金属价格上涨驱动下采矿边界品位动态调整逻辑探究*

邓艳娥[1,2,3],杨小艳[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造技术中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:在金属市场价格波动加剧,整体呈现震荡向上的背景下,传统的固定边界品位决策难以适应市场变化,不利于矿山企业的长期发展。基于此,研究了金属价格波动与采矿边界品位动态调整间的内在逻辑与经济机理。利用帝国竞争算法(ICA),结合盈亏平衡分析、多金属品位折算、随机价格预测等模型,构建了集成数据感知、模型决策、智能执行与反馈优化的边界品位动态调整逻辑框架。以某铜多金属矿为例,设置静态均价、价格渐进上涨、随机价格路径及价格-成本双向联动四种情景进行实证分析,结果表明:边界品位与价格水平呈显著负相关,动态调整可有效延长矿山生产年限并提升净现值;随机价格下的最优策略较确定性情景更为保守,可有效规避金属价格下行风险;成本弹性系数对边界品位具有显著调节效应,成本弹性系数增大时,降低利润波动性的同时也削弱了价格上涨时期的利润弹性。未来,矿山企业需聚焦于深度融合地质、市场价格与生产数据,借助智能化技术实现从"静态设计"到"动态响应"的根本转变,以提升整体抗风险能力与资源利用效率。

关键词:边界品位;金属价格上涨;帝国竞争算法;价格-品位-利润模型;动态调整

中图分类号:TD80;F407.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0328-10

Study on Dynamic Adjustment Logic of Mining Cut-Off Grade Driven by Rising Metal Prices

Deng Yan'e[1,2,3], *Yang Xiaoyan*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Provincial Technology Center for Mine Geological Disaster Prevention and Control and Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Against the background of intensified price fluctuations and an overall oscillating upward trend in the metal market, traditional decision-making based on a fixed cut-off grade is difficult to adapt to market changes, which is detrimental to the long-term development of mining enterprises. Based on this, the internal logic and economic mechanism between metal price fluctuation and dynamic adjustment of mining cut-off grade were studied. Using the imperialist competitive algorithm (ICA), combined with models such as break-even analysis, multi-metal grade conversion, and stochastic price prediction, a logical framework for the dynamic adjustment of cut-off grade integrating data perception, model decision-making, intelligent execution, and feedback optimization was constructed. Taking a copper polymetallic mine as an example, four scenarios, namely static average price, progressive price increase, stochastic price path, and two-way price-cost linkage, were set up for empirical analysis. The results show that the cut-off grade is significantly negatively correlated with the price level, and dynamic adjustment can effectively prolong the mine production life and increase the net present value; the optimal strategy under stochastic prices is more conservative than that in deterministic scenarios, which can effectively mitigate the downside risk of metal prices; the cost elasticity coefficient has a significant regulating effect on the cut-off grade, and an increase in the cost elasticity coefficient reduces profit volatility while simultaneously weakening profit elasticity during periods of price increases. In the future, mining enterprises should focus on the deep integration of geological, market price and production data, and utilize intelligent technologies to achieve a fundamental transformation from "static design" to "dynamic response", thereby enhancing overall risk resistance capacity and resource utilization efficiency.

Key words: Cut-off grade, Metal price rise, Imperialist competitive algorithm, Price-grade-profit model, Dynamic adjustment

---

* **收稿日期**:2026-04-29

作者简介:邓艳娥(1985—),女,湖北荆州人,高级工程师,主要从事金属矿床开采设计及咨询、工程经济研究等方面的工作。E-mail:279021241@qq.com

通信作者:杨小艳(1998—),女,江西吉安人,硕士,工程师,主要从事金属矿床开采、工程经济研究等方面的工作。E-mail:2605061778@qq.com

0　引言

边界品位是区分矿石与废石、决定矿产资源经济可采性的关键技术经济指标[1-2]。在矿业项目全生命周期中，边界品位并非一成不变，而是受到金属价格、开采选冶成本、技术条件、税收政策及资金时间价值等多重因素的动态影响[3-4]。其中，金属市场价格作为最活跃、最不可控的外部变量，对边界品位的确定具有决定性作用。

围绕边界品位的动态调整，国内外学者进行了大量研究。Lane[5]于1964年提出的经典动态规划方法，奠定了考虑时间价值的边界品位优化理论基础，后续学者在此基础上进行了多方面拓展。Nieto等[6]基于Lane的理论提出了一种迭代优化算法，实现了边界品位的动态寻优，使净现值提升了40%。Mohammadi等[7]将帝国竞争算法（Imperialist Competitive Algorithm，ICA）应用于Golgohar铁矿的边界品位优化，验证了ICA在多约束非线性优化问题上的有效性。Roos[8]则从不确定性量化角度出发，为边界品位的可视化选择与评估提供了新思路。国内研究同样也取得积极进展。李裕伟[2]系统总结了边界品位的确定方法及其在矿产勘查中的应用，强调了动态思维的重要性。王青等[9]采用经典的盈亏平衡法，对边界品位和露天境界进行了协同优化。钟旭东[1]采用粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法、遗传算法（Genetic Algorithm，GA）开展多金属矿边界品位的动态测算，并结合配矿优化技术进行了实证分析。姜梦珂[4]结合GA和二项式定价法，研究金属价格波动下边界品位的动态优化策略。许倩倩等[10]对比了ICA和Lane法对多金属矿边界品位优化的结果，发现ICA具有更优的求解性能。然而，现有研究多聚焦于单一环节的优化，如仅考虑价格因素或仅采用确定性模型，缺乏将价格、成本、利润有机整合的系统性研究。因此，如何构建从数据感知到智能执行的完整逻辑框架，实现边界品位从“静态确定”到“动态调整”的转变，已成为当前亟待深入研究的课题。

当前全球资源供需格局失衡、地缘政治博弈持续加剧，且中国对战略性资源的需求不断提升，矿业发展正面临日益复杂的政治环境与剧烈的市场波动[11]。以铜市场为例，2026年上半年铜价呈现高位宽幅震荡格局，振幅超过24%；矿端供应扰动（如印尼Grasberg铜矿尾矿事故、美伊地缘风险等）与冶炼成本压力相互叠加，形成了负反馈循环，导致铜的市场价格波动加剧。在此背景下，僵化的固定边界品位策略将导致企业陷入两难困境：一方面，在价格上涨时错失利用低品位资源盈利的机会；另一方面，在价格下跌时因开采高成本矿石而亏损。因此，探究金属价格上涨驱动下边界品位的动态调整逻辑，建立一套科学、灵敏、可操作的决策体系，对于提升矿山企业的经济效益、抗风险能力及资源综合利用水平具有重要的理论与现实意义。

本文以某铜多金属矿为研究对象，以盈亏平衡分析为逻辑起点，引入ICA作为多目标优化工具，结合多金属品位折算、随机价格预测和价格-成本联动机制，构建了一个集成数据感知、模型决策、智能执行与反馈优化于一体的边界品位动态调整逻辑框架。通过四种情景的实证分析，系统揭示了价格-品位-利润之间的传导链条与内在经济机理，为矿山企业在金属价格上涨环境下实现经济效益最大化提供科学依据与决策支持。

1　边界品位优化模型演进

边界品位优化的核心目标，是在给定约束下实现矿山净现值最大化。模型演进经历了从静态到动态[6]、从单目标到多目标、从确定性到随机性的发展过程[8]。

1.1　经典模型与算法

1.1.1　盈亏平衡分析模型

盈亏平衡分析模型[12]是最基础的决策模型。通过建立涵盖采矿、选矿等环节的成本-收入函数，可确定使净利润为零的临界品位。当单位矿石的销售收入恰好等于其总成本时，对应的临界品位即为理论边界品位g_{cut}：

$$V=P\cdot R\cdot(1-\rho)\cdot g\cdot Q-(C_1+C_2+C_f)\cdot Q=0 \tag{1}$$

$$g_{cut}=\frac{C_1+C_2+C_f}{P\cdot R\cdot(1-\rho)} \tag{2}$$

式中：V为利润，元；Q为年生产能力，万t；P为金属价格，元/t；R为选矿回收率，%；ρ为采矿贫化率，%；g为地质品位；C_1为单位采矿成本，元/t；C_2为单位选矿成本，元/t；C_f为单位固定成本，元/t。

该模型直观揭示了价格、成本与品位之间的关系，是动态调整的逻辑起点。从模型表达式可以看出，价格P与边界品位g_{cut}之间呈反比关系：在成本

结构不变的条件下,价格上涨将直接降低盈亏平衡品位,使更多低品位物料进入经济可采范围。然而,实际矿山生产中,成本也会随市场环境变化(如能源、炸药价格上涨),因此,后续优化模型需引入成本动态追踪机制,以更准确地反映真实决策条件。

1.1.2 多金属矿综合品位折算模型

对于多金属共生矿床,不同金属的市场价格差异显著,且各金属的选矿回收率也不同。为确定统一的开采边界,需要将伴生金属的品位按经济价值折算为主金属的等价品位,由此构建多金属矿综合品位折算模型[10,13]:

$$k_i=\frac{P_i\cdot R_i}{P_A\cdot R_A} \tag{3}$$

$$g_{eq}=g_A+\sum_{i=0}^{n}k_i\cdot g_i \tag{4}$$

式中:k_i 为伴生金属的品位折算系数;P_A、P_i 为主、伴生金属价格,元/t;R_A、R_i 为主、伴生金属回收率;%;g_{eq} 为主金属综合折算品位,%;g_A、g_i 为主、伴生金属入选平均品位,%。

1.1.3 Lane 法

Lane 法[14] 将矿山视为一个处理原料的"工厂",通过平衡开采、选矿和冶炼三个环节的边际收益与边际成本,求解生命周期内的最优边界品位序列,以实现净现值 NPV 最大化。该方法考虑了时间价值的动态优化:

$$\max NPV=\sum_{j=1}^{T}\frac{(P_j\cdot R\cdot Q_j-C_{1,j}-C_{2,j}-C_{3,j})(1-\tau)-I_j}{(1-r)^j} \tag{5}$$

式中:T 为矿山总服务年限,a;P_j 为第 j 年金属价格,元/t;Q_j 为第 j 年矿石开采量,万 t;$C_{1,j}$ 为第 j 年采矿成本,万元/a;$C_{2,j}$ 为第 j 年选矿成本,万元/a;$C_{3,j}$ 为第 j 年冶炼成本,万元/a;r 为折现率,%;τ 为所得税率,%;I_j 为第 j 年资本支出,万元。约束条件包括:采选冶产能上限、总资源量、入选品位上下限及非负约束。

1.1.4 现代智能化算法

现代智能化算法可解决多金属、多约束、非线性等复杂优化问题,常见方法包括 GA、ICA 等。ICA 是由 Atashpaz-Gargari 和 Lucas 于 2007 年提出的一种受社会政治启发的元启发式优化算法[15],其核心在于通过帝国之间的同化、竞争与消亡过程,使种群在搜索空间中逐步向全局最优解聚集。基于 ICA 的边界品位优化流程如图 1 所示。

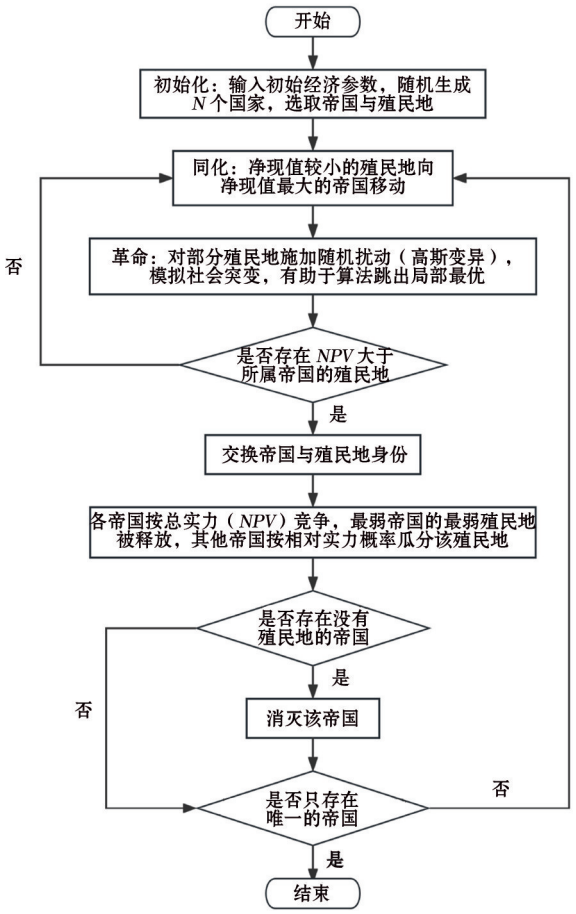


图 1 基于 ICA 的边界品位优化流程

Fig.1 Cut-off grade optimization process based on ICA

与 Lane 法相比,ICA 在求解最佳边界品位时具有更高的准确性和更好的性能[10]。

1.1.5 价格预测模型

几何布朗运动(Geometric Brownian Motion,GBM)价格预测模型[16]是金融数学中常用的价格预测模型,用于刻画资产价格在连续时间内的随机演变路径,能够较好地捕捉金属市场的连续波动与趋势特征。其核心假设为:价格的对数收益率服从正态分布,且价格的波动幅度与当前价格水平成比例(即波动率随价格水平缩放)。GBM 模型受以下随机微分方程(SDE)控制:

$$dS_t=\mu\cdot S_t\cdot dt+\sigma\cdot S_t\cdot dW_t \tag{6}$$

式中:S_t 为 t 时刻的金属价格;dS_t 为价格的瞬时变化量;μ 为漂移率,反映价格的长期趋势;σ 为波动率,反映价格的随机波动强度;dW_t 为标准维纳过程增量,即服从标准正态分布的随机项,代表市场噪声。漂移率 μ 和波动率 σ 可分别由历史价格数据的

对数收益率均值和标准差进行估计。

该模型可以模拟生成成千上万条价格路径,构建未来价格情景集,预测价格的概率区间,为边界品位的稳健决策提供随机价格输入。

1.2 金属价格波动的传导机制与影响路径

金属价格上涨通过直接和间接两条路径影响边界品位决策。

1.2.1 直接影响

在成本结构短期内相对稳定的假设下,金属价格上涨直接导致销售收入增加。根据盈亏平衡模型,盈亏平衡点所对应的临界品位(即边界品位)将下调。原本被划分为废石的低品位物料,因其所含金属的价值超过了采选总成本,转而进入矿石范畴。这使得矿体形态在经济效益层面发生“膨胀”,可采矿石量增加,矿山寿命得以延长。

1.2.2 间接影响

价格上涨会引发一系列连锁反应,使决策更加复杂化[17-18]。

(1) 成本上涨。全球性金属价格上涨往往伴随能源、电力、炸药、钢材等原材料及人力成本的普遍上升,侵蚀部分利润空间。

(2) 供应端响应。价格上涨刺激矿山增产或复产,但实际增产受制于地缘政治、政策法规(如实物税、法律制度趋向严格化)、基础设施和自然灾害等多重约束,导致供应弹性不足,价格波动加剧。

(3) 需求端转换。价格上涨推动需求结构变化。例如,铜在新能源、AI 等新兴领域的需求大幅上涨,部分对冲了传统行业如建筑业的萎缩,呈现出“传统托底、新兴爆发的需求格局”,要求多金属矿更关注不同金属或品级产品的组合价值。

(4) 多金属综合品位折算。金属价格上涨的影响评估从一维扩展到多维,决策复杂性倍增。对于多金属矿床,单一金属价格上涨会改变共伴生金属之间的经济权重[19],这是多金属矿综合品位折算模型的核心,也是利用帝国竞争算法实现多金属矿边界品位动态调整的关键环节。

2 动态调整的逻辑框架构建

基于上述理论与机制分析,可构建一个适应金属价格上涨背景下的采矿边界品位动态调整逻辑框架。该框架为包含数据感知、模型决策、智能执行与反馈优化的闭环系统,如图 2 所示。

(1) 数据感知与价格预测模块。该模块实时采集全球金属市场交易数据、宏观经济指标及行业新闻,获取矿山基本信息数据,如工艺参数、地质模型等。价格预测是动态调整的“前置雷达”,基于采集的价格数据,利用 GBM 模型模拟未来价格路径,为复杂条件下的稳健边界品位决策提供基础输入。

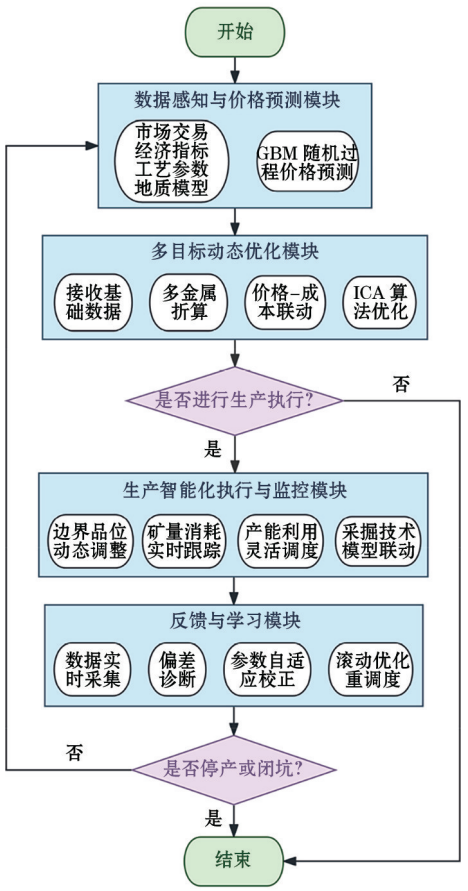


图 2 边界品位动态调整逻辑框架

Fig.2 Dynamic adjustment logic framework for cut-off grade

(2) 多目标动态优化模块。该模块是框架的“决策大脑”,集成以下功能:

接收上一模块数据,包括价格预测、成本更新及地质模型数据;

进行多金属矿综合品位折算;

以净现值最大化为核心目标,兼顾资源利用率、生产平稳性等约束,采用 ICA 进行全局寻优,输出推荐的最优边界品位序列及相应的生产计划。

(3) 生产智能化执行与监控模块。该模块是决策落地的“四肢”,可以实现生产过程中边界品位动态调整和矿量消耗实时跟踪,并根据品位和矿量灵活调度产能。此外,随着闭环系统向深度智能化演进,该模块还能和采掘技术相关模型联动,实现精细化的生产动态管控。以中国黄金乌山铜钼矿生产实

践为例[20],其构建的“五模型三阶段”精细化管控体系,搭载矿废分离爆破技术和精准铲装引导系统,有效控制了贫化损失率,实现了边界品位和工业品位的动态调整,以及从长期规划到铲装作业的多阶段管控。

(4) 反馈与学习模块。该模块通过数据库对比、无人机扫描、在线品位分析等手段,实时监测价格、成本、品位等指标偏差,并将数据反馈至前置模块,实现模型的动态更新与自我校准,形成“感知-决策-执行-学习”的完整闭环。

上述核心逻辑模块主要是通过前述理论模型实现。GBM 模型为优化提供随机价格输入,将决策从确定性优化拓展为随机优化;通过盈亏平衡分析模型与多金属综合品位折算相结合,确定边界品位范围,为动态调整提供基准参考;Lane 法的动态规划思想为多期优化提供了时序框架启示,但其线性化假设在多约束非线性场景中具有局限性,故采用 ICA 作为核心求解算法,在提供的约束与目标基础上,在全局搜索空间中迭代寻优。具体传递关系为:GBM 模型输出价格情景集→多金属折算模型计算综合品位→盈亏平衡模型确定品位搜索范围→ICA 以净现值最大化为目标进行全局寻优,最终输出最优边界品位序列及生产计划。

3 案例探讨与实证分析

3.1 案例概况

以某铜多金属矿为例,该矿山为矽卡岩型铜矿床,矿体埋深较大,采用地下开采方式,矿石品位较高,资源利用率较好。矿山各有用组分中,Cu 资源量达到中型,且规模最大,经济价值最高,为主矿产;Au、Ag 的含量未达到一般工业指标中边界品位,不具备单独开采价值,作为伴生矿产。矿山主要生产技术指标及经济参数指标见表 1。

表 1 生产技术指标及经济参数

Table 1 Production technical indicators and economic parameters

折现率/%	生产能力/(万 t/a)		成本		
	采矿	选矿	年固定/(万元/a)	采矿/(元/t)	选矿/(元/t)
10	100.00	100.00	23 820.95	226.50	169.69
选矿回收率			精矿品位		
Cu/%	Au/%	Ag/%	Cu/%	Au/(g/t)	Ag/(g/t)
94.00	50.00	64.00	26.00	13.30	196.79

各金属的市场平均价格及计价系数见表 2。

表 2 金属价格及计价系数

Table 2 Metal prices and pricing coefficients

项目	Cu/(元/t)	Au/(元/g)	Ag/(元/kg)
计价系数	0.86	0.85	0.74
三年均价	74 451	600	7 513
五年均价	71 891	515	6 490
八年均价	63 334	443	5 575
十年均价	59 403	409	5 237

注:计价系数无单位。

勘查工作对原始样品进行了基本统计分析,各有效金属品位变化范围如下:铜品位为 0.20%~11.16%,平均品位为 1.23%,品位变化系数为 126.3%;伴生金品位为 0.10~15.29 g/t,平均品位为 1.32 g/t,品位变化系数为 170.7%;伴生银品位为 1.01~136.96 g/t,平均品位为 11.75 g/t,品位变化系数为 153.7%。

以 Cu 为主元素,按五年均价,将 Au 和 Ag 品位分别折算成 Cu 品位。根据式(3)及相关经济参数,计算得到该铜多金属矿中金、银金属折算系数分别为:

$$k_{Au}=\frac{P_{Au}\cdot R_{Au}}{P_{Cu}\cdot R_{Cu}}\approx 3\ 768.30 \tag{7}$$

$$k_{Ag}=\frac{P_{Ag}\cdot R_{Ag}}{P_{Cu}\cdot R_{Cu}}\approx 52.89 \tag{8}$$

将式(7)、式(8)代入公式(4)可计算出综合铜品位:

$$g_{eq}=g_{Cu}+3\ 768.30g_{Au}+52.89g_{Ag} \tag{9}$$

处理后综合品位-吨位分布情况如图 3 所示。

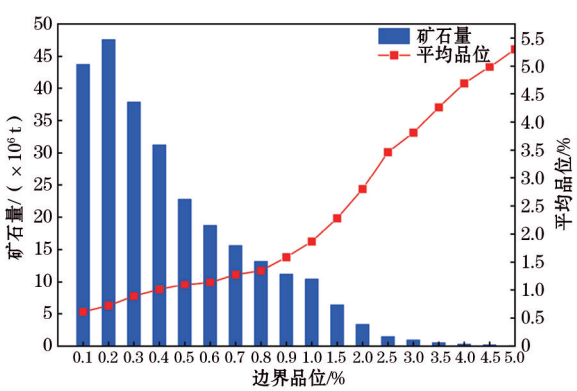


图 3 品位-吨位分布

Fig.3 Reserve and grade distribution

品位-吨位分布反映了矿床品位的非均质性特征,整体呈右偏态分布,即高品位端资源量迅速衰减,低品位端资源量占比显著。这种高变异性的品位分布,构成了动态边界品位调整的地质前提:当价

格上涨时,大量低品位“废石”因经济性改善而转化为“矿石”,可采资源量对边界品位的弹性非常显著。

3.2 情景分析与结果讨论

以表 1、表 2 及图 3 的数据作为输入参数,同时考虑亏损年份自动减产/闭坑约束、资源总量约束,综合边界品位设定为 0～5%,以矿山最大净现值为目标,利用 ICA 计算最佳边界品位。

3.2.1 情景 1:静态均价

金属价格分别取十年、八年、五年、三年均价,计算结果见表 3。

表 3 情景 1 计算结果

Table 3 Results of case 1

金属价格	边界品位/%	平均品位/%	生产年限/a	最大净现值/万元
十年均价	0.92	1.80	12	151 101.21
八年均价	0.84	1.70	13	163 873.03
五年均价	0.69	1.49	16	182 130.71
三年均价	0.65	1.44	18	185 164.00

情景 1 计算结果揭示了“价格→边界品位→净现值”的递推关系链,呈现出以下规律。

(1) 边界品位与价格水平呈显著负相关。随着金属价格从十年均价上涨至三年均价,铜价涨幅约为 25.33%,对应边界品位的降幅达 29.35%。边界品位降幅高于价格涨幅,这是由于品位-吨位分布呈右偏特征,价格提升使更多的低品位物料进入经济可采范围,导致入选矿石的“门槛”系统性降低。

(2) 平均品位同步下降。随着边界品位从 0.92%下降至 0.65%,平均品位从 1.80%降至 1.44%,降幅为 20.00%。平均品位下降意味着更多低品位矿石被纳入开采计划,这是边界品位下调的直接结果。

(3) 生产年限显著延长。边界品位从 0.92%降至 0.65%,矿山生产年限从 12 a 延长至 18 a,在年产能保持不变的情况下,可采矿石量显著增加,使矿山能够在更长的周期内捕获价格红利。

(4) 净现值单调增长,但边际递减。随着金属价格从十年均价上涨至三年均价,最大净现值增幅为 22.54%,但十年均价到八年均价的净现值增幅(8.45%)明显高于五年均价到三年均价的增幅(1.7%),呈现边际收益递减趋势。这表明边界品位的下调存在经济上的最优区间,过度降低边界品位虽然扩大了资源基础,但新增低品位矿石的边际利润逐渐减小。

3.2.2 情景 2:价格渐进上涨

金属价格分别以十年、八年、五年、三年均价为初始价,考虑每隔 4 年价格上涨 5%。以铜十年均价为例,生产年限内第 1～4 年取 59 403 元/t,第 5～8 年在此基础上上涨 5%,为 62 373 元/t,以此类推,直到生产年限的最后一年。

情景 2 的边界品位变化、平均品位变化、累计净现值变化分别如图 4 至图 6 所示。

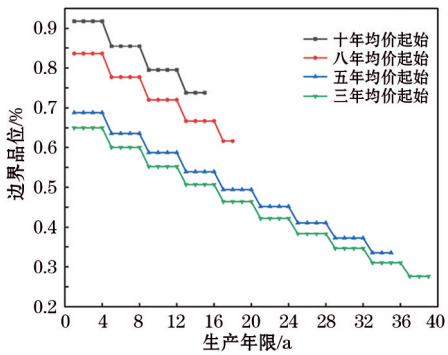


图 4 情景 2 的边界品位变化

Fig.4 Cut-off grade variation for case 2

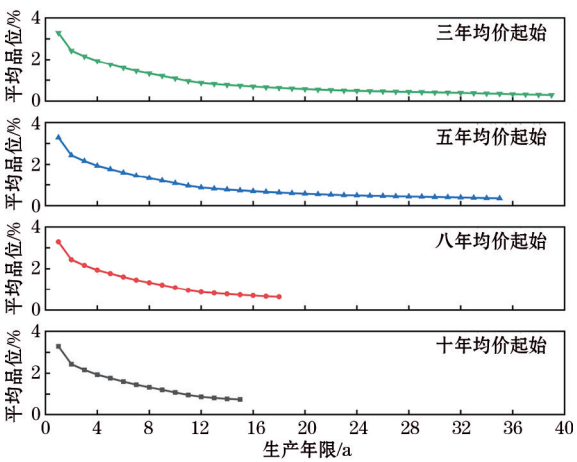


图 5 情景 2 的平均品位变化

Fig.5 Average grade variation for case 2

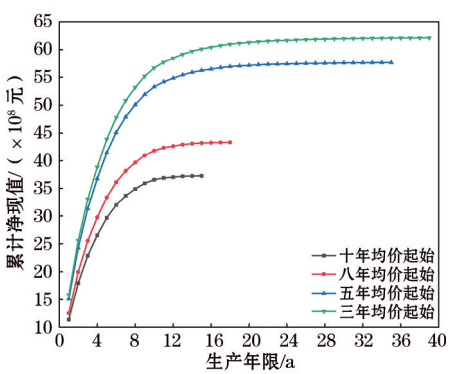


图 6 情景 2 的累计净现值变化

Fig.6 Cumulative NPV variation for case 2

情景 2 模拟了价格渐进上涨情景,与情景 1 的“静态均价”假设相比,呈现以下特征。

(1) 边界品位呈现阶梯式下降趋势。在每个 4 年周期内,边界品位保持相对平稳;在价格台阶跃迁的节点,边界品位出现“跳跃式”下调。

(2) 平均品位逐年下行,且其变化幅度较边界品位更为平缓。开采前期,平均品位下降幅度较大,后期趋于平稳。这是由于基于 ICA 的开采序列遵循先采高品位、后采低品位的原则,前期边界品位下调而新增的低品位矿石品位会快速稀释原有高品位矿石,多次下调后新增低品位矿石与原有矿石品位越来越接近,平均品位变化趋于平稳。

(3) 累计净现值曲线呈现先快速增长后趋于平稳的特征。在开采初期存在大量高品位矿石,即便边界品位下调导致平均品位快速下降,仍能快速贡献利润,而在开采后期高品位矿石逐步消耗,新增利润空间逐渐收窄。

3.2.3 情景 3:随机价格路径

在实际金属交易市场中,金属价格并非单边上涨,往往存在剧烈波动。参考近 10 年铜金属的市场价格,引入 GBM 价格预测模型,计算结果如图 7 所示。

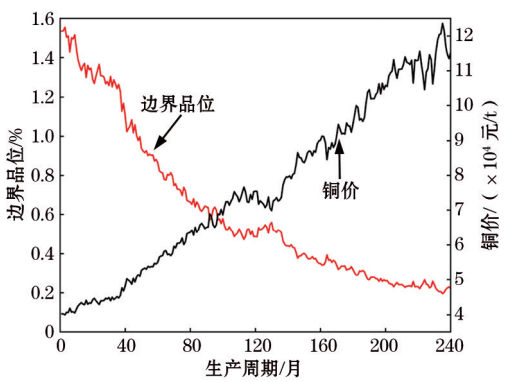


图 7 情景 3 边界品位计算结果

Fig.7 Cut-off grade calculation results of case 3

情景 3 通过 GBM 模型引入价格不确定性,将决策维度从“确定性优化”变为更贴合实际的“随机优化”,呈现以下特征。

(1) 边界品位轨迹不再是一条平滑曲线,而呈现出与价格路径对应的“锯齿状”波动。在价格下行阶段,ICA 会主动上调边界品位以规避亏损风险;在价格上行阶段则下调边界品位以捕获更多资源价值。

(2) 与情景 1、情景 2 的确定性解相比,随机价格下的最优边界品位策略更为“保守”,其边界品位水平略高于情景 1、情景 2 同等价格下的边界品位。这是由于 GBM 价格模拟路径中存在价格大幅下挫的风险,算法在期望净现值最大化的同时,考虑了“尾部风险(发生概率极低,但一旦发生则损失巨大的极端事件所带来的风险)”约束,避免了极端不利价格情况下的过度亏损。

(3) GBM+ICA 的联合模型使得边界品位决策从“单点预测”升级为“情景树决策”:在某一种价格趋势下,形成“条件性边界品位策略集”,为矿山管理提供多情景预案,提升决策的稳健性。

3.2.4 情景 4:价格-成本双向联动

上述 3 种情景仅考虑了价格对边界品位的直接影响,未考虑价格上涨推动成本上涨的间接影响。引入价格-成本模型:

$$C_P = C_f + C_{v0} \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma} \tag{10}$$

式中:C_P 为 P 价格的单位成本,元/t;C_{v0} 为单位基准可变成本,元/t;P_0 为金属基准价格,元/t;γ 为成本弹性系数,取值 0~1。

铜价取 40 000~120 000 元/t,基准参考价格 P_0=64 000 元/t,价格-成本协同影响下的矿山边界品位计算结果如图 8 所示。

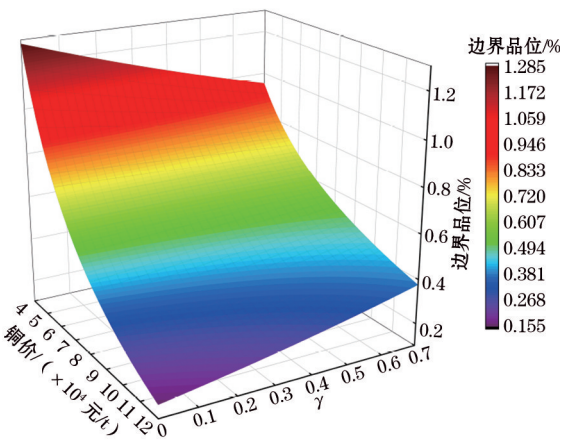


图 8 情景 4 边界品位计算结果

Fig.8 Cut-off grade calculation results of case 4

情景 4 将模型从“单边价格驱动”升级为“价格-成本双向联动”,呈现以下特征。

(1) 边界品位随铜价上升而下降的趋势依然成立,但下降速率受成本弹性系数 γ 的影响。当 $P<P_0$ 时,γ 越大成本越低,矿山可在低成本条件下扩大低品位矿石的开采,以“低成本+低品位”的策略缓冲低价压力;当 $P=P_0$ 时,成本固定,此时边界品

位不随 γ 变化，该点即为“成本-价格平衡锚点”；当 $P>P_0$ 时，γ 越大，成本上涨侵蚀利润空间，迫使边界品位抬升。

(2) 图 8 直观展示了成本弹性的调节效应：$\gamma=0$(成本刚性)时，边界品位对价格的响应最为敏感(曲线最陡)；γ 越大，边界品位曲线越趋于平缓，最佳边界品位对价格波动的敏感度越低，系统抗风险能力越强，但会错失部分价格上行收益。

(3) 从风险管理角度来看，γ 增大是矿山将“价格风险”部分转化为“成本风险”的过程：γ 越大意味着矿山与上游供应商之间形成了更强的联动机制，成本与价格联动降低了利润的波动性，但也削弱了价格上涨时期的利润弹性。二者的关系决定了矿山在制定采购战略和签订长期合同时，需依据自身对价格走势的判断，选取合理的 γ 区间。具体而言，矿山企业可根据矿山历史价格与成本数据，利用双对数回归分析模型估计 γ 置信区间，再以一定步长(如 0.1)进行遍历计算，观察各 γ 取值下净现值、边界品位等关键指标的变化规律，结合矿山风险偏好和价格走势确定合理区间。

根据情景 4 的计算结果进行敏感性分析，引入敏感度系数 $|\Delta g_{cut}/\Delta\gamma|$，探讨价格上涨情况下，$\gamma$ 每增加 0.1 所对应的边界品位变化，结果如图 9 所示。

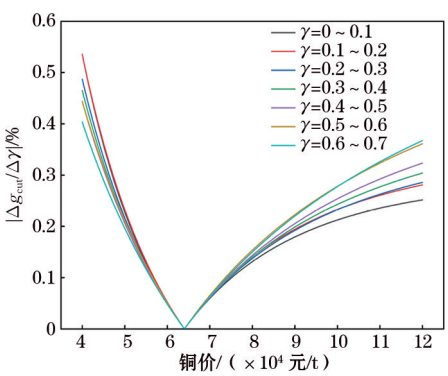


图 9　敏感性分析结果

Fig.9　Results of sensitivity analysis

由图 9 可以看出，敏感度系数为 0 处对应 $P=P_0$，此时成本固定，边界品位不随 γ 变化。在 $P=P_0$ 两端，敏感度系数呈非对称分布：当 $P<P_0$ 时，随着价格的上涨，敏感度系数逐渐减小，且同一价格下，γ 越小敏感度系数越大；反之当 $P>P_0$ 时，随着价格的上涨，敏感度系数逐渐增大，且同一价格下，γ 越大，敏感度系数也越大。

综上所述，从确定性优化到随机价格路径、从单边价格驱动到价格-成本双向联动，边界品位决策模型逐步贴近矿山运营的实际复杂性。四种情景案例的系统性分析，验证了“数据感知-模型决策-智能执行-反馈优化”闭环逻辑框架的可行性与有效性。

3.3　研究局限性

本文研究立足矿山实际决策需求，探讨了四种情景下边界品位的动态调整规律，并在模型构建中纳入多项关键约束。然而，受数据可得性与建模复杂度限制，尚存在以下局限。

(1) 产能刚性假设。模型假定矿山年采选产能恒定为 100 万 t/a，未考虑产能弹性调节能力，未考虑边界品位下调后低品位矿石占比提升带来的选矿处理效率变化、药剂消耗增加、尾矿堆存产能约束及选矿产能负荷等现实问题。

(2) 开采时序约束缺失。未纳入开拓工程滞后、采掘衔接时序约束等矿山实际生产中的时序约束条件，可能影响优化方案的可操作性。

(3) 单目标优化框架。GBM 随机价格模型未在决策中考虑无亏损自动减产/闭坑决策管控机制，未将亏损概率、净现值方差等风险指标构建为多目标指标，限制了模型在风险条件下的适用性。

未来，随着矿山生产数据的持续积累和闭环系统智能化水平的不断提升，可进一步针对上述局限开展研究，为矿山提供更为可靠、适用的决策指导。

4　面临挑战与未来展望

尽管边界品位动态调整逻辑清晰且效益显著，但在生产实践中仍面临多重挑战。

(1) 技术集成复杂。GBM+ICA 框架求解再联合采掘技术模型，对计算资源要求高，迭代求解速度与矿山生产调度的实时性之间存在矛盾。此外，高精度地质模型需要大量钻孔数据和实时生产数据反馈修正，而国内多数矿山在数据采集密度和建模自动化程度上仍处于较低水平。

(2) 组织与管理变革。边界品位动态调整要求地质、采矿、计划、调度等部门高度协同，但传统矿山采用“分部门、分段管理”模式，地质模型更新滞后于采矿进度，计划与执行之间存在信息断层。打破数据孤岛，是对传统矿山管理模式的重大挑战。

(3) 长期与短期利益的平衡。过度追求短期高价而大幅降低边界品位，可能导致优质资源被快速消耗，损害矿山长期价值。另一方面，过于保守的品

位策略又可能在价格高位时错失盈利窗口。因此,需在优化模型中植入战略约束,例如,设置最低边界品位下限以保护资源。

(4) 数据基础薄弱导致模型可信度不足。边界品位动态调整依赖于高质量的实时数据输入,包括品位在线分析、设备状态监测、成本实时核算等。当前多数矿山的数字化基础薄弱,数据采集频率低、精度差,导致模型输出结果的置信区间过宽,管理层的决策意愿受到影响。

未来发展趋势将集中在以下方向。

(1) 决策智能化与自动化。更深度地将人工智能与机器学习应用于价格预测、品位插值、优化求解,实现更自主、更精准的实时决策。

(2) 全流程数字孪生。构建涵盖地质、开采、选冶乃至市场环境的矿山数字孪生体,在虚拟空间中模拟测试不同价格情景下的调整策略,实现风险预判与策略预演。

(3) 可持续性目标融合。未来的优化模型不仅要考虑经济效益,还需要将碳排放、生态扰动、社区影响等环境社会因素内化为约束或目标,推动边界品位决策向更全面的可持续发展决策演进。

5 结论

本文研究了金属价格上涨背景下矿山边界品位的动态调整问题,梳理了价格上涨影响边界品位决策的直接与间接影响路径,构建了集成 GBM 价格预测、多金属品位折算、盈亏平衡分析与 ICA 优化的闭环决策框架,并通过某铜多金属矿四种情景的实证分析验证了其有效性。研究得出以下主要结论。

(1) 综合 GBM 模型、盈亏平衡分析模型、多金属综合品位折算、ICA 等,构建了适应金属价格上涨背景的采矿边界品位动态调整逻辑框架。框架包含数据感知与价格预测模块、多目标动态优化模块、生产智能化执行与监控模块、反馈与学习模块,形成“数据感知-模型决策-智能执行-动态优化”的闭环系统,为多金属矿边界品位动态调整提供了系统性技术路径。

(2) 金属价格上涨通过直接和间接两条路径影响边界品位决策。直接路径表现为价格上涨提升单位矿石收入,使盈亏平衡临界品位降低,可采资源量增加,矿山生产年限延长。间接路径表现为价格上涨通过成本上涨、供应端响应、需求端转换、多金属综合品位折算等引发连锁反应,其中价格上涨伴随的能源、原材料成本上升会部分抵消价格红利,而伴生金属价格变动则会改变综合品位折算系数,进一步增加决策复杂度。

(3) 静态均价情景中,铜价从十年均价上涨至三年均价时,边界品位降幅达 29.35%,平均品位下降 20.00%,生产年限从 12 a 延长至 18 a,净现值累计增长 22.54%,且净现值增长呈现边际递减特征。价格渐进上涨情景中,边界品位随价格台阶呈现阶梯式下调特征,平均品位下降幅度随开采周期逐步趋缓,累计净现值呈现先快速增长后趋于平稳的特征。

(4) 随机价格路径情景中,边界品位随价格波动呈现“锯齿状”动态调整特征,最优边界品位策略较为保守,可规避价格大幅下挫的尾部风险。价格-成本双向联动情景中,边界品位随铜价上升而下降,且下降速率受成本弹性系数 γ 的影响,随着 γ 增大,成本与价格联动降低了利润的波动性,但也削弱了价格上涨时期的利润弹性。

参考文献(References):

[1] 钟旭东. 多金属矿边界品位动态测算与配矿优化技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
Zhong Xudong. Research on dynamic measurement of polymetallic ore cut-off grade and ore blending optimization technology[D]. Changsha:Central South University, 2023.

[2] 李裕伟. 边界品位确定方法及其在矿产勘查中的应用[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(3):4-15.
Li Yuwei. Determination method of cut off grade and its applications in mineral exploration[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(3):4-15.

[3] 陈景河, 王京彬, 刘金辉, 等. 初论矿床动态技术经济评价[J]. 矿床地质, 2025, 44(2):259-278.
Chen Jinghe, Wang Jingbin, Liu Jinhui, et al. A preliminary study on dynamic technical and economic evaluation of mineral deposits[J]. Mineral Deposits, 2025, 44(2):259-278.

[4] 姜梦珂. 基于金属价格波动的露天矿边界品位动态优化及应用[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
Jiang Mengke. Dynamic optimization and application of cut-off grade in open pit mines based on metal price fluctuations[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.

[5] Lane K F. Choosing the optimum cut-off grade[J]. Colorado School of Mines Quarterly, 1964, 59(4):811-829.

[6] Nieto Antonio, Muncher Bruno. An applied economic assessment and value maximisation of a mining operation based on an iterative cut-off grade optimisation algorithm[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2021, 12(4):309-326.

[7] Mohammadi S, Ataei M, Kakaie R, et al. Comparison of golden section search method and imperialist competitive algorithm for optimization cut-off grade-case study: mine No.1 of Golgohar[J]. Journal of Mining & Environment, 2015, 6(1):63-71.

[8] Roos C. Visualizing and quantifying uncertainty in cut-off grade selection[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(6):3757-3768.

[9] 王青,顾晓薇,胥孝川.边界品位对露天矿最佳境界及总利润的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1187-1191.
Wang Qing, Gu Xiaowei, Xu Xiaochuan. Influence of cutoff grade on optimum pit limit and total profit[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(8):1187-1191.

[10] 许倩倩,郭进平,王小林,等.基于帝国竞争算法的多金属矿山边界品位优化研究[J].矿产保护与利用,2025,45(1):8-14.
Xu Qianqian, Guo Jinping, Wang Xiaolin, et al. Research on optimization of cut-off grade in polymetallic mines using imperialist competitive algorithm[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(1):8-14.

[11] 王瑞.全球关键矿产规则博弈与中国矿产企业的供应链尽责管理[J].国际论坛,2026,28(4):78-96.
Wang Rui. The rule-based competition of global critical minerals and the due diligence practices of Chinese mining enterprises[J].International Forum, 2026, 28(4):78-96.

[12] 杨志强,肖柏林,高谦,等.矿产品价格对多金属矿床开采边界品位影响建模分析[J].现代矿业,2016,32(1):17-19.
Yang Zhiqiang, Xiao Bolin, Gao Qian, et al. Modeling analysis of the mineral prices to cutoff grade of polymetallic deposit[J]. Modern Mining, 2016, 32(1):17-19.

[13] 李静.蔡家陨子镍钴多金属矿最低综合工业品位制定方法[J].有色矿冶,2023,39(5):62-63+66.
Li Jing. Method for determining the minimum comprehensive industrial grade of the Caijiaweizi nickel cobalt polymetallic mine[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2023, 39(5):62-63+66.

[14] Ahmadi Mohammad Reza. Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model[J]. Journal of Sustainable Mining, 2018, 17(2):68-75.

[15] Atashpaz-Gargari Esmaeil, Lucas Caro. Imperialist competitive algorithm:an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 2007: 4661-4667.

[16] Rakhsha Ramin, Savolainen Jyrki, Reynolds Mark. Model for continuous cut-off grade estimation with system dynamic simulation[J]. Mineral Economics, 2026.

[17] 向先迪,李云煜,金刊,等.基于产业链传导机制的锡金属价格组合预测研究[J].中国矿业,2025,34(2):244-255.
Xiang Xiandi, Li Yunyu, Jin Kan, et al. Study on the combined forecasting of tin metal price based on the industry chain transmission mechanism[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2):244-255.

[18] 宋明媚,张海亮,董洋.国际有色金属价格波动对中国产业链的传导机制与效应:基于双层复杂网络模型[J].资源科学,2023,45(4):812-826.
Song Mingmei, Zhang Hailiang, Dong Yang. Transmission mechanism and effect of international nonferrous metal price fluctuation to China's industrial chain:based on a two-layer complex network model[J]. Resources Science, 2023, 45(4):812-826.

[19] 郭庆伟,戴晓江,孙长坤.多金属矿床开采中伴生元素品位对综合品位的敏感性分析[J].甘肃科学学报,2015,27(4):91-94.
Guo Qingwei, Dai Xiaojiang, Sun Changkun. The sensitivity analysis of associated elementary grade for the comprehensive grade in polymetallic deposit mining[J]. Journal of Gansu Sciences, 2015,27(4):91-94.

[20] 周宏.乌山铜钼矿智能化建设[J].露天采矿技术,2022,37(5):89-92.
Zhou Hong. Intelligent construction of Wushan Copper Molybdenum Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(5):89-92.