

# 中国能源利用效率改进机制研究 ——基于路径分析模型的实证\*

陶用之 奚潭

**摘要:** 为了探索中国能源利用效率改进机制以进一步提高中国能源利用效率, 本文在研读国内外相关文献的基础上, 归纳出影响能源利用效率改进的三大主要因素; 然后, 针对三大影响因素收集数据、建立路径分析模型进行实证分析; 最后使用R求解路径分析模型并绘制路径分析图, 以直观展示中国能源利用效率改进机制。

本文研究结果表明, 技术进步、产业结构变动和能源消费结构三大因素共能解释中国自1989年以来96.23%能源利用效率变化; 煤炭消费结构对能源利用效率总影响系数为0.8388, 直接影响系数为0.6298; 技术水平对能源利用效率的间接影响系数达到-0.9719。

**关键词:** 能源利用效率 改进机制 路径分析模型

中国是世界能源消费大国, 能源消费量从1978年5.714亿吨标准煤增长到2008年28.5亿吨标准煤, 年均增长5.5%, 其中, 2000~2008年均增长9.4%; 2002年后, 由于经济过热导致的固定资产投资加速, 能源消费增长速度超过国民经济增长速度, 2003、2004、2005年能源消费弹性系数分别达到1.53、1.59、1.02。纵向来看, 中国的节能工作取得了突出的成绩, 1978~2008年, 中国能源利用效率下降了94%, 但横向比较, 目前中国能源的综合利用效率仍然低于世界平均水平约10% (Philip Andrews-Speed, 2009), 能源利用效率有待进一步提高。

通过什么途径来降低能源利用效率? 政府应采取哪些宏观调控政策? 对这些问题的回答依赖于对中国能源效率改进机制研究。

## 1 相关文献

能源利用效率主要取决于产业结构变化、技术进步和能源消费结构改进。因而, 国内外学者对此进行了大量的研究。王群伟(2009)利用非参数的DEA-Malmquist生产率指数法将广义技术进步分解为科技进步和技术效率两部分, 采用自回归分布滞后方法(ARDL)检验两者与能源利用效率的协整关系。刘畅(2008)对中国29个工业行业的面板数据进行实证研究, 结果表明, 科技经费支出的增加有助于高能耗行业能源效率的提高。孙立成、周德群和李群(2008)应用DEA-Malmquist方法测算了1997-2006年12个国家的能源利用效率及变动指数, 研究发现, 能源利用技术进步增长率的下降是中国能源利用效率未得到提高的主要原因。Karen(2004)指出企业研发的投入和对人员的培训能促进企业生产和加工活动的革新, 对企业能源利用效率下降的贡献为16.9%。张意翔(2009)运用对数平均D氏指数方法分析了中国能源效率变化原因, 认为产业结构变化是2000年以后中国能源效率变化主要因素; 韩智勇(2004)将能源利用效率变化分解为结构份额和效率份额, 对其进行定量分析结果表明中国能源利用效率下降的主要动力来源于各产业能源利用效率的提高; Fisher-Vanden使用企业层次的数据分析能源效率提高的因素, 发现随着产业分类细化, 产业结构变动所起的作用逐渐提高, 当将结构变动细化到四位数产业甚至公司水平时, 结构变动对能源利用效率变动的贡献超过技术变动的贡献; Ding(2006)、Guo(2008)实证分析了中国能源消费结构对能源利用效率的影响, 研究结果表明石油消费结构比重主要制约了中国单位GDP能耗的降低。

已有国内外研究有利于理解中国能源利用效率的变化和成因, 并为改善中国能源利用效率提供了借鉴。但现有研究大多局限在定性描述, 或单一因素的定量分析, 缺乏各因素间的交互影响。

本文将运用路径分析模型实证研究中国能源利用效率改进机制, 为进一步提高中国能源利用效率提供政策建议。

## 2 路径分析模型与变量选择

路径分析模型分析是因果模型的一种方法和技术。在完成相关性分析后, 将总的相关系数分解为直接路径相关系数, 间接路径相关系数。借此反映自变量对因变量的直接影响和自变量借助其他变量对因变量的间接影响。

---

\* 作者简介: 陶用之, 男, 四川射洪人, 工作单位, 南京财经大学经济学院。210003; 南京市鼓楼区铁路北街146号, 电话: (025) 83495772 13337805772; E-mail: [tyz146@163.com](mailto:tyz146@163.com)。奚潭, 男, 江苏南通人, 工作单位, 南京财经大学经济学院。

## 2.1 路径分析模型的特点

令  $X_1, X_2, \dots, X_k$  为自变量,  $Y$  为因变量, 多元线性回归可以表示如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_5 X_5 \quad (1)$$

令  $\bar{X}_i$  为  $X_i$  的样本均值,  $\sigma_{x_i}$  和  $\sigma_y$  样本  $X_i$  和  $y$  的标准差。由 (1) 可以得到标准多元线性回归模型。令

$$\beta'_i = \beta_i \sigma_{x_i} / \sigma_y \quad (2)$$

则  $\beta'_i$  表示标准化的系数。公式 (2) 表明标准化系数不仅与自变量的回归系数有关, 同时与自变量的离散程度有关。随着一个自变量离散程度的增加, 该自变量对因变量影响程度也随之增加。

然而, 在计算标准化系数的过程中, 上述公式并没有考虑到变量间的交互因素, 同时也没有考虑到自变量借助其它变量对因变量的影响。借助路径分析可以很好解决这一问题。路径分析不仅可以处理有多个因变量和中介变量的问题, 而且可以处理一些变量互为因果的问题, 即所谓的非递归模型。

## 2.2 指标和数据的选取

基于对国内外文献的研究, 本文以能源利用效率表示中国能源利用效率; 选取了体现产业结构变动的指标  $X_3$ 、 $X_4$ , 即第二产业、第三产业增加值占 GDP 的比重; 反映能源消费结构变动的指标  $X_1$ 、 $X_2$ , 分别表示煤炭消费量、石油消费量占能源总消费量的比重; 此外从技术创新投入角度选取指标  $X_5$  “R&D 经费支出额占 GDP 比重” 作为衡量中国技术水平的指标 (表 1)。

根据上述指标, 选取 1989~2008 时间序列数据建模, 数据主要来自于历年《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》(附录 1)。

表 1 模型中所选变量

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| $y$ 能源利用效率          | $X_3$ 第二产业增加值占 GDP 比重 |
| $X_1$ 煤炭消费占能源总消费量比重 | $X_4$ 第三产业增加值占 GDP 比重 |
| $X_2$ 石油消费占能源总消费量比重 | $X_5$ R&D经费支出额占GDP比重  |

## 3 中国能源利用效率改进机制分析

依据上述统计指标及1989~2008时间序列数据, 建立路径分析模型分析中国能源利用效率改进机制。

### 3.1 路径分析模型的建立

将  $r_{ij}$  定义为自变量  $X_i$  和  $X_j$  间的简单相关系数,  $r_{iy}$  定义为自变量  $X_i$  和因变量  $y$  间的简单相关系数, 对所有简单相关系数的分解方程可以表示为:

$$\begin{cases} P_{1y} + r_{12}P_{2y} + \dots + r_{15}P_{5y} = r_{1y} \\ r_{21}P_{1y} + P_{2y} + \dots + r_{25}P_{5y} = r_{2y} \\ \dots \\ r_{51}P_{1y} + r_{52}P_{2y} + \dots + P_{5y} = r_{5y} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{令 } R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ r_{51} & r_{52} & \cdots & r_{55} \end{bmatrix}, P = \begin{pmatrix} P_{1y} \\ P_{2y} \\ \vdots \\ P_{5y} \end{pmatrix}, R_y = \begin{pmatrix} R_{1y} \\ R_{2y} \\ \vdots \\ R_{5y} \end{pmatrix}, \text{ 则 (3) 式可以表示为}$$

$$RP = R_y \quad (4)$$

求解线性方程组 (4) 可得  $P = R^{-1}R_y$ ，其中  $P_{iy}$  为自变量  $X_i$  对因变量  $y$  的直接影响。

基于方程 (4) 的运算结果，可以计算  $X_i$  对  $y$  的直接判决系数  $R_i^2 = P_{iy}^2$ ； $X_i$  通过  $X_j$  对  $y$  的间接影响系数  $r_{ij}P_{jy}$ ；自变量  $X_i$  通过  $X_j$  对因变量  $y$  的间接判决系数  $R_{ij}^2 = 2P_{iy}r_{ij}P_{jy}$ ； $X_i$  通过其它变量对因变量总的间接影响  $\sum_{i \neq j} r_{ij}P_{jy}$ ； $X_i$  对  $y$  的综合作用和影响或  $X_i$  对  $y$  总的判决系数  $R(i)^2 = R_i^2 + \sum_{i \neq j} R_{ij}^2$ 。

由于经济现象的复杂性和认知的局限性，在建立模型时不可能考虑所有对因变量有影响的因素。因此，应该进一步计算遗漏的变量和误差对因变量的影响系数，即残差影响  $P_{ay}$ ，其公式为：

$$P_{ay} = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^k P_{iy}r_{iy}}$$

如果残差影响很小，这说明路径分析模型抓住了关键变量，否则路径分析模型也许遗漏了一些主要的变量和其他一些需要继续寻找的因素。

### 3.2 路径分析模型的求解

基于上述建立的路径分析模型，本文使用统计  $R$  语言编写路径分析计算程序，求解路径分析模型（附录 2）。

1. 计算各自变量之间的相关系数，得到矩阵  $R$  的一个实现值（表 2）

表 2 自变量之间的相关系数

|      | 煤       | 石油      | 第二产业    | 第三产业    | R&D     |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 煤    | 1.0000  | -0.9261 | -0.4520 | -0.9330 | -0.6979 |
| 石油   | -0.9261 | 1.0000  | 0.2818  | 0.8050  | 0.4432  |
| 第二产业 | -0.4520 | 0.2818  | 1.0000  | 0.4256  | 0.4613  |
| 第三产业 | -0.9330 | 0.8050  | 0.4256  | 1.0000  | 0.8424  |
| R&D  | -0.6979 | 0.4432  | 0.4613  | 0.8424  | 1.0000  |

2. 计算各自变量和因变量之间简单的相关系数，得到  $R_y$  的一个实现值

$$R_y^T = (0.3952, -0.1500, -0.1711, -0.9415, -0.5579)$$

3. 求解路径分析模型  $RP = R_y$ ， $P = R^{-1}R_y$ （表 3），根据表 3 的计算结果作路径分析图 1~5，以直观展示中国能源利用效率改进机制：

表3 路径分析模型计算结果

| 自变量   | $r_{iy}$ | $P_{iy}$ | $\sum_{i \neq j} r_{ij} P_{ij}$ | $r_{i1} P_{1y}$ | $r_{i2} P_{2y}$ | $r_{i3} P_{3y}$ | $r_{i4} P_{4y}$ | $r_{i5} P_{5y}$ |
|-------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $x_1$ | 0.8388   | 0.6298   | 0.2090                          |                 | -0.1468         | 0.2647          | 0.3683          | -0.2771         |
| $x_2$ | -0.7315  | 0.1585   | -0.8900                         | -0.5833         |                 | -0.1650         | -0.3177         | 0.1760          |
| $x_3$ | -0.8104  | -0.5856  | -0.2248                         | -0.2847         | 0.0447          |                 | -0.1680         | 0.1832          |
| $x_4$ | -0.7694  | -0.3947  | -0.3747                         | -0.5876         | 0.1276          |                 | -0.2492         | 0.3345          |
| $x_5$ | -0.5748  | 0.3971   | -0.9719                         | -0.4395         | 0.0702          | -0.2701         |                 | -0.3325         |

### 3.3 模型的检验

由  $R^2(i) = R_i^2 + \sum_{i \neq j} R_{ij}^2$  可推导出各因子的判决系数计算公式为 (附录4):  $R^2(i) = 2P_{iy}r_{iy} - P_{iy}^2$ 。

经计算可得:

$$R^2(1) = 0.6599, R^2(2) = -0.2570, R^2(3) = 0.6062, R^2(4) = 0.4516, R^2(5) = -0.6142$$

所以  $R^2(1) > R^2(3) > R^2(4) > R^2(2) > R^2(5)$

$$R^2 = \sum_{i=1}^5 P_{iy} r_{iy} \approx 0.9623, P_{ay} = \sqrt{1 - R^2} \approx 0.1941$$

路径分析模型的检验结果表明, 产业结构变化、技术进步和能源消费结构改进三大因素能解释中国自 1989 年以来 96.23% 能源利用效率变化, 据此可认为本文选择的路径分析模型有效刻画了中国能源利用效率改进机制。

### 4 结论与政策建议

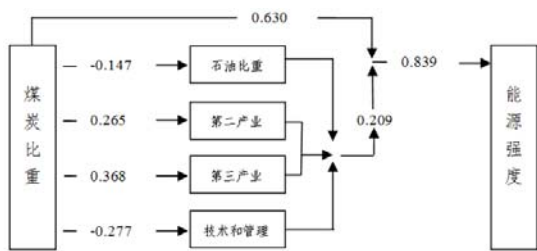


图1 煤炭比重改进能源效率机制

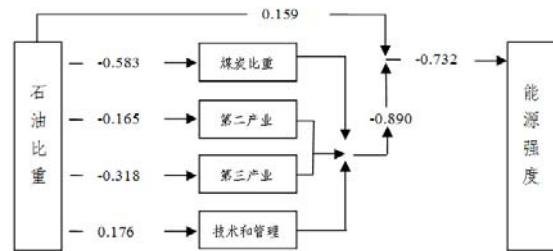


图2 石油比重改进能源效率机制

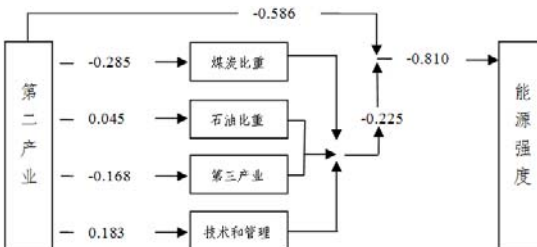


图3 第二产业比重改进能源效率机制

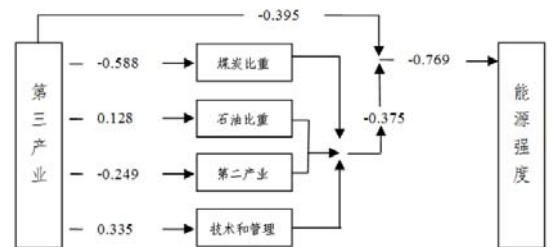


图4 第三产业比重改进能源效率机制

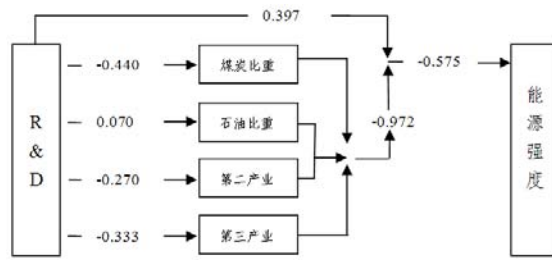


图 5 R&D 改进能源效率机制

从表 3 可以看出，所有变量对能源利用效率直接影响顺序为： $X_1 > X_3 > X_5 > X_4 > X_2$ ，即煤炭消费量在总能源消费中的比重、第二产业增加值占 GDP 比重以及技术水平对能源利用效率的直接影响相对较大，直接影响系数分别达到 0.6298，-0.5856 和 0.3971。这说明  $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_5$  显示出直接影响因子特性。据此可认为，提高中国能源利用效率，见效最快的是降低煤炭在总能源消费中的比重和进行产业结构调整，增加 R&D 投入；或者在保持第二产业比重不变的前提下，提高第二产业内部的能源利用效率。由于中国目前的主要任务是经济发展，而从 GDP 的构成来看，第二产业增加值每年对 GDP 的贡献达到 40% 以上，兼顾到经济平稳发展这一目标，降低第二产业在经济中的比重在短期内不可能也太现实。因此中国的主要政策导向应集中在提高第二产业内部的能源利用效率上。

所有变量对能源利用效率间接总影响顺序为： $X_5 > X_2 > X_4 > X_3 > X_1$ 。可以看出，技术水平对能源利用效率的间接影响最大，间接影响系数达到 -0.9719，与能源利用效率高度负相关。因此从长远的发展战略出发，提高技术水平是提高中国能源利用效率的必经之路，特别是要注意加强节能技术的应用和开发。

此外，所选变量对能源利用效率总的的影响大小是： $X_1 > X_3 > X_4 > X_2 > X_5$ ，且每个因素对中国能源利用效率的绝对影响效应都大于 0.5。其中煤炭消费在总能源消费中的比重对能源利用效率总的影响最大，总影响系数达到 0.8388，且与能源利用效率正相关。因此要提高中国能源利用效率，首当其冲的是降低煤炭消费在总能源消费中的比重，大力发展清洁能源和可再生能源，进而促进中国能源消费结构的改善。

## 参考文献

- [1] Guo Ju'e, Chai Jian, Xi Youmin, 2008, Analysis of Influences between the Energy Structure Change and Energy Intensity in China[J], China Population, Resources and Environment, Volume 18, Issue 4.
- [2] Philip Andrews-Speed, China's ongoing energy efficiency drive: Origins, progress and prospects [J], Energy Policy 37(2009) 1331-1344.
- [3] Ding, D.P., Zhu, X., Wei, L.B., 2006., The analysis of influences between the energy consumption structure and industries development in China[J], Chinese Environmental Management, (3):1-3.
- [4] Han, Z.Y., Fan, Y., Jiao, J.L., et al., 2007. Energy structure, marginal efficiency and substitution rate: an empirical study of China, [J], Energy, 32:935-942.
- [5] Feng, T., et al., The relationship between energy consumption structure, economic structure and energy intensity in China[J], Energy Policy (2009), .2009.08.008.
- [6] Fish-Vanden, K., Jefferson, G.H., Liu, H.M., Tao, Q., What is driving China's decline in energy intensity?[J], Resource and energy Economics, 2004, 26.
- [7] Karen Fisher-Vanden, GH Jefferson, M. Jingkui, X. Jianyi, Technology Development and Energy Productivity in China, Energy Economics, 2006, 28, pp.690-705
- [8] 林伯强，结构变化、效率改进与能源需求预测[J],经济研究,2003.5.
- [9] 耿诺,王高尚,中国能源效率分析[J],中国能源,2008,(7):32~36.
- [10] 孙立成,周德群,中国全要素能源效率变动的实证研究[J],系统工程,2008,(7):74~80.
- [11] 王群伟,周德群,陈洪涛,技术进步与能源效率—基于ARDL方法的分析[J],数量统计与管理,2009,9.
- [12] 薛毅,陈立萍,统计建模与R软件[M],清华大学出版社, 2006.
- [13] 刘畅,孔宪丽,高铁梅,中国工业行业能源利用效率变动及影响因素分析[J],资源科学,2008,(9).
- [14] 张意翔,刘捷,成金华,中国能源效率变化趋势与调整政策[J],管理学报, 2009.6.
- [15] 韩智勇,魏一鸣,范英,中国能源利用效率与经济结构变化特征研究[J],数理统计与管理, 2004(1).