

粤港澳大湾区清洁能源技术转移的空间路径及其减排效应

周彦楠¹, 何则², 张雅欣^{3,4}, 杨思睿¹, 杨宇^{5,6}

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2. 中国宏观经济研究院能源研究所, 北京 100038;
3. 中国国际咨询工程有限公司博士后科研工作站, 北京 100048; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084;
5. 北京师范大学地理科学部, 北京 100875; 6. 中国科学院地理科学与资源研究所
中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 推动清洁能源技术转移和应用是缓解能源相关环境问题和应对气候变化的重要途径。粤港澳大湾区(简称大湾区)作为中国的经济和创新中心之一,在推动清洁能源技术转移及减排方面具有巨大潜力。本文基于2010—2022年清洁能源专利转让数据,开展大湾区本地、跨区域及跨国清洁能源技术转移的不同空间路径特征分析,并采用STIRPAT模型探讨其对区域减排目标的影响。研究发现:①大湾区本地清洁能源技术转移规模波动上升,转移模式以“城内集散型”为主,转移网络由单核驱动到双核驱动再到多中心互动;②大湾区跨区域清洁能源技术转移日益活跃,与本地转移规模的差距缩小,转移模式由集聚向扩散转变,技术对外需求的地域范围从长三角城市群向京津冀城市群转变,对外扩散则由东中部创新水平较高的城市向海西、乌鲁木齐、克拉玛依等西部城市拓展;③大湾区跨国清洁能源技术转移规模相对较小,但其活跃度逐渐提升,形成以香港—深圳为核心的转移网络,互动对象更加多元;④清洁能源技术转移对大湾区碳排放具有显著抑制作用,特别是本地及跨区域的城际技术转移,而跨国技术转移的减排效应尚不显著。本文揭示了粤港澳大湾区清洁能源技术转移的空间路径、特征及其减排效应,可为制定区域低碳政策和促进科技创新合作提供参考。

关键词: 清洁能源技术; 技术转移; 空间路径; 减排效应; 粤港澳大湾区

DOI: 10.11821/dlxb202505007

1 引言

推广应用清洁能源技术是世界各国应对日益严重的环境挑战、实现碳中和目标和积极应对气候变化的重要途径^[1]。国际能源署(International Energy Agency, IEA)报告指出,得益于太阳能、风能等清洁能源的快速发展,2023年全球与能源活动相关的碳排放量增幅呈现降低态势^[1]。同时,后疫情时代大力发展清洁能源技术和产业也是全球经济“绿色复苏”的必然选择。标普全球商品洞察的预测显示,全球清洁能源技术投资到2030年有望达到1万亿美元,届时全球将进入清洁能源技术引领的新工业化时代^[2],经济发展模式从能源资源依赖型向能源技术依赖型转变^[3]。然而,清洁能源技术的研发、应用和推

收稿日期: 2024-02-22; 修订日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130712, 72348003, 42201196) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42130712, No.72348003, No.42201196]

作者简介: 周彦楠(1992-), 女, 河南信阳人, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为能源环境管理与区域可持续发展。

E-mail: zhouyannan@usst.edu.cn

通讯作者: 杨宇(1984-), 男, 山东威海人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为能源地理与可持续发展。

E-mail: yangyu@igsnr.ac.cn

广仍面临着诸多挑战。技术的公共物品属性强、研发周期长、投入产出效益低、经济环境双重外部性突出等特征,使得独立开展清洁能源技术研发困难重重^[4]。此外,区域间技术发展的不均衡性进一步加剧区域“绿色鸿沟”,发达地区在创新资源、创新效应等方面占据优势地位,而发展中地区则相对滞后^[5]。

在此背景下,技术转移成为一种可以快速实现技术推广的有效途径^[6],特别是通过“引进—吸收—扩散—再创新”的模式,欠发达地区可以显著降低研发成本、规避研发风险和克服技术壁垒^[7],从而提升本地清洁能源技术能力^[8],弥补区域间技术差距^[9]。近年来,学术界对清洁能源技术转移的关注度日益上升,相关研究聚焦于过程解析、空间效应和影响因素等方面,并取得了积极进展。首先,在清洁能源技术转移的过程特征分析方面,基于创新扩散理论的“S”型曲线规律,大量研究对技术扩散的时间和接纳者数量等过程特征开展了研究分析^[10];博弈论、系统动力学等模型被广泛使用^[11-13],用于解析技术转移动态演变特征和内在机制。其次,清洁能源技术转移的地理扩散特征和空间溢出效应成为关注焦点^[14]。相关研究主要采用复杂网络模型、空间计量模型等探讨清洁能源技术空间扩散的竞争格局^[15-16]、空间溢出效应^[17-18]、空间关联网[19-20]与区域空间结构等^[21-22],较好地揭示清洁能源技术在不同区域间的动态扩散特征和互动模式,为理解清洁能源技术转移的地域特性提供重要依据。此外,清洁能源技术转移的驱动因素日益成为学界关注的重点^[10]。学者们通常采用因素分解模型、面板计量模型等方法,探讨经济与产业基础、技术特性与势差、转出与吸收能力、市场与政策规制及地理距离邻近性等因素对清洁能源技术转移的影响^[10, 23-24]。特别是,技术转入地的技术吸收能力被认为是清洁能源技术转移的关键因素之一,直接影响技术转移的效果,并决定外部技术能否内化为本地新质生产力。

然而,面向更高质量推动清洁能源技术转移和推广应用发展,现有研究仍存在一些不足。首先,清洁能源技术转移的多元模式、具体路径和环境效应等,仍需要进行深入的挖掘,尤其是清洁能源技术的转移如何具体影响碳排放的探讨^[25-26]。其次,现有研究大多聚焦于全球尺度的南南合作与南北互动^[27-29],而对于区域层面技术转移的减排效应探讨相对有限。特别是在像粤港澳大湾区这样的特殊区域,清洁能源技术转移的研究更是相对匮乏。尽管有研究从邻近性角度,对大湾区的知识创新和转移进行分析^[30],但从技术转移内容和应用角度看,相关研究仍较为欠缺。这主要表现在两个方面:一是针对大湾区的探讨主要集中于技术转移的整体分析层面^[31],而从清洁能源这一特殊领域的技术转移研究相对有限,相关研究结果对大湾区建设绿色低碳湾区示范性与指导性尚显不足。二是清洁能源技术转移与碳减排之间的关系尚待明晰,尤其是从不同空间路径探讨清洁能源技术在跨国、跨区域、本地等多尺度视角下进行技术转移及其环境效应的差异性相对匮乏。技术转移能够通过加强知识流动、促进知识吸收与扩散、提高再创新能力、强化转移双方合作等途径提高城市的环境绩效。而缄默知识、标准差异、国际风险等“摩擦力”会造成跨国、跨区域、本地技术转移的路径模式及效应的差异性。转移双方的知识差异过大,则“摩擦力”造成的成本过高,在技术应用与创新层面难度加大;转移双方的知识过于相近,则主体行为模式固定而削弱技术转移的效应,不利于新知识的引入与创新。

因此,如何科学地选择适当的路径或路径组合来引进技术,以最大化技术转移的效应,亟需进行深入的研究和探讨。这不仅有助于揭示技术转移在不同空间尺度上与本地知识吸收、技术扩散及环境改善之间的复杂关系,也为区域能源和科技政策的制定提供宝贵启示。为此,本文以粤港澳大湾区为典型研究区域,深入分析2010—2022年大湾区

在本地、跨区域、跨国等不同空间尺度清洁能源技术转移的空间特征，并采用STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 模型进一步评估其在不同空间路径下获取清洁能源技术对碳减排的影响程度及其作用机制的差异性。本文通过揭示大湾区清洁能源创新空间的互动机制及其减排效应，为大湾区科技支撑绿色低碳湾区提供重要参考。

2 清洁能源技术转移路径及其减排效应的理论框架

城市清洁能源技术创新能力的提升，不仅依赖于内部的知识基础和研发投入，更受益于外部的创新溢出效应。这种创新溢出，既可能来自同一区域内的其他城市或企业，也可能跨越更广泛的地理空间。实际上，除了少数在清洁能源技术创新上具有显著优势的城市（如北京、上海、深圳等）外，大多数城市或区域都需要通过获取外部的清洁能源技术来弥补本地的技术供给不足^[24]。为了更加全面地揭示区域清洁能源技术的流动性质，相关研究通常以城市为基本分析单元，从技术扩散和技术集聚两种方向来开展分析（图1）。从技术集聚角度，若城市从本区域内部获取的清洁能源技术数量大于从区域外部获取的清洁能源技术量，则为内源型；反之，为外源型。从技术扩散角度，若城市向区域内部转移的清洁能源技术量大于外部，则为内给型；反之，则为外给型^[22]。对于技术扩散城市而言，技术的流出在促进经济增长、剥离冗余知识等方面具有积极影响；而对于技术受让城市，即技术集聚城市，外部技术的引入能够优化本地创新能力、推动产业结构升级，进而促进经济增长^[18]。

同样，技术的流动方向对城市碳减排作用机制具有显著差异性。在清洁能源技术从扩散城市转移出去之前，它作为该城市的清洁技术存量对当地的碳排放减少做出贡献。然而，一旦技术发生转让，即专利权属变更后，原有的减排效应不再对扩散城市产生直接影响，而是转移到受让城市，成为其技术增量^[32]。在受让城市中，这些引入的清洁能源技术可以通过在产业链上“点”的嵌入，催化传统产业的转型升级，促进节能减排技术的应用。这种技术转移的“点”效应逐渐形成“链”的集群效应，在受让城市的创新链、生产链、服务链拓展，从而提升产业劳动生产率，优化能源消费结构^[33]，最终显著降低碳排放。然而，受让城市要实现通过清洁能源技术转移促进减排的目标，关键在于能否内化吸收引进技术并提升本地清洁能源开发利用水平^[34]。这意味着仅仅引进技术是不够的，还需要考虑技术引进后的消化吸收能力以及引进技术与本地经济、社会、环境等要素的匹配程度。如果引进与本地条件不匹配，那么技术引进很难转化为实际能源效

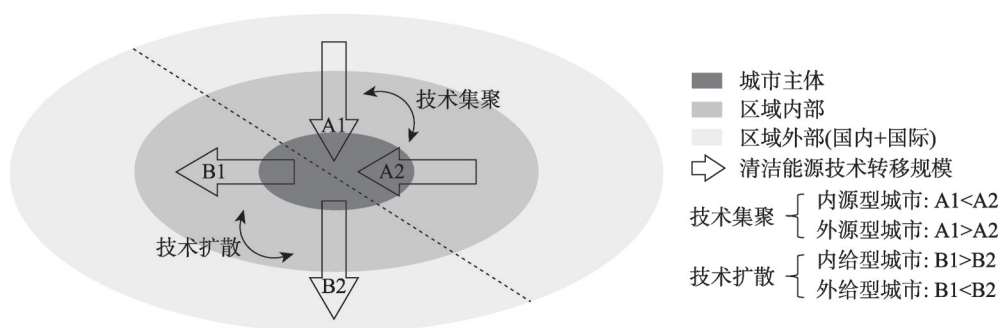


图1 基于清洁能源技术转移的城市类型划分框架图

Fig. 1 Framework for classifying city types based on clean energy technology transfer

率的提升实现减排^[35]。为此,可以进一步采用Dietz等提出的STIRPAT模型框架^[36],来阐述以清洁能源技术转移为核心的多维因素约束的城市碳减排框架(图2)。STIRPAT框架是在Ehrlich等提出的经典 $I=PAT$ 模型的基础上进行拓展和细化^[37],其中 I (Impact)为环境影响, P (Population)为人口数量, A (Affluence)为人均富裕度水平, T (Technology)为技术水平。该框架可以用来解释人口、经济和技术等因素对环境的影响。

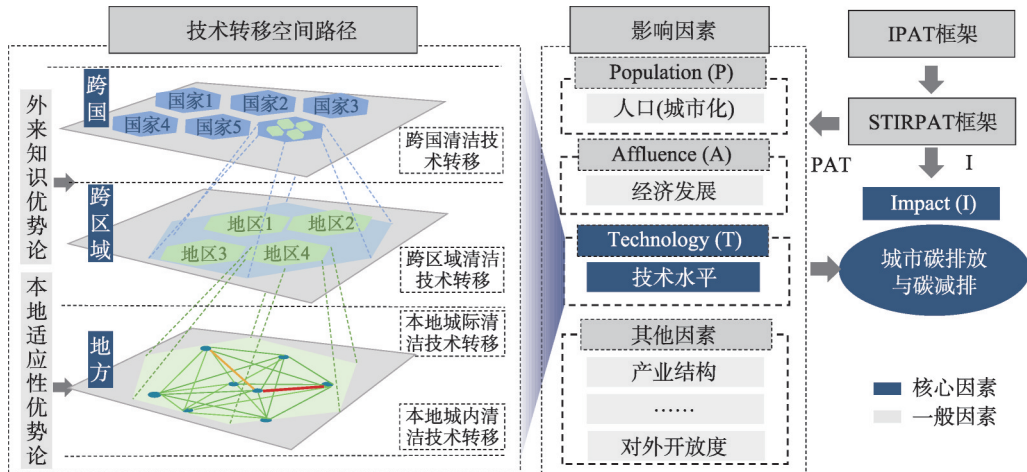


图2 清洁能源技术转移及其减排效应理论分析框架

Fig. 2 Theoretical framework of clean energy technology transfers and its emission reduction effect

在STIRPAT研究框架下,以清洁能源技术转移为代表的技术水平对地理空间距离表现出一定的敏感性^[38-39]。这一现象在地理学中被广泛讨论,尤其是在有关知识溢出和区域创新系统的研究中^[40]。近距离的地理邻近性通常被认为有助于知识的非正式交流和共享,促进技术的快速传播和应用^[41]。然而,随着信息通信技术的发展,地理距离的限制逐渐被削弱,跨区域甚至跨国的技术转移变得更加频繁^[42]。这种不同空间尺度下的技术转移所引发的效应差异,引发越来越多的学者讨论。一部分学者强调外域新异知识的引入对本地创新的重要性^[38, 43-45]。在演化经济地理学中,外部知识,特别是那些与本地知识基础存在相关性的知识,能够丰富本地知识池的多样性,避免路径依赖和技术锁定的风险^[46-49]。例如,Teng的实证研究表明,国外技术引进对降低工业部门的能源强度具有显著效果,而国内技术引进的影响相对有限^[50]。这一发现支持了“外来知识优势论”,即外部知识由于其新颖性和异质性,能够为本地创新带来突破口。然而,另一些学者则提出不同的观点。他们从制度经济地理和关系经济地理的角度出发,强调本地化知识的优势,认为本地技术转移更易适配本地应用场景,符合区域的社会经济条件和市场需求^[51]。随着国家科技水平的提升,国内不同区域之间的技术差距逐渐缩小,本地技术更具备针对性和可操作性^[52]。尤其是在清洁能源领域,技术的有效应用往往需要与当地的自然条件、产业结构和政策环境相结合。本地技术提供者对这些因素具有更深入的理解,因而能够提供更为定制化的解决方案,对地区环境改善的功效并不亚于国外引进的技术^[53]。此观点强调了“本地适应性优势”,即技术的适用性和有效性在很大程度上取决于其与本地环境的契合程度^[54]。

此外,基于STIRPAT模型框架,清洁能源技术转移协同区域经济发展水平、城市化进程、产业结构以及对外开放程度等因素共同作用城市碳减排。具体而言,经济发展水平作为衡量地区综合实力的关键指标,对清洁能源技术传播与应用具有显著影响。经济

发达地区通常具备更强的财政实力和市场需求，能够投入更多资源用于清洁能源技术的研发、引进和推广^[55]。这些地区往往对环保和可持续发展有更高的认识，更愿意接受并应用清洁能源技术。同时，较高的经济发展水平也意味着更完善的基础设施和产业链配套，为清洁能源技术的规模化应用提供了有利条件，进一步促进技术的落地与减排效果的发挥^[56-57]。其次，城市化进程在推动能源需求快速增长的同时，也对清洁能源技术的传播与应用产生双重影响。一方面，城市化推动了能源需求的快速增长^[58-59]，特别是建筑能耗和交通用能的增加，这为清洁能源技术提供了广阔的市场空间。同时，城市化进程中的人口和资源集聚也可能加剧环境污染和生态压力^[60-61]，促使地区更加重视清洁能源的发展。因此，城市地区往往成为清洁能源技术推广的前沿阵地。另一方面，城市化也带来了土地利用紧张^[62]、基础设施改造难度大等问题^[63]，对清洁能源技术的本地适应性提出了更高要求，需要技术创新与政策支持的双重努力。此外，产业结构是影响清洁能源技术传播与应用的关键因素之一。以重工业为主的地区面临传统能源消费量大与环境污染严重的双重压力^[64]，对清洁能源技术的需求更为迫切。相比之下，以服务业和高新技术产业为主的地区，其产业结构相对清洁^[65]，对清洁能源技术的接受度更高，技术转移和应用的过程更为顺畅。同时，产业结构的变化还会影响能源消费模式和能源需求结构^[66]，进而影响清洁能源技术的市场潜力和减排效果。最后，对外开放程度不仅反映了一个地区与外部世界的经济联系紧密程度，还间接反映了该地区获取并应用国际先进清洁能源技术的能力与潜力^[67]。通过对外开放引进的技术可能面临本地适配等一系列挑战，这些挑战包括技术适应性、操作和维护的复杂性以及与本地产业链的兼容性等。这些因素不仅增加了技术应用的难度，还可能导致额外的成本负担，从而限制外部技术在本地的推广和应用，削弱其对碳减排的贡献。

3 数据来源与方法

3.1 数据来源

专利是有效衡量技术的重要指标，专利变更和交易是目前主要的技术转移方式。本文在测度城市清洁能源技术转移过程中，参考世界知识产权组织（WIPO）推出的国际专利分类绿色清单工具（IPC Green Inventory）中的技术分类体系，并选取其中的可替代能源生产（Alternative Energy Production）部分作为筛选清洁能源技术的依据（表1）。这一分类涵盖了太阳能、风能、生物燃料、燃料电池、地热能、非燃烧热能、水能、废弃物能源和余热能共9类清洁能源技术。基于IncoPat全球专利数据库，通过识别专利转移法律状态中转让人、受让人地址及其专利转移登记生效日，提取2010—2022年粤港澳大湾区本地、跨区域以及跨国清洁能源专利转移数据。统计结果显示，2010—2022年大湾区发生清洁能源技术转移共计9603件。在清洁能源技术转移中，太阳能技术占比最高，占大湾区总量的47.43%，其次是废弃物能源（12.44%）、生物燃料（11.92%）、燃料电池（11.31%）等清洁能源技术。

城市碳排放数据主要来源于中国碳核算数据库（Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADs）以及IEA能源数据库。粤港澳大湾区各城市社会经济数据主要来源于《中国城市统计年鉴》以及各地统计公报。受数据限制，碳排放数据以及社会经济数据选取年份为2010—2020年。

3.2 研究方法

本文基于STIRPAT模型，将城市获取清洁能源技术这一核心解释变量纳入到

表1 基于IPC分类体系的清洁能源技术专利识别及占比

可替代能源分类	IPC 专利分类类别	占比(%)
太阳能	F24S、H02S、H01L27/142、H01L31/00、H01L31/02、H01L31/0248、H01L31/04、H01L31/00、H01L31/02、H01L31/0203、H01L31/0216、H01L31/0224等	47.43
风能	F03D、H02K7/18、B63B35/00、E04H12/00、B60K16/00、B60L8/00、B63H13/00	4.98
生物燃料	C10B53/02、C10L5/40、C10L9/00、C10L1/02、C10L1/19、C07C67/00、C07C69/00、C10G、C11C3/10、C11C、C12P7/64、C10L1/182、C12N9/24、C12P7/06等	11.92
燃料电池	C10J、C10B53/00、H01M12/00、H01M12/02、H01M12/04、H01M12/06、H01M12/08、H01M2/00、H01M2/02、H01M2/04、H01M4/86、H01M4/88等	11.31
水能	E02B9/08、F03B13/12、F03B13/14、F03B13/16、F03B13/18、F03B13/20、F03B13/22、F03B13/24、F03B13/26、F03B15/00等	0.85
地热能	F24T、F01K、F24F5/00、H02N10/00、F25B30/06、F03G4/00、F03G4/02、F03G4/04、F03G4/06、F03G7/04	6.53
废弃物能源	C10L5/42、C10L5/44、F23G7/00、F23G7/10、C10J3/02、C10J3/46、F23B90/00、F23G5/027、B09B3/00、C21B5/06、D21C11/00、A62D3/02、C02F11/04等	12.44
非燃烧热能	F24T10/00、F24T50/00、F24V30/00、F24V40/00、F24V50/00、F24V40/10、F24D11/02、F24D15/04、F24D17/02、F24H4/00、F25B30/00等	0.35

STIRPAT回归模型中,同时控制其他可能影响城市碳排放水平的变量,进而评估清洁能源技术转移对碳排放的影响。具体地,取对数后的基准回归模型形式如下:

$$\ln CI_{it} = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \ln X_{ikt} + \sum_{j=1}^4 \beta_j \ln CX_{jkt} + c_0 + v_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: CI 为城市 CO_2 排放强度(简称碳排放强度); X 为解释变量集,反映大湾区城市清洁能源技术受让情况; CX 为控制变量集; i 代表城市; t 为时间; k 是解释变量; j 是控制变量数; α_i 、 β_j 分别代表解释变量、控制变量的待估计系数; c_0 为常数项; v_i 为个体固定效应; δ_t 为时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

考虑到清洁能源技术的传播和应用过程对地理空间距离表现出一定的敏感性,本文细化了清洁能源技术转移的空间指标体系,以深入剖析不同空间路径下清洁能源技术的获取对碳排放的影响的复杂机理(表2)。具体而言,本文首先以大湾区清洁能源技术集

表2 变量说明

Tab. 2 Definition of variables

类别	指标	描述
被解释变量	城市碳排放强度(CI)	大湾区城市单位GDP的 CO_2 排放量
解释变量集(X)	大湾区清洁能源技术集聚规模总量(pin)	大湾区城市清洁能源技术转入总量
	本地城市内部清洁能源技术集聚强度($plocal$)	大湾区城市清洁能源技术来源于城市内部流动量占区域总量的比例
	本地城际清洁能源技术集聚强度($pgba$)	大湾区城市清洁能源技术来源于区域内部跨城流动量占区域总量的比例
	跨区域城际清洁能源技术集聚强度($pdom$)	大湾区城市清洁能源技术来源于区域外部跨城流动量占区域总量的比例
	跨国清洁能源技术集聚强度($pint$)	大湾区城市清洁能源技术来源于国际其他地区跨城流动量占区域总量的比例
控制变量集(CX)	经济发展程度($pgdp$)	城市生产总值与总人口比值
	城镇化水平(ur)	城市年末城镇人口占总人口比例
	产业结构(is)	城市第二产业增加值与GDP比值
	对外开放度(op)	城市对外直接投资(FDI)与GDP比值

聚规模 (pin) 来衡量城市在清洁能源技术领域的整体集聚水平。其次, 用本地城市内部清洁能源技术集聚强度 ($plocal$) 反映城市内部清洁能源技术的集聚程度及其自我供给能力, 为理解清洁能源技术本地化提供重要视角。进一步地, 为了探究大湾区区域内部城市间清洁能源技术的协同与集聚效率, 引入本地城际清洁能源技术集聚强度 ($pgba$) 反映大湾区区域内部各城市间技术流动与合作的紧密程度, 这是评估区域技术一体化水平的关键维度。同时, 考虑到区域外部技术资源对大湾区城市清洁能源发展的影响, 采用跨区域城际清洁能源技术集聚强度 ($pdom$) 用来衡量大湾区城市对区域外部技术资源的依赖与整合能力, 从而揭示跨区域技术合作的动态过程; 最后, 在全球化大背景下, 本文还特别关注大湾区城市在国际清洁能源技术合作中的地位与角色, 引入跨国清洁能源技术集聚强度 ($pint$) 用来反映大湾区城市在全球清洁能源技术创新网络中的连接度与合作潜力, 为评估其国际清洁能源技术合作减排效应提供重要依据。

此外, 为了更好刻画一些可能潜在影响清洁能源技术转移减排效应的复杂因素, 本文设置了一套控制变量集 (CX)。该变量集包括经济发展程度 ($pgdp$)、城镇化水平 (ur)、产业结构 (is)、对外开放度 (op) 4个核心因素, 旨在构建一个更加精细且全面的分析框架, 以深入评估清洁能源技术转移对碳排放强度的综合影响机制。首先, 经济发展程度 ($pgdp$), 作为衡量地区经济实力和清洁能源技术需求及应用的关键指标, 通过人均国内生产总值这一具体量化指标来表征, 以期理解在不同经济水平下, 清洁能源技术转移对碳排放影响的差异性及其背后的经济逻辑。其次, 采用城市年末城镇人口占总人口比例作为城镇化水平的量化指标, 以全面地评估城市化背景下清洁能源技术转移的减排效应及其复杂性。再次, 采用城市第二产业增加值占GDP的比例作为产业结构的代理变量, 用以分析清洁能源技术转移在不同产业结构背景下的减排效果及其产业特异性。最后, 采用城市对外直接投资额占GDP比例作为衡量城市对外开放度的量化指标, 用于探讨在全球化背景下大湾区清洁能源技术转移如何与地区开放程度相互作用, 进而影响碳排放水平的动态机制。

4 结果与讨论

4.1 粤港澳大湾区清洁能源技术转移与碳排放变化特征

粤港澳大湾区在清洁能源技术集聚方面呈现出整体波动上升的特征, 碳排放强度呈现为下降趋势。作为全国清洁能源技术流动较为活跃的典型区域之一, 大湾区清洁能源技术转入量在全国的占比从2010年的28%提升到2022年的35%, 显示了其在全国清洁能源技术市场中的重要性和影响力日益增强。与此同时, 其清洁能源技术转入量也从2010年的102件提升至2022年779件, 实现了近7倍的大幅增长, 进一步凸显了大湾区在清洁能源技术领域的强劲活力和吸引能力 (图3)。与之对应, 2010—2020年间大湾区碳排放强度变化趋势与其清洁能源技术受让趋势呈现出相反的态势, 即碳排放强度波动下降。具体而言, 大湾区的碳排放强度由2010年0.67 t/万元降至2020年0.36 t/万元, 降幅达到44.78%。

4.2 粤港澳大湾区清洁能源技术转移空间特征

4.2.1 本地转移以城内集散型为主 粤港澳大湾区本地清洁能源技术转移规模整体呈波动上升的趋势, 转移模式以城内集散型为主。2010—2022年大湾区本地清洁能源技术转移量由78件波动增加至487件。实现增长的动力主要来源于大湾区各城市内部清洁能源技术的转移; 相比之下, 大湾区区域内部城际间清洁能源技术转移整体动力略显不足 (图4a)。具体而言, 2010—2014年大湾区本地共转移清洁能源技术639件, 其中本地城际清

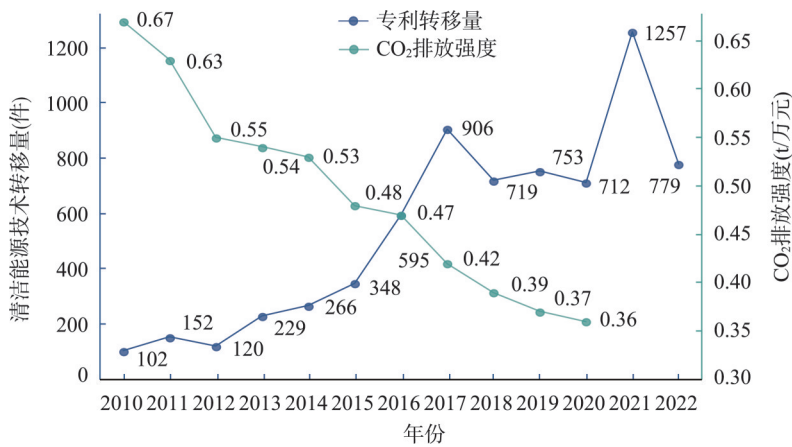


图3 2010—2022年粤港澳大湾区清洁能源技术转移量与CO₂排放强度变化

Fig. 3 Changes in clean energy technology transfers and CO₂ emission intensity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2022

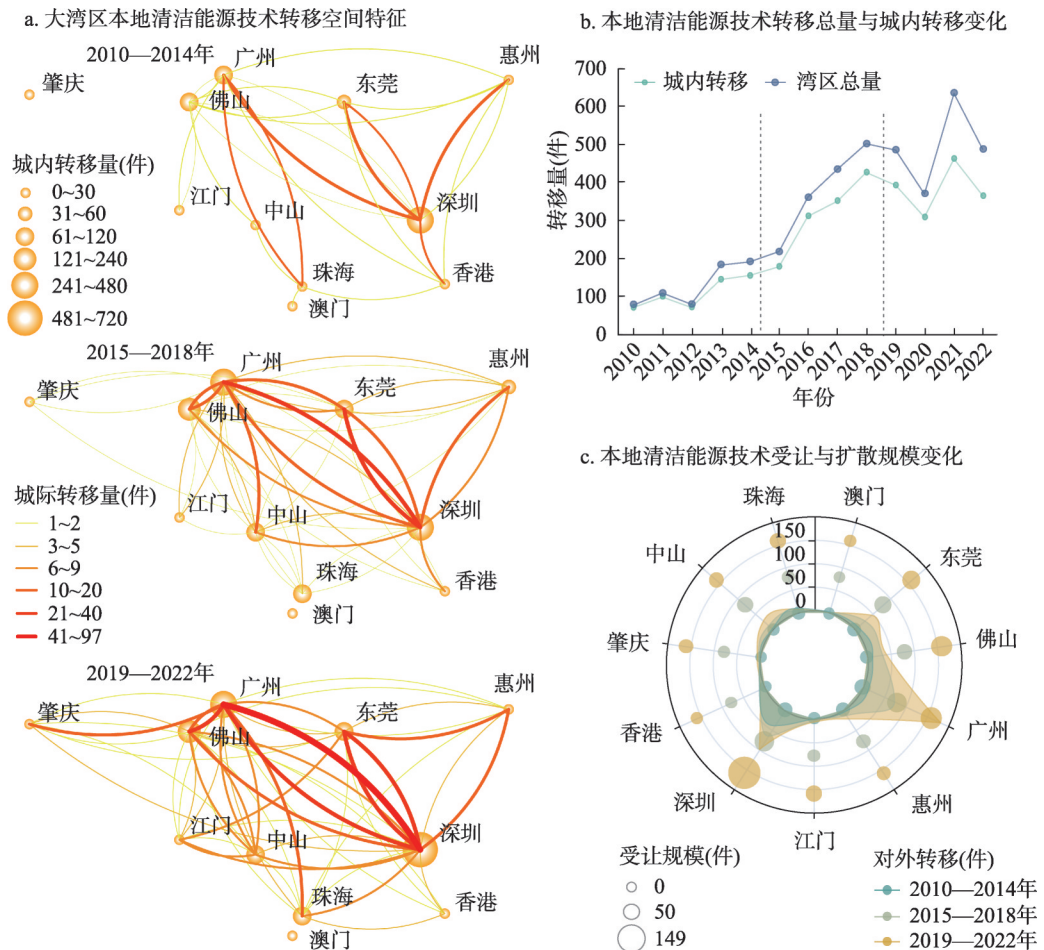


图4 2010—2022年粤港澳大湾区本地清洁能源技术转移演化特征

Fig. 4 Changes in local clean energy technology transfers within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2022

清洁能源技术转移量仅为101件,占大湾区转移总量的15.81%。而2015—2018年大湾区本地清洁能源技术转移量大规模增长,达到1512件,增幅高达136.62%。相应地,大湾区本地城际清洁能源技术转移增加至246件,在大湾区转移总量的比例小幅提升,为16.27%。2019—2022年受疫情影响,大湾区清洁能源技术转移量波动性较大。相较于上一阶段,大湾区本地清洁能源技术转移的增长幅度有所下滑,仅为30.75%,转移规模增加至1977件。然而,同期本地城际清洁能源技术转移的活跃度整体上有所提升,增加至451件,占大湾区本地清洁技术转移总量的22.81%。由此可见,随着大湾区城市清洁能源技术创新能力的提升,其在满足部分自给的前提下,开始向大湾区内部其他城市进行技术扩散,表明大湾区在清洁能源领域的发展正逐渐走向区域一体化和协同创新的道路。

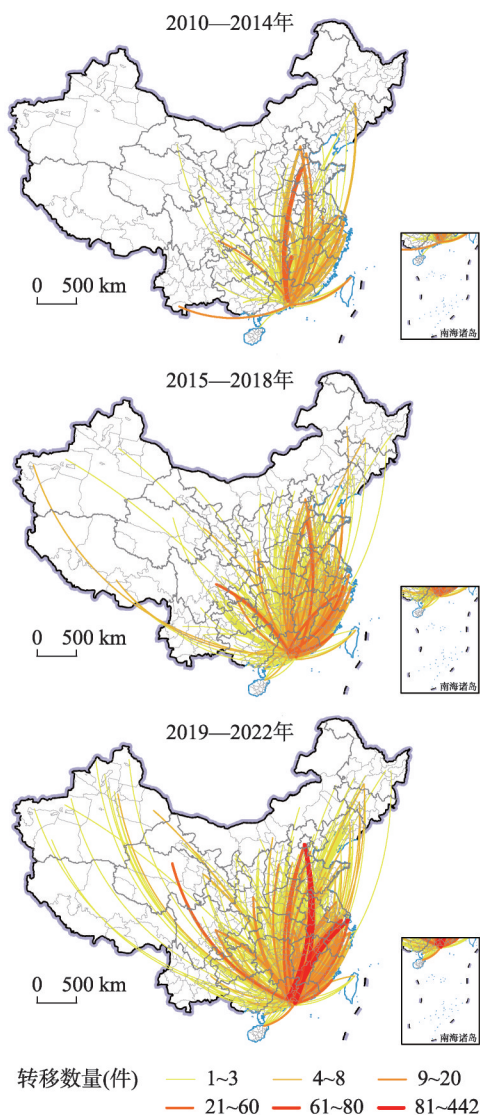
粤港澳大湾区本地清洁能源技术转移网络结构整体呈现由深圳单核驱动到深圳—广州双核心驱动,再到多中心互动的空间演变特征。2010—2014年大湾区清洁能源技术转移网络以深圳为核心,形成了单核心模式。深圳作为网络唯一的枢纽,其清洁能源技术转移量高达304件,占大湾区总量的41.08%。其中,深圳城内清洁能源技术转移为244件,从大湾区本地获取20件,同时向大湾区其他城市扩散40件。而广州是大湾区区域内部仅次于深圳的第二大清洁能源技术转移城市,其技术转移量占大湾区转移总量的20.14%。2015—2018年大湾区清洁能源技术转移网络结构开始发生变化,逐渐呈现深圳与广州为双核驱动的转移模式。在此期间,深圳的清洁能源技术转移增长至540件,但在大湾区总量的比例有所下滑。相比之下,广州在大湾区区域内部清洁能源技术转移的比例有了大幅提升,增加至27.25%,与深圳共同形成双核驱动的转移网络结构。而2019—2022年大湾区内越来越多城市在提升自身创新能力的同时,也积极参与到区域清洁能源创新协作中来,城际之间清洁能源技术的转移逐渐活跃。以佛山和东莞为代表的清洁能源创新中心逐渐形成。尽管二者的清洁能源技术转移尚不及深圳与广州,但它们积极参与区域清洁能源创新,与其他城市共同形成了多中心互动的区域清洁能源技术转移网络。具体而言,佛山与大湾区其他城市进行的清洁能源技术转移规模显著增长,由2010—2014年的20件增加至2019—2022年的107件,其中66件来自大湾区,41件扩散至大湾区。同样地,东莞与大湾区其他城市转移清洁能源技术由6件增加至92件,其中向大湾区吸收与扩散各占46件。这一趋势表明,大湾区在清洁能源技术领域的发展逐渐走向多元化和协同创新的道路。

在本地清洁能源技术转移网络中,深圳具有较强的清洁能源技术自主创新能力,但广州对大湾区的技术支撑能力更强。城市向区域内部转移的清洁能源技术量占区域转移总量的比例在一定程度上反映城市的区域清洁能源技术支撑能力。2010—2014年大湾区本地城际清洁能源技术转移规模整体不高,转移量仅为101件。其中,深圳作为本地清洁能源技术的主要扩散者,向大湾区内其他城市扩散清洁能源技术40件,其区域清洁能源技术支撑能力为39.66%。然而,2015—2018年深圳的区域清洁能源技术支撑能力被广州赶超。在此期间,深圳城内清洁能源技术转移量达到419件,但向大湾区其他城市扩散的清洁能源技术仅为65件,其区域清洁能源技术支撑能力下降至26.42%。而与此同时,广州的城内清洁能源技术转移虽相对较低(348件),但其向区域扩散的技术量赶超深圳(73件),区域清洁能源技术支撑能力由2010—2014年的11.88%提升至2015—2018年的29.67%,超出了前期在该领域位居首位的深圳。2019—2022年深圳与广州在大湾区内技术扩散的差距进一步扩大。在此期间,深圳的清洁能源技术转移量已增长至711件,但其向大湾区其他城市扩散的规模仅为100件,区域清洁能源技术支撑能力下降至22.17%。此外,广州的城内清洁能源技术转移增长虽然不及深圳(374件),但其向区域扩散的规模(183件)却远远超过深圳,使得广州的区域清洁能源技术支撑能力以40.58%位居大湾区

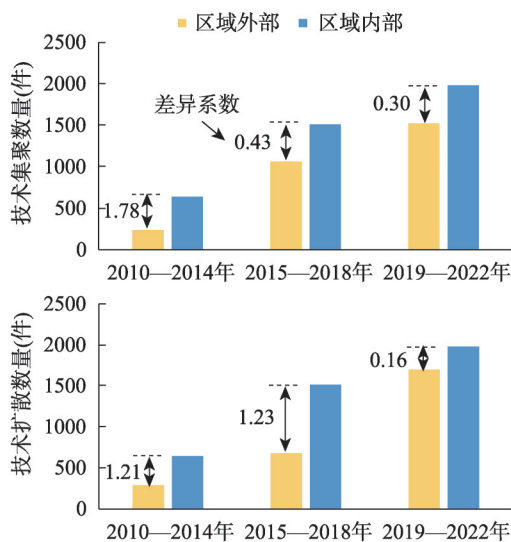
首位。这一变化特征表明,在区域清洁能源技术支撑能力方面,广州逐渐崭露头角,成为大湾区的领军城市。

4.2.2 跨区域转移与本地间转移的差距在缩小 粤港澳大湾区在清洁能源技术转化与应用上,不仅注重区域内部创新体系的完善,还积极与区域外部城市进行技术互动。随着国家“双碳”目标的提出与推进,大湾区积极加快推动区域低碳发展,催生了对清洁能源技术的巨大需求。为满足这一需求,大湾区不仅依赖本地的清洁能源技术,还广泛吸收大量来自区域以外的技术,形成内外联动的技术获取模式(图5a)。

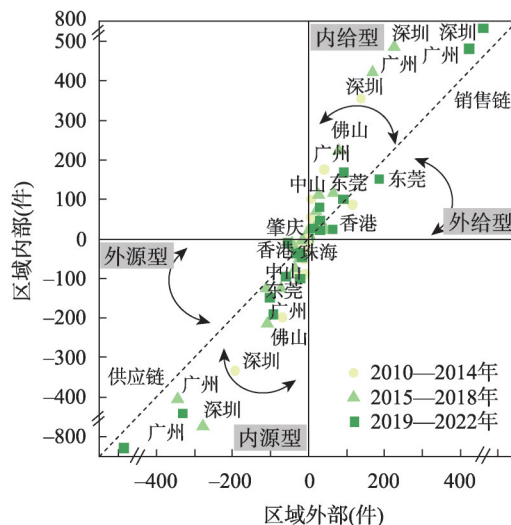
a. 大湾区跨区域清洁能源技术转移空间特征



b. 大湾区跨区域清洁能源技术集聚与扩散特征



c. 清洁能源技术跨区域获取与本地之间的对比



注:基于自然资源部地图标准地图服务网站审图号为GS(2019)1835号的标准地图制作,底图边界无修改;差异系数=(区域内部-区域外部)/区域外部。

图5 2010—2022年粤港澳大湾区跨区域清洁能源技术转移特征

Fig. 5 Characteristics of interregional clean energy technology transfers in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and cities outside the Greater Bay Area from 2010 to 2022

从清洁能源技术集聚角度,2010—2014年大湾区清洁能源技术的获取渠道主要来源于区域内部创新体系,而跨区域获取清洁能源技术相对较少,仅为230件。此阶段,大湾区跨区域获取的清洁能源技术与本地间的差距较大,差异系数高达1.78,显示出明显的内外技术差异。然而,2015—2018年大湾区跨区域获取的清洁能源技术量大幅增加,达到1056件,较上一阶段增长3.59倍。同时,大湾区跨区域获取的清洁能源技术与本地间差距逐渐缩小,差异系数降低至0.43。2019—2022年尽管大湾区跨区域获取的清洁能源技术增速有所放缓(增幅44.31%),但与本地间的差距进一步缩小,差异系数降低至0.30。在此阶段,从技术集聚角度来看,大湾区城市功能类型主要表现为内源型,清洁能源技术的获取仍以本地为主,但跨区域获取清洁能源技术的规模与本地之间的差距在缩小(图5c)。这表明大湾区正在实现内外协同的清洁技术获取模式,为推动区域低碳经济的发展提供更加多元化的技术支持。

从粤港澳大湾区清洁能源技术对外需求的特征来看,其技术需求的供应地域格局发生了显著变化。在初期阶段,长三角城市群是大湾区清洁能源技术需求的主要供应地。随着时间推移,这一地域格局发生了演变,京津冀城市群逐渐崭露头角,并超越长三角城市群,成为大湾区清洁能源技术对外需求的最大供应地。2010—2014年大湾区从长三角城市群和京津冀城市群分别获取清洁能源技术44件和51件,这些技术分别占大湾区清洁能源技术外部需求总量的22.17%、19.13%。2015—2018年长三角城市群在清洁能源技术领域的创新和供应能力继续保持强劲势头,向大湾区扩散的清洁能源技术份额进一步增加至33.43%。与此同时,京津冀城市群向大湾区扩散的清洁能源技术份额略微下降至18.37%。2018—2022年大湾区清洁能源技术对外需求的供应格局发生变化。京津冀城市群在此阶段清洁能源技术领域的供应能力显著增强,超越长三角城市群成为大湾区清洁能源技术对外需求的最大供应地,占据大湾区对外清洁能源技术需求总量的39.68%。与此同时,大湾区从长三角城市群获取的清洁能源技术则略微下降,由2015—2018年的353件降低至317件,所占份额也由33.43%降低至20.78%。

从清洁能源技术扩散角度,随着粤港澳大湾区清洁能源技术创新能力的不断提升,其跨区域清洁能源技术转移规模不断提升。2010—2022年大湾区向外扩散的清洁能源技术由16件增加至470件,与此同时,其与大湾区本地清洁能源技术扩散的差距在减少。2010—2014年大湾区跨区域扩散清洁能源技术289件,而同期大湾区本地清洁能源技术扩散为639件,两者之间差异系数为1.21,显示出一定的内外扩散差异。2015—2018年大湾区跨区域扩散的清洁能源技术数量进一步增加至678件。然而,与大湾区本地清洁能源技术扩散量相比,差异系数仍保持在1.23,表明内外扩散的差异在这个阶段相对稳定。随着大湾区清洁能源技术创新能力的持续增强,其对外清洁能源技术支撑能力也在不断提升。2019—2022年大湾区向区域外部扩散的清洁能源技术相较上一阶段实现了150%的增长,扩散量至1698件;与区域内部清洁能源技术扩散的差距也显著缩小,差异系数降至0.16。

从大湾区清洁能源技术对外扩散的空间特征来看,其技术扩散的地域范围从东中部创新水平较高地区的集中式扩散逐渐拓展到西部地区等城市跳跃式扩散。在2010—2014年期间,长三角城市群是大湾区技术对外扩散的最大承接地,承接了大湾区33.56%的清洁能源技术对外扩散份额。而这一比例在2019—2022年期间进一步增加至41.81%,凸显了其在技术扩散中的重要地位。京津冀城市群则是大湾区清洁能源技术对外扩散的次要承接地。同时,大湾区参与清洁能源技术向外扩散的城市数量也在不断增加。从2010年初期的深圳、广州、香港、珠海、佛山、东莞、中山等7个城市,逐渐扩展至除澳门以外

的全域参与。此外,随着大湾区清洁能源技术创新能力的不断提升,其清洁能源技术扩散的地域范围也在逐步扩大。2010—2022年大湾区清洁能源技术扩散的区域已经从主要以东中部创新水平较高的城市,拓展至青海省的海西和新疆的乌鲁木齐、克拉玛依、石河子等城市,显示了其技术服务地域范围的拓展。在对外转移扩散过程中,深圳和广州是大湾区向外部转移清洁能源技术的核心城市,它们的技术扩散能力和影响力显著。东莞则紧随其后,也在技术扩散中发挥了重要作用。而佛山、中山等城市清洁能源技术对外支撑能力不可小觑。以佛山、东莞为例,2010—2014年其对外清洁能源技术扩散分别为9件和12件;而2019—2022年两者的清洁能源技术对外扩散已分别增加至94件和93件,显示了其在技术扩散方面的显著增长和贡献。

4.2.3 跨国转移规模较低但日趋活跃且多元化 粤港澳大湾区在跨国清洁能源技术转移方面的整体规模虽不高,但其转移的活跃度却呈现出明显的上升态势。同时,清洁能源技术转移网络互动对象也趋于多元化,逐渐形成以香港—深圳为核心的网络组织结构(图6)。2010—2014年日本、德国和美国是大湾区清洁能源技术转移对外需求的主要国际供应商,它们在此期间向大湾区转移16件清洁能源技术。这一时期,大湾区清洁能源技术主要以转入为主。进入2015—2018年,大湾区跨国清洁能源技术转移活动逐渐活跃,从日本、美国、德国、加拿大等地吸收清洁能源技术数量增加至41件。同时,大湾区清洁能源技术在满足自身需求的基础上,开始逐渐打开“城门”,向国际市场提供清洁能源技术支持。这一时期,大湾区共向国际转移19件清洁能源技术,并以香港为唯一枢纽,构建了面向日本、美国等国的跨国技术扩散网络。2019—2022年大湾区清洁能源技术转移的地域范围更加广泛,以往以日本、美国、德国为核心的清洁能源技术供应网络逐渐向

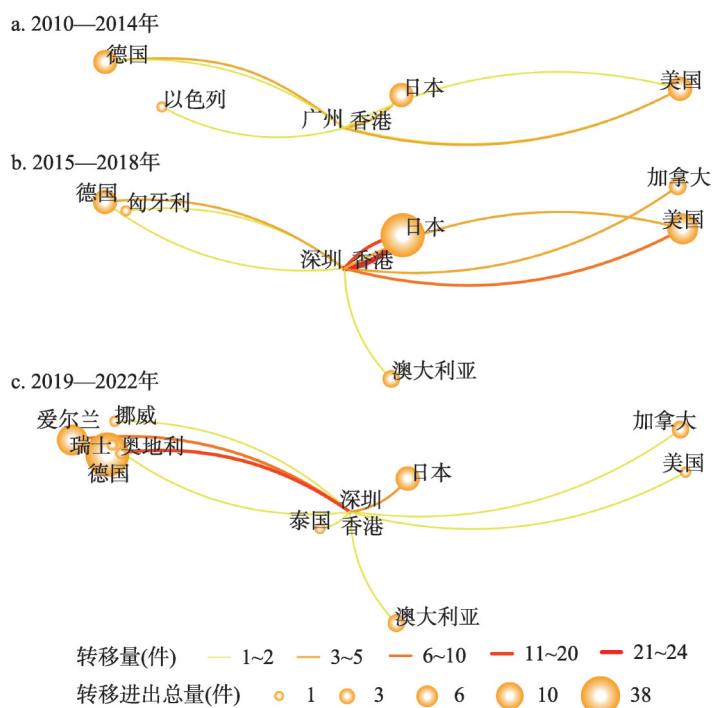


图6 2010—2022年粤港澳大湾区清洁能源技术在全球转移变化

Fig. 6 Changes in global transfer of clean energy technology in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2022

瑞士、爱尔兰等地区拓展。然而由于受疫情影响，大湾区清洁能源技术扩散影响力有所下降，向国际转移的清洁能源技术降至2件。

4.3 粤港澳大湾区清洁能源技术转移的减排效应

4.3.1 共线性检验及单位根检验 在模型回归之前，开展共线性诊断。如表3所示，所有自变量的相关系数小于0.80，且方差膨胀因子VIF值均小于5，说明回归模型的影响因子之间不存在严重的共线性问题。

其次，为避免伪回归，对大湾区涉及的变量数据进行单位根检验。数据是否平稳是进行回归估计的前提。LLC (Levin, Lin and Chu) 检验、IPS (Im, Pesaran and Shin) 检验是目前常用的数据平稳性检验方法^[68]。在检验结论不一致时，则认为变量为非平稳，继续进行差分检验，直至平稳。通过一阶差分，所有变量LLC、IPS检验均通过1%的检验水平，反映研究变量具有平稳性（表4），为一阶单整。进一步对研究涉及的变量进行数据协整检验，采用KAO检验。检验结果显示通过1%检验水平，则拒绝无协整性的原假设，说明各变量之间存在协整性，可以纳入计量模型进行进一步分析。

表3 变量相关系数及方差膨胀因子(VIF)
Tab. 3 Correlation coefficients and variance inflation factors

变量	<i>CI</i>	<i>pin</i>	<i>plocal</i>	<i>pgba</i>	<i>pdom</i>	<i>pint</i>	<i>pgdp</i>	<i>ur</i>	<i>is</i>	<i>op</i>
<i>CI</i>	1.00									
<i>pin</i>	-0.57	1.00								
<i>plocal</i>	-0.19	0.33	1.00							
<i>pgba</i>	0.25	0.05	-0.10	1.00						
<i>pdom</i>	-0.26	0.50	-0.16	-0.16	1.00					
<i>pint</i>	-0.43	-0.07	-0.28	-0.24	-0.08	1.00				
<i>pgdp</i>	-0.83	0.55	0.23	-0.21	0.17	0.59	1.00			
<i>ur</i>	-0.73	0.58	0.50	-0.16	0.08	0.32	0.79	1.00		
<i>is</i>	-0.59	0.35	0.00	-0.25	0.18	0.65	0.76	0.55	1.00	
<i>op</i>	0.16	-0.13	0.22	0.19	-0.14	-0.10	-0.15	0.06	-0.21	1.00
<i>VIF</i>	-	3.21	2.48	1.38	1.95	3.49	4.62	4.55	3.54	1.30

表4 基于LLC、IPS的单位根检验结果
Tab. 4 Unit root test based on LLC and IPS

变量	LLC		IPS	
	截距	截距和趋势	截距	截距和趋势
$\ln CI$	-7.04***	-6.31***	-6.40***	-4.81***
$\ln pin$	-6.79***	-5.56***	-6.55***	-5.44***
$\ln plocal$	-10.62***	-8.92***	-11.24***	-7.81***
$\ln pgba$	-8.98***	-9.03***	-8.79***	-9.66***
$\ln pdom$	-11.07***	-7.52***	-9.72***	-8.13***
$\ln pint$	-9.72***	-7.14***	-9.09***	-7.19***
$\ln pgdp$	-3.82***	-3.61***	-2.32***	-1.36***
$\ln ur$	-7.04***	-6.31***	-6.40***	-4.81***
$\ln is$	-13.20***	-11.07***	-10.95***	-8.10***
$\ln op$	-11.57***	-10.27***	-11.44***	-10.42***

注：***、**和*分别代表1%、5%和10%水平显著，后同。

在进行面板模型前,进一步对计量模型类型进行选择。Hausman检验用于随机效应以及固定效应的检测,经检测Hausman的统计值通过1%的显著水平检验,说明建立随机效应模型的原假设不成立,应采用具有固定效应模型进行分析。进一步通过 F 检验判别模型是否存在个体固定效应模型。检验结果显示 F 统计值通过1%的显著水平,即拒绝模型是混合模型的原假设,应建立具有个体固定效应的模型。

4.3.2 清洁能源技术转移减排效应计量结果

粤港澳大湾区清洁能源技术转移对碳排放强度具有显著的抑制作用。计量结果显示,大湾区清洁能源技术集聚规模总量每增加1%,将抑制碳排放强度0.05%的增加(表5)。清洁能源技术转移对碳减排的影响可以多途径。通过清洁能源技术的引入,大湾区城市碳排放强度可以通过清洁能源技术创新得到有效控制,为实现区域碳中和目标提供有效途径。

首先,相较于大湾区本地城内的清洁能源技术转移,大湾区本地以及跨区域城际间的技术转移展现出更为显著的碳减排效应。计量分析结果显示,2010—2020年大湾区本地城市内部清洁能源技术集聚强度每增加1%,相应地会导致碳排放强度降低0.42%;而本地和跨区域城际清洁能源技术集聚强度对碳排放强度的抑制作用分别为-0.58%和-0.52%,并且这些结果均通过5%的显著性检验。这一现象可以归因于知识溢出效应和空间耦合效应的共同作用。城际间的技术转移打破单一城市内部的知识壁垒,促进了区域间知识和创新资源的流动。这种流动不仅引入了外部新异知识,同时丰富了区域知识池的多样性,有效避免知识创新的路径依赖和本地化锁定现象^[38]。随着外部新异知识的引入,区域知识结构得以丰富,激发创新活力,减少同质化竞争,从而提高清洁技术资源的配置效率。此外,外部清洁能源技术的引入往往伴随着非冗余知识的增益^[69]。这些知识与区域内既有的知识体系形成互补,提供新的视角和方法,有助于本地企业和机构突破传统的技术框架进行创新。因此,这种外部知识的输入,通过增强区域技术多样性,进一步促进了本地技术能力的提升。特别是在清洁能源领域,外部技术通过带来先进的技术解决方案,有效缓解大湾区低碳创新资源之间的同质化竞争和错配问题^[23],进而在更大程度上提升清洁能源技术资源配置效率,增强技术转入地的清洁能源技术水平,实现碳排放强度降低。

其次,对比不同空间路径城际清洁能源技术转移的减排效应发现,大湾区本地城际清洁能源技术转移对碳减排的效果(-0.58%)相对高于跨区域城际清洁能源技术转移的减排效果(-0.52%)。这一细微差别主要可以归因于区域内部技术转移的本地适配性更强。具体而言,区域内部的技术转移在技术与本地需求、资源条件、产业结构等方面具有更高的契合度,更加符合本地的技术发展路径和需求^[43],从而能够较好地融入本地的创新系统,并实现清洁能源技术的实际应用和推广^[70]。这种高度契合的技术转移模式有助于加速清洁能源技术在大湾区区域内部的普及,进而促进碳减排目标的实现。相比之下,跨区域引进的清洁能源技术,尽管在某些方面可能具有先进性,但其在本地化适配过程中往往面临更多挑战。这些挑战包括技术适应性、操作和维护的复杂性以及与本地产业链的兼容性等。这些因素不仅增加了技术应用的难度,还可能导致额外的成本负担,从而限制外部技术在本地的推广和应用,削弱其对碳减排的贡献。

表5 清洁能源技术转移对碳排放强度影响结果

Tab. 5 Econometric results on the impact of clean energy technology transfer on CO₂ emission intensity

变量类型	变量	系数	t
核心解释变量	$\ln pin$	-0.05***	-4.67
	$\ln plocal$	-0.42*	-1.95
	$\ln pgba$	-0.58**	-2.10
	$\ln pdom$	-0.52**	-1.92
	$\ln pint$	0.21	0.93
控制变量	$\ln pgdp$	-0.35***	-6.91
	$\ln ur$	0.04	0.03
	$\ln is$	-0.27***	-3.3
	$\ln op$	0.14	1.31
$adj R^2$	0.68		

此外，尽管跨国技术引进有潜力提供先进的清洁能源方案，但由于规模相对较小，目前尚未对区域碳排放产生显著的减排效应。计量结果显示，跨国清洁能源技术集聚强度每增加1%将促进大湾区碳排放强度0.21%的增加，但这一结果并未通过显著性检验。这一现象可能与以下几个因素有关。首先，跨国清洁能源技术转移可能并未完全适应大湾区本地条件。技术的适应性包括技术对当地资源、经济结果以及政策环境的适应程度。国际技术在引进后可能面临一系列技术适配问题，从而导致其未能充分发挥降低碳排放强度的作用。这一点在许多跨国技术转移中都是一个较为常见的问题，因为不同国家或地区在能源资源、技术基础设施以及人力资源等方面均存在较大差异^[71]。其次，跨国技术转移往往伴随着较高的成本和复杂性，包括技术获取费用、专利使用费、技术适应的本地化改造成本。这些成本可能在短期内抵消技术带来的碳减排效益，甚至在某些情况下导致碳强度的暂时增加^[72]。此外，清洁能源技术的实施往往需要新进或升级现有的基础设施，这不仅增加了经济成本，还可能在初期阶段增加能源消耗，从而导致碳排放的暂时上升。

综上，粤港澳大湾区本地城际清洁能源技术转移对碳减排的正外部性不可忽视。大湾区在推进清洁能源技术转移的同时，需要强化跨区域联合研发，促进清洁能源技术协同、内化并转化为区域各地清洁能源技术内生创新能力，努力实现清洁能源技术从“授之以鱼”到“授之以渔”转变^[73]。

4.3.3 稳健性检验 在进行模型选择过程中，混合效应与随机效应计量结果与本文所采用的个体固定效应回归结果基本保持一致，这在一定程度上说明本文计量结果的稳健性（表6）。为进一步验证大湾区清洁能源技术转移的碳减排效应，本文参考已有研究^[74-75]，通过替换被解释变量和缩短窗口期两种方法进行稳健性检验。具体而言，模型(3)使用碳排放总量替换被解释变量，并重新进行计量模型估计。模型(4)考虑到2020年重大公共卫生事件可能带来的影响，将样本期调整为2010—2019年，并同样重新进行计量模型估计。从模型(3)和模型(4)的计量结果可见，尽管部分变量的弹性系数相较表6略有波动，但其符号与显著性水平并未发生显著变化。这表明表5中的计量结果能够较为稳健地反映清洁能源技术转移对碳排放的影响，从而证明本文的主要研究结果具有较好的稳健性。

表6 稳健性检验结果

Tab. 6 Robustness test results

变量	混合效应	随机效应	替换变量：碳排放总量	缩短时间窗口：2010—2019年
	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
$\ln pin$	-0.08	-0.12*	-0.02*	-0.25***
$\ln plocal$	-0.39***	-0.28**	-0.18**	0.24
$\ln pgba$	-0.48**	-0.32**	-0.27	-0.43***
$\ln pdom$	-0.12*	0.23	-0.23*	-0.37**
$\ln pint$	0.31*	0.19	-0.38	0.41*
控制变量	YES	YES	YES	YES
$adj R^2$	0.58	0.56	0.49	0.63

5 结论与建议

5.1 结论

为加强清洁能源技术转移和创新合作，在构建理论分析框架的基础上，基于2010—2022年城市清洁能源专利转让数据，剖析了不同空间尺度下大湾区各城市本地、跨区域

以及跨国清洁能源技术转移路径,揭示了该区域清洁能源技术转移空间路径的关键特征。同时,采用STIRPAT模型,进一步探究了这些不同空间路径下清洁能源技术转移对区域碳减排目标的影响。主要研究结论如下:

(1) 大湾区本地清洁能源技术转移网络中,转移规模整体呈波动上升趋势,反映区域内部清洁技术交流的日益活跃。与此同时,转移模式以“城内集散型”为主,而城际清洁能源技术转移整体动力相对不足,区域内技术流动的外溢效应有限。转移网络结构则经历了从单核驱动到双核心驱动,再到多中心互动的演化过程。此外,尽管深圳在清洁能源技术方面表现较高的自主创新能力,但在区域清洁能源技术创新支撑能力方面后期不及广州。

(2) 大湾区跨区域清洁能源技术转移网络中,转移规模与本地间的差距逐渐缩小。与此同时,转移模式从以集聚为主向对外扩散转变。从跨区域技术转移集散空间格局来看,大湾区技术对外需求的地域范围由最初主要依赖长三角城市群逐渐转向京津冀城市群;对外扩散的地域范围从东中部创新水平较高城市逐渐拓展到海西、乌鲁木齐、克拉玛依等西部城市,呈现从集中式扩散转向跳跃式扩散模式。

(3) 大湾区跨国清洁能源技术转移网络中,尽管整体转移规模相对较低,但其转移活跃度在近年来呈现出上升的态势。与此同时,转移网络的互动对象更加多元化,逐渐形成以香港—深圳为核心的网络组织结构。

(4) 大湾区清洁能源技术受让对碳排放强度具有显著的抑制作用,其中本地及跨区域城际清洁能源技术转移对大湾区的减排效应更显著,而国际引进清洁能源技术对大湾区碳排放强度影响尚不显著。

5.2 政策建议

根据以上结论,从构建清洁能源技术创新共同体、加强跨区域清洁能源技术转移转化以及完善清洁能源技术创新生态系统3个维度提出政策建议:

(1) 加快构建多层次、开放型的粤港澳大湾区清洁能源技术创新共同体。积极推进深圳建设具有全球影响力的清洁能源技术中心建设,并注重提升其与大湾区内其他城市清洁能源技术转移转化的辐射带动作用。依托广州、佛山、东莞、中山等为核心节点,打造多个区域性清洁能源技术创新中心,强化这些区域中心在清洁能源技术创新方面的辐射能力,促进创新能力的提升。充分利用深圳、香港国际开放功能,加强粤港澳大湾区与国际开展清洁能源技术创新相关的合作,推进深港国际清洁能源技术创新网络枢纽城市建设,并持续做好国际先进清洁能源技术的引进和本地化适应工作。

(2) 积极支持粤港澳大湾区开展跨区域清洁能源技术转移转化。鼓励开展跨区域、跨领域、跨学科的关键清洁能源技术攻关,协同布局绿色清洁能源技术科技创新重大项目和攻关计划。特别关注提升大湾区清洁能源技术向西部地区转移转化,增强深圳、广州等清洁能源技术创新资源丰富地区对新疆、宁夏、甘肃等西部地区城市清洁能源技术转移和转化能力,帮助西部地区摆脱发展上的“技术锁定”和转型上的“高碳锁定”。

(3) 着力完善粤港澳大湾区清洁能源技术创新合作生态系统。紧密围绕清洁能源技术创新合作需求,深化大湾区清洁能源技术共享平台建设,共建跨区域的清洁能源技术创新合作平台,形成“国家实验室—大学/科研院所—企业研发中心”的全方位清洁能源技术创新合作网络。建立和完善清洁能源资源共享服务机构联盟、清洁能源技术创新联盟、清洁能源技术市场联盟,深化在清洁能源技术方面跨区域交流协作,推动清洁能源技术创新资源自由流动和高效配置。

5.3 不足与展望

尽管本文对不同空间路径下清洁能源技术转移的特征及其碳减排效应进行了较为深入的探索,但仍存在一定的局限性和不足之处。首先,本文的分析主要依赖于清洁能源专利数据与碳排放数据,然而,碳排放是一个受多重因素影响的复杂系统,技术转移虽然是重要的推动力,但并非唯一的决定性因素。能源结构的变化、消费模式的转变以及政策环境的变化都可能对碳排放产生重要影响。本文未能充分纳入这些因素,因此在解释技术转移对碳减排的贡献时,可能存在一定的局限性。未来可以考虑更多地整合能源政策、消费模式变化等多维度数据,以便更全面地评估清洁能源技术转移对碳减排的真实影响。其次,本文使用的专利数据主要聚焦于清洁能源技术领域,而CEADs提供的碳排放数据涵盖全领域碳排放,包括多个方面,其中许多排放内容与清洁能源技术无直接关联。这种数据的广泛性可能在一定程度上影响研究结果的准确性和针对性。未来的研究可以进一步探索更为细化、更具针对性的碳排放数据,特别是针对清洁能源技术直接相关的排放数据,以提高研究的准确性和针对性。此外,本文在碳减排来源及各部门减排作用范围的明确性方面存在一定的不足。清洁能源技术的碳减排来源具有多样性,其对不同部门的影响存在差异。具体而言,清洁能源技术的推广在工业、交通、建筑和电力等部门产生的减排效果并不相同。如在工业部门,清洁能源技术通常通过提高能源利用效率和替代高排放能源来实现减排;在交通部门,则通过电气化、使用清洁燃料等方式来降低排放;而在建筑部门,主要通过改进建筑能效和推广可再生能源的使用来减少碳排放。本文由于数据的广泛性,未能对这些不同部门的减排效应进行精细化区分,这可能在一定程度上影响对清洁能源技术实际减排贡献的理解和评估。因此,未来的研究应进一步细化清洁技术的碳减排来源,并结合各部门的碳排放特征,明确其对各部门的具体减排贡献,确保对清洁能源技术减排效应的理解更加准确和全面。

参考文献(References)

- [1] IEA. CO₂ Emission in 2023. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [2] IEA. Tracking Energy Innovation: Focus on China. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [3] He Kebin. Dual-carbon goals for a new paradigm in the world economy. Beijing: Xinhua News Agency, 2021. https://www.news.cn/politics/2022-01/11/c_1128253817.htm. [贺克斌. “双碳”目标促进世界经济向新的模式发展. 新华网, 2021. https://www.news.cn/politics/2022-01/11/c_1128253817.htm]
- [4] Montresor S, Quatraro F. Green technologies and smart specialisation strategies: A European patent-based analysis of the intertwining of technological relatedness and key enabling technologies. *Regional Studies*, 2020, 54(10): 1354-1365.
- [5] Mao Xiyan, He Canfei. The new narrative of economic globalization and the new trends in economic geography. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(12): 2905-2921. [毛熙彦, 贺灿飞. 经济全球化新叙事与中国经济地理学发展新趋势. *地理学报*, 2023, 78(12): 2905-2921.]
- [6] Yang Y, Zhou Y N, Shan Y L, et al. The shift of embodied energy flows among the Global South and Global North in the post-globalisation era. *Energy Economics*, 2024, 131: 107408. DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107408.
- [7] Zheng X, Yu H, Yang L. Technology imports, independent innovation, and China's green economic efficiency: An analysis based on spatial and mediating effect. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(24): 36170-36188.
- [8] Duffy J, Ralston J. Innovate versus imitate: Theory and experimental evidence. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2020, 177: 727-751.
- [9] Weko S, Goldthau A. Bridging the low-carbon technology gap? Assessing energy initiatives for the Global South. *Energy Policy*, 2022, 169: 113192. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113192.
- [10] Duan Dezhong, Jin Hong. Spatiotemporal process and driving factors of green technology diffusion in Chinese cities. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(8): 2001-2018. [段德忠, 金红. 中国城市绿色技术扩散的时空过程与形成机制. *地理学报*, 2023, 78(8): 2001-2018.]
- [11] Luan Guiqin, Yang Yi, Zhang Yongkun, et al. Analysis of new low-carbon technology diffusion in China. *Resource*

- Development & Market, 2011, 27(11): 1043-1046. [栾贵勤, 杨怡, 张永坤, 等. 我国低碳技术扩散路径研究. 资源开发与市场, 2011, 27(11): 1043-1046.]
- [12] Cao Xia, Zhang Lupeng. Evolutionary game analysis of the diffusion of green technological innovation of enterprises. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(7): 68-76. [曹霞, 张路蓬. 企业绿色技术创新扩散的演化博弈分析. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 68-76.]
- [13] Chen Heng, Peng Cheng, Guo Shuang, et al. Two-stage evolution analysis of green technology innovation diffusion based on complex market network. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(3): 135-144. [陈恒, 彭程, 郭爽, 等. 基于复杂市场网络绿色技术创新扩散的两阶段演化分析. 中国管理科学, 2024, 32(3): 135-144.]
- [14] Dai Liang, Ding Zijun, Ma Haitao, et al. Spatial linkages and endogenous mechanisms of technology transfer in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(6): 1503-1520. [戴靓, 丁子军, 马海涛, 等. 粤港澳大湾区技术转移的空间关联与内生动力. 地理学报, 2024, 79(6): 1503-1520.]
- [15] Ding J F, Du D B, Duan D Z, et al. A network analysis of global competition in photovoltaic technologies: Evidence from patent data. *Applied Energy*, 2024, 375: 124010. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124010.
- [16] Wang C, Huang X, Hu X Q, et al. Trade characteristics, competition patterns and COVID-19 related shock propagation in the global solar photovoltaic cell trade. *Applied Energy*, 2021, 290: 116744. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116744.
- [17] Wang Weidong, Lu Na, Zhang Caijing. Low-carbon technology innovation responding to climate change based on perspective of spatial spillover effect. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(8): 22-30. [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. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 22-30.]
- [18] Duan Dezhong, Yang Fan, Hu Xuan. Spatial spillover effect of technology transfer in China's city system and its impacts on city economic growth. *Science Research Management*, 2020, 41(6): 90-97. [段德忠, 杨凡, 胡璇. 中国城市技术转移的空间溢出效应与经济增长. 科研管理, 2020, 41(6): 90-97.]
- [19] Sun Zhongrui, Fan Jie, Sun Yong, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in China. *Economic Geography*, 2022, 42(3): 33-43. [孙中瑞, 樊杰, 孙勇, 等. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素. 经济地理, 2022, 42(3): 33-43.]
- [20] Liu Y Q, Shao X Y, Tang M P, et al. Spatio-temporal evolution of green innovation network and its multidimensional proximity analysis: Empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 124649. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124649.
- [21] Cheng Danya, Zeng Gang. The structural characteristic green technology innovation network in the Yangtze River Delta from a local-transboundary perspective. *Human Geography*, 2023, 38(5): 79-87. [程丹亚, 曾刚. 本地—跨界视角下长三角区域绿色技术创新网络结构特征研究. 人文地理, 2023, 38(5): 79-87.]
- [22] Du Debin, Jin Hong, Duan Dezhong. Ecological green integration in Yangtze River Delta from perspective of intercity green technology transfer. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(12): 1770-1782. [杜德斌, 金红, 段德忠. 绿色技术跨城流动下长三角生态绿色一体化发展研究. 中国科学院院刊, 2022, 37(12): 1770-1782.]
- [23] Li Q X, Du D B, Yu Y J. Scaling and network evolution of technology transfer in US cities. *Nature Cities*, 2025, 2: 316-326.
- [24] Jin Hong, Duan Dezhong. Spatial and temporal characteristics of intercity green technology flows and emission reduction effects in the Yangtze River Economic Belt. *Progress in Geography*, 2024, 43(1): 17-32. [金红, 段德忠. 长江经济带城际绿色技术流动的时空特征及减排效应研究. 地理科学进展, 2024, 43(1): 17-32.]
- [25] Gu Gaoxiang, Wang Zheng. Research of carbon abatement by international low carbon technology transfer in the context of the Paris Agreement. *China Soft Science*, 2018(12): 8-16. [顾高翔, 王铮. 《巴黎协定》背景下国际低碳技术转移的碳减排研究. 中国软科学, 2018(12): 8-16.]
- [26] Wu Kang, Geng Yirui, Guo Tao. The impact of green technology innovation on carbon emissions from the perspective of urban agglomeration: The moderating effect of human capitals. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(9): 2121-2139. [吴康, 耿一睿, 郭涛. 城市群绿色技术创新对碳排放的影响: 基于人力资本的调节效应. 自然资源学报, 2024, 39(9): 2121-2139.]
- [27] Kennedy M, Basu B. Overcoming barriers to low carbon technology transfer and deployment: An exploration of the impact of projects in developing and emerging economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 685-693.
- [28] Kouladoum J C, Ngouhouo I, Wendji Miamo C. Wellbeing in Africa: The role of technology transfer. *Technology in Society*, 2023, 73: 102238. DOI:10.1016/j.techsoc.2023.102238.
- [29] van der Gaast W, Begg K, Flamos A. Promoting sustainable energy technology transfers to developing countries through the CDM. *Applied Energy*, 2009, 86(2): 230-236.

- [30] Ma H T, Li Y C, Huang X D. Proximity and the evolving knowledge polycentricity of megalopolitan science: Evidence from China's Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, 1990-2016. *Urban Studies*, 2021, 58(12): 2405-2423.
- [31] Cai H C, Feng Z J, Zhou W, et al. Understanding the spatial polarization pattern of technology transfer network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area. *Growth and Change*, 2023, 54(1): 4-25.
- [32] Umme H, Cao X B, Ahsan A. Do green technology innovations, financial development, and renewable energy use help to curb carbon emissions? *Renewable Energy*, 2022, 193: 1082-1093.
- [33] Yan Xiang, Huang Yongchun, Hu Shiliang, et al. How green technology transfer curbs carbon emissions: Empirical evidence from cities in the Yangtze River Delta. *Management Review*, 2023, 35(8):171-183. [严翔, 黄永春, 胡世亮, 等. 绿色技术转移何以抑制碳排放: 基于长三角城市的经验证据. *管理评论*, 2023, 35(8): 171-183.]
- [34] Pigato M, Black S, Dussaux D, et al. *Technology Transfer and Innovation for Low-carbon Development*. Washington: World Bank Publications, 2020.
- [35] Meng Wangsheng, Zhang Yang. Natural resource endowment, path selection of technological progress, and green economic growth: An empirical research based on China's provincial panel data. *Resources Science*, 2020, 42(12): 2314-2327. [孟望生, 张扬. 自然资源禀赋、技术进步方式与绿色经济增长: 基于中国省级面板数据的经验研究. *资源科学*, 2020, 42(12): 2314-2327.]
- [36] Dietz T, Rosa E. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Human Ecology Review*, 1994, 1(2): 277-300.
- [37] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [38] Bathelt H, Malmberg A, Maskell P. Clusters and knowledge: Local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation. *Progress in Human Geography*, 2004, 28(1): 31-56.
- [39] Gertler M S. Tacit knowledge and the economic geography of context, or the undefinable tacitness of being (there). *Journal of Economic Geography*, 2003, 3(1): 75-99.
- [40] Storper M, Venables A J. Buzz: Face-to-face contact and the urban economy. *Journal of Economic Geography*, 2004, 4(4): 351-370.
- [41] Audretsch D B, Feldman M P. R&D spillovers and the geography of innovation and production. *The American Economic Review*, 1996, 86(3): 630-640.
- [42] Asheim B T, Coenen L. Knowledge bases and regional innovation systems: Comparing Nordic clusters. *Research Policy*, 2005, 34(8): 1173-1190.
- [43] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [44] Maskell P, Malmberg A. The competitiveness of firms and regions: 'Ubiquitification' and the importance of localized learning. *European Urban and Regional Studies*, 1999, 6(1): 9-25.
- [45] Tödting F, Trippel M. One size fits all? Towards a differentiated regional innovation policy approach. *Research Policy*, 2005, 34(8): 1203-1219.
- [46] Frenken K, Van Oort F, Verburg T. Related variety, unrelated variety and regional economic growth. *Regional Studies*, 2007, 41(5): 685-697.
- [47] Boschma R, Frenken K. Why is economic geography not an evolutionary science? Towards an evolutionary economic geography. *Journal of Economic Geography*, 2006, 6(3): 273-302.
- [48] Martin R, Sunley P. Path dependence and regional economic evolution. *Journal of Economic Geography*, 2006, 6(4): 395-437.
- [49] Asheim B T, Boschma R, Cooke P. Constructing regional advantage: Platform policies based on related variety and differentiated knowledge bases. *Regional Studies*, 2011, 45(7): 893-904.
- [50] Teng Y H. Indigenous R&D, technology imports and energy consumption intensity: Evidence from industrial sectors in China. *Energy Procedia*, 2012, 16: 2019-2026.
- [51] Iammarino S, McCann P. *Multinationals and Economic Geography: Location, Technology and Innovation*. Massachusetts: Edward Elgar Publishing, 2013.
- [52] Malerba F, Orsenigo L. Technological regimes and sectoral patterns of innovative activities. *Industrial and Corporate Change*, 1997, 6(1): 83-118.
- [53] Khosla R, Sagar A, Mathur A. Deploying low-carbon technologies in developing countries: A view from India's buildings sector. *Environmental Policy and Governance*, 2017, 27(2): 149-162
- [54] Scott A, Storper M. Regions, globalization, development. *Regional Studies*, 2003, 37(6/7): 579-593.
- [55] Gielen D, Boshell F, Saygin D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy*

- Reviews, 2019, 24: 38-50.
- [56] Shan Y L, Guan Y R, Hang Y, et al. City-level emission peak and drivers in China. *Science Bulletin*, 2022, 67(18): 1910-1920.
- [57] Wang S J, Wang J Y, Chen X J, et al. Impact of international trade on the carbon intensity of human well-being. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(17): 6898-6909.
- [58] Gao Shuang, Wang Shaojian, Mo Huibin. A comparative study of China's urbanization process and its carbon emission effect from a global perspective. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(2): 204-215. [高爽, 王少剑, 莫惠斌. 全球视角下中国城镇化进程及其碳排放效应的比较研究. *地理科学*, 2024, 44(2): 204-215.]
- [59] Wang Shaojian, Su Yongxian, Zhao Yabo. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 414-428. [王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素. *地理学报*, 2018, 73(3): 414-428.]
- [60] Zhou Y N, Poon J, Yang Y. China's CO₂ emission intensity and its drivers: An evolutionary Geo-Tree approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 171: 105630. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105630.
- [61] Xu B, Lin B Q. How industrialization and urbanization process impact on CO₂ emissions in China: Evidence from nonparametric additive regression models. *Energy Economics*, 2015, 48: 188-202.
- [62] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Yun Wenju, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1123-1136. [赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1123-1136.]
- [63] Chen S Y, Jin H, Lu Y L. Impact of urbanization on CO₂ emissions and energy consumption structure: A panel data analysis for Chinese prefecture-level cities. *Structural change and economic dynamics*, 2019, 49: 107-119.
- [64] Hang Y, Wang Q W, Zhou D Q, et al. Factors influencing the progress in decoupling economic growth from carbon dioxide emissions in China's manufacturing industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 77-88.
- [65] Gu W, Liu D, Wang C, et al. Direct and indirect impacts of high-tech industry development on CO₂ emissions: Empirical evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 27093-27110.
- [66] Wang Shaojian, Xie Zihan, Wang Zehong. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO₂ emissions at the county level of China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3103-3118. [王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素. *地理学报*, 2021, 76(12): 3103-3118.]
- [67] Huang C, Zhu Y Y, Ren M, et al. Prospective climate change impacts on China's fossil and renewable power-generation infrastructure: Regional and plant-level analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 188: 106704. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106704.
- [68] Zhou Y N, Yang Y, Xia S Y. A novel geographic evolution tree based on econometrics for analyzing regional differences in determinants of Chinese CO₂ emission intensity. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114402.
- [69] Ma Haitao. The theoretical construction and network simulation of intercity innovative relationships in knowledge flow space. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 708-721. [马海涛. 知识流动空间的城市关系建构与创新网络模拟. *地理学报*, 2020, 75(4): 708-721.]
- [70] Storper M. *The Regional World: Territorial Development in A Global Economy*. New York: Guilford Press, 1997.
- [71] Xu X P, Sheng Y. Productivity spillovers from foreign direct investment: Firm-level evidence from China. *World Development*, 2012, 40(1): 62-74.
- [72] Keller W. *International Trade, Foreign Direct Investment, and Technology Spillovers in Handbook of the Economics of Innovation*. Amsterdam: North-Holland, 2010: 793-829.
- [73] Shang Yongmin, Mi Zefeng. Impact of low-carbon technology innovation cooperation in the Yangtze River Delta on green economic growth. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(10): 135-145. [尚勇敏, 宓泽锋. 长三角低碳技术创新合作对绿色经济增长的影响. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(10): 135-145.]
- [74] Yin Fengchun, Tian Nannan, Yan Xiang. Re-examining the carbon emission reduction effect of technology talent clustering from the perspective of green technology transfer. *Scientific Management Research*, 2023, 41(4): 117-124. [殷凤春, 田楠楠, 严翔. 绿色技术转移视角下科技人才集聚的碳减排效应再检验. *科学管理研究*, 2023, 41(4): 117-124.]
- [75] Liu Zhen, Li Wei, Liu Shenghe. Effects of regional population shrinkage on economic growth and the underlying mechanism. *Geographical Research*, 2024, 43(4): 949-965. [刘振, 李伟, 刘盛和. 中国区域人口收缩对经济增长的影响及形成机理. *地理研究*, 2024, 43(4): 949-965.]

Spatial pathways of clean energy technology transfers and emission reduction effects in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

ZHOU Yannan¹, HE Ze², ZHANG Yaxin^{3,4}, YANG Sirui¹, YANG Yu^{5,6}

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Energy Research Institute, Chinese Academy of Macroeconomics Research, Beijing 100038, China;

3. Postdoctoral Research Workstation of China International Consulting Engineering Co., Ltd., Beijing 100048, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

6. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Advancing the transfer and application of clean energy technologies is a pivotal strategy for addressing energy-related environmental and climate challenges. The Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), a major economic and innovation hub in China, possesses substantial potential in facilitating clean energy technology transfer and reducing carbon emissions. This study examines the spatial dynamics of local, interregional, and international clean energy technology transfers within the GBA, based on patent transfer data from 2010 to 2022. Furthermore, the study employs the STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) model to assess the impact of these transfers on the region's emission reduction targets. This study reveals the following findings: (1) The scale of local clean energy technology transfers within the GBA exhibits a fluctuating upward trend, predominantly following an "intra-city hub-and-spoke" model. The transfer network has evolved from a single-core to a dual-core and, eventually, to a multi-center configuration. (2) Interregional clean energy technology transfers are increasingly active, narrowing the gap with local transfers. The transfer model has shifted from concentration to diffusion, with external demand transitioning from the Yangtze River Delta to the Beijing-Tianjin-Hebei region. The spatial pattern of outward diffusion has expanded from innovation-intensive cities in the eastern and central regions to western cities such as Haixi, Urumqi, and Karamay. (3) The scale of international clean energy technology transfers remains relatively small, but its activity is gradually increasing, with the Hong Kong-Shenzhen core network engaging with a more diverse array of partners. (4) Clean energy technology transfer has had a significant inhibitory effect on carbon emissions in the GBA, particularly through local and interregional intercity transfers, while the emission reduction effect of international transfers is not yet significant. This study sheds light on the spatial pathways, characteristics, and emission reduction impacts of clean energy technology transfers in the GBA, providing valuable insights for formulating regional low-carbon policies and promoting technological innovation cooperation.

Keywords: clean energy technology; technology transfers; spatial pathways; emission reduction effects; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area