

基于水动力学模型的暴雨浅层滑坡风险分析

张灿亨¹, 王鑫², 郑文棠¹

(1. 广东科诺勘测工程有限公司, 广州 510663; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广州 510635)

摘要: 暴雨诱发浅层滑坡对公共安全和社会经济发展构成重大威胁, 但迄今为止对浅层滑坡的形成机理认识有限, 尚无可靠的浅层滑坡风险分析方法。本文建立暴雨山洪水动力学数学模型, 能较好地模拟暴雨产流、汇流及入渗等水文过程; 采用边坡极限平衡方法构建暴雨水动力学滑坡模型, 对暴雨诱发浅层滑坡进行风险分析。将该模型应用于典型浅层滑坡易发区, 计算结果表明, 本文水动力学模型能较好地模拟降雨入渗过程, 基于该模型的浅层滑坡风险分析较为合理, 为有效防御暴雨浅层滑坡提供了新的技术。

关键词: 暴雨浅层滑坡; 极限平衡方法; 水动力学模型; 滑坡稳定性分析

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0198-05

Assessment of Rainstorm-induced Shallow Landslide Hazard with Hydrodynamic Model

ZHANG Canheng¹, WANG Xin², ZHENG Wentang¹

(1. Guangdong Kenuo Sureing Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Shallow landslide induced by rainstorm can pose great threats to public safety and social and economic development, but the knowledge of shallow landslide formation mechanism is limited so far. There is no reliable analysis method on shallow landslide hazard. In this paper, hydrodynamic model of heavy rainfall-induced flash flood is developed. The model can better simulate the hydrological processes of rainstorm runoff, convergence and infiltration, etc. The rainstorm hydrodynamic landslide model is used to assess rainstorm-induced shallow landslide hazard, with the limit equilibrium method of slope. The model has been applied to a typical shallow landslide-prone area. The calculation results show that the hydrodynamic model can better simulate the process of rainfall infiltration, the assessment of shallow landslide hazard, based on the model, is more reasonable. It provided a new technology to defend effectively rainstorm-induced shallow landslide.

Key words: rainstorm-induced shallow landslide; limit equilibrium method; hydrodynamic model; landslide stability analysis

暴雨诱发浅层滑坡是由于降雨下渗改变土体应力条件, 从而导致浅层斜坡失稳的地质现象^[1]。我国是世界上浅层滑坡灾害最严重的国家之一, 浅层滑坡每年都造成重大的人员伤亡和经济损失, 严重威胁社会公共安全和经济发展^[2]。降雨诱发滑坡是我国面临的重要自然灾害, 尤其对包括电网在内的能源设施等重要基础设施的安全具有重要影响, 小则导致局部输电线路受损, 大则导致电网系统大面

积停电。因此深入研究暴雨诱发浅层滑坡对有效防御滑坡灾害有重要意义, 可以为能源设施建设中边坡稳定评估及处理、电网线路规划及杆塔定位、发电工程科学选址提供重要的风险依据。

滑坡经常发生在山区较为陡峭的斜坡处, 其稳定性受地形地貌和降雨特征的影响。传统上, 降雨诱发滑坡的预测主要依赖于一些经验方法, 根据地形地貌、降雨强度和历时等数据来判断。目前国内研究暴雨诱发浅层滑坡的方法主要有二类: 一是基于历史实测降雨数据与滑坡资料, 采用统计分析方法和经验统计公式建立降雨条件与滑坡灾害的相关关系^[3-6]。该方法提出滑坡降雨阈值的概念, 可以简单应用于评价降雨诱发的浅层滑坡, 但难以反

收稿日期: 2015-11-01

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(41372275)

作者简介: 张灿亨(1985), 男, 广东揭阳人, 工程师, 硕士, 主要从事电力工程水气象勘测设计和水动力数值模拟研究工作(email) canhengzhang@163.com。

映降雨诱发滑坡的物理过程。二是采用具有物理学基础的滑坡分析模型, 研究不同降雨条件与其他因子对浅层滑坡的影响。极限平衡法理论已发展成为一种成熟的边坡稳定分析方法^[7], 为研究暴雨诱发浅层滑坡提供重要的基础技术手段。于是, 采用先进的方法处理降雨、下渗及产汇流等暴雨水文过程, 客观反映降雨下渗对浅层滑坡稳定性的影响, 是现阶段急需解决的问题。

采用水文学方法简化降雨下渗等水文过程, 联合极限平衡模型, 已有不同的降雨诱发滑坡分析模型被提出^[8-11]。该模型通过计算区域内各点的滑坡临界降雨量和边坡安全系数进行降雨滑坡的区域风险分析, 能进一步研究降雨条件、地形地貌特征、土壤特性等因素对滑坡稳定性的影响。该类模型应用较简便, 在特定条件下也能取得较好的应用效果, 但是假定降雨完全下渗, 浅层地下径流作稳态考虑, 难以准确描述强度大而历时较短的暴雨产流过程。该类方法的诸多假设条件从根本上限制了其应用, 且难以客观地反映降雨条件下边坡内部土壤的含水状态、强度和受力条件等的变化过程, 对深入研究暴雨诱发滑坡机理的帮助作用甚微。

应用水动力学模型可以计算降雨下渗、产流过程, 得到边坡的渗流场以及土壤含水量、孔隙水压力、土壤强度等的变化过程。本文建立暴雨山洪水动力学数学模型, 模型能较好地模拟暴雨水文过程, 并较准确计算渗入土坡的累积下渗量及下渗深度。基于该模型, 采用边坡极限平衡分析法, 建立暴雨诱发浅层滑坡的风险分析模型。将该模型应用于典型浅层滑坡易发区, 计算结果表明本文模型描述暴雨水文过程更为合理, 从而较好地反映暴雨对浅层滑坡稳定性的影响, 为有效防御暴雨浅层滑坡提供新的技术。

1 计算模型

1.1 水动力学模型

基于水文学方法的传统极限平衡模型^[8-9]假设降雨完全下渗, 不考虑地表径流过程, 这不符合客观的暴雨水文过程。本文建立暴雨山洪水动力学模型, 模型能准确计算降雨产汇流过程, 更合理地反映了降雨入渗过程。

建立在流体力学基本守恒定律基础上的二维浅水控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程^[12],

考虑降雨和土壤入渗的影响, 可以整理成如下守恒形式:

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y = S(U) \quad (1)$$

式中: U 为守恒变量, $F(U)$ 、 $G(U)$ 为通量向量, $S(U)$ 为源项向量, 定义如下:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} r - f \\ gh(S_{bx} - S_{fx}) \\ gh(S_{by} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量; g 为重力加速度; r 为降雨强度; f 为入渗强度; $S_{bx} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}$, $S_{by} = -\frac{\partial z_b}{\partial y}$ 分别表示 x 和 y 方向的坡面比降; z_b 为地表高程; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的阻力坡度。

设 Manning 糙率系数为 n , 阻力坡度计算公式如下:

$$S_{fx} = n^2 \sqrt{u^2 + v^2} u / h^3, S_{fy} = n^2 \sqrt{u^2 + v^2} v / h^3 \quad (3)$$

采用 Green-Ampt 公式计算入渗强度, 旨在初步地描述入渗对流域产、汇流的定量影响^[13]。暴雨的降雨强度显然是超过土壤饱和渗透能力的, 同时假定边坡土壤的初始含水量为均匀分布, Green-Ampt 公式在此处采用是合理的, 具体公式为:

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) H_c}{F} \right) \quad (4)$$

式中: K_s 为饱和水力传导度; H_c 为 Green-Ampt 压力水头, 也即湿润锋处的土壤水吸力; θ_s 、 θ_i 分别为饱和、初始含水量; F 为累积入渗深度。以上入渗参数主要取决于土壤实测资料, 通过求解微分方程(4)可以得到 F 关于时间 t 的隐式方程:

$$F = K_s t + H_c (\theta_s - \theta_i) \ln \left(1 + \frac{F}{(\theta_s - \theta_i) H_c} \right) \quad (5)$$

采用能够捕捉激波的 WAF-TVD 二阶数值方法离散基本控制方程(1), 具体求解过程及模型验证参见文献[14]。通过与 Iwagaki (1955) 的实验数据^[15]和 FRMRC 的研究结果^[16]两个算例的对比验证表明, 本文水动力学模型能够较好地模拟复杂地形条件下暴雨的产汇流过程。该模型已被应用于湖南省典型山洪易发区, 并取得了较好的效果^[14]。

1.2 边坡稳定性分析

极限平衡法已发展成为具有完整理论体系的边坡分析方法，本文采用简单无限斜坡极限平衡模型对边坡稳定性进行分析。对每一斜坡单元采用如图1所示的斜坡计算模型，假定滑动面、湿润锋面与地表面平行，渗流方向与斜坡方向一致。根据有效应力原理，考虑静水压力，浅层滑坡安全性系数 F_s 可表示为^[17]：

$$F_s = \frac{C' + [(Z - Z_s)\rho_d g + Z_s \rho_{sat} g] \cos^2 \theta \tan \varphi}{[(Z - Z_s)\rho_d g + Z_s \rho_{sat} g] \sin \theta \cos \theta} \quad (6)$$

式中： C' 为土壤的有效粘聚力； Z 为滑坡体的总深度，即滑动面深度； Z_s 为饱和土壤厚度； ρ_d 为天然土壤的密度； ρ_{sat} 为饱和土壤的密度； φ 为土壤的内摩擦角； θ 为斜坡体的坡度角。

基于水文学方法的极限平衡模型采用如图2所示的斜坡计算模型，假定滑动面、地下水位与地表面平行，渗流方向与斜坡方向一致。考虑了静水压力和动水压力的影响，浅层滑坡安全系数计算方法与(6)式类似。

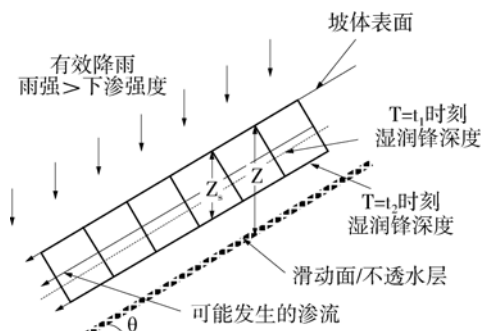


图1 基于水动力学滑坡模型

Fig. 1 The Landslide Model with Hydrodynamic Model

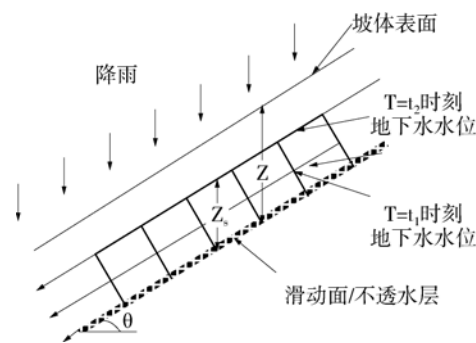


图2 基于水文学方法的滑坡模型

Fig. 2 The Landslide Model with Hydrodynamic Model

由暴雨山洪水动力学数学模型计算得到的累积入渗深度 F ，即为(6)式中饱和土壤厚度 Z_s ，如此

即可得到计算斜坡单元不同深度滑动面的浅层滑坡安全系数。根据计算结果，本文将计算区域分为二类： $0 \leq F_s < 1.0$ 时，为不稳定区域； $F_s > 1.0$ 时，为稳定区域。

2 案例研究

涟源市三甲乡位于湖南省中部，地处雪峰山东南麓，南部有龙山，地形多为丘陵和山地，区域面积约为 100 km²。属中亚热带季风湿润气候，年平均降雨量为 1 354 mm，主要河溪均注入涟水。由于雨水偏多，土壤湿重，多为红壤，其次还有黄壤、黄褐土等。以三甲乡为中心，选取面积约为 100.0 km² 的区域作为模型计算区域区域，其地形如图3所示，其分辨率为 25.0 m。从图中可以看出，三甲乡三面环山，群山与洼地犬牙交错，构成“E”字形盆地，且地势沿西南至东北方向逐渐降低，高程跨度在 900 m ~ 400 m 之间，坡面起伏较大(见图4)。三甲乡是湖南省的一个典型山洪易发区。

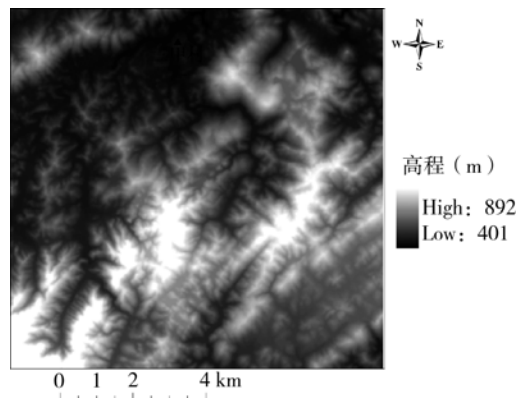


图3 计算区域地理数字高程模型 (DEM)

Fig. 3 Digital Elevation Model of Calculation Area

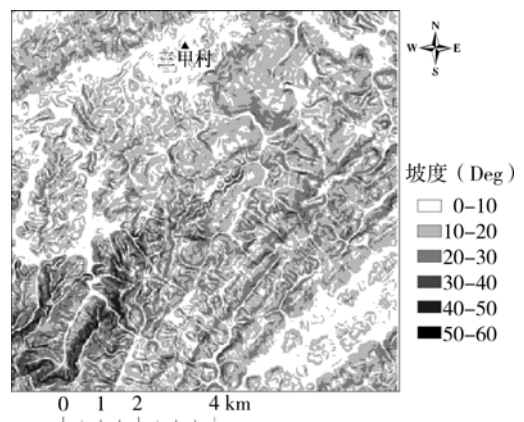


图4 计算区域地形坡度分布图

Fig. 4 The Terrain Slope Distribution of Calculation Area

参照邻近区域的土壤实测资料分析^[18], 选取土壤参数如下: 土壤初始含水率 $\theta_i = 17\%$; 土壤饱和含水率 $\theta_s = 48\%$; 土壤饱和水力传导度 $K_s = 1.465 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。天然土壤的密度 $\rho_d = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 饱和土壤的密度 $\rho_{sat} = 2.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 土壤有效粘聚力 $C' = 10.0 \text{ kN/m}^2$; 土壤内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$; 水的密度 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

暴雨山洪水动力学数学模型的 x 和 y 方向空间步长均为 25.0 m , 糙率取 $n = 0.05$, Green-Ampt 压力水头 $H_c = 0.2 \text{ m}$ 。两小时均匀降雨历时, 降雨量为 300 mm 的暴雨条件下, 采用(1)~(6)式进行计算。可以得到入渗至斜坡体的累积下渗量及下渗深度, 即得斜坡饱和土壤厚度。

考虑土坡厚度为 $Z = 0.5 \text{ m}$ 和 1.0 m 两种情况下, 三甲乡暴雨诱发浅层滑坡风险的空间分布特征, 计算结果如图 5(a, b) 所示。从图中可以看出, 三甲乡西南角山丘区发生暴雨诱发浅层滑坡的风险较大。同时, 斜坡土壤厚度变大, 其浅层滑坡安全系数略为变小, 高风险区域也稍有扩大, 这是符合物理学基础的。从图 1 可看出, 短历时暴雨条件下, 入渗的雨水主要分布于土坡表层。由(6)式可知, 土坡厚度的物理含义即为斜坡的可能滑动面深度。当滑动面下移, 滑坡体的体积变大, 而滑坡体的总含水量基本不变。在重力作用下, 厚度较大的滑坡体稳定性将略有降低, 具体见表 1。

表 1 不稳定区域面积百分比及最小安全系数的对比

Table 1 Comparison of the Unstable Region Area Percentage and the Minimum Safety Factor

	土坡厚度/ Z	不稳定区域 ($0 < F_s < 1.0$)	稳定区域 ($F_s > 1.0$)	安全系数 最小值
本文滑坡 分析模型	$Z = 0.5 \text{ m}$	1.06 %	99.18 %	0.592 4
	$Z = 1.0 \text{ m}$	1.57 %	98.67 %	0.507 3
基于水文学方法 的滑坡分析模型	$Z = 0.5 \text{ m}$	0.00 %	100.00 %	1.333 9
	$Z = 1.0 \text{ m}$	1.29 %	98.71 %	0.796 1

图 6(a, b) 为相同降雨条件下, 采用基于水文学方法的极限平衡模型计算的浅层滑坡风险分布图。从图中可发现, 当土坡厚度为 0.5 m 时, 不存在浅层滑坡的高风险区域, 安全系数都大于 1; 而土坡厚度为 1.0 m 时, 则有相当一部分区域安全系数减至小于 1, 且仅为 0.5 m 时的一半。

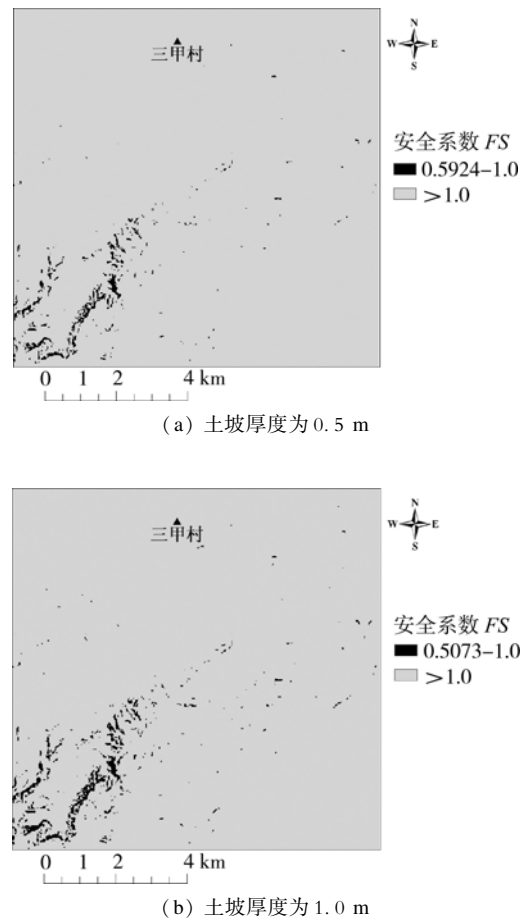


图 5 基于水动力学滑坡模型计算的滑坡风险分布图
Fig. 5 The Landslide Hazard Distribution Map Based on the Landslide Model with Hydrodynamic Model

该现象的出现是由模型结构引起的。从图 2 可看出, 在强降雨条件下, 滑坡体将完全达到饱和状态。当滑动面下降时, 滑坡体的土壤体积变大, 同时滑坡体总含水量也相应地增多。在重力和水压力的作用下, 厚度为 1.0 m 的滑坡体稳定性将明显小于厚度为 0.5 m 时的稳定性(见表 1)。该模型主要有两个处理环节是不合理的。第一, 模型假设土壤下渗强度总大于降雨强度, 这在暴雨条件下是有可能满足的; 第二, 如以模型中的方法处理土壤饱和因子, 滑坡体在暴雨条件下将可能达到饱和状态, 并可以采用 Darcy 定律描述地下水流, 这与客观现象是不相符的。诸多滑坡事件证明, 已发滑坡体基本没有达到饱和状态。因此, 基于水文学方法的极限平衡模型难以准确描述降雨下渗过程, 不能客观地反映暴雨对浅层滑坡稳定性的影响。

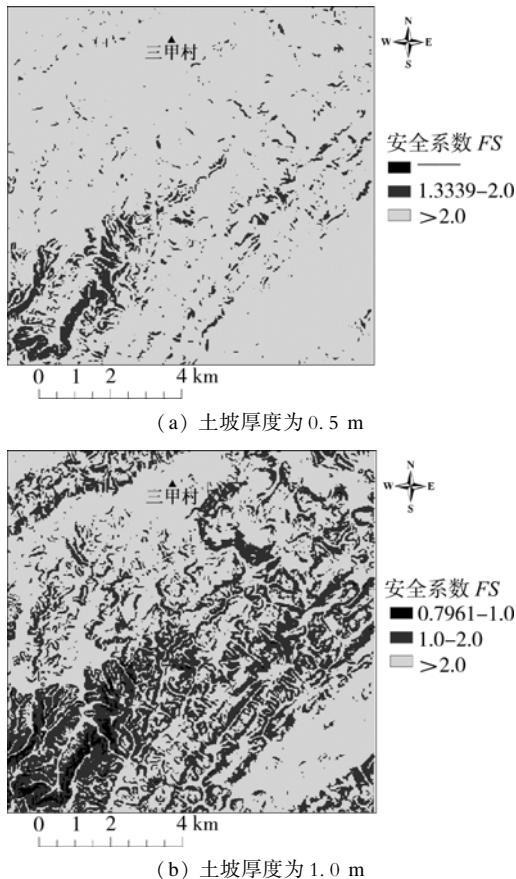


图6 基于水文学方法计算的滑坡风险分布图

Fig. 6 The Landslide Hazard Distribution Map Based on The Landslide Model with Hydrodynamic Model

3 结论

基于水文学方法的极限平衡模型假定降雨完全下渗,忽略地表径流,采用浅层稳态模型处理地下径流,不符合客观的暴雨水文过程,难以准确分析暴雨诱发的浅层滑坡风险。本文建立暴雨山洪水动力学数学模型,可以准确模拟计算暴雨在复杂地形的产汇流过程、雨水累积入渗量及湿润锋下渗深度,更合理地描述了降雨入渗过程。在此基础上采用极限平衡方法分析暴雨诱发的浅层滑坡风险,从而建立暴雨诱发浅层滑坡风险的滑坡分析模型。计算结果表明,本文滑坡分析模型更为合理地反映了暴雨对浅层滑坡稳定性的影响,为有效防御暴雨型浅层滑坡灾害提供了新的技术方法。

参考文献:

[1] 孙建平,刘青泉,李家春,等.降雨入渗对深层滑坡稳定性影响研究[J].中国科学G辑,2008,38(8):945-954.

- [2] 文宝萍.滑坡预测预报研究现状与发展趋势[J].地质前缘,中国地质大学,北京:1996,3(1-2):86-92.
- [3] CARRARA A. Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation [J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15(3): 403-426.
- [4] 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): 3-17.
- [5] REICHENBACH P, CARDINALI M, VITA P D, et al. Regional Hydrological Thresholds for Landslides and Floods in the Tiber River Basin (Central Italy) [J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2-3): 146-159.
- [6] ZHOU C H, LEE C F, LI J, et al. On the Spatial Relationship Between Landslides and Causative Factors on Lantau Island, Hongkong [J]. *Geomorphology*, 2002(43): 197-207.
- [7] 陈祖煜.土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M].中国水利水电出版社,2003.
- [8] MONTGOMERY D R, SULLIVAN K, GREENBERG H M. Regional Test of A Model for Shallow Landsliding [J]. *Hydrological Processes*, 1998(12): 943-955.
- [9] BORGA M, FONTANA G D, GREGORETTI C, et al. Assessment of Shallow Landsliding by Using a Physically Based Model of Hillslope Stability [J]. *Hydrological Processes*, 2002(16): 2833-2851.
- [10] PACK R T, TARBOTON D G, GOODWIN C N. The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping [C]. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 1998.
- [11] WU W, SIDLE R C. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins [J]. *Water Resources Research*, 1995(31): 2097-2110.
- [12] BATCHELOR G. An Introduction to Fluid Dynamics [M]. Cambridge University Press, 1967.
- [13] SMITH R E. Infiltration Theory for Hydrologic Applications [M]. *Water Resources Monograph 15*, American Geophysical Union, Washington D. C., 2002.
- [14] 曹志先,王鑫.湖南省山洪灾害临界雨量计算模型研究报告[R].武汉大学,2009.
- [15] IWAGAKI Y. Fundamental Studies on the Runoff Analysis by Characteristics [J]. *Disaster Prevention Research Institute Kyoto University Bulletins*, 1955, 10.
- [16] HUNTER M. Benchmarking 2D Hydraulic Models for Urban Flooding [J]. *Water Management, Proceedings of Institution of Civil Engineers*, 2008(161): 13-30.
- [17] 靳德武,牛富俊,陈志新,倪万魁.不同渗流条件下无限斜坡稳定性分析方法探讨[J].地质灾害与环境保护,2003,14(4):63-67.
- [18] 刘青泉,李家春.降雨坡面径流汇集模型及其在茅坪滑坡中的应用[J].自然科学进展,2006,16(6):662-671.

(责任编辑 高春萌)