

引用格式:李艳梅,付丽媛,迟远英. 与中国的经贸合作对“一带一路”沿线国家碳强度收敛的影响[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 756-767. [Li Y M, Fu L Y, Chi Y Y. Influence of investment and trade cooperation with China on carbon intensity convergence in countries along the Belt and Road[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 756-767.] DOI: 10.18402/resci.2022.04.09

# 与中国的经贸合作对“一带一路”沿线国家碳强度收敛的影响

李艳梅,付丽媛,迟远英

(北京工业大学经济与管理学院,北京 100124)

**摘要:**“一带一路”沿线国家的共同低碳转型对于全球应对气候变化意义重大,考察沿线国家碳强度收敛特征,并分析与中国开展经贸合作是否可以促进其碳强度收敛速度,对于客观评价中国在促进绿色“一带一路”建设中的作用具有重要意义。本文基于2003—2018年87个国家数据,运用包含空间效应的绝对和条件 $\beta$ 收敛模型,从整体以及区域层面分析与中国开展投资和贸易合作对沿线国家碳强度收敛速度的影响。研究表明:①从整体层面来看,“一带一路”沿线国家碳强度存在空间 $\beta$ 收敛趋势,并且条件 $\beta$ 收敛速度大于绝对 $\beta$ 收敛速度,反映了与中国开展经贸合作能够明显加速碳强度收敛。②从大洲层面来看,与中国开展经贸合作均对碳强度收敛速度起到促进作用。其中,对非洲地区的促进作用最大,其次是亚洲和拉丁美洲,最后是欧洲。③从大洲内部来看,与中国开展经贸合作对非洲撒哈拉沙漠以北地区碳强度收敛的促进作用大于以南地区;对亚洲各区域碳强度收敛的促进作用由大到小依次为中亚、西亚、南亚、东亚及东南亚。因此,“一带一路”沿线国家应加强区域交流沟通,共同应对气候变化,尤其是结合自身发展特点,深化与中国的经贸合作关系,有利于早日共同实现低碳转型。

**关键词:**碳强度;收敛性;空间相关性;“一带一路”沿线国家;中国;经贸合作

DOI:10.18402/resci.2022.04.09

## 1 引言

“一带一路”建设秉承共商、共建、共享原则,得到许多国家的积极响应与支持。自2013年“一带一路”倡议提出后,中国与沿线国家经贸合作范围和规模不断扩大。截至2022年2月,已有148个国家与中国签署共建“一带一路”合作文件<sup>[1]</sup>。这些国家与中国年度贸易额由2013年的1.0万亿美元增长至2018年的1.3万亿美元<sup>[2]</sup>;接受来自中国的直接投资存量金额由2013年的1152.9亿美元增长至2018年的2468.8亿美元<sup>[3]</sup>。

“一带一路”沿线国家在推动世界经济发展和应对全球气候变化进程中发挥着重要作用。根据世界银行数据库和全球大气研究排放数据库(ED-

GAR)的相关数据,2018年上述148个国家的GDP占全球比例为23.4%,CO<sub>2</sub>排放量占全球比例为30.7%,碳强度约为全球平均水平的1.3倍。由于沿线国家处于经济发展的不同阶段,碳强度水平存在较大差异,不利于经济社会的共同发展与繁荣。因此,降低碳强度并且缩小地区间碳强度差异将成为“一带一路”沿线国家共同绿色低碳转型发展的主要目标<sup>[4]</sup>。

“一带一路”沿线国家与中国开展的经贸合作在规模扩大的同时,结构也在不断优化。例如,2020年中国在“一带一路”沿线国家能源投资中的可再生能源投资占比首次超过化石能源<sup>[5]</sup>。中国将低碳转型理念融入经贸合作中,携手“一带一路”沿

收稿日期:2021-11-26;修订日期:2022-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41871201)。

作者简介:李艳梅,女,内蒙古乌兰察布人,研究员,博士,研究方向为能源经济和低碳经济。E-mail: liyanmei@bjut.edu.cn

通讯作者:迟远英,女,山东烟台人,教授,博士,研究方向为能源经济和低碳经济。E-mail: goodcyy@bjut.edu.cn

2022年4月

线国家共同提升应对气候变化能力。在上述背景下,本文研究“一带一路”沿线国家碳强度收敛性,并重点探究与中国开展经贸合作是否促进其碳强度收敛速度,对于客观评价中国在促进绿色“一带一路”建设中的作用具有重要意义。

## 2 文献综述

### 2.1 能源环境领域的收敛研究

收敛假说来源于Solow<sup>[6]</sup>提出的经济增长模型,该理论认为人均资本率更低的国家或地区具有更高的经济增长率,因而欠发达国家或地区在追赶发达国家或地区时出现了收敛的趋势。收敛类型主要有 $\sigma$ 收敛和 $\beta$ 收敛<sup>[7]</sup>,其中 $\sigma$ 收敛是针对存量进行描述, $\beta$ 收敛则关注增量的变化。 $\sigma$ 收敛主要指不同经济个体评价指标的标准差随时间变化而逐渐缩小; $\beta$ 收敛包含绝对 $\beta$ 收敛与条件 $\beta$ 收敛两种类型,二者的差异在于不同经济个体是否具备相同的初始条件以及是否收敛于相同的稳态水平<sup>[8]</sup>。现如今,收敛理论已经被运用到能源经济、环境经济等领域,国内外已有大量相关文献。

从研究内容来看,能源及环境领域相关指标主要集中在以下两类:一是人均指标,包含人均能源消费量<sup>[9]</sup>、人均CO<sub>2</sub>排放量<sup>[10]</sup>;二是效率指标,包含能源强度<sup>[11]</sup>、能源效率<sup>[12]</sup>,以及碳强度<sup>[13]</sup>、碳生产率<sup>[14]</sup>。从研究范围来看,国家层面上,有的研究部分国家的收敛情况,例如欧盟国家<sup>[15,16]</sup>、亚洲发展中国家<sup>[17]</sup>等,有的对不同经济组织收敛情况进行对比<sup>[18]</sup>。省级层面上,往往按照不同省市或州等方式进行样本划分,如对澳大利亚各州<sup>[19]</sup>、中国各省<sup>[20]</sup>、中国长江经济带各城市<sup>[21]</sup>等的研究。此外,还有研究聚焦于某些行业或领域,例如交通行业<sup>[22]</sup>、工业部门<sup>[23]</sup>等。从研究方法来看,主要包括计量经济学模型<sup>[24]</sup>、分布动态学<sup>[25]</sup>等。大部分研究选择建立计量经济学模型,特别是在不同区域的收敛研究中,很多学者关注到了变量的截面空间滞后性,从而建立了空间计量经济学模型<sup>[26]</sup>。

### 2.2 “一带一路”沿线国家碳排放研究

“一带一路”沿线国家的气候变化问题已经引起学术界广泛讨论<sup>[27]</sup>。该区域整体上承受较大的碳排放压力<sup>[28]</sup>,经济发展和能源消费增加是碳排放量

上升的主要原因,可再生能源发展、碳减排技术进步有利于降低碳排放<sup>[29]</sup>,城市化进程对碳排放也具有影响<sup>[30]</sup>。来自中国的投资,尤其是在结构效应方面,对“一带一路”沿线地区的CO<sub>2</sub>累积减排有积极影响<sup>[31]</sup>,并且有助于降低碳强度<sup>[32]</sup>。中国与“一带一路”沿线地区间的贸易并没有引起污染转移<sup>[33]</sup>。

已有文献主要利用计量经济模型对“一带一路”沿线国家能源、碳排放相关指标的收敛性进行研究<sup>[34,35]</sup>,并且考虑了空间相关性。其中,研究较多的是“一带一路”沿线国家的能源相关指标,认为其存在收敛性,并且提升全球化水平<sup>[36]</sup>、贸易一体化程度<sup>[37]</sup>等对收敛有促进作用。也有研究认为贸易总额、外商直接投资的增加对“一带一路”沿线国家能源相关指标的收敛性并没有明显促进作用<sup>[38]</sup>。此外,有学者重点关注了“一带一路”沿线国家与中国经济联系对能源强度收敛的作用,发现增加双边贸易规模能加速收敛<sup>[39]</sup>。

如上所述,相关文献已将与中国开展贸易合作纳入“一带一路”沿线国家能源环境收敛分析模型中,但是没有考虑投资的作用。在中国对“一带一路”沿线国家直接投资不断增长的背景下,本文同时将贸易和投资合作纳入碳强度收敛模型中,从指标选取方面进一步拓展了相关研究的分析视角。此外,现有文献大多关注“一带一路”沿线国家整体能源环境指标的收敛性,对内部的区域差异分析不足。本文在从整体层面进行分析的基础上,进一步从大洲以及大洲内部两个层面,探究了与中国开展经贸合作对碳强度收敛促进作用的区域差异,从研究空间方面细化了已有文献的分析视角。

## 3 研究区、方法与数据

### 3.1 研究区域

综合考虑样本须包含尽可能多的国家个体以及相关数据可得性等情况,选定87个“一带一路”沿线国家作为研究样本(表1)。这些样本国家占上述148个“一带一路”沿线国家碳排放总量的90.9%和GDP的89.7%,因此选取的样本具有较好的代表性。从地理分布特征来看,87个“一带一路”沿线国家分布于亚洲、非洲、欧洲和拉丁美洲。由于样本国家分布广泛,为分析碳排放强度收敛的区域差

表1 本研究包括的“一带一路”沿线国家

Table 1 The Belt and Road countries in this study

	地区	数量	国家
亚洲	东亚及东南亚	12	菲律宾、柬埔寨、老挝、马来西亚、缅甸、泰国、文莱、新加坡、印度尼西亚、越南、韩国、蒙古
	南亚	4	巴基斯坦、孟加拉、尼泊尔、斯里兰卡
	中亚	4	哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦
	西亚	11	阿富汗、阿联酋、阿塞拜疆、巴林、卡塔尔、科威特、沙特阿拉伯、土耳其、也门、伊拉克、伊朗
非洲	撒哈拉沙漠以北	5	阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥、突尼斯
	撒哈拉沙漠以南	30	埃塞俄比亚、安哥拉、贝宁、博茨瓦纳、赤道几内亚、多哥、冈比亚、刚果布、几内亚、加纳、加蓬、津巴布韦、喀麦隆、科特迪瓦、肯尼亚、莱索托、利比里亚、卢旺达、马达加斯加、马里、毛里塔尼亚、纳米比亚、南非、尼日尔、尼日利亚、塞内加尔、塞舌尔、坦桑尼亚、乌干达、赞比亚
其他洲	欧洲	13	乌克兰、奥地利、波兰、捷克、拉脱维亚、罗马尼亚、马耳他、斯洛伐克、匈牙利、意大利、保加利亚、波黑、俄罗斯
	拉丁美洲	8	安提瓜和巴布达、巴拿马、厄瓜多尔、圭亚那、秘鲁、苏里南、乌拉圭、智利

异,进一步将亚洲国家样本分为4个地区:东亚及东南亚、南亚、中亚、西亚,将非洲国家样本分为撒哈拉沙漠以北非洲和以南非洲,欧洲和拉丁美洲所包含的国家样本数较少,不再对其进行细分。

“一带一路”倡议虽于2013年提出,但本质是已有区域合作机制的对接和补充。样本国家加入“一带一路”倡议时间主要集中于2014—2018年,但是在20世纪末及21世纪初就已经建立了相关区域合作机制,如上海合作组织(SCO)、中国—东盟“10+1”、亚太经合组织(APEC)、亚欧会议(ASEM)、亚洲合作对话(ACD)、亚信会议(CICA)、中阿合作论坛、大湄公河次区域(GMS)经济合作、中亚区域经济合作(CAREC)、中非合作论坛等。结合以上背景,本文基于相关文献的研究经验<sup>[40,41]</sup>、数据可得性以及收敛模型在较长时期内更加适用等原因,选取研究样本期为2003—2018年。

### 3.2 变量选取

本文主要研究“一带一路”沿线国家碳强度收敛,因而碳强度为核心变量。重点考察了与中国的经济合作关系对收敛的影响,故选取“一带一路”沿线国家与中国投资和贸易合作指标作为条件变量。

(1)碳强度( $CI$ ),以单位GDP碳排放量表示。

(2)与中国的投资合作关系( $FDI$ ),利用“一带一路”沿线国家吸收来自中国的直接投资存量金额表示。根据商务部统计,2020年中国对“一带一路”沿线国家非金融类直接投资177.9亿美元,而“一带一路”沿线国家对华直接投资82.7亿美元<sup>[42]</sup>。相较于来自中国的直接投资,“一带一路”沿线国家对华

直接投资金额较小并且部分对华直接投资的数据不可获得,因此本文仅考虑了单边投资的情况。

(3)与中国的贸易合作关系( $Trade$ ),利用“一带一路”沿线国家与中国货物贸易进出口总额来表示。

### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 空间相关性检验

在考虑空间效应的碳强度 $\beta$ 收敛检验时,需要检验“一带一路”沿线国家碳强度是否具有空间相关性。本文利用全局莫兰指数对其进行检验:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (CI_i - \overline{CI})(CI_j - \overline{CI})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (CI_i - \overline{CI})^2} \quad (1)$$

式中: $I$ 为全局莫兰指数; $n$ 为样本个数; $CI_i$ 和 $CI_j$ 分别表示 $i$ 国和 $j$ 国的碳强度; $\overline{CI}$ 是所有国家碳强度均值; $w_{ij}$ 为空间权重,反映 $i$ 地区和 $j$ 地区之间的空间关系。根据地理学第一定律,相近的事物关联更紧密,所以地理距离的大小能够反映空间关系的紧密程度。本文选取地理权重矩阵反映空间关系,构造方法为:当 $i \neq j$ 时, $w_{ij}=1/d_{ij}$ ;当 $i=j$ 时, $w_{ij}=0$ 。其中, $d_{ij}$ 表示利用两国首都城市经纬度计算出在球面上的最短距离<sup>[37]</sup>,地理距离信息数据来源于CEPII数据库。 $I$ 取值范围在 $[-1, 1]$ 之间,在通过显著性检验的情况下, $I>0$ 表示存在正的空间相关性,反映具有相似属性的个体在空间上邻近; $I<0$ 表示存在负的空间相关性,反映了具有相异属性的个体在空间上邻近。莫兰指数检验了“一带一路”沿线国家



2022年4月

碳强度在整个区域表现出的相关性情况,为建立空间计量模型提供必要条件。

### 3.3.2 绝对 $\beta$ 收敛模型

绝对  $\beta$  收敛指在碳强度下降过程中碳强度很高的国家倾向于以较快的速度降低碳强度,并且不同国家的碳强度将收敛于相同稳态均衡水平。模型如公式(2)所示:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

式中:  $CI_{i,t}$  和  $CI_{i,t-1}$  分别表示  $i$  国  $t$  年和  $t-1$  年的碳强度;  $\alpha$  为常数;  $\beta$  为核心系数;  $\varepsilon_{i,t}$  为随机扰动项。如果  $\beta > 0$ , 代表不存在收敛; 如果  $\beta < 0$ , 代表存在碳强度绝对  $\beta$  收敛。通过  $\beta$  值可以计算碳强度收敛速度  $s$ , 公式如下:

$$s = -\ln(1 + \beta) \quad (3)$$

本文构建含空间效应的绝对  $\beta$  收敛模型分析“一带一路”沿线国家碳强度收敛情况。常见的空间面板模型类型有空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)及空间杜宾模型(SDM), 3种模型分别对应的公式如(4)–(6)所示。

SLM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \rho W(\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1}) + \beta \ln CI_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

SEM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda W\varepsilon_{i,t} + v_{i,t}$$

SDM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \rho W(\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1}) + \beta \ln CI_{i,t-1} + \theta W \ln CI_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

式中:  $W$  代表反映地理距离的空间权重矩阵, 由元素  $w_{ij}$  组成,  $w_{ij}$  同公式(1)中的含义。SLM模型中,  $W(\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1})$  为因变量空间滞后项;  $\rho$  为空间自相关系数; 模型反映一国因变量受其他国家因变量的影响。SEM模型中,  $W\varepsilon_{i,t}$  为误差项的空间滞后项;  $\lambda$  为空间误差相关系数;  $v_{i,t}$  为随机扰动项; 模型反映了一国因变量受其他国家误差项的影响。SDM模型中,  $W \ln CI_{i,t-1}$  为碳强度空间滞后项;  $\theta$  代表碳强度的空间滞后项系数; 模型包含了自变量和因变量的空间滞后项, 反映其他国家自变量和因变量对本国的影响。

### 3.3.3 条件 $\beta$ 收敛模型

为检验与中国开展经贸合作对“一带一路”沿线国家碳强度收敛的影响, 本文在  $\beta$  收敛模型中引入反映投资和贸易合作关系的变量, 构建条件  $\beta$  收敛模型。条件  $\beta$  收敛表示各国家的碳强度增长速度不仅取决于初始值, 还会受到其他条件的影响。并且具有不同初始碳强度值的国家, 收敛于不同的稳定状态。模型如公式(7)所示:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \delta_1 \ln FDI_{i,t} + \delta_2 \ln Trade_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

式中:  $FDI_{i,t}$  表示“一带一路”沿线国家吸收来自中国的直接投资;  $\delta_1$  表示投资指标对因变量的影响系数;  $Trade_{i,t}$  表示“一带一路”沿线国家与中国的双边贸易;  $\delta_2$  表示该贸易指标对因变量的影响系数。进一步构建考虑空间效应的条件  $\beta$  收敛模型, 3种空间模型分别对应公式(8)–(10):

SLM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \rho W(\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1}) + \beta \ln CI_{i,t-1} + \delta_1 \ln FDI_{i,t} + \delta_2 \ln Trade_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

SEM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \delta_1 \ln FDI_{i,t} + \delta_2 \ln Trade_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda W\varepsilon_{i,t} + v_{i,t}$$

SDM模型:

$$\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1} = \alpha + \rho W(\ln CI_{i,t} - \ln CI_{i,t-1}) + \delta_1 \ln FDI_{i,t} + \delta_2 \ln Trade_{i,t} + \theta W \ln CI_{i,t-1} + \varphi_1 W \ln FDI_{i,t} + \varphi_2 W \ln Trade_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (10)$$

式中:  $W \ln FDI_{i,t}$  为条件变量  $FDI_{i,t}$  的空间滞后项;  $W \ln Trade_{i,t}$  为条件变量  $Trade_{i,t}$  的空间滞后项;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为  $FDI_{i,t}$  和  $Trade_{i,t}$  的空间滞后项系数, 反映其他国家与中国的投资和贸易合作对本国的影响。

### 3.4 数据来源

“一带一路”沿线国家  $CO_2$  排放量数据来源于EDGAR数据库; GDP数据来源于世界银行数据库, 并且以2010年为基年利用GDP平减指数消除价格影响; “一带一路”沿线国家吸收来自中国的直接投资存量数据来源于《2004—2019年度中国对外直接

投资统计公报》;“一带一路”沿线国家与中国货物贸易进出口总额数据来源于联合国贸易统计数据库(UN Comtrade);投资与贸易数据以2010年为基年并利用GDP平减指数消除价格影响。

表2是相关变量的描述性统计分析。为减弱回归过程中异方差的影响,所有变量进行对数变换处理。

## 4 结果与分析

### 4.1 空间相关性检验结果

空间相关性检验结果如表3所示,可以看出,2003—2018年碳强度全局莫兰指数均大于0,且都通过1%水平下的显著性检验,即表现为显著的空间正自相关性。表明碳强度在空间分布上不是随机的,均呈现出集聚现象,符合地理学第一定律的观点。碳强度的空间集聚效应主要来源于两个方面:①CO<sub>2</sub>外部性的影响,邻近国家更易受到彼此CO<sub>2</sub>排放外部性的影响;②资源禀赋的相似性<sup>[14]</sup>,地理位置相近的国家很可能具备相似的资源禀赋,进而导致经济以及技术发展情况相似。从空间集聚程度来看,碳强度全局莫兰指数值在研究期内稳定于0.081~0.101的范围内。综上,“一带一路”沿线国

家碳强度空间相关性不可忽视,检验碳强度 $\beta$ 收敛时应将其空间效应纳入其中。

### 4.2 $\beta$ 收敛模型选择结果

借鉴已有文献对空间面板模型的估计方法<sup>[43]</sup>,采用极大似然估计法(MLE)得到回归结果。在对SLM、SEM、SDM空间面板模型进行选择时,首先构造包含更广泛空间交互效应来源的SDM模型,之后检验SDM模型能否简化为SLM模型或SEM模型,综合考虑AIC、log L和Wald检验进行判断<sup>[44]</sup>,相关检验结果见表4。logL值越大,模型拟合度越高,SDM模型相较于SLM和SEM模型拟合度更好。AIC值越小,模型解释力越好,可以发现在绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛模型中SDM模型的AIC值均为最小。Wald检验用于判断SDM能否简化为SLM或SEM,Wald-lag和Wald-error检验结果都显著拒绝原假设,表明SDM模型拒绝简化为SLM模型和SEM模型。因此,本文选择SDM模型进行分析。

之后运用Hausman检验确定空间面板模型采用固定效应模型还是随机效应。绝对 $\beta$ 收敛模型和条件 $\beta$ 收敛模型中Hausman检验统计量 $Chi^2$ 结果分别为56.910、69.750,均显著拒绝随机效应模

表2 变量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of corresponding variables

变量	单位	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
$\ln CI_{it} - \ln CI_{it-1}$	t/万美元	1392	-0.006	0.106	-0.859	0.982
$\ln CI_{it-1}$	t/万美元	1392	1.526	0.720	-0.667	3.896
$\ln FDI_{it}$	万美元	1392	9.184	2.440	0.000	15.288
$\ln Trade_{it}$	万美元	1392	12.327	1.967	5.324	17.122

表3 2003—2018年碳强度全局莫兰指数检验结果

Table 3 Global Moran's I of carbon intensity, 2003-2018

年份	I	z值	年份	I	z值
2003	0.089***	5.175	2011	0.081***	4.358
2004	0.093***	5.273	2012	0.082***	4.408
2005	0.095***	5.334	2013	0.101***	5.301
2006	0.090***	4.991	2014	0.097***	5.082
2007	0.088***	4.864	2015	0.097***	5.060
2008	0.093***	5.053	2016	0.094***	4.874
2009	0.095***	5.111	2017	0.083***	4.395
2010	0.083***	4.480	2018	0.086***	4.523

注:\*\*\*表示在1%的置信水平下显著。

2022年4月

型,最终采用固定效应模型。进一步运用 $LR$ 检验对空间面板固定效应模型进行单向固定效应和双向固定效应进行识别: $LR$ -ind通过显著性检验表明双向固定效应模型优于个体单向固定效应模型; $LR$ -time通过显著性检验表明双向固定效应模型优于时间单向固定效应模型(表4)。

综上,全样本最终选取双向固定效应的空间杜宾模型进行实证分析。为保证分样本模型回归结果具有可比性,各分样本的模型选取与全样本保持一致,均选取双向固定效应的SDM模型。

#### 4.3 全样本 $\beta$ 收敛结果

从全样本实证结果来看,“一带一路”沿线国家碳强度有明显的收敛趋势。绝对 $\beta$ 收敛检验结果见表5, $\beta$ 值为-0.160,通过1%水平的显著性检验,

表4 模型适用性检验结果

Table 4 Results of model suitability test

相关检验	绝对 $\beta$ 收敛	条件 $\beta$ 收敛
$\log L(\text{SLM})$	1284.129	1284.510
$\log L(\text{SEM})$	1282.837	1283.117
$\log L(\text{SDM})$	1286.890	1296.290
$AIC(\text{SLM})$	-2562.257	-2559.020
$AIC(\text{SEM})$	-2559.674	-2556.235
$AIC(\text{SDM})$	-2565.780	-2576.581
$Wald$ -lag	5.520**(0.019)	18.52*** (0.000)
$Wald$ -error	8.120*** (0.004)	26.470*** (0.000)
$Chi^2$	56.910*** (0.000)	69.750*** (0.000)
$LR$ -ind	28.690*** (0.000)	38.710*** (0.000)
$LR$ -time	203.830*** (0.000)	212.840*** (0.000)

注:小括号内为 $p$ 值,\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的置信水平下显著,下同。

表5 全样本  $\beta$  收敛结果Table 5  $\beta$  convergence test of carbon intensity in the Belt and Road countries

	绝对 $\beta$ 收敛	条件 $\beta$ 收敛
$\beta$	-0.160*** (0.000)	-0.172*** (0.000)
$\ln FDI$		-0.000 (0.903)
$\ln Trade$		-0.006 (0.370)
$\theta$	0.175** (0.019)	0.064 (0.440)
$W \times \ln FDI$		-0.056** (0.011)
$W \times \ln Trade$		0.188*** (0.000)
$\rho$	-0.243* (0.054)	-0.291** (0.023)
$s$	0.174	0.189

进一步得到碳强度收敛速度 $s$ 为0.174。可见,“一带一路”沿线国家整体上碳强度存在绝对 $\beta$ 收敛,反映样本国家间碳强度差异不断缩小,在长期内将收敛于同一稳态,这将为“一带一路”沿线国家共同实现低碳转型发展提供基础。条件 $\beta$ 收敛检验结果见表5, $\beta$ 值为-0.172,通过1%水平的显著性检验,收敛速度为0.189。相比于绝对收敛速度,条件收敛速度提升0.015。可见,与中国开展投资和贸易合作对“一带一路”沿线国家碳强度收敛整体上具有促进作用。

与中国开展投资和贸易合作之所以对“一带一路”沿线国家的碳强度收敛具有促进作用,原因在于随着经贸合作规模不断扩大,其碳减排效应日益凸显<sup>[45,46]</sup>。首先,在贸易合作方面,近几年中国对“一带一路”沿线国家出口商品集中于机电类产品<sup>[47]</sup>,这些产品的进口国可以通过获得技术溢出效应提高本国技术水平<sup>[37]</sup>,技术水平的提升有利于降低碳强度<sup>[48]</sup>,进而缩小其与较为先进国家间的碳强度差异。②在投资合作方面,中国对“一带一路”沿线国家能源领域的投资越来越倾向于清洁能源<sup>[49]</sup>。清洁能源产业的发展不仅有助于“一带一路”沿线国家产业结构升级,还有效减少了碳排放,为碳强度较高的国家追赶碳强度较低的国家提供动力。因此,加强与中国的投资与贸易合作有助于“一带一路”沿线国家的碳强度收敛。

#### 4.4 分样本 $\beta$ 收敛结果

由于“一带一路”沿线国家分布范围广泛,区域差异较大,通过细化区域得到各分样本的碳强度收敛情况(表6)。从各分样本实证结果的特点来看,所有区域碳强度均表现出绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛趋势,并通过显著性检验,表明各分样本区域内均出现碳强度较高的国家追赶碳强度较低国家的趋势。条件收敛速度均大于绝对收敛速度,表明通过加强与中国的经贸合作提升了碳强度收敛速度。此外,各区域碳强度收敛过程都受到空间效应的影响。从分样本实证结果不同之处来看,分样本区域的碳强度收敛速度存在差异,并且与中国开展经贸合作对各分样本的碳强度收敛速度提升作用大小有所差异。本文进一步从亚洲、非洲、欧洲及

表6 分样本 $\beta$ 收敛结果Table 6  $\beta$  convergence test of carbon intensity grouped by region

洲	区域	收敛类型	$\beta$	$\ln FDI$	$\ln Trade$	$\theta$	$\rho$	$s$
亚洲	东南亚及东亚	绝对	-0.109*** (0.000)			-0.340* (0.066)	-0.958*** (0.000)	0.115
		条件	-0.183*** (0.000)	-0.001 (0.962)	0.050*** (0.004)	-0.284* (0.074)	-1.083*** (0.000)	0.202
	南亚	绝对	-0.111* (0.100)			-0.321* (0.059)	-0.991*** (0.000)	0.118
		条件	-0.196** (0.035)	-0.016 (0.535)	0.198*** (0.024)	-0.209* (0.087)	-0.976*** (0.000)	0.218
	中亚	绝对	-0.138** (0.024)			-0.387* (0.065)	-0.876*** (0.000)	0.149
		条件	-0.317** (0.013)	0.003 (0.915)	-0.119 (0.118)	-0.489* (0.056)	-0.878*** (0.000)	0.381
	西亚	绝对	-0.117*** (0.003)			-0.274* (0.069)	-0.638** (0.011)	0.124
		条件	-0.205*** (0.000)	0.028*** (0.001)	-0.037 (0.204)	-0.381* (0.087)	-0.561** (0.025)	0.229
非洲	撒哈拉以北	绝对	-0.616*** (0.000)			-0.931*** (0.007)	-1.137*** (0.000)	0.957
		条件	-0.703*** (0.000)	-0.060** (0.025)	-0.143*** (0.001)	-0.735** (0.039)	-0.925*** (0.000)	1.214
	撒哈拉以南	绝对	-0.264*** (0.000)			-0.418*** (0.007)	-0.991*** (0.000)	0.307
		条件	-0.297*** (0.000)	-0.014** (0.048)	-0.038*** (0.003)	-0.395** (0.010)	-0.976*** (0.000)	0.352
其他洲	欧洲	绝对	-0.091** (0.015)			-0.480** (0.046)	-0.160* (0.090)	0.095
		条件	-0.107** (0.010)	-0.001 (0.750)	-0.001 (0.960)	-0.667** (0.020)	-0.169* (0.089)	0.113
	拉丁美洲	绝对	-0.127*** (0.009)			-0.273 (0.147)	-0.459* (0.075)	0.136
		条件	-0.198*** (0.000)	-0.014 (0.197)	-0.021 (0.381)	-0.322* (0.093)	-0.563* (0.064)	0.221

拉丁美洲4个区域范围分析各样本组的差异及其原因。

亚洲地域广阔,将其细化为东南亚及东亚、南亚、中亚、西亚4个地区进行分析,发现与中国开展经贸合作对其碳强度收敛速度的提升作用存在差异。其中,提升作用最为突出的是中亚地区,其碳强度条件 $\beta$ 收敛速度为0.381,比绝对 $\beta$ 收敛速度0.149提升了0.232;其次是西亚提升了0.105;再次是南亚提升了0.100;最后是东南亚及东亚,收敛速度提升了0.087。原因在于,相比于亚洲其他地区,中国对位于中亚的“一带一路”沿线国家的投资增长速度更快。研究期内中国对中亚样本国家直接

投资增加了约243倍,远远大于排名第二位的东南亚及东亚地区(约99倍)。针对贸易额增长倍数而言,东南亚及东亚、南亚、中亚、西亚4个地区差距较小,依次为2.80、5.32、4.22、4.88倍。可见,在促进中亚地区碳强度收敛过程中,中国与该地区“一带一路”沿线国家的直接投资合作发挥的作用更大。相对而言,与中国开展经贸合作对亚洲其他3个地区的碳强度收敛速度提升作用差距较小。

以撒哈拉沙漠为界,将非洲国家划分为撒哈拉沙漠以北和以南两个分样本进行比对,实证结果发现:①相较于亚洲、拉丁美洲和欧洲,非洲具有更快的碳强度收敛速度。原因可能在于非洲样本国家



2022年4月

普遍面临能源贫困状况,制约了经济发展,因此具有更强烈的发展需求。同时非洲地区可再生能源丰富,具有降低碳强度的较大潜力<sup>[50]</sup>,因而表现出更快的碳强度收敛速度。②条件 $\beta$ 收敛模型中,非洲两个分样本的投资合作与贸易合作变量均显著为负,表明与中国开展经贸合作非常显著地抑制了其碳强度的增长率。原因在于中国与非洲开展的经贸合作对其经济发展起到了很大的促进作用,经贸合作规模占当地GDP比例的增长率在所有地区中最高,其中撒哈拉以北和以南地区分别为4.62%和4.27%。可见,来自中国的直接投资和与中国开展的双边贸易对非洲“一带一路”沿线国家的经济产生较大影响,进而显著地影响了碳强度的变化。③对比条件 $\beta$ 收敛与绝对 $\beta$ 收敛结果发现,撒哈拉沙漠以北国家碳强度收敛速度提升了0.257,而撒哈拉沙漠以南国家提升了0.045。表明相较于撒哈拉沙漠以南地区,中国与撒哈拉沙漠以北地区开展的投资和贸易合作在碳强度收敛过程中均具有更显著的促进作用。研究期内,撒哈拉沙漠以北非洲与中国的投资合作增长了109倍,贸易合作增长了6.56倍;而撒哈拉沙漠以南非洲与中国的投资合作增长了52倍,贸易合作增长了6.45倍。由此可见,与中国开展经贸合作对撒哈拉沙漠以北国家的碳强度收敛促进作用大于以南国家,并且在促进收敛过程中投资合作发挥了重要作用。

欧洲样本组在所有分样本中碳强度收敛速度提升最小。由于欧洲样本中70%的国家属于高收入水平,其经济结构优化空间较小并且碳强度更接近稳态水平<sup>[37]</sup>,因而表现出与中国开展经贸合作对碳排放强度收敛速度提升作用相对较小,仅为0.018。拉丁美洲样本组的碳强度收敛速度介于非洲样本与欧洲样本之间,更接近于亚洲样本。拉丁美洲样本条件收敛速度为0.221,比绝对收敛速度0.136增长了0.085,这一增长水平低于亚洲区域。原因可能在于与亚洲相比,拉丁美洲与中国相距较远,经济合作基础较弱,特别是接受来自中国的直接投资在样本期内仅增长了17倍,低于亚洲样本。因此,未来还存在通过加强与中国的投资合作<sup>[51]</sup>进一步促进拉丁美洲“一带一路”沿线国家碳强度收敛的潜力。

## 5 结论与政策启示

### 5.1 结论

本文基于地理距离权重矩阵建立空间 $\beta$ 收敛模型,对2003—2018年87个“一带一路”沿线国家整体与局部区域碳强度的收敛性进行研究。在此基础上,进一步探究了与中国开展投资和贸易合作对“一带一路”沿线国家碳强度收敛的影响。主要结论如下:

(1)“一带一路”沿线国家整体与局部地区碳强度均存在 $\beta$ 收敛趋势,并且在收敛过程中受到空间效应的显著影响,这种影响随着地理距离的增加而减弱。更为重要的是,与中国开展经贸合作能够明显促进“一带一路”沿线国家整体与局部各地区的碳强度收敛速度。这说明与中国的投资和贸易合作能够为碳强度较高的国家追赶碳强度较低的国家提供动力;反映出中国正在为“一带一路”沿线国家低碳转型奉献力量,为缓解全球气候变化作出贡献。

(2)分布于不同大洲的“一带一路”沿线国家与中国开展经贸合作对碳强度收敛的促进作用存在差异。就与中国开展经贸合作对碳强度收敛的促进作用而言,非洲地区最大,即与中国开展的经贸合作促进非洲地区经济发展的同时显著地抑制了碳强度的增长率,有助于碳强度加快收敛速度;其次是亚洲和拉丁美洲,其中对亚洲地区的促进作用大于拉丁美洲,原因在于中国与亚洲国家的地理空间接近、合作基础较好;最后是欧洲,由于欧洲发达国家居多,碳强度接近稳态水平,碳强度收敛速度提升空间小。

(3)分布于同一大洲不同地区的“一带一路”沿线国家与中国开展经贸合作对碳强度收敛的促进作用有所不同。在亚洲,由于中国对中亚的直接投资增加迅猛,因此对中亚碳强度收敛速度提升作用最为突出;而中国对西亚、南亚以及东亚和东南亚3个地区碳强度收敛速度的提升作用较低。在非洲,中国对撒哈拉以北地区的“一带一路”沿线国家的直接投资远远大于以南地区,因而对撒哈拉以北地区的碳强度收敛提升作用大于以南地区。

### 5.2 政策启示

基于以上结论,本文得出以下启示:



(1)加强“一带一路”沿线国家之间的交流与沟通,共同应对气候变化问题具有重要意义。碳强度存在空间相关性说明了各国碳强度变化相互影响、相互作用。应对气候变化问题不应该仅仅局限于各国家内部,应该打破国家边界的约束,加强跨地区交流合作。先进技术、管理经验的共享与融合更能催生有利于全球低碳转型的要素,进一步降低减碳成本,有利于碳强度向低值收敛,为“一带一路”沿线国家协同高质量发展提供基础。

(2)与中国加强经贸合作,对于“一带一路”沿线国家低碳发展具有重要作用。一方面,“一带一路”沿线国家加强与中国的贸易合作,可以从中获得技术溢出带来的好处;另一方面“一带一路”沿线国家积极接受来自中国的可再生能源项目投资,优化了当地产业结构并且减少化石能源碳排放量,使具有丰富可再生能源但开发水平不足的地区具有了降低碳强度的动力。因此,“一带一路”沿线国家加强与中国的经济联系,有助于促进本国技术进步和产业结构优化,从而可以促进低碳发展进程。

(3)各国家或地区可以结合自身特点,进一步挖掘与中国进行经贸合作的重点领域。首先,未来应进一步寻找亚洲“一带一路”沿线国家与中国经贸合作的新动力,尤其是在低碳经济领域。《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)在2022年开始生效,东盟国家及中、韩都参与其中,双方可以借此机制进一步深化贸易合作、升级贸易结构,共同推动亚洲地区的绿色低碳高质量发展。其次,非洲“一带一路”沿线国家未来可以进一步加强与中国在可再生能源领域的合作,这不仅可以促进非洲的经济发展,还有助于缓解其面临的能源供应不足问题。再次,拉丁美洲地区未来可结合自身的市场需求,在可再生能源投资、通信基础设施投资等方面与中国进行深入合作,携手应对气候变化问题。最后,欧洲地区经济发展水平与技术水平较高,通过加强中欧双方在高科技领域的经贸合作,能够提升技术水平,从而促进低碳发展,并为其他发展中国家完成低碳转型起到示范作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 中国一带一路网. 已同中国签订共建“一带一路”合作文件的国家一览[N/OL]. (2022-02-07) [2022-02-13]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/roll/77298.htm>. [Belt and Road Portal. List of Countries that Have Signed Cooperation Documents with China to Build the Belt and Road Initiative[N/OL]. (2022-02-07) [2022-02-13]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/roll/77298.htm>.]
- [2] 央视财经. 商务部:2018年我国与“一带一路”沿线国家经贸合作持续深化[N/OL]. (2019-01-24)[2022-03-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1623549903412505158&wfr=spider&for=pc>. [CCTV Financial. Ministry of Commerce: China's Economic and Trade Cooperation with the Belt and Road Initiative Countries Continued to Deepen in 2018[N/OL]. (2019-01-24)[2022-03-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1623549903412505158&wfr=spider&for=pc>.]
- [3] 中华人民共和国商务部, 国家统计局和国家外汇管理局. 2019年度中国对外直接投资统计公报[M]. 北京: 中国商务出版社, 2020. [Ministry of Commerce of the People's Republic of China, The National Bureau of Statistics and The State Administration of Foreign Exchange. 2019 Statistical Bulletin of China's Outward Foreign Direct Investment[M]. Beijing: China Commerce and Trade Press, 2020.]
- [4] Wang L, Wei Y M, Brown M A. Global transition to low-carbon electricity: A bibliometric analysis[J]. Applied Energy, 2017, 205: 57-68.
- [5] 中国一带一路网. 可再生能源成“一带一路”能源合作主力军[N/OL]. (2021-08-30) [2021-10-26]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/gnxw/185045.htm>. [Belt and Road Portal. Renewable Energy Becomes a Major Part of Energy Cooperation in the Belt and Road Initiative[N/OL]. (2021-08-30) [2021-10-26]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/gnxw/185045.htm>.]
- [6] Solow R M. A contribution to the theory of economic growth[J]. Quarterly Journal of Economics, 1956, 70(1): 65-94.
- [7] Barro R J, Xavier S. Convergence[J]. Journal of Political Economy, 1992, 100(2): 223-251.
- [8] 林伯强, 黄光晓. 梯度发展模式下中国区域碳排放的演化趋势: 基于空间分析的视角[J]. 金融研究, 2011, (12): 35-46. [Lin B Q, Huang G X. The spatial characteristics of China's regional carbon emissions under its gradient economic developing mode[J]. Journal of Financial Research, 2011, (12): 35-46.]
- [9] He W J, Chen H. Will China's provincial per capita energy consumption converge to a common level over 1990-2017? Evidence from a club convergence approach[J]. Energy, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123624.
- [10] 许广月. 碳排放收敛性: 理论假说和中国的经验研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2010, 27(9): 31-42. [Xu G Y. The convergence in carbon dioxide emissions: Theoretical hypotheses and empirical research in China[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2010, 27(9): 31-42.]
- [11] Zhao X G, Lu F. Spatial distribution characteristics and conver-

2022年4月

- gence of China's regional energy intensity: An industrial transfer perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118022.
- [12] 张文彬, 郝佳馨. 生态足迹视角下中国能源效率的空间差异性和收敛性研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2020, 20(5): 76–90. [Zhang W B, Hao J X. Study on regional differences and convergence of energy efficiency in China from the perspective of ecological footprint[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2020, 20(5): 76–90.]
- [13] 胡宗义, 唐李伟, 苏静. 省域碳排放强度的收敛性与动态演进[J]. *资源科学*, 2015, 37(1): 142–151. [Hu Z Y, Tang L W, Su J. Convergence of provincial carbon emission intensity and dynamic processes[J]. *Resources Science*, 2015, 37(1): 142–151.]
- [14] 王许亮, 王恕立, 滕泽伟. 中国服务业碳生产率的空间收敛性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(2): 70–79. [Wang X L, Wang S L, Teng Z W. Research on spatial convergence of carbon productivity in China's service industry[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(2): 70–79.]
- [15] Mussini M. Inequality and convergence in energy intensity in the European Union[J]. *Applied Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114371.
- [16] Cialani C, Mortazavi R. Sectoral analysis of club convergence in EU countries' CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.121332.
- [17] Matsuki T, Pan L. Per capita carbon emissions convergence in developing Asia: A century of evidence from covariate unit root test with endogenous structural breaks[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105326.
- [18] Liddle B, Sadorsky P. Energy efficiency in OECD and non-OECD countries: Estimates and convergence[J]. *Energy Efficiency*, 2021, DOI: 10.1007/s12053-021-09992-7.
- [19] Bhattacharya M, Inekwe J N, Sadorsky P. Convergence of energy productivity in Australian states and territories: Determinants and forecasts[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104538.
- [20] Li W, Zhao T, Wang Y A, et al. How does foreign direct investment influence energy intensity convergence in China? Evidence from prefecture-level data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.025.
- [21] Li J B, Huang X J, Yang H, et al. Convergence of carbon intensity in the Yangtze River Delta, China[J]. *Habitat International*, 2017, 60: 58–68.
- [22] Marrero Á S, Marrero G A, González R M, et al. Convergence in road transport CO<sub>2</sub> emissions in Europe[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105322.
- [23] 张峰, 薛惠锋. 基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 964–973. [Zhang F, Xue H F. Spatiotemporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 964–973.]
- [24] 杨旭, 屈志光, 邓远建. 中国省域林业生产技术效率的空间收敛性及分异特征[J]. *资源科学*, 2021, 43(10): 1947–1960. [Yang X, Qu Z G, Deng Y J. Spatial convergence and differentiation of forestry production technology efficiency in 30 provinces of China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(10): 1947–1960.]
- [25] Kounetas K E. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions convergence in European Union member countries. A tonneau des Danaïdes[J]. *Energy Economics*, 2018, DOI: 10.1016/j.eneco.2017.11.015.
- [26] Zhao X G, Zhang Y F, Bin L Y. The spillovers of foreign direct investment and the convergence of energy intensity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.225.
- [27] Tan X C, Zhu K W, Sun Y L, et al. Bibliometric research on the development of climate change in the BRI regions[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(2): 254–262.
- [28] 姚秋蕙, 韩梦瑶, 刘卫东. “一带一路”沿线地区隐含碳流动研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2210–2222. [Yao Q H, Han M Y, Liu W D. Tracking embodied carbon flows in the Belt and Road regions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2210–2222.]
- [29] Fan J L, Da Y B, Wan S L, et al. Determinants of carbon emissions in 'Belt and Road initiative' countries: A production technology perspective[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 268–279.
- [30] Muhammad S, Long X L, Salman M, et al. Effect of urbanization and international trade on CO<sub>2</sub> emissions across 65 Belt and Road initiative countries[J]. *Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117102.
- [31] Li X X, Liu C X, Wang F, et al. The effect of Chinese investment on reducing CO<sub>2</sub> emission for the Belt and Road countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125125.
- [32] 李侠祥, 刘昌新, 王芳, 等. 中国投资对“一带一路”地区经济增长和碳排放强度的影响[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(6): 618–631. [Li X X, Liu C X, Wang F, et al. The impact of China's investment on economic growth and carbon emission intensity in the "Belt and Road"[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(6): 618–631.]
- [33] Cai X, Che X H, Zhu B Z, et al. Will developing countries become pollution havens for developed countries? An empirical investigation in the Belt and Road[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 624–632.
- [34] Qi S Z, Peng H R, Zhang X L, et al. Is energy efficiency of Belt and Road Initiative countries catching up or falling behind? Evidence from a panel quantile regression approach[J]. *Applied Energy*, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113581.
- [35] 李小平, 王洋. “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[J]. *武汉大学学报(哲学社会科学版)*, 2017, 70

- (3): 58–76. [Li X P, Wang Y. A study on the convergence of carbon productivity in the major countries of the Belt and Road and the analysis of its influencing factors[J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Science), 2017, 70(3): 58–76.]
- [36] Huang Z L, Zhang H, Duan H B. Nonlinear globalization threshold effect of energy intensity convergence in Belt and Road countries [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117750.
- [37] Han L, Han B T, Shi X P, et al. Energy efficiency convergence across countries in the context of China's Belt and Road initiative [J]. Applied Energy, 2018, 213: 112–122.
- [38] Peng H R, Qi S Z, Zhang Y J. Does trade promote energy efficiency convergence in the Belt and Road Initiative countries?[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129063.
- [39] Qi S Z, Peng H R, Zhang Y J. Energy intensity convergence in Belt and Road Initiative (BRI) countries: What role does China-BRI trade play?[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 1–16.
- [40] 刘乃全, 戴晋. 我国对“一带一路”沿线国家OFDI的环境效应[J]. 经济管理, 2017, 39(12): 6–23. [Liu N Q, Dai J. Empirical analysis on the environmental effects of China's OFDI to countries along “The Belt and Road” [J]. Business and Management Journal, 2017, 39(12): 6–23.]
- [41] 高赢, 冯宗宪. “一带一路”沿线国家低碳发展效率测评及影响因素探究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(21): 39–47. [Gao Y, Feng Z X. Study on efficiency measurement and impact factors of low-carbon development for countries along the “One Belt and Road” [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2018, 35(21): 39–47.]
- [42] 中国一带一路网. 2020年“一带一路”沿线国家在华新设企业4294家, 直接投资82.7亿美元[N/OL]. (2021-01-31) [2022-01-26]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1690338620263893611&wfr=spider&for=pc>. [Belt and Road Portal. The Belt and Road Initiative Countries Have Set Up 4, 294 New Enterprises in China with a Direct Investment of 8.27 Billion US Dollars[N/OL]. (2021-01-31) [2022-01-26]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1690338620263893611&wfr=spider&for=pc>.]
- [43] 邓远建, 杨旭, 马强文, 等. 中国生态福利绩效水平的地区差距及收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 132–143. [Deng Y J, Yang X, Ma Q W, et al. Regional disparity and convergence of China's ecological welfare performance level[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(4): 132–143.]
- [44] 杨明海, 张红霞, 孙亚男, 等. 中国八大综合经济区科技创新能力的区域差距及其影响因素研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(4): 3–19. [Yang M H, Zhang H X, Sun Y N, et al. The study of the science and technology innovation ability in eight comprehensive economic areas of China[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(4): 3–19.]
- [45] 李艳梅, 牛苗苗, 张红丽. 京津冀区域内增加值贸易的经济收益和隐含碳排放比较[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1619–1629. [Li Y M, Niu M M, Zhang H L. Comparison of economic benefits and embodied carbon emissions of intraregional value-added trade in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Resources Science, 2019, 41(9): 1619–1629.]
- [46] 李子豪. 外商直接投资对中国碳排放的门槛效应研究[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 163–174. [Li Z H. Threshold effects of foreign direct investment on China's carbon emissions[J]. Resources Science, 2015, 37(1): 163–174.]
- [47] 中国一带一路网. 《“一带一路”贸易合作大数据报告2018》正式发布[N/OL]. (2018-05-06) [2022-01-26]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/gnxw/54720.htm>. [Belt and Road Portal. “Belt and Road” Trade Cooperation Big Data Report 2018 Was Officially Released[N/OL]. (2018-05-06) [2022-01-26]. <https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/gnxw/54720.htm>.]
- [48] 张兵兵, 徐康宁, 陈庭强. 技术进步对二氧化碳排放强度的影响研究[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 567–576. [Zhang B B, Xu K N, Chen T Q. The influence of technical progress on carbon dioxide emission intensity[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 567–576.]
- [49] Liu H Y, Wang Y L, Jiang J, et al. How green is the “Belt and Road Initiative”? Evidence from Chinese OFDI in the energy sector[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111709.
- [50] 叶芳. 中国对非直接投资对非洲国家实现2030可持续发展目标的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 13–22. [Ye F. Influence of foreign direct investment from China on achieving the 2030 sustainable development goals in African countries[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(4): 13–22.]
- [51] 沈维萍, 张莹. “一带一路”建设中“贸易畅通”的区域经济效应: 基于GTAP模拟的比较分析[J]. 西部论坛, 2020, 30(4): 110–124. [Shen W P, Zhang Y. Research on regional economic effect of “unblocked trade” in the construction of the “Belt and Road”: Comparative analysis based on GTAP simulation[J]. West Forum, 2020, 30(4): 110–124.]



## Influence of investment and trade cooperation with China on carbon intensity convergence in countries along the Belt and Road

LI Yanmei, FU Liyuan, CHI Yuanying

(College of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The common low-carbon transformation in the Belt and Road (BR) countries is crucial to global climate change mitigation. It is of great significance to examine carbon intensity convergence in the BR countries and analyze the impact of investment and trade cooperation with China on carbon intensity convergence for evaluating China's role in promoting the construction of the green BR. Based on the panel data of 87 BR countries from 2003 to 2018, this study established absolute and conditional  $\beta$  convergence models including spatial effects to analyze the carbon intensity convergence considering the investment and trade cooperation between China and the BR countries. The empirical results show that: (1) There are spatial autocorrelation and convergence of carbon intensity in the BR countries. The investment and trade cooperation between China and the BR countries has a positive influence on carbon intensity convergence. (2) The investment and trade cooperation between China and the BR countries has different effects on the improvement of carbon intensity convergence rate in different continents. The degree of improvement in Africa is greater than Asia, followed by Latin America. The degree of carbon intensity convergence improvement is minimal in Europe. (3) In different parts of the same continent, the investment and trade cooperation also have different effects on the improvement of carbon intensity convergence rate. In Africa, the whole continent is divided by the Sahara. The increase of convergence rate of carbon intensity in the areas north of the Sahara is faster than that to the south. In Asia, as far as the growth rate of carbon intensity convergence is concerned, Central Asia is most affected, followed by West Asia, South Asia, East Asia and Southeast Asia. Therefore, the BR countries should enhance communication to address climate change together. In particular, these countries can deepen the investment and trade cooperation relationship with China based on their own development characteristics, which is conducive to the early realization of common low-carbon transformation.

**Key words:** carbon intensity; convergence; spatial correlation; Belt and Road countries; China; investment and trade cooperation