

# 低碳转型下的技术发展路径选择

## ——基于技术学习、不确定性与碳税的分析

迟春洁,马铁驹

(华东理工大学 商学院,上海 200237)

**摘要:**通过建立一个内生技术变化的优化模型,考察了在不确定的技术学习、确定性的技术学习以及不确定的碳税3种情况下,向低碳经济转型的技术发展路径选择问题。研究表明,通过选择适当的技术发展路径,可以有效减少减排成本和碳排放,实现向低碳经济转型。技术学习是产生这种最优技术发展路径的关键因素,技术学习的不确定性会扩大不同技术发展路径之间的差异,而不确定的碳税则缩小了这些技术发展路径的差异。

**关键词:**技术发展路径;不确定性;技术学习;碳税

**DOI:**10.6049/kjbydc.2011050433

**中图分类号:**F062.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-7348(2012)12-0001-04

## 0 引言

由于日益明显的全球气候变化,以减碳为目的的低碳经济发展模式正逐步成为世界各国的共识。尽管英国政府于2006年10月发布《气候变化的经济学:斯特恩报告》,对全球气候变化的经济影响做了较权威的定量评估,指出如果目前全球每年以GDP1%的减排成本投入,可以避免将来每年5%~20%的GDP损失,呼吁全球尽早向低碳经济转型<sup>[1]</sup>。但是,温室气体减排是否会给经济带来负面影响仍然存在争论。Elzen等<sup>[2]</sup>认为不同地区面临不同的减排成本,要以可接受的成本实现碳减排需要对未来的减排体制进行设计。有研究表明,以2006年的GDP计算,我国由高碳经济向低碳经济转变,年需资金250亿美元,这对我国显然是一个沉重负担,这还不考虑短期内对经济增长的影响产生的巨大成本<sup>[3]</sup>。陈文颖等<sup>[4]</sup>应用我国MARKAL-MACRO模型模拟的结果表明,碳减排率越高,对GDP增长的冲击强度越大,持续时间也越长。当减排率在0~45%时,由于碳减排造成的GDP损失率在0~2.5%。在相关研究的基础上,本文构建了一个高度形式化的内生技术变化优化模型,分别考虑不确定的技术学习、确定性的技术学习以及不确定的碳税情况下,是否存在一条最优的技术发展路径,以比较小

的代价获得碳减排,从而实现低碳经济转型。

## 1 内生技术变化优化模型构建

### 1.1 模型的基本框架

本文所构建的内生技术变化优化模型基于Grubler、Gritsevskiy等<sup>[5,6]</sup>的研究上。模型假定只存在一种主要资源,其开采成本作为资源消耗的函数随时间不断增加。同时,假定经济需要某一种同质产品,且需求随着时间而增加。在模型中,存在3种技术将主要资源转化成经济所需要的产品: $T_1$ —现有技术; $T_2$ —增量技术; $T_3$ —革命性技术。现有技术(如煤电厂)是完全成熟的技术,效率比较低但初始投资成本也较低,其成本和效率不随时间而改变,而且会产生大量的污染。增量技术(如燃气涡轮机)具有较高的效率,初始投资成本也较高,会产生较少的污染。革命性技术(如光伏电池)以更高的初始投资成本获得比前两种技术高得多的效率,而且几乎没有污染。增量技术和革命性技术具有技术学习的潜力,这意味着它们的初始投资成本未来会不断降低。技术学习是非常不确定的,本文采用的技术学习率是在对数正态分布确定的均值基础上设定一个不确定性的范围。增量技术的学习率均值假定为10%,而革命性技术的学习率均值为30%。

收稿日期:2011-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(70901026);教育部人文社会科学基金项目(10YJC630032)

作者简介:迟春洁(1978—),女,山东烟台人,博士,华东理工大学商学院讲师,研究方向为能源技术系统演化;马铁驹(1975—),男,江苏常州人,华东理工大学商学院教授、博士生导师,研究方向为能源系统分析、基于Agent的建模。

模型的目标函数是得到最小化的经济系统总贴现成本。目前,普遍采用的一种处理不确定性的方法是在目标函数中,用主观设定的风险系数来考虑由于高估了技术学习率而带来的期望风险成本。本文采用的就是这种最普遍的做法。模型的具体表达公式如下:

3 种技术所生产的年总产量首先必须满足外生给定的需求:

$$d^t \leq \sum_i x_i^t, i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中,  $d^t$  为  $t$  时刻的需求;  $x_i^t$  为技术  $i$  在  $t$  时刻的总产量。用  $\eta_i$  表示技术  $i$  的转化效率,那么每种技术所消耗的资源总和就是资源的年开采量  $r^t$ :

$$r^t = \sum \frac{1}{\eta_i} x_i^t (\eta_i \leq 1) \quad (2)$$

因此,资源的累计开采量可表示为:

$$\bar{r}^t = \sum_{j=1}^t r^j \quad (3)$$

用  $y_i^t (i=1, 2, 3)$  表示技术  $i$  在时间  $t$  的年新装机容量,则技术  $i$  在时间  $t$  的总装机容量可以用下式来计算:

$$C_i^t = \sum_{j=t-\tau_i}^t y_i^j \quad (4)$$

其中,  $\tau_i$  是技术  $i$  的工厂寿命。

技术  $i$  在时间  $t$  的累计装机容量  $\bar{C}_i^t$  为:

$$\bar{C}_i^t = \sum_{j=-\infty}^t C_i^j = \sum_{j=1}^t C_i^j + \bar{C}_i^0 \quad (5)$$

其中,  $\bar{C}_i^0$  表示技术  $i$  的初始装机容量。

资源的开采成本计算公式是:

$$c_E^t = c_E^0 + k_E r^t \quad (6)$$

其中,  $c_E^t$  表示时刻  $t$  每单位资源的开采成本;  $c_E^0$  表示初始开采成本;  $k_E$  是一个常数系数。

增量技术和革命性技术的投资成本会随着累计已装机容量的增加而增加,具体计算公式如下:

$$c_{Fi}^t = c_{Fi}^0 \times (\bar{C}_i^t)^{-b} \quad (7)$$

其中,  $1-2^{-b}$  为技术  $i$  的学习率,  $2^{-b}$  是进步率,  $c_{Fi}^0$  是技术  $i$  的初始成本。

本文用跨期优化来得到最小化的总贴现成本。模型的时间跨度为 1990—2090 年,10 年为 1 步。贴现率设定为 5%。模型通过一个足够大的样本  $M$  进行求解,  $M$  值是通过连续的实验确定的,即比较同样样本大小的几个连续重复运算结果,如果解没有太大变化,同时目标函数可以求解,那么就可以认为  $M$  是足够大的样本,详见 Messner<sup>[7]</sup>。

下面分 3 种情况来比较经济系统的技术发展路径和碳排放。

(1) 考虑技术学习的不确定性。如果考虑技术学习的不确定性,那么目标函数由 3 部分组成,具体公式如下:

$$\min \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t (c_{Fi}^t y_i^t + c_{OMi} x_i^t) + \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t c_E^t r^t$$

$$+ \rho \{ E \{ \sum_{t=1}^T \max \{ 0, [c'_{F3}(\phi) - c'_{F3}] y_3^t \} \} \} \quad (8)$$

约束条件为:

$$d^t \leq \sum_{i=1}^3 x_i^t \quad (9)$$

$$x_i^t \leq C_i^t \quad (10)$$

$$x_i^t \geq 0 \quad (11)$$

$$y_i^t \geq 0 \quad (12)$$

其中,  $T$  为所考察的时间跨度;  $\delta$  是贴现率;  $c_{OMi}$  为技术  $i$  的运营维护成本;  $\rho$  是决策者的风险态度(该值比较小时表示冒险态度,比较大时表示风险厌恶的态度);  $c'_{F3}(\phi)$  为随机变量,  $\phi$  表示从一个对数正态分布的概率空间得到的值,  $c'_{F3}$  是该对数正态分布的均值;  $E$  为期望值。

(2) 考虑确定性的技术学习。为了比较是否考虑技术学习的不确定所带来的差异,从上述目标函数中去掉风险成本,只考虑确定性的技术学习。这时,目标函数就变成了:

$$\min \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t (c'_{Fi} y_i^t + c_{OMi} x_i^t) + \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t c_E^t r^t \quad (13)$$

约束条件同上。

(3) 考虑不确定的碳税。为了考察碳税对技术发展路径和碳排放的影响,在模型中假设是否引入碳税是不确定的,其概率为 0.33。同时,何时引入碳税也是不确定的。因此,目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t (c'_{Fi} y_i^t + c_{OMi} x_i^t) + \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+\delta}\right)^t c_E^t r^t + p^{bx} \{ p^t \{ \sum_{t=t_0}^T \sum_{i=1}^3 c_i \frac{\lambda_i}{\eta_i} x_i^t + \rho \{ E \{ \sum_{t=t_0}^T \max \{ 0, \sum_{i=2}^3 \{ [c(\omega) - c] x \} \} \} \} \} \} \} \quad (14)$$

约束条件同上。

其中,  $p^{bx}$  是引入碳税的概率;  $p^t$  表示如果引入碳税,在时刻  $t_0$  前引入的概率;  $c_i$  是不确定碳税的均值;  $\lambda_i$  表示技术  $i$ ; 生产和消费每单位产品所产生的碳排放;  $c_i(\omega)$  是随机变量,  $\omega$  是从服从 Weibull 分布的概率空间中得到的值。

## 1.2 未来技术与碳排放的基准方案

模拟的基准方案中各个参数的初始值如表 1 所示。

## 2 低碳经济转型成本对碳排放的影响

(1) 考虑技术学习的不确定性。考虑不确定的技术学习的优化模型通常产生非线性、非凸的随机优化问题。相对于传统的优化问题,难以找到全局最优的解决方案。在这种情况下,模拟得到了 3 种技术发展路径,其中两条路径非常类似。为简化起见,本文只比较了两种差异较大的情况。

表 1 基准方案的参数值

	3 种技术的相关参数		
	现有技术	增量技术	革命性技术
初始投资成本(美元 / 千瓦)	$c_{F1} = 1\ 000$	$c_{F2} = 2\ 000$	$c_{F3} = 3\ 000$
效率	$\eta_1 = 30\%$	$\eta_2 = 40\%$	$\eta_3 = 90\%$
工厂寿命期(年)	$\tau_1 = 30$	$\tau_2 = 30$	$\tau_3 = 30$
初始总装机容量(千瓦)	$C_1^0 = 100$	$C_2^0 = 0$	$C_3^0 = 0$
初始累计装机容量(千瓦)	$C_1^0 = 100$	$C_2^0 = 1$	$C_3^0 = 1$
运营维护成本(美元 / 千瓦)	$C_{OM1} = 30$	$C_{OM2} = 50$	$C_{OM3} = 50$
学习率均值 1	$b_1 = 0$	$b_2 = 0.152\ 0$	$b_3 = 0.514\ 6$
	$1 - 2^{-b_1} = 0$	$1 - 2^{-b_2} = 10\%$	$1 - 2^{-b_3} = 30\%$
年需求增长率	$\alpha = 2.6\%$		
初始需求(千瓦年)	$d_0 = 100$		
初始开采成本(美元 / 千瓦)	$c_E^0 = 100$		
开采成本系数	$k_E = 0.01$		
时间跨度	$T = 100$ , 决策周期为 10 年		
贴现率	$\delta = 5\%$		
风险系数	$\rho = 1$		

图 1 对比了这两种情况下 3 种技术的市场份额演变。在第一种情况中, 革命性技术从 2020 年开始出现, 经过缓慢的增长之后, 市场份额自 2060 年开始突破性增长, 并最终在 2090 年达到 100%。而在第二种情况中, 革命性技术至始至终都没有出现, 增量技术从 2030 年开始在市场上占据了统治地位。实际上, 这两种完全不同的技术发展路径具有类似的成本: 第二种情况的总贴现成本是第一种情况的 98%。

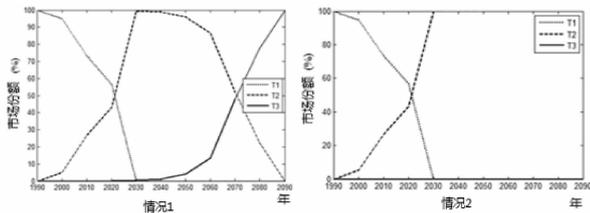


图 1 考虑不确定的技术学习时 3 种技术的市场份额

同时, 这两种不同的技术发展路径也带来了完全不同的碳排放轨迹。本文假定现有技术和增量技术的碳排放系数为 0.8, 革命性技术的碳排放系数为 0, 得到的结果如图 2 所示。可以看到, 第一种情况由于出现了革命性技术, 碳排在 2060 年达到顶峰之后就逐步下降, 直至 2090 年, 基本上降到了 1990 的水平。而第二种情况由于没有出现革命性技术, 碳排放始终在增加。

(2) 考虑确定性的技术学习。如果只考虑确定性的技术学习, 模拟得到了两种差异比较大的情况, 如图 3 所示。在这两种情况中, 都出现了革命性技术。其主要的差别是革命性技术占据统治性地位的时间有所不同。第一种情况中, 革命性技术在 2060 年达到顶峰, 比第二种情况的 2050 年晚了 10 年。而这两种情况的总成本也是类似的(第一种情况的总贴现成本是第二种情况的 99%)。与考虑不确定性的技术学习相比较, 确定性的技术学习总是会带来革命性技术的采用。而技术学习的不确定性则延迟了对革命性技术的投资, 当

然也就延迟并减少了对碳排放的积极作用。

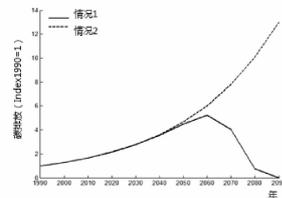


图 2 考虑不确定的技术学习时碳排放路径

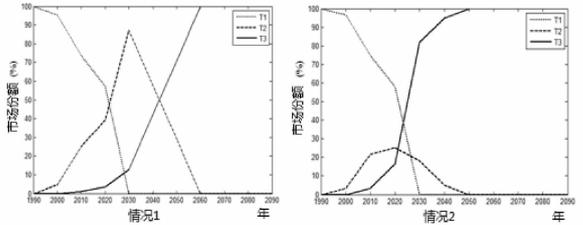


图 3 考虑确定的技术学习时 3 种技术的市场份额

图 4 显示了这两种情况下的碳排放路径。由于第一种情况革命性技术占据统治性地位比第二种情况晚了 10 年, 相应地, 碳排放也就比第二种情况晚了 10 年才达到顶峰, 并分别于 2040 年和 2060 年降到了 1990 年的水平, 与不确定的技术学习的情况相比, 早了近 30~50 年。

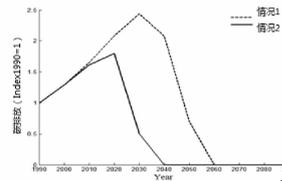


图 4 考虑不确定的技术学习时碳排放路径

(3) 考虑不确定的碳税。在考虑确定性的技术学习的基础上, 又在目标函数中引入了不确定的碳税。这种情况下的所有模拟结果如图 5 所示。可以看到, 革命性技术总会被采用, 基本上会在 2040—2050 年间占据 100% 的市场份额。同时, 这种情况下不同解之间的差异在缩小。图 6 显示了所有的碳排放路径。基本上, 在 2025 年左右碳排放会达到顶峰, 然后急剧下降, 在 2030—2040 年间降到 1990 年的水平。

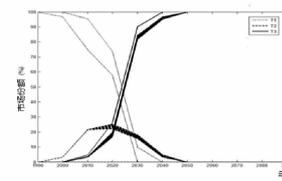


图 5 考虑不确定的碳税时 3 种技术的市场份额

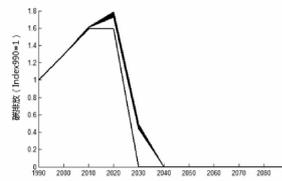


图 6 考虑不确定的碳税时碳排放路径

### 3 结论

通过本文的研究,得到以下几个重要的结论:

(1)未来温室气体排放取决于技术发展路径选择。存在一种最优的技术发展路径,并可以用较低的宏观经济成本把大气中的温室气体浓度稳定在较低水平。

(2)技术学习的不确定性会延迟对革命性技术的投资和采用,加大最优解的差异。而确定性的技术学习总是会带来革命性技术的采用。换句话说,由于技术学习本身而不是技术学习的不确定性的存在,带来了不同的技术发展路径。两个完全不同的技术发展路径可能有着类似的总成本,碳排放却完全不同。这意味着,我们可以实现向低碳经济的转型,而并不花费额外的成本。学习本身带来了上述的成本类似,而碳排放却大大减少的最优技术发展路径。

(3)引入碳税可以使革命性技术总是得到采用,并且不同技术发展路径之间的差异在缩小,这样可以更有效地、更快地实现向低碳经济的转型。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers of IPCC fourth assessment report[R]. Working Group II, 2007.
- [2] MICHEL DEN ELZEN, PAUL LUCAS, DETLEF VAN VUUREN. Abatement costs of post-Kyoto climate regimes [J]. *Energy Policy*, 2005(33):213-315 1.
- [3] 胡初枝,黄贤金,钟太洋,等. 中国碳排放特征及其动态演进分析[J]. *中国人口资源与环境*, 2008,18(3):38-42.
- [4] 陈文颖,高鹏飞,何建坤. 二氧化碳减排对中国未来 GDP 增长的影响[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2004,44(6):744-747.
- [5] GRUBLER A, NAKICENOVIC A. A model of endogenous technological change through uncertain returns on innovation[J]. *Technological Change and the Environment*, 2002, 12(5):280-319.
- [6] TIEJU MA. Coping with uncertainties in technological learning [J]. *Management Science*, 2010,56(1):192-201.
- [7] MESSNER S. Endogenized technological learning in an energy systems model[J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 1997,7(3):291-313.

(责任编辑:赵 可)

## The Technology Development Path Selection under Transition to A Low-carbon Economy

——Based on Technological Learning, Uncertainty and Carbon tax

Chi Chunjie, Ma Tieju

(School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** This article examines how the uncertain technological learning, deterministic technological learning and uncertain carbon tax affect the technology development path and carbon emissions of the transition to low-carbon economy through an endogenous technological learning optimal model. Results show that the transition to low-carbon economy can be realized by choosing appropriate technology development path to decrease the costs and emissions. Technological learning is a key factor to generate such optimal path and the uncertainty in technological learning can expand the divergence between the technology development path. However, the uncertain carbon narrows the divergence.

**Key Words:** Technology Development Path; Uncertainty; Technological Learning; Carbon Tax