

中国多中心城市空间结构与能源效率关系

田成诗, 张亚兵

(东北财经大学统计学院, 大连 116025)

摘要:当前,北京、深圳、武汉等城市纷纷提出多中心的发展思路。作为城市建设的一项重要举措,多中心战略必须符合可持续发展目标,然而多中心结构是否有助于提高能源效率亟待检验。利用2017年我国地级及以上城市数据,分别运用改进的社会网络法和超效率EBM模型测度城市多中心度与城市能源效率,实证检验多中心度对城市能源效率的影响。研究发现:城市多中心度与能源效率之间存在倒“U”形变动特征。然而,仅有约25%的样本城市的多中心度突破了拐点,且这些城市主要为大型城市或受地形约束的山地城市,表明对于大多数中小城市而言,多中心度的提升能够促进城市的能源效率。

关键词:多中心;能源效率;可持续发展;超效率EBM

空间结构通常指人口或就业在区域中的分布特征。实际上,人口或就业的分布状况可以从多个维度进行描述,如单或多中心、密度或规模、蔓延、集中或分散等。本文主要关注单中心—多中心维度,因为它既是空间结构最重要的维度^[1],也是目前学术和政策研究的热点。多中心结构可以协调公共政策,通过基础设施建设缓解城市和区域间要素成本上升、机会不平等等问题^[2]。近年来,为缓解人口集聚所带来的拥挤效应,促进城市内部协调发展,我国不少城市都在实践“多中心”式发展。北京一直加快行政副中心建设,上海、深圳也多次提及多中心格局的发展思路。一些省会城市和其他地级市也投入到“多城”建设中,如武汉在2018年公布2017—2035年城市总体规划格局将由1中心城区+6远城区的“1+6”模式向(主城+新城)+3副城+3组团的“133”格局转变。

能源对城市发展的作用不容忽视。生产需要通过能源、资源的投入得以实现,城市的发展规划同样需要考虑能源政策^[3],城市建设在受限于能源投入的同时,还不可避免地产生非期望产出一环境污染^[4,5]。作为城市高质量发展的基石,可持续发展要求社会、经济、自然协调发展,这也意味着,作为城市发展的一项重要举措,多中心战略是否可行需经过经济、能源、环境等多方面的检验^[6],应有助于资源节约型城市的形成。然而,现阶段的多数研究只关注城市空间结构与经济发展的关系,忽略了经济系统中的能源约束及城市建设产生的污染问题,这难免会掩盖城市空间结构与可持续发展的真正作用规律。Vander-motten等^[7]指出,多中心建设能够促进可持续发展。但多中心空间结构是否符合我国城市可持续发展的目标尚缺少严谨的实证研究。本文基于2017年我国173个地级及直辖市数据,从城市空间结构的生态维度出发,借助DEA方法综合经济发展、能源消耗、环境污染等多个层面的指标测度城市能源效率,进而研究多中心结构对城市能源效率的影响。

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 2020年辽宁省高等学校创新人才支持计划

作者简介: 田成诗(1971-),男,辽宁大连人,博士,教授,博士生导师,主要从事资源经济学研究。

E-mail: sctian71@163.com

1 研究方法与数据来源

1.1 文献综述

1.1.1 多中心的界定

现代多中心结构的概念可追溯到19世纪末20世纪初。此后,随着社会经济的发展,多中心的空间结构因具有重要的政治和学术意义而受到密切关注,但始终没有形成一个一致性的定义^[8,9]。Liu等^[10]、Meeteren等^[11]指出“多中心”的定义需要注意两个关键点:一是形态维度与功能维度,二是空间尺度依赖性。

首先,形态维度是根据区域物质特征如人口规模、就业人数和GDP测度单元内各区域间的相对均匀程度;功能维度指内部单元间的功能联系程度或内部流动关系,强调空间节点间的互联性。功能多中心往往使用各中心的人流、物流、信息流或通勤流的信息来测度,这意味着功能多中心的测度有更高的数据要求^[12,13]。有学者利用社会网络技术从形态和功能两方面定义多中心,即在功能多中心的基础上引入“距离”对多中心定义做了扩展,但根据该定义的多中心测度在实际操作中仍较为困难。Meijers^[9]认为多中心城市不是一个网络化系统,多中心指的是给定区域内的多个中心,本质上是一个形态问题,也有学者^[14,15]证实形态学和其他形式的多中心性通常是正相关的。

其次,“多中心”定义具有空间尺度依赖性。空间尺度是单或多中心研究对象所在的地理单元,目前多中心研究的地理单元主要集中在较大区域的大都市群^[16]和较小的市域^[12]等。由于不同空间尺度表现的中心形式可能有所不同,使得在不同空间尺度上探索多中心与其他变量的关系结论存在差异,故在研究单或多中心时要对空间尺度格外注意^[17]。

1.1.2 城市多中心与能源效率关系的研究

能源效率是指用较少的能源生产同等数量的服务或有用的产品^[18],目前对能源效率影响因素的研究主要集中于结构变动、技术进步及制度等方面,从城市空间结构尤其是单或多中心角度的研究并不多。在单或多中心结构与能源效率两者间内在机制的理论分析上,Faludi^[19]认为,在能源效率方面,多中心结构比单中心结构更具竞争力,因为多中心城市可利用与大型集聚区相关的一些积极因素,如更广阔的劳动力市场、多样的服务如交通方式的多样化等,同时避免相关的一些负面因素如污染、犯罪和拥挤。胡杰等^[20]认为城市达到一定规模后,多中心结构会帮助人们缩短通勤距离,降低污染排放。孙斌栋等^[21]也分析了多中心结构在环境友好、人居和谐、能源节约等方面的积极作用。而单中心支持者认为,一定程度的集聚、单中心的城市空间结构有助于减少能源消耗,因为城市短期内的发展难以消除对原有老城区的依赖,而新城市中心的出现一般会增加通勤距离和空气污染物^[22]。

在实证研究上,学者们的结论亦多有分歧。有学者认为,单中心结构会在降低能源消耗、提高能源效率方面体现积极的作用。如李治等^[23]运用市区个数代表行政分割度(这里的行政分割度反映城市多中心度),发现行政分割会扭曲资源配置从而使全要素能源效率降低。阎宏等^[9]利用2010年人口普查数据测度我国地级市的多中心度,发现城市多中心度的提高会降低城市人均能耗和单位GDP能耗,从而肯定多中心城市结构对提高能源效率的积极作用,不过有学者^[24]指出,将单位GDP能耗作为追求目标会造成经济社会领域其他方面的损失,因此使用单位GDP能耗作为考察能源效率的指标有失偏颇。此外,Zou等^[25]根据人口规模对城市进行划分,探索多中心发展对不同规模城市能源效率的影响,结果表明多中心发展与大城市的能源效率负相关、与中小城市的能源效率正相关。Veneri等^[26]探究了意大利NUTS-2区域多中心化程度与环境可持续性之间的关系,没

有发现两者之间的相关性证据。

纵观已有文献,无论理论分析还是实证研究,单或多中心空间结构对能源效率的影响方向仍有待检验,且关于多中心空间结构与我国能源效率两者关系的研究少之又少,已有研究多以省级或市级层面为基础,侧重于多中心空间结构与经济绩效、能源消耗或空气污染等单一层面的关系,缺乏多中心度对城市发展综合影响的考量。

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 数据来源

中国现行行政区划由省级、地级、县级、乡级行政区组成的四级架构,地级行政区(地级市、地区、自治州、盟)是我国城市管理的主体单位,考虑到地区、自治州、盟治理体系较为特殊,故本文将样本确定为地级市及直辖市。截至2017年底,我国有294个地级市和4个直辖市,鉴于数据的可得性,最终样本确定为安庆、盐城等173座城市。样本城市分布于21个省份,覆盖东中西部主要人口聚集区域,且这些样本包含从小城市到超大城市的所有规模类型,城市性质多样,具有较强的代表性。

中国地级及以上城市通常由县级行政单位(市辖区、县级市、县)组成,一般来说,市辖区、县级市、县的人口分布相对集中,县级单位之间的边界区域的人口密度相对较低,所以我们将测度多中心的空间范围(次级单元)界定为县级行政单位,即一个市辖区、县或县级市代表城市的一个中心,这些中心之间往往有村庄、复杂地形阻隔,人口密度不集中,因此可视作独立的中心。图1显示了173座城市县级行政单位的数量分布,除个别城市的县级行政单位超过13个外,多数城市为4~10个。

样本数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》、各省份统计年鉴及2017年各省市国民经济和社会发展统计公报。能源效率测度所需的部分城市污染物数据来源于各市生态环境局发布的《2017年度固体废物环境污染防治信息公告》以及《2017年环境状况公报》。此外,有个别城市2017年的污染物数据未公布,用相邻年份(2016年或2018年)的数据近似代替。

1.2.2 研究方法

(1) 城市多中心度测度方法

本文从形态学角度出发探讨城市的多中心性,即基于城市内部中心的规模分布测度城市的多中心性:如果一个城市各中心人口规模分布更加均衡,那么它就被认为是更加多中心的。多中心性的形态学测度指标主要有两类:一类强调城市内部中心的人口或就

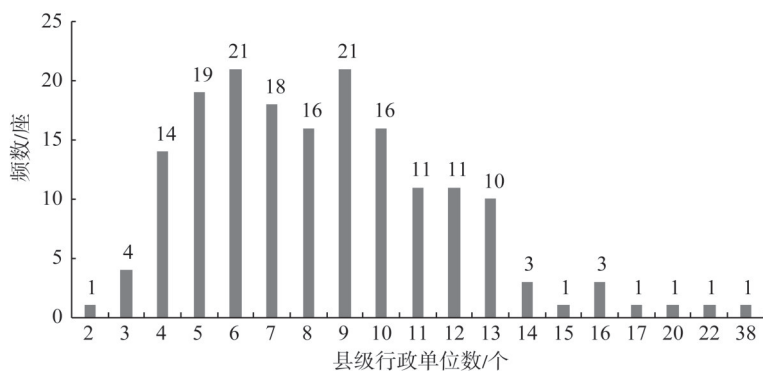


图1 2017年173座城市的县级行政单位的频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of 173 cities by number of county-level administrative units in 2017

业规模, 常见指标有城市位序规模系数^[27]、基尼系数^[5,28]、赫芬达尔指数^[29]以及城市首位度^[26,30]等; 一类是将距离纳入, 给城市内部多中心的空间结构增加地理尺度信息, 如根据距离—单位图得到的主城区中心指数^[31,32]、Zhang等^[33]提出的三个多中心指标、城市中心度指数UCI^[34]以及社会网络法^[12,13,35]等。

考虑到多中心的研究结果可能对地理尺度敏感, 且当前的城市形态应该是一个多维的概念^[33], 故采用同时考虑规模和距离的第二类测度方法。该类方法中, 前两种方法往往赋予主城区和远城区更大的权重, 弱化了其他区域的作用; 城市中心度UCI主要针对对密集型的网格数据, 涉及网格之间的成对距离, 并不适用于我国城市区划结构。故本文对城市多中心度的测算是Li等^[35]基于Green^[13]社会网络法改进的形态多中心性测度法:

$$P = 1 - \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{max}} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2 / n}}{I_{max} / 2} \quad (1)$$

$$I_i = x_i d_i \quad (2)$$

$$I_{max} = x_{max} d_{max} \quad (3)$$

式中: P 为城市的形态多中心度指标; σ_{obs} 为城市内各中心“重要性”的标准差; σ_{max} 为假设的两个中心城市的“重要性”标准差, 主中心(人口规模最大的中心)具有最大的可观察到的“重要性”, 另一个中心(次中心)具有零“重要性”; \bar{I} 为所有中心区域的平均“重要性”, 其中次中心的“重要性” I_i 由人口规模 x_i 和到主中心的距离 d_i 的乘积来测度, 主中心的“重要性”即是最大“重要性”的观测值 I_{max} 也是其人口规模 x_{max} 和最大主中心一次中心距离 d_{max} 的乘积; n 是一个城市中心的总数(个); 人口规模 x 用各中心的常住人口数(万人)表示; 城市中心间的距离 d (km)以各中心行政区域质心经纬度坐标为基准位置点, 由Stata软件的geodist命令计算而得, 质心经纬度由国家基础地理信息中心公布的中国矢量地图数据获取。 P 的理论值在0~1之间, 0表示城市只有一个中心(单中心), 1表示城市由多个相同大小的中心组成。

特别地, 当 $n=2$ 时, P 表示次中心的人口规模与主中心人口规模的比值:

$$P_{n=2} = 1 - \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{max}} = \frac{x_{sub}}{x_{max}} \quad (4)$$

这表明, 当城市只有两个中心时, 无法将 d 纳入式(1), 也就丧失了“距离”信息。若两个城市均具有两个中心, 且两个中心的人口规模比都一样, 不同的是两个城市的中心距相差很大, 即一个城市两中心相距很近, 人口最密集区域紧紧相连, 另一个城市的两个中心相距很远, 甚至完全没有接壤。但据式(4), 这并不影响两个城市拥有相同的多中心度, 显然会高估中心距较近的城市多中心度。由于两中心城市只涉及金昌一座城市, 且金川区和永昌县的质心距离为42.9 km, 距离相对较远, 可视作两个独立中心, 故可直接运用式(1)或式(4)计算金昌市的多中心指数。

(2) 超效率EBM模型

数据包络分析(DEA)在能源效率评价中得到广泛应用, 与其他方法相比, 其不仅将“单投入”扩展为“多投入”, 从而可评价多投入多产出的同类决策单元, 还避免了参数法的拟合不一致性及因不收敛而无解的问题。此外, 传统的DEA模型(CCR、BCC、SBM等)仅限于从径向或非径向模式测度效率, 无法处理同时包含径向和非径向的情况^[36]。针对这一缺陷, Tone等^[37]提出了综合径向与非径向两类距离函数的混合模型EBM(Epsilon-Based Measure), 该模型既包括DMU与强有效目标值的差距中等比例

改进的部分,也可衡量该差距间松弛改进的部分。EBM模型分为投入导向、产出导向和非导向模式,由于重在对要素投入层面的探讨,期望通过对要素投入结构的优化促进产出效率的提高,故选取投入导向角度。此外,期望产出与非期望产出往往相伴而生,魏楚等^[38]指出,忽略非期望产出会使能源效率被高估,为此引入非期望产出,得到一个将非期望产出考虑在内规模收益不变假设下投入导向的EBM模型(EBM-I-C)。考虑到基本的EBM模型无法将所有DMU效率值计算出来,构建超效率EBM模型对综合效率有效的DMU进行效率评估与区分,最终构建的超效率EBM-I-C模型如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \gamma = \min & \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i^- S_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^s \frac{\omega_r^+ S_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_u \sum_{p=1}^q \frac{\omega_p^{u-} S_p^{u-}}{u_{pk}}} \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + S_i^- = \theta x_{ik}, i = 1, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - S_r^+ = \varphi y_{rk}, r = 1, \dots, s \\ & \sum_{j=1}^n u_{pj} \lambda_j + S_p^{u-} = \varphi u_{pk}, p = 1, \dots, q \\ & \lambda_j \geq 0, S_i^-, S_r^+, S_p^{u-} \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: 假设有 n 个决策单元 $DMU_j (j=1, 2, \dots, n)$; 每个 DMU_j 有 m 种投入 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, m)$; s 种期望产出 $y_{rj} (r=1, 2, \dots, s)$; q 种非期望产出 $u_{pj} (p=1, 2, \dots, q)$; λ 为DMU的线性组合系数; x_{ik} 、 y_{rk} 和 u_{pk} 分别为待测 DMU_k 的投入、期望产出和非期望产出; S_i^- 、 S_r^+ 和 S_p^{u-} 分别为第 i 种投入、第 r 种期望产出和第 p 种非期望产出的松弛量; ω_i^- 、 ω_r^+ 和 ω_p^{u-} 分别为第 i 种投入、第 r 种期望产出和第 p 种非期望产出指标的权重; θ 、 φ 为径向条件下的效率值; ε 表示在效率值的计算中非径向部分的重要程度: 取 0 时相当于径向模型, 取 1 时相当于 SBM 模型; DMU 的效率值 γ 为目标函数的最优解。

通常, 参数 ω_i^- 、 ω_r^+ 、 ω_p^{u-} 和 ε 根据数据特征确定, Tone 等^[37]在提出 EBM 模型的同时, 也提出根据离散指数计算关联系数来确定参数值的方法, 但 Cheng 等^[39]指出该方法具有一定缺陷, 并认为由调整的 Pearson 相关系数计算得到的关联系数构建 EBM 模型参数更适宜, 因此, EBM 模型参数的计算采用的是调整 Pearson 相关系数。

本文在 Rasche 等^[40]提出的能源三要素生产函数基础之上, 引入污染物这类非期望产出指标, 给出能源效率评价体系如表 1 所示。

假定生产过程中需要能源、劳动力和资本三种要素投入。能源投入选取能源消费总量(万 t tce), 部分城市未公布能源消费总量, 根据李治等^[23]提出的方法得到: 假设城市全社会供电量、燃气总量(煤气与天然气之和)和液化石油气总量统一转换成万吨标准煤后的消费量之和占城市能源消费总量比例和省域水平所占比例相同, 鉴于提供煤气供应量数据的城市较少, 对燃气项目只采用天然气一项; 劳动力投入选取的是城镇单位平均就业人数(人), 用 2016 年城镇单位期末就业人员数与 2017 年城镇单位期末就业人员数的均值表示; 2017 年年末城市资本存量(亿元)作为资本投入指标, 本文借鉴张军等^[41]的研究, 用永续盘存法 $K_{it} = K_{it-1}(1 - \sigma_{it}) + I_{it}$ 得到。鉴于 2000 年以前我国城市数量和行政范围一直在变化, 2000 年之后较为固定, 文中以 2000 年为基期, 城市固定资产投资总额为当年投资指

标 I ，基期固定资产投资总额除以10%作为初始资本存量，采用各省固定资产投资价格指数将城市固定资产总额折算成以基年（2000年）不变价格表示的实际值，折旧率 σ 设为9.6%。

产出指标包括期望产出和非期望产出。期望产出为经济产出，用2017年城市GDP表示；在投入产出过程中排放的污染物主要有废水、废气和固体废弃物，综合考虑工业生产所造成的污染物危害，最终选取工业废水排放量（万t）、工业二氧化硫排放量（t）和工业固体废物产生量（万t）作为非期望产出。

（3）多中心度与能源效率关系模型的构建

一个城市的单或多中心空间结构的改变需要经过较长时期^[32]，故可认为短期内城市多中心度指数 P 外生于能源效率 γ ，基于此，采用OLS估计分析城市多中心度对能源效率的影响。为捕捉两者之间可能存在的“U”形或倒“U”形曲线关系，引入多中心指数的二次项来检验这一效应。由于能源效率还受经济、技术、制度等影响，故我们还在模型中加入以下控制变量：

经济发展水平（ Eco ），用人均GDP（元）对数表示，经济发展水平高的城市生产力强、资源配置通常更合理，能源利用效率相应较高^[42]。政府干预（ Gov ），剔除教育支出后的政府支出与地方GDP的比例衡量政府干预市场的程度，该比例越高，政府干预度越强，魏楚^[43]、李治等^[23]指出政府对市场的干预会给能源效率带来负面影响。产业结构（ Ind ），能源的高消耗主要来源于第二产业^[44]，第二产业占GDP比例的降低对能源效率有正向作用。技术进步（ Tec ），先进的技术会提高能源效率^[43]，这里用城市专利授权数（件）代替。劳动力，劳动与能源之间存在替代作用^[43,45]，在岗人数（ $Labor$ ）的增加，有助于减少能源投入，提高能源效率；而工资水平（ $Wage$ ）的提高有助于刺激工作效率，一般情况下，工资水平高的城市能源效率也较高^[45]。这两项指标分别用城市在岗职工平均人数（万人）和在岗职工平均工资（元）的对数表示。区域特性（ $East$ ），引入地区的虚拟变量，东部地区为1，其他地区均为0，根据对能源效率的测度，经济相对发达的东部地区能源效率较高，中西部地区的整体水平较低且能源效率相当。

最终，本文将考察城市多中心度对能源效率影响的模型设定为：

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 P_i + \beta_2 P_i^2 + \beta_3 Eco_i + \beta_4 Ind_i + \beta_5 Labor_i + \beta_6 Wage_i + \beta_7 Gov_i + \beta_8 Tec_i + \beta_9 East_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中： $\beta_0 \sim \beta_9$ 分别为常数项以及各解释变量的系数。

2 结果分析

2.1 多中心度测度结果

由式（4）计算的173座城市多中心指数的描述统计结果如表2所示，将2000年城市的行政区域按2017年的区划进行调整以确保这两年城市行政边界的一致。整体来看，样本城市的多中心指数均值低于0.5，表明我国城市更偏向于单中心，2017年与2000年的城市多中心指数均值相差仅0.015，但差异显著，说明尽管2000—2017年我国城市空间

表1 城市能源效率评价指标体系

Table 1 Energy efficiency evaluation index system of cities

| 项目 | 指标类别 | 具体指标 |
|------|-------|------------|
| 投入指标 | 能源投入 | 能源消费总量 |
| | 劳动力投入 | 城镇单位平均就业人数 |
| | 资本投入 | 资本存量 |
| 产出指标 | 期望产出 | 城市GDP |
| | 非期望产出 | 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 |

表2 多中心指数的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of polycentric index

| 多中心指数 | 样本量/座 | 极小值 | 极大值 | 均值 | 标准差 | 均值差异检验 |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|----------|----------|
| <i>P</i> | 173 | 0.2372 | 0.9941 | 0.4602 | 0.088093 | 0.015*** |
| <i>P</i> ₂₀₀₀ | 173 | 0.1850 | 0.8310 | 0.4452 | 0.093518 | |

注：***表示2017年和2000年多中心指数的均值差异在1%水平上显著。

结构改变较小，但仍有向多中心结构演变的趋势。

前20位及后20位城市的多中心指数值如表3所示。我国大部分城市的多中心度处于0.2~0.6，意味着这些城市的空间结构远没有达到“绝对均衡”的多中心。此外，地形特征和城市本身的区划数量是影响城市多中心性的重要因素。首先，山区城市往往具有较高的多中心度，如多中心度最高的金昌市虽然只有金川区和永昌县两个辖区，但其境内山地平川交错以及戈壁众多的复杂地形对两个中心的土地利用模式起到限制作用，使得两个中心的功能相对独立，再加之各中心人口总数相当，也就造成金昌城市结构的高多中心度。甘肃天水的山地地貌以及宁夏石嘴山的台地、山地地貌都对自身多中心形态的形成有显著影响。然而，以平原为主的城市（如安阳、鄂州、北海），其投资、基础设施建设和人口增长易发生在核心城区，经济发展较为集中，往往拥有低多中心度。其次，经济实力强的大型城市（如北京、上海、天津和重庆）的多中心度一般高于整体均值，达到0.5以上，表明这些城市更偏向于多中心。不过，较多的区划数量并不意味着它们的

表3 前20位和后20位城市的多中心指数值
Table 3 Polycentric index of top 20 and bottom 20 cities

| 位次 | 城市 | <i>P</i> | 区划数/个 | 位次 | 城市 | <i>P</i> | 区划数/个 |
|----|-----|----------|-------|-----|-----|----------|-------|
| 1 | 金昌 | 0.9941 | 2 | 154 | 无锡 | 0.3565 | 10 |
| 2 | 石嘴山 | 0.7296 | 3 | 155 | 泸州 | 0.3525 | 7 |
| 3 | 海口 | 0.6130 | 4 | 156 | 眉山 | 0.3522 | 6 |
| 4 | 天水 | 0.5899 | 7 | 157 | 张掖 | 0.3510 | 6 |
| 5 | 成都 | 0.5872 | 20 | 158 | 益阳 | 0.3501 | 6 |
| 6 | 亳州 | 0.5800 | 4 | 159 | 连云港 | 0.3496 | 6 |
| 7 | 河池 | 0.5751 | 11 | 160 | 酒泉 | 0.3484 | 7 |
| 8 | 阳江 | 0.5684 | 4 | 161 | 湘潭 | 0.3439 | 5 |
| 9 | 重庆 | 0.5649 | 38 | 162 | 汕尾 | 0.3408 | 4 |
| 10 | 南阳 | 0.5640 | 13 | 163 | 新乡 | 0.3284 | 12 |
| 11 | 上海 | 0.5620 | 16 | 164 | 张家界 | 0.3268 | 4 |
| 12 | 怀化 | 0.5608 | 12 | 165 | 潮州 | 0.3195 | 3 |
| 13 | 遵义 | 0.5600 | 14 | 166 | 铜陵 | 0.3031 | 4 |
| 14 | 六盘水 | 0.5592 | 4 | 167 | 武威 | 0.2976 | 4 |
| 15 | 咸阳 | 0.5586 | 13 | 168 | 广安 | 0.2908 | 6 |
| 16 | 绍兴 | 0.5573 | 6 | 169 | 佛山 | 0.2904 | 5 |
| 17 | 商丘 | 0.5565 | 9 | 170 | 北海 | 0.2878 | 4 |
| 18 | 北京 | 0.5536 | 16 | 171 | 鄂州 | 0.2840 | 3 |
| 19 | 嘉兴 | 0.5515 | 7 | 172 | 安阳 | 0.2423 | 9 |
| 20 | 天津 | 0.5511 | 16 | 173 | 池州 | 0.2372 | 4 |

多中心度会非常高,因为这些城市存在一些由相邻的核心城区组成的城区群,而这些城区群的总人口占城市总人口的绝大比例,如上海浦东新区与其周围的黄浦区、虹口区、杨浦区、徐汇区形成一个区域群,一个浦东新区就容纳了552.84万人,而仅次于浦东新区的闵行区只有253.43万人。重庆行政区划数高达38个,但其人口主要集中在距离相近的渝北区、渝中区、巴南区、沙坪坝区、九龙坡区等区域。

2.2 城市能源效率测算结果

根据调整的超效率EBM模型,利用软件maxdea pro 8.3测算2017年173座城市的能源效率,针对计算过程中存在的模型无可行解的问题,采用FPA法求解超效率。能源效率值越大代表城市对现有资源利用的能力越佳,能源效率值小于1时,该DMU被认为无效率。表4给出能源效率排序前20位及后20位的城市。总体而言,城市能源效率差距较为明显,排名前20的城市大多位于东部省份。其中,温州、金华、张家界、深圳、长沙等17座城市处于前沿曲线上,表现为CRS效率有效;温州排名最高,效率值为1.2777,表明该城市在产能、污染物排放控制及资源利用效率上具有合理布局。后20位城市全部来自中西部省份,能源效率值均低于0.5,说明这些城市距能源效率有效还有较大差距,应注重自身资源利用效率与产能规划。其中陇南市能源效率值最低,为0.2858。

能源效率区域分布情况如表5所示。东部地区能源效率整体水平最高,均值达0.7896,中部与西部地区能源效率水平相差不大,分别为0.6103和0.6222,中部与西部的差距相较之前多数学者^[46]得出的东中西能源效率依次递减的结论来说有所缓和,但与

表4 前20位和后20位城市的能源效率

Table 4 Energy efficiency of top 20 and bottom 20 cities

| 位次 | 城市 | 能源效率 | 地区 | 位次 | 城市 | 能源效率 | 地区 |
|----|------|--------|----|-----|----|--------|----|
| 1 | 温州 | 1.2777 | 东 | 154 | 长治 | 0.4636 | 中 |
| 2 | 金华 | 1.2240 | 东 | 155 | 忻州 | 0.4598 | 中 |
| 3 | 张家界 | 1.0913 | 中 | 156 | 吴忠 | 0.4518 | 西 |
| 4 | 深圳 | 1.0642 | 东 | 157 | 贵阳 | 0.4453 | 西 |
| 5 | 长沙 | 1.0170 | 中 | 158 | 十堰 | 0.4426 | 中 |
| 6 | 丽水 | 1.0163 | 东 | 159 | 武威 | 0.4416 | 西 |
| 7 | 鄂尔多斯 | 1.0124 | 西 | 160 | 河池 | 0.4349 | 西 |
| 8 | 宁波 | 1.0086 | 东 | 161 | 铜川 | 0.4287 | 西 |
| 9 | 青岛 | 1.0050 | 东 | 162 | 商丘 | 0.4215 | 中 |
| 10 | 广州 | 1.0041 | 东 | 163 | 渭南 | 0.4212 | 西 |
| 11 | 镇江 | 1.0030 | 东 | 164 | 黄冈 | 0.4109 | 中 |
| 12 | 无锡 | 1.0027 | 东 | 165 | 大同 | 0.3917 | 中 |
| 13 | 安康 | 1.0018 | 西 | 166 | 白银 | 0.3799 | 西 |
| 14 | 茂名 | 1.0017 | 东 | 167 | 孝感 | 0.3629 | 中 |
| 15 | 常州 | 1.0011 | 东 | 168 | 定西 | 0.3494 | 西 |
| 16 | 北京 | 1.0002 | 东 | 169 | 宿州 | 0.3399 | 中 |
| 17 | 海口 | 1.0000 | 东 | 170 | 金昌 | 0.3273 | 西 |
| 18 | 呼和浩特 | 0.9605 | 西 | 171 | 六安 | 0.3265 | 中 |
| 19 | 榆林 | 0.9551 | 西 | 172 | 平凉 | 0.3138 | 西 |
| 20 | 包头 | 0.9550 | 西 | 173 | 陇南 | 0.2858 | 西 |

注:表中为规模收益不变假设下投入导向的EBM模型(EBM-I-C)的部分计算结果。

表5 各区域能源效率描述性统计
Table 5 Descriptive statistics of regional energy efficiency

| 区域 | 均值 | N/座 | 标准差 | 极小值 | 极大值 |
|----|--------|-----|--------|--------|--------|
| 东 | 0.7896 | 60 | 0.1704 | 0.5375 | 1.2777 |
| 中 | 0.6103 | 56 | 0.1521 | 0.3265 | 1.0913 |
| 西 | 0.6222 | 57 | 0.1822 | 0.2858 | 1.0124 |
| 全国 | 0.6764 | 173 | 0.1867 | 0.2858 | 1.2777 |

东部地区相比仍有明显差距，且低于全国能源效率平均水平0.6764。

2.3 回归结果及分析

OLS估计结果如表6所示。在模型（1）和模型（2）中，多中心指数的平方项 P^2 的系数为负且在1%的显著性水平上显著，说明多中心指数与城市能源效率呈倒“U”形二次曲线关系，即能源效率随城市多中心度的提高呈先上升后下降的趋势。根据模型（2）可知，拐点处于0.5的多中心度左右，表明在其他变量不变的情况下，多中心度超过这一拐点，城市能源效率会下降，趋向绝对多中心和绝对单中心的城市能源效率普遍不高。事实上，刘修岩等^[47]在考察城市空间结构对经济效率影响时，发现了单中心度与经济效率的倒“U”形关系，这也意味着多中心度与经济效率的倒“U”形特征也同样成立，表6的回归结果说明综合考虑经济、能源、污染后这种倒“U”形关系依然存在。

本文认为，到达拐点前，能源效率随多中心度提高而上升可理解为一个城市的空间结构若随着集聚规模的扩大而变得更加单中心时，人口集聚所带来的负外部性如拥挤、要素成本上升和污染等问题将不断加重，集聚不经济逐渐成为主导，进而会损害城市能源效率，而通过将过度集中在一个主中心的人口分流到其他外围地区（次中心），使人口和产业分散化，能够减少过分集聚带来的城市病。

然而，在其他因素的制约下，一个多中心度较高的城市能源效率往往也较低，一个可能的原因是对多中心的探讨是从形态多中心出发，从功能角度看，这些中心之间尚缺少强有力的功能联系。首先，对于大型城市而言，多中心发展无法提升其能源效率，可能在于早期粗放式的发展模式使得建设用地面积不断扩大，以至于目前次中心的土地利

表6 OLS估计结果

Table 6 OLS estimation results

| 被解释变量 y | 模型（1） | 模型（2） |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| P | 0.9862 (1.4483) | 1.5835*** (3.0131) |
| P^2 | -1.1101* (-1.7009) | -1.5548*** (-3.1390) |
| $Eco(\ln)$ | | 0.0668* (1.7609) |
| Ind | | -0.0052** (-3.8989) |
| $Labor(\ln)$ | | -0.1272*** (-5.4348) |
| $Wage(\ln)$ | | 0.1751* (1.8386) |
| Gov | | -1.3225*** (-5.8097) |
| $Tec(\ln)$ | | 0.0000*** (3.9878) |
| $East$ | | 0.0430* (1.7288) |
| 常数项 | 0.4662*** (2.6197) | -1.5105 (-1.6317) |
| 调整 R^2 | 0.0095 | 0.5268 |
| F 值 | 1.8210 | 22.2763*** |
| 样本量/座 | 173 | 173 |

注：括号中为 t 值，***、**、*分别表示估计系数在1%、5%、10%水平上显著，下同。

用率、设施建设与扩张速度并不匹配,整个城市的空间结构还没有达到功能多中心意义上的资源共享与规模共享。不过,孙斌栋等^[32]在研究我国特大城市多中心度的经济绩效时得出特大城市的多中心结构更为高效的结论。本文将结论相反的原因归结于两点:一是研究地理单元的不一致,其多中心结构的研究单元为市辖区,而本文的研究单元为整个市域;二是研究特大城市的经济绩效时其并未考虑经济发展所带来的能源消耗与污染问题。其次,我国多中心度较高的城市除了大型城市以外,更多的是一些由于地形原因造成的多中心城市。对于山区城市而言,地形的天然分割与地形阻隔限制了其经济主体间的交流,各中心无法形成功能上的规模互借,使得各中心在其所处的较小区域内表现为单中心。说明这些城市虽有较高的多中心度,但本质上仍是利用单中心的本地集群效应及发展模式,再加上各行政中心快速的城镇化、工业化的进程,在严重消耗集聚区域的土地、水资源时,环境质量易遭到持续恶化,能源效率也很难达到较高水平。Li等^[35]在研究我国地级及以上城市空间结构对经济生产力的影响时,也指出多中心对城市生产力的积极影响可能依赖于城市(次)中心之间的强大功能联系,可见我国部分城市无法凭借多中心发展提高能源效率可能同样是受到各中心功能性不足以及地形制约的影响。

进一步考察能源效率与多中心度的倒“U”形关系,发现173座城市中仅有约25%的城市突破了拐点;根据多中心指数测算结果,这些城市要么是大型城市要么是有地形阻碍的山区城市。这意味着对于大多数中小城市而言,多中心度的提升能够促进城市的能源效率,此项结论也与Zou等^[25]的发现一致。

此外,能源效率与经济发展水平(*Eco*)、工资水平(*Wage*)、技术进步(*Tec*)显著正相关,与前文判断一致,表明经济发展水平、劳动者薪资水平的提升以及技术进步对能源效率的提高起到促进作用。其次,第二产业所占比例(*Ind*)、政府干预(*Gov*)与城市能源效率负相关,符合前期的理论判断——第二产业是城市能源消耗与污染物排放的主要来源,其比例的增加确实会给能源效率的提升带来负面影响,政府行为虽然也试图影响能源利用效率,但由于政策的滞后效应以及地方政府对经济发展的重视,一些提高能源效率的政策尚未与地方政府实际发展目标挂钩,且政府干预度侧面反映了城市的市场化水平,较高的政府干预度不利于市场能源资源的合理配置^[43]。在岗人数(*Labor*)对能源效率的提高起抑制作用,本文认为劳动力冗余以及个人禀赋的制约可能是造成这种负面影响的主要原因。地区虚拟变量(*East*)为正且显著,表明我国能源效率地域分布差异明显,东部地区能源效率显著高于中西部。其他变量对能源效率的影响也与以往文献结论相同。

2.4 内生性检验

前文中,一直假设多中心指数外生于当年的城市能源效率,因此直接使用OLS估计来验证能源效率与多中心指数的关系,然而城市空间结构可能是内生的,多中心度也许会受到城市当年能源效率的影响。本文采用历史工具变量,即2000年的城市多中心指数来消除内生性导致的潜在偏差,认为其与2017年的城市多中心指数相关,并且外生于该年的能源效率。为使2000年与2017年的行政边界一致,计算2000年城市多中心指数时根据2017年的行政区划进行调整,表7报告了利用TSLS估计的第一阶段和第二阶段的回归结果。第一阶段用工具变量及其二次项对多中心指数及其平方项进行OLS估计,系数显著,表明采用2000年城市多中心指数作为工具变量是有效的,TSLS估计结果与表6中模型(2)的估计结果相近,即考虑了内生性后,多中心指数与能源效率仍存在倒“U”形关系。值得注意的是,Hausman内生性检验的 P 值为0.7369,意味着不能否定当期多中心指数及其二次项的外生性假设,Wooldridge^[48]指出,当被检验的变量是外生时,OLS估

计将比 TSLS 估计更有效，因此可认为将多中心指数视为外生变量的 OLS 估计结果是可靠的。

3 结论与讨论

多中心结构吸引了越来越多学者的关注，这种结构也被寄望于成为促进城市可持续发展的重要战略，然而该战略是否符合可持续发展的目标尚缺乏有利证据。已有研究大多注重空间结构与经济、能耗、环境等单一层面关系，尚未从能源效率这一综合性层面对多中心战略的可持续问题进行探讨。为此，本文利用我国 173 座城市的横截面数据对多中心空间结构的能源效率进行实证检验。

实证分析表明，多中心度与能源效率之间存在倒“U”形变动特征，过于集聚或过于分散都可能给城市能源效率带来不利影响。然而 173 座城市中仅有约 25% 的城市的多中心度突破了拐点，且这些城市主要是大型城市及受地形约束的山地城市。这意味着，对于大多数中小城市而言，多中心度的提升能够促进城市能源效率。经济水平、产业结构、政府干预、技术进步以及劳动力是影响城市能源效率

的重要因素，经济发展水平的提高、城市规模的扩大、劳动力薪资水平、第三产业所占比例的提升能促进能源效率提高，故在城市建设中需注意这些因素。

本文结论既为我国城市实施合理的空间战略提供理论支撑，也对城市规划和决策有所启示：并非所有城市都适合多中心发展战略，需对城市所处的规模及地形进行综合考量。

第一，中国大部分城市是没有山地、丘陵等地形限制的中小城市，这些城市主要依靠单一的中心结构来发挥集聚优势，但人口集聚所产生的环境污染、交通拥堵、土地价格上升等不经济性易阻碍能源效率的提高。此时引导城市空间结构从单中心向多中心调整能够减轻城市过分集聚的负外部性，使其可以承受持续的能源增长压力。

第二，对于大城市而言，经济与工业化水平发展成熟，且本身的城市规模及较多的区划数使得资源要素分散化程度较高，因此不应单纯追求行政区域的多中心—形态多中心，而要着重于各中心的功能性链接。此时发挥区划众多的多中心格局优势，加强城际间资源和功能整合以及产业分工的精细度，更有利于各经济中心形成规模互借从而得以协调发展，减少无序扩张所带来的土地利用率低、能源资源高消耗以及环境污染严重等

表 7 TSLS 估计结果
Table 7 TSLS estimation results

| 被解释变量 估计方法 | <i>P</i> OLS | <i>P</i> ² OLS | γ TSLS |
|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| <i>P</i> ₂₀₀₀ | -0.4670 (-1.649) | -1.3907*** (-4.922) | |
| <i>P</i> ₂₀₀₀ ² | 1.2831*** (4.141) | 2.3253*** (7.523) | |
| <i>P</i> | | | 1.6229** (2.157) |
| <i>P</i> ² | | | -1.5230** (-2.247) |
| <i>Eco</i> (ln) | -0.0126 (-0.734) | -0.0035 (-0.207) | 0.0680* (1.815) |
| <i>Ind</i> | 0.0004 (0.628) | 0.0002 (0.253) | -0.0053*** (-4.035) |
| <i>Labor</i> (ln) | 0.0150 (1.466) | 0.0056 (0.546) | -0.1295*** (-5.100) |
| <i>Wage</i> (ln) | 0.0507 (1.181) | 0.0289 (0.675) | 0.1710* (1.812) |
| <i>Gov</i> | -0.0571 (-0.544) | -0.0657 (-0.627) | -1.3342*** (-5.999) |
| <i>Tec</i> (ln) | 0.0000 (-0.943) | 0.0000 (-0.567) | 0.0000*** (3.973) |
| <i>East</i> | -0.0033 (-0.288) | -0.0042 (-0.368) | 0.0438* (1.811) |
| 常数项 | -0.0797 (-0.188) | -0.0634 (0.150) | -1.4922* (-1.657) |
| 调整 <i>R</i> ² | 0.5564 | 0.5944 | 0.5505 |
| <i>F</i> 值/ <i>Wald</i> chi2 | 24.97 | 29.01 | 206.87 |
| 样本量/座 | 173 | 173 | 173 |

负作用。

第三,对于有地形阻碍的山区城市,强调已建设区域的单一集聚会加剧该区域的资源匮乏、环境质量恶化等问题,再加上复杂的地形特征是空间建设的重要制约因素,要使其实现多中心意义上的规模互借也会导致更高的土地成本与物质消耗,引发生态问题,不利于城市的可持续性发展。因此该类城市需以全域为视角,在统筹协调各类制约因素和发展需求基础上,注重各中心外围的合理开发,提高城市土地的集约利用水平。

第四,合理的空间战略能够提高城市群的整体能源效率,前提是地方政府在加强城市集聚或多中心建设时,还应再重视劳动力质量、不断增强自身经济实力、促进产业结构升级、加大技术研发与投入等。

尽管本文从单中心或多中心角度揭示了城市空间结构对能源效率的影响,但由于无法获得详细的城市区域信息,仅从形态学角度判断城市的多中心度,未从功能学角度对多中心度加以分析,况且空间结构对能源效率的持续性影响需经过长期发展来检验。鉴于我国多数城市的多中心战略刚起步,短期内空间结构难以改变,故本文仅使用横截面数据探讨能源效率与空间结构的影响,今后需对单中心或多中心结构是否具有持续性的发展潜力做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] ANAS A, ARNOTT R, SMALL K A. Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*, 1998, 36(3): 1426-1464.
- [2] HEALEY P. The treatment of space and place in the new strategic spatial planning in Europe. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2004, 28(1): 45-67.
- [3] GIBBS D. Ecological modernisation, regional economic development and regional development agencies. *Geoforum*, 2000, 31(1): 9-19.
- [4] LANGE A, QUAAS M F. Economic geography and the effect of environmental pollution on agglomeration. *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*, 2007, 7(1): 1-33.
- [5] 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, 37(7): 86-114. [LU M, FENG H. Agglomeration and emission reduction: Empirical study on the impact of urban scale gap on industrial pollution intensity. *The Journal of World Economy*, 2014, 37(7): 86-114.]
- [6] 阎宏, 孙斌栋. 多中心城市空间结构的能耗绩效: 基于我国地级及以上城市的实证研究. *低碳生态城市*, 2015, 22(12): 13-19. [YAN H, SUN B D. The impact of polycentric urban spatial structure on energy consumption: Empirical study on the prefecture-level and above cities in China. *Low Carbon Eco-city*, 2015, 22(12): 13-19.]
- [7] VANDERMOTTEN C, HALBERT L, ROELANDTS M, et al. European planning and the polycentric consensus: Wishful thinking?. *Regional Studies*, 2008, 42(8): 1205-1217.
- [8] DAVOUDI S. Polycentricity in European spatial planning: From an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*, 2003, 11(8): 979-999.
- [9] MEIJERS E J. Measuring polycentricity and its promises. *European Planning Studies*, 2008, 16(9): 1313-1323.
- [10] LIU X J, DERUDDER B, WU K. Measuring polycentric urban development in China: An intercity transportation network perspective. *Regional Studies*, 2016, 50(8): 1302-1315.
- [11] MEETEREN M V, POORTHUIS A, DERUDDER B, et al. Pacifying Babel's tower: A scientometric analysis of polycentricity in urban research. *Urban Studies*, 2016, 53(6): 1278-1298.
- [12] LIU X J, WANG M S. How polycentric is urban China and why? A case study of 318 cities. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 151: 10-20.
- [13] GREEN N. Functional polycentricity: A formal definition in terms of social network analysis. *Urban Studies*, 2007, 44(11): 2077-2103.
- [14] MEIJERS E, SANDBERG K. Reducing regional disparities by means of polycentric development: Panacea or placebo?. *Scienze Regionali*, 2008, 7(2): 71-96.
- [15] VASANEN A. Functional polycentricity: Examining metropolitan spatial structure through the connectivity of urban sub-centres. *Urban Studies*, 2012, 49(16): 3627-3644.

- [16] 范擎宇, 杨山. 协调视角下长三角城市群的空间结构演变与优化. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1581-1592. [FAN Q Y, YANG S. Evolution and optimization of spatial structure of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from the perspective of coordination. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1581-1592.]
- [17] 李琬. 中国市域空间结构的绩效分析: 单中心和多中心的视角. 上海: 华东师范大学, 2018. [LI W. Spatial structure and its performance in Chinese prefecture regions: From the perspective of monocentricity and polycentricity. Shanghai: East China Normal University, 2018.]
- [18] PATTERSON M G. What is energy efficiency: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 1996, 24 (5): 377-390.
- [19] FALUDI A. The European spatial development perspective and Northwest Europe: Application and the future. *European Planning Studies*, 2004, 12(3): 391-408.
- [20] 胡杰, 黄经南, 黄瑾, 等. 多中心城市空间结构与家庭碳排放关系研究. 规划师, 2014, 30(11): 87-92. [HU J, HUANG J N, HUANG J, et al. Multi-spatial structure and family carbon emission. *Planners*, 2014, 30(11): 87-92.]
- [21] 孙斌栋, 袁淳. 多中心城市的生态绩效研究. 中国城市研究, 2012, (5): 130-143. [SUN B D, YUAN Z. Study on the ecological performance of polycentric urban structure. *China Urban Studies*, 2012, (5): 130-143.]
- [22] JUN M J, HUR J W. Commuting costs of "leap-frog" newtown development in Seoul. Elsevier Ltd, 2001, 18(3): 151-158.
- [23] 李治, 李国平. 中国城市能源效率差异特征及影响因素分析. 经济理论与经济管理, 2010, (7): 17-23. [LI Z, LI G P. A study on the regional difference of Chinese urban energy efficiency and its influential factors. *Economic Theory and Business Management*, 2010, (7): 17-23.]
- [24] 魏一鸣, 廖华. 能源效率的七类测度指标及其测度方法. 中国软科学, 2010, (1): 128-137. [WEI Y M, LIAO H. Seven energy efficiency indicators and their measurement approaches. *China Soft Science*, 2010, (1): 128-137.]
- [25] ZOU Y F, LU Y H, CHENG Y. The impact of polycentric development on regional gap of energy efficiency: A Chinese provincial perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 838-851.
- [26] VENERI P, BURGALASSI D. Questioning polycentric development and its effects. Issues of definition and measurement for the Italian NUTS-2 regions. *European Planning Studies*, 2012, 20(6): 1017-1037.
- [27] HALL P G, PAIN K. The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe. London: Earth Scan, 2006.
- [28] ADDOLPHSON M. Estimating a polycentric urban structure: Case study: Urban changes in the Stockholm region 1991-2004. *Journal of Urban Planning and Development*, 2009, 135(1): 19-30.
- [29] MEIJERS E, HOOGERBRUGGE M, CARDOSO R. Beyond polycentricity: Does stronger integration between cities in polycentric urban regions improve performance?. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2018, 109(1): 1-21.
- [30] BREZZI M, VENERI P. Assessing polycentric urban systems in the OECD: Country, regional and metropolitan perspectives. *European Planning Studies*, 2015, 23(6): 1128-1145.
- [31] 王旭辉. 特大城市多中心空间结构经济绩效的理论探讨与实证检验. 上海: 华东师范大学, 2013. [WANG X H. The economic performance of the polycentric spatial structure of mega-cities: The theoretical explanation and the empirical test. Shanghai: East China Normal University, 2013.]
- [32] 孙斌栋, 王旭辉, 蔡寅寅, 等. 特大城市多中心空间结构的经济绩效: 中国实证研究. 城市规划, 2015, 39(8): 39-45. [SUN B D, WANG X H, CAI Y Y, et al. An empirical study on the economic performance of polycentric spatial structure of mega-cities in China. *City Planning Review*, 2015, 39(8): 39-45.]
- [33] ZHANG T L, SUN B D, LI W. The economic performance of urban structure: From the perspective of polycentricity and monocentricity. *Cities*, 2017, 68(8): 18-24.
- [34] PEREIRA R H M, NADALIN V, MONASTERIO L, et al. Urban centrality: A simple index. *Geographical Analysis*, 2013, 45(1): 77-89.
- [35] LI Y C, LIU X J. How did urban polycentricity and dispersion affect economic productivity? A case study of 306 Chinese cities. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 173: 51-59.
- [36] 龙亮军. 综合福利视角下中国生态文明建设绩效评价及国际比较. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1259-1272. [LONG L J. Evaluation of ecological civilization construction performance and its international comparison from the perspective of overall well-being. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1259-1272.]
- [37] TONE K, TSUTSUI M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3): 1554-1563.
- [38] 魏楚, 沈满洪. 能源效率研究发展及趋势: 一个综述. 浙江大学学报: 人文社会科学版, 2009, 39(3): 55-63. [WEI C, SHEN M H. Current progresses and new trend of research on energy efficiency: A literature review. *Journal of Zhejiang University: Humanities and Social Science*, 2009, 39(3): 55-63.]

- [39] CHENG G, QIAN Z H. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: An alternative method for the affinity index. MPRA Paper, 2011.
- [40] RASCHE R H, TATOM J A. Energy resources and potential GNP. Federal Reserve Bank of St Louis Review, 1977, 59 (6): 10-24.
- [41] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. 经济研究, 2004, (10): 35-44. [ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. Economic Research Journal, 2004, (10): 35-44.]
- [42] 史丹. 中国能源效率的地区差异与节能潜力分析. 中国工业经济, 2006, (10): 49-58. [SHI D. Regional differences in China's energy efficiency and conservation potentials. China Industrial Economics, 2006, (10): 49-58.]
- [43] 魏楚. 中国能源效率问题研究. 杭州: 浙江大学, 2009. [WEI C. Research on energy efficiency of China. Hanzhou: Zhejiang University, 2009.]
- [44] 李治, 李国平. 城市能源效率分布特征影响因素研究: 基于空间计量模型. 城市发展研究, 2010, 17(6): 22-26. [LI Z, LI G P. An analysis on impact factors of urban energy efficiency distribution: Based on spatial panel data. Urban Development Studies, 2010, 17(6): 22-26.]
- [45] 何凌云, 薛永刚. 要素价格变动对能源效率影响的差异性研究. 管理现代化, 2011, (3): 6-8. [HE L Y, XUE Y G. On the differences of the effect of factors price to energy efficiency. Modernization of Management, 2011, (3): 6-8.]
- [46] 李兰冰. 中国能源绩效的动态演化、地区差距与成因识别. 管理世界, 2015, (11): 40-52. [LI L B. Dynamic evolution, regional disparity and genesis identification of Chinese energy performance. Management World, 2015, (11): 40-52.]
- [47] 刘修岩, 李松林, 秦蒙. 城市空间结构与地区经济效率: 兼论中国城镇化发展道路的模式选择. 管理世界, 2017, (1): 51-64. [LIU X Y, LI S L, QIN M. Urban spatial structure and regional economic efficiency: Concurrently discuss the patterns of urbanization in China. Management World, 2017, (1): 51-64.]
- [48] WOOLDRIDGE J M. Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data. London: The MIT Press, 2002.

The relationship between polycentric urban spatial structure and energy efficiency of cities in China

TIAN Cheng-shi, ZHANG Ya-bing

(College of Statistics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

Abstract: Currently, Beijing, Shenzhen, Wuhan and other cities have put forward multi-center development ideas. As a crucial measure of urban construction, polycentric strategy must conform to the goal of sustainable development. Nevertheless, whether polycentric structure can improve the energy efficiency and promote the sustainable development of cities needs to be urgently tested. Based on the 2017 data of the prefecture-level and above cities in China, this paper respectively uses the improved social network method and the super-efficiency EBM model to measure urban polycentricity and urban energy efficiency, and empirically examines the impact of polycentric structure on urban energy efficiency. The results present a U-shaped pattern between urban polycentricity and urban energy efficiency. However, only about 25% of the sample cities can pass the inflection point, and they are mainly large cities or mountain cities constrained by terrain, indicating that for most small and medium-sized cities, the improvement of polycentricity can promote the energy efficiency of cities.

Keywords: polycentricity; energy efficiency; sustainable development; super-efficiency EBM