

实物期权理论在边际品位最优化研究中的应用

李寿国¹, 杨 厂²

(1. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 矿山资源开采可以被视为是一个多期多阶段的复合看涨期权过程, 当前价格、便利收益、利率、随机波动、跳跃系数和跳跃值等都对矿产资源未来价格有较大影响. 在参考研究现有理论的基础上构建了基于实物期权理论的矿产资源价格扩散-跳跃模型并获得解析解; 通过随机模拟产生将来时刻的一些点价格; 用蒙特卡罗模拟法分析了矿产资源的价格变化过程并反推出当前的最优边际品位值; 最后以洛阳栾川钼矿为实例进行分析.

关键词: 实物期权; 价格模型; 边际品位优化; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: TD85

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)03-0393-07

矿产资源开发领域的评估方法主要采用成本法、可比销售法和净现值法, 虽然这些方法应用已经比较成熟, 但由于在实际操作中存在过多假设, 从而忽略了矿产资源市场的不确定性以及矿山企业在资源开发过程中根据市场变化所做出的决策思想; 实物期权法则充分体现了这种不确定性, 对矿产资源的机会价值做出预测, 同时, 由于矿山企业对市场波动所做出的决策还可以增加项目的实物期权价值, 因此, 把实物期权法运用到边际品位研究中, 能使矿山企业获得理想的利益, 最大限度地降低各种风险.

1 矿产资源实物期权

实物期权是由实物商品自身构成期权底层实体的一种特殊期权, 实物期权理论和方法来源于金融期权, 但又不同于金融期权: 前者主要研究期权决策与分析, 后者主要研究期权估价. 将实物期权理论引入矿产资源开发, 充分体现矿产资源价格的风险性、不确定性和连续性, 可以使矿山企业根据市场即时信息柔性地调整矿山开采过程, 使开采过程更符合矿山企业的实际利益, 即利润最大化.

实物期权思想的实现途径是建模, 主要建模思想有网格模型、期权定价解析解、随机微分方程和蒙特卡罗模拟四类. 目前广泛使用的二项式期权法和布莱克-休斯法分属网格模型和期权定价解析解; 随机微分方程因其复杂性通常与蒙特卡罗模拟等数值方法联合使用.

大量资料表明, 目前我国矿业领域内研究实物期权的还非常少, 且主要集中在矿业权评估方面, 用实物期权理论进行边际品位研究仅查询到谢明亮^[1]一人. 文献[1]采用实物期权连续扩散价格模型, 未考虑矿产资源价格因突发事件发生跳跃的情形; 本文在参考其蒙特卡罗模拟思路的基础上, 将实物期权跳跃扩散模型引入矿产边际品位最优化研究.

2 矿产资源期权价格模型

与金融市场的资产价格近似呈连续变化不同, 矿产资源的价格很容易受多种因素的影响而呈跳跃式变化. 例如: 近年来日本企业为了打压中国经济发展速度, 与国际三大铁矿石出口商合作大幅度违背市场规律提高铁矿石价格. 首先日本钢企与三大铁矿石出口商融资(排斥中国钢企融资); 然后以日本钢企名义优先与三大铁矿石出口商订好本年度的高额价格, 造成既定事实, 迫使中国钢企接受该价格. 数据表明, 在日本钢企明显操作国际铁矿石价格以前, 2003年铁矿石涨幅8.90%, 2004年涨幅18.60%; 而2005年达到71.50%, 2008年更是达到96.5%.

收稿日期: 2011-12-31 修改稿日期: 2012-05-20

基金项目: 榆林市2011年校企产学研合作项目—煤矿及多矿种综合边际品位优化

作者简介: 李寿国(1971-), 男, 甘肃白银人, 博士研究生, 副教授, 主要从事矿山系统工程研究.

在有效市场条件下,矿产资源的价格具有马尔可夫性.当市场信息以连续平滑的方式到来时,矿产资源的价格可以用近似连续的扩散曲线来描述,服从布朗运动;而当市场信息非平滑到来或有影响价格的重大突发事件发生时,矿产资源的价格变动为跳跃式,服从 Poisson 分布.合理的矿产资源价格变动应该是由连续时间扩散过程和跳跃 Poisson 过程叠加而成,由于扩散过程和跳跃过程相互独立,所以 Merton 跳跃扩散模型可以很好的描述矿产资源期权价格.该模型的随机微分方程表达式如下:

$$\frac{dP_t}{P_t} = (\gamma - \delta)dt + \sigma d\omega_t + h \sum_{j=1}^{N_t} (Y_j - 1) \quad (1)$$

式中, P_t 为 t 时间的矿产资源价格, γ 为无风险利率, δ 为便利收益率, σ 为矿产资源的瞬时标准差, ω_t 为标准布朗运动, $d\omega_t$ 为标准的维纳过程增量, h 是常数, N_t 为 $(0, t)$ 时间的矿产资源价格跳跃次数,它是强度系数为 λ 的 Poisson 过程, $Y_j - 1$ 表示价格的跳跃值.

令 $\gamma - \delta = \mu$, μ 为矿产资源价格增长率,则(1)为^[3]:

$$\frac{dP_t}{P_t} = \mu dt + \sigma d\omega_t + h \sum_{j=1}^{N_t} (Y_j - 1) \quad (2)$$

由于(2)中的跳跃部分服从 Poisson 分布,矿产资源价格跳跃间断时间服从参数为 λ 的指数分布.假定在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内发生一次跳跃,则在 $t + \Delta t$ 时刻的矿产资源价格可表示为: $P_{t+\Delta t} = P_t Y$, 故有: $P_{t+\Delta t} - P_t = P_t(Y - 1)$, 所以随机变量 $Y - 1$ 也成为跳跃值.根据矿产资源价格的实际情况,通常可认为 $\{Y_j, j = 1, 2, \dots\}$ 服从独立同分布,跳跃出现的频率和跳跃值这两个随机变量是也相互独立,因此由连续扩散过程和不连续跳跃点过程合成的矿产资源期权价格模型也可以写成^[2-3]:

$$\frac{dP_t}{P_t} = \{\alpha_t - \lambda\mu_0\}dt + \sigma_t d\omega_t + d_t^Q(\lambda) \quad (3)$$

式中, α_t 是瞬时期望收益率, μ_0 是相对跳跃值的期望, σ_t 为没有发生跳跃时的矿产资源收益率的瞬时波动率,其它同上.由于(3)所表示的矿产资源期权价格模型在在大部分时间上是连续的,只在有限的离散时间点上跳跃的.如果令 α_t 和 σ_t 为常数,则模型的连续部分服从对数正态分布,如果 $(0, t)$ 区间的价格跳跃次数为 N_t ,则 t 时刻的矿产资源价格 P_t ^[3] 可以表示为:

$$P_t = P_0 \exp \left\{ \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2 - \lambda\mu_0 \right) t + \sigma\omega_t \right\} Y^*(N_t) \quad (4)$$

其中当 $N_t = 0$ 时, $Y^*(N_t) = 0$; 当 $N_t \geq 1$ 时, $Y^*(N_t) = \prod_{j=1}^{N_t} Y_j$.

由于 ω_t 为标准布朗运动,维纳过程增量 $d\omega_t$ 的分布只与时间差有关,从上面的矿产资源期权价格模型可以看出,矿产资源的价格与当前价格、瞬时期望收益率、相对跳跃值的期望,跳跃强度系数,瞬时标准差,跳跃次数和跳跃值有关.在实际的模型运用过程中,除维纳增量 $d\omega_t$ 外的参数全都可以获得(或简化为常数),所以可以用该价格模型模拟以后的矿产资源价格.

3 矿产资源点价格模拟

在模型中, P_t 是欲模拟的 t 时间的矿产资源价格,除维纳增量 $d\omega_t$ 外的参数全都可以获得(或简化为常数),因此模拟价格的关键在于获得维纳增量 $d\omega_t$.由维纳过程的定义有: $\Delta\omega = \sqrt{\Delta t}\xi$,其极限形式可表示为: $d\omega = \sqrt{dt}\xi$,其中 ξ 服从标准正态分布.

根据中心极限定理, n 个互相独立、同分布且存在均值与期望的随机变量,其和服从渐近正态分布^[4].故本文采用均匀分布的随机数来生成近似服从正态分布的正态伪随机数.设在 (a, b) 区间上有服从均匀分布的随机变量 τ ,其期望与方差分别为: $E(\tau) = (a + b)/2$, $D(\tau) = (a - b)^2/12$.取 $a = 0, b = 1$,则由 n 个在 $(0, 1)$ 区间上的均匀分布随机数所构成的随机变量 ξ 有:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \tau_i - \frac{n}{2}$$

此时 ξ 近似服从正态分布 $N(0, 1/12)$; 取 $n = 12$, 则 ξ 服从标准正态分布 $N(0, 1)$, 因此有:

$$\xi = \sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6$$

将上式带入 $\Delta w = \sqrt{\Delta t} \xi$, 即有: 在 (s, t) 时间段上 $w_t = (\sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6) \sqrt{t-s} + w_s, w_0 = 0$; 再令 $t = 1, s = 0$ 有:

$$w_1 = (\sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6) + w_0, \tag{5}$$

结合(4) 式可模拟预测出矿产资源在未来各个时间点上的价格, 进而由这些点价格反推出其对应的边际品位值, 反推公式见(6).

4 基于蒙特卡罗法的边际品位最优化模拟

蒙特卡罗模拟方法的原理是当问题或对象本身具有概率特征时, 可以用计算机模拟的方法产生抽样结果, 根据抽样计算统计量或者参数的值; 随着模拟次数的增多, 可以通过对各次统计量或参数的估计值求平均的方法得到稳定结论. 具体到矿产开发边际品位就是: 先模拟预测在矿山开采寿命期以内每年的离散矿产资源点价格; 然后依照矿产资源价格波动与边际品位调整的关系函数求出最后一年的边际品位值, 依次逐步后退计算直至当前时间点为止. 这样, 当前的边际品位决策与调整, 包含了未来不同价格波动下的品位决策调整因素, 由此包含了期权价值因素^[1-5].

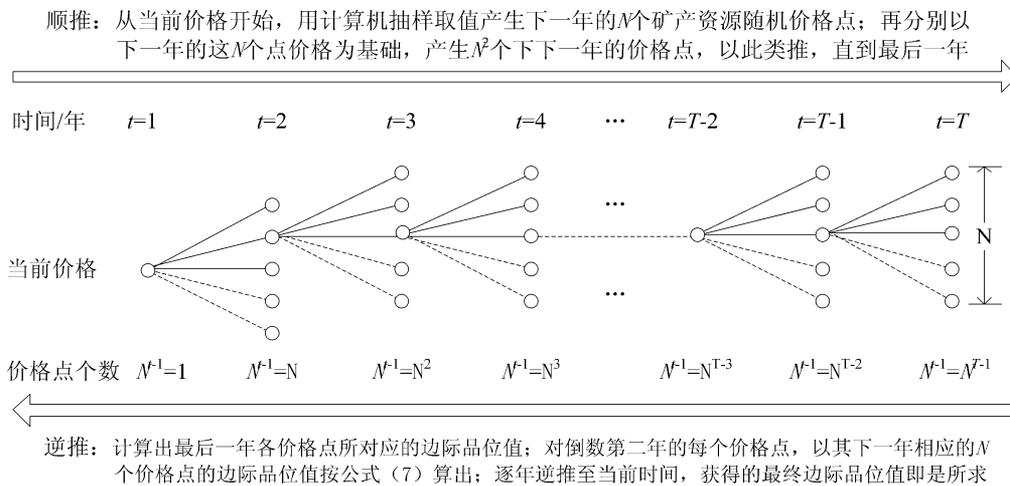


图 1 蒙特卡罗法模拟最优边际品位思路

fig. 1 The basis thought of Monter Carlo simulation

具体步骤如下:

- (1) 假设矿山剩余开采寿命为 T 年;
- (2) 从当前价格开始, 用计算机抽样取值产生下一年的 N 个矿产资源随机点价格, 再以下一年的这 N 个点价格为基础, 分别产生 N 个下下一年的点价格, 以此类推, 直到最后一年. 因为目前的品位决策是以当前价格为基础, 指导未来一个时间段的矿产开采, 故当还可以开采 T 年时, 则需要 N^{T-1} 个点价格. 当矿山寿命较长, 如果 N 取值较大, 程序计算量非常大, 可以根据分析的实际需要适当地选择 N 的个数;
- (3) 计算最后一年各个点价格所对应的边际品位指标值, 计算采用 *W. Schaap* 提出的矿产资源价格波动与边际品位调整简单函数:

$$g_t = \bar{g} - \frac{P}{P_t} (\bar{g} - g) \tag{6}$$

式中, P_t 是矿产资源 t 时间价格, P 是矿产资源长期价格, g_t 是 t 时间的边际品位, \bar{g} 是长期边际品位, g 是长期边际品位下的平均品位; 除 P_t 和 g_t 外, 其余都为常数.

- (4) 对倒数第二年, 以其下一年的相应各点价格所对应边际品位获得的净现值为基础计算其期望

值,以此期望值为依据计算出本点价格的最优品位值,计算过程采用(8)式;

为使单位时间内矿产资源净现值最大,有函数关系式 $\omega(\bar{g} - g_t) = \frac{m}{\epsilon P_t}$,其中: ω 为矿岩中矿石比例, m 为矿石开采费用, ϵ 为回收率^[1].

将其变形有: $P_t = \frac{m}{\epsilon \omega} \frac{1}{\bar{g} - g_t}$,令 $\frac{m}{\epsilon \omega}$ 为常数 C ,有 $P_t = C \frac{1}{\bar{g} - g_t}$

$$P_{t-1} = \frac{1}{N} \sum_{\pi=1}^N C \frac{1}{\bar{g} - g_{t\pi}} = \frac{C}{N} \sum_{\pi=1}^N \frac{1}{\bar{g} - g_{t\pi}} \tag{7}$$

将上带入 $P_{t-1} = C \frac{1}{\bar{g} - g_{t-1}}$ 得出边际品位逐年逆推模型:

$$g_{t-1} = \bar{g} + \frac{N}{\sum_{\pi=1}^N \frac{1}{g_{t\pi} - \bar{g}}} \tag{8}$$

- (5) 重复第(4)步,可得倒数第三年的边际品位值,以此类推,直到倒数第 T 年;
- (6) 计算出所有抽样价格点边际品位所对应的储量消耗,计算每年的储量消耗期望值,并逐年累加;
- (7) 如果储量消耗大于现有储量,则调低 T 值,反之增加 T 值,直至储量消耗期望值与现有储量相吻合为止,这时倒数第 T 个时间段(即当前)的值即为最优边际品位;
- (8) 考虑到实际开采中可能会遇到的某些因素,可以事先对所欲求得的最优边际品位值进行上、下限约束^[1].

6 以洛阳栾川三道庄钼矿为案例分析

分析思路:首先,依据我国近年钼矿价格统计数据计算出钼矿价格跳跃扩散模型所需经济学参数,依据栾川三道庄钼矿开采报告^[6]获取边际品位相关数据,并计算出相应的综合品位参数;其次,简化模拟参数及方法;再次,以 2011 年价格为初始值,逐年模拟出每一年各价格点的预测值,直至最后一年;最后,以倒数第一年各价格点对应的边际品位逆推每年边际品位,逆推出的当前一年的边际品位即是本例所需值.目前该矿山年开采能力固定,开采年限可以直接算出.

6.1 模拟所需参数计算

为便于获取模拟所需参数,根据我国 2003—2011 年钼矿价格走势近似地将 2006—2008.9 和 2008.10—2011.8 视为价格连续两个时间段;2003—2004,2004—2005,2005—2006,2008.9—2008.10 近似地视为价格跳跃点.由此可以计算出(4)所需的一些参数,见表 1.

表 1 2003—2011 年中国钼矿价格(单位:元/吨度)
Tab.1 2003—2011 China Molybdenum Ore Price (Unit:yuan/mtu)

年	2003	2004	2005	2006	2007	2008.1—2008.9	2008.10—2009.7	2009.8—2010.7	2010.8—2011.8
价格	943	2 643	5 548	4 128	4 160	4 081	1 773	2 158	2 096

1) α ,瞬时期望收益率

此处抽样时不考虑跳跃情况,并以平均期望收益率来近似替代瞬时期望收益率.

计算公式:期望收益率 = (期末价格 - 期初价格) / 期初价格 + 无风险利率,其中无风险利率取值 0.05.

$$\alpha = ((4 160 - 4 128) / 4 128 + (4 081 - 4 160) / 4 160 + (2 158 - 1 773) / 1 773 + (2 096 - 2 158) / 2 158) / 4 + 0.05 \approx 0.094$$

2) σ ,非跳跃时收益率的瞬时波动率

矿产资源价格的非跳跃瞬时波动率即标准差.

计算公式: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$,其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, i = 1, 2, \dots, n$

$\therefore \bar{x} = 0.094$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = ((0.058 - 0.094)^2 + (0.031 - 0.094)^2 + (0.267 - 0.094)^2 + (0.021 - 0.094)^2) / 4$$

$$= (0.001296 + 0.003969 + 0.029929 + 0.005329) / 4 \approx 0.01013075 \approx 0.01$$

$$\therefore \sigma = 0.1$$

3) μ_0 , 相对跳跃值的期望

$$\mu_0 = ((2.8 - 1) + (2.1 - 1) + (0.74 - 1) + (0.43 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1.2 - 1) + (1 - 1)) / 4 \approx 0.28$$

4) λ , Poisson 分布的强度系数

参数 λ 是单位时间(年)内价格跳跃的平均发生率. 考虑到实际情况, 将 2003—2011 年跳跃频率取 3 次.

$$\lambda = 3/9 \approx 0.33$$

5) $Y, Y - 1$ 为跳跃值

考虑到价格跳跃由偶然因素引起, 跳跃值独立同分布, 所以不对表 1 的跳跃值抽样取值; 而是随机抽取 (0.43—2.8) 区间的离散值, 其中 0.43 为 2003—2011 年最小跳跃值, 2.8 为最大跳跃值.

6) P , 中国钼矿长期价格

中国钼矿长期价格取值 2 446.6 元 / 吨度^[6], 即 $P = 2 446.6$

7) g , 三道庄钼矿长期综合边际品位

文献[6]对我国钼矿和钨矿的长期市场价格进行了预测. 钼矿: 2 446 元 / 吨度; 钨矿: 2 123 元 / 吨度. 需要特别指出, 三道庄钼矿含有大量伴生矿——钨矿, 需要将钨矿折算成钼矿进行统一计算. 选矿统计结果表明, 钼的回收率为 84%, 钨的回收率为 67%, 综合考虑矿石价格和回收率两大主要影响因素, 可计算出钼、钨当量折算系数为 0.69.

$$\text{WO}_3 = (2 123 \times 67\%) / (2 446 \times 84\%) \text{MoO}_3 = 0.69 \text{MoO}_3$$

g_{MoO_3} , 三道庄钼矿的长期边际品位: $g_{\text{MoO}_3} = 0.1$

g_{WO_3} , 三道庄钨矿的长期边际品位: $g_{\text{WO}_3} = 0.12$

钨矿折算为钼矿后的三道庄钼矿长期综合边际品位为: $g = 0.06$

8) \bar{g} , 三道庄钼矿长期综合边际品位下的平均综合品位

\bar{g}_{MoO_3} , 三道庄钼矿的长期边际品位下的平均品位: $\bar{g}_{\text{MoO}_3} = 0.069$

\bar{g}_{WO_3} , 三道庄钨矿的长期边际品位下的平均品位: $\bar{g}_{\text{WO}_3} = 0.1$

钨矿折算为钼矿后的三道庄钼矿长期综合边际品位下的平均综合品位为: $\bar{g} = 0.135$

6.2 模拟方法简化

本实例只是为了分析处理过程, 为减少运算量, 特做简化处理; 在实际应用中, 应该越详细越好, 不建议太过简化, 否则会急剧放大误差, 丧失使用意义. 具体简化主要有:

1) 参数未作调整

作为期权模型的一种, 本期权价格模型注重价格长期变化研究, 普通价格模型侧重于短期研究. 上述参数来源于抽样取值, 抽样值过少会使参数产生偏差, 应根据具体实际情况进行参数修正, 但为保证数据的客观性, 本文未作调整.

2) 矿山服务年限固定

理想的蒙特卡罗模拟应该不仅可以调整钼矿价格变化调整边际品位; 还可以调整年开采量, 从而延长或缩短矿山开采寿命. 三道庄钼矿的年开采量固定为 990 万 t, 剩余开采寿命 50 a^[6]. 本实例在模拟时 $T = 50$, 不需反复调整 T 的取值以适应各年开采量之和等于储量, 极大地减少了计算量.

3) N 取值为 3

N 的取值越大, 模拟出的结果就越逼近真实情况. 价格点的个数为 N^{T-1} , 所以随着 N 的增加计算量也会急剧增加, 考虑到本实例只是为了分析模拟过程, 故将 N 取值为 3.

4) 跳跃值模拟简化

由抽样可以看出, 跳跃情况的出现概率大概 1/3. 在模拟 Y_j 时, 2/3 时候取值 1, 即没发生跳跃; 1/3

时候取值随机. 如果将 N 的值取大, 则 Y_j 可以全部取随机值, 其期望为 1.

6.3 模拟所需公式

1) 钼矿价格跳跃扩散模型

假设一年内跳跃一次, 将参数具体值和 $\omega_1 = (\sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6) + \omega_0$ 带入(4)式有:

$$P_t = P_0 \exp\{0.1((\sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6) + \omega_{t-1}) - 0.004t\} Y_j$$

令 $t = 1$, 则专门用于计算下一年的公式为:

$$P_t = P_0 \exp\{0.1(\sum_{i=1}^{12} \tau_i - 6) - 0.004\} Y_j$$

其中 τ 服从 $(0, 1)$ 区间上的均匀分布, Y_j 服从 $(0.43 - 2.8)$ 区间上的均匀分布.

2) 钼矿价格变动与边际品位变动关系模型

将相关参数带入(6)式, 有:

$$g_t = 0.135 - \frac{183}{P_t}$$

3) 钼矿边际品位逐年逆推公式

$$g_{t-1} = 0.135 + \frac{N}{\sum_{\pi=1}^N \frac{1}{g_{\pi} - 0.135}}$$

此公式仅用于第 t 年的一组边际品位值逆推其在第 $t - 1$ 年中的父节点的那个价格点边际品位值.

6.3 模拟结果分析

蒙特卡罗模拟中, 价格点之间的关系类似树根节点间的关系. 表 2 列出了一条模拟记录: 从当前年份直至最后一年, 旁支的点价格没有列出.

表 2 某一点价格模拟结果统计

Tab. 2 part of results from Monte Carlo Simulation

第 t 年	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$	$t = 7$	$t = 8$	$t = 9$	$t = 10$
随机数 Y_j	1.00	1.00	1.49	0.63	1.00	1.00	1.36	1.00	0.96	1.00
随机数 ξ	0.49	0.24	-0.21	0.06	-0.15	0.25	-0.13	0.15	1.11	-0.36
点价格	2 192	2 236	3 248	2 046	2 005	2 045	2 336	2 359	2 514	2 413
点价格边际品位	0.052	0.053	0.078	0.046	0.044	0.046	0.057	0.057	0.062	0.059
第 t 年	$t = 11$	$t = 12$	$t = 13$	$t = 14$	$t = 15$	$t = 16$	$t = 17$	$t = 18$	$t = 19$	$t = 20$
随机数 Y_j	1.00	0.79	1.26	1.00	1.00	1.00	1.15	0.82	1.47	1.00
随机数 ξ	-0.43	0.61	0.16	-0.24	0.19	1.23	-0.66	-0.42	-0.11	0.58
点价格	2 302	1 925	2 450	2 382	2 418	2 660	2 480	1 942	2 812	2 953
点价格边际品位	0.056	0.040	0.060	0.058	0.059	0.066	0.061	0.040	0.070	0.073
第 t 年	$t = 21$	$t = 22$	$t = 23$	$t = 24$	$t = 25$	$t = 26$	$t = 27$	$t = 28$	$t = 29$	$t = 30$
随机数 Y_j	1.00	1.00	1.00	0.83	0.91	1.33	1.00	1.00	1.00	0.78
随机数 ξ	-1.13	0.14	0.48	-0.08	0.19	0.30	-0.29	-0.11	0.98	0.51
点价格	2 628	2 654	2 760	2 268	2 095	2 859	2 773	2 731	3 002	2 454
点价格边际品位	0.065	0.066	0.069	0.054	0.048	0.071	0.069	0.068	0.074	0.060
第 t 年	$t = 31$	$t = 32$	$t = 33$	$t = 34$	$t = 35$	$t = 36$	$t = 37$	$t = 38$	$t = 39$	$t = 40$
随机数 Y_j	1.61	1.30	1.00	1.00	1.00	1.00	0.72	1.00	1.22	1.00
随机数 ξ	-0.39	0.05	-0.26	0.12	-0.09	0.31	-0.19	0.15	-0.06	-0.01
点价格	2 568	3 372	3 270	3 297	3 254	3 342	2 350	2 376	2 870	2 856
点价格边际品位	0.064	0.080	0.078	0.079	0.078	0.080	0.057	0.058	0.071	0.071
第 t 年	$t = 41$	$t = 42$	$t = 43$	$t = 44$	$t = 45$	$t = 46$	$t = 47$	$t = 48$	$t = 49$	$t = 50$
随机数 Y_j	1.00	1.55	0.71	1.00	1.00	1.00	0.90	1.19	1.00	1.00
随机数 ξ	0.19	-0.27	0.45	-0.41	0.16	-0.24	0.19	0.83	0.13	-0.09
点价格	2 912	4 376	3 234	3 092	3 123	3 037	2 773	3 565	3 597	3 550
点价格边际品位	0.072	0.093	0.079	0.076	0.077	0.074	0.069	0.083	0.084	0.083

如前所述,令 $N = 3$, 最后一年的边际品位值个数为: $N^{T-1} = 3^{49}$. 表 2 列举了其中一个典型模拟值的产生过程; 以最后一年的所有边际品位值逐年逆推直至当前一年, 获得的值即是当前的最优边际品位值 $g_1 = 0.068$, 基本符合“高价位高品位”思路. 按边际品位值计算 0.068 推出对应的价格为 2731 元/吨度, 说明对市场波动所做出的决策增加了项目的实物期权价值.

参考文献 References

- [1] 谢英亮. 露天矿边际品位最优化的经济分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
XIE Ying-liang. Economic analysis of optimum cut-off grades in surface mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [2] JIANG G J. Jump-diffusion model of exchange rate dynamics; estimation via indirect inference[M]. Technology reports. Groningen: University of Groningen, 1998.
- [3] 陈金龙. 实物期权定价理论与应用研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
CHEN Jin-long. Application research on real option pricing theories[M]. Beijing: Machine Press, 2007.
- [4] 计奎, 杨建华, 杨志强. 利用 Windows 时间函数生成服从正态分布的随机数[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2): 19-20.
JI Kui, YANG Jian-hua, YANG Zhi-qiang. Random producing method based on windows time function[J]. Journal of Geomatics, 2004, 29(2): 19-20.
- [5] MEDEIROS Milton. Monte Carlo simulation of polarisable systems: Early rejection scheme for improving the performance of adiabatic nuclear and electronic sampling Monte Carlo simulations[J]. Theoretical Chemistry Accounts, 2005, 113(3): 178-182.
- [6] 西安建筑科技大学, 洛阳栾川钼业集团股份有限公司. 三道庄露天矿综合开采技术优化[R]. 西安: 2011.
Xi'an University of architecture and technology, Shandaozhuang molybdenum Group. A comprehensive mining technology optimization in Sandaozhuang W-Mo Deposit[R]. Xi'an, 2011.

Research on cut-off grade in surface mining metal ore deposits based on real option theory

LI Shou-guo¹, YANG Chang²

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Mining mineral resources is considered a multi-period and multi-stage compound European call option process. Present price, convenience yield, interest rates, stochastic volatility, hopping coefficient, hopping value, etc are the many economic coefficients which may have influence on the future price of mineral resources. After studying the existing theories of real options, we brought jump diffusion options price model is ushered into the study of mineral resources price; which produced some future prices by stochastic simulation. The price changing process is analyzed using Monte Carlo simulation and indirect gained the optimal present cut-off grade is gained. Finally, a mining enterprise is taken as an example to validate the results.

Key words: real option; price model; optimization of cut-off grade; Monte Carlo simulation