等方法来确定<sup>[53]</sup>。泥石流的洪峰流量与泥石流冲出量具有相关性<sup>[54-55]</sup>,还可以通过它们之间的经验关系来计算<sup>[55]</sup>。泥石流在堆积扇上的淹没面积是衡量泥石流规模和影响范围的一个重要指标。对历史泥石流的淹没面积确定主要通过野外调查、资料记录及航片解译等方法确定;对未来可能发生的泥石流灾害,水动力模型FLO-2D常被用来通过模拟泥石流的堆积深度和流速、依据堆积区的地形条件来估算泥石流的淹没范围<sup>[20,56-57]</sup>。

在确定泥石流危险评估区域,并系统的确定了多个泥石流发生的频次和规模后,就可以着手建立泥石流的频次—规模关系、绘制频次—规模曲线,评估其危险性高低。在此基础上,有学者进一步提出了泥石流危险度的概念<sup>[14]</sup>,用泥石流的规模和发生概率的乘积来直接度量泥石流危险性,给出了泥石流危险度公式:

$$\text{危险度}(H) = \text{规模}(M) \times \text{概率}(P) \quad (2)$$

在泥石流危险性评估实践中,特别是对泥石流进行区域危险性评价时,由于规模、频次这些因子具有一定的不确定性,有学者开始尝试采用历史资料和数学统计分析的方法,选用影响泥石流频次和规模的气象、地貌、地质等代用指标来评估泥石流的危险性<sup>[19,58-61]</sup>。20世纪90年代以来,依据上述因子对泥石流危险性的影响,多位中外学者将其他学科的理论、研究成果和新技术引入泥石流危险评价领域,建立了各种泥石流危险性评价模型,常见的评价模型有:回归分析<sup>[62-64]</sup>,多变量统计分析<sup>[65-66]</sup>、模糊数学综合评判<sup>[67-70]</sup>、层次分析<sup>[71]</sup>、灰色关联度分析<sup>[72-75]</sup>、人工神经网络<sup>[76-80]</sup>、投影寻踪法<sup>[81]</sup>,计算机数值模拟<sup>[82]</sup>,地理信息系统(GIS)<sup>[83-84]</sup>等。表1给出了几

种常见的泥石流危险方法综合比较。

总结起来,经过几十年的研究,泥石流的危险性研究已经由简单的自然属性描述发展到量化、模型化评估,特别是国内一些学者的持续深入研究,使我们对泥石流活动机理和致险性的认识不断加深,研究成果实用性和可操作性不断加强,有的国家甚至还据此编制危险性评估的规范<sup>[53,85-87]</sup>。因此,泥石流危险性研究已基本形成了较成熟的评估方法体系。

### 3.2 承灾体脆弱程度评估

泥石流灾害承灾体脆弱程度评估是关于承灾体可能遭受到的损失评价<sup>[88]</sup>。由于居住状况、基础设施、国家政策和政府管理、组织能力、社会不公平状况、性别关系、经济模式等<sup>[89]</sup>均可以对脆弱性产生影响,特别是泥石流空间分布差异、早期的预警系统及防护措施的影响等<sup>[90]</sup>决定着不同类型的承灾体的脆弱状况,因此,准确的评估泥石流、滑坡这类灾害的脆弱性有一定的难度<sup>[91]</sup>。近年来,国外学者近年开展了相关研究,如Birkmann等<sup>[92]</sup>用灾害造成的损失量或破坏量来度量一个社会或成员在面临灾害风险时的脆弱性。Fuchs等<sup>[93]</sup>等通过计算货币损失和重建价值之间的比率来确定承灾体脆弱程度,并把承灾体区分为人的生命价值和财产价值分别进行评估。Pandey等<sup>[89]</sup>选用农民或从事农业劳工的数量、0~6岁儿童的数量、人口密度、性别比、受教育状况等社会因子采用GIS叠加的方法来计算承灾体的脆弱性。国内学者刘希林等<sup>[88]</sup>提出了泥石流易损度的概念,用来表示泥石流承灾体脆弱程度的高低。易损度指在一定区域和时段内,由于泥石流而可能导致的该区域内所存在的一切人、财、物的潜在最大损失<sup>[16]</sup>。由于脆弱性有区域差异,还随时间变化,它既是空间的函数,又是时间的函数<sup>[94]</sup>,对易损度直接进行计算仍旧有许多困难。因此,学者<sup>[95-98]</sup>进一步提出和建立了泥石流易损度评价指标体系,利用数学模型尝试着对其进行间接估算。

总结起来,选取人口、财产、经济和环境等因子进行叠加计算是当前评估泥石流承灾体脆弱性的主要方法;评估过程中,在承灾体分类、指标因子选择及权重确定方面多借助于个人经验或历史灾情,具有一定随机性和主观性;对脆弱性概念的理解也争议颇多。这主要是由于对灾害的社会属性研究不足、脆弱性评估研究相对薄弱和滞后造成的。灾



表1 泥石流危险性评估常用方法比较

Tab.1 Comparison of some methods for debris flow risk assessments

评估模型	研究人员	评估单元	原理	所需数据	优缺点评价
回归分析法	梁明贵 <sup>[62]</sup> , Bughi, 等 <sup>[64]</sup> , 久保田哲也, 等 <sup>[63]</sup> ,	单沟 泥石流	基于数理统计原理,对统计数据进行处理并建立因变量与自变量之间的回归关系函数表达式进行危险性外推的定量评估方法。	历史灾情数据,气象、地质、地貌等因子	优点:客观性强、模型简单使用。缺点:需要掌握大量的数据。
多变量统计分析模型	Aleotti 等 <sup>[65]</sup> , Leroi <sup>[66]</sup>	单沟泥石流、 滑坡等	运用数理统计的方法,研究多个随机变量之间相互依赖关系以及内在统计规律性。	野外观测、调查数据,水文、地质、地形、气象数据等。	优点:能够使复杂的指标简单化,并对研究对象进行分类和简化。缺点:调查数据需求量大,工作任务重。
模糊数学模型综合评判	余宏明,等 <sup>[67]</sup> ;苏 经宇,等 <sup>[68]</sup> ;张 跃,等 <sup>[69]</sup> ;唐川, 等 <sup>[70]</sup> ;魏永明, 等 <sup>[72]</sup> ;孙广仁, 等 <sup>[99]</sup>	单沟或区域泥 石流、滑坡等	运用模糊数学的方法,通过构造等级模糊子集(隶属度),将反映泥石流危险性的模糊指标进行量化并利用模糊变换原理综合个指标因子进行评价的方法。	历史灾情数据和气象、地貌、地质等间接指标因子。	优点:能较好反映泥石流危险性评估中的模糊不确定性问题,应用较广。缺点:在确定评定因子及隶属函数形式等方面具一定的主观性
层次分析	汤家法,等 <sup>[100]</sup> , 白利平,等 <sup>[101]</sup> , Liping,等 <sup>[102]</sup>	区域泥石流、 滑坡等	是一种定性定量相结合确定因子权重的科学方法。它通过构造判断矩阵,利用相关领域多位专家的经验,确定各因子权重值并进行一致性检验,进而评估泥石流危险性方法。	降雨、岩性、构造、区域稳定性、人类活动、植被、坡度、水系等间接指标	优点:是基于专家经验的一种定量评估方法,层次关系分明、简单明了,实用性强。缺点:因子选择与因子权重确定主观性强。
灰色关联度分析法	李志斌,等 <sup>[75]</sup> , 刘希林,等 <sup>[103]</sup> , 张春山 <sup>[74]</sup>	单沟泥石流、 滑坡等	基于灰色系统理论,使用微分拟合和关联度分析的方法,根据因子之间发展趋势的相似或相异程度,对泥石流灾害危险性进行评估的方法。	野外调查观测数据和气象、地貌、地质等间接指标因子。	优点:可以确定主次因子之间关系的密切程度,算法思路清晰,对数据要求较低、易于程序化处理。缺点:是间接的评估方法,评估结果争议较大,国外研究较少运用该方法。
人工神经网络	汪明武 <sup>[76]</sup> , 黄双,等 <sup>[77]</sup> , Aleotti,等 <sup>[79]</sup> , 刘涌江,等 <sup>[104]</sup>	区域 泥石流	是一个非线性动力学系统,模拟人的思维方式、选定典型评估单元(常用格网数据),输入标准化的因子指标对网络训练,获得调整后的权值及阈值;然后对其他评估单元进行仿真,即获得各个单元的危险性等级。	数据:气象、地貌、地质等间接指标因子。	优点:客观性强,较好地避免主观赋权引起的误差,可靠性高,适宜程序化处理。缺点:各因子的作用和彼此关系比较模糊。

害脆弱性评价是灾害风险评价的重要内容,重视脆弱性研究,借鉴其他学科的理论 and 研究成果,通过实验、灾情数据分析等方法,构建客观性强、更符合实际情况承灾体脆弱性评估理论体系将是未来泥石流灾害风险研究的重点。

3.3 风险评估方法

风险评估的目的是为了辨识危害、降低风险损失;对泥石流灾害风险评估而言,它主要包括风险辨识,风险估算和风险评价3个环节。风险辨识是定性描述泥石流可能对承灾体造成的损害状况,可以通过野外调查、航片解译、问卷、资料收集研究等方法<sup>[46]</sup>初步确定泥石流灾害的风险状况,是风险估

算的前期调研。风险评价是根据风险估算的结果对承灾体面临的风险状况进行分析,提出规避风险的应对措施,是估算结果的实际应用。作为核心环节的风险估算则着眼于定量的描述泥石流灾害发生的可能性、承灾体的暴露量、脆弱性等。由于对风险内涵的理解差异,风险估算存在着许多争议。如,Maskrey<sup>[105]</sup>认为灾害风险是危险性和承灾体脆弱性叠加影响的结果,用危险度和易损度的和表示风险的高低;Tobin 等<sup>[106]</sup>把风险视为灾害发生的概率及其对承灾体造成的影响,用概率+脆弱性来计算风险。随着研究的深入,人们发现泥石流等灾害危险性高,却不一定会造成高的损害结果,比如发

生在无人居住区的灾害事件,对人类社会致损的风险几乎可以忽略不计,因此用危险性和脆弱性的和来计算风险高低不能表现出灾害的上述状况。根据 Anbalagan 等提出的风险评价矩阵(RAM)<sup>[95]</sup>概念模型,国际地质科学联合会(IUGS)等<sup>[16, 107-108]</sup>提出了用二者之积来计算风险,这样当灾害危险性或脆弱性增大或减小时,则风险也相应地增大或减小;当易损性和危险性其一为零,则风险为零。这一观点遂获较多学者的认同,并且应用于多种灾害的风险评估<sup>[109-112]</sup>。在此基础上,史培军等认为自然灾害是致灾因子、孕灾环境和承灾体三者综合作用的结果<sup>[113]</sup>,灾害风险评估应该是由危险性、暴露性和脆弱性这3个因素相互作用形成的<sup>[114]</sup>。因此,国际减灾战略组织(ISDR)在2004年把灾害发生的危险程度和暴露在灾害分布区的承灾体的脆弱度和物理暴露量结合起来进行考虑,给出了新的灾害风险评估公式:风险=危险性×脆弱性×物理暴露量<sup>[13]</sup>。

实践中,面对同一强度的致灾因子,处于不同环境(如高程、坡度、坡向、地质基础等)中的不同承灾体(如居民点、水库、农田、道路、桥梁等),其脆弱性程度及反应将存在很大差别,故危险性分析不可或缺<sup>[115]</sup>。不同性质、不同等级的承灾体(如建筑物的类型、人的受教育状况等),脆弱性不同,最后造成的损失也会有显著的差异;此外,承灾体的物理暴露量也是影响风险大小的一个重要的因子。因此,国际减灾战略组织给出灾害风险评估公式对灾害风险的理解更清晰些,在评估实践中,也更贴近操作实际。

## 4 结论和讨论

泥石流灾害风险评估是进行灾害风险管理、减轻泥石流灾害损失的重要途径。准确的评估结果能够为管理规划、工程建设和投资决策者提供有价值的判断依据,政府部门和当地居民可以因地制宜的据此制定减灾政策,有的放矢的进行防灾减灾。就泥石流灾害风险而言,国内外学者对泥石流灾害风险的理解已逐渐趋同,在风险评估内容、风险评估要素及风险评估模型等方面已形成了一套完整的理论方法体系。不过,在泥石流灾害对承灾体的致损风险机理分析、区域性泥石流危险性研究、承灾体脆弱性研究等方面还有待于进一步深入。因此未来泥石流风险评估应该重点开展:

(1) 泥石流灾害对承灾体的致损机理研究。泥石流灾害风险研究由灾害危险性和承灾体脆弱程度两部分构成,二者本身又受多种因子的制约,特别是承灾体脆弱性的问题,既受社会经济条件影响,还受其所处的自然环境条件的制约,评价指标因子和脆弱程度间的关系常常是非线形的,定量化评析比较困难。此外,致灾因子与承灾体之间的关系也比较复杂,用简单的积函数得出的风险评估结果相对性较强,可信度不高。因此,未来泥石流灾害风险的研究重点应该放在致损机理研究方面,采用自下而上的地学方法,通过详实的调查、分析、模拟,系统的研究泥石流的危险性和承灾体脆弱性之间的关系,建立广泛可接受的承灾体脆弱性曲线,提高风险评估结果的可信度。

(2) 泥石流灾害危险性的点评价和面评价问题。与地震、洪涝、干旱等灾害相比,泥石流灾害有其特殊性,它的危害范围较小,如单个村庄或城镇等。所以,国外文献中常见的是对泥石流灾害风险的点评价(沟谷评价),由于评估面积小,影响危险性和脆弱性的指标获取容易,评价结果定量化程度较高。不过,区域经济建设和发展的实践提出了进行区域自然灾害风险分析的迫切需要<sup>[116]</sup>。如果要像地震、洪涝等一样,对泥石流灾害进行区域性的风险评估,就需要首先解决泥石流灾害风险的点评价如何向面评价尺度转化的问题。这方面,国内学者虽然进行了多种尝试性探讨,但许多因素具有较高程度的模糊性和不确定性,评估结果的相对性仍较高,还需要进一步深入探讨研究。

(3) 重视泥石流承灾体脆弱性研究。相比危险性研究,对泥石流承灾体脆弱性研究显得不足,对脆弱性的概念理解、评估指标选择和评估方法确定等研究仍处于探讨阶段。因此,结合泥石流灾害的自然属性和社会属性,并以社会属性为主,尝试着构建脆弱性评估方法体系,评估泥石流灾害造成的人口和社会经济可能损失风险,将是未来泥石流风险研究的一项重要内容。

## 参考文献

- [1] 陈光曦,王继康,王林海. 泥石流防治. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [2] 唐邦兴, 柳素清. 我国山地灾害及其防治. 山地研究, 1996, 14(2): 103-109.
- [3] 韩用顺, 崔鹏, 刘洪江, 等. 泥石流灾害风险评价方法及

- 其应用研究. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 140-147.
- [4] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究. 灾害学, 1988, 3 (3): 10-15.
- [5] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] Blackwelder E. Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains (with discussion by Joseph T. Singewald, jr.). Bulletin of the Geological Society of America, 1928, 39 (2): 465.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 工程地质术语. in: 国家技术监督局, (Ed), GB-91, 1991.
- [8] 张国平, 徐晶, 毕宝贵. 滑坡和泥石流灾害与环境因子的关系. 应用生态学报, 2009, 20(3): 653-658.
- [9] 钱宁, 王兆印. 泥石流运动机理的初步探讨. 地理学报, 1984, 39(1): 1-33.
- [10] Bell R, Glade T. Quantitative risk analysis for landslides: Examples from Bildudalur, NW-Iceland. Nat Hazards Earth Sci Syst, 2004, 4: 117-131.
- [11] 高庆华, 马宗晋, 张业成. 自然灾害评估. 北京: 气象出版社, 2007.
- [12] 葛全胜, 邹铭, 郑景云. 中国自然灾害风险综合评估初步研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] ISDR. Terminology of disaster risk reduction, 2004.
- [14] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价. 科学出版社, 1995.
- [15] 胡封兵, 高甲荣, 陈子珊, 等. 泥石流风险评价. 灾害学, 2006, 21(3): 36-41.
- [16] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价. 成都/乌鲁木齐: 四川科学技术出版社, 2003.
- [17] 朱良峰, 张梁. 地质灾害风险分析与 GIS 技术应用研究. 地理学与国土研究, 2002, 18(4): 10-13.
- [18] IUGS. Working group on landslides, committee on risk assessment, quantitative risk assessment for slopes and landslides: state of the art//Cruden D M, Fell R (Eds). Proceedings International Workshop on Landslides Risk Assessment. Rotterdam: Balkema, 1997: 3-12.
- [19] Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal/Revue Canadienne de Geotechnique, 1994, 31(2): 261-272.
- [20] Gentile F, Bisantino T, Trisorio L G. Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern-Italy). Nat Hazards, 2008, 44(1): 1-17.
- [21] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展. 地质论评, 2007, 53(6): 797-806.
- [22] Johnson A M, Rahn P H. Mobilization of debris flows. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1970, 9: 168-186.
- [23] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel. Journal of the Hydraulics Division, 1980, 106(3): 381-396.
- [24] Chen C. Generalized viscoplastic modeling of debris flow. Journal of hydraulic engineering, 1988, 114(3): 237-258.
- [25] O'brien J S, Julien P Y, Fullerton W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of hydraulic engineering, 1993, 119(2): 244-261.
- [26] Iverson R M. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.
- [27] Blijenberg H M, De Graaf P J, Hendriks M R, et al. Investigation of infiltration characteristics and debris flow initiation conditions in debris flow source areas using a rainfall simulator. Hydrological Processes, 1996, 10(11): 1527-1543.
- [28] Major J J. Depositional processes in large-scale debris-flow experiments. The Journal of Geology, 1997, 105(3): 345-366.
- [29] Huang, X. A perturbation solution for Bingham-plastic mudflows. Journal of hydraulic engineering, 1997, 123: 986.
- [30] Huang X, Garcia M H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 374: 305-333.
- [31] Major J J, Iverson R M. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(10): 1424.
- [32] Hungr O. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow. Earth surface processes and landforms, 2000, 25(5): 483-495.
- [33] Gregoretti C. The initiation of debris flow at high slopes: experimental results. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(2): 83-88.
- [34] Chen H, Lee C F. Numerical simulation of debris flows. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 146-160.
- [35] Imran J, Parker G, Locat J, et al. 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. Journal of hydraulic engineering, 2001, 127(11): 959-968.
- [36] Parsons J D, Whipple K X, Simoni A. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. The Journal of Geology, 2001, 109(4): 427-447.
- [37] Hearn G J. Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi copper mine, Papua New Guinea. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1995, 28(1): 47.
- [38] Alexander D. Natural disasters: A framework for re-



- search and teaching. *Disasters*, 1991, 15(3): 209-226.
- [39] Carrara A, Cardinali M, Detti R, et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 1991, 16(5): 427-445.
- [40] De Ploey J, Kirkby M J, Ahnert F. Hillslope erosion by rainstorms: A magnitude-frequency analysis. *Earth surface processes and landforms*, 1991, 16(5): 399-409.
- [41] Glade T. Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. *environmental Geology*, 1998, 35(2): 160-174.
- [42] Zarn B, Davies T R H. The significance of processes on alluvial fans to hazard assessment. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1994, 38: 487-487.
- [43] Creek S. Debris Flow Study and Risk Mitigation Alternatives for Mackay Creek, 2003.
- [44] Jakob M. Debris-flow hazard analysis//Jakob M, Hungr O(Eds). *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin: Springer, 2005: 411-443.
- [45] Hürlimann M, Copons R, Altimir J. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology*, 2006, 78(3-4): 359-372.
- [46] Sigafoos R S. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition: US Geol. Survey Prof. Paper, 1964, 485.
- [47] Jackson L E. Dating and recurrence frequency of prehistoric mudflows near Big Sur, Monterey County, California. *Journal of Research US Geological Survey*, 1977, 5(1): 17-32.
- [48] Shroder J F. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 1978, 9(2): 168-185.
- [49] Butler D R. Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research*, 1979, 11(1): 17-32.
- [50] Hupp C R. Dendrogeomorphic evidence of debris flow frequency and magnitude at Mount Shasta, California. *environmental Geology*, 1984, 6(2): 121-128.
- [51] Hupp C R, Osterkamp W R, Thornton J L. Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. 1987.
- [52] Strunk H. Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Muffrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. Roderer, 1995.
- [53] Jakob M, Weatherly H. Debris flow hazard and risk assessment, Jones Creek, Washington//Hungr O, Fell R, Couture R, et al., (Eds). *Landslide Risk Management*. London: Taylor & Francis, 2005: 533-541.
- [54] Mizuyama T, Kobashi S, Ou G. Prediction of debris flow peak discharge. Bern, Switzerland, 1992.
- [55] Jakob M. Morphometric and geotechnical controls of debris flow frequency and magnitude in southwestern British Columbia. National Library of Canada, 1996.
- [56] Tsao T C, Hsu W K, Cheng C T, et al. A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan, Interpraevent 2010-International Symposium in Pacific Rim, Taipei, 2010: 930-939.
- [57] Jakob M, Weatherly H. Debris flow hazard and risk assessment, Jones Creek, Washington. *Landslide risk management. Proceedings*, 2005: 533-542.
- [58] 足立胜治, 德山九仁夫, 中筋章人. 石流发生危险度の判定にやて. *新砂防*, 1977, 30(3): 7-16.
- [59] 丁永建. 山区小流域洪水过程中泥沙搬运方式的初步研究. *地理学报*, 1989, 44(4): 487-495.
- [60] Fuchu D, Lee C F, Sijing W. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology*, 1999, 51(4): 279-290.
- [61] 程根伟. 山区暴雨泥石流风险估计及其发生规模预测. *中国科学: E 辑*, 2003, 33(B12): 10-16.
- [62] 梁明贵. 泥石流沟严重程度的评定方法分析. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(5): 109-112.
- [63] 久保田哲也, 正务章, 板垣昭彦. 板垣昭彦. 流域の任意地点における短时间降雨预测手法と土石流发生危险度判定图の開発. *新砂防*, 1990, 42(6): 11-17.
- [64] Bughi S, Aleotti P, Bruschì R, et al. Slow movements of slopes interfering with pipelines: modelling and monitoring. *Proceedings of 15th. International Conference of offshore mechanics and arctic engineering*. Florence: 1996, 363-372.
- [65] Aleotti P, Baldelli P, Polloni G. Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro basin (Italy). *Proceedings International Congress Interpraevent 1996. Garmisch-Partenkirchen*, 1996: 435-446.
- [66] Leroi E. Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. 7th International Symposium on Landslides. Trondheim: 1996, 17-21.
- [67] 余宏明, 袁宏成, 唐辉明. 巴东县新城区冲沟泥石流危险度评价. *水文地质工程地质*, 2003, 1: 47-49.
- [68] 苏经宇, 周锡元. 泥石流危险等级评价的模糊数学方法. *自然灾害学报*, 1993, 2(2): 83-90.
- [69] 张跃, 宿芬, 邹寿平. 模糊数学方法及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [70] 唐川, 周钜乾. 云南崩塌滑坡危险度分区的模糊综合分

- 析法. 水土保持学报, 1994, 8(4): 48-54.
- [71] 褚洪斌, 母海东, 王金哲. 层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 125-129.
- [72] 魏永明, 谢又予. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 107-117.
- [73] 刘希林, 唐川. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法. 灾害学, 1993, 8(2): 1-7.
- [74] 张春山. 北京地区泥石流灾害危险性评价. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(3): 33-40.
- [75] 李志斌, 郑成德. 滑坡、泥石流危险度评判的灰色模式识别理论与模型. 系统工程理论与实践, 2000, 20(5): 128-132.
- [76] 汪明武. 基于神经网络的泥石流危险度区划. 水文地质工程地质, 2000, 27(2): 18-19.
- [77] 黄双, 李广杰, 陈伟伟. 基于人工神经网络的泥石流灾害危险性评价. 山西建筑, 2007, 33(3): 1-2.
- [78] Aleotti P, Baldelli P, De Marchi D. Le reti neurali nella valutazione della pericolosità da frana. Geol Tec Ambient, 1996b, 4: 37-48.
- [79] Aleotti P, Baldelli P, Polloni G, et al. Different approaches to landslide hazard assessment//Sivakumar M C R. Proc 2nd Int Conf on Environmental Management (ICEM2), Elsevier, Wollongong, 1998: 3-10.
- [80] Lees B. Neural networks applications in the geosciences: An introduction. Comput Geosci, 1996, 22: 955-957.
- [81] 汪明武, 金菊良, 李丽. 投影寻踪新方法在泥石流危险度评价中的应用. 水土保持学报, 2002, 16(6): 79-81.
- [82] 邵颂东, 王礼先. 北京山区泥石流运动数值模拟及危险区制图. 北京林业大学学报, 1999, 21(6): 9-16.
- [83] 唐川, 朱静. GIS支持下的滇西北地区泥石流灾害评价. 水土保持学报, 2001, 15(6): 84-87.
- [84] 闫满存, 王光谦, 刘家宏. GIS支持的澜沧江下游区泥石流爆发危险性评价. 地理科学, 2001, 21(4): 334-338.
- [85] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, et al. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 1999, 31(1-4): 181-216.
- [86] Hofmeister R J, Miller D J, Mills K A, et al. GIS overview map of potential rapidly moving landslide hazards in western Oregon. Portland: Department of Geology and Mineral Industries, 2002.
- [87] Lin P S, Lin J Y, Hung J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan. Engineering Geology, 2002, 66(3-4): 295-313.
- [88] 刘希林, 莫多闻. 泥石流易损度评价. 地理研究, 2002, 21(5): 569-577.
- [89] Pandey A C, Singh S K, Nathawat M S. Waterlogging and flood hazards vulnerability and risk assessment in Indo Gangetic plain. Nat Hazards, 2010(55): 273-289.
- [90] Glade T. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. Die Erde (Beitrag zur Erdsystemforschung), 2003, 134(2): 123-146.
- [91] Leone F, Asté J P, Leroi E. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception. Trondheim, 1996.
- [92] Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. Environmental Hazards, 2007, 7(1): 20-31.
- [93] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. Nat Hazard Earth Sys, 2007, 7: 495-506.
- [94] 刘希林, 莫多闻, 王小丹. 区域泥石流易损性评价. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 7-12.
- [95] Anbalagan R, Singh B. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains--a case study from Kumaun Himalaya, India. Engineering Geology, 1996, 43(4): 237-246.
- [96] 金晓冬, 罗云. 区域社会经济“易灾性”综合评价实践. 灾害学, 1993, 8(4): 1-5.
- [97] 张业成. 云南省东川市泥石流灾害风险分析. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(1): 25-34.
- [98] 尹之潜. 地震灾害损失预测的动态分析模型. 自然灾害学报, 1994, 3(2): 72-80.
- [99] 孙广仁, 毕海良. 模糊数学综合评判法在泥石流沟判别与危险度评价中的应用. 青海环境, 1997, 7(2): 72-77.
- [100] 汤家法, 谢洪. GIS技术支持下的泥石流危险度区划研究: 以岷江上游为例. 四川测绘, 1999, 22(3): 120-122.
- [101] 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. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 12-15.
- [102] Liping B, Yeyao W, Jiali S, et al. Application of extension theory in risk zoning of debris flow in Beijing. Global Geology, 2009, 12(1): 40-45.
- [103] 刘希林, 张松林, 唐川. 沟谷泥石流危险度评价研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 20-25.
- [104] 刘涌江, 胡厚田. 泥石流危险度评价的神经网络法. 地质与勘探, 2001, 37(2): 84-87.
- [105] Maskrey A. Disaster Mitigation: A Community Based Approach, Oxfam. Oxford: Oxfam, 1989.
- [106] Tobin G A, Montz B E. Natural hazards: Explanation and integration. New York: The Guilford Press, 1997.



- [107] IUGS. Quantitative Risk Assessment for Slopes and Landslides—the State of the Art. Balkema: Rotterdam, 1997.
- [108] Deyle R E, French S P, Olshansky R B, et al. Hazard assessment: The factual basis for planning and mitigation, 1998.
- [109] Shook G. An assessment of disaster risk and its management in Thailand. *Disasters*, 1997, 21(1): 77-88.
- [110] 刘希林. 区域泥石流风险评价研究. *自然灾害学报*, 2000, 9(1): 54-61.
- [111] 成玉祥, 任春林, 张骏. 基于BP神经网络的地质灾害风险评估方法探讨: 以天水地区为例. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2): 100-104.
- [112] 刘光旭, 吴文祥, 张绪教. 昆明市东川区泥石流风险性评价研究. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(3): 29-33.
- [113] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1-9.
- [114] Okada N, Tatano H, Hagihara Y, et al. Integrated research on methodological development of urban diagnosis for disaster risk and its applications. *Annals of Disast. Prev. Res. Institute, Kyoto Univ*, 2004: 1-8.
- [115] 叶金玉, 林广发, 张明锋. 自然灾害风险评估研究进展. *防灾科技学院学报*, 2010, 12(3): 20-25.

## A Study on Theory and Method in Debris Flow Risk Assessment

LIU Guangxu<sup>1,2</sup>, DAI Erfu<sup>1</sup>, WU Shaohong<sup>1</sup>, WU Wenxiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The frequent occurrences of debris flow disasters have caused great damage in some regions of China during recent years. Yet it is difficult to forecast such disasters accurately due to its big quantity in large area and sudden outbreak. Therefore it is especially urgent to pre-evaluate debris flow disaster risk. This paper reviewed the research on debris risk assessment in the past decades, including its conceptual constituents, hazard assessment and vulnerability evaluation. It was found that a tangible disaster risk assessment formula had been formed and debris flow hazard assessment methods had been successfully established. However, there were still some problems which need to be further explored, such as the mechanism analysis of the damage risk to hazard-bearing items, the effective transition from the point evaluation to the regional one, the neglected vulnerability research. Hence, it might be necessary to strengthen research in these aspects in the future, which might consequently enhance the reliability of the risk assessment results and improve its practicality.

**Key words:** debris flow risk; debris flow hazard; vulnerability of hazard-bearing items; risk assessment

本文引用格式:

刘光旭, 戴尔阜, 吴绍洪, 等. 泥石流灾害风险评估理论与方法研究. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 383-391.

## 胡启恒院士向林超地理博物馆捐赠馆藏品

2011年岁末,中国互联网协会理事长、中国工程院院士、乌克兰国家科学院外籍院士、国家信息化咨询专家、中国科学院原副院长、中国科协原副主席胡启恒以其本人和丈夫练元坚的名义将他们夫妇多年私藏集邮品2800余件捐赠给林超地理博物馆。中国地理学会张国友秘书长,林超地理博物馆建设工作组组长、中国科学院地理科学与资源研究所刘闯研究员共同接收了捐赠品。

胡启恒院士是国内外著名的自动化、信息化和互联网专家。她是新中国成立后最早留学国外的研究生,于1963年获得前苏联莫斯科化工机械学院研究生部工业过程自动化专业副博士学位。她从事手写数字识别自动化研究开始,研究了基于模式的信息分析和决策规则的归纳推断方法,领导建成了我国在模式识别领域的第一个国家重点实验室,发展了识别算法和邮码识别样机,成为我国模式识别与人工智能领域最早的探索者之一,并获1978年全国科学大会奖和中国科学院重大科技成果奖。1980-1982年在美国CWRU(Case Western Reserve University)大学电机与应用物理系任客座教授。曾担任中国科学院自动化研究所所长。1994年当选为中国工程院院士,1995年当选为乌克兰国家科学院外籍院士。在任中国科学院副院长期间,她致力于推进科技体制改革、互联网在中国的早期发展以及在相应领域中的国际交流与合作。曾担任中国科协副主席、中国计算机学会理事长、中国自动化学会理事长、国际科学理事会(ICSU)“科学的责任与伦理”委员会委员、联合国千年计划特别任务组“科技与创新”以及联合国互联网治理工作组(WGIG)成员等职务。胡启恒院士积极倡导开放的、有序的并与知识融合的互联网是信息时代生产力的理念,积极推动互联网开放知识环境建设工作。她作为团长率中国科协代表团出席世界信息峰会(突尼斯,2005);作为中国互联网协会理事长,她在各种场合、采取各种方式积极推动互联网的普及、广泛应用、治理和各类知识共享平台的建设,其中包括中国数字化图书馆、中国科技基础条件平台建设等。

练元坚先生(1934-2004)是胡启恒院士的同窗,二人同时在莫斯科留学。练元坚先生1957年毕业于前苏联莫斯科化工机械学院,从事化工通用机械技术的研究开发应用工作,1988年获研究员级高级工程师职称。20世纪80年代参加机械工业行业管理及科技管理工作。曾担任机械工业部通用机械局局长、基础产品司司长、科技质量监督司司长、机械工业部科学技术委员会副主任、国家机械工业局科学技术委员会副主任、中国机械工程学会副理事长、中国机械工业联合会专家委员会成员、机械工业先进制造技术研究中心专家等职务。发表了科技政策及科技体制、科技发展方针、表面工程技术等方面论文50余篇。练元坚、胡启恒夫妇几十年相辅相助,常常以“我的成功有我的一半也有你的一半”相互鼓励,相互帮助。练、胡夫妇助人为乐,给予多名归国科研人员事业上和生活上的帮助,刘闯研究员就是其中一名。他们踏实向上、严于律己,不谋私利、勇于奉献的科学家高尚品格也成为子女的好榜样。

林超地理博物馆(网络版)([www.geomuseum.cn](http://www.geomuseum.cn))是以已故北京大学林超教授名字命名,在国际地理联合会(IGU)和国际科学技术数据委员会(CODATA)联合支持下,由中国地理学会主办,北京大学等单位协办,中国地理学会环境遥感分会(中国科学院遥感应用研究所)计算机网络维护与运行的数字化地理博物馆。该博物馆将是展示林超等中国地理学老一辈地理学家对地理学的贡献以及国内外地理集邮艺术品的计算机网络地理知识开放平台。该博物馆于2011年10月正式启动。博物馆建立贡献者展厅(建设中)机制——一个人人可以从获取地理知识、人人可以为之贡献的机制。之前,著名国学大师、香港中文大学饶宗颐教授、中国科学院陆大道院士、中国地理学会刘燕华理事长、中科院地理资源所葛全胜副所长、国际宇航科学院副院长刘纪原院士等先后为博物馆题字,刘闯和在美国工作的儿子刘阳以及来自美国、日本、英国、法国、南非和中国等国家的专家先后向博物馆捐赠馆藏品。



练元坚、胡启恒夫妇于2001年金秋时节在家中合影



2006年北京邮票厂发行中国人民政治协商会议第十届全国委员会代表胡启恒院士邮品