

# 中国城市绿色技术扩散的时空过程与形成机制

段德忠, 金 红

(华东师范大学全球创新与发展研究院, 上海 200062)

**摘要:** 以绿色专利转让刻画绿色技术扩散, 分析了2001—2020年中国城市绿色技术扩散的持续动态以及空间格局, 揭示了中国城市绿色技术扩散活动中的热门技术、行为主体和城市类型, 并探讨了驱动中国城际绿色技术扩散的主要因素。研究发现: ① 中国绿色技术交易市场中的热门技术由环境治理技术快速转变为绿色建筑技术和清洁能源技术, 企业始终是绿色技术扩散的主要行为体; ② 绿色技术跨城流动成为新常态, 城市角色逐渐由自给自足式的城内集散型向开放创新式的城际集散型发展, 全国统一的绿色技术交易大市场正在逐渐形成; ③ 绿色技术扩散活动高度集聚在由东部沿海和长江经济带组成的“T”型地区, 其中城际绿色技术扩散形成以京津、长三角、珠三角、成渝地区为枢纽的菱形网络; ④ 遵循偏好连接和同配性法则, 城际绿色技术扩散网络中新加入城市倾向于从枢纽城市获取绿色技术, 但枢纽城市间的绿色技术流动更加频繁; ⑤ 多维邻近性分析框架下的模型回归结果揭示了城市间技术差距、地理邻近性、经济邻近性、认知邻近性对城际绿色技术扩散的形成机制差异。

**关键词:** 绿色专利; 绿色技术扩散; 时空格局; 城市类型; 驱动因素; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202308010

## 1 引言

绿色技术的协同开发和全球共享被认为是应对全球气候变化、降低环境污染和生态破坏的关键举措<sup>[1-2]</sup>。全球绿色技术扩散和共享机制也在不断探索中建构, 如由几个大型跨国公司IBM、诺基亚、索尼等, 于2008年发起的生态专利共享项目(Eco-Patent Commons)<sup>[3-4]</sup>, 以及联合国气候变化框架公约中的技术需求评估计划(Technology Needs Assessment Program)等。同样, 在强调以减污降碳、推动绿色发展、促进人与自然和谐共生为目标的中国经济高质量发展关键期, 构建以市场为导向的绿色技术创新体系从而加速绿色技术在区域、城市、机构间的扩散, 已上升为国家战略决策<sup>[5]</sup>。2019年国家发展改革委和科技部联合颁布了《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》, 提出要建立健全绿色技术转移转化市场交易体系, 完善绿色技术创新成果转化机制, 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。2020年国家发展改革委、科技部、工业和信息化部、自然资源部组织编制了《绿色技术推广目录(2020年)》, 涉及节能环保产业、清洁生产产业、清洁能源产业、生态环境产业和基础设施绿色升级5个领域的116项绿色技术。

收稿日期: 2022-04-02; 修订日期: 2023-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271186, 41901139); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(22YJA79001)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42271186, No.41901139; MOE Project of Humanities and Social Sciences, No.22YJA79001]

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

2001-2018 页

绿色技术扩散作为一般技术扩散形式中的一类,不仅在全球气候变化和环境生态压力下获得了极大的关注,而且在产业转型升级和企业绿色技术创新实践中扮演关键角色。与一般技术扩散不同的是,绿色技术扩散无论是对国家、区域、城市还是对于企业而言,其不仅能够带来技术溢出的经济效益,还能够带来技术溢出的环境效益。综观当前绿色技术扩散研究,集中于以下几个议题:①绿色技术扩散过程的仿真模拟研究。创新扩散理论的“S”型曲线规律激发了大量学者对绿色技术扩散过程(包括扩散时间和接纳者数量)进行研究,学者们采用了多种模型(如S型模型、Logistic模型、Bass模型、网络动力学模型等)对企业绿色技术扩散过程进行仿真模拟和曲线拟合<sup>[6-8]</sup>;②绿色技术扩散的驱动因素研究。绿色技术扩散的驱动因素研究是当前绿色技术扩散研究最主要、最集中的领域<sup>[9-10]</sup>。知识基础理论、吸收能力理论、技术差距理论、知识粘性理论、多维邻近性理论、利益相关者理论、社会网络理论等理论模型被广泛应用于揭示驱动绿色技术扩散的主要因素<sup>[11-13]</sup>,其中多维邻近性理论及技术差距理论是最常见的分析理论框架,普遍发现环境规制、地理距离、企业自身属性、预期收益、技术复杂性和相关性、公众消费需求等因素影响着绿色技术扩散的效率<sup>[14-15]</sup>;③加快绿色技术扩散的对策研究。绿色技术扩散存在多重外部性,加速绿色技术扩散会产生多重收益,如企业个体绿色经济增长、行业群体绿色经济增长,城市或区域绿色经济增长等,因而众多学者将研究视角放置在如何加速绿色技术扩散上来,并展开了一系列的对策探索研究<sup>[16-18]</sup>。相关研究发现,稳定的绿色技术扩散途径(合作伙伴关系)、专业化的中介机构、有力的政策支持(补贴、减税、知识产权保护等)等措施能够显著加速企业间或区域间的绿色技术扩散<sup>[19-20]</sup>。

综上可知,当前绿色技术扩散研究主要集中于某一绿色技术领域(绿色制造技术、绿色建筑技术、绿色交通技术、绿色照明技术、节能技术、节水技术等)下企业绿色技术扩散过程模拟、驱动因素和加速对策探索<sup>[21-23]</sup>,研究方法多采用基于案例分析的计量经济学模型和系统动力学模型,鲜有从空间层面开展城市、区域绿色技术扩散的时空过程研究<sup>[14]</sup>,也鲜有开展多技术领域下的绿色技术扩散比较研究。虽然近年来在响应创新驱动发展战略下,创新经济地理学中围绕知识流动、技术转移、科技成果转化、创新扩散的研究屡见不鲜<sup>[24-27]</sup>,但呼应“绿色技术创新支撑绿色发展”的研究才刚刚起步<sup>[28-29]</sup>,而关于绿色技术的空间扩散研究则更是不多见<sup>[30-31]</sup>。基于此,本文以绿色专利转让刻画绿色技术扩散,将企业绿色技术扩散拓展至空间层面,从城市尺度分析了2001—2020年中国绿色技术扩散的时续发展动态以及空间分布格局,揭示了中国城市绿色技术扩散活动中的热门技术、行为主体和城市类型,并探讨了驱动中国城市绿色技术扩散的主要因素,一方面试图丰富当前创新和环境经济地理学的研究内容,另一方面试图为建设市场导向的绿色技术创新体系提供案例支撑。

## 2 数据和方法

### 2.1 绿色技术扩散数据获取与处理

本文在测度城市绿色技术扩散时,采用世界知识产权组织(World Intellectual Property Organization, WIPO)测度绿色技术扩散的惯例做法,以绿色专利转让来衡量绿色技术扩散。首先,借鉴段德忠等构建的基于IPC专利分类号的绿色专利识别体系(包括清洁能源技术、温室气体处理技术、绿色交通技术、绿色建筑技术、环境治理技术和绿色水技术)<sup>[32]</sup>,以知识产权出版社专利信息服务平台(<http://search.cnipr.com/>)为数据源,从而获取2001—2020年中国绿色专利转让详情数据,共计207128条;其次,根据绿

色专利转让详情数据中的“变更前权利人地址”和“变更后权利人地址”信息，识别绿色专利转让前权利人所在城市和转让后权利人所在城市<sup>①</sup>，暂未包括香港、澳门、台湾的跨境绿色专利转让数据和地址无法识别的绿色专利转让数据，最终得到本文的分析数据，即成功识别地址的绿色专利转移数据 167632 条。数据处理结果显示，绿色专利转移量占专利转移总量的比重基本稳定在 10% 左右（其中 2003 年最低，为 5%；2015 年最高，为 14%），而具备清晰地址的绿色专利转移量占绿色专利转移整体的比重稳步上升，从 2001 年 20% 左右增长至 2020 年的 80% 左右（2019 年更是达到 89%）。

2.2 城市绿色技术扩散类型划分

将主体间的绿色技术扩散映射至城市尺度，就必然面临将原组织内部或组织间的绿色技术扩散重构为城市内部或城市间的绿色技术扩散。根据城市城内绿色技术转移量、城际绿色技术转移量的相对大小，可将城市绿色扩散类型划分为 3 大类，城内集散型、城际集散型和混合型（表 1）：① 城内集散型即城市绿色技术扩散活动完全或主要发生在城市边界以内，根据其活跃程度又可划分为完全自给自足型和主要城内集散型两种细分小类；② 城际集散型即城市绿色技术扩散活动完全或主要呈现于跨越城市边界形态，根据城际绿色技术扩散量、城际绿色技术集聚量的相对大小，城际集散型又可划分为完全外销型、完全外源型、主要外源型、主要外销型和外源外销兼顾型；③ 混合型城市意味着城内绿色技术转移和城际绿色技术转移对其都很重要，由于在城内绿色技术转移维度，集聚量即是扩散量，因而在混合型大类下，继续依照城际绿色技术扩散量和城际绿色技术集聚量对其进行细分，可细分为混合集聚型、混合扩散型和混合集散型。

表 1 城市绿色技术扩散类型划分  
Tab 1. Types classification of city green technology diffusion

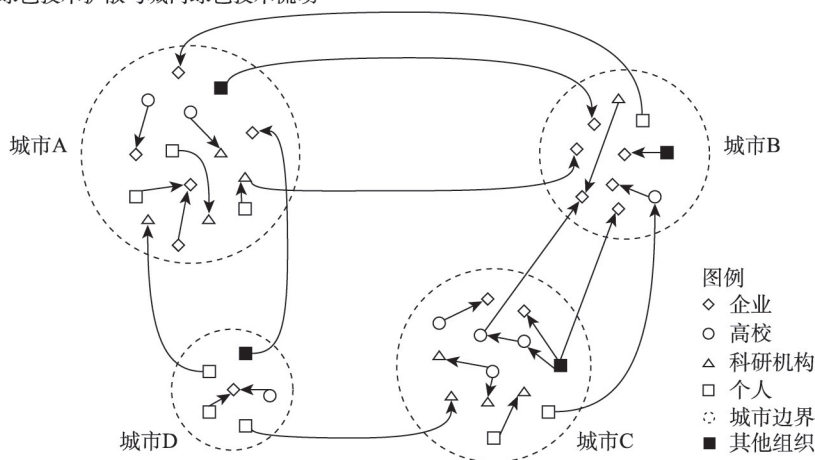
大类	小类	描述
城内集散型	完全自给自足型	仅存在城内绿色技术流动现象
	主要城内集散型	同时存在城内绿色技术流动和城际绿色技术流动现象，但以城内绿色技术流动为主
城际集散型	完全外销型	仅存在向其他城市扩散绿色技术现象
	完全外源型	仅存在从其他城市获取绿色技术现象
	外源外销兼顾型	同时存在向其他城市扩散绿色技术和从其他城市获取绿色技术现象，且两者所占比例基本持平
	主要外源型	同时存在向其他城市扩散绿色技术和从其他城市获取绿色技术现象，但以从其他城市获取绿色技术为主
	主要外销型	同时存在向其他城市扩散绿色技术和从其他城市获取绿色技术现象，但以从其他城市获取绿色技术为主
混合型	混合集聚型	城内绿色技术转移和城际绿色技术转移量基本持平，但以绿色技术集聚活动为主
	混合扩散型	城内绿色技术转移和城际绿色技术转移量基本持平，但以绿色技术扩散活动为主
	混合集散型	城内绿色技术转移和城际绿色技术转移量基本持平，且绿色技术集聚和扩散量也基本持平

2.3 城际绿色技术扩散的驱动因素分析

（1）理论框架建构。无论是城内绿色技术流动还是城际绿色技术扩散，其依托的核心主体还是企业，因而驱动城内绿色技术流动和城际绿色技术扩散演化发展的因素在本质上是内在相通的。但由于本文重在探讨城市尺度的中国绿色技术扩散特征，因而本文聚焦解析绿色技术跨城流动的驱动因素（图 1）。

① 本文城市指的是中国地级及以上城市，也包括省直辖县级市（暂未含港澳台地区），具体涵盖直辖市、地级市、地区、盟、自治州、省直管县级市。

a. 城际绿色技术扩散与城内绿色技术流动



b. 城际绿色技术扩散驱动因素解析

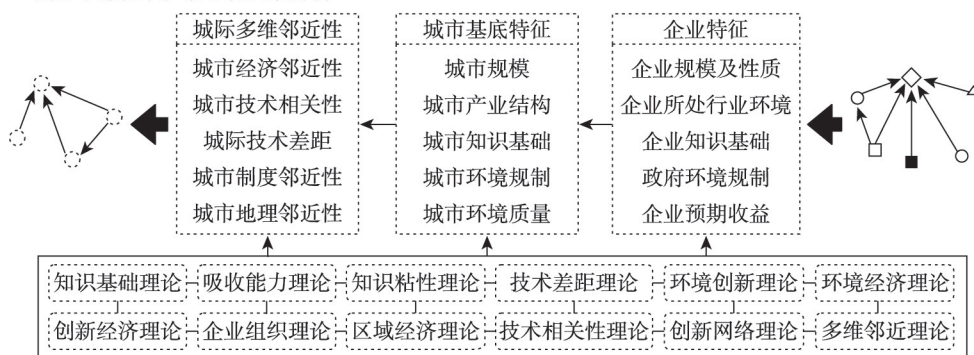


图1 城市绿色技术扩散研究分析框架

Fig. 1 Analysis framework of city green technology diffusion

企业绿色技术扩散驱动因素的研究积累为本文探讨城际绿色技术扩散的影响因素提供了很好的借鉴<sup>[14-15]</sup>。知识基础理论、吸收能力理论和知识粘性理论认为,主体或区域的知识基础在很大程度上决定了其知识创新的演化路径,以及其获取外部知识的能力<sup>[33-35]</sup>。在企业绿色技术扩散上,以企业现有绿色技术创新能力衡量的知识基础通常作为基本变量,一方面决定企业绿色技术创新的演化路径,另一方面决定企业在绿色技术扩散上的扩散能力和吸收能力。在城际绿色技术扩散上,城市绿色技术创新能力(知识基础)越强,代表其拥有的绿色技术数量越多,也代表其从外部获取绿色技术的能力越强。同时,技术差距理论认为技术差距能够诱导技术转移或技术扩散发生<sup>[36-37]</sup>,且过往中国城际技术扩散研究也证明,技术差距是中国城际技术扩散体系演化的动力与拓扑连接机制。

环境创新理论认为,政府环境规制对企业、城市、区域绿色技术创新在长期视角来看存在显著的正向影响<sup>[5]</sup>。在绿色技术扩散研究中,地方、区域或国家环境规制强度同样被作为一个核心驱动因素被广泛考量。如领先市场的环境规制强度一方面会对发展中国家或地区的生产者施加增加绿色技术投入的影响,另一方面也会迫使本地落后产能向环境规制强度较弱的地方转移,并带来绿色技术扩散的溢出效应。在城际绿色技术扩散上,环境规制较强的城市不仅会刺激本地绿色技术的生产,也会加大城市对外部绿色技术获取的力度;而环境规制较弱的城市由于其本地绿色技术需求较低,也会促使本地绿色技术向环境规制较强的城市流动。



环境经济学、创新经济学和区域经济学理论认为, 企业属性影响着企业绿色技术创新能力。在绿色技术扩散上, 企业属性同样起着重要作用, 在企业规模层面表现出企业规模越大, 其扩散和获取绿色技术的能力就越强; 在企业性质层面表现出民营企业相对国有企业而言更具有绿色技术扩散的主观意愿<sup>[38-39]</sup>。在城际绿色技术扩散上, 固然会存在因城市基底特征的不同而形成城市间绿色技术扩散行为差异, 如大城市或者高等级城市往往在绿色技术创新和绿色技术扩散上更具主动性。企业组织理论还认为, 不同产业、不同行业的企业对绿色技术需求的量存在差异, 对绿色技术需求的领域存在差异<sup>[21-23]</sup>。在城市层面, 城市主导产业既决定了城市哪类绿色技术产出量较大, 也决定了城市对哪类绿色技术需求量较大。

多维邻近性分析框架下的创新网络演化理论也为解析技术扩散的驱动机制提供了有效的分析框架, 认为地理邻近性、认知邻近性、制度邻近性、文化邻近性、组织邻近性等能够有效地促进机构间、城市间、区域间以及国家间的技术扩散<sup>[40-42]</sup>。在企业绿色技术扩散中, 技术相关性影响着企业所吸收的绿色技术领域和规模, 即企业间如果在绿色技术创新领域存在高度同构性, 则相互之前进行绿色技术扩散的意愿和规模就越大。放置在城市层面, 城市间的绿色技术创新结构如果高度相关, 则被认为具有共同的知识基础, 则更容易扩散和吸收绿色技术。另外, 城市绿色技术扩散本质上就是知识或技术的空间扩散, 虽然不断升级变革的信息通讯和交通运输技术大大缩小了地理距离对技术空间扩散的约束, 但创新经济时代仍然重要的“面对面的交流”依然凸显了地理邻近性在交流沟通、技术扩散以及科技合作上的重要性。同时, 已有研究也揭示出城市间经济发展水平相似性对城际技术扩散体系演化有着显著正向促进作用, 即经济发展水平相近的城市间, 其技术扩散活动越活跃。

(2) 模型建构。基于上述理论框架建构过程, 本文借鉴多维邻近性分析框架<sup>[42]</sup>, 通过建构城市多维邻近性指标, 分析影响城际绿色技术扩散的驱动因素:

$$GTD_{i \rightarrow j, t}^{intercity} = \alpha + \beta_1 Gre\_Pat\_Apli_{i, t} + \beta_2 Gre\_Pat\_Apli_{j, t} + \beta_3 Tech\_Gap_{i, j}^t + \beta_4 Geo\_Prox_{i, j} + \beta_5 Eco\_Prox_{i, j}^t + \beta_6 Inst\_Prox_{i, j}^t + \beta_7 Cog\_Prox_{i, j}^t + \varepsilon_{i, j}^t \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为常数项;  $\beta$  为系数;  $\varepsilon_{i, j}^t$  为随机误差项;  $GTD_{i \rightarrow j, t}^{intercity}$  为城市  $i$  在  $t$  时间扩散至城市  $j$  的绿色技术数量;  $Gre\_Pat\_Apli_{i, t}$  和  $Gre\_Pat\_Apli_{j, t}$  分别是城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的绿色专利申请量;  $Tech\_Gap_{i, j}^t$  为城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的技术差距, 以两个城市的在  $t$  时间绿色专利申请量之差的绝对值来衡量;  $Geo\_Prox_{i, j}$  为城市  $i$  和城市  $j$  间的地理邻近性, 以经纬度计算的直线地理距离为衡量标准;  $Eco\_Prox_{i, j}^t$  为城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的经济邻近性, 为城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的 GDP 之比 (高 GDP 城市/低 GDP 城市);  $Inst\_Prox_{i, j}^t$  为城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的制度邻近性, 为城市  $i$  和城市  $j$  的环境规制强度之比 (强环境规制城市/低环境规制城市), 城市环境规制强度计算借鉴已有相关研究, 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<sup>[5]</sup>, 通过加权处理获得 (公式(2));  $Cog\_Prox_{i, j}^t$  为城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的认知邻近性, 以城市  $i$  和城市  $j$  在  $t$  时间的绿色技术相关性为衡量标准, 而城市间绿色技术相关性的测度方法则借鉴产业相关性测度方法<sup>[32]</sup>, 计算公式见公式 (3)。

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

$$Environ\_Regu_{i, t} = \left( \sum_{g=1}^3 \frac{P_{i, t}^g}{P_t^g} \times S\_Pr_{i, t}^g \right) / 3 \quad (2)$$

$$Cog\_Prox_{ij}^t = \frac{\sum_{k=1}^k [(Pat_{i,k} - \overline{Pat}_i)(Pat_{j,k} - \overline{Pat}_j)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^k (Pat_{i,k} - \overline{Pat}_i)^2 (Pat_{j,k} - \overline{Pat}_j)^2}} \quad (3)$$

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小值； $Environ\_Regu_{i,t}$  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； $Cog\_Prox_{ij}^t$  为城市  $i$  和城市  $j$  的绿色技术创新相关性； $Pat_{i,k}$  为  $i$  城市  $k$  类绿色专利的申请量占总申请量的比重； $\overline{Pat}_i$  是  $Pat_{i,k}$  的均值； $k$  是绿色专利种类的数量。

### 3 中国绿色技术扩散的时序动态

#### 3.1 环境治理热情快速冷却,面向消费端的绿色建筑和清洁能源技术快速崛起

2001—2020 年中国绿色技术交易市场中流行技术由环境治理技术转变为绿色建筑技术和清洁能源技术。具体来看：2001—2005 年环境治理技术主导中国绿色技术扩散，该领域的专利转移量占整体绿色专利转移量的比重由 2001 年的 28.6% 增长至 2005 年的 34.4%。根据绿色专利识别体系，环境治理技术包括空气污染减排、水污染治理、废物管理、土壤修复和环境监测五小类，即主要涉及污染物排放总量控制和污染物排放治理达标这两个层面的“末端治理”技术。1978 年改革开放至 20 世纪末，中国快速经济增长和工业化、城镇化进程给生态环境带来了前所未有的压力。在 1996 年《国务院关于环境保护若干问题的决定》提出的污染物排放总量控制制度指导下，“一控双达标”（控制主要污染物排放总量，工业污染源达标和重点城市的环境质量按功能区达标）成为“九五”（1996—2000 年）至“十一五”（2006—2010 年）期间中国环境保护和治理政策的核心，国家先后颁布实施《全国主要污染物排放总量控制计划》和《跨世纪绿色工程规划》，并在“十一五”期间将“总量控制”提升到国家环境保护战略的高度<sup>[43]</sup>。

2006 年绿色建筑技术的转移量超过环境治理技术，以及 2007 年清洁能源技术的转移量也超过环境治理技术，从而形成持续至今的中国绿色技术交易市场主要特征，即绿色建筑技术和清洁能源技术主导中国绿色技术扩散，并根据其发展态势（年均增长率分别达到 44.5% 和 46.2%），这两大技术仍将在未来一段时间继续主导中国绿色技术扩散。这一方面是由于从“两型社会”、生态文明建设和美丽中国建设，到推动绿色发展、促进人与自然和谐共生，从《清洁生产促进法》《循环经济促进法》到新一轮《环境保护法》重大修订，中国环境保护和污染治理模式已由末端治理转向全过程控制，中国的绿色技术创新也由偏重于环境治理技术转向偏重于绿色生产技术。另一方面也源于中国高速增长的房地产经济对绿色建筑技术的需求持续增大和快速崛起的新能源汽车产业对清洁能源生产、能源储备和电池技术的需求持续增大。

#### 3.2 城市边界的“栅栏”效应开始减弱,绿色技术跨城流动成为新常态

在地方政府的强力监管下和专利技术流动的地理距离约束性，中国绿色技术的空间流动严重受到城市边界的“限制”，呈现出“自产自销”式的自给化特征。2001—2018 年中国绿色专利转移始终以城内转移为主导，其中 2003 年城内转移的比重更是达到 84.7%。但随着市场经济体制的持续深入改革，专利流动的行政壁垒和地区封锁逐渐被打

破,以专利为主的创新要素的自由流动和充分竞争得到保证。同时在本地区技术创新路径依赖下,本地绿色技术愈发无法满足城市产业结构转型和可持续发展的需求,地方绿色技术创新网络逐渐跨越城市边界,融于区域创新网络和国家创新体系,城市边界对于专利技术的“栅栏”效应减弱,城际绿色技术流动愈发繁,绿色技术跨城流动成为常态。2001—2020年中国绿色专利转移中城际转移的比重由18.2%快速增长至57.5%,尤其2019年城际绿色专利转移量首次超过城内绿色专利转移量,并在2020年迅速拉大两者间的差距。

依据中国绿色专利转移的时续发展特征,将中国绿色技术扩散划分为3个阶段,即2001—2007年的缓慢发展阶段(转移5001件绿色专利)、2008—2014年的初步增长阶段(转移45251件绿色专利)和2015—2020年的快速增长阶段(转移156876件绿色专利)。通过梳理每个阶段内不同技术领域的城内专利量和城际转移量发现,3个阶段内唯有环境治理技术的城际转移量在第3阶段超过其城内转移量,而其他5类绿色技术的城际转移量虽快速增长,但在3个阶段内皆少于其城内转移量。这表明,在技术创新路径依赖、以及环境治理技术开发成本较高的前提下,再加上环境治理技术市场交易“冷却”行情,本地的环境治理技术愈发无法满足本地的污染物总量控制目标,需要进行跨城技术交易来弥补本地的供给不足。

### 3.3 企业不仅是中国绿色技术的主要出让者,也是集成吸纳者

根据创新主体的分类以及绿色技术转移前后权利人信息,中国绿色技术扩散的行为主体可以划分为4个类别:企业、大学及科研机构、个体、其他(无法识别其主体的具体类别,故归为“其他”)。2001—2020年企业始终主导中国绿色技术扩散,即企业既是中国绿色技术的主要出让方,也是中国绿色技术的主要购买方,且主导的力度在持续加强。在技术出让维度,中国绿色技术交易市场来源于企业的绿色技术占比由2002年的40.7%波动增长至2020年的67.2%;在技术购买维度,企业作为消费者购买的绿色技术占比由2002年的66.1%波动增长至2020年的85.9%。个体在中国绿色技术扩散中也扮演着至关重要的角色,但主要体现在技术出让维度。2001—2020年中国绿色技术交易市场中来源于个体的绿色技术占比基本维持在20%以上,其中在2004年和2010年更是分别达到41.7%和41.9%。大学和科研机构在中国绿色技术扩散中的作用较小,无论是在技术出让维度还是在技术购买维度,其所占的比重皆较小。

从主体间技术扩散来看,企业不仅通过“自我消化”耗散掉中国绿色技术交易市场中的大部分绿色技术,还广泛吸收来自大学和科研机构、个体出让的绿色技术。即对于大学和科研机构、个体而言,企业是其绿色技术的主要消费者,但在不同阶段也有所差异。2001—2007年大学和科研机构出让的195件绿色专利中有161件流向企业,占比达82.6%。个体出让的802件绿色专利中有445件流向企业,占比达55.5%。2008—2014年大学和科研机构出让的2110件绿色专利中有1213件流向企业,占比下降至57.5%。个体出让的11104件绿色专利中有8116件流向企业,占比升至73.1%。2015—2020年大学和科研机构出让的10437件绿色专利中有7130件流向企业,占比上升至68.3%。个体出让的32733件绿色专利中有27413件流向企业,占比继续升至83.7%。

## 4 中国绿色技术扩散的空间格局

### 4.1 城内流动:京津—长三角—珠三角与长江经济带构成的“T”型格局显现

2001—2020年中国城内绿色技术流动活动高度集聚在以京津、长三角和珠三角为增



长极的东部沿海地区,以及以长三角、长江中游和成渝城市群为核心枢纽的长江经济带,中国国土开发与经济布局的“T”型架构在城内绿色技术扩散上显得尤为明显。

2001—2007年,1662件绿色专利(占整体73.8%)在127个城市内部发生了专利权的转移,实现了绿色技术的流动。虽东部沿海城市居多,但中西部地区也广泛分布,整体较为均衡。其中仅有28个城市的城内绿色专利转移量超过10件,北京、深圳和上海分别以309件、125件和119件的城内绿色专利转移量分列全国1~3位。2008—2014年城内绿色专利转移量增至24717件,但占整体的比重稍有下降,降至70.5%。有城内绿色技术转移活动的城市数量也增至278个,但城内绿色专利转移量超过100件的城市也仅有47个,其中北京、上海和深圳3个城市的城内绿色专利转移量超过1000件,分别达到3870件、2504件和1985件。这一阶段,除北京、上海和深圳外,长三角和珠三角地区其他城市的城内绿色专利转移量也快速增长,如长三角的杭州(877件)、南京(724件)、宁波(589件)、苏州(563件)、无锡(477件)等,珠三角的佛山(719件)、广州(541件)、东莞(428件)等。2015—2020年,64923件绿色专利在319个城市内部发生专利权转移,但其占整体的比重下降较快,至49.9%,城际绿色技术转移量已经超过城内绿色技术转移量。这一阶段,城内绿色专利转移量超过100件的城市增至73个,超过1000件的城市也有15个,北京继续以7834件绿色专利转移量位列第1,深圳和上海分别以5893件和4123件绿色专利转移量位列第2和第3。此外,除了长三角和珠三角地区城市城内绿色专利转移量普遍性增长外,长江经济带沿线的省会城市在这一阶段也上升较快,如成都、武汉、重庆、长沙分别以1876件、1472件、1339件和830件城内绿色专利转移量位列第6、第10、第12和第19位。至此,由京津—长三角—珠三角与长江经济带构成的中国城内绿色技术转移“T”型格局初步显现。

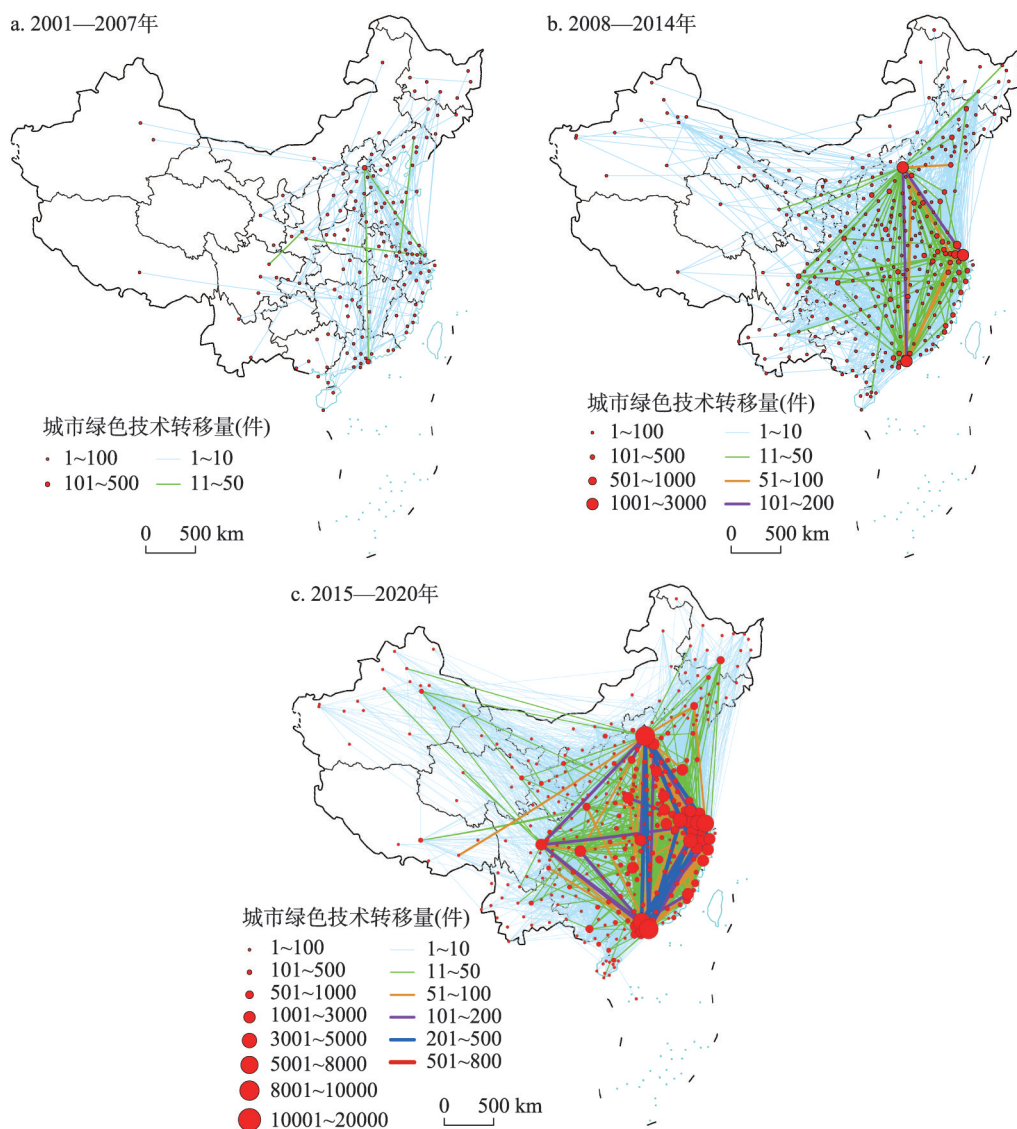
#### 4.2 城际扩散:由随机分散格局经三角格局向菱形格局演化

2001—2020年,随着参与城际绿色技术扩散的城市数量不断增多和扩散的绿色专利数量急剧增加,中国城际绿色技术扩散网络呈现出由随机分散格局经三角格局向菱形格局演化,京津、长三角、珠三角和成渝地区成长为中国城际绿色技术扩散网络的枢纽(图2)。

(1) 中国绿色技术城际扩散由扩散经济向集聚经济转变。2001—2020年,参与中国城际绿色技术扩散网络中的城市数量由第一阶段的137个增长至第三阶段的352个,其中从其他城市集聚绿色技术的城市数量由第一阶段的82个快速增长至第三阶段的345个,由第一阶段的少于向其他城市扩散绿色技术的城市数量(101个),发展至第二(268个)和第三阶段(337个)的超过向其他城市扩散绿色技术的城市数量。由此可见,随着对绿色经济发展的“觉醒”,越来越多的城市表现出对绿色技术的强烈需求,而在此方面率先行动的城市通过促进本城绿色技术创新,逐渐从早期的绿色技术购买者发展为后期的绿色技术出售者。如2001—2007年北京和深圳分别从44个、14个城市吸收107件和70件绿色专利,成为这一阶段中国绿色技术的两个最大购买者;而到了2015—2020年,深圳和北京分别向230个、235个城市扩散5229件、4984件绿色专利,成为了这一阶段中国绿色技术的两个最大出售者。

(2) 中国绿色技术城际扩散由随机分散性向空间集聚性转变。2001—2007年中国绿色技术城际转移关系表现出一定的随机性和分散性,在250对城际转移关系中,有139对仅转移1件绿色专利,转移绿色专利超过10件的仅有8对(占比为3.2%),最大的城际转移关系发生在北京和深圳之间,即北京向深圳转移41件绿色专利。2008—2014年中国绿色技术城际转移网络在第一阶段的随机性和分散性的基础上,逐渐发育出有序性和集聚





注：基于自然资源部标准地图服务系统审图号为GS(2016)1554号标准地图制作,底图边界无修改。

图2 2001—2020年3个阶段中国城际绿色技术转移的空间演化特征

Fig. 2 Spatial evolution characteristics of China's intercity green technology transfer in three stages from 2001 to 2020

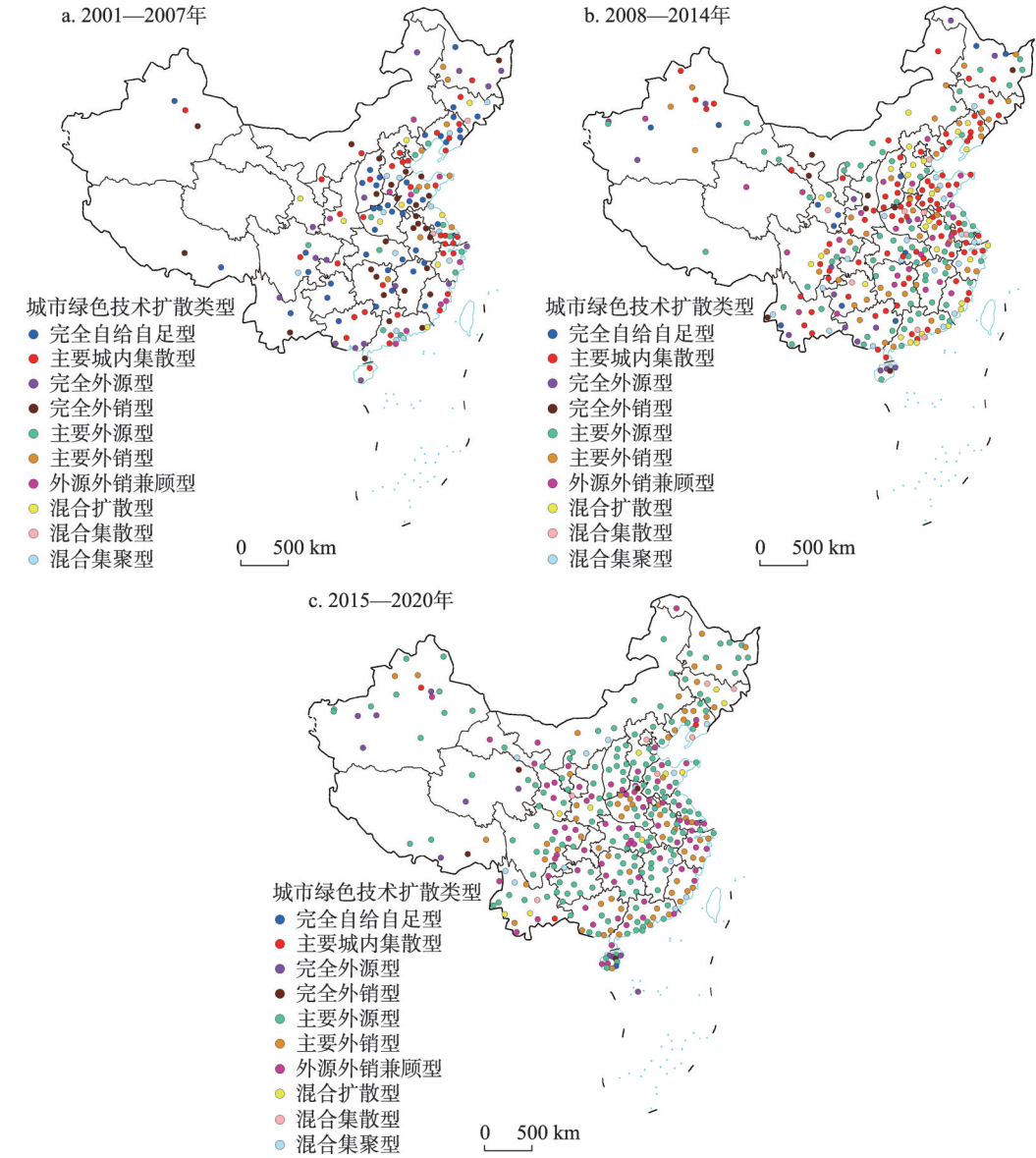
性,以京津、长三角和珠三角为节点的城际绿色技术转移“三角”结构初步形成。在2378对城际转移关系中,虽也有1111对仅扩散1件绿色专利,但扩散绿色专利超过10件的已达221对(占比为9.3%)。这一阶段,绿色技术在京津、长三角和珠三角地区间以及地区内频繁流动,如深圳向北京扩散134件绿色专利位居第一位,北京向深圳扩散110件绿色专利位居第2位,北京向上海扩散106件绿色专利位居第3位,上海向北京扩散103件绿色专利位居第4位。2015—2020年中国绿色技术城际扩散网络的有序性和集聚性继续发育,以京津、长三角和珠三角为节点的城际绿色技术扩散“三角”结构稳定形成,并在此基础上发育出以成渝地区为节点的“菱形”结构。在11460对城际扩散关系中,扩散绿色专利超过10件的关系对达到1319对,占比升至11.5%。其中,深圳向东莞扩散

696 件绿色专利，北京和广州皆向杭州扩散 435 件专利，深圳向广州扩散 340 件专利，北京向上海扩散 340 件绿色专利。

4.3 城市类型：由自给自足向开放创新发展，全国统一的绿色技术交易大市场正在逐渐形成

根据城市绿色技术扩散类型划分体系，对 2001—2020 年融入中国城市绿色技术扩散网络中的城市类型进行了 3 个阶段的识别（图 3）。

（1）绿色技术转移量较大的城市逐渐由“城内集散型”向“城际集散型”，特别是向“外销型”转型，这表明绿色技术创新“先行者”城市在满足自身需求的基础上，逐渐打



注：基于自然资源部标准地图服务系统审图号为GS(2016)1554号标准地图制作，底图边界无修改。

图3 2001—2020年3个阶段中国城市绿色技术扩散类型演化

Fig 3. The evolution of city green technology diffusion types in China in three stages from 2001 to 2020

开“城门”,开展绿色技术的对外服务。2001—2007年绿色技术转移量(城内转移与城际转移之和)排名前10的城市中有7个城市的类型为“主要城内集散型”,如北京(518件,第1)、上海(207件,第3)、咸阳(127件,第4)、杭州(109件,第5)等;2008—2014年,绿色技术转移量排名前10的城市中依然有7个城市的类型为“主要城内集散型”,如北京(6838件,第1)、上海(3823件,第2)、杭州(1356件,第4)、南京(1190件,第6)等;2015—2020年绿色技术转移量排名前10的城市中,除北京属于“混合集散型”外(14809件,第1),其余9个城市全部为“城际集散型”,且其中更是有8个城市为“外销型”,如深圳(14809件,第2,主要外销型)、广州(10142件,第3,外源外销兼顾型)、上海(9973件,第4,外源外销兼顾型)、苏州(7046件,第5,外源外销兼顾型)等。

(2)也正是因为上述这些“先行者”城市逐渐扩大的城际绿色技术扩散活动,才使得更多的城市能够通过城际集聚来获取绿色技术,以及加入到中国绿色技术扩散网络中。2001—2007年,有177个城市通过城内集散或城际集散融入中国绿色技术扩散网络中,而到2008—2014年,融入中国绿色技术扩散网络中的城市数量增加至319个,相较于前一阶段(2001—2007年),新增143个城市,其中有57个城市是完全(15个城市为“完全外源型”)或者主要(42个城市为“主要外源型”)通过城际技术集聚来加入至绿色技术扩散网络中,还有15个城市则部分通过(为“外源外销兼顾型”)城市技术集聚来加入至绿色技术扩散网络中。2015—2020年,中国绿色技术扩散网络中城市数量增至353个,相较于前一阶段(2008—2014年)新增34个城市,其中16个城市是完全(6个城市为“完全外源型”)或者主要(10个城市为“主要外源型”)通过城际技术集聚加入至绿色技术扩散网络中,还有3个城市则部分通过(为“外源外销兼顾型”)城市技术集聚来加入至绿色技术扩散网络中。

(3)愈发频繁的绿色技术跨城流动促使全国统一的绿色技术交易大市场正在逐渐形成。2001—2007年中国绿色技术扩散网络中177个城市中有77个属于“城内集散型”,占比达43.5%。其中更是有40个城市属于“完全自给自足型”,在网络中属于孤立的节点,与其他城市不产生任何联系。2008—2014年,虽然中国绿色技术扩散网络中“城内集散型”的城市数量增至99个,但占比下降至31.0%,其中孤立节点——“完全自给自足型”城市数量减少至12个。至2015—2020年,中国绿色技术扩散网络中“城内集散型”的城市数量锐减至4个,仅占整体的1.1%,其中“完全自给自足型”城市仅有1个(海南省万宁市)。也就是说,353个城市构成的中国绿色技术扩散网络中有349个城市通过强城际绿色技术转移关系架构了全国绿色技术交易市场体系,同时随着核心城市(深圳、北京、广州和上海)的对外辐射能力增强,这一绿色市场交易体系逐渐由区域性向全国统一性演化。如2015—2020年,由深圳、北京、广州和上海4个城市架构的城际绿色技术转移关系对就达到1624对,占比达17.2%,覆盖除万宁市以外融入中国绿色城际扩散网络中的所有城市。这4个城市参与的城际绿色技术转移量达28054件,占这一阶段城际转移量的43.0%。

## 5 中国城际绿色技术扩散的驱动因素

### 5.1 偏好性:新加入城市倾向于从网络中枢城市获取绿色技术

复杂网络或社会网络生长机理中的偏好连接法则从动态视角揭示了现实生活中大部分真实网络生长过程中遵循的一般规律,即网络中新加入的节点总是先寻求与现有网络



中的枢纽节点建立联系。偏好连接法则既揭示了网络中新成员如何能够快速“站稳脚跟”并得以发展的“生存法则”，也揭示了网络中已有核心成员如何快速地开辟新市场和扩大其腹地范围从而巩固其枢纽地位的“垄断法则”。从创新扩散理论的视角，偏好连接法则还印证了技术差距论的存在价值，即“距离产生美”。上文已经分析了后两个阶段相较于前一阶段新加入中国绿色技术扩散网络中城市的类型特征，揭示了新加入的城市中有50%左右是通过城际技术集聚来补充本城的绿色技术供给，那么这些绿色技术是来源于网络中的已有城市节点，还是来源于新加入的其他城市，是来源于网络中的枢纽城市，还是来源于网络中与其地位相同的城市？这些问题的答案正是偏好连接法则验证所得的结果。通过分析2008—2014年相对于2001—2007年新加入的城市特征以及2015—2020年相对于2008—2014年新加入的城市特征发现，偏好连接现象在中国绿色技术扩散体系（网络）中同样存在。在2001—2007年中国绿色技术扩散体系中，北京、深圳和上海无疑是网络的枢纽。2008—2014年中国绿色技术扩散体系中新加入的143个城市中，仅8个城市为“完全自给自足型”，其余135个城市皆与其他城市进行绿色技术转移活动，共转移了1841件绿色专利，其中有543件绿色专利的转移活动有北京、上海和深圳这3个城市参与，占比达29.5%。在2008—2014年中国绿色技术扩散体系中，北京、深圳和上海同样是网络的枢纽。2015—2020年中国绿色技术扩散体系中新加入的34个城市中，仅2个城市为“完全自给自足型”，其余32个城市皆与其他城市进行绿色技术转移活动，共转移了479件绿色专利，其中有155件绿色专利的转移活动有北京、上海和深圳这3个城市参与，占比升至32.4%。

## 5.2 同配性：网络中枢纽城市间的绿色技术流动更加频繁

相较于偏好连接从动态的视角阐释网络的生长过程，度相关性则从相对静态的视角解构网络的架构骨架。同样地，在大量现实生活的真实网络（如互联网、科学家合作网络）中，强劲的程度相关性特征被普遍发现，即网络中的枢纽节点总是倾向于与其他枢纽节点相连，当然也存在异配性。网络科学将具有正相关特性的网络称之为同配网络，负相关特性的网络称之为异配网络，而不显著（即随机性）的网络称之为中性网络。通过分析3个阶段中国城际绿色技术扩散网络的加权度相关性特征（中国绿色技术扩散网络是典型的加权有向网络，故而分析其加权度相关性特征），中国城际绿色技术扩散网络也遵循度相关性规律，呈现出同配网络的特性，即绿色技术流动更加活跃于枢纽节点之间。在前两个阶段的中国城际绿色技术扩散网络中，网络中最大的技术流动始终发生在北京和深圳这两个城市间，而这两个城市的加权度值（即绿色技术转移量）皆为前两个阶段最大的两个城市。在2001—2007年250对城际绿色技术扩散关系中，扩散量前30对（占整体46.2%）中有20对（占整体40.1%）发生于加权度值前10的城市之间。在2008—2014年2378对城际绿色技术扩散关系中，扩散量前30对（占整体18.8%）中有23对（占整体16.9%）发生于加权度值前10的城市之间。虽然在2015—2020年的城际绿色技术扩散网络中，网络中最大的技术流动，甚至是扩散量前8对中并没有一对发生在加权度值最大的两个城市，即北京和深圳之间，但扩散量前30对（占整体12.6%）中有29对（占整体12.4%）发生于加权度值前10的城市之间。

## 5.3 城际绿色技术扩散的驱动因素分析

鉴于城际绿色技术扩散为非负整数，且被解释变量的方差明显大于期望。因此，本文采用负二项式回归方法来分析中国城际绿色技术扩散的驱动因素。模型检验发现，Alpha的置信区间在5%的显著性水平上拒绝“过度分散”参数“Alpha=0”的原假设，即

本文使用负二项回归方法正确,模型的回归结果如表2所示,基本佐证了本文在理论框架建构中的推论。

① 城市绿色专利申请量是影响城际绿色技术扩散网络生长的重要影响因素,且影响程度呈持续强化趋势。城市间绿色技术扩散规模与各自的绿色专利申请规模成正比,即申请的绿色专利越多,两城之间存在绿色技术扩散的可能性及扩散量越大,表明城际绿色技术扩散存在显著的强强联合、合作共赢特征,这也与上文发现的“同配性”特征相互佐证。② 城市间绿色技术专利申请量的差距越大,城市间绿色技术扩散规模也就越大,这不仅证实了本文在理论框架建构部分的技术差距理论的推论一致,也与已有关于城市一般技术扩散研究的结论相一致<sup>[6]</sup>。③ 城市间的地理距离对城际绿色技术扩散的阻抗作用愈发凸显,即城市之间的地理距离与城际绿色技术扩散的数量呈显著的负相关。在地理距离约束这一点,城内绿色专利转移的活跃就已经表征城市边界和地理距离在绿色技术扩散中扮演中重要的作用。实际上,2001—2020年,虽然中国城际绿色技术扩散的平均距离不断增长,由2001—2007年的805.60 km增长至2015—2020年的927.03 km,但高于这一平均距离的城际绿色技术扩散量所占比则逐渐降低,由50.1%下降至41.8%。

由于本文采用的是城市GDP比值(高/低)和环境规制比值(高/低)来分别衡量城市经济邻近性和城市制度邻近性,因而这两个指标实则为负向指标。2001—2020年城市经济邻近性对城际绿色技术扩散的影响系数为负,这意味着城市经济邻近性对城际绿色技术扩散的影响显著为正,且影响程度呈持续强化趋势,突显出中国城市绿色技术流动越来越多的发生在经济发展水平相近的城市之间,城市间的经济发展水平越接近,相应的绿色技术需求越一致,越能促进绿色技术扩散规模,这一研究发现与已有城际技术流动网络的驱动因素研究一致<sup>[12]</sup>。然而,城市制度邻近性的影响系数在2001—2007年为正,在2008—2014年和2015—2020年为负,这表明城市制度邻近性对城际绿色技术扩散的作用机制呈现出由负转正的发展过程。这一变化态势在城市认知邻近性上同样得到验证。2001—2007年城市制度邻近性系数为正,城市认知邻近性的系数为负,表现出城市间环境规制强度差异越大或技术关联性越小,则城市间绿色技术扩散规模越大。在环境规制层面似乎印证了本文上述假设,但在技术关联性层面则与本文上述假设相悖,究其原因可能是2001—2007年中国绿色技术城际扩散体系尚处于初始阶段,且城市绿色技术创新活动也高度集聚于少数城市,城市间的绿色技术创新技术领域差异较大。2008—2014年和2015—2020年城市制度邻近性系数为负,而认知邻近性的系数为正,且正向影响作用显著增强,呈现出城市间环境规制强度差异越小或技术关联性越大,则城市间绿色技术扩散规模越大。在技术关联性层面似乎印证了本文上述假设,但在环境规制层面又发展为与本文上述假设相悖。这一结果也可以理解,随着城市绿色技术创新的发展以及城市经济发展水平的提升,尤其是城市工业化的不断发展,大多数城市已具备一定的绿色技术产出和转化能力,愈发强化的环境规制强度不仅能促使绿色技术供给过剩的城

表2 城际绿色技术扩散驱动因素的负二项回归模型估计结果

Tab. 2 Influencing factors of intercity green technology diffusion: Estimation results of negative binomial models

变量	2001—2007年	2008—2014年	2015—2020年
<i>Gre_Pat_Apli<sub>i,t</sub></i>	0.021*	0.036**	0.048***
<i>Gre_Pat_Apli<sub>j,t</sub></i>	0.015*	0.023**	0.037***
<i>Tech_Gap<sub>i,t</sub></i>	0.023**	0.041**	0.052**
<i>Geo_Prox<sub>i,t</sub></i>	-0.002*	-0.003**	-0.015***
<i>Eco_Prox<sub>i,t</sub></i>	-0.231*	-0.324**	-3.568***
<i>Inst_Prox<sub>i,t</sub></i>	0.421*	-0.714**	-1.124***
<i>Cog_Prox<sub>i,t</sub></i>	-0.824*	6.321**	7.214***
常数	2.314	-1.245	-3.541
样本量	250	2378	11460

注: \*, \*\*, \*\*\*分别表示10%、5%和1%的水平显著。

市向外扩散技术,也激发绿色技术供给不足的城市不断从外部寻求技术,进而呈现出城市环境规制强度越相似,城市间绿色技术扩散规模越大的现象。

## 6 结论与讨论

### 6.1 结论

促进绿色技术自由流动是构建以市场为导向的绿色技术创新体系的核心内涵,也是新时期中国推动绿色发展、促进人与自然和谐共生,从而实现中国经济高质量发展和提升国家创新体系整体效能的关键。以绿色专利转让刻画绿色技术扩散,本文从城内和城际两个视角探讨了2001—2020年中国绿色技术扩散活动的时空特征及其驱动因素,得出以下结论:

(1) 随着中国环境保护和污染治理模式由末端治理转向全过程控制,2001—2020年中国绿色技术交易市场中的热门技术由环境治理技术快速转变为绿色建筑技术和清洁能源技术,企业不仅是中国绿色技术的主要出让者,也是集成吸纳者,广泛吸收来自大学和科研机构、个体出让的绿色技术。环境治理技术转移量的下降、绿色建筑技术和清洁能源技术转移量的上升,也从侧面说明了作为中国绿色技术扩散的行为主体,企业的绿色技术创新的战略导向也从“成本控制”转向了“效益追求”。环境治理技术的开发大大增加了企业的生产成本,而绿色建筑技术和清洁能源技术却能够让企业快速地得到因政府环境规制和消费者绿色产品偏好带来的“收益”。

(2) 中国城内绿色技术流动活动高度集聚在以京津、长三角和珠三角为增长极的东部沿海地区,以及以长三角、长江中游和成渝城市群为核心枢纽的长江经济带。城际绿色技术扩散网络呈现出由随机分散格局经三角格局向菱形格局演化,京津、长三角、珠三角和成渝地区成长为中国城际绿色技术扩散网络的枢纽。随着市场经济体制改革的持续深入和开放创新的迫切需求,中国绿色技术的空间流动受到城市行政边界的约束作用开始减弱,绿色技术跨城流动成为新常态。中国城市在绿色技术扩散网络中的角色逐渐由自给自足式的城内集散型向开放创新式的城际集散型发展,尤其是绿色技术转移量较大的城市逐渐由“城内集散型”向“城际集散型”转型,越来越多的城市,特别是新加入绿色技术扩散网络的城市主要通过城际技术集聚来补充本城的绿色技术供给,因而在愈发频繁的绿色技术跨城流动下,全国统一的绿色技术交易大市场正在逐渐形成。

(3) 在城际绿色技术扩散的形成机制上,复杂网络生长机理中的偏好连接法则和同配性法则分别从动态视角和静态视角揭示了中国城际绿色技术扩散体系生长过程中遵循的一般规律,即中国城际绿色技术扩散网络中,新加入城市倾向于从网络中枢纽城市获取绿色技术,且枢纽城市间的绿色技术流动更加频繁。多维邻近性分析框架下的模型回归结果也验证了上述规律,即中国城际绿色技术扩散存在显著的强强联合、合作共赢特征,并呈现出强劲的“技术差距”链接机制。此外,城市间地理邻近性、经济邻近性也对城际绿色技术扩散起着显著的正向促进作用,而制度邻近性和认知邻近性对城际绿色技术扩散的作用机制皆呈现出由负转正的发展过程。

(4) 挖掘绿色技术扩散的空间特征及分析城际绿色技术扩散的驱动因素,是探索构建以市场为导向的绿色技术创新体系和建构全国统一绿色技术交易大市场的基础研究工作。基于上述实证研究发现,为建构全国绿色技术转移转化市场交易体系提出以下几点对策:① 鉴于城内绿色技术流动仍占较大比重,应继续打破各级行政壁垒,加速绿色技



术的跨省、跨区域和跨城流动;② 强化绿色技术转移转化交易体系中企业的主体地位,通过设立绿色技术转移转化示范试点企业,来加强主体间的绿色技术流动;③ 以北京、上海、深圳、武汉、成都(重庆)等为枢纽城市,建立国家级绿色技术银行或绿色技术转移转化中心,并依托长三角、粤港澳、京津冀等区域,建立绿色技术转移转化综合示范区,借助区域一体化国家战略强化区域内部的绿色技术流动。

## 6.2 讨论

以绿色专利转让衡量绿色技术扩散,将企业尺度的绿色技术扩散拓展至城市尺度,本文在建构城市绿色技术扩散研究分析框架的基础上,对中国绿色技术扩散的热门技术、行为主体和城市类型等进行了详细的研究,不仅将当前创新地理学中一般技术扩散(无技术领域之分)的研究细化至绿色技术领域,还将当前环境经济地理学集中于城市绿色发展差异研究拓展至城市绿色发展空间联系研究,有益地丰富了创新和环境经济地理的研究内容。但无论是在绿色技术扩散的衡量指标上,还是在城市尺度绿色技术扩散抽象过程中,都无法忽视片面化导致本文存在诸多尚待改进的地方:

(1) 以绿色专利转让衡量绿色技术扩散虽是国际惯例,但仅仅涉及绿色技术扩散规模这一维度,绿色专利转让实际包含诸多信息,如转让价格表征的绿色技术质量,转让时间表征的绿色技术扩散速度等<sup>[31]</sup>,这些维度本文并没有涉及。同时,绿色技术扩散的形式和途径多种多样,除绿色专利转让外,如何进行其他扩散形式相关数据的获取从而进行多途径下的绿色技术扩散综合研究以及多途径的绿色技术扩散比较研究是下一步需要攻克的方向。

(2) 本文虽然通过绿色技术领域分类识别了2001—2020年间中国绿色技术交易市场上的热门技术,但并未分析每一类绿色技术扩散的详细特征。实际上,无论是从绿色技术创新的视角还是从绿色技术扩散的视角,技术领域不同,其创新主体、空间分布和时序发展特征差异显著。同时,中国绿色技术扩散体系的建构也应当充分考虑技术领域不同带来的差异性。因此,不同技术领域、甚至不同行业领域的绿色技术扩散比较研究是未来需要研究的问题。

(3) 本文虽然解析了中国绿色技术扩散活动中的行为主体特征,并印证了绿色技术创新体系中的企业主体地位,但并未深入分析不同规模、不同性质、甚至不同行业的企业在中国绿色技术扩散活动中的差异,即企业异质性问题并未纳入本文的分析框架。实际上,在企业绿色技术扩散中,企业异质性一直是一个重要的分析维度<sup>[28-30]</sup>,因而企业异质性与绿色技术扩散的空间差异、空间关联、空间溢出等问题也将是下一步需要研究的问题。

## 参考文献(References)

- [1] Brant J. Green technology diffusion: Insights from industry. WIPO Magazine, 2014, 1: 6-11.
- [2] Glachant M. Greening Global Value Chains: Innovation and the International Diffusion of Technologies and Knowledge. OECD Green Growth Papers, No.2013/05. Paris: OECD Publishing.
- [3] Hall B H, Helmers C. Innovation and diffusion of clean/green technology: Can patent commons help? Journal of Environmental Economics and Management, 2013, 66(1): 33-51.
- [4] Contreras J L, Hall B H, Helmers C. Green technology diffusion: A post-mortem analysis of the Eco-Patent Commons. NBER Working Paper 25271, 2018. DOI: 10.3386/w25271.
- [5] 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.]

- [6] 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.]
- [7] 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*, 2022. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2026. [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*, 2022. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2026.]
- [8] Cai Liru, Wu Xinhui, Du Zhiwei. The spatio-temporal pattern of environmentally- friendly agricultural technology diffusion and its influencing factors: From the social network perspective. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 63-78. [蔡丽茹, 吴昕晖, 杜志威. 环境友好型农业技术扩散的时空演化与影响因素: 基于社会网络视角. *地理研究*, 2022, 41(1): 63-78.]
- [9] Kong D, Feng Q, Zhou Y, et al. Local implementation for green-manufacturing technology diffusion policy in China: From the user firms' perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 129: 113-124.
- [10] Zhao Peipei, Yan Beibei, Liu Tianjun. Inverted U-shaped relationship between socio-economic status differences and the diffusion of agricultural green control technologies: Mediating effect of social learning. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(8): 18-25. [赵佩佩, 闫贝贝, 刘天军. 社会经济地位差异与农业绿色防控技术扩散倒U型关系: 社会学习的中介效应. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(8): 18-25.]
- [11] Liu P, Zhou Y, Zhou D K, et al. Energy performance contract models for the diffusion of green- manufacturing technologies in China: A stakeholder analysis from SMEs' perspective. *Energy Policy*. 2017, 106: 59-67.
- [12] Clayton P, Lanahan L, Nelson A. Dissecting diffusion: Tracing the plurality of factors that shape knowledge diffusion. *Research Policy*, 2022, 51(1): 104389. DOI: 10.1016/j.respol.2021.104389.
- [13] Feng Zhonglei, Wang Bobo, Xie Xiongbiao, et al. Research on the diffusion network of green technology in the context of professional virtual community. *Science and Technology Management Research*, 2018, 38(18): 256-260. [冯忠垒, 王波波, 谢雄标, 等. 专业虚拟社区情境下的绿色技术扩散网络研究. *科技管理研究*, 2018, 38(18): 256-260.]
- [14] Losacker S. 'License to green': Regional patent licensing networks and green technology diffusion in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 175: 121336. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121336.
- [15] Yang Guozhong, Guo Qin. Research on the influencing factors of green technology innovation diffusion based on multi-agent model. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2017, 36(8): 43-50. [杨国忠, 龔琴. 基于多智能体模型的绿色技术创新扩散影响因素研究. *工业技术经济*, 2017, 36(8): 43-50.]
- [16] Hötte K. How to accelerate green technology diffusion? Directed technological change in the presence of coevolving absorptive capacity. *Energy Economics*, 2020, 85: 104565. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104565.
- [17] Stucki T, Woerter M. Intra-firm diffusion of green energy technologies and the choice of policy instruments. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131: 545-560.
- [18] Bergek A. Diffusion intermediaries: A taxonomy based on renewable electricity technology in Sweden. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2020, 36: 378-392.
- [19] Peng Yayuan, Ma Zhongfa. Green technology transfer under the global environment facility: Approaches and implication. *International Business Research*, 2022, 13(1): 83-97. [彭亚媛, 马忠法. 全球环境基金促进绿色技术转移的路径及启示. *国际商务研究*, 2022, 13(1): 83-97.]
- [20] Liu Peng, Zhou Kedi, Yan Jianlin, et al. Promoting green manufacturing technology diffusion using an innovative policy implementation method. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(4): 101-108. [刘朋, 周可迪, 延建林, 等. 促进绿色制造技术扩散的政策模式创新研究. *中国工程科学*, 2016, 18(4): 101-108.]
- [21] WIPO. Green technology diffusion: The case of GIVEWATTS green lanterns. *WIPO Green Case Studies*, 2014.
- [22] WIPO. Green technology diffusion: The case of Arivi paraffin cookstoves. *WIPO Green Case Studies*, 2014.
- [23] WIPO. Green technology diffusion: The case of Ecosan waterless toilets. *WIPO Green Case Studies*, 2014.
- [24] Duan Dezhong, Du Debin, Chen Ying, et al. Technology transfer in China's city system: Process, pattern and influencing factor. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 738-754. [段德忠, 杜德斌, 湛颖, 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.]
- [25] Ma Haitao. The theoretical construction and network simulation of intercity innovative relationships in knowledge flow space. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 708-721. [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.]
- [26] Wang Jiaoc, Du Fangye, Liu Weidong. Embedded technology transfer from an institutional and cultural perspective: A

- case study of Mombasa-Nairobi standard gauge railway. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1147-1158. [王姣娥, 杜方叶, 刘卫东. 制度与文化对嵌入式技术海外转移的影响: 以蒙内铁路为例. *地理学报*, 2020, 75(6): 1147-1158.]
- [27] Wang Chengjin, Xie Yongshun, Chen Peiran, et al. Institutional-economic-cultural adaptability of overseas railway construction: A case study of Addis Ababa-Djibouti Railway. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1170-1184. [王成金, 谢永顺, 陈沛然, 等. 铁路技术跨越式转移的制度—经济—文化适应性: 基于亚吉铁路的实证分析. *地理学报*, 2020, 75(6): 1170-1184.]
- [28] Duan Dezhong, Xia Qifan. Does environmental regulation promote environmental innovation? An empirical study of cities in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(1): 139. DOI: 10.3390/ijerph19010139.
- [29] Sun Yanming, Shen Simiao. The spatio-temporal evolutionary pattern and driving forces mechanism of green technology innovation efficiency in the Yangtze River Delta region. *Geographical Research*, 2021, 40(10): 2743-2759. [孙燕铭, 湛思邈. 长三角区域绿色技术创新效率的时空演化格局及驱动因素. *地理研究*, 2021, 40(10): 2743-2759.]
- [30] 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.]
- [31] Duan D Z, Jin H. Environmental regulation and green technology diffusion: A case study of Yangtze River Delta, China. *Land*, 2022, 11(11): 1923. DOI: 10.3390/land11111923.
- [32] Duan Dezhong, Du Debin. Green technology innovation in China city system: Dynamics and determinants. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(12): 3125-3145. [段德忠, 杜德斌. 中国城市绿色技术创新的时空分布特征及影响因素. *地理学报*, 2022, 77(12): 3125-3145.]
- [33] Malhotra A, Schmidt T S, Huenteler J. The role of inter-sectoral learning in knowledge development and diffusion: Case studies on three clean energy technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146: 464-487.
- [34] Miguélez E, Moreno R. Knowledge flows and the absorptive capacity of regions. *Research Policy*, 2015, 44(4): 833-848.
- [35] Crescenzi R, Gagliardi L. The innovative performance of firms in heterogeneous environments: The interplay between external knowledge and internal absorptive capacities. *Research Policy*, 2018, 47(4): 782-795.
- [36] Razzaq A, An H, Delpachitra S. Does technology gap increase FDI spillovers on productivity growth? Evidence from Chinese outward FDI in Belt and Road host countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 172: 121050. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121050.
- [37] Hong J, Zhou C, Wu Y, et al. Technology Gap, Reverse technology spillover and domestic innovation performance in outward foreign direct investment: Evidence from China. *China & World Economy*, 2019, 27(2): 1-23. DOI: 10.1111/cwe.12272.
- [38] Marin G, Zanfei A. Does host market regulation induce cross-border environmental innovation? *The World Economy*, 2019, 42(7): 2089-2119.
- [39] Ouyang X, Li Q, Du K. 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.
- [40] Breschi S, Lissoni F, Malerba F. Knowledge-relatedness in firm technological diversification. *Research Policy*, 2003, 32(1): 69-87.
- [41] Boschma R, Balland P A, Kogler D F. Relatedness and technological change in cities: The rise and fall of technological knowledge in US metropolitan areas from 1981 to 2010. *Industrial and Corporate Change*, 2015, 24(1): 223-250.
- [42] Liu Chengliang, Gui Qinchang, Duan Dezhong, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 71(4): 737-752. [刘承良, 桂钦昌, 段德忠, 等. 全球科研论文合作网络的结构异质性及其邻近性机理. *地理学报*, 2017, 71(4): 737-752.]
- [43] Wang Jinnan, Dong Zhanfeng, Jiang Hongqiang, et al. Historical evolution and reform of China's environmental strategy and policy during the past seventy years (1949-2019). *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1636-1644. [王金南, 董战峰, 蒋洪强, 等. 中国环境保护战略政策 70 年历史变迁与改革方向. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1636-1644.]



## Spatiotemporal process and driving factors of green technology diffusion in Chinese cities

DUAN Dezhong, JIN Hong

(Institute for Global Innovation and Development, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Building a market-oriented green technology innovation system to accelerate the diffusion of green technology between regions, cities, and institutions has become a national strategy. Using green patent transfer to characterize the diffusion of green technology, this paper analyzed the temporal development dynamics and spatial distribution pattern of green technology diffusion in China from 2001 to 2020, and also discussed the main factors driving the diffusion of green technologies in Chinese cities. The study found that from 2001 to 2020, the popular technologies in China's green technology market rapidly changed from environmental governance technology to green building technology and clean energy technology, while enterprises were always the main actors of green technology diffusion. Secondly, from 2001 to 2020, with the cross-city flow of green technology becoming the new normal, a unified national green technology trading market was gradually taking shape. Thirdly, green technology diffusion activities were highly concentrated in the "T" region composed of the eastern coastal areas and the Yangtze River Economic Belt, in which the intercity green technology diffusion formed a diamond network with the Beijing-Tianjin, Yangtze River Delta, Pearl River Delta and Chengdu-Chongqing regions as the hubs. Fourthly, following the principle of preference connection and the law of assortativity, new cities in the intercity green technology diffusion network tended to obtain green technology from hub cities, but the flow of green technology between hub cities was more frequent. Fifthly, the regression results of the model under the multi-dimensional proximity analysis framework also verified the above laws, and revealed the differences in the formation mechanism of intercity green technology diffusion caused by technology gap, geographical proximity, economic proximity and cognitive proximity among cities.

**Keywords:** green patents; green technology diffusion; spatiotemporal pattern; city types; driving factors; China