

文章编号:1673-5005(2009)06-0161-06

未开发油田价值评估和投资时机选择模型的构建及应用

赵 林, 冯连勇

(中国石油大学 工商管理学院, 北京 102249)

摘要:分析未开发油田投资决策的实物期权特征,建立未开发油田价值评估和投资时机选择模型,运用蒙特卡罗方法模拟原油价格波动的随机过程,并求解美式延迟期权及原油价格波动率和无风险利率等模型参数,最后通过案例计算标的油田的价值和最优开发时间。结果表明,所建模型能够突破传统贴现现金流法的局限,可以为决策者提供客观的依据,帮助决策者更充分地了解投资项目所面临的风险和潜在收益,使最终决策更加客观、科学。

关键词:石油经济;实物期权;蒙特卡罗模拟;投资决策;未开发油田

中图分类号:TE 322

文献标识码:A

Establishment and application of evaluation and investment timing model for undeveloped oilfield

ZHAO Lin, FENG Lian-yong

(School of Business Administration in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The real option traits within the development of an undeveloped oilfield project were analyzed, and a novel evaluation and investment timing model was established. Monte Carlo method was used to simulate the stochastic process of price fluctuation for crude oil and to evaluate the delay option. The calculation of the parameters in the model was discussed. The model was applied to calculate the value of an underlying undeveloped oilfield and the optimal time to develop in a practical case. The results show that the new model can break the limitation of traditional discounted cash flow method, and provide objective proofs to decision-makers and help them to realize the internal risk and potential benefits of the investment project more clearly, which makes the decision process more objective and scientific.

Key words: petroleum economics; real option; Monte Carlo simulation; investment decision-making; undeveloped oilfield

未开发油田投资决策过程中主要存在两个关键问题:未开发油田价值的评估和油田开发决策最优时间的选择。研究这些问题通常采用贴现现金流(DCF)法^[1],该方法简单实用,但很难估计合适的折现率。一种改进方法是确定性等值现金流法^[2],该方法对风险的调节和测度在现金流中完成,因此使用无风险利率进行贴现,但多数情况下确定性等值现金流的估计非常困难。这两种方法属于传统的项目评价方法,均只认识到了预期现金流和投入资本的现值,实际上此方法暗含一个假设——决策者必须立即决定是否进行投资^[3]。对于一些具有潜在投资价值的项目而言,决策者推迟投资可能会获得更大收益。因

此,当使用传统方法评价未开发油田的价值和投资时机选择问题时,往往忽视投资时机选择产生的价值,从而低估未开发油田的价值。笔者在实物期权方法框架内建立可拓展的未开发油田价值评估和投资时机选择模型,运用蒙特卡罗模拟方法定量分析未开发油田的价值评估与投资时机选择问题。

1 未开发油田投资决策实物期权特征

一个拥有未开发油田投资机会的决策者拥有这样一项权利:在现在或未来支付一定的投资费用而得到投资项目。这样决策者可以根据各种条件的变化

收稿日期:2008-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(70841024)

作者简介:赵林(1982-),男(汉族),江苏江都人,博士研究生,主要从事石油工程管理等研究。

情况,等到最适当的时机才做出取舍该权利的重大决策。因此,石油开发投资决策最主要的特点是开发投资的可延迟性,其最主要的期权形式是延迟期权^[4]。

2 价值评估和投资时机选择模型

2.1 模型的起点与假设

模型构建的起点是油气资源有了商业发现之后,石油公司对拟开发的油田有比较清晰的认识,对其储量有比较准确的把握。此时未开发油田投资决策最主要的风险来自于原油市场^[5],投资决策者根据油价的变化调整来决定油田开发时间,因此本文中采用如下假设:无技术风险,即当油气资源有了商业发现后,决策者已经掌握了相对准确的储量等方面的信息,产能建成后,油田能够按照设计方案进行生产。

2.2 原油价格波动的随机过程

油价是石油项目评估中的关键因素。模拟油价随机过程的选取在很大程度上会影响评价结果,因此要选择合适的随机过程来进行油价的模拟。目前模拟油价的随机过程主要有几何布朗运动、均值回复等^[6-7]。如果油价的样本时间跨度很大,如130 a,则用均值回复比几何布朗运动好,若是30 a则两者分析结果差别不大,且在波动率低、分析时间不很长的情况下,均值回复与几何布朗运动的结果差别不是很大。

在实物期权的框架内研究未开发油田的投资决策问题,选择油价的跨越时间为30 a左右,因此选择原油现货价格 S 服从几何布朗运动的随机过程。

若标的资产的价格服从几何布朗运动规律,则有

$$dS = \mu S dt + \sigma S dz. \quad (1)$$

其中

$$dz = \varepsilon \sqrt{dt}, \varepsilon \sim N(0, 1).$$

式中, S 为标的资产价格,美元/桶; μ 为标的资产价格预期增长率,%; σ 为标的资产价格的波动率,%; dz 为标准维纳过程的一个增量。

2.3 执行期权后油田开发价值评估模型

根据伊藤引理,若变量 x 遵循伊藤过程,则变量 x 和 t 的函数 G 将遵循如下过程:

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial x} a + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} b^2 \right) dt + \frac{\partial G}{\partial x} b dz. \quad (2)$$

其中, dz 为一个标准布朗运动。由于 a 和 b 都是 x 和 t 的函数,因此函数 G 也遵循伊藤过程,它的漂移率为 $\frac{\partial G}{\partial x} a + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} b^2$,方差率为 $\left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 b^2$ 。

将式(1)代入式(2),整理后可得

$$d \ln S = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) dt + \sigma dZ. \quad (3)$$

即 $\ln S$ 在一段时间内(如时点 t 至 T)的变动服从正态分布:

$$\ln S_T - \ln S_t \sim \phi \left[\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T - t), \sigma \sqrt{T - t} \right]. \quad (4)$$

其中 $\phi(m, s)$ 是期望值为 m ,标准差为 s 的正态分布,在风险中立的假设下,以无风险利率 r 代替 μ ,则式(4)为

$$\ln S_T \sim \phi \left[\ln S_t + \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T - t), \sigma \sqrt{T - t} \right]. \quad (5)$$

可以看出,未来任意时间 T 时现货价格 S_t 服从对数正态分布。

由式(5)可得,时点 T 时原油现货价格为

$$S_T = S_t \exp \left[\left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T - t) + \sigma \sqrt{T - t} \varepsilon \right]. \quad (6)$$

当 $t = 0$ 时,式(6)为

$$S_T = S_0 \exp \left[\left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) T + \sigma \sqrt{T} \varepsilon \right]. \quad (7)$$

其中 $\varepsilon \sim N(0, 1)$ 。

在风险中性假设下,未来现金流可以用其期望值按无风险利率贴现^[8]。由于模型假设不存在技术风险,所以一旦进行投资,石油产量以及将产量运输到市场的成本都是已知的。实际上这些变量也符合一定的随机过程。本文中只是使用了这些变量值的期望值,并假设和这些变量相关的风险能被分散掉。

假定现金流在每年年末产生,执行期权后油田开发的价值等于未来油田开发后现金流的现值,即

$$V_D = \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r)^i} \left[(Q_i S_{i,e} - C_i) (1 - \tau) + \tau D_i \right]. \quad (8)$$

式中, V_D 为执行期权后油田开发的价值, 10^4 元; S 为石油的现货价格,美元/桶; Q_i 为第 i 年生产的石油产量, 10^4 t; e 为美元对人民币的汇率,元/美元; c 为桶吨系数,桶/t; C_i 为第 i 年总生产成本, 10^4 元; D_i 为第 i 年允许的折旧, 10^4 元; τ 为适用的公司税率,%; N 为投产后的油田的寿命,a。该式中,假设一旦油田被开发,所有的产量都将按计划开采出来,折旧的税盾效应也始终存在。

2.4 蒙特卡罗模拟

未开发油田的投资决策实际上是一个延迟期权。在决策过程中,因为在开发权有效期限内的任何时间都可以做出决策,所以该期权属于美式延迟期权。本文中使用蒙特卡罗模拟方法^[9-10]来求解,总体思路是通过衍生性商品标的资产价格变动的随机

过程进行模拟,进而求出此衍生性商品的价值。未开发油田投资决策延后期权的收益不仅受到期日(时间 T)时原油现货价格的影响,也受从发行日(时间 0)至到期日原油现货价格的路径的影响。具体求解过程如下:

(1) 假设开发油田的决策可以在 $t = 1 \sim T$ 内的任何离散时间做出,其中 T 是投产项目的寿命期。如果决策是每年做一次,那么原来的美式期权的执行决策问题就被划分成了 T 个阶段的执行决策问题。然后,在每一个时间 t 做一些初步模拟,将损益空间分割成 K 个区块,编号为 $k = 1, \dots, K$ 。对于每一个 S 的模拟值,用式(8)计算执行期权后未开发油田延后期权的损益值(执行价值),然后将这些损益值降序排列,保证每个区块中都包含相同次数的模拟。如果做了 M 次初步模拟,每个时间点 t 的每个区块内都包含 M/K 次模拟。

(2) 在分隔点决定之后,计算在第 t 期落入每个区块的路径在第 $t + 1$ 期时转移至每个区块的转换概率,此转换概率将用来回推期权的价值。需要说明的是,有许多的转换概率值可能为 0 。

对每个时间点 t 的损益区块 k ,用 $a_t(k)$ 记录落入区块 k 的路径的数目。对于 t 和 $t + 1$ 连续时间段内的每一对区块 k 和 j ,用 $b_t(k, j)$ 记录落入两个区块内路径的数目。对每一个时间点 t 的损益区块 k ,用 $c_t(k) = \sum V_D$ 记录在时间 t 时落入区块 k 内所有路径的损益之和。在模拟过程中,当所有的路径都生成后, $a_t(k)$, $b_t(k, j)$ 和 $c_t(k)$ 的值就确定下来,则从时间 t 时区块 k 到时间 $t + 1$ 时区块 j 的转换概率为

$$p_t(k, j) = b_t(k, j) / a_t(k). \quad (9)$$

式中, $b_t(k, j)$ 为同时落入时间 t 时区块 k 和时间 $t + 1$ 时区块 j 内路径的数目; $a_t(k)$ 为时间 t 时落入区块 k 的路径的数目。

(3) 从 $t = T$ 往前回推求解美式期权价值。令 $V(t, k)$ 表示时间 t 时损益区块 k 内估计的未开发油田价值(即时间 t 时美式期权的价值)。对每个区块来说,都需要比较提前执行价值和持有价值进而确定该区块的期权价值,美式期权价值等于两者中的较大者。每个区块的提前执行价值为此区块内所有路径执行价值的平均值,在第 T 期时,可以计算出 K 个区块的执行价值。由于是最后一期,期权价值为 0 ,所以只要执行价值大于 0 ,此执行价值即为该区块的期权价值,即时间 T 时区块 k 的美式期权的价值等于完成于时间 T 时区块 k 内路径的平均损益减去开发投资 I 的差与 0 之间的最大值。

接着往前回推至第 $t = T - 1$ 期,针对第 $t = T - 1$ 期每个区块比较提前执行价值和持有价值以确定该区块的期权价值,提前执行价值的算法同第 T 期,持有所值的算法则是计算下一期(第 T 期)期权价值期望值的折现值,也就是将转换概率乘上对应的下一期每一区块的期权价值再予以折现。期权价值是平均损益减去开发投资的差与估计持有所值中的最大值,即

$$V(t, k) = \max \left[\frac{c_t(k)}{a_t(k)} - I, \frac{1}{(1+r)^{\Delta t}} \sum_{j=1}^K p_t(k, j) V(t+1, j) \right]. \quad (10)$$

式中, $V(t, k)$ 为时间 t 时损益区块 k 内估计的未开发油田价值, 10^4 元; $c_t(k)$ 为时间 t 时落入区块 k 内所有路径的损益之和, 10^4 元; r 为无风险利率; $V(t+1, j)$ 为时间 $t+1$ 时损益区块 j 内估计的未开发油田价值, 10^4 元; Δt 是决策点之间的时间, a 。

若提前执行价值大于持有所值,表示该区块应提前执行,故提前执行价值即为此区块的期权价值;反之则该区块不应提前执行,持有所值即为此区块的期权价值。继续重复此步骤,递归回推至第 0 期为止,即可算出此美式期权的价值。

最后,初始状态变量取初始值 S_0 (时间 $t = 0$ 时)时未开发油田的价值就是立即开发油田和持有所值之间的最大值,即

$$V_U(0) = \max \left[V_D(0) - I, \frac{1}{(1+r)^{\Delta t}} \sum_{j=1}^K p_0(k, j) V(1, j) \right]. \quad (11)$$

式中, $V_U(0)$ 为初始状态时未开发油田的价值, 10^4 元; $V_D(0)$ 为初始状态时执行期权后油田开发的价值, 10^4 元; $p_0(k, j)$ 为从时间 0 时区块 k 到时间 1 时区块 j 的转换概率, $\%$; $V(1, j)$ 为时间 1 时损益区块 j 内估计的未开发油田价值, 10^4 元。

2.5 模型的可拓展性

在未来的研究中,只要能够找到合适的微分方程,就可以用蒙特卡罗方法模拟其他变量的随机过程,如成本、石油储量等,从而将模型从一维拓展到多维。

3 模型参数的选择

3.1 原油现货价格随机过程的模拟

式(1)描述的是连续时间模型,为了使用蒙特卡罗方法来模拟原油价格的随机过程,本文中做如下处理:首先必须得到未来有限时间内原油现货价格的分布。由式(5)可知,原油现货价格服从对数正态分布。

由于本文模拟的是固定时间段的价值(如1 a),则式(5)中 $T = 1$ 。因此,进行蒙特卡罗模拟时只须利用Microsoft Excel中的随机数产生器产生 N 个服从 $N(0,1)$ 标准正态分布的随机数,再代入式(7),就可以得到未来 T 时的原油现货价格的随机分布。

3.2 原油价格波动率的估计

采用Davis(1998)提出的公式^[11]来估计原油价格波动率,计算式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}, \quad (12)$$

$$u_i = \ln(P_i/P_{i-1}). \quad (13)$$

式中, P_i 为第 i 个时间间隔末的原油价格,美元/桶; τ 为数据之间的时间间隔,a。

3.3 无风险利率的选择

在无风险利率选择问题上,本文中做简化处理,选择与项目寿命期相近时限的同期国债年利率为无风险利率。

4 模型的应用

4.1 案例描述

某未开发油田,如果开发将生产7 a,年产量从第1年的170万桶递减到第7年的7万桶。每年的操作成本也由第1年的300万美元下降到第7年的47万美元。表1为油田开发项目期内估计的产量和操作成本。开发权的所有者可以在 $T = 5$ a内的任何时间执行开发油田的期权,5 a后如果没有任何投资,该期权就过期作废,即期权的有效期为5 a。开发投资 I 为3000万美元。本文中桶吨系数取7.33,汇率取2008年3月18日中国人民银行公布的汇率值为1美元对人民币7.0870元^[12]。评价日为2008年3月18日, S_0 取当日WTI现货价,为109.57美元/桶^[13],相当于5691.91元/t。假设产量集中于每年的年末,而且一旦做出开发投资的决策,将持续生产7 a,假设公司的税率 $\tau = 35\%$ 。

表1 油田生产期的预测产量和操作成本

Table 1 Forecast production and operating cost of oilfield during production period

生产期 t/a	预测产量 $Q_t/10^4 t$	操作成本 $C_t/10^6$ 元
1	23.19	21.2610
2	13.64	14.1740
3	7.50	9.9218
4	4.64	7.7957
5	3.14	6.8744
6	2.18	6.1657
7	0.95	3.3309

注:案例中产量和操作成本的原始数据来自文献[14],经整理和计算得表1中数据。

4.2 模型参数计算

4.2.1 原油现货价格随机过程模拟

假设在开发权期限内的每年年末做出是否开发油田的决策。利用蒙特卡罗模拟方法做了1000次初步模拟,产生1000条损益路径,在每个决策点将损益空间划分为100个区块,即 $N = 1000, K = 100$,每个损益区块中均有10条路径。

4.2.2 原油价格波动率的估计

利用式(12)和式(13),采用2007年6月《BP能源统计》中1976—2006年间WTI油价的数据^[15]来估计原油价格波动率 σ ,计算结果为 $\sigma = 24.50\%$ 。

4.2.3 无风险利率的选择

案例中项目寿命期为7 a,则选择近期7 a期国债年利率值为无风险利率,根据中华人民共和国财政部公告2008年第3号文件,2008年2月13日开始发行的7年期国债票面年利率为3.95%^[16]。本案例中,为了对现金流进行贴现,不管是已开发油田还是未开发油田,选取的折现率是5.95%,比同期国债票面年利率高2%。这种风险溢价可以解释为每年油田被资源国政府没收而不给予投资者任何补偿的泊松概率,即政治风险^[17],则本案例中的无风险利率 $r = 5.95\%$ 。

4.3 计算结果

本文在Microsoft Excel中使用VBA进行编程实现算法,给定了所有参数,计算结果见图1。

$t = 0$ 决策点时,决定立即开发和延迟开发的分界点在区块38和区块39之间。 $t = 1$ 时区块38的平均油价为121.39美元/桶,区块39的平均油价为120.38美元/桶。如果对第1年末的原油现货价格的估计在121.39美元/桶以上,选择延迟开发;如果对第1年末的原油现货价格的估计在120.38美元/桶以下,选择立即开发。最优投资的最低损益区块是区块100,平均现货价格是61.08美元/桶,此时决策是立即开发,未开发油田价值为执行价值,约为5.81亿元。 $t = 1 \sim 5$ 决策点的计算结果同样可由图1分析得到。

详细数据如表2所示。可以看出,由于近几年来油价飙升,持续在高位震荡,油田开发几乎不存在亏损的情况。值得注意的是,在开发权的最后一年,即 $t = 5$ 决策点时,由于在这一时点上不存在任何期权价值,只要油田的执行价值大于0,油田将会被开发。在本案例中, $t = 5$ 时最优投资的最低损益区块是区块100,即使第6年末的平均油价为29.36美元/桶,油田的开发价值也有1.89亿元。

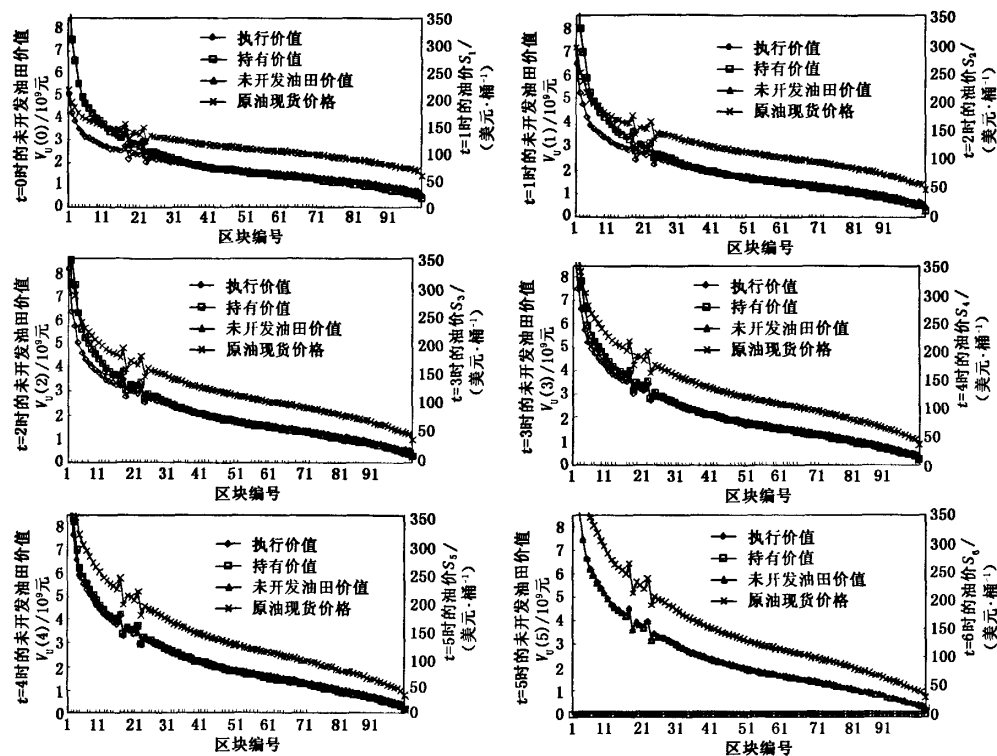


图1 各决策点的未开发油田价值和原油现货价格

Fig.1 Undeveloped oilfield valuation and spot price for crude oil of decision nodes

表2 各决策点时的参数

Table 2 Parameters of decision nodes

决策点 t	决策分界点		决策分界点区块 $t+1$ 时的 平均油价 / (美元·桶 ⁻¹)		最优投资的最低损益区块相关参数	
	上区块	下区块	上区块	下区块	区块 编号	$t+1$ 时的平均油价 / (美元·桶 ⁻¹) 油田价值 / 10 ⁸ 元
0	区块 38	区块 39	121.39	120.38	100	61.08 5.8136
1	区块 36	区块 37	131.68	130.24	100	48.86 4.4075
2	区块 34	区块 35	143.53	141.01	100	41.48 3.4945
3	区块 33	区块 34	154.22	152.04	100	36.32 2.7277
4	区块 32	区块 33	166.30	163.09	100	32.42 2.3104
5	立即执行		—	—	100	29.36 1.8937

5 结束语

本文中构建的未开发油田价值评估和投资时机选择模型可以为决策者提供客观依据,帮助决策者更充分地了解投资项目所面临的风险和潜在收益,使最终决策更加客观、科学。

该模型主要考虑了油价风险,适用于油气资源有了商业发现后,决策者已经基本掌握了相对准确的储量等方面的信息,油田投产就能按设计方案进行生产。该模型还存在一定的局限性:(1) 对描述油价随机过程的研究有待深入。本文中假设油价变化服从几何布朗运动,但实际油价的变动很难用一

个微分方程去描述,描述油价的模型还有均值回复加泊松跳跃过程、双因素模型、三因素模型等。如何选择更适合的随机过程来模拟国际油价,这是未来的研究方向之一。(2) 忽略了实物期权和金融期权之间的差异,如实物资产存在建设时间,而金融资产随着交易的完成,可立即建立起来。(3) 该模型包含了无技术风险假设,是对现实世界的一种近似和简化,实际的油田开发投资情况十分复杂。考虑地质、工程等方面的风险,将本文构建的一维模型拓展为多位模型,这也是未来的研究方向之一。

致谢 感谢中国工程院院士、中国石油天然气勘探开发公司高级顾问童晓光教授、中国石油大学(北

京)工商管理学院王震教授、吕鹏博士及苏斌同学。

参考文献:

- [1] LENOS T. Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocation [M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1996:2-9.
- [2] CHORN L G, SHOKHOR S. Real options for risk management in petroleum development investments[J]. Energy Economics, 2006, 28:489-505.
- [3] 徐枫. 风险投资决策评价中的实物期权理论方法研究[D]. 广州:暨南大学经济学院, 2003:59-61.
- [4] 罗东坤, 汪华. 石油开发项目实物期权评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4):493-496.
LUO Dong-kun, WANG Hua. Real option valuation model for petroleum development projects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4):493-496.
- [5] 张永峰, 杨树锋, 贾承造, 等. 石油勘探开发项目实物期权特性分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1):115-118.
ZHANG Yong-feng, YANG Shu-feng, JIA Cheng-zao, et al. Real option characters of petroleum exploration and development projects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1):115-118.
- [6] ANTONIO M, DIAS G. Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 44(1/2):93-114.
- [7] LAINE J P. Option valuation of field development project [R]. SPE 37965, 1997.
- [8] HULL J C. Options, futures, and other derivatives[M]. 5th ed. Beijing: Pearson Education Asia Limited and Tsinghua University Press, 2007:244-246.
- [9] BARRAQUAND J, MARTINEAU D. Numerical valuation of high dimensional multivariate American securities [J]. Journal of Financial and Quantitative Analysis, 1995, 30(3):383-405.
- [10] RAYMAR S, ZWECHER M. Monte Carlo estimation of American call options on the maximum of several stocks [J]. The Journal of Derivatives, 1997, 5(1):7-23.
- [11] DAVIS G A. Estimating volatility and dividend yield when valuing option to invest or abandon [J]. The Quarterly Review of Economics and Finance, 1998, 38(3):725-754.
- [12] 中华人民共和国人民银行. 中国外汇交易中心受权公布人民币汇率中间价公告[EB/OL]. (2008-03-18) [2008-03-25]. <http://www.pbc.gov.cn/detail.asp?col=483&ID=2027>.
- [13] Energy Information Agency. Spot price for crude oil and petroleum products[DB/OL]. [2008-03-25]. http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm.
- [14] CORTAZAR C, SCHWARTZ E S. Monte Carlo evaluation model of an undeveloped oil field [J]. Journal of Energy Finance & Development, 1998, 3(1):73-84.
- [15] BP. Statistical review of world energy 2007[DB/OL]. [2008-03-25]. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/lobalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2007/STAGING/local_assets/downloads/spreadsheets/statistical_review_full_report_workbook_2007.xls.
- [16] 中华人民共和国财政部. 中华人民共和国财政部公告 2008 年第 3 号[EB/OL]. (2008-02-01) [2008-03-25]. http://www.mof.gov.cn/news/20080201_1720_30732.htm.
- [17] BRENNAN M J, SCHARTZ E S. Evaluating natural resource investments [J]. Journal of Business, 1985, 58(2):135-157.

(编辑 修荣荣)

(上接第 160 页)

- [5] SCHWARTZ E S. The stochastic behavior of commodity prices: implications for valuation and hedging[J]. The Journal of Finance, 1997, LII(3):923-973.
- [6] LAUGHTON D G, JACOBY H D. Reversion, timing options, and long-term decision-making [J]. Financial Management, 1993, 22(1):225-240.
- [7] SCHWARTZ E S, SMITH J E. Short-term variations and long-term dynamics in commodity prices [J]. Management Science, 2000, 46(7):893-911.
- [8] MERTON R C. Continuous-time finance [M]. Cambridge, MA: Basil Blackwell, 1990:70-123.
- [9] JARROW R A, RUDD A. Option pricing[M]. Homewood: Dow Jones-Irwin, 1983:112-232.
- [10] COX J C, ROSS S A. The valuation of options for alteration stochastic process[J]. Journal of Financial Economics, 1985, 3(4):145-166.
- [11] 龚光鲁. 随机微分方程引论[M]. 北京:北京大学出版社, 1987:399-402.
- [12] IKEDA N, WATANABE S. Stochastic differential equations and diffusion processes [M]. North-Holland: Amsterdam, 1981:66-96.
- [13] GUO W J, XU C M. Optimal portfolio selection when stock prices follow a jump-diffusion process[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2004, 60(3):485-496.

(编辑 韩国良)