

不确定环境下自然资源开发项目投资评价模型^①

何沐文, 刘金兰, 高奇特
(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 以不确定环境下自然资源开发项目投资评价问题为研究对象, 以现金收益、开发投资和运营成本的不确定性对投资价值的影响为切入点, 在现有实物期权投资评价模型的基础上, 同时考虑项目方在投资阶段推迟投资和在生产阶段暂停运营的管理柔性, 建立基于多随机变量的自然资源开发项目实物期权投资评价模型. 应用交换型期权和鞅过程等定价理论给出了模型的解析解, 并结合某原油开发项目的实例进行了参数的静态分析.

关键词: 投资评价; 实物期权; 不确定性; 自然资源开发

中图分类号: F272.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2013)06-0046-10

0 引言

自然资源开发项目是指以获取原油、煤炭、天然气、金属材料、贵金属等资源产品为目的的风险投资项目. 此类项目投资大、周期长、风险高, 准确评价其投资价值尤为重要. 早期的风险投资评价理论因未能认识到投资不可逆性、不确定性和时机选择的重要意义, 导致了其评价结果的一些偏差^[1]. 针对该问题, Myers^[2]和Ross^[3]首先提出了“实物期权”概念, 用以解决风险投资评价问题. 与金融期权相似, 实物期权理论同样建立在非套利均衡理论的基础上, 其核心思想是投资者在确定投资机会的价值和最优投资策略时, 不应简单地使用主观概率方法或效用函数, 而应理性地寻求一种建立在市场基础上的使项目价值最大化的方法^[4]. 该理论将项目中潜在的投资机会视为一种期权, 为风险项目投资评价问题打开了新思路.

在自然资源开发领域早期的实物期权研究中, Brennan^[5]首先使用实物期权理论定义了矿石挖掘项目的最优化战略, 此研究在领域内具有开拓性的重要地位. 几乎在同一时期, McDonald和

Siegel^[6-8]也做了类似的分析. 随后, Trigeorgis^[9]借鉴决策树分析模式, 将期权模型应用于跨国公司的矿产开采计划中. 此外, Paddock^[10]、Smith^[11, 12]探讨了石油开发项目中的实物期权模型.

随着实物期权投资评价模型的基本建立, 该领域的研究逐渐进入成熟阶段. 近十年来, 学者们将研究的重点由期权模型的应用转为期权模型的扩展, 其中项目价值的不确定性分析是模型扩展的重要方向之一. Armstrong等^[13]将技术不确定性和石油项目建设的风险联系在一起, 致力于合理评估取得更多信息的项目. Lima和Suslick^[14]分析了运营成本的不确定性在矿藏开发项目实物期权估价模型中的作用. Takashi^[15]将影响利润的潜在不确定性因素定义为随机过程, 研究了在其影响下的期权模型. 此外, 国内不少学者针对该问题也进行了深入研究, 参见文献[16-18].

纵观国内外相关研究, 尽管学者们分别指出了影响开发项目投资价值的多种不确定因素(如投资、成本、储量、技术等), 但是在其各自的期权评价模型中仅能体现其中之一, 而忽略其它因素.

① 收稿日期: 2011-03-16; 修订日期: 2011-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70672027).

作者简介: 何沐文(1983—), 女, 天津人, 博士, 助理研究员. Email: hmw198308@yahoo.com.cn

这样的局限性是由于随着模型复杂程度的增加, 模型求解的难度也将增大, 甚至无法推导出确定解. 使用蒙特卡洛模拟的方法求解虽然可以简化问题, 但不利于进一步的参数分析以及经济意义的解释. 针对这一问题, Won^[19] 在其研究中构建了一个同时考虑收益和投资双重不确定性的期权评价模型, 并利用鞅过程理论给出了该模型的确定解.

然而, Won 模型在以下两个方面仍存在不足: 首先, 根据停止营业点理论, 项目方除了拥有推迟投资的期权外, 还拥有根据运营成本和收益的变动情况随时暂停(或终止)生产的管理灵活性, 这一期权将在一定程度上提升项目的投资价值. 其次, Won 模型虽然对传统模型进行了扩展, 考虑了投资的不确定性, 然而仍存在诸多投资价值的影响因素需要深入分析, 例如成本的不确定性对项目方是否暂停项目具有重要作用. 因此, 本文将在现有研究的基础上, 进一步将投资划分为资本性支出(即开发投资)和运营性支出(即运营成本), 同时考虑开发投资、运营成本和收益的不确定性对生产决策和投资价值的影响. 构建基于多随机变量且分阶段的自然资源开发项目实物期权评价模型, 给出模型的确定解, 并结合某原油开发项目的实例对模型参数进行分析.

1 自然资源开发项目特征分析

1.1 自然资源开发项目投资模式

自然资源开发项目的投资方在签订开发合同或购买开发许可证之前, 首先会根据招标方提供的不完全勘探信息, 对项目的可采储量、产品质量、开发难度和所需投资等指标进行估计, 并以此为基础制定详细的生产计划和投资预算, 从而预测逐年的现金收益及运营成本.

开发项目的实施过程一般可划分为产能建设阶段和生产阶段, 如图 1 所示. 产能建设阶段是指为获得产能而进行的资本投资过程, 包括建设厂房、购建设备、勘探、铺设管道等; 生产阶段指获取产品并销售的生产运营过程. 由于自然资源多处于较深的地下层, 项目方需在产能建设阶段消耗大量的资金和时间, 这些资本性支出往往是不

可回收的. 进入生产阶段后, 资本性支出逐渐减少, 项目重心转为产品的生产、运输和销售, 开始产生现金收益, 现金支出转为材料费、人工费、管理费和销售费等运营性支出.

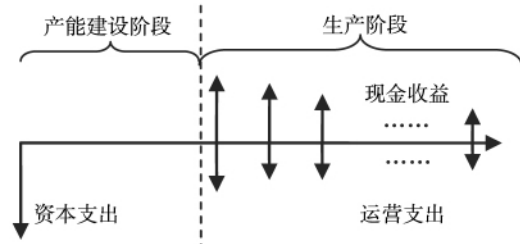


图 1 投资模式示意图

Fig. 1 Sketch of investment model

1.2 影响项目价值的不确定因素

基于对某石油企业原油开发项目的调查研究, 本文对影响自然资源开发项目投资价值的影响因素进行以下分析. 投资评价理论通常以贴现现金流的形式量化价值, 自然资源开发项目在生产阶段时间 t 的净现金流 NCF 可概括表示为

$$NCF(t) = P_t - C_t = price_t \times Q_t \times (1 - G_t) - (MC_t + LC_t + AC_t + OC_t) \quad (1)$$

其中 P_t 表示单位时间内的现金收益; C_t 表示单位时间内的运营成本; $price_t$ 表示单位时间内的产品销售价格均值; Q_t 表示单位时间内的产量; G_t 表示单位时间内需缴的各项税费的税率估计值, 一般包括增值税、所得税、特别收益金、城市维护建设税、教育附加费和矿区使用费等. MC_t 、 LC_t 、 AC_t 和 OC_t 分别表示生产经营所需的材料费、人工费、管理费和其它直接支出.

考虑资金的时间价值, 项目的净现值 NPV 可表示为下式

$$NPV = \sum_{t=T_0}^T \frac{P_t - C_t}{(1+u)^t} - \sum_{t=1}^{T_0} \frac{I_t}{(1+u)^t} \quad (2)$$

其中 I_t 表示产能建设阶段所需的资本性支出(简称开发投资); T_0 表示产能建设阶段的时间长度; T 表示项目生命期总长度; u 表示经风险修正的折现率, 包含无风险收益率、风险报酬率和通货膨胀率.

由以上分析可知自然资源开发项目的投资价值主要受以下因素影响:

1) 现金收益

由公式(1)可知现金收益主要受产品价格、产量和税率影响. 其中, 产品价格受市场影响具

有较高的不确定性;产量为项目的内生变量,由企业的生产计划制定;税率由国家或地方政策决定,在短时间内变动的可能性不大.因此,产品价格的波动是造成现金收益不确定的主要因素.

进一步分析产品价格的波动情况,概括如下.首先,自然资源产品价格普遍具有较高的波动率.由文献[1]可知在1987年至2002年时间范围内,几种自然资源的价格波动率分别为铜163.91%、铬119.05%、铀168.24%、锌153.87%、铅44.46%.其次,自然资源产品价格的波动过程具有较高的随机性.以石油价格为例,图2所示为美国能源部能源情报署(EIA)公布的1991年至2010年间西德克萨斯原油价格季度数据.如图所示,原油价格的波动并无明显趋势,难以准确预测其未来走势.因此,本文遵循传统实物期权评价理论将自然资源产品价格的波动过程(即现金收益的波动过程)定义为服从几何布朗运动的随机过程.

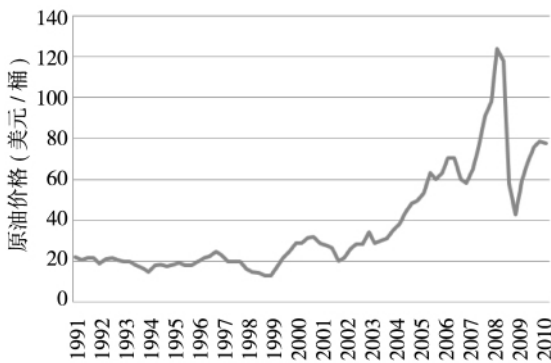


图2 西德克萨斯原油季度平均价格

Fig.2 The average crude oil price of West Texas quarterly

2) 开发投资

开发投资在传统期权定价模型中被认为是确定值,然而正如Won在文献[19]中指出的,自然资源开发项目不同于一般意义上的生产加工项目,将开发投资作为不确定变量考虑更符合该领域的实际情况.此类项目往往具有投资额大、回收期长、潜在风险高的特点,且在项目的开发过程中,由于地质、储量和其它不可控因素的影响,项目所需开发投资额往往是不可准确预期的.因此,本文将开发投资也作为影响项目投资价值的不确定因素之一.

3) 运营成本

由公式(1)可知运营成本主要由材料费、人工费、管理费和其它费用构成,其中材料费和人工费为主要支出.易知,材料费和人工费分别受原材料市场和劳动力市场的影响,具有较高的不确定性.因此,本文不同于传统期权定价模型,将运营成本也作为影响投资价值的不确定因素之一.

本文将开发投资和运营成本分开考虑是具有现实意义的.根据微观经济学中的盈亏平衡点理论,在项目的生产运营过程中,如当期成本大于收益,企业应暂停或终止项目,以避免更大损失,而当成本降低或收益增高从而达到平衡点时,生产运营应被恢复.由此可知,根据运营成本和现金收益的波动性,项目方拥有随时暂停项目的管理灵活性,而这种灵活性将有助于提升项目的预期价值,从而影响项目的投资决策^[20].

2 投资评价模型

2.1 模型假设

由上述分析可知,自然资源开发项目具有投资不可逆、价值不确定和时机可推迟的特征.这些特征与金融期权极为相似,因此本文选取实物期权方法对自然资源开发项目进行估价.与Brennan^[5]模型一致,本文假设待评项目处于完全竞争市场;投资时机可被无成本、无时限地推迟;项目结束后不具有清理价值;并以几何布朗运动模拟价值的波动过程,如式(3)~式(6)所示.

在每个生产决策单元中,现金收益 P 和运营成本 C 的波动过程服从几何布朗运动

$$\frac{dP}{P} = \alpha_P dt + \sigma_P dz_P \tag{3}$$

$$\frac{dC}{C} = \alpha_C dt + \sigma_C dz_C \tag{4}$$

其中 α_P 和 α_C 表示漂移参数, σ_P 和 σ_C 表示方差参数, dz_P 和 dz_C 为标准Weiner过程增量.

开发投资 I 和项目价值 V 的波动过程服从几何布朗运动

$$\frac{dV}{V} = \alpha_V dt + \sigma_V dz_V \tag{5}$$

$$\frac{dI}{I} = \alpha_I dt + \sigma_I dz_I \tag{6}$$

其中 α_V 和 α_I 表示漂移参数, σ_V 和 σ_I 表示方差参

数 dz_V 和 dz_I 为标准 Weiner 过程增量。

此外,为简化模型,提升模型的可用性,本文假设生产运营决策以年度为单位,且每年的决策过程相互独立。作此假设的目的是为模拟项目方在生产期拥有的暂停/启动项目的管理灵活性,以年度为单位的设计较为符合自然资源开发项目实际的运营情况。

2.2 模型框架

基于以上假设,本文建立了如图 3 所示的两阶段实物期权定价模型。

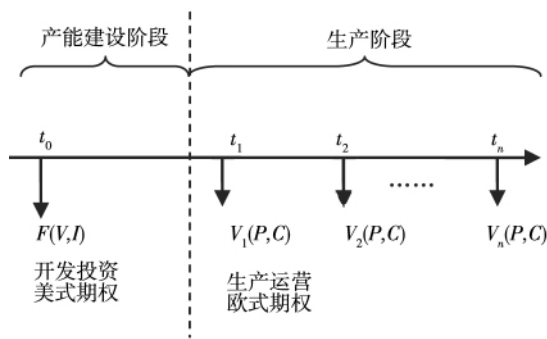


图 3 期权模型示意图

Fig.3 Sketch of real option model

第一阶段分析项目的内在价值 V 。传统实物期权投资评价理论将项目的实施过程作为一个黑箱,笼统地将项目的内在价值假设为一个随机波动的变量。本文则进一步深入分析项目价值,探究现金收益和运营成本不确定性对生产运营以及投资价值的影响。因此,本文将项目价值视为一个由多个生产决策单元组成的集合^[7],每一个生产决策单元都拥有一个欧式交换型期权。该期权赋予投资方在特定时间决策是否继续运营该项目的权利(没有必须运营的义务)。项目的总价值 V 即为多个期权价值的和

$$V = \sum_{i=1}^n V_i(P_i, C_i) \quad (7)$$

其中 P_i 表示现金收益, C_i 表示运营成本,函数 $V_i(P_i, C_i)$ 表示每个生产运营决策单元(如年、季度等)对应的期权价值, n 表示生产阶段包含的生产运营决策单元个数。

第二阶段分析投资机会的价值 $F(V, I)$ 。该投资机会非常类似于一个可无限推迟的美式交换型期权,它赋予投资方在任何时间投资该开发项目的权利(没有必须投资的义务)。

分阶段的期权模型与传统实物期权评价模型

比较有以下两个优点:首先,新模型不仅考虑了推迟投资决策的管理灵活性,还考虑了进入生产阶段后随时暂停运营的柔性对项目价值的影响,使模型更加贴近现实。其次,分阶段的期权模型增加了评估者对模型的主观可控性。自然资源开发项目的特点之一是生产期较长,普遍持续二十年左右。在长时间段上采用几何布朗运动的随机过程模拟变量,可能会使估计值与实际值产生较大偏差。并且投资方往往具有此类项目丰富的开发经验,对未来收益和成本的变动趋势具有主观的判断。因此,将生产阶段划分为多个生产决策单元后,投资方需要针对每个生产决策单元估计收益和成本的基础值以及其它相关参数值,从而增加了评价结果的主观可控性。

2.3 模型定价

步骤 1 求解逐个生产运营期权价值 $V_i(P_i, C_i)$ 。

该期权具有双随机变量,因此在使用 Black-Scholes 定价方法求解之前需要进行变量转化。首先,根据伊藤引理^[21]将 $V_i(P_i, C_i)$ 展开

$$dV^i = \frac{1}{2} V_{PC}^i dP dC + V_P^i dP + V_C^i dC + V_t^i dt \quad (8)$$

其中 $V^i \equiv V_i(P_i, C_i)$, $V_P^i \equiv \frac{\partial V^i}{\partial P}$, $V_{PC}^i \equiv \frac{\partial^2 (V^i)}{\partial P \partial C}$, $dP dC = \rho_{P,C} P_i C_i dt$, $\rho_{P,C}$ 表示现金收益 P_i 和运营成本 C_i 的相关系数。为简化公式的表现形式,在下文 $V_i(P_i, C_i)$ 的求解过程中将省略现金收益 P_i 、运营成本 C_i 和其它参数表达式中表示运营决策单元的下标 i 。

将式(3)和式(4)所示的现金收益和运营成本波动方程代入上式,整理可知

$$dV^i = \left(\frac{1}{2} \sigma_P^2 P^2 V_{PP}^i + \rho_{P,C} \sigma_P \sigma_C P C V_{PC}^i + \frac{1}{2} \sigma_C^2 C^2 V_{CC}^i + \alpha_P P V_P^i + \alpha_C C V_C^i - V_t^i \right) dt + \sigma_P P V_P^i dz_P + \sigma_C C V_C^i dz_C \quad (9)$$

将上式代入连续时间上的贝尔曼方程,可知期权价值 V^i 满足下列偏微分方程

$$\left(\frac{1}{2} \sigma_P^2 P^2 V_{PP}^i + \rho_{P,C} \sigma_P \sigma_C P C V_{PC}^i + \frac{1}{2} \sigma_C^2 C^2 V_{CC}^i \right) + [(r - \delta_P) P V_P^i + (r - \delta_C) C V_C^i] - V_t^i - r V^i = 0 \quad (10)$$

其中 r 表示无风险收益率 δ_p, δ_c 分别表示与现金收益和运营成本对应的固定股息报酬率, 在此期权模型中的经济意义为推迟项目实施而保持投资期权有活力的机会成本.

这是一个双变量的偏微分方程, 为求解方程的解析解, 需将其转化到一维空间中. 由自然齐次式的性质可知, 当 P 和 C 的当前值都加倍, 它仅仅使现金收益及运营成本加倍, 而不影响投资决策的临界值, 即最优决策取决于收益和成本的相对值 $\chi, \chi = \frac{P}{C}$. 相应地, 期权价值在 (P, C) 内为次数为 1 的齐次式, 由此可知

$$V_i(P, C) = DV_i(\chi, 1) \quad (11)$$

从而, 可将式 (10) 所示偏微分方程转化为一随机变量 (χ) 问题^[22].

$$\frac{1}{2}s^2\chi^2V_{\chi\chi}^i + (\delta_c - \delta_p)PV_{\chi}^i - V_{\tau}\delta_cV^i = 0 \quad (12)$$

其中 $s^2 = \sigma_p^2 + \sigma_c^2 - 2\rho_{p,c}\sigma_p\sigma_c$, 利用 B-S 定价方法^[23] 可知该双变量期权价值的确定解

$$V_i(P_i, C_i) = P_i e^{-\delta_p \tau} N(d_1) - C_i e^{-\delta_c \tau} N(d_2) \quad (13)$$

$$\text{其中 } d_1 = \frac{\ln(P_i/C_i) + [(\delta_{c_i} - \delta_{p_i}) + \frac{1}{2}s_i^2]\tau}{s_i\sqrt{\tau}}$$

$$d_2 = d_1 - s\sqrt{\tau},$$

$$s_i = \sigma_{p_i}^2 + \sigma_{c_i}^2 - 2\rho_{p_i,c_i}\sigma_{p_i}\sigma_{c_i}$$

将该期权价值代入式 (7), 即可得开发投资的项目价值 V .

步骤 2 求解投资机会价值 $F(V, I)$.

美式期权定价首先需确定使收益最大化的最优实施时间. 最优停时理论和选择抽样理论将用于解决该问题^[24]. 最优实施时间 T 可表示为

$$T = \inf \{ t \geq 0 \mid \max [V(t) - I(t)] > 0 \} \quad (14)$$

其中 \inf 表示下确界.

根据无套利的资产定价理论, 开发投资的美式期权价值 $F(V, I)$ 可表示为

$$F(V, I) = E\{ e^{-rT} \max [V(T) - I(T)] \}, \quad \forall 0 \leq T \leq \infty \quad (15)$$

同样采用步骤一中双随机变量期权降阶的方法, 可知期权价值在 (V, I) 内满足 $F(V, I) = CV_i(\eta, 1)$, 其中 η 表示项目价值和开发投资的相对值 $\eta = V/I$. 这意味着是否实施该期权不是取决于项目价值 V 或开发投资 I 的绝对值, 而是取决

于两者的相对值. 因此, 该期权的最优实施时间还可表示为

$$T_{\eta} = \inf \{ t \geq 0 \mid V(t) \geq \eta I(t) \} \quad (16)$$

其中 $\eta > 1$; T_{η} 表示由项目价值和开发投资相对值决定的期权最优实施时间.

同样, 在 T_{η} 被实施的期权价值转化为

$$F(V, I; \eta) = (\eta - 1) E\{ e^{-rT_{\eta}} I(T_{\eta}) \} \quad (17)$$

为求解上式中的期望值, 需借助鞅过程的性质. 可证 $\{ X(t) = e^{-rt} I(t) [V(t)/I(t)]^{\theta}; t \geq 0 \}$ 是一个鞅过程, 证明过程可参考文献 [19] 和文献 [25]. 由鞅过程的性质和停时定理可知

$$E(X(t)) = E(X(0)) \quad (18)$$

$$E(X(t)) = E\{ e^{-rT_{\eta}} I(T_{\eta}^*) \left[\frac{V(T_{\eta})}{I(T_{\eta})} \right]^{\theta} \text{Ind}(T_{\eta} \leq t) \} + E\{ e^{-rT_{\eta}} I(T_{\eta}) \left[\frac{V(T_{\eta})}{I(T_{\eta})} \right]^{\theta} \text{Ind}(T_{\eta} >$$

$$t) \} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \delta^{\theta} E\{ e^{-rT_{\eta}} I(T_{\eta}) \} \quad (19)$$

将以上结论代入式 (17) 可知投资期权价值

$$F(V, I; \eta) = \left(\frac{\eta - 1}{\eta^{\theta}} \right) \left[\frac{V(t)}{I(t)} \right]^{\theta} I(t) \quad (20)$$

其中为了使期权价值最大化 η 取值为 $\eta^* = \frac{\theta}{\theta - 1}$, 代入上式可得期权价值的确定解

$$F_i(V, I) = \frac{\left[\frac{V(t)}{I(t)} \right]^{\theta}}{\left[\frac{I(t)}{I(t)} \right]^{\theta-1}} \text{if } \frac{V(t)}{I(t)} < \frac{I(t)}{\theta - 1} = \quad (21)$$

$$V(t) - I(t) \text{ if } \frac{V(t)}{I(t)} \geq \frac{I(t)}{\theta - 1}$$

其中

$$\theta = \frac{1}{2} + \frac{\delta_v}{\sigma^2} - \frac{\delta_l}{\sigma^2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\delta_v + \delta_l}{\sigma^2} + \left(\frac{\delta_v - \delta_l}{\sigma^2} \right)^2}$$

$$\sigma^2 = \sigma_v^2 - 2\rho_{v,l}\sigma_v\sigma_l + \sigma_l^2$$

由式 (13) 和式 (21) 可知定价模型的确定解, 直观分析可知: 1) 项目投资价值与每个不确定因素的波动率和股息率相关, 而与偏移参数无关, 这一结论与传统实物期权模型一致. 这就表明在采用本模型进行投资评价时, 无需估计预期收益、成本和投资的偏移趋势, 同样无需考虑投资者的风险属性. 这一特点增加了评价模型的可用性和稳定性. 2) 传统实物期权模型认为投资项目的机会价值与价值波动率成正比, 即较高的项目

价值不确定性将有助于获取较高的利润。然而在本模型中，投资项目的机会价值 $F_i(V, I)$ 与各个不确定因素的波动之间并非简单的线性关系，它们之间的相关性将在下文的参数分析中作详细阐述。

3 算 例

3.1 算例说明

本文以石油企业某油藏开发项目为例，进一步说明上述模型。该开发项目合同期为 20 年，其

中产能建设期 5 年、生产期 15 年；预计所需产能建设投资 (I) 为 15 000 万美元；生产期的前 5 年将保持稳产，预计产油率为 50 万桶 / 年，后 10 年以 20% 的年递减率减少；以年度作为生产运营决策单元；逐年原油价格波动基础值取自 EIA 公布的 2011 年至 2025 年原油预测价格；运营成本约占原油价格的 1/3。由以上信息可知项目逐年现金收益 (P_i) 和运营成本 (C_i)，如表 1 所示。若采用传统贴现现金流的方法对投资价值进行评价，在行业基准收益率为 12% 的情况下可求得项目预计 NPV 为 -1 466 万美元。

表 1 生产阶段预计年度现金收支表

Table 1 The forecast table of annual cash flow in production stage

i	1	2	3	4	5	6	7	8
现金收益	3 332	3 647	3 954	4 192	4 344	3 604	2 967	2 447
运营成本	1 111	1 216	1 318	1 397	1 448	1 201	989	816
i	9	10	11	12	13	14	15	
现金收益	1 984	1 608	1 302	1 054	855	692	561	
运营成本	661	536	434	351	285	231	187	

下面使用上述实物期权模型对该投资进行评价。为简化算例，假设在生产阶段中波动率和股息率参数值保持不变。模型所需参数取值如下：现金收益波动率主要受原油价格影响，因此取 EIA 公布的 MIT 原油价格数据（1990 年至 2009 年）为样本进行估计，求得 $\sigma_p = 24%$ ；运营成本和开发投资的波动率估值所需市场样本较难获取，因此以某石油企业每年平均桶油运营成本和桶油开发投资数据（1990 年至 2009 年）为基础进行估值，求得 $\sigma_c = 10%$ 、 $\sigma_I = 10%$ ；多不确定因素同时受市场环境的影响，具有较高的相关性，因此本文认为现金收益与运营成本之间、项目价值和

开发投资之间具有较高的相关系数 $\rho_{P,C} = \rho_{V,I} = 0.5$ ；股息率的估值采用机会成本的思想，现金收益和项目价值的股息率等于将该资金投入其它项目可能获得的平均收益率 $\delta_p = \delta_v = 5%$ ；开发投资和运营成本的股息率则取银行贷款利率 $\delta_c = \delta_I = 4%$ 。

3.2 评价结果

本文使用 MATLAB 建立模型，对上述算例进行了计算。首先计算生产运营期权价值 $V_i(P_i, C_i)$ ，将以上参数取值代入式 (13)，求得项目逐年生产运营期权价值 $V_i(P_i, C_i)$ 如表 2 所示。再由式 (7) 解得项目价值 V 为 14 243 美元，项目价值波动率 $\sigma_V = s = 20.88%$ 。

表 2 逐年生产运营期权价值

Table 2 The yearly value of production option

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_i(P_i, C_i)$	1 298	1 421	1 541	1 634	1 693	1 405	1 156	954
i	9	10	11	12	13	14	15	
$V_i(P_i, C_i)$	773	627	507	411	333	270	219	

其次，计算项目投资价值。根据式 (21) 解得 $\sigma = 18.09%$ ， $\theta = 2.56$ ，此时 $\frac{V(t)}{\theta} = 5 554$ ， $\frac{I(t)}{\theta - 1} =$

9 587，可知满足条件 $\frac{V(t)}{\theta} < \frac{I(t)}{\theta - 1}$ ，因此投资不会被立即实施，此时该项目的投资价值 $F(V, I)$ 为

$$F(V, I) = \frac{[\frac{V(t)}{\theta}]^\theta}{[\frac{I(t)}{\theta-1}]^{\theta-1}} = \frac{[\frac{14\ 243}{2.56}]^{2.56}}{[\frac{15\ 000}{2.56-1}]^{2.56-1}} = 2\ 364$$

该结果表明,投资该原油开发项目的机会价值为2 364 万美元,且受目前低油价、高成本的市场环境影响,立即投资进行生产将是不明智的.最优决策应为持有该项目的开发权,等待相对收益足够大时($\frac{V(t)}{\theta} \geq \frac{I(t)}{\theta-1}$)再实施项目.

3.3 参数分析

1) 运营成本与运营期权价值

如图4所示,运营期权价值 $V_i(P_i, C_i)$ 随现金收益 P_i 的增大而增大,随运营成本 C_i 的增大而减小.因此,较高的现金收益和较低的运营成本对生产运营和开发投资均具有积极的促进作用.

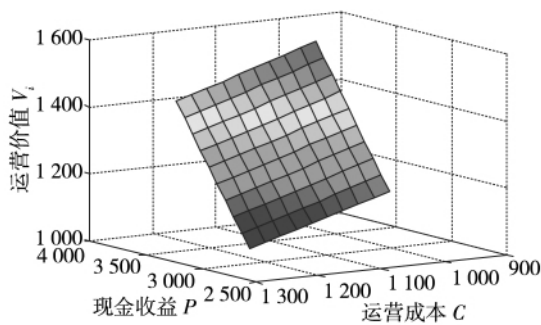


图4 不同运营成本、现金收益下的运营价值

Fig.4 The value under different operation cost and income

进一步分析波动率对运营期权价值的影响.由式(13)中转换期权波动率 s 的表达式可知,当现金收益和运营成本相关系数 $\rho_{P,C}$ 为负数时,较高的现金收益波动率和运营成本波动率都会对生产运营价值的提高起到积极作用.但当 $\rho_{P,C}$ 为正数时,波动率对运营价值的影响就不是简单的线性关系了.如图5所示,当 $\rho_{P,C} = 0.5, \sigma_C = 0.1$ 时,现金收益波动率在满足 $\sigma_P > \rho_{P,C}\sigma_C$ 的情况下,生产运营价值 $V_i(P_i, C_i)$ 随现金收益波动率的增大而增大;反之,当 $\sigma_P \leq \rho_{P,C}\sigma_C$ 时, $V_i(P_i, C_i)$ 随现金收益波动率的增大而减小.运营成本波动率的影响作用与现金收益波动率类似,如图6所示.

此外由图5和图6还可知:运营价值随现金收益股息率 δ_p 的增大而减小,随运营成本股息率 δ_c 的增大而增大.该结论可以较直观地理解,现金收益的股息率表示将资金投到其它项目中可以获

得的期望收益,增大现金收益股息率也就是增大了资金的机会成本,从而降低了项目生产运营的相对价值.另外,由以上分析已知运营成本与现金收益对运营价值的作用相反,从而运营成本股息率的增大将会提高生产运营价值就不难理解了.

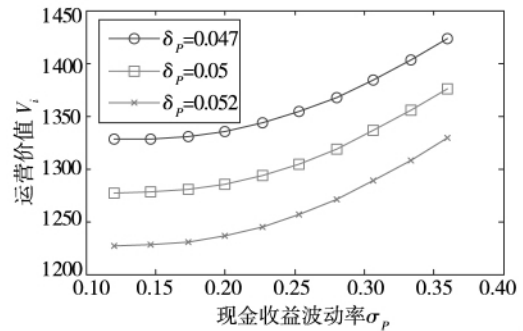


图5 现金收益参数分析

Fig.5 The parameters analysis of cash income

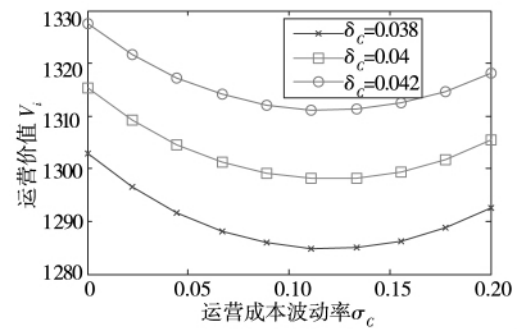


图6 运营成本参数分析

Fig.6 The parameters analysis of cash cost

2) 开发投资与投资价值

为比较开发投资 I 、现金收益 P 和运营成本 C 对项目投资价值 F 的影响,分别保持运营成本和现金收益不变,分析了其余两变量的取值对投资价值的影响.如图7和图8所示,自然资源开发项目的投资价值与现金收益成正比、与运营成反比、与开发投资成反比.

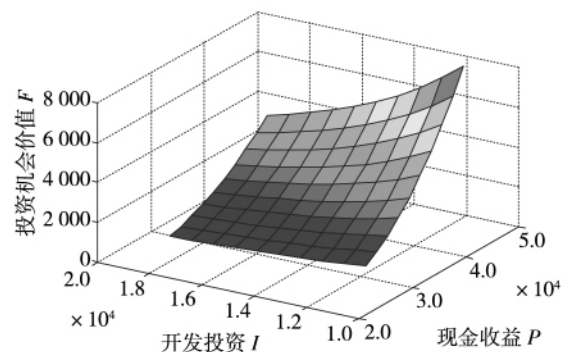


图7 不同开发投资与现金收益下的投资价值

Fig.7 The value under different investment and income

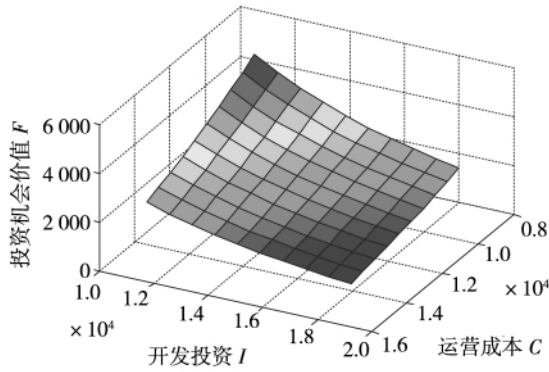


图 8 不同开发投资与运营成本下的投资价值
Fig. 8 The value under different investment and cost

进一步分析开发投资的波动率和股息率对投资价值的影响。由式(21)中转换期权波动率 σ 的计算公式可知,当项目价值和开发投资相关系数 $\rho_{V,I}$ 为负数时,较高的开发投资波动率和项目价值波动率都会对投资价值的增大起到促进作用;但当 $\rho_{V,I}$ 为正数时,如图9所示,只有在满足 $\sigma_I > \rho_{V,I}\sigma_V$ 时,增大开发投资波动率才会使投资价值增加,反之,当 $\sigma_I \leq \rho_{V,I}\sigma_V$ 时,增大开发投资波动率会降低投资价值。此外,较高的开发投资股息率对投资价值的提高具有促进作用。

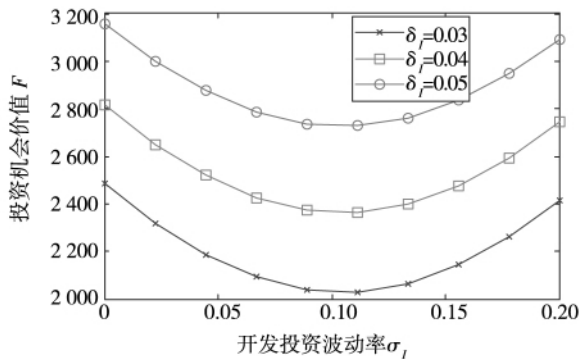


图 9 开发投资参数分析
Fig. 9 The parameters analysis of investment

综合以上结论可知,若要使自然资源开发项目具有较高的投资价值应选择:较高的现金收益、较低的运营成本、较低的开发投资、为负且较小的现金收益与运营成本相关系数、为负且较小的项目价值与开发投资相关系数、较高的现金收益波动率、较高的运营成本波动率、较高的开发投资波动率、较低的现金收益股息率、较高的运营成本股息率和较高的开发投资股息率。

3) 波动率与投资时机

由以上分析已知,波动率是影响投资价值的

最主要参数之一。因此,在完成对期权价值的分析后,本文进一步分析波动率对投资时机的影响方式。由模型的求解过程可知,项目的投资时机取决于项目价值和开发投资的相对值 η ($\eta = \frac{\theta}{\theta - 1}$)。通过计算不同波动率条件下的投资时机临界值 η^* ,得到如下结论:当价值波动率较高时,实施投资的临界值也较大,如图10所示。

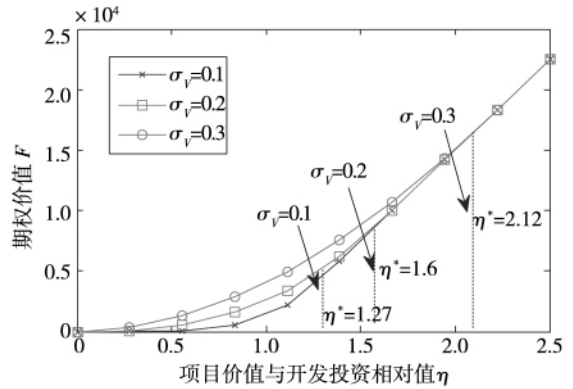


图 10 不同波动率下临界值分析
Fig. 10 The threshold analysis under different volatility

这一结论的经济意义如下:随着价值波动率的增加,未来收益的不确定性也随之增大,即项目方拥有更大的可能性在未来获得更高的收益,项目方为获取这部分收益,自然会更久的推迟投资,期待在未来以更少的投资换取更高的利润。相反,当价值波动率较低时,项目在未来获得增值的可能性也较少,也就没有继续等待的必要了。

4 结束语

本文针对自然资源开发项目特有的投资模式和价值影响因素,以现有实物期权评价模型为基础,建立了基于多随机变量且分阶段的自然资源开发项目投资评价模型。模型同时考虑项目方在投资阶段推迟投资和在生产阶段暂停运营的管理柔性,着重分析了运营成本和开发投资的不确定性对投资价值的影响。本文给出了模型的解析解,并结合某原油开发项目的实例,对运营成本、开发投资及其各自的波动率、股息率等参数进行了分析。

本文的工作具有以下意义:1) 将项目支出划分为固定成本(即开发投资)和可变成本(即运营成本)两部分,分别考虑两者的不确定性对推迟

投资和暂停运营的影响,从而使评价模型更贴近实际;2) 将开发项目的实施过程划分为产能建设阶段和生产阶段,并将生产阶段划分为多个生产运营决策单元,分别对项目价值和投资机

会价值进行评价,从而使评价模型具有较高的可控性;3) 模型的定价方法具有一定的普遍性,对于多不确定条件下的风险投资研究具有一定的价值.

参 考 文 献:

- [1] Dixit A K, Pindyck R S. Investment Under Uncertainty [M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [2] Myers S C, Turnbull S M. Capital budgeting and the capital asset pricing model: Good news and bad news [J]. The Journal of Finance, 1977, 32 (2): 321 - 333.
- [3] Ross S A. A simple approach to the valuation of risky income streams [J]. Journal of Business, 1978, 51: 453 - 475.
- [4] 赵秀云, 李敏强, 寇纪淞. 风险项目投资决策与实物期权估价方法 [J]. 系统工程学报, 2000, 15 (3): 243 - 246.
Zhao Xiuyun, Li Minqiang, Kou Jisong. Investment decision on risky project and real option pricing method [J]. Journal of Systems Engineering, 2000, 15 (3): 243 - 246. (in Chinese)
- [5] Brennan M J, Schwartz E S. Evaluation natural resource investments [J]. Journal of Business, 1985, 58 (2): 135 - 149.
- [6] McDonald R, Siegel D. Option pricing when the underlying asset earns a below-equilibrium rate of return: A note [J]. Journal of Finance, 1984, 34 (1): 261 - 265.
- [7] McDonald R, Siegel D. Investment and the valuation of firms when there is an option of shut down [J]. International Economic Review, 1985, 28 (2): 331 - 349.
- [8] McDonald R, Siegel D. The value of waiting to invest [J]. Quarterly Journal of Economics, 1986, 11: 707 - 727.
- [9] Trigeorgis, Lenos, Mason S P. Valuing managerial flexibility [J]. Midland Corporate Finance Journal, 1987, (5): 14 - 21.
- [10] Paddock J L, Siegel D R, Smith J L. Option valuation of claims on real assets: The case of offshore petroleum leases [J]. Quarterly Journal of Economics, 1988, 103: 479 - 508.
- [11] Smith J E, McCardle K F. Valuing oil properties: Integrating option pricing and decision analysis approaches [J]. Operations Research, 1996, 46: 198 - 217.
- [12] Smith J E, McCardle K F. Options in the real world: Lessons learned in evaluating oil and gas investments [J]. Operations Research, 1999, 47: 1 - 15.
- [13] Armstrong M, Galli A, Bailey W, et al. Incorporation technical uncertainty in real option valuation of oil projects [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2004, 44: 67 - 82.
- [14] Lima G A, Suslick S B. Estimation of volatility of selected oil production project [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2006, 54: 129 - 139.
- [15] Takashi S. The impacts of uncertainties in a real options model under incomplete information [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187: 1368 - 1379.
- [16] 蔡永明, 关忠良, 马 红. 企业信息化投资的双随机变量实物期权应用 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46 (S1): 909 - 913.
Cai Yongming, Guan Zhongliang, Ma Hong. Application of real option approach with double stochastic parameters in analyzing information system investment [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46 (S1): 909 - 913. (in Chinese)
- [17] 邢小强, 仝允桓. 不确定性、学习与新技术序列投资决策 [J]. 管理科学学报, 2010, 13 (3): 29 - 37.
Xing Xiaoqiang, Tong Yunhuan. Uncertainty, learning and new technology sequential investment decision [J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13 (3): 29 - 37. (in Chinese)
- [18] 马家喜, 仲伟俊, 梅姝娥. 不确定环境下基于 Bertrand 竞争的企业创新模式比较研究 [J]. 管理工程学报, 2010, 24 (1): 152 - 158.
Ma Jiayi, Zhong Weijun, Mei Shue. Comparison research among the technological innovation modes based on bertrand competition under the uncertainty environment [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2010,

- 24 (1): 152 – 158. (in Chinese)
- [19] Won C. Valuation of investments in natural resources using contingent-claim framework with application to bituminous coal developments in Korea [J]. *Energy*, 2009, 34: 1215 – 1224.
- [20] Szklo A S, Carneiro J T G, Machado G. Break-even price for upstream activities in Brazil: Evaluation of the opportunity cost of oil production delay in a non-mature sedimentary production region [J]. *Energy*, 2008, 33: 589 – 600.
- [21] Dixit A. Irreversible investment with price ceilings [J]. *Journal of Political Economy*, 1991, 99 (3): 541 – 557.
- [22] Margrabe W. The value of an option to exchange one asset for another [J]. *Journal of Finance*, 1978, 33: 177 – 186.
- [23] Black F, Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities [J]. *Journal of Political Economy*, 1973, 81 (3): 637 – 654.
- [24] Beibel M, Creche H R. A new look at optimal stopping problems related to mathematical finance [J]. *Statisitc Sinica*, 1997, 7: 93 – 108.
- [25] Hans U G, Elias S W. Martingale approach to pricing perpetual American options on two stocks [J]. *Mathematical Finance*, 1996, 6: 303 – 322.

An investment evaluation model for natural resource development project under multiple uncertainties

HE Mu-wen, LIU Jin-lan, GAO Qi-te

College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: This paper focuses on the investment valuation of natural resource development projects under uncertainties of cash inflows, development costs and operating costs. On the basis of existing real option investment valuation models, with the management flexibilities of both postponing the investment decision and stopping the production in the production process considered, a real option valuation model on natural resource development projects with multiply uncertainties is established. An analytic solution of the model are also provided through applying the price principles such as exchange option and martingale process, and the main parameters are statically analyzed based on a real example of crude-oil development project in China.

Key words: investment valuation; real options; uncertainty; natural resource development