

中国省级全要素能源效率测算

——基于共同前沿DDF模型与GML指数

李 力, 胡佳茜*

湖北大学商学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月6日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月22日

摘 要

本文采用中国2008~2022年除西藏、港澳台地区外30个省、市、自治区的面板数据, 以资本、劳动、能耗为投入指标, 考虑期望产出与非期望产出, 将群组技术异质性纳入考察范围, 根据共同前沿DDF模型, 分析共同前沿和群组前沿下的全要素能源效率。并结合GML指数对能源效率进行分解与进一步分析, 研究表明: 1) 2008~2022年间中国能源总消耗量呈稳步递增的态势; 2) 中国整体全要素能源效率处于较低水平, 呈现小幅下降随后稳步上升的趋势; 3) 全要素能源效率存在区域异质性, 呈现“东-西-中”递减的分布特征, 区域异质性对能源效率有显著影响。基于此, 我们认为应推动技术创新与转移, 强化区域协调发展, 促进产业结构转型; 根据能源无效项制定差异化的措施来提升整体效率; 激励能源节约, 持续推进能源结构优化。

关键词

能源效率, 共同前沿, 群组前沿, TGR, GML指数

Measurement of Total Factor Energy Efficiency at the Provincial Level in China

—Based on the Common Frontier DDF Model and GML Index

Li Li, Jiaxi Hu*

Business School of Hubei University, Wuhan Hubei

Received: Mar. 6th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

This paper utilizes panel data from 30 provinces, municipalities, and autonomous regions in China

*通讯作者。

文章引用: 李力, 胡佳茜. 中国省级全要素能源效率测算[J]. 社会科学前沿, 2025, 14(5): 420-436.

DOI: 10.12677/ass.2025.145410

(excluding Xizang, Hong Kong SAR, Macao, and Taiwan Region) from 2008 to 2022. With capital, labor, and energy consumption as input indicators, and considering both desirable and undesirable outputs, the study incorporates group technology heterogeneity into the analysis. Using the common frontier DDF model, it examines total factor energy efficiency under both the common frontier and group frontiers. Additionally, the GML index is employed to decompose and further analyze energy efficiency. The research findings indicate: 1) China's total energy consumption showed a steady increasing trend from 2008 to 2022; 2) The overall total factor energy efficiency in China remains at a relatively low level, displaying a slight decline followed by a steady rise; 3) There is regional heterogeneity in total factor energy efficiency, exhibiting a decreasing distribution pattern of "East-West-Central", with regional heterogeneity significantly impacting energy efficiency. Based on these findings, the study suggests promoting technological innovation and transfer, strengthening regional coordinated development, and facilitating industrial structure transformation. It also recommends formulating differentiated measures based on energy inefficiency to enhance overall efficiency, as well as incentivizing energy conservation and continuously advancing energy structure optimization.

Keywords

Energy Efficiency, Common Frontier, Group Frontier, TGR, GML Index

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

推动实现碳达峰、碳中和目标,需要切实提高能源效率。推进“双碳”工作,是破解资源环境约束突出问题、实现可持续发展的迫切需要。随着我国经济的飞速发展,环境问题日益凸显,已经成为限制我国经济持续健康增长的主要障碍。根据《中国能源统计年鉴》的数据,从2000年到2019年,我国的能源消耗总量从14.10亿吨标准煤增长到44.76亿吨标准煤,年均增长率达到6.27%;在能源供应方面,我国的一次能源产量也从2000年的13.24亿吨标准煤增加到35.71亿吨标准煤,供需之间的缺口从0.86亿吨标准煤扩大到9.05亿吨标准煤,这导致了对能源依赖度的持续增加。

从宏观角度看,我国能源消费的主体仍以生产为主,消费占比较少[1]。随着经济进入新常态,依赖于投入的粗放型经济增长模式已难以持续[2]。考虑到能源密集型产业在我国经济发展中扮演的不可或缺的角色和能源消耗的巨大需求以及面临的能源短缺和环境污染问题,提高能源效率成为最佳选择。因此,有序地推进双碳工作,控制能源消费并提升能源效率,在确保经济稳定发展的同时,实现经济增长与能源消耗之间的脱钩,显得尤为重要。

本文使用共同前沿DEA模型估计了2008~2022年中国30个省(除西藏与港澳台地区)的能源效率。与以往对中国能源效率的研究不同,本文在以下几个方面做出了贡献:首先,考虑非期望产出,将群组技术异质性纳入考察范围,根据共同前沿DDF模型,分析共同前沿和群组前沿下的全要素能源效率。其次,结合GML指数对能源效率进行分解与分析,对能源效率项的时间变化趋势与区域异质性进行了印证。

2. 文献综述

世界能源委员会将能源效率定义为“减少为提供相同能源服务而需的能源投入”。经济学视角下,

能源效率关注的是提供单位服务或产品所需的能量投入。在实践中, 受到多种因素的影响, 国内学者采纳了众多方法, 从不同的视角对能源效率进行了深入研究。

在现有研究框架中, 根据不同的投入要素, 能效被划分为单一要素能源效率和全要素能源效率两类。前者仅考虑能源作为投入因素, 而后者除了能源外, 还涵盖了资本和劳动力这两个关键要素。

单一要素能源效率的计算虽简单, 但存在明显局限, 因为在衡量整体能效时, 它仅关注一种投入和产出, 忽略了劳动、资本等其他投入变量与能源投入间的相互替代性和协同作用[3]。相较之下, 全要素能效能够处理多种投入与产出, 更准确地反映能源使用的实际情况。这是因为能源本身并不直接产生经济产出, 而是需要与资本、劳动等其他要素结合, 共同促进产出[4]。

Hu & Wang (2006)首先提出了全要素能源效率的概念, 并测算了中国 29 个省(区、市)的全要素能源效率, 发现中部区域能源效率最低, 且随着人均 GDP 的提高而增长。自此从全要素的角度研究能源效率的文献层出不穷。Filippini & Hunt 从经济学的角度勾勒和解释了衡量能源效率水平的理论框架和实证方法, 指出全要素能源效率比能源强度更适合衡量能效[5]。Pang & Deng 则从国际角度对全要素能源效率进行比较分析和影响因素分析, 从研究结果看存在异质性, 影响因素也是如此[6]。

梳理已有研究成果发现, 多数研究表明, 中国总体能效水平总体较低, 且呈现“东-中-西”递减的趋势, 同时全要素能源效率表现出明显的差异[7]。由于研究时间、数据处理方法、采用的模型等因素, 各学者的研究成果有很大的差别, 有些研究表明 TFP 呈现出不断下降的趋势, 而部分研究表明 TFP 在不断提高[8]-[11]。陶长琪等认为中国全要素能源效率呈波动变化, 陈菁泉等认为中国全要素能源效率大致呈先下降后上升的趋势[12] [13]。

同时在全要素能源效率测算指标的选取上, 目前学者们已经展开了较为详尽的探讨, 然而, 关于非期望产出指标的选择问题, 学术界尚未形成共识[13] [14]。部分研究将 CO₂ 视为不希望输出的度[10] [15]; 部分研究将 SO₂ 视为不希望的输出[7] [16]; 也有研究将多种污染物合并成单一的指标来度量不希望的产量[17] [18]。

在全面评估全要素能源效率的方法学上, 既可以采用参数化方法也可以采用非参数化方法。参数化方法中, 随机前沿分析(SFA)是典型代表。SFA 基于先验函数形式的假设, 它在处理样本多样性时可能存在不一致性。Ferrier & Lovell 的开创性研究中提出利用随机前沿函数来计算技术效率[19]。后续, 诸多学者采用了 SFA 模型深入分析了能源效率及其影响因素[20]-[22]。虽然 SFA 为分析技术异质性提供了元前沿分析方法, 但其固有局限性在于只能处理单一输出情况, 导致在多输出环境下可能出现不稳定性。以往研究在测算时往往只着眼于理想产出, 忽略了生产中能耗带来的复杂性, 这一做法可能偏颇地评价了经济表现。早期学者尝试通过引入 Shephard 的输出距离函数, 将不希望的产出纳入全要素能源效率(TFEE)的度量, 但这一方法未能充分考虑污染排放的负面外部性, 从而导致了能源效率测量的误差。

非参数化方法中, 数据包络分析(DEA)以其无需预设函数形式的特点脱颖而出。Chung *et al.*在 1997 年扩展了 Shephard 函数, 考虑了生产中产生的不良产出, 并提出了径向方向距离函数[23]。基于 DEA 和 Malmquist 指数法, 陈海跃对不同区域进行了能源效率的评估[24]。解文华等基于 SBM-DEA 模型, 利用 2010 年到 2015 年能源投入与能源产出的相关数据, 对中国和欧盟共 16 家航空运输企业能源利用情况进行分析研究[25]。刘建翠和朱承亮利用 SBM-Undesirable 模型测算了 2012~2021 年中国地区能源效率, 并分析了各地区节能潜力[7]。利用 DEA, 研究者能够分解每年的变化情况, 对能效进行动态监测。基于全要素生产率框架, 一些研究综合考虑了资本、劳动力和能源投入, 以及理想产出和不理想产出, 并采用 DDF 来衡量 TFEE [26] [27]。DDF 在考虑非期望产出时, 提供了一种更加全面的能效评估方式, 一些学者也基于这种方法整合了多样的输入和输出因素, 更准确地衡量了 TFEE。

鉴于不同区域在自然要素、资源条件以及政策环境上的异质性, 假定统一的生产条件是不切实际的。

因此,在评估我国的能源效率时,生产技术的区域异质性必须被考虑在内。为了解决这一挑战,O'Donnell *et al.*基于数据包络方法(DEA)构建了共同前沿[28]。Oh、Oh & Lee 将群体异质性整合到传统的TFEE 测量模型中,有效地解决了上述问题[29][30]。

本研究构建了一个新的分析框架,结合了方向距离函数(DDF 函数)和共同前沿理论(Meta-Frontier 模型),有效克服了传统能源效率评估的两大局限:非期望产出的忽略与技术同质化假设的偏差,通过动态结合区域异质性特征与多维效率分解(GML 指数分解与能源无效项分解),构建了技术异质性约束下的能源效率评估体系,为区域差异化治理提供了方法论工具与实证依据。

3. 模型设置

3.1. 方向距离函数

假定每个省市(决策单元)的 M 种投入为 $x=(x_1, x_2, \dots, x_m) \in R_m^+$, 可以产生 N 种理想产出 $y=(y_1, y_2, \dots, y_n) \in R_n^+$ 和 j 种非理想产出 $b=(b_1, b_2, \dots, b_n) \in R_j^+$ 。则其对应的技术可能集为: $T=\{(x, y, b): x \text{ 能生产 } (y, b)\}$, 对应的生产可能集为: $P_{(x)}=\{(x, y, b): x \text{ 能生产 } (y, b)\}$

为了表示理想产出和非理想产出联合生产性, Fare (2005)等对该生产可能集做出如下假设: 1) 若 $(y, b) \in P$, 且 $0 \leq \theta \leq 1$, 则 $(\theta y, \theta b) \in P_{(x)}$, 表明理想产出和非理想产出的联合弱可处置性, 减少非理想产出则理想产出也相应减少, 即污染物的减排是有成本的。2) 在投入既定的条件下, 若 $(y, b) \in P_{(x)}$, 则 $(y-s, b) \in P, s \geq 0$ 即理想产出具有强可处置性。3) 若 $(y, b) \in P_{(x)}$ 且 $b=0$, 则 $y=0$, 即生产理想产出的同时必然会排放出非理想产出。我们将基于方向距离函数定义为:

$$\bar{D}(x_n, y_n; g_n, -g_n) = \sup \left\{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \right\} \quad (1)$$

其中 n 表示决策单元, 尺度向量 β 表示输出效率低下, 方向向量 $g=(g_y, -g_b)$, 即理想产出和非理想产出通过同比例增减达到生产前沿面上的最大可行数量。

3.2. Meta-Frontier 模型

将决策单元(DMUs)按技术相似性或外部环境划分为若干子群, 每组单独构建生产前沿面生成的群组前沿(Group Frontier)可反映组内最优技术边界。共同前沿(Meta-Frontier)则整合所有子群的 DMUs 构建全局生产前沿面, 代表全域最优潜在技术水平, 通常高于或等于任何群组前沿。

基于此, 本文参考 O'Donnell [28]构建了基于 DEA 方法的群组前沿和共同前沿。对于 DEA 模型中的各 DMUs, 同上文方向距离函数定义, 通过投入 $x(x \in R_m^+)$ 可以得到产出 $y(y \in R_n^+)$, 包含所有投入产出的共同技术集合为: $T^{meta}=\{(x, y) | x \geq 0, y \geq 0, x \text{ 能生产 } y\}$, 与之对应的生产可能集为: $P_{(x)}^{meta}=\{y | (x, y) \in T^{meta}\}$, $P_{(x)}^{meta}$ 的上界即为“共同前沿”。共同技术效率(MTE)等价于共同距离函数 D^{meta} :

$$0 \leq D_{(x,y)}^{meta} = \inf_{\theta} \left\{ \theta > 0 \mid \left\{ \frac{y}{\theta} \right\} \in P_{(x)}^{meta} \right\} = \text{MTE} \leq 1 \quad (2)$$

θ 表示 x 至生产前沿的径向距离值。共同前沿下技术集合 T^m 包含所有群组 $(T^1, T^2, \dots, T^G)$ 技术, 因此构建共同前沿生产技术为 $T^{meta} = \{T^1 \cup T^2 \cup T^3 \cup \dots \cup T^G\}$

各群组技术集合为 $T^{group} = \{(x, y) | x \geq 0, y \geq 0, \text{群组 } g \text{ 中 } x \text{ 能生产 } y\}$, 与之对应的生产可能集为: $P_{(x)}^{group} = \{y | (x, y) \in T^{group}\}$, 组技术效率(GTE)等价于群组距离函数 D^{group} , 即:

$$0 \leq D_{(x,y)}^{group} = \inf_{\theta} \left\{ \theta > 0 \mid \left\{ \frac{y}{\theta} \right\} \in P_{(x)}^{group} \right\} = \text{GTE} \leq 1 \quad (3)$$

D^{meta} 和 D^{group} 分别为共同前沿和群组前沿条件下的距离函数, 衡量了决策单元(DMUs)与不同生产前沿面之间的技术差距, 也反映其技术效率值。在共同前沿框架下, 还有一个重要的指标是技术落差比 (TGR), 该指标以比值形式反映了群组前沿和共同前沿技术水平的差距。TGR 用共同和群组距离函数表示为:

$$0 \leq TGR = \frac{D_{(x,y)}^{meta}}{D_{(x,y)}^{group}} = \frac{MTE}{GTE} \leq 1 \quad (4)$$

TGR 越接近 1, 表示群组的生水平越接近共同生产技术水平, 反之则表示群组的生水平越远离共同生产技术水平。

3.3. 能源利用无效率分解

在对能源效率研究中, 采用技术落差比(TGR)指标可以分析各省市能源效率与潜在最优效率之间的差异, 为了进一步探究不同地区能源效率差异的真正原因, 本文参考闫庆友等[31]将共同前沿下各省市能源利用无效(IE)分解为技术差距无效率(TIE)与管理无效率(MIE), 具体如下:

$$IE = 1 - MTE = TIE + MTE \quad (5)$$

$$TIE = GTE \times (1 - TGR) \quad (6)$$

$$MIE = 1 - GTE \quad (7)$$

其中, TIE 是不同省市区由于生产技术水平差异导致的无效率, MIE 是不同省市区由于内部管理水平低导致的无效率。通过这种分解可以进一步发现制约我国不同地区能源效率的因素, 为各项政策制定提供参考。

3.4. GML 指数

过去研究中常用的 ML 生产率指数一般采用两个当期 ML 指数几何平均的形式, 不具有循环性或传递性, 无法观察生产效率的长期增长趋势。Oh 在此基础上将非期望产出加入, 构建了 GML 生产率变动指数, 并将其分解为技术进步和技术效率变动[29]。

本文参考 Oh 模型[30], 计算 GML 指数, 具体公式如下:

$$\begin{aligned} & GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) \\ &= \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \\ &= \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \left[\frac{(1 + D^G(x^t, y^t, b^t)) / (1 + D^t(x^t, y^t, b^t))}{(1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})) / (1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}))} \right] \\ &= \frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \left[\frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} \right] \\ &= EC^{t,t+1} \times BPC^{t,t+1} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, TE^t 是衡量 t 时期技术效率的指标; 效率变化项 $EC^{t,t+1}$ 是两个时期内技术效率的变化, 反映了 DMU 在 $t+1$ 时期对应于 t 期的同期基准技术移动的距离即效率增益(损失), $EC^{t,t+1} > (<) 1$ 表示赶上(落后于)同期基准技术前沿。 $BPG_s^{t,t+1}$ 是当时的技术前沿与全球技术前沿之间的最佳实践差距。 $BPC^{t,t+1}$ 是两个 BPG 的比值, 用于衡量同期技术前沿向全球技术前沿的转移程度, 即向更多理想产出和更少不理想产出的方

向转移的程度。 $BPC^{t,t+1} > (<) 1$ 相当于技术进步(退步)。

3.5. 变量选取与数据说明

3.5.1. 变量选取

本文涉及五个基础变量, 分别是三个投入指标: 资本投入 K , 能源投入 E , 劳动投入 L , 以及两个产出指标: 期望产出 Y , 非期望产出 B 。各变量的说明如下: 1) 资本 K : 资本投入以各省的资本消费为代表, 采用永续盘存法 $K_{i,t} = I_{i,t} + (1 - \delta_{i,t})K_{i,t-1}$ 对资本存量进行估计, 并利用单豪杰法对初始资本存量进行估计。其中投资 $I_{i,t}$ 为各个城市的年度固定资产投资额, 并按投资价格指数进行平减; 折旧率 $\delta_{i,t}$ 取 10.96%; 初始资本存量 $K_{i,1}$: $K_{i,1} = I_1 / (g + \delta)$, g 是年度实际投资的几何增长率。2) 能源 E : 能源输入以标准煤单位的能源消耗表示。本文将各省每年主要能源消费量(煤炭、石油、天然气等)按照标准煤折算因子转化为标准煤总量(万吨标准煤), 采用 $E = \sum_{i=1}^n (e_i \times c_i)$ 进行计算, 其中 n 为能源产品种类; e_i 为不同种类能源产品消耗量; c_i 为标准煤系数。3) 劳动 L : 劳动力投入以劳动力消费为代表, 即各省的就业人数。4) 期望产出 Y : 由每个省的实际国内生产总值表示, 根据国内生产总值平减指数换算, 按 1998 年不变价格计算。5) 非期望产出 B : 由于二氧化硫是我国环境规制中的典型污染物和主要控制对象。因此, 本文选取二氧化硫 SO_2 总排放量作为非期望产出指标, 以万吨为单位进行统计。

3.5.2. 数据说明

根据数据可用性, 收集了 2008 年至 2022 年中国 30 个省、市、自治区的面板数据以及全国的时间序列数据。由于香港和澳门高度自治, 而西藏的数据不可用, 因此予以剔除, 共收集了 450 份样本观察结果。三个输入和两个输出数据主要来自《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及省级统计年鉴, 标准煤系数来自《中华人民共和国国家标准》, 部分缺失数据来自省级统计局或线性插值法估算。

3.5.3. 分组依据

将决策单元进行分组形成组间前沿, 充分考虑区域间的差异性, 进而可以研究不同区域与整体间的差异。本文按地理位置将除西藏以外的 30 个省市自治区划分为东、中、西部。东部包含 12 个省份(北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、安徽、福建、山东、广东、海南), 中部包含 8 个省份(山西、内蒙古、吉林、黑龙江、江西、河南、湖北、湖南), 西部有 10 个省份(广西、重庆、四川、甘肃、贵州、宁夏、青海、陕西、新疆、云南)。

4. 结果分析

4.1. 描述性分析

图 1 分别展示了全国的能源消费总量的变动情况与年增长率变化趋势, 自 2008 年以来全国能源消费总量稳步上升, 从 2008 年的 320,611 万吨增加到 2022 年的 541,000 万吨。

年增长率呈现波动性增长的趋势, 在 2010 年和 2011 年, 增长率达到峰值, 分别是 7.30% 和 7.32%。之后增长率逐渐下降, 在 2015 年达到最低点 1.35%, 然后再次波动上升。2009 年的高增长率可能出于全球金融危机后各国实施的经济刺激方案推动了能源需求增加。2010 年和 2011 年, 能源消费增长率达到峰值, 主要得益于国内外经济的快速增长, 特别是工业和建筑业的强劲扩张。从 2012 年开始, 增长率开始下降, 可能是因为经济进入调整期, 能源密集型产业增长放缓, 以及能源效率和可再生能源的使用提高。2016 年之后, 增长率小幅回升, 这可能与经济的稳健复苏和能源需求的渐增有关。到了 2021 年, 增长率激增至 5.54%, 这与经济在 COVID-19 大流行后的迅速恢复有显著联系。而 2022 年的增长率降至

2.87%，这反映了全球经济环境变化、能源转型的加速以及对可持续发展目标的持续追求，共同作用于能源消费增速的放缓。

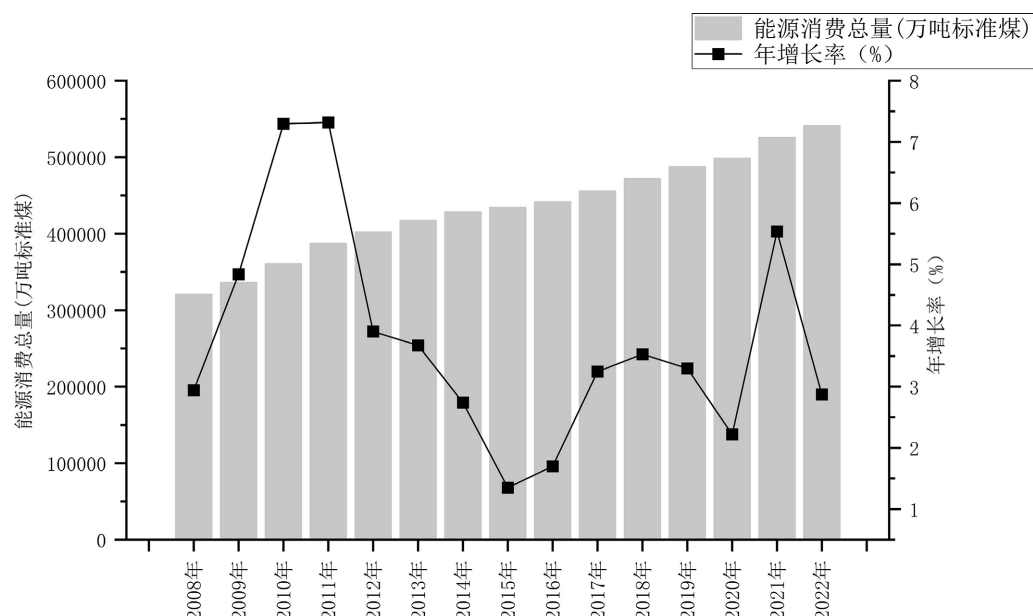


Figure 1. Trend of China's total energy consumption and annual growth rate from 2008 to 2022
图 1. 2008~2022 年中国能源消费总量与年增长率变化趋势

图 2 展现了中国各省份的平均能源消费量。总体上能源消费量在不同省份之间分布不均，反映了中国地区经济发展和工业化水平的不同。山东省的能源消费总量最高，达到 39346.54 万吨标准煤，而海南省的消费量最低，为 1877.22 万吨标准煤。

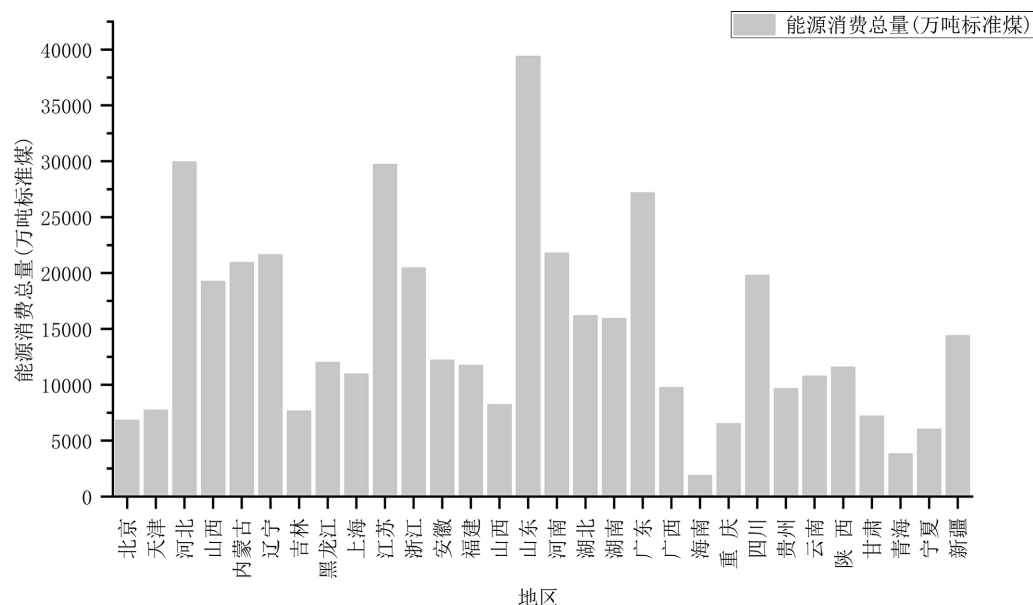


Figure 2. Average energy consumption of Chinese provinces (10,000 tons of standard coal)
图 2. 中国省份能源消费平均值(万吨标准煤)

表 1 展示了各投入产出变量的简要描述，不同组之间存在显著差异。东部地区的资本存量明显高于中部和西部水平，凸显了东部在经济发展中的主导地位；同时，东部地区的平均 GDP 也遥遥领先于中部和西部地区，其中东部地区的最大 GDP 甚至达到了中西部地区最大 GDP 的两倍；在劳动力投入方面，东部地区依然处于领先地位，中部地区次之，而西部地区位于最低水平，突显了西部地区经济发展的不平衡性和就业机会的局部性；东部地区的能源消费量位列第一，均值为 18284.47 万吨标准煤，高于中部的 15226.62 万吨标准煤，也高于西部的 9937.75 万吨标准煤，显示出明显的地域差异；在非期望产出中，尽管最大值仍然来自东部地区，但中部地区的普遍表现超过了东部和西部地区。

Table 1. Descriptive statistics of the input-output variables
表 1. 投入产出变量描述性统计

变量	分组	观测数	平均值	标准差	最小值	最大值
资本存量 <i>K</i> (亿元)	东	180	102175.42	74399.56	12138.90	337385.91
	中	120	78409.71	54129.42	16977.40	280816.41
	西	150	48926.76	42825.83	2262.90	205708.41
	全国	450	78088.34	64098.45	2262.90	337385.91
就业人数 <i>L</i> (万人)	东	180	3138.53	1976.67	408.40	7150.25
	中	120	2780.39	1557.20	1103.30	6766.86
	西	150	1911.41	1266.70	256.00	4889.00
	全国	450	2633.98	1736.38	256.00	7150.25
能源消费量 <i>E</i> (万吨标准煤)	东	180	18284.47	11401.98	1135.33	48166.90
	中	120	15226.62	5582.26	5383.00	30708.95
	西	150	9937.75	4895.58	2497.74	23952.88
	全国	450	14686.80	8991.21	1135.33	48166.90
期望产出 <i>Y</i> (亿元)	东	180	42750.82	35644.04	1474.70	190919.80
	中	120	26269.26	18561.74	4834.70	92254.70
	西	150	15170.61	15407.61	896.90	91364.20
	全国	450	29162.34	28605.18	896.90	190919.80
非期望产出 <i>B</i> (万吨)	东	180	42.17	45.68	0.11	182.74
	中	120	53.27	43.73	5.51	145.20
	西	150	41.47	32.58	4.01	123.50
	全国	450	44.90	41.43	0.11	182.74

4.2. 省际能源效率实证分析

经共同前沿 DEA 模型测算得到了中国不同省份的共同前沿效率和群组前沿效率，由于篇幅限制，不做详细展示，对数据进行统计描述，见表 2。

结合图 3 与表 2，进一步分析 2008~2022 年共同前沿和群组前沿下中国省际能源效率值对比情况。在共同前沿下，东、中、西部地区的能源效率平均值分别为 0.620、0.479 和 0.535，群组差异性显著。东部地区能源环境效率显著高于中、西部地区，表明东部地区能源使用表现良好，这与东部地区在经济

Table 2. Statistical description of inter provincial common frontier efficiency and group frontier efficiency
表 2. 省际共同前沿效率、群组前沿效率的统计描述

地区	省(市)	共同前沿 MTE				群组前沿 GTE			
		平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值
东部	北京	0.787	0.166	1.000	0.628	0.877	0.115	1.000	0.735
	天津	0.552	0.199	1.000	0.395	0.719	0.163	1.000	0.512
	河北	0.340	0.072	0.527	0.269	0.468	0.179	1.000	0.292
	辽宁	0.488	0.219	1.000	0.301	0.726	0.196	1.000	0.443
	上海	0.725	0.198	1.000	0.486	0.868	0.097	1.000	0.744
	江苏	0.642	0.157	1.000	0.509	0.712	0.119	1.000	0.599
	浙江	0.558	0.112	0.887	0.484	0.613	0.104	0.887	0.488
	安徽	0.426	0.104	0.671	0.333	0.572	0.142	1.000	0.435
	福建	0.529	0.110	0.788	0.415	0.632	0.156	1.000	0.467
	山东	0.627	0.187	1.000	0.389	0.708	0.200	1.000	0.416
	广东	0.879	0.063	1.000	0.794	0.880	0.063	1.000	0.795
	海南	0.888	0.115	1.000	0.714	0.906	0.099	1.000	0.749
东部平均		0.620	0.221	1.000	0.269	0.723	0.192	1.000	0.292
中部	山西	0.585	0.177	1.000	0.338	0.806	0.145	1.000	0.602
	内蒙古	0.546	0.178	1.000	0.331	0.829	0.109	1.000	0.668
	吉林	0.380	0.134	0.672	0.251	0.942	0.082	1.000	0.754
	黑龙江	0.404	0.088	0.620	0.326	0.871	0.126	1.000	0.683
	江西	0.475	0.064	0.610	0.401	0.830	0.077	1.000	0.740
	河南	0.454	0.093	0.678	0.374	0.855	0.147	1.000	0.614
	湖北	0.495	0.120	0.762	0.375	0.784	0.120	1.000	0.641
	湖南	0.491	0.102	0.723	0.393	0.797	0.103	1.000	0.673
中部平均		0.479	0.137	1.000	0.251	0.839	0.122	1.000	0.602
西部	广西	0.426	0.114	0.729	0.328	0.632	0.089	0.868	0.555
	重庆	0.693	0.185	1.000	0.498	0.792	0.127	1.000	0.676
	四川	0.435	0.114	0.688	0.333	0.752	0.098	1.000	0.673
	贵州	0.439	0.268	1.000	0.248	0.601	0.232	1.000	0.402
	云南	0.365	0.076	0.559	0.296	0.624	0.138	0.932	0.499
	陕西	0.431	0.069	0.573	0.322	0.668	0.084	0.859	0.563
	甘肃	0.423	0.130	0.775	0.303	0.655	0.157	1.000	0.465
	青海	0.932	0.066	1.000	0.797	0.953	0.068	1.000	0.797
	宁夏	0.806	0.138	1.000	0.610	0.845	0.131	1.000	0.632
	新疆	0.402	0.154	0.755	0.258	0.708	0.233	1.000	0.446
西部		0.535	0.235	1.000	0.248	0.723	0.178	1.000	0.402
全国		0.554	0.215	1.000	0.248	0.754	0.178	1.000	0.292

发展和技术创新方面的优势相关；西部地区内部效率差异最大，标准差高达 0.235，表明省份间两极分化明显；而中部地区虽内部差异较小(标准差 0.137)，但效率值普遍偏低，反映出区域技术同质化与结构性瓶颈的并存。进一步原因分析表明，这种差异可能源于区域资源禀赋、技术采纳能力及产业结构的差异，例如东部清洁能源利用与高端制造业的协同效应，西部清洁能源富集区与传统工业区的并存格局，以及中部老工业基地的技术路径依赖问题。全国范围内效率极值分布进一步印证上述趋势：青海、海南等清洁能源主导型地区效率领跑，而河北、云南等重工业或传统能源依赖省份效率垫底。

在群组前沿下中部地区取得最大值，但在共同前沿下的能源效率最低，说明尽管中部地区在自身条件下表现最佳，但与其他地区相比，其整体的能源利用技术和效率水平依旧较低，需要改进或采纳更高效的技术和管理策略，以提升其在共同前沿水平上的能源效率。相较之下，东部与西部群组效率虽数值趋同，但驱动逻辑截然不同：东部依赖技术协同推动整体优化，而西部则依靠青海、宁夏等单点突破形成局部高地，但贵州等低效省份仍拖累区域均衡性。值得注意的是，全国共同前沿效率(0.554)显著低于群组均值(0.754)，这一差距既揭示区域间技术壁垒与政策协同不足的深层矛盾，也印证中西部地区对跨区域技术适配的迫切需求。

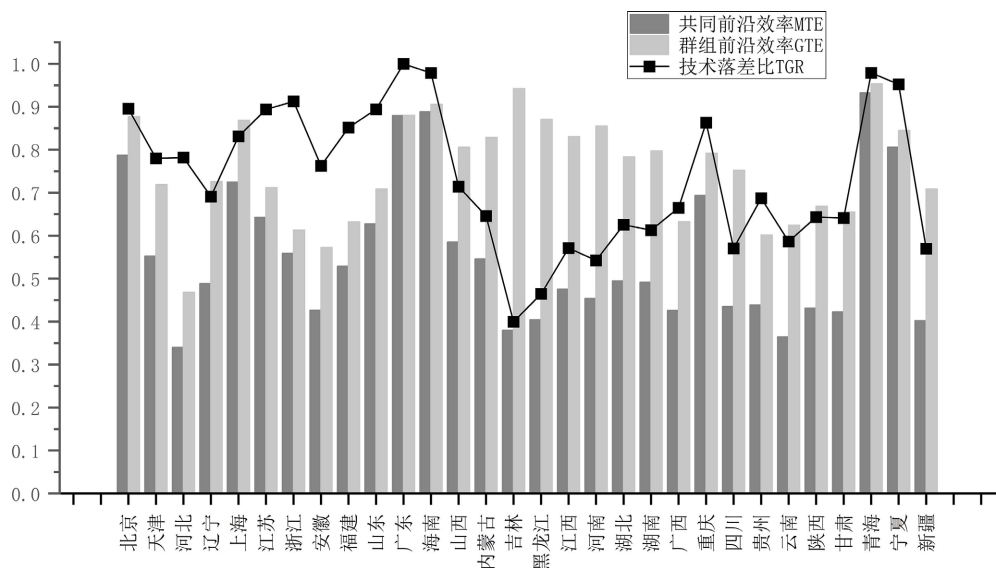


Figure 3. Comparison chart of China's inter-provincial energy efficiency values under the common Frontier and the Group Frontier from 2008 to 2022

图 3. 2008~2022 年共同前沿和群组前沿下中国省际能源效率值对比图

技术落差比(TGR)反映了特定群组技术水平与潜在最优技术水平之间的缺口，其值越大，表明决策单元的技术水平越接近潜在的最优技术水平。东、中、西部地区平均技术落差比 TGR 分别为 0.856、0.572、0.716。东部地区技术落差比最高，说明东部地区拥有潜在的最优绿色生产技术，可能原因是东部地区内多数省(市)处于沿海地区，市场环境良好，对外资吸引力较大，自主创新和管理模式较为先进。西部地区技术落差比相对较小，能源利用技术和效率水平依旧较低，侧面阐述了技术落后是制约能源环境效率提高的关键因素。而中部地区技术落差比最低，说明与整体的共同前沿(即所有地区的技术前沿)相比存在显著的技术差距。为了提高效率，这些地区需要专注于技术创新、研发投资、技能提升和知识转移，以弥合技术差距并更接近共同前沿。具体而言，广东、海南和福建等地的技术落差比接近于 1，说明这些地区已经接近潜在的最优技术水平，侧面表明这些地区在能源利用和技术创新方面取得了显著进展。而吉林、

黑龙江的技术落差比仅为 0.400、0.465, 与技术前沿的差距较大, 有较大的技术提升空间。

如图 4, 描述了 2008~2022 年各地区和全国水平下的 TGR 变化水平。具体来看, 东部地区的技术落差比(TGR)在 2008~2022 年间内稳步提升, 且在 2010 年以后稳定处于领先地位, 这表明东部地区在技术上的追赶速度相对较快, 一般而言东部地区拥有更好的基础设施、更多的外资以及政策支持, 这可能有助于快速采纳新技术和提升生产效率。中部地区的 TGR 虽然也在增长, 但速度较东部地区慢, 且经历了一定的起伏, 这可能是由于中部地区在工业基础、资本投入和技术创新方面相对较弱, 这阻碍了它们向技术前沿的靠近。西部地区的 TGR 起始值较高, 但随后出现了下降趋势, 尽管“西部大开发”战略可能带来了一定的技术改进和资本投入, 但西部地区广阔的地理空间和复杂的地形可能导致了技术推广和应用的不均匀性。随着时间的推移, 所有地区的 TGR 都有所提高, 这表明中国在全国范围内的技术效率正在改善。这种趋势可能反映了全国一体化战略的效果, 通过增加内部贸易流动、优化产业布局和提升全国技术水平, 促进了各地区技术的追赶。

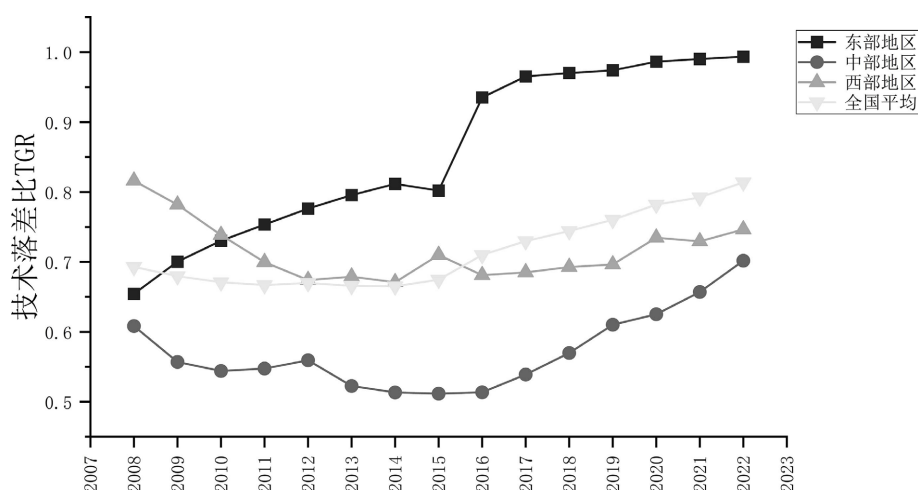


Figure 4. CTrend chart of TGR of technical gap ratio in each region from 2008 to 2022

图 4. 2008~2022 年间各地区技术落差比 TGR 变化趋势图

4.3. 共同前沿低效率及其分解

根据公式(5)、(6)、(7)计算得到能源无效项 IE, 并分解得到技术无效项(TIE)和管理无效项(TIE)。参考闫庆友等[31], 当某省(市)的技术无效(管理无效)占比超过 40%时就认定应着重改进该项能力。

如表 3, 中国能源无效均值为 0.446, 节能潜力巨大, 有 6 个省(区、市)制约能源环境效率提升因素为技术, 其中吉林(TIE = 0.562)、黑龙江(TIE = 0.466)技术无效率值最高。有 14 个省(区、市)制约能源环境效率提升因素为管理, 其中河北(MIE = 0.532)、安徽(MIE = 0.428)管理水平改善空间巨大。另外, 湖北、山西、四川等 10 省(市)无论是技术还是管理都处于无效区, 因此在重点改善管理能力的同时也应通过技术交流, 进行生产技术革新。

就群组差异来看, 东、中、西部地区的能源无效项的分布具有显著差异性, 东部经济发达, 基础设施和技术投入相对充足, 但管理效率可能因为高速发展而未得到充分关注, 大部分省份的 MIE 占比超过 40%。中部地区可能出于正经历产业结构的调整和升级的缘故, 所有省份的 TIE 占比都超过了 40%, 这意味着中部地区技术水平落后, 应当集中于提高技术效率。而西部地区所有省份的 MIE 占比超过 50%, 说明管理方面有很大的提升空间, 这可能源于西部地区政府管理手段滞后、执行不到位等因素的影响。

在全国范围内, 管理无效项 MIE 的占比为 55.1%, 较技术无效项 TIE 的 44.9%占比稍高, 这表明从

宏观角度看，优化管理流程和提升管理效率对整体提升能源效率而言是一项普遍且关键的策略。在东部地区，技术无效项和管理无效项的比例都相对较低，这可能反映了东部地区在技术利用和管理实践方面的成熟度较高。相比之下，中部和西部地区的技术无效项和管理无效项比例则相对较高，暗示着这些地区可能面临技术升级缓慢和管理体系不够完善等挑战。考虑到东部地区的能源无效项 IE 均值仅为 0.380，显著低于中部地区的 0.521 和西部地区的 0.465，尽管东部地区在管理方面有提升空间，但对中部和西部地区来说，技术层面的改进更显迫切。

Table 3. Decomposition of energy inefficiency items in Chinese provinces
表 3. 中国各省能源无效率项的分解

分组	地区	能源无效(IE)	技术无效(TIE)		管理无效(MIE)		改进方向	
			均值	占比	均值	占比	技术	管理
东部	北京	0.213	0.090	42.3%	0.123	57.7%	√	√
	天津	0.448	0.166	37.2%	0.281	62.8%		√
	河北	0.660	0.128	19.4%	0.532	80.6%		√
	辽宁	0.512	0.238	46.5%	0.274	53.5%	√	√
	上海	0.275	0.143	52.1%	0.132	47.9%	√	√
	江苏	0.358	0.069	19.3%	0.288	80.7%		√
	浙江	0.442	0.054	12.3%	0.387	87.7%		√
	安徽	0.574	0.146	25.5%	0.428	74.5%		√
	福建	0.471	0.103	21.9%	0.368	78.1%		√
	山东	0.373	0.081	21.7%	0.292	78.3%		√
	广东	0.121	0.000	0.2%	0.120	99.8%		√
	海南	0.112	0.018	15.7%	0.094	84.3%		√
	东部平均	0.380	0.103	27.2%	0.277	72.8%		
中部	山西	0.415	0.221	53.2%	0.194	46.8%	√	√
	内蒙古	0.454	0.283	62.3%	0.171	37.7%	√	
	吉林	0.620	0.562	90.7%	0.058	9.3%	√	
	黑龙江	0.596	0.466	78.3%	0.129	21.7%	√	
	江西	0.525	0.355	67.7%	0.170	32.3%	√	
	河南	0.546	0.401	73.5%	0.145	26.5%	√	
	湖北	0.505	0.289	57.2%	0.216	42.8%	√	√
	湖南	0.509	0.306	60.1%	0.203	39.9%	√	
	中部平均	0.521	0.360	69.1%	0.161	30.9%		
西部	广西	0.574	0.206	36.0%	0.368	64.0%		√
	重庆	0.307	0.098	32.0%	0.208	68.0%		√
	四川	0.565	0.317	56.1%	0.248	43.9%	√	√
	贵州	0.561	0.163	29.0%	0.399	71.0%		√
	云南	0.635	0.260	40.9%	0.376	59.1%	√	√

续表

	陕西	0.569	0.237	41.7%	0.332	58.3%	√	√
	甘肃	0.577	0.232	40.3%	0.345	59.7%	√	√
	青海	0.068	0.021	30.8%	0.047	69.2%		√
	宁夏	0.194	0.039	20.1%	0.155	79.9%		√
	新疆	0.598	0.306	51.2%	0.292	48.8%	√	√
	西部平均	0.465	0.188	40.4%	0.277	59.6%		
全国	全国平均	0.446	0.200	44.9%	0.246	55.1%		

4.4. GML 指数分解

本文由式(8)计算得到 GML 指数, 通过对 GML 指数进行分解来进一步讨论能源效率内部效率项的变动情况, 参考 Färe *et al.* (1994)对 GML 指数进行 FGNZ 分解[32]。GML 指数立足于全局视角, 对所有年份所有省(市)建立一个共同前沿面, 分析不同年份不同地区的差异化变现。

表 4 反映了 2008~2022 年间能源效率分解项的变动趋势。从上述分析中我们可以看到, 在不同时间段内, 这五种效率变化表现出了各自的趋势。效率变化(*effch*)反映了企业运营效率和市场环境的综合影响, 整体上在 1 左右波动, 说明在考察的年份里, 效率总体保持稳定, 但在 2015~2016 年和 2019~2020 年之间出现了显著下降, 可能与经济环境变动密不可分。技术变化(*techch*)通常与技术进步、创新活动和研发投入的增加密切相关, 在 2008~2017 年之前一直未能超过基准线, 可能反映了技术的相对滞后, 但从 2017~2018 年开始呈现出上升趋势, 这可能是新技术采纳的结果。纯技术效率变化(*pech*)反映了企业管理水平、生产流程和效率改进措施的变化, 与管理实践和内部流程优化紧密相关, 数值上相对稳定, 表明从技术角度看, 管理效率保持一致。规模效率变化(*sech*)与企业规模扩张、产能利用率和市场竞争力有关, 整体呈现小幅波动、整体稳定的情况, 说明运营规模基本保持稳定。而全要素生产率变化(*tfpch*)作为一个综合指标, 结合了技术变化和效率变化, 反映了一个地区或国家的整体生产力水平, 2008~2016 年间呈现负增长趋势, 反映了当期的市场环境、成本控制或技术条件限制对全要素能源效率的影响强度。而在 2016~2022 呈现稳定增长趋势表明长期内, 生产效率和技术水平在提升, 尤其在 2021~2022 年的显著增长可能与经济恢复有关。

Table 4. Trend of FGNZ decomposition terms of GML index from 2008 to 2022

表 4. 2008~2022 年 GML 指数 FGNZ 分解项的变化趋势

period	<i>effch</i>	<i>techch</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>tfpch</i>
2008~2009	0.9965	0.9783	0.9920	1.0045	0.9747
2009~2010	1.0011	0.9753	1.0023	0.9990	0.9761
2010~2011	1.0027	0.9875	1.0139	0.9898	0.9896
2011~2012	0.9938	0.9887	0.9948	0.9990	0.9825
2012~2013	1.0022	0.9799	1.0015	1.0007	0.9819
2013~2014	0.9973	0.9908	0.9990	0.9984	0.9881
2014~2015	1.0061	0.9924	1.0102	0.9960	0.9978
2015~2016	0.9803	0.9840	0.9855	0.9956	0.9622
2016~2017	1.0123	0.9902	1.0064	1.0064	1.0010

续表

2017~2018	1.0013	1.0072	1.0033	0.9981	1.0083
2018~2019	1.0071	1.0021	1.0066	1.0006	1.0083
2019~2020	1.0193	0.9923	1.0199	1.0008	1.0086
2020~2021	1.0127	1.0042	1.0048	1.0079	1.0149
2021~2022	0.9782	1.0317	0.9839	0.9942	1.0085
平均	1.0008	0.9932	1.0017	0.9994	0.9930

表 5 反映了不同地区 GML 指数分解的差异化表现。发达地区如北京、上海、江苏等，基于其坚实的经济基础、高产业集聚度和完备的基础设施，效率变化表现良好。而中西部地区如甘肃、新疆，可能因经济发展较慢和产业多样性不足而表现不佳。技术创新倾向于集中在大城市和经济特区，这些地区的研发和科技人才资源丰富，因此在技术变化上表现出色。与之相反，资源型地区或工业基础薄弱的内蒙古、西部地区在技术进步上可能会落后。一线城市和一些发达的二线城市管理水平高，可能在纯技术效率上呈现积极趋势。不发达地区由于缺乏有效的管理实践和教育资源，可能表现较差。在产业规模迅速扩张和市场需求大的地区，如珠三角、长三角，规模效率变化显著。相较之下，人口较少或工业化程度较低的西部省份，在规模效率提升上的空间可能较小。经济基础强、创新活跃的地区，如北京和天津，全要素生产率变化通常较好，反映出竞争力和生产效率的提高。

从东、中、西划区来看，东部地区，尤其是沿海省份，由于其经济发展程度高、产业基础坚实、基础设施完善、教育和技术水平较高，因此在效率变化上表现优越。这些地区的技术变化显著，主要得益于高投入的研发活动和创新政策的支持。管理效率较高，通常体现在企业管理能力强、政府政策有效和劳动力市场灵活。规模效率变化通常在产业集群效应显著、市场大和企业规模经济效益显著的地区更加突出，例如珠三角和长三角。全要素生产率变化则在经济基础好、创新能力强和教育水平高的地区更为显著，如北京和天津。

中部地区的经济结构调整和产业升级正处于转型阶段，因此在效率变化上表现为波动。这些地区在技术变化和纯技术效率变化上可能不如东部地区显著，这与中部地区的产业基础相对落后、高等教育和科研机构较少、高技术人才紧缺有关。规模效率变化可能受限于产业规模的扩展和市场的发展潜力。全要素生产率的变化可能反映了这些地区在经济增长模式转变过程中的挑战。

西部地区，特别是远离沿海的内陆省份，经济发展水平普遍较低，基础设施建设和产业发展相对滞后。这些因素限制了西部地区的效率变化和技术创新。纯技术效率变化可能因为缺乏有效的管理实践和教育资源而受限。规模效率变化在人口较少、工业化程度不高的地区面临挑战，这些地区可能缺乏有效的市场规模和产业支撑。西部地区的全要素生产率变化可能不如东部和中部地区，这反映了西部地区在产业升级和技术创新方面的潜在难题。

Table 5. GML Index FGNZ decomposition in 2022 in 2008 (by region)
表 5. 2008~2022 年 GML 指数 FGNZ 分解(分地区)

地区	省(市)	effch	techch	pech	sech
东部	北京	1.0000	1.0044	1.0000	1.0000
	天津	1.0146	1.0073	1.0070	1.0073
	河北	0.9980	0.9973	1.0033	0.9949

续表

	辽宁	1.0074	0.9827	1.0002	1.0077
	上海	1.0002	0.9849	1.0000	1.0002
	江苏	1.0098	0.9916	1.0096	1.0003
	浙江	1.0146	0.9929	1.0189	0.9959
	安徽	1.0209	0.9817	1.0204	1.0005
	福建	1.0000	1.0091	1.0000	1.0000
	山东	0.9997	1.0021	1.0002	0.9995
	广东	0.9926	1.0009	1.0047	0.9881
	海南	1.0025	0.9958	1.0029	0.9997
	东部平均	1.0050	0.9959	1.0056	0.9995
中部	山西	1.0007	0.9947	1.0032	0.9977
	内蒙古	1.0051	0.9911	1.0014	1.0038
	吉林	0.9999	0.9988	1.0010	1.0009
	黑龙江	1.0008	0.9974	1.0092	0.9949
	江西	0.9928	0.9943	0.9974	0.9955
	河南	0.9924	0.9956	0.9971	0.9954
	湖北	0.9938	0.9955	1.0000	0.9938
	湖南	0.9840	0.9954	0.9827	1.0012
	中部平均	0.9962	0.9953	0.9990	0.9979
西部	广西	0.9872	1.0161	1.0000	0.9872
	重庆	0.9965	0.9914	0.9981	0.9982
	四川	1.0022	0.9938	1.0079	0.9946
	贵州	0.9915	0.9812	0.9929	0.9981
	云南	1.0155	0.9746	1.0134	1.0022
	陕西	0.9905	0.9990	0.9922	0.9986
	甘肃	1.0105	0.9730	1.0064	1.0046
	青海	1.0183	0.9783	1.0000	1.0183
	宁夏	1.0000	0.9800	1.0000	1.0000
	新疆	0.9816	0.9945	0.9818	1.0016
	西部平均	0.9994	0.9882	0.9993	1.0003

5. 对策建议

本文测算了群组前沿和共同前沿下能源环境效率，对能源无效率进行分解与优化路径讨论，同时使用 GML 指数进行能源效率项的分解与进一步研究，并根据上述结果提出以下建议：

1) 推动技术创新与转移：中西部地区应加强与东部地区的技术合作与交流，引进先进技术和管理经验，以缩小与东部地区的效率差距。同时中西部区域各省市招商引资产过程要严格准入门槛，坚持生态环保理念，以防能源技术差距的不断扩大。

2) 强化区域协调发展: 政府应深化区域协调发展战略, 为中西部地区提供更多支持, 包括基础设施建设、教育资源投入和产业升级政策, 以促进地区间的平衡发展。

3) 提升管理效率: 不同地区应该根据自身能源无效项 IE 的分解情况来确定改进方向。东部地区需注重管理能力的提升, 中部地区需重点提高技术效率, 而西部地区则需在管理能力上做出改进, 同时也不忽视技术效率的提升。各地区的决策者应考虑这些数据, 以制定针对性的政策和措施来提升整体效率。

4) 激励能源节约: 政府应通过政策激励和经济手段, 如税收优惠、补贴等, 鼓励企业和个人采用节能技术, 促进能源效率的提升。全国各地区应继续推进能源结构的优化, 提高清洁能源比重, 以应对未来能源消费总量增长带来的挑战。

基金项目

国家社科基金项目“经济新常态下的中国环境政策工具选择与评价研究”(19BGL195)。

参考文献

- [1] 林伯强. 碳中和背景下的广义节能——基于产业结构调整、低碳消费和循环经济的节能新内涵[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2022, 72(2): 10-20.
- [2] 余泳泽, 杨晓章, 张少辉. 中国经济由高速增长向高质量发展的时空转换特征研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2019, 36(6): 3-21.
- [3] 史丹. 中国能源效率的地区差异与节能潜力分析[J]. 中国工业经济, 2006(10): 49-58.
- [4] Hu, J. and Wang, S. (2006) Total-factor Energy Efficiency of Regions in China. *Energy Policy*, **34**, 3206-3217. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.015>
- [5] Filippini, M. and Hunt, L.C. (2015) Measurement of Energy Efficiency Based on Economic Foundations. *Energy Economics*, **52**, S5-S16. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.023>
- [6] Pang, R., Deng, Z. and Hu, J. (2015) Clean Energy Use and Total-Factor Efficiencies: An International Comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **52**, 1158-1171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.002>
- [7] 刘建翠, 朱承亮. 中国地区全要素能源效率评价及节能潜力分析[J]. 工业技术经济, 2023, 42(8): 31-40.
- [8] 张文彬, 郝佳馨. 生态足迹视角下中国全要素能源效率的空间差异性和收敛性研究[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2020, 20(5): 76-90.
- [9] Shang, Y., Liu, H. and Lv, Y. (2020) Total Factor Energy Efficiency in Regions of China: An Empirical Analysis on SBM-DEA Model with Undesired Generation. *Journal of King Saud University—Science*, **32**, 1925-1931. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.01.033>
- [10] Du, H., Matisoff, D.C., Wang, Y. and Liu, X. (2016) Understanding Drivers of Energy Efficiency Changes in China. *Applied Energy*, **184**, 1196-1206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.002>
- [11] 吴江, 谭涛, 杨河, 等. 中国全要素能源效率评价研究——基于不可分的三阶段 DEA 模型[J]. 数理统计与管理, 2019, 38(3): 418-432.
- [12] 陶长琪, 李翠, 王夏欢. 环境规制对全要素能源效率的作用效应与能源消费结构演变的适配关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 98-108.
- [13] 刘建翠, 郑世林. 中国工业绿色发展的技术效率及其影响因素研究——基于投入产出表的分析[J]. 城市与环境研究, 2019(3): 37-54.
- [14] 陈菁泉, 连欣燕, 马晓君, 等. 中国全要素能源效率测算及其驱动因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2453-2463.
- [15] Guo, Q., Dong, Y., Feng, B. and Zhang, H. (2023) Can Green Finance Development Promote Total-Factor Energy Efficiency? Empirical Evidence from China Based on a Spatial Durbin Model. *Energy Policy*, **177**, Article 113523. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113523>
- [16] 张志辉. 中国区域能源效率演变及其影响因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2015(8): 73-88.
- [17] 袁晓玲, 张宝山, 杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国工业经济, 2009(2): 76-86.
- [18] 龙如银, 刘爽, 王佳琪. 环境约束下中国际能源效率评价——基于博弈交叉效率和 Malmquist 指数模型[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2021, 23(1): 75-90.

-
- [19] Ferrier, G.D. and Lovell, C.A.K. (1990) Measuring Cost Efficiency in Banking. *Journal of Econometrics*, **46**, 229-245. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(90\)90057-z](https://doi.org/10.1016/0304-4076(90)90057-z)
 - [20] 史丹, 吴利学, 傅晓霞, 等. 中国能源效率地区差异及其成因研究——基于随机前沿生产函数的方差分解[J]. 管理世界, 2008(2): 35-43.
 - [21] 李坤明, 方丽婷. 中国区域能源效率及其影响因素——基于面板随机前沿模型的分析[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(11): 1324-1327+1370.
 - [22] 刘争, 黄浩. 中国省际能源效率及其影响因素研究——基于 Shephard 能源距离函数的 SFA 模型[J]. 南京财经大学学报, 2019(1): 99-108.
 - [23] Chung, Y.H., Färe, R. and Grosskopf, S. (1997) Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, **51**, 229-240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
 - [24] 陈海跃. 中国区域能源效率及其影响因素分析——基于 DEA-Malmquist 模型[J]. 贵州财经大学学报, 2017(6): 32-39.
 - [25] 解文华, 方虹, 张军峰, 等. 基于 SBM-DEA 模型及 Malmquist 指数的中国与欧盟航空运输企业能源效率比较研究[J]. 数学的实践与认识, 2017(17): 194-201.
 - [26] Guo, X., Zhu, L., Fan, Y. and Xie, B. (2011) Evaluation of Potential Reductions in Carbon Emissions in Chinese Provinces Based on Environmental Dea. *Energy Policy*, **39**, 2352-2360. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.055>
 - [27] Meng, F., Su, B., Thomson, E., Zhou, D. and Zhou, P. (2016) Measuring China's Regional Energy and Carbon Emission Efficiency with DEA Models: A Survey. *Applied Energy*, **183**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.158>
 - [28] O'Donnell, C.J., Rao, D.S.P. and Battese, G.E. (2007) Meta-Frontier Frameworks for the Study of Firm-Level Efficiencies and Technology Ratios. *Empirical Economics*, **34**, 231-255. <https://doi.org/10.1007/s00181-007-0119-4>
 - [29] Oh, D. (2010) A Meta-Frontier Approach for Measuring an Environmentally Sensitive Productivity Growth Index. *Energy Economics*, **32**, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.07.006>
 - [30] Oh, D. and Lee, J. (2009) A Meta-Frontier Approach for Measuring Malmquist Productivity Index. *Empirical Economics*, **38**, 47-64. <https://doi.org/10.1007/s00181-009-0255-0>
 - [31] 闫庆友, 桂增侃, 张文华, 等. 中国能源影子价格和能源环境效率省际差异[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1040-1051.
 - [32] Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., et al. (1994) Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries. *The American Economic Review*, **87**, 66-83.