

# 基于监测和数值模拟的白音华凸台边坡 变形稳定性分析

李志国<sup>1</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 刘永杰<sup>2</sup>, 李敬国<sup>3</sup>, 于海里<sup>3</sup>, 董强<sup>2</sup>, 付腾飞<sup>1</sup>, 赵博<sup>1</sup>

(1. 东北大学岩石破裂与失稳研究所, 辽宁沈阳 110819;

2. 国家电投内蒙古公司, 内蒙古通辽 029200;

3. 内蒙古自治区白音华蒙东露天煤业有限公司, 内蒙古锡林郭勒 026000)

**摘要:** 因采矿权原因白音华三号露天矿东北部形成了三面解除约束的凸台状边坡, 凸台边坡的稳定性严重影响并制约着矿山的安全高效生产。本文采用 GPS 现场监测与三维数值模拟相结合的方法, 首先开展了采动条件下凸台边坡变形稳定性的现场监测和三维数值模拟对比分析研究, 数值模拟结果与现场监测数据吻合较好。进一步探究了凸台边坡南侧回填和北侧开采对凸台边坡变形的影响。研究表明, 凸台前端及边坡底部变形较大, 凸台边坡没有产生明显的贯通性剪切变形, 随着凸台边坡南侧回填和北侧煤炭开采, 凸台边坡前端变形量逐渐减小, 主要变形区域逐渐向凸台边坡东帮移动。本文研究工作及时有效地对边坡稳定性进行评价并为边坡变形治理提供参考。

**关键词:** 凸台边坡; 监测数据; 三维地质模型; 边坡稳定性; 数值模拟

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2022)S1-0084-09

## Deformation stability analysis of Baiyinhua convex slope based on field monitoring and numerical simulation

LI Zhiguo<sup>1</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, LIU Yongjie<sup>2</sup>, LI Jingguo<sup>3</sup>, YU Haili<sup>3</sup>, DONG Qiang<sup>2</sup>, FU Tengfei<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>

(1. Center for Rock Instability & Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Tongliao Branch, State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd.,

Tongliao 029200, China;

3. Inner Mongolia Baiyinhua Mengdong Open-pit Coal Industry Co., Ltd., Xilingol 026000, China)

**Abstract:** The convex slope with three unconstrained sides is formed in the northeast of Baiyinhua No. 3 Open-Pit Mine due to mining reasons. The stability of the convex slope seriously affects and restricts the safe and efficient production of the open-pit mine. In this paper, GPS field monitoring and three-dimensional numerical simulation are combined to comparatively analyze the deformation stability of the convex slope under mining conditions. The numerical simulation results are in good agreement with the field monitoring data. The influence of the south side backfilling and the north side mining on the deformation of the convex slope is further studied. The research show that the deformation of the head of the convex and the bottom of the slope is large, and the convex slope does not produce obvious penetrating shear deformation. With the back filling of the south side of the convex slope and the mining of the north slide, the deformation of the

**收稿日期:** 2022-04-29 **责任编辑:** 刘硕

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(编号:42172312;51974062)

**第一作者简介:** 李志国(1997—),男,硕士研究生,主要从事边坡稳定性研究工作,E-mail:1036399974@qq.com.

**通讯作者简介:** 徐涛(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事岩石破裂与失稳方面的研究工作,E-mail:xutao@mail.neu.edu.cn.

**引用格式:** 李志国,徐涛,刘永杰,等.基于监测和数值模拟的白音华凸台边坡变形稳定性分析[J].中国矿业,2022,31(S1):84-92. doi:10.12075/j.issn.1004-4051.2022.S1.060

LI Zhiguo, XU Tao, LIU Yongjie, et al. Deformation stability analysis of Baiyinhua convex slope based on field monitoring and numerical simulation[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(S1): 84-92. doi:10.12075/j.issn.1004-4051.2022.S1.060

front end of the boss slope decreases gradually, and the main deformation area will move to the east side of the convex slope. In this paper the stability of slope is evaluated effectively and timely, and the treatment of slope deformation can be referenced. The work presented in this paper can effectively and timely evaluate the slope stability and provide a reference for the deformation control of the slope.

**Keywords:** convex slope; monitoring data; three dimensional geological model; slope stability; numerical simulation

露天矿边坡滑坡失稳灾害是影响露天矿安全生产的主要灾害之一。针对有滑坡趋势的边坡, 企业往往会花费巨资用于矿山边坡变形的监测预警及治理, 有时候不得不修改原有开采方案以应对边坡变形<sup>[1-2]</sup>。大型边坡的稳定性评价一直是岩土工程领域研究的热点问题, 许多学者从边坡工程地质、边坡监测、理论分析、数值模拟等方面进行了大量的研究<sup>[3-5]</sup>。边坡变形监测按照监测位置一般分为地表位移监测和地下位移监测, 地表变形监测技术主要包括数字近距离摄影测量技术、GNSS 监测技术、地面三维激光扫描系统、全站仪监测技术、地基合成孔径雷达技术、InSAR 监测技术等<sup>[6-9]</sup>, 地下变形监测主要包括时域反射测量技术、钻孔测斜仪监测技术、多点伸长计监测技术、声发射监测等<sup>[10-13]</sup>。边坡变形监测可以直观地反映边坡变形信息, 但是不能提供边坡变形过程中岩土体内部的应力变化情况, 数值模拟为从力学角度分析边坡变形提供了新的途径。随着计算机计算能力的不断提高, 人们对大型边坡的数值计算的准确度要求也越来越高。李澜堃等<sup>[14]</sup>针对中国大孤山铁矿构建了亿级自由度精细化网格模型, 并基于 RFPA3D-Parallel 数值模拟软件的高效并行求解迭代计算方法, 成功模拟了大孤山露天矿西北帮楔形体滑坡的孕育、形成过程。刘春等<sup>[15]</sup>基于具体滑坡实例提出了一种三维大规模滑坡离散元建模与数值模拟方法, 模拟得出了滑坡启动、高速下滑和堆积的全过程。大规模三维模型数值分析可以提供边坡变形过程中应力的空间分布情况, 同时矿山实际监测信息也可以对数值模拟结果进行验证, 因此, 有必要采用监测技术与数值模拟相结合的方案对大型边坡变形进行协同分析。

基于此, 本文以国家电力投资集团白音华三号露天矿凸台边坡为实例, 基于 Rhino 软件 (含 Griddle 插件) 建立露天矿大型三维数值模型, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对凸台边坡变形及稳定性进行了数值研究, 获得岩石边坡在不同水平下的变形规律, 同时将现场监测数据与模拟结果进行对比, 采用数值模拟与现场监测相结合的分析方法对白音华三号露天矿边坡进行稳定性分析, 进一步研究了凸台边坡南

侧回填和北侧开采对凸台边坡变形的影响, 以期为矿区边坡变形治理提供支持, 同时为类似大型露天矿边坡监测和潜在灾害防治提供参考。

## 1 工程背景

白音华三号露天矿位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗, 矿区长度约 14.25 km, 平均宽度 3.8 km, 矿区抵触内蒙古高原大兴安岭西坡南段北侧, 系丘陵低山区。由于采矿权原因, 在矿区东北帮形成了面积约 1 km<sup>2</sup> 的凸台, 如图 1 所示, 凸台边坡三面解除约束, 对边坡稳定性极为不利。过去几年在东北帮凸台边坡北侧 985~937 m 水平出现多处变形区, 对煤炭的开采造成极为不利的影 响。根据已有的地质报告, 白音华三号露天矿露天矿主体构造形态为一不完整的走向北 40°东、倾角 1°~8°的宽缓向斜, 中部为一同沉积隆起 (背斜), 与主体构造复合, 使全井田的构造形态呈“马鞍”状, 形成“两凹一隆”的构造格局<sup>[16]</sup>。



图 1 白音华三号露天矿凸台边坡俯瞰图及研究区  
Fig. 1 Vertical view and study area of convex slope of Baiyinhu NO. 3 open-pit mine

## 2 现场监测

GPS 监测可以完成沿边坡各个方向的监测, 为了更准确分析边坡沿各个方向的变形, 重点分析 GPS 监测技术所得的数据。白音华三号露天煤矿凸台边坡附近监测点位经过了若干次的调整, 所以选取了北帮边坡存在明显变形的一个相对集中的时

间区段进行分析,即 2020 年 11 月 1 日—2021 年 7 月 11 日,监测点分布如图 2 所示。其中,NO. 13 点位、NO. 16 点位、NO. 20 点位为现场 GPS 监测点,NO. 21 点位为边坡底部发生底鼓点位,NO. 16 点位位于凸台边坡的前端中部,其变形具有较大的参考意义,NO. 16 点位竖直方向变形速度和水平方向变形速度如图 3 所示,边坡整体变形速度较小,均小于 5 mm/d,随着时间的增加,边坡变形逐步趋于稳定。

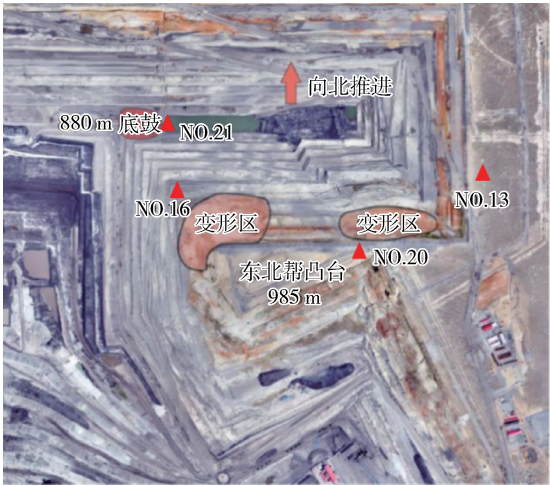


图 2 白音华三号露天矿凸台边坡监测点位  
Fig. 2 Monitoring points of convex slope in Baiyinhua NO. 3 open-pit mine

### 3 数值模型构建

#### 3.1 露天矿边坡地质模型

白音华三号露天矿岩(土)体地层较为简单,自上而下分布为第四系褐黑色腐植土、浅黄~褐黄色

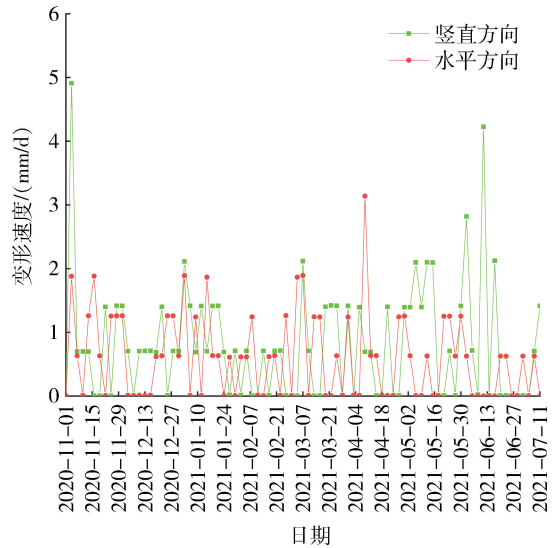


图 3 NO. 16 点位变形速度  
Fig. 3 Deformation velocity at NO. 16 point

砂土组成、第三系黏土或砂质黏土、泥岩层、煤层、泥砂岩互层等主要岩层。岩层剖面如图 4 所示,主采煤层由 2-1 中煤层、2-1 下煤层、3-1 煤层、3-2 煤层、3-3 煤层五层煤。为了更直观显现白音华露天矿地质结构的形态,同时为了后续对凸台边坡进行稳定性分析计算,基于白音华三号露天煤矿岩层结构剖面图、地表无人机 DEM 图,利用 3DMine 和 Rhino 软件建立了包含凸台边坡在内的白音华三号露天矿整体精细化三维地质模型,为了建模便利,将炭质泥岩、砂质泥岩等岩层统一化为泥岩进行建模,地质模拟还原了白音华三号露天矿的岩层分布以及现场台阶高度等边坡几何形态信息,如图 5 所示。

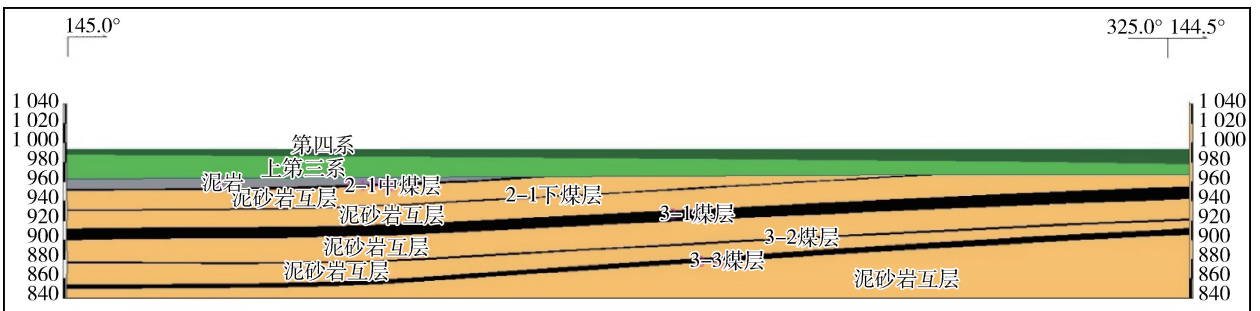


图 4 白音华三号露天矿地质剖面  
Fig. 4 Geological section of Baiyinhua NO. 3 open-pit mine

#### 3.2 边坡数值计算模型

本文研究数值模拟主要通过 FLAC<sup>3D</sup> 软件实现凸台边坡稳定性分析。FLAC<sup>3D</sup> 软件是一款广泛应用于岩土工程中的三维数值模拟软件,其求解过程采用显示有限差分格式。有限差分法基于连续介质力学的广义胡克定律和几何方程,通过计算得到任

意时刻节点的速度、位移、单元应变及应力<sup>[17]</sup>。

选取东北帮凸台边坡为研究对象,根据边坡等高线以及岩层线剖面生成东北帮凸台边坡地质模型后,然后利用 Griddle 插件通过调整网格的几何参数优化网格质量,导出能到直接导入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件的网格文件,边坡计算模型南北方向为 3 330 m,东西

方向为 2 340 m, 高为 540 m, 包含 150 万个单元, 根据现场地质勘测结果, 在边坡模型中划分不同岩性的岩层, 得到最终用于计算的边坡数值模型(图 6)。

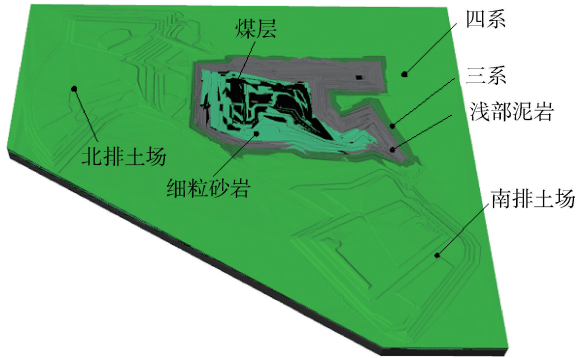


图 5 白音华三号露天矿地质模型

Fig. 5 Geological model of Baiyinhu NO. 3 open-pit mine

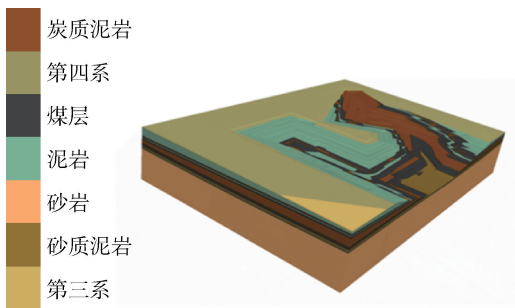


图 6 凸台边坡数值计算模型

Fig. 6 Numerical model of convex slope

数值模拟的一个明显优势就是可以考虑初始地应力的影响, 由于本次研究凸台边坡深度较浅(模型总高度 540 m)且凸台边坡区域没有较大的断层, 所以此次研究假设初始地应力仅由岩、土体的自重作用产生, 忽略岩体内部的构造应力, 在纯重力作用下首先采用弹性求解法求解初始地应力, 待计算平衡后采用摩尔-库伦弹塑性本构模型研究凸台边坡变形<sup>[18]</sup>。设置加载方向为竖直向下的重力加速度为  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。白音华三号露天矿凸台研究区域是从整个矿区模型中剥离出了一部分, 处于整个矿区模型的“包裹”之中, 四周边界不会发生大的错动位移, 且本文只考虑静态分析条件下的边坡稳定性, 故对研究区域模型底面边界固定, 四周施加法向位移约束。

综合分析白音华三号露天矿以往各阶段所取得研究成果、滑坡反分析成果及类比相关指标数据后, 本文研究推荐的岩层物理力学指标见表 1。

### 3.3 凸台边坡模拟结果

模型计算平衡后得到的凸台边坡整体最大剪切应变增量云图及所选择的各个剖面(#1 剖面、#2 剖面、#3 剖面、#4 剖面和 #5 剖面)的最大剪切应变增

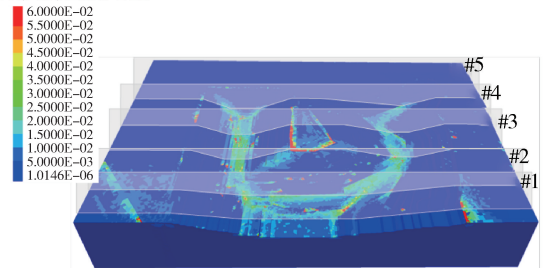
量云图如图 7 所示, 可以看出凸台边坡没有产生明显的贯通性剪切变形, 潜在破坏区域主要集中在凸台边坡北帮底部、凸台边坡坡顶和北帮边坡与西帮交界区域。这些区域应该是监测的重点区域。

表 1 岩层物理力学参数表

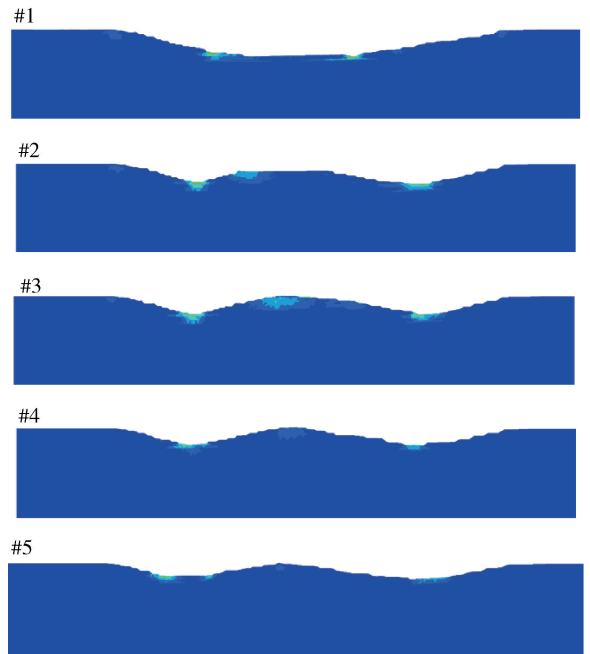
Table 1 Physic-mechanical parameters of strata

岩层	容重 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
第四系	18.90	5	15.8
第三系	19.90	10	16.1
炭质泥岩	20.50	15	19.6
泥岩	20.00	35	23.6
煤层	13.00	36	23.5
砂质泥岩	20.60	12	22.1
砂岩	20.50	64	27.6

最大剪切应变增量



(a) 最大剪切应变增量云图



(b) 各个剖面最大剪切应变增量云图

图 7 凸台现状边坡最大剪切应变增量云图

Fig. 7 Maximum shear strain increment of convex slope

## 4 数值模拟与现场监测对比

现场监测数据可以验证边坡模拟是否准确, 图 8 为凸台边坡位移云图, 为方便分析不同区域的边坡变形, 本文在图 8 凸台边坡整体位移云图上对不

同区域进行了标注,模拟结果显示凸台边坡坡顶前端位移最大,产生的下沉位移量最明显,凸台边坡北帮底部产生隆起,且北帮变形量大于南帮变形量,边坡北帮坡底隆起位移量也大于边坡南帮隆起位移

量。据现场监测得知,边坡北帮坡底隆起量在 500 mm 左右,图 9 为现场监测和数值模拟在特定监测点位的对比,模拟结果与边坡实际观测值基本吻合,这验证了本模拟过程的可靠性。

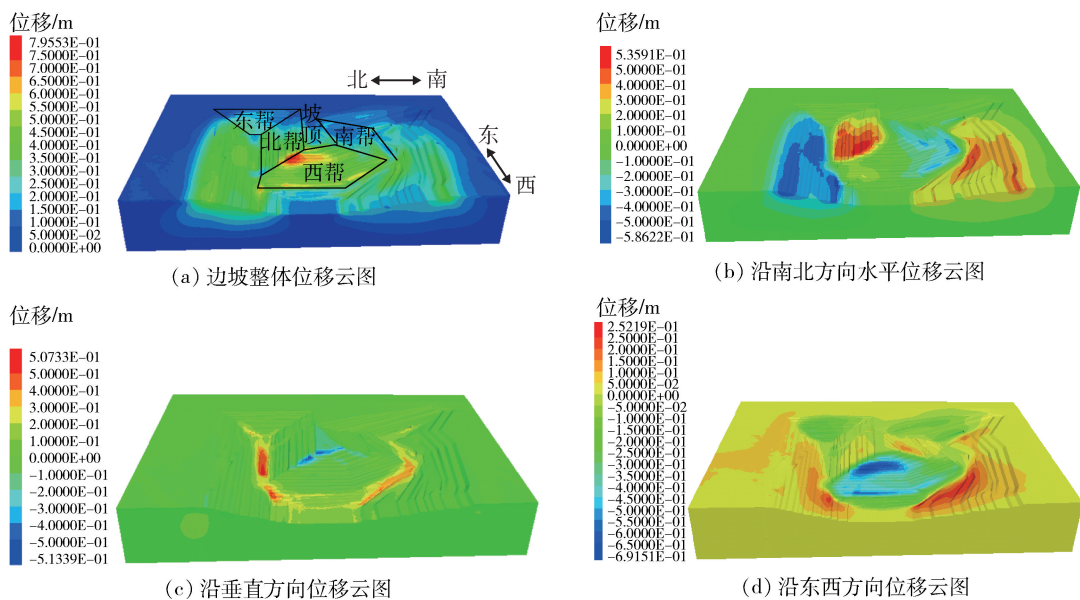


图 8 凸台现状边坡凸台边坡不同方向位移云图

Fig. 8 Displacement diagram of convex slope in different directions

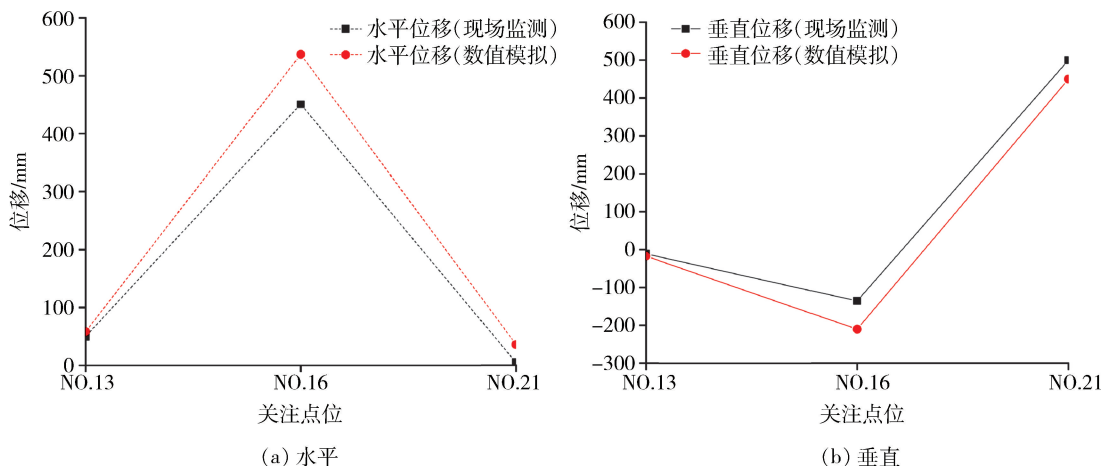


图 9 凸台现状边坡凸台边坡现场监测和数值模拟结果数值对比

Fig. 9 Comparisons between field monitoring and numerical simulation of convex slope

## 5 凸台边坡回填及回采对边坡的影响

按旗、盟两级自然资源主管部门的要求,白音华三号露天矿需要在凸台边坡的南侧进行回填,回填工作分三年完成,同时为了保证矿山产量,凸台北侧继续向北回采,凸台回填和回采计划如图 10 所示,基于回填和回采计划,建立了三个阶段(2021 年回采回填模型、2022 年回采回填模型、2023 年回采回填模型)回采回采模型,如图 11 所示。

采用 3.2 部分的模型设置及参数,通过计算得

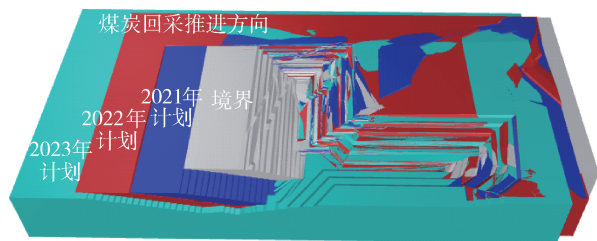


图 10 不同阶段回填和开采计划对比图

Fig. 10 Comparison diagram of backfilling and mining plans at different stages

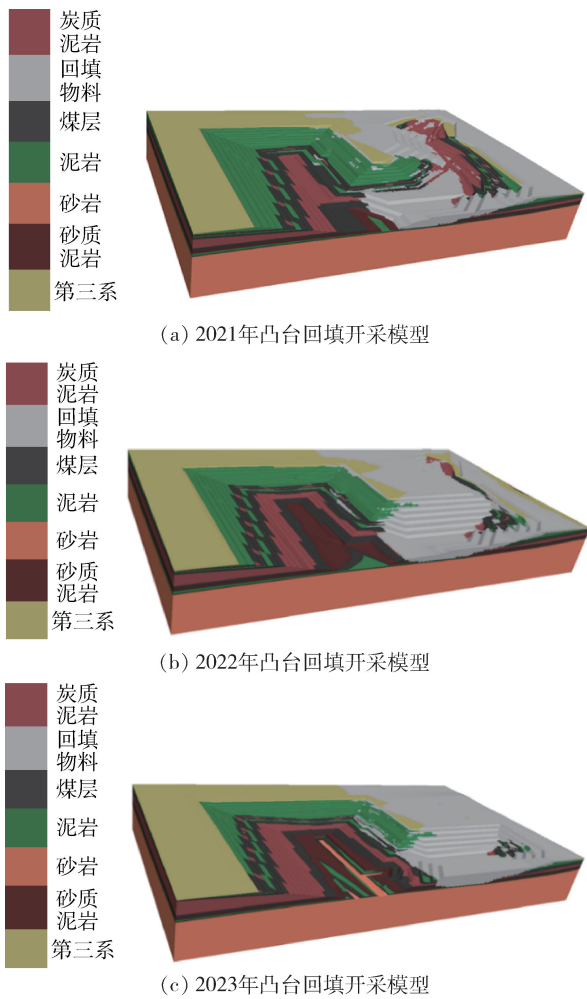


图 11 凸台边坡回采和回填模型

Fig. 11 Mining and backfilling models for convex slopes

到凸台边坡附近岩(土)体塑性区分布如图 12 所示, 实施不同回填开采方案情况下, 凸台边坡局部产生了破坏, 边坡潜在破坏区域主要集中在边坡坡底, 凸台边坡东帮边坡和北帮交界处破坏区域逐渐增加, 同时随着凸台边坡南侧的回填, 凸台边坡坡顶部西帮和北帮交界处应力集中效应逐渐减弱, 凸台边坡顶部破坏区域越来越小。

不同回填回采阶段的凸台边坡整体位移云图如图 13 所示, 同时为了定量分析凸台边坡回采和回填对凸台边坡变形的影响, 在已有 NO. 16 监测点位(凸台边坡前端北帮与西帮的交界处)、NO. 21 监测点位(边坡底部)的基础上在东帮边坡中部选取一个监测点(NO. 22)进行监测, 三个监测点位分布在图 13(a)中标出, 根据监测云图及监测曲线(图 14)可以里看出随着煤炭回采的向北推进, 凸台附近形成的东帮边坡区域暴露的范围越来越大, 东帮边坡产生的位移量随着煤炭的回采越来越大, 且变形范围逐渐增加。凸台边坡顶部北帮和西帮的交界位置

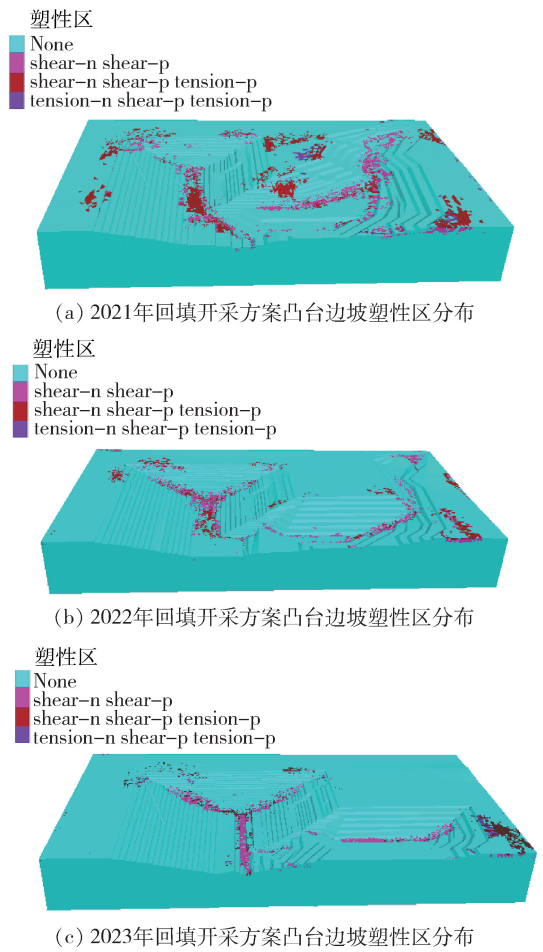
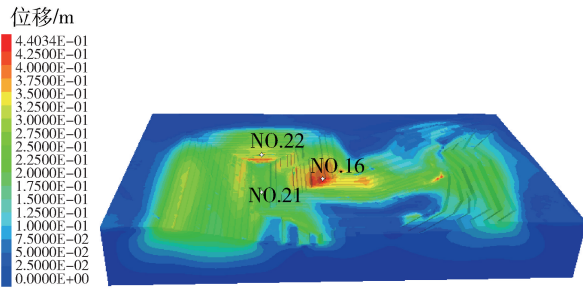


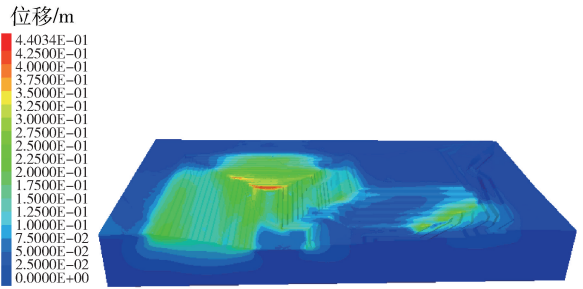
图 12 回填和开采方案凸台边坡塑性区分布

Fig. 12 Plastic zone distribution diagram of convex slope for backfill and mining schemes

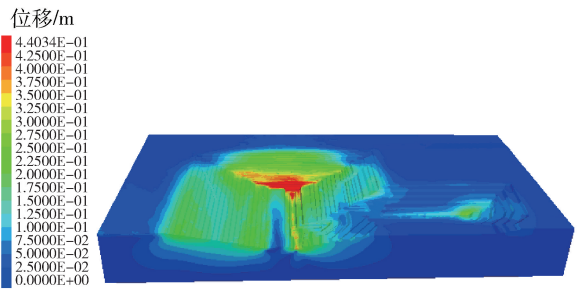
(NO. 16)由于凸台南侧的回填变形量逐渐减小, 由 NO. 21 监测曲线可以看出, 随着煤炭开采的向北推进, 边坡底部面积逐渐增大, 边坡底部一侧约束减小, 所以边坡底部变形量有所减小, 在 2023 年的回采和回填计划中, 底部向下延伸开挖了两个台阶, 凸台北帮边坡底部在一侧形成了新的约束, 所以底部变形量出现了明显的增加。基于边坡不同方向的位移云图分析可以更详细的掌握边坡不同方位的变形特征, 不同回填回采阶段的凸台边坡垂直方向位移云图、东西方向位移云图及南北方向云图如图 15 所示, 模拟结果显示随着凸台边坡南侧回填量的增多和北侧向北方向的推进开采, 凸台边坡顶部下沉位移量减小, 且北帮边坡与东帮的交界区域隆起位移量较明显。凸台边坡沿东西方向的位移云图显示随着凸台北侧煤炭资源的回采, 形成东帮边坡区域的范围越来越大, 沿边坡临空面产生的位移量及范围也逐渐增大, 沿南北方向位移云图结果显示随着凸台体边坡南侧的回填, 凸台边坡南帮的变形逐渐减



(a) 2021年回填开采方案边坡整体位移云图



(b) 2022年回填开采方案边坡整体位移云图



(c) 2023年回填开采方案边坡整体位移云图

图 13 回填和开采方案凸台边坡整体位移图

Fig. 13 Global displacement diagram of convex slope under backfilling and mining schemes

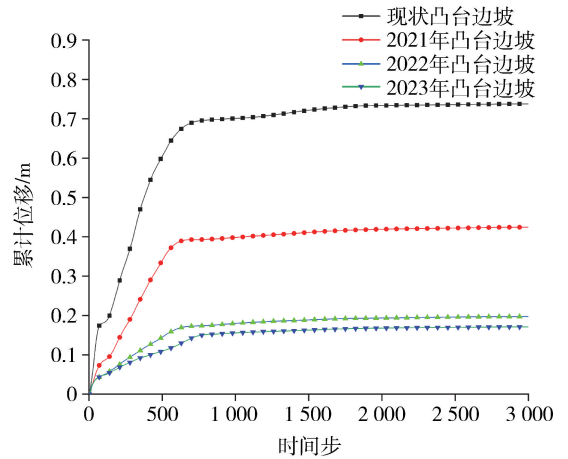
小,凸台边坡北帮向北的位移量也逐渐减小,而向北推进的采取边坡向边坡临空面位移量变化较小。

### 6 结论

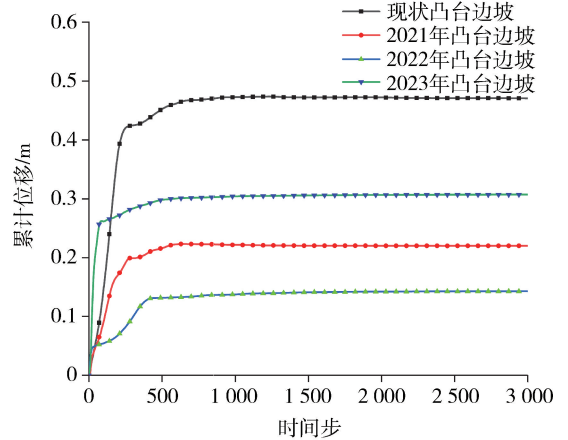
本文基于白音华矿区地质剖面应用 Rhino 软件及 Griddle 插件建立了包含岩层信息和地表信息的白音华凸台边坡三维数值模型,应用有限差分 FLAC<sup>3D</sup> 软件开展了白音华三号露天矿东北帮凸台边坡三维数值模拟,结合 GPS 变形现场监测分析,综合分析了白音华三号露天矿东北帮凸台边坡的稳定性,进一步探究了凸台边坡南侧回填和北侧回采作用下的变形特征,形成的主要结论如下所述。

1) 针对白音华三号露天矿边坡 GPS 变形监测数据分析表明,在当前开采条件下白音华三号露天矿东北帮凸台边坡变形速率小于 5 mm/d,并逐渐趋于稳定。

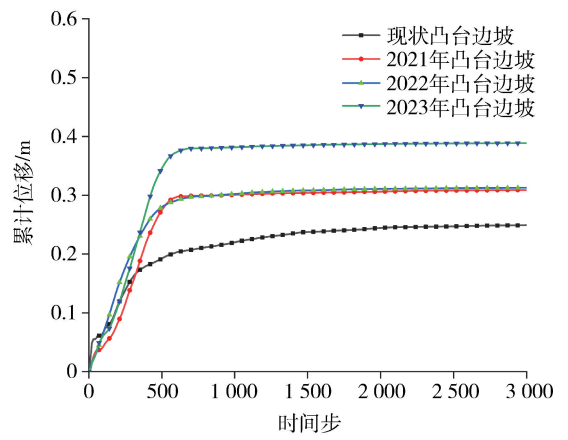
2) 开展了白音华三号露天矿凸台边坡变形的三维数值模拟,数值模拟结果与现场监测吻合较好,



(a) NO.16监测位移曲线



(b) NO.21监测位移曲线



(c) NO.22监测位移曲线

图 14 数值模拟监测点位移曲线

Fig. 14 Numerical displacement curves of monitoring points

数值模拟结果表明,凸台前端北帮及边坡底部变形较大,凸台边坡没有产生明显的贯通性剪切变形。

3) 随着凸台边坡南侧的回填和北侧煤炭回采,凸台前端坡顶北帮和西帮交界处变形逐渐减小,坡底位置的变形问题以及东帮边坡与凸台边坡北帮的交界处变形问题将更加严重,在这些区域应采取一定的防范治理措施。

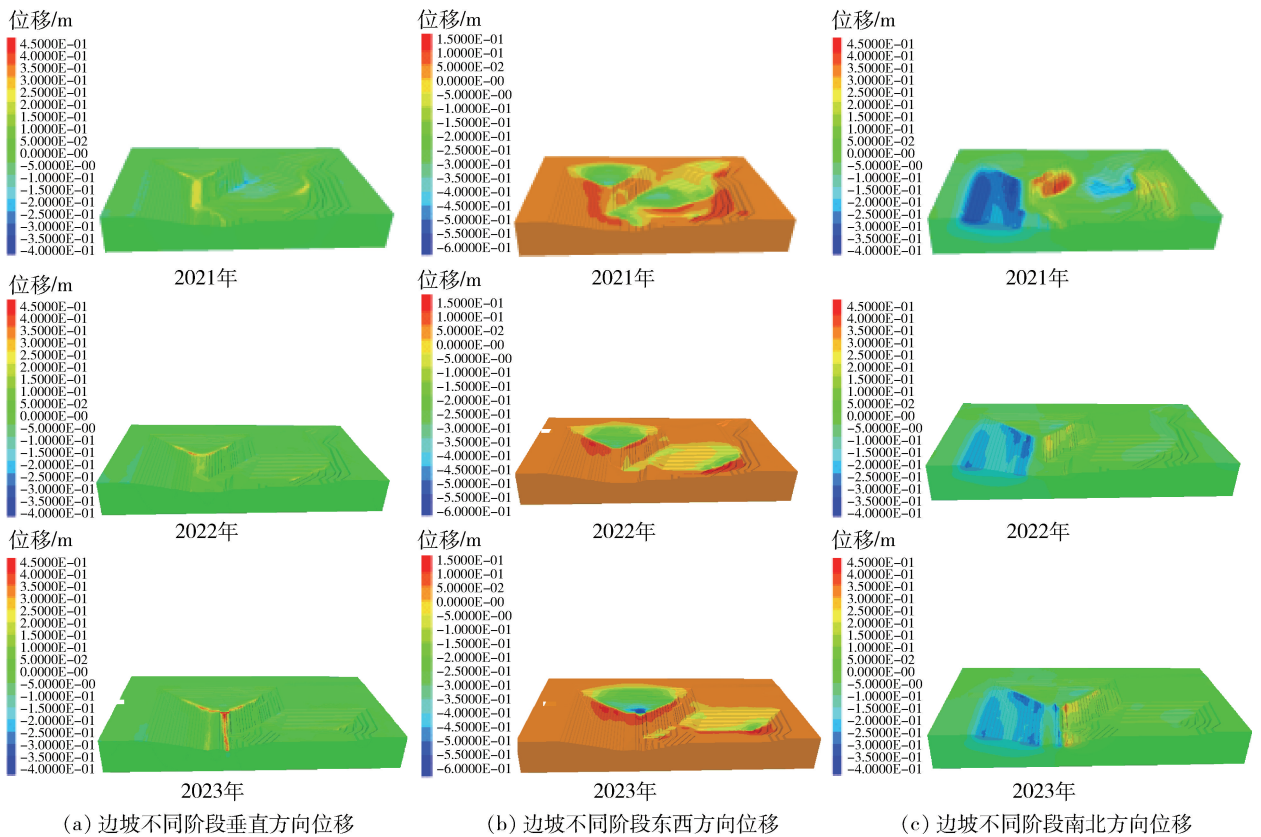


图 15 回填和开采方案凸台边坡不同方向位移云图

Fig. 15 Displacement diagram of convex slope in different directions under backfilling and mining schemes

## 参考文献

- [1] 魏金发, 刘亮, 于大鹏. 控制开采与梯级截排技术在伊敏露天矿边坡治理中的应用[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(9): 25-30.  
WEI Jinfa, LIU Liang, YU Dapeng. Application of controlled mining and cascade cutting technology in Yimin Open-pit Mine slope governance[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(9): 25-30.
- [2] 李强, 李文明, 张丁. 哈尔乌素露天矿北端帮保护台阶开采安全评价[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 229-232, 241.  
LI Qiang, LI Wenming, ZHANG Ding. Safety evaluation of protective bench in northern end slope of Haerwusu Open-Pit Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(6): 229-232, 241.
- [3] 柯秋璧, 周小平. 四川巴中谭家山石灰岩露天矿边坡安全隐患及处置对策[J]. 中国矿业, 2021, 30(4): 201-205.  
KE Qiubi, ZHOU Xiaoping. The potential safety hazard for the Tanjianshan limestone open-pit slope in Bazhong of Sichuan Province and its treatment matures[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(4): 201-205.
- [4] WANG Pengyu, WANG Shuhong, ZHU Chengjin, et al. Classification and extent determination of rock slope using deep learning[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(5): 23-30.
- [5] 丁震. 露天煤矿边坡实时监测技术应用对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S1): 189-192.  
DING Zhen. Comparative analysis on application of real-time monitoring technology of slope in open pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 189-192.
- [6] 李欣, 李树文, 王树根, 等. 数字近景摄影测量在高速公路边坡物理模型变形测量中的应用[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 209-210, 233.  
LI Xin, LI Shuwen, WANG Shugen, et al. Application of digital close range photogrammetry in physical model deformation measurement of highway slope[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 209-210, 233.
- [7] 张新伟, 徐兴全, 刘俊明, 等. GNSS监测数据在滑坡预警中的处理与应用: 以王家台滑坡为例[J]. 城市地质, 2021, 16(3): 294-300.  
ZHANG Xinwei, XU Xingquan, LIU Junming, et al. GNSS data processing and application in landslide early warning-taking Wangjiatai Landslide as an example[J]. Urban Geology, 2021, 16(3): 294-300.
- [8] 保振永, 李学才, 陈科, 等. 地面三维激光扫描在不稳定边坡监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 206-209.  
BAO Zhenyong, LI Xuecai, CHEN Ke, et al. Research on application of ground 3D laser scanning in unstable slope monitoring[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 206-209.
- [9] AFENI T B, CAWOOD F T. Slope monitoring using total station what are the challenges and how should these be mitigated[J]. South African Journal of Geomatics, 2013(2).
- [10] 李海蒙, 李军财. 国内外矿山边坡监测技术应用的最新进展

- [J]. 中国矿业, 2006, 15(4): 46-47, 54.
- LI Haimeng, LI Juncai. Study on slope monitoring technology and its application to open pit mine at home and overseas[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(4): 46-47, 54.
- [11] 李振东, 刘宏, 胡宣. 测斜仪在机场高填方边坡变形监测中的应用[J]. 公路, 2020, 65(5): 280-285.
- LI Zhendong, LIU Hong, HU Xuan. Application of inclinometer in deformation monitoring of airport high fill slope[J]. Highway, 2020, 65(5): 280-285.
- [12] 黄秋香, 汪家林, 邓建辉. 基于多点位移计监测成果的坡体变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2667-2667.
- HUANG Qiuxiang, WANG Jialin, DENG Jianhui. Slope deformation characteristics analysis based on monitoring results of multi-point borehole extensometer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2667-2667.
- [13] DENG Lizheng, YUAN Hongyong, CHEN Jianguo, et al. Experimental investigation on integrated subsurface monitoring of soil slope using acoustic emission and mechanical measurement[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7173.
- [14] 李澜堃, 朱万成, 代风, 等. 大孤山露天矿边坡亿级自由度建模与基于 RFPA~(3D) 的数值模拟[J]. 金属矿山, 2021(2): 179-185. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202102027.
- LI Lankun, ZHU Wancheng, DAI Feng, et al. Modelling of Dagushan Open-pit Mine Slope with one hundred million degrees of freedom and associated numerical simulation with RFPA~(3D) for Dagushan Open-pit Mine slope[J]. 2021(2): 179-185. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202102027.
- [15] 刘春, 张晓宇, 许强, 等. 三维离散元模型的滑坡能量守恒模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 698-704.
- LIU Chun, ZHANG Xiaoyu, XU Qiang, et al. Research on energy conservation simulation of three dimensional discrete element model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 689-704.
- [16] 刘永杰, 王兆刚. 白音华三号露天矿西帮滑坡治理技术[J]. 露天采矿技术, 2014(4): 7-9.
- LIU Yongjie, WANG Zhaogang. Treatment technology of west side landslide in Baiyinhua No. 3 Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2014(4): 7-9.
- [17] 吴顺川, 李利平, 张晓平. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 394-405.
- [18] 王家臣, 孙书伟. 露天矿边坡工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 255-300.

\*\*\*\*\*  
(上接第 67 页)

- [7] 张君宇, 王伊杰, 张亚明. 金属矿产资源节约集约利用评价指标体系[J]. 现代矿业, 2020, 36(12): 1-4, 7.
- ZHANG Junyu, WANG Yijie, ZHANG Yaming. Evaluation index system of the conservation and intensive use of metal mineral resources[J]. Modern Mining, 2020, 36(12): 1-4, 7.
- [8] 廖福源, 林钟扬, 荣一萍. 浙江省地下开采矿产资源节约集约利用水平评估[J]. 科技和产业, 2021, 21(9): 221-226.
- LIAO Fuyuan, LIN Zhongyang, RONG Yiping. Evaluation on the level of economical and intensive utilization of underground mining mineral resources in Zhejiang Province[J]. Science Technology and Industry, 2021, 21(9): 221-226.
- [9] 许大纯, 闫卫东, 鲍荣华, 等. 我国矿产资源节约集约利用评价指标研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(2): 1-8.
- XU Dachun, YAN Weidong, BAO Ronghua, et al. Research on economical and intensive utilization of mineral resources evaluation in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016(2): 1-8.
- [10] 林钟扬, 向宇, 吴鸣, 等. 地下开采矿产资源节约集约利用评价指标体系构建; 以浙江省为例[J]. 科技和产业, 2020, 20(10): 175-179.
- LIN Zhongyang, XIANG Yu, WU Ming, et al. The construction of evaluation index system of saving and intensive utilization of underground mining mineral resources in Zhejiang Province[J]. Science Technology and Industry, 2020, 20(10): 175-179.
- [11] 武秋杰, 吕振福, 曹进成, 等. 基于层次分析法的矿产资源节约集约利用水平评价[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 33-39.
- WU Qiujie, LYU Zhenfu, CAO Jincheng, et al. Evaluation system of mineral resources economical and intensive utilization based on AHP[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 33-39.
- [12] 林钟扬, 孟祥随, 曹进成, 等. 露天开采矿山节约集约利用水平评价指标体系构建[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 129-134.
- LIN Zhongyang, MENG Xiangsui, CAO Jincheng, et al. Establishment of Evaluation Index System for Evaluating the Level of Economical and Intensive Utilization of Surface Mining[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 129-134.