

# 中国城市能源转型的特征及影响因素分析

——基于中国131个城市的经验证据

赵晓丽<sup>1,2</sup>, 张钰琛<sup>1,2</sup>, 杨曦<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京100083; 2. 中国石油大学(北京)低碳经济与政策研究中心, 北京100083;

3. 对外经贸大学国际经济贸易学院, 北京100029)

**摘要:**城市是能源消费的中心,城市能源转型是实现中国碳中和目标的重要条件。因此,研究城市能源转型的特征及影响因素十分必要。本文首先分析了中国城市能源转型的技术特征和时空特征;其次,基于2001—2016年131个城市的非平衡面板数据,实证分析了影响中国不同类型城市能源转型的关键因素。研究发现:①中国城市能源转型中更重视电动汽车的发展,国外城市则相对更重视生物质的发展;②中国城市能源转型存在“东快西慢、南快北慢”等区域差异特征;③从影响因素看,煤炭资源禀赋情况对能源转型影响最大;其次是技术进步;之后是政策性因素;④影响城市能源转型的关键因素对不同城市有所不同。本文有助于可以为城市能源转型政策的精准化实施提供参考依据。

**关键词:**城市能源转型;技术特征;时空特征;影响因素;实证分析

**中图分类号:** X22; F426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2022)4—0130—11

## 一、引言

城市是能源消费的中心,城市的面积占地球表面不到1%,却消耗了全球76%的煤炭、63%的石油和82%的天然气(徐科等,2017)。中国城市的能源消耗占全部能源消耗比例为85%,超出世界67%平均水平近20个百分点<sup>①</sup>。因此,解决能源消费面临的巨大环境压力,实现2060年“碳中和”目标,研究中国城市能源转型的特征及影响因素,促进中国城市能源转型尤为重要。

现有关于城市能源转型的研究主要集中在能源转型技术和能源转型影响因素两个方面。在能源转型技术方面,现有研究认为城市能源转型主要通过加强对可再生能源的利用、改善用能设施来实现。以太阳能、风能、电动汽车和氢能为代表的城市能源转型技术得到了众多学者的关注(Morlet和Keirstead,2013;Yuan et al,2018;Li et al 2016;何建坤,2014)。改善用能设施大致可以分为建筑能效改造和市政设施改造。在一些大型城市,建筑能效改造已经出具成效。Hou et al(2016)的研究指出上海、天津、深圳、重庆的部分商业建筑进行用能设施改造,可以达到20%左右的能效优化。市政设施的改造最典型的技术应用是太阳能路灯,在日照、釜山等城市都有体现(Huang et al,2018;Beak et al,2016)。但是应该看到,改善用能设施往往涉及城市更深层次的改造,和城市整体的发展规划息息相关。

能源转型的影响因素是城市能源转型领域研究的另一个热点问题,相关研究主要包括技术因素的影响(Kim et al,2017),经济因素的影响(林伯强和杜之利,2018),制度因素的影响(Polemis,2016),以及政策因素的影响(Mamounakis et al,2019)。这些研究对揭示城市能源转型的推动力发挥了重要作用,但还存在以下三点需要进一步改进之处:第一,现有研究主要集中于对国外技术因素的分析,缺少对中国技术进步对城市能源转型影响的量化分析。第二,关于政策实施效果的研究多集中于对单一政策效果,比如,可再生能源配额(RPS)政策、固定上网电价(FIT)政策,财政补贴政策的影响等,缺少对各种政策综合分析。第三,

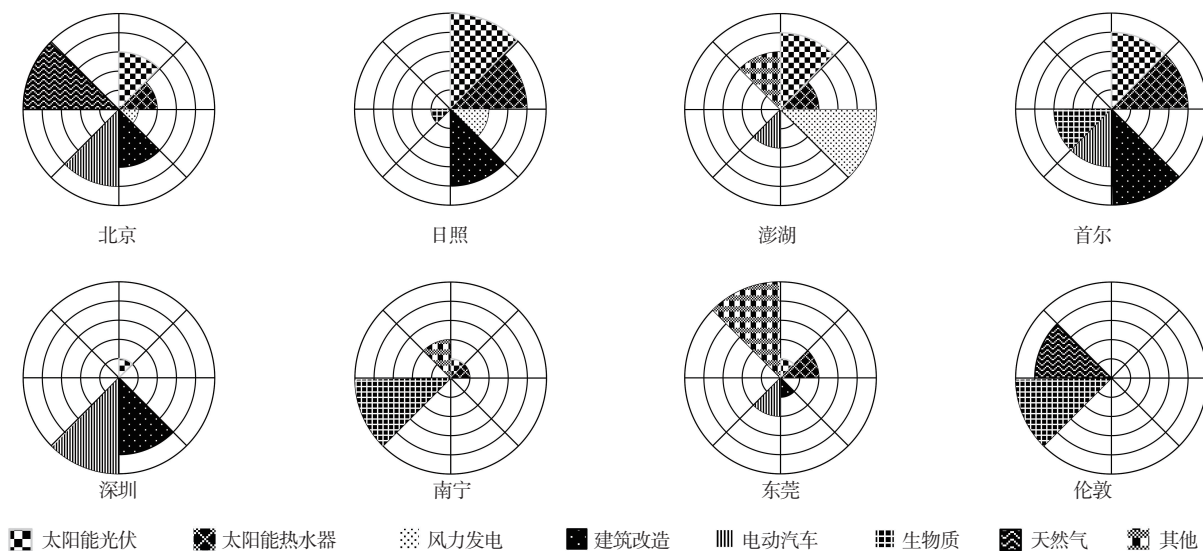
收稿日期:2021-06-13

基金项目:国家自然科学基金“城市能源系统低碳转型的驱动机制及政策研究”(71934006)

作者简介:(通讯作者)赵晓丽,博士,中国石油大学(北京)经济管理学院副院长,教授,博士研究生导师,研究方向:能源经济,节能减排政策,环境管制与可持续发展;张钰琛,中国石油大学(北京)硕士研究生,研究方向:产业经济学,能源经济,能源转型政策;杨曦,对外经贸大学博士研究生,研究方向:产业经济学,能源经济。

① 数据来源:国家电网、国网(苏州)城市能源研究院、中国城市能源报告总体特征与样本发现,2018。





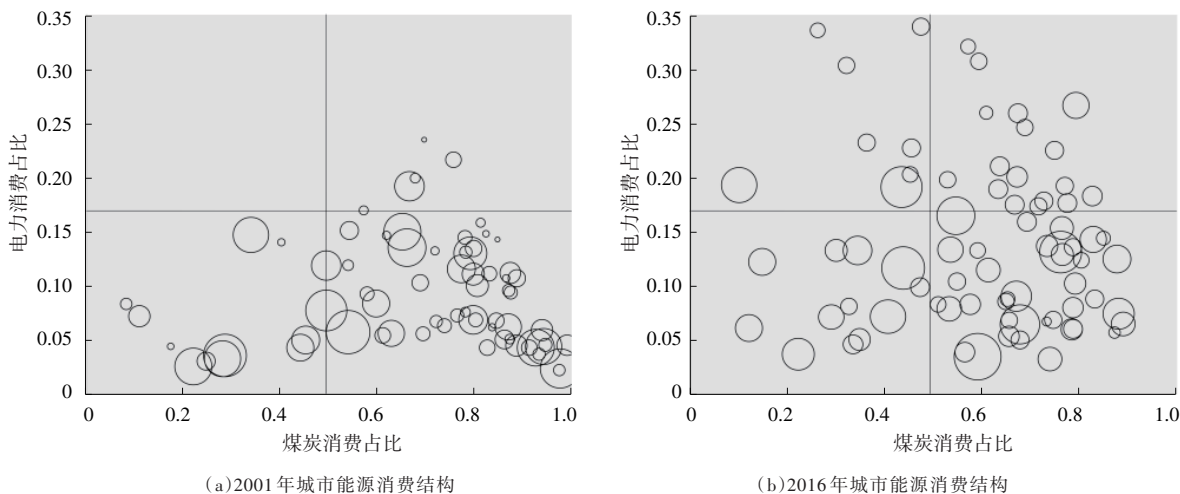
横轴代表煤炭消费占比,纵轴代表电力消费占比,圆形面积代表能源消费总量

图 3 典型城市的能源转型技术热度

## (二) 中国城市能源转型的时间和空间特征

### 1. 中国城市能源转型的时间特征

中国的煤炭消费占一次能源比例从 2008 年的 72.6% 下降到 2018 年的 58%<sup>③</sup>,城市煤炭消费占比自 2010 年以来也呈现出快速下降趋势;与此相对应的是,电力消费占比显著增加。图 4 显示,与 2001 年相比,2016 年城市统计图中左上区域的圆圈明显增多<sup>④</sup>,说明电力消费占比提升显著;另外,从圆圈的大小来看,许多城市在电力消费增加的同时,能源消费总量也在增加。电力消费增加表明电能取代化石能源,逐渐成为工业设备的主要能源。因此,电力消费占比的增加体现了产业的不断升级,而能源消费总量的增加则是经济发展的表现。



资料来源:作者根据各城市能源统计年鉴计算得到

圆形面积代表能源消费总量(GJ)

图 4 2001 年和 2016 年城市能源消费结构

### 2. 中国城市能源转型的空间特征

中国城市能源转型的空间重心总体呈“从东南向西北”的变化趋势。为研究城市能源转型在地理空间上

③ 资料来源:国家统计局.中国统计年鉴.2019。

④ 既包含 2001 年,又包含 2016 年能源消费数据的城市共有 70 个。

的变化特征,本文引入城市能源结构的时空重心。采用区域经济学研究中常用的重力模型,来描绘中国城市能源消费结构的时空分布特征。重力模型又称为引力模型,由牛顿万有引力定律衍生而来,是指区域空间的某一点,该点是变量在空间中的“均衡”(李创新等,2010)。在经济学研究中,重力模型被广泛应用于工业化、产业演变、环境污染等领域(樊杰等,2013;冯宗宪和蒋伟杰,2017;丁焕峰和李佩仪,2012)。

在物理学中重心的改变反映了物体的密度分布变化。与之相似的是,空间重心是地图上假想的一点,该点的煤炭消费占比取值,是所有城市能源结构的“浓缩”和“代表”;如果中国城市的能源结构发生动态变化,空间重心必然会向能源结构的高值区偏移。

重力模型的参数计算如下:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ii} x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad \bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ii} y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (1)$$

其中:\$(\bar{X}\_i, \bar{Y}\_i)\$为中国城市能源结构空间重心的经纬度;\$Q\_{ii}\$为各城市煤炭消费占总能源消费的百分比;\$(x\_i, y\_i)\$为各城市的经纬度坐标。城市经纬度数据通过python调用百度地图的应用程序接口(API)进行抓取获得。

图5是中国城市能源结构空间重心的变化轨迹。可以发现,中国城市能源转型空间重心大体上呈“从东南向西北”的变化趋势。这种空间上的变化反映了现实中不同地理区域用能行为的差异,东部、南部地区的能源转型变化可能比西部、北部更早,或者更明显。

### (三)中国城市能源转型的差异性特征

#### 1. 大型城市能源转型速度快于中、小型城市

表1显示,大型城市煤炭消费比例下降速度远远高于小型城市和中型城市;相对应的是大型城市天然气和电力消费增加比例远远高于小型城市和中型城市。这些差异的深层次原因可能是:体量小的城市基础设施建设不足,同时自身产业可能相对落后、经济实力有限,这些因素对能源转型产生了不利影响。

#### 2. 不同地区的城市能源转型具有较大差异

对于地理位置的划分方法有很多,结合张彩云和苏丹妮(2020)、田青等(2008)学者的研究,本文根据国家统计局2011年6月13号的划分办法,将中国划分为4个经济地理区域:东北、中部、东部和西部。与之前的处理类似,求各组城市各种能源占比的平均值。表2显示了四个区域内城市能源结构变化的统计结果。

由表2可知,与2001年相比,4个区域的煤炭消费占比下降,而石油、天然气、电力消费占比上升。但是,不同地区间能源结构差距在2016年变得更大:对煤炭来说,东部地区消费占比下降明显,中部、西部地区次之,而东北地区则不明显;对石油来说,各地区消费占比均有小幅上涨,西部地区涨幅较小;对天然气来说,东部地区消费占比涨幅最大,明显高于其他三个地区;对电力来说,依然是东部地区消费占比涨幅最大,中部、

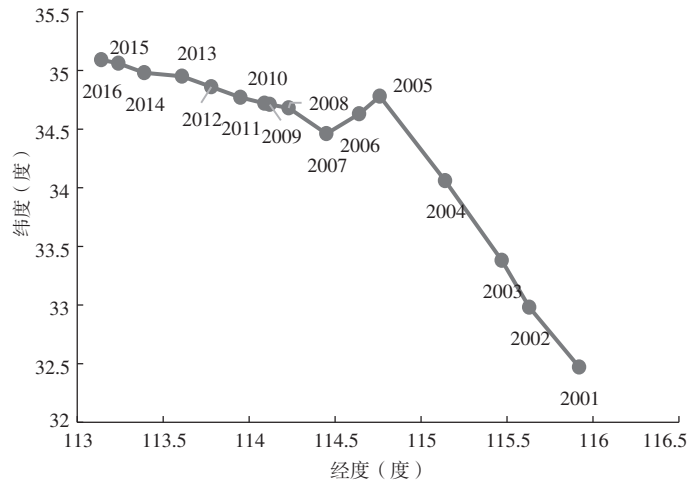


图5 中国城市能源结构空间重心的变化轨迹

表1 不同规模城市的能源结构转型特征

能源种类	大型城市		中型城市		小型城市	
	2001年	2016年	2001年	2016年	2001年	2016年
煤炭	66.0	41.5	72.8	62.9	71.2	63.2
石油	21.7	26.9	16.2	18.4	17.3	19.0
天然气	4.9	11.6	4.3	6.7	4.0	5.1
电力	6.8	19.1	6.2	11.7	6.7	12.3
其他	0.6	0.9	0.5	0.3	0.8	0.4

数据来源:本文作者根据各城市统计年鉴数据整理。

表2 东西部城市的能源结构变化

能源种类	东北地区		中部地区		东部地区		西部地区	
	2001年	2016年	2001年	2016年	2001年	2016年	2001年	2016年
煤炭	68.9	64.5	71.8	62.9	68.9	53.9	71.2	62.4
石油	17.5	19.4	16.4	18.4	17.8	20.3	17.1	18.8
天然气	4.6	5.7	4.5	6.7	5.3	9.7	4.4	6.2
电力	8.9	10.2	6.9	11.7	7.5	15.6	6.5	11.9
其他	0.1	0.2	0.4	0.3	0.5	0.5	0.8	0.7

数据来源:根据本文样本城市的统计年鉴整理获得。

西部次之,东北地区最小。总体看来,东部地区能源转型速度最快,而东北部地区能源转型则相对最慢。

另外,结合地理学中的“秦岭-淮河线”,本文还将城市样本划分为“南方城市”和“北方城市”。对各组城市样本数据求均值后,汇总得到表 3。

由表 3 可知,无论是在 2001 年还是 2016 年,南方城市的煤炭消费占比均小于北方城市,而石油、天然气、电力消费占比均大于北方城市,说明南方城市的能源转型比北方城市发展更快。对煤炭消费占比来说,南方城市的下降幅度大于北方城市;而对石油、天然气、电力的消费占比来说,南方城市的下降幅度和北方城市接近,但消费占比基数更大。这些现象的原因可能涉及资源禀赋、产业结构、地方差异等,根本上来说仍是经济社会发展的差距。

### 3. 不同资源禀赋条件的城市能源转型具有较大差异

资源型城市是世界城市发展史上的一类典型城市,一般指以矿产、森林等不可再生资源的开采和加工为主导产业的城市。根据国务院于 2013 年发布的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》,将城市样本划分为“资源型城市”和“非资源型城市”,规划范围包括 262 个资源型城市,其中地级行政区(包括地级市、地区、自治州、盟等)126 个。本文选取了上述 126 个资源型城市,同时选取了 169 个非资源型城市,通过对两种类别城市集合的统计分析,所得结果见表 4。

表 4 显示,非资源型城市的煤炭消费占比下降速度快于资源型城市,天然气消费占比增长速度明显快于资源型城市,电力消费占比增长速度略高于资源型城市。总体上看,非资源型城市转型速度快于资源型城市。这表明“资源诅咒”很可能存在,初步判断资源禀赋对城市能源转型有负面影响,对此问题将在后面的实证分析中进行进一步分析。

表 3 南北方城市的能源结构变化

能源种类	南方城市(%)		北方城市(%)	
	2001年	2016年	2001年	2016年
煤炭	68.9	57.5	71.1	61.6
石油	18.1	20.1	16.5	18.8
天然气	4.7	7.9	4.6	7.1
电力	7.8	13.9	7.1	12.3
其他	0.5	0.6	0.7	0.2

数据来源:根据本文样本城市的统计年鉴整理获得。

表 4 资源型、非资源型城市能源结构变化

能源种类	资源型城市			非资源型城市		
	2001年	2016年	变化比例(%)	2001年	2016年	变化比例(%)
煤炭	72.6	63.1	-9.5	67.7	56.7	-11
石油	16.3	18.6	2.3	19.2	21.1	0.9
天然气	4.1	6.0	1.9	4.8	8.2	3.4
电力	7.0	12.2	5.2	7.9	13.5	5.6
其他	0.2	0.1	-0.1	0.4	0.5	0.1

数据来源:根据本文样本城市的统计年鉴整理获得。

## 三、中国城市能源转型的影响因素分析

### (一)变量定义与数据来源

#### 1. 被解释变量

被解释变量为能源结构,采用煤炭消费量与总能源消费量的比例衡量城市能源结构。煤炭消费量和总能源消费量已经进行标准煤折算处理,主要能源品类的折标系数见表 5。变量代号为 *ES\_Coal*。

#### 2. 解释变量

(1)政策积极性(*Pol*)。为研究政策对城市能源转型的影响,本文从不同城市发改委官方网站的能源板块抓取与能源转型相关的政府文件、公告,然后使用文本挖掘工具(ROST-CM)进行词频分析。“政策积极性”是指地方政府对于推动能源转型所作的努力,用“与城市能源转型政策相关的新闻”中获取数据。出现词频数量排在前五位的是:补贴、光伏、电动汽车、基础设施、财政支出。

(2)资源禀赋(*Res*)。前面的分析显示,资源型城市能源转型进程慢于非资源型城市。由于“资源诅咒”现象,资源型城市往往存在贸易条件恶化、荷兰病或人力资本的投资不足等问题(Gylfason 和 Hochreiter, 2009),因而会导致资源禀赋越丰富的地方越不利于能源转型。但另一方面,与传统化石能源所代表的资源禀赋不同的是,在风能和太阳能丰富的地区,可再生能源可能会得到更快速的发展,由此会促进能源转型。因此,本文将资源禀赋分为两个方面:一是化石能源资源禀赋,本文用煤炭资源禀赋 *Res\_Coal* 代表;二是风能

表 5 主要能源品类折标系数

能源品类	折标系数	能源品类	折标系数
原煤	0.7143	汽油	1.4714
洗精煤	0.9	柴油	1.4571
煤制品	0.5286	煤油	1.4714
焦炭	0.9714	燃料油	1.4286
焦炉煤气	5.714	液化石油气	1.7143
天然气	13.3	电力	1.229
液化天然气	1.7572	热力	0.0341
原油	1.4286	其他	1

数据来源:中国能源统计年.中国统计出版社,2018. <http://www.zgtjcb.com/books/booksdetail.jsp?id=4769&nodeid=461&siteid=2>。

和太阳能资源禀赋,分别用 $Res\_Wind$ 、 $Res\_Solar$ 代表<sup>⑤</sup>。

(3)技术进步( $Tech$ )。刘平阔等(2019)认为随着经济社会持续发展和体制改革不断深化,兼顾经济社会发展、能源安全和环境保护等多层目标,能源发展需要从“资源依赖型”转变为“技术依赖型”,走出一条符合中国特色社会主义市场经济规律的可持续转型之路。马丽梅等(2018)指出的一种能源转型模式强调通过科学产能和用能对能源消费总量进行控制,大力发展化石能源的清洁高效利用技术(如煤基多联产能源系统技术、碳捕获、利用与封存技术等)。综合上述研究,我们可以看出未来能源转型离不开技术的支持。技术进步不但可以推动用能设备升级换代,向清洁、节能的方向发展,还可以带动劳动生产率和能源效率的提高;更重要的是,技术进步可以推动新型能源的勘探、开发与利用,从而促进能源结构的转型升级。本文参考白雪洁等(2014)<sup>33</sup>的研究,采用预算内科学技术支出和教育事业支出之和占总预算内支出的比值,作为衡量城市技术进步的指标。

### 3. 控制变量

(1)经济水平( $Eco$ )。本文选择居民人均收入作为衡量城市经济水平的指标。为保证数据的科学性,采用2001年不变值进行平减。

(2)产业结构( $IS$ )<sup>⑥</sup>。产业结构高度化的过程往往伴随着宏观经济的转型和升级。因此产业结构也有可能对能源结构产生影响。本文用第三产业产值占总产值的比例来衡量产业结构。

(3)城市集聚水平( $Agglo$ )。对于城市集聚水平的研究非常丰富,一部分学者认为集聚水平影响能源利用效率,从而对能源结构产生影响(姚昕等,2017)。本文选择人口密度(年末总人口数除以城市面积)来控制集聚水平对城市用能行为的影响。

(4)基础设施水平( $Infra$ )。为控制基础设施水平对能源转型可能产生的影响,本文参考白雪洁等(2014)<sup>37</sup>的研究,选取国际互联网用户数作为基础设施水平的替代变量。为避免可能存在的异方差问题,对数据进行对数化处理。

(5)教育水平( $Stu$ )。教育水平可能从以下几个方面影响能源结构:教育水平影响城市居民的环保意识,进而影响了他们对能源转型的接受和支持程度,从而影响能源结构。由于教育水平难以准确衡量,本文使用高校在校学生数作为替代变量,来控制教育对能源结构的可能影响。

(6)环境污染( $Envir$ )。能源的粗放利用是环境污染的主要推手,为控制环境污染和能源结构可能存在的影响关系,本文采用工业生产中的三种污染物排放量(二氧化硫、氮氧化物、烟尘)之和作为环境污染的替代指标。为避免可能存在的异方差问题,对数据进行对数化处理。

由于相关随机效应需要加入必要的固定效应,以得到准确的估计结果,本文还设置了两个固定效应变量:

(7)城市区块( $Area$ )。中央政府已经提出了“西部大开发”“东北振兴”“中部崛起”的国家战略,在经济地理的角度来看,中国可以被划分为东北、中部、东部、西部四大区块,区块内的城市有相似性,区块之间有差异性。本文沿用这种经验上的划分方法,并对各个区块内的城市依次赋值为0、1、2、3。

(8)城市等级( $Rank$ )。作为中国最具影响力的财经媒体,《第一财经》每年都会发布中国城市等级的划分名单,其权威性和客观性得到社会的认可。本文采用《第一财经》对2016年中国城市等级的划分(主要参考商业资源集聚度、城市枢纽性、城市人活跃度、生活方式多样性和未来可塑性五个维度),将中国城市分为一线、二线、三线、四线、五线五个等级,依次赋值为0、1、2、3、4。

### 4. 数据来源

目前中国共有295个地级市<sup>⑦</sup>,由于一些城市的能源消费数据无法获得,本文基于中国131个城市2001—2016年的能源消费数据,对相关问题展开研究。

⑤ 煤炭资源禀赋和风能和太阳能资源禀赋的测度方法见后面“数据来源”部分的说明。

⑥ 在绝大部分城市生产用能远高于生活用能的情况下,产业结构是影响城市能源转型的重要变量,应该作为核心解释变量。但是,现有不少文献中已经重点研究了产业结构对能源转型的影响(张雷和黄园浙,2008;范德成等,2012;唐晓华和刘相峰,2016;Deng et al,2014),研究基本已得到一致的结论,即产业之间的比例均衡和关联协调程度的提高,以及产业比例关系的改进和劳动生产率的提高能够带动能源消费结构的优化,同时产业结构的优化升级能够提高能源效率,实现节能减排。因此,本文将关注的重点是政策、资源禀赋以及技术进步对能源转型的影响,并由此将政策、资源禀赋以及技术进步作为解释变量,将产业结构作为控制变量。

⑦ 数据来源:《中国城市统计年鉴2018》。

煤炭资源禀赋  $Res\_Coal$ : 本文采用国土资源部于 2016 年发布的《全国矿产资源规划》中对中国 162 个国家规划煤炭矿区的定义, 通过在国家及企业相关网站上获取各个煤矿的探明储量。由于数据可得性的限制, 舍弃掉一部分没有储量数据的煤矿, 共保留 96 个矿区。然后, 用地理信息系统软件 ArcGIS 对这些矿区进行地理定位, 同时求得本文所用能源数据中 131 个城市与各个矿区的反距离矩阵。最后, 用矿区探明储量矩阵与反距离矩阵相乘, 再对结果进行标准化处理, 得到各城市煤炭资源禀赋的相对值。

风资源  $Res\_Wind$ : 从 NASA 的数据库中获取各城市在不同高度 (50 米、100 米、150 米、300 米) 的大气中每个月份的平均风速。对各个月份数据求平均值, 再对不同高度求平均值, 最后将数据进行标准化, 得到各城市风能资源禀赋的相对值。

太阳能资源  $Res\_Solar$ : 从美国国家航空航天局 (NASA) 的数据库中获取各城市每个月份单位面积的日发电量 ( $kW \cdot h/m^2/d$ )。与风能数据的处理方式类似, 本文对各个月份数据求平均值, 再将数据进行标准化, 得到各城市太阳能资源禀赋的相对值。

政策变量  $Pol$ : 本文要测算的政策指数参考 Baker 和 Fradkin (2013) 的方法, 将各城市的发改委官方网站作为新闻来源。发改委官方网站中有“政务信息”板块, 本文对这一板块所有涉及能源的新闻进行了抓取, 共抓取到约 20000 条新闻。参考 Baker et al (2016) 的方法, 对各个城市能源转型相关的政策进行计算, 得到本文中的政策积极性综合指数。

本文其他变量所需数据均来自于历年《中国城市统计年鉴》和各城市独立的统计年鉴。各变量的定义和数据来源见表 6。

表 6 变量定义及数据来源

变量分类	变量名称	变量定义	数据来源
被解释变量	$ES\_Coal$	煤炭消费比例	各城市统计年鉴
	$Res\_Coal$	煤炭资源禀赋	能源相关的国家、企业网站
解释变量	$Res\_Wind$	风能资源禀赋	NASA
	$Res\_Solar$	太阳能资源禀赋	NASA
	$Pol$	政策积极性	由各城市发改委网站数据整理
	$Tech$	技术水平	《中国城市统计年鉴》
	$Eco$	经济水平 (居民人均收入)	《中国城市统计年鉴》
控制变量	$IS$	产业结构	《中国城市统计年鉴》
	$Agglo$	城市集聚水平	《中国城市统计年鉴》
	$Infra$	基础设施水平	《中国城市统计年鉴》
	$Stu$	教育水平	《中国城市统计年鉴》
	$Envir$	环境污染	《中国城市统计年鉴》
	$Area$	城市区域	由国务院政策文件整理
	$Rank$	城市等级	《第一财经》年度清单

## (二) 模型构建与统计分析

本文选取从 2001 年到 2016 年 131 个城市的非平衡面板数据。从数据特征看, 城市数据样本量足够大, 且研究旨在分析城市总体的特征。因此更适合选择固定效应模型; 但由于关键解释变量, 城市所处的区域位置 ( $Area$ ) 是不随时间变化的常量, 该变量在使用固定效应模型的时候会因多重共线性而被剔除掉。因此, 本文同时给出了固定效应结果和随机效应结果; 其中, 随机效应分析中选择相关随机效应 (CRE) 模型, 该模型更有利于解决不随时间变化的变量估计问题。本文的基准模型构建为

$$ES\_Coal_{it} = \beta_0 + \beta_1 Res_{it} + \beta_2 Pol_{it} + \beta_3 Tech_{it} + \gamma X_{it} + a_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中:  $ES\_Coal_{it}$  为第  $i$  个城市在第  $t$  年的能源结构;  $Res_{it}$ 、 $Pol_{it}$ 、 $Tech_{it}$  分别为资源禀赋、政策积极性、技术水平, 是本文的核心解释变量, 其中  $Res$  具体分为  $Res\_Coal$ 、 $Res\_Wind$ 、 $Res\_Solar$ ;  $X_{it}$  为控制变量;  $X_{it}$  中部分变量已经进行对数化处理, 消除可能存在的异方差和内生性问题;  $a_i$  为不随时间变化的固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为白噪声, 用以反映不可观测的特征和内在随机性;  $\beta$ 、 $\gamma$  为估计参数。使用聚类稳健标准误。

变量的描述性统计结果见表 7。

## (三) 计算结果及分析

### 1. 政策对城市能源转型的影响

表 8 报告了基准模型回归的结果。其中, (1)、(3)、(5) 是没有加入城市类型固定效应的混合 OLS, 作为对照; (2)、(4)、(6) 是相关随机效应模型, 加入了城市类型固定效应。

表 8 显示, 政策对城市能源转型具有促进作用; 但是, 政策在不同地区对能源转型作用强度不同。表 9 显

表 7 变量描述性统计

变量	均值	标准差	最小值	最大值
$ES\_Coal$	0.685	0.223	0.018	1
$Res\_Coal$	0.352	0.227	0	1
$Res\_Solar$	0.382	0.185	0	1
$Res\_wind$	0.365	0.25	0	1
$Tech$	0.17	0.046	0.020	0.830
$Eco$	4.515	0.415	0.214	5.704
$IS$	0.408	0.098	0.092	0.802
$Agglo$	5.916	0.771	2.679	7.983
$Infra$	10.476	0.792	8.214	13.271
$Stu$	4.835	0.594	2.516	6.024
$Envir$	10.238	3.957	0	17.807

注: 样本数为 1452。

示,对政策作用来说,中部地区回归结果最显著,其次是东北、西部,最后是东部。也就是说,政策对不同地区城市能源转型的影响程度按“东北、东部、中部、西部”逐渐降低。可能的原因是:东北是中国老工业基地,国有企业比例较高,对能源转型政策执行力度往往更大;而东部地区由于经济发展水平高,人们对环境改善的意愿强,进而带动了能源转型政策的实施效果。

对于不同规模的城市而言,政策对能源转型的影响也存在差异。本文将城市分为了五个等级,分别是一线至五线城市,研究发现政策在四线城市中表现出了对能源转型的最强的影响作用,见表10。这可能是由于四线城市多属于资源密集型城市,这些城市受能源转型政策的影响更为敏感。

## 2. 资源禀赋对能源转型的影响

表8显示煤炭资源与能源转型表现为显著正相关,说明化石资源禀赋对城市能源转型有抑制作用,再次验证了“资源诅咒”问题的存在;风力资源与能源转型表现为显著负相关,说明可再生能源禀赋和城市能源转型呈正相关;以上两种结果与本文的预期相吻合。但是,太阳能资源与能源转型关系的估计系数不显著,一个可能的解释是:中国城市的太阳能潜力并没有得到充分释放,一些太阳能潜力大的城市并没有利用好这种禀赋的优势。

由表10可知,对于不同规模的城市,资源禀赋对能源转型的影响也有一定差异。煤炭资源禀赋对一线城市能源转型不再具有抑制作用,这表明在经济发达地区,“资源诅咒”问题存在的可能性大大降低,主要是因为一线城市有着发达的第三产业,对资源禀赋的依赖已经不明显。而四线城市和五线城市的“资源诅咒”效果则明显高于二线城市和三线城市,四线城市效果最为突出,这可能是由于四线城市普遍处在能源密集型产业刺激经济增长的阶段,对资源禀赋依赖大。

## 3. 技术进步对能源转型的影响

技术进步与能源转型显著负相关,说明技术水平的提高可以刺激能源转型的发展,这也符合本文的预期。此外,与政策和资源禀赋对能源转型的影响对比可以发现,技术进步对能源转型的影响作用要大于政策与资源禀赋对能源转型的影响作用。根据社会-技术转型理论,技术创新作为一种利基(Niche)因素,会形成激进创新轨迹,打破旧有的稳定社会技术制度,进而促进能源系统转型(Geels和Schot, 2007)。Milliman和Prince(1989)的研究进一步指出,技术进步主要通过三个阶段,革新、扩散、最优主体响应(optimal agency response)对能源转型产生影响。其中,最优主体相应是指技术进步扩散后导致政府对相关政策进行了调整,进而激励了能源转型。例如,成本降低的酸雨减排的技术进步极大地激励了对这项污染进行管制的努力。从实际情况看,技术进步主要通过降低新能源价格促进能源转型。《2018年可再生能源发电

表8 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Res_Coal	0.262***	0.286***				
Res_Solar			0.045	0.109		
Res_wind					-0.168***	-0.110**
Pol	-0.118	-0.157**	-0.057	-0.154**	-0.126	-0.156**
Tech	-0.221*	-0.205**	-0.227*	-0.203**	-0.256**	-0.204**
Eco	-0.049***	0.008	-0.077***	0.005	-0.046**	0.007
IS	-0.129	-0.065	-0.219*	-0.075	-0.084	-0.065
Agglo	-0.013*	-0.003	0.002	-0.002	0.003	-0.002
Infra	-0.010	-0.012	-0.009	-0.012	-0.012	-0.012
Stu	-0.037***	-0.004	-0.031**	-0.001	-0.043***	-0.002
Envir	0.003**	0.001**	0.004**	0.002**	0.004**	0.002**
Area	否	是	否	是	否	是
R <sup>2</sup>	0.124	0.118	0.122	0.119	0.121	0.118
N	1452	1452	1452	1452	1452	1452

注:\*, \*\*, \*\*\*表示回归系数在10%、5%、1%的水平上统计显著。

表9 不同地区城市能源转型影响因素回归结果

变量	东北	中部	东部	西部
Res_Coal	2.037***	0.276**	0.248**	0.308**
Res_Solar	0.110	0.053	0.099	0.083
Res_Wind	-0.128*	-0.174**	-0.163**	-0.235***
Pol	-0.696*	-0.341***	-0.471*	-0.155**
Tech	-0.473	-0.321*	-0.275**	-0.352
Eco	0.007	0.008	0.008	0.007
IS	-0.064	-0.066	-0.063	-0.065
Agglo	-0.003	-0.003	-0.001	-0.003
Infra	-0.012	-0.012	-0.011	-0.012
Stu	-0.004	-0.005	-0.004	-0.005
Envir	0.001*	0.001**	0.002**	0.001**
固定效应	是	是	是	是
R <sup>2</sup>	0.125	0.126	0.129	0.124
N	121	333	693	305

注:\*, \*\*, \*\*\*表示回归系数在10%、5%、1%的水平上统计显著。

表10 不同规模城市能源转型影响因素回归结果

变量	一线城市	二线城市	三线城市	四线城市	五线城市
Res_Coal	0.047	0.271*	0.214*	0.532***	0.387*
Res_Solar	0.109	0.079	0.087	0.133	0.110
Res_Wind	-0.109**	-0.175**	-0.164**	-0.135**	-0.118**
Pol	-0.308*	-0.318*	-0.377**	-0.617***	-0.390**
Tech	-0.567**	-0.304*	-0.204*	-0.225	-0.467*
Eco	0.009	0.008	0.008	0.007	0.005
IS	-0.064	-0.063	-0.065	-0.065	-0.064
Agglo	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.002
Infra	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012	-0.011
Stu	-0.004	-0.005	-0.004	-0.005	-0.004
Envir	0.001*	0.001**	0.002**	0.001**	0.001*
固定效应	是	是	是	是	是
R <sup>2</sup>	0.125	0.126	0.129	0.124	0.125
N	271	356	461	217	147

注:\*, \*\*, \*\*\*表示回归系数在10%、5%、1%的水平上统计显著。

成本报告》显示,与 2010 年相比,截止 2017 年陆上风电成本下降 25%,大型地面光伏发电成本下降 72%;《2020 年可再生能源发电成本报告》进一步显示,公用事业规模太阳能光伏发电成本从 2010 年到 2020 年下降了 85%;正是可再生能源的技术进步导致的成本降低使风电和光伏发电规模快速增加。因此,技术进步对能源转型发挥着十分重要的作用。

考察不同地区技术进步对能源转型的差异性影响结果(表 9)可以发现,技术进步在东部地区和中部地区对能源转型的影响很显著;而在东北部和西部地区,则没有发现显著的影响。这可能是由于科技水平对能源转型的影响程度与社会对科技和知识的接纳程度有关,或者可能是当地的经济水平限制了技术的推广应用。东部地区高校、科研院所实力雄厚,而且高素质人才储备丰富。因此科技水平的提高会迅速“落地”,推动社会生活的进步。而东北、西部地区科教水平薄弱,高新产业稀缺,一方面是科技创新较少;另一方面是科技水平的提高得不到应有的重视。

#### 4. 其他因素对能源转型的影响

(1)经济因素对能源转型的影响。表 8 表明经济发展水平有利于促进能源转型,这是由于一方面,随着人均收入水平的提高,人们更有可能负担得起相对更高成本的清洁能源;另一方面,伴随着经济水平的提高,人们对环境质量要求提高,这也将有利于促进能源转型。但是,与经济发展对能源转型影响不同的是,产业结构对能源转型的影响结果并不显著。主要原因是本文仅用第三产业增加值的比例变化代表产业结构,而对第二产业内部各部门生产结构变化的影响没有进行分析,可能存在着第二产业内部各部门产值变化对能源消费影响的相互抵消作用。

(2)教育水平对能源转型的影响。表 8 显示,教育水平的提高对于能源转型具有显著的影响作用。这主要是由于:第一,教育水平高的地区往往经济和技术都比较先进,有利于实现能源转型;第二,教育水平高的地区,文化氛围往往更加开放包容,有利于吸纳新鲜事物,进而有利于促进新能源技术对传统能源技术的替代。

(3)环境因素对能源转型的影响。表 8 的结果表明环境污染越严重的地区,能源转型的进程越慢。这一结论与前面的资源禀赋对能源转型的影响结果相同。这是由于在煤炭资源丰富的地区,污染情况往往也比较严重。因此,前面结果表明的“资源诅咒”效应与这里的环境因素对能源转型的影响结果的一致性,也在一定程度上验证了本文结果的可靠性。

#### (四)稳健性检验

为了验证回归结果的稳健性,本文采用替换被解释变量的方法进行稳健性检验。结合已有文献使用新能源消费占一次能源消费量的比例代表能源结构,其中新能源主要指风电、核能等一次电力(邹璇和王盼,2019)。本文采用一次电力消费量与总消费量的比值作为能源结构的替代变量,利用模型(2)进行回归,结果见表 11。可以发现,煤炭资源与能源转型表现为显著负相关,说明化石资源禀赋对城市能源转型有抑制作用;风力资源与能源转型表现为显著正相关,太阳能资源与能源转型表现为呈显著负相关;技术进步与能源转型显著正相关,说明科技水平的提高对城市能源转型具有促进作用。这表明,资源禀赋、政策及技术进步的估计结果与表 8 中的结果的显著性基本一致,且估计系数符号均与基准回归结果相反。说明前文构建的中国城市能源转型的关键因素对能源转型影响模型回归结果稳健。

表 11 稳健性检验回归结果

变量	(1)	(3)	(5)
<i>Res_Coal</i>	-0.157**		
<i>Res_Solar</i>		-0.082**	
<i>Res_Wind</i>			0.016
<i>Pol</i>	0.052	0.048	0.050
<i>Tech</i>	0.066**	0.065**	0.066**
<i>N</i>	1 452	1 452	1 452

注: \*、\*\*、\*\*\*表示回归系数在 10%、5%、1% 的水平上统计显著;(1)、(3)、(5)是指没有加入城市类型固定效应的混合 OLS。

## 四、结论及政策建议

中国正在全力推动能源清洁低碳化转型,以在 2060 年实现“碳中和”的目标。本文基于 131 个地级城市的相关数据,从能源的需求侧入手,运用文本挖掘、统计分析、计量回归分析等方法,分析得出中国城市能源转型的特征与影响因素。研究发现从能源转型技术发展的角度来说,中国城市在太阳能光伏、太阳能热水器、风力发电和电动汽车等新能源技术上发展迅速。从时间尺度上看,中国城市的煤炭消费占比不断降低,石油消费占比稳中有增,天然气、可再生能源消费占比迅速增加。从空间尺度上看,中国城市能源转型呈现

出由东南部向西北部推进的特征,由东向西转移的趋势要快于由南向北转移的趋势。同时,不同类型的城市表现出了能源转型发展的差异性特征:大、中、小型城市转型进程依次减缓;南方城市能源转型成效优于北方城市,东部城市能源转型成效优于西部城市;非资源型城市转型速度快于资源型城市。

在影响中国城市能源转型的主要因素方面,研究发现:煤炭资源禀赋与城市能源转型负相关,而可再生能源禀赋则和城市能源转型呈正相关。技术水平和政策因素均有利于促进能源转型,技术进步的促进作用要高于政策性因素的影响作用。

本文研究进一步显示:对不同地区(东北、西部、中部、东部)的城市来说,资源禀赋、技术水平和政策因素对城市能源转型的影响效果不同。资源禀赋对西部地区的能源转型的影响最大,技术水平对东部地区能源转型影响统计意义上的显著性水平最大,政策因素则对东北地区的能源转型的影响最强。同时,资源禀赋、技术水平和政策因素对不同规模的城市能源转型影响效果也不同:煤炭资源禀赋条件和政策性因素对四线城市(以资源密集型产业为主)影响效果最明显,技术进步因素则对一线城市的能源转型影响效果最明显。通过以上结果,研究得到的进一步结论是:①经济水平发达的地区,技术进步对城市能源转型的作用效果最强;②老工业基地等国有企业占有主要地位的地区,政策性因素对城市能源转型的影响最大;③更多依赖资源型产业的地区,资源禀赋条件对城市能源转型的影响效果最大。

综上,为更有效地促进中国城市能源转型,提出如下政策建议:第一,促进中国城市能源转型政策实施的重点地区应该是西部地区、北部地区(尤其是东北地区),以及资源密集型地区;第二,在不同地区推动城市能源转型的主要措施应该有所不同。东部地区和其他经济发达地区,应该以推动技术进步为主的能源转型措施为核心;东部三省及其他国有企业为主、市场经济相对不够活跃的地区,应该更加注重发挥能源转型政策的推动作用;西部地区等资源密集型地区应该更多考虑如何减少资源密集型产业对能源转型的阻碍作用。

### 参考文献

- [ 1 ] 白雪洁,汪海凤,闫文凯,2014.资源衰退、科教支持与城市转型——基于坏产出动态SBM模型的资源型城市转型效率研究[J].中国工业经济,(11):30-43.
- [ 2 ] 丁焕峰,李佩仪,2012.中国区域污染与经济增长实证:基于面板数据联立方程[J].中国人口·资源与环境,22(1):49-56.
- [ 3 ] 樊杰,刘毅,陈田,等,2013.优化我国城镇化空间布局的战略重点与创新思路[J].中国科学院院刊,28(1):20-27.
- [ 4 ] 范德成,王韶华,张伟,2012.低碳经济目标下一次能源消费结构影响因素分析[J].资源科学,34(4):696-703.
- [ 5 ] 冯宗宪,蒋伟杰,2017.基于产业内贸易视角的“一带一路”国家战略研究[J].国际贸易问题,(3):166-176.
- [ 6 ] 何建坤,2014.新型能源体系革命是通向生态文明的必由之路[J].中国地质大学学报(社会科学版),14(2):1-10.
- [ 7 ] 李创新,马耀峰,张佑印,等,2010.中国旅游热点城市入境客流与收入时空动态演化与错位——重力模型的实证[J].经济地理,30(8):1372-1377.
- [ 8 ] 林伯强,杜之利,2018.中国城市车辆耗能与公共交通效率研究[J].经济研究,6:142-156.
- [ 9 ] 刘平阔,彭欢,骆赛,2019.中国能源转型驱动力的结构性特征研究[J].中国人口·资源与环境,29(12):45-56.
- [ 10 ] 马丽梅,史丹,裴庆冰,2018.中国能源低碳转型(2015—2050):可再生能源发展与可行路径[J].中国人口·资源与环境,28(2):8-18.
- [ 11 ] 唐晓华,刘相锋,2016.能源强度与中国制造业产业结构优化实证[J].中国人口·资源与环境,26(10):78-85.
- [ 12 ] 田青,马健,高铁梅,2008.我国城镇居民消费影响因素的区域差异分析[J].管理世界,24(7):27-33.
- [ 13 ] 徐科,罗凤章,魏冠元,2017.面向城市能源互联网的城市能源消费特征量化对比分析[J].电力系统及其自动化学报,29(3):50-54.
- [ 14 ] 姚昕,潘是英,孙传旺,2017.城市规模、空间集聚与电力强度[J].经济研究,52(11):165-177.
- [ 15 ] 张彩云,苏丹妮,2020.环境规制、要素禀赋与企业选址——兼论“污染避难所效应”和“要素禀赋假说”[J].产业经济研究,(3):43-56.
- [ 16 ] 张雷,黄园渐,2008.中国产业结构节能潜力分析[J].中国软科学,(5):27-29,31-34,51.
- [ 17 ] 邹璇,王盼,2019.产业结构调整与能源消费结构优化[J].软科学,33(5):11-16.
- [ 18 ] BAEK S , PARK E , KIM M G , et al,2016. Optimal renewable power generation systems for Busan metropolitan city in South Korea[J]. Renewable Energy, 88(4):517-525.
- [ 19 ] BAKER S R , BLOOM N , DAVIS S J , 2016. Measuring economic policy uncertainty [J]. The Quarterly Journal of Economics, 131(4): 1593-1636.
- [ 20 ] BAKER S R , FRADKIN A , 2013. The Impact of unemployment insurance on job search: Evidence from google search data

- [J]. *Review of Economics & Statistics*, 99(5): 756-768.
- [21] DENG S H, ZHANG J, SHEN F, et al, 2014. The relationship between industry structure, household-number and energy consumption in China[J]. *Energy Sources Part B Economics Planning and Policy*, 9(4): 325-333.
- [22] GEELS F W, SCHOT J, 2007. Typology of sociotechnical transition pathways[J]. *Research Policy*, 36(3): 399-417.
- [23] GYLFASSON T, HOCHREITER E, 2009. Growing apart? A tale of two republics: Estonia and Georgia[J]. *European Journal of Political Economy*, 25(3): 355-370.
- [24] HOU J, LIU Y S, WU Y, et al, 2016. Comparative study of commercial building energy-efficiency retrofit policies in four pilot cities in China[J]. *Energy Policy*, 88: 204-215.
- [25] HUANG P, BROTO V C, LIU Y, et al, 2018. The governance of urban energy transitions: A comparative study of solar water heating systems in two Chinese cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 180(10): 222-231.
- [26] KIM K, HEO E, KIM Y, 2017. Dynamic policy impacts on a technological-change system of renewable energy: An empirical analysis[J]. *Environmental Resource Economics*, 66: 205-236.
- [27] LI Y, ZHAN C, DE J M, et al, 2016. Business innovation and government regulation for the promotion of electric vehicle use: Lessons from Shenzhen, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 134(5): 371-383.
- [28] MAMOUNAKIS I, EFTHYMIPOULOS N, MAKRIS P, 2019. A novel pricing scheme for managing virtual energy communities and promoting behavioral change towards energy efficiency [J]. *Electric Power Systems Research*, 167(2): 130-137.
- [29] MILLIMAN S R, PRINCE R, 1989. Firm incentives to promote technological change in pollution control [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 22(3): 247-265.
- [30] MORLET C, KEIRSTEAD, J, 2013. A comparative analysis of urban energy governance in four European cities[J]. *Energy Policy*, 61: 852-863.
- [31] POLEMIS ML, 2016. New evidence on the impact of structural reforms on electricity sector performance[J]. *Energy Policy*, 92, 420-431.
- [32] YUAN X C, LYU Y J, WANG B, et al, 2018. China's energy transition strategy at the city level: The role of renewable energy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 205: 980-986.

## Characteristics and Influencing Factors of Urban Energy Transition in China: Based on Empirical Evidence from 131 Cities in China

Zhao Xiaoli<sup>1,2</sup>, Zhang Yuchen<sup>1,2</sup>, Yang Xi<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Low Carbon Economy and Policy Research Center, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 100083, China;

3. School of International Economics and Trade, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Cities are the centers of energy consumption, and urban energy transformation is an important basis for achieving China's carbon neutral goal. Therefore, it is necessary to study the characteristics and influencing factors of urban energy transformation. Firstly, the technical and temporal characteristics of China's urban energy transformation was analyzed. Secondly, the key factors affecting the energy transformation of different types of cities in China were empirically analyzed based on the unbalanced panel data of 131 cities from 2001 to 2016. The results show as follows. Chinese cities pay more attention to the development of electric vehicles in the energy transition, while foreign cities pay more attention to the development of biomass. There are regional differences in the energy transformation of Chinese cities, such as "fast in the east and slow in the west, fast in the south and slow in the north". From the perspective of influencing factors, the coal resource endowment has the largest impact on the energy transition, followed by technological progress, followed by policy factors. The key factors affecting urban energy transformation are different for different cities. It is helpful to provide reference for the precise implementation of urban energy transformation policies.

**Keywords:** urban energy transformation; technology characters; spatial-temporal characteristics; influential factors; empirical analysis