

·地质灾害风险评估技术方法·

地质灾害风险评估技术指南初论

吴树仁, 石菊松, 张春山, 王 涛

WU Shu-ren, SHI Ju-song, ZHANG Chun-shan, WANG Tao

国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室/中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources/

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要: 为了分析阐明突发地质灾害风险评估领域的一些热点问题, 在概要地分析地质灾害风险评估技术指南编写的目的、基本原则和结构层次、核心内容的基础上, 重点探索了地质灾害易发程度、危险性和风险评估的工作流程。初步提出地质灾害风险评估应该遵循的 6 条基本原则、结构层次及核心内容; 初步提出定性分析-定量评价相结合的地质灾害风险评估技术方法, 提倡实用性技术方法和 GIS 技术的推广应用; 初步提出地质灾害易发性、危险性和风险评估区划的基本工作流程。最后, 简要地讨论了地质灾害风险评估的一些主要难点和易于混淆的问题, 为地质灾害风险评估技术指南的编制和修改完善提供参考依据。

关键词: 地质灾害; 易发性; 危险性; 风险

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2009)08-0995-11

Wu S R, Shi J S, Zhang C S, Wang T. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8):995-1005

Abstract: In order to analyze and clarify some key issues in the field of sudden geo-hazard risk assessment, on the basis of general analysis of purposes, basic principles, structure and core contents of the technical guideline for geo-hazard risk assessment, this paper has focused on the working process of risk, probability and possible consequence assessment. Six basic principles, structure and core contents which should be followed are put forward; qualitative analysis with combination of quantitative evaluation method and techniques are achieved with emphasis on practical techniques and GIS application; basic working process of risk, probability and possible consequence geo-hazard assessment are put forward. Lastly, there are some brief discussions on some of the major difficulties which are easy to be confused in terms of geo-hazard risk assessment, which can be referred to for the technical guideline revision and improvement.

Key words: geo-hazard; probability; fatallness; risk

地质灾害(这里主要指崩塌、滑坡、泥石流, 相当于国际上广义的滑坡) 风险评估与管理在国际上越来越流行、越来越普及, 已经成为国际减灾防灾战略的重要成分^[1-2], 特别是进入 21 世纪以来, 国际上滑坡风险管理的推广应用成为热点, 每年至少召开一次相关的国际专题讨论会和推广培训会议, 积极宣传讨论滑坡风险评估与管理的成熟经验、技术方法和热点问题^[3-6]。尽管在实施地质灾害风险

评估与管理过程中还有很多难点问题和困惑, 但是世界上许多学者都在努力研究探索, 不断改进完善这个过程^[2, 7-14], 其中不断改进完善滑坡风险评估指南是主要途径之一。目前, 国际上滑坡风险评估指南已经出版了 3~4 版(代)^[11, 14-15], 国内相关研究也早有开展, 在地质灾害风险评估与管理方法的系统研究方面也有大量探索研究^[16-21], 但是至今国内没有正式出版地质灾害风险评估技术指南。因此, 本文在分

收稿日期: 2009-05-20; 修订日期: 2009-06-02

地调项目: 国家“十一五”科技支撑课题(编号: 2006BAC04B05)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2008CB425803)和中国地质调查局项目(编号: 1212010640401)资助

作者简介: 吴树仁(1956-), 男, 博士, 研究员, 从事工程地质和地质灾害研究。E-mail: shrwu@sohu.com

析总结近年来大家潜心研究的基础上,从地质灾害风险评估的目的、基本原则、结构层次、主要内容、易发程度、危险性和风险评估定性-量化工作流程等方面,初步总结了如何编写突发地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流)风险评估技术指南,试图为国内地质灾害风险评估技术指南正式编辑出版提供基础。

1 地质灾害风险评估技术指南研究的目的与基本原则

1.1 地质灾害风险评估指南研究的目的

地质灾害风险评估是在地质灾害空间预测评价的基础上综合考虑人员、社会经济要素和抗灾能力的综合预测评价,不仅需要评价时间概率,还需要进行空间预测。多年来,这个领域中的很多术语概念、结构层次和工作流程比较模糊,特别是在与国际接轨又适合中国大陆实际情况方面还有差距。因此,多年来致力于研究编写地质灾害风险评估技术指南,主要是为了阐明突发地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流)风险评估与管理的指导性原则,促进地质灾害风险评估有关术语概念、技术方法、主要内容和结构层次向更规范、更国际化和更适用于中国实际情况的方向发展。

1.2 地质灾害风险评估的基本原则

(1)地质灾害风险评估通常基于3种假设^[22-23]

①过去对未来有一定的指示作用,因此过去曾经发生过地质灾害的地区未来也有可能发生地质灾害,即基于历史和现实资料预测未来地质灾害的发展趋势和过程。

②具有与曾经发生地质灾害地区相似的地形、地质及地貌因素的地区未来也有可能发生地质灾害。在实际应用过程中,这种假设一般是合理的,但是也应该注意到可能存在一些例外的情况,如地质历史时期形成的古、老滑坡不仅使斜坡地形地貌发生了变化,而且滑坡形成时的不良条件组合亦不再具备。

③导致地质灾害发生的基本要素能够有效识别。风险的构成要素能够有效识别、表达或量化,风险评估中的易发程度、危险性和风险都可以用定性方法与定量方法来表征和描述。

(2)地质灾害风险评估工作精度的分级原则

地质灾害风险评估工作精度分级是进行规范化和程序化研究的重要步骤,有利于不同学者在同一

地区进行风险评估工作的对比分析。长期以来,在地质灾害预测评价和风险评估方面,国内对于资料的质量和精度分析比较少,大多强调技术方法的改进。实际上,基础资料、数据的质量和精度直接影响预测评价的结果。因此,对基础资料数据和工作精度进行质量分级,有利于风险评估精度的提高和成果的推广应用。参考国际上同行的经验,结合国内目前的实际情况及有关的研究基础,初步将资料数据准备和评价工作的精度等级分为3级:即初(等)级、中等、高等(详细)精度。

初级工作精度:风险评估的所有资料、信息主要来源于室内收集分析、遥感解译和野外现场线路考察编录,没有进行按比例尺的地质灾害野外现场调查编录;重点关注地质灾害点和点密度相关的资料信息;评估方法采用定性分析、统计分析和简单模型计算评估。

中等工作精度:风险评估的所有资料、信息主要来源于室内收集分析、遥感解译和野外按比例尺调查编录,只是地质灾害调查为草测或简测;重点关注地质灾害形态和面密度方面的相关资料信息;评估方法采用定性分析、统计分析和简单的专家系统或层次分析评估。

高等工作精度:风险评估的所有资料、信息主要来源于室内收集分析、遥感解译和野外按比例尺进行地质灾害正测调查编录,并配合必要的工程勘查、岩土取样测试分析和量化模拟计算,典型的滑坡位移仿真模拟计算。需要关注地质灾害的体积、速度、位移、强度、概率方面的系统资料和信息;评估方法采用定性分析、统计分析和基于GIS量化空间分析模型评价。

(3)地质灾害风险评估结果的分级原则

地质灾害风险评估结果与制图的等级不宜划分得太细。为了便于统一和对比,建议不同层次的评价(易发程度、危险性、风险)与工作精度分级相对应,分3~5级:初级工作精度地区的评价结果分为高、中、低3级,中等工作精度地区分为极高、高、中、低4级,高等工作精度地区分为极高、高、中、低、极低5级(表1)。建议不同层次的评价结果的分级数量保持一致,即如果易发程度评价结果分为4级,相应的危险性和风险评价结果也分为4级。为了制图方便、美观和统一,不同级别的分区制图的颜色要统一,从低级到高级颜色逐步加深。

表 1 地质灾害风险评估结果与制图分级的原则

Table 1 Results of geo-hazard risk assessment and principles for mapping and classification

工作精度级别	易发程度	危险性	风 险
初级	高、中、低	高、中、低	高、中、低
中等	极高、高、中、低	极高、高、中、低	极高、高、中、低
高等	极高、高、中、低和极低	极高、高、中、低和极低	极高、高、中、低和极低

(4)地质灾害风险评估以定性分析为主,以定量计算评估为辅,提倡实用性的技术方法

区域地质灾害风险评价需要寻找和利用空间衰减趋势和规律,然而,崩塌、滑坡、泥石流灾害的发生属于点到点的灾害(不同于地震,地震是点影响面,具有明显的空间衰减趋势),没有明显的空间衰减趋势和渐变规律。一方面,形成崩塌、滑坡、泥石流灾害的地形地貌和地质背景条件没有明显的衰减趋势,不同构造地貌单元之间、不同自然边坡之间、不同工程岩组之间的渐变趋势不明显,一般是相对截然的边界;另一方面,崩塌、滑坡、泥石流灾害一般是孤立的事件过程,需要一个一个地制图、描述和评价,每一个都具有不同的特征。单个滑坡体及其影响范围内危险程度没有明显的差异;相同斜坡上不同滑坡之间、滑坡与崩塌之间、滑坡与泥石流之间也没有明显的衰减趋势和逐步过渡的状态;不同斜坡、不同流域(冲沟)之间的滑坡分布更没有衰减规律。崩塌和泥石流也是如此。这就给区域的风险评估和预测评价带来很大的困难,空间预测评价总是希望寻找空间上的渐变趋势,利用空间衰减规律进行预测评价和分区。地质灾害没有明显的衰减规律,对崩塌、滑坡、泥石流的预测评价会形成有限点群的散点(区带)分布,完成依赖于数学模型的过渡插值方法,不一定与实际情况相符;而在定性分析的基础上,适当归并散点(区带)形成评价分区,会引起一些误差和分区的间断,即从高易发区直接过渡到极低易发区、从高风险区过渡到极低危险区等。因此,区域地质灾害风险区划一定要强调以定性分析为主、定量计算为辅的基本原则。地质灾害的形成条件、主要影响因素、诱发因素是大家公认的,包括形成机理等是可以认知的,只是不同地区、不同时间段的主要控制因素有所差异,因此,定性的分析评价是至关重要的、是可以得到大家公认的。根据多年的跟踪研究,提倡地质灾害风险评估需要在定性分析评价的基础上,采

用简单实用(最好基于 GIS)的模型和方法,进行定量预测评价,将定性定量评价相结合,获得不同层次的评价区划结果。

(5)地质灾害风险评估区划制图比例尺及其应用范围

不同比例尺的地图、相应的地质灾害调查编录和易发性、危险性、风险区划制图类型不同,所对应的成果精度、应用范围也不同。为了能够显示特定区划水平要求的信息,地质灾害风险评价分区图应当以合适的比例尺编绘。所谓合适的比例尺,强调不同的资料底图对应于不同的评价分区图,应当适用于不同的应用对象(表 2)。国内在预测评价区划方面还没有这方面比较成熟的规范,故本文参考澳大利亚地质力学学会 2007 年提出的滑坡风险区划指南^[22],初步提出地质灾害风险区划结果的应用范围(表 2)。根据目前全国地质灾害调查的进展情况,强调全国或者全省范围小于 1:20 万比例尺的调查分布和易发性评价分区图是比较适合的,这样小比例尺的全国地质灾害危险性和风险区划图,质量和精度是难以保证的;1:20 万和 1:5 万比例尺的调查和初级到中级水平的危险性分区制图比较适合中国地(地区)市级和县市级的土地利用和防灾减灾规划;而大比例尺的地质灾害调查、勘查、编录和危险性、风险区划制图只适用于重点城镇和国家重大工程场地。

(6)提倡推广应用 GIS 技术和 RS 技术

遥感技术和 GIS 技术在地质灾害预测评价中的应用越来越普及、越来越重要。这是因为 GIS 技术可以贯穿于地质灾害调查编录、数据库建设、空间预测评价区划、监测预警预报、防治和管理的全过程,特别是其数据更新、信息共享、信息发布及可视化功能,适合于突发地质灾害预测评价、应急排查评价和长期动态跟踪,评价结果有利于为社会经济服务、有利于地质灾害风险管理和控制。但是,目前熟练掌握

表 2 地质灾害风险评估分区制图比例尺及其应用范围
Table 2 Geo-hazard zoning mapping scale and its application

比例尺种类	比例尺区间	分 区 应 用 范 围	一般的分区面积
小	<1 : 200000	地质灾害调查编录分布图和易发性分区图可以通告政策制定者和一般公众	>10000 km ²
中	1 : 200000~ 1 : 50000	为区域和地区发展或非常大尺度的工程项目服务的地质灾害编录和易发性分区;地区范围内初级到中级水平的危险性分区制图	1000~10000 km ²
大	1 : 50000~ 1 : 5000	城镇和场区范围内的地质灾害编录和易发性、危险性分区;场区范围内初级水平的风险区划和大型工程构筑物、公路、铁路规划的详细危险性评价	10~1000 km ²
详细	>1 : 5000	城镇、专门场地范围内和大型工程构筑物、公路、铁路设计阶段的中等、高级水平的危险性和风险性分区	<10 km ²

GIS 技术、又精通工程地质和地质灾害的人才少之又少,还需要长期的、扎扎实实的努力。

2 地质灾害风险管理的层次结构和主要内容

2.1 地质灾害风险评估与管理的主要内容

突发地质灾害风险评估的主要内容分为 3 个层次,即地质灾害易发程度评价、危险性评价和风险评价区划。评价结果一般建议分为 4 级,即高、中、低、极低,如果工作程度低,可以分为 3 级,如果工作程度详细,则可分为 5 级。

(1)地质灾害易发程度评价:相当于国外的滑坡敏感性(Landslide Susceptibility)分析评价,重点分析评价一个地区地质灾害已经发生的程度,并预测未来将要发生地质灾害的倾向性;强调静态地质灾害易发条件和灾害发生的空间概率统计分析评价,是进行危险性和风险评价的基础。核心内容包括地质灾害特征、空间密度、易发条件和潜在易发区预测评价。分析评价的主要因素和指标包括地形地貌、地质构造、工程岩土性质、斜坡结构和斜坡水文地质条件。

地质灾害易发程度预测评价区划结果,可以作为区域土地利用规划的初步依据和气象地质灾害预警预报的基础(图 1)。

(2)地质灾害危险性评价(Hazard Assessment):分析评价地质灾害发生的时间概率、破坏力(强度)及其扩展和影响范围,强调地质灾害发生破坏的自然属性——频次、强度、速度、距离和扩展范围的预测评价。主要包括地质灾害的分布位置、体积(或面积)、发生时间概率、诱发条件(强降雨、地震和人类

工程活动)、可能的扩展范围、运动速度、运动距离及其影响范围和强度。分析评价的主要因素指标包括地质灾害的分布密度(点密度和面密度),运动速度、位移距离及其影响范围,强降雨、地震诱发概率和强度,发生频率和强度。

地质灾害危险性评价区划结果,可以作为土地利用规划、地质灾害防治规划、地质灾害防治管理的依据和地质灾害监测预警系统建设的基础(图 1)。

(3)地质灾害风险评价(Risk Assessment):重点分析评价地质灾害的综合危险性和后果,主要包括地质灾害的时空概率分析评价和危险性、危害性、土地利用状态、承灾体分布特征、强度趋势、易损性、灾情评价,目前以定性分析为主、定量计算为辅。分析评价的主要因素和指标包括:危险性、危害性、承灾体特征、易损性、灾害损失程度和时空概率。

地质灾害风险评价结果,可以作为详细土地利用规划、场地土地利用规划、地质灾害防治规划和风险管理的依据,也可以作为地质灾害监测预警系统建设的基础(图 1)。

上述 3 个层次的预测评价内容相互关联、逐步递进,总体上都是基于现实资料预测评价未来的综合分析 with 评估的过程。其基本属性各有侧重点。地质灾害易发程度预测评价的基本属性是:地质时期形成的相对静态的地质、地形地貌、斜坡结构、工程岩组和水系背景条件分析评价;危险性预测评价的基本属性是:地质灾害形成演化的自然动态过程——频次、强度、速度、位移距离、扩展范围、诱发条件和概率的预测评价;风险评价的基本属性是:地质灾害

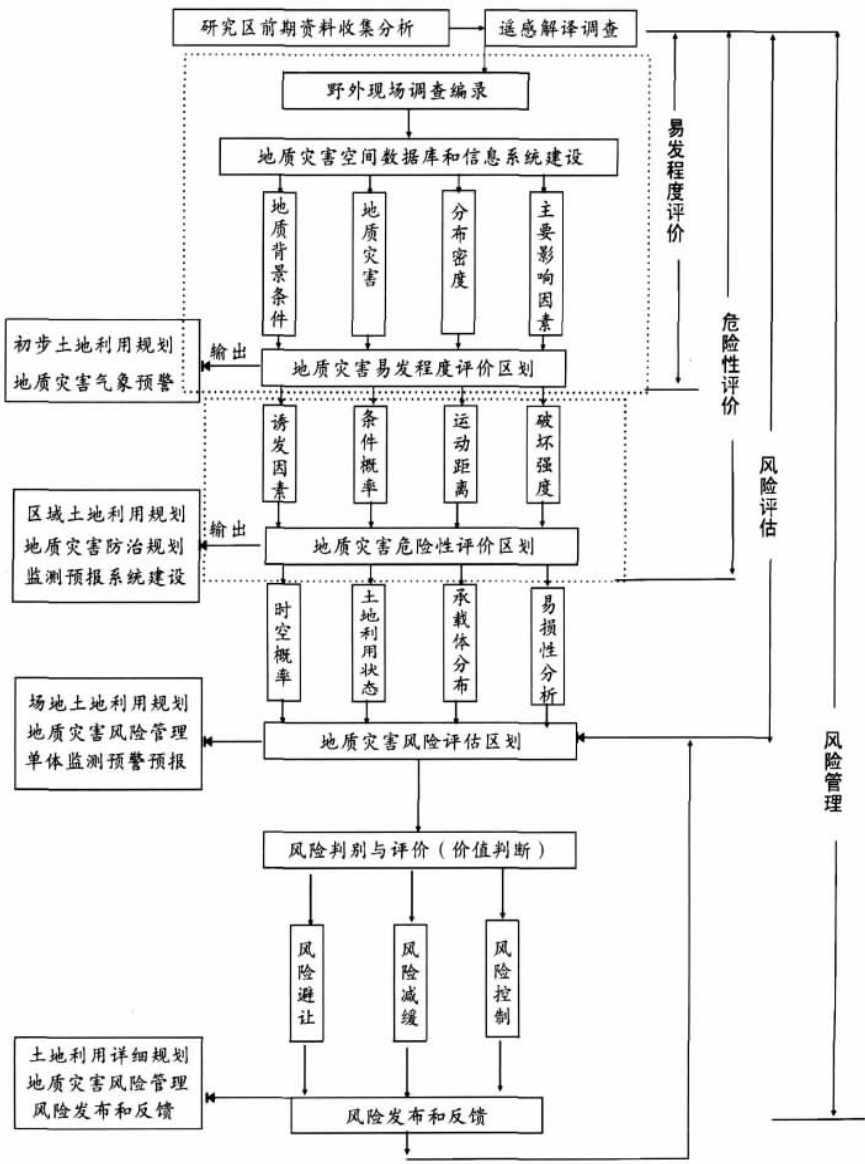


图 1 地质灾害风险管理层次结构图解

Fig. 1 Framework diagram of geo-hazard risk management

形成演化的危险性、危害性、灾情、损失、承灾体特征及易损性预测评价。前两者属于自然属性,后者则具有自然和社会经济双重属性。

(4)地质灾害风险管理(Risk Management):主要根据地质灾害风险评估结果划分风险接受标准与等级,制定风险转移、减缓、避免和控制措施,风险动态监测和预警,风险教育宣传和信息发布。主要包括:考虑如何减缓风险,减小风险发生的可能性,减轻和避免风险发生的危害等;制定撤离预案、防治风险预案或转移风险(办理保险)的方法,制定可以实施的调整控制措施,并根据需要进行风险监测、信息反馈

和风险复查;风险教育宣传、风险信息交流和发布、公共信息服务与管理(图 1)。

2.2 地质灾害风险管理的层次结构

目前国际上形成了比较统一的滑坡风险管理层次结构图解^[2-5],但是不一定适合中国大陆的实际情况。关键是,国际上滑坡风险评估与管理推广应用已有 30 多年,比较成熟,因此层次结构图解很简要,没有明确界定不同层次评估的主要参数指标及其差异,而国内这方面易于混淆,故需要强调不同层次评价的主要参数的差异和不同层次评价结果的有针对性的应用(图 1),结构图解也就相对复杂一些。

表 3 地质灾害易发程度定性分析评价

Table 3 Qualitative probability assessment of geo-hazard

背景条件	极易发条件(Ai)	易发条件(Bi)	较易发条件(Ci)	不易发条件(Di)
地形地貌	特征及分布 A1	特征及分布 B1	特征及分布 C1	特征及分布 D1
地质构造	特征及分布 A2	特征及分布 B2	特征及分布 C2	特征及分布 D2
工程岩组	特征及分布 A3	特征及分布 B3	特征及分布 C3	特征及分布 D3
斜坡结构与类型	特征及分布 A4	特征及分布 B4	特征及分布 C4	特征及分布 D4
斜坡水文地质	特征及分布 A5	特征及分布 B5	特征及分布 C5	特征及分布 D5

如何使层次结构图解达到简单明了,高度概括和引领整个地质灾害风险评估与管理的全过程,需要在研究实践中不断修改完善。

3 地质灾害易发程度和危险性评价

3.1 地质灾害易发程度分区评价

3.1.1 地质灾害易发程度定性分析评价

地质灾害易发程度定性分析评价(分区):主要从一定地区的地质背景条件——地形地貌、地质构造、工程岩组、斜坡结构和斜坡水文地质条件 5 个方面分析地质灾害从极易发到不易发的条件组合特征和分布范围。由于一定地区地质背景条件的变化没有明显的空间衰减规律和趋势,难以用量化模型模拟空间变化趋势,因此定性分析空间变化及其与地质灾害形成发展的关系尤为重要。在区域地质灾害调查编录和数据库建设的基础上,从地形地貌方面:分析中高山区易发还是中低山区或丘陵地区易发地质灾害,一级河流两岸易发地质灾害还是二级或者三级冲沟易发地质灾害,河流高陡岸坡易发还是中等或缓坡易发地质灾害,并且从高到低排列相对易发的顺序;从工程岩组方面:分析薄层软弱岩组(泥岩-页岩-煤层组合)、中厚层软硬相间岩组、厚层坚硬岩组与块状岩体之间的地质灾害易发程度差异;从斜坡结构与类型方面:分析松散土坡、岩体边坡与混合边坡的地质灾害易发程度差异,顺向坡、斜向坡和横反向坡的地质灾害易发程度差异。总之,从 5 个方面分析列出从极易发到不易发的条件和分布的大致范围(表 3),将满足 A 类(极易发)条件 2 条以上(含 2 条)的地段和满足 A 类条件之一同时满足 B 类(易发)条件 2 条以上(含 2 条)的地段划分为高易发区;类似地满足 B 类条件 2 条以上(含 2 条)的地段和满足 B 类条件之一同时满足 C 类条件 2 条以上(含 2 条)的地段划分为中易发区;类似地

表 4 地质灾害易发程度定量统计分析评价

Table 4 Quantitative probability assessment of geo-hazard

灾害密度	高易发区	中易发区	低易发区	极低易发区
地质灾害发生 面密度(概率)	≥20%	5%~20%	0.1%~5%	0
点密度 (点数/100km ²)	≥20	5~20	1~5	0

满足 C 类条件 2 条以上(含 2 条)的地段划分为低易发区,不满足上述任何条件的地段属于极低(不)易发区。

3.1.2 地质灾害易发程度定量化评价

地质灾害定量化评价提倡统计分析评价与定量模型计算相结合,其中统计分析评价是古老而最常用的方法,现代 GIS 技术的快速发展又赋予其新的活力,特别是其在数据跟踪、更新、共享、输出和制图方面的优势,弥补和克服了以前因人而异、因统计样本而异的缺陷。因此,基于 GIS 系统的定量统计分析评价是目前国际上地质灾害区划的主要途径之一。其中,对地质灾害空间分布的面密度和点密度(小型灾害,一般小于 1000 m³)的统计计算,是评价预测地质灾害易发程度的重要依据之一(表 4)。对于具体的研究区,需要统计分析区域上的最大、平均、最小面密度和点密度。需要注意,最大面密度是研究区地质灾害分布最密集带的所有灾害体的面积与这个带斜坡总面积之比。在具体划分确定高、中易发区的临界值时,可以依据实际情况,在 20% 上下有 3%~5% 的变化。

在定性和统计分析的基础上,利用数值或统计模型定量预测评价地质灾害的易发程度,最终获得易发程度分区评价图。目前定量化评价模型比较多^[6,11-27],初步归纳主要有 6 类:确定性模型、统计模型、灰色模型、人工智能模型、非线性预测预报模

表 5 滑坡滑动速度分类

Table 5 Classification of land-sliding speed

速度分类	高速(远程)	快 速	慢 速	蠕 滑
基本特征	剪出口高, 滑体(可能)脱离滑面“飞行”, 速度 $\geq 5\text{m/s}$, 或者大于人跑步的速度, 绝对位移距离大于 1km	滑体不能离开滑面的块体快速滑动, 速度相当于人跑步的速度	滑体位移速度为 0.5~2m/km·a	位移速度 $< 0.5\text{m/km}\cdot\text{a}$

型和基于 GIS 技术的信息模型^[25]。根据不同模型的对比分析, 预测评价的主要问题不是模型好坏的问题, 而是资料数据的质量问题、更新问题和参数因子分析选择问题。资料的详细程度、代表性和差异性分析容易被忽略, GIS 系统在这方面具有良好的性能, 因此 21 世纪以来基于 GIS 系统的突发地质灾害半定量—定量预测评价逐步成为主流发展趋势。以 GIS 技术为主, 虚拟现实技术和计算机数值模拟等最新的应用技术在地质灾害易发程度与风险评价研究中的应用, 促进了 GIS 技术在地质灾害编录、空间数据库建设、空间分析评价、风险区划制图、预测预警及其综合防灾减灾决策信息系统建设方面的应用, 为地质灾害易发程度预测评价建立了一个可以对比、共享、交流、更新、发布的平台, 使地质灾害易发程度预测评价过程透明、结果更合理、应用面更广泛。

值得注意的是, 所谓的定量预测评价是相对的, 不是绝对的, 因为各种影响因素和因子的量化都可能存在误差, 从而必然导致计算结果存在误差, 这不是模型能解决的。这也就是本文为什么一再强调定性分析的重要性。

3.2 地质灾害危险性分区评价

3.2.1 地质灾害危险性定性分区评价

地质灾害危险性定性分析评价: 主要在地质灾害易发程度分区的基础上, 分析评价降雨诱发、地震引发、人类工程活动诱发的地质灾害的危险程度, 即重点评价由于条件概率变化产生的地质灾害发生的时间概率及其扩展影响范围。重点进行两方面的分析评估: ①分析区域内强震、暴雨和人类活动诱发地质灾害的频率和强度, 重大诱发事件的年超越概率, 特别是注意近场强震($M_s \geq 7$)作用下低易发区中的高山峡谷地段、强台风暴雨期间中等易发区地质灾害的发生频率与高易发区平常降雨发生频率的对比分析, 评估研究区强震和强暴雨诱发地质灾害的危险性(类似于气象预警)。②分析研究区地质灾害可能发生运动的速度、强度、最大距离、一般距离、差异位移、最小位移等, 评价地质灾害的扩展影响范围。其中, 扩展范围重点从滑坡后缘和两侧分析滑坡的破裂发展趋势及影响范围; 而滑坡速度和位移分析, 先从地形地貌特征分析位移的限制条件: 如狭窄冲沟两侧滑坡位移和影响范围有限, 斜坡高度

表 6 地质灾害危险性定性分析评价

Table 6 Qualitative fatalness assessment of geo-hazard

易发区	高 危 险	中等危险	低 危 险	极低危险
高易发区	高易发区及影响范围	高易发区缓慢变形、低强度灾害及其影响范围	无	无
中等易发区	强降雨带内的中等易发区(高强度、快速灾害)及其影响范围	中等易发区及其影响范围	低强度变形灾害及其影响范围	无
低易发区	强地震作用下低易发区中的高山峡谷地段	强降雨带内的中等易发区	低易发区及其影响范围	缓变灾害及其影响范围
不易发区	近场极强震作用下不易发区中的高山峡谷地段	强地震作用下不易发区的高山峡谷地段	强震和强降雨带内的不易发区	其他地区

小于200 m,滑坡剪出口低(在坡脚)等,滑坡的位移就受到限制。如果不满足上述地形地貌限制条件,则从滑坡速度定性分析,分为高速、快速、慢速和蠕滑4类(表5)。滑坡剪出口高,(从地形地貌分析)滑动(可能)脱离滑面“飞行”,速度大于5 m/s,或者大于人跑步的极限速度,滑动的绝对位移大于1 km,称为高速(远程)滑坡(表5);滑体没有离开滑面的块体快速滑动称为快速滑坡,速度大致与人跑步相当;滑体位移速度为0.5~2 m/km·a,可以称为慢速滑动;滑体位移速度小于0.5 m/km·a,可以称为蠕滑(表5)。

在对条件概率、扩展影响范围、速度和位移定性分析的基础上,结合易发程度分区,定性地划分危险性分区(表6)。其中,要注意在近场极强震的作用下,不易发地质灾害地区的高山峡谷地段也可能成为高危险地域(表6)。例如,2008年汶川8.0级地震使岷江两岸一些不易发地质灾害的地段也发生大量崩塌—碎屑流灾害。

3.2.2 地质灾害危险性定量化评价

地质灾害危险性定量化评价可以在易发程度分区评价的基础上,结合危险性定性分析评价和定量化统计分析,考虑条件概率和动态发生频率,进行模拟计算评价。危险性评价相对强调动态变化过程,例如某年暴雨频降,危险性比平时大;也可能在易发程度定量化评价过程中直接叠加动态参数(地震、暴雨和人类活动的情况)而直接获得危险性评价分区,即预测评价模拟相同,只是评价参数有差异,可以在一个定量化评价流程的过程中分别输出易发程度和危险性分区评价图。

一定区域内,突发地质灾害发生时间概率的统计分析计算是预测评价地质灾害危险性的重要依据之一,是在空间密度统计计算的基础上,根据地质灾害发生的时间记录资料,统计分析时间概率。由于地质灾害发生的时间记录比较少,统计样本少,计算有困难,特别是统计计算最大的时间概率比较困难。随着全国地质灾害调查、监测预警和研究程度的提高,情况有所好转。对于具体的研究区,需要统计分析区域上的最大、平均、最小时间概率。需要注意,突发地质灾害发生的最大时间概率一般与暴雨(地震)诱发相关。以近年来陕西省宝鸡市陇县地质灾害的调查统计分析为例,概要地说明陇县地质灾害发生的最大时间概率的统计计算过程。

陇县全县表面积为2452 km²,去掉平坦开阔地

表7 地质灾害危险性定量统计评价

Table 7 Quantitative fatalness assessment of geo-hazard

危险性分级	高危险	中等危险	低危险	极低危险
灾害发生数(次/a·km ²)	>1	0.1~1	0.01~0.1	<0.01

区(大约7 km²),陇县斜坡面积为2445 km²。从数据库统计分析,1965—2006年间陇县累计发生突发地质灾害69次,其中2005年雨季暴雨集中诱发群发滑坡和泥石流26处。

利用42年有时间记录的地质灾害统计计算,基于斜坡面积的地质灾害发生频率为69/(42×24.45)=6.72×10⁻²次/a×100 km²,即陇县突发地质灾害平均时间概率很低(在宝鸡市属于地质灾害低危险区)。而2005年基于全县斜坡面积的地质灾害发生频率为26/24.45=1.1次/a×100 km²,即2005年的平均概率比42年的平均概率高很多。但是,这26次地质灾害分布范围大致是陇县整个面积的一半,其中,有8处地质灾害密集分布在陇县县城西南部的天成镇附近,利用这2个分布区的斜坡面积计算,2005年的平均概率为2.3次/a×100 km²,最大时间概率为8/9.9=0.81次/a×km²。参照国际上通用的时间概率标准,陇县大部分属于低危险区,只有2005年密集发生灾害的天成镇附近属于中、高危险区(表7)。

地质灾害危险性评价与动态诱发条件的概率相关,因此强调一定时期的危险性是一个相对动态的评价过程。如暴雨季节的地质灾害危险性高于平时的危险性,强震期间地质灾害危险性远远大于平时的危险性,而这种动态的危险性评价更有意义。

4 风险评估

4.1 地质灾害风险定性分析评估

地质灾害风险定性分析评价,重点分析评价地

表8 地质灾害风险定性分析评价

Table 8 Qualitative risk assessment of geo-hazard

灾害发生的可能性	对人类生命和财产产生的后果			
	灾难性和重大的	中等的	较轻的	轻微的
基本确定	H	H	M	M—L
可能的	H	M	M—L	L
可能性很小	M	L	L	VL
不可能	VL	VL	VL	VL

注:H—高风险;M—中等风险;L—低风险;VL—极低风险

质灾害发生并且可能到达受灾体的时空概率,包括地质灾害发生的可能性,灾害对人员、财产、城市工程建设可能造成的损失大小和严重性,概括风险概率发生的可能性分析和易损性分析。具体的风险概率大小定性分析评估分级主要参考国外的成果和经验,结合国内的实际情况和研究进展,初步提出一个参考办法和标准(表 8),还需要在实践中进一步完善。其中,易损性定性分析评估尤其重要。

易损性是指:在某一区域内,一定的承灾体(主要是人口、建筑和公共基础设施)在地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流)影响下发生损失的程度,即承灾体抵抗灾害的能力,包括承灾体自身固有的特征实力和地质灾害强度。在实际评价过程中,更重要的是承灾体的分布位置及其与地质灾害分布之间的关系。对于人而言,身体抵抗滑坡冲击的能力是有限的,不同的人不会有大的差异,关键在于人所处的位置和时间。对于建筑物和公共基础设施而言,固有的特征实力和抵抗地质灾害的能力差别比较大,如三峡大坝工程,任何规模的滑坡都不可能破坏和损害它,即易损性是 0;而对于一般民用建筑物(房屋),易损性的量化值在 0~1 之间,即用百分率表示,具体地确定数值比较难,国际上通常采用一定地区过去损失的百分率(即过去对未来有一定的指示作用原则)来确定。实际情况可能差别很大,一方面,人类会根据过去的损失情况不断改进防灾减灾措施,减少灾害损失;另一方面,地质灾害发生发展的情况也可能变化,因此易损性量化评价难度大,目前只是依靠统计分析和经验确定相对的定量。

4.2 地质灾害风险定量化评估

区域性的突发地质灾害风险统计评价的依据主要是人员死亡概率和财产损失概率统计分析,这是目前国内外快速风险评估制图(不需要进行易发性和危险性分析评价)的主要途径之一。其中,灾害损失现状评价严格意义上是灾情评估,只是风险评估的内容之一;而依据损失现状预测评估未来的灾情,则含有危险性和危害性评估,属于风险快速评估途径之一,国内还处于探索阶段。在参考国际上的工作

程序和标准的基础上,结合国内的实际情况,以前面的定性分析结果为基础,初步将每年人员死亡率大于 1 人/km²、财产损失每年大于 20 万元/km²的地区确定为高风险区,其他等级划分可以类推(表 9)。

国际上滑坡风险定量评估有统一的计算公式,突发地质灾害风险定量评估同样利用这个公式计算。根据条件概率原理,当滑坡风险定义为每年单个个体生命死亡概率时,就可以按以下公式进行计算(Morgan et al.,1992):

$$R(DI)=P(H) \times P(S|H) \times P(T|S) \times V(L|T) \quad (1)$$

式中:R(DI)是风险概率(即每年的个体生命死亡概率);P(H)是每年滑坡事件发生的概率;P(S|H)是事件发生的空间影响概率;P(T|S)是对于空间影响的时间影响概率;V(L|T)是个体的脆弱程度(即对于这些影响个体生命死亡的概率)。

对于财产损失,相应的表达式是:

$$R(PD)=P(H) \times P(S|H) \times V(P|S) \times E \quad (2)$$

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)指空间影响的概率;V(P|S)指财产的易损性(即财产损失的比例);E 指风险因素(例如财产评估)。

在实际评估过程中,关键是 P—危险性和 V—易损性的定量化评估。危险性包括发生概率、条件诱发概率、强度和影响范围(距离/run-out)估算,难度比较大,问题比较多,一直是风险评估的关键困难问题之一;易损性的量化值在 0~1 之间,用百分率表示,确定具体的数值比较难,需要结合定性分析确定。严格意义上的易损性是承灾体固有的抵抗灾害损失的能力,在实际评估过程中,承灾体的分布位置和灾害强度对固有能力变化的影响很大,因此导致易损性评估难度大。

总体而言,影响人和财产易损性定量化评估的主要因素包括下述几项:

- (1)承灾体的特征、类型,例如城市建筑、乡镇民用建筑、水库大坝、铁路、公路,运行的火车、汽车等。
- (2)承灾体的分布位置,例如是在滑体正下方还是偏离滑坡一定距离,在露天场地还是在交通工具或建筑物中。
- (3)滑坡位移量的大小,滑坡相对位移越大,有关承灾体的易损性值越大、风险越高。
- (4)灾害规模和运动速度,规模越大、速度越快,有关承灾体的易损性值越大、风险越高,特别是承灾

表 9 地质灾害风险统计评价

Table 9 Quantitative risk assessment of geo-hazard

风险分级	高风险	中等风险	低风险	极低风险
死亡人数(人/a·km ²)	>1	0.1~1	0.01~0.1	<0.01
损失财产(万元/a·km ²)	20	2~20	0.2~2	<0.2

体位于高速远程滑坡体上比位于缓变滑坡上易损性要高很多。

5 讨 论

国际上滑坡风险评估技术指南经过近 30 年的修改和推广应用,已经越来越完善、细致、具体。对于中国大陆,由于刚刚开始考虑地质灾害风险评估技术指南的推广应用,国际上的指南并不完全实用,甚至有些复杂。因此,本文重点从宏观构架、基本原则和内涵、工作流程、简单实用等方面初步提出地质灾害风险评估技术指南,试图使其在国际上不失真(有其基本原则和内涵)、符合发展趋势(有其精华和前沿性),也适合于国内的实际情况,有利于推广应用。当然,还有很多问题需要进一步讨论,以便修改完善。主要集中在下列几个方面。

(1)基本原则讨论:本文初步提出地质灾害风险评估需要考虑的 6 条基本原则。其中,基本假设、不同比例尺评估应用和 GIS 技术推广应用 3 个方面的原则基本与国际上一致,只是强调作为一个基本原则来重视。关于质量精度分类和评价等级分类,则相对于国际上的指南有很大的简化,在保存其实质内涵的基础上,突出中国特色和推广应用的可能性。在质量精度方面:重点从室内收集资料、野外草测(简测)和正测 3 个方面,以点资料、面资料(形态)、体积、有关的强度和概率 3 个方面作为划分高级、中级、低级精度的基本依据,可操作性强。在评估分类方面:强调 4 级划分原则(高、中、低、极低),不同层次评价(易发程度、危险性、风险)都一样 4 级划分,这有利于推广应用和对比分析。

关于以定性分析为主、定量评估为辅,提倡简单实用技术方法的原则,主要是针对目前国内的实际情况,风险评估指南属于刚刚起步阶段,过分强调定量评价模型推广应用不实际。不过,单体和具体边坡风险评估需要以定量估算为主,这方面香港和国际上有很好的经验。

(2)易发程度评价:基本内涵和工作流程国内外基本一致,本文只是系统提出从定性分析到定量统计、量化模型评估的基本思路 and 过程,操作性和推广应用性较强,具有引导和示范意义。在实际评估过程中,很多人容易将降雨、地震和人类活动因素考虑为地质灾害易发因素,实际上,它们激化和诱发了地质灾害,加大了其滑动频率和强度,属于危险性评估

考虑的因素。这是需要澄清的主要问题之一。

(3)危险性分析评价:这是地质灾害预测评价的难点和易于混淆的问题之一。国际上重视滑坡扩展范围分析、产出特征(Run-out)仿真模拟估算,国内则相对重视强降雨、地震和人类活动诱发强度分析评价,滑动概率和强度的定量化评价是危险性评价的主要难点。易于混淆的问题是,危险性的内涵是地质灾害强度、频率的大小,基本不涉及危害(人和财产),但在实际评价过程中,很多人在危险性评价过程中就涉及到危害性评价。这并不是错误,因为有些地区不进行风险评估,把危险性评价向前进半步,作为危险性和风险评价的过渡状态考虑也是一种暂时可用的办法,作为技术指南不提倡这样的过渡状态。

(4)风险评估与评价(Risk Assessment):风险评估与评价在概念上有所差别,后者是把前者的评估结果与一定的参考标准进行对比分析,划分一定地区可接受的风险级别。在实际应用过程中,国内外并没有特别强调两者的差异,而是一个词就包含有这两方面的意义。风险评估的难点是危险性和易损性评价,危险性评价的难点是强度和频率的定量化评价,而易损性评估的难点则是定性分析评估,易损性的定量值从 0~1,总可以确定一个值,关键是从定性分析的角度如何确定这个值更合理、更有代表性。从基本含义上分析易损性是承灾体固有的抵抗灾害的能力,如果从这个意义分析评价易损性是容易定量确定的,每个人抵抗滑坡的能力差别不大,大致都是 1,因为滑坡快速滑动,一个人是不能抵挡而自己不伤亡的。但是,在实际评价过程中,人的位置和防范意识尤其重要。如果一个人在滑体中部,假如滑坡刚刚启动快速滑动时,他向两侧或后缘跑比向前缘跑的易损性要小;同样的原理,位置不同易损性差别更大,这就导致易损性评价的可能。

(5)关于地质灾害风险评估制图:滑坡风险评估制图是国际上滑坡风险管理越来越重视的内容,因此国际上新出版的滑坡风险评估指南强调利用 GIS 和 RS 技术评价制图的推广应用。但是,目前国内在这方面的应用难以全面展开,所以第一版指南没有硬性强调制图技术的重要性,而是提倡推广应用 GIS 和 RS 技术。

总之,目前国内外关于地质灾害风险评估仍然有很多难点和易于混淆的问题。正是这些问题的存在,吸引了众多努力钻研,为之奋斗;也正是这些

问题的存在,使地质灾害风险评估技术指南的修改完善更具有吸引力。

致谢:本文构思成文得益于 2008 年 10 月 24 日科技支撑课题召开的“地质灾害风险评估技术指南讨论会”,特别得益于张茂省研究员和汪华斌教授的很多建议,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65–87.
- [2] Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A framework for landslide risk assessment and management[C]//Hungr O, et al. *Landslide Risk Management*. London: Taylor and Francis, 2005: 3–26.
- [3] L Picareli F O, Evans S G, Mostyn G, et al. Hazard characterization and quantification[C]//The International Conference on Landslide Risk Management 2005. Vancouver, Canada: A. A. Balkema Publishers, 2005.
- [4] Cascini L. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development[C]//R F Oldrich Hungr, *Landslide Risk Management*. A. A. BALKEMA, 2005: 199–235.
- [5] Roberds W. Estimating temporal and spatial variability and vulnerability[C]//The International Conference on Landslide Risk Management. Vancouver, Canada: A. A. Balkema Publishers, 2005.
- [6] Hungr O, Corominas J, Eberhardt E. Estimating landslide motion mechanisms, travel distance and velocity [C]//Hungr O, et al. *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis: London, 2005: 99–128.
- [7] Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(5): 250–250.
- [8] Remondo J, Bonachea J, Cendrero A. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences[J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4): 496–507.
- [9] Carrara A, Pike R J. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk[J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4): 257–260.
- [10] Chau K T, Sze Fung Y L, Wong M K, et al. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 429–443.
- [11] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning[J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3/4): 85–111.
- [12] van Westen C J, Castellanos E, Kuriakose S L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview[J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3/4): 112–131.
- [13] Corominas J, Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes[J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3/4): 193–213.
- [14] Leventhal A R, Kotze G P. Landslide susceptibility and hazard mapping in Australia for land-use planning — with reference to challenges in metropolitan suburbia[J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3/4): 238–250.
- [15] IUGS. Quantitative risk assessment for slopes and landslides—The state of the art[C]//*Landslide Risk Assessment*. Rotterdam: Balkema, 1997.
- [16] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 185–190.
- [17] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. *地质评论*, 2007, 53(6): 797–806.
- [18] 曾忠平, 付小林, 刘雪梅, 等. GIS 支持下滑坡斜坡类型量化及制图研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(1): 22–25.
- [19] 张继贤. 3S 支持下的滑坡地质灾害监测、评估与建模[J]. *测绘工程*, 2005, 14(2): 1–5.
- [20] 张茂省, 唐亚民. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1205–1216.
- [21] 罗元华, 张梁, 张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 76–116.
- [22] Australian Geomechanics Society. Landslide risk management [M]. Australian Geomechanics, 2007, 42(1): 13–36.
- [23] Varnes D J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice[C]//International association of engineering geology commission on landslides and other mass movements on slopes. 1984: Int. Assoc. Eng. Geol., UNESCO Natural Hazards Series.
- [24] 吴树仁, 董诚, 石菊松, 等. 地质灾害信息系统研究——以重庆市丰都县为例[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 683–691.
- [25] 吴树仁. 突发地质灾害研究某些新进展[J]. *地质力学学报*, 2006, 12(2): 265–263.
- [26] 吴树仁, 石菊松, 王涛. 突发地质灾害预测评价概论[J]. *地质通报*, 2008, 27(11): 1753–1763.
- [27] 吴树仁, 张永双, 石菊松, 等. 三峡库区丰都县滑坡灾害危险性评价[J]. *地质通报*, 2007, 26(5): 574–582.