

Research on Carbon Emission Reduction Effect of Heterogeneous Low-Carbon Technology Innovation under Space Effect

Wenli Ni, Pin Zhao, Zixiong Hou, Huizi Xu, Zhaowen Sun

Faculty of Finance and Economics, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Email: niwenli163@163.com

Received: Dec. 27th, 2019; accepted: Jan. 9th, 2020; published: Jan. 16th, 2020

Abstract

Technological innovation is considered to be one of the most important ways to address climate change, and it is necessary to explore the different impacts of different types of low-carbon technological innovation on carbon emissions. Using panel data from 30 provinces in China from 2004 to 2015, this paper uses SDM model to analyze the spatial effects of clean low-carbon technology innovation and gray low-carbon technology innovation on carbon emissions. It is found that low-carbon technology innovation and carbon emissions in China have a certain degree of concentration in the spatial distribution. Overall, low-carbon technology innovation significantly inhibited carbon emissions in the region, but did not affect neighboring regions. The role of different types of technology is different. Clean technologies have shown significant inhibitory effects on carbon emissions both locally and in neighboring regions, but gray technologies have limited their inhibitory effects on carbon emissions. This requires significant advances in clean technology innovation for zero-carbon production or consumption. At the same time, different types of innovation activities should be coordinated, as well as low-carbon governance in different regions.

Keywords

Low-Carbon Technology Innovation, Clean Technology, Gray Technology, Carbon Emissions, Spatial Durbin Model

空间效应下异质性低碳技术创新的碳减排效果研究

倪文立, 赵品, 侯子雄, 徐惠子, 孙兆文

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

Email: niwenli163@163.com

文章引用: 倪文立, 赵品, 侯子雄, 徐惠子, 孙兆文. 空间效应下异质性低碳技术创新的碳减排效果研究[J]. 可持续发展, 2020, 10(1): 74-84. DOI: 10.12677/sd.2020.101010

收稿日期：2019年12月27日；录用日期：2020年1月9日；发布日期：2020年1月16日

摘要

低碳技术创新被认为是应对气候变化问题的最重要途径之一，而探究不同类型低碳技术创新对碳排放的影响差异十分必要。本文将低碳技术创新区分为清洁与灰色技术创新，利用2004~2015年中国30个省的面板数据，采用SDM模型实证分析两类技术创新对碳排放影响的空间效应。研究发现：中国低碳技术创新与碳排放的空间分布上具有一定的集聚性；总体而言，低碳技术创新显著抑制本地区碳排放，但并未影响到邻近地区；不同类型技术的作用呈现出差异，清洁技术无论对本地还是邻近地区的碳排放都显示出显著抑制效果，但灰色技术对碳排放的抑制作用仅限于本地。这就要求大力推进零碳生产或消费的清洁低碳技术创新；同时，既应协同不同类型创新活动，又要协同不同区域低碳治理。

关键词

低碳技术创新，清洁技术，灰色技术，碳排放，空间杜宾模型

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，主要由碳排放引致的气候变化问题得到了世界各国的高度重视。中国作为全球碳排放第一大国，如何通过有效的减排措施与合理的减排政策来实现国际承诺，成为当前面临的主要问题之一。在众多解决方案之中，技术创新被认为是应对气候变化问题的一条重要途径[1]。然而，不同类型低碳技术创新往往能够造成不一样的碳减排效果，需要深入分析低碳技术创新类型。其中，一种分类方法是根据低碳技术创新的功能角度，将其分为清洁技术创新与灰色技术创新两类[2]。据此，本文探讨清洁与灰色两类低碳技术创新对中国实现碳减排的作用，并纳入这一影响的空间展开方式，将技术应对气候变化研究进一步深入，并为低碳转型提供更为详细的实践指引。

2. 文献综述

2.1. 清洁与灰色低碳技术创新

根据低碳技术的发生领域，从不同功能角度出发的低碳技术分类近年得到的研究日益增多。如在能源领域区分了面向传统化石能源和新能源发展与应用的有碳与无碳技术[3]。在更为细分的生物燃料部门，区分了源于传统生产的第一代技术与源于科学的第二代先进技术[4]。在这些研究基础上，研究者[2]进而将低碳技术在总体上区分为清洁与灰色两类：第一类清洁技术创新主要包括了与零碳生产和消费有关的相关技术创新；第二类灰色技术创新，即除去清洁技术的低碳技术创新，这类创新并非完全无碳，但往往具有提高能源效率的潜力。

2.2. 低碳技术创新与碳排放

国内外有多外学者对低碳技术创新的碳排放效应进行了研究，并取得了大量成果。但对于该问题的

结论, 还存在分歧。一方面, 诸多研究强调技术进步对减排的积极作用。如 IPCC 曾指出, 低碳技术创新被认为是解决气候变化以及环境问题的重要手段之一, 其潜在作用甚至超过了其他因素之和[1] [5]。基于多种指数分解模型的研究, 相关学者认为技术进步将成为中国碳减排主要的潜在推动力[6]。此外, 学者们对技术创新能够显著地减少碳排放进行了实证检验。如魏巍贤和杨芳[7]基于中国省级数据, 构建了知识存量和国外技术引进存量指标并检验, 显示自主研发和技术引进皆显著地促进了中国的碳减排。然而, 另一方面, 诸多研究对技术进步对碳减排的作用提出了质疑。如研究显示[8], 技术创新推动了中国的碳排放总量上升, 可能的影响机理是技术创新通过推动经济增长促进的碳增排, 大于其通过能源效率改进带来的碳减排[9]。

以上研究关注于技术创新总体对碳减排的作用分析, 大多没有考虑技术的差异性与多样性, 可能是导致研究结果产生分歧的重要原因之一。根据偏向性技术进步理论[10], 要素禀赋的差异将带来不同的技术轨道, 因此清洁技术与灰色技术在技术范式和应用领域上的差异, 也应该能够导致整体上技术进步呈现偏向性, 从而引起经济和环境影响的不同结果。这就要求进一步依据技术异质性, 深入探究不同技术的影响。

2.3. 低碳技术创新对碳排放作用的空间溢出效应

在以往的研究中, 多采用普通面板回归模型, 较少考虑到二氧化碳、技术创新等等诸多因素在不同地区之间的关联性与流动性, 忽视了要素在地区间可能存在的交换和溢出作用[11] [12]。空间计量学者 Anselin 的研究指出, 空间因素对环境问题具有重要的影响[13]。作为一种知识活动, 技术创新本身具有显著的空间依赖性, 创新活动的空间集中会有效地促进知识溢出, 而基于地理媒介的知识溢出则会对创新活动的地理分布产生重大影响[14], 进而对环境变化的空间格局产生更大范围的影响。与此同时, 在空间维度上, 碳元素本身具有明显的流动性。如程叶青等[15]直接采用空间面板计量模型, 分析了碳强度空间格局的主要影响因素。然而, 目前研究较少考虑技术创新在空间上对碳排放的影响, 关于技术创新本身异质性对于碳排放的空间效应研究更为缺失。因此, 本文基于技术差异性视角, 将低碳技术创新分为清洁技术与灰色技术, 通过空间效应分析, 深入低碳技术创新作用过程的细节, 探求异质性低碳技术创新对碳排放的影响。

3. 模型构建

3.1. 空间计量模型

本文参考 STIRPAT 模型作为基础框架[16], 采用该模型探讨低碳创新对碳排放的影响。STIRPAT 模型的一般形式为: $I_{it} = \alpha P_{it}^b A_{it}^c T_{it}^d e$, 其中 I 、 P 、 A 和 T 分别表示环境影响、人口规模、人均财富和技术水平, e 为误差项。考虑到 STIRPAT 模型允许扩充其中的影响因素[17], 本文将参考 EKC 假说[18]选择相应的解释变量。初始计量模型设定如式(1)所示。然后, 进一步研究低碳技术创新内部异质性对于碳排放的作用, 引入清洁技术创新与灰色技术创新, 模型设定如式(2)所示。

$$\ln carbon_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 Y02_{i,t} + \delta X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

$$\ln carbon_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 gray_{i,t} + \alpha_2 clean_{i,t} + \delta X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

式中, i 代表各省市; t 代表时间; $\ln carbon$ 为被解释变量, 代表碳排放量; $Y02$ 代表低碳创新专利; $gray$ 、 $clean$ 分别代表 $Y02$ 内部清洁低碳技术创新与灰色低碳技术创新; $X_{i,t}$ 为一组控制变量, 包含了可能对碳排放产生影响的若干变量; δ 代表控制变量的弹性系数; $\varepsilon_{i,t}$ 代表残差项。

由于碳排放和低碳创新活动具有空间相关性, 本文将采用空间计量模型来具体验证低碳创新及其异

质性对碳排放的作用。本文采用空间杜宾模型(SDM), 表达式如式(3)所示。

$$y_{it} = c + \rho \sum_{i=1}^n w_{it} y_{it} + \alpha x_{it} + \sum_{i=1}^n w_{it} x_{it} \gamma + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中, y_{it} 为被解释变量, x_{it} 为解释变量, ρ 为空间自回归系数, γ 为自变量空间滞后系数, μ_i 、 δ_t 分别表示空间效应和时间效应, w_{it} 为空间权重矩阵, ε_{it} 为残差项; α 表示本地区自变量对因变量的影响。

3.2. 变量选取

3.2.1. 被解释变量

碳排放(carbon): 本文采用各省碳排放量的对数表征低碳发展水平。由于中国未公开发布历年的碳排放量, 故本文的碳核算方法参考 IPCC 提供的排放系数法, 计算公式如式 2 所示。

$$carbon = \frac{12}{44} \times (\sum E_n \times \alpha_n \times \beta_n) \quad (4)$$

式中, carbon 指碳排放量; E_n 表示第 n 种能源终端消费量, 能源种类包括原煤、原油、天然气等 17 种能源品种; α_n 表示第 n 种能源的折标煤系数; β_n 表示第 n 种能源的 CO_2 排放系数。

3.2.2. 核心解释变量

低碳创新(Y02): 本文采用 2013 年美国 and 英国联合颁布的合作专利分类系统(CPC)中 Y02 (改善气候变化的技术)分类申请专利数来衡量低碳创新[19], 且仅采用中国籍人士于中国国内申请的专利。为排除大量低质量专利的干扰[20], 本文以每个技术每年领域被引次数前 5% 的专利作为衡量低碳创新的指标, 以 2004~2015 年为研究区间, 对各领域加总后获得每个省每年的低碳创新数据。鉴于 Y02 低碳技术创新存在异质性, 将低碳技术创新分为清洁技术与灰色技术两个亚类。清洁技术代表了与零碳生产或零碳消费相关的技术创新; 灰色技术并非零碳, 但在提高能源利用效率方面存在潜力; 与处理 Y02 低碳技术创新数据方法相同, 仍以每个技术领域被引量前 5% 的专利加以衡量, 加总得到清洁技术与灰色技术数据。

3.2.3. 控制变量

考虑到影响碳排放的其他因素, 本文还将设置以下控制变量:

① 经济水平(PGDP): 碳排放与经济增长有着密切的关系, 预计经济的增长会带来碳排放的增加, 随着经济结构的升级, 经济增长对于碳排放的促进效果可能会变弱, 但是仍然会有所影响。本文用一个国家或地区的人均国内生产总值来表示经济发展水平。

② 城镇化水平(UR): 选用城镇人口占该区域总人口比重。一方面, 城镇化带来的人口规模效应促进碳排放增长; 另一方面, 城镇化产生的集聚效应总体上会抑制碳排放增长。综合考虑中国目前所处的城镇化阶段特征, 本文预期其系数为正。

③ 产业结构(IS): 第二产业消耗大量化石能源, 成为中国碳排放最主要的来源。不断加快的工业化进程造成工业部门总体能耗远高于其他产业, 本文采用第二产业产值占该 GDP 的比重来表示。故预期该变量系数为正。

④ 环境规制(ER): 以环境污染治理投资占 GDP 比重反映政府污染治理的努力程度, 投资额越高越有利于环境的改善, 因此预期其对碳排放的系数为负。

⑤ 对外开放(FDI): 本文采用实际利用外商直接投资占 GDP 比重来反映各地区的对外开放程度。综合以往的研究[21] [22], FDI 可能因不同的国家与行业, 而对碳排放呈现出不同的影响。

⑥ 知识存量(stock): 本文在 Y02 低碳技术创新的基础上计算出知识存量指标。知识存量反映了知识作为固定变量对于碳排放的影响。知识存量变量构造如下:

$$K_{i,t} = \sum_{s=0}^{\infty} e^{-\beta_1 s} (1 - e^{-\beta_2(s+1)}) PAT_{i,s} \quad (5)$$

其中, $K_{i,t}$ 表示第一年经济中低碳技术的知识储备; $PAT_{i,s}$ 表示 Y02 低碳技术专利的数量; s 表示前一年的数量; β_1 表示衰减率, β_2 表示扩散率。参照已有研究[23], β_1 和 β_2 分别设为 0.36 和 0.03。

3.2.4. 数据来源与处理

本文采用 2004~2015 年为研究区间, 中国 30 个省市为研究对象(港澳台及西藏数据缺失)。Y02 专利数据来自 incopat 专利数据库; 环境污染治理投资等数据来源于对应年份《中国环境统计年鉴》以及; GDP、外商直接投资、城镇化水平等数据来源于国家统计局数据。采用人民币兑美元年均价汇率将以美元为单位的出口额换算成人民币, 达到统一货币单位的目的。为了消除价格波动影响, 以 2004 年为基期, 对经济变量做了不变价处理。同时消除异方差的影响, 本文对部分变量采取对数处理。

3.3. 空间自相关检验

考虑到区域之间各元素的流动性带来的空间溢出, 一个地区的碳排放水平可能受到相邻地区碳排放的影响, 仅使用普通计量模型可能存在较大偏差。本文对核心变量进行空间自相关检验, 作为进一步选择普通计量模型或空间计量模型的依据。本文采用常用的全局和局部 Moran's I 来分别验证碳排放(carbon)和低碳技术创新(Y02)的空间相关性, 选择地理距离权重矩阵作为空间权重矩阵, 其元素 w_{ij} 表示 i 地区省会与 j 地区省会最近公路里程的倒数[24]。全局 Moran's I 的计算公式为:

$$I = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (c_i - \bar{c})(c_j - \bar{c}) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (c_i - \bar{c})^2 \right]} \quad (6)$$

其中 n 表示 30 个省, w_{ij} 是空间权重矩阵, c 和 \bar{c} 分别是碳排放量和碳排放均值。经计算碳排放和低碳创新的全局 Moran's I 均大于零, 绝大多数通过 5% 水平的显著性检验, 说明中国省域碳排放和低碳技术创新均存在显著的空间相关性。

碳排放和低碳技术创新的局部空间相关性采用 Moran's I 散点图验证(限于篇幅, 仅选择 2004 年与 2015 年报告)。局部 Moran's I 计算公式为:

$$I_i = \left[(c_i - \bar{c}) / S^2 \right] \times \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_j - \bar{c}) \quad (7)$$

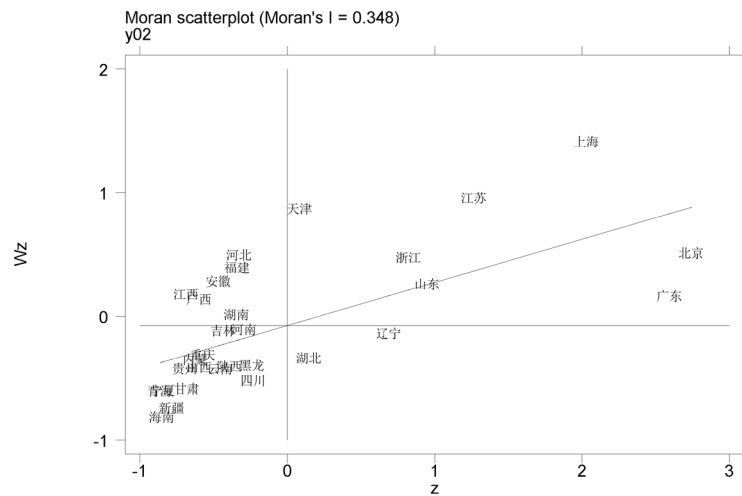
结果见图 1 与图 2, 可以看出趋势线均位于一三象限, 表明碳排放与低碳技术创新均具有局部空间相关性。

4. 实证结果与分析

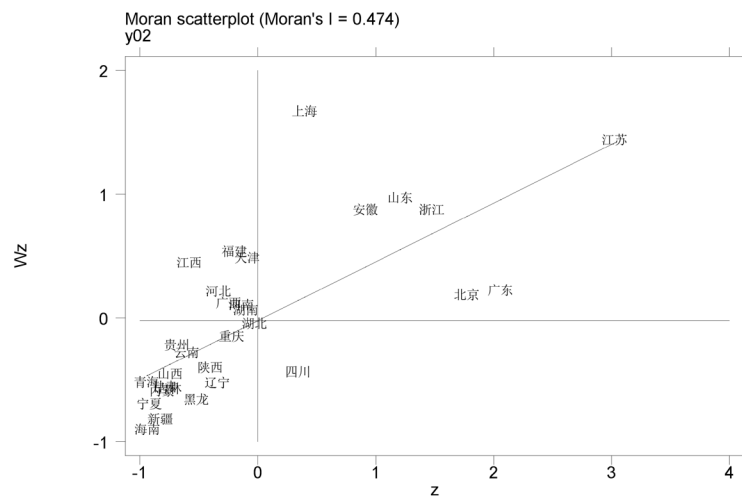
4.1. 低碳技术创新对碳排放的空间效应

4.1.1. 空间计量模型选择检验

根据全局 Moran's I 检验结果, 本文将采用空间计量模型对两者之间的关系进行实证分析。在确定模型之前还需要做以下检验: 首先, 普通面板数据模型(OLS)回归残差的空间自相关检验显示, LM-lag、LM-error 以及 Robust LM-error 的 p 统计值在 1% 显著性水平下拒绝原假设, Robust LM-lag 的 p 统计值在 5% 显著性水平下拒绝原假设, 进一步佐证构建空间计量模型的合理性; 此外进行 LR 检验, 结果显示空间滞后模型(SAR)和空间误差模型(SEM)的 LR 值均通过显著性水平检验, 说明 SDM 模型不可退化为 SAR 或 SEM 模型; 最后采用 Hausman 检验, 检验结果表明随机效应模型优于固定效应。检验过程结果见表 1。

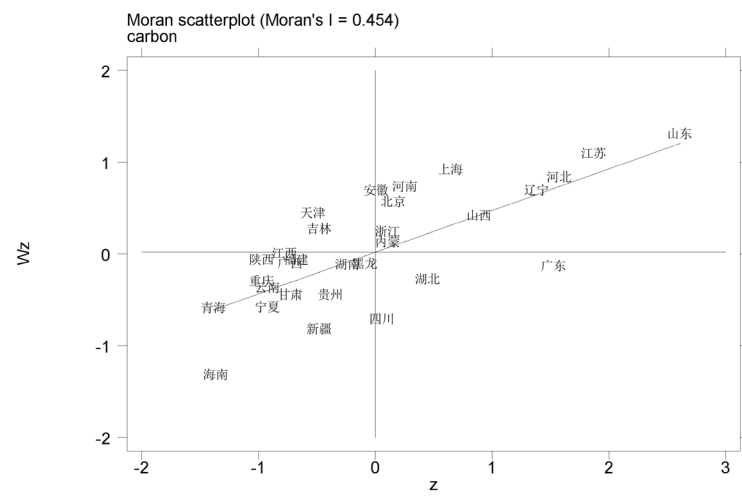


(a) 2004



(b) 2015

Figure 1. Scatter plot of local carbon emissions by Moran's I
图 1. 碳排放局部 Moran's I 散点图



(a) 2004

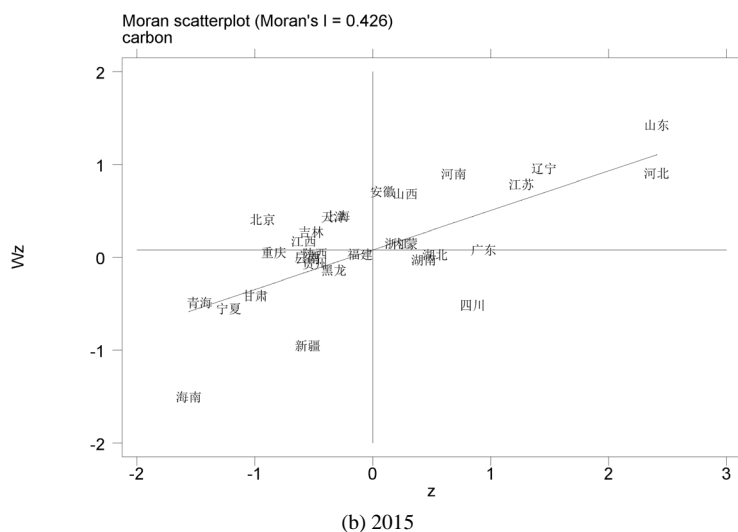


Figure 2. Moran's I scatter plot of Y02 low-carbon technology innovation (2004 and 2015)

图 2. Y02 低碳技术创新局部 Moran's I 散点图(2004 与 2015)

Table 1. SDM model empirical results

表 1. SDM 模型实证结果

	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应
Y02	-0.000923*** (-7.27)	0.00126*** (-8.85)	--	--
gray	--	--	-0.000262 (-1.01)	-0.000729** (-2.37)
clean	--	--	-0.00246*** (-4.89)	-0.00250*** (-4.23)
lnPGDP	1.071*** (5.46)	-0.159 (-1.46)	1.175*** (6.05)	-0.157 (-1.46)
UR	1.915*** (3.40)	1.438*** (2.75)	1.681*** (3.01)	1.278** (2.44)
IS	0.427* (1.66)	0.977*** (4.14)	0.247 (0.96)	0.960*** (4.06)
ER	3.487 (1.58)	-0.851 (-0.32)	3.326 (1.54)	-1.244 (-0.48)
FDI	0.0603*** (2.94)	0.0634*** (2.58)	0.0631*** (3.14)	0.0638*** (2.61)
stock	0.137** (2.57)	0.144*** (4.54)	0.172*** (3.24)	0.164*** (5.06)
_cons	--	12.09*** (8.87)	--	12.83*** (9.22)
rho	-0.0814 (-0.96)	0.273*** (4.02)	-0.132 (-1.54)	0.228*** (3.24)
LM-lag		7.248***		7.877***
LM-error		21.436***		20.603***
Robust LM-lag		6.127**		6.716***
Robust LM-error		20.314***		19.442***
LR-lag		19.50***		20.60***
LR-error		19.81***		20.73***
Hausman		-4.32		-3.33

注: *、**、***分别表示在 10%、5%、1%水平下显著。括号内为 t 值。

4.1.2. 空间计量模型结果

根据空间杜宾模型,采用极大似然法估计 2004~2015 年中国低碳技术创新对碳排放的影响,估计结果见表 1。为了对比,表 1 列出了杜宾固定效应与随机效应的估计结果。由估计结果可知,核心被解释变量低碳技术创新($Y02$)通过 1% 显著性水平检验。

表 1 中空间杜宾随机效应模型的估计结果显示,低碳技术创新($Y02$)的系数为负,且通过 1% 水平显著性水平检验,说明低碳技术创新对本地碳排放发挥了抑制作用。表明通过聚焦于重点产业领域与关键技术研发,中国技术创新驱动低碳转型的战略取得了初步成效,并为未来中国实现碳减排目标奠定了较为坚实的技术基础,与预期相符。

4.1.3. 低碳技术创新与碳排放的空间效应分解

在 SDM 模型中,解释变量不仅会影响本地区的被解释变量,同时也会影响邻近地区的被解释变量,并通过反馈效应反作用于本地区,因此前文的估计系数并不能直接反映自变量对因变量的边际效应,而仅仅在作用方向和显著性水平上是有效的。根据相关研究,本文进一步将各影响因素对碳排放的影响分解为直接效应和间接效应[25]。直接效应指的是某因素变动对本地区碳排放的影响,其中包含反馈效应,但是由于其数值较小,一般可以忽略;间接效应指的是本地某因素的变化对邻近地区碳排放产生影响,即为该因素的空间溢出效应。各因素的影响效应分解结果见表 2 所示。

Table 2. SDM model decomposition

表 2. SDM 模型分解

	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
$Y02$	-0.00127*** (-8.83)	-0.000335 (-1.03)	-0.00161*** (-4.81)	--	--	--
gray	--	--	--	-0.000711** (-2.30)	0.000218 (0.39)	-0.000493 (-0.92)
clean	--	--	--	-0.00260*** (-4.41)	-0.00206* (-1.89)	-0.00465*** (-4.14)
$\ln PGDP$	-0.166 (-1.56)	-0.0624 (-1.34)	-0.228 (-1.54)	-0.148 (-1.43)	-0.0430 (-1.18)	-0.191 (-1.41)
UR	1.518*** (2.97)	0.570** (2.00)	2.088*** (2.82)	1.259** (2.55)	0.374* (1.67)	1.633** (2.40)
IS	0.989*** (4.31)	0.373** (2.25)	1.362*** (3.81)	0.968*** (4.13)	0.282** (2.07)	1.250*** (3.76)
ER	-0.868 (-0.34)	-0.296 (-0.30)	-1.164 (-0.33)	-1.133 (-0.44)	-0.324 (-0.40)	-1.457 (-0.43)
FDI	0.0656*** (2.67)	0.0243* (1.96)	0.0899*** (2.61)	0.0646** (2.51)	0.0181* (1.87)	0.0827** (2.52)
$stock$	0.146*** (4.88)	0.0525*** (3.10)	0.198*** (5.45)	0.163*** (4.94)	0.0453*** (2.85)	0.209*** (5.58)

注: *、**、***分别表示在 10%、5%、1% 水平下显著。括号内为 t 值。

通过表 2 各影响因素的效应分解结果可见, 低碳技术创新($Y02$)的作用表现为两个方面。一是直接效应。低碳技术创新对本地区碳排放的影响系数为 -8.83 , 通过了 1% 的显著性检验, 这与我们的预期和先前大量学者的研究结果一致。结果表明, 通过聚焦于重点产业领域与关键技术研发, 中国技术创新驱动低碳转型的战略取得了初步成效, 并为未来实现碳减排目标奠定了较为坚实的技术基础。二是间接效应。低碳技术创新的空间溢出效应为负, 说明一个地区的低碳创新活动对其他地区的碳排放也具有抑制作用, 但尚不显著。表明目前一个地区的低碳创新活动还主要局限于本地, 区域的联动性与技术发展水平不高, 共同推进低碳创新的机制尚未形成。考虑到低碳技术创新的内部异质性所导致的可能性, 本文将在下文具体探讨清洁技术与灰色技术对碳排放的影响。

就控制变量而言, 经济水平($\ln PGDP$)对无论本地区还是临近地区的碳排放都具有反向作用, 但不显著。可能的原因是随着人们对环境问题的持续关注, 经济越是发达的地区越是加快调整产业结构, 从而实现绿色发展。城镇化发展水平(UR)推动了碳排放的增长。说明中国城镇化发展模式引致能源的大规模消耗, 从而增加了碳排放量, 向以人为本的高质量城镇化转变是解决此问题的关键。产业结构(IS)以第二产业占比表示, 作为推动我国经济高速发展的主导产业, 第二产业是碳排放的重要来源之一, 这导致产业结构对碳排放的增加具有显著的正向影响, 不仅对本地区的碳排放具有显著的正向作用, 对相邻地区碳排放也具有一定的促进作用。环境规制(ER)对碳排放的直接效应与间接效应均为负, 但是尚不显著。外商直接投资(FDI)向本地转移了高排放、高污染的非环境友好型产业, 同时, 本地外商直接投资比重的提高对邻近地区碳排放同样具有正效应。可能的原因是邻近地区一味追求外商投资的规模, 而忽视了生态要求, 从而间接增加了邻近地区碳排放。知识存量($stock$): 结果表明知识以及技术创新水平经过时间的沉淀与市场的淘汰, 剩下的知识存量往往能够对碳排放起到显著地抑制作用, 并且在区域上也具有一定的联动性, 拥有对其他地区的节能减排的潜力。

4.2. 清洁技术创新与灰色技术创新对碳排放的空间效应

考虑到整体 $Y02$ 技术创新对碳排放的空间溢出效应并不显著, 有可能是 $Y02$ 技术本身异质性所造成。本文将 $Y02$ 技术创新划分为清洁技术与灰色技术两个子类, 验证两类技术分别对于碳排放的作用与影响。

4.2.1. 空间计量模型选择检验

与前文一样, 首先进行空间计量模型选择检验。LM 检验与 LR 检验均通过了 1% 显著性水平检验, 同样表明 SDM 模型不可退化为 SAR 或 SEM 模型; Hausman 检验结果表明随机效应模型优于固定效应。检验过程结果如表 1 所示。

4.2.2. 空间计量模型结果

由表 1 的估计结果可知, 灰色低碳技术创新($gray$)与清洁低碳技术创新($clean$)的系数均为负, 且分别通过 5%、1% 显著性水平检验, 说明无论是清洁技术还是灰色技术, 都对本地碳排放发挥了抑制作用。下文将具体探讨两类技术创新的空间溢出效应。

4.2.3. 清洁、灰色技术创新与碳排放的空间效应分解

① 灰色技术创新($gray$)

从直接效应来看, 灰色技术创新对本地区碳排放显著为负, 影响系数为 -0.00127 , 通过了 1% 的显著性检验。这说明了灰色技术虽然不涉及零碳生产或者零碳消费, 但是能够起到节约能源以及提高能源利用效率的作用, 从而可能抑制了碳排放。

从间接效应来看, 灰色技术创新空间溢出效应为正, 但是不显著。这说明一个地区的灰色低碳技术创新活动对其他地区的碳排放具有促进作用。可能的原因是灰色技术创新存在“回弹效应” [26]。即由于

灰色技术创新提高了能源利用率以及生产效率，还可能刺激能源的需求，从而导致碳排放的提升。

② 清洁技术创新(clean)

清洁技术创新对本地区碳排放的直接效应与间接效应均显著为负，影响系数分别为-0.00260 与 -0.00206，通过了 1% 的显著性检验。这说明了清洁技术节能减排的潜力十分显著，而且不仅能够降低本地区的碳排放，在区域上也具有联动性以及空间溢出性，对其他地区的碳减排也能够做出积极贡献。

5. 结论与建议

根据实证结果，本文研究结论如下：

(1) 样本期内，中国的碳排放与低碳技术创新整体空间分布具有一定的集聚性，局部空间集聚性具有差异，并且随着时间的变化，局部空间集聚性呈现动态演变的特征。(2) 无论是直接效应还是溢出效应，低碳技术创新对碳排放都具有显著的抑制作用，相比较而言，空间溢出作用的影响系数更小，可能与低碳创新内部异质性有关。(3) 清洁技术创新对于本地区的碳排放存在显著的抑制作用，并且空间溢出效应也十分明显。(4) 灰色技术创新对于本地区的碳减排作用显著，但是对于其他地区的碳排放具有正作用，但不显著，表明了灰色技术对于邻接地区的碳排放可能存在促进作用，可能是“回弹效应”所带来的结果。(5) 城市化、产业结构升级以及外商直接投资等都会导致中国碳排放的增长，而经济增长并没有显著引致碳排放增加，环境规制则对碳排放起到了抑制作用，但是作用不显著。

基于以上研究结论，进而得到政策建议如下：(1) 由于低碳技术创新内部具有异质性，科技政策的重心应该进一步聚焦于与零碳生产和消费相关的清洁技术创新专利上，加大研发投入。(2) 政府在发挥低碳技术创新的作用时，要考虑到技术本身存在的异质性，推动技术创新之间的协同发展。(3) 促进区域之间合作，积极构建信息共享机制，整合科技资源，深化市场一体化建设，拓展低碳技术发展与应用的空间。

参考文献

- [1] IPCC (2007) The Physical Science Basis of Climate Change (Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change). International Panel on Climate Change (IPCC), Geneva.
- [2] Yan, Z., Yi, L., Du, K. and Yang, Z. (2017) Impacts of Low-Carbon Innovation and Its Heterogeneous Components on CO₂ Emissions. *Sustainability*, **9**, 548. <https://doi.org/10.3390/su9040548>
- [3] Wang, Z., Yang, Z., Zhang, Y. and Yin, J. (2012) Energy Technology Patents-CO₂ Emissions Nexus: An Empirical Analysis from China. *Energy Policy*, **42**, 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.082>
- [4] Costantini, V., Crespi, F. and Palma, A. (2017) Characterizing the Policy Mix and Its Impact on Eco-Innovation. *Research Policy*, **46**, 799-819. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.02.004>
- [5] 杨芳. 技术进步对中国二氧化碳排放的影响及政策研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2013.
- [6] 陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011, 34(4): 124-143.
- [7] 魏巍贤, 杨芳. 技术进步对中国二氧化碳排放的影响[J]. 统计研究, 2010, 27(7): 36-44.
- [8] 袁鹏, 程施, 刘海洋. 国际贸易对我国 CO₂ 排放增长的影响——基于 SDA 与 LMDI 结合的分解法[J]. 经济评论, 2012(1): 122-132.
- [9] 金培振, 张亚斌, 彭星. 技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应——基于中国工业 35 个行业的经验证据[J]. 科学学研究, 2014, 32(5): 706-716.
- [10] Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. and Hemous, D. (2012) The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, **102**, 131-166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- [11] 王为东, 卢娜, 张财经. 空间溢出效应视角下低碳技术创新对气候变化的响应[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 22-30.
- [12] 卢娜, 王为东, 王淼, 张财经. 突破性低碳创新与碳排放: 直接影响与空间溢出[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 95-103.
- [13] Anselin, L. (2001) Spatial Effects in Econometric Practice in Environmental and Resource Economics. *American*

Journal of Agricultural Economics, **83**, 705-710. <https://doi.org/10.1111/0002-9092.00194>

- [14] 李国平, 王春扬. 我国省域创新产出的空间特征和时空演化——基于探索性空间数据分析的实证[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 95-106.
- [15] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消耗碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [16] Dietz, T. and Rosa, E.A. (1997) Effects of Population and Affluence on CO₂ Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **94**, 175-179. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.1.175>
- [17] Shao, S., Yang, L., Yu, M. and Yu, M. (2011) Estimation, Characteristics, and Determinants of Energy-Related Industrial CO₂ Emissions in Shanghai (China), 1994-2009. *Energy Policy*, **39**, 6476-6494. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.049>
- [18] Grossman, G.M. (1995) Pollution and Growth: What Do We Know? In: Goldin, I. and Winters, L.A., Eds., *The Economics of Sustainable Development*, Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511751905.003>
- [19] Bian, Y., He, P. and Xu, H. (2013) Estimation of Potential Energy Saving and Carbon Dioxide Emission Reduction in China Based on an Extended Non-Radial DEA Approach. *Energy Policy*, **63**, 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.051>
- [20] Trajtenberg, M. (1990) A Penny for Your Quotes: Patent Citations and the Value of Innovations. *The RAND Journal of Economics*, **21**, 172-187.
- [21] Cole, M.A. and Fredriksson, E.P.G. (2006) Endogenous Pollution Havens: Does FDI Influence Environmental Regulations? *The Scandinavian Journal of Economics*, **108**, 157-178. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9442.2006.00439.x>
- [22] Antweiler, W., Copeland, B.R. and Taylor, M.S. (2001) Is Free Trade Good for the Environment? *American Economic Review*, **91**, 877-908. <https://doi.org/10.1257/aer.91.4.877>
- [23] Popp, D.C. (2001) The Effect of New Technology on Energy Consumption. *Resource & Energy Economics*, **23**, 215-239. [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(00)00045-2)
- [24] 邵帅, 李欣, 曹建华, 杨莉莉. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73-88.
- [25] Bell, K.P. (2010) Introduction to Spatial Econometrics, by James Le Sage and R. Kelly Pace. *Journal of Regional Science*, **50**, 1014-1015. https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2010.00709_7.x
- [26] Herring, H. and Sorrell, S. (2009) Energy Efficiency and Sustainable Consumption: The Rebound Effect. *Energy Efficiency and Sustainable Consumption*. Palgrave Macmillan, New York. <https://doi.org/10.1057/9780230583108>