



“一带一路”沿线主要国家碳生产率收敛性及其影响因素分析

李小平 王 洋

摘 要: 基于松弛的(Slack-Based Measure, SBM)方向性距离函数和全域 Malmquist-Luenberger 指数,对 1992—2014 年“一带一路”沿线主要国家的碳生产率及其收敛性进行测算,并对其影响因素进行实证分析后的研究发现:(1)各国总体的碳生产率总体呈增长趋势,效率进步是其变动的主要因素(年均增长 1.01%);(2)各国总体的碳生产率存在 σ 收敛和 β 收敛;(3)人均 GDP、对外开放度、工业化和投资率的提高是提高碳生产率的有效途径,固定资本占比、就业参与率、人均二氧化碳排放量、政府规模、城镇化进程和消耗能源碳含量对碳生产率的影响为负;因此“一带一路”沿线主要国家目前的主要重心是提高要素的配置效率,以开放促发展也是提升碳生产率的有效途径。

关键词: 一带一路; 碳生产率; δ 收敛; β 收敛

中图分类号: F17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7320(2017)03-0058-19

一、引 言

人类要实现可持续发展,就必须探索新型的绿色低碳发展路径,促成社会发展方式的根本性变革。低碳经济是一种新的发展模式,以低能耗、低污染、低排放为基础,目的是在保证经济增长、人民生活水平不断提高的前提下,降低 CO₂ 等温室气体的排放量。提高碳生产率是发展低碳经济的核心,亦是在可持续发展框架下应对气候变化的关键对策,对减少碳排放和保持经济持续增长具有重要意义。我国自 1978 年改革开放以来,经济长期保持高速增长,取得了人类经济史上从未有过的奇迹。如今我国人均收入正从全球中下游水平向第一世界国家水平迈进,在“一带一路”沿线国家中树立了典范。我国将充分发挥自身优势,不仅促进“一带一路”沿线国家基础设施建设互联互通,也促进各国间的贸易沟通和投资合作等。目前我国已成为全球最大货物贸易国、最大外汇储备国和最大吸收外资国,对外投资流量也位列全球第二位,与世界经济的融合正在进一步加深。“一带一路”沿线主要国家作为命运共同体,将成为未来世界上由于独特的市场一体化过程而拥有极强双边贸易增长力的地区之一;我国作为经济大国,需在世界发展和环境治理中承担更多责任。关于前者,我们的发展经验对发展中国家、转轨经济国家和新兴市场经济国家不仅具有理论意义,更具高度的实践价值,并足以提供切实可行的技术援助;关于后者,我们愿在发展的同时履行生态责任,并惠及尽可能多的国家。从 2002 年开始,我国受益于“清洁发展机制”,从发达国家引进了很多经济建设项目,如今作为发展中国家的龙头国家,我们有能力使其他发展中国家分享我国经济发展建设和“碳减排”项目技术创新的成果,实现发展中国家的共同发展、共同富裕。鉴于此,本文拟通过对“一带一路”沿线国家碳生产率收敛情况的分析,重点研究提高“一带一路”沿线国家碳生产率的实现路径,为全

球低碳经济发展提供政策建议。

二、文献综述

(一) 碳生产率的定义与测算方法

“碳生产率”(carbon productivity)的经济学涵义是在一定技术水平下,以最少的碳资源投入获得最大产出;其具体定义源于 Kaya & Yokobori(1997)的著作,他们提出以 GDP 与二氧化碳排放量的比值作为衡量碳生产率的指标。2008 年麦肯锡全球研究所(MGI)提出,可将碳生产率与劳动生产率、资本生产率同等看待。He Jiankun & Su Mingshan(2011:9-15)分析不同国家的碳生产率差异及影响因素,认为可用碳生产率的年增长率衡量一国为气候变化所做出的努力。

通常国家层面的碳生产率被定义为一段时期内一国 GDP 与同期碳排放量之比,是形成单位 GDP 的过程中消耗的碳排放强度的倒数,反映了单位二氧化碳排放产生的经济效益。此方法计算简便的优势显而易见,但缺点也不容忽视:包含的要素过少,从而忽略了其它生产要素的作用,在一定程度上不够严谨。目前,大部分学者都根据此界定方法衡量碳生产率。若要测算行业碳生产率,需要二氧化碳排放量数据,由于目前国内还未开始分地区、分行业的统计,多数文献采用 IPCC(2006)推荐的方法来估算 CO₂排放量(陈诗一,2009:41-55)。

近年来,学者开始尝试将其他方法应用于碳生产率的测算领域。随机前沿分析方法和数据包络分析(Data Envelopment Analysis,DEA)类线性规划方法均可测度效率,但前者存在缺点:要求设定无效项与生产函数(成本函数)的分布形式。而 DEA 方法则不需设定具体函数形式,并能够对生产率进行分解,因此用其测算全要素生产率渐成趋势,并有学者将其运用于对碳生产率的测算研究,力求在不需二次测算的前提下,减少误差可能性,计算相对准确的碳生产率数据。一般学界常用基于 DEA 模型的 Malmquist(M)指数法测算生产率,但 M 指数不考虑非期望产出,易导致测算偏误,为此 Chung 等(1997:229-240)提出了 Malmquist-Luenberger(ML)指数。ML 指数的缺陷在于:计算混合性方向性距离函数时,若 t+1 期的投入产出值在 t 期的技术条件下不可行,则当期 DEA 方法线性规划无解,且 t 期的投入产出值在 t+1 期的技术条件下亦可能无解。这会使测算结果缺乏稳定性,也可能使测算结果与实际的生产活动不相符。因此 Oh(2010:183-197)对参考技术集进行重新构造,发展了全域生产可能性集合,据此提出全域 ML 生产率指数(Global Malmquist-Luenberger,GML)。

(二) 碳生产率的影响因素研究

自碳生产率概念提出至今,学术界对其进行了多方面及不同深度的拓展研究。国外学者偏重于对碳强度问题的研究,对碳生产率分析的文献相对较少;对碳生产率的研究方面,主要集中于在低碳约束下,对碳生产率增长速度进行估算方面的研究。国内学者的研究主要集中于省际层面,将中国各省划分为东、中、西三个区域,分别进行区域整体的碳生产率计算和影响因素研究;研究内容基本分为两类:一类以区域划分为基础,一类以行业划分为基础,皆辅助多种研究方法,探索该领域碳生产率增长的影响因素。

1. 基于区域层面的分析

现有研究发现影响中国碳生产率变动的主要因素有很多,包括国民经济、技术先进性、能源消费结构和产业结构变动等,此外,FDI、R&D、空间集聚、贸易开放、资源错配程度、能源消费强度、城市化和人均 GDP 对区域碳生产率增长也起到积极的促进作用。

Meng Ming & Niu Dongxiao(2012:179-187)考察影响中国碳生产率变动的因素,发现技术创新的作用大于产业结构,分配地方政府责任、优化出口结构和淘汰落后工业产能对提高碳生产率非常重要。林善浪等(2013:36-45)采用我国省域面板数据,通过空间实证研究发现我国区域碳生产率有较强空间相关性,受空间集聚和产业结构的影响较大,技术创新的作用未充分发挥但正在增强(存在区域差别);碳生产率的提高受到制造业集聚不经济和产业结构的阻碍。张丽峰(2013:742-745)运用 LMDI 分解法将我国

东、中、西三大区域的碳生产率总体变动分解为能源效率、碳排放能耗和碳排放结构 3 个影响因素,发现我国碳生产率呈上升趋势、主要影响因素是能源的使用效率,因此为提高我国碳生产率,应提高区域能源效率、改善区域碳排放结构。赵皋(2014:70-74)通过面板单位根和面板协整方法考察发现,FDI、贸易开放、城市化和人均 GDP 对碳生产率增长起促进作用,第二产业占比增加则起抑制作用。赵皋、费能云(2014:187-190)通过我国省际面板数据发现 FDI、R&D 和人均 GDP 对碳生产率起促进作用且前二者有显著的联合影响,产业结构与能源强度的影响则为负,且不同因素的影响力存在区域差异,因此各区域提升碳生产率水平时应各有侧重。Meng Ming 等(2014:250-255)认为应做到三点以提高中国碳生产率:减缓二氧化碳排放总量的增长速度;敦促省级政府落实降低二氧化碳排放增速的政策;各省在制定政策时应结合其地理区位和经济发展速度,由此确定发展模式、控制碳排放量的降低。邓晓兰和鄢哲明(2014:74-83)考察资源错配程度变化对工业低碳生产率的影响,发现资源错配程度的减轻和加剧,分别显著促进和阻碍了低碳生产率进步。Jianchang Lu 等(2015:3093-3117)采用对数平均迪氏指数法(LMDI),分别从影响因素、区域结构和产业结构层面分析影响中国碳生产率的要素,研究表明经济总量、省际碳生产率和能源结构是影响力最大的因素;由于存在地方保护主义,需要考虑地区的实际情况;由于产业结构调整还未完善,产业贡献值是我国碳生产率的最重要影响因素。

2. 基于产业层面的分析

饶畅(2013:81-86)通过研究认为,碳生产率与制造业服务化之间存在非线性“U”形关系:制造业服务化上升对碳生产率的短期影响为负,但长期影响为正,因此在总体上提高了制造业的碳生产率。周五七和武戈等(2013:38-47)在考虑能源与碳排放的全要素分析框架下研究得出,技术效率和技术进步对工业碳生产率增长均起积极影响(前者的影响力大于后者),因此在发挥技术进步的促进作用的同时,也要重视提升技术效率的推动作用。在此基础上,周五七(2014:63-69)发现重工业的技术效率与技术进步对碳生产率增长的促进效应高于轻工业。Lu Zhengnan 等(2014:1893-1896)研究了中国八大主要行业的低碳发展情况,并采用拉氏指数(Laspeyres index)分解方法分析碳生产率变化的特点和产业结构的来源,研究表明中国碳生产率增长主要来自行业生产效率,而结构因素起阻碍作用;农业和制造业二者作为结构因素、效率因素时分别对碳生产率提高起抑制、促进作用;服务业作为结构因素具有更强的促进作用。郭炳南等(2014:148-158)分析了中国工业行业碳生产率的总体特征和分要素密集型行业碳生产率的差异,发现总体碳生产率呈增长态势但行业间存在显著差异,影响因素对资本技术、劳动力和资源密集型行业的影响程度有所不同。路正南等(2014:82-90)的研究表明,低碳技术进步是驱动碳生产率增长的主导因素,不合理的碳排放结构阻碍了低碳经济的发展;低碳技术先进的行业部门碳排放空间不足是导致碳生产率增长缓慢的根本原因,从行业角度看,各部门碳排放结构调整和低碳技术进步对碳生产率变动的贡献程度有所不同;之后路正南等(2015:234-238)研究产业系统的碳生产率变动时,通过拉氏因素分解法(Laspeyres Decomposition),定量影响因素、分析碳生产率的增长渠道。结果表明,碳生产率增长的主导因素是低碳技术进步;就变动趋势而言,技术进步的贡献值在逐步降低,而结构优化的贡献值在逐渐上升。

3. 碳生产率的收敛性研究

学界对生产率收敛性的研究始于新古典增长模型(即索罗-斯旺模型, Solow-Swan Model)(Solow, 1956:65-94; Swan, 1956:334-361),该模型认为初始状态下人均收入与资本禀赋间的差异在长期将随着经济增长率的下降而逐步缩小,终至消失,此时经济状态为稳态。能源生产率收敛性的研究是近年来的研究热点。Strazicich & List(2003:263-271)对 OECD 国家的 CO₂ 排放量的收敛性进行探索后, Miketa & Mulder(2005:429-453)研究了 56 国制造业部门的能源生产率,发现其差距呈缩小趋势,且初始水平较低的国家的增长率相对较高。继其之后, Mulder & Groot(2007:85-112)选取 14 个 OECD 国家,对其能源-劳动生产率的收敛性进行分析,发现相对落后国家与相对领先国家之间的能源生产率差距呈缩小趋势。类似研究还有 Aldy(2006:533-555)、Westerlund & Basher(2008:109-120)、Liddle(2009:1470-1478; 2010:3218-

3225)、Mulder & Groot(2012:1910-1921)和 Wana & Mulder(2015:253-264)等,均对 OECD 等国家组的能源生产率收敛性进行探索。国内学者杨正林和方齐云(2008:17-30)等也研究了能源生产率的收敛性,其中多数文献研究的侧重点是测算和比较能源生产率(魏楚、沈满洪,2007:66-76;张少华、蒋伟杰,2014:54-60)。

碳生产率正逐渐成为发展中国家经济发展的重要指标(Mielnik & Goldemberg,1999:307-308)。目前学界对碳生产率的收敛相关研究不多,Strazicich & List(2003:263-271)首次研究了二氧化碳排放量的收敛性,其样本区间为 1960—1997 年,研究对象为 21 个 OECD 国家,发现它们的二氧化碳排放量呈收敛性。Aldy(2006:533-555)则发现 88 个国家的二氧化碳排放趋势为扩散性。Westerlund & Basher(2008:109-120)的研究样本同时包括了发达国家和发展中国家(国家数分别为 16 和 12 个),发现两类国家的二氧化碳排放量均呈现收敛趋势。国内学者对碳生产率收敛性的近年研究可概括为三方面:首先是分析特定区域内的碳生产率的收敛性。潘家华和张丽峰(2011:47-57)分析我国省际碳生产率时发现其在大部分省份呈上升趋势,但彭文强和赵凯(2012:16-22)、杨骞和刘华军(2012:87-98)的研究表明碳生产率的收敛趋势存在明显的区域差异;张成等(2013:18-30)指出全国和东、中、西地区及各省的碳生产率均存在显著的条件 β 收敛,全国碳生产率存在“U”形 σ 收敛,但碳生产率的增长速度相对滞后于经济增长。沈能等(2013:40-47)发现我国碳生产率存在空间条件 β 趋同,且其连续性和粘滞性有空间差异性——在邻近地域表现明显并存在很强的局部集聚特征;二是对影响碳生产率增长趋势的因素进行分析:林善浪等(2013:36-45)发现阻碍中国碳生产率增长的主要因素是制造业的集聚不经济与产业结构水平较低;张成等(2014:41-47)认为,碳生产率增长率的变化主要受三个分解变量的影响:技术进步效应、资本—能源替代效应和劳动—能源替代效应(前两者的效应为正,最后一者的效应为负);第三类文献引用全要素生产率的测算方法,对碳生产率进行测算,其中 CO_2 或作为投入变量,或作为“坏”产出变量;赵国浩和高文静(2013:31-36)量化了广义碳生产率,通过基于方向性距离函数的 DEA 方法,发现中国工业部门的广义碳生产率水平整体呈下降趋势,导致此结果的主要原因是技术效率和规模效率低下;张巍钰(2014:74-78)研究发现产业结构优化对碳生产率的影响呈现区域差异:可以促进全国层面的碳生产率,而在分区域层面,相较于中、西部地区,东部地区更加显著;杨翔等(2015:3-20)采用 DEA 分析方法对中国 26 个制造业行业层面的碳生产率收敛性进行测算并分析其收敛性,发现制造业的碳生产率整体呈增长趋势并存在 σ 收敛和 β 收敛,不同分类的行业的收敛特征有所不同。

提高碳生产率是世界各国应对低碳约束的必由之路。因此,如何提高碳生产率以及碳生产率变动的经济效应成为学术界所关注的重要课题。现有文献为本文研究低碳约束下碳生产率变动的影响因素提供了很好的研究基础。本文的主要贡献在于:第一,在国家实施“一带一路”战略的指引下,分析沿线主要国家整体的影响因素对碳生产率变动,进而对经济发展的影响,存在着较大的研究空间。目前学界对碳生产率测算和收敛的研究均尚未延伸到“一带一路”领域,我们对“一带一路”沿线主要国家的碳生产率收敛性及其主要影响因素进行了分析,因此本文的分析具有较强的理论和现实意义。第二,本文得到了一些有关“一带一路”沿线国家的很有意义的结论,并提出了对应的政策建议。

三、碳生产率测算与样本选取

本文借鉴杨翔等(2015:3-20)的方法,采用 SBM 方向性距离函数和 GML 指数,对样本时间段内“一带一路”沿线主要国家的碳生产率进行测算。下面我们对测算方法进行详细说明。

(一) 碳生产率的测算方法

1. 全域生产可能性集

本文将各国分别视为独立的生产决策单位(DMU),由此构造“一带一路”沿线主要 55 国历年的生产最佳实践边界。根据 Färe 等(2007:1055-1066)的思路,假设每国使用 N 种投入要素 $x=(x_1, \dots, x_N) \in R_+^N$, 产生 M 种“好”产出 $y=(y_1, \dots, y_M) \in R_+^M$ 和 I 种“坏”产出 $b=(b_1, \dots, b_I) \in R_+^I$ 。设每个时期为 $t=1, 2, \dots, T$, $t=1, \dots, T$ 每个国家为

$k=1,2,\dots,K, k=1,\dots,K$, 则 k 国在 t 时期的投入和产出值可表示为 $(x^{k,t}, y^{k,t}, b^{k,t})$ 。

生产可能性集满足如下假设:(1)闭集和有界集;(2)“好”产出具有强可处置性,投入有自由可处置性;(3)产出具有联合弱可处置性;(4)零结合公理,即没有“坏”产出就没有“好”产出。运用 DEA 方法可以将当期的生产可能性集表示如下:

$$P^t(x^t) = \{ (y^t, b^t) : \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq y_{km}^t, \forall m; \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t = b_{ki}^t, \forall i; \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_{kn}^t, \forall n; \sum_{k=1}^K z_k^t = 1, z_k^t > 0, \forall k \} \tag{1}$$

式中, z_k^t 为每个横截面观察值的权重,若 $\sum_{k=1}^K z_k^t = 1$ 且 $z_k^t \geq 0$, 则表示生产技术为规模报酬可变(VRS);若 $z_k^t \geq 0$, 则表示规模报酬不变(CRS)。GML 指数需要将当期生产可能性集 $P^t(x^t)$ 替换为全域生产可能性集 $P^G(x)$, $P^G(x) = P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \dots \cup P^T(x^T)$ $P^G(x) = P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \dots \cup P^T(x^T)$, 运用 DEA 方法可表示为:

$$P^G(x) = \{ (y^t, b^t) : \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq y_{km}^t, \forall m; \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t = b_{ki}^t, \forall i; \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_{kn}^t, \forall n; \sum_{k=1}^K z_k^t = 1, z_k^t \geq 0, \forall k \} \tag{2}$$

2. 全域 SBM 方向性距离函数

借鉴 Fukuyama & Weber(2009:274-287)的方法,本文将考虑 CO₂ 排放的全域 SBM 方向性距离函数定义为:

$$S_V^G(x^{t,k'}, y^{t,k'}, b^{t,k'}, g^x, g^y, g^b) = \max_{s^x, s^y, s^b} \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n^x}{g_n^x} + \frac{1}{M+I} (\sum_{m=1}^M \frac{s_m^y}{g_m^y} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^b}{g_i^b})}{2} \tag{3}$$

$$s.t. \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t + s_n^x = x_{kn}^t, \forall n; \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t - s_m^y = y_{km}^t, \forall m; \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t + s_i^b = b_{ki}^t, \forall i;$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^t = 1, z_k^t \geq 0, \forall k; s_n^x \geq 0, \forall n; s_m^y \geq 0, \forall m; s_i^b \geq 0, \forall i$$

式中, $x^{t,k'}$ 、 $y^{t,k'}$ 和 $b^{t,k'}$ 分别表示 t 期 k 国的投入、“好”产出和“坏”产出的向量, g^x 、 g^y 和 g^b 分别表示投入减少、“好”产出增加和“坏”产出减少的方向向量, s_n^x 、 s_m^y 和 s_i^b 分别表示投入、“好”产出和“坏”产出的松弛向量, s_n^x 和 s_i^b 为正表示实际的投入和“坏”产出大于边界的投入和产出, s_m^y 为正则表示实际产出则小于边界的产出,因此, s_n^x 、 s_m^y 和 s_i^b 分别表示投入过度、“好”产出不足以及“坏”产出过多的量(王兵等, 2010:95-109)。

3. GML 指数

本文进一步引入 GML 指数来衡量各国的碳生产率。遵循 Oh(2010:183-197)的思路,本文的 GML 指数以全域 SBM 方向性距离函数为基础,表示为:

$$GML_t^{t+1} = \frac{1 + S_V^G(x^t, y^t, b^t; g)}{1 + S_V^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)} \tag{4}$$

GML_t^{t+1} 指数大于 1、小于 1 和等于 1 分别表示从 t 到 $t+1$ 时期碳生产率增长、下降和不变。GML_t^{t+1} 指数可分解为全域效率变化指数(GEFFCH_t^{t+1})和全域技术变化指数(GTECH_t^{t+1})的乘积^①, 本文将从该分解中探究碳生产率变动的来源, GML 指数的具体分解如下:

$$GML_t^{t+1} = GEFCH_t^{t+1} \times GTECH_t^{t+1}$$

① 由于 GML 指数以各期的总和作为参考集, 相邻的两期在计算时参考的是同一全局前沿, 不存在前沿交叉, 所以 GML 指数只能分解为效率变化和技术变化两类指数, 而不能进行进一步的细分。

$$\text{GEFFCH}_t^{t+1} = \frac{1 + S_V^t(x^t, y^t, b^t; g)}{1 + S_V^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)}$$

$$\text{GTECH}_t^{t+1} = \frac{[1 + S_V^t(x^t, y^t, b^t; g)] / [1 + S_V^t(x^t, y^t, b^t; g)]}{[1 + S_V^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)] / [1 + S_V^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)]} \quad (5)$$

式中, GEFFCH_t^{t+1} 和 GTECH_t^{t+1} 指数大于(小于)1 分别表示从 t 到 $t+1$ 时期效率提高(降低)和技术进步(退步)。

本文以劳动、资本和能源作为生产要素的投入变量, 国民生产总值(GDP)作为期望产出变量, CO_2 排放量作为非期望产出变量, 通过 SBM 方向性距离函数和 GML 指数, 对“一带一路”沿线样本国家的碳生产率进行测算。

(二) DEA 方法测算碳生产率的数据来源

基于数据包络分析方法(DEA)估计碳生产率时, 需要的数据包括三种投入要素与两种产出要素。按照上述理论方法, 本文需要“一带一路”样本国家在样本时间段内“好”产出、“坏”产出以及生产投入要素的基础数据。我们选取的三种投入要素分别为劳动、资本与能源, 两种产出要素分别为“好产出”GDP与“坏产出”二氧化碳排放量(王兵等, 2010: 95-109)。这些基础数据主要来源于世界银行、Penn World Table 数据库和美国能源署。具体如下:

1. 投入要素

(1) 劳动力总数(Labor): 包括所有年满 15 周岁、符合国际劳工组织对从事经济活动人口所作定义的群体: 所有在特定阶段为货物和服务的生产提供劳力的人员。数据来源为世界银行数据库。

(2) 资本存量(Capital): 衡量标准为 2011 年不变价美元, 数据来源为 Penn World Table 数据库。

(3) 能源使用量(Energy): 本文所采用的指标为初级能源消费总量。由于无以千吨煤为单位的的数据, 所以我们使用美国能源署的相关指标数据——Toal Primary Energy Consumption, 初级能源消费总量, 单位为千兆英热(quadrillion BTU)。数据来源为美国能源署。

2. 产出要素

(1) “好”产出(GDP): 常用指标有国内生产总值、地区生产总值、工业增加值等, 本文选择 GDP 总量(衡量标准为 2005 年不变价美元)。数据来源: 世界银行数据库。

(2) “坏”产出(CO_2): 常用指标有 SO_2 排放量、化学需氧量、 CO_2 排放量等, 本文选择二氧化碳排放总量。数据来源于美国能源署。

各测算指标的描述性统计情况如表 1 所示。

表 1 测算碳生产率的投入产出指标的描述性统计情况

变量	变量含义	单位	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
CO_2	CO_2 排放总量	百万吨	1265	221.6485	805.3926	0.1296	9222.336
GDP	GDP 总量	2005 年不变价美元	1265	1.37e+11	3.95e+11	3.59e+08	5.27e+12
Labor	劳动力总数	人	1265	3.33e+07	1.14e+08	118033	8.06e+08
Energy	能源消耗总量	千兆英热	1265	3.209062	10.5302	0.0077	119.5335
Capital	资本存量	百万 2011 年不变价美元	1265	1261593	4444321	4410.485	6.94e+07

注: $e+n$ 为科学计数法形式, 意味着 10 的 n 次方。

根据上述思路, 表 2 给出了基于 GML 指数的 1993—2014 年“一带一路”沿线 55 国的效率变化指数、技术变化指数和平均碳生产率。本文发现: (1) 各国的碳生产率呈增长的趋势。除 21 个国家外, 另 34 个国家的平均碳生产率均大于等于 1, 说明这 55 个国家整体上的碳生产率呈增长趋势。(2) 通过比较效率变化指数和技术变化指数的数值, 我们认为从整体来看, 55 国碳生产率的提高主要得益于效率变化因素。原因是除 20 国外, 另 35 个国家的效率变化指数均大于其技术变化指数, 而且总体来看, 效

率变化的年均增长率亦大于技术变化的年均增长率(分别为 1.01% 和 0.99%)。由此我们认为,效率进步是推动 55 国碳生产率增长的主要因素。

表 2 1993—2014 年各国的 3 类指标数据

国家	效率变化指数	技术变化指数	碳生产率平均数	国家	效率变化指数	技术变化指数	碳生产率平均数
ALB	1.037278	0.987025	1.023819	LKA	0.98712	1.009897	0.99689
ARM	1.100567	0.946658	1.04186	LTU	1.061859	0.991696	1.05304
AZE	1.101742	0.94592	1.04216	LVA	1.061889	0.995754	1.05738
BGD	0.957861	1.017426	0.974553	MDA	1.06713	0.95921	1.023602
BGR	1.013193	0.986328	0.999341	MKD	1.018639	0.976917	0.995125
BIH	1.026243	0.982489	1.008272	MNG	1.007944	0.968868	0.976565
BLR	1.070674	0.985195	1.054823	MYS	1.014265	0.986292	1.000361
BRN	1	0.963288	0.963288	NPL	0.963444	0.991694	0.955442
BTN	1	0.956782	0.956782	OMN	0.955406	0.986016	0.942045
CHN	1	1.065819	1.065819	PAK	0.999745	0.991839	0.991586
CYP	1	1.010078	1.010078	PHL	1.009983	0.993866	1.003788
CZE	1.022126	0.993204	1.01518	POL	1.045495	0.991788	1.03691
EGY	0.940223	1.01564	0.954929	ROU	1.019909	0.997487	1.017346
EST	1.049926	1	1.049926	RUS	1	1.063453	1.063453
GEO	1.072597	0.967001	1.037203	SAU	1	1.027779	1.027779
GRC	1	1.006323	1.006323	SGP	1	1.018891	1.018891
HRV	1.011963	0.995533	1.007442	SVK	1.050069	1.003564	1.053811
HUN	1.016706	0.994406	1.011018	SVN	1.024038	1.003372	1.027491
IDN	0.980623	0.999429	0.980063	SYR	0.959535	1.007141	0.966387
IND	1.015985	1.058845	1.075771	THA	0.991707	0.987687	0.979496
IRN	0.985811	0.989953	0.975907	TJK	1.034569	0.968699	1.002186
IRQ	1.048994	0.987584	1.03597	TKM	1.01007	0.983766	0.993673
JOR	0.993537	0.991705	0.985295	TUR	1	1.007539	1.007539
KAZ	1.037341	0.99346	1.030557	UKR	1.012276	0.990562	1.002722
KGZ	1.105848	0.912785	1.009402	UZB	1.040803	0.970095	1.009678
KHM	0.977126	0.98913	0.966504	VNM	0.975163	0.990996	0.966383
LAO	1	1	1	YEM	0.939169	0.990903	0.930625
LBN	0.982336	0.992569	0.975036				

注:表中 ALB、ARM、...、UZB、VNM 为国际通用的国家代码。

(三) 本文选取研究样本的原因及过程

1. 样本国家的选取

由于“一带一路”是我国提出的国际性倡议,而非确定性文件,因此我国政府尚未明确列出国家名单,但学界对此有基本共识(约 64 或 65 个国家)。我们选取的国家数量为 65 个,因此包含中国在内,共 66 个国家。在实证分析中,7 个国家(分别为巴勒斯坦、缅甸、塞尔维亚、黑山、阿富汗、马尔代夫、卡塔尔)的大部分相关数据有严重缺失,有的甚至无法进行有效的补数据处理;而由于工业增加值占 GDP 比例的数据所限,进一步删除 4 个国家(阿联酋、巴林、以色列和科威特),因此我们在分析碳生产率的收敛性时的样本国家为 55 个。

2. 样本时间段的选取

在本文选取的国家中,有 15 个国家曾经隶属于前苏联。前苏联于 1991 年解体后,各国际组织数据库统计这 15 个国家的数据指标时,均从 1992 年开始统计。另外,1992 年联合国政府间谈判委员会就气候变化问题达成并通过了《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC),成为世界上第一个围绕全球气候变化问题进行国际合作的公约,旨在全面控制二氧化碳等温室气体的排放,以应对全球变暖的负社会效应。同时此《公约》亦被视为各国进行国际合作的基本框架。因此,1992 年可视为全球正式治理温室效应的里程碑。因此,我们将样本时间段的起始年度选定于 1992 年。对于截止年份,由于数据所限,将其选定于 2014 年。综上,本文所选取的样本时间段为 1992—2014 年。

四、碳生产率收敛的实证分析

(一) 数据来源与指标构建

由于碳生产率与全要素生产率相似,在某种程度上可视为扣除“有形”的要素投入量之后与产出相关的剩余部分,因此我们参考白重恩和张琼(2015:3-28)的做法,将影响碳生产率的要素使用效率分为两方面的三类影响因素:第一方面为要素投入的有效使用率变动,导致在名义要素投入量不变的情况下,产出发生变动;此类因素与要素生产力整体提高有关,我们将其归为“X-”效率因素(Leibenstein, 1966:392-415)。第二方面为单位要素的生产力变动,从而导致要素的名义投入量与实际有效使用量不变的情况下,产出水平变动。此方面因素可细分为两类:第一类的前提为生产能力提升,体现为要素的整体生产力提高,此类因素与要素有效使用量有关,我们将其归为“要素有效使用”因素;第二类的前提为技术效率提高,体现为要素的区域性生产力差异导致要素配置结构变动,单位要素的总生产力提高,此类因素与要素配置结构有关,我们将其归为“配置效率”因素。

在使用数据包络分析法得到各国 1993—2014 年的各年碳生产率估计值后,我们用下式所示的面板数据分析框架来识别上述三类因素对碳生产率(以 CP 表示)的影响(以下如无特殊说明,下标 i 与 t 分别表示国家与年份):

$$CP_{it} = (\underbrace{\varphi_{it} TE_{1,it} + \varphi_{it} TE_{2,it} + \dots}_{\text{“X-效率”因素}}) + (\underbrace{\varphi_{it} EU_{1,it} + \varphi_{it} EU_{2,it} + \dots}_{\text{“要素有效使用”因素}}) + (\underbrace{\gamma_{it} AE_{1,it} + \gamma_{it} AE_{2,it} + \dots}_{\text{“配置效率”因素}}) + \Gamma X + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

其中,向量 X 主要包括年份或国家等表征的年份或地区。

如前文所述,我们将碳生产率的影响因素概括为三个方面:第一类“X-”效率因素与要素生产力整体提高有关、第二类“要素有效使用”因素与要素有效使用量有关、第三类“配置效率”因素与要素配置结构有关。因此,以下识别碳生产率影响因素的过程围绕此三类因素展开(对于缺失的数据,我们采用多重补漏分析法进行补充):

对于第一类因素:“X-”效率因素,我们考虑两个指标:“人均 GDP”和“对外开放度”。

1. “人均 GDP”(perGDP):GDP 可以代表一国的发展程度,但由于各国的人口数量大不相同,所以此指标的反映不够全面,我们选择人均 GDP。数据来源:世界银行数据库。

2. “对外开放度”(Ftd):对此我们以“对外依存度”来衡量,这一指标被定义为“贸易额与国家生产总值(GDP)之比”,其中贸易额是指货物和服务的进出口额在国民生产总值中的份额。数据来源:世界银行数据库。

对于第二类因素:“要素有效使用”因素,我们主要考虑三个指标:“(物质)资本闲置率”、“就业参与率”和“人均二氧化碳排放量”。

1. 我们用“固定资本形成总额(占 GDP 的百分比)”(Inventory)近似度量(物质)资本闲置率(固定

资本形成总额以前称为国内固定投资总额)。数据来源:世界银行数据库。

2. 我们用“劳动力参与率”(Eir)代替“就业参与率”指标:出于对实际劳动有效率的考量,我们在“劳动力参与率,总数(占15岁以上总人口的百分比)”与“劳动力参与率,总数(占15~64岁总人口的百分比)”中选择后者作为衡量指标。数据来源:世界银行数据库。

3. “人均二氧化碳排放量”指标(perCO₂):指标单位为“人均公吨数”。为与DEA方法涉及的“二氧化碳排放总量”相匹配,我们用美国能源署“二氧化碳排放总量”数据,除以世界银行的“人口,总数”数据,得到“人均CO₂排放量”的数据。数据来源:美国能源署、世界银行数据库。

对于第三类因素:“配置效率”因素,我们主要考虑“政府规模”、“城镇化进程”、“产业结构”、“投资率”与“能源消费结构”。其中,“政府规模”指标用以度量政府对经济的干预程度,“城镇化进程”用以度量劳动力要素在各国国土中的流动程度及各国的现代化进程,“产业结构变动”指标用以度量各国三次产业中与碳排放量最密切相关的第二产业规模,“投资率”指标用以度量资本深化与物化技术程度,“能源消费结构”用以度量国别碳排放强度。

1. 对于“政府规模”指标(Gov),我们参考文献的通常做法,用“一般政府最终消费支出(占GDP的百分比)”来进行衡量。数据来源:世界银行数据库。

2. 由于“一带一路”沿线主要国家中非高收入国家数量占比达70.91%(对国家收入类型的划分依据:世界银行),因此考虑到国家的发展程度不一,我们用城市化指标衡量国别现代化程度差异。“城镇化进程”的衡量指标为“城市化率”,对此我们用“城镇人口(占总人口比例)”(Urb)近似度量。数据来源:世界银行数据库。

3. 我们用“第二产业规模变化”近似度量“产业结构”(Ind):这一指标被定义为“工业增加值与国家生产总值GDP(均以2005年不变价美元计)之比”。数据来源:世界银行数据库、联合国数据库。关于指标来源数据库的选取:在世界银行数据库和联合国数据库均有此指标数据,由于本文中大部分指标的来源是世界银行,因此为保持数据统计口径来源的一致性,我们选择了世界银行作为该指标数据的主体来源,然后对其通过多重补漏分析法进行补齐。对于在补充数据后仍有数据缺失的国家,我们用联合国数据库的相应数据进行再次补齐。

4. “投资率”(inv_rate)指标包括“国外投资”与“国内投资”两部分:

“国外投资”的衡量指标即“外商直接投资”(FDI),我们用“外国直接投资净流入(占GDP的百分比)”近似度量。数据来源:世界银行数据库。

“国内投资”定义为“资本形成总额(占GDP的百分比)”(Dom)(资本形成总额以前称为国内投资总额),数据来源:世界银行数据库。

5. 对于“能源消费结构”(Eng)这一指标,我们的衡量过程与测算过程如下:学界对能源消费和碳生产率的相关研究中,选取的研究样本多集中于一国范围的分区域、世界范围的分区域或相近层面的国家地区组。以如此方式选取的样本,其资源禀赋由于地理环境的高度相似而通常极为接近,这导致样本的能源消费结构极为接近,因此可以采用某种能源占总能源的比重来反映该指标,而且这一指标通常为煤炭消耗量占总能源消耗量之比。“一带一路”沿线主要国家横跨欧、亚、非三大洲,其资源禀赋截然不同,可归类为煤炭、石油和天然气(数据来源:美国能源署)。根据本文的研究对象——碳生产率的定义,我们将“能源消费结构”转化为“消耗能源中的碳含量”。具体计算过程:我们在联合国政府间气候变化专门委员会的碳排放因子数据库(Emission Factor Database, EFDB)中查找普适性缺省因子和各国在实践工作中采用的数据,然后我们在《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的《能源》卷中查找我们需要的计算指标,之后将计算得出的各燃料碳排放系数乘以各国该燃料消耗量与总能源消耗量之比。

由于IPCC的低位发热量指标中没有中国的指标,且推荐采用的缺省值较大,若按推荐的缺省值计算,会在很大程度上夸大我国的碳排放量,因此在测算中凡涉及到我国的能源系数,我们均选取《中国能源统计年鉴2014》中的国家标准,并结合中国国家标准GB/T 2589—2008《综合能耗计算通则》选取平

均低位发热量系数。

(二) 碳生产率收敛的实证分析

1. 实证检验方法的说明

常用的收敛分析方法一般有三种： σ 收敛、绝对 β 收敛和条件 β 收敛(Baumol & Oates, 1988; Ray, 1988; 34-39; Sala-i-Martin, 1996: 1019; 沈坤荣、马俊, 2002: 33-39+94-95; 林光平等, 2006: 14-21+69), 其中 σ 收敛和绝对 β 收敛属于绝对收敛(Quah, 1996: 1353-1375)。检验 σ 收敛的重要指标是离散程度, 该收敛存在的标志即是碳生产率的离散程度呈缩小趋势。本文选用标准差、变异系数和 σ 系数来分析“一带一路”主要国家的碳生产率的离散程度, 三种系数的计算公式如下所示:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (CP_i - \overline{CP})^2}{N}} \quad CV = \frac{S}{\overline{CP}} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln CP_i - \overline{\ln CP})^2}{N}} \quad (7)$$

式中, i 为国家, S 代表标准差, CV 代表变异系数, σ 代表 σ 系数, CP 代表碳生产率, \overline{CP} 代表碳生产率的均值, N 代表国家总数, \ln 表示取自然对数。

绝对 β 收敛是指各国的碳生产率呈现完全相同的稳态增长, 且低碳生产率的国家的增长速度快于高碳生产率的国家的。碳生产率的绝对 β 收敛模型可表示为:

$$g_{i,t+1} = \alpha + \beta \ln CP_{i,t} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

式中, i 为国家, t 为时间, $\ln CP_{i,t}$ 为 i 国 t 年的碳生产率的对数形式, $g_{i,t+1}$ 为 i 国碳生产率在 $t+1$ 时段内的平均增长率, 即 $\frac{\ln CP_{i,t+1} - \ln CP_{i,0}}{t+1}$, 其中 $\ln CP_{i,0}$ 为基期碳生产率, $t \in [0, 21]$, $t+1$ 代表观察的时间跨度。 α 为截距项, β 为基期碳生产率的回归系数, η_i 、 μ_t 和 $\varepsilon_{i,t}$ 分别表示反映各国家差异的个体效应、随时间变化的时间效应与其他干扰项。当回归系数 β 显著为负时, 则表明存在绝对 β 收敛。

条件 β 收敛是指由于各国的特性不同, 其各自拥有的稳态水平也不相同, 在长期中, 碳生产率水平将向各自的稳态水平趋近。碳生产率的初始水平是影响碳生产率平均增长率的因素之一, 在绝对 β 收敛模型的基础上加入其它有影响作用的条件变量, 即构建条件 β 收敛模型。本文在借鉴 Miketa & Mulder(2005: 429-453)和 Wana & Mulder(2015: 253-264)对国家层面、行业层面的能源生产率所进行收敛分析的基础上, 构建了如下条件 β 收敛模型:

$$g_{i,t+1} = \alpha + \beta \ln CP_{i,t} + \gamma \text{perGDP}_{i,t} + \lambda \text{FTD}_{i,t} + \dots + \varphi \text{ENG}_{i,t} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

式中的 γ 、 λ 和 φ 等分别为人均 GDP、对外开放度和消耗能源碳含量等影响因素的回归系数, 其他变量与绝对 β 收敛模型相同。当回归系数 β 显著为负时, 则表明存在条件 β 收敛。

关于数据的选取, 笔者首先尝试使用各指标的直接数据(即表示比重的百分比型数据), 但其在碳生产率收敛的检验中的结果非常不显著且与直观预测结果相背离, 原因在于 g 属于增长率类型的指标, 而我们原先选取的指标均属相对量, 将这两类不同类型的指标直接进行回归不仅易导致估计结果出现偏误, 而且不符合经济学含义, 结论在很大程度上有失偏颇。因此, 本文最终选取 11 个变量的增长率作为代理变量代入计量模型中。

条件 β 收敛检验部分各测算指标的描述性统计情况如表 3 所示。

选择估计方法时, 笔者选择 Hausman 检验方法, 它是常用的检验绝对 β 收敛的方法。Hausman 检验是学界认可度很高的模型检验方法, 但该方法在估计条件 β 收敛模型时较可能存在内生性问题及遗漏变量。为解决这两个问题, 可使用动态面板一阶差分 GMM 估计法, 或系统 GMM 估计法(彭国华, 2005: 19-29)。综上, 借鉴学界的通用做法, 我们检验绝对 β 收敛、条件 β 收敛的模型时使用的方法如下: (1) 对于绝对 β 收敛模型, 我们使用 Hausman 检验方法; (2) 对于条件 β 收敛模型, 我们使用基于 Hausman 检验的面板数据估计方法、动态面板一阶差分 GMM 估计法和系统 GMM 估计法。

2. σ 收敛检验

我们希望尽可能全面地反映“一带一路”沿线主要国家的碳生产率收敛情况,因此我们将所有可以通过 DEA 方法测算出碳生产率的国家全部进行 σ 收敛分析。图 1 中的三个小图分别为 1993—2014 年“一带一路”沿线主要国家的碳生产率的标准差、变异系数和 σ 系数的变动情况。

表 3 碳生产率收敛检验的主要变量描述性统计情况

变量	单位	变量含义	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
g	—	碳生产率的平均增长率	1155	-0.0000	0.0295	-0.2491	0.2989
lnCP	—	碳生产率的对数	1155	0.0050	0.1086	-0.8151	0.8237
perGDP	%	人均 GDP 的增长率	1155	120.9307	188.2698	-524.2968	1455.374
Ftd	%	对外开放度的增长率	1155	1.2984	6.0518	-78.0681	48.2637
Inventory	%	(物质)资本闲置率的增长率	1155	0.2264	1.1740	-4.5987	12.5857
Eir	%	就业参与率的增长率	1155	-0.0859	0.4780	-2.7000	6.2000
perCO ₂	%	人均 CO ₂ 排放量的增长率	1155	0.0117	0.2731	-3.2395	1.3451
Gov	%	政府规模的增长率	1155	-0.1848	0.8548	-8.6652	7.0227
Urb	%	城镇化进程的增长率	1155	0.2107	0.3697	-0.5510	1.2930
Ind	%	产业结构的增长率	1155	0.0700	1.5659	-21.9542	9.4559
FDI	%	国外投资率的增长率	1155	0.1620	0.8689	-16.4419	4.9119
Dom	%	国内投资率的增长率	1155	0.0696	1.8900	-26.9736	13.5779
Eng	%	消耗能源的碳含量的增长率	1155	-0.1377	1.0962	-12.2715	7.2553

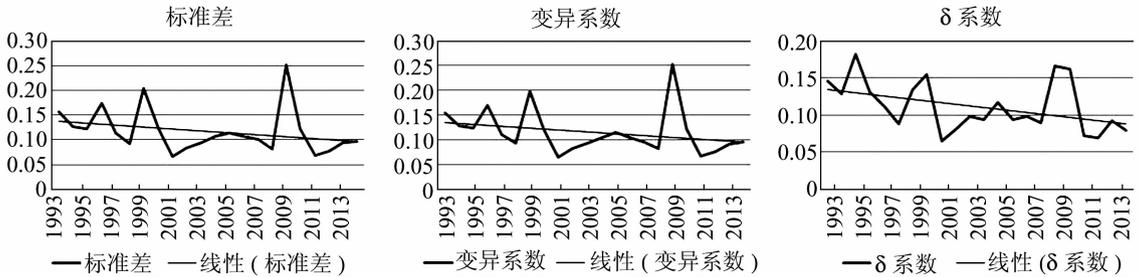


图 1

由图 1 可见,三种系数呈现相似的波动特征,均为“在波动中下降-骤升-再次下降”的变动趋势,其中在 1993—2008 年呈现波动下降的趋势,而在 2008—2010 年出现上升趋势,之后在短暂波动中最终再次下降。从整体上看,三种系数均呈下降趋势,即各国的碳生产率离散程度呈下降趋势,意味着“一带一路”沿线主要国家的碳生产率存在 σ 收敛。

3. β 收敛检验

(1) 绝对 β 收敛

由于条件 β 收敛在绝对 β 收敛的基础上进行,且需要的指标多于绝对 β 收敛所需指标,因此在样本选取层面更有局限性。出于保持样本容量一致性的考量,我们将绝对 β 收敛的样本国家、样本时间段选取与条件 β 收敛进行统一,以条件 β 收敛的样本国家、样本时间段为准,具体请参见下方的条件 β 收敛部分。

(2) 条件 β 收敛

对样本时间段的说明:我们的样本时间段为 1992—2014 年,由于 DEA 方法测算碳生产率以 1992 年作为基年,因此测算出的碳生产率始于 1993 年,终于 2014 年;由公式的涵义可见,g 的最后一年(2014 年)数据为 0。在绝对 β 收敛和条件 β 收敛中,g 均为我们的被解释变量,因此我们在计算出 g 值后,删除 2014 年数据。至此,我们拟定的绝对 β 收敛、条件 β 收敛和条件 β 的动态面板回归的样本时间段均为 1993—2013 年。

模型(1)列出的是绝对 β 收敛的估计结果:我们首先进行基于面板数据的 Hausman 检验,由 P 值(0.9998)判断应选择随机效应模型为最优^①;由回归结果可见 lnCP 的回归系数(β)值为负且在 1%的水平下高度显著,这表明 55 个国家的碳生产率存在绝对 β 收敛,且低碳生产率的国家的增长速度整体上大于高碳生产率的国家。

表 4 总体样本 β 收敛模型的估计结果解释变量

g	(1)	(2)	(3)	(4)
lnCP	-0.0389*** (-5.53)	-0.0498*** (-7.28)	-0.0581*** (-3.00)	-0.0569*** (-3.82)
L1. lnCP			-0.0561*** (-4.03)	-0.0595*** (-5.15)
perGDP		0.0001*** (6.04)	0.0001** (2.27)	0.0000 (0.76)
Ftd		-0.0004** (-2.45)	0.0005 (1.22)	0.0003 (0.66)
Inventory		-0.0026*** (-3.09)	-0.0042 (-1.38)	-0.0072*** (-2.74)
Eir		-0.0097*** (-4.40)	-0.0130 (-1.45)	-0.0058 (-0.89)
perCO ₂		-0.0133*** (-2.76)	-0.0624*** (-4.58)	-0.0387*** (-4.59)
Gov		-0.0012 (-0.95)	-0.0059** (-2.04)	-0.0029 (-0.93)
Urb		-0.0069 (-0.89)	-0.0085 (-0.63)	-0.0208*** (-3.64)
Ind		0.0022*** (2.98)	0.0019 (1.20)	0.0007 (0.39)
FDI		0.0005 (0.51)	0.0032** (1.80)	0.0043*** (2.72)
Dom		0.0022*** (3.73)	0.0022 (0.90)	0.0050** (2.48)
Eng		-0.0051*** (-6.29)	-0.0178*** (-4.68)	-0.0172*** (-4.88)
L1. g			0.0811 (0.88)	0.0977 (1.06)
L2. g			0.1886*** (3.43)	0.2344*** (5.52)
C	0.0002 (0.10)	-0.0074*** (-3.32)	-0.0076 (-1.19)	0.0019 (0.50)
R ²	0.0268	0.1418		
F 或 Wald	30.61 (0.0000)	14.48 (0.0000)	247.79 (0.0000)	307.10 (0.0000)
Hausman test	0.00 [0.9998]	48.62 [0.0000]		
AR(1)检验			-2.2405 (0.0251)	-2.4518 (0.0142)
AR(2)检验			0.3009 (0.7635)	0.1261 (0.8997)
模型	RE	FE	DIFF-GMM	SYS-GMM
Obs	1155	1155	990	1045

说明:表中系数值下面小括号内为 t 值或 z 值,中括号内为 p 值。***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的统计显著水平。在动态面板估计中,内生变量为 lnCP,模型采用的工具变量是 g 和 lnCP 的二阶及以上的滞后项,模型(3)和模型(4)展示了稳健性检验的回归结果。

模型(2)~(4)列出的是不同估计方法下的碳生产率条件 β 收敛的估计结果。由固定效应模型的回归结果可见,lnCP 的回归系数为负且在 1%的水平下高度显著,表明“一带一路”沿线 55 个样本国家的

①在 Hausman 检验的基础上,本文对 FE 模型和 RE 模型的适用性进行了甄选,报告中仅列出甄选后的检验结果。

碳生产率存在条件 β 收敛,各国均呈稳态水平并向该水平收敛。

为解决模型的内生性问题,我们以内生变量的滞后项或其它变量的滞后项作为工具变量(连玉君等,2008:92-99),即以内生变量碳生产率的平均增长率 g 、碳生产率的对数 $\ln CP$ 的二阶及以后滞后项作为工具变量,并通过 Sargan 统计值来检验工具变量的过度识别问题。AR(1)和 AR(2)检验结果显示,扰动项的差分存在一阶自相关,但不存在二阶自相关,故接受原假设“扰动项无自相关”,可以使用差分 GMM 和系统 GMM。Sargan 统计值显示,在 10% 的显著性水平上,差分 GMM 和系统 GMM 均无法拒绝“所有工具变量均有效”的原假设,故所选的工具变量是有效的。

结果表明,与“X”效率有关的指标中,人均 GDP 对碳生产率的影响为正,这与直观印象相符:经济发展程度越高,经济体越有能力提高能源使用效率,从而提高碳生产率。“对外开放度”对碳生产率的影响在条件 β 收敛中为负,在动态面板估计中为正。一般来说,对外开放度提高会促进国家(或经济体)间的友好往来,在此过程中不仅可以向较先进的国家学习、引进技术,还利于通过贸易等发挥本国的比较优势,从而促进碳生产率的上升趋势。

以下三个指标属于“要素有效使用”类型,其中(物质)资本闲置率对碳生产率增长的影响为负,“人均二氧化碳排放量”的影响为负,这也与我们的印象相符:固定资本比例提高即越来越多的产出未得以直接作用于生产活动,而是被用于积累,这会降低投入要素的有效使用量(白重恩、张琼,2015:3-28);人均二氧化碳排放量上升会增加二氧化碳排放总量,从而在有限的技术水平增加控制碳含量排放的难度,最终导致碳生产率水平降低。在理论上就业参与率上升,代表着直接参与经济活动的劳动力增多,此时投入要素的有效使用量上升,应利于提高碳生产率;实证结果表明“就业参与率”的影响为负,我们分析其原因可能为:就业参与率提高不等同于劳动生产率的提高,“一带一路”沿线主要国家大多为非发达、非高收入国家,因此其工业化水平普遍低于较发达国家的一般水平,进而导致其劳动生产率也低于它们。所以,其就业参与率的提高,意味着增加了更多的非效率性劳动,进而降低了整体的劳动绩效,最终导致碳生产率水平的降低。

对“配置效率”类的影响因素的分析如下:实证结果表明“政府规模”扩大对碳生产率产生负向影响,这符合学界的一般共识:政府的行政干预在大部分情况下被认为不利于优化要素的有效配置与使用途径,因此会降低能源的使用效率,进而降低碳生产率;关于城镇化进程:关于城镇化对区域碳排放规模的影响力学界已形成共识,认为其影响力较大。但对于其作用机制及量化问题尚未达成一致,原因在于其中关系的复杂性(王莹,2013:75)。推进城镇化进程必然伴随着经济的平稳增长,这带来两种不同的作用机制:第一个作用是能源消耗量平稳增加并伴随提高了二氧化碳的排放量,第二个作用则是在实现资源合理化整合的同时,因居民素质提高带来技术水平上升、产业结构与产品结构优化等积极效应,由此促使能源消耗量下降,间接导致二氧化碳排放量下降(孙辉煌,2012:69-74)。以居民耗电量为例:城镇化水平提高伴随着电网覆盖率上升,理论上会导致耗电量上升、能源消耗量上升。但随着高层建筑的普及率上升,单位家庭的能源消耗量呈降低趋势。另外,城镇化水平提高伴随着人口集中度上升和公共交通普及率上升,这在很大程度上减少了人口集中度低带来的私人交通工具数量(例如,地铁的覆盖幅度与私家车的数量在一定程度上呈负相关),由此减轻交通方面的能源消耗量,间接降低了二氧化碳的排放量(Badoe & Miller,2000:235-263)。王钦迟(2011:3-13)总结了这两种效应。第一种效应为促进效应:城镇化进程的推进带来工业化程度的提高,直接导致经济活动、居民生活消耗的能源量上升,以及土地利用方式的改变等,导致碳排放量增加;第二种效应为相反的降低效应:城镇化进程的推进必然伴随人口的集中和经济活动的集中,有利于技术效应的发挥,从而有助于实现绿色低碳的经济发展模式。而且,当城镇化发展到一定程度,不仅会提高土地的使用率从而提高土地要素的使用效率,还会出现人口出生率降低的现象。这两者联合起来,会形成能源消费集聚后的规模效应,从而对二氧化碳的排放量起降低作用。我们的实证结果显示,“城镇化进程”对碳生产率的影响为负,因此我们倾向于上述的第一种效应。

产业结构对碳生产率的影响为正,不符合我们的预期:我们的衡量指标代表了工业占 GDP 的比重,

而工业相对于第一、三产业,明显是碳排放的主要来源。因此,工业占比的增加会显著增加碳排放量,从而降低碳生产率。进行原因分析时,我们认为产业结构对碳生产率的影响与城市的规模存在一定相关性。区分城市规模大小的通常依据是城市聚居人口的数量(对此各国各有各的分级标准,不尽相同但大同小异),联合国定义城市人口的起步数量为2万人,而大城市、特大城市的人口起步数量则分别为10万、100万人,部分国家依此划分本国的城市标准。柯善咨和赵曜(2014,76-88+115)研究了我国城市的产业规模-城市协同效应,所选取的城市样本为268个地级及以上城市。该研究发现,我国城市的产业规模-城市协同效应存在着人口数量的门槛:随着经济社会的发展,产业结构中的最大比例必然依次是第一至三次产业,其中,从第一产业向第二产业的转变难度小,而从第二产业向第三产业转型则具有较大挑战,这是大部分发展中国家最关心的问题之一。柯善咨和赵曜发现,若希望产业结构在工业向服务业转型中有效率,则该城市的市辖区人口最少应满足(约)43.5万人,这是门槛的规模;若一城市的人口数量低于此门槛规模,则该城市产业结构中的服务业占比上升,反而会降低其经济效率,因此,只有达到此门槛规模才能提高经济效率。“一带一路”沿线多为小型国家和较不发达国家,各国的城镇化进程相对滞后,大城市尤其是特大城市的数量远低于较发达国家。对于此类国家,工业规模的扩大有利于提高其城市效率,进而提高碳生产率。因此我们认为本研究中产业结构对碳生产率影响为正的实证结果,很可能与分析样本中国家的城镇规模有关,这是一带一路沿线主要国家的特点之一,同时也是我们今后进一步研究过程中应该注意的问题。

我们的投资指标包括外商投资和国内投资,实证结果表明两者均对碳生产率产生正向影响。我们认为这表明投资增加有助于完善该国的设施建设、增加资金投入于绿色技术水平的提高,形成能源消费规模效应,最终提高碳生产率。能源碳含量排放的提高会导致碳生产率的降低,这也符合我们的预期:消耗能源的碳含量反映了碳生产率的环境效应。通常来说,目前世界范围内主要使用的能源类型均具有较高污染排放,其他干净能源(例如水能、风能、太阳能等)的替代程度很小,因此较难形成正的环境效应。由于碳生产率的环境效应为正,因此我们预期该指标的影响系数为负。尽管我们所研究的能源有3种,但它们均含有碳元素,在消耗过程中无论燃尽的百分比为何,都会有相应程度的碳排放产生,从而降低碳生产率。

(3) β 收敛的稳健性检验

考虑到运用GML指数所测算的碳生产率可能存在偏误,并影响 β 收敛检验的结果,为了进一步验证模型结论的稳健性,本文采用ML指数测算的碳生产率对55国的碳生产率重新进行了 β 收敛检验。表5报告了 β 收敛检验的稳健性检验结果,可见55个国家的碳生产率存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛。与表4的不同之处在于,各变量的显著性有所区别且系数存在一定差异。

五、结论与建议

本文采用SBM方向性距离函数和全域Malmquist-Luenberger指数,对1992—2014年“一带一路”沿线主要国家的碳生产率进行了测算,并在此基础上运用标准差、变异系数和 σ 系数来检验各个国家碳生产率的 σ 收敛,运用绝对 β 收敛、条件 β 收敛模型,我们得到了如下的主要结论:

第一,“一带一路”沿线主要国家的碳生产率整体上呈现增长的趋势,且效率进步是推动碳生产率增长的主要因素。

第二,各国总体的碳生产率的标准差、变异系数和 σ 系数均呈宏观递减趋势,表明存在 σ 收敛。各国总体的碳生产率存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛。绝对 β 收敛分析表明,各国的碳生产率差异呈缩小趋势;条件 β 收敛分析表明,各国的碳生产率存在稳态水平并向其收敛。

第三,人均GDP和对外开放度的增长、工业占三次产业之比的加大、国外国内投资率的上升、清洁能源的普及均有利于“一带一路”沿线主要国家碳生产率的增长;固定资本占比、就业参与率、人均二氧化碳排放量及政府规模、城市化率的提高则对碳生产率起负面影响。

表5 总体样本β收敛模型的估计结果

解释变量 g	(1)	(2)	(3)	(4)
lnCP	-0.0067 (-0.98)	-0.0151** (-2.26)	-0.0404 (-1.17)	-0.0354** (-2.00)
L1. lnCP			-0.0420** (-2.05)	-0.0383*** (-3.50)
perGDP		0.0001*** (5.18)	0.0000 (1.38)	0.0000 (0.87)
Ftd		-5.59e-06 (-0.03)	0.0006 (1.36)	0.0006 (1.09)
Inventory		-0.0029*** (-2.81)	-0.0029 (-0.65)	-0.0106** (-2.26)
Eir		-0.0142*** (-5.23)	-0.0068 (-0.55)	0.0081 (0.84)
perCO ₂		-0.0086 (-1.46)	-0.0455*** (-2.74)	-0.0528** (-2.13)
Gov		-0.0032** (-2.13)	-0.0061 (-1.37)	-0.0038 (-0.95)
Urb		0.0103 (1.08)	-0.0286 (-0.89)	-0.0145** (-1.85)
Ind		0.0018** (1.95)	0.0026 (0.62)	0.0006 (0.23)
FDI		-0.0011 (-0.88)	0.0007 (0.35)	0.0030 (1.13)
Dom		0.0015*** (1.99)	0.0018 (0.36)	0.0037 (1.25)
Eng		-0.0066*** (-6.62)	-0.0201*** (-4.81)	-0.0165*** (-4.00)
L1. g			0.1584 (0.98)	0.1597 (1.38)
L2. g			0.1315 (1.50)	0.1633*** (2.95)
C	-0.0015 (-0.63)	-0.0143*** (-5.26)	-0.0020 (-0.22)	-0.0001 (-0.02)
R ²	0.0274	0.1024		
F 或 Wald	0.95 (0.3287)	10.34 (0.0000)	273.17 (0.0000)	191.89 (0.0000)
Hausman test	1.91 [0.3851]	34.24 [0.0011]		
AR(1)检验			-1.6351 (0.1020)	-1.9281 (0.0538)
AR(2)检验			0.2938 (0.7689)	0.0276 (0.9780)
模型	RE	FE	DIFF-GMM	SYS-GMM
Obs	1155	1155	990	1045

说明:表中系数值下面小括号内为t值或z值,中括号内为p值。***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著水平。在动态面板估计中,内生变量为lnCP,模型采用的工具变量是g和lnCP的二阶及以上的滞后项,模型(3)和模型(4)展示了稳健性检验的回归结果。e+n为科学计数法形式,意味着10的n次方。

在全球性的低碳趋势下,“一带一路”沿线主要国家的主要任务是发展经济并保持经济平稳增长,提高人民的生活水平,同时也要兼顾提高碳生产率、实现碳减排。因此,我们根据实证结果提出如下建议:

第一,通过对外开放,吸收国外的先进技术并改造为己所用,提高能源利用率。各国可在吸引外资的同时,通过政策加大国内投资力度,在完善基础设施建设的同时形成规模效应,促进碳生产率增长。在既定的城市规模下促进工业发展,由此提高城市效率与碳生产率。同时逐步提升城市规模,最终促使产业结构重心向服务业转移,减少碳排放量。在以技术手段提高劳动效率的同时,通过教育、培训等渠

道提升劳动力素质,进而使就业参与率的上升发挥积极效应,降低碳排放量。各国在力所能及的情况下结合本国自然资源禀赋、提高技术能力,选择可兼顾经济增长和环境保护的最优清洁能源,降低消耗能源的碳含量,由此提高碳生产率。另外在发展经济,提高人均 GDP 的同时,也要降低固定资本比例,优化资源配置;适当减少政府对经济的干预程度,鼓励城镇化进程,以有效地提高碳生产率。

第二,效率进步是样本国家碳生产率增长的主要因素,因此“一带一路”沿线主要国家目前的重心是提高要素的配置效率,提高碳生产率,下一步重心则是在此基础上提高技术。相关国家碳生产率增长的核心推动力在于要素的有效配置。对此,不仅要从国家层面给予政策支持,也要鼓励企业在生产活动中科学配置资源,并加大对榜样企业的支持力度,以要素有效配置推动经济增长和碳生产率的提高。

第三,各国不仅拥有不同的发展进程,其独特的历史进程、自然资源禀赋也有区别,因此要有针对性地采取差异化的政策,立足于本国的独特条件,在参考他国经验的基础上结合本国的发展经验,平稳发展国民经济,与其他“一带一路”沿线主要国家共同提高人民生活水平,实现共赢和共同富裕。

参考文献:

- [1] 白重恩、张 琼(2015). 中国生产率估计及其波动分解. 世界经济,12.
- [2] 陈诗一(2009). 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展. 经济研究,4.
- [3] 邓晓兰、鄢哲明(2014). 资源错配对中国工业低碳生产率影响的实证分析. 财经科学,5.
- [4] 郭炳南、张 成、林 基(2014). 外商直接投资、研发投入与中国工业行业碳生产率——基于工业行业面板数据的实证分析. 兰州学刊,10.
- [5] 柯善咨、赵 曜(2014). 产业结构、城市规模与中国城市生产率. 经济研究,4.
- [6] 林光平、龙 志、吴 梅(2006). 中国地区经济 σ 收敛的空间计量实证分析. 数量经济技术经济研究,4.
- [7] 连玉君、苏 治、丁志国(2008). 现金—现金流敏感性能检验融资约束假说吗?. 统计研究,10.
- [8] 林善浪、张作雄、刘国平(2013). 技术创新、空间集聚与区域碳生产率. 中国人口·资源与环境,5.
- [9] 路正南、杨 洋、王 健(2014). 基于 Laspeyres 分解法的中国碳生产率影响因素解析. 工业技术经济,8.
- [10] 路正南、杨 洋、王 健(2015). 碳结构变动对产业系统碳生产率的影响——基于 Laspeyres 分解模型的经验分析. 科技管理研究,10.
- [11] 潘家华、张丽峰(2011). 我国碳生产率区域差异性研究. 中国工业经济,5.
- [12] 彭国华(2005). 中国地区收入差距、全要素生产率及其收敛分析. 经济研究,9.
- [13] 彭文强、赵 凯(2012). 我国碳生产率的收敛性研究. 西安财经学院学报,5.
- [14] 饶 畅(2013). 制造业投入服务化对碳生产率影响的理论建模和实证检验——以珠三角为例. 经济与管理,6.
- [15] 沈 能、王 艳、王群伟(2013). 集聚外部性与碳生产率空间趋同研究. 中国人口·资源与环境,12.
- [16] 孙辉煌(2012). 我国城市化、经济发展水平与二氧化碳排放——基于中国省级面板数据的实证检验. 华东经济管理,10.
- [17] 王 兵、吴延瑞、颜鹏飞(2010). 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长. 经济研究,5.
- [18] 王钦迟(2011). 基于非线性假设的人口和碳排放关系研究. 人口研究,1.
- [19] 王 莹(2013). 中国碳生产率变动及其主要影响因素研究. 华中科技大学博士学位论文.
- [20] 魏 楚、沈满洪(2007). 能源效率及其影响因素:基于 DEA 的实证分析. 管理世界,8.
- [21] 杨 骞、刘华军(2012). 中国碳强度分布的地区差异与收敛性——基于 1995~2009 年省际数据的实证研究. 当代财经,2.
- [22] 杨 翔、李小平、周大川(2015). 中国制造业碳生产率的差异与收敛性研究. 数量经济技术经济研究,12.
- [23] 杨正林、方齐云(2008). 能源生产率差异与收敛:基于省际面板数据的实证分析. 数量经济技术经济研究,9.
- [24] 张 成、蔡万焕、于同申(2013). 区域经济增长与碳生产率——基于收敛及脱钩指数的分析. 中国工业经济,5.
- [25] 张 成、王建科、史文悦、李 远(2014). 中国区域碳生产率波动的因素分解. 中国人口·资源与环境,10.
- [26] 张丽峰(2013). 基于 LMDI 分解法的我国碳生产率影响因素研究. 资源开发与市场,7.
- [27] 张少华、蒋伟杰(2014). 中国全要素生产率的再测度与分解. 统计研究,3.
- [28] 张巍钰(2014). 产业结构合理化对区域碳生产率的影响——基于 DEA-Malmquist 指数法的分析. 湘潭大学学报

(哲学社会科学版),5.

- [29] 赵 泉(2014). 我国碳生产率增长的长期关系和短期效应——基于面板协整研究. *软科学*,6.
- [30] 赵 泉、费能云(2014). 外商直接投资、自主创新与碳生产率增长. *资源开发与市场*,2.
- [31] 赵国浩、高文静(2013). 基于前沿分析方法的中国工业部门广义碳生产率指数测算及变化分解. *中国管理科学*,1.
- [32] 周五七(2014). 效率增进与技术进步对绿色生产率增长的影响——来自中国36个两位数工业行业的实证. *统计与信息论坛*,4.
- [33] 周五七、武 戈(2013). 绿色TFP增长来源及其对工业碳生产率的影响差异——基于中国省际面板数据的实证分析. *现代财经*,12.
- [34] Badoe, D. A. & Miller, E. J(2000). Transportation-land-use Interaction; Empirical Findings in North America, and their Implications for Modeling. *Transportation Research (Part D): Transport and Environment*,5(4).
- [35] Miketa, A. & Mulder, P(2005). Energy-productivity Across Developed and Developing Countries in 10 Manufacturing Sectors; Patterns of Growth and Convergence. *Energy Economics*,27(3).
- [36] Liddle, B(2009). Electricity Intensity Convergence in IEA/OECD Countries: Aggregate and Sectoral Analysis. *Energy Policy*,37(4).
- [37] Liddle, B(2010). Revisiting World Energy Intensity Convergence for Regional Differences. *Applied Energy*,87(10).
- [38] Strazicich, M. C. & List, J. A(2003). Are CO₂ Emission Levels Converging among Industrial Countries?. *Environmental and Resource Economics*,24(3).
- [39] Ray, D(1988). Straight Talk on Fees; What to do when the Issue of Money Rears Its Ugly Head. *Family Advocate*,11(2Special).
- [40] Aldy, Joseph. E(2006). Per Capita Carbon Dioxide Emissions: Convergence or Divergence?. *Environment and Resource Economics*,33(4).
- [41] Fukuyama, H. & Weber, W. L(2009). A Directional Slacks-based Measure of Technical Inefficiency. *Socio-Economic Planning Science*,43(4).
- [42] Jiankun, He. & Mingshan, Su(2011). Carbon Productivity Analysis to Address Global Climate Change. *Chinese Journal of Population Resources & Environment*,9(1).
- [43] Leibenstein, H(1966). Allocative Efficiency vs. "X-efficiency". *The American Economic Review*,56(3).
- [44] Chung, Y. H. ,Färe, R. & Grosskopf, S(1997). Productivity and Undesirable Outputs; A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*,51(3).
- [45] Oh, D. H(2010). A Global Malmquist-luenberger Productivity Index. *Journal of Productivity Analysis*,34(3).
- [46] Wana, J. , Baylis, K. & Mulder, P(2015). Trade-Facilitated Technology Spillovers in Energy Productivity Convergence Processes across EU Countries. *Energy Economics*,48(1).
- [47] Westerlund, J. & Basher, S. A(2008). Testing for Convergence in Carbon Dioxide Emissions Using a Century of Panel Data. *Environmental and Resource Economics*,40(1).
- [48] Baumol, W. J. & Oates, W. E(1988). *The Theory of Environmental Policy*. New York: Cambridge University Press.
- [49] Jianchang, Lu. , Fan, W. & M, Meng(2015). Empirical Research on China's Carbon Productivity Decomposition Model Based on Multi-Dimensional Factors. *Energies*,8(4)
- [50] Ming Meng & Dongxiao Niu(2012). Three-dimensional Decomposition Models for Carbon Productivity. *Energy*,46.
- [51] Ming Meng, Dongxiao Niu & Q Gao(2014). Decomposition Analysis of Chinese Provincial Economic Growth Through Carbon Productivity Analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*,33(1).
- [52] Solow, R. M(1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*,70(1).
- [53] Mielnik, O. & Goldemberg, J(1999). The Evolution of the Carbonization Index in Developing Countries. *Energy Policy*,27(5).
- [54] Mulder, P. & de Groot, H. L. F(2007). Sectoral Energy and Labour Productivity Convergence. *Environmental and Resource Economics*,36(1).
- [55] Mulder, P. & de Groot, H. L. F(2012). Structural Change and Convergence of Energy Intensity Across OECD Countries, 1970—2005. *Energy Economics*,34(6).

- [56] Färe, R., Grosskopf, S. & Pasurka Jr, C. A (2007). Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions. *Energy*, 32(7).
- [57] Quah, D. T (1996). Empirics for Economic Growth and Convergence. *European Economic Review*, 40(6).
- [58] Swan, T. W (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32(2).
- [59] Sala-i-Martin, X. X (1996). The Classical Approach to Convergence Analysis: The Journal of the Royal Economic Society. *The Economic Journal*, 106(437).
- [60] Kaya, Y. & Yokobori, K (1997). *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability*. Tokyo: United Nations University Press.

A Study on the Convergence of Carbon Productivity in the Major Countries of The Belt and Road and the Analysis of its Influencing Factors

Li Xiaoping & Wang Yang (ZhongNan University of Economics and Law)

Abstract: Two thousand years ago, the ancient Silk Road from Chang'an (now Xi'an) to the west (e. g., the Roman Empire), became the major trade route between China and the countries in Asia and Europe, so the ancient Silk Road at the time is undoubtedly a great international business artery. More importantly, it was a bridge to promote the friendly communication between the East and the West. On September 7, 2013, at the University of Nazarbayev in Kazakhstan, Xi Jinping, the President of the People's Republic of China, presented the "Silk Road Economic Belt" strategic initiative, also known as "The Belt and Road, B&R". This strategy is different from other international "integration" project. Its purpose isn't regional control, and does not interfere in the internal affairs of other countries. This makes it more feasible. The scale of the strategy is large enough to integrate funds and resources to the greatest extent, and peaceably promote the economic development of these countries. Through the expansion of the cooperation with Central Asia, South Asia and West Asian countries, the development of China's western region can be promoted, and achieve the balanced and coordinated development of the eastern and western regions.

The "Silk Road Economic Belt" is the latest move of China's opening-up policy. It means the policy has been matured and balanced. This economic belt crosses Asia, Europe and Africa (the 3 continents accounted for 82% of the world's total population), and directly covers the population of nearly 3 billion, including countries with abundant resources which need to improve the capacities of production, construction and transportation. And these factors are our advantages. One of the main purposes of the economic belt is to build the unified transport facility from the Pacific Ocean to the Baltic Sea, and to create a win-win situation with partner countries.

Although the current contribution of the economic belt to China's total economic output is relatively small, but if broaden the horizon to long term (such as 30 years), through the realization of the transportation passageway between two seas, the gradual completion of the road connectivity, the liberalization of trade and investment, by then the economic belt of the Silk Road will grow into a prosperous region with rapid growth, China's eastern region can rely on the low-cost logistics to enhance its global competitiveness, while a number of urban agglomerations on the economic belt become China's new economic growth areas, such as the Western Triangle Urban agglomeration, Hexi Corridor Urban agglomeration and Tianshan northern slope economic belt.

Industrial development must be accompanied by the increase in carbon emissions. To achieve sustainable development, we must explore a new development path of low-carbon and promote the fundamental revolution of social productivity. Low-carbon economy is a new economic development model, with the basis of low energy consumption, low pollution and low emissions. CO₂ and other greenhouse gas emissions should be reduced under the premise of economic growth and improve people's living standards. As an economic big power, China is responsible to assume more responsibility for environmental governance in the world development. With regard to the former, our developing experience is valuable for developing countries, economies in transition and emerging market economies. It is not only with theoretical significance, but also with practical value. It is able to provide practical technical assistance. With regard to the latter, we would like carry out ecology responsibility, and benefit as many countries as possible. "The Belt and Road" as a national strategy aims at promoting the

multi-country common development. In the future, related countries as a community of shared future will be one of the areas that have very strong bilateral trade growth due to the unique process of market integration. Its development plays a decisive role. This region not only is the major source of China's energy imports, but also has a core position in global energy supply. Therefore, energy cooperation is one of the focuses of the strategic plan. Whether from economic considerations to improve the energy performance, or environmental considerations to save energy, we should take carbon productivity as the breakthrough point, and view the degree of coordination between economic development and natural ecology of the countries along the "The Belt and Road" from macro perspective, and try to improve the living standards for the people in these countries and play an active role to the environment at the same time.

Carbon productivity is the core of low-carbon economy development, and can be used as an indicator to measure the effectiveness of regional economic development and the efforts responding to climate change. For a long time, the way of estimating carbon productivity has been in lack of scientificity and accuracy, and there is no scholar took the low-carbon constraint into the framework of "The Belt and Road" area to analysis the trend of carbon productivity and it's influencing factors. Therefore, in this paper, we measure the carbon productivities of major countries of The Belt and Road from 1992 to 2014 by using Global Malmquist-Luenberger index that is from directional distance function based on Slack-based measure, and have an empirical analysis of the influencing factors to its convergence.

The study found: (1) the carbon productivities of the countries show growth trend on the whole, and efficiency improvement is the main factor of the change (the annual growth rate is 1.01%); (2) there exist σ convergence and β convergence in the carbon productivities of the whole countries; (3) the promotion of GDP per capita, opening degree, industrialization and investment rate is the effective way to promote carbon productivity. On the contrary, fixed capital ratio, employment-population ratio, CO₂ emission per capita, government size, urbanization and carbon content of energy consumption play a negative role in carbon productivity promoting. Therefore, the main point of the major countries of "The Belt and Road" is to raise the factors' allocation efficiency, and developing by openness is also an effective way to raise carbon productivity.

In general, there are many important factors that affect carbon productivity. But because of the different geographical location and the level of economic development, the influence of the above factors on the convergence of carbon productivity varies in different countries. Only by optimizing economic development conditions and reducing carbon intensity can be conducive to the countries' sustainable economy development.

Key words: The Belt and Road; carbon productivity; σ convergence; β convergence

■收稿日期:2016-02-23

■作者地址:李小平,中南财经政法大学经济学院;湖北 武汉 430073。Email:chineselixp@126.com。

王 洋,中南财经政法大学经济学院。

■基金项目:国家社会科学基金重大项目(16ZDA039)

■责任编辑:刘金波