水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

抚顺西露天矿蓄水期涉水软岩边坡失稳机制分析

吴季寰，董冠宏，李旭光，江　山，马天宇，崔　原

Instability mechanism of water-wading soft rock slope during storage period in Fushun west open-pit mine

WU Jihuan, DONG Guanhong, LI Xuguang, JIANG Shan, MA Tianyu, and CUI Yuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁　水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

考虑非饱和浸润层厚度和累积入渗量的改进Green-Ampt模型

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine

王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 张超彪, 王翠, 朱永东　水文地质工程地质. 2021, 48(6): 64-71

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康　水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

崔潇, 周妍如, 刘孝阳, 白中科　水文地质工程地质. 2021, 48(2): 164-173

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

张建全, 张克利, 程贵方　水文地质工程地质. 2021, 48(6): 131-139

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰　水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401027

吴季寰, 董冠宏, 李旭光, 等. 抚顺西露天矿蓄水期涉水软岩边坡失稳机制分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 168-180.
WU Jihuan, DONG Guanhong, LI Xuguang, et al. Instability mechanism of water-wading soft rock slope during storage period in Fushun west open-pit mine[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 168-180.

抚顺西露天矿蓄水期涉水软岩边坡失稳机制分析

吴季寰[1,2,3], 董冠宏[4], 李旭光[2,5,6], 江　山[2,5,6], 马天宇[2,5,6], 崔　原[6,7]

（1. 中国地质科学院, 北京　100037; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳　110034; 3. 自然资源部黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳　110034; 4. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江　157021; 5. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳　110034; 6. 自然资源部辽宁抚顺露天矿滑坡灾害野外科学观测研究站, 辽宁 抚顺　113004; 7. 辽宁省第十地质大队有限责任公司, 辽宁 抚顺　113004）

摘要： 抚顺西露天矿历经百余年开采, 已形成面积逾 12 km^2、最大深度超 400 m 的矿坑, 在贡献区域发展同时, 也伴随着矿山边坡变形失稳等地质安全问题。随着其停采后“蓄水成湖”治理构想的提出, 为提升矿区后续地质灾害防控能力, 以潜在涉水软岩边坡为例, 通过详细地质调查、岩土试验与数值模拟技术相结合, 探究了矿区蓄水期软岩边坡的失稳滑坡机制。研究结果表明: (1)矿坑蓄水对软岩边坡产生 4 方面影响, 按作用程度依次是弱化软岩、静水压脚、浮托减重和渗透反压, 其中弱化软岩是涉水边坡失稳的主因; (2)同等“填蓄”改造强度下, 软岩边坡中段稳定性相对最低, 如当矿坑先填土至−150 m 后再蓄水至−50 m 时, 软岩边坡东西段基本稳定, 中段却失稳发生泥页岩切层滑坡, 潜在滑体规模约 133.4 万 m^3, 建议改造过程中重点关注中段边坡的岩体隔水防渗和坡脚加压。研究成果可为抚顺西露天矿及类似深挖露天矿的修复治理提供参考。

关键词： 地质灾害; 软岩边坡; 数值模拟; 矿坑蓄水; 滑坡机制; 抚顺西露天矿

中图分类号： P694; P642.5　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3665(2025)04-0168-13

Instability mechanism of water-wading soft rock slope during storage period in Fushun west open-pit mine

WU Jihuan[1,2,3], DONG Guanhong[4], LI Xuguang[2,5,6], JIANG Shan[2,5,6], MA Tianyu[2,5,6], CUI Yuan[6,7]

(1. *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*　100037, *China*; 2. *Shenyang Center of China Geological Survey*, *Shenyang*, *Liaoning*　110034, *China*; 3. *Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect*, *Ministry of Natural Resources*, *Shenyang*, *Liaoning*　110034, *China*; 4. *Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center*, *China Geological Survey*, *Mudanjiang*, *Heilongjiang*　157021, *China*; 5. *Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect*, *Liaoning Province*, *Shenyang*, *Liaoning*　110034, *China*; 6. *Field Scientific Observation and Research Station for Landslide Disaster in Fushun Open Pit Mine*, *Liaoning Province*, *Ministry of Natural Resources*, *Fushun*, *Liaoning*　113004, *China*; 7. *Liaoning Tenth Geological Brigade Co. Ltd.*, *Fushun*, *Liaoning*　113004, *China*)

收稿日期： 2023-01-12; **修订日期：** 2024-09-23　　**投稿网址：** www.swdzgcdz.com

基金项目： 中国地质调查局沈阳地调中心(东北地质科技创新中心)主任基金项目(SJ202302); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230437); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220450)

第一作者： 吴季寰(1997—), 男, 博士研究生, 助理工程师, 从事地质灾害调查与评价工作。E-mail: wujihuan97@163.com

通讯作者： 董冠宏(1992—), 男, 本科, 工程师, 从事水工环地质调查工作。E-mail: 414030714@qq.com

Abstract: The Fushun west open pit mine, encompassing over 12 km^2, with a maximum depth exceeding 400 m, has undergone more than a century of intensive mining. While the mine has significantly contributed to regional development, it has also led to serious geological safety concerns, particularly slope deformation and instability. Following mine closure, a strategy of “water storage into lakes” for the treatment of the mine pit has been proposed. To prevent the occurrence of subsequent geological disaster events, this study investigated the mechanism of unstable landslide of soft rock slope during storage period in mining area through detailed geological survey, geotechnical test, and numerical simulation techniques. The results shows that pit water storage has four effects on soft rock slope: soft rock weakening, hydrostatic pressure on the toe of slope, floating weight reduction, and seepage force in slope according to influence degree. Soft rock weakening is the main cause of instability of water-wading slope. Under the same intensity of “filling and storage” transformation, the stability of the middle section of the soft rock slope is the lowest. For instance, when the pit is filled to −150 m and then water is stored to −50 m, the east and west sections of the soft rock slope are basically stable, while the middle section is unstable and prone to cutting through mudstone and shale to cause landslides. The potential sliding mass is about 133.4×10^4 m^3. It is suggested that during the reconstruction process, special attention should be paid to water-proofing and seepage prevention measures for the rock mass, as well as reinforcing measures at the slope toe in the middle section of the slope. This study provide technical guidance for the repair and treatment of Fushun West open-pit mine and similar deep open-pit mines.

Keywords: geologic hazard； soft rock slope； numerical simulation； open-pit mine impoundment； landslide mechanism； Fushun west open-pit mine

露天矿山边坡和水库涉水岸坡具有形态高陡、影响范围较大的共性，由二者失稳所引发的工程滑坡在世界范围内频繁发生[1－3]。诸如，2023 年阿拉善新井煤矿滑坡造成 53 人死亡，2.04 亿元经济损失[4]；2011 年土耳其Çöllolar 褐煤矿滑坡导致 11 人死亡，矿山暂停生产 4 d[5]；2003 年秭归县三峡库区千将坪滑坡激起涌浪 40 m，摧毁房屋 1 100 余座，造成 14 人死亡、10 人失踪[6]；1963 年意大利 Vajont 水库大坝上游岸坡失稳激起 220 m 巨浪，致使 2 000 余人死亡[7]。此类滑坡的灾害效应突出，是人类工程活动诱发地质灾害的重要表现形式[8－9]，对采矿和水利水电工程的安全运行构成了严重威胁[10－11]，开展相应工程边坡失稳机理研究的需求日益迫切。

国内外学者从多角度研究了露天矿边坡或水库岸坡失稳滑坡的成因机制。在露天矿滑坡方面，Meng 等[12] 以抚顺西露天矿北帮边坡为研究对象，从露天开挖塑造陡立坡形、构造拖曳控制斜坡结构和集中降水促进斜坡变形等多方面分析了矿山滑坡的形成机理，指导矿山滑坡防治；陶志刚等[13] 以南芬露天矿滑坡为例，提出了露天矿滑坡典型成因机理，即坡顶堆载促使滑面贯通，坡脚卸荷打破应力平衡，导致边坡失稳。在水库岸坡失稳方面，李长冬等[14] 综述了近 20 年前人对水库滑坡的研究，提出关于库水对边（滑）坡的宏观力学作用方式、库水作用下边坡岩土体渗流应力耦合机理和库水对边坡岩土体劣化作用过程的研究是当前水库滑坡的研究热点；Wolter 等[15] 开展了蓄水作用诱发水库岸坡岩体裂隙闭合效应和超孔隙水压力激增效应的研究，并应用于意大利 Vajoint 水库岸坡失稳滑坡的成因分析；杨正荣等[16] 通过 InSAR 观测发现，蓄水促使库岸边坡加速变形，是控制库岸潜在滑坡发育的关键；裴向军等[17] 通过长期多场监测提出，蓄水期间边坡变形主要受岩体结构面劣化、库水浮托力和水平推力影响；李鹏岳等[18] 研究发现库水位抬升阶段，岸坡稳定性先升高再降低，且稳定性升高后的衰减幅值与库水位上升速率呈正相关；白洁等[19] 利用现场监测和数值模拟法探究了库水位上升引起岸坡变形失稳的地下水动力学作用，认为蓄水后库水入渗导致岸坡阻滑段有效应力减小，易引发牵引式滑坡破坏。诸多研究成果对未来类似工程活动引发滑坡灾害或潜在滑坡危害工程项目运营的风险减缓具有重要的应用价值。

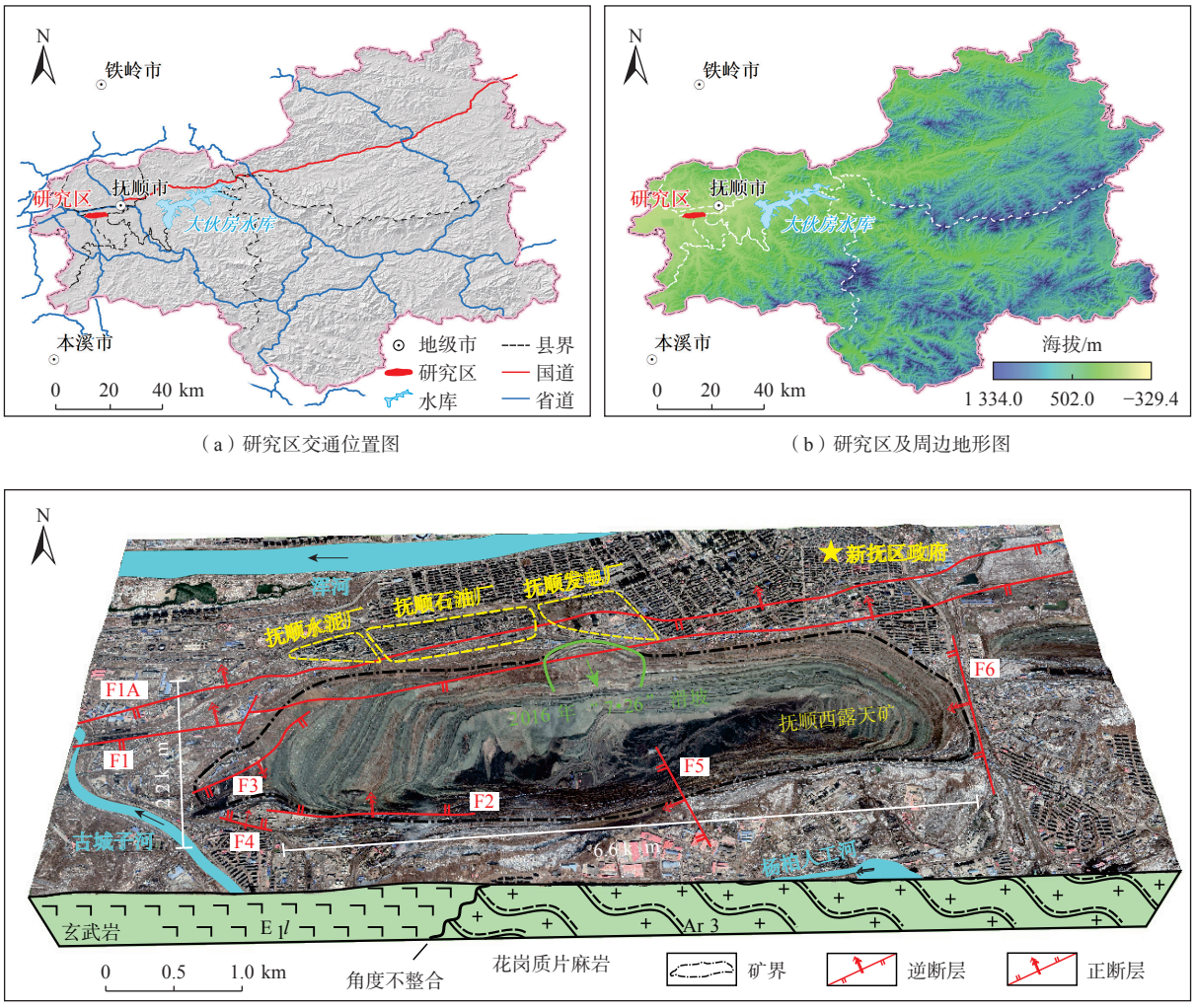
抚顺西露天矿规模巨大，边坡变形失稳事件时有发生[20]，随着停采后巨型矿坑“蓄水成湖”治理构想的提出[21]，已开展多轮论证[22－24]，但矿区涉水软岩边坡变形破坏机制的研究尚属空白。鉴于此，笔者参考前人关于露天矿和水库滑坡的研究经验，在抚顺西露天矿

选取了兼具矿山边坡和水库岸坡特点的潜在涉水软岩边坡作为研究对象，依托详细地质调查和岩土试验成果，采用基于流固耦合理论的数值模拟方法分析了软岩边坡的蓄水响应特征，探究了水岩（土）耦合作用下涉水软岩边坡失稳滑坡的机制，提出了蓄水后潜在滑坡灾害的防控措施建议，为矿山治理改造和相关工程滑坡的防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 矿区基本情况

研究区为辽宁省抚顺市西露天煤矿，历经百余年开采（1901—2019 年），现已发展成东西长超 6 km、南北宽超 2 km、最低海拔约−329 m、顶底高差超 400 m 的“亚洲第一大坑”[25]（图 1）。



（a）研究区交通位置图　（b）研究区及周边地形图

（c）研究区基本情况图

图 1 研究区概况图

Fig. 1 General situation of research area

抚顺西露天矿坑位于中朝准地台胶辽台隆，属郯庐断裂东北延“敦化—密山”深大断裂西南段的浑河断裂控制区，处于浑河断裂主干 F1 断层及其牵引构造急剧发育部位，区内构造主要表现为断层、褶皱和节理。矿区主要涉及地层有白垩系砂砾岩，古近系玄武岩、凝灰岩、泥岩、页岩、油母页岩、煤和基底太古代鞍山群花岗质片麻岩（图 2）。在此进行的大规模露天采掘对矿区内外地质环境造成了严重负面影响，至今发生可统计的矿坑边坡变形及失稳滑坡近百处，直接威胁抚顺石油一厂、发电厂、水泥厂、化工厂以及周边 790 户 2 370 人的生命财产安全[26]。

1.2 矿区蓄水工程背景

在 2019 年 5 月，抚顺西露天矿正式闭坑停采后，当地政府积极探寻矿坑综合治理方案，并根据西露天

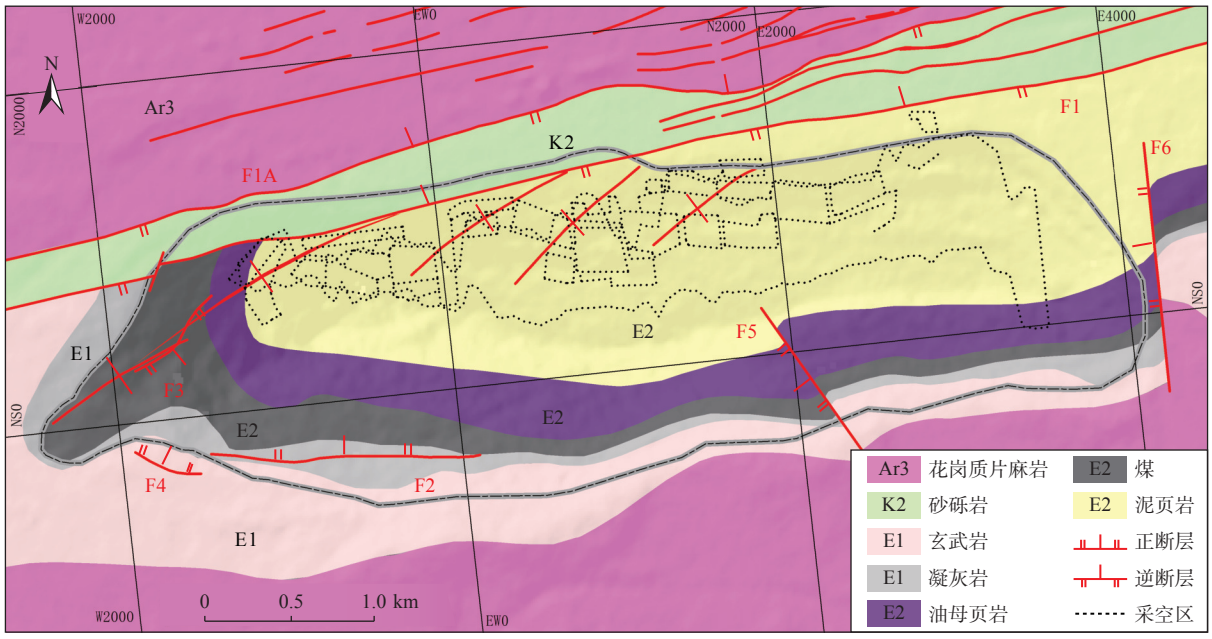


图 2　抚顺西露天矿基础地质条件图

Fig. 2　Basic geological conditions of Fushun west open-pit mine

矿坑周边地表水系发达，北靠浑河，西近古城子河，南临杨柏人工河，三面环水的区位特征，提出了将抚顺西露天矿蓄水成湖的设计构想[21]。此后，地方政府分别向多家设计单位咨询了矿坑蓄水成湖的可行性[22－24, 27]，关于抚顺西露天矿“蓄水成湖”方案可行性的分析已然成为该矿区综合治理改造的研究热点难点。

2　矿区潜在涉水软岩边坡特征

目前，抚顺西露天矿主要边坡为矿坑北帮和南帮边坡（图 1c）。

从构造发育程度剖析（图 2），右旋兼逆冲性质的浑河断裂主断层 F1A、F1 斜切矿坑北帮，使临近地层产状和岩体结构受其影响，在北帮边坡范围内的古近系地层中形成不对称牵引向斜构造；南帮边坡内主要发育浑河断裂分支断裂 F2、F5 断层，造成断层两侧岩体构造节理裂隙发育，未致地层原始产状改变，仍以北倾单斜地层出露，构造条件相对简单。从地层岩体角度剖析，北帮边坡岩体主要是古近系绿色泥岩与褐色页岩互层的软岩岩组，受大规模露井联采影响，北帮软岩边坡内结构面富集，切割破碎岩体，导致坡体浅表部岩体质量处于 III—V 级[28]，导水构造发育，有利于地下水浸润软化坡体，为矿坑蓄水期边坡失稳提供有利地质条件；南帮边坡则是玄武岩大范围出露，披覆在坚硬完整的花岗质片麻岩基底上，岩体节理裂隙较发育，以块状结构为主，局部碎裂。

对比可知，南帮边坡岩体坚硬、结构简单，坡体相对稳定[29]；北帮边坡则岩体软弱、遇水软化且构造发育，是矿坑蓄水期的主要涉水软岩边坡，其多变的坡体结构、破碎软弱的泥页岩层和持续的水体入渗浸润共同构成蓄水后边坡潜在变形失稳的主控因素。

3　矿区蓄水期软岩边坡失稳机制

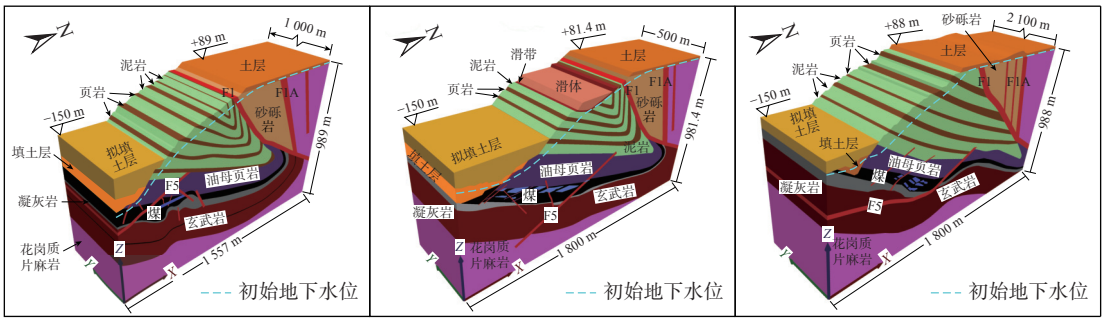
3.1　研究方法与过程

宏观上，水体对涉水岸坡的水力学作用和软化岩土体作用，是导致边坡失稳滑坡的主因[14]。为探究抚顺西露天蓄水过程对软岩边坡的具体影响方式，揭示蓄水期软岩边坡潜在的失稳破坏机制，笔者以多项蓄水改造可行性研究中均有提及的“自坑底南北贯通式填土至−150 m 高程后，然后再逐渐蓄水至−50 m”的填蓄工况[23－24] 为例进行分析。

（1）水力学作用分析

基于饱和-非饱和渗流理论，采用 Geo-studio 软件 Slope/w 模块，分析蓄水期涉水边坡内水力作用方式和程度，前者依托渗流场变化模拟、后者依托稳定性计算完成。

在考虑地层产状、地质构造的基础上，结合历史采掘、前期滑坡和未来回填等各类地形改造，可将矿坑北帮软岩边坡按坡体结构的不同分为三段（图 3）：西段倒转向斜逆向坡（矿区相对坐标 W800 m—E800 m）、中段上覆老滑体的向斜逆向坡（E800 m—E1 300 m）和



（a）西段边坡坡体结构 （b）中段边坡坡体结构 （c）东段边坡坡体结构

图 3 矿区软岩边坡典型坡体结构示意图

Fig. 3 Typical slope structures of the soft rock slope in mining area

东段单斜反倾逆向坡(E1 300 m—E3 400 m)。据此构建软岩边坡典型剖面通用计算模型，按平均 10 m 间距剖分网格，西段剖面含 28 495 个单元，中段剖面含 25 421 个单元，东段剖面含 26 278 个单元。并在矿区岩土体物理力学和水理试验的基础上，确定各计算参数如表 1。

表 1 岩土体物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

名称	含水状态	密度/(kg·m^{-3})	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·d^{-1})	弹性模量/GPa	泊松比
泥岩	天然	2 250	0.740	26.5	0.300 0(顺层) 0.000 9(切层)	1.200	0.28
	饱和	2 330	0.380	20.7			
页岩	天然	2 160	0.290	23.2	0.300 0(顺层) 0.000 9(切层)	1.800	0.25
	饱和	2 245	0.160	16.3			
油母页岩	天然	2 300	0.950	33.1	0.000 1	3.400	0.26
	饱和	2 375	0.710	28.5			
回填土	天然	1 970	0.047	25.0	100.000 0	0.025	0.40
	饱和	2 040	0.028	21.4			
砂砾石土	天然	1 800	0.200	25.0	100.000 0	0.020	0.20
	饱和	1 850	0.200	23.0			
煤	天然	2 340	0.450	30.8	0.010 0	0.500	0.26
	饱和	2 420	0.410	26.0			
凝灰岩	天然	2 590	4.520	38.6	0.009 0	11.800	0.24
	饱和	2 650	3.610	30.9			
玄武岩	天然	2 600	1.770	37.2	0.003 0	17.300	0.22
	饱和	2 650	1.420	33.8			
片麻岩	天然	2 690	5.000	52.0	0.015 0	25.100	0.22
砂砾岩	天然	2 630	2.500	38.0	0.250 0	5.500	0.25
断层	天然	2 400	0.300	30.0	0.400 0	2.000	0.30

边坡渗流场变化模拟中，由于矿坑从当前状态到填土至−150 m 时，不涉及地下水位改变，坡内渗流场可视为稳态渗流过程。随后，从蓄水至−50 m 到坡内渗流稳定阶段，坡内渗流场应视为瞬态渗流过程，蓄水位和时间的关系见式(1)。

$$H(t)=\begin{cases}-150+10t/3, & t\in[0,30]\\ -50, & t\in(30,120]\end{cases} \tag{1}$$

式中：H——蓄水位/m；

t——蓄水时间/d。

将初始地下水位作为模型定水头边界，进行现状、填土阶段的渗流稳态分析，初始地下水位分布由勘察资料获得。随后，为涉水边坡施加定水头 $H(t)$ 边界条件，模型上部非临水区设置零流量边界，将稳态分析结果作为初始状态，依设计蓄水过程进行逐日瞬态渗流分析。

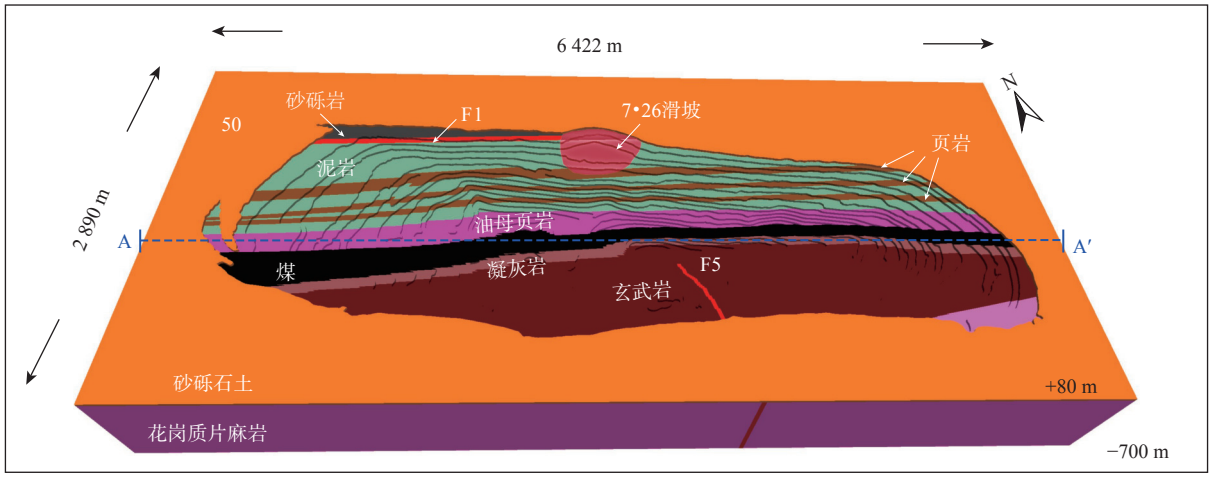
边坡稳定性计算中，为反映各类水力作用对边坡的作用程度，不引入弱化软岩的干扰，参考控制变量法，将“泥页岩遇水强度指标下降”的物理事实，作为可控变量暂且忽略，在此仅考虑蓄水位变更和地下水浸润线演化带来的水力作用。故采用 Morgenstern-

Price 法，选取 Mohr-Coulomb 本构，仅按初始地下水位上下各岩土体饱和状态区分计算参数，跟踪软岩边坡从现状到蓄水至渗流稳定的稳定性演化全过程。

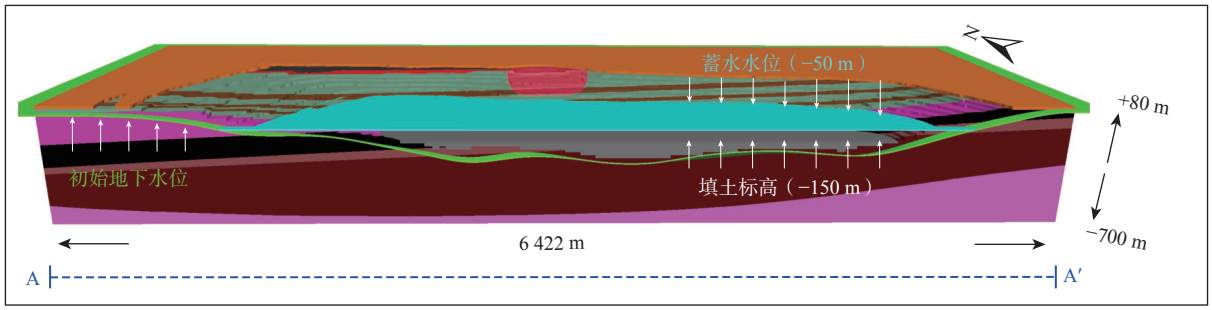
（2）弱化软岩作用分析

采用 Geo-studio 和 FLAC3D 软件，研究弱化软岩作用对边坡影响程度、与水力作用间关系，并综合分析蓄水后软岩边坡的变形破坏特征，前者依托稳定性计算、后者需叠加变形场模拟完成。

故构建矿区“填蓄”边坡变形场计算模型如图 4，模型长 6 422 m，宽 2 890 m，高 780 m，共计 4 081 882 个网格单元，模型中各类岩土体各工况计算参数均取自表 1。



（a）矿区三维地质模型



（b）矿区填土蓄水模型

图 4　矿区填土蓄水数值模型

Fig. 4　Numerical model of filling and impoundment in mining area

边坡稳定性评估中，作为控制变量对照组，引入弱化软岩作用，综合水力作用影响，采用同样计算方法，参考前文算得不同时步下零孔压线（坑内为蓄水线，坡内为浸润线），对水位上下边坡岩土体参数分别取天然与饱和状态值，分析现状、填土至−150 m、蓄水达峰（−50 m）和蓄水后渗流稳定工况下软岩边坡的稳定性。

边坡变形场模拟中，类比本阶段稳定性评估，按相同顺序，将各工况三剖面的地下水位线分别插值成水位面耦合至有限差分模拟，计算工程活动引发的软岩边坡附加位移[30]。

综上，本节涉及全部计算工况可汇总为表 2。

表 2　计算工况一览表

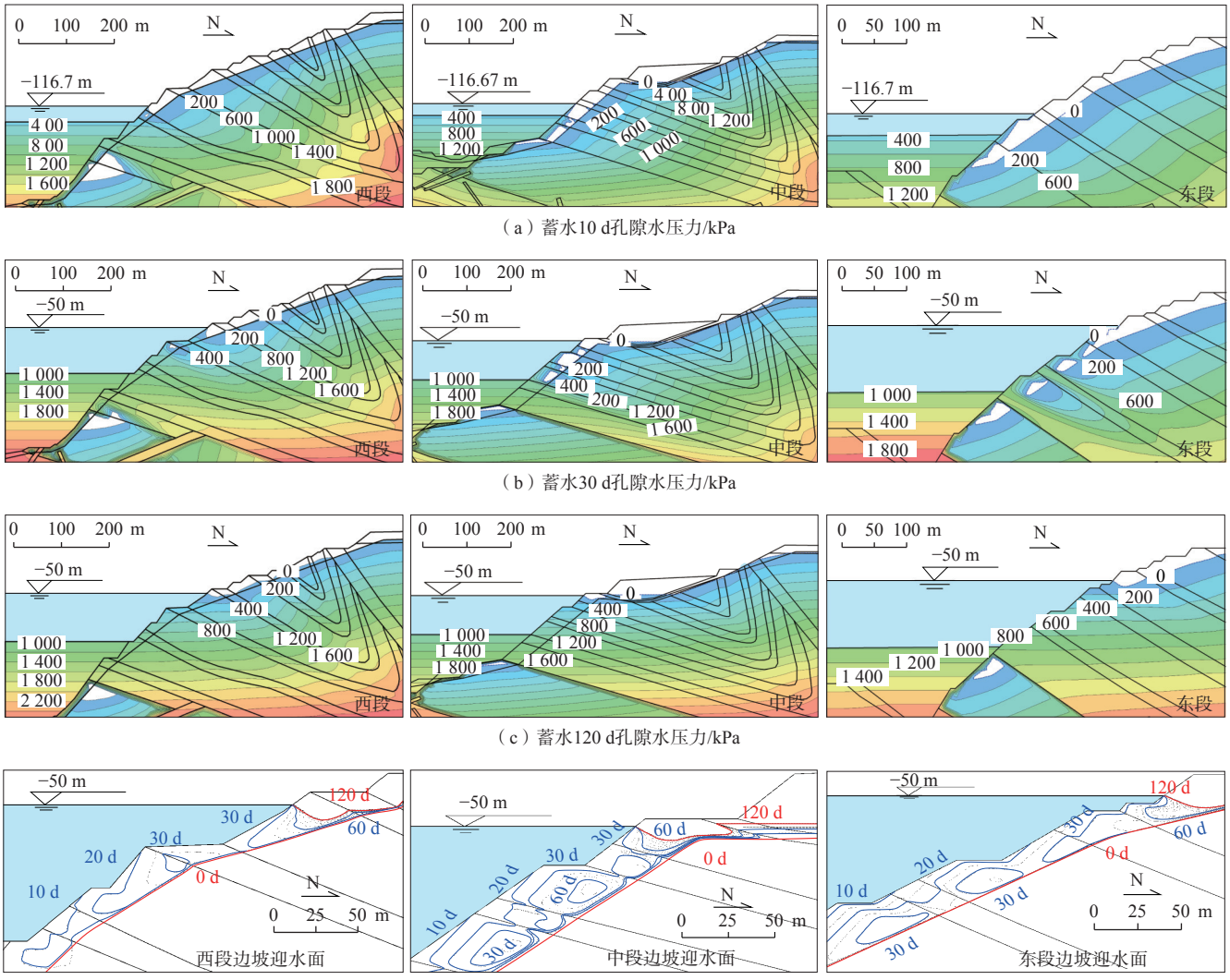
Table 2　Schedule of calculation conditions

工况		天然状态	填土至 −150 m	蓄水至 −50 m	蓄水达峰后渗流稳定
渗流场模拟		√	√	√ 逐日计算	
稳定性	无软岩弱化	√	√	√ 逐日计算	
	软岩弱化	√	√	√ 节点计算	√ 节点计算
变形场模拟		√	√	√ 节点计算	√ 节点计算

3.2　边坡水力响应特征

通过边坡渗流场演化数值分析，在蓄水开始后软岩高边坡不同区段内孔隙水压力和浸润线变化过程如图 5。从矿坑水位变化与边坡孔隙水压力和浸润线变化的关系来看：随着水位上升，边坡内初始潜水位

以上逐渐由干边坡过渡为饱水边坡(图 5a—c),但由于边坡迎水面泥页岩的渗透系数(9×10^{-4} ~ 3×10^{-1} m/d)明显小于蓄水速度(3.33 m/d),地下水水位的上升滞后于库水的上升,浸润线变化滞后于库水位的变化,矿坑蓄积水有向坡体"倒灌"的趋势,此时渗流场属于向内补给型,浸润线上凹且倾向坡体内。在蓄水 30 d 水位达到峰值后,随着时间的增长,"倒灌"效应逐步减弱,浸润线逐渐趋于平缓。



(a)蓄水10 d孔隙水压力/kPa

(b)蓄水30 d孔隙水压力/kPa

(c)蓄水120 d孔隙水压力/kPa

(d)浸润线(迎水面放大)

图 5 蓄水后软岩边坡孔隙水压力和浸润线变化图

Fig. 5 Variations of pore water pressure and phreatic line of the soft rock slope after water storage

从地下水动力学的角度分析,西露天矿蓄水对边坡产生三种力学作用:①静水压脚作用,受限于岩土体渗透系数较小,在蓄水过程中任意时刻,仅极少部分水体向坡内渗流并浸润坡体,未入渗流体则会以静水压力形式作用于浸没坡脚部分,水压大小取决于水深与边坡无关,该作用有利于边坡稳定性;②渗透反压作用,力源为非饱和与饱和交界面渗透压力,由于动水压力产生的渗透力垂直于浸润面,指向坡体内非饱和部分,在某种程度上起到反压的作用,有利于坡体稳定,但随着干边坡趋于饱和而消散;③浮托减重作用,由有效应力原理可知,有效应力随着孔隙水压力的上升而降低,边坡浅部逐渐饱和的过程就是坡体有效自重应力逐渐降低的过程。具体量化体现在稳定性分析中,库水浸润的抗滑段岩体所提供的抗滑力计算取值由天然容重降低为浮容重,并且使岩体饱和增大下滑力,不利于坡体维持稳定。

通过暂不考虑"浸水软岩强度指标"变量的边坡稳定性分析(图 6),表明软岩边坡安全性系数变化与库

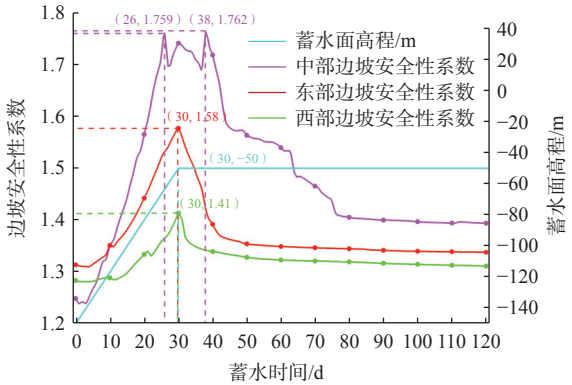


图 6　矿区蓄水至渗流稳定过程中边坡稳定性变化曲线

Fig. 6　Slope stability variation curve during the process from water storage to seepage stability in the mining area

水位的上升存在着明显的对应关系：

（1）在 0 ~ 30 d 期间，矿坑匀速蓄水到−50 m，各边坡稳定性均呈上升态势，且蓄水到既定水位时稳定性也达到峰值，由此可知该阶段静水压脚与渗透反压的合作用>浮托减重作用对边坡抗滑力影响。

（2）在 30 d 之后，矿坑内维持−50 m 水位高程不继续蓄水，边坡稳定性呈指数形式衰减，衰减曲线表现为下凸形。在衰减曲线发生转折（分别为东西段 50 d、中段 80 d）之后，各边坡安全性系数基本逐步趋于定值，此时基本达成渗流稳定状态。该现象说明：①由于 30 d 后矿坑水位不再升高，所以静水压力维持不变，未对边坡稳定增加额外贡献；②在 30 ~ 50/80 d 期间，剥离了水位上升期间静水压力持续增加的影响后，各段边坡稳定性下降，可推知矿坑蓄水至边坡渗流稳定前，浮托减重对边坡稳定性的减小量>静水压脚和渗透反压对边坡稳定性的增加量，即在 0 ~ 50/80 d 期间，水力浮托减重作用>渗透反压作用；③在蓄水 50/80 d 之后，各边坡安全性系数基本不变，说明库水基本完成浸润干边坡过程，浮托减重与渗透反压效应基本相等，可互相抵消；④在整个过程中，稳定性始终较初始值高，说明从蓄水开始到渗流稳定，始终是静水压力起主导作用。

（3）总体而言，0 ~ 50/80 d 内静水压脚作用>浮托减重作用>渗透反压作用；50/80 ~ 120 d 内静水压脚作用>浮托减重作用≈渗透反压作用；0 ~ 120 d 全过程中，静水压脚作用>浮托减重作用>渗透反压作用。即在矿坑蓄水后，不考虑边坡岩体遇水软化的前提下，由于被淹没边坡上方水体区域远大于坡面以下地下水位润湿的干边坡区域，整体上可表现为矿坑蓄水对前缘坡脚阻滑段反压，增大边坡稳定性。

3.3　边坡岩体软化的稳定性和变形破坏响应特征

综合考虑“浸水软岩强度指标”变量和水力作用，边坡稳定性计算结果见表 3，结合前文并对比图 6 分析，可知，矿坑蓄积水对边坡产生 4 种作用：静水压脚、渗透反压、浮托减重和弱化软岩。在同时考虑泥页岩软化效应和前 3 种水力作用时，边坡稳定性明显降低；而未考虑涉水边坡岩体软化时，边坡稳定性有所提升。说明在蓄水全过程中，弱化软岩起主导作用。

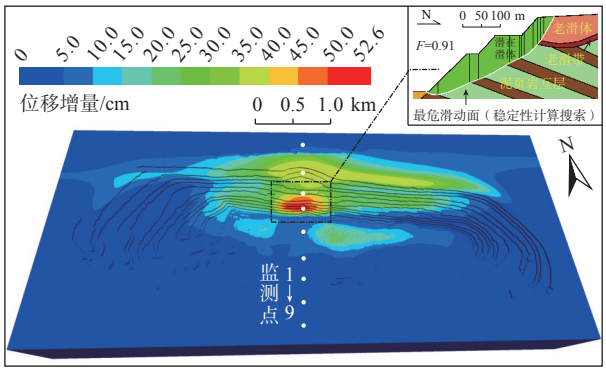
表 3　各工况边坡安全性系数变化表

Table 3　Variation of slope stability coefficient under each working condition

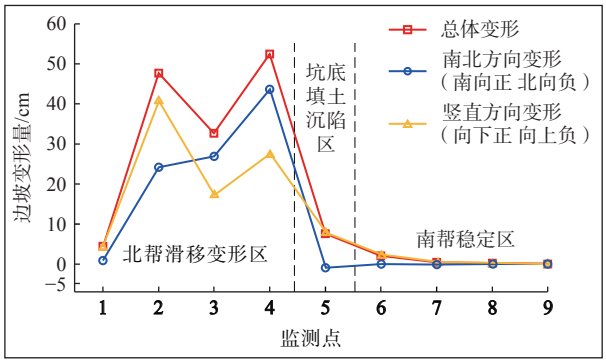
边坡	边坡安全性系数			
	天然状态	填土至−150 m后	蓄水达峰至−50 m后	蓄水后渗流稳定后
东段	1.08	1.31	1.20	1.06
中段	1.01	1.25	1.19	0.91
西段	1.09	1.28	1.18	1.07

此外，填土完成到蓄水达峰阶段边坡稳定性下降量（0.06 ~ 0.11）低于渗流稳定过程（0.11 ~ 0.28）的计算结果，这表明：在蓄水达峰前静水压力快速上升，作用在边坡下部，对于减缓因软岩弱化而引发的边坡稳定性降低发挥了关键作用；而蓄水达峰后的渗流阶段，当静水压力不再增加时，浮托减重和渗透反压对于弱化软岩作用的抵御能力明显削弱，侧面论证了静水压脚在蓄水期起到次主导作用。故蓄水作用对抚顺西露天矿软岩边坡的影响程度依次为弱化软岩、静水压脚、浮托减重和渗透反压。

矿区经历“填蓄”工程后，软岩边坡岩土体变形的模拟结果如图 7 所示。由图 7(a)可知，在蓄水渗流稳定后，西段边坡位移量相对最小且局限于靠近中段边坡的一侧，这是由于在西露天矿闭坑停采之前，从 1992 年起便对矿区西部进行回填，目前矿坑西端帮地形较缓[31]，边坡基本处于稳定状态；东段边坡次之，其后缘位移较大，与西露天矿外围的南阳路上北帮边坡变形后缘拉裂缝位置吻合[32]，整体勉强维持基本稳定；“蓄水”附加变形极值出现在软岩边坡中下部，高达 52.06 cm，且如表 4 所示该边坡稳定性不足（安全性系数 F<1），由失稳转化为滑坡，其最危险滑动面分布在泥页岩层中，潜在滑体后缘自顶部 2016 年“7•26”滑坡体内拉裂，前缘自泥页岩层内切层剪出。综合剖面稳定性和变形模拟计算结果，可知潜在滑坡体长 206.8 m，宽 620.0 m，前后缘高差 155.0 m，滑带平均深度 50.0 m，剖面面积约 6 456.33 m^2，滑坡体积约 133.42 万 m^3。



（a）蓄水后软岩边坡变形增量和潜在滑体



（b）软岩边坡中段变形监测剖面

图 7　蓄水后软岩边坡变形情况

Fig. 7　Deformation situation of the soft rock slope after water storage

综上，经矿区“填蓄”工程后，矿坑北帮软岩边坡中下部的泥页岩高边坡最易失稳。

分析认为，在蓄水后“软岩弱化”程度一致的条件下，该区段滑坡危险性相对最高的原因是：①软岩边坡主要变形区位于坡体下部，自东向西坡角依次为 27.9°、35.4°和 23.3°，中下部坡形最陡，重力部分提供的抗滑力与下滑力比值相对最低；②中段以及西段边坡内泥页岩地层受浑河断裂牵引形成复向斜褶皱，与东段的北倾单斜泥页岩地层相比，在岩体完整性、坡体结构复杂性方面，均不利于坡体稳定；③2016 年抚顺西露天矿“7•26”滑坡以中段下部泥页岩边坡为滑床[12]，受滑坡振动影响，该段边坡上部泥页岩体和顶部残留滑坡堆积体，较两侧边坡岩体相对结构松散，抗剪强度更低。因此，受坡形、岩体质量、坡体结构和历史扰动四方面因素控制，蓄水后该边坡稳定性相对较差。

易失稳区段软岩边坡变形破坏的特征，可通过提取监测点处位移，分析边坡表面变形监测曲线（图 7b）得知。①北帮中段边坡变形集中在坡脚和坡顶，前者变形量大。坡脚处局部边坡（监测点 3、4）兼具南向和沉陷变形，呈滑移式变形特征，变形机理为坡脚蓄水区泥页岩软化，且应力最集中，故率先滑动；坡顶（监测点 2）以沉降为主，南向变形为辅，呈座落沉陷式变形特征，变形机理为北倾 F1 断层贯穿变形中心，在下部边坡滑移牵引作用下，F1 断层发生向南倾倒旋转变形，由断层隔绝的上下盘地质体变形响应速率不一致，上盘砂砾岩楔形体滞后，断层处局部“脱空”，故坡顶变形主要受重力影响，沉陷变形大。因此，北帮中段边坡整体呈现“滑移-沉陷式”变形模式。②北帮中下部潜在最危滑面以上岩土体（监测点 3、4）变形趋势一致，但越靠近坡底蓄水越早，变形越先发生，变形量越大，故下部高陡边坡表现出“牵引式”滑坡破坏模式。

4　边坡防护对策建议

矿区蓄水以后，地质环境条件发生了改变，地质灾害风险防控面临新的形势：矿坑软岩边坡稳定性降低，北帮中下部区段具有较高的失稳滑坡概率；而且由于矿坑深大，蓄水湖作为该滑坡体堆排的主要空间，矿区还将存在由此滑坡引发涌浪次生灾害的可能，建议采取以下针对性的工程处置和监测措施，降低灾害风险。

（1）蓄水后的矿山边坡同属煤矿边坡和水库岸坡，按煤炭工业露天矿设计规范（GB 50197—2015）[33] 和水利水电工程边坡设计规范（SL 386—2007）[34] 要求，根据边坡规模、重要性、服务年限以及失稳后危害程度，可将其划定为服务年限大于 20 a 的采掘场最终边坡和水库长期临水的 1 级边坡，设计稳定系数需达 1.3 方可满足安全储备。

（2）据西露天矿边坡治理经验，回填和削坡成本优势最高[35－36]。对比不同回填压脚和削坡减载方案下软岩边坡潜在失稳区段的稳定性和工程适宜性计算结果（表 4），可知：调整填土措施，提升坑底填土至 −100 m，或维持填土设计不变，补充削坡措施，削减北帮坡度至 20°之后蓄水，易失稳边坡稳定性可提高至 1.3。

表 4　不同方案下潜在失稳边坡稳定性及工程量

Table 4　Stability and construction quantities of potential unstable slope under different schemes

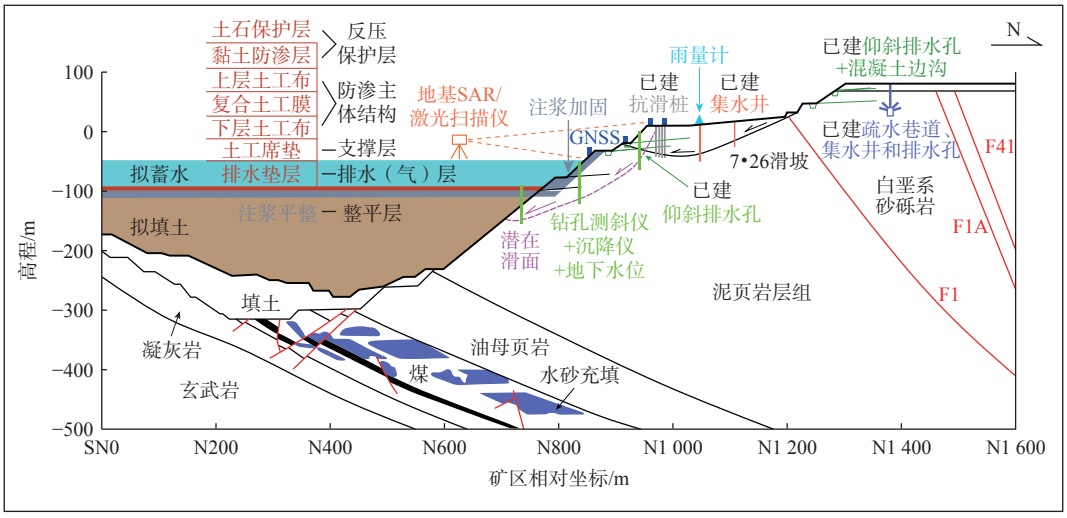
填土高度/m	安全性系数	填方量/(m³·m⁻¹)	削坡坡度/(°)	安全性系数	挖方量/(m³·m⁻¹)	坡肩后退距/m
−150	0.911	24 501	45	0.911	0	0
−140	1.013	3 111	35	1.047	1 420.2	0
−120	1.177	9 399	30	1.082	4 456.7	0
−100	1.333	17 098	25	1.269	8 598.1	0
−80	1.452	23 917	20	1.393	20 487.0	85.5

前者填方量较少，后者挖方规模大，且存在坡肩后退占用发电厂等城市用地的问题，故填土措施优势显著。

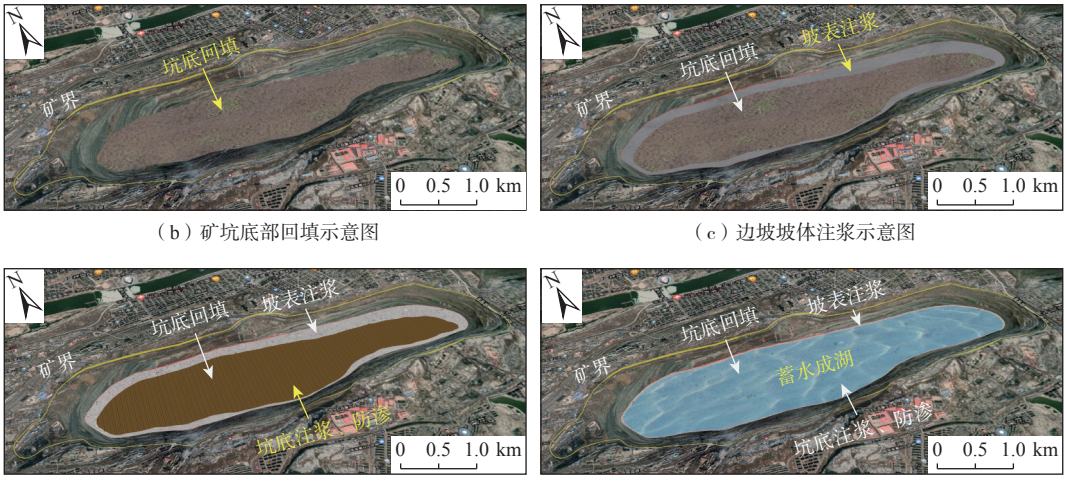
此外，北帮东西段软岩边坡在填土至−150 m 后蓄水至−50 m 的填蓄条件下，处于基本稳定状态，仅能满足临时工作帮边坡需求。经分析，调整填土高度至−100 m 后蓄水，软岩边坡东、中、西段均可满足安全储备，且工程经济适宜性相对最佳。研究过程同前文一致，限于篇幅不再展开。

（3）从边坡工程治理效果角度考虑，相比削坡减载，西露天矿软岩边坡稳定性对回填压脚的敏感性更高；从边坡失稳致灾因素方面考虑，相比蓄水带来的附加水力学效应，边坡泥页岩的强度水敏性更为突出，应加强边坡的防渗处置。

因此，建议抚顺西露天矿“蓄水成湖”改造工程中，首先于矿坑底部填土至−100 m，并结合边坡加固、库盆（填土顶面和边坡坡面）防渗与排水工程措施，随后再进行矿坑蓄水至−50 m（图 8）。其中，坑底回填起到的反压边坡坡脚、改善蓄水后边坡受力状态作用和坡体防渗起到的阻隔水岩、防止软岩劣化作用将是维持边坡稳定、防范灾害发生的关键。



（a）软岩边坡潜在灾害防治工程建议图



（b）矿坑底部回填示意图　（c）边坡坡体注浆示意图

（d）矿坑底部防渗示意图　（e）矿坑蓄水成湖示意图

图 8　矿坑软岩边坡潜在灾害防治建议

Fig. 8　Suggestion for potential disaster prevention of the soft rock slope in the open-pit mine

（4）西露天矿软岩边坡在以往采动期间滑坡频发，现已对该坡段内建立了完善的“空天地”一体化监测网络。在后续矿坑蓄水改造施工和长期运营阶段仍应配合日常巡排查，全面持续监测，并在易失稳区段加密监测，尽早形成新环境下“人防+技防”模式，长期发挥防灾作用。

对于易失稳区段软岩边坡，建议沿主滑方向布设监测剖面 1 条（图 8a），包括 1 台激光雷达扫描仪和边

坡 SAR 定期扫描用于坡表大型裂缝发育程度和坡面整体变形监测，4 台 GNSS 位移监测站开展地表形变监测，3 个综合监测孔进行深部位移和地下水波动监测，1 台雨量计监测潜在滑坡区降水量，结合库水位观测记录，构成了一套囊括隐患早期识别（裂缝和坡表变形监测）、失稳破坏预警（综合变形监测）、滑带深度控制（深部变形监测）和滑坡诱因分析（降雨、库水、地下水位监测）的专业边坡监测系统。

对于不同的监测阶段，在施工监测期，需及时掌握坑底回填、坡面加固和蓄水过程中软岩边坡应力、变形、地下水位等关键指标情况，判断边坡状态，用以反馈设计、指导施工，实现矿坑改造的动态设计与信息化施工，有效控制施工安全风险；在运营监测期，要结合现有监测体系，补充降水、库水波动监测项目，研究边坡变形影响因子和边坡位移的关系，确定影响边坡稳定的核心因素。并建立软岩边坡变形的中长期预测模型、制定软岩边坡失稳的中短期预报预警标准，服务运营期软岩边坡灾变防控。

5 结论

（1）结合边坡渗流和稳定性分析可知，矿坑蓄水对软岩边坡产生 4 方面影响，按作用效果排序为：弱化软岩、静水压脚、浮托减重和渗透反压。其中，弱化软岩和浮托减重不利于边坡维稳，静水压脚和渗透反压有利于边坡稳定，弱化软岩是蓄水后软岩边坡稳定性下降乃至失稳滑坡的根本原因。

（2）矿区同等“填蓄”改造强度下，软岩边坡中段下部稳定性最差，易发泥页岩切层滑坡。如“填土至 −150 m、蓄水至−50 m”工况，矿坑软岩边坡东西段基本稳定，中段存在潜在滑体，长约 207 m，宽约 620 m，前后缘高差约 155 m，滑带平均深度 50 m，滑体规模约 133.4 万 m^3。

（3）抚顺西露天矿蓄水后岩体遇水弱化是软岩边坡稳定性下降的主因，坑底填土改善边坡受力状态是稳定性提升的有效措施。故在矿坑“蓄水成湖”改造工作中，矿坑边坡失稳预防的关键是“岩体隔水防渗”和“边坡坡脚加压”。

文章以抚顺西露天矿为例，提供了一种矿坑蓄水场景下软岩边坡失稳机制的分析思路，但尚存在泥页岩软化过程不清、“填蓄”工况概化等不足。今后研究需进一步关注边坡软岩弱化损伤规律与机理，细化计算过程，丰富应用场景，以供软岩边坡灾害防治参考。

参考文献（References）：

[1] 王涛，吴树仁，石菊松，等. 国内外典型工程滑坡灾害比较[J]. 地质通报，2013，32(12)：1881 − 1899.［WANG Tao，WU Shuren，SHI Jusong，et al. A comparative study of typical engineering landslide disasters both in China and abroad[J]. Geological Bulletin of China，2013，32(12)：1881 − 1899.（in Chinese with English abstract）］

[2] FROUDE M J，PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences，2018，18(8)：2161 − 2181.

[3] 毛正君，毕银丽，李成，等. 渭北石灰岩露天采区高陡边坡破坏模式及形态优化研究[J]. 西北地质，2021，54(4)：211 − 226.［MAO Zhengjun，BI Yinli，LI Cheng，et al. Study on failure mode and shape optimization of high and steep slope of open-pit limestone mining area in Weibei[J]. Northwestern Geology，2021，54(4)：211 − 226.（in Chinese with English abstract）］

[4] AN Bei，WANG Changcheng，LIU Chen，et al. A multi-source remote sensing satellite view of the February 22nd Xinjing landslide in the mining area of Alxa left Banner，China[J]. Landslides，2023，20(11)：2517 − 2523.

[5] OZBAY A，CABALAR A F. FEM and LEM stability analyses of the fatal landslides at Çöllolar open-cast lignite mine in Elbistan，Turkey[J]. Landslides，2015，12(1)：155 − 163.

[6] YIN Yueping，HUANG Bolin，CHEN Xiaoting，et al. Numerical analysis on wave generated by the Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir，China[J]. Landslides，2015，12(2)：355 − 364.

[7] BELLONI L G，STEFANI R. The Vajont slide：Instrumentation—Past experience and the modern approach[J]. Engineering Geology，1987，24(1/2/3/4)：445 − 474.

[8] 孟晖，胡海涛. 我国主要人类工程活动引起的滑坡、崩塌和泥石流灾害[J]. 工程地质学报，1996，4(4)：69 − 74.［MENG Hui，HU Haitao. Disasters of landslides，rockfalls，and mudflows induced by human engineering in China[J]. Journal of Engineering Geology，1996，4(4)：69 − 74.（in Chinese with English abstract）］

[9] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评，2014，60(4)：858 − 868.［LIU Chuanzheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geological Review，2014，60(4)：858 − 868.（in Chinese with English abstract）］

[10] 王佳佳，陈浩军，肖莉丽，等. 大型水库区桥基边坡稳定性与失稳运动特征[J]. 水文地质工程地质，2024，

51(3)：130 − 139. ［WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, et al. Stability and motion characteristics of bridge slope in the large reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3)：130 − 139.（in Chinese with English abstract）］

［11］ 安雪莲，密长林，孙德亮，等. 基于不同评价单元的三峡库区滑坡易发性对比——以重庆市云阳县为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024, 54(5)：1629 − 1644. ［AN Xuelian, MI Changlin, SUN Deliang, et al. Comparison of landslide susceptibility in Three Gorges Reservoir area based on different evaluation units—Take Yunyang County in Chongqing as an example[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(5)：1629 − 1644.（in Chinese with English abstract）］

［12］ MENG Huajun, WU Jihuan, ZHANG Chunshan, et al. Mechanism analysis and process inversion of the “7·26” landslide in the west open-pit mine of Fushun, China[J]. Water, 2023, 15(14)：2652.

［13］ 陶志刚，孟祥臻，马成荣，等. 南芬露天采场楔形滑坡机理及滑动力监测预警分析 [J]. 煤炭学报，2017, 42(12)：3149 − 3158. ［TAO Zhigang, MENG Xiangzhen, MA Chengrong, et al. Analysis of wedge-shaped landslide mechanism and sliding force monitoring warning in Nanfen open pit iron mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12)：3149 − 3158.（in Chinese with English abstract）］

［14］ 李长冬，龙晶晶，姜茜慧，等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望 [J]. 地质科技通报，2020, 39(1)：67 − 77. ［LI Changdong, LONG Jingjing, JIANG Qianhui, et al. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1)：67 − 77.（in Chinese with English abstract）］

［15］ WOLTER A, STEAD D, WARD B C, et al. Engineering geomorphological characterisation of the Vajont slide, Italy, and a new interpretation of the chronology and evolution of the landslide[J]. Landslides, 2016, 13(5)：1067 − 1081.

［16］ 杨正荣，喜文飞，史正涛，等. 基于 SBAS-InSAR 技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2022, 33(5)：83 − 92. ［YANG Zhengrong, XI Wenfei, SHI Zhengtao, et al. Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan hydropower station based on SBAS-InSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5)：83 − 92.（in Chinese with English abstract）］

［17］ 裴向军，何如许，朱利君，等. 锦屏一级水电站左岸边坡蓄水变形响应研究 [J]. 中国农村水利水电，2019(10)：139 − 147. ［PEI Xiangjun, HE Ruxu, ZHU Lijun, et al. Research on the deformation response of left slope of Jinping I hydropower station influenced by impoundment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(10)：139 − 147.（in Chinese with English abstract）］

［18］ 李鹏岳，巴仁基，倪化勇，等. 库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析 [J]. 地质力学学报，2017, 23(2)：288 − 295. ［LI Pengyue, BA Renji, NI Huayong, et al. Simulation analysis of the influence of the reservoir water level fluctuation rate on the stability of Shuangjiaping accumulation landslide in Ya’an[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2)：288 − 295.（in Chinese with English abstract）］

［19］ 白洁，巨能攀，张成强，等. 苗尾水电站赵子坪岸坡变形失稳的地下水动力作用分析 [J]. 水文地质工程地质，2019, 46(4)：159 − 166. ［BAI Jie, JU Nengpan, ZHANG Chengqiang, et al. Dynamic analyses of groundwater on the deformation and instability of the Zhaoziping bank slope near the Miaowei hydropower station[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4)：159 − 166.（in Chinese with English abstract）］

［20］ 吴季寰，张春山，孟华君，等. 抚顺西露天矿区滑坡易发性评价与时空特征分析 [J]. 地质力学学报，2021, 27(3)：409 − 417. ［WU Jihuan, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. Temporal and spatial characteristics of landslide susceptibility in the west open-pit mining area, Fushun, China[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(3)：409 − 417.（in Chinese with English abstract）］

［21］ 辽宁省水利厅. 省水利厅部署抚顺西露天矿蓄水成湖可行性初步研究工作 [EB/OL].（2020-11-18）[2024-01-12]. ［Liaoning Provincial Department of Water Resources. Preliminary feasibility study on water storage and lake formation in Fushun west open-pit mine deployed by the provincial department of water resources[EB/OL].（2020-11-18）[2024-01-12]. Https://slt.ln.gov.cn/slt/zwgk/zfxxgk/fdzdgknr/zdxm/ssqk/753CD81C284F4C52A9C1ACEF274C157F/index.shtml.（in Chinese）］

［22］ 罗恩华，马淑杰，李华，等. 抚顺西露天矿综合治理与整合利用总体思路 [R]. 北京：中国国际工程咨询有限公司，2020. ［LUO Enhua, MA Shujie, LI Hua, et al. Overall ideas for comprehensive management and integrated utilization of Fushun west open-pit mine[R]. Beijing: China International Engineering Consulting Limited Company, 2020.（in Chinese）］

［23］ 李凤明，王宏，胡炳南，等. 抚顺西露天矿地质灾害综合治理可行性研究 [R]. 北京：中煤科工集团土地整治与生态修复科技研究院有限公司，2020. ［LI Fengming, WANG Hong, HU Bingnan, et al. Feasibility study on comprehensive management of geological hazards in Fushun west open-pit mine[R]. Beijing: China Coal Science and Industry Group Land Improvement and

Ecological Restoration Technology Research Institute, 2020.(in Chinese)]

[24] 杨霄霄, 关李海, 赵杰君, 等. 抚顺西露天矿综合治理与整合利用方案研究: 蓄水成湖方案[R]. 北京: 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 2021. [YANG Xiaoxiao, GUAN Lihai, ZHAO Jiejun, et al. Research on comprehensive management and integrated utilization plan of Fushun west open-pit mine: Water storage and lake formation plan[R]. Beijing: China Electric Power Construction Group Beijing Survey, Design and Research Institute, 2021.(in Chinese)]

[25] ZHANG Fei, YANG Tianhong, LI Lianchong, et al. Cooperative monitoring and numerical investigation on the stability of the south slope of the Fushun west open-pit mine[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(4): 2409 − 2429.

[26] 靳鹏, 申力, 韩晓极, 等. 辽宁抚顺西露天矿地质灾害时空分布特征及影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 68 − 76. [JIN Peng, SHEN Li, HAN Xiaoji, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of geological disasters in the open-pit mining area of western Fushun, Liaoning Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 68 − 76.(in Chinese with English abstract)]

[27] 辽宁水利土木工程咨询有限公司. 抚顺西露天矿蓄水成湖可行性研究方案结果公告[EB/OL].(2021-12-07)[2024-01-12]. [Liaoning Water Conservancy and Civil Engineering Consulting Limited Company. Announcement of feasibility study plan results for water storage and lake formation in Fushun west-open pit mine[EB/OL]. (2021-12-07)[2024-01-12]. https://www.ccgp.gov.cn/cggg/dfgg/zbgg/202112/t20211207_17337593.htm.(in Chinese)]

[28] 孙广明, 胡高建, 肖平, 等. 抚顺西露天矿边坡岩体强度计算及质量分级研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 36 − 41. [SUN Guangming, HU Gaojian, XIAO Ping, et al. Study on strength calculation and quality grading of slope rock in Fushun west open pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 36 − 41.(in Chinese with English abstract)]

[29] 刘传正, 崔原, 陈春利, 等. 辽宁抚顺西露天矿南帮滑坡成因[J]. 地质通报, 2022, 41(5): 713 − 726. [LIU Chuanzheng, CUI Yuan, CHEN Chunli, et al. Research on the south side landslide at west open-pit coal mine in Fushun City, Liaoning Province of China[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 713 − 726.(in Chinese with English abstract)]

[30] 殷跃平, 张晨阳, 闫慧, 等. 三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 649 − 659. [YIN Yueping, ZHANG Chenyang, YAN Hui, et al. Research on seepage stability and prevention design of landslides during impoundment operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 649 − 659.(in Chinese with English abstract)]

[31] 马兴德, 冯萍. 抚顺西露天矿内排土场生态修复区地质灾害防治[J]. 露天采矿技术, 2022, 37(4): 98 − 100. [MA Xingde, FENG Ping. Prevention and control of geological hazards in ecological restoration area of internal dump in Fushun west open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(4): 98 − 100.(in Chinese with English abstract)]

[32] 王宏飞. 抚顺市区地裂缝分布特征, 成因机制及活动性预测模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. [WANG Hongfei. Study on distribution characteristics, genetic mechanism and activity prediction model of ground fissures in Fushun city[D]. Changchun: Jilin University, 2017.(in Chinese with English abstract)]

[33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤炭工业露天矿设计规范: GB 50197—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of open pit mine of coal industry: GB 50197—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.(in Chinese)]

[34] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for engineered slopes in water resources and hydropower projects: SL 386—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.(in Chinese)]

[35] 王凤林, 王东明, 杨天鸿, 等. 抚顺西露天矿软硬岩互层反倾岩体边坡稳定性分析及治理[J]. 金属矿山, 2022(1): 162 − 169. [WANG Fenglin, WANG Dongming, YANG Tianhong, et al. Stability analysis and treatment of anti-dip rock slope interbedded with soft and hard rock in Fushun west open-pit mine[J]. Metal Mine, 2022(1): 162 − 169.(in Chinese with English abstract)]

[36] 谢江, 王金安, 孙阳, 等. 基于改进 AHP 方法的西露天矿区地质稳定性评价[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11): 21 − 27. [XIE Jiang, WANG Jin'an, SUN Yang, et al. Evaluation of geological stability of western open-pit mining area based on improved AHP method[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 21 − 27.(in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真