

# Measurement and Evaluation of Ecological Efficiency of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan Based on Meta-US-SBM Model

Yuhui Xie, Yulin Zhu

Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan  
Email: xieyuhui1994@163.com

Received: Nov. 15<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 30<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 7<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Developing a green economy is a necessary channel for Changsha, Zhuzhou and Xiangtan to achieve a two-type society. The measurement and evaluation of ecological efficiency is a suitable method for the assessment of green economy. This paper takes the "3 + 5" urban agglomeration of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan as the research object, establishes a total factor production framework, and integrates economic efficiency, energy efficiency, environmental efficiency and ecological efficiency into a unified model, and uses the Meta-US-SBM model to measure the cities' Eco-efficiency and its sub-efficiency in 2006-2016, and then analyze the causes of eco-efficiency based on the results of each city's efficiency. The empirical results show that the overall eco-efficiency of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan urban agglomerations is on the rise, but Changsha is in a clear leading position, and the gap with other cities is obvious. The Changsha, Zhuzhou and Xiangtan urban agglomerations have high economic efficiency, the overall economic development is good, and the trend is stable. Under the environmental efficiency, the cities of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan have an upward trend, but they are relatively flat compared with economic efficiency. In terms of energy efficiency, the overall Lower, needs to be treated with emphasis.

## Keywords

CZT Urban Agglomerations, Meta-US-SBM Model, Eco-Efficiency

---

# 基于Meta-US-SBM模型的长株潭生态效率测度与评价

谢宇慧, 朱玉林

中南林业科技大学, 湖南 长沙  
Email: xieyuhui1994@163.com

收稿日期: 2018年11月15日; 录用日期: 2018年11月30日; 发布日期: 2018年12月7日

## 摘要

发展绿色经济是长株潭实现两型社会的必要渠道, 生态效率的测度与评价对于绿色经济的评估, 是比较合适的方法。本文以长株潭“3+5”城市群为研究对象, 建立全要素生产框架, 将经济效率、能源效率、环境效率与生态效率纳入统一模型中, 运用Meta-US-SBM模型测算了各市2006~2016年的生态效率及其子效率, 再根据各市子效率的结果分析其生态效率高低的成因。实证结果表明: 长株潭城市群生态效率整体呈上升趋势, 但长沙处于明显领先地位, 与其他各市差距明显。长株潭城市群经济效率较高, 经济发展整体良好, 且趋势稳定; 在环境效率下, 长株潭城市群各市均具有上升趋势, 但与经济效率相比相对平缓; 而能源效率方面, 整体较低, 需要重点对待。

## 关键词

长株潭城市群, Meta-US-SBM模型, 生态效率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

长株潭一般指长株潭城市群, 其是湖南省经济发展的核心增长极, 是中部经济崛起发展的重要引擎, 对国家的经济发展起着重要的推动作用。而近年来随着经济的高速发展, 环境污染问题愈发凸显。作为“全国两型社会综合配套改革试验区”, 寻求经济与生态的协调发展, 对长株潭来说已经迫在眉睫。生态效率是利用生态资源最大化地满足人类需要的效率, 是资源和环境约束下的全要素生产率。在各种评价区域绿色发展的指标中, 生态效率作为一个综合性强、概念明晰、容易测度的指标, 得到了许多学者的关注。

本文借鉴 Huang [1] 的全新 DEA 模型——Meta-US-SBM 模型测算生态效率, 并且针对经济效率、能源效率和环境效率, 分别运用投入或产出导向测度模型, 以解决异质性技术、全面识别性、可传递性和跨期可比性以及非期望产出等问题, 从而全面、准确地分析长株潭城市群各市生态效率高低的具體原因, 并提出建议对策。不仅为城市群的绿色发展量化研究提供了新的视角和方法, 也为长株潭城市群的生态效率提升了一定的参考。

## 2. 文献综述

生态效率最初是由德国学者 Schaltegger 和 Sturm [2] 提出。此后, 经济合作与发展组织(OECD)和世界可持续发展工商联合会(WBCSD)等相继对生态效率的概念进行了界定、分析与拓展。而对这些概念的总结广为接受的是 Seppala [3] 的解释: “生态效率是单位环境压力或者成本所对应的产品和服务价值, 这些产品和服务的价值反映了一个公司、产业或者经济体的总产出。”这一概念注重以最少代价或者冲击来最大化地获取经济价值。而伴随着绿色经济的崛起, 生态效率也已成为研究者和企业家的热点与重点。

自李丽萍[4]等(2000)将生态效率概念介绍到中国后, 周国梅[5] (2003)、诸大建和朱远[6] (2005)等较早地从循环经济角度介绍和分析生态效率, 吕彬和杨建新[7] (2006)介绍了生态效率方法研究与应用。而有关研究主要从企业(如张炳[8]等, 2008; 陈晓红、陈石[9], 2013)、生态园(如商华、武春友[10], 2007;

武春友、孙源远[11], 2009)、行业(王飞儿、史铁锤[12], 2008; 毛建素等[13], 2010)以及区域(陈傲[14], 2008; 罗能生[15]等, 2013; 李胜兰[16]等, 2014; 成金华[17]等, 2014; 李佳佳[18]等, 2016)等层面展开, 区域的研究起步相对较晚, 但增长很快。

现有文献对区域生态效率的评价以及影响因子分析已经有了丰厚的成果, 但是与新兴的城市群概念结合并不多, 除了付丽娜[19]等(2013)少数研究者之外, 鲜有探讨。但随着国家发展重心逐渐下放到各区域城市群, 城市群生态效率的评价与分析是值得研究与探析的问题。

### 3. 研究方法及数据说明

#### 3.1. 研究方法



Figure 1. Research ideas

图 1. 研究思路

本文构建了一个全要素生产模型来揭示生态效率、环境效率、资源效率和经济效率之间的内在联系(如图 1), 将 4 个效率放置于同一个全要素生产框架, 并运用最新的综合模型 Meta-US-SBM 对其进行分别测算。生态效率是这个框架的核心, 有其最广泛的含义: 经济产出最大化、环境污染最小化、能源消耗最小化。而经济效率、环境效率、能源效率在本文被视作生态效率的子效率进行考虑, 其分别对应上文 3 项效率的最大化(环境污染与资源消耗越少表示环境效率与资源效率越高)。因各子效率的目的与含义不同, 而对长株潭城市群进行分别测量可以找到各市生态效率值高低的成因, 发现各市发展模式的偏好及短板。

##### 3.1.1. Meta-US-SBM 模型

DEA 模型最初由 Charnes、Cooper 和 Rhodes [3]提出, 具有较多优点, 例如, 无须假设生产函数形式, 不受指标量纲影响, 不需要估计参数, 可同时考虑多投入多产出的情形, 实现了客观赋权, 可以进行效率分解, 还可以考虑环境污染这类坏产出, 因此被广泛用于投入产出的评价。随着问题的逐步拓展与深入, 研究发现 DEA 方法测度绿色效率时仍然存在一些重要而关键的问题。Huang 根据最新文献研究进展, 给出了更具综合性的测度模型——Meta-US-SBM 模型:

假定 DMU 的个数为  $N$ , 可根据异质性特征将其划分为  $H(H > 1)$ 组。定义第  $h$  组的 DMU 个数为  $N_h (h=1, 2, \dots, H)$ , 有  $\sum_{h=1}^H N_h = N$ 。假定每个决策单元有三类投入产出变量: 投入、好产出和坏产出, 分别用以下变量表示:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_M] \in \mathbb{R}_+^M$ ,  $y = [y_1, y_2, \dots, y_R] \in \mathbb{R}_+^R$ ,  $b = [b_1, b_2, \dots, b_J] \in \mathbb{R}_+^J$ , 其中  $M$ 、 $R$  和  $J$  分别依次表示三类变量的个数。其生产可能性集根据共同前沿可以表示为:

$$P^{meta} = \left\{ (x, y, b) : \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h x_n^h \leq x^h; \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h y_n^h \leq y^h; \right. \\ \left. \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h b_n^h \leq b^h; \xi_n^h \geq 0; n = 1, 2, \dots, N_h; h = 1, 2, \dots, H \right\} \quad (式 1)$$

式 1 中,  $\rho^{meta} = \{\rho^1 \cup \rho^2 \cup \dots \cup \rho^H\}$ ,  $\xi_n^h$  为第  $n$  个 DMU 在共同前沿第  $h$  群组下的权重。根据生态效率测量需要的 Meta-US-SBM 模型数学形式如下:

$$[Meta-US-SBM] \rho_{ko}^{Meta*} = \min \frac{1 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_{mko}^x}{x_{mko}^x}}{1 - \frac{1}{R+J} \left( \sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^y}{y_{rko}^y} + \sum_{j=1}^J \frac{s_{jko}^b}{b_{rko}^b} \right)}$$

$$s.t. \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h x_{mhn} + s_{mko}^x \geq 0$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} + s_{mko}^y \geq 0$$

$$b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h b_{jhn} + s_{jko}^b \geq 0$$

$$1 - \frac{1}{R+J} \left( \sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^y}{y_{rko}^y} + \sum_{j=1}^J \frac{s_{jko}^b}{b_{jko}^b} \right) \geq \varepsilon$$

$$\xi_n^h, s^x, s^y, s^b \geq 0$$

$$m = 1, 2, \dots, M; r = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, J \quad (式 2)$$

其中  $s^x$ ,  $s^y$  和  $s^b$  分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量,  $\rho_{ko}^{Meta*}$  为第  $o$  个 DMU 在第  $k$  个群组下的共同前沿效率。在规模报酬可变情况时, 需要加上约束条件  $\sum_{h=1, n=1}^H \sum_{n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h = 1$ 。  $\varepsilon$  为非阿基米德无穷小, 其是约束公式中分母大于 0。下文数据解释均与此处一致。

Meta-US-SBM 的评价思路如下:

- 1、先根据异质性特征将样本分为若干群组, 群组内部各决策单元具有相同或高度相近的技术水平, 每个群组分别构建生产技术前沿(称为“群组前沿”)由此可以测算得到群组效率, 进一步再给予个群组前沿构建一个包络所有族群生产可能性集的共同生产可能性集, 即所有群组的共同前沿面(见图 2), 称为“共同前沿”;
- 2、采用非径向处理好松弛变量, 并运用超效率模型概念处理好更高的数据只能落在生产沿面的问题;
- 3、使用非导向处理使得可以同时从投入和产出两个方面进行测量;
- 4、利用全局参比技术, 对面板数据进行处理, 以解决跨期可比性和可传递性问题。

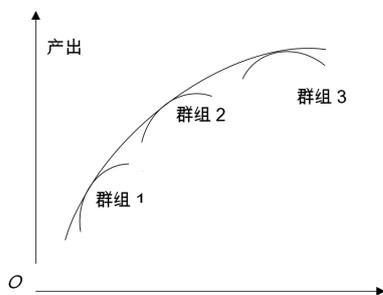


Figure 2. Common Frontier Model  
图 2. 共同前沿模型

### 3.1.2. 能源效率的测度

在全要素生产率视角下, 能源效率是指其他投入变量和产出变量等因素既定时, 一个决策单元在生产中利用能源的相对效率, 反映其最大化利用能源的相对潜力或者能力(与其他决策单元相比较)。更具体而言, 是指产出和其他资源耗用数量既定条件下, 一个生产体系(国家、地区、企业或单项耗能设备等)有效利用的能量(最佳能源投入量)与实际消耗能量的比率。考虑到能源作为投入变量出现在 DMU 的生产过程中, 且要体现“其他因素相同”这一要求, 我们不仅需要采用投入导向模型且确保产出变量的松弛为 0, 而且需要利用能源投入变量对应的松弛变量来测算最佳能源投入量(DEA 模型中为目标值), 进而用最佳能源投入量和实际使用量的比值来测算能源效率。

假定各个投入产出变量的界定同前, 其中能源投入记为  $x_e$ 。在规模报酬不变下假设下, 第  $k$  组第  $o$  个 DMU 求解以下共同前沿超效率模型:

$$\begin{aligned} \rho_{ko}^{Meta*} &= \min \left( 1 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_{mko}^x}{x_{mko}^x} \right) \\ s.t. \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq k}^{N_h} \xi_n^h x_{mhn} + s_{mko}^x &\geq 0 \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq k}^{N_h} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} &\geq 0 \\ b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq k}^{N_h} \xi_n^h b_{jhn} &\geq 0 \\ \xi_n^h, s_{mko}^x &\geq 0 \\ m &= 1, 2, \dots, M; r = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \tag{式 3}$$

式 3 中,  $\xi$  表示非负权重。根据求解结果获得与能源投入对应的松弛变量  $s_e^{Meta}$ 。相对于共同前沿而言, 第  $k$  组第  $o$  个 DMU 的能源效率为:

$$EE^{Meta} = \frac{x_e - s_e^{Meta}}{x_e}$$

### 3.1.3. 经济效率的测度

全要素生产率视角下, 经济效率是指各类资源投入和非期望产出等其他因素既定时, 一个决策单元获得经济产出的小队效率, 反映其最大化获得经济产出的相对潜力或者能力(与其他决策单元相比较)。为体现“其他因素既定”这一要求, 需要采用产出导向模型且确保其他产出变量的松弛为 0。为了识别前沿面的决策单元并确保跨期可比, 需要采用超效率模型。而且, 为了考虑非径向变化, 需要采用 SBM 模型。而为了考虑异质性因素, 需要引入共同前沿技术。

考虑坏处出时, 对于第  $k$  组第  $o$  个 DMU 的经济效率相对于所在共同前沿的产出导向通过求解一下规划得到:

$$\begin{aligned} \rho_{ko}^{Meta*} &= \min \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^y}{y_{rko}}} \\ s.t. \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq k}^{N_h} \xi_n^h x_{mhn} &\geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} + s_{rko}^x \geq 0 \\
& b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h b_{jhn} = 0 \\
& \xi_n^h, s_{jko}^b \geq 0; m = 1, 2, \dots, M; \\
& r = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, J
\end{aligned} \tag{式 4}$$

### 3.1.4. 环境效率的测度

在全要素生产率视角下, 环境效率是指各类资源投入和经济产出等其他因素既定时, 一个决策单元在生产中最小化产出(排放)环境污染物的小队效率时, 反映其以最小环境成本获得既定经济产出的相对潜力或者能力(与其他决策单元相比较)。类似于经济效率的测度, 其考虑好产出时, 对于第  $k$  组第  $o$  个 DMU 的环境效率相对于所在共同前沿的产出导向模型超效率可以通过求解一下规划得到:

$$\begin{aligned}
\rho_{ko}^{Meta^*} &= \min \frac{1}{1 - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{s_{jko}^b}{b_{jko}}} \\
s.t. \quad x_{mko} &- \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h x_{mhn} \geq 0 \\
& \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} = 0 \\
b_{jko} &- \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_h} \xi_n^h b_{jhn} + s_{jko}^b \geq 0 \\
& \xi_n^h, s_{jko}^b \geq 0 \\
& r = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, J
\end{aligned} \tag{式 5}$$

## 3.2. 研究指标及数据选取

参考有关文献(Zhang [5]; Huang [1])并根据数据性和完整性, 本文数据以长沙、株洲、湘潭、常德、衡阳、益阳、岳阳、娄底 8 个城市为样本。观测期为 2007~2016 年。GDP、资本投入、劳动投入、土地投入、能源投入来源于历年《中国城市统计年鉴》、《湖南省统计年鉴》、环境指数测算所需数据均来自于各市统计年鉴、环境公报及环保局资料等。详细数据见附录 2。

为全面和准确地测度生态效率, 应尽可能考虑各种投入变量和产出变量。本文借鉴参考了 Li [20]和 Huang [1]的变量选取。有关变量说明如下:

1) “好”产出(期望产出)。选用各地区的实际地区生产总值(GDP), 换算为 2007 年不变价。

2) “坏”产出(非期望产出)。现代社会环境污染物颇多, 相互之间既有差异有存在较高程度的相关性, 且具有奇异值。现有文献主要考虑了  $SO_2$  和  $CO_2$  这两类污染物(如 Li, 2012), 本文根据数据可得性, 选用了 6 个指标:  $CO_2$  排放量、 $SO_2$  排放量、废水排放总量、废水中化学需要量(COD)、废水中氨氮排放量和烟(粉)尘排放量。为避免高相关性和奇异值的影响, 借鉴 Huang (2014)利用熵权法构建环境污染指数 (Environment index, EI), 以之作为坏产出指标综合反映环境约束。其取值标准化到 0~100, 越大(小)意味着污染物越多(少)。

3) 资本投入。估算资本投入最常见的方法是“永续存盘法”, 简要说明如下: 1、当期投资指标选

择。参考张军等(2004) [21], 本文选取固定资本形成总额  $I_t$  作为当年投资。2、基期资本存量的测算。借鉴 Harberger (1978), 用式 5 测算:

$$K_0 = \frac{I_0}{g + \delta} \tag{式 5}$$

式 5 中,  $K_0$  为基期资本存量,  $I_0$  为基期固定资本形成总额,  $g$  为固定资本形成总额平均增长测度, 根据《湖南省统计年鉴》和各市统计年鉴提供的固定资本形成总额发展速度数据测算,  $\delta$  为湖南省(各市因为缺乏数据, 故统一为湖南省的标准)的折旧率, 采用吴延瑞(2008) [22]的数据。3、价格换算。采用固定资产投资价格指数进行投资平减, 将有关数据换算为 2006 年价格。由此,  $t$  期的资本投入可表示为:

$$K_t = (1 - \delta)K_{t-1} + I_t = (1 - \delta)^n K_0 + \sum_{i=1}^t (1 - \delta)^{t-i} I_i \tag{式 6}$$

- 4) 劳动投入。根据可得性, 采用各市历年来从业人数作为劳动投入指标。
- 5) 土地投入。尽管各市行政区域面积已固定, 但实际利用面积和利用方式却在不断变化。根据数据可得性, 本文借鉴 Huang (2014), 采用各市建成区面积作为土地投入指标。
- 6) 水资源投入。选取供水总量为代理变量, 该数据涵盖了农业与工业生产、生活和生态用水等信息。
- 7) 能源投入。采用各市所有能源的消费量(换算为标准煤)指标。

## 4. 实证结果分析

### 4.1. 生态效率的区域特征

本文采用 MaxDEA 6 软件测算效率, 结果显示, CRS (规模报酬不变)和 VRS (规模报酬可变)下的效率值有较大差异(两者均值差为 0.1), VRS 下的效率值均不低于 CRS 下的效率值。Zheng 等(1998)指出, 若两种技术假设得出的结果不同, 运用 VRS 下的结果更好。因此, 本文在分析中均采用 VRS 的效率值。如表 1。

**Table 1.** Eco-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
**表 1.** 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群生态效率值(2006~2016)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Mean	Ranking	AR
长沙	1.597	1.631	1.462	1.481	1.682	1.648	1.665	1.823	1.845	1.98	1.94	1.705	1	0.0196
株洲	0.431	0.415	0.417	0.497	0.542	0.589	0.655	0.652	0.687	0.719	0.724	0.575	8	0.0901
湘潭	0.878	0.826	0.753	0.711	0.707	0.718	0.725	0.73	0.733	0.714	0.693	0.754	5	0.0236
岳阳	0.655	0.627	0.674	0.692	0.716	0.712	0.727	0.751	0.734	0.746	0.769	0.709	6	0.0161
衡阳	0.681	0.662	0.684	0.695	0.702	0.692	0.706	0.712	0.716	0.728	0.735	0.701	7	0.0076
益阳	0.862	0.847	0.883	0.771	0.812	0.806	0.823	0.821	0.815	0.823	0.835	0.827	3	0.0032
娄底	0.874	0.889	0.911	0.818	0.804	0.789	0.776	0.771	0.776	0.768	0.756	0.812	4	0.0143
常德	0.978	1.074	1.042	1.089	0.981	0.946	0.889	0.924	1.042	1.183	1.159	1.03	2	0.0171
Mean	0.869	0.871	0.853	0.844	0.868	0.862	0.87	0.898	0.918	0.957	0.951	0.889125		

注: AR = Average Change (%), 2006~2016。

由表 1 可知:

1) 11 年间长株潭城市群的生态效率平均水平先下降并维持在了一定水平之后, 又继续上升。2016 年的效率水平高于观察初期(2006 年), 2009 年为相对低位。由此可见, 尽管受到了 2008 年美国金融危机影响, 整体经济放缓, 生态效率总体上仍然保持上升态势, 说明长株潭城市群总体上正在向绿色发展转变。

2) 如图 3, 生态效率较高的为长沙和常德, 其他城市的生态效率明显较低, 而较低的 6 所城市又可分为中、低两档, 长株潭呈现“三段式”现象。具体地, 长沙和常德一直保持在较高的生态效率水平, 其中长沙最为显著, 2006 年为最低水平, 之后快速上升并远远超过其他区域, 也远远高于常德和全国平均水平。而常德的平均效率值大于 1, 且方差较小, 与其他中低地区相比, 效率值较高且稳定。根据效率平均值的相对比较, 湘潭、益阳和娄底为生态效率中等地区(Mean = 0.75 - 0.85), 湘潭的平均效率值处于中等(0.754), 但是生态效率整体呈现下降趋势。益阳的生态效率波动较小, 趋向于稳定。娄底与益阳的生态效率相比, 平均效率虽然接近, 但是其波动更大, 且大部分时间处于下降趋势。相对低生态效率的地区为株洲、岳阳、衡阳(Mean = 0.69 - 0.75)。株洲的生态效率为最低(0.575), 但是其自 2009 年开始一直呈现上涨趋势, 且近几年增长强劲。岳阳生态效率整体平稳, 一直处于中下水准, 但是逐年上升。衡阳与岳阳的生态效率趋势整体相近, 但其增长速率低于岳阳, 在观测初期生态效率大于岳阳的情况下, 观测末期与平均效率均低于岳阳。

3) 各城市的生态效率跨期变化不大, 路径依赖较为严重。其中 6 所城市的平均增长率均小于 0.02, 只有湘潭与株洲的平均增长率大于 0.02, 其中株洲的平均变化率更是达到了 0.0901。另外, 湘潭、益阳和娄底的平均效率负, 且湘潭的负增长率大于了绝大多数城市的增长率, 而益阳与娄底的负增长率业与其他大多数城市的增长率相近。

总的来说, 长株潭生态效率整体上升平稳, 在逐渐的改进其发展模式, 绿色经济发展已经取得了初步成效。长沙作为长株潭城市群的核心, 自 2007 年以来, 经济发展强劲, 产业转型顺利, 尤其是经开区内的生态园、绿色工厂层出叠现, 引领了长沙的绿色发展, 为长沙的领先地位打下了坚实的基础。常德虽然整体落后于长沙, 但是相较于其他城市具有明显的优势, 这与其常年严格的环境规制和优秀的城市规划密不可分。湘潭、益阳和娄底的生态效率虽然位于中等, 但对于长沙而言, 湘潭、益阳和娄底其仍有较大的提升空间。且该 3 市近年来生态效率逐渐降低, 其需要在促进发展的同时注意节能减排和绿色生产, 以追求绿色发展的进步。株洲、湘潭和衡阳都是老工业城市, 株洲更是 2006 年的十大工业污染城市之一, 高耗能、高污染的产业是生态效率较低的主要来源, 解决环境污染和资源浪费是它们的首要任务。另外, 株洲虽然在测算初期生态效率很低, 但是随着近年来产业转型和整体规划方面的大力改革, 该市的绿色发展得到了良好的改善, 生态效率也显著提高。

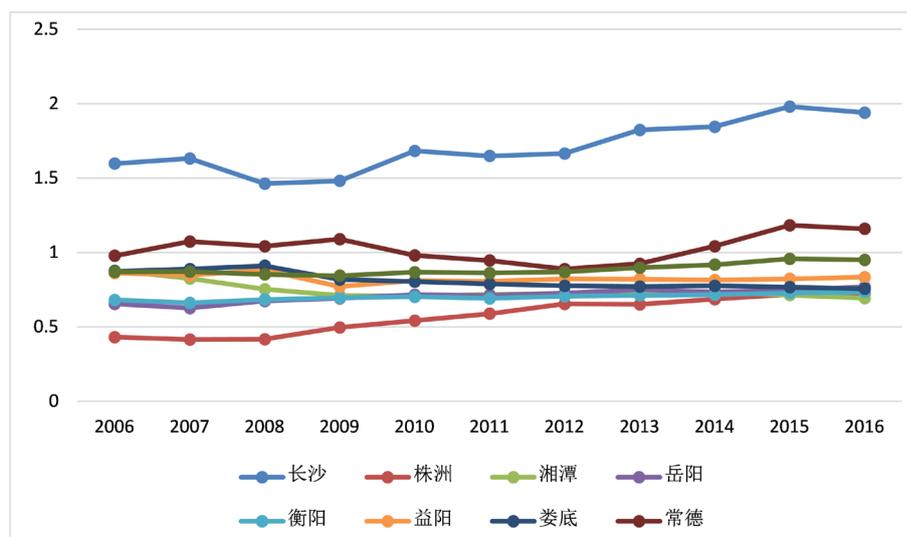


Figure 3. Eco-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
图 3. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群生态效率值(2006-2016)

## 4.2. 子效率的区域特征

### 4.2.1. 经济效率的区域特征

经济效率反映了一个区域在既定资源和环境约束下最大化获得经济产出的能力或者潜力。利用前文提到的经济效率测度模型, 计算出 2006~2016 年长株潭城市群的经济效率得分。如表 2。

**Table 2.** Economic-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
**表 2.** 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群经济效率值(2006~2016)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Mean	Ranking	AR
长沙	1.597	1.631	1.462	1.481	1.682	1.648	1.665	1.823	1.845	1.98	1.94	1.705	1	0.0196
株洲	0.431	0.415	0.417	0.497	0.542	0.589	0.655	0.652	0.687	0.719	0.724	0.575	8	0.0901
湘潭	0.878	0.826	0.753	0.711	0.707	0.718	0.725	0.73	0.733	0.714	0.693	0.754	5	0.0236
岳阳	0.655	0.627	0.674	0.692	0.716	0.712	0.727	0.751	0.734	0.746	0.769	0.709	6	0.0161
衡阳	0.681	0.662	0.684	0.695	0.702	0.692	0.706	0.712	0.716	0.728	0.735	0.701	7	0.0076
益阳	0.862	0.847	0.883	0.771	0.812	0.806	0.823	0.821	0.815	0.823	0.835	0.827	3	0.0032
娄底	0.874	0.889	0.911	0.818	0.804	0.789	0.776	0.771	0.776	0.768	0.756	0.812	4	0.0143
常德	0.978	1.074	1.042	1.089	0.981	0.946	0.889	0.924	1.042	1.183	1.159	1.03	2	0.0171
Mean	0.869	0.871	0.853	0.844	0.868	0.862	0.87	0.898	0.918	0.957	0.951	0.889		

由表 2 可知:

1) 总体上, 经济效率分为 3 个档次。长沙的经济效率较高, 而岳阳、常德、衡阳、株洲 4 市的经济效率次之, 湘潭、益阳、娄底 3 市的区域经济效率相对较低。

2) 如图 4, 动态比较, 长沙在观察期间(2006~2016)保持了很高的经济效率且效率有明显提升(平均增长率大于 0.01), 但湘潭、益阳、娄底 3 市的经济效率不仅相对较低, 而且增长缓慢(平均增长率小于 0.01), 甚至呈现下降态势。另外, 岳阳、常德、衡阳、株洲 4 市的经济效率相对较高, 除岳阳外, 平均效率均大于 0.01, 上升趋势显著。

3) 各市的经济效率增长趋势平稳, 但在 2008~2009 之间受到了一定的限制, 可能是由于金融危机的影响, 而大部分城市的经济效率增速在之后又有了回升态势。

与上一小节有关发现比较可知, 经济效率与生态效率的区域特征有一些共同之处, 例如长沙、常德的经济效率和生态效率较高。但是区别更加明显, 例如, 岳阳、衡阳、株洲具有相对较高经济效率, 但其生态效率均较低。这意味着些城市在在保持高速经济发展的同时, 可能产生了大量的环境破坏与资源浪费。另外, 与生态效率不同, 长株潭城市群的所有样本点的平均增长率都为正, 且平均经济效率值(0.986)明显大于平均生态效率(0.889), 这表示自 2006 年以来, 长株潭城市群的经济效率发展较好, 但是综合各方面的绿色经济发展较弱。这些发现都暗示着各个市在经济和环境的均衡发展方面各有其侧重点, 有必要更深入地分析其各自的优劣势, 找出其生态效率高低的成因, 以寻求特定的解决方案。

### 4.2.2. 环境效率的区域特征

环境效率反映了一个区域在既定资源约束下, 以最小环境代价获得经济产出的能力或者潜力, 侧重于反映一个区域的环境保护绩效。利用前文给出的环境效率测度模型, 计算出 2006~2016 年长株潭城市群的环境效率得分。如表 3。

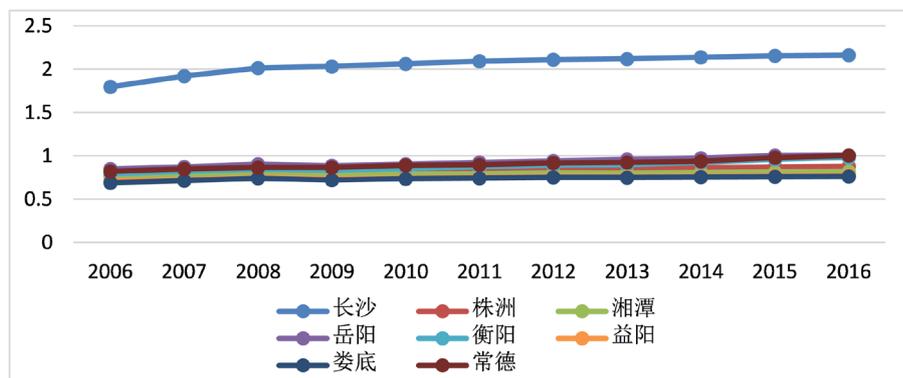


Figure 4. Economic-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
图 4. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群经济效率值(2006~2016)

Table 3. Economic-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
表 3. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群经济效率值(2006~2016)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Mean	Ranking	AR
长沙	1.796	1.92	2.012	2.032	2.061	2.093	2.11	2.118	2.136	2.154	2.16	2.053	1	0.0186
株洲	0.78	0.809	0.825	0.81	0.823	0.838	0.851	0.853	0.862	0.871	0.88	0.837	5	0.0121
湘潭	0.767	0.781	0.804	0.782	0.789	0.794	0.802	0.8	0.807	0.812	0.816	0.796	6	0.0062
岳阳	0.848	0.871	0.904	0.886	0.902	0.923	0.941	0.957	0.974	1.002	1.005	0.928	2	0.0017
衡阳	0.794	0.821	0.846	0.834	0.85	0.872	0.891	0.896	0.922	0.957	0.981	0.879	4	0.0213
益阳	0.709	0.723	0.751	0.737	0.745	0.752	0.76	0.759	0.764	0.771	0.777	0.75	7	0.0092
娄底	0.69	0.714	0.74	0.722	0.736	0.743	0.751	0.75	0.754	0.759	0.762	0.738	8	0.0099
常德	0.822	0.849	0.865	0.864	0.888	0.896	0.917	0.925	0.938	0.98	1.002	0.904	3	0.0199
Mean	0.681	0.717	0.738	0.745	0.729	0.763	0.732	0.739	0.746	0.748	0.779	0.729		

由表 3 可知:

1) 总体上, 环境效率长沙、常德的环境效率较高(平均效率大于 0.8), 益阳、娄底、湘潭的环境效率次之(平均效率大于 0.65), 岳阳、衡阳、株洲的环境效率相对最低。

2) 如图 5 动态比较, 长沙、常德、娄底在观察期间(2006~2016 年)保持了较高的环境效率, 但平均增长率均较低(小于 0.01), 而益阳的环境效率虽有起伏, 但是环境效率较高, 且有着较高的平均增长率(大于 0.02)。另外株洲、岳阳的环境效率虽然相对较低, 但是平均增长率较高(大于 0.025), 而湘潭、衡阳的环境效率相对较低, 且平均增长率较低(小于 0.01)。

3) 由历年的平均环境效率可知, 各市的环境效率整体增长平稳且较为缓慢, 2008 年的美国金融危机、欧洲债务危机对环境效率的影响不明显, 但是 2011 年的平均环境效率迎来一个峰值, 其原因可能是十二五大力提倡的绿色发展, 对于长株潭城市群建立资源节约型、环境友好型社会起到了良好的政策导向作用。

与前文有关发现比较可知, 环境效率与生态效率、经济效率的区域特征有一些共同之处, 例如长沙、常德的环境效率、经济效率和生态效率均较高, 湘潭、娄底的平均增长率都相对较低。长沙、常德自 2006 年以来一直注重环境规划和城区建设, 特别是对于污染企业的控制是其高环境效率的原因之一。但同样地, 存在更多的明显区别, 尤其是与经济效率比较。例如, 岳阳、衡阳具有相对较高的经济效率, 但其环境效率却相对较低。岳阳、衡阳近年来一直在拓展城区、发展建设, 但是相应的环保意识与规定并没

有同步到位, 这使得它们的环境效率处于落后地位。益阳、娄底的环境效率相对较高, 但是却有着较低的经济效率。其 2 市对于省下达的环保建设要求做的较好, 但是由于自身规模及地理位置等因素, 经济发展处于落后地位。

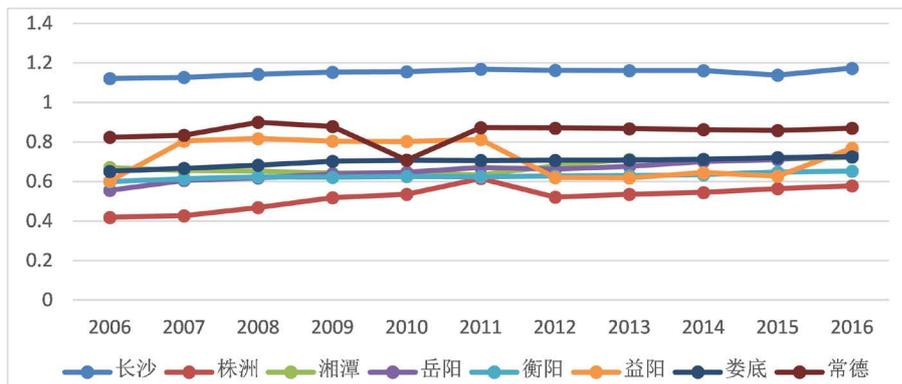


Figure 5. Environmental-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM

图 5. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群环境效率值(2006~2016)

#### 4.2.3. 能源效率的区域特征

能源效率反映了一个区域在既定环境代价和经济产出约束下, 最大化利用能源的能力或者潜力, 侧重于从资源利用效率反映区域发展水平。利用前文给出的能源效率测度模型, 计算出 2006-2016 年长株潭城市群的能源效率得分, 如表 4。

Table 4. Energy-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM

表 4. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群能源效率值(2006~2016)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Mean	Ranking	AR
长沙	1	0.984	0.942	0.976	0.969	0.963	0.941	0.889	0.923	0.96	0.945	0.968	1	0.0056
株洲	0.704	0.731	0.787	0.794	0.723	0.751	0.739	0.781	0.739	0.754	0.766	0.747	2	0.0084
湘潭	0.504	0.518	0.502	0.508	0.51	0.514	0.515	0.515	0.522	0.533	0.522	0.510	6	0.0035
岳阳	0.724	0.683	0.671	0.6	0.547	0.518	0.495	0.483	0.478	0.461	0.518	0.605	5	0.0329
衡阳	0.557	0.569	0.605	0.621	0.59	0.591	0.599	0.607	0.593	0.571	0.516	0.590	4	0.0076
益阳	0.468	0.474	0.464	0.461	0.462	0.462	0.45	0.448	0.442	0.438	0.44	0.463	7	0.0061
娄底	0.494	0.445	0.438	0.449	0.443	0.435	0.438	0.444	0.431	0.43	0.427	0.449	8	0.0145
常德	0.691	0.664	0.671	0.686	0.661	0.618	0.591	0.625	0.636	0.649	0.657	0.655	3	0.0063
Mean	0.643	0.634	0.635	0.637	0.613	0.607	0.596	0.599	0.596	0.600	0.599	0.623		

1) 总体上看, 长株潭城市群的能源效率较低, 平均效率仅为 0.623, 且没有平均效率大于 1 的城市。而其中, 长沙、株洲的能源效率较高, 而常德、岳阳、衡阳次之, 湘潭、益阳、娄底的能源效率相对最低。

2) 动态比较, 大部分城市的能源效率平均增长率为负, 且岳阳的平均增长率甚至达到了-0.03, 而仅为正向增长的株洲、湘潭, 增长率也较低(小于 0.01), 这说明了长株潭城市群的整体能源效率是在下降的, 资源浪费和能源耗散是极为严重的发展短板。

3) 如图 6, 长株潭城市群能源效率从 2006 年一直下降到 2012 年然后趋于平稳, 受金融危机、环境政策的影响并不明显。

与前文基于生态效率、经济效率、环境效率的观察结果可以发现, 能源效率的区域特征与生态效率、经济效率和环境效率的差异较大。例如, 长株潭城市群的能源效率整体趋势是下降, 但其他效率均呈上升态势。除岳阳、娄底外, 其他城市的能源效率平均变化率较小, 路径依赖严重。这说明了自 2006 年以来, 长株潭城市群的能源效率较低是一种集聚状态, 各市的能源效率都较低, 且模式具有路径依赖性。而长株潭城市群本身的资源丰富, 能源充足, 其问题可能在于资源利用, 而非资源开发。

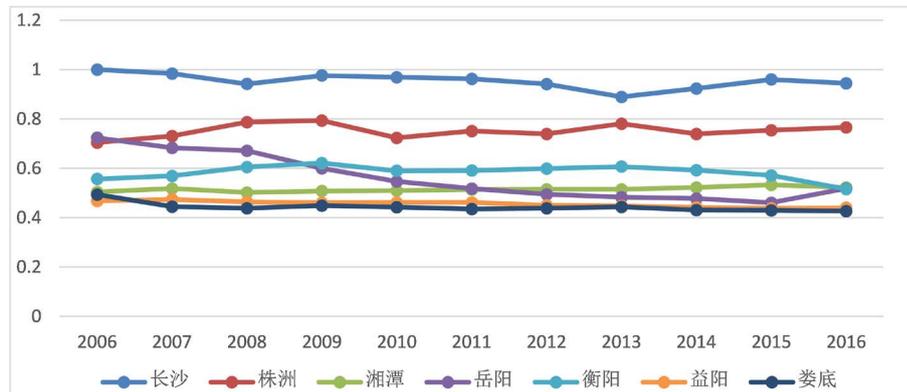


Figure 6. Energy-efficiency value of ChangZhuTan city agglomeration according to Meta-US-SBM  
图 6. 基于 Meta-US-SBM 的长株潭城市群能源效率值(2006~2016)

## 5. 结论与讨论

本文基于 2006~2016 年湖南 8 个城市面板数据, 运用 Meta-US-SBM, 对长株潭城市群的生态效率及其子效率进行分析, 得出以下结论:

1) 自 2006 年以来长株潭城市群生态效率在观测期间整体上升, 这说明其发展模式呈现出优化趋势。其中长沙的领先地位显著, 且具有不断拉开差距的态势。长沙作为城市群的核心, 具有的优势与现实相符, 但其与其他城市越来越大的差距也意味着各城市的锁定效应明显, 追赶效应较弱。各市的生态效率路径依赖较为明显, 呈现出梯度收敛现象, 难以出现跨阶段的发展。因此, 各市需要找准自己的薄弱环节, 因地制宜地采取策略发展好其绿色经济。而长沙在保证自己发展的同时, 需要发挥其核心作用, 扩大其空间溢出效应, 带动其他城市的绿色发展。

2) 长株潭城市群的各市子效率显示的特征各有不同, 也意味着各城市的优先发展模式不同, 需要重点考虑的短板也不同。在能源效率方面, 虽然长沙、株洲等城市相对较高, 但与经济效率和环境效率相比较, 都处于明显劣势, 各市均需要重点对待, 在注重资源开发的同时, 需要提高资源利用效率问题, 大力发展科技创新、引进人才等政策是可行的方法。另外需要严格控制企业, 尤其是大型工业企业的能源使用行为, 避免在资源丰富环境下的浪费行为。

3) 从长株潭城市群的经济效率来看, 长株潭城市群经济发展整体良好, 但 2008 年金融危机对各市影响显著, 使其有着明显的负效应, 但是在此之后各市恢复良好且趋势稳定。各城市需要保持好上升态势以靠近长沙的发展速度, 形成追赶效应来促进整体发展。再者, 为了能够更好地发展绿色经济, 各市需要坚持以供给侧结构性改革为主线, 大力实施创新, 引领开放崛起战略, 并且不断优化产业结构, 以打造健康、可持续的城市群生态环境, 促进各地区经济、资源和环境的协调发展。

4) 在环境效率下, 长株潭城市群各市均具有上升趋势, 但与经济效率相比相对平缓。各市应该效仿长沙、常德, 积极建立环保意识、做好城区规划、大力发展循环经济, 并对污染企业进行适当关停以及整体改良。株洲的环境效率虽然落后但近年来一系列改革使得上升显著, 这也说明了株洲政府的积极政

策效果明显, 各市政府需要学习株洲, 积极开展环保工作, 为优质的绿色发展助力。

5) 总体上, 本文建议应注重各区域和资源、环境、经济各子系统的协调发展; 整合、优化资源配置, 提高趋于技术创新能力和增强人们的环保意识, 培养和凝聚人力资本; 以协调、可持续发展为理念, 整合资源、保护环境, 实现资源、环境和经济的协同发展。

## 参考文献

- [1] Huang, J., Yang, X., Cheng, G., *et al.* (2014) A Comprehensive Eco-Efficiency Model and Dynamics of Regional Eco-Efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, **67**, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.003>
- [2] Schaltegger, S. and Sturm, A. (1990) Ecological Rationality. *Die unternehmung*, **44**, 273-290.
- [3] Seppala, J., Melanen, M. and Maenpaa, I. (2005) How Can the Eco-Efficiency of a Region Be Measured and Monitored? *Journal of Industrial Ecology*, **9**, 117-130. <https://doi.org/10.1162/108819805775247972>
- [4] 李丽萍, 田春秀, 国冬梅. 生态效率——OECD 全新环境管理经验[J]. 环境与可持续发展, 2000(1): 33-36.
- [5] 周国梅, 彭昊, 曹凤中. 循环经济和工业生态效率指标体系[J]. 城市环境与城市生态, 2003(6): 201-203.
- [6] 诸大建, 朱远. 从生态效率的角度深入认识循环经济[J]. 中国发展, 2005(1): 6-11.
- [7] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用[J]. 生态学报, 2006(11): 3898-3906.
- [8] 张炳, 毕军, 黄和平, 等. 基于 DEA 的企业生态效率评价:以杭州湾精细化工业园区企业为例[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 4(4): 159-166.
- [9] 陈晓红, 陈石. 企业生态效率差异及技术进步贡献——基于要素密集度视角的分位数回归分析[J]. 清华大学学报:(哲学社会科学版), 2013(3): 148-157.
- [10] 商华, 武春友. 基于生态效率的生态工业园评价方法研究[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2007, 28(2): 25-29.
- [11] 武春友, 孙源远. 基于生态承载力的工业园生态效率评价研究[J]. 管理学报, 2009, 6(6): 751-754.
- [12] 王飞儿, 史铁锤. 基于物质代谢的中国纺织业生态效率评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 122-126.
- [13] 毛建素, 曾润, 杜艳春, 等. 中国工业行业的生态效率[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2788-2794.
- [14] 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000 年-2016 年省级数据为例[J]. 中国管理科学, 2008(s1): 566-570.
- [15] 罗能生, 李佳佳. 中国城镇化进程与区域生态效率关系的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 53-60.
- [16] 李胜兰, 初善冰, 申晨. 地方政府竞争,环境规制与区域生态效率[J]. 世界经济, 2014(4): 88-110.
- [17] 成金华, 孙琼, 郭明晶. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(1).
- [18] 李佳佳, 罗能生. 城市规模对生态效率的影响及区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 129-136.
- [19] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3 + 5”城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 169-175.
- [20] 李海东, 王善勇. “两型”社会建设中生态效率评价及影响因素实证分析——以 2006-2009 年省级面板数据为例[J]. 电子科技大学学报(社会科学版), 2012(6): 72-77.
- [21] 张军, 吴贵英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000 [J]. 经济研究, 2004(10): 35-44.
- [22] 吴延瑞. 生产率对中国经济增长的贡献: 新的估计[J]. 经济学(季刊), 2008(3): 827-842.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-2251，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sa@hanspub.org](mailto:sa@hanspub.org)