

区域生态与环境过程系列丛书

基于RS / GIS的 降雨条件下滑坡风险性 评估研究

李巍岳 刘春 高峻 著

JIYU RS/GIS DE
JIANGYU TIAOJIAN XIA HUAPO
FENGXIANXING
PINGGU YANJIU



科学出版社

区域生态与环境过程系列丛书

基于 RS/GIS 的降雨条件下 滑坡风险性评估研究

李巍岳 刘春 高峻 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了降雨滑坡在中国的发生与分布的现状,并采用 RS 与 GIS 手段对降雨滑坡造成的风险进行评估研究。本书给出降雨滑坡数据收集、入库、制图以及可视化表达的过程,为揭示中国降雨滑坡分布的规律以及为降低滑坡风险提供科学的依据。

本书内容翔实、应用性强,是一本地理信息科学中技术与应用并存的参考书,适合滑坡灾害学研究人员和有关大专院校地理信息科学专业的师生阅读,也可供从事遥感监测以及地理信息系统的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 RS/GIS 的降雨条件下滑坡风险性评估研究/李巍岳,
刘春,高峻著. —北京:科学出版社,2016.9
(区域生态与环境过程系列丛书)
ISBN 978-7-03-050033-5

I. ①基… II. ①李… ②刘… ③高… III. ①滑坡—
风险评价 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 231880 号

责任编辑:许 健

责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 9 插页 8

字数: 200 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

区域生态与环境过程系列丛书

序言

“十八大”以来,党中央高度重视生态文明建设。中共十八届五中全会强调,实现“十三五”时期发展目标,破解发展难题,厚植发展优势,必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念。同时提出:坚持绿色发展,必须坚持可持续发展,推进美丽中国建设,为全球生态安全做出新贡献。构建科学合理的城市化格局、农业发展格局、生态安全格局、自然岸线格局,推动建立绿色低碳循环发展产业体系。推动低碳循环发展,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系,实施近零碳排放区示范工程。加大环境治理力度,深入实施大气、水、土壤污染防治行动计划,实行省以下环保机构监测监察执法垂直管理制度。筑牢生态安全屏障,坚持保护优先、自然恢复为主,实施山水林田湖生态保护和修复工程,开展大规模国土绿化行动,完善天然林保护制度,开展蓝色海湾整治行动。

作为我国经济最发达、城市化速度最快的地区,长江三角洲(简称“长三角”)城市群面临着快速城市化所带来的一系列环境问题。快速城市化的过程常伴随着土地覆被、景观格局的变化而改变了固有下垫面特征,在城市中形成了特有的局地气候,导致城市热岛及极端天气的频繁发生,严重危害人们的生命财产安全。此外,工业化过程所引起的大量化学物质的使用和排放更对区域生态环境造成了莫大的威胁。快速城市化过程中所出现的环境问题,其核心还是没有很好地尊重自然,没有协调人-地关系,没有把可持续发展作为区域发展的最核心问题来对待。因此,我们需要在可持续发展思想的指导下,进一步加强城市生态环境研究,以促进上海及长三角区域的可持续发展。

上海师范大学是上海市重点建设的高校,环境科学是上海师范大学重点发展领域之一。1978年,上海师范大学成立环境保护研究室,开展了长江三峡大坝环境影响评价、上海市72个工业小区环境调查、太湖流域环境本底调查和崇明东滩鸟类自然保护区生态环境调查等工作,拥有一批知名的环境保护研究专家。经过三十多年的发展,上海师范大学现在拥有环境工程本科专业、环境科学硕士点专业、环境科学博士点专业和环境科学博士后流动站,设立有杭州湾生态定位观测站等。2013年,上海师范大学为了进一步加强城市生态环境研究,成立城市发展研究院。城市发展研究院将根据国家战略需求和上海社会经济发展要求,秉承“开放、流动、竞争、合作”原则,进一步凝练目标,整合上海师范大学学

科优势,以前沿科学问题为导向,以社会需求和国家任务带动学科发展,构建创新型研究平台,开拓新的学科发展方向,建立国际一流的研究团队,加强国际科研合作,更好地为上海建设现代化国际大都市提供智力支撑。城市发展研究院将重点在城市遥感与环境模拟、城市生态与景观过程、城市生态经济耦合分析等领域开展研究工作。通过城市发展研究院的建立,充分发挥上海师范大学在地理、环境和生态等领域的学科优势,将学科发展与上海城市经济建设和社会发展紧密结合,进一步凝练学科专业优势和特色,通过集成多学科力量,提升上海师范大学在城市发展研究中的综合实力,力争使上海师范大学成为我国城市研究的重镇和政府决策咨询的智库。

该丛书集中展现了近年来城市发展研究院中青年科研人员的研究成果,既涵盖了城市污泥资源化的先进技术、新兴污染物的迁移转化机制及科学数据应用于地球科学的挑战,也透过中高分辨率遥感与卫星遥感降水数据,分析极端天气的变化趋势及变化区域,通过反演地表温度,揭示城市化过程中地表温度的时间维、空间维、分形维的格局特征,定量分析了地表温度与土地覆被、景观格局、降水和人口的相关关系。同时从环境变化和区域时空过程的视角,对城市环境系统的要素、结构、功能和协调度进行分析评价,探讨人类活动影响对区域生态安全的影响及其响应机制,促进区域环境的可持续发展。该系列丛书有助于我们对城市化过程中的区域生态、城市污泥资源化、新兴污染物的迁移转化、滑坡灾害防治、景观格局变化、科学数据共享、环境恢复力以及城市热岛效应等方面有更深入的认识,期望为政府及相关部门解决城市化过程中的生态环境问题和制定相关决策系统提供科学依据,为城市可持续发展提供基础性、前瞻性和战略性的理论及技术支持。

上海师范大学城市发展研究院院长



院士

2016年6月于上海

前 言

滑坡作用过程属于一种自然地质现象,它是指大量山体物质受降雨、地震及洪水等外在因素的诱导,在重力作用下沿着其内部的一个滑动面突然向下的过程。目前,随着全球气候和环境的变化,同时受人为因素的影响,滑坡灾害的发生更加频繁,严重地威胁人们的生命及财产安全。中国是一个滑坡频发的国家,特别是降雨滑坡,占到了总滑坡数的 90% 左右。每年雨季,中国南方的许多地区受滑坡威胁严重,因为滑坡造成的人员伤亡及财产损失居高不下。因此,寻求一套合理快速的滑坡风险分析理论体系,是对滑坡灾害评估及预警预测的关键。

RS 与 GIS 技术的兴起,为滑坡灾害在监测、海量数据处理及管理、分析、预报预警等方面提供了新的工具。鉴于此,本书立足于降雨条件下的滑坡风险分析,采用 RS 与 GIS 技术手段,归纳总结出一套合理可行的滑坡风险分析方案。本书包括两个部分:第一部分是滑坡的基础知识,第二部分是降雨滑坡风险性的评估研究。

主要研究内容如下。

(1) 中国滑坡历史数据收集、管理及分析。利用从媒体报道、统计年鉴以及中国的网络数据库中筛选出的从 1949 年新中国成立到 2011 年的 1 221 个信息完整的典型滑坡事件数据,进行分类编目。采用 Google Fusion Tables 及 Google Maps API 技术,开发了网络版中国滑坡数据库系统,实现 Google 云平台对滑坡空间数据的查询、分发、更新、可视化等应用功能,突破了现有滑坡网络单纯靠文字及图片描述滑坡的模式,实现了滑坡空间与属性信息的统一。在区域地质环境分区基础上,总结出中国典型滑坡的分布、死亡人数及经济损失,重点分析降雨滑坡在中国的分布规律及对相应人群的威胁程度。

(2) 基于 RS 技术的滑坡关键影响因子的提取。重点介绍降雨滑坡最重要的两个因子的提取:DEM 与降雨。DEM 根据分辨率的需求不同,RS 所选择的平台不同。研究中以机载 LiDAR 点云数据及航空遥感影像结合为例,分析 DEM 获取的过程及其在滑坡风险分析中的应用;来自卫星遥感的降雨产品有许多种类型,研究中比较分析目前较为常用四种降雨产品的精度及分辨率,最终选择 TRMM 3B42 系列降雨产品作为降雨的获取数据。同时,利用 TRMM 3B42 V7 数据及典型区滑坡记录,拟合出降雨强度阈值与降雨持续时间的关系曲线。

(3) 中国尺度降雨滑坡风险分析。详细分析引起滑坡的主要内部因子:岩性、凹凸性、坡度、坡向、高度、土壤类型、植被覆盖度、水系及断裂带分布,并结合前面

获取的滑坡历史数据,构建出中国滑坡敏感性的 BP 神经网络模型,得到滑坡敏感性分布图,分析中国公路、铁路及居民点的滑坡风险性。同时,结合收集到的 TRMM 3B42 V7 数据,绘出降雨滑坡的危险性等级分布图,并根据拟合得到的降雨强度阈值与降雨持续时间的关系曲线,分析短期降雨的滑坡分布规律。

(4) 区域尺度降雨滑坡风险分析。从饱和-非饱和土壤降雨入渗规律入手,详细介绍区域滑坡风险分析中用到的 4 个滑坡物理模型,比较分析得出 SLIDE 模型在本书中的适用性,并在该模型原理基础上,开发出界面版的 Ma-SLIDE 运行软件。以四川省理县境内的某次滑坡事件为例,结合前面介绍的 TRMM 3B42 V7 降雨数据,分析 SLIDE 模型的适用性。同时,将前期得到的滑坡经验模型与物理模型结合,以我国的 3 个典型降雨滑坡为例,阐述滑坡时空风险分析的可行性与应用价值。

本书的作者有李巍岳、刘春、高峻,其中李巍岳编写了大部分章节并负责全书统稿,其他作者编写了部分章节并对本书提供了有价值的指导。

本书得以完成,除了要感谢诸多专家提供的宝贵建议与支持外,还需要感谢国家自然科学基金(41501458)、中国博士后科学基金(2016M592860)、科技部国家重点研发项目(2016YFC0502726)、上海市高峰高原学科建设项目以及上海师范大学科研项目(SK201525)在经费上的支持。

由于作者才疏学浅,书中难免会有疏漏与错误之处,还望读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月

目 录

区域生态与环境过程系列丛书序言

前言

第一篇 滑坡的基础知识

第 1 章 绪论	3
1.1 滑坡的定义	3
1.2 滑坡风险	7
1.2.1 滑坡风险定义	7
1.2.2 滑坡风险分类	8
1.3 国内外研究现状	8
1.3.1 总体概况	8
1.3.2 RS 与 GIS 在滑坡风险分析中的研究现状	10
1.3.3 降雨滑坡的研究现状	14
1.3.4 本书存在的问题及不足	17
1.4 本书的着眼点	18
1.5 主要方法与实现过程	19
1.6 本书结构安排	20
第 2 章 中国滑坡分区及主要分布规律	23
2.1 滑坡与地形地貌	23
2.2 滑坡与区域地质环境	24
2.2.1 主要概况	24
2.2.2 区域地质环境分区	25
2.3 降雨滑坡主要概况	27
2.4 本章小结	28
第 3 章 滑坡数据收集及网络数据库系统管理	29
3.1 滑坡数据收集	29
3.1.1 滑坡数据源	29
3.1.2 滑坡数据编目	33
3.1.3 滑坡数据的不确定性	34
3.2 滑坡网络数据库系统	35

3.2.1	WebGIS	35
3.2.2	Google 地图服务与 Google Maps API	36
3.2.3	云数据库及 Google Fusion Tables	37
3.2.4	基于网络服务的滑坡数据库系统设计与开发	39
3.3	滑坡数据风险性分析	42
3.3.1	滑坡数据收集的时空特性	42
3.3.2	基于区域地质环境一级区划的滑坡数据分析	44
3.4	本章小结	49
第 4 章	RS 技术在滑坡因子识别与提取中的研究	51
4.1	滑坡研究中常用的遥感类型	51
4.2	机载 LiDAR 及航片在滑坡监测及建筑物适宜性分析	54
4.2.1	研究区	55
4.2.2	数据收集及处理	55
4.2.3	研究区滑坡危险区分析	58
4.2.4	建筑物适宜性分析	59
4.2.5	结论	59
4.3	卫星降雨数据比较及在滑坡中的应用	60
4.3.1	卫星降雨产品	60
4.3.2	研究区域及地面雨量观测数据	62
4.3.3	数据评估指标	63
4.3.4	卫星降雨产品比较结果分析	64
4.3.5	典型降雨滑坡的主要分布及规律	66
4.4	本章小结	72

第二篇 降雨滑坡风险性评估研究

第 5 章	中国尺度降雨滑坡风险分析	75
5.1	中国滑坡敏感性制图及分析	75
5.1.1	滑坡敏感性	75
5.1.2	统计分析模型	76
5.1.3	滑坡内部因子辨识	78
5.1.4	基于 BP 神经网络训练的滑坡敏感性制图及分析	87
5.2	降雨滑坡风险性分析	92
5.2.1	潜在滑坡威胁的铁路及公路分布区	93
5.2.2	潜在滑坡威胁的居民点分布	94
5.2.3	降雨滑坡的风险分析	96

5.3 本章小结	99
第 6 章 区域尺度降雨滑坡风险分析	100
6.1 饱和-非饱和渗流研究	100
6.2 区域浅层滑坡模型	101
6.2.1 SHALSTAB 模型	101
6.2.2 SINMAP 模型	102
6.2.3 TRIGRS 模型	104
6.2.4 SLIDE 模型	106
6.3 SLIDE 模型在理县滑坡风险分析中的应用	108
6.3.1 Ma - SLIDE	108
6.3.2 理县概况	110
6.3.3 试验分析	111
6.4 经验与物理模型相结合的降雨滑坡风险分析	113
6.4.1 基本原理	113
6.4.2 实例分析	114
6.5 滑坡时间与降雨量临界值之间的关系	119
6.6 本章小结	121
第 7 章 结论与展望	122
7.1 研究结论	122
7.2 特色与创新	123
7.3 展望与下一步工作	124
参考文献	125

第一篇 滑坡的基础知识

第 1 章 绪 论

1.1 滑坡的定义

“自然灾害”是人类依赖的自然界中发生的异常且不可避免的现象,它给人类社会造成了严重的危害,主要包括:地震、火山喷发、滑坡、台风、洪水、土地侵蚀、土地沙漠化、水污染等,这些灾害与环境破坏、人类生命安全有着复杂且密切的联系(徐邦栋,2001)。其中,滑坡灾害所造成的人员及财产的损失往往列于其他自然灾害损害之首(Brugioni et al., 2001)。据 2013 年中国地质灾害通报显示,2013 年中国共发生地质灾害 15 403 起,其中滑坡 9 849 起、崩塌 3 313 起、泥石流 1 541 起、地面塌陷 371 起、地裂缝 301 起和地面沉降 28 起,滑坡占地质灾害总数的 63.9%(图 1.1)。

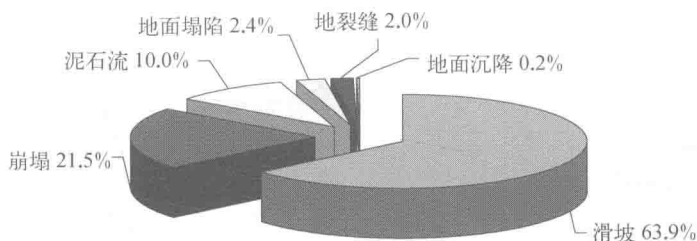


图 1.1 2013 年中国地质灾害类型构成(来自 2013 年地质灾害通报)

滑坡是指大量的山体物质在重力作用下,沿着其内部的一个滑动面,突然向下滑动的自然现象,它由多种外界因素刺激发生,如地震、火山、河流冲刷、融雪、降雨及人类活动等(肖和平等,2000;杜继稳,2010)。尤其是大型滑坡所引起的其他次生灾害的破坏力甚至远远超过它的直接破坏力。近些年来,受全球气候变化异常的影响,山洪滑坡灾害频发,每年因滑坡灾害造成的经济损失近百亿美元,导致数千人伤亡,如美国在 20 世纪 70 年代,滑坡造成的经济损失每年达 10 亿美元,防灾减灾费用更是惊人。2005 年 10 月 8 日的克什米尔大地震所造成的 87 350 死亡人数中有 25 500 人死于由地震所诱发的地质灾害(Dunning et al., 2007)。2008 年汶川地震罹难人数达 69 130 人,其中地震引发的大量山体滑坡是最主要的灾害之一。

中国滑坡发生密度大、频度高、分布范围广。Petley(2012)统计了近 40 个易发生滑坡国家及地区在 2004~2010 年 7 年之间主要滑坡的次数及死亡人数(图

1.2),可以看出,亚洲是滑坡的多发地段,包括 17 个国家:中国、菲律宾、印度、印度尼西亚、巴基斯坦、尼泊尔、越南、孟加拉国、缅甸、日本、泰国、斯里兰卡、塔吉克斯坦、韩国、阿富汗、马来西亚、不丹。中国因为滑坡造成的死亡人数为 6 860 人,排在第一位;而印度的主要滑坡次数为 393 起,明显高于其他国家。中国地质灾害调查报告表明,受潜在地质灾害困扰的中国县级城镇达 400 多个,有 1 万多个村庄受到滑坡、崩塌、泥石流等灾害的威胁(殷坤龙等,2010)。特别是在南方和西北数省的 70 市县中分布有 9 万多处滑坡隐患,几千万人常年生活在滑坡的威胁之下,滑坡灾害平均每年导致数千人死亡和上百亿的财产损失(Zhou et al., 2005)。据中国地质灾害通报显示,2012 年,全国共发生地质灾害 14 322 起,其中滑坡 10 888 起,占到了总灾害的 76.0%。滑坡对人类的危害主要有四个方面:① 对居民点的危害;② 对公路、铁路的危害;③ 对水利、水电工程的危害;④ 对矿山的危害(李长江等,2008)。

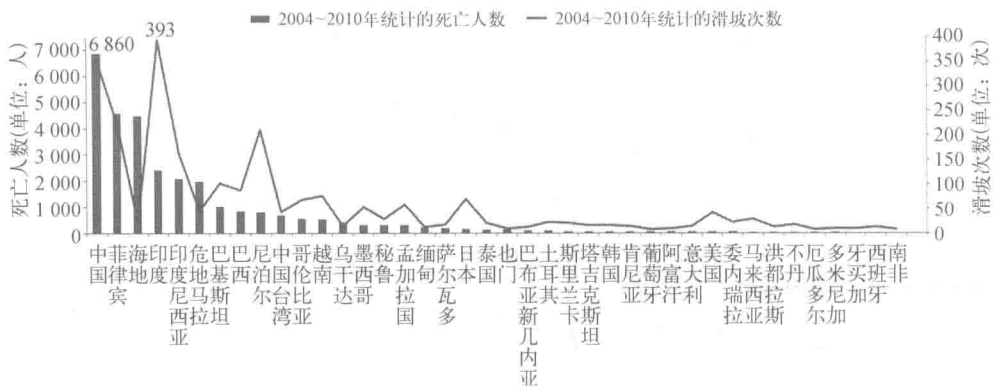


图 1.2 2004~2010 年间易发生滑坡的国家及地区主要滑坡次数及死亡人数(Petley, 2012)

滑坡主要诱发的原因是降雨,在中国,降雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90% 左右(李媛等,2004)。据中国地质灾害通报显示,2009~2012 年 4 年间,中国共发生特大型滑坡、泥石流 142 起,其中 2010 年、2012 年分别为 34 起与 72 起,泥石流通常都会伴有滑坡产生。这 142 起滑坡与泥石流事件中,95% 以上属于降雨诱导产生。(注:据《地质灾害防治条例》,因灾死亡 30 人以上或者直接经济损失 1 000 万元以上的为特大型地质灾害)。

这个阶段,典型的降雨诱导滑坡事件有以下几个案例。

2009 年 7 月 23 日凌晨 2 时 57 分,由于局地强降雨,四川省甘孜藏族自治州康定县(今康定市)舍联乡干沟村响水沟发生特大泥石流灾害。泥石流直接穿过并掩埋了位于沟口的长河坝水电站的工地宿舍区,共造成 16 人死亡、38 人失踪、4 人受伤,冲毁和掩埋省道 211 线近千米(图 1.3)。

2010 年 6 月 28 日 14 时左右,受持续强降雨影响,贵州省关岭布依族苗族自治



图 1.3 四川省甘孜藏族自治州“7.23”泥石流冲毁水电施工工棚和道路
(来自 2009 年中国地质灾害通报)

县岗乌镇大寨村发生特大山体滑坡,导致大寨村遭受灭顶之灾,造成 42 人死亡、57 人失踪。此次滑坡呈现高速远程滑动特征,下滑的岩土体前行约 500 m 后,与岗乌镇大寨村永窝组所处的一个小山坡发生剧烈撞击,偏转 90° 后转化为碎屑流呈直角形高速下滑(图 1.4)。



图 1.4 贵州省关岭布依族苗族自治县岗乌镇滑坡(来自 2010 年中国地质灾害通报)

2010 年 8 月 8 日 0 时 12 分,甘肃省舟曲县城区及上游村庄遭受特大山洪泥石流灾害,造成 1 501 人死亡、264 人失踪。2010 年 8 月 7 日 23~24 时,舟曲县城北部山区三眼峪、罗家峪流域突降暴雨,1 小时降雨达到 96.77 mm,半小时瞬时降雨量达到 77.3 mm。短时超强暴雨在三眼峪、罗家峪两个流域分别汇聚成巨大的山洪,由

北向南冲向县城,造成沿河房屋被冲毁,泥石流阻断了白龙江,形成了堰塞湖。

2010 年 9 月 21 日 0~10 时,台风“凡亚比”造成了广东省高州市和信宜市交界地区的马贵、古丁、大坡、深镇、平塘五镇强降雨,从而引发了群发性山体崩塌、滑坡和泥石流灾害,共造成了 21 人死亡、12 人失踪、5 人受伤。

2011 年 9 月 17 日 14 时 10 分,陕西省西安市灞桥区席王街道石家道村白鹿塬北坡由于持续降雨发生特大黄土滑坡灾害。据气象资料显示,9 月 1 日至 17 日该区域累计降雨量达 284.5 mm,灾害规模达 $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 土方量,共造成 32 人死亡、5 人受伤,直接经济损失达 5 200 万元(图 1.5)。



图 1.5 陕西灞桥区黄土滑坡(来自 2011 年中国地质灾害通报)

2012 年 8 月 29 日下午 18 时至 30 日凌晨,四川省凉山彝族自治州突降暴雨,木里藏族自治县、盐源县、冕宁县三县交界处的锦屏水电站施工区发生群发性滑坡、泥石流灾害 100 余处,共造成 24 人死亡失踪、2 人受伤。其中,工程区施工人员死亡失踪 10 人、工程区外围村民死亡失踪 14 人(图 1.6)。

2012 年 10 月 4 日上午 8 时 10 分,云南省彝良县龙海乡田头小学发生滑坡灾害,滑坡造成了 19 人死亡(包括学生 18 人、当地村民 1 人)、1 人受伤。滑坡损毁小学教室 3 间、村民房屋 9 间。滑坡的原因是由于持续降雨,当地岩土体逐渐饱和,抗剪强度降低,松散土与基岩接触面失稳。

以上的这些降雨滑坡事件让人触目惊心,同时也表明,降雨多的年份滑坡灾害明显要多于降雨少的年份。这些大型、特大型降雨滑坡总体的特点是体积大、势能高、危害对象多,同时降雨滑坡还具有突发性的特点,结果往往造成严重的损失。不仅威胁到当地居民的生命财产,还严重地影响工厂、矿山、铁路、公路等重要的基础设施。因此,对降雨滑坡风险分析研究,既有利于加深对降雨滑坡发生、演变及防治措施的认识,又能充分利用其规律来指导灾害地区规划及基础设施的建设,最终达到防灾减灾的目的。这项研究具有重要的理论价值和现实意义。



图 1.6 锦屏水电站大型群发性滑坡、泥石流(来自 2012 年中国地质灾害通报)

1.2 滑 坡 风 险

1.2.1 滑坡风险定义

“风险”一词的英文是“risk”，来源于古意大利语“riscare”，英译为“To dare”（敢），是指冒险并与利益相关的主动行为。根据国际岩土力学和地质工程协会（2005）编著的《滑坡风险评价术语表》（Fell et al., 2005），风险被定义为生命、财产或者环境造成的影响事件的严重性和可能性的度量。在数量上，风险等于危险与潜在损失价值的乘积，这也可以表述为不利事件发生所造成的损失结果与事件发生概率的乘积。不同地域由于地形、区位、植被、地貌、水文等差异，会有不同形式的灾害发生。任何形式的灾害都有一定的风险，不同的灾害所造成的风险大小程度不同。

国外开展滑坡风险研究工作较早，研究体系已经基本形成，针对不同类型的滑坡风险也给出了明确的定义，其内容和形式大同小异。但国内的研究较为滞后，对滑坡风险的定义和分析都还比较模糊（吴彩燕和王青，2012）。大量的文献中对地质灾害风险的定义比较倾向于联合国人道主义事务部给出的表达形式：

$$\text{风险} = \text{危险性} \times \text{易损性}$$

套用到滑坡风险的定义应该为滑坡发生的危险性和滑坡损失的可能性的综合评价。还有一种更为普遍的表示形式，即用非乘积的形式对概率和损失