

广东省小流域地区降雨诱发的滑坡灾害 预警体系探讨

宫清华^{1, 2, 4} 黄光庆^{1, 2} 张俊香³

(1 广州地理研究所, 广州 510070; 2 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

3 黄山学院旅游学院, 黄山 245021; 4 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 全球气候变化背景下, 广东省台风暴雨频发, 小流域地区的滑坡灾害风险不断增大。针对广东省小流域地区滑坡灾害形成的地质环境和滑坡特点, 分析了广东省降雨与滑坡灾害的关系, 剖析了小流域地区滑坡灾害减灾现状与问题, 提出了一套适合小流域地区的滑坡灾害预警系统框架和方法。该预警体系的提出, 一方面可改进目前滑坡预测单元, 提高灾害预警的空间精度, 另一方面从灾害的形成机理出发, 可提高灾害预警的强度精度, 建立基于临界降雨量和斜坡单元的小流域滑坡地质灾害预警体系对于山地科学发展具有重要意义, 同时为广东省山区经济社会发展和山区减灾工作提供科学参考。

关键词: 广东省, 小流域, 滑坡, 降雨, 预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.04.006

Rainfall Induced Landslides Disaster Warning System in Small Watershed Areas of Guangdong Province

Gong Qinghua^{1, 2, 4}, Huang Guangqing^{1, 2}, Zhang Junxiang³

(1 Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070 2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 3 Tourism College, Huangshan University, Huangshan 245021 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Global climate change leads to frequent torrential rains in Guangdong Province. Storm rainfall constantly updates history record. The disaster risk is high in small watershed areas. However, the capacity of disaster monitoring, early warning and its management is weak in those areas. Firstly, this paper analyzes the relationship between the rainfall and landslide based on the geological environment of landslide formation and the characteristics of the landslide. Secondly, the present situation and problems in disaster mitigation are analyzed. Finally, a set of framework and method of landslide disaster warning system is put forward. The early warning system can not only improve the space precision but also improve the disaster warning precision.

Keywords: Guangdong province, small watershed, landslide, rainfall, early warning

0 引言

小流域治理问题一直是我国乃至全世界的难题, 广东省特定的地质环境条件, 加上近年来频发的台风暴雨, 使得山地丘陵地区发生山洪和地质灾害的风险不断增大。然而, 山区小流域又是灾害监测、预警和管理的薄弱地带, 如何在缺少基础数据与共享信息平

台的山区小流域建立高精度洪水—地质灾害预警系统, 是必须解决的一项重要问题。

本文首先立足广东省小流域地区的地质环境条件和防灾减灾工作现状及问题, 从小流域地区暴雨诱发滑坡灾害的过程机理出发, 应用现代科学技术手段对丘陵山区小流域洪水诱发的滑坡灾害进行系统研究, 揭示出暴雨诱发滑坡灾害的形成机制和作用过程, 分析流域的水文过程和地质灾害机理, 将流域水文过程模型应用到地质灾害预警系统中, 结合当地雨量遥测系统, 构建小流域滑坡灾害的预警体系。建立以小流域为单元的滑坡灾害预警系统, 是山区防灾减灾的一项重要非工程性措施, 建立基于小流域尺度的山洪—地质灾害预警和防灾减灾管理体系具有重要现实意义。

收稿日期: 2013年11月29日; 修回日期: 2014年3月9日
第一作者: 宫清华(1981—), Email: gqh100608@163.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(41201557); 广东省自然科学基金项目(S2011010004555); 广东省科技计划项目(2010A030200020, 2011A030200006, 2012A030200010)

1 广东省小流域地区地质环境与滑坡灾害特点

1.1 小流域地区地质环境特点

小流域是指以分水岭和出口断面为界的一个相对独立而完整的自然集水区域，是山地和丘陵区的基本水文地理单元，也是山区经济社会区划和山区灾害防治的基本单元，我国把面积10~200km²的流域称为小流域^[1]。山区小流域往往地形变化幅度大，河床比降大，汇流速度快，蓄滞洪能力弱，暴雨后极易发生滑坡灾害。广东省小流域，主要集中在粤东、粤西和粤北等山区，覆盖土地总面积11.68万平方千米，占全省总面积65.6%，覆盖人口2717.74万，占全省人口总数31.5%。其中，有山洪、泥石流、滑坡、崩塌等灾害记录的小流域有944条，占全省地质灾害记录总数的80%。按照《全国山洪灾害防治规划编制技术大纲》的有关标准，广东省有42%的小流域属于灾害高易发区，40%属于中易发区。这些小流域大部分处于自然条件脆弱的山区，经济基础薄弱、筹集资金能力低下，防灾抗灾能力薄弱。

1.2 广东省小流域滑坡灾害特点

广东省滑坡灾害多发区主要集中分布在粤北中低山丘陵区、粤西低山丘陵区 and 粤东低山丘陵区。小流域地区山势陡峻，河流切割强烈，侵蚀、剥蚀作用强烈，气候条件复杂。从分布空间看，绝大多数滑坡灾害点分布在海拔100~500m的丘陵地区，这与丘陵区坡度适宜，有利于形成较厚的堆积层有关。而标高>500m的低山区坡度较大，不利于风化剥离物的堆积，表土层薄；标高<100m的盆台区虽然表土层较厚，但地势平坦，稳定性好，两者皆不利于滑坡等地质灾害的形成。

小流域地区的滑坡灾害与发育深厚风化壳有着密切的关系^[2]。由于各种岩类的风化岩土在剖面上形成明显的分带，在某些强风化带和中风化带中还保留有原岩结构面，形成了相对的岩土层界面。在不同的风化带中，岩土的颗粒组成和颗粒间的孔隙度也有相对的差异。因受这些不同风化带的岩土特征以及各个结构面的影响，在长期降雨产生的坡面径流，水分向下渗透时，形成相对的地下水径流带和相对的隔水界面（水分聚集带）。降雨补给水分的持续渗透，使斜坡的松散岩土层中出现临时的高地下水位，在相对的隔水界面上形成滑动面，即会产生动水压力和孔隙水压力，在岩土重力作用下导致顺倾斜面滑坡的发生。

从地层岩性看，滑坡主要分布在以下两种岩组中：一是与岩浆作用有关的风化层较厚的块状较硬一坚硬岩组，如侵入岩、喷出岩、混合岩等；二是

前层状较软变质岩组。断层破坏带及褶皱核部岩层破碎，极易产生破碎岩滑坡；单斜岩层的顺向坡，当岩层面临空时，易产生顺层滑坡；在地震作用下，水平岩层地区也可能形成大型滑坡，地震强烈活动区，滑坡往往强烈发育；岩层风化带接触带（如岩土接触面等）临空时，斜坡易沿接触面产生滑坡。地下水活动，在滑坡形成中起着主要作用，其主要表现在软化岩、土，降低岩、土体的强度，产生的动水压力和孔隙水压力，会潜蚀岩、土，增大岩、土容重，对透水岩层产生浮托力等^[3-5]。

广东省小流域地区的滑坡灾害表现为数量多、规模小、稳定性差的特点。据统计，小流域地区由于其独特的地质环境条件，使得灾害一般为小型浅层滑坡，滑体厚度约1m左右，且滑动距离短，牵引式（自坡脚逐级向上牵引发展），在山丘陡壁，陡坡上则常沿裂隙面发生整体滑塌。据调查，研究区域内，小型规模灾害占96.36%，中型以上占3.64%。

2 降雨与滑坡的关系研究

2.1 滑坡与月降雨量的关系

选取梅州市作为案例区域，根据野外调查以及收集的当地资料，统计了有记录的1058个滑坡灾害点的发生月份以及当月的雨量，发现滑坡灾害的发生具有明显的季节性，这种季节性与降雨的季节性基本吻合。灾害点分布与雨量分布如图1。在梅州市已知发生时间的地质灾害点中，有92.1%处发生在4—8月的雨季。发生于4月、5月、6月、7月、8月的滑坡数分别占总数的10.9%、23.3%、19.6%、13.8%、24.5%，各发生滑坡的百分比与当月降水量基本成正相关。而干旱季节，降雨较少，滑坡次数也相对较少，仅占滑坡总次数的8.9%。滑坡一般发生在暴雨期，大规模的滑坡暴雨强度临界值为200mm以上。

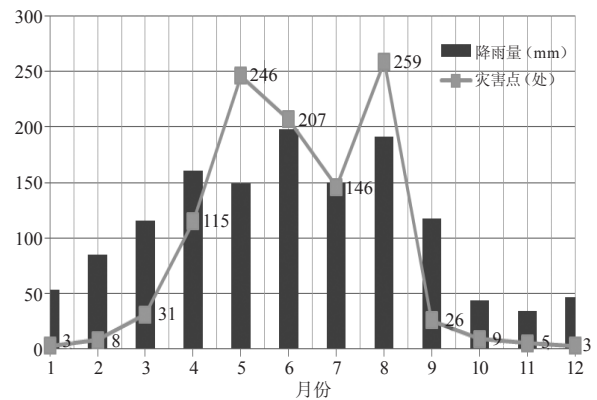


图1 滑坡灾害点与月降雨量统计图

2.2 滑坡与日降雨量的关系

梅州市的坡地地质灾害以暴雨型滑坡和崩塌为

主。滑坡、崩塌往往发生在强降雨期间。暴雨是斜坡产生滑坡的重要诱发因素，滑坡的发生数量、规模与持续过程降雨、雨量等关系十分明显。现对历史上有降雨资料的滑坡做统计分析。滑坡灾害的发生数量与日累计降雨量呈现明显的正相关关系（图2）。当降雨量大于200mm时，滑坡灾害的发生数量也急剧增加。根据暴雨，可基本决定滑坡发生的时间。据统计，当日降水量>50mm，发生的滑坡占86%，其中，日降水量>100 mm，发生的滑坡占70%。滑坡发生时，当日的平均降水量为110 mm。小流域地区多为浅层滑坡，故滑坡灾害发生多与降雨同步，少数滞后。与当日或前期连续降水量同步发的占92%，滞后降雨发生的占8%，滞后期一般为1~3天。

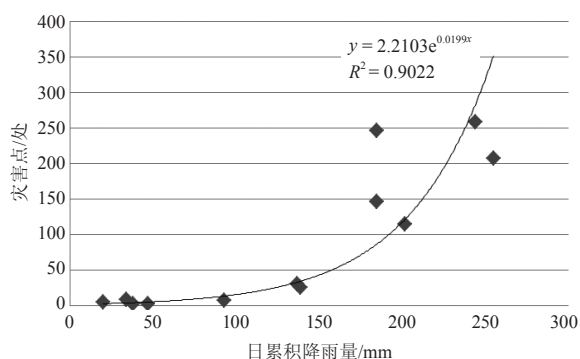


图2 滑坡灾害与日累计降雨量的关系

2.3 降雨对滑坡的影响

在小流域地区，强度大、时间长的暴雨，往往造成滑坡灾害群发。根据以往研究成果和广东省小流域地区的地质环境条件分析，降雨只有转化成边坡地下水才能对滑坡产生作用，小流域地区降雨对滑坡的影响主要体现在以下几个方面：一是对软弱结构面的侵蚀软化作用，降低结构面的抗剪强度，加快滑动面的形成；二是增加边坡岩土体的重量，使得下滑力急剧增加，破坏边坡岩土体的力学平衡，起诱发破坏作用；三是滑动面孔隙水压力增加，对滑坡变形破坏起控制作用。

广东省小流域地区的成灾模式多数表现为：表土层为强风化透水层，基岩为弱风化或未风化弱透水层。在持续降雨作用下，地下水位上升，孔隙水压力增大，破坏了原有的岩土体强度和斜坡应力状态，进而发生滑坡。滑坡发生的主要原因在于持续强降雨作用下，引发地下水位上升，土壤饱和，有效剪切强度降低。降雨造成的地下水位在短时间内大幅度上升是大多数滑坡形成的直接诱因^[6]。以广东省梅州市为例，在全市已确定成因的351处地质灾害中，由降雨和人类工程活动因素共同造成的有247处，占75.1%；

由单纯降雨因素造成有46处，占14%；由单纯人类工程活动因素造成的有36处，占10.9%。

3 构建基于临界降雨量的小流域地区滑坡预警预报体系

广东省在2004年7月启动了地质灾害—气象预报预警工作，气象预报预警工作在灾害预防方面正发挥着重要作用。从空间尺度上，目前常用的预警尺度有两种方式：一种是以行政单元作为基本单元的区域尺度预警，滑坡灾害的规模往往只有几平方米到几公顷，现有的气象地质灾害空间预警精度无法满足防灾减灾需求；另一种是微观尺度的单体斜坡的稳定性分析，斜坡的微观是针对某一特定的潜在灾害体进行稳定性预测，这种模式过高依赖于高精度的监测和实验数据，因此很难在区域范围内推广应用。从预警模型方面，区域预警结果多是据滑坡灾害敏感性分析的成果，叠加气象预测数据获得，而滑坡灾害敏感性分析是以栅格或行政单元为基本单元，对目标区域内的地质环境因子进行线性或非线性的空间叠加运算而来，多为半定量的结果；而单体稳定性分析是通过大量的实测参数和地质力学模型运算获得稳定性指数，稳定性指数只适用于特定的单体，缺乏区域预警意义。

总之，现时的气象地质灾害空间预警尺度无法预测灾害可能发生的具体位置，尤其对于基层的乡村一线防灾减灾管理人员来说，这种宏观尺度的预警成果难于实际应用。而微观尺度的单体斜坡稳定性预测这种定点式方法，需要花费大量的人力和财力，而且预警范围小，只能对少数几个地点进行预警，缺乏区域意义^[7-9]。

3.1 小流域地区预警预报设计流程

小流域暴雨诱发的滑坡灾害预警系统是利用地理信息系统（GIS）的技术与方法，结合小流域管理和滑坡灾害各项具体业务，在GIS和数据库管理等基础软件支持下进行二次开发，实现对区域范围内的相关示范小流域各类信息的采集输入，以及业务数据实时更新、信息查询与存贮管理、统计分析、报表及成果输出，并对已形成的各类数据成果进行查询、统计及成果发布和输出，将小流域、滑坡灾害和实时天气情况多维数据，在多维空间上可视化反映小流域各类信息的空间分布的统计综合信息管理，为决策提供支撑。这种系统是小流域地区防灾减灾的必备措施。

预警系统设计主要满足基础地理数据、基础地质数据、地质灾害数据和气象水文数据等的数据采集、数据传输、数据处理和数据应用需要。通过合理的业务流程设计、网络设计、软件设计和安全保密方案设计，可以使洪水—地质灾害气象预警工作科学准确、

安全方便。

基于降雨量的滑坡灾害预警预报的工作流程：接收气象预报信息→雨量实时遥测数据→叠加水文和地质环境背景信息→预测模型分析→生成小流域滑坡灾害预警预报总图和警戒等级。根据工作流程将系统可以划分为接受遥测数据的数据接口、基础地理信息数据库的建立、滑坡灾害预警模型计算和预警结果表达几个组成部分。

3.2 将临界降雨量作为滑坡灾害预警的关键指标

目前公认的自然因素引起的滑坡是边坡岩土体在降雨触发因素的作用下，斜坡的原有地形、地质等内部条件发生改变，进而对斜坡的稳定状态造成破坏的过程。地形地质等内部条件是在短期内不会发生改变的，可定为确定因素，降雨为唯一的可变因素，在斜坡的内部条件确定后，可通过研究降水与内部条件的耦合关系来预测斜坡的稳定状态。因此，本文建议可将临界降雨量作为滑坡灾害预警的指标，通过气象部门的实时雨量遥测数据作为预警的数据源完成预警工作。

3.3 斜坡单元作为小流域地区滑坡预警的基本单元

在预警单元划分的过程中，尽量保证每一单元内部的一致性以及单元之间的明显差异性。斜坡单元是以山脊线和沟谷底线为边界线组成的空间单元，斜坡单元内部无河沟侵蚀，且地形地质条件（坡向、坡度、坡面、流向等）一致，但某一斜坡单元与其邻近的斜坡有着明显不同的地形地质特征。滑坡是边坡岩土体在降雨、人文活动等触发因素的作用下，受斜坡地形、地质等内部因素的影响，发生变形破坏失稳的过程。由于影响滑坡的各种条件，包括地形地貌、地质构造、岩土性质和水文分布等在空间分布上存在不一致性，因此，在滑坡形成过程中，斜坡单元是基本保证内部地形地质特性一致的最小尺度。鉴于此，本文建议小流域地区选用斜坡单元作为预警单元。可通过GIS的空间分析功能和水文分析，建立基于DEM的单元划分模型，单元划分借助GIS空间分析平台，应用水文学D8方法进行水文因子的计算而自动生成。

3.4 预警过程

降水转化为地下水后，通过改变岩土体的力学性质来改变斜坡的稳定性，本文推荐极限平衡法来测算水文—地质之间的耦合关系，然后，通过水文因子将气象—水文关系和地质—水文关系进行关联，得到某一斜坡在处于稳定和非稳定的临界状态时（稳定系数 $FS=1$ ）的临界降雨量，再通过将每个斜坡的实际预测降雨量与

临界降雨量对比，即可得到斜坡在实际降雨量下的稳定状态，从而对每个斜坡的稳定性进行预警预报。

运用历史数据对模型进行调试检验，收集目标区域的已发灾害点的历史数据，对能准备对应灾害点位置的数据进行空间配准，查阅发生灾害点发生时的降雨量，将历史降雨量与模型运算的灾害点所在斜坡的临界降雨量对比，以达到对以上预警模型验证调试的过程，如若二者数量差异较大，可通过调整参数进行微调，直到模型结果较为理想。运用模型进行斜坡单元滑坡灾害预警。在模型参数确定后，计算每个斜坡单元的临界降雨量，将每日气象预报的降雨量预测结果与每个单元的临界降雨量值相减，预报降雨量比临界降雨量越大单元，发生滑坡的可能性越大，根据二者的差值划分预警等级，由预警系统作相应处理。

4 结论

降雨是诱发小流域地区滑坡灾害的关键因素。由于特定的地质环境造成广东省小流域地区的滑坡灾害表现为数量多、规模小、稳定性差的特点。小流域地区滑坡灾害的成灾范式为表土层为强风化透水层，基岩为弱风化或未风化弱透水层。在持续降雨作用下，地下水位上升，孔隙水压力增大，破坏了原有的岩土体强度和斜坡应力状态，进而发生滑坡。

现实的气象地质灾害空间预警尺度无法满足小流域地区的现实需求，建议建立基于临界降雨量和斜坡单元的滑坡预警体系，以为小流域地区的防灾减灾工作提供依据。

本文提出的预警预报体系适用于降雨诱发的浅层中小型滑坡。为使本文提出的方法更具推广价值，广泛应用于预警预报中，建议在GIS基础上，进行软件二次开发，缩短预警产品的制作时间。

参考文献

- [1] 官清华, 黄光庆. 广东典型小流域滑坡灾害预测模型研究. 广东农业科学, 2010, 10:172-175.
- [2] 刘瑞华, 孙宁, 唐光良. 广东滑坡灾害的地质环境与致灾因素分析. 热带地理, 2010, 1:13-17.
- [3] 张奕祥, 钟于明, 等. 梅州市地质灾害防治规划(2006-2020). 梅州市国土资源局, 2006.
- [4] 广东省国土资源厅. 广东省地质灾害防治规划. 2001-2015.
- [5] 广东防灾减灾年鉴编委会. 广东省防灾减灾年鉴. 北京: 气象出版社, 1995-2004.
- [6] 魏敏. 广东省强降雨诱发地质灾害的统计研究. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [7] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究. 地质通报, 2003(4): 303-309.
- [8] 傅朝义, 张鑫林, 李再凯, 等. 广东省地质灾害预警信息系统流程设计. 中国地质灾害与防治学报, 2006(1): 51-55.
- [9] 张晨辉, 罗碧瑜, 廖仕湘, 等. 梅州市地质灾害气象预报方法初探. 广东水利水电, 2008(1): 19-21.