

# 气象与滑坡研究国际进展评介

贾朋群<sup>1</sup> 张萌<sup>1</sup> 许小峰<sup>2</sup>

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 在梳理了不同学科角度对滑坡的定义和界定描述基础上, 介绍了国际上对滑坡灾害的认识、研究、评估以及应对等方面的进展情况, 特别着重强调了气象因素在以滑坡为代表的地质灾害的防御中所起到的关键作用。

**关键词:** 滑坡, 气象, 预警

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.z1.001

## 1 引言

作为地质灾害中分布最广泛和影响最大的灾害, 滑坡 (landslide) 因为在学术上涉及的学科众多以及滑坡现象本身的复杂性, 其定义较为宽泛。《中国大百科全书》(第二版) 将属于滑坡的泥石流 (英文取词 debris flow) 定义为: 产生于沟谷中或坡地上的饱含大量固体物质 (泥、沙、石块和巨砾) 的不均质的特殊洪流, 具有暴发突然、历时短暂、来势凶猛和破坏力大等特点, 是山区常见的一种自然灾害。美国气象学会 (AMS) 最新版《气象词汇》中, 将滑坡 (landslide) 和雪崩或崩塌 (avalanche) 等灾害归为一类, 其定义为: 大量雪 (可能含有冰和岩石) 沿着陡峭山坡快速下滑。AMS 的定义, 更多着眼于高寒和高纬度地区, 强调了附着于陆地, 特别是山区地表上不稳定的雪盖, 以及其移动带动的冰和泥石等地表物质。

更为一般的滑坡现象 (图1), 是指土体、岩块或堆积物以及它们的混合体在重力作用下沿滑动面做整体下滑运动的过程和现象, 也可以指这种运动造成的地形。由于当滑坡发生在有人居住的区域时, 经常造成人员和财产损失, 因此在现代灾害学研究中, 大多将滑坡列为地质灾害中最重要的灾种。在滑坡过程中, 发生移动的岩石块、土体等称为滑动体; 移动的底面称为移动面。当移动体是泥石流的时候, 滑坡也就是泥石流 (英文用 mudflow、earthflow、erosional land forms 或 debris flow 等表示), 而当移动体主要是岩石的时候, 根据移动的性质, 又可以称为落石 (rockfalls)、下落 (slumps and subsidence) 或断层/坍塌 (faults)、地震蠕变 (seismic creep) 等。雪崩 (avalanche), 即当滑坡发生地在雪山, 移动体是积雪时发生的现象, 也可以从更广泛的意义上归类为滑

坡。斜坡是大多数滑坡发生的基础, 很多滑坡发生在坡度小于  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  的缓斜坡上, 因此, 滑坡也有边坡坍方 (slope collapse)、斜坡崩塌 (slope failure) 等别称。

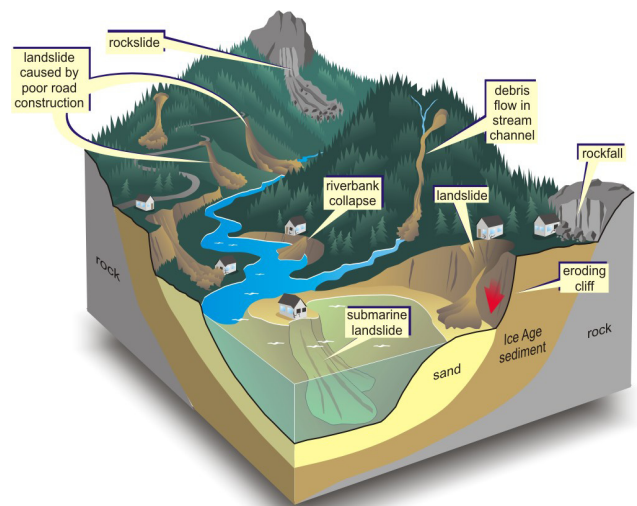


图1 一些常见的自然和人为因素导致的滑坡

由于斜坡的类型也有多种, 可以按承载滑坡的斜坡组成物质, 将滑坡分为土质滑坡和岩质滑坡: 土质滑坡又分为黏土滑坡、黄土滑坡、碎屑滑坡; 岩质滑坡又分为沉积岩滑坡、风化岩浆岩滑坡、变质片岩滑坡等。另外, 按滑动体厚度, 还可以分为浅层滑坡 (厚度为数米)、中层滑坡 (厚度为数米至20米) 和深层滑坡 (厚度为20米以上)。按形成年代, 又可将滑坡分为古滑坡、老滑坡和新滑坡。滑坡的规模大小悬殊, 移动体的体积有数十立方米, 数百至数百万、数千万立方米乃至数亿或数十亿立方米。滑坡的运动速度差异也大, 有慢得让人的肉眼难以觉察的滑坡; 也有速度很快, 如崩塌型的滑坡。不少滑坡的活动具有间歇性。

滑坡的运动方式是滑动, 有牵引滑动、推动滑动, 都使滑坡体在运动过程中保持宏观上的完整性。

收稿日期: 2013年11月20日; 修回日期: 2013年12月1日  
第一作者: 贾朋群 (1961—), Email: jiapq@cma.gov.cn

滑坡造成特有的一些地貌。例如，“滑坡壁”是指滑坡体脱离后，在坡上方未动岩土与其原结合部形成半圆形的陡壁；“滑坡台阶”是指滑坡体相对于滑坡壁构成的错乱台阶；“滑坡鼓丘”是指滑坡体前部受阻隆起而形成的丘；“滑坡洼地”是指滑坡鼓丘后相对凹下的部分。这些地貌要素都或多或少地与滑坡的主要触发因素——降水和地震事件存在潜在的联系，或者说气象和地震等触发因子是上述滑坡地貌形成的可能起因，因此是研究人员密切关注的因子。

滑坡是一种危害极大的灾害性地貌现象，给人民生命财产带来巨大损失。特别是随着人类活动在不断改变地球环境，滑坡作为自然灾害的一种，也加入了很多人为因素。例如，人类对土地覆盖的改变以及各种水利工程，都可能触发或加重滑坡灾害，而地球人口的扩张，也让人类更多地暴露在滑坡危害下，人员伤亡和财产损失无疑成倍增加。

滑坡，简言之就是地表的构造组织出现了不稳定而发生改变。因此，地震是人们最先想到的滑坡触发机制。另外，大多数滑坡现象，其移动体中或多或少都有水分参与其中，水分的润滑作用，以及水对一些结构的损毁作用也是很多滑坡之所以发生的关键所在，而水分的来源又和气象因子密不可分。例如，降水直接补充水分，而温度升高可能让冰雪层、冻土层融化，使水从固态转为液态。鉴于本文从最广泛的意义上讨论滑坡及其与气象因子的关系，本文下面内容一般用“滑坡”笼统表示上面所述的所有类型灾害。本文的评介主要基于文后给出的相关文献。

## 2 滑坡灾害分布广、损失大

最近的一些研究表明，全球每年因滑坡死亡的人数，较以前的估计要多出数千人。鉴于滑坡带来的风险不断扩大，科学家们在仔细考量滑坡造成的死亡人数时发现，以往数据都低估了滑坡造成死亡的人数，主要原因是一些死亡被归并到地震或引发滑坡的天气事件中，而导致死亡的直接原因，实际上是地震或天气事件的衍生灾害——滑坡。

根据设在英国杜伦大学的国际滑坡中心（International Landslide Centre, ILC）统计，在2004—2010年之间，全球发生了2620起造成人员死亡的、非地震触发的滑坡事件（图2），死亡人数达到32322人（年均约4600人）。这一统计结果，尽管不包括地震引发的滑坡，死亡人数也已超过了洪水造成的死亡人数的一半（统计显示，1990—2006年间，全球每年因洪水造成的死亡人数平均为7600人）。几乎在同一时期，全球因林火死亡的人数，年均仅47人。这些数据充分表明了滑坡在灾害影响中，是单次事件影响区域相对较小，但是因为分布广，具有相对“强大”的杀伤率的灾种。世界上一些主要滑坡灾害国家2004—2010年滑坡灾害死亡人数和发生次数的统计，见表1。

在图3中给出了2004—2010年全球滑坡事件和死亡人数统计的更多视角信息。首先，从滑坡事件造成的死亡人数的概率密度函数（数学上，概率密度函数用来表示一组随机数据值落在某指定范围内的概率；本文中，将滑坡事件数按照死亡人数进行分组后，可以获得一组“死亡人数—滑坡事件数”分布数据，能近似表示滑坡数随死亡人数变化的规律）分布可以看

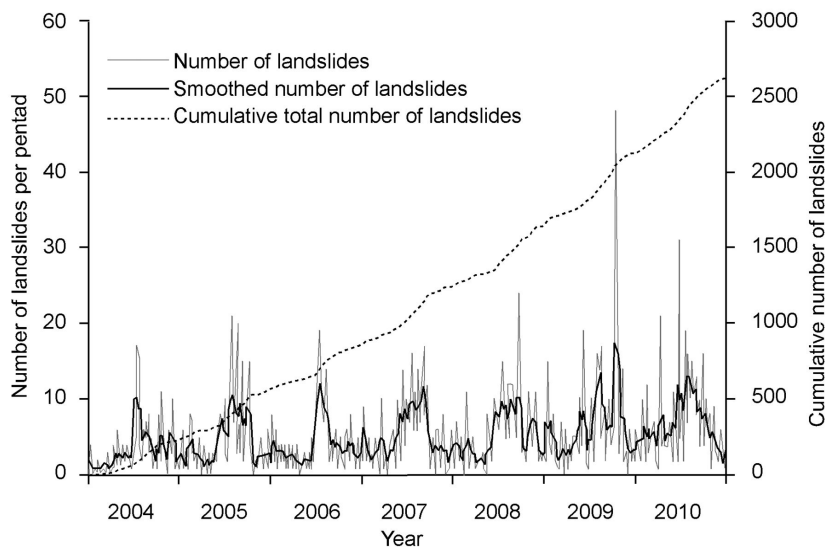


图2 2004—2010年全球非地震引发的滑坡事件和滑坡事件累计数（时间统计时段为每5天，图中还给出25天滑动平均）

出，造成低死亡人数的滑坡事件远远多于造成大量死亡的滑坡事件。而死亡人数少的滑坡事件的多发和造成大量人员死亡的滑坡事件的突发，也使得滑坡事件次数与死亡人数之间，并不存在一致性很好的关系，即有时几次事件可能造成大量死伤，而在事件多发生时，可能死伤人数并不多。

从滑坡事件发生的平均年变化上看（图4），滑坡在北半球夏秋季节发生的频率最高，此时季风影响东南亚地区，飓风和台风则在中美洲及加勒比海地区和西北太平洋登陆肆虐。统计还显示，全球滑坡发生的频率在增加。考虑到统计时段并没有严重的厄尔尼诺事件（厄尔尼诺发生时，登陆中美洲和加勒比海地区的飓风增加）和暴露在滑坡潜在发生地人口有增无减等因素，未来滑坡造成的损失无疑会增加。

研究者认为，在滑坡事件中导致人员死亡的主要

表1 2004—2010年部分国家滑坡灾害死亡人数和滑坡事件次数的统计

国家	死亡人数	滑坡次数	平均死亡人数
阿富汗	67	9	7.44
孟加拉	302	58	5.21
不丹	50	18	2.78
巴西	823	88	9.35
中国	6860	353	19.43
哥伦比亚	564	6868	0.08
多米尼加	46	10	4.60
厄瓜多尔	48	8	6.00
萨尔瓦多	197	18	10.94
危地马拉	2001	45	44.47
海地	4475	22	203.41
洪都拉斯	52	12	4.33
印度	2415	393	6.15
印度尼西亚	2078	164	12.67
意大利	67	14	4.79
牙买加	20	10	2.00
日本	147	70	2.10
肯尼亚	72	15	4.80
马来西亚	53	29	1.83
墨西哥	318	53	6.00
缅甸	211	12	17.58
尼泊尔	809	211	3.83
巴基斯坦	1023	102	10.03
巴布亚新几内亚	105	13	8.08
秘鲁	313	29	10.79
菲律宾	4583	226	20.28
葡萄牙	70	8	8.75
南非	12	8	1.50
韩国	74	16	4.63
西班牙	15	12	1.25
斯里兰卡	81	21	3.86
中国台湾	693	44	15.75
塔吉克斯坦	75	16	4.69
泰国	134	20	6.70
土耳其	85	22	3.86
乌干达	408	15	27.20
美国	64	42	1.52
委内瑞拉	63	23	2.74
越南	528	76	6.95
也门	121	9	13.44

因素，是滑动面足够陡峭、大量降水和人员居住密集等。因此，从这个角度看，滑坡与气象，特别是与降水的关系非常紧密。

滑坡在全球山区广为分布，最活跃的地区是北回归线至50°N之间的山区。泥石流灾害波及60多个国家

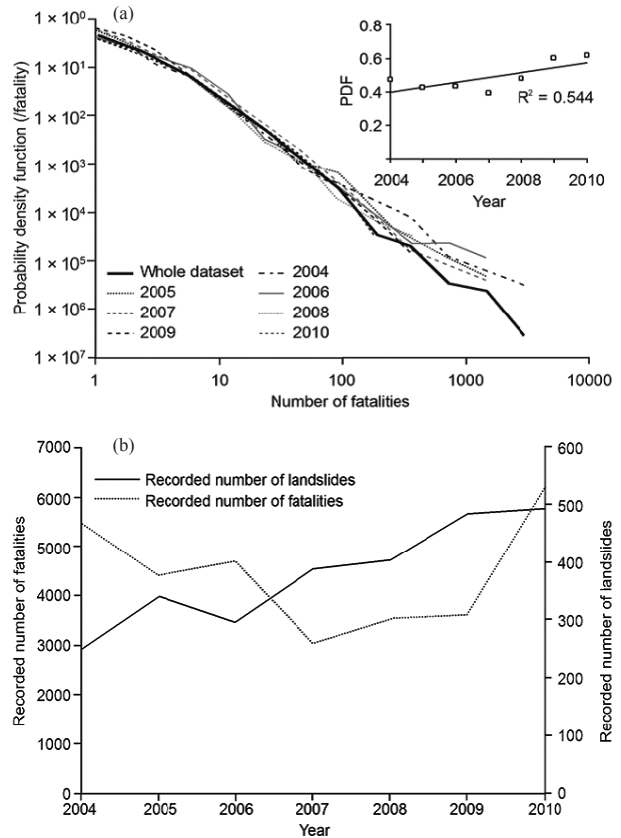


图3 2004—2010年逐年以及所有数据概率密度函数 (PDF) 幂次定律分布，插图给出导致单一死亡的滑坡事件的PDF逐年变化，其明显的增加趋势表明记录较小规模的滑坡事件的技巧在增加 (a)；2004—2010年逐年滑坡事件和死亡人数分布 (b)

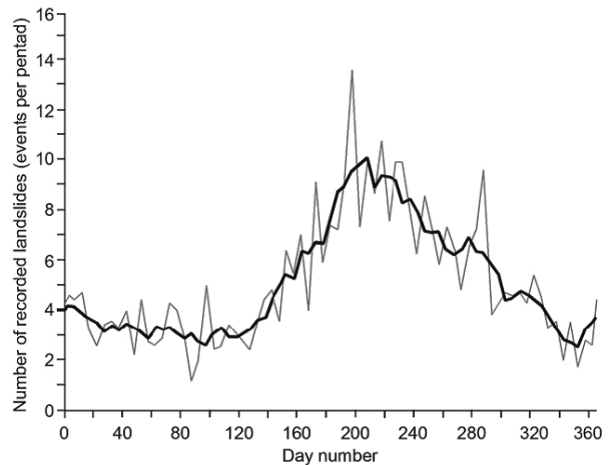


图4 2004—2010年滑坡事件的平均年变化 (粗线为25天滑动平均)

和地区且损害程度不同(图5)。在中国,根据自然环境的差异以及泥石流类型、结构和活动的特点,泥石流的区划可以分为极强活动、强烈活动和弱活动3个区和6个亚区。

这6个区域可以概括为:①青藏高原边缘山地冰川泥石流亚区;②横断山脉和川滇山地暴雨泥石流亚区;③黄土高原边缘梁峁沟壑暴雨泥石流亚区;④西北山地暴雨—冰雪消融泥石流亚区;⑤华北和东北山地暴雨水石流亚区;⑥东南沿海山地丘陵暴雨(台风雨)水石流亚区。据统计,泥石流灾害波及中国23个省(市、自治区),有近200座县城遭受过灾害性泥石流。有迹象表明,中国泥石流的活动范围和破坏强度,随着山区建设的不断发展,有明显扩大和加重的趋势(链接1)。

根据美国地质调查局(USGS)的统计,在美国所有50个州和地区都曾经发生过滑坡灾害,滑坡灾害是传播最为广泛的自然灾害之一,其每年给美国造成

的损失为10~20亿美元,平均每年有25人死于滑坡灾害。近年来随着城市膨胀和娱乐业向山区拓展,更多人群面临滑坡的风险。特别是滑坡往往伴随其他自然灾害,例如,地震、火山喷发、林火和洪水共同发生,经常能够“放大”已有的灾害。

此外,在全球范围内的一些大型人造工程,特别是水库和水利发电站,也是全球滑坡更加频发的原因之一(图6)。这一情况要求人类在“改变”自然的时候,应该具有更好的风险意识,尤其是大型工程前期的风险论证,需要特别注意滑坡这类潜在的、具有毁灭性的灾难,避免出现工程项目的“衍生”灾害。

在滑坡造成的经济损失方面,与滑坡导致伤亡人数的统计类似,全球滑坡造成的经济损失,如果以占各国GDP的百分比统计,则有40%发生在中南美洲和加勒比地区,另40%出现在亚洲。需要特别指出的是,由于滑坡灾害较多地出现在农村,因此滑坡损失

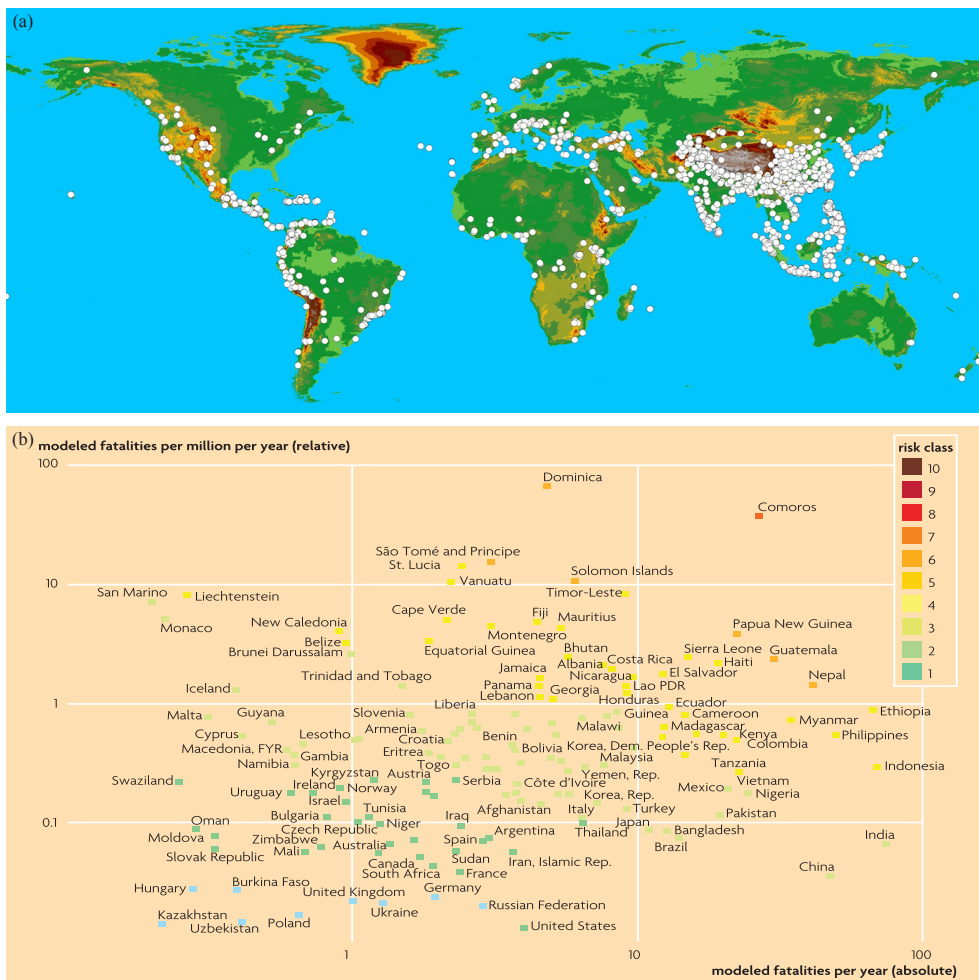


图5 全球2004—2010年造成人员死亡的滑坡发生地分布(白色点),世界上滑坡灾害严重的地区包括印度西南部、亚洲东部、中美洲和加勒比等地区(a);世界不同国家因降水引发滑坡造成死亡人数的统计(b,横坐标为模拟的年死亡人数,纵坐标为模拟的每百万人口每年死亡人数)

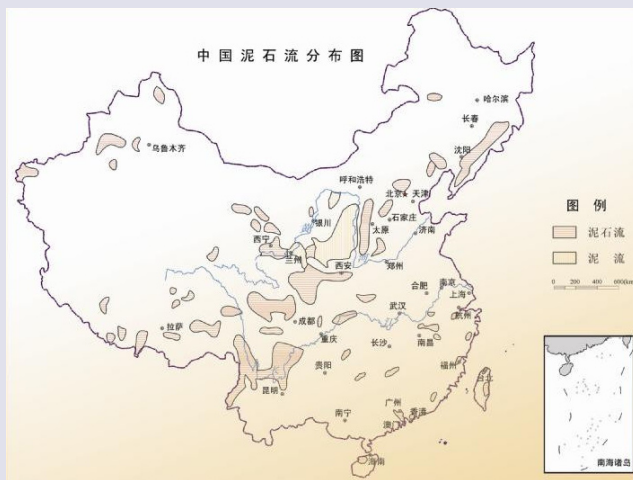
## 链接1 中国的山洪地质灾害

中国是一个多山的国家,山区占我国陆地总面积的69.4%,山区人口占全国总人口的一半以上。山区地质构造复杂,生态环境脆弱;随着山区建设速度加快,生态环境遭到破坏,泥石流、滑坡、崩塌、山洪等山地灾害暴发频繁。据统计,山地灾害平均每年导致我国经济损失达57亿元人民币,人员伤亡超过1000人。

我国有灾害性泥石流沟一万多条,滑坡数万处,崩塌数十万处,广泛分布在高原、山地和丘陵地区,主要分布在川滇山地、秦岭、云贵高原、黄土高原、燕山、太行山、长白山、天山和青藏高原等地区。山洪分布更为广泛,除上海市以外,各省、市、自治区的山区都可能发生山洪灾害。

2010年10月7—8日,甘肃省舟曲县发生的特大泥石流,是我国有历史记载以来造成损失最大的一次泥石流灾害。科学家通过对甘肃省舟曲县城后山三眼峪沟和罗家峪沟特大泥石流灾害的现场调查,并参考遥感图像进行分析,结果表明,舟曲泥石流是局部强降雨作用下发生的百年一遇的水力型特大泥石流灾害。其中,2010年8月7日23—24时的1h降雨量达77.3mm,是灾害的主要诱因。研究进一步揭示,此次舟曲暴雨区中心雨量为350mm,主雨区面积约40km<sup>2</sup>,面平均雨量200mm。此外,根据暴雨特性和雨区地理位置,按有关洪水计算公式计算得到洪峰流量为646m<sup>3</sup>/s。暴雨形成强大洪水依次冲毁两条沟内的天然堆石坝和人工拦挡坝,形成规模巨大的高容重黏性泥石流,泥石流冲出总量和泥沙总量分别为(144.2×10<sup>4</sup>)m<sup>3</sup>和(97.7×10<sup>4</sup>)m<sup>3</sup>;泥石流携带具有强大冲击力的巨石冲毁房屋5500余间;在白龙江内形成长约550m,宽约70m,高约10m的堰塞坝并形成堰塞湖,堰塞湖回水长3km,造成县城一半被淹;泥石流造成1744人死亡和失踪,初步估计直接经济损失达4亿元。

(更多山洪地质灾害信息,请见<http://amuseum.cdstm.cn/moundisaster/>)



往往被低估。

应对这些灾害最有效的方式,显然是提前预警(图7),而建立预警系统,就需要加强对滑坡灾害本身开展基础和应用的研究。

### 3 全球滑坡研究概况

与滑坡灾害作为一个长期存在的灾种的历史相比,学术界对滑坡开展的研究起步相对较晚。在SCIE数据库中,1975年以前,全球每年发表的滑坡研究文

章不到2篇,在1990年前后,年发表文章大约20篇。20世纪末和21世纪初,滑坡研究论文量呈现快速增加的趋势,目前已经接近每年1000篇,在1902—2010年超过100年的时间里,滑坡研究论文累计达到8500多篇。此外,与滑坡相关的国际和国家研究组织、专门科学期刊也在最近10年左右的时间里开始出现。但是,针对滑坡的研究,其作者在全球的分布不均(图8)。各国学术界对滑坡研究的投入,如果按照需求(可以用滑坡造成的死亡人数表示)大致可以划分为三个阵

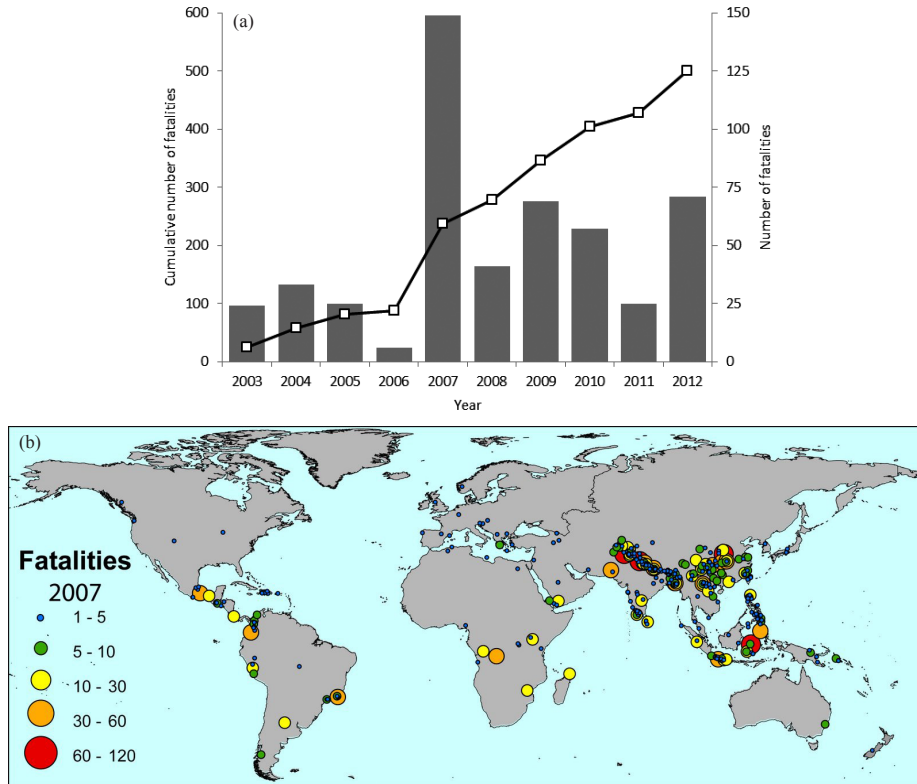


图6 2003—2012年与水坝或水电站相关的造成死亡的滑坡事件分布 (a, 柱状给出每年死亡人数, 细线给出事件的累积数量, 表明除了2007年以外, 损失一直在增加); 2007年较多的滑坡事件全球分布 (b)

营: 第一阵营包括了主要发达国家中的大国和欧洲, 开展的研究多但滑坡造成的死亡人数有限, 典型国家有意大利、美国、日本、加拿大、西班牙和土耳其等 (图8中绿色区域); 第二阵营是指滑坡成灾和研究较为“对称”的发展中国家, 以中国和印度为代表; 第三阵营中, 有大量的滑坡灾情较重, 但是研究力量薄弱的发展中国家, 如菲律宾、海地、印尼等。

妨碍滑坡研究的主要因素之一, 是滑坡属于典

型的跨学科研究领域, 例如, 降水和地震是触发滑坡发生的主要因素, 而滑坡灾害在发展中国家影响更大 (图9), 前者使得滑坡涉及了地质、地貌和气象等几乎地球科学的各个领域, 而发展中国家薄弱的灾害监测体系, 很难收集到完整的滑坡灾害样本数据。

对滑坡的监测和分析, 也要依靠更多领域的技术突破和科学知识。随着全球气象和地震观测网越来越广泛的全球覆盖, 以及遥感技术以及地学领域多方面

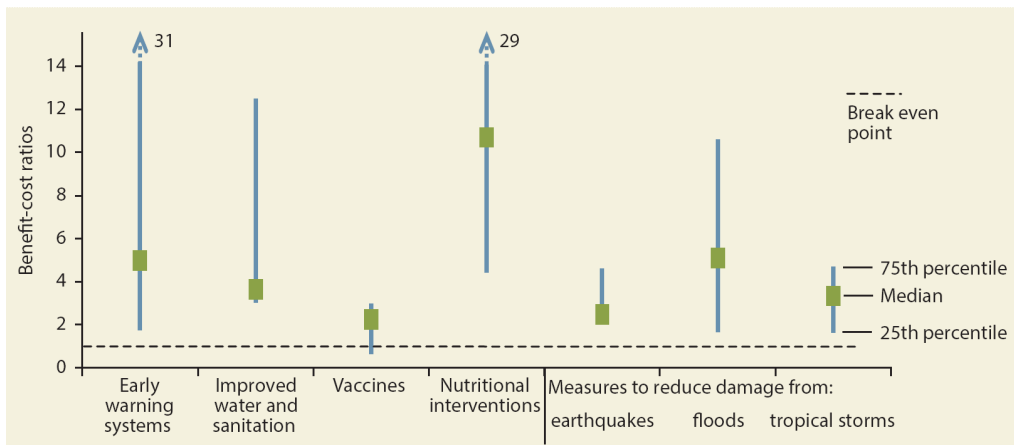


图7 各种减灾手段的效益—投入比例分布, 图中给出了该比例的25%、中值和75%的统计数值

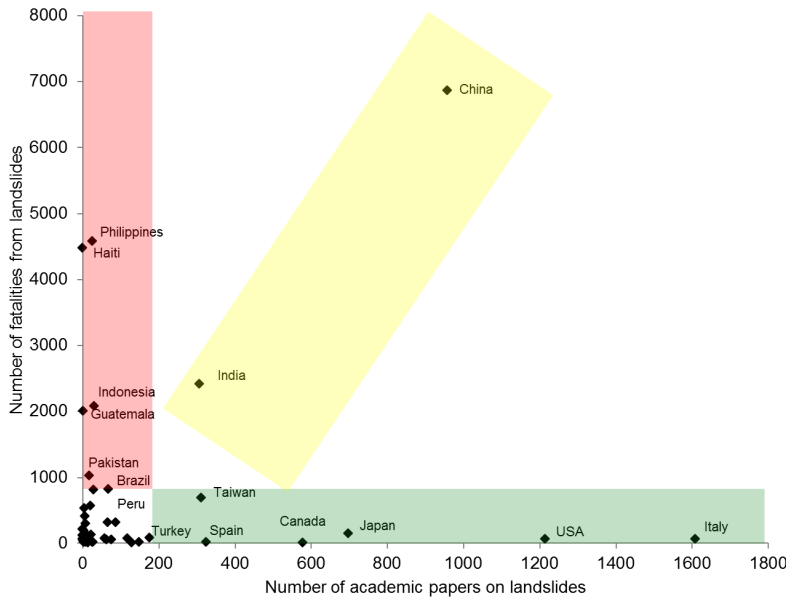


图8 造成死亡的滑坡事件和滑坡研究论文篇数按照国家分布

的研究进展，进入21世纪以来，全球滑坡研究进入了一个快速发展时期。

2002年1月，国际滑坡协会（International Consortium on Landslides, ICL）成立，国际滑坡研究计划（International Programme on Landslides, IPL）随之启动。2005年在日本神户召开了联合国世界减灾会议，2006年在东京又召开了圆桌会谈，在两次会议形成了“东京行动计划”过程中，IPL获得了极大的强化。目前，IPL获得国际社会的广泛关注与支持，其运行由全球促进委员会负责，该委员会成员由ICL和其支持成员机构构成，包括了联合国国际减灾战略（United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction, UN-ISDR），联合国教科文卫组织（United Nations Educational,

Scientific and Cultural Organization, UNESCO），世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO），联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO），联合国大学（United Nations University, UNU），国际科学理事会（International Council for Science, ICSU），世界工程组织联合会（World Federation of Engineering Organizations, WFEO）。

ICL和IPL极大地促进了滑坡研究的学科建设、人才培养和实际应用，这一进展尤其让深受滑坡灾害影响的发展中国家受益。其中以“世界滑坡论坛”为代表的全球滑坡研究界，也已形成了一定规模。每3年一次的系列学术会议已经召开了2次，参会专家数量可观，2014年还将在北京召开第三次世界滑坡论坛学术会议（图10），必将继续促进全球滑坡研究取得进一步发展。

#### 4 滑坡的分类和滑坡空间数据

如前所述，滑坡发生的情况较为复杂，我们在表2中将滑坡按照起因、形变和滑动主体等因素进行了具体的划分和描述。地质学上描述的滑坡，是土壤、岩石或两者的混合物在滑动面上发生的沿边坡向下的运动。如果滑动面是曲面的，则称为旋转式滑坡；如果是平面的，则称为平移式滑坡。在滑坡运动过程中，滑动体内的物质往往表现为具有粘聚力或半粘聚力的整体，在滑坡体内部很少有变形产生。

滑坡的形成，大多是泥沙、石块及其他地表物质（如林火过后的遗迹等）和水（主要来自降水过程）

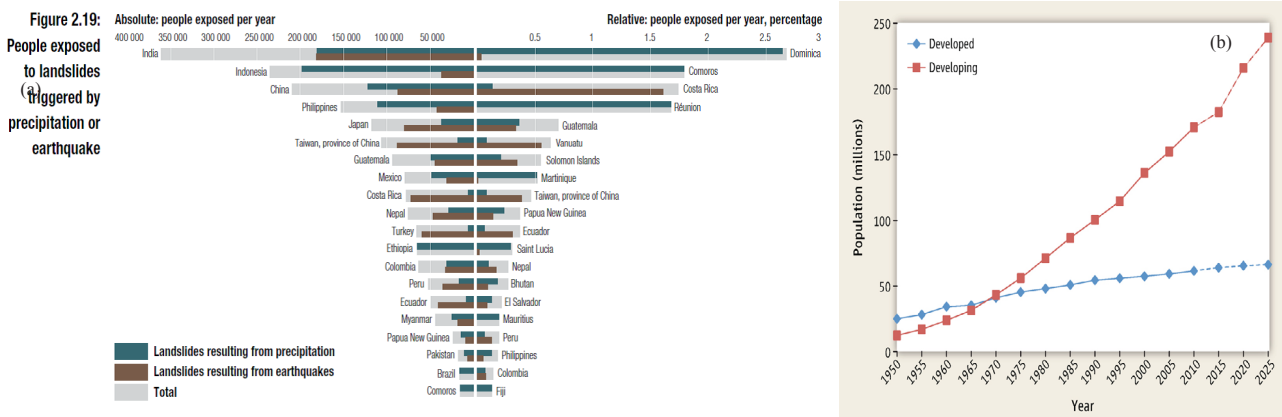


图9 不同国家每年受到降水和地震引发的滑坡威胁的人数和相对人数（单位：%）分布（a）；1950年以来发展中国家和发达国家城市（指位于地震烈度 $\geq 7$ 的震源100 km内）受到地震影响人数趋势（b）

相互作用的结果，其形成和发展受到地质、地貌、水文和气象等一系列因素的控制和影响，而人类活动的合理与否又在很大程度上抑制或加剧了滑坡灾害的形成和发展。概括起来，滑坡的形成须同时具备3个条件：①流域内有丰富的松散固体物质，并能以滑坡、崩塌等块体运动方式转移到沟谷内。②流域内谷坡陡峻，有利于水流的汇集和松散堆积物的崩落，并混合成为泥石流迅猛下泻。③在沟谷的上、中游区，有暴雨洪水，或冰川积雪融水和湖泊、水库溃决等提供充沛的水源，凭借有利的汇流地形，冲蚀掏挖谷坡或沟床松散物。上述3个条件是相辅相成的，总的规律是：滑坡的区域分布和发育程度受控于地质构造和地貌组合；滑坡的暴发频率和活动强度受控于水源补给量和水动力激发因素；滑坡的性质和规模受控于松散固体物质的储量多寡和补给方式。

此外，从滑坡的形态分区角度看，其从上游到下



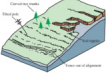
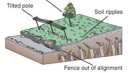

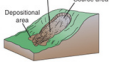
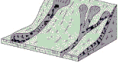
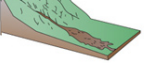
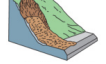
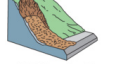
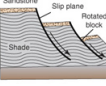
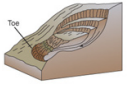
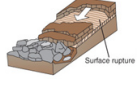




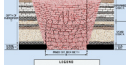
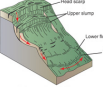
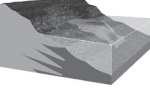


图10 2014年第三届世界滑坡论坛即将在北京召开

游分为滑坡的形成区、流通区和堆积区等3个区段：

① 形成区位于流域的上游，多为高山环抱的漏斗

表2 滑坡分类

移动类型	移动物质	
	岩石	土壤
下落	 岩崩 (rock fall)	 土壤下落 (soil fall)
慢速流动	 岩石蠕变 (rock creep)	 土壤蠕变 (soil creep)
中速流动	 泥石流 (earth flow)	 泥石流 (earth flow)
快速流动	 碎屑流 (debris/ mud flow)	 碎屑流 (debris/ mud flow)
高速流动	 碎屑崩 (debris avalanche)	 碎屑崩 (debris avalanche)
不同水含量和移动速度滑坡 (旋转)	 岩石坍落 (rock slump)	 土壤坍落 (soil slump)
不同水含量和移动速度滑坡 (平移)	 岩滑 (rock slide)	 塌方 (soil slide/ slip)
横向传播	 岩石横向传播	 土壤横向传播
下沉	 岩石下沉 (rock subsidence)	 土壤下沉 (soil subsidence)
混合型	 复杂滑坡 (complex slide)	
水面 (海面) 以下滑坡	 水下滑坡 (subaqueous flow of sand or silt)	

状, 这里山高谷深, 坡陡流急, 重力侵蚀和坡面侵蚀强烈, 是滑坡的发源地、泥石流的固体物质和水源主要供给地。

② 流通区位于流域的中游, 多为基岩峡谷地形, 沟床纵坡大, 常有陡坎、跌水或瀑布, 是滑坡破山而出的通道。

③ 堆积区多位于流域的下游, 滑坡到此摆动频繁, 快速漫淤, 形成扇形和锥形地貌。此处大小石块密集, 地面垄岗起伏、坎坷不平, 山区城镇、村寨、厂矿、铁路和公路等多布设于此, 是遭受滑坡袭击的主要地区。

近年来, 滑坡研究受到越来越多的重视, 在很大程度上源于人类活动范围的拓展大大提高了生命财产对滑坡灾害的脆弱性。此外, 对土地的开发和形成新的城镇和城市本身, 也可以成为滑坡的诱因。特别是, 对排水方式的改变和对植被的破坏等是最常见的诱发滑坡的人为因素。另外, 滑坡也可能和其他人类活动, 例如灌溉、水库排水或蓄水、水管渗漏、不合理地开挖或削坡等形成明显或潜在的因果关系。这样的联系, 如图11所示, 可能带来更为复杂的滑坡类型。

滑坡不同于一般水流或洪水, 是高浓度的固液相颗粒流, 滑坡流体中固体物质的体积占30%~80%。固体物质的多寡、成分和补给方式, 决定了滑坡的性质、类型和规模。与一般水流相比, 滑坡有如下特点:

① 突发性和短暂性。滑坡可以几年、十几年甚至几十年出现一次, 一旦出现, 暴发突然、瞬间即逝(一场泥石流历时几分钟至几个小时)、来势凶猛, 常在顷刻之间造成巨大灾难。

② 多相性和不均质性。滑坡是泥沙石块和巨砾组成的不均质的固液两相流体。其成分从粒径0.005mm的粉沙黏粒到几米至十几米的大漂砾, 大小悬殊。

③ 脉动性和大冲淤量。滑坡发生时, 几乎以相等的时间间隔一阵一阵地流动, 称为阵性运动或波状运动。滑坡的冲淤量可以很大, 一次滑坡可将沟床切深几米至十几米, 搬出山外的固体物质可达几十万、几百万至上千万立方米; 搬出和移动的巨砾的重量, 可达几百吨、几千吨至上万吨。

滑坡作为一种灾害形式, 不仅类型复杂和可能导致的人员和财产损失多样, 更由于其触发的因素包含了气象等外界因素和地震活动等地质本身变化而有多种可能, 因此目前针对滑坡的敏感性、灾害损失和风险评估等科学研究活动, 涉及了多层次和多学科。表3对这些数据进行了归纳。这些数据, 是针对滑坡开展敏感性分析、风险预警和各种相关评估过程(图12)中不可或缺的内容。

滑坡研究所需的数据, 大致分为4类: 滑坡清单、环境因子、触发因子和危险因素。其中, 记录历史上滑坡事件过程的滑坡清单数据, 在目前科学、完整和详尽的滑坡事件记录还不够多的情况下, 无疑是最为重要的。清单数据的累计, 是更加深入认识局地以及全球滑坡地点、类型、发生机制、引发因子、发生频率、规模和损害等的主要依据。精确和完整的滑坡清单数据, 能够很好地揭示出滑坡活动的信息, 因此涉及到较大区域多时间尺度的滑坡信息。例如, 在滑坡区划中, 滑坡活动分析经常仅限于单一滑坡事件, 这就导致因样本不充分, 分析的价值就要大打折扣。因此, 为了滑坡清单数据的完整性和科学性, 应

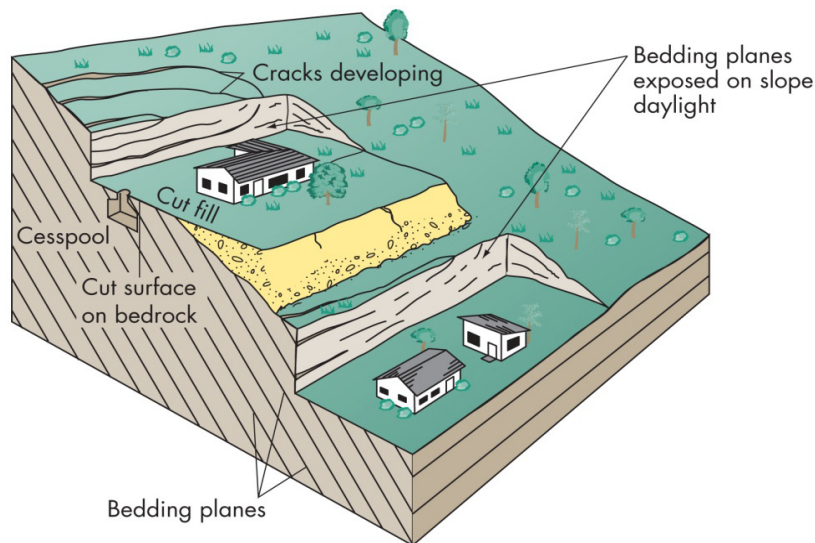


图11 人类土地利用的改变, 往往能够形成更为复杂的滑坡类型潜在灾害

表3 滑坡敏感性、灾害和风险评估依据的基本数据集框架

数据		理想更新频率(年) 10.....1.....0.002(天)	RS <sup>a</sup>	尺度 <sup>b</sup>				灾害模式 <sup>c</sup>				风险 方法 <sup>d</sup>	
主要类型	层			S	M	L	D	H	S	D	P	S	Q
滑坡清单	滑坡清单	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	滑坡活动	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	滑坡监测	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
环境因子	数字高程模型	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	倾斜角、相位等	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	内部减轻	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	流量积算	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	岩石学	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	结构	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	断层	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	土壤类型	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	土壤深度	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	斜坡水文	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	主要地貌单元	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	详细的地貌单元	→		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	土地利用类型	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	土地利用变化	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	触发因子	降水	←		■	■	■	■	■	■	■	■	■
温度、蒸散		←		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
地震手册		↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
地面加速度		↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
危险元素	建筑物	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	交通网	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	救命绳	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	关键设施	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	人口数据	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	农业数据	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	经济数据	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	生态数据	↔		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

注：■关键 ■非常重要 ■比较重要 ■次要的 ■不相关  
a 遥感对所需数据的实用性；  
b 小尺度(S)、中尺度(M)、大尺度(L)或详尽尺度(D)资料层的重要性(相对于特定地点获取资料的可行性)；  
c 对启发式(H)、统计(S)、确定(D)或概率(P)模式数据的重要性；  
d 资料层对(半)定量(S)或定性(Q)的脆弱性和风险分析的重要性。

呼吁建立更多的滑坡观测网。

在环境因子方面，涉及到对滑坡发生有影响的多个数据层面，这样的多层面数据集，能够用于预测未来滑坡起因的研究。这部分数据要素，要比表2中列出的更多。但是，环境因子资料，会因为滑坡区域具体环境特点，导致滑坡的类型和机制等的不同，研究者的选择就变得十分重要和关键。表4中这类数据涉及形态、地质、土壤类型、水文、地形和土地利用，几乎涵盖了地学各主要领域。环境因子数据用来描述环境的两个方面：静态和动态。静态数据的例子包括地质、土壤类型、地形和地貌等。如果说静态数据的更新时间可以较长的话，那么，动态数据，主要

是气象因子及其对斜坡水文作用，其数据更新常常要求在几小时到数天之内，而土地利用和人口等动态数据的更新则可以从数月数年到数年。需要注意的是，因为滑坡会改变地表状况，因此，土地利用要素既是环境因子，也是滑坡影响的要素。

在触发因子数据中，时空分布显得尤为重要。特别是，降水和气温以及地震活动等，需要有足够长时间的资料累计，才能更好地了解这些因子与滑坡发生之间的联系。在气象因子方面，当地面气象站资料缺乏或者研究的区域尺度较大时，卫星遥感资料，特别是卫星遥感反演的降水资料是很重要的替代资料，尤其是一些专门的降水探测卫星及产品。例如，TRMM (Tropical

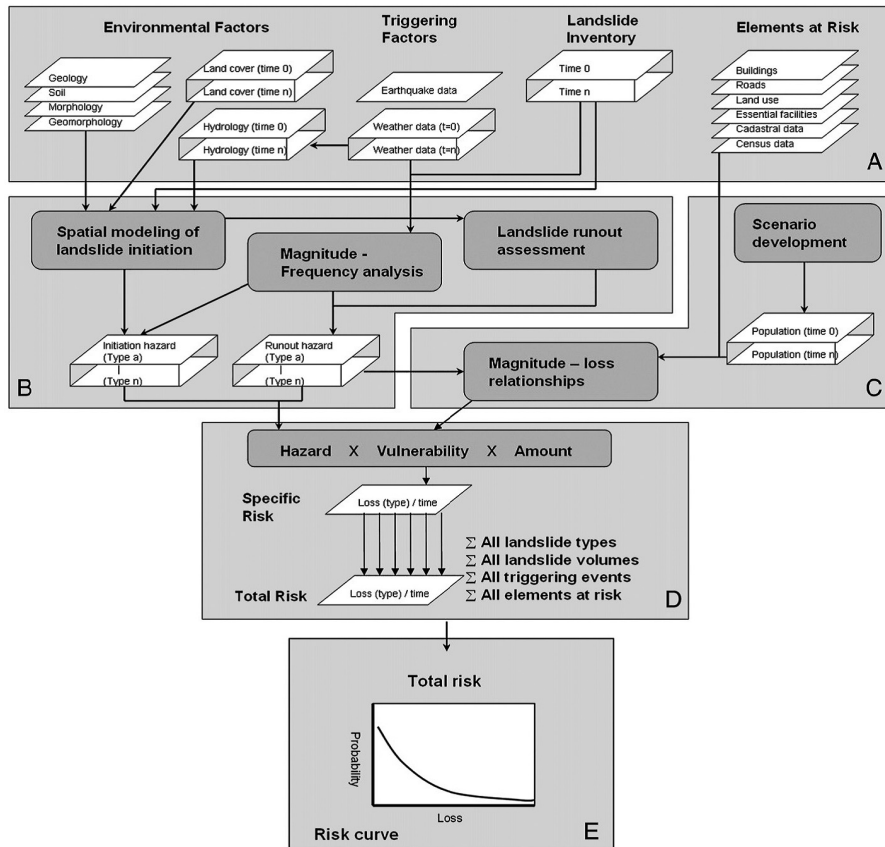


图12 滑坡敏感性、灾害和风险评估依据的基本数据集框架

Rainfall Measuring Mission, 链接2) 卫星及多卫星降水分析 (TMPA, TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis) 资料, 目前应用在很多涉及滑坡的研究和业务中。需要指出的是, 触发因子数据必须与滑坡清单数据结合起来, 才能更好地在滑坡预警中有效地被利用。

从滑坡灾害防御角度看, 与滑坡风险分布相关的人口、居住地和建筑物等人文要素的分布, 是预警决策过程必须考虑的, 但是这些社会、经济要素, 或者依据普查才能准确获得, 或者因为社会变动快而很

难得到准确的数据, 因而导致有目标的预警信息不易做出。特别是在很多地区, 住户信息等非空间数据和建筑物位置等空间数据之间并没有建立很好的联系, 直接导致对滑坡风险人群判断的困难。面对这样的挑战, 在完善社会人文数据并不断更新等常规办法之外, 一些新技术也在不断被应用。例如, 移动GIS技术可以获得动态人员信息, 而通过InSAR、LiDAR和IKONOS (高分辨卫星图像) 等探测技术, 提取人类建筑信息能够很好地用于滑坡预警的制作。

总之, 随着对各种滑坡现象认识的深入和包括

#### 链接2 热带降雨测量任务 (TRMM) 卫星和TRMM多卫星降水分析 (TMPA) 资料

自1997年推出以来, TRMM为热带和亚热带地区提供了关键的降水测量值。降水雷达 (PR) 可以看穿降水柱, 为监视热带风暴的结构和加强提供新的视角。TRMM微波成像仪 (TMI) 通过测量地球及其大气层发出的微波能量来量化水蒸汽、云水和大气降水强度。TRMM将填补许多我们关于降雨特征及其变化的理解上的空白。包括: 1) 降雨强度和覆盖面积的频率分布; 2) 将降水划分为对流和层状类别; 3) 水凝物的垂直分布 (包括层状区域亮带的结构和强度); 4) 最大降水量的时间变化——特别是海上大尺度对流系统在夜间的加强, 以及陆地上地形和海风强迫系统在日间的加强。TRMM可使降雨量的较大的时间和空间变化映射在准周期环流异常上, 如MJO和ENSO。另外, 大型年际环流系统的爆发, 如亚洲夏季风, 将会被更加深入地研究。TRMM降水测量已经且将继续在热带气旋预报、数值天气预报、降水气候学等方面提供关键数据, 并将更广泛地应用于社会。

TMPA资料集依据多卫星观测结果和地面雨量站数据, 提供校正后的高时空分辨率 ( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 每3h) 连续降水资料。该资料可以实时或过后提供, 目前数据集覆盖1980年以来 $50^{\circ}N-50^{\circ}S$ 之间的区域。

表4 环境因子及其与滑坡敏感性和灾害评估关系概览

领域	数据层和类型	相关性	分析尺度			
			R	M	L	D
数字高程模型	坡度	重力运动最关键的因素	■	■	■	■
	坡向	土壤湿度和植被的反映上可能有差别	■	■	■	■
	坡长、形状	斜坡水文的指标	■	■	■	■
	流向	应用于斜坡水文建模	■	■	■	■
	流量积算	应用于斜坡水文建模	■	■	■	■
	内部减轻	应用于地形类型小规模评估的指标	■	■	■	■
	河网密度	应用于地形类型小规模评估的指标	■	■	■	■
地质学	岩石类型	岩性地图根据工程特点而不是地层划分	■	■	■	■
	风化作用	风化剖面的深度是滑坡的一个重要因素	■	■	■	■
	间断点	岩崩的不连续集和特征	■	■	■	■
	构造相位	地质构造与斜坡角度和方向的关系对岩崩预测很有意义	■	■	■	■
土壤	断层	活动断层的距离或断层带的宽度对绘制预测地图是很重要的	■	■	■	■
	土壤类型	土壤工程学类型基于基因或地质技术的分类	■	■	■	■
	土壤深度	基于钻孔、地球物理和露出地面的岩层的土壤深度是稳定性分析的关键数据层	■	■	■	■
	岩土工程属性	粒度分布、内聚力、摩擦角和堆积密度是坡面稳定性分析的关键参数	■	■	■	■
水文学	水文属性	空隙容积、饱和土壤传导度和PF曲线是应用于地下水模拟的主要参数	■	■	■	■
	地下水位	不同空间和时间地下水位深度	■	■	■	■
	土壤水分	不同空间和时间土壤水分是稳定性分析的主要内容	■	■	■	■
	水文成分	截流、蒸散、穿落量、地表径流、渗透、渗滤等	■	■	■	■
地貌学	河网	缓冲区围绕第一级溪流，或围绕河流侵蚀区	■	■	■	■
	地形单元	给出区域内第一个地形细分，这与小规模绘图有关	■	■	■	■
	地形图单元	均一的岩性、地貌和过程特征	■	■	■	■
	地貌单元	主要地形生成过程的成因分类	■	■	■	■
土地利用	地貌子单元	地形的地貌细分的最小单元，也叫坡面	■	■	■	■
	土地利用地图	土地利用类型、土地覆盖是稳定性分析的主要内容	■	■	■	■
	土地利用变化	时间不同的土地利用、土地覆盖是稳定性分析的主要内容	■	■	■	■
	植被特征	植被类型、郁蔽度、生根深度、根的内聚力和重量等	■	■	■	■
	道路	道路分割的斜坡带中包围道路的缓冲区是绘制地图的要素	■	■	■	■
	建筑物	斜坡分割用于修建建筑物的区域有时会作为绘制地图的要素	■	■	■	■

注：■ 非常适用 ■ 一般适用 ■ 不适用。R为局部的；M为中尺度；L为大尺度；D为详尽尺度。

遥感在内的观测手段的增加，对滑坡的研究、监测和业务预警等行为，已经开始借助更多的技术平台。在这方面的技术发展中，相关的遥感平台建设和数据获取、处理，是最值得关注的。这不仅是因为遥感数据具有高技术性，其能力在不断更新中，而且，遥感数据能够很好地解析滑坡多发的山区各种滑坡相关的特征以及可能的受威胁人群情况，其客观性和科学性都将成为未来减灾活动中信息获得的最重要渠道。图13给出了欧洲17个国家目前在滑坡预防和评估中使用的各种遥感技术平台情况。结果表明，在滑坡探测和区划方面，欧洲主要依据的遥感技术手段包括航空照相以及光学和雷达图像，而在滑坡监测方面，卫星雷达手段最为通用，其次是高空摄影和气象监测。更加深入的分析表明，这些技术的性能基本相似，因此，不同地区对滑坡的研究和认识、预防水平，基本上是和

这些技术手段的应用同步提高的。

## 5 滑坡与气象因子：预警

从全球滑坡灾害发生频率的分布来看，不难发现滑坡易发区域具有两个明显特征，即山区和半山区以及多雨地带。实际上，不同的土壤构造和类型（其中粘土等类型特别容易发生滑坡类灾害）也源于气候（图14），而原始岩石类型、植被和生物类型、地形以及这些要素随着时间的相互作用，加上正常的风化过程，造就了各地特点不同的土壤类型，在其中的过程中，不同的气候类型能导致陆地表面土壤类型的差异明显。

图15给出了2011年秋亚洲、欧洲和北美的9个国家，21个滑坡业务部门给出的23次滑坡事件原因的统计结果。在这次统计研究中，滑坡的触发机制被分成物质传输、构造应力、水和斜坡形成物质重量等四个

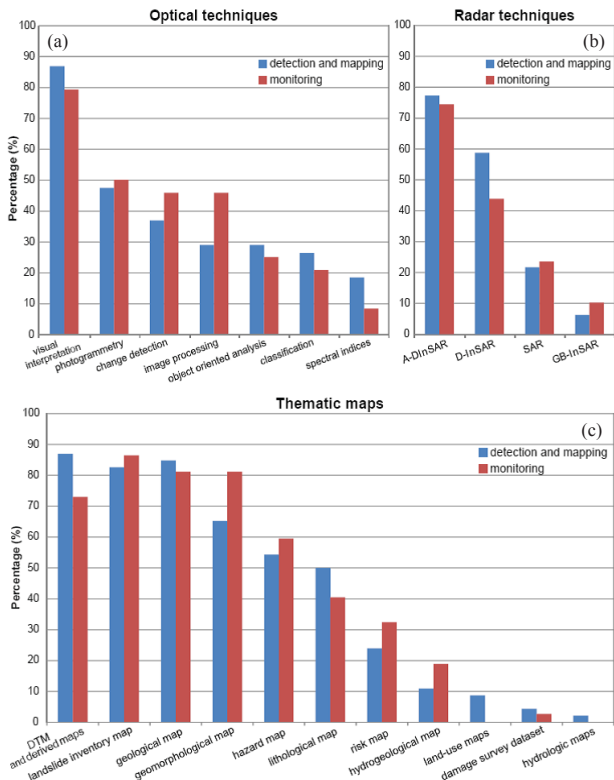


图13 欧洲17个国家滑坡研究和预警服务借助的遥感数据来源分布：(a) 光学技术手段；(b) 雷达技术；(c) 综合

方面，其中由降水和雪融化/冻土融化组成的水原因，直接和气象的降水及温度因子相关，占87%，无疑是最重要的触发机制。

实际上，从全面的滑坡发生触发因子角度看，降水和地震，无疑是触发滑坡的最主要因素。研究发现，二者的“合作”，即地震和降水在时间轴上的叠加，往往能够触发更多且更加严重的滑坡。例如，从1960年以来降水、地震以及滑坡事件的分布（图16）来看，降水和地震无疑都能够触发随后的滑坡事件，但是在1970年前后，地震之后很快发生降水而触发的滑坡事件，要比单独的降水或地震更加“高效”，这显然是因为地震在前期改变了地表的牢固程度，使得山区地表环境更加脆弱，如果这时候有降水，滑坡发生的几率就会大幅度上升。因此，气象因子与滑坡的关系，因为降水要素的触发，以及在地震等事件后气象因子触发滑坡的“高效”而更加密切。如果考虑到高山冰雪和冻土层，因温度升高可能导致的融化，进

而诱发雪崩、冻土层不稳定等现象，气象与滑坡的联系就更不可分。

为了应对滑坡灾害，特别是由降水引发的滑坡灾害，很多研究基于滑坡事件和相关的降水历史数据，建立二者之间联系的统计关系（图17），从而给出半经验的可能触发滑坡的降水阈值，可以用于与滑坡相关的预警。随着滑坡和降水数据的不断累计，这类研究因降水在滑坡的触发机制中起到绝对重要作用而不断增加，甚至出现了“阈值分析（threshold analysis）”专门词汇，描述科学家从降水数据中找到预警滑坡灾害的工作。然而，尽管这类研究的结果在趋势上有相似性，但是其应用受到很多限制，其中，前期降水和土壤构造、水分吸纳能力等，很难用简单的雨强或降水时间表示出来。

一些研究者在探索更加深入的研究和应用。例如，意大利学者在个例研究中，对所有降水参数，除了降水量和降水持续时间外，还有累计降水（cumulative rainfall）、前期降水（antecedent rainfall）、降水强度等进行研究，并提出了“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。而斯洛伐克学者更是通过引入“潜在有效降水”的概念（指超过潜在蒸发蒸腾量的部分降水），将降水和地表含水量联系在一

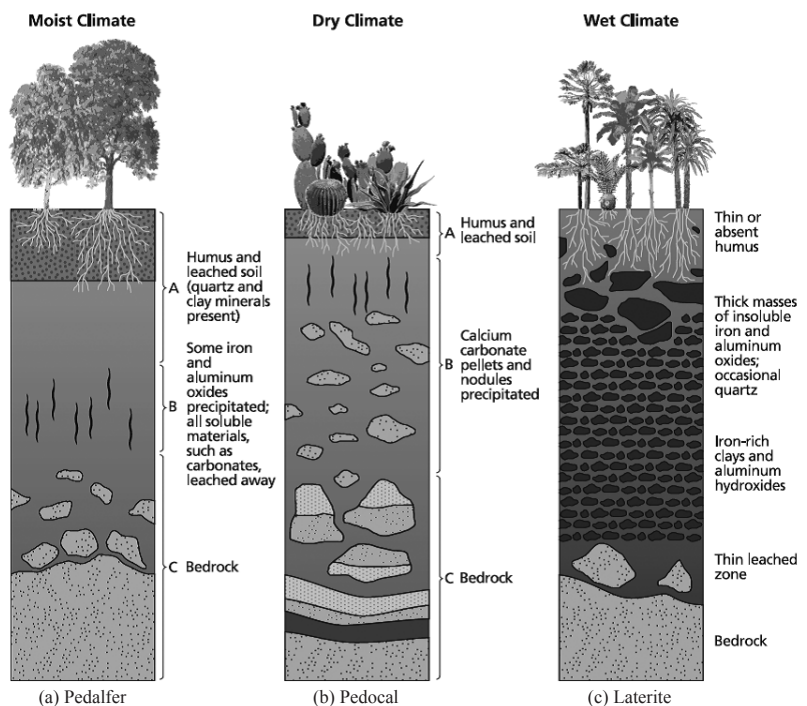


图14 不同类型气候条件下的典型土壤类型湿润气候下的淋余土（a，土壤的腐殖土密度高的发育充分的A层和大量过滤后的B层）；干燥气候下的钙层土（b，A层薄或没有，碳酸钙集中于B层）；潮湿气候下的红土（c，腐殖土很浅或没有，深层有大量无法溶解的铁和铝氧土）

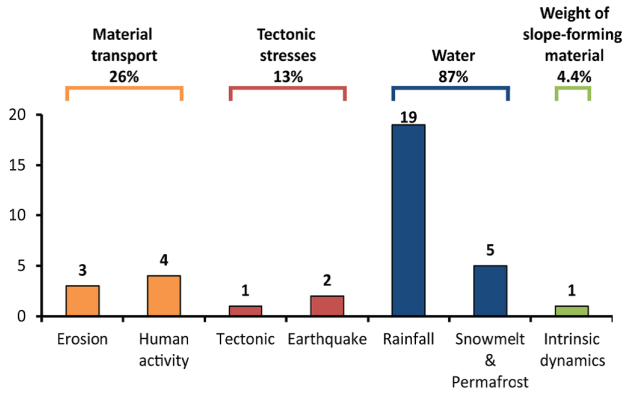


图15 2011年秋获得的9个国家21个业务部门总计23次滑坡的触发机制统计分布（注：因为滑坡可能涉及多种机制，因此机制的总次数多于滑坡总次数）

起，从而更加有效地表示出降水与滑坡的潜在联系。

虽然很多人一提起滑坡，就认为是激烈的天塌地陷的灾害。实际上，一些滑坡是从坡地表层慢速移动开始的，这种慢速的移动，是酿成巨大灾害的过程。而坡地浅地层每天大约毫米量级的移动，可以被仪器精准地探测到。图18给出了意大利学者针对降水与浅地层慢速移动之间联系的观测结果。探测结果来自意大利西北部亚平宁山脉一处滑坡多发地，为了监测滑坡动态，2000年在该地安装了各种滑坡探测仪器，包括倾斜计、压强计和雨量站等。其中，自动埋藏深度为13.5m的倾斜计系统（Automatic Inclinometric System, AIS）每天2次自动进行观测，从而获得山坡的移动。科学家通过将这一移动和降水记录进行对比，发现降水峰值与山坡移动峰值之间存在9天的间隔：即在降水峰值日之后9天，山坡的移动也达到峰值。意大利学者的研究，不管在时间还是地域上，都经过了不断扩大，但是，降水和浅地层移动之间时间

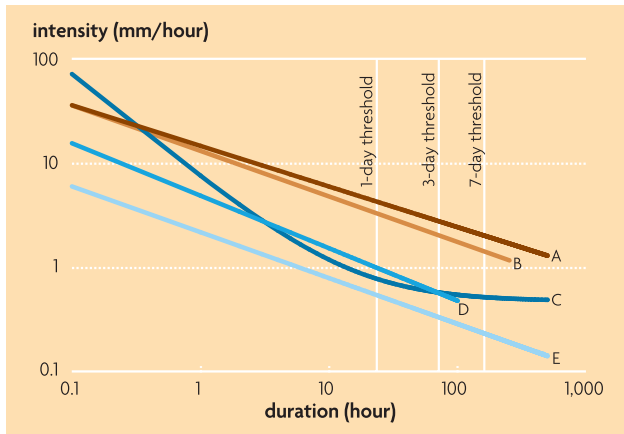


图17 不同研究者（A—E）给出的用降水强度和持续时间解析的滑坡预警阈值分布

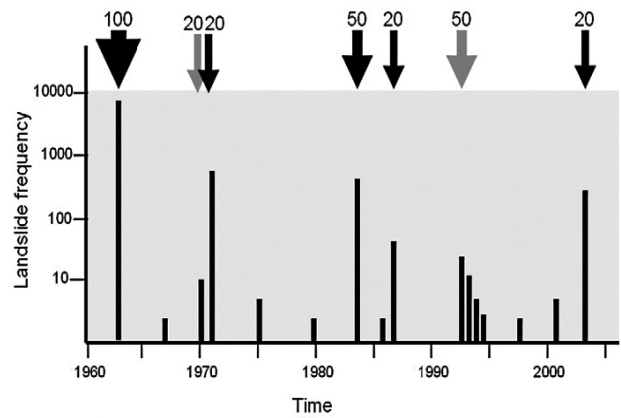


图16 1960年以来全球降水 and 地震引发的滑坡频率分布（图上部深色箭头代表降水事件，浅色箭头代表地震）

间隔仍然不变，在一定程度上反映了二者之间一种必然的联系。

虽然意大利学者的研究结果，还很具有局地性，但是，一旦其所反映的降水与地表层移动之间滞后性的联系具有一定的普适意义，那么就为基于降水的滑坡警报系统提供了一个方向。

## 6 预警——滑坡减灾战略的核心

滑坡作为一种自然灾害，而且随着人口增加、人类活动的疆界不断扩展和气候变化加剧，其危害也在增加，这就需要在滑坡灾害易发生地区采取应对措施。然而，一些措施，例如人员的大规模搬迁和水文状况的改变，或者代价高昂，或者可行性不高。人类不得不与滑坡等灾害风险长期相伴。在这样的情形下，联合国国际减灾战略于2009年提出了预警系统的概念，其定义为“一组用于及时制取和传递有价值警示信息的能力，以使受到致灾因子威胁的个人、社区和机构做好准备并采取恰当的行动，在足够的时间内

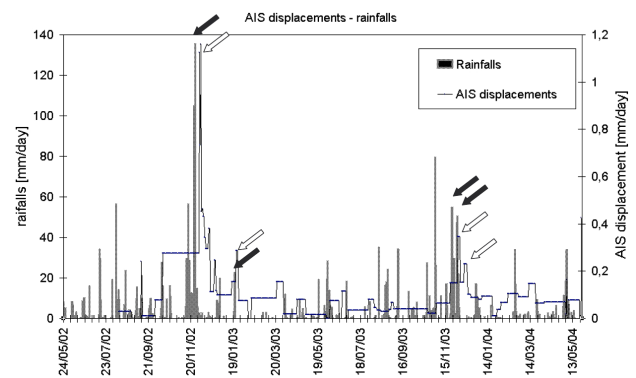


图18 2002年5月—2004年5月意大利西北部Apennines一处滑坡易发地的日降水量和13.5m深处位移的对比（空心箭头指出了降水峰值之后重要的位移）

减少可能的危害或损失。”这个定义包含一系列的要素，以实现接警后的有效响应。一个以人为本的早期预警系统需要有四个主要部分组成：相关风险的知识，监视、分析和预报致灾因子，传递或扩散戒备性提示和警报，地方力量收到警报后进行响应。“点到点的预警系统”说法也被用来强调警报系统需要覆盖从确定致灾因子到社区响应的所有步骤。

### 6.1 基于视觉的滑坡应急系统

滑坡是一种突发的灾害，也是政府和社区，特别是在山区的应急战略中最先考虑的灾种之一。过去10年来，随着信息技术的发展，一种基于计算机视觉的综合灾害预警系统已经开始推广。针对滑坡、海啸、洪水和山火等突发性强，而且造成巨大视觉冲击的突发现象，可以通过视觉（主要是摄像监控）图像的快速处理系统（图19）做出预警，以最大限度地减少损失。

滑坡及其前兆现象的发生，从该区域地表监控的视觉图像上分析，因为地表层滑动和植被被破坏，会出现像素改变、分布变化、色彩变异和形态改变等特征。在图像自动采集处理系统中，采用计算机图像

处理技术，例如逻辑交叉、点相似函数、多层目标函数和遗传编程等手段，可以自动、快速地做出滑坡预警，从而第一时间采取人员疏散等对策。

在一些研究和应用中，针对滑坡高发区域，如果在监测中加入激光雷达，就能够在滑坡发生前以及滑坡发生后对比更加精准的、覆盖范围更广的雷达图像从而获得关键信息。通过参考图像和特别时期不断更新的同一地点的图像进行对比，当像素的改变超过通过分析局地点相似性确定的阈值，就可以据此发出不同级别的滑坡预警信息；而在滑坡后处理时，同样的过程还有助于获得更广泛区域的滑坡动态。这样一套完整的业务流程，无疑能够很好地支持滑坡应急系统和快速评估系统运作。

### 6.2 滑坡预警需要气象监测和预测的支撑

由于降水是滑坡发生的最重要的触发因子，因此包括降水在内的气象记录，一直是滑坡灾害分析、预警的基础资料之一。其中，滑坡目录库的建立，其最重要的目的之一，就是通过降水记录和滑坡事件发生记录之间的对比，建立二者之间的关系，从而获得经验的滑坡预警信息。其中，针对降水触发滑坡阈值的

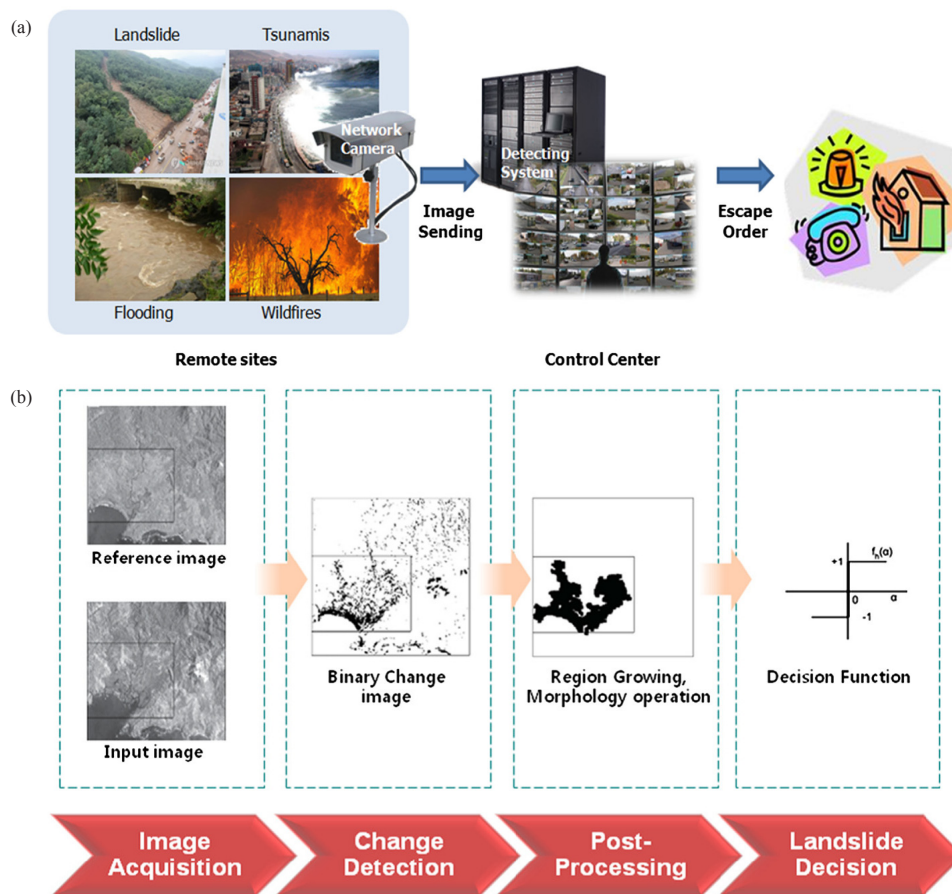


图19 基于视觉监测的自然灾害警报系统框架 (a) 和滑坡处理流程 (b)

研究最为广泛，依据大量观测样本获得的阈值具有一定的相似性(图17)，而在应用中也最具局地性。此外，目前这类降水经验阈值公式，在降水参数的选取上，如图中所示，主要集中在“雨强-持续时间”这两个重要参数上。这类降水阈值公式一般可以表示为：

$$I = c + \alpha D^{-\beta} \quad (1)$$

其中， $I$ 是雨强， $D$ 是降雨持续时间，参数 $c \geq 0$ ， $\alpha > 0$ ， $\beta > 0$ 。

一般情况下，雨强在 $1 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，降雨持续时间在 $1 \sim 200 \text{ h}$ 之间，参数 $\beta$ 在 $2.00 \sim 0.19$ 之间。当 $c = 0$ 时，式(1)是简单的幂函数。而式(1)建立的负幂关系，在降水时间(可以是 $500 \text{ h}$ )的4次方与雨强之间建立了准线性关系，准确地表明，高雨强或者长时间降水，都同样可能触发滑坡灾害。1993年的一项研究，给出了位于西印度群岛东部的岛屿波多黎各的雨强-降水持续时间关系为：

$$I = 91.46D^{-0.82} \quad (2)$$

但是，当滑坡地貌和土壤情况较为复杂的时候，这些直接和相对简单的降水参数，可能很难和滑坡事件建立很好的联系。这时，就需要综合考虑气象因素在触发滑坡机制中的特点。一些学者用“潜在有效降水”等变型降水指标的概念，相对于雨强等指标，变型指标能更好地考虑到前期降水、土壤饱和状态和蒸发等状况(见本期P94页文章第3.2.4节)，从而将更加复杂的滑坡事件与当地水文-气象多参数组合之间建立联系。

触发滑坡降水阈值分析的意义还在于，由于气象预报技术的发展，这类经验-统计模型建立后，就能够基于量化的降水预报，提前1天到数天获知滑坡可能发生的风险信息，为应对滑坡和减少损失创造了很好的条件。实际上，由于数值天气预报的发展，目前很多气象预报监测和预报产品，已经“集体”进入滑坡以及其他相关灾害的预警系统中(图20)。

### 6.3 滑坡预警是对精细化数值气象预报产品高需求领域

在滑坡研究和业务应用较为先进的意大利，气象与滑坡预警的密切联系，充分体现在滑坡预警系统最为重要的模拟链和预报链两部分(图21)中，核心均是数值气象预报产品。该滑坡预警系统，是由数值天气预报模式、统计降水降尺度工具和地球技术模型组合构成。预报链端输出能给出一系列不稳定的概率图。

这一较为成熟和有效的滑坡实际预报系统框架，既是未来世界各地降水触发的浅层滑坡主要预警系统可参考的样板，也是气象数值预报系统功能有意义的延伸，应该引起气象界极大的重视，特别是与局地滑坡空间尺度接近的千米级分辨率的局地模式产品，无疑是滑坡预警成败的最关键的因子。

### 6.4 滑坡信息发布：发布机构和借助现代化信息媒体的渠道

滑坡预警最为关键的一步，就是预警信息的及时

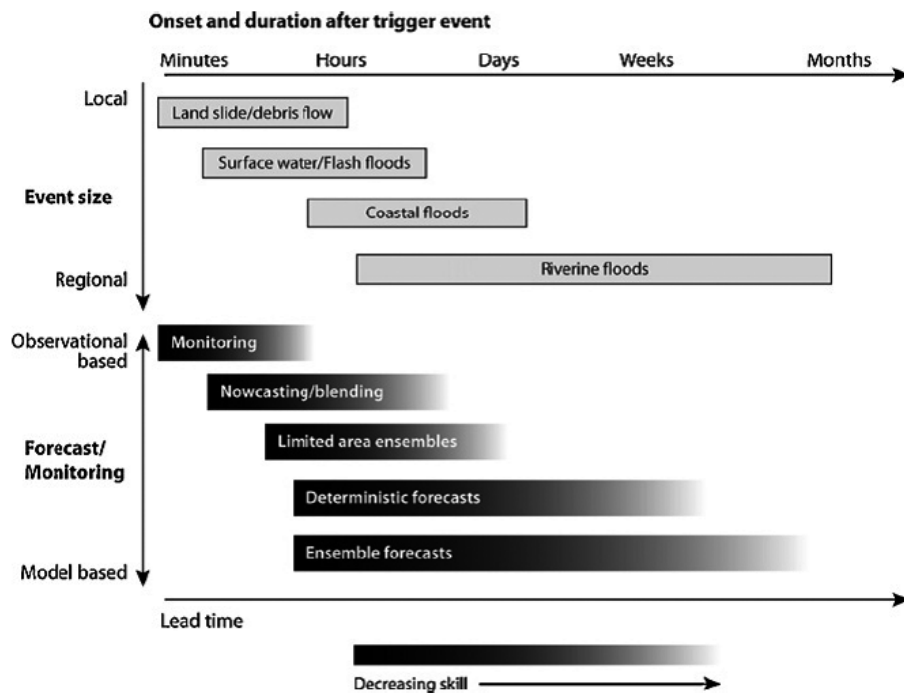


图20 滑坡等与水相关的灾害时空分布及其气象监测预报产品的关系

发布。由于滑坡事发突然，信息能否快速抵达可能受到影响的人群，是关系到整个预警体系能否最大限度减少滑坡造成灾害的关键。目前已有的滑坡预警系统中，借助现代通信手段，以现代信息通信手段和自动发送为主的发布方式成为主流，而且，滑坡预警战略制定的主管部门包含主要的业务和地方、国家政府部门，已经成为主流（图22）。

## 7 结果和讨论

滑坡作为一个自然和人为引发的“灾种”，人类正视滑坡并开展观测和研究活动已有悠久的历史，但是对其开展专门的多学科全球范围较大规模的研究，还是伴随21世纪的到来逐渐展开的，至今只有10年左右的历史。然而，滑坡研究及应用近年来发展迅速，特别是在与气象因子相关的滑坡灾害的观测、数据分析、机理分析、综合评估、模拟和预警技术等多方面，获得了长足进步。很多研究已经或正在转化为防灾减灾能力，气象和地质等部门通过发布滑坡预警而服务于社会。因为滑坡涉及多

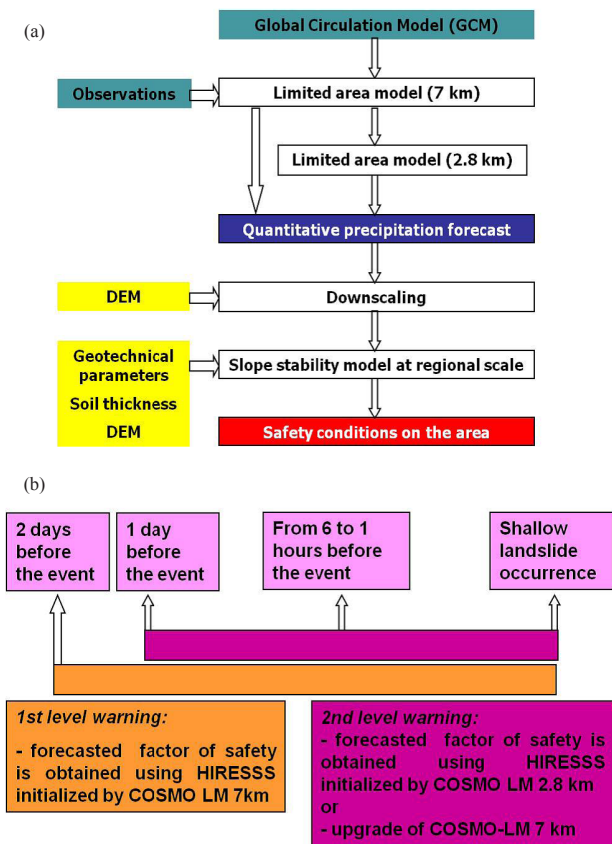


图21 意大利滑坡

(a) 模拟链流程图；(b) 预警示范系统的时间窗（其中滑坡预报模式（HIRESSS, the High REsolution Slope Stability Simulator）由7km分辨率的局地模式驱动，降尺度COSMO局地模式的分辨率分别为7km和2.8km）

个学科领域，对滑坡完整的科学认知，还需要更多科学家的积极参与。

### (1) 滑坡研究跳跃式的发展特征显著

国际上滑坡研究的前沿，主要集中在欧美以及日本等发达国家。最近10年来，这些国家关注滑坡研究的科学家队伍规模，有了明显的增加。例如，21世纪初欧洲滑坡研究专门会议吸引的参与者大多几十人，而最近召开的滑坡国际会议有数百位科学家参与，而且这些专家分别来自地质、水利、减灾、气象、水文和生态等几乎所有相关的学科领域，完整“谱系”的学者在一起讨论、共同攻关，已经形成了滑坡研究的基本力量和重要特色。多学科的重视、研究队伍的壮大以及更多业务机构参与其中，并第一时间将一些滑坡研究成果转化为业务服务能力，都标志着滑坡研究近年来取得了跳跃式的发展。

### (2) 滑坡研究和应用的交流平台业已形成

针对滑坡研究的国际学术组织和大型研究项目开始逐步增多，滑坡研究的学术平台在世界滑坡协会的推动下已经获得了重要进展。特别是，从21世纪初开始，欧洲地学联盟（EGU）已经将滑坡研究列入其系

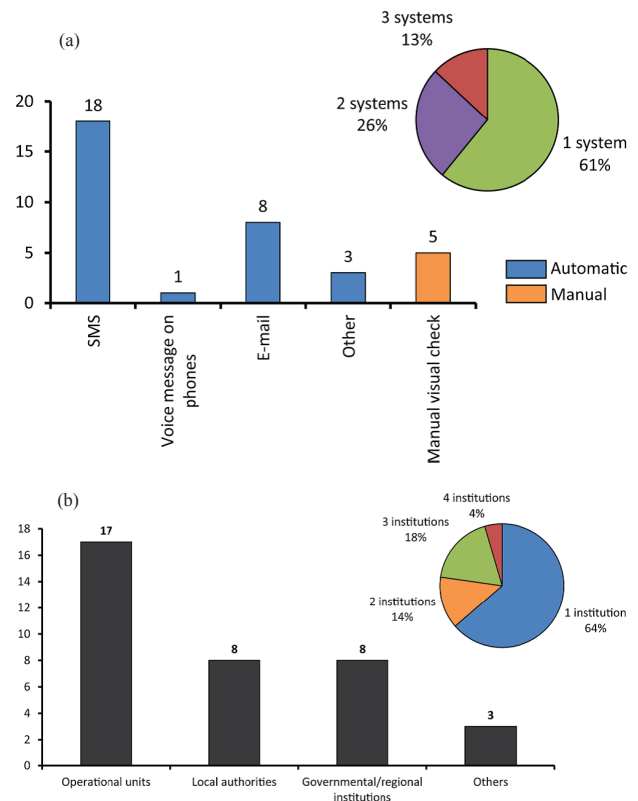


图22 欧洲、亚洲和北美的9个国家滑坡预警发布渠道分布(a)和各国制定滑坡战略相关机构分布(b)（图中的饼图分别为发布的渠道数或制定战略的参与机构数的分布比例）

列学术活动的常设内容（链接3），极大地促进了欧美科学家在滑坡研究和应用上的投入。2008年在日本和2011年在意大利召开了前二届世界滑坡论坛之后，2014年即将在北京召开的第三届世界滑坡论坛，无疑将在唤醒广大第三世界科学家重视滑坡研究，并且通过各种国际合作提高滑坡灾害的应对能力等方面起到极大的推进作用。

（3）滑坡研究将向引进遥感等新技术和机理创新研究方向发展

回顾过去10年乃至更长时间滑坡研究的过程，不难发现，滑坡的观测和详尽的描述及评估始终是重中之重，这是因为没有对大量滑坡个例的深入分析，其他工作都将是无本之末。对滑坡个例多学科详尽的描述，也是最终解决滑坡预警的必经之路。此外，智能和多灾种综合预警是滑坡防控的主流方向，与之相呼应，地震、水文、气象等观测网无疑将担负起滑坡预警排头兵的角色。今后，监测和评估还会是核心内容，但是完善评估方法和多元化及高科技仪器（如LIDAR和DEM）的引进，将是滑坡研究和应用能否

上一个台阶的关键所在。特别是，遥感应用于滑坡监测是目前和未来进展最快速的领域，而与遥感监测的理论研究、数值模拟技术相结合，通过综合与创新获得可行的和更加精确的流程及处理手段，是在业务上获得滑坡预警能力整体提高的关键。在这方面，气象部门不仅具有很好的经验，更在降水、遥感和数值模拟技术等方面具有极大的优势，对于滑坡，特别是气象因子触发的滑坡的预警无疑肩负更多的职责。

在遥感技术，特别是基于卫星的空基遥感平台方面，很多新的尝试已经显现。例如，NASA的土壤湿度主被动（Soil Moisture Active Passive, SMAP）项目（图23），瞄准了土壤湿度的及时和精确化观测。计划在2014年底升空的SMAP，载有新型微波辐射计和一台合成孔径雷达系统，两种主动和被动遥感设备的一并集成，可以更好地解析出全球土壤的水分状态，从而为陆地滑坡的分析和预警提供更加详实的土壤信息。在技术方面，传统辐射计通过大带宽及长时间间隔测量，然后取加和平均值的办法测量信号功率，以处理微波辐射的波动。但SMAP辐射计将把时间间隔

### 链接3 欧洲地球物理学联盟（EGU）年会“滑坡”相关主题

- 2012年：New developments and applications in early warning, monitoring and remote sensing of landslides（滑坡预警、监测和遥感的新进展和应用）
- 2011年：Documentation and monitoring of landslides and debris flows for mathematical modelling and design of mitigation measures（滑坡记录和监测以及泥石流的数学模拟及减灾措施设计）
- 2011年：Landslide hazard and risk assessment at different scales（不同尺度滑坡灾害和风险评估）
- 2009年：Documentation and monitoring of landslides and debris flows（滑坡和泥石流记录和监测）
- 2009年：Rockfall protection: From hazard identification to mitigation measures（岩崩防护：从灾害确认到减灾措施）
- 2008年：Methods and strategies to evaluate landslide hazard and risk（评估滑坡灾害和 risk 的方法和策略）
- 2008年：LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization（LIDAR和DEM技术用于滑坡监测和描述）
- 2007年：Time and intensity prediction in landslide hazard assessment（滑坡灾害评估中的时间和强度预测）
- 2006年：Slope movements in weathered materials: Recognition, analysis and hazard assessment（风化物沿坡移动：确认、分析和灾害评估）
- 2005年：Documentation and monitoring of landslides and debris flows for mathematical modelling and design of mitigation measures（滑坡记录和监测以及泥石流的数学模拟及减灾措施设计）
- 2004年：Landslides and debris flows: analysis, monitoring, modeling and hazard assessment（滑坡和泥石流：分析、监测和灾害评估）
- 2004年：Monitoring and modeling of landslides and debris flows（滑坡和泥石流的监测及模拟）
- 2004年：Landslide and flood hazards assessment（滑坡和洪水灾害评估）
- 2003年：Monitoring, modeling and mapping of mass movements（物质移动的监测、模拟和区划）
- 2003年：Landslide risk assessment and mapping（风险评估和区划）
- 2003年：Landslides and related phenomena: Rainfall triggered landslides and debris flows（滑坡和相关现象：降水触发的滑坡和泥石流）
- 2002年：Assessing and mapping landslide hazards and risk（滑坡灾害和 risk 的评估和区划）
- 2002年：Landslides and related phenomena: Avalanches（滑坡和相关现象：岩崩/雪崩）

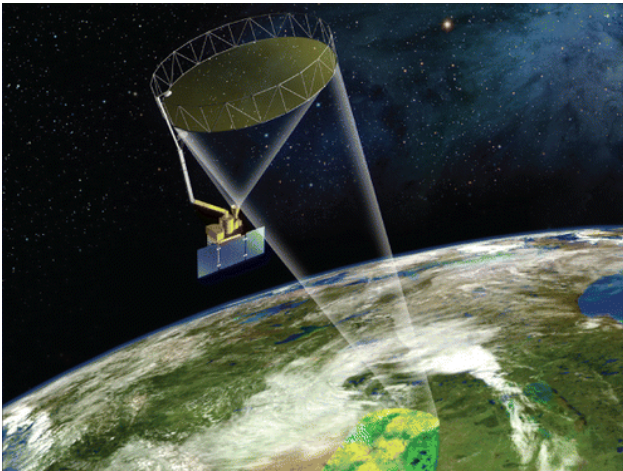


图23 NASA的SMAP项目中，共享输入系统和反射器天线的L波段雷达和辐射计扫描示意图，SMAP雷达和辐射计得到的土壤湿度数据分辨率分别可达3km和36km，它们共同获得的数据分辨率为9km

分割得更小，使探测人为RFI信号更简单。该辐射计通过及时截取信号，可以去除干扰信号，并将优质信号留给科学家。

(4) 全球滑坡业务预警能力的相对滞后需要更多跨部门的协作

在滑坡研究相对发达的欧洲，研究队伍的主力军大多集中在大学里，这一情况在很多国家也或多或少有所表现。造成这一状况的原因之一，是滑坡预防一般涉及到政府多部门，因此，研究领域活动有新进展后，滑坡预警服务的业务能力及时跟进，往往缺少机制。但是，滑坡研究的主要目标，无疑是减轻灾害，而业务部门掌握的观测、遥感、各种相关产品（如地表状况更新、地震预测、未来雨情等）和预警发布平台，无疑是滑坡研究和服务必须借助的平台。例如，由地震引发的滑坡需要地震局对地震的及时、有效探测（图24），而可能加重灾情的震后降水则需气象部门监测。只有多部门建立通畅有效的应对联动机制，才能将滑坡预报、预警、应急工作落到实处。

正如美国地质局和加拿大地质局联合编写，2008年正式发表的《滑坡灾害防治手册——认识滑坡防治滑坡》所言，“滑坡学（手册倾向于滑坡作为单独的学科——作者注）尚处在发展之中，还在不断地被改进和改善。”特别是，虽然滑坡灾害有很多独自的特点和预防手段，但是，对滑坡的认识、预防和更加广泛的应对，却涉及到更多的学科进展。滑坡的监测、制图以及分析、预测的方法等方面，都处于不断改进和完善过程中。

#### ON THE MARCH

Since 2004, 400 moveable seismometers have measured tremors in different parts of the United States.

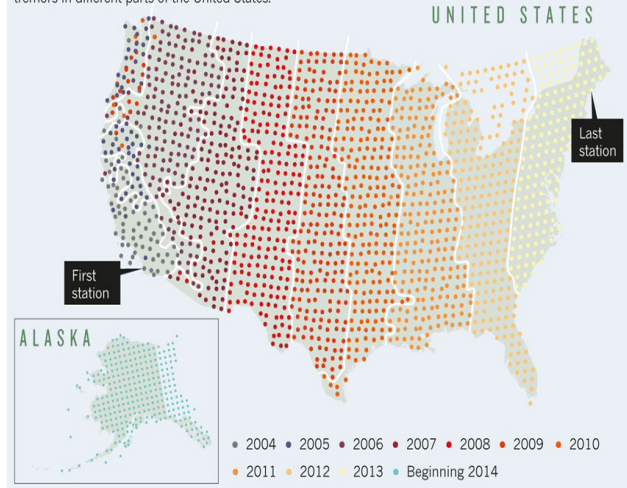


图24 美国地震监测网

#### 深入阅读

- 安培浚, 李栋, 张志强. 2011. 国际滑坡、泥石流研究文献计量分析. 地球科学进展, 26(10): 1116-1124.
- 胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏. 2010. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识. 山地学报, 28(5): 628-634.
- 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 2013. 舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理. 地质力学学报, 19(2): 178-187.
- 赵映东. 2012. 舟曲特大山洪泥石流灾害成因分析. 水文, 32(1): 88-91.
- 中国大百科全书编委会. 2011. 中国大百科全书(第2版). 北京: 中国大百科全书出版社.
- AMS. 2012. Meteorological Glossary. <http://glossary.ametsoc.org/>
- Anderson M G, Holcombe E. 2013. Community-Based Landslide Risk Reduction-Managing Disasters in Small Steps. The World Bank.
- Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia. 2010. Guidelines for Legislated Landslide Assessments for Proposed Residential Development in British Columbia. APEGBC.
- Brown M E, Escobar V, Moran S, et al. 2013. NASA's Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission and opportunities for applications users. Bull Amer Meteor Soc, 94: 1125-1128.
- Egholm D L, Knudsen M F, Sandiford M. 2013. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers. Nature, 498: 475-478. doi:10.1038/nature12218.
- Highland L M, Bobrowsky P. 2008. The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides. Reston: U.S. Geological Survey.
- Hincks T K, Aspinall W P, Sparks R S J, et al. 2013. Landslide and avalanche hazards. In: Rougier J, Sparks S, Hill L. Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards. New York: Cambridge University Press.
- Holcombe L. 2011. Delivering urban landslide risk reduction in developing countries. IHRR Seminar, Durham University.
- Ko B C, Kwak S Y. 2012. Survey of computer vision-based natural disaster warning systems. Optical Engineering, 51(7).

- Kusky T M. 2008. Landslides: Mass Wasting, Soil, and Mineral Hazards. Facts On File.
- Lollino G, Arattano M P, Allasia P. 2006. Time response of a landslide to meteorological events. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 6: 179-184.
- Lorenzo A, Salamon P, Pappenberger F, et al. 2102. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, (21): 35-49.
- Mercogliano P, Segoni S, Rossi G, et al. 2013. A prototype forecasting chain for rainfall induced shallow landslides. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13: 771-777.
- Michoud C, Bazin S, Blikra L H, et al. 2013. Experiences from site-specific landslide early warning systems. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13: 2659-2673.
- Perkins S. 2012. Death toll from landslides vastly underestimated: Improved database shows thousands more people die annually from landslides than was thought. *Nature*, doi:10.1038/nature.2012.11140.
- Petley D. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 2012, 40(10): 927-930.
- Shan W, et al. 2012. Proceedings of the International Consortium on Landslides. The First Meeting of Cold Region Landslides Network and First Symposium on Landslides in Cold Region.
- Thiebes B. 2012. Landslide analysis and early warning system: Local and regional case study in the Swabian Alb, Germany, Doctoral Thesis, The University of Vienna, Austria.
- Tofani V, Segoni S, Agostini A, et al. 2013. Technical Note: Use of remote sensing for landslide studies in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13: 299-309.
- Tucker B. 2013. Reducing earthquake risk. *Science*, 341: 1072.
- UNIMIB. 2011. Guidelines for use of numerical codes for prediction of climate-induced landslides. In 7th Framework Programme Cooperation Theme 6 Environment (including climate change) Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards.
- UNIMIB. 2012. Landslide triggering mechanisms in Europe: Overview and State of the Art. In 7th Framework Programme Cooperation Theme 6 Environment (including climate change) Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards.
- van Westen C J, Castellanos E, Kuriakose S L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102: 112-131.
- van Westen C J, van Asch T W J, Soeters R. 2006. Landslide hazard and risk zonation: Why is it still so difficult? *Bull Eng Geol Env*, (65): 167-184.
- Witze A. 2013. US seismic array eyes its final frontier. *Nature*, (503): 16-17.

## “气象科技史”增刊征稿启事

1904年，V. 皮叶克尼斯提出天气预报是一个物理初值问题并给出了描述大气运动的方程组，从而开启了现代气象学的大门。时至今日，气象学发展成为一门独立的学科已有百年的时间，追溯其历史、梳理前人的思路，能够带给读者一些新的启迪。

2014年《气象科技进展》将推出以“气象科技史”为主题的增刊，现面向国内外气象科学及相关学科的科研、业务人员及相关专业师生征稿。

### 来稿要求：

1. 增刊拟设“研究进展”、“论坛”、“特写”、“书评”等栏目，所有投稿请围绕“气象科技史”主题自拟题目，字数不限。
2. 投稿方式：登录本刊主页“作者中心”进行投稿，来稿请注明“气象史增刊投稿”字样及投稿栏目。
3. 截止日期：2014年3月31日