资源科学 Resources Science
第43卷 第1期 2021年1月 2021,43(1):94-103 Vol.43, No.1 Jan., 2021

引用格式:曾刚, 陆琳忆, 何金廖. 生态创新对资源型城市产业结构与工业绿色效率的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 94-103. [Zeng G, Lu L Y, He J L. Impact of ecological innovation on the economic transformation of resource-based cities[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 94-103.] DOI: 10.18402/resci.2021.01.08

生态创新对资源型城市产业结构与工业绿色效率的影响

曾 刚[1,2,3],陆琳忆[1,2,3],何金廖[1,3]

(1. 华东师范大学中国现代城市研究中心,上海 200062; 2. 华东师范大学城市与区域科学学院,上海 200241; 3. 华东师范大学城市发展研究院,上海 200062)

摘 要:理清生态创新对资源型城市产业结构和工业绿色效率的影响,对资源型城市实现经济转型具有重要意义。本文以中国115个资源型城市为例,通过测算这些城市的产业结构高级度、工业绿色效率,构建回归模型,实证分析了生态创新对不同发展阶段资源型城市产业结构升级和工业绿色效率提升的影响。研究发现:①中国资源型城市的产业结构和工业绿色效率都存在较大的空间差异,且两者具有相似的空间格局,表现较优的城市主要集中在陕西、山西和内蒙古南部、山东西部等地区;②生态创新对提升资源型城市的产业结构具有显著的正向作用,这种作用对成长型、成熟型、衰退型和再生型资源型城市均显著;③生态创新对提升资源型城市工业绿色效率没有显著的影响,其中生态创新对成长型城市提升工业绿色效率有显著负面影响,对成熟型、衰退型和再生型城市的影响则不显著。基于以上发现,本文认为生态创新对于促进中国资源型城市经济转型升级的作用尚未得到充分显现,并提出完善中国资源型城市生态创新政策的具体建议。

关键词:生态创新;资源型城市;产业结构;工业绿色效率;城市转型

DOI:10.18402/resci.2021.01.08

1 引言

资源型城市作为国家经济建设中重要的能源与资源供给基地,为中国工业化进程作出了重要贡献。近年来,长期高强度的资源开采和粗放型经济增长模式导致中国大部分资源型城市都面临资源枯竭、环境恶化、产业结构失衡、经济发展滞缓等难题。尤其在2008年金融危机之后,钢铁、煤炭、有色金属等产能严重过剩,国际市场价格大幅下降,资源型城市的发展受到重大打击,城市经济转型迫在眉睫。

技术创新在城市转型中的作用一直是学界讨论的热点问题[1,2]。随着资源环境对经济增长的约束趋紧,生态创新也逐渐受到学界的重视。然而,已有文献尚未对生态创新进行统一的界定。James等[3]最早提出生态创新的概念,将其定义为企业产品和生产工艺方面的系列创新,这类创新给企业和客户带来价值增值,同时有助于减少生产对环境的负面影响。Kesidou等[4]将生态创新归纳为末端控制技术、清洁生产技术、环保技术研发等。上述观点均强调技术层面的创新,属于狭义上的生态创新。另有学者为生态创新赋予了更广的内涵。Rennings[5]将其定义为能够改善环境的新工艺、产品、技术和制度。Eiadat等[6]将生态创新概括为"一系列能够促进减排、污染防治的环境管理措施"。世界经济合作与发展组织(OECD)认为"能够降低产品生产周期中的环境风险和资源利用的新组织、新产

收稿日期:2020-02-14;**修稿日期**:2020-07-12

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502701);国家自然科学基金项目(41701180)。

作者简介:曾刚,男,湖北武汉人,教授,研究方向为生态文明与区域发展方式、创新网络与产业集群。**E-mail:** gzeng@re.ecnu.edu.cn

通讯作者:何金廖,男,湖南邵阳人,研究员,研究方向为城市与经济地理研究。**E-mail:** jlhe@iud.ecnu.edu.cn

品、新服务、新管理经营方式”均可被认为是生态创新[7]。这类研究对生态创新的定义超出了工艺、技术和产品创新的范畴,包括了组织创新和管理创新等。尽管现有文献对生态创新内涵的表述不尽相同,但是都强调生态创新应包含两个关键目标:一是环境效益,减少环境污染或提升资源利用效率;二是经济效益,生态创新应具有商业价值。出于定量分析的考虑,本文采用生态创新狭义的概念,将其定义为能同时提高经济效益和环境效益的技术创新。

从本质上来说,生态创新属于技术创新的范畴,包含了研发、试验、生产、传播等环节[8]。然而,生态创新又区别于一般技术创新,生态创新具有对环境效益的明确诉求,要求创新成果能够带来污染减少、能源节约、环境改善等效果。定量分析生态创新是一个巨大的挑战,有学者基于“化繁为易”的思维,采用环境相关专利反映生态创新的情况[9,10]。尽管使用专利指标测算生态创新的方法仍然不够完善,主要在于不同专利的经济价值差异较大,但在基于大样本量的生态创新研究中,采用专利衡量生态创新成果仍是当前学界的主流做法[11]。

目前,中国资源型城市在经济转型过程中面临重重困难。其中,产业结构落后和工业环境污染严重是资源型城市经济转型必须解决的难题。一方面,产业结构是影响城市发展的重要因素,产业结构升级往往能带动城市功能转型[12]。另一方面,提升城市产业结构可以促进资源型城市的工业绿色效率,进而减少污染产出,减轻环境负担。基于此,本文使用中国115个资源型城市2009—2017年的数据进行实证研究,分析资源型城市产业结构和工业绿色效率时空格局,揭示生态创新对中国资源型城市产业结构升级、工业绿色效率提升的作用。

2　影响机理与理论假设

2.1　生态创新对产业结构升级的影响

从产业经济学视角看,技术创新对经济结构升级有重要的驱动作用。生态创新作为一种特殊的技术创新,能够为企业创造竞争优势,也为资源型城市产业结构转型升级提供了新通道[13]。概括起来,生态创新主要从以下几个方面对资源型城市的经济结构升级产生积极作用。首先,生态创新能够提升产品的科技含量和附加值,推动资源型城市的矿产资源产业链上下延伸,使得城市产业结构向多样化和高级化发展。其次,突破性的生态创新会改变整个技术系统的演进,能够创造出新生产领域,衍生出新产业[14]。比如,绿色产品、新清洁工艺、新环保能源的出现,促进了环保产业发展,在产业结构中培养新的增长点,改善资源型城市产业结构单一的问题。再次,生产要素随着技术扩散逐渐集聚在具有技术优势的产业部门,技术落后和生产效率低下的产业将面临被市场淘汰的风险。优胜劣汰的市场机制会驱动企业迎合环境友好型的市场需求,自发加大创新投入和培养创新型人才,改善资源型城市产业升级过程中动力不足的问题。

基于上述分析,本文提出第一条理论假说:生态创新能够提升资源型城市的产业结构。

2.2　生态创新对工业绿色效率的影响

生态创新主要通过污染治理和清洁生产两个方面发挥作用,达到提升工业绿色效率的目标。首先,企业采用生态创新技术和工艺,能够提高末端治理能力,实现对生产过程的污染控制和末端减排。因此,提升生态创新水平能够缓解资源型城市长期以来面临的环境污染问题,有利于城市生态修复和环境治理。此外,清洁生产技术、环保材料、生产流程优化使得工业生产过程更加清洁,促进企业生产更加环保的绿色产品,引导资源型城市的整个工业链向节约型、低排放的循环经济发展方式转变。很多学者对此进行了实证研究。Fethi等[15]以全球前20个成品油出口国家2007—2016年的数据为样本,研究生态创新对碳减排的作用,结果表明生态创新对碳排放有负向且显著的长期影响。Fethi等[16]针对中国石化企业碳排放的研究也得到了类似的结果。刘晓红[17]认为生态创新水平提升能够显著减少本地区、相邻地区甚至全局的雾霾污染。何小钢[18]提出绿色技术水平的提升能够显著提升行业全要素生产率,同时降低行业污染排放。

基于上述文献,本文提出第二条理论假说:生态创新能够提升资源型城市的工业绿色效率。

综合上述研究,生态创新理论上会对产业结构升级和工业绿色效率产生显著的正向作用,作用路径如图1。

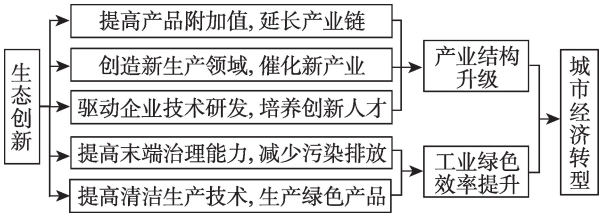

图1 生态创新影响资源型城市经济转型路径图

Figure 1 Mechanism of ecological innovation affecting the economic transformation of resource-based cities

3 研究方法

3.1 产业结构高级度测算

产业结构高级度提升是指产业结构在合理的基础上，由低级到高级的动态发展过程[19]。研究采用夹角求值法计算资源型城市的产业高级度，反映资源型城市产业结构水平。具体方法如下：首先，划分三次产业并计算各产业增加值占GDP的比重，构成一组三维向量$\boldsymbol{X}_0=(x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0})$，然后分别计算$\boldsymbol{X}_0$与三次产业的向量$\boldsymbol{X}_1=(1,0,0)$，$\boldsymbol{X}_2=(0,1,0)$，$\boldsymbol{X}_3=(0,0,1)$的夹角$\theta_1$，$\theta_2$，$\theta_3$，计算公式为：

$$\theta_m=\arccos\left[\frac{\sum_{n=1}^{3}(\boldsymbol{x}_{n,m}\times\boldsymbol{x}_{n,0})}{\sum_{n=1}^{3}(\boldsymbol{x}_{n,m}^2)^{1/2}\times\sum_{n=1}^{3}(\boldsymbol{x}_{n,0}^2)^{1/2}}\right] \quad (1)$$

$$ih=\sum_{k=1}^{3}\sum_{m=1}^{k}\theta_m \quad (2)$$

式中：θ_m为各向量的弧度值；$\boldsymbol{x}_{n,m}$为三维向量中的分量；n和m分别代表m次产业中的第n类产业，m=1，2，3；ih代表产业结构高级度；ih的值越大代表城市产业结构高级化水平越高。

3.2 工业绿色效率测算

实现经济增长与环境保护的协调发展是资源型城市经济转型的重要目标之一。本文选取工业废水排放量、工业二氧化硫排放量、工业固体废物产生量的综合效应表征资源型城市环境污染程度。首先，将工业三废指标进行无量纲标准化处理，加权求和得到环境污染综合值，最后计算单位环境污染综合值的经济产出，以此表示各城市的工业绿色效率。

$$E_{ab}=\left[\left(x_{ab}-\min x_{ab}\right)/\left(\max x_{ab}-\min x_{ab}\right)\right]+1 \quad (3)$$

$$ei_{it}=\sum_{i}^{3}\frac{1}{3}E_{ab} \quad (4)$$

$$ep_{it}=\frac{G_{it}}{ei_{it}} \quad (5)$$

式中：E_{ab}代表第a种污染物的第b个标准化结果；x_{ab}、$\min x_{ab}$、$\max x_{ab}$分别代表第a种污染物的第b个原始数据以及原始数据中的最小值和最大值；ei_{it}表示i市t年的环境污染综合值；G_{it}为i城市t年的国内生产总值；ep_{it}为单位环境污染综合值的经济产出，其值越高代表城市的工业绿色效率越高。

3.3 模型设定与变量说明

本文分别以资源型城市的产业结构高级度（$\log ih_{it}$）和工业绿色效率（$\log ep_{it}$）为被解释变量，建立如下回归模型，以考察生态创新对这两个指标的影响：

$$\begin{aligned}\log ih_{it}=&\alpha_{it}+\beta_0\log ih_{it-1}+\beta_1\log ei_{it-2}+\\&\beta_2\log pgdp_{it}+\beta_3\log rp_{it}+\\&\beta_4\log gov_{it}+\beta_5\log fdi_{it}+\varepsilon_{it}\end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\log ep_{it}=&\alpha_{it}+\beta_0\log ih_{it-1}+\beta_1\log ei_{it-2}+\\&\beta_2\log pgdp_{it}+\beta_3\log rp_{it}+\\&\beta_4\log gov_{it}+\beta_5\log fdi_{it}+\varepsilon_{it}\end{aligned} \quad (7)$$

考虑到生态创新的影响具有滞后性，将生态创新指标滞后两期放入模型，用ei_{it-2}表示。模型中的控制变量包括：人均GDP（$pgdp_{it}$，万元），用于控制城市经济规模；科技人员数量（rp_{it}，人），用于控制城市的研发投入；实际利用外资额（fdi_{it}，万元），用于控制对外开放水平；城市污水集中处理率（gov_{it}，%），作为环境规制的代理变量，控制环境政策对工业污染排放的影响。考虑到不同资源型城市发展生态创新的条件存在差异，研究在模型中引入了个体效应项。城市间的经济基础、科技水平及产业发展阶段差异比较大，研究对所有变量取对数，使得数据变化更加平稳。变量的描述性统计见表1。

表1 变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量名	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
ih	1495	6.31	0.46	4.97	8.01
ep	1495	8762.24	769.66	601.25	5999.52
ei	1492	55.97	119.41	0.00	1418.00
pgdp	1495	34067.71	28527.26	99.00	256877.00
rp	1495	4002.67	5859.60	100.00	110000.00
gov	1495	69.81	26.10	0.00	113.00
fdi	1400	25677.60	37399.12	3.00	269864.00

3.4 数据来源与处理

根据2013年《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》对资源型城市类型的划分,研究共整理了115个地级市资源型城市的数据,包括成长型城市14个,成熟型城市62个,衰退型城市24个以及再生型城市15个。通过统计分析可以发现,资源型城市具有与一般城市明显不同的特征:首先,城市经济发展高度依赖于自然资源,其主导产业或支柱产业是依靠城市具有的资源优势发展起来的。第二产业在资源型城市的经济结构中占据主导位置,第一、第三产业发展严重滞后。2017年,中国第二产业增加值占国民生产总值的比重为40.5%,而资源型城市的比重达到了45.1%。其中,克拉玛依、石嘴山、吕梁、鹤壁、攀枝花等城市第二产业的比重都达到60%以上,有超过1/3的资源型城市这一指标高于50%。其次,资源型城市的工业环境污染问题比其他城市更加严重。2017年,中国非资源型城市单位人均GDP的工业SO_2排放量为0.17 t,而资源型城市达到了0.49 t,是非资源型城市的近3倍。本研究的时间跨度为2009—2017年,这一时期是中国资源型城市经济和环境问题集中爆发的时期,同时是加速城市转型发展的关键时期。

本文通过"低碳、环保、节能、减排、降耗、清洁、绿色、生态、治理、污染、回收、可持续、可再生、环境友好、循环利用"等关键词从中国国家专利检索系统筛选出与绿色生态相关的发明专利授权数,作为资源型城市生态创新的指标。诚然,人工搜索生态相关发明专利授权量可能存在不够全面、带有主观性等问题,但是这种方法可操作性较强,同时也满足了大样本研究的数据需求。事实上,类似使用关键词收集绿色专利数据来衡量生态创新水平的方法在区域经济研究中应用已较为广泛[20,21],并取得了比较可信的研究结果。

此外,资源型城市三次产业的GDP、环境污染数据,以及控制变量中的人均GDP、科技人员数量、外商投资利用额等数据主要来源于《中国城市统计年鉴》、各地级市的统计年鉴以及统计公报等官方渠道。

4 结果与分析

4.1 资源型城市产业结构高级度和工业绿色效率的时空格局

根据式(1)-(5)计算得到资源型城市在2009年、2013年和2017年3个代表年份的产业结构高级度和工业绿色效率,并使用ArcGIS 10.2软件进行可视化处理,利用自然间断点分级法将产业结构高级度和工业绿色效率划分为5级(图2)。

首先,中国资源型城市的产业结构高级度存在较大的空间差异。以2017年为例,大同、阳泉和吉林产业结构高级度排名前3,其产业结构高级度达到了7以上;鹤岗、伊春和黑河排名落后,产业结构高级度仅在5.81以下。产业结构高级度的高值区均集中在山东西南部、河南西部和内蒙古南部地区,低值区呈斑块状分布在内蒙古东北部、黑龙江北部、甘肃中部、四川北部、福建西部以及云南东北部等地区。这一空间格局在研究期间没有发生显著的变化。资源型城市产业结构高级度的提升趋势非常微弱。产业结构高级度在2017年的平均值为6.52,与2009年相比仅提升了0.21。鸡西、黑河、

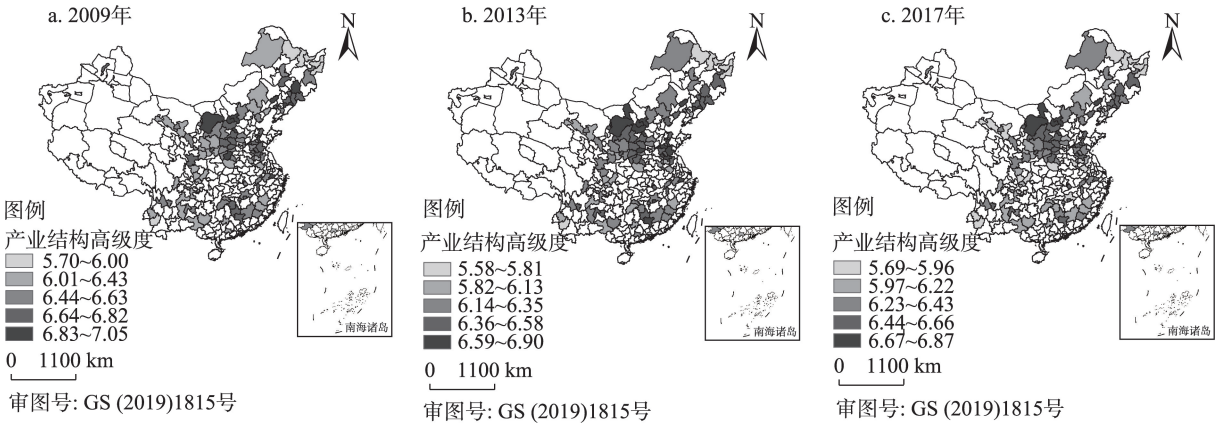

图2 2009年、2013年和2017年中国资源型城市产业结构高级度

Figure 2 Industrial structure upgrading situation of China's resource-based cities, 2009, 2013, and 2017

鹤岗、葫芦岛等7个城市的产业结构高级度甚至呈现下降趋势。由此可见，中国大部分资源型城市的产业结构并没有成功实现转型升级。

其次，中国资源型城市的工业绿色效率也存在较大的空间差异（图3）。3个节点年份的高值区集中在陕西中北部、山西中南部、内蒙古南部、山东西南部、河南西部等地区，低值区呈斑块状分布在内蒙古东北部、东北三省、湖南中西部、江西以及云南东北部等地区。资源型城市的工业绿色效率上升趋势明显，平均值从2009年的643.18上升到了2017年的1425.85。对比产业结构高级度和工业绿色效率的空间格局，可以发现两者存在较高的相似度。这说明，产业结构较优的资源型城市在工业绿色转型方面表现也很出色，而产业结构较为低级的资源型城市在工业绿色效率提升方面也不理想。

4.2 生态创新对资源型城市产业结构和工业绿色效率影响的检验

考虑到当期的产业结构高级度和工业绿色效率都可能受到前一期绿色创新的影响，导致计量模型存在无双向因果关系的内生性问题，本文将滞后一期的产业结构高级度和工业绿色效率纳入模型，分别记为l.log*ih*和l.log*ep*，采用一阶差分GMM法进行检验，表2报告了模型的回归结果。其中，模型1、模型4报告了2009—2013年的检验结果，模型2、模型5报告了2013—2017年的检验结果，模型3和模型6报告了2009—2017年的检验结果。

根据模型1-3，产业结构高级度滞后项的系数均显著为正，说明产业结构向高级化发展的首要动力来自于产业结构比例的惯性连续，这一结论在相关研究中也得到了验证[22]。2009—2017年，生态创新对资源型城市产业结构高级度提升有显著的积极作用，并且积极作用在模型1—2中显著性有增强的趋势，这一结果验证了理论假说一。2009—2013年，生态创新对产业结构升级的正面影响在统计意义上不显著。这一时期，生态创新未被给予足够重视。资源型产业的多数产品为资源要素投入的初级产品，生态技术含量不高。由于资源型城市生态相关的专利数量较小，对产业结构升级的影响力较弱。2013—2017年，生态创新对产业结构高级度的影响在5%的置信水平下显著为正，生态创新水平每提高1%，产业结构高级度将提升0.40%。在这个时期，资源型城市的生态技术发明专利大量增加，促进了新产业的产生，推动产业结构逐渐从低端的初级加工制造向高端发展。在控制变量中，人均GDP、外来投资额对产业结构高级度的影响为正，但是在统计意义上并不显著。

模型4-6的结果表明，上一期的工业绿色效率显著正向影响本期的工业绿色效率，说明资源型城市工业绿色效率提升存在路径依赖，工业绿色转型将是一个循序渐进的过程。生态创新的估计系数均为正数，说明生态创新在2009—2017年对提高工业绿色效率有正面的影响，但是在统计意义上并不显著。这意味着生态创新对资源型城市工业绿色效率的提升作用比较微弱，理论假说二没有得到充分验证。这可能是由于资源型城市中，产学研合作、专利转化等机制尚未完善，一定程度上阻碍了

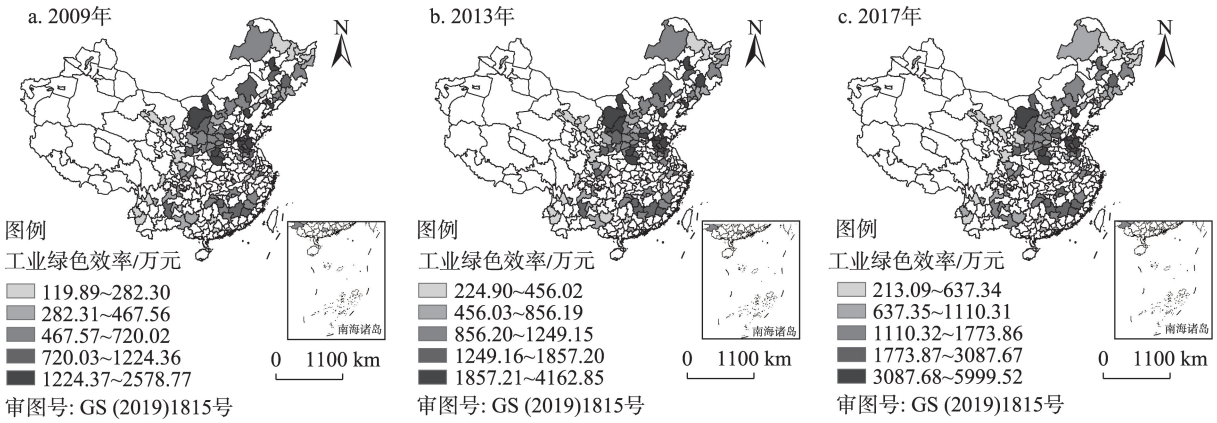

图3 2009年、2013年和2017年中国资源型城市工业绿色效率

Figure 3 Industrial green efficiency of resource-based cities in China, 2009, 2013, and 2017

表2 2009—2017年生态创新对资源型城市经济转型的影响检验

Table 2 Impact of ecological innovation on the economic transformation of resource-based cities, 2009-2017

变量	模型1 log*ih*	模型2 log*ih*	模型3 log*ih*	模型4 log*ep*	模型5 log*ep*	模型6 log*ep*
l.log*ih*	0.9098*** (0.2211)	1.0432*** (0.0908)	1.0050*** (0.0761)			
l.log*ep*				0.5455*** (0.0672)	0.3768*** (0.1247)	0.4402*** (0.0788)
log*ei*	0.0008 (0.0008)	0.0040** (0.0015)	0.0031*** (0.0009)	0.0017 (0.0071)	0.0084 (0.0203)	0.0059 (0.0074)
log*gdp*	0.0104*** (0.0038)	0.0054 (0.0091)	0.0048 (0.0036)	0.3067*** (0.0774)	0.8356*** (0.1777)	0.4775*** (0. 0893)
log*rp*	0.0005 (0.0016)	0.0002 (0.0039)	−0.0003 (0.0024)	0.0090 (0.0075)	−0.0417 (0.0388)	−0.0275 (0.0431)
log*gov*	−0.0009 (0.0022)	−0.0004 (0.0047)	−0.0008 (0.0006)	0.0157* (0.0196)	0.0002* (0.0352)	0.0010* (0.0038)
log*fdi*	−0.0002 (0.0011)	−0.0006 (0.0005)	0.0006 (0.0027)	0.0052 (0.0077)	−0.0037 (0.0044)	0.0285 (0. 0177)
常数项	0.0583 (0.4073)	−0.0267 (−0.0267)	−0.0608 (0.1419)	3.9370*** (0.3941)	1.5623* (0.8651)	4.0718*** (0.4248)
*P*值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

注:括号内为系数估计的标准差;*、**、***分别代表在10%、5%、1%的置信水平下显著;实证结果由Stata14.0软件测算得出。

生态创新的科技成果转化,导致生态创新没有在实际工业生产中发挥出应有的环境效益。

4.3 城市分类视角下的检验结果

为了检验生态创新在不同阶段的资源型城市中的异质性影响,本文对成长型城市、成熟型城市、衰退型城市和再生型城市分别采用一阶差分GMM方法进行了回归分析,表3和表4报告了检验结果。

根据表3中模型1−4的结果,生态创新对产业结构高级度提升的作用在各类型城市中都显著为正,理论假说一得到验证。在成长型城市和成熟型城市中,生态创新对产业结构高级度的提升作用在5%的置信水平下显著。在衰退型城市和再生型城市中,生态创新的提升作用在1%的置信水平下的显著,生态创新水平每提高1%,其产业结构高级度将分别提升0.15%和0.21%。生态创新对产业结构升级的正面影响在再生型城市中最为明显。这是由于再生型城市已经基本摆脱资源依赖,具备了培育战略性新兴产业的经济和技术条件。生态创新通过促进新产品和新产业的产生,加速淘汰落后产能,进而优化了资源型城市的产业结构。随着经济结构的升级,技术人才回流且不再集中于资源型产业,这进一步促进了生态创新的发展,由此逐渐形成良性循环。

从各项控制变量来看,经济发展规模对4类资源型城市的结构转型都具有正面作用,尤其在成熟型城市中具有显著的正向作用,说明产业结构的调整需要经济规模的支撑。科技人员数量仅在再生型资源型城市中表现出正向影响。这可能因为在其他3类城市中,科研人才的总体质量不高,科技创新的驱动作用未得到显现。此外,外商投资对成长型、成熟型城市的产业结构升级具有负面作用,可能是由于外商在这些城市中的投资集中在资源密集型产业,获取初级资源是其投资主要目的。

表4模型1−4分别检验了生态创新对成长型、成熟型、衰退型和再生型城市工业绿色效率的影响。首先,生态创新对成长型城市的工业绿色效率提升具有显著的负面作用,理论假说二没有得到验证。这一方面是由于成长型城市的环境压力相对较小,通过开采资源即可获得令人满意的经济效益,产业结构高级度提升微弱,甚至在部分年份存在下降趋势。另一方面,在成长型城市对生态创新的重视程度较低,有限的生态创新主要应用在提高资源利用率、降低生产成本方面,没有充分发挥其环境保护的作用。其次,生态创新对衰退型城市工

表3 2009—2017年生态创新对不同阶段资源型城市产业高级度的影响

Table 3 Impact of ecological innovation on industrial structure upgrading during 2009-2017, based on city classification

变量	模型1 成长型城市	模型2 成熟型城市	模型3 衰退型城市	模型4 再生型城市
l.log*ih*	0.9694**	0.8795***	0.9938***	0.9500***
	(0.0172)	(0.1093)	(0.0090)	(0.0324)
log*ei*	0.0017**	0.0032**	0.0015***	0.0021***
	(0.0008)	(0.0012)	(0.0005)	(0.0007)
log*gdp*	0.0001	0.0113***	0.0002	0.0022
	(0.0024)	(0.0037)	(0.0015)	(0.0027)
log*rp*	−0.00005	−0.0009	−0.0005	0.00008
	0.0018	(0.0007)	(0.0014)	(0.0011)
log*gov*	0.00717	0.0023	−0.0001	−0.0007
	(0.0073)	(0.0036)	(0.0006)	(0.0005)
log*fdi*	−0.00003	−0.0007	0.0021	0.0118**
	(0.0010)	(0.0005)	(0.0017)	(0.0052)
常数项	0.0220	0.0993	0.0031	0.0663
	(0.0394)	(0.1906)	(0.0193)	(0.0574)
*P*值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表4 2009—2017年生态创新对不同阶段资源型城市工业绿色效率的影响

Table 4 Impact of ecological innovation on industrial green efficiency in 2009-2017, based on city classification

变量	模型1 成长型城市	模型2 成熟型城市	模型3 衰退型城市	模型4 再生型城市
l.log*ep*	0.7761***	0.5291***	0.8516***	0.95812***
	(0.0901)	(0.0848)	(0.0531)	(0.0244)
log*ei*	−0.0245***	0.0077	−0.0014	0.0008
	(0.0056)	0.0091	(0.0088)	(0.0128)
log*gdp*	0.1293**	0.4029***	0.0184	−0.0209
	(0.0706)	(0.0037)	(0.0405)	(0.0197)
log*rp*	0.0662	−0.0195	0.0446	−0.0218
	(0.0468)	(0.0438)	(0.0289)	(0.0157)
log*gov*	−0.1073**	−0.0181	−0.0112	−0.1579*
	(0.0495)	(0.0348)	(0.0129)	0.0925
log*fdi*	0.0094	−0.0031	0.0388***	0.0265***
	(0.0123)	(0.0036)	(0.0092)	(0.0101)
常数项	2.2565***	0.655***	1.555***	1.618***
	(0.62991)	(0.5527)	(0.5252)	(0.5742)
*P*值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

业绿色效率的提升同样具有负面影响，不过在统计意义上不显著。衰退型城市面临的人才和资金短缺问题最为严重，没有建立起完善的生态创新系统。生态创新无法遏制经济衰退的势头，也很难发挥其应有的环境效益。最后，根据模型2和模型4，生态创新对成熟型城市和再生型城市工业绿色效率的提升具有正面作用，但是这种作用在统计意义上并不显著。这主要由于成熟型城市的资源开采已到鼎盛时期，环境污染与经济发展的矛盾加剧，政府和企业对生态创新的投入力度加大，生态创新的作用得以初步显现。另一方面，随着环境规制趋紧，企业自发在污染治理方面加大创新投入，降低了污染物的排放强度。在再生型城市中，经济发展开始步入良性轨道，城市发展的重点落在提高经济发展的质量和环境效益，生态创新的发展环境较好。

4.4 稳健性检验

为检验上述结果的稳健性，将资源型城市的数据拓展到2005-2017年进行回归，观察扩展样本量之后获得的结果是否与估计结果保持一致性（表5）。另外，在稳健性检验中，替换了被解释变量的指标。使用产业结构升级系数[23,24]替换产业结构高级度，产业结构层次系数（*stru*）代表各个资源型城

表5 2005—2017年生态创新对资源型城市经济转型的影响

Table 5 Impact of ecological innovation on the economic transformation of resource-based cities during 2005-2017 (Robustness test)

变量	模型1 log*stru*	模型2 log*water*	模型3 log*so*	模型4 log*solid*
l.log*stru*	0.9788***			
	(0.0171)			
l.log*water*		0.3969***		
		(0.0227)		
l.log*so*			0.9220***	
			(0.0128)	
l.log*dust*				0.3967***
				(0.0169)
log*ei*	0.0045***	-0.1091 ***	-0.0613***	-0.1353 ***
	(0.0003)	(0.0139)	(0.0066)	(0.0104)
log*gdp*	-0.0053**	-0.5692***	-0.2650***	-0.3708***
	(0.0011)	(0.0499)	(0.0295)	(0.0513)
log*rp*	0.0055***	0.0707 **	-0.1217***	0.2274***
	(0.0015)	(0.0338)	(0.0234)	(0.0463)
log*gov*	0.0003	-0.0899***	-0.0155	-0.0194
	(0.0008)	(0.0336)	(0.0120)	(0.0235)
log*fdi*	−0.0011***	0.0676***	0.0045***	0.0435***
	(0.0002)	(0.0099)	(0.0076)	(0.0089)
常数项	0.0268	6.2282***	1.6978***	3.9979***
	(0.0183)	(0.5072)	(0.2747)	(0.5520)
*P*值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

市的产业结构升级水平,测算公式为:

$$stru=\sum_{i}^{3}q_i\times i=q_1\times 1+q_2\times 2+q_3\times 3$$

式中:q_i为第i产业的产值比重。产业结构层次系数的取值在1~3之间,越接近于3,产业结构升级的水平越高。

根据表5的结果,生态创新对产业结构层次系数具有显著的正向作用,说明生态创新有利于提升产业结构。在模型2-4中,生态创新的估计系数显著为负,说明生态创新对单位GDP的工业三废排放量具有抑制作用,该结论与分类型的资源型城市工业绿色效率回归分析结果有所差异。但总体上稳健性检验的结果与上文回归分析结果基本保持一致,且各类控制变量的结果也没有发生明显改变,说明该回归模型基本稳健。

5 结论与建议

5.1 结论

资源依赖是资源型城市的本质特征[25],矿产资源的有限性和不可再生性决定了资源型城市需要实现经济转型。本文首次测算了中国2009—2017年115个资源型城市的产业结构高级度和工业绿色效率,分析了资源型城市经济转型的时空演变特征,实证检验了生态创新对不同类型资源型城市产业结构升级和工业绿色效率提升的影响。得到如下结论:

(1)中国资源型城市的经济转型尚处于初级阶段,经济转型能力存在明显的空间差异。2009—2017年,资源型城市工业绿色效率有所提升,但是产业结构高级度上升趋势不明显。产业结构升级较快和工业绿色效率较高的城市均集中在陕西、山西和内蒙古南部、山东西部等地区。

(2)2009—2017年,生态创新对提升资源型城市产业结构有显著的正面作用,这种作用存在于不同类型的资源型城市,并随着城市经济发展水平的提升表现更加明显。这说明利用生态创新提升产业结构,需要一定的经济和技术条件作为保障。

(3)生态创新对资源型城市工业绿色效率的促进作用在统计意义上不显著,说明中国资源型城市的工业绿色效率提升并非由生态创新驱动,而更可能受到环境规制和国家宏观政策的影响。生态创新对成长型城市的工业绿色效率的影响表现为负相关,资源型城市早期对生态创新的重视程度不够,一定程度上延缓了中国资源型城市成功转型的进度。

5.2 建议

基于以上研究结论,本文认为生态创新在中国资源型城市经济转型过程中中尚未完全发挥其应有的经济效益和环境效益,对此,提出以下政策建议:

(1)资源型城市应当更加重视通过生态创新来促进产业结构升级和提高工业绿色效率的路径。一方面,通过承接产业转移、建设跨地区合作园区等方式,加强与其他发达城市之间的技术和人才交流。出台优惠政策,大力吸引更多优质企业和更高层次的科研人才。另一方面,资源型城市的高技术人才、研发资金等创新要素过度集中于资源型产业,政府应当引导创新要素向服务业、新兴产业等环境友好型产业流动,引导技术创新与生态保护相结合。

(2)城市的经济转型和生态创新政策需因地制宜。成长型资源城市处于资源开发的初期阶段,资源型产业带动城市经济规模快速增长,环境问题尚不明显。这类城市应当降低资源开采强度,降低资源开发过程中对环境的破坏。成熟型城市已经具备成熟的资源开采、运输和加工体系,城市的经济压力较小但是环境问题日渐凸显。这类城市应当加大研发投入,引进生态创新人才,同时应大力支持第三产业的发展防止出现资源型产业独大的局面。衰退型城市的资源开采已经接近枯竭,经济下行压力与环境恶化压力并存。这类城市应将重点放在环境隐患的治理,加强环保技术的应用转化,同时要引进新技术和新产业,培养经济的新增长点。再生型城市的经济发展模式已经逐步向环境友好型转型,这类城市应当着重提高产业的技术含量,引导产业向集约化发展,提高经济发展的环境与社会效益。

本文依然存在一些不足之处,未来可从以下几个方面展开更加深入的研究。一是由于数据获取的限制,本文仅划分一、二、三产业来测量产业结构高级度,后续研究可根据产业的技术密集度进行划

分,更加详细地反映产业结构由低附加值向高附加值产业演进的情况;二是资源型城市的支柱产业存在差异,比如矿产型城市和森工型城市的经济转型路径有较大区别,需要进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 赵洋. 我国资源型城市产业绿色转型效率研究: 基于地级资源型城市面板数据实证分析[J]. 经济问题探索, 2019, (7): 94-101. [Zhao Y. Research on the efficiency of industrial green transformation of resource-based cities in China: An empirical analysis based on panel data of prefecture-level resource-based cities[J]. Inquiry into Economic Issues, 2019, (7): 94-101.]

[2] 孙晓华, 郑辉. 资源型地区经济转型模式: 国际比较及借鉴[J]. 经济学家, 2019, (11): 104-112. [Sun X H, Zheng H. Economic transformation mode in resource-based regions: International comparison and reference[J]. Economist, 2019, (11): 104-112.]

[3] James P, Fussler C. Driving Eco-innovation: A Breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability[M]. London: Pitman Pub, 1996.

[4] Kesidou E, Demirel P. On the drivers of eco-innovations: Empirical evidence from the UK[J]. Research Policy, 2012, 41(5): 862-870.

[5] Rennings K. Redefining innovation: Eco-innovation research and the contribution from ecological economics[J]. Ecological Economics, 2000, 32(2): 319-332.

[6] Eiadat Y, Kelly A, Roche F, et al. Green and competitive? An empirical test of the mediating role of environmental innovation strategy[J]. Journal of World Business, 2008, 43(2): 131-145.

[7] OECD. Sustainable Manufacturing and Eco-innovation[M]. Paris: OECD, 2009.

[8] 蒋秀兰, 沈志渔. 基于波特假说的企业生态创新驱动机制与创新绩效研究[J]. 经济管理, 2015, 37(5): 190-199. [Jiang X L, Shen Z Y. Research on driving mechanism and performance of enterprises' ecological innovation based on porter hypothesis[J]. Economic Management, 2015, 37(5): 190-199.]

[9] Costantini V, Crespi F, Martini C, et al. Demand-pull and technology-push public support for eco-innovation: The case of the biofuels sector[J]. Research Policy, 2015, 44(3): 577-595.

[10] Ghisetti C, Quatraro F. Green technologies and environmental productivity: A cross-sectoral analysis of direct and indirect effects in Italian regions[J]. Ecological Economics, 2017, 132: 1-13.

[11] 李青青. 区域异质性视角下环境规制的生态创新效应研究: 以长江经济带为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2019. [Li Q Q. Ecological Innovation Effect of Environmental Regulation from the Perspective of Regional Heterogeneity: A Case Study of Yangtze River Economic Belt[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.]

[12] 郑紫颜, 仇方道, 张春丽, 等. 再生性资源型城市功能转型异质性及其工业结构解析[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 570-582. [Zheng Z Y, Qiu F D, Zhang C L, et al. Heterogeneity of functional transformation of renewable resource-based cities in China and analysis of their industrial structure[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 570-582.]

[13] Mirata M, Emtairah T. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(10): 993-1002.

[14] 陈守强. 绿色技术创新对产业结构升级作用机理探析[J]. 黑龙江对外经贸, 2011, (10): 54-55. [Chen S Q. Analysis on the mechanism of green technology innovation on industrial structure upgrading[J]. Heilongjiang Foreign Economic Relations & Trade, 2011, (10): 54-55.]

[15] Fethi S, Rahuma A. The role of eco-innovation on CO_2 emission reduction in an extended version of the environmental Kuznets Curve: Evidence from the top 20 refined oil exporting countries[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(29): 30145-30153.

[16] Fethi S, Rahuma A. The impact of eco-innovation on CO_2 emission reductions: Evidence from selected petroleumcompanies[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2020, 53: 108-115.

[17] 刘晓红. 空间关联下绿色创新的雾霾污染效应研究[J]. 华东经济管理, 2019, 33(10): 48-57. [Liu X H. Study on haze pollution effect of green innovation under spatial correlation [J]. East China Economic Management, 2019, 33(10): 48-57.]

[18] 何小钢. 能源约束、绿色技术创新与可持续增长: 理论模型与经验证据[J]. 中南财经政法大学学报, 2015, (4): 30-38. [He X G. The constraint of energy, green technology innovation and sustainable growth: Theoretical model and empirical evidence[J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2015, (4): 30-38.]

[19] 高远东, 张卫国, 阳琴. 中国产业结构高级化的影响因素研究[J]. 经济地理, 2015, 35(6): 96-101. [Gao Y D, Zhang W G, Yang Q. The factors influencing of industrial structure upgrade in China [J]. Economic Geography, 2015, 35(6): 96-101.]

[20] Sun Y M, Lu Y L, Wang T Y, et al. Pattern of patent-based environmental technology innovation in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2008, 75(7): 1032-1042.

[21] Johnstone N, Haščič I, Popp D. Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts[J]. Environmental & Resource Economics, 2010, 45: 133-155.

[22] 付宏, 毛蕴诗, 宋来胜. 创新对产业结构高级化影响的实证研究: 基于2000-2011年的省际面板数据[J]. 中国工业经济, 2013, (9): 56-68. [Fu H, Mao Y S, Song L S. Empirical analysis

on the effect of innovation on advancement of industrial structure process: Based on panel datas of provinces from 2000 to 2011[J]. China Industrial Economy, 2013, (9): 56-68.]

[23] 李敏, 孙佳佳, 张婷婷. 人力资本结构高级化对产业结构升级的影响研究: 基于中国省级面板数据[J]. 工业技术经济, 2020, 39(8): 72-77. [Li M, Sun J J, Zhang T T. Research on the impact of human capital structure upgrading on industrial structure upgrading: Based on provincial panel data[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2020, 39(8): 72-77.]

[24] 徐敏, 姜勇. 中国产业结构升级能缩小城乡消费差距吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(3): 3-21. [Xu M, Jiang Y. Can the China's industrial structure upgrading narrow the gap between urban and rural consumption? [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015, 32(3): 3-21.]

[25] 严太华, 胡尧. 基于资源脱钩视角的资源型城市分类[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2172-2181. [Yan T H, Hu Y. Classification of resource-based cities from the perspective of resource decoupling [J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2172-2181.]

Impact of ecological innovation on the economic transformation of resource-based cities

ZENG Gang[1, 2, 3], LU Linyi[1, 2, 3], HE Jinliao[1, 3]

(1. The Center for Modern Chinese City Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. School of Urban & Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. The Institute of Urban Development, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The impact of technological innovation on urban economic transformation has received great attention, but few existing studies have focused on the impact of ecological innovation on the economic transformation of resource-based cities. This study used data of 115 resource-based prefecture-level cities in China from 2009 to 2017 to test the impact of ecological innovation on resource-based cities, including the upgrading of industrial structure and industrial green efficiency. It was found that the economic transformation of China's resource-based cities is still at an early stage. Although the industrial green efficiency of resource-based cities has improved, the upward trend of the industrial structure upgrading was very weak. Resource-based cities are spatially differentiated in their economic transformation capabilities. The cities with high performance are concentrated in Shaanxi Province, Shanxi Province, southern Inner Mongolia, and western Shandong Province. The empirical results show that ecological innovation has a significant positive effect on improving the level of industrial structure upgrading in resource-based cities, and this effect is more pronounced in mature and regenerative cities. But the impact of ecological innovation on improving industrial green efficiency is not significant. We suggest that innovation policies need to be tailored according to the characteristics of different cities.

Key words: ecological innovation; resource-based city; industrial structure; industrial green efficiency; urban transformation