

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

#### 基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究

刘 凡,邓亚虹,慕焕东,钱法桥

# A study of the stability evaluation method of rainfall-induced shallow loess landslides based on the Maxent-Sinmap slope model

LIU Fan, DENG Yahong, MU Huandong, and QIAN Faqiao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207050

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil 石爱红, 李国庆, 丁德民, 苑权坤 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 141–151

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method 秦溯, 李云安, 孙琳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 81-88

# 基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory 鞠兴华,杨晓华,张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112-118

基于Green-Ampt模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究

Rainfall infiltration process of multi-layer slope based on improved Green-Ampt model stability analysis 宋宜祥, 尹子航, 黄达 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 162-170

# 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory 贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82-89

# 湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan 刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21-21



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207050

刘凡,邓亚虹,慕焕东,等.基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究[J].水文地质工程地质, 2023, 50(5):146-158.

LIU Fan, DENG Yahong, MU Huandong, *et al.* A study of the stability evaluation method of rainfall-induced shallow loess landslides based on the Maxent-Sinmap slope model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 146-158.

# 基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡 稳定性评价方法研究

刘 凡<sup>1,2,3</sup>,邓亚虹<sup>1,2</sup>,慕焕东<sup>4</sup>,钱法桥<sup>1,2,3</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054;2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室,陕西西安 710054;3. 陕西省地质调查院,陕西西安 710068;
 4. 西安理工大学岩土工程研究所,陕西西安 710048)

摘要:无限边坡(Sinmap)模型在评价降雨作用下浅层黄土滑坡稳定性时精度较低。针对这一问题,基于最大熵(Maxent)模型对 Sinmap模型评价进行改进,构建了最大熵-无限边坡(Maxent-Sinmap)模型,评价降雨作用下区域性浅层降雨型黄土滑坡稳定性。以黄土滑坡高发区的陕西省志丹县为例,利用野外及室内相关工作获取地形、岩土体力学参数及地质灾害等相关数据,通过 Maxent模型获取主要环境变量,再根据主要环境变量进行分区,通过 Sinmap模型对降雨作用下不同分区的浅层黄土滑坡稳定性进行评价。研究结果表明:基于 Maxent模型得到志丹县内滑坡主要受坡度、降雨量、地貌、道路缓冲区及归一化植被覆盖指数等5个指标影响,对历史灾点的贡献率分别为27.1%、20.3%、18.8%、18.7%、6.2%。相较于传统Sinmap模型,该模型不稳定区域灾点密度在小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨情况下分别提高了17.26%、16.54%、17.39%、14.20%、12.96%。Maxent-Sinmap模型计算结果相较于 Sinmap模型计算结果具有更大的稳定区域,且稳定区的扩大区无历史灾点分布。表明该模型具有更高精度及更可靠的结果,可以更好的为区域性浅层降雨型滑坡评价提供科学依据。 关键词: Maxent-Sinmap;降雨作用;区域性;浅层黄土滑坡;稳定性评价 中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)05-0146-13

# A study of the stability evaluation method of rainfall-induced shallow loess landslides based on the Maxent-Sinmap slope model

LIU Fan<sup>1,2,3</sup>, DENG Yahong<sup>1,2</sup>, MU Huandong<sup>4</sup>, QIAN Faqiao<sup>1,2,3</sup>

College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
 Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, MNR, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
 Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

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

Abstract: To address the problem of low evaluation accuracy of the Sinmap model in evaluating the stability of shallow loess landslides under the action of rainfall, a method based on the Maxent-Sinmap model is constructed

第一作者: 刘凡(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治研究工作。E-mail: 2020126091@chd.edu.cn

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-10-13 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目(202101); 国家自然科学基金项目(41772275); 陕西省教育厅科学研究计划专项项目(20JK0801); 陕西省自然科学基础研究计划一般项目(2022JQ-289);

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工作。E-mail: dgdyh@chd.edu.cn

to evaluate the stability of regional shallow rainfall loess landslides under the action of rainfall by improving the evaluation of the Sinmap model based on the maximum entropy model. Taking Zhidan County, Shaanxi Province, a high-incidence area of loess landslides, as an example, the relevant data of topography, geotechnical parameters and geological disasters were obtained by field and indoor work. The main environmental variables were obtained by Maxent model, and then the main environmental variables were partitioned. The Sinmap model was used to evaluate the stability of shallow loess landslides in different partitions under rainfall. The results show that based on the Maxent model, the landslide in Zhidan County is mainly affected by five indicators, such as slope, rainfall, landform, road buffer zone and normalized vegetation coverage index. The contribution rates to historical disaster points are 27.1 %, 20.3 %, 18.8 %, 18.7 % and 6.2 %, respectively. Compared with the traditional Sinmap model, the density of disaster points in the unstable area of the model increased by 17.26 %, 16.54 %, 17.39 %, 14.20 % and 12.96 % respectively under the conditions of light rainfall, moderate rainfall, heavy rainfall, rainstorm and downpour. The results of the Maxent-Sinmap model have a larger stable area than those of the Sinmap model, and there is no historical disaster distribution in the expanded area of the stable area. The model has higher accuracy and more reliable results, which can provide a better scientific basis for the evaluation of regional shallow rainfall landslides.

Keywords: Maxent-Sinmap; rainfall; regional; shallow loess landslide; stability evaluation

黄土高原地区因特殊的地形地貌条件以及土体 类型,成为我国乃至世界上水土流失最严重、生态环 境最脆弱的地质灾害频发高发区<sup>[1-3]</sup>。据不完全统 计,我国每年有约三分之一的地质灾害发生于黄土高 原<sup>[4]</sup>。由于黄土的水敏性,在降雨作用下其强度迅速 降低而易发生滑坡、剥落等地质灾害。据文献记载, 超过 75%的黄土地质灾害是由降雨诱发的<sup>[5]</sup>。近年 来,极端天气频发使得浅层黄土滑坡广泛发育<sup>[6-8]</sup>。 因此,对降雨作用下区域性黄土斜坡稳定性评价具有 重要意义。

滑坡稳定性评价方法众多,根据评价指标大体分 为两类:定性评价方法与定量评价方法。定性评价方 法主要根据地质灾害所处的地质环境并结合专家个 人经验进行评价,具有一定的主观性<sup>19</sup>。定量评价方 法应用较为广泛,一般分为确定性评价方法及不确定 性评价方法。不确定性评价方法包括:逻辑回归模 型[10-11]、人工神经网络[12-13]、支持向量机模型[14-15]、 决策树模型169、信息量模型177 等。不确定性评价方法 关注滑坡灾害与影响因子之间的数学关系,未考虑坡 体变形破坏的过程机理,存在一定的不合理性[18]。确 定性评价方法主要有极限平衡法、有限元数值分析法 等。在极限平衡法的基础上创立了多种区域性边坡 稳定性评价模型,如无限边坡(Sinmap)模型<sup>[19-20]</sup>、 Trigrs 模型<sup>[21-22]</sup>及 Scoops3D<sup>[23-24]</sup>模型等。Sinmap 模 型将无限边坡理论与稳态水文模型进行耦合,实现了 区域性计算过程中地形及岩土体物理力学参数的变

化,使得该模型在不同的区域均具有一定的适用性<sup>[25]</sup>。随着研究的不断深入,Sinmap模型被广泛应用于区域 地质灾害评估,武利等<sup>[26]</sup>将Sinmap应用于江口流域, 表明Sinmap适用于浅层滑坡评估。康超等<sup>[27]</sup>为了进 一步探讨Sinmap模型在黄土地区的适用性,在甘肃省 华池县区域性黄土浅层滑坡评估中进行了应用。

上述学者对滑坡稳定性评价方法及 Sinmap 模型 评价区域性黄土浅层滑坡稳定性进行了较为系统的 研究,取得了非常有意义的研究成果。但滑坡稳定性 评价方法中模型评估精度主要取决于岩土体物理力 学参数选取的准确性及地形数据(DEM)的精度,而在 以往对 Sinmap 模型的应用中,对评价区域往往根据其 行政单元进行划分,忽略了环境因素导致的土体物理 力学参数的变化,进而导致评价精度的降低。

为了进一步提高 Sinmap 模型评估精度,对岩土体 物理力学参数的空间差异性进行分析,通过选取一定 影响因子,基于最大熵(Maxent)模型对影响因子相关 性进行评价,实现研究区的合理分区。根据分区结果 对岩土体物理力学参数进行分区标记,进而改进目前 以行政区为单元的计算方法,以提高 Sinmap 模型计算 精度。以黄土滑坡高发区的陕西省志丹县为例,基于 Maxent 模型<sup>[28]</sup>与 Sinmap 模型开展降雨作用下区域性 浅层黄土滑坡稳定性评价。通过 Maxent 模型进行主 要影响因子选取,在此基础上进行研究区域分区进而 通过 Sinamp 模型进行稳定性评价。通过对比、验证 和分析 Maxent-Sinmap 与 Sinmap 模型计算结果得到 研究区高精度地质灾害易发性评价结果。以建立 Maxent-Sinmap 模型来规避 Sinmap 模型计算过程中单 一研究区划分的弊端,更好地为防灾减灾提供理论 依据。

# 1 研究区域概况

研究区位于陕西省延安市志丹县,地处西北内陆,属暖温带温凉气候区,每年降雨主要集中在6—9月,多年年平均降雨量为392.49 mm,占全年降雨量的73%。降雨强度最大为7月份,平均月降雨量为120.6 mm,可占全年总量的23%,平均日降雨量为8.6 mm,日最大降雨量为103.1 mm(1977年7月5日),时最大降雨量为42.9 mm。

志丹县地处陕北黄土高原腹地,整体地势由西北向东南缓倾,洛河、周河、杏子河三条河流依地势由西北向东南级贯全县。海拔1093~1741m,地形陡峭。经长期的剥蚀、侵蚀和堆积作用,形成了志丹县现今地表支离破碎,梁峁起伏、沟壑纵横的地貌。其中黄土丘陵沟壑区占全区总面积的83.93%。

区内主要出露中生界一新生界地层,包括白垩系、新近系和第四系地层。其中第四系地层分布广泛 且多以黄土为主,几乎遍布全区,区内主要出露:中更 新统风积层( $Qp_2^{edl}$ ),厚 60~100 m;上更新统冲积( $Qp_3^{ad}$ ), 厚 10~20 m;上更新统风积层( $Qp_3^{edl}$ ),厚 10~30 m;下 全新统( $Qh_1^{ad}$ )冲积层,厚 5~15 m;中全新统( $Qh_2^{ad}$ )冲 积层,厚 0~3 m。

# 2 Maxent-Sinmap 模型构建

#### 2.1 Maxent 模型简介

Maxent模型又称最大熵模型,最早出现在信息统 计科学研究中<sup>[29]</sup>,是概率分布未知的情况下在已有约 束条件下最合理的推断。进一步解释为:在一个多维 度空间里,某一类分布点同时挂接关联着多个相关因 素点,这些点各自的特有属性会对点在多维空间内的 分布产生不同影响。通过选取相关致灾因素,分析分 布点与各个因素点之间的联系,得出对于分布点的影 响程度,最终得到熵最大的一种分布结果<sup>[30]</sup>。

#### 2.2 Sinmap 模型简介

Sinmap 模型是 1998 年 Pack 等<sup>[25]</sup> 基于无限斜坡稳 定模型及稳态水文模型所建立的。该模型通过稳态 水文模型获得坡度、有效集水区等相关参数。在无限 斜坡稳定模型的基础上,忽略水平向作用力且假设滑 动面为平面的情况下,采用潜在滑动土体的下滑力与 抗滑力之比作为安全系数(FS),其表达式为:

$$FS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{Ra}{T\sin\theta}, 1\right)r\right] \tan\phi}{\sin\theta} \tag{1}$$

$$C = \frac{C_r + C_s}{h\rho_s g} \tag{2}$$

- 式中: C——土壤黏聚力与根系黏聚力相组合的无量纲 黏聚力;
  - *C*<sub>1</sub>——根系黏聚力/kPa;
  - *C*, ——土壤黏聚力/kPa;
  - *h*──垂直于边坡的规定厚度/m;
  - *R*——稳定状态时的流量/(m·d<sup>-1</sup>);
  - *T*──滑坡体导水系数/(m<sup>2</sup>·d<sup>-1</sup>);
  - a——比集水区面积/(m<sup>2</sup>·m<sup>-1</sup>);
  - *θ*——边坡坡度/(°);
  - r——水与土壤密度之比;
  - *ϕ*──土壤内摩擦角/(°)。

进行区域滑坡稳定性评价时,因参数具有时间和 空间上的不确定性,准确的输入某一确定值是较为困 难的,因此 Sinmap 模型通过输入范围性 *T/R*、*C*及θ值 进行计算。Sinmap 模型通过定义滑坡稳定性指数 (*SI*)来表达斜坡稳定性,采用概率的方法得到滑坡在 一定随机分布的参数区间内保持稳定的可能性,即 *SI* = Prob(*FS* > 1)。其稳定性分级见表 1。

表 1 稳定性分级 Table 1 Stability classification

稳定性级别	稳定性指数	稳定性
1	<i>SI</i> ≥1.5	极稳定区
2	1.5≥ <i>SI</i> >1.25	稳定区
3	1.25≥ <i>SI</i> >1.0	基本稳定区
4	1.0≥ <i>SI</i> >0.5	潜在不稳定区
5	$0.5 \ge SI \ge 0$	不稳定区
6	SI=0	极不稳定区

#### 2.3 参数选取及数据来源

#### 2.3.1 Maxent 数据准备

采用 Phillips 等<sup>[31]</sup> 基于最大熵模型开发的 Maxent 软件,输入符合模型要求的灾点分布数据及环境变量 数据,同时分析样本数据,合理设置模型循环次数及 验证样本集比例,计算得到研究区易发性评价结果。在 易发性评价的基础上,分析得到各环境变量贡献比重。

选取与滑坡稳定性密切相关的9个影响因子作为 环境变量进行分析,分别为:地貌、坡向、坡度、岩 层、地形曲率、河流缓冲区、道路缓冲区、降雨量及归 一化植被覆盖指数(NDVI)<sup>[32]</sup>。

### 2.3.2 Sinmap 数据准备

Sinmap 模型中降雨参数 *T/R*(土体导水系数与有效降雨量之比)作为单一变量考虑,通过分布地形湿度指数及反复模型运算,在 *T/R*参数设置为1000~3000时,大于1的湿度指数与志丹县的水系分布相似。依据中国气象局台站数据得到志丹县多年日平均降雨量为8.6mm,选取年日平均降雨量为8.6mm作为有效降雨量,通过反演分析法计算导数系数<sup>[18,33]</sup>,计算得到不同降雨作用下 *T/R*参数值,具体数值见表 2<sup>[34]</sup>。

表 2 不同降雨量下的 *T/R* 参数值 Table 2 *T/R* parameter values under different rainfall

降雨级别	降雨量值/(mm·d <sup>-1</sup> )	T/R下限	T/R上限
小雨	0.1 ~ 9.9	1 000	3 000
中雨	10 ~ 24.9	573	1 270
大雨	25 ~ 49.9	344	1 032
暴雨	50 ~ 99.9	172	516
大暴雨	100 ~ 200	86	258

同时,通过收集志丹县历史滑坡数据<sup>[53]</sup>,得到志丹 县历史滑坡分布如图1所示。由图1可知在保安街 道、顺宁镇及双河镇灾点分布相对密集;在永宁镇、 义正镇、杏河镇、金鼎镇及旦八镇灾点分布相对稀疏。



Fig. 1 Distribution of historical landslides in Zhidan County

# 3 稳定性评价与分析

# 3.1 空间校准区划分

#### 3.1.1 Maxent 模型精度

Maxent 模型常用 ROC (Receiver Operating Characteristic)曲线对模型精准度进行评价。ROC 曲线以特 异性为横轴, 以敏感度为纵轴, 该曲线所包裹的区域 面积即为 *AUC* (Area Under ROC Curve)值, 其范围为 0~1, 当模型精度越好时, 其 *AUC* 值越高。

通过设置 10% 的灾点为测试样本集,并设置模型运行循环 10次,完成模型的计算。通过计算得到志丹县地质灾害易发性评价结果及 ROC 曲线见图 2、图 3, ROC 曲线图中红色线条为运算 10次平均值,蓝色区域代表测试数据的浮动范围。AUC 值为 0.818,表明模型计算精度较好,可以使用。



图 2 志丹县地质灾害易发性评价图

Fig. 2 Evaluation map of geological disaster susceptibility in Zhidan County



### 3.1.2 影响因子对模型贡献率

进行易发性评价过程中,计算得到各影响因子对 历史灾点的影响程度,表示为影响因子对模型的贡献 率。通过贡献率来表达不同影响因子对滑坡的影响 程度,影响因子贡献率结果如图4所示。结果表明影 响滑坡易发性分区的主要影响因子依次是坡度、降雨量、地貌、道路缓冲区以及归一化植被覆盖指数,因子贡献率分别是 27.1%、20.3%、18.8%、18.7%、6.2%,5个影响因子贡献率累计达 91.1%。



3.1.3 影响因子与滑坡发生的关系

志丹县主要影响因子响应特征如图5所示。



由图 4、图 5 可知,对滑坡发生的主要贡献因子为 坡度、降雨量、地貌及道路缓冲区。坡度对滑坡的贡 献率一直呈正相关,这与实际中滑坡大部分发生于高 陡斜坡相吻合,但是作为滑坡发生的基本要素在进行 分区时不给予讨论。降雨作为滑坡发生的主要诱发 因素,根据影响因子响应曲线可以发现在 500 mm 左 右有明显区分,在 500 mm 以后均为负相关,所以在降 雨区的划分采用 500 mm 分界线作为区域划分边界 线。地貌作为贡献率第三的影响因素,在志丹县地貌 主要分为三类即黄土丘陵沟壑区(83.93%)、土石山区 (13.60%)以及河谷阶地区(2.44%)。由于河谷阶地区 分布较少且多分散于黄土丘陵沟壑区内,所以利用该 因素进行划分忽略黄土阶地区,将其归类于黄土丘陵 沟壑区。

根据降雨及地形地貌将研究区划分为4块,如 图6所示。已有研究表明,黄土丘陵沟壑区岩土体风 化程度强,受降雨作用影响显著,结构性及其强度较 弱<sup>[56]</sup>。土石山区岩土体风化程度弱,黏粒颗粒较多, 结构性及其强度较强<sup>[37]</sup>。同时降雨对浅层黄土湿度影 响大,在高降雨区浅层黄土湿度相对较大,在低降雨 区浅层黄土湿度相对较小。



Fig. 6 Zoning map of calibration area in Zhidan County

**3.2** Sinmap 模型计算

3.2.1 模型参数确定

Sinmap模型计算过程中涉及多个参数,包括比集 水区、有效降雨量、坡度、根系黏聚力、土壤黏聚力、 内摩擦角、土壤密度、湿度(土壤含水率)等相关参 数。其中岩土体的物理力学参数主要通过相关室内 土工试验获得,具体数值见表3。

根据 Sinmap 模型相关指数选取方法,对总区域相 关指标根据各区域指标进行选取。对具有上下限值 的相关指标如粘聚力等,以对应指标中最大值及最小 值为依据进行选取。对单体指标如密度、湿度等,按 照面积进行加权平均得到总区域指标参数。总区域

#### 表 3 研究区分区岩土体物理力学参数

 
 Table 3
 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass in the study area

区域	泪座///	黏剔	图力	内摩擦	〔角/(°)	土体密度	
	亚良/%	上限	下限	上限	下限	$/(kg \cdot m^{-3})$	
低降雨黄土丘陵区	15	0.2	0.4	25	40	1 750	
低降雨土石山区	15	0.28	0.54	31	55	1870	
高降雨黄土丘陵区	18	0.2	0.4	30	50	1 520	
高降雨土石山区	18	0.28	0.54	31	55	1870	

#### 指标具体参数见表4。

# 3.2.2 模型分区计算

分别利用上述两种计算模型 Maxent-Sinmap 模型

表 4 研究区总区域岩土体物理力学参数

 
 Table 4
 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass in the study area

区楼	泪庄肉	黏	聚力	内摩擦	土体密度		
区域研究区	亚度/%	上限	下限	上限	下限	$/(kg \cdot m^{-3})$	
研究区	16	0.2	0.54	25	55	1 728	

(分区计算)及 Sinmap 模型(未分区计算), 对志丹县 浅层降雨型滑坡进行预测评价。

模式一(Maxent-Sinmap 模型):根据上述分区,引 入计算参数得到计算结果,并对计算结果进行汇总得 到表 5。

表 5 研究区分区计算结果	汇总
---------------	----

 Table 5
 Summary of zonal calculation results in the study area

<b>治宫州</b> 笙如	<i>R</i> =8.	6 mm	<i>R</i> =1	5 mm	<i>R</i> =2	5 mm	R=5	0 mm	<i>R</i> =100 mm	
梞走住守纵	面积/km <sup>2</sup>	滑坡数/处								
极稳定	2 266.3	59	2 108.9	45	1 917.2	39	1 655.7	29	1 435.5	21
稳定	478.9	46	496.9	43	507.8	27	487.6	20	413.1	13
基本稳定	471.7	36	515.1	46	551.6	53	567.5	44	581.6	26
潜在不稳定	409.2	58	488.7	64	614.2	75	819.7	89	984.3	101
不稳定	56.7	11	71.1	12	88.7	16	142.9	26	243.7	44
极不稳定	5.3	1	6.7	1	7.4	1	12.1	3	23.2	6

将计算结果按表1分区原则进行分级可以发现: 低降雨量 R=8.6 mm 时,研究区整体稳定性较高,稳定 区域(极稳定、稳定、基本稳定)面积为 3216.9 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积 87.22%。其中极稳定去面积达到 2266.3 km<sup>2</sup>,占总面积的 61.44%。不稳定区域(潜在不 稳定、不稳定、极不稳定)所占面积仅为471.2 km<sup>2</sup>,占 研究区总面积 12.78%。其中极不稳定区域仅 5.3 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积 0.14%。随着降雨量的增大,稳定区 域面积明显减少,不稳定区域面积明显增大,在降雨 量 R 为 8.6, 15, 25, 50, 100 mm时不稳定区面积分别 为12.78%、15.36%、19.26%、26.45%及33.99%,趋势变 化见图 7。同时,伴随着降雨量的增大,不稳定区域滑 坡点分布明显增多。在降雨量为8.6 mm时,不稳定区 域内分布有 70 个滑坡点。在降雨量 100 mm 时, 不稳 定区域内分布有151个滑坡点。分区计算模型滑坡点 分布及地表稳定性指数示意图见图8。

模式二(Sinmap 模型):根据以往计算方法输入计 算参数,得到未分区计算结果,对计算结果进行汇总 得到表 6。

将计算结果按表1进行分级可以发现:在未分区 工况下计算结果与分区工况计算结果整体趋势基本 一致。在低降雨量 R=8.6 mm 时,整体稳定较高。稳 定区域占研究区总面积的 84.95%,不稳定区域占研究 区总面积的 15.05%。随着降雨量的增大,稳定区域面 积减少,不稳定区域面积增大,趋势变化见图 9。未分 区计算模型滑坡点分布及地表稳定性指数示意图见 图 10。

通过表 5 和表 6 可以看出, 在分区计算结果中降 雨量 R 为 8.6, 15, 25, 50, 100 mm 时不稳定区域灾点密 度分别为 0.148 56, 0.135 92, 0.129 52, 0.121 06, 0.120 68; 未分区计算结果中降雨量为 8.6, 15, 25, 50, 100 mm









表 6 研究区未分区计算结果汇总

		Table 6	Summary	of calculation	n results wit	hout partition	ns in the stud	ly area		
码户赴您历	R=8	.6mm	R=1	5mm	R=2	<i>R</i> =25mm <i>R</i> =50mm			<i>R</i> =100mm	
稳定性寺级	:等级 面积/km <sup>2</sup> 滑坡数/y	滑坡数/处	面积/km <sup>2</sup>	滑坡数/处	面积/km <sup>2</sup>	滑坡数/处	面积/km <sup>2</sup>	滑坡数/处	面积/km <sup>2</sup>	滑坡数/处
极稳定	2 128.4	55	1 970.3	42	1 782.3	35	1 545.8	27	1 354.6	20
稳定	508.1	46	516.7	44	517	30	476.7	20	392.5	14
基本稳定	527.8	39	568.9	47	591.6	54	579.7	45	564.3	26
潜在不稳定	554.6	70	660.4	76	822.1	89	1 099.0	113	1 361.4	141
不稳定	5.8	1	8.4	2	11.7	3	23.4	6	51.7	10
极不稳定	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.2	0





时,不稳定区域灾点密度分别为 0.126 69, 0.116 63, 0.110 34, 0.106 01, 0.106 84。相对于未分区计算结果, 分区计算结果中的灾点密度分别提升了 0.021 87, 0.019 29, 0.019 18, 0.015 05, 0.013 84。同时,分区计算 结果中,极不稳定区域面积相对于未分区计算结果中 有明显提升。由此表明在同一区域,采用分区计算方 法可以进一步提高不稳定区计算精度,进而提高 Sinmap模型对区域斜坡稳定性预测精度。

#### 4 模型验证

#### 4.1 滑坡稳定性野外验证

为进一步验证 Sinmap 模型精度对研究区评价 准确性,选取研究区内典型地质灾害点进行对比,如 图 11 所示。3个典型滑坡分别为纸坊乡政府滑坡、新 砖窑厂滑坡以及孟门沟滑坡,地貌上均属于黄土丘陵 地貌,且坡度大冲刷切割强烈,在降雨等诱发条件下 易于产生滑坡。将典型滑坡点与滑坡稳定性评价结 果进行对比可知:该模型在降雨条件下处于不稳 定状态,表明计算结果预测准确度相当,具有较好的 效果。

#### 4.2 稳定区扩大区结果评价

通过图 12 可以看出,在稳定区增大面积相对集中 的区域内,灾点均分布于稳定区扩大区外。同时,对 各个降雨条件下稳定区扩大区进行分析,在新增稳定 区内无历史灾点分布。表明在分区计算条件下,稳定 区面积增大,不稳定面积减小,且灾点分布于不稳定 区数量不变,进一步提高了 Sinmap 计算精度。

# 4.3 误差分析

通过 Sinmap 模型及 Maxent-Sinmap 模型对志丹县 进行模拟得到预测结果,将预测结果与现有滑坡点位 进行对比表明:两种模型在志丹县都有较好的适用 性,但 Maxent-Sinmap 具有更高的准确性。但同时受 条件限制计算结果存在一定误差,原因如下:① DEM 精度较低。DEM 是该模型计算的基础,利用 DEM 获 取的坡度、坡向、曲率及集水区面积都是该模型所应 用的栅格数据,当栅格精度越高模型越准确,该模型 中所应用的为 30 m 分辨率 DEM 数据。② 土样采集 及试验数量较少。收集选取了 6 处岩土体,参数密度 较低。当采集得到的岩土体参数越多 Sinmap 计算参 数越准确,模型精度越高。③ 历史滑坡定位准确度较 低。历史滑坡点位因实际勘察中定位存在一定偏移, 而 Sinmap 模型验证中该点位可能会从原来不稳定区 域偏移到稳定区域,进而影响最终模型精度的验证。

# 5 结论

(1)通过 Maxent 模型计算可知, 滑坡主要受坡度、降雨量、地貌、道路缓冲区及归一化植被覆盖指数等5个指标影响, 贡献率分别为27.1%、20.3%、18.8%、18.7%、6.2%, 累计贡献率达91.1%。

(2)评价结果显示,伴随着降雨量的增大,Sinmap 模型与 Maxent-Sinmap 模型不稳定区域逐渐增大,稳 定区域逐渐减少。Maxent-Sinmap 模型相对于 Sinmap 模型, *R*=8.6 mm 时不稳地区域灾点密度上升 0.021 87, 提升了 17.26%; *R*=15 mm 时不稳地区域灾点密度上升 0.019 29,提升了 16.54%; *R*=25 mm 时不稳地区域灾点 密度上升 0.019 18,提升了 17.39%; R=50 mm 时不稳地





Fig. 10 Surface stability index of the non-partitioned calculation model



Fig. 11 Verification of landslide stability evaluation results in the study area

区域灾点密度上升 0.015 05, 提升了 14.20%; *R*=100 mm 时不稳地区域灾点密度上升 0.013 84, 提升了 12.96%, 反映出 Maxent-Sinmap 模型相对于 Sinmap 模型具有 更高精度。

(3)Maxent-Sinmap模型计算结果相较于 Sinmap 模型计算结果具有更大的稳定区域。在稳定区扩大 区无历史灾点分布,且已发生滑坡分布于不稳定区。 通过对比发现 Maxent-Sinmap模型相较于 Sinmap模 型可以更好的用于区域性浅层降雨型滑坡预测。利 用 Maxent-Sinmap模型不仅能避免以往单一行政单元 划分的弊端,为区域性浅层降雨型滑坡评价提供借 鉴,同时为区域防灾减灾提供参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘东生,安芷生,文启忠,等.中国黄土的地质环境
  [J].科学通报,1978,23(1):1-9. [LIU Dongsheng,
  AN Zhisheng, WEN Qizhong, et al. Geological environment of loess in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1978,23(1):1-9. (in Chinese)]
- [2] 索安宁,李金朝,王天明,等. 黄土高原流域土地利用 变化的水土流失效应[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 767 – 772. [SUO Anning, LI Jinchao, WANG Tianming, et al. Effects of land use changes on river basin soil and water loss in loess plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 767 – 772. (in Chinese with English abstract)]
- [3] QIU Haijun, CUI Peng, REGMI A D, et al. Slope height

and slope gradient controls on the loess slide size within different slip surfaces [J]. Physical Geography, 2017, 38(4); 303 - 317.

- [4] 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 Hungchou, 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)]
- [5] 陈林万,张晓超,裴向军,等.降雨诱发直线型黄土填 方边坡失稳模型试验[J].水文地质工程地质,2021, 48(6):151-160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 151 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘朋飞.黄土高原地区环境变迁与地质灾害关系研究——以延安地区滑坡为例[D].西安:长安大学,2010.[LIU Pengfei. Study on the environmental change and geological disasters of the loess plateau region: Take the landslide of Yan'an as an example[D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 卢永兴,陈剑,霍志涛,等.降雨与开挖作用下黄土滑 坡失稳过程分析——以关中地区长武县杨厂村老庙 滑坡为例[J].地质科技通报,2022,41(6):95-104.
  [LU Yongxing, CHEN Jian, HUO Zhitao, et al. Analysis of instability process of the loess landslides under rainfall and excavation actions: A case study of Laomiao landslide at Yangchang Village in Changwu County, Guanzhong area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 95 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨志华,吴瑞安,郭长宝,等.川西巴塘断裂带地质灾 害效应与典型滑坡发育特征[J].中国地质,2022, 49(2):355 - 368. [YANG Zhihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. Geology in China, 2022, 49(2):355 - 368. (in Chinese with English abstract)]
- [9] VAN WESTEN C J, VAN ASCH T W J, SOETERS R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65(2): 167 – 184.
- [10] 田春山,刘希林,汪佳.基于CF和Logistic回归模型的



Fig. 12 Schematic diagrams of the expansion area of the stable area under different rainfall conditions

广东省地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质, 2016, 43(6): 154 - 161. [TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and logistic regression models in Guangdong[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 154 - 161. (in Chinese with English abstract)]

- [11] AYALEW L, YAMAGISHI H. The application of GISbased logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan[J]. Geomorphology, 2005, 65(1/2): 15 - 31.
- [12] 孙长明,马润勇,尚合欣,等.基于滑坡分类的西宁市 滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质,2020,47(3):
  173 - 181. [SUN Changming, MA Runyong, SHANG Hexin, et al. Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 173 - 181. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LEE S, RYU J H, WON J S, et al. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network[J]. Engineering Geology, 2004, 71(3/4): 289 – 302.
- [14] PRADHAN B. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS[J]. Computers & Geosciences, 2013, 51: 350 – 365.
- [15] 牛瑞卿,彭令,叶润青,等.基于粗糙集的支持向量机 滑坡易发性评价[J].吉林大学学报(地球科学版), 2012,42(2):430-439. [NIU Ruiqing, PENG Ling, YE Runqing, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 430-439. (in Chinese with English abstract)]
- [16] SAITO H, NAKAYAMA D, MATSUYAMA H. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan[J]. Geomorphology, 2009, 109(3/4): 108 - 121.
- [17] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川 藏交通廊道滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质, 2021,48(5):102-111. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regressioninformation value method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 102 - 111. (in

Chinese with English abstract) ]

- [18] 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,2003,48(5):
  507 - 512. [LAN Hengxing, ZHOU Chenghu, WU Faquan, et al. Spatial analysis and prediction of rainfall landslide risk based on GIS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003,48(5):507-512. (in Chinese)]
- [19] 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. [WULi. 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)]
- [20] 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[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 ProvinceFull text replacement[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 105 114. (in Chinese with English abstract)]
- [21] HE Jianyin, QIU Haijun, QU Feihang, et al. Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRIGRS and Scoops3D models[J]. CATENA, 2021, 197: 104999.
- [22] 吕佼佼,范文,吕远强.考虑土层深度分布的浅层滑 坡危险性评价——以陕西秦巴山区为例[J].灾害学, 2018, 33(2): 218 - 223. [LYU Jiaojiao, FAN Wen, LYU Yuanqiang. Hazard assessment of shallow landslide considering soil depth distribution—A case study of qinba mountains in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 218 - 223. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 姚杰,李秀珍,徐瑞池.降雨条件下拟建川藏铁路典型段潜在滑坡三维稳定性动态识别研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):422-431. [YAO Jie, LI Xiuzhen, XU Ruichi. Dynamic identification of three-dimensional stability of potential landslides in a typical section of the proposed Sichuan-Tibet railway under rainfall conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 422 431. (in Chinese with English abstract)]
- [24] WEIDNER L, DEPREKEL K, OOMMEN T, et al. Investigating large landslides along a river valley using combined physical, statistical, and hydrologic

modeling[J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105169.

- [25] PACK R T, TARBOTON D G, GOODWIN C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. Proceedings of the 8<sup>th</sup> congress of the International Association of Engineering Geology. Netherlands: A Balkema Publisher, 1998. 1157-1165.
- [26] 武利,张万昌,张东,等.基于遥感与地理信息系统的 分布式斜坡稳定性定量评估模型[J].地理科学, 2004, 24(4): 458 - 464. [WU Li, ZHANG Wanchang, ZHANG Dong, et al. Remote sensing & GIS-based distributed hillslope stability: quantitative evaluation model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(4): 458 - 464. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 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[J]. 中南大 学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1987 - 1992.
  [KANG Chao, CHEN Wenwu, ZHANG Fanyu. Application of distributed hillslope stability model based on DEM to stability of shallow landslide of the loess gully area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 1987 - 1992. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 麦鉴锋,洗宇阳,刘桂林.气候变化情景下广东省降 雨诱发型滑坡灾害潜在分布及预测[J].地球信息科 学学报,2021,23(11):2042 - 2054. [MAI Jianfeng, XIAN Yuyang, LIU Guilin. Predicting potential rainfalltriggered landslides sites in Guangdong Province(China) using MaxEnt model under climate changes scenarios[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021,23(11):2042 -2054. (in Chinese with English abstract)]
- [29] CHEN W, POURGHASEMI H R, KORNEJADY A, et al. Landslide spatial modeling: introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques[J]. Geoderma, 2017, 305: 314 – 327.
- [30] 万洋,郭捷,马凤山,等.基于最大熵模型的中尼交通 廊道滑坡易发性分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 88 - 95. [WAN Yang, GUO Jie, MA Fengshan, et al. Landslide susceptibility assessment based on MaxEnt model of along Sino-Nepal traffic corridor[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 88 - 95. (in Chinese with English abstract)]

- [31] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231 – 259.
- [32] YANG Jilin, DONG Jinwei, XIAO Xiangming, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233; 111395.
- [33] 杨文璐, 邱海军, 裴艳茜, 等. 典型黄土丘陵区浅层黄 土滑坡稳定性评价——以延安市志丹县为例[J]. 第 四纪研究, 2019(2): 408 - 419. [YANG Wenlu, QIU Haijun, PEI Yanqian, et al. Evalution of shallow loess landslide stability in typical loess hilly region: a case study of Zhidan County in Yan'an area of Shaanxi Province[J]. Quaternary Sciences, 2019(2): 408 - 419. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.降水量等级:GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grade of precipitation: GB/T 28592—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)]
- [35] 王丽英,王红梅,郭盈盈,等.基于不同建模数据的陕西省志丹县滑坡易发性分区[J].人民长江,2021,52(12):99-106.[WANG Liying, WANG Hongmei,GUO Yingying, et al. Landslide susceptibility mapping based on differentiated modeling data in Zhidan County,Shaanxi Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(12):99-106. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 谢定义,邢义川.黄土土力学[M].北京:高等教育出版社,2016. [XIE Dingyi,XING Yichuan. Soil mechanics for loess soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)]
- [37] 郭靖,骆亚生,郭鸿,等.不同地区黄土的结构性试验研究[J].水土保持通报,2010,30(1):89-92. [GUO Jing, LUO Yasheng, GUO Hong, et al. Experimental study on structural characteristics of loess in different regions
  [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1):89-92. (in Chinese with English abstract)]

编辑:王支农