

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^{*}

官清华^{1,2,3}, 黄光庆^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

2. 广州地理研究所, 广东 广州 510070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 广东省小流域地区滑坡灾害具有多发性、广泛性和严重性的特点, 严重影响山区社会安定和经济发展。长期以来区域滑坡灾害预警和单体地质灾害稳定性研究总是在两个不同的体系下进行, 二者缺乏有机联系, 常用的滑坡灾害预警单元也不能反映成灾机理。以广东省梅州市程江流域的松岗小流域为研究区域, 以斜坡单元为基本单元, 以气象、水文、人文过程为主要参数, 通过分析各参数与灾害形成的内在关系, 结合 GIS 技术, 构建气象 - 地形 - 水文 - 地质 - 人文耦合模型, 并通过历史数据对模型进行验证, 结果表明, 该模型不仅提高了滑坡预测的空间精度, 而且可对特定降雨条件下的滑坡灾害进行客观有效地预测。

关键词: 小流域; 滑坡; 斜坡单元; 气象 - 地形 - 水文 - 地质 - 人文耦合

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0020-04

地质灾害气象预警是目前我国采用最多的宏观尺度的区域预警方式, 一般是以行政区域为基本单元进行预警^[1-3], 这种预警方式无法反映灾害的形成机理, 同时也无法满足精细化预警的精度要求。不同以往以行政单元或者栅格单元为预警单元的传统, 本文从滑坡灾害的成灾机理入手研究, 将具有滑坡灾变特征的斜坡单元作为预警单元, 并将洪水、人类工活动等因素引入到预警模型中, 建立气象 - 地形 - 水文 - 人文 - 地质耦合的滑坡预警模型, 弥补传统山洪地质灾害预警中缺乏洪水和人类工程活动要素的考虑的不足, 使得灾害预警更符合实际和有效。

1 预警空间单元的选择

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, 在这个过程中, 斜坡单元是基本保证单元内部属性一致的最小尺度, 同时, 斜坡单元内部无河沟等冲蚀, 容易累积松散堆积物和地下水, 是容易发生滑动的区域。

鉴于此, 本文选用斜坡单元作为预警单元。以 1:1 万地形图生成的 DEM 为斜坡单元划分的基础, 采用源头切割法, 以山脊线及沟谷线为边界, 在 GIS 平台上, 经执行斜坡单元划分程式实现斜坡单元划分, 划分结果如图 1 所示。

2 气象 - 地形 - 水文 - 地质 - 人文耦合预警模型

2.1 气象 - 水文 - 地质耦合关系

在研究气象 - 地形 - 水文的耦合关系中, 我们发现可以通过饱和因子 w 将气象 - 水文关系和水文 - 地质关系关联起来, 形成基于饱和因子(w)的气象 - 水文 - 地质耦合模型^[4]。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, 假设斜坡处于极限平衡状态, 即稳定系数 $F_s = 1$, 此时将反映气象降水量和水文饱和情况的关系式和反映饱和情况与斜坡稳定性之间关系的进行联立, 即得到降水量和稳定性之间的关系式, 即气象 - 水文 - 地质之间的耦合关系, 计算过程参见参考文献[4]。

^{*} 收稿日期: 2012-11-26 修回日期: 2013-01-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41201557); 广东省科学院青年基金项目(qnj201007); 广东省自然科学基金项目(S2011010004555); 广东省科技计划项目(2010A030200020, 2011A030200006)

作者简介: 官清华(1981-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事环境地质方向研究. E-mail: gqh100608@163.com

$$q = \frac{T \sin \theta \cdot [C' + (\tan \phi - \tan \theta)]}{\alpha \cdot r(\tan \phi + \tan \theta)}, \quad (1)$$

式中: q 为临界降雨量 (mm); C' 为有效粘聚力 (kPa); ϕ 为内摩擦角; θ 为滑面倾角; α 为比集水面积 (m^2); T 为导水系数 (m/d); γ 为土体容重 (kN/m^3)。

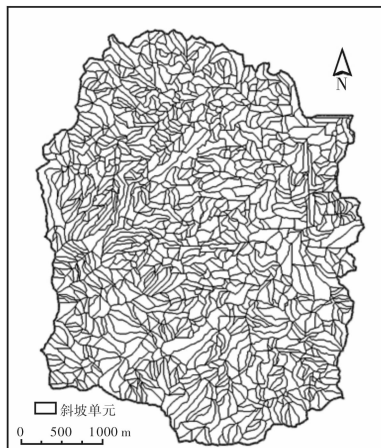


图1 研究区斜坡单元划分

2.2 气象-水文-地质-人文耦合关系

在对研究区的进一步调查研究中,我们发现山洪和人类活动对滑坡灾害也有不可忽略的影响作用。它们影响的根本是改变了地貌形态和地下水循环,从而影响斜坡稳定性。人类活动对斜坡的影响目前尚无统一标准,本文通过对文献和实地的综合研究,假设人类活动和山洪冲刷作用最强时,斜坡的稳定系数降低 50%。也就是说天然状态下,斜坡稳定性系数为 0.5,受人类活动强烈影响,斜坡处于临界状态。以此类推。

$$F_s = \frac{0.5}{RH}, \quad (2)$$

式中: R 为人类活动定量化指数归一化值; H 为山洪因子归一化值。此时,斜坡处于极限平衡状态,由式 (1) 和式 (2) 推出临界降雨量为:

$$q = \frac{T \sin \theta \cdot [C' + (\tan \phi - \frac{0.5}{RH} \tan \theta)]}{\alpha \cdot r(\tan \phi + \frac{0.5}{RH} \tan \theta)}. \quad (3)$$

$$\text{当 } q > \frac{T \sin \theta \cdot [C' + (\tan \phi - \frac{0.5}{RH} \tan \theta)]}{\alpha \cdot r(\tan \phi + \frac{0.5}{RH} \tan \theta)}, \text{ 滑坡}$$

失稳; $q < \frac{T \sin \theta \cdot [C' + (\tan \phi - \frac{0.5}{RH} \tan \theta)]}{\alpha \cdot r(\tan \phi + \frac{0.5}{RH} \tan \theta)}$ 时, 斜坡稳定。

3 模型计算

3.1 模型参数的设置

模型中的地形参数坡度 (θ) 和比集水面积 (α), 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, 因此我们按照岩性类型将研究区分成三种地质区如图 2 所示, 在此基础上进行地质参数的反算工作。根据查阅历史文献和现场调查实验^[5-10], 确定了各地质区的平均地质参数如表 1 所示。其中土壤容重 (γ) 和内摩擦角 (ϕ) 在每个地质区内基本稳定, 因此, 直接采纳各个分区的平均值。导水系数 (T)、粘聚力 (C)、人类活动定量化指数 (R)、山洪影响程度 (H) 四个值通过 GIS 和相关的研究结果进行计算和反推。

表1 各地质区地质参数

地质区	$\gamma/(\text{kN/m}^2)$	$K/(\text{m/s})$	$\phi/(\circ)$	$C_{\max}/(\text{kPa})$
Zone1	18.2	9×10^{-4}	9	7
Zone2	19.6	1×10^{-3}	20	4
Zone3	18.9	2×10^{-3}	27	5

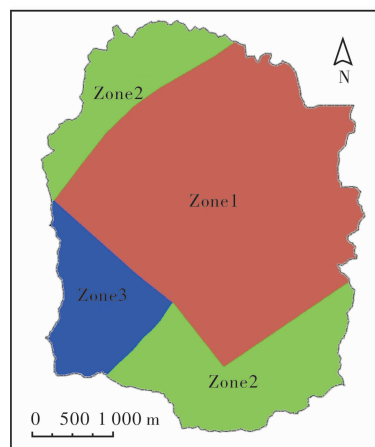


图2 小流域地质分区图

3.1.1 导水系数 T

从上文知滑坡土体的导水系数 $T = Kh = KZ \cos \theta$, K 的取值如表 1 所示。前人的研究发现土层厚度和坡度具有较高的相关性^[11], 为求得松岗河小流域的土层厚度分布情况, 进行了土壤深度的野外量测工作, 主要的量测项目为土层厚度和地表坡度, 根据调查数据对松岗河小流域地区坡度和土层厚度之间的关系进行回归模拟得到 $y = -2.864 \ln(x) + 10.719$ 。根据单元平均坡度值可反推土层厚度分布, 进而获得导水系数分布, 如图 3、图 4 所示。

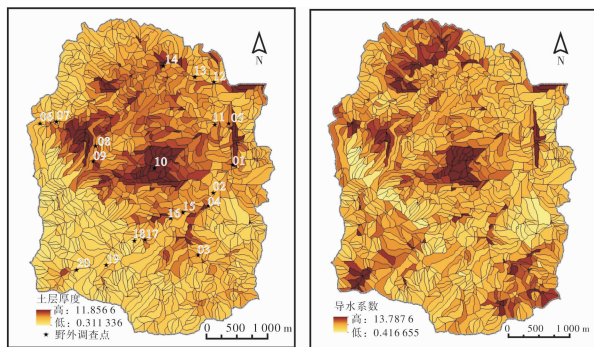
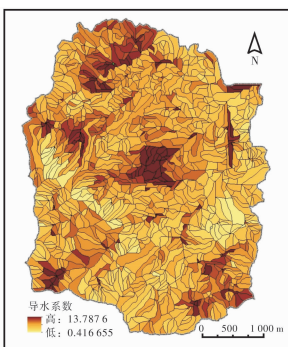


图3 斜坡单元土层平均厚度分布图



3.1.2 土壤有效粘聚力 C'

土壤的有效粘聚力是土壤粘聚力与植物根系粘聚力的组合^[12],因此本研究根据植被覆盖的情况,结合几个地质分区的土壤类型及粘聚力数值分布情况,运算土壤的有效粘聚力。以植被指数推算有效粘聚力的方式确定有效粘聚力的运算:

$$C' = C_{\max} \frac{NDVI(x,y) + 1}{2} \quad (4)$$

式中: C' 为有效粘聚力; C_{\max} 为最大有效粘聚力; $NDVI$ 为植被指数。式中 C_{\max} 通过查阅文献资料和野外调查获得表1, $NDVI$ 通过遥感图像反演计算获得。最后经过GIS的地图代数功能运算每个斜坡单元的土壤有效粘聚力如图5所示。

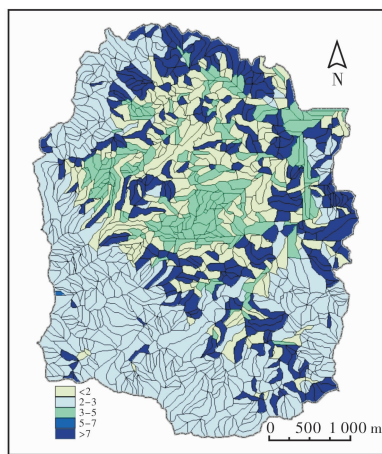


图5 斜坡单元有效粘聚力分布图

3.1.3 人类工程活动定量化指数 R

由于人类活动包罗万象,需要从中选择一些重要的活动作为衡量人类活动的指标。对于不同的问题,选择的指标不同。鉴于松岗河小流域以农业为主体经济,人类活动主要包括开垦种植、修筑房屋和道路几个方面,因此,选取垦植指数、建筑强度、道路密度几个指标分别衡量人类开垦强度、人类工程活动和道路切割程度,构建了区域人类活动强度的评价指标体系;然后,采用层次分析法获取各指

标的权重;最后,利用加权法将各指标综合获取区域人类活动定量化指数^[13]。篇幅限制,本文不赘述。

3.1.4 山洪因子 H

洪水诱发的地质灾害除了具有一般山地灾害的基本特征外,其特殊性在于水位上涨使得滑坡赋存的水文地质环境发生了变化。水岩作用导致岩土体抗剪强度参数降低,对渗透稳定性的影响等。本文运用斜坡单元内山洪影响范围占斜坡单元的面积比作为山洪因子。通过ARCGIS分析平台获取数据。

3.2 评价预测结果

首先,在ARCGIS平台下,对研究区内的斜坡稳定性进行评价,得到如图6所示的研究区滑坡危险性区划图。对于概率不稳定区,运用公式(3)构建气象-地形-水文-地质-人文多要素耦合模型,并按照上文的模型参数设置,计算每一个斜坡单元的临界降雨量值,结果如图7所示。将每个单元的临界降雨量值与实际雨量对比,即可得到在特定降雨量条件下的斜坡稳定性情况,以达到预警目的。

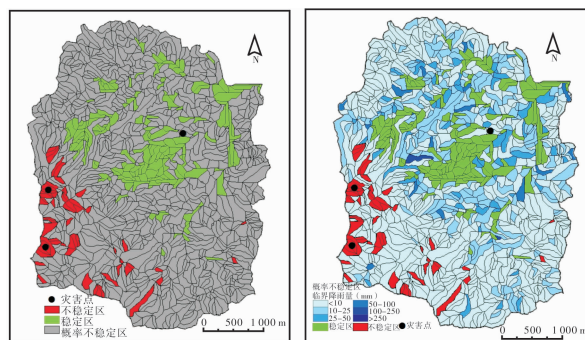


图6 研究区滑坡危险性区划图

4 模型验证

由于滑坡灾害发生的随机性和研究的基础相对较为薄弱,目前还没有形成较为完善的灾情记录体系,小流域地区缺乏长期的野外监测资料,因此预警模型的验证工作缺乏充足数据支撑,本文试图通过历史资料对模型进行点状验证。

根据现有的历史资料^[5,14],在研究区内有3个记录的灾害点,其中2个灾害点是位于不稳定区(图7);第3个灾害点是位于概率不稳定区,根据历史记录,2000年4月30日,在梅州市梅县瑶上镇白叶村发生滑坡(第3个灾害点),对照广东省气象数据,该日梅州地区24h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。以上可以说明模型的结果较为理想。

5 结论

(1)滑坡灾变预警的基本工作是确定预警单元,预警单元的确定要考虑滑坡的成灾机理,考虑模型计算过程等等,传统预警模型中以栅格单元和行政单元作为基本的预警单元,这两种划分方法虽能简单快速的实现预警模型计算,但是却不能科学的反应成灾机理。本文将斜坡单元引入预警模型,这种预警单元即能反应滑坡灾变的成灾规律,又能方便快速的实现预警运算。

(2)由于滑坡灾害不仅仅是大气降水诱发的,还与地质条件和水文条件息息相关,本文基于滑坡灾害的发生机理建立了气象-地形-水文-地质-人文耦合的预警模型。并根据历史资料对模型进行了验证,结果表明模型运算效果较为理想。

(3)本文的不足之处是模型在几种假设条件的基础上完成的,假设条件与实际情况有一定出入,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,这些将在下一步工作中将深入研究。

参考文献:

[1] 刘传正,温铭生,唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2003(04): 303-309.

- [2] 傅朝义,张鑫林,李再凯,等. 广东省地质灾害预警信息系统设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 51-55.
- [3] 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[J]. 广东水利水电, 2008(1): 19-21.
- [4] 宫清华,黄光庆. 广东典型小流域滑坡灾害预测模型研究[J]. 广东农业科学, 2010(10): 172-175.
- [5] 广东省地质局区域地质调查队一分队. 1:20万区域地质调查报告(梅县幅)[R]. 广州:广东省地质局区域地质调查队, 1971.
- [6] 张奕祥,钟于明,黄坚,等. 梅州市地质灾害防治规划(2006-2020)[R]. 梅州:梅州市国土资源局, 2006.
- [7] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [8] 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队. 广东山区水土流失及其治理[M]. 广州:广东科技出版社, 1991.
- [9] 林宗元. 岩土工程勘察手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1996.
- [10] 文日海,叶成俊,莫运松. 基于地形因素与滑动带综合内摩擦角呈线性回归分析[J]. 西部探矿工程, 2008(2): 120-124.
- [11] 孙孝林,赵玉国,赵量,等. 应用土壤-景观定量模型预测土壤属性空间分布及制图[J]. 土壤, 2008, 40(5): 837-842.
- [12] Dietrich WE, Montgomery D R. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. Water Resources Research, 1994, 30: 1153-1171.
- [13] 崔鹏,林勇明. 自然因素与工程作用对山区道路泥石流、滑坡形成的影响[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 11-16.
- [14] 广东防灾减灾年鉴编委会. 广东省防灾减灾年鉴[M]. 广州:气象出版社, 1995-2004.

Research on Landslide Hazard Space Early Warning Based on Meteorological-physiognomy-hydrology-geology-humanity Coupling

Gong Qinghua^{1, 2, 3}, Huang Guangqing^{1, 2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;

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

Abstract: The small watershed in Guangdong Province is suffered greatly from landslide hazards, which are multiple, wide and severe, could affect seriously the social stability and economic development of the mountainous regions. The research methods of regional landslide disaster prediction and monomer geological disaster stability have been adopted under two different technology systems for a long time. However, the two systems are lack of organic relation, and the usual warning unit of landslide hazard can not reflect the formation mechanism of landslide. The Songgang small watershed of Chengjiang watershed in Meizhou City in China is selected as the study area. Slope unit is fixed as a basic unit, meteorological, hydrology, and humanity process are used as major parameters, based on analysis on the inner relationship between the parameter and disaster formation, and combining with GIS techniques, a model for Meteorological-physiognomy-hydrology-geology-humanity Coupling is established. The model is further verified according to historical data. Results show that the model could evidently increase prediction accuracy and could predict potential risks effectively.

Key words: small watershed; landslide; slope-unit; meteorological-physiognomy-hydrology-geology-humanity coupling