

滑坡风险评价的理论与方法研究*

胡瑞林^① 范林峰^{①②} 王珊珊^{①②} 王立朝^③ 王学良^{①②}

(①中国科学院工程地质力学重点实验室 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(②中国科学院研究生院 北京 100049)

(③中国地质环境监测院 北京 100081)

摘要 作为防灾减灾的重要措施之一,滑坡风险评价已经成为近年来国际上滑坡研究的热点,并形成了较为完备的滑坡风险管理体系。国内的滑坡风险研究则起步较晚,滑坡风险评价的关键支撑技术体系尚未建立。本文对滑坡风险评价中的关键理论和方法进行梳理,阐述了国际滑坡风险评价的理论框架和技术流程,介绍了国内外滑坡易发性、危险性和风险评价的最新进展,评述了滑坡易发性评价、扩展范围预测、频率分析以及承灾体易损性评价的主要方法,阐明了现阶段滑坡风险评价的重点领域和前沿科学问题,并对滑坡灾害的风险评价提出了三点展望。

关键词 滑坡 风险 易发性 危险性 易损性 扩展范围 频率

中图分类号:P694 文献标识码:A

THEORY AND METHOD FOR LANDSLIDE RISK ASSESSMENT-CURRENT STATUS AND FUTURE DEVELOPMENT

HU Ruilin^① FAN Linfeng^{①②} WANG Shanshan^{①②} WANG Lichao^③ WANG Xueliang^{①②}

(①Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

(②Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(③China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081)

Abstract As one of the most promising tools for landslide hazard prevention and mitigation, risk assessment has been a hot research topic in recent years. A relatively complete international landslide risk management system has been proposed. However, the domestic research in this field is rather weak and the key support technology system for landslide risk assessment has not been established. This paper investigates the key theory and method for landslide risk assessment, describes the theoretical framework for landslide risk analysis and management and reviews the recent advances in landslide susceptibility, hazard and risk assessment. Then, different approaches for assessing landslide susceptibility, runout, frequency, vulnerability and risk are examined and compared. At the end, this paper illustrates the key areas and cutting-edge scientific issues for landslide risk assessment and three prospects in this area are proposed.

Key words Landslide, Risk, Susceptibility, Hazard, Vulnerability, Runout, Frequency

* 收稿日期: 2012-06-02; 收到修改稿日期: 2012-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金(41030750)和国家科技支撑计划课题(2008BAK50B04-3).

第一作者简介: 胡瑞林, 主要从事地质灾害与工程地质研究工作. Email: Hurl@mail.igcas.ac.cn

1 引言

滑坡灾害风险评价是滑坡灾害风险管理的基础性工作,是制定各项防灾减灾措施的重要依据。作为防灾减灾的有效途径之一,滑坡灾害风险评价已经成为滑坡研究的热点之一。国际上,美国、加拿大、澳大利亚、意大利、瑞士等国均出版了一系列与滑坡风险管理相关的研究计划、技术指南,甚至法规条例,且有不少基于风险的边坡管理和环境控制方面较为成功的应用实例^[1-5]。国内除香港^[6,7]以外的地区滑坡风险评价研究起步较晚,主要进展集中于近10a来所取得的成果,与国际上的风险评价水平有较大差距。因此,本文根据滑坡风险评价的不同层次,从基本理论和技术框架、常用评价方法及存在的问题等方面,对滑坡风险评价的关键问题进行研究,拟为我国的滑坡风险评价研究和实践提供参考借鉴。

2 滑坡风险评价的层次结构

根据 Varnes^[8]的定义,风险指的是一定区域在一定时间段内由于灾害发生可能导致的人员伤亡、

财产损失以及对经济活动的干扰。可由式(1)表示:

$$R = H \times V \times E = H \times C \quad (1)$$

式中, R (Risk)为风险; H (Hazard)为危险性,即一定区域在一定时间段内灾害发生的概率,包括空间概率和时间概率; E (Elements at risk)为承灾体,即某一地区内受灾害潜在影响的人口、建筑物、工程设施、公共事业设备、基础设施、经济活动、文化和环境等; V (Vulnerability)为易损性,即某种灾害以一定的强度发生而对承灾体所造成的损失程度; C (Consequence)为危害,即灾害可能导致的后果,一般用损失、破坏、人员伤亡来表示,是承灾体的价值与其易损性的乘积,即 $C = V \times E$ 。

风险的计算公式看似简单,实则十分复杂,每一项的展开都涉及到滑坡研究的众多方面。国内外众多学者从不同角度提出滑坡风险评价的理论框架和技术流程^[9-20]。其中, Van Westen^[19]提出的滑坡风险评价技术框架(图1)较完整地表达了滑坡风险评价的层次结构和技术环节,在实践中得到广泛应用。

滑坡灾害风险评估一般分为易发性评价、危险性评价和风险评价3个层次。

易发性评价相当于国外的敏感性评价(Suscep-

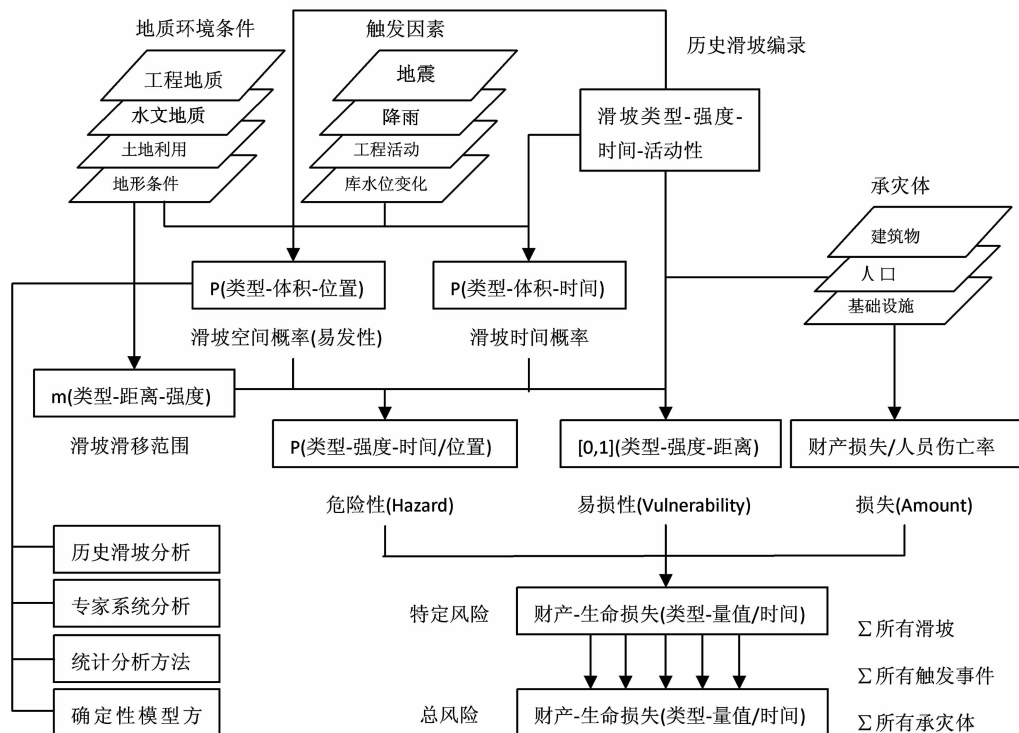


图1 滑坡风险分析技术流程^[19-22]

Fig. 1 Schematic diagram of landslide risk analysis^[19-22]

tibility assessment),重点分析一个地区滑坡已经发生的程度,强调基础地质环境条件和灾害分布的空间统计分析,是进行危险性和风险评价的基础。其核心内容包括:滑坡发育特征、空间密度、易发条件和潜在易发区预测评价。

危险性评价(Hazard assessment)是在易发性评价的基础上,对某一地区特定时间内现有或潜在滑坡的扩展和影响范围、发生的时间概率和强度进行评价。

风险评价(Risk assessment)主要评价滑坡对人口、物质财产、社会经济活动以及生态环境等产生的危害,分析这种危害的严重程度和概率大小,是评价体系的最终结果。主要包括:承灾体分布特征、时空概率和易损性评价。

滑坡灾害风险评价是易发性评价、危险性评价和风险评价的综合,是层层递进的分析决策过程。各阶段具有不同的评价目标和应用范围。在实际评价实践中,应结合评价对象和目的,综合考虑研究区的研究程度和基础数据的可获取性,合理选择评价模型。

3 滑坡风险评价的技术方法与流程

3.1 易发性评价

滑坡风险评价首先需要回答“什么地方易于发生地质灾害”的问题,即需要进行所谓的易发性评价,其评价结果可以用来表征滑坡发生的空间概率。

3.1.1 评价单元

评价单元的划分是滑坡易发性评价的关键步骤之一。在划分评价单元时,应保证每个单元内部条件的最大均一性和各单元间的最大差异性。Guzzetti F^[23]、兰恒星^[24]将目前滑坡风险评估中常用的评价单元分为以下4类:

3.1.1.1 格网单元

格网单元划分方法将整个研究区划分为预定大小的规则多边形单元。由于格网单元对应于GIS中的栅格数据结构,因此在进行空间分析时,计算机实现起来十分简单快捷。主要缺点是网格单元与各种滑坡诱发因子(如地质、地形等)之间的相关性较差。

3.1.1.2 地域单元

地域单元以不同的地质单元、地形单元之间的分界线作为评价单元的边界。地域单元利于分析斜坡破坏与地形地貌之间的关系,但是其划分很大程

度上取决于研究者的主观分析,带有很大的主观性。

3.1.1.3 均一条件单元

将每个滑坡影响因子作为一个单独的图层,按一定规则将其划分为几个显著的类别,可称为均一条件单元。这种评价单元主要用于双变量统计分析模型中,用来比较各影响因子对滑坡作用的大小。均一条件单元的数目和大小取决于评价过程中所选取的影响因子的数目和单因子划分的标准。

3.1.1.4 子流域单元和斜坡单元

子流域单元以地形特征线(如脊线和谷线)和水系路径等作为单元界线,可由DEM提取而来。子流域单元可进一步划分为斜坡单元。由于滑坡与山区的地形单元存在较为明确的物理关系,因此,斜坡单元通常被视为研究滑坡易发性的理想单元。

3.1.2 评价模型

3.1.2.1 主观推断分析

主观推断分析法指根据专家判断评价滑坡的易发性,包括地形分析和因子指标叠加2种方法。

地形地质分析中,专家根据地形地质特征,通过类比分析判断,直接对研究区进行评价。这种方法严重依赖于专家经验,不同专家得到的评价结果可能有较大差异。因子指标叠加法按滑坡诱发因子的重要性对其进行分级并赋予权重,进而对各个因子进行加权叠加,根据叠加结果将研究区划分为不同的易发性级别。因子指标分析法操作简单,易于实现,其难点在于因子指标的选取和权重的确定。

3.1.2.2 统计分析模型

统计分析模型主要分析各滑坡影响因子与滑坡分布的统计关系,在此基础上进行评价滑坡的易发性。现有的统计分析模型主要包括双变量统计分析和多变量统计分析。双变量统计分析模型首先选择控制滑坡稳定性的关键因子,作出相应的指标图,将每一个指标图与滑坡分布图进行叠加分析,根据一定的统计指标确定权重,再将所有指标图进行叠加分析,得到易发性分析结果。国内广泛使用的信息量模型、证据权模型和确定性系数方法等本质上都属于双变量统计方法。多变量统计分析模型利用多元统计方法分析滑坡影响因子与滑坡分布之间的函数关系,包括判别分析,线性回归和逻辑回归等。

由于统计分析模型基于数理统计技术,很大程度上保证了易发性分区的客观性。但是此类方法受数据质量的严重制约,滑坡编录不完整、数据精度不够都将对评价结果产生重要影响。另外,对某些描述性影响因素如岩性、土地利用类型、植被覆盖等的

量化存在较大的主观性。

3.1.2.3 确定性模型

确定性模型以滑坡失稳的物理机制为基础,通过计算滑坡稳定性系数或分析其应力应变状态,确定滑坡的易发程度。确定性模型的优势在于其可以对滑坡的发生机理进行深入研究。但是,这种方法需要标准的土力学参数输入,如斜坡几何形态、岩土体强度、孔隙水压力等。确定性模型评价结果的准确性和可靠性依赖于研究区工作的详细程度及参数的获取情况。因此,这种方法比较适用于小范围的详细研究。

3.1.2.4 其他

除了上述3种模型外,很多其他理论和方法也被引入滑坡的危险性评价中,如神经网络、模糊数学、灰色系统、粗糙集、可拓学、元胞自动机和支持向量机等,这些理论和方法都为滑坡的易发性评价提供了新的途径。

滑坡易发性评价单元和模型的选择取决于多种因素,如研究目的、尺度、滑坡类型、已有数据的类型和精度以及采用的分析工具等^[25~27]。在实际工作中,应当根据研究区的具体情况和收集到的数据,进行合理选择,也可同时采用多种单元和模型进行对比研究,确定合适的评价模型。

3.2 危险性评价

危险性评价是在易发性评价的基础上,对某一地区一定时间内现有或潜在滑坡灾害的扩展和影响范围、发生频率或时间概率以及滑坡灾害强度进行评价。

3.2.1 Runout 预测

Runout 是对滑坡变形、失稳特征的简称,其基本问题是滑坡运移距离、运动速度、堆积厚度等。滑坡体 runout 行为与滑坡发生和运移机制、坡体特征、滑坡体运移路径等因素有关。目前,滑坡 runout 预测的主要方法有经验模型法、简化分析法、数值模拟法^[28,29]。

3.2.1.1 经验模型法

经验模型法通过对滑坡的几何特征(如坡高、滑距、体积等)的统计分析,确定滑坡 runout 特征的经验公式和统计预测模型。其中,最为典型的是由 Corominas J^[30] 提出的滑坡接触角模型。

滑坡接触角的定义为滑坡源区与最远运移块体的连线与水平线的夹角(图2),且 $\tan\alpha = H/L$ 。大量研究^[30~33]发现滑坡接触角与滑坡体积存在如式

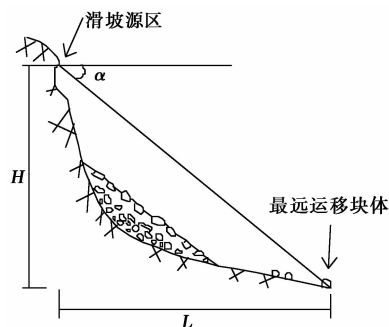


图2 滑坡接触角示意图

Fig. 2 Graph of angle of reach

(2)所示的关系:

$$\lg \tan \alpha = A + B \lg V \quad (2)$$

式中, α 为滑坡接触角($^{\circ}$); V 为滑坡体体积(10^3 m^3); A 、 B 为常数。

经验模型通常比较简单,易于运用,模型所需要的数据也比较容易获得。但经验模型只能对滑坡的运移路径进行简单的预测,且模型的预测结果与实际测量结果有时并不能很好吻合。另外,由于不同研究区的地质环境存在差异,模型的通用性较差。

3.2.1.2 简化解析法

解析法通过求解滑体滑动过程中的物理控制方程(如质量守恒、能量守恒等)确定滑坡体的 runout 特征。

滑动摩擦模型^[34~37]是比较常见的简化解析法,它将滑体视为质点,认为滑坡运动过程中的动能消耗于滑道上克服摩擦力所做的功,见式(3)。

$$\frac{1}{2} \frac{dv^2}{ds} = g(\sin\theta - \tan\phi_b \cos\theta) \quad (3)$$

$$\tan\phi_b = (1-r_u) \tan\phi$$

式中, v 为滑动速度; s 为滑距; θ 为坡角; ϕ_b 为滑体与基底接触面的有效摩擦角; ϕ 为滑体与基底接触面的视摩擦角; g 为重力加速度; r_u 为孔隙水压力系数。

上述解析模型将滑坡体视作一个质点,在模型的构建过程中没有考虑滑体的体积,且计算参数的选取对预测结果的准确性存在重要影响。在实际工作中,只有在充分理解滑坡机制的基础上,利用试验手段或对已有滑坡进行反分析,才能选取合适的计算参数。

3.2.1.3 数值模拟法

数值模拟法通过对滑坡发生和运移的一系列控制方程(如应力平衡方程、应变协调方程、岩土体本构关系、边界条件等)进行数值求解,确定滑坡发生

的速度、位移、应力、应变等物理量。

目前使用的数值计算方法主要有基于连续介质的应力应变分析方法和基于非连续介质的应力应变分析方法。其中基于连续介质分析方法的主要包括有限元法(FEM)和快速 Lagrangian (FLAC)分析法;基于非连续介质分析方法的主要有离散元法(DEM)、不连续变形分析法(DDA)、流形元法(MEM)和界面元法等。

数值模拟方法能对滑坡的发生机理和运移过程做出详细的分析,但是需要建立正确的控制方程,并通过现场或室内试验确定计算所需要的参数。因此,数值模拟法是进行单体滑坡 runout 预测的主要手段。

从上述分析中可以看出,经验模型法是基于经验的统计分析模型,忽略了滑坡发生和运移的物理力学机理。简化解析法虽然建立在比较严格的推理分析基础上,但是不可避免的引入了许多人为的假设,针对不同的斜坡变形破坏机制,这些假设的合理性还有待进一步检验。数值模拟法本质上是对滑坡变形破坏的控制方程的数值求解,但在材料本构模型和力学参数的选取方面仍存在较大的主观性。在实际工作中,可针对具体的研究目的和精度要求,对比分析采用不同的评价方法获得的评价结果,选择合适的评价模型。

3.2.2 滑坡发生的频率或时间概率

滑坡危险性评价的另一关键问题是确定一定时间内滑坡灾害发生的时间概率或频率。由于遭受滑坡发生频率低,一个可能遭受大型滑坡的地区可能会被划分为低危险性。相反,即使一个地区只会发生小规模滑坡,但是发生频率很高,这个地区也可能被视为高危险区。

3.2.2.1 滑坡发生频率或概率的表征^[38]

严格意义上的滑坡发生频率是指研究区给定时间内(通常指 1a)发生的滑坡数量。古滑坡的复活或活动性滑坡的突然加速运动也可以看作一次滑坡事件,评价时应予以考虑。对于区域群发性滑坡事件的发生频率,可以用研究区给定时间内单位面积或长度上发生的滑坡数目或面积(即滑坡点密度或面密度)表示,也可通过与诱发因素的相关分析,根据诱发因素的年超越概率来确定。另外,滑坡堆积体的厚度、后缘裂缝的扩展等信息也可用来表征滑坡的发生频率。

3.2.2.2 滑坡发生概率或频率的确定方法

(1) 滑坡的 M-F 关系。通过对历史滑坡的统

计分析,确定研究区内一定时间段内特定规模滑坡发生的频率,即建立所谓的滑坡 M-F 关系(即 Magnitude-Frequency 关系、规模-频率关系),是目前较为常用的确定滑坡发生频率的方法。研究^[38-42]发现,滑坡的规模和频率呈现指数关系,见式(4)(图3)。

$$N_E = CA_L^{-\beta} \quad (4)$$

式中, N_E 为规模大于等于 A 的滑坡数目; A_L 为滑坡规模(通常用滑坡的体积或面积表征); C 、 β 为常数

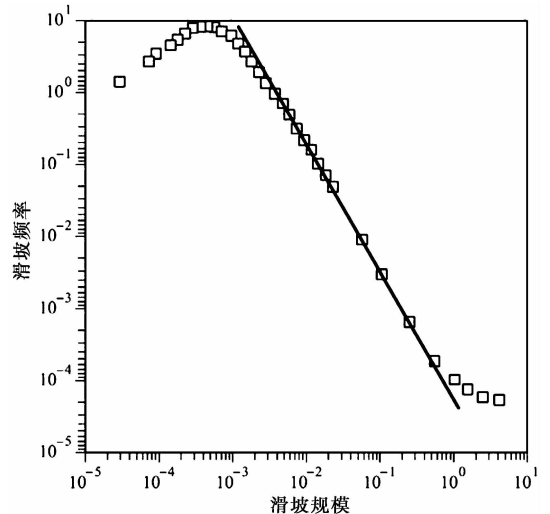


图3 典型的滑坡 M-F 关系^[38]

Fig. 3 Typical plot of landslides M-F relationship^[38]

(2) 滑坡与诱发因素的相关分析法。滑坡通常是由一定的诱发因素诱变形成的,如降雨、地震等。相关分析法假定滑坡发生频率等同于诱发因素的重现周期。如对于降雨性滑坡,可首先根据滑坡诱发机制确定诱发滑坡的降雨判据,如降雨量、降雨强度、降雨持续时间等,再通过确定临界降雨特征的重现周期,确定滑坡发生频率^[43-45]。

(3) 确定性方法。上述2种方法均建立在历史滑坡编录资料的基础上,确定性方法则直接对现有的滑坡或潜在滑坡进行分析,确定其失稳概率。

动态分析模型被认为是确定滑坡失稳概率最理想的方法^[38]。例如对降雨型滑坡,可以通过建立滑坡的水文-斜坡耦合模型,模拟降雨对滑坡区水文环境的影响,分析滑坡对降雨事件的响应,确定滑坡的失稳概率。

斜坡的可靠度分析考虑了影响斜坡稳定性的各种土力学参数(如土体的内摩擦角和黏聚力等)及环境因素(如降雨、地下水位、地震等)的不确定性,

借助 FSOM、蒙特-卡洛模拟等方法,用滑坡的破坏概率来表示其稳定性。

确定性方法可以确定斜坡失稳机制,模拟斜坡失稳的动态过程。但是确定性方法要求具有高质量的数据,需要对研究区的滑坡做详细调查,通过试验或反分析等手段确定合适的计算参数,比较适用于大比例尺的滑坡危险性评价。

(4)其他^[38,21]。除了以上方法外,还有多种方法可以确定滑坡发生的频率或概率,如通过对比分析多年的遥感影像数据,定每年新生的滑坡数量,进而确定滑坡的发生频率;通过分析滑坡地貌特征,如地裂缝、新鲜滑壁、建筑物变形等,推断滑坡活动期次;通过对古老滑坡堆积物定年,确定大规模滑坡的重现周期。

3.2.3 滑坡灾害强度

滑坡风险不仅与滑坡易滑条件和发生频率有关,还受到滑坡规模和破坏力的影响。滑坡灾害强度即为描述滑坡破坏性的指标。

单体滑坡的强度与滑坡发生过程中释放的能量、滑动速度、运移距离、活动滑体及堆积物厚度等因素有关。滑坡体积与速度的乘积可以较好地表征单体滑坡的强度^[46]。实际应用中,由于滑坡速度不易测定,一般用体积大小划分规模等级。

对于区域群发性滑坡,Crozier M^[47]提出,可以用滑坡的数量、频率、体积、点密度、面密度、速度和距离等表征。吴树仁等^[48]从滑坡灾害强度的基本物理含义出发,认为区域性群发滑坡灾害活动强度应为活动频率、规模和速度的乘积。但群发性滑坡的体积和速度不易快速测定,所以改用滑坡面密度来表征区域群发性滑坡灾害的强度。

3.3 风险评价

滑坡风险评价不仅需要考察滑坡的自然属性,也包括对其社会属性的分析评价,即需要对滑坡可能造成的危害进行分析。危害分析主要包括承灾体识别、价值估算、时空概率的确定以及易损性评价。

3.3.1 承灾体的种类和时空概率

承灾体是区域内受灾害潜在影响的人口、建筑物、工程设施、公共事业设备、基础设施、经济活动、文化、环境等要素。由于对经济活动、文化、环境的损失评价难度比较大,目前的滑坡风险评价中一般只考虑滑坡灾害对人口、建筑物、工程设施、公共事业设备、基础设施等造成的损失,且仅考虑滑坡造成的直接损失(如人员伤亡、建筑物损坏等),而不考

虑间接损失(如灾害对人们的心理造成的创伤)。

滑坡危及承灾体的时空概率分为空间概率和时间概率。空间概率可通过对危险性区划图和承灾体分布图进行叠加分析确定,难点在于时间概率的确定。对于静态承灾体,若在滑坡影响范围内,则可认为其遭受损失的时间概率是1。对于动态承灾体,则需进一步确定滑坡危及承灾体的时间概率,如对于交通工具,其时间概率是1a在滑坡影响范围内通行的时间总和;对于建筑物中的人员,其时间概率就是1a内这些人员待在建筑物中的时间^[19]。

3.3.2 承灾体的易损性评价

3.3.2.1 易损性的定义

在自然科学领域,承灾体的易损性通常指的是承灾体的物理易损性^[49~51]。根据 Varnes^[8]的定义,易损性指的是某种灾害现象以一定的强度发生而对受威胁对象所造成的损失程度。用0(没有损失)和1(完全损失)之间的数字来表征。这一定义强调了承灾体与灾害的相互作用,是目前地质灾害的风险评价中普遍采用的易损性定义。但是,也有学者认为承灾体的易损性与其自身的自然性质、物质成分、结构、制作工艺过程及防护程度等有关^[52],或认为易损性是承灾体遭受地质灾害破坏机会的多少与受到伤害或损伤的难易程度,表示承灾体对灾害活动的敏感程度与承受能力^[53]。本文提及的易损性在没有说明的情况下指的 Varnes 所定义的物理易损性。

3.3.2.2 易损性的评价方法

承灾体的易损性是目前滑坡灾害风险评价中较为困难的一个环节。由于影响易损性的因素较为复杂、历史滑坡灾害损失数据缺失等原因,至今难以获得较为客观和普适的滑坡规模与损失情况的对应关系。目前常见的易损性评价方法主要有以下几种:

(1)历史资料反演法。历史资料反演法通过分析统计历史地质灾害资料,得出不同承灾体对于滑坡灾害的价值破坏损失响应曲线,通常称之为V-I曲线(即Vulnerability-Intensity曲线、易损性-灾害强度曲线)^[51]。应用易损性曲线进行承灾体易损性分析的最大障碍在于承灾体对不同类型和规模的滑坡历史灾害编录数据的缺乏。

(2)综合评判法。综合评判法认为承灾体的易损性可以用一定的指标(如承灾体的特征、类型、分布位置,滑坡的机制、位移、体积、运动速度、释放的能量等)表征。这种方法首先筛选出易损性指标,建立易损性评价矩阵^[54],或利用数学模型(如加权

叠加法、模糊综合评判法、灰色聚类综合评价法、物元模型等)确定承灾体的综合易损性。综合评判法不受历史灾害损失编录数据的影响,评价结果更为客观,其主要难点在于易损性矩阵的具体值不易确定。

(3)模型试验或数值模拟法。模型试验和数值模拟法通过模拟承灾体与灾害的作用过程,阐明承灾体对灾害的响应机制,进而得出承灾体针对不同灾害种类的易损性特征。

3.3.3 风险评价方法

滑坡风险评价的方法模型可以分为定量评价和定性评价2类。通常,在大比例尺的风险评价工作中,基础数据资料(如滑坡数据、诱发因素数据、承灾体损失信息等)较为全面时,可采用定量的评价方法。而在区域的滑坡风险评价中,通常很难对单个滑坡进行详细的分析,多采用定性的评价方法,评价结果多用于区域土地利用规划。在实际工作中,可根据评价精度要求和研究区资料的翔实情况,选择合适的评价模型。

3.3.3.1 定量方法

滑坡风险的定量评价可以直接由风险计算公式计算,也可以由风险曲线进行估算。下面分别介绍这2种方法。

(1)风险计算公式^[55]。滑坡对财产和人口的风险可以按式(5)进行定量计算:

对于财产损失,

$$R(PD) = P(H) \times P(S|H) \times V(P|S) \times E \quad (5)$$

式中, $R(PD)$ 指滑坡造成的风险(即每年财产损失的价值); $P(H)$ 指每年滑坡事件发生的概率; $P(S|H)$ 指滑坡事件的空间影响概率; $V(P|S)$ 指财产的易损性; E 指风险因素(如财产)。

对于人员伤亡,相应的表达式是:

$$R(DI) = P(H) \times P(S|H) \times P(T|S) \times V(L|T) \quad (6)$$

式中, $R(DI)$ 指风险概率(即每年的个体生命死亡概率); $P(H)$ 指每年滑坡事件发生的概率; $P(S|H)$ 指滑坡事件的空间影响概率; $P(T|S)$ 指对于空间影响的时间影响概率; $V(L|T)$ 指人口的易损性。

(2)风险曲线^[19]。风险曲线通过建立滑坡灾害损失与滑坡概率的关系实现风险的量化。其横坐标是研究区一定时间内一定规模或强度的滑坡的发生概率,纵坐标是滑坡危害,可由承灾体价值与易损性相乘得到,曲线下的面积即为研究区在一定时间内的滑坡风险。

3.3.3.2 定性方法

定性风险评价方法通过建立风险等级与危害、危险性之间的对应关系,确定滑坡灾害的风险。风险评价矩阵(图4)是最常见的定性风险评价方法。

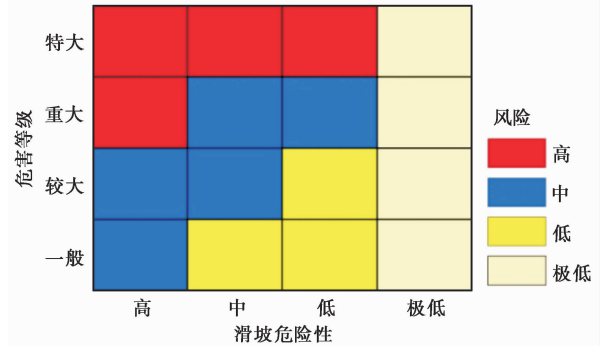


图4 滑坡风险定性评价矩阵

Fig. 4 Qualitative assessment matrix of landslide risk

4 展望

4.1 评价结果的检验

基础数据的获取存在难度且精度不同、评价单元与模型自身的局限性以及对滑坡发生和运移机制的理解不充分,使得滑坡风险评价结果存在较大不确定性^[56]。因此,对评价结果进行有效性检验是十分必要的。目前对滑坡风险的检验通常仅限于对易发性预测结果的检验,检验方法也比较单一^[57, 58]。如何对评价结果进行有效性检验是目前滑坡风险评价研究的难点之一。

4.2 动态风险评价

滑坡的风险评价不是一个静态的概念,而是一个动态的过程。由于气候条件和土地利用类型的变化和人类工程活动,滑坡发生的基础地质条件和诱发因素也会相应发生改变。社会经济条件的改变和人类自身对地质灾害的调整也会使得承灾体的种类和易损性不断变化。如何分析评价这种动态的风险,也是如今滑坡灾害风险评价面临的挑战之一。

4.3 灾害链效应

目前对滑坡的风险评价主要集中在滑坡单灾种的风险评价,忽略了滑坡的灾害链效应。以汶川地震灾区为例,地震引发了大量的滑坡、泥石流,若这些滑体冲入河道则有可能阻塞河道,形成堰塞体,并在上游形成堰塞湖。当这些堰塞湖扩展到一定规

模,则会对堰塞体的稳定性产生威胁。堰塞体的溃决又可能进一步引发下游的洪涝灾害。在这一过程中,地震、滑坡、泥石流、洪水等地质灾害相互联系相互作用,传统的单灾种风险评价已经不能有效评价这种灾害链效应可能产生的危害。对于这种灾害链的风险研究应当成为今后学术界关注的重点。

参 考 文 献

- [1] Fell R. Landslide risk management concepts and guidelines-Australian Geomechanics Society Sub-Committee on Landslide Risk Management. International Union of Geological Sciences, 2000, 51~93.
- [2] Spiker EC, Gori P. National Landslide Hazards Mitigation Strategy, A Framework for Loss Reduction. US Geological Survey, 2003.
- [3] Lateltin O, Haemmig C, Raetzo H, et al. Landslide risk management in Switzerland. *Landslides*, 2005, 2(4): 313~320.
- [4] Leroi E, Bonnard C, Fell R, et al. Risk assessment and management. *Landslide Risk Management*, 2005, 159~198.
- [5] Crozier MJ, Glade T. Landslide hazard and risk: Issues, concepts and approach. *Landslide Hazard and Risk*, Wiley, West Sussex, 2006, 1~40.
- [6] Geotechnical Engineering Office(GEO). Geotechnical Manual for Slopes (2nd Edition, 4th reprint). Hong Kong: Government of Hong Kong Publication, 2000.
- [7] Geotechnical Engineering Office(GEO). Geoguide 5: Guide to Slope Maintenance (3rd Edition). Hong Kong: Government of Hong Kong Publication, 2003.
- [8] Varnes DJ. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles Aand Practice. Paris; UNESCO, 1984.
- [9] 张梁. 地质灾害风险评价理论与方法[J]. 中国地质矿产经济, 1996, (4): 40~45.
Zhang Liang. The theory and method for disaster risk evaluation in geological prospecting. *China Geology & Mining Economics*, 1996, (4): 40~45.
- [10] 张业成, 张梁. 论地质灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 1~6.
Zhang Yecheng, Zhang Liang. On risk evaluation of geological hazards. *Journal of Geological Hazard and Environmental Preservation*, 1996, 7(3): 1~6.
- [11] Aleotti P, Chowdhury R. Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999, 58(1): 21~44.
- [12] 向喜琼, 黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 38~41.
Xiang Xiqiong, Huang Runqiu. Risk assessment and risk management for slope geohazards. *Journal of Geological Hazard and Environmental Preservation*, 2000, 11(1): 38~41.
- [13] 张梁, 张建军. 地质灾害风险区划理论与方法[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(4): 323~328.
Zhang Liang, Zhang Jianjun. The theory and method of risk zonation of geo-hazard. *Journal of Geological Hazard and Environmental Preservation*, 2000, 11(4): 323~328.
- [14] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 279~284.
Yin Kunlong, Zhu Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of GIS. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 279~284.
- [15] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 96~102.
Zhang Chunshan, Wu Manlu, Zhang Yecheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 96~102.
- [16] 刘传正, 李铁锋, 程凌鹏, 等. 区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法[J]. 水文地质工程地质, 2004, (4): 1~8.
Liu Chuazheng, Li Tiefeng, Cheng Lingpeng, et al. A method to analyze four parameters for assessment and early warning on the regional geo-hazards. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, (4): 1~8.
- [17] 马寅生, 张业成, 张春山, 等. 地质灾害风险评价的理论与方法[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 7~18.
Ma Yinsheng, Zhang Yecheng, Zhang Chunshan, et al. Theory and approaches to the risk evaluation of geological hazards. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10(1): 7~18.
- [18] Cascini L, Bonnard C, Corominas J, et al. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. *Landslide Risk Management Taylor and Francis*, London, 2005, 199~235.
- [19] Van Westen C J, Asch TWJ, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2005, 65(2): 167~184.
- [20] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995~1005.
Wu Shuren, Shi Jusong, Zhang Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995~1005.
- [21] 王涛, 吴树仁, 石菊松. 国际滑坡风险评估与管理指南研究综述[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1006~1019.
Wang Tao, Wu Shuren, Shi Jusong. A review of international landslide risk assessment and management guidelines. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 1006~1019.
- [22] 石菊松. 基于遥感和地理信息系统的滑坡风险评估关键技术研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
Shi Jusong. Key Techniques Study of Remote Sensing and Geographic Information System Based Landslide Risk Assessment. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2008.
- [23] 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): 181~216.
- [24] 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 地理信息系统支持下的滑坡灾害分析模型研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 421~427.
Lan Hengxing, Wang Lingjuan, Zhou Chenghu. Study on GIS-aided model for analysis of landslide hazard. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4): 421~427.
- [25] Van Westen CJ, Castellanos E, Kuriakose SL. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment;

- An overview. *Engineering Geology*, 2008, **102**(3~4): 112~131.
- [26] 张茂省, 唐亚明. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. 地质通报, 2008, **27**(8): 1205~1216.
Zhang Maosheng, Tang Yaming. Risk investigation method and practice of geohazards. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(8): 1205~1216.
- [27] 石菊松, 石玲, 吴树仁, 等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 2009, **28**(8): 1020~1030.
Shi Jusong, Shi Ling, Wu Shuren, et al. Difficulties and countermeasures in the practice of landslide risk assessment. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(8): 1020~1030.
- [28] Dai F, Lee C, Ngai Y. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology*, 2002, **64**(1): 65~87.
- [29] Hungr O, Corominas J, Eberhardt E. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslide Risk Management*, 2005, 99~128.
- [30] Corominas J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**(2): 260~271.
- [31] Scheidegger AE. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1973, **5**(4): 231~236.
- [32] Tianchi L. A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1983, **27**(4): 473~482.
- [33] Nicoletti PG, Sorriso-Valvo M. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, **103**(10): 1365~1373.
- [34] Heim A. *Bergsturz und Menschenleben*: Fretz & Wasmuth, 1932.
- [35] Hutchinson J. A sliding-consolidation model for flow slides. *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, **23**(2): 115~126.
- [36] Sassa K, Wang G, Fukuoka H, et al. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas. *Landslides*, 2004, **1**(3): 221~235.
- [37] Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen; L'Espacement des Râteliers de Retenue de la Neige: W. Jeger & A. Ostertag, 1955.
- [38] Corominas J, Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 2008, **102**(3~4): 193~213.
- [39] Dai F, Lee C. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 2001, **59**(3): 253~266.
- [40] Guzzetti F, Malamud B D, Turcotte D L, et al. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **195**(3): 169~183.
- [41] Malamud BD, Turcotte DL, Guzzetti F, et al. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, **29**(6): 687~711.
- [42] Picarelli L, Oboni F, Evans S, et al. Hazard characterization and quantification. *Landslide Risk Management*, 2005, 27~62.
- [43] Hungr O, Evans S, Hazzard J. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(2): 224~238.
- [44] Stark CP, Hovius N. The characterization of landslide size distributions. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(6): 1091~1094.
- [45] Caine N. the rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler Series a Physical Geography*, 1980, 23~27.
- [46] Hungr O. Some methods of landslide hazard intensity mapping. *Landslide risk assessment Balkema*, Rotterdam, 1997, 215~226.
- [47] Crozier M. Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: Hazard management issues. *Landslides*, 2005, **2**(4): 247~256.
- [48] 吴树仁, 石菊松, 王涛, 等. 地质灾害活动强度评估的原理、方法和实例[J]. 地质通报, 2009, **28**(8): 1127~1137.
Wu Shuren, Shi Jusong, Wang Tao, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(8): 1127~1137.
- [49] Glade T. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Erde*, 2003, **134**(2): 123~146.
- [50] Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 2007, **7**(1): 20~31.
- [51] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, **7**: 495~506.
- [52] Kappes MS, Papatoma-Köhle M, Keiler M. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 2012, **32**(2): 577~590.
- [53] Deyle RE, French SP, Olshansky RB, et al. Hazard assessment: The factual basis for planning and mitigation. Cooperating with nature: Confronting natural hazards and land use planning for sustainable communities, 1998, 119~166.
- [54] Leone F, Asté J, Leroi E. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception. *Landslides-Glissements de Terrain Balkema*, Rotterdam; 1996, 263~270.
- [55] Morgenstern N. Toward landslide risk assessment in practice. *Landslide Risk Assessment Balkema*, Rotterdam, 1997, 15~23.
- [56] Carrara A. *Uncertainty in Evaluating Landslide Hazard and Risk*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993, 101~109.
- [57] Guzzetti F, Reichenbach P, Arzozzone F, et al. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 2006, **81**(1~2): 166~184.
- [58] Chung C,J,F, Fabbri AG. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 2003, **30**(3): 451~472.