

国外地质灾害调查、监测、预警预报

(美国、加拿大、法国、日本、意大利情况介绍)

美国地质调查局

美国地质调查局提出了 2006~2010 年滑坡灾害计划 (LHP) 该计划可以帮助美国地质调查局 (USGS) 利用可靠的科学信息来降低自然灾害造成的生命和财产损失的任务。LHP 的任务是提供可以降低滑坡损失的信息, 促进人们对滑坡灾害的了解, 制定科学的减灾战略, 提高公众的安全意识。

2006~2010 年的 LHP 计划是

一 新的预测模型

最近几年来, LHP 开发了一些评价斜坡稳定性或滑坡敏感性的模型。根据这些模型可以推测将来滑坡发生的时间、位置和规模。其中一个模型是 SCOOPS, 可以分析从沿海峭壁到火山爆发的三维深部旋转破坏。LHP 计划对这一模型进行了改进, 使其可以分析相似尺度下的三维滑动破坏。由于这个模型可以提供破坏体积的信息, LHP 也计划将这一模型与火山灾害计划的模型结合起来, 预测滑坡和泥石流沿坡而下的泛滥区。USGS 开发的另一个模型是 TEIGRS, 可以分析与时间相关的降雨入渗量和其造成的浅层崩积物的不稳定性。LHP 计划改进了这一模型, 并用它分析暴雨开始时非饱和土壤的入渗以及在持续降雨过程中形成的侧向流动。同时也需要在实时降雨和 (或) 地震地面运动的条件下, 为满足滑坡敏感性的静态图以及编制第二代动态图的需要, 研究各种敏感性模型的概率结果。对滑坡历史和重现情况要继续进行研究, 以便更好地认识美国大部分地区发生滑坡的可能性, 包括研究美国东部山区由于强降雨造成的滑坡事件, 确定这一地区的降雨阈值。另外, 可以应用改进的模型评价美国其它地区的滑坡灾害。

计划还将这些模型引入到一个决策支持系统中, 以迅速评价火灾后发生的泥石流灾害。LHP 已经建立了火灾后泥石流响应和发生过程

的数据库, 包括根据地球资源探测卫星图像获取的全国范围内火灾程度的实用信息。计划对现有的经验模型以及研究火灾区径流和侵蚀过程的物理模型进行改进。预计这些模型可以提高火灾后泥石流评价的精度和准确性。

二 新的滑坡监测技术

LHP 计划改进和开发动态滑坡环境的监测技术。这些技术可以更好地预测将来的滑坡活动。该计划预计可以提高实时监测能力, 采用成本较低的 GPS 接收器等仪器来监测从缓慢蠕变到迅速灾难性破坏的滑坡活动。如果条件允许, 还计划应用地球资源探测卫星数据和高分辨率的遥感数据, 如 LIDAR 和 SAR, 对滑坡活动进行探测、绘图或做出迅速评价。

三 对知之甚少的滑坡过程的研究

LHP 计划将研究重点放在以下特别棘手且缺乏对其认识的滑坡灾害上。这一成果有助于开发新的评价工具:

- 1、进行野外分析研究, 以更好地认识泥石流的发展过程。许多破坏性的泥石流的规模最初都很小, 通过侵蚀流经的通道和向下运移过程中携带沉积物的“体积膨胀”作用而逐渐扩大。认识泥石流的发展机制和前期状态有助于对泥石流灾害进行评价。

- 2、需要对能够引起滑坡沉积物再次活动的必要条件进行研究。这一工作有助于预测引起老滑坡再次活动的条件。

- 3、要不断寻求其它机构的协助, 以便研究和应用不同方法来评价岩崩灾害对公共土地的影响。

LHP 的长期目标:

一 滑坡灾害评价

在美国进行滑坡野外调查、研究、监测和分析以减小滑坡灾害和风险时, 特别要强调的是采用 GIS 和遥感技术开发新方法和开展试点

研究。根据以后发生的滑坡，对滑坡灾害评价进行有效性检验。

二 活动滑坡监测和模拟

对活动滑坡和不稳定边坡进行远程和近距离的实时监测，有助于提高公共安全，进一步认识滑坡的起动机制和滑坡速度。与 NOAA/NWS、USGS 地震和火山灾害计划、NPS 以及其它联邦、州和地方机构合作，对可能诱发滑坡的外部因素进行监测。进行包括模拟和分析在内的研究，以进一步认识滑坡的诱发机制和发生前的征兆，这样有助于预测滑坡的起动、扩大或再活动。需要不断开发预测滑坡位置、起动和影响的物理模型。为了使与 DOGAMI 合作的滑坡研究顺利进行，LHP 计划在俄勒冈州西部地区增加一些监测点。

三 滑坡灾害发生后的迅速评价

开发随机性和确定性模型及方法，包括降雨阈值，来预测与气候相关的滑坡起动机制。与 NWS 合作，为迅速处理数据、进行预测以及通知合作伙伴和其他用户，建立分析系统、运算法则、协议和程序。这些系统和运算法则，如简单的降雨累积和降雨持续时间的阈值模型，可以通过现有的实时雨量站网获取的数据进行评估和改进。同时需要与 FEMA、联邦土地管理机构、州/县应急管理机构 and USGS 的其它项目合作，对火灾后的烧毁程度和发生泥石流的可能性做出迅速评价。

滑 坡

美国地质调查局（USGS）的战略提出：USGS 应该制定一个旨在了解滑坡过程和诱发机制的研究计划，主要的战略目标是：1 确定研究日程表和执行计划，更好地了解滑坡过程、临界值和诱发因素，从而预测滑坡灾害；2 建立可以用于预测滑坡灾害的地面变形和斜坡失稳科学模型；3 建立不同诱发因素（如强降雨、地震等）的滑坡灾害时空预测系统。

很好地了解滑坡过程的机制是建立可靠滑坡预警系统和进行有效减灾工作的基础。

针对加利福尼亚南部最近发生过火灾的盆地，建立可能造成泥石流活动的降雨累积量和持续时间的阈值。与 NWS 合作，将阈值引入加利福尼亚南部最近发生过火灾地区的泥石流预警原型系统中。将 USGS 和 NWS 的泥石流预警系统应用到美国其它地区，首先从阿巴拉契亚山区开始，LHP 科学家不断对该地区的降雨阈值进行改进。同时也与 DOGAMI 和俄勒冈州林业部合作，确定俄勒冈州西部地区的降雨累积量和持续时间的阈值。

四 交流和减灾

不断向联邦、州和当地政府，私人企业，土地规划人员，那些监测土地开发的环境影响和制定土地利用政策的人以及部分市民提供滑坡信息。研究滑坡信息在提高减灾能力中的作用，根据这些研究结果，可以对信息传递进行改进，以达到减灾的目标。需要在全国范围内不断汇编与滑坡相关的损失数据，收集可用的滑坡图件和详细目录。另外，USGS 也直接或间接对火山灾害计划、国家合作地质填图计划、地震灾害计划、沿海和海洋地质计划、水资源和地理学提供专业的滑坡灾害支持。这些计划直接研究和评价由暴雨、地震、野火、火山、水下滑坡、河流和海岸侵蚀造成的滑坡、泥石流和火山泥流。

1 对任何潜在的滑坡地点的调查要搞清楚如下问题：（1）滑坡是怎样诱发的？（2）滑坡发生的预兆是什么？（3）滑坡会有多大规模？（4）滑坡体运动多远？（5）滑坡运动多快？上述问题的答案因滑坡类型和滑坡体物质状况的不同而异。滑落到高速公路上的一块岩石也许会造成可怕的灾祸，在人口密集区，一个高速滑动的小型滑坡也许比一个大的缓慢滑坡对公众造成更大的威胁。在香港，体积为

200m³的小滑坡也曾造成人员死亡事故（Works Bureau,1998）。

2 基岩滑坡：在美国，相当多的地区都分布有软弱岩石，曾经发生古滑坡或者现代滑坡。因此应该搞清楚下列问题：（1）控制基岩滑坡分布的因素？（2）气候变化如何影响基岩滑坡？

（3）控制滑坡速度的因素？（4）在稳定滑坡上进行开发的安全性如何？

3 水下滑坡：美国滑坡减灾战略应该延伸至近海区域，重新认识水下滑坡伴随产生的特殊问题，尤其是在表面和地下采样以及进行原位土工测试难度很大。应该搞清楚下列问题：（1）如何进行有效填图？（2）斜坡失稳中水化气的作用？（3）如何评价水下滑坡的工程地质特征？（4）如何将工程地质特征进行风险评价？

为了回答这些问题，应该制定一个全面研究计划，包括的内容如下：（1）野外实地特征；（2）试验室特征；（3）工程地质和水文地质模型计算结果；（4）动力学模拟计算结果；（5）野外实地研究有助于确定场地特征和模型的有效性。

只有建立在许多进行长期野外工作基础上的科学研究规划才可以解释与滑坡过程有关的许多重要问题。这些问题涉及范围很广，从物质特征确定，到孔隙压力研究，到地质力学分析，到大的变形评价，主要是取决于滑坡类型的特定性质和地质环境。应该由 USGS 和其他联邦及州机构合作选择野外工作位置和制定典型点的工作计划。应该由易于进行技术转让的私人或公共机构在典型点进行专项研究。尽管应该优先考虑对泥石流、软弱基岩滑坡和可能的水下滑坡进行野外实地研究，但是如果条件合适也要考虑其它滑坡类型。以前，USGS 进行的滑坡工作主要集中在根据野外工作进行灾害填图和评估。随着人们对滑坡机理的进一步认识以及现代数理力学理论和计算机技术的迅速发展，各种预测预报方法不断涌现，且取得较好的预测结果。

滑坡预测预报主要包括空间和时间两个方面，缺一不可。滑坡的空间预测为时间预报提供对象；滑坡时间预报的选点必须首先以滑坡空间预测成果为依据，从而避免盲目设点造成错漏的弊端。

滑坡空间预测预报。空间预测是指对滑坡发生的地点、规模等的预测，目前使用较多的方法有以下几种：

——**传统的稳定系数预测法** 稳定系数预测法是最早的滑坡空间预测的方法。该法通过计算滑坡体的安全系数 F_s 来预测某一具体边坡的稳定性。

$$F_s = F_{\text{抗滑力}} / F_{\text{下滑力}}$$

当 $F_s < 1.0$ 时，边坡处于不稳定状态，当 $F_s = 1.0$ 时，边坡处于临界状态，当 $F_s > 1.0$ 时，边坡处于稳定状态。

计算稳定性系数的方法有多种，如基于极限平衡理论的条分法、瑞典法、数值分析法等。在计算中，参数的选取直接影响到分析结果的正确性。这种方法多适用于单体滑坡的预测，在工程中应用非常广泛，且为设计人员熟悉。

——**信息模型法。**信息模型法把各种滑坡因素在滑坡作用过程中所起作用的大小程度用信息量表达。

——**灾变模型预测法。**计算边坡的稳定系数需要涉及到岩土的计算参数，由于岩土性质的不确定性和离散性，使得同一边坡采用不同的计算参数得出差别较大结果，甚至得出相反的结论。采用灾变理论避开了这些不确定性的参数的影响，它假定系统在任何时刻的状态都可完全由给定的几个状态内部量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的值来确定，同时系统还受到 m 个独立的控制量 (u_1, u_2, \dots, u_m) 的控制，通过数学方法，研究系统状态的稳定与否与各量值的关系。该方法综合考虑了各种边坡要素对边坡稳定性的不同程度的影响，能较真实地描绘边坡系统的状态。

——**模糊综合评判法**。边坡的稳定性受诸多因素的影响，很难用一个确定的结论来表述其稳定还是不稳定，往往用模糊概念来表述，如把边坡的稳定等级分为“危险区”、“不稳定区”、“较不稳定”、“稳定区”等。模糊综合评判方法就是对边坡稳定性等级进行分类，并通过专家评分或构造隶属函数确定对同一等级各因素以及某一因素在不同等级中对边坡稳定性的影响程度(隶属度)，建立模糊评判矩阵，确定边坡的稳定性对各等级的隶属程度，最后按择优原则预测边坡的稳定性。该方法的最终结果是否可靠，受单因素的选择和隶属度的确定影响较大。

滑坡时间预测预报。时间预报是指对滑坡发生的具体时间的预报，即对已获取的监测数据，通过数学模型来预测未来某一时刻坡体的状态。目前常用的方法有：

——**斋滕法**。该方法以土体的蠕变理论为基础。土体的蠕变分为三个阶段，第Ⅰ阶段是减速蠕变阶段，第Ⅱ阶段是稳定蠕变阶段，第Ⅲ阶段是加速蠕变阶段。1965年，斋滕迪孝根据室内实验和仪器监测的结果，提出以第Ⅱ蠕变阶段和第Ⅲ蠕变阶段的应变速率为基本参数的预测预报经验公式，认为在稳定蠕变阶段，各时刻的应变速率与该时刻距破坏时刻的时间的对数成反比，相应计算公式为：

$$\lg t_r = 2.33 - 0.916 \times \lg \varepsilon \pm 0.59$$

在加速蠕变阶段，取期间变形量相等的 t_1 、 t_2 、 t_3 三个时间来计算最后破坏时间，相应计算公式为：

$$t_r = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)^2 / 2}{(t_2 - t_1) - (t_3 - t_1) / 2}$$

公式中， t_r 为边坡最终破坏时间。

——**灰色理论模型预测**。色模型是根据德国数学及生物学家Verhulst用灰色系统理论建立的用于生物繁殖量的预测模型演变过来的滑坡时间预测预报模型。灰色理论的预测是趋势性预测，在实际使用中，为了保证预测的现实逼

近性，通常需要用最新的实测数据进行建模。

预测模型为：

$$t_r = -\frac{\Delta t}{a} \ln\left(\frac{bx_1}{a - bx_1}\right) + t_1$$

其中 a 、 b 为与滑坡位移原始监测数据有关的参数。

——**非线性动力学模型预测**。非线性动力学模型是按照非线性动力学的观点并运用耗散结构理论和协同学的宏观研究方法从时间序列数据中建立的边坡系统动力学模型。

——**多参数预报法**。选取多种参数，预测滑坡发生时间。美国学者B. Voight于1989年提出多参数预报经验公式：

$$t_r - t_s = (\Omega_s^{\frac{1}{1-\alpha}} - \Omega_r^{\frac{1}{1-\alpha}}) / A(\alpha - 1)$$

式中： Ω ——任意参数，位移，剪应力，地面倾角等。

Ω_s ——初始值， Ω_r ——预报值， α ， A ——经验常数。

——**神经网络预报法**。国外滑坡监测的研究在传感器、数据传输与共享以及预测预报等领域均开展了大量的工作，目前处在一个较成熟的水平。近年来最主要的进展在数据传输网络方面。美国地质调查局(USGS)为监测连接内华达州与加利福尼亚州的50公路两侧的多处滑坡设计并实现了活动滑坡实时监测系统(Real-Time Monitoring of Active Landslides)。近十年来，滑坡监测研究的一个热点是时间域反射测试技术(TDR)的应用，它由美国的研究人员最早运用，目前已发展为一种成熟的滑坡监测技术。同时，监测系统与预警系统(Alarm System)的衔接也是目前国外研究的热点，现阶段国外较新的监测手段与技术包括GPS监测、高分辨率遥感监测、三维扫描测量监测、光纤形变测量技术“BOTDR”等。同时，大量被利用的还有多种传统的监测技术与方法，如全站仪为主要设备的位移测量、地下水位监测、降雨量监测、应力监测等。

实例

用光纤传感器研究边坡稳定性的监测系统

为了使用光纤传感器监测道路边坡的稳定性,这个研究开发了三种监测系统, BOTDR(光纤形变测量技术)系统、FBG 系统和 MDM 系统。这些系统已经在日本的几个地方经过了测试,校验了它们的应用。本论文就是说明了这些系统的校验结果(摘要)。

印度南部 Nilgiris 可见区和近红外区滑坡带成分的反射光谱(摘要)

滑坡在发生以前没有任何预兆,因此它对人类、植被和地貌造成相当大的危害。这样的不可预见性需要开发详细滑坡研究的方法和技术。用遥感技术能够较好地确定滑坡和滑坡易发区。然而多数的方法都是对航空图片和卫星图片的解译。这篇论文与遥感技术的评价有关,绘制印度南部 Nilgiris 滑坡地带的组成图。研究中用卫星图像选择了 Marappalam 滑坡带,用以研究这些构成地带的反射特征,即滑动带、岩石露头、土层、植被、密高岭土等。用电阻磁谱法(EMS)研究可见区和近红外线区域($0.4\mu\text{m}$ to $1.1\mu\text{m}$)。对多重瞬时卫星图片进行分析,确定和绘制 Marappalam 滑坡。过去的滑坡卫星图片显示出滑坡是位于两个明显轮廓线的交点处。根据反射系数的,可观察到较年轻的滑坡在可见区和近红外区反射系数高。NDVI(正常的不同植被指数)低表示滑坡区或、易发生滑坡的区域或者岩层露头,因此这种光谱敏感技术和多重成像解译技术可以根据滑坡的研究和不同灾害管理的有效要素。

Chichi 地震诱发的滑坡(摘要)

1999 年 9 月 21 日 chi-chi 地震诱发了许多滑坡发生。这些滑坡根据研究中的 SPOT 成像已经编制成图。用 GIS 作为工具,作者建立了地震诱发滑坡的 GIS 平台,分析了它们的特点,包括类型、分布、面积和数量等。滑坡的分布

和面积可与震源、断层的距离、与道路的距离、与河流的距离、岩石类型、斜坡的坡度和斜坡的距离相比。研究应用了 SPOT 卫星成像和航空照片确定滑坡。地图信息 GIS 软件用于数字化滑坡的位置和范围。然后计算 Chi-Chi 地震诱发的滑坡的数量和面积。GIS 的空间函数用于分析滑坡分布和诱发滑坡因素之间的关系。

用恒定散射技术监测滑坡和构造运动(摘要)

欧洲空间组织(European Space Agency (ESA))用地球资源卫星(ERS)合成孔径雷达(SAR)传感器在南加利福尼亚上空获得的 55 帧影,其处理结果表明,恒定散射体(PS)的测量精度非常接近它的理论极限值(大约 1mm),对描述一个复杂的断层系统来说,出现毫米级的误差现象,是正常并允许的。已经对南加利福尼亚卫星定位系统综合网络(SCIGN)的 GPS 有关固定测站的位移,与其相应的时间序列进行了对应比较。此外,逐个分析恒定散射体的像素特性,为在雷达靶标低相关区探索独特相位创造了可能条件。这使得只要人工建筑物或裸露的岩体有一个可充分利用的空间分布密度,宇宙空间干涉仪便可在广阔飘渺的区域进行测量。安科纳滑坡(意大利中部)的评价,是通过对时间跨度在 1992 年 6 月至 2000 年 12 月之间的 61 帧 ERS 影像的处理分析而做出的。其结果已经与安科纳市政当局在此期间用光学水准测量获得的滑坡变形值做了比较。综观恒定散射体 PS 与 GPS 及光学水准测量的特性,发现它们在一定程度上是相互延伸和互补的;亦即,三种技术的互补使用,将有力的提高大地变形监测的质量和可靠性。

滑坡风险分析—实例研究(摘要)

在喜马拉雅地区,通过运用随机现场模型,结合斜坡稳定性分析,对由于土体参数易变性引起的滑坡风险不确定性进行研究。在滑坡地

区一个典型斜坡的水平方向和垂直方向上，就试验样品数量、承压水位的变化和地震效应等的准确程度的空间差异性影响进行了研究。结果表明土体参数的偏差程度、土体参数的空间分异、试验样品的数量和承压水位的变化对滑坡地区斜坡稳定性的影响尤为显著。结果同时表明，用均匀变化的假说来判断斜坡稳定性是保守的。研究成果是一个有益的成功的范例；同时应指出，地下排水形式的缓解措施能改善滑坡地区斜坡稳定性。

华盛顿州西雅图地区预报降水诱发的早期滑坡使用的方法

对与已发生在西雅图的山体滑坡相关的降雨数据的分析，可以判定诱发山体滑坡的降雨限量。同时借助降水量，确定多个山体滑坡事件的空气温度，可以总结出一种方法来预测在 11 月到 3 月的潮湿季节出现的山体滑坡，这个方法所用数据是采集于山体缓坡发生之前的三天的降水量，以及在这三天之前的 15 天的降水量。数据表明这 15 天的降水量影响随后 3 天的降水量，正是这 3 天的降水量诱发了山体滑坡。分析的结果也表明可以使用空气的温度来帮助确定造成山体滑坡的条件。分析表明与山体滑坡相关的降水量的平均最高值都出现在日空气温度最大值在 46 到 56 华氏（9 到 13 摄氏度），而且几乎所有山体滑坡都出现在日最高温度 43 华氏度至上。在冬天雨季期间，预测滑坡发生的方法是基于降水的临界值和气温指数。很方便的便可从最近的气象站得到日或是每小时的降水量，可以计算得到 3 天的和在这 3 天之前 15 天的总降水量。同时，临界值公式被用来确定一个诱发滑坡的降水指数。（条件是前期 15 天的降水少于 3.0 英寸）。从实际或被观察到的 3 天的降水量减去 3 降水临界值得到的。

$$P_0 = P_1 - (-P_2(0.67) + 3.5) \text{ 或者 } P_0 = P_1 + 0.67P_2 - 3.5$$

P_0 是降水指数； P_1 由英寸表示的 3 天内（72 小时）的实际降水； P_2 是在 3 天前的 15 天降水量；

P_0 是正的条件下，在降水临界值之上，如是负值，它在临界值之下。

降水指数和气温指数一道用来确定当时的条件或者基于降水和气温预报条件，表明有利于诱发滑坡的时间。当日最高气温大于⁴³⁰F，有利条件被确定，以下两个准则就有一个能出现。当 15 天的前期降水小于 3.0 英寸，降水指数 P_0 是正值。当 15 天的前期降水大于 3.0 英寸，而接下来的 3 天降水大于 1 英寸。在这项研究中，描述了在西雅图地区降水量与历史性的滑坡关系，并基于降水临界值与气温指数，提出了一个预报滑坡发生的新方法。研究结果表明，前期 15 天的累计降水并由此影响到的 3 天降水量是诱发滑坡开始发生的特定值。因为降水临界值和气温指数只是大致的，同时其他因素对诱发滑坡的影响，一些错误的信息可能在这个方法上用到了。因此，这个方法不能用作滑坡发生的预测。但是，它可以作用确定由降水激发的滑坡并有可能发生的时间，为此减少滑坡带来的危害提供一个依据。例如，避开、对有滑坡倾向地区增强监测和观察。另外，这个方法还可以对根据持续的降水强度极限值，并由 J. Godt 开发的帮助确定关键时刻监测降雨量的一个补充。方法的优势包括它的简单易行和获取其数据非常容易，并且，估计到了在所有的特定时期，由前期 15 天的累计降水提供一个基本估计其 3 天的降水超过临界值的方法。对于诱发滑坡的其他重要因素也需要进行同样的考虑。例如，土壤水分蒸发蒸腾损失总量和融化过程能影响到一定量的降水，同时对渗透也有用，并且降水临界值和气温指数可以通过考虑不同类型的，单独的滑坡发生更好的定义。小的迅速的滑坡和泥石流在强降水后就可能突然发生，然而，缓慢运动的、深层次的滑坡是典型的降水响应逐渐发生的。工作包括对未来冬天雨季和分析历史气候以及和没有作为这项研究的滑坡数据的编辑与分析，得到一个评估方法。如果评估是确定的有用的方法，它可应用在有典型滑坡危害的其他区域。

降雨入渗引发的滑坡

由降水引发的滑坡所涉及的物理过程作用根本不同的时间尺度，这些时间尺度的间相互关系，指导改进了这数学模型，此模型利用理查德方程式的简化形式来评估在不同情况下降水渗透对滑坡的发生时间、深度和坡体加速度的影响。最长的恰当时间尺度是 A/D 。 D 是最大的土壤水力扩散系数， A 是汇水面积。其中， A 的重心坐标和深度 H ，在可能发生滑坡的滑动面位置，潜在地影响着地下水压力。建立响应于降水的稳定的背景水压力在 (x, y, H) 处的演化状况需要把时间尺度调到比 A/D 更大一些，这些时间尺度通常从几天到几十年不等。这些稳定的地下水压力在 (x, y, H) 处影响着滑坡发生的内在趋势，但是它们不引发边坡破坏，边坡破坏产生于一个较短时间尺度 H^2/D_0 的降水，此时间尺度与暴雨时瞬时的孔隙水压力传递相关，通常这个时间序列从几分钟到几个月不等，影响滑坡对降水响应的最小时间尺度是 $\sqrt{H/g}$ 其中 g 是重力加速度，边坡破坏后的滑坡运动发生在这个时间尺度内，这表明如果所有其它因素是变量，则厚度最小的滑坡滑动速度会在瞬间变大，水文过程对滑坡发生过程的影响是通过交互作用的时间尺度实现的，这些时间尺度由一个响应函数 $R(t^*) = \sqrt{t^*/\pi} \exp(-1/t^*) - \operatorname{erfc}(1/\sqrt{t^*})$ 相互联系 ($R(t^*)$ 决定于标准时间 t^*)。结合地形资料，降水强度和时长信息，无限坡长的边坡破坏标准和牛顿第二定律，利用响应函数 $R(t^*)$ 来预测由降水引发的滑坡所发生的时间，滑坡深度和坡体加速状况，资料取自于发生深度小，速度快的滑坡与发生深度大速度缓的滑坡之间的实例对比。

高山区滑坡研究中卫星成像的使用（摘要）

滑坡给人类生活带来一系列的灾害，在大多数的山脉中，滑坡都是活动的。然而由于不同的自然条件，直接评价边坡滑动的敏感性是困难的。因此，这样的环境下，遥感技术提供

了许多滑坡潜力调查感兴趣的资料，特别是在少数发达国家，它们的资源和环境信息都是有限的。然而这就需要确保技术是有效的、可靠的、能够按照取得的数据的数量和准确性提供经济价值。在天然地形条件下，这篇论文用某一研究实例，比较了评价滑坡敏感性的陆地卫星 $ETM+$ 和 $IKONOS$ 成像的可用性。根据位于尼泊尔和不丹丘陵地带的六个研究区域的研究进行这些工作。在每一个实例中，成像直接地用于滑坡的绘图和调查滑坡可能性的重要因素诸如，水的渗漏。成像的结果广泛地用于野外调查。这个研究说明目前的陆地卫星 $ETM+$ ，由于它的成本相对低并且分辨率高，是绘制滑坡敏感性图件的最经济有效的工具。但是它的空间分辨率有它的局限性。这种限制用高的分辨率、多谱段的 $IKONOS$ 成像可以避免，它可以使得甚至更小的滑坡可以详细的绘制出来。然而，多数光谱分辨率的局限性对于因素类型的绘制可用性很小。遗憾的是，这种高费用的成像将继续妨碍这种技术在发展中国家的开发和使用。

活动滑坡的实时监测

美国的每个州都有滑坡威胁着人们的生命和财产。为了降低活动滑坡的危害，美国地质调查局开发、使用了滑坡实时监测系统。通过监测可以发现急速、具有灾难性滑坡运动的早期标志。最新最快的监测或者说实时监控，提供滑坡活动的即时信息，从而有可能挽救生命和财产。实时监测获得的连续资料也使人们对滑坡活动有了较好的认识，使工程师能够设计更有效的方案来终止滑坡活动。1997年1月大雨期间，内华达州塞拉地区成千上万吨土体塌方毁坏了三家房屋，阻塞了加利福尼亚州北部的一条主要道路（U.S.50），并且造成美洲河附近短暂断流。滑坡体阻塞的河水迅速淹没了两辆正在公路上行驶的车辆，最终引发了一场戏剧性的营救。公路重新开通花费了4.5亿美元，而公路断行造成的间接经济损失超过5亿美元。

在上述地区，几个大型活动滑坡继续威胁

着 U.S.50 公路。虽然这些滑坡平常移动缓慢，但是有些可能会发生灾难性的倒塌。为了减少这些滑坡造成的风险，美国地质调查局 (USGS) 与其它机构合作，迅速采取行动，利用 USGS 研发的用来监测边远地区活火山的系统，为滑坡活动提供了不间断的实时监测。传感器响应装置生成的图表通过因特网对当地官员、技术工程师、突发事件管理人员实现共享。为什么要远程搜集滑坡的实时数据？实时系统对滑坡活动的即时侦查可以在紧要关头挽救生命、保护财产。传统的实地观察，即使采取定期检测，也不能觉察出滑坡发生时的变化。此外，在活动滑坡上工作可能会有危险，并且滑坡大规模活动经常发生在暴风雨期间，那时的能见度非常低。远程实时监测持续提供数据，可以使人们更好的了解滑坡动态；反过来，能够使工程师制定出终止滑坡活动更有效的方案。美国地质调查局对滑坡区实施远程监测，每时每刻都在测量地下水的流动和地面压力。变形监测器用来探测地面的伸长或缩短，它记录了滑坡向坡下运动的距离。埋在滑坡里面的地震检波器用来监测由滑坡运动引起的地面振动。正常情况下，数据每隔 10 分钟向 USGS 的电脑传送一次。但是，如果大规模滑坡运动引起的强烈地面振动被检测到以后，数据将立即传输。目前，58 号系统对沿着 U.S.50 公路的 5 个滑坡被实时监控。与加州交通局合作运行的这个系统，为工程师和地质学家提供了滑坡活动早期的数据，有助于其制定阻止滑坡下滑的补救措施。从这些滑坡中的任何一个获得的数据都在网站 <http://landslides.usgs.gov/hwy50> 上供市民参考。美国地质调查局还建立了其它远程滑坡实时监测站点。在华盛顿州的西雅图附近，实时系统监测着一个威胁主要铁路的滑坡 (<http://landslides.usgs.gov/woodway>)；在加利福尼亚的里约热内卢，另外一个系统监控一个威胁 140 户人家的大滑坡。美国地质调查局通过远程监控，在加利福尼亚州的弗里蒙特市发现滑坡移动威胁着坡下的居民，记录了新墨西哥州不稳定斜坡上天然火灾的影响。在科罗拉多

州，几个滑坡站点的远程监控则提供了由大型缓变滑坡或急速泥石流引发的地面移动的信息。包括滑坡在内的活跃地面运动在美国的每一个州区都存在。为了降低滑坡灾害的风险，美国地质调查局的科学家们已经开发了实时监测系统和其它设备，用来帮助人们了解、预测滑坡发生时间、地方和方式。科学家们还在滑坡灾害发生期间向当局提供技术支持。美国地质调查局滑坡灾害系统的工作宗旨是保护整个国家人民的生命和财产，使之免于滑坡灾害。

运用地理信息系统新技术进行滑坡稳定性三维评价和滑动过程模拟研究（摘要）

该方法在传统的边坡稳定性三维分析模型的基础上，提出了一个全新的基于 GIS 的边坡稳定性三维栅格分析模型。在这个模型中，假定初始滑动面就是椭球底面，采用蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 随机模拟方法，在求取最小安全系数法的同时，确定出最危险滑动面。运用 GIS 栅格模型和 GIS 数据模拟滑坡滑动过程时，滑坡体将沿主滑方向滑动，直到其安全系数上升到 1 为止。所有的计算均可通过一个称为三维边坡地理信息系统 (3DSLOPGIS) 的计算程序来完成，该程序主要利用 GIS 的空间数据处理分析功能。

太平洋西北的复合滑坡类型（摘要）

太平洋西北海岸山脉经常遭受伴随冬天风暴出现的许多相对较小的滑坡事件。1998 年 11 月和 12 月两次风暴后，发生了一次典型的滑坡事件。11 月的风暴在华盛顿南 King 县诱发了一些小滑坡，堵塞了一些道路，包括西雅图机场附近的北行的州际 5 号公路，但没有造成严重破坏。12 月的风暴要严重一些，融雪水的径流与降雨量相结合产生洪水并诱发了遍及华盛顿西部的滑坡，尤其是西部的俄勒冈。一些滑坡造成了严重的破坏作用，造成了许多道路和公路堵塞。美国地质调查局的科学家们进行了调查研究来确定滑坡诱发机制，并且报导该滑坡

有许多类型,包括土体滑动、岩石滑动、岩崩、快速土流和泥石流。

密歇根巨大的海岸滑坡(摘要)

1995年2月,当地居民乔治威克斯在沿着密歇根国家湖岸的 Sleeping Bear 沙丘的海滨散步时,惊奇地发现刚在最近形成的美丽海滩,已经落入了密歇根湖。由几百万立方英尺砂组成的沙滩在巨大的海岸滑坡中消失在湖水之下。幸运的是,当海滩滑入湖中时,没有人在海滩上。美国地质调查局被指定调查和确定滑坡产生的原因,1997年,美国地质调查局的科学家研究了1995年滑坡的水下部分。在靠近海岸处发现一个深洞,而在此之前是一个平缓的倾斜湖底,还发现了一个厚的滑动碎屑层,延伸到2英里以外的近海,入水深度超过了250英尺,比想象的更远也更深。滑动较深部分的水下视频显示,原生长在悬崖中的树林,由于滑动进入到深水中。最有可能的原因是,冰冻悬崖面或承压砂层融雪滞留造成了悬崖上孔隙压力增加,有历史资料支持这一推断,1914年12月和1971年3月, Sleeping Bear Point 发生了两次类似的滑坡,也是出现在冬季的反常变暖天气。

地面沉降

地面沉降是地面由于地下物质运移而发生的渐进下陷或急剧下沉。这是一个全球性问题,仅在美国,已经有遍及45个州,超过44030km²的土地受到了地面沉降的影响,相当于新汉布什尔州与佛蒙特州的总和。由此引发的经济损失更是惊人:仅在圣克拉拉山谷,沉降所造成的直接经济损失,在1979年大约为1.31亿美元,而到了1998年则高达3亿美元。造成这一灾害的原因主要有含水层的压实、有机质土的疏干排水、地下采矿、自然压实、溶坑以及永冻土的解冻等。

一 地面沉降类型

根据土质条件,美国的地面沉降主要可以分为三大类:第一类,含水层压实引发的地面沉降;

加利福尼亚约塞米蒂山谷岩崩(摘要)

岩崩和其它的块体运动是形成约塞米蒂山谷景观的重要因素。在历史时期已经发生了400多次的岩崩,造成9人死亡和多人受伤。据记载,最大的岩崩发生在1996年7月,两块大岩石结合形成约70000吨的重量,从2000英尺高的 Glacier Point 悬崖下落到快乐群岛的谷底(Wieczorek等,1992)。岩石下落产生了空气爆炸,压平了附近的2000棵树木,造成了1人死亡,14人严重受伤。国家园林局和美国地质调查局的地质学家对地质灾害进行了评价,并对约塞米蒂山谷潜在的岩崩灾害区和范围进行填图。然而这些图件不能预测岩崩的发生时间和发生频率;因此,既不能确定特定点发生岩崩的可能性,也不能评价给人类或设施可能造成的破坏。在约塞米蒂,持续发生岩崩灾害。2001年2月12日,岩崩造成了公园东0.5英里的El入口道路(140公路)堵塞约24小时。道路上方一尺寸不太清楚的花岗岩石板松动了大约1000英尺,最后碎成许多直径在2~12英尺的小块,造成路面损坏。

第二类,有机土的疏干引发地面沉降;第三类,洞穴塌陷引发的地面沉降。

二 缓解措施

1 ASR技术的应用

为了满足供水和改善水质的要求,含水层存储和恢复技术(ASR)在美国各州得以广泛的应用。在圣克拉拉山谷,目前的需水量仍然很大,但由于地表水的引入,回灌得以实施,使得地下水抽汲量减少,从而防止了地下水位重回历史最低位。另外,该区水资源管理局在当地的河流上建立了5个蓄水坝以收集雨水,这样增加了河水对流经区的地下水的补给。该区是美国第一个被发现也是第一个采取了有效措施而在1969年前后终止了沉降的地区。同样的情况还有亚历

桑那州的中南部,通过引入科罗拉多河的河水减少了对地下水的需求强度,从而缓解了地面沉降。

2 改变土地使用类型

将土地使用由农业用地型向城市用地型转变,以降低需水强度,防止地下水位的进一步下降。特别适用于佛罗里达州的泥沼区,这种方法可以防止有机土的进一步分解。

3 节水

利用含水层组贮藏和运输地下水,要优于造价高昂的地表蓄水和输水系统。因此节水是制止沉降的一项重要举措。如在圣琼斯地区,目前人均用水量只有 1920 年的五分之一,远低于过去作为农业用地时的用水量。因此即便是在 1976~1977 和 1987~1991 年,这两个加州的主要的早期里,水位还是保持在历史最低水位以上。

4 加固堤防

防止洪水泛滥和海水入侵。例如在加利福尼亚州的 SACRAMENTO-SANJOAQUIN 三角洲,大面积的人工堤坝及人工岛有效的保护了这个三角洲,使之免遭海水的入侵,同时维持了有利的淡水坡度,保持了它的淡水源作用。

5 立法

在圣克拉拉山谷成立了一个专门的水资源管理机构来管理该区的用水,使地表水和地下水得到了长期有效的综合利用。许多地区甚至采取法制措施来防治地面沉降。例如 1980 年通过了“亚历桑那地下水管理法案”。其基本目标是:加强对已衰竭含水层组的管理;把有限的地下水资源进行最合理的分配;发展新的水资源供应来增加亚历桑那的地下水资源。

6 减少落水洞产生的影响

已有的案例表明,落水洞的活动与地下水的抽取有直接关系,控制地下水位的波动可以防止

落水洞的形成。佛罗里达西南水资源管理区与其他水资源机构通力合作,设立了佛罗里达中西部地下水的临界水位。最低水位的提出将会改良一些诱发条件,减少落水洞产生的影响。

三 地面沉降的监测

1 伸长计——测量地面沉降和水平位移

钻孔伸长计可记录地表与钻孔底部的参照点之间垂直距离发生的连续变化。在含水层系出现压实的地区,伸长计是精确测量观测点连续变形的最有效的工具。当地下阶地标志处于压实含水层系底部时,伸长计可以作为局部测量的稳定参照点或初始点。在一个简单的仪器中插入多级伸长计还可以同时测量不同深度段的含水层系的压实程度。

2 雷达干涉测量技术(InSAR)

干涉测量合成孔径雷达(简称 InSAR)是一种高效的新工具。它运用雷达信号测量地壳变形。它的出现使空间清晰度和测量分辨率达到空前的高度。合成孔径雷达(简称 SAR)通过空间飞行器卫星绕轨道运行,数学的合成一个大型的操作天线,并产生高空图像分辨能力。对某个地区而言,若在一段时期内,它有一些稳定的雷达反射物体,那么就可对反射物体处的变化进行高精度的测量。在理想状况下,可测量出 5~10mm 的抬升变化。

3 GPS 测量

基于人造卫星的全球定位系统(GPS)的诞生之前,地面测量最常用的工具是经纬仪和光电测距仪(简称 EDM)。水准测量技术方法很简单,但它的精确度却很高,即使在测量精度要求不高的情况下,这种方法也能够测量到数英里外 0.05(1mm)英尺的抬升变化。但在大规模的测量中,水准测量和 EDM 测量所产生的错误就会明显增加。当测量范围较小(不超过 8km)且测量密度较大时,人们通常采用气泡水准测量,因为它的精确度高而且成本相对较低。对于大规模的

区域网应该采用先进的全球定位系统(GPS)进行全方位的测量。GPS 可借助于人造地球卫星进行三边测量定位。它的原理就是利用雷达信号从卫星传到接收天线所需的时间来计算距离。通过接收器与至少 4 颗人造卫星之间的距离(即三边测量术)就可准确地确定所处位置的三维坐标。目前 GPS 可达到的精度为 5~8cm。在地面沉降和其他的地壳运动测量中,当两台 GPS 接受器放在各自的观测点上同时接受由同组卫星群(至少由 4 颗人造卫星组成)发射出的雷达信号时,这两个观测点的相对位置即可确定。在随后的某个时间段里,当人造卫星再次捕

捉到这两个观测点时,它们在这段时间里发生的相对运动就可被测出。

测量网上的各个观测点都可采用该方法进行测量。第一个地面沉降监测测量网 1992 年在加利福尼亚莫哈韦沙漠的 Antelope 山谷中诞生。它主要用于确定古阶地的沉降,确保测量点间(间距为几十英里)的测量精度以便今后的沉降监测。GPS 测量技术也是一种多功能的勘探手段,它可以迅速地判定沉降的大概位置,以便设置更加精密可随时随地测量的仪器(如伸长计)。加拿大和伊朗也已应用了这种监测方法。表 1 列出了各种沉降监测方法的比较。

表 1 沉降监测方法的比较

测 量 方 法	测量方式	分辨率	空间测量密度	空间测量范围
水准仪	垂直测量	0.1~1	10~100	线—网
光电测距仪	水平测量	1	10~100	线—网
伸长仪	垂直测量	0.01~0.1	1~3 点	点
卷尺	水平测量	0.3	1~101~10	线列
不胀钢尺	水平测量	0.0001	1	线
石英管	垂直测量	0.00001	1	线
GPS	水平测量	20	10~100	网
	垂直测量	5		
InSAR	测距	5	100 000~10000 000	象素点

注:表中所示分辨率为最大分辨率; InSAR 图上的一个象素点在实际地面上代表 40~80 m²

实 例

利用 InSAR 测量地面沉降（摘要）

在美国直接受下陷影响地区达 45 个,受灾面积超过 17000 平方英里,每年相关经济损失约为 125 万美元。导致下陷的主要原因有含水层系统挤压、有机土壤排水、地下采矿、自然挤压、污水池、冻土融化等(国家调查委员会,1991)。一个强大的映射成图工具(InSAR)对于评估和缓解下陷方面比较有效。InSAR 能够

以惊人的精度监测地表微小形变。InSAR 所形成的干涉图增强了我们监控和处理由于含水层系统挤压引起的下陷,也展现了人类控制自然物理过程的新视野。干涉合成孔径雷达(InSAR)是一种新型的用雷达信号监测地表微小形变的工具,其反映的空间细节水平非常惊人,测量结果精度很高。美国地质调查局及其他一些单位正在利用 InSAR 成图和监控由于含水层系压造成的。雷达干涉测量法应用于地球物理,它在

利用雷达定相反射信号测量地表高程距离变化方面具有自己的优势 (Gabriel 等,1989 年; Massonnet 和 Feigl,1998)。由于卫星天线所限,在地球轨道卫星上的普通雷达数据的地面分辨率很小,只有 300 到 400 英里。合成孔径雷达 (SAR)进行了改进,在沿轨道运行的太空船上安装大量工作天线,将他们进行数学改造合成,从而具备获取高空间分辨率成像能力,分辨率能达到数百英尺。

加利福尼亚三角洲沉降 (摘要)

位于加利福尼亚州的萨克拉曼多圣 joaqiun 河三角洲曾为泥炭及泥炭类淤积层所覆盖的巨大潮汐淡水湿地。从十九世纪末期开始,人们沿渠建立了防洪堤,使土地免于洪水灾害并进行耕作。目前三角洲为特别富裕的农业区 (1993 年农业收入超过五亿美元),这个富饶的农业区是美国其它州的淡水供应地,也是北水南调的中心。大部分水被调往南部圣 joaquin 山谷及加利福尼亚州的中部及南部地区。防洪堤坝区域及小岛可以防止咸水入侵,保持淡水水力坡度,并保护抽水设施。然而,堤坝后方持续地面沉降降低了坝体稳定性,导致北水南调输水系统水质恶化。目前,三角洲中 1100km² 的堤坝没有很好的保护 57 块岛地免受洪水侵害。再造农业耕地,导致中西部三角洲上的岛地地面沉降,多年来的平均沉降速度为每年 1-3 英寸 (Rojstaczer 和 others,1991),在三角洲中部的岛地目前低于海平面 10-25 英尺。由于持续的沉降,必须对堤坝进行定期维护和加固。

用全球定位系统(GPS)和人工干涉雷达 (InSAR)监测加利福尼亚 Coachell 峡谷地区的地面沉降, 1996-1998 (摘要)

在加利福尼亚的 Coachell 峡谷,由地下水水位下降引起的地面沉降一直被认为是一个潜在的问题。二十年代早期,当地的工农业和生活用水就主要依靠地下水,从而导致在 40 年代晚期,当地地下水水位下降了 15 米。在 1949

年,随着 Colorado 河水注入 Coachella 峡谷开始,地下水的抽取量开始减少,地下水水位在 50 年代到 70 年代有所恢复。从 70 年代末期开始,当地对水的需求量大增,注入的地表水不能满足需要,重新导致了对地下水抽取的增加和地下水水位下降。但具体到该地区发生地面沉降的幅度和时间还不太确定。因为数据稀少,准确性差,并且该地区构造活动强烈,在过去的几百万里已经发生过许多次地面沉降,其进一步加剧了数据解释的复杂性。地表海拔高度数据是从各个渠道得到的,因此他们采用的是不同的方法和不同的地理标准。因为以上原因,该峡谷南部地区 1930-1996 年之间的 150mm 的下沉量可能有 $\pm 90\text{mm}$ 的误差。在 1996-1998 年期间地面沉降发生的具体位置和下降幅度是由 GPS 和 InSAR 两种方法得到的。对该地区 14 个 GPS 监测桩的监测结果显示从 1996 到 1998 年地面沉降的变化范围是 $(-13-67\text{mm}) \pm 40\text{mm}$,其中有 7 个监测桩的变化范围超过了 GPS 误差 $\pm 40\text{mm}$ 。这说明在 1996 到 1998 年期间,该地区发生了少量的地面沉降,同时监测桩周围的一些井的水位也达到了其有记录以来的最低值。历史上的最低水位和地面沉降之间的联系说明含水层的固结压力在那个时期已经被超过,并且已经下沉的地面是永远不可恢复的了。通过对几对监测桩和水井的比较表明短期内水位下降的幅度和地面下降的幅度之间的关系没有被清楚的确定。1996-1998 年的 InSAR 监测结果显示地面沉降的幅度是 $(-20-70\text{mm}) \pm (5-10\text{mm})$ 。地面沉降发生在该峡谷的三个地方: Palm 沙漠附近,印地安井附近 Cahuilla 湖。在 Palm 沙漠和印第安井附近的地面下沉区是和地下水抽取量大的地区相一致的。Coachella 峡谷水务局的报告显示他们在 Cahuilla 湖地区没有抽取地下水,但那里或许有一些私人水井在抽取地下水,从私人水井里抽取的地下水或可能的构造活动也可能引起地面沉降。报告中的

GPS 监测网覆盖了从南部 Salton 海到北部的 Indio 地区。InSAR 监测区的范围是 Coachella 的西部, Cahuilla 湖的北部和 Palm 沙漠地区。这两种方法监测了从 Palm 沙漠到 Salton 海的地面沉降变化情况。因为 InSAR 在大部分地区生成了更多更详细的空间数据, 所以在地面沉降变化不大的地区 InSAR 数据更有意义。比如 Palm 沙漠和印第安井地区, 起位于当时 (1998) 监测网的北部。另外, 由 InSAR 图得到的详细空间解析度补充了 GPS 监测网的不足。

美国的地面沉降

地下水是一个国家最重要的自然资源。它为城镇居民提供饮用水, 支持国家工农业发展, 维持溪流、江河的正常流动、维护海岸和湿地生态系统。在我们国家的许多地区, 地下水未来的可承载能力正在接受来自用水过度和水污染的挑战。因为人类活动对地下水系统的影响是长期而缓慢的, 就需要对这种宝贵资源建立一种长期有效的管理制度。本书就是描述全国地下水资源观点中的事例之一, 如同美国地质调查部门所作的一些工作, 这些工作为利用、管理和保护地下水提供信息, 使地下水向可持续发展方向。



图1 佛罗里达中西部的一口新灌溉井导致 20 英亩面积上出现了上百个沉降坑洞

最近美国地质调查局报告显示, 该国土地和水资源的可持续发展依赖于对沉降现象的科

学认识和研究。这份报告列举了 9 个案例, 这些案例表明了地下水在人类活动导致的地面沉降中所起的作用。美国超过 80% 的地面沉降经过鉴定都是人类活动对地下水影响的结果, 同时也是我们土地和水资源利用不合理而造成的环境恶化的结果。土地与水资源不合理开发利用的发展, 预示着已经存在的地面沉降问题继续恶化和新问题的不断出现 (图 1)。地球表面的地面沉降是由地球物质的内部活动而引起的逐步下陷或突然下沉。地面沉降是一种全球性问题。在美国, 45 州中超过 17, 000 平方英里的土地, 大约有汉普郡和佛蒙特的总和那么大, 正在直接遭受着地面沉降的影响。其根本原因是含水系统的压实作用、有机土壤排水、地下水开采、水压实作用、自然压实作用、灰岩坑以及冻土层溶解 (1991 年, 国家调查局)。对大多数与水有关的地面沉降来说, 有三个过程是其形成的明显原因: 含水系统的压实作用、有机土壤排水以及随之而来的有机土壤氧化作用、松动岩石的分解和崩塌。

地下水开采

伴随地下水的过量开采而出现的松散含水层的压实是目前为止引起地面沉降的最主要的原因。这种含水系统中水量的透支导致了永久性的沉降和地面破坏。含水层系统包含着足够厚度的淤泥与黏土层 (弱透水层), 长期的地下水位下降能够致使弱透水层中压缩水的释放, 从而导致了地面沉降 (图 2)。伴随着压缩水的释放, 也就是压实弱透水层中孔隙容积的大量缩减, 导致了具有储水能力的含水层系统的减少。这种“压缩水”不会因为水位恢复到原来状态而复原。为经济利益而抽取水资源是导致长期开采地下水的真正目的。五个事例表明地方性工业与农业地下水利用是如何耗尽了本已达到警戒线的地下水资源并造成了整个地区地面沉降的 (图 3)。

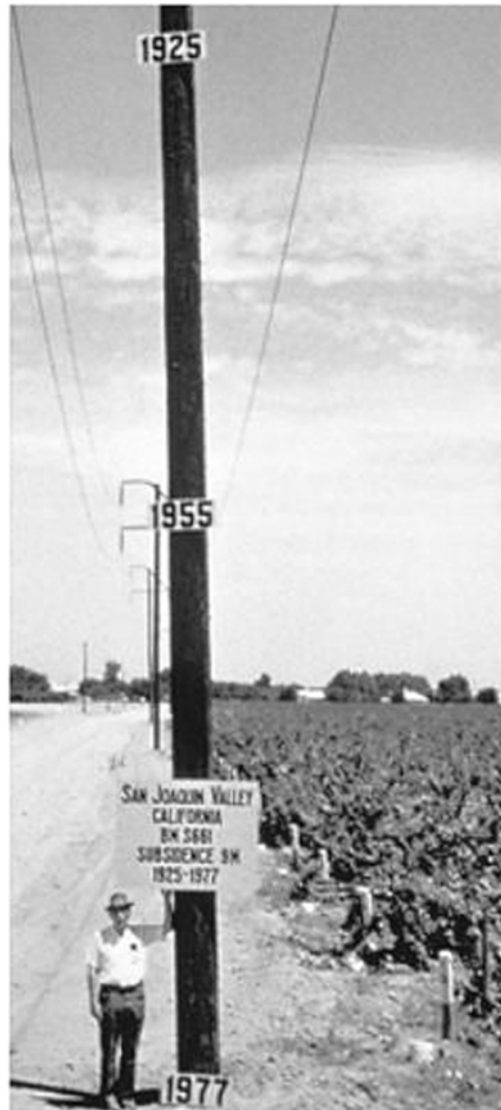


图2 波兰约瑟夫博士调查到的美国最大路面沉陷的大概位置



这包括位于北佛罗里达州的圣克拉克峡谷，那里早期农业用水造成了地面沉降，永久性的增加了圣琼斯地区洪灾的危险。附近的圣卓肯峡谷，是一个因大量人类活动而引起地表地形变化的案例，那里是由于维持高产农业生产而大量开采地下水所形成的（图 2）。标题照片拍摄的是穿过圣卓肯峡谷的加利福尼亚沟，



图 4 得克萨斯休斯敦市某地（5-7 英尺的地面沉陷）正遭受洪水危害

内华达拉斯维加斯峡谷，地下水的亏空与随之而来的沉降已经使这块沙漠绿洲变成了一个干涸之地、结果只是形成发展快速的大都市。亚利桑那州中南部不断的农业用水造成了大范围的地面沉降和地裂缝（图 5）。但在上述地区，地表水的使用已经减少或稳定了地下水的开采，因此暂时减缓或停止了沉降的进程。

有机土壤排水

当富含有机碳的土壤因农业或其它原因而被消耗排水时，地面沉降就发生了。沉降最主要的一个原因就是微生物的分解，在排水条件下，微生物将有机碳转化为二氧化碳和水，挤压、干燥、风和水的侵蚀及意外的燃烧也是沉降的重要因素。美国有机土总面积大约等同与明尼苏达州的面积，大约 80,000 平方英里，而阿拉斯加有近一半的面积都是“苔泥碳”（卢卡斯，1982）（图 6）。在毗邻的 48 个州中，大约有 70% 的有机土地区都出现在北方，在早期的冻土区“苔泥炭”也很常见。苔泥炭是由大部分的泥碳苔藓和相关种群组成的，酸性很

这条沟把水从圣克拉蒙特—圣卓肯三角洲输灌到佛罗里达中南部由地面沉降而形成的盆地。在得克萨斯州霍失顿—盖维斯地区，早期油气制造和长期的地下水开采引起了代价惨重的海岸洪水灾害，并影响了濒危的环境资源—盖维斯顿海岸三角湾（图 4）。

高（pH 值在 3.5—4 之间），很难分解，即使在排水时也是如此。但在那些因为农业种植而改善了苔泥碳的地区，比如通过施肥和施用大量石灰的方法来提高 pH 值，苔泥炭就可以象其它类型的有机土一样快速分解了。



图 5 亚力桑那州地裂缝类型地面沉陷



图 6 北部 48 州和阿拉斯加的有机土壤分布

有机土壤沉降的两项研究集中在了由残留莎草和芦苇的分解而引起的快速沉降的案例上（每年沉降 1 到 3 英尺）。国家两个重要湿地生态系统，加利福尼亚圣克拉蒙特—圣卓肯三角洲和佛罗里达的爱沃哥雷——持续的有机土壤沉降威胁着农业生产，影响了为城市饮水工程的基础，致使由联邦政府和州政府提供赞助

的生态系统恢复工程的工作复杂化。受沉降影响而弱化的防洪堤使三角洲岛屿发生洪灾的潜力增加，破坏了淡水河流，威胁到加利福尼亚北水南调系统的完整性。在湿地农业地区，当前所有农业产值是 75 亿美元，因为不断的地面沉降，农业的生命力十分有限（图 7）。



图 7 湿地建筑物由于沉陷增加了楼梯和基础

岩洞坍塌

不时突发性的沉降灾难与地下落水洞的局部断裂有关（图 8），在这上述两个案例研究中被详细论述。这种沉降经常由于地下水位下降引起，地下水下降则是开采地下水和提高地下

水渗透性的结果。坍塌特征与岩石特定类型有关，例如蒸发岩（盐、石膏、无水石膏）、碳酸盐（石灰石和白云石）（图 9）。这些岩石易于在水中分解，且盐和石膏的成分比石灰石更易溶解，岩石类型与大多数落水洞组成有关。



图 8 落水洞坍塌导致的灾害性破坏

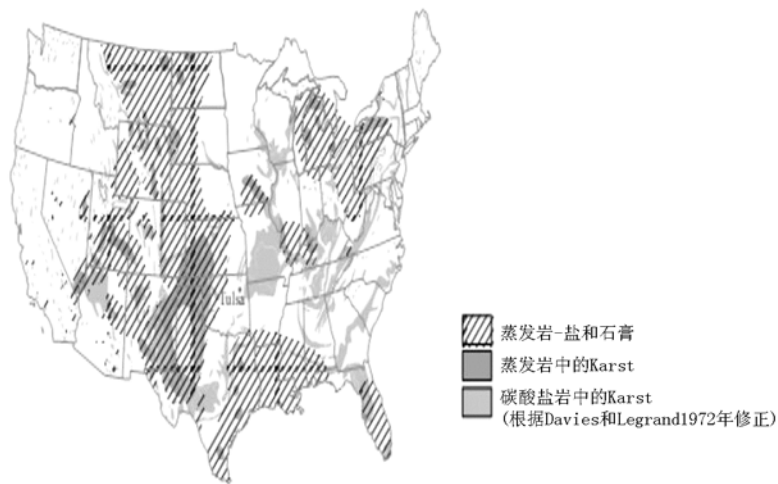


图 9 美国 40%的国土受到盐类、石膏类、可溶性岩石的破坏

美国地下 35%—40%都是蒸发岩，但大部分都埋深很深。美国天然的与溶解有关的沉降都发生在高盐盆地，盐与石膏的高溶解性促成了空穴的形成，尽管二氧化碳岩床上的空穴形成是一个非常缓慢的过程（大约需要几个世纪或者上千年）。人类活动能使这些易受影响的物质加速空穴的形成并引发它们的断裂，也会引起以前存在的地下空穴的断裂。虽然坍塌具有地域性特征，但是通过污染物竟如地下水的

可能通道，它们的影响能够延伸到坍塌区域以外的地方。两个坍塌岩洞研究案例，纽约莱特索夫和佛罗里达的中西部地区——分别证明了人类活动导致了由盐和石膏构成的岩石的水解，从而引发的岩洞坍塌。

科学的作用

地面沉降的发生很少像灾害性落水洞或矿山崩塌那样明显。包含地下水开采和有机土壤

排水的地区，沉降是渐进且范围广泛的。今天俯视加利福尼亚圣卓肯峡谷，人们很难辨别出，近 75 年以前，这里的某些地区的地面要比现在高出近 30 英尺（图 2）。沉降的探测和绘制对科学理解和调控我们的土地和水资源都很有必要，很久以来区域性的沉降探测依赖关键水准基点变动这个发明。陆地调查建立了水准基点位置以便能精确定位道路、洪水控制及排水建筑的位置以及管道和其它工程建筑的基础构造。一旦不稳定的水准基点被发现，并且稳定的水准基点建立后，沉降就可以用图描绘出来，以前用水平仪来完成，而现在通过 GPS 就可完成。在过去几十年中，一个新工具的出现意味着我们对地表可塑性的探测和绘制能力提高了，这个工具，干涉测量合成孔径雷达，利用从地球轨道卫星得到的雷达往复成像，来测量沉降并绘出空间细节图，并提高了测量精度（厘米级）（图 10）。



图

10 SAR 拍摄的地表重塑图

一旦地面沉降被分辨出并被绘制出来，监控沉降计划就能实施，提高我们对沉降过程认识理解的科学研究就能启动。科学认识、细心

操作，能够减少由土地和水资源发展而产生的沉降现象。

日本利用 GIS 预测和降低地面沉降的时空发展（摘要）

采用 GIS 方法建立地下水流和地面沉降的时空预测系统，并应用于沉降持续发展的日本沿海平原。将与地下水流和地面沉降相关的不同基础数据进行数字化，并输入到 GIS 数据库。采用 GIS 对整个平原的地表水文地质循环进行模拟，据此获得了地下水入渗量。通过 GIS 数据库将数据转化为地下水流动代码 (MODFLOW)，建立三维地下水流动模型，完成过去 21 年的非稳定地下水流动模拟。最后，用 VB 编写了含水层和隔水层的地面沉降的程序。根据不同的地下水抽水量对未来的地面沉降进行预测，研究结果对于制定减缓地面沉降的决策提供了重要信息。

用 InSAR 观测拉斯维加斯的季节性地面沉降和回弹（摘要）

分析受力含水层系统的地面沉降和回弹面积变化，与测量造成的这些变化的水头变化结合起来，可以获得关于含水层系统的压缩量和贮藏性质。历史上，应力应变之间的联系是根据安装成对的变形测定器/压力计获得的，只能提供点源数据。由于获得特别详细的空间地面变形数据不太可能，因此在含水层的约束概念和数值模型中，通常不考虑面积应力应变联系和它们之间的变化。干涉测量合成孔径雷达 (InSAR) 技术在 100km 宽的卫星扫描带，可以绘制几十米空间变化的地面变形图。InSAR 以前多用于较大的范围，一般来说用于固定含水层系统压实，以年或更长时间周期为单位的地面沉降。本文提出的 InSAR 进行的是小面积测量，一般是用于在拉斯维加斯河谷含水层系统随季节性变化可以恢复的地面变形。据此获得拉斯维加斯河谷几个不同位置的弹性贮水系数。这些高分辨率的测量，可以为含水层系统性质和含水层系统结构的时空不均匀性进行更

深的调查研究，而且可以监测正在进行的含水

层压实和地面沉降

地 裂 缝

美国是发现地裂缝灾害最早的国家，也是对地裂缝灾害研究较为广泛和深入的国家。到上世纪 80 年代，其西南部有 6 个州、14 个地区都出现了地面沉降和地裂缝，其中，亚利桑纳、加利福尼亚、内华达、德克萨斯、新墨西哥等州为集中发育区，损失非常严重。

一 美国地裂缝的类型与分布

1 美国地裂缝的类型

美国的现代地裂缝主要有张裂缝和剪裂缝，它们都与由于开采地下水或石油而导致的地面沉降有密切的联系。张裂缝，即地面上水平张开的裂缝。它没有剪切运动分量。最长的张裂缝带长 3.5km，但几百米的较为常见。裂缝因冲蚀而加宽，常形成 1~2m 宽的地沟。据测量，最大张开深度为 25m，但 2~3m 的比较普遍。张裂缝仅在内华达州的拉斯维加斯和亚利桑那州的凤凰城两个大城市出现。所幸的是，其影响的大部分是农田，因此破坏造成的损失并不大。剪裂缝，即垂直于地面作剪切滑动的裂缝。是由于抽取地下流体而形成差异沉降所致。其形态酷似正断层，因而容易混淆。它们的差别在于：是否存在季节性蠕滑，或蠕滑运动是否随地下水位波动而变化；是否存在断裂活动与抽取地下流体之间的相关联系，以及断裂错动是否局限在被开采的含水层深度内。这类地裂缝最长达 16.7km，地表断坎最高可达 1m。

2 美国地裂缝的分布

在美国，地裂缝密度在各个沉降地区变化很大。主要地裂缝区有：

亚利桑那州，在亚利桑那中南部，有 50 多条张裂缝和 4 条剪裂缝；德克萨斯州，休斯敦地区，地表可见地裂缝多达 160 余条，累计长度 500km。但有近一半的地裂缝是古裂缝，活

动地裂缝有 86 条，累计长度 240km。含水层底面最大深度约 800m，含水层水位下降超过 100m，区域水位下降产生了本地区最大的沉降漏斗；内华达州，拉斯维加斯地区是内华达州南部的冲积盆地，未固结冲积层的最大厚度为 200m；加利福尼亚州，有 3 个盆地发生了地裂缝：Fremont、San Jacinto 和 San Joaquin 盆地。Fremont 盆地是一个长约 40km、宽 10km 的沉积盆地，由未固结冲积层组成的含水层系厚约 275m。现代地裂缝中既有张裂缝也有剪裂缝。这一区域至少有 12 个裂缝带和 5 个现代断坎。San Jacinto 盆地是加州洛杉矶东 130km 处一构造盆地，历史上曾发生过大面积地面沉降。因抽取地下水，诱发了古地裂缝复活。美国两大沉降区域之一的 San Joaquin 盆地，面积为 13500km²。其沉降中心(M endota)1925~1977 年地面累积沉降量为 9m。相应地，因抽取地下水而形成了 3 条张裂缝和 1 条剪裂缝。3 条裂缝彼此间距小于 12km。该区地裂缝灾害严重，直到 90 年代仍有因地裂缝损失要求索赔的诉讼案。

二 美国地裂缝的成因

关于美国地裂缝的成因，有 3 种不同的观点。

1 构造成因

构造成因观点最早由 Leonard(1929 年)提出。他从地震角度分析了 1927 年 9 月 12 日出现于亚利桑纳州 Picacho 城附近的地裂缝及相距 13km 的 EiTiro Mine 地面异常破裂的成因。有些学者他们对成因机制的解释却不尽相同，多认为构造对地裂缝的影响表现为控制性的，但不排除其它因素的间接影响。Carpenter(1993 年)根据 Picacho 盆地地裂缝变形和地面沉降的长期观测资料，利用 Okada 的三维位错理论

(1985 年)及 Matsuura 等的构造裂变修正模型(1975 年),就构造活动对地裂缝成因影响进行了分析。认为,断层位移对地裂缝在水平方向的张裂变形及垂直方向的差异变形都有一定影响。

2 地下水开采成因

地下水开采成因观点在研究早期就被大多数地裂缝研究者所接受。但对其成因机理却在较长时间内有很大争议。

3 构造与地下水开采复合成因

20 世纪 70 年代末以来, Holzer 等人通过对亚利桑纳州中南部构造盆地地裂缝的活动性、地质环境资料及地面沉降观测资料综合分析认为,该区域构造活动与地下水开采是影响地裂缝发育及活动的 2 个主要因素。为了量化评价构造活动与地面沉降对地裂缝活动性的影响, Holzer 等将地裂缝的形变分为错断(fault)和开裂(fissure)2 种形式:错断主要产生平行裂面的位移;而开裂主要表现为垂直裂面的位移。构造活动对地表形变的影响主要表现为错断位移;而土层差异压密变形的影响则表现为开裂位移。Bell(1990 年)根据 Las Vegas 盆地的地质条件,分析了地裂缝的发育特点,认为地面沉降盆地内部呈放射状分布的地裂缝,是隐伏破裂面经渗透变形诱发而成,并对地裂缝的形成过程提出了不同的分析模式。Haneberg(1993 年)在 Holzer 对地裂缝形变分类的基础上将地裂缝成因模式分成开裂模式(opening mode)、剪裂模式(shearing mode)及撕裂模式(tearing mode)3 种类型。随着研究的深入及大量长期观测资料的积累,人们在比较普遍接受地裂缝的构造及地下水开采复合成因观点的同时,也深深认识到地裂缝成因机理的多样性和复杂性。

三 地裂缝灾害管理

1 地裂缝灾害预测

根据地裂缝的特性、地质环境和形成机制,可对地裂缝灾害进行预测。预测分下列 3 个步骤:

(1) 地质调查 调查目前地裂缝的分布、先存断裂、隐伏断裂和地层形态。第一,可采用航空照片解释法研究有关区域的地貌特征。航空照片判读对于指导野外调查、寻找地表高程梯度带是非常有帮助的;第二,进行有目的的实地考察。对潜在地裂缝灾害区域的实地调查会找到裂缝的一些迹象,因为处于向上扩展阶段的隐伏地裂缝在致灾前会使建筑物上出现一定规律的细缝;第三,采用地震勘探、重力勘测、电法测量以及氦测量等物探手段,查明先存断裂或其它类型的不整合地层的位置。在调查中,探槽和钻孔数据是非常有用的。

(2) 监测地面形变 对于隐伏地裂灾害区域,可采用包括大地水准测量、跨断层形变测量和工程地质测量等方法监测地面不均匀沉降的变化,并寻找差异沉降曲线的最大梯度点,预测未来地裂缝灾害的确切位置。而监测和分析蠕滑速率的变化趋势将有助于预测灾害发生的时间。短水准的重复测量可用来预测未来地裂缝带位置。美国亚利桑那州已采用 GIS 和 GPS 来监测地裂缝。

(3) 裂缝附近抽水量的变化预测 地裂缝的主要位移是由不均匀沉降引起的。沉降速率、地裂缝蠕动速率和活断层滑动速率三者之比为 100/0/(指数量级之比)。其中,90%的垂直剪切位移来自差异沉降。

2 地裂缝灾害减灾法规

为减轻地裂缝灾害,在可能致灾的区域应建立专门的法规或条例。美国加利福尼亚州政府于 1958 年颁布了地面沉降法(加利福尼亚公共资源条例 3315, 3347 条),严格控制开采地下水和石油。该法令对减缓地面沉降和地裂缝起到了很大作用。针对地裂缝灾害,亚利桑那州成立了专门的地裂缝灾害委员会,统一管理地裂缝减灾各项事宜,并提出了普及地裂缝减灾的科普教育、地裂缝早期监测与识别和及时处置相结合的对策。

3 引地表水工程

为减轻地裂缝灾害,在过量开采地下水的地区,最主要的对策是限制开采地下水。因此,

采用引进地表水源来解决城市缺水问题是从根本上减轻地裂缝灾害的措施。在由自然因素和人为因素两者共同作用引起的诸多灾害中，地

裂缝灾害具有典型性。为了减轻地裂缝灾害，不仅需要多学科综合研究的科技对策，而且也需要政府的社会管理对策。

泥 石 流

泥石流：常由强降雨诱发，泥石流在山区具有毁灭性的后果。要调查如下问题：（1）泥石流是如何被诱发的？（2）如何确定流动特征？（3）控制泥石流的规模和频率以及再次发生时间的因素？

NOAA-USGS 泥石流预警系统

美国预警系统的发展将有助于 NOAA-USGS 在更加广泛的范围内，向受到影响的民众和城市管理者及时发布泥石流灾害警报。泥石流是滑坡灾害中危害最大的一种灾害类型。由于泥石流具有巨大的破坏力，因而其造成的危害与其它类型的滑坡具有明显的不同。泥石流可以在毫无征兆的情况下发生，能够对其运动路径上的物体施加巨大的冲击荷载。即使小型泥石流也可以剥蚀植被，阻塞排水通道，破坏建筑，危及人类生命（Iverson, 1997）。超高密集流是山地地形区存在的另外一种形式的泥水混合物。超高密集流是一种处于泥石流和流动沉积物之间的一种单相流，超高密集流的体积大于水和沉积物。结果，粗糙的颗粒流动速度比较快，流动的沉积物和水混合物经常包含较小的颗粒。超高密集流中的沉积物主要是砂子，它是在沿着向下的斜坡滑动过程中和水流混合形成的，它也在水侵蚀和吸收大量的沉积物的过程中形成。

泥石流的触发机制：

泥石流是一种由分选性很差的岩石、泥土以及大量的水所构成的流体，沿着斜坡和沟谷向下流动的自然现象。大多数泥石流形成的必备条件都包括丰富的松散固体物质来源、陡峭的斜坡和充足的水源。泥石流最常见的水源是强度很大或持续时间很长的降雨以及冰雪融水

（有时也可能是二者的结合）。泥石流的触发机制很多。一般地，当滑坡体转化为迅速移动的流体时就意味着泥石流发生了。但是，当斜坡径流速度很大或者洪水剧烈地侵蚀并搬运沟谷中的沉积物时，也可能发生泥石流。火山爆发和降雨强度很大时，火山流和迅速融化的冰雪体的混合也会导致泥石流的发生。地震和大坝的失效也可能导致泥石流的发生。触发机制会极大地影响泥石流的体积、组成和流动过程。任何造成斜坡不稳定、径流速度加快或者山洪爆发的因素都可能促使泥石流的发生。下面主要介绍降雨诱发的泥石流。

1 滑坡型泥石流。在流量相对较大的水作用下，许多泥石流起初是陡坡（坡度大于 15° ）上不连续分布的滑坡体（Iverson 等，1997）。斜坡失稳通常发生在洼地的前面（不良的排水系统），但是也会发生在平坦的或者凸起的坡面上。当降雨通过一块较大面积的土壤入渗时，就很有可能引起滑坡。由于土壤逐渐地达到饱和，孔隙水压力增加，抗剪强度降低。滑坡发生时，整个厚度的土壤层不一定会达到饱和。开始时，滑坡失稳，然后慢慢移动成为泥浆，这就是泥石流。滑坡产生的泥石流能以很快的速度沿斜坡向下运动，并且常常会搬运很大体积的沟谷沉积物，因此随着流动距离的增加体积也越来越大。

2 沟谷型泥石流。已经证明，大规模的沉积物有可能产生泥石流。沟谷中的沉积物可能由于径流或者山洪的爆发而发生移动，并很可能会成为泥石流的沉积物来源。在多个地区的研究发现，由于流动搬运沉积物所导致的体积的增加被认为是产生大型泥石流的重要因素甚至是主导因素。这个过程的初始阶段，被称为沉积物的积累阶段，也被认为是火山地区和非火山

地区产生泥石流的重要过程。**Scott(1971)**指出沟谷沉积物是加利福尼亚南部圣盖堡山区泥石流沉积物的主要来源。

泥石流灾害评价:

要建立起准确可靠的泥石流监测和预警系统,就必须对泥石流易发区进行全面的研究,对导致泥石流发生的各种条件进行识别。因此,一个综合的泥石流灾害评价必须要强调下面几个问题:

1 泥石流发生的时间(降雨强度和持续时间临界值)

为了知道泥石流在一场暴雨中或者在暴雨季节中可能发生的机率,必须考虑到两个与时间相关的触发临界值:一是前期降雨的临界值,即这个季节中的累积降雨量;二是暴雨强度和持续时间的临界值,即在暴雨过程中,超过了比较关键的降雨强度和持续时间的值。存在前期降雨临界值,是因为山坡土壤在旱季失水,需要一定量的降雨来补充土壤水分。如果土壤水分没有恢复到正常的水平,那么就不会达到斜坡失稳所需要的孔隙水压力,泥石流即使在暴雨条件下也不会发生。需要注意的是,在最近发生过火灾的地区,泥石流最有可能是由径流过程而不是由渗透过程触发的,大规模的泥石流一般都是由影响一个地区的第一次明显的降雨造成的。因此,对于泥石流而言,在已发生过火灾的地方,前期降雨条件就不如在未扰动地方的影响大。在被烧过的地方,降雨强度和持续时间的临界值能够为泥石流的初始预报提供足够多的信息。

对于滑坡触发的泥石流,一旦超过前期降雨的临界值,就要对降雨进行评价,确定预期降雨的强度和持续时间,能否触发泥石流的运动。暴雨的临界值是根据那些能够触发泥石流的暴雨的强度和持续时间确定的。降雨临界线包括了各种可以导致泥石流发生的暴雨,例如持续时间短但强度很大的降雨,或者持续时间很长但强度较低的降雨。临界值通常是以函数形式表示的,因为在不同的地区导致泥石流发

生的降雨条件也会不同,因而,降雨临界值有着明显的地域特点。例如,在波多黎各、香港、台湾(台湾水土保持局)、加利福尼亚中南部、西雅图、维吉尼亚、新西兰以及意大利的皮蒙地区,由滑坡触发的降雨的临界值均有所不同。为了说明降雨临界值的地域性,一些学者提出利用年均降水量或者雨季的正态曲线将降雨临界值正态化。降雨强度和持续时间的临界值也可以用来表示潜在灾害发生的水平。

2 泥石流发生地点(灾害填图)

在过去的30年,地质学家们已经开发出多种方法来分析泥石流灾害。这些方法从广义上可以分为推理方法、统计方法和过程分析方法。目前,仍利用这三种方法来制作泥石流的灾害分布图。在美国,并没有一种标准的方法。这些方法的时空和时间上的分辨率以及理论基础都存在着很大的差异。

推理方法是一种很常用的方法,它利用许多不同的信息源来制作地图,以说明可能发生滑坡的地点。滑坡敏感性图的制作就利用了这种方法。这种地图将一个地区的斜坡稳定性划分为稳定至不稳定等几个级别。控制滑坡分布的因素以及每一个控制因素的相对影响通常都是根据专家的推断、野外观测以及滑坡的一些历史资料推断出来的。

3 泥石流的规模(体积或者峰值流量)

泥石流的规模通常用峰值流量、可能被淹没地区的平面面积或者是可以从山坡或者沟谷搬运下来的沉积物的体积来表示。**Rickenmann(1999)**提出,评价堆积在沟谷中沉积物的体积是确定泥石流大小的一种最可靠的方法。**D'Agostino** 和 **Marchi(2003)** 在意大利的 **Dolomites** 地区就应用了上述方法。还有另一种方法是 **Cannon** 等(2004)提出的,他利用从美国西部最近刚发生过火灾的地区获得的资料,开发出一种多元统计模型,可用于评价从山口流出的泥石流的体积。该方法将泥石流的规模看成是火灾面积、地面坡度、沉积物性质和降雨因素共同作用的结果。值得注意的是,尽管峰值流量是表示洪水大小的一个标准指标,但

是它并不一定能够很好的刻画泥石流的大小。因为很多泥石流都是发生在没有设置测量站的山区，即使设置了测量系统，想要在泥石流事件之后仍保持完好简直是不可能的事情。所以，有必要利用一种间接的方法来确定峰值流量。但是这种间接方法应用也十分有限，因为泥石流是非牛顿流体，而其峰值流量的大小在很短的流动路程上（数百米）就会产生很大的变化。对一些灾害评价而言，泥石流淹没的地区的平面面积或者是经过谷口的泥石流的总体积的测量数据被认为是更加有意义的资料（Pierson, 2005）。

4 泥石流的滑动距离（泛滥面积填图）

传统上，对泥石流灾害的评价是以详细的泥石流沉积物分布图和对流域内可能被淹没地区的推断为基础的。但是，这种方法具有很大的主观性。模拟模型提供了一个相对客观的灾害评价方法。目前已经提出了多种经验和数值

模型来模拟泥石流的滑动距离和泛滥范围（例如 Hungr, 1995; O'Brien 等, 1993）。尽管对泥石流机制进行理论的和数值的分析已经取得了很大的进展，但是利用物理模型对泥石流进行三维空间上的分析还未得到广泛的认可。目前，用来识别泥石流泛滥面积的最为实际的方法就是以历史资料为基础的经验分析。然而，一些事实表明泥石流的泛滥面积是与其流动体积相关的。实际工作中，识别泥石流扩展和淹没的一个相当有用的经验方法就是判定流动体积和泛滥面积之间的关系（Iverson 等, 1998）。这个方法要利用历史上的泥石流资料对模拟模型进行校正，并以泥石流的预估体积，沟谷的横截面积以及泛滥面积之间的比例和统计关系为基础。在泥石流发生之前，对初始失效体积进行评价是相当困难的，但是利用泥石流的预估体积和泛滥面积可以对泥石流的体积增大或者发生概率的减小进行绘图。

实例

泥石流预警系统

1 现有的预警系统

和降雨预测以及实时降雨测量相比，降雨的“强度—时间”临界值已经是开发可操作的滑坡预警系统的基础。现有的泥石流预警系统主要适用于具有潜在滑坡危险的大范围地区。香港岩土工程研究室于 1977 年建立了一个预警系统，连续的数据收集和周期性回顾分析已经很好地完善了确定发布和取消滑坡预警系统的标准。从 1986 年到 1995 年，美国地质调查局和美国国家气象局已经合作在旧金山湾区运行了一个泥石流预警系统（Keefer 等, 1987; Wilson 等, 1993 和 1997）。在巴西的里约热内卢，一个有 30 台降雨计量器和天气预报雷达组成的预报网络系统已经被用来在暴风雨期间加强对滑坡和暴洪的预报。台湾行政院农业委员会水土保持局已经建立了一个由降雨实时监测网络、滑坡体流动监测设施和图像监测系统组成的泥

石流预警系统。通过比较降雨的“强度—时间”临界值和降雨累计情况，美国俄勒冈州在其西部运行了一个滑坡预警系统。在英国，通过从滑坡体监测网络系统获的数据和降雨信息相比较，警示居民滑坡活动的周期（Cole and Davis, 2002）。Baum 等人于 2005 年提出了一个关于美国华盛顿西雅图市的综合预警系统，该系统通过对降水量、土壤湿度和土壤孔隙压力进行现场测量，形成了依赖于时间的不饱和土壤渗透模型、降水预报系统和“强度—时间”临界值，最终实现了综合的早期预警系统。

2 NOAA-USGS 目前的能力和局限性

NOAA-USGS 专责小组认为，在目前的资金条件下，最初的研究（为了美国地质调查局实现泥石流预警系统，该小组号召美国气象局为美国地质调查局提供有关降水的预测信息）是不可行的，原因是缺少全天运行的监测系统。

可行的是，在原有的水平上，专责小组同意用美国气象局的暴洪监测和预报系统，实现可操作系统的运行。

3 泥石流预警系统的组成

泥石流预警系统（DFWS）理论上应该由独立的产品、监测和预警体系组成，特别是能够在空间和时间上为系统用户（紧急事务管理者、计划者和回应者）提供应有用的服务。训练美国地质调查局和美国气象局工作人员加强对泥石流发生过程和灾害评价技术以及降水预报和测量的理解尤为重要。通知系统用户和公共用户以及系统的限制用户也非常必要。另外，能够提高系统效率的方法也非常必需。主要内容包括如下几点：

3.1 产 品

产品通过 DFWS 对外发布，其中包括对泥石流活动的预测、监控和警报系统。

美国地质调查局将通过预报给定区域连续 10 年内暴雨发生概率来发展预测系统；预测系统将能识别有潜在泥石流危险的郡县，其中还会包括一些造成泥石流危险的特殊信息。预测系统必将因为能够更新精确的降水预报信息而变得非常有效。美国地质调查局将发展泥石流的监测系统，把降水预报信息输入到详细的水文模型和地质模型中，通过分析泥石流的敏感性、山坡的水文条件和斜坡的稳定性推断出泥石流发生的可能性。泥石流监测系统将会识别出泥石流敏感区。该系统还将包括泥石流危险的其它特殊信息。监控系统也必将会因为能够更新精确的降水预报信息而变得可行。美国地质调查局将开发泥石流的警报系统，利用雷达获得的降水资料、ALERT 网络获得的降雨数据和其它的一些信息，输入到详细的水文模型和地质模型中，预测泥石流的敏感性、山坡的水文地质条件和斜坡的稳定性，并最终预测泥石流的发展状态。报警系统将会确定泥石流活动的区域和一些泥石流危险的特殊信息。该系

统还将及时更新降水的实时信息和泥石流的发展情况。

任何预测、监控和警报系统都将包括如下信息：

- 发布时间：泥石流预警系统产品是不定期的、受事件驱动的产品；
- 有效时间：泥石流产品一直都是有效的直到该产品被取消或者被其它产品更新；
- 通用的规范类型：泥石流预警系统产品利用了各个州的规范；
- 媒体产品线：产品线产品为“泥石流预报系统”、“泥石流监测系统”、“泥石流警报系统”；
- 标题名字的定义；
- 系统覆盖范围的确定；
- 事件发生周期的预测；
- 相关的因素（例如，降水预报资料、土壤条件、暴雨发生情况和相关的极限条件等。）
- 潜在危险发生概率；
- 针对预测事件制定恰当的行动计划；
- 当 USGS 和 NOAA-NWS 更新信息时，系统被终止。

3.2 数据格式

为了评价泥石流的潜在危险性，确定发布泥石流预报、监测和警报系统的必要性，美国气象局将为美国地质调查局提供三种形式的数据：（1）定量化的降水预报信息；（2）雷达预测的降雨信息；（3）ALERT 网络和其它方法获得的降雨数据。这些数据能够被输入到进行实时预报的水文模型和地质模型中，进行泥石流的敏感性预测、山坡水文条件预测和斜坡稳定性预测。

美国气象局的预报信息和雷达观测数据都将以一种地理信息系统所兼容的形式传送给美国地质调查局。这些信息都是 ASCII 的形式。美国气象局将会被直接传送给美国地质调查局及其控制的地点。美国气象局和美国地质调查

局信息技术人员将最终确定最有效的传输方法。

天气预报机构将提供给美国地质调查局定量化降水预报信息。这些预报信息的有效时间范围从每天两次（常规的水文气象预报周期内每 12 小时 1 次）到每天 4 次（灾害发生期内每 6 小时一次）。由雷达获得通过定量化评估的降雨信息通过美国气象局及时传输给美国地质调查局。雷达降水信息包括每 5 分钟、1 小时、3 小时和 6 小时 1 次的降雨资料。

来自 ALERT 降雨监测网络的降水信息和其它一些来自地方中间网络所获得信息都将有效地服务于美国地质调查局。美国气象局和美国地质调查局的信息技术人员将会为每一个预报区域提供最有效的方法。通过其它一些方法所获得的降雨信息和由天气预报机构所提供的泥石流预测报告，都将最终传输给美国地质调查局。

3.3 程序和协议

美国地质调查局将会与最合适的天气预报机构进行接触来完成由高级交互式气象处理系统（AWIPS）所实现的泥石流预报、监测和警报系统。预报信息将会被格式化后警告预报员，以一种警报信息在预报工作站上显示出来，并产生相应的文本形式产品。美国气象局将详细而又安全的信息技术协助美国地质调查局将信息通过 AWIPS 传递给美国气象局。

美国的天气预报机构将会通过公共信息系统和美国海洋与大气的管理局的天气无线全灾害广播系统（NOAA Weather Radio，简称 NWR。广播时又称“国家天气之声”）发布被推荐的产品。任何泥石流的预测、监控和警报系统的声明都将参见美国地质调查局滑坡灾害项目网站信息，其中声明部分将会针对有潜在灾害危险的区域和泥石流活动的影响区域逐一显示出来。任何系统声明都将会把信息提供给美国地质调查局的高级顾问、美国地质调查局地质和

水资源方面的副懂事、美国地质调查局国家滑坡信息中心的主任、水资源科学中心以及美国地质调查局的信息交流中心。如果信息有一定的价值，那么包括预测、监控和报警系统的声明都将通过美国地质调查局的交流中心被发布，但是必须是在公共信息声明被发布之后。

3.4 培训

美国地质调查局把培训内容提供给天气预报机构和河流预报中心（RFC）、相关的监测站和国家气象局的一些志愿组织机构。培训在于强调泥石流发生的方式、发生地点、发生的物理因素和气象条件以及美国地质调查局在预测、监控和警报系统的基础上还会利用什么样的产品。培训内容每天都会在天气预报机构和河流预报中心以数字产品的形式产生。

3.5 推广和报导

美国地质调查局滑坡信息办公室将联合相关机构，在泥石流预警系统应用范围内发展一项推广计划。可能的推广文件包括描述泥石流预警系统的新闻稿件和描述泥石流产生原因的情况说明书。美国地质调查局滑坡信息中心还将免费提供咨询。所有的产品都有英语和西班牙语两种版本形式。

3.6 评估方法

美国旧金山地区的泥石流预报监测工程尽管从 1986 年至 1995 年已经取得了许多预报和预警的成功（例如，Wilson 等，1993），但是大多都琐碎而主观，并非是综合而又客观的案例。任何预警系统都应该经过严格的评审。

美国气象局正在评估他们对不同气象的预报能力，其中包括严重的降水天气、暴洪等。诸如洪水和强降水天气这种二元（是或否）事件预报，都要利用假警报率（FAR）和命中率（POD）进行评估。最后，美国气象局利用发生概率（Glickman，2000），结合假警报率和命中率对强降水天气和泥石流预测方法进行评估。同样的方法也可以应用到泥石流的预报和

评价当中。混合型泥石流一定会超越制定的标准值和范围吗？单一型泥石流就一定能够充分地证明预测的成功吗？暴风雨过后，美国地质调查局将进行野外调查，在预报和预警区域用拍摄和录像等方式进行取证证实。美国国家海洋和大气管理局有关暴雨数据的报告（其中包括：私人观察、新闻报导和损失鉴定等）都将被用来进行泥石流的评价。另外，还有一些更为熟练的监测方法被应用到局部严重的区域。无论预测系统成功或者失败，都不仅仅是简单的预报技术的应用，更重要的是评价预警系统的有效性。这包括是否决定对风险区居民进行及时的监控和警报，或者是否采取撤离行动等。泥石流中的罹难者大多都是没有及时地听取或者忽略了警告。虽然报导了灾难中的伤亡人数，但是，却很少有人会记得由于成功的预报而逃离灾难的人数。预报错误而使预警区内的人员撤离所付出的代价是非常大的，因此有可能会忽略了以后的预警。这些问题很难进行评价，但是预警系统的整体效益要比单一预报手段的评价要直接得多。因此，原型系统必须与紧急事件管理（EM）机构紧密联系起来，以保证预报和预警能够获得最大的效益，紧急事件管理者的主观评价必须成为原型系统评价的一部分。EM 评价可以利用每一个冬季之前，之中和之后的直接调查的预定计划或者是网络上的问卷调查来获得信息。后一个方法已经成功地应用于 NOAA 在太平洋喷气机试验（PACJET）风暴研究计划当中，评价新型雷达观测在 NWS 预报中的有效性。紧急事件管理机构所进行的评价必须成为项目中预先计划的部分，而不是后来附加进去的内容。

4 泥石流预警模型原型系统

现有的气象监测系统

成功的泥石流预警系统必须紧紧依靠准确的降雨实时观测信息和短期预报数据。几年来，加利福尼亚南部的降雨观测设施已经得到了扩

充，许多雨量计和雷达观测站的分布密度得到了一定程度地提高。由地方洪水和水资源控制管区进行维护的降雨监测网（ALERT），是该系统的核心。ALERT 监测网络系统由美国气象局（NWS）加利福尼亚州—内华达州河流预报中心（CNRFC）在 20 世纪 70 年代开发出来的，旨在为地方当局提供一种获得实时降雨信息和河流数据的低成本方法，以便更好地进行洪水评价。在 ALERT 监测网络系统的组成部分中，与泥石流预警密切相关的部分是降雨和河流监测站。大部分 ALERT 的降雨监测站都配置了标准的翻斗式雨量计。当翻斗式雨量计倾倒（0.04 英寸的降雨累积量）时，信号就会被发送到中央 ALERT 控制中心，控制中心会依次将这些信息传送到洪水管理的部门。根据每一个 ALERT 监测站的历史降雨资料，当降雨总量达到能够引发洪水的临界值时，就会发出警报。类似地，当河流水位达到预先确定的水位时，洪水站的传感器就会向地方上的洪水管理部门和 NWS 当局发送信息。实时数据也可以直接传到郡的紧急事件管理部门和道路监察队，使他们能够为可能暴发的洪水做好准备。也可以从接受过培训的观察员、紧急事件管理者、法律执行人员和公众那里获得一些信息，从而获知洪水已经发生的地点或即将到达的地方。许多其它机构都在局部地区运行着很多其它的雨量计监测网络，其中包括 USGS 在加利福尼亚南部一些山区设置的河流观测站。

在加利福尼亚州南部的“NEXRAD”雷达网络中，ALERT 的雨量计和监控雷达的工作情况表明雷达电波可以观测到地面上小于 1km 的地方。由于电波干扰等其它因素的影响，在海拔低的地区明显存在雷达覆盖盲区。加利福尼亚州南部地区有 300 多个 ALERT 雨量计。美国国家气象局的 4 个“NEXRAD”雷达所覆盖的区域包括：圣地亚哥（KNKX），洛杉矶—圣安娜（KSOX），硫磺山脉—文图拉地区

(Sulphur Mountain - Ventura) (KVTX) 和巴斯托(Barstow)(KEYX)地区。运行“NEXRAD”雷达可以用盖度类型扫描周围的地区。为了制作降雨图,用到了折射率和降雨之间的经验关系,这些数据被转换到笛卡尔坐标系的网格中。在加利福尼亚南部地区,雷达扫描盲区是一个很大的问题。在加利福尼亚南部地区,NEXRAD雷达在低海拔(地面上小于 1km)内的扫描覆盖范围是相当有限的。由于地形对电波的阻碍作用,一些设置在山顶上的 NEXRAD 雷达位置的海拔高度较大(海平面上 2~3km),并且雷达用到的最小扫描仰角是 0.5 度,这些因素共同导致了数据空白区的出现。由于以上种种原因,很少能观测到洛杉矶盆地内一些海拔位置低但又容易出现强烈的局部暴雨的地区,甚至有时雷达会完全错过这些地区。其它一些因素,比如低海拔处的逆温现象,也降低了雷达探测低海拔处降雨条件的能力。在整个加利福尼亚盆地内,大面积的低海拔区域都处于 NEXRAD 雷达的监测范围之外。这些雷达扫描盲区会产生许多问题,因为很多推动地形隆起和水气凝结的冬季的暴雨和风都是在低空产生的。折射率随垂直梯度的变化也增加了雷达对地面降雨评价的不确定性。最近美国的一些学术研究(美国国家研究委员会,2005)详细探讨了这些问题,特别是针对洛杉矶地区,解决办法之一就是建议补充对数据空白区的雷达监测。

原型预警系统的组成

泥石流预警模型原型系统(PWS)理论上应当由独立的预测、监控警报系统构成,这些产品在时间和空间上都具有较强的针对性,能够为紧急事件的管理者、规划者和响应者提供非常有用的指导。对 USGS 和 NWS 的职员进行培训,让他们认识泥石流和灾害评价的技术以及降雨预报和测量中的重要问题是非常关键的。给系统用户和公众发布一些信息产品是很

有必要的。随着校正方法的不断提高,预警系统的有效性也会逐渐地被提高。

弗吉尼亚麦迪逊县的泥石流(摘要)

在弗吉尼亚中心的蓝色山脊山麓丘陵地带,沿着弯曲河流散布着许多加工农场。最初觉得这一地区非常平静,但是进一步视察就会发现在山底有大量的卵石,这是过去剧烈地质事件的标志——灾难性巨大滑坡和泥石流塑造的景观。1995 年 6 月 27 日,在弗吉尼亚麦迪逊县的蓝色山脊的山麓丘陵地带,强风暴造成 16 小时的大雨,降雨量为 30 英寸,在陡峭的斜坡诱发了许多的泥石流,并迅速向山沟移动。小泥石流的加入形成了更大规模的泥石流,当进入山谷低处时,泥土、卵石和其它的碎屑淹没了房子和农场。一条泥石流移动了近 2 英里,据目击者估计,泥石流以接近每小时 20 英里的速度移动。因为风暴的影响,桥梁、道路、电力和电话线都被中断,隔绝了乡村居民区。直到几天后进行航空测量,才确定了损失程度,将该县确认为联邦灾区。科学家们已经记录了 1844 年到 1985 年期间在阿巴拉契亚山脉部分地区,绝大部分在蓝色山脊地区的 51 条泥石流事件。对泥石流堆积物中保留的植物进行放射性测年研究,结果表明过去的 34000 年,这些过程重复发生,每一河流盆地的重复发生间隔在 2000~4000 年左右(Eaton 等 2003)。

纽约快速泥石流(摘要)

1993 年 4 月 27 日正午,在 Syracuse 南部大约 12 英里的纽约奥内达加县 LaFayette 的 Bare 山脚下,发生了一大型滑坡。滑坡迅速流向 Tully 山谷的中部,影响土地面积约为 50 英亩,毁坏了三所房屋。幸运的是,当时许多居民都不在家中,因此没有造成人员伤亡。据纽约州地质调查局报导,这是 75 年以来该州发生的规模最大的滑坡。然而,纽约州的一些地方,包括 Finger 湖地区、Hudson 和 Mohawk 山谷,以及美国东北部的一些地区,例如波士顿和太平洋西北的 Puget Sound 地区,都覆盖着相似的冰川粘土,最初沉积在湖泊或海洋环境。这些

粘土具有不稳定的内部结构特征，即使地形非常平缓，也极易发生突然滑坡和快速的碎屑流。因此，这种滑坡类型已成为美国地质调查局和纽约州的合作研究课题。奥内达加县已经开始查明滑坡灾害区，并据此进行相应的分区。

水文地质环境地质调查中心葛秀珍 供稿