

第五届全国大学生 能源经济学术创意大赛

环境约束下能源消费结构对全要素 能源效率的影响研究

作者团队	谭惠月（大四）
作品类别	学术论文类
指导教师	李国柱 教授
单 位	河北地质大学

2019 年 5 月

摘 要

能源问题涉及到国家安全问题，自 2010 年中国成为世界上最大的能源消费国，巨大消费量的背后是环境污染日益严重，人民生活质量受到威胁。本文在研究了我国能源消费结构的现状后，采用基于非期望产出的超效率 SBM 模型计算出全要素能源效率值，发现其存在显著的区域差异性，并构建面板分位数回归模型研究能源消费结构对能源效率的影响，再分八大经济区探索能源效率区域差异的原因，通过分析得出能源消费结构对全要素能源效率具有抑制作用，这种作用随分位点而有所不同。因此，根据不同地区存在的问题，因地制宜的提出合理建议，可以有效提高我国的全要素能源效率。

关键词：能源消费结构；全要素能源效率；超效率 SBM 模型；面板分位数回归模型

ABSTRACT

Energy is a national security issue. Since 2010, China has become the world's largest energy consumer. In this paper, after studying the status quo of China's energy consumption structure, based on the expected output of SBM model to calculate the total factor efficiency energy efficiency value, found that the existence of significant regional differences, and build panel quantile regression model to study the effect of energy consumption structure on energy efficiency, and then give the eight economic zone to explore the regional differences in energy efficiency, through the analysis of energy consumption structure has inhibitory effect on all the factors of energy efficiency, this effect varies with the quantiles. Therefore, according to the problems in different regions, reasonable Suggestions based on local conditions can effectively improve China's total factor energy efficiency.

Key words: energy consumption structure; Total factor energy efficiency; Superefficient SBM model; Panel fractional regression model

目 录

一、 文献综述.....	1
(一) 能源消费结构相关研究.....	1
1. 国外研究.....	1
2. 国内研究.....	1
(二) 能源效率相关研究.....	2
1. 国外研究.....	2
2. 国内研究.....	2
(三) 能源消费结构对能源效率影响的相关研究.....	3
1. 国外研究.....	3
2. 国内研究.....	3
(四) 文献述评.....	3
二、 能源消费结构分析.....	4
(一) 中国能源消费结构现状.....	4
(二) 不同行业能源消费结构现状.....	6
三、 全要素能源效率分析.....	9
(一) 全要素能源效率的内涵.....	9
(二) 全要素能源效率的测度方法.....	9
(三) 全要素能源效率的测度结果.....	11
1. 指标说明与数据来源.....	11
2. 结果分析.....	12
四、 能源消费结构对全要素能源效率的影响研究.....	20
(一) 模型设定与数据来源.....	20
1. 理论模型的设定.....	20
2. 指标说明和数据来源.....	21
(二) 实证分析.....	22
1. 描述统计.....	23
2. OLS 回归和固定效应回归.....	23
3. 面板分位数回归.....	24
五、 结论与建议.....	29
(一) 结论.....	29
(二) 建议.....	30
参考文献.....	32

环境约束下能源消费结构对全要素能源效率的影响研究

能源是国民经济的重要物质基础，一个国家未来的发展潜力取决于它对能源的掌控能力。经济发展需要能源的支撑，而能源消费带来的环境污染问题已经成了世界性话题。能源作为现代社会的血液，必须紧跟时代步伐，实现未来能源更好满足人民对美好生活用能的追求。我国能源发展前景良好，提高能源效率，有利于能源体系的可持续健康发展，能源消费结构的优化调整刻不容缓。

我国目前的能源消费结构是否合理？各地区的能源效率达到什么水平？二者之间的关系如何？对此，本文将运用超效率 SBM 模型来测量我国各省全要素能源效率，并建立面板分位数回归模型来研究能源消费结构对全要素能源效率的影响，深入研究能源效率产生地区差异的原因，为提高能源效率提供有效可行的建议。

一、文献综述

（一）能源消费结构相关研究

1. 国外研究

国外学者注重实证研究，重点放在能源消费结构对经济、环境的影响上。如 Zhao and Luo^[1]基于 VECM 的 ARDL 界限检验和格兰杰因果关系，研究表明长期看煤炭、石油和天然气消费对 GDP 和碳强度具有正向弹性。Chen 等^[2]研究能源消费、能源强度、经济增长、城市化之间的关系，发现能源消费结构是影响中低收入国家 pm2.5 浓度的最大因素。Sun 等^[3]用 DEA 模型发现提高天然气消费占总能源使用的比例可以优化能源消费结构。Wu 等^[4]则发现减少二氧化硫排放的重点是调整能源消费结构。

2. 国内研究

国内学者注重定性和定量分析来调整和优化能源消费结构，尽可能降低能源消耗带来的环境污染，实现对环境友好发展。如郝宇等^[5]通过泰尔指数和情景分析研究能源不平衡的状况，发现不平衡主要在西部。王彩明等^[6]通过调整一次能源消费结构发现可以有效降低京津冀碳强度。田志勇等^[7]、揣小伟等^[8]引入了信息熵的概念，通过构建能源消费结构的均衡度和优势度来判断其发展情况，发现应该

提高煤炭的利用效率和清洁利用问题。张彩庆等^[9]、唐建荣等^[10]、魏楚等^[11]、闫晓霞^[12]研究具体地区或区域的能源消费结构现状及优化问题。向其凤等^[13]从内部替代和供给约束角度来探讨实现节能减排最优的能源结构问题。高湘昀等^[14]考虑了环境变量对能源消费结构的长期均衡影响。周彦楠等^[15]从能源的时空分异及演化来调整能源消费结构以实现低碳发展。

（二）能源效率相关研究

1. 国外研究

Hu 和 Wang^[16]从要素是否可以相互作用角度，率先将能源效率分为单要素和全要素两种类型，为后续学者研究能源效率提供了划分基础。

对能源效率的测算角度主要是从不同行业 and 不同经济体出发，且在方法上使用最多最成熟的是由 Charnes 等^[17]提出的 DEA 方法（CCR）和 Banker 等^[18]提出的 DEA 方法（BBC）。如 Hu and Kao^[19]采用 DEA 方法研究了亚太经济合作组织的节能目标比率，发现香港、美国和菲律宾的能源效率最高，中国消费量最多；Thomas^[20]用 DEA 测算了美国德克萨斯州的电力效率；Weyman^[21]用 DEA 测算了电力企业的关联效率；Ramanathan^[22]用数据包络分析研究了中东和北非 17 个国家的能源消耗问题，并用 MPI 方法分析了这些国家的效率变化情况。

DEA 模型虽好但是缺乏对环境因素的考虑，于是 Tone^[23]提出了考虑环境因素的 SBM 模型，同时可以解决 DEA 存在的投入松弛问题；由于 DEA 和 SBM 模型测算的效率值受限最大为 1，故 Tone^[24]又提出了超效率 SBM 模型。可见能源效率的测度在国外发展历史渊源，研究方法众多且角度清晰，方法的理论研究比较透彻。

2. 国内研究

在测度指标上，我国进行了更深层的划分，魏一鸣、廖华^[25]将能源效率测度指标分为七大类，分别研究其理论基础、相互关系、应用领域、测度方法等。

在方法上我国学者更多倾向于 DEA 方法，如魏楚等^[26]、刘浩旻等^[27]、陈敏德等^[28]利用 DEA 方法对我国省际能源效率进行测算，发现大多数省份能源效率符合先上升后下降趋势。也有部分学者采用随机前沿技术测算能源效率，如陈关聚^[29]、史丹等^[30]。由于近几年我国环境污染问题日益严重，不少学者开始关注环境对能源效率的影响作用，因此 SBM 模型的应用开始增多，如蒋伟等^[31]用多种污染指标

发现环境约束下的能源效率存在地区差异，中部在规模效率上较差，而西部缺乏技术效率；周四军^[32]具体研究了能源效率在不同环境规制的变化情况；刘心等^[33]通过因子分析将 5 种环境污染整理成一个综合指标加入到能源效率的测算中，发现环境污染变量对中西部更敏感；王喜平等^[34]在测算能源效率同时还分析了能源利用无效率情况。随着我国经济的发展，很多地区的能源效率也已经达到了有效前沿面，为了更进一步的研究其发展趋势，故部分学者也开始采用最前沿的超效率 SBM 模型，如宫大鹏等^[35]、杜嘉敏^[36]、王腾等^[37]。

测算角度上，我国主要是分区域研究，其中大多数学者采用东中西的分法，并且大家结论比较一致，东部最高，中部和西部的能源效率高则会根据不同测度指标有所差别。也有少部分学者开始采用八大综合经济区的分法，如薛静静等^[38]、王兆华等^[39]、于雪霞等^[40]、郭文^[41]。可见国内这些年关于能源效率的研究也比较丰富。

（三）能源消费结构对能源效率影响的相关研究

1. 国外研究

国外在二者关系的研究上比较少。Meng 等^[42]研究发现亚太经合组织 16 个国家的能源拥堵是由化石能源造成的。Han 等^[43]用边际概念研究能源之间的替代作用，发现煤和石油的替代率为 5.38 倍。Edenhofer 等^[44]用非线性模型研究得到能源消费结构的变化对能源效率有正面作用。

2. 国内研究

目前国内关于二者关系的研究也处于发展中，主要是定量和定性角度，主要方法有协整模型、VAR 模型、Tobit 回归、面板分位数回归等。张瑞等^[45]通过建立协整模型发现一次能源消费结构与能源效率之间存在长期协整关系。汪行等^[46]通过建立 VAR 模型发现能源效率与能源消费结构之间存在正相关，且煤炭消费比重对能源效率的冲击效应较小。李宏勋等^[47]、范凤岩等^[48]采用 Tobit 全面研究了能源效率的影响因素，发现能源消费结构具有负面影响，而产业结构的影响性结论不统一，有正有负。同时还考虑了其他因素对能源效率的约束影响，如经济发展水平、技术进步、对外开放程度等。李金昌等^[49]通过分位数回归研究了能源强度影响因素，发现煤炭比重对能源强度有正向影响。周四军^[50]则通过面板分位数回归来研究能源消费结构对能源效率的影响，同时加入了制度因素和政府影响力等作

为约束。

（四）文献述评

综上所述，现有文献对能源消费结构的研究大多是从定量角度，更多关注能源消费结构与环境之间的相互影响，多数研究证明优化能源消费结构可有效减低碳排放，实现环境友好发展。对能源效率的研究比较丰富，从测度指标上看，更多学者倾向于全要素角度；从计算方法上看，DEA 方法使用最成熟但缺点也十分明显，超效率 SBM 方法最前沿但效率是相对值，其中 SBM 方法中，非期望产出的指标选择有单一污染、多种污染和综合污染三种，后两种更具有代表性；从区域划分看，多数采用东中西的笼统划分，无法完全体现区域差异。目前对二者关系研究主要是通过定性和定量角度，大多关注影响的正负性，对产生影响的原因进行区域原因探索的研究还不是很丰富。

故本文希望在现有文献基础上，用相对最前沿的方法计算能源效率，并在研究能源消费结构对能源效率的影响中加入环境因素的约束，环境因素采用综合指标形式，然后分区域深入探究能源效率应该如何提升。

二、能源消费结构分析

（一）中国能源消费结构现状

从 1990 年到 2017 年，能源消费总量增长了约 4.5 倍，环比增长率呈波浪式变化，最高为 2004 年，相对 2003 年环比增长 16.84%，最低为 1998 年，相比 1997 年环比增长 0.2%，见表 1。

表 1 中国能源消费总量及增长率

年份	能源消费总量 (万吨标准煤)	能源消费增长率 (%)	能源消费环比增长率 (%)
1990	98703.00	—	—
1991	103783.00	5.15	5.15
1992	109170.00	10.60	5.19
1993	115993.00	17.52	6.25
1994	122737.00	24.35	6.15
1995	131176.00	32.90	6.88

1996	135192.00	36.97	3.06
1997	135909.00	37.69	7.15
1998	136184.00	37.97	0.20
1999	140569.00	42.42	3.22
2000	146964.00	48.90	8.15
2001	155547.00	57.59	5.84
2002	169577.00	71.81	9.02
2003	197083.00	99.67	9.15
2004	230281.00	133.31	16.84
2005	261369.00	164.80	13.50
2006	286467.00	190.23	10.15
2007	311442.00	215.53	8.72
2008	320611.00	224.82	2.94
2009	336126.00	240.54	11.15
2010	360648.00	265.39	7.30
2011	387043.00	292.13	7.32
2012	402138.00	307.42	12.15
2013	416913.00	322.39	3.67
2014	425806.00	331.40	2.13
2015	429905.00	335.55	13.15
2016	435819.00	341.55	1.38
2017	449000.00	354.90	3.02

资料来源：1991-2018 年《中国统计年鉴》

在一次能源消费结构的不同能源消费量中，横向观察，每一年的煤炭消费量占比都是最大的，依次是石油、一次电力及其他能源、天然气。纵向观察，从1990-2017 年煤炭消费量占比下降 15.8%，将占比最大的煤炭和石油进行合并，发现二者之和下降了 13.6%，天然气和一次电力及其他能源比重之和上升了 13.6%，说明随着国家对能源的更高政策约束和科技水平的提高，清洁高效的能源会逐步取代煤炭等低效高污染能源，从而不断优化能源消费结构，提高能源效率，结果见表 2。

表 2 1990-2017 年中国能源消费结构

年份	能源消费总量	占能源消费总量的比重（%）
----	--------	---------------

	(万吨标准煤)	煤炭	石油	天然气	一次电力及 其他能源
1990	98703.00	76.2	16.6	2.1	5.1
1991	103783.00	76.1	17.1	2.0	4.8
1992	109170.00	75.7	17.5	1.9	4.9
1993	115993.00	74.7	18.2	1.9	5.2
1994	122737.00	75.0	17.4	1.9	5.7
1995	131176.00	74.6	17.5	1.8	6.1
1996	135192.00	73.5	18.7	1.8	6.0
1997	135909.00	71.4	20.4	1.8	6.4
1998	136184.00	70.9	20.8	1.8	6.5
1999	140569.00	70.6	21.5	2.0	5.9
2000	146964.00	68.5	22.0	2.2	7.3
2001	155547.00	68.0	21.2	2.4	8.4
2002	169577.00	68.5	21.0	2.3	8.2
2003	197083.00	70.2	20.1	2.3	7.4
2004	230281.00	70.2	19.9	2.3	7.6
2005	261369.00	72.4	17.8	2.4	7.4
2006	286467.00	72.4	17.5	2.7	7.4
2007	311442.00	72.5	17.0	3.0	7.5
2008	320611.00	71.5	16.7	3.4	8.4
2009	336126.00	71.6	16.4	3.5	8.5
2010	360648.00	69.2	17.4	4.0	9.4
2011	387043.00	70.2	16.8	4.6	8.4
2012	402138.00	68.5	17.0	4.8	9.7
2013	416913.00	67.4	17.1	5.3	10.2
2014	425806.00	65.6	17.4	5.7	11.3
2015	429905.00	63.7	18.3	5.9	12.1
2016	435819.00	62.0	18.5	6.2	13.3
2017	449000.00	60.4	18.8	7.0	13.8

资料来源：2018 年《中国统计年鉴》

从图 1 可以发现，虽然煤炭的消费量整体呈现下滑趋势，但占比都维持在 60%

以上，仍居主体地位，在 2017 年达到了最小值 60.4%。石油消费量占比变化比较平稳，维持在 18%左右。从 1990 年开始，天然气和一次电力及其他能源消费量占能源消费总量比重逐年上升，尤其在 2013 年后，电力的消费量占比维持在 10%以上，说明我国开始重视电力的开发和利用。

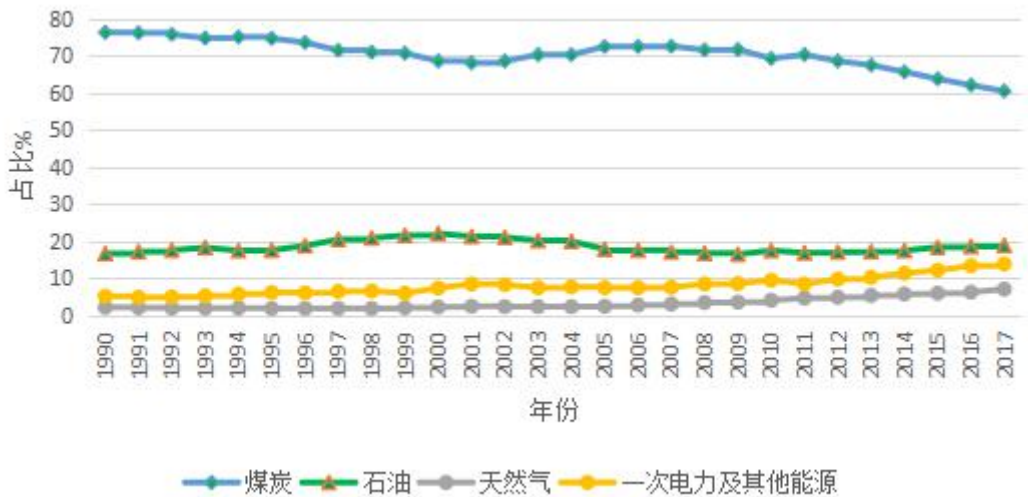


图 1 1990-2017 年中国能源消费结构折线图

（二）不同行业能源消费结构现状

由于部分年鉴数据不全，为了直观分析不同行业能源消费结构的情况，本文收集了 1995-2016 年我国主要七大行业的能源消费量，数据来源于《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

如图 2 所示，1999-2012 年增速最快，之后速度放缓。在不同行业中，工业的能源消费量居首位，与能源消费总量保持一致的增长趋势，说明我国能源消费总量的快速增长主要得益于工业行业的快速发展，以 2012 年为例，工业占能源消费总量约 70%，而其他行业加总占比才约 30%。但 2012 年后，工业占能源消费总量在比重在下降。

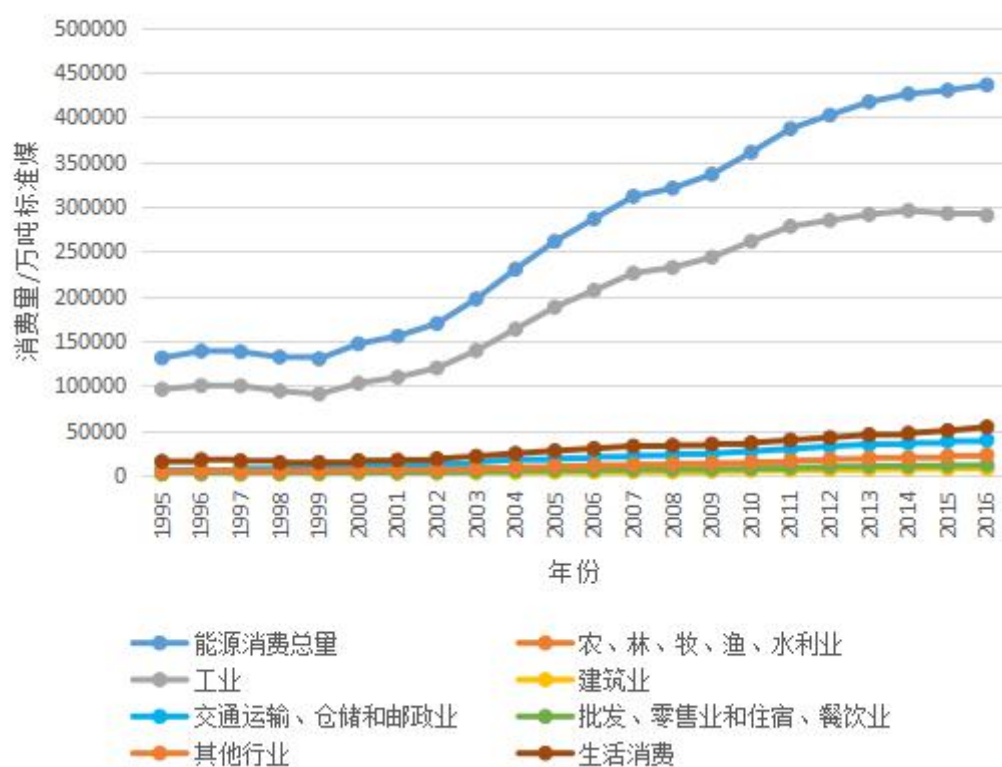


图2 1995-2016 年行业能源消费总量情况

煤炭、石油、天然气、电力及其他能源最终可以转化成 9 种能源消费品种被七大行业使用，下面对 2016 年的不同能源消费品种的行业能源消费情况做详细分析。

由表 3 可知，每种能源消费品种的使用范围不尽相同，煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、天然气和电力在七大行业中都有使用，但是原油只用于工业和交通运输、仓储和邮政业中，生活消费能源不包含燃料油。可用于工业的能源品种丰富，有煤炭、焦炭、原油、燃料油、天然气和电力，占比都超过 60%，其中煤炭、焦炭和原油超过 90%都用于工业消费；交通运输、仓储和邮政业的能源消费来源主要是汽油、煤油、柴油和燃料油，其中煤油用于交通运输、仓储和邮政业的占比高达 94.76%；生活消费能源主要包括汽油、天然气和电力。

表 3 2016 年不同能源消费品种的行业消费情况

行业	煤炭		焦炭		原油	
	消费量	占比	消费量	占比	消费量	占比
	(万吨)	(%)	(万吨)	(%)	(万吨)	(%)
农、林、牧、渔业	2778.12	0.72	53.11	0.12		
工业	363175.14	94.44	45324.73	99.70	56003.59	99.96

建筑业	805.29	0.21	7.05	0.02		
交通运输、仓储和邮政业	403.86	0.11	3.21	0.01	22.34	0.04
批发、零售业和住宿、餐饮业	3825.59	0.99	41.34	0.09		
其他行业	4080.82	1.06	5.57	0.01		
生活消费	9491.52	2.47	27.40	0.06		
消费总量	384560.34	100.00	45462.41	100.00	56025.93	100.00

(续表 3)

行业	汽油		煤油		柴油	
	消费量	占比	消费量	占比	消费量	占比
	(万吨)	(%)	(万吨)	(%)	(万吨)	(%)
农、林、牧、渔业	224.39	1.89	2.24	0.08	1495.86	8.88
工业	436.32	3.68	19.96	0.67	1412.91	8.39
建筑业	437.26	3.68	10.00	0.34	561.26	3.33
交通运输、仓储和邮政业	5511.15	46.44	2814.94	94.76	11068.48	65.73
批发、零售业和住宿、餐饮业	240.86	2.03	11.21	0.38	231.97	1.38
其他行业	2046.40	17.25	85.93	2.89	1307.24	7.76
生活消费	2969.67	25.03	26.43	0.89	761.31	4.52
消费总量	11866.05	100.00	2970.71	100.00	16839.03	100.00

(续表 3)

行业	燃料油		天然气		电力	
	消费量	占比	消费量(亿	占比	消费量(亿	占比
	(万吨)	(%)	立方米)	(%)	千瓦小时)	(%)
农、林、牧、渔业	1.03	0.02	1.09	0.05	1091.91	1.78
工业	3035.41	65.54	1338.59	64.42	43088.89	70.30
建筑业	51.91	1.12	1.95	0.09	725.62	1.18
交通运输、仓储和邮政业	1511.38	32.64	254.77	12.26	1251.49	2.04
批发、零售业和	17.25	0.37	53.75	2.59	2323.78	3.79

住宿、餐饮业						
其他行业	14.06	0.30	48.17	2.32	4394.80	7.17
生活消费			379.75	18.27	8420.60	13.74
消费总量	4631.04	100.00	2078.07	100.00	61297.09	100.00

资料来源：2018 年 《中国统计年鉴》

三、全要素能源效率分析

（一）全要素能源效率的内涵

目前对能源效率的研究主要分为单要素和全要素能源效率，关于二者的定义、优缺点总结如表 4。

表 4 定义

	单要素能源效率	全要素能源效率
定义	能源强度：单位 GDP 能耗	在能源投入外的其他要素保持不变的前提下，按照最佳生产实践，一定的产出所需的目标能源投入量与实际投入量的比值
优点	计算简便且易于理解	综合考虑了能源与资本、劳动力等各种投入要素在产出中的相互作用，能源效率的相对评估更加准确合理
缺点	只考虑能源要素的投入和产出，不考虑其他生产要素间的相互作用，无法反映真实的能源效率	计算复杂，效率是相对值

（二）全要素能源效率的测度方法

根据前面的文献研究，目前测算能源效率最前沿的方法是超效率 SBM 模型，计算超效率 SBM 模型需要先对决策单元(DMU)运用 SBM 模型，再对有效的 DMU 运用超效率 SBM 模型进行评价。

假定生产系统有 n 个 DMU，每个 DMU 有三个向量：投入、期望产出、非期

望产出，用向量表示为 $x \in R^m, y^g \in R^{s_1}$ 和 $y^b \in R^{s_2}$ ，定义如下矩阵 X, Y^g, Y^b ：

$$X = [x_1, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$$

$$Y^g = [y_1^g, \dots, y_n^g] \in R^{s_1 \times n}$$

$$Y^b = [y_1^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n}$$

其中， $X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0$ 。

为了使生产中的期望产出与非期望产出更加符合实际情况，Fare 等^[51]提出了关于生产可能集的两个假设：

假设 1：产出弱可自由处置性。如 $(x, y^g, y^b) \in T$ 且 $0 \leq \theta \leq 1$ ，那么 $(x, \theta y^g, \theta y^b) \in T$

假设 2：期望与非期望产出空连接。如： $(x, y^g, y^b) \in T$ ，若 $y^g = 0$ ，则 $y^b = 0$

基于上面两个假设，定义生产可能集 P ：

$$P = \left\{ (x, y^g, y^b) \mid x \geq X\lambda, y^g \leq Y^g\lambda, y^b \geq Y^b\lambda, \lambda \geq 0 \right\}$$

$\lambda \in R^n$ 是常数向量，表示每个 DMU 的权重。

按照 Tone 提出的考虑非期望产出的 SBM 模型公式为：

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - s^g \\ y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases}$$

其中，每个 DMU 有 m 个投入，有 S_1 个期望产出， S_2 个非期望产出， s^-, s^g, s^b

表示投入、期望产出、非期望产出的松弛量， λ 是权重向量。目标函数 ρ^* 是关于 s^-, s^g, s^b 严格递减的，而且 $0 \leq \rho^* \leq 1$ 。对于待估 DMU，当且仅当 $\rho^* = 1$ ，即 $s^- = 0, s^g = 0, s^b = 0$ 时，该 DMU 是有效的；当 $0 \leq \rho^* < 1$ ，即 s^-, s^g, s^b 三者中至少一个不为 0，说明 DMU 是非有效的。

在 SBM 决策单元有效情况下，用 (X, Y) 除去点 x_0, y_0^g, y_0^b ，定义生产可能集

$P^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b)$ ：

$$P^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b) = \{(\bar{x}, \bar{y}^g, \bar{y}^b) | \bar{x} \geq X\lambda, \bar{y}^g \leq Y^g\lambda, \bar{y}^b \geq Y^b\lambda, \bar{y} \geq 0, \lambda \geq 0\}$$

我们再定义 $P^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 的子集为 $\bar{P}^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b)$ ，假设

$X > 0, \lambda > 0, \bar{P}^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 非空。

$$\bar{P}^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b) = P^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b) \cap \{\bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b\}$$

$P^{\setminus}(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 表示点 (x_0, y_0^g, y_0^b) 被排除。

则基于非期望产出的超效率 SBM 模型的公式为：

$$\alpha^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq X\lambda \\ \bar{y}^g \leq Y^g\lambda \\ \bar{y}^b \geq Y^b\lambda \\ \bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b, \lambda \geq 0 \end{cases}$$

(三) 全要素能源效率的测度结果

1. 指标说明与数据来源

（1）投入指标说明

能源投入：本文主要研究一次能源消费结构，所以用各地区的能源消费总量表示能源投入，它由煤炭、石油、天然气和一次电力及其他能源四种能源转换成统一单位加总，单位为万吨标准煤。

劳动力投入：由于我国缺乏对劳动时间的统计，所以根据数据的可得性，本文用各省历年年末城镇就业人数表示劳动力投入。

资本投入：关于资本投入数据我国目前没有现成统一的指标，有采用固定资产投资额、固定资本形成总额等来表示，也有人采用张军等人的“永续盘存法”来估计实际的资本存量，公式为 $K_{i,t} = I_{i,t} + (1 - \delta_{i,t})K_{i,t-1}$ 。本文采用各省的全社会固定资产投资额作为资本投入。

（2）产出指标说明

期望产出：本文选用衡量一个国家经济状况的最佳指标 GDP 来表示期望产出，为保持数据的可比性，以 2001 年为基期进行不变价格处理，化为实际 GDP。

非期望产出：生产过程中难免产生环境污染物，主要包括废水、废气和固体废物，根据对环境污染的重要程度，本文选取二氧化硫排放量、烟（粉）尘排放量、废水中氨氮排放量、废水中化学需氧量、工业固体废物产生量这五个指标，我们参照刘心的处理方法，整理成一个综合污染指标。

由于现有统计年鉴中关于环境污染的指标在 2001 前后有变化，为了数据的一致性，本文选取 2001-2016 年中国的 29 个省、市、自治区的面板数据（不包括西藏，重庆市的指标归入四川省内），数据来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》及各省的统计年鉴。上述变量的描述统计结果见表 5。

表 5 投入产出变量描述统计

变量	单位	极小值	极大值	均值	标准差
能源投入	万吨标准煤	520	38899	11533.53	8079.37
劳动力投入	万人	63.1	4498.9	781.1631	618.5331
资本投入	亿元	191.08	148841.1	8825.866	11467.33
期望产出 GDP	亿元	300.13	60306.64	10073.31	9859.521
非期望产出	万吨	21.54	12739.3	2084.513	2052.819

2.结果分析

（1）模型检验

在用 DEA 的方法测度效率之前，需检验投入与产出是否满足“等张性”，即

各 DMU 投入增加时产出也要相应的增加。用 Person 相关系数检验结果见表 6，在 0.01 的显著性水平下，投入与产出都是正相关，且投入与期望产出之间的相关性远远大于投入与非期望产出之间的相关性。因此，利用该样本建立的超效率 SBM 模型测度能源效率是完全可信的。

表 6 Person 相关系数检验结果

		相关性				
		能源	劳动力	资本	GDP	污染
能源	Pearson 相关性	1	.771**	.659**	.850**	.670**
	显著性（双侧）		.000	.000	.000	.000
	N	464	464	464	464	464
劳动力	Pearson 相关性	.771**	1	.586**	.893**	.252**
	显著性（双侧）	.000		.000	.000	.000
	N	464	464	464	464	464
资本	Pearson 相关性	.659**	.586**	1	.703**	.434**
	显著性（双侧）	.000	.000		.000	.000
	N	464	464	464	464	464
GDP	Pearson 相关性	.850**	.893**	.703**	1	.352**
	显著性（双侧）	.000	.000	.000		.000
	N	464	464	464	464	464
环境 污染	Pearson 相关性	.670**	.252**	.434**	.352**	1
	显著性（双侧）	.000	.000	.000	.000	
	N	464	464	464	464	464

**：在 .01 水平（双侧）上显著相关。

（2）各省全要素能源效率测算结果及分析

本文基于规模报酬不变的非导向的超效率 SBM 模型，运用 MaxDEA6.4 软件对我国 29 个省市自治区 2001-2016 年的全要素能源效率进行测算。需要注意的是，计算出来的能源效率是一个相对值，如果一个省份处于效率生产的前沿面，说明这个省份在一定程度上比其他省份占优，但还是有减少污染物排放的可能的。

由表 7 可知，海南省的全要素能源效率都是 1，说明它处于投入有效面上，是有效 DMU 的对比标准省，可作为评价其他省份能源效率高低的标杆。上海、广东、青海的全要素能源效率在 2001-2016 年始终是大 于 1 的，说明这三个省份的能源效率处于最优的生产前沿面上。北京、天津、黑龙江、江苏、浙江、福建、山东、宁夏有较多年份全要素能源效率大于 1 也处于生产前沿面上。全要素能源效率有一年位于生产前沿面上的地区有内蒙古、辽宁、安徽、江西、河南、广西。而河北、山西、吉林、湖北、湖南、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、新疆，这些地方 的能源效率都低于 1，说明能源的投入产出不达标，长期处于投入过多或者产出过少 的情况，距离生产有效前沿面距离远，但也说明了这些省份相比其他城市具有更高的 节能减排潜力。

表 7 中国 29 个省全要素能源效率值

地区	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
北京	0.7844	0.7953	0.8491	0.8830	0.9410	0.9756	1.0198	1.2033
天津	0.8869	0.9383	0.9587	1.0375	1.1139	1.1177	1.2244	1.0302
河北	0.8317	0.8533	0.9001	0.9107	0.9706	0.9586	0.9513	0.9408
山西	0.8750	0.8145	0.7264	0.7105	0.6945	0.6815	0.6491	0.5976
内蒙古	1.0042	0.8044	0.6447	0.6710	0.7292	0.7397	0.7381	0.8370
辽宁	0.9865	0.9709	0.8859	0.7669	0.7054	0.7028	0.7098	0.7405
吉林	0.8837	0.8136	0.8169	0.8151	0.6914	0.6526	0.6695	0.7061
黑龙江	0.9822	1.0113	1.0727	1.0987	1.0516	0.9125	0.8185	0.7763
上海	1.0680	1.0216	1.0641	1.0418	1.0505	1.1365	1.1419	1.1809
江苏	0.9888	1.0615	1.0311	1.0007	1.0135	0.9905	0.9882	0.9394
浙江	1.0220	1.0209	0.9773	0.9280	0.9720	0.8902	0.8712	0.8746
安徽	1.0301	0.9310	0.8141	0.7648	0.7328	0.7303	0.7230	0.7427
福建	1.1000	1.0453	1.0557	0.9916	0.9554	0.9344	0.9347	0.9287
江西	1.0058	0.7807	0.6934	0.7069	0.7227	0.7331	0.7452	0.7632
山东	0.9466	0.8533	0.8379	0.8685	0.9002	0.9851	1.0504	1.1135
河南	1.0146	0.9875	0.8879	0.8069	0.7461	0.7396	0.7632	0.7790
湖北	0.7469	0.7505	0.7661	0.7490	0.7522	0.7036	0.6919	0.6260
湖南	0.9355	0.8840	0.8613	0.8143	0.7658	0.7513	0.7105	0.6536
广东	1.9196	1.9756	1.9468	1.9757	2.0443	2.2142	2.0609	1.8312
广西	1.0110	0.9708	0.9226	0.8481	0.7603	0.7126	0.6866	0.6884

海南	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
四川	0.7481	0.6742	0.6505	0.6386	0.6342	0.6472	0.6312	0.6078
贵州	0.6658	0.6180	0.6365	0.6348	0.6494	0.6406	0.6331	0.6236
云南	0.8493	0.8283	0.7899	0.7534	0.6593	0.6387	0.5682	0.5251
陕西	0.7552	0.7040	0.6396	0.6355	0.6360	0.6010	0.5880	0.6190
甘肃	0.7659	0.7254	0.7362	0.7432	0.7446	0.7176	0.6923	0.6474
青海	1.6576	1.5836	1.8346	1.7062	1.6587	1.6659	1.6106	1.9477
宁夏	1.0751	1.0325	0.9091	0.8939	0.9427	0.8827	0.9588	1.0945
新疆	0.6529	0.6108	0.6020	0.6106	0.6115	0.6050	0.6112	0.6048

(续表 7)

地区	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
北京	1.0905	1.1858	1.5511	1.4920	1.5047	1.5264	2.1423	2.0939
天津	1.1700	1.2073	1.2808	1.3906	1.5390	1.7086	1.7569	1.4101
河北	0.7918	0.9742	0.9868	0.9612	0.9158	0.9584	0.9201	0.8937
山西	0.5738	0.5456	0.6051	0.5672	0.5382	0.5336	0.5134	0.4863
内蒙古	0.8225	0.8078	0.8511	0.8161	0.7334	0.6460	0.7339	0.9495
辽宁	0.7441	0.7849	0.8065	0.8016	0.8024	0.7909	0.9317	1.1028
吉林	0.6809	0.6699	0.6978	0.7091	0.7118	0.7158	0.7501	0.8014
黑龙江	0.6551	0.6454	0.6991	0.6969	0.7229	0.7917	0.9150	0.8267
上海	1.2114	1.2775	1.4396	1.6024	1.6794	1.6014	1.6482	1.6230
江苏	0.9409	0.9013	0.9225	0.9524	0.8869	0.9203	0.9499	1.0034
浙江	0.8785	0.8711	0.8412	0.8477	0.8466	0.8493	0.8356	0.8929
安徽	0.7388	0.7320	0.7321	0.7328	0.7214	0.7048	0.7116	0.7833
福建	0.9196	0.9354	0.8850	0.8883	0.9310	0.9016	0.9174	0.9428
江西	0.7792	0.7873	0.7576	0.7684	0.7456	0.7184	0.7166	0.7375
山东	1.1634	1.1069	1.1054	1.1413	1.2910	1.3537	1.4263	1.1559
河南	0.7560	0.7616	0.7705	0.7710	0.7800	0.7588	0.7626	0.6834
湖北	0.6058	0.6024	0.6200	0.6278	0.6780	0.6617	0.6889	0.7210
湖南	0.6663	0.6559	0.6641	0.6801	0.7023	0.6956	0.7090	0.8371
广东	1.8675	1.8339	1.9236	1.8777	1.8955	1.9597	1.9445	1.9945
广西	0.6941	0.6862	0.6992	0.7198	0.7106	0.6918	0.6887	0.6817
海南	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

四川	0.6288	0.6523	0.6780	0.6817	0.6982	0.6859	0.6495	0.7310
贵州	0.5918	0.5790	0.6128	0.5548	0.5192	0.5142	0.5077	0.4634
云南	0.4998	0.4947	0.5007	0.5076	0.5290	0.5211	0.5993	0.5514
陕西	0.6577	0.6615	0.6236	0.6277	0.6014	0.5834	0.5717	0.5585
甘肃	0.5836	0.5647	0.6207	0.6110	0.5501	0.5317	0.5365	0.5141
青海	1.9547	2.1561	1.7947	1.7460	1.4932	1.7184	2.3121	1.5187
宁夏	0.8167	0.8714	1.4212	1.5884	2.3581	1.8464	1.7017	1.7391
新疆	0.5820	0.5563	0.5851	0.5475	0.5401	0.5162	0.5058	0.5191

计算 2001-2016 年中国各省的全要素能源效率平均值,并将其排序,如表 8 所示,排名靠前的省份,如北京、天津、上海、山东、广东、海南、青海、宁夏的平均能源效率值都大于 1,说明这些地方经济发展较快,同时环境污染也相对较少。江苏、福建、河北、浙江、黑龙江、辽宁的平均能源效率在 0.8-1 之间,这些省份想提高能源效率达到有效生产前沿面比较容易。而甘肃、山西、陕西、云南、贵州、新疆,这些省份的平均能源效率都低于 0.65,远远偏离生产前沿面,是未来能源效率提高的重点考察省份。

表 8 中国各省全要素能源效率排名

地区	平均全要素能源效率	排名
北京	1.2524	5
天津	1.2357	6
河北	0.9199	11
山西	0.6320	25
内蒙古	0.7830	16
辽宁	0.8271	14
吉林	0.7366	21
黑龙江	0.8548	13
上海	1.2993	3
江苏	0.9682	9
浙江	0.9012	12
安徽	0.7704	17
福建	0.9542	10
江西	0.7601	19
山东	1.0812	7

河南	0.7980	15
湖北	0.6870	22
湖南	0.7492	20
广东	1.9541	1
广西	0.7608	18
海南	1.0000	8
四川	0.6648	23
贵州	0.5903	28
云南	0.6135	27
陕西	0.6290	26
甘肃	0.6428	24
青海	1.7724	2
宁夏	1.2583	4
新疆	0.5788	29

图 3 是 29 个省全要素能源效率的箱图，发现每个省的全要素能源效率差别很大。首先，安徽、福建、广东、广西、河北、河南、江西、内蒙古、青海、山西这些地方出现异常值，表明这些地方在某一年出现了极高或者极低的全要素能源效率值，如果异常值在上方如安徽、江西等，说明该地区的能源效率提高的空间大，如果异常值出现的下方如河北、河南等，说明这些地方应注意稳定当下的能源效率水平。其次，通过上下四分位数来看数据的波动程度，北京、宁夏、上海、天津等地方的方差较大，说明这些地区的全要素能源效率不稳定，安徽、河南、江西、四川等地方的方差较小，说明这些地区的能源效率比较稳定。像广东、青海、上海等地方的全要素能源效率处于较高水平，说明该地区的能源政策制定合理，符合当地的能源资源禀赋，而像陕西、新疆等地全要素能源效率低且稳定，说明该地区的能源效率提升过于缓慢，政策效果不明显，需要及时调整。

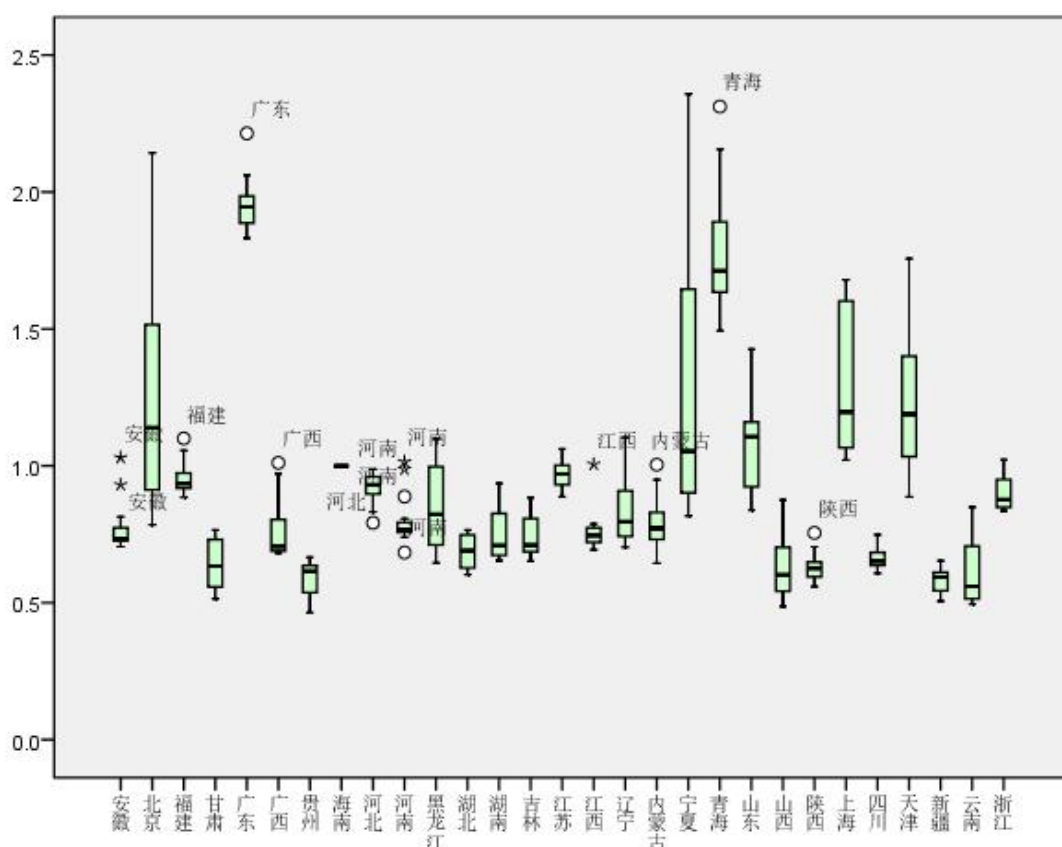


图3 中国29个省全要素能源效率的箱图

(3) 分区域全要素能源效率分析

目前多数研究遵循着“七五”计划公布的将我国划分为东中西三个区域，分别研究其经济、地理等情况来制定相应政策。然而国务院发展研究中心日前指出了更合适的区域划分：分为东、中、西和东北四大板块，并将四大板块分为八大综合经济区。

表9 区域划分

区域	地区			
东北综合经济区	辽宁	吉林	黑龙江	
北部沿海综合经济区	北京	天津	河北	山东
东部沿海综合经济区	上海	江苏	浙江	
南部沿海经济区	福建	广东	海南	
黄河中游综合经济区	陕西	山西	河南	内蒙古
长江中游综合经济区	安徽	湖北	湖南	江西
大西南综合经济区	云南	贵州	四川	广西

大西北综合经济区	甘肃	青海	宁夏	新疆
----------	----	----	----	----

按照表 9 对 29 个省进行划分后，计算其全要素能源效率结果如表 10 所示。

表 10 八大综合经济区的全要素能源效率值

区域	东北 综合	北部 沿海	东部 沿海	南部 沿海	黄河 中游	长江 中游	大西南 综合	大西北 综合
2001	0.9508	0.8624	1.0263	1.3399	0.9123	0.9296	0.8185	1.0379
2002	0.9319	0.8601	1.0347	1.3403	0.8276	0.8365	0.7728	0.9881
2003	0.9251	0.8864	1.0242	1.3341	0.7246	0.7837	0.7499	1.0205
2004	0.8935	0.9249	0.9902	1.3224	0.7060	0.7587	0.7187	0.9885
2005	0.8161	0.9814	1.0120	1.3332	0.7014	0.7434	0.6758	0.9894
2006	0.7560	1.0093	1.0057	1.3829	0.6905	0.7296	0.6598	0.9678
2007	0.7326	1.0615	1.0004	1.3319	0.6846	0.7177	0.6298	0.9682
2008	0.7409	1.0720	0.9983	1.2533	0.7082	0.6964	0.6112	1.0736
2009	0.6934	1.0539	1.0103	1.2624	0.7025	0.6975	0.6036	0.9843
2010	0.7001	1.1185	1.0166	1.2565	0.6941	0.6944	0.6030	1.0371
2011	0.7345	1.2310	1.0678	1.2695	0.7126	0.6935	0.6227	1.1054
2012	0.7359	1.2463	1.1342	1.2553	0.6955	0.7023	0.6160	1.1232
2013	0.7457	1.3126	1.1376	1.2755	0.6633	0.7118	0.6142	1.2354
2014	0.7661	1.3868	1.1237	1.2871	0.6305	0.6951	0.6033	1.1532
2015	0.8656	1.5614	1.1445	1.2873	0.6454	0.7065	0.6113	1.2640
2016	0.9103	1.3884	1.1731	1.3124	0.6694	0.7697	0.6069	1.0728
均值	0.8062	1.1223	1.0562	1.3028	0.7105	0.7417	0.6574	1.0631

对八大经济区的能源效率进行平均，从图 4 可以看到，沿海经济区的全要素能源效率值普遍高于内陆地区，大西北综合经济区的全要素能源效率值在内陆地区中居首位。说明经济发达的地区其能源效率也越高，同时环境污染也会更少；反之，经济落后的地区能源效率提高还有很大空间，节能减排潜力也更大。

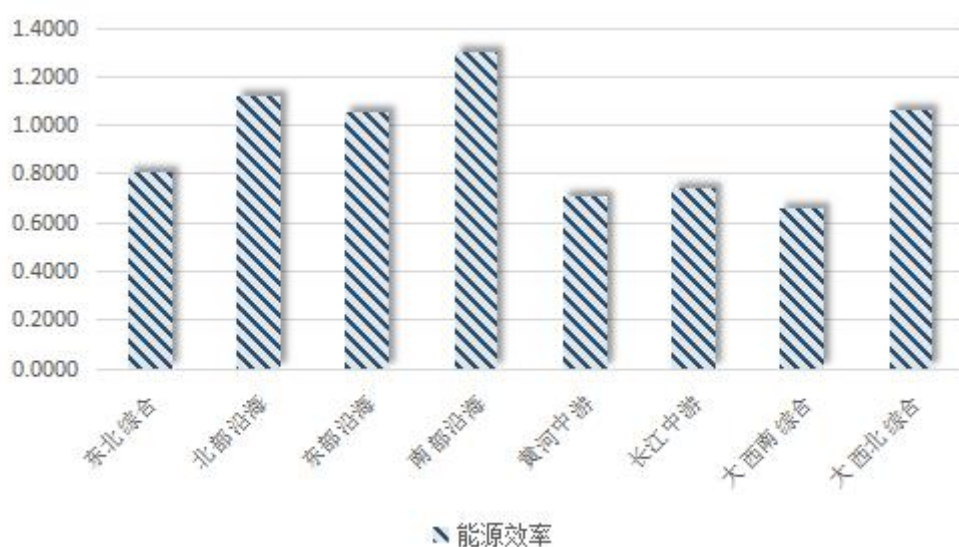


图 4 八大经济区全要素能源效率均值

从图 5 可得，南部沿海经济区的全要素能源效率值高于其他经济区，北部沿海经济区虽然一开始能源效率低，但是 2001-2016 年一直保持高速增长状态，到 2016 年已经超过南部沿海成为全要素能源效率最高的经济区；东部沿海经济区的全要素能源效率增长缓慢，大西北综合经济区则呈现波动式增长，二者增长趋势一致，上述四个经济区的全要素能源效率均超过全国能源效率的平均水平。而东北综合经济区、黄河中游综合经济区、长江中游综合经济区、大西南综合经济区的全要素能源效率值具有相同的发展趋势，都远远低于全国平均水平。

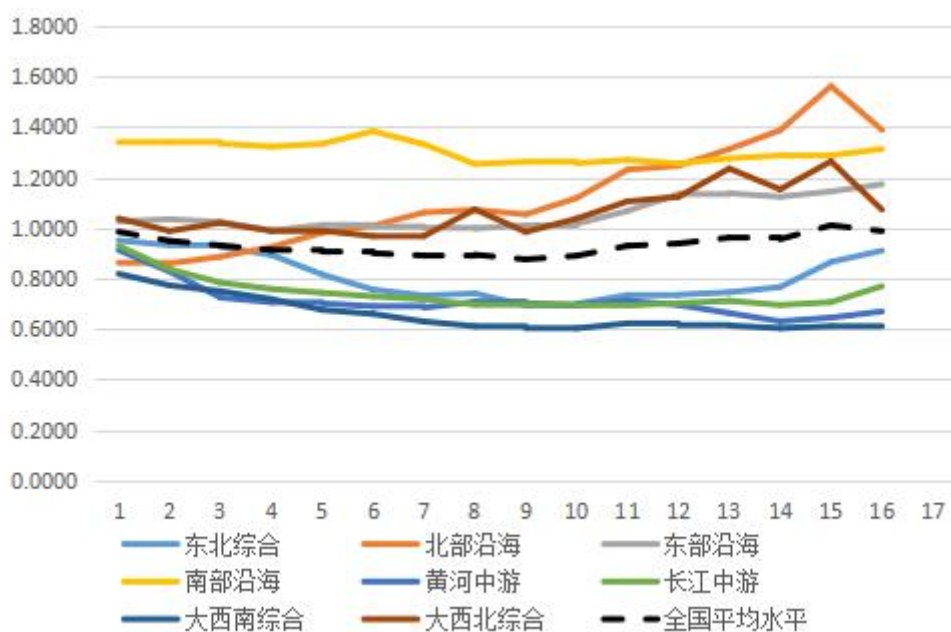


图 5 八大综合经济区全要素能源效率

四、能源消费结构对全要素能源效率的影响研究

（一）模型设定与数据来源

1.理论模型的设定

普通回归主要是指均值回归，只考察解释变量 x 对被解释变量 y 的条件期望 $E(y|x)$ 的影响，也就是说当我们真正关心的是 x 对整个条件分布 $y|x$ 的影响，如果条件分布 $y|x$ 不是对称分布，则均值回归不能准确反映整个条件分布的全貌。

Koenker and Bassett^[52]提出的“分位数回归”很好的解决了这个问题。通过取 0-1 之间的任何分位数进行回归（如 1/4 分位数、1/5 分位数），其结果不易受极端值的影响，比 OLS 更稳健，对异常值的敏感程度也小很多，最重要的是能提供条件分布的全面信息。

因此，本文结合面板数据的优势，建立面板分位数回归模型来研究我国 2004-2016 年的能源消费结构对全要素能源效率的影响。

为了和面板分位数回归做对比，先做 OLS，通过取对数的方式来尽可能消除数据指标间的异方差，根据前面的理论，建立如下计量模型：

$$\begin{aligned} LTFEE_{it} = & \alpha_0 + \alpha_1 LECS_{it} + \alpha_2 LIS_{it} + \alpha_3 LEPC_{it} + \alpha_4 LES_{it} + \alpha_5 LDFT_{it} \\ & + \alpha_9 LGI_{it} + \alpha_{10} LR.D_{it} + \alpha_{11} LTP_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

其中， i 和 t 表示省份和时间， $LTFEE_{it}$ 表示 t 时期 i 省（市）的全要素能源效率， $LECS_{it}$ 是核心解释变量，表示 t 时期 i 省（市）的能源消费结构， LIS_{it} 、 $LEPC_{it}$ 、 LES_{it} 、 $LDFT_{it}$ 、 LGI_{it} 、 $LR.D_{it}$ 、 LTP_{it} 是影响能源效率的其他控制变量，分别表示 t 时期 i 省（市）的产业结构、环境污染治理投资强度、经济发展水平、对外贸易依存度、政府影响力、R&D 经费投入强度和技术进步， ε_{it} 表示残差项。

假设 Y 为连续型随机变量， $F_y(\bullet)$ 表示它的累积分布函数，则 Y 的总体 q 分位数记作 y_q ，定义为： $q = P(Y \leq y_q) = F_y(y_q)$

分位数函数模型构造：

$$Q_{Y_i}(\tau | x_i) = x_i' \beta(\tau)$$

面板数据的一般模型表示如下：

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + u_{it}, \text{ 其中 } i = 1, 2, \dots, n$$

因此，本文的面板分位数回归模型构造如下：

$$\begin{aligned} \text{LTFEE}_{it}(\tau | x_{it}) = & \alpha_0 + \alpha_i + \beta_1(\tau) \text{LECS}_{it} + \beta_2(\tau) \text{LIS}_{it} + \beta_3(\tau) \text{LEPC}_{it} + \beta_4(\tau) \text{LES}_{it} \\ & + \beta_5(\tau) \text{LDFT}_{it} + \beta_6(\tau) \text{LGI}_{it} + \beta_7(\tau) \text{LR.D}_{it} + \beta_8(\tau) \text{LTP}_{it} + u_{it} \end{aligned}$$

其中， τ 表示分位数， $\beta_i(\tau)$ 表示分位数水平 τ 的第 i 个变量的回归系数，其他变量含义同上， u_{it} 表示随机误差项。

2. 指标说明和数据来源

为了避免只纳入能源消费结构会造成遗漏变量偏误，同时加入产业结构、环境污染治理投资强度、经济发展水平、对外贸易依存度、政府影响力、R&D 经费投入强度、技术进步 7 个控制因素对模型进行约束，用超效率 SBM 模型计算出来的全要素能源效率值作为被解释变量，其他 8 个影响因素作为解释变量，并重点分析能源消费结构对全要素能源效率的影响。

（1）能源消费结构（ECS）

选择一次能源消费结构中最大的煤炭占比表示各省能源消费结构。煤炭消费量的单位需要通过折算系数化为万吨标准煤，折算系数为 0.7143，由于不同能源折算系数不同，所以各地区相加与全国总数不等。

（2）产业结构（IS）

三大产业中，第二产业的能源消费量最高，故采用各省的第二产业总产值占 GDP 中的比重来表示产业结构。

（3）环境污染治理投资强度（EPC）

当前国家正深入践行绿水青山就是金山银山的理念，坚定不移走好生态优先绿色发展之路，所以能源效率的提高必须在环境约束下才符合当下发展要求。选用各省的环境污染治理投资额来表示各省的环境污染程度以及政府对环境污染的治理力度。

（4）经济发展水平（ES）

经济的发展与能源的消耗是密切关联的，为了客观的表示经济发展水平，我们用各省的人均 GDP 来表示。

（5）对外贸易依存度（DFT）

对外贸易依存度是衡量一国对国际市场的依赖程度和对外开放程度的重要指标，定义为进出口总额与国内生产总值之比。故本文选用各省的进出口总额比上地区生产总值来量化对外贸易依存度。

（6）政府影响力（GI）

我国正在深入推进新时代能源的供给侧结构性改革，在市场经济下，政府在能源效率提高中的作用不可忽视。选用地区财政支出占地区生产总值的比重来衡量政府对市场的影响力。

（7）R&D 经费投入强度（R.D）

R&D 经费能有效衡量一个地区科技发展水平和核心竞争力。因此，选用各省的 R&D 经费内部投入与地区生产总值的比值来表示 R&D 经费投入强度。

（8）技术进步（TP）

技术的进步可以提高能源的有效开采，减少能源消费过程中带来的环境污染问题。选用各省的专利申请数作为技术进步的衡量指标。

本文选用 2004-2016 年我国 29 个省（剔除西藏，重庆市的指标归入四川省）的面板数据，其中产业结构、对外贸易依存度、政府影响力、经济发展水平的数据来自 2005-2017 年的《中国统计年鉴》，能源消费结构来自 2005-2017 年的《中国能源统计年鉴》，环境污染治理投资额来自 2005-2017 年的《中国环境统计年鉴》，R&D 经费投入和技术进步来自 2005-2017 年的《中国科技统计年鉴》。

（二）实证分析

1.描述统计

上述解释变量的描述统计值见表 11，环境污染治理投资强度、经济发展水平、技术进步三个变量没有比值处理，数据相对较大，因此建模时为尽可能降低变量间异方差进行对数处理是可行的。

表 11 解释变量描述统计结果

影响因素	符号	Mean	SD	Min	Max
能源消费结构	ECS	69.18	26.87	8.7	150.1
产业结构	IS	48.75	11.82	19.3	105.5
环境污染治理投资强度	EPC	195.99	187.32	5.3	1416.2
经济发展水平	ES	36289.93	23641.9	4215	118198

对外贸易依存度	DFT	31.75	38.06	3.25	164.37
政府影响力	GI	20.89	9.43	7.92	62.69
R&D 经费投入强度	R.D	0.28	0.51	0.03	3.05
技术进步	TP	11170.81	21511.0	5	145448

2.OLS 回归和固定效应回归

处理面板数据时必须确定选择固定效应模型还是随机效应模型,可以通过做 F 检验和 Hausman 检验来确定,分析结果见表 12。

表 12 检验结果

项目	统计量	P 值
F 检验	47.31	0.00
Hausman 检验	16.93	0.0498

取显著性水平 0.05, F 检验的 P 值为 0.00, 拒绝原假设, 即认为 FE 明显优于混合回归模型, 应该允许每个个体拥有独立的截距项; Hausman 检验的结果 $P < 0.05$, 拒绝原假设, 认为应该选择固定效应模型。

从表 13 可以看出, 能源消费结构对能源效率的影响显著为负, 这与目前的多数研究一致, 在 OLS 回归中, 能源消费结构的系数为 -0.273, 表明能源消费中煤炭每增加 1%, 能源效率就降低 0.273%; 在 FE 模型中, 能源消费结构的系数为 -0.255, 表明能源消费中煤炭每增加 1%, 能源效率就降低 0.255%。产业结构和技术进步对能源效率的影响不显著。

表 13 回归结果

变量	OLS	FE
LECS	-0.273***	-0.255***
LIS	0.0111	-0.139
LEPC	-0.170***	-0.0381
LES	0.312***	0.0965*
LDFT	0.0549*	-0.0601*
LGI	-0.147**	-0.213*
LR.D	-0.0912***	0.0608
LTP	0.00384	0.0131
_cons	-1.389**	1.447***

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$, 由 Stata14.0 计算得出

3.面板分位数回归

为了研究能源消费结构在不同分位点对能源效率的影响程度，并找出能源效率地区差异产生的原因，本文选择 10%、30%、50%、70%、90%这五个具有代表性的分位点来做面板分位数回归，同时做出回归的系数图。

（1）全国样本的面板分位数回归

首先，以全国数据为样本进行面板分位数回归，结果如表 14 所示。整体看，除了技术进步以外，其它变量对能源效率均具有显著影响。首先观察核心解释变量能源消费结构对全要素能源效率的影响，无论在那个分位点，能源消费结构的系数都是负的，充分说明了煤炭的过多消费对能源效率的提升具有强抑制性，在各个分位点上能源消费结构的影响系数依次为-0.0912、-0.0985、-0.0988、-0.521、-0.482，可以看出在 0.5-0.7 分位点之间，能源消费结构的影响程度发生了“向下跳跃”，这表明对于全要素能源效率较高的省份而言，能源消费结构对全要素能源效率的影响更大，具体而言，这些地区的煤炭消费量每增多 1%，全要素能源效率会降低 0.482%-0.521%，而位于全要素能源效率中下游的地区，能源消费结构的影响较小，均在-0.09%左右。表明我国能源消费结构的改善迫在眉睫；但是，由于我国的特殊资源结构决定了煤炭资源丰富，天然气等清洁高效能源开采困难，长期以来形成的对煤炭资源的依赖不容易立刻消除，需要从各方面制定均衡政策来调节能源消费结构。

在控制变量中，技术进步对能源效率的影响仅在 10%分位点表现出负面影响，其它分位点系数为正，也就是在全要素能源效率极低的地区存在着技术进步的“回弹效应”，整体看符合技术进步的理論意义，但是均未达到统计意义上的显著，可能原因是我国技术发展还不够先进，选择作为代表的专利申请数不太合理，和发达国家相比我国的技术发展有待提升。

产业结构在 70%和 90%的分位点处系数为正，但均不显著，在 30%和 50%的分位点处显著又为负，这与目前的多数研究相悖，可能随着我国对能源方面的要求越高，仅通过产业结构的改变来提高能源效率不符合实际，且对于全要素能源效率中等偏低的地区而言，产业结构的不合理变动还会抑制能源效率的提升。

环境污染治理投资强度在五个分位点均显著为负，符合其理论意义，表明资金投入越多环境污染越严重，能源效率越低。在 30%分位点处负面影响最大，说明能源效率中等偏下一点的地区为了尽快提高全要素能源效率达到有效前沿面，缺乏环境保护意识，政府需要付出更高的资金代价来处理环境污染问题。

经济发展水平在五个分位点上均显著为正，影响系数随分位点的提高呈现波

动上升趋势，说明经济的良好发展确实有助于提高能源效率，全要素能源效率越高的地区经济发展的积极带动作用比全要素能源效率低的地区更明显。

对外贸易依存度是个积极变量，且在全要素能源效率中低的地区达到统计意义上的显著，表明通过制定开放政策、增加对外出口有助于落后地区加速达到能源效率前沿面，而全要素能源效率高的地区一般对外开放程度也高，所以对外贸易依存度的影响性会减弱。

政府影响力在低分位点出现显著的负面影响，随着分位点的增高负面影响减弱，90%分位点处表现出正面影响但是不显著，说明市场经济下，对于全要素能源效率低的地区政府过分干预市场运行反而不利于能源效率提高，在全要素能源效率高的地区政府制定的政策比较合理，符合地区能源的可持续清洁高效发展。

R&D 经费投入强度随着分位点增高负面影响越强，且在中高分位点显著，没有出现理论上的积极作用，原因可能在全要素能源效率越高的地区越重视科研发展质量，致力形成地区核心竞争力，却没有处理好科技发展和环境污染之间的关系，R&D 内部经费很少用于研发绿色清洁技术的创新，长此以往反而会降低能源效率。

最后将 OLS、FE 模型和面板分位数回归作比较，前面两个模型只能得出影响因素是否显著的二点判断，结论具有绝对性和笼统性，不一定符合实际情况，如产业结构的影响性在 OLS、FE 模型中无法体现；而面板分位数回归可以同时体现出不同地区之间的差异，方便各地方政府因地制宜，制定出更好的提升能源效率的政策。

表 14 全国样本的面板分位数回归结果

	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Intercept	-0.612* (0.306)	-0.216 (0.354)	-0.471 (0.457)	-0.274 (0.920)	-0.437 (0.896)
LECS	-0.0912** (0.0328)	-0.0985** (0.0379)	-0.0988* (0.0488)	-0.521*** (0.0984)	-0.482*** (0.0958)
LIS	-0.0768 (0.0459)	-0.139** (0.0531)	-0.144* (0.0684)	0.116 (0.138)	0.0240 (0.134)
LEPC	-0.116*** (0.0201)	-0.137*** (0.0232)	-0.131*** (0.0299)	-0.122* (0.0602)	-0.124* (0.0587)
LES	0.229*** (0.0280)	0.208*** (0.0324)	0.215*** (0.0418)	0.238** (0.0842)	0.237** (0.0820)

LDFT	0.0424*	0.0556**	0.0781**	0.0297	0.0745
	(0.0165)	(0.0191)	(0.0246)	(0.0496)	(0.0483)
LGI	-0.334***	-0.314***	-0.268***	-0.118	0.0304
	(0.0339)	(0.0393)	(0.0506)	(0.102)	(0.0992)
LR.D	-0.0180	-0.0147	-0.0437**	-0.121***	-0.178***
	(0.0104)	(0.0120)	(0.0155)	(0.0313)	(0.0304)
LTP	-0.00975	0.0128	0.0131	0.0192	0.00292
	(0.0113)	(0.0131)	(0.0169)	(0.0340)	(0.0331)
N	377	377	377	377	377

*表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.01$, ***表示 $p<0.001$, 下文同

(2) 面板分位数回归系数图

图 6 绘制了所有解释变量对被解释变量影响的系数随分位数变化的动态趋势，比表更直观和全面，可作为表的辅助解释。首先观察能源消费结构的系数变化，在第一行第二列的小图中，能源消费结构的面板分位数回归系数刚开始平稳波动，突然在 0.6-0.8 分位数之间出现剧烈的下跌，印证了表 14 中的趋势，说明全要素能源效率高的地区一定要致力于开发新能源，更多使用清洁高效的天然气、电力等能源来替代对煤炭的依赖；其次灰色部分表示系数估计的置信带，全程上下距离均匀，说明能源消费结构的面板分位回归系数估计很准确，研究具有可靠性。

在控制变量中，产业结构和能源消费结构的系数走势正好呈对称分布，一开始产业结构系数变动稳定，突然在 0.6-0.8 分位数之间出现“逆袭直上”，说明全要素能源效率偏高的地区可以通过产业结构的优化升级来弥补能源消费结构带来的负面影响。经济发展水平和环境污染治理投资强度的系数变动都比较平稳，且在 0.7 分位点处环境污染治理投资强度系数估计的标准误差大，所以这点的估计结果偏差大。对外贸易依存度和技术进步的都有波动上升趋势，且都在 0.5-0.7 分位点间有下跌点，说明全要素能源效率中等水平的地区可以减少在对外出口和技术进步上的投入，更多关注其它会带来积极影响的因素。政府影响力和 R&D 内部经费投入呈现强烈对比，随着分位点的增大，政府影响力系数呈指数趋势稳定上升，R&D 内部经费投入系数呈直线趋势稳定下降，说明全要素能源效率低的地区政府干预应该更多体现在支持科研发展上，研发出高新技术可以更好控制能源消费时带来的环境污染问题。

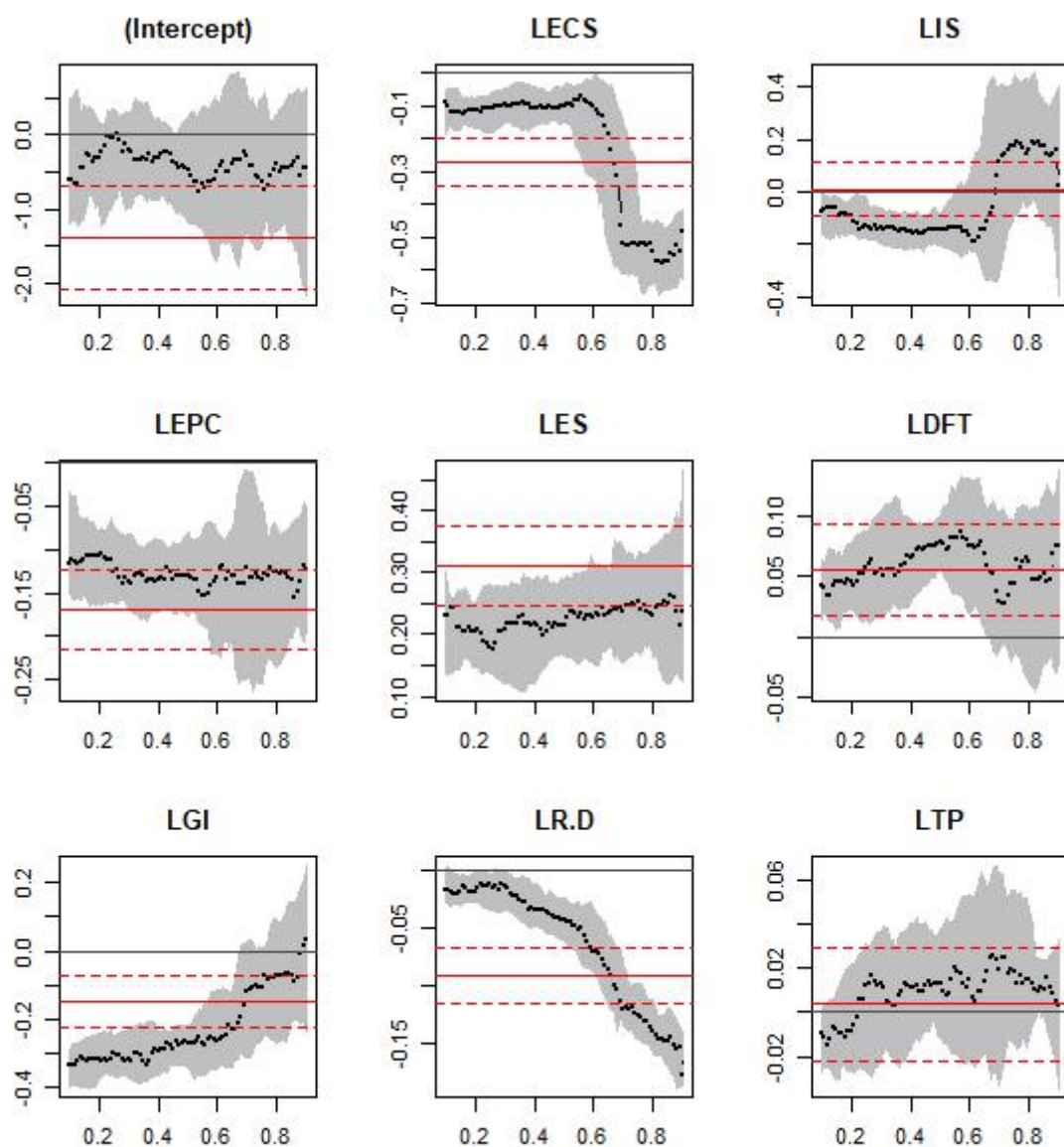


图6 面板分位数回归系数图

(3) 八大经济区的面板分位数回归

根据前面的分析,发现能源效率区域差异很明显,研究能源消费结构对它的影响时应全面考虑。故仍取 10%、30%、50%、70%、90%这五个分位点,研究八大经济区全要素能源效率受能源消费结构的影响,结果见表 15。

表 15 八大经济区的能源消费结构对能源效率的面板分位数回归

	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
东北综合	0.525 (0.512)	0.194 (0.309)	-0.227 (0.358)	-0.425** (0.435)	-0.557** (0.659)
北部沿海	-0.423* (0.173)	-0.433** (0.165)	-0.465** (0.184)	-0.340* (0.250)	-0.427* (0.218)

东部沿海	0.0792 (0.307)	-0.0549 (0.324)	-0.205 (0.312)	0.0932** (0.343)	0.428** (0.269)
南部沿海	-0.683*** (0.122)	-0.684*** (0.0962)	-0.722*** (0.102)	-0.697*** (0.0956)	-0.718*** (0.142)
黄河中游	-0.188 (0.149)	-0.144 (0.126)	-0.270 (0.168)	-0.357* (0.141)	-0.273 (0.224)
长江中游	0.130 (0.198)	0.166 (0.277)	-0.0346 (0.206)	-0.155* (0.272)	0.110 (0.245)
大西南	-0.0385 (0.141)	-0.205 (0.113)	-0.275 (0.118)	-0.195 (0.131)	-0.312 (0.163)
大西北	-0.182** (0.176)	-0.112** (0.273)	0.101 (0.230)	0.367 (0.215)	0.0433 (0.299)

能源消费结构对南部沿海经济区的负面影响最显著，从分位数来看，影响呈波动上升，具体来说，当南部沿海经济区中 10%的低能源效率地区，能源消费结构中煤炭消费多 1%时，全要素能源效率会降低 0.683%。北部沿海综合经济区受到能源消费结构的负面影响略小于南部沿海，除在 70%分位点处有个回落，其他水平的影响度比较均衡。东部沿海综合经济区却在高分位点受到显著的正面影响，低分位点存在不显著的负面影响，所以东部沿海综合经济区内部可能存在能源效率提升的矛盾地区。

能源消费结构对东北综合经济区存在高分位点显著抑制作用，其中 10%高能源效率地区的煤炭消费每多 1%，全要素能源效率会降低 0.557%，这个比例接近南部沿海经济区中落后地区能源消费结构系数。能源消费结构对大西北综合经济区存在低分位点显著抑制作用，其中落后的 10%地区煤炭消费每多 1%，全要素能源效率会降低 0.182%。对黄河中游、长江中游综合经济区而言，能源消费结构都在 70%分位点处都存在显著负面影响。对大西南综合经济区，能源消费结构系数都是负的，可是均为通过显著性检验。

沿海地区资源禀赋丰富，是外向型经济发展区，我国大多数制造业和研发基地都在这里，拥有最多的高新技术人才，对外出口也比内陆地区方便，全要素能源效率水平普遍较高，过度使用煤炭会降低能源消费结构的平衡。具体看，南部沿海经济区的省份中包含了我国从改革开放到现在的五个经济特区，经济发展离不开能源消耗，但是过度依赖煤炭，肯定不利于能源效率的提高；北部沿海综合经济区中，主要是作为首都的北京拥有得天独厚的优势，经济发展紧跟国家步伐，是全国的经济、政治、文化、科技交流中心，京津冀一带自 2015 年通过了协同发展纲要，在能源消费、环境保护方面都取得不错的突破，全要素能源效率水

平高，过度消费煤炭一样会打破能源消费结构的平衡性；而东部沿海综合经济区是最具影响力的多功能的制造业中心，制造业发展离不开能源消耗，而储量丰富的煤炭是理想能源，但只能提供短期经济效应，因为中间水平的地区已经出现能源消费结构带来的一定抑制作用。大西北综合经济区中，青海和宁夏两个地区具有“经济发展快、能源资源丰富、环境污染少”的特点，一定量的煤炭消费反而会带动工业发展、经济进步，从而提升能源效率，相反能源效率低的地区会受到能源消费结构带来的抑制冲击。东北综合经济区是重型装备和设备制造业基地，其中能源效率高的省份受到的抑制作用接近南部沿海落后省份，说明只要东北综合经济区能够减少对煤炭的依赖，未来有望成为新的能源高效示范省。黄河中游综合经济区拥有我国大半的能源资源，可是经济落后，开采石油等新能源成本高，所以长期依赖煤炭导致能源效率低下且易受能源消费结构带来的抑制作用。长江中游综合经济区由于水资源丰富，水力发电技术的发展减少了对化石燃料的使用，所以煤炭对其影响有正有负。大西南综合经济区的旅游业发达，不可避免的会产生额外的环境污染、出行拥堵、能源消耗过多等问题，当地政府没有制定合理的政策来提高能源效率时减少外来因素的影响，依赖煤炭只会拖发展的后腿。

五、结论与建议

（一）结论

本文先用描述统计方法对我国的能源消费结构的现状进行分析，然后用基于非期望产出的超效率 SBM 模型计算出各省的全要素能源效率值，最后建立面板分位数回归模型分析了不同地区不同能源效率水平下能源消费结构对全要素能源效率的具体影响，并探索了能源效率存在地区差异的原因，得到如下结论：

1.全要素能源效率具有明显的省际差异和区域差异

省际差异体现在上海、广东、青海已达到最优生产前沿面；而甘肃、山西、陕西、云南、贵州的平均能源效率值还低于 0.65，这些地区是未来能源效率提高的重点考察省份。区域差异体现在沿海经济区高于内陆经济区，其中南部沿海经济区遥遥领先，大西北综合经济区的能源效率水平赶上东部沿海综合经济区，东北、黄河中游、长江中游、大西南综合经济区的能源效率水平远低于全国平均水平，但同时也有更高的提升空间。

2.能源消费结构对全要素能源效率的影响存在省际差异和区域差异

从全国看，能源消费结构对全要素能源效率具有绝对的负面影响，且全要素能源效率越高的省份，受到能源消费结构的抑制作用更显著。从区域看，不同经济区的能源效率受到能源消费结构的影响差别显著，即使同一经济区，这种影响也会随分位点有所变化，具体来看，除了大西南综合经济区，其他经济区均受到不同程度的影响，南部和北部沿海经济区受到的抑制作用最显著，东部沿海则存在显著的正面影响，东北综合经济区高分位点受到显著抑制，大西北综合经济区低分位点受到显著抑制，黄河中游和长江中游综合经济区存在 0.7 分位点显著抑制。

3.除了技术进步，其他因素对能源效率的影响均显著

在探究能源效率存在地区差异的原因中，发现能源消费结构、环境污染治理投资强度是最显著的抑制因素，经济发展水平是最显著的促进因素。技术进步除了在低能源效率地区存在“回弹效应”，整体符合理论意义，但没有达到统计意义上的显著。产业结构的合理优化可以弥补能源消费结构带来的负面影响。提高对外贸易依存度有利于全要素能源效率中等偏低的地区提前达到生产前沿面。政府影响力和 R&D 经费内部投入随分位点增大呈强烈反向变动。

（二）建议

1.加大对可再生能源的开发和利用，减少对不可再生能源的依赖

煤炭等不可再生能源资源具有“高污染、低效率”特点，对能源效率具有显著的负面影响，应尽快减少对煤炭的依赖，进一步优化能源消费结构。我国可再生能源资源丰富，分布广泛，且对环境污染极小，符合我国当下绿色发展的主题，应该加快研发新技术，加大开采力度，尽早实现能源体系的清洁高效运行。

2.保持经济良好发展，坚持扩大对外开放

经济的良好发展对提高能源效率具有显著的促进作用，它可以为能源消费提供动力，应谨遵习总书记的指示，推动实体经济高质量发展，加快落实“四个革命+一个合作”的能源新战略，坚持扩大对外开放，加强各国之间的能源问题交流，

互相学习先进技术和经验，构建能源命运全球共同体，一起维护能源的可持续健康发展。

3.调整第二产业比重，优化能源消费结构

产业结构的调整可以缓解能源消费结构中煤炭使用过多带来的消极影响，原因是 90%以上的煤炭用于第二产业中工业的发展，减少第二产业比重可有效减少煤炭的使用，起到优化能源消费结构的作用，加快升级煤炭开采使用过程中的清洁处理技术，并逐步淘汰高污染、低能效的企业，大力推行绿色环保活动。

4.设立合适的能源发展目标，制定因地制宜的能源政策

能源消费量和能源效率都具有明显的区域差异，不能全国一个标准。发展快的沿海地区目标不易设置过高，再增长能源效率难度大，同时涉及到的技术困难更多，不能以科技发展为由，以污染环境为代价，需从源头解决影响能源效率提升的因素，加强企业污染排放监控，加大科研经费投入来研发绿色清洁技术，减少能源开采利用过程中的环境污染。落后内陆地区虽然提升空间大，但是缺乏高新技术能源效率也难以提高，所以政府需要加大科研经费投入来推动科技进步，促进经济发展，扩大对外开放，积极面对技术进步带来的“回弹效应”。沿海和内陆地区可根据各自的区域优势，加强经济合作，建立能源消费线，沿海地区提供开采技术，内陆地区提供能源资源，利用大数据技术实现能源消费的互通互享互助，最大限度提高能源效率。

参考文献

- [1] Xu Zhao, Dongkun Luo. Forecasting fossil energy consumption structure toward low-carbon and sustainable economy in China: Evidence and policy responses[J]. Energy Strategy Reviews, 2018, 22.
- [2] Jing Chen, Chunshan Zhou, Shaojian Wang, Shijie Li. Impacts of energy consumption structure, energy intensity, economic growth, urbanization on PM 2.5 concentrations in countries globally[J]. Applied Energy, 2018, 230.
- [3] Jiasen Sun, Guo Li, Zhaohua Wang. Optimizing China's energy consumption structure under energy and carbon constraints[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2018.
- [4] Wu L Y, Zeng W H. Research on the Contribution of Structure Adjustment on SO₂ Emissions Reduction-Case Study of Shijingshan District Beijing[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18(114):848~855
- [5] 郝宇, 王冷鸥, 吴烨睿. 新时代中国能源经济预测与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(02):8-14.
- [6] 王彩明, 李健. 一次能源消费结构调整对京津冀碳强度目标的贡献力分析[J]. 科技管理研究, 2017, 37(07):226-233.
- [7] 田志勇, 关忠良, 王思强. 基于信息熵的能源消费结构演变分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(01):117-121.
- [8] 揣小伟, 黄贤金, 王倩倩, 钟太洋. 基于信息熵的中国能源消费动态及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2009, 31(08):1280-1285.
- [9] 张彩庆, 郑金成, 臧鹏飞, 黄元生. 京津冀农村生活能源消费结构及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(19):258-262.
- [10] 唐建荣, 廖祥宾. 基于碳夹点技术的江苏省能源消费结构优化路径研究[J]. 资源科学, 2014, 36(12):2560-2568.
- [11] 魏楚, 韩晓. 中国农村家庭能源消费结构: 基于 Meta 方法的研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2018, 18(06):23-35.
- [12] 闫晓霞. 新常态下陕西省能源消费结构研究[J]. 煤炭经济研究, 2018, 38(10):18-24.
- [13] 向其凤, 王文举. 中国能源结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 经济与管理研究, 2014(07):13-22.
- [14] 高湘昀, 安海忠, 郝晓晴. 京津冀能源消费结构对环境的动态效应研究[J]. 资源与产业, 2016, 18(06):59-67.

- [15]周彦楠,何则,马丽,杨宇,张天媛,陈力原.中国能源消费结构地域分布的时空分异及影响因素[J].资源科学,2017,39(12):2247-2257.
- [16]Jin-Li Hu,Shih-Chuan Wang. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy,2005,34(17).
- [17]Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units[J]. European Journal of Operational Research,1978,2 (78) :429-444
- [18]Banker R. D,Charnes A,Cooper W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis[J]. Management Science, 1984,30 (9):1078-1092
- [19]Jin-Li Hu,Chih-Hung Kao. Efficient energy-saving targets for APEC economies[J]. Energy Policy,2005,35(1): 373-382
- [20]Thomas,D.L.,R.Greefe & K.C.Grant,Application of data envelopment analysis to management audits of electric distribution utilities,Public Utility Commission of Texas,Austin,TX
- [21] Weyman-Jones,T.G,Productive efficiency in regulated industry:The Area Electricity Boards of England and Wales,Energy Economics 1991(13):116-122.
- [22]Ramakrishnan Ramanathan. An analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in countries of the Middle East and North Africa[J]. Energy,2005,30(30):2831-2842.
- [23]Kaoru Tone. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2001,130(3):498-509.
- [24]Kaoru Tone. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2002,143(1):32-41
- [25]魏一鸣,廖华.能源效率的七类测度指标及其测度方法[J].中国软科学,2010(01):128-137.
- [26]魏楚,沈满洪.能源效率及其影响因素:基于 DEA 的实证分析[J].管理世界,2007(08):66-76.
- [27]刘浩旻,张在旭,王丽洋.供给侧改革视域下中国省域能源效率及影响因素研究[J].统计与决策,2018,34(22):131-136.
- [28]陈德敏,张瑞.环境规制对中国全要素能源效率的影响——基于省际面板数据的实证检验[J].经济科学,2012(04):49-65.
- [29]陈关聚.中国制造业全要素能源效率及影响因素研究——基于面板数据的随机前沿分析[J].中国软科学,2014(01):180-192.
- [30]史丹,吴利学,傅晓霞,吴滨.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(02):35-43.
- [31]蒋伟,李蓉,强林飞,吴诣民.环境约束下的中国全要素能源效率研究[J].统计与信息论坛,2015,30(05):22-28
- [32]周四军,王文淳.基于不同环境规制的我国区域能源效率研究[J].湖南大学学报(社会科学

版),2017,31(06):59-66.

[33]刘心,李淑敏.基于非期望产出 SBM 模型的中国各省份能源效率的实证分析[J].数学的实践与认识,2015,45(02):35-43.

[34]王喜平,姜晔.环境约束下中国能源效率地区差异研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(11):1419-1425.

[35]宫大鹏,赵涛,慈兆程,姚浩.基于超效率 SBM 的中国省际工业化石能源效率评价及影响因素分析[J].环境科学学报,2015,35(02):585-595.

[36]杜嘉敏.基于超效率 DEA 的中国省际能源效率评价[J].生态经济,2015,31(07):51-55+75.

[37]王腾,梁晶.基于非期望产出超效率 SBM 模型的港口能源效率评价[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(04):637-641.

[38]薛静静,沈镭,刘立涛,高天明.中国区域能源利用效率与经济水平协调发展研究[J].资源科学,2013,35(04):713-721.

[39]王兆华,丰超,郝宇,康玉臣,刘营.中国典型区域全要素能源效率变动走向及趋同性分析——以八大经济区域为例[J].北京理工大学学报(社会科学版),2013,15(05):1-9+22.

[40]于雪霞.区域碳生产率变化差异成因分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S1):344-349.

[41]郭文.环境规制影响区域能源效率的阈值效应[J].软科学,2016,30(11):61-65.

[42]F.Y. Meng,P. Zhou,D.Q. Zhou,Y. Bai. Inefficiency and Congestion Assessment of Mix Energy Consumption in 16 APEC Countries by using DEA Window Analysis[J]. Energy Procedia,2014,61.

[43]Zhi-Yong Han,Ying Fan,Jian-Ling Jiao,ji-Sheng Yan,Yi-Ming Wei. Energy structure, marginal efficiency and substitution rate: An empirical study of China[J]. Energy,2006,32(6).

[44]Ottmar Edenhofer,Carlo C. Jaeger. Power shifts: the dynamics of energy efficiency[J]. Energy Economics,1998,20(5).

[45]张瑞,丁日佳.我国能源效率与能源消费结构的协整分析[J].煤炭经济研究,2006(12):8-10.

[46]汪行,范中启,张瑞.基于 VAR 的我国能源效率与能源结构关系的实证分析[J].工业技术经济,2016,35(09):128-134.

[47]李宏勋,兰致,王明丽,李宁.基于超效率 DEA-Tobit 模型的环渤海经济区全要素能源效率研究[J].科技管理研究,2014,34(20):226-230.

[48]范凤岩,雷涯邻.北京市能源效率评价及其影响因素分析[J].科技管理研究,2014,34(24):28-32.

[49]李金昌,杨松,赵楠.中国能源强度影响因素分析——基于分位数回归法[J].商业经济与管理,2014(12):73-80.

[50]周四军,孔晓琳.能源消费结构影响能源效率的面板分位回归研究[J].工业技术经济,2018,37(06):145-153.

[51]Fare R,Lovell C A K.1978.Measuring the technical efficiency of production[J]. Jouranl of Economic Theory,19(01):150-162

[52]Koenker,R. and G. Bassett.Regression Quantiles[J]. Economics,1978,46:107-112.