

# 中国城市绿色技术创新的时空分布特征及影响因素

段德忠<sup>1,2</sup>, 杜德斌<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学全球创新与发展研究院, 上海 200062;

2. 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200241)

**摘要:** 借鉴经济合作与发展组织(OECD)的绿色专利识别方法, 本文建构了2007—2017年中国城市尺度的绿色专利申请量时空数据库, 从而揭示了2007—2017年中国绿色技术创新活动的时空分布特征, 并基于空间杜宾模型探讨了其影响因素。研究发现: ① 时序发展上, 无论是在专利申请量上还是城市参与度上, 绿色建筑技术一直主导中国绿色技术创新发展, 11年间绿色建筑技术领域专利申请量占整体的比例一直维持在30%以上; ② 创新主体上, 中国绿色技术创新由企业主导的特征愈发显著, 企业申请的绿色专利占整体的比例由2007年的39.7%增长至2017年的62.6%; ③ 空间演化上, 中国绿色技术创新空间分布呈现出显著的空间集聚性特征, 以长三角、珠三角和京津地区为主导的三极格局日益凸显。个体城市上, 11年间北京、深圳相继超越上海, 成为中国绿色技术创新最为集聚的两大核心城市; ④ 影响因素上, 中国城市绿色技术创新具有显著的空间溢出效应和路径依赖性特征, 城市环境规制强度、城市经济规模、城市市场规模、城市技术创新水平、城市吸引的FDI以及城市空气质量对城市绿色技术创新具有明显的积极影响, 而以第二产业为主的产业结构对城市绿色技术创新具有明显的抑制作用。

**关键词:** 绿色专利; 绿色技术创新; 创新主体; 时空格局; 影响因素; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202212012

## 1 引言

推动绿色发展, 促进人与自然和谐共生是以习近平为核心的党中央在大力推进生态文明建设、美丽中国建设上作出的重大战略举措。绿色发展强调“绿色青山就是金山银山”, 人与自然和谐共生重在正确处理生态环境保护与经济发展的关系, 而实现这两个目标, 就需要向创新要动力, 即绿色技术创新是推动绿色发展, 促进人与自然和谐共生的第一动力<sup>[1-6]</sup>。实际上, 在2016年的“科技三会”上, 习近平总书记就指出, 生态文明发展面临日益严峻的环境污染, 需要依靠更多更好的科技创新建设天蓝、地绿、水清的美丽中国。随后, 国家发展与改革委员会和科技部在2019年联合颁布的《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》(简称《意见》)中就明确提出要加快构建以企业为主体、以市场为导向的绿色技术创新体系。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》(简称《纲要》)中第11篇第39章中也明确指出, 要构建市场导向的绿色技术创新体系, 实施绿色技术创新攻关行动。此外, 《意见》和

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-12-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42271186); 国家社会科学基金重大项目(21ZDA011); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJC790023) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42271186; Major Projects of National Social Science Foundation of China, No.21ZDA011; MOE Project of Humanities and Social Sciences, No.19YJC790023]

**作者简介:** 段德忠(1989-), 男, 江苏溧阳人, 副教授, 硕导, 中国地理学会会员(S110010030M), 研究方向为全球科技地理、城市与区域创新。E-mail: dzduan@geo.ecnu.edu.cn

3125-3145 页

《纲要》皆提出了若干绿色技术创新的重点领域,如节能环保、清洁生产、清洁能源、生态保护与修护等。《意见》中还指出要选择绿色技术创新基础较好的城市,建设绿色技术创新综合示范区,推进绿色生态城市建设。那么,在中国绿色技术创新的实践中是否已经形成以企业为主体的绿色技术创新体系?中国绿色技术创新活动是否集中于上述几个重点技术领域?哪些城市的绿色技术创新基础较好?回答这些问题,我们就必须对中国绿色技术创新展开实证研究。

绿色技术创新是环境经济学、创新经济学、创新管理学等研究领域的核心议题,也是近年来环境经济地理学领域研究的新兴课题之一。追溯绿色技术创新研究文献,可发现绿色技术创新研究起源于20世纪80—90年代,繁荣于21世纪初,尤其是近年来在可持续发展框架下作为应对全球气候变化的核心支撑,绿色技术创新及其国际科技合作相关问题引起了学者们的广泛关注<sup>[7-8]</sup>。在绿色技术创新研究的进程中,绿色技术创新的概念内涵发生着明显的转向,从“响应导向”(作为政府环境规制的响应)到“治理导向”(减少环境损害)、“目标导向”(寻求技术突破,实现转型升级),再到当前的“内容导向”(包括产品设计、工艺创新、制度创新等),绿色技术创新的内涵愈发广泛,也愈发强调国家制度体系对于绿色技术创新的重要性<sup>[9-12]</sup>。另外,因评价指标、关注重点、研究区域或案例的不同,学者们在研究过程中也推出了诸多类似的概念,如环境创新、生态创新、可持续创新等。但一致的是,这些概念的内涵一方面皆强调技术层面的发明创造是根本,另一方面也都认可企业的绿色技术创新主体地位,这也是当前绿色技术创新研究集中于企业层面的主要原因<sup>[13-15]</sup>。学术界就企业绿色技术创新能力评价、企业绿色创新行为的驱动因素、企业绿色技术创新效应、企业绿色技术创新战略设计等内容进行了深入的探讨<sup>[9-12]</sup>。虽然在环境经济地理研究的带动下,区域层面的绿色技术创新评价、绿色技术创新效率测算等研究在近年也慢慢增多,但整体而言还相对较少,特别是城市尺度的绿色技术创新空间差异研究还很少见<sup>[16-18]</sup>。

基于此,本文通过借鉴经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)的绿色专利识别方法,从绿色专利申请量的视角分析了2007—2017年中国城市绿色技术创新的时续发展特征、创新主体特征以及空间分布特征,并探讨了其影响因素,一方面试图丰富当前环境经济地理学的研究内容,另一方面试图为建设中国绿色技术创新体系提供案例支撑。

## 2 理论基础与研究假设

基于已有的关于绿色技术创新、生态创新、环境创新、可持续创新的综述文献发现<sup>[7-8]</sup>,绿色技术创新研究基本遵循4个理论研究视角:

(1) 环境经济学理论视角下的环境规制对企业绿色技术创新行为的影响研究。环境经济学其将环境规制视作企业外在成本内部化的一种政策手段,主要关注环境规制对企业的影响<sup>[19-20]</sup>。早期观点集中阐释“抑制效应”,即环境规制一方面会造成企业生产成本增加,降低企业竞争优势;另一方面还会促使污染物的转移,带来“污染避难所”效应<sup>[21-22]</sup>。随着“波特假说”的提出,大量实证研究也证明了环境规制的正外部性效应,即环境规制会诱发(迫使)企业选择绿色技术创新路径,从而在绿色产品市场获取有利地位<sup>[23-24]</sup>。环境经济学对于企业绿色技术创新行为驱动因素中环境规制的关注给予本文研究城市绿色技术创新驱动因素很好的启示。实际上,在环境经济地理学领域,学者们已广泛探讨了环境规制对城市工业绿色发展效率的影响、环境规制对污染物或污染型企业转

移的影响、环境规制对城市碳排放的影响、环境规制对城市产业结构转型升级的影响等, 普遍发现环境规制的影响效应呈现倒“U”型特征, 即短期抑制、长期促进<sup>[25-29]</sup>。

基于此, 本文提出研究假设1, 即城市环境规制强度对城市绿色技术创新具有正向的促进作用, 城市环境规制强度越强, 城市绿色技术创新能力就越强。

(2) 创新经济学理论视角下的企业绿色技术创新的驱动因素研究。创新经济学研究已广泛揭示企业层面绿色技术创新行为的影响因素, 如在市场驱动因素层面, 创新经济学广泛探讨了外商直接投资(Foreign Direct Investment, FDI)与绿色技术创新之间的关系, 相关理论包括吸收能力、知识粘性、创新扩散和技术转让。当发达国家的一些跨国公司在落后的发展中国家投资时, 先进的生产技术和经营理念将对东道国产生积极的环境影响<sup>[30-32]</sup>。在技术驱动因素层面, 创新经济学也深入研究了企业技术创新能力对于其进行绿色创新转型的影响, 普遍发现创新能力较强的企业往往在绿色技术创新领域也会表象抢眼<sup>[33]</sup>。创新经济学对于企业绿色技术创新行为驱动因素中市场和技术层面的关注也给予本文研究城市绿色技术的创新驱动因素很好的启示。同样, 在环境经济地理学领域, 学者们也广泛探讨了FDI与城市绿色全要素生产率的关系、FDI与区域环境污染的关系, 以及创新投入与城市绿色经济效率的关系、创新水平与城市绿色发展效率的关系等, 普遍发现外向型的经济结构能够有效改善区域环境质量, 城市创新水平与城市绿色发展之间呈现出显著的正相关关系<sup>[34-37]</sup>。

基于此, 本文提出研究假设2, 即城市本身的技术创新能力越强或城市经济发展的外向型程度越高, 就越有可能从事绿色技术创新活动。

(3) 创新管理学理论视角下的企业绿色技术创新战略研究。实施绿色技术创新战略不仅能够显著提升企业绩效, 也有助于企业树立良好的绿色形象<sup>[38-39]</sup>。创新管理学认为, 企业实施绿色技术创新战略需要具备一定的绿色技术创新基础<sup>[40-41]</sup>。除此之外, 外部环境压力和对未来的期望(收益)也是企业积极实施绿色技术创新战略的重要考驱动因素, 比如行业竞争对手率先实施绿色技术创新战略带来的竞争压力使得企业不得不跟进实施绿色技术创新战略<sup>[42-44]</sup>。创新管理学对于企业绿色技术创新行为驱动因素中来自竞争对手压力的关注, 使得本文在研究城市绿色技术创新时, 不得不考虑来自邻近城市的“压力”, 即城市绿色技术创新是否也具有显著的空间关联特征和空间溢出效应。城市创新活动具有显著的空间关联特征和空间溢出效应, 这在创新经济地理学研究中已作为一条“基本规律”存在<sup>[45-46]</sup>。作为创新行为的一类, 城市绿色技术创新显然也受此类法则支配。

基于此, 本文提出研究假设3, 即城市绿色技术创新受邻近城市影响, 具有显著的空间关联特征和空间溢出效应。

(4) 演化经济学视角下企业绿色技术创新研究。演化经济学理论视角下的企业绿色技术创新研究主要关注企业的异质性。大量研究表明, 企业之间的绿色技术创新实践差异很大。大公司, 尤其是跨国公司, 是绿色技术创新的先驱和领导者, 而中小企业在绿色技术创新方面表现出更多的不确定性<sup>[47]</sup>。企业异质性还表现行业领域差异和企业类型差异上, 比如在对绿色技术创新的实证研究中普遍发现, 市场竞争和人力资本投资较高的行业企业往往具有较强的绿色技术创新能力, 民营企业相对于国有企业更愿意进行绿色技术创新<sup>[48]</sup>。近年来, 随着演化理论、扎根理论研究的深入, 学者们发现企业创新意愿、创新态度对企业环境创新行为具有重要的推动作用<sup>[49]</sup>, 企业环境创新对其自身发展模式、成长路径以及产业中创新环境有着较高的依赖<sup>[50]</sup>。演化经济地理学同样高度关注企业异质性和企业发展路径, 并延伸至区域异质性和区域发展路径, 诸多研究表明区域创新具有一定的路径依赖特征, 并呈现出显著的空间异质性。



基于此,本文提出研究假设4,即城市绿色技术创新具有一定的路径依赖,并随城市规模差异呈现出显著的向大城市集聚的特征。

上述4个理论分析视角基本囊括当前绿色技术创新研究的分析框架,这也凸显了绿色技术创新研究主要集中于经济学和管理学领域,分析主体也集中于企业层面。如上文提到的,随着环境问题重要性愈发凸显,经济地理学者对于环境问题的关注,以及将环境问题纳入分析框架中来,使得环境经济地理逐渐成为经济地理学新兴的研究领域<sup>[51]</sup>。从空间差异的视角将绿色技术创新从企业视角延伸至区域视角是环境经济地理学对绿色技术创新研究的贡献。相关研究主要从两个视角展开:① 侧重不同空间尺度(省域、城市)的区域绿色技术创新能力评价及影响因素分析<sup>[52-54]</sup>;② 侧重绿色技术创新效率的区际差异及影响因素研究<sup>[10, 55]</sup>。但整体而言经济地理学领域对绿色技术创新研究还相对较少,特别是城市尺度的绿色技术创新空间差异研究还很少见。

### 3 数据和方法

本文旨在研究中国城市绿色技术创新的时空演化特征和影响因素。基于上述理论分析,假设城市绿色技术创新受到城市环境规制强度、城市规模、城市FDI、城市技术创新能力等因素的影响,并呈现出一定的路径依赖和空间关联特征,进而估计了简便模型:

$$Patents_{i,t} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 Environ\_Regu_{i,t-2} + \beta_2 Size_{i,t-2} + \beta_3 In\_FDI_{i,t-2} + \beta_4 Tech\_Inno_{i,t-2} + \beta_5 EI\_initial_i + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中: $i$ 指城市; $t$ 指时间; $Patents$ 是绿色专利数量; $Environ\_Regu$ 是环境规制强度; $Size$ 是城市规模; $In\_FDI$ 表示城市吸收FDI; $Tech\_Inno$ 是城市技术创新能力; $EI\_initial$ 表示城市在绿色技术创新领域的初始能力; $\alpha_i$ 指代城市异质性; $\gamma_t$ 代表时间效应; $\varepsilon_{i,t}$ 是指代残差。此外,还引入了2年滞后,以最大限度地减少内生性和反向因果关系的可能问题。

#### 3.1 被解释变量:城市绿色技术创新

在绿色技术创新测度方面,不同学科、不同研究领域的学者提出了各种不同的测度方法。测度绿色技术创新不仅有助于评估国家、地区或企业在经济增长与环境退化脱钩方面取得了进展,还有助于分析绿色技术创新的影响因素及其经济和环境效应<sup>[56]</sup>。

综合现有研究进展,绿色技术创新测度方法可分为4类:① 通过构建涵盖尽可能多指标的评价体系,从而对绿色技术创新进行整体评价<sup>[57-59]</sup>。如欧盟委员会《生态创新行动计划》(Eco-innovation Action Plan)开展的生态创新记分牌(Eco-Innovation Scoreboard)和生态创新指数(Eco-Innovation Index)就从五个维度(生态创新投入、生态创新活动、生态创新产出、资源效率和社会经济成果)捕捉生态创新的不同方面。② 注重绿色技术创新投入,通常以环境研发投资来表征绿色技术创新水平<sup>[60-63]</sup>。在OECD生态创新记分牌中,“政府环境和能源研发拨款和支出(占GDP的百分比)”“研发人员和研究人员总数(占总就业人数的百分比)”“绿色早期投资总额(美元)”3个指标用来衡量生态创新投入,其结果表明,21世纪初以来对清洁技术的总体投资一直在增加,投资最多的是能源生产技术、能源效率和运输技术。此外,生态创新记分牌还发现,增加环境和能源主题的研发投资会使得公司和研究机构的创造性表现更好<sup>[33]</sup>。③ 注重绿色技术创新产出,通常以绿色专利来衡量<sup>[63-66]</sup>。2015年OECD的Hašič等改进了与环境有关的专利的搜索策略,其根据国际专利分类(International Patent Classification, IPC)(A-H部)和联合专利分类(Cooperative Patent Classification, CPC)(Y部)的分类,绿色专利分为7大类,并提供了除生物多样性保护和生态系统健康技术外的6类绿色专利检索方法<sup>[63]</sup>。此外,一些国家的专利局也发布了一些与环境有关的专利。例如美国专利商标局技术评估

和预测办公室认定的绿色专利包括：危险或有毒废物的销毁或遏制、废物的回收或再利用、酸雨预防、固体废物处理、替代能源、空气污染预防和水污染预防<sup>[67-68]</sup>。④ 注重绿色技术创新的过程，通常以绿色技术创新效率作为绿色技术创新的替代指标<sup>[69-70]</sup>。现有研究一般在 DEA 分析框架下，从投入（研发投入、人员投入、资源投入等）、期望产出（经济增长、环境相关专利、绿色产品等）和非期望产出（污染物排放、环境损失等）3 个方面来衡量绿色技术创新效率。遵循这一分析逻辑，现有研究已完成了对部分企业（大型企业、中小企业或特定企业）、部分城市、部分地区和部分国家的绿色技术创新效率测度<sup>[71-72]</sup>。当然，还有其他衡量绿色技术创新的方法，如根据工业和商品分类确定绿色产品，而确定绿色产品首先需要识别代表环境的行业或商品类<sup>[64]</sup>。

上述4类绿色技术创新测度方法各有侧重。相比较而言，在城市尺度，绿色专利比环境研发投资、绿色产品和其他指标具有更高的可获得性和更广泛的覆盖范围。这也是诸如 OECD 这类国际组织在评价国家绿色技术创新能力或绿色经济增长时，也主要采用绿色专利作为核心指标的原因<sup>[64-66]</sup>。基于此，本文在研究中国城市绿色技术创新实践时，也选取绿色专利数量作为评价指标，并以万方数据知识服务平台为数据源，获取并建构了2007—2017年中国城市绿色专利申请时空数据库。具体建构策略为：① 基于 Python 数据爬虫从万方数据知识服务平台获取2007—2017年中国发明专利申请详情数据，共计7398626件发明专利；② 由于中国专利分类体系采用的是 IPC 分类，因而本文借鉴 OECD 绿色专利的搜索策略<sup>[64]</sup>，首先建构了 IPC（Y）部与 IPC（A-H）部的对应表，将 OECD 绿色专利的搜索策略中基于 CPC 分类体系识别绿色专利的方法转化为基于 IPC 分类体系识别绿色专利的方法，表1展示了最终基于 IPC 专利分类的绿色专利搜索策略。在此搜索策略下，2007—2017年中国绿色发明专利共计2006292件；③ 由于每一件专利的专利类别并非唯一性，且 OECD 绿色专利的搜索策略也非一一对应（存在一个专利类别隶属于不同绿色技术领域，如 B01D53 既隶属于温室气体处理技术，也隶属于环境治理技术），因而本文在统计各类绿色技术领域的专利申请量时采取全计数法进行统计；④ 根据绿色专利申请人地址，将2007—2017年2006292件绿色专利分配至城市尺度（包括直辖市、地级市、自治州，地区、盟和省直辖市，暂未包含港澳台地区），从而建构2007—2017年中国城市绿色专利申请时空数据库。

表1 基于 IPC 分类体系的绿色专利识别  
Tab. 1 Green technology identification based on patent category

环境技术	描述	IPC 专利类别
清洁能源技术	与能源生产、传输和分配相关的气候变化缓解技术	F24J2、F03D9、H01L31、F03D11、H02J3、B03B1、F03D7、F03D3、F03B13、H01L51、H02N6、F03G6、F02J7 等 47 个专利类别
温室气体处理技术	温室气体的捕获、储存、封存或处置	B01D53、B01J20、C01B31
绿色交通技术	与交通有关的减缓气候变化技术	B60L11、H02J7、B60L8、F02M25、B60L15、F02M21、F01N3、B60W20、F02B29、B60W10、F01N5、F01N11 等 34 个专利类别
绿色建筑技术	与建筑有关的减缓气候变化技术	E04D13、F24F5、F21S9、F03D9、F24D17、H01L31、F24J2、H02J9、E04H1、H05B37、F21S9、F21S8 等 64 个专利类别
环境治理技术	减少空气污染技术、减少水污染技术、废物管理技术、土壤修复和环境监测技术	B01D53、F23G7、F23J15、F27B1、C21B7、C21C5、F23B80、F23C9、F23C10、B01D53、F02M3、B01J23、F01M13、F02B47 等 96 个技术类别
绿色水技术	水源保护和利用技术	F16K21、F16L55、E03C1、E03D3、E03D1、A47K11、E03D13、E03D5、E03B1 等 21 个专利类别

本文所涉及的绿色技术包括清洁能源技术（与能源生产、传输和分配相关的气候变化缓解技术）、温室气体处理技术（温室气体的捕获、储存、封存或处置）、绿色交通技术（与交通有关的减缓气候变化技术）、绿色建筑技术（与建筑有关的减缓气候变化技术）、环境治理技术（减少空气污染技术、减少水污染技术、废物管理技术、土壤修复和环境监测技术）和绿色水技术（水源保护和利用技术）。

### 3.2 核心解释变量

本文的解释变量包括城市环境规制强度、城市经济规模、城市 FDI、城市技术创新能力以及城市在绿色技术创新上的初始能力。

根据以往的经验<sup>[73-74]</sup>，本文在工业固体废物综合利用率、生活污水处理率和生活垃圾无害化处理率 3 个指标的基础上，构建了 2005—2015 年中国城市环境规制强度面板数据。相关数据来源于《中国城市统计年鉴》，具体方法如下：首先采用极值法对 3 种污染物的处理率进行标准化：

$$S\_Pr_{i,t}^g = \left[ Pr_{i,t}^g - \min(Pr_t^g) \right] / \left[ \max(Pr_t^g) - \min(Pr_t^g) \right] \quad (2)$$

式中： $S\_Pr_{i,t}^g$  和  $Pr_{i,t}^g$  分别是  $i$  城市  $g$  污染物在  $t$  年份处理率的标准化值和原始值； $\max(Pr_t^g)$  和  $\min(Pr_t^g)$  分别是城市尺度上  $t$  年份在  $g$  污染物上处理率的全国最大值和全国最低值。

其次，考虑到每个城市污染物排放的差异，如果一个城市的某类污染物排放量比其他城市大，却拥有与其他城市相近的污染物处理率，可能意味着这个城市有更严格的环境法规，因此被赋予更大的环境规制权重。最后，将这 3 种污染物处理率的加权平均值作为城市环境规制强度的替代指标：

$$Environ\_Regu_{i,t} = \left[ \sum_{g=1}^3 \left( \frac{P_{i,t}^g}{P_t^g} \right) \times S\_Pr_{i,t}^g \right] / 3 \quad (3)$$

式中： $Environ\_Regu_{i,t}$  为城市  $i$  在  $t$  年份的环境规制强度； $P_{i,t}^g$  为  $i$  城市  $g$  污染物在  $t$  年份的排放量； $P_t^g$  为  $g$  污染物在  $t$  年份的全国排放量。

在城市经济规模和对外直接投资方面，本文利用城市 GDP 和当年实际利用外资额来描述城市经济规模和城市 FDI。此外，利用研发投资来衡量城市的技术创新能力，相关数据来自《中国城市统计年鉴》。为探讨城市在绿色技术创新方面是否具有路径依赖性特征，利用 1990 年该市的绿色专利数量来描述其在绿色技术创新上的初始能力。国家知识产权局于 1985 年开始收集专利数据。考虑到前几年数据不完整，则采用 1990 年的数据。

### 3.3 其他变量

此外，基于现有绿色技术创新研究，本文增加了 3 个控制变量：城市市场规模、城市空气质量和城市产业结构。

作为创新环境的重要组成部分，空气质量常用于衡量城市的创新环境。经验研究表明，空气质量良好的城市往往在创新方面表现更为突出。同样，这一因素在推动区域绿色技术创新方面也得到了广泛的证明。本文以城市年均  $PM_{2.5}$  作为城市空气质量的代理指标，数据来源于华盛顿大学大气成分分析组（Atmospheric Composition Analysis Group of Washington University）对中国  $PM_{2.5}$  的区域估计。

市场规模作为刺激企业进行绿色技术创新的众多市场类型因素之一，不仅体现在公众对绿色产品需求的增加上，也体现在一个地区或一个城市的整体消费规模上。作为补充，本文以城市消费品零售额来衡量城市的市场规模。此外，绿色技术创新是企业（特

别是制造业）响应环境法规、参与市场竞争的一种手段。因此，如果一个城市的产业结构以工业制造业为主，它将承担更多的环境保护和污染减排责任，城市也将出台更多的环境政策，以激励企业进行绿色技术创新<sup>[48]</sup>。因此在此基础上，本文采用城市第二产业的比重来衡量城市的产业结构。表2列出本文的被解释变量和解释变量详情。

表2 变量描述与数据来源  
Tab. 2 Variable descriptions and data sources

	变量	描述	数据来源
被解释变量	绿色技术创新水平	绿色专利申请数量	万方专利数据库
核心解释变量	环境规制强度	3种污染物处理率的加权平均值	中国城市统计年鉴
	城市经济规模	GDP	
	外商直接投资(FDI)	当年实际利用外资额	
	技术创新能力	研发投资	
其他解释变量	城市绿色技术创新处事能力	1990年绿色专利数量	万方专利数据库
	市场规模	消费品零售额	中国城市统计年鉴
	产业结构	第二产业比重	
	空气质量	年平均PM <sub>2.5</sub>	华盛顿大学大气成分分析组对中国PM <sub>2.5</sub> 区域估算

3.4 空间相关性检验

为验证中国城市绿色技术创新是否存在空间相关性，本文利用全局 Moran's *I* 对 2007—2017 年中国城市绿色技术创新进行空间相关性检验：

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n W_{ij}} \tag{4}$$
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad W_{ij} = 1/d_{ij}$$

式中： $X_i$ 和 $X_j$ 分别代表*i*城市和*j*城市的绿色技术创新能力； $W_{ij}$ 是空间加权矩阵； $n$ 是城市的数量； $d_{ij}$ 是城市*i*和城市*j*之间的距离。全局 Moran's *I*取值范围为[-1, 1]。

4 中国城市绿色技术创新的时空特征

4.1 时序发展特征：绿色建筑技术主导中国绿色技术创新发展

2007—2017 年中国绿色专利数量从 87691 件增长至 307929 件，年均增长率达到 13.4%。其中，除在 2010 年略低于清洁能源技术外，绿色建筑技术领域的专利申请量一直位列第一，从 2007 年的 35850 件增加到 2017 年的 105681 件（图 1）。2009 年绿色建筑技术占整体绿色专利的比例一度达到 59.5%。除了在 2010 年上升到第一，在 2017 年下降到第三，清洁能源领域的专利申请基本一直位居第二，从 2007 年的 32352 件增加到 2017 年的 79562 件。环境治理技术领域的专利申请量从 2007 年的第四位波动增长至 2017 年的第二位。2007—2017 年绿色交通技术的专利申请量波动很大，曾在 2009 年和 2011 年降至最后一位，也曾在 2007 年、2010 年和 2015 年上升到第三位。2017 年绿色交通技术的专利申请量为 16075 件。温室气体处理技术和绿色水技术领域的专利申请数量相对较少且比较稳定。在时序增长上，6 类技术领域专利申请量的年均增长率均超过 5%。其中，环境治理技术领域最高，达到 29.6%，温室气体处理技术领域也达到 28.2%，绿色交通技术



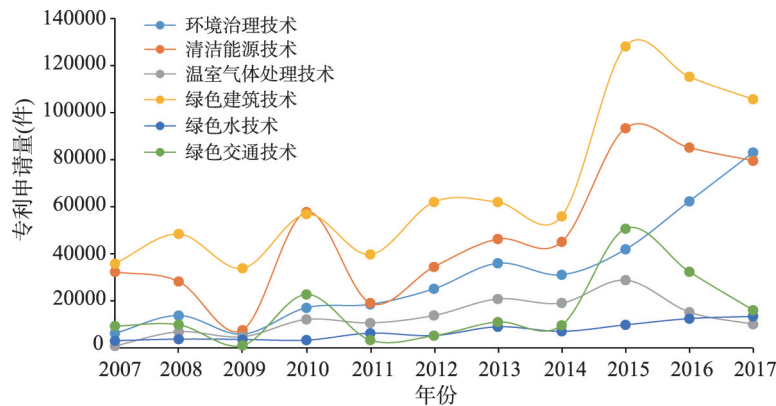


图1 2007—2017年中国城市绿色技术创新发展

Fig. 1 Development of green technology innovation in China from 2007 to 2017

年均增长率最低，为5.6%。从时续发展上看，中国绿色技术创新，尤其清洁能源技术和绿色建筑技术创新在2008—2009年和2015—2016年间经历了两波急速下降期，而在2009—2010年以及2014—2015年间又迎来了两波快速发展期，究其原因可能与国家在这两类技术创新上的政策实施有关。如2007—2008年住房和城乡建设部先后发布《绿色建筑评价标识管理办法》《绿色建筑评价标准》《绿色建筑评价技术细则》和《绿色建筑评价技术细则补充说明（规划设计部分）》，提高了绿色建筑技术准入标准。2014年科技部、工业和信息化部联合组织制定了《2014—2015年节能减排科技专项行动方案》，该方案确定了6大类（工业、能源、交通、农业、绿色建筑、资源环境）节能减排关键共性技术公关重点，通过增加环境研发投资，直接促进了清洁能源和绿色建筑技术在2014—2015年间快速增长。

表3展示了中国城市绿色创新的一些统计特征，包括6类绿色技术的变异系数和Moran's *I*指数。首先，在城市参与方面，中国参与绿色技术创新的城市数量从2007年的330个增加到2017年的338个，其中围绕绿色建筑技术领域创新的城市数量始终最多，而围绕温室气体处理技术进行创新的城市数量始终最少。其次，6类环境技术的变异系

表3 2007年、2012年和2017年6类绿色技术的统计分析

Tab. 3 Descriptive statistic of the six types of green technologies in 2007, 2012 and 2017

年份	指标	环境治理技术	清洁能源技术	温室气体处理技术	绿色建筑技术	绿色水技术	绿色交通技术
2007	专利申请数量(件)	6210	32352	843	35850	3096	9340
	参与城市数量(个)	235	279	73	289	209	150
	变异系数	2.399	5.760	1.689	2.960	2.388	2.400
	Moran's <i>I</i>	0.193***	0.107***	0.117***	0.257***	0.111***	0.176***
2012	专利申请数量(件)	25173	34480	13809	62043	5279	5221
	参与城市数量(个)	307	295	211	314	229	203
	变异系数	2.739	4.263	2.578	2.601	2.326	2.050
	Moran's <i>I</i>	0.201***	0.185***	0.156***	0.326***	0.178***	0.267***
2017	专利申请数量(件)	83090	79562	10081	105681	13440	16075
	参与城市数量(个)	338	333	282	343	314	287
	变异系数	2.220	3.426	2.248	2.847	2.095	2.839
	Moran's <i>I</i>	0.330***	0.202***	0.266***	0.353***	0.267***	0.273***

注：\*\*\*表示1%的显著性水平。



数在3个时间点均大于1,特别是2012年和2017年大于2,表现出强烈的离散特征。其中,清洁能源技术和绿色水技术的变化系数持续下降,环境治理技术和温室气体处理技术变异系数呈现先上升后下降的特征,绿色建筑技术与绿色交通变异系数则呈现出先下降后上升的趋势。最后,6类环境技术的Moran's  $I$ 均呈上升趋势,且至研究期末皆在1%水平上显著,表明中国城市绿色技术创新的空间集聚特征日益显著,即城市绿色技术创新容易受到邻近城市的影响,从而显示出显著的空间相关效应,这一点也部分证明了本文假设4的正确性。

#### 4.2 创新主体特征:企业主导中国绿色技术创新发展

根据绿色专利的申请人信息,将绿色技术创新主体识别为4个类别,即大学及科研机构、企业、个人及其他学校(小学、中学等),从而分析了2007—2017年中国城市绿色技术创新的主体特征。虽然存在其他学校作为绿色技术创新的主体,但在研究时段内,其所占比皆低于1%,因而本文不对其进行详细探讨。

2007—2017年中国绿色技术创新行为的主体特征呈现出由个人和企业并重发展为由企业单体主导,凸显了企业作为绿色技术创新主体的本质特征。2007年中国绿色技术创新主体中个人和企业占比分别为42.0%和39.7%,表明此时中国的绿色技术创新多是基于个人的研究或发明兴趣而进行。2007年大学及科研机构所占比例仅有17.7%。2012年中国绿色技术创新主体中企业所占比例快速增至62.6%,个人、大学及科研机构所占比例急剧下降,分别降至20.37%和16.81%。2017年企业所占比例继续增加至70.2%,个人所占比例继续减少至12.7%,而大学和科研机构所占比例增长至17.0%,这表明中国绿色技术创新愈发的成为企业创新行为。

然而,对于不同技术领域而言,进行绿色技术创新的主体呈现出不一样的偏好特征(表4)。虽然2012年和2017年6类技术领域的创新主体都由企业主导,但2007年环境治理技术、绿色建筑技术、绿色水技术这3个技术领域的创新主体却由个人主导,且温室气体处理技术领域的创新主体也由大学及科研机构主导。从时序发展上看,个人在6类技术领域创新主体中的比例皆呈现出逐渐下降态势,企业在6类技术领域创新主体中的比例则呈现持续增长态势,而大学及科研机构在环境治理技术、温室气体处理技术和绿色水技术领域的占比呈现先上升后下降的趋势,但在其与3类技术领域的占比则是持续增长态势。2017年,虽然个人在整个中国绿色技术创新主体中所占比例仅为11%,但在环境治理技术、温室气体处理技术和绿色水技术3个领域,其绿色技术创新的贡献率与大学和科研机构则是旗鼓相当,不相上下。

#### 4.3 空间演化特征:长三角、珠三角和京津地区主导中国绿色技术创新发展

2007—2017年中国城市绿色技术创新格局呈现出强烈的空间非均衡特征,由长三角地区、珠三角地区和京津地区主导的三极格局日益突出(图2)。

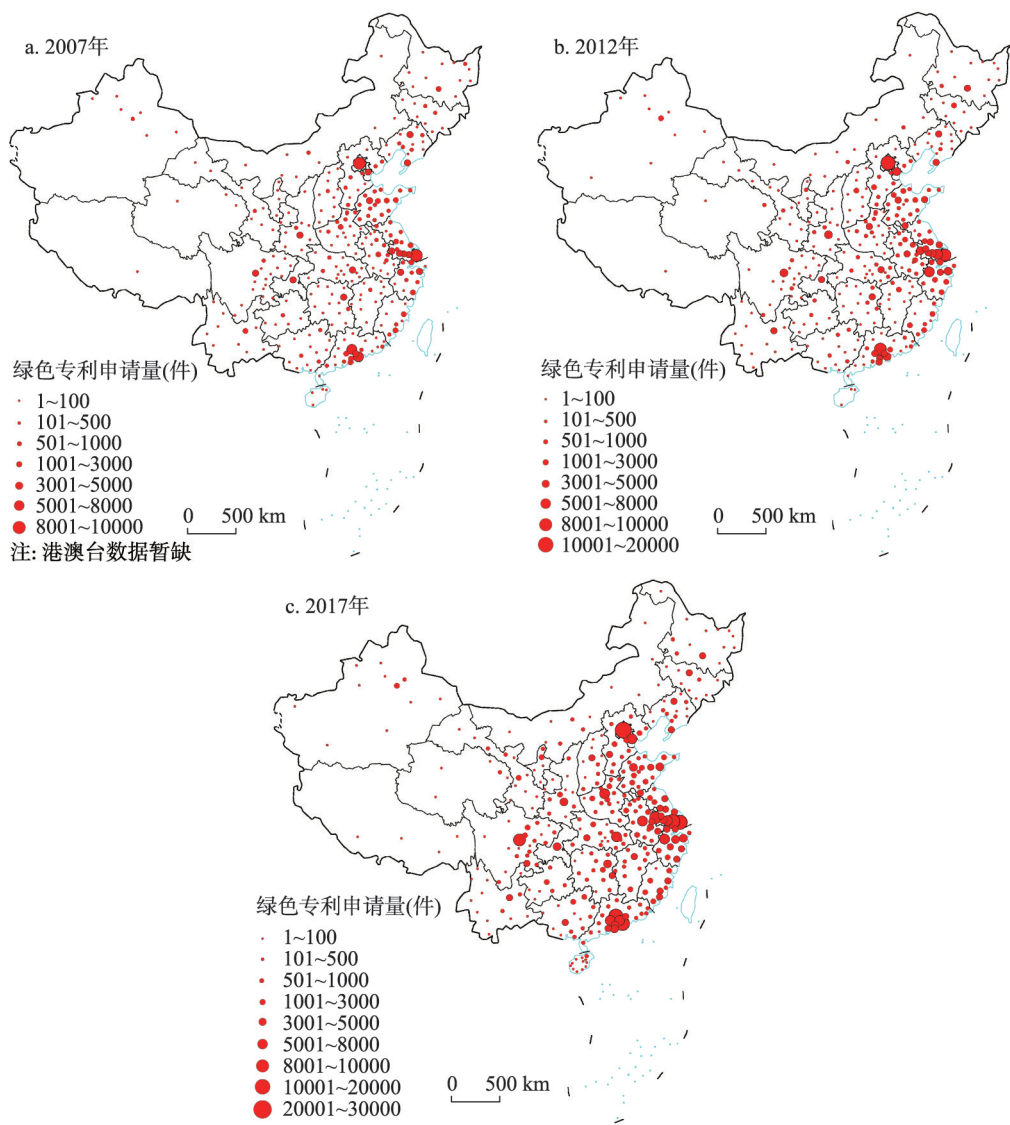
2007年中国绿色技术创新行为高度集中在少数几个城市。在参与绿色技术创新的318个城市中,绿色专利申请量超过1000件的城市只有20个,而有70个城市的绿色专利申请量不足10件。绿色技术创新前十名城市占中国绿色专利申请量的48.1%。其中,4个位于长三角地区,3个位于珠三角地区。4个城市的绿色专利申请量超过5000件,即上海(9003件),北京(8073件),广州(6689件)和深圳(6174件)。上海在温室气体处理技术、绿色建筑技术、绿色水技术和绿色交通技术领域的专利申请量也名列第一,而北京在环境治理技术和清洁能源技术领域排名第一。此外,天津和济南分别以2488件和1908件绿色专利申请量位列第五和第八位。在不同的技术领域,表现突出城市大多都位于东部地区,中西部地区城市在绿色技术创新方面普遍落后。在环境治理技术领域,前10名

表 4 2007 年、2012 年和 2017 年不同技术领域的创新主体占比特征  
Tab. 4 The proportion of innovation subjects in different green technologies in 2007, 2012 and 2017

技术领域	主体类型	创新主体占比(%)		
		2007 年	2012 年	2017 年
环境治理技术	大学及科研机构	13.86	16.78	15.76
	个人	46.55	17.81	14.63
	企业	38.49	65.22	69.50
	其他学校	1.10	0.18	0.11
清洁能源技术	大学及科研机构	13.78	16.79	18.10
	个人	36.97	20.15	9.68
	企业	48.89	63.00	72.18
	其他学校	0.36	0.07	0.04
温室气体处理技术	大学及科研机构	40.33	20.90	12.85
	个人	23.49	12.63	12.30
	企业	36.18	66.47	74.46
	其他学校	0.00	0.00	0.09
绿色建筑技术	大学及科研机构	9.06	9.18	20.84
	个人	46.71	28.61	7.96
	企业	43.67	62.02	71.17
	其他学校	0.56	0.19	0.03
绿色水技术	大学及科研机构	21.22	26.43	21.82
	个人	57.46	21.18	19.47
	企业	19.70	51.62	58.56
	其他学校	1.61	0.78	0.15
绿色交通技术	大学及科研机构	7.64	10.80	12.59
	个人	40.61	21.85	12.19
	企业	51.01	67.25	75.13
	其他学校	0.74	0.10	0.09

城市中只有重庆和武汉来自中西部地区，分别以 177 件和 155 件绿色专利申请量排名第六和第七。在清洁能源技术领域，中西部地区只有武汉和西安位居前十强，分别以 658 件和 615 件绿色专利申请量排名第九和第十。在温室气体处理技术领域前十强中，虽然中西部地区由 5 个城市（重庆、沈阳、成都、太原、长沙）进入榜单，但只有重庆进入前五强。绿色建筑技术领域前十名的城市全部位于东部地区，绿色水技术和绿色交通技术领域，中西部地区只有重庆和成都进入前十名。

2012 年在参与绿色技术创新的 325 个城市中，虽然只有 34 个城市的绿色专利申请量超过 1000 件，但绿色专利申请量少于 10 件的城市数量也下降至 29 个。绿色技术创新前 10 强城市占中国绿色专利申请量的比重也下降至 43.3%。其中，5 个位于长三角地区，2 个来自京津地区，1 个位于珠三角地区。北京不仅在绿色专利申请总量上超过了上海，而且在所有 6 个技术领域都名列第一。中西部地区的成都和西安分别以 3852 件和 3822 件绿色专利申请量位列第六和第七。同样，在不同的技术领域，表现突出的城市也大多位于东部地区。中西部地区城市绿色技术创新总体上还处于落后地位。在环境治理技术领域，前十名城市中只有成都和重庆来自中西部地区，分别以 653 件和 562 件绿色专利申请量排名第九和第十。在清洁能源技术领域，成都和西安分别以 824 件和 777 件绿色专利申请量名列第八和第九。在温室气体处理技术方面，中西部地区只有成都以 402 件绿色专



注：基于自然资源部标准地图服务系统GS(2016)1554号标准地图绘制,底图边界无修改。

图2 2007年、2012年和2017年中国城市绿色技术创新体系时空演化格局

Fig. 2 Green technology innovation pattern in China's city system in 2007, 2012 and 2017

利申请位列第九。在绿色建筑技术方面，西安和成都分别以2127件和1718件绿色专利申请量位列第五和第八位。在绿色水技术方面，中西部地区只有武汉以161件绿色专利申请量位列第七。在绿色交通技术方面，重庆、成都和武汉分别以190件、148件和134件绿色专利申请量位列第四、第八和第九位。

到2017年，在参与绿色技术创新的349个城市中，绿色专利申请量超过1000件的城市增至57个，而低于10件的城市也下降至20个。北京以26224件绿色专利申请量继续名列第一，深圳以18997件绿色专利申请量位居第二。上海、广州和苏州分别以14801件、11800件和10659件绿色专利申请量位列第三、第四和第五位。在绿色专利申请排名前10的城市中，4个位于长三角地区，3个位于珠三角地区，2个来自京津地区。中西部地区

仅有成都一个城市,以9371件绿色专利申请量居全国第六位。在绿色技术的6大类中,北京在环境治理、清洁能源、温室气体处理和绿色交通技术方面仍居首位,深圳在绿色建筑和绿色水技术方面位列第一。

## 5 中国城市绿色技术创新的影响因素

空间自相关分析已表明中国城市绿色技术创新具有显著的空间相关性,因而本文采用空间面板回归模型来验证中国城市绿色技术创新的影响因素。基于STATA 12.0分析的空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间Durbin模型(SDM)的比较,发现3种模型中SDM的拟合优度和可信度最高,Hausman检验结果也表明固定效应的SDM是最优的。因此,本文选取具有固定效应的SDM模型来分析中国城市绿色技术创新的影响因素,模型如下:

$$\begin{aligned} \ln Patents_{i,t} = & \alpha_i + \beta_1 \ln Environ\_Regu_{i,t-2} + \beta_2 \ln Size_{i,t-2} + \beta_3 \ln In\_FDI_{i,t-2} + \\ & \beta_4 \ln Tech\_Inno_{i,t-2} + \beta_5 \ln Patents_i^{1990} + \beta_6 \ln Mar\_Size_{i,t-2} + \\ & \beta_7 \ln Ind\_Str_{i,t-2} + \beta_8 \ln Air\_Qua_{i,t-2} + \lambda \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Patents_{j,t} + \\ & \theta_1 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Environ\_Regu_{j,t-2} + \theta_2 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Size_{j,t-2} + \\ & \theta_3 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln In\_FDI_{j,t-2} + \theta_4 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Tech\_Inno_{j,t-2} + \theta_5 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Patents_j^{1990} + \\ & \theta_6 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Mar\_Size_{j,t-2} + \theta_7 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Ind\_Str_{j,t-2} + \theta_8 \sum_{j=1}^{11} w_{ij} \ln Air\_Qua_{j,t-2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $Mar\_Size$  代表城市市场规模,以城市社会消费品零售额来衡量;  $Ind\_Str$  代表城市产业结构,以城市第二产业比重来衡量;  $Air\_Qua$  代表城市空气质量,按城市年均  $PM_{2.5}$  来衡量。

由于SDM包含解释变量和解释变量的空间滞后项,采用偏微分法将SDM的溢出效应分解为直接效应、间接效应和总效应。其中,直接效应体现为对城市绿色技术创新的影响,即局部效应。间接效应反映了对周边城市绿色技术创新的影响,即溢出效应。总效应等于直接效应和间接效应之和。表5呈现了SDM模型的分析结果,  $R^2$  为0.852, spatial rho在1%置信水平上显著,系数为0.213,表明中国城市绿色技术创新具有显著的正向空间溢出效应,进而证明了本文假设3的正确性。另外,为了验证结果的稳健性,将城市按区域归属划分为3个子样本(东部地区、中部地区和西部地区),并进行相同的回归分析,结果如表6所示,表明整体样本的回归结果并没有因区域差异而产生明显变异,反而呈现强劲的稳健性。

(1) 环境规制和市场规模具有显著的正局部效应,这证明了本文研究假设1的正确性。环境规制的直接效应为0.040,市场规模的直接效应为0.024,显著性水平为1%。这意味着,城市环境规制强度提高1%时,城市绿色技术创新能力提高0.040%,城市市场规模扩大1%时,城市绿色技术创新能力提高0.024%。另外,虽然环境规制和市场规模的间接效应都是正向的,但都没有通过显著性检验,说明环境规制和市场规模对城市绿色技术创新的影响不存在明显的溢出效应。环境规制对中国城市绿色技术创新显著的促进作用证明了企业层面的“波特假说”在城市层面同样存在,同时其不显著的邻近效应



表5 中国城市绿色技术创新影响因素的SDM估计结果  
Tab. 5 Results of the Spatial Durbin Model (SDM)

变量	因素		效应分解		
	局部	溢出	直接	间接	总效应
lnEnviron_Regu	0.040**	-0.004	0.040*	0.008	0.048**
lnSize	0.464***	0.196	0.470***	0.352*	0.822***
lnIn_FDI	0.025***	-0.066***	0.036***	-0.083*	-0.047***
lnTech_Inno	0.082**	-0.264***	0.082**	-0.304***	-0.222***
lnPatents <sup>1990</sup>	0.331***	-0.218***	0.331***	-0.182***	0.149**
lnMar_Size	0.028***	0.001**	0.024***	0.003	0.027***
lnInd_Str	-0.024**	0.012**	-0.032**	-0.018**	-0.050**
lnAir_Qua	-0.013**	0.001***	-0.025***	-0.013***	-0.038***
常数项			-12.145***		
spatial rho			0.213***		
R <sup>2</sup>			0.852		
Log-likelihood			-3361.321		

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

也呼应了当前环境规制与城市绿色发展效率关系研究的结论，即环境规制对城市绿色发展效率的空间溢出效应有限。

(2) 城市规模和空气质量有利于促进城市本身及其周边城市的绿色技术创新，这证明了本文假设4的正确性。城市规模和城市空气质量的直接影响分别为0.470和-0.025，两者在1%的重要水平上都具有重要意义。也就是说，城市规模每增加1%，城市空气质量每增加1%（城市PM<sub>2.5</sub>每减少1%），城市绿色技术创新能力就会增加0.470%或0.025%。城市规模和城市空气质量的间接影响分别为0.352和-0.013，均通过了显著性检验，即城市规模每增加1%，城市空气质量每增加1%（城市PM<sub>2.5</sub>每下降1%），周边城市的绿色技术创新能力将提高0.352%或0.013%。城市规模对于城市绿色技术创新的正向影响验证结果，与当前关于企业绿色技术创新与企业规模关系，以及区域绿色技术创新与区域规模的关系的研究发现是一致的<sup>[47, 75]</sup>。经济规模较大的城市往往能够投入更多资本进行技术创新，也往往具备更加完善的技术创新基础设施。面对环境问题，经济实力强劲的城市也率先承担环境治理、污染减排、产业结构转型升级的重任，在绿色发展和绿色技术创新上也是走在最前列。如北京，上海为落实国家发展改革委、科技部《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》，在2020年相继制定了《北京市构建市场导向的绿色技术创新体系实施方案》和《上海市构建市场导向的绿色技术创新体系实施方案》。另外，上文关于中国绿色技术创新的空间分布特征也显示出东部经济发达的城市往往申请更多的绿色专利。

(3) FDI、研发投资和城市初始绿色技术创新能力都显示出积极的局部效应和负面的溢出效应，这与已有的研究成果一致<sup>[31, 76]</sup>，也证明了本文假设2和假设4的正确性。其中，FDI的直接效应为0.036，在1%的显著水平上具有显著意义，即城市吸收的FDI每增长1%，城市绿色技术创新能力就会提高0.036%。但是，FDI的间接效应为-0.083，在10%的意义水平上具有显著意义，即城市吸收的FDI每增长1%，周边城市的绿色技术创新能力就会下降0.083%。研发投资的直接影响为0.082，表明本市研发投资每增长1%，绿色技术创新能力就会提高0.082%，研发投资的间接效应是-0.304，即本市研发投资每增长1%，周边城市的绿色技术创新能力就会下降0.304%。城市吸收的外来资本越多，

表 6 中国城市绿色技术创新影响因素地区 SDM 估计结果  
Tab. 6 Results of the Spatial Durbin Model (SDM) of different regions

变量	东部地区						中部地区						西部地区					
	因素			效应分解			因素			效应分解			因素			效应分解		
	局部	溢出	直接	间接	总效应		局部	溢出	直接	间接	总效应		局部	溢出	直接	间接	总效应	
<i>lnEnviron_Regu</i>	0.120**	-0.012	0.118*	0.014	0.132**		0.101**	-0.084	0.096*	0.012	0.108**		0.061**	-0.042	0.071*	0.009	0.080**	
<i>lnSize</i>	0.556***	0.301	0.561***	0.421*	0.982***		0.501***	0.305	0.475***	0.384*	0.859***		0.356***	0.212	0.253***	0.114*	0.367***	
<i>lnIn_FDI</i>	0.124***	-0.101**	0.134***	-0.218*	-0.084**		0.113***	-0.097*	0.112***	-0.179*	-0.067**		0.012**	-0.003*	0.103***	-0.184*	-0.081**	
<i>lnTech_Inno</i>	0.113**	-0.125***	0.098**	-0.202***	-0.104*		0.089**	-0.101**	0.074**	-0.152**	-0.078**		0.054**	-0.075**	0.064**	-0.102**	-0.038**	
<i>lnPatents<sub>1990</sub></i>	0.421***	-0.125***	0.405***	-0.101***	0.304**		0.301***	-0.134*	0.374***	-0.124**	0.250**		0.184***	-0.084**	0.191***	-0.118**	0.073**	
<i>lnMar_Size</i>	0.101***	0.009*	0.111***	0.045	0.156***		0.076***	0.011*	0.086***	0.018	0.104***		0.043***	0.007**	0.051***	0.009	0.060***	
<i>lnInd_Sir</i>	-0.085**	0.026**	-0.078**	-0.035**	-0.113**		-0.124**	0.041**	-0.121**	-0.038**	-0.159**		-0.256**	0.081**	-0.351**	-0.042**	-0.393**	
<i>lnAir_Qua</i>	-0.026**	0.004***	-0.031**	-0.017**	-0.048**		-0.018**	0.003***	-0.017**	-0.009**	-0.026**		-0.002**	0.001***	-0.001**	-0.001**	-0.002**	
常数项			-18.311***						-15.412***						-19.536***			
spatial rho			0.401***						0.315***						0.241***			
<i>R</i> <sup>2</sup>			0.912						0.898						0.817			
Log-likelihood			-4538.511						-3484.977						-2984.153			

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

代表其经济结构的外向程度越高。创新扩散、技术转移等创新经济学理论广泛揭示出FDI与区域创新能力间存在正相关关系。同时,环境经济学也揭示出跨国公司比本土企业更倾向于从事绿色技术创新活动。城市研发投入规模代表城市的技术创新能力,创新能力强的城市在区域创新经济发展中能够形成强劲的资源集聚效应,使周边城市的人才、资本等创新要素向该城转移,从而抑制周边城市的绿色技术创新,进而形成竞争机制。城市初始绿色技术创新能力的直接效应为0.331,间接效应为-0.182,两者在1%的意义水平上都具有重要意义,表明城市绿色技术创新具有较强的路径依赖性特征,也反映出前期绿色技术创新表现良好的城市也会形成虹吸效应,从而制约周边城市的绿色技术创新。

(4)以第二产业为主的产业结构不仅没有促进城市绿色技术创新,而且起到了明显的抑制作用。SDM结果表明,第二产业比重每提高1%,城市绿色技术创新能力就会下降0.032%,周边城市的绿色技术创新能力也会下降0.018%。这一发现与现有的相关研究明显不同<sup>[16, 48]</sup>。为了验证这一结果的正确性,本文用第三产业比重替代这一变量,并再次进行了回归分析,发现以第三产业为主导的产业结构对促进城市本身及其周边城市的绿色技术创新具有重要作用。原因可能是,在以第二产业为主的中国城市中,传统制造业仍是支柱产业,而专利申请大多由以信息通信业、房地产业和科研为代表的第三产业完成。

## 6 结论与讨论

### 6.1 结论

绿色技术创新不仅可持续发展的基石,也是中国创新发展和绿色发展相结合的纽带。本文以绿色专利申请数量作为城市绿色技术创新能力的替代指标,探讨了2007—2017年中国城市绿色技术创新活动的时空分布特征及其影响因素,得出以下结论:

(1)2007—2017年无论是在绿色专利申请量上还是城市参与度上,绿色建筑技术一直主导中国绿色技术创新发展,而围绕温室气体处理技术和绿色水技术领域的绿色技术创新较少。此外,中国城市绿色技术创新的两极分化显著,并呈现强劲的空间相关性。

(2)2007—2017年中国绿色技术创新行为的主体特征呈现出由个人和企业并重,发展为由企业单体主导,凸显了企业作为绿色技术创新主体的本质特征。然而,对于不同技术领域而言,进行绿色技术创新的主体呈现出不一样的偏好特征。至2017年,6类技术领域的创新主体都由企业主导,而在环境治理技术、温室气体处理技术和绿色水技术3个领域,大学和科研机构 and 个人的绿色技术创新贡献率则是旗鼓相当,不相上下。

(3)2007—2017年中国城市绿色技术创新空间差异显著,表现突出的城市大多位于东部地区,中西部地区城市绿色技术创新能力普遍落后。另外,在以长三角、珠三角、京津地区为主导的三极格局日益凸显的进程中,北京和深圳超越上海成为中国环境绿色技术的代表城市,其中北京在环境治理、清洁能源、温室气体处理和绿色交通技术方面较为突出,深圳在绿色建筑和绿色水技术方面较为突出。

(4)空间SDM模型回归结果表明了中国城市绿色技术创新具有显著的空间溢出效应和路径依赖性特征。其中,环境规制和市场规模对城市绿色技术创新具有显著的正局部效应,但溢出效应不明显;城市规模和城市空气质量不仅有利于促进城市绿色技术创新自身,还有利于其周边城市的环境创新;城市FDI、城市研发投入和城市初始绿色技术

创新能力均表现出正的局部效应和负的溢出效应,凸显出城市资本投入对城市绿色技术创新的“虹吸效应”;而以第二产业为主的产业结构对城市绿色技术创新具有明显的抑制作用。

## 6.2 讨论

本文通过借鉴OECD的绿色专利搜索策略,以绿色专利申请量从城市尺度对中国绿色技术创新的时空演化特征进行了初步研究,将当前集中于企业层面的绿色技术创新研究拓展至空间尺度,丰富了环境经济地理的研究内容。但无论是研究视角、数据基础还是分析框架,依然存在诸多尚待改进的地方:

(1) 本文以绿色专利衡量城市绿色技术创新实践,仅仅涉及绿色技术创新产出这一个维度,且也仅仅是绿色技术创新产出这一维度中的一个方面。城市绿色技术创新不仅仅是绿色专利发明,还包含绿色技术创新投入、绿色技术创新管理、绿色技术创新服务等。除此之外,本文以绿色专利申请量作为具体评价指标虽注重了绿色技术创新的前期投入,但忽视了绿色技术创新后期的实际产出,即绿色专利授权量。因此在今后的研究中,一方面需综合考虑绿色专利申请量、绿色专利授权量、绿色专利申请/授权比等指标,另一方面也需要充分借鉴环境经济学、创新经济学等领域的研究,拓宽城市绿色技术创新的评价维度和评价体系。

(2) 本文虽然通过专利申请人地址将绿色专利分配至中国城市尺度,但忽视了企业或科研机构本身的空间区位,以及这些机构在申请专利时的策略行为。比如中国绿色技术创新活动的空间分布特征实则与中国绿色企业的空间分布特征,或从事污染减排、环境保护研究的科研机构的空间分布特征高度相关;再比如一些大型企业的子公司申请专利时,时常以总公司作为专利申请人,这就可能造成绿色专利申请的空间特征与实际绿色技术创新活动的空间特征不符。

(3) 本文虽然应用空间杜宾模型发现城市绿色技术创新存在一定的空间溢出效应,但并未能揭示其空间溢出路径和空间溢出距离。首先,知识溢出的空间邻近特征在创新经济地理研究领域被广泛揭示,那么绿色技术创新的空间溢出半径(距离)如何还有待深入阐释。其次,一般技术创新的空间溢出路径,如产学研合作、技术转移、创新扩散、人员流动等也在诸多研究中得到一一阐释,那么绿色技术创新空间溢出的路径或通道是否与一般技术创新一致还有待更多的实证研究进行验证。

同时,相较于经济学、管理学等学科领域的研究,环境经济地理学的绿色技术创新研究还有诸多有待加强、或者值得进一步探讨的方向:

(1) 如何凸显绿色技术创新的企业主体特征。企业是绿色技术创新的主体特征不仅在经济学、管理学的研究中被广泛证明,在环境经济地理研究中也再被再三验证。本文研究结果中显示,绿色建筑技术始终主导中国绿色技术创新发展,同时中国城市绿色技术创新呈现显著的空间差异,这是否与中国绿色技术创新企业行业分布特征以及空间分布特征有关还有待更多深入的研究。因而在今后的环境经济地理研究中,企业绿色技术创新的空间差异及其影响因素研究应当成为研究重点。同时也应将企业异质性纳入分析框架,探讨企业异质性与企业绿色技术创新的空间差异、空间关联、空间溢出等问题。

(2) 如何凸显绿色技术创新体系的市场导向特征。《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》和《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》相继提出要构建市场导向的绿色技术创新体系研究。在创新经济学研究中已经发现市场驱动因素对企业绿色技术创新有明显的促进作用,本文也揭示了FDI



与城市绿色技术创新的正相关关系,但这相对于建构市场导向的绿色技术创新体系这一政策实践而言,基础研究还相对缺乏,如市场导向的绿色技术创新体系内涵、特征及其包含内容还有待阐释,绿色技术的市场交易行为和交易机制也有待揭示,绿色技术创新中机构合作、跨区域合作行为也有待发现等。

## 参考文献(References)

- [1] Cheng Yu, Wang Jingjing, Wang Yaping, et al. A comparative research of the spatial-temporal evolution track and influence mechanism of green development in China. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2745-2765. [程钰, 王晶晶, 王亚平, 等. 中国绿色发展时空演变轨迹与影响机理研究. *地理研究*, 2019, 38(11): 2745-2765.]
- [2] Zhou Liang, Che Lei, Zhou Chenghu. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(10): 2027-2044. [周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. *地理学报*, 2019, 74(10): 2027-2044.]
- [3] Urban F. Environmental innovation for sustainable development: The role of China. *Sustainable Development*, 2015, 23(4): 203-205.
- [4] Alvarez-Herranz A, Balsalobre-Lorente D, Shahbaz M, et al. Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels. *Energy Policy*, 2017, 105: 386-397.
- [5] Khan Z, Ali S, Umar M, et al. Consumption-based carbon emissions and international trade in G7 countries: The role of environmental innovation and renewable energy. *Science of The Total Environment*, 2020, 730: 138945. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138945.
- [6] Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1788-1798. [车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析. *地理科学*, 2018, 38(11): 1788-1798.]
- [7] Li Xu. Analysis and outlook of the related researches on green innovation. *R&D Management*, 2015, 27(2): 1-11. [李旭. 绿色创新相关研究的梳理与展望. *研究与发展管理*, 2015, 27(2): 1-11.]
- [8] Dai Hongyi, Liu Xielin. Some comments on research of environmental innovation. *Studies in Science of Science*, 2009, 27(11): 1601-1610. [戴鸿轶, 柳卸林. 对环境创新研究的一些评论. *科学学研究*, 2009, 27(11): 1601-1610.]
- [9] Barbieri N, Ghisetti C, Gilli M, et al. A survey of the literature on environmental innovation based on main path analysis. *Journal of Economic Surveys*, 2016, 30(3): 596-623.
- [10] Luo Liangwen, Liang Shengrong. Green technology innovation efficiency and factor decomposition of China's industrial enterprises. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(9): 149-157. [罗良文, 梁圣蓉. 中国区域工业企业绿色技术创新效率及因素分解. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(9): 149-157.]
- [11] Zhang Yanbo, Pan Peiyao, Lu Wei, et al. Research on policy effect of industrial enterprises environmental technology innovation in China. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(9): 138-144. [张彦博, 潘培尧, 鲁伟, 等. 中国工业企业环境技术创新的政策效应. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(9): 138-144.]
- [12] Jiao J L, Wang C X, Yang R R. Exploring the driving orientations and driving mechanisms of environmental innovation: The case study of the China Gezhouba. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 121016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121016.
- [13] Karakaya E, Hidalgo A, Nuur C. Diffusion of eco-innovations: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 392-399.
- [14] Schiederig T, Tietze F, Herstatt C. Green innovation in technology and innovation management: An exploratory literature review. *R&D Management*, 2012, 42(2): 180-192.
- [15] Villegas-Palacio C, Coria J. On the interaction between imperfect compliance and technology adoption: Taxes versus tradable emissions permits. *Journal of Regulatory Economics*, 2010, 38(3): 274-291.
- [16] Chen J, Cheng J H, Dai S. Regional eco-innovation in China: An analysis of eco-innovation levels and influencing factors. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153: 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.141.
- [17] Long X L, Sun C W, Wu C, et al. Green innovation efficiency across China's 30 provinces: Estimate, comparison, and convergence. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(7): 1243-1260.
- [18] Duan Dezhong, Xia Qifan, Zhang Yang, et al. Evolution pattern and impact factors of environmental innovation in the Yangtze River Economic Belt. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1158-1167. [段德忠, 夏启繁, 张杨, 等. 长江经济带环境创新的时空特征及其影响因素. *地理科学*, 2021, 41(7): 1158-1167.]

- [19] Cecere G, Corrocher N, Gossart C, et al. Technological pervasiveness and variety of innovators in Green ICT: A patent-based analysis. *Research Policy*, 2014, 43(10): 1827-1839.
- [20] Huang Y, Tu J, Lin T. Key success factors of green innovation for transforming traditional industries//Matsumoto M, Masui K, Fukushige S, et al. *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design. EcoProduction (Environmental Issues in Logistics and Manufacturing)*. Singapore: Springer, 2017.
- [21] Forsman H, Temel S, Uotila M. Towards sustainable competitiveness: comparison of the successful and unsuccessful eco-innovators. *International Journal of Innovation Management*, 2013, 17(3): 45-70.
- [22] Liao Z. Corporate culture, environmental innovation and financial performance. *Business Strategy and the Environment*, 2018, 27(8): 1368-1375.
- [23] Li Bin, Peng Xing. Studies on spatial heterogeneity effects of environmental regulation instruments: Spatial empirical analysis from the perspective of transformation of government functions. *Industrial Economics Research*, 2013(6): 38-47. [李斌, 彭星. 环境规制工具的空间异质效应研究: 基于政府职能转变视角的空间计量分析. *产业经济研究*, 2013(6): 38-47.]
- [24] Tang K, Qiu Y, Zhou D. Does command-and-control regulation promote green innovation performance? Evidence from China's industrial enterprises. *Science of The Total Environment*, 2020, 712: 136362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136362
- [25] Xiang Yunbo, Wang Shengyun, Deng Chuxiong. Spatial differentiation and driving factor of green development efficiency of chemical industry in Yangtze River Economic Belt. *Economic Geography*, 2021, 41(4): 108-117. [向云波, 王圣云, 邓楚雄. 长江经济带化工产业绿色发展效率的空间分异及驱动因素. *经济地理*, 2021, 41(4): 108-117.]
- [26] Huang Lei, Wu Chuanqing. Impact of environmental regulations on the cities' efficiency of industrial green development in Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1075-1085. [黄磊, 吴传清. 环境规制对长江经济带城市工业绿色发展效率的影响研究. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1075-1085.]
- [27] Xin Xiaohua, Lyu Lachang. Spatial differentiation and mechanism of technological innovation affecting environmental pollution in major Chinese cities. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 129-139. [辛晓华, 吕拉昌. 中国主要城市技术创新影响环境污染的空间分异与机理. *地理科学*, 2021, 41(1): 129-139.]
- [28] Dai Qiwen, Yang Jingyun, Zhang Xiaoqi, et al. Transfer characteristics, patterns and mechanisms of polluting enterprises and industries. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1511-1533. [戴其文, 杨靖云, 张晓奇, 等. 污染企业/产业转移的特征、模式与动力机制. *地理研究*, 2020, 39(7): 1511-1533.]
- [29] Tian Guanghui, Miao Changhong, Hu Zhiqiang, et al. Environmental regulation, local protection and the spatial distribution of pollution-intensive industries in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1954-1969. [田光辉, 苗长虹, 胡志强, 等. 环境规制、地方保护与中国污染密集型产业布局. *地理学报*, 2018, 73(10): 1954-1969.]
- [30] Zhang D Y, Rong Z, Ji Q. Green innovation and firm performance: Evidence from listed companies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 144: 48-55.
- [31] Tang D L, Xu H, Yang Y H. Mutual influence of energy consumption and foreign direct investment on haze pollution in China: a spatial econometric approach. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(4): 1743-1752.
- [32] Hao Y, Wu Y R, Wu H T, et al. How do FDI and technical innovation affect environmental quality? Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8): 7835-7850.
- [33] Smol M, Kulczycka J, Avdiushchenko A. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19(3): 669-678.
- [34] Zhang Weike, Ge Yao. The spatial effect analysis of OFDI on green total factor productivity. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 26-35. [张伟科, 葛尧. 对外直接投资对绿色全要素生产率的空间效应影响. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 26-35.]
- [35] Zhao Mingliang, Liu Fangyi, Wang Huan, et al. Foreign direct investment, environmental regulation and urban green total factor productivity of the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 38-47. [赵明亮, 刘芳毅, 王欢, 等. FDI、环境规制与黄河流域城市绿色全要素生产率. *经济地理*, 2020, 40(4): 38-47.]
- [36] Jiang Lei, Zhou Haifeng, Bai Ling. Spatial heterogeneity analysis of impacts of foreign direct investment on air pollution: Empirical evidence from 150 cities in China based on AQI. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 351-360. [姜磊, 周海峰, 柏玲. 外商直接投资对空气污染影响的空间异质性分析: 以中国150个城市空气质量指数(AQI)为例. *地理科学*, 2018, 38(3): 351-360.]
- [37] Xie Li, Zhang Jingbin. The spatial technology spillovers effect of Chinese manufacturing industries' agglomeration: The

- difference of institutional environment. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 909-928. [谢里, 张敬斌. 中国制造业集聚的空间技术溢出效应: 引入制度环境差异的研究. *地理研究*, 2016, 35(5): 909-928.]
- [38] Zhang Gang, Zhang Xiaojun. Green innovation strategy and corporate performance: An empirical research with employee participation as a mediating variable. *Finance and Trade Research*, 2013, 24(4): 132-140. [张钢, 张小军. 绿色创新战略与企业绩效的关系: 以员工参与为中介变量. *财贸研究*, 2013, 24(4): 132-140.]
- [39] Chen Zewen, Cao Hongjun. How the green innovation strategy improves corporate performance: The mediating role of green image and core competence. *East China Economic Management*, 2019, 33(2): 34-43. [陈泽文, 曹洪军. 绿色创新战略如何提升企业绩效: 绿色形象和核心能力的中介作用. *华东经济管理*, 2019, 33(2): 34-43.]
- [40] Qi G Y, Zeng S, Chiming T, et al. Stakeholders' influences on corporate green innovation strategy: A case study of manufacturing firms in China. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2013, 20(1): 1-14. DOI: 10.1002/csr.283.
- [41] Lin W L, Mohanmed, A B, Sambasivan M, et al. Effect of green innovation strategy on firm-idiosyncratic risk: A competitive action perspective. *Business Strategy and the Environment*, 2020, 29(3): 886-901.
- [42] Shi Jianjun, Zhang Wenhong, Yang Jing, et al. Stakeholders management in green innovation strategy: A case study of Jiangsu Redbud Technology Co. Ltd. *China Industrial Economics*, 2012(11): 123-134. [施建军, 张文红, 杨静, 等. 绿色创新战略中的利益相关者管理: 基于江苏紫荆花公司的案例研究. *中国工业经济*, 2012(11): 123-134.]
- [43] Cao Hongjun, Chen Zewen. The driving effect of internal and external environment on green innovation strategy: The moderating role of top management's environmental awareness. *Nankai Business Review*, 2017, 20(6): 95-103. [曹洪军, 陈泽文. 内外环境对企业绿色创新战略的驱动效应: 高管环保意识的调节作用. *南开管理评论*, 2017, 20(6): 95-103.]
- [44] Yang Jing, Liu Qiuhua, Shi Jianjun. The value of corporate green innovation strategy. *Science Research Management*, 2015, 36(1): 18-25. [杨静, 刘秋华, 施建军. 企业绿色创新战略的价值研究. *科研管理*, 2015, 36(1): 18-25.]
- [45] Duan Dezhong, Du Debin, Liu Chengliang. Spatial-temporal evolution mode of urban innovation spatial structure: A case study of Shanghai and Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1911-1925. [段德忠, 杜德斌, 刘承良. 上海和北京城市创新空间结构的时空演化模式. *地理学报*, 2015, 70(12): 1911-1925.]
- [46] Duan Dezhong, Du Debin, Chen Ying, et al. Technology transfer in China's city system: Process, pattern and influencing factors. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 738-754. [段德忠, 杜德斌, 谌颖, 等. 中国城市创新技术转移格局与影响因素. *地理学报*, 2018, 73(4): 738-754.]
- [47] Marin G, Zanfei A. Does host market regulation induce cross-border environmental innovation? *The World Economy*, 2019, 42(7): 2089-2119.
- [48] Ouyang X L, Li Q, Du K R. How does environmental regulation promote technological innovations in the industrial sector? Evidence from Chinese provincial panel data. *Energy Policy*, 2020, 139: 111310. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111310.
- [49] Xu Jianzhong, Qu Xiaoyu. Study on driving factors of environmental technology innovation behavior of equipment manufacturing enterprises based on grounded theory. *Management Review*, 2014, 26(10): 90-101. [徐建中, 曲小瑜. 基于扎根理论的装备制造企业环境技术创新行为驱动因素的质化研究. *管理评论*, 2014, 26(10): 90-101.]
- [50] Jia Jun, Zhang Wei. The path dependency of green technology innovation and environmental regulation analysis. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2014, 35(5): 44-52. [贾军, 张伟. 绿色技术创新中路径依赖及环境规制影响分析. *科学学与科学技术管理*, 2014, 35(5): 44-52.]
- [51] He Canfei, Zhou Yi. *Environmental Economic Geography Research*. Beijing: Science Press, 2016. [贺灿飞, 周沂. *环境经济地理研究*. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [52] Sun Yamei, Lyu Yonglong, Wang Tieyu, et al. Spatial discrepancy in patent-based innovation of environmental technologies. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(3): 123-129. [孙亚梅, 吕永龙, 王铁宇, 等. 基于专利的区域环境技术创新水平空间分异研究. *环境工程学报*, 2007, 1(3): 123-129.]
- [53] Cao Hui, Shi Baofeng, Zhao Kai. Evaluation on provincial green innovation capability: Based on index screening model of collinearity-coefficient of variation. *Chinese Journal of Management*, 2016, 13(8): 1215-1222. [曹慧, 石宝峰, 赵凯. 我国省级绿色创新能力评价及实证. *管理学报*, 2016, 13(8): 1215-1222.]
- [54] Liu Zhangsheng, Song Deyong, Gong Yuanyuan. Research on the spatial-temporal differences and convergence of green innovation capacity in China. *Chinese Journal of Management*, 2017, 14(10): 1475-1483. [刘章生, 宋德勇, 弓媛媛. 中国绿色创新能力的时空分异与收敛性研究. *管理学报*, 2017, 14(10): 1475-1483.]
- [55] Cheng Hua, Liao Zhongju. China regional environmental innovation performance evaluation and research. *China*

- Environmental Science, 2011, 31(3): 522-528. [程华, 廖中举. 中国区域环境创新绩效评价与研究. 中国环境科学, 2011, 31(3): 522-528.]
- [56] Kemp R, Pearson P. Final report MEI project about measuring eco-innovation. UM Merit DG Research of the European Commission, Maastricht, The Netherlands, 2017.
- [57] Chen Y S, Lai S B, Wen C T. The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 2006, 67(4): 331-339.
- [58] Pan X F, Han C C, Lu X W, et al. Green innovation ability evaluation of manufacturing enterprises based on AHP-OVP model. *Annals of Operations Research*, 2020, 290: 409-419.
- [59] Wang C H. An environmental perspective extends market orientation: Green innovation sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 2020, 29(8): 3123-3134.
- [60] Ardito L, Petruzzelli A M, Pascucci F, et al. Inter-firm R&D collaborations and green innovation value: The role of family firms' involvement and the moderating effects of proximity dimensions. *Business Strategy and the Environment*, 2019, 28(1): 185-197.
- [61] Tumelero C, Sbragia R, Evans S. Cooperation in R&D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 1138-1149.
- [62] Lee S H, Park S, Kim T. Review on investment direction of green technology R&D in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 186-193.
- [63] Dechezleprêtre A, Haščič I, Johnstone N. Invention and international diffusion of water conservation and availability technologies: Evidence from Patent Data. OECD Environment Working Papers, No.82, OECD Publishing, Paris, 2015.
- [64] Haščič I, Migotto M. Measuring environmental innovation using patent data. OECD Environment Working Papers, No. 89, OECD Publishing, Paris, 2015.
- [65] Haščič I, Silva J, Johnstone N. Climate mitigation and adaptation in Africa: Evidence from patent data. OECD Environment Working Papers, No.50, OECD Publishing, Paris, 2012.
- [66] Haščič I, Silva J, Johnstone N. The use of patent statistics for international comparisons and analysis of narrow technological fields. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No.2015/05, OECD Publishing, Paris, 2015.
- [67] Carrión-Flores C E, Innes R. Environmental innovation and environmental performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 59(1): 27-42.
- [68] Leyva- de la Hiz D I. Environmental innovations and policy network styles: The influence of pluralism and corporativism. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 839-847.
- [69] Zhang J, Kang L, Li H, et al. The impact of environmental regulations on urban Green innovation efficiency: The case of Xi'an. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102123. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102123.
- [70] Liu C Y, Gao X Y, Ma W L, et al. Research on regional differences and influencing factors of green technology innovation efficiency of China's high-tech industry. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2020, 369: 112597. DOI: 10.1016/j.cam.2019.112597.
- [71] Yang F X, Yang M. Analysis on China's eco- innovations: Regulation context, intertemporal change and regional differences. *European Journal of Operational Research*, 2015, 247(3): 1003-1012.
- [72] Gudipudi R, Lüdeke M K B, Rybski D, et al. Benchmarking urban eco-efficiency and urbanites' perception. *Cities*, 2018, 74: 109-118.
- [73] Huang Zhiji, He Canfei, Yang Fan, et al. Environmental regulation, geographic location and growth of firms' productivity in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1581-1591. [黄志基, 贺灿飞, 杨帆, 等. 中国环境规制、地理区位与企业生产率增长. 地理学报, 2015, 70(10): 1581-1591.]
- [74] Peng X. Strategic interaction of environmental regulation and green productivity growth in China: Green innovation or pollution refuge? *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139200. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139200.
- [75] Triguero A, Moreno-Mondéjar L, Davia M A. Leaders and laggards in environmental innovation: An empirical analysis of SMEs in Europe. *Business Strategy and the Environment*, 2016, 25(1): 28-39.
- [76] Huang Z H, Liao G K, Li Z H. Loaning scale and government subsidy for promoting green innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 144: 148-156.



## Green technology innovation in China city system: Dynamics and determinants

DUAN Dezhong<sup>1,2</sup>, DU Debin<sup>1,2</sup>

(1. Institute for Global Innovation and Development, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. School of Urban & Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Green technology innovation is the first driving force to promote green development and harmonious coexistence between human and nature. Green technology innovation is the core issue of environmental economics, innovation economics, innovation management and other research fields. It is also one of the emerging topics in the field of environmental economic geography in recent years. Overall, the research on enterprise level is dominant, while the research on spatial scale is relatively less. In this paper, by deriving green patent applications for measuring green technology innovation from the Wanfang Patent Database, the spatial and temporal characteristics and its determinants of green technology innovation in China's city system from 2007 to 2017 are explored. The results indicate that technologies related to buildings has dominated the development of environmental innovation in China's city system, while technologies in the field of greenhouse gases and water adaptation were quite unpopular throughout China. In 2007, China's environmental innovation was dominated by individuals and enterprises. By 2017, enterprises have become the main body of China's environmental innovation, highlighting the essential characteristics of enterprises as the subject of environmental innovation. In space, the geography of environmental innovation in China's city system presents a strong spatial imbalance feature, a tripolar pattern dominated by the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta, and the Beijing- Tianjin region has become increasingly prominent. In terms of determinants, spatial Durbin model regression results reflect that there are significant spatial spillover effects and path dependence characteristics in China's environmental innovation. Environmental regulation intensity, city size, market size, technological innovation level, FDI, and air quality have obvious positive effects on urban environmental innovation, while the industrial structure dominated by secondary industry has obvious inhibitory effect on urban environmental innovation.

**Keywords:** green patents; green technology innovation; innovation subjects; space- time pattern; determinants; China