长历时降雨后排土场边坡稳定性动态变化研究*

马增[1,2,3],费汉强[1,2,3],孙春辉[1,2,3],何环莎[1,2,3],牛小明[1,2,3],王旭[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为了揭示长历时降雨后排土场边坡渗流场和稳定性动态变化规律,以刚果(金)某排土场为例,基于饱和-非饱和土力学理论,采用Geo-Studio软件进行了长历时降雨后排土场边坡地下水渗流场模拟和极限平衡分析。结果表明:降雨初期以垂直入渗为主,后期以侧向渗流为主,初始水位上升较快,降雨后2 d逐渐下降,25 d时趋于稳定;短历时降雨条件下,边坡安全系数存在波动,而长历时降雨条件下,边坡安全系数先减小后增大,最小安全系数出现在降雨后4 d左右;降雨对排土场边坡稳定性影响具有一定的持续性和滞后性,对于初始稳定性不好的边坡,应采取安全防控措施。

关键词:排土场;长历时降雨;渗流场;边坡稳定性;滞后性

中图分类号:TD854.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0169-08

Study on Dynamic Variation of Dump Slope Stability After Long Duration Rainfall

MA Zeng[1,2,3], *FEI Hanqiang*[1,2,3], *SUN Chunhui*[1,2,3], *HE Huansha*[1,2,3], *NIU Xiaoming*[1,2,3], *WANG Xu*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Engineering Research Center of Prevention and Management of
Mine Geological Hazard and Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic variation law of seepage field and stability of the dump slope under long duration rainfall, a case study of the dump in the Democratic Republic of the Congo was conducted. Based on the saturated-unsaturated soil mechanics theory, Geo-Studio software was used to simulate the seepage field of groundwater and perform the limit equilibrium analysis of the dump slope after long duration rainfall. The results show that the rainfall is mainly vertical infiltration in the initial stage, and it is mainly lateral infiltration in the later stage. The initial water level rises rapidly, and gradually decreases after 2 d of rainfall, and tends to be stable after 25 d. Under the condition of short duration rainfall, the safety factor of slope fluctuates whereas under prolonged rainfall, it initially decreases and then increases, and the minimum safety factor appears about 4 d after rainfall. The impact of rainfall on the stability of dump slope has a certain degree of persistence and hysteresis, and safety prevention and control measures should be taken for the slope with poor initial stability.

Key words: Dump, Long duration rainfall, Seepage field, Slope stability, Hysteresis

0 引言

排土场是矿山开采过程中用于堆放剥离表土和废石的场所,易产生滑坡、泥石流等地质灾害[1]。降雨是影响排土场稳定性的主要因素,不仅会弱化岩体强度,而且会削弱其基底抗滑能力[2-5]。研究表明,降雨对排土场稳定性的影响程度与降雨的历时和强度密切相关[6-14]。排土场失稳具有滞后性,往往发生在降雨后的某个时间段,因此,研究长历时降雨后排土场边坡稳定性动态变化对矿山安全生产和管理具有重要意义[15]。

近年来,众多学者开展了降雨对排土场边坡稳

* **收稿日期**:2025-01-23
作者简介:马增(1998—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事矿山岩石力学及边坡工程防灾减灾研究。E-mail:mazeng1540@163.com

定性的影响研究。张文飞等[16]以和尚桥铁矿排土场为研究背景,分析了降雨强度及降雨时长对边坡孔隙水压力的影响,得到了不同降雨强度下边坡孔隙水压力分布规律及边坡安全系数。陈光木[17]利用 Geostudio 软件对李屋排土场进行了多工况、多方法的计算,研究了降雨对软弱基底排土场边坡稳定性的影响,发现边坡安全系数随降雨量的增加而减小。谢振华[18]分析了贵州某排土场降雨与边坡位移的关系,发现降雨是导致排土场滑坡的主要原因,降雨影响具有滞后性且降雨量可以作为排土场滑坡的预警指标。李东等[19]以非饱和土力学理论为基础,分析了降雨入渗过程中基质吸力的分布状态,并得出结论:排土场安全系数随降雨入渗基质吸力的减小而减小,随着蒸发作用基质吸力增大而增大。李宏达等[20]以福建某排土场边坡为例分析了不同雨型对边坡渗流特征及稳定性的影响,研究表明,短时高强度降雨对排土场边坡稳定性影响较大,最小安全系数通常出现在降雨结束后。耿莹莹[21]分析了厄瓜多尔米拉多铜矿排土场边坡在降雨入渗过程中的稳定性变化,发现降雨入渗过程中,排土场边坡安全系数缓慢降低,降雨结束后会逐渐上升直至达到新的稳定状态。

本研究以刚果(金)某排土场为研究对象,基于饱和-非饱和土力学理论,采用 Geostudio 软件,结合 Van Genuchten 模型对长历时降雨后排土场边坡渗流场进行模拟和极限平衡分析。研究成果可为该矿山的安全生产和管理提供参考。

1 排土场概况

某排土场位于刚果(金)上加丹加省,矿区气候属于热带高原气候。根据气候特点及降雨量,矿区全年可分为旱季和雨季:旱季基本不降雨,雨季降雨历时长且次数频繁。矿区内设有气象站,记录了矿区 2011 年 1 月至 2024 年 12 月的降雨数据,矿区年降雨量为 863.50～1 411.54 mm,平均为 990.00 mm,主要集中在 9 月份至次年 6 月份,最大月降雨量为 341.25 mm,最大日降雨量为 117.00 mm。

排土场占地 80 万 m^2,堆置标高+1 416～+1 555 m,最高堆高为 139 m,单台阶高度为 30 m,安全平台宽 16 m,台阶坡角为自然安息角 35°,整体边坡角控制在 28°以内。采用自卸汽车运输,实施分层堆置,最终形成总库容 54 万 m^3 的堆场,并按 1 465 m、1 495 m、1 525 m、1 555 m 四个标高形成台阶。排土场南西侧靠山,其余方位地势开阔。根据排土场的主要滑动方向和边坡情况布置 4 个监测剖面,如图 1 所示。

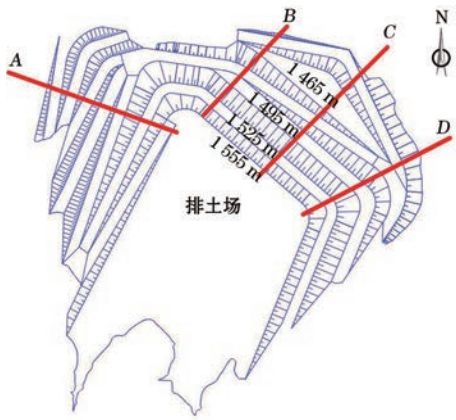


图 1 排土场示意

Fig.1 Schematic of the dump

排土场位于两个矿坑之间,主要接收来自这两个采场的废石。废石按散体性质可分为Ⅰ类和Ⅱ类,二者物理力学参数略有差异。场地地表主要被第四系土层和全风化岩层覆盖。为探明排土场基底岩层特征,在已有勘察资料基础上,沿每个剖面增设 3 个钻孔,获取了第四系土层、全风化岩层、强风化岩层及中风化岩层的厚度与埋深数据,见表 1。表中岩层厚度数据为各钻孔实测值的平均值。

表 1 排土场基底岩层特征

Table 1 Characteristics of rock strata at basement of the dump

岩土名称	状态	厚度/m	层顶埋深/m
第四系及残积土	松散	4.69	0～59.90
全风化白云(页)岩	可塑	7.72	0～60.42
强风化白云(页)岩	可塑	17.33	12.85～75.03
中风化白云(页)岩	—	—	17.10～84.96

2 模型建立及参数选取

2.1 模型建立

基于图 1 所示的剖面布置方案,根据钻孔勘探数据绘制分析剖面。同时由于Ⅱ散体仅分布于 *C* 剖面和 *D* 剖面下部,且 *D* 剖面安全系数最小,因此选取 *D* 剖面作为典型分析剖面。采用 Geo Studio 软件中 SEEP/W 和 SLOPE/W 分析模块对边坡稳定性和渗流场进行耦合分析,建立的模型见图 2。

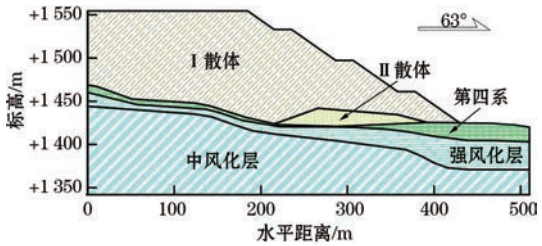


图 2 *D* 剖面工程地质模型

Fig.2 Engineering geological model of *D* profile

2.2 排土场散体参数选取

2.2.1 散体块度筛分

散体块度对排土场的力学性质和稳定性具有重要影响,块度越小,其强度越低。因此,在开展排土场散体物料研究时,需要重点分析排土场块度构成及其分布规律。采用定制的筛网将散体筛分为+10 cm、+5～−10 cm 和−5 cm,散体筛分流程见图 3。在密实的排土场台阶表面开挖试样坑,并采用注水方法测量样坑体积,对样坑内取出的物料进行筛分,得到不同粒级散体物料的质量,结合细颗粒筛分结果,绘制散体颗粒级配曲线。将−5 cm 的散体烘干并测定散体的含水量,然后取适量−5 cm 的散体进行直剪试验。

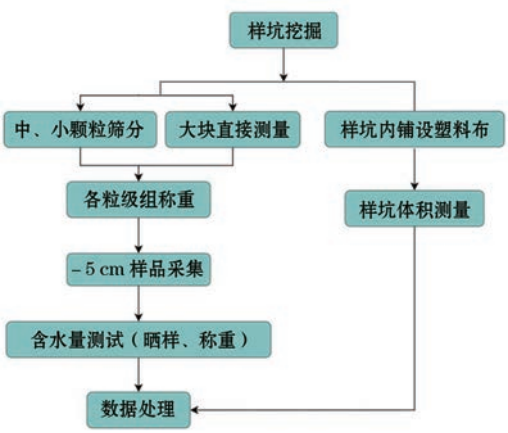


图 3 散体块度筛分流程

Fig.3 Screening process of granular fragmentation

2.2.2 散体室内试验

散体室内试验流程见图 4。通过对样品进行二次筛分,得到更详细的散体物料颗粒级配数据。按照−5 mm 颗粒含量不变的原则,等量替代+5 mm 至限制粒径的颗粒,大于限制粒径的颗粒按比例进行等量代替。为确保试验数据与现场情况相符,除了控制样品的颗粒级配外,还应还原现场样品的含水量、密实度等实测参数,按照比例将筛分后的物料与水充分拌合,最终制备出符合要求的试样。试样制备完成后开展散体直剪试验,通过加载不同的轴向正应力得到不同的峰值应力,经数据分析后得到散体的抗剪强度参数。

利用环刀采集适量制备好的试样,经 5～8 h 饱水养护,采用压力板仪及配套设备测定散体样本不同吸力下的含水量数据。基于测试数据,采用 Van Genuchten 模型进行参数拟合,并借助专业分析软件进行数据整理和分析,最终得到光滑、准确的土-水特征曲线。

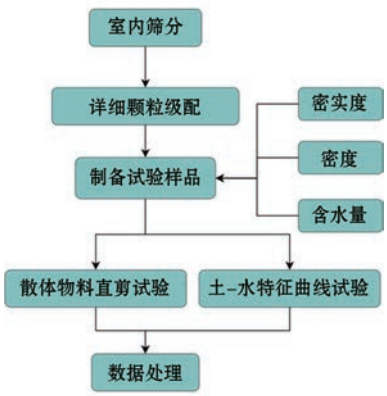


图 4 散体室内试验流程

Fig.4 Laboratory test process of granular materials

2.2.3 散体力学参数

对排土场散体物料开展了筛分试验、直剪试验,对基岩开展了单轴压缩试验、巴西劈裂试验和三轴压缩试验。按照排土场基底岩性特征和排土物料类型,将排土场岩体划分为 5 类:Ⅰ散体、Ⅱ散体、第四系、强风化层和中风化层。由于全风化岩与第四系土层性质接近,故统一按照第四系岩体参数取值。根据试验结果获得了自然和饱水状态下的排土场岩体力学参数,见表 2。

表 2 排土场岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the rock mass in the dump

岩体名称	状态	密度/(g/cm³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
Ⅰ散体	自然	2.22	20.00	0.27	21.05	32.36
	饱水	2.26	16.00	0.28	19.42	28.80
Ⅱ散体	自然	1.78	5.00	0.28	35.10	25.91
	饱水	1.92	3.00	0.29	32.17	20.15
第四系	自然	1.80	21.75	0.30	32.04	18.47
	饱水	1.90	15.23	0.31	25.63	14.78
强风化层	自然	2.23	1 626.55	0.34	150.00	24.18
	饱水	2.28	1 271.71	0.31	120.00	23.25
中风化层	自然	2.51	2 062.38	0.16	210.00	29.00
	饱水	2.57	1 613.55	0.17	160.00	28.00

2.3 降雨参数选取

采用皮尔逊Ⅲ型频率曲线方法对矿区气象站历年降雨量数据进行分析,利用充足的数据样本预测矿区不同重现期下的降雨特征参数,获得各概率下的降雨强度及最大日降雨量[22-23]。

计算结果表明,矿区 10 年一遇的日最大降雨量为 93.00 mm,20 年一遇的日最大降雨量为 111.85 mm,50 年一遇的日最大降雨量为 137.39 mm,100 年一遇的日最大降雨量为 157.48 mm。按照《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)要求,结合该排土场堆置高度(139 m)以及设计库容(54 万 m^3),该排土场属于二级排土场。按照受灾对象、受灾程度等因素分析,该排土场的滑坡防治工程级别为二级,计算时采用 50 年一遇降雨量。

2.4 饱和-非饱和渗流参数选取

渗透系数函数和体积含水量均表现为基质吸力的函数,通过压力板仪测得Ⅰ散体和Ⅱ散体的基质吸力和体积含水量数据,采用 GeoSlope-SEEP 模块中提供的 Van Genuchten 模型对土-水特征曲线进行拟合[24-27]。由于排土场基层岩体缺乏试验资料,第四系、强风化层和中风化层按照饱和状态考虑。根据工程勘察资料及取样试验,排土场散体介质含水量函数和渗透系数函数的拟合参数见表 3。

表 3 土-水特征函数拟合参数

Table 3 Fitting parameters of the soil-water characteristic function

岩体名称	饱和渗透系数/(cm/s)	孔隙率	土-水特征曲线参数		
			α	n	m
Ⅰ散体	3.76	0.45	25	1.45	0.31
Ⅱ散体	1.19	0.43	10	1.23	0.19
第四系	1.35×10^{-4}	0.42	—	—	—
强风化层	1.17×10^{-4}	0.38	—	—	—
中风化层	5.80×10^{-5}	0.37	—	—	—

3 渗流分析

3.1 饱和-非饱和计算原理

多孔岩土介质的渗流微分方程见式(1)。

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_i)+S=\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) \tag{1}$$

式中:n 为孔隙率;S 为汇源项;ρ 为物质的密度;v_i 为 i 点处的流速;x 为方向变量;t 为时间变量。

非饱和岩土渗流的渗流速度可表示为:

$$v_i=-K_{ij}K_r(\theta)\frac{\partial H}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中:K_{ij} 为平面方向上(i,j)位置上的渗透系数;K_r 为非饱和渗透系数相对饱和渗透系数的比值,非饱和区 $0<K_r<1$,在饱和区 $K_r=1$;θ 为体积含水率;H 为压力水头。

将式(1)中的孔隙率变为非饱和岩土介质的含水率,就可以得到非饱和渗流的连续方程,见式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho K_{ij}K_r(\theta))\frac{\partial H}{\partial x_j}+S=\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) \tag{3}$$

由于 θ 与非饱和岩土体的基质吸力 h 之间存在一定的函数关系,可表示如下。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial\theta}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t} \tag{4}$$

令 $C=\frac{\partial\theta}{\partial h}$对式(3)整理,可以得到饱和-非饱和渗流方程,见式(5)。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(K_{ij}K_r(h))\frac{\partial H}{\partial x_j}+K_{i3}K_r(h)+S=(C+\beta S_s)\frac{\partial h}{\partial t} \tag{5}$$

式中,C 为容水度,在饱和状态下等于 0;S_s 为贮水系数,非饱和状态下为 0,饱和状态下为一常数;β 在饱和区为 1。

3.2 模型边界条件

(1) 水头边界条件。矿区西部为分水岭,有两个高山头,海拔标高分别为+1 562.68 m 和+1 561.10 m,矿区东侧设有可取水的供水井。目前,矿区地下水位已降至+1 314.65 m,整体流向为西南向东北。根据矿区开采情况以及水力计算,确定水头为 1 325 m。

(2) 降雨边界条件。大气降雨一部分通过散体孔隙渗入岩体内,另一部分形成地面径流,两者比值称为降雨入渗补给系数。本研究结合现场踏勘和双环渗透试验,确定矿区排土场降雨入渗补给系数为 0.8。分析采用 50 年一遇日最大降雨量 137.39 mm 为设计值,考虑入渗补给影响取 109.9 mm。降雨时长设定为 6 h,符合刚果(金)地区雨季降雨特征。

3.3 渗流场分析结果

排土场的渗流场模拟分析结果如图 5 所示。在降雨初期,排土场物料处于干燥状态,降水入渗速率较高,以垂直下渗为主要渗流方式,导致短时间内地下水位显著上升。随着降雨持续,表层土体逐渐饱和,下渗速率降低,入渗的地下水向临空面流动,此时地下水渗流方式以侧向渗流为主。由于Ⅱ散体渗透系数较小,形成了一个相对隔水

的透镜体,随着周围岩层逐渐饱和,地下水逐渐向II散体渗透。在数值模型中,上层散体设为饱和-非饱和模型,下层基岩设为饱和模型,导致在降雨初期地下水位迅速上升;随着地下水位到达散体层,由于非饱和区的存在,水位上升速率减缓,并逐渐形成侧向排泄。

随着降雨时间增长,排土场地下水渗流方式逐渐由垂直下渗转化为侧向渗流。降雨后2 d,排土场左侧边界水位开始下降,右侧边界水位略有抬升,表明降雨后地下水由左向右排泄;15 d时,排土场坡脚出现涌水,排泄量不断增大,且I散体与第四系交界处产生上层滞水,范围不断扩大;20 d时,坡脚涌水量趋于稳定,I散体与第四系交界处上层滞水逐渐消散,地下水渗流消失;25 d后,地下水位趋于稳定。降雨入渗过程较长,对排土场边坡地下水渗流的影响具有持续性。同时,由于降雨补给地下水需要一定的时间,因此降雨对排土场边坡稳定性的影响也具有滞后性。

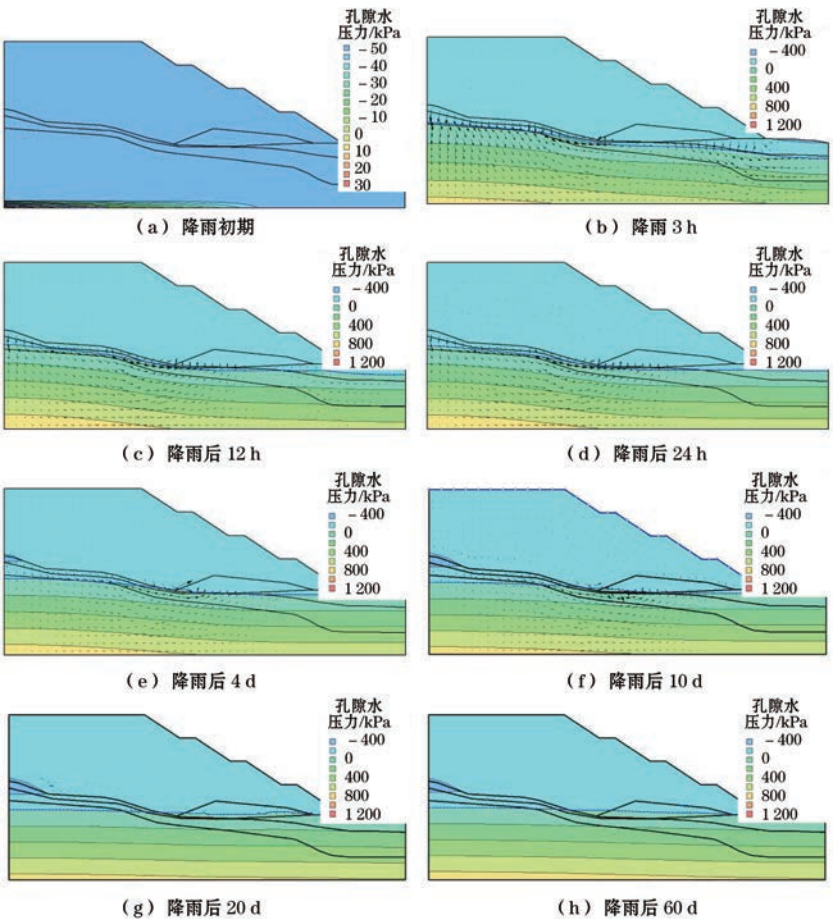


图5 排土场渗流场分析结果

Fig.5 Results of seepage field analysis in the dump

4 边坡安全系数计算

4.1 计算方法

排土场主要由散体构成,边坡破坏模式以"圆弧滑动"为主。本次边坡稳定性分析采用简化Bishop法,该方法基于圆弧滑面假设,属于极限平衡方法。

4.2 计算结果分析

由表4可以看出,在短历时降雨条件下,边坡安全系数存在波动,但始终大于许用安全系数1.15,边坡处于稳定状态;在长历时降雨条件下,边坡安全系数先减小后增加。结合渗流场分析可知,降雨初期地下水位上升导致边坡安全系数减小,随后排水作用增强使地下水位降低,安全系数增加。最小安全系数出现在降雨后4 d左右,此时边坡稳定性最差,矿区应该及时防范,避免安全事故发生;降雨后20 d,边坡安全系数趋于稳定,表明降雨对边坡稳定性的影响逐渐减弱。长期来看,降雨对排土场边坡稳定性的影响具有一定的持续性(可达30 d)和滞后性

(安全系数最低值出现在降雨后 4 d)。

表 4 不同降雨时刻排土场边坡安全系数

Table 4 Safety factors of the dump slope at different moments after rainfall

降雨条件	降雨时刻	安全系数
短历时	初始时刻	1.299
	36 min	1.304
	3 h	1.315
	9 h	1.313
	18 h	1.294
	24 h	1.297
长历时	2 d	1.284
	4 d	1.270
	6 d	1.286
	8 d	1.284
	10 d	1.293
	20 d	1.301
	30 d	1.301
	40 d	1.311
	60 d	1.311

针对降雨后排土场边坡可能出现的安全事故,提出以下安全防控措施:

(1) 排土场建设初期应对原始地表的软弱层进行清理,同时在排土场顶部开挖纵横盲沟以加速入渗降雨的排出;

(2) 排土场堆排过程中应尽量将大块废石堆排在排土场坡脚,形成反压和反滤作用,有助于排土场排泄内部持水,并提高排土场边坡稳定性;

(3) 完善排水系统,开挖排土场平台排水沟并在排土场与原始山坡结合处开挖截水沟,避免大量的坡面径流转化为地下水渗流;

(4) 在补救条件不足的情况下,可以采取主动加固措施对排土场进行加固。

5 结论

本文采用 GEO-Studio 软件对长历时降雨后的排土场开展地下水渗流场和边坡稳定性分析,得到以下主要结论。

(1) 基于散体室内试验和现场钻孔数据,得到排土场岩体力学参数,将排土场岩体划分为 5 类:Ⅰ散体、Ⅱ散体、第四系、强风化层和中风化层。根据矿区历年降雨数据和水力计算,确定了排土场水头为 1 325 m,考虑入渗补给的影响,取 50 年一遇日最大降雨量为 109.9 mm。

(2) 基于饱和-非饱和土力学理论,采用 GEO-studio 软件对排土场边坡地下水渗流场进行分析,结果表明,降雨初期以垂直入渗为主,地下水位迅速上升;后期以侧向渗流为主,降雨后 2 d 地下水由左向右排泄,15 d 时排土场坡脚会产生渗水,25 d 后地下水位逐渐稳定。

(3) 采用简化 Bishop 法计算了不同降雨时刻下的边坡安全系数,发现短历时降雨条件下边坡安全系数存在波动,在长历时降雨条件下边坡安全系数先减小后增加。最小安全系数出现在降雨后 4 d 左右,此时边坡稳定性最差;降雨后 20 d 边坡安全系数趋于稳定,表明降雨对边坡稳定性的影响逐渐减弱。

(4) 渗流场分析和边坡稳定性分析表明,降雨对排土场边坡稳定性影响具有一定的持续性和滞后性。对于初始稳定性不好的边坡,应当采取基底处理、截排水、合理堆填顺序和加固等措施防范安全隐患。

参考文献(References):

[1] 王运敏,项宏海.排土场稳定性及灾害防治[M].北京:冶金工业出版社,2011.
WANG Yunmin, XIANG Honghai. Stability and disaster prevention of waste dump [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2011.

[2] 蓝宇.基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理[J].矿业研究与开发,2023,43(3):77-82.
LAN Yu. Stability analysis and treatment of high and steep slope in open-pit dump based on numerical simulation[J]. Mining Research and Development,2023,43(3):77-82.

[3] 张亚宾,陈超,甘德清.降雨对排土场边坡渗流及稳定性的影响[J].金属矿山,2016(5):173-177.
ZHANG Yabin, CHEN Chao, GAN Deqing. Influence of rainfall on permeability and stability of the dump slope[J]. Metal Mine,2016(5):173-177.

[4] 韩连生,夏强,赵会德.降雨条件下老岭排土场边坡渗流及稳定性分析[J].中国钨业,2018,33(3):14-19.
HAN Liansheng, XIA Qiang, ZHAO Huide. Analysis of seepage and stability of Laoling dump slope under rainfall conditions[J]. China Tungsten Industry,2018,33(3):14-19.

[5] 李文虔,陈敏,寇向宇.露天矿排土场稳定性分析及滑坡防治措施[J].采矿技术,2023,23(1):59-61.
LI Wenqian, CHEN Min, KOU Xiangyu. Stability analysis and landslide prevention and control measures for open pit mine dumps[J]. Mining Technology,2023,23(1):59-61.

[6] 蔡文倩.岭南强降雨条件下分层排土场边坡失稳及防控技术研究[D].广州:华南理工大学,2021.
CAI Wenqian. Study on slope instability and prevention technology of layered dump under heavy rainfall in South of the Five Ridges[D].Guangzhou: South China University of Technology,2021.

[7] 丁小刚,马丽娜,蔺文博,等.非饱和重塑弱膨胀土孔隙结构与土-水特征曲线试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊1):3081-3090.
DING Xiaogang, MA Lina, LIN Wenbo, et al. Experimental study on the pore structure and soil-water characteristic curve of unsaturated remodeled weakly expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(Suppl.1):3081-3090.

[8] 蔡文倩,王建德,姜立春.分层排土场边坡降雨入渗过程及稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2021,73(5):35-42.
CAI Wenqian, WANG Jiande, JIANG Lichun. Analysis on rainfall infiltration process and stability of layered dump slope[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(5):35-42.

[9] 刘维发.不同降雨工况下某矿山超高排土场边坡稳定性研究[D].赣州:江西理工大学,2018.
LIU Weifa. Study on slope stability of super-high dump site of a mine under different rainfall conditions[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2018.

[10] 高黎黎.昆钢大坡铁矿3#排土场滑坡主要致因研究及治理措施评价[D].昆明:昆明理工大学,2022.
GAO Lili. Study on the main causes of landslides and evaluation of management measures in the NO. 3 waste dump of Dapo iron mine of Kunming Iron Steel Co., Ltd. [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022.

[11] 包一丁.排土场边坡稳定性评价及潜在滑坡灾害范围预测:以朱家包包排土场为例[D].长春:吉林大学,2020.
BAO Yiding. Stability analysis and landslide failure potential forecasting of the waste dump: Zhujiabaobao waste dump case study[D]. Changchun: Jilin University,2020.

[12] 王志留.降雨和地下水联合作用边坡力学模型及露天矿应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
WANG Zhiliu. Study on the mechanical model of slopes considering rainfall and groundwater and its application in open pit mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing,2020.

[13] 夏强.降雨条件下老岭排土场边坡渗流及稳定性分析[D].鞍山:辽宁科技大学,2018.
XIA Qiang. Analysis on slope seepage and stability of Laoling dump under rainfall condition [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2018.

[14] 郑开欢,罗周全,罗成彦,等.短时强降雨对排土场碎石土边坡稳定性的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(6):39-47.
ZHENG Kaihuan, LUO Zhouquan, LUO Chengyan, et al. Effect of short-term heavy rainfall on gravel soil slope stability of waste dump[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2016,36(6):39-47.

[15] 甘海阔,周汉民,崔旋,等.长历时降雨入渗对多台阶排土场边坡稳定性影响研究[J].有色金属(矿山部分),2014,66(5):79-84.
GAN Haikuo, ZHOU Hanmin, CUI Xuan, et al. Stability analysis of multi-stage dump slope under long time rainfall infiltration[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2014,66(5):79-84.

[16] 张文飞,任奋华,郭奇峰,等.降雨作用下和尚桥铁矿内排土场边坡稳定性分析[J].金属矿山,2022(5):205-211.
ZHANG Wenfei, REN Fenhua, GUO Qifeng, et al. Analysis on slope stability of inner dump in Heshangqiao iron mine under rainfall[J]. Metal Mine,2022(5):205-211.

[17] 陈光木.降雨对露天矿软弱基底排土场边坡稳定性的弱化效应[J].矿业研究与开发,2022,42(12):56-62.
CHEN Guangmu. Weakening effect of rainfall on slope stability of dump with weak base pit mine soft substrate discharge site[J]. Mining Research and Development,2022,42(12):56-62.

[18] 谢振华.降雨引发排土场滑坡的预警准则研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(11):153-158.
XIE Zhenhua. Research on early warning criterion of dump landslide caused by rainfall[J]. Journal of Safety Science and Technology,2020,16(11):153-158.

[19] 李东,吴俊霖,张默.降雨入渗作用下排土场边坡动态稳定性分析[J].现代矿业,2019,35(7):227-230.
LI Dong, WU Junlin, ZHANG Mo. Dynamic stability analysis of waste dump slope under rainfall infiltration[J]. Modern Mining,2019,35(7):227-230.

[20] 李宏达,简文彬,蔡泽宏,等.福建某排土场边坡降雨作用下渗流稳定时变分析[J].路基工程,2016(4):33-36+49.
LI Hongda, JIAN Wenbin, CAI Zehong, et al. Time-dependent analysis on seepage stability of a refuse-dump slope under rainfall in Fujian[J]. Subgrade Engineering,2016(4):33-36+49.

[21] 耿莹莹.降雨入渗条件下排土场边坡稳定性研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
GENG Yingying. Study on slope stability of waste dump under rainfall infiltration[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2020.

[22] 马增.基于皮尔逊Ⅲ型曲线对科米卡矿区的降雨量计算[J].采矿技术,2019,19(3):141-142.
MA Zeng. Calculation of rainfall in Comica mine based on Pearson type Ⅲ curve[J]. Mining Technology,2019,19(3):141-142.

[23] 马增,刘正宇,虎万杰,等.排土场软弱夹层厚度与降雨量耦合的稳定性研究[J].有色金属(矿山部分),2019,71(5):78-80.
MA Zeng, LIU Zhengyu, HU Wanjie, et al. Stability of the soil dump based on the coupling of soft intercalated layer thickness and rainfall [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2019,71(5):78-80.

[24] 毕骏,谌文武,戴鹏飞,等.校正系数对不同形式的 Van Genuchten 方程各拟合参数的影响[J].岩土力学,2018,39(4):1302-1310.
BI Jun, CHEN Wenwu, DAI Pengfei, et al. Influence of correction factor on fitting parameters of various types of Van Genuchten model[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(4):1302-1310.

[25] 方薇,李万,曾宪璋.基于 van Genuchten 模型的非饱和土非线性抗剪强度研究[J].应用力学学报,2019,36(5):1220-1226+1266.
FANG Wei, LI Wan, ZENG Xianzhang. Study on nonlinear shear strength of unsaturated soil based on van Genuchten model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2019,36(5):1220-1226+1266.

[26] 陈勇,邹皓天,苏剑,等.基于数据挖掘的土水特征曲线影响分析及预测研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(2):451-466.
CHEN Yong, ZOU Haotian, SU Jian, et al. Impact analysis and prediction research of soil-water characteristic curves based on data mining[J]. Journal of Basic Sciences and Engineering,2023,31(2):451-466.

[27] 颜荣涛,徐玉博,颜梦秋.含水合物土体的土水特征曲线及渗透系数[J].岩土工程学报,2023,45(5):921-930.
YAN Rongtao, XU Yubo, YAN Mengqiu. Soil-water characteristic curves and permeability of hydrate-bearing soils[J]. Chinses Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(5):921-930.