

# 经济集聚的节能减排效应： 理论与中国经验<sup>\*</sup>

□邵 帅 张 可 豆建民

**摘要：**经济集聚和节能减排分别作为中国经济转型发展的重要推力和目标函数，两类政策能否达到“珠联璧合”的实施效果，是决定未来中国绿色转型发展能否顺利实现的关键。本文试图从理论和经验两个层面，就中国城市群崛起和区域协调发展背景下的经济集聚现象对节能和减排两个维度的影响机制进行系统考察。本文将能源消费和碳排放分别作为投入要素和非期望产出纳入传统的产出密度模型，就经济集聚和能源强度对碳排放强度的非线性影响机制进行规范阐释，进而利用由1995~2016年中国30个省级地区数据所构成的动态空间面板杜宾模型，并结合中介效应模型，对提出的理论假说进行实证检验。研究发现：经济集聚与碳排放强度及人均碳排放之间均存在典型的“倒N”型曲线关系，而能源强度与碳排放强度及人均碳排放之间存在典型的“倒U”型曲线关系；当经济集聚水平达到一定阈值后，其可能同时表现出节能和减排的“双重”效应；能源强度可以成为经济集聚影响碳排放的中介变量，即经济集聚可以通过其各种正外部性对碳排放产生直接影响，同时还会通过能源强度对碳排放产生间接影响；碳排放和能源强度在时间维度上表现出显著的“滚雪球”效应，在空间维度上则具有明显的策略性竞争效应。本文据此提出，中国在大力发展城市群经济的过程中，需要有效发挥经济集聚对节能减排的积极作用，促进经济集聚与节能减排政策的相互协调，同时还要推动地区间形成节能减排政策的协同联动机制。

**关键词：**经济集聚 节能减排 碳排放 空间杜宾模型 “倒N”型曲线

DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2019.0005

## 一、引言

中国经济已步入“新常态”阶段，经济发展正逐渐由追求增长速度的粗放式模式向追求结构调整和环境效率的内涵式模式转变，而经济集聚和节能减排无疑已成为中国经济绿色转型发展过程中的两大“主旋律”。一方面，新型城镇化和“两带一路”<sup>①</sup>等区域发展战略的实施，实质上均是预期通过发挥集聚经济所具有的各种正外部性（如共享、匹配、学习及各类溢出效应）促使经济发展的效率和质量得以提升；另一方面，作为世界一次能源消费和碳排放的第一大国，中国的节能减排压力之大是不言而喻的。处于转型时期的中国经济正面临着能源消耗、二氧化碳排放与经济增长效率之间的权衡与协调，而节能减排已经成为我国新时期经济可持续发展的战略需要。继我国在“十一五”规划中首次提出约束性节能指标后，2009年又首次提出2020年单位GDP碳排放较2005年下降40%~45%的控制温室气体排放行动目标。我国的“十二五”、“十三五”规划也相继提出了约束性的能源强度和碳排放强度控制目标。2014年底，中国在《中美气候变化联合声明》中首次提出，在2030年左右使二氧化碳

<sup>\*</sup>本文得到国家自然科学基金项目(71373153、71773075、71773115)、国家社会科学基金重大项目(18ZDA051、17AZD009)及青年项目(17CJL018)、上海市“科技创新行动计划”软科学研究重点项目(18692105600)、上海市人才发展资金资助项目、华东政法大学科学研究项目(17HZK031)及华东政法大学高峰高原骨干学者资助计划项目的资助。本文在第二届能源与环境经济学研讨会、第六届能源经济与管理学术年会、第三届香樟经济学论坛、中南财经政法大学文澜公共经济青年学者论坛等学术会议上报告过，作者一并感谢与会者提出的宝贵意见和建议。张可为本文通讯作者。

排放达到峰值且将努力早日达峰的承诺。节能减排目标的提出既为中国未来的经济发展提出了挑战,同时也成为中国经济绿色转型的重要机遇和杠杆。

值得注意的是,经济集聚和节能减排分别作为中国经济转型发展的重要推力和目标函数,二者之间可能存在着不容忽视的内在联系。中国城市群经济的兴起,以及长江经济带、丝绸之路经济带、21世纪海上丝绸之路等区域发展战略的提出和实施,可能通过经济要素的再配置而产生相应的集聚效应,进而对节能减排表现出双重影响。一方面,作为一种紧凑型的空间经济行为,集聚过程伴随着各种正外部性,有利于推动技术进步并提高要素利用效率,从而表现出对节能减排的积极作用;另一方面,经济集聚又可能通过扩大区域生产规模和要素投入数量,加速能源消耗和相应的碳排放,从而对节能减排目标的实现产生不利影响。因此,中国区域经济发展过程中所必然经历的经济集聚现象,对节能减排这一当今世界经济发展所提出的时代要求而言,究竟是顺势而为,还是背道而驰,即经济集聚对节能减排可能表现出怎样的影响方向和作用机制,这是一个非常值得探究的现实问题。

显然,无论就宏观层面的经济结构调整、可持续增长和绿色转型发展而言,还是从微观层面的提高居民福利、改善生活质量的角度来看,提高能源利用效率、改善生态环境、削减温室气体排放均是中国经济新常态阶段所面临的新要求和新挑战。从上述“两带一路”等国家区域发展战略来看,未来一段时期中国经济将进一步强化“以点带面、从线到片”的区域集聚特征。同时,工业化和城镇化的持续推进也必然使我国的能源和环境压力与日俱增。在这一背景下,我们所期望的经济发展理想状态是:在追求经济活动空间集聚的正外部性收益最大化的同时,也能够实现能源消耗和污染(碳)排放的最小化,即达到经济发展与节能减排的“双赢”状态。

传统的集聚经济理论认为,集聚具有各种溢出效应和规模经济效应,要素的空间集中有利于节约各种成本并提高要素的使用效率,在将能源和环境视为生产投入要素的条件下,集聚过程理应有助于提高能源和环境要素的利用效率。正如Glaser(2011)所指出的:“集聚程度高的城市相对经济密度低的乡村更加节能和环保”。Zeng和Zhao(2009)也认为,集聚在一定的条件下存在“国内市场效应”,从而在一定程度上能够缓解“污染避难所”效应。那么,经济活动的集中在我国是否也如理论预期的那样,能够表现出节能和减排的“双重”效应呢?如果经济活动的集中表现出对节能减排的综合积极影响,那么就说明当前我国大力推进的新型城镇化、城市群经济、“两带一路”等城市和区域发展战略,与所提出的节能减排目标及其实施政策之间是不谋而合的;反之,则说明存在着两大发展战略及其实施政策之间的背离与“摩擦”,这种“只见树木,不见森林”的政策“组合”显然会产生无谓的政策实施摩擦成本耗损,不利于我国经济整体绿色转型发展的推进。

从我国的现实情况来看,城市群经济的兴起已经成为我国区域发展战略实施和城镇化加速推进过程中所催生出的经济集聚效应的基本表现。长三角、珠三角、京津冀三大城市群将中国最优质的资本、人力、教育、科技、医疗、文化等资源吸纳其中,是中国经济规模最大和经济密度最高的区域,但同时也成为中国能源消费规模最大和环境污染问题最突出的地区<sup>②</sup>。2014年“中国城市百人论坛”上多名院士和城市经济学者指出,中国的城市群已经成为“污染群”,三大城市群的污染水平明显高于全国平均水平。这也引发本文提出如下疑问:经济活动集聚是导致区域能源消费增加和环境损害加剧的关键根源吗?显然,这需要通过严谨的规范分析和稳健的实证检验才能对此问题提供科学的解答。因此,基于对上述现实问题的思考,本文将从理论和实证两个层面,对经济集聚的节能减排效应进行系统考察。

具体而言,本文的边际贡献主要体现在以下3个方面:首先,本文对Ushifusa和Tomohara(2013)的产出密度模型进行了扩展,将能源和碳排放要素纳入其中,首次就经济集聚及能源强度在不同阈值条件下,对碳排放强度的影响效果及影响机制进行数理阐释,提出经济集聚与碳排放强度之间存在“倒N”型曲线关系,以及能源强度与碳排放强度之间存在“倒U”型曲线关系的理论假说,首次规范地证明了经济集聚可能表现出节能和减排的双重效应;其次,本文采用1995~2016年中国30个省级地区的面板数据样本,基于中介效应的检验思路,并利用动态空间面板杜宾模型结合Han-Phillips广义矩估计(GMM)方法,对碳排放的时间滞后效应、空间滞后效应及模型的内生性问题同时进行控制,在尽可能稳健的条件下为提出的理论假说提供可靠的经验支持;最

后,不同于以往研究仅采用单一指标的做法,本文从生产和消费两个角度对碳排放指标进行细化度量,分别考察经济集聚对碳排放强度和人均碳排放的影响,获得了更为全面的经验证据。本文旨在通过系统而严谨的理论及经验研究,从空间经济集聚的视角,为我国有效实现节能减排目标、经济绿色转型发展,以及区域空间开发模式选择策略提供重要的决策参考。

本文余下部分的结构安排如下:第二部分提供相关领域的文献评述;第三部分构建理论模型,对经济集聚的节能减排效应进行了规范分析;第四部分为实证策略和数据样本说明;第五部分对实证检验结果进行讨论分析;最后是结论及政策含义。

## 二、文献回顾

### (一)经济集聚对环境污染的影响

从现有文献的结论来看,如同硬币的两面,经济集聚对环境污染通常具有双重效应。一方面,经济集聚对产出具有规模效应,即伴随着经济活动的集中,产出规模的扩张会引起单位空间内污染排放总量的增加而加剧环境污染。这类研究强调了经济集聚对环境所产生的负外部性。Virkanen(1998)的研究表明芬兰南部的工业集聚区是导致大量空气污染和水污染的直接原因。Frank(2001)以欧盟200个城市集聚区为样本研究发现,产业集聚的规模化与大气污染存在着显著的正相关性。Verhoef和Nijkamp(2002)也认为工业集聚是产生环境污染的主要原因。另一方面,经济集聚对环境污染也可能具有积极的改善作用,这种正向效应来源于集聚经济的规模经济效应、成本节约及各类溢出效应。He(2006)、许和连和邓玉萍(2012)均通过中国省域面板数据样本证实了外商直接投资(FDI)的集聚可以改善环境质量。Glaser(2011)认为,作为经济集聚体的城市,相比分散生产和居住的乡村更加环保,集聚可以有效降低通勤距离从而降低污染排放。李勇刚和张鹏(2013)研究认为产业集聚在一定程度上改善了中国的环境质量,且东部地区的产业集聚对环境质量的促进作用大于中西部地区。张可和豆建民(2013)研究表明,东部沿海城市集聚水平相对较高,但环境污染却相对中西部城市更加“节约”,东部沿海地区大城市集聚所产生的环境效率要高于中小城市。陆铭和冯皓(2014)采用地级市人口规模差距刻画了省域内部的空间集聚程度,研究发现人口和经济活动空间集聚度的提高有利于降低单位工业产值的污染排放。

显然,经济集聚对环境污染的影响取决于上述双重效应的综合效果,因此一些实证研究发现二者的关系是不确定或非线性的。如李伟娜等(2010)的实证研究结果显示,中国制造业集聚与大气污染之间呈现“N”型关系;闫逢柱等(2011)运用中国制造业数据样本研究发现,短期内产业集聚发展有利于降低环境污染,但长期来看,产业集聚与环境污染不存在必然的因果关系;沈能(2014)运用空间非线性模型考察发现,中国城市工业集聚与环境效率之间呈现“倒U”型关系;李筱乐(2014)将市场化作为门槛变量考察了中国省域工业集聚与环境污染的关系,发现随着市场化水平的提高,二者呈现“倒U”型关系。最近,杨仁发(2015)、原毅军和谢荣辉(2015)的研究也显示产业集聚与环境污染呈现“倒U”型关系。

就本文重点关注的经济集聚对碳排放的影响研究而言,目前国内外相关文献并不多见。Qin和Wu(2014)采用1998~2005年中国25个省级地区的数据考察了城市经济活动空间结构对碳排放的影响后发现,随着经济活动集中度的提高,碳排放强度呈现出明显的先增后减的趋势,且规模经济、技术进步、所有制结构和产业结构是导致城市集聚度与碳排放呈现非线性关系的主要原因。Newman和Kenworthy(1989)、Kamal-Chaoui和Robert(2009)、Glaser和Kahn(2010)等研究均认为,提高城市经济密度有利于降低碳排放,且两者之间存在非线性关系,经济活动的集中有利于提高能源利用效率。沈能等(2014)在新经济地理学的视角下考察了空间集聚与碳减排的关系后发现,空间集聚外部性是降低碳排放的重要机制,且不同的空间集聚水平和方式对应着不同的碳排放行为。李炫榆等(2015)运用中国省域数据考察了集聚与碳排放之间的空间交互影响后发现,集聚与碳排放之间存在典型的“倒U”型关系,集聚到达一定的程度后对环境具有“自净”功能。



## (二)经济集聚对能源效率的影响

众多研究表明能源效率的提高本质上依赖于技术进步(Lin and Polenske, 1995; Fisher-Vanden et al., 2004; 李廉水、周勇, 2006), 而经济集聚具有典型的技术溢出和知识溢出效应, 大量的企业集聚在一起有利于劳动者之间的知识和技能交流, 从而可以促进劳动生产率的提高(Ciccone and Hall, 1996; 范剑勇, 2006)。此外, 本地化经济可以增进企业间、行业间的技术和知识模仿行为从而提高企业生产率, 而城市化经济则可以促进不同行业间多样化的技术和知识的溢出从而提高社会生产率(Tveteras and Battese, 2006; Yamamura and Shin, 2007)。可见, 经济集聚有助于推动技术进步从而提高能源效率。

相对于分散的生产方式, 集中的生产方式具有规模经济效应、规模报酬递增和冰山成本等特征, 经济集聚可通过共享、匹配、学习等机制有效节约企业的生产成本、促进能源的集中利用, 从而有利于降低能源损失、提高能源利用效率。Kamal-Chaoui 和 Robert (2009)、Glaser 和 Kahn (2010)的研究均表明提高城市经济密度有利于降低能源消费。Glaser (2011)指出, 集聚程度高的城市相对经济密度低的乡村更加节能和环保, 集中的、高密度的生产和居住方式可以有效降低通勤时间, 有利于降低交通成本、促进能源的集中利用, 使得单位面积上的能源消费量相对更低。一些学者对上述观点提供了中国的经验证据。王海宁和陈媛媛(2010)运用中国行业层面数据研究发现, 产业集聚能有效提高能源效率。李思慧(2011)运用微观企业数据的实证分析结果表明, 产业集聚对企业的能源效率具有显著的正向促进作用。Otsuka 等(2014)运用日本的数据研究发现, 生产率促进了能源效率的提高, 而经济集聚是生产率提高的核心动力, 因此经济集聚显著提高了能源效率。同时, 作为经济集聚的特征之一, 本地化经济对能源效率的提升作用在中等规模的城市更加明显。

同时, 也有少数学者认为经济集聚对能源效率并非完全呈现出促进作用, 二者可能存在非线性或更复杂的关系, 原因是经济集聚在不同阶段的外部性不同, 不同外部性对能源效率的影响也存在差异, 且不同阶段的能源需求和效率存在差异。师博和沈坤荣(2013)从企业、产业和区域3个层面考察了集聚对能源效率的影响后发现, 城市集聚程度与能源效率呈现明显的“倒U”形关系, 期初的城市集聚提高了能源效率, 而过度的城市集聚却抑制能源效率的提高。韩峰等(2014)认为, 经济活动的空间集聚并不必然对能源效率产生促进作用, 而是取决于多种力量; 空间集聚外部性对地区能源效率的综合效应为正, 但存在地区差异; 中间投入的空间可得性和空间技术外溢对能源消费的空间溢出具有显著的促进作用, 但空间的劳动力集聚却对地区能源效率产生了抑制作用。

## (三)能源消费对环境污染的影响

环境经济学通常将能源消费视为环境污染的直接根源, 以煤炭为代表的化石燃料燃烧在生产利用过程中会直接产生二氧化碳、二氧化硫等污染物。一些学者研究了能源消费、能源强度与环境质量之间的关系, 证实能源消费是导致环境污染的重要原因(Poon et al., 2006; Chuai et al., 2012; Arouri et al., 2012)。Zhang 等(2013)研究指出, 能源消费是中国经济增长的重要动力, 同时也是环境污染的主要来源。Akhmat 等(2014)证实了南亚区域合作联盟各国的能源消费是导致污染排放增加的重要原因, 但污染排放并非能源消费走高的原因。Zhao 和 Jiang (2013)的研究表明工业经济发展和能源消费是城市热污染(thermal pollution)的主要来源。Mehrara 和 Musai (2011)也证实了能源消费是导致环境质量恶化的主要原因。同时, 也有学者认为, 能源效率的提高对减少环境污染具有重要作用, 原因是技术改进在有效提高能源效率的同时也将降低碳排放(Zhang et al., 2013)。李国璋(2010)研究了能源效率与环境污染之间的关系后发现, 能源效率提高对减少环境污染具有积极影响, 要实现节能减排必须要提高能源效率。

另一些学者研究了能源消费结构对环境污染的影响, 他们认为, 能源消费结构与环境质量密切相关, 煤炭等化石能源消费占比较高会加重环境污染和碳排放。蔡昉等(2008)认为产业结构和能源结构的优化对改善环境质量具有重要作用。林伯强和蒋竺均(2009)通过对数平均迪式指数分解法(LMDI)研究发现, 能够反映能源结构变化对碳排放影响的能源消费碳排放强度对中国人均碳排放增量的贡献在2002年后由负变为正。杨子晖(2011)研究指出, 以煤炭消费为主导的能源消费结构导致了中国经济增长对能源消费的刚性需求, 从

而增加二氧化碳排放。Mudakkar等(2013)的研究表明,核能源、电力能源、化石能源消费所引起的环境损害存在较大差异,且不同行业的能源结构与环境损害间的因果关系也存在差异。马丽梅和张晓(2014)运用静态空间面板回归模型考察了中国省域层面能源结构对雾霾污染的影响,结果显示雾霾污染水平与能源结构和产业结构密切相关,能源结构中煤炭占比每增加1%,雾霾污染会相应提高0.064%。

通过以上综述不难看出,既有文献对经济集聚、能源效率(强度)和环境污染(碳排放)之间的两两关系开展了较为丰富的探讨,但尚未发现将三者纳入同一分析框架而开展的理论和实证研究。从逻辑上看,集聚作为一种紧凑型的空间生产方式,集聚经济的各种正外部性和溢出效应有助于提高能源利用效率并降低污染(碳)排放强度,而能源作为生产过程中的必要投入品或中间产品,又是污染(碳)排放的直接原因,因此将经济集聚、能源强度和碳排放三者纳入同一分析框架显然有利于更加全面地理解经济集聚的节能减排效应的内在机制。此外,现有研究基本均从经验层面关注经济集聚对碳排放的影响,而鲜见将其影响机制借助严格的数理模型予以规范阐释的研究。从实证研究方法来看,现有研究中虽然有部分文献采用了能够考虑碳排放所固有的空间溢出效应的空间计量方法开展分析(程叶青等,2013),但对于碳排放在时间维度上所具有的路径依赖特征(Shao et al., 2011)并未予以足够的关注,对于碳排放与相关因素(如经济增长、FDI)之间可能存在的双向因果关系而导致的潜在内生性问题同样重视不够,从而在很大程度上削弱了研究结果的稳健性和说服力。

针对上述研究的缺陷与不足,本文以产出密度模型框架为基础,首次同时将能源要素和碳排放引入其中,构建了一个能够刻画经济集聚、能源强度与碳排放强度之间关系的理论模型,对经济集聚的节能减排效应进行了理论阐释,进而采用能够同时控制碳排放的时间滞后效应、空间滞后效应和内生性问题的动态空间面板杜宾模型,为得到的理论假说提供稳健的经验证据,从理论和经验两个层面明晰了经济集聚的节能减排效应。

### 三、理论模型

通常认为,经济集聚是指单位空间单元内人类经济活动的密集程度。经济集聚度更高的地区,相同的空间单位内产出规模更大、相同的产出规模所占用的空间更小。经济集聚能够通过地方化经济和城市化经济等形式产生一定的正外部性,即通过共享、匹配和学习等途径而带来各种外溢效应。以Jacobs(1969)、Marshall(1980)、Porter(1990)为代表的一些相关研究,已从劳动力蓄水池、知识溢出和产业比较优势等视角阐明了经济集聚外溢效应的存在。特别地,Ciccone和Hall(1996)进一步从经济密度的视角对集聚的正外部性进行了规范的数理阐释。他们假定每种要素(土地、劳动和资本)的空间分布都是均质的,产出密度(即单位面积的产出)由总产出、生产的空间面积及单位面积的劳动和资本投入所决定,而集聚的外部性则由产出密度所决定。与传统的新古典模型不同的是,Ciccone和Hall(1996)提出的产出密度模型允许存在规模报酬递增,并充分考虑空间因素对产出的影响,从而为刻画空间生产活动提供了基本的理论分析框架。Ushifusa和Tomohara(2013)进一步对该产出密度模型进行如下简化:

$$q_i = Q_i/A_i = \Omega_i \left[ (n_i)^\beta \kappa_i^{1-\beta} \right]^\alpha \left( Q_i/A_i \right)^{(1-\lambda)/\lambda} \quad (1)$$

其中, $Q_i$ 和 $A_i$ 分别为非农产出和地区总面积,因此 $q_i$ 表示第 $i$ 个地区的单位面积非农产出,即产出密度,用以反映经济集聚水平; $\Omega_i$ 为希克斯中性参数; $n_i$ 为就业密度(单位面积的就业人数,即 $N_i/Q_i$ ); $\beta$ ( $0 < \beta < 1$ )表示劳动投入相对于资本投入的单位面积产出贡献率(income share of labor to capital); $\kappa_i$ 为单位面积的资本投入。

容易看出,上式与传统的Cobb-Douglas生产函数的主要不同之处在于,其包含了参数 $\alpha$ 和乘子 $(Q_i/A_i)^{(1-\lambda)/\lambda}$ 。其中 $\alpha$ ( $0 < \alpha \leq 1$ )为资本和劳动两种要素相对于土地的单位面积产出贡献率(income share of the two inputs to land),反映了由要素拥挤所带来的要素边际生产率递减现象, $\alpha$ 越小表示要素生产效率越低(Ushifusa and Tomohara, 2013)。Ciccone和Hall(1996)将这种由单位面积上追加要素投入而引起的生产效率损失定义为拥挤效应(congestion effect)<sup>③</sup>,并给出如下解释:在希克斯中性技术条件下,土地要素相对固定,随着资本和劳动投入的增加,要素投入会偏离资本—土地、劳动—土地的最优配置水平,使得单位土地面积资本和劳动的边际产出水平和要素生产率逐渐下降,从而引起资本和劳动的边际报酬递减。显然, $\alpha=1$ 表示要素边际报酬不变。 $\lambda$ ( $\lambda > 1$ )为产

出密度系数,  $(\lambda-1)/\lambda$  为产出密度弹性, 用于反映集聚效应 (agglomeration effect), 即集聚的外部性。容易看出,  $\lambda$  越大, 产出密度弹性  $(\lambda-1)/\lambda$  也越大, 集聚的正外部性就越强, 其对产出密度的贡献也就越大, 因而  $\lambda$  可被视为集聚的外部性参数。由于集聚效应与经济发展阶段密切相关, 不同经济发展阶段中经济活动的空间集中具有不同的集聚效应, 通常经济发展水平较高的经济体也会呈现出较强的集聚外部性 (Eva et al., 2013; Mads and Torben, 2013), 因此  $\lambda$  的大小可对应于不同的经济发展阶段。更重要的是,  $\lambda$  的存在赋予了产出密度函数呈现规模报酬递增特征的可能。对 (1) 式进行整理后可以得到产出密度函数的最终形式为  $q_i = Q_i/A_i = \Omega_i^\lambda \left[ (n_i)^\beta \kappa_i^{1-\beta} \right]^{\alpha\lambda}$ 。可以看出, 其中  $\alpha\lambda$  的大小决定了产出密度函数的规模报酬特征。即使存在  $0 < \alpha \leq 1$ , 但只要  $\lambda$  足够大而使  $\alpha\lambda > 1$ , 那么产出密度函数即可表现出规模报酬递增的特征。此时, 集聚效应的正外部性对产出的贡献大于上述拥挤效应对产出的“抑制”效应, 弥补了既定空间中要素集聚而带来的生产效率损失。

可见, 产出密度函数将现实中客观存在的生产要素的拥挤效应和经济活动的集聚效应同时予以体现, 并允许生产函数在不同条件 (即  $\alpha\lambda$  与 1 的大小关系) 下具有不同的规模报酬特征, 从而从空间经济行为的视角对现实经济活动提供了更加一般化的阐释。然而, 现有的产出密度函数尚未将当今人类经济活动所必须面对的能源与环境约束条件予以反映而存在一定的局限性。有鉴于此, 本文首次尝试将能源和环境 (碳排放) 因素纳入其中, 对其进行必要的拓展改进。从投入侧来看, 能源作为生产过程中的基本要素投入, 可同资本、劳动一并被纳入生产函数 (Fisher-Vanden et al., 2004; Ramanathan, 2005; 陈诗一, 2009; 师博、沈坤荣, 2013)。从产出侧来看, 碳排放等污染物可被视为生产过程中伴随能源要素的使用而产生的一种非期望产出, 可以与期望产出一同被纳入生产函数 (Chung et al., 1997; 涂正革, 2008; 袁晓玲等, 2009)。因此, 基于实际生产过程的事实和现有研究的设定, 本文将能源消费和碳排放分别视为投入要素和非期望产出同时纳入上述产出密度函数。令  $E_i$  为能源消费量,  $e_i = E_i/A_i$  为单位面积的能源消费量, 同时假定整个生产过程会产生  $C_i$  单位的碳排放。这样, 可将 (1) 式扩展为<sup>④</sup>:

$$(Q_i + C_i)/A_i = (Q_i/A_i)(1 + C_i/Q_i) = \Omega_i^\lambda \left[ (n_i)^\beta \kappa_i^{1-\beta} e_i^{1-\beta-l} \right]^\alpha \left( Q_i/A_i \right)^{(\lambda-1)/\lambda} (1 + C_i/Q_i)^{(\lambda-1)/\lambda} \quad (2)$$

其中,  $l(0 < \beta + l < 1)$  为资本投入对单位面积产出的贡献率,  $\alpha$  被重新定义为物质资本、劳动和能源的单位面积产出份额, 其他变量的含义与前文一致。

假设资本可以完全跨区域流动, 因此均衡状态下各地区的资本价格 (即利率)  $r$  相等。均衡状态时要素市场上资本的边际产出等于资本价格, 由此资本需求密度 (总资本  $K$  与地区面积之比) 可表示为:

$$\kappa_i = \frac{K_i}{A_i} = \frac{\alpha l}{r} \times (Q_i/A_i)(1 + C_i/Q_i) \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (2) 式中整理可得:

$$1 + \frac{C_i}{Q_i} = \Omega_i^{\frac{\lambda}{1-\alpha\lambda}} \times \left( \frac{\alpha l}{r} \right)^{\frac{\alpha\lambda}{1-\alpha\lambda}} \times \left( \frac{Q_i}{N_i} \right)^{\frac{-\alpha\beta\lambda}{1-\alpha\lambda}} \times \left( \frac{E_i}{Q_i} \right)^{\frac{\alpha(1-\beta-l)\lambda}{1-\alpha\lambda}} \times \left( \frac{Q_i}{A_i} \right)^{\frac{\alpha\lambda-1}{1-\alpha\lambda}} \quad (4)$$

(4) 式两边同时取对数可得:

$$\ln(1 + \frac{C_i}{Q_i}) = \Phi - \frac{\alpha\beta\lambda}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{Q_i}{N_i}) + \frac{\alpha(1-\beta-l)\lambda}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{E_i}{Q_i}) + \frac{\alpha\lambda-1}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{Q_i}{A_i}) \quad (5)$$

其中,  $\Phi = \frac{\lambda}{1-\alpha\lambda} \ln \Omega + \frac{\alpha l \lambda}{1-\alpha\lambda} (\ln \alpha l - \ln r)$ 。

由于  $\ln(1 + C_i/Q_i) \approx C_i/Q_i$ , 因而 (5) 式可进一步变形为<sup>⑤</sup>:

$$\frac{C_i}{Q_i} = \Phi - \frac{\alpha\beta\lambda}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{Q_i}{N_i}) + \frac{\alpha(1-\beta-l)\lambda}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{E_i}{Q_i}) + \frac{\alpha\lambda-1}{1-\alpha\lambda} \ln(\frac{Q_i}{A_i}) \quad (6)$$

(6) 式左边为单位非农产出的碳排放, 即碳排放强度, 右边包含了经济集聚水平 (即产出密度)  $Q_i/A_i$ 、能源强度  $E_i/Q_i$  和劳动生产率  $Q_i/N_i$ , 从而表明在考虑集聚经济的条件下, 碳排放强度取决于产出密度、能源强度和劳动生产率 3 个因素, 其中产出密度和能源强度对碳排放强度的影响方向由集聚外部性  $\lambda$  与各要素的回报率共同决定。产业集聚是经济集聚的重要表现之一, 产业集聚生命周期理论认为不同产业集聚水平对应着不同



的人力资本、研发活动强度和基础设施从而引起不同程度的外部性,同时不同的产业集聚生命周期对应着不同的经济发展阶段,集聚的外部性水平越高,意味着经济处于越高级的发展阶段,即经济集聚的外部性水平与经济发展阶段通常表现为同步相关性(Eva et al., 2013; Mads and Torben, 2013; 原毅军、谢荣辉, 2015)。因此,在不同集聚外部性水平所对应的不同经济发展阶段下,经济集聚和能源强度对碳排放强度的影响也存在差异。对此,本文可以通过基于(6)式得到的比较静态分析结果来进行讨论(见表1)。

#### (一)经济集聚对碳排放强度的影响

如表1所示,当 $1 < \lambda < 1/\alpha$ 时,经济集聚程度的提高有利于碳排放强度的降低。此时经济体处于经济发展的起步阶段,与要素和市场相对更分散的乡村相比,城镇等具有集聚经济性质的发展单元的兴起使得各类公共基础设施和一定数量的企业集中在一起而呈现出明显的规模经济效应,经济集聚的正外部性初步显现。企业可以共享公共基础设施所带来的正向外溢效应,从而降低企业生产所需的能源及其他要素的运输成本和管理成本、提高能源利用效率,并通过共用的污染处理设施使得污染处理的平均分摊单位成本低于各自进行污染处理的单位成本。这些节约的成本可用于扩大企业的生产规模和技术改进,有利于单位产出碳排放的下降。同时,由于处于经济发展初始阶段,集聚区域内的工业企业的数量和规模相对较小,对应的产出和能耗规模也相对较小,其产生的碳排放总量还不足以形成明显的规模效应。因此,由设施共享、成本节约和能源利用的规模经济效应所引起的碳排放强度下降幅度,大于由产能规模扩张所引起的碳排放强度增加幅度,使得经济集聚对碳排放强度的“净”影响表现为抑制效应。

当 $1/\alpha < \lambda < 1/\alpha l$ 时,经济集聚程度的提高不利于碳排放强度的降低。此时经济体处于快速发展阶段,中心集聚区的要素吸引力不断增强,经济集聚度不断提升,产能规模快速扩张会引致能源需求急剧增加,从而引起碳排放强度的增加量大于由规模经济、技术溢出、知识共享等正外部性所引致的碳排放强度减少量。并且,由于民众对高环境质量的诉求相对较低,环境标准和环境规制强度相对宽松,企业会选择各自开展简单的污染处理活动,无法形成对能源消费的有效“倒逼”效应,从而使得单位产出碳排放持续增加。此外,经济快速发展阶段通常会以能源密集型和高污染型重工业为主的产业结构特征,同样也不利于碳排放强度的降低。综上,在集聚外部性水平仍相对较低的经济加速发展阶段,规模扩张、技术水平、环境规制及产业结构等因素均难以对碳排放规模产生明显的抑制效应,使得碳排放增速快于产出增速,因而经济集聚对碳排放强度表现出促增效应。

当 $\lambda > 1/\alpha l$ 时,经济集聚程度的提高有利于碳排放强度的降低。此时经济体处于经济发展的成熟阶段,大量的企业集中在一起,地方化经济和城市化经济凸显,较高的经济集聚水平所产生的各种溢出、共享、集中监管等外部性可以充分发挥出减排作用,同时技术进步的提高、严格的环境规制,以及低能耗、低排放的第三产业比重提高等因素,均可在不同程度上抑制碳排放的增加,从而促使单位产出的碳排放趋于下降。具体而言,集聚的减排效应可能通过以下3种机制得以实现。(1)绿色技术溢出机制:无论是传统污染物的治理还是二氧化碳的削减,均需要绿色生产技术和减排技术的创新和应用,而大量企业的集中通常有利于节能减排技术的交流、学习和大范围推广。这种集聚的绿色技术溢出效应有助于提高碳排放绩效、降低单位产出的碳排放。(2)集中监管机制:大量企业的集中无疑有助于环保部门对其实施统一监管和环保宣传。环保部门可以在一定规模的产业园区设立环境监测点,建立实时联网动态环境监测系统,从而实现对企业污染排放和碳排放的集中监管。同时,大量企业的集聚也有利于集中开展节能减排政策宣传,并且企业之间也容易形成相互监

表1 不同外部性条件下经济集聚、能源强度对碳排放强度的影响

	外部性	发展阶段	影响方向	环境效应	主要机制
经济集聚	$1 < \lambda < 1/\alpha$	起步期	负	抑制	设施共享、成本节约、规模经济效应
	$1/\alpha < \lambda < 1/\alpha l$	加速期	正	促增	经济规模扩张、能源需求增加、环境规制宽松、重工业型产业结构
	$\lambda > 1/\alpha l$	成熟期	负	抑制	技术溢出、集中监管、专业化分工、环境规制严格、产业结构绿色化
能源强度	$1 < \lambda < 1/\alpha l$	起步期、加速期	正	促增	经济规模扩张、能源需求增加、重工业型产业结构、能源结构单一、节能技术落后、环境规制宽松、产业转移
	$\lambda > 1/\alpha l$	成熟期	负	抑制	能源效率提高、产业结构绿色化、能源结构清洁化、节能减排技术创新、能源价格市场化、环境规制严格

督。因此,经济集聚程度的提高能够降低环境监管和环境宣传成本并提高其效率,从而在一定程度上有效抑制碳排放。(3)减排的专业化分工机制:马歇尔外部性认为,大量的企业集聚有利于促进专业化的分工,因此集聚程度的提高可以促进治污和减排的专业化分工,催生出大量的专业环保企业,如污染处理公司、合同能源管理企业和第三方碳排放监测机构等,允许企业将治污和减排业务交由第三方企业运营而更加专注于生产经营活动,从而有效促进包括碳排放效率在内的总体环境绩效的提升。

由此,本文可以提出理论假说1。

假说1:在其他条件不变的情况下,经济集聚与碳排放强度之间存在“倒N”型曲线关系,即随着经济集聚水平的提高,碳排放强度会表现出下降—上升—下降的变化趋势。

## (二)能源强度对碳排放强度的影响

如表1所示,当 $1 < \lambda < 1/\alpha l$ 时,经济体历经起步和加速发展阶段,经济集聚程度逐渐提升但仍相对较低,集聚的外部性尚未完全显现,能源强度的提高不利于碳排放强度的降低。在此阶段,尽管经济体可能表现出一定的规模经济特征,但节能减排技术水平和能源利用效率相对较低,尚不足以对碳排放产生有效的抑制效应。尤其是经济体进入快速成长期后,工业化的加速推进、经济规模的进一步扩大通常会引致能源需求和相应的碳排放显著增加,同时在由经济发展特定阶段所决定的以高能耗、高排放为主要特征的重工业化产业结构、因新能源开发成本偏高尚未实现价格优势而难以短期改变的以传统化石能源为主的能源消费结构,以及节能减排技术尚未取得实质突破的技术瓶颈限制等因素的共同影响下,经济发展与能源消费及碳排放之间无法实现有效的“脱钩”<sup>⑥</sup>,使得能源强度与碳排放强度也处于未脱钩状态。此外,从经验性事实来看,一些发展中国家(地区)由于劳动力、能源等要素价格相对低廉且环境规制强度较小,可能会吸引国外(区域外)一些高能耗、高污染、高排放的产业以外商直接投资(FDI)的形式大量流入,从而成为碳排放的“避难所”和“生态倾销”的来源地,导致碳排放强度进一步提高。因此,在集聚外部性相对较低的条件下,能源强度的提高会对碳排放强度表现出促增效应。

当 $\lambda > 1/\alpha l$ 时,经济体处于经济发展的成熟阶段,较高的经济集聚水平使其外部性显著体现,能源强度的提高有利于碳排放强度的降低。在此阶段,经济集聚的规模经济特征和各种溢出效应凸显,从而有效地促进了能源的集中利用和能源效率的提高;产业结构向低能耗、低排放的方向调整而逐步实现了绿色升级;新能源技术的突破可以有效降低清洁能源的生产成本和市场价格,使得新能源和清洁能源的需求显著上升,从而推动能源消费结构的“绿色”调整;集聚的技术溢出效应等正外部性有助于节能减排技术的突破创新;能源要素市场不断成熟,能源产品定价机制趋于完善,使得能源价格能够对市场供求关系及环境外部性予以合理反映,促使能源产品在生产和消费过程中均能得到高效配置;随着收入水平的提高,民众对高环境质量的诉求不断增强,促使环境规制政策更加严格,环境规制强度逐渐提高。在上述因素的共同作用下,经济体中的能源消费碳排放强度,即相同能源消费量所产生的碳排放逐渐降低,从而促使能源强度提高对碳排放强度反而表现出抑制效应。

需要说明的是,同一项技术应用于不同经济发展阶段的不同地区,抑或对于同一地区的不同发展阶段而言,其所产生的技术外溢效应均存在一定的差异。如在经济集聚水平较高(经济发展成熟期)的地区,较高的经济密度意味着集聚经济的“共享、匹配和学习”的溢出效应更大(Mads and Torben, 2013),集聚的正外部性和规模经济特征就会更加明显,从而有利于技术的交流、推广和创新,尤其是节能减排技术的外溢效应有助于更多企业有效改进其节能减排绩效。从能源使用的实际情况来看,相对于经济密度较低或处于经济发展初期阶段的地区(如小城市、农村),经济密度更高或处于经济成熟阶段的地区(如特大城市)的能源供应和利用更加集中,人均能源消耗和相应的排放水平相对较低(Glaser, 2011),所以在不同的经济发展阶段,经济集聚的外部性差异会导致能源强度和碳排放强度水平有所不同(Poumanyong and Kaneko, 2010)。因此,从发展的角度来看,不同发展阶段对应着不同的集聚水平,而不同的发展阶段在一定程度上也决定着产业结构、能源政策和环境政策的演化方向。从这个意义上讲,产业结构、能源政策和环境政策等经济因素在一定程度上是内生于经济集聚的(Naito, 2010)。例如,当一个地区的经济高度集聚时,前期发展过程中人口和产业的集中所引发的环



境污染问题会促使政府制定更加严格的环境规制政策(企业排污成本上升),而经济高度集聚也意味着相对固定的土地资源的稀缺性增加,使得企业的扩张成本增加,容易导致土地要素与资本、劳动等要素的组合比例逐渐偏离最优水平,从而不利于提高单位土地面积的要素生产率,这种生产效率的损失及要素成本的上升会倒逼企业加强技术创新,促使地区产业转型升级,以及发展替代能源等更加绿色的经济行为发生(Wu and Reimer, 2016)。因此,随着地区经济集聚水平的提高,节能减排技术创新、环境规制强化、能源要素市场化、产业结构升级、能源结构优化等调整过程就会形成节能减排的驱动力量,只要一个地区经济处于不断发展、经济密度不断提高的过程,那么经济集聚就可能促进该地区经济的绿色转型。由此,本文提出理论假说2<sup>⑦</sup>。

假说2:在其他条件不变的情况下,能源强度与碳排放强度之间存在“倒U”型曲线关系,即随着能源强度的提高,碳排放强度会表现出先上升再下降的变化趋势。

通过上述分析不难看出,经济集聚、能源强度与碳排放强度之间存在着密切的关联。经济集聚对碳排放强度的影响可以概括为直接和间接两种机制:其一,经济集聚可以通过各种外部性、各类溢出效应、成本节约、集中监管、专业化分工等途径对碳排放强度产生直接影响;其二,经济集聚可以通过能源集中利用的规模经济效益、绿色技术溢出促进能源效率改进等途径影响能源强度,进而对碳排放强度产生间接影响。显然,这两种影响路径存在着显著的“分工”。经济集聚是经济活动空间分布和各种要素空间配置的主要表现,而经济活动的空间布局无疑会对能源需求和污染(碳)排放产生重要影响(Grazi et al., 2016),同时也会对产出和要素的生产效率产生重要影响(Rodriguez et al., 2016)。在生产活动空间布局的视角下,经济集聚对碳排放这种非期望产出的直接影响,主要体现于集聚的各类溢出效应、专业化分工、成本节约、集中监管等因素对企业污染(碳)排放的影响(豆建民、张可, 2015),如企业的集聚(地理邻近)有利于新技术的学习和推广(沈能, 2014),从而促进企业的共同减排。而经济集聚对碳排放强度的间接影响,主要是考虑到碳排放来源于化石能源燃烧,因而经济集聚一旦对能源利用效率产生影响,就势必会间接影响碳排放强度。一方面,经济集聚有利于通过技术溢出、知识共享和要素匹配等途径提高要素的生产效率(Ciccone and Hall, 1996; 范剑勇, 2006; 陈良文等, 2008),从而带动能源利用效率的改进(Otsuka et al., 2014);另一方面,经济活动的空间集中有助于产生规模经济效应,从而有利于降低单位产出的能源消费而提高能源利用效率(Kamal-Chaoui and Robert, 2009; Glaser and Kahn, 2010; 王海宁、陈媛媛, 2010; 李思慧, 2011)。因而,经济集聚会通过影响能源利用效率(外在表现为能源强度的变化)而对碳排放强度施加间接影响。据此,本文进一步提出理论假说3。

假说3:能源强度在经济集聚对碳排放强度的影响过程中具有显著的中介效应。

从中国的现实情况来看,工业化和城镇化均已进入快速推进阶段,各地区的经济集聚水平也经历了由低到高的演变过程。同时,中国地区间的经济发展水平和经济集聚程度均存在显著差异,其中东部地区是公认的经济程度和经济集聚程度较高的区域,而中西部的经济发展和经济集聚水平则相对较低。因此,可以说中国是研究经济集聚、能源强度和碳排放强度三者关系的理想样本。下文将以中国省域面板数据为研究样本对上述3个理论假说进行实证检验。

## 四、实证策略及数据说明

本部分将采用1995~2016年中国30个省级地区的空间面板数据样本对前文得到的3个理论假说进行验证。概括而言,本文的实证检验主要分两个步骤进行:第一步,对假说1和假说2进行检验,即检验经济集聚对碳排放强度是否存在“倒N”型的非线性影响,以及能源强度对碳排放强度是否存在“倒U”型的非线性影响;第二步,检验经济集聚是否通过能源强度对碳排放强度产生影响,即考察能源强度是否充当了经济集聚影响碳排放强度的中介变量,同时也考察经济集聚是否具有抑制能源强度的节能效应。

### (一)计量模型设定

#### 1. 经济集聚和能源强度对碳排放强度影响的检验模型

现有研究已经表明,经济集聚(张可、汪东芳, 2014)、能源强度(孙庆刚等, 2013)和碳排放(付云鹏等,

2015)均具有较强的空间相关性,所以如果忽略其固有的空间溢出效应则很可能得到偏误的实证结果。因此,本文考虑采用空间面板模型开展实证研究,将三者的空间滞后项均纳入模型,以期对其空间相关性予以控制。另外,空间相关性既可能来自被解释变量本身,同时还可能来自解释变量及误差项,而空间杜宾模型则可以对不同来源的空间相关性予以很好的反映(Elhorst, 2014)。作为空间计量模型的标准起点,空间杜宾模型是捕捉各类空间溢出效应的标准框架,它可以在不同系数设定条件下变形为常见的空间滞后模型和空间误差模型,从而更具一般性(田相辉、张秀生, 2013)。因此,本文主要采用空间杜宾模型开展实证检验。此外,考虑到碳排放变化可能存在时间上的路径依赖特征,即时间滞后效应,以及碳排放可能与经济增长、技术进步等因素之间存在双向因果关系而引致内生性问题(Shao et al., 2011),本文将碳排放变量的滞后一期引入标准的静态空间面板杜宾模型,基于(6)式构建如下动态空间面板杜宾模型:

$$cg_{it} = \beta_0 + \beta_1 cg_{i,t-1} + \rho_1 \sum_{j=1}^n w_{ij} cg_{jt} + \beta_2 ag_{it} + \beta_3 sag_{it} + \beta_4 cag_{it} + \rho_2 \sum_{j=1}^n w_{ij} ag_{jt} + \beta_5 ei_{it} + \beta_6 sei_{it} + \rho_3 \sum_{j=1}^n w_{ij} ei_{jt} + \delta \sum X_{it} + \lambda \sum_{j=1}^n w_{ij} X_{jt} + u_i + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中, $i$ 表示省份, $t$ 表示年份; $cg_{it}$ 表示碳排放强度,与理论模型保持一致,本文采用单位非农产出的二氧化碳排放量予以度量; $cg_{i,t-1}$ 表示滞后一期的碳排放强度,用来控制和考察碳排放强度变化的时间滞后效应; $ag_{it}$ 表示产出密度,用来度量经济集聚程度。通常认为,经济集聚主要指经济活动在单位空间内的疏密程度,其常见的度量指标包括空间基尼系数、赫芬达尔指数、泰尔指数等,但这些指标均忽略了较小地理单元差异所产生的空间偏倚(刘修岩, 2014),而产出密度(单位面积上承载的经济活动量)被认为是衡量一个地区经济集聚的良好指标(Ciccone and Hall, 1996)。与空间基尼系数等指标不同,产出密度不仅可以刻画经济活动在空间上的疏密程度和分布情况,还能准确反映出单位地理面积上的经济活动承载量,符合经济集聚的密度特征。因此,借鉴范剑勇(2006)、张可和汪东芳(2014)等研究的做法,本文采用各省份地级及以上城市的非农产出(即第二、第三产业增加值之和)总和与这些城市行政面积总和之比来度量经济集聚程度<sup>⑧</sup>。 $ei_{it}$ 表示能源强度,与理论模型保持一致,本文采用单位非农产出的能源消费量予以度量。基于前文理论模型得到的经济集聚、能源强度与碳排放强度之间的非线性关系假说,本文将经济集聚的二次项( $sag_{it}$ )和三次项( $cag_{it}$ ),以及能源强度的二次项( $sei_{it}$ )引入模型,以期对假说1和假说2进行检验。 $w_{ij}$ 是用来描述地区间空间邻近关系的空间权重矩阵的元素,不失一般性,本文采用最常用的二值空间权重矩阵,即当两地区地理邻接时 $w_{ij}=1$ ,非地理邻接时 $w_{ij}=0$ 。 $r$ 和 $l$ 分别表示各主要解释变量及控制变量的空间滞后系数; $\beta_0 \sim \beta_6$ 为待估系数,其中 $\beta_1$ 为碳排放强度的时间滞后项系数; $u$ 表示地区固定效应, $\varepsilon$ 表示随机扰动项。

考虑到影响碳排放强度的因素众多,本文引入了一组相关控制变量 $X$ ,包括劳动生产率、人均收入水平及其二次项、城镇化、能源消费结构、产业结构、技术进步、对外开放度、环境规制、市场化程度等变量。各控制变量具体说明见表2。

(1)劳动生产率( $lp$ ):与理论模型保持一致,采用劳均非农产出( $p$ )的自然对数( $lp$ )予以度量。(6)式表明劳

表2 各变量的定性描述

变量类别	符号	含义	度量指标及说明	单位	预期符号
被解释变量	$cg$	碳排放强度	单位非农产出的碳排放量(2000年不变价格)	吨/万元	—
	$lpc$	人均碳排放	单位人口的碳排放量	吨/人	—
兴趣变量	$ag$	经济集聚	单位面积的非农产出(2000年不变价格)	亿元/万公顷	非线性
	$ei$	能源强度	单位非农产出的能源消费量(2000年不变价格)	吨标煤/万元	非线性
控制变量	$lp$	劳动生产率	劳均非农产出(2000年不变价格)	亿元/万人	正
	$ly$	人均收入水平	人均GDP(2000年不变价格)的自然对数	万元/人	非线性
	$ur$	城镇化	城镇人口占总人口比重	百分比	非线性
	$es$	能源消费结构	煤炭消费占能源消费总量比重	百分比	正
	$is$	产业结构	工业增加值占GDP比重	百分比	正
	$rd$	技术进步	平均每百人研发从业人员拥有专利授予数	百分比	不确定
	$fd$	对外开放度	FDI占GDP比重	百分比	不确定
	$er$	环境规制	各省份环境标准及环境法规累计颁布总数的自然对数	—	负
	$os$	市场化程度	非国有职工人数占总职工人数比重	百分比	负
	$dum$	节能减排政策	2006年及之后年份取1,2006年之前年份取0	—	负

动生产率是碳排放强度的重要影响因素。劳动生产率的提高会引起单位时间产出水平的提高,而在技术水平不变的情况下,产出的扩张可能会引起污染(碳)排放的增加(张可、汪东芳, 2014)。同时,人力资本等劳动生产率的重要决定因素也与环境污染物

度密切相关,当贸易专业化、对外开放度增加时,大量的劳动力可能向污染密集型行业集中,此时劳动生产率的提高可能会恶化环境质量(Lan et al., 2012)。因此,本文预期其系数符号为正。

(2)人均收入水平( $ly$ ):采用人均GDP( $y$ )的自然对数测度。经典的环境库兹涅茨曲线(EKC)假说认为,人均收入与环境污染之间呈“倒U”型曲线关系(Grossman and Krueger, 1995),但碳排放强度与人均GDP之间可能存在着更加复杂的非线性关系(Roberts and Grimes, 1997; 虞义华等, 2011),因此本文将取自然对数的人均GDP一次项 $ly$ 及二次项 $sl_y$ 引入模型。

(3)城镇化( $ur$ ):采用城镇人口占总人口比重测度。城镇化进程会引致大量的能源消费需求(Perry, 2013; 孙庆刚等, 2013),从而可能引起相应的碳排放增加。但另一方面,当城镇化率超过一定的水平后,新环保技术的应用、能源效率的提高、低碳绿色城市发展模式的实施等因素均有利于碳减排(王芳、周兴, 2012)。因此,本文将其一次项 $ur$ 和二次项 $sur$ 同时引入模型,并预期城镇化与碳排放强度之间呈“倒U”型曲线关系。

(4)能源消费结构( $es$ ):采用煤炭消费占能源消费总量的比重测度。能源消费结构直接决定了能源消费碳排放强度(即单位能源消费的碳排放)的大小,当能源消费结构中清洁能源比重较大时,相同水平的能源消费量所产生的碳排放就会较少,而以煤炭为主的化石能源则是产生二氧化碳的主要来源(林伯强、蒋竺均, 2009),煤炭消费比重越高显然越不利于碳排放强度的下降。因此,本文预期其系数符号为正。

(5)产业结构( $is$ ):采用工业增加值占GDP比重测度。工业部门是碳排放的“第一大户”(Shao et al., 2011),因此产业结构中工业的占比越大,越不利于碳减排。因此,本文采用工业增加值比重来刻画产业结构对碳排放强度的影响,并预期其系数符号为正。

(6)技术进步( $rd$ ):采用平均每百人研发从业人员拥有的专利授予数量测度。一方面,技术进步可以促进能源利用效率的提高而有利于减少生产过程中的污染(碳)排放(李廉水、周勇, 2006);另一方面,技术进步也可能不是“绿色偏向”的,而是朝着提高生产效率和扩大生产规模的方向进行,从而可能会使碳排放增加(邵帅等, 2013)。因此,其系数符号并不确定。

(7)对外开放度( $fd$ ):采用FDI占GDP比重测度。对外开放有利于吸引具备更高节能减排技术的外资企业开展更加“绿色”的生产活动,从而有利于碳减排(He, 2006; 许和连、邓玉萍, 2012)。但同时,FDI的进入还可能源于发展中国家较低的环境标准和环境规制强度,从而引起“污染避难所”效应和“碳泄漏”问题(Wagner and Timmins, 2009; 李小平、卢现祥, 2010)。因此,对外开放对碳排放强度的影响并不确定。

(8)环境规制( $er$ ):借鉴Shao等(2011)的做法,采用各省份环境标准及环境法规累计颁布数量的自然对数测度。以排污费为代表的环境支出可视为企业的生产成本之一,而较高的环境规制强度会迫使企业选择减排或重新选址,因此环境规制强度是抑制企业污染排放及碳排放行为的重要因素(Shao et al., 2011; 包群等, 2013; 黄茂兴、林寿富, 2013)。因此,本文预期其系数符号为负。

(9)市场化程度( $os$ ):采用非国有职工人数占总职工人数比重测度。市场化会通过影响经济集聚的外部性而对污染(碳)排放产生影响(李筱乐, 2014)。市场化水平的提高有利于改进资源配置效率和能源利用效率,进而有助于促进碳减排(Shao et al., 2011)。因此,本文预期其系数符号为负。

(10)节能减排政策( $dum$ ):借鉴Shao等(2011)的做法,引入一个政策虚拟变量以对我国节能减排政策实施情况进行控制,令该变量2006及以后年份取值为1,2006年之前的年份取值为0。我国从“十一五”时期(2006~2010年)开始将节能(降低能源强度)指标作为约束性指标而提出,而后在“十二五”和“十三五”规划中均同时提出了降低能源强度和碳排放强度的约束性指标,这一“自上而下”的节能减排目标政策的实施,势必会对我国能源强度和碳排放强度的变化产生重要影响。因此,本文将其作为一个基本控制变量引入模型,并预期其系数符号为负。

## 2. 能源强度的中介效应与经济集聚的节能效应检验模型

基于前文的理论假说3,经济集聚可能通过能源强度对碳排放强度产生影响,为了检验能源强度是否充当中介变量的角色,本文采用规范的中介效应模型并基于空间计量技术开展进一步的实证考察。解释变量通过



中间变量对被解释变量产生的间接效应被称为中介效应(Mackinnon et al., 2000)。被较为广泛采用的检验中介效应的方法是Baron和Kenny(1986)提出的逐步法,其检验过程主要基于以下两个条件是否成立:如果(i)解释变量显著影响被解释变量且(ii)对于在因果链中的任一变量,当控制了前面的变量(包括被解释变量)后,会显著影响其后续变量。如果上述两个条件成立,即表明中介效应显著存在,并且中介效应还可以根据加入中介变量后解释变量的系数显著和不显著而分别对应于部分中介效应和完全中介效应两种类型。具体而言,研究解释变量( $X$ )通过中间变量( $M$ )对被解释变量( $Y$ )的间接影响,可以采用如下方程形式予以描述:

$$Y=cX+e_1 \quad (8)$$

$$M=aX+e_2 \quad (9)$$

$$Y=c'X+bM+e_3 \quad (10)$$

其检验步骤如下(如图1所示):第一步,检验方程(8)的回归系数 $c$ ,如果 $c$ 显著,则按存在中介效应立论,但无论 $c$ 是否显著,都要进行后续检验;第二步,依次检验方程(9)的回归系数 $a$ 和方程(10)的回归系数 $b$ ,如果二者都显著,则表明间接效应显著;第三步,检验方程(10)的系数 $c'$ 是否显著,如果其不显著,则直接效应不显著,表明只存在中介效应,此时称为完全中介效应;如果其显著,则表明直接效应也显著,此时称为部分中介效应。

根据理论假说3,本文将碳排放强度 $cg_{it}$ 视为被解释变量 $Y$ ,将能源强度 $ei_{it}$ 视为待检验的中介变量 $M$ ,将经济集聚 $ag_{it}$ 视为解释变量 $X$ ,并将碳排放强度的时间滞后项和空间滞后项、能源强度和经济集聚的空间滞后项,以及其他控制变量作为中介变量模型的控制变量。具体的中介效应检验模型设定如下:

$$cg_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 cg_{it-1} + \pi_1 \sum_{j=1}^n w_{ij} cg_{jt} + \alpha_2 ag_{it} + \alpha_3 sag_{it} + \alpha_4 cag_{it} \quad (11)$$

$$+ \pi_2 \sum_{j=1}^n w_{ij} ag_{jt} + \varphi X_{it} + \pi_3 \sum_{j=1}^n w_{ij} X_{jt} + v_i + \zeta_{it}$$

$$ei_{it} = \eta_0 + \eta_1 ei_{it-1} + \theta_1 \sum_{j=1}^n w_{ij} ei_{jt} + \eta_2 ag_{it} + \eta_3 sag_{it} + \eta_4 cag_{it} \quad (12)$$

$$+ \theta_2 \sum_{j=1}^n w_{ij} ag_{jt} + \kappa X_{it} + \theta_3 \sum_{j=1}^n w_{ij} X_{jt} + \vartheta_i + \tau_{it}$$

显然,(7)式可对应于中介效应检验模型中的(10)式,而(11)式和(12)式则分别对应于中介效应检验模型中的(8)式和(9)式,因此,(11)式、(12)式和(7)式就构成了本文的完整中介效应模型检验过程,即与图1中的检验过程一一对应。其中(12)式还可以作为经济集聚是否存在节能效应的检验模型,即可同时被用于考察经济集聚与能源强度之间的非线性关系,以及能源强度的空间溢出效应和时间滞后效应。

## (二)参数估计方法

由于(7)、(11)和(12)式中均存在被解释变量的空间滞后项和时间滞后项作为解释变量,其残差不再满足同方差和外生性的基本假设,传统的最小二乘法(OLS)、固定效应和随机效应估计均会得到有偏的估计结果,而常见的用于估计静态空间面板模型的极大似然法(MLE)对于潜在的内生性问题的控制也是无能为力的。Han和Phillips(2010)提出的Han-Phillips广义矩估计(GMM)法能够有效克服传统的工具变量法和差分GMM估计的弱工具变量问题,同时还可以避免系统GMM估计时因时间自回归系数接近单位1和T较大时导致估计不一致的问题,且对样本截面数N和时间T的限制要求较小,特别是在小样本条件下依然可以得到一致且无偏的估计结果,因而可以很好地胜任本文的动态空间面板杜宾模型估计任务。后文将主要采用这一方法进行参数估计。但为便于比较,本文在后文中同时也报告了基于传统非空间OLS、非空间面板固定效应、非空间动态面板模型的广义矩估计结果,以及静态空间面板模型的广义空间面板自回归两阶段最小二乘法(generalized spatial panel autoregressive two-stage least squares, GSPA2SLS)的估计结果。

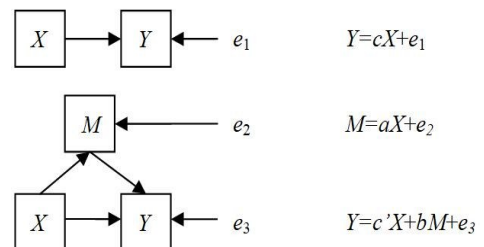


图1 中介效应检验示意图

此外,本文还需要对被解释变量的空间相关性进行检验以判断是否有必要采用空间面板模型。对此,本文采用常见的 Moran's I 指数、LMlag、LMerr 统计量进行判别。另外,与传统的面板数据模型一样,根据随机干扰项成分分解的不同,空间面板模型也包括固定效应(FE)与随机效应(RE)两种基本的设定形式,对此仍然可以采用通行的 Hausman 检验对模型进行设定筛选(Elhorst, 2003)。

### (三)数据样本说明

除碳排放外,上述模型中的变量指标均可根据相关统计资料报告的数据予以构造。对于统计资料中尚未报告的碳排放数据,本文采用 IPCC (2006) 参考方法结合中国官方公布的相关参数对其进行估算,考虑的能源种类为《中国能源统计年鉴》中各年连续报告的所有 17 种化石能源,包括原煤、洗精煤、型煤、其他洗煤、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化制品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油、炼厂干气、其他石油制品和天然气。并且,为提高估算的准确性,本文在估算时扣除了工业部门作为原料使用的能源消费量。

基于数据的可得性和口径一致性,本文采用 1995~2016 年中国 30 个省级行政区(省、直辖市、自治区)(西藏因数据严重缺失而被剔除)的面板数据作为研究样本,数据主要来源于历年《中国统计年鉴》、《新中国六十年统计资料汇编》、《中国能源统计年鉴》、《中国科技统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、《中国环境年鉴》及各省(自治区、直辖市)统计年鉴,其中各类货币量指标均以 2000 不变价格进行了平减调整。此外,在实证分析时,本文对非百分比指标度量的变量数据均取自然对数以降低样本数据的离散程度。各变量的描述性统计情况和各变量间的相关系数分别报告于表 3 和表 4。容易看出,各解释变量之间的相关系数最大值为 0.711,因此后文的回归分析可以忽略多重共线性的问题。

## 五、实证结果及讨论

### (一)空间相关性检验结果

在对所有空间面板模型进行参数估计前,本文均首先对基于相应的 OLS 估计结果的残差进行了空间相关性检验,结果统一报告于表 5。容易看出,表 6~表 9 中报告的各空间回归方程对应的 Moran's I 指数均至少在 10% 的水平上显著,尤其是碳排放强度方程的 Moran's I 指数在 1% 的水平上显著,且 LMlag 和 LMerr 统计量大部分是显著的,从而表明各方程的被解释变量均存在明显的空间相关性,通过空间面板模型来考察本文所研究的问题是必要的。考虑到地区个体差异和时期因素可能产生的估计偏差,本文主要采用时空双向固定效应的动态空间面板模型进行参数估计。同时为便于对比,本文还报告了非空间面板模型固定效应、非空间动态面板系统 GMM,以及静态空间面板杜宾模型的 GSPA2SLS 估计结果。当回归分析局限于一些特定的个体时,固定效应模型是更好的选择(Baltagi, 2001),而且 Hausman 检验结果也显示,本文的非空间面板模型和静态空间杜宾模型均适合采用固定效应进行估计<sup>⑨</sup>。

### (二)经济集聚和能源强度对碳排放强度的影响考察——对假说 1 和假说 2 的实证检验

由表 6 可知,未考虑内生性问题的模型 1 和模型 2 中经济集聚的估计系数并不显著,而未考虑空间相关性的模型 3 中经济集聚三次方项的估计系数并不显著,从而说明不考虑内生性和空间相关性均可能导致偏误的

表 3 各变量的描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
cg	660	2.388	1.880	0.245	13.686
ag	660	4.125	1.020	2.399	11.64
ei	660	1.791	1.272	0.272	9.272
lp	660	3.334	2.821	0.374	19.23
ly	660	9.493	0.812	7.574	11.41
ur	660	49.74	20.57	17.50	89.62
es	660	60.89	19.42	8.310	96.71
is	660	38.16	8.280	11.90	53.58
rd	660	76.10	151.20	1.204	1489.6
fdl	660	2.999	3.075	0.039	24.25
er	660	3.957	0.922	0	5.451
os	660	57.65	18.45	10.70	92.36
dum	660	0.500	0.500	0	1

表 4 各变量间的相关系数

	cg	ag	ei	lp	ly	ur	es	is	rd	fdl	er	os	dum
cg	1												
ag	-0.356	1											
ei	-0.708	0.520	1										
lp	-0.507	0.503	0.601	1									
ly	-0.645	0.631	0.591	0.585	1								
ur	-0.332	0.141	-0.491	0.614	0.549	1							
es	0.261	-0.218	-0.439	-0.360	-0.310	-0.290	1						
is	0.088	0.290	-0.057	0.122	0.301	0.112	0.261	1					
rd	-0.372	0.390	-0.602	0.439	0.512	0.246	-0.312	0.205	1				
fdl	-0.327	-0.054	-0.202	0.183	0.213	0.333	-0.159	0.083	-0.003	1			
er	-0.169	0.325	-0.237	0.203	0.324	0.045	-0.013	0.321	0.290	-0.242	1		
os	-0.653	0.660	-0.507	0.610	0.671	0.374	-0.314	0.250	0.570	0.066	0.454	1	
dum	-0.387	0.711	-0.569	0.551	0.697	0.182	-0.217	0.228	0.393	-0.153	0.364	0.628	1

估计结果,要想得到更为稳健的估计结果,对内生性和空间相关性的考虑缺一不可。而同时考虑了内生性问题和空间相关性的模型4和模型5的估计结果也确实表现出更为优良的统计特征。另外,由于大部分控制变量在模型1~模型5中的系数符号是一致的,说明内生性问题很可能主要来自本文的兴趣变量——经济集聚,从而进一步表明考虑内生性问题的必要性。再进一步从模型4和模型5的比较来看,由于模型5中碳排放强度时间滞后项的系数在5%的水平上显著为正,从而验证了前文所述的碳排放强度变化具有时间上的路径依赖特征的推断。无疑,与前4个模型相比,同时考虑了内生性问题、空间相关性及被解释变量时间滞后效应的模型5的结果,具有最为优良的理论预期及计量技术表现,因此在下文的讨论中本文重点关注基于 Han-Phillips GMM 得到的动态空间面板杜宾模型的估计结果。

由表6的模型5结果可知,碳排放强度同时具有显著的时间滞后效应和空间溢出效应。一方面,碳排放强度在时间维度上具有较强的路径依赖特征,即表现出明显的“滚雪球”效应,上一期碳排放强度如果处于较高水平,那么下一期的碳排放强度也可能持续走高,这意味着碳减排工作具有相当的紧迫性和艰巨性。另一方面,碳排放强度的空间滞后项系数在1%的水平上显著为正,表明各省域间的碳排放强度存在明显的策略性竞争效应,即地区间的碳排放存在“逐底”竞争策略互动。经济集聚的空间滞后项估计系数显著为正,表明邻近省份的经济集聚对本地的碳排放强度也具有促增效应。一方面,由于地区间的经济竞争和相互模

表5 基于OLS估计结果的残差空间相关性检验

变量	表6	表7	表8		表9	
	<i>lcg</i>	<i>lpc</i>	<i>lei</i>	<i>lcg</i>	<i>lei</i>	<i>lpc</i>
Moran's <i>I</i>	0.812*** [0.00]	0.705** [0.03]	0.625* [0.07]	0.752*** [0.00]	0.462* [0.06]	0.644** [0.03]
<i>Lmlag</i>	15.210*** [0.00]	4.225* [0.05]	12.055** [0.02]	18.129*** [0.00]	14.252*** [0.00]	5.219** [0.04]
<i>LMerr</i>	2.8115* [0.08]	1.314 [0.19]	15.119*** [0.00]	12.105*** [0.00]	9.225** [0.04]	2.115 [0.27]

注:*lcg*、*lpc*和*lei*分别表示碳排放强度、人均碳排放和能源强度的自然对数(以下各表同);中括号内数值为相伴概率;\*\*\*、\*\*和\*分别代表1%、5%和10%的显著水平。第2列和第3列分别对应于下文表6和表7中*lcg*和*lpc*的非空间OLS残差的空间相关性检验;第4列和第5列分别对应于下文表8中*lei*和*lcg*的非空间OLS残差的空间相关性检验;第6列和第7列分别对应于下文表9中*lei*和*lpc*的非空间OLS残差的空间相关性检验。

表6 经济集聚和能源强度对碳排放强度的影响

变量	非空间OLS 模型1	非空间普通面板模型(FE) 模型2	非空间动态面板模型(SYS-GMM) 模型3	静态空间杜宾模型(GSPA2SLS) 模型4	动态空间面板杜宾模型(Han-Phillips GMM) 模型5
<i>L.lcg</i>			0.500*** (5.96)		0.795*** (2.33)
<i>lag</i>	-0.519 (-0.65)	0.709 (0.40)	-0.969* (-1.68)	-0.043** (-2.21)	-0.038** (-2.04)
<i>slag</i>	0.304 (0.47)	-0.505 (-0.50)	0.024* (1.65)	0.034* (1.74)	0.018* (1.93)
<i>clag</i>	-0.015 (-0.54)	0.122 (0.65)	-0.197 (-0.72)	-0.006* (-1.70)	-0.002* (-1.81)
<i>lei</i>	0.865*** (11.22)	1.048*** (6.30)	1.681** (2.01)	0.995*** (6.00)	1.395*** (4.18)
<i>slei</i>	-0.102** (-2.02)	-0.053* (-1.73)	-0.790* (-1.93)	-0.014* (-1.69)	-0.157* (-1.80)
<i>lp</i>	0.043*** (2.96)	0.031** (2.20)	0.074** (2.50)	0.150* (1.68)	0.078* (1.70)
<i>ly</i>	1.826*** (4.18)	1.417*** (8.53)	1.481** (2.30)	1.150** (2.01)	0.534* (1.87)
<i>sly</i>	-0.074*** (-3.00)	-0.156*** (-6.82)	-0.330** (-2.01)	-0.120*** (-7.39)	-0.010* (-1.71)
<i>ur</i>	0.018*** (5.14)	0.011*** (3.37)	0.014** (2.22)	0.012*** (4.09)	0.013* (1.85)
<i>sur</i>	-0.001*** (-5.23)	-0.001** (-3.59)	-0.001* (-1.89)	-0.001** (-2.27)	-0.001* (-1.78)
<i>es</i>	0.002*** (3.76)	0.002** (2.31)	0.003*** (3.18)	0.002** (2.36)	0.001* (1.68)
<i>is</i>	0.003* (1.93)	0.004** (2.21)	0.015*** (3.15)	0.003* (1.80)	0.003* (1.80)
<i>rd</i>	-0.0001 (-1.40)	-0.0001 (-1.49)	-0.0001 (-1.39)	-0.0001 (-1.09)	-0.0001 (-1.02)
<i>fd</i>	-0.005 (-0.97)	-0.002 (-0.59)	-0.001 (-0.23)	-0.002* (-1.68)	-0.006* (-1.87)
<i>er</i>	-0.004 (-0.33)	-0.070 (-1.28)	-0.010 (-0.29)	-0.067 (-1.08)	-0.066 (-1.06)
<i>os</i>	-0.006*** (-4.77)	-0.005*** (-3.74)	-0.003* (-1.73)	-0.005*** (-3.60)	-0.002* (-1.66)
<i>dum</i>	-0.084*** (-2.79)	-0.044* (-1.68)	-0.044* (-1.70)	-0.045* (-1.71)	-0.066* (-1.76)
<i>w.lcg</i>				0.174** (2.34)	0.134*** (6.39)
<i>w.lag</i>					0.489* (1.85)
<i>w.lei</i>					0.229** (2.28)
常数项	14.382*** (5.94)	9.127*** (9.22)	7.149* (1.79)	5.858*** (7.32)	0.125 (0.84)
F(Wald) [P]	409.70 [0.00]	449.08 [0.00]	1728.60 [0.00]	422.07 [0.00]	674.64 [0.00]
AR (1) [P]			-2.60 [0.01]		-7.52 [0.00]
AR (2) [P]			0.87 [0.38]		0.60 [0.55]
Sargan [P]			143.38 [0.28]		263.15 [0.34]

注:括号内数值为t值或z值,中括号内数值为相伴概率,\*\*\*、\*\*和\*分别代表1%、5%和10%的显著水平;*sx*和*cx*分别表示变量*x*的二次项和三次项;*L.lcg*表示碳排放强度自然对数的时间滞后项,*w.lcg*、*w.lag*、*w.lei*分别表示碳排放强度自然对数、经济集聚自然对数、能源强度自然对数的空间滞后项;除空间动态面板模型和非空间动态面板模型(SYS-GMM)报告了Wald检验结果外,其余模型均报告了F检验结果;限于篇幅,本文未报告模型5各控制变量空间滞后项系数的估计结果,有兴趣的读者可向作者索取。以下各表同。



仿,邻近省份的高经济集聚和碳减排模式会对本地形成较强的示范效应;另一方面,随着区域一体化程度的提高,相互邻近省份间的经济联系日益密切,更易于形成关联度较高产业前后向、上下游关联,有利于技术的外溢和知识的传播,从而使得邻近地区的经济集聚水平与本地的碳排放强度呈现出高度的正相关性。

经济集聚的一次项、二次项和三次项系数分别在5%、10%和10%的水平上显著且依次为负、正和负,表明经济集聚与碳排放强度之间确实存在显著的“倒N”型曲线关系。首先,当集聚水平低于1.37(393.5万元/平方公里)<sup>⑩</sup>的拐点值时,经济集聚会对碳排放强度产生抑制效应,此时的经济集聚度相对较低,处于经济发展和城镇化的起步阶段,可对应于中国改革开放初期阶段。这一阶段各类基础设施建设快速推进,区域内的企业数量相对较少,规模经济效应和设施共享对碳排放强度产生了一定的抑制作用,且此阶段产出总量相对较小,经济集聚带来的碳排放规模效应并不明显。当经济集聚水平超过拐点值1.37(393.5万元/平方公里)并小于4.63(10251.4万元/平方公里)时,其对碳排放强度表现出显著的促进效应,此时经济处于快速扩张期,经济活动的快速集中引致了巨大的能源消费和相应的碳排放,经济集聚带来的产出扩张的排放效应大于经济集聚的规模经济及设施共享对碳排放的抑制效应,同时偏重于重工业的经济快速集聚会引起大量的产能扩张和碳排放,环境规制强度、减排处理设备利用及技术进步的增长速度难以对碳排放规模的快速增长发挥有效的抑制作用,从而引起碳排放的增长速度快于产出的增长速度,使得碳排放强度明显增加。这一阶段可以对应于中国20世纪90年代末期和21世纪初期,这一时期中国沿海地区依靠劳动、土地等要素价格比较优势逐渐成为全球代加工和出口的集聚地,但粗放的增长方式也产生了巨大的生态环境代价。

当经济集聚水平超过第二个拐点值4.63(10251.4万元/平方公里)后,经济集聚的各类正外部性、成本节约、节能减排专业化分工、集中环境监管及各类溢出效应凸显,从而开始对碳排放强度表现出抑制效应。改革开放以来,中国的城镇化和工业化快速推进,经济空间集中程度不断提高。当经济活动在空间上的集聚程度超过某一阈值时,大量企业的集中有利于共享节能减排处理设施,降低减排的单位成本,使得节能减排的规模经济效应逐渐显现。同时,企业的集中也有利于碳排放的集中监管和企业间减排经验和技术的相互学习和外溢。另外,集聚还有利于生产和节能减排的专业化分工而有助于节能减排效率提升。因此,经济集聚程度提高至第二个阈值后,就会对碳排放强度表现出显著的抑制效应。从各省份所处的阶段来看,2016年超过第二个拐点值4.63(10251.4万元/平方公里)的样本仅有北京、上海、天津、江苏、浙江、广东6个省份,其余省份均处于拐点1.37~4.63(393.5万元/平方公里~10251.4万元/平方公里)之间“倒N”型曲线的第二阶段,说明随着大部分省份经济集聚程度的进一步提高,未来一段时间内我国仍然会面临较大的碳减排压力。但另一方面,就位于“倒N”型曲线第三阶段的省份而言,虽然北京、上海、天津、江苏、浙江、广东6省份的碳排放总量相对较大,但是继续提高这些省份的经济集聚程度将有利于促进这些省份的碳减排,进而带动全国的碳减排。上述结果表明前文提出的理论假说1是成立的。

从能源强度来看,其一次项系数为正且在1%的水平上显著,二次项估计系数为负且在10%的水平上显著,表明能源强度与碳排放强度之间存在典型的“倒U”型曲线关系:当低于4.44(0.85吨标准煤/万元)的拐点值时,能源强度的提高对碳排放强度具有促增效应;当能源强度超过拐点值4.44(0.85吨标准煤/万元)后,则能源强度的提高对碳排放强度具有抑制效应。结合经济集聚的特征,本文提出可能的解释是:能源强度的高低主要取决于技术进步(Fisher-Vanden et al., 2004),我国改革开放初期的经济发展、技术水平及经济集聚程度均相对较低,集聚难以通过其技术溢出等正外部性对技术进步和能源效率发挥显著的推动作用,同时能源消费的规模经济效应也尚未形成,使得经济规模的扩张所带来的能源强度增加也推高了碳排放强度。当经济发展程度和集聚水平较高时,集聚经济的各种溢出效应、节能减排的成本节约、专业化分工、集中监管等机制使得节能减排技术得到改善,能源结构也得以“清洁化”,从而使得更加“绿色”的能源强度的提高对碳排放强度反而表现出抑制效应。本文还发现,能源强度的空间滞后项系数在5%的水平上显著为正,表明邻近省份的能源强度对本省份的碳排放强度也存在一定的正向影响,这可以归因于地区间经济竞争和示范效应的存在。当邻近省份通过扶持高污染、高能耗产业而获得快速发展时,本地区也将倾向于模仿和学习邻近省份的发展模

式,并可能与之形成一定的产业关联效应,从而引起碳排放强度的同步增加。上述结果表明前文提出的理论假说2是成立的。

从控制变量来看,劳动生产率的估计系数为正且显著,劳动生产率每提高1%,碳排放强度将增加0.078%。这表明中国近年来劳动生产率的提高对碳排放强度产生了促增效应而不利于碳减排。人均收入及其二次项估计系数分别显著为正和显著为负,从而证明了人均收入与碳排放强度之间满足EKC假说,即呈现出“倒U”型曲线关系。同样地,城镇化与碳排放强度之间也存在显著的“倒U”型曲线关系,表明随着城镇化率的提高,城市基础设施、环境规制、低碳技术、环保意识等不断完善,经济集聚的外部性逐渐凸显,使得城镇化率在超过一定的阈值后将有利于碳减排。能源结构的系数为正且在10%的水平上显著,表明煤炭消费占比越高,碳排放强度越高,再次验证了当前中国煤炭比重畸高的“高碳”能源消费结构是阻碍碳排放强度下降的重要原因。产业结构的系数也显著为正,这与本文的预期相符,表明较大的工业部门比重不利于碳排放强度的降低。

技术进步的系数为负但不显著,表明技术进步并未对碳排放强度发挥出应有的积极效果。如果技术进步具有“绿色偏向”特征则会有利于节能减排,但如果是以提高生产率为导向的,就会通过引致生产规模扩大而不利于节能减排(邵帅等,2013)。而由于技术进步的环保效应周期相对较长,地方政府可能更倾向于将财政支出投向更具经济增长效应的领域而非节能减排技术领域(张克中等,2011)。此外,新技术的开发和应用往往具有时滞性,新节能减排技术的研发和推广通常需要一定的周期。因此,当期的技术进步并不一定不会对碳排放强度产生显著的抑制效应。对外开放度的系数显著为负,表明外资的引进可以通过其更高的环保标准和更先进的节能减排技术,在改善环境质量和碳减排方面发挥出积极作用(张可、汪东芳,2014)。环境规制的系数为负但不显著。近年来,尽管中国的环境规制强度有所提高,但环境政策的执行力度尚不理想(贺灿飞等,2013),并且一直以来中国的环境规制政策主要针对二氧化硫、工业废水、工业烟尘(粉尘)等传统污染物,而碳排放的来源相对更为广泛,因而环境规制对碳排放的抑制效果还很有限。市场化程度的系数显著为负,表明市场化改革有利于降低碳排放强度。碳排放绩效的提高与能源、自然资源等要素价格的市场化程度密切相关(Fan et al., 2015),中国近年来在自然资源和能源的定价、产权界定、市场交易等领域推行的市场化改革,有利于提高要素的配置效率从而对碳排放强度发挥一定的抑制效应。节能减排政策虚拟变量的系数显著为负,表明自“十一五”时期起中国实施的节能减排目标政策确实发挥了抑制能源强度和碳排放强度的预期效果。

尽管前文采用的单位非农产出的碳排放指标能够从生产活动的角度对碳排放强度进行度量,但考虑到生产活动的主要服务对象是消费者,一国或地区居民的消费水平和消费模式在很大程度上左右着其生产活动的规模和方向,进而也会对其碳排放产生重要影响。因此,作为稳健性分析,本文进一步采用能够从消费行为的角度对碳排放强度予以度量的人均碳排放这一指标作为被解释变量,基于与前文同样的计量模型和方法,就经济集聚和能源强度对人均碳排放( $lpc$ )的影响进行实证考察,结果报告于表7。容易看出,表7的估计结果依然能够支持前文的主要结论。人均碳排放的时间滞后项系数为正且在1%的水平上显著,当期的人均碳排放每增加1%,下期的人均碳排放将增加0.709%,从而表明人均碳排放的变化同样存在明显的路径依赖特征。经济集聚和能源强度与人均碳排放之间分别呈现出显著的“倒N”型和倒“U”型曲线关系。经济集聚对人均碳排放影响变化的临界值分别为1.82(617.7万元/平方公里)和4.84(12646.9万元/平方公里)。对应于实际样本值,北京、上海、天津、江苏、浙江、广东6省份的经济集聚水平均于2016年越过第二个拐点值4.84(12646.9万元/平方公里),从而进入经济集聚对人均碳排放的抑制阶段,其余省份的经济集聚水平平均处于1.82~4.84(617.7万元/平方公里~12646.9万元/平方公里)的区间内,即仍然停留在经济集聚对人均碳排放的促增阶段。这一结果再次印证了经济集聚具有非线性的减排效应。同时,能源强度超过临界值4.48(0.89吨标准煤/万元)后,其提高将会抑制人均碳排放的增加。人均碳排放、能源强度和经济集聚的空间滞后项系数均为正且分别在1%、5%和10%的水平上显著,表明人均碳排放省份间同样存在明显的空间依赖特征,而且邻接省份的能源强度和经济集聚与本省份的人均碳排放显著正相关,从而再次表明邻接省份间存在的示范效应和产业关联效应是导致地区间碳排放“协同演化”的主要原因。其他控制变量的系数符号和显著性与前文保持一致,不再赘述。

综上,经济集聚与碳排放强度及人均碳排放之间均存在典型的“倒N”型曲线关系,当超过一定的阈值后,经济集聚就会表现出显著的减排效应。从拐点值的大小来看,经济集聚对碳排放强度影响的第二个减排临界值(10251.4万元/平方公里)要小于其对人均碳排放影响的第二个减排临界值(12646.9万元/平方公里),从而在一定程度上说明消费行为所产生的碳排放较生产活动所产生的碳排放更难于进行调控,而二者在临界值上的差异对于减排政策制定的启示是:单位产出的碳减排目标较人均碳减排目标更易于被实现,因此在制定碳减排目标和政策时应遵循循序渐进的原则,逐渐由降低碳排放强度转变到降低人均碳排放,进而最终实现对碳排放总量的有效控制。能源强度与碳排放强度及人均碳排放之间均存在典型的“倒U”型曲线关系,表明即使经济增长对能源消费的需求有所增加,仍然可以通过能源结构的清洁化调整,在满足能源需求的同时促使碳减排目标得以实现。此外,碳排放强度和人均碳排放在时间上均表现出较强的路径依赖特征,表明前期碳排放与当期碳排放高度相关,碳排放背后的产业路径和技术路径一旦形成,就可能需要付出较大的努力去改变碳排放的演化路径,因此碳减排是一项长期性的艰巨任务。最后,碳排放强度和人均碳排放均具有显著的正向空间相关性,这表明当前中国碳减排工作的实施必须形成区域间的协同联动效应。

### (三)能源强度的中介效应与经济集聚的节能效应考察——对假说3的实证检验

本节将综合(7)式、(11)式和(12)式对假说3,即能源强度是否充当了经济集聚影响碳排放强度的中介变量进行实证检验,其检验过程遵循前文所述的中介效应模型的基本检验步骤。同时,我们还将对经济集聚是否存在节能效应进行考察。具体而言,我们需要考察(12)式中经济集聚及其二次项系数的符号,若至少一个系数出现负号且显著,则表明经济集聚在某种条件下能够表现出节能效应。同样,为进行对比和稳健性分析,我们同时报告了非空间OLS、非空间面板模型固定效应、非空间动态面板模型、静态空间面板杜宾模型及动态空间面板杜宾模型的估计结果(见表8),并且依然将动态空间面板杜宾模型作为主要解释模型。

从表8的估计结果比较来看,考虑了空间相关性和内生性问题后的主要兴趣变量的系数估计结果明显优于非空间、非动态模型的

表7 经济集聚和能源强度对人均碳排放的影响

变量	非空间 OLS 模型 1	非空间普通面 板模型(FE) 模型 2	非空间动态面 板模型(SYS-GMM) 模型 3	静态空间面板杜宾 模型(GSPA2SLS) 模型 4	动态空间面板杜宾模型 (Han-Phillips GMM) 模型 5
<i>L.lpc</i>			0.625*** (5.43)		0.709*** (4.28)
<i>lag</i>	-0.068 (-0.35)	0.696 (0.43)	-0.035*** (-2.92)	-0.037* (-1.76)	-0.053*** (-3.51)
<i>slag</i>	0.432 (1.42)	-0.469 (-0.51)	0.019*** (2.97)	0.021* (1.74)	0.020*** (3.30)
<i>clag</i>	-0.008 (-0.44)	0.112 (0.69)	-0.006*** (-2.98)	-0.003** (-2.33)	-0.002*** (-3.07)
<i>lei</i>	1.074*** (10.10)	1.576*** (10.37)	1.055*** (6.45)	0.872*** (11.44)	0.825*** (9.05)
<i>slei</i>	-0.473** (-2.22)	-0.298*** (-4.56)	-0.282*** (-4.14)	-0.086* (-1.85)	-0.092*** (-3.38)
<i>lp</i>	0.125* (1.70)	0.039*** (3.04)	0.001 (0.13)	0.195* (1.85)	0.188* (1.80)
<i>ly</i>	0.649* (1.70)	1.179*** (3.22)	0.211 (0.41)	0.352 (1.12)	1.690*** (2.70)
<i>sly</i>	-0.079*** (-3.64)	-0.106*** (-5.09)	-0.008 (-0.29)	-0.063*** (-4.26)	-0.112*** (-3.65)
<i>ur</i>	0.014*** (4.66)	0.009*** (3.00)	0.007* (1.70)	0.010*** (3.85)	0.009* (1.73)
<i>sur</i>	-0.001*** (-4.36)	-0.001*** (-2.96)	-0.001** (-2.02)	-0.002*** (-3.73)	-0.001* (-1.68)
<i>es</i>	0.002*** (3.92)	0.001* (1.67)	0.002** (2.17)	0.001* (1.66)	0.002** (2.27)
<i>is</i>	0.001* (1.69)	0.001* (1.79)	0.001* (1.67)	0.001* (1.77)	0.001* (1.76)
<i>rd</i>	-0.0003 (-1.21)	-0.0002 (-1.10)	-0.0005 (-1.50)	-0.0001 (-1.62)	-0.0001 (-1.56)
<i>fd</i>	-0.009*** (-2.84)	-0.003 (-0.82)	-0.002 (-0.51)	-0.002* (-1.66)	-0.010** (-2.58)
<i>er</i>	-0.020 (-1.07)	-0.026 (-1.34)	-0.017 (-0.76)	-0.027 (-1.34)	-0.006 (-0.27)
<i>os</i>	-0.001* (-1.79)	-0.002* (-1.82)	-0.001* (-1.83)	-0.001* (-1.74)	-0.001* (-1.80)
<i>dum</i>	-0.058** (-2.21)	-0.103*** (-4.10)	-0.018* (-1.70)	-0.084*** (-3.18)	-0.071* (-1.92)
<i>w.lpc</i>				0.019** (2.20)	0.062*** (3.38)
<i>w.lag</i>					0.884* (1.80)
<i>w.lei</i>					0.045* (1.79)
常数项	0.957 (-0.45)	2.776 (-1.47)	0.532 (0.21)	-1.485 (-0.78)	2.913*** (3.08)
F(Wald) [P]	331.56 [0.00]	263.04 [0.00]	1838.59 [0.00]	244.80 [0.00]	1618.71 [0.00]
AR (1) [P]			-3.31 [0.00]		-3.92 [0.00]
AR (2) [P]			1.25 [0.25]		1.29 [0.20]
Sargan [P]			274.90 [0.30]		255.18 [0.34]



估计结果。以经济集聚系数的估计结果为例,不考虑空间相关性和内生性问题的模型中经济集聚估计系数的显著程度欠佳,再次表明不考虑空间相关性和内生性问题均会导致估计偏误。在能够同时捕捉碳排放强度和能源强度在时间维度和空间维度上依赖特征的动态空间面板杜宾模型中,兴趣变量经济集聚的估计系数符号和显著性与前文的估计结果保持一致,从而再次证明了动态空间面板杜宾模型的优越性。其估计结果显示,(12)式中经济集聚及其二次项的系数均在5%的水平上分别显著为正和显著为负,表明经济集聚与能源强度之间存在明显的“倒U”型曲线关系,当经济集聚水平超过拐点值4.07(5864.1万元/平方公里)后,经济集聚将表现出抑制能源强度的节能效应。2016年,北京、上海、天津、江苏、浙江、广东、福建、山东、重庆、河南、河北等11省份的经济集聚水平超过了4.07(5864.1万元/平方公里)而进入经济集聚对能源强度的抑制阶段。值得注意的是,经济集聚产

生节能效应的临界值明显小于经济集聚产生减排效应的临界值4.63(10251.4万元/平方公里)和4.84(12646.9万元/平方公里),即随着经济集聚程度的提高,其首先表现出对能源强度的抑制效应,而继续提高到一定的阈值后,才会同时表现出节能与减排的双重效应,从而表明经济集聚的节能效应较其减排效应更容易显现。因此,从经济集聚的角度来看,节能目标相对减排目标更易于被实现。同时,这一结果也在一定程度上预示了能源强度可能是经济集聚影响碳排放强度的一个中介变量,即经济集聚可能通过影响能源强度而对碳排放强度产生影响,但这一推断还需要通过(11)式的估计结果而提供更加严谨的经验支持。

由表8的最后一列结果可知,(11)式中经济集聚的一次项、二次项和三次项系数均在

表8 基于碳排放强度的能源强度中介效应检验

变量	非空间 OLS		非空间面板模型(FE)		非空间动态面板模型(SYS-GMM)		静态空间面板杜宾模型(GSPA2SLS)		动态空间面板杜宾模型(Han-Phillips GMM)	
	<i>lei</i>	<i>leg</i>	<i>lei</i>	<i>leg</i>	<i>lei</i>	<i>leg</i>	<i>lei</i>	<i>leg</i>	<i>lei</i>	<i>leg</i>
<i>Lleg</i>						0.539*** (3.08)				0.784*** (6.14)
<i>Llei</i>					0.849*** (8.67)				0.429*** (3.62)	
<i>lag</i>	0.494* (1.74)	-0.062** (-2.20)	0.657*** (2.80)	0.212 (0.10)	0.135* (1.81)	-0.083 (-1.30)	0.408* (1.76)	-0.055* (-1.75)	0.342** (2.20)	-0.059** (-2.52)
<i>slag</i>	-0.126* (-1.66)	0.045* (1.81)	-0.080*** (-2.73)	-0.026 (-1.02)	-0.033 (-0.72)	0.219 (1.19)	-0.094* (-1.75)	0.029* (1.90)	-0.042** (-2.31)	0.033** (2.27)
<i>clag</i>		-0.005*** (-3.73)		0.006 (0.71)		-0.009 (-1.01)		-0.003* (-1.83)		-0.004** (-2.00)
<i>lp</i>	0.265*** (3.88)	0.786*** (6.91)	0.255*** (3.82)	0.379*** (2.92)	0.116* (1.72)	0.593* (1.78)	0.224*** (3.44)	0.357*** (2.70)	0.159** (2.05)	0.342** (2.25)
<i>ly</i>	0.561** (2.04)	1.355*** (7.84)	0.094*** (11.38)	0.924*** (2.71)	0.960*** (2.94)	0.963* (1.92)	0.804*** (10.58)	0.822** (2.33)	1.153*** (5.07)	1.641*** (3.61)
<i>sly</i>	-0.049*** (-3.71)	-0.115*** (-5.59)	-0.002 (-0.90)	-0.027* (-1.68)	-0.053*** (-3.53)	-0.040* (-1.73)	-0.092*** (-7.38)	-0.022 (-1.33)	-0.070*** (-6.19)	-0.085** (-2.29)
<i>ur</i>	0.010*** (3.48)	0.025*** (5.49)	0.002** (2.08)	0.014*** (4.03)	0.009* (1.71)	0.011** (2.39)	0.013** (2.10)	0.014** (2.03)	0.017** (2.17)	0.015*** (3.31)
<i>sur</i>	-0.001*** (-3.84)	-0.001*** (-5.74)	-0.001 (-1.48)	-0.001** (-3.98)	-0.002 (-1.52)	-0.001* (-2.22)	-0.001* (-1.79)	-0.001** (-2.08)	-0.001* (-1.72)	-0.001** (2.15)
<i>es</i>	0.001*** (2.88)	0.003** (4.46)	0.003*** (7.55)	0.005*** (5.64)	0.001*** (2.60)	0.003*** (3.74)	0.003*** (6.08)	0.005*** (5.30)	0.001* (3.68)	0.003*** (3.17)
<i>is</i>	0.009*** (8.83)	0.008*** (4.36)	0.007*** (6.83)	0.004* (1.78)	0.001* (1.77)	0.003* (1.73)	0.007*** (7.08)	0.004* (1.90)	0.007*** (6.67)	0.004* (1.87)
<i>rd</i>	-0.0004 (-1.39)	-0.0001 (-1.17)	-0.0001 (-1.11)	-0.0001 (-0.84)	-0.0001 (-0.21)	-0.0001 (-0.37)	-0.0001 (-0.78)	-0.0001 (-0.62)	-0.0001 (-0.84)	-0.0001 (-0.99)
<i>fd</i>	-0.031*** (-10.59)	-0.021*** (-4.55)	-0.005*** (-2.12)	-0.002* (-1.69)	-0.004*** (-1.97)	-0.005* (-1.75)	-0.002* (-1.71)	-0.001* (-1.68)	-0.002* (-1.72)	-0.005* (-1.83)
<i>er</i>	-0.008 (-0.82)	-0.001 (-0.10)	-0.006 (-0.45)	-0.061 (-1.48)	-0.005 (-1.28)	-0.090 (-1.57)	-0.011 (-0.87)	-0.062 (-1.51)	-0.004 (-0.44)	-0.005 (-0.25)
<i>os</i>	-0.009*** (-8.69)	-0.014*** (-8.49)	-0.001* (-1.71)	-0.006*** (-3.80)	-0.001* (-1.69)	-0.003* (-1.71)	-0.001* (-1.74)	-0.006*** (-2.05)	-0.001* (-1.66)	-0.003* (-1.71)
<i>dum</i>	-0.082*** (-3.14)	-0.014* (-1.68)	-0.025* (-1.66)	-0.062* (-1.95)	-0.015*** (-3.05)	-0.007* (-1.68)	-0.008* (-1.68)	-0.055* (-1.69)	-0.055* (-1.68)	-0.056* (-1.70)
<i>wleg</i>								0.182*** (3.66)		0.172** (2.30)
<i>wlag</i>									0.054* (1.80)	0.065** (2.23)
<i>wlei</i>							0.064*** (6.14)		0.144** (2.24)	
常数项	2.414* (1.68)	10.121*** (9.36)	10.043*** (10.27)	6.252*** (2.84)	4.578** (2.45)	-5.354 (-0.59)	9.881*** (10.38)	5.501** (2.35)	-2.409*** (-4.80)	-7.656*** (-5.29)
F(Wald) [P]	136.13 [0.00]	234.81 [0.00]	205.96 [0.00]	158.80 [0.00]	1428.08 [0.00]	1553.46 [0.00]	205.44 [0.00]	349.58 [0.00]	1075.71 [0.00]	1051.92 [0.00]
AR (1) [P]					-3.65 [0.00]	-3.62 [0.00]			-3.84 [0.00]	-8.12 [0.00]
AR (2) [P]					1.24 [0.21]	0.72 [0.47]			0.86 [0.39]	0.57 [0.56]
Sargan [P]					180.42 [0.24]	191.45 [0.22]			210.31 [0.20]	229.60 [0.18]

注:在以能源强度为被解释变量的回归分析时,本文首先将经济集聚的一次项、二次项和三次项均引入方程,但发现三次项系数不显著而予以剔除,因此最终选择报告包含其一次项和二次项的估计结果;除空间动态面板模型和非空间动态面板模型(SYS-GMM)报告了Wald检验结果外,其余模型均报告了F检验结果;表9同。

5%的水平上显著且依次为负值、正值和负值,表明在不考虑能源强度对碳排放强度影响的情况下,经济集聚与碳排放强度之间仍然存在“倒N”型曲线关系。在不考虑能源强度影响的条件下,经济集聚水平超过4.37(7904.4万元/平方公里)的第二个拐点值后,经济集聚将对碳排放强度产生抑制效应。这一临界值小于考虑能源强度影响下的(7)式的临界值4.63(10251.4万元/平方公里)。基于前文所述的中介效应的检验步骤和判断标准,即综合(7)式、(11)式和(12)式的估计结果来看,经济集聚的系数在3个方程中均是显著且符合预期的,能源强度的系数在(12)式和(7)式中也均是显著且符合预期的,从而规范、严谨地证明了能源强度是经济集聚影响碳排放强度的中介变量,即前文的理论假说3是成立的。

此外,本文还发现,当经济集聚低于临界值4.07(5864.1万元/平方公里)时,集聚程度的提高对能源强度具有促增效应,此时能源强度的增加也会引起碳排放强度的增加,这与中国一直以来的城镇化、工业化及经济发展的经验事实是吻合的。改革开放之初,中国各省份的经济集聚水平相对较低,随着改革开放和经济发展的快速推进,工业化和城镇化进程加快,重工业优先发展战略使得中国大部分地区的产业结构以高能耗、高污染、高排放的产业为主导,加上环境规制及碳排放规制强度相对宽松,节能减排技术相对落后,导致这一阶段经济集聚水平的提升主要表现出以产能扩张和能耗增加为主要特征的规模效应,推动能源消费和碳排放持续走高。当经济集聚水平超过4.07(5864.1万元/平方公里)的阈值时,经济集聚所带来的各种正外部性才明显得以显现,从而开始对能源强度和碳排放强度表现出抑制效应。上述能源强度中介效应的检验过程也严谨地验证了经济集聚在达到一定阈值后会同时表现出节能和减排的双重效应这一理论推断。同时,本文可以通过上述分析清楚的得知,在经济集聚的视角下,减排目标的实现应以节能目标作为前提和途径。

表8的估计结果还显示,碳排放强度和能源强度的时间和空间滞后项的估计系数均显著为正,表明碳排放强度和能源强度在时间和空间上分别具有显著的路径依赖特征和空间溢出效应。而经济集聚的空间滞后项系数也显著为正,表明邻近省份的经济集聚对本省份的能源强度和碳排放强度也产生了显著的影响。通过表8中最后两列的系数结果比较可知,各控制变量对于能源强度和碳排放强度的影响方向完全一致,只是在显著程度上略有差异。其中劳动生产率的估计系数均显著为正,表明劳动生产率同时促进了能源强度和碳排放强度的提高。而人均收入无论与能源强度,还是碳排放强度之间均存在显著的“倒U”型曲线关系。在能源强度方程中,能源结构和产业结构的估计系数均为正且分别在10%和1%的水平上显著,表明能源消费结构中煤炭消费比重越高、产业结构中工业增加值比重越高,越不利于能源强度的降低;同碳排放强度方程的估计结果一致,城镇化一次项和二次项的系数一正一负且均是显著的,表明城镇化对能源强度和碳排放强度的影响均呈“倒U”型趋势,城镇化提高到一定程度后将有利于节能减排;环境规制对能源强度和碳排放强度均表现出不显著的负向影响,再次表明环境政策的执行力度欠佳而削弱了其应有的节能减排效果;技术进步的系数虽然为负但不显著,再次表明我国技术进步的“绿色偏向”特征并不明显,尚未对节能减排表现出预期的积极作用;对外开放度和市场化的系数均显著为负,表明近年来中国对外开放程度的提高和市场化改革的推进对能源强度和碳排放强度均产生了一定的抑制效应;“十一五”时期开始实施的节能减排目标政策也表现出显著的节能减排效果。

为进一步考察能源强度中介效应的稳健性,本文也报告了基于人均碳排放的中介效应检验结果(见表9)。表9的估计结果与表8保持一致,从而表明本文的实证结果是稳健的。在不考虑能源强度影响的情况下,经济集聚与人均碳排放同样呈现出“倒N”型曲线关系,曲线的两个拐点值分别为1.59(490.4万元/平方公里)和4.41(8226.9万元/平方公里),即当经济集聚水平超过4.41(8226.9万元/平方公里)时,其对人均碳排放将产生抑制效应。这一拐点值要小于表7中考虑能源强度后经济集聚与人均碳排放之间“倒N”型曲线的第二个拐点值4.84(12646.9万元/平方公里),而这一结论对于碳排放强度同样适用,考虑和不考虑能源强度下经济集聚与碳排放强度“倒N”型曲线的第二个拐点值分别为4.63(10251.4万元/平方公里)和4.37(7904.4万元/平方公里),从而表明能源强度的提高会推延经济集聚对碳排放产生抑制效应阶段的到来,也再次印证了能源强度可以成为经济集聚影响碳排放的一个中介变量。同时,还可以发现,无论是否考虑能源强度,经济集聚对碳排放

强度产生抑制效应的临界值都要小于其对人均碳排放产生负向影响的临界值,从而再次表明碳排放强度较人均碳排放更易于被调控,基于单位产出碳排放强度减排目标较基于人均碳排放强度的减排目标更易于被实现。结合能源强度方程的结果来看,经济集聚、能源强度和人均碳排放之间完全符合前文所述的中介效应的判断标准,从而表明能源强度是经济集聚影响人均碳排放的中介变量,因而本文的理论假说3得到了更加稳健的验证。另外,还可以看到,人均碳排放在时间和空间上均表现出显著的路径依赖特征和空间溢出效应,而且邻近省份的经济集聚对本省份的人均碳排放也存在显著影响,这与全文的结论是一致的。

## 六、结论与政策含义

随着中国新型城镇化、城市群经济和“两带一路”等城市与区域发展战略的稳步推进,“以点带面、从线到片”的空间集聚过程已经成为中国区域发展格局的基本表现和经济增长的关键动力。但同时,中国经济的区

表9 基于人均碳排放的能源强度中介效应检验

变量	非空间 OLS		非空间面板模型(FE)		非空间动态面板模型(SYS-GMM)		静态空间面板杜宾模型(GSPA2SLS)		动态空间面板杜宾模型(Han-Phillips GMM)	
	<i>lei</i>	<i>lpc</i>	<i>lei</i>	<i>lpc</i>	<i>lei</i>	<i>lpc</i>	<i>lei</i>	<i>lpc</i>	<i>lei</i>	<i>lpc</i>
<i>L.lpc</i>						0.695*** (4.72)				0.749*** (5.14)
<i>L.lei</i>					0.849*** (8.67)				0.429*** (3.62)	
<i>lag</i>	0.494* (1.74)	-0.057* (-1.93)	0.657*** (2.80)	0.079 (0.23)	0.135* (1.81)	-0.022* (-1.76)	0.408* (1.76)	-0.016** (-2.35)	0.342** (2.20)	-0.021*** (-2.85)
<i>slag</i>	-0.126* (-1.66)	0.042 (0.91)	-0.080*** (-2.73)	-0.042 (-1.01)	-0.033 (-0.72)	0.011 (1.45)	-0.094* (-1.75)	0.014* (1.87)	-0.042** (-2.31)	0.009** (2.49)
<i>clag</i>		-0.001 (-0.79)		0.003 (1.01)		-0.002 (-1.41)		-0.001* (-1.72)		-0.001** (-2.31)
<i>lp</i>	0.265*** (3.88)	0.605*** (5.42)	0.255*** (3.82)	0.412** (2.35)	0.116* (1.72)	0.085* (1.67)	0.224*** (3.44)	0.074*** (3.92)	0.159** (2.05)	0.302** (2.12)
<i>ly</i>	0.561** (2.04)	0.844 (1.55)	0.094*** (11.38)	1.296 (1.02)	0.960*** (2.94)	0.855* (1.69)	0.804*** (10.58)	0.746** (2.32)	1.153*** (5.07)	0.882* (1.90)
<i>sly</i>	-0.049*** (-3.71)	-0.071 (-1.05)	-0.002 (-0.90)	-0.026 (-0.79)	-0.053*** (-3.53)	-0.044* (-1.71)	-0.092*** (-7.38)	-0.045* (-1.70)	-0.070*** (-6.19)	-0.043* (-1.75)
<i>ur</i>	0.010*** (3.48)	0.021*** (5.15)	0.002** (2.08)	0.011*** (3.65)	0.009* (1.71)	0.007** (2.02)	0.013** (2.10)	0.010*** (3.02)	0.017** (2.17)	0.010* (1.73)
<i>sur</i>	-0.001*** (-3.84)	-0.001*** (-5.36)	-0.001 (-1.48)	-0.003** (-2.42)	-0.002 (-1.52)	-0.002* (-1.88)	-0.001* (-1.79)	-0.003* (-1.84)	-0.001* (-1.72)	-0.001* (-1.66)
<i>es</i>	0.001*** (2.88)	0.002*** (3.10)	0.003*** (7.55)	0.002*** (3.12)	0.001*** (2.60)	0.002* (1.68)	0.003*** (6.08)	0.004*** (4.69)	0.001* (3.68)	0.002*** (2.95)
<i>is</i>	0.009*** (8.83)	0.014*** (6.15)	0.007*** (6.83)	0.010*** (5.16)	0.001* (1.77)	0.001* (1.75)	0.007*** (7.08)	0.002** (2.44)	0.007*** (6.67)	0.005** (2.21)
<i>rd</i>	-0.0004 (-1.39)	-0.0001 (-1.20)	-0.0001 (-1.11)	-0.0001 (-0.19)	-0.0001 (-0.21)	-0.0001 (-1.11)	-0.0001 (-0.78)	-0.0001 (-1.47)	-0.0001 (-0.84)	-0.0002 (-1.35)
<i>fd</i>	-0.031*** (-10.59)	-0.022*** (-5.09)	-0.005*** (-2.12)	-0.002* (-1.77)	-0.004** (-1.97)	-0.002* (-1.77)	-0.002* (-1.71)	-0.004* (-1.80)	-0.002*** (-1.72)	-0.001* (-1.68)
<i>er</i>	-0.008 (-0.82)	-0.010 (-0.72)	-0.006 (-0.45)	0.023 (1.02)	-0.005 (-1.28)	-0.008 (-0.45)	-0.011 (-0.87)	-0.030 (-1.32)	-0.004 (-0.44)	-0.001 (-0.55)
<i>os</i>	-0.009*** (-8.69)	-0.011*** (-6.72)	-0.001* (-1.71)	-0.003* (-1.76)	-0.001* (-1.69)	-0.001* (-1.70)	-0.001* (-1.74)	-0.001* (-1.67)	-0.001* (-1.66)	-0.001* (-1.72)
<i>dum</i>	-0.082*** (-3.14)	-0.154*** (-3.74)	-0.025* (-1.66)	-0.020** (-2.15)	-0.015*** (-3.05)	-0.037* (-1.68)	-0.008* (-1.68)	-0.084*** (-3.05)	-0.055* (-1.68)	-0.075** (-2.12)
<i>w.lpc</i>								0.045*** (3.11)		0.162*** (3.44)
<i>w.lag</i>									0.054* (1.80)	0.056** (2.33)
<i>w.lei</i>							0.064*** (6.14)		0.144** (2.24)	
常数项	2.414* (1.68)	8.219*** (3.11)	10.043*** (10.27)	-7.335*** (-3.50)	4.578** (2.45)	-3.144** (-2.25)	9.881*** (10.38)	-9.044*** (-3.77)	-2.409*** (-4.80)	2.012 (1.47)
F(Wald) [P]	136.13 [0.00]	112.64 [0.00]	205.96 [0.00]	202.33 [0.00]	1428.08 [0.00]	1421.25 [0.00]	205.44 [0.00]	211.33 [0.00]	1075.71 [0.00]	522.96 [0.00]
AR (1) [P]					-3.65 [0.00]	-5.79 [0.00]			-3.84 [0.00]	-6.52 [0.00]
AR (2) [P]					1.24 [0.21]	1.09 [0.27]			0.86 [0.39]	1.31 [0.18]
Sargan [P]					180.42 [0.24]	169.47 [0.54]			210.31 [0.20]	188.41 [0.36]



域格局演化和可持续发展过程也面临着节能减排与增长效率的权衡与协调。能否实现发展集聚经济和促进节能减排两大战略之间“双赢”,即如何协调好要素空间优化配置和节能减排目标约束已经成为当前和未来很长一段时间内中国经济转型发展和提升国家竞争力所面临的重大理论和现实问题。在这一背景下,本文将能源消费和碳排放引入传统的产出密度模型中,构建了一个能够刻画经济集聚、能源强度与碳排放强度三者关系的理论模型,对经济集聚的节能减排效应进行了理论阐释,进而采用1995~2016年中国30个省级地区的数据样本,基于动态空间面板杜宾模型和中介效应模型等计量分析技术,对提出的理论假说进行了系统而稳健的实证检验,得到如下主要结论。

(1)经济集聚可能同时具有节能和减排的双重效应。经济集聚与碳排放强度及人均碳排放之间均存在显著的“倒N”型曲线关系,即经济集聚对碳排放强度和人均碳排放均存在一个增排临界点和减排临界点。当经济集聚超过一定的阈值后,集聚可以对碳排放表现出显著的减排效应。经济集聚与能源强度之间存在显著的“倒U”型曲线关系,即当经济集聚水平较低时,集聚会促进能源强度的增加,而当经济集聚超过一定的阈值后,其可以对能源强度表现出显著的抑制效应,即经济集聚具有节能效应。从理论上讲,经济集聚的节能减排机制主要源于经济集聚的技术溢出、设施共享、成本节约、集中监管和专业化分工等正外部性。

(2)经济集聚对碳排放的影响机制存在直接影响和间接影响两种途径。能源强度与碳排放强度及人均碳排放之间存在显著的“倒U”型曲线关系,当能源强度超过一定的临界值后会对碳排放产生抑制效应。因此,一方面,经济集聚可以通过其各种正外部性直接对碳排放强度和人均碳排放产生减排效应;另一方面,经济集聚还会通过能源强度对碳排放产生影响,即能源强度充当了其中介变量。这种中介效应呈现出非线性特征,具体的作用机制为:当经济集聚水平较低时,经济集聚会促使能源强度提高,从而引致碳排放强度的增加;当经济集聚水平超过一定的临界值后,经济集聚程度的提升会促使能源强度降低,进而有利于碳排放强度的降低。

(3)经济集聚对碳排放强度和人均碳排放产生抑制效应的临界值存在差异,经济集聚对碳排放强度和能源强度产生影响的临界值也存在差异。经济集聚对碳排放强度的减排效应临界值小于其对人均碳排放的减排临界值,说明碳排放强度较人均碳排放更易于被调控。同时,经济集聚产生节能效应的临界值小于其产生减排效应的临界值,表明经济集聚的节能效应较其减排效应更容易产生。在集聚经济视角下,节能目标相对减排目标更容易实现。

(4)碳排放和能源强度均具有较强的时空依赖效应,即碳排放和能源强度既表现出时间维度上的路径依赖特征,同时也具有显著的空间溢出效应。在时间维度上,碳排放和能源强度均表现出显著的“滚雪球”效应,即上一期的碳排放和能源强度如果处于较高水平,那么下一期的碳排放和能源强度也可能持续走高。在空间维度上,地区间的碳排放和能源强度均表现出显著的空间正相关性,表明在“GDP锦标赛”的驱动下,地方政府在节能减排的制度设计上易于形成显著的策略性竞争效应,因而节能减排政策的制定和实施必须形成有效的区域协同联动效应。

上述研究结论对促进当前中国以经济集聚为主要特征的区域发展战略,与节能减排政策之间的有效融合具有重要的政策含义。

首先,当前中国正处于新型城镇化快速发展时期,城市群成为新型城镇化的主要空间形态,“两带一路”等区域发展战略除具有促进内外经济大联通的作用外,还有利于经济活动的集中。同时,实施节能减排政策也成为了中国走可持续发展道路的必然选择。本文的研究显示,当经济集聚达到一定程度后,经济活动的空间集中生产方式较分散的生产方式而言具有明显的节能效应和减排效应。因此,在经济集聚视角下,上述区域发展战略与中国的节能减排政策目标在一定条件下能够实现“璧合珠联”的理想实施效果。传统的发展理念认为高密度的经济活动是导致高能耗、高污染和各类城市病的根本原因,而忽略了经济集聚本身潜在的节能和减排效应。尽管当前中国的城镇化推进过程中,城市高能耗、高污染等问题较为突出,但这也说明经济集聚尚处于低级阶段,其对节能减排的正外部性尚不明显。而本文的研究结果显示,当前中国部分发达省份的经

济集聚程度已经越过了经济集聚产生节能减排效应的临界点。因此,可以预期的是,随着中国区域经济集聚水平的不断提升,其内在的节能减排效应将会在更大的范围内得以实现。基于这样的判断,中国应该继续大力发展城市群经济,促进区域经济一体化,打破区域间的贸易壁垒(孙博文,2018),支持各类产业园区的建设,加快推进新型城镇化步伐,提高经济活动的空间集中度,特别需要着力提升中西部地区的经济集聚程度,加速推动各省份的经济集聚程度提升而使其达到能够发挥显著节能减排效应的理想阶段。

其次,节能政策和减排政策应同步进行,减排目标的实现应以节能目标为前提。本研究表明经济集聚对碳排放的影响存在直接和间接影响路径,经济集聚会通过影响能源强度而影响碳排放,因而能源强度的中介效应表明碳减排与节能政策之间存在直接关联,政府在制定节能和减排政策时应充分考虑两种政策的相互协调,以期使其同时发挥出经济集聚的节能和减排效应。此外,本研究发现经济集聚产生减排效应的临界值大于产生节能效应的临界值,并且能源强度在经济集聚影响碳减排过程中的中介效应明显存在,这说明在经济集聚视角下,政府在制定碳减排目标和相应的政策时应以有效的节能目标及其配套政策为先决条件,因为相对于节能目标而言,经济集聚实现碳减排目标的作用机制和路径可能更加复杂。同时,在制定碳减排政策时应该适时选择合理的减排指标。本文发现经济集聚对碳减排强度产生抑制效应的拐点值要小于其对人均碳排放抑制效应的拐点值,说明实现不同类别的碳减排目标其难度也存在差异。当前和未来中国的新型城镇化过程仍然存在大量的能源和碳排放需求,在发展为第一要务的前提下,“一步到位”地寻求快速降低人均碳排放和碳排放总量的目标并不现实。因此,要想逐步实现经济发展与节能减排的“双赢”,当前所采用的以碳排放强度为碳减排目标的政策是符合中国现阶段国情的,但随着区域经济集聚水平的不断提高,未来应该适时将碳减排目标转换到以人均碳排放和碳排放总量为主的减排阶段。

最后,本文显示碳排放和能源强度均存在显著的空间溢出效应,从而表明要想有效实现节能和减排目标,必须促进地区间的节能减排政策形成协同联动机制。在传统污染物的治理方面,目前中国不少省份间已开始尝试联合污染治理的探索,如近年来京津冀污染联合治理已经取得了一定的成效。而全国性碳排放交易市场已于2017年12月启动,但目前仅限于发电行业,覆盖范围仍然有限。因此,中国尚缺乏针对节能减排目标的成熟、健全的区域联动机制。这一重要环节的缺失很可能会导致“碳泄漏”效应(孙永平等,2016)而不利于全国总体碳减排目标的实现。此外,本文的研究结果表明,地区间的能源强度除具有较强的空间相关性外,还会通过中介效应影响碳减排效果。因此,除了开展传统环境污染物的区域联合治理外,还应尽快推进节能政策方面的区域联动机制,这既能为整体节能目标的实现提供基本保障,也能成为实现碳减排目标的重要途径。为此,地区间应该尽快开展节能政策的协同合作,争取在企业节能补贴、新能源产业扶持以及新能源技术开发应用激励等相关能源政策上形成区域间的有效对接。同时,碳排放和能源强度在时间维度上的路径依赖特征表明,节能减排工作具有相当的紧迫性和艰巨性,必须建立长效机制以保持节能减排政策在时间上的持续性和连贯性,才能不断推动区域经济沿着有利于节能减排的路径演化。

(作者单位:邵帅,上海财经大学城市与区域科学学院/财经研究所;张可,华东政法大学商学院;豆建民,上海财经大学城市与区域科学学院/财经研究所。责任编辑:李逸飞)

#### 注释

①即丝绸之路经济带、长江经济带和21世纪海上丝绸之路。

②如2012年底以来,京津冀和长三角地区成为我国雾霾污染最严重的地区。

③Ciccone和Hall(1996)、Ushifusa和Tomohara(2013)均认为 $\alpha$ 反映了导致单位面积要素边际报酬递减的拥挤效应,并指出这种“拥挤效应”意味着生产效率的降低。假定只有劳动、资本和土地3种生产要素,且满足希克斯中性技术的条件下,那么 $\alpha$ 的存在使得在不考虑集聚正外部性的情况下,产出密度函数表现出边际报酬递减的特征。这种边际报酬递减现象主要源于要素的“拥挤效应”,即在既定土地上追加劳动、资本投入,单位土地的要素投入会越来越“拥挤”,反而使得资本和劳动的生产率下降,导致其边际产出递减。

④(2)式的推导过程说明如下:首先,在(1)式基础上引入能源和碳排放的新产出密度函数为:

$$q_i = (Q_i + C_i)/A_i = \Omega_i [n_i^\beta \kappa_i^\beta e_i^{1-\beta-\alpha}] [(Q_i + C_i)/A_i]^{(\alpha-1)/\alpha}$$

其中, $q_i$ 为考虑能源和碳排放条件下的单位面积产出,再将 $(Q_i + C_i)/A_i = (Q_i/A_i)(1 + C_i/Q_i)$ 代入上式整理后即可得到下式:

$$q_i = (Q_i + C_i)/A_i = \Omega_i [n_i^\beta \kappa_i^\beta e_i^{1-\beta-\alpha}] [(Q_i + C_i)/A_i]^{(\alpha-1)/\alpha} (1 + C_i/Q_i)^{(\alpha-1)/\alpha}$$

需要说明的是,尽管以实物量计量的碳排放与以价值量计量的非农产出不具有直接的可加性,但在实施碳排放交易等碳减排政



策的条件下,碳排放被赋予了商品属性而拥有了实际价格,从而使其实物量可以转化为价值量。在这种情形下,上式及(2)式中出现的非农产出与碳排放就可以以相加的形式出现。事实上,中国于2017年12月启动的全国性碳排放交易市场可为这一模型设定形式提供现实依据。

⑤当 $x \rightarrow 0$ 时, $\ln(1+x) \approx x$ 。显然,在选择合适的数量级单位的情况下可以使 $0 < C/Q < 1$ ,而在现实中节能减排技术不断改进的条件下, $C/Q$ 会呈现逐渐下降的趋势,从而使得上述数学条件得到满足。

⑥即去物质化(dematerialisation)和去污染化(depollution),使经济活动的环境影响逐渐减少的过程(de Bruyn and Opschoor, 1997)。

⑦本文基于全球能源消费总量中的煤炭消费比重数据及中国相关统计数据发现:无论从全球还是中国的能源消费结构变化趋势来看,能源消费总量中的煤炭消费比重均呈现出不断下降的趋势,同时清洁、低碳能源的消费比重不断提高。此外,本文还利用样本数据考察了经济集聚及相关因素对能源消费结构(由煤炭消费比重度量)的影响,回归结果显示:经济集聚对煤炭消费比重具有显著的抑制作用。这一结果为假说2的合理性提供了重要的经验证据。有兴趣的读者可向作者索要相关分析结果。作者感谢匿名审稿专家关于增强假说2论证严谨性的建设性意见。

⑧作为经济集聚的直接空间载体,经济集聚现象在城市层面上具有更加明显的体现,因而城市样本可能更适合考察经济集聚对节能减排的影响,但限于统计数据的可得性(中国城市层面的化石能源分类消费数据在相关统计资料中并未被系统报告,仅有煤气、液化石油气、燃料煤等少数几种化石能源数据可得),中国城市层面的碳排放量、能源消费总量及能源结构等数据均无法准确获取,因此本文只能采用这种利用城市层面数据构造省级层面经济集聚指标的方式来弥补上述数据不可得的缺憾。显然,与直接采用单个城市单位面积的非农产出来度量经济集聚的做法,本文采用的城市数据加总的经济集聚度量指标,同样可以在平均意义上反映各省份城市层面的经济集聚水平。

⑨限于篇幅,本文没有报告Hausman检验的结果,有兴趣的读者可以向作者索取。

⑩本文中的拐点值均通过对回归方程求一阶偏导后令其为零求解而得,并且拐点值的计算采用了保留更多位有效数字的参数直接估计结果,因此与基于本文实际报告的估计参数的拐点值计算结果略有差异。为便于比较考察,在下文中将经济集聚水平的单位均换算成了万元/平方公里。

### 参考文献

- (1)陈诗一:《能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展》,《经济研究》,2009年第4期。
- (2)陈良文、杨开忠、沈体雁、王伟:《经济集聚密度与劳动生产率差异——基于北京市微观数据的实证研究》,《经济学(季刊)》,2008年第1期。
- (3)程叶青、王哲野、张守志、叶信岳、姜会明:《中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量》,《地理学报》,2013年第10期。
- (4)包群、邵敏、杨大利:《环境规制抑制了污染排放吗?》,《经济研究》,2013年第12期。
- (5)蔡昉、都阳、王美艳:《经济发展方式转变与节能减排内在动力》,《经济研究》,2008年第6期。
- (6)豆建民、张可:《空间依赖性、经济集聚与城市环境污染》,《经济管理》,2015年第10期。
- (7)范剑勇:《产业集聚与地区间劳动生产率差异》,《经济研究》,2006年第11期。
- (8)付云鹏、马树才、宋琪:《中国区域碳排放强度的空间计量分析》,《统计研究》,2015年第6期。
- (9)韩峰、冯萍、阳立高:《中国城市的空间集聚效应与工业能源效率》,《中国人口、资源与环境》,2014年第5期。
- (10)贺灿飞、张腾、杨晟朗:《环境规制效果与中国城市空气污染》,《自然资源学报》,2013年第10期。
- (11)黄茂兴、林寿富:《污染损害、环境管理与经济可持续增长——基于五部门内生经济增长模型的分析》,《经济研究》,2013年第12期。
- (12)李国璋:《全要素能源效率与环境污染关系研究》,《中国人口、资源与环境》,2010年第4期。
- (13)李思慧:《产业集聚、人力资本与企业能源效率——以高新技术企业为例》,《财贸经济》,2011年第9期。
- (14)李筱乐:《市场化、工业集聚和环境污染的实证分析》,《统计研究》,2014年第1期。
- (15)李炫榆、宋海清、李碧珍:《集聚与二氧化碳排放的空间交互作用》,《山西财经大学学报》,2015年第5期。
- (16)李小平、卢现祥:《国际贸易、污染产业转移和中国工业CO<sub>2</sub>排放》,《经济研究》,2010年第1期。
- (17)李伟娜、杨永福、王珍珍:《制造业集聚、大气污染与节能减排》,《经济管理》,2010年第9期。
- (18)李勇刚、张鹏:《产业集聚加剧了中国的环境污染吗?》,《华中科技大学学报(社会科学版)》,2013年第5期。
- (19)李廉水、周勇:《技术进步能提高能源效率吗?——基于中国工业部门的实证检验》,《管理世界》,2006年第10期。
- (20)林伯强、蒋竺均:《中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析》,《管理世界》,2009年第4期。
- (21)刘修岩:《空间效率与区域平衡:对中国省级层面集聚效应的检验》,《世界经济》,2014年第1期。
- (22)陆铭、冯皓:《集聚与减排:城市规模差距影响工业污染强度的经验研究》,《世界经济》,2014年第7期。
- (23)马丽梅、张晓:《中国雾霾的空间效应及经济、能源结构影响》,《中国工业经济》,2014年第4期。
- (24)邵帅、杨莉莉、黄涛:《能源回弹效应的理论模型与中国经验》,《经济研究》,2013年第2期。
- (25)沈能:《工业集聚能改善环境效率吗?》,《管理工程学报》,2014年第3期。
- (26)沈能:《空间集聚、规模门槛与技术创新:基于中国制造业企业普查数据的实证分析》,《管理工程学报》,2014年第4期。
- (27)沈能、王群伟、赵增耀:《贸易关联、空间集聚与碳排放》,《管理世界》,2014年第1期。
- (28)师傅、沈坤荣:《政府干预、经济集聚与能源效率》,《管理世界》,2013年第10期。
- (29)孙庆刚、郭菊娥、师傅:《中国省域间能源强度空间溢出效应分析》,《中国人口、资源与环境》,2013年第11期。
- (30)孙博文:《市场一体化是否有助于降低污染排放》,《环境经济研究》,2018年第1期。
- (31)孙永平、王磊、王成:《碳排放权交易、行业竞争力与配额分配》,《环境经济研究》,2016年第1期。
- (32)田相辉、张秀生:《空间外部性的识别问题》,《统计研究》,2013年第9期。
- (33)涂正革:《环境、资源与工业增长的协调性》,《经济研究》,2008年第2期。



- (34)王海宁、陈媛媛:《产业集聚效应与工业能源效率研究——基于中国25个工业行业的实证分析》,《财经研究》,2010年第9期。
- (35)王芳、周兴:《人口结构、城镇化与碳排放——基于跨国面板数据的实证研究》,《中国人口科学》,2012年第2期。
- (36)许和连、邓玉萍:《外商直接投资导致了中国的环境污染吗?》,《管理世界》,2012年第2期。
- (37)闫逢柱、苏李、乔娟:《产业集聚发展与环境污染关系的考察》,《科学学研究》,2011年第1期。
- (38)杨仁发:《产业集聚、外商直接投资与环境污染》,《经济管理》,2015年第2期。
- (39)杨子晖:《经济增长、能源消费与二氧化碳排放的动态关系研究》,《世界经济》,2011年第6期。
- (40)虞义华、郑新业、张莉:《经济发展水平、产业结构与碳排放强度》,《经济理论与经济管理》,2011年第3期。
- (41)原毅军、谢荣辉:《产业集聚、技术创新与环境污染的内在联系》,《科学学研究》,2015年第10期。
- (42)袁晓玲、张宝山、杨万平:《基于环境污染的中国全要素能源效率研究》,《中国工业经济》,2009年第2期。
- (43)张可、豆建民:《集聚对环境污染的作用机制研究》,《中国人口科学》,2013年第5期。
- (44)张可、汪东芳:《经济集聚与环境污染的交互影响及空间溢出》,《中国工业经济》,2014年第6期。
- (45)张克中、王娟、崔小勇:《财政分权与环境污染:碳排放的视角》,《中国工业经济》,2011年第10期。
- (46) Akhmat, G., Zaman, K., Shukui, T., Irfan, D. and M. M. Khan, 2014, "Does Energy Consumption Contribute Environmental Pollutants? Evidence from SAARC Counties", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.21, No.9, pp.5940~5951.
- (47) Aroui, M. E. H., Youssef, A. B., M'henni, H. and C. Rault, 2012, "Energy Consumption, Economic Growth and CO<sub>2</sub> Emissions in Middle East and North African Countries", *Energy Policy*, Vol.45, pp.342~349.
- (48) Baltagi, B. H., 2001, *Econometric Analysis of Panel Data*, John Wiley & Sons, New York.
- (49) Baron, R. M. and D. A. Kenny, 1986, "The Moderator-mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations", *Journal of Personality & Social Psychology*, Vol.51, No.6, pp.1173~1182.
- (50) Chuai, X., Huang, X., Wang, W., Wen, J., Cheng, Q. and J. Peng, 2012, "Spatial Econometric Analysis of Carbon Emissions from Energy Consumption in China", *Journal of Geographical Sciences*, Vol.22, No.4, pp.630~642.
- (51) Chung, Y. H., Fare, R. and S. Grosskopf, 1997, "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach", *Journal of Environmental Management*, Vol.51, pp.229~240.
- (52) Ciccone, A. and R. Hall, 1996, "Productivity and the Density of Economic Activity", *American Economic Review*, Vol.86, No.1, pp.54~70.
- (53) de Bruyn, S. M. and J. B. Opschoor, 1997, "Developments in the Throughput-Income Relationship: Theoretical and Empirical Observations", *Ecological Economics*, Vol.20, No.3, pp.255~268.
- (54) Elhorst, J. P., 2003, "Specification and Estimation of Spatial Panel Data Models", *International Regional Science Review*, Vol.26, No.3, pp.244~268.
- (55) Elhorst, J. P., 2014, *Spatial Econometrics: From Cross-sectional Data to Spatial Panels*, Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
- (56) Eva, J., Drahomira, P., Magdalena, B. D. and L. Homolka, 2013, "The Age of Clusters and Its Influence on Their Activity Preferences", *Technological and Economic Development of Economy*, Vol.19, No.4, pp.621~637.
- (57) Fan, M., Shao, S. and L. Yang, 2015, "Combining Global Malmquist-Luenberger Index and Generalized Method of Moments to Investigate Industrial Total Factor CO<sub>2</sub> Emission Performance", *Energy Policy*, Vol.79, No.1, pp.189~200.
- (58) Fisher-Vanden, K., Jefferson, G. H., Liu, H. and Q. Tao, 2004, "What is Driving China's Decline in Energy Improvement?", *Resource and Energy Economics*, Vol.26, pp.2287~2295.
- (59) Frank, A., 2001, "Urban Air Quality in Larger Conurbations in the European Union", *Environmental Modeling and Software*, Vol.14, No.4, pp.399~414.
- (60) Glaser, E. L., 2011, *Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier*, Penguin Press, Maryland.
- (61) Glaser, E. L. and M. E. Kahn, 2010, "The Greenness of Cities: Carbon Dioxide Emissions and Urban Development", *Journal of Urban Economics*, Vol.67, pp.404~418.
- (62) Grossman, G. M. and A. B. Krueger, 1995, "Economic Growth and the Environment", NBER Working Paper No. 4634, National Bureau of Economic Research.
- (63) Grazi, F., van den Bergh, J. and H. Waisman, 2016, "A Simple Model of Agglomeration Economies with Environmental Externalities", AFD Research Papers No. 2016-18, French Agency for Development.
- (64) Han, C. and P. C. B. Phillips, 2010, "GMM Estimation for Dynamic Panels with Fixed Effects and Strong at Unity", *Econometric Theory*, Vol.26, pp.119~151.
- (65) He, J., 2006, "Pollution Haven Hypothesis and Environmental Impacts of Foreign Direct Investment: The Case of Industrial Emission of Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) in Chinese Provinces", *Ecological Economics*, Vol.14, No.4, pp.228~245.
- (66) Jacobs, J., 1969, *The Economy of Cities*, Random House, New York.
- (67) Kamal-Chaoui, L. and A. Robert, 2009, "Competitive Cities and Climate Changes", OECD Regional Development Working Papers No. 2009/02, Organization for Economic Co-operation and Development.
- (68) Lan, J., Kakinaka, M. and X. Huang, 2012, "Foreign Direct Investment, Human Capital and Environmental Pollution in China", *Environmental and Resource Economics*, Vol.51, pp.255~275.
- (69) Lin, X. and K. R. Polenske, 1995, "Input-Output Anatomy of China's Energy Use Changes in the 1980's", *Economic System Research*, Vol.7, pp.32~45.

- (70) Mackinnon, D. P., Krull, J.L. and C. M. Lockwood, 2000, "Equivalence of the Mediation, Suppression and Confounding Effect", *Prevention Science*, Vol.1, No.4, pp.173~181.
- (71) Mads, B. I. and D. Torben, 2013, "Cluster Facilitation from a Cluster Life Cycle Perspective", *European Planning Studies*, Vol.21, No.4, pp.556~574.
- (72) Marshal, A., 1980, *Principles of Economics*, Macmillan, London.
- (73) Mehra, M. and M. Musai, 2011, "Pollution, Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from India, China and Brazil", *Journal of Sustainable Energy*, Vol.2, No.4, pp.1~7.
- (74) Mudakkar, S. R., Zaman, K. and M. M. Khan, 2013, "Energy for Economic Growth, Industrialization, Environment and Nature Resources: Living Is Just Enough", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.25, pp.580~595.
- (75) Naito, T., 2010, "Regional Agglomeration and Transfer of Pollution Reduction Technology under the Presence of Transboundary Pollution", *Regional Science Policy & Practice*, Vol.2, No.2, pp.157~175.
- (76) Newman, P. W. G. and J. R. Kenworthy, 1989, *Cities and Automobile Dependence: An International Source Book*, Gower Publishing Company, Aldershot.
- (77) Otsuka, E., Goto, M. and T. Sueyoshi, 2014, "Efficiency and Agglomeration Economics: The Case of Japanese Manufacturing Industries", *Regional Science Policy & Practice*, Vol.6, No.2, pp.195~212.
- (78) Perry, S., 2013, "Do Urbanization and Industrialization Affect Energy Intensity in Developing Countries", *Energy Economics*, Vol.37, pp.52~59.
- (79) Poon, J. P. H., Casas, I. and C. He, 2006, "The Impact of Energy, Transport and Trade on Air Pollution in China", *Eurasian Geography and Economics*, Vol.47, No.5, pp.568~584.
- (80) Porter, M., 1990, *The Competitive Advantage of Nations*, Free Press, New York.
- (81) Poumanyong, P. and S. Kaneko, 2010, "Does Urbanization Lead to Less Energy Use and Lower CO<sub>2</sub> Emissions? A Cross-country Analysis", *Ecological Economics*, Vol.70, No.2, pp.434~444.
- (82) Qin, B. and J. Wu, 2014, "Does Urban Concentration Mitigate CO<sub>2</sub> Emission? Evidence from China from 1998~2008", *China Economic Review*, Vol.35, pp.220~231.
- (83) Ramanathan, R., 2005, "An Analysis of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Countries of the Middle East and North in Africa", *Energy*, Vol.30, No.15, pp.2831~2842.
- (84) Roberts, J. T. and P. Grimes, 1997, "Carbon Intensity and Economic Development 1962~1991: A Brief Exploration of the Environmental Kuznets Curve", *World Development*, Vol.25, No.2, pp.191~198.
- (85) Rodriguez, M. C., Dupont-Courtade, L. and W. Oueslat, 2016, "Air Pollution and Urban Structure Linkage Evidence from European Cities", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol.53, pp.1~9.
- (86) Shao, S., Yang, L. L., Yu, M. B. and M. L. Yu, 2011, "Estimation, Characteristics and Determinants of Energy-related Industrial CO<sub>2</sub> Emissions in Shanghai (China), 1994~2009", *Energy Policy*, Vol.39, pp.6476~6494.
- (87) The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", Institute for Global Environmental Strategies (IGES): Hayama, Kanagawa, Japan.
- (88) Tveteras, R. and G. E. Battese, 2006, "Agglomeration Externalities, Productivity and Technical Inefficiency", *Journal of Regional Science*, Vol.46, pp.605~625.
- (89) Ushifusa, U. and A. Tomohara, 2013, "Productivity and Labor Density: Agglomeration Effects over Time", *Atlantic Economic Journal*, Vol.41, No.3, pp.123~132.
- (90) Verhoef, E. T. and P. Nijkamp, 2002, "Externalities in Urban Sustainability: Environmental versus Localization-type Agglomeration Externalities in a General Spatial Equilibrium Model of a Single-Sector Monocentric Industrial City", *Ecological Economics*, Vol.40, No.2, pp.157~179.
- (91) Virkanen, J., 1998, "Effect of Urbanization on Metal Deposition in the Bay of Southern Finland", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.36, No.9, pp.729~738.
- (92) Wagner, U. J. and C. D. Timmins, 2009, "Agglomeration Effects in Foreign Direct Investment and the Pollution Haven Hypothesis", *Environmental and Resource Economics*, Vol.43, No.2, pp.231~256.
- (93) Wu, J. J. and J. J. Reimer, 2016, "Pollution Mobility, Productivity Disparity and the Spatial Distribution of Polluting and Nonpolluting Firms", *Journal of Regional Science*, Vol.56, No.4, pp.615~634.
- (94) Yamamura, E. and I. Shin, 2007, "Dynamics of Agglomeration Economics and Regional Industrial Structure: The Case of the Assembly Industry of the Greater Tokyo Region 1960~2000", *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol.18, pp.483~499.
- (95) Zhang, Y., Wu, J., Lin, L., Wang, Y. and L. Wang, 2013, "Evaluating the Relationship among Economic Growth, Energy Consumption, Air Emissions and Air Environmental Protection Investment in China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.18, pp.259~270.
- (96) Zhao, X. F. and H. Jiang, 2013, "Remotely Sensed Thermal Pollution and Its Relationship with Energy Consumption and Industry in a Rapidly Urbanizing Chinese City", *Energy Policy*, Vol.57, pp.398~406.
- (97) Zeng, D. and L. Zhao, 2009, "Pollution Havens and Industrial Agglomeration", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.58, No.2, pp.141~153.

**ABSTRACTS OF SELECTED ARTICLES****Comparisons on the Income Measurements in Chinese Household Survey Data**

*Luo Chuliang and Li Shi*

With more attention to social and economic issues during economic transition in China, more and more household surveys have been collected. There are many similarities among the surveys in terms of the survey method, targeted population groups, and even research topics design, but the findings and conclusions drawn from the various surveys might be very different. Therefore, this paper attempts to make some comparisons of demographic characteristics of sample population structure deviation, relationship between income and consumption, and differences in the explanatory factor of income distribution and income inequality. The findings indicate that, (1) almost all the surveys are seriously biased in the composition of “gender–age–educational attainment”, although the readjustment on the demographic composition makes little change in the level of income and income inequality; (2) there is very weak correlation between income and consumption in some survey datasets, which seems to be related to the measurement error on income and consumption variables; (3) the inequality measures (variance of log income) is hard to be explained by the demographic composition and coefficient effect by regressed income function among the surveys.

**Effects of Economic Agglomeration on Energy Saving and Emission Reduction:****Theory and Empirical Evidence from China**

*Shao Shuai, Zhang Ke and Dou Jianmin*

Economic agglomeration and energy saving & emission reduction are the primary driver and objective function of China's economic development transformation, respectively. Whether their corresponding policies could achieve a “win-win” effect is the key to achieving China's green development transformation. This paper theoretically and empirically investigates the influential mechanism of economic agglomeration on energy saving and emission reduction under the background of China's urban agglomeration boom and regional harmonious development. We introduce energy consumption and carbon emissions into traditional production density model as input and undesirable output, respectively, to theoretically discuss the non-linear influential mechanism of agglomeration and energy intensity on carbon intensity. Furthermore, based on the panel data of China's 30 provincial-level regions over 1995~2016, we use the dynamic spatial panel Durbin model to verify the explanatory power of our theoretical model. The results show that economic agglomeration and carbon intensity present a typical inverted N-shape curve relationship, while energy intensity and carbon intensity have a typical inverted U-shape curve relationship. When the agglomeration reaches a certain threshold, it can simultaneously exert an energy-saving effect and an emission-reduction effect. Moreover, energy intensity can be a mediator of economic agglomeration to mitigate carbon emissions, i.e., the agglomeration not only shows a direct effect on carbon intensity, but also exerts an indirect effect on it through energy intensity. Carbon emissions and energy intensity all present an evident “snow ball” effect in the time dimension and an obvious strategic competition effect in the spatial dimension. Accordingly, we argue that in the process of vigorously impelling urban agglomeration, China should make efforts to promote the positive impacts of economic agglomeration on energy saving and emission reduction through their consistent policies, and should promote the inter-regional linkage and coordination of energy-saving and emission-reduction policies.