

# 降雨入渗作用下秭归向斜核部南段斜坡稳定性评价

齐信, 刘广宁, 黄波林, 王世昌, 黄长生

(中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** [目的] 开展降雨条件下湖北省秭归县向斜核部斜坡稳定性评价研究, 为政府部门减灾防灾工程提供科学支持, 为滑坡灾害的预测和管理提供科学依据。[方法] 以耦合了地下水动力学的 TRIGRS 无限斜坡稳定性计算模型为基础, 详细介绍了斜坡稳定性评价的数据处理过程以及参数选取方法。[结果] 发生斜坡失稳的区域多位于松散土体中等厚—较厚, 地形坡度中等的区域, 尤其是土层厚度在 7—10 m, 地形坡度在 20°~30° 范围内为斜坡失稳高发区。[结论] 在土层厚度和地形地貌的双重控制下, 短时强降雨入渗作用导致孔隙水压力增大, 这些区域的斜坡土体极易发生滑动, 为滑坡危险性较高的多发区域。斜坡稳定性评价结果和滑坡实际分布吻合程度较高, 在一定程度上反映出降雨诱发滑坡空间分布关系和分布规律。

**关键词:** TRIGRS 模型; 斜坡稳定性评价; 瞬态渗透模型; 秭归向斜盆地

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)03-0097-05

**中图分类号:** P642.22

**文献参数:** 齐信, 刘广宁, 黄波林, 等. 降雨入渗作用下秭归向斜核部南段斜坡稳定性评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 97-101. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 017; Qi Xin, Liu Guangning, Huang Bolin, et al. Slope stability evaluation of southern section of Zigui syncline core under rainfall infiltration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 97-101. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 017

## Slope Stability Evaluation of Southern Section of Zigui Syncline Core Under Rainfall Infiltration

QI Xin, LIU Guangning, HUANG Bolin, WANG Shichang, HUANG Changsheng

(Wuhan Geological Survey Center, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China)

**Abstract:** [Objective] The main stream of synclinal basin core in Zigui County of Hubei Province was selected as an case study area, and the slope stability evaluation under transient rainfall infiltration was carried out to provided scientific support for disaster prevention and mitigation projects of government departments, and to provide scientific basis for landslide hazard prediction and management. [Methods] Based on TRIGRS infinite slope stability calculation model coupled with groundwater dynamics, the data processing procedure and parameter selection methods of the slope stability evaluation tool was introduced in detail. [Results] Slope instability mainly located in the region with loose soil having medium thick or thicker layer, and medium slope, especially in the region having soil thickness of 7 to 10 m, and terrain slope ranged 20° to 30°, where were high incidence areas of slope instability. [Conclusion] Under the synergic effects of soil layer thickness and topography, short-duration but heavy rainfall can lead to the increase of pore-water pressure, where slope sliding happen easily, which was determined as landslide high risk area. The slope stability evaluation results were in good agreement with the actual distribution of landslides, and it can reflect the spatial distribution of rainfall-induced landslides to some extent.

**Keywords:** TRIGRS model; slope stability evaluation; transient infiltration model; Zigui synclinal basin

收稿日期: 2017-02-07

修回日期: 2017-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于水波动力学的水库崩塌滑坡涌浪研究”(41372321); 中国地质调查局灾害预警项目(12120114079301); 水工环调查项目(DD20160257)

第一作者: 齐信(1983—), 男(汉族), 河南省永城市, 硕士, 工程师, 主要从事灾害地质、工程地质、环境地质的调查与研究。E-mail: qx\_cdut@126.com。

中国是世界上崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害多发的国家之一,斜坡是地质灾害孕育的载体。影响斜坡失稳大体上分为内在固有因素和外在诱发因素。内在固有因素是斜坡自身发育的属性,包括地形地貌、地层岩性、地质构造、物质组成、斜坡结构、土体类型、密实度、亲水性等。外在诱发因素是指斜坡失稳的诱发因素,包括地震、降雨、人类工程活动等。其中,降雨是斜坡失稳发生和发展的最重要因素之一<sup>[1]</sup>。降雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90%<sup>[2]</sup>。这是因为在降雨条件下,地表水下渗和地下水径流导致地下水位上升,增大了斜坡岩土体饱和程度和孔隙水压力,岩土体力学参数强度降低,当斜坡岩土体的下滑力大于抗滑力时,就会引起斜坡土体失稳。

长期以来,国内外学者一直重视研究斜坡失稳与降雨的关系,以期找到合理的降雨型斜坡失稳预测预报方法和防治措施。目前针对降雨诱发斜坡失稳规律的研究主要分为两个方面:一是数理统计的半定量研究方法;二是基于水力物理模型的定量研究方法。前者针对降雨与滑坡发生的规律分析,多进行易发性、危险性、风险性和降雨阈值的研究<sup>[2]</sup>。后者多在无限斜坡稳定性计算模型的基础之上,充分考虑降雨入渗及地下水变化对斜坡稳定性的影响。国内外学者已经提出多种降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型。如: Dietrich<sup>[3]</sup> 的 SHALSTAB 模型, Pack<sup>[4]</sup> 建立了 SINMAP 模型, Baum 的 TRIGRS 模型<sup>[5-6]</sup>, Tarolli 等<sup>[7]</sup> 提出 QD-SLaM 模型, 兰恒星等<sup>[8]</sup> 提出的改进 SINMAP 模型。

降雨入渗作用下建立的物理模型是评价降雨诱发斜坡失稳最有效的方法,但是,由于每种物理模型都有一定的边界条件下提出的,因此每种模型都有一定的适用条件和适用范围。本文的研究区位于三峡

地区秭归向斜盆地,秭归向斜盆地两翼地层均呈顺向坡特征,类似于无限斜坡模型,且顺层斜坡上发育较厚风化层、崩坡积层、滑坡堆积层、残坡积层等岩土体,在降雨、渗流作用下,松散岩土体极易沿着斜坡面发生滑动失稳造成灾害。TRIGRS 模型是耦合了地下水动力学的无限斜坡稳定性计算模型,等同于降雨持续作用下,滑坡土体沿着滑动面滑动,因此,该区评价方法适宜于利用瞬态降雨入渗斜坡稳定性计算 TRIGRS 模型。本文拟以三峡地区秭归向斜核部的归州河干流为例,开展降雨条件下秭归向斜核部斜坡稳定性评价研究,以为政府部门减灾防灾工程提供科学支持,为滑坡灾害的预测和管理提供科学依据。

## 1 TRIGRS 计算模型

TRIGRS(transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability model)是以无限边坡为基础,基于栅格的降雨诱发型斜坡稳定性计算模型<sup>[5-6]</sup>,以估算降雨导致斜坡孔隙水压力增大而导致斜坡的失稳。无限斜坡模型是基于极限平衡方法分析确定剪切应力与抗剪强度之间的平衡,用来计算斜坡的安全系数,是一个耦合了地下水压力水头的无限斜坡稳定性分析公式(公式(1)):

$$F_s(Z,t) = \frac{\tan\phi'}{\tan\delta} + \frac{c' - \psi(Z,t)\gamma_w \tan\phi'}{\gamma_s Z \sin\delta \cos\delta} \quad (1)$$

式中:  $F_s$ ——安全系数;  $\gamma_s$ ——土的容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $\gamma_w$ ——地下水的容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $c'$ ——有效黏聚力( $\text{kPa}$ );  $\phi'$ ——有效内摩擦角( $^\circ$ )。

短历时强降雨过程中,地表水下渗和地下水径流导致地下水位上升,松散土体力学参数强度降低,地下水压力水头发生变化,浅表层土体达到近饱和状态,在此采用有透水边界的水文模型进行计算(公式(2))。

$$\psi(Z,t) = (Z-d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t-t_n) [D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left[ \frac{Z}{2 \times D_1^{\frac{1}{2}}(t-t_n)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t-t_{n+1}) [D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left[ \frac{Z}{2 \times D_1^{\frac{1}{2}}(t-t_{n+1})^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中:  $Z$ ——朝下的纵向方向坐标,  $Z = z/\cos\delta$ ;  $\delta$ ——坡角( $^\circ$ );  $z$ ——垂直坡面向下的方向地表以下厚度(m);  $I_{nz}$ ——第  $n$  个时间内给定的表面通量的强度,  $D_1 = D_0/\cos^2\delta$ ;  $D_0$ ——饱和水力扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\psi$ ——地下水压力水头;  $t$ ——时间(s);  $t_n$ ——指第  $n$  个降雨强度阶段对应的时间;  $N$ ——时间段的总数目;  $d$ ——稳态的地下水深度(m);  $\beta = \cos^2\delta - (I_{zLT}/K_s)$ ;  $I_{zLT}$ ——初始表面通量;  $K_s$ ——垂向饱和渗透系数( $\text{m}/\text{s}$ );  $H(t-t_n)$ ——Heaviside 阶梯函数;  $\text{ierfc}(\eta)$ ——高斯补误差函数一次积分值,定义为:

$$\text{ierfc}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2) - \eta \text{erfc}(\eta) \quad (3)$$

## 2 研究区概况及数据参数

### 2.1 研究区概况

研究区位于三峡地区秭归向斜盆地核部,属于长江一级支流归州河流域。秭归向斜盆地形成始于晚三叠世,秭归向斜构成秭归盆地的主体褶皱。主要出露中生代侏罗纪地层,发育良好,分布广泛,构成秭归盆地的主体部分。斜坡评价区纵长约 8.9 km,横宽

约 4 km,总面积为 35.60 km<sup>2</sup>。按照 10 m×10 m 的栅格大小划分为 890 行,400 列,总共 356 000 个栅格。

## 2.2 计算数据及主要参数

TRIGRS 评价模型涉及的参数比较多,包括地形地貌、海拔高度、地形坡度、土层厚度、降雨参数、岩土力学参数及水文参数。

2.2.1 海拔高度 海拔高度是斜坡稳定性评价重要因子,也是地下水和降雨径流路径的决定因子。应用 1:5 万地形图数据在 ARCGIS 生成数字高程模型 DEM 数据,即可得到海拔高度数据。该区海拔高度范围为 0~877.5 m,最高峰位于归州河与长江交叉口西部。

2.2.2 地形坡度 地形坡度是斜坡稳定性的重要影响因子之一,一般地形坡度越大,越不利于斜坡的稳定。但是如果坡度太大,比如大于 50°,斜坡因土层太薄而几乎不会有滑坡发生;如果坡度小于 10°,斜坡土体因坡度太小而重力驱动力不足而很少发生滑动<sup>[9]</sup>。一般认为地形坡度在 20°~45°较为适宜。地形坡度提取于数字高程模型(DEM)。研究区地形坡度值范围为 0°~88.7°。研究区南西和北东部位地形坡度较陡,平均坡度大于 60°。

2.2.3 斜坡土层厚度 斜坡土层厚度为斜坡稳定性评价的物质基础,TRIGRS 模型的本质就是判断斜坡土体的稳定性。研究区出露土体主要为崩坡积、滑坡堆积、残坡积等碎石土体。通过槽探、收集钻孔数

据、土体剖面露头、野外调查等手段采集土体厚度数据 400 余点,采用克里金(kriging)插值法对数据点进行内插,得出斜坡土体厚度分区图。研究区内土体厚度范围为 0.1~12.9 m,多分布于归州河两岸缓倾角斜坡坡体上。

2.2.4 降雨参数 降雨是诱发斜坡失稳的一个十分重要的触发因素和动力来源<sup>[10]</sup>,因此是斜坡稳定性评价的重要因子。2014 年 9 月 2 日秭归发生一起强降雨事件,此次强降雨诱发大量的滑坡发生。因此,本次采用该次平均强降雨参数计算该区的斜坡稳定性。根据降雨观测资料,2014 年 9 月 2 日降雨量达到 96.5 mm。

2.2.5 岩土力学和水文参数 由于研究区较大,包含不同的岩土体类型及地形地貌环境,为简化数据处理难度,采用归并处理程序,总体将研究区划分成 2 个区域,分别为:分区 1—崩塌、滑坡堆积区;分区 2—基岩上覆残坡积区,基岩全风化、强风化区。模型所涉及的主要岩土力学参数和水文参数包括黏聚力( $c$ )、内摩擦角( $\psi$ )、容重( $\gamma_s$ )、水力扩散系数( $D_0$ )、饱和土体渗透系数( $K_s$ )等。岩土力学参数和水文参数的获取:通过室内试验,采用非饱和土水动力学参数取值的经验公式〔公式(3)和公式(4)]<sup>[11-14]</sup>,并结合前人在该地区的试验研究获得。研究区的岩土体力学和水文主要参数如表 1 所示。

$$D_0 = 200K_s \quad (4)$$

$$I_{zLT} = 0.01K_s \quad (5)$$

表 1 研究区岩土力学和水文参数

分区	土体容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	有效平均黏聚力/ kPa	有效平均内摩擦角/ (°)	平均饱和渗透系数/ (m·s <sup>-1</sup> )	水力扩散系数/ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	21.2	22.1	22.0	3.0×10 <sup>-6</sup>	6.0×10 <sup>-4</sup>
2	19.5	24.3	15.6	2.0×10 <sup>-6</sup>	4.0×10 <sup>-4</sup>

## 3 结果与分析

### 3.1 评价结果分析

通过上述数据处理以及相关参数设置,即可开始斜坡稳定性评价。首先,建立 dem. asc, slope. asc, zmax. asc, zones. asc 等栅格 ASC 数据文件;其次,根据表 1 参数,修改 tr\_in. txt 文件中相对应参数值;最后,运行 TRIGRS 模拟计算模块,即完成斜坡稳定性评价工作。TRIGRS 模型只对每个栅格单元体单独进行稳定系数计算,未考虑各栅格单元体之间力的作用,导致计算结果偏小。但是,对于地质灾害评价而言,较保守的评价是可以接受的。为了更好的表达降雨不同阶段斜坡失稳与降雨持续时间的关系,按照平

均降雨量,分别进行 1,6,12,24 h 4 个时间阶段斜坡失稳个数对比分析。

根据计算结果,1 h 后,有 882 个栅格单元稳定系数小于 1,发生失稳的栅格数量占总体栅格数量的 0.25%;6 h 后,1 036 个栅格单元稳定系数小于 1,发生失稳的栅格数量占总体栅格数量的 0.29%;12 h 后,1 356 个栅格单元稳定系数小于 1,发生失稳的栅格数量占总体栅格数量的 0.38%;24 h 后,1 682 个栅格单元稳定系数小于 1,发生失稳的栅格数量占总体栅格数量的 0.47%。计算结果表明:① 降雨 1 h 后,不稳定栅格单元失稳个数最多,这是因为在降雨初期,潜在不稳定或欠稳定斜坡极易在降雨作用下失稳,而随着时间的持续,潜在不稳定或欠稳定斜坡个

数减少,失稳增量速率会随之不断降低;②随着降雨时间的持续,不稳定斜坡土体单元总量不断增多,24 h后不稳定斜坡单元数量是1 h后不稳定斜坡单元数量的近2倍,且栅格单元个数( $N$ )与降雨时间( $T$ )呈指数关系(图1),相关性指数为0.9916,具有较好的相关性。

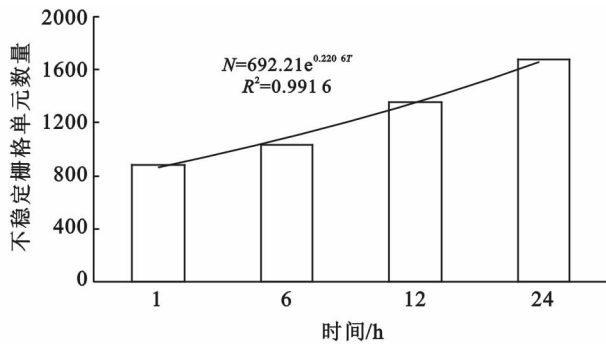


图1 不同降雨阶段不稳定斜坡单元数量统计

### 3.2 斜坡稳定性控制条件影响分析

地形坡度与土层厚度是斜坡稳定性评价重要的参数,开展斜坡失稳概率与地形坡度和土层厚度关系曲线图对比显示,发生斜坡失稳的区域,多位于土体中等厚—较厚、地形坡度中等的区域。一般来说,土体是滑坡发生的物质基础,研究区内土层厚度在5—11 m范围内是滑坡发生的高易发区,尤其土层厚度在7—10 m范围内斜坡单元失稳概率达到总数的88.2%(图2);地形坡度中等的区域是斜坡易于失稳的区域,是因为地形坡度太大,土体难于在斜坡上累积,斜坡因土层太薄而几乎不会有滑坡发生。如果地形坡度太小,斜坡土体因坡度太小而重力驱动力不足而很少发生滑动,研究区内地形坡度在 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 较为适宜,尤其是地形坡度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内斜坡单元失稳概率达到总数的81.3%(图3)。因此,在土层厚度和地形地貌的双重控制下,尤其是土层厚度在7—10 m、地形坡度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的斜坡土体极易发生滑动,为危险性较高区域。

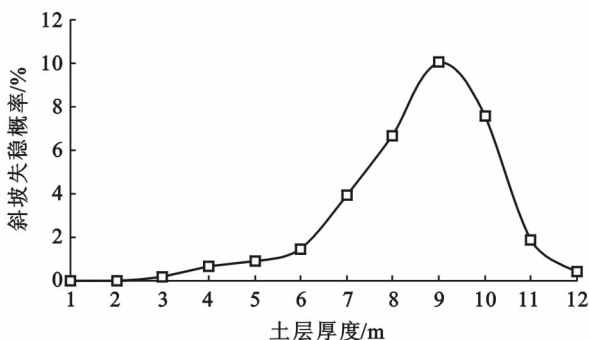


图2 土层厚度与斜坡单元失稳概率

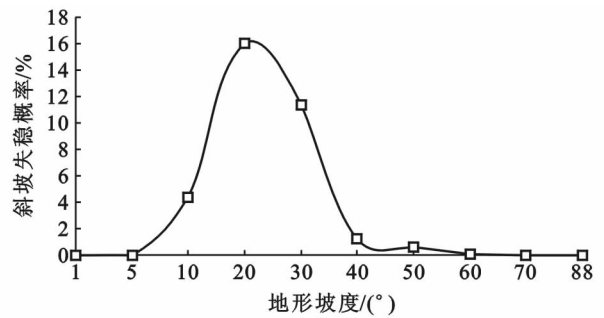


图3 地形坡度与斜坡单元失稳概率

### 3.3 评价结果验证

为了进一步对评价结果可靠性进行验证,搜集到该区2014年9月2日因强降雨诱发的滑坡分布。在9月2日降雨作用下,研究区内共发生滑坡8处,滑坡分布总面积约0.46 km<sup>2</sup>。通过TRIGRS模型稳定性计算,24 h后,发生斜坡失稳单元总面积为0.67 km<sup>2</sup>。开展滑坡分布与TRIGRS斜坡稳定性计算分区评价图叠加分析,对比结果显示:滑坡分布图与斜坡失稳危险性较高区域具有较高重叠区,发生斜坡单元失稳面积的71%均发生在8个滑坡范围内。针对该区8个滑坡,当地国土局已经建立滑坡监测预警、群测群防体系,而分布于8个滑坡外易发生斜坡单元失稳29%面积,是地方政府和国土部门下一步开展地质灾害防治、监测预警、群测群防体系的重点。因此,基于TRIGRS评价模型的方法适合于降雨诱发斜坡稳定性评价,得出的斜坡稳定性计算分区评价图,在一定程度上反映研究区降雨诱发滑坡灾害空间分布关系和分布规律,为地方政府和国土部门的地质灾害防治、监测预警、群测群防体系建设提供科学依据。

## 4 结论

(1) 本研究采用瞬态降雨入渗斜坡稳定性计算模型,以三峡地区秭归向斜核部的归州河干流为例,开展降雨条件下秭归向斜核部土质斜坡稳定性评价研究。应用一种可考虑不同降雨强度的大区域性斜坡稳定性评价方法,该方法以栅格个体为评价计算单元,统计在一定降雨期内各斜坡栅格单元体失稳的概率,继而获得区域上浅层滑坡危险性分区。

(2) 斜坡稳定性计算结果显示,发生斜坡失稳的区域,多位于松散土体中厚—较厚,地形坡度中等的区域,在土层厚度和地形地貌的双重控制下,土层厚度在7—10 m、地形坡度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的这些区域的斜坡土体极易发生滑动,为危险性较高区域。

(3) 本文计算所需要的岩土力学及水文参数是实验室测试和前人研究成果而获得,数据具有一定的代表性和可靠性。计算的分区评价图与野外滑坡填图对比分析,斜坡稳定性评价结果和实际吻合程度较高,发生斜坡失稳面积的 71% 均发生在降雨后灾害应急填图圈闭的 8 个滑坡范围内。

(4) 基于 TRIGRS 评价模型的方法适合于降雨诱发的浅层土质斜坡稳定性评价,得出的斜坡稳定性计算分区评价图,在一定程度上反映研究区的降雨诱发土质滑坡灾害空间分布关系和分布规律,为地方政府和国土部门的地质灾害防治、监测预警、群测群防体系建设提供科学依据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-455.
- [2] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征: 基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29-31.
- [3] Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(3/4): 383-400.
- [4] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping[C]// 8 th Congress of the International Association of Engineering Geology. Columbia: Vancouver, 1998.
- [5] Baum R L, Savage W Z, Godt J W, et al. TRIGRS: A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis[R]. Colorado: US Department of the Interior and US Geological Survey, 2002.
- [6] Baum R L, Savage W Z, Godt J W. TRIGRS: A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2. 0 [R]. Colorado: US Department of the Interior and US Geological Survey, 2008.
- [7] Tarolli P, Borga M, Chang K T, et al. Modelling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties[J]. Geomorphology, 2011, 133(3/4): 199-211.
- [8] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报, 2003, 48(5): 507-512.
- [9] Godt J W, Baum R L, Savage W Z, et al. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework[J]. Engineering Geology, 2008, 102: 214-226.
- [10] 李秀珍, 何思明, 王震宇, 等. 降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 34-38.
- [11] 张桂荣, 程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 476-482.
- [12] 陈崇希, 林敏, 成建梅. 地下水水动力学[M]. 5 版. 北京: 地质出版社, 2011: 100-110.
- [13] Liu Chianan, Wu Chiachen. Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach [J]. Environ Geology, 2008, 55(4): 907-915.
- [14] Salciarini D, Godt J W, Savage W Z, et al. Modeling landslide recurrence in Seattle, Washington, USA[J]. Engineering Geology, 2008, 102(3): 227-237.
- [1] 张永光, 伍永秋, 刘洪鹤, 等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 35-38, 49.
- [2] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1165-1173.
- [3] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探: 以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 16-19, 41.
- [4] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 545-549.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. (GB/T 16453. 3-2008) 水土保持综合治理技术规范: 沟壑治理技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] 孟令钦, 李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 7-11.
- [7] 李飞, 张树文, 李天奇, 等. 东北典型黑土区南部侵蚀沟与地形要素之间的空间分布关系[J]. 土壤与作物, 2012, 1(3): 148-154.
- [8] 王宇, 韩兴, 赵兰坡. 黑土坡面土壤团聚体组成特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 88-90.
- [9] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究, 1996, 13(3): 57-63.
- [10] 郝春红, 潘英华, 陈曦, 等. 坡度、雨强对壤土入渗特征的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(10): 1040-1044.
- [11] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 40-43.

(上接第 96 页)