

滑坡监测预警国内外研究现状及评述

唐亚明^{1,2)}, 张茂省²⁾, 薛强²⁾, 毕俊攀²⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京, 100083; 2) 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054

内容提要: 本文从降雨临界值研究、监测技术方法、区域性监测预警系统三个方面对滑坡监测预警的国内外研究现状进行了回顾和总结。首先归纳了国内外 28 个国家或地区的滑坡降雨临界值及统计方法, 三个模型——日降雨量模型、前期降雨量模型和前期土体含水状态模型, 基本概括了当前降雨诱发滑坡临界值的确定方法; 但由于降雨入渗触发滑坡的复杂性, 不同机理的滑坡“需要”不同的降雨临界值; 目前的研究趋势是对雨量大强降雨时—土体渗流场动态变化—土体抗剪强度变化的耦合关系进行研究。按监测对象的不同, 滑坡监测可分为四大类, 即位移监测、物理场监测、地下水监测和外部诱发因素监测; 按监测手段的不同, 则可分为人工监测、简易监测、专业监测三大类; 目前国内外在滑坡监测技术、方法、手段上并无太大差距, 专业仪器已成为常规设备, 只是由于价格因素得不到普及; 一些新技术如 InSAR、三维激光扫描等能很快应用到滑坡监测领域; 监测数据的采集和传输也都实现了自动化和远程化; 监测和预警系统有向 Web—GIS 发展的趋势。利用一个地区的滑坡易发区划或危险区划, 结合降雨临界值, 可以设定不同的预警级别, 在区内布设一定数量的雨量站, 监测雨量加上预报雨量, 就可进行滑坡预警预报, 国内外的区域性降雨型滑坡监测预警大体都是这个思路和做法, 该方法在对公众进行警示方面起到了良好效果, 但由于预警的范围太大, 在具体的单点防治上, 难以做到有效。我国在近 10 年开展了大量的监测预警工作, 并取得了丰硕的成果, 但根据统计数据, 其成功预警率却并不理想, 这一方面表现在成功预警实例中专业预警所占比例过低, 另一方面同时表现在发生的大量的地质灾害在已有的预警点之外。制约目前工作有效性的主要问题是滑坡隐患点的排查和识别问题, 因为只有识别出了隐患点才能进行下一步的监测和预警, 它是一切工作的基础。而解决这一问题的重要途径是分析区域上的滑坡发育规律, 找到有效的隐患点识别技术方法, 以及引进风险管理的概念, 进行监测资源的合理分配和有效预警。

关键词: 滑坡; 监测预警; 研究现状; 评述

监测预警作为地质灾害风险减缓的重要措施之一, 正越来越受到人们的重视(李长江等, 2011b)。从本世纪初开始, 区域性的滑坡监测预警工作在我国大陆地区逐渐开展, 2003 年 4 月国土资源部和中国气象局签订了《关于联合开展地质灾害气象预警预报工作协议》, 随后各省、市、县也相继开展此项工作, 截止 2010 年 10 月全国已有 30 个省(自治区、直辖市)、223 个市(地、州)、1035 个县(市、区)开展了区域性的地质灾害气象预警预报工作(范宏喜, 2010)。各类单体滑坡专业监测也相继开展起来, 较早的如三峡库区(2001 年)、四川雅安(2001 年), 巫山县(2003 年)等地的滑坡监测, 2007 年左右云

南哀牢山、陕西延安、福建闽东南、四川华蓥山等地相继开展了专业性的地质灾害监测预警工作。如今, 地质灾害监测预警工作在我国已发展了近 10 年, 国内对这一工作亦积累了一定经验, 当前, 对这一领域的国内外研究现状进行一下总结, 对今后的发展趋势做一分析是十分必要的。本文即从降雨临界值研究、监测技术方法、区域性监测预警系统三个方面, 对国内外在这一领域的研究现状和今后的发展趋势做一综述, 其目的在于总结现状, 找到制约地质灾害监测预警的瓶颈问题, 为指导今后的实际工作提供经验和借鉴。文中主要针对的是地质灾害当中的滑坡灾害。

注: 本文为陕西省自然科学基金面上项目“延安宝塔区地质灾害风险管理研究”(编号 2010JM5010); 中国地质调查局项目“延安宝塔区地质灾害监测预警示范”(编号 1212010740907); 中国地质调查局计划项目“西北黄土高原区地质灾害详细调查”(编号 1212010640330)的成果。

收稿日期: 2011-10-03; 改回日期: 2011-12-12; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 唐亚明, 女, 1973 年生。博士研究生, 高级工程师。主要从事地质灾害调查和研究工作。电话: 029-87821775; 通讯地址: 710054, 西安市友谊东路 438 号; Email: tangyaming73@sohu.com。

1 降雨临界值的研究

滑坡的最主要诱发因素是地震和降雨(徐则民等,2007;许领等,2010;许冲等,2011),地震的准确预报现阶段困难较大,因而降雨是滑坡监测预警的重要工作对象,多年来人们一直试图找到适用于某一地区的降雨量临界值(阈值、门槛值、起始值)以便对不同危险级别的滑坡进行监测和预警。

国际上对这一问题的研究主要集中在上世纪八、九十年代,Glade(1998)通过对新西兰惠林顿(Wellington)地区的滑坡和降雨资料进行研究,建立了确定降雨临界值的三个模型—日降雨量模型、前期降雨量模型和前期土体含水状态模型,基本概括了当前降雨诱发滑坡临界值的确定方法。Caine(1980)对全球不同地区降雨诱发滑坡关系的研究,Band等(1984)对香港地区临界值的研究,Cannon和Ellen(1985)、Wieczorek(1987)、Mark和Newman(1989)根据1982年旧金山海湾滑坡和降雨数据建立的滑坡与降雨强度和持续时间临界关系曲线,Guidicini G.(1997)对巴西九个地区滑坡和降雨之间的统计关系的研究,Ayalew(1999)对埃塞俄比亚64个滑坡和降雨量的分析研究,以及Grozier和Eyles(1980)对前期土体含水量状态和雨量过剩指数的研究等,都可以归结为以上三类临界值模型。

国内对降雨诱发泥石流临界值的研究较早,如谭炳炎(1992、1995)、蒋忠信(1994)、朱平一(1995)等的研究。滑坡降雨临界值的研究主要始于2000年以后,如谢剑明等(2003)对浙江省台风区和非台风区的滑坡降雨临界值做了研究;吴树仁等(2004)以三峡库区为例对滑坡预警判据做了研究;李铁峰等(2006)结合前期有效雨量和Logistic模型对降雨临界值的确定做了研究,并以三峡地区做了方法验证;李媛(2006)、李昂(2007)采用不同的统计方法对四川雅安雨城区降雨临界值做了研究;此外,浙江、云南、陕西、山东、宁夏等省,陇南、兰州、青岛等地都建立了自己的降雨诱发滑坡临界值,并进行了实际的预警预报。国内的降雨诱发滑坡临界值模型也都可以归结为上述的日降雨量(或降雨强度)和前期降雨量模型,采用小时雨强、当日降雨量、前几日累计降雨量(或前期有效降雨量)、前期降雨量占年平均雨量的比值(%)等表达式对临界降雨量进行刻画,其基本方法是采用统计技术对历史滑坡和降雨资料进行分析,取其统计意义上的临界点作为降雨诱发滑坡的临界值。

表1查阅了国内外公开发表的相关文献,将国内外一些地区滑坡降雨临界值作一归纳,并列出了所用的统计方法及文献。

2 滑坡监测技术方法现状

滑坡的监测方法前人已做过一定总结(石菊松等,2007;王念秦等,2008);石菊松等(2008)还专门总结了遥感在滑坡灾害研究中的应用进展。本文拟按监测对象和监测手段的不同进行一个系统的分类和总结。

2.1 按监测对象划分

按监测对象的不同,滑坡监测可分为四大类:即位移监测、物理场监测、地下水监测和外部诱发因素监测。这四大类监测又可分为若干小类,每类监测采取的方法手段不同,使用的仪器不同,获取的参数也不同。

2.1.1 位移监测

(1)地面绝对位移监测。是最基本的常规监测方法,应用大地测量法来测得崩滑体测点在不同时刻的三维坐标,从而得出测点的位移量、位移方向与位移速率。主要使用经纬仪、水准仪、红外测距仪、激光仪、全站仪和高精度GPS等(季伟峰,2005)。利用多期遥感数据或DEM数据也可对滑坡、泥石流等灾害体进行监测(薛强等,2011)。还可利用合成孔径干涉雷达InSAR测量技术进行大面积的滑坡监测。2006年至今中国地质调查局与加拿大地质调查局合作,在四川西部的甲居寨滑坡进行了InSAR和GPS的联合监测,GPS提供连续的水平位移监测,InSAR提供每月一次的垂直位移监测,取得了良好的监测效果,通过实践还证明InSAR技术在川西高陡山区判定新滑坡时具备良好的功效(Yin Yueping et al., 2010)。视频监控是近期发展的一种滑坡监测技术,可以通过定点照相或录像,监测滑坡、崩塌、泥石流的整体或局部变化情况,其原理是通过数字图像处理方法识别标志点,从而实现视频数据中灾害体的自动识别,并判断规模大小。

(2)地面相对位移监测。是量测崩滑体变形部位点与点之间相对位移变化的一种监测方法。主要对裂缝等重点部位的张开、闭合、下沉、抬升、错动等进行监测,是位移监测的重要内容之一。目前常用的监测仪器有振弦位移计、电阻式位移计、裂缝计、变位计、收敛计、大量程位移计等。使用BOTDR分布式光纤传感技术也可进行监测。近来有人使用三维激光扫描仪进行滑坡体表面监测,与GPS、全站仪

表 1 国内外一些地区的滑坡降雨临界值
Table 1 The rainfall threshold of some area in the world

序号	研究地区	降雨临界值及表达式	研究方法/统计方法	文献
1	日本	$I = 2.18D^{-0.26}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	样本统计法, 统计 2006 ~ 2008 年日本发生的 1174 起滑坡	Hitoshi Saito et al., 2010
2	意大利	$I = 7.74D^{-0.64}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	贝叶斯统计法和频率分析法	Brunetti et al., 2010
3	尼泊尔喜马拉雅山地区	$I = 73.90D^{-0.79}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	样本统计法, 统计喜马拉雅山地区 193 处与降雨相关的滑坡 I 与 D 的关系	Dahal et al., 2008
4	中欧、南欧地区	$I = 9.40D^{-0.56}$; $I = 15.56D^{-0.70}$; $I = 7.56D^{-0.48}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	贝叶斯统计法	Guzzetti et al., 2007
5	美国华盛顿西雅图地区	$I = 82.73D^{-1.13}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	样本统计分析	Godt et al., 2006
6	意大利西北部	$I = 19D^{-0.50}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	数理统计、样本分析	Pietro, 2004
7	委内瑞拉	250mm/(24h)。	样本统计分析	Wieczorek et al, 2001
8	新西兰北岛地区	$r_{a0} = r_1 + 2^d r_2 + 3^d r_3 + \dots + n^d r_n$ 其中 r_{a0} 表示滑坡发生前期雨量 (mm); d 为一常数, 指表层水的流出量; r_n 表示滑坡发生前第 n 天的降雨量 (mm)。	前期降雨量模型	Glade, et al., 2000
9	西班牙略夫雷加特河流域	两种模式: 若无前期降雨, 则临界值为 190mm; 若前期为中等降雨强度, 则临界值为 200mm。	采用雨量计分析降雨记录与滑坡发生的关系	Jordi et al., 1999
10	埃塞俄比亚	引入累积降雨量与平均降雨量的比值因子 L_t , 若 L_t 处于 15% ~ 30%, 则滑坡变形迹象明显, 若 L_t 大于 30%, 则发生滑坡。	样本统计分析	Ayalew, 1999
11	波多黎各	$I = 91.46D^{-0.82}$, I 为降雨强度 (mm/h), D 为降雨持续时间 (h)。	样本统计分析	Larsen et al., 1993
12	美国旧金山海湾地区	Caine 关系式: I_0 为 4.49mm/h, Q_c 为 13.65mm; Cannon-Ellen 关系式: I_0 为 6.86mm/h, Q_c 为 38.1mm; Wieczorek 关系式: I_0 为 1.52mm/h, Q_c 为 9.00mm; I_0 为整个降雨过程的平均排水速率, Q_c 为含水量临界值。	土体力学强度与降雨两者耦合分析	Keefer et al., 1987
13	巴西	使用“最终系数” $C_f = C_c + C_e$ 来预警, 其中 C_c 为当年所有前期降雨量的累加值与年平均降雨量的比值; C_e 为本次降雨期间的雨量与年平均降雨量比值。巴西 Caragua—tatuba 地区 C_f 临界值取为 1.56。	样本分析法, 通过分析滑坡记录与降雨资料关系建立统计关系	Guidicini et al., 1977
14	浙江省	使用阈值线 $P_0 = 140.27 - 0.67P_{EA}$ 判断, 降雨在该阈值线以上时将会发生滑坡, 式中 P_0 为日降雨, P_{EA} 为前期有效降雨量。	建立累积滑坡频度—降雨量分形关系计算前期有效降雨量	李长江等, 2011a
15	浙江省	非台风区: 当日降雨量阈值高易发区为 60 mm, 中易发区为 130 mm; 有效降雨量阈值高易发区为 150 mm, 中易发区为 225mm。 台风区: 当日降雨量阈值高易发区为 90 mm, 中易发区为 150 mm; 有效降雨量阈值高易发区为 125 mm, 中易发区为 275mm。	相关性分析, 幂指数有效降雨量模型	谢剑明等, 2003
16	陕北黄土高原地区	降雨诱发黄土崩滑可概化为三种模式: 一是缓慢下渗诱发型, 二是入渗阻滞诱发型, 三是入渗贯通诱发型, 第一种模式的滑坡发生概率可由 Logistic 模型判断, $p = \frac{\exp(-3.169 + 0.105R_1 + 0.119R_2 + 0.038R_3)}{1 + \exp(-3.169 + 0.105R_1 + 0.119R_2 + 0.038R_3)}$ 第二种模式的临界值为 10.1 ~ 20.0 mm, 第三种模式的最小临界值是 0.1 ~ 10.0mm, 最大临界值是 50.1 ~ 60.0mm。	二项 Logistic 回归分析法, 相关性分析法	Tang Yaming et al., 2010
17	陕西黄土高原	诱发滑坡的降雨启动值、加速值、临灾值分别为 25mm、35mm、65mm, 诱发崩塌降雨启动值、加速值、临灾值分别为 15mm、30mm、50mm。	样本统计分析和日综合雨量方法	李明等, 2010
18	三峡地区	$p = \frac{\exp(-3.847 + 0.04r + 0.043r_a)}{1 + \exp(-3.847 + 0.04r + 0.043r_a)}$ p 为滑坡发生概率, r 为当日降雨量, r_a 为前期有效降雨量。	Logistic 回归模型法, 前期有效雨量法	李铁锋等, 2006

序号	研究地区	降雨临界值及表达式	研究方法/统计方法	文献
19	三峡库区	临界降雨量变化范围大致在 100~200mm/d, 其中, 降雨量在 100mm/d 可能开始诱发滑坡, 而在 200mm/d 则必然诱发大量滑坡。	样本统计分析	吴树仁等, 2004
20	闽西北	日降雨量 > 200mm 及过程降雨量 < 250mm 时, 地质灾害的群发性特征表现突出。	对一次性强降雨天气后灾点稳定系数变化关系进行相关统计	黄光明, 2010
21	四川省沐川县	单体滑坡启动参考值: 降雨量 $Q \geq 40\text{mm}$ (2005 年类比法预测值), $Q \geq 30\text{mm}$ (2007 年实测值); 群体滑坡启动参考值: $Q \geq 100\text{mm}$ (2005 年类比法预测值), $Q \geq 70\text{mm}$ (2007 年实测值)。	概率统计关系	乔建平等, 2009
22	广东德庆县	前 5d 总降雨量 > 60mm。	灾点降雨量值统计	王文波等, 2009
23	深圳市	有效降雨量 > 220mm。	应用偏相关分析方法	高华喜等, 2007
24	四川雅安	$R = R_L + 0.62R_{13} + 84.4$, 当 $R \geq$ 时, 滑坡有可能发生; 当 $R \leq$ 时, 滑坡基本不会发生。式中 R_L —滑坡发生当日降雨量; R_{13} —滑坡发生前 3 日累计降雨量。	利用逻辑回归模型	李媛等, 2006
25	江西省	8 个滑坡监测点, 其中某点预警值为 $\geq 253\text{mm}/24\text{h}$; 某点为 $\geq 67\text{mm}/24\text{h}$; 其余各点预警值为 $\geq 100\text{mm}/24\text{h}$ 。	降水与滑坡稳定性试验研究	魏丽等, 2006
26	陕南地区	暴雨强度达到 50mm 或日综合雨量达到 75mm 滑坡启动。	样本统计关系曲线	王雁林, 2005
27	湖北省西部山地	划分为 3 个区域, 竹山、竹溪、郧西、南漳等 12 个县市降雨临界值为 54mm; 秭归、兴山、巴东、宜昌等 9 个县市降雨临界值为 35mm; 恩施、建始、鹤峰等 8 个县市降雨临界值为 39mm。	样本统计法	王仁乔等, 2005
28	重庆市	当日降雨量 > 25mm,	样本统计	马力等, 2002

等数据相结合, 能达到很好的精度。特别是在滑坡急剧变形阶段, 过大的变形会破坏各种监测设施, 在这种情况下采用三维激光扫描测量来快速建立滑坡监测系统, 可以满足临滑预报要求(徐进军等, 2010)。

(3) 深部位移监测。方法是先在滑坡等变形体上钻孔并穿过滑带以下至稳定段, 定向下入专用测斜管, 管孔间环状间隙用水泥砂浆(适于岩体钻孔)或砂土石(适于松散堆积体钻孔)回填固结测斜管, 下入钻孔倾斜仪, 以孔底为零位移点, 向上按一定间隔测量钻孔内各深度点相对于孔底的位移量。常用的监测仪器有钻孔倾斜仪、钻孔多点位移计等(季伟峰, 2005)。

2.1.2 物理场监测

(1) 应力监测。因为在地质体变形的过程中必定伴随着地质体内部应力的变化和调整, 所以监测应力的变化是十分必要的。常用的仪器有锚杆应力计、锚索应力计、振弦式土压力计等。

(2) 应变监测。埋设于钻孔、平硐、竖井内, 监测滑坡、崩塌体内不同深度的应变情况。可采用埋入式混凝土应变计, 是一种钢弦式传感器, 或管式应变计。

(3) 声发射监测。是对声信号的监测。如泥石流次声报警器就是通过捕捉泥石流源地的次声信号

而实现预警的, 次声信号以空气为介质传播, 速度约每秒 344m, 其信号极小衰减并可通过极小缝隙传播。据观测, 其警报提前量至少 10 min 以上, 最多可达 0.5 h 以上(章书成等, 2010)。

2.1.3 地下水监测

地下水是对滑坡的稳定状态起直接作用的最主要因素, 所以对地下水位、孔隙水压力、土体含水量等进行监测十分重要。常用的监测仪器有水位计、渗压计、孔隙水压力计、TDR 土壤水分仪等。

2.1.4 外部触发因素监测

滑坡的触发因素一般有地震、降雨、冻融、人类活动这几类。

(1) 地震监测。地震一般由专业台网监测。当地质灾害位于地震高发区时, 应经常及时收集附近地震台站资料, 评价地震作用对区内崩滑体稳定性的影响。

(2) 降雨量监测。降雨是触发滑坡的重要因素, 因此雨量监测成为滑坡监测的重要组成部分, 已成为区域性滑坡预报预警的基础和依据。现阶段一般采用遥测自动雨量计进行监测, 技术已较成熟。

(3) 冻融监测。在高纬度地区, 冻融作用也是触发滑坡的因素之一, 如陕北很多黄土滑坡和崩塌就发生在春季冻融之际。对于冻融触发的地质灾害, 目前还没有好的专业性监测仪器, 可通过地温计

结合孔隙水压力计监测,研究地温变化与冻结滞水之间的关系,目前中国地调局西安地质调查中心对甘肃黑方台滑坡正在进行这项工作。

(4) 人类活动监测。人类活动如掘洞采矿、削坡取土、爆破采石、坡顶加载、斩坡建窑、灌溉等往往诱发地质灾害,应监测人类活动的范围、强度、速度等。

2.2 按监测手段划分

以上是从监测对象划分的监测类型,如果从监测手段划分,则可分为人工监测、简易监测、专业监测三大类。

(1) 人工监测:纯粹使用人力进行监测。定期对崩滑体出现的宏观变形迹象,如裂缝发生及发展、地面沉降、塌陷、坍塌、膨胀、隆起、建筑物变形等进行观察,对有关的异常现象,如地声、地下水异常等进行调查记录。该法直观性强、适应性强、可信程度高,也是群测群防的主要内容。

(2) 简易监测:简易监测除了人力外还辅助使用一定的简易仪器,主要用于群防群测。这类监测经历了一个发展阶段,早期的,如在建筑物开裂部位用贴条法、埋钉法、上漆法等,在滑坡裂缝处用拉线法、埋桩法等,测量工具以卷尺、钢直尺和游标卡尺为主。从2006年起,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心研制了一系列简易监测仪器,如雨量预警器、数据传输预警雨量仪、滑坡预警伸缩仪、裂缝报警器、四路位移预警仪、激光多点位移循测预警仪、泥石流地声仪、泥石流远程监视预警仪等,在全国各地推广使用,达到了较好的效果。

(3) 专业监测:专业监测主要使用专门的仪器设备进行,一般能达到远程自动遥测及采集数据的功能。国外的滑坡专业监测是于上个世纪60年代逐步发展起来的,在此介绍一个笔者考察过的专业监测站——挪威 Åknes 岩质滑坡监测预警系统。监测站位于挪威西部的 Storfjorden 海岬地区,Åknes 山体的不稳定岩块体积达 $30 \times 10^6 \sim 40 \times 10^6 \text{ m}^3$,其风险在于巨大的岩质滑坡会在海岬地区引起涌浪,从而威胁两岸居民的安全。该滑坡平均位移速率为 $3 \sim 10 \text{ cm/a}$,在极端气候下,如春季融雪和暴雨时,速率可上升10倍,即可达到 1 mm/day 。挪威地调局在此安装了裂缝位移计、激光角反射器、高精度GPS、全站仪、地声仪、气象站、钻孔倾斜仪、孔隙水压力计等多套监测仪器,因其陡峭的地形和恶劣的环境,人只能通过直升机到达监测站,所以其电力保障和通讯系统也是非常可靠的。基于历史数据,其预警级

别分为绿色、蓝色、黄色、橙色、红色5级,临界变形速率分为稳定阶段 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm/day}$ 、极端气候 $0.5 \sim 1 \text{ mm/day}$ 、速度增长阶段 2 mm/day 、加速阶段 5 mm/day ,滑坡发生阶段 $10 \sim 20 \text{ mm/day}$ (Blikra, 2008)。

中国地质调查局也在四川巫山县建立了具有国际先进水平的滑坡监测示范站,从2003年开始运行,目前共建立1个中心站和向家沟、玉皇阁等5个滑坡现场监测站,选用国际上先进的BOTDR光纤技术监测治理后滑坡的微变形情况,使用GPS监测地表位移,使用固定式钻孔倾斜仪和TDR技术监测深部位移,使用孔隙水压力计监测滑坡的孔隙水压力和饱水时的水位、水温,同时兼顾地温、降水量、及库水位的监测,所有数据通过数据采集仪自动采集,使用GPRS远程传输,并基于Web-GIS实现了信息发布和预警功能(Yin Yueping et al., 2010)。此外,从2001年起我国在三峡库区、四川雅安等地开始建设专业滑坡监测站;2007年前后,云南哀牢山、陕西延安、福建闽东南、四川华蓥山等地也开始了专业的地质灾害监测预警示范建设。

3 区域性监测预警系统发展现状

美国(Keefner et al., 1987)、日本(Fukuzono, 1985)、委内瑞拉(Wieczorek, 2001)、波多黎各(Larsen et al., 1993)、意大利(Pietro, 2004)等国家曾经或正在进行面向公众的区域性降雨型滑坡实时预报。其中,美国加利福尼亚旧金山湾地区的预警系统最具代表性。1985年,美国地质调查局(USGS)和美国国家气象服务中心(USNWS)联合建立了一套滑坡实时预报系统(Wieczorek, 1990),该系统是基于1982年1月3~5日在旧金山海湾地区发生的一次特大暴雨所引起的滑坡灾害数据建立的。于1986年2月12~21日在该地区的另一次特大暴雨灾害中用于滑坡预报,并得到检验。系统考虑了临界降雨强度和持续时间,并且考虑地质条件、降雨的空间分布、以及地形条件等。在整个海湾地区共设置了45个自动雨量站,当雨量每增加1mm就通过自动方式将数据传送到美国地质调查局的接收中心。同时,为监测降雨期间地下水的变化,他们还设置了若干个孔隙水压力计,以观测斜坡中地下水压力的变化。当降雨量和降雨强度将要超过临界值时提前进行预报,以减少灾害损失和人员伤亡。概括起来,该系统包括了一个滑坡易发区划图,一个降雨量与滑坡发生关系的经验模型,实时的雨量监

测数据,以及国家气象服务中心的雨量预报。

香港是世界上最早研究降雨和滑坡关系并实施预警预报的地区之一。其最早始于1972年6月18日发生的Sau Mau Ping和Po Shan滑坡的降雨临界值研究。后来,Brand等人(1984)在详细分析了1963—1983年的滑坡数目与1天至30天的累积降雨关系之后,认为香港地区的日均滑坡数量和滑坡伤亡人数与前期降雨量之间基本无关系可循,但与小时降雨量关系密切。通过对香港1982年的资料分析,得出当最大小时降雨量超过40mm时,将发生较大滑坡的结论。由于通过短历时强降雨很难提前预测滑坡,而累计降雨量在到达临界值前几个小时就可以估算到,因此采用了24h降雨量预测滑坡的方法。经分析,香港地区24h降雨量超过100mm时将发生滑坡。香港政府于1984年启动了滑坡预警系统,该系统由86个自动雨量计构成,最后确定小时降雨量75mm和24h日降雨量175mm为滑坡预报的临界降雨量。预警系统启动以来,平均每年发布3次滑坡预警。

我国大陆地区也在逐步开展区域性地质灾害监测预警,四川雅安(刘传正等,2004)借鉴美国旧金山湾和香港地区的经验,初步建成了地质灾害监测预警试验区,由20台遥测雨量计构成降雨观测网;结合历史降雨资料,初步研究了试验区的年、日、小时和十分钟最大降雨特征;利用2003年8月23~25日的过程降雨观测资料,对试验区在该降雨过程中发生的地质灾害事件进行了时空预警反演模拟研究,计算出的地质灾害“危险度”分布比较符合实际,“危险度”可以作为预警指数使用。浙江省也建立了基于Web—GIS的地质灾害实时预警预报系统(殷坤龙等,2003),该系统包括灾害数据库和信息管理库,灾害空间预测和时间预警预报系统,以及减灾防灾技术支持系统,系统实现了与网络连接的实时预警预报,并根据气象条件对浙江省可能遭受的突发性地质灾害进行概率预报。此外,三峡库区也开展了区域性监测预警工作(刘传正,2004),以齐岳山为界,将三峡库区划分为A区和B区,分别得到两区的不同预警判据,据此,当接到三峡地区次日的降雨预报数据后,就可以对该区发生地质灾害的可能性做出预警预报,提请有关机构和公民注意防范。

4 现状评述

(1)人们都认识到降雨是触发滑坡的主要因素

之一,并且在降雨临界值研究方面做了大量工作,试图找寻降雨量与滑坡发生之间的必然联系,并藉此进行预报预警。这类工作大多是基于各类统计学方法开展的,因此所得结果仅能反映在某种经验水平上某一地区在某个临界值下会有滑坡发生,至于滑坡的数量、空间位置、以及类型,则无法预测,这也是由于降雨入渗触发滑坡的复杂性所决定的。实际情况是,降雨临界值与被触发的滑坡的机理紧密相关,不同机理的滑坡“需要”不同的降雨临界值。目前的研究趋势是对雨量雨强雨时—土体渗流场动态变化—土体抗剪强度变化的耦合关系进行研究,以从机理方面确定降雨临界值。

(2)目前国内外在滑坡监测的技术、方法、手段上并无太大差距。除了传统的贴片法、埋桩法以外,GPS、钻孔倾斜仪、孔隙水压力计、自动化雨量站这些专业仪器已成为滑坡监测的常规设备,只是由于价格因素得不到广泛普及。近来,一些新技术能够很快应用到滑坡监测领域,如InSAR、BOTDR、三维激光扫描等。监测数据的采集和传输也都实现了自动化、远程化。监测系统和预警系统有向Web—GIS发展的趋势。

(3)利用一个地区的滑坡易发区划或危险区划,结合降雨临界值,可以设定不同的预警级别,在区域内布设一定数量的雨量站,监测雨量加上预报雨量,就可进行滑坡预警预报。无论是国外还是国内的区域性降雨型滑坡监测预警大体都是这个思路和做法。该方法在对公众进行警示方面(尤其当有极端气候条件出现时)起到了良好效果,但由于预警的范围太大,在具体的单点防治上,难以有针对性地采取临灾措施。

5 存在问题及解决途径

我国在近10年开展了大量的专业性的监测预警工作,并取得了丰硕的成果,但综观历史及现状,其成功预警率却并不理想。这一方面表现在成功预警实例中专业预警所占比例过低:据2004年全国715个地质灾害成功预报避灾实例统计分析,居民自我判定的占成功避灾总数的3.5%,群测群防的占86.7%,专业性临界雨量预报的仅占总数的9.8%(刘传正等,2006);另一方面表现在大量的地质灾害(约三分之一)在已有的预警点之外(徐绍史,2010),即失败的预警率很高。造成上述结果的原因主要有以下几个:第一,监测预警模型的预警对象是一个较大的区域范围,而这一范围内的地质条件

是有差异的,具体到每个边坡的坡度、坡型、岩土体结构、地下水条件等等都是不同的,企图用一个临界值去预警该范围内的所有滑坡是不现实的。第二,因为预警的是一个区域范围,预警区范围以外的所有边坡都排除在了预警目标之外,而实际上低易发区内也会有滑坡发生,这样就会遗漏一些潜在的灾害点。第三,许多事先确定的隐患点在一些极端气候条件下并未发生滑坡。第四,与之相反的,很多潜在的隐患点又未被调查人员识别出来。

由此看来,制约现有滑坡监测预警有效性的瓶颈问题主要是如何在工作区内(通常是几百至几千 km^2 的面积)进行滑坡隐患点的排查和识别,因为只有识别出了隐患点才能进行下一步的监测和预警,它是一切工作的基础。隐患点的“漏查”导致了本该监测的而没有监测,隐患点的“多查”又导致了大量监测资源的浪费;而如果能够较为准确地识别隐患点,将其纳入监测体系之内,则无论是否进行专业性监测,都能进行一定的预防,使监测预警工作有的放矢。因此,如何在广大的面积区域上识别出隐患点,做到“不漏查、不多查”是提高监测预警成功率的关键。分析区域上的滑坡发育规律,找到有效的隐患点识别技术方法,是解决这一问题的重要途径,也是未来的发展趋势。

另外一面,在地质灾害监测预警中引入风险管理的概念也是一个有效的解决途径。对滑坡进行面积性的普查工作,依照滑坡的发育密度和经济社会的重要程度,对不同的区域选定不同普查比例尺的工作精度。对调查的各单体滑坡评价其危险性和承灾体的易损性,并评价其风险大小。对各个单体滑坡的风险按大小排序,以确定对各滑坡实施专业监测、简易监测、或人工巡查等不同的监测方案以及不同的监测间隔时间,做到合理分配监测资源,进行有效的监测和预警。

参 考 文 献 / References

- 范宏喜. 2010. 我国地灾气象预警预报成效显著[N/OL]. 中国国土资源报, 2010-10-15. [2011-10-01] http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201010/t20101015_782222.htm.
- 高华喜, 殷坤龙. 2007. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨. 岩土力学, 28(5): 1055 ~ 1060.
- 黄光明. 2010. 降雨量与闽西北地区地质灾害关系初探. 福建地质, 29(1): 115 ~ 118.
- 季伟峰. 2005. 地质灾害防治工程中监测新技术的开发应用与展望. 见: 中国地质调查局编, 地质灾害调查与监测技术方法论文集. 北京: 中国大地出版社, 53 ~ 57.
- 蒋忠信. 1994. 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案. 自然灾害学报, 3(1): 75 ~ 83.
- 李铁锋, 丛威青. 2006. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法. 中国地质灾害与防治学报, 17(1): 33 ~ 35.
- 李媛, 杨旭东. 2006. 降雨诱发区域性滑坡预报预警方法研究. 水文地质工程地质, 02: 101 ~ 104.
- 李昂, 侯圣山, 周平根. 2007. 四川雅安市雨城区降雨诱发滑坡研究. 中国地质灾害与防治学报, 18(3): 15 ~ 17.
- 李长江, 麻土华, 孙乐玲. 2011a. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法. 山地学报, 29(1): 81 ~ 86.
- 李长江, 麻土华. 2011b. 反思舟曲灾难事件: 如何最大限度减少人员伤亡? 地质论评, 57(5): 687 ~ 699.
- 李明, 高维英, 杜继稳. 2010. 陕西黄土高原诱发地质灾害降雨临界值研究. 陕西气象, 5: 1 ~ 5.
- 刘传正, 李云贵, 温铭生. 2004. 四川雅安地质灾害时空预警试验区初步研究. 水文地质与工程地质, 04: 20 ~ 30.
- 刘传正, 温铭生, 唐灿. 2004. 中国地质灾害气象预警初步研究. 地质通报, 23(4): 303 ~ 309.
- 刘传正, 张明霞, 孟晖. 2006. 论地质灾害群测群防体系. 防灾减灾工程学报, 26(2): 175 ~ 179.
- 马力, 曾祥平, 向波. 2002. 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析. 山地学报, 20(2): 246 ~ 249.
- 乔建平, 杨宗估, 田宏岭. 2009. 降雨滑坡预警的概率分析方法. 工程地质学报, 17(3): 343 ~ 348.
- 石菊松, 石玲, 吴树仁. 2007. 滑坡风险评估的难点和进展. 地质论评, 53(6): 797 ~ 806.
- 石菊松, 吴树仁, 石玲. 2008. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展. 地质论评, 54(4): 505 ~ 514.
- 谭炳炎. 1992. 暴雨泥石流预报的研究. 铁道学报, 14(9): 92 ~ 100.
- 谭炳炎, 段爱英. 1995. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究. 自然灾害学报, 4(2): 43 ~ 52.
- 王文波, 温坚培, 彭瑞. 2009. 诱发德庆县地质灾害的强降雨特征与分区预警指标. 气象研究与应用, 30(2): 228 ~ 229.
- 王念秦, 王永锋, 罗东海, 姚勇. 2008. 中国滑坡预测预报研究综述. 地质论评, 54(3): 355 ~ 361.
- 王雁林. 2005. 陕南地区滑坡灾害气象预报预警及其防范对策探析. 地质灾害与环境保护, 16(4): 345 ~ 349.
- 王仁乔, 周月华, 王丽. 2005. 大降雨型滑坡临界雨量及潜势预报模型研究. 气象科技, 33(4): 311 ~ 313.
- 魏丽, 单九生, 边小庚. 2006. 降水与滑坡稳定性临界值试验研究. 气象与减灾研究, 29(2): 18 ~ 24.
- 吴树仁, 金逸民, 石菊松. 2004. 滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例. 吉林大学学报, 34(4): 596 ~ 600.
- 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙. 2003. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究. 地质科技情报, 22(4): 101 ~ 105.
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论评, 56(6): 860 ~ 874.
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 谭国焕, 涂新斌. 2009. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义. 地质论评, 55(1): 85 ~ 90.
- 徐绍史. 2010. 今年中国 1/3 地质灾害发生在发现的隐患点之外 [OL]. [2011-10-01] <http://www.chinanews.com/gn/2010/08-10/2456635.shtml>.
- 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 2007. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制. 地质论评, 53(5): 727 ~ 728.
- 徐进军, 王海城, 罗喻真. 2010. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理. 岩土力学, 31(7): 2188 ~ 2196.
- 薛强, 张茂省, 唐亚明. 2011. 基于 DEM 的黑方台焦家滑坡变形分析. 水文地质与工程地质, 38(1): 133 ~ 138.
- 殷坤龙, 张桂荣, 龚日祥. 2003. 基于 Web-GIS 的浙江省地质灾害

- 实时预警预报系统设计. 水文地质与工程地质, 03:19~23.
- 章书成, 余南阳. 2010. 泥石流早期警报系统. 山地学报, 38(3):379~384.
- 朱平一, 李沛. 1995. 雅砻江二滩水电站库区泥石流. 山地研究, 13(4):273~278.
- Ayalew L. 1999. The effect of seasonal rainfall on landslides in the highland of Ethiopia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58:9~19.
- Band E W, Premchitt J. 1984. Relationship between rainfall and landslide in HongKong. *Proceeding 4th International Symposium Landslides*, Toronto, 17 September 1984:1377~1384.
- Blikra L H. 2008. The Åknes rockslide; monitoring, threshold values and early-warning. In: Chen Zuyu et al. eds. *Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future. Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, 30 June-4 July 2008, Xi'an, China. London: Taylor and Francis, 1089~1094.
- Brand, E. W., Premchitt, J., Phillipson, H. B. 1984. Relationship between rainfall and landslide in HongKong. *Proceeding 4th International Symposium Landslides*, Toronto, 17 September 1984, 1:377~384.
- Brunetti M. T., Peruccacci S., Rossi M. 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:447~458.
- Caine N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler. Series A; Physical Geography*, 62(1~2):23~27.
- Cannon S H, Ellen S D. 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *California Geology*, 38(12):267~272.
- Crozier M J, Eyles R J. 1980. Assessing the probability of rapid mass movement. In: Third Australia—New Zealand conference on geomechanics; Volume 2, Webster, *Proceedings of Technical Groups—New Zealand Institution of Engineers*, 6(1):247~251.
- Dahal Ranjan Kumar, Hasegawa Shuichi. 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100:429~443.
- Fukuzono, T. 1985. Method to predict failure time of slope collapse by using inverse of surface moving velocity by precipitation. *Landslide*, 22: 8 13 (in Japanese).
- Glade T. 1998. Models of antecedent rainfall and soil water status applied to different regions in New Zealand. In: 23rd general assembly of the European Geophysical Society; hydrology, oceans & atmosphere, Anonymou, *Annales Geophysicae*, 16(Suppl.): 24~70.
- Glade T, Crozier M, Smith P. 2000. Applying probability determination to refine landslide—triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”. *Pure and Applied Geophysics*, 157:1059~1079.
- Godt Jonathan W, Baum Rex L, Chleborad Alan F. 2006. Rainfall characteristics for shallow land sliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 97~110.
- Guidicini G, Iwasa O Y. 1977. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 16(1): 13~20.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3/4): 239~267.
- Hitoshi Saito, Daichi Nakayama, Hiroshi Matsuyama. 2010. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity—duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118:167~175.
- Jordi Corominas, Jose Moya. 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30:79~93.
- Keefer D K, Wilson R C, Mark R K. 1987. Real time landslide warning system during heavy rainfall. *Science*, 238: 921~925.
- Larsen M C, Simon A. 1993. A Rainfall intensity—duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geographical Annular*, 75A(1 2):13 23.
- Mark R K, Newman E B. 1988. Rainfall totals before and during the storm; distribution and correlation with damaging landslides (in Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3~5, 1982, in San Francisco Bay region, California). U. S. Geological Survey Professional Paper, 17~26.
- Pietro Aleotti. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3~4):247~265.
- Tang Yaming, Yin Yueping, Sun Pingping, Hu Wei. 2010. Rainfall triggering model on loess landslide and the thresholds. In: Kyoji Sassa et al. eds. *Early Warning of Landslides*. Beijing: Geological Publishing House, 122~134.
- Yin Yueping, Wang Hongde, Gao Youlong, Li Xiaochun. 2010. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 7:339~349.
- Yin Yueping, Zheng Wamo, Liu Yuping, Zhang Jialong, Li Xiaochun. 2010. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China. *Landslides*, 7:359~365.
- Wieczorek G. F. 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: Costa and Wieczorek (eds). *Debris Flows/Avalanches; Processes, Recognition and Mitigation Reviews in Engineering Geology*, Geological Society of America, 7:23~104.
- Wieczorek G F, Wilson R C, Mark R K. 1990. Landslide warning system in the San Francisco Bay region, California. *Landslide News*, 4:5~8.
- Wieczorek G F, Larsen M C, Eaton L S. 2001. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation[OL]. [2011-10-01] Open File Report 01 - 0144. U. S. Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0144/>.

Landslide Monitoring and Early-warning: an Overview

TANG Yaming^{1, 2)}, ZHANG Maosheng²⁾, XUE Qiang²⁾, BI Junbo²⁾

1) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;*

2) *Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey, Xi'an, 710054*

Abstract: Overview the landslide monitoring and early-warning researches achievements from three aspects as the rainfall thresholds, monitoring techniques, and regional monitoring and early-warning system. Firstly, it summarized the landslide rainfall thresholds of 28 countries or regions in the world including their study or statistic methods. Day rainfall model, antecedent rainfall model and soil moisture content model almost cover all rainfall thresholds calculation methods. On the other hand, due to the complicated water infiltrating and triggering types, different mechanism landslides “need” different thresholds. Study of coupling rainfall to water seepage to soil strength is the trends in the future. The monitoring techniques can be divided into four kinds as the displacement monitoring, physical field monitoring, underground water monitoring, and trigger factors monitoring according to the monitoring objects. It also can be divided into three kinds as manual monitoring, simply equipped monitoring and professional monitoring according to the monitoring devices. At present, the domestic monitoring techniques are closed to foreign countries. Some professional monitoring equipment has become very common. Its limit application only because of the high price. Some new technology such as InSAR, three dimension laser scan can be utilized in the landslide monitoring quickly. The data collecting comes to automatically remote control and monitoring system has a Web—GIS trend. People can design a set of early-warning level through combining the susceptibility or hazard zoning map and the rainfall threshold. Installing certain amount of rain gage, plus the forecast rainfall, it can do the landslide early-warning then. It is the routine method on regional rain triggered landslide warning whatever domestic or overseas. This kind of early-warning played an important role especially on public alert, but it is difficult to warn individual landslide effectively. Landslide monitoring and early-warning projects were implemented in China in many places in recent 10 years and got great achievements. But according to the statistic data, the successful warning rate is not so high. One hand is the rate of professional successful alert to total successful alert is very low; another hand is many landslides occurred outside the alerting zone. So the bottleneck problem of restraining the effectiveness of monitoring and early-warning is the potential landslides identifying which is the basis of all other measurements. The way to resolve it is to study the landslides regional development regulars to find the effective identifying technology for the potential landslides, and to bring the landslide risk management conception into it, so can distribute the monitoring resources reasonable and to warning effectively.

Key words: Landslide; Monitoring and early-warning; Review