Development of Energy Science
May 2015, Volume 3, Issue 2, PP.32-41

Capital-Labor Substitution and Industrial Upgrading in China's Steel Sector

Lihong Yu*[#]*, Li Huang, Jiachen Li

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

[#]Email: ylhcumt@vip.sina.com

Abstract

Under the pressure of energy conservation and emissions reduction, industrial upgrading depends on biased technology progress, such as capital substitute for energy, clean energy substitute for fossil fuels in China's steel sector. The measure is the elasticity of substitution between energy and non-energy factors. Based on translog production, this paper builds share equations of factors and AES elasticity of substitution model of Chinese steel industry, and estimates AES elasticity of substitution between the energy and non-energy factors and fuels using the data from 1990 to 2012. The results show that there are substitution and complementary between factors. Among them, there is AES complementary between capital and energy, and very weak substitution for capital to energy. Moreover, there are great alternative between electricity and gas, while complementary relationship between coal and other fuels. Therefore, the government may promote the corresponding energy price and industrial policies, advance capital substitute for energy further, and support research and development of energy saving technology, technical reform and improve efficiency to implementation the goals of energy conservation and emissions reduction.

Keywords: AES Elasticity of Substitution; China's Steel Sector; Interfactor Substitution; Interfuel Substitution

中国钢铁产业的资本-能源替代与产业升级 *

于立宏，黄丽，李嘉晨

华东理工大学 商学院，上海 200237

摘 要：在节能减排约束强化条件下，中国钢铁产业升级依赖于能够实现资本替代能源、清洁能源替代高碳能源的有偏技术进步，而其衡量指标便是要素间和能源间的替代弹性。本文基于超对数生产函数建立了中国钢铁行业要素份额方程和 AES 替代弹性模型，并利用 1990-2012 年的数据估算了要素间以及燃料间的 AES 替代弹性以及交叉价格弹性。结果显示，钢铁行业各要素间存在替代与互补关系，其中，资本与能源间 AES 互补，资本对能源存在极弱的替代性；电和天然气之间具有较大的可替代性，而煤与其他燃料之间均为互补关系。因此，政府需要推进相应的能源价格政策和产业政策，促进资本对能源的可替代增加，支持节能技术研发、技术改造和效率提高，以达到节能减排目的。

关键词：AES 替代弹性；钢铁行业；要素替代；能源替代

引言

在经历了三十多年的高速增长后，中国经济增长中的结构问题不断累积，能源资源约束趋于强化，生态环境明显恶化，对未来经济的进一步发展带来严峻挑战，粗放型经济增长模式不可持续。调整产业结构和能源结构已成为经济发展方式转型的必由之路。然而，中国产业结构调整进展缓慢，工业能耗占一次能源消费的比重始终在 70%以上，而高耗能产业贡献了其中的 80%左右。考虑到中国目前所处的经济发展阶段，重化

*基金资助：受教育部人文社科研究一般项目（14YJA790074）、上海市哲社规划一般课题（2014BJB004）、中央高校基本科研业务费资助。

工业将在相当长时期内占据重要地位。因此，产业结构调整与升级不应只聚焦在三次产业间，更应重点关注高耗能产业内部，优化其要素投入结构、能源投入结构和产业技术演化路径。换言之，就是在中国要素资源禀赋的基本国情下，通过要素替代、能源替代来打破能源资源刚性约束和实现产业可持续发展。

在高耗能产业中，钢铁产业尤为典型。中国是世界上最大的钢铁生产国，2013 年粗钢产量达到 7.79 吨，同比增长 7.6%。然而，钢铁生产是能源密集的，从原料开采、烧结、炼铁、炼钢、轧钢到压延加工都需要消耗大量的能源，其中，煤炭占钢铁行业总体能耗的 51%，电力占 45%（70%来自煤电），而清洁的天然气仅占 3%左右。与之相比，2005 年美国钢铁业的水平是，煤炭占 60%，电力占 16%，天然气占 17%，石油占 7%；类似地，德国煤炭占 55.8%，电力占 15.3%，天然气占 8.2%，石油占 20.7%（王维兴，2009）。不难看出，与先进国家钢铁行业的能源结构相比，中国在石油和天然气上的消耗很少。另外，我国所使用的煤炭质量标准和国际水平也存在差距，热值低于发达国家水平，致使煤炭的转换效率更低，这些都导致中国钢铁行业吨钢综合能耗较高，加之煤炭中含有较高的灰分、硫、氮等，生产过程中会产生大量的固体废弃物、SO_2、NO_x等。因此，钢铁产业又是高污染产业。

现代炼钢技术的演化体现为资本替代劳动、煤炭替代木材、电力替代水力和蒸汽机、氧气替代空气、电力替代煤炭、天然气替代煤炭或电力的过程；此外，由于连铸连轧技术的突破，也使得钢铁产业中使用的能源逐步减少。当然，初始的技术选择依赖于要素禀赋、要素相对价格、当时的技术水平等。从这一意义上，钢铁产业技术进步的主要表现就是生产过程中能耗的不断下降以及能源效率的提高。2006 年至 2013 年，中国吨钢综合能耗下降了 7%，显示近年来钢铁行业为落实节能减排政策所进行的设备升级改造取得了一定的效果。然而，中国钢铁企业之间的技术经济指标仍存在较大差异，原因是企业规模与设备水平差距较大。中国现有 870 多家钢铁企业，共有 420 多台烧结机，1300 多座高炉，530 多座转炉，179 台电炉，上千套各种类型的轧机。大型企业、先进设备与小企业的落后产能并存，生产分散，产业集中度不高。因此，能耗高、效率低、落后产能仍大量存在仍是中国钢铁产业的可持续发展的主要障碍，深化钢铁产业内部的结构调整、优化与升级势在必行。

本文认为，中国钢铁产业结构调整与升级可采取三个途径：一是实现资本对能源的替代，通过有偏技术进步，淘汰落后设备、实现技术升级，从源头上减少能源消耗；二是基于资源禀赋实现能源间替代，以清洁的天然气或页岩气、煤层气等能源替代煤炭，在提高能源效率的同时，减少污染物产生量；三是提高能源使用效率，以较少或同等的能源投入产生更高的收益，可降低吨钢能耗等指标。以上三个路径能否实现取决于要素间与能源间的可替代性。如果资本对能源是替代关系，则采用节能型设备的投资就可降低能源消耗量；否则节能减排政策效果不佳。类似地，如果天然气、电力等清洁能源可替代煤炭，也可大量减少钢铁生产过程中的煤炭消耗，进而减少污染。本文将对中国钢铁产业要素间和能源间替代弹性进行估算，并以此为基础，深入探讨要素可替代性与产业升级路径的可能关系，并结合钢铁行业当前的技术发展状况，提出钢铁行业产业内结构升级的政策建议。

1 文献综述

二十世纪七十年代第一次石油危机爆发以来，出现了大量的关于要素替代的文献。然而，结论差异较大。例如，Griffin 和 Gregory (1976)发现能源与资本之间是替代关系，但 Berndt 和 Wood (1979)却得出两者是互补的结论。迄今为止，两者的关系仍未有定论（Kintis 和 Panas，1989；Apostolakis，1990；Frondel 和 Schmidt，2002，等），可能的原因是研究范围与对象、数据与处理、模型与指标选取等不同。

从研究对象上来划分，替代研究首先从北美、欧洲开始，然后扩展到其他区域。Ozatalay 等(1979)对七个发达国家制造业的研究表明：能源与资本以及能源与劳动力之间都存在较为明显的替代关系。Field 和 Grebenstein (1980)对资本进行了细分，分别估算了美国制造业能源与可再生资本、营运资本之间的关系。结果显示，对绝大部分行业而言，前者呈现互补关系，而后者存在替代关系。Fuss (1977)发现，加拿大五个地

区的制造业燃料品种之间存在显著的替代关系，而能源与其他投入要素之间的替代关系并不明显。Prywes (1986)发现在美国制造业的大多数行业中资本与能源为互补关系。Hisnanick 和 Kyer (1995)将能源数据分为用于发电的能源和非用于发电的能源两部分，结果显示，两者与资本都存在替代关系。Caioghirou 等(1997)发现，从短期来看，希腊制造业中要素间存在显著的替代关系；而从长期来看，资本与电力之间，劳动力与非发电能源之间都存在互补关系。Kemfert (1998)发现从长期来看，德国工业中要素间均存在替代关系。Amberg 和 Bjomer (2007)基于企业层面数据发现，丹麦工业中电力与非用于发电的能源之间替代弹性较小，且两者与机器资本之间均存在互补关系。Turnovsky 和 Donnelly (1984)显示，澳洲钢铁产业资本和能源是替代品，但在能源价格稳定或者下降时，资本与能源间的关系是互补的。

值得指出的是，发达国家的市场化程度高，企业对价格变化可以采取灵活技术加以应对。而发展中国家通常依赖进口设备与技术，且市场化程度较低，应对价格变化的技术调整则要弱得多。一些实证研究也证明了这一点。Williams 和 Laumas (1981)发现印度八个制造业中资本与能源间是弱替代关系，而哈里亚纳邦制造业的劳动和资本以及劳动和能源间的替代可能性也相当有限，但资本与能源间存在较大的替代可能性(Hemlata, 2011)Mahmud (2000)对巴基斯坦制造业的研究表明，要素间都是有限的替代关系，但电力与天然气间替代性较大。Kim 和 Labys (1988)发现，韩国能源密集性行业中（如非金属、基本金属），资本对能源存在一定的替代性。Roy 等(2006)选择美国、韩国、巴西、印度的几个能源密集产业（如造纸、钢铁）和制造业进行对比研究。结果表明，钢铁业的资本与能源为替代关系，其中，韩国 AES 替代弹性为 1.96，高于印度的 1.83。Chang (1994)发现台湾制造业的资本与能源存在可替代性。

针对中国钢铁行业的研究不多。Smyth 等(2011)发现，能源与资本、劳动力之间均存在替代关系，且资本与能源间的替代弹性值（大约为 1）大于能源与劳动力间的值（0.7 左右）。董会忠等(2012)发现各要素间均存在 MES 替代关系，其中，劳动和能源之间的替代关系最强。史红亮等(2010)发现，煤炭与天然气、电力的替代弹性都大于 1。然而，遗憾的是，以上研究都要么只涉及要素间替代，要么只涉及能源间替代。本文运用超对数生产函数以及 AES 替代弹性模型，不仅估算 1990-2012 年间中国钢铁行业要素间替代弹性的变化趋势，更针对能源间可替代性进行估算，这可以为产业政策提供更为准确的依据，是对这一领域的研究成果的补充与完善。

2 份额方程与 AES 模型

假设，在生产过程中，厂商首先选择燃料的投入来使能源成本最小化，然后选择资本、劳动力和总能源来使总生产成本最小化(Pindyck, 1979)。那么，厂商将资本、劳动力、能源以及原材料等要素投入转化为产出的过程可以用以下生产函数来描述：

$$Y = f[K(K_1,...,K_K), L(L_1...L_L), E(E_1,...,E_N), M(M_1...M_M)] \tag{1}$$

其中，$K(\cdot)$、$L(\cdot)$、$E(\cdot)$和$M(\cdot)$分别表示特定类别的投入要素的聚合函数，并具有弱可分性(Fuss, 1977)。同时，投入要素，尤其是能源的聚合函数也是位似函数。这可以确保能源价格指数的建立以及相应的四种燃料总体价格的表达。

第一步，本文基于由 Christensen 等(1973)提出的超越对数生产函数构建总成本函数。设$P = P(P_K, P_L, P_E, P_M) > 0$是投入要素的总价格，且价格$P$和产量$Y$都是外生决定的。二元理论认为，可以用一个同样具有弱可分性的成本函数来表示(1)式的生产函数，即：

$$C = h(P_E(P_{E_1},...,P_{E_N}), P_K, P_L, P_M, Q) \tag{2}$$

其中，C是总成本，P_E是能源投入（煤、石油、电和天然气）的总价格，P_K, P_L, P_M分别是资本、劳动和原材料的价格。将(2)式用对数形式的二阶泰勒展开，则有：

$$\ln C = \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ln P_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \gamma_{ij} \ln P_i \ln P_j + \sum_{i=1}^{n} \gamma_i Q \ln P_i \ln Q + \frac{1}{2}\gamma_{QQ}(\ln Q)^2 \tag{3}$$

其中，$i,j=K,L,E$，C 为总成本，Q 为总产量，P_i 表示第 i 种投入要素的价格，α_0、α 和 γ 为待估计的参数。

根据 Shephard 引理，对(3)式的要素价格求导，便可得出企业成本最小化目标下的要素投入份额方程：

$$\partial \ln C/\partial \ln P_i = P_i X_i/C = S_i \tag{4}$$

其中，$i,j=K,L,E$，X_i 表示第 i 种要素投入量，S_i 表示第 i 种要素投入的成本份额，那么，总成本为 $C=P_K X_K+P_L X_L+P_E X_E$。将(3)代入(4)可以得到用成本份额形式表示的要素投入需求函数：

$$S_i=\alpha_i+\gamma_{iQ}\ln Q+\sum_{j=1}^{n}\gamma_{ij}\ln P_j \tag{5}$$

且有 $\sum_{i=1}^{n}\alpha_i=1;\sum_{i=1}^{n}\gamma_{ij}=0;\sum_{i=1}^{n}\gamma_{iY}=0;\gamma_{ij}=\gamma_{ji};\gamma_{iQ}=0$。

第二步，构建 AES 替代弹性模型。生产要素之间的替代性可以用 Allen 偏替代弹性(AES)和要素交叉价格弹性来表示。AES 是一种份额加权的交叉价格弹性，表明要素相对价格的变化引致的要素相对份额的变化。根据 Uzawa (1962)，Allen 偏替代弹性(AES)的表达式为：

$$\sigma_{ij}=C_i C_{ij}/C_i C_j \tag{6}$$

其中，$C_i=\partial C/\partial P_i, C_{ij}=\partial^2 C/(\partial P_i \partial P_j)$ 根据(6)式，超对数成本函数下 Allen 自价格弹性和偏替代弹性可以用下式进行估计：

$$\begin{aligned}\sigma_{ii}&=(\gamma_{ii}+S_i^{\,2}-S_i)/S_i^{\,2}\\ \sigma_{ij}&=(\gamma_{ij}+S_i S_j)/S_i S_j\end{aligned} \tag{7}$$

那么，AES 符号为正表示要素之间是替代关系，为负表示互补关系。

此外，要素的自价格弹性和交叉价格弹性可以如下表示：

$$\begin{aligned}\eta_{ii}&=\partial \ln X_i/\partial \ln P_i=\sigma_{ii}S_i\\ \eta_{ij}&=\partial \ln X_i/\partial \ln P_j=\sigma_{ij}S_j\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$i,j=K,L,E$。

由于各种燃料之间并不是完全替代的，因此，Pindyck (1979)提出用聚合价格指数来表示总能源成本的价格指数，后被广泛采用（Andrikopoulos 等，1989；Cho 等，2004）。类似地，能源的总价格可以用位似的超对数成本函数来表示：

$$\ln P_E=\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i\ln P_i+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\beta_{ij}\ln P_i\ln P_j\quad i,j=c,o,e,g \tag{9}$$

其中，P_E 是能源的综合价格，P_i 和 P_j 是燃料的价格。对(9)式求导可得每种燃料投入相对于总能源成本的成本份额：

$$S_{Ei}=\beta_i+\sum_{j=1}^{n}\beta_{ij}\ln P_j \tag{10}$$

其中，S_{Ei} 是第 i 种燃料投入的成本份额，并有 $\sum_{i}^{n}\beta_i=1;\sum_{i}^{n}\beta_{ij}=0;\beta_{ij}=\beta_{ji}$。

同理，能源间的 Allen 替代弹性和自价格弹性也可以用式(7)和(8)进行估算。

3 数据处理

本文选用 1990–2012 年中国钢铁行业的年度统计数据，数据来源于《中国钢铁工业年鉴》（1991–2013 年）、《中国统计年鉴》（2013 年）、《中国工业统计年鉴》（1990–2013 年）。具体处理如下：

第一，劳动力价格和劳动成本份额。劳动力名义价格和劳动力数量来源于中国钢铁工业年鉴。用 CPI 对名义价格进行平减后便可得到实际价格。钢铁行业实际劳动成本额即为实际劳动力价格与劳动力数量之乘积。劳动力年成本额占钢铁行业总成本额的比重即为劳动成本份额。

第二，资本价格和资本成本份额。本文的资本价格，即利率，采取了中国 3 至 5 年贷款利率。关于资本存量，本文参考张军(2004)根据永续盘存法对中国的资本存量的估算方法，采用的当年投资指标是固定资本形成总额（不包含存货），并利用固定资产投资价格指数(price index of investment)缩减现价固定资本形成总额而成的。同时，经济折旧率取 9.6%。在永续盘存法的意义下，如果基年选择越早，那么基年资本存量估计的误差对后续年份的影响就会越小，同时考虑到数据的可得性，本文从 1990 年开始。

第三，能源价格和能源成本份额。钢铁能源消费总量数据以及各种燃料（煤、电力和天然气）消耗数据来自于《中国钢铁工业统计年鉴》，单位均为万吨标准煤。现有的统计数据并没有给出各种能源的价格，只能通过相关数据库和文献整理得到。为了更好地反映煤炭的市场价格并从数据的可得性出发，本文选取秦皇岛港大同优混（>6000 大卡）平仓价作为煤炭价格。国内电力价格通过历年电力报告和调价报告整理得到。根据以上数据整理计算得到相应的能源成本份额以及燃料成本份额。

4 实证结果及分析

实证研究分为两个步骤。首先，对(5)和(10)式的要素及燃料成本份额方程进行估算，得到相应的估算系数。然后，根据(7)和(8)式计算要素间以及燃料间（煤、天然气和电力）的 Allen 替代弹性、交叉价格弹性和自价格弹性。

4.1 成本份额方程的估计结果

要素成本及燃料成本份额方程的估计系数如表 1 所示。从估计结果看，方程的拟合效果良好，大部分系数在 10%的水平上显著，同时模型的拟合优度较好，基本达到 90%以上。

表 1 要素成本份额方程参数估计结果

要素成本份额方程参数						燃料成本份额方程参数					
S_L	系数	S_K	系数	S_E	系数	S_C	系数	S_G	系数	S_{EL}	系数
β_L	-0.273***	β_K	2.043***	β_E	-0.297	β_C	1.329***	β_G	-0.372**	β_{El}	-0.154***
β_{LL}	0.070***	β_{KL}	-0.061***	β_{EL}	0.025	β_{CC}	0.288***	β_{GC}	-0.010***	β_{ELC}	-0.196***
β_{LK}	-0.061***	β_{KK}	0.177***	β_{EK}	-0.209***	β_{CG}	-0.093**	β_{GG}	0.006*	β_{ElG}	0.096***
β_{LE}	0.025	β_{KE}	-0.209***	β_{EE}	0.211***	β_{CEl}	-0.296***	β_{GEl}	0.063***	β_{ElEl}	0.171*
R^2=0.99		R^2=0.99		R^2=0.89		R^2=0.99		R^2=0.93		R^2=0.91	

注：*表示 10%显著水平；**表示 5%显著水平；***表示 1%的显著水平。

4.2 要素间替代弹性估算结果

表 2 的结果表明，劳动、资本和能源的自替代弹性均为先正后负，表明 1991-1996 年劳动力的价格、1990-2000 的资本价格和 1990-1992 年能源的价格存在扭曲现象，并不能导致市场的真实反应，此后要素价格逐渐符合市场规律。此外，能源与资本一直表现为互补的关系，且互补性呈现逐渐降低，近年又反弹的趋势。资本与劳动以及劳动与能源之间基本呈现先互补后替代的关系。劳动与能源的替代弹性虽然在均值上表现为互补，但从 2003 年开始，其替代弹性值一直为正且逐渐增大，2012 年的替代弹性值为 0.76。

类似地，表 3 的结果表明，劳动与资本自价格弹性先正后负，能源的自价格弹性一直为负，且绝对值最大，说明能源投入在钢铁行业成本中所占份额较大，因而能源价格波动会在较大程度上影响行业的产出。资本的自价格弹性较小，说明钢铁产业对投资的依赖性仍然较强。但与 AES 不同的是，交叉价格弹性可以反映要素的相互替代性。可以看到，资本对能源的可替代性极低，反向的情况，能源对资本的互补性很大，但绝对值呈现递减状态，有向替代关系发展的趋势。这表明，在能源价格上升的情况下，企业有机

会使用更多的资本，以利用节能型技术和设备来代替现有落后设备。

表 2 要素间 AES 替代弹性

年份	σ_{LL}	σ_{KK}	σ_{EE}	σ_{KL}	σ_{LE}	σ_{EK}
1990	-1.11	0.08	1.13	0.18	-5.19	-4.12
1991	1.08	0.10	1.42	0.01	-7.45	-4.56
1992	3.59	0.11	1.09	-0.12	-8.94	-4.62
1993	4.30	0.10	-2.30	-0.17	-7.04	-3.45
1994	4.25	0.10	-2.51	-0.17	-7.22	-3.55
1995	4.34	0.09	-2.54	-0.19	-5.55	-2.67
1996	1.08	0.06	-1.93	-0.04	-3.17	-1.88
1997	-0.30	0.04	-1.48	0.04	-2.17	-1.52
1998	-1.02	0.05	-2.94	0.12	-2.17	-1.73
1999	-2.18	0.02	-2.53	0.27	-1.30	-1.58
2000	-2.39	0.00	-2.74	0.31	-0.89	-1.38
2001	-2.53	-0.05	-1.09	0.44	-0.26	-1.26
2002	-2.53	-0.08	-1.56	0.41	-0.01	-0.89
2003	-2.45	-0.12	-1.34	0.44	0.19	-0.77
2004	-2.45	-0.17	0.69	0.40	0.35	-0.53
2005	-2.42	-0.25	0.08	0.35	0.50	-0.35
2006	-1.58	1.59	-0.13	-0.28	0.84	-1.38
2007	-2.41	-0.32	-0.14	0.26	0.60	-0.26
2008	-2.41	-0.40	-0.18	0.09	0.68	-0.24
2009	-2.23	-0.41	-0.18	0.14	0.72	-0.33
2010	-2.23	-0.41	-0.18	0.12	0.73	-0.33
2011	-2.20	-0.41	-0.18	0.15	0.72	-0.34
2012	-2.09	-0.38	-0.17	0.09	0.76	-0.44
均值	-0.69	-0.03	-0.86	0.12	-1.97	-1.66

因此，通过提高能源价格或增加对能源使用的税收可以倒逼钢铁行业加大对节能技术和设备的投资，加快资本对能源的替代。反之，资本价格上升却导致能源使用量增加。劳动与能源间先互补后替代，且劳动对能源的替代性大于能源对劳动的替代性。令人吃惊的是，资本对劳动是互补关系，且变波动较小，这反应了中国钢铁产业的劳动力与资本的匹配已经达到了稳定状态，机械化程度已经较高。

4.3 燃料间弹性估算结果

从表 4 和 5 可以看出，除煤炭之外，天然气和电力的自价格弹性均为负值，说明价格的上升会引起这些能源需求量的减少，符合市场规律。煤炭自价格弹性为正，主要原因是长期以来，我国煤炭价格受到政府严格控制，21 世纪初又改为了“双轨制”，近年来才全面放开，加之资源禀赋导致的煤炭依赖，致使煤炭资源配置的严重扭曲，市场对煤炭价格变动的反应异常。电力自价格弹性极低，而天然气很高，反映了钢铁行业严重依赖煤炭和电力的现状。

进一步，表 4 中的煤炭与天然气、煤炭和电力之间存在互补关系，但煤炭和天然气之间的互补关系逐年减弱，平均为-10.23。煤炭与电力之间的互补关系变化却比较稳定，平均值为-0.53。这可能是因为钢铁行业消耗的煤炭中有相当一部分用于自备电厂发电，同时，我国当前的煤炭价格与电力市场价格形成机制存在较大差异，电煤价格的上升也将导致电价的上升从而电力需求也将降低。电力与天然气间存在相当大的替代性，说明可以通过利用天然气对煤电的替代来达到节能减排的效果。类似的，在表 5 中，天然气对电力

的替代性较大，反之则很低；而煤炭与电力，以及煤炭与天然气间仍然互补关系。

表 3 要素间交叉价格弹性和自价格弹性

年份	η_{LL}	η_{KK}	η_{EE}	η_{LK}	η_{LE}	η_{KL}	η_{KE}	η_{EL}	η_{EK}
1990	-0.10	0.07	-3.53	0.15	-0.24	-0.19	0.02	-0.45	-3.57
1991	0.08	0.09	-4.02	0.01	-0.32	-0.19	0.00	-0.52	-4.05
1992	0.22	0.10	-4.13	-0.11	-0.37	-0.19	-0.01	-0.54	-4.14
1993	0.25	0.09	-3.04	-0.15	-0.37	-0.18	-0.01	-0.41	-3.06
1994	0.25	0.09	-3.14	-0.15	-0.37	-0.18	-0.01	-0.43	-3.16
1995	0.26	0.08	-2.31	-0.17	-0.36	-0.17	-0.01	-0.33	-2.34
1996	0.08	0.05	-1.54	-0.03	-0.27	-0.16	0.00	-0.22	-1.59
1997	-0.02	0.04	-1.19	0.04	-0.22	-0.15	0.00	-0.17	-1.25
1998	-0.09	0.04	-1.36	0.10	-0.20	-0.16	0.01	-0.18	-1.42
1999	-0.23	0.02	-1.16	0.21	-0.13	-0.16	0.03	-0.14	-1.25
2000	-0.28	0.00	-0.97	0.24	-0.10	-0.16	0.04	-0.10	-1.06
2001	-0.39	-0.04	-0.76	0.32	-0.03	-0.16	0.07	-0.04	-0.90
2002	-0.39	-0.06	-0.47	0.28	0.00	-0.14	0.06	0.00	-0.61
2003	-0.42	-0.08	-0.34	0.29	0.04	-0.14	0.08	0.03	-0.50
2004	-0.42	-0.10	-0.16	0.24	0.08	-0.12	0.07	0.06	-0.32
2005	-0.42	-0.13	-0.02	0.19	0.14	-0.10	0.06	0.09	-0.19
2006	-0.47	0.26	-0.07	-0.05	0.46	-0.75	-0.08	0.25	-0.22
2007	-0.42	-0.15	-0.05	0.12	0.21	-0.09	0.05	0.10	-0.12
2008	-0.42	-0.15	-0.08	0.03	0.30	-0.11	0.02	0.12	-0.09
2009	-0.45	-0.15	-0.08	0.05	0.32	-0.14	0.03	0.14	-0.12
2010	-0.45	-0.14	-0.08	0.04	0.33	-0.15	0.02	0.15	-0.12
2011	-0.45	-0.14	-0.08	0.05	0.32	-0.15	0.03	0.15	-0.12
2012	-0.46	-0.12	-0.08	0.03	0.36	-0.21	0.02	0.17	-0.13
均值	-0.21	-0.02	-1.25	0.08	-0.02	-0.18	0.02	-0.10	-1.32

5 结论和政策建议

本文利用 1990-2012 年的数据，基于超对数生产函数对中国钢铁行业的要素间和能源间的 AES 替代弹性、交叉价格弹性、自价格弹性进行了估算。根据以上结果，本文提出以下五点政策建议：

第一，大力进行能源价格改革，形成产业技术进步的倒逼机制。上述估计结果显示，各要素间存在互补与替代关系，其中，资本与能源间为 AES 互补，但不断降低。但从交叉价格弹性可以看到，资本对能源的可替代性存在，但极低，反之，能源对资本的互补性越来越小。这表明，随着十几年来能源价格的上升，企业存在使用更多的资本，以利用节能型技术和设备来代替现有落后设备的机会。因此，需进一步通过提高能源使用成本倒逼钢铁行业加大对节能技术和设备的投资，加快资本对能源的替代。

然而，本文的估计也表明，中国钢铁行业能源的自价格弹性较小，意味着单纯的提价政策作用有限，需要配合其他政策共同施加强制力，如调整企业用电时间的峰谷波段、推广季节性电价、高可靠性电价、可中断负荷电价等，改变企业的用电方式，以及引入基于市场机制的碳税或碳排放权交易，以提高钢铁行业使用能源的成本和通过节能实现总成本下降的激励。

此外，由于中国钢铁产业存在大量落后产能，其对高耗能设备的“技术依赖”降低了企业适应能源价格变化的能力，因而，政府必须继续采取强制性“关停并转”以提升产业对价格的敏感性，让能源价格和产业政策效应更显著。

第二，利用能源政策促进常规或非常规天然气对煤炭的替代。我们的估算表明，钢铁行业电力和天然气之间的替代弹性较大，特别是天然气对电力的交叉价格弹性较大，存在利用天然气对煤电的替代来达到

节能减排效果的机会。然而，由于在中国钢铁行业能源结构中电力所占的份额将近一半，加之目前我国天然气价格高昂，因而，短期内企业很难从使用电力的技术调整为使用天然气的技术。从设备形态的角度来看，能源技术可以说是一系列设备的集合，如锅炉、烤炉、加热器、发电机、蒸汽发电机等。这些设备的设计可以有较强的选择性，或可设计为消耗单一燃料的，或可设计为消耗多种燃料混合物的。因此，在能源技术与燃料替代之间，存在很强的相关性。这就需要政府采取激励与强制相结合的能源政策，鼓励页岩气、煤层气等非常规天然气的开发与利用，与常规天然气混输混用，降低用气价格，促进企业的能源技术替代。

表 4 燃料间 AES 替代弹性

年份	σ_{CC}	σ_{GG}	σ_{EIEI}	σ_{CG}	σ_{CEI}	σ_{GEI}
1990	0.28	-8.80	-0.24	-6.86	-0.29	4.87
1991	0.68	-10.82	-0.38	-12.41	-1.07	7.56
1992	0.81	-11.95	-0.29	-15.74	-0.85	7.62
1993	0.55	-12.70	-0.28	-16.16	-0.66	8.52
1994	0.43	-12.80	-0.32	-15.39	-0.66	9.15
1995	0.39	-12.68	-0.34	-14.56	-0.64	9.14
1996	0.32	-12.79	-0.38	-14.04	-0.69	10.02
1997	0.26	-12.05	-0.35	-11.47	-0.49	8.40
1998	0.24	-11.58	-0.32	-10.33	-0.39	7.56
1999	0.39	-10.93	-0.30	-10.74	-0.56	6.83
2000	0.53	-11.35	-0.24	-12.55	-0.54	6.65
2001	0.56	-10.57	-0.21	-11.29	-0.50	5.83
2002	0.56	-10.99	-0.23	-12.08	-0.54	6.27
2003	0.49	-11.80	-0.23	-13.20	-0.48	6.93
2004	0.47	-10.69	-0.23	-10.95	-0.48	6.06
2005	0.34	-11.09	0.27	-10.58	-0.43	6.68
2006	0.37	-11.32	-0.24	-11.31	-0.41	6.63
2007	0.45	-9.01	-0.24	-8.27	-0.48	5.01
2008	0.21	-7.19	-0.31	-4.66	-0.33	4.38
2009	0.29	-5.66	-0.30	-3.70	-0.43	3.52
2010	0.26	-4.23	-0.32	-2.38	-0.45	2.92
2011	0.41	-4.79	-0.25	-3.34	-0.45	2.94
2012	0.42	-4.64	-0.24	-3.22	-0.45	2.87
均值	0.42	-10.02	-0.28	-10.23	-0.53	6.36

第三，实现对煤炭的高效综合利用。上述研究表明，煤炭与其他燃料之间均为互补关系，加之中国依赖煤炭的资源禀赋，因而，在中短期内，煤炭还不能有效地被其他燃料所大量替代。因此，在短期内，提高钢铁产业煤炭利用效率是重中之重。这需要政府采取碳税、碳排放权交易等方式促进企业节煤型技术进步、采取高效锅炉等，切实减少以煤炭的使用，提高煤炭利用效率，并减少污染排放。

第四，鼓励钢铁行业在炼焦、烧结、炼铁、炼钢不同生产工艺环节上持续进行技术创新，发展节能减排工艺技术，如烧结余热利用等。钢铁行业还可以通过开发高炉煤气回收等副产品循环利用技术，提高二次能源使用比例。

第五，淘汰落后产能，提高行业技术装备的水平。政府强制对落后以及不达标产能的调整可以进一步促进能源消耗和污染排放。同时，在淘汰落后产能的同时，要淘汰老旧设备，推广新型设备的技术、提高大型装备投资。落后产能的淘汰也能为高附加值产品的产量比重增加提供空间。钢铁设备要向大型化、高效化、连续化、自动化、环保化发展，新的装备投资要促进钢铁企业往循环经济的方向发展。

第六，在产业组织政策上，促进大型企业对小型企业的兼并。钢铁行业具有显著的规模效应，而我国大型企业较少，中小企业较多，这种低市场集中度会导致市场竞争无序，竞争力下降。企业的兼并和重组同样可以起到优化钢铁行业能源结构的作用。

表 5 燃料间自价格弹性和交叉价格弹性

年份	η_{CC}	η_{GG}	η_{ElEl}	η_{CG}	η_{CEl}	η_{GC}	η_{GEl}	η_{ElC}	η_{ElG}
1990	0.11	-0.25	-0.13	-0.20	-0.16	-2.80	2.74	-0.16	0.14
1991	0.22	-0.23	-0.17	-0.27	-0.48	-3.99	3.36	-0.48	0.16
1992	0.25	-0.22	-0.15	-0.29	-0.44	-4.81	3.99	-0.44	0.14
1993	0.19	-0.20	-0.15	-0.26	-0.35	-5.48	4.47	-0.35	0.14
1994	0.16	-0.20	-0.16	-0.24	-0.32	-5.58	4.52	-0.32	0.14
1995	0.14	-0.20	-0.16	-0.23	-0.31	-5.43	4.42	-0.31	0.15
1996	0.12	-0.20	-0.17	-0.22	-0.31	-5.53	4.46	-0.31	0.16
1997	0.11	-0.22	-0.16	-0.21	-0.23	-4.79	4.00	-0.23	0.15
1998	0.10	-0.22	-0.16	-0.20	-0.20	-4.40	3.77	-0.20	0.15
1999	0.14	-0.23	-0.16	-0.23	-0.28	-4.01	3.48	-0.28	0.14
2000	0.18	-0.23	-0.14	-0.25	-0.30	-4.32	3.72	-0.30	0.13
2001	0.19	-0.24	-0.12	-0.25	-0.29	-3.82	3.40	-0.29	0.13
2002	0.19	-0.23	-0.13	-0.25	-0.31	-4.08	3.56	-0.31	0.13
2003	0.17	-0.22	-0.13	-0.25	-0.27	-4.64	3.95	-0.27	0.13
2004	0.17	-0.24	-0.13	-0.24	-0.27	-3.88	3.43	-0.27	0.13
2005	0.13	-0.23	-0.15	-0.22	-0.23	-4.10	3.57	-0.23	0.14
2006	0.14	-0.23	-0.14	-0.23	-0.23	-4.27	3.70	-0.23	0.13
2007	0.16	-0.25	-0.13	-0.23	-0.27	-2.96	2.81	-0.27	0.14
2008	0.09	-0.27	-0.16	-0.17	-0.17	-2.06	2.20	-0.17	0.16
2009	0.12	-0.28	-0.15	-0.18	-0.22	-1.50	1.80	-0.22	0.17
2010	0.11	-0.28	-0.16	-0.16	-0.22	-0.99	1.44	-0.22	0.19
2011	0.15	-0.28	-0.14	-0.20	-0.25	-1.23	1.63	-0.25	0.17
2012	0.15	-0.28	-0.14	-0.19	-0.25	-1.18	0.04	-0.25	0.00
均值	0.15	-0.24	-0.15	-0.22	-0.28	-3.73	3.24	-0.28	0.14

REFERENCES

[1] Boyd, G.A., Karlson, S.H. “The Impact of Energy Prices on Technology Choice in the United States Steel Industry.” Energy Journal 14(1993): 47-56

[2] Berndt, E. R., Wood, D. O. “Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity.” American Economic Review 69(1979): 342-354

[3] Griffin, J. M., Gregory, P. R. “An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses.” American Economic Review 66(1976): 845-857

[4] Kintis, A., Panas, E.E. “The capital-energy controversy: further results.” Energy Economics 11(1989): 201-212

[5] Apostolakis, B.E. “Energy-capital substitutability complementarity: the dichotomy.” Energy Economics 1 (1990): 48-58

[6] Frondel, M., Schmidt, C.M. “The capital-energy controversy: an artifact of cost shares.” Energy Journal 3 (2002): 53-79

[7] Ozatalay, S., Grubaugh, S., Long Ⅱ, T.V. “Energy Substitution and National Energy Policy.” American Economic Review 69(1979): 369-371

[8] Field, B.C., Grebenstein, C. “Capital-Energy Substitution in U.S. Manufacturing.” Review of Economics and Statistics 62(1980): 207-212

[9] Fuss, M. A. “The Demand for Energy in Canadian Manufacturing: An Example of the Estimation of Production Structures with Many Inputs.” Journal of Econometrics 5(1977): 89-116

[10] Prywes, M. “A nested CES approach to capital-energy substitution.” Energy Economics 8(1986): 22-28

[11] Hisnanick, J.J., Kyer, B.L. “Assessing a disaggregated energy input: using confidence intervals around translog elasticity

estimates.” Energy Economics, 2(1995): 125-132

[12] Kemfert, C. “Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany.” Energy Economics, 3(1998): 249-264

[13] Williams, M., Laumas, P. “The Relation between Energy and Non-Energy Inputs in India’s Manufacturing Industries.” Journal of Industrial Economics, 30(1981): 113-122

[14] Mahmud, S. F. “The Energy Demand in the Manufacturing Sector of Pakistan: Some Further Results.” Energy Economics 22(2000): 641-648

[15] Kim, B. C., Labys, W. C. “Application of the Translog Model of Energy Substitution to Developing Countries.” Energy Economics, 10(1988): 313-323

[16] Roy, J., Stanstad, A. H., Sathaye, J. A., Khaddaria, R. “Substitution and Price Elasticity Estimates Using Inter-country Pooled Data in a Translog Cost Model.” Energy Economics, 28(2006): 706-719

[17] Chang, Kuo-Ping. “Capital-energy substitution and the multi-level CES production function.” Energy Economics, 16(1994): 22-26

[18] Turnovsky, M. H. L., Donnelly, W. A. “Energy Substitution, Separability, and Technical Progress in the Australian Iron and Steel Industry.” Journal of Business & Economic Statistics, 2(1984): 54-63

[19] Smyth, R., Narayanm, P. K., Shi, H. “Substitution between energy and classical factor inputs in the Chinese steel sector.” Applied energy, 1(2011): 361-367

[20] Shi, H-L., Chen, K., Yan, B. “Substitution Elasticity among Energy, Capital and Labor inputs in Chinese Steel Sector-based on a trans-log production function.” Technological Economics, 9(2010): 56-59. In Chinese

[21] Dong, H-Z., Yan, X-X., Tao, J-G. “The energy-capital-labor substitution relationship of iron and steel industry in China.” Science Research Management, 8 (2012): 120-127. In Chinese

[22] Smyth, R., Narayan, P.K., Shi, H-L. “Inter-fuel substitution in the Chinese iron and steel sector.” International Journal of Production Economics, 2(2012): 525-532

[23] Pindyck, R.S. “Interfuel Subsitution and the Industrial Demand for Energy: an Intertemporal Comparison.” Review of Economics and Statistics 61(1979): 169-179

[24] Uzawa, H. “Production Functions with Constant Elasticities of Substitution.” Review of Economics Studies, 29(1962): 291-299

[25] Andrikopoulos, A.A., Brox, J. A. “Demand systems for energy consumption by the manufacturing sector.” Journal of Economics and Business, 2(1986): 141-153

[26] Cho, W.G. Nam, K., Pagán, J.A. “Economic growth and interfactor /interfuel substitution in Korea.” Energy Economics, 1(2004): 31-50

[27] Zhang, Jun. “The Estimation of China’s provincial capital stock: 1952-2000.” Economics Research, 10(2004): 35-44

【作者简介】



[1] 于立宏（1965-），女，汉，博士，教授，产业组织，能源经济、政府规制，2006 年毕业于复旦大学管理学院产业经济学系。Email: ylhcumt@vip.sina.com

[2] 黄丽（1990-），女，汉，硕士生，产业经济。Email: huangli36hao@126.com

[3] 李嘉晨（1988-），女，汉，博士生，产业组织。Email: 18801972220@163.com