

# 石油战略储备计划与石油消费的动态路径分析

李 卓

(武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072)

**摘要:** 采用动态最优控制方法分析了在面临外生性石油供给冲击时, 国家石油战略储备计划对国内石油消费以及石油价格走势的动态影响. 分析结果表明, 在面临石油冲击威胁时, 石油战略储备的建立对平滑石油消费的动态演化路径具有重大影响; 石油战略储备计划启动最优时机的选取主要取决于消费的结构特征以及石油供给状况. 尽管石油战略储备有助于平缓石油冲击的影响, 但并不能消除石油冲击发生时油价的跳跃性波动, 由此也凸现了战略性石油储备的功能和战略目标主要应该定位在应付外部石油供给的突然中断, 而不适宜定位在平抑油价走势上. 在石油供给有限以及油价不断攀升的背景下, 积极推行能源消费多元化战略对于经济发展和能源安全都具有积极意义.

**关键词:** 石油战略储备; 能源利用效率; 能源消费多元化

**中图分类号:** F407      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007 - 9807(2008)01 - 0022 - 09

## 0 引 言

近年来, 世界石油市场价格剧烈波动, 再加之某些特定的政治、经济敏感事件的频发, 使得世界各国不得不重新审视其各自的石油安全问题. 在高油价时代再次来临之际, 各国政府从自身安全和发展的角度出发纷纷制定(优化)了其各自的国家能源安全战略. 美国现任总统布什上任伊始就在 2001 年 5 月宣布了他的“新能源计划”, 旨在强化其国家能源安全战略. 中国政府也早在 2001 年 3 月就将“建立国家石油战略储备, 维护国家能源安全”等内容详细写入了“十五”规划. 2005 年 6 月经国务院常务会议审议通过的《国家能源中长期发展规划(2004—2020)》明确提出了建立国家石油战略储备的要求. 由此, 我国的国家石油战略储备计划正式启动, 国家战略石油储备基地建设的一期工程已经在大连、黄岛、舟山等地全面铺开.

在此背景下, 深入研究石油战略储备计划对石油消费以及油价运行的影响具有重要的理论与现实意义.

石油属于典型的不可再生性资源, 因此, 有关的研究基本都遵循“霍特林传统”<sup>[1]</sup>, 关注的问题包括: 不可再生资源的可获得性及其对经济增长的作用<sup>[2,3]</sup>, 相关资源的最优开发与消耗策略<sup>[4]</sup>, 以及对有关资源的最优定价问题、环境影响问题<sup>[5,6]</sup>等等. 考虑到资源的不可再生性, 研究者关注的问题也包括再生性资源与不可再生性资源的替代性问题<sup>[7-9]</sup>, 以及两类资源在经济增长过程中的作用问题<sup>[10]</sup>.

霍特林<sup>[1]</sup>在上个世纪 20、30 年代的开创性研究具有划时代的意义, 无论是就理论研究的前瞻性还是研究方法的严谨性而言, 至今仍是无可争议的经典之作. 但是, 自霍特林之后的近半个世纪, 有关的研究鲜有进展、乏善可陈. 直至因“石油冲击”的影响以及动态优化分析方法在经济分析中的广泛应用, 进入 20 世纪 70 年代以后, 越来

收稿日期: 2004 - 11 - 17; 修订日期: 2007 - 04 - 06  
基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目 (10515).  
作者简介: 李 卓 (1969—), 男, 湖北应城人, 博士, 教授, Email: lizhuo@whu.edu.cn

越多的理论研究者开始关注不可再生性资源的有关研究。早期的研究基本上是将 Ramsey 的最优增长模型与 Hotelling 的模型合并, 在经济增长的驱动要素中加入一种储量有限的不可再生性资源<sup>[2]</sup>, 这类研究实质上是最优经济增长模型的变型<sup>[3]</sup>, 部分源于“罗马俱乐部”的《增长的极限》的悲观论断<sup>[11]</sup>, 后续研究开始关注不可再生性资源的最优开发速度、替代资源的可获得性以及替代资源的获得成本等问题<sup>[4, 5, 7]</sup>, 这类研究的理论价值在于: 除了在观念和意识上部分地淡化了类似《增长的极限》式的悲观情绪, 同时在研究方法上也有不少创新, 将理论研究的重心转移到通过经济增长(资本积累)如何内生性地决定替代资源的可获得性、获得成本乃至获得的时间问题等等。考虑到新技术研发过程中所固有的风险问题, 许多研究还引入了不确定性分析<sup>[4, 7]</sup>, 但是, 从研究框架来看, 这类研究还不属于随机动态分析, 因而还不是真正意义上的动态不确定性分析。

具体到国家石油战略储备问题, 从现有的研究成果来看, 在国外的相关研究文献中尚未找到专门分析战略性石油储备与能源消费问题的理论结果, 而国内现有的相关研究则主要集中在通过对比分析、总结发达国家石油战略储备计划的经验以及对我国的启示和借鉴意义, 也尚未见到将石油战略储备计划与能源利用效率、能源消费战略等相联系的理论结果, 本文尝试采用动态最优控制方法对相关问题的分析。就分析方法和模型设定而言, 本文主要借鉴了文献[4, 7]的分析框架。但是, 分析的问题和侧重点迥异。

论文的创新点包括: 第一, 首次运用动态优化分析方法将不可再生性资源的储备问题与其最优消耗问题在一个统一的框架内进行了分析; 第二, 通过针对能源开发和利用效率的分析, 本文的分析结果突破了“Hotelling 传统”关于不可再生性资源价格单边上扬的分析范式; 第三, 针对替代能源与石油消耗的关系问题, 本文的研究在两个方面发展了现有的理论成果: 首先, 在考虑到石油和替代能源的生产技术与使用效率后, 模型分析显示整个经济体系中存在着一个石油消费与替代能

源消耗所占比率的均衡水平, 并且现实中两大类能源的消耗比率将逐步趋向该均衡水平。其次, 通过成功地解决一类由非线性、非齐次常微分方程表示的能源消费动力系统, 本文的研究扩展了已有的分析框架和结果。

## 1 石油冲击、战略储备与石油消费的动态优化: 基本模型

### 1.1 模型描述

尽管世界主要发达国家的国家战略石油储备计划在规模、管理和运行机制等方面存在着明显差异, 但是都无一例外地将其在与不可再生性资源(许多文献也使用“可耗尽性资源”的表述, depletable or exhaustible resource)有关的研究中, 一直存在着按存量(典型的是<sup>[11]</sup>)和按流量(典型的是<sup>[7]</sup>)两种不同的形式来反映不可再生性资源的供给状况, 本文选择后者作为模型设定的组成部分。

假定石油供给存在两种状态(分别用 $\bar{c}_t$ 和 $\underline{c}_t$ 表示): 相比于实际的石油消费需求( $c_t$ ), 一种状态供给充分, 能够满足消费需求( $\bar{c}_t = c_t$ ); 而另一种状态则供给不足, 不能完全满足消费需求( $\underline{c}_t < c_t$ ), 供给性冲击表现为石油的供给由第一种状态转入第二种状态(即 $0 < \underline{c}_t < \bar{c}_t$ )。为了应对石油冲击的影响, 经济行为人考虑在石油供给相对充裕时建立战略储备, 以备在石油供给下降时的不时之需。为了尽量与现实相吻合, 假定所建立的战略储备量相对有限。整个经济过程不存在不确定性问题, 经济行为人在面临前述约束的前提下, 最大化其由消费所获得的效用。

具体而言, 为了应对石油冲击的影响, 经济行为人考虑在石油供给相对充裕的时候( $t \in [0, T]$ )建立储量为 $B$ 的石油战略储备。

$$\max_{c_t} \int_0^T e^{-\rho t} U(c_t) dt + \bar{V}(k(T)) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \dot{k}_t = \bar{k}_t - c_t \quad (2a)$$

$$0 \leq k_t \leq B \quad (2b)$$

通过 $\bar{c}_t$ 和 $\underline{c}_t$ 来反映石油供给状况, 其作用相当与文献[7]模型设定中的变量 $M$ 。相应地, 本文的方程(2a)、(2b)相当于文献[7]中的方程(9.4)。

按照国际能源组织的建议, 各国国家石油战略储备的储量应维持在相当于本国 90 d 原油进口量的水平。

$$\bar{k}(T) = \min(\bar{k}^*, B) \quad (2c)$$

由于经济行为人所能建立的石油战略储备量有限,因此她在截至  $[0, \bar{T}]$  时期末积累的最优石油储备  $\bar{k}^*$  不能超出她拥有的战略储备能力  $B$ .

当石油供给在  $[T, T]$  时间段内转变为  $\bar{c}$  时,经济行为人所面临的问题为

$$\max_{c_t} \int_T^T e^{-\rho t} U(c_t) dt \quad (3)$$

$$\dot{k}_t = \bar{c} - c_t \quad (4a)$$

$$0 \leq k_t \leq B \quad (4b)$$

$$k(T) = 0 \quad (4c)$$

其中,效用函数  $U(c_t)$  (相对于  $c_t$ ) 严格递增、严格凹且连续可微,满足条件  $U'(0) = +\infty$ .

### 1.2 跨时动态优化及最优性条件

给定前述最优化问题,可以首先研究行为人的最优决策应当满足的条件.采用递归方法(Recursive Method)求解,因此,当  $t \in [T, T]$  时,可以构造用于动态优化分析的哈密尔顿函数如下

$$H = U(c_t) + \lambda_t(\bar{c} - c_t) + \mu_1 k_t + \mu_2 (B - k_t) \quad (5)$$

为了便于对本研究感兴趣的优化问题进行细致分析,不妨采用如下效用函数

$$U(c_t) = \frac{c_t^{1-\rho}}{1-\rho} \quad (0 < \rho < 1)$$

根据由(5)确定的优化条件,当  $t \in [T, T]$  时经济行为人的最优消费路径由以下方程决定

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = -\rho \Rightarrow c_t = \bar{c}(T) e^{-\rho(t-T)} \quad (6)$$

相应的储备的积累路径由下式确定

$$k_t = \bar{c}(T)(t-T) + \bar{c}(T) e^{-\rho(t-T)} + d_1 \quad (7)$$

其中  $d_1$  为待定的积分常数.由于所能建立的石油战略储备的储量有限,出于应对石油冲击的需要,经济行为人会危机到来前将石油储备积累到她所拥有的最大储量  $B$ ,即  $k(T) = B$ .在冲击来临以后则通过动用储备来尽量平滑其消费水平,直至储备耗尽,即  $k(T) = 0$ .将  $k(T) = B$  及  $k(T) = 0$  代入(7)解得  $\bar{c}(T)$ 、 $d_1$  分别为

$$d_1 = B - \bar{c}(T)$$

$$\bar{c}(T) = \frac{B + \bar{c}(T - T)}{1 - e^{-\rho(T-T)}} > 0$$

由模型解得的  $\bar{c}(T) > 0$  符合所研究问题的经济的基本实质,  $\bar{c}(T)$  代表  $T$  时刻的消费水平.

类似地,当  $t \in [0, T]$  时,通过构造相应的哈密尔顿函数同样也可以确定在此时间段的石油消费和储备积累的动态演化方程.不同的是:相比于  $t \in [T, T]$  时的决策,行为人在考虑最优的消费和积累路径时还必须根据她所处的经济环境确定一个开始积累石油储备的最优时间  $T^*$ .显然,没有任何理由想当然地认为行为人应当从  $t = 0$  时就开始积累储备,因此,这是一个如何决定储备建立最优时机的问题.

**命题 1** 给定消费者的行为偏好和石油供给状况,战略性石油储备构建的最优时机取决于拟建储备的储量、消费者偏好以及组建储备时的石油供给水平,而与未来石油冲击的程度无关.

为了确定石油储备积累启动的最优时机,不妨先假定最优时机  $T^* \in [0, T]$  然后经由决定最优消费和储备积累路径的优化条件来确定  $T^*$  的取值.显然,  $t \in [0, T^*]$  时,  $k_t = 0$ ,  $\dot{k}_t = 0$ ,  $c_t = \bar{c}$ .而当  $t \in [T^*, T]$  时,储备积累和消费增长分别由以下两个方程决定

$$\begin{aligned} \dot{k}_t &= \bar{c} - c_t \\ c_t &= \bar{c}(T^*) e^{-\rho(t-T^*)}, \quad c(T^*) = \bar{c} \end{aligned}$$

因此,储备积累的最优路径为

$$k_t = \bar{c} \cdot t - \bar{c} \cdot e^{-\rho(t-T^*)} \cdot \bar{c} + d_2 \quad (8)$$

利用  $k(T^*) = 0$  解得

$$d_2 = -\bar{c} (T^* + \bar{c})$$

将  $d_2$  代回式(8)、由  $k(T) = B$  可得

$$\bar{c}(T - T^*) + \bar{c} (e^{-\rho(T-T^*)} - 1) = \frac{B}{\bar{c}} \quad (9)$$

等式(9)是  $T^*$  的隐函数,因此,战略储备启动的最优时机  $T^*$  由该函数完全决定.定义消费偏好特征  $\rho$  以及储量  $B$  相对于石油供给水平的比率  $s = B/\bar{c}$ ,由隐函数定理可推知:  $\partial T^* / \partial s <$

这里对效用函数所作的要求类似于文献[4],但是弱于文献[7]方程(0.1)和(0.2)的要求.原因是本文的目的是寻求整个优化问题的解析解,因此将给出效用函数的具体形式.最优化问题的目标函数(1)(3)与文献[7]中的目标函数(0.3)相同.

$$0, \partial T^* / \partial > 0, \partial T^* / \partial > 0, \partial T^* / \partial < 0 .$$

其中:  $\partial T^* / \partial s < 0$  表明如果石油供给相对充裕, 则储备积累启动的时间可以相对较晚. 而  $\partial T^* / \partial \beta > 0$ 、 $\partial T^* / \partial \gamma > 0$  则反映了经济行为人的消费偏好, 其中,  $\beta$  为主观贴现率,  $\gamma$  为相对风险回避系数,  $\delta$  则综合反映了行为人所面临跨时动态决策时的偏好.

类似地, 如果她更多地关注于当前消费 (  $\delta$  较大, 则  $e^{-\delta t}$  较小, 消费者越偏好近期消费,  $T^*$  越靠后 )、且具有更强的风险回避意识 (  $\gamma$  较大, 消费者风险厌恶程度越强, 越应该尽早开始有储备,  $T^*$  越靠前 ), 因此, 反映总体消费偏好特征的  $\beta$  越大, 那么她就会倾向于推迟开始积累储备的时间 (  $T^*$  较大 ).

此外, 从式 (9) 也可以看出, 战略储备启动的最优时机  $T^*$  与将要发生的冲击的程度 (  $\bar{c} - c_t$  ) 无关, 因此, 命题 1 得证.

关于国家战略石油储备计划的最优启动时机问题, 命题 1 中所包含结论的现实意义在于: 尽管我国早在 2001 年制定和通过的“十五”规划中就提出了建立国家战略石油储备的设想, 但是, 该计划并未立即实施, 也许在过去的 4 ~ 5 年时间里我们一直在关注和考察着一个最优的启动时机.

### 1.3 消费、价格与战略储备变动的动态路径

通过前述跨时动态优化分析, 现已得到描述石油消费与储备变动的动态系统, 而储备积累启动的最优时机  $T^*$  则由式 (9) 决定. 尽管目前还无法通过式 (9) 显示地解得  $T^*$  的取值, 但是, 根据布劳尔 (Brower) 不动点定理<sup>[12]</sup>, 由式 (9) 确定的系统存在不动点, 该不动点就是我们所关注的  $T^*$ , 此外,  $T^*$  的取值同时还会对最优消费和储备变动的动态路径产生直接影响.

如果由式 (9) 确定的  $T^* < 0$ , 则意味经济行为人所储备意愿强烈、或者计划筹建的储备量太大

以至于在 0 和  $\bar{T}$  之间不足以积累, 因此在  $t \in [0, \bar{T}]$  的优化决策中左端起点受到约束, 我们取  $T^* = 0$  ;

如果由式 (9) 确定的  $T^* \geq \bar{T}$ , 则反映出经济行为人所储备意愿较低, 因此在  $\bar{T}$  时刻她的最优储备量  $k_t^*$  不会受到储量 (  $B$  ) 有限的约束 .

而更加典型的情形是:  $T^* \in [0, \bar{T}]$ , 此时, 典型的动态消费路径如图 1 所示.

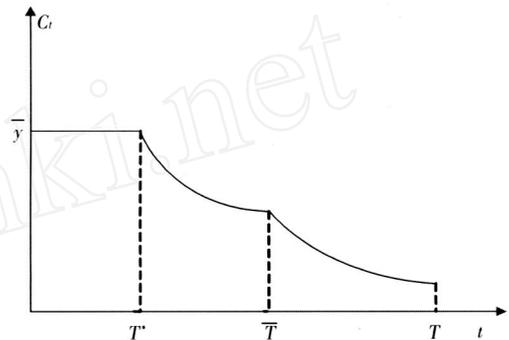


图 1 消费的动态路径

Fig 1 Dynamic path of consumption

相应地, 储备变动的动态路径则如图 2 所示.

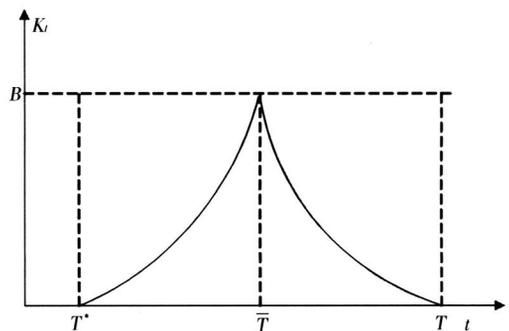


图 2 储备变动的动态路径

Fig 2 Dynamic path of reserve adjustment

在  $t \in [0, T^*]$  时, 消费  $c_t = \bar{c}$  而储备积累  $k_t = 0$ . 随后由于考虑到石油冲击的影响, 消费水平持续下降, 战略储备则在  $t \in [T^*, \bar{T}]$  时逐步增

成立的前提条件为  $1 + (\bar{T} - T^*) < e^{(\bar{T} - T^*)}$ , 从形式上看, 这一条件要求不等号左边的线性函数小于不等号右边的指数函数, 因此, 这一条件很容易满足. 详细的推导过程请参见本文计算附录, 下载地址: <http://202.114.65.51/fzjx/lizhuo/downloads/Appendix.pdf>

显然, 如果  $\bar{T} + \frac{1}{\delta} (e^{-\delta(\bar{T} - T^*)} - 1) < \frac{B}{\delta}$ , 则  $T^* < 0$  并且, 由方程 (9) 可以确定该方程有两个解, 一个小于  $\bar{T}$ , 另一个大于  $\bar{T}$ . 因为, 设  $Y = (\bar{T} - T^*) + \frac{1}{\delta} (e^{-\delta(\bar{T} - T^*)} - 1)$ , 则  $\frac{\partial Y}{\partial T^*} = -1 + e^{-\delta(\bar{T} - T^*)}$  大于 0 (小于 0), 如果  $\bar{T} < T^*$  ( $\bar{T} > T^*$ ).

无论行为人的储备意愿如何, 在  $\bar{T}$  时刻她的最优储备量  $k_t^*$  都应该大于或等于 0, 由方程 (9) 则意味着  $(\bar{T} - T^*) + \frac{1}{\delta} (e^{-\delta(\bar{T} - T^*)} - 1) = \frac{k_t^*}{\delta}$  0, ( $k_t^* < B$ ), 也即, 要求  $[1 - (\bar{T} - T^*) e^{-\delta(\bar{T} - T^*)}]$ . 值得注意的是, 此时  $\bar{T} < T^*$ , 因此, 唯一的限制条件仍然是脚注 4 所分析的条件. 当然, 一种合乎逻辑的推断是在面临石油供给相比与消费需求日渐短缺的背景下, 理性的经济行为人应当具有较强的储备意识, 因此排除  $T < T^*$ , 从而拟建的战略储备储量有限的约束有效.

加,在  $t \in [T, T]$  被消耗而逐步减少. 其中,只有当经由动态优化问题 (1) 确定的意愿最优储备  $k^* = B$  时,消费路径在  $T$  处才是连续的. 但是,无论消费和储备积累的动态路径如何调整作为石油储备影子价格的  $\lambda$ ,在  $T$  处总会存在一个向上的跳跃间断,反映出石油冲击对实际经济的重大影响.

**命题 2** 给定消费者的行为偏好和石油供给状况,战略性石油储备的建立仍无法避免石油冲击来临时油价的跳跃性波动.

在本文现有的框架和分析结构下,源于效用函数  $U(c_t)$  的连续性,  $\lambda$  的动态路径也会尽可能的平滑 (smoothing),原因是行为人要尽可能地平滑其动态消费,因此,  $\lambda$  的跳跃间断将发生在  $t = T$  处.

根据 Seierstad 及 Sydsaeter 定理 4 的有关内容<sup>[13]</sup>,在现有分析框架下,存在跳跃间断的充要条件是

$$(\lambda^- - \lambda^+) (k_t - k(T)) = 0 \quad (10)$$

其中,  $\lambda^-$ 、 $\lambda^+$  分别为  $\lambda$  在可能存在的跳跃点前后的取值. 在  $t = T$  处,  $k(T) = B$ ,根据由不等式约束  $(0 \leq k_t \leq B)$  生成的库恩-塔克条件有  $\mu_1 = 0$ 、 $\mu_2 > 0$  考虑哈密尔顿函数关于状态变量  $k_t$  的一阶条件  $(\partial H / \partial k_t = \mu_1 - \mu_2 = \lambda^- - \lambda^+)$  有

$$\lambda^- = \lambda^+ + \mu_2 \quad (11)$$

即在  $t \in [T^+, T]$  时,  $\lambda$  的运行轨迹遵从  $\dot{\lambda} = -r\lambda$ , 随即转变为式 (11). 所以,  $(\lambda^- - \lambda^+) < 0$  而根据战略石油储备的积累路径显然有  $(k_t - k(T)) > 0$ , 因此, 条件 (10) 确立, 命题 2 得证.

命题 2 中所包含结论的现实意义在于: 尽管石油战略储备有助于平缓石油冲击的影响, 但不能消除石油冲击发生时油价的跳跃性波动, 由此也凸现了战略性石油储备的功能和战略目标主要应该定位在应付外部石油供给的突然中断, 而不适宜 (也不可能) 定位在平抑油价走势上. 基于此, 现实中似乎也不难理解尽管世界主要发达国家的国家战略石油储备计划存在着明显差异, 但是都无一例外地将其战略性石油储备的主要目的定位于防范因政治动荡、军事冲突等突发因素所

导致的石油供应中断的威胁, 并不担当石油市场供求和价格波动的调节责任.

## 2 战略储备、能源利用效率与石油消费的动态优化

### 2.1 模型描述

面对日益严峻的能源供给与消费状况, 努力提高原油的开发和利用效率不失为理性的选择. 在保持石油供给水平不变的前提下, 提高其开发和利用效率实质上等于增加了石油的供给.

作为对前述基本模型的一种扩充, 考虑不同的能源利用效率对油价走势和石油消费的影响. 具体而言, 储备的积累由以下动态方程决定

$$\dot{k}_t = \lambda_t + A_1 k_t - c_t \quad (A_i > 0, i = 1, 2) \quad (12a)$$

$$0 \leq k_t \leq B \quad (12b)$$

$$k(T) = \min(k^*, B) \quad (12c)$$

其中, 石油的供给状态  $\lambda_t$  如前所述. 当  $t \in [0, T]$  时, 能源开发和利用的效率因子为  $A_1$ ; 而在  $t \in [T, T]$  时, 效率因子为  $A_2$ , 因此, 在以  $T$  为分界的前后两个时期中能源开发和利用的效率因子存在明显差异, 原因是在能源供给相对丰裕或短缺时, 促成经济体系内部提高能源利用效率的动力和压力明显不同. 而且, 可以进一步假定能源开发利用效率具有明显的规模效应, 从效率因子  $A_i$  进入储备积累方程 (12a) 的形式来看, 显然, 随着储备积累的增加, 由效率因素带来的供给的增长效应越明显.

### 2.2 能源利用效率对消费、价格动态路径的影响

类似于前述分析, 也可以将整个分解为两个继启的动态优化问题, 目标函数仍然是式 (1) 与 (3), 但是, 约束条件为式 (12).

构造哈密尔顿函数如下:

本文对能源开发和利用效率的关注受到这样一种现象的启发: 对于许多不可再生性资源 (包括石油、天然气等等) 储量的估计实际上一直呈上升趋势, 新增储量甚至经常超过实际的消耗量. 主要的原因无外乎两点: 一方面, 勘测能力的提高导致新的油气资源不断被人类发现; 另一方面, 开发和利用效率的提高使得相同的油气资源可以产生出更多的石油产品 (参见文献 [14] 第 6 页的数据和论述). 一方面, 能源开发和利用效率的提高需要不断投入大量人力、财力研发新的技术, 而且, 与石化产业相关联的许多适用技术都具有明显的规模效应; 另一方面, 就模型构建而言, 效率因子以 “Ak model” 的形式进入储备积累方程也便于寻求模型的解析解. 从经济增长理论的有关模型发展来看, “Ak model” (及其变种) 往往是获得解析解的唯一形式.

$$H = U(c_t) + \mu_1(\dot{k}_t + A_1 k_t - c_t) + \mu_2(B - k_t) \quad (13)$$

最优消费路径由以下方程决定

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = -\frac{(A_1 - \rho)}{A_1} \quad (14)$$

当  $t \in [T, T^*]$  时,

$$c_t = c(T) e^{-\frac{(A_1 - \rho)(t-T)}{A_1}} \quad (15)$$

以及

$$k_t = -\frac{B}{A_2} + \frac{c(T)}{A_2 + \frac{\rho - A_2}{A_2}} \times e^{-\frac{(A_2 - \rho)(t-T)}{A_2}} + D_1 e^{A_2 t} \quad (16)$$

利用边界条件, 解得  $c(T)$ 、 $D_1$  分别为

$$\frac{(A_2 + \frac{\rho - A_2}{A_2}) \left\{ \frac{B}{A_2} [1 - e^{A_2(T-T^*)}] - B e^{A_2(T-T^*)} \right\}}{e^{-\frac{(A_2 - \rho)(T-T^*)}{A_2}} - e^{A_2(T-T^*)}} > 0 \quad (17)$$

$$D_1 = \left( B + \frac{B}{A_2} - \frac{c(T)}{A_2 + \frac{\rho - A_2}{A_2}} \right) e^{-A_2 T^*} \quad (18)$$

类似地, 可以解得  $t \in [0, T^*]$  时的最优消费和储备积累路径

$$c_t = c(T^*) e^{-\frac{(A_1 - \rho)(t-T^*)}{A_1}} \quad (19)$$

$$k_t = -\frac{B}{A_1} + \frac{c(T^*)}{A_1 + \frac{\rho - A_1}{A_1}} e^{-\frac{(A_1 - \rho)(t-T^*)}{A_1}} + D_2 e^{A_1 t} \quad (20)$$

其中,  $T^*$  是战略性石油储备开始积累的最优时机. 显然, 在  $t \in [0, T^*]$  时  $\dot{k}_t = 0, c(T^*) = \bar{c}$ .

利用边界条件  $k(T^*) = 0$  和  $k(T) = B$ , 解得

$$D_2 = \left( \frac{B}{A_1} - \frac{c(T^*)}{A_1 + \frac{\rho - A_1}{A_1}} \right) e^{-A_1 T^*} \quad (21)$$

$$\frac{(e^{-\frac{(A_1 - \rho)(T-T^*)}{A_1}} - e^{A_1(T-T^*)}) / (A_1 + \frac{\rho - A_1}{A_1})}{\frac{B}{A_1} + \frac{1}{A_1} [1 - e^{A_1(T-T^*)}]} = \quad (22)$$

与式 (9) 类似, 尽管无法通过式 (22) 显示地解得  $T^*$  的取值, 但是, 根据布劳尔 (Brower) 不动点定理<sup>[12]</sup>, 由式 (22) 确定的系统存在不动点. 因此, 与前述基本模型的分析结果类似, 战略储备启动的最优时机  $T^*$  由式 (22) 确定的隐函数完全决定. 类似地, 可以定义储量  $B$  相对于石油供给水平

的比率为  $s = B/\bar{c}$  以及  $\bar{c} = \frac{\rho - A_1}{A_1}$ , 由隐函数定律有  $\partial T^* / \partial s < 0, \partial T^* / \partial \rho > 0, \partial T^* / \partial A_1 > 0, \partial T^* / \partial A_2 < 0$  (如果  $\rho < (1 - \rho)A_1$ ) 以及  $\partial T^* / \partial \rho > 0$  (如果  $\rho > A_1$ )<sup>⑩</sup>.

其中,  $\partial T^* / \partial s$  小于 0,  $\partial T^* / \partial \rho$  及  $\partial T^* / \partial A_1$  大于 0 的经济涵义分别与未考虑能源利用效率时的解释类似<sup>⑪</sup>.  $\partial T^* / \partial A_2 < 0$  意味着如果消费者具有更强的风险回避意识 ( $\rho$  较大), 并且其主观贴现率较小<sup>⑫</sup> ( $\rho$  的大小受到一定的限制, 即  $\rho < (1 - \rho)A_1$ ), 则消费者倾向于尽早开始储蓄, 因此战略储备启动的最优时机较早 ( $T^*$  较小). 但是, 如果  $\rho > A_1$ , 则消费者会更加倾向于立即消费, 从而推迟开始积累储备的时间. 显然, 在考虑到能源利用效率后现有的研究结果可以更加细致地刻画经济行为人的决策行为.

长期以来, 就不可再生性资源的价格与消费而言, 以“霍特林传统”为代表的理论分析往往断言: 由于供给的有限性, 资源价格的动态演化路径只能是单边上升. 但是, 现实中不仅时常目睹油气资源价格的频繁波动, 而且, 自 20 世纪 70 年代“石油冲击”以来也不止一次地出现过在相当长一段时间内石油价格是持续下降的. 通过考虑能源开发和利用效率的影响, 可以协调上述理论与现实的矛盾: 考虑到在能源供给相对丰裕或短缺时, 经济体系内部提高能源利用效率的动力和压力可能明显不同, 最优消费与石油价格的动态路径有多种可能的路径组合, 具体而言:

- 1) 如果  $\rho > A_i (i = 1, 2)$ , 油价在  $t \in [0, T^*]$  及  $t \in [T, T^*]$  内均呈现上升走势;
- 2) 如果  $\rho < A_i (i = 1, 2)$ , 油价在  $t \in [0, T^*]$

⑩ 详细的推导过程请参见本文计算附录, 下载地址: <http://202.114.65.51/fzjx/lizhuo/downloads/Appendix.pdf>  
 ⑪ 不同的是 改为  $\rho$ , 前提条件  $1 + [A_1 + \rho] (T - T^*) < e^{[A_1 + \rho](T - T^*)}$  也同样只是要求不等号左边的线性函数小于不等号右边的指数函数.  
 ⑫ 主观贴现率反映消费者对当前消费的关注程度,  $\rho$  较大意味消费者储蓄意愿较低, 因此更加倾向于尽早消费.

及  $t \in [T, T]$  内均呈现下降走势;

3) 如果  $A_2 < A_1$ , 油价在  $t \in [0, T]$  及  $t \in [T, T]$  内呈现先抑后扬走势;

4) 如果  $A_1 < A_2$ , 油价在  $t \in [0, T]$  及  $t \in [T, T]$  内呈现先上升后下降走势.

因此, 能源开发利用效率的高低对石油的最优消费路径与相应的油价变动趋势具有重要影响.

### 3 能源消费多元化

面对石油供给的有限性以及油价的不断上涨, 积极开发和利用替代石油的其它能源、大力推行能源消费多元化战略具有积极的意义. 沿续前述分析框架, 在石油冲击发生后引入替代能源, 从而分析能源消费多元化战略的影响.

拟采用 Dasgupta-Heal-So low 模型<sup>[7, 10]</sup>, 作为对此类模型的一种发展, 尝试在模型中加入能源开发利用效率的影响因素. 假定生产过程使用两种能源: 石油 (gasoline— $G_t$ ) 及其替代能源 (资本品— $K_t$ ), 在利用两种能源的过程中, 整个经济具有“科布—道格拉斯”生产技术<sup>③</sup>.

类似地, 可以将整个决策问题描述为如下最优控制问题

$$\max_{c_t, G_t} \int_0^T e^{-\rho t} U(c_t) dt \quad (0 < \rho < 1) \quad (23)$$

$$\dot{X}_t = -\delta X_t + A_2 X_t - G_t \quad (24a)$$

$$\dot{K}_t = A K_t^\alpha G_t - c_t, \quad (0 < \alpha < 1) \quad (24b)$$

$$\text{给定 } X(T) = B, K(T) = K \quad (24c)$$

构造哈密尔顿函数:

$$H = U(c_t) + \lambda_t (-\delta X_t + A_2 X_t - G_t) + \mu_t (A K_t^\alpha G_t - c_t) \quad (25)$$

其中,  $U(c_t)$  仍然满足通常假定. 协态变量 (Co-state Variables)  $\lambda_t, \mu_t$  分别对应于石油及其替代能源的影子价格,  $A$  是与总体生产函数相联系的技术进步及效率因子. 相应的优化条件为

$$\frac{\partial H}{\partial c_t} = U'(c_t) - \mu_t = 0 \quad (26a)$$

$$\frac{\partial H}{\partial G_t} = -\lambda_t + \mu_t A \alpha K_t^{\alpha-1} G_t^{-1} = 0 \quad (26b)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_t} = \lambda_t A_2 = \rho - \lambda_t \quad (26c)$$

$$\frac{\partial H}{\partial K_t} = (1 - \alpha) \mu_t A K_t^{-1} G_t = \rho - \dot{\mu}_t \quad (26d)$$

定义石油消耗与替代能源的比率为  $r_t = G_t/K_t$ , 对式 (26b) 微分

$$-(\rho - A_2) \cdot \lambda_t + \lambda_t \mu_t A r_t^{-1} + (\rho - 1) \mu_t \cdot A r_t^{-2} \dot{r}_t = 0 \quad (27)$$

而借助式 (26d) 可以确定替代能源的动态价格路径

$$\frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = -(\rho - \alpha) A r_t \quad (28)$$

利用式 (26b) 及 (28) 将式 (27) 化简为

$$A \cdot r_t + \frac{\dot{r}_t}{r_t} = \frac{A_2}{1 - \alpha} \quad (29)$$

方程 (29) 是关于  $r_t$  的非线性、非齐次常微分方程<sup>④</sup>.

命题 3 给定石油和替代能源的生产技术与使用效率, 整个经济体系中存在着一个石油消费与替代能源消耗所占比率的均衡水平, 并且这两大类能源的消耗比率将向该均衡水平趋同.

从方程 (29) 的形式来看,  $\left[ \frac{A_2}{A(1-\alpha)} \right]^{-1}$  是式 (29) 的一个解, 并且与时间无关, 因此是方程 (29) 的一个平衡点. 尽管式 (29) 是非线性、非齐次的, 但是, 从形式上看它属于“伯努利方程”, 通过适当变换后可以转化为线性微分方程, 从而解析地得到式 (29) 的解

$$r_t = \left\{ \left[ r(T) \right]^{-1} e^{\frac{A_2}{1-\alpha}(\rho-\alpha)(T-t)} + \frac{A}{A_2} (1-\alpha) \left[ 1 - e^{\frac{A_2}{1-\alpha}(\rho-\alpha)(T-t)} \right] \right\}^{-1} \quad (30)$$

其中,  $r(T) = G_T/K_T$ . 显然, 当  $t \rightarrow T$  时,  $r_t = \left[ \frac{A_2}{A(1-\alpha)} \right]^{-1}$  是方程 (29) 的一个平衡点, 取决于石油和替代能源的生产与使用效率, 其中  $A_2$  为石油的使用效率、 $A$  为生产的技术效率. 通过计算  $\partial r_t / \partial t, \partial r_t / \partial \rho$  与  $\partial r_t / \partial A_2$ , 显然可以判断石油消费

③ 也曾尝试过使用其他形式的生产函数, 如: CES函数, 模型的基本结论是一致的, 但是由模型所导出的动态方程无法得到解析解.

④ 对于非线性、非齐次微分方程, 一般都很难得到其解析解. 作为对比, 本文采用的模型较之文献 [15] 第 128 ~ 139 页的模型更加一般化, 后者得到的动态方程是非线性、齐次微分方程, 很容易求解.

与其替代能源消耗比率的动态路径具有如下特征<sup>④</sup>

1) 当  $\bar{r}(T) < r = \left[ \frac{A_2}{A(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$  时,  $\partial r_t / \partial t > 0$ ,  $\partial r_t / \partial A_2 > 0$

2) 当  $\bar{r}(T) > r = \left[ \frac{A_2}{A(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$  时,  $\partial r_t / \partial t < 0$ , 但是  $\partial r_t / \partial A_2$  的符号不定。

这两类特征意味着: 在引入替代能源时, 如果石油消耗与替代能源消耗的比率低于由系统决定的均衡水平, 则该比率会逐渐上升, 并且, 通过提高石油的使用效率可能进一步提高石油的相对消耗水平。相反, 如果石油消耗与替代能源消耗的比率已经高于由系统决定的均衡水平, 则该比率会逐渐下降, 而且, 由于此时石油消耗的相对水平已经过高, 石油资源短缺的制约性很强, 即使提高石油的使用效率经济系统也不能够一致地允许石油消耗相对于其替代能源的消耗进一步上升。

有鉴于此, 命题 3 的现实意义在于: 首先, 对于当前石油消费水平的高低以及其最优的演化路径作出判断时, 我们尚需谨慎分析, 尤其是对于可能存在的相对上升路径的判断, 其实并不能完全排除其存在的可能性; 其次, 尽管从经济最优化的角度出发, 整个体系可能允许存在相对上升的路径, 但是, 不可再生性资源即使是在没有明确考虑其供给的有限性的情况下, 其对经济动态优化决策的约束性也是十分严厉的, 一旦对此类资源的消耗超过一定的界限, 无论如何改进技术和提高效率, 不可再生性资源的消耗比率必须无条件地降低。

## 4 结 论

通过建立一类相对简单的动态最优控制模

型, 本文对面临石油供给性冲击威胁条件下的国家石油战略储备计划对石油消费动态路径的影响进行了深入分析。研究表明, 石油冲击威胁和石油战略储备计划对石油消费和价格的动态路径具有重大影响。关于国家石油战略储备计划的实施, 模型的分析表明: 石油战略储备计划启动的最优时机的选取需要考虑消费的结构特征以及石油供给的状况。尽管石油战略储备的建立有助于平缓石油冲击的影响, 但是, 并不能消除石油冲击发生时油价的跳跃性波动。在石油供给有限以及油价不断攀升的背景下, 积极推行能源消费多元化战略具有积极意义, 使用替代能源可以有效缓解现有能源供给与消费的矛盾, 模型结果显示: 不可再生性资源 (例如石油) 对经济动态优化决策的约束性是十分严厉的, 一旦对此类资源的消耗超过一定的界限, 无论如何改进技术和提高效率, 不可再生性资源的消耗比率必须无条件地降低。

论文的不足在于本文使用的分析框架是确定性的, 例如: 现实中由于无法预知石油冲击发生的具体时间和准确程度, 而本文的分析框架假定石油冲击发生于  $T$  时刻, 石油冲击的程度则简单地通过  $\bar{r} - r$  的大小来予以表示, 这也成为后续拓展研究的一个重要取向, 一种可能的扩展是假定在每一个时点上石油冲击发生的机率服从于某种概率分布 (例如: 泊松分布)。此外, 通过拓展模型的分析框架积极寻求可供检验的实证分析框架, 这也是后续研究值得探讨的问题。尽管有关不可再生性资源的实证分析还处在探索阶段, 各类研究的方法、取向乃至结果都仍然有待提炼和完善<sup>[16, 17]</sup>, 我们可以尝试讨论国家战略石油储备计划启动的时机问题, 分析战略性储备建立过程中储备规模、建立的时间跨度与石油价格水平、原油供给状况以及能源消耗结构性特征之间的关联性。

## 参 考 文 献:

- [1] Hotelling H. The economics of exhaustible resources[J]. Journal of Political Economy, 1931, 39: 137—175.
- [2] Anderson K P. Optimal growth when the stock of resources is finite and depletable[J]. Journal of Economic Theory, 1972, 7: 256—267.
- [3] Barbier E B. Endogenous growth and natural resource scarcity[J]. Environmental and Resource Economics, 1999, 14(1):

④ 详细的推导过程请参见本文的计算附录, 下载地址: <http://202.114.65.51/fzjx/lizhuo/downloads/Appendix.pdf>

51—74.

- [4] Kamien M I, Schwartz N L. Optimal exhaustible resource depletion and endogenous technical change[J]. *Review of Economic Studies*, 1978, XLV (139): 179—196.
- [5] Hoel M. Resource extraction and recycling with environmental costs[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1978, 5: 220—235.
- [6] 满大庆, 侯亚丁. 生态价格: 对生态经济系统的动态分析 [J]. *管理科学学报*, 2004, 7(1): 34—41.  
Man Daqing, Hou yading. Ecological prices: Dynamics of ecology system [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2004, 7(1): 34—41. (in Chinese)
- [7] Dasgupta P, Heal G. The optimal depletion of exhaustible resources[J]. *Review of Economic Studies (Symposium)*, 1974, 41: 3—28.
- [8] Hartwick J. Substitution among exhaustible resources and intergenerational equity[J]. *Review of Economic Studies*, 1978, 45: 347—354.
- [9] 魏晓平, 谢钰敏. 矿产资源与可再生资源之间替代模型研究 [J]. *管理科学学报*, 2001, 4(2): 63—66  
Wei Xiaoping, Xie Yumen. Model research on the substitution between mineral resource and renewable resource [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(2): 63—66. (in Chinese)
- [10] Solow R. Intergenerational equity and exhaustible resources[J]. *Review of Economic Studies (Symposium)*, 1974, 41: 29—45.
- [11] 梅多斯 D H. 增长的极限 [M]. 北京: 商务印书馆, 1984.  
Meadows D H. *Limits of Growth* [M]. Beijing: Shangwu Press, 1984. (in Chinese)
- [12] Border K C. *Fixed Point Theorems with Applications to Economics and Game Theory*. Cambridge [M]. UK: Cambridge University Press, 1985.
- [13] Seierstad A, Sydsaeter K. Sufficient conditions in optimal control theory[J]. *International Economic Review*, 1977, 18: 12—46.
- [14] Krautkraemer J, Toman M. Fundamental economics of depletable energy supply [A]. In Cutler Cleveland, ed. *Encyclopedia of Energy* [M]. New York: Academic Press, 2003. 167—198.
- [15] Kamien M I, Schwartz N L. *Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management* [M]. New York: North Holland Press, 1981.
- [16] Smith V K. Natural resource scarcity: A statistical analysis [J]. *Review of Economics and Statistics*, 1979, 61: 423—427.
- [17] Slade M E, Thille H. Hotelling confronts CAEM: A test of the theory of exhaustible resource [J]. *Canadian Journal of Economics*, 1997, 30: 685—798.

## Strategic reserve and dynamics of oil consumption

LI Zhuo

School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** We study the dynamics of oil consumption and oil price in a situation where the pending oil shock and strategic oil reserve plan are relevant. By the optimal conditions of dynamic optimal control, we show that it is important to choose an optimal launching time to start the strategic oil reserve plan and it is still not possible to eliminate jumping rising of oil price when oil shock happens finally. It is also interesting that energy diversification strategy should be encouraged when subjected to the constraints of shortage of oil supply.

**Key words:** strategic reserve; efficiency of technology; diversification of energy consumption