

储量不确定对可耗竭资源优化开采的影响研究

葛世龙,周德群,陈洪涛

(南京航空航天大学经济与管理学院,江苏 南京 210016)

摘要:回采率是储量不确定的重要参数之一。利用回采率提高的概率、调整次数及调整幅度描述回采率不确定,给出回采率的调整方法,进而确定了有效可采储量,然后利用最优控制理论建立了可耗竭资源最优开采模型,确定了资源最优开采路径、影子价格和耗竭时间。结果表明:提高回采率,能增加企业资源供给量,延长采区的服务年限;回采率提高的越多,需要调整的次数也越多,回采率提高的概率较高时,相应调整次数可以减少些;在理论上验证了当前提高回采率政策的有效性。

关键词:可耗竭资源;回采率;有效可采储量;耗竭时间

中图分类号:F407;O224 **文献标识码:**A

1 引言

资源储量是一个动态概念,因技术、人类认知能力和水平、勘探、开采、培育和改造等能力的变化而变化,也与特定时期的经济能力有关。

资源耗竭理论最早可追溯到1931年 Hotelling 的奠基性文献,但其理论应用受到许多限制,在于其结论是基于严格的假设条件获得的,而现实中存在着众多的不确定性,储量不确定是其中之一。储量不确定主要包括储量大小及其分布不确定,以及资源品位的变化。在研究储量大小及其分布不确定方面,学者们往往通过假定某种概率分别进行分析,并考虑勘探活动和开采活动的影响。此类问题最早是由 Kemp 提出的。Loury (1978) 通过假定储量的概率分析,进而结合开采活动获得的信息修正概率分布,研究了资源优化开采问题^[1]。Gilbert (1979) 认为资源储量是一组大小递增的储量序列组成,并给出相应的初始概率,根据资源开采对概率进行 Bayes 修正,讨论了资源的优化开采及勘探活动获得信息的价值^[2]。Pindyck (1980) 认为可采储量可

能增加,也可能减少,利用随机过程描述了储量不确定,对勘探活动的两种功能,即增加储量和减少不确定性,进行分别讨论,拓展了资源优化开采研究^[3]。Martin & Sparrow (1985) 注意到勘探和开采活动是相关性,利用计算机模拟勘探活动,通过获得的信息修正矿藏的特征参数及其主观概率分布,进而利用随机优化模型研究资源的优化开采^[4]。Epaulard & Pommeret (2003) 在回归效用函数中引入了跨期替代弹性系数和风险厌恶系数,分析了储量不确定和技术进步不确定的资源跨期均衡模型^[5]。Kumar (2002, 2005) 分别从离散和连续两个角度研究了储量大小不确定时资源的优化规划问题^[6,7]。在资源品位研究方面,不仅涉及资源品位、质量,还涉及资源开采顺序问题。当地理位置优越和高品位的资源不断耗尽时,人们转向诸如海底和地层深处的地理位置不好和低品位的资源,或积极勘探新的资源,从而保证资源的持续供应。随着资源价格的不断提高,使得许多低品位资源具有经济价值,而得到开采。Krautkraemer (1988) 分析了资源价格对边界品位的影响^[8]。Shinkuma & Nishiyama (2000) 发现当矿石质量是无序分布时,矿石价格提高会降低边界品位;当矿石质量按序分布时,开采规则是反的,并得到铜矿的实证支持^[9]。Marvasti (2000) 把海洋资源作为陆地资源的替代资源,认为资源质量及储量大小会影响成本函数,海洋资源是高质量的资源,是一种新的储量不确定,进而研究了资源优化开采和勘探策略^[10]。资源开采顺序是解决资源不同品位和不同资源间的优化开采问题, Kemp & Long

收稿日期:2008-03-25; 修订日期:2008-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90510010);国家自然科学基金资助项目(70873058);南京航空航天大学科研创新群体基金(2007-5);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX07B_241r)

作者简介:葛世龙(1980-),男(汉族),浙江天台人,南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生,研究方向:能源-环境-经济(3E)系统建模的研究。

(2007)研究了储量大小不确定的优化开采顺序问题^[11]。国外文献很少关注开采行为对储量不确定的影响,Gowdy & Juli á(2007)分析了回采技术提高对石油耗竭行为的影响,通过实证表明回采技术提高加快了资源的耗竭^[12]。

在国内,资源耗竭理论的研究相对落后,尤其缺少储量不确定下资源的最优开采的研究。近年来,经济快速发展带动了资源的需求,资源价格又持续上涨,加快了资源的开采,还出现了“挑肥拣瘦”,即采厚弃薄,采易弃难,不仅缩短矿山服务年限,而且还造成资源的严重浪费和破坏。我国资源回采率普遍较低,例如煤炭资源的平均回采率为40%,而世界的平均水平为60%~70%。提高回采率也是近年来讨论的热点话题,任一鑫等(2006)研究了回采率与费用间存在的规律性,研究表明费用曲线呈U型^[13]。刘新梅等(2008)研究了提高煤炭资源总回采率的税费征收方式^[14]。他们的研究为政府干预资源开采行为提供依据。李英德等(2008)就煤炭最佳回采率的经济性展开研究,认为提高回采率需要调整成本,包括生态环境成本和追加投入成本^[15]。这些研究没有对资源开采进行讨论。

综上,本文给出了回采率的调整方法,进而确定有效可采储量,研究了储量不确定问题。建立了资源最优开采模型,讨论各参数对资源最优开采的影响。

2 资源最优开采模型的建立

2.1 变量说明

n 、 p 分别表示回采率的调整次数、调整幅度和调整概率。 i ($i = 0, 1, \dots, n$) 表示经过 i 次调整的回采率; S_0 、 S_∞ 、 X_t 、 S_∞ 分别表示资源采区的工业储量、有效可采储量、 t 时刻资源的开采量和 t 时刻资源的有效剩余储量; Q_t 、 P_t 、 $C_t(X_t)$ 、 π_t 分别表示 t 时刻资源需求量、资源价格、成本函数和利润函数; a 、 b 是成本函数中的系数,为分析方便,取 $b = 0$ (在推导最优开采路径中,固定成本不起作用); c 是需求函数的系数,通过标准化使 $c = 1$; T 表示采区的规划时间或资源的耗竭时间, S_T 为对应于资源耗竭的储量,文中取为 0; r 为社会贴现率,设为不变。

2.2 基本假设

Kneese, Sweeney(1993)在文献[16]中给出可耗竭资源的数学定义,满足可耗竭性的条件为:资源储量因资源开采而逐渐减少;储量只减不增;储量减少的速率是资源开采速率的单增函数;最

终资源储量会变为零。在此基础上,可写出资源耗竭的基本限制条件:

$$\begin{cases} \dot{S}_\infty = -X_t \\ S_\infty = 0, S_T = 0 \end{cases} \quad (1)$$

资源最优开采还取决于资源市场中的各种因素,如价格、需求量和市场结构等,文中还作如下假设:

假设 1:市场出清。即企业开采出来的资源均投入市场,当市场出清时,所有企业提供的资源量等于市场需求量,即:

$$X_t = Q_t \quad (2)$$

可耗竭资源是经济发展的必要投入要素(如能源资源、煤、石油等),在经济快速发展时,尤其是当需求大于供给时,该条件是合适的。该条件在有些情形下并不成立,如运输能力的限制、因生产连续性而保有库存量等,这些将在结果讨论中给以说明。

假设 2:成本函数与时间 t 和开采量 X_t 有关,且具有弱凸性,即 $\frac{\partial C_t}{\partial X_t} > 0$, $\frac{\partial^2 C_t}{\partial X_t^2} > 0$ 。根据这些要求,可选取二次成本函数进行研究:

$$C_t(X_t) = \frac{aX_t^2}{2} + b \quad (3)$$

可耗竭资源一般为地下资源,随着资源不断开采难度也加大,提高了开采成本,如深层煤炭比地表煤炭开采成本高,石油、铁矿石等也类似。此外,资源品位随开采而降低,提高了单位开采成本。开采成本函数一直是资源耗竭理论和实证研究的重要问题,它与开采量的关系也不尽一致。

假设 3:企业是价格接受者。并设定需求函数具有凹性,即 $dQ_t/dP_t < 0$ 。为研究方便,文中取线性形式:

$$Q_t = c(\bar{P} - P_t) \quad (4)$$

价格接受者是因为国内企业对资源价格没有控制力,往往要看国际价格的变化,而且政府经常会干预与管制资源价格。需求函数的设定是根据价格是由市场决定考虑的,而且当 P_t 高于价格上限 \bar{P} 时,消费者对资源的消费需求就减少为零,此时资源开采和消费都停止,需求退出了市场,资源将被其替代品所替代;当 P_t 低于价格下限 \underline{P} 时,生产者将无利可图而停止开采。

假设 4:文中涉及的函数均为连续、可导。

2.3 有效可采储量

回采率是指资源采出量占采矿范围内工业储量的百分比,它是衡量一个资源企业内部的管理水平

高低,资源利用好坏的重要的技术经济指标。

在实际工作中,为了监督和管理企业的合理开采资源,是以矿井为单位进行核算,且是以固定周期(如年、月)进行计算。回采率与开采技术、开采方法、管理水平和资源政策等相关。一般认为,企业可以通过追加投入提高回采率,也会因为投机、短期目标和不良开采行为等造成回采率降低。因此,设定整个开采过程中回采率共调整 n 次,每次调整幅度为 p ,并记回采率提高的概率为 p 。

由上可得调整一次的回采率为:

$$p_1 = p(p_0 + \Delta) + (1-p)(p_0 - \Delta) \quad (5)$$

由(5)可推得调整 n 次后的回采率:

$$p_n = p_0 + (2p-1)n \quad (6)$$

根据回采率定义,资源有效开采储量可表示为:

$$S_{\infty} = p_n S_0 = [p_0 + (2p-1)n] S_0 \quad (7)$$

由方程(7)可知,资源有效可采储量与参数 p_0 , p , n , 有关:

当 $p = 1/2$ 时,即提高和降低回采率的可能性相等时,资源有效可采储量只与 p_0 有关,且是 p_0 的增函数;

当 $p < 1/2$ 时,资源有效可采储量是 p_0 , p 的增函数,是 n 的减函数;

当 $p > 1/2$ 时,资源有效可采储量是 p_0 , p , n 的增函数。

2.4 目标函数

企业以追求利润最大化为目标,其利润函数表示为:

$$J = P_t X_t - C_t(X_t) \quad (8)$$

因此,整个开采过程的目标函数为:

$$\text{Max} \int_0^T [P_t X_t - C_t(X_t)] e^{-rt} dt \quad (9)$$

2.5 最优开采模型

将(2),(3),(4)代入(9),并联立(1),(7),可得最优开采模型:

$$\begin{aligned} \text{Max} \int_0^T & (\bar{P}X_t - \frac{2+a}{2} X_t^2) e^{-rt} dt \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \dot{S}_t = -X_t \\ S_t = 0, S_0 = p_n S_0, S_T = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

3 结果分析

3.1 最优开采路径的确定

根据最优控制理论^[17],可以构造优化问题(10)的现值哈密顿函数为:

$$H_t = \bar{P}X_t - \frac{2+a}{2} X_t^2 - \lambda_t X_t \quad (11)$$

其中, λ_t 为资源的影子价格。

从而可得求解问题的一阶条件与横截条件为:

$$\dot{S}_t = \frac{\partial H_t}{\partial S_t} = -X_t \quad (12)$$

$$\dot{\lambda}_t = -\frac{\partial H_t}{\partial S_t} + r\lambda_t = r\lambda_t \quad (13)$$

$$\frac{\partial H_t}{\partial X_t} = \bar{P} - (2+a)X_t - \lambda_t = 0 \quad (14)$$

$$[H_t]_{t=T} = 0 \quad (15)$$

其中,方程(12),(13)分别表示资源储量、影子价格的运动方程。方程(14)表示优化开采问题(10)解存在的一阶条件(必要性)。根据前面假设可知目标函数是凹的,确保优化问题(10)具有唯一解。方程(15)是终端时间是自由的横截条件。

由(14)可得:

$$\lambda_t = \bar{P} - (2+a)X_t \quad (16)$$

代入(13),得如下微分方程:

$$(2+a)\dot{S}_t - r(2+a)\dot{S}_t = r\bar{P} \quad (17)$$

结合边界条件: $S_0 = [p_0 + (2p-1)n] S_0$, $S_T = 0$ 。可得:

$$\lambda_t = \frac{[\bar{P}T - (2+a)S_0]r}{e^{rT} - 1} e^{rt} \quad (18)$$

$$X_t = \frac{\bar{P} - \frac{[\bar{P}T - (2+a)S_0]r}{e^{rT} - 1} e^{rt}}{2+a} \quad (19)$$

根据 $X_T = 0$ 可知 T 是由如下方程决定:

$$\bar{P}e^{-rT^*} = \bar{P} + r(2+a)S_0 - r\bar{P}T^* \quad (20)$$

令 $y_1 = \bar{P}e^{-rT^*}$, $y_2 = \bar{P} + r(2+a)S_0 - r\bar{P}T^*$, 通过图解法可以确定 T^* 的唯一解(如图1)。

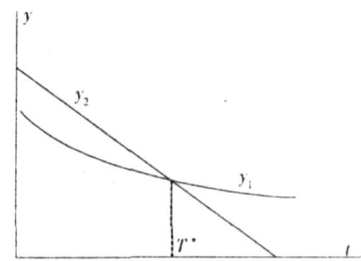


图1 耗竭时间 T^* 的确定

3.2 数值分析

由(18),(19)可见,资源影子价格是有效可采储量的减函数,最优开采量是有效可采储量的增函数,也是调整后回采率的增函数。

文中以煤炭开采为例说明各参数对资源最优开采的影响。我国煤炭资源储量丰富,在所有工业里一次能源的70%左右倚重于它。2005年4月开展的全国煤炭资源回采率专项检查表明,2004年全国

煤矿平均矿井回采率仅为 46%, 大型、中小型和小煤矿分别为 48%、43%、40%, 而发达国家平均矿井回采率达到 70% 以上。

现有煤矿储量 $S_0 = 10000$, 其它参数分别取 $\bar{P} = 500$, $r = 0.1$, $a = 0.5$, 以我国的矿井平均回采率为初始回采率, 为了计算方便, 取 $\alpha_0 = 45\%$, 以发达国家平均水平为调整上限, 取 $\alpha_n = 70\%$, 由于提高回采率有利于节约资源, 提高资源的利用率, 并由 (6) 知, $p > 1/2$ 。针对不同的调整目标和调整幅度分析各参数对资源最优开采量及最优耗竭时间的影响。调整目标取 50%、55%、60%、65% 和 70%, 调整幅度取 5%, 在回采率提高的不同概率下, 调整次数、最优开采路径和最优耗竭时间如表 1 所示:

表 1 参数对结果的影响

		p 的取值					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1	
n 的 取 值	50 %	n	5	2	1	1	1
		T^*			34		
		X_t			$200 - 2.5e^{0.1t}$		
	55 %	n	10	5	3	2	2
		T^*			37		
		X_t			$200 - 1.9e^{0.1t}$		
	60 %	n	15	7	5	3	3
		T^*			39		
		X_t			$200 - 1.5e^{0.1t}$		
	65 %	n	20	10	6	5	4
T^*				42			
X_t				$200 - 1.2e^{0.1t}$			
70 %	n	25	12	8	6	5	
	T^*			44			
	X_t			$200 - 0.9e^{0.1t}$			

类似地, 可以分析 $\alpha = 10\%$ 等其它情形。

由表 1 可知: (1) 当调整的回采率越高时, 该煤矿耗竭的时间越长, 这说明提高回采率可以延长矿井的服务期限; (2) 资源的最优开采路径也因回采率不同而不同, 高的回采率对应于高的开采量, 这说明了提高回采率可以增加每个时期的资源产出量, 提高资源的利用率; (3) 当提高回采率的概率相同时, 需要多次调整才能获得高回采率, 而当提高回采率的目标一定时, 调整次数随概率的提高而减少; (4) 根据开采路径的表达式可知, 往往具有较大的初始开采量, 如果企业的生产能力有限, 无法满足初始开采量, 则以最大生产能力进行开采, 直到满足优化值时, 再按最优路径开采, 相反若生产能力过剩, 则会按最优开采路径开采, 这说明了资源开采是依从最适接近路径 (Most rapid approach path, 即 MARP) 进行的。

这些结论验证了模型推导所得结论的正确性, 也验证了当前政府提高资源回采率政策的有效性。

3.3 结果讨论

以上结果是基于特殊的假设条件获得的, 当条件发生变化, 结果也会发生相应的变化。

(1) 当企业为了保持生产连续时而拥有库存, 使得市场不再出清, 这就需要区分销售与生产两个时期, 文中的结论可直接应用于分析销售过程, 而研究最优开采需从成本角度入手, 在资源耗竭理论研究和实证分析中往往忽视此类问题, 可能是因为问题的复杂性; 运输瓶颈也会使市场出清存在问题, 在研究煤炭问题时最为关注的就是运力不足问题, 除了加快铁路建设和其它相关制度的建立外, 还可以针对当前的运输制约问题, 合理安排资源开采, 调整最优开采行为。

(2) 成本函数在资源耗竭理论研究中起到非常重要的作用。随着技术水平的提高和科技进步, 勘探发现更多的储量及新资源 (如海洋资源), 都会降低开采成本。而现有研究中成本与储量大小关系并不明确, 剩余储量往往也会影响开采成本, 必然影响到资源最优开采的研究。

(3) 价格接受者及完全竞争市场假设也受到质疑。将问题推广到垄断市场, 只需将价格变化为边际收益, 最优开采问题就可得到解决, 而在讨论其它市场结构, 如垄断竞争和寡头垄断等, 还需借助博弈理论, 探讨各利益相关者间的战略互动效应, 使得最优开采问题更接近实际。

4 结语

可耗竭资源将随着人类的不断开采而最终耗尽。若过早耗竭, 即在找到替代资源之前耗竭, 必然会影响到社会经济的可持续发展。从提高回采率的角度研究了资源的有效可采储量, 探讨储量不确定下资源的最优开采行为。研究表明, 资源有效可采储量和资源耗竭时间随回采率提高而提高及延长; 回采率调整次数与提高回采率的可能性有关, 在概率一定时, 高回采率需要进行多次调整; 当回采率确定后, 提高回采率的概率越高, 需要调整的次数越少。这些结论是在完全竞争市场中获得, 也很容易推广到垄断市场。结论是在 U 型成本和无存货的假定下得到, 对回采率的调整成本没有进行分析, 这可以包含在对成本函数的进一步讨论中。文中是针对企业利润最大化展开讨论, 需拓展到对社会福利最大化的研究。

参考文献:

- [1] G. C. Loury. The Optimal Exploitation of an Unknown Reserve[J]. Review of Economic Studies, 1978, 45 (141): 621 - 636.
- [2] R. J. Gilbert. Optimal Depletion of an Uncertain Stock [J]. Review of Economic Studies, 1979, 46(142): 47 - 57.
- [3] R. S. Pindyck. Uncertainty and Exhaustible Resource Markets[J]. Journal of Political Economy, 1980, 88(6): 1203 - 1225.
- [4] D. Martin & F. T. Sparrow. The Treatment of Uncertainty in Mineral Exploration and Exploitation[J]. Annals of Operations Research, 1985, (2): 271 - 284.
- [5] A. Epaulard & A. Pommeret. Optimally Eating a Stochastic Cake: a Recursive Utility Approach [J]. Resource and Energy Economics, 2003, 25(2): 129 - 139.
- [6] R. C. Kumar. How Long to Eat a Cake of Unknown Size? Optimal Time Horizon under Uncertainty[J]. Canadian Journal of Economics, 2002, 35(4): 843 - 853.
- [7] R. C. Kumar. How to Eat a Cake of Unknown Size: A Reconsideration[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2005, 50(2): 408 - 421.
- [8] J. A. Krautkraemer. The Cut - off Grade and the Theory of Extraction[J]. Canadian Journal of Economics, 1988, 21(1): 146 - 160.
- [9] T. Shinkuma & T. Nishiyama. The grade selection rule of the metal mines: an empirical study on copper mines [J]. Resources Policy, 2000, 26(1): 31 - 38.
- [10] A. Marvasti. Resource Characteristics, Extraction Costs, and Optimal Exploitation of Mineral Resources [J]. Environmental and Resource Economics, 2000, 17 (4): 395 - 408.
- [11] M. C. Kemp & N. V. Long. Extracting Several Resource Deposits of Unknown Size: Optimal Order. <http://www.cirano.qc.ca/pdf/publication/2007s-10.pdf>.
- [12] J. Gowdy & R. Juliá. Technology and petroleum exhaustion: Evidence from two mega - oilfields[J]. Energy, 2007, 32(8): 1448 - 1454.
- [13] 任一鑫, 李英德, 孙丕悦等. 资源回采率与费用关系研究[J]. 矿冶工程, 2006, 26(3): 88 - 91.
- [14] 刘新梅, 徐润芳, 燕方. 提高煤炭资源总回采率的税费征收方式[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2008, 28(2): 19 - 21, 26.
- [15] 李英德, 谢芳, 蒋金泉. 煤炭资源最佳回采率的经济分析[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(3): 78 - 81.
- [16] A. V. Kneese & J. L. Sweeney. Handbook of Natural Resource and Energy Economics (Volume) [M]. Elsevier Science Publishers B. V., 1993: 761 - 762.
- [17] 蒋中一著, 王永宏译. 动态最优化基础[M]. 北京: 商务印书馆, 1999: 252 - 255.

Study of Impact on Optimum Extraction of Exhaustible Resources under Stock Uncertainty

GE Shi-long, ZHOU De-qun, CHEN Hong-tao

(College of Economics and Management, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Recovery rate is an important parameter of stock uncertainty. Using the probability of improved recovery rate, the number and extent of adjustment and the new recovery rate, recovery rate uncertainty is described. Then effective recoverable stock is determined. In the end, the model of optimal extraction of exhaustible resources is built by using the theory of optimal control. The expressions of optimal extraction path, shadow prices and exhaustible time are received. The results show that: the higher recovery rate is, the more resources are supplied and the longer service life of mining area is gained. Also the resources can be protected; higher recovery rate need more frequent to adjust. When probability of improved recovery rate is high, less frequency of adjustment is required. And it is proved in theory that the action to increase recovery rate is effective.

Key words: exhaustible resources; recovery rate; effective stock; exhaustible time