

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.284

引用格式:赵景昌,王瀚澍,侯鹏,等.窄采区高产能露天煤矿工作线布置及发展方式优化[J].重庆大学学报,2025,48(6): 45-62.



# 窄采区高产能露天煤矿工作线布置及发展方式优化

赵景昌<sup>1a,1b</sup>, 王瀚澍<sup>1b</sup>, 侯 鹏<sup>1b</sup>, 白润才<sup>1a,1b</sup>, 任仕豪<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 a. 矿产资源开发利用技术及装备研究院; b. 矿业学院,辽宁 阜新 123000;  
2. 中煤平朔集团有限公司 安家岭露天矿,山西 朔州 036000)

**摘要:**以哈尔乌素露天煤矿为工程实例,针对其首采区工作线退回至矿权界内后,工作线长度变短、采区宽度变窄的特殊条件下,如何确保实现 35 Mt/a 原煤产能的问题,以技术可行性与经济合理性为原则,综合考虑工作线长度对生产剥采比、剥离物内排运距、原煤产量规模等的影响,建立了以年剥离总费用最低为目标的工作线长度优化数学模型,确定了经济合理工作线长度为 1 620~2 315 m。结合哈尔乌素露天矿现有采掘设备生产能力和设备布置方案,分析确定了当工作线年平均推进度控制在 400~515.25 m 时,充分发挥采掘设备生产能力的工作线长度为 1 820 m。采用蒙特卡洛方法设计工作线形态,提出了 3 种满足工作线长度要求与年推进度限制的工作线布置与发展方式方案,构建了基于各方案平均生产剥采比、剥离加权平均运距、原煤加权平均运距、剥离加权平均提升高差、原煤加权平均提升高差和平均最大推进度等 6 项关键指标的客观赋权法 CRITIC-TOPSIS 综合评价模型。对 3 种方案的评价结果表明,方案二与理想解贴近度最高,能够使哈尔乌素露天煤矿在采区变窄条件下以最佳技术与经济效益实现 35 Mt/a 的原煤产能目标。

**关键词:**露天煤矿;窄采区;高产能;工作线布置与发展方式;蒙特卡洛方法;CRITIC-TOPSIS 综合评价模型

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)06-045-18

## Optimization of working line layout and development mode for a high-capacity open-pit coal mine in a narrow mining district

ZHAO Jingchang<sup>1a,1b</sup>, WANG Hanshu<sup>1b</sup>, HOU Peng<sup>1b</sup>, BAI Runcai<sup>1a,1b</sup>, REN Shihao<sup>2</sup>

(1a. Institute of Mineral Resources Exploitation and Utilization Technology & Equipment; 1b. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P. R. China; 2. Anjialing Open-pit Mine, China Coal Pingshuo Group Co., Ltd., Shuzhou, Shanxi 036000, P. R. China)

**Abstract:** Taking the Haerwusu open-pit coal mine as a case study, this research addresses the challenge of achieving a high design capacity of 35 Mt/a under the constraints of shortened working line length and reduced

收稿日期:2024-07-17 网络出版日期:2024-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374123);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01, LNTU20TD-07)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52374123), and Discipline Innovation Team Project of Liaoning University of Engineering and Technology(LNTU20TD-01; LNTU20TD-07).

作者简介:赵景昌(1974—),男,博士,讲师,从事露天开采理论与技术、智能露天矿等方面的研究,(E-mail)lntuzjc@126.com。

通信作者:王瀚澍(1999—),男,硕士研究生,(E-mail)lntu\_whs@163.com。

mining district width, following the retraction of the first mining district's working line into the mining license boundary. Based on principles of technical feasibility and economic rationality, and with considering the influence of working line length on production stripping ratio, stripping haulage distance, and raw coal production capacity, a mathematical model was established to minimize the annual total stripping cost. The economically optimal working line length was determined to range from 1 620 m to 2 315 m. Building upon this, and with integrating the production capacity and equipment configuration of existing mining equipment at Haerwusu, it was determined that the average annual advancing speed of the working line should be maintained between 400 m to 515.25 m. A working line length of 1 820 m was found to maximize the operational efficiency of the mining equipment. Based on the feasible range of advancing speeds, the Monte Carlo method was innovatively used to optimize the working line shape. Three working line layout and development schemes, all satisfying the constraints of the working line length and annual advancing speed, were proposed. To evaluate these schemes, a CRITIC-TOPSIS comprehensive evaluation model based on objective weighting was constructed, incorporating six key indicators: average production stripping ratio, weighted average haulage distance and lifting height for both stripping and raw coal, and the average maximum advancing speed of the working line. Evaluation results show that scheme 2 exhibits the closest proximity to the ideal solution. This scheme enables Haerwusu open-pit coal mine to achieve its 35 Mt/a raw coal production target within a narrow mining district, while delivering optimal technical and economic outcomes.

**Keywords:** open-pit coal mine; narrow mining district; high-capacity; working line layout and development; Monte Carlo method; CRITIC-TOPSIS comprehensive evaluation model

合理的工作线长度以及工作线布置和发展方案是露天煤矿安全、经济、高效生产的重要前提<sup>[1]</sup>。在一定的开采工艺和开采程序条件下,工作线长度、工作线布置和发展方式的改变,将使采剥工程随之产生波动,生产剥采比和矿岩运输距离也会相应增大或减小,从而影响露天矿山可实现的产量规模和企业经济效益。

采用分区开采的露天矿,合理的工作线长度是采区划分的主要依据。在此基础上,研究合理的工作线布置与发展方式以及工作线年推进度,是使露天矿山维持产能持续稳定并获取最佳经济效益的保障。马力等<sup>[2]</sup>和孙俊东<sup>[3]</sup>基于经济工作线长度优化理论,建立了以年剥离费用最低为目标的工作线长度优化数学模型,结合新疆准东与内蒙古胜利一号露天矿工程实际,确定了对矿山剥采工程发展及生产成本影响最小,且能使产能持续稳定的采区划分和转向方案。当产量规模、地质或生产条件发生较大变化时,则需结合具体工程条件重新确定合理的工作线长度以及工作线布置和发展方式。曹兰柱等<sup>[4]</sup>针对元宝山露天煤矿产能核增的工程背景,根据该矿煤层赋存条件及综合开采工艺系统布置,在深入分析工作线长度与原煤产量规模、生产剥采比之间关系的基础上,确定了满足元宝山露天煤矿产量规模核增后的合理工作线长度。刘月亭等<sup>[5]</sup>针对哈尔乌素露天煤矿因征地受阻导致工作线长度变短、生产组织及原煤生产接续困难等问题,通过改变工作线布置方式,有效缓解了生产组织压力,确保了原煤产能目标的实现。赵天佑等<sup>[6]</sup>和薛万海<sup>[7]</sup>针对安太堡露天矿在芦子沟背斜区开采期间,煤层推进度变小,产量下降,剥离物运距远、提升高差大等问题,建立了背斜区剥采工程延深条件下的工作线长度优化数学模型,确定了满足背斜区延深进度与正常生产接续要求的合理工作线长度。郑红军等<sup>[8]</sup>针对安家岭露天矿受背斜及征地影响导致的生产不利局面,通过方案比选确定了使运输成本最低的工作线布置及发展方案。针对缓倾斜煤层露天矿采用走向布置工作线时存在的设备作业条件差、内排重车下行、煤层底板三角煤处理困难等问题,贾荣军<sup>[9]</sup>提出将工作线沿煤层伪走向布置、沿伪倾向推进的工作线布置及发展方案,从而有效缓解了缓倾斜煤层露天矿生产中存在的一系列问题。此外,赵登娟等<sup>[10]</sup>和苏迁军<sup>[11]</sup>对自移式破碎机半连续工艺条件下的工作线长度、工作线形态及布置方式等进行了优化,王东等<sup>[12]</sup>在分析内排土场基底倾角与排土工作线布置方式之间关系的基础上,确定了横采内排时排土工作线

的最佳布置方式。高岩等<sup>[13]</sup>在对6种露天煤矿典型工作线布置方式进行综合评价的基础上,确定了适用于黑岱沟露天煤矿工程实际的工作线布置方案。文献[14-20]针对露天矿开采设计过程中的采区划分及过渡方案、不同工程条件下的开采技术方案等采用了不同的方案评价及优选方法,确定了最佳方案。

笔者以哈尔乌素露天煤矿首采区工作线退回至矿权界内后,采区宽度变窄、产能接续困难为工程背景,建立以年剥离总费用最小为目标的工作线长度优化数学模型,结合哈尔乌素露天煤矿设备生产能力和设备布置方式,确定工作线推进强度约束下的合理工作线长度。在此基础上,采用蒙特卡洛法优化工作线形态,设计并推演工作线布置及发展方案与剥、采、排、运时空发展关系,选取平均生产剥采比、剥离物平均运距与提升高差等6项主要技术经济指标,建立基于客观赋权法的CRITIC-TOPSIS综合评价模型,通过评价比选确定哈尔乌素露天煤矿采区变窄条件下实现35 Mt/a原煤产能目标的合理工作线布置及发展方式。

## 1 工程背景

哈尔乌素与黑岱沟露天煤矿是准格尔煤田两座相邻的特大型露天煤矿(哈尔乌素露天煤矿核定产能35 Mt/a,黑岱沟露天煤矿核定产能34 Mt/a),主要开采6号复煤层,煤层倾角一般小于10°,平均总厚30.25~31.90 m,为低硫、低磷、低熔点和高发热量的“绿色煤炭”。中煤国际工程集团沈阳设计研究院于2004年7月完成的哈尔乌素露天煤矿初步设计中,综合考虑哈尔乌素与黑岱沟露天煤矿开采工艺系统布置及原煤产量规模等因素,将哈尔乌素露天煤矿首采区北帮深部界局部向黑岱沟露天煤矿方向进行了外扩(最大外扩距离417 m,见图1)。

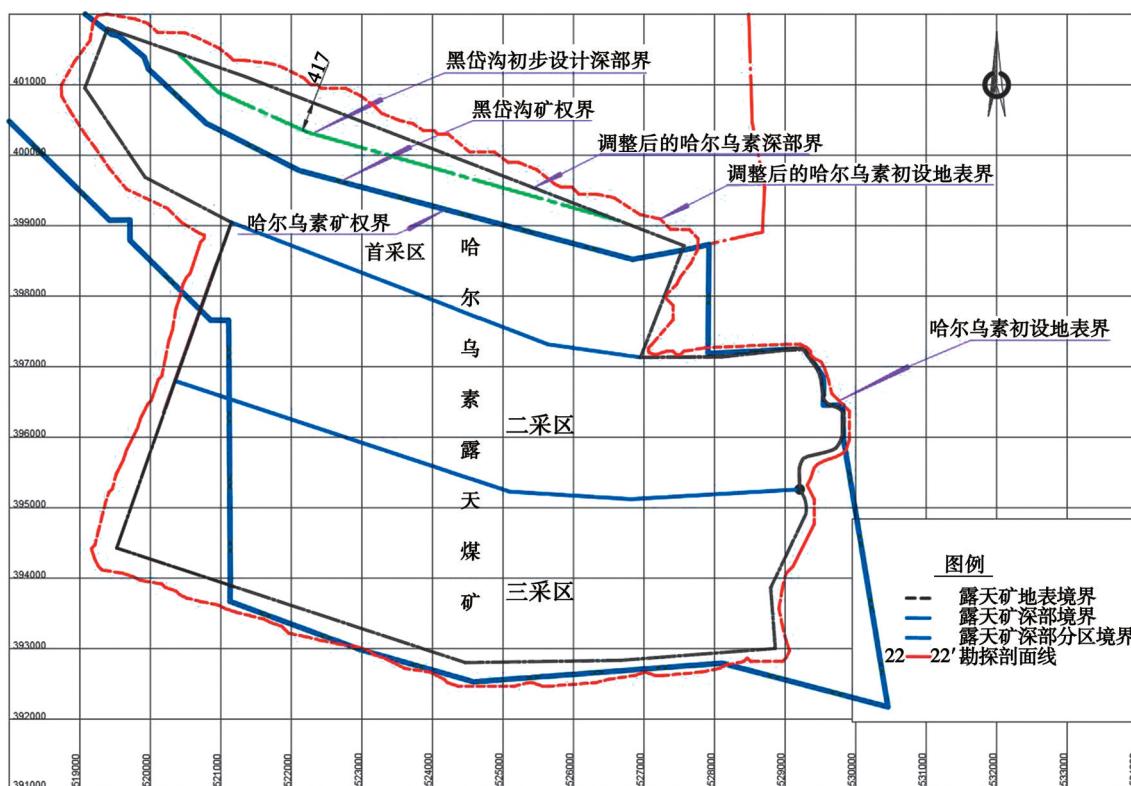


图1 哈尔乌素露天煤矿初步设计采区划分与开采境界平面图

Fig. 1 Preliminary design mining area division and mining boundary plan of Haerwusu open-pit coal mine

哈尔乌素露天煤矿自开工建设以来,一直按初步设计进行开采作业(见图2)。2023年4月,同一矿业权实际控制人调整相邻矿区开采范围,哈尔乌素露天煤矿首采区采煤工作线开始退回至矿权界范围内开采,导致首采区采煤工作线由原来的2.0 km缩短至1.2 km。在工作线长度缩短近1/2后,若仍按原设计开采程序开采,将无法完成35.0 Mt/a原煤生产任务。

哈尔乌素露天煤矿工作线退回至矿权界内后,在首采区工作线长度缩短、宽度变窄条件下,如何优化工作线布置和发展方式,对确保该矿原煤生产接续、维持产量持续稳定,完成煤炭保供任务等具有重要意义。

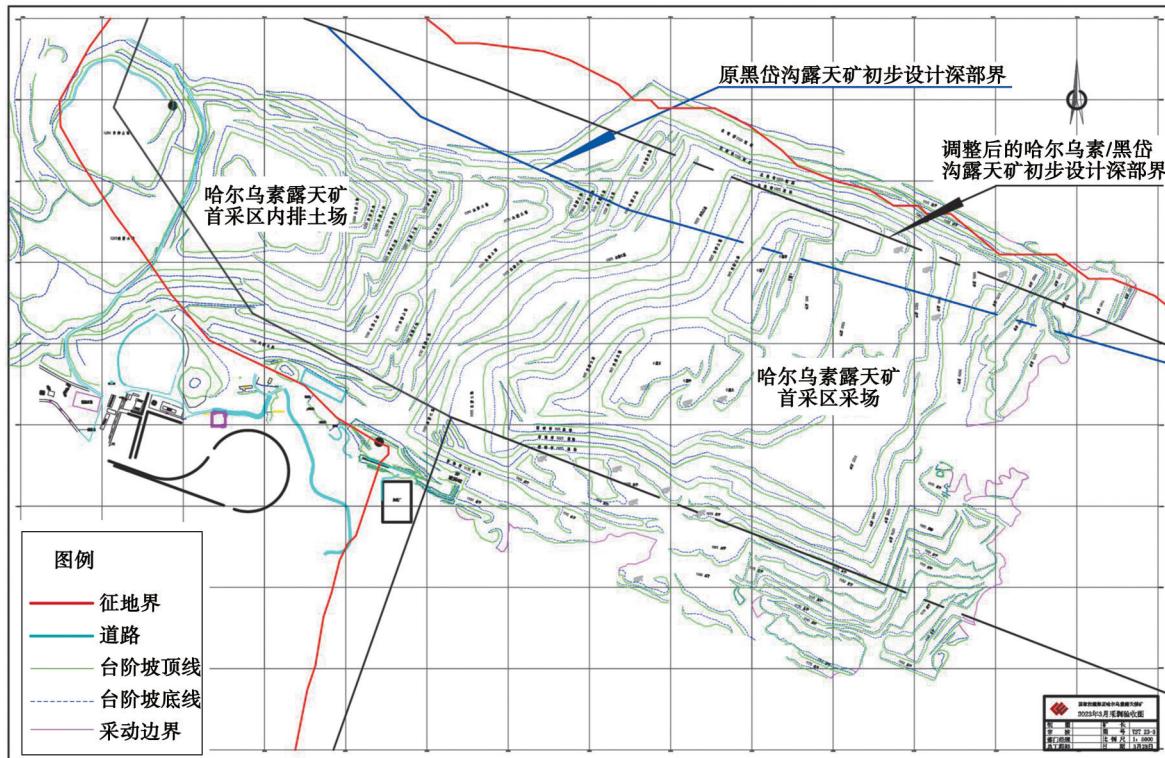


图2 哈尔乌素露天煤矿2023年3月末采场现状与首采区开采境界位置关系平面图

Fig. 2 Relationship between the current situation of the stope at the end of March, 2023 and the position of the mining boundary in the first mining area of the open-pit coal mine in Haerwusu open-pit coal mine

## 2 哈尔乌素露天煤矿合理工作线长度与年推进度分析

### 2.1 合理工作线长度理论分析

工作线长度是露天矿重要的开采参数之一,影响露天矿的产量规模、生产费用、端帮量在全矿总剥离量中所占的比重、生产剥采比乃至整体剥离费用。工作线长度与露天矿产量、年推进度、煤层厚度、煤的密度、原煤回采率的关系应满足<sup>[21-22]</sup>

$$x = \frac{A_p}{u \cdot h \cdot \gamma \cdot \eta}, \quad (1)$$

式中: $x$ 为工作线长度,km; $A_p$ 为哈尔乌素露天煤矿原煤产量规模,35.0 Mt/a; $u$ 为工作线年推进度,m/a; $h$ 为煤层厚度,m; $\gamma$ 为煤的密度,t/m<sup>3</sup>; $\eta$ 为原煤回采率,0.9。

年剥离量为

$$V = [1000xH + H(H+2h)\cot\beta]u, \quad (2)$$

式中: $H$ 为覆盖层厚度,m; $h$ 为煤层厚度,m; $\beta$ 为端帮边坡角,°,采场断面示意图如图3所示。

生产剥采比 $n$ 为

$$n = \frac{V}{A_p} = \frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta} + \frac{H(H+2h)\cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta} \times \frac{1}{x}. \quad (3)$$

式(3)中,生产剥采比由2部分组成,即 $\frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta}$ 和 $\frac{H(H+2h)\cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta} \times \frac{1}{x}$ 。其中, $\frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta}$ 相当于钻孔柱状剥采比,一般情况下,它反映整剥离量与采煤量的比值,可称之为整剥采比,其值与工作线长度无关。后一部分则是由端帮剥离量而引起的生产剥采比增量,与工作线长度成反比。由上述分析可知,整剥采比是生产

剥采比的最小极限值,由于端帮量的存在,实际的生产剥采比总要大于整剥采比,但可以通过增大工作线长度来降低生产剥采比增量,从而减小生产剥采比。

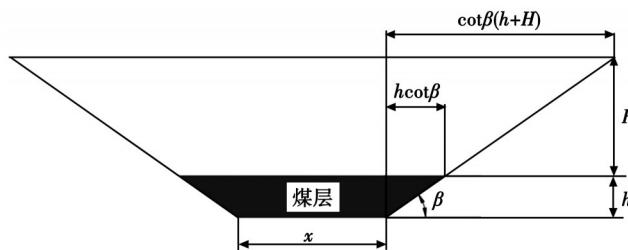


图3 采场断面示意图

Fig. 3 Stope section

工作线长度与内排运距 $L_{\text{排}}$ 之间为简单的一次函数关系

$$L_{\text{排}} = ax + b, \quad (4)$$

式中: $a$ 为排弃路线系数,双环内排时, $a = \frac{1}{2}$ ,单环内排时, $a=1$ ; $b$ 为排弃影响距离(见图4),主要取决于端帮上的运距。

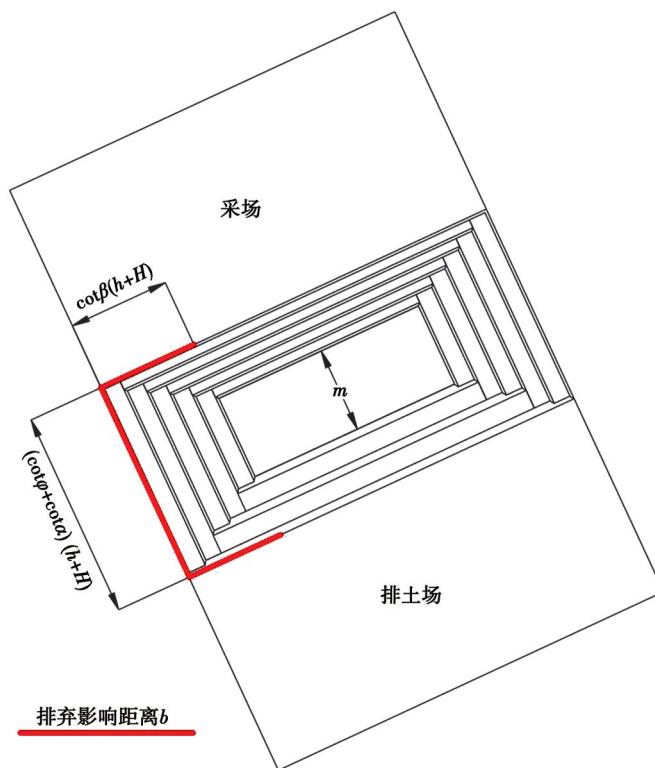


图4 排弃影响距离示意图

Fig. 4 Schematic diagram of discard influence distance

排弃影响距离可按式(5)计算

$$b = \frac{H+h}{2000} (\cot\varphi + \cot\alpha + 2\cot\beta) + m, \quad (5)$$

式中: $\varphi$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为采场工作帮、内排工作帮和端帮的边坡角,°; $m$ 为排土场与采场的追踪距离,km。

根据哈尔乌素露天煤矿采场开采参数与内排土场排土参数、内排土场与采场追踪距离(见图5),可确定式(5)中各参数值分别为: $\varphi=9^\circ$ 、 $\alpha=14^\circ$ 、 $\beta=38^\circ$ 、 $m=50$  km,解得排弃影响距离(端帮运距) $b=1.15$  km。

露天矿剥离费用一般分解为采排费用与运输费用。设每立方米土岩的采排费为 $C_1$ 元,根据式(3),

年剥离量采排费用  $y_1$  可由式(6)表示。

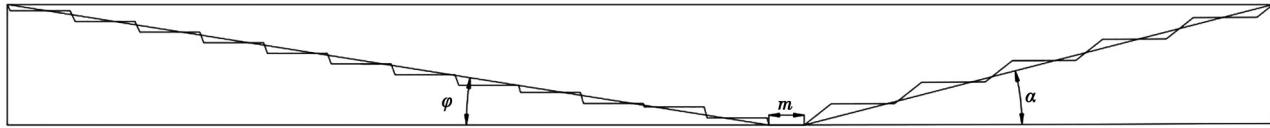


图 5 哈尔乌素露天矿横截面示意图

Fig. 5 Haerwusu open-pit mine cross section

$$y_1 = nA_p C_1 = \frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta} A_p C_1 + \frac{H(H+2h) \cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta} A_p C_1 \frac{1}{x} \quad (6)$$

设土岩的运输费为  $C_2$  元, 则年剥离运输费用  $y_2$  为

$$y_2 = nA_p C_2 (ax + b) = A_p C_2 \left( \frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta} + \frac{H(H+2h) \cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta} \times \frac{1}{x} \right) (ax + b) \quad (7)$$

年剥离总费用  $y$  为式(6)与式(7)之和, 即

$$y = A_p \left( \frac{H}{h \cdot \gamma \cdot \eta} + \frac{H(H+2h) \cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta} \times \frac{1}{x} \right) [(C_1 + C_2 b) + C_2 ax] \quad (8)$$

式(8)可归结为  $y = px + \frac{q}{x} + S$  的形式, 其中  $q = \frac{A_p(C_1 + C_2 b)H(H+2h)\cot\beta}{1000h \cdot \gamma \cdot \eta}$ ,  $p = \frac{A_p C_2 a H}{h \cdot \gamma \cdot \eta}$ ,  $S = \frac{A_p \cdot H}{h \cdot \gamma \cdot \eta} \left[ (C_1 + C_2 b) + \frac{(H+2h) \cdot \cot\beta \cdot C_2 \cdot a}{1000} \right]$ 。

经济合理的工作线长度  $x_0$  应为年剥离总费用(直接费用)最小的工作线长度, 当  $x = \sqrt{q/p}$  时,  $y$  有极小值:  $y_{\min} = 2\sqrt{pq} + S$ , 则哈尔乌素露天煤矿经济合理工作线长度为

$$x_0 = \sqrt{\frac{(H+2h)\cot\beta \left\{ C_1 + C_2 \left[ \frac{H+h}{2000} (\cot\phi + \cot\alpha + 2\cot\beta) + m \right] \right\}}{500C_2}} \quad (9)$$

经济合理的工作线长度  $x_0$  应为年剥离总费用(直接费用)最小的工作线长度, 哈尔乌素露天矿核定产量规模为 35.0 Mt/a, 煤层平均厚度  $h=28$  m, 原煤容重  $\gamma=1.5$  t/m<sup>3</sup>, 覆盖层平均厚度  $H=140$  m。剥离采用单斗-卡车工艺, 采煤采用单斗-卡车-半固定破碎站-胶带输送机半连续工艺, 采场工作帮坡角  $\phi=9^\circ$ , 端帮边坡角  $\beta=38^\circ$ , 内排土场工作帮坡角  $\alpha=14^\circ$ , 内排土场与采场追踪距离  $m=50$  m, 采排费  $C_1=6$  元/m<sup>3</sup>, 运输费  $C_2=1.5$  元/(m<sup>3</sup>·km)。上述指标代入式(8), 得

$$y = 102605.56 + 25634.44 \frac{1}{x} + 9713.33x \quad (10)$$

应用 Matlab 计算式(10)不同工作线长度  $x$  条件下年剥离总费用  $y$ , 并绘制函数图像, 如表 1 和图 6 所示。

表 1 不同工作线长度所需的费用

Table 1 Costs of different working line lengths

$x/\text{km}$	$y/\text{万元}$								
0.5	158731	1.5	134265	1.7	134197	1.9	134553	2.5	137143
1.0	137953	1.6	134168	1.8	134331	2.0	134849	3.0	140290

进一步对式(8)求解, 可得经济合理工作线长度理论值  $x_0=1.62$  km。在工作线长度 1.62 km 条件下, 完成 35.0 Mt/a 原煤生产任务的工作线推进强度为

$$u = \frac{A_p}{x \cdot h \cdot \gamma \cdot \eta}, \quad (11)$$

计算得  $u=571.6$  m/a。

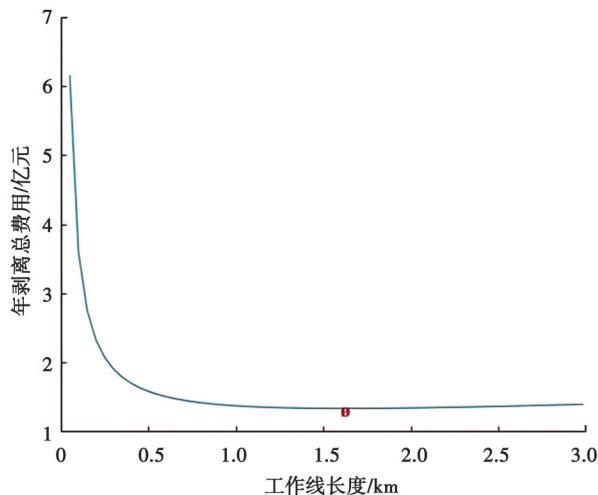


图6 采排运输费用与工作线长度变化关系曲线

Fig. 6 Relationship between the cost of mining and transportation and the length of working line

《煤炭工业露天矿设计规范》(GB50197—2015)中关于单斗-卡车开采工艺条件下的工作线推进速度上限参考值为400 m/a<sup>[23]</sup>,则按工作线推进速度400 m/a计算哈尔乌素露天煤矿的工作线长度应为

$$x = \frac{3500 \times 10^4}{400 \times 28 \times 1.5 \times 0.9} \approx 2315。 \quad (12)$$

综上,哈尔乌素露天煤矿经济上合理、技术上可行的工作线长度1 620~2 315 m,工作线年推进度为400~571.6 m。

## 2.2 基于采掘设备生产能力与布置方式的工作线可行推进速度分析

哈尔乌素露天煤矿属于近水平煤层露天矿,当工作线长度一定时,可实现的原煤生产能力主要取决于工作线年推进度,而工作线年推进度一般主要受采掘设备生产和布置方式影响。哈尔乌素露天煤矿现有的自营采煤设备型号、数量及生产能力如表2所示。

表2 哈尔乌素露天煤矿采煤设备型号及生产能力

Table 2 Coal mining equipment model and production capacity of Haerwusu open-pit coal mine

电铲型号	出动台数	铲斗容积/m <sup>3</sup>	计划年生产能力/万 m <sup>3</sup>	计划月生产能力/万 m <sup>3</sup>	计划日生产能力/万 m <sup>3</sup>
395BI	1	32.0	610	50.83	1.69
WK35	2	49.2	708	59.00	1.97
L-2350	2	35.0	270	22.50	0.75

为了提高采掘设备作业时间利用率、充分发挥采掘设备作业效率,减小其他环节以及设备调动影响,每台挖掘机采掘区通常由待装区(已爆破)、待爆区(已穿孔)和待穿区等3个区域构成,每个区域应保证采掘设备7~10 d的作业量。按表2所列哈尔乌素露天煤矿采掘设备生产能力,分析不同型号采掘设备的最小采掘区长度如表3所示。

表3 哈尔乌素露天煤矿采煤设备型号与采掘区长度

Table 3 Coal mining equipment model and length of mining area in Haerwusu open-pit coal mine

电铲型号	计划7 d生产 能力/万 m <sup>3</sup>	采煤台阶高度10 m 时采掘区长度/m	计划10 d生产 能力/万 m <sup>3</sup>	采煤台阶高度10 m 时采掘区长度/m
395BI	11.86	889.53	16.94	1 270.75
WK35	13.77	1 032.50	19.67	1 475.00
L-2350	5.25	393.75	7.50	562.50

根据表2和表3所示不同型号采掘设备生产能力及采掘区长度,分析在不同工作线长度和不同采掘设备布置方式条件下,合理的工作线年推进度为:采煤台阶高度10 m,每个作业区满足采煤设备7 d作业量要求时的采煤工作线年推进度。

按照2.1节中计算的合理工作线长度,采煤台阶工作线长度1 620~2 315 m,每个台阶可布置2台采掘设备(1台395BI,1台WK35),形成2个采掘区。采煤设备采掘区中每个作业区满足395BI与WK35采煤设备7 d作业量要求时的采掘区长度为889.53~1 032 m,则满足采掘设备对采掘区长度的要求,工作线长度宜设置在1 922.03 m以上,395BI与WK35年生产能力分别为610万m<sup>3</sup>、708万m<sup>3</sup>,由此可推算出采煤台阶工作线年推进度(见表4)。

表4 按满足395BI与WK35 7 d作业量布置设备时的采煤台阶工作线年推进度

Table 4 Annual advance degree of the working line of the coal mining step when the equipment is arranged according to the operation volume of 395BI and WK35 in 7 d

采掘设备年生产能力/万m <sup>3</sup>		采煤台阶工作线	采煤台阶	采煤台阶工作线年
395BI	WK35	长度/m	高度/m	推进度/m
610	708	1 922	10	687
610	708	2 000	10	659
610	708	2 100	10	628
610	708	2 200	10	599
610	708	2 315	10	573

WK35电铲一个采掘区长度为1 032.5 m,L-2350前装机一个采掘区长度为393.75 m,则每个采煤台阶可布置3台采掘设备(2台L-2350,1台WK35),形成3个采掘区,为满足采掘设备对采掘区长度的要求,工作线长度宜设置在1 820 m以上,L-2350与WK35年生产能力分别为270万m<sup>3</sup>、708万m<sup>3</sup>,由此可推算出采煤台阶工作线的年推进度(见表5)。

表5 按满足L-2350与WK35 7 d作业量布置设备时的采煤台阶工作线年推进度

Table 5 Annual advance degree of the working line of the coal mining step when the equipment is arranged according to the operation volume of L-2350 and WK35 in 7 d

采掘设备年生产能力/万m <sup>3</sup>			采煤台阶工作线	采煤台阶	采煤台阶工作线年
L-2350	L-2350	WK35	长度/m	高度/m	推进度/m
270	270	708	1 820	10	685
270	270	708	1 900	10	657
270	270	708	2 000	10	624
270	270	708	2 100	10	594
270	270	708	2 200	10	567
270	270	708	2 315	10	543

一个采煤台阶布置1台395BI、1台WK35,采煤台阶工作线长度1 922.03~2 315 m,采掘设备达极限能力时工作线年推进度可达687 m/a(见表4);一个采煤台阶布置1台WK35、2台L-2350,采煤台阶工作线长度1 820~2 315 m,采掘设备达极限能力时工作线年推进度可达685 m/a(见表5)。

结合表4和表5分析结果可知,不同采掘设备布置方案条件下,工作线年推进度543~687 m/a,需要说明的是,543~687 m/a是整个工作线在理想条件下的最大推进速度,实际推进度受气候、地质、设备出动等因素的影响,不可能全年全时保持最大推进强度。因此,采掘设备能力可达的工作线年推进强度取最大推进强度的75%较为适宜<sup>[24]</sup>,即407.25~515.25 m/a。

### 2.3 哈尔乌素露天煤矿合理工作线长度与年推进度

基于年剥离总费用最低为目标的工作线长度优化数学模型,可得哈尔乌素露天矿经济合理的理论工作线长度1 620~2 315 m,完成35 Mt/a原煤产能目标的工作线年推进度400~571.6 m。

根据哈尔乌素露天矿现有采掘设备型号及生产能力,分析在不同采掘设备布置方式条件下所能达到的最大推进强度可知:若满足采掘设备对采掘区长度的要求,工作线长度宜设置在1 820 m以上。在采煤台阶高度10 m、工作线长度为1 820~2 315 m时,满足设备理论最大能力的工作线推进度极限可达到543~687 m/a。考虑气候变化、地质条件、设备出动率等因素的影响,取工作线年推进度理论上最大值的75%,即407.25~515.25 m/a为宜。

综上,哈尔乌素露天矿完成35 Mt/a原煤生产任务的合理工作线长度为1 620~2 315 m,当工作线长度在1 820 m以上时,采掘设备能力可以得到最大发挥,此时的工作线年推进度在400~515.25 m的可行范围内。

## 3 哈尔乌素露天煤矿工作线布置及发展方案设计与工程推演

哈尔乌素露天矿首采区工作线退回至矿权界内后,若仍沿用工作线沿煤层倾向直线型布置、沿走向平行发展的开采程序,完成35 Mt/a原煤生产任务的工作线推进位置如图7所示,各年度工作线长度与推进度如表6所示。

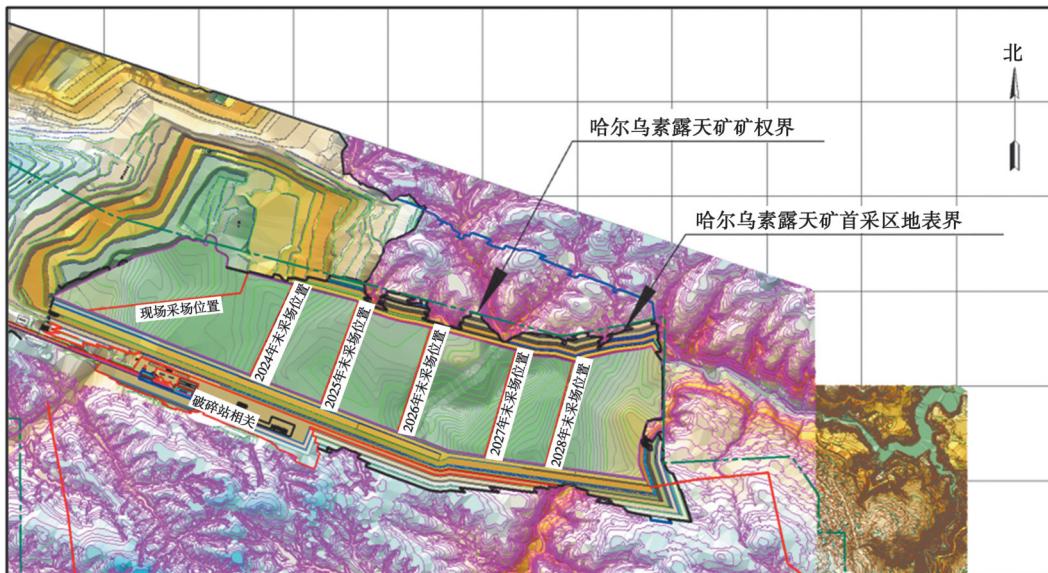


图7 工作线沿倾向直线布置、沿走向平行发展模拟开采结果

Fig. 7 Simulated mining results when the working line is arranged in a straight line along the tendency and parallel development along the strike

表6 工作线沿倾向直线布置、沿走向平行发展各阶段工作线长度与推进度

Table 6 The length and advance degree of the working line in each stage when the working line is arranged in a straight line along the tendency, and developed in parallel along the trend

阶段位置	工作线长度/km	推进度/m	生产能力/万t
2024	1.04	878	3 500
2025	1.11	760	3 500
2026	1.14	849	3 500
2027	1.15	943	3 500
2028	1.12	628	3 500

由表6可知,工作线沿煤层倾向直线型布置、沿走向平行发展时,工作线长度1.04~1.15 km,工作线推进度628~943 m。工作线长度已小于合理工作线长度与布置采掘设备所需的采掘区长度,而且,工作线推进度也已远超可行范围,生产组织上难以实现。

### 3.1 基于蒙特卡洛方法的工作线形态优化

由前述分析可知:当采用工作线沿煤层倾向直线型布置、沿走向平行发展的开采程序时,工作线长度和推进速度均不在合理范围内,因此,为了延长工作线长度,并将工作线年推进度控制在合理范围内,可以采用工作线斜交煤层走向布置、近平行发展的开采程序,但此时工作线与北端帮会斜交形成锐夹角,给采掘和运输设备作业带来较大困难(见图8)。若将工作线形态改变为类现场工作线布置形态的“L”型布置,使工作线北翼与北端帮形成的夹角大于等于90°,会有效改善采运设备作业条件<sup>[25]</sup>。按此原则设计工作线形态可供选择的工作线形态较多,这里应用蒙特卡洛方法对工作线形态进行设计优选。

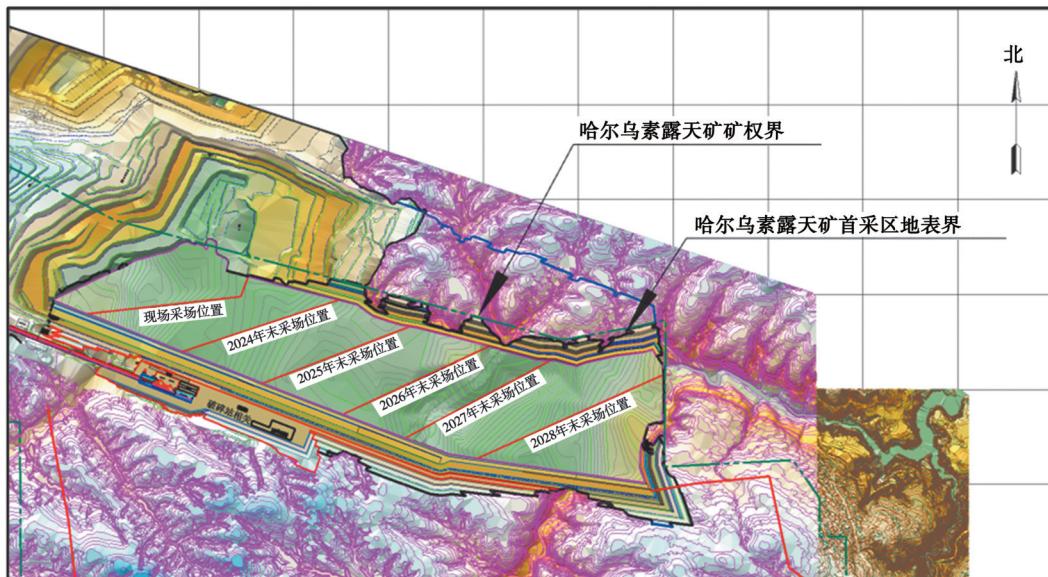


图8 工作线斜交煤层走向布置,近扇形方式发展模拟开采结果

Fig. 8 Simulated mining results when the working line is arranged along the strike of the oblique coal seam and developed in an approximately fan-shaped way

蒙特卡洛方法的核心思想是针对某一问题的解设定参数、建立模型,根据现实情况进行大量的随机模拟,随机模拟次数越多,得到的解越趋近于问题的真实解<sup>[26-27]</sup>。

$$\xi_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi_n = \bar{\xi} \approx E(\xi), \quad (13)$$

式中:设数学期望是  $E(\xi)$ ,对  $\xi$  进行  $N$  次模拟得到  $N$  个  $\xi$  值,当  $N \rightarrow \infty$  时,  $\bar{\xi} \approx E(\xi)$ 。

由于工作线形态是一种抽象的概念,难以使用数学方法直接建模求解,应用蒙特卡洛方法在煤底板平面上随机抽取点作为“L”型布置工作线的拐点,检查按其作为拐点布置“L”型工作线时,得到的工作线形态是否满足设定条件。在随机模拟过程中过滤掉不符合目标要求的结果后,得到所有可行的“L”型工作线形态。

蒙特卡洛方法设计工作线形态的具体步骤如下:

1)连接现场工作线与南北端帮交点做基准线(见图9),根据基准线位置做工作线斜交煤层走向布置,工作线采用近平行发展方式模拟开采。

2)在改变工作线形态为类“L”型布置时,会在条块内产生煤量缩量区域  $M_1$  与增量区域  $M_2$ (见图10(a))。若  $M_1=M_2$ ,则产能不变。同理,推进至下一阶段时,需使缩量  $M_2$  与增量  $M_3$  相等,循环计算即可求得所有工作线布置形态。

在初始条块,基准线与现场工作线组成的近三角形区域内煤量为初始缩量  $M_1$ 。在区域  $ABCD$  内搜寻所有



图9 基准线所在位置

Fig. 9 Location of the reference line

将工作线改变为类“L”型布置时符合条件的工作线折线拐点O,使形态改变后的工作线BOC的长度满足2.3节中确定的合理工作线长度要求(见图10(b))。

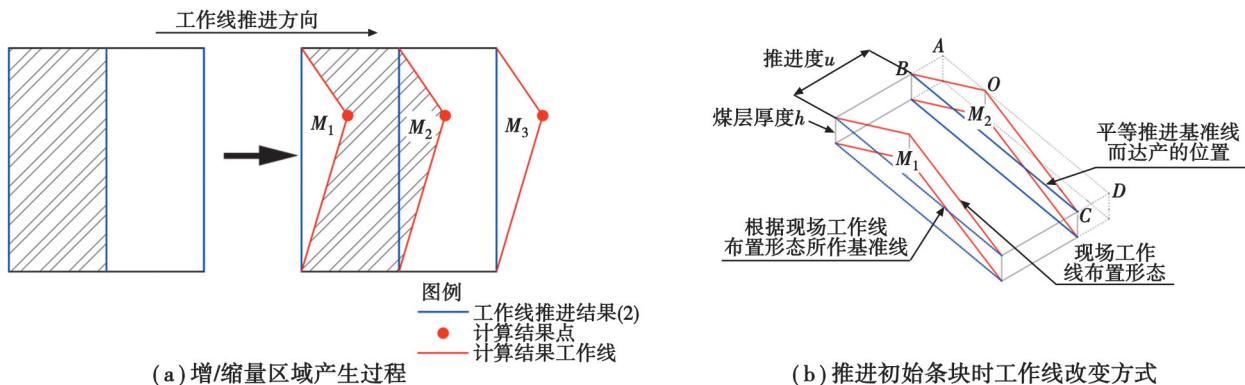


图10 划分条块后工作线形态改变方式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the shape change of the working line after the division of the strip

为了便于在图中展示工作线形态优化后的成果,将原图中坐标进行如下转换。

$$\begin{aligned} A &= \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots, (X_n, Y_n)\}, \\ B_i(x_i, y_i) &= (X_i - X_{\min}, Y_i - Y_{\min}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ B &= \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)\}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中:A为原图中拐点平面坐标集;B为转换后的拐点平面坐标集。

拐点坐标转换后,任意两点间距离l为

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}。 \quad (15)$$

缩/增量区域内煤量表示为

$$M_i = h\gamma \sqrt{s \cdot (s-a) \cdot (s-b) \cdot (s-c)}, \quad (16)$$

式中: $M_i$ 为缩/增量区域内煤量,t; $h$ 为煤层平均厚度,m; $\gamma$ 为煤的密度,t/m<sup>3</sup>; $s = \frac{a+b+c}{2}$ 为缩/增量区域周长一半,m; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为式(15)计算所得缩/增量区域边长 $l$ ,m。

算法采用Python语言实现,在限制工作线BOC长度范围为1 820~2 315 m, $M_1=M_2$ 后,应用蒙特卡洛方法,随机模拟 $10^8$ 次,允许结果误差范围在0.01之内,输出所有符合条件的点O坐标。

图11为蒙特卡洛法输出的工作线拐点坐标经过转化后的二维形态,图中点O即为与合理工作线长度1 820 m误差最小的拐点。

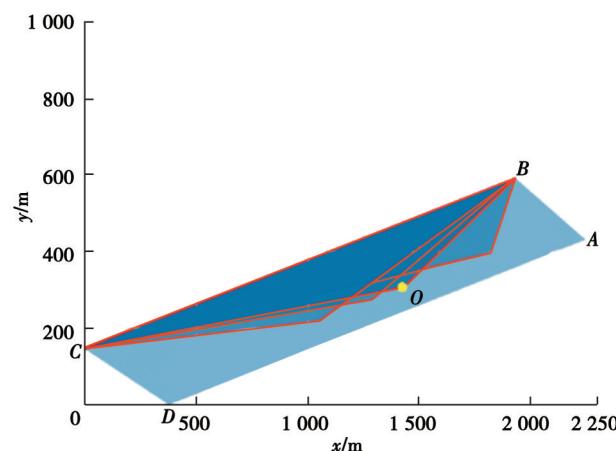


图11 2024年位置工作线形态计算输出结果

Fig. 11 Output results of position working line shape calculation in 2024

### 3.2 工作线布置及发展方案的工程推演

#### 3.2.1 方案一

整理蒙特卡洛方法输出结果,选取所有使工作线形态改变后长度最贴近1 820 m的拐点,将其平面坐标转化为地理坐标后,呈现在工程图上为工作线布置方案一(见图12),此方案首采区服务年限为5.8 a。按原煤产量规模35 Mt/a和优化后的工作线形态,对2024—2028年剥、采、排、运工程发展演变进行了详细设计,篇幅所限,未将逐年度详细设计工程位置图在文中一一呈现,仅以各年末采煤工作线推进位置在图中简化表示,至2028年末,首采区采煤工作线由“L”型调整为整体与煤层走向斜交布置的直线型。此方案2024—2028年各年度主要技术经济指标如表7所示。

由图12和表7可知,此方案可较好地满足2.3节中确定的合理工作线长度,可获得最佳经济效益。但部分区域工作线推进度过大,在实际生产中实现存在一定困难。

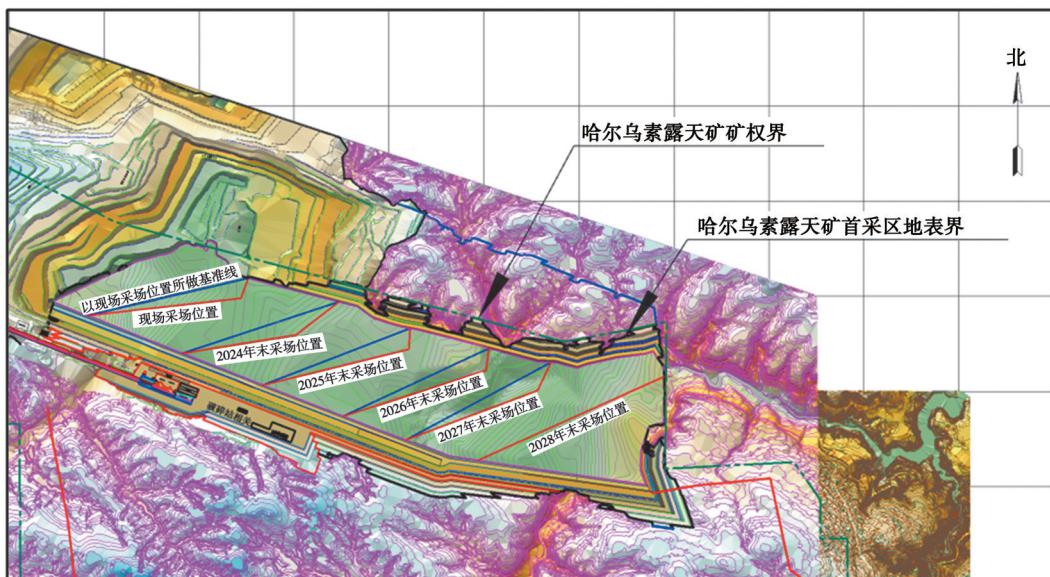


图12 工作线布置方案一

Fig. 12 Working line layout of scheme 1

表7 方案一2024—2028年生产指标

Table 7 Production index from 2024 to 2028 of scheme 1

年度	工作线长度/m			平均推 进度/m	原煤运距/ km	原煤提升 高差/m	剥离物运 距/km	剥离物提 升高差/m	生产剥 采比
	南翼	北翼	合计						
2024	1 621.80	225.74	1 847.54	485	5.58	157.67	3.41	-28.73	3.72
2025	1 250.25	569.75	1 821.13	538	5.77	139.84	4.19	1.51	3.66
2026	1 599.92	220.08	1 820.64	489	5.63	94.29	2.92	10.80	3.53
2027	1 585.55	234.45	1 820.37	457	6.11	120.86	2.51	88.65	3.60
2028	—	—	2 147.21	498	5.21	110.00	3.55	-35.48	3.57

#### 3.2.2 方案二

为尽量使工作线平行发展,在计算时增加限制条件:北翼工作线长度固定为与现场工作线形态近似的225.74 m,允许工作线总长度与目标长度的误差为±100 m。图13为本方案通过工程推演确定的2024—2028年各年度年末采煤工作线推进位置,表8所列为2024—2028年各年度主要技术经济指标。

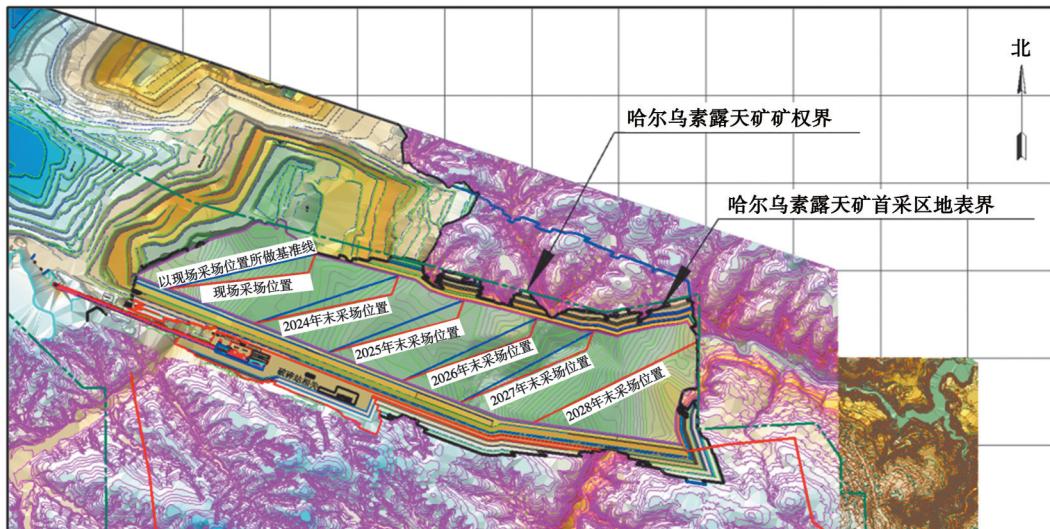


图 13 工作线布置方案二

Fig. 13 Working line layout of scheme 2

表 8 方案二 2024—2028 年生产指标

Table 8 Production index from 2024 to 2028 of scheme 2

年度	工作线长度/m			平均推进度/m	原煤运距/km	原煤提升高差/m	剥离物运距/km	剥离物提升高差/m	生产剥采比
	南翼	北翼	合计						
2024	1 621.80	225.74	1 847.54	492	5.67	157.67	3.37	-28.73	3.54
2025	1 603.09	225.74	1 828.83	500	5.86	139.84	4.22	1.51	3.35
2026	1 520.67	225.74	1 734.41	487	5.63	94.29	2.83	10.80	3.44
2027	1 540.41	225.74	1 766.15	462	6.40	120.86	2.48	88.65	3.50
2028	—	—	2 092.62	500	5.15	110.00	3.42	-35.48	3.44

### 3.2.3 方案三

为延长首采区服务年限<sup>[23]</sup>,进一步减小后续工作线年推进强度,根据哈乌素露天矿矿权界和已确定的合理工作线长度,将原首采区南端帮向南扩帮,重新圈定首采区开采境界(见图 14),扩帮后首采区服务年限为 10.3 a。

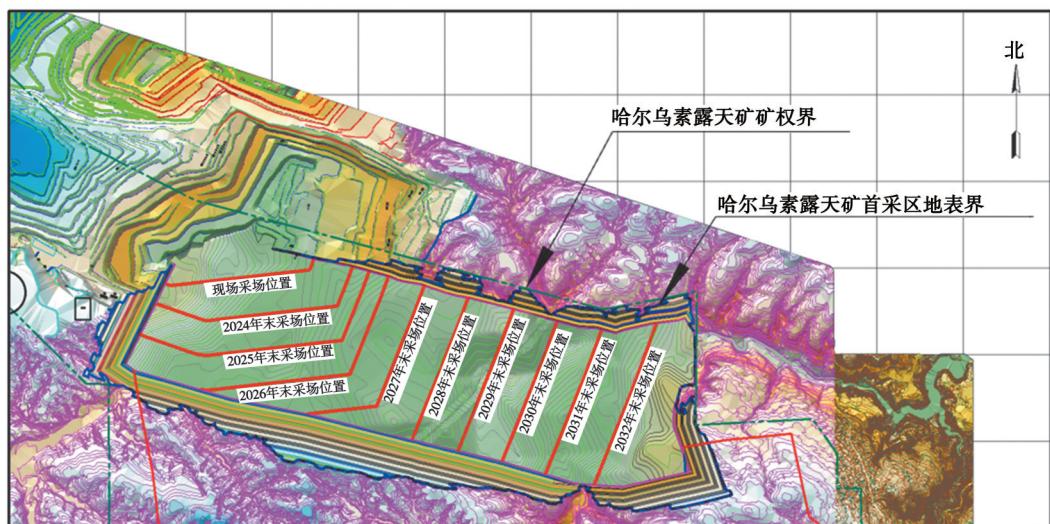


图 14 工作线布置方案三

Fig. 14 Working line layout of scheme 3

基于哈尔乌素露天矿采剥现状,此方案在2024—2026年工作帮向东推进的同时,南端帮向南扩帮,采煤工作线呈“U”型布置;至2026年底,“U”型工作线向南扩帮至设计境界位置后,从2027年开始,采煤工作线由“U”型转变为“L”型布置,向东南和向东平行发展;至2028年底,采煤工作线演变为沿煤层走向直线型布置、平行发展。2024—2028年各年度年末采煤工作线计划推进位置如图14所示,各年度主要技术经济指标如表9所示。

表9 方案三2024—2028年生产指标

Table 9 Production index from 2024 to 2028 of scheme 3

年度	向南扩帮 推进度/m	工作线 长度/m	向东平均 推进度/m	原煤 运距/km	原煤提升 高差/m	剥离物 运距/km	剥离物提 升高差/m	生产剥 采比
2024	200	2 639.30	470	4.15	73.78	3.60	51.24	5.43
2025	400	3 248.75	395	4.61	65.62	4.60	77.33	5.42
2026	432	2 954.67	385	4.11	40.20	3.87	-14.97	4.79
2027	—	2 302.97	425	4.54	43.19	3.24	-29.37	4.08
2028	—	1 862.31	525	3.71	36.66	2.14	0.31	4.10

#### 4 基于CRITIC-TOPSIS的工作线布置与工作方案综合评价比选

近年来,多学科的交叉与融合使得多指标综合评价方法不断丰富,常用的方法主要有:层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、模糊综合评判法(fuzzy comprehensive evaluation method)、灰色关联度法(grey relational analysis)、逼近理想解排序(technique for order of preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法、主成分分析法(principal component analysis, PCA)、数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)、变异系数法(coefficient of variation method)等<sup>[28]</sup>。

TOPSIS法是一种通过计算评价对象与最优方案和最劣方案间的距离来评判该评价对象优劣的方法,因具有简单可行且合乎逻辑等优点而得到广泛应用<sup>[29]</sup>。

在应用TOPSIS法进行综合评价过程中,需要确定评价指标体系中各指标的权重,常用的主观赋权法如:专家评判法、AHP法等,评价指标权重的确定偏主观性,可能会导致评价结果与实际情况出现较大偏差<sup>[30]</sup>。因此,在选用TOPSIS法作为工作线布置方案评价方法的同时,辅以CRITIC(criteria importance through intercrieria correlation)法基于评价指标的对比强度和冲突性来确定评价指标的客观权数<sup>[31]</sup>,以降低评价结果的主观性,提高决策科学性。

##### 4.1 哈尔乌素露天矿工作线布置及工作方案评价指标选取

通过对所提出的3种工作线布置及工作方案进行逐年度剥、采、排、运工程时空发展关系动态推演,测算得到的各方案生产剥采比、剥离加权平均运距与提升高差、原煤加权平均运距与提升高差、平均最大推进度等6项关键指标(见表7~9)。

3种工作线布置方案技术指标表现各有优劣(见表10),难以直接判断最优方案。方案一、二首采区服务年限为5.8 a,所以取各方案5 a内6项关键指标平均值构建客观赋权法CRITIC-TOPSIS综合评价模型。

表10 工作线布置方案测算指标

Table 10 Calculation index of working line layout scheme

序号	指标	方案一	方案二	方案三
$X_1$	平均生产剥采比/( $m^3 \cdot t^{-1}$ )	3.62	3.45	4.76
$X_2$	剥离加权平均运距/km	3.32	3.26	3.49
$X_3$	原煤加权平均运距/km	5.66	5.74	4.22
$X_4$	剥离加权平均提升高差/m	7.35	7.35	16.91
$X_5$	原煤加权平均提升高差/m	124.53	124.53	51.89
$X_6$	平均最大推进度/m	524	497	440

平均生产剥采比( $X_1$ )、剥离加权平均运距( $X_2$ )与原煤加权平均运距( $X_3$ )、剥离加权平均提升高差( $X_4$ )、原煤加权平均提升高差( $X_5$ )与平均最大推进度( $X_6$ )6项指标均属于成本型指标,越小越理想。

#### 4.2 基于CRITIC-TOPSIS综合评价模型的工作线布置及发展方案评价

基于CRITIC-TOPSIS综合评价模型对工作线布置方案进行多指标综合比较优选步骤如下:

1)构建决策矩阵。假设有 $m$ 个评价对象,每个对象定义 $n$ 个评价指标,则决策矩阵 $A$ 为<sup>[32]</sup>

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} = (a_{ij})_{m \times n} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n), \quad (17)$$

式中: $A$ 为决策矩阵; $a_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 项评价指标。

基于表10所列工作线布置方案选取的评价指标值,构建工作线布置方案评价决策矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 3.62 & 3.32 & 5.66 & 7.35 & 124.53 & 524 \\ 3.45 & 3.26 & 5.74 & 7.35 & 124.53 & 497 \\ 4.76 & 3.49 & 4.22 & 16.91 & 51.89 & 440 \end{bmatrix}.$$

2)决策矩阵归一化。按式(18)对决策矩阵进行归一化处理<sup>[33]</sup>

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}, \quad (18)$$

式中: $a_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 项评价指标; $a_{ij}^*$ 为归一化处理后的评价指标。

应用式(18)对工作线布置方案评价决策矩阵进行归一化,归一化后的决策矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.3060 & 0.3297 & 0.3624 & 0.2325 & 0.4138 & 0.3587 \\ 0.2916 & 0.3237 & 0.3675 & 0.2325 & 0.4138 & 0.3402 \\ 0.4024 & 0.3466 & 0.2702 & 0.5350 & 0.1724 & 0.3012 \end{bmatrix}.$$

3)建立加权标准化决策矩阵。加权标准化决策矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} \omega_{11}a_{11}^* & \omega_{12}a_{12}^* & \cdots & \omega_{1n}a_{1n}^* \\ \omega_{21}a_{21}^* & \omega_{22}a_{22}^* & \cdots & \omega_{2n}a_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \omega_{m1}a_{m1}^* & \omega_{m2}a_{m2}^* & \cdots & \omega_{mn}a_{mn}^* \end{bmatrix} = (\omega_{ij}a_{ij}^*)_{m \times n} = (c_{ij})_{m \times n} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n), \quad (19)$$

式中: $C$ 为加权标准化决策矩阵; $a_{ij}^*$ 为归一化后的评价指标; $\omega_{ij}$ 为指标权重,采用CRITIC法确定; $c_{ij}$ 为加权标准化后的评价指标。

加权标准化决策矩阵的建立,需要首先确定各项评价指标的客观权重,应用文献[33]中方法计算工作线布置方案评价指标客观权重为

$$W = (0.1267 \quad 0.0246 \quad 0.1178 \quad 0.3721 \quad 0.2982 \quad 0.0607).$$

在已确定各项评价指标权重的基础上,应用式(19)建立工作线布置方案评价加权标准化决策矩阵

$$C = \begin{bmatrix} 0.0388 & 0.0081 & 0.0427 & 0.0865 & 0.1234 & 0.2177 \\ 0.0369 & 0.0080 & 0.0433 & 0.0865 & 0.1234 & 0.2065 \\ 0.0510 & 0.0085 & 0.0318 & 0.1990 & 0.0514 & 0.1828 \end{bmatrix}.$$

4)计算工作线布置方案理想解接近度。

①构建理想解矩阵。理想解按式(20)计算。

$$\begin{cases} C^+ = \left[ \left( \max_i c_{ij} | j \in J_1 \right), \left( \min_i c_{ij} | j \in J_2 \right) \right], \\ C^- = \left[ \left( \min_i c_{ij} | j \in J_1 \right), \left( \max_i c_{ij} | j \in J_2 \right) \right], \end{cases} \quad (20)$$

式中: $C^+$ 和 $C^-$ 分别为正、负理想解矩阵; $J_1$ 为效益型指标集,该指标集中的指标值越大越理想; $J_2$ 为成本型指标集,该指标集中的指标值越小越理想。6项指标均属成本型指标。

②计算各评价对象与理想解的距离。

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2}, \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2}. \end{cases} \quad (21)$$

式中: $d_i^+$ 和 $d_i^-$ 分别为待评价对象与正、负理想解的距离; $c_j^+$ 和 $c_j^-$ 分别为理想解矩阵中各评价指标值。

③计算评价对象接近度。按式(22)计算评价对象接近度

$$E_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} (0 \leq E_i^+ \leq 1), \quad (22)$$

式中: $E_i^+$ 为评价对象的接近度,值越大,表明评价对象与最优解越接近; $d_i^+$ 和 $d_i^-$ 分别为待评价对象与正、负理想解的距离。

### 4.3 工作线布置及发展方案比选

应用式(20)构建工作线布置方案正负理想解矩阵

$$\begin{cases} C^+ = [0.0369 \ 0.0080 \ 0.0318 \ 0.0865 \ 0.0514 \ 0.1828], \\ C^- = [0.0510 \ 0.0085 \ 0.0433 \ 0.1990 \ 0.1234 \ 0.2177]. \end{cases}$$

应用式(21)(22)计算工作线布置方案与理想解的接近度: $E_1^+=0.5835$ 、 $E_2^+=0.5978$ 、 $E_3^+=0.4162$ 。

计算结果表明方案二优于方案一和三,因此,选择方案二作为工作线布置方案。

## 5 结 论

1)针对哈尔乌素露天煤矿在首采区工作线退回至矿权界内后,工作线长度变短、采区宽度变窄的工程背景,以经济合理、技术可行为基本原则,建立了以年剥离总费用最低为目标的工作线长度优化数学模型,确定了经济合理的工作线长度为1 620~2 315 m,进一步结合哈尔乌素露天矿现有采掘设备生产能力和设备布置方案,确定了工作线年平均推进度控制在400~515.25 m可行范围内时,可使采掘设备生产能力充分发挥的工作线长度为1 820 m;

2)基于工作线可行推进度分析确定的工作线长度,采用蒙特卡洛方法对工作线形态进行了优化设计,提出了3种满足工作线长度要求与年推进度限制的工作线布置与发展方式方案,在对3种方案逐年度进行剥、采、排、运工程时空发展关系动态推演的基础上,测算了各方案生产剥采比、剥离加权平均运距与提升高差、原煤加权平均运距与提升高差、平均最大推进度等6项关键指标;

3)构建了基于客观赋权法的CRITIC-TOPSIS综合评价模型对3种工作线布置和发展方案进行综合评价,评价结果表明,方案2与理想解贴近度最高,可使哈尔乌素露天煤矿在采区宽度变窄条件下以最佳技术与经济效益实现35 Mt/a的原煤产能目标。

## 参考文献

- [1] 高永涛,吴顺川.露天采矿学[M].长沙:中南大学出版社,2010: 171-174.  
Gao Y T, Wu S C. Open pit mining[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 171-174. (in Chinese)
- [2] 马力,李瑞行,刘福明,等.露天煤矿产能核增影响下采区划分研究[J].煤炭科学技术,2023, 51(11): 63-70.  
Ma L, Li R H, Liu F M, et al. Study on division of mining area under influence of production capacity increasing of open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 63-70. (in Chinese)
- [3] 孙俊东.胜利一号露天矿采区转向方式优化研究[J].煤炭工程,2021, 53(9): 11-15.  
Sun J D. Optimization of mining area steering scheme in Shengli No.1 Open-pit Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2021, 53(9): 11-15. (in Chinese)
- [4] 曹兰柱,林木,丁春健.元宝山露天矿合理工作线长度的研究[J].露天采矿技术,2020, 35(1): 1-3, 8.  
Cao L Z, Lin M, Ding C J. Study on reasonable working line length in Yuanbaoshan open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(1): 1-3, 8. (in Chinese)
- [5] 刘月亭,侯占山,韦玉飞.大型露天矿狭窄工作线采矿优化研究[J].露天采矿技术,2019, 34(5): 12-14.  
Liu Y T, Hou Z S, Wei Y F. Optimization study on narrow working line mining in large open-pit mine[J]. Opencast Mining

- Technology, 2019, 34(5): 12-14. (in Chinese)
- [6] 赵天佑, 武懋. 平朔安太堡露天矿背斜东翼开拓延深工作线长度优化[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(4): 1-3, 7.  
Zhao T Y, Wu M. Optimization of anticline east wing extended working line length in Pingshuo Antaibao open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2018, 33(4): 1-3, 7. (in Chinese)
- [7] 薛万海. 安太堡露天矿局部并帮缩界内排优化方案探讨[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(9): 56-58, 62.  
Xue W H. Discussion on local combined slope shrinkage internal dumping optimization scheme[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(9): 56-58, 62. (in Chinese)
- [8] 郑红升. 安家岭露天矿首采区东南部剥离工作线优化研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(2): 67-71.  
Zheng H S. Study on optimization of stripping line in southeast of the first mining area of Anjialing open pit mine[J]. Mining Technology, 2024, 24(2): 67-71. (in Chinese)
- [9] 贾荣军. 伪走向工作线布置在奇台总场露天煤矿设计中的应用[J]. 露天采矿技术, 2012, 27(4): 17-18.  
Jia R J. Application of pseudo-strike working line layout in the design of Qitai general field open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2012, 27(4): 17-18. (in Chinese)
- [10] 赵登娟, 傅新华. 露天矿应用自移式破碎机半连续工艺合理的工作线长度[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(7): 46-49.  
Zhao D J, Fu X H. Reasonable working line length of semi-continuous process with self-moving crusher in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(7): 46-49. (in Chinese)
- [11] 苏迁军. 自移式半连续工艺工作线布置形态的研究[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(8): 29-32.  
Su Q J. Research on self-moving semi-continuous technology working-line layout pattern[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(8): 29-32. (in Chinese)
- [12] 王东, 李广贺, 曹兰柱, 等. 基于内排空间利用最大化的露天煤矿排土线布置方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3150-3156.  
Wang D, Li G H, Cao L Z, et al. Method for arranging the working line of internal waste dump in surface coal mining based on maximizing utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3150-3156. (in Chinese)
- [13] 高岩, 昌珺, 房健, 等. 大型露天煤矿工作线布置方式研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(9): 51-54.  
Gao Y, Chang J, Fang J, et al. Study on arrangement of work line in large open-pit coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(9): 51-54. (in Chinese)
- [14] 白润才, 白文政, 刘光伟, 等. 露天矿采区划分TOPSIS决策方法及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(12): 1240-1245.  
Bai R C, Bai W Z, Liu G W, et al. The division of the open-pit mining area-based TOPSIS decision making method and its application[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(12): 1240-1245. (in Chinese)
- [15] 张利忠. 宝日希勒露天煤矿二采区3号煤层开采方案优化研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.  
Zhang L Z. Research on streamline mining scheme of 3# coal seam in second mining district of Baorixile surface coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014. (in Chinese)
- [16] 刘桐. 霍林河一号露天矿采区划分及过渡优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.  
Liu T. Optimization research on mining section dividing and transition for Huolin River No. 1 open-pit mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] 蔡忠超, 魏峰, 李慧智. 不同工作线长度下拉沟方案的比选[J]. 煤炭工程, 2012, 44(S2): 10-11, 14.  
Cai Z C, Wei Z, Li H Z. Comparison and selection of ditching schemes with different working line length[J]. Coal Engineering, 2012, 44(S2): 10-11, 14. (in Chinese)
- [18] 贾荣军. 白砾滩露天煤矿开采工艺方案比选[J]. 煤炭工程, 2012, 44(7): 12-13.  
Jia R J. Comparison and selection of mining technology schemes in Bailitan open-pit coal mine[J]. Coal Engineering, 2012, 44(7): 12-13. (in Chinese)
- [19] 赵红泽, 刘元旭, 郭帅, 等. 安家岭露天煤矿过背斜开采方案优化及比选[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 25-30.  
Zhao H Z, Liu Y X, Guo S, et al. Optimization and selection of mining schemes across anticlines in Anjialing open-pit coal mine[J]. Coal Engineering, 2021, 53(10): 25-30. (in Chinese)
- [20] 王寰宇, 韩延清, 渠爱巧, 等. 某露天煤矿陡帮开采技术方案比选[J]. 现代矿业, 2017, 33(6): 57-62, 75.  
Wang H Y, Han Y Q, Qu A Q, et al. Optimization selection of steep mining technical scheme of a open-pit coal mine[J]. Modern Mining, 2017, 33(6): 57-62, 75. (in Chinese)
- [21] 杨荣新. 露天采矿学-下册[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 146-149.

- Yang R X. Open pit mining-volume II[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1990: 146-149. (in Chinese)
- [22] 于汝绶, 习永峰. 露天矿工作线长度的优化[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 15(1): 18-32.
- Yu R S, Xi Y F. Optimization of the economical length of working-line in open pit mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986, 15(1): 18-32. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 董宝弟. 露天矿单斗-卡车开采工艺水平推进强度的理论计算[J]. 煤炭工程, 2007, 39(F10): 9-10.
- Dong B D. Theoretical calculation of horizontal propulsion strength of single bucket-truck mining technology in open pit mine[J]. Coal Engineering, 2007, 39(F10): 9-10. (in Chinese)
- [25] 于汝绶, 张瑞新. 露天采矿优化理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 174-189.
- Yu R S, Zhang R X. Optimization theory and practice of open-pit mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005: 174-189. (in Chinese)
- [26] 周绪达. 使用蒙特卡洛方法求解不规则图形的面积[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2019(1): 147-148.
- Zhou X D. Using Monte Carlo method to solve the area of irregular graphics[J]. Management & Technology of SME, 2019(1): 147-148. (in Chinese)
- [27] 卢皎旭, 李角群, 郭进平, 等. 蒙特卡洛模拟法在矿业项目净现值计算中的应用[J]. 采矿技术, 2021, 21(5): 187-191.
- Lu J X, Li J Q, Guo J P, et al. Application of Monte Carlo simulation method in calculation of net present value of mining projects[J]. Mining Technology, 2021, 21(5): 187-191. (in Chinese)
- [28] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 综合评价方法分类及研究进展[J]. 管理科学学报, 2004, 7(2): 69-79.
- Chen Y T, Chen G H, Li M J. Classification & research advancement of comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(2): 69-79. (in Chinese)
- [29] 肖青, 胡豪, 李晶. 基于CRITIC-TOPSIS法的邮船船型选择[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(3): 53-56, 84.
- Xiao Q, Hu H, Li J. Selection of cruise ship type based on CRITIC-TOPSIS method[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2018, 39(3): 53-56, 84. (in Chinese)
- [30] 何超, 李萌, 李婷婷, 等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 172-178.
- He C, Li M, Li T T, et al. Comparison and analysis of the four methods of determining weights in multi-objective comprehensive evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(2): 172-178. (in Chinese)
- [31] 徐宇恒, 程嗣怡, 庞梦洋. 基于CRITIC-TOPSIS的动态辐射源威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2168-2175.
- Xu Y H, Cheng S Y, Pang M Y. Dynamic radiator threat assessment based on CRITIC-TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(11): 2168-2175. (in Chinese)
- [32] 吴振坤, 金爱兵, 陈帅军. 基于多指标综合评价的采场结构参数及回采顺序优选[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 1-7.
- Wu Z K, Jin A B, Chen S J. Optimization of stope structure parameters and stoping sequence based on multi-index comprehensive evaluation[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 1-7. (in Chinese)
- [33] 张富兴, 张宏伟, 虞松涛, 等. 基于CRITIC赋权的回采顺序优化模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(4): 1-7.
- Zhang F X, Zhang H W, Yu S T, et al. Simulation research on mining sequence optimization based on CRITIC empowerment[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese)

(编辑 郑洁)