

基于Geostudio的杜峪滑坡边坡稳定性分析

曹晋磊, 胡 榕, 闫广柱

陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司, 陕西 渭南

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年9月23日

摘 要

本文以杜峪滑坡形成的边坡为例, 采用Geostudio数值模拟法, 基于Morgenstern-Price法和Spencer法两种理论, 对边坡在自然工况、地震工况、降雨工况三种工况下的稳定性进行分析。研究表明: 在自然工况下, 边坡处于基本稳定状态; 在地震工况下, 边坡处于不稳定状态; 在降雨工况下, 边坡安全系数随降雨时间增加逐渐减小, 当降雨16小时后, 边坡安全系数趋于稳定, 当降雨24小时, 安全系数最小为0.702, 边坡处于不稳定状态。对曾经发生过灾害的边坡进行稳定性分析, 是灾后处理的必要环节, 更是防灾减灾体系的重要支撑, 给后续灾害处理方式提供理论参考。

关键词

边坡稳定性, Geostudio, Morgenstern-Price法, Spencer法

Analysis of Slope Stability Duyu Landslide Based on Geostudio

Jinlei Cao, Rong Hu, Guangzhu Yan

Shaanxi Yisanjiu Coalfield Geological Hydrogeology Co., Ltd., Weinan Shaanxi

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Sep. 23rd, 2025

Abstract

Taking the slope formed Duyu landslide as an example, this paper uses Geostudio numerical simulation method, based on Morgenstern-Price method and Spencer method, to analyze the stability of the slope under natural conditions, earthquake conditions and rainfall conditions. The results show that the slope is basically stable under natural conditions. Under seismic conditions, the slope is in

an unstable state; under rainfall conditions, the slope safety factor gradually decreases with the increase of rainfall time. When the rainfall is 16 hours, the slope safety factor tends to be stable. When the rainfall is 24 hours, the minimum safety factor is 0.702, and the slope is in an unstable state. The stability analysis of slopes that have been affected by disasters is a necessary link in post-disaster treatment, and it is also an important support for the disaster prevention and mitigation system, providing a theoretical reference for subsequent disaster treatment methods.

Keywords

Slope Stability, Geostudio, Morgenstern-Price, Spencer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国陕西省位于中国内陆中部，横跨黄河与长江两大流域，由北向南可划分为三大地貌单元：陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山地。渭南华阴市位于关中平原向陕南秦巴山地的过渡地带，区内地貌可分为：秦岭山地区、秦岭洪积扇区、黄土台塬区和河流阶地区。

华阴市内各种地质灾害如滑坡、崩塌、泥石流频发，严重危害当地居民的生命与财产安全。例如 1988 年 7 月 8 日，桃下镇竹峪匣上村发生严重滑坡，农民李新潮家房屋被塌毁，死亡 3 人；1998 年夏季，大夫峪上游华阳川一带暴雨诱发山洪和泥石流，冲毁房屋 160 余间，造成直接经济损失 2000 余万元；2019 年 2 月，华阴市罗敷镇华金公路 12 公里处发生山体崩塌，造成长约 25 m 公路路基受损，未造成人员伤亡。

地质灾害发生后，如果对灾害点置之不理，在外部因素影响下可能引发二次灾害；但如果过度治理，对二次灾害风险极低的灾害点实施加固工程，又会造成社会资源的浪费。因此，对曾发生灾害的边坡开展稳定性分析，不仅是灾后处置的必要环节，更是防灾减灾体系的重要支撑。其分析结果为后续灾害治理提供科学依据，确保有限资源精准投入风险最突出的区域，实现防灾效益最大化。

本文以杜峪滑坡形成的边坡为例，基于 Geostudio 数值模拟方法开展稳定性分析，以期类似滑坡灾害的稳定性评估与治理提供参考依据。

2. 边坡概况

杜峪滑坡地处陕西省渭南华阴市岳庙办东山村南秦岭山前大断裂断层三角面，微地貌属山地斜坡，区内地形南高北低，地面标高 465~630 m，相对高差 165 m。滑向 324°，属于覆盖层滑坡，上部覆盖层结构松散，下覆相对隔水的花岗片麻岩，雨水下渗导致上部土体力学性质降低，形成滑坡。居民在坡脚进行切坡耕地是主要的外在因素，形成高约 6~8 m 高的临空面。1987 年第一次滑动，坡体后缘出现高约 5 m 的错坎，裂缝宽 0.3~0.5 m，在强降雨和冻融作用下，滑坡易再次发生。

至今近四十年，杜峪滑坡形成的边坡虽未再次发生灾害，但滑坡后形成的边坡坡度上陡、中缓、下陡，整体坡度 40°~45°，高差 165 m，不能排除滑坡再次发生的可能。现今边坡表层被粉质黏土覆盖，下部与太古界片麻岩接触，岩层产状为 335°~350°∠30°~35°。坡脚为杜峪村及陇海铁路。坡体表面为灌木林覆盖，覆盖率 90% 以上。边坡全貌图如图 1 所示，边坡剖面图如图 2 所示。



Figure 1. Slope panorama (mirror image 107°)

图 1. 边坡全貌图(镜像 107°)

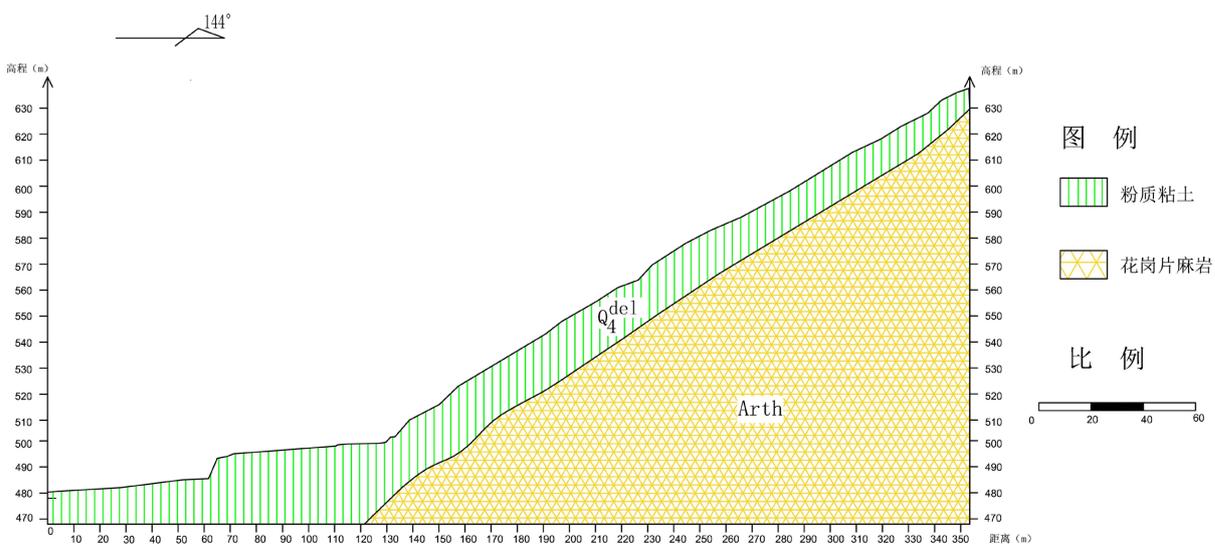


Figure 2. Slope profile

图 2. 边坡剖面图

边坡出露的地层主要有太古界太华群(Arth)花岗片麻岩和第四系(Q)粉质粘土。花岗片麻岩呈灰白色,片麻状构造,有鳞片粒状变晶,主要由长石、石英、云母等组成;粉质黏土呈褐黄色,土质较纯净,粘性较差,略具水层理,局部可见针状孔隙,其中顶部 0.3~0.5 m 段含较多植物根系。

3. 数据选取与处理

Geostudio 数值模拟法需要的数据主要包括：花岗片麻岩和粉质粘土的容重、粘聚力和内摩擦角。其中花岗片麻岩和粉质粘土的容重，粉质粘土的容重、粘聚力和内摩擦角由土工试验测得。花岗片麻岩的粘聚力和内摩擦角难以直接测得，本文选择室内试验测得花岗片麻岩石的抗压强度，再利用 Hoek-Brown 准则[1]使用 Rocscience RocData 软件折减得到花岗片麻岩体的粘聚力和内摩擦角。试验测得数据见表 1。

Table 1. Experimentally measured physical and mechanical parameters

表 1. 试验测得物理力学参数

	容重(KN/m ³)		粘聚力(KPa)		内摩擦角(°)		抗压强度(MPa)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
粉质粘土	16.8	18.5	40.2	31.5	22	21	/	/
花岗片麻岩石	27.6	29.3	/	/	/	/	185	134

在基于 Hoek-Brown 准则的岩体参数折减过程中，需要确定四个关键参数：岩石单轴抗压强度、完整岩石的 Hoek-Brown 常数 m_i 、地质强度指标 GSI 和岩体扰动因子 D。本研究依据《岩质边坡稳定性分析——原理·方法·程序》[2]与现场观测确定参数取值为： $m_i = 23$ ，GSI = 25，D = 0.5。采用 Rocscience RocData 软件进行计算，最终获得花岗片麻岩体的物理力学参数：天然状态下粘聚力为 998 kPa，内摩擦角为 42.2°；饱和状态下粘聚力为 923 kPa，内摩擦角为 39.4°。用于模拟计算的岩土体物理力学参数见表 2。

Table 2. Physical and mechanical parameters of rock mass

表 2. 岩土体物理力学参数

	容重(KN/m ³)		粘聚力(KPa)		内摩擦角(°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
粉质粘土	16.8	18.5	40.2	31.5	22.0	21.0
花岗片麻岩石	27.6	29.3	998	923	42.2	39.4

4. Geostudio 数值模拟

研究区边坡周边的人类活动主要表现为坡脚切坡取土及农业种植等扰动，未见爆破开采等剧烈工业活动影响。基于此，本研究重点考察以下三种工况下的边坡稳定性：① 自然工况；② 地震工况；③ 降雨工况。

Geostudio 作为国际通用的边坡稳定性分析专业软件，其数值模拟分析流程主要包括以下关键步骤：首先基于实测数据确定岩体物理力学参数；其次设定计算条件，包括边坡允许最小安全系数、地震水平影响系数及研究区降雨强度等关键参数；最终通过数值计算获取自然状态、地震作用、降雨条件以及地震-降雨耦合作用四种典型工况下的边坡安全系数，并通过与边坡允许最小安全系数对比分析，综合评价边坡稳定性状况。

4.1. 边坡允许最小安全系数

边坡允许最小安全系数参照《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T 0218-2006) [3]确定，分级见表 3。

Table 3. Classification standard of landslide stability state**表 3.** 滑坡稳定状态分级标准

滑坡稳定系数	<1.00	1.00 ≤ F < 1.05	1.05 ≤ F < 1.15	F ≥ 1.15
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

4.2. 地震水平影响系数

根据《中国地震动参数区划图(GB 18306-2015)》[4], 边坡所在区地震峰值加速度为 0.2 g。地震水平影响系数 K_c 可通过下式求得[5] [6]:

$$F_i = \frac{\alpha \zeta \beta_i W_i}{g}$$

$$K_c = \frac{F_i}{W_i}$$

式中[5]: F_i 为第 i 条块水平地震惯性力, KN; g 为重力加速度, m/s; α 为设计基本地震加速度, m/s; ζ 为折减系数, 取 0.25; β_i 为第 i 条块的动态分布系数, 取 1; W_i 为第 i 条块的重量; K_c 为地震水平影响系数。计算确定本次地震水平影响系数 K_c 为 0.05。

4.3. 研究区地下水位及降雨强度

按地下水赋存条件, 边坡所在区内地下水可分为两类: 基岩裂隙水和松散岩类孔隙水, 地下水位埋深在 50~70 m 左右, 越靠近坡脚, 地下水埋深越浅, 本次研究取坡顶地下水位为 70 m, 坡脚地下水位为 50 m。

自 1970 年至今, 边坡所在区内年平均降水量为 594.0 mm, 降水多集中在 6~9 月三个月, 且多为暴雨形式出现, 历年来年最大降雨量为 926.7 mm, 日最大降雨量为 158.2 mm, 本次研究取连续降雨一日, 日降雨量为 158.2 mm。

4.4. 稳定性计算结果

边坡稳定性分析中的条分法包含多种技术方法, 其基本原理相似, 主要区别在于所考虑的平衡方程类型以及对条间力作用关系的假设条件不同。本研究采用的 Morgenstern-Price 法和 Spencer 法具有以下优势: 1) 同时考虑法向和切向条间力作用; 2) 满足静力平衡和力矩平衡方程。相较于其他简化方法, 这两种方法在力学模型上更为完善, 计算结果具有更高的可靠性。计算结果见表 4, Geostudio 计算结果如图 3 所示。

Table 4. Slope stability calculation results**表 4.** 边坡稳定性计算结果

工况	Geostudio (安全系数)		滑坡稳定系数	滑坡稳定状态
	Morgenstern-Price	Spencer		
①	1.083	1.083	1.05 ≤ F < 1.15	基本稳定
②	0.985	0.986	<1.00	不稳定
③	0.702	0.704	<1.00	不稳定

注: 工况①: 自然工况; 工况②: 地震工况; 工况③: 降雨工况。

在工况①自然工况下,边坡处于自然状态,不施加任何外部荷载, Morgenstern-Price 法和 Spencer 法两种方法计算得出:边坡安全系数为 1.083,安全系数 ≥ 1.05 且 < 1.15 ,边坡处于基本稳定状态。

在工况②地震工况下,边坡处于地震状态,两种方法计算得出:边坡安全系数最小为 0.985,安全系数 < 1.00 ,边坡处于不稳定状态。

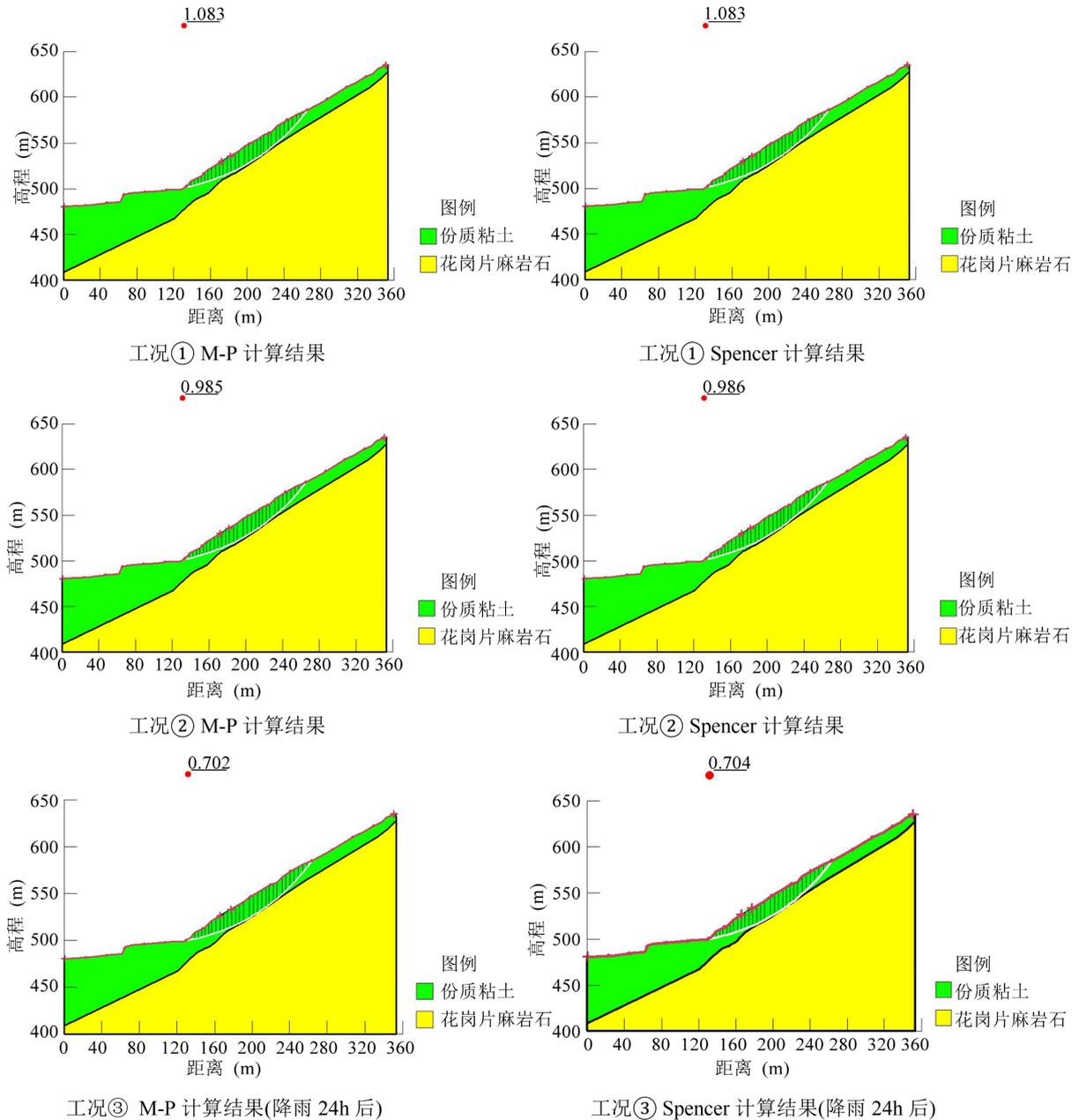


Figure 3. Geostudio calculation results

图 3. Geostudio 计算结果

在工况③降雨工况下,边坡处于降雨状态,假定其连续降雨 24 小时,日降雨量为 158.2 mm,两种方法计算得出:安全系数随降雨时间增加逐渐减小,当降雨 16 小时后,边坡安全系数趋于稳定,当降雨 24 小时时,安全系数最小为 0.702,安全系数 < 1.00 ,边坡处于不稳定状态。降雨工况下,安全系数随时间

变化如图 4 所示。

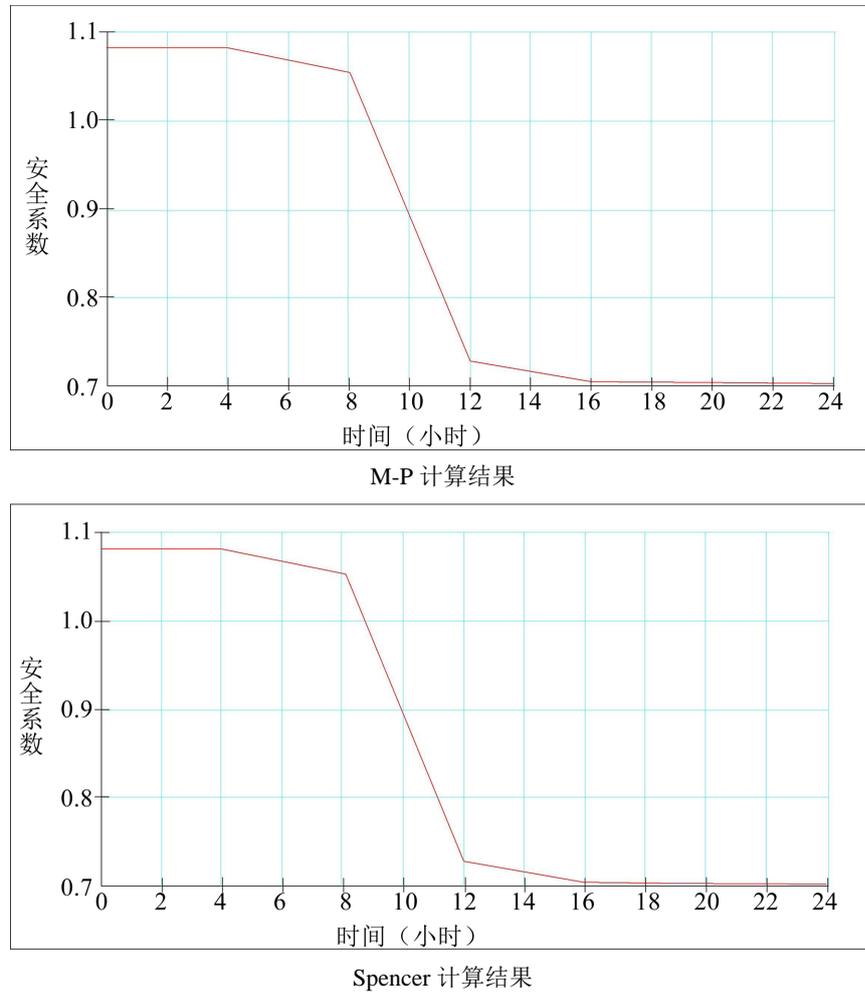


Figure 4. The safety factor changes with time under rainfall conditions
图 4. 降雨工况下安全系数随时间变化

5. 结论

本文以杜峪滑坡后形成的边坡为例,采用 Geostudio 数值模拟法,基于 Morgenstern-Price 法和 Spencer 法两种理论,对边坡在自然工况、地震工况、降雨工况三种工况下的稳定性进行计算。计算结果表明:在自然工况下,边坡安全系数为 1.083,边坡处于基本稳定状态,边坡发生滑坡的可能性较小。在地震工况下,边坡安全系数最小为 0.985,边坡处于不稳定状态。

在降雨工况下,边坡安全系数随降雨时间增加逐渐减小,前 4 个小时雨水初步入渗边坡粉质粘土体的表面,边坡的安全系数变化极小,边坡处于基本稳定状态;降雨 4 到 8 个小时,雨水进一步入渗,边坡粉质粘土体的容重增大,粘聚力与内摩擦角减小,边坡的安全系数变化较为明显,但边坡仍处于基本稳定状态;降雨 8 个小时,边坡顶部覆盖层较浅的位置,雨水已经入渗到基岩面,在降雨 8 到 12 个小时内,雨水进一步入渗到粉质粘土体和花岗片麻岩体中,在增大岩土体容重,减小岩土体粘聚力与内摩擦角的同时,润滑了粉质粘土体和花岗片麻岩体的接触面,使边坡的安全系数急剧减小,在降雨 8 个小时 40 分钟左右,边坡的安全系数降到 1.00 以下,边坡处于不稳定状态;在降雨 12 个小时,边坡覆盖层粉

质粘土体被雨水完全入渗,在降雨 8 到 12 个小时内,粉质粘土体的容重、粘聚力和内摩擦角基本不再变化,此时的入渗到岩土体雨水中的部分沿基岩裂缝补给地下水,更多的雨水在基岩面聚集,给予上部粉质粘土体一个上浮力,抵消其自重的同时,也进一步减小了其与基岩面的摩擦力,边坡的安全系数继续减小;当降雨 16 小时后,边坡安全系数趋于稳定,当降雨 24 小时时,安全系数最小为 0.702,边坡处于不稳定状态。

综上所述,杜峪滑坡后形成的边坡在自然状态下处于基本稳定状态,但若遭遇强降雨或者地震,发生二次滑坡的可能性极大,应当对其进行工程加固。

参考文献

- [1] 陈志坚,孙英学. 裂隙岩体力学参数的弱化处理[J]. 江苏地质, 2000(1): 36-38.
- [2] 陈祖煜. 岩质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 245-267.
- [3] 国土资源部国际合作与科技司. 滑坡防治工程勘查规范: DZ/T 0218-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] GB18306-2015, 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] 闫广柱. 露天矿山边坡稳定性分析及预警预报[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [6] GB51016-2014, 非煤露天矿边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.