

引用格式:王鑫盈,马超,张岩. 浅层黄土滑坡易发性评价:以晋西黄土区蔡家川农地小流域为例[J]. 山地学报, 2023, 41(6): 904-915.

WANG Xinying, MA Chao, ZHANG Yan. Risk assessment of shallow loess landslides: Taking a small watershed of Caijiachuan farmland in the loess region of western Shanxi of China as an example [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 904-915.

浅层黄土滑坡易发性评价:以晋西黄土区 蔡家川农地小流域为例

王鑫盈^a, 马超^{a,b}, 张岩^{a,b*}

(北京林业大学 a. 水土保持学院, 北京 100083; b. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 临汾 042200)

摘要:黄土高原中部地区极端暴雨事件频发,引发大面积浅层滑坡和泥石流灾害。随着全球变暖,降雨增加,中国西北黄土高原植被覆盖发生显著变化,不考虑植被因素的黄土滑坡易发性分区的评价方法需要改进。本文以晋西黄土区蔡家川流域农地小流域为研究对象,基于暴雨前后流域高分辨率图像、数字高程模型,野外滑坡调查和室内岩土测试,利用半定量的信息量模型、信息量-逻辑回归耦合模型和定量的物理模型,按有植被和无植被两种工况开展了浅层黄土滑坡易发性分区,并评估模型精度。结果表明:考虑植被时,半定量模型获取的易发性指数均下降,物理模型计算的稳定区面积显著增大,说明植被对浅层滑坡有抑制作用;考虑植被时,各个模型的评价精度都有所提高,信息量-逻辑回归耦合模型的精度高于信息量模型,物理模型的精度整体高于两个半定量模型。研究结果可为以暴雨滑坡为主要类型的小流域水土流失预测预报提供参考。

关键词:极端降雨;浅层黄土滑坡;易发性分区;黄土高原

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

中国黄土高原水土流失严重,水资源短缺、生态环境问题突出^[1]。近年来,黄土高原中部地区极端暴雨事件频发^[2-5]。例如:2013年7月甘肃天水、陕西延安极端暴雨诱发大面积的滑坡、泥石流灾害^[3-4];2017年陕西绥德、子洲暴雨导致大量淤地坝受损^[5]。在全球变暖、区域极端天气多发的背景下,降雨诱发的浅层黄土滑坡和黄土泥石流灾害是黄土高原水土流失的主要形式^[6-7]。开展以小流域为基本单元的暴雨黄土滑坡易发性分区对于地质灾害预警预报、水土流失预测等方面具实际意义。

滑坡易发性分区的评价方法大致可以归纳为基于经验推理的定性分析,应用数理统计模型的半定量方法和基于物理机制的确定性模型^[8-10]。定性

分析法主要包括滑坡成因机制分析法、工程地质类比法和层次分析法等;半定量方法有信息量模型、逻辑回归模型、神经网络模型等^[9];基于物理机制的确定性模型以滑坡发生的物理机制出发,定量分析斜坡稳定性,适用在小范围或者小流域尺度上开展研究^[10]。

暴雨滑坡具有规模小、数量多、分布广等特点,其分布规律与斜坡单元形态、地貌特征、植被因素等密切相关^[11]。针对暴雨型黄土滑坡,有学者提出了黄土滑坡易发性分区的评价方法^[12-13]。然而,随着中国西北气候发生改变,降雨增加,黄土高原植被覆盖发生显著变化,植被的坡向差异及其产生的附加粘聚力影响暴雨黄土滑坡的分布

收稿日期(Received date): 2023-03-22; 改回日期(Accepted date): 2023-12-05

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42177309)。[National Natural Science Foundation of China (42177309)]

作者简介(Biography): 王鑫盈(1998-),女,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向:山地灾害预测预报。[WANG Xinying (1998-), female, born in Dongying, Shandong province, M. Sc. candidate, research on the mountain hazard prediction] E-mail: wxyxy1123@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 张岩(1970-),女,博士,教授,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。[ZHANG Yan (1970-), female, Ph. D., professor, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: zhangyan9@bjfu.edu.cn

规律以及规模。

本文以晋西黄土区蔡家川流域中农地小流域为例,通过高分辨无人机数据获取 2021 年 10 月极端暴雨滑坡灾害前、后 DEM 和遥感图像,分析植被覆盖信息,解译浅层滑坡点;在野外调查滑坡边界缓冲区植被类型、根系力学性能等基础上,分别采用半定量模型的信息量、信息量-逻辑回归耦合模型和定量的 SHALSTAB (SHallow Landslide STABILITY model) 模型进行浅层滑坡易发分区,并进行验证;探讨将植被因素对模型识别精度的影响。本研究可提高暴雨滑坡空间预测预报的精度,为小流域水土流失预测提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

蔡家川流域地处黄河中游,黄土高原东南部、山西省西南部,本文以山西省临汾市吉县蔡家川流域的农地小流域为研究对象(图 1)。流域面积 0.67 km²,南北走向,属于典型的梁状丘陵沟壑区,

海拔 733 ~ 981 m。流域黄土梁顶部有第四纪马兰黄土覆盖(高程 930 ~ 980 m),中下部为离石黄土(高程 733 ~ 930 m),坡脚有河湖相沉积物(厚度 1 ~ 3 m),滑坡主要发生在离石黄土分布区(图 2)。流域内土地利用类型以农地、林地、灌木地为主^[14]。研究区属温带大陆性季风气候,多年平均气温 10.5 °C,年平均降水 520.3 mm,6—10 月的降水量占全年的 75% 以上^[15]。以蔡家川流域实验基地的观测数据为例,降雨主要从 10 月 3 日 01:00 开始,于 10 月 6 日 14:00 结束,累计降水达 170 mm。据蔡家川实验基地人员以及当地居民访谈结果,滑坡主要发生在 5 日晚。

1.2 数据来源

本文主要用到的基础数据包括图像数据、现场调查数据和实验数据。图像数据包括研究区内遥感影像数据和 DEM。DEM 由大疆 Inspire 2 于灾前(2019 年 10 月 12 日)和灾后(2021 年 10 月 14 日)所拍摄,分辨率分别为 0.10 m 和 0.23 m,灾前的遥感图像分辨率为 0.50 m。其中,通过 ArcGIS 软件基于 DEM 提取该区域的地形因子图层。基于遥感

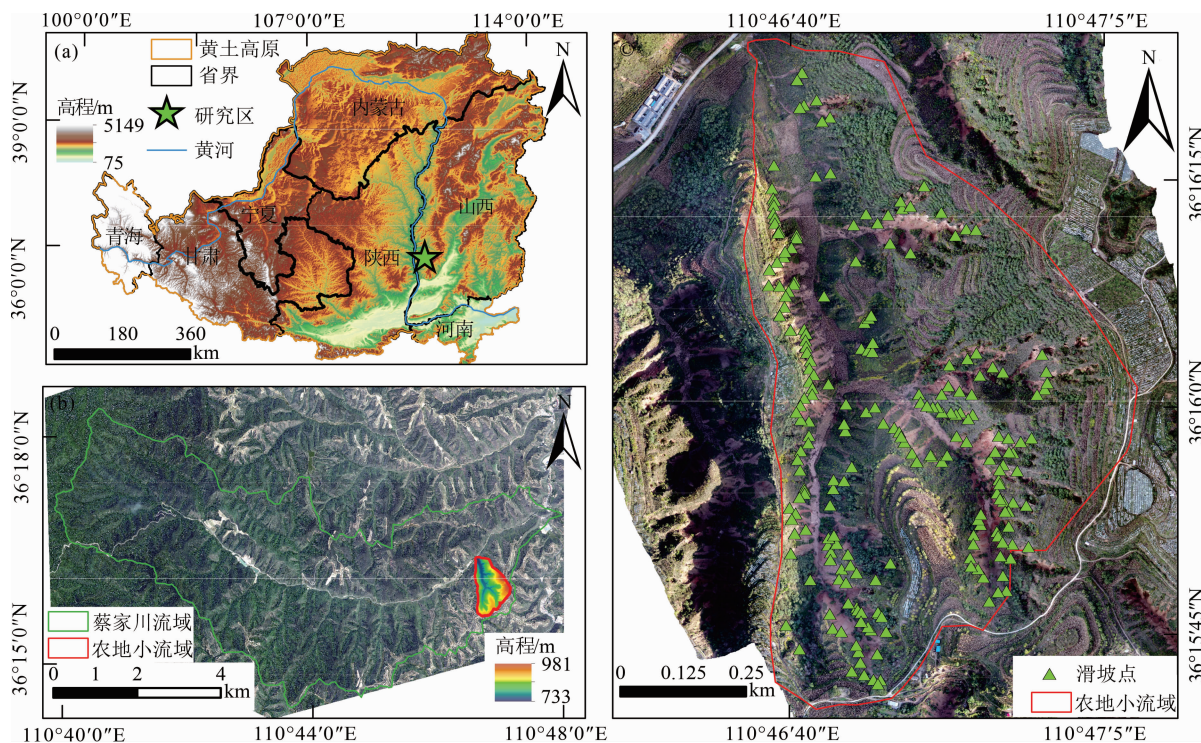


图 1 研究区及滑坡分布概况:(a) 研究区在黄土高原的位置;(b) 蔡家川流域;(c) 农地小流域浅层滑坡分布

Fig. 1 Study area and landslide distribution: (a) study area in the loess region;

(b) Caijiachuan watershed; (c) landslide distribution in farmland watershed

(审图号:GS(2016)1591 号)

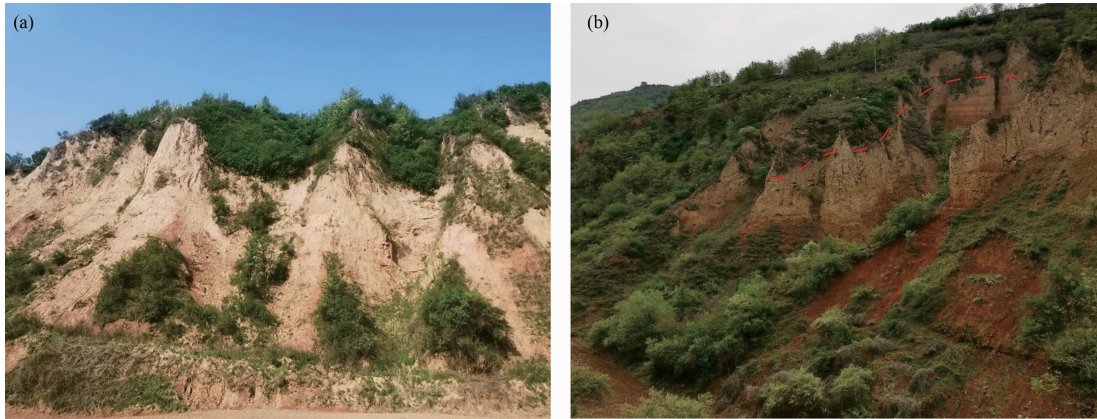


图 b 中红色虚线上部为马兰黄土,下部为离石黄土。

图 2 现场调查图: (a) 滑坡图; (b) 滑坡及黄土出露照片

Fig. 2 Field survey map: (a) landslide photo; (b) landslide and loess exposure photo

影像与现场调查结果得到植被类型与植被覆盖度图层。由灾害前后图像和现场调查对比解译滑坡 220 处,通过 ArcGIS 随机生成点功能生成点 300 处,剔除分布在滑坡及其周围的 80 处,保留 220 处;和现有滑坡点 220 处组成 440 个总训练样本,以此来满足建立模型与检验评价结果合理性对样本数量的要求,并最终讨论比较不同模型的适用性和准确性。

2 评价模型

2.1 信息量模型

信息量模型能将滑坡影响因子定量化,通过获取已经发生的滑坡区的信息来计算不同影响因子的影响,进而预测滑坡是否发生^[16]。通常越高的因子信息量值,代表越高的易发性。计算公式如下:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中, I 为因素 x_i 对滑坡发生事件 H 提供的信息量值; N_i 为评价指标的滑坡单元数; N 为研究区滑坡总数; S_i 为评价指标的评价单元数; S 为研究区评价单元总数。

2.2 信息量-逻辑回归模型

逻辑回归是基于二项分类的模型,该模型以地质灾害发生取值为 1 或不发生取值为 0 作为因变量 (Y),以致灾因子为自变量 (x_n),建立逻辑回归方程来确立地质灾害发生的概率 (P)^[17]。模型中自变量可以是连续的或离散的,不需要满足正态分布:

$$\begin{cases} P(Y = 1 | X) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \\ z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 为地质灾害发生概率,范围为 0 ~ 1; β_0 为逻辑回归常数项; n 为因子数量^[17-18]; β_n 为逻辑回归系数; x_n 为因子信息量值。

2.3 SHALSTAB 模型

本研究采用的物理模型是 SHALSTAB 模型,该模型耦合了水文模型和无限边坡模型,用于评价浅层滑坡稳定性的空间分布(图 3)。在稳定降雨条件下,以坡度和集水面积为地形参数,基于摩尔-库仑破坏准则,进行斜坡稳定性评估。单位面积滑体的平衡方程为^[19]:

$$\rho_s g H \cos \theta \sin \theta = c' + (\rho_s H - \rho_w H_w) g \cos^2 \theta \tan \varphi' \quad (3)$$

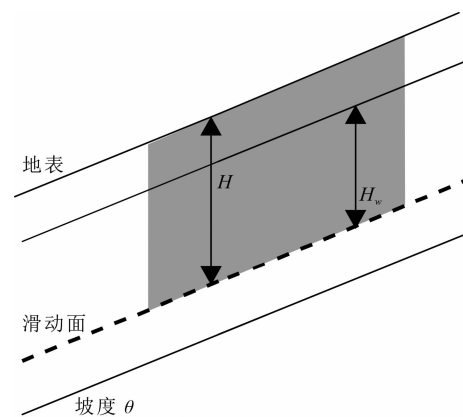


图 3 无限边坡模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of infinite slope stability model

式中, ρ_s 为饱和土体密度(kg/m^3); H 为滑动土层厚度(m); θ 为坡度($^\circ$); c' 为有效黏聚力 kPa; ρ_w 为水的密度(kg/m^3); H_w 为饱和滑动土层厚度(m); φ' 为有效内摩擦角($^\circ$); 重力加速度取 $10 \text{ N}/\text{kg}$ 。

整理后可得到无限边坡稳定性模型:

$$\frac{H_w}{H} = \frac{c'}{\rho_w g H \cos^2 \theta \tan \varphi'} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi'}\right) \quad (4)$$

假设集水面积内的稳定降雨量与某一等高线下相应地下排泄量均衡, 根据达西定律得:

$$q a = k H_w \sin \theta \cos \theta b \quad (5)$$

式中, q 为有效降雨量(m); a 为上坡集水面积(m^2); b 是排水截面等高线的长度(m)。

在饱和土的浅层地表下径流中, 根据 T 和 H 的关系, 式(5)可转化为:

$$T b \sin \theta = k H \sin \theta \cos \theta b \quad (6)$$

式中, T 为水力传导系数(m^2/d)。

结合式(5)和(6), 可以得出水文模型为:

$$m = \frac{H_w}{H} = \frac{q}{T} \frac{a/b}{\sin \theta} \quad (7)$$

式中, m 为湿度指数。

结合式(7)和式(4)生成斜坡临界状态降雨量模型为^[20]:

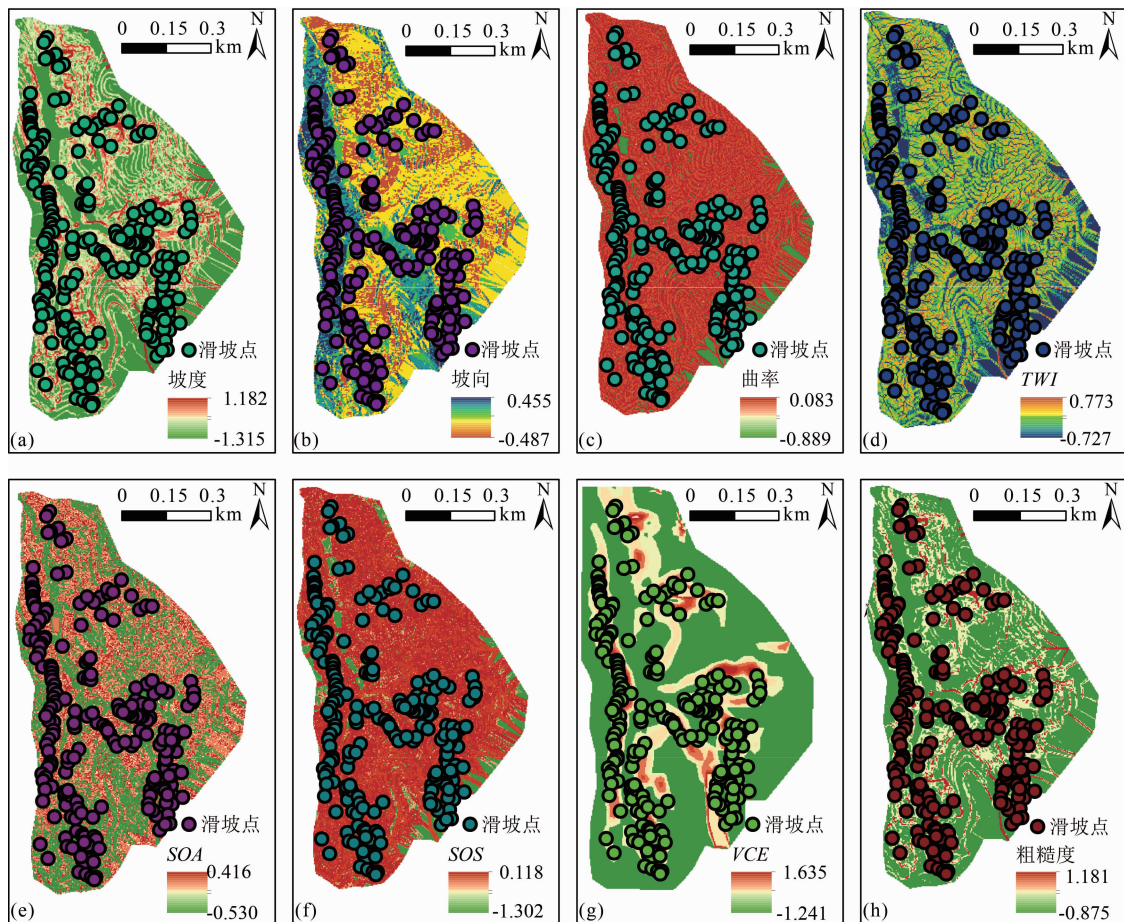
$$\frac{q}{T} = \frac{b \sin \theta}{a} \frac{c'}{\rho_w g H \cos^2 \theta \tan \varphi'} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi'}\right) \quad (8)$$

3 滑坡易发性评价模型因子及参数确定

3.1 地形因子

如图4所示, 农地流域滑坡发生的坡度一般为 $40^\circ \sim 60^\circ$, 其中 $40^\circ \sim 50^\circ$ 发育最多; 信息量值随坡度增大而增大, 坡度 $< 40^\circ$ 的区域信息量值为负。滑坡主要分布在东、东北方向, 滑坡坡向分布没有明显差异; 滑坡灾害主要分布在凸凹坡区域, 平直型坡上发育较少。

基于海拔、坡度和坡向等进一步获取粗糙度、高程变异系数 (Variable Coefficient of Elevation, VCE)、平面曲率 (Slope of Aspect, SOA)、剖面曲率 (Slope of Slope, SOS)、地形起伏度、地形湿度指数 (Topographic Wetness Index, TWI) 因子。粗糙度反



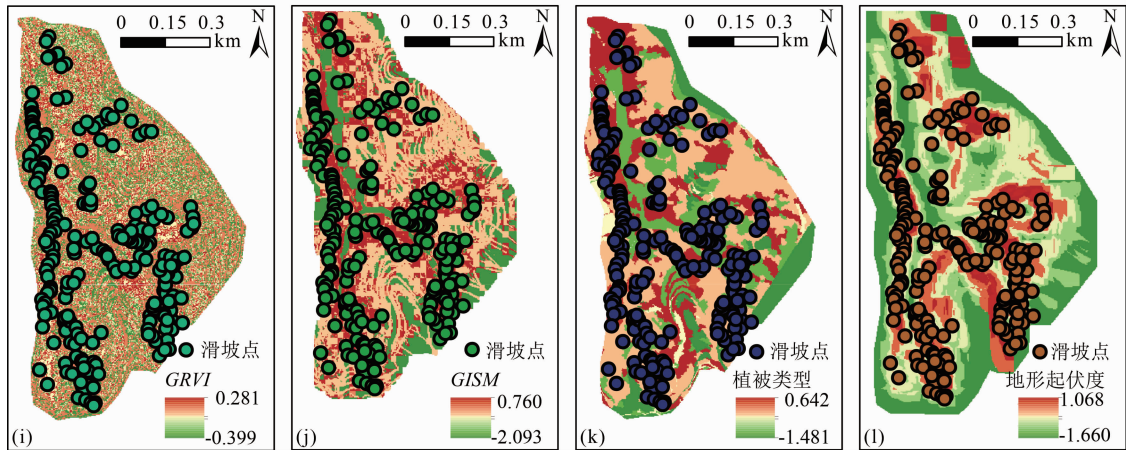


图 4 半定量模型影响因子信息量分布:(a) 坡度;(b) 坡向;(c) 曲率;(d) TWI;(e) SOA;
(f) SOS;(g) VCE;(h) 粗糙度;(i) GRVI;(j) GISM;(k) 植被类型;(l) 地形起伏度

Fig. 4 Distribution of information value of index factors: (a) slope; (b) aspect; (c) curvature; (d) TWI; (e) SOA;
(f) SOS; (g) VCE; (h) surface roughness; (i) GRVI; (j) GISM; (k) vegetation type; (l) topographic relief height

映地表侵蚀程度。地形起伏度是一定范围内的高程差。由表 1 可知,粗糙度 > 1.4 的区域滑坡数量少但信息量值较大,说明粗糙度值高的区域较容易发生滑坡,农地流域近半数滑坡发育在粗糙度 < 1.4 的区域,这与低粗糙度区域面积大有关。滑坡发生最多的地形起伏度区间为 $40 \sim 50$,信息量值随地形起伏度值增大而增大,说明地形起伏度值越大的区域越容易发育滑坡。高程变异系数为一定范围内的高程标准差与平均高程的比值,反映地貌特征的变化性。当高程变异系数 > 0.01 ,信息量值由负变正,说明在高程变异系数 < 0.01 的区域,相对稳定。平面曲率描述地表沿水平方向变化情况,在平面曲率值 $39 \sim 45$ 区域滑坡发育较多,在平面曲率值 $33 \sim 39$ 区域信息量值较高,更容易发育滑坡。平面曲率即坡度变率,信息量值随剖面曲率值增大而增大,剖面曲率 < 15 的区域信息量值远小于 0,相对来说非常稳定。地形湿度指数是集水面积与坡度值之比的自然对数。本研究区地形湿度指数值偏小,滑坡主要分布在地形湿度指数值 < 3 的区域。

地形影响土壤颗粒的运移,根据 GIST 模型综合考虑坡位、地形起伏和滑坡启动阈值获得土壤移动性地理指数 (Geographic Index of Soil Mobility, GISM)^[21],计算如下:

$$G = C\eta\varphi^{-1} \quad (9)$$

式中, G 为土壤移动性地理指数; C 为基于地形起伏的指标; η 为描述点在山坡位置的指标; φ^{-1} 为考虑

滑坡启动阈值的指标。

C 根据曲率量化取值;理想条件下,山坡平坦时越接近坡脚土壤堆积越厚,本研究简化山坡形状, η 根据山坡顶部取 0 坡脚取 1 的原则赋值; φ 的取值标准为在局部斜率高于阈值的区域等于 $(1 + \tan \theta)$,其他区域都等于 1。 C 、 η 、 φ^{-1} 以 0 到 1 无量纲的纯数字形式代表山坡上某点土壤颗粒积累的倾向。在土壤颗粒较易移动与较稳定的区域均不容易发生滑坡。

3.2 植被因子

植被是本研究主要考虑的环境因子,包括植被覆盖度和植被类型。用植被绿度指数 (Green-Red Vegetation Index, GRVI) 表示植被覆盖程度。滑坡灾害点主要分布在植被覆盖较差的区域,在高强度短时降雨过程中,坡面裸露、植物根系不发达,坡面易失稳。 $GRVI > 0$ 时认为植被覆盖条件好, $GRVI < 0$ 时认为地表没有植被覆盖^[4]。研究区裸土区、建设用地区的 $GRVI < 0$,最小值为 -0.32 ;林地、灌木地 $GRVI > 0$,最大值为 0.56 。即 $GRVI$ 越大,代表植被越密集, $GRVI$ 越小,代表植被越稀疏。 $GRVI$ 最小的区间,滑坡数量最多且信息量较高,植被覆盖度低的区域较容易发生滑坡;滑坡主要分布在灌木地和乔木地,灌木地信息量值最高,说明灌木地较容易发育滑坡,乔木地滑坡数量较多信息量值为负,与乔木地面积较大有关。

3.3 因子选取

致灾因子之间如果存在一定的相关性或共线

表 1 影响因子分级、滑坡分布与信息量值统计表

Tab. 1 Statistical table of index factor classification, landslide distribution and information value

| 因子 | 因子等级划分 | 灾害 个数/个 | 分级面积 占比/% | 信息量值 | 因子 | 因子等级划分 | 灾害 个数/个 | 分级面积 占比/% | 信息量值 |
|--------|---------------|------------|--------------|--------|--------|---------------|------------|--------------|--------|
| 坡度 | 0 ~ 20° | 21 | 0.355 | -1.315 | SOA | < 30 | 26 | 0.097 | 0.198 |
| | 20° ~ 30° | 21 | 0.163 | -0.533 | | 30 ~ 33 | 10 | 0.047 | -0.039 |
| | 30° ~ 40° | 36 | 0.201 | -0.207 | | 33 ~ 36 | 26 | 0.078 | 0.416 |
| | 40° ~ 50° | 62 | 0.157 | 0.584 | | 36 ~ 39 | 45 | 0.135 | 0.416 |
| | 50° ~ 60° | 50 | 0.082 | 1.021 | | 39 ~ 42 | 61 | 0.241 | 0.139 |
| | 60° ~ 90° | 30 | 0.042 | 1.182 | | 42 ~ 45 | 52 | 0.402 | -0.530 |
| 坡向 | 北 | 26 | 0.105 | 0.120 | SOS | 0 - 15 | 4 | 0.067 | -1.302 |
| | 东北 | 39 | 0.133 | 0.287 | | 15 - 30 | 11 | 0.067 | -0.227 |
| | 东 | 37 | 0.107 | 0.455 | | 30 - 45 | 23 | 0.097 | 0.075 |
| | 东南 | 16 | 0.055 | 0.288 | | 45 - 60 | 40 | 0.174 | 0.042 |
| | 南 | 16 | 0.086 | -0.163 | | 60 - 75 | 86 | 0.348 | 0.118 |
| | 西南 | 33 | 0.176 | -0.158 | | > 75 | 56 | 0.252 | 0.012 |
| | 西 | 27 | 0.200 | -0.487 | 地形起伏度 | 0 ~ 20 | 10 | 0.240 | -1.665 |
| | 西北 | 26 | 0.140 | -0.170 | | 20 ~ 30 | 18 | 0.200 | -0.892 |
| 曲率 | < -0.5 | 116 | 0.485 | 0.083 | | 30 ~ 40 | 33 | 0.232 | -0.436 |
| | -0.5 ~ 0.5 | 6 | 0.066 | -0.889 | | 40 ~ 50 | 78 | 0.197 | 0.587 |
| | > 0.5 | 98 | 0.448 | -0.006 | | 50 ~ 60 | 62 | 0.097 | 1.068 |
| 粗糙度 | 1.0 ~ 1.2 | 54 | 0.589 | -0.875 | GISM | 60 ~ 90 | 19 | 0.034 | 0.931 |
| | 1.2 ~ 1.4 | 50 | 0.208 | 0.088 | | 0 ~ 0.165 | 72 | 0.474 | -0.369 |
| | 1.4 ~ 1.6 | 42 | 0.094 | 0.708 | | 0.165 ~ 0.330 | 87 | 0.185 | 0.760 |
| | 1.6 ~ 1.8 | 30 | 0.043 | 1.144 | | 0.330 ~ 0.495 | 37 | 0.092 | 0.605 |
| | 1.8 ~ 2.0 | 14 | 0.023 | 1.003 | | 0.495 ~ 0.660 | 10 | 0.043 | 0.044 |
| | > 2.0 | 30 | 0.042 | 1.182 | | 0.660 ~ 0.825 | 9 | 0.022 | 0.627 |
| 高程变异系数 | < 0.01 | 38 | 0.597 | -1.241 | | 0.825 ~ 1.000 | 5 | 0.184 | -2.093 |
| | 0.010 ~ 0.012 | 33 | 0.133 | 0.117 | 植被覆盖度 | < 0 | 72 | 0.290 | 0.121 |
| | 0.012 ~ 0.014 | 35 | 0.111 | 0.363 | | 0 ~ 0.05 | 34 | 0.230 | -0.399 |
| | 0.014 ~ 0.016 | 47 | 0.075 | 1.042 | | 0.05 ~ 0.10 | 36 | 0.179 | -0.090 |
| | 0.016 ~ 0.018 | 40 | 0.047 | 1.351 | | 0.10 ~ 0.15 | 39 | 0.151 | 0.162 |
| | 0.018 ~ 0.020 | 22 | 0.020 | 1.635 | | 0.15 ~ 0.20 | 27 | 0.093 | 0.281 |
| 地形湿度指数 | > 0.02 | 5 | 0.017 | 0.317 | | > 0.2 | 12 | 0.057 | -0.048 |
| | < 1 | 24 | 0.050 | 0.773 | 土地利用类型 | 乔木 | 63 | 0.337 | -0.161 |
| | 1 ~ 2 | 73 | 0.223 | 0.398 | | 灌木 | 137 | 0.373 | 0.642 |
| | 2 ~ 3 | 56 | 0.243 | 0.047 | | 旱地 | 12 | 0.150 | -1.185 |
| | 3 ~ 4 | 30 | 0.162 | -0.175 | | 草地 | 7 | 0.019 | 0.494 |
| | 4 ~ 5 | 14 | 0.105 | -0.504 | | 果园 | 4 | 0.088 | -1.481 |
| | > 5 | 23 | 0.216 | -0.727 | | 建设用地 | 2 | 0.033 | -0.429 |

性,会影响模型的准确性。因此对 12 项因子利用 SPSS 软件进行相关性检验及共线性诊断。高程变异系数与地形起伏度之间皮尔逊相关系数 > 0.5,呈中度相关;其他因子之间基本不相关或低度相关(表 2)。因子的多元共线采用方差膨胀因子

(Variance Index Factor, VIF)和容许度来测试,显示高程变异系数和地形起伏度 $VIF > 5$,其他指标因子 VIF 值均小于 5。综合以上分析,剔除地形起伏度因子,保留相关性与多重共线性均较低的 11 个评价因子作为评价因子(表 3)。

表 2 影响因子之间的相关系数矩阵
Tab.2 Correlation coefficient matrix between various index factors

| 因子 | 坡度 | 坡向 | 曲率 | SOS | SOA | TWI | 起伏度 | 粗糙度 | VCE | GRVI | 植被 | GISM |
|------|----|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 坡度 | 1 | 0.031 | -0.230 | 0.137 | -0.185 | -0.457 | 0.415 | 0.480 | 0.481 | -0.007 | 0.118 | -0.243 |
| 坡向 | | 1 | 0.064 | 0.073 | -0.003 | 0.022 | -0.126 | -0.126 | -0.194 | -0.198 | -0.03 | 0.091 |
| 曲率 | | | 1 | -0.05 | -0.046 | -0.17 | -0.142 | -0.144 | -0.145 | -0.05 | 0.001 | -0.022 |
| SOS | | | | 1 | 0.316 | -0.031 | 0.085 | 0.040 | 0.058 | -0.032 | 0.045 | -0.111 |
| SOA | | | | | 1 | 0.079 | -0.062 | -0.101 | -0.111 | 0.009 | -0.043 | 0.017 |
| TWI | | | | | | 1 | -0.255 | -0.134 | -0.296 | -0.03 | -0.081 | 0.315 |
| 起伏度 | | | | | | | 1 | 0.136 | 0.884 | -0.037 | 0.116 | -0.366 |
| 粗糙度 | | | | | | | | 1 | 0.135 | 0.009 | 0.026 | -0.048 |
| VCE | | | | | | | | | 1 | -0.043 | 0.092 | -0.328 |
| GRVI | | | | | | | | | | 1 | 0.016 | -0.072 |
| 植被 | | | | | | | | | | | 1 | -0.184 |
| GISM | | | | | | | | | | | | 1 |

表 3 VIF 与容许度
Tab.3 The VIF and the tolerance

| 因子 | 诊断 1 | | 诊断 2 | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 容许度 | VIF | 容许度 | VIF |
| 坡度 | 0.278 | 3.597 | 0.284 | 3.518 |
| 坡向 | 0.911 | 1.098 | 0.912 | 1.096 |
| 曲率 | 0.622 | 1.606 | 0.646 | 1.548 |
| SOS | 0.824 | 1.213 | 0.829 | 1.206 |
| SOA | 0.819 | 1.221 | 0.822 | 1.217 |
| TWI | 0.59 | 1.694 | 0.592 | 1.689 |
| 地形起伏度 | 0.185 | 5.398 | - | - |
| 地表粗糙度 | 0.283 | 3.536 | 0.307 | 3.256 |
| VCE | 0.172 | 5.824 | 0.676 | 1.478 |
| GRVI | 0.965 | 1.037 | 0.965 | 1.036 |
| 植被类型 | 0.908 | 1.101 | 0.913 | 1.096 |
| GISM | 0.679 | 1.472 | 0.680 | 1.470 |

3.4 SHALSTAB 模型参数取值

根据室内三轴实验,有效内摩擦角取 16°。植被类型或覆盖对于土粘聚力有影响^[16],本文考虑三种黏聚力分布。一是根据室内三轴实验,取均一裸土粘聚力为 10 kPa;二是考虑不同植被的附加粘聚力,根据以往对黄土区植被附加粘聚力的研究,草本、灌木、乔木的附加粘聚力分别取 2 kPa、5 kPa、

10 kPa^[22-25];三是根据植被覆盖度量化灌木、乔木的附加粘聚力。根据 GRVI 量化粘聚力,计算如下^[26]:

$$C_{(x,y)} = C_{\min} + C_{\text{interval}} \times \frac{GRVI + 1}{2} \quad (10)$$

式中, C 为粘聚力 (kPa); C_{\min} 为粘聚力的最小值 (kPa); C_{interval} 为粘聚力的区间长度,具体到各植被类型即附加粘聚力的值。

其他参数的取值: ρ_s/ρ_w 取 1.60; a/b 基于 DEM 提取;土层厚度 H 取 1.2 m 的均匀深度。考虑三种粘聚力的工况,在下文分别简称为 SHALSTAB 模型 1、SHALSTAB 模型 2、SHALSTAB 模型 3。

4 滑坡易发性评价与对比分析

4.1 滑坡易发性评价

基于信息量模型与信息量-逻辑耦合模型,不考虑植被得出易发性指数分别在 -3.57 ~ 3.88、-9.86 ~ 6.60 范围内,平均易发性指数分别为 -1.77、-0.52;叠加植被类型因子得出易发性评价指标分别在 -4.17 ~ 3.91、-11.33 ~ 7.24 范围内,平均易发性指数分别为 -2.00、-0.61 (图 5)。考虑植被类型的易发性指数区间大于不考虑植被的情况,但平均易发性指数相反,叠加植被类型因子后主要扩大了低易发性指数区域。说明植被在浅层滑坡

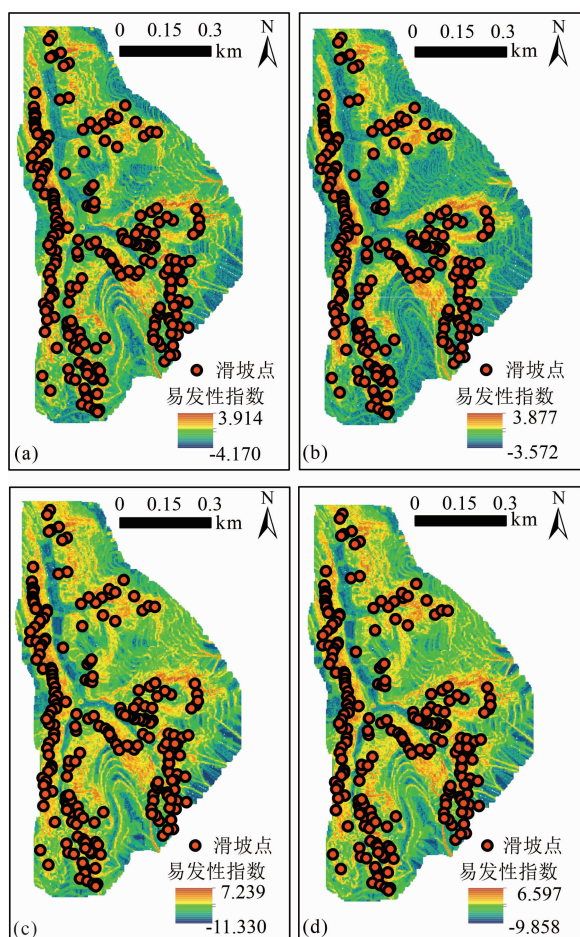


图5 易发性指数: (a)信息量-逻辑回归耦合模型(考虑植被); (b)信息量-逻辑回归耦合模型(不考虑植被); (c)信息量模型(考虑植被); (d)信息量模型(不考虑植被)

Fig. 5 Susceptibility map: (a) informativeness-logic regression coupling model (with vegetation consideration); (b) informativeness-logic regression coupling model (without vegetation); (c) informativeness model (with vegetation consideration); (d) informativeness model (without vegetation)

孕育中起着抑制作用。

将考虑植被类型因子进行易发性评价得到的结果等距划分为5个等级。相较于单一的信息量模型,耦合模型划分的极高易发区和高易发区面积更小,稳定区和低易发区面积更大;即将更小的区域划分为较易发区(图6)。

对比图7和图8 SHALSTAB模型三种粘聚力分布的易发性等级,考虑植被因素附加粘聚力的下稳定区面积比不考虑植被的提高10%以上,其他四部分区域面积均降低;对比植被覆盖度的影响,可以看出稳定区面积提高幅度减小,说明考虑植被因素越细致,易发性分区越精确。对比定量与半定量模型

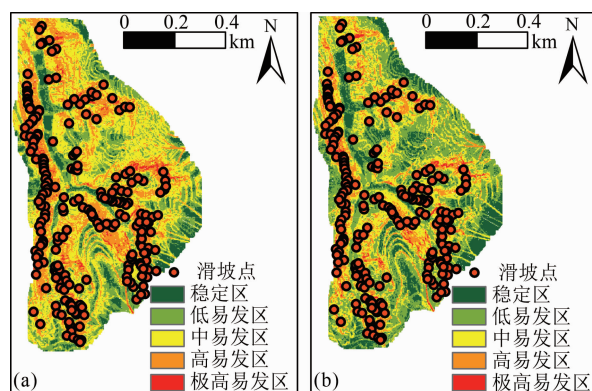


图6 易发性等级:

(a)信息量模型; (b)信息量-逻辑回归耦合模型

Fig. 6 Susceptibility zoning maps: (a) informativeness model; (b) informativeness-logic regression coupling model

的易发性等级,定量模型划分的稳定区面积是半定量模型划分稳定区面积的2倍多,同时定量模型划分的中易发区面积显著小于半定量模型划分的中易发区面积。说明相较于半定量模型,定量模型划定的易发区更精确。

4.2 模型精度检验

本文评价模型预测结果的精度用ROC (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线及 F_1 检验。ROC曲线以假正率为横坐标、真正率为纵坐标,曲线下的面积即AUC (Area Under the Curve, AUC) 值。 F_1 检验平衡了精确率 (Precision) 与召回率 (Recall) 的偏差,对模型的分类能力进行检验。AUC与 F_1 均是越高代表模型越可靠。本文选取220处滑坡点及220处对照点对模型进行检验。

AUC最高的是SHALSTAB模型3,为0.910;最低的模型是没有考虑植被类型的信息量模型,为0.864; F_1 与AUC检验结果一致(表4)。SHALSTAB模型的精度整体高于半定量模型。此外,比较信息量模型和信息量逻辑回归耦合模型,耦合模型精度略有提高,耦合模型比单一模型更可靠。两个半定量模型考虑植被因子后精度明显提高,SHALSTAB模型中植被对粘聚力的影响量化得越细致精度越高,说明考虑植被因素有利于更全面地反映植被生长良好地区浅层滑坡的易发性。

5 结论

本文以晋西黄土区蔡家川农地小流域为研究

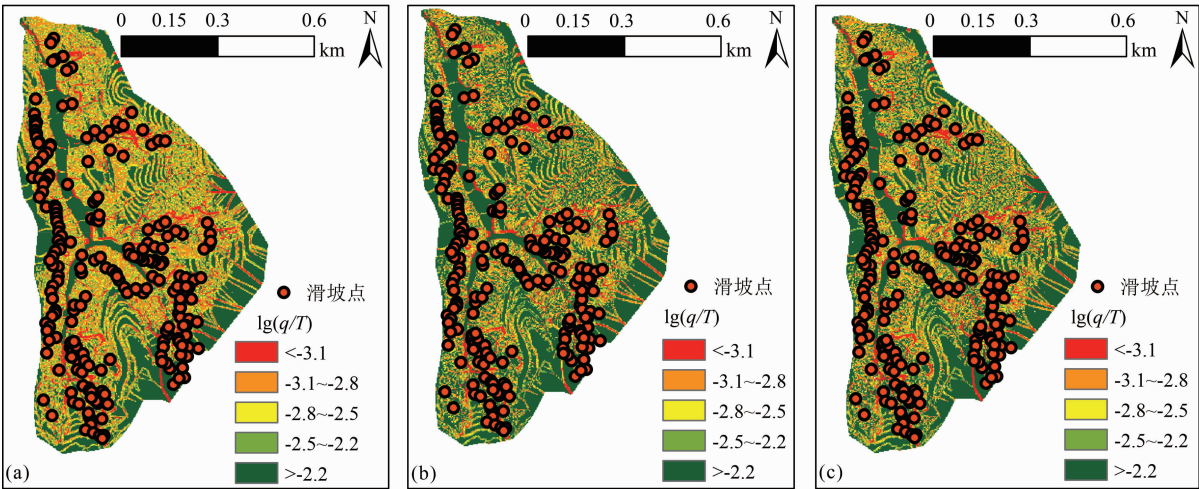


图 7 SHALSTAB 模型易发性等级: (a) SHALSTAB 模型 1; (b) SHALSTAB 模型 2; (c) SHALSTAB 模型 3
Fig. 7 Susceptibility zoning map of SHALSTAB model: (a) SHALSTAB model 1; (b) SHALSTAB model 2; (c) SHALSTAB model 3

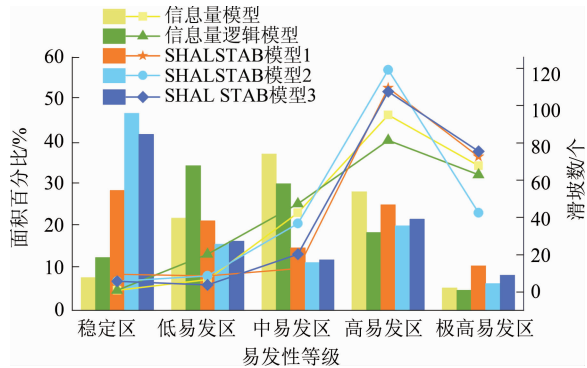


图 8 基于易发性等级分区的面积及灾害点统计
Fig. 8 Statistics of area and landslide points based on susceptibility zoning

表 4 AUC 与 F_1 统计

Tab. 4 Statistics of AUC and F_1 values

| 模型 | AUC | F_1 |
|-----------------|-------|-------|
| 信息量模型 (不考虑植被) | 0.864 | 0.773 |
| 信息量模型 (考虑植被) | 0.877 | 0.795 |
| 信息量逻辑模型 (不考虑植被) | 0.865 | 0.782 |
| 信息量逻辑模型 (考虑植被) | 0.880 | 0.800 |
| SHALSTAB 模型 1 | 0.876 | 0.841 |
| SHALSTAB 模型 2 | 0.896 | 0.859 |
| SHALSTAB 模型 3 | 0.910 | 0.877 |

区,获取暴雨前、后的流域高分辨率数字地形和遥感图像,提取地形要素和植被要素,用信息量模型、信息量-逻辑回归耦合模型等对研究区易发性进行了评价,采用 ROC 曲线对模型的精度进行评估。主要

结论如下:

- (1) 考虑植被因子后,半定量模型易发性指数均下降;定量模型得到的稳定区面积显著增大。这充分说明植被在浅层滑坡灾害孕育中起降低易发性的作用。
- (2) 考虑植被因子后,半定量模型和物理模型的精度均提高,说明开展浅层滑坡易发性评价时考虑植被因子可以使结果更准确。
- (3) 通过 ROC 曲线与 F_1 值的精度分析,耦合模型比单一模型精度略有提高,物理模型的精度整体高于半定量模型。

参考文献 (References)

[1] WANG Genlong, LI Tonglu, XING Xianli, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **73**(12): 7933 – 7944. DOI: 10.1007/s12665-014-3951-9

[2] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县“7·21”特大暴雨为例[J]. 生态学报, 2016, **36**(15): 4635 – 4643. [HAN Yong, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian county [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(15): 4635 – 4643] DOI: 10.5846/stxb201501140117

[3] DENG Jiayong, MA Chao, ZHANG Yan. Shallow landslide characteristics and its response to vegetation by example of July 2013, extreme rainstorm, Central Loess Plateau, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(3): 100. DOI: 10.1007/s10064-022-02606-1

- [4] LI Muyang, MA Chao, DU Cui, et al. Landslide response to vegetation by example of July 25 – 26, 2013, extreme rainstorm, Tianshui, Gansu province, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, **80**(1): 751 – 764. DOI: 10.1007/s10064 – 020 – 02000 – 9
- [5] 杨萌, 宋晓鹏, 张岩, 等. 黄土高原丘一区典型流域坡耕地分布及其侵蚀地形特征[J]. *中国水土保持科学*, 2020, **18**(6): 1 – 8. [YANG Meng, SONG Xiaopeng, ZHANG Yan, et al. Distribution of sloping cropland and correlative erosional landform in typical watersheds on the hilly Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, **18**(6): 1 – 8] DOI: 10.16843/j. sswc. 2020. 06. 001
- [6] 郭富赞, 孟兴民, 黎志恒, 等. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J]. *山地学报*, 2015, **33**(1): 100 – 107. [GUO Fuyun, MENG Xinmin, LI Zhiheng, et al. Characteristics and causes of assembled geo-hazards induced by the rainstorm on 25th July 2013 in Tianshui city, Gansu, China [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(1): 100 – 107] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000014
- [7] 彭建兵, 王启耀, 门玉明, 等. 黄土高原滑坡灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 26 – 48. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, MEN Yuming, et al. *Loess Plateau landslide hazard* [M]. Beijing: Science Press, 2019: 26 – 48]
- [8] 司康平, 田原, 汪大明, 等. 滑坡灾害危险性评价的3种统计方法比较——以深圳市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, **45**(4): 639 – 646. [SI Kangping, TIAN Yuan, WANG Daming, et al. Comparison of three statistical methods on landslide susceptibility analysis: A case study of Shenzhen city [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, **45**(4): 639 – 646] DOI: 10.13209/j. 0479 – 8023. 2009. 096
- [9] 胡德勇, 李京, 陈云浩, 等. GIS支持下滑坡灾害空间预测方法研究[J]. *遥感学报*, 2007, **11**(6): 852 – 859. [HU Deyong, LI Jing, CHEN Yunhao, et al. GIS-based landslide spatial prediction methods: A case study in Cameron highland, Malaysia [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, **11**(6): 852 – 859] DOI: 10.3321/j. issn: 1007 – 4619. 2007. 06. 012
- [10] 王晓波, 鲁恒, 刘雪梅, 等. 基于SHALSTAB模型与面向对象遥感影像分析的地震滑坡信息快速检测[J]. *地震研究*, 2019, **42**(2): 273 – 279 + 306. [WANG Xiaobo, LU Heng, LIU Xuemei, et al. Rapid detection of seismic landslide information based on SHALSTAB model and object-oriented remote sensing image [J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, **42**(2): 273 – 279 + 306] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 – 0666. 2019. 02. 016
- [11] 崔阳阳. 基于不同评价单元的滑坡易发性评价方法研究——以陕西省洛南县为例[D]. 西安: 西安科技大学, 2021: 1 – 3 [CUI Yangyang. A comparative study on evaluation methods of landslide susceptibility based on different evaluation units: A case study of Luonan county, Shaanxi province [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021: 1 – 3] DOI: 10.27397/d. cnki. gxaku. 2021. 000039
- [12] 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] DOI: 10.13278/j. cnki. jjuese. 2013. 03. 039
- [13] 孙何生, 邱海军, 朱亚茹, 等. 黄河上游典型流域滑坡稳定性预测及模型应用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, **52**(3): 380 – 390. [SUN Hesheng, QIU Haijun, ZHU Yaru, et al. Landslide stability prediction and model application in typical watersheds of the upper Yellow River [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, **52**(3): 380 – 390] DOI: 10.16152/j. cnki. xdxbr. 2022 – 03 – 003
- [14] 郭宁珊, 王佳希, 张岩, 等. 基于无人机可见光影像的树种和树冠信息提取——以晋西黄土区蔡家川流域为例[J]. *浙江农业学报*, 2021, **33**(8): 1505 – 1518. [WU Ningshan, WANG Jiaxi, ZHANG Yan, et al. Determining tree species and crown width from unmanned aerial vehicle imagery in hilly loess region of west Shanxi, China: A case study from Caijiachuan watershed [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, **33**(8): 1505 – 1518] DOI: 10.3969/j. issn. 1004 – 1524. 2021. 08. 18
- [15] 李阳, 张建军, 魏广阔, 等. 晋西黄土区极端降雨后浅层滑坡调查及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(5): 44 – 50. [LI Yang, ZHANG Jianjun, WEI Guangkuo, et al. Investigation of shallow landslide after extreme rainfall and analysis of its influencing factors in the west Shanxi Loess Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(5): 44 – 50] DOI: 10.13870/j. cnki. stbxb. 2022. 05. 007
- [16] 周萍, 邓辉, 张文江, 等. 基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究——以四川理县为例[J]. *地理科学*, 2022, **42**(9): 1665 – 1675. [ZHOU Ping, DENG Hui, ZHANG Wenjiang, et al. Landslide susceptibility evaluation based on Information Value model and Machine Learning method: A case study of Lixian county, Sichuan province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(9): 1665 – 1675] DOI: 10.13249/j. cnki. sgs. 2022. 09. 016
- [17] 李信, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 基于信息量模型和信息量—逻辑回归模型的海南岛中部山区地质灾害易发性研究[J]. *地质力学学报*, 2022, **28**(2): 294 – 305. [LI Xin, XUE Guicheng, LIU Changzhu, et al. Evaluation of geohazard susceptibility based on information value model and information value-logistic regression model: A case study of the central mountainous area of Hainan Island [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, **28**(2): 294 – 305] DOI: 10.12090/j. issn. 1006 – 6616. 2021111
- [18] 李信, 薛桂澄, 夏南, 等. 基于CF/CF-LR和CF-AHP模型的国家热带雨林公园地质灾害易发性研究: 以海南保亭为例

- [J]. 现代地质, 2023, **37**(4): 1033 – 1043. [LI Xin, XUE Guicheng, XIA Nan, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF, CF-LR and CF-AHP models in national tropical rain forest park: Taking Baoting county, Hainan province as an example [J]. Geoscience, 2023, **37**(4): 1033 – 1043] DOI: 10.19657/j.geoscience.1000 – 8527.2023.002
- [19] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E. Channel initiation and the problem of landscape scale [J]. Science, 1992, **255**(5046): 826 – 830. DOI: 10.1126/science.255.5046.826
- [20] 康超, 谌文武, 张帆宇, 等. 确定性模型在黄土沟壑区斜坡稳定性预测中的应用[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 207 – 210 + 260. [KANG Chao, ZHAN Wenwu, ZHANG Fan, et al. Application of deterministic model to analyzing stability of hillslope of loess gully area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 207 – 210 + 260] DOI: 10.16285/j.rsm.2011.01.009
- [21] CATANI F, SEGONI S, FALORNI G. An empirical geomorphology - based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2010, **46**(5): W05508. DOI: 10.1029/2008WR007450
- [22] WANG Xinhao, MA Chao, WANG Yunqi, et al. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: Variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite [J]. Landslides, 2020, **17**(11): 1965 – 1977. DOI: 10.1007/s10346 – 020 – 01422 – 6
- [23] 余芹芹, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 寒旱环境灌木植物根—土复合强度模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(5): 1020 – 1031. [YU Qinqin, HU Xiasong, LI Guorong, et al. Research on strength model test of shrub root-soil composite system in cold and arid environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(5): 1020 – 1031] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 6915.2013.05.021
- [24] 李佳, 汪霞, 贾海霞, 等. 浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(14): 5117 – 5126. [LI Jia, WANG Xia, JIA Haixia, et al. Ecological restoration with shrub roots for slope reinforcement in a shallow landslide-prone region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(14): 5117 – 5126] DOI: 10.5846/stxb201809141986
- [25] DAI Zhisheng, MA Chao, MIAO Lv, et al. Initiation conditions of shallow landslides in two man-made forests and back estimation of the possible rainfall threshold [J]. Landslides, 2022, **19**(5): 1031 – 1044 DOI: 10.1007/s10346 – 021 – 01823 – 1
- [26] HUANG J C, KAO S J, HSU M L, et al. Stochastic procedure to extract and to integrate landslide susceptibility maps: An example of mountainous watershed in Taiwan [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, **6**(5): 803 – 815. DOI: 10.5194/nhess – 6 – 803 – 2006

Risk Assessment of Shallow Loess Landslides: Taking a Small Watershed of Caijiachuan Farmland in the Loess Region of Western Shanxi of China as an Example

WANG Xinying^a, MA Chao^{a,b}, ZHANG Yan^{a,b*}

(a. School of Soil and Water Conservation, Beijing 100083;

b. Shanxi Ji County Station of Chinese National Ecosystem Research Network, Linfen 042200, Shanxi, Beijing Forestry University, China)

Abstract: Extreme heavy rainfall events are frequent in the central Loess Plateau region, triggering extensive shallow loess landslides and loess mudflow. With global warming and increased rainfall in Loess Plateau, vegetation cover in Northwest China has changed significantly, and the evaluation method of loess landslide susceptibility zoning without considering the vegetation needs to be improved.

In this paper, it took a small watershed of Caijiachuan farmland in the loess region of western Shanxi of China for a case study. After comparison of post-rainstorm high-resolution images of the watershed and pre-rainstorm ones, digital elevation model construction, field landslide investigation and indoor geotechnical testing, shallow loess landslide susceptibility zoning was completed for the Caijiachuan watershed in terms of two working cinnerio, vegetated or unvegetated loess slopes. Semi-quantitative informativeness model, informativeness-logistic regression coupling model, and quantitative physical model were utilized in the evaluation and then the model accuracy was

evaluated by ROC curves and the F_1 proxy respectively.

It finds that when vegetation was included in simulation, the vulnerability index obtained by the semi-quantitative model decreased, and the area of stable zone calculated by physical model increased significantly, indicating that vegetation had an restricted effect on shallow landslides. The evaluation accuracy of each model improved in the presence of vegetation, with the coupled informative-logistic regression model having a higher accuracy than the informative model, and the physical model having an overall higher accuracy than the two semi-quantitative models. The accuracies of the two semi-quantitative models with vegetation consideration are better than those without vegetation involved.

The results of this work can be supportive for rainfall-induced landslides prediction in vegetated landscape, Loess Plateau, China.

Key words: extreme rainstorm; shallow loess landslide; susceptibility zoning; Loess Plateau

(责任编辑 钟雨倩)