

丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率时空分异与影响因素

——基于超效率及地理探测器模型

马远, 张同蕾

新疆财经大学, 乌鲁木齐 830012

摘要 使用2006—2019年丝绸之路经济带沿线省市数据, 采用超效率SBM模型和地理探测器模型, 测度了能源综合效率及其影响因素。研究表明: 丝绸之路经济带能源综合效率总体呈先下降后上升的“V”字形特征, 效率整体呈上升趋势; 从Malmquist指数的结果来看, 技术进步对能源综合效率的贡献最大, 沿线省份的技术效率有待加强; 单影响因素影响显著, 其中能源结构和产业结构作用呈现上升趋势, 政府干预、城市化、互联网普及率、交通可达性和环境规制呈下降趋势; 双因素交互作用大于单因素作用, 其中能源结构与其他因素结合、交通可达性与其他因素结合是丝绸之路经济带能源综合效率最主要的影响因素。

关键词 丝绸之路经济带; 能源综合效率; 超效率SBM模型; Malmquist指数; 地理探测器

能源问题是我国当前面临的巨大挑战之一, 随着经济规模的不断扩大, 我国对能源的需求正逐年提高。作为全球最大的能源消费国和最大的碳排放国, 我国存在着粗放型经济增长方式。这导致了两大主要问题, 一是存在能源浪费和效率低下的问题, 二是面临着严重的生态环境问题。国务院

2022年12月印发《扩大内需战略规划纲要(2022—2035年)》, 其中提出要大力倡导绿色低碳循环理念, 大幅提高能源的利用和高效发展水平; 2023年2月, 《质量强国建设纲要》中也明确提出要实现资源的绿色高效再利用, 并引导中西部地区因地制宜, 发展特色产业, 促进区域内部的支柱产业, 培育

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-11-05

基金项目: 国家社会科学基金项目(20BGL289); 新疆维吾尔自治区社会科学基金项目(20BJL058); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A54); 新疆财经大学校级科研创新项目(XJUFE2023B004)

作者简介: 马远, 教授, 研究方向为区域经济学, 电子邮箱: 1156261711@qq.com; 张同蕾(通信作者), 博士研究生, 研究方向为区域经济学, 1316951594@qq.com

引用格式: 马远, 张同蕾. 丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率时空分异与影响因素——基于超效率及地理探测器模型[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 91-103; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.04.00525

形成质量发展上的比较优势。

根据2015年发布的《共建“一带一路”倡议愿景与行动计划》，中国的18个省份及一些核心城市被纳入了“一带一路”倡议的关键发展地区，丝绸之路经济带主要涉及西北5省区的宁夏、青海、甘肃、陕西、新疆和广西、云南、重庆和四川西南4省市^[1-3]。丝绸之路经济带连接亚欧大陆和欧洲发达经济圈，优越的交通枢纽地位使其成为全球贸易和能源输送的重要通道。本文研究丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率具有以下几个方面的意义，首先，能源的高效利用对于增强对外开放态势具有至关重要的意义。高效的能源利用有助于促进能源资源的共享和互联互通，减少各地区对单一能源来源的依赖，从而实现能源多元化。这不仅有助于丝绸之路经济带在“一带一路”倡议中发挥关键的国际合作作用，还能推动区域一体化，并实现共赢合作。其次，在产业竞争力方面，高效的能源利用直接影响生产成本，提高效率将增加省份的吸引力，从而加速产业升级和区域发展。这有助于提高企业的竞争力，吸引更多制造业和高附加值产业的发展。另外，高效的能源利用使得政府鼓励并支持发展绿色产业，如可再生能源、清洁技术和环保产业。这些领域的发展可以有效降低能源消耗、减少环境污染，提高生产效益，促进经济可持续发展。这对于解决全球能源和环境问题具有积极意义。最后，能源综合效率的提高不仅有助于提高物流效率和降低运输成本，还能通过促进跨境贸易和物流发展，强化丝绸之路经济带的交通枢纽优势。另外，对于位于丝绸之路经济带中介于能源资源和消费市场之间的省份，高效的能源利用可以增强其地缘优势，从而吸引更多跨国公司投资。总之，提高丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率对于增强其开放态势、促进产业升级、提升区位和交通优势都具有深远的经济和地缘政治意义。

1 文献综述

国内外学者对能源效率的研究，主要包括测算

方法和影响因素2个方面。

对于能源效率的测算，由于传统的单要素测算方法有着简单、利于大众理解的双重优点，成为了早期学者的不二之选。但是由于产出不是单个要素作用的结果，以单个要素的投入来估计能源效率会使得数值与真实水平有较大差距，使得结果偏高，所以这种方法被后来的学者逐渐淘汰，考虑从全要素的角度测算能源效率。李玉婷等^[4]运用随机前沿分析方法，对我国工业的能源效率进行了全要素和收敛性的分析，并与单要素测算的能源效率进行了结果比对，结果表明，单要素测算的能源效率不能反映我国工业行业在能源效率上的变化趋势，且测算结果与实际水平之间的差距和全要素能源效率相比差距很大。因此，以全要素的视角测算能源效率的作用不言而喻，其中较为典型的测算方法有参数法和非参数法。周江等^[5]借助随机前沿分析法（参数法），利用参数估计值，通过静态和动态2个维度分析我国各能源产业的全要素生产率，计算结果表明对全要素生产率起决定作用的2个因素分别是技术进步和规模进步，而技术效率变化起到阻碍作用。由于现实的复杂性难以预知和衡量，加之参数法的参数分析需要提前构造函数，以数据包络分析法（DEA）为代表的非参数估计逐渐兴起。Hu等^[6]第一次使用DEA方法，测算了我国1995—2002年期间的能源效率，测算结果显示我国在除西部外，东中地区的能源效率得到有效提高。通过梳理相关文献，运用DEA测算效率的文献不在少数，孙广生等^[7]以行业资本存量的数据结果为基础，以能源效率为主要出发点，运用DEA模型对我国14各部门的工业进行了细致地解剖，结果表明各行业的能源效率呈现出“U”型变化；戴俊等^[8]基于DEA方法，测度了2007—2016年间我国各地区的能源效率；杨志江等^[9]基于环境方向性距离函数的DEA模型测算了我国各省市的能源效率。

关于影响能源效率的因素，多数研究事先确定了影响因素与能源效率之间的函数关系，并集中研究这些因素对能源综合效率的影响程度，以确定它们是促进还是抑制的因素。例如，张士强等^[10]采用

省级面板数据,构建了各种测度和影响模型,以探究中介效应。并进一步将产能空间集聚的异质性分为东部、中部和西部,结果显示,东部地区具有促进作用,而中部和西部地区具有抑制作用。另一方面,崔琪等^[11]使用Tobit模型探讨了8大经济区的能源效率影响因素,并研究了这些因素对能源效率的正向或负向影响。此外,张瑞等^[12]使用了超效率SBM(slacks-based measure)模型来测算我国物流业的能源生态效率指数。构建了面板向量自回归模型,以进一步探讨政府投入水平、经济发展和城镇化等因素对能源效率的正面或负面影响。

通过对现有文献的整理和分析,可以发现相关学者已经对能源的效率问题做了大量的且较为深入的研究,但是不免存在有待完善的地方。第一,从研究视角来看,现有文献大多集中在全国层面,而具有比较优势且作为能源密集地区的丝绸之路经济带很少被作为研究对象,这为未来的研究提供了一个有待探索的领域。第二,多数文献采用简单的数据包络分析(DEA)模型,该模型只能对决策单元的相对效率进行测算,不能深入分析即不能对效率细分,而加入Malmquist指数既能解决这一问题,还可以分析能源效率在一定时间段内的动态变化。这种方法的应用将有助于更全面地理解能源效率的演变和趋势。第三,提前假设能源效率与各影响因素之间的函数关系,不能很好地模拟数据。此外,对能源综合效率的影响因素以及影响因素对能源综合效率影响的文献较为匮乏,并缺乏深入探讨。

因此,本文将从丝绸之路沿线省份的层面出发,借助超效率DEA模型和Malmquist指数,引进地理探测器模型,更准确地建模能源效率与其影响因素之间的关系,以更好地反映实际情况并深入探讨丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 超效率SBM模型

DEA是一种常用的分析模型,学者经常使用

该模型测量相关的效率问题,但是当存在过度投入或者产出不足的现象时,对决策单元使用径向DEA测算的结果数值会偏高。因为投入或产出的复杂性和变动性在计算过程中被忽视,使得角度DEA计算出的结果不准确,不能反映真实的效率值,基于上述问题,Tone^[13]在基于松弛变量的基础上创造了新的测度效率的方法,即SBM模型。而随着当今社会生产方式的提高,不可避免地出现了大量的废水废气等污染物(称之为非期望产出),而SBM模型并未考虑非期望产出,在环境规制下,Tone^[14]在此前研究的基础上,进一步弥补了非期望产出存在的缺陷,即产出过剩或产出不足,进而构建了非期望产出SBM模型。但是与传统的DEA模型一样的是,SBM模型与其存在共同的缺陷,即计算出来的效率值在0到1之间,效率值为1的地区表明DEA有效,而效率值小于1的地区视为无效率状态,因此,当存在多个有效决策单元时,无法进行比较。因此,为了弥补该缺陷,Tone^[15]进一步构建了超效率SBM模型。具体公式如下

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n^x}{x_{k'n}^x}}{1 + \frac{1}{(M+I)} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_m^y}{y_{k'm}^y} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^b}{b_{k'i}^b} \right)}$$

$$s.t. \quad \sum_{t=1}^T \sum_{k=1, k \neq k'}^K \lambda_k^t x_{kn}^t + s_n^x = x_{k'n}^t, n = 1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1, k \neq k'}^K \sum_{t=1}^T \lambda_k^t y_{km}^t - s_m^y = y_{k'm}^t, m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1, k \neq k'}^K \lambda_k^t b_{ki}^t + s_i^b = b_{k'i}^t, i = 1, \dots, I$$

$$\lambda_k^t \geq 0, s_n^x \geq 0, s_m^y \geq 0, s_i^b \geq 0, k = 1, \dots, K \quad (1)$$

式中, ρ 表示能源综合效率值, N 表示能源投入个数, M 表示期望产出类型个数, I 表示非期望产出类型个数;对于向量, x 表示能源投入向量, y 表示期望产出向量, b 表示非期望产出向量;对于下标, t 代表第 t 个年份, k 代表第 k 个地区; λ 代表强度变量, s 表示松弛向量。

在 (s_n^x, s_m^y, s_i^b) 中, s_n^x 代表第 n 个投入, s_m^y 代表第 m 个期望产出, s_i^b 代表第 i 个非期望产出的松弛向量,

$(x'_{k'n}, y'_{k'm}, b'_{k'i})$ 中的表示在第 t' 个年份时被评价的第 k' 个地区的投入产出向量。

2.2 Malmquist 指数

将丝路沿线各省份作为决策单元(DMU),采用 Malmquist 指数测算能源综合效率,并将其分解为 2 类指数,分别是技术进步指数和技术效率变动率指数,以便更好地分析各省份能源综合效率的主要影响因素。

$$M_j^{t+1} = (X^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \sqrt{\frac{D_j^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^{t+1}(x^t, y^t)}} \quad (2)$$

式中,参考 t 期的技术, (x^t, y^t) 和 (x^{t+1}, y^{t+1}) 分别表示该省份在 t 和 $t+1$ 的要素投入量与产出量; $D_j^t(x^t, y^t)$ 、 $D_j^t(x^{t+1}, y^{t+1})$ 分别代表 DMU 在第 t 期和第 $t+1$ 期时,实际生产点与前沿面的距离函数, $D_j^{t+1}(x^t, y^t)$ 、 $D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$ 分别代表以 $t+1$ 期为参考技术的距离函数(即保持 t 和 $t+1$ 期的技术不变, 2 期生产前沿面与能源综合效率之间的距离)。

在规模报酬不变(CRS)的基础上, Malmquist 指数分解步骤如下所示:

$$M_j^{t+1} = (X^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^t(x^t, y^t)} \times \sqrt{\frac{D_j^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^{t+1}(x^t, y^t)}} = EC_j \cdot TC_j \quad (3)$$

在规模报酬不变(CRS)的基础上, Ray & Desli (1997)将 CRS 模型中的 M 指数分解为纯技术效率变动(PEC)、规模效率变动(SCH)和纯技术变动(PTC),分解步骤如下:

$$M_j^{t+1} = \frac{S_j^t(x^t, y^t)}{S_j^t(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}/CRS)}{D_j^t(x^t, y^t/CRS)} \times \sqrt{\frac{D_j^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_j^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_j^t(x^t, y^t)}{D_j^{t+1}(x^t, y^t)}} \quad (4)$$

$$\text{即 } M_j^{t+1} = EC_j \cdot TC_j = PEC \cdot SCH \cdot PTC \quad (5)$$

式中,能源综合效率的升降情况即 Malmquist 指数用等号左边的 M_j^{t+1} 代表,数值大于 1 说明能源综合效率上升,数值小于 1 说明能源综合效率下降,数值等于 1 说明能源综合效率不变。

将 Malmquist 指数分解的技术效率分为 2 个二级指数,即规模指数和纯技术效应指数,可以进一步分析二级指数对一级指数的影响。

2.3 地理探测器模型

在时空分异的背后,难免存在着一些影响因素,地理探测器作为一种新的统计学方法,能够探测并分析其背后的因素,此外,一方面,能对数值型数据进行探测并定性数据^[16];另一方面,可以分析 2 种因素共同作用对被解释变量的影响,种种优势使得地理探测器被广泛应用在多个领域,诸如环境科学、社会科学、自然科学以及人类健康等^[17]。本文将借助该方法,探索影响能源综合效率的主要因素,并分析 2 种因素交叉时对能源效率的影响,具体探测模型如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中, q 的值域为 $[0,1]$,该值域度量的是其中某一个影响因素 X 对能源综合效率 Y 空间分异的解释能力有多大。 q 值越接近 1,说明 X 对 Y 的影响程度越高; h 为变量的分层; σ_h^2 代表层 h 的方差; σ^2 代表全层 Y 的方差; N 代表全区的样本数量; N_h 代表层 h 内的样本数量。

2.4 指标选取与来源

能源的发展与经济、社会和环境密切相关,在实现经济系统、社会系统和自然系统共生性与多元化目标的前提下,建立理论框架(图 1)。在关伟等^[18]和周亮等^[19]的效率评价指标体系的基础上进行改进和优化,构建丝绸之路经济带能源综合效率的评价指标体系(表 1)。投入方面选取资源、资本、劳动力和技术等要素。具体地,选取能源消费代表资源投入,将资本存量、年末就业人口和地专利授权数量分别作为资本、劳动和技术投入的指标。其中采用张军的永续盘存法计算资本存量,以 2000 年为基期进行估算,计算公式为

$$K_{it} = K_{it-1}(1 - \delta) + I_{it}/P_{it} \quad (7)$$

式中, I_{it} 为 i 地区第 t 期的固定资产总额, P_{it} 表示 i 省市第 t 年的固定资产投资价格指数, δ 为折旧率;期望产出方面,选取以 2000 年为基期的国内生产总

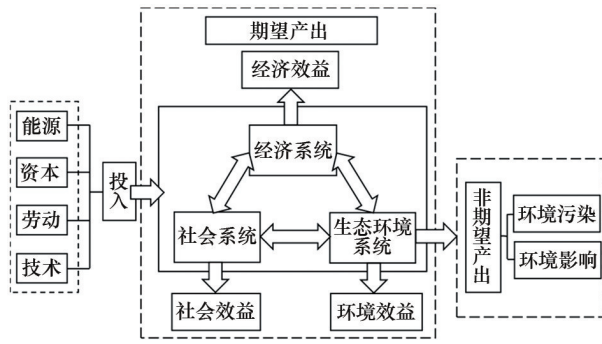


图1 能源综合效率理论框架

值作为经济效益,反映经济产出;社会产出以社会消费品零售总额和职工平均货币工资作为衡量指标;非期望产出方面,以工业固体废弃物、工业SO₂排放量和工业废水排放量反映环境污染,以CO₂排放量反映环境影响。

本文研究指标的数据来源于《中国统计年鉴》^[20]《中国能源统计年鉴》^[21]《中国环境统计年鉴》^[22]《中国区域统计年鉴》^[23]以及各省市、自治区统计年鉴。

表1 能源综合效率评价指标体系

类别	一级	二级	三级
投入	资源要素	能源消费	地区能源消费总量(万吨标准煤)
	资本要素	资本存量	张军算法下的资本存量(2000年为基期)
	劳动力要素	就业人口	年末地区就业人口
	技术要素	专利授权量	各地专利申请授权数量
产出	期望产出	经济效益	国内生产总值(2000年不变价)
		社会效益	职工平均货币工资、社会消费品零售总额
		环境效益	城市绿地面积
	非期望产出	环境污染	工业固体废弃物、工业SO ₂ 排放量、工业废水排放量
		环境影响	二氧化碳排放量

3 丝绸之路经济带能源效率的测算及变化

3.1 基于超效率SBM模型的全要素能源效率测算

运用超效率SBM模型,以2006—2019年作为考察时间段,以丝绸之路经济带沿线9个省份的面板数据为依据,运用Matlab2021软件测算这些省份的能源综合效率,用折线图反映出丝绸之路经济带能源综合效率水平的总体变化情况,得到图2。

如图2所示,丝绸之路经济带沿线省份在2006—2019年间,其沿线9省份的能源效率值都在1以上,整体呈上升趋势,其中2006—2009年的能源综合效率值处于下降趋势,在2009年达到近几年最低值1.09。这是由于在2002—2009年期间,全球经济波动,尤其是2008年的国际金融危机,对中国包括丝绸之路经济带沿线省份的实体经济和工业发展造成了重大影响,导致部分地区和企业的就业

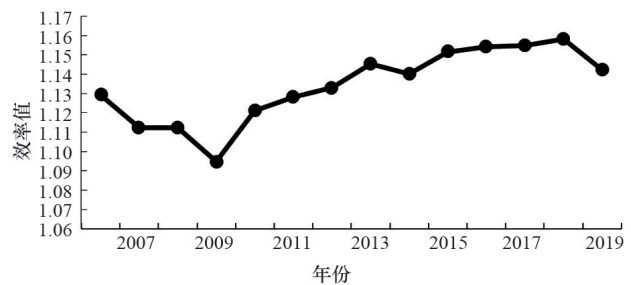


图2 2006—2019年丝绸之路经济带能源综合效率值变化情况

率下降、开工率不足、经济效益下滑,使得丝绸之路经济带沿线省市的能源综合效率下降。然而,在2009年第一季度触底后,我国采取了较为有效的刺激性经济政策,情况逐渐好转,对能源生产和需求的增长产生了积极的影响,丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率也随着经济的好转不断提升,呈现出“V”字形的运行趋势。

如表2所示,从整体上来看,2006—2019年丝绸之路经济带的能源综合效率的平均值处于1.095~1.158,效率值从2006年的1.129上升为2019年的1.142,平均增长率为0.087%,平均能源综合效率不断增长,能源利用率不断提升。从单个省份来看,重庆市的能源综合效率在2006—2019年间一直处于较高水平,且能源综合效率的平均值和平均增长率都位居首位。青海和广西略低于重庆,虽然增长率为负,但是总体效率值较高,说明此3个

省份的经济增长以较少的能耗为代价,合理地配置了能源资源。甘肃、新疆和云南的能源综合效率呈平稳上升趋势,但是增长速度缓慢;相比之下,宁夏和四川的年均增长率较高,分别为0.682%和0.641%;而陕西的能源综合效率一直处于较低的水平,且年均增长率为负,说明陕西省的能源利用率有待提升的空间还很大,需要继续调整能源结构并优化资源配置。

表2 丝路沿线省份能源综合效率测算结果

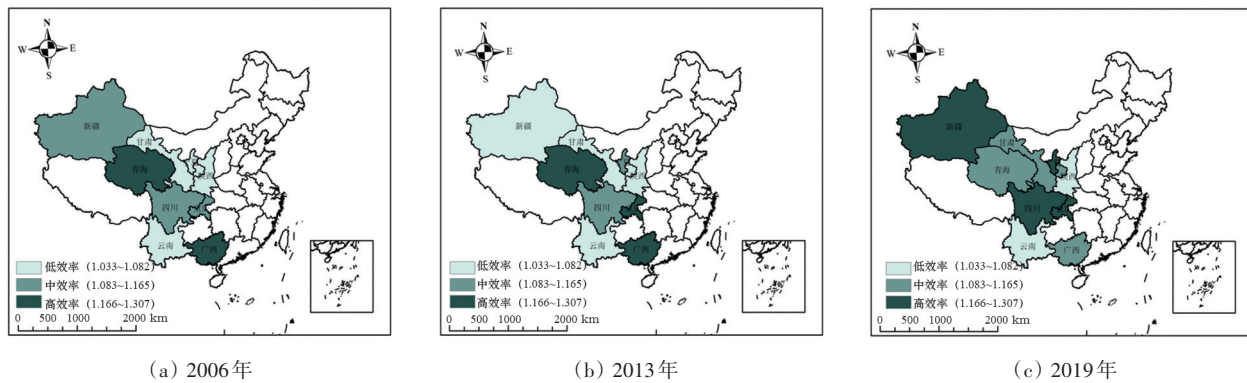
年份	甘肃	广西	宁夏	青海	陕西	四川	新疆	云南	重庆	经济带平均值
2006	1.082	1.220	1.081	1.307	1.033	1.103	1.165	1.055	1.118	1.129
2007	1.081	1.204	1.105	1.148	1.023	1.102	1.151	1.061	1.134	1.112
2008	1.069	1.192	1.113	1.172	1.024	1.097	1.124	1.085	1.136	1.112
2009	1.068	1.197	1.092	1.104	1.020	1.088	1.086	1.079	1.121	1.095
2010	1.074	1.185	1.097	1.276	1.005	1.064	1.091	1.103	1.193	1.121
2011	1.062	1.223	1.180	1.132	1.028	1.091	1.167	1.024	1.246	1.128
2012	1.067	1.231	1.171	1.193	1.033	1.127	1.069	1.036	1.271	1.133
2013	1.065	1.233	1.163	1.278	1.015	1.141	1.071	1.043	1.301	1.145
2014	1.070	1.196	1.141	1.268	1.023	1.098	1.090	1.033	1.343	1.140
2015	1.094	1.213	1.180	1.250	1.127	1.071	1.076	1.039	1.314	1.152
2016	1.085	1.200	1.099	1.215	1.148	1.074	1.101	1.006	1.460	1.154
2017	1.096	1.218	1.113	1.198	1.007	1.139	1.090	1.042	1.492	1.155
2018	1.085	1.220	1.144	1.133	1.021	1.154	1.132	1.047	1.488	1.158
2019	1.083	1.114	1.180	1.123	0.734	1.199	1.168	1.064	1.615	1.142
平均值	1.077	1.203	1.133	1.200	1.017	1.110	1.113	1.051	1.302	1.134
平均增长率/%	0.005	-0.697	0.682	-1.159	-2.599	0.641	0.017	0.064	2.874	0.087

3.2 空间分异特征

为更好地刻画丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率的空间异质性,运用ArcGIS10.7软件,取2006—2019年中间年份作为间断点,分别以2006、2013和2019年作为观测点,绘制出丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率的时空分异图(图3),观察能源综合效率的变化趋势。ArcGIS以“组间差异大,组内差异小”为依据,作为该软件默认的指标分类方法即自然断裂法,运用该默认方法将能源综合效率值水平分为3类,分别为低效率、中效率和高效率,能源综合效率由低到高对应图3中颜色由

浅至深,整理能源综合效率时空分异图得到表3。

对于能源综合效率的空间分布,综合来看,丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率的在2006—2019年间整体上得到提升,主要得益于丝路沿线各省份在技术创新、生产方式改变、政府调控、国际贸易和合作等多重因素的共同作用。从省域视角来看,各省市之间空间差异较大。丝路沿线省份拥有不同的自然资源,如新疆、陕西和甘肃,丰富的自然资源使其在能源综合效率方面具有天然的优势,同时会更加依赖能源密集型产业,而其他省份可能更多地依赖其他产业,这种产业结构差异会因为能



本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,地图无修改

图3 丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率空间分布格局

表3 能源综合效率省份等级划分

能源综合效率	2006年省份	2013年省份	2019年省份
低效率	甘肃、宁夏、陕西、云南	新疆、甘肃、陕西、云南	陕西、云南
中效率	新疆、四川、重庆	宁夏、四川	青海、甘肃、广西
高效率	青海、广西	青海、重庆、广西	新疆、宁夏、四川、重庆

源需求和效率的不同进而使能源综合效率存在省域差异。从时间维度来看,低效率省市的数量在减少,其中,甘肃、宁夏实现了效率升级。高效率的省市数量在增多,其中新疆、四川和重庆实现由中效率到高效率的升级。例如,新疆积极发展现代煤炭产业,提高产能,通过技术节能和转型升级,能源加工效率得到全面提升,能源消费结构得以逐渐优化,其中,天然气消费量占能源消费总量的比例由2006年的14.3%上升至2019年的22.8%;煤炭消费占能源消费总量的比例由2006年的56.7%降为2019年的44.5%。与此同时,也有少数省份的能源综合效率常年处于较为稳定的状态,如青海和广西虽从2006年和2013年的高效率区下降为2019年的中效率区,但变化不大,而云南和陕西常年处于低效率区。

3.3 基于Malmquist指数的能源综合效率

为深入探讨丝路沿线省份的能源综合效率的内在原因,将借助Malmquist指数对能源综合效率分别以年、省进行分解。将测算结果进行整理分析,具体结果见表4和表5。

由表4能源综合效率的分解结果可以看出,在2006—2019年期间,各省的能源综合效率变幅度

不是很大。从这几年的平均变动指数来看,平均能源综合效率变动为1.019,即年均增长率为1.9%,增长率为正,说明各省份的能源综合效率总体上逐年升高,达到了能源效率的前沿面;平均技术变动指数为1.019,即年均进步技术为1.9%,表明技术生产前沿面在2006—2019年期间往前移动,其主要原因一方面在于丝绸之路沿线省份注重能源方面的科技进步,其利用也得到了连年改善,另一方面受东部地区的能源技术溢出,进而推动了经济带沿线省份的技术进步。从表4可以看出,平均技术效率变动指数为1.001,即年均增长率为0.1%,并不是很高,说明沿线省份的技术效率有待加强。将技术效率分解为纯技术效率和规模变动效率,沿线省份的纯技术效率的平均变动值为1.008,可以计算出年均增长率为0.8%;规模效率的年均变动值为1.015,得出年均增长率为1.5%;规模效率上升速度大于纯技术效率上升速度。

由表5丝路沿线省份的Malmquist指数及分解结果可以得出,平均能源综合效率变动指数均大于1,因此丝路沿线省份在2006—2019年间的能源综合效率是呈增长趋势的。重庆、陕西和四川的能源综合效率的增长率位居前3,均高于丝路沿线省份

表4 丝路沿线省份2006—2019年Malmquist能源综合效率变动及分解

年份	能源综合效率变动	技术变动	技术效率变动	纯技术效率变动	规模效率变动
2006—2007	0.997	1.010	0.987	0.974	1.019
2007—2008	1.034	1.034	1.000	1.015	0.993
2008—2009	0.990	1.006	0.985	0.970	1.013
2009—2010	1.022	0.999	1.024	1.072	0.988
2010—2011	1.023	1.014	1.008	1.067	1.105
2011—2012	1.006	1.001	1.005	0.974	1.026
2012—2013	1.019	1.009	1.010	1.012	1.007
2013—2014	1.008	1.013	0.995	0.990	1.015
2014—2015	1.000	0.988	1.012	1.025	1.007
2015—2016	1.098	1.096	1.001	1.043	0.970
2016—2017	1.040	1.043	1.001	0.985	1.021
2017—2018	1.004	1.000	1.004	0.978	1.025
2018—2019	1.006	1.031	0.981	0.992	1.001
平均值	1.019	1.019	1.001	1.008	1.015

表5 2006—2019年丝路沿线各省份Malmquist能源综合效率变动及分解

省份	能源综合效率变动	排名	技术变动	排名	技术效率变动	排名	纯技术效率变动	规模效率变动
甘肃	1.014	4	1.014	5	1.000	6	1.007	0.996
广西	1.012	5	1.019	4	0.993	7	0.994	0.997
宁夏	1.002	8	0.995	9	1.007	2	1.031	1.037
青海	0.990	9	0.998	8	0.991	8	1.008	1.128
陕西	1.045	2	1.073	1	0.979	9	0.980	0.997
四川	1.033	3	1.026	3	1.007	3	1.005	0.993
新疆	1.006	7	1.005	7	1.001	5	1.001	0.998
云南	1.010	6	1.009	6	1.001	4	1.001	0.994
重庆	1.061	1	1.030	2	1.029	1	1.042	0.990
平均值	1.019	—	1.019	—	1.001	—	1.008	1.015

整体平均增长率,重庆市能源综合效率的平均增长率高达6%;除去较高增长率的3个省份,剩余省份的增长率较低,其中青海的能源综合效率小于1,为0.99,年均增长率为-0.1%。从Malmquist指数分解的技术变动来看,陕西、重庆、四川、广西、甘肃、云南和新疆的技术变化指数全都超过了1,说明这些省份的技术前沿面和能源技术存在着较大进步;而宁夏和青海的技术变化指数均小于1,分别为0.995和0.998,年均增长率均为负。以技术效率变动来看,各省份的均值为1.001,接近于1,除了广西、青海和陕西外,其余省份的技术效率都超过了1,但是技术

效率的进步较小,说明这13年间,技术效率表现较为平稳。而广西、青海和陕西的技术效率存在不同趋势的降低,说明技术效率的可提升空间很大。

综合来看,2006—2019年丝绸之路经济带各省市技术效率指数的平均变动率为1.001,技术进步指数的平均变动率为1.019,纯技术效率指数的变动率均值为1.008,规模效率值的平均变动率为1.015,由此可以看出,技术进步对能源综合效率的贡献最大。从结果上来看,对技术效率起最大促进作用的是纯技术效率,但是技术效率对能源综合效率起着较小的推动作用。各省市的整体规模效率

处于上升趋势,但是其年均增长率仅为1.5%,说明丝绸之路经济带的现有规模化水平有待进一步提高,规模体系仍需进一步完善。

4 丝绸之路经济带能源综合效率的影响因素

4.1 指标选取

能源综合效率受多种因素,如自然、社会、教育、创新等综合作用的影响,通过对相关文献的梳理^[20-31],发现经济发展水平、人力资本、城市化水平、能源强度、能源结构、对外开放水平、产业结构、交通可达性、环境规制、创新水平、人口数量对能源效率起着重要的作用。在满足数据的可得性、可比性和可量化下,选取政府干预(x_1)、能源结构(x_2)、产业结构(x_3)、城市化(x_4)、互联网普及率(x_5)、交通可达性(x_6)和环境规制(x_7)作为影响因素,下一步将对这些因素进行分析(表6)。

表6 能源综合效率驱动力指标

代码	探测因素	具体含义
x_1	政府干预	地方财政一般预算支出/亿元
x_2	能源结构	煤炭在总能源消耗中的占比/%
x_3	产业结构	第二产业增加值占比/%
x_4	城市化	人口城镇化/%
x_5	互联网普及率	互联网宽带接入端口/万个
x_6	交通可达性	各省份客运量/万人 各省份货运量/万人
x_7	环境规制	城镇环境基础设施建设投资/亿元

4.2 能源综合效率影响因素分析

借助 Arcgis10.7 软件对上述7个影响因素运用自然断裂点的方法进行离散化处理,转变为类型变量,再利用地理探测器测算各探测因素对能源综合效率驱动能力 q 值的大小, q 值越大说明该影响因素对丝绸之路经济带能源综合效率的影响力越大(表7)。

表7 2006、2019年丝绸之路经济带能源综合效率探测因素结果

代码	探测因素	q 值		驱动作用
		2006	2019	
x_1	政府干预	0.804***	0.279***	↓
x_2	能源结构	0.413***	0.564***	↑
x_3	产业结构	0.390***	0.550***	↑
x_4	城市化	0.419***	0.394***	↓
x_5	互联网普及率	0.658***	0.341***	↓
x_6	交通可达性	0.658***	0.257***	↓
x_7	环境规制	0.496***	0.288***	↓

注:***、**、*分别表示变量在1%、5%和10%的水平上显著。

2006年丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率的主要影响因素依序为:政府干预(0.804)、互联网普及率(0.658)、交通可达性(0.658)、环境规制(0.496)、城市化(0.419)、能源结构(0.413)和产业结构(0.390)。上述7项因子均通过了1%的显著性水平,说明对能源综合效率的解释能力较强。其中,政府干预成为第一大影响因素,这是由于在2006年之前,丝绸之路经济带沿线省份的大部分地区均为中西部地区,相对于东部地区来说,市场

机制还不够完善,政府调控的作用影响相对较大。

2019年丝绸之路经济带沿线省份能源综合效率的主要影响因素顺序发生变化,依序为:能源结构(0.564)、产业结构(0.550)、城市化(0.394)、互联网普及率(0.341)、环境规制(0.288)、政府干预(0.279)、交通可达性(0.257)。第一大影响因素已由2006年的政府干预演变为能源结构,这一演变反映了地区经济的不同阶段和发展重点。在早期,政府干预在初期工业化和基础设施建设中发挥了

关键作用,促进了投入要素的改善和期望产出的增加,这对能源综合效率的提高至关重要。然而,随着时间的推移,国际社会对环境问题的关注以及清洁技术的进步推动了清洁能源的应用,使能源结构成为影响能源效率的主要因素。这一演变强调了地区经济发展的新方向,即更加注重环境可持续性和能源安全性。相较其他因素,产业结构的作用力度由2006年的0.390上升为2019年的0.550,2006年,丝绸之路经济带沿线省份的产业结构与东部地区相比相对单一,至2019年该地区的产业结构相较2006年得到升级和多元化发展。产业结构转型从重工业向服务业和高科技产业发展,这种结构变化通常伴随着生产方式的改进和能源效率的提高,产业结构的变化对能源综合效率的作用也得以提升。城市化的作用下降,但整体变化不大。互联网普及率因素在2006年时对能源综合效率的影响力高达0.658,但是至2019年其影响降低为0.341。这是由于互联网的应用提高了信息流通的效率,使企业和个体更容易获得市场信息、能源价格和供求情况,在线购物和电子支付的便捷性达到了节约出行、降低交易与通信成本的效果,减少了以此带来的能源消耗,此时对能源综合效率的边际效用较高,随着时间的推移,互联网成为大众的通用性技术,互联网普及达到饱和状态,带来的边际效用下降。交通可达性的作用、环境规制的作用均存在下降趋势。

4.3 影响因素交互作用

为了进一步探究影响能源综合效率的因素是否存在双因素交叉影响,本文通过地理探测器分析2019年影响能源综合效率不同因素 x_m 之间的交互作用,即评估解释变量 x_1 和解释变量 x_2 共同作用时对被解释变量 y 的解释能力,判断依据如表8所示^[7]。

根据表9,可以得出如下结论。(1)各因素交互后对能源效率的影响强度均大于单个因素的驱动能力,根据表8的依据判断为双因素增强关系。由此可见,丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率并非受到单一因素的影响,而是受到政府干预、能源结构和产业结构等多维度因素的协同影响。

表8 2个自变量对因变量交互作用类型识别

判断依据	交互作用类型
$q(x_1 \cap x_2) < \min\{q(x_1), q(x_2)\}$	非线性减弱
$\min\{q(x_1), q(x_2)\} < q(x_1 \cap x_2) < \max\{q(x_1), q(x_2)\}$	单因素非线性减弱
$q(x_1 \cap x_2) > \max\{q(x_1), q(x_2)\}$	双因素增强
$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立
$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性减弱

注: $q(x_1)$ 与 $q(x_2)$ 分别表示以 x_1 与 x_2 分层依据计算对 y 的 q 值,
 $q(x_1 \cap x_2)$ 表示叠加 x_1 与 x_2 时计算的对 y 的 q 统计量。

(2)交互影响存在差异,其中能源结构与互联网普及率、能源结构与交通可达性、能源结构与环境规制、城市化与交通可达性这4对交互因素的作用解释力最高, q 值为1。能源结构与其他因素的交叉作用突出,主要由于能源结构涉及能源的类型、运输成本和环境,与其他因素的交叉可以显著改变资源配置和生产方式,进而深刻影响能源综合效率。

5 结论

以2006—2019年为研究时段,以丝绸之路沿线各省份为研究对象,基于超效率SBM模型构建能源综合效率评价体系,并测度了其能源综合效率值,在此基础上运用地理探测器模型探测其影响因素,主要结论如下。(1)2006—2019年,丝绸之路经济带能源综合效率总体呈先下降后上升的阶段特征,效率整体呈上升趋势。从时序上分析,2006—2009年,能源综合效率值下降;2006—2019年能源综合效率值回升并继续增长。从Malmquist指数的结果来看,技术进步对能源综合效率的贡献最大,沿线省份的技术效率有待加强。(2)单影响因素影响显著,其中能源结构和产业结构作用呈现上升趋势,政府干预、城市化、互联网普及率、交通可达性和环境规制呈下降趋势。(3)双因素交互作用大于单因素作用,其中能源结构与其他因素结合、交通可达性与其他因素结合是丝绸之路经济带能源综合效率最主要的影响组合。基于提升丝绸之路经济带沿线省份的能源综合效率的目标,针对上述研究结果提出以下建议:通过制定激励政策、提供补

表9 2019年各影响因素探测及交互作用探测结果

影响因素 $x_1 \cap x_2$	交互贡献率 $q(x_1 \cap x_2)$	交互值对比	交互结果
政府干预/能源结构	0.957	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
政府干预/产业结构	0.805	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
政府干预/城市化	0.601	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
政府干预/互联网普及率	0.507	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
政府干预/交通可达性	0.814	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
政府干预/环境规制	0.432	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
能源结构/产业结构	0.723	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
能源结构/城市化	0.834	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
能源结构/互联网普及率	1.000	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
能源结构/交通可达性	1.000	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
能源结构/环境规制	1.000	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
产业结构/城市化	0.814	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
产业结构/互联网普及率	0.805	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
产业结构/交通可达性	0.969	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
产业结构/环境规制	0.805	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
城市化/互联网普及率	0.706	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
城市化/交通可达性	1.000	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
城市化/环境规制	0.601	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
互联网普及率/交通可达性	0.623	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
互联网普及率/环境规制	0.750	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强
交通可达性/环境规制	0.969	$>\max q(x_1, x_2)$	双因素增强

贴和减免税收等方式,推动能源结构的升级和多元化,减少对化石燃料依赖的同时鼓励可再生能源的利用;鼓励绿色技术和清洁生产的研究和应用;加大对基础设施的投资力度,改善道路、铁路、港口和物流网络。

参考文献 (References)

- [1] 郑玉雯, 薛伟贤. 碳中和导向下丝绸之路经济带沿线省份经济发展与生态环境的协同演进研究[J]. 贵州财经大学学报, 2022(1): 100-110.
- [2] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [3] 王艳. 丝绸之路经济带沿线省份生态效率测定及影响因素: 基于FDI与产业结构优化视角[J]. 华东经济管理, 2018, 32(11): 44-51.
- [4] 李玉婷, 刘祥艳. 中国工业能源效率及其收敛性: SFA全要素与单要素方法的比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016(12): 14-19.
- [5] 周江, 胡静锋, 王波. 中国能源产业效率测量及比较分析[J]. 经济问题, 2018(8): 60-65.
- [6] Hu J L, Wang S C. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy, 2006, 34(17): 3206-3217.
- [7] 孙广生, 杨先明, 黄祎. 中国工业行业的能源效率(1987-2005): 变化趋势、节能潜力与影响因素研究[J]. 中国软科学, 2011(11): 29-39.

- [8] 戴俊, 傅彦铭. 环境规制、产业结构对能源效率的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 55-63.
- [9] 杨志江, 朱桂龙. 技术创新、环境规制与能源效率: 基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 研究与发展管理, 2017, 29(4): 23-32.
- [10] 张士强, 孟璐莎, 李跃. 能源产能空间集聚对区域能源效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5): 58-66.
- [11] 崔琪, 马晓钰, 张思思. 绿色全要素能源效率评价及影响因素研究: 基于中国八大经济区数据的分析[J]. 技术经济与管理研究, 2022(3): 94-99.
- [12] 张瑞, 胡彦勇, 郗晓彤. 中国物流业能源生态效率与其影响因素的动态响应研究[J]. 经济问题, 2021(8): 9-17.
- [13] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [14] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks based measure(SBM) approach[R]. Tokyo: GRIPS, 2003.
- [15] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [16] Hsiao C, Li Q, Racine J S. A consistent model specification test with mixed discrete and continuous data[J]. *Journal of Econometrics*, 2006, 140(2): 802-826.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 关伟, 许淑婷, 郭岫垚. 黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 150-158.
- [19] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国区域统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [24] 林伯强, 谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究, 2019, 54(2): 119-132.
- [25] 钱争鸣, 刘晓晨. 中国绿色经济效率的区域差异与影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 104-109.
- [26] 钱龙. 中国城市绿色经济效率测度及影响因素的空间计量研究[J]. 经济问题探索, 2018(8): 160-170.
- [27] 郝国彩, 徐银良, 张晓萌, 等. 长江经济带城市绿色经济绩效的溢出效应及其分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(5): 75-83.
- [28] 张文博, 邓玲, 尹传斌. “一带一路”主要节点城市的绿色经济效率评价及影响因素分析[J]. 经济问题探索, 2017(11): 84-90.
- [29] 林晓, 徐伟, 杨凡, 等. 东北老工业基地绿色经济效率的时空演变及影响机制: 以辽宁省为例[J]. 经济地理, 2017, 37(5): 125-132.
- [30] 李平星. 泛长三角地区碳生态效率的空间格局及影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8500-8511.
- [31] 刘朝, 朱于珂, 覃昌雄. 公路交通能源环境效率与能源回弹效应: 基于空间溢出效应的研究[J]. 技术经济, 2019, 38(4): 114-128.

Spatial-temporal differentiation and influencing factors of comprehensive energy efficiency in provinces along Silk Road Economic Belt: Based on ultra-efficient and geodetector models

MA Yuan, ZHANG Tonglei

Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

Abstract Improving comprehensive energy efficiency in provinces along the Silk Road Economic Belt has far-reaching economic and geopolitical significance so as to enhance openness posture, promote industrial upgrading, and improve location and transportation advantages. Using the data of the provinces and cities along the Silk Road Economic Belt from 2006 to 2019, their comprehensive energy efficiencies and influencing factors were measured and analyzed by adopting the super-efficient SBM model and geodetector model. The conclusions of the study are as follows. The comprehensive energy efficiency of the Silk Road Economic Belt could be generally characterized by a "V" shape, with the efficiency being an overall upward trend. From the results of Malmquist index, technical progress contributed most to the comprehensive energy efficiency, and the technical efficiency of the provinces along the route should be strengthened. The influence of single-influence factor was significant, and the roles of energy structure and industrial structure showed an upward trend while the roles of government intervention, urbanization, Internet penetration, transportation accessibility, and environmental regulation a downward trend. The double-factor interaction was greater than the single-factor, and the energy structure combined with other factors and transportation accessibility combined with other factors were the most important double-influencing factors of the comprehensive energy efficiency of the Silk Road Economic Belt. Finally, suggestions are presented to improve the comprehensive energy efficiency of the provinces along the Silk Road Economic Belt.

Keywords silk road economic belt; overall energy efficiency; super-efficient SBM model; Malmquist index; geographic detector



(责任编辑 祝叶华)