


中国地质环境监测院资助项目

地质灾害风险评估

DIZHI ZAIHAI FENGXIAN PINGGU

理论  实践
LI LUN

董颖等 主编

地质出版社

地质灾害风险评估

DIZHI ZAHAI FENGXIAN PINGGU

理论 LI LUN 与 YU SHIJIAN 实践



主 编 董 颖 张丽君 徐 为 张 梁 胡 杰
编 委 (按拼音排序)

曹晓娟 陈 辉 程 凯 程新歌 胡晓强
黄文启 李励红 李茗媚 李 媛 梁 静
刘桂英 刘 嵘 刘艳辉 孟 晖 唐 灿
王来龙 邢丽霞 杨 冰 赵建康 赵建明

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书依托“重点地区地质灾害风险评估示范”项目成果，在广泛收集国内外地质灾害风险评估科研成果的基础上，分析、研究、借鉴了国内外地质灾害风险评估理论方法，比较系统地阐述了地质灾害风险评估研究的进展、地质灾害危险性评估、易损性评估、地质灾害风险评估和风险管理的过程与方法，拟定了区域地质灾害风险评估思路，并形成了具有一定层次特点的地质灾害风险评估系统；同时选择了一个典型地区进行了地质灾害风险评估实践。

图书在版编目 (CIP) 数据

地质灾害风险评估理论与实践 / 董颖等主编.

—北京: 地质出版社, 2009.12

ISBN 978-7-116-06381-5

I. ①地… II. ①董… III. ①地质灾害—风险分析
IV. ①P694

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第203790号

责任编辑: 郑长胜

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路31号, 100083

咨询电话: (010) 82324575 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310749

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 200千字

版 次: 2009年12月北京第1版·第1次印刷

定 价: 25.00元

书 号: ISBN 978-7-116-06381-5

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

QIAN YAN

1999年11月，第54届联合国大会作出国际减灾十年活动后续安排的决议。决议指出，联合国决定在“国际减灾十年”活动的基础上，从2000年起开展全球性“国际减灾战略”行动，其目标是提高社会对灾害的抗御能力，并将原来对灾害的简单防御变为对风险的综合管理。因此，风险评估已成为地质灾害防治的重要内容。

我国地质灾害种类多、分布广，破坏损失巨大，伴随经济社会发展日趋严重。因此，更需提高人类对地质灾害抗御能力，将对地质灾害的防治变为对地质灾害风险的综合管理。在地质灾害风险评估的基础上，制定各省（市、区）地质灾害减灾规划，采取地质灾害群测群防、重点工程治理与区域（流域）环境综合治理相结合的方法，部署和组织地质灾害减灾工作。

已有的国内外大量研究成果，多是小区域的或单一灾种的危险性评估研究，即地质灾害发生的可能性及其分布方面的研究，而承灾体易损性及地质灾害风险评估研究成果少见。地质灾害的风险包括自然风险（地质灾害发生的可能性）和经济风险（灾害损失的可能性），重点在经济风险。地质灾害风险评估为地质灾害风险管理和制定地质灾害减灾规划提供科学依据，具有重要的理论和实际意义及广阔的应用前景。

本书界定了地质灾害风险的基本内涵，系统总结了地质灾害风险评估的现状、地质灾害危险性分析与易损性分析与评价的方法、地质灾害风险评估的方法，拟定了区域地质灾害风险评估思路。

危险性分析和易损性分析是地质灾害风险评估的基础，通过这两方面的分析，确定风险区位置、范围以及地质灾害活动的分布密度与时间概率，进而确定可能遭受地质灾害的人口、工程、财产以及资源、环境的空间分布与破坏损失率。期望损失分析是地质灾害风险评估的核心，其目标是预测地质灾害可能造成的人口伤亡、经济损失以及资源、环境的破坏损失程度，综合反映地质灾害的风险水平。这三方面分析相互联系，形成具有层次特点的地质灾害风险评估系统。

浙江省衢州市衢江区地质灾害风险评估，在系统分析衢州区土地利用规划资料、地质灾害调查资料、社会经济调查与统计资料的基础上，确定了该区地质灾害的主要影响因素及风险评估的主要指标和因子，并进行综合评估和分析，对该地区地质灾害防治与管理提出了建议。

本书主要依托“重点地区地质灾害风险评估示范”项目成果编撰而成。在广泛收集国内外地质灾害风险评估科研成果、专著、论文的基础上，进行综合分析研究，并借鉴国内外地质灾害风险评估理论方法，选择典型地区——浙江省衢州市衢江区，进行了地质灾害风险评估实践。衢江区地质灾害调查基础数据资料主要来源于浙江省衢州市衢江区小流域滑坡泥石流调查项目资料、衢州市衢江区重要地质灾害（隐患）点防灾预案、衢州市衢江区地质灾害调查与区划报告、浙江省衢州市衢江区地质灾害防治规划等。

本项目在实施过程中，得到了国土资源部地质环境司、中国地质调查局、中国地质环境监测院、浙江省国土资源厅、浙江省地质环境监测总站、衢州市国土资源局、衢州区国土资源局、衢州区地质环境分站等多位领导和专家的大力支持和帮助，在此表示最衷心的感谢！

本书在编撰过程中，得到了中国地质环境监测院侯金武院长、田廷山副院长和李文鹏总工程师的大力支持和鼓励，得到了岑嘉法教授、钟自然、姜建军、张卫东、柳源、殷跃平、张作辰、罗元华、向喜琼、陈红旗等的指导，在此一并表示感谢！

董颖

2009年10月

目

录

M U L U

前言

第一章 地质灾害风险内涵与评估框架、方法	1
第一节 地质灾害风险基本概念及内涵	1
第二节 地质灾害风险评估框架	3
第三节 地质灾害风险评估方法	6
第二章 国内外地质灾害风险评估研究进展综述	16
第一节 国内外地质灾害风险研究开展情况	16
第二节 滑坡灾害危险性与风险评估研究进展	19
第三节 地质灾害风险评估方法研究进展	32
第四节 滑坡灾害风险评估与区划的难点及发展前景	38
第三章 地质灾害危险性评估	46
第一节 地质灾害危险性评估框架	46
第二节 滑坡灾害危险性的识别	46
第三节 滑坡频率与规模的确定和触发临界分析	50
第四节 滑坡灾害危险性评估战略研究	51
第五节 滑坡、泥石流灾害危险度评估经验模型	52
第六节 滑坡、泥石流地质灾害气象预警预报	55
第四章 地质灾害易损性评估	63
第一节 滑坡灾害易损性评估	63
第二节 泥石流灾害易损性评估	70
第五章 地质灾害风险评估	74
第一节 地质灾害风险评估的表征	74
第二节 欧盟大型滑坡项目的定量风险评估框架	75
第三节 香港边坡安全体系与量化风险分析	77

第四节	地质灾害风险区划	78
第五节	推荐的滑坡灾害风险评估框架	80
第六章	地质灾害风险管理	85
第一节	地质灾害风险管理内容	85
第二节	地质灾害风险管理措施	86
第七章	典型实例：浙江省衢州市衢江区地质灾害风险评估	89
第一节	衢江区环境地质条件	89
第二节	衢江区地质灾害发育特征	99
第三节	滑坡灾害风险评估	103
第四节	衢江区地质灾害风险区划与管理	117
参考文献		129

第一章 地质灾害风险内涵与评估框架、方法

第一节 地质灾害风险基本概念及内涵

一、地质灾害定义

地质灾害属于灾害的一种类型，目前对灾害尚无公认严格定义。联合国灾害管理培训教材将其定义为：自然或人为环境中，对人类生命、财产或活动等社会功能的严重破坏，它引起普遍的人类、物质或环境损失，这些损失超出了受影响的社会只利用其本身的资源所能应对的能力。

韦氏字典的定义是：一个突然发生的、造成巨大物质破坏和损失以及危难的不幸事件。

牛津字典定义为：突然发生的巨大灾祸或不幸事件。

从以上定义可知，灾害是一种自然的或人为因素引起的不幸事件（或过程），它对人类的生命财产、社会经济活动和发展的基础——资源与环境造成了危害和破坏，是自然界的一种灾变过程。它的发生往往是不以人的意志为转移的。也就是说，灾害是由危害人类的生命财产以及资源环境损失构成的。危害是自然或人为环境中对生命财产以及资源环境或活动产生不利影响并达到造成灾害程度的罕见的或极端的事件。危害是致灾因子，只有造成生命财产损失的危害才称其为灾害。

对地质灾害的概念有不同的理解，代表性的有：

地质灾害是由于地质作用使地质自然环境恶化，并造成人类生命财产毁损或人类赖以生存与发展的资源、环境发生严重破坏的事件（或过程）。

地质灾害是指各种（天然的和人为的）地质作用对人民生命财产和国家建设事业（人类的生存与发展）造成的灾害。

联合国教科文组织（UNESCO）：地质灾害活动及其对人类造成破坏的可能性。

中华人民共和国国土资源部行业标准《地质灾害分类分级》采用的地质灾害的定义，侧重于地质灾害发生结果的评估等级，其定义为：地质灾害（geological disaster）是地球在内动力、外动力或人类工程活动作用下发生的危害人类生命财产、生产生活活动或破坏人类赖以生存与发展的资源与环境的不幸的地质事件。主要包括地震、火山、崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降；其次包括煤层自燃、矿井突水、水土流失、土地沙漠化等。

国务院颁布的《地质灾害防治条例》所称地质灾害：“包括自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害”。

地质灾害内涵应该包括以下两方面内容：第一，强调致灾的动力条件，主要由地质作

用形成的灾害事件才是地质灾害；第二，强调灾害事件的后果，即对人类生命财产和生存环境产生损毁的地质事件称为地质灾害，而那些仅仅是地质环境恶化，但并没有直接破坏人类生命财产和生产、生活环境的地质事件，称其为环境地质问题。

在上述地质灾害定义的各种描述中，国务院颁布的《地质灾害防治条例》的有关规定，是具有法律地位的，可作为确定研究内容的依据。

二、地质灾害风险定义

“灾害”是指在某一特定时间内，一定规模的事件的发生概率。灾害具有两方面的含义：一是具有潜在损害性的物理过程或行为；二是表明其发生可能性的威胁状态或条件。灾害造成的后果有大有小，有的是直接的影响，有的是间接的。这取决于灾害发生区内承灾体的属性特征及其受到影响的程度（即易损性）。因此，就提出了“灾害风险”的概念，其通常包含两层意思，一是灾害发生的可能性，二是如果发生灾害，可能造成的后果。灾害风险水平则是二者作用的综合结果（图1-1）。

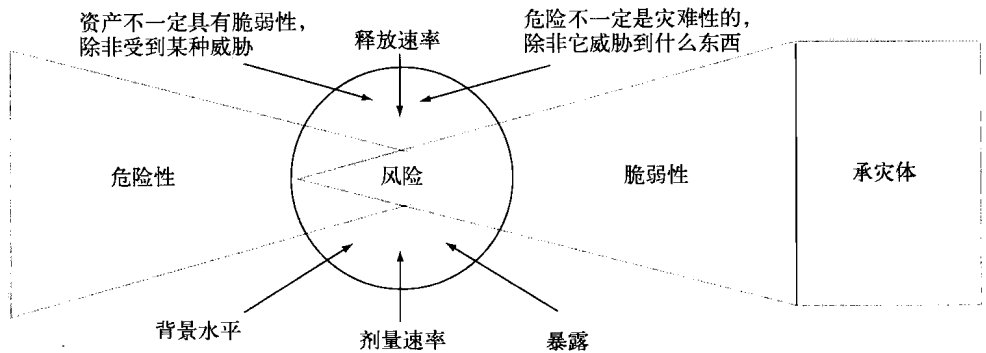


图1-1 灾害、风险因素、易损性和风险之间的概念关系

(据Alexander, 2002)

许多学者和机构提出了各种各样的风险定义，其中最有影响并得到普遍公认和应用的是，联合国人道主义事务部（UNDHA）于1991年和1992年两次正式公布的自然灾害风险的定义：“风险是在一定区域和给定时段内，由于某一自然灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值”。地质灾害风险就是地质灾害破坏产生不良后果的可能性，包括地质灾害发生破坏的可能性及其所产生的后果（损失）两个方面。这是当今国际上最具有代表性和权威性的地质灾害风险的基本定义，它是1984年在联合国教科文组织的一项研究计划中，由美国著名的滑坡专家Varnes提出，随后得到了国际地质灾害研究领域的全面认同，成为对灾害风险评估的基本模式。

根据Varnes（1984）：“一定地区、一定时期内因特殊毁灭性现象造成的生命伤亡、财产损失和经济活动中断的预期值”。当考虑物理损失是（特定）风险可以定量表示为承灾体的预期损失（易损性乘以承灾体的价值或数量）与一定规模/强度的灾害事件发生的概率之积。总风险则是所有类型承灾体的预期损失综合乘以一定规模/强度灾害发生概率。

根据以上的阐述，可将“地质灾害”定义为其特殊的影响特征及其规模和频率而造成

损害的可能的物理过程；因而，“地质灾害风险”则是伴随着地质灾害事件（如滑坡）的预期影响或损害、损失或代价。

根据上述“灾害风险”概念的阐述，以及Varnes（1984）、Fell（1994）、Leroi（1996）、Lee和Jones（2004）等对风险的定义，目前世界上对地质灾害风险计算，普遍采用了简单但功能强大的计算公式：

$$\text{风险度 (risk)} = \text{危险度 (Hazard)} \times \text{易损度 (Vulnerability)}$$

地质灾害具有自然属性和社会属性双重属性。地质灾害风险可以表达为危险性和易损性的乘积。因此，地质灾害的风险特征一方面是自然属性，表现为地质灾害发生、发展内在的随机性和不确定性。地质灾害风险的不确定性，反映了自然界本身固有的不确定性与人类对自然界的认识能力之间的关系。地质灾害发生和危害的不确定性是导致地质灾害存在风险的主要原因。地质灾害的发生受内在不确定性因素影响，使人类无法准确预测和完全控制，这就构成了风险的自然属性；另一方面是社会属性，表现为地质灾害的危害对象——受灾体的承受能力的不确定性，各种防灾工程的可变性，人类社会和经济活动的日益加剧而导致不确定因素增加等，构成了风险的社会属性。

地质灾害风险程度主要取决于两方面条件：一是地质灾害活动的动力条件，主要包括地质条件（岩土性质与结构、活动性构造等）、地貌条件（地貌类型、切割程度等）、气象条件（降水量、暴雨强度等）、人类工程经济活动（工程建设、采矿、耕植、放牧等）。通常情况下，地质灾害活动的动力条件越充分，地质灾害活动越强烈，所造成的破坏损失越严重，灾害风险越高。二是人类社会经济易损性，即承灾区生命财产和各项经济活动对地质灾害的抵御能力与可恢复能力，主要包括人口密度及人居环境、财产价值密度与财产类型、资源丰度与环境易损性等。通常情况下，承灾区（地质灾害影响区）的人口密度与工程、财产密度越高，人居环境和工程、财产对地质灾害的抗御能力以及灾后重建的可恢复性越差，生态环境越脆弱，遭受地质灾害的破坏越严重，所造成的损失越大，地质灾害的风险也越高。上述两方面条件分别称为危险性和易损性，它们共同决定了地质灾害的风险程度。基于此，地质灾害的风险要素亦由危险性和易损性这两个要素系列组成。危险性要素系列包括地质条件要素、地貌条件要素、气象条件要素、人类工程经济活动要素以及地质灾害密度、规模、发生概率（或发展速率）等要素。易损性要素系列包括人口易损性要素、工程设施与社会财产易损性要素、经济活动与社会易损性要素、资源与环境易损性要素等。

第二节 地质灾害风险评估框架

一、地质灾害风险评估

地质灾害风险评估，即分析不同强度的地质灾害发生的概率及其可能造成的损失，是对风险区发生不同强度地质灾害活动的可能性及其可能造成的损失进行的定量化分析与评估。地质灾害风险评估的目的是清晰地反映评估区地质灾害总体风险水平与地区差异，为指导国土资源

开发、保护环境、规划与实施地质灾害防治工程提供科学依据。地质灾害风险区划是按计算的地质灾害期望损失值分成不同等级风险区，针对不同风险区的特点提出减少风险的各项对策。

根据地质灾害风险的构成因素，地质灾害风险评估主要应包括两个方面：一是危险性评估；二是易损性评估。滑坡风险分析（区域尺度）不仅可以识别现有承灾体的影响，还可以识别出与未来开发相关的潜在影响，这对未来开发决策具有指导意义。也就是说，地质灾害风险分析就是对滑坡灾害进行风险识别、风险评估、风险估计，回答“什么原因”、“在哪发生”、“什么时候发生”、“强度多大”、“频率多少”、“影响多大”、“风险水平是否可以接受”这些关键问题。并在此基础上优化组合各种风险管理技术，做出风险决策。对地质灾害实施有效的控制和处理风险所致损失的后果，期望以最小的成本换取大的安全保障。滑坡、泥石流等地质灾害风险总是与人类社会共存，人类社会所能做的工作，就是要降低滑坡、泥石流等地质灾害风险，进行风险分散和转移，将风险管理到一个可以接受的程度，而风险评估则是实现风险管理的关键。

在地质灾害风险计算的基础上进行风险评估，主要是判断存在的风险是否可接受，并制定风险处理选择方案或建议。一般将风险分为可接受水平、容忍水平或不可容忍水平。什么水平的风险是可以接受或容忍的，在很大程度上取决于当地生产力水平和防灾能力、心理预期、社会和文化价值取向等因素。

比如在比较贫困落后的地区，所能接受的灾害风险水平要比相对富裕地区高。在风险高地区生活的人，所能接受的风险水平要比生活在低风险地区的人高。因此，在不同地区和不同人群，可接受的风险水平是不一样的。可接受的风险水平要综合考虑各种因素，进行风险—效益分析，最后得出权衡后的风险水平。

香港特区政府岩土工程办公室将新开发坡体的可接受的个人风险定为 1×10^{-5} ，对于已存在的坡体开发个人风险定为 1×10^{-4} 。一般使用频率—死亡人数（FN）图解法确定可接受的社会风险水平（图1-2）。

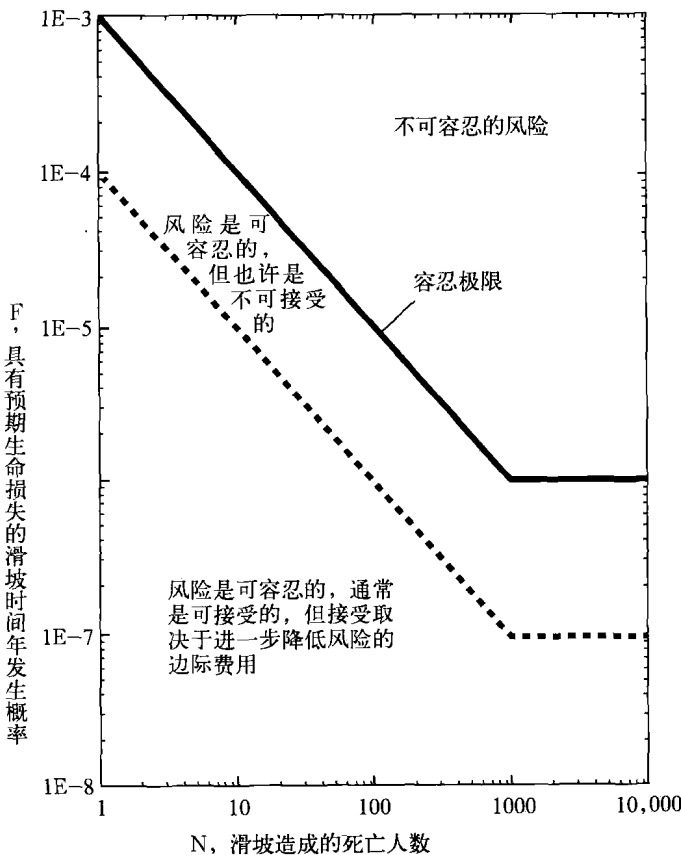


图1-2 一定规模（死亡人数）的事件发生频率与死亡人数（FN）图解
（据澳大利亚岩土力学协会，2000）

二、地质灾害风险评估框架

地质灾害风险管理主要包括风险识别、风险评估和风险处置三个方面。首先是风险识别，然后进行风险评估，在此基础上通过成本-效益方法以及综合考虑各方面因素确定减灾行动。降低地质灾害风险涉及风险的接受、避让、预防、减轻或共同分担。减灾手段包括“硬”的工程方法，还包括“软”的立法、教育、保险、援助、应急和规划。关于滑坡风险管理，目前世界上还没有一个通用的框架，比较公认的是澳大利亚岩土力学协会（2000）在其滑坡风险管理指南中确定的框架（图1-3）。

香港斜坡安全管理是一项持续努力和全方位的长期计划，其宗旨是最大程度地降低香港的滑坡风险。从20世纪90年代开始，香港将量化风险的理念引入边坡安全管理政策中，开展了一系列试验研究，并将试验研究成果应用到边坡安全政策中。香港边坡安全量化风险评估采用了Stewart（2000）提出的香港化学工业界的风险管理框架（图1-4），内容主要包括风险分析、风险评估和风险管理。风险管理是风险评估、风险控制和实施行动和/或监测计划的整个过程。风险控制涉及风险处理措施的评估（包括风险减轻、风险接受和风险避让）。根据风险控制过程的结果实施行动和/或监测计划。参照英国健康与安全行政官（HSE）风险容忍准则（图1-5），制定了“滑

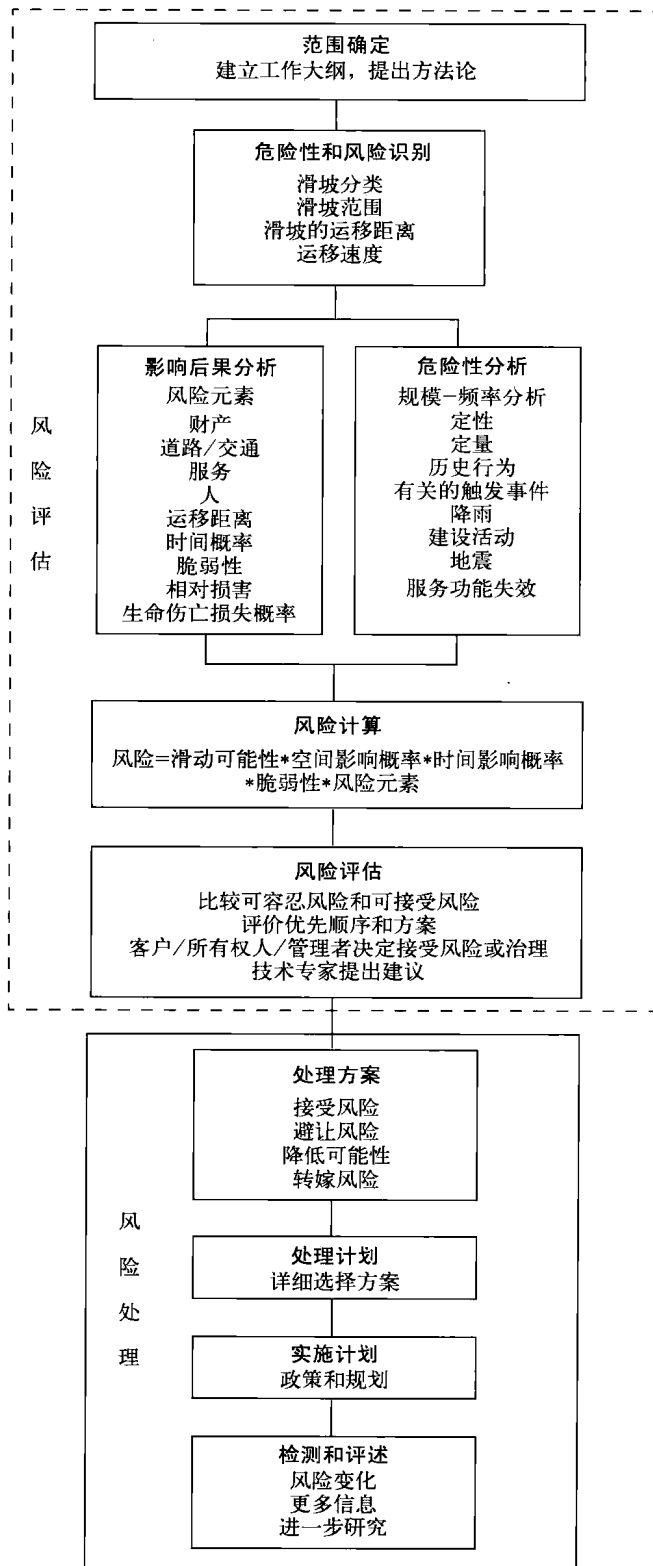


图1-3 滑坡风险管理程序
(据澳大利亚岩土力学协会AGS, 2000)

坡风险准则”。当风险水平介于两个极限之间（位于“可容忍区”）时，针对这一风险指标要求开始采取行动，将风险降至“切实可行的”水平。这就是所谓的ALARP要求。对每个存在潜在危险性设施都实施了减轻风险计划，随后对土地利用规划实行控制，以避免风险加大，并在可能的情况下降低附近地区的风险。

可以说，香港风险管理理念是在1993年被用于检查边坡安全政策的，到1995，风险管理手段开始被认为是有助于边坡安全的一项不可或缺的政策。利用量化风险评估（QRA）技术，来计算和管理滑坡风险已经逐渐获得香港岩土工程业界的认同，因而驱使相关技术在近年来得到发展和应用。

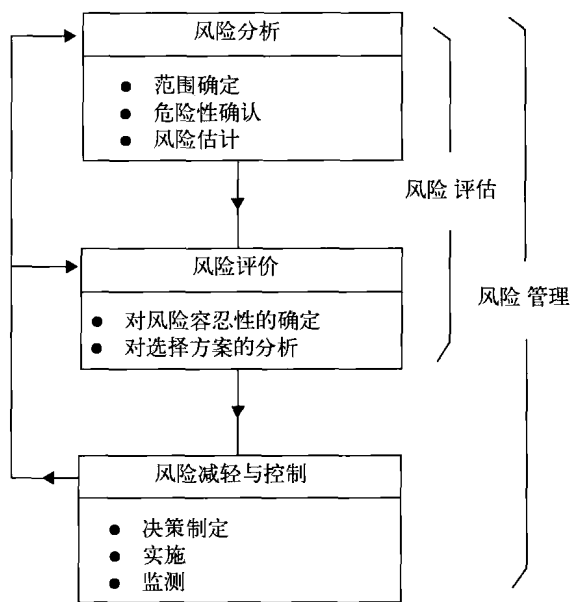


图1-4 香港化学工业界风险管理框架

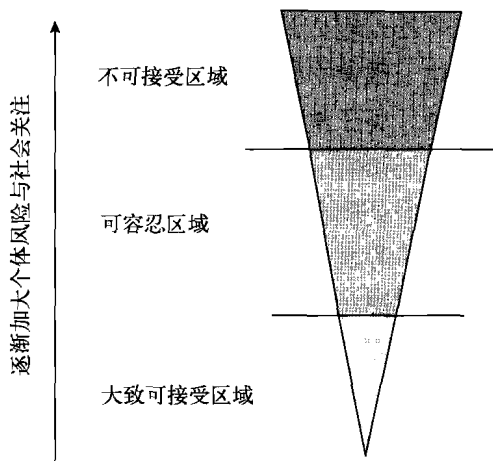


图1-5 健康与安全行政官(HSE)的风险容忍度框架

第三节 地质灾害风险评估方法

滑坡泥石流等地质灾害的不确定性决定了其评估方法采用非确定性分析方法。该类方法是基于地质灾害预测理论的广义系统科学原理，在类比法的基础上发展起来的一类研究方法。随着概率论、数理统计及信息理论、模糊数学理论用于地质灾害预测，目前已形成了多种预测模型，其预测成果可相互对比、检验，从而使预测成果更具合理性、科学性。目前常用的非确定性分析方法主要有以下几种。

一、参数合成法

参数合成法又称专家经验指数综合评判法。它是最为简单的定量评估方法。该类模

型主要是建立在专家丰富的经验基础之上的,通过专家打分法等途径获取专家经验知识,专家选择影响地质灾害的因子并编制成图。根据专家的经验,赋予每个因子一个适当的权重,最后进行加权叠加或合成,形成地质灾害危险性分区图。

它的主要优点是:①可以同时考虑大量的参数;②可以应用于任意比例尺的区域和单体斜坡稳定性评估;③大大降低了隐含规则的使用,定量化程度提高;④整个流程可以在GIS的支持下快速完成,使数据管理标准化,时间短,费用少。主要缺点有:①主观性较强,不同的调查者或专家得出的结果无法进行比较。权值的确定仍含有不同程度的主观性;②隐含的评判规则使结果分析和更新困难;③需要详细的野外调查;④应用于大区域评估时,操作复杂,模型难以推广。

二、数理多元统计模型法

该方法是通过通过对现有地质灾害及其类似不稳定现象与地质环境条件和作用因素之间的统计规律研究,建立相关的预测模型,从而预测区域地质灾害的危险性。该类模型方法很多,如回归分析、判别分析、聚类分析方法等。

统计分析的前提是已知学习区(训练区)的地质灾害分布情况,根据数理统计理论,建立影响参数和地质灾害发生与否的数学统计模型,在测试区得到验证后,将其应用到地质环境相同或相似的地区,预测研究区的灾害危险性分布规律。因此,统计分析方法评估的结果的可靠度直接取决于测试区原始数据的精度,模型也不能在任何地区推广使用。尽管如此,大量的研究表明,统计分析是目前最为适用的区域地质灾害危险度评估区划方法,它有严格的数理统计理论作基础,数学模型简单易懂,而且与GIS技术能够很好地结合,使庞大的数据得到合理的标准化管理、分析与储存。

多元统计分析中的主成分分析和因子分析方法在环境统计方面有不少成功的应用。将这两种方法结合起来的主成分-因子分析法可以应用于多变量的因子赋权研究(吴聿明,1991)。主成分-因子分析法的主要思想是(应农根,刘幼慈,1987):在所研究的全部原始变量中将有关信息集中起来,通过探讨相关矩阵的内部依赖结构,将多变量综合成少数彼此互不相关的主成分,以再现原始变量之间的关系,并通过因子荷载矩阵的轴正交或斜交旋转,进一步探索产生这些相关联系的内在原因。

此方法适用于区域地质灾害空间预测研究,对一定地区土地利用、国土开发、城市规划具有宏观指导作用。

三、层次分析法

层次分析法是对一个包括多方面因子而又难以准确量化的复杂系统进行分析评估时,根据各因子之间以及它们与评估目标的相关性,理顺组合方式和层次,据此建立系统评估的结构模型和数学模型;对模型中的各种模糊性因子,根据它们的强度以及对影响对象的控制程度,确定标度指标和作用权重;将这些指标作为基本参数,代入评估模型,逐级进行定量分析并最终取得评估目标。根据地质灾害风险系统组成,大致可通过4个层次的统

计分析完成评估工作：以各种要素为主体的基础层统计分析；以危险性、易损性、减灾能力为目的的过渡层分析；以期望损失为目标的准则层分析；以风险度或风险等级为最终目标的目标层分析。

四、模糊与灰色聚类方法

模糊聚类判别法模型以模糊数学理论为基础。由于地质灾害系统的复杂性，用绝对的“非此即彼”不能准确地描述地质灾害系统的客观实际，存在着“亦此亦彼”的模糊现象，不能用1或0二值逻辑来刻画，而需用区间 $[0, 1]$ 的多值（或连续值）逻辑来表达。而模糊数学理论正是适用于地质灾害系统的不确定性，用隶属函数来描述那些边界不清的过渡性问题及受多因素影响的复杂系统的非确定性问题。目前常用的方法有模糊综合评判法、模糊可靠度分析方法及其与层次性原理相结合而派生的模糊层次综合评判法。模糊聚类综合评估的基本步骤是：根据地质灾害风险构成，建立因素集、综合评估集和权重集，确定隶属函数，得到综合评估结果，并进行解释分析。

灰色聚类综合评估法以灰色系统理论为基础，常用于研究“小样本、贫信息不确定性”问题。在地质灾害预测中，可利用灰色关联分析，评估斜坡稳定性各影响因素的影响程度，可以克服通常数理统计方法作系统分析所导致的缺憾，对样本量和样本的规律性无特殊要求。同样可通过灰色聚类中的灰类白化权函数聚类，在考虑多种影响因素的基础上对各研究单元的危险性状态进行判定，进而完成空间预测中的危险性分区。灰色系统的以灰色模型（GM）为核心的各种预测模型还为分析地质灾害预测中的各种时序数据提供了有效途径，成为目前地质灾害实时跟踪预报的常用方法之一。灰色聚类综合评估的基本步骤是：确定聚类白化数和白化函数，标定聚类权，求聚类系数，构造类向量，求解聚类灰数。

五、信息模型评估法

该类模型的理论基础是信息论。用地质灾害发生过程中熵的减少来表征地质灾害事件产生的可能性，因素组合对某地质灾害事件的确定所带来的不肯定性程度的平均减少量等于该地质灾害系统熵值的变化。认为地质灾害的产生与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关，是用信息量来衡量的，信息量越大，表明产生地质灾害的可能性越大。该类模型预测法同统计预测模型一样，适用于中小比例尺区域预测。

信息科学现已成为广泛使用的一门科学，但它的产生却只有短短的半个世纪历史。1948年Shannon发表的著名论文《通信的数学理论》标志着信息科学的诞生。Shannon把信息定义为“随机事件不确定性的减少”，并把数学统计方法移植到了通信领域，提出了信息量的概念及信息熵的数学公式。信息科学研究的对象是信息，它的重要任务是研究信息的提取、信息传输、信息处理、信息存储等。由于现代自然科学发展的综合整体化趋势，各学科的相互渗透、相互联系，经过几十年的发展，使信息量和信息熵的概念已远远超出了通信领域。信息科学不仅应用于各种自然科学领域，而且已广泛应用在管理、社会科学等领域。

运用信息论方法进行地质学领域的矿床预测研究是由维索奥斯特罗斯卡娅(1968)及恰金(1969)先后提出。赵鹏大等在《矿床统计预测》一书中研究了信息量方法在区域找矿工作中的应用问题。晏同珍、殷坤龙等自1985年起,先后多次在陕南及长江三峡库区探索了信息量方法在区域性滑坡灾害空间预测分区中的应用,并与其他方法(如聚类分析、回归分析、数量化理论方法等)的研究成果进行了比较性研究。艾南山、苗天德(1987)研究了侵蚀流域地貌系统的信息熵问题,他们在斯揣勒的流域面积——高程曲线的基础上构造了侵蚀流域地貌系统的信息熵表达式,并据此作为流域稳定性的一种判定指标。Read J. 和Harr M. (1988)首次将信息熵的概念与斜坡安全系数计算的条分法结合在一起。由于地质灾害预测内容的多样性,所以决定了预测理论和方法的非单一性。晏同珍等(1989)将其概括为三类模型预测法——确定性模型预测法、统计模型预测法、信息模型预测法;前两种模型又可分别称其为“白箱”和“黑箱”模型,而信息模型则是介于两者之间。

地质灾害现象(Y)受多种因素 X_i 的影响,各种因素所起作用的大小、性质是不相同的。在各种不同的地质环境中,对于地质灾害而言,总会存在一种“最佳因素组合”。因此,对于区域地质灾害预测要综合研究“最佳因素组合”,而不是停留在单个因素上。信息预测的观点认为,地质灾害产生与否是与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关,因此可用信息量来衡量:

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = \lg_2 \frac{P(y, x_1 x_2 \cdots x_n)}{P(y)} \quad (1)$$

根据条件概率运算,上式可进一步写成:

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = I(y, x_1) + I_{x_1}(y, x_2) + \cdots + I_{x_1 x_2 \cdots x_{n-1}}(y, x_n) \quad (2)$$

式中: $I(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为因素组合 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 对地质灾害所提供的信息量(bit); $P(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为因素 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 组合条件下地质灾害发生的概率; $I_{x_1}(y, x_2)$ 为因素 x_1 存在时,因素 x_2 对地质灾害提供的信息量(bit); $P(y)$ 为地质灾害发生的概率。

式(2)说明,因素组合 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 对地质灾害所提供的信息量等于因素 x_1 提供的信息量,加上因素 x_1 确定后因素 x_2 对地质灾害提供的信息量,直至因素 $x_1 x_2 \cdots x_{n-1}$ 确定后, x_n 对地质灾害提供的信息量,反映出信息的可加性特征,从而说明区域地质灾害信息预测是充分考虑因素组合的共同影响与作用。

$P(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 和 $P(y)$ 可用统计概率来表示,各种因素组合对预测地质灾害提供的信息量可正可负,当 $P(y, x_1 x_2 \cdots x_n) > P(y)$ 时, $I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) > 0$;反之 $I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) < 0$ 。大于0情况表示因素组合 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 有利于所预测地质灾害的发生,相反情况则表明这些因素组合不利于地质灾害的发生。

区域地质灾害预测是在对研究区域网格单元划分的基础上进行的,根据不同地区具体的地质、地形条件,采用相应的网格形状和网格大小,进一步结合区域地质灾害分布图开展信息统计分析。假定某区域内共划分成 N 个单元,已经发生地质灾害的单元为 N_0 个。具相同因素 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 组合的单元共 M 个,而在这些单元中有地质灾害的单元数为 M_0 个。按照

统计概率代表先验概率的原理，式（1），因素 $x_1x_2\cdots x_n$ 在该地区内对地质灾害提供的信息量为：

$$I(y, x_1x_2\cdots x_n) = \lg_2 \frac{M_0/M}{N_0/N} \quad (3)$$

如果采用面积比来计算信息量值，则式（3）可表示成：

$$I(y, x_1x_2\cdots x_n) = \lg_2 \frac{S_0/S}{A_0/A} \quad (4)$$

式中： A 为区域内单元总面积； A_0 为已经发生地质灾害的单元面积之和； S 为具相同因素 $x_1x_2\cdots x_n$ 组合的单元总面积； S_0 为具相同因素 $x_1x_2\cdots x_n$ 组合单元中发生地质灾害的单元面积之和。

一般情况下，由于作用于地质灾害的因素很多，相应的因素组合状态也特别多，样本统计数量往往受到限制，故采用简化的单因素信息量模型的分步计算，再综合叠加分析相应的信息量模型改写为：

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \lg_2 \frac{S_0^i/S^i}{A_0^i/A} \quad (5)$$

式中： I 为预测区某单元信息量预测值； S^i 为因素 x_i 所占单元总面积； S_0^i 为因素 x_i 单元中发生地质灾害的单元面积之和。

六、实证权重法

实证权重法（Weights of evidence,）是加拿大数学地质学家Agterberg等（1989）提出的一种基于二值（存在或不存在）图像的地质统计方法，是在假设条件独立的前提下，基于贝叶斯定理（Bayesian' rule）的一种定量预测方法。Bonham-Carter等（1990）和Harris等（2001）都先后应用WOE方法来预测矿产的远景分布。通过对已知成矿情况网格单元的预测因子和响应因子之间的统计分析，计算出权重，然后对各待预测网格单元的各预测因子进行加权综合，最后，通过确定每一单元响应因子出现的概率大小便可得到不同级别的成矿远景区。

Van Westen进一步将模型应用到灾害危险性评估领域。数据驱动权重模拟方法的主要原理是利用滑坡历史分布数据，建立滑坡分布与各影响因子之间的统计关系，即根据在各影响因子不同类别中滑坡分布的统计情况来确定各影响因子对滑坡灾害的贡献率（权重）大小。这种采用数据进行权重确定的方法被称为数据驱动模型。与专家知识模型相比，权重的确定更加科学和可靠，避免了专家的主观性所带来的不确定性。最后，利用另一时期的滑坡分布历史数据对评估结果进行检验和成功率预测，调整不合理的边界，使评估结果更加具有可信度。基于统计学的Bayesian方法的数据驱动权重模型所采用的统计方法更加严谨，充分考虑了滑坡影响因素之间的关系，以及各影响因素与滑坡灾害的关系；并进行影响因素的独