

# 《滑坡科学和实践》系列图书评介

■ 贾朋群 张萌

## 1 引言

2013年, Springer出版社陆续出版了《滑坡科学和实践》系列图书。该系列图书的出版, 标志着在滑坡研究和应用这一多学科交叉、与防灾减灾社会经济活动密切相关的学科领域, 其理论和指导实践的水平都有了进一步的成熟并上了一个台阶。

目前丛书已经出版了7部, 内容来自2011年10月3—9日在意大利罗马召开的“第二届世界滑坡论坛”<sup>①</sup>上学者们所做的学术交流。这一会议文集丛书, 涵盖了此次会议学术交流的所有内容, 丛书编辑将会议内容划分为7个方面, 通过丛书“卷1~7”分别进行论述。

卷1: 《滑坡清单和敏感性评价及灾害区划》(*Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*)

卷2: 《预警、仪器和监测》(*Early Warning, Instrumentation and Monitoring*)

卷3: 《空间分析和模拟》(*Spatial Analysis and Modeling*)

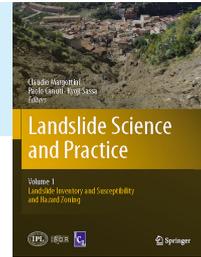
卷4: 《全球环境变化》(*Global Environmental Change*)

卷5: 《复杂环境》(*Complex Environment*)

卷6: 《风险评估、管理和减缓》(*Risk Assessment, Management and Mitigation*)

卷7: 《社会和经济影响及政策》(*Social and Economic Impact and Policies*)

继2008年在日本东京召开了第一届世界滑坡论坛之后, 每3年召开一次的世界滑坡论坛, 于2011年10月在意大利召开第二届。本次会议



Springer出版社, 2013年出版



制作滑坡清单和易发性评价地图是应对滑坡灾害的首要任务, 气象因子是影响斜坡稳定性最重要的要素之一, 对滑坡的监测手段和方法始终离不开对降水的观测, 有关降水的物理量经常被用来作为滑坡发生预警的阈值。



图1 2011年10月召开的第二届世界滑坡论坛摘要集

的主题“将科学用于实践”(Putting Science into Practice)贯穿于整个会议(图1)。此次论坛由国际滑坡研究计划(IPL)的全球促进委员会(由国际滑坡联盟(ICL)以及联合国教科文组织(UNESCO)、世界气象组织(WMO)、联合国粮农组织(FAO)、联合国国际减灾战略(UNISDR)、联合国大学(UNU)、国际科学理事会(ICSU)和世界工程组织联合会(WFEO)等机构组成)以及东道国意大利的两个ICL成员(意大利环境保护和研究所(ISPRA)和佛罗伦萨大学地球科学系)共同主办。来自63个国家的864位学者参加了这次会

议, 人数是2008年在东京举办的第一次论坛人数(430人)的两倍。会议有25个技术分会, 收到了与会者提交的465篇论文。

在第一届论坛上, 通过了“与UNISDR合作加强国际滑坡研究项目”的声明。本届论坛着眼于通过展示全球各组织和学术界相关活动开展和合作平台构建的全景图像, 进一步落实上一次论坛的成果。而本次论坛的主题, 更是反映出论坛希望更多的科学认知和技术突破应用于有关滑坡的防灾减灾的实际中, 以及研究人员、工程师、私企、利益攸关者以及决策者直接参与其中, 并通过广泛的交流与合作推进整个事业的进步。

本文主要针对丛书名为《滑坡科学与实践》的第二届世界滑坡论坛文集系列第1和2卷的内容进行评介, 重点放在厘清概念和主要进展, 同时更加关注滑坡与气象因素关系方面的内容。

## 2 滑坡清单和敏感性评价及灾害区划(卷1)

编制滑坡清单和绘制滑坡敏感性及灾害区划地图, 是制定土地利用、民防规划和管理、民居工程工作以及执行减灾项目至关重要的工

<sup>①</sup> 有关“世界滑坡论坛”的介绍详见本期P81《国际滑坡专门组织和专门期刊评介》一文。

具。在第二届世界滑坡论坛中，提交的大约1/6论文涉及到此问题，也从一个侧面反映了上述首先在认识层面把握滑坡发生发展主题的重要性。

在编制滑坡清单、绘制滑坡敏感性及灾害区划图方面的主要进展，包括了各地不同地形、地质和气候背景下，针对不同类型的滑坡灾害的实践、方法改进和技术应用等方面，从特定地区开展的调查到全球范围的分析。提交的论文中，本主题的研究有65%来自欧洲，亚洲和南美各占25%和8%，而北美和非洲学者的工作则涉及很少。这也说明了欧洲和亚洲学者更加重视这部分工作。

## 2.1 概述

滑坡清单 (Landslide Inventory) 一般是指以地图标注或数据登记等形式，对发生的滑坡进行数据库登记更新。注册在案的要素包括滑坡地点、分类、体积、活跃性和发生时间等。这种清单式的数据库可以针对滑坡特征对数据进行检索，从而获得，例如，各不同种类的滑坡、暴雨或降雪引发的滑坡、不同纬度或不同季节发生的滑坡、发生人员伤亡的滑坡以及逐年滑坡发生次数等。当这种统计时间足够长的时候，基于上述数据就可以依据滑坡发生的频率绘制出区域分布图（滑坡密度图），以及类似的滑坡清单数据库产品（如降水引发滑坡历史分布图、主要滑坡人员伤亡分布图、不同坡度地形滑坡发生分布图等）。滑坡清单数据库的制作机构还可以和用户合作，根据需要选择1个或多个滑坡参数，计算出不同时段、区域等滑坡发生的频率，以应对滑坡灾害。

滑坡清单是量化分区滑坡敏感性、灾害和分析的最为重要的信息源。清单应该对滑坡的地点、时间、类型、规模、活跃程度和引发因子等要素以及造成的损失等有准确的把握。可以说制作滑坡清单也是应对滑坡灾害的第一步，因此

很多国家或地区都建立了滑坡数据库。滑坡国家数据库建设最为完整的欧洲，其国家滑坡数据库建设的经验表明，目前数据库所用的方法基本上还很传统，即限于现场调查、历史资料（包括科学文献和技术报告等）分析和空中照片解读等。

近年来，一些新的方法开始在滑坡清单的制作过程中得到应用，这些新方法包括现代遥感技术的应用，在被动或主动光学影像中滑坡信息的像素和基于目标的自动提取技术的重要改进，以及激光雷达 (LiDAR) 产品在滑坡清单数据库中的应用等。特别值得注意的是，卫星SAR（合成孔径雷达）干涉技术开始应用于滑坡调查中，一些主要的进展集中在新的数据处理和算法的应用上。此外，在滑坡调查中，遥感数据和常规监测相结合的方法也渐成气候，已经引起学术界更多的兴趣。

书中给出从局地（滑坡地或单个地形坡）到国家甚至大陆（如整个欧洲）滑坡敏感性评估研究的结果。局地研究能够提供滑坡过程和机制的更多细节，并能够用确定性模型决定敏感性。而更大尺度的研究则更多基于描述性模型（如空间多判据评估），或者更为熟知和流行的统计模型（如逻辑回归、人造神经网络、模糊显示模式等）。在这样的背景下，模型之间的对比研究，这一在几年前开始的趋势还在持续中。只是比较的着重点已经从不同统计模型转移到了改进输入变量的选择和输入变量的预处理过程，因为后者较所用的模型对模拟结果的影响更大。

一些标准化的评估技术，例如接受者操作特性 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线和成功率曲线 (success rate curves)，到目前已经获得承认。更多的注意力放在了分类滑坡敏感性地图的制作上，该图对于空间规划至关重要。

虽然目前全球学术界针对滑

坡的研究较为广泛，但是一些“短板”依然。例如，和相对较多的滑坡敏感性模拟相比，灾害评估研究还是相对较少。此外，获取滑坡频率的信息还是比较困难，尽管一些研究给出了多时间遥感数据、雨量数据分析和树木年轮方面的成果。这里需要提醒的是，滑坡灾害的细致研究，依然是滑坡风险评估依据的重要因素。

## 2.2 国家/地区评估

很多国家/地区，特别是滑坡多发的发达国家和发展中国家/地区，都在试图开展绘制国家级的滑坡清单和滑坡敏感性评价地图，通过这样的滑坡分析评估，让减灾部门和公众能够对滑坡灾害的潜在威胁有所认知。由于这样的评估工作需要大量科学认知的积累以及人力、物力、财力的支持，不少国家/地区在开展这方面的工作时，都是“先地方，后中央”，即从滑坡易发地区着手，逐步扩展到整个国家/地区范围。同时，根据不同滑坡类型，依据不同的技术手段开展滑坡的国家/地区评估，这些评估结果虽然质量各异，但都从根本上促进了国家决策层和公众对本国/本地区滑坡灾害的全面认识。

### 2.2.1 印度

印度国土的大约15%是山区（约49万km<sup>2</sup>），其中喜马拉雅山脉、梅加拉亚高原 (the Meghalaya plateau) 和西高止山脉 (the Western Ghats) 是滑坡多发区域。特别是在季风季节，上述地区因降水触发的滑坡不断，更为严重的是，很多滑坡易发区还与地震带重合，加剧了滑坡的风险。

为了减轻包括滑坡在内的灾害影响，印度政府于2005年颁发了《国家灾害管理法》。该法强调了在防灾减灾上的投入远比救灾和恢复要有效得多。因此，绘制至少中等分辨率（1:25000到1:50000）的印度滑坡灾害的预测地图，对管理和规划者来说将是十分关键的地理

信息产品，可以用于区域滑坡灾害规划的制定。此外，中等尺度的滑坡灾害地图还能用于起草滑坡多发区适宜的土地应用分区制度，以减缓潜在的生命和财产损失。

以往滑坡研究一直受制于资料的缺乏，尤其是一些滑坡多发区集中在印度的边界地区，地形图和高空图像的使用受到安全方面的局限，就更加困难。这样一种局面导致了印度一直没有完整的国家滑坡清单地图。改善这一状况的机会，来自印度自主的地球观测卫星系统的建立，进而获得高分辨率的遥感（如Cartosat卫星系统）数据，作为滑坡清单制图系统的标准化输入，可以生成用于滑坡研究的数字化高度模型。

2006年，印度地质调查局（the Geological Survey of India, GSI）、国家遥感中心（NRSC，隶属于印度太空部）和荷兰特文特大学地理信息科学和地区观测学院（ITC）签署了研究协议，致力于滑坡方面的培训和开发。GSI被印度政府指定为滑坡主管机构，隶属于印度太空研究组织（the Indian Space Research Organisation, ISRO）的国家遥感中心（National Remote Sensing Center, NRSC）负责利用印度自行研制的卫星开展灾害的快速评估，并且利用卫星数据进行清单制图和敏感性评估。印度开展的这些合作研究，还吸引了一些欧洲研究所加入其中，包括荷兰的乌得勒支大学地球科学院、意大利国家研究委员会、维也纳大学和德国地质调查局等。

这项联合研究的主要目的，就是检验滑坡清单制图、敏感性、灾害和风险评估的方法是否能够在印度应用，这其中就考虑到印度滑坡多发区地形的多变和复杂性，以及可用数据的有限性等因素。研究中开发了用于不同尺度分析的多种方法，这些方法借助了生成滑坡清单技术，使用了适宜的敏感性模型（如启发式模型、统计模型和基于

物理原理模型等），并从时间、空间和可能的规模等角度对滑坡灾害进行特征分析，并应用于滑坡风险的分析中。

研究集中在印度四个不同区域，每个区域开展的研究，各有侧重。而进行分析的滑坡事件样本取自1968—2007年，分“轻度滑坡事件”、“中度滑坡事件”和“重大滑坡事件”三类（图2）。书中针对4个检验地点个例进行较为详细的介绍。

个例A：通过基于目标的图像分析调查滑坡。

在针对该地区的滑坡研究中，利用Cartosat卫星图像建立了数字地表模型，应用基于NDVI指数的临界值监测滑坡，实现了对滑坡类型的半自动分类，开发出从多时段全色图像探测滑坡的方法，开展双变量统计分析和半定量风险分析。

个例B：知识指导滑坡预报的经验预测。

通过多时段图像解读制作滑坡清单，开展基于滑坡事件的调查，分析其与引发的降水之间的关系；分析断点对岩石滑坡的结构控制；将启发式模型和统计模型结合起来开展敏感性评估；开展滑坡的时空和规模的频率分析；开展半量化的分析。

个例C：用基于物理原理的动力模拟，研究土地利用变化对浅滑坡

发生的影响。

用基于社区的图像制作滑坡清单，模拟详细的土壤厚度；对滑坡环境的地质技术和水文的特征进行描述；开展地下水模拟和开展斜坡稳定性分析等。

个例D：基于历史信息进行沿运输通道的滑坡量化分析。

滑坡清单来自公路和铁路的维护记录，进行降水的临界值分析和滑坡灾害的频率-规模分析，对直接和间接分析进行定量分析并应用于减灾。

上述4个个例中，虽然各有特色，但至少有两个个例中包含了降水临界值的分析，表明印度滑坡灾害与气象因素关系比较密切。

印度关于滑坡的联合研究项目的实施，提高了印度应对滑坡灾害的能力，还培养了滑坡灾害研究人才。2011年分别在荷兰和印度召开了印度滑坡和风险评估专门学术会议，大大提高了印度的滑坡研究和应用水平。

### 2.2.2 挪威

在20世纪，挪威发生了3次岩崩（rock avalanches），均引发了湖泊或峡湾（fjord）高达数十米的排水波浪（displacement waves），总计导致175人死亡。根据史料记载，类似的情况在20世纪以前也有发生，这使得岩崩成为该国第二大自然在

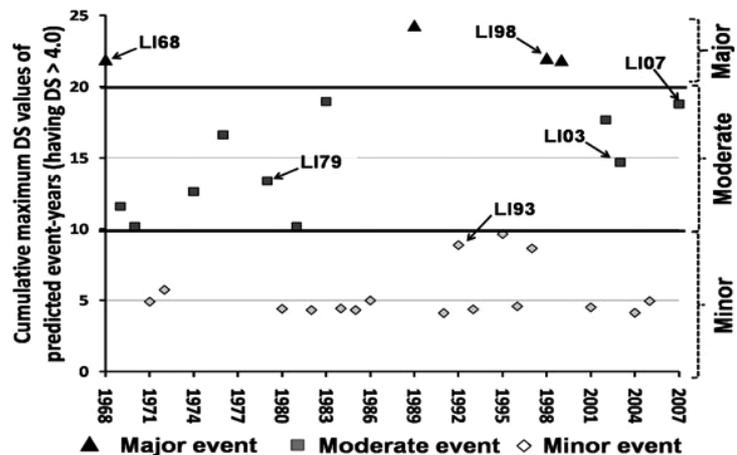


图2 用来预测“轻度滑坡事件”、“中度滑坡事件”和“重大滑坡事件”的阈值累积判别得分（DS），清单数据中相应的6个事件描述了模式给出的对已知滑坡事件严重程度分类的有效性

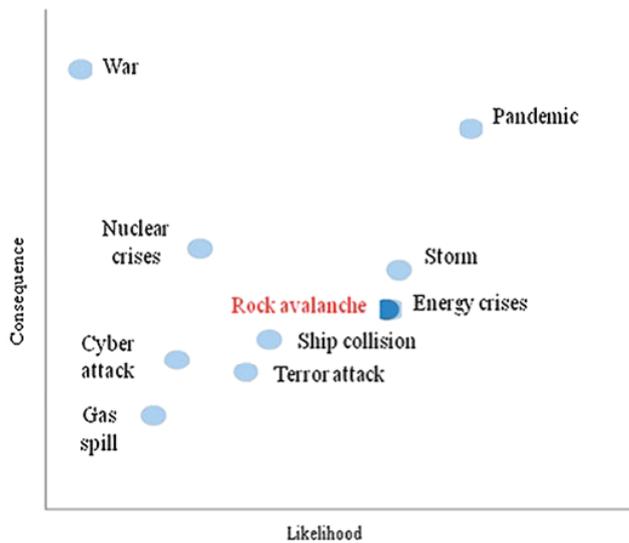


图3 挪威灾害评估报告中的岩崩灾害

灾害，而最大的自然灾害是雪崩，它们都是广泛意义上的滑坡灾害。

科学家们注意到，岩崩与雪崩不同，在过去几十年中，旅游季节在山区的开阔地，岩崩往往能造成重大人员伤亡，是最大的灾害。岩崩也因此受到更大的重视，这是因为如果说雪崩情形下潜在牺牲者是移动进入灾区的话，那么岩崩的牺牲者则就居住在灾区内。挪威社会较为独特地受到岩崩的威胁，岩崩的衍生灾害，例如岩崩对水体的影响或形成堰塞湖（valley damming），并受到挪威民防机构的极大重视，开展了专门的调查和研究。2010年挪威民防部发表了包括岩崩在内的灾害评估报告。报告将岩崩与其他可能的人为和自然灾害放在一起进行评估，其可能性和后果均位于中游（图3）。

为了应对频繁发生的岩崩灾害，挪威开始绘制区域灾害分布图。由于挪威国土中山区面积占了很大比重，灾情绘制工作首先集中在3个地区，其他地区不稳定岩石坡的信息，则仅限于历史上各种灾情报告分析进行简单的分区（图4）。据统计，挪威19个县历史上曾经发生过431次重大岩崩灾害，其中导致人员死亡的有134次。截至目前，挪

威已经对3个省285个地点岩石斜坡特征进行了系统分析并绘制成图。这些地点岩石的滑动速度从无法探知到3年中速度大约为10 cm/a。

### 2.2.3 欧洲

在欧洲，绝大多数造成重大伤亡的滑坡事件，都和强降水或持续性降水的触发有关。其他的触发机制包括地震、雪融化和河流或海浪对斜坡根部的侵蚀、山区永冻土融化、火山喷发及人类活动等。欧

洲滑坡灾害的分布与地质条件、地震带分布和降水分布密切相关。因此，山区（例如阿尔卑斯山脉）、欧洲南部和挪威是滑坡高发地区。而在欧洲中部则影响较小。欧洲东部也同样影响不大，但罗马尼亚和保加利亚例外。图5给出近年来欧洲滑坡灾情。

在欧洲发生的大多数滑坡事件，因为是规模小的局地事件，造成的人员伤亡和经济损失也很少，因此在全球灾情数据库中因为事件严重性低于一些指标的阈值而很难被收录。例如，在2003—2010年，欧洲有152人在112次滑坡事件中死亡，这一数字远远高于一些灾区数据库中同期数字。在图6中，给出了欧洲完成了国家滑坡清单绘制的国家分布。大多数欧洲国家重视滑坡灾情，完成了滑坡清单。但是，在滑坡分布图绘制的分辨率和信息详尽程度上，也存在不平衡。特别是很多清单数据并不对公众开放（图7）。

滑坡是受到不同因素，如滑落物类型、基岩状况、坡度以及强降水等触发机制共同影响的复杂现象。欧洲学者认为，因为滑坡大多是局部现象，因此收集过去滑坡事件，并且在地方当局全程参与下制

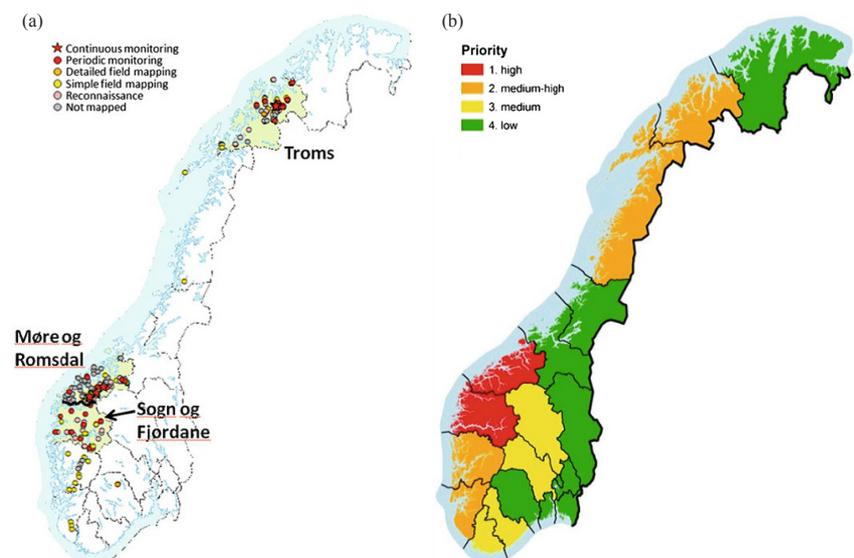


图4 挪威已知的不稳定斜坡地点以及截止到目前绘制的清单图（a，绘制结果并非都包括了灾害分类和风险等级，图中只有用☆标记的地点为最高风险等级地点）和基于历史资料分析获得的挪威岩崩灾害分区（b）

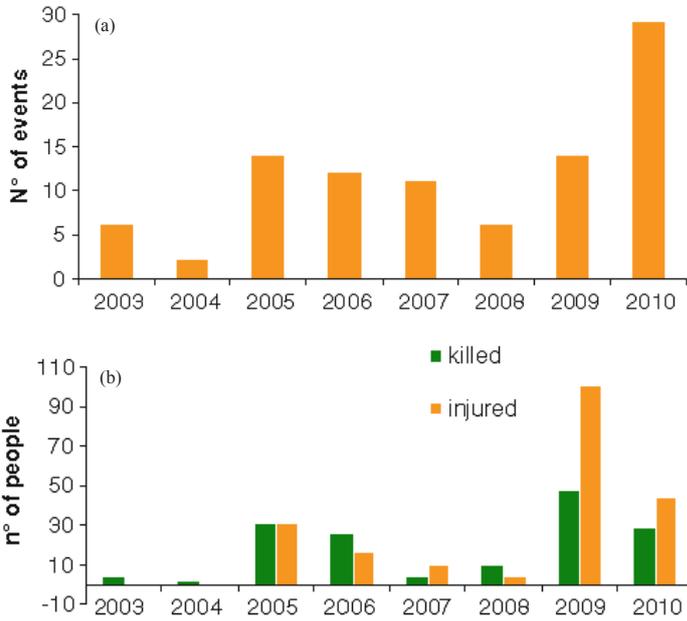


图5 2003—2010年欧洲滑坡事件分布 (a) 和伤亡人数 (b)

作详细的滑坡分布地图就非常重要。虽然很多欧洲国家都制作了滑坡分布地图，但是在分辨率和提供的信息量等方面参差不齐。一些滑坡清单工作还没有向公众开放，在一定程度上限制了滑坡数据获得更加完善的补充和应用。因此，今后整个欧洲应对滑坡的工作，还有很大的上升空间。

### 3 预警、仪器和监测(卷2)

在第二届世界滑坡论坛上，130位与会代表针对“滑坡仪器和监测”的主题，在持续4天的分会场进行了交流和研讨。提交分会场的论文有75篇，52篇论文作者进行了口头发言，28篇论文进行了墙报交流。

与会代表的交流表明，关于滑坡仪器和监测的研究，是滑坡领

域研究持续取得进展的主要推动力量，正是在该领域的进展，使得科学家对滑坡现象的认识在走向深入，包括了对滑坡多种因子的透彻分析，如底层地质学、下层地质学和次地质详情、起因和触发因子，土壤的物理机制和工程特性，地下水机制和压力特点以及包括地表/深层位移和位移率的滑坡动力学等。总之，滑坡监测和仪器是认识滑坡机制的基础，得到了科学家的重视。

#### 3.1 概述

考虑到滑坡特征的不同，滑坡观测的类型也有所不同，其划分经常要根据以下因素：(1) 地理环境特点和流域特征；(2) 现象分类；(3) 分析尺度；(4) 监测的参数（如降水量级和降水率、坡度位移）；(5) 压力变化等。本节内容对上述分类观测均有所涉及。

着眼于滑坡模拟的监测研究，侧重于对快速和慢速滑坡的监测，一些创新性的外场检验方法被提出，用于对滑坡包含的土壤的机械和水文特征分析。针对快速移动的滑坡，一些个例研究瞄准了岩崩，并提出监测的一般概念和需求。一些作者指出，地震传感器网数据可以获得若干应用。

多参数（如温度、地下水位和位移等）监测系统更多地包含了无线传感器网、光纤传感系统和遥感数据，这些数据的获取较常规技术具有投入少和省时间的优势。

受到不同类型滑坡影响地区的地球环境特征的改变和相关的信息（如表层位移、表层裂缝的宽度和植被变化等），可以成功地被光学图像处理技术探测到。而对于深层/表层位移的监测，也出现了一些创新技术，例如，微机电系统（Micro Electro-Mechanical System, MMES）以及一些相对成熟技术的先进处理（包括GPS技术，全部站数据处理和光达等）。

遥感数据的应用呈现增加趋势，特别是针对大区域的分析更

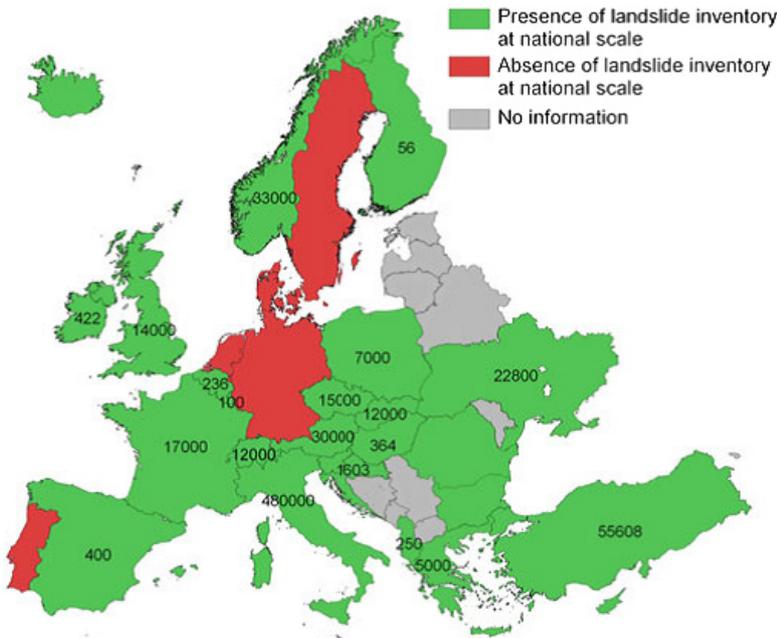


图6 欧洲制作了滑坡清单国家分布，图中给出了国家和相关的探知滑坡事件的次数

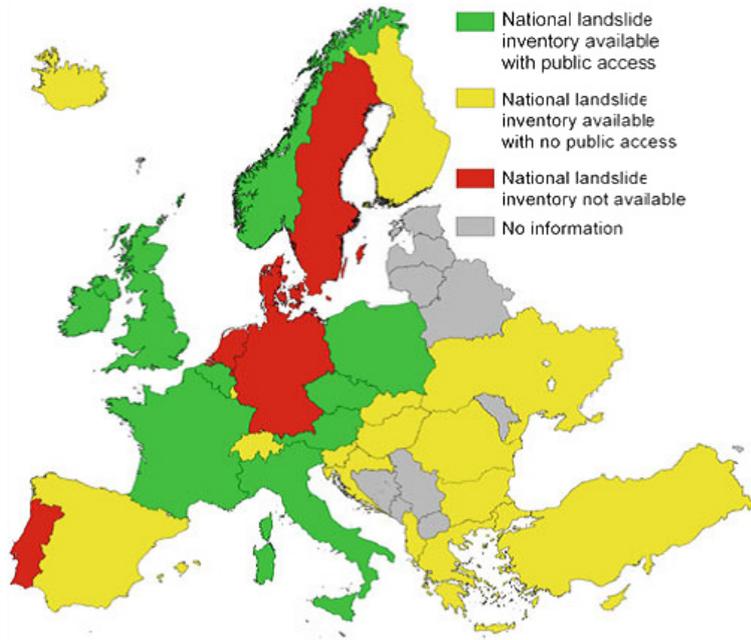


图7 欧洲各国滑坡清单国家分布向公众开放情况

是如此，这方面的研究数量较多的领域有天基和地基合成孔径雷达图像，以及通过微分干涉技术 SAR (differential interferometric techniques, DInSAR) 处理后的图像等。该数据对于广大区域或单一现象表面位移的监测尤其有效。

还有一些在欧洲、印度和东南亚开展的个例研究，分析了已经长期工作或新建立的预警系统，具有很好的实用性和示范意义。

本书介绍了滑坡仪器和监测以及预警两部分内容。

## 3.2 滑坡仪器和监测

### 3.2.1 波兰——将自动气象站建设纳入滑坡实时自动监测和预警系统中

在欧盟的资助下，波兰第一个示范性质的全自动实时滑坡监测和预警系统在喀尔巴阡山脉的Beskid Niski地区建成，该地区滑坡风险极大，很多公共道路、桥梁、私人建筑和基础设施都受到滑坡的威胁。观测表明，近3年该地区土地的移动在5~180mm之间变化。虽然在2009年末，针对滑坡活跃地区进行了坡地加固，但是加固后依然能够发现一些地方发生了10~15mm的移动，

并且在2010年5—6月，这种不稳定有加速的迹象。在这样的形势下，尤其是考虑到当年波兰南部发生了创纪录的降水并引发洪水，安装部署滑坡的监测和预警系统就显得十分必要。

该滑坡监测和预警系统的新仪器在2010年6月完成，系统包括：(1) 3套滑坡监测站；(2) 一个气象站；(3) 3D测斜仪 (inclinometer)；(4) 60个埋入14~16 m深传感器；(5) 3套单轴

原地IP传感器；(6) 2套自动VW纯压力计；(7) 地下水和温度传感器。其中，气象监测包括了降水、气压、空气温湿度的自动监测。所有数据每小时送入互联网(图8)。

由于该地区滑坡的主要触发机制中，气象因素非常重要，因此系统选择滑坡边界区域安装了自动气象站(图9)。自动站每60分钟向互联网传输数据。自2011年4月开始，自动站加装了太阳能板供电。上传的数据既可以是文本格式，也可以编辑成图像，自动站软件在获得与位移及压力数据密切相关的气象参数时，及时发出提示。例如，2010年6月1—2日累计降水达到100mm，是超纪录的降水过程(图10)。

### 3.2.2 意大利南部降水触发的滑坡

影响斜坡稳定性的要素众多，其中气象因子是最重要的一类。因此，关键气象要素的监测，是滑坡监测的重要组成部分，气象因素不仅是滑坡灾害的形成因素，更是重要的触发因素。然而，详细描述山坡尺度的水文过程和现象很复杂，这时，采用简单的概念和经验模型，是一个不错的替代方案。这样的模型直接将降水和滑坡联系起来，可以在灾情分析和实时预报中得到很好的应用。

在这样的模型中，经验阈值可

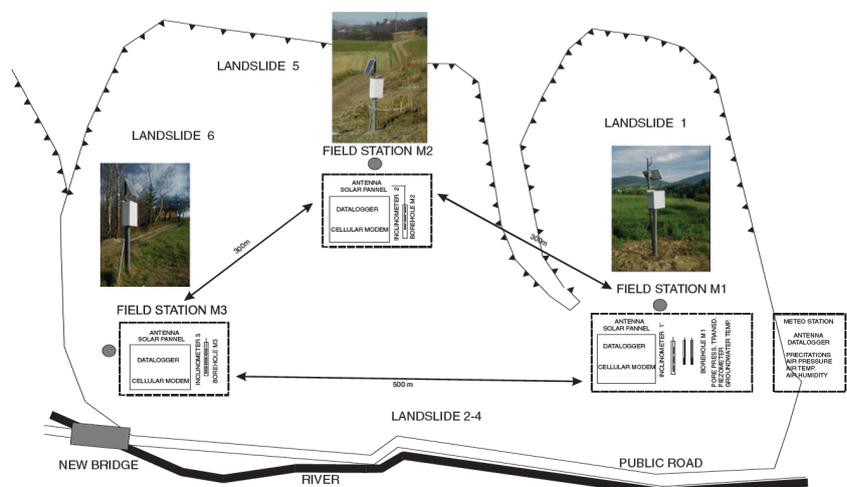


图8 波兰喀尔巴阡山脉Beskid Niski地区滑坡监测预警系统各组成部分之间的连接示意



图9 滑坡监测预警系统中的自动气象站

以通过收集滑坡发生和未发生时相关的降水数据并进行分析获得。

在设计短期强降水触发的滑坡模型时，为了建立二者关系的公式，首先定义降水参数，即降水强度  $I$  (mm/h)、临界降水持续时间  $D$  (h)。意大利学者通过对以往滑坡事件的分析，还提出了“关键降水” (critical rainfall) 参数的概念：从降水强度突然增加到首次滑坡发生时的降水量 (图11)。一旦得到这个参数，就可以通过模型发布滑坡的预警。

尽管降水触发的滑坡事件中，很多降水参数，例如，累计降水 (cumulative rainfall)、前期降水 (antecedent rainfall)、降水强度 (rainfall intensity) 和降水持续时间 (rainfall duration) 经常被用来作为滑坡发生预警的阈值，但是，不同的选取即取决于资料情况 (可用样例和资料质量等)，更和局地滑坡特别情形密切相关。在意大利南部，为了获得降水引发的滑坡模型，将降水阈值表示为最小的降水强度或持续时间、最小的水压力、斜坡角度以及切变强度的减少或所需位移等变量的函数。

意大利学者针对意大利南部 Enna 地区 1991—2005 年发生的 19 次滑坡的个例分析，给出了针对不同坡度

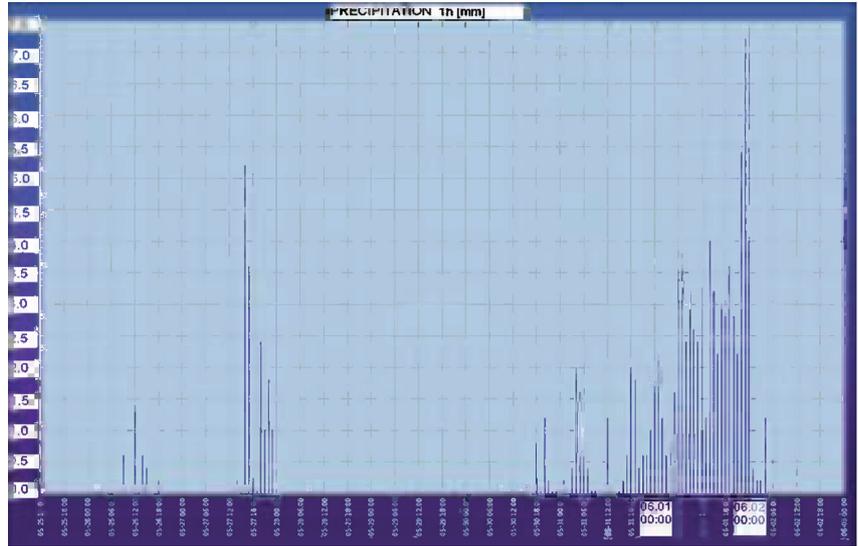


图10 自动气象站显示的2010年5—6月降水

地形区域降水导致滑坡的水文模型预警的从1到29天不等的提前时间。

### 3.2.3 比利牛斯山地区流域尺度滑坡监测和预警

欧洲中东部的比利牛斯山地区，是欧洲滑坡多发地之一，在2010年前后，该地区建立了3个滑坡观测站 (其中一个实验站，2个一般站) 组成了滑坡监测和预警系统。在实验站还配备了较为先进的超声测量仪器和摄像机等 (图12)。

系统安装的传感器分为两类，第一类包括雨量站和温度计等气象传感器，主要用于分析滑坡是否会发生。第二类传感器与滑坡探测和滑坡动力行为的分析相关，典型的传感器是地震监测器、测量流量深度的仪器 (超声设备、激光和雷达

仪器等) 和摄像机等。

气象站的位置，最开始位于 Geo1 附近，后来因为山崩被毁，新站移到位于山间通道的上部 (图12 中 Geo2 和 Geo3 之间)。气象站配备标准的翻斗式雨量计，分辨率为 0.1mm。气象要素观测时间间隔为 5 分钟。

因为雨量站不加热，因此必须配备温度计区分降水的形式是雨或雪。但是，降雪的水当量只能是估计，这是该系统的一个重要的“短板”，因为观测表明，一些滑坡是由降雪引发的。为了弥补这一遗憾，系统计划增加安装观测积雪高度的传感器。

系统在 2009—2011 年运行的最初两年，震动传感器探测到 74 次事

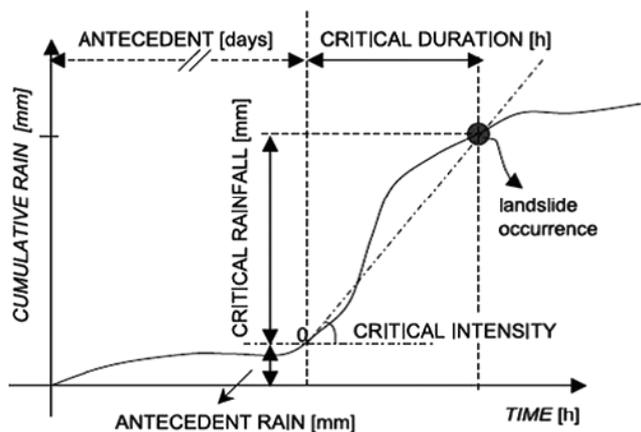


图11 在滑坡模型中降水参数的定义

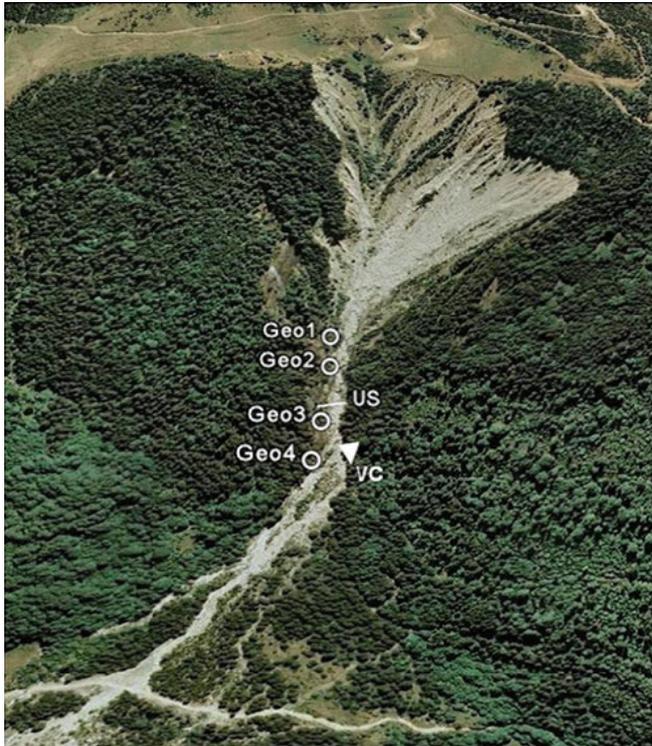


图12 比利牛斯山地区滑坡实验测站的布局: US—超声波厚度测定器 (ultrasonic device); VC—摄影机 (video camera)

件, 这些事件大多发生在夏季, 但是与降水关系不大。为了鉴别可能引发滑坡的关键降水过程, 研究者对比了22次引起和15次没有引起地面震动的降水过程后发现, 引发滑坡的降水过程总降水量变化极大, 从小于10mm到接近100mm不等。令人吃惊的10mm左右的降水引发的滑坡过程, 大多可以从前期降水或因雪融化导致其他水输入得到解释。对比分析还表明, 流域内触发滑坡

的降水, 一般只持续几个小时, 但雨强很大, 介于5~50mm/h之间。记录显示, 更小时间间隔 (如5min) 的雨强能够更好地显示高强度降水与触发滑坡之间的联系 (图13), 即短时间高雨强降水, 具有触发各类滑坡的最高“效率”。

在对不同时间间隔 (1、3和10天) 的前期降水触发机制的分析表明, 二者并没有特别明显的相关关系, 但是可以发现较小雨强的触发

降水过程往往与较大的前期降水联系在一起, 而且, 这样的趋势对应于间隔10天的前期降水更加明显。

因此, 在监测预警系统中, 滑坡发生预警的降水经验阈值最可行的方案, 是将降水持续时间和平均雨强结合起来。但是, 仅仅基于两年的试验观测资料, 这样的规律还仅仅是雏形 (图14), 尚无法获得准确的经验公式, 更加准确和可用的经验公式, 还需要更多的样本和更加深入的分析才能获得。

### 3.2.4 斯洛伐克中部地区滑坡的水文-气候分析

在喀尔巴阡山西麓地区, 各种形式的滑坡灾害频发, 截止到2006年, 记录在案的滑坡事件达到约21200起, 这些事件覆盖的区域, 占斯洛伐克国土面积的5.25%。

喀尔巴阡山西麓发生的几乎所有滑坡, 都是因长时间降水 (经常和雪融化联系在一起) 导致空隙水压力增加而触发, 只是滑坡的发生要延迟相当一段时间, 而且二者之间的关系尚不明朗。因此, 滑坡灾害的未来走向就很难做出预测。

2010年斯洛伐克遭遇创纪录的降水, 主要强降水发生在5月到6月初, 但全年天气潮湿。该年斯洛伐克出现了数百次滑坡也创造了纪录。这些滑坡包括原滑坡地点的复发和新的滑坡。

历史上, 该地区曾经在1977年2月发生特大滑坡, 这次滑坡前曾

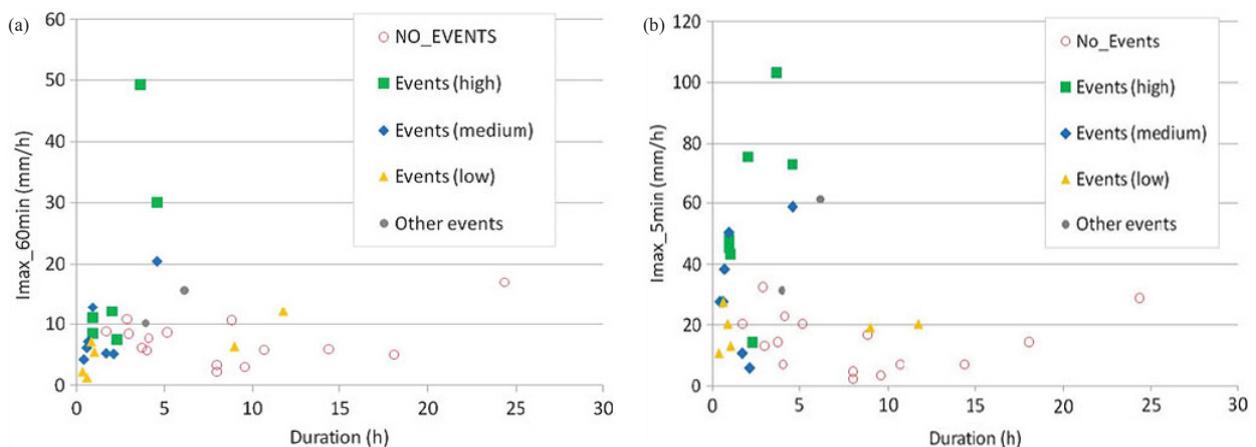


图13 比利牛斯山流域降水持续时间与最大小时雨量 (a) 和最大5分钟雨量 (b) 分布及与触发不同强度滑坡事件的可能关系

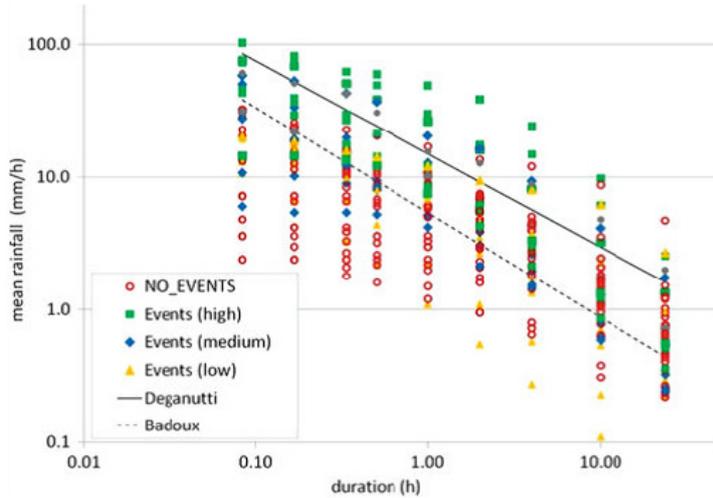


图14 比利牛斯山流域降水持续时间-雨强图及其于已经发表的阈值进行比较的结果

经持续了很长时间的降水和积雪融化，而且在主要滑坡发生前，一些以前滑坡发生地出现滑坡复发。

对滑坡的水文-气候分析，使用了该区域内1951年以来的水文气象资料，包括1981年以来日降水资料以及1975年以来的逐日水文流量观测等资料。考虑到常规的降水与滑坡触发之间的关系不明显，研究者引入了“有效降水”分析以期获得进展。所谓有效降水，是指总降水中到达地下水层的部分，因此，这部分降水是导致地下水增加和触发滑坡发生的有效部分。实际上，真正有效降水受到多种因素的影响，如前期土壤湿度和土壤水储量、土壤渗透力的年内变率、蒸发和地表径流等，因此很难对有效降水准确地量化。为此，进一步引入“潜在有效降水”的概念，作为降水中可以渗透部分的简单指标，而在实际计算中，潜在有效降水是指超过潜在蒸发蒸腾量的部分降水，它也可以理解为类似气候湿度指数(CMI)的指标。当其为正数时，土壤吸收水文直到饱和，为负数时表示土壤存储的水分在释放。如果用 $pET$ 表示潜在有效降水，则可用经验公式计算其月份 $i$ 的数值：

$$pET_i = 0.0018(25 + T_m)_i^2 (100 - r_i)$$

式中， $T_m$ 是该月平均气温(°C)， $r_i$ 是该月平均相对湿度(%)。

为了更好地认识降水(包括雪融化)、前期水汽条件与滑坡发生之间的关系，还对流域河流日流量进行了分析，并将该量用于流域对降水反应的指标。通过计算子流域的日和月降水总量以及日和月河流流量，可以获得降水和流量之比率。

研究表明，中等和深度滑坡(即滑动平面深度在3m以上，影响的区域大于 $0.1\text{km}^2$ ，而且滑动物质的体积大于 $10^5\text{m}^3$ )，其发生和降水之间具有复杂和缓慢的关系，因此利用日和月降水及蒸发气象数据，就能够对滑坡气候-水文特征进行分析。

为了了解滑坡深层部分地下水的的作用机制中蒸发的重要性，首先用季节降水总量作为参数进行分析，但效果不理想(图15a)，但是当用 $pET$ 作为前期水文状况的指标，可以获得带来大量信息的分析图： $pET$ 的合计曲线的上升和下降处，分别代表了水渗透和排放时间段，而水平直线则代表了降水和蒸发之间的平衡(图15b)。因此，该合计曲线可以用来作为触发滑坡发生的很好指示因子，尤其是当综合考虑其平均变化趋势时，效果更佳。当合计曲线与趋势线交叉或位于其下时，表明长时间(如几个季节)的降水导致了水剩余，随后将造成过饱和或短时间降水发生，这往往指示滑坡即将发生的临界时

刻。此外，图中还有一些干期，土壤和低层土中水分不多，例如在1985—1993年和2006—2009年两个时间段就是如此。很显然，干期过后即使是很罕见的降水，也不会诱发滑坡的发生，而只是出现轻微的加速。

### 3.3 预警

分析滑坡的各种机制，是为了更好地预防其灾害。在滑坡的预警方面，最新的进展包括了技术开发、滑坡影响方案制定、能力建设、减缓规划、预警和恢复等几个方面。

这些进展中涉及到预警的关键问题，例如，对触发滑坡因子的认识、前期信号和异常的快速确认、不同指标之间的相关性、多参数监测以及阈值和警报级别的确认等。一句话，就像滑坡带来巨大灾害风险一样，滑坡的预警也同样因为各种不确定性的存在，需要承担很大的风险。

此外，与滑坡灾害预警相关的技术和科学需求，例如，滑坡风险模拟、快速降低风险措施的实施、民间营救行动规划以及不同预警等级下的行动方案等，也得到很多科学家的关注。一些成果可以归为以下几个方面。

#### 3.3.1 预警系统的基础是降水阈值和水文模式

因为滑坡与降水具有最为密切的联系，因此最终触发滑坡发生的最重要的机制就是降水达到了一定程度。雨量阈值的计算都是使用一个前期日降雨模式，这个模式基于本区域较长时间内降雨引发滑坡的事件。根据历史、地震和降水量数据绘制三个敏感性地图。一个综合的滑坡敏感性得分则需要考虑这三个因素导致滑坡的最大概率。

Jamaludin和Hj Ali从马来西亚国家层面上综述了描述降水量与触发浅层滑坡关系的经验公式。马来西亚早期的预警系统基于三类经验雨量阈值：强度与持续时间阈值、

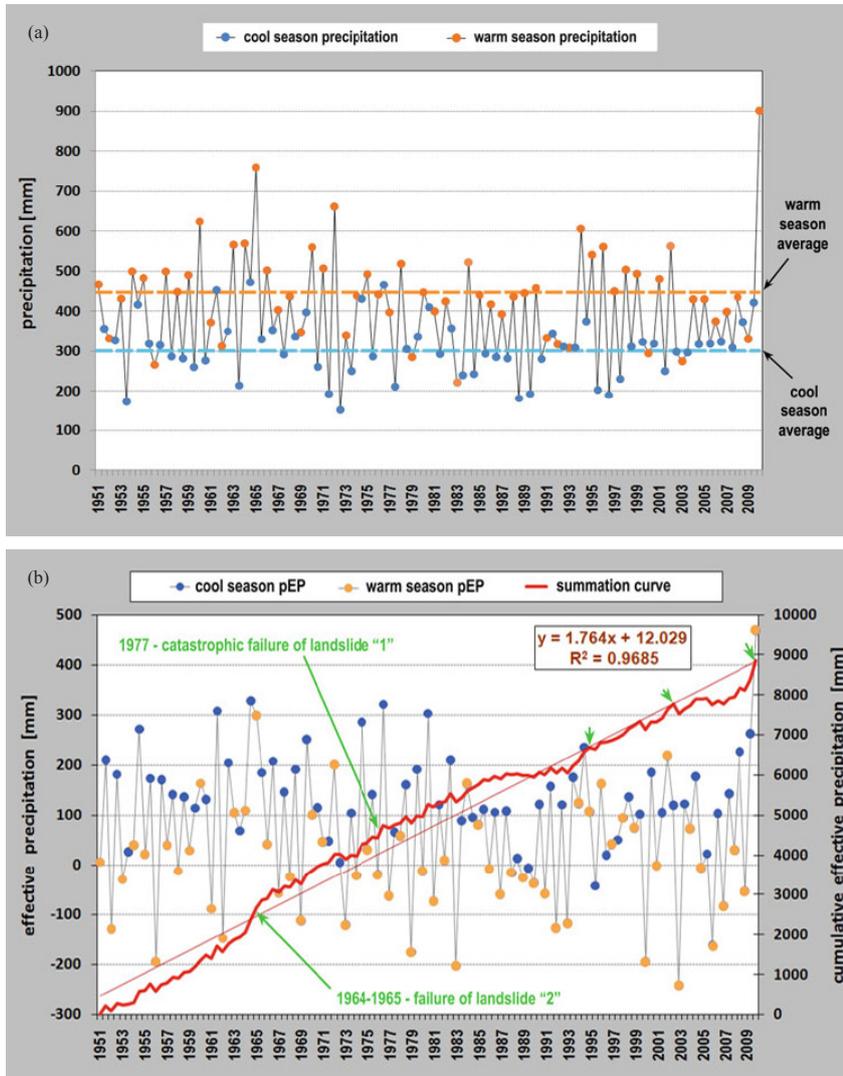


图15 1951年以来的正常和有效季节降水总量

(a) 季节降水总量与长期季节平均值；(b) 季节pEP总量、pEP合计曲线（红色粗线）和累计pEP趋势线（红色细线）  
（小的绿色箭头表示记录到的地表物质缓慢移动的加速）

强度与有效降水阈值以及强度与前期阈值。

一组报告聚焦于由意大利政府在2004年建立，并由国家民防和区域实施的国家预警系统，这套系统将降水量预报和临近预报作为输入的阈值模型来预报区域尺度滑坡的触发。

Basile和Panebianco描述了西西里地区的经验模型，这套预警模型基于降水强度和过去15天的前期雨量的结合。预警模型关联到特定的程序来激活区域民防系统和由地质学家开展的现场评估。

Lazzari等在巴斯利卡塔（意大利南部）地区开展了一项当地雨量阈值触发滑坡的研究。研究者使用历史的滑坡和气候数据建立了数据库以及300次以上的年代确定的滑坡事件。对于每个有记录的滑坡事件，计算每日降雨量和之前2、3、5、10、15、30天的累积雨量来确定降水阈值。同时研究了标准化降水指数的应用。

Martelloni等描述了一个在艾米利亚-罗马涅区（意大利北部）运行的预测区域尺度滑坡发生的预警系统。这套系统名为SIGMA，结合雨

量计测量值和降水量预测并比较其与一系列基于降水总量的统计学降水阈值，降水总量累积考虑了不同时间间隔为1~365天。该模型集成到了艾米利亚-罗马涅区用于民防的区域预警系统中。由于它的简便易行，这套拟建模型似乎特别适用于那些没有系统性的滑坡分布信息的发展中国家。

Ratto等举例说明奥斯塔地区（意大利北部）水文地质预警系统的操作程序。他们根据前期降水、当前降水（最大值和平均值）以及量雪尺定义了多参数阈值。相关操作程序基于考虑了监测结果和实际情况定义的警戒水平建立。结果以条件概率（低、中或高）的形式给出。山区范围已经安装了新型土壤水分传感器网络为特殊的水文模型服务。

Ponziani等介绍了Landwarn模型，它是翁布里亚区（意大利中部）一个基于降水阈值和土壤水分的有效的滑坡预警系统。作者开发和测试一个连续的基于物理原理的土壤水平衡模型，估计整个地区的土壤水分条件。用计算土壤水分条件和降雨强度阈值来定义滑坡触发阈值。

Salciarini等提出一种方法来定义预警系统中基于物理原理的降水阈值。根据降水持续时间和斜坡的几何、水文、机械特征，作者结合了在给定的区域内引发浅层滑坡和泥石流短时降水预报和评估最小降水强度的GIS代码。在翁布里亚试验地区的应用结果表明，为特定站点服务的预警模型具有根据不同降水情况阈值发布不同等级风险警报的能力。

### 3.3.2 预警系统要基于多土壤特征的观测

Raj Bhat等强调末状态渐变过程试验对于研究土壤滑坡过程非常重要。基于时间序列分析滑坡的位移或速度，可以提升预警模式的预报性能。作者通过改进扭力环状切

变，并发明了末状态渐变过程的实验程序，于是可以在时间轴上，根据定常渐变变量测量出位移。

Chae等基于测量体积含水量变化，提出了一个滑坡预警的创新方法。他们的研究基于实时监视系统，在降雨时段观察土壤的物理变化。

根据作者的研究，体积含水量的响应要比水压力来得快，在坡身不稳定之前，体积含水量会在最大值上维持一段时间。结果表明，大的降雨量和高体积含水量导致坡身不稳定，基于这些结果，可以确定一个体积含水量梯度的阈值，用来在降雨初期预警滑坡。

### 3.3.3 应急管理

Dell'Acqua等描述了一个由研究机构和意大利民防局开展的应急管理成功案例。这个案例再现了蒙塔古托泥流，这次泥流发生在2010年3月，导致了铁路和相关国家线路中断。部署了一个实时监控系统，并结合实时全测站与地面雷达干涉测量。根据观测法，连续实时监控系统受限于系统设计和稳定措施的实施。在低环境影响下，排水和工程解决方案能够实现滑坡稳定化。

Fischer Gramani 介绍了一个成功的个例研究，即2008年伊塔雅伊淡水河谷（巴西）的应急行动和实地测量中的过程和危险情境的识别。11月，暴雨在圣塔卡琳娜州（巴西南部）引发了几次大的滑坡，致使该地区135人死亡，2人失踪，近80000人无家可归。识别不同情境并了解它们的进展，有助于当地政府建立预防措施，及制定个人和团队救援工作的安全规程。受灾地区灾后行动期间采取技术检查和岩土安全程序。

### 3.3.4 能力建设

Bandara等和Billedo等介绍了亚洲防灾中心（ADPC）和挪威岩土研究所（NGI）的联合区域项目，该项目在孟加拉国、不丹、中国、印度、印度尼西亚、尼泊尔、巴基斯坦、菲律宾、斯里兰卡、泰国和越南实施，旨在记录和分享良好的滑坡预警实践。这个正在进行的项目旨在促进符合成本效益的滑坡监测和预警的可持续发展。目前正在通过现有的方法进行数据采集，并通过成立联合工作小组，确定关键因素。该项目期望在参与国之间传播良好的滑坡监测实践知识，来促进滑坡预警水平的提高。

Fathani等人描述了在印尼默拉皮火山地区的泥石流预警系统，该系统是建立在2010年的大型火山喷发后，为了监控Boyong/Code河边可能发生的泥石流，以保护日惹市。泥石流受到河道上游淤积物的影响，由降雨引发。预警系统基于最适应、低成本和协同的技术，该系统研发过程中，在确定监测设备的类型和位置时，充分考虑了社会需求，以维持其可持续发展。

### 3.3.5 技术开发

Towhata等为在不稳定斜坡安装低成本多传感器装置来进行斜坡监测提供了验证和解释。采用的传感器在暴雨中可以依靠斜度仪监测斜坡形变。无线网络定期从传感器收集信号，并且根据传感器倾斜的程度，通过手机给地方政府发送警报信号或紧急疏散令。最近，成熟的设备已经部署在几个山坡，来验证其在野外的表现。

Tapete等给出了一个罗马（意大利）考古领域中的案例研究，其

中描述了一套对处在风险中的古迹进行预警的系统，该系统基于地面的雷达干涉测量（GB-InSAR）和永久散射体（PSInSAR）技术。GB-InSAR设备的高采样频率和高空间分辨率使得作者对罗马古迹的位移及其结构行为的实时监测成为可能。

Pascal等强调数据融合对基于实时多参数监测技术的预警系统的重要性。他们提出使用术语“云监测”作为一种创新方法，“云监测”也涉及数据仓库对于资料及元数据的数据冗余和获得长期互动的可访问性的处理能力。

## 4 小结

(1) 《滑坡清单和敏感性评价及灾害区划》一书给出了从局地到国家甚至大陆的滑坡易发性评估研究结果。从这些个例中可以看出，制作滑坡清单和易发性评价地图是应对滑坡灾害的首要任务，但各国应在分辨率和提供的信息方面进行统一，并向公众开放，以便滑坡数据的完善和应用。

(2) 《预警、仪器和监测》一书介绍了一些有关滑坡监测和预警的创新性的仪器和方法，具有很好的实用性和示范意义。许多个例表明，气象因子是影响斜坡稳定性最重要的要素之一，对滑坡的监测手段和方法始终离不开对降水的观测，有关降水的物理量经常被用来作为滑坡发生预警的阈值。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)