考虑土地利用变化和根系力空间异质性的滑坡易发性评价①

苗则朗[1], 成志炜[2], 熊耀鹏[1], 吴佳奇[1], 彭祖武[2], 雷钧焕[3,4]
(1.中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2.湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410014; 3.湖南省自然资源事务中心, 湖南 长沙 410000; 4.洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 为探究土地利用变化对滑坡易发性的影响,以湖南省浏阳市为研究区,基于 2000—2020 年土地利用数据,结合根系力反演模型和动态水文修正方法,构建改进的无限边坡模型,量化土地利用变化对滑坡稳定性的影响机制。通过对比 6 种参数组合情景,验证模型精度。结果表明,考虑根系力空间异质性与土地利用修正饱和导水率的模型预测精度极高(曲线下面积为 0.815 0),较传统模型提升显著;森林转向建设用地使滑坡易发性显著增加(滑坡频率比值为 1.426 9),植被覆盖减少导致根系加固能力下降。

关键词: 地质灾害; 滑坡易发性; 土地利用; 根系力; 无限边坡模型; 导水率; 滑坡; 空间异质性
中图分类号: P642 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.004
文章编号: 0253-6099(2025)06-0019-07

Landslide Susceptibility Assessment Considering Land Use Change and Spatial Heterogeneity of Root Cohesion

MIAO Zelang[1], CHENG Zhiwei[2], XIONG Yaopeng[1], WU Jiaqi[1], PENG Zuwu[2], LEI Junhuan[3,4]
(1. *School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2. *Hunan Institute of Geological Survey, Changsha* 410114, *Hunan, China*; 3. *Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha* 410000, *Hunan, China*; 4. *Hunan Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring for Ecological Environment in Dongting Lake Region, Changsha* 410004, *Hunan, China*)

Abstract: To explore the influence of land use change on landslide susceptibility, Liuyang City of Hunan Province was taken for research. An improved infinite slope model was established based on land use data from 2000 to 2020, by using an inversion model of root cohesion and dynamic hydrological correction, and the influence mechanism of land use change on landslide susceptibility was quantified. The model accuracy was verified by comparing six types of parameter combinations. It is found that the model considering spatial heterogeneity of root cohesion and saturated hydraulic conductivity corrected based on land use has extremely high prediction accuracy (AUC = 0.815 0), presenting a significant improvement compared with the traditional model. Besides, forest land conversion to land for construction significantly increases landslide susceptibility (with a frequency ratio of 1.426 9), and decline of vegetation cover leads to reduction in root reinforcement.

Key words: geological hazard; landslide susceptibility; land use; root cohesion; infinite slope model; hydraulic conductivity; landslide; spatial heterogeneity

土地利用变化是影响滑坡易发性的关键环境因子。随着人类活动强度的持续增强及地质环境快速演变,滑坡灾害的发生频率与危险性呈上升趋势[1]。在矿业活动高度集中的地区,土地利用形式的改变常通过坡面切割、土壤剥离和尾矿堆积等手段,不仅改变地形地貌,还显著扰动了地表水文过程与土体力学特性,从而增强了滑坡的潜在风险[2-3]。开采过程形成的高悬坡、尾矿库堆积体以及植被清除后的裸露边坡,其滑坡诱发机制具有明确的物理链路[4]。已有研究指出,矿区坡体因植被丧失、材料堆积与水文扰动等导致稳定性显著下降。因此,有必要将土地利用变化过程作为影响机制来讨论其对滑坡易发性的影响[5]。

① **收稿日期**: 2025-07-09
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0208000);国家自然科学基金(42171084);自然资源部部省合作试点项目(2023ZRBSHZ056)
作者简介: 苗则朗(1988—),男,安徽砀山人,博士,副教授,研究方向为遥感解译和灾害风险评价。E-mail:zelang.miao@csu.edu.cn

在滑坡易发性评价研究中,根系力作为稳定坡面的重要因子,能够通过增强土壤结构强度、改变水文入渗过程,对降雨型滑坡具有显著缓解作用[6]。然而,随着植被砍伐、森林向农用地/建设用地转化加速,植被根系作用减弱,特别是在土地利用剧烈变化地区[7]。另一方面,土地利用变化的非均匀性(包括植被类型、开挖扰动强度、坡体几何变化等)意味着根系力、土体物性、水文响应在空间上并非均一[8]。因此,将根系力的空间异质性纳入滑坡易发性评价模型,有助于提升预测精度。与此同时,经典的无限边坡稳定性模型虽然结构简洁、易于工程推广,但是如果仅以静态、均匀参数处理,不能充分反映现实中土地利用变化、水文扰动与植被力学效应的联合作用。已有研究指出,将动态水文修正、根系加固效应、土地利用扰动机制联合纳入滑坡易发性模型,能显著提升评价效果。

本文提出一种考虑土地利用变化与根系力空间异质性的滑坡易发性评价方法。首先,基于多源遥感与野外样本数据(如树高、地上生物量)反演根系力空间分布,并建立根系力与立地条件的回归关系;其次,将根系力反演结果与动态水文修正方法联合,嵌入改进的无限边坡稳定性分析框架,以实现降雨条件下时空动态的滑坡易发性映射;最后,以湖南省浏阳市为研究区,探讨该方法对矿区及非矿区土地利用扰动背景下滑坡易发性的适用性与推广价值[9]。尽管该研究区并非典型矿区,但其土地利用变化机制在物理链路上可与矿区扰动类比。

1 研究区概况与土地利用变化

1.1 研究区概况

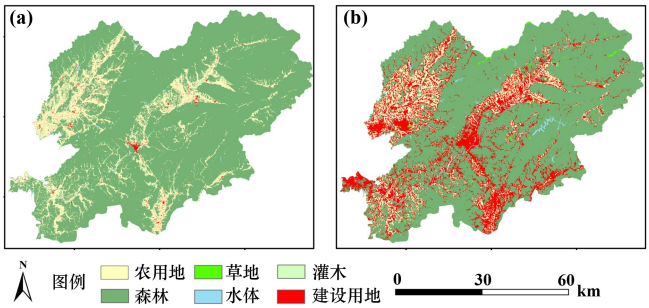
浏阳市位于湖南省东北部,东西跨度 105.8 km,南北相距 80.9 km,总面积约 5 007.75 km^2。多年平均降水量为 1 400~1 800 mm。该地区植被丰富,森林覆盖率达 66.2%,土壤类型以红壤、黄壤为主。

受自然环境多样性和人为活动的影响,浏阳市近年来频繁发生滑坡灾害,特别是在山区和丘陵地带,对当地农用地、交通设施及人民生活造成了较大威胁。降雨是影响滑坡发生的关键因素之一,特别是暴雨频发时期,会使岩土体含水量急剧增加,重度增大,抗剪强度降低,进而增大滑坡发生的风险[10]。

1.2 土地利用空间分布

图 1 为浏阳市 2000 年和 2020 年的土地利用空间分布格局。从整体来看,浏阳市以森林覆盖为主,两期土地利用类型在空间上均呈现明显的地形控制特征。

2000 年,森林是浏阳市最主要的土地利用类型,总面积达 4 080.56 km^2,占全市面积的 81.49%,广泛分布于全域中高海拔山地丘陵地区。农用地面积为 866.09 km^2,占比 17.30%,主要集中于河谷、盆地和地势较为平缓的地区,是主要的人类生产活动空间。建设用地面积仅 35.78 km^2(0.71%),规模较小,主要分布在城区及交通干线沿线。其他地类(灌木、草地、水体)所占比例极低,空间分布零散。



(a) 2000 年;(b) 2020 年

图 1 浏阳市土地利用空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of land use in Liuyang City

2020 年的土地利用分布呈现更为突出的空间分异。森林仍是主导类型,总面积为 3 488.95 km^2,占比 69.67%,主要分布在周边山地,但整体斑块呈现一定程度的破碎化。农用地面积减少至 520.93 km^2,占比 10.40%,分布主要集中在乡镇周边的低洼平地。相比之下,建设用地面积显著扩大至 889.11 km^2,占比提升至 17.76%,在城区周边、交通走廊以及乡镇节点呈现连续扩张态势。水体面积增加至 73.75 km^2,占比 1.47%,在河流与库区位置表现明显。总体来看,2000—2020 年,浏阳市土地利用格局具有“森林主导、农用地次之、建设用地集中分布”的典型山地丘陵市域特征,但 2020 年建设用地斑块更加集中且范围更广,与城市化、交通发展和土地利用结构调整有关;森林依然占主导地位,但分布形态更为破碎,农用地呈收缩趋势。

1.3 土地利用变化与滑坡分布

表 1 为 2000—2020 年浏阳市不同用地的面积变化和占比。由表 1 可知,2000—2020 年,浏阳市土地利用发生了显著变化,农用地面积减少了 345.15 km^2,森林面积减少了 591.61 km^2,而建设用地面积增加了 853.34 km^2,大量农用地和未利用地转化为建设用地。

土地利用类型面积转移桑基图见图 2。可以看出,用地类型间的转移以森林和农用地向建设用地转换为主。建设用地的增加绝大部分来源于农用地和森林的转移,建设用地不断扩张,大量林地、农用地被占用。以部分城区和工业园区周边为例,为满足城市建设和工

业发展需求,大量植被遭到砍伐,林地面积锐减。空间分布上表现为在原有城镇区四周向外扩张。证明了土地利用的动态变化对滑坡空间分布具有显著影响。

表 1　2000—2020 年浏阳市不同用地的面积变化和占比

Table 1　Area change and proportion of different land uses in Liuyang City from 2000 to 2020

土地利用类型	面积/km²			占比/%	
	2000 年	2020 年	变化	2000 年	2020 年
农用地	866.09	520.93	-345.15	17.295	10.403
森林	4 080.56	3 488.95	-591.61	81.485	69.671
灌木	0.14	0.23	0.09	0.003	0.005
草地	0.13	34.77	34.64	0.003	0.694
水体	25.05	73.75	48.70	0.500	0.500
建设用地	35.78	889.11	853.34	0.714	17.755

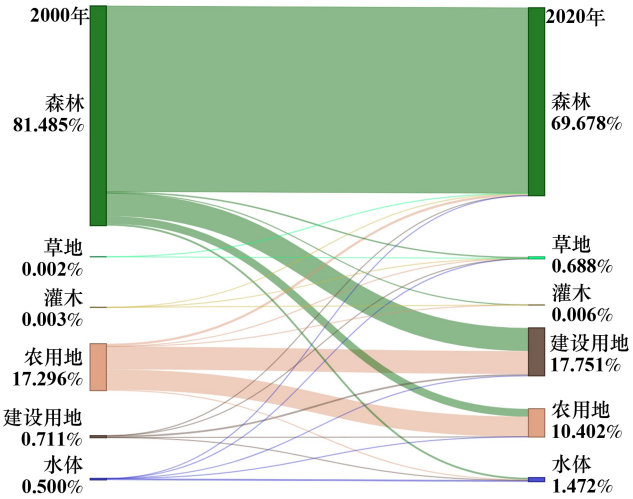


图 2　土地利用类型面积转移桑基图

Fig. 2　Sankey diagram for land use transition

滑坡比表示每个地类中发生滑坡的面积所占的比例,滑坡频率比值(FR)指标表征了指标因子各级状态对滑坡发生的重要程度:FR>1 表示该状态与滑坡发生的对应程度较高;FR<1 表示其对应程度较低。采用 FR 定量分析土地利用动态变化与滑坡发育之间的关系,结果见表 2。由表 2 可知,浏阳市森林区域的滑坡比最高,为区域滑坡总数的 76.01%,其次是建设区域,为 22.37%;建设区域的 FR 值大于 1。滑坡更多分布在发生土地利用类型变化的区域,其中森林转为其他地类以及其他地类转为建设用地的区域均表现出较高的滑坡比和对应的 FR 值。这表明土地利用类型变化比静态土地利用类型更能解释滑坡的空间分布,尤其是森林向建设用地的转变反映了人类活动的增强,容易破坏原有植被覆盖与地质环境,从而降低斜坡稳定性。整体来看,变化地类的 FR 普遍高于未变化地类,说明土地利用类型变化与滑坡发生具有更强的相关性,在滑坡易发性评价中有必要考虑土地利用类型变化。

表 2　土地利用动态变化与滑坡发育之间的关系

Table 2　Correlation between land use change and landslide occurrence

土地利用类型	2020 年		2000–2020 年土地利用类型变化		
	滑坡比	FR	变化类别	滑坡比	FR
农用地	0.013 7	0.131 9	转出(农用地发生变化)	0.058 7	0.598 6
			转入(变为农用地)	0.010 6	0.362 2
森林	0.760 1	0.965 9	转出(森林发生变化)	0.181 3	1.426 9
			转入(变为森林)	0.005 8	0.654 8
灌木	0.000 9	0.035 4	转出(灌木发生变化)	0.000 2	0.901 7
			转入(变为灌木)	0.000 5	0.047 5
草地	0.001 6	0.233 9	转出(草地发生变化)	0	0
			转入(变为草地)	0.001 6	0.234 3
水体	0	0	转出(水体发生变化)	0.000 3	0.014 6
			转入(变为水体)	0	0
建设用地	0.223 7	1.260 2	转出(建设用地发生变化)	0.000 5	0.065 3
			转入(变为建设用地)	0.221 7	1.295 3

2　实验方法

2.1　改进的无限边坡模型

研究区滑坡多为降雨型浅层滑坡,本文采用无限边坡模型对其进行易发性评价[11]。为反映土地利用类型变化对边坡稳定性的动态影响,本研究对经典公式进行以下修正:

$$F_S = \frac{C_S + C_r + \cos 2\alpha \cdot \tan\varphi \cdot (q_t + W)}{\cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot (q_t + W)} \tag{1}$$

式中:F_S 为边坡稳定系数;C_S 为土壤内聚力,kg/m²;C_r 为植被根系力,kg/m²;α 为边坡坡度,(°);φ 为土壤内摩擦角,(°);q_t 为边坡上的植被荷载,即总生物量(地上生物量与地下生物量的和),kg/m²;W 为单位面积土体有效重度,其计算公式见式(2)。

$$W = Z[\gamma_m + (\gamma_{sat} - \gamma_m - \gamma_w)h_w] \tag{2}$$

式中:γ_{sat}为饱和土壤的密度,kg/m³;γ_m 为自然状态下土壤密度,kg/m³;γ_w 为水的密度,kg/m³;Z 为土层厚度,m;h_w 为土壤湿度指数,%。

改进后的无限边坡模型在传统无限边坡模型基础上,综合考虑了更多与边坡稳定性相关的关键因素,见图 3。

2.2　区域根系力反演模型

植被根系力可以理解为植被根系在不同土壤深度的根系力的积分,即通过对各深度处根系提供的抗剪强度进行累计计算,以反映植被对土壤稳定性的整体贡献。

$$C_r = \int_0^{\infty} C_r(z)\,\mathrm{d}z \tag{3}$$

式中 $C_r(z)$是土壤深度 z 处的根系力。

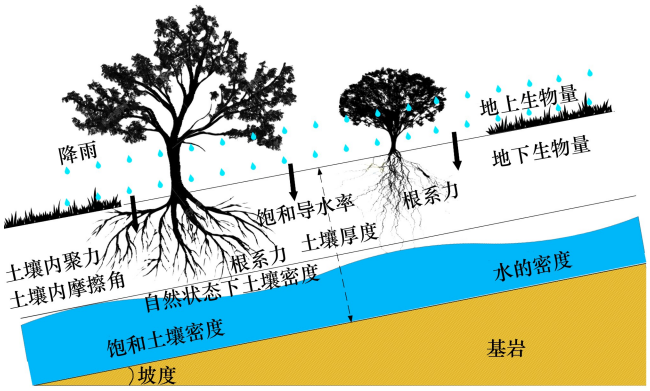


图 3 改进的无限边坡模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of improved infinite slope model

单根抗拉强度是根系力的基础,但根系力还取决于根系的整体结构和分布。因此,可将 $C_r(z)$ 表示为:

$$C_r(z) = K \cdot T_r \cdot A(z) \tag{4}$$

式中:K 为常数,通常假设为 1.2 m^{-1};T_r 为单根抗拉强度,kg/m^2;$A(z)$ 为土壤深度 z 处的根系面积,通常用指数衰减模型[见式(5)]表示其随着深度的变化。

$$A(z) = A_0 e^{-\lambda z} \tag{5}$$

式中:A_0 为表层土壤的根系面积;λ 为衰减系数,反映根系面积随深度减少的速率。

将式(4)、(5)代入式(3)可得:

$$C_r = \int_0^{\infty} K \cdot T_r \cdot A_0 e^{-\lambda z} \cdot dz = K \cdot T_r \cdot \int_0^{\infty} A_0 e^{-\lambda z} \cdot dz$$

$$= K \cdot T_r \cdot V_r = K \cdot T_r \cdot \frac{A_0}{\lambda} \tag{6}$$

式中 V_r 为根系体积。

单根抗拉强度 T_r 与树高 H 之间存在正相关关系[11]:

$$T_r = \alpha \cdot H^{\beta} \tag{7}$$

式中 α、β 为经验参数。根据文献[12],α、β 分别设置为 0.185 9、2.109 8。

由于研究区的生态系统以植物根系为主,本文将地下生物量 B_r 等同于根系质量 M_r 为:

$$B_r \approx M_r = \rho_r V_r = \rho_r \frac{A_0}{\lambda} \tag{8}$$

式中 ρ_r 为根密度,取 435.33 kg/m^3。相关研究表明,地下生物量 B_r 与地上生物量 A_r 存在如下关系[12]:

$$B_r = 0.26 \times A_r \tag{9}$$

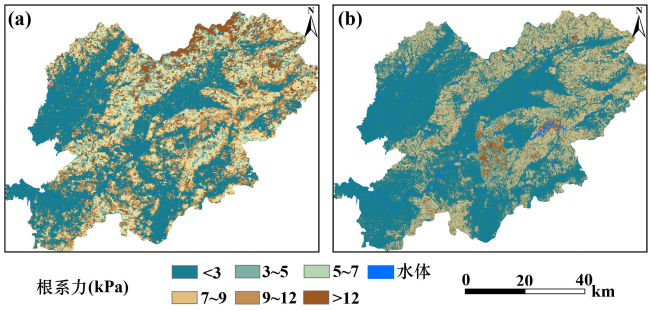
通过公开获取的地上生物量产品数据可以计算地下生物量,进而可以获取 A_0:

$$A_0 = \frac{B_r \cdot \lambda}{\rho_r} \tag{10}$$

联立式(6)和式(10),可得:

$$C_r = K \cdot T_r \cdot \frac{B_r}{\rho_r} \tag{11}$$

通过以上公式推导,计算得到研究区的根系力结果如图 4 所示。



(a) 2000 年;(b) 2020 年

图 4 浏阳市根系力反演结果

Fig. 4 Inverse of root cohesion in Liuyang City

2.3 水文模型构建

降雨引发的土壤含水量增加会提高孔隙水压力并降低抗剪强度,进而影响边坡稳定性。因此,精确评估滑坡风险需耦合降雨-土壤含水量动态过程。本研究将土壤含水量指数 h_w 分解为稳态湿度 h_s 与瞬态湿度 h_r 两个组分,分别表征长期地下水位响应和短期降雨入渗效应,其表达式为:

$$h_s = \frac{z_s}{Z} \tag{12}$$

$$h_r = \frac{z_i}{Z} \tag{13}$$

$$h_w = h_s + h_r \tag{14}$$

式中:h_s 是对前期降雨长期响应下的稳态土壤水分指数,主要响应在土地下不透水基岩上方深度 z_s 处;h_r 体现了降雨期间自地表产生的瞬态垂直入渗过程,此过程形成了深度 z_i 的湿润锋。

1)稳态湿度。采用 TOPOG 模型模拟稳态水文的湿度变化:

$$h_s = \frac{I_e a}{b K_s Z \cos\alpha \sin\alpha} \tag{15}$$

式中:I_e 为在充分考虑雨季期间径流和蒸散损失之后,最终能够渗入土壤的大气降雨量;a 为上坡贡献面积,m^2;b 为土壤单元的宽度,m;K_s 为饱和导水率,m/s。

2)瞬态湿度。采用 Green-Ampt 模型模拟降雨入渗过程。根据降雨强度 I 和入渗率 f 之间的相互关系,Green-Ampt 模型可分为以下 2 种不同的情景。

当 $I < f$ 时,在给定的时间间隔 t 内,雨水能够完全渗入土壤中,不会出现地表水积聚的现象。在这种情况下,累计入渗量 F_t 恰好等于累计降雨量 I_t。

当 $I > f$ 时,仅有一部分降雨渗透进入土壤,导致地表水积聚和径流产生。此时,累计入渗量 F_t 为:

$$F_t = F_p + K_s(t - t_p) + \psi\Delta\theta\ln\left(\frac{F_t + \psi\Delta\theta}{F_p + \psi\Delta\theta}\right) \quad (16)$$

式中:ψ 为湿润锋处的基质吸力头;$\Delta\theta$ 为土壤水分亏缺;t_p 为蓄水开始的时间点;F_p 为地表水蓄水开始时的累计入渗量。

$$F_p = \frac{K_s\psi\Delta\theta}{I - K_s} \quad (17)$$

湿润锋深度估算公式为:

$$z_i = \frac{F_t}{\Delta\theta}$$

由此可得瞬态降雨入渗期间的相对湿度为:

$$h_r = \frac{F_t}{Z\Delta\theta} \quad (18)$$

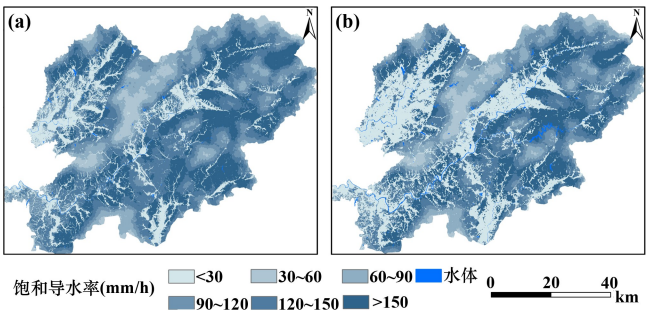
林地因其具有广泛且深的根系系统,以及丰富的土壤动物活动,使得土壤中形成较多大孔隙,从而具有较高的饱和导水率和入渗率。农用地由于每年进行耕作,土壤结构遭到破坏,大孔隙减少,导水率相对较低。文献[13]通过分析现场数据以及大量文献,得出的土壤饱和导水率修正系数如表 3 所示。

表 3　基于土地利用类型的土壤饱和导水率修正系数

Table 3　Correction factor for saturated hydraulic conductivity of soil based on land use type

土地利用类型	土壤饱和导水率修正系数
农用地	$1K_s$
草地	$2K_s$
半自然区域	$4.5K_s$
森林	$8K_s$

依据表 3,对浏阳市 2000 年和 2020 年的饱和导水率进行修正,修正后的结果如图 5 所示。



(a) 2010 年;(b) 2020 年

图 5　浏阳市饱和导水率修正结果

Fig. 5　Correction results of saturated hydraulic conductivity for Liuyang City

3　实验结果与分析

3.1　滑坡易发性评价

为评估根系力 C_r 和调整后的饱和导水率 K_s 在滑坡易发性模型中的有效性,设置 6 种不同 C_r 和 K_s 参数的情景,如表 4 所示。

表 4　不同根系力 C_r 和饱和导水率 K_s 模型的组合情景

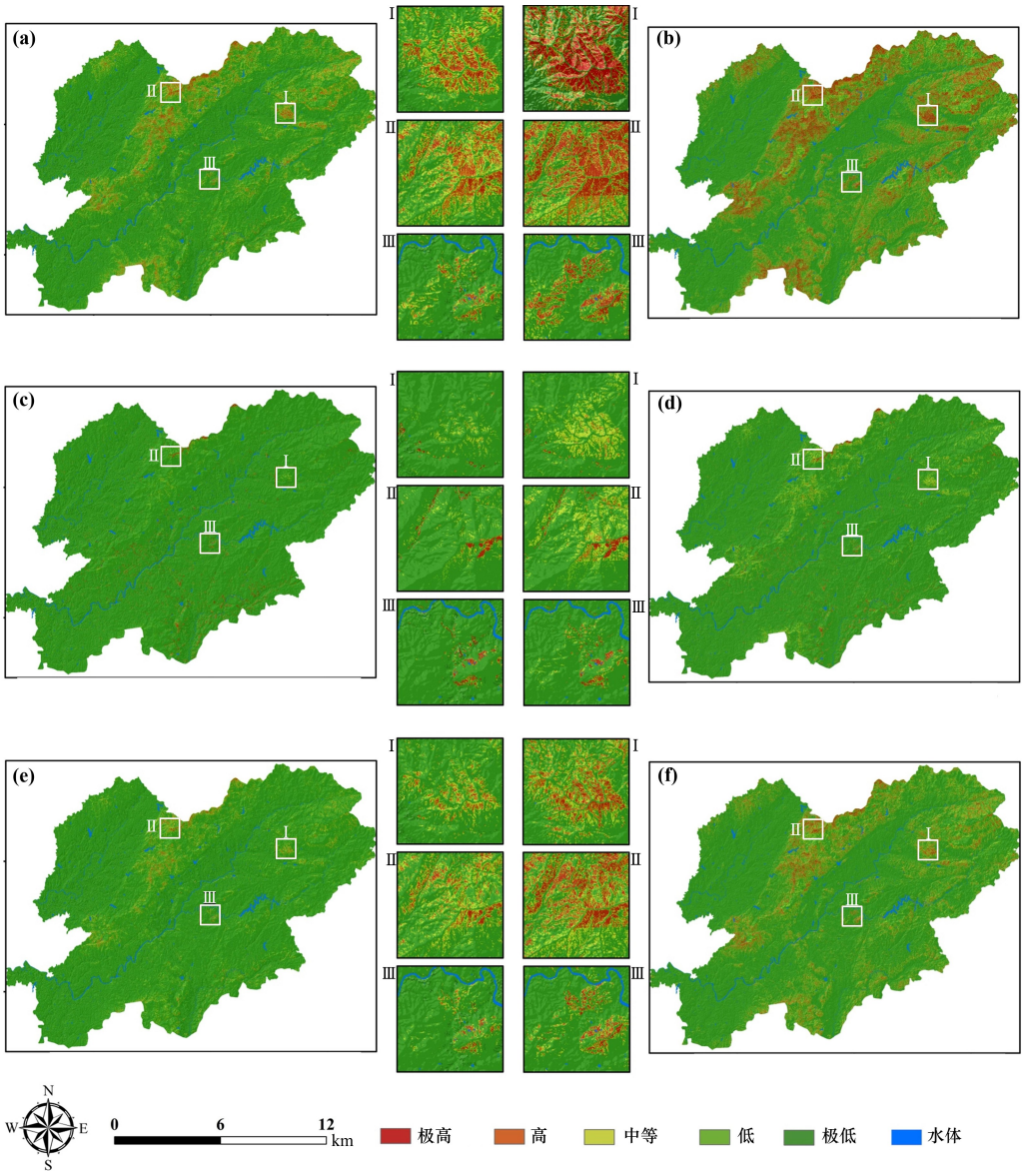
Table 4　Combinations of different root cohesion (C_r) and saturated hydraulic conductivity (K_s)

情景	C_r	K_s
1	0	修正 K_s
2	0	K_s
3	赋值	修正 K_s
4	赋值	K_s
5	反演	修正 K_s
6	反演	K_s

在根系力方面,测试了 3 种情况:一是不考虑根系力(情景 1、2),$C_r = 0$;二是基于土地利用类型赋值根系力(情景 3、4),参考文献[14],将农用地、草地、灌木、森林的根系力赋值分别设定为 0.15、5、15、20 kPa;三是运用本研究提出的根系力反演模型(情景 5、6),计算根系力。在饱和导水率方面,考虑了两种情况:一是饱和导水率 K_s 仅由土壤类型推导得出,忽略土地利用的影响(情景 2、4、6);二是考虑土地利用影响,修正饱和导水率 K_s(情景 1、3、5)。

基于表 4 中不同 C_r 和 K_s 组合生成的滑坡易发性如图 6 所示。总体来看,根系力和饱和导水率均对滑坡易发性产生显著影响。情景 1、2 普遍出现大面积滑坡高易发区域,明显高于情景 3、4 以及情景 5、6。这说明忽略根系力会系统性低估植被对边坡的加固作用,高估滑坡易发性。而土地利用赋值虽然能一定程度降低这一偏差,但由于其对同一土地利用内部的物种差异与根系空间异质性无法刻画,仍表现出局部过估。相比之下,反演根系力情景 5、6 呈现的滑坡高易发区范围极小、空间分布更合理,表明考虑植被结构、树高、土壤质地等因素后,模型能够更准确地反映不同区域的真实抗剪能力。

其次,设定的 2 种饱和导水率中,情景 2、4、6 普遍出现更连续、高值更集中的滑坡易发区域。说明忽略土地利用类型变化对土壤水力特性的影响,会导致土壤趋于更易饱和的假设,从而进一步增大滑坡易发性。情景 1、3、5 在各根系力设定下呈现更为离散、局部化的滑坡高易发区域,符合人类活动强度和土壤扰动的空间分布特点。



(a) 情景 1; (b) 情景 2; (c) 情景 3; (d) 情景 4; (e) 情景 5; (f) 情景 6

图 6 研究区不同场景滑坡易发性图

Fig. 6 Landslide susceptibility of study area under different scenarios

3.2 评价结果及分析

基于表 4 中不同 C_r 和 K_s 组合生成滑坡易发性的受试者工作特征(receiver operating characteristic, 简称 ROC)曲线。不同情境下浏阳市滑坡易发性 ROC 曲线见图 7。

在不考虑根系力($C_r=0$)的情况下,从情景 2 变为情景 1 时,曲线下面积(AUC)从 0.783 5 提升至 0.798 8。表明不考虑根系力,基于土地利用对 K_s 进行调整也能提高模型精度,但提升幅度较小,模型的预测能力有限。K_s 变化对滑坡易发性的影响不如 C_r 变化对滑坡易发性的影响大,这表明根系力,尤其是在植被茂密的区域,对滑坡易发性发挥着更为主导的作用。

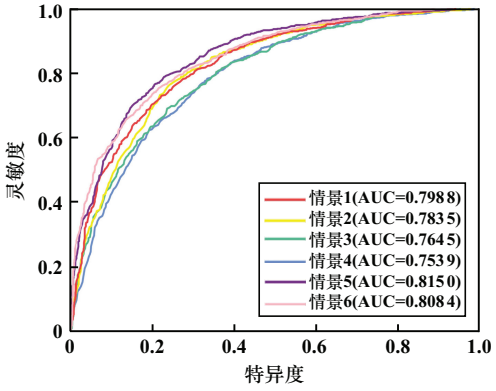


图 7 不同情境下浏阳市滑坡易发性 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curves of landslide susceptibility under different scenarios

情景 5、6 表现出更高的 AUC 值。具体而言,反演模型计算的 C_r 与标准 K_s 组合(情景 6)的 AUC 值为 0.808 4,优于 2 种不考虑根系力的情景,甚至超过了仅修正 K_s 模型的 AUC 值(0.798 8)。当反演模型计算的 C_r 与修正 K_s 相结合(情景 5)时,AUC 值进一步提升至 0.815 0,这凸显了同时考虑根系力的空间变化和土地利用类型对饱和导水率影响的重要性。相比之下,基于土地利用类型设置固定值的情景,AUC 值明显较低。固定 C_r 值分别与修正 K_s 和标准 K_s 组合的 AUC 值分别为 0.764 5和 0.753 9,表明该方法与反演模型相比表现较差。固定 C_r 值无法捕捉不同植被类型下根系力的空间异质性和动态变化,导致易发性地图的准确性欠佳。综上所述,本研究提出的区域根系力反演模型,结合基于土地利用类型对饱和导水率的修正,能够生成准确的滑坡易发性地图,有利于预判区域滑坡易发性。

4　结语

1) 从土地利用类型变化、植被根系加固作用与水文过程三方面,系统探讨了浏阳市 2000—2020 年滑坡易发性的主控因素,并构建了改进的无限边坡模型开展评价。结果表明,土地利用类型动态扰动显著改变了区域地质环境稳定性,其中森林向建设用地转化的区域滑坡发生率最高(FR = 1.426 9),说明人类活动增强是研究区滑坡多发的主要驱动因素之一。

2) 本文提出的根系力反演模型能够有效表征根系力在不同植被与土壤条件下的空间异质性。将反演根系力、土地利用修正饱和导水率与水文参数共同纳入改进的边坡稳定性模型后,滑坡易发性评价精度明显提升(AUC = 0.815 0),验证了植被加固作用与水文性质在滑坡形成机制中的关键影响。

3) 研究形成了“植被—水文—工程扰动”于一体的滑坡易发性评价框架,可为矿山边坡、采动区及尾矿库周边的地质灾害风险识别与治理提供理论支持和方法借鉴。

参考文献(References):

[1] NWAILA G T, GHORBANI Y, ZHANG S E, et al. Valorisation of mine waste - Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example[J]. Journal of Environmental Management, 2021,295:113013.

[2] SONTER L J, MORAN C J, BARRETT D J, et al. Processes of land use change in mining regions[J]. Journal of Cleaner Production, 2014,84:494-501.

[3] 龙长聪,李军伟,蒋鑫,等. 沅麻盆地降雨诱发滑坡阈值模型研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):22-28.
LONG Changcong, LI Junwei, JIANG Xin, et al. Threshold model for rainfall-induced landslides in Yuanma Basin[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):22-28.

[4] SONG Z Y, YANG X M, ZHANG H P, et al. How does coal mining affect land use in townships? A perspective of land use transition[J]. Journal of Cleaner Production, 2024,475:143662.

[5] MU C, YU X Y, ZHAO B C, et al. The formation mechanism of surface landslide disasters in the mining area under different slope angles[J]. Advances in Civil Engineering, 2021:6697790.

[6] MIAO Z L, XIONG Y P, CHENG Z W, et al. Quantifying root cohesion spatial heterogeneity using remote sensing for improved landslide susceptibility modeling: A case study of Caijiachuan landslides[J]. Sensors, 2025,25(13):4221.

[7] MIAO Z L, CHENG Z W, et al. Landslide susceptibility mapping under cropland expansion: Considering root cohesion variability and land use effects on saturated hydraulic conductivity[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2025,16:2569797.

[8] CRONKITE-RATCLIFF C, SCHMIDT K M, WIRION C. Comparing root cohesion estimates from three models at a shallow landslide in the Oregon coast range[J]. GeoHazards, 2022,3(3):428-451.

[9] 刘磊磊,肖浩,王璨,等. 湖南红层地区滑坡地质灾害致灾因子敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):169-174.
LIU Leilei, XIAO Hao, WANG Can, et al. Landslide analysis based on susceptibility to factors causing geological disasters in red beds area of Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):169-174.

[10] 饶国柱,饶运章,高中泉,等. 不同降雨强度下离子型稀土矿边坡渗流特性与临界滑移面变化分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):22-27.
RAO Guozhu, RAO Yunzhang, GAO Zhongquan, et al. Analysis on seepage characteristics and varied critical slip surface of ionic rare earth mine slope under different rainfall intensities[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):22-27.

[11] EVANS J R, IMAIZUMI F, OHSAKA O, et al. Relationship between tree height and landslide characteristics obtained by GIS assessment[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020,45(13):3280-3292.

[12] MOKANY K, RAISON R J, PROKUSHKIN A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes[J]. Global Change Biology, 2006,12(1):84-96.

[13] ARCHER N A L, BONELL M, COLES N, et al. Soil characteristics and landcover relationships on soil hydraulic conductivity at a hillslope scale: A view towards local flood management[J]. Journal of Hydrology, 2013,497:208-222.

[14] STRAUCH R, ISTANBULLUOGLU E, NUDURUPATI S S, et al. A hydroclimatological approach to predicting regional landslide probability using landlab[J]. Earth Surface Dynamics, 2018,6(1):49-75.

引用本文:苗则朗,成志炜,熊耀鹏,等. 考虑土地利用变化和根系力空间异质性的滑坡易发性评价[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):19-25.
MIAO Zelang, CHENG Zhiwei, XIONG Yaopeng, et al. Landslide susceptibility assessment considering land use change and spatial heterogeneity of root cohesion[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):19-25.