

引用格式: 顾高翔. 国际低碳技术共享的碳减排与气候治理[J]. 资源科学, 2026, 48(3): 611-626. [Gu G X. Carbon emission reduction and climate governance through international low-carbon technology sharing[J]. Resources Science, 2026, 48(3): 611-626.]

DOI: 10.18402/resci.2026.03.08

# 国际低碳技术共享的碳减排与气候治理

顾高翔

(华东师范大学人口研究所, 上海 200241)

**摘要:**【目的】国际低碳技术共享是实现全球碳中和的重要途径。综合评价国际低碳技术共享的碳减排潜力, 及其在降低碳中和成本、减缓气候变化、促进技术进步等方面的效果, 对未来全球气候合作具有重要的理论和政策意义。【方法】构建气候-经济-技术集成评估模型 CIECIA-GT, 对 2025—2100 年国际低碳技术共享政策的碳减排潜力及其在碳中和目标约束下的气候治理效果进行了综合评价。【结果】①全球 2100 年地表温升幅度随低碳技术共享程度的提高明显下降, 在低碳技术完全共享的情况下可控制在 2.62 °C。②在技术完全共享情景下, 发达经济体凭借较高的技术学习能力充分获得低碳技术转移, 低碳技术水平显著提升; 发展中经济体受制于自身的技术研发学习能力, 技术水平提升反而有限。③实施国际低碳技术共享政策, 可以帮助各国在碳中和约束下减少对碳限额措施的依赖, 累积效用显著上升, 碳中和成本得到控制。④发达经济体对发展中经济体提供额外技术支持, 可有效加速发展中经济体的技术模仿, 进一步降低碳中和成本, 但边际效果有限。【结论】国际低碳技术共享具有显著的技术提升和碳减排潜力, 但无法直接实现气候变化减缓目标; 减少专利保护年限可以促进发达经济体参与国际低碳技术转移, 对减缓气候变化的效果好于降低专利宽度; 国际低碳技术共享可大幅降低碳中和成本, 而发达经济体为发展中经济体提供额外技术支持, 可以进一步提升全球碳中和路径的可行性和公平性, 具有显著的气候治理意义; 将低碳技术共享与其他高经济成本减排措施组合是一种合理的国际碳减排合作方案设计思路。

**关键词:** 低碳技术共享; 技术转移; 碳中和; 气候治理; 集成评估模型

DOI: 10.18402/resci.2026.03.08

## 1 引言

为减轻全球气候变化的潜在风险, 到 21 世纪中叶实现碳中和已成为全球最重要的减排目标之一, 得到世界各国的积极响应<sup>[1]</sup>。碳中和旨在通过碳清除手段抵消人为排放的二氧化碳, 实现碳源与碳汇之间的相对平衡<sup>[2]</sup>, 被认为是将全球变暖限制在 1.5 °C 以下的关键战略<sup>[3]</sup>。当前, 已有 160 多个国家提出了碳中和目标, 包括中国、美国和欧盟等在内的约 80 个国家(地区)将碳中和目标写入了法律或政策文件。碳中和业已成为全球中远期气候行动方案的核心目标<sup>[4]</sup>。

科学技术变革是支撑碳中和目标实现的关键<sup>[5,6]</sup>。建立可行有效的国际低碳技术共享机制, 加

快低碳技术的转移/转让, 可有效提高低碳技术的普及率、降低减排成本、发挥减排潜力, 是促进低碳技术进步、实现减排目标的重要措施<sup>[7]</sup>。低碳技术共享的重要性在有关气候变化的各类协议、声明和宣言中被一再强调: UNFCCC 在 2004 年就建立了技术评估机制, 致力于识别和分析发展中国家未来所需要的减缓/适应优先技术, 以促进技术的跨国转移<sup>[8]</sup>; 《哥本哈根协议》呼吁加强国家间的技术合作以支持适应和缓解行动<sup>[9]</sup>; 《巴黎协定》提出建立新的技术机制, 以加强国际低碳技术共享程度, 加快技术转移速度<sup>[7]</sup>; UNFCCC 第 28 次缔约方会议重申了加强低碳技术共享以支持发展中国家实现缓解和适应气候变化目标的全球共识。

收稿日期: 2025-01-14; 修订日期: 2025-06-02

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(21BGJ076)

作者简介: 顾高翔, 男, 浙江宁波人, 博士, 副研究员, 研究方向为地理计算、经济计算、气候变化经济学。E-mail: caesarggx@163.com

注: 第二十八届中国科协年会学术论文。

低碳技术共享是当前国际气候合作领域的研究热点,学者针对技术共享下低碳技术的发展问题进行了广泛的研究。这些研究的内容涵盖共享过程中低碳技术的创新<sup>[10]</sup>、传播<sup>[11]</sup>、使用<sup>[12]</sup>,以及技术共享涉及的制度和法律问题<sup>[13]</sup>,取得了大量重要成果。尽管如此,现有研究往往聚焦于特定地区、行业、技术类型,无法对低碳技术共享在实现全球气候变化减缓中的作用进行综合性评价。另一方面,现有研究较少涉及低碳技术共享对各国社会发展可能带来的冲击。考虑到经济问题是实现包括碳中和在内的全球气候保护目标的关键因素<sup>[14]</sup>,对国际低碳技术共享进行包括气候、社会经济、技术在内的综合评价,对于实现全球碳中和目标具有重要的理论和现实意义。

针对已有研究存在的不足,本文在资本-产业进化与气候变化集成评估模型(Capital, Industrial Evolution and Climate-change Integrated Assessment model, CIECIA)的基础上,构建 CIECIA-GT (CIECIA-Green Technology)模型,以情景模拟的方式对 2025—2100 年碳中和目标约束下国际低碳技术共享的气候-经济-技术影响进行模拟,综合评价其气候治理效果。本文的边际贡献体现在以下 3 个方面:①相较于已有研究,本文尝试从全球气候-经济-技术复杂动态关系出发,将低碳技术共享的研究纳入多学科融合的框架中,从促进低碳技术国际转移、降低碳排放、减缓气候变化、减少碳减排成本 4 个角度对其有效性、公平性和可行性进行综合评价,全面分析碳中和目标约束下国际低碳技术共享的气候治理效果;②在研究方法上,针对现有主流集成评估模型在低碳技术进步机制方面存在的缺陷,本文在 CIECIA-GT 模型中设计了一套专利系统约束下的低碳技术创新和转移模型,实现了自上而下的宏观经济模型与专利制度保护下的基于个体行为的技术模型的耦合;③在国际低碳技术共享的基础上,探索了发达经济体向发展中经济体提供额外技术转移支持行动的技术提升效果、碳减排潜力和社会经济影响,为解决当前国际气候合作中存在的矛盾和分歧提供新的视角,也为国际气候合作模式的创新提供政策设计依据。

## 2 文献回顾

### 2.1 低碳技术共享研究

现有关于低碳技术共享及转移的研究通常聚

焦低碳技术的知识产权分享对特定绿色低碳技术在特定区域/行业间转移/转让的影响及其作用机制,一般采用计量模型进行实证研究。许多研究基于真实专利技术的转移数据,分析低碳技术共享的实施效果及其影响机制,如 Weko 等<sup>[15]</sup>自主编制低碳技术转移案例数据库,研究了知识产权共享对促进低碳技术转让、弥合技术差距的效果;Liao 等<sup>[16]</sup>基于 incoPat 专利数据库中近 2 万条绿色技术专利,研究了产业竞争下专利的技术价值、经济价值和法律价值对其转让的影响机制。部分研究基于企业调查数据,分析低碳技术转移和共享对企业绿色发展的促进效果,如 Song 等<sup>[17]</sup>基于 247 家中国制造业企业的调查数据,分析绿色知识共享促进制造业企业绿色创新的效果;Sun<sup>[18]</sup>基于上市公司数据,分析了企业知识共享在数字化转型与绿色技术创新绩效之间的中介机制。还有一些研究将空间尺度扩展到城市级别,如尚勇敏等<sup>[19]</sup>基于 2005—2019 年中国城际低碳技术专利转让数据,分析城际低碳技术转移对碳排放的影响。这类计量实证研究对低碳技术共享促进技术进步的机制和效果进行了全面分析,但研究内容较为单一,缺乏对低碳技术共享下气候-经济-技术之间动态关系的系统刻画。此外,研究尺度也通常局限于特定区域和行业,无法量化全球范围内低碳技术共享可能带来的其他气候、社会、经济影响。

低碳技术共享中的知识产权制度问题及其解决途径也是当前研究热点之一。这类研究通常以案例的形式,聚焦微观层面上具体的绿色低碳技术的转移和共享机制创新,如 Silva 等<sup>[20]</sup>尝试构建一个高校-企业绿色技术转移概念模型,通过建立专门的技术创新激励机制和评估体系,加强企业和高校之间的知识共享和技术合作;Perot<sup>[21]</sup>提出一个绿色技术共享框架,为与发展中国家和最不发达国家签订绿色许可协议的企业提供税收减免,以期实现全球绿色转型正义。也有学者将研究视角扩展到国家之间的技术转移/共享机制,如 Kyllili 等<sup>[22]</sup>以西非为例,设计了一套发达国家通过技术转移帮助发展中国家可再生能源开发的整体框架。还有部分学者从法律的角度出发,探讨了绿色低碳技术转移与共享的制度建设问题,如 Perrone 等<sup>[13]</sup>梳理了跨国技术转移相关法律与转移机制的发展历史,对“全球南方”国家技术共享需求下的知识产权等问题进行

2026年3月

了再思考;郝海青等<sup>[23]</sup>从法律层面对绿色低碳技术的提供方和需求方在技术共享和转让过程中存在的问题提出建议。这类研究往往采用微观视角下的定性研究和案例分析方法,一般不对低碳技术共享实际减排效果进行测算,无法满足对低碳技术共享进行综合评价的需求。

此外,部分研究关注技术共享下多方技术转移行为及其动态过程,通常采用博弈模型作为研究方法。如汪明月等<sup>[24]</sup>构建动态博弈模型,研究了低碳技术异地协同共享的减排收益。很多这类研究还在模型中融合技术转移以外的其他技术进步相关的过程,如Chen等<sup>[25]</sup>构建的碳减排双寡头模型同时考虑技术研发和技术共享两个过程,以此研究古诺竞争和贝特朗竞争下的不同企业的低碳技术研发/共享策略;王丽强等<sup>[26]</sup>建立的制造业绿色创新知识共享演化博弈模型包含创新网络,研究不同知识共享成本、知识产权保护强度下,不同类型企业的绿色知识共享的博弈策略变化。这类基于博弈模型的研究对低碳技术共享下不同类型个体的技术发展策略变化进行了细致的分析,但通常需要对现实世界进行高度抽象和简化,参数设置缺乏现实依据,研究结果难以对现实中气候合作方案设计产生直接的指导作用。

综上所述,已有研究针对技术共享下的低碳技术进步,从动态机制、实施效果和影响因素等多方面进行了细致的分析和讨论。然而,这些研究的视角普遍聚焦于微观的企业层面,少数扩展到行业或者国家层面,缺乏从多国乃至全球层面对低碳技术共享实施效果的分析。另一方面,这些研究没有系统性地刻画气候、社会经济、技术等要素之间的复杂动态关系,因而无法对低碳技术共享潜在的气候、社会经济和技术发展影响进行综合评价。

## 2.2 集成评估模型

国际低碳技术共享与全球气候变化以及各国的社会经济发展和技术进步之间存在复杂的内在联系,是一个涉及多国政治、社会、经济利益的综合性问题。考虑减排过程带来的经济损失是历次国际气候谈判出现分歧的焦点之一<sup>[13]</sup>,从社会经济角度对气候政策进行综合评价尤为重要。集成评估模型(Integrated Assessment Model, IAM)全面刻画全球自然生态-社会经济系统,充分反映气候变化下国家间复杂的社会经济联系,被广泛应用于包括

低碳技术发展在内的气候政策模拟和分析<sup>[27]</sup>,适用于对国际低碳技术共享政策进行多方面的综合性分析和评价。

与现有的低碳技术共享研究,特别是聚焦制度和法律方面的研究相反,IAM关注低碳技术创新扩散的减排潜力、减排成本和社会经济环境影响,但是缺乏对先进低碳技术在制度上的可获得性,及其具体扩散转移过程的讨论。这主要是由于现有的IAM普遍缺乏对知识产权保护制度的刻画,且低碳技术的创新扩散和共享机制都过于简化。许多IAM对先进低碳技术可获得性的考虑并不充分,忽视了政策制度在技术扩散过程中起到的重要作用。正如Shiraki等<sup>[28]</sup>所指出的,传统的IAM一大缺陷就是以缓慢变化的、相对同质的方式去处理技术进步。例如,WITCH<sup>[29]</sup>、IPAC<sup>[30]</sup>和CGEM<sup>[31]</sup>等模型利用学习曲线或自主能源效率提高参数等来表示低碳技术共享情况下技术学习对研发效率的提高作用。这种高度简化的方式无法反映专利等制度性因素约束下的低碳技术转移过程。因此,将知识产权制度引入IAM是综合评价低碳技术共享政策的必要条件。

针对上述问题,本文构建CIECIA-GT模型来刻画知识产权保护制度下的国际低碳技术共享和转移机制。标准CIECIA模型是一个以多国多部门一般均衡模型为经济核心的气候-经济-技术集成评估模型。CIECIA-GT模型引入一个低碳技术专利系统,通过设置专利保护参数表示不同程度的低碳技术国际共享,反映现实中的知识产权保护制度。此外,CIECIA-GT模型还包含一个自底向上的低碳技术转移模型,该模型通过刻画微观个体之间的技术模仿行为,涌现出宏观层面上的技术转移。通过耦合技术专利系统和技术转移模型,CIECIA-GT以微观行为-宏观涌现的方式,实现了对知识产权保护制度约束下低碳技术国际转移的模拟。

## 3 CIECIA-GT模型

### 3.1 模型概述

本文在标准CIECIA模型的基础上,构建了CIECIA-GT模型。CIECIA包含6个国家(地区):中国、美国、日本、欧盟、印度、俄罗斯,将全球其余国家(地区)中的发达国家合并成其他发达国家组合(其他发达国家),并依据联合国人类发展指数将其余的发展中国家(地区)分为高人类发展水平国家

组合(高发展国家)、中人类发展水平国家组合(中发展国家)、低人类发展水平国家组合(低发展国家),共计10个经济体。其中,中国、印度、俄罗斯、高发展国家、中发展国家和低发展国家属于发展中经济体,美国、日本、欧盟和其他发达国家属于发达经济体。依据产业特征,CIECIA将各经济体的经济划分为12个产业部门:农业、食品加工业、能源业、金属及其他矿业、轻工业、化工业、重工业、建筑业、商贸零售业、交通运输业、金融保险业、其他服务业。CIECIA模型以多国多部门一般均衡模型为经济核心,以3层全球碳循环模型为气候核心,通过碳核算模块和气候损失函数的连接,实现经济系统与气候系统的耦合。CIECIA模型的技术进步模块包含3种技术进步模式:劳动力技术进步、知识资本累积和反映生产过程中工艺改进的过程技术进步。此外,CIECIA系列模型还包括碳限额、碳税、产业投资、气候投融资、绿色技术R&D等一系列低碳技术政策模块。

在CIECIA模型的基础上,CIECIA-GT模型引入一个技术专利系统,反映现实中的知识产权保护制度。该系统从专利保护长度和宽度两个维度对创新技术进行新技术的知识产权保护,保护范围内的专利技术无法被其他国家/部门模仿学习。基于专利系统,CIECIA-GT模型建立了一套自底向上的基于个体行为的低碳技术创新转移模型,该模型依据个体的技术研发、模仿和学习行为,从微观层面上刻画了低碳技术从投资、研发、扩散转移、部署应用直至淘汰的整个生命过程。在CIECIA-GT模型中,低碳技术转移受到专利系统的控制,专利保护程度直接反映低碳技术的共享程度。考虑本文的核心内容是专利制度约束下的国际低碳技术转移与共享,只详细介绍与其相关的专利系统和低碳技术创新转移系统,模型的其余部分,包括数据来源、基础参数设置、基准情景校验等,详见Gu等<sup>[32]</sup>和顾高翔等<sup>[33]</sup>。图1显示了CIECIA-GT模型的基本结构。

### 3.2 专利系统

CIECIA-GT模型的专利系统以专利保护长度和宽度来实现对低碳技术知识产权的制度性保护,这种专利制度提供了使技术发明者排除竞争对手使用受保护技术的具有时效性的权力<sup>[34]</sup>。

专利长度表示专利保护的持续时间,是法定的专利保护期限,也是竞争对手限制模仿受保护技术

的年限。本文模型假定模拟期间专利长度 $L$ 固定,则对于在第 $t$ 期发明的低碳技术 $\psi_{i,t}^j$ ,从第 $t$ 期到第 $t+L$ 期,该技术无法被模仿,此后专利保护过期,该技术可被竞争者免费获得并模仿学习。这一机制确保技术在专利到期之前始终受专利系统保护,不管其是否被其他更新的技术所超越。对于被超越的专利技术,尽管其仍然在专利保护期内,但将失去对模仿者的技术吸引力。

相对而言,专利“宽度”并没有非常明确的定义。Denicolò<sup>[35]</sup>以成本下降型的技术为例,将专利宽度定义为专利技术带来的成本下降幅度中,不能免费溢出到其他企业的部分。这个概念相对直观,可以很容易地合并到计算模型中;本文沿用这个概念,定义专利宽度为专利制度允许的技术共享程度。专利宽度保护了创新中的核心部分,使其无法被技术模仿者免费获得。参考Gu等<sup>[32]</sup>的方法,本文以标准碳强度 $c_{i,t}^j$ 表示低碳技术的技术水平。

$$c_{i,t}^j = \bar{F}_t (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{M}}_t)^{-1} (\boldsymbol{\psi}_{i,t}^j)^T + \sum_e a_{E,j,i,t} v_{i,j,t} \zeta_{e,i,j,t} \theta_{e,i,j,t} \quad (1)$$

$$\bar{F}_t = \left[ \begin{array}{c} \sum_e \bar{a}_{E,1,t} \bar{v}_{1,t} \bar{\zeta}_{e,1,t} \bar{\theta}_{e,1,t}, \dots, \sum_e \bar{a}_{E,j,t} \bar{v}_{j,t} \bar{\zeta}_{e,j,t} \bar{\theta}_{e,j,t}, \dots \\ \sum_e \bar{a}_{E,j,t} \bar{v}_{j,t} \bar{\zeta}_{e,j,t} \bar{\theta}_{e,j,t} \end{array} \right] \quad (2)$$

式中: $\sum_e a_{E,j,i,t} v_{i,j,t} \zeta_{e,i,j,t} \theta_{e,i,j,t}$ 表示国家(地区) $j$ 部门 $i$ 第 $t$ 期的直接碳排放强度; $\bar{F}_t (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{M}}_t)^{-1} (\boldsymbol{\psi}_{i,t}^j)^T$ 表示间接碳排放强度; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $a_{E,j,i,t}$ 为国(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期的能源产品直接消耗系数; $v_{i,j,t}$ 表示国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期使用能源产品带来能源消耗的强度; $\zeta_{e,i,j,t}$ 表示国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期的能源结构; $\theta_{e,i,j,t}$ 表示国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期使用能源产品 $e$ 的碳排放强度; $\bar{a}_{E,i,t}$ 表示第 $t$ 期部门 $i$ 的平均能源产品直接消耗系数; $\bar{v}_{i,t}$ 表示第 $t$ 期部门 $i$ 使用能源产品带来能源消耗的平均强度; $\bar{\zeta}_{e,i,t}$ 表示第 $t$ 期部门 $i$ 的能源结构全球能源结构; $\bar{\theta}_{e,i,t}$ 表示第 $t$ 期部门 $i$ 使用能源产品 $e$ 的平均碳排放强度; $\bar{a}_{E,i,t} \bar{v}_{i,t} \bar{\zeta}_{e,i,t} \bar{\theta}_{e,i,t}$ 表示第 $t$ 期部门 $i$ 使用能源产品 $e$ 带来的直接碳排放强度; $\bar{\mathbf{M}}_t$ 表示第 $t$ 期平均直接消耗系数矩阵; $\bar{F}_t$ 表示第 $t$ 期全球各部门平均的直接碳排放强度; $\boldsymbol{\psi}_{i,t}^j$ 是以行向量表示的国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期采用的低碳技术。

假设国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期获得低碳技术

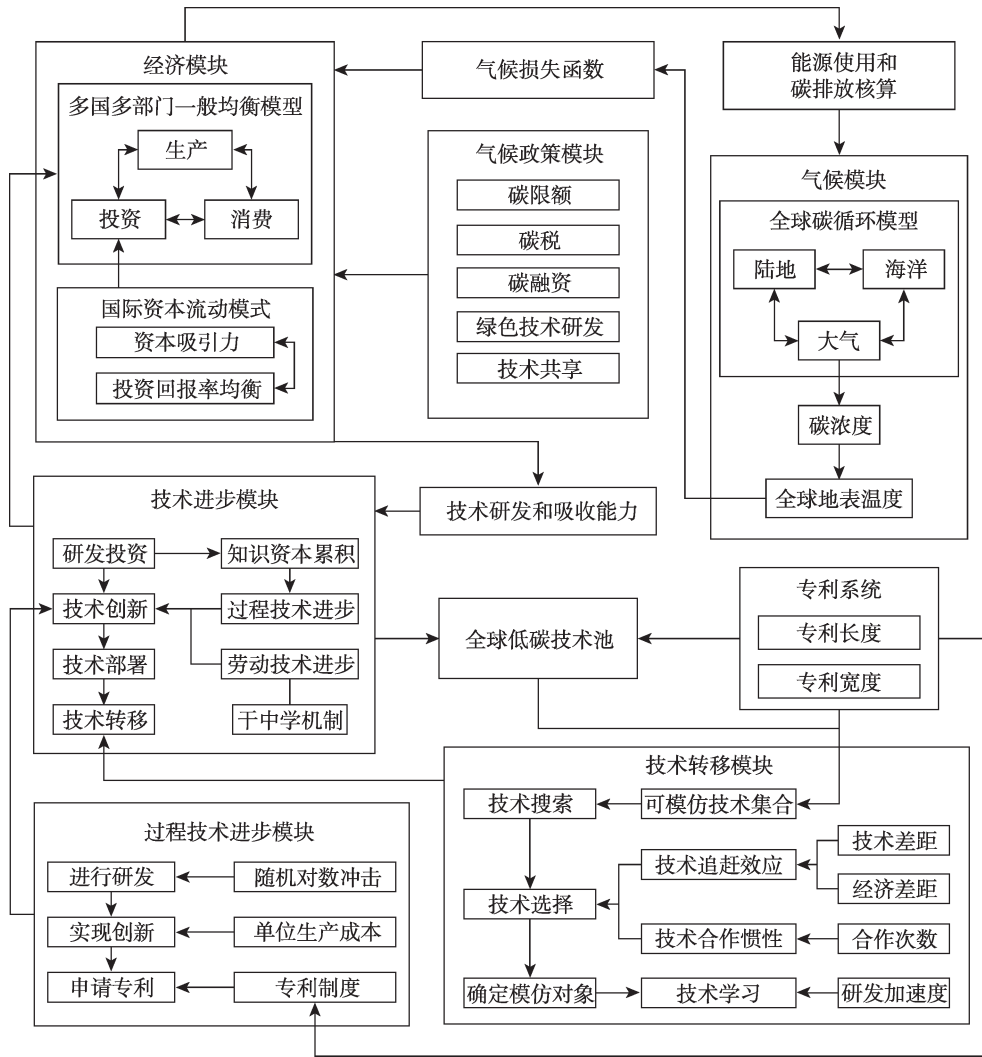


图1 CIECIA-GT 模型基本结构

Figure 1 Basic structure of CIECIA-GT

$\psi_{i,t}^j$  的专利,且该技术的单位碳强度为  $c_{i,t}^j$ ,则  $c_{i,0}^j$  到  $c_{i,t}^j$  的成本下降幅度为其累积创新。假定专利保护宽度为  $W$ ,则  $(1+W)c_{i,t}^j$  到  $c_{i,t}^j$  之间的部分为专利保护范围,而  $c_{i,0}^j$  到  $(1+W)c_{i,t}^j$  之间的部分可被模仿者免费获得。此外,在本文模型中,只有原创技术才能被专利保护,依靠模仿获得的技术无法获得专利。对于国家  $j$  部门  $i$ ,其在第  $t$  期可模仿学习的低碳技术集合  $\psi_{i,t}^j$  可表示为仍然处于保护期的专利集合  $\psi_{i,t}^P$  和过期专利集合  $\psi_{i,t}^E$  的合集:

$$\psi_{i,t}^j = \psi_{i,t}^P \cup \psi_{i,t}^E \quad (3)$$

$$\psi_{i,t}^P = \{ \psi_{i,\tau}^k | c_{i,t}^j > (1+W)c_{i,\tau}^k, (t-\tau) < L \} \quad (4)$$

$$\psi_{i,t}^E = \{ \psi_{i,\tau}^k | c_{i,t}^j > c_{i,\tau}^k, (t-\tau) \geq L \} \quad (5)$$

式中:  $c_{i,t}^j$  是国家(地区)  $j$  部门  $i$  在第  $t$  期的碳强度;  $c_{i,\tau}^k$

是国家(地区)  $k$  部门  $i$  在第  $\tau$  期原创的技术  $\psi_{i,\tau}^k$  的碳强度。若  $(t-\tau) < L$ ,则该技术仍在专利保护期内,  $(1+W)c_{i,\tau}^k, c_{i,t}^j$  表示该技术受保护的部分,国家(地区)  $j$  部门  $i$  在第  $t$  期无法模仿,而专利保护宽度外的  $(c_{i,\tau}^k, (1+W)c_{i,t}^j)$  部分可被国家(地区)  $j$  部门  $i$  模仿;若  $(t-\tau) \geq L$ ,则该专利已过期,可被其他国家(地区)/部门完全模仿学习。

根据当前全球通行的专利保护年限<sup>[30]</sup>,专利长度  $L$  的上限为 20 年;同时根据 Wang 等<sup>[37]</sup>和 Gu 等<sup>[32]</sup>的研究,专利宽度  $W$  的上限为 20%,反映正常情况下知识产权制度对技术转移扩散的限制。随着专利宽度和长度的下降,技术的共享程度逐渐提高,当专利宽度或专利长度为 0 时,表明技术在全球范

围内实现完全的共享。

### 3.3 低碳技术创新与转移机制

#### 3.3.1 技术创新

CIECIA 系列模型采用过程技术进步概念反映生产过程中,由技术创新带来的包含能源产品和非能源产品的中间投入需求下降。其中,能源产品需求的下降直接降低本部门的碳排放量,而非能源产品需求的下降则通过供应链关系降低其他部门的碳排放量,表现为间接碳减排。过程技术刻画了广义上的生产端节能减排技术,以直接消耗系数清单的行向量表示:

$$\psi_{i,t}^j = (a_{1,j,i,t}, \dots, a_{m,j,i,t}, \dots, a_{l,j,i,t}) \quad (6)$$

式中: $\psi_{i,t}^j$ 是国家(地区) $j$ 部门 $i$ 在第 $t$ 期的过程技术清单; $a_{m,j,i,t}$ 是国家(地区) $j$ 部门 $i$ 对中间产品 $m$ 的直接消耗系数。

CIECIA 系列模型以对数随机冲击方式驱动过程技术创新。每期各国(地区)各部门的直接消耗系数 $a_{m,j,i,t}$ 都会受到 $N$ 轮随机冲击,第 $n$ 轮的随机冲击为 $\varepsilon_{j,m,i,t,n} \sim N(0; \rho_{m,t}^j)$ ,每一轮冲击后得到一组过程技术清单 $\psi_{i,j,t,n} = (a_{1,j,i,t,n}, \dots, a_{m,j,i,t,n}, \dots, a_{l,j,i,t,n})$ ,若该过程技术的单位生产成本 $\sum_m^l a_{m,j,i,t,n} p_{m,t}$ 低于前一次冲击得到的过程技术,则该技术创新将被保留,否则沿用前序技术 $\psi_{i,j,t,n-1}$ 。这是因为尽管过程创新进步反映广义层面上的节能减排技术,但从企业生产者的角度出发,节约生产成本是其推动技术创新的主要动力。

$$\ln(a_{m,j,i,t,n}) = \ln(a_{m,j,i,t,n-1}) + \varepsilon_{j,m,i,t,n} \quad (7)$$

$$\psi_{i,j,t,n} = \begin{cases} \psi_{i,j,t,n} & \text{if } \sum_m^l a_{m,j,i,t,n} p_{m,t} < \sum_m^l a_{m,j,i,t,n-1} p_{m,t} \\ \psi_{i,j,t,n-1} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

经过 $N$ 轮随机对数冲击,国家(地区) $j$ 部门 $i$ 将采纳 $\psi_{i,j,t,N}$ 作为第 $t+1$ 期的过程技术清单,完成本期技术创新。同时,若该技术完全由自主研发获得,则将在专利系统中申请成为专利技术,受到专利系统的保护。

#### 3.3.2 技术转移

CIECIA-GT 模型采用自底向上的技术模仿学习机制刻画共享条件下的低碳节能技术转移过程。这一机制基于个体的技术学习行为,将技术转移过

程划分为3个阶段:可模仿技术搜索、技术选择和技术学习。

在可模仿技术搜索阶段,各国(地区)各部门基于式(4)和(5)搜索可模仿的先进技术。若该部门当前已经处于技术模仿过程中,则必须先完成当前的技术学习。

在技术搜索阶段,已经获得可模仿技术集合 $\psi_{i,t}^j$ 的部门将基于点对点的技术吸引力,从中选择学习对象。技术吸引力由技术追赶和技术合作惯性两部分组成<sup>[32]</sup>。技术追赶由国家(地区)/部门间的过程技术水平差距决定,差距越大吸引力越强,相比于处于保护期的专利技术,过期技术对模仿者的吸引力更大。同时,它还受到经济差距的影响。技术合作惯性指技术模仿者会对过去技术转移中的合作关系产生依赖作用,更倾向于从有过技术学习经历的国家(地区)/部门学习先进技术,刻画了技术转移过程中的路径依赖。

$$E_{i,t}^{j,k,\tau} = Eg_{i,t}^{j,k,\tau} + Ez_{i,t}^{j,k,\tau} = (1 - \zeta_{j,k,\tau} WL) \mu e^{\mu_0 \Delta c_{i,t}^{j,k,\tau} + \mu_1 \Delta x_{i,t}^{j,k,\tau}} + v_0 n_{i,t}^{j,k,\tau} \quad (9)$$

式中: $E_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为国家(地区) $k$ 部门 $i$ 在第 $\tau$ 期的过程技术对第 $t$ 期国家(地区) $j$ 部门 $i$ 的技术吸引力; $Eg_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为技术追赶强度; $Ez_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为技术合作惯性强度; $\Delta c_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为第 $\tau$ 期的国家(地区) $k$ 部门 $i$ 对国家(地区) $j$ 部门 $i$ 之间的技术差距,以式(1)的标准碳强度的比值表示; $\Delta x_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为经济差距,以人均GDP的比值表示; $n_{i,t}^{j,k,\tau}$ 为第 $t$ 期以前,国家(地区) $j$ 部门 $i$ 从国家(地区) $k$ 部门 $i$ 获得技术转移的次数; $\zeta_{j,k,\tau}$ 为知识产权保护制度对技术吸引力的影响因子,若第 $\tau$ 期距离第 $t$ 期的时间超过专利长度 $L$ ,则 $\zeta_{j,k,\tau}$ 为0; $\mu$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu_1$ 、 $v$ 和 $v_0$ 为参数。

在技术学习阶段,技术模仿者模仿技术,以研发加速度 $s$ 加快研发速度,快速完成技术学习,实现技术转移。若模仿者选定的技术仍处于专利保护期,则只能模仿该技术在专利宽度保护以外部分,受专利保护的部分需要模仿者自主研发完成。技术完全共享政策下,技术模仿者可以通过模仿原先被专利保护的先进低碳技术,大幅加快自身的技术进步速度。这一机制体现了技术转移在微观层面上的复杂过程,即技术转移不能使技术接收者直接具备使用先进技术的能力,技术的吸收和学习同样需要投入时间和成本。在技术转移过程中,式(7)中的随机技术冲击模式被扩展为:

$$\varepsilon_{j,m,i,t,n} \sim \begin{cases} N(0; s\rho_{m,t}^j) & \text{if } a_{m,j,i,t,n-1} > (1+W)a_{m,j,i,t} \\ & \text{and } (t-\tau) < L \\ N(0; s\rho_{m,t}^j) & \text{if } a_{m,j,i,t,n-1} > a_{m,j,i,t} \\ & \text{and } (t-\tau) \geq L \\ N(0; \rho_{m,t}^j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

CIECIA-GT的技术模块与专利模块共同刻画了完整的低碳技术生命周期,包括研发投入、技术创新、专利申请与保护、技术部署、专利过期、技术共享、技术模仿、技术转移扩散,直至最终的技术更新和淘汰。

## 4 结果与分析

### 4.1 国际低碳技术共享的气候变化减缓效果

本文各情景以2025—2100年作为国际低碳技术共享政策的实施期,所有展示的情景计算结果为200次模拟结果的均值。CIECIA-GT的基准情景下,全球2100年地表温度较工业化前将提高约3.23°C,其结果与SSP2-60基本一致,属于共享社会经济路径中延续历史模式的中间路径。图2显示,当专利宽度和长度的取值分别为20%和20年时,全球2100年地表温升幅度下降到2.78°C,较基准情景降幅明显,表明正常情况下的低碳技术转移扩散具有显著的减缓气候变化效果。随着专利宽度和长

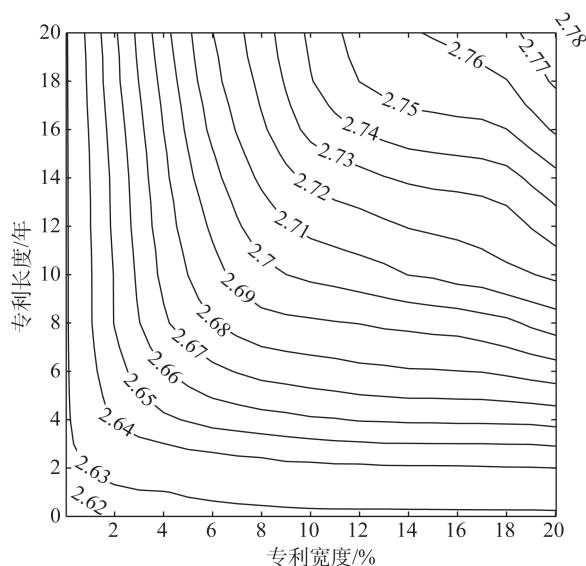


图2 不同专利宽度/长度组合下2100年全球地表温度较工业化前水平的上升幅度(°C)

Figure 2 Global surface temperature rise in 2100 relative to pre-industrial level under different combinations of patent length and breadth (°C)

度的逐渐下降,全球地表温升幅度随之降低,当全球实现低碳技术完全共享时,2100年的地表温升幅度可下降到2.62°C,但较2°C和1.5°C目标仍有较大差距。

模拟结果显示,降低专利长度的温升控制效果要好于降低专利宽度。从等值线分布来看,专利宽度表现为高值区等值线稀疏,低值区等值线密集,降温过程主要在低值区实现;而专利长度表现为中高值区等值线密集,低值区等值线略微稀疏。单独降低专利长度到4年,2100年全球地表温升可降低到2.66°C左右;而单独降低专利宽度则需要调整到2%才能达到这一控温水平。

### 4.2 国际低碳技术共享的技术提升和碳减排潜力

本文选取了5种具有代表性的专利宽度/长度组合作为国际低碳技术共享政策情景,分析其从促进低碳技术进步到实现碳减排的过程。各情景的技术共享相关参数设置见表1:情景1代表有知识产权制度保护下的技术转移和扩散;情景2和情景3分别将专利宽度和专利长度减半,提高低碳技术的共享程度;情景4下专利长度和专利宽度均减半,表示技术共享程度的进一步提高;情景5代表低碳技术的完全共享。5种情景下的技术模仿加速度均为200%,反映正常情况下的技术转移对技术进步的加速效果<sup>[37]</sup>。

#### 4.2.1 低碳技术水平

本文以式(1)标准碳强度的下降表示低碳技术水平的提升。图3显示了5种情景下各经济体2100年的低碳技术水平较基准情景的变化率。总体上,发展中经济体的低碳技术水平提升率高于发达经济体,两者之间的技术差距得到减小。情景1下,中国、印度、俄罗斯、中发展国家和低发展国家的低碳技术水平提升幅度明显高于美国、日本、欧盟和其他发达国家。随着低碳技术共享程度的提高,各经济体的低碳技术水平逐渐提升。全球实现低碳技术完全共享时,印度、俄罗斯的标准碳强度较基准

表1 情景1-5的技术共享参数设置

Table 1 Technology sharing parameter settings for scenarios 1 to 5

参数	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
专利宽度/%	20	10	20	10	0
专利长度/年	20	20	10	10	0
技术模仿加速度/%	200	200	200	200	200

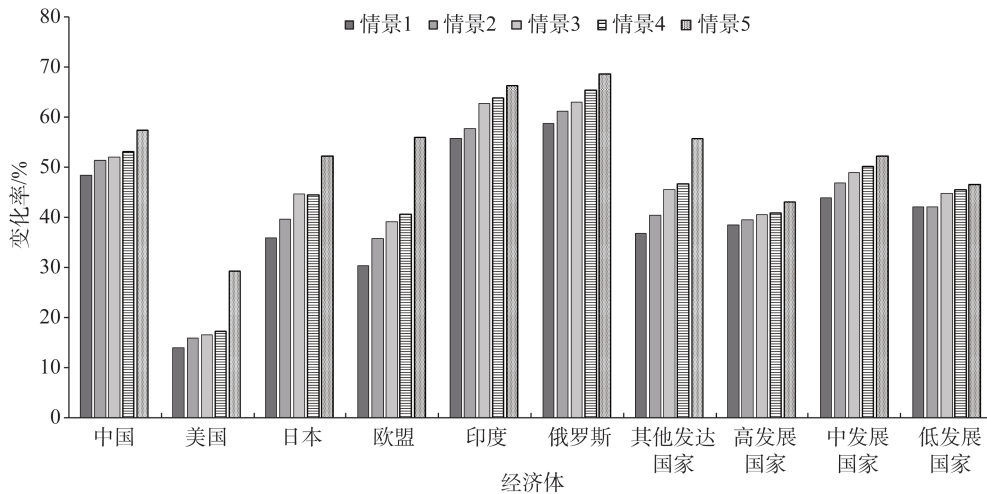


图3 情景1-5下2100年各经济体低碳技术水平较基准情景变化率

Figure 3 Change rates of low-carbon technology levels in 2100 for economies compared to baseline scenario under scenarios 1 to 5

情景可下降65%以上,中国、欧盟、日本和其他发达国家的标准碳强度下降率也将接近60%。从情景4到情景5,发达经济体的低碳技术水平有一个跃升,而印度、中发展国家和低发展国家的低碳技术水平提高幅度有限,特别是低发展国家,从情景3到情景5的技术水平提升幅度非常小,这使发达经济体和发展中经济体的技术差距再次被拉大。

造成这一现象的主要原因是发达经济体之间,如日本和欧盟本身技术水平比较接近,技术共享程度较低时,发达经济体之间的技术模仿和学习仍受到较大限制。如表2所示,随着技术共享程度的提高,美国、日本、欧盟和其他发达国家凭借其较高的技术研发/学习能力得以快速实现技术模仿,其在模拟期间获得低碳技术转移的次数迅速提高。印度、中发展国家和低发展国家由于自身的技术研发/学习能力有限,需要花费较多的时间完成技术转移,

难以从完全技术共享中充分获利,导致其低碳技术水平提升幅度相对较小。此外,图3中所有经济体在情景3下的低碳技术水平平均高于情景2,这与图2一致,证明在促进低碳技术进步方面,降低专利长度的效果好于降低专利宽度,这也是降低专利长度对减缓气候变化效果更好的原因。

表3显示,专利宽度的下降对模仿仍在专利保护期内技术的占比提高有限,而专利长度的下降则极大地提高了模仿专利过期技术的占比。因此,相较于选择模仿最新专利技术中不受专利宽度保护的部分,随着专利长度的下降,大部分部门逐渐更倾向于选择模仿专利过期或即将过期的技术。值得注意的是,从情景1到情景5,未进行技术模仿的时间占比小幅增加。这是由于随着专利保护程度下降,各经济体采取专利技术模仿策略时,花费在自主研发专利保护部分的时间减少,技术模仿力度

表2 情景1-5模拟期间各经济体平均接受技术转移次数

Table 2 Average numbers of technology transfer received by economies during simulation under scenarios 1 to 5

经济体	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
中国	109.05	116.01	116.33	113.59	135.00
美国	42.48	53.93	55.50	62.37	164.88
日本	75.82	83.91	94.14	95.27	163.38
欧盟	92.94	109.37	139.70	146.53	363.98
印度	62.12	71.70	82.38	84.06	111.36
俄罗斯	110.27	141.61	143.71	161.76	180.62
其他发达国家	125.84	124.58	147.99	152.33	230.70
高发展国家	35.62	43.23	39.83	40.37	43.27
中发展国家	45.77	65.33	61.23	63.83	61.72
低发展国家	47.09	49.95	50.45	49.42	47.28

2026年3月

表3 情景1-5模拟期间各经济体采取不同技术模仿策略的时间占比(%)

Table 3 Time proportions of different technology imitation strategies adopted by economies during simulation under scenarios 1 to 5 (%)

情景	专利技术模仿	过期技术模仿	未模仿
情景1	38.61	36.18	25.21
情景2	40.42	33.95	25.63
情景3	22.87	51.16	25.97
情景4	24.40	49.12	26.48
情景5	0.00	73.14	26.86

加强。这就导致低碳技术水平较高的经济体之间的技术水平差距快速缩小,模拟后期市场上可供其模仿的技术数量下降,使得各经济体平均处于技术模仿的时间略有减少。

#### 4.2.2 碳排放量

国际低碳技术共享通过提高低碳技术水平,推动了各经济体碳排放量的下降。如图4所示,情景1-5下各经济体在模拟期间累积碳排放量较基准情景有显著的下降,其下降趋势与低碳技术进步水平基本一致。情景1下,全球的碳排放量较基准情景下降了29%,随着低碳技术共享程度的提高,全球碳排放量进一步降低,到情景5低碳技术完全共享的情况下,全球碳排放量的下降率提高到约38%,其中印度的累积碳排放量较基准情景下降超过55%,中国和中美发展国家的碳减排率超过40%,而日本、欧盟和其他发达国家的碳减排率达到30%以

上,美国的碳减排率也上升到15%左右。

从情景1到情景5,高发展国家、中发展国家和低发展国家呈现不同的碳减排特征:高发展国家与发达经济体接近,从情景1到情景4碳排放量小幅逐渐下降,从情景4到情景5则大幅下降;低发展国家与印度较为相似,从情景1到情景4碳排放量明显下降,但情景4到情景5下降幅度很小;中发展国家则介于两者之间。这主要是由于高发展国家的低碳技术水平与作为低碳技术主要输出国的发达经济体更为接近,而中发展国家和低发展国家与发达经济体技术差距明显。表4显示,在低碳技术共享政策开始前的2024年,高发展国家与最先进低碳技术之间的差距明显小于中发展国家和低发展国家。对于高发展国家,技术共享程度的小幅提高对其可模仿技术数量的影响较弱,但是对于中发展国家和低发展国家,降低专利保护力度可有效提高其可模仿技术数量,这与表2呈现的结果接近。

从情景4到情景5,随着技术完全共享,高发展国家和发达经济体之间不再有技术转移的专利保护壁垒,凭借较高的技术学习能力得以充分学习模仿先进低碳技术;而低发展国家受限于技术学习能力,需要花费更长的时间去学习模仿技术,无法从完全技术共享中充分获利。表4显示,高发展国家在研发投入率和知识资本存量方面对比中发展国家和低发展国家的优势明显。这表明制度性因素

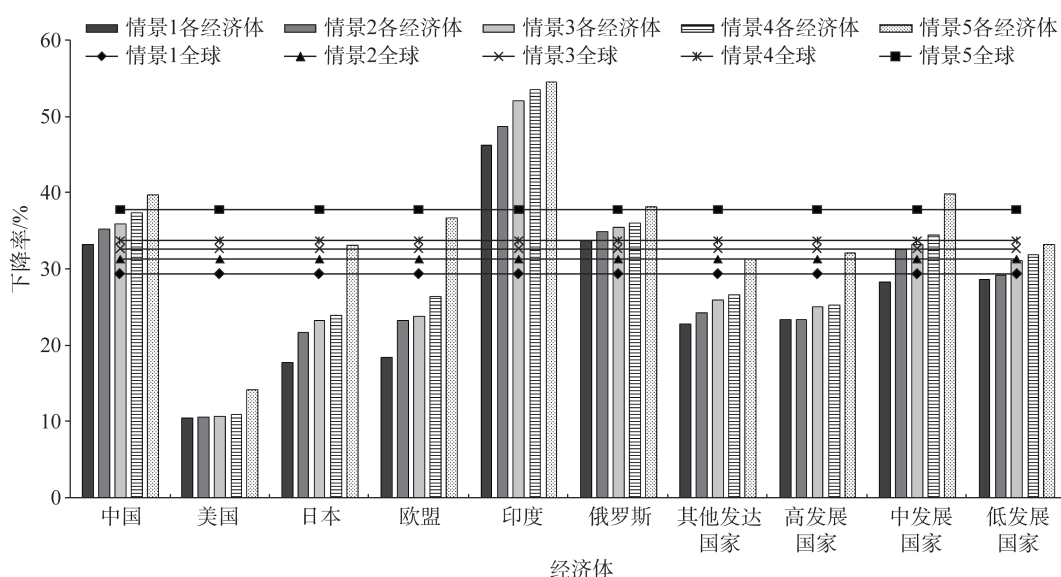


图4 情景1-5全球和各经济体2025—2100年累积碳排放量较基准情景下降率

Figure 4 Reduction rates of cumulative carbon emissions for globe and economies compared to baseline scenario from 2025 to 2100 under scenarios 1 to 5

表4 基准情景2024年高发展国家、中发展国家和低发展国家低碳技术发展情况

Table 4 Low-carbon technology development status of high-, middle-, and low-development countries in 2024 under baseline scenario

经济体	研发投入率/%	知识资本存量/亿美元	与最先进低碳技术差距/%
高发展国家	0.41	1115.94	251.17
中发展国家	0.14	757.67	313.50
低发展国家	0.16	136.54	311.39

注:最先进低碳技术是由当年全球范围内各部门的最低标准碳强度组合构成,各经济体与最先进低碳技术之间的技术差距采用其实际标准碳强度与最低标准碳强度之差与最低标准碳强度的比值表示。

是高发展国家乃至欧美发达经济体通过低碳技术转移减排的主要制约因素,而中发展国家和低发展国家的主要制约因素是资本性因素(例如知识资本基础),这与Gu等<sup>[32]</sup>和Li等<sup>[38]</sup>的结论基本一致。相较于高发展国家和低发展国家,中发展国家的技术学习能力和与发达经济体的技术差距都介于两者中间,没有制约其获得技术转移的短板,因此获得了更大的碳减排潜力,在5种情景下的减排幅度均高于高发展国家和低发展国家。

相比技术进步幅度,从情景4到情景5,美国和其他发达国家的碳减排幅度略低,而高发展国家和中发展国家的碳减排幅度却高于技术进步幅度。这是由于两类经济体在低碳技术水平和碳排放需求的变化趋势上存在差异。通过低碳技术转移实现减排需要投入时间,按照基准情景的模拟结果,美国和其他发达国家在2025年后已过了碳排放高峰,碳排放需求总体呈现下降趋势,而高发展国家和中发展国家的碳排放需求却仍在不断上升。如图5所示,情景5下尽管高发展国家和中发展国家2100年的低碳技术水平提高幅度有限,但技术进步幅度最大的时期正对应碳排放需求高速增长期;而美国和其他发达国家在情景5下技术水平大幅提高的阶段却对应碳排放需求低点,在一定程度上降低了碳减排率。此外,尽管高发展国家的技术研发/学习能力高于中发展国家,但与发达经济体之间的技术差距较小,使其在情景5下低碳技术水平提升幅度和碳减排率均显著低于中发展国家。

尽管2025年低碳技术完全共享政策实施以后,高发展国家和中发展国家的低碳技术水平较情景4

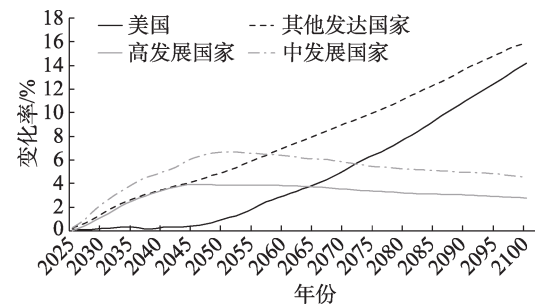


图5 情景5中2025—2100年美国、其他发达国家、高发展国家和中发展国家低碳技术水平较情景4的变化率

Figure 5 Change rates of low-carbon technology levels for USA, other developed countries, and high- and middle-development countries from 2025 to 2100 under scenario 5 compared to scenario 4

有显著提升,但2050年后提升幅度陷入停滞,甚至有所下降。这再次证明发展中经济体受限于自身技术学习吸收能力的限制,技术完全共享对其低碳技术水平的提升作用有限。

#### 4.3 碳中和约束下国际低碳技术共享的气候治理分析

本文沿用顾高翔等<sup>[33]</sup>提出的NDC-碳中和情景作为未来全球实现碳中和的减排路径。在该路径下,各经济体首先在2030年前后实现国家自主贡献(NDCs)设定的碳减排目标,在此基础上逐年降低碳排放量,直到其承诺的碳中和目标年达到碳中和。其中,中国、俄罗斯和高发展国家的碳中和目标年是2060年,印度的碳中和目标年为2070年,欧美发达国家(地区)都在2050年实现碳中和。由于目前尚有40多个国家没有提出碳中和目标,其中绝大部分是中低发展中国家,NDC-碳中和路径将中发展国家和低发展国家的碳中和年份设定在当前最晚的碳中和目标年,即2070年。NDC-碳中和情景下各经济体的碳排放路径和累积净碳排放限额参见顾高翔等<sup>[33]</sup>。在NDC-碳中和路径下,生产部门每期在生产端都有严格的碳限额措施控制其真实碳排放量。在此路径下,全球2100年的地表平均温度较工业化前水平升高幅度约为1.7 °C,无法实现1.5 °C目标。

在NDC-碳中和情景的基础上,设计了5种碳中和目标约束下的低碳技术共享情景(表5),并以NDC-碳中和情景作为情景分析的参照。情景6、情景7和情景8下专利保护长度和宽度分别与情景1、情景4和情景5一致。考虑到发达国家为发展中国

2026年3月

表5 情景6-10的技术共享/支持参数设置

Table 5 Technology sharing/support parameter settings for scenarios 6 to 10

参数	情景6	情景7	情景8	情景9	情景10
专利宽度/%	20	10	0	0	0
专利长度/年	20	10	0	0	0
技术模仿加速度(满足额外支持条件)/%	200	200	200	400	600
技术模仿加速度(不满足额外支持条件)/%	200	200	200	200	200

家提供低碳技术支持的义务和重要性,本文基于情景8,设计了情景9和10作为低碳技术共享-支持情景,提高包括中国、印度、高发展国家、中发展国家和低发展国家在内的发展中经济体模仿学习美国、日本、欧盟和其他发达国家低碳技术的速度,反映发达经济体在技术转移过程中对发展中经济体的额外技术支持。本节各情景的政策实施时间仍然是2025—2100年。

#### 4.3.1 全球地表温升幅度

情景6-10下,全球2100年的地表温升幅度较NDC-碳中和情景有小幅下降。情景10下,全球地表温升幅度下降到1.66℃,但仍然无法达到1.5℃的气候变化减缓目标。尽管如此,低碳技术共享政策有效降低了全球经济发展的碳排放需求,减少了NDC-碳中和路径对碳限额措施的依赖,并能够进一步降低全球碳排放总量。因此,尽管国际社会无法单独依靠低碳技术共享实现碳中和目标,其巨大的减排潜力对于实现碳中和目标仍然有重要的实践意义。

#### 4.3.2 碳排放需求

由于碳中和约束下各经济体的真实碳排放量

受到碳限额措施的严格控制,因此本节采用碳排放需求的变化表示NDC-碳中和路径下国际低碳技术共享的碳减排效果。图6显示了5种情景下各经济体在低碳技术共享/支持政策实施过程中累积碳排放需求较NDC-碳中和情景的下降率。随着低碳技术共享程度的提高,各经济体的碳排放需求量明显降低,其中获得额外技术支持的经济体的碳排放需求下降尤为明显。情景8下,当低碳技术完全共享,中国的碳排放需求较NDC-碳中和情景可下降约40%,而印度的下降率达到50%左右,高发展国家、中发展国家和低发展国家的下降率也在30%以上。从情景7到情景8,发达经济体的碳排放需求量显著下降,日本、欧盟和其他发达国家的碳排放需求下降率都达到30%以上。与图5显示的结果一致,由于自身低碳技术水平和技术研发学习能力的差异,从情景6到情景7,技术共享程度的提高对减少高发展国家碳排放需求的效果并不明显,但增加了低发展国家的可模仿技术数量,显著降低其碳排放需求;而从情景7到情景8,技术的完全共享推动了高发展国家从发达经济体学习模仿先进技术,实现较大幅度的碳减排,但低发展国家受制于自身技术学

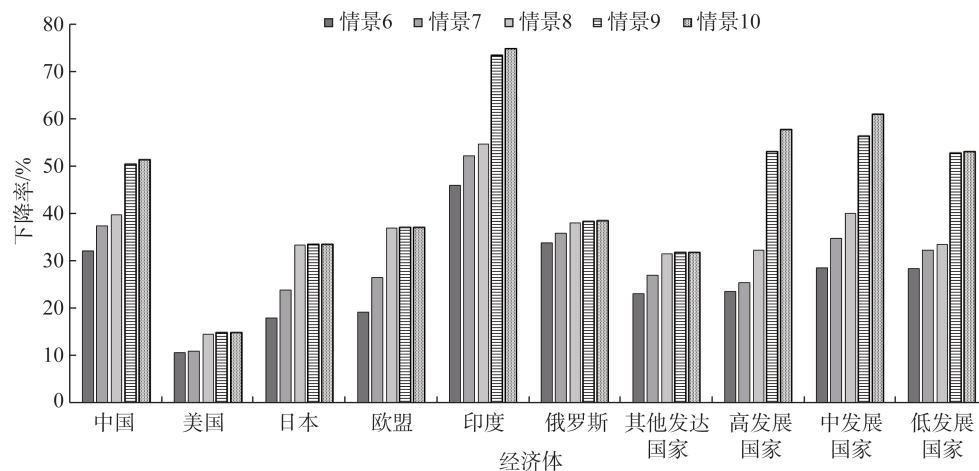


图6 情景6-10各经济体2025—2100年累积碳排放需求较NDC-碳中和情景下降率

Figure 6 Reduction rates of cumulative carbon emission demands for economies from 2025 to 2100 compared to NDC-carbon neutrality scenario under scenarios 6 to 10

习能力的不足,碳减排效果有限。

情景9和10的结果显示,发达经济体提供的额外技术转移支持有助于大幅降低获得支持的发展中经济体的碳排放需求,但其边际效果有限。情景9下,印度的累积碳排放需求下降率超过70%,中国、高发展国家、中发展国家和低发展国家也都超过50%;但在情景10下,各经济体的碳减排率较情景9的提高幅度极小,其中,高发展国家和中发展国家提高了4个百分点左右,低发展国家只提高了1个百分点。如表6所示,低碳技术的完全共享和发达经济体提供的额外技术转移支持使获得支持的发展中经济体可以在短时间内赶上甚至超过提供支持的发达经济体的低碳技术水平,这使得情景9和情景10出现大量发展中经济体内部的技术转移。从情景9到情景10,印度和高发展国家从发达经济体获取的技术转移次数仅有小幅的增长,中国、中

发展国家和低发展国家甚至出现下降,而发展中经济体之间的技术转移却愈加频繁。情景10下,高发展国家和中发展国家获得的总技术转移次数有所增长,使其碳排放需求较情景9仍然有所下降;低发展国家从发达经济体获得的技术转移次数大幅下降,增加的来自其他发展中经济体的技术转移不包含额外技术支持,只能以基准技术加速度完成模仿,导致其碳减排率较情景9几乎没有上升。

#### 4.3.3 碳中和经济成本

图7显示了NDC-碳中和情景和5种低碳技术共享/支持情景下各经济体在模拟期间的累积经济效用较基准情景的变化率,以反映碳中和经济成本的变化。NDC-碳中和情景下,各经济体以牺牲经济发展、付出较大经济成本为代价实现碳中和目标。其中,俄罗斯、高发展国家和低发展国家的累积效用损失率都在2%以上,而发达经济体的碳中和成

表6 情景8-10得到额外技术支持的经济体获得来自发达经济体和发展中经济体的平均低碳技术转移次数

Table 6 Average numbers of low-carbon technology transfer received from developed and developing economies by economies receiving additional technological support under scenarios 8 to 10

经济体	情景8		情景9		情景10	
	发达经济体	发展中经济体	发达经济体	发展中经济体	发达经济体	发展中经济体
中国	98	33	51	26	40	27
印度	55	64	40	221	41	250
高发展国家	31	14	65	29	83	62
中发展国家	52	15	46	137	38	149
低发展国家	27	19	42	48	28	57

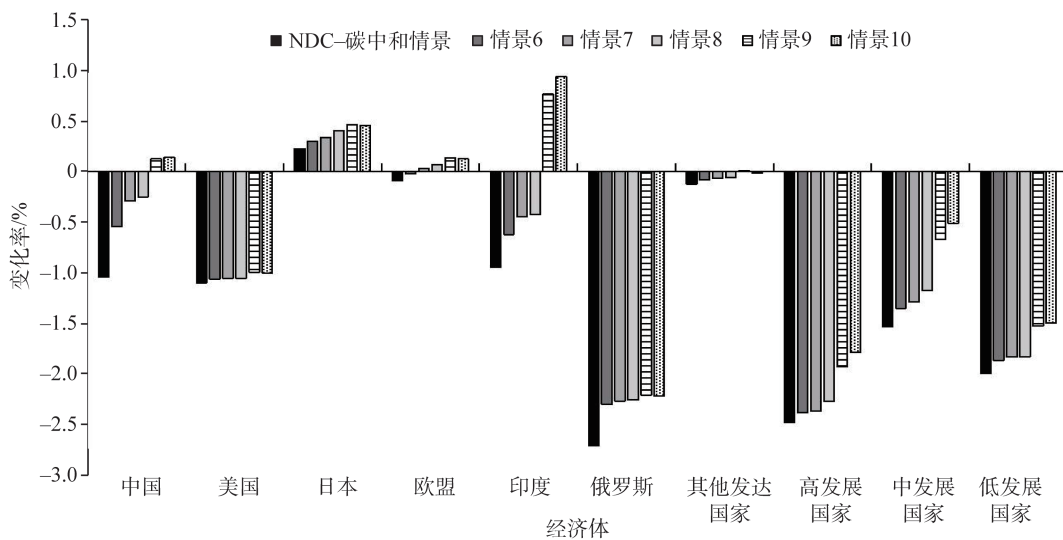


图7 碳中和情景与情景6-10各经济体累积经济效用较基准情景变化率

Figure 7 Change rates of cumulative economic utilities for economies compared to baseline scenario under NDC-carbon neutrality scenario and scenarios 6 to 10

2026年3月

本普遍较低,甚至可以通过气候变化减缓得到的气候福利完全抵消经济成本。在低碳技术共享情景下,随着碳排放需求的下降,各经济体对碳限额措施的依赖程度随之下降,碳中和成本得到降低。情景6下,各发展中经济体的累积效用虽仍低于基准情景,但较NDC-碳中和情景有了明显的提升。情景7和情景8下,随着技术共享程度的提高,各经济体的累积效用进一步提升。尽管如此,发展中经济体的碳中和成本仍然明显高于发达经济体,这主要是由于发展中经济体在未来经济发展过程中较高的碳排放需求,使得在2050年前后实现碳中和的目标对其经济的损害程度明显高于已过碳高峰的发达经济体。

情景9和10下,依靠发达经济体的额外技术转移支持,由低碳技术进步带来的气候福利进一步抵消碳中和成本,中国和印度的累积效用超过基准情景,高发展国家、中发展国家和低发展国家的累积效用损失率也显著下降。这表明发达经济体提供的技术支持可以有效帮助发展中经济体降低碳中和成本,提升碳中和路径的经济可行性。此外,在情景9和10下,发达经济体和发展中经济体之间碳中和经济成本的差距较情景8显著缩小,这也提高了碳中和经济成本分摊的公平性。

综上所述,单独采用国际低碳技术共享无法直接实现碳中和目标,也无法将全球地表升温幅度控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 以内。但是,低碳技术共享能够以极小的成本提高全球低碳技术水平,有效降低碳排放需求,减少对碳限额这类经济损害型碳减排措施的依赖,从而降低碳中和成本,同时也缩小了发达经济体和发展中经济体在低碳技术水平和碳中和损失上的差距。因此,国际低碳技术共享极大地提高了实现全球碳中和目标的可行性和公平性,对探索国际合作减排框架下的全球碳中和路径具有重要的治理意义。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

依照Wang等<sup>[14]</sup>提出的减排责任和损失分摊公平性、气候保护与碳减排有效性,以及社会经济发展可行性这3个国际碳减排合作方案综合评价原则,本文对碳中和目标约束下国际低碳技术共享政策的气候治理效果进行讨论。模拟结果显示,国际低碳技术共享在政策的公平性、有效性和可行性方

面都展现出重要的全球气候治理意义。

在公平性方面,国际低碳技术共享使得发展中经济体的技术水平得到显著提升,大幅缩小了发达经济体和发展中经济体之间的低碳技术差距;而发达经济体对发展中经济体额外的低碳技术支持,进一步缩小了两者在碳中和路径下经济损失的差距,体现发达经济体帮助发展中经济体实现适应和减缓目标的责任和义务,符合“共同但有区别责任”原则。

在有效性方面,伴随着国际低碳技术共享水平的提高,全球碳排放需求显著下降。当低碳技术实现完全共享,不仅发展中经济体大量减排,发达经济体之间也出现大量低碳技术转移,实现了可观的碳减排。尽管无法直接实现全球碳中和、 $2^{\circ}\text{C}$ 或 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温升控制目标,国际低碳技术共享在气候变化减缓和碳减排方面仍然是非常有效的。

在可行性方面,国际低碳技术共享政策的实施使得各经济体在NDC-碳中和路径下的累积效用损失显著下降,碳中和经济成本得到有效控制。考虑到经济利益问题是历次国际气候谈判出现分歧的焦点之一<sup>[13]</sup>,降低碳减排成本无疑能够极大地提升国际气候保护和碳减排合作方案的经济可行性,提高全球碳中和目标实现的可能。这对于未来全球通过国际合作实现气候治理而言至关重要。

尽管如此,单独实施国际低碳技术共享政策的气候变化减缓效果距离全球碳中和目标仍有很大的差距,且由于技术转移仍然需要时间和资金的投入,从低碳技术共享政策实施到实现碳减排存在滞后期,因此低碳技术共享政策的实施时间也会对其最终的气候治理效果造成较大影响。

此外,本文构建的CIECIA-GT模型以自底向上的视角将低碳技术进步分解成个体行为,实现对其微观过程的刻画,但为适应宏观经济模型,技术本身仍然采用部门层面的过程技术水平来描述,没有细化到真实的专利技术,而且专利制度以外生方式固定保护阈值,无法内生反映国际政治格局变动对技术共享的不确定影响。在下一步的研究中,我们将继续改进和扩展集成评估模型,进一步细化低碳技术类型,引入诸如碳捕集技术等真实的、具有代表性的低碳技术,改进专利系统与经济系统之间的响应关系,同时设计、引入其他低碳技术合作类型,探索合理、有效、可行的国际低碳技术合作方案。

## 5.2 结论

本文构建了一个气候-经济-技术集成评估模型CIECIA-GT,在不同技术共享水平下模拟了2025—2100年低碳技术的国际转移特征,分析其气候变化减缓效果、低碳技术水平提升和碳减排潜力。在此基础上,本文将低碳技术共享政策引入全球碳中和路径,综合评价其在促进低碳技术转移、减少碳排放需求、降低碳中和成本等方面的气候治理效果。主要结论如下:

(1)国际低碳技术共享有效促进了先进低碳技术转移,缩小发达经济体和发展中经济体之间的技术差距,推动碳排放量下降,具有显著的技术提升和碳减排潜力,减缓了全球地表温升的速度,但对全球气候变化的控制能力仍然有限,无法单独实现1.5 °C或2 °C目标,也无法直接实现全球碳中和目标。

(2)发达经济体之间技术差距较小,专利宽度的小幅降低并不能释放发达经济体之间的技术转移潜力;减少专利保护年限则更能使其获得充分的可模仿技术,促使其深度参与国际技术转移,实现低碳技术水平的提升,从而降低碳排放量。这就使降低专利长度的全球气候变化减缓效果优于降低专利宽度。

(3)碳中和目标约束下,国际低碳技术共享政策以极低的成本有效地提高了各经济体的低碳技术水平,在减少碳排放需求、降低碳中和成本等方面表现出显著的气候治理效果。在此基础上,发达经济体提供的额外技术转移支持,可进一步降低中国、印度等发展中经济体的碳中和成本,缩小其与发达经济体的技术和经济损失差距,既体现了发达经济体的义务和责任,也进一步提高了全球碳中和路径的经济可行性和损失分摊公平性。

(4)从国际气候合作方案设计角度出发,将低碳技术共享与其他社会经济成本较高的碳减排措施相结合,依靠技术共享降低碳减排的经济成本,提高碳减排方案的经济可行性和公平性,充分发挥国际低碳技术共享在全球气候保护合作中的治理作用,是一种合理的国际碳减排合作方案设计思路,值得在未来国际气候合作中得到关注。

## 参考文献(References):

[1] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环

境管理,2020,12(6):58-64.[Wang C,Zhang Y X.Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J].Chinese Journal of Environmental Management,2020,12(6):58-64.]

- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Path-Ways[EB/OL].(2018-10-08)[2025-01-04].<https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [3] Xu G Y, Dong H Y, Xu Z C, et al. China can reach carbon neutrality before 2050 by improving economic development quality[J]. Energy, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2021.123087.
- [4] 巢清尘.“碳达峰和碳中和”的科学内涵及我国的政策措施[J].环境与可持续发展,2021,46(2):14-19.[Chao Q C. Scientific connotation of “carbon peak and carbon neutrality” and the policy measures of our country[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 14-19.]
- [5] 张冰倩,高晗博,田金平,等.面向“双碳”目标的前瞻性生命周期评价:研究进展与方法框架[J].资源科学,2023,45(12):2341-2357.[Zhang B Q, Gao H B, Tian J P, et al. Prospective life cycle assessment targeting the dual-carbon strategy: Progress review and methodological framework[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2341-2357.]
- [6] 岳婷,李梦婷,陈红,等.碳中和研究热点与演进趋势:基于科学知识图谱[J].资源科学,2022,44(4):701-715.[Yue T, Li M T, Chen H, et al. Carbon neutrality research hotspots and evolution trend: Based on the scientific knowledge map[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 701-715.]
- [7] United Nations Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris agreement[R]. Geneva: United Nations Office, 2015.
- [8] 丛建辉,李锐,王灿,等.中国应对气候变化技术清单研制的方法学比较[J].中国人口·资源与环境,2021,31(3):13-23.[Cong J H, Li R, Wang C, et al. A comparative study on the methodologies for the development of China's technology lists for addressing climate change[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(3): 13-23.]
- [9] United Nations Framework Convention on Climate Change. Copenhagen Accord (Decision 2/CP.15)[EB/OL].(2010-03-30)[2025-01-04].<https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/l07.pdf>.
- [10] Lin Y H, Chen Y S. Determinants of green competitive advantage: The roles of green knowledge sharing, green dynamic capabilities, and green service innovation[J]. Quality & Quantity, 2017, 51: 1663-1685.
- [11] Jiang Y, Xu J, Wang G F. Trade in green patents: How do green technologies flow in China?[J]. The Journal of Technology Transfer, 2024, 49: 823-856.
- [12] Yin C H, Gu H Y, Zhang S J. Measuring technological collaborations on carbon capture and storage based on patents: A social network analysis approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,

2026年3月

- DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122867.
- [13] Perrone N M, Glens N S. Technology transfer and climate change: A transnational law analysis[J]. *Transnational Legal Theory*, 2022, 13(2): 261–286.
- [14] Wang Z, Gu G X, Wu J, et al. CIECIA: A new climate change integrated assessment model and its assessments of global carbon abatement schemes[J]. *Science China Earth Science*, 2016, 59: 185–206.
- [15] Weko S, Goldthau A. Bridging the low-carbon technology gap? Assessing energy initiatives for the Global South[J]. *Energy Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113192.
- [16] Liao Z J, Hong W D, Wang Y F, et al. Does the patent value of green technology affect its transfer? The moderating role of industry competition[J]. *Environmental Research*, 2024, DOI: 10.1016/j.envres.2023.117620.
- [17] Song M X, Yang M X, Zeng K J, et al. Green knowledge sharing, stakeholder pressure, absorptive capacity, and green innovation: Evidence from Chinese manufacturing firms[J]. *Business Strategy and the Environment*, 2020, 29(3): 1517–1531.
- [18] Sun Y M. Digital transformation and corporates' green technology innovation performance: The mediating role of knowledge sharing[J]. *Finance Research Letters*, 2024, DOI: 10.1016/j.frl.2024.105105.
- [19] 尚勇敏, 宓泽锋, 周灿, 等. 中国城际低碳技术转移对碳排放的影响: 基于知识学习与技术学习“二分法”视角[J]. *资源科学*, 2023, 45(4): 827–842. [Shang Y M, Mi Z F, Zhou C, et al. Impact of intercity low-carbon technology transfer on carbon emission reduction in China: Based on the “dichotomy” of knowledge learning and technology learning[J]. *Resources Science*, 2023, 45(4): 827–842.]
- [20] Silva L C S, Caten C S T, Gaia S. Conceptual framework of green technology transfer at public university scope Brazilian[J]. *Innovation and Green Development*, 2023, DOI: 10.1016/j.igd.2023.100076.
- [21] Perot E. Incentivised licensing: A global green technology transfer box to facilitate the just transition[J]. *Global Energy Law and Sustainability*, 2025, 6(1): 1–31.
- [22] Kylili A, Thabit Q, Nassour A, et al. Adoption of a holistic framework for innovative sustainable renewable energy development: A case study[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 47(1): 6157–6177.
- [23] 郝海青, 朱甜. “双碳”背景下气候技术国际转让的困境及法律解决路径[J]. *中国科技论坛*, 2023, (10): 141–149. [Hao H Q, Zhu T. The dilemma and legal solution to the international transfer of climate technology in the context of dual carbon[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2023, (10): 141–149.]
- [24] 汪明月, 刘宇, 史文强, 等. 碳交易政策下低碳技术异地协同共享策略及减排收益研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(6): 1419–1434. [Wang M Y, Liu Y, Shi W Q, et al. Research on technology remote synergic sharing strategy of low carbon under the ETS in China[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2019, 39(6): 1419–1434.]
- [25] Chen J L, Sun C Q, Shi J Y, et al. Technology R&D and sharing in carbon emission reduction in a duopoly[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121936.
- [26] 王丽强, 秦芬, 米捷. 创新网络中制造企业的绿色创新知识共享行为演化博弈[J]. *技术与创新管理*, 2024, 45(4): 382–390. [Wang L Q, Qin F, Mi J. Research on evolutionary game of green innovation knowledge sharing behavior in innovative networks among manufacturing companies[J]. *Technology and Innovation Management*, 2024, 45(4): 382–390.]
- [27] Pauliuk S, Arvesen A, Stadler K, et al. Industrial ecology in integrated assessment models[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 13–20.
- [28] Shiraki H, Sugiyama M. Back to the basic: Toward improvement of technoeconomic representation in integrated assessment models[J]. *Climatic Change*, 2020, 162: 13–24.
- [29] Bosetti V, Carraro C, Duval R, et al. The Role of R&D and Technology Diffusion in Climate Change Mitigation: New Perspectives using Witch Model[R]. Paris: OECD Economics Department Working Papers, 2009.
- [30] Jiang K J, Chen S, He C M. et al. Energy transition, CO<sub>2</sub> mitigation, and air pollutant emission reduction: Scenario analysis from IPAC model[J]. *Nature Hazards*, 2019, 99: 1277–1293.
- [31] Wang T P, Teng F, Zhang X L. Assessing global and national economic losses from climate change: A study based on CGEM-IAM in China[J]. *Climate Change Economics*, 2020, DOI: 10.1142/S2010007820410031.
- [32] Gu G X, Wang Z, Wu L Y. Carbon emission reductions under global low-carbon technology transfer and its policy mix with R&D improvement[J]. *Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2020.119300.
- [33] 顾高翔, 沈思矣, 何湘琦, 等. 碳中和目标约束下国际低碳技术融资的碳治理研究[J]. *地理研究*, 2023, 42(3): 842–856. [Gu G X, Shen S Y, He X Q, et al. Research of the carbon governance of global low carbon technology financing under the carbon neutrality constraints[J]. *Geographical Research*, 2023, 42(3): 842–856.]
- [34] Heger D, Zaby A K. Patent breadth as effective barrier to market entry[J]. *Economics of Innovation and New Technology*, 2018, 27(2): 174–188.
- [35] Denicolò V. Patent races and optimal patent breadth and length[J]. *The Journal of Industrial Economics*, 1996, 44(3): 249–265.
- [36] Chu A C, Furukawa Y, Mallick S, et al. Dynamic effects of patent policy on innovation and inequality in a Schumpeterian economy[J]. *Economic Theory*, 2021, 71: 1429–1465.
- [37] Wang Z, Yao Z X, Gu G X, et al. Multi agent-based simulation on technology innovation-diffusion in China[J]. *Papers in Regional Science*, 2014, 93(2): 385–408.
- [38] Li D Y, Alkemade F, Frenken K, et al. Catching up in clean energy technologies: A patent analysis[J]. *The Journal of Technology Transfer*, 2023, 48: 693–715.

# Carbon emission reduction and climate governance through international low-carbon technology sharing

GU Gaoxiang

(Institute of Population Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** **[Objective]** International low-carbon technology sharing is an important pathway to achieve global carbon neutrality. Comprehensively evaluating the carbon reduction potential of international low-carbon technology sharing, as well as its effects on reducing carbon neutrality costs, mitigating climate change, and promoting technological progress, holds significant theoretical and policy implications for future global climate cooperation. **[Methods]** This study constructed a climate-economy-technology integrated assessment model, CIECIA-GT, to comprehensively evaluate the carbon emission reduction potential of international low-carbon technology sharing policies and their climate governance effectiveness under the constraint of carbon neutrality from 2025 to 2100. **[Results]** (1) The global surface temperature rise in 2100 will decrease significantly as the degree of low-carbon technology sharing increases. Under the scenario of complete technology sharing, it can be controlled within 2.62 °C. (2) Under the scenario of complete technology sharing, developed economies will fully acquire low-carbon technology transfer due to their superior learning capabilities. In contrast, developing economies will be constrained by their own technological innovation and learning capabilities, leading to limited improvements in their technology levels. (3) The implementation of international low-carbon technology sharing policies can help countries reduce their reliance on carbon cap measures under the constraint of carbon neutrality, and increase cumulative economic utility significantly, and control their carbon neutrality costs. (4) Additional technological support from developed economies can effectively accelerate technological imitation in developing economies and further reduce carbon neutrality costs, but the marginal effect will be limited. **[Conclusion]** International low-carbon technology sharing holds significant potential for technological advancement and carbon emission reduction, but it cannot directly achieve climate change mitigation goals. Reducing patent protection duration can promote the participation of developed economies in international low-carbon technology transfer, and is more effective in mitigating climate change than reducing patent breadth. International low-carbon technology sharing can significantly reduce carbon neutrality costs, and additional technological support from developed economies to developing economies can further enhance the feasibility and equity of global carbon neutrality pathways, and therefore is of clear significance to climate governance. Combining low-carbon technology sharing with other high-cost emission reduction measures is a reasonable design approach for international carbon emission reduction cooperation.

**Key words:** low-carbon technology sharing; technology transfer; carbon neutrality; climate governance; integrated assessment model