

实物期权在钢铁企业 铁矿资源投资决策中的运用

陈玉山(博士)

(南京晓庄学院商学院, 南京 211171)

【摘要】目前,我国钢铁企业对海外铁矿石过度依赖,且由于市场上铁矿价格波动幅度巨大,常常导致企业投资决策失误。本文基于金融理论,分析了铁矿投资项目中实物期权的价值,并以Black-Scholes期权定价模型为基础,将铁矿价格波动作为虚拟变量,建立了含有扩张和延迟实物期权的铁矿资源投资决策模型。这不仅对传统净现值投资定价方法进行了补充,也为我钢铁企业的对外投资和扩张决策提供了理论参考。

【关键词】实物期权; 铁矿资源; 投资决策

一、引言

近十多年来,铁矿石价格的不断上涨,给我国钢铁行业的发展带来巨大的不利影响。2011年,铁矿价格的上涨和波动,使得国外仅力拓集团一家铁矿公司的年利润就超过了我国钢铁行业全部利润的总和;2014年,铁矿价格又在年初140美元/吨到年底的80美元/吨间巨幅震荡;我国虽然推出铁矿期货交易,可是国内仅有几家大型钢铁企业通过套期保值规避部分风险,依然改变不了海外铁矿企业(以下简称“矿企”)对铁矿价格的实质控制。铁矿的暴利引起某些中小型矿企扩大产能,但是国内只有少数钢铁企业参与海内外中小矿企的产能扩张。因此,我国钢铁行业的发展依然面临铁矿对外依存度较高和价格不确定风险。

针对这种情况,众多学者作出相关研究。与铁矿价格波动相关的研究中,褚永和贺婷婷(2007)、何维达和万学军(2008)主要利用博弈工具对铁矿的定价权和定价机制进行研究,并提出相应对策。Martin K. J.(1996)从投资机会角度,研究了在投资机会较好的条件下,控制权易于股权转让,易于现金转让。Caldentey R.和Haugh M.(2006)研究了金融市场中公司利润的动态套期保值,讨论了不同信息情况会造成不同类型的套期保值,并提出较优的操作解决方案。Dolinsky Y.和Kifer Y.(2007)在研究有效的套期保值的初始资本投资组合时,认为一个完美的对冲是不可能的,但是可以尽量减少投资组合的风险,并在市场中找到合适、有效的对冲策略。从上下游产业角度进行的研究中,王明喜(2012)以钢铁行业集中度的高低为参考,认为钢铁行业集中度较高时,铁矿价格会下降,并提出长期和短期的铁矿博弈均衡。陈玉山(2015)基于供应链上的无产量约束或Bertrand博弈均衡产量约束,分析

了寡头矿企和钢铁企业间的动态博弈,讨论了铁矿价格对钢铁企业一体化程度的影响及相应对策。从矿山开发角度,李松青和刘异玲(2008)用实物期权理论构建了基于延迟实物期权的矿业投资决策模型,为矿业投资提供新的决策思路。邵必林和吴琼(2012)运用二叉树期权定价模型,研究了在钼矿最佳投资时机确立栏杆价格的理论方法。上述文献大都从铁矿制度和铁矿价格考虑,基于对铁矿价格这个风险因素的规避,而没有考虑对风险因素的利用。很少有文献把铁矿资源作为一种金融工具,从实物期权角度来考虑铁矿价格,也很少有钢铁企业利用实物期权对铁矿资源项目进行投资决策的研究。

由于我国矿企对海外铁矿石有较高的依存度,为此增加铁矿资源的投资很有必要。一方面,要获得新的铁矿项目或供给来源以提高铁矿自给率;另一方面,铁矿项目的传统价值评估存在一些缺陷,只关注了外界铁矿石价格的变化,忽视了企业内部在利用风险因素的过程中铁矿项目带来的价值,即实物期权的价值,从而造成海外铁矿产能扩张缓慢。因此,本文基于实物期权Black-Scholes模型理论,利用铁矿价格的不确定性影响因素,构建含有虚拟变量的铁矿项目实物期权投资决策模型。该模型能更好地应对市场中含有价格风险的投资行为,为矿企获得更有竞争的原料供应提供理论参考。

二、铁矿资源投资的定价方法和实物期权价值构成

期权(Options)是一种金融衍生工具,也称为或有索取权,它是期权持有者在未来的一种选择权利,期权交易是一种权利的交易。当期权的标的物不是股票、债券、期货等金融资产而是具体的实物投资项目、自然资源、企业工厂时,称之为实物期权(Real Options)。实物期权是期权定价理论在实物资产方面的延伸和扩展,它是实物资产

(非金融资产)定价的依据。

(一)铁矿资源投资的传统定价法和实物期权定价法

1. 传统投资定价方法。传统投资定价方法有:净现值法(NPV)、现值指数法(PI)、内部收益率法(IRR)、投资回收期法。其中净现值法(NPV)是一种常用的方法,用公式表示为:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(CI - CO)_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

当 $NPV > 0$ 时,表示投资项目的净效益折抵相当于用基准收益率计算的利息后仍有盈余,该项目可以投资;当 $NPV < 0$ 时,表示投资项目的净效益没有达到必要报酬率的要求,该项目不能投资。

2. 实物期权定价方法。实物期权定价方法是通过与金融期权的对应关系,在金融市场上找到相应的标的金融资产并用于计算的方法,通常可以采用Black-Scholes期权定价模型(以下简称“B-S模型”)。B-S模型中投资者的风险偏好对期权定价不产生影响,而影响期权价格的因素主要包括:标的资产的市场价格、期权的执行价格、无风险利率、收益方差和期权到期时间等。此外还有二项式模型、蒙特卡洛模拟法等实物期权定价方法。

3. 实物期权定价方法适用范围。由于实物期权定价方法较为复杂、计算量大,需要用到一些复杂的数学公式,因而实物期权方法并不是在所有情况下都适用。例如,含有不确定因素较少的铁矿投资项目中包含实物期权的价值相对较小,此时仅需使用传统投资定价方法,就可以满足价值评估的要求。而对于因市场环境多变导致不确定因素对未来价值影响较大的铁矿投资项目,实物期权方法能够较好地分析其期权价值。具体来说,以下投资决策评价条件可以运用实物期权方法进行定价计算和决策。

第一,钢企对铁矿项目存在多种投资选择,并且投资选择中含有对项目价值影响较大的不确定因素。此时,传统的定价方法不能估计投资选择带来的价值,只有运用实物期权方法才能正确估价。

第二,铁矿投资项目的价值在很大程度上由项目未来实物期权的价值决定,而不是由当前项目的资金流决定。即使投资项目现在的净现值为负,但拥有未来成长性期权,仍然可以投资。

第三,铁矿投资项目中的各种影响因素发生变化后,钢企对该项目投资价值需要重新估算或钢企的投资策略发生改变。

第四,铁矿投资项目中,钢企的柔性经营和灵活管理这类不确定因素能够产生较大的价值,这类价值需要运用实物期权方法进行定价。当然,实物期权定价方法只是完善而不是否定传统的投资定价方法,它们各自有不同的适用范围。我们在分析铁矿投资项目的价值时,应该根

据面临的实际市场和环境,来考虑该项目中实物期权的价值。

(二)铁矿资源投资项目中实物期权的价值构成

铁矿投资项目中含有的实物期权价值的大小,与未来不确定因素的大小紧密相关,不确定因素又小又少的,其实物期权价值自然就小。此外,实物期权种类不同,其价值大小也不相同。

1. 铁矿资源投资项目中实物期权的种类。Amram和Kulatilaka(1998)认为项目投资过程中可能使用诸如扩大、推迟、转换、关闭等非金融性选择权,即投资项目中含有的四种实物期权。在此基础上,黄生权(2006)提出了分阶段、收缩、停启等共七种实物期权。

铁矿资源投资项目中实物期权与金融期权的交易选择权不完全相同,实物期权的价值主要来自于铁矿市场价格的不确定性和企业的柔性管理。在铁矿资源投资项目中,由于当前铁矿价格波动较大,使得扩张和延迟实物期权价值较大,而其余的实物期权价值较小,甚至可以忽略不计。

2. 铁矿资源投资项目中扩张实物期权价值构成。当钢企投资铁矿项目并进行开采以后,若某段时间内市场上铁矿石交易价格不断上涨,对铁矿项目来讲就产生了扩大生产的经营选择机会(扩张实物期权)。此时,钢企决定在铁矿石价格上升期间追加投资并扩大生产规模,以达到增加利润的目的。因此在计算项目中的实物期权价值时,需要分析该铁矿投资项目中影响资本收益的因素,这些因素可以划分为以下两类:

一类为确定性因素,包括项目投资工期、项目管理成本等。这类因素主要受到钢企对铁矿资源投资项目经营管理的影响,在正常管理下这类因素变化较小,钢企可以把它们当成确定因素。这样就无须采用实物期权定价方法来计算这类确定因素在铁矿投资项目中的实物期权价值,而采用传统的净现值法来计算铁矿投资项目的现金流入及资金支付,从而形成并体现为项目部分价值的净现值,该净现值是铁矿投资项目固有的价值,用 NPV_1 表示。

另一类为不确定因素。铁矿市场价格上升、利率、项目的地质环境等构成铁矿投资项目的外部不确定因素,其中最主要的是铁矿市场价格上升。此时钢企通过作出追加投资提高产能的决策来获取项目中的扩张实物期权价值。例如钢企可以追加铁矿项目的投资金额(I_E),铁矿项目价值相应增加 $X\%$ 。这就对铁矿投资项目实施了增加产能和规模的选择权,即扩张实物期权。扩张实物期权本质相当于一个欧式金融买权,追加的投资金额(I_E)就是该实物期权的执行价格。如果在 t 时期,铁矿投资项目收益价值为 V_t , V_t 就是实物期权的标的资产价值。那么扩张实物期权价值就是 $\text{Max}\{(X\%V_t - I_E), 0\}$,用 C_G 表示。钢企可

根据该期权价值波动和实际情况,机动地实施扩张投资策略,从而获取铁矿投资项目中蕴含的扩张实物期权价值。

3. 铁矿资源投资项目中延迟实物期权的价值构成。当钢企投资铁矿项目并进行开采以后,若某时期内市场上铁矿石交易价格不断下降,对铁矿项目来讲就产生了中断生产的经营选择机会(延迟实物期权)。此时,钢企决定在铁矿石价格下降期间暂时中断开采,以减少亏损。因此在计算项目中的延迟实物期权价值时,需要分析该铁矿投资项目中影响资本收益的因素,这些因素可以划分为两类,与影响扩张实物期权价值的因素类似,有些仅仅是数值不同。

一类为确定性因素,包括项目投资工期、项目管理成本等。这类因素主要受到钢企对铁矿投资项目经营管理的影响,在正常管理下这类因素变化较小,钢企可以把它们当成确定因素。这样就无须采用实物期权定价方法来计算这类确定因素在铁矿投资项目中的实物期权价值,而采用传统的净现值法来计算项目内在的净现值。该净现值是铁矿投资项目固有的价值。

另一类为不确定因素。铁矿市场价格下降、利率、项目的地质环境等构成铁矿投资项目的外部不确定因素,其中铁矿市场价格下降是最主要的不确定因素。此时钢企通过暂时中断生产的经营决策来获取项目中的延迟实物期权价值,用 C_D 表示。钢企可根据该期权价值波动和实际情况,机动地实施延迟投资策略,从而获取铁矿投资项目中蕴含的延迟实物期权价值。

三、基于实物期权的铁矿资源投资决策模型

由于铁矿市场价格波动存在较大的不确定性,当价格上涨时,铁矿投资项目蕴含扩张实物期权;当价格下跌时,铁矿投资项目蕴含延迟实物期权。

因此,可以把铁矿投资项目总价值 V_T 构造为价值固定的铁矿投资项目与未来可追加投资提高产能的扩张实物期权价值或者是未来可暂时中断生产的延迟实物期权价值之和。这符合在不确定的市场环境下钢企投资铁矿项目的长远战略利益。

(一)铁矿资源投资项目中实物期权决策模型的建立

考虑到确定和不确定因素对铁矿项目价值的不同影响,铁矿投资项目的总体价值是投资项目的净现值和实物期权(扩张或者延迟)价值之和。由于扩张或者延迟实物期权价值相比其他期权而言大得多,同时,铁矿价格的上升和下降不能够同时出现,因此,在决策时项目中含有不同的实物期权,具体公式如下:

铁矿投资项目的总价值=铁矿投资项目内在的净现值+项目中的扩张实物期权价值(或项目中的延迟实物期权价值),即:

$$V_T = NPV_1 + D_1 C_G + D_2 C_D \quad (2)$$

其中: V_T 表示钢企对铁矿投资项目的总价值; NPV_1 表示铁矿投资项目内在的净现值; D_1 是虚拟变量,铁矿价格上升时为1,铁矿价格下降时为0; D_2 是虚拟变量,铁矿价格上升时为0,铁矿价格下降时为1; C_G 表示用B-S模型计算的项目中含有的扩张实物期权价值; C_D 表示用B-S模型计算的项目中含有的延迟实物期权价值。

根据铁矿资源的实物期权决策分析框架,可以计算铁矿投资项目总价值(V_T),当 $V_T > 0$ 时,钢企可以进行铁矿项目投资;当 $V_T < 0$ 时,钢企应该放弃铁矿项目投资。

(二)铁矿资源投资项目中实物期权价值的计算

我们只要分别计算铁矿项目内在的净现值和项目中的扩张或延迟实物期权价值,然后再求和,就可以得出铁矿投资项目的总价值。

1. 扩张实物期权定价计算。铁矿投资项目中的扩张实物期权是一种不可交易的实物期权,该实物期权价值的计算与金融期权价值的计算存在本质的差别。但是Cox、Ingersoll和Ross(1985)指出,在企业的最终目标是追求利润最大化的情况下,当项目具有与标准折现现金流量方法相同的假定条件时,项目中含有的实物期权的定价能够用B-S模型进行计算。当钢企进行铁矿项目投资时,认为该项目的市场交易能给钢企带来一定的利润增量,项目实物期权定价的出发点在于考虑项目对钢企的价值贡献。因此,只要在金融资本市场上获得与所评估的铁矿投资项目具有相同或近似的不确定特征的可交易证券(孪生证券),就能够运用无风险债券与近似不确定特征证券的组合,来推导和计算项目中实物期权的价值。

依据B-S模型期权定价原理,假设钢企在铁矿投资项目中的铁矿资产价值服从维纳(又称几何布朗运动)过程,如下所示:

$$dV_t = (\mu - \varepsilon)V_t dt + \sigma V_t dZ_t \quad (3)$$

其中: V_t 表示t时刻铁矿投资项目中的铁矿资产价值; μ 表示单位时间内价值增长速度的期望值,即铁矿投资项目中铁矿资产价值的期望值漂移率; ε 表示扩张投资给整个铁矿投资项目造成的报酬亏空率,或者项目红利; σ 表示单位时间内铁矿投资项目的资产价值增长的标准差(价值的波动率); dZ_t 表示t时刻的维纳过程。

由伊藤定理可知,扩张实物期权价值 C_G 满足B-S模型所示的微分方程,即:

$$rC_{G,t} = \frac{dC_{G,t}}{dt} + (\mu - \varepsilon)V_t \frac{dC_{G,t}}{dV_t} + \frac{1}{2} \sigma^2 V_t^2 \frac{d^2 C_{G,t}}{dV_t^2} \quad (4)$$

式中: $C_{G,t}$ 表示t时刻铁矿投资项目扩张实物期权价值; r 表示无风险利率。

上述扩张实物期权定价公式有着如下的限制条件:

$$C_{G,t=T} = e^{-r(T-t)} \text{Max}\{(S-1), 0\} \quad (5)$$

其中: T 表示铁矿项目扩张投资的最终时间; t 表示铁矿项目扩张投资的开始时间; S 表示铁矿投资项目现金流

入在扩张期末的现值;I表示铁矿投资项目现金流出在扩张期末的现值;r表示无风险利率。

根据B-S模型期权公式进行推导,得出:

$$C_{G,t} = S \times N(d_1) - I \times e^{-r(T-t)} \times N(d_2) \quad (6)$$

$$d_1 = [\ln(S/I) + (r - \varepsilon + 1/2\sigma^2)] / (\sigma\sqrt{t})$$

$$d_2 = d_1 - (\sigma\sqrt{t})$$

其中: $N(d_1)$ 、 $N(d_2)$ 表示正态分布变量的累计概率。式(6)即铁矿投资决策模型中扩张实物期权价值的计算公式。

2. 延迟实物期权定价计算。当铁矿项目中含有价值较大的延迟实物期权时,铁矿投资项目的资本收益可以按照金融期权的市场价格进行计算。延迟期后的资本成本类似于金融期权的执行价,延迟期前的资本成本类似于金融期权的买进价,具体计算原理同扩张实物期权。

根据B-S模型期权公式进行推导,得出:

$$C_{D,t} = S \times N(d_1) - I \times e^{-r(T-t)} \times N(d_2) \quad (7)$$

$$d_1 = [\ln(S/I) + (r - \varepsilon + 1/2\sigma^2)] / (\sigma\sqrt{t})$$

$$d_2 = d_1 - (\sigma\sqrt{t})$$

其中: $N(d_1)$ 、 $N(d_2)$ 是正态分布变量的累计概率。式(7)即为铁矿投资决策模型中延迟实物期权价值的计算公式。

(三)铁矿资源投资项目中实物期权价值的影响因素

铁矿投资项目中的实物期权因标的资产在未来具有不确定性而蕴含一定的价值。当铁矿投资项目具有某一类型的实物期权(如欧式看涨期权)时,该类实物期权的价值通常受到以下因素的影响:

1. 铁矿投资项目资产的价值。钢企投资者可以用明确的投资价格获取铁矿投资项目中的某个投资选择权,即该项目中的实物期权。钢企通过增资或投资来获取铁矿投资项目的选择权即为欧式看涨实物期权。项目中的实物期权价值将会随着资产价值的增加而相应地增加。

2. 铁矿投资项目资产的波动性。铁矿投资项目因受到不确定因素的影响而具有不稳定性。当项目扩张价值超过项目成本或者项目资产的价值具有较大波动性时,项目中的实物期权具有较大价值,钢企选择扩张机会进行投资;当项目扩张价值小于项目成本或者项目资产的价值几乎没有波动时,实物期权价值很小从而没有投资价值。因此,铁矿投资项目的实物期权价值随着资产的不确定性增加而增加。

3. 铁矿投资项目的执行价格。铁矿投资项目的执行价格就是项目投资时的资本投资总额,也是项目中实物期权的执行价格。例如,当铁矿投资项目中看涨实物期权的投资总额降低时,该项目中实物期权的价值将会增加。

4. 项目中实物期权的到期时间。铁矿投资项目中实物期权到期时限的延长将会增加期权的价值,反之,到期时限的缩短将会减少期权的价值。钢企在铁矿投资项目

等待的期限越长,则该项目发生不确定变化的机会就越多,该项目中实物期权价值上升的可能性就越大,项目投资价值增长的机会也越多。

5. 无风险利率。铁矿投资项目的实物期权现值与无风险利率的变化正相关,无风险利率增加时实物期权的现值增加。由于实物期权的现值将会影响项目的未来支付和收益,因此,铁矿投资项目执行价格的现值将随着无风险利率(折现率)的增加而下降。

6. 投资项目中红利的支付。红利是铁矿投资项目支出的、超出无风险利息的现金流。投资项目一旦支付红利,就会降低投资的总资产价值,同时也会降低铁矿投资项目中实物期权的价值。

此外,在计算铁矿投资项目中的实物期权价值时,还存在一些困难因素。第一,由于铁矿投资项目中的实物期权不是通过市场交易获得,因而资产的市场价格和波动率等参数不能按照金融期权市场的实际价格进行计算,也不能直接带进实物期权定价模型进行计算。第二,铁矿投资项目的实物期权定价估算模型更为复杂。B-S模型通常只能解决单个实物期权的价值计算,而对于复合期权定价还没有普遍适用的方法。

四、实物期权在铁矿资源投资项目中的决策应用

本文以某钢企对铁矿资源项目进行投资为例,在面對铁矿价格下降的不确定因素时,利用基于实物期权的铁矿资源投资决策模型,详细地分析了实物期权在项目投资中的决策应用。

例:某钢企为获得铁矿原料对一铁矿资源项目进行开发投资,该项目中铁矿资源持续开采的最长期限约为10年。项目建设和运营2年后,钢企预测国际铁矿前景不佳,铁矿石价格将在今后的2年内一直走低。因此钢企作出暂时延迟生产开采的决策,2年后市场行情旺盛时,钢企将再重新开采和生产。预计铁矿项目的总投资额为229.16百万美元,项目延迟投资年份每年支出6百万美元,并且没有收益。

可以看出,铁矿资源投资项目中隐含着—个在项目持续运营2年之后,铁矿投资项目的投资人可以选择是否执行的延迟实物期权。要分析钢企的决策是否合理,就需要考虑这个实物期权的价值。同时,由于存在铁矿价格下跌,该项目中没有扩张实物期权。

1. 基本数据。钢企的决策者根据铁矿石价格的历史资料测算出铁矿价格波动的标准差大约为30%。根据银行借贷的利率波动情况,假定无风险利率为8%,投资项目的折现率为10%。铁矿投资项目的报酬亏空率为铁矿资源实际开采年限(不含延期2年)的倒数,即 $\varepsilon=1/10$ 。同时根据钢企财务部门对建设和生产的成本费用及铁矿价格供需行情的分析,预测该项目投资后各年的资金进出流量如下所示:

铁矿投资项目各年的资金进出流量表 单位:百万美元

现金流	时间	第0年	第1~2年	第3~4年	第5~10年	第11~12年
总投资		229.16				
每年投资现金流出			21	6	21	24.58
每年收益现金流入			14	0	25	28.08
净现金流			-7	-6	4	3.5

2. 净现值计算与分析。计算该铁矿投资项目内在的净现值NPV_I。

$$NPV_I = \sum_{t=1}^{12} (CI - CO)_t (1+i)^{-t}$$

将有关数据代入上式,可得:NPV_I = -6.51(百万美元)。

3. 计算该铁矿投资项目延迟实物期权价值C_D。

(1) 实物期权执行价格等于第3~4年和第5~12年的投资资金流出量在第4年年末的现值之和。

$$I = \sum_{t=5}^{12} CO_t (1+i)^{-t} + [6 \times (1+10\%)^2 + 6 \times (1+10\%)^1] = 232.59(\text{百万美元})$$

(2) 实物期权当前价格等于第3~12年的收益现金流入量在第2年年末的现值。

$$S = \sum_{t=3}^{12} CI_t (1+i)^{-t} = 198.00(\text{百万美元})$$

经查表,N(d₁) = 0.397 4, N(d₂) = 0.245 1;将有关数据代入延迟实物期权价值模型,即:

$$C_{D,t} = S \times N(d_1) - I \times e^{-r(T-t)} \times N(d_2)$$

$$d_1 = [\ln(S/I) + (r - \epsilon + 1/2\sigma^2)] / (\sigma \sqrt{t})$$

$$d_2 = d_1 - (\sigma \sqrt{t})$$

经过计算可得:d₁ = -0.261 7; d₂ = -0.685 9;第4年年末的延迟实物期权价值C_D = 30.11(百万美元)。

4. 根据实物期权投资模型计算铁矿投资项目的总价值。由于价格下降,虚拟变量D₁为0, D₂为1,因此该项目中没有扩张期权。根据公式(2)可得:

$$V_T = NPV_I + 0 \times C_G + 1 \times C_D = -6.51 + 30.11 = 23.6(\text{百万美元})$$

在该案例中,若单纯使用净现值法得出NPV_I = -6.51 < 0,则该铁矿投资项目将被放弃。而考虑到铁矿投资项目中的延迟实物期权价值后,V_T = 23.6 > 0,即铁矿投资项目总价值大于零,能够进行开发投资。在不确定因素的影响下,净现值法往往造成对铁矿投资项目价值的低估。因此在计算铁矿投资项目的总价值时,不仅要计算项目的净现值,同时也要计算项目中蕴含的实物期权价值,只有这

样才能全面地考虑钢企获得铁矿资源的价值。

五、结论

传统的投资决策回避了铁矿投资中的不确定性风险,也忽视了铁矿投资项目中隐含的实物期权的价值。而利用实物期权理论建立的铁矿资源投资决策模型,为钢企在铁矿项目上的投资决策提供了有价值的理论参考,也是对传统决策方法的补充。

特别是在面临全球铁矿价格上涨和波动的风险时,这种投资决策加大了钢企自身在投资项目中的风险承受能力,提高了我国钢企在铁矿项目投资时的竞争能力和投资效率。同时提高了钢铁企业的原料自给和铁矿市场的供给,减少了对海外铁矿石的过分依赖。

主要参考文献

Cox J., Ingersoll J., Ross S.. An intertemporal general equilibrium model of asset prices[J]. *Econometrica*, 1985 (2).

Amram M., Kulatilaka N.. *Real options: managing strategic investment in an uncertain world*[M]. Cambridge: Harvard Business School Press, 1998.

邵必林, 吴琼. 实物期权在矿业最佳投资时机中的应用[J]. *金属矿山*, 2012(11).

李松青, 刘异玲. 基于延迟实物期权的矿业投资决策模型[J]. *系统工程*, 2008(3).

陈玉山. 基于钢企纵向一体化程度下的竞争博弈分析[J]. *技术经济与管理研究*, 2015(4).

王明喜. 博弈视角下我国铁矿石进口价格谈判的长期均衡[J]. *经济与金融*, 2012(9).

Dolinsky Y., Kifer Y.. Hedging with risk for game options in discrete time [J]. *Stochastics An International Journal of Probability and Stochastic Processes*, 2007(79).

Caldentey R., Haugh M.. Optimal control and hedging of operations in the presence of financial markets [J]. *Mathematics of Operations Research*, 2006(2).

Martin K. J.. The method payment in corporate acquisitions, investment opportunities and managerial ownership [J]. *Journal of Finance*, 1996(4).

何维达, 万学军. 铁矿石国际贸易定价权与议价力的博弈分析[J]. *国际经贸探索*, 2008(2).

褚永, 贺婷婷. 国际铁矿石贸易结构和定价机制的经济学分析[J]. *中国物价*, 2007(5).

【基金项目】国家自然科学基金青年项目“城市再生水的自主定价模型及定价方法研究”(项目编号:41401630)