

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-13

李艳杰, 唐亚明, 邓亚虹, 等. 降雨型浅层黄土滑坡危险性评价与区划——以山西柳林县为例——以山西柳林县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 105-114.

LI Yanjie, TANG Yaming, DENG Yahong, *et al.* Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 105-114.

## 降雨型浅层黄土滑坡危险性评价与区划 ——以山西柳林县为例

李艳杰<sup>1</sup>, 唐亚明<sup>2</sup>, 邓亚虹<sup>1</sup>, 宋焱勋<sup>1</sup>, 慕焕东<sup>3</sup>, 山 聪<sup>1</sup>, 崔思颖<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:**黄土高原是我国地质灾害最为发育的地区之一, 其中降雨诱发的浅层黄土滑坡又最为典型。以典型黄土地貌区-柳林县为例, 应用 SINMAP 模型, 探讨模型在黄土地区的适用性, 分析了随着研究区内降雨量的增加, 滑坡变形失稳区域的面积变化、分布位置和扩展趋势。研究表明, 随着降雨量的增加, 滑坡所处位置逐渐由稳定状态向失稳状态发展, 位于失稳分区的滑坡数量逐渐增加, 说明降雨对该研究区的斜坡稳定性影响较为明显。通过将模拟结果与实际发生的由降雨触发的滑坡灾害进行对比分析, 可以得出 SINMAP 模型在黄土地区, 对区域性降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性的模拟预测有效, 可以用于黄土地区浅层滑坡的稳定性评价研究。

**关键词:** 降雨; 浅层黄土滑坡; 稳定性; SINMAP 模型

中图分类号: P642.22; P642.13<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)02-0105-10

## Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province

LI Yanjie<sup>1</sup>, TANG Yaming<sup>2</sup>, DENG Yahong<sup>1</sup>, SONG Yanxun<sup>1</sup>, MU Huandong<sup>3</sup>, SHAN Cong<sup>1</sup>, CUI Siying<sup>1</sup>

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Loess Plateau is one of the most developed areas of geological disasters in China, and the shallow loess landslide induced by rainfall is the most typical. Taking Liulin County, a typical loess landform area, as an example. With the increase of rainfall in the study area, the area change, distribution location and expansion trend of the landslide deformation instability area are analyzed. The research shows that with the increase of rainfall, the location of landslides gradually develops from a stable state to an unstable state, and the number of landslides in the unstable zone gradually increases, indicating that rainfall has a significant impact on the slope stability of the study area. By comparing the simulation results with the actual rainfall-triggered landslide disasters. It can be concluded that the SINMAP model is effective in simulating and predicting the regional stability of

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-03-16

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772275); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190642); 陕西省教育厅科学研究计划专项项目(20JK0801); 陕西省自然科学基金研究计划一般项目(2022JQ-289)

第一作者: 李艳杰(1996-), 女, 硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害防治灾害。E-mail: liyj@chd.edu.cn

通讯作者: 邓亚虹(1978-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: dgdyh@chd.edu.cn

shallow loess landslide induced by rainfall in the loess region, as well as can be used in the stability assessment of shallow landslide in the loess region.

**Keywords:** rainfall; shallow loess landslides; stability; SINMAP model

## 0 引言

黄土高原山区地形结构破碎、沟壑纵横、土质疏松、水土流失严重,特殊的地形地貌条件及土体类型使黄土高原地区成为目前我国自然地质灾害最为发育的典型地区之一<sup>[1]</sup>。据悉,我国每年发生在黄土高原的地质灾害占比高达 30%,严重制约着我国黄土高原地区的新型城镇化各类工程建设,危及公路、铁路、水利等重大基础工程的安全运营。由于发育于黄土高原的黄土是一种大孔隙且多具有湿陷性的特殊性质的土,其在遇水后力学强度迅速降低。因此,在黄土高原地区降雨诱发地质灾害频发<sup>[2-3]</sup>,尤其是降雨诱发的浅表层滑坡地质灾害最为频发。据统计,黄土高原中地质灾害的 75% 以上触发于降雨条件下<sup>[4]</sup>。近年来,受极端天气的影响,黄土高原强降雨频发<sup>[5]</sup>,使得浅表层黄土滑坡广泛发育,浅层滑坡已成为黄土高原最危险的地貌之一<sup>[6]</sup>。因此,对降雨作用下黄土斜坡稳定性分析与评价具有重要的理论实际意义。

一般从单体和区域两方面,对斜坡的稳定性进行评价<sup>[7-8]</sup>。目前,已经有很多的方法被应用于模拟计算单体斜坡的平均稳定性<sup>[9-11]</sup>,然而单体斜坡的稳定性评价,主要针对某一个具体的地质剖面,在时间尺度上对灾害进行预报,适用于滑坡工程治理。斜坡的不稳定地质灾害通常具有突发性、群发性、分布广、隐蔽性等特点。因此,区域斜坡稳定性分析对地区的土地规划和减灾防灾更加具有参考价值。研究表明,初步从区域稳定性进行宏观把控,在空间尺度上判断灾害发生的危险性,对于可能会失稳的区域,进行重点监测和防治,精准施策,使危险较高的地段得到保护和实施措施,实现资源最大化利用,有助于保护人民的生命财产安全<sup>[12]</sup>。

为了对区域斜坡稳定性进行分析,大量的定性和统计方法已经被用来进行模拟预测,例如模糊数学法<sup>[13]</sup>、层次分析法<sup>[14-15]</sup>、信息量法<sup>[16-17]</sup>、支持向量机<sup>[18-19]</sup>、回归模型<sup>[20-21]</sup>、神经网络<sup>[22]</sup>和证据权模型<sup>[23-25]</sup>等。其中定性分析法具有较大的人为主观判断因素;统计模型的研究方法只考虑历史中地质灾害事件出现的频数,不深入考量灾害发生的内在机制,不以明确的力学过程作为基础,所得的稳定性评价结果只适用于某个

具体的区域。一些学者从关注滑坡机理的角度出发,提出了一些结合滑坡机理的定量评估的物理模型,如 SHALSTAB<sup>[26-27]</sup>、SINMAP<sup>[28-29]</sup>、TRIGRS<sup>[30-31]</sup>、SCOOPS3D<sup>[32-33]</sup>等。上述这些模型在评价边坡稳定性方面基于物理模型并将影响边坡稳定的因素量化来计算安全系数,具有明确的力学过程作为基础,减少了人为主观判断因素等优势。

柳林县境内 80% 以上是黄土梁峁区。据统计,柳林县所发生的地质灾害基本分布在黄土梁峁区,且多为强降雨诱发的浅层黄土滑坡。文中基于 SINMAP 模型,以柳林县为研究对象,对研究区不同降雨条件下的区域斜坡稳定性做了对比分析。希望通过降雨条件下柳林县的浅层黄土滑坡危险性评价的预测研究成果,为柳林县土地规划和减灾防灾提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于山西省中部西侧,吕梁山西部。该区域属于典型的温带大陆性干旱—半干旱气候,6—9 月份是降雨聚集时间段,全年总降雨量的 67.5% 基本产生在此时间段。据历史统计,柳林县的降雨量,年峰值为 632 mm,多年雨季平均日降雨量的峰值为 45 mm,日峰值为 91 mm,时峰值为 49 mm,多年平均为 494 mm,年平均蒸发量为 1 901 mm<sup>[34]</sup>。

柳林县位于吕梁山区西部,区内沟壑纵横,山峦起伏,整体上呈东北高、西南低的地形。黄土梁峁区约占 80% 以上。海拔 700~1 300 m,地形陡峻,河流侧蚀严重,这使得该地区很容易发生滑坡等地质灾害。在地貌上,柳林县所发生的地质灾害基本上分布在黄土梁峁区。其中,刘家山、成家庄、东洼、龙门垣、下罗候一线以西,基本上以黄土丘陵区为主,黄土沟谷区主要分布于黄河东岸及其各支流等较大沟谷中<sup>[34]</sup>。

区内出露地层中太古界河口群主要分布于县内北部大雨梁、王家会村一带;古生界寒武系分布于县东北部杨家岭一带;奥陶系分布于县东部溶蚀、剥蚀区;石炭系和二叠系主要分布在境内中、东部广大地区;中生界三叠系分布于沟谷中;新生界上新近系分布于境内屈产河、三川河等河谷两侧,第四系分布于黄土梁峁区及屈产河、三川河等河谷中。区内构造较为简单,整体上呈由北东向南西渐倾的单斜构造,构造形迹主要为断

裂、褶皱。

由区内含水介质的主要岩石分类结构特征和地下水主要赋存的环境条件可知, 区内地下水分为五大类。其中, 松散岩类孔隙水广泛分布于黄土梁峁区、三川河及黄河支流河谷; 碎屑岩类裂隙水主要分布于柳林县中西部的黄土沟谷区; 碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙岩溶水分布于柳林县成家庄—龙门塔一线及广大的中西部地区; 碳酸盐岩岩溶水分布较广, 遍于柳林县; 变质岩类裂隙水较少, 仅在柳林县东部杜家岭、王家会一带小面积分布(图 1)。

境内主要河流为三川河、屈产河, 均属黄河流域。屈产河属黄河一级支流, 发源于石楼县最南端, 向北经柳林县汇入黄河, 境内长 12.8 km, 流域面积约 109.6 km<sup>2</sup>; 三川河是横贯县东西的一条大河, 发育于方山县、离石市和中阳县, 长 70.4 km, 流域面积约 558.1 km<sup>2</sup>; 黄河在县境西界由北向南, 长约 56.7 km, 年平均流量 397.3×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

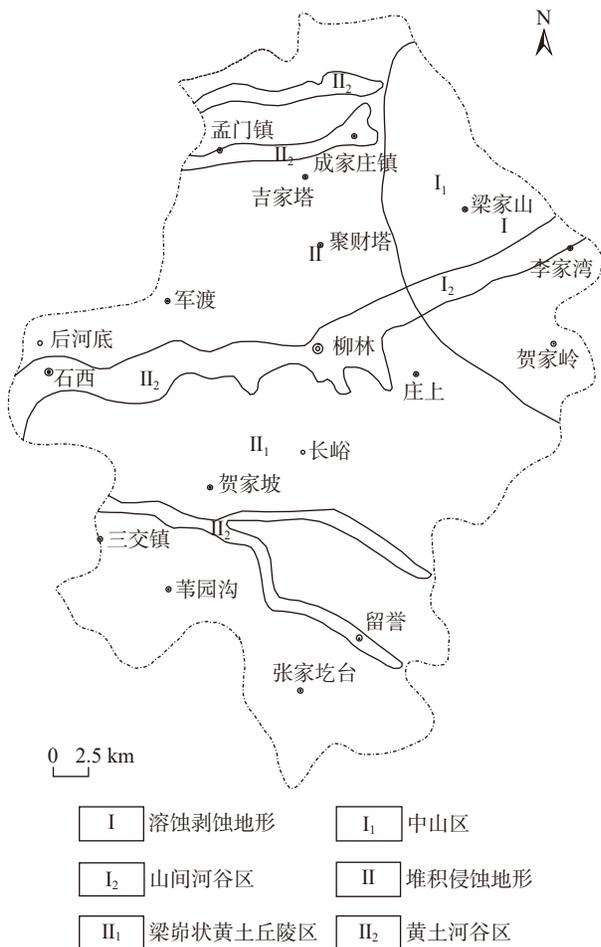


图 1 山西省柳林县地貌分区图<sup>[34]</sup>

Fig. 1 Geomorphological zoning map of Liulin County, Shanxi Province

## 2 SINMAP 模型的应用

### 2.1 基本原理

Pack 等<sup>[35]</sup>基于无限斜坡稳定性模型和稳态水文模型建立了 SINMAP 模型, 并将稳定指数 (*SI*) 作为输出结果, 对研究区的斜坡稳定性进行评价。该指数的定义为假设参数在不确定性范围内均匀分布, 地表斜坡处于稳定状态的概率, 即  $SI = \text{Prob}(FS > 1)$ 。

#### 2.1.1 地形湿度指数 *w*

采用稳态水文模型估算地形湿度指数 *w*, 地形湿度指数的上限为 1, 如果值大于 1, 则会在地表形成径流, 可定义为:

$$w = \min\left(\frac{Ra}{T \sin \theta}, 1\right) \quad (1)$$

式中: *R*——稳定状态时的流量/(mm·d<sup>-1</sup>);

*a*——单位汇水面积/m<sup>2</sup>;

*T*——导水系数/(m<sup>2</sup>·d<sup>-1</sup>);

$\theta$ ——滑面倾角/(°)。

式(1)中 *R* 为关键时期触发滑坡所需的有效补给, 而不是长期(例如年)平均补给量。SINMAP 模型出于综合考虑气候和水文地质因素的影响, 把 *R/T* 视为单个参数来量化相对湿度。

#### 2.1.2 无限斜坡稳定性模型

为了定义稳定性指数 Stability Index(*SI*), 式(1)中的湿度指数被并入式(2)所示的无量纲安全系数中:

$$FS = \frac{c + \cos \theta [1 - wr] \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (2)$$

变量 *a* 和  $\theta$  是由数字高程模型 (DEM) 计算获取的。密度比 *r* 用来描述水和密度之间的关系, 一般规定为定值。SINMAP 模型中的一些输入参数, 如 *c*、 $\tan \varphi$  和 *R/T*, 通过设置最大和最小阈值, 来允许变量的不确定性。输入参数在阈值之间的随机变化会生成地表稳定性的概率分布。

假设  $R/T = x$ ,  $\tan \varphi = t$ , 上下限均匀分布为:

$$c \sim U(c_1, c_2)$$

$$x \sim U(x_1, x_2)$$

$$t \sim U(t_1, t_2)$$

对于斜坡稳定性最不利的(最保守的)参数组合为在 *c*、*x* 和 *t* 的分布上, 当  $c = c_1$ 、 $t = t_1$  和  $x = x_2$  时。在这种情况下, 理论上得到的安全系数  $FS (FS_{\min})$ , 为参数不确定性组合中能够计算出来的最小值。在此条件下, 如果  $FS > 1$ , 则该区域是无条件稳定的, *SI* 定义为:

$$SI = FS_{\min} = \frac{c_1 + \cos\theta \left[ 1 - \min\left(x_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \right] r_1}{\sin\theta} \quad (3)$$

最小安全系数值低于 1 的地表斜坡, 存在变形失稳的概率, 也就是说当  $FS_{\min} < 1, FS_{\max} > 1$  时, 该斜坡存在变形失稳的概率, 此时,  $0 < SI < 1$ 。一方面是由于  $c$ 、 $\tan\varphi$  和  $t$  等参数随机分布产生的空间概率, 另一方面是由于  $R$  代表可能随时间变化的湿度, 也就是说, 参数  $x$  中的随机分布包含了时间和空间的概率。在这种情况下 ( $FS_{\min} < 1$ ),  $SI$  定义为:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) \quad (4)$$

对于斜坡稳定性最有利的参数组合为在  $c$ 、 $x$  和  $t$  的分布上, 当  $c = c_2$ 、 $t = t_2$  和  $x = x_1$  时。在这种情况下, 理论上得到的安全系数  $FS(FS_{\max})$ , 为参数不确定性组合中能够计算出来的最大值:

$$FS_{\max} = \frac{c_2 + \cos\theta \left[ 1 - \min\left(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \right] r_2}{\sin\theta} \quad (5)$$

当  $FS_{\max} < 1$  时, 视为该处地表坡处于不稳定状态, 那么  $SI = \text{Prob}(FS > 1) = 0$ 。

## 2.2 数据来源

选取柳林县分辨率为 30 m 的数字高程模型 (DEM), 基于土壤类型、地质、地形地貌和气候水文等资料, 结合研究区内分布的历史滑坡灾害点, 对研究区的斜坡稳定性进行评价。已知研究区内已有的滑坡中, 大型滑坡比例占 1.5%, 中型滑坡比例占 14.4%, 小型滑坡比例占 30.3%。从物质成份上看, 主要为土质滑坡, 共占滑坡总数的 92%, 土体主要为松散的粉土及粉质黏土。

根据调查柳林县地质灾害大多由暴雨及以上的降雨诱发, 降雨与灾害间的关系极其密切。其中暴雨型滑坡主要分布于庄上镇、成家庄镇、王家沟乡孟门镇、陈家湾乡等乡镇, 滑坡共 38 处, 其中 35 处为老滑坡, 发生时间不明; 其余 1 处为孟门镇前冯家沟村于 1976 年 9 月发生的滑坡, 2 处为王家沟乡佐主村、大圪塔村分别于 1987 年 6 月和 2001 年 6 月发生的滑坡, 其全部为降雨诱发。

## 2.3 参数设置

SINMAP 模型的计算涉及到多个参数, 包括比集水区面积  $a$ 、稳态时的流量 (有效降雨量)  $R$ 、坡度  $\theta$  以及岩土体的物理力学参数, 其中岩土体的物理力学参数主要包括密度  $\rho$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、黏聚力  $c$  和导水系数  $T$  等。首先, 坡度和比集水区面积数据由 DEM 高程数据计算得出。其次, 土的抗剪强度参数和密度是通过野外采取的

土样进行室内试验获得。最后, 对于稳态时的流量 (有效降雨量)  $R$  和导水系数  $T$ , 因导水率总是远大于稳态时的流量, 亦即  $R/T$  的值较小。因此, 在分析地形湿度指数  $w$  的空间分布情况时, 采用了不同的  $T/R$  进行试算。研究发现, 在  $T/R = 3\ 000$  时, 大于 1 的地形湿度指数分布情况与柳林县的水系分布相似。因此, 由多年雨季平均日最大降雨量 (45 mm), 采用反演分析法<sup>[36]</sup> 计算土体的导水系数。根据野外采取的土样获得的室内实验结果, 结合已有的数据资料, 选取以下参数 (表 1)。

表 1 模型选取的参数值  
Table 1 Parameter values selected by the model

重力加速度 /(m·s <sup>-2</sup> )	湿度 /%	内聚力 /kPa		内摩擦角 /(°)		土体密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	土体的导水系数 /(m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
		下限	上限	下限	上限		
9.81	10	3	15	15	24	1 540	135

## 2.4 稳定性指数

根据  $SI$  的值, 对研究区内区域稳定性进行分类, 可以分为 6 个类别 (表 2)。由表 2 可知, 1~3 类为稳定区 ( $FS_{\min} > 1$ ), 亦即在该区域内, 即使斜坡处于最易失稳的情况, 仍然保持稳定, 除非叠加强降雨、地震等巨大的不稳定因素, 才可能会失稳。第 4 和第 5 类均存在失稳的可能性 ( $FS_{\min} < 1, FS_{\max} > 1$ ), 其中第 4 类失稳的可能性小于 50%, 第 5 类失稳的可能性大于 50%, 第 6 类 ( $FS_{\max} < 1$ ) 在指定参数取值范围内取任何值, 这些区域都将发生失稳。

表 2 稳定性分类定义  
Table 2 Stability classification definition

序号	条件	类	预测状态	未建模因素的可能影响
1	$SI > 1.5$	1	极稳定	不稳定需要巨大的 不稳定因素
2	$1.5 \geq SI > 1.25$	2	稳定	不稳定需要适度的 不稳定因素
3	$1.25 \geq SI > 1.0$	3	基本稳定	较小的不稳定因素可能导致不稳定
4	$1.0 \geq SI > 0.5$	4	潜在不稳定	不稳定不需要 不稳定因素
5	$0.5 \geq SI > 0$	5	不稳定	稳定因素可能是 稳定的原因
6	$SI = 0$	6	极不稳定	稳定需要稳定因素

## 3 不同降雨条件下滑坡变形失稳预测

据历史统计的 40 年日降雨数据来看, 柳林县超过 50 mm 的暴雨为 45 次, 日降雨量超过 100 mm 的大暴雨为 4 次, 超过 20 mm 的特大暴雨为 1 次<sup>[37]</sup>。因此, 文中研究主要对 30, 50, 100, 200 mm/d 四种降雨量下的柳林县的滑坡变形失稳危险性进行分析预测。基本对应大雨、暴雨和大暴雨工况。通过计算得到不同降雨量下失稳面积的变化规律如图 2 所示, 图 2 中纵坐标所示

的面积百分比代表各稳定分区的面积与区域总面积的比值。由图 2 可知, 随着降雨量的增加, 研究区域内各稳定分区的面积逐渐减小, 失稳分区的面积逐渐增大, 表明稳定区逐渐过渡到失稳区, 变化幅度为 31.6%。

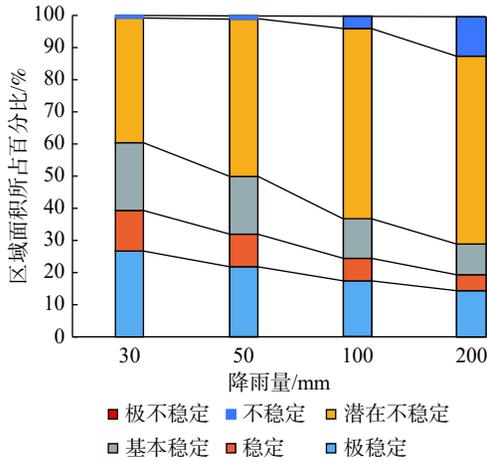


图 2 不同降雨量下失稳面积变化

Fig. 2 Changes of instability area under different rainfall

为了更直观反映不同降雨强度下不同稳定级别区域面积的变化规律, 绘制不同稳定级别下区域面积随降雨强度增加的变化规律图如图 3 所示。

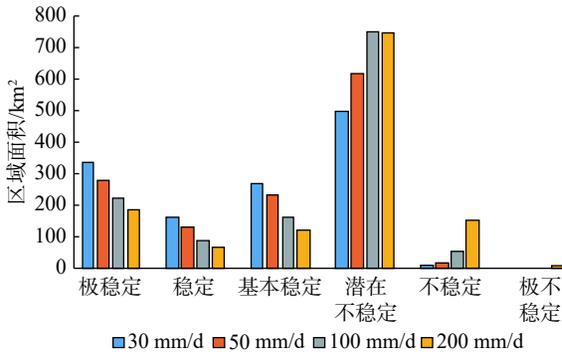


图 3 不同稳定级别下区域面积变化

Fig. 3 Regional area changes under different stability levels

由图 3 可知, 随着降雨量的增加, 区域内处于稳定状态的地区逐渐减少, 处于失稳状态的地区逐渐扩张。具体表现为, 极稳定区, 稳定区及基本稳定区的面积所占总面积的比例, 随着降雨量的增加均呈递减趋势, 降幅分别为 12.1%, 7.7% 和 11.8%。潜在不稳定分区, 不稳定分区和极不稳定分区分别占总面积的比例, 随着降雨量的增加整体均呈递增的趋势, 增幅分别为 20%, 11.6% 和 0.008%。其中潜在不稳定区的面积在降雨量为 100 mm/d 与 200 mm/d 表现为持平, 此时不稳定区面积则表现为突增的状态, 说明在该区域当降雨强度达到 200 mm/d 时, 产生滑坡等地质灾害的概率、分布区

域与危险性进一步增加。

为了量化 SINMAP 模型对研究区内区域斜坡稳定性的预测结果与浅层滑坡空间分布的一致性, 绘制了不同稳定性级别下滑坡分布区域面积所占比例示意图 (图 4)。

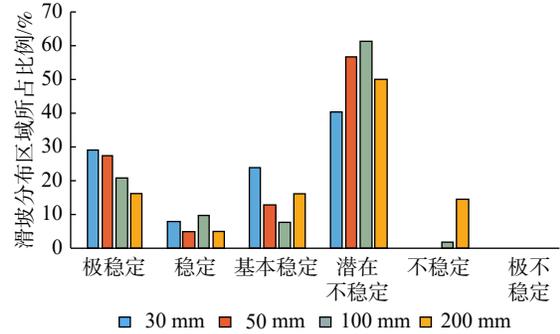


图 4 不同稳定性级别下滑坡分布区域面积所占比例 (24 h 内)

Fig. 4 Proportion of the area of landslides with different stability levels (with 24 h)

由图 4 可知, 当雨量较小时, 滑坡主要产生在模拟结果中比较稳定的区域。随着降雨量的增加, 滑坡所处位置逐渐由稳定状态向失稳状态发展, 位于失稳分区的滑坡数量逐渐增加, 且失稳分区内也存在潜在不稳定区向不稳定区的转化。当降雨量为 200 mm/d 时潜在不稳定区向不稳定区转移较大, 说明不同降雨强度可能会触发不同的滑坡危险程度。

基于 SINMAP 模型通过输入 DEM 数据、土体密度、内摩擦角等参数, 结合已有滑坡灾害点分布数据, 计算不同降雨量下研究区的地表稳定性指数分布图 (图 5-8)。

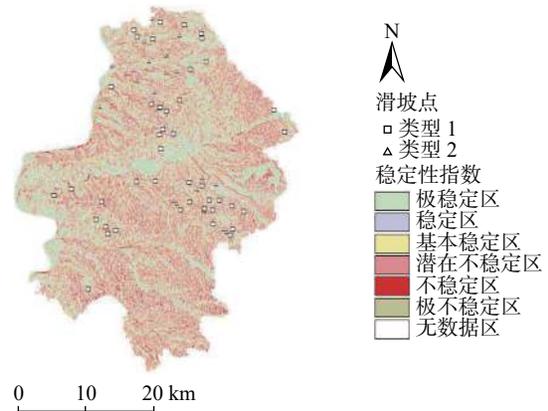


图 5 30 mm 降雨地表稳定指数分布图

Fig. 5 30 mm rainfall surface stability index distribution map

从图 5-8 中可以观察到, 失稳区域随降雨量的增加呈现增多的趋势。这表明当降雨量较小时, 由于受到地

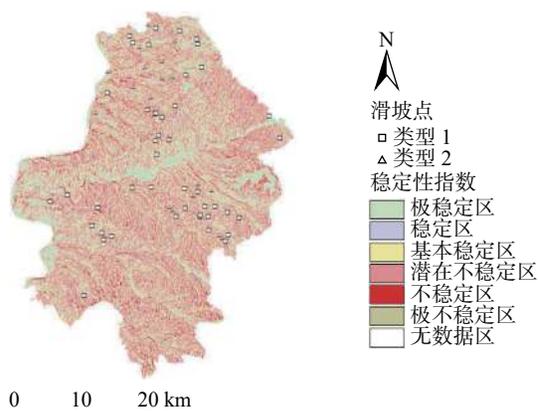


图 6 50 mm 降雨地表稳定指数分布图

Fig. 6 50 mm rainfall surface stability index distribution map

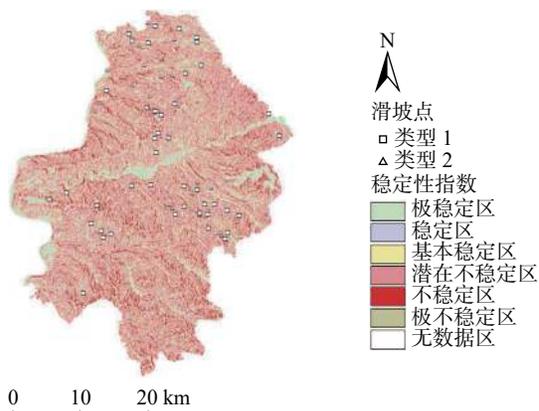


图 7 100 mm 降雨地表稳定指数分布图

Fig. 7 100 mm rainfall surface stability index distribution map

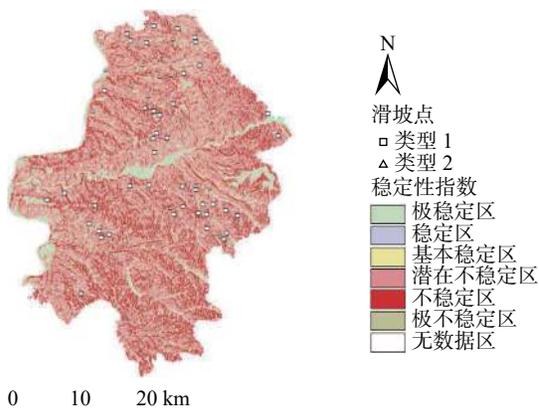


图 8 200 mm 降雨地表稳定指数分布图

Fig. 8 200 mm rainfall surface stability index distribution map

形的影响,失稳分区主要分布在雨水汇集的黄土沟谷区。随着降雨强度的加强,失稳分区逐渐向山脊和坡度较缓的斜坡单元扩展。在地表稳定指数分析的基础上,基于 SINMAP 模型,模拟得到不同的降雨量下研究区内坡度-比集水区面积图(图 9-12)。从图 9-12 中可以

观察到,饱和、非饱和以及 10% 的湿度分界线,当日降雨量增大时,均呈现了向下移动的趋势。这表明,研究区内的饱和程度,随降雨强度的加强而增长。研究发现,失稳分区中的滑坡点和用小黑点示意的研究区中的随机区域占总体的比例,同样伴随着降雨量的增加而出现了递增的趋势。具体表现为,分布在稳定区中的滑坡点和小黑点逐渐向失稳区扩展。由于地形的影响,当研究区内降雨量较小时,滑坡主要分布在雨水汇集的黄土沟谷区。随着降雨量的增加,区域内斜坡稳定性也随之降低,失稳地区逐渐由沟谷区向沟谷上游延伸,因此失稳地区的滑坡数量也越来越多。

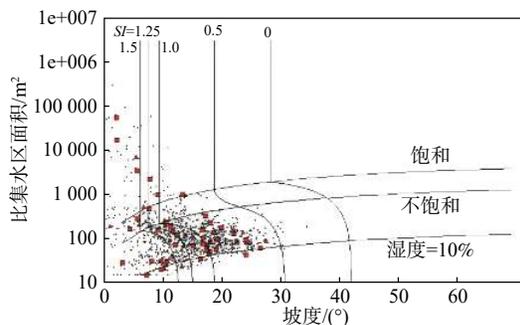


图 9 30 mm 降雨研究区域坡度—比集水区面积图

Fig. 9 Slope-Contributing Area of study area in 30 mm rainfall

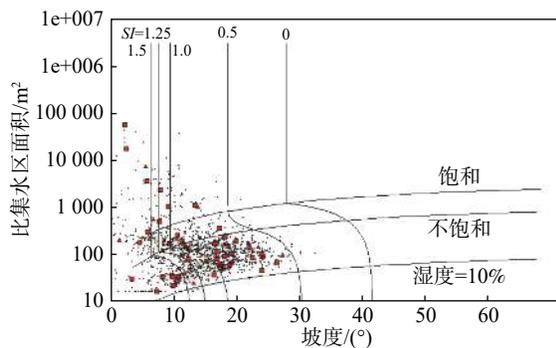


图 10 50 mm 降雨研究区域坡度—比集水区面积图

Fig. 10 Slope-Contributing Area of study area in 50 mm rainfall

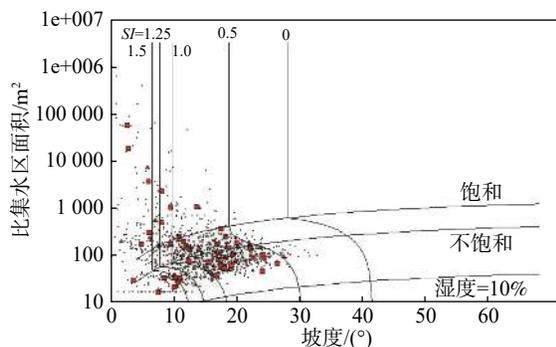


图 11 100 mm 降雨研究区域坡度—比集水区面积图

Fig. 11 Slope-Contributing Area of study area in 100 mm rainfall

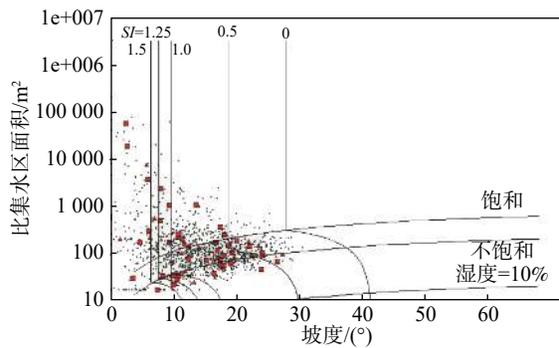


图 12 200 mm 降雨研究区域坡度—比集水区面积图

Fig. 12 Slope-Contributing Area of study area in 200 mm rainfall

为了得到研究区内降雨触发滑坡的阈值, 绘制不同降雨量与滑坡总面积中失稳分区所占滑坡面积变化曲线如图 13 所示。

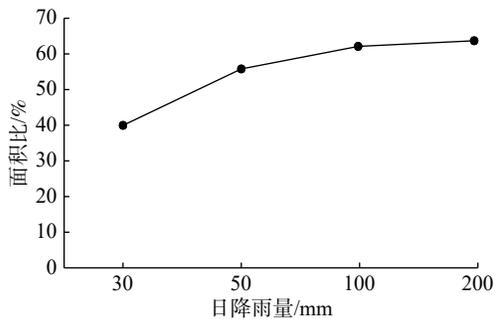


图 13 失稳分区中滑坡面积占滑坡总面积的比例统计曲线

Fig. 13 Statistical curve of the proportion of the landslide area in the total landslide area in the instability zone

由图 13 可知, 滑坡总量的 50% 触发于日降雨量小于 50 mm 的工况下。分布在失稳分区中的滑坡比例, 随降雨强度的加强呈线性增长。当日降雨量为 100 mm 时, 位于失稳分区中的滑坡占比高达 62%。由此可认为当日降雨量大于 100 mm 时, 大部分的滑坡可能处于变形失稳的状态, 即触发柳林县滑坡危险性的降雨阈值约为 100 mm/d。

基于 SINMAP 模型评价结果发现, 日降雨量为 100 mm 时, 研究区总面积的 63% 分布于潜在不稳定区、不稳定区以及极不稳定区。滑坡总数的 61.9% 分布于预测的不稳定区, 共计 39 个滑坡点, 其中潜在不稳定区分布了 38 个滑坡。以上分析结果说明 SINMAP 模型对模拟不同降雨条件下区域斜坡的稳定性的预测具有有效性。

#### 4 滑坡变形失稳预测结果及误差验证

##### 4.1 滑坡变形失稳预测结果验证

为了进一步验证 SINMAP 模型对研究区的预测具

有有效性, 选取了研究区内 3 个典型滑坡与模拟结果进行对比。3 个典型滑坡分别为贺家坡村西滑坡, 聚财塔村滑坡和苇园沟村滑坡, 地貌上均属于黄土梁峁侵蚀堆积区, 地形切割强烈。出露地层为第四系中上更新统粉质黏土及粉土, 在降雨的诱发下, 表层土体沿下伏地层面发生滑动, 形成滑坡。将典型滑坡点与模拟得到的地表稳定指数分布图进行对比, 其对比结果如图 14 所示, 由图 14 可知该模型在降雨条件下对研究区的已有滑坡预测准确, 可应用于黄土地区的区域斜坡稳定性预测。

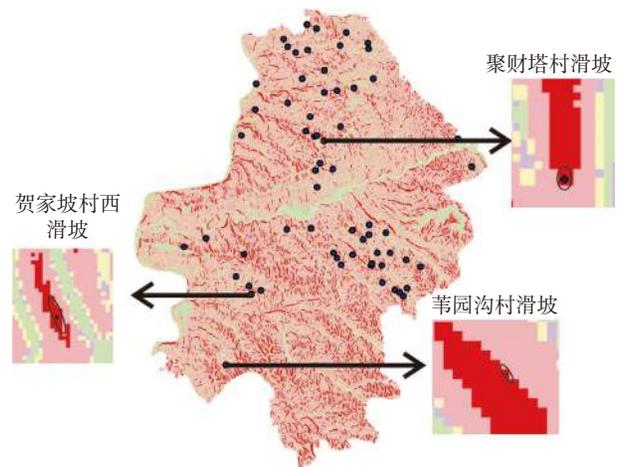


图 14 分布示意图

Fig. 14 Schematic diagram of distribution

##### 4.2 误差分析

通过 SINMAP 模型在柳林县范围模拟得出的预测结果与现有的滑坡灾害分布对比分析可知, 模型在黄土地区的应用具有适用性, 但模拟结果与实际还是有一定的差距, 考虑到模型在输出精度上不仅受数字高程模型影响较大, 而且受到已知滑坡精确定位的影响。如果 DEM 分辨率越高, 已知滑坡定位越精确, 则模型计算结果越准确。

#### 5 结论和建议

(1) 应用 SINMAP 模型, 对柳林县不同降雨量下的滑坡变形失稳的可能性, 进行了模拟预测。研究发现, 随着降雨量的增加, 区域内饱和程度增加, 处于稳定状态的地区逐渐减少, 与此相反, 处于失稳状态的地区逐渐扩张, 说明降雨对该研究区的斜坡稳定性影响较为明显。

(2) 当日降雨量超过 100 mm 时, 失稳分区中滑坡比例超过 63%, 表明触发柳林县滑坡失稳的降雨量阈值大约为 100 mm/d。

(3)应用 SINMAP 模型,分析探讨了随着研究区内降雨量的增加,滑坡变形失稳区域的空间分布变化情况。研究表明,随着降雨量的增加,滑坡所处位置逐渐由稳定状态向失稳状态发展,位于失稳分区的滑坡数量逐渐增加。通过将模拟结果与实际由降雨触发的滑坡灾害进行对比分析,发现 SINMAP 模型在黄土地区模型预测结果与实际浅层滑坡空间分布具有一致性,证实 SINMAP 模型对区域性降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性的模拟预测有效,可以用于黄土地区浅层滑坡的稳定性评价研究,对该地区的土地规划和减灾防灾具有一定的参考价值。

#### 参考文献 (References) :

- [1] 梁四宝. 明清晋陕黄土高原的水土流失与水土保持 [J]. 中国水土保持, 1990(6): 50-52. [LIANG Sibao. Soil erosion and water and soil conservation in the loess plateau of Shanxi and Shaanxi in the Ming and Qing Dynasties [J]. Soil and Water Conservation in China, 1990(6): 50-52. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691. [PENG Jianbing, LIN Hongzhou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684-691. (in Chinese with English abstract)]
- [3] TANG Y M, XUE Q, LI Z G, et al. Three modes of rainfall infiltration inducing loess landslide [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 137-150.
- [4] 巨玉文, 齐琼, 董震, 等. 山西西部地区黄土地质灾害与降雨的关联性分析 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 81-87. [JU Yuwen, QI Qiong, DONG Zhen, et al. Analysis of relevance between loess geological disasters and rainfalls in the western area of Shanxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 81-87. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LI Z, ZHENG F L, LIU W Z, et al. Spatially downscaling GCMs outputs to project changes in extreme precipitation and temperature events on the loess plateau of China during the 21st Century [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 82/83: 65-73.
- [6] WANG G L, LI T L, XING X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7933-7944.
- [7] 唐亚明, 薛强, 李政国, 等. 基于单体和区域尺度的黄土滑坡监测预警方法与实例 [J]. 灾害学, 2015, 30(4): 91-95. [TANG Yaming, XUE Qiang, LI Zhengguo, et al. Loess landslide monitoring and early-warning methods and practices on scale of single slope and regional scope [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(4): 91-95. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 吴赛男, 田毅. 我国单体滑坡模拟和区域滑坡易发性评价研究进展 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 113-119. [WU Sainan, TIAN Yi. Review on progress of individual landslide simulation and assessment of regional landslide susceptibility in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 113-119. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 姜彤, 马莎, 李永新. 抗剪强度  $c$ ,  $\phi$  值概率分布对边坡可靠性分析的影响 [J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(3): 46-49. [JIANG Tong, MA Sha, LI Yongxin. The study of effect on the reliability of rock slope by different probability distribution of shear strength  $c$ ,  $\phi$  [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2004, 25(3): 46-49. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 曾亚武, 田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5355-5359. [ZENG Yawu, TIAN Weiming. Slope stability analysis by combining fem with limit equilibrium method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup 2): 5355-5359. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郭子仪, 范振华, 朱云升, 等. 边坡稳定性分析中的有限元极限平衡法 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(1): 79-84. [GUO Ziyi, FAN Zhenhua, ZHU Yunsheng, et al. Finite element and limit equilibrium method applied on the stability analysis of road slope [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(1): 79-84. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 崔志杰. 灌溉条件下黄土阶地斜坡区域稳定性评价: 以黑台为例 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [CUI Zhijie. Slope stability assessment of irrigated loess terraces—A case study at heitai, Gansu Province, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张永波. 斜坡稳定性分析的模糊综合评判方法 [J]. 太原工业大学学报, 1996, 27(1): 59-63. [ZHANG Yongbo. Fuzzy mathematics method of the analysis of slope stability [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1996, 27(1): 59-63. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王亚强, 王兰民, 张小曳. GIS支持下的黄土高原地震滑坡区划研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 170-176. [WANG Yaqiang, WANG Lanmin, ZHANG Xiaoye. GIS based seismic landslide zonation of the loess plateau [J]. *Scientia*

- Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 170–176. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 唐亚明,程秀娟,薛强,等.基于层次分析法的黄土滑塌风险评价指标权重分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 40–46. [ TANG Yaming, CHENG Xiujuan, XUE Qiang, et al. Weights analysis of loess collapse risk assessing factors based on analytical hierarchy process [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 40–46. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 戴悦.基于信息量模型的三峡库区滑坡区域危险性评价方法研究 [ D ] .北京:清华大学, 2013. [ DAI Yue. Study on the method of regional early warning of landslide in Three Gorges area based on information model [ D ] . Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 殷坤龙,朱良峰.滑坡灾害空间区划及GIS应用研究 [ J ] . 地学前缘, 2001, 8(2): 279–284. [ YIN Kunlong, ZHU Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of gis [ J ] . *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 279–284. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 戴福初,姚鑫,谭国焕.滑坡灾害空间预测支持向量机模型及其应用 [ J ] . 地学前缘, 2007, 14(6): 153–159. [ DAI Fuchu, YAO Xin, TAN Guohuan. Landslide susceptibility mapping using support vector machines [ J ] . *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 153–159. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 许冲,徐锡伟.基于不同核函数的2010年玉树地震滑坡空间预测模型研究 [ J ] . 地球物理学报, 2012, 55(9): 2994–3005. [ XU Chong, XU Xiwei. The 2010 Yushu earthquake triggered landslides spatial prediction models based on several kernel function types [ J ] . *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2994–3005. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] DAI F C, LEE C F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [ J ] . *Geomorphology*, 2002, 42(3/4): 213–228.
- [ 21 ] 方然可,刘艳辉,苏永超,等.基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 181–187. [ FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181–187. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] BISWAJEET P, SARO L. Utilization of optical remote sensing data and GIS tools for regional landslide hazard analysis using an artificial neural network model [ J ] . *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 143–151.
- [ 23 ] 杨华阳,许向宁,杨鸿发.基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 20–29. [ YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 20–29. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] SIFA S F, MAHMUD T, TARIN M A, et al. Event-based landslide susceptibility mapping using weights of evidence (WoE) and modified frequency ratio (MFR) model: A case study of Rangamati district in Bangladesh [ J ] . *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2020, 4(3): 222–235.
- [ 25 ] TANG Y M, FENG F, GUO Z Z, et al. Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: a comparative study from the loess plateau area in Shanxi (China) [ J ] . *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 124159.
- [ 26 ] 康超.确定性模型在黄土沟壑区斜坡稳定性预测中的应用 [ D ] .兰州:兰州大学, 2010. [ KANG Chao. Application of deterministic model in analysis and prediction of stability in loess gully area [ D ] . Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 27 ] MICHEL G P, KOBİYAMA M, GOERL R F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River Basin, southern Brazil [ J ] . *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(7): 1266–1277.
- [ 28 ] 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(2): 35–39. [ WU Li. A SINMAP-based quantitative assessment and model verification of regional landslide hazard [ J ] . *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(2): 35–39. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 29 ] 庄建琦,彭建兵,张利勇.不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价 [ J ] . 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(3): 867–876. [ ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, ZHANG Liyong. Risk assessment and prediction of the shallow landslide at different precipitation in loess plateau [ J ] . *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(3): 867–876. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 30 ] KIM D, IM S, LEE S H, et al. Predicting the rainfall-triggered landslides in a forested mountain region using TRIGRS model [ J ] . *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(1): 83–91.
- [ 31 ] 夏蒙,王家鼎,谷天峰,等.基于TRIGRS模型的浅层黄土滑坡破坏概率评价 [ J ] . 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 453–458. [ XIA Meng, WANG Jiading, GU Tianfeng, et al. Evaluation of shallow loess landslide destruction probability based on TRIGRS model [ J ] . *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(4): 453–458. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 刘磊,殷坤龙,徐勇,等.考虑降雨及库水位变动的区域

- 滑坡灾害稳定性评价研究 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 403 - 414. [ LIU Lei, YIN Kunlong, XU Yong, et al. Evaluation of regional landslide stability considering rainfall and variation of water level of reservoir [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 403 - 414. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 33 ] 文杰. 基于 SCOOPS3D 和 TRIGRS 模型的区域性降雨滑坡危险性评价: 以陇南武都区典型地段为例 [ D ] . 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [ WEN Jie. Regional rainfall landslide hazard assessment based on SCOOPS3D and TRIGRS models—A case study in typical areas in wudu district of south Gansu Province [ D ] . Beijing: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 李鹏强. 火电厂地下水污染溶质运移数值模拟研究 [ D ] . 太原: 太原理工大学, 2012. [ LI Pengqiang. Numerical simulation study of solute transportation during groundwater polluted in thermal power plant [ D ] . Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 35 ] PACK R T, TARBOTON D G, GOODWIN C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: MOORE D, HUNGER O, eds. Proceedings of 8th congress of the International Association of Engineering Geology. Netherlands: A Balkema Publisher, 1998. 1157-1165.
- [ 36 ] 兰恒星, 周成虎, 伍法权, 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(5): 507 - 512. [ LAN Hengxin, ZHOU Chenghu, WU Faquan, et al. Spatial analysis and prediction of the risk of rainfall-type landslides supported by GIS [ J ] . Chinese Science Bulletin, 2003(5): 507 - 512. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 37 ] 赵敦江, 任六平, 卫中平. 吕梁地区暴雨规律分析 [ J ] . 山西水土保持科技, 2001, 3: 6 - 8. [ ZHAO Dunjiang, REN Liuping, WEI Zhongping. Analysis on the law of rainstorm in Luliang area [ J ] . Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2001, 3: 6 - 8. (in Chinese) ]