

杨 顺, 潘华利, 王 钧, 等. 泥石流监测预警研究现状综述[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 150 – 156. [Yang Shun, Pan Huali, Wang Jun, et al. A Review of the Study on Debris Flow Monitoring and Early Warning[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 150 – 156.]

泥石流监测预警研究现状综述^{*}

杨 顺^{1,2,3}, 潘华利^{1,2}, 王 钧^{1,2,3}, 陆桂红^{1,2,3}, 欧国强^{1,2}, 宇 岩^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在泥石流灾害频发的今天, 开展泥石流监测预警是一种行之有效的预防手段。从泥石流监测内容研究(固体物源、水源条件和泥石流运动特征等)、泥石流预警临界雨量、监测预警技术方法、手段等方面对泥石流监测预警的国内外研究现状进行了回顾和总结, 并对现阶段泥石流等地质灾害监测预警成功率较低所存在的问题进行了分析, 进而提出建议和未来监测预警的发展趋势。

关键词: 泥石流; 监测; 预警; 研究综述

中图分类号: P642. 23; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 – 811X(2014)01 – 0150 – 07

doi: 10. 3969/j. issn. 1000 – 811X. 2014. 01. 027

我国是世界上泥石流灾害威胁最为严重的国家之一, 泥石流灾害种类多、分布地域广、发生频率高、造成损失大, 严重威胁国民经济和社会的可持续发展^[1]。特别是2008年汶川8.0级地震和2013年芦山7.0级地震后, 山体松动, 泥石流孕灾环境发生了显著变化, 地震影响区泥石流较震前更容易发生。如2010年四川省“8·13”群发性特大泥石流灾害, 造成重大人员伤亡, 冲毁、掩埋地震灾区民房等重建设施, 给灾区人民带来了巨大灾难^[2]。因此, 为了有效预防和减少灾害损失, 泥石流监测预警作为一种经济、有效、先行的预防手段, 越来越受到国内外学者、减灾科技工作者和政府部门的广泛关注^[3-4]。目前这方面研究很多, 泥石流监测手段、方法、内容等得到不断完善, 预警技术得到不断提高。本文就从泥石流监测内容、预警技术方法、手段等方面做一综述, 其目的在于总结现状, 分析泥石流灾害监测预警所存在的问题, 进而提出建议, 为指导今后的实际工作提供经验和借鉴。

1 泥石流监测内容研究

泥石流监测是泥石流研究的先行手段, 是泥石流理论研究、实验研究、机理分析、物理过程、

数学模拟以及预警的基础。而泥石流预警则是根据监测结果, 对外发布警报, 其需要解决的关键问题是在什么时间(When)什么地点(Where)会发生多大(How Scale)规模的泥石流? 这就涉及到泥石流形成的必要条件(水源、物源和地形条件)在何种组合情况下才能暴发泥石流。因此, 对于泥石流监测来说, 主要内容可分为形成条件(物源、水源等)监测、运动特征(流动动态要素、动力要素和输移冲淤等)监测、流体特征(物质组成及其物理化学性质等)监测等^[5]。为了预防泥石流灾害, 并尽可能降低灾害对广大人民群众的生命财产威胁, 国土资源部和相关减灾部门陆续采取了多项泥石流监测措施, 逐步完善泥石流监测内容。

1.1 泥石流固体物质来源(物源)监测

泥石流固体物质来源是泥石流形成的物质基础, 应对其地质环境和固体物质性质、类型、空间分布、规模进行监测。泥石流源区固体物质主要为堆积于沟道、坡面的崩塌、滑坡土体, 其物质成分大多为宽级配的砾石、泥、沙、粘土等。其中, 形成泥石流的物源大部分来自崩塌、滑坡土体。因此, 固体物质来源监测需着重关注泥石流流域内, 尤其物源区坡面、沟道内堆积体(不稳定斜坡)的空间分布、积聚速度以及位移情况, 如地表变形监测、深部位移监测等; 而对于流域内

^{*} 收稿日期: 2013 – 06 – 09 修回日期: 2013 – 08 – 23

基金项目: 中国科学院西部之光人才培养计划项目“震后泥石流激发条件研究——以都江堰虹口深溪沟流域为例”; 不利部公益性行业科研专项经费项目资助(201301058)

作者简介: 杨顺(1986 –), 男, 四川旺苍人, 博士研究生, 主要从事泥石流动力过程方面研究。E – mail: yangshun09@126. com

作者简介: 欧国强(1959 –), 男, 四川南充人, 研究员, 博士生导师, 主要从事泥石流动力过程研究。E – mail: ougq@imde. ac. cn

表层松散固体物质(松散土体、建筑垃圾等人工弃渣),除监测其分布范围、储量、积聚速度、位移情况及可移动厚度外,还应监测其在降雨过程中、薄层径流条件下的物理性质变化情况,如松散土体含水量、孔隙水压力变化过程等。

1.2 气象水文条件(水源)监测

水源既是泥石流形成的必要条件,又是其主要的动力来源之一。泥石流源区水源主要以大气降水、地表径流、冰雪融水、溃决以及地下水等为主。对大气降水来说,主要监测其降雨量、降雨强度和降雨历时;对冰雪融水主要监测其消融水量和历时;当泥石流源区分布有湖泊、水库等,还应评估其渗漏、溃决的危险性。其中,大气降水引起的泥石流分布最广,因此,针对大气降水,主要监测内容包括流域点雨量监测(自计雨量计观测)、气象雨量监测和雷达雨量监测。①点雨量监测。对于中小泥石流流域,设置一定数量的自计雨量计于泥石流物源区,实时监测降雨过程,并对历次泥石流发生情况的降雨资料进行统计分析,建立相关流域泥石流临界雨量预报图,进而对实时雨量与临界雨量线进行对比,发布预警信息。②气象雨量监测。根据国家及当地气象台等发布的卫星云图来监视该区域各种天气系统,如锋面、高空槽、台风等的位置、移动和变化情况,根据气象云图上的云型特征预报、预警降水。③雷达雨量监测。根据雷达发射电磁波的回波结构特征,探测带雨云团的分布及移动情况,提供未来 24 h 及更长时间降雨发生、发展、分布及雨区移动和降水强度,结合区域沟道设定的临界降雨量标准进行综合判别后发布泥石流预警信息。

1.3 泥石流运动特征及流体特征监测

泥石流运动特征监测,主要包括泥石流暴发时间、历时、运动过程、流态和流速、泥位、流面宽度、爬高、阵流次数、沟床纵横坡度变化、输移冲淤变化和堆积情况等^[6],通过监测,可进一步计算出泥石流的深度、输砂量或泥石流流量、总径流量、固体总径流量等;另外还需要监测泥石流运动过程中流体动压力、流体冲击力、个别石块冲击力等动力要素。流体特征监测内容主要包括泥石流物质组成(矿物组成、化学成分等)、结构特性(孔隙率、浆体微观结构等)及其相关物理化学性质(流体容重、粘度等)。

2 泥石流预警研究

2.1 基于泥石流灾害临界雨量的预警研究

如前所述,充足的水源(主要为降水)不但是

泥石流形成的必要条件,还是泥石流激发的决定因素。因此,多年来,国内外研究者试图找到适用于某一地区的降雨量临界值/阈值以便对泥石流暴发风险进行监测、预警。

国际上对这一问题进行研究主要集中在 1970 年以后,其主要是根据对激发泥石流的降雨特征(如前期雨量、降雨量、降雨强度、降雨历时等)进行统计分析后,确定泥石流的临界降雨量,建立泥石流预警模型,如日本学者奥田节夫于 1972 年首先提出了 10 min 雨强为激发泥石流雨量的概念,并确定了日本烧上上沟的激发泥石流的 10 min 雨强为 8 mm^[7];Caine 在 1980 年首次对泥石流及浅层滑坡的发生与降雨强度-历时经验关系做了统计分析,并给出了一个指数经验表达式^[8];通常,临界降雨量具有明显的地域特征,Cannon, Ellen 在考察美国西部泥石流时,发现激发科罗拉多州泥石流的临界雨量强度在 1~32 mm/h,降雨历时较短,为 6~10 min,而加利福尼亚州泥石流发生的临界雨量强度仅需 2~10 mm/h,但降雨历时较长,为 2~16 h,并统计建立了降雨强度和历时关系^[9];之后 Wieczorek^[10], Jibson^[11], Larsen and Simon^[12], Chien-Yuan et al.^[13], Hong et al.^[14], Dahal and Hasegawa^[15], Hitoshi Saito et al.^[16], Crosta and Frattini.^[17], Aleotti^[18], Guzzetti et al.^[19]等对此进行了进一步的研究,分别建立相应研究区域的降雨强度-历时关系与泥石流形成的预警模型;另外,De Vita 等在研究意大利西南部泥石流与降雨关系时发现,前期降雨量对引发泥石流的日降雨量影响显著^[20];Takahashi^[21],谢正伦等利用累计降雨量和降雨强度指标建立土石流发生临界经验条件,并广泛应用于日本和中国台湾地区预警系统^[22];1999 年我国台湾集集 7.6 级地震之后,陈俞旭对台湾陈有兰溪流域诱发土石流灾害的临界降雨量进行了研究,发现引发土石流的小时临界降雨量在震后的第一年急剧下降(达震前 1/4),之后随着时间逐渐回升^[23]。这些统计模型均可归结为临界雨量模型。

而中国大陆对降雨引发泥石流的临界值问题研究稍晚,如 1980 年以来,中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所和中国科学院东川泥石流观测研究站就利用当地气象台 10 min 降雨记录,结合西南山区各地泥石流发生情况,建立一系列不同降雨特征条件下的泥石流预报模型,如谭万沛提出的最大 10 min 雨强或 1 h 雨强与总有效雨量组合判别模型^[24],日雨量、小时雨量、10 min 雨量组合模式^[7]和小时雨强与日雨量组合判别模型^[25];陈景武等的 10 min 雨强与前期雨量组合

判别模型^[26]；谭炳炎等对成昆铁路沿线泥石流观测后，提出最大日降雨雨强、最大 10 min 雨强、最大小时雨强组合模型^[27]；通过对 1981 年四川凉山彝族自治州南部和松潘—平武等山区暴雨泥石流的调查分析后，唐邦兴得出暴雨泥石流是 10 min 雨强(10.5 mm)和 1 h 雨强(31.2 mm)共同作用的结果^[28]；文科军等以降雨强度与当日激发雨量和前期有效雨量为基础，建立了泥石流判别方程^[29]；另外，田冰等根据泥石流暴发的前期雨量与日降水量的权重关系，将蒋家沟泥石流分为前期降水型、强降水型和特殊型三种^[30]；魏永明等以层次分析法和多元回归法对降雨型泥石流预报模型进行了研究^[31]；李铁锋等^[32]，丛威青等^[33]利用 Logistic 回归模型对当日雨量和前期有效降雨量进行回归分析，形成了一整套对降雨型泥石流临界雨量进行定量分析的方法，并以此进行泥石流预报；梁光模等^[34]，倪化勇等^[35]，赵然杭等^[36]针对前期降雨量对暴雨型泥石流的贡献问题、对泥石流预警预报模式问题等进行了研究，提出了降雨型泥石流的预警框架和建议；王治华等^[37]根据现阶段泥石流在预测研究领域取得的成果，依据数字滑坡技术建立了泥石流预警、监测模型；潘建华等^[38]基于模糊综合评判震后灾区泥石流气候风险；王春山等^[39]、赵鑫等^[40]则就具体流域泥石流进行了综合评判及危险性评价，从而为泥石流监测、预警提供参考依据；汶川地震后，Tang C 等根据对北川震前和震后泥石流发生的临界雨量和雨强的初步分析，发现震后该区域泥石流启动的前期累积雨量较震前降低了 14.8%~22.1%，小时雨强降低了 25.4%~31.6%，泥石流预警雨量阈值显著减小^[41]。随着研究的深入，许多典型单沟泥石流的临界雨量指标逐步获得，如东川蒋家沟、波密古乡沟、加马其美沟、西昌黑沙河、武都火烧沟等。

这些研究的基本方法大多是对大量历史泥石流和降雨数据的统计分析，其结果仅能反映在某种经验水平上某个特定泥石流流域在多大特征降雨条件下可能暴发泥石流，至于该泥石流的规模、运动形态、类型、危害范围等无法预测。实际上，降雨量与泥石流形成机理密切相关，针对不同类型、成因泥石流，其引发泥石流的降雨量是不同的，目前进一步研究趋势是对雨量过程—土体渗流、径流场动态变化—源地土体强度三者耦合关系进行研究，以便从泥石流形成机理方面确定降雨临界值。

2.2 基于泥石流形成机理的预警研究

基于泥石流形成机理的预警研究，主要是从

泥石流启动的临界条件出发，探寻不同启动临界条件下的预警指标，确定指标的阈值，进而建立泥石流预警模型和方法。目前这方面研究主要是通过土力学角度出发建立固体物源的临界判别式以及依据泥石流原型试验结果而选择的预警指标这两方面。

如前所述，泥石流的成因复杂多变，区域变化大，因此，有学者从分析泥石流固体物质的受力特性出发，推导出泥石流启动与降雨量的关系，如 Takahashi 对饱和沟床泥砂进行极限平衡分析后，得出饱和沟床堆积物在表层水流条件下，水泥石流的临界启动条件(体积浓度的函数)^[42]；崔鹏通过 47 组实验后，分析得到泥石流启动临界数学模型(坡度、水分、级配函数)和解析曲面，进而对沟道内泥石流进行预警和危险性判别^[43]；Iverson 通过大量试验，研究浅层滑坡体转化泥石流的启动过程中含水量、孔隙水压力、粘粒含量等土体内部物理性质的变化趋势来预测泥石流的发生^[44]；费祥俊等也在坡体饱水条件下，依据极限平衡原理，建立了类似 Takahashi 的泥石流临界坡度(体积浓度的函数)^[45]；郭仲三等采用有限元法建立了预警泥石流发生的动力学模型，依据该模型，蒋家沟坡地土力类泥石流的始发日降雨量为 17 mm，启动土层厚度为 6~17 cm，临界坡度为 12°^[46]；张万顺等针对单一坡面泥石流启动问题，结合分布式水文模型理论，建立了分布式坡面泥石流启动模型，可预测坡面泥石流启动时间、部位及启动量^[47]；白利平在假定沟床物质在饱水时，沟床物质会受到重力、摩擦力、内聚力、浮力、水流推力的作用，进而根据力学平衡条件，建立相应的松散固体物质启动判别式和雨强表达式^[48]，该方法可计算在一定雨强条件下，松散固体物质是否处于稳定状态，从而对泥石流是否发生进行预报；另外，潘华利等根据目前实证法和频率计算法不能满足泥石流预警的需要，通过分析降雨条件、水文特征及下垫面条件，提出了基于水力类泥石流启动机制来计算泥石流预警雨量阈值的方法^[49]。目前这类研究尚处于起步阶段，还较薄弱，有待进一步深入开展其研究。

除此之外，泥石流灾害来临时还可直接利用监测预警仪器发布预警的模式，这类方法主要将自计雨量计(达到该流域临界降水量就预警)、水位/泥位计(达到设置断面报警阈值就预警)、地声/次声报警仪(捕捉到山洪泥石流运动频率就预警)等安置在具体的流域中，达到预警值(阈值)就预警。这些技术在国内外应用逐渐增加，尤其针对流域临界降雨量监测，如章书成等建立的以遥

测智能雨量计、泥石流次声警报器和摄像设备等组成的早期预警系统,将泥石流预警时间提前 1 h 左右等^[50]。但其成功案例尚少,推广难度较大,主要原因在于目前雨量计所测雨量均为点雨量,不能反映流域内降雨时空变化的真实情况。因此,目前已有学者尝试开发新型高精度测雨雷达,从流域空间内把握降雨情况,在掌握了雨量空间分布的基础上,结合泥石流源区固体物源分布情况进行山洪泥石流预报,将是一种行之有效的泥石流预警方法。

3 泥石流监测预警方法和预警手段

3.1 泥石流监测预警技术方法

目前泥石流监测预警技术还不太成熟,但也取得了一系列成果,尤其针对降雨型泥石流。泥石流预警是基于泥石流发生时的警报,其方法主要是通过感应器获取暴雨、泥位、孔隙水压力等突变信息后,利用现有的传输手段(如手机网络、互联网等)进行信息发布。在泥石流频发的今天,作为减轻泥石流灾害的先行手段,泥石流监测预警的重要性愈来愈凸现出来。

泥石流监测预警仪器的广泛应用,在泥石流防灾减灾中发挥了重要作用。根据与泥石流接触与否可将监测仪器分为接触式预警仪和非接触式预警仪。

(1)对于接触式预警仪,主要原理是通过预警仪器与泥石流直接接触时触动感应装置而发出警报^[51],主要有高精度 GPS 位移监测仪、各种传感器、地下水位计、断面钢索监测仪及冲击力监测器等。

高精度 GPS 位移监测仪^[52]能对流域内测点位移量、方向、速率等进行直接量测,可根据测点位移量、位移速率大小进行预警,但由于其成本较高,目前主要应用灾害性较严重的泥石流沟道、坡面;泥石流发生前,物源区土体在降水及其他水体条件下物理性质会发生显著变化,如土体内总压力、孔隙水压力、土体含水量等,因此,可利用振弦式土压力计、孔隙水压力计、地下水位计、土体含水量传感器等能对地质体内土压力、孔压、含水量等进行实时量测,根据其物理量变化趋势进行泥石流预警,由于需要埋设,传感器易被泥石流冲走;断面钢索监测仪是根据泥石流接触钢索使其断裂,从而触发探测器内部感应装置而传出报警信号,可根据钢索位置对泥石流规模进行分级预警,其可靠性较高但对泥石流敏感性较差;而冲击力监测器则通过电阻应变片等测

量泥石流冲击力大小,进而判断泥石流发生的规模,并发出不同级别预警信号,但该应变片易损坏,成本相对较高。

(2)对于非接触式警报仪,主要是根据监测仪器在不与泥石流(物源、水源、流体)直接接触的情况下获取泥石流影像、声音、泥位等信息,对泥石流是否发生进行判别后发布不同级别预警。如天气雷达、红外视频监控仪(夜视仪)、超声波泥位计、地声、次声报警器、自计雨量计等。

对于泥石流多发区域,天气雷达可监视该区域上空的降雨云团分布、移动方向、移动速率,进而对区域泥石流进行预警,但该方法造价高且预警范围较大,往往对小流域降雨把握不准;红外视频监控仪(夜视仪)通过录像、照相,实时、长距离(数千米)监测泥石流发生、运动的全过程,但监测数据量大且需专人值守;超声波泥位计则通过对设置断面(平直、规则,不易冲毁段)实时监测,根据接收到的超声波时差分析泥石流深度(泥位)与预警临界值的关系,确定通过断面的泥石流规模大小,发出不同等级的泥石流预警信息^[53],是近年来该仪器可靠且实用,但成本相对较高;在泥石流发生及运动过程中,会不断撞击沟岸向沟床方向传播一定频率(低频)的振动信号(地声),其强度与泥石流规模成正比,当接收振动信号超过预设阈值则进行预警^[54],通过在蒋家沟多次实测,发现很容易得到 10 ~ 15 km 以外泥石流信号,报警提前量达 15 ~ 30 min^[55],章书成等通过泥石流早期预警系统中的地声监测,将暴雨型泥石流的预警时间提前 1 h 以上^[50],其预警可靠但不能准确判定具体暴发泥石流沟道;另外还有遥测自计雨量计(点雨量)监测预警,当达到该沟道泥石流暴发的雨量阈值时进行报警。

3.2 泥石流监测预警手段

根据泥石流监测预警的手段划分,可分为人工监测预警、自动监测预警两大类。

(1)人工监测预警,主要是通过人力的方式对泥石流进行监测预警。在已查明的不同规模泥石流流域内,安排固定人员(监测员)定点、不定时对泥石流流域沟道内固体物源、水源分布、坡体堆积物的移动性等进行观测,对出现的异常现象(地下水异常)进行记录;当接收到当地气象部门提供的降雨等气象信息之后,密切监测流域内降雨过程并根据经验判别沟坡系统固体物质能否被降雨激发形成泥石流;当发现中下游沟道水流变浑或听到上游传来异常声响、下游沟道内水流变小甚至断流等均可能出现上游有泥石流发生,应立即向外发出警报。该预警手段直观、可信,但

是会花费大量人力、物力,且监测员需要具有较高的临灾判别能力。

(2)自动监测预警,主要是通过综控中心(控制台)、雨量遥测、GPS 位移、地声遥测、泥/水位遥测等子系统共同作用对泥石流活动进行监测。雨量遥测是针对单个流域安置若干自计雨量筒,监测降水过程,结合该沟历史雨量特征与泥石流发生之间的关系进行判别,当降雨量达到该沟临界雨量阈值时,发出警报;GPS 位移遥测则根据对松散坡体在降雨过程中位移、形变实时监测,达到设定阈值警报;而泥/水位断面监测则是在预先选择的平直型、断面变化不大的沟道中设置标尺,或者安置泥/水位计实时监测,当水位达到预警值时发布预警。这些监测预警仪器除具有远程自动遥测、传输外,还有自动分析等功能^[56]。该方法可靠性高于人工监测预警,但成本较高。1986—1995 年,美国国家气象局(NWS)和美国地质调查局(USGS)建立泥石流预警系统(包括天气预报、降水预报、流域土壤含水量和孔隙水压力等)^[57],并在旧金山湾地区进行试验,获得成功^[58];日本^[59]、香港^[60]、新西兰^[61]、南非^[62]等相继建立了类似的泥石流预警系统。近年来,泥石流、滑坡等地质灾害频发,造成的损失巨大,业已引起国土、地矿等相关减灾部门的高度重视,许多泥石流等灾害专业监测预警系统陆续建立起来。如长江水利委员会建立的长江上游滑坡泥石流监测预警系统,到 2005 年底,系统建立 1 个中心站(武汉长江委水土保持局),3 个一级站(宜宾、武都、重庆),8 个二级站,56 个监测预警点和 18 个群测群防重点县等,成功预报多次泥石流灾害^[63]。

目前国内外在泥石流监测预警方面的技术、方法等差距不是很大。除了传统的人工监测预警手段外,GPS 位移计、孔隙水压力计、TDR 土体水分计、自计雨量计以及视频监控等专业仪器逐渐成为泥石流监测的常规设备。近年来,一些新技术也很快应用到泥石流监测领域,如 3S 技术、三维激光扫描、干涉测量合成孔径雷达(InSAR)^[64-65]等,且监测数据的采集与传输都实现了自动化、远程化。

4 问题及建议

4.1 问题

近年来,针对泥石流、滑坡等山地灾害,我国开展了大量监测、预警工作,取得了丰硕的成果,但纵观其发展过程,发现预警成功率并不理想,泥石流监测预警还存在一些有待解决的

问题。

(1)量化泥石流源区可移动固体物源。目前有很多计算泥石流物源区松散固体物质总量的方法以及经验公式,但由于其概化条件的差异,与实际误差一般在 70%~150%,最大甚至可达 300%^[66],进而对泥石流沟评价、监测预警等带来很大影响。

(2)把握流域内水源“降雨”的时空变化。对于一个流域,降雨云团分布、移动情况不同,地表接收到的降雨就显著不同。现行监测气象的天气雷达属于监测水汽云团的监视雷达,不能将云、雨分开,还难以准确捕捉强降雨单元的时空分布和变化^[67],无法对降水进行比较准确的定量测量,在山区,降水落区就更难把握,无法满足山洪泥石流等山地灾害监测预警对降雨信息的需求;另外,自计雨量计只是对单个点的测量,不能代表附近的其它地方,要在山区建立雨量计网监测站,成本会更高、管理难度大且数据容易出错,亦无法满足泥石流监测预警对降雨条件的要求。

(3)泥石流监测预警手段落后。目前主要还是通过当地群众的人工监测预警手段,专业性监测预警相对较少。如刘传正对 2004 年 715 个地质灾害点成功预报避难实例的统计分析发现,当地群众的群测群防监测预警高达 86.7%,而依靠临界雨量预报仅占 9.8%^[68]。

4.2 建议

为了进一步提高泥石流等监测预警成功率,并针对目前所存在的问题,提出如下建议:

(1)弄清物源,即建立泥石流物源区可移动固体物质(不同于传统松散固体物质)力学模型,计算其在不同水动力(主要为降雨)作用下固体物质可能发生移动的总量、分布。

(2)开发、利用高分辨率测雨雷达(精度 30 m)取代传统的点雨量及天气雷达监测,从流域空间上把握降水的过程、降水落区及降水量。在此基础上,利用分布式水文模型将泥石流物源区可移动固体物质与精确雨量过程进行耦合计算、分析,可得到流域泥石流规模以及可能造成的危害范围,从而有效的解决中、小流域泥石流的预警难题,是未来泥石流预警发展的方向。

(3)结合现阶段专业的泥石流地声、次声监测、泥位监测和传感器监测技术与预警手段,建立泥石流自动监测预警系统,充分发挥其先锋作用。从而在泥石流发生前、发生时、发生后进行层层预警,可保证泥石流预警信息准确,为当地居民避灾提供充足时间,将灾害损失降到最低。

参考文献:

- [1] 崔鹏, 刘世建, 谭万沛. 中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 10–15.
- [2] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点, 成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596–608.
- [3] 李长江, 麻土华. 反思舟曲灾难事件: 如何最大限度减少人员伤亡? [J]. 地质论评, 2011, 57(5): 687–699.
- [4] 吴树仁, 周平根, 雷伟志, 等. 地质灾害防治领域重大科技问题讨论[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 1–6.
- [5] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0221—2006 崩塌、滑坡、泥石流监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 7–9.
- [6] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 99–104.
- [7] 谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报—以攀西地区为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 1–279.
- [8] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Physical Geography*, 1980, 62A(1/2): 23–27.
- [9] Cannon S H, Ellen S D. Rainfall conditions for abundant debris flow avalanches in the San Francisco Bay region California [J]. *California Geology*, 1985, 38(12): 267–272.
- [10] Wieczorek G F. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California [C]//*Debris flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*. New York: Geological society of America, 1987, 17: 93–104.
- [11] Jibson R. Debris flow in southern Puerto Rico [J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 1989, 236: 29–55.
- [12] Larsen M C, Simon A. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico [J]. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 1993, 75: 13–23.
- [13] Chien-Yuan C, Tien-Chien C, Fan-Chieh Y, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(5): 715–724.
- [14] Hong Y, Hiura H, Shino K, et al. The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan [J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 97–105.
- [15] Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, et al. Failure characteristics of rainfall-induced shallow landslides in granitic terrains of Shikoku Island of Japan [J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(7): 1295–1310.
- [16] Saito H, Nakayama D, Matsuyama H. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(1): 167–175.
- [17] Crosta G B, Frattini P. Rainfall thresholds for the triggering of soil slips and debris flows [C]//*Proceedings 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*. Siena, Italy. 2001: 463–488.
- [18] Aleotti P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(3/4): 247–265.
- [19] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows: an update [J]. *Landslides*, 2008, 5(1): 3–17.
- [20] De Vita P. Fenomeni di instabilità delle coperture piroclastiche dei Monti Lattari, di Sarno e di Salerno (Campania) ed analisi degli eventi pluviometrici determinanti [J]. *Quaderni di geologia applicata*, 2000, 7(2): 213–235.
- [21] Takahashi T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster [J]. *Natural Disaster Science*, 1981, 3(1): 57–89.
- [22] Shieh C L, Chen L Z. Developing the critical line of debris-flow occurrence [J]. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 1995, 26(3): 167–172.
- [23] 陈俞旭. 地震对崩塌与土石流发生影响之研究[D]. 台北: 国立成功大学水利及海洋工程研究所, 2008: 132–144.
- [24] 谭万沛. 泥石流沟的临界雨量线分布特征[J]. 水土保持通报, 1989, 9(6): 21–26.
- [25] 谭万沛. 中国暴雨泥石流预报研究基本理论与现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 88–95.
- [26] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 197–213.
- [27] 谭炳炎, 段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 43–52.
- [28] 唐邦兴. 1981年四川暴雨泥石流分析[C]//泥石流(2). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 9–13.
- [29] 文科军, 王礼先, 谢宝元, 等. 暴雨泥石流实时预报的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 59–64.
- [30] 田冰, 王裕宜, 洪勇. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 71–75.
- [31] 魏永明, 谢又予. 降雨型泥石流(水石流)预报模型研究[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(4): 48–54.
- [32] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 39–41.
- [33] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (1): 2808–2812.
- [34] 梁光模, 姚令侃. 确定暴雨泥石流临界雨量的研究[J]. 路基工程, 2008, (6): 3–5.
- [35] 倪化勇, 王德伟. 基于雨量(强)条件的泥石流预测预报研究现状、问题与建议[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 124–128.
- [36] 赵然杭, 王敏, 陆小蕾. 山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 55–59.
- [37] 王治华, 郭兆成, 杜明亮, 等. 基于数字滑坡技术的暴雨滑坡, 泥石流预警, 监测模型研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 303–309.
- [38] 潘建华, 彭贵芬, 彭俊, 等. 基于模糊综合评判的汶川8.0级地震重灾区滑坡泥石流气候风险评估[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 10–16.
- [39] 王春山, 巴仁基, 刘宇杰, 等. 四川省石棉县安顺场飞水岩沟泥石流综合评判及风险性分析[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 69–73.
- [40] 赵鑫, 程尊兰, 刘建康, 等. 云南东川地区单沟泥石流危险度评价研究[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 102–106.
- [41] Tang C, Zhu J, Chang M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. *Quaternary International*, 2012, 250: 63–73.
- [42] Takahashi T. Debris Flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 13(1): 57–77.
- [43] 崔鹏. 泥石流起动条件及机理的实验研究[J]. 科学通报,

- 1991, 36(21): 1650–1652.
- [44] Iverson R M, Reid M E, LaHusen R G. Debris-flow mobilization from landslides 1[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1997, 25(1): 85–138.
- [45] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 81–98.
- [46] 郭仲三, 田连权, 郭四稳, 等. 蒋家沟坡地土力类泥石流启动的动力学模型[M]//泥石流观测与研究. 北京: 科学出版社, 1996: 57–63.
- [47] 张万顺, 乔飞, 崔鹏, 等. 坡面泥石流起动模型研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 146–149.
- [48] 白利平. 北京山区泥石流灾害临界雨量研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(4): 101–104.
- [49] 潘华利, 欧国强, 黄江成, 等. 缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2122–2126.
- [50] 章书成, 余南阳. 泥石流早期警报系统[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 379–384.
- [51] 叶华祥. 接触型泥石流警报传感器的试验研究[M]//泥石流防治理论与实践. 成都: 西南交通大学出版社, 1991: 95–105.
- [52] 季伟峰. 地质灾害防治工程中监测新技术的开发应用与展望[C]//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, 2005: 53–57.
- [53] 康志成, 胡平华. 泥石流泥位报警原理及仪器 VI-1(有线)和 DFT-3(无线)报警仪[C]//第二届全国泥石流学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 42–46.
- [54] 李朝安, 胡卸文, 王良玮. 山区铁路沿线泥石流次声监测预警方法[J]. 声学技术, 2012, 31(4): 351–356.
- [55] 章书成, 陈精日, 叶明富. 蒋家沟泥石流物理参数的测试与研究[M]//云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1990: 156–164.
- [56] 铁道科学研究院铁道建筑研究所. 国内外泥石流流报警系统研制概述—兼论铁路泥石流防灾警戒避难体制[J]. 水土保持通报, 1989, 9(3): 57–62.
- [57] Keefer D K, Wilson R C, Mark R K, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall[J]. Science, 1987, 238(4829): 921–925.
- [58] U S Geological Survey. NOAA-USGS Debris-Flow Warning System-Final Report[EB/OL]. [2013–04–09]. <http://pubs.usgs.gov/circ/2005/1283/>.
- [59] Onodera T, Yohinaka R, Kazama H. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan[J]. Applied Geology, 1974, 15(4): 191–200.
- [60] Brand E W. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong [C]//Proc. of the IV International Symposium on Landslides. Toronto: Canadian Geotechnical society, 1984: 377–384.
- [61] Crozier M J. Prediction of rainfall - triggered landslides: A test of the antecedent water status model [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(9): 825–833.
- [62] Garland G G, Olivier M J. Predicting landslides from rainfall in a humid, sub-tropical region [J]. Geomorphology, 1993, 8(2): 165–173.
- [63] 中华人民共和国水利部. “十五”期间长江上游滑坡泥石流预警系统减灾效益巨大[EB/OL]. [2006–01–19]. http://www.mwr.gov.cn/slxz/slyw/200601/t20060119_149485.html.
- [64] 王超. 干涉雷达在地学研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 1997, 12(4): 36–43.
- [65] 李发斌, 崔鹏, 周爱霞. RS 和 GIS 在滑坡泥石流防灾减灾中的应用[J]. 灾害学, 2004, 19(4): 18–24.
- [66] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 45–48.
- [67] 科学时报. 李长江: 建立泥石流预报预警系统的思考与尝试[EB/OL]. [2010–09–28]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2010/9/238075.shtm>.
- [68] 刘传正, 张明霞, 孟晖. 论地质灾害群测群防体系[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 175–179.

A Review of the Study on Debris Flow Monitoring and Early Warning

Yang Shun^{1, 2, 3}, Pan Huali^{1, 2}, Wang Jun^{1, 2, 3}, Lu Guihong^{1, 2, 3},
Ou Guoqiang^{1, 2} and Yu Yan^{1, 2, 3}

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Debris flow monitoring and early warning is one of the helpful soft ways to debris flow prevention in modern time. This paper reviewed and summarized the research of debris flow monitoring and early warning at home and abroad so far through debris flow monitoring (solid materials, water condition and debris flow movement characters etc.), debris flow critical rainfall model and debris flow early warning technology method etc. Then the problem of low early warning rate of debris flow available at present time is analyzed. And last the advances on questions need to be solved are posed. The further research trend of debris flow monitoring and early warning is given, that is to introduce the researched work so far and promote the development of disaster prevention.

Key words: debris flow; monitoring; early warning; review