

极端降雨诱发山地公路 地质灾害风险评价与实践

Theory and Application of Risk Assessment for
Extreme Rainfall-induced Geological Hazards of Mountain Road

薛凯喜◎著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>



极端降雨诱发山地公路 地质灾害风险评价与实践

Theory and Application of Risk Assessment for
Extreme Rainfall-induced Geological Hazards of Mountain Road

薛凯喜◎著

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

极端降雨诱发山地公路地质灾害风险评价与实践/
薛凯喜编著. —重庆:重庆大学出版社,2013. 10

ISBN 978-7-5624-7771-6

I. ①极… II. ①薛… III. ①降雨—山地道路—地质
灾害—危险评估—研究 IV. ①U421

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 238680 号

极端降雨诱发山地公路地质灾害风险评价与实践

薛凯喜 著

策划编辑:林青山

责任编辑:文 鹏 刘 真 版式设计:林青山

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆新生代彩印技术有限公司

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:289 千

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-7771-6 定价:33.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

我国幅员辽阔,地形复杂多样,山地面积占全国土地总面积的 2/3。山地具有相对复杂的地质结构,因此往往是地质灾害的易发区。伴随着全球气候变化,“继续强降雨”“大暴雨”“持续干旱后降雨”等极端气象频繁出现,由此诱发的地质灾害给山地公路的通行带来了巨大困难,如何应对极端天气诱发的地质灾害对山区公路交通的影响,已成为我国山地公路维护与保通亟须解决的问题。

基于此,笔者认为当前情况下迫切需要结合山地公路的工程实际,开展主要干线公路的地质灾害风险评价和区划研究工作,从而为建立公路地质灾害监测网络、制定应急措施并保障生命和财产安全提供工作基础。本书采用野外调查、理论分析、模型构建等多种手段,对山地公路运营过程中极端降雨诱发地质灾害的风险评价进行了系统深入的研究,密切结合西部山区干线公路地质灾害发育、发生及演化的工程实际,具有重要的理论意义和工程实用价值。主要创新性研究成果有如下几点:

①通过开展山地公路地质灾害实地调研与分析,全面研究了极端降雨诱发山地公路地质灾害的基本类型、破坏模式及其对各影响因素的响应规律,分析了降雨与山地公路地质灾害的相关性,并构建了诱发山地公路滑坡、崩塌灾害的极端降雨事件识别模型和预测模型。

②针对极端降雨诱发山地公路地质灾害危险性和易损性评价问题,构建了评价指标体系,研究了评价指标的动态权重,综合集成可拓学与模糊理论进行危险性评价,运用基于观测值 K —均值聚类的方法评价易损性。

③分析了极端降雨诱发山地公路地质灾害这一复杂系统,提出了风险线评价的概念,并构建评价指标体系和理论模型,运用风险矩阵图测算风险值,最终基于

ARCGIS软件平台实现了风险区划。

本书是笔者从事西部交通建设科技项目(2009318000001)“三峡库区极端气候衍生公路灾害监测预警技术研究”、东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK201110)“极端降雨诱发滑坡灾变机理模型试验研究”、江西省数字国土重点实验室项目(DLLJ201212)“融合多源数据协同分析的山地公路滑坡灾害危险性评价与区划”等科研成果的基础上,结合国内外最新研究成果对地质灾害风险评价理论做了较为系统的总结。以期本书的出版能起到抛砖引玉的作用,并给广大科研工作者提供参考。鉴于笔者能力有限,许多问题也尚在探索之中,难免出现较多的问题甚至错误,作者衷心欢迎各位读者的批评与指导。

本书在编著过程中得到了后勤工程学院郑颖人院士、重庆大学岩土工程专家刘东燕教授、张永兴教授的热心支持和悉心指导。他们渊博的学识和严谨的治学态度使我受益匪浅,其谦逊、平易近人的作风令我难忘。在此谨向各位导师表示衷心的感谢。

在现场调研和论文编纂过程中,还得到了重庆大学李东升副教授、罗云菊副教授,重庆科技学院赵宝云博士的大力支持和帮助,刘东燕教授团队办公室的师兄弟们帮助我完成了很多基础性工作,在此表示诚挚的感谢。书中引用了许多国内外学者的文献和学术资料,在此不能一一列出,谨表衷心的感谢。

本书的出版得到了东华理工大学2012年学术专著资助出版项目的支持,在此感谢东华理工大学的领导和同事的大力支持和关怀,尤其感谢建筑工程学院杨泽平院长、叶周书记、易萍华副院长给予本人的无私帮助。全文校核由胡艳香女士完成。对所有在本人研究和本书稿付梓过程中付出辛勤劳动及给予协助的同志表示崇高的敬意和感谢。

薛凯喜

2013年6月于南昌

目 录

1 绪 论	1
1.1 摘要	1
1.2 研究的目的及意义	2
1.3 国内外研究现状	4
1.4 研究内容与技术路线	15
2 山地公路地质灾害实地调研与发育规律	18
2.1 调研概况	18
2.2 山地公路地质灾害特征统计分析	23
2.3 地灾孕育环境地质条件及灾害发育规律	31
2.4 历史及潜在灾害点分布规律	53
2.5 本章小结	58
3 极端降雨因素与山地公路地质灾害相关性	60
3.1 数据处理	60
3.2 山地公路地质灾害与降雨相关性分析	61
3.3 极端降雨事件的辨识模型	65
3.4 基于逻辑斯蒂回归的降雨诱发山地公路地质灾害预测模型	70
3.5 本章小结	76
4 山地公路地质灾害危险性的可拓学与模糊理论综合评价	77
4.1 危险性评价原理	77
4.2 山地公路沿线地质灾害危险性评价指标体系	79
4.3 基于可拓学与模糊理论的综合集成评价方法	88
4.4 实例应用	98
4.5 本章小结	108
5 山地公路地质灾害易损性的 K—均值聚类综合评价	110
5.1 山地公路地质灾害易损性构成及评价内容	110
5.2 山地公路地质灾害易损性评价指标体系	112
5.3 山地公路地质灾害承灾体价值及损失率的测算	116
5.4 基于 K—均值聚类的易损性分级综合评价方法	122

5.5 实例应用	124
5.6 本章小结	126
6 极端降雨诱发山地公路地质灾害风险评价体系及应用	127
6.1 山地公路地质灾害复杂系统分析	128
6.2 山地公路地质灾害风险线评价体系	132
6.3 风险线评价的矩阵图方法与区划	140
6.4 实例应用	147
6.5 本章小结	151
7 结论与建议	152
7.1 结论	152
7.2 建议	153
附录	155
附表1 山地公路地质灾害源普查表	155
附表2 山地公路滑坡灾害专业调查表	156
附表3 山地公路崩塌灾害专业调查表	158
附表4 山地公路泥石流专业调查表	160
附表5 山地公路地质灾害调查情况统计表	162
附表6 重庆市国省干线公路滑坡灾害危险性、易损性、风险评价结果一览表.....	163
附表7 重庆市国省干线公路崩塌灾害危险性、易损性、风险评价结果一览表.....	176
附图1 重庆市国省干线公路滑坡地质灾害危险性区划图	189
附图2 重庆市国省干线公路滑坡地质灾害易损性区划图	194
附图3 重庆市国省干线公路滑坡地质灾害风险区划图	199
附图4 重庆市国省干线公路崩塌地质灾害危险性区划图	204
附图5 重庆市国省干线公路崩塌地质灾害易损性区划图	209
附图6 重庆市国省干线公路崩塌地质灾害风险区划图	214
参考文献	219

1

绪 论

1.1 摘 要

本书将传统的地质灾害勘察理论与现代统计学理论、可拓学理论、模糊数学理论以及 GIS 图显软件相结合,首先立足于现有资料和成果的利用,在此基础上再针对山地公路工程的具体特点,综合利用现场踏勘、数据收集、理论分析和工程应用等具体方式开展研究工作。全书本着“发现问题—探寻解决问题的方式方法—解决问题”这一总体思路,严格遵照遵循各分项研究内容注重由感性认识分层次提升到理性认识的基本原则,探索了一套切实可行的、服务于山地公路等大型线性工程的地质灾害风险评价理论与方法体系,并应用于重庆市国省干线公路的滑坡、崩塌地质灾害风险评价。通过本书的研究,得到如下成果:

①以重庆市国省干线公路为例进行山地公路地质灾害实地调研,总调研里程 9 346.84 km,编录历史灾害点 1 695 处,潜在灾害点 3 283 处;对山地公路地质灾害的发育类型及破坏模式进行了辨识,认为滑坡灾害与崩塌灾害是山地公路地质灾害的主要类型,其破坏模式包括碎屑流渐进式滑坡,崩积层滑坡,砂泥岩、页岩互层崩塌和陡倾砂岩、泥岩、灰岩互层崩塌这四类。

②对山地公路地质灾害孕育环境地质表征因素进行识别,分别从地形地貌、地层岩性、斜坡类型、地质构造、水文地质条件及植被覆盖等方面研究了山地公路滑坡、崩塌地质灾害的发育规律,并初步划分出各单因素条件下地质灾害危险性等级。

③历史及潜在灾害点的分布规律一定程度上影响未来山地公路地质灾害的发育,本书以重庆市公路地质灾害为例,对 249 个国省干线路段的滑坡、崩塌地质灾害从数量分布密度和规模分布密度两个方面进行专门研究,得出了相应的分布规律,并进行了初步的等级划分。

④综合运用多种统计分析方法研究了山地公路地质灾害与极端降雨的相关性。分别拟合了诱发山地公路滑坡、崩塌地质灾害的累积有效降雨量计算公式,并以此作为极端降雨事件的识别模型,并通过 Logistic 回归分析构建了山地公路地质灾害预测

模型,同时给出了两种数学模型在风险评价中的应用方法。

⑤山地公路地质灾害危险性评价的目的在于探讨评价区域内各种地质灾害危险性程度。本书对危险性评价的原理进行了阐述,确定了危险性评价的基本步骤,构建了评价指标体系和基于可拓学与模糊理论的综合集成方法的评价模型,最后以重庆市国省干线公路地质灾害为例进行了危险性评价。

⑥在前人研究的基础上重新定义了山地公路地质灾害的易损性,即易损性用于描述特定灾害类型对承灾体进行损毁或破坏的直接效应,它表征了承灾体和灾害之间的相互作用程度,本质上是承灾体遭受破坏时表现出的固有属性;另一方面,针对某种特定灾害类型和易损性间接衡量人类社会为抗击灾害所采取防控措施、设置防灾工程的效能,是承灾体被动防控和人类社会主动防控而付出直接或间接投入的综合。

⑦山地公路地质灾害的易损性评价不同于危险性评价,本书应用基于观测值K—均值聚类的方法对山地公路地质灾害的易损性进行了研究,通过虚设聚类中心划分了易损性等级,并对重庆市国省干线公路滑坡、崩塌灾害易损性进行了区划。

⑧在对山地公路地质灾害复杂系统进行分析的基础上,详细阐述了山地公路地质灾害风险管理系统,提出了风险线评价的理念,构建了山地公路地质灾害风险线评价指标体系,同时对指标体系内诸要素进行了定义性描述。指出宜采用综合集成方法对地质灾害进行风险评价,运用风险矩阵图的进行各路段风险值的测算与评价,为解决风险矩阵图直观性较差的问题,应用 ARCGIS 的图显功能对风险进行了区划。

1.2 研究的目的地及意义

我国国土面积辽阔,地形复杂多样。据统计,我国的山地约占全国土地总面积的33%,高原占26%,盆地占19%,平原占12%,丘陵占10%。如果把高山、中山、低山、丘陵和崎岖不平的高原都包括在内,那么中国山区的面积要占全国土地总面积的2/3以上。山地具有相对复杂的地质结构,因此往往是地质灾害的易发区。伴随着全球气候变化,“继续强降雨”“大暴雨”“持续干旱后降雨”等极端气象频繁出现,尤其是极端降雨事件诱发的地质灾害给山地公路的通行带来了巨大困难,如何应对极端降雨诱发的地质灾害对山区公路交通的影响,已成为我国山地公路维护与保通需要解决的急迫问题。

以我国西南山区的重庆市为例,据《重庆市统计年鉴2010》,截至2010年重庆干线公路总里程突破8 000 km,伴随公路的快速发展,极端降雨诱发的公路地质灾害也呈快速上升趋势。如2007年重庆多次遭受连续暴雨袭击,特别是7月16日至20日的暴雨,雨量大,持续时间长,南岸、沙坪坝、九龙坡、北碚、江津、璧山、铜梁、合川、綦江、大足、荣昌、万盛等区县受灾极为严重。根据气象部门提供的数据,沙坪坝区24 h

内降雨量达 266.6 mm、璧山县达 260.5 mm,均为重庆有气象记录的 115 年以来历史最高值,暴雨及其诱发的地质灾害对公路等基础设施造成了严重损毁。

山地公路地质灾害是指在山地公路沿线及路堑边坡范围内由于地质作用斜坡体所处的地质环境产生突发的或渐进的破坏,并造成公路损毁或人类生命财产损失的现象和事件,它同时具有自然属性和社会属性,两种属性对立统一而形成山地公路地质灾害灾情。因此,研究地质灾害活动规律,并对其进行防控就需要从上述两个基本属性入手。但在以往的地质灾害研究中,相关专家学者仅将其作为一种地质动力活动,主要是研究其自然属性,预测评价也多从内外影响因素入手,着力于研究其形成机制、诱发条件及发展规律等,度量的指标多为稳定性系数、稳定性程度,而对地质灾害的社会属性和与之密切相关的破坏效应、防治效益等研究力度不足^[1]。然而,从目前的社会经济发展水平来看,在充分探明地质灾害发生机理后对所有灾害点采取有效地工程防护设施尚有难度,而确保山地公路地质灾害现象或事件对人类不造成不可接受的危害更是不可能的。因此,无论是政府还是保险等防减灾企业,都迫切需要掌握各种地质灾害的风险程度,从而作出防减灾决策,通过管理的手段尽可能减小灾害造成的损失。上述要求,促使山地公路地质灾害研究工作在继续深入分析灾害活动规模、强度、频次等自然特征的同时,还需要调查危害区人口、工程、资源、资产等社会经济条件,分析各类承灾体对灾害的敏感程度和抵御能力,并把二者结合起来,综合分析一个独立灾害体或一个地区发生灾害活动的几率和可能产生的破坏损失的程度,这就是逐渐兴起的地质灾害风险研究^[1]。

一般认为,针对不同目的或服务对象,可进行不同类型的地质灾害风险评价,根据地质灾害评价范围或面积将地质灾害风险评价可分为点评价、面评价、区域评价三种基本类型^[2]。其中,点评价需要的基础信息量最为详尽,定量化程度最高,所得评价结果针对性强,结果最为准确细致;而面评价和区域评价相对较为模糊,多用宏观性描述方法确定评价指标,最终评价结果只能为区域范围内的整体防灾减灾决策服务,不针对各个具体灾害点。我国地质灾害风险评价研究虽然起步较晚,但近几年发展速度很快,尤其是针对区域地质灾害评价的研究成果更为丰富,但专门针对公路、铁路、水利、能源输送等生命线工程沿线地质灾害的风险评价较为少见,研究某种诱发或致灾因素(如极端降雨)导致山地公路等线性工程地质灾害风险的课题尚未见诸报端。就山地公路地质灾害而言,按照区县行政单位进行路段划分后,待评价路段从数千米到上百千米不等,且评价范围仅限于公路及其两侧斜坡体,有关灾害评价的基础资料易于收集,这种情况下若按点进行评价将过于复杂,进行面评价或区域评价则结果太过粗略。因此,前文所述三种地质灾害风险评价基本类型在评价范围、基础数据特征及评价精度上与公路等线性工程不相适应,为有效地开展公路地质灾害防控工作,现阶段亟需建立一套适用于公路等大型线性工程风险评价的理论方法体系。

综上所述,笔者认为当前情况下迫切需要结合我国山地公路的工程实际,对极端

降雨诱发山地公路地质灾害类型及特征进行调查分析,研究极端降雨诱发山地公路地质灾害的发生条件及规律,并对各主要路段进行地质灾害风险评价和区划。基于此,在导师刘东燕教授的指导下,以西部交通建设科技项目“三峡库区极端气候衍生公路灾害监测预警技术研究”为支撑,依托课题组对重庆市国省干线公路地质灾害相关调研资料,拟以“极端降雨诱发山地公路地质灾害风险评价及应用研究”为题进行博士学位论文撰写,旨在探索一套切实可行的、服务于山地公路等大型等线形工程的地质灾害风险评价理论与方法体系,并以重庆市为例对国省干线公路进行滑坡、崩塌地质灾害风险评价,为受地质灾害威胁的干线公路建立监测网络、制定应急措施并保障生命和财产安全提供工作基础,该研究具有重要的学术价值和现实意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 危险性评价及区划研究

危险性评价及区划作为地质灾害研究的重要内容,早在20世纪中期国内外相关学者就已开展了卓有成效的工作。根据已有资料记载,日本1958年规定凡在山区进行交通建设必须先做斜坡危险度评价,对流域滑坡灾害的危险性评价采用坡度、切割密度、降雨、滑坡分布等因素综合处理,并根据评价结果提出设防标准^[3];美国、西欧国家自20世纪60年代末、70年代初就开始了以滑坡灾害为主体的地质灾害危险性区划研究^[4];进入80年代后,很多国家和地区都开始了区域地质灾害危险性分区及预测问题的研究,如意大利、瑞士、美国、法国、澳大利亚、西班牙、新西兰、印度等;自90年代起,围绕国际减灾十年计划行动,北美及欧洲许多国家在原地质灾害危险区划研究的基础上,开展了地质灾害危险性与土地利用立法的风险评价研究,把原来单纯的地质灾害危险区划研究拓展到了综合减灾效益方面的系统研究^[5]。

国内方面,我国开展地质灾害危险性区划工作始于20世纪70年代末,在此期间由于我国相继发生了四川鸡扒子滑坡、湖北盐池河磷矿、甘肃洒勒山、湖北新滩镇等一些重大滑坡、崩塌事件,以及三峡水电站和二滩水电工程的相继开展,推动了我国地质灾害空间性预测的发展。进入80年代后,中科院成都地理所(现成都山地所)应用坡度、地形、滑坡分布密度三种要素对雅碧江二滩水电站库区进行了滑坡危险性分段。地矿部成都水文队、南江水文队等对四川省山地灾害进行危险性划分;1991年中科院成都山地所提出采用危险度方法判别滑坡的危险性^[98]后又将滑坡危险度判别方法进一步应用到区域滑坡危险性区划领域^[6,7];进入21世纪以来,国内开始重视地质灾害危险性区划研究^[8]。

1) 危险性评价模型及指标体系研究

GIS作为分析和管理地理空间数据的管理系统,它拥有强大的地理信息空间分

析功能,且其制图功能和可视化特点显著。近年来,GIS 技术在滑坡危险性评价研究方面得到了快速发展,为地质灾害的研究提供了一种有效工具,它可以从不同空间和时间的尺度上分析地质灾害的发生与环境因素之间的统计关系,评价各种地质灾害的危险性和可能的灾害范围^[9]。由于该系统运行的前提条件是获取可靠的源数据并确定各数据层叠加的权重,因此,相关学者对基于 GIS 的模型研究展开了大量的研究工作,地质灾害空间预测模型方法与 GIS 的结合也成为地质灾害危险评价研究的新趋势^[10,11]。

国外评价模型研究方面,具有代表性的有 Montgomery 等人和 Dietrich 等人的考虑地下水作用的物理确定性模型、Wu 等人的分布式斜坡稳定性模型、Pike 等指标分析模型、Atkinson & Massari 的逻辑回归模型、Chung 等和 Carrara 等的统计分析模型、Chung 等人的概率分析预测模型以及 Binaghi 等和 Chung 等的模糊集预测模型。这些模型均具有各自的优点,但同时也存在一定的不足,如指标分析方法、概率统计方法以及模糊预测方法所建立的模型一般仅适用于特定的研究地区,同时很难提取与滑体地质、力学及其他环境条件有关的信息^[12]。Saro Lee & Kyungduck Min 等用 GIS 的空间数据管理功能和空间分析能力结合遥感数据分析了韩国 Yongin 地区滑坡敏感性^[13];Gregory 等使用多重罗吉斯回归和 GIS 技术对堪萨斯东北的滑坡进行了预测^[14];Forster 等以南威尔士煤田的土地利用提供指南为目的,利用 GIS 技术对当地的滑坡灾害进行了危险性评价研究^[14]。

国内危险性评价模型研究虽然起步较晚,但自 20 世纪 90 年代后,国内学者在评价方法、模型方面的研究逐渐深入,工程应用范围不断拓广,实用性得到很大提升。

伍四明等运用模糊 ISODATA 聚类分析和模糊综合评判方法,对万县滑坡群稳定性作出评价。其计算结果与稳定性评价的地质分析法,极限平衡计算等方法得出的结论一致,从而证实了模糊 ISODATA 聚类分析和模糊综合评判方法用于滑坡群稳定性评价的合理性^[15];孙明华对等级参数评判法中等级参数向量 W 与等级分数线之间的相互关联与制约,指出这两个因素的协调配合是直接影响对模糊综合评判结果的关键^[16];邵顺妹等在研究了古浪—海原地区地震滑坡和重力滑坡形成条件和特点的基础上,采用多因素模糊数学评判方法对该地区的滑坡空间分布特征进行了探讨^[17];夏元友等针对边坡稳定性工程地质评价方法过分强调经验和难以量化的缺点,提出了一种基于人工神经网络的边坡稳定性工程地质评价方法(AN2S2EGEM),详细介绍了它的建模方法和应用实例^[18];谢全敏等(1997)在清江隔河岩水电站进出口边坡稳定性分析中提出了岩体边坡稳定性灰色聚类空间预测方法,并获得了较好的结果^[19];陈亚宁基于灰色系统理论,结合新疆“96·7”特大暴雨公路受灾地区实际灾害损失,进行了定量化灾情损失评估和灾害等级划分,得出暴雨公路中各受灾地、州、市的聚类系数和灾度等级表^[20];吴向阳用灰色聚类方法对某金矿边坡工程岩体质量进行评价^[21];张厚美等通过收集钻井岩石力学性能指标(岩石可钻性、压入硬

度、研磨性、抗压强度、泊松比、渗透率等),应用聚类分析、主成分分析等多元统计方法及灰色系统理论方法对这些数据进行了处理,结果表明岩石可钻性和压力硬度的关系最为密切,存在着近似的幂函数关系^[22];陈顺良采用灰色系统理论对边坡岩体稳定性分级指标进行计算机定量分析,并根据所得聚类向量,对边坡岩体的工程性质作出评价^[23];罗先启等采用 BP 神经网络模型建立了大石板滑坡在降雨条件下,地下水位与降雨过程之间的非线性关系,并预测了诱发滑坡的 1983 年六七月典型降雨过程引起的地下水位^[24];吕培印试运用人工神经网络方法,将滑落层的内摩擦角和倾角、滑落层走向与边坡走向间的夹角、剪切带长度、降雨量、断层、坡高等因素作为网络的输入,以滑坡体的长度、宽度和顶部裂缝距坡顶的距离作为网络的输出,网络训练好以后便可用于对潜在不稳定区范围的预报和圈定^[25];谢全敏等应用灰色系统理论提出了危岩块体稳定性的灰色聚类评价方法,同时结合可靠性理论和时序分析方法对危岩块体稳定性进行综合评价,并用该方法对清江电站 V 号危岩块体进行了稳定性分析^[26];马跃平等对影响露天矿边坡稳定的各种岩性,进行分析、归纳,找出主次要因素,进而用灰色系统聚类方法对边坡的稳定性进行研究,为边坡维护和治理指明方向^[27];蔡雪峰等在建地铁暗挖施工技术采用灰色聚类评估方法构造出相应的评价模型,计算结果显示 3 个不同灰类的白化权函数值可以确定各项暗挖技术是合理的^[28];朱庆杰等基于人工神经网络方法,建立了区域地壳稳定性评价的数学模型,并介绍了计算方法^[29]。

其他学者,如殷坤龙、晏同珍等就滑坡灾害和斜坡不稳定性空间预测与区划进行了深入的系统研究,先后提出了信息分析模型、多因素回归分析模型、聚类分析模型、判别分析模型等。通过秦巴山区、三峡库区区域滑坡灾害预测的实例研究,探索了信息分析模型的理论基础,认为特定地区的滑坡影响因素不是简单地与单个因素有关,而更重要的是与多因素组合有关,从而提出了信息熵分析模型。该系统经过近 20 年的研究与发展,目前已经完全实现了基于 GIS 技术的滑坡灾害危险性预测与区划^[30]。程凌鹏等在对重庆市渝北区进行的地质灾害空间预警研究中,提出了“地质灾害综合预警指标”的概念和模型,认为该指标比地质灾害危险性更为准确合理,初步形成了以地质灾害空间发育度 F 、危险度 W 、综合预警指标 D 为核心的区域地质灾害预警指标和模型体系^[31]。宋光齐在进行四川省地质灾害危险性评价研究时,运用测度理论,以地(市)为单位进行了地质灾害危险性宏观统计分析,并讨论了暴雨型滑坡预警等问题^[32]。朱良峰等利用 GIS 系统中 API 函数的开发模式开发了信息量模型,建立了基于 GIS 技术的区域地质灾害信息分析系统,进而对区域斜坡地质灾害进行了分析^[33]。单新建等使用定量因子分析模型建立 GIS 计算模块对香港大屿山岛中部进行了区域滑坡危险性预测^[34]。周翠英等在 GIS 系统下,以边坡失稳的确定性系数(CF)计算和滑坡因子敏感性分析,确定了各因子中对应于滑坡发生的最不利数值区间,在对区域性滑坡发生概率分析中,得出了三峡库区奉节段滑坡发生的敏感条

件为坡度和边坡所处位置高程的结论^[35]。王志旺等(2006)利用 GIS 的空间分析功能,采用逻辑回归方法对长江三峡库区姊归—巴东一带滑坡灾害进行了危险度分区定量评价^[36]。

2) 危险性区划及制图研究

随着人民对地质灾害认识的逐渐加深,世界各地在进行城市总体规划集镇及村庄规划时均不同程度的要求进行地质灾害的危险性评估,并根据危险性大小进行区划。国内外学者在危险性区划方法及制图研究领域进行了不少有益的探索,最早可追溯到 20 世纪 70 年代。

据学者 Wieczork 介绍,美国早在 1977 年就因滑坡地质灾害防治的需要,而在 1:3 000 土地利用图上开展加利福尼亚州的危险性区划制图工作;1983 年后又利用 1:24 000 地形图对加利福尼亚北部进行了滑坡危险性区划,并服务于山林伐木规划的编制工作;1988 年 S. D. Ellen 以加利福尼亚地区的高精度航片为基础资料,通过判译后得到研究区域与滑坡有关的地形、岩性、分布规律等因素数据,进而专门进行了暴雨型滑坡的危险度区划,分 5 个等级,并注明了防灾重点地区;瑞士政府水文管理相关部门于 1995 年出台规定,专门制定了滑坡灾害危险性评价标准,将危险性等级划分为高、中、低 3 类,并以地形坡度和滑坡速度为主要评价指标对全国范围内的斜坡地带开展危险性区划工作^[37,38,39]。

印度 Rookree 大学(Gupta 等)针对喜马拉雅山麓 Rmagnaga Catchment 地区滑坡地质灾害问题展开研究,过程中引入多源数据集,用危险性系数(LNRF)量化描述滑坡灾害的危险性,并以此为据进行区划制图^[40]。

Martin Cross 根据地质图和航片的判译结果,对滑坡灾害的影响因素加以识别,并创新性地提出了滑坡敏感性指标(LSI)的概念,将其定义为滑坡面积与研究区域总面积的比值,认为敏感性越大则滑坡危险性越高,最终以正方形网格为基本单位开展危险性区划制图研究。后来 Aleott 等学者(2000)进一步扩展了 LSI 指标的内涵,使得该指标同时反映研究区域内历史灾害点的发育规律和现有滑坡灾害点的控制性因素,从而提高了区划的合理性^[41]。

A. K. Pachauri 等探索综合运用地形学和地质学相关理论开展滑坡危险性分区,并成功运用于喜马拉雅山麓 Garhwal 地区^[42]。

P. Aloetti & Chowhdury 以文献综述的形式对学术领域地质灾害危险性评价和风险评价的研究成果做了分析,涉及思路、方法、数学模型等诸多方面,并对可接受风险水平问题做了专门论述^[43]。

A. Ragozin 试图构建地质灾害风险评价的理论体系,他在文中对危险性、易损性和风险做了定义性描述,分别给出了危险性评价指标和易损性评价指标的确定方法,认为危险性可用地质灾害各个主控因素概率的乘积来表达,易损性通过调查统计直

接获取,提出了针对单灾种地质灾害的易损性指标评价表^[44]。

M. Michael-Leiba 等将 GIS 软件技术平台成功运用于澳大利亚 Cairns 地区的地质灾害危险性和风险区划研究中。当时的研究成果基本代表了风险区划制图领域的国际领先水平,尤其是当时提出的三维评价系统、结合网络技术等为该学科的发展指明了方向^[45]。

A. Uromeihy 等提出潜在灾害指数(SPI)的概念,该指数在对伊朗 Khorshrostan 地区滑坡灾害进行危险性区划时得到检验^[46]。基本思路是:首先识别灾害影响因素,然后利用模糊综合评判理论对评价区域内事先划定的在网格单元分别计算该指数,依次实现地质灾害危险性的定量化表达,最终结果用于绘制区划图^[47]。

进入 21 世纪后,国外学者在地质灾害危险性或风险评价区划研究方面已无重大突破,评价方法、模型等基本成熟,相关领域的研究多转向斜坡破坏模式、灾变主控因素的识别、智能化等几个方面。

国内以中科院山地所为代表的科研院所于 20 世纪 80 年代初开始地质灾害危险性区划研究,提出了基于坡度、地形和滑坡分布密度三要素的危险度判别等方法。其研究成果相继应用于黄河龙羊峡水电站库区、长江三峡水电站库区、湖北秭归县等地区,期间成功预报了鸡鸣寺滑坡。1991 年后上述判别方法进一步丰富并拓展了区域地质灾害危险性区划领域^[48]。

20 世纪 90 年代以后,我国学者在地质灾害危险性区划领域开展了诸多研究工作,研究范围遍及全国各地的各种地质灾害类型,研究成果的实用性逐步增强,为国内地质灾害风险管理及进一步制订规划、采取防控措施奠定了较为坚实的基础。如黄润秋、陈喜昌等运用多种数学模型开展长江三峡库岸稳定性区划制图;张业成等研究并绘制了全国地质灾害强度分布图;刘汉超、陈明东等针对金沙江向家坝水电站库区进行了岸坡危险性分区制图;唐川等针对云南省地质灾害发育情况,按 4 个危险性等级进行区划研究^[49];赵强等针对铜川市市区范围的斜坡稳定性开展区划制图工作;柴贺军等人结合眠江实例,对滑坡堵江危险性评价与预测进行了系统研究;付延玲对陕西省地质环境质量等级划分问题进行研究,并分 7 个等级进行分区^[50];杨建军等对西安市区域地壳稳定性进行分区评价,按 3 个等级划分为 10 个区域^[51];胡亚东专门研究了黄河积石峡水电站库区的泥石流沟危险性,综合运用两种数学模型开展区划工作^[52];唐红梅等运用 GIS 软件平台,以重庆市万州区吴家湾滑坡为例,通过绘制危险性等值线图的方式对其进行危险区划^[53]。

公路作为承担交通运输的生命线工程,相关学者近年来逐渐认识到地质灾害对其造成的损害越来越大,由此公路地质灾害危险性评价与区划的研究工作相继展开。乔晓霞针对复杂山区高速公路沿线地质灾害危险性,依据公路沿线地质灾害的特点,选用三级模糊综合评判法对多灾种综合影响下的公路沿线地质灾害危险性进行了综合评价,得出危险性分区评价图^[54]。本书以陕西公路主要地质灾害(崩塌、滑坡和泥

石流)危险性分区与评价为研究内容,陈雷结合陕西省造成地质灾害频发的地质工程条件和动力环境条件,分析了境内公路地质灾害的发育现状,提出了具体的危险性区划方案,并进行分区评价^[55];刘玉杰以陕鄂界至安康高速公路为例,运用 GIS 数据管理系统对高速公路滑坡灾害危险性进行评价,为公路沿线地质环境管理和灾害评估的信息化提供了参考依据^[56]。

通过综述国内外学者在危险性评价及区划领域所作的研究工作后可以发现:①危险性评价方法和模型众多,较为常见的有多元回归法、聚类分析法、模式识别法、神经网络法、信息量法、综合评判法等;②评价模型的运用是以前期获取的评价指标要素为基础的,评价指标的识别和选取从研究开始的单因素向多因素逐步发展,基本建立了某些特定条件下地质灾害危险性评价的指标体系;③基于不同的研究目的,区划制图方式灵活、多样,运用 GIS 软件技术平台程序化评价模型和制图代表了当前领域的发展方向;④鉴于山地公路地质灾害具有一定的特殊性,具有针对性的研究工作开展时间不长,相关研究成果较少,系统性的评价理论方法仍处于探索阶段。

1.3.2 易损性评价及区划研究

纵观近年来国内外学者对自然灾害(包括地质灾害)的研究以及开展的防灾减灾活动成果,相关研究对灾害成因、发展演化机理的探讨较多,且较为成熟,由此而针对灾变机理进行的防护工程建设的投入较大。然而,地质灾害具有自然和社会两种属性,随着研究工作的逐步深入,众多学者把目光转移到对地质灾害的社会属性当中,于是易损性研究开始发展,虽然该研究起步较晚,但也已长达半个多世纪。具体研究现状如下:

(1) 国外自然灾害易损性研究的现状

国外地质灾害社会易损性的研究始于 20 世纪 50—60 年代,美国在这个时期自然灾害频发,给社会经济造成巨大损失,政府决策部门的迫切需要促进了该研究领域的全面发展。事实上,早在 1931 年美国学者 MacIver 就探讨了人类社会与自然灾害的关系,并提出“环境塑造灾害,以及环境改变人类命运”的观点;进入 70 年代末,Burton 等人编著了《环境灾害》,这时已经对灾害的易损性有了比较清晰的认识,认为易损性就是易于遭受自然灾害的破坏或损失^[57];Blaikie 等人从易损性的社会结构出发给出了定义,重点分析了人类社会历史、文化、社会制度及经济发展对灾害处理能力的影响。

1975 年的,为加大防灾减灾力度,确定国家政策在该领域的导向,美国首次开展了基于社会科学方法的国家级自然灾害评估工作。该项目由地理学家吉尔伯特·F. 怀特(Gilbert F. White)和社会学家 J. 尤金·哈斯(J. Eugene Haas)主持,组成了由学者和决策者共同构成的评估委员会,通过对自然灾害风险管理理论和防灾减灾活动

的回顾和评估,全面规划了该领域今后研究的重大关键课题,为自然灾害的易损性研究指明了方向^[58]。

1981年,Pelanda指出“灾害是社会易损性的实现”,“灾害是一种或多种致灾因子对易损性人口、建筑物、经济财产或敏感性环境打击的结果,这些致灾事件超过了当地社会的应对能力”(Carter,1991;Cuny,1993;Ward,1994)^[59]。

1992年,K. Smith初步阐述了风险管理各构成要素的相互联系,系统总结了人类社会对灾害认知、风险评估、社会易损性及如何调整灾害等,并把自然灾害区分为对地质灾害、气象灾害、水文灾害和技术灾害这4个类型,分别描述了其灾害特征和调整模式^[60]。

William J. Petak 和 Arthur A. Atkisson 对承灾体进行了划分,并对不同因素或条件对承灾体的影响开展了深入研究;防灾、减灾与灾害救援等政策制定的影响因素和政策对不同灾害受害者的影响^[61]。Blaikie 等在“*At Risk*”一书中首次提出描述灾情的模型(灾害=致灾因素+易损性),指出致灾因素和易损性共同构成灾情,前者是必要条件,后者是形成灾害的根源。还进一步指出同一灾害强度下,人类社会经济损失随易损性的增大而增大,并认识到全球一体化、人口增长、城市化、气候变化等对社会易损性存在重要影响,灾害防控应从致灾因素和易损性两个方面进行综合研究^[62]。

20世纪90年代,Susan L. Cutter 通过对研究区域范围内社会经济数据及人口数据的统计分析,提出了自然灾害社会易损性指数的概念(SVL),并给出了计算模型,通过计算该指数以划分易损性等级,同时采取措施提高人类社会抵御自然灾害的能力。Juha I. Ditto 等学者专门针对社会弱势群体研究其易损性,用以完善灾害管理体系。自此之后,国外部分学者进一步探索了易损性的内涵,Weichsel 认为易损性是承灾体承受自然灾害时的综合能力,它受灾害影响范围内承灾体的暴露度、人类社会的应急准备及灾害防控措施的综合影响;Wisner 定义易损性为个人或群体处理灾害、对其进行抵抗及灾后恢复的能力,易损性评价需要考虑分散或特定灾害状况下人们的生命和生存程度;Alexander 进一步指出“易损性”一词来源于拉丁词“*vulnerare*”,意为“将要”,指明显的自然或人为伤害^[63]。

(2) 国内自然灾害易损性研究的现状

在1987年第42届联合国大会上,一致通过了第169号决议,确定1990—2000年在全世界范围内开展一个“国际减轻灾害十年”活动,其宗旨是通过国际上的一致努力,将当前世界上各种灾害造成的损失,特别是发展中国家因自然灾害造成的损失减轻到最低限度。由此开始,国内学者结合我国自然灾害特征及社会经济状况开展社会易损性的研究。

1988年北京师范大学史培军、黄崇福、王静爱等承担国家科技计划部门基金项目“区域自然灾害系统研究”,并于2003年结题。该项目建立了区域自然灾害系统结构、功能信息不完备条件下自然灾害风险分析的理论和方法,指出我国宏观自然灾害