

降雨型滑坡预报

的理论、方法及应用

Forecasting of Landslides Triggered by Rainfall:
Theory, Methods & Applications

李长江 麻士华 朱兴盛 著

地质出版社

降雨型滑坡预报 的理论、方法及应用

Forecasting of Landslides Triggered by Rainfall:
Theory, Methods & Applications

李长江 麻土华 朱兴盛 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书由三部分内容组成。第一部分介绍了滑坡的危害与分布,滑坡的定义、分类和形成条件。第二部分总结、分析了前人对降雨型滑坡机理和预报研究的主要成果。第三部分是本书的重点,介绍分形、人工神经网络和地理信息系统等理论和方法在降雨型滑坡预报与易发程度评价中应用研究的最新进展,主要阐述了降雨型滑坡的分形分布、计算有效前期降雨量的分形方法、降雨型滑坡的时间与空间预报的条件概率,以及基于GIS和aiNet的滑坡时空概率预报系统、滑坡易发程度区划方法等问题。

本书可供灾害地质、资源环境、地理信息系统与计算机应用等方面的研究人员、工程技术人员以及高等院校有关专业的教师、高年级学生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

降雨型滑坡预报的理论、方法及应用/李长江等著.

北京:地质出版社,2008.11

ISBN 978-7-116-05890-3

I. 降… II. 李… III. 滑坡-预报-研究 IV. P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第174699号

JIANGYUXING HUAPU YUBAO DE LILUN, FANGFA JI YINGYONG

责任编辑:陈军中

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张:12.125

字 数:270千字

印 数:1—1200册

版 次:2008年11月北京第1版·第1次印刷

审图号:GS(2008)2796

定 价:38.00元

书 号:ISBN 978-7-116-05890-3

(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)

序 一

降雨引发的滑坡（包括泥石流）是一种发生频度很高，分布地域很广，危害十分严重的地质灾害。发展科学的预报方法，建立有效的业务化运行系统，最大可能地把降雨型滑坡灾害减灾工作的重点放在灾害前而不是灾害发生之后，是地质学家和气象学家共同的责任。

降雨引发的滑坡是雨水与作为天气系统下垫面的地质、地形、土壤等因素共同作用的结果，对一地区，如何根据给定的降雨条件，综合利用地质、地形、土壤等信息细化对滑坡预报的空间分辨率，既是减灾实践的需要，也是一个重要的科学问题。地质、地形、土壤等条件在空间上是非均匀变化的，并非所有的地方都会发生滑坡；只有在地质、地形、土壤等因素满足一定条件的地方，降雨才会引起滑坡；因此降雨引发滑坡的预报是一个非线性问题，它涉及复杂的系统工程。要实现对降雨引发滑坡的精细化预报，除了需要提高降雨预报的时间和空间分辨率，更需要考虑下垫面因素的作用，并引入与发展新的理论和方法。

李长江等同志系统地研究了降雨型滑坡的预报问题，阐明了给定降雨条件下，滑坡与下垫面因素（地层岩性、地形、土壤等）之间的条件概率关系，从理论上提出了对降雨引发滑坡的精细化预报问题的解决方案，并在此基础上采用一种自组织型人工神经网络与地理信息系统技术建立了预报模型。作为该模型的一个应用示范，建立的业务化运行系统，实现了以区域降雨预报和雨量监测数据作为输入变量，按 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格单元的 24 小时滑坡概率预报；自 2003 年以来，该系统一直被浙江省国土资源厅与浙江省气象局，以及宁波市气象台应用于日常的降雨-滑坡预报工作中，并取得了很好的减灾效果。《降雨型滑坡预报的理论、方法及应用》这本专著全面总结了作者的理论探索和成果的应用过程，具有学科交叉、理论紧密联系实际的重要意义。

作者对降雨型滑坡的分形研究成果是本书的另一个重要内容，它揭示了降雨引发的滑坡在空间上具有分形分布性质，滑坡频度作为降雨量的函数遵循分形关系，并在此基础上发展了一些新的滑坡评价方法。

我深信本书一定会给关心降雨-滑坡问题的气象和地学工作者以新的启迪和收获，并对降雨型滑坡预报理论和方法的发展起到积极的推动作用。

中国科学院院士
气象学教授

任荣生

2008 年 10 月 9 日

序 二

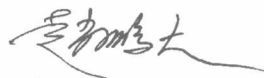
各种地质灾害对世界的破坏正在日益加剧,对地质灾害的评价与预报研究已成为当代地球科学中一个备受关注的领域。不久前在挪威召开的第33届国际地质大会将地质灾害问题列为大会的8个议题之一,其核心内容是:如何开发有效的灾害预报及应急系统,最大可能地减小地质灾害对人类生命财产造成的威胁和损失。《降雨型滑坡预报的理论、方法及应用》正是适应了这一形势的需要。

降雨型滑坡是在一定的地质、地形、地貌等条件下水与斜坡岩土体相互作用的结果。岩土体具有各种尺度的不均匀性,地形、地貌等也存在复杂性和空间变化性;不同地段的斜坡,其内在的稳定性不同,触发滑坡的降雨量也不同。滑坡发生概率是随不同地质、地形位置和降雨分布而变化的;因此,降雨-滑坡是一个复杂的非线性系统,对它的研究涉及地球科学的前沿领域。对于区域上的降雨型滑坡预报研究,关键在于如何采用非线性的理论,集成多种技术方法,从复杂的降雨-滑坡关系中发现非直观的滑坡形成与分布规律,揭示滑坡与降雨、地层岩性、构造、地形等因素之间的条件概率关系。

李长江等广泛涉猎了国内外的研究现状,采用分形、人工神经网络等非线性理论、方法以及GIS技术,基于翔实的滑坡调查结果、降雨观测数据和地质、地形、土壤等资料,揭示了降雨型滑坡在空间上的分形分布规律,滑坡频度与降雨量之间存在分形的关系,提出了评价滑坡的降雨条件和滑坡易发程度的分形方法,建立了降雨引发滑坡的条件概率模型,发展了不同于传统方法的,集GIS、人工神经网络与数据库为一体的滑坡时间与空间概率预报系统。作者的研究不仅创新之处颇多,而且理论联系实际。该书是作者在其研发的滑坡预报系统经过连续5年实际应用之后总结完善基础上而写成的,作者这种严谨的治学精神尤其值得称道。

中国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一,特别是随着经济的发展,人口不断向城镇迁移,城镇周边山地正在不断被开发利用,由此造成降雨型滑坡逐年增加,减轻和预防滑坡灾害已日益成为紧迫而重要的课题。该书的出版对于推动滑坡预报研究的发展,预防和减轻灾害损失将具有重要意义。

中国科学院院士
勘查地质与数学地质学教授



2008年10月31日

前言

滑坡（土体和岩体滑动，也包括泥石流和崩塌等）是山区经常发生的灾害。滑坡与地震、海啸等灾害不同，滑坡在有些地方一年可以发生几次，甚至几十次。世界上的大多数山区几乎每年都会发生大大小小的滑坡。在许多国家和地区，滑坡灾害每年都威胁着人们的生命和财产安全。为了促进滑坡研究的发展，积极应对滑坡灾害带来的挑战，联合国教科文组织（UNESCO）、国际气象组织（WMO）、联合国粮农组织（FAO）、联合国国际减灾战略组织（UN/ISDR）于2002年1月在日本京都成立了国际性的滑坡学会组织——国际滑坡协会（the International Consortium on Landslides, ICL），国际滑坡协会的刊物——《滑坡》（Landslides）于2004年正式创刊。

各种自然因素引发的各类滑坡中，以降雨引发的滑坡，即降雨型滑坡发生的频度最高，分布的地域最广，造成的灾害最严重，它是滑坡预报研究的主要对象。目前一般认为，雨水渗入斜坡岩土体后导致其内部孔隙压力增大、有效应力减小是降雨型滑坡发生的主要机制。于是，对降雨型滑坡的预报自然就与降雨预报概率紧密地联系在一起了。降雨的预报早已成为人类每天的例行工作，降雨预报的时间与空间分辨率仍在不断提高，因而对降雨型滑坡进行预报也是可能的。

能够引发滑坡的天气条件与气象学家、水文学家用于预测洪水的信息基本相同，但是与预报洪涝灾害相比，预报滑坡灾害的难度要大得多。潜在的洪灾区容易被标示在图上，并且一旦圈定出来一般在很长时间内不会由于后来发生的洪泛事件而改变（除非防洪基础发生了改变）。潜在的滑坡地点却很难确定，因为导致滑坡的水文地质作用会受局部因素（如地层岩性、构造裂隙、土体厚度、地形地貌等）的强烈影响，会随着位置不同而变化。

Varnes 和国际工程地质协会（1984）对自然灾害风险的定义是“某种潜在致损现象在一个给定地区于某一给定时段内发生的概率”。按照这个定义，对降雨型滑坡的预报应当能够提供在给定降雨条件下一个区域内任一地方在给定时段的滑坡发生概率。此外，还需要对可能发生的滑坡规模进行预测。因此，对一个区域的滑坡预报从根本上讲需要解决三个问题：①什么时间发生？②在哪里发生？③规模有多大？迄今，人们关注和研究最多的主要是前两个问题。对于一个区域内可能发生的滑坡事件规模预测，目前主要是通过研究对滑坡发生规模和发生频度之间关系的研究对可能发生的大于某个规模的滑坡事件概率进行评价（如 Malamud 等，2004），在这方面分形统计学是一种有用的工具。

由于滑坡与降雨之间有密切联系，人们自然就希望能够通过对引发（或未引发）滑坡的历史降雨数据的各种统计分析来确定可能引发滑坡的降雨量，以此作为实时降雨信息的参照来预测可能引发滑坡的暴雨。基于这个思路，香港土力工程处与香港天文台于1984年在香港建立了滑坡警报系统。Caine（1980）在全球范围收集了前人报道的73处浅层滑坡附近的降雨记录，把峰值降雨强度和历时标绘在双对数坐标图上，得到了一个滑坡发生的降雨强度-历时阈值（下限）。1985年美国地质调查局与美国国家气象局采用降雨强度-

历时阈值方法在旧金山湾区建立了滑坡实时预报系统,并在1986年2月12日至21日的一场暴雨期间对这个系统进行了试验;在试验中利用降雨监测网络的实时监测数据和国家气象局的降雨雷达数值预报信息,通过比对先前对该地区提出的滑坡发生的降雨强度-历时阈值发布了二次滑坡预报。Keefer等(1987)发现这次试验预报的滑坡发生时段与文献报道的滑坡时间吻合较好。

自旧金山湾区的试验以来,对降雨型滑坡的预报研究几乎一直围绕降雨强度-历时关系展开,人们提出了各种经验的或统计的方法来确定可能引发滑坡的降雨阈值。日本、巴西、意大利等国家的部分地区,中国内地及台湾省也先后建立或正在建立基于降雨阈值的滑坡预报系统。然而,现有的各种方法在确定降雨阈值时几乎都未考虑地层岩性、断裂构造、地形地貌等环境因素的影响,已提出的各种降雨阈值尽管在形式上有不同,但都是—种区域性的平均值。基于区域平均阈值建立的预报系统只能按照降雨预报或者进行雨量监测的区域范围,以降雨强度和历时是否达到或超过阈值来预测滑坡可能发生的时间,不能给出预报降雨或雨量监测区域范围内滑坡的概率分布。实际上,与滑坡发生有关的降雨阈值会受地层岩性、断裂构造、地形地貌、植被土壤等许多环境因素的强烈影响,而环境因素在空间上是变化的。因此,对一个预报区域,在给定降雨分布时,滑坡发生的概率在空间上也是变化的。对于这种情况,Casadei等(2003)曾指出,如果对一个区域发布了滑坡警报,但是对于可能遭受滑坡危险的空间模式不清楚,那么这个警报也是难以实施的。如果可能遭受滑坡危险的地带是随着不同地形位置和降雨分布而变化很大,但又不能实时、动态地在图上表示出潜在滑坡的位置,就很难为那些处于危险境地的人们提供警报。

为了解决基于降雨阈值的预报系统无法预测滑坡最可能在哪里发生的问题,人们采取了许多办法,其中的一个主要措施是在预报流程上采用事先编制的滑坡敏感度图来指示潜在滑坡的空间分布(如: Aleotti, 2004等; NOAA-USGS Debris Flow Task Force, 2005)。然而,滑坡敏感度图对潜在滑坡的空间概率提供的是一种静态描述,在其编制过程中一般也不考虑诱发因素(降雨条件)的影响。只有少数研究者在编制滑坡敏感度图时考虑了降雨因素(如: Dai和Lee, 2003; Wang和Sassa, 2006),但是仍然不能对降雨期间滑坡发生的空间概率进行动态性的描述,因而也难以在滑坡敏感度图与基于降雨阈值的预报系统之间实现实时联动。

在许多国家和地区,航空照片解译是应用最广泛的滑坡填图方法。采用航空照片解译进行滑坡填图通常是在较大的滑坡事件之后,甚至是几年以后进行的,按发生年份记录的滑坡数据相当罕见(Casadei等, 2003),以至难以确定有关滑坡发生的具体日期或时间。与滑坡数据相比,在一些建有雨量站的地方通常可以获得比较完整的降雨记录。这种情况或许就导致了他们对降雨型滑坡的预报研究主要集中在降雨强度-历时关系方面。

人们也提出了一些基于过程或者物理的模型(如水文学-无限斜坡稳定性耦合模型)来评价引起斜坡破坏所需要的降雨量和可能滑坡的位置与时间。2005年美国国家海洋和大气管理局与美国地质调查局联合组织的泥石流专责小组在报告中也提出“在5~10年内发展和采用基于物理的斜坡破坏模型来预测在一场暴雨期间泥石流可能发生的地点和时间”。然而,采用这类模型必须要有许多水文学和岩土力学参数,而这些参数往往会随着岩土体类型和采样位置的不同变化很大,又难以在较大范围内对许多点都进行测定(Van Westen等, 2006);目前也鲜有能够在野外进行这方面现场测试的设备(Guzzetti等, 2007)。

因此,基于过程或物理的模型难以在较大范围上应用于降雨型滑坡预报,至今也尚未实际应用于滑坡灾害预报。将它用于一个斜坡体或工程场地的稳定性评价或许是可行的。

国际滑坡界对“在给定降雨条件下,滑坡发生的时间与空间概率预报问题”的研究尚未取得突破性的进展。要解决这个问题除了需要有足够的有日期(时间)和坐标记录的滑坡样本和对应的降雨观测数据以外,其困难还在于:在一个地区影响斜坡稳定性的各种环境因素具有复杂性和空间变化性,并且空间变化性与观测尺度相关联,这些因素与水的相互作用会使孔隙压力对降雨量的响应关系变得十分复杂。如果把降雨型滑坡的发生过程看作一个系统,降雨和环境因素作为对它的输入,滑坡发生概率作为其输出,则输出与输入之间的关系是非线性的。传统的统计方法(如多元回归和判别分析等)或基于物理的确定性模型最初都是为处理线性问题而提出的,因此不适合处理复杂的非线性问题。此外,无论数值天气预报模式的水平分辨率(格点间的距离),还是雨量监测站的密度,现在都还难以捕捉降雨模式的空间变化,尤其对于山区的极端降雨事件更是如此。对降雨预报和监测的空间分辨率也远远大于实际滑坡的线性尺度。

滑坡减灾实践和科学需求需要发展新的理论与方法来解决降雨型滑坡的时空概率预报问题;需要探索如何在当前的区域降雨预报和降雨监测条件下,综合利用地质、地形和地貌等信息细化对滑坡预报的空间分辨率,这是当前对降雨引发的滑坡进行预报面临的主要挑战。

我们从1998年开始关注上述问题。一些科学和技术领域的进展表明,分形理论使人们能以新的观念、新的手段处理非线性问题,从复杂现象中揭示规律;人工神经网络作为一种非线性自适应系统能够通过有限样本的学习,对输入和输出的高度非线性对应关系进行模拟,充分逼近样本所蕴含的规律;GIS是一种以计算机为基础的技术,用于采集、储存、处理、分析和显示各种空间数据或带有地理坐标的数据集,它为处理和综合大量不同来源又具有空间联系的数据提供了一种有力的工具。综合应用这些新的理论和方法,为我们解决降雨型滑坡的时空概率预报问题带来了希望和动力。

浙江省是中国降雨型滑坡频发的地区之一,每年都会因降雨发生大量滑坡。浙江省地质部门在长期的滑坡观测与调查中积累了丰富的资料。我们依据在1990~2003年期间发生的有坐标(位置)记录的3285个滑坡(其中有发生日期记录的1414处)和1257个雨量站记录的日降雨量数据,结合地质、地形、土壤和土地利用等资料,探索了降雨型滑坡的分形分布、滑坡频度与降雨量分布的分形关系、基于分形的有效前期降雨量模型和滑坡易发程度区划方法、降雨型滑坡的时间与空间预报的条件概率等问题。降雨引发滑坡的条件概率模型从数学上描述了在给定降雨条件下一个区域内任一地方在给定时段的滑坡发生概率,2003年在此基础上我们将一种基于自组织系统的人工神经网络(aiNet)与GIS结合起来,发展了一种不同于传统方法的滑坡时空概率预报系统(aiNet-GISPSRIL)。这是一个可以对降雨期间滑坡发生的时空概率进行动态描述的系统。这个系统从2003年7月开始被浙江省国土资源厅和浙江省气象局应用。在每年的雨季,浙江省国土资源厅和浙江省气象局联合组织的突发性地质灾害预报工作组每天使用aiNet-GISPSRIL接收浙江省气象台发布的24h区域降水预报信息和来自浙江省水文局雨量站网的降雨监测数据,经运行处理后,通过浙江省电视台气象预报节目、互联网和手机短信息系统向公众和政府有关部门发布全省区域的24h滑坡预报,预报的空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ (对每个 $1\text{ km}\times$

1 km网格给出一个滑坡概率)。经实地调查,在2003~2007年期间浙江区域发生的可验证的滑坡(包括泥石流)共459处,其中304处滑坡在预报的时间内发生并与预报有滑坡的网格单元吻合,预报成功率为66.2%。由于aiNet-GISPSRIL提供了及时和较准确的滑坡预警,政府有关部门能够及时启动群防体系,并组织处于危险区的人员撤离,使1774人避免了伤亡。

基于aiNet和GIS的滑坡预报系统具有动态性、自适应性和自学习功能,因此它对降雨型滑坡发生的时间和空间概率的预报能力会随着降雨精确预报能力的提高,以及地质、地形、地貌等相关数据的精度,质量的改善与实时更新而不断提高。自2003年以来,许多新的资料不断增加,aiNet-GISPSRIL也在应用中被不断完善;我们的工作受到许多研究者的关注,一些省市的有关部门希望应用aiNet-GISPSRIL。这就促使我们对从1998年开始的这项研究进行系统的回顾,本书就是对它的一个总结。

本书各章节的执笔者和参加者为:第1、2章李长江、朱兴盛;第3、4、5、6、7、8章李长江、麻土华;第9章麻土华、李长江。全书最后由李长江修改定稿。唐小明曾参与了部分研究,王建国参加了部分资料准备工作。

在本项研究中,于2006年分别得到浙江省科学技术厅浙江省重大科技专项重点项目(浙江省地质灾害隐患监测网络系统,计划编号:2006C13024)和国土资源部国家数字国土工程项目(浙江省突发性地质灾害监测预报与应急指挥系统关键技术研究,编号:7S13)的支持;浙江省国土资源厅、浙江省气象局、浙江省气象台、宁波市气象台、浙江省水文局、浙江省地质环境监测总站等许多单位对这项研究给予了大量的支持,在此表示衷心的感谢。

在本书出版之际,我们特别感谢伍荣生院士、陈颙院士、赵鹏大院士、孙岩教授等对这项研究的热忱支持、鼓励与指导。

我们也非常感谢浙江省国土资源厅地质环境处王洲平处长、孙乐玲副处长、李炜工程师、肖常贵工程师,浙江省地质环境监测总站朱川教授级高级工程师、赵建康教授级高级工程师,浙江大学沈晓华教授,浙江省第十一地质大队龚新法教授级高级工程师,浙江省气象局薛根元研究员,浙江省水文局伍远康教授级高级工程师,浙江省气象台王东法高级工程师、潘劲松高级工程师,宁波市气象台陈有利高级工程师,浙江省气象科学研究所俞善贤研究员,杭州国电水利电力工程有限公司吕永进教授级高级工程师,以及我们的同事赵光弟、唐碧雅等给予的许多支持和帮助。

我们还要感谢浙江省地质环境监测总站余丰华、夏跃珍、张义顺等为aiNet-GISPSRIL在浙江的应用和日常运行所做的大量工作。

我们期望本书能在灾害地质领域激发起多学科的综合研究,通过人工神经网络、GIS、分形和计算机与地质学、气象学、水文学的紧密结合,以更有效的方法去预测地质灾害,减少灾害损失。若能如此,我们将不胜欣喜。

李长江
二〇〇八年八月于杭州

目次

序 一

序 二

前 言

第 1 章 滑坡的危害和分布 (1)

1.1 滑坡的危害 (1)

1.2 滑坡的分布 (7)

第 2 章 滑坡的定义、分类和形成条件 (13)

2.1 滑坡的定义和分类 (13)

2.1.1 广义滑坡 (13)

2.1.2 狭义滑坡 (15)

2.1.3 泥石流 (17)

2.1.4 狭义滑坡、崩塌、泥石流之间的关系 (19)

2.1.5 按照触发因素的滑坡分类 (22)

2.2 滑坡的形成条件 (23)

2.2.1 重力作用 (23)

2.2.2 发生滑坡的条件 (24)

第 3 章 降雨型滑坡的机理 (28)

3.1 水对岩土体力学强度的影响 (28)

3.2 滑坡的孔隙压力作用机制 (32)

3.3 斜坡失稳与颗粒流 (36)

3.3.1 沙堆的静止角和颗粒中的摩擦力 (37)

3.3.2 颗粒的堆积密度和挤压膨胀 (37)

3.3.3 应力分布与成拱现象 (37)

3.3.4 颗粒流动分选 (38)

3.4 小 结 (40)

第 4 章 降雨型滑坡预报研究现状 (41)

4.1 降雨阈值方法 (42)

4.1.1 基于过程降雨分析的阈值 (42)

4.1.2 考虑前期降雨条件的阈值 (51)

4.1.3 其他类型的阈值 (54)

4.2	前期土壤含水量模型 (ASWM)	(54)
4.2.1	模型	(55)
4.2.2	预报方法	(57)
4.3	水文学-斜坡稳定性模型	(59)
4.3.1	模型	(59)
4.3.2	试验结果	(62)
4.4	基于降雨阈值的滑坡预报系统	(67)
4.4.1	美国旧金山海湾区的滑坡实时预报系统	(68)
4.4.2	中国香港地区的滑坡实时预报系统	(71)
4.4.3	中国内地的国家级滑坡实时预报系统	(75)
4.4.4	意大利西北 Piedmont 地区的滑坡预报系统	(79)
4.4	小 结	(79)
第5章	降雨型滑坡的分形分布	(81)
5.1	分形分布的定义	(81)
5.2	滑坡频度-大小分形分布	(82)
5.3	滑坡的空间分形分布	(85)
5.3.1	滑坡的分形丛集分布	(85)
5.3.2	滑坡的密度分形分布	(88)
5.4	滑坡频度-降雨量的分形关系	(90)
5.5	小 结	(96)
第6章	影响滑坡发生的前期降雨条件	(97)
6.1	前人提出的有效前期降雨量计算方法	(97)
6.2	基于降雨-滑坡分形关系的有效前期降雨量模型	(99)
6.3	小 结	(102)
第7章	基于 GIS 和 aiNet 的降雨型滑坡时空概率预报系统	(103)
7.1	降雨型滑坡的时间与空间预报的条件概率问题	(104)
7.2	ANN 的特点	(109)
7.3	ANN 模型	(110)
7.4	aiNet 神经网络	(111)
7.5	ANN 与 GIS 的关系	(112)
7.6	基于 aiNet 和 GIS 的滑坡概率实时预报系统	(113)
7.7	小 结	(116)
第8章	aiNet-GISPSRIL 在浙江的应用	(117)
8.1	浙江的气候地理环境和地质背景	(117)
8.1.1	自然地理特征	(117)

8.1.2 地质构造、地层及岩类	(126)
8.2 浙江滑坡类型、成因和环境控制因素	(127)
8.2.1 浙江滑坡类型和成因	(127)
8.2.2 影响浙江滑坡的主要环境因素	(128)
8.3 aiNet-GISPSRIL 在浙江的应用	(132)
8.3.1 滑坡和降雨数据	(133)
8.3.2 地理空间数据库和 DEM 数据	(133)
8.3.3 aiNet 的输入和输出变量	(136)
8.3.4 aiNet 训练结果与可靠性检验	(138)
8.3.5 应用效果查证	(140)
8.4 几点说明与展望	(145)
第 9 章 滑坡易发程度区划	(147)
9.1 成图单元	(147)
9.2 DEM 数据	(149)
9.3 基于一般线性模型的方法	(149)
9.4 基于 GIS 与 aiNet 的方法	(152)
9.4.1 数据与方法	(153)
9.4.2 结果	(155)
9.5 基于 GIS 与模糊 Gamma 运算的方法	(155)
9.5.1 数据与方法	(155)
9.5.2 结果	(159)
9.6 基于 GIS 的分形丛集分布方法	(159)
9.6.1 数据和方法	(160)
9.6.2 结果	(160)
9.7 讨 论	(162)
结束语	(171)
参考文献	(173)

第 1 章 滑坡的危害和分布

滑坡（土体和岩体滑动，也包括泥石流和崩塌等）是山区经常发生的灾害。滑坡与地震、海啸等灾害几十年、几百年发生一次不同，在有些地方一年可以发生几次，甚至几十次。在世界的大多数山区几乎每年都会发生大大小小的滑坡。滑坡灾害的特点是：发生的频度高，分布的地域广，造成的灾害严重。

1.1 滑坡的危害

全世界每年都会发生许多滑坡，然而对发生滑坡的数目却难以确切了解，甚至滑坡造成的人员伤亡在全世界也无法被正确统计。正如 Sassa 等（2005）指出，由降雨引发的滑坡造成的人员伤亡，大多数经常被归入飓风或洪水灾害的人员伤亡统计表中，由地震引发滑坡造成的人员伤亡往往也被统计在地震灾害的人员伤亡中。因此，对于滑坡灾害导致的人员伤亡常常被严重低估了。表 1.1 是根据可查找到的文献统计的全球死亡和失踪在 500 人以上的一些滑坡灾害。图 1.1 是日本在 1967~2004 年期间对滑坡、地震和火山灾害造成的人员伤亡统计结果。从 1967 年至 2004 年，日本几乎每年都有滑坡灾害发生，造成死亡的人数为 3285 人，接近于同期地震灾害死亡人数的一半；同期地震灾害死亡人数为 7008 人（包括 1995 年的神户大地震），在地震灾害死亡人数中包括了地震引发滑坡灾害的死亡人数（Sassa 等，2005）。尽管在全世界的许多国家对于滑坡的灾害损失和人员伤亡没有可靠的统计数据，但是从表 1.1 和图 1.1 仍然可以清楚地看出滑坡灾害对人类社会造成的严重损失。中国是一个滑坡、泥石流等地质灾害发生十分频繁和灾害损失极为严重的国家，尤其是地处青藏高原东南缘的我国西南山区和东南沿海的低山丘陵区。据中国地质环境监测院不完全统计，1995~2007 年，滑坡和泥石流等突发性地质灾害共造成 13492 人死亡和失踪，平均每年死亡和失踪 1038 人、财产损失 42 亿元。

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。

滑坡最常见的危害之一是毁坏修建在山坡上、坡脚或沟口的建筑，造成房屋倒塌，人员伤亡。泥石流可以冲进乡村、城镇，摧毁房屋、工厂及其他场所、设施，淹没人畜，毁坏土地，甚至造成村毁人亡的灾难。

1972 年 6 月 16 至 18 日香港持续暴雨，3 d 最大累积降雨量达 652 mm，24 h 最大降雨量为 280 mm（Horelli，2005）。6 月 18 日在香港九龙秀茂坪（Sau Mau Ping）40 m 高的路堤发生坍塌，造成 71 人死亡（图 1.2）。在该处滑坡数小时之后，港岛宝珊道（Po Shan road）发生滑坡，导致大楼倒塌，造成 67 人死亡（图 1.3）。

1989 年 7 月 10 日，四川省华蓥山地区发生大暴雨，华蓥市溪口镇于 10 日下午 1 时 30 分发生 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的大滑坡。滑体在滑动过程中破碎解体，在暴雨和地表径流的

表 1.1 全球死亡和失踪在 500 人以上的主要滑坡灾害

类 型	诱发因素	日 期	地 点	死亡和失踪人数	资料来源
滑坡	降雨	1310 年	中国湖北秭归	3466 人	元史《武宗纪》
滑坡	降雨	1561 年	中国湖北秭归	超过 1000 人	明万历《归州志》
火山泥石流	火山喷发	1772 年 8 月 12 日	爪哇 Vulkan Papandayan	2000~3000 人	Nussbaumer, 1998
火山泥石流	火山喷发	1792 年 2 月 10 日	日本 Vulkan Unzendake	10000 人	Nussbaumer, 1998
火山泥石流	火山喷发	1845 年 2 月 19 日	哥伦比亚 Vulkan Nevada del Ruiz	1000 人	Nussbaumer, 1998
滑坡	不详	1857 年 9 月	意大利 Montem. /Basilic	5000 人	Nussbaumer, 1998
火山泥石流	火山喷发	1919 年	爪哇, 印尼	5110 人, 104 个村庄被损毁	Brand, 1989
滑坡、泥石流	台风、暴雨	1939 年	日本 Hyogo	505 人, 130 000 间房屋被毁	Nakano 等, 1974; Ministry of Construction, 1983
泥石流	不详	1941 年 12 月 14 日	秘鲁 Huaraz	4000~6000 人	Erickson 等, 1989; Nussbaumer, 1998
滑坡	不详	1945 年	日本	1200 人	Oyagi, 1989
滑坡	地震	1949 年	塔吉克斯坦 Khait	12000 人	Alexander, 1995
碎屑崩滑	不详	1949 年	前苏联	12000~20000 人	①
滑坡、泥石流	地震	1950 年 8 月 15 日	印度阿萨姆邦	近 30000 人	Nussbaumer, 1998
滑坡	台风、暴雨	1953 年	日本和歌山、京都	796 人, 9894 间房屋被毁	Ministry of Construction, 1983
滑坡	降雨	1958 年	日本静冈	1094 人, 19754 座建筑被毁	Ministry of Construction, 1983
滑坡	不详	1959 年 10 月 29 日	墨西哥 Minatitlan	5000 人	Nussbaumer, 1998
泥石流	不详	1962 年 1 月 10 日	秘鲁 Nevados, Mt. Huascaran	4000 人	Erickson 等, 1989; Nussbaumer, 1998
滑坡	不详	1963 年 10 月 10 日	意大利皮亚韦河谷 Vaiont Dam	1189 人, 部分村庄被毁	Müller, 1964; Soldati, 1999
滑坡	降雨	1966 年	巴西 Rio de Janeiro	1000 人	Smith <i>et al.</i> , 1996
滑坡	降雨	1967 年	巴西 Sierra des Araras	1700 人	Erickson 等, 1989
碎屑崩滑	不详	1970 年	秘鲁	70000 人	①
滑坡	不详	1973 年 9 月 20 日	洪都拉斯 Choloma	2800 人	Nussbaumer, 1998
滑坡、泥石流	降雨	1973 年 4 月 27 日	中国甘肃省庄浪县文家沟	>500 人	段永侯等(1993)
火山泥石流	火山喷发	1985 年 11 月 13 日	哥伦比亚 Nevado del Ruiz	超过 25000 人	Nussbaumer, 1998
滑坡	不详	1987 年 4 月 3 日	厄瓜多尔 Cochancay	1000 人	Nussbaumer, 1998
滑坡	地震	1989 年 1 月 23 日	塔吉克斯坦	超过 10000 人, 2 个村庄被毁	Nussbaumer, 1998
泥石流	降雨	1991 年 6 月	智利 Antofagasta	数百人	Van Sint Jan(1994)
滑坡	不详	1993 年 6 月 7 日	尼泊尔	3000 人	Nussbaumer, 1998
滑坡、泥石流	Mitch 飓风、暴雨	1998 年 10 月 27 日至 11 月 1 日	尼加拉瓜 Gasita 火山	>2000	Cannon 等, 2001
滑坡、泥石流	降雨	1999 年 12 月	委内瑞拉	30000 人, 400000 人无家可归	Larsen 等, 2001
泥石流	降雨	1999 年	哥伦比亚	10000 人	①
泥石流	降雨	2005 年 10 月 5 日	危地马拉	超过 1400 人	②
泥石流	降雨	2006 年 2 月 17 日	菲律宾宾莱特岛	超过 1800 人, 许多房屋和 1 座小学被毁	③

注: ① <http://www.scienceclarified.com/landforms/Faults-to-Mountains/Landslide-and-Other-Gravity-Movements.html>, 2008 年 8 月 15 日下载; ② <http://www.sina.com.cn>, 2005 年 10 月 9 日下载; ③ <http://www.sina.com.cn>, 2006 年 2 月 19 日下载。

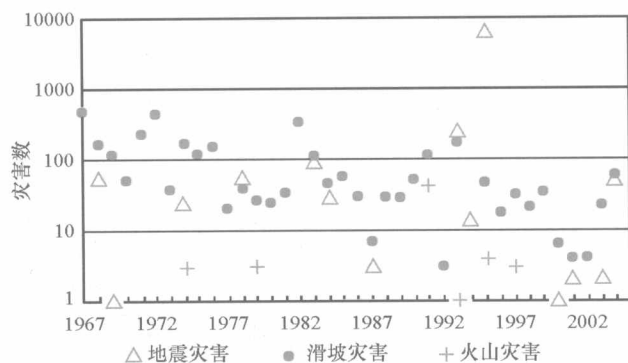


图 1.1 日本 1967~2004 年因滑坡、地震和火山灾害造成的死亡人数
(据 Sassa 等, 2005)

其中, 地震灾害死亡 7008 人, 滑坡灾害死亡 3285 人, 火山灾害死亡 57 人。地震灾害死亡人数中包括了地震引发滑坡灾害的死亡人数, 火山灾害死亡人数中包括火山气体造成的死亡人数



图 1.2 1972 年 6 月 18 日香港九龙秀茂坪 (Sau Mau Ping) 滑坡
造成 71 人死亡, 引自: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/talou/pg/horelli/landslid.pdf>

渗混下旋即转化为泥石流。泥石流顺坡奔腾而下, 流动距离达 1 km, 所经之处, 农田、村庄被摧毁。泥石流掩埋了红岩煤矿、溪口粮店、溪口水泥厂等单位 and 数个村庄的房屋、建筑和生产设施, 导致 221 人死亡^①。

2004 年 8 月 12 至 13 日, 受“云娜”台风影响, 在浙东南沿海的乐清市山区, 24 h 最大降雨量达到 864 mm, 最大 6 h 降雨量达到 372 mm, 13 日清晨发生 47 处滑坡和泥石流, 其中 5 处造成了 42 人死亡 (图 1.4)。

① <http://www.scwater.gov.cn/html/2005scwater/huasuosl/river/jialinjiang.htm>。



图 1.3 1972 年 6 月 18 日香港宝珊道 (Po Shan road) 滑坡造成 67 人死亡, 引自: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/talou/pg/horelli/landslid.pdf>



图 1.4 2004 年 8 月 13 日乐清市山区滑坡和泥石流
受“云娜”台风影响, 强降雨在浙东南沿海的乐清市山区引发 47 处滑坡和泥石流, 其中 5 处滑坡和泥石流造成 42 人死亡^①。本图为乐清仙溪镇白岩山灾害现场照相 (照片来源: 肖常贵)

^① 据浙江省地质环境监测总站 (2004) 调查资料, 2004 年 8 月 12 至 13 日“云娜”台风暴雨在浙江乐清引发了 47 处滑坡和泥石流, 其中造成 42 人死亡的 5 处滑坡和泥石流均发生在浙江省国土资源厅和浙江省气象局 12 日 18:30 发布的 3 级和 4 级预报区内。虽然在滑坡、泥石流发生前及时通过电视和互联网发出了预报信息, 但是由于种种原因这些预报信息未能充分发挥应有的效果。

菲律宾每年都要遭遇大约 20 次台风, 台风带来的强降雨造成的滑坡和泥石流常常导致大量人员伤亡。2006 年 2 月, 拉尼娜现象使菲律宾莱特岛持续两周降雨, 17 日该岛南部山区发生大规模滑坡和泥石流, 三个村庄受灾; 其中一个有近 1900 名居民的村庄发生严重山体滑坡, 整个村庄被泥石流掩埋, 1800 人遇难 (见图 1.5), 其中包括 240 多名小学师生。2006 年 11 月 30 日, 热带台风“榴莲”登陆菲律宾东部, 暴雨在距马尼拉东南 350 km 的马荣火山附近引发泥石流, 导致 4 个村庄被掩埋, 至少 388 人死亡^①。



(a)



(b)

图 1.5 2006 年 2 月 17 日菲律宾莱特岛的滑坡和泥石流

造成 1800 人死亡 (<http://www.cctv.com>, 2006 年 02 月 18 日 11: 55)

(a) 在滑坡现场的救援人员; (b) 救援人员在被泥石流摧毁的吉恩萨贡村艰难跋涉

滑坡和泥石流可直接埋没车站、铁路、公路, 摧毁路基、桥涵等设施, 致使交通中断; 还可引起正在运行的火车、汽车颠覆, 造成重大的人身伤亡事故 (图 1.6)。有时泥石流汇入河流, 引起河道大幅度变迁, 间接毁坏公路、铁路及其他建筑物, 甚至迫使道路改线, 造成巨大经济损失。中国是一个多山的国家, 各类滑坡灾害给铁路和公路交通造成了无法估计的巨大损失。据陈颙和史培军(2007)资料, 中国每年有近百座县城受到泥石流的直接威胁和危害, 有 20 条铁路干线经过滑坡和泥石流的分布区域内; 1949 年以来, 先后发生中断铁路运行的泥石流灾害 300 余起, 有 33 座车站被淤埋。在我国的公路网中, 以川藏、川滇、川陕、川甘等线路的泥石流灾害最严重, 仅川藏公路沿线就有泥石流沟 1000 余条, 先后发生泥石流灾害 400 余起, 每年因泥石流灾害可阻碍车辆行驶时间长达 1~6 个月。降雨引发的滑坡和泥石流经常对一些河流航道造成严重危害, 如金沙江中下游、雅砻江中下游和嘉陵江中下游等, 滑坡和泥石流及其堆积物是这些河段通航的最大障碍。

1981 年 7 月 9 日, 暴雨引发的泥石流在成昆铁路大渡河路段造成了一次严重灾害^②。

山洪裹带着数十万方土石, 形成特大泥石流, 山崩地裂般从高山上向大渡河冲来。两层楼高的泥石流顺着利子依达沟冲向沟口高 15 m 长 100 m 的铁路桥, 将这座成昆线上的钢铁桥梁像玩具一样折断, 推进泥浪滚滚的大渡河中。此刻, 从钢铁基地攀枝花开往成都的 442 次旅客列车正在风雨交加中行驶, 当司机发现前方桥梁已经冲断之际, 用自己生命

^① <http://www.uswtv.com/btnews/gjnews/200612/10008.htm>.

^② <http://www.01am.com/bbs/Appraise.asp?boardid=24&topicid=23925&postid=103510>.