

Shallow Landslide Spatial Early Warning Model Induced by Heavy Rainfall in South China Area

Qinghua Gong^{1,2}, Jun Wang^{1,2}, Junxiang Zhang³, Shaoxiong Yuan^{1,2}, Jun Chen^{1,2}

¹Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou 510070, China;

²Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;

³Tourism College, Huangshan University, Huangshan, 245021, China;

华南山区暴雨型浅层滑坡空间预警模型研究

宫清华^{1,2}, 王钧^{1,2}, 张俊香³, 袁少雄^{1,2}, 陈军^{1,2}

¹广州地理研究所, 广东广州 510070;

²广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东广州 510070,

³黄山学院旅游学院, 黄山 245021;

Abstract

Controlled by the characteristics of regional geological environment, the mechanism of slope runoff and hydrological processes under severe rainfall conditions in South China is fundamentally different from other regions. Therefore, the formation mechanism of shallow landslides induced by heavy precipitation has unique regional characteristics. In this study, by analyzing the response mechanism of slopes in South China to heavy rainfall, the slope unit was selected as the basic unit for early warning, and the concept of slope physical mechanism model (SINMAP) was used for reference and expansion. Through the introduction of heavy rainfall impact coefficients and coupled hydrological models and landslide stability analysis models, Shallow landslide warning model suitable for the geological environment in South China was established. Taking Song gang River as a case, an early warning

process calculation was carried out. The results show that the model calculation process is suitable for the small watershed area and the calculation results of the model are ideal. Construct a landslide space early warning model and explore the critical rainfall threshold for inducing landslides to provide a scientific basis for warning and prevention of landslide hazards.

Keywords: SINMAP; South China; Heavy Rainfall; Shallow Landslide; Early Warning

摘要

受区域地质环境特征控制, 华南地区强降雨条件下斜坡产流机制和水文过程与其他地区有本质性区别, 因此强降雨诱发的浅层滑坡的形成机理具有独特的区域特色。本研究通过分析华南地区斜坡对于暴雨的响应机制, 选用斜坡单元为预警基本单元, 借鉴和扩展斜坡物理机制模型 (SINMAP) 的理念, 通过引入暴雨影响系数和耦合水文模型和滑坡稳定性分析模型, 建立了适合华南地区地质环境特征的浅层滑坡预警理论模

型。探索诱发滑坡的临界降雨阈值，为滑坡灾害预警及防治提供科学依据。以松岗河小流域为案例，进行了预警过程计算，结果证明模型运算过程适合小流域地区，模型的运算结果较为理想。

关键词：SINMAP，华南，暴雨，浅层滑坡，预警

1. 引言

大量的滑坡实例表明，降雨（特别是暴雨）是触发滑坡灾害的主要诱因。根据全国290个县市调查统计发现，滑坡在地质灾害中所占比例高达51%，而暴雨诱发的滑坡比重竟占滑坡总数的90%^[1]。可见暴雨诱发的滑坡已经成为我国乃至世界各国面临的最严峻的地质灾害问题之一。纵观滑坡预报研究的发展历程，目前常用滑坡灾害模型可划分为统计学模型和物理机制模型^{[2][3][4][5]}。利用统计模型进行预警的前提是必须拥有长期、比较完整的降雨资料，具有布置密度比较合理的降雨遥控监测网络和先进的数据传输系统。但在华南山区，研究基础薄弱，历史记录少，往往缺乏良好的滑坡发生时间及其对应的累积雨量等资料，统计样本很难形成具有统计意义的数据体系，利用统计方法开展预警工作其误差较大。物理模型法是从降雨入渗、水文水力条件和边坡岩土体失稳机理上着手推导公式，分析得出基于滑坡过程模型的物理性降雨阈值，或者通过研究地质灾害的运动机理和径流过程，确定滑坡临界水流量。降雨滑坡形成机理的本质在于雨水入渗斜坡后破坏了斜坡的应力平衡体系。在目前的研究中，统计模型对数据的依赖性过高，在小流域地区难以实现。物理机制模型多为通用模型，评价和预警模型参数不具备区域特征，未能将影响华南区域滑坡的关键因子纳入模型中，严重影响了预警结果的准确性。

本文分析华南暴雨区斜坡地下水文系统规律和斜坡的水文-力学过程，借鉴当前得公认的浅层滑坡灾害模型（SINMAP）的概念架构，以斜坡为基本单元建立华南小流域暴雨型浅层滑坡预警理论模型，并以松岗河流域为研究去，进行了预警过程计算，结果证明模型运算过程适合小流域地区，模型的

运算结果较为理想。构建滑坡空间预警模型，探索诱发滑坡的临界降雨阈值，为滑坡灾害预警及防治提供科学依据。

2. 研究区概况

华南典型的滑坡表层为强风化层和残坡积层，风化层节理裂隙发育，坡体表层为透水性的砂岩，下层为不透水基岩，暴雨期间，降雨顺节理裂隙迅速渗漏至不透水层，地下水在基岩表面存储并形成滑动面，且地表岩土体雨水容易软化，抗剪强度降低，沿表层松散堆积物与基岩界面发生的平移型滑动破坏^{[6][7]}。一般破坏深度小于3~5 m，破坏面形态受基岩面控制，破坏土体全部顺坡下滑形成滑坡灾害。灾害体受山体斜坡控制，且在暴雨期短时间内群发。华南山区气候湿润，松散层堆积厚度大，含水量较高，表层拉张节理裂隙发育暴雨在时间上较为集中，导致暴雨成为引发群发性浅层滑坡发生的主导因素，华南暴雨型滑坡除了具有一般降雨型滑坡灾害的基本特征外，其特殊性在于：华南滑坡表层为多强风化层和残坡积层松散物质，表层节理裂隙发育，暴雨足以通过冲刷孔隙，使得孔隙逐渐变大，形成地表入渗的快速通道，降水转为大孔隙优先流，在松散层形成临时地下水位，此时的地下水具有了地表水的动水压力，对岩土体产生浮拖和冲刷等作用。因此，大孔隙优先流在滑坡形成过程中起着至关重要的作用。

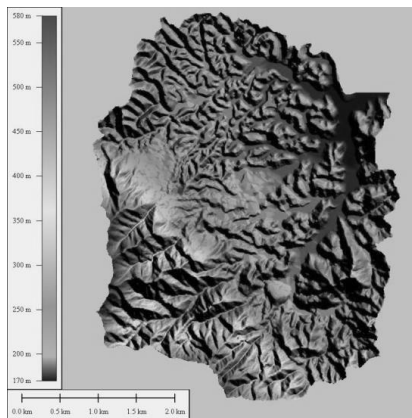


图1 松岗小流域及其地势图

本研究的松岗小流域位于梅州市程江流域的中上游。位于广东省梅州市梅县境内

的大坪镇境内，是程江河流域的一条支沟，土地总面积 15.57km²。在梅州市地貌格局中，松岗小流域位于铁山嶂山地的东北侧，属于低山丘陵地貌，地势四周高，中间低，河谷开阔，最高海拔 580m，最低海拔 170m。小流域四周地势高，高程多在 300m 以上，起伏大，坡度较陡，坡度多为 20-40 度；中部地势低，高程多在 160-300 m，起伏较平缓，坡度多为 10-20 度。地形格局总体上北东方向倾斜。白色石英质砂岩、沙砾岩和含砾砂岩年降雨量在 1400-1500mm 之间^[9]。

$$F_s = \frac{CL + (\gamma_s ZL \cos^2 \theta - \gamma_w Z_w L \cos^2 \theta - F_e \sin \theta) \tan \phi}{ZL \gamma_s \cos \theta \sin \theta + F_e \cos \theta + F_w}$$

其中：F_s——安全系数；C——内聚力（kPa）；γ——滑坡土体容重（KN/m³）；γ_w——水容重（KN/m³）；Z——滑坡土体垂直厚度（m）；Z_w——地下水距滑面的

将上公式经过无量纲化处理：

$$F_s = \frac{C' + (1 - \gamma w) \tan \phi}{(1 + \gamma w) \tan \theta}$$

根据中国知网统计，以上模型已经被 80 余篇文献引用，并应用滑坡稳定性判别模型中^{[11][12]}。引用文献的研究区多集中于黄土高原地区和西南地区，且上式假定无地表径流条件下的滑坡对暴雨的响应。如前文所述，华南地区的滑坡形成机理有不同于以上区域的特征，因此本文基于以上模型的理念，

$$F_b = \gamma_w Z_w L \cos \theta$$

设大孔隙率为 λ (%), 则大孔隙产生的静水压力为：

$$F_t = \lambda \gamma_w ZL \cos^2 \theta$$

$$F_s = \frac{CL + (\gamma_s ZL \cos^2 \theta - \lambda \gamma_w ZL \cos^2 \theta - \gamma_w Z_w L \cos \theta) \tan \phi}{ZL \gamma_s \cos \theta \sin \theta + Z_w L \gamma_w \cos \theta \sin \theta}$$

将以上公示进行无量纲化处理为：

3. 预警模型

SINMAP 模型是目前用于浅层滑坡稳定性分析的模型之一，模型利用稳态水文模型的地形湿度指数与无限边坡模型想融合，获得单元稳定性等级评价。无限斜面模型，假定地下水位和滑动面与地表平行，安全系数为抗滑力和下滑力之比。根据极限平衡原理，在考虑滑体重力、静水压力、地震力、及动水压力(渗透压力)时，滑坡稳定性系数可表示为^{[10][11]}

高度（m）；θ——滑面倾角（°）；φ——内摩擦角（°）；F_e 为水平地震力（N），F_w = ZLγ_wcosθsinθ 为渗透压力（动水压力）。

其中

$$w = \frac{qa}{T \sin \theta}$$

根据华南地区特征对模型做进一步扩展。在华南地区，暴雨期间，在地表径流形成后，土体饱和，因大孔隙流产生的作用于滑坡面的浮托力（F_b）作用于饱和的岩土体，浮托力是暴雨型滑坡不可忽略的因子。根据水力学理论和以上对坡体简化的理念^[13]，可推导出：

因此在考虑临时地下水位形成后滑体重力、静水压、渗透压力和浮托力综合作用下，则稳定性系数为：

$$F_s = \frac{(1 - \lambda w \gamma - \frac{\gamma w}{\cos \theta}) \tan \phi}{(1 + w \gamma) \tan \theta}$$

根据暴雨入渗机制分析，对于华南暴雨型滑坡，应以形成地表径流为节点，考虑两

种情况，在未形成地表径流时，地下水入渗量和稳定性系数受降雨量控制，在地表径流

形成后，地下水入渗量取决于大孔隙容量。

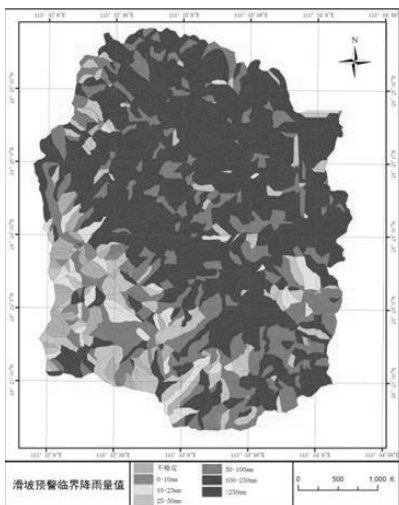


图2 斜坡单元的临界降雨量

本文通过饱和因子 w 将水文分析和斜坡稳定性关联起来，形成基于临界降雨量的预警模型型。我们研究滑坡灾害的预警模型最终的落脚点是研究引发滑坡灾害的水文临界点，因此假设滑坡处于各临界状态时，即 $F_s=1$ ，时，将以上的降雨入渗量关系和入渗量与斜坡稳定性关系进行关联，即可获取引发滑坡的临界降雨入渗量值。

当 $F_s=1$ 时，在暴雨条件下，将式上式联立得到：

$$\begin{cases} w = \frac{C' + (\tan \phi - \tan \theta)}{\gamma(\tan \phi + \tan \theta)} = \frac{qa}{T \sin \theta} (P < 0.2S) \\ w = \frac{\cos \theta \tan \phi (1 - \lambda w \gamma)}{\gamma(\tan \phi + \sin \theta)} = \frac{qa}{T \sin \theta} (P \geq 0.2S) \end{cases}$$

则 $F_s=1$ 时：

$$\begin{cases} q_{FS1} = \frac{T \sin \theta \cdot [C' + (\tan \phi - \tan \theta)]}{a \cdot \gamma(\tan \phi + \tan \theta)} (P < 0.2S) \\ q_{FS1} = \frac{T \sin \theta (\tan \phi - \tan \theta)}{a \cdot \gamma(\lambda \tan \phi + \tan \theta + \tan \phi / \cos \theta)} (P \geq 0.2S) \end{cases}$$

从以上公式可知，当 $\phi < \theta$ 时， $q < 0$ ，也就是说在天然状态下，无论有无降水，斜坡已经处于不稳定状态；实际上，在 $\theta < 50$ 时，地势平缓，斜坡处于稳定状态；在 $50 < \theta < \phi$ 时，斜坡处于概率不稳定状态，

可将实际降雨量与以上临界降雨量做对比，判断斜坡的稳定状态。

4. 计算结果

4.1 临界降雨阈值

模型中的地形参数坡度 (θ) 和比集水面积 (a)，利用 DEM，通过 GIS 空间分析功能运算获得。因地质参数的大小主要取决于岩性类别，根据查阅历史文献和现场调查实验，土壤容重 (γ) 和内摩擦角 (ϕ) 确定平均地质参数^{[9][4]}。坡度、表土层厚度、导水系数 (T)、比集水面积 (a)，根据文献调查和根据研究区的岩土特征，在研究区中部的相对平缓地区，大孔隙的影响作用不明显，根据地形和土壤质地条件，本文假设暴雨影响系数为 0-0.04。利用 ARCGIS 的栅格计算功能，将上述参数代入预警模型中，计算每个斜坡单元的临界降雨量，结果如图 2，研究区临界降雨量值范围为 0-517mm。临界降雨量较低的区域，也是滑坡灾害的高易发区。

4.2 不同降雨量条件下的滑坡预警情景模拟

预警过程是报是根据地质灾害发生的基本规律，通过对区域未来一个时段 (通常为 24 h) 降水预报，结合该区域地质灾害的潜在变化，应用预警模型，对该时段内地质灾害发生的危害等级做出的一种预报。过程是将预警指标输入到预警模型中进行警戒指标的运算和预警级别确定的过程。降水预报可参照气象局发布的次日气象预报数据。为了进一步说明暴雨条件下对滑坡的预警过程，本文利用以上计算结果，分别模拟日降雨量为 50mm 的暴雨和日降雨量 100mm、250mm 的大暴雨三种情景下，该区域滑坡灾害的分布情况 (图 3，表 1)。首先，在计算完临界降雨量的基础上，对预警的雨量进行等级划分，本文按照雨量和预警等级的基本关系，分别计算不同等级条件下的临界降雨量值，将预报雨量值与临界降雨量最比较，即为预警结果。

根据预警结果，统计处于各预警等级中的斜坡单元个数，由计算分析可知，当降雨

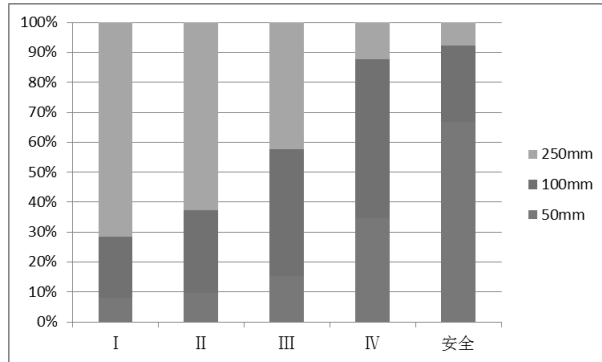


图3 不同等级单元统计结果

表1 模拟不同降雨量条件下各等级单元个数

预报级别	I	II	III	IV	V	安全
50mm	69	30	76	62	236	736
100mm	175	85	213	142	314	280
250mm	614	193	211	63	43	85

量达到暴雨等级时，处于警报级别的单元个数有69个，占总个数的5.7%。大暴雨(100mm)等级时，处于警报级别的单元个数有175个，占总单元个数的14.4%，斜坡单元失稳有连成片的趋势。当暴雨量达到250mm以上时，处于警报级别的单元数将达到50%，大部分单元有连成片的趋势，斜坡产生滑动失稳的可能性较大，暴雨引发的流域性群发灾害。

4.3 结果验证

验证非常重要，但因灾害的突发性和小流域地区资料缺乏的特点，使得模型验证工作困难重重。验证工作需要滑坡时间、位置、与暴雨的关系有完善预警标准的基础，包括降雨强度、时间、发生位置等。收集这些资料是极其耗费人力的，通常包括对目击者进行访问，并进行实地调查。对模型的验证部分因缺少长期的野外监测资料而无法系统完成，只能根据历史资料做了几点验证，根据野外调查，研究区有14个浅层滑坡灾害点，但只有1个灾害点能从历史资料中查阅到时间和当日降雨量记录，2000年4月30日，在梅州市梅县瑶上镇白叶村发生滑坡，对照广东省气象数据，该日梅州地区24小时降雨量为43.3mm，而模型运算的该滑坡点

的临界降雨量值为44.14mm。以上是对模型很好的验证。

5. 结论与讨论

暴雨型的滑坡是对华南地区的主要滑坡灾害类型，且其群发性特征给社会经济造成严重危害。本文选用华南小流域为研究区域，开展降雨型滑坡灾害形成机理和空间预警模型的研究。

(1) 降水对于滑坡的影响是转化为地下水后，通过增加斜坡重量、抬高地下水位、软化斜坡土体，降低其抗剪强度，改变岩土体水压等方式破坏斜坡平衡，产生滑坡。华南暴雨型滑坡除了具有一般降雨型滑坡灾害的基本特征外，其特殊性在于：华南滑坡表层为多强风化层和残坡积层松散物质，表层节理裂隙发育，暴雨足以通过冲刷孔隙，使得孔隙逐渐变大，形成地表入渗的快速通道，降水转为大孔隙优先流，对滑坡体产生冲刷作用，且在松散层形成临时地下水位，产生顺坡向的动态扩张力和浮托力，导致滑坡的发生。

(2) 通过分析华南地区斜坡对于暴雨的响应机制，耦合水文模型和滑坡稳定性分析模型，建立了适合华南地区地质环境特征的浅层滑坡预警理论模型。以DEM数据为基

础,斜坡单元为研究对象,通过引入大孔隙影响系数和临时地下水所形成的浮托力,拓展 SINMAP 模型,建立基于斜坡单元和有效降雨量的滑坡预警过程。

(3) 预警过程是根据地质灾害发生的基本规律,通过对研究区降水预报与临界降雨阈值比较,确定滑坡灾害危险等级。本文分别模拟日降雨量为 50mm 的暴雨和日降雨量 100mm、250mm 的大暴雨三种情景下,该区域滑坡灾害的分布情况,并将模拟结果与灾害事件做对比,结果表明模型的计算合理。

(4) 本文只针对表层为强风化层和残坡积层,风化层节理裂隙发育,坡体表层为透水性的砂岩,下层为不透水基岩的岩土体组合上的滑坡成灾模式进行了探索,滑坡的形成过程复杂多变,本文的模式并不能涵盖华南地区的所有滑坡类型。

Acknowledgements

This paper is supported by Chinese National Natural Science Foundation (41671506) and GDAS' Special Project of Science and Technology Development (2017GDASCX-0803, 2017GDASCX-0101), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A030310469), Science and Technology Plan Projects of Guangzhou (201804010126、201803030025)

致谢

本研究得到了国家自然科学基金(41671506);广东省科学院创新人才引进专项(2017GDASCX-0803、2017GDASCX-0803)、广东省自然科学基金(2018A030310469)、广州市科技计划项目(201804010126、201803030025)资助。

参考文献

[1] 周创兵,李典庆.暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展.地球科学进展.2009,24(5):477-478

- [2] 费晓燕,柳锦宝,屈伯强,刘志红,王增武.四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型.水土保持通报,2017,37(05):315-321+327.
- [3] 黄雯,方琼,王国卫,李明波.湖南茶陵滑坡空间预警的降雨临界值初步分析.中国地质灾害与防治学报,2014,25(03):38-42.
- [4] 宫清华,黄光庆.基于气象-地形-水文-地质-人文耦合的滑坡灾害空间预警研究.灾害学,2013,28(03):20-23.
- [5] 吕佼佼,范文,吕远强.基于土壤侵蚀模型的浅层滑坡预警研究.水土保持通报,2017,37(03):227-230+236.
- [6] 戚国庆.降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究.成都理工大学,2004.
- [7] 刘礼领,殷坤龙.暴雨型滑坡降水入渗机理分析.岩土力学,2008,04:1061-1066.
- [8] 刘艳辉,刘丽楠.基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例.工程地质学报,2016,24(04):542-549.
- [9] 宫清华,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,2010,37(10):172-175.
- [10] 武利.基于 SINMAP 模型的区域滑坡危险性定量评估及模型验证[J].地理与地理信息科学,2012,28(02):35-39+113.
- [11] 康超,谌文武,张帆宇.基于 DEM 的分布式斜坡稳定性模型在黄土沟壑区浅层滑坡中的应用.中南大学学报(自然科学版),2010,41(05):1987-1992.
- [12] 何玉琼.植被发育斜坡的稳定性研究.昆明理工大学,2013.
- [13] 黄润秋.地质灾害过程模拟与过程控制研究科学出版社.2002.
- [14] 黄俊宝.德化县滑坡成灾临界降雨量研究.福建地质,2013,32(01):65-69.
- [15] 陈君,王浩,戴强.湖北恩施市降雨引发滑坡灾害的风险评价.中国地质灾害与防治学报,2016,27(01):15-21.