

能源技术的学习曲线研究^{*}

■ 耿妍丽 邹骥^{**} 许光清 王克 / 中国人民大学环境学院

摘要 能源技术学习曲线是基于“经验能改进技术表现”这一基本假设,刻画了技术需求(市场)和技术供给(研发)两种力量对技术进步的影响。由于学习曲线为衡量内生技术变动提供了一个重要指标——学习率,因此在国际上越来越多的学者在关注这方面的研究。本文从方法学、研究进展和存在的问题三个方面详细介绍了国外对能源技术学习曲线的研究。

关键词 学习曲线 技术学习 能源技术

监理单位主要依靠经验,在质量控制尺度的掌握上容易产生较大差异,不仅不利于环保要求的落实,也不利于监理工作的考核与监督。因此,迫切需要研究制订出工程环境监理工作规范,完善技术标准体系,确立考核与验收指标,既为工程环境监理开展提供依据,也为考核监理单位工作成效提供标准,使得各项措施更加合理、可行、有效。另外,由于工程环境监理单位为第三方技术咨询机构,经济效益的好坏是影响其发展的重要因素,因此,必须尽快制定符合建设方和工程环境监理单位合法权益的收费标准,确保监理单位顺利发展,促进工程环境监理行业有序繁荣。

3.4 加强技术交流与培训,提高从业人员业务水平

工程环境监理是一项综合性很强

的工作,对从事该项工作的专业技术人员来说,不但要具备环境保护工程与技术方面的专业知识,还要具备工程技术方面的专业知识,更要熟悉环境保护的法律、法规。因此,建立工程环境监理制度,必须培养一批既有环境保护技能又懂工程监理的复合型专业技术人员^[4]。现阶段,我国工程环境监理仍处于发展的初级阶段,进行经验交流和技术培训无疑是提高从业人员业务水平的有效手段,而工程环境监理技术培训班又可以提供交流与培训的平台。因此,应大力举办工程环境监理技术培训班,充分借鉴环境影响评价技术人员培训的成功经验,开展工程环境监理上岗培训,并编写工程环境监理培训教材,推动工程环境监理技术人员数量满足行业需求;充分利用现有与工程环境监理工作相关的职业资格制度,通过对环评工程师、监

理工程师、环保工程师等专业技术人员的培训,使其成为工程环境监理高级专业人才。在各层次人员数量有一定积累的基础上逐步实现工程环境监理技术人员与工程环境监理单位资质挂钩。^①

参考文献

- [1] 虞涛. 工业类项目实行环境监理的初步实践和思考[J]. 环境科学与管理, 2007, 10:8-10.
- [2] 曹晓红, 李继文. 建设项目工程环境监理中的问题和建议. [J] 环境与可持续发展, 2006, 2:14-15.
- [3] 杨超, 鲍炯炯, 夏文健. 工程环境监理在环境保护管理中的作用及前景展望. [J] 环境污染与防治, 2008 (5): 104-105.
- [4] 谢建宇, 马晓明. 工程环境监理与工程监理的比较及发展建议. [J] 四川环境, 2007, 2:109-112.

^{*} 基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAC03A07)。

^{**} 通讯作者。

广泛地采用环境友好型的能源技术,被认为是减少现代能源系统对气候和环境影响的一个非常有效的手段和途径。目前,虽然存在着多种清洁的能源技术,但是由于这些技术通常都比传统能源技术的成本高,它们大多数还不能被广泛地使用。如何去推动这些技术的发展?首先必须要分析技术变动的趋势,从而能帮助我们决定重点发展哪些技术,并且采取怎样的措施去推动技术发展。

目前,国际上广泛采用学习曲线的方法去衡量技术变动。学习曲线的实证研究最早是由Wright用于研究飞机制造业的学习情况。后来,在1968年Boston Consulting Group (BCG)将学习曲线运用到管理科学的相关研究中。自此以后,这一方法被广泛应用到多个领域的研究,比如化工行业、纺织品生产等。从20世纪90年代开始,由于能源技术政策分析的需要,学习曲线被广泛用于估计能源技术的学习率,用学习率来衡量内生技术变动。能源技术的学习曲线主要是刻画了成本下降和累积生产量或累积研发投入之间的关系。技术的成本被认为在一段时间内会以一定的百分比下降。这个百分比被称作学习率,表示当经验翻倍时成本下降的比例。

1 技术学习曲线的方法学

学习曲线是基于技术学习这一现象发展而来的。技术学习是指随着技术越来越多地被使用,逐渐积累的经验将改进技术的表现。为了解释这一现象,人们从理论上提出了四种技术机制:做中学,研究中学,用中学,交流中学。

然而,在实证研究中,学习曲线目前仅能刻画做中学和研究中学这两种机制。早期的学习曲线用于描述累积生产量对技术成本的影响,仅反映了做中学

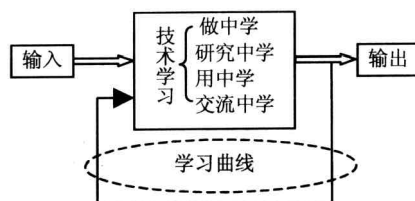


图1 技术学习的基本模型

这一技术学习机制,被称为单因子学习曲线。其方程形式可以采用指数形式或者对数形式,如(1)、(2)式:

$$C(Q) = C_0 Q^{-\partial} \quad (1)$$

$$\log C(Q) = \log C_0 - \partial \log Q \quad (2)$$

其中 $C(Q)$ 表示使用某项技术的单位成本, C_0 表示使用某项技术的第一单位产量的成本, Q 表示累积生产量, ∂ 是做中学的学习参数。学习率定义为 $1-2^{-\partial}$,表示当累积产量翻倍时技术成本下降的比例。与学习率相对应的概念是进步率,表示为 $2^{-\partial}$ 。比如,20%的学习率对应于80%的进步率,分别表示当累积产量翻倍时,某项技术的成本会下降20%,即是原来水平的80%。

后来,一些学者开始考虑如何用学习曲线去量化研究中学对技术成本的影响,从而学习曲线有单因子扩展到双因子。其方程形式也有指数和对数两种形式,如(3)、(4)两式:

$$C(Q, K) = C_0 Q^{-\partial} K^{-\beta} \quad (3)$$

$$\log C(Q, K) = \log C_0 - \partial \log Q - \beta \log K \quad (4)$$

其中 K 表示知识存量, β 表示研究中学的学习参数。由研究中学导致的学习率为 $1-2^{-\beta}$,相应的进步率为 $2^{-\beta}$ 。

2 能源技术学习曲线的研究情况

将学习曲线应用到能源技术最早可以追溯到20世纪70年代早期。在大量的研究中,学习曲线最普遍的形式是单因子方程。但是,随着研究的深入,一些学者对单因子方程形式提出了质

疑,认为这种形式的学习曲线在帮助认识能源技术变动过程方面存在着较大的局限性。Jamasb, T指出单因子学习曲线仅仅只考察了技术需求对技术进步的影响,而没有反映技术供给对改进技术表现的影响,从而会造成对“做中学”学习率的估计出现偏差^[1]。Söderholm, P., Sundqvist, T.根据不同模型估计风电技术学习率的结果,指出用单因子方程估计的结果对数据和变量十分敏感,在理解和运用这些结果应当谨慎^[2]。因此,在近年来的研究中,学习曲线已经从单因子方程扩展到包含“研究中学”的双因子方程。Kouvariatakis et al.首先提出把累积研发投入同累积产量一起作为降低技术成本的主要驱动力^[3]。随后,Klassen et al., Kobos et al., Jamasb, Söderholm and Klaassen都使用双因子学习曲线分析能源技术的成本变动^[4]。他们的研究表明运用双因子方程估计的“研究中学”学习率普遍高于相应的“做中学”学习率,这意味着相对于增加技术使用,加强研发投入更有利于改进技术表现。并且,一些研究者比较了分别使用单因子和双因子学习曲线所估计的“做中学”学习率,结果表明前者都高于后者。他们认为这是由于单因子学习曲线没有考虑研发投入对技术成本的影响,重要变量的遗漏导致“做中学”学习率被过高地估计。

能源技术学习率的估计值是能源技术学习曲线的核心。它被认为是衡量内生技术变动的一项重要指标。Alan McDonald, Leo Schrattenholzer, IEA, Kahouli-Brahmi, S收集和整理了已有研究估计的能源技术学习率^[5-6]。图2表示了收集到的各种技术学习率的分布情况。从图2看出,能源技术的学习率存在着很大的差别:其最低值为-11%,而最高值则可以达到44%。并且,即使是同一种技术的学习率,不同的研究者也会得出不同的学习率估计值(图

3)。以燃气轮机联合循环电厂为例, Claeson 用 1981—1991 年的全球数据估计在这段时间技术的学习率为 -11%, 但是用 1991—1997 的全球数据研究表明其学习率为 2.6%。而 Kouvaritakis et al. 研究表明在 1984—1994 期间, 在 OECD 国家相关技术的学习率为 34%。

造成这些差异的原因是十分复杂的。目前关于这方面的讨论可以分为两大类, 即由变量的不同选择和技术在不同发展阶段对学习率估计值的影响。在变量选择方面, 实证研究中经验和技术表现可以用不同的指标来衡量: 技术表现指标最常见的是价格、生产成本和投资成本; 经验指标主要是累积生产量, 累积装机容量和累积研发投入。McDonald, A; Schrattenholzer, L 认为当燃料价格很低时, 用生产成本

估计的能源技术学习率会高于用投资成本得到的估计值。Söderholm, P., Sundqvist, T. 分别用风电的累积装机容量和累积发电量来衡量丹麦、西班牙、德国、英国在风电技术上的经验, 前者得到的学习率低于后者。最典型的例子是用价格来代替成本衡量技术表现对学习率的影响。在实证研究中, 技术成本数据常常较难获得, 一些研究者用价格来替代成本数据。但是, 价格除了受到技术自身的影响, 还受到许多非技术因素的影响。比如, Goldemberg, J. 在研究巴西乙醇生产技术的学习曲线时, 发现乙醇的价格与国际油价相关, 不能很好的反映乙醇的生产成本。Neij 发现风机的价格在早期低于实际成本, 在技术得到发展后又高于实际成本。如果用风机价格衡量技术表现, 得到的学习率会

被低估^[7-8]。IEA 在 BCG 工作的基础上扩展了用于解释价格和成本两者关系的模型(图4)。他们认为成本会以一个固定比率下降, 然而价格的变化可以分为四个阶段。在发展阶段, 生产商为了获得市场会以低于成本的价格来销售产品; 在价格保护阶段, 由于这一时期技术被少数生产商掌握, 从而生产商可以控制价格, 以高于成本的价格来获得较高的利润; 在竞争阶段, 这种技术被越来越多地生产商掌握, 少数生产商失去了控制价格的能力, 市场的力量使价格逼近于成本; 在稳定阶段, 技术已经完全商业化, 价格将和成本以同样的趋势变化。因此, 在前两个阶段, 用价格来估计的学习率是固定的, 并且低于用成本估计的学习率。在竞争阶段, 用价格估计的学习率会高于用成本估计的学习率。在最后阶段, 两种学习率会趋于相同。Akisawa 对采用新热泵空调的学习曲线的研究在一定程度上证明了 IEA 的模型^[10]。他注意到在新空调大量替代传统空调时, 价格出现了波动。如果只用这段时期后的数据去估计学习率, 得到了更高的学习率 17%。由于在这段时期后被认为进入了稳定阶段, 所以, 相比于用全部数据估计的 10%, 17% 被认为是更可靠的学习率。

另一方面, 技术的发展阶段会影响技术的学习率。一般来说, 因为市场化程度高和创新潜力有限, 成熟技术的学习率通常会低于新技术。技术学习理论将这种现象称之为“经验贬值”。基于这样的认识, Kouvaritakis et al. 在研究中使用了分段学习曲线, 并且发现当技术在成熟阶段时学习率很低。Jamassb, T 用双因子学习曲线对四类处于不同阶段技术的学习率进行了估计。其结果表明成熟技术和萌芽中技术都拥有较低的“做中学”和“研究中学”学习率; 重新被重视的技术拥有较低的“做中学”学习率, 但是有高“研究中学”

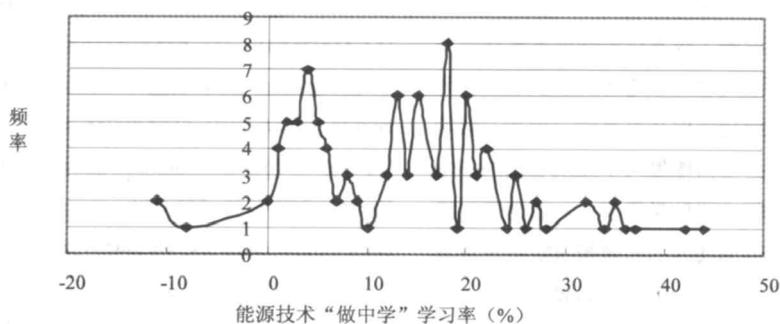


图2 能源技术学习率的分布

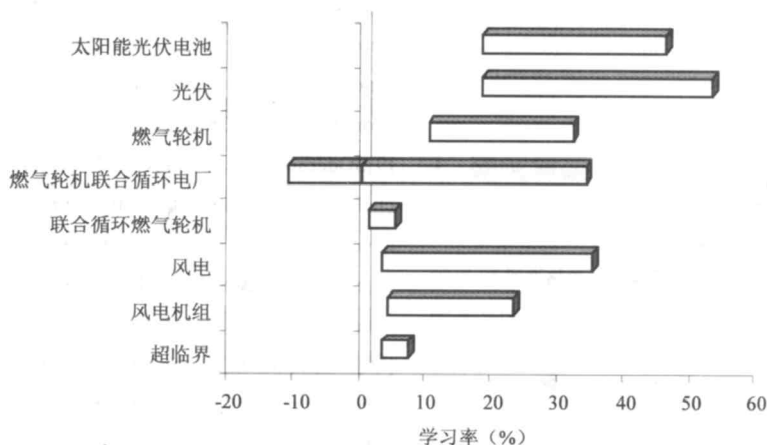


图3 几种能源技术的学习率分布

学习率；发展中技术的两种学习率都较高。但是 Jamasb, T 并没有对这样的结果给出进一步的解释。

3 能源技术学习曲线存在的问题

现在，对学习曲线的质疑主要体现在以下 3 个方面。

第一，内生关系的存在。学习曲线是基于累积生产量或累积装机容量的增加将减少成本这一假设。但是，在现实中，这样的因果关系是存在问题的。因为成本的降低常常也刺激了某种技术被更广泛的使用。这意味着技术扩散（累积生产量增加）和技术创新（成本下降）是相互影响的。在计量上反映为解释变量与干扰项相关，会造成计量结果出现偏差。

第二，其他重要变量的遗漏。学习曲线主要反映了累积生产量或累积装机容量对技术成本的影响。然而，成本的变动很可能受到与学习曲线解释变量相关的其它因素的影响，从而造成计量上的偏差。比如，规模效应和学习效应都有助于技术成本的下降，但是这两种影响很难被分开。Söderholm, P., Sundqvist, T. 认为由于难以从学习曲线中分离规模效应的影响，核电技术

的学习率会偏高。

第三，技术外溢的影响。在不同的能源技术之间，可能出现技术外溢。比如，光伏发电的技术进步会在一定程度上影响风电技术的发展。然而，目前的能源技术学习曲线的研究很少考虑了技术外溢因素。这会使得在运用分析结果进行政策分析时把技术成本下降都归功于技术的使用或研发投入。

4 结语

能源技术学习曲线是基于“经验能改进技术表现”这一基本假设，刻画了技术需求（市场）和技术供给（研发）两种力量对技术进步的影响。它的模型形式已经从单因子形式发展为双因子形式，正处在被不断完善的过程中。估计能源技术的学习率是能源技术学习曲线研究最重要的价值。需要注意的是，学习率的估计值常常存在着较大差异，并且主要反映了技术过去的成本变动，从而使得运用学习率进行技术变动分析时需要谨慎地考虑其可靠性。但是，学习率仍然是目前衡量内生技术变化的一个重要指标。借助学习率，一方面可以直接通过预测技术的扩散情况或研发投入情况预测技术的成本变动趋势，另一方

面可以将学习率运用到经济 - 能源 - 环境模型中，实现内生技术变化在模型中被更好地量化。^⑥

参考文献

- [1] IEA. Experience Curves for Energy Technology Policy[M]. International Energy Agency, Paris, France .2000.
- [2] Jamasb, T. Technological change theory and learning curves: progress and patterns in energy technologies[J]. EPRG Winter Research Seminar, University of Cambridge. 2006.
- [3] Kahouli-Brahmi, S. Technological learning in energy-environment-economy modelling: A survey[J]. energy policy 2008, 36 (1): 138-162 .
- [4] Kouvaritakis, N., Soria, A., Isoard, S., Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptative expectations model with learning-by-doing and learning-by-searching[J]. International Journal of Global Energy Issues. 2000,14(1-4), 104-115.
- [5] McDonald, A; Schrattenholzer, L, Learning rates for energy technologies[J], energy policy 2001; 29 (4): 255-261.
- [6] Neij, L. Cost dynamics of wind power[J]. Energy. 1999(24), 375-389.
- [7] Neij, L. Cost development of future technologies for power generation - A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments[J]; energy policy 2008;36 (6): 2200-2211.
- [8] Söderholm, P., Klaassen, G. Wind power in Europe: a simultaneous innovation-diffusion model[J]. Environmental and resource economics 2007(36),163-190.
- [9] Söderholm, P., Sundqvist, T. Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies[J]. Renewable energy. 2007.
- [10] Yeh, S; Rubin, ES; A centurial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers[J]; energy 2007;32(10):1996-2005.

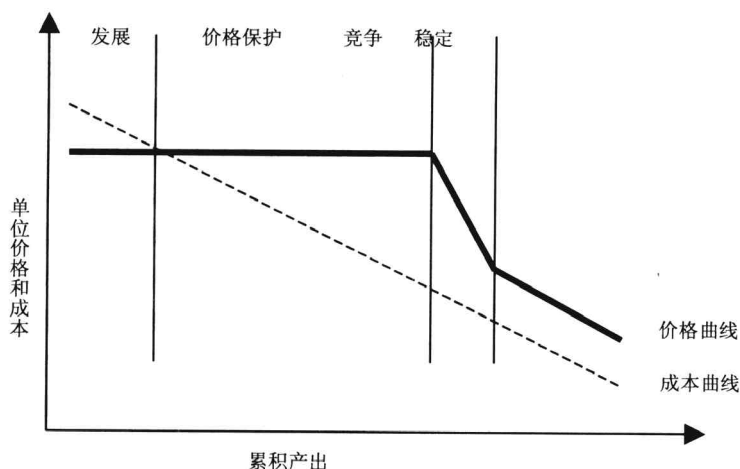


图4 成本与价格的关系^[10]