

1990–2009年中国区域能源效率时空分异特征与成因

王 强^{1,2,3,4}, 樊 杰^{2,3}, 伍世代¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文通过对1990-2009年包括台湾省在内的31个省、市、自治区能源效率进行测算, 揭示其时空分异特征及其影响因素, 并进一步提出未来我国能源效率提升的重点政策方向。研究结果显示: ① 20世纪90年代以来, 中国大陆地区能源效率整体上处于中等水平(远低于台湾地区), 呈升高趋势, 但变化幅度小。② 中国大陆地区能源效率提升以要素大规模投入而产生的外部经济效益为主导驱动, 相比之下, 科技进步并不是经济产出增长的主要来源, 但其发展水平的快速提升对能源效率改善幅度具有重要的推动作用。③ 从空间分异规律来看, 东、中部地区能源效率整体高于西部地区, 东北地区逐渐由能源效率最低层级升至仅次于东部地区、略高于中部地区的第二层级; 纯技术效率按照由高到低依次是东部地区、中部地区、东北地区、西部地区; 规模效率分异明显, 东部地区最高、中部地区次之, 西部地区规模效率较低, 东北地区受国家市场需求影响, 长期处于效率最低水平。④ 在国家、省域两种不同尺度下, 同一因素在两个尺度上对能源效率影响的适宜性、贡献率存在较大差异。⑤ 未来在提升中国大陆地区能源效率过程中, 应正确认识我国产业结构组合、能源市场化改革以及对外贸易发展等三个重要问题。

关键词: 区域能源效率; DEA模型; 时空分异; 成因; 中国

DOI: 10.11821/dlyj201401005

1 引言

气候变化与能源消费是当今最复杂的全球环境、经济、资源问题, 也是人类社会发展面临的巨大挑战之一^[1-2]。在此背景下, 中国把节能减排、提高能源效率作为当前及未来社会经济发展的重要目标之一, 并将提高能源效率作为解决能源矛盾的重要出路^[3-4]。从地理学角度来看, 对于一个国家能源效率的研究不仅需要从整体层面进行评估, 还需要从区域格局变化来把握, 以便在进行国家节能减排目标和相关政策的制定时才会具有更为明确的针对性和更为良好的可操作性^[5]。总体来看, 国内外已有研究主要是基于投入产出视角研究区域能源效率, 较多将GDP作为预期产出目标, 而忽略了CO₂排放作为非预期产出的相关研究^[6-16], 而在当前社会背景下, 如何准确评价能源经济产出的外部环境效应仍是一个亟待解决的难题; 另外, 鉴于台湾地区较高的能源效率, 本文将台湾省纳入研究范围, 以便将其与大陆地区进行对比分析, 这也是当前能源研究领域的有益尝试。基于以上考虑,

收稿日期: 2012-09-19; 修订日期: 2013-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201171); 福建省科技厅公益类科研院所专项项目(2011R1037-1)

作者简介: 王强(1982-), 男, 河北成安人, 讲师, 主要从事区域可持续发展与规划研究。

E-mail: wangqiang_1102@126.com

通讯作者: 樊杰(1961-), 男, 陕西西安人, 博士生导师, 研究员, 主要从事区域发展问题研究。E-mail: fanj@igsrr.ac.cn

本文将区域GDP与CO₂排放量一并作为能源消费过程中产生的外部经济效益、环境效应进行综合分析评价,在对1990-2009年中国大陆区域与台湾地区能源效率进行对比分析的基础上,揭示区域能源效率时空演化特征,以期为中国大陆地区制定有效的地区能源消费战略提供参考与依据。

2 模型方法及指标数据

2.1 可变规模报酬模型 (VRS)

数据包络分析 (Data Envelopment analysis, DEA) 是著名运筹学家 A.Charnes 等和 E.Rhodes 等学者于 1978 年开始创建的数学、运筹学、数理经济学和管理科学的交叉领域^[17]。DEA 方法基于数学规划思想,通过建立线性规划模型以评价决策单元之间的相对效率,具有黑箱方法的特色,对社会经济系统的多投入和多产出指标相对有效性评价很有效^[18]。为此,本文采用 DEA 模型用以评价各区域能源效率,其模型构建思路如下^[19]:评价区域个数为 N ,且评价指标体系中包括 I 种投入指标、 M 种产出指标。设 x_{ji} 代表第 j 个区域的第 i 种投入总量, y_{jm} 代表第 j 个区域的第 m 种产出总量,则 DEA 应用模型:

$$\begin{cases} \min(\theta - \varepsilon(e_1^T s^- + e_2^T s^+)) \\ s.t. \sum_{j=1}^n x_{ji} \lambda_j + s^- = \theta x_i^n \quad i=1,2,\dots,I \\ \sum_{j=1}^n y_{jm} \lambda_j - s^+ = y_m^n \quad m=1,2,\dots,M \\ \lambda_j \geq 0 \quad n=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ ($0 < \theta \leq 1$) 为能源效率指数,用以表征区域实际产出占在相同投入规模、投入结构及市场价格条件下所能达到的最大产出量的比值,可以衡量在现有的技术水平下,经济单元获得最大产出的能力。 λ_j ($\lambda_j \geq 0$) 为权重变量; s^- ($s^- \geq 0$) 为松弛变量; s^+ ($s^+ \geq 0$) 为剩余变量; ε 为无穷小量; $e_1^T = (1, 1, \dots, 1) \in E_m$ 和 $e_2^T = (1, 1, \dots, 1) \in E_n$ 分别为 m 维和 n 维单位向量空间,式 (1) 是基于不变规模报酬模型 (Constant Returns to Scale, CRS) 的 DEA 模型,简称 CRS 模型。若引入约束条件 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$, 式 (1) 转变为可变规模报酬模型 (Variable Returns to Scale, VRS) 的 DEA 模型,简称 VRS 模型。若 θ 的值越接近于 1, 则表示第 n 个区域能源效率就越高,反之,就越低;当 $\theta=1$ 则表明该区域能源利用在所有区域中处于最优生产前沿面上。另外,能源效率指数 θ 可分解为纯技术效率指数 θ_0 ($0 < \theta_0 \leq 1$, $\theta_0 \geq \theta$) 与规模效率指数 SE (Scale Efficiency, $SE = \theta/\theta_0$) 的乘积。其中,纯技术效率指数则表示区域能源消费过程中,在一定科技条件下地区投入能源要素的使用率,用以衡量地区有效利用生产技术使能源产出最大化的能力;规模效率指数则表征区域经济产出与能源投入的比例是否适当,该值越高表示规模越适合,规模经济效益越大。

2.2 投入—产出指标选取与数据处理说明

为全面反映能源投入的预期经济产出与附加温室气体排放的正负效应,本文在选取产出指标时,着重考虑了 GDP、CO₂ 两项指标,但这两项指标对能源消费效率变化的作用方向不同。一般而言, GDP 增长与能源效率提升成正向关系, CO₂ 排放作为经济增长的副产品且对环境具有负效应。为此,本文将 GDP 指标与 CO₂ 指标的比值 (单位: 万元/t), 即二氧化碳生产率^[20]为产出指标。需要指出的是,虽然二氧化碳生产率与单位 GDP 二氧化碳排放强度在数量上是倒数关系,但两者存在本质区别,原因在于二氧化碳生产率是从经

济学的角度将碳作为一种隐含在能源和物质产品中的投入要素来进行效率测度的^[21]。

本文除选择劳动力、资本等生产要素作为投入指标外,还考虑到能源消费结构对能源消费效率的影响,将煤炭、石油、天然气、电力等能源消费也作为投入指标。其中,选择各区域年均从业人口数来表征劳动力投入量;按照张军等提出的“永续盘存法”对固定资产进行测算^[22],将其作为资本投入量;煤炭、石油、天然气、电力等能源消费指标按照当年《中国能源统计年鉴》中所颁布的标准煤折算系数将其折算成标准煤消费量^[23],将其作为能源投入量。

由于台湾地区GDP不变价格折算基期选择为2006年,为保持与其一致,将大陆各省份GDP按照各年GDP增长指数折算成基于2006年的不变价格;按照1990-2009年各年台币兑换人民币汇率将台币折算为人民币;依据IPCC温室气体指导方针中有关CO₂排放总量估算方法(公式2),并将计算结果与美国能源情报署(Energy Information Administration,简称EIA)公布的年度数据进行对比,以此控制误差在合理区间范围。

$$CO_2 = \sum_i EC_i \times ef_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中: EC_i 为*i*能源消费总量(万吨标准煤); ef_i 为燃料*i*中的含碳量(参照文献24);数值44和12分别为CO₂和C的摩尔量。

表1 各类能源的碳排放系数^[24]

Tab. 1 The carbon emissions coefficient of various types of energy

能源种类	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料	天然气
碳排放系数(10 ⁴ t/10 ⁴ t)	0.7480	0.8550	0.5850	0.5538	0.5714	0.5912	0.6185	0.4440

中国大陆地区能源消费资料主要来自1996-2010年《中国能源统计年鉴》^[23],经济资料主要来自1991-2010年《中国统计年鉴》^[25]。台湾省能源消费及经济资料主要来自2010年《台湾统计年鉴》^[26],CO₂排放量资料主要来自2010年《台湾环境保护统计年报》^[27]。

3 能源效率时空分异规律

3.1 能源效率时序变化特征

20世纪90年代以来,中国大陆地区能源效率整体上处于中等水平。1990年、1995年、2000年、2005年和2009年大陆地区能源效率指数分别是0.64、0.58、0.64、0.63、0.73,较台湾地区(能源效率指数年值均为1),仅达到其水平的64.40%、58.20%、63.60%、63.20%、73.30%(表2)。从能源效率变化情况来看,台湾地区能源效率一直最优(能源效率指数年值均为1),大陆地区则呈现阶段性变化规律(图1)。

表2 中国大陆地区与台湾地区能源效率、纯技术效率、规模效率对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of energy efficiency, technology efficiency and scale efficiency between the mainland and Taiwan in China, 1990-2009

年份	大陆地区			台湾地区		
	能源消费效率	纯技术效率	规模效率	能源消费效率	纯技术效率	规模效率
1990	0.64	0.74	0.87	1.00	1.00	1.00
1995	0.58	0.67	0.86	1.00	1.00	1.00
2000	0.64	0.73	0.87	1.00	1.00	1.00
2005	0.63	0.75	0.89	1.00	1.00	1.00
2009	0.73	0.79	0.92	1.00	1.00	1.00

(1) 1990-2001年, 伴随中国大陆地区工业经济发展迅速, 能源消费总量也随之增加, 而规模效率指数变化幅度微小, 纯技术效率指数变化呈现增长态势, 科学技术进步对区域能源效率的提升作用显著。这一期间, 能源效率变化呈现缓慢提高态势。

(2) 2002年, 中国大陆地区为提升自身工业经济地位, 与其他东亚国家签署了《中国—东盟全面经济合作框架协议货物贸易协议》, 大力发展区域工业, 这一时期能源集中型产业发展尤为快速^[6], 而纯技术效率指数呈现微小降低态势, 说明科技进步对能源效率的提升作用较前期不明显。自此, 能源效率呈现短暂性下降态势, 从2002年的0.65下降至2004年的0.61。

(3) 自“十一五”以来, 伴随中国大陆地区经济结构持续转型、节能技术快速发展以及能源价格的大力调整, 能源消费的规模效率与纯技术效率均呈现明显提升, 能源效率也随之由2005年的0.63增长到2009年的0.73。

(4) 值得注意的是, 1990-2009年期间, 规模效率指数均值(0.88)大于纯技术效率指数均值(0.72), 说明中国大陆地区能源效率提升以生产规模外延扩张而产生的外部经济效益为主导驱动, 科技进步并不是经济产出增长的主要来源, 但其发展水平的快速提高对能源效率的改善具有重要的推动作用。

3.2 能源效率空间分异特征

为科学反映中国大陆地区不同区域能源效率空间分异状况, 并与国家区域发展政策相衔接, 将中国大陆各省(市、自治区)归入东部、中部、西部和东北4大片区。其中, 东部片区包括: 北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南等10个省(市); 中部片区包括山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南等6个地区; 西部片区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等11个地区(西藏地区为无数据区, 不做研究); 东北片区包括辽宁、吉林和黑龙江等3个省区。另外为客观反映1990-2009年间中国各省(市、自治区)区能源效率空间分布格局, 在对比历年格局图的基础上, 遴选2000-2009年10年能源效率指数、技术效率指数、规模效率指数的算数平均值 $\bar{\theta}$ 、 $\bar{\theta}_t$ 、 $\bar{\theta}_s$ 作为评价指标, 用以划分区域类型(图2-图7)。

(1) 从能源效率空间分异特征来看(图2, 图5), 东、中部地区整体高于西部地区, 东北地区能源效率指数变化幅度最大。能源高效区($0.8 < \bar{\theta} \leq 1$)集中分布于东部地区(主要包括北京、天津、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南等沿海省(市)地区, 仅重庆属西部地区); 山西、河南、安徽、江西、湖南等中部6地区, 以及河北、山东、黑龙江、吉林、四川、云南、广西等省区一并归入能源较高效地区($0.65 < \bar{\theta} \leq 0.8$); 中效区($0.5 < \bar{\theta} \leq 0.65$)主要包括辽宁、陕西、湖北、贵州等地区; 低效区($0 < \bar{\theta} \leq 0.5$)主要集中在西部地区的内蒙古、宁夏、甘肃、青海、新疆等地区。

(2) 从能源规模效率空间分异特征来看(图3、图6), 东部地区能源规模效率远高于其他地区, 中部地区次之, 西部地区与东北地区最低。能源规模效率达到最佳($0.95 <$

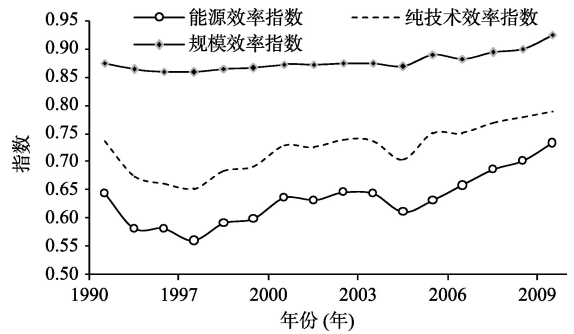


图1 1990-2009年中国大陆地区能源效率、纯技术效率、规模效率变化情况

Fig. 1 Changes of energy efficiency, technology efficiency and scale efficiency in mainland China, 1990-2009

$\overline{SE} \leq 1$) 的地区主要分布在环渤海的北京、天津, 长三角地区的江苏、上海、浙江, 以及广东、海南、重庆等地区。这些地区相较于其他地区能源消费规模投入更具有规模边际效益, 即这些地区每增加1个单位的能源投入规模产出的经济效益高于其他地区; 规模效率较高地区 ($0.9 < \overline{SE} \leq 0.95$) 主要集中在东北三省、河北、福建等地区; 大陆地区大部分地区能源规模效率处于中等水平 ($0.75 < \overline{SE} \leq 0.9$), 主要包括山东、山西、河南、安徽、江西、湖北、湖南、甘肃、陕西、四川、贵州、云南、广西、新疆等地区; 规模低效区 ($0 < \overline{SE} \leq 0.75$) 主要包括内蒙古、青海、宁夏等地区。

(3) 从纯技术效率空间分异特征来看 (图4、图7), 东部地区纯技术效率最高, 中部地区与东北地区次之, 西部地区最低。纯技术高效区 ($0.9 < \bar{\theta}_b \leq 1$) 主要集中在东部地区的北京、天津、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南等9个沿海省市区和西部重庆地区, 这与能源消费高效区分布较为相似; 而能源纯技术较高效区 ($0.8 < \bar{\theta}_b \leq 0.9$) 集中分布于高效区的外围地区, 说明能源消费过程中技术空间外溢起到了非常重要的作用, 主要包括在山东、山西、河南、安徽、江西、湖南、广西、四川等地区; 纯技术中效区 ($0.7 < \bar{\theta}_b \leq 0.8$) 主要分布在黑龙江、吉林、河北、贵州、云南地区, 纯技术低效地区 ($0 < \bar{\theta}_b \leq 0.7$) 则主要分布在西部地区 (内蒙古、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆)、东北辽宁地区、中部湖北地区。

(4) 整体上来看, 仅东部地区20年间纯技术效率指数均值大于规模效率指数均值, 且两者各年差值呈现缩小态势 (图8), 说明东部地区能源投入规模与能源利用率日趋协调; 西部地区纯技术效率指数均值略小于规模效率指数均值, 两者基本相当, 但从两者差值变化过程来看, 呈现出阶段性大幅波动, 由“规模效率指数为大”逐渐转向“纯技术效率指数为大”, 能源投入规模与能源利用率具有阶段性失衡特征; 中部地区与东北地区纯技术

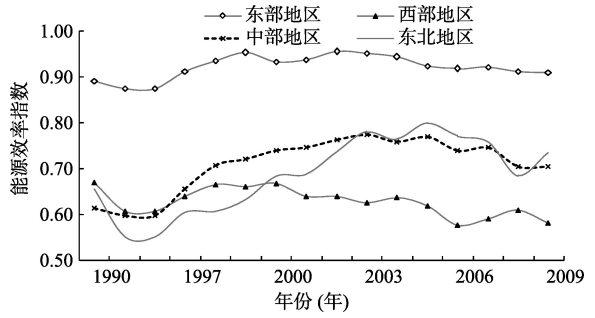


图2 1990-2009年中国大陆各地区能源效率对比
Fig. 2 Comparison of energy efficiency among mainland China's regions, 1990-2009

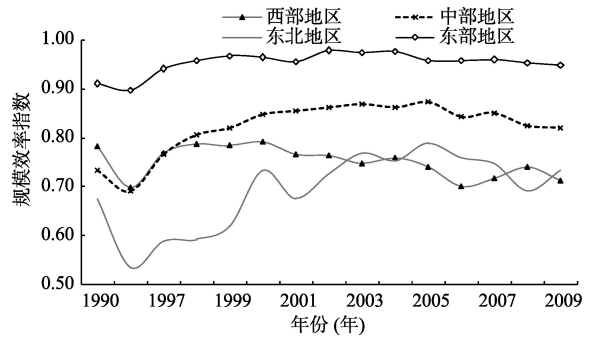


图3 1990-2009年中国大陆各地区能源规模效率对比
Fig. 3 Comparison of scale efficiency among mainland China's regions, 1990-2009

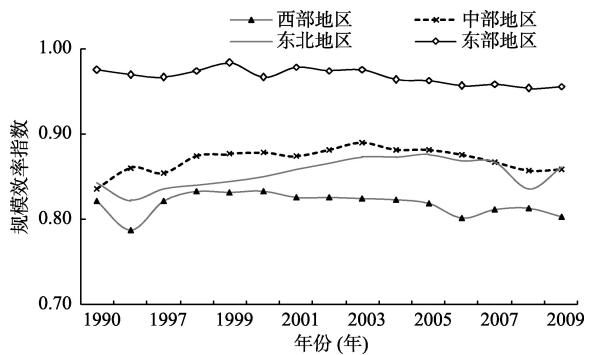


图4 1990-2009年中国大陆各地区纯技术效率对比
Fig. 4 Comparison of pure technology efficiency among Mainland China's regions, 1990-2009

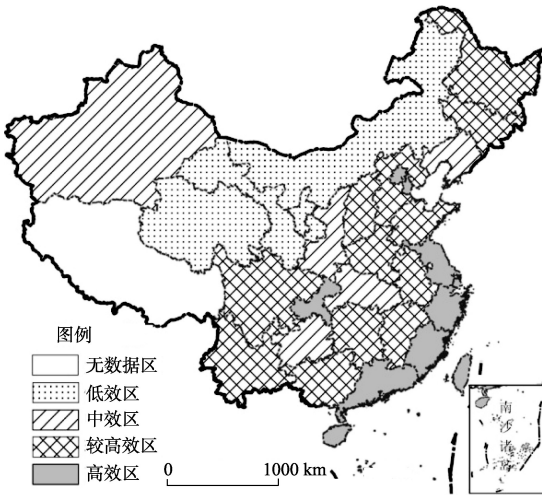


图5 区域能源效率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of energy efficiency in China

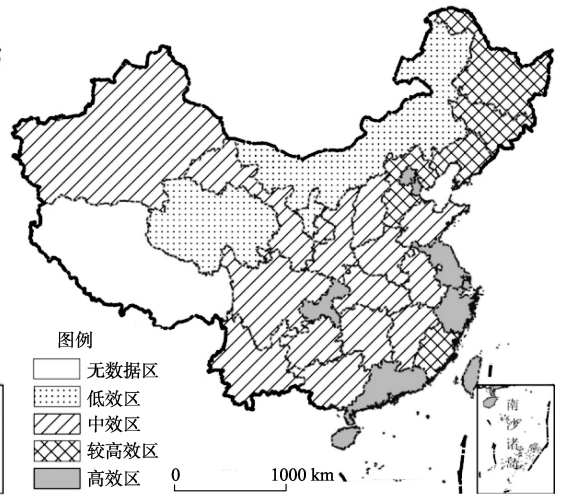


图6 区域能源规模效率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of scale efficiency in China

效率指数均值与规模效率指数均值之差呈现增加趋势,说明能源投入规模偏大、能源利用率偏低的失衡态势明显存在。

4 大陆地区能源效率时空变化影响因素分析

影响能源效率提升的因素繁杂而难以列举穷尽。已有研究着重从产业结构、能源消费结构、技术进步、对外开放等因素对能源效率变化的影响^[28-35]。值得注意的是,尺度是有关地理空间概念建模的重要因素,空间形态、结构、过程以及内在驱动机理也会随着尺度的不同而发生变化^[36]。因此,对于不同尺度的空间现象研究,应该选择其适宜的影响因素。由于本文要对大陆地区能源效率时序、空间变化特征进行因素解析,其实质是基于国家、省域两种尺度来研究这一问题,同一因素在两个尺度上对能源效率影响的适宜性、贡献率可能存在较大差异,甚至作用方向截然不同。已有研究虽对上述4个影响因素

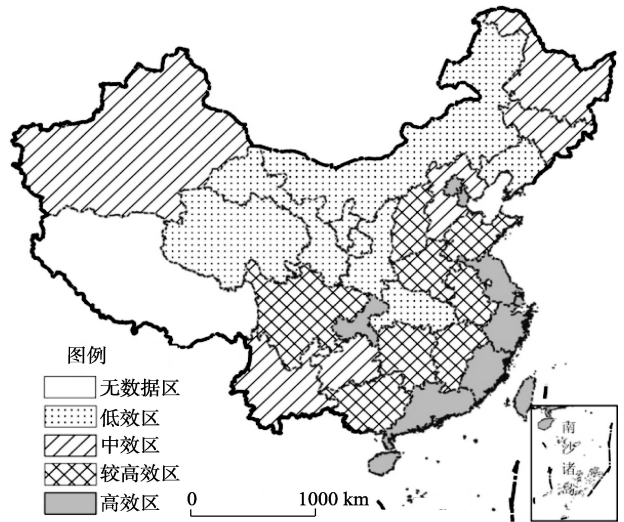


图7 区域纯技术效率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of pure technology efficiency in China

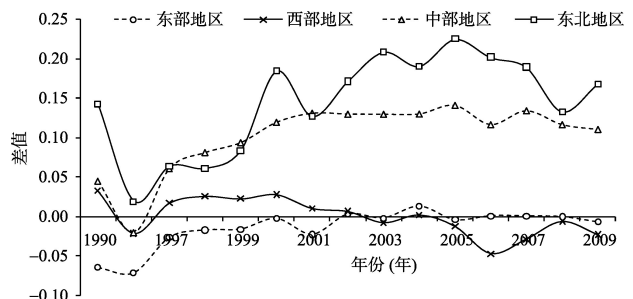


图8 1990-2009年中国大陆地区能源规模效率指数与纯技术效率指数差值时序变化

Fig. 8 Changes of gap between scale efficiency index and technology efficiency index in Mainland China, 1990-2009

的作用机理进行了系统研究,但多是在国家单一尺度下的研究成果,而在省域尺度下,已有结论是否依然成立,也正是下文探讨的主要问题。

4.1 大陆地区能源效率时序变化影响因素

从能源效率时序变化特征已知,规模效率是影响能源效率水平的主导因素,而纯技术效率是影响能源效率变化的推动因素。为此,揭示影响能源效率时序变化影响因素,实质是探究影响规模效率、纯技术效率时序演变的内在机制。本文拟利用逐步回归模型^[37],用以构建分别以规模效率指数、纯技术效率指数为因变量,以各年中国大陆地区R&D投入占GDP比重、非农产业结构比重、进出口总额占GDP比重、煤炭占能源消费总量比重为自变量的线性函数。其中,选择非农产业结构比重作为探究产业结构升级对能源效率影响的指标原因是,通过回归分析,发现第二产业结构比重、第三产业结构比重对能源效率变化并无明显影响,而非农产业结构比重变化则具有显著贡献,故选择其作为研究指标。选择逐步回归模型的原因在于,其主要优势是在规避“伪回归”的前提条件下,能在回归方程中包含所有对因变量影响显著的自变量而剔除对因变量影响不显著的自变量,并对各个影响因素的贡献率予以定量表述^[35]。鉴于文章篇幅所限,计算过程见文献37。结果显示:

(1) 规模效率变化影响因素。回归分析结果显示,中国大陆地区规模效率变化主要受非农产业发展、对外经济增长、煤炭消费依赖三个主要因素影响,其中,非农产业发展贡献最大(标准化回归系数1.338,表3)。1990-2009年,大陆地区非农产业结构比重由72.90%增长至89.70%(图9),二、三产业规模体量不断壮大与空间集聚程度逐渐增强,有力推动了能源消费的“规模红利”,产业体量增长拉动了能源消费规模,产业规模经济促进了能源效率提升;同期,中国大陆地区进出口总额也由1154.40亿美元增长至22075.00亿美元,年均增长15.59%。但从其对能源规模效率变化的影响来看,进出口总额的快速增长却抑制了能源规模效率的提升,结合董利等研究成果,进口能够促进能源效率提高,但不显著,出口则会降低能源效率^[35]。20年间,中国大陆地区贸易顺差呈现迅速增长,由1990年的87.40亿美元增长至2008年的2981.00亿美元,2009年又下滑至1957.00亿美元(图10),可见,出口贸易在对外贸易中的主导作用逐渐强化。而按照国际分工的比较优势原则,大陆地区出口的商品基本上是劳动、资源密集型产品,这些高耗能产品的出口不仅不能提高能源效率水平,反而会加重能源消耗,抑制能源效率的提高^[35];大陆地区能源消费中“煤炭为纲”的结构特征,促进了能源消费规模效率提升(标准化回归系数0.175),但贡献率不强,煤炭作为中国经济发展的传统投入要素,产业发展为追求能源投入成本最小化,将其作为主体能源并呈现明显的“路径依赖性”。在此基础上,产业发展逐步实现规模经济与集聚经济,从而促进能源规模效率提升。

(2) 纯技术效率变化影响因素。纯技术效率与科技投入比重、产业结构升级明显相关,其中科技进步对纯技术效率变化贡献率较大(标准化回归系数为0.747,表3)。20世纪90年代以来,随着经济发展和工业化进程的不断深入,技术进步逐步成为增长的主要

表3 逐步回归分析结果

Tab. 3 The result of the stepwise regression analysis

标准化回归系数	R&D投入比重	非农产业结构比重	进出口总额占GDP比重	煤炭占能源消费总量比重
规模效率	—	1.338**	-0.498**	0.175*
纯技术效率	0.747**	0.293**	—	—

注:*表示通过0.1显著水平检验;**表示通过0.05显著水平检验;

驱动力,先进技术知识创新和设备研发活动经费投入日益增加。1995-2009年间(1995年之前无数据),中国R&D科技投入占GDP比重由1995年的0.39%增长至2009年的1.35%,呈现出明显的线性增长态势,较大推动了科技创新成果转化与广泛应用。反映在能源消费上,节能技术开发与低能耗设备研制应用极大提高了能源要素的组合、配置、利用效率。同时,产业结构优化过程,其实也是科技创新与成果应用转化过程,尤其是随着产业结构由以劳动、资源密集型产业为主导逐步转向以知识、技术密集型产业为重点支撑的转移过程,传统高耗能产业逐步实现了节能技术创新突破和资源循环利用路径优化,极大地提高了能源利用效率。

4.2 能源效率空间分异影响因素

地域差异性是影响省域尺度下各地区能源效率驱动因素统一性的主要原因,不同地区能源效率变化的诱因可能存在显著差异。本文以2009年大陆地区30个省(市、自治区)作为样本,以各地区能源效率指数为因变量,以非农产业结构比重、煤炭占能源消费总量比重、进出口总额占GDP比重、R&D投入占GDP比重为自变量,进行逐步回归分析。结果说明,只有进出口总额占GDP比重与能源效率指数之间存在明显的正向线性关系(表4),而与基于国家尺度所得结论不同,说明不同尺度下,即便是同一区域能源效率驱动因素,其作用方向和贡献率也呈现明显差异。为此,本文将研究尺度进一步细分,就各类能源效率类型区开展影响因素与驱动机制进行初步探讨。

(1) 能源高效区成因。大陆地区能源高效区主要包括北京、天津、江苏、上海、浙江、广东、海南、重庆、福建等地区。根据能源消费结构、对外贸易依存度、产业结构特征,高效区又可分为对外贸易驱动型、能源结构优化驱动型、低耗能工业驱动型三类。其中,贸易驱动型地区主要包括北京、天津、江苏、上海、浙江、广东、福建等地区,7省(市)属对外贸易驱动型高效区,进出口贸易总额占GDP比重均位于全国各省(市、自治

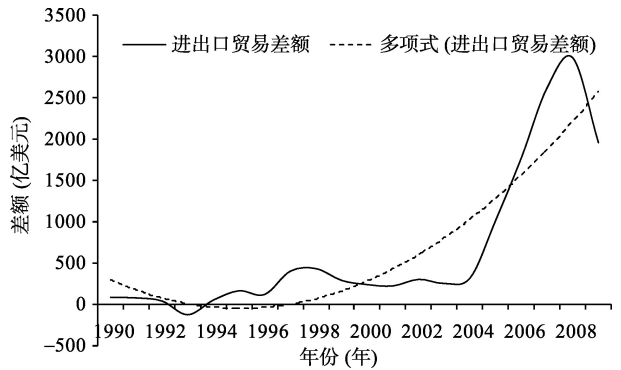


图9 1990-2009年中国大陆地区贸易顺差时序变化

Fig. 9 Changes of trade surplus in Mainland China, 1990-2009

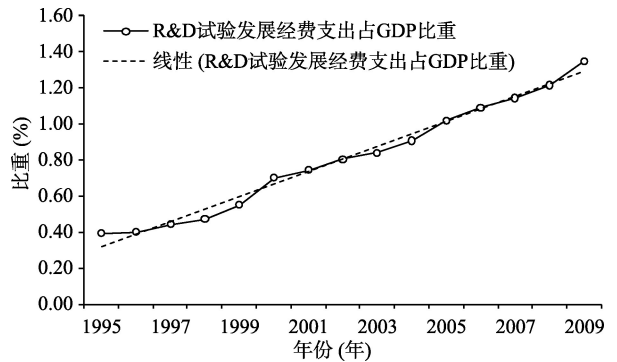


图10 1990-2009年中国大陆地区R&D经费支出占GDP比重时序变化

Fig. 10 Changes of ratio of intramural expenditure on R&D to GDP in Mainland China, 1990-2009

表4 回归分析结果

Tab. 4 The result of the regression analysis

指标	标准化系数	t	Sig
非农产业结构比重	-0.212	-0.822	0.419
煤炭占能源消费总量比重	0.120	0.454	0.654
进出口总额占GDP比重	0.805	2.758	0.011
R&D投入占GDP比重	0.200	0.933	0.360

注:模型R系数=0.661, F=4.843, Sig=0.005

区)前列,其对外贸易依存度高(均达40%以上),有力提升了地区能源效率;海南省以农业、旅游业发展为主,煤炭占能源消费总量的结构比重全国最低,仅达20%,较低的煤炭依赖度与低耗能产业发展,是提高其能源效率、减少CO₂排放的主要原因;重庆因在石油加工、炼焦及核燃料加工业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业、电力热力的生产和供应业、化学原料及化学制品制造业等6大高耗能产业区位熵在全国最低(0.50),经济增长方式对能源依赖程度也较低(表5)。

表5 2009年能源高效区各项指标发展情况

Tab. 5 The indexes of the highest energy efficiency regions in 2009

地区	煤炭占能源消费 结构比重(%)	进出口总额占 GDP比重(%)	6大高耗能 产业区位熵	非农产业结构 比重小计(%)	其中	
					第二产业比重(%)	第三产业比重(%)
海南	20.50	35.00	0.70	72.10	26.8	45.30
福建	75.74	45.31	0.64	90.40	49.1	41.30
重庆	78.76	8.06	0.50	90.70	52.8	37.90
江苏	76.19	72.47	1.18	93.50	53.9	39.60
浙江	67.45	62.55	0.86	94.90	51.8	43.10
广东	51.77	109.23	0.70	94.90	49.2	45.70
天津	67.66	65.35	1.15	98.30	53	45.30
北京	38.57	48.90	0.51	99.00	23.5	75.50
上海	48.87	123.97	0.76	99.30	39.9	59.40
全国 平均水平	73.36	27.45	1.00	89.70	48.54	41.16

(2) 能源较高效地区成因。大陆地区能源较高效地区主要包括河北、黑龙江、吉林、山东、山西、河南、安徽、江西、湖南、四川、广西、云南等地区(表5),根据产业结构特征,较高效区又可分为工业化驱动型和第三产业驱动型两种。其中,工业化驱动型地区主要包括河北、黑龙江、吉林、山东、山西、河南、安徽、江西、四川等地区,这些地区工业化水平均高于全国平均水平(39.72%),均达40%以上,而第三产业结构比重均远低于全国平均水平(43.36%),其中,河北、山东、山西、江西、河南等省又是大陆地区6大高耗能产业集中区,地区工业化发展推动了经济总量增长与能源消费规模扩张,也提升了地区能源效率;湖南、云南、广西三省(自治区)工业化水平低于全国平均水平,而旅游业发展带动了地区住宿和餐饮业发展(地区住宿和餐饮业区位熵大于1),且住宿和餐饮服务业对大规模煤炭消费依赖度普遍较低,地区能源效率相对较高(表6)。

(3) 能源中效区、低效区成因。大陆地区能源中效区主要包括辽宁、陕西、湖北、贵州等地区,低效区主要包括内蒙古、宁夏、青海、甘肃、新疆等省(自治区)等地区。其中,陕西、湖北、贵州等中效地区,以及内蒙古、宁夏、青海、甘肃等低效区,经济发展方式以内向型为主导,主要以区内资源及其他生产要素的配置和流通过来发展本地区经济;虽然辽宁、新疆地区对外贸易依存度相对较高,但辽宁是耗能产业集中地,而新疆则是大陆地区非农产业结构比重最低的地区,经济发展水平较低,导致能源效率较低(表7)。

5 结论与政策建议

面临资源环境压力不断增加、能源约束持续加剧的发展现实,政府作为区域能源消费行为引导、调控、管制的主体,应基于区域自身能源消费特征制定出差别化、针对性的区

表6 2009年能源较高效率区产业结构指标发展情况

Tab. 6 The industrial structure indexes of higher energy efficiency regions in 2009

地区	非农产业结构 比重小计(%)	其中		住宿和餐饮业 区位熵	6大高耗能 产业区位熵
		工业比重(%)	第三产业结构比重(%)		
广西	82.90	36.91	37.60	1.28	0.69
湖南	85.70	36.90	41.40	1.22	0.74
云南	84.70	33.85	40.80	1.26	0.85
山西	94.00	47.82	39.20	1.02	1.15
四川	85.80	40.13	36.70	1.37	0.75
安徽	86.00	40.39	36.40	0.75	0.89
黑龙江	87.60	41.34	39.30	1.18	0.54
吉林	88.30	41.97	37.90	1.04	0.66
江西	88.10	41.76	34.40	1.05	1.15
河北	87.90	46.32	35.20	0.69	1.40
山东	90.90	49.85	34.70	0.84	1.24
河南	86.30	50.82	29.30	1.29	1.04
全国 平均水平	89.70	39.72	43.36	1.00	1.00

域能源发展战略。本文利用DEA方法对包括台湾在内的31个省(市、自治区)1990-2009年的能源效率时空演化特征进行深入分析,并进一步指出影响我国大陆地区能源效率时空分异特征的主要因素以及未来区域能源效率提升的主要战略导向。

(1) 20世纪90年代以来,中国大陆地区能源效率整体上处于中等水平(远低于台湾地区),虽整体呈提

高趋势,但增加幅度不大。另外,中国大陆地区能源效率提升以要素大规模投入而产生的外部经济效益为主导驱动,相比之下,科技进步并不是经济产出增长的主要来源,但其发展水平的快速提升对能源效率改善幅度具有重要的推动作用。

(2) 从空间分异规律来看,东、中部地区能源效率整体高于西部地区,东北地区能源效率指变动幅度较大,由能源效率最低层级升至仅次于东部地区、略高于中部地区的第二位;纯技术效率按照由高到低依次是东部地区、中部地区、东北地区、西部地区;规模效率分异明显,东部地区最高、中部地区次之,西部地区规模效率较低,东北地区受国家市场需求影响,长期处于效率最低水平。

(3) 从能源效率时序变化影响因素分析来看,中国大陆地区规模效率变化主要受非农产业发展、对外经济增长、煤炭消费依赖三个主要因素影响,其中非农产业发展贡献最大。纯技术效率与科技投入比重、产业结构升级明显相关,其中科技进步对纯技术效率变

表7 2009年能源中效率区、低效率区各指标发展情况

Tab. 7 The indexes of middle energy efficiency and low energy efficiency regions in 2009

地区	非农产业结构 比重小计(%)	进出口总额占 GDP比重(%)	工业比重(%)	6大高耗能 产业区位熵
湖北	86.2	9.31	39.99	0.84
陕西	90.4	7.24	42.86	0.67
辽宁	90.7	31.33	45.53	1.36
新疆	82.2	25.73	36.38	0.86
甘肃	85.3	9.03	35.53	1.45
青海	90.1	4.53	43.5	1.2
内蒙古	90.5	6.63	46.23	0.93
宁夏	90.6	9.89	38.45	1.17
全国平均水平	89.7	27.45	39.72	1.00

化贡献率较大。

(4) 从能源效率空间分异影响因素分析来看,在国家、省域两种不同尺度下,同一因素在两个尺度上对能源效率影响的适宜性、贡献率存在较大差异,甚至作用方向截然不同。产业结构、能源消费结构、技术进步、对外开放等因素4个指标在省域尺度中,只有进出口总额占GDP比重与能源效率指数之间存在明显的正向线性关系。为此,本文就各类能源效率区驱动因素与机制进行了初步探讨,但限于文章体量与数据可获得性,文章在这一部分研究还有待进一步深化。

综上所述,本文认为要提高中国大陆地区能源效率,缩小地区间能源效率差距,除了积极推进经济发展方式转型,提高科技发展水平以外,还应该注意处理好以下几个方面的关系和问题:

(1) 科学优化“第二产业为纲”的产业结构组合。长期以来,大陆地区能源规模投入增长的规模效益较科技创新的节能效应更能拉动大陆地区能源效率提升,在技术发展水平相对滞后的生产条件下,区域经济发展过度依赖第二产业规模发展带动,不仅增加了全社会能源需求的压力,而且以资源、能源大量投入为特征的粗放型发展会导致能源效率的降低。因此,在地区第二产业快速发展的过程中,不应盲目追求第二产业结构比重的快速提高,而应更加注重第二产业发展到一定程度后,增强产业科技创新与节能技术投入,减少产业发展对资源要素的依赖与生态环境的破坏。

(2) 逐步推进能源市场化改革与能源结构多元发展。长期以来,政策干预较大的煤炭价格鼓励了高耗能、高污染产业的发展,大力支持了大陆地区工业化发展,但同时也刺激了产业能源需求井喷式增长,忽视了能源节约措施以及节能技术的研发和能源结构多元化发展。而由于煤炭在大陆地区社会经济发展过程中的基础支撑作用,未来煤炭能源供求关系调控,不宜过松或过紧,应循序过渡、适度控制,重点通过将煤炭外部环境成本内部化、煤炭价格逐步市场化促进要素资源的流动。此外,国家也应着重开发水电、核能、风能新能源,提高石油、天然气等替代性高级能源的可进入性,并通过生产设备的改进逐步降低企业对煤炭资源过度依赖。

(3) 理性认识对外贸易发展对区域能源效率的“双重效应”。就全国而言,高耗能、高污染、低附加值的对外贸易产业发展实质上抑制了大陆地区能源效率提升,而就对外贸易依存度较高的东部沿海省份,对外贸易发展则促进了地区能源效率提升。究其原因在于,大陆地区高耗能产业生产活动多集中于中、西部内陆地区,而进出口贸易则多集中于沿海地区。为此,政府应加快分别针对不同区域制定严格的环境法规的制定和产业导向政策,以此保证其能源投入增加过程中生态环境安全和能源效率提高。

参考文献(References)

- [1] 葛全胜,刘浩龙,田砚宇. 中国气候资源与可持续发展. 北京: 科学出版社, 2007. [Ge Quansheng, Liu Haolong, Tian Yanyu. Climatic resources and its sustainable development in China. Beijing: Science Press, 2007.]
- [2] 郭义强, 郑景云, 葛全胜. 一次能源消费导致的二氧化碳排放量变化. 地理研究, 2010(6): 1027-1036. [Guo Yiqiang, Zheng Jingyun, Ge Quansheng. Study on the primary energy-related carbon dioxide emissions in China. Geographical Research, 2010, 29(6): 1027-1036.]
- [3] 张雷, 马蓓蓓, 黄园渐, 等. 国家能源供应保障的时空协调初探. 地理研究, 2010(1): 13-23. [Zhang Lei, Ma Beibei, Huang Yuanxi et al. Study on space-time coordination of national energy supply. Geographical Research, 2010, 29(1): 13-23.]
- [4] 刘佳骏, 董锁成, 李宇. 产业结构对区域能源效率贡献的空间分析: 以中国大陆31省(市、自治区)为例. 自然资源学报, 2011(12): 1999-2011. [Liu Jiajun, Dong Suocheng, Li Yu. Spatial analysis on the contribution of industrial

- structure change to regional energy efficiency: A case study of 31 Provinces in Mainland China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 1999-2011.]
- [5] 张雷. 中国一次能源消费的碳排放区域格局变化. *地理研究*, 2006, 25(1): 1-9. [Zhang Lei. A changing pattern of regional CO₂ emissions in China. *Geographical Research*, 2006, 25(1): 1-9.]
- [6] Chen T Y, Lai P Y. A comparative study of energy utilization efficiency between Taiwan and China. *Energy Policy*, 2010, 38 (5): 2386-2394.
- [7] Patterson M G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 1996, 24 (5): 377-390.
- [8] 王庆一. 中国的能源效率及国际比较. *节能与环保*, 2003, (8): 11-14. [Wang Qingyi. Chinese energy efficiency and international comparisons. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2003, (8): 11-14.]
- [9] 王强, 郑颖, 伍世代等. 能源效率对产业结构及能源消费结构演变的响应. *地理学报*, 2011, 66(6): 741-749. [Wang Qiang, Zheng Ying, Wu Shidai et al. Mechanism of energy efficiency response to industrial restructuring and energy consumption structure change. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(6): 741-749.]
- [10] 史丹, 张金隆. 产业结构变动对能源消费的影响. *经济理论与经济管理*, 2003, (8): 30-32. [Shi Dan, Zhang Jinlong. Effects of changing industrial structures on energy consumptions. *Economic Theory and Business Management*. 2003, (8): 30-32.]
- [11] 王姗姗, 屈小娥. 技术进步、技术效率与制造业全要素能源效率. *山西财经大学学报*, 2011, 33(2): 55-60. [Wang Shanshan, Ju Xiao'e. Technology advancement, technical efficiency and manufacturing industry entire essential factor energy rate change—Based on Malmquist Index Empirical Study. *Journal of Shanxi Finance and Economics University*, 2011, 33(2): 55-60.]
- [12] 陈媛媛, 王海宁. FDI、人力资本与省际工业能源效率. *国际贸易问题*. 2011, (3): 99-109. [Chen Yuanyuan, Wang Haining. FDI, Human Capital and Regional Industrial Energy efficiency. *Journal of international trade*, 2011, (3): 99-109.]
- [13] Medlock K B, Soligo R. Economic development and End-Use energy demand. *The Energy Journal*, 2001, 22(2): 77-105.
- [14] Fisher V K, Jefferson G H, Liu H T. What is driving China's decline in energy intensity. *Resource and Energy Economics*, 2004, (26): 77-97.
- [15] Boyd G A, Pang J. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity. *Energy Policy*, 2000, 28(5): 289-296.
- [16] Ghali K H, El-Sakka M. Energy Use and output growth in Canada: A Multivariate Co-integration Analysis. *Energy Economics*, 2004, 26(2): 225-238.
- [17] 魏权龄. *数据包络分析*. 北京: 科学出版社, 2004. [Wei Q L. *Data Envelopment Analysis*. Beijing: Science Press, 2004.]
- [18] 赵媛, 郝丽莎, 杨足膺. 江苏省能源效率空间分异特征与成因分析. *地理学报*, 2010, 65(8): 919-928. [Zhao Yuan, Hao Lisha, Yang Zuying. Regional Differentiation of Energy Efficiency and Its Causes in Jiangsu. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(8): 919-928.]
- [19] 郭腾云, 徐勇, 王志强. 基于DEA的中国特大城市资源效率及其变化. *地理学报*, 2009, 64(4): 408-416. [Guo Tengyun, Xu Yong, Wang Zhiqiang. The analyses of Metropolitan efficiencies and their changes in China based on DEA and Malmquist Index Models. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 408-416.]
- [21] Beinhocker et al. *The Carbon productivity challenge: Curbing climate change and sustaining economic growth*. McKinsey Global Institute, June 2008.
- [22] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000. *经济研究*, 2004, (10): 35-44. [Zhang Jun, Wu Guiying, Zhang Jipeng. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.]
- [23] 国家统计局能源统计司. *中国能源统计年鉴 1991-2010*. 北京: 中国统计出版社, 1991-2010. [Department of Energy statistics, National Bureau of Statistics, People's Republic of China. *Energy Statistical Yearbook 1991-2010*. Beijing: China Statistics Press, 1991-2010.]
- [24] 王强, 伍世代. 中国工业经济转型过程中能源消费与碳排放时空特征研究. *地理科学*, 2011, 30(1): 36-41. [Wang Qiang, Wu Shidai. Spatial-temporal characteristics of energy consumption and carbon emissions in industry sector during the period of Economic Transition in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 30(1): 36-41.]
- [25] 国家统计局. *中国统计年鉴 1991~2010*. 北京: 中国统计出版社, 1991-2010. [National Bureau of Statistics, People's Republic of China. *China Statistics Yearbook 1991-2010*. Beijing: Beijing: China Statistics Press, 1991-2010.]
- [26] 台湾省行政院主计处. *台湾统计年鉴 1991~2010*. 台北: 台湾省行政院主计处. 2011-10. <http://www.stat.gov.tw/lp.asp?ctNode=2115&CtUnit=1049&BaseDSD=34>. [Council for Economic Planning and Development, Taiwan. *Taiwan Statistical Data Book 1991-2010*. Taipei: Council for Economic Planning and Development, 2011-10. <http://www.stat.gov.tw/lp.asp?ctNode=2115&CtUnit=1049&BaseDSD=34>.]

- gov.tw/lp.asp?ctNode=2115&CtUnit=1049&BaseDSD=34.]
- [27] 行政院环境保护署. 台湾环境保护统计年报2010. 台北: 行政院环境保护署. 2011-8. <http://www.epa.gov.tw/yearbook>. [Environmental Protection Administration, Taiwan. Yearbook of Environmental Protection Statistics 2010. Taipei: Environmental Protection Administration. 2011-8. <http://www.epa.gov.tw/yearbook>.]
- [28] 路正南. 产业结构调整对我国能源消费影响的实证分析. 数量经济技术经济研究, 1999, (12): 53-55. [Lu Zhengnan. Analysis on positive effect of industrial structure adjustment on energy consumption in China. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 1999, (12): 53-55.]
- [29] 史丹, 张金隆. 产业结构变动对能源消费的影响. 经济理论与经济管理, 2003, (8): 30-32. [Shi Dan, Zhang Jinlong. Impact of changes in industrial structure on energy consumption in China. Economic Theory and Business Management, 2003, (8): 30-32.]
- [30] 魏楚, 沈满洪. 结构调整能否改善能源效率: 基于中国省级数据的研究. 世界经济, 2008, (11): 77-85. [Wei Chu, Shen Manhong. Can structure change improve the energy efficiency? An empirical study based on Provincial Data. The Journal of World Economy, 2008, (11): 77-85.]
- [31] 赵晓丽, 欧阳超. 北京市经济结构与能源消费关系研究. 中国能源, 2008, (3): 21~24. [Zhao Xiaoli, Ouyang Chao. The Relationship between Economic structure and energy consumption in Beijing. Energy of China, 2008, (3): 21-24.]
- [32] 韩智勇, 魏一鸣, 范英. 中国能源强度与经济结构变化特征研究. 数理统计与管理, 2004, (1): 1-6. [Han Zhiyong, Wei Yiming, Fan Ying. Research on change features of Chinese energy intensity and economic structure. Application of Statistics and Management, 2004, (1): 1-6.]
- [33] 吴巧生, 成金华. 中国工业化中的能源消耗强度变动及因素分析: 基于分解模型的实证分析. 财经研究, 2006, (6): 75-85. [Wu Qiaosheng, Cheng Jinhua. Change in energy consumption intensity and the main factors during the process of China's Industrialization: An empirical analysis based on the Decomposition Model. Journal of Finance and Economics, 2006, (6): 75-85.]
- [34] 王玉潜. 能耗强度变动的因素分析方法及其应用. 数量经济技术经济研究, 2003, (8): 43-52. [Wang Yuqian. Factor analysis and its application of intensity fluctuation of China's energy consumption. Quantitative & Technical Economics, 2003, (8): 43-52.]
- [35] 董利. 我国能源效率变化趋势的影响因素分析. 产业经济研究, 2008, (1): 8-17. [Dong Li. Energy Intensity trend and its influential factors in China. Industrial Economics Research, 2008, (1): 8-17.]
- [36] 鲁学军, 周成虎, 张洪岩, 等. 地理空间的尺度—结构分析模式探讨. 地理科学进展, 2004, 23(2): 107-114. [Lu Xuejun, Zhou Chenhu, Zhang Hongyan, et al. Analytical scheme on scale-Structure of geographical space. Process in Geography, 2004, 23(2): 107-114.]
- [37] 徐建华. 计量地理学. 北京: 高等教育出版社, 2006. [Xu Jianhua. Quantitative geography. Beijing: Higher Education Press, 2006.]

Spatial-temporal variation of regional energy efficiency and its causes in China, 1990–2009

WANG Qiang^{1, 2, 3, 4}, FAN Jie^{2, 3}, WU Shidai¹

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper used DEA model and correlation method to calculate the energy efficiency of 31 regions including Taiwan from 1990 to 2009, and revealed the spatial-temporal variation. It also testified empirically the relations between energy efficiency and the industrial structure, the energy consumption structure, the technical progress and the degree of opening-up. Furthermore, the paper put forward the direction of policy-making for improving regional energy efficiency. The values of this paper was that it had provided advanced analytical tools and a research platform for Chinese economic researchers, also offered policies basis for the governments. The results showed: (1) as a whole, since the

1990s, there was a slow-growing trend of energy efficiency in Chinese mainland, but it was still at the middle level and lower than Taiwan. (2) As stimulus, large-scale investment of production factors played an even greater role in promoting energy efficiency than the progress of science and technology, but the latter had a greater impact on the extent of energy efficiency improvement. (3) In term of spatial differentiation, the energy efficiency was high and stable in the eastern region, but it was low and decreasing in the western region. Meanwhile, there was an increasing trend in the central and northeastern regions, especially, the northeastern region showed significant growing characteristics. According to the sequence from high to low, technical efficiency of the eastern region was the highest, and the central region took the second place, the northeastern region was the third one, and the western region was the lowest one. Scale efficiency differentiated obviously, the sequence from high to low could be given as below: the eastern region, the central region, the western region, and the northeastern region was the lowest that affected by the national market demand. (4) At two different scales of the national level and provincial level, the suitability and contribution of same factors showed obvious differences. At the national level, advance of science and technology, development of non-agriculture industries, growth of foreign trade, and dependence on coal were the main causes of changes in energy efficiency. Specifically, development of non-agriculture industries and dependence on coal promoted the growth of scale efficiency, while growth of foreign trade dragged increase of scale efficiency. The advance of science and technology and development of non-agriculture industries facilitated the promotion of technical efficiency. At the provincial level, only growth of foreign trade showed a positive correlation with energy efficiency. (5) In process of promoting energy efficiency in mainland China, three aspects should be correctly recognized, including industrial structure, the energy market reform and the development of foreign trade. On one hand, we should pursue development by taking a new road toward industrialization to improve the industrial structure and preserve energy resources, and should be committed to making efforts to diversify the energy mix and enhance the share of clean and renewable energy in order to meet the enormous energy requirements in the future. On the other hand, the proportion of energy embodied in the commodities China exports had been much higher than that for other countries for a long time, which was a challenge to China's energy security and sustainable development. From this point, in the medium and medium to long term, carbon emission tax and environmental tax should be designed and implemented to strengthen export control of energy-intensive products.

Key words: regional energy efficiency; Data Envelopment Analysis model; temporal and spatial differentiation; causes