

城市能源代谢的异质性分析

——以北京市为例

穆献中, 周文韬, 胡广文

(北京工业大学 循环经济研究院, 北京 100124)

摘要: 充分探究城市能源代谢过程中部门间的内在差异, 深入解析并评估其对城市能源代谢过程的影响对于进一步优化城市能源代谢结构, 推动节能减排、提质增效具有重要价值。本文基于引力模型分析城市能源代谢过程中能源流两端连接节点的属性差异, 选取煤、石油、天然气三种能源, 以北京市非首都功能疏解部门为例探究要素差异及部门自身属性差异在能源代谢过程中的影响; 利用情景分析法, 分析两种能源优化强度和三种部门疏解强度的6种组合情景下四部门的不同种类能源消耗的变化。结果表明, 不同要素对部门能源消耗的正负反馈机制及不同部门对不同能源偏好程度均存在异质性, 这种异质性导致不同政策情景对北京市非首都功能疏解部门能源结构优化的作用效果不同。强优化强疏解情景对于制造业部门煤和天然气能源的替代最为有利, 低疏解强优化情景对控制交通业及批发和零售业部门的能源消费, 改善教育业的能源消费结构最有利。

关键词: 能源代谢; 异质性; 引力模型; 多情景模拟; 非首都功能疏解

中图分类号: F206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2022)4-0153-13

一、引言

伴随近年来城市化进程的持续推进, 我国城市外部资源压力与生态环境问题愈加突出, “大城市病”不断显现。为此, 北京、上海等城市相继探索通过区域协同和功能疏解等方式缓解和改善城市发展问题, 积极谋求绿色发展的可行路径。尤其在“双碳”目标愈加明确的背景下, 优化城市功能布局、转变资源利用模式、提升能源经济环境综合绩效成为未来城市转型发展的重要方向。基于我国仍将长期处于发展上升阶段、城市供能-用能系统零碳转型尚未实现的现实状况, 探究城市能源利用模式和效率提升路径具有重要实际意义。

一直以来, 国内外学者围绕城市能源利用模式和效率提升做了诸多探索, 有力支持了城市可持续发展。其中, 结合城市能源投入产出过程与生态代谢过程的相似性(赵颜创等, 2016), Wolman(1965)于1965年提出基于代谢的视角, 将城市能源消费、经济效益和环境质量关联起来, 揭示城市在能源利用过程中存在的问题及产生的代谢污染物对生态环境的影响, 评估城市发展过程中能源代谢影响(Zhang et al, 2015; 卢伊和陈彬, 2015), 从而为城市能源的合理规划与政策制定提供科学依据。

城市能源代谢研究的分析手段包括能量流分析、投入产出分析和生态网络分析等方法。早期对于城市能源代谢的研究多以能量流分析(energy flow analysis, EFA)为主, 主要针对城市能源的利用规模和转换效率(郑宏媚和郑宇涵, 2020)。EFA以能量守恒定律为基础, 通过追踪能量在社会经济系统中流动的过程及途径, 揭示特定区域的能量流特性、转换效率和总吞吐量。Browne et al(2012)曾利用能量流分析法, 研究爱尔兰城区能源代谢情况。Krausmann et al(2003)、Haberl(2006)基于此方法分别对奥地利和美国城市代谢状况进行分析。Odum(1986)在20世纪80年代提出能值分析法, 将能值定义为某种产品或劳务的生产过程中直接或间接投入的可用能, 为城市能源代谢研究提供了新的视角。Ascione et al(2009)利用能值分析法, 比较罗马的新陈代谢指标与其他同类研究的指标差异, 最终发现罗马生活生产消耗更高, 并且罗马经济发展需要

收稿日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“能源输入型城市能源生态系统建模及优化路径研究”(71673017); 国家自然科学基金面上项目“生产-生活系统循环链接体系下全要素能效提升路径及政策仿真”(72174015)

作者简介: 穆献中, 博士, 北京工业大学研究员, 博士研究生导师, 研究方向: 能源经济, 技术经济; 周文韬, 北京工业大学硕士研究生, 研究方向: 能源经济; (通讯作者)胡广文, 博士, 北京工业大学助理研究员, 研究方向: 能源经济。

的环境代价要远大于经济系统的发展程度。张妍和杨志峰(2007)、吴玉琴和严茂超(2011)等运用能值分析法测度了广州、深圳等城市能源代谢状况。

能量流分析可以较好的计算社会经济系统能量的输入和输出,但此方法无法研究系统内物质及能量的流动,忽略了能量流动过程的隐含能量(穆献中和朱雪婷,2019)。投入产出分析(input-output analysis, IOA)最早由列昂惕夫在1936年提出,在20世纪七八十年代被应用到我国能源领域的研究中。该方法能够发现部门中间交换的间接能量流,基于IOA的区域能源及碳排放建模被广泛应用到研究当中(Chen和Chen, 2015)。Liang et al(2010)利用改进的投入产出法对苏州市能源代谢进行分析。姜巍等(2015)利用我国2007年投入产出表构建了中国各行业之间的联系网络,并分析了煤炭开采与洗选业等5个主要能源行业的网络特征。Zhang et al(2016)利用投入产出分析计算了北京、天津及河北城市群的能流过程,结果表明河北省城市群能耗最高,天津次之。但是,这种方法无法衡量中间产品的生产和交换中隐含的能源消耗和复杂的生态关系(Chen et al, 2013)。

生态网络分析(ecological network analysis, ENA)是一种从投入产出演变而来的面向系统的方法,它可以从整体上评估城市系统的结构和功能(Wu, 2016)。ENA将生态系统抽象成网络当中的节点、流量及路径,节点与节点间的交互关系组成系统网络,研究系统间及系统内节点之间的流动关系,分析系统结构、功能及演化规律(Zhai, 2019)。Chen和Chen(2013)基于生态网络分析,利用多区域投入产出表建立2007年世界能源消耗网络模型,将世界经济体部门化为6784个节点的网络结构,对部门间能源流动和交互进行分析。Zhang et al(2010)利用生态网络分析,探究北京、重庆、天津、上海的能源代谢系统及水代谢系统。An et al(2014)基于生态网络分析方法构建了中国工业产业的隐含能流网络,从能源角度揭示产业间的相互关联关系。Zhang et al(2017)等将投入产出分析和生态网络分析相结合,详细描述京津冀能源流动过程并计算部门和区域能源消耗。Wang和Chen(2016)等运用生态网络分析法对城市能源和水资源的代谢特征进行综合分析。

基于以上分析,目前城市能源系统代谢研究已取得长足发展,尤其对于城市能源代谢过程及综合影响,已形成相对完整的理论方法体系支撑。然而,随着近年来城市功能疏解、区域协同、产业迁移、清洁技术进步等活动的不断推进,城市能源系统的系统规模、复杂程度和动态特征愈加突出,系统内部要素由于个体差异导致代谢过程演化的影响逐渐显现。而现有代谢研究体系普遍关注能源系统内部节点流动及部门间交互关系,对于节点间属性差异及由此导致的整体代谢差异反映不足,很少有研究解决能源流两端联接节点在城市能源代谢过程中的异质性问题。因此,有必要对城市能源系统中各部门在代谢过程中的异质性进行充分考虑和分析。

城市能源系统的异质性主要体现了不同部门对能源代谢波动相应的差异性,进而对宏观城市能源代谢产生影响。针对城市代谢异质性研究,在模型方法选择上,引力模型提供了较有针对性的分析思路。引力模型作为万有引力定律在社会科学领域的延伸,可以反映系统内有向流节点对有向流的不同作用,进而突出不同属性节点在系统内的异质性。引力模型在社会科学领域已拥有较为广泛的应用,比如, Tinbergen(1962)在1962年将引力模型应用在国际贸易领域,研究双边贸易与国家间经济规模和地理位置的关系。王希(2020)运用引力模型,从城市规模划分和城市空间经济联系两个角度分析京津冀城市群的经济联系。相雪梅(2020)基于引力模型中 K_j 的修正,构建城市网络模型,分析山东省各城市间经济关联结构。Fracasso(2014)将引力模型应用在水循环领域,探究国家虚拟水贸易的决定因素。

综上所述,国内外学者对城市能源代谢问题的研究不断增加,但在研究方法方面,大多采用能量流、投入产出或生态网络分析方法,运用引力模型方法进行实证分析的还很少;在研究内容方面,很少有研究关注能源流两端节点在城市能源代谢过程中的异质性问题。与现有文献相比,本文有以下方面的创新。第一,本文将引力模型应用到城市能源代谢系统的分析中,并结合城市能源系统特征,对该模型做出相应改进;第二,本文通过揭示不同部门和能源产品的差异性在城市能源代谢中的影响及互动关系,探究要素异质性在城市能源代谢系统中的作用机理,弥补以往对于异质性问题的研究不足;第三,本文以北京市非首都功能疏解部门作为实证研究对象,利用多情景模拟分析不同疏解和能源结构优化强度下各部门能源消费的变化情况,基于要素异质性特征形成差异化的政策建议。

二、模型构建与数据来源

(一)城市能源代谢异质分析模型构建

本文构建的城市能源代谢异质分析模型架构基于引力模型,描述城市能源代谢系统中由于供需两端由于要素异质性导致的代谢能流差异。根据地理学第一定律,地理事物或属性在空间分布上互为相关,越相近的事物联系越紧密(陈强,2013)。经典的牛顿万有引力模型将事物间的空间联系考虑在内:

$$Y_{ij} = G \frac{X_i X_j}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

其中: Y_{ij} 表示起始节点*i*与目的节点*j*间的有向流; G 表示引力系数; X_i 、 X_j 分别表示起始节点*i*与目的节点*j*的质量; d_{ij} 表示两个节点间的距离。

Head et al(2014)在2014年提出社会科学研究中引力模型的一般形式为

$$Y_{ij} = GX_i^\alpha X_j^\beta d_{ij}^\gamma \quad (2)$$

其中: Y_{ij} 表示起始节点*i*与目的节点*j*间的有向流; G 为引力系数; X_i 、 X_j 分别表示起始节点*i*与目的节点*j*的相关影响因子度量; d_{ij} 表示起始节点*i*与目的节点*j*的距离; α 、 β 、 γ 表示弹性系数。

在城市能源代谢网络中,能源流两端连接节点的属性会对能流产生不同影响(图1),而引力模型可以对不同节点属性差异进行分析,进而突出不同节点在能源代谢过程中的异质性。

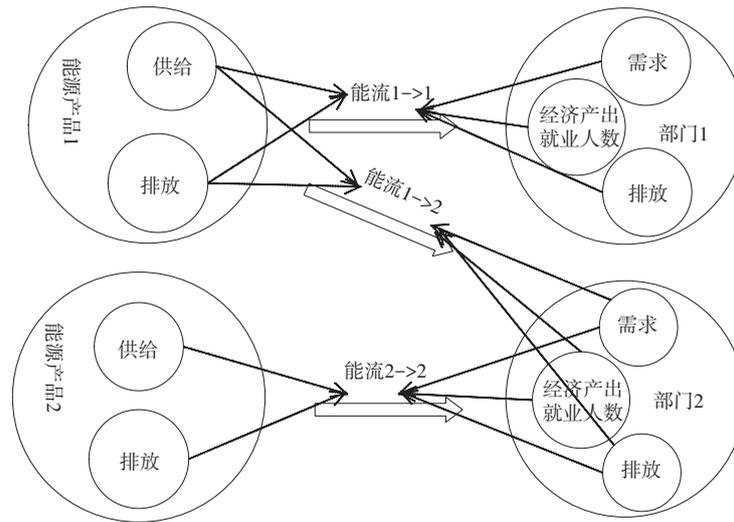


图1 城市能源代谢网络引力模型

本文将引力模型应用到城市能源系统代谢方面,结合城市能源系统特征,对该模型做出相应改进,建立模型为

$$Y_{ij} = \alpha_0 X_i^{\alpha_1} X_j^{\alpha_2} E_j^{\alpha_3} P_j^{\alpha_4} D_i^{\alpha_5} D_j^{\alpha_6} \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

其中: Y_{ij} 表示由能源*i*流向消费部门*j*的能流,即消费部门*j*对于能源*i*的消费量; X_i 表示能源*i*在城市中的供给总量; X_j 表示消费部门*j*对所有能源的消费量; E_j 表示消费部门*j*的总经济产出; P_j 表示消费部门*j*的就业人数; D_i 表示能源*i*消费导致的所有二氧化碳排放; D_j 表示消费部门*j*产生的所有二氧化碳排放; α_0 表示常数项; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 表示弹性系数; ε_{ij} 表示随机误差。

上述指标的选择综合考虑了能源、经济、环境三方面因素。城市能源的供给和需求会影响能源资源的分配和竞争,从而影响部门的能源消费量。部门经济产出和就业人数的增加会使得部门对能源的消耗量增加,但同时也会提高部门的能源利用效率和竞争力,当经济产出和就业人数增加到一定程度时会对部门能源消费产生负向影响。能源产品的二氧化碳排放对于消费部门的能源选择具有重要影响,而消费部门的二氧化碳排放对于消费部门自身的能源消费行为具有重要影响。

对模型两边取对数,使模型线性化:

$$\ln Y_{ij} = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_i + \alpha_2 \ln X_j + \alpha_3 \ln E_j + \alpha_4 \ln P_j + \alpha_5 \ln D_i + \alpha_6 \ln D_j + \ln \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

本文所选解释变量间存在严重的多重共线性,故采用主成分回归法进行处理。

(二)数据来源及处理

北京作为我国的首都和现代化大城市,是我国政治、文化、国际交往、科技创新中心,同样也面临着巨大的城市发展压力。长期以来,北京市能源消费基数较大,而北京自身能源资源有限,能源的对外依存度较高,能源的供需矛盾对城市生态环境发展造成严重负担。《北京城市总体规划(2016—2035)》指出,“建设首都必须抓住京津冀协同发展战略契机,以疏解非首都功能为‘牛鼻子’,突出把握首都发展、减量集约、创新驱动、改善民生的要求,明确核心区功能重组、中心城区疏解提升”,阐述了非首都功能疏解的必要性。北京市非首都功能疏解部门主要包括制造业,交通运输、仓储和邮政业,批发和零售业及教育业^①,这四个部门在能源系统中具有重要地位,2017年这四个部门能源消费量占能源消费总量的比重达到42.27%。本文以北京市四个非首都功能疏解部门为例,分析其能源流两端联接节点的属性对能流产生的影响,进而突出部门能源代谢过程中节点间的异质性,并探索不同疏解和能源结构优化强度下各部门能源消费的变化情况,对于实现非首都功能疏解和降低北京市整体能耗同步发展,完成北京市节能减排目标具有重要意义。

1. 数据来源

本文选取煤、石油、天然气三种能源产品和制造业,交通运输、仓储和邮政业,批发和零售业及教育业这四个非首都功能疏解部门进行研究。时间跨度为2005—2017年,数据均来自于2006—2018年的《北京统计年鉴》。

2. 碳排放量的计算

碳排放量由联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的碳排放公式计算:

$$C = \sum_{i=1}^n E_i C_i \quad (5)$$

其中:C为碳排放量; E_i 是第*i*种能源的消耗,使用标准煤计算; C_i 是第*i*种能源的碳排放系数。碳排放系数参考IPCC温室气体指南及我国《省级温室气体清单编排指南》(表1)。

表1 各种能源标准煤折算系数和碳排放系数

能源品种	标准煤折算系数	碳排放系数
原煤	0.7143(千克标准煤/千克)	1.9745 千克 CO ₂ /千克
焦炭	0.9714(千克标准煤/千克)	2.8604 千克 CO ₂ /千克
汽油	1.4714(千克标准煤/千克)	2.9251 千克 CO ₂ /千克
煤油	1.4714(千克标准煤/千克)	3.0334 千克 CO ₂ /千克
柴油	1.4571(千克标准煤/千克)	3.0959 千克 CO ₂ /千克
燃料油	1.4286(千克标准煤/千克)	3.1705 千克 CO ₂ /千克
液化石油气	1.7143(千克标准煤/千克)	3.1013 千克 CO ₂ /千克
天然气	1.1000(千克标准煤/立方米)	2.1622 千克 CO ₂ /立方米

三、实证结果分析

(一)煤类能源

针对煤类能源,本文将其与制造业,交通运输、仓储和邮政业,批发和零售业,教育业这四个部门分别建模,以讨论部门间的异质性。下面以制造业为例说明建模过程。

1. 单位根检验与协整检验

本文所选数据为时间序列,为防止出现伪回归的现象,应对数据进行协整检验。首先,使用ADF检验法判断数据是否平稳,结果见表2。

由表2可知,各变量序列二阶差分后平稳,说明它们是二阶单整的,可以继续协整检验。本文利用Engle-Granger两步法,对残差序列进行检验(表3),结果显示ADF统计量对应*t*值为-4.337345,小于三个不同检验水平下的临界值,从而可以拒绝存在单位根的原假设,残差项平稳,各变量间存在协整关系。

2. 主成分回归

检验解释变量间的相关性可发现解释变量间高度相关,如果直接使用最小二乘法进行回归将会出现严重的多重共线性,导致模型估计结果的不准确。故本文采取主成分回归的方法来提高引力模型的参数精度。

表2 平稳性检验结果

变量	差分阶数	ADF 对应 <i>t</i> 值	<i>P</i>	结论
ln Y_{it}	2	-3.956783	0.0188	平稳
ln X_{1t}	2	-5.209802	0.0029	平稳
ln X_{2t}	2	-4.079888	0.0159	平稳
ln E_{it}	2	-4.330764	0.0113	平稳
ln P_{it}	2	-4.383174	0.0088	平稳
ln D_{1t}	2	-5.568021	0.0018	平稳
ln D_{2t}	2	-4.927684	0.0052	平稳

① 《京津冀协同发展规划纲要》:从疏解对象讲,重点是疏解一般性产业特别是高消耗产业,区域性物流基地、区域性专业市场等部分第三产业,部分教育、医疗、培训机构等社会公共服务功能,部分行政性、事业性服务机构和企业总部等四类非首都功能。中共中央政治局会议,2015-4-30, <https://www.donglinxiaofang.com/news/32320.html>。

对6个解释变量进行主成分回归分析,根据特征值大于1的原则提取出2个主成分,解释的总方差为81.599%,可以较好的解释原始变量的特征。根据成份得分系数矩阵,可以得到各个主成分与原始变量的表达式为

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.822\ln X_i - 0.819\ln X_j + 0.789\ln E_j + 0.669\ln P_j + 0.765\ln D_i - 0.617\ln D_j, \\ F_2 &= 0.513\ln X_i + 0.484\ln X_j - 0.177\ln E_j + 0.211\ln P_j + 0.587\ln D_i + 0.772\ln D_j \end{aligned} \quad (6)$$

其中: F_1 、 F_2 为主成分的代表变量; X_i 、 X_j 、 E_j 、 P_j 、 D_i 、 D_j 与式(3)中各变量含义相同。

提取主成分后,继续对变量进行主成分回归分析,即将两个主成分与因变量做最小二乘回归,得到回归结果见表4。

根据表4可知,常量 a 的 t 统计量为-0.805,对应 P 为0.444,说明常数项不显著,可以删除。综合变量 F_1 、 F_2 的系数分别为-0.219、0.255,对应 P 分别为0.012、0.006,均小于0.05,说明方程各系数是显著的。对方程进行 F 检验, F 为12.112,对应 P 为0.004,方程总体显著。计算方程的拟合优度, R^2 为0.784,拟合效果较好。该方程的函数关系为

$$\ln Y_{ij} = -0.219F_1 + 0.255F_2 \quad (7)$$

将上面得到的6个原始解释变量与每个综合变量之间的线性函数关系代入式(7),得到原始解释变量与碳排放量之间的线性函数关系为

$$\ln Y_{ij} = -0.049\ln X_i + 0.303\ln X_j - 0.218\ln E_j - 0.093\ln P_j - 0.018\ln D_i + 0.332\ln D_j \quad (8)$$

类似上述建模过程,可以得到交通运输、仓储和邮政业,批发和零售业,教育业这几个部门的引力模型。

(1)交通运输、仓储和邮政业:

$$\ln Y_{ij} = 1.009\ln X_i - 0.662\ln X_j - 0.833\ln E_j - 0.644\ln P_j + 1.008\ln D_i - 0.737\ln D_j \quad (9)$$

(2)批发和零售业:

$$\ln Y_{ij} = 0.758\ln X_i - 0.353\ln X_j - 0.807\ln E_j - 0.874\ln P_j + 0.801\ln D_i + 0.205\ln D_j \quad (10)$$

(3)教育业:

$$\ln Y_{ij} = 1.009\ln X_i - 0.602\ln X_j - 0.872\ln E_j - 0.867\ln P_j + 1.001\ln D_i + 0.999\ln D_j \quad (11)$$

3. 结果分析

根据式(8)可知,对于制造业而言,该部门的能源需求量、该部门煤的消费导致的二氧化碳排放量会对该部门的煤类能源消费量产生促进作用。当该部门能源需求量增加1%时,会引起该部门煤的消费量增加0.303%;当该部门煤的消费导致的二氧化碳排放量增加1%时,会引起该部门煤的消费量增加0.332%。煤的供给量、制造业部门的总经济产出、制造业部门的就业人数、煤的消费导致的所有二氧化碳排放会对制造业部门产生抑制作用。当能源产品总供给增加1%时,会引起该部门煤类能源消费量减少0.049%;当该部门总经济产出增加1%时,会引起该部门煤类能源消费量减少0.218%;当该部门就业人数增加1%时,会引起该部门煤类能源消费量减少0.093%。当煤的消费导致的二氧化碳排放量增加1%时,会引起该部门煤类能源消费量减少0.018%。

根据式(9),对于交通运输、仓储和邮政业而言,煤的供给量和煤的消费导致的所有二氧化碳排放会对该部门的煤类能源消费量产生促进作用。当这两个自变量分别增加1%时,该部门的煤的消费量分别增加1.009%、1.008%。而交通业部门的能源需求量、总经济产出、就业人数和部门煤的消费导致的所有二氧化碳排放量会对该部门的煤类能源消费量产生抑制作用。当这4个指标分别增加1%时,会引起交通业部门煤类能源消费量分别减少0.662%、0.833%、0.644%、0.737%。

根据式(10),对于批发和零售业而言,煤的供给量、煤的消费导致的所有二氧化碳排放量、该部门煤的消费导致的二氧化碳排放量会对该部门的煤类能源消费量产生促进作用。当这三个指标分别增加1%时,会引起批发和零售业煤炭消费量分别增加0.758%、0.801%、0.205%。批发和零售业部门的能源需求量、总经济

表3 协整检验结果

ADF统计量和各显著性水平下临界值		t 统计量	P
ADF检验统计量		-4.337345	0.0070
检验临界值	1% level	-4.121990	
	5% level	-3.144920	
	10% level	-2.713751	

表4 主成分回归结果

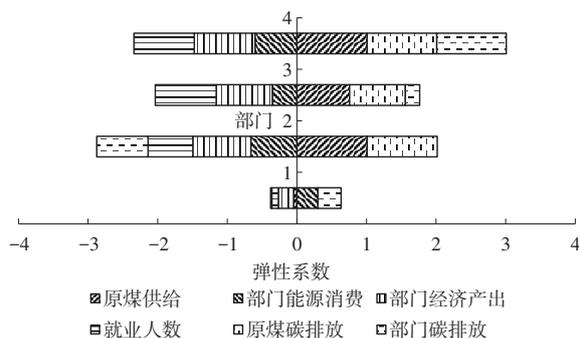
变量	系数	t 统计值	P
常量 a	-0.052	-0.805	0.444
F_1	-0.219	-3.212	0.012
F_2	0.255	3.729	0.006
F 统计量	12.112		
R^2	0.784		

产出和就业人数对该部门煤类能源消费量产生抑制作用。当这三个指标分别增加 1% 时,会引起批发和零售业煤类能源消费量分别减少 0.353%、0.807%、0.874%。

根据式(11),对于教育业而言,煤的供给量、煤的消费导致的所有二氧化碳排放量、该部门煤的消费导致的二氧化碳排放量会对该部门的煤类能源消费量产生促进作用。当这三个指标分别增加 1% 时,会引起教育业煤类能源消费量分别增加 1.009%、1.001%、0.999%。教育业部门的能源需求量、总经济产出和就业人数对该部门煤类能源消费量产生抑制作用。当这三个指标分别增加 1% 时,会引起教育业煤类能源消费量分别减少 0.602%、0.872%、0.867%。

图 2 展示了不同要素对四个非首都功能疏解部门煤类能源消费的弹性系数分布。其中,与能源供需相关的要素以对角线形式标注,与经济产出和就业人数相关的要素以横竖实线形式标注,与二氧化碳排放相关的要素以横竖虚线形式标注。

综合来看,在经济方面,经济产出和就业人数对四个部门的煤类能源消费量均产生负向影响,这说明对于煤类能源北京市这 4 个部门在所有部门中的经济竞争力较强,部门煤类能源效率较高。其中,就经济产出而言,教育业弹性系数的绝对值最大,达到 0.872,交通业、批发和零售业的弹性系数绝对值也在 0.8 以上,但制造业的弹性系数绝对值只有 0.218;针对就业人数,批发和零售业的弹性系数绝对值最大,为 0.874,教育业的弹性系数绝对值为 0.867,略低于批发和零售业,交通业的弹性系数为 0.644,但制造业的弹性系数绝对值只有 0.093,远远小于其他三个产业。这说明在非首都功能疏解的四个部门中,制造业的竞争力还相对较小,该部门经济状况对于煤类能源消费量的抑制作用还很小。



1 为制造业;2 为交通运输、仓储和邮政业;3 为批发和零售业;4 为教育业
图 2 北京市非首都疏解部门煤类能源消费相关弹性系数分析

在能源方面,对于制造业而言,能源供给量对其煤类能源消费量产生负向影响,能源需求量产生正向影响;对于交通业、批发和零售业、教育业这三个部门而言,能源供给量对煤类能源消费量产生正向影响,能源需求量产生负向影响。从能源供给角度,这说明交通业、批发和零售业和教育业这三个部门对于煤类能源的竞争力较强;从能源需求角度,这说明制造业对于煤类能源的依赖性较强,而交通业、批发和零售业和教育业对于煤类能源的依赖性较弱。其中,交通业和教育业这两个部门的煤类能源供给量的弹性系数最大,且均已超过 1,煤类能源供给量的变动所引起的部门煤类能源消费量的变动已超过供给量自身的变化,说明这两个部门对于煤类能源的竞争力很强。

在碳排放方面,对于煤类能源消费导致的所有碳排放量指标,会对制造业的煤类能源消费量产生负向影响,而对交通业、批发和零售业、教育业这三个部门产生正向影响。对于消费部门产生的碳排放量指标,会对交通业的碳排放量产生负向影响,而对制造业、批发和零售业、教育业这三个部门产生正向影响。这说明在供给端,制造业与煤类能源节点间存在一种二氧化碳排放的内控机制,当北京市部门整体由于煤类能源消费导致二氧化碳排放增加,制造业部门倾向于降低煤类能源消费,从而减少二氧化碳排放;而交通业、批发和零售业及教育业与煤类能源节点间存在一种二氧化碳排放的放大机制,当北京市部门整体由于煤类能源消费导致二氧化碳排放增加,这三个部门倾向于增加煤类能源消费,从而增加二氧化碳排放。在需求端,制造业、交通业及批发和零售业部门内部存在一种二氧化碳排放的放大机制,导致部门自身煤类能源消费与二氧化碳排放间存在互相加强的正反馈;教育业部门内部存在一种二氧化碳排放的内控机制,导致部门自身煤类能源消费与二氧化碳排放间存在互相减弱的负反馈。

(二) 石油

1. 模型建立

针对石油能源,类似上述建模过程,对于四个非首都功能疏解部门建立方程如下。

(1) 制造业。

$$\ln Y_{ij} = -0.095 \ln X_i + 0.737 \ln X_j - 0.599 \ln E_j - 0.824 \ln P_j - 0.483 \ln D_i + 0.786 \ln D_j \quad (12)$$

(2) 通运输、仓储和邮政业。

$$\ln Y_{ij} = 0.781 \ln X_i + 1.008 \ln X_j + 1.008 \ln E_j + 0.999 \ln P_j + 1.021 \ln D_i + 1.027 \ln D_j \quad (13)$$

(3) 批发和零售业。

$$\ln Y_{ij} = 0.720 \ln X_i + 0.953 \ln X_j + 0.553 \ln E_j + 0.485 \ln P_j + 0.725 \ln D_i + 0.873 \ln D_j \quad (14)$$

(4) 教育业。

$$\ln Y_{ij} = -0.634 \ln X_i - 0.860 \ln X_j - 0.975 \ln E_j - 0.964 \ln P_j - 0.897 \ln D_i + 0.854 \ln D_j \quad (15)$$

2. 结果分析

四个方程单独来看,对于制造业而言,石油的供给总量、部门总经济产出、就业人数、石油消费导致的二氧化碳排放会对该部门石油消费量产生负向影响,当它们分别增加1%时,会引起制造业部门石油消费量分别减少0.095%、0.599%、0.824%、0.483%。制造业对所有能源的消费量、制造业自身产生的所有二氧化碳排放会对该部门石油消费量产生正向影响,当它们分别增加1%时,会引起制造业部门石油消费量分别增加0.737%、0.786%。对于交通运输、仓储和邮政业而言,所有指标均会对该部门石油消费量产生正向影响,当石油供给总量、交通业对所有能源消费量、总经济产出、就业人数、石油消费导致的二氧化碳排放量、交通业自身产生的所有二氧化碳排放量分别增加1%时,会引起交通业部门石油消费量分别增加0.781%、1.008%、1.008%、0.999%、1.021%、1.027%。对于批发和零售业而言,所有指标同样会对该部门石油消费量产生正向影响,当它们分别增加1%时,会使该部门石油消费量分别增加0.72%、0.953%、0.553%、0.485%、0.725%、0.873%。对于教育业而言,该部门自身产生的所有二氧化碳排放量会对该部门石油消费量产生正向影响,当其增加1%时,会引起该部门石油消费量增加0.854%;其他五个指标均会对该部门石油消费量产生负向影响,当它们分别增加1%时,会引起教育业石油消费量分别减少0.634%、0.86%、0.975%、0.964%、0.897%。

图3展示了北京市4个非首都功能疏解部门石油消费相关弹性系数分布,标注形式同图2。综合来看,在经济方面,经济产出和就业人数对制造业和教育业的石油消费量产生负向影响,对交通业及批发和零售业的石油消费量产生正向影响。这说明制造业和教育业在对于石油能源的利用方面效率较高,经济竞争力较强;而交通业及批发和零售业对于石油能源的利用效率还较低,这可能与这两个部门对于石油资源的大量需求有关。

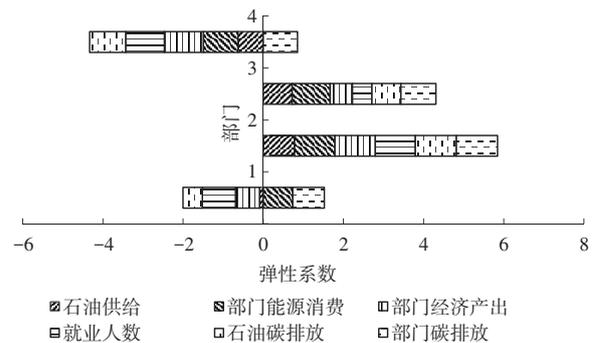
在能源方面,石油的供给总量指标对制造业和教育业产生负向影响,对交通业及批发和零售业产生正向影响;部门对所有能源的需求量指标对教育业产生负向影响,对制造业、交通业、批发和零售业产生正向影响。这说明在能源供给方面,交通业及批发和零售业对于石油能源的竞争力较强,而制造业和教育业的竞争力较弱;在能源需求方面,制造业、交通业及批发和零售业对于石油资源的依赖性较强,教育业对其依赖性较弱。

在碳排放方面,石油消费导致的二氧化碳排放量会对制造业和教育业的石油消费量产生负向影响,对交通业及批发和零售业产生正向影响。部门自身能源消费产生的所有二氧化碳排放量对四个部门均会产生正向影响。这说明在供给端,制造业和教育业与石油能源的节点间存在二氧化碳排放的内控机制,当北京市部门整体由于石油能源消费导致二氧化碳排放增加,制造业和教育业部门倾向于降低石油能源消费,从而减少二氧化碳排放;交通业及批发和零售业与石油能源的节点间存在二氧化碳排放的放大机制。而在需求端,这四个部门内部对于石油能源的二氧化碳排放都存在一种放大机制,导致部门自身石油能源消费与二氧化碳排放间存在互相加强的正反馈。

(三) 天然气

1. 模型建立

针对天然气能源,类似上述建模过程,对于4个非首都功能疏解部门建立方程如下。



1为制造业;2为交通运输、仓储和邮政业;3为批发和零售业;4为教育业

图3 北京市非首都功能疏解部门石油消费相关弹性系数分布

(1)制造业。

$$\ln Y_{ij} = 0.909 \ln X_i - 0.878 \ln X_j + 0.945 \ln E_j + 0.558 \ln P_j + 0.907 \ln D_i - 0.847 \ln D_j \quad (16)$$

(2)交通运输、仓储和邮政业。

$$\ln Y_{ij} = -0.580 \ln X_i - 0.343 \ln X_j - 0.568 \ln E_j - 0.444 \ln P_j - 0.579 \ln D_i - 0.433 \ln D_j \quad (17)$$

(3)批发和零售业。

$$\ln Y_{ij} = -0.553 \ln X_i - 0.193 \ln X_j - 0.580 \ln E_j - 0.615 \ln P_j - 0.553 \ln D_i + 0.264 \ln D_j \quad (18)$$

(4)教育业。

$$\ln Y_{ij} = 0.909 \ln X_i + 0.984 \ln X_j + 0.872 \ln E_j + 0.864 \ln P_j + 0.909 \ln D_i - 0.409 \ln D_j \quad (19)$$

2. 结果分析

四个方程单独来看,对于制造业而言,天然气的供给总量、部门总经济产出、就业人数、天然气消费导致的二氧化碳排放会对该部门天然气消费量产生正向影响,当它们分别增加1%时,会引起制造业部门天然气消费量分别增加0.909%、0.945%、0.558%、0.907%。制造业对所有能源的消费量、制造业自身产生的所有二氧化碳排放会对该部门天然气消费量产生负向影响,当它们分别增加1%时,会引起制造业部门天然气消费量分别减少0.878%、0.847%。对于交通运输、仓储和邮政业而言,所有指标均会对该部门天然气消费量产生负向影响,当天然气供给总量、交通业对所有能源消费量、总经济产出、就业人数、天然气消费导致的二氧化碳排放量、交通业自身产生的所有二氧化碳排放量分别增加1%时,会引起交通业部门天然气消费量分别减少0.580%、0.343%、0.568%、0.444%、0.579%、0.433%。对于批发和零售业而言,该部门自身产生的二氧化碳排放量增加1%时,会引起该部门天然气消费量增加0.264%。其他5个指标均会对批发和零售业部门天然气消费量产生负向影响,当它们分别增加1%时,会使该部门天然气消费量分别减少0.553%、0.193%、0.580%、0.615%、0.553%。对于教育业而言,该部门自身产生的所有二氧化碳排放量会对该部门天然气消费量产生负向影响,当其增加1%时,会引起该部门天然气消费量减少0.409%;其他五个指标均会对该部门石油消费量产生正向影响,当它们分别增加1%时,会引起教育业天然气消费量分别增加0.909%、0.984%、0.872%、0.864%、0.909%。

图4展示了北京市4个非首都功能疏解部门相关弹性系数分布,标注色系同图2。综合来看,在经济方面,经济产出和就业人数两个指标对制造业和教育业部门产生正向影响,对交通运输、仓储和邮政业及批发和零售业两个部门产生负向影响。这说明交通业及批发和零售业这两个部门对于天然气的利用效率较高,而制造业及教育业的利用效率较低。

在能源方面,天然气供给量对制造业和教育业部门产生正向影响,对交通业及批发和零售业产生负向影响;部门总的能源消耗量对教育业部门产生正向影响,对其他三个部门产生负向影响。这说明在能源供给方面,制造业和教育业对天然气能源的竞争力较强;在能源需求方面,教育业对于天然气的依赖性较强。

在碳排放方面,天然气消费导致的二氧化碳排放量会对制造业和教育业的天然气消费量产生正向影响,对交通业及批发和零售业产生负向影响。部门自身能源消费产生的所有二氧化碳排放量对批发和零售业部门产生正向影响,对其余三个部门产生负向影响。这说明在碳排放方面,在供给端交通业及批发和零售业与天然气能源节点间存在二氧化碳排放的内控机制,制造业和教育业与天然气能源节点间存在二氧化碳排放的放大机制。在需求端,批发和零售业部门内部存在一种二氧化碳排放的放大机制,制造业、交通业和教育业部门内部存在一种二氧化碳的内控机制。

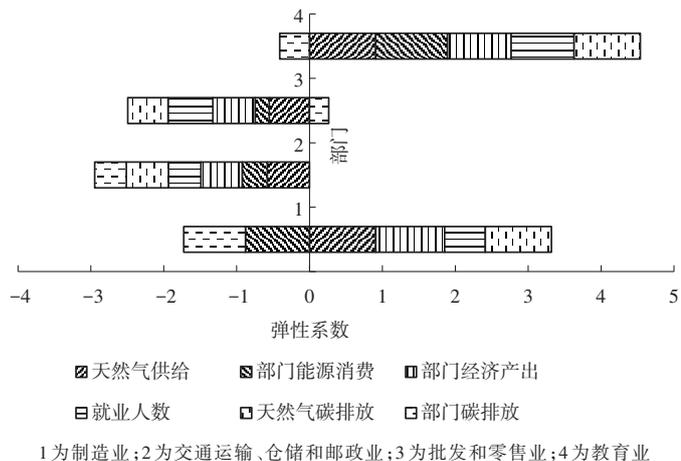


图4 北京市非首都功能疏解部门天然气消费相关弹性系数分布

四、北京市能源代谢部门异质性分析

在第三部分的分析中,主要通过分析不同要素对4个非首都功能疏解部门能源代谢的正负反馈机制突出了要素的异质性影响,但是对于不同能源间的敏感性及由于部门属性导致的对不同能源的偏好程度并没有深入分析。本节重点分析不同部门属性对不同能源偏好的异质性并探究部门异质性对清洁能源替代的影响。

图5展示了北京市4个非首都功能疏解部门对煤、石油、天然气能源的偏好程度对比,其中对角线形式表示能源类要素,横竖实线形式表示经济类要素,点线形式表示环境类要素。

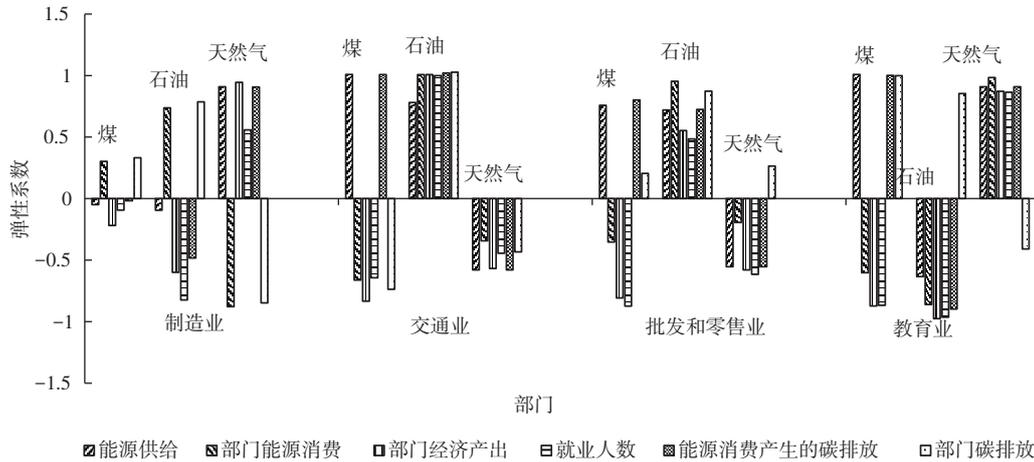


图5 北京市非首都功能疏解部门煤、石油、天然气能源代谢异质性比较

对于制造业,煤和石油的部门代谢对这两种能源的总供给、这两种能源消费产生的碳排放量、部门的总经济产出和就业人数的变化均为负反馈,对该部门的所有能源消费量、部门能源消费产生的碳排放量的变化均为正反馈;天然气的部门代谢对该种能源总供给、该种能源消费产生的碳排放量、部门总经济产出和就业人数的变化均为正反馈,对该部门的所有能源消费量、部门能源消费导致的碳排放量的变化均为负反馈。这表明制造业对于煤和石油的依赖性较大并且对这两种能源的能源利用效率较高,而对天然气的利用程度还较低且利用效率不高。当对应要素增加时,部门天然气消费会出现一定程度的增长而煤和石油会出现一定程度的下降。因此在扩张情景下对于该部门的天然气这类相对清洁能源对传统能源的替代有促进作用。

对于交通运输、仓储和邮政业,石油的部门代谢对所有要素的变化均为正反馈,天然气的部门代谢对所有要素的变化均为负反馈。煤类能源的部门代谢对于该种能源供给和该种能源消费产生的二氧化碳的变化为正反馈,对于该部门能源需求量、经济产出、就业人数和该部门能源消费产生的二氧化碳排放量的变化为负反馈。这表明交通业部门对于石油的依赖性较大并且利用效率较低,对于天然气的利用程度较低但利用效率较高,对于煤炭的依赖性较强但利用效率较高。当对应要素增加时,部门天然气消费会减少而石油和煤的消费会增加。因此在紧缩情景下对于该部门的天然气对石油与煤的替代具有促进作用。

对于批发和零售业,煤类能源的部门代谢对于该种能源的供给总量、该种能源消费产生的二氧化碳排放量及该部门能源消费产生的二氧化碳排放量的变动为正反馈,对于该部门的能源消费量、经济产出和就业人数的变化为负反馈。石油的部门代谢对于所有要素的变化均为正反馈,天然气的部门代谢对于该部门能源消费产生的二氧化碳排放为正反馈,对其他要素的变化均为负反馈。这表明批发和零售业部门对煤类能源的依赖性较大但能源利用效率较高,对于石油能源的依赖性较强且利用效率较低,对于天然气能源的利用程度较低但利用效率较高。当对应要素增加时,部门天然气消费会减少而煤和石油的消费增加。因此在紧缩情景下有利于该部门天然气能源对煤和石油能源的替代。

对于教育业,煤类能源的部门代谢对于该种能源的供给总量、该种能源消费产生的二氧化碳排放量及该部门能源消费产生的二氧化碳排放量的变动为正反馈,对于该部门的能源需求量、经济产出和就业人数的变化为负反馈。石油的部门代谢对于该部门能源消费产生的二氧化碳排放量的变动为正反馈,对其他要素的变化为负反馈。天然气的部门代谢对该部门能源消费产生的二氧化碳排放量的变动为负反馈,对其他要素

的变化均为正反馈。这说明教育业部门对煤炭的依赖性较高但利用效率较高,对石油的依赖性较低并且利用效率较高,对天然气的利用程度较高但利用效率较低。当对应要素增加时,部门天然气和煤炭能源消费增加并且煤类能源的变化幅度大于天然气,石油消费减少。因此在扩张情景下有利于天然气对于石油的替代,在紧缩情景下有利于天然气对于煤炭能源的替代。

五、情景分析

将引力模型中能源*i*在城市中的供给总量、消费部门*j*对所有能源的消费量、消费部门*j*的总经济产出、消费部门*j*的就业人数、消费部门*j*产生的所有二氧化碳排放这5个变量分为两组:非首都功能疏解变量和能源结构优化变量。其中非首都功能疏解变量包括消费部门*j*对所有能源的消费量、总经济产出、就业人数和产生的所有二氧化碳这4个变量,能源结构优化变量指能源*i*在城市中的供给总量。将非首都功能疏解变量分别设置低疏解、中疏解和强疏解三种模式,将能源结构优化变量设置为中优化和强优化两种模式。两组变量进行组合可形成6种发展模式:低疏解中优化、低疏解强优化、中疏解中优化、中疏解强优化、强疏解中优化、强疏解强优化。

2017年北京市煤类能源供给约占6%,根据《北京城市总体规划(2016—2035)》,到2035年优质能源比重提高到99%,设置中优化模式为到2035年北京煤类能源下降5%天然气能源增加5%,强优化模式为到2035年北京煤类能源下降6%天然气能源增加6%。假设部门规模缩减引起部门能源消费量、部门总经济产出、部门就业人数、部门二氧化碳等比减少,设置低疏解模式下部门规模缩减4%,中疏解模式下缩减5%,强疏解模式下缩减6%(表5)。

表5 不同情景下各指标变化

情景类型	煤供给总量	天然气供给总量	部门能源消费量	部门总经济产出	部门就业人数	部门二氧化碳排放
低疏解中优化	减少5%	增加5%	减少4%	减少4%	减少4%	减少4%
低疏解强优化	减少6%	增加6%	减少4%	减少4%	减少4%	减少4%
中疏解中优化	减少5%	增加5%	减少5%	减少5%	减少5%	减少5%
中疏解强优化	减少6%	增加6%	减少5%	减少5%	减少5%	减少5%
强疏解中优化	减少5%	增加5%	减少6%	减少6%	减少6%	减少6%
强疏解强优化	减少6%	增加6%	减少6%	减少6%	减少6%	减少6%

将以上6种不同情景对应数据代入模型,得出不同模式下北京市4个非首都功能疏解部门煤和天然气的消耗情况,结果如图6所示。

从表5可知,对于制造业部门,6种情景均会使该部门煤类能源消费减少,天然气消费增加。在强疏解强优化模式下对该部门能源消费替代最有利,可以使其煤类能源消费减少1.65%,天然气消费增加6.786%。对于交通运输、仓储和邮政业部门,6种情景会使该部门煤类能源消费和天然气能源消费均增加,本文所设定的六种模式均对该部门煤类能源和天然气能源的替代无明显作用,比较而言,低疏解强优化模式对控制该部门能源消费最为有利,使煤类能源消费增加最少,增加比例为5.45%,此时天然气消费的增加比例为3.672%。对于批发和零售业部门,6种情景同样会使该部门煤类能源消费和天然气能源消费均增加,这6种模式对该部门煤类能源和天然气能源的替代无明显作用,低疏解强优化模式对控制该部门能源消费量最有利,煤类能源的增加在此种模式下最少,增加比例为2.768%,此时天然气消费增加比例为1.178%。对于教育业部门,低疏解强优化情景会使该部门煤类能源消费降低,其余5种情景会使该部门煤类能源消费增加,6种情景均使该部门天然气消费降低,低疏解强优化模式对改善该部门能源消费结构最有利,可以使该部门煤类能源消费降低,天然气消费减少值最小,减少比例分别为0.686%、3.79%。

根据以上分析,能源结构优化对四部门能源消费结构的升级均较有利,煤类能源供给越低,天然气能源供给越高,越有利于部门煤炭消费向天然气消费的转变。然而非首都功能疏解只对制造业部门比较有利,疏解强度越高,越有助于制造业部门天然气能源对煤类能源的替代。然而对于交通业及批发和零售业,部门规模疏解强度的提高会引起煤类能源和天然气能源的同时增加,而对于教育业,部门规模疏解强度的提高甚至会使天然气能源消费降低。这主要是因为这些部门对于煤炭能源的利用效率较高,经济竞争力较强,经济产出的增加反而会引起这三个部门煤炭消费的减少;另外在对于天然气的利用方面,交通业及批发和零售业的利用效率较高,教育业的利用效率较低,经济产出的增加会导致交通业及批发和零售业的天然气消费的减少和教育业天然气消费的增加。而本文考虑部门规模缩减时,将各部门总的能源消费、经济产出、就业人数和

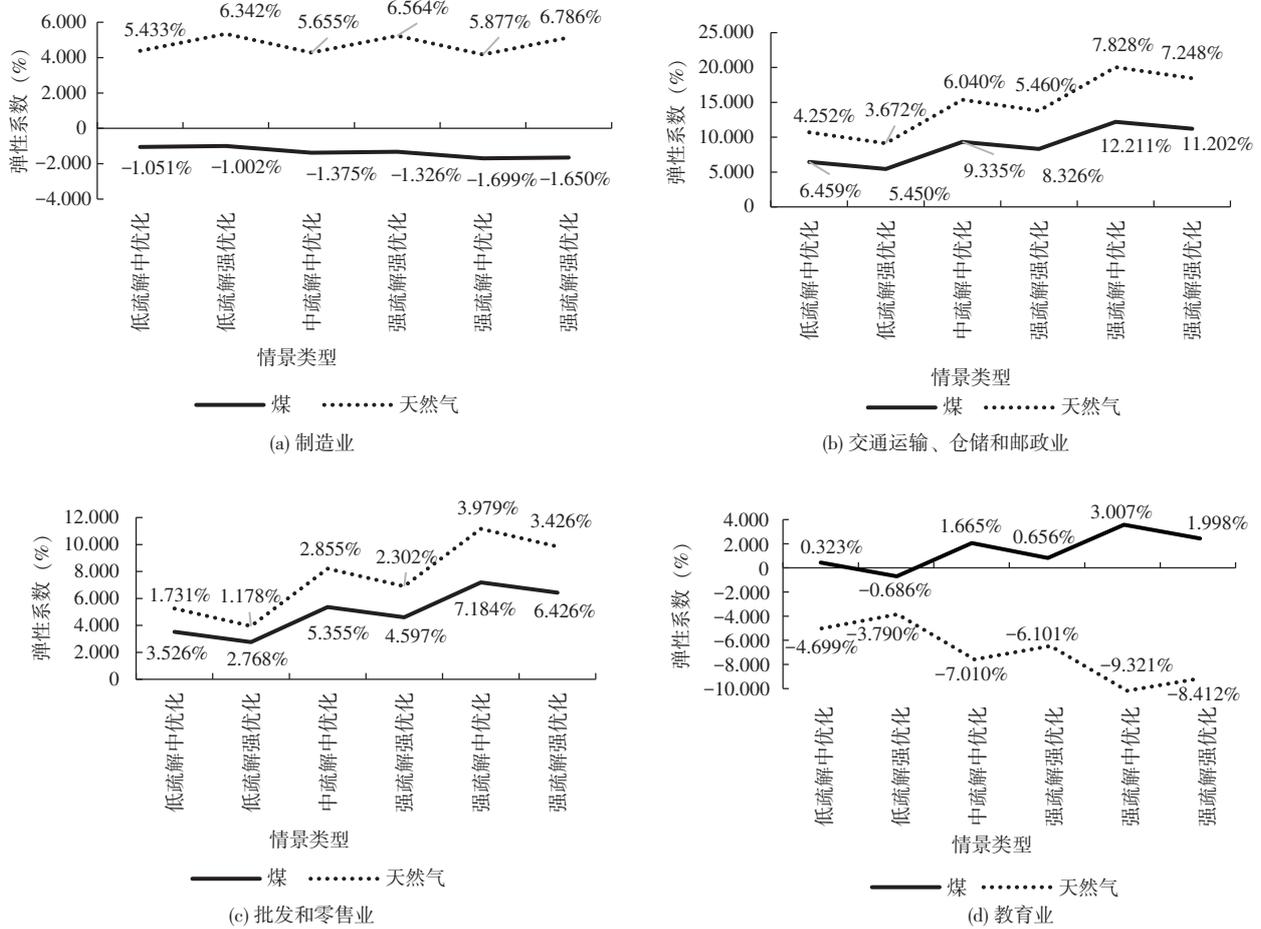


图6 6种不同情景下部门能源代谢演变

碳排放量抽象为等比变化,只考虑其他因素不变时单纯由部门规模缩减导致的不同种类能源消费量的变化。但是在实际情况下,由于技术的进步、产业间的转移等因素影响,经济产出将依然呈上升趋势,批发和零售业及教育业的就业人数会增加,碳排放量减少的比例也将大于部门规模缩减比例。因此非首都功能的疏解对于能源消费中煤炭和天然气的替代仍有效。

六、研究结论和政策启示

本文针对城市能源系统代谢的要素异质性,基于引力模型框架分析部门和能源产品差异对城市能源代谢的影响。选取非首都功能疏解背景下的北京市能源代谢过程为研究对象,基于制造业、交通业、批发和零售业及教育业4个非首都功能疏解重点部门为例进行实证检验,探究不同要素在能源代谢过程中对能流产生的异质性影响及各部门对不同能源偏好程度的异质性;通过将非首都功能疏解变量设置为低疏解、中疏解和强疏解三种模式,将能源结构优化变量设置为中优化和强优化两种模式得到低疏解中优化、低疏解强优化等6种情景,并探究何种情景下更有利于不同部门的煤类能源和天然气能源的替代。得到主要结论如下:

(1)城市能源系统代谢过程的要素异质性一方面体现在不同要素对部门能源消耗正负反馈的差异性,一方面体现在部门自身属性导致的对不同能源的敏感性和偏好程度差异。经济、能源、环境这三类要素对北京市四个非首都功能疏解部门三种能源产品的能源消耗产生不同影响,这表明要素异质性在城市能源系统代谢研究中的必要性,以及基于引力模型分析城市能源代谢异质性的方法适用性。

(2)不同部门对不同能源偏好存在异质性,这种异质性导致要素的扩张或收缩对部门清洁能源替代的作用效果不同。就北京市四个非首都功能疏解部门而言,对于制造业部门,扩张情景下有利于实现天然气这类相对清洁能源对传统能源的替代。对于交通运输、仓储和邮政业部门及批发和零售业部门,在紧缩情景下有利于实现天然气对煤和石油的替代。对于教育业部门,扩张情景下有利于天然气对石油的替代,紧缩情景下

有利于天然气对煤类能源的替代。因此,北京市应发挥部门自身优势,针对要素供给端与需求端的正负反馈机制采取不同措施实现清洁能源替代。

(3)能源代谢过程中异质性的存在造成不同情景对北京市不同部门能源消费结构优化的影响效果存在差异。强优化强疏解情景对于制造业部门煤和天然气能源的替代最为有利,可以使该部门煤类能源消费减少1.65%,天然气消费增加6.786%。低疏解强优化情景对控制交通业及批发和零售业部门的能源消费最有利,将使这两个部门煤类能源消费分别增加5.45%、2.768%,使天然气消费分别增加3.672%、1.678%,总的增加值在6种情景下最低。低疏解强优化模式对改善教育业的能源消费结构最有利,可以使该部门煤类能源消费减少0.686%,天然气消费减少3.79%。因此,北京市应改善能源供给结构,扩大清洁能源使用范围,平稳推进天然气分布能源系统建设。同时加大制造业部门的疏解力度,合理控制交通业、批发和零售业与教育业的部门规模。

参考文献

- [1] 陈强, 2013. 高级计量经济学及Stata应用(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社.
- [2] 姜巍, 高卫东, 熊天琦, 2015. 中国能源产业网络结构特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 29(8): 196-202.
- [3] 卢伊, 陈彬, 2015. 城市代谢研究评述: 内涵与方法[J]. 生态学报, 35(8): 2438-2451.
- [4] 穆献中, 朱雪婷, 2019. 城市能源代谢生态网络分析研究进展[J]. 生态学报, 39(12): 4223-4232.
- [5] 王希, 2020. 基于引力模型的京津冀城市群经济联系研究[J]. 经济师, (1): 82-84.
- [6] 吴玉琴, 严茂超, 2011. 广州城市代谢效率的模拟分析[J]. 资源科学, 33(8): 1555-1562.
- [7] 相雪梅, 2020. 省内城市间经济关联结构研究——基于引力模型中 K_{ij} 的修正[J]. 技术经济, 39(10): 128-137.
- [8] 张妍, 杨志峰, 2007. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例[J]. 生态学报, (8): 3124-3131.
- [9] 赵颜创, 赵小锋, 林剑艺, 2016. 厦门市城市能源代谢综合分析方法及应用[J]. 生态科学, 35(5): 110-116.
- [10] 郑宏媚, 郑宇涵, 2020. 京津冀城市群能源代谢时空特征及优化调控研究[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), (1): 104-105.
- [11] BROWNE D, O'REGAN B, MOLES R, 2012. Comparison of energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprinting as tools for measuring urban sustainability: A case-study of an Irish city-region[J]. Ecological Economics, 83: 97-107.
- [12] CHEN G Q, GUO S, SHAO L, et al, 2013. Three-scale input-output modeling for urban economy: Carbon emission by Beijing 2007[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 18(9): 2493-2506.
- [13] CHEN S Q, CHEN B, 2015. Urban energy consumption: Different insights from energy flow analysis, input-output analysis and ecological network analysis[J]. Applied Energy, 138: 99-107.
- [14] CHEN Z M, CHEN G Q, 2013. Demand-driven energy requirement of world economy 2007: A multi-region input-output network simulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 18(7): 1757-1774.
- [15] FRACASSO A, 2014. A gravity model of virtual water trade[J]. MPRA Paper, 108: 215-228.
- [16] HABERL H, 2006. The global socioeconomic energetic metabolism as a sustainability problem[J]. Energy, 31(1): 87-99.
- [17] HEAD K, MAYER T, THOENIG M, 2014. Welfare and Trade Without Pareto[J]. Working Papers, 104(5): 310-316.
- [18] KRAUSMANN F, HABERL H, SCHULZ N B, et al, 2003. Land-use change and socio-economic metabolism in Austria-Part I: Driving forces of land-use change: 1950-1995[J]. Land Use Policy, 20(1): 1-20.
- [19] LIANG S, WANG C, ZHANG T Z, et al, 2010. An improved input-output model for energy analysis: A case study of Suzhou [J]. Ecological Economics, 69(9): 1805-1813.
- [20] ASCIONE M, CAMPANELLA L, CHERUBINI F, et al, 2009. Environmental driving forces of urban growth and development: An energy-based assessment of the city of Rome, Italy[J]. Journal of Architectural Engineering, 93(3-4): 238-249.
- [21] ODUM H T. 1986. Energy in ecosystems[J]. Ecosystem Theory and Application, 21: 337-369.
- [22] AN Q E, AN H Z, FANG W, et al, 2014. Embodied energy flow network of chinese industries: A complex network theory based analysis[J]. Energy Procedia, 61: 369-372.
- [23] TINBERGE J, 1962. Shaping the world economy: Suggestions for an international economic policy [R]. New York: Twentieth Century Fund.
- [24] WANG S G, CHEN B, et al, 2016. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Applied Energy, 178: 773-783.
- [25] WOLMAN A, 1965. The metabolism of cities[J]. Scientific American, 213(3): 179.
- [26] WU B, ZENG W H, CHEN H H, et al, 2016. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism[J]. Journal of Cleaner Production, 112: 3138-3151.
- [27] ZHAI M Y, HUANG G H, LIU L R, et al, 2019. Ecological network analysis of an energy metabolism system based on

- input-output tables: Model development and case study for Guangdong[J]. *Journal of Cleaner Production*, 227: 434-446.
- [28] ZHANG Y, LI Y X, ZHENG H M, 2017. Ecological network analysis of energy metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration[J]. *Ecological Modelling*, 351: 51-62.
- [29] ZHANG Y, YANG Z F, FATH B D, et al, 2010. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities[J]. *Ecological Modelling*, 221(16): 1865-1879.
- [30] ZHANG Y, YANG Z F, YU X Y, 2015. Urban metabolism: A review of current knowledge and directions for future study [J]. *Environmental Science & Technology*, 49(19): 11247-11263.
- [31] ZHANG Y, ZHENG H M, YANG Z F, et al, 2016. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: Combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 114: 243-256.

Analysis of Heterogeneity of Urban Energy Metabolism: Take Beijing as an Example

Mu Xianzhong, Zhou Wentao, Hu Guangwen

(Research Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The promotion on energy conservation and efficiency improvement relies on the comprehensive understanding of the urban energy metabolic mechanism, especially of the impacts related to heterogeneity within the urban energy metabolic processes. The gravity model was introduced to analyze the attribute differences of the connecting nodes on each side of the energy flows within urban energy metabolic processes. Using Beijing's main departments associated with the non-capital functional dispersal policies as the case study, three fossil energy including coal, oil and natural gas were included in the empirical analysis to evaluate the induced impacts within Beijing's energy metabolism due to the heterogeneity of departments. Based on the scenario analysis that consists of six combinations of two intensities of energy optimization and three intensities of department dissolution, results suggest that both the positive and negative feedback mechanisms of different factors on the departments' energy consumption and the degree of preference for different energy in different departments were heterogeneous. The heterogeneity causes different policy scenarios to have different effects on the optimization of the energy structure of Beijing's non-capital functional demobilization sector. Strong optimization and strong dissolution scenarios are most beneficial to the substitution of coal and natural gas in the manufacturing department, while low dissolution but strong optimization scenarios are most beneficial to control energy consumption in the transportation industry, wholesale and retail departments. The latter also has some advantages on improving the energy consumption structure of the education industry.

Keywords: energy metabolism; heterogeneity; gravity model; multi-scenario simulation; non-capital function resolving