

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202008015

# 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\*

姚杰<sup>1,2</sup>, 李秀珍<sup>1</sup>, 徐瑞池<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 拟建川藏铁路是国家中长期规划网中的重要一线, 具有重大的国防和经济意义。铁路横穿青藏高原东缘地形急变带, 沿线发育崩塌、滑坡等众多山地灾害。以川藏铁路比选线邦达机场至然乌段作为主要研究区段, 在该段已有滑坡灾害进行野外调查和遥感解译的基础上, 将降雨入渗斜坡稳定性分析模型(TRIGRS)中的降雨入渗模块和三维斜坡稳定性分析模型(Scoops3D)有机结合起来, 对川藏铁路典型段的潜在滑坡进行系统的三维搜索及识别, 分析天然状态下潜在滑坡的分布范围和50年一遇极端降雨情景下研究区段斜坡稳定性的动态变化。研究结果表明:(1)在天然状态下, 高风险潜在滑坡主要集中在分布于拟建怒江大桥附近, 低风险潜在滑坡主要分布于冷曲河两岸陡峻斜坡和拟建怒江大桥附近;(2)在50年一遇极端降雨情景下, 潜在滑坡区的分布范围较天然状态下均显著增大, 高风险和低风险潜在滑坡在拟建怒江大桥附近和沿冷曲河两岸陡峻斜坡均有密集分布;(3)极端降雨情景下模型计算的潜在滑坡分布结果与历史滑坡灾害的分布特征基本是一致的。

**关键词:** 川藏铁路; TRIGRS模型; Scoops3D模型; 潜在滑坡; 稳定性; 动态识别

**中图分类号:** P642.22    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0422-10

## Dynamic Identification of Three-dimensional Stability of Potential Landslides in a Typical Section of the Proposed Sichuan-Tibet Railway under Rainfall Conditions

YAO Jie<sup>1,2</sup>, LI Xiuzhen<sup>1</sup>, XU Ruichi<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The proposed Sichuan-Tibet railway is an important line in the national medium and long-term planning network, which has great national defense and economic significance. The railway passes through the abrupt terrain belt on the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, and there are many mountain hazards such as rockfalls and landslides along the line. In this paper, the section from Bangda airport to Ranwu of Sichuan-Tibet railway comparison line is taken as the main study section. Based on the field investigations and remote sensing interpretations of the existing landslide hazards in this section, the rainfall infiltration module in the rainfall infiltration slope stability analysis model

\* 收稿日期:2020-08-15;修回日期:2020-11-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41772386)、中科院战略性先导科技专项(A类)(XDA20030301)、国家重点研发计划项目(YS2018YFGH000001)资助

作者简介:姚杰(1994—),男,硕士研究生。主要从事地质灾害评价及预测研究。E-mail:yaojie18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:李秀珍(1975—),女,研究员,博士。主要从事地质灾害评价及预测研究。E-mail:lxzljt@sina.com

(TRIGRS) and the three-dimensional slope stability analysis model (Scoops3D) are combined organically to perform a systematic three-dimensional search and identification of potential landslides in the typical section of Sichuan-Tibet railway. Moreover, the distribution range of potential landslides in the natural state and the dynamic change of slope stability in the study section under the 50-year extreme rainfall scenario are analyzed. The research results show that: (a) under natural conditions, potential high-risk landslides are mainly distributed near the proposed Nujiang River Bridge, and potential low-risk landslides are mainly distributed near the steep slopes on both sides of the Lengqu River and the proposed Nujiang River Bridge; (b) under the 50-year extreme rainfall scenario, the distribution range of potential landslide areas is significantly larger than that in the natural state, potential high-risk and low-risk landslides are densely distributed near the proposed Nujiang River Bridge and along the steep slopes of both banks of the Lengqu River; (c) the distribution of potential landslides calculated by the model under the extreme rainfall scenario is basically consistent with the distribution characteristics of historical landslide disasters.

**Keywords:** Sichuan-Tibet railway; TRIGRS model; Scoops3D model; potential landslide; stability; dynamic identification

## 引言

拟建川藏铁路全长约 1 832 km,其规划建设对国家长治久安和西藏经济社会发展具有重大而深远的战略意义<sup>[1]</sup>。铁路沿线地形起伏大,构造运动强烈,地层岩性及气候复杂多变,滑坡等山地灾害具有规模大、破坏力强、发生频繁且难以治理等特点<sup>[2]</sup>。目前,全球变暖已成为不争的事实,气候变化造成极端天气事件(如极端强降雨)逐渐增多,进一步加剧了滑坡灾害的发生概率和危害程度,如 2000 年西藏易贡冰雪融水诱发了巨型高速远程滑坡,导致 4 000 多人受灾,经济损失约 1.4 亿元人民币。据统计,我国在 1949~1995 年期间发生的滑坡灾害,有 68.5% 是由降雨诱发引起的<sup>[3]</sup>。

21 世纪初以来,随着 GIS 技术的迅速发展,滑坡稳定性评价及预测逐渐成为滑坡领域研究的热点,目前已提出了很多评价方法。以降雨滑坡评价方法为例,可大致分为 4 类:经验判识法、统计分析法、人工智能方法和物理模型法,其中物理模型法是目前降雨滑坡评价的主要研究方向。该方法以极限平衡法为基础,考虑降雨入渗及地下水变化等对边坡稳定性的影响,将降雨入渗理论与边坡稳定性计算有机结合,对特定降雨条件下坡体的稳定性进行评估。孙金山等<sup>[4]</sup>建立了基于降雨入渗动态守恒的瞬态降雨入渗模型;何玉琼等<sup>[5]</sup>在数字高程模型的基础上,耦合了无限边坡模型与稳定状态的水文模型;辛鹏等<sup>[6]</sup>利用无限边坡模型原理在 GIS 环境下进行了滑坡危险性的预测研究。这些模型多

以一维和二维模型为主,最具代表性的有 TRIGRS 模型<sup>[7]</sup>、SINMAP 模型<sup>[8]</sup>、SHALSTAB 模型<sup>[9]</sup>等。由于一维和二维模型过度简化了滑坡诱发机理,而影响边坡失稳的地形、地质、水文等因素在空间上的分布均是三维的,因此较难真实地反映滑坡实际发生时的力学机制。由此,一些三维滑坡稳定性分析模型相继被提出,如 Scoops3D、3DSLOPE、SVSlope 等。特别是美国地质调查局开发的 Scoops3D 模型,能够与一些降雨入渗及水文模型有机耦合来考虑复杂的地下水情况,结合 DEM 提供的地形数据对斜坡做出精确的三维稳定性评价,已经成功应用于华盛顿州潜在滑坡灾害的识别研究<sup>[10-13]</sup>。例如 D.L.Brien 和 M.E.Reid<sup>[14-15]</sup>将 MODFLOW 计算的三维地下水结果应用到 Scoops3D 模型中,完成了对于西雅图 Puget 海峡沿岸斜坡稳定性的评价;T.V. Tran 等<sup>[16]</sup>利用 TRIGRS 模型对斜坡的孔隙水压力进行三维动态模拟,并与 Scoops3D 模型耦合,分析了 2011 年 7 月韩国 Umyeon 山降雨滑坡的稳定性变化过程。

本文以拟建川藏铁路比选线邦达机场至然乌段作为主要研究区段,在对该区段自然地质环境条件及已有滑坡灾害进行野外调查和遥感解译的基础上,将 TRIGRS 模型与 Scoops3D 模型有机结合,对研究区段的潜在滑坡进行三维搜索及识别,分析天然状态下潜在滑坡的分布范围和 50 年一遇极端降雨情景下潜在滑坡的动态分布变化,相关成果可以为拟建川藏铁路线选定及施工运营提供科学依据。

# 1 研究区概况

本文以拟建川藏铁路沿线比选线八宿县邦达机场至然乌段两侧各 5 km 范围内的区域作为典型研究区段。

## 1.1 自然地质环境条件

八宿县位于西藏自治区昌都市西南部,其西南、西北地势较高,东北、东南部较低(图 1)。在长期的地质隆升过程中,县境形成了广大基岩山地挟持河谷的总体地貌态势,主要有冰川作用地貌、河谷地貌和侵蚀剥蚀地貌三种类型。研究区地处印度板块和欧亚板块的汇聚带附近,新生代以来印度板块向北东强烈推挤,青藏高原地壳物质向南东方向强力楔入,导致该地区整体产生强烈的垂直差异运动,块体边界断裂发生水平剪切错动,形成了复杂的构造框架。境内及其周边发育的活动断裂带主要有班公错-怒江断裂带、狮泉河-申扎断裂和嘉黎-然乌断裂。该区地震活动频度和强度较低,主要为 6 级以下地震,峰值加速度一般为 0.1~0.15g(图 1)。

研究区地层发育较为齐全,可见第四系(Q)、上第三系(N)、白垩系(K)、侏罗系(J)、三叠系(T)、石炭-二叠系(CP)、石炭系(C)、泥盆系(D)、前震旦系(AnZ)等地层(图 2)。出露地层岩性复杂,上覆地层为第四系全新统坡残积碎石土、块石土,第四系全新统坡洪积的角砾土、圆砾土、卵石土、碎石土,下部基岩主要为变质板岩、千枚岩和砂板岩等。

八宿县属于高原温带半干旱季风气候区,在青藏高原的三大气候和地形等综合因素的影响下,冬春季气候较为干燥寒冷,夏秋季受西南季风的影响温暖多雨。根据八宿县气象站资料显示,该区日照充足,多年平均气温为 10.4℃,干、雨两季分明,多年平均降水量为 257.77 mm,年最大降水量为 375.0 mm,年最小降水量为 105.8 mm。县境地表径流属于怒江水系、雅鲁藏布江水系和玉曲流域(图 1),水源主要来自于大气降水和冰雪融水,地下水主要以松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水的形式存在。

## 1.2 历史滑坡概况

由于研究区所处的特殊地形和气候条件,境内滑坡等地质灾害极为发育。据野外实地调查和遥感影像数据解译,本文对研究区段 52 处已发生的滑坡灾害进行分析,结果如图 3 所示,并按照滑坡方量对其进行分类,分类标准及分类结果见表 1。



图 1 研究区地貌及断裂带分布

Fig.1 Distribution map of geomorphology and fault zones in the study area



图 2 研究区地层分布

Fig.2 Stratigraphic distribution map of the study area

表 1 研究区已有滑坡规模分类

Table 1 Scale classification lists of existing landslides in the study area

	划分体积/(万 m <sup>3</sup> )	数量	数量百分比/%
小型	<10	13	25.000
中型	10~100	15	28.850
大型	100~1 000	12	23.075
特大型	>1 000	12	23.075
合计		52	100.00

由表 1 可见,研究区小型、中型、大型及特大型滑坡均具有一定的分布,且数量都较为接近。根据

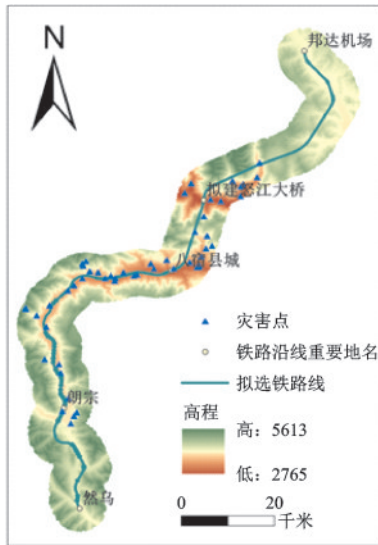


图3 研究区历史滑坡分布

Fig.3 Distribution map of historical landslides in the study area

图4可知,朗宗到然乌段沿线地势较为平坦,该段滑坡相比其他各段较少,仅占滑坡总数的7.69%;而拟建怒江大桥到朗宗铁路沿线地形起伏较大,断裂构造发育,故该段滑坡灾害分布密集,占滑坡总数的73.08%,为灾害易发区,而且大型、特大型滑坡灾害在该段密集分布,如图5、6所示。

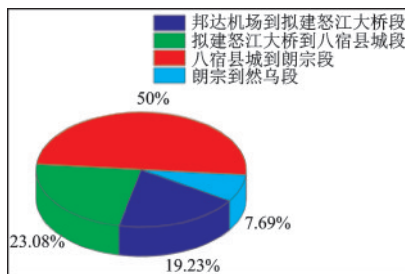


图4 研究区拟建铁路沿线历史滑坡分布饼图

Fig.4 Pie chart of historical landslides along the proposed railway in the study area

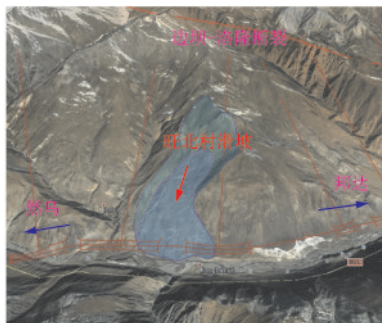


图5 八宿县旺北村特大型滑坡

Fig.5 Extra large landslide in Wangbei Village, Basu County, Tibet

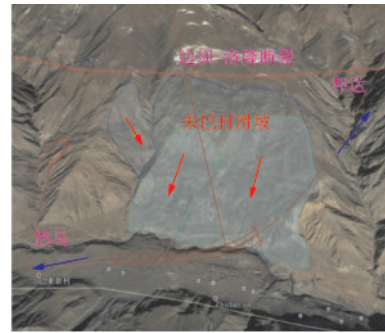


图6 八宿县朱巴村特大型滑坡

Fig.6 Extra large landslide in Juba Village, Basu County, Tibet

## 2 研究方法

本研究拟首先利用 Scoops3D 模型进行天然状态下潜在滑坡的三维搜索和识别,然后再将 TRIGRS 模型中的降雨入渗模块与 Scoops3D 模型有机结合,分析极端降雨情景下潜在滑坡的动态分布变化,探究研究区潜在滑坡与降雨之间的动态响应关系,对于研究区的防灾减灾工作有着重大意义。

### 2.1 TRIGRS 模型

TRIGRS 模型是由美国地质调查局开发的降雨诱发斜坡稳定性分析模型(图7),结合 DEM 栅格单元以无限边坡模型为基础,根据 R.M.Iverson<sup>[17]</sup>提出的 Richards 方程的解析解,进行降雨暂态入渗的动态分析,计算研究区的安全系数以及不同深度处的孔隙水压力。

该模型以 DEM 栅格单元为计算单位,其中岩土体参数、降雨参数、渗透系数以及水力扩散系数等参数均可随空间或时间设定为相应的值,通过求解渗流方程可以获得降雨期间研究区的动态孔隙水压力,结合极限平衡理论可以得到各栅格单元在降雨入渗期间随时间变化的安全系数。

TRIGRS 模型包括降雨入渗模块、稳定性计算模块和水文模块三部分。降雨入渗模块源于 Richards 方程的线性解,包括稳态入渗和瞬态入渗两部分。瞬态入渗假定水流一维垂直向下流动,而且入渗强度会随着降雨强度的增加而增加,可实现土层无限深度及任意时间段的垂直渗流计算。模块中压力水头有两种计算方式,分为下边界有限深和下边界无限深,有限深条件下的压力水头可由式(1)<sup>[7]</sup>进行计算。

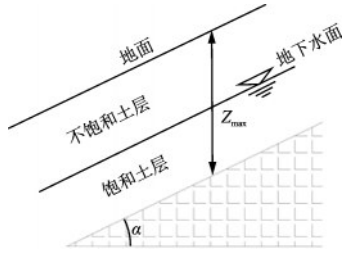


图7 TRIGRS无限边坡模型示意

Fig.7 Schematic diagram of a infinite slope model in the TRIGRS model

$$\begin{aligned} \psi(Z,t) = & (Z-d)\beta + \\ & 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t-t_n) [D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}*} \\ & \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \text{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] + \\ & \text{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \right\} - \\ & 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t-t_{n+1}) [D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}*} \\ & \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \text{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] + \\ & \text{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\psi$  为地下水压力水头;  $K_s$  为垂向饱和渗透系数;  $t$  为时间;  $Z$  为土层垂向厚度;  $d$  为地下水位初始深度;  $I_{nz}$  为第  $n$  个时间段内给定的表面通量强度;  $d_{LZ}$  为基底深度;  $N$  为时间序列;  $H(t-t_n)$  为 Heavyside 阶梯函数;  $t_n$  为第  $n$  个降雨强度对应的时间;  $\text{ierfc}(\eta)$  为高斯补差函数的一次积分值(见式(2)<sup>[7]</sup>), 其中  $\beta$  和  $D_1$  见式(3)<sup>[7]</sup>和式(4)<sup>[7]</sup>。

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

$$\beta = \cos^2 \delta - \frac{I_{ZLT}}{K_s} \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{D_0}{\cos^2 \delta} \quad (4)$$

式中,  $\text{erfc}(\eta)$  为互补误差函数;  $\delta$  为坡度;  $I_{ZLT}$  为初始表面通量;  $D_0$  为饱和水力扩散系数。

稳定性计算模块主要基于无限边坡利用极限平衡法计算安全系数。水文模块采用了简单的水量平衡来模拟地表径流, 无法在当前时间域内入渗的降雨, 都将假设为地表径流直接流往运算域内下游栅格, 确保降雨产生的地表径流不会在网格中无故消失, 以保证每一个运算时间域内质量守恒。

## 2.2 Scoops3D 模型

Scoops3D 是由美国地质调查局的 M.E.Reid 等<sup>[18]</sup>于 2015 年开发, 基于 DEM 数字高程模型编写的三维斜坡稳定性计算模型, 可在复杂地形和地下水以及地震等条件下计算三维潜在滑坡的稳定性。Scoops3D 采用极限平衡法将斜坡三维条块化, 对潜在滑坡范围内的每个 DEM 栅格进行标记, 利用瑞典条分法或简化 Bishop 法分析其稳定性, 计算效率高, 覆盖范围广。

模型在计算过程中, 将研究区斜坡体网格化成若干三维柱体, 并在 DEM 上方生成一定范围的搜索球心, 按照一定的搜索半径生成球体, 与地表相交得到的球面即为潜在滑面, 如图 8 所示。当滑体体积达到设定的阈值时, 利用极限平衡法对相交的所有滑体进行稳定性计算得到最小的安全系数, 此时的滑体即被视为最危险滑体。

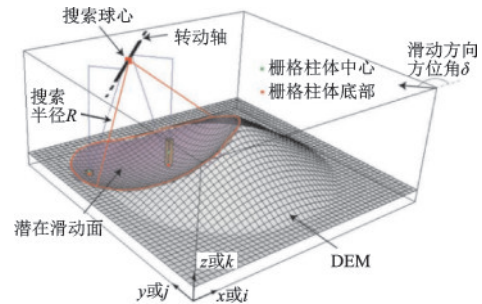


图8 Scoops3D 潜在滑面示意<sup>[19]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of the potential sliding surface in the Scoops3D model<sup>[19]</sup>

本文使用极限平衡法中的简化 Bishop 法计算安全系数:

$$F_s = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{i,j} + (W_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \varphi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{i,j} e_{i,j}) F_s} \quad (5)$$

$$(\cos \beta_{i,j} F_s + \sin \alpha_{i,j} \tan \varphi_{i,j})$$

式中,  $i, j$  为三维柱体的行编号和列编号;  $R_{i,j}$  为球心到三维柱体滑面的距离;  $e_{i,j}$  为球心到三维柱体质心的距离;  $A_{i,j}$  为三维柱体潜在滑面的面积;  $c_{i,j}$  为滑面的黏聚力;  $\varphi_{i,j}$  为滑面的内摩擦角;  $\alpha_{i,j}$  为潜在滑面的

视倾角;  $W_{i,j}$  为三维柱体的重力;  $u_{i,j}$  为孔隙水压力;  $k_{i,j}$  为水平振动荷载;  $\beta_{i,j}$  为潜在滑面真倾角。

### 2.3 TRIGRS 和 Scoops3D 模型的耦合

TRIGRS 考虑了瞬态降雨对于地下水的影响, 相比较其他降雨入渗模型能更好地反映孔隙水压力的动态变化, 结果也更为精确<sup>[20]</sup>。Scoops3D 充分考虑了地形的空间影响和复杂的地下水文情况, 能够根据用户感兴趣的滑坡体积范围搜索沿任意方向滑动的滑体, 可以对区域滑坡进行系统全面的三维搜索。

本文将 TRIGRS 与 Scoops3D 模型有机耦合, 耦合原理如图 9 所示。TRIGRS 模拟研究区降雨入渗过程, 输出不同降雨时刻的二维孔隙水压力动态数据, Scoops3D 针对数据沿土壤深度方向进行线性插值, 建立降雨入渗后的三维孔隙水压力应力场, 对瞬态降雨引起的地下水变化情况进行较为真实的模拟, 并耦合 Scoops3D 模型对研究区潜在滑坡进行三维搜索及识别, 获得研究区降雨情景下潜在滑坡的分布范围。

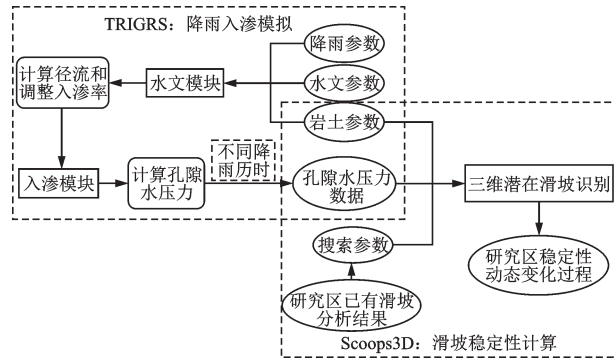


图9 TRIGRS 与 Scoops3D 模型耦合原理

Fig.9 Schematic diagram of the coupling principle of TRIGRS model and Scoops3D model

## 3 应用

### 3.1 模型参数选取

TRIGRS 和 Scoops3D 模型有各自要求输入的参数, 且耦合情况下有些参数需要统一, 具体可分为研究区岩土体参数、降雨参数、水文参数以及 Scoops3D 搜索参数。

#### 3.1.1 岩土体参数

根据室内外试验、工程地质类比以及相关文献

研究<sup>[21-23]</sup>, 综合确定研究区的岩土体参数见表 2。

表 2 研究区岩土体参数取值

Table 2 Values of geotechnical parameters in the study area

参数	土体黏聚力/kPa	土体内摩擦角/(°)	土体重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	水重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
取值	25	30	22	9.8

土体厚度的空间分布是由地形、成土母质、气候、生物、植被等因素相互作用而形成的<sup>[24]</sup>, 其影响因素繁多且作用过程复杂, 本文参考 G.Delmonaco 等<sup>[25]</sup>按照坡度范围确定土厚的方法, 对土厚值进行设定, 结果见表 3<sup>[26]</sup>。

表 3 坡度与土厚关系表

Table 3 Relationship between slope and soil thickness

坡度/(°)	土壤平均厚度/m
<30	5.0
30~40	4.0
40~60	3.0
>60	2.0

#### 3.1.2 降雨参数

基于邵尧明<sup>[27]</sup>对于城市暴雨强度的研究以及黎炳焱<sup>[28]</sup>将其暴雨强度公式应用于山区的尝试探索, 本文借助研究区的暴雨强度公式<sup>[27]</sup>, 得到其极端降雨情景下的降雨强度, 为

$$i = \frac{32.8108 + 43.2262 \lg P}{(t + 21.5013)^{1.2788}} \quad (6)$$

式中,  $i$  为暴雨强度;  $P$  为重现期;  $t$  为降雨历时。取重现期为 50 年, 降雨历时为 12 小时, 得降雨强度为  $3.783 \times 10^{-7}$  m/s。

短时强降雨过程中, 土体强度会随着雨水入渗而急剧下降, 地下水也会随之发生变化, 浅层土体会迅速达到饱和状态, 故本文利用 TRIGRS 模型模拟强降雨入渗过程时采用饱和入渗方式。

#### 3.1.3 水文参数

根据对研究区已发生滑坡的野外调查与试验结果可知, 研究区斜坡土体类型主要为碎石土。许建聪<sup>[29]</sup>总结碎石土饱和和渗透系数与颗粒级配之间的相关性, 得出如下关系式:

$$K_s = -18.4 + 0.1836d_1 + 0.2189d_2 + 0.1401d_3 + 0.1834d_4 \quad (7)$$

式中,  $K_s$  为碎石土的饱和渗透系数 ( $10^{-4}$  m/s);  $d_1$  为

大于 20 mm 粒径的粒组含量(%)； $d_2$  为 2~20 mm 粒径的粒组含量(%)； $d_3$  为 0.1~2 mm 粒径的粒组含量(%)； $d_4$  为小于 0.1 mm 粒径的粒组含量(%)。根据室内碎石土颗粒级配试验情况，分别取  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$  为 12.357、48.885、25.824 和 12.934，算得  $K_s$  为  $5.5971 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。根据渗透系数  $K_s$  与水力扩散系数  $D_0$ 、入渗速率  $I_z$  之间的经验关系<sup>[30]</sup> 可得表 4 的结果。

### 3.1.4 Scoops3D 搜索参数

研究区采用 90 m×90 m 分辨率的 DEM，共 179 191 个栅格。Scoops3D 对于三维潜在滑坡的搜索，需要在 DEM 上方确定搜索球心位置以及搜索

表 4 研究区水文参数取值

Table 4 List of hydrological parameters in the study area

饱和渗透系数 $K_s$ / ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	水力扩散系数 / ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) $D_0=200K_s$	入渗速率 / ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) $I_z=0.01K_s$
$5.5971 \times 10^{-7}$	$1.1194 \times 10^{-4}$	$5.5971 \times 10^{-9}$

体积阈值等搜索参数。研究区已发生滑坡最小方量为 1.365 万  $\text{m}^3$ ，最大方量为 10 640 万  $\text{m}^3$ ，则搜索体积阈值范围为  $10^4 \sim 2 \times 10^9 \text{m}^3$ 。研究区最高海拔为 5 613 m，最低海拔为 2 765 m，则球心位置高程范围为 3 000~8 000 m，其他相关参数见表 5。

表 5 Scoops3D 搜索参数

Table 5 List of searching parameters of Scoops3D model

搜索起始点 坐标	栅格横向点数	栅格纵向点数	球心最低高程 / m	球心最高高程 / m	相邻球心间隔 栅格数目 / 个	搜索半径增量 / m
(1,1)	721	1 196	3 000	8 000	5	50

## 3.2 潜在滑坡三维搜索及识别

鉴于研究区滑坡灾害较为发育的特点，对研究区的潜在滑坡进行细致划分(表 6<sup>[31]</sup>)，天然状态和 50 年一遇极端降雨情景下的稳定性结果如图 10、表 7、表 8 所示。

表 6 潜在滑坡划分标准

Table 6 Classification standard of potential landslides

分区类别	稳定性系数
高风险潜在滑坡区	$F_s < 0.75$
低风险潜在滑坡区	$0.75 \leq F_s < 1$
非潜在滑坡区	$1 \leq F_s$

从图 10(a)中可以看出，天然状态下高风险潜在滑坡区、低风险潜在滑坡区和非潜在滑坡区分布范围分别占研究区段总面积的 2.89%、22.66% 和

74.45%。高风险潜在滑坡区主要集中分布于拟建怒江大桥附近，八宿县城至然乌段零星分布；低风险潜在滑坡区主要在拟建怒江大桥附近以及沿冷曲河两岸陡峻斜坡分布。

从图 10(b)~(d)中可以看出，在 50 年一遇极端降雨情景下，高风险和低风险潜在滑坡区的分布范围相较天然状态下均明显增大。当降雨 1 小时后，潜在滑坡区的总分布面积(高风险潜在滑坡区和低风险潜在滑坡区面积之和)占研究区段总面积的 43%，约为天然状态下潜在滑坡区总面积(25.55%)的 1.7 倍。而且随降雨时间的延续，潜在滑坡区的分布范围也逐渐增大。在此降雨情景下，高风险和低风险潜在滑坡区在拟建怒江大桥附近以及沿冷曲河两岸陡峻斜坡都有密集分布。

由表 8 可以看出，拟建川藏铁路沿线邦达至然乌段在 50 年一遇极端降雨情景下降雨 12 小时后，

表 7 研究区 Scoops3D 稳定性计算结果统计

Table 7 Statistical table of stability calculation results of Scoops3D model in the study area

工况	高风险潜在滑坡区	低风险潜在滑坡区	非潜在滑坡区
	面积百分比 / %	面积百分比 / %	面积百分比 / %
天然状态	2.89	22.66	74.45
50 年一遇极端降雨情景	降雨 1 小时	13.61	57.00
	降雨 6 小时	13.93	56.82
	降雨 12 小时	14.65	56.48

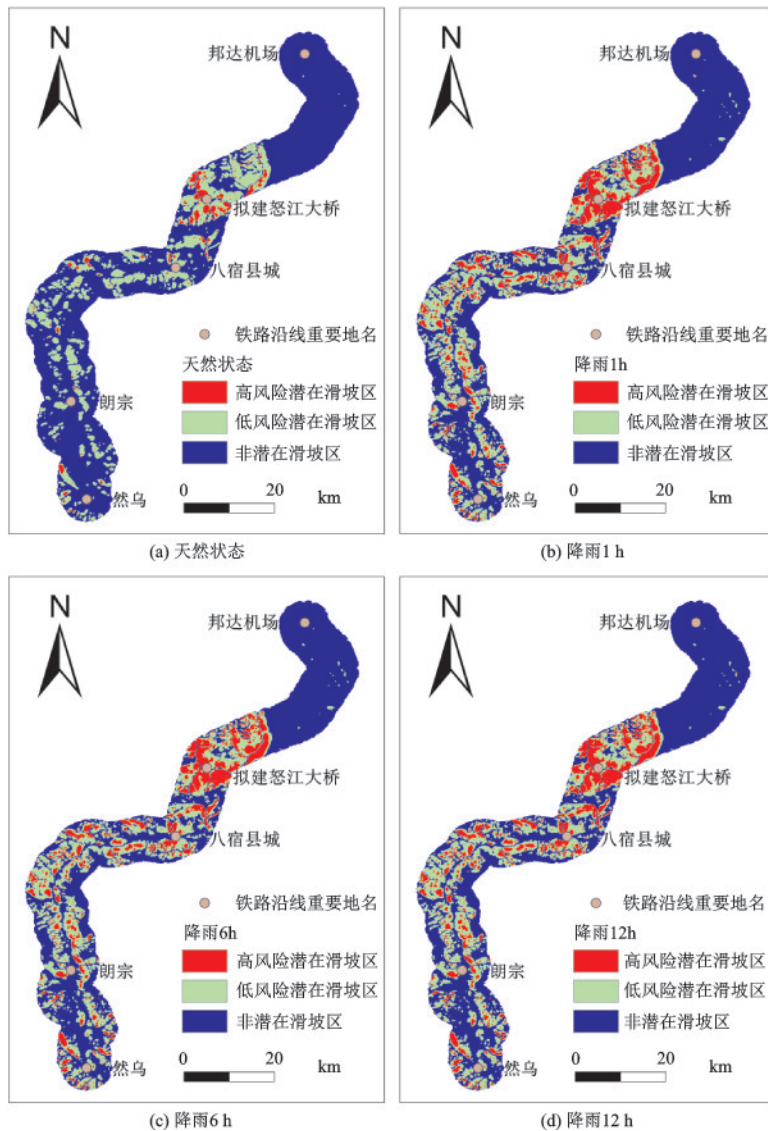


图 10 研究区 Scoops3D 稳定性模拟结果

Fig.10 Stability simulation results of Scoops3D model in the study area

潜在滑坡区的面积约占研究区总面积的 43.52%，在该区段内分布历史滑坡 34 处，滑坡密度为 0.023 7 处/km<sup>2</sup>；非潜在滑坡区（即稳定区）的面积约占研究区总面积的 56.48%，该区段内分布历史滑坡 18 处，滑坡密度为 0.012 5 处/km<sup>2</sup>。由此可见，

65.38% 的历史滑坡与模型预测潜在滑坡分布位置一致，潜在滑坡区滑坡灾害的分布数量、密度均明显高于非潜在滑坡区滑坡灾害的分布数量和分布密度，模型计算结果与历史滑坡灾害分布特征基本是一致的。

表 8 50 年一遇极端降雨情景下降雨 12 小时后模型计算结果与历史滑坡分布特征对比分析

Table 8 Comparison of model calculation results and historical landslide characteristics after 12 hours of rainfall under 50-year rainfall scenario

分区类别	模型计算各分区面积占研究区总面积的百分比/%	历史滑坡数量/处	历史滑坡分布密度/(处/km <sup>2</sup> )
潜在滑坡区	43.52	34	0.023 7
非潜在滑坡区	56.48	18	0.012 5

## 4 结 论

(1)在天然状态下,拟建川藏铁路沿线邦达至然乌段高风险潜在滑坡区、低风险潜在滑坡区和非潜在滑坡区分布范围分别占该研究区段总面积的2.89%、22.66%和74.45%。高风险潜在滑坡区主要集中分布于拟建怒江大桥附近,从八宿县城至然乌段零星分布;低风险潜在滑坡区主要在拟建怒江大桥附近以及沿冷曲河两岸陡峻斜坡分布。

(2)在50年一遇极端降雨情景下,当降雨1小时后,潜在滑坡区的总分布面积约占研究区段总面积的43%,约为天然状态下潜在滑坡区总面积(25.55%)的1.7倍。且随降雨时间的延续,潜在滑坡区的分布范围也在逐渐增大。在此降雨情景下,高风险和低风险潜在滑坡区在拟建怒江大桥附近以及沿冷曲河两岸陡峻斜坡都有密集分布。

(3)50年一遇极端降雨情景下,模型计算的潜在滑坡区分布结果与历史滑坡灾害分布特征基本是一致的。潜在滑坡区滑坡灾害的分布数量、密度均明显高于非潜在滑坡区滑坡灾害的分布数量和分布密度。

下一步研究中,将划分不同工程地质区段,并结合历史滑坡灾害特征,对研究区的岩土体参数等进行参数反演、分区取值等方面的研究,以进一步提高模型的可靠性和适用性。

### 参考文献:

- [1] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017,37(8):1049-1054.  
Zheng Z X, Sun Q Q. Sichuan Tibet railway tunnel project [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (8) : 1049-1054.(in Chinese)
- [2] 宋章,张广泽,蒋良文,等.川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J].铁道标准设计,2016,60(1):14-19.  
Song Zh, Zhang G Z, Jiang L W, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan-Tibet railway [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(1):14-19. (in Chinese)
- [3] 丁继新,杨志法,尚彦军,等.降雨型滑坡时空预报新方法[J].中国科学(D辑):地球科学,2006,36(6):579-586.  
Ding J X, Yang Zh F, Shang Y J, et al. A new method of time and space prediction for rainfall type landslides [J]. Science in China (Ser.D): Earth Sciences, 2006, 36(6): 579-586.(in Chinese)
- [4] 孙金山,陈明,左昌群,等.降雨型浅层滑坡危险性预测模型[J].地质科技情报,2012,31(2):117-121.  
Sun J Sh, Chen M, Zuo Ch Q, et al. A model for predicting rainfall-induced shallow landslides[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(2): 117-121.(in Chinese)
- [5] 何玉琼,徐则民,王志奇,等.基于GIS的耦合模型在斜坡稳定分析中的应用[J].武汉理工大学学报,2011,33(2):100-104.  
He Y Q, Xu Z M, Wang Zh Q, et al. The coupling model based on GIS in the slope stability analysis of application[J].Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2):100-104.(in Chinese)
- [6] 辛鹏,吴树仁,石菊松,等.基于降雨响应的黄土丘陵区滑坡危险性预测研究——以宝鸡市麟游县为例[J].地球学报,2012,33(3):349-359.  
Xin P, Wu Sh R, Shi J S, et al. A predictive study of the hazardousness of landslides in loess hilly region based on rainfall response: a case study of Linyou County, Baoji City [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33 (3): 349-359. (in Chinese)
- [7] Baum R L, Savage W Z, Godt J W. TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0[R]. Colorado: USGS, 2008.
- [8] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping [J]. Congress of the International Association of Engineering Geology, 1998: 21-25.
- [9] Montgomery D R, Dietrich W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding [J]. Water Resources Research, 1994, 30(4) : 1153-1171.
- [10] Reid M E, Sisson T W, Brien D L. Volcano collapse promoted by hydrothermal alternation and edifices shape, Mount Rainier, Washington [J]. Geology, 2001, 29(9): 779-782.
- [11] Vallance J W, Schilling S P, Devoli G, et al. Lahar hazards at Casita and San Cristóbal Volcanoes, Nicaragua [R].U.S.: U.S.Geological Survey,2004.
- [12] Reid M E, Christian S B, Brien D L. Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices [J]. Journal of Geophysical Research,2000,105(B3):6043-6056.
- [13] Reid M E, Keith T E C, Kayen R E, et al. Volcano collapse promoted by progressive strength reduction: new data from Mount St.Helens [J]. Bulletin of Volca-

- nology, 2010, 72:761-766.
- [14] Brien D L, Reid M E. Modeling 3-D slope stability of coastal bluffs using 3-D ground-water flow, southwestern Seattle, Washington [R]. U. S.: U. S. Geological Survey, 2007.
- [15] Brien D L, Reid M E. Assessing deep-seated landslide susceptibility using 3-D groundwater and slope-stability analyses, southwestern Seattle, Washington [J]. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 2008, 20(5): 83-101.
- [16] Tran T V, Alvioli M, Lee G, et al. Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study [J]. Landslides, 2018, 15(6):1071-1084.
- [17] Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration [J]. Water Resources Research, 2000, 36(7):1897-1910.
- [18] Reid M E, Christian S B, Brien D L, et al. Scoops3D-Software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape [M]. Virginia: USGS, 2015: 1-218.
- [19] 辛星. 黄土沟壑区浅层滑坡的制图和危险性评价研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
Xin X. The study on the mapping and hazard assessment of shallow landslides in gully loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese)
- [20] Godt J W, Baum R L, Savage W Z, et al. Transient-deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework [J]. Engineering Geology, 2008, 102 (3/4) : 214-226.
- [21] 蒋世银. 川藏铁路邦达段粗颗粒冻土边坡稳定性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
Jiang Sh Y. Study on stability of coarse grain frozen soil slope in Bangda section of Sichuan-Tibet railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [22] 张迪. 川藏铁路邦达段季节性粗颗粒冻土工程特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
Zhang D. Study on engineering characteristics of seasonal coarse-grained frozen soil in Bangda section of Sichuan-Tibet railway [D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [23] 樊柱军, 刘晓娟, 程东幸. 西藏藏中与昌都联网工程八宿县 10L336-10L338 段滑坡及塔基稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2):55-60.  
Fan Zh J, Liu X J, Cheng D X. Stability analysis of the landslide and the tower foundations at the section 10L336-10L338 of the network project between Tibet's Central Region and Changdu Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 55-60. (in Chinese)
- [24] Tesfa T K, Tarboton D G, Chandler D G, et al. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes [J]. Water Resources Research, 2009, 45(10) : 1-16.
- [25] Delmonaco G, Leoni G, Margottini C, et al. Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3(5):443-455.
- [26] 聂银瓶. 基于 TRIGRS 与 Flow-R 耦合模型的滑坡型泥石流流动态危险性评价 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.  
Nie Y P. Dynamic hazard assessment of landslide-debris flow based on TRIGRS and Flow-R coupled model [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [27] 邵尧明. 中国城市新一代暴雨强度公式 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014:1-94.  
Shao Y M. A new generation of urban rainstorm intensity formula in China [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014:1-94. (in Chinese)
- [28] 黎炳焱. 基于 RUSLE 的铁山水库饮用水水源地流域面源污染模拟及控制技术 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.  
Li B Y. Simulation and control technology of non-point source pollution in the drinking water of Tieshan reservoir based on RUSLE [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [29] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11):2264-2271.  
Xu J C, Shang Y Q. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (11) : 2264-2271. (in Chinese)
- [30] 齐信, 刘广宁, 黄波林, 等. 降雨入渗作用下秭归向斜核部南段斜坡稳定性评价 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):97-101.  
Qi X, Liu G N, Huang B L, et al. Slope stability evaluation of southern section of Zigui syncline core under rainfall infiltration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):97-101. (in Chinese)
- [31] Teixeira M, Bateira C, Marques F, et al. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal [J]. Landslides, 2014, 12(3):455-468.

(本文责编:赵霞)