

DOI: 10.5846/stxb201911292591

王雅晴, 谭德明, 张佳田, 孟楠, 韩宝龙, 欧阳志云. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.

Wang Y Q, Tan D M, Zhang J T, Meng N, Han B L, Ouyang Z Y. The impact of urbanization on carbon emissions: Analysis of panel data from 158 cities in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7897-7907.

我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析

王雅晴^{1,2}, 谭德明³, 张佳田², 孟楠^{1,2}, 韩宝龙^{2,*}, 欧阳志云²

1 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 南华大学经济管理学院, 衡阳 421001

摘要: 城市化与城市能耗及其碳排放密切相关, 城市发展过程中的人口城市化进程和产业总量与结构调整都是能源碳排放变化的主要驱动因素。以 2006—2015 年全国 158 个地级城市的面板数据为基础, 从总量变化趋势和空间变化趋势两个角度分析了研究期内的我国城市发展特征及能源碳排放特征; 并利用面板计量分析方法研究了城市发展因素对城市总能耗、总能耗碳排放、单位能耗碳排放量的驱动特征。结果表明: 城市化每提升 0.095%, 总能耗上升 1%。虽然城市总能耗及能耗碳排放量在降低, 但是单位能耗碳排放量在增加; 第二产业和第三产业发展对总能耗及能耗碳排放的驱动作用大; 城市第三产业的发展有利于能源结构优化调整等; 并基于研究发现给出一些政策建议。

关键词: 城市化; 能源消费; 碳排放; 空间重心; 面板分析

The impact of urbanization on carbon emissions: Analysis of panel data from 158 cities in China

WANG Yaqing^{1,2}, TAN Deming³, ZHANG Jiatian², MENG Nan^{1,2}, HAN Baolong^{2,*}, OUYANG Zhiyun²

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 University of South China School of economics and management, Hengyang 421001, China

Abstract: Urbanization is closely related to urban energy consumption and associated carbon emissions. The process of population urbanization and industrial structure adjustment in urban development are the main drivers of changes in carbon emissions. Based on the panel data of 158 prefecture-level cities in China from 2006 to 2015, this study analyzes the urban development characteristics and energy carbon emission characteristics of China from total volume and spatial variation. The study uses panel measurement to analyze the driving characteristics of urban development factors on total urban energy consumption, total carbon emissions, and carbon emissions per unit energy consumption. The results show that for every 0.095% increase in urbanization, the total energy consumption increases by 1%. Although the total urban energy consumption and carbon emissions are decreasing, the carbon emissions per unit energy consumption are increasing. The total energy consumption of secondary and tertiary industries is also increasing. The development of tertiary industries in the city is beneficial for the optimization and adjustment of the energy structure. Based on the findings, some policy suggestions are proposed.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71533005); 国家重点研发项目(2017YFF0207303)

收稿日期: 2019-11-29; **修订日期:** 2020-06-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhan@rcees.ac.cn

Key Words: urbanization; energy consumption; carbon emission; space center of gravity; panel analysis

我国进入经济新常态后,为了维持经济的稳定增长,需要快速城市化作为动力支撑;同时,在巴黎气候协定的约束下,我国面临碳减排的巨大挑战。前者由快速城市化带来对能源消费增长的刚性拉动;后者由政府承诺带来对能源消费碳减排的硬性约束。缓和或破解二者矛盾具有极强的现实意义,而此项工作的关键恰在于厘清城市能源消费的碳排放特征与驱动机制。

城市化推动能耗,能耗推动城市碳排放。围绕城市化与城市能源消费的关系与机理,国内外学者开展了一系列研究,形成一系列典型结论。Zhang 和 Lin^[1]等利用我国省级面板数据建立柯步道格劳斯模型,发现城市化对城市碳排放和能源消耗的影响,发现城市化推动了能源消耗的上升,但其影响效应在东、中、西部存在显著差异。王海鲲等^[2]在对无锡市多年碳排放的核算研究中发现,城市能源消费的平均年度碳排放占平均年度总体碳排放的 80%。Wang 等^[3]对 170 个国家 1980—2011 的城市化、经济增长、能源消费和碳排放的研究发现各个变量存在不同程度的 Granger 因果关系。Bilgili 等^[4]对亚洲 10 个国家 1990—2014 年的统计数据分析,发现城市化对能源密度长期有重要的影响。

城市第二产业是影响能源碳排放密度与效率的主要原因。Lin 和 Zhu^[5]对我国 30 个省工业化与能源强度的研究表明,二产结构和比例对能源密度有重要影响,能源密度随着产业结构的调整下降。张伟等^[6]借助 Kaya 恒等式对产业体系的碳排放量因素分解建立产业体系碳排放模型,对我国 29 个省区产业体系及其三次产业 1995—2014 年间的碳排放强度、能源碳排放密度和能源消费强度进行测度,研究发现:我国产业体系低碳化发展是由能源结构的变化所驱动,属于能源结构变化型;由于产出占比和能源消费占比较大,导致我国产业体系能源消费强度,即能源使用效率主要受二次产业的影响。

我国经济增长、能源消费、碳排放间具有耦合特征,但存在解耦可能。Asumadu-Sarkodie 和 Dwusu^[7]利用电力消耗表征了城市发展,并发现电力消耗与碳排放呈现动态相关,在不同阶段耦合特征不一致。仇婷婷^[8]利用面板 Granger 因果检验分析经济增长与能源消费、经济增长与碳排放的相互影响关系,实证结果显示,经济增长与能源消费、经济增长与碳排放之间均存在双向的因果关系。王凯等^[9]基于 IPCC 温室气体排放清单指南中的碳排放因子与核算方法,核算了 1995—2010 年中国服务业能源消费和 CO₂ 排放量,并发现服务业能源消费、CO₂ 排放量与增加值之间的脱钩状况总体上呈现出逐步好转的态势;服务业存在从经济增长到能源消费、CO₂ 排放的单向 Granger 因果关系。杜祥琬等^[10]在研究发达国家经济发展与能源消费、能源消费与二氧化碳排放解耦规律的基础上,提出我国未来发展的 3 种情景假设,即惯性情景、低碳情景和综合情景。如按假设的低碳情景发展,中国发展进入新常态,GDP 预期增速虽有所下降,但经济总量仍保持良好增长态势,2020 年后我国经济增长与能源消费开始呈现逐步解耦的趋势。

人均 GDP、能源消费结构、产业结构是影响碳排放效率的主要原因。Asumadu-Sarkodie 等^[11]研究了能源消耗、二氧化碳排放、GDP、工业化、金融发展和人口之间的因果关系,通过 ARDL 回归分析、神经网络预测及格兰杰因果关系检验表明能源使用和二氧化碳排放之间存在单向的因果关系,工业化和能源使用之间的双向因果关系。查建平^[12]利用相对“脱钩”、“复钩”的理论与测度模型,对 2000—2009 年我国工业经济增长与能源消费和碳排放之间的脱钩关系进行研究,认为能源效率是实现碳排放与工业经济增长之间弱“脱钩”的主要拉升因素,能源排放强度、能源结构以及产业结构等是脱钩工作中的薄弱环节。张庆民等^[13]基于我国 1995—2009 年统计数据对产业结构与碳排放之间的内在关联性进行了分析,结果表明,第一产业碳排放总量与碳排放强度远低于其他产业,但碳排放量增长率高于其 GDP 增长率;第二产业碳排放总量最高,碳排放增长率一直在高位运行且波动幅度较大,碳排放强度呈现明显下降趋势;第三产业碳排放总量却远低于第二产业,碳排放强度与第一产业相似,但其碳排放增长率较高。盖美等^[14]选取辽宁沿海经济带为研究对象,构建 Tobit 多元线性回归模型对碳排放效率的影响因素进行详细分析,研究表明:人均 GDP 与碳排放效率呈显著正相关,而能源消费结构、能源消费强度、产业结构及政府干预与碳排放效率呈显著负相关。

在文献综述过程中发现,现有全国范围的城市能源碳排放研究多是以省级或全国尺度为数据最小单元,城市数据单元的研究多出现在分省或分区域的研究中;数据采集多是单样本区域的时间序列或多样本区域的截面数据,少有面板数据。分析其原因,可能是长时间序列数据收集中,行政区划调整、统计口径、统计指标调整导致数据可获得性不高。因此,本文通过简化城市发展指标,及重新核算城市能源碳排放数据的方式,开展 10 年 158 个地级城市的面板数据分析,以期对我国城市发展与城市能源碳排放关系有更全面和动态的认识;同时,采用空间中心模型,刻画各类指标的空间中心变化,以弥补当前研究中空间分析的不足。

2 案例与数据方法

2.1 研究对象与数据来源

本研究中使用到的数据包括:(1)各城市年末总人口数据及城市年末非农业总人口数据;(2)各城市地区生产总值及三次产业增加值数据;(3)各城市能源消费总量及各类型能源消费量等。主要来自于历年《中国城市统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》,此外各类能源碳排放换算参数主要来自于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)和《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041 号)。上述数据的研究分析时间跨度为 2006 年至 2015 年,涉及货币单位的指标,统一利用历年 CPI 值转化为 2015 年价格表示。在对所有空值样本和 0 值样本剔除后,剩余完整分析样本 158 个,占全国地级城市总数的一半以上,多数分布在漠河—腾冲线东部,认为能够反映我国城市的总体情况,具有较强代表性。样本城市的空间分布如图 1 所示。

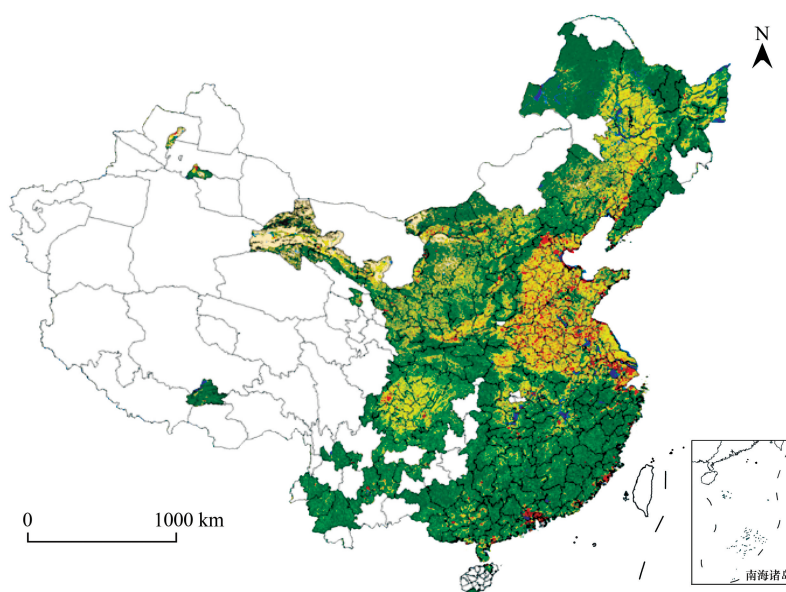


图 1 研究对象与总体实验样本分布

Fig.1 Research object and distribution of total experimental samples

2.2 变量与面板数据分析

本文研究城市化水平、三次产业产值与能源消耗、能源碳排放及单位能耗的碳排放强度之间的关系。建立柯布道格拉斯方程模型如下:

$$Y = UR^{\alpha_1} \times FI^{\alpha_2} \times SI^{\alpha_3} \times TI^{\alpha_4} \times \varepsilon$$

式中, UR 为城市化率、 FI 为第一产业产值、 SI 为第二产业产值、 TI 为第三产业产值、 ε 为扰动项。 Y 在三个不同的面板分析中分别为总能耗($Y1$)、总能源碳排放($Y2$)以及单位能耗的碳排放强度($Y3$)。为了消除原始数

据中存在的异方差和不同变量之间的数量级差异,且假设柯步道格劳函数模式符合本文变量之间关系,因此,在进行面板数据分析之前,对各个指标数据进行自然底对数处理:

$$Y_{it} = \alpha_1 \ln(UR_{it}) + \alpha_2 \ln(FI_{it}) + \alpha_3 \ln(SI_{it}) + \alpha_4 \ln(TI_{it}) + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

式中, i 表示各样本城市, t 表示时间年份, α_i 表示各变量的回归系数, μ_i 表示各城市的个体差异, ε_{it} 表示模型的随机扰动项。下表给出了模型中各个对数序列的描述性统计量。

表 1 各变量的描述统计量
Table 1 Descriptive statistics for each variable

描述统计量 Statistic	城市化 UR Urban Rate	第三产业 产值 TI Tertiary industries GDP	第二产业 产值 SI Secondary industries GDP	第一产业 产值 FI First industries GDP	总能耗 $Y1$ Total energy consumption	总能源碳 排放 $Y2$ Total energy carbon emissions	单位能耗的碳 排放强度 $Y3$ Carbon intensity per unit of energy consumption
平均值 Mean	-0.829	15.386	15.784	14.055	15.432	16.773	1.341
中值 Median	0.788	15.250	15.767	14.179	15.367	16.700	1.398
最大值 Maximum	0.000	19.027	18.623	16.229	20.601	21.433	1.960
最小值 Minimum	2.230	12.349	12.902	9.781	12.391	13.425	0.718
标准偏差 Std. Dev.	0.442	1.091	0.953	0.897	1.189	1.192	0.213
截距 Skewness	0.405	0.436	0.006	-1.512	0.316	0.164	-0.649
峰值 Kurtosis	2.828	3.101	2.809	6.688	3.171	2.925	2.790

在对一般面板模型进行参数估计时,先用个体效应 F 统计量检验模型中是否存在个体效应,若存在则选择变截距模型估计,若不存在则采用混合最小二乘法估计。为了进一步确定是固定影响模型还是随机影响模型,需要进行 Hausman 检验,由于固定效应模型比随机效应模型假设条件更宽松,如果 Hausman 检验拒绝原假设,则应该接受假设条件更宽松的模型,即应该采用固定效应模型,否则应该采用随机效应模型。

固定效应模型和随机效应模型最大的不同就在于其基本假设,即个体不随时间改变的变量是否与自变量有关,固定效应模型认为不随时间改变的变量是内生的,与解释变量相关,随机效应模型认为不随时间改变的变量是外生的,与解释变量不相关。在模型变量的引入上,固定效应模型默认了那些不随时间变化的自变量不会对因变量造成影响,因而不允许这类变量出现在模型之中,而随机效应模型则认为表示某些个体特征的但不随时间变化而变化的自变量能够对因变量造成影响,允许这类变量引入到模型之中。

2.3 能源消费碳足迹核算

本文整合 2007—2016 年《中国能源统计年鉴》数据进行相关能源消费碳足迹核算。考虑到以化石能源为代表的传统能源是造成碳排放的主要原因,因此仅计算包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力等九类能源的碳排放。

基于 2007—2016 年能源消费原始数据,结合煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气等八类能源二氧化碳排放系数,将各类型能源消费碳排放量折算为国际统一单位(t),具体折算方法采用如下公式:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n e_n \times A_n$$

式中, E_1 表示能源消费碳排放量,单位吨; n 表示不同类型的能源; e 表示能源消费量,单位吨; A 表示二氧化碳排放系数,各类能源具体系数见表 2。

电力能源消费碳排放量采用如下公式进行计算,计算后折算为国际统一单位(t):

$$E_2 = \sum_{i=1}^n e_n \times B_n \times 10$$

式中, E_2 表示电力能源消费碳排放量,单位 t; n 表示不同地区; e 表示能源消费量,单位万千瓦小时; B 表示二氧化碳排放系数,各地区能源具体系数见表 3。

表 2 各类能源二氧化碳排放系数
Table 2 CO₂ emission factors for all types of energy

能源类型 Energy type	平均低位发热量 Average low heat	折标准煤系数 Folding standard coal coefficient	单位热含碳量 Tons of carbon/TJ	碳氧化率 Carbon oxidation rate	二氧化碳排放系数 CO ₂ emission coefficient
煤炭 Coal	20908 kJ/kg	0.7143 kgce/kg	26.37	0.94	1.9003 kg-CO ₂ /kg
焦炭 Coke	28435 kJ/kg	0.9714 kgce/kg	29.50	0.93	2.8604 kg-CO ₂ /kg
原油 Crude oil	41816 kJ/kg	1.4286 kgce/kg	20.10	0.98	3.0202 kg-CO ₂ /kg
汽油 Gasoline	43070 kJ/kg	1.4714 kgce/kg	18.90	0.98	2.9251 kg-CO ₂ /kg
煤油 Kerosene	43070 kJ/kg	1.4714 kgce/kg	19.50	0.98	3.0719 kg-CO ₂ /kg
柴油 Diesel	42652 kJ/kg	1.4571 kgce/kg	20.20	0.98	3.0959 kg-CO ₂ /kg
燃料油 Fuel oil	41816 kJ/kg	1.4286 kgce/kg	21.10	0.98	3.1705 kg-CO ₂ /kg
天然气 Natural gas	38931 kJ/m ³	1.3300 kgce/m ³	15.30	0.99	2.1622 kg-CO ₂ /m ³

低位发热量等于 29307 千焦的燃料,成为 1 千克标准煤;上表前两列来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)后两列来源于《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041 号)

表 3 我国区域电网单位供电平均二氧化碳排放
Table 3 Average CO₂ emissions per unit of power supply in China's regional power grid

电网名称 Power grid	覆盖省市区 Provinces and cities	二氧化碳排放系数/ (kg kw ⁻¹ h ⁻¹)
华北地区 North China	北京市 天津市 河北省 山西省 山东省 内蒙古	1.246
东北地区 Northeast	辽宁省 吉林省 黑龙江省 内蒙古东部地区	1.096
华东地区 East China	上海市 江苏省 浙江省 安徽省 福建省	0.928
华中地区 the Central of China	河南省 湖北省 湖南省 江西省 四川省 重庆市	0.801
西北地区 Northwest	陕西省 青海省 甘肃省 宁夏 新疆	0.977
南方 South	广东省 广西 云南省 贵州省	0.714
海南 Hainan	海南省	0.917

数据来源于《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041 号)

2.4 城市化率缺失处理

为了科学、真实地反映我国各城市不同阶段城乡人口、社会 and 经济发展情况,准确评价城市化水平,本文通过对 2007 年到 2016 年《中国城市统计年鉴》中地级及以上城市全市年末总人口数量和非农业人口数量的数据进行整理,采用城乡划分中的非农人口占总人口(包括农业与非农业)比重进行计算,其结果用百分比(%)来表示。

但由于部分年鉴中非农业人口数量数据缺失,导致上述办法无法计算出全国各省市的城市化率。可综合 2007—2016 年《中国统计年鉴》中各个省份真实城市化率(全省城镇人口比总人口),并根据各个省市某一年份城市化率比重比值及需要计算年份各个省市城市化率比重比值来进行推算,方法如下:

q = Q × a/A

式中,q 为需计算年份各城市的城市化率;Q 为需计算年份各省份的城市化率;a 为各城市的城市化率;A 为各省份的城市化率。2007—2009 年年鉴中城市化率的计算(山东省除外),是采用城非农人口占总人口(包括农业与非农业)比重来进行计算;山东省 2008—2016 年年鉴中城市化率是根据 2007 年年鉴中山东省和省 内各个城市的城市化率及需计算年份山东省城市化率比重采用上述公式推算得出;其他各城市 2010 年到 2016 年年鉴中的城市化率均是根据 2009 年年鉴中各个省市城市化率比重的比值及当年个省份城市化率比值 采用上述公式推算得出。

2.5 空间重心计算

地理研究中,可用重心移动反映地理事物和现象空间分布的变化。将其用在本文的研究中用于体现相关 指标近十年在空间上的变化情况,下面以某指标 A 为例,说明其空间重心的计算方式。

$$(A_{C,X}, A_{C,Y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n A_i \times I_X}{\sum_{i=1}^n A_i}, \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times I_Y}{\sum_{i=1}^n A_i} \right)$$

式中, $(A_{C,X}, A_{C,Y})$ 为该指标的全国重心经纬度坐标, (I_X, I_Y) 为第 I 城市的经纬度坐标, A_i 为第 I 城市的该指标得分。

3 结果

3.1 中国城市能源消费动态特征

本文选取典型城市来构建 2006—2015 年中国各城市能源碳排放变化曲线,并分别利用城市的总能源消耗、能源消耗的总二氧化碳排放量和能源二氧化碳排放逆效率(单位能耗的二氧化碳排放量)三项指标来分析中国各城市能源碳排放总体变化趋势,从总能源消耗重心转移和总能源消耗二氧化碳排放重心转移两项指标来分析其时空变化趋势。样本城市能源碳排放总体变化趋势。从 2006—2015 年,三项指标总体趋势有显著差别:总能源消耗量总体呈现逐年平稳下降趋势能源消耗造成的二氧化碳排放量则呈现 2006—2012 年先快速下降,2013—2015 年后缓慢上升的趋势;而二氧化碳排放逆效率则呈现逐年匀速增长的趋势(图 2,图 3)

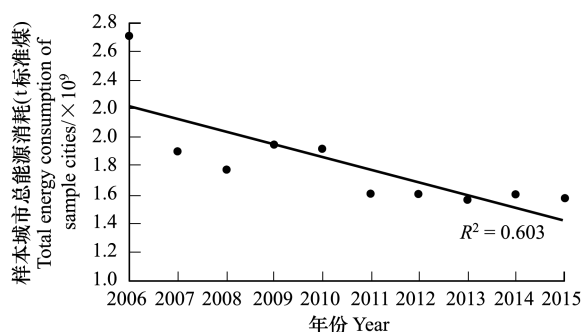


图 2 样本城市总能源消耗

Fig.2 Total energy consumption in sample cities

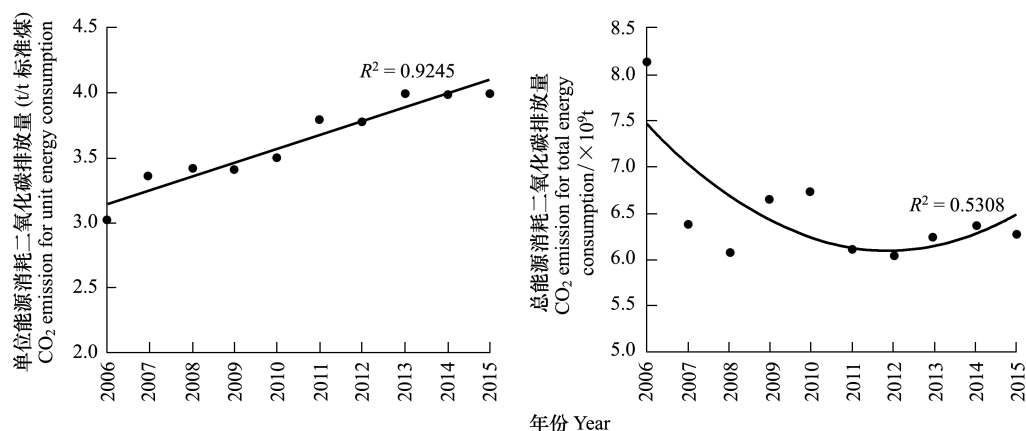


图 3 样本城市单位能源消耗二氧化碳排放量和总能源消耗二氧化碳排放量

Fig.3 CO₂ emission for unit energy consumption & CO₂ emission for total energy consumption

样本城市能源碳排放的空间重心转移趋势。根据样本城市总能源消耗重心转移曲线和二氧化碳排放重心转移曲线,可以发现,二者在时空演变范围上具有显著的一致性,其中经度变化范围为 116°05′—118°00′E,纬度变化范围为 36°06′—39°02′N。具体表现为:2006—2011 年期间,经、纬度变化都较为明显,且无规律性;2012—2015 年期间,经、纬度基本保持不变;总体来说二者重心都向我国西北地区转移(图 4)。而二氧化碳排放逆效率重心呈现波动无规律性转移(图 5)。

3.2 中国城市发展动态特征

中国城市化率自 2006 年起呈稳步递增趋势,截至 2015 年城市化率已达 57%。总体而言,2006—2008 年城镇化率空间重心转移以向西的单向转移为主,2008—2015 年则是东、南方向上的两向转移(图 6)。

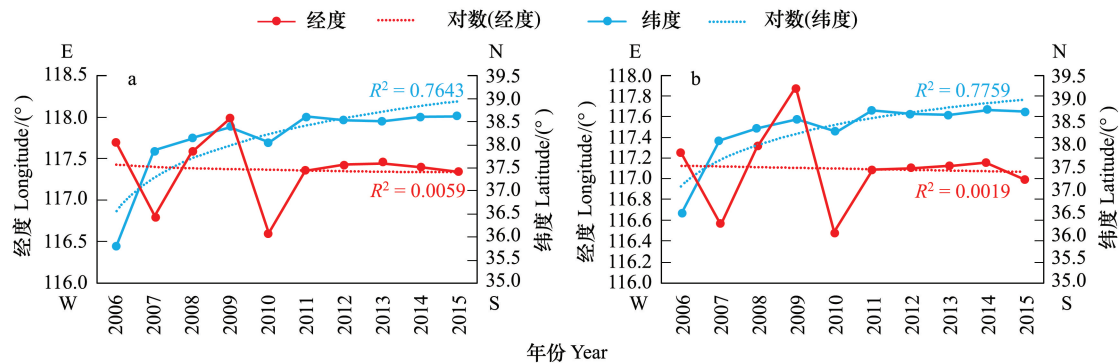


图4 样本城市总能源消耗和能耗二氧化碳排放重心转移

Fig.4 The shift of spatial weight for total energy consumption(a) and its CO₂ emission(b)

中国国内生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值和第三产业增加值自1990年来总体均呈现增长趋势。第一产业增加值自1990—2005年以来发展平稳,2006—2011年出现短时间微弱增长趋势,2012年后又趋于平稳;第二产业增加值1990—2000年10年间稳步增长,2001—2011年10年间快速增长,2012年后增长速率出现浮动但总体仍是增长趋势;第三产业增加值自1990年起,就以增加速率不断提高的形势发展;需要特别说明的是,在1990—2009年年间、2010年和2011年第二产业增加值总是高于第三产业,于2009年和2012年先后两次相交后第三产业增加值远超出第二产业增加值(图7)。

我国城市地区生产总值重心是沿东南方向迁移

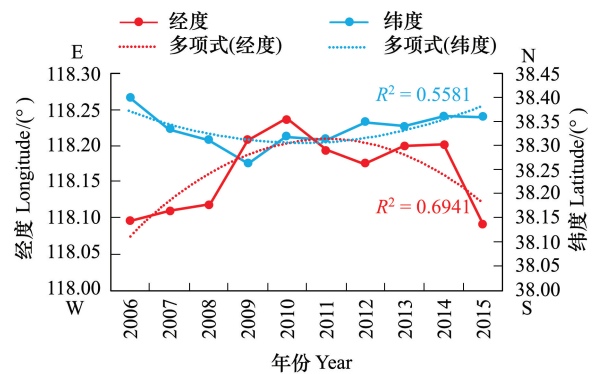


图5 样本城市能源消耗二氧化碳排放效率重心转移

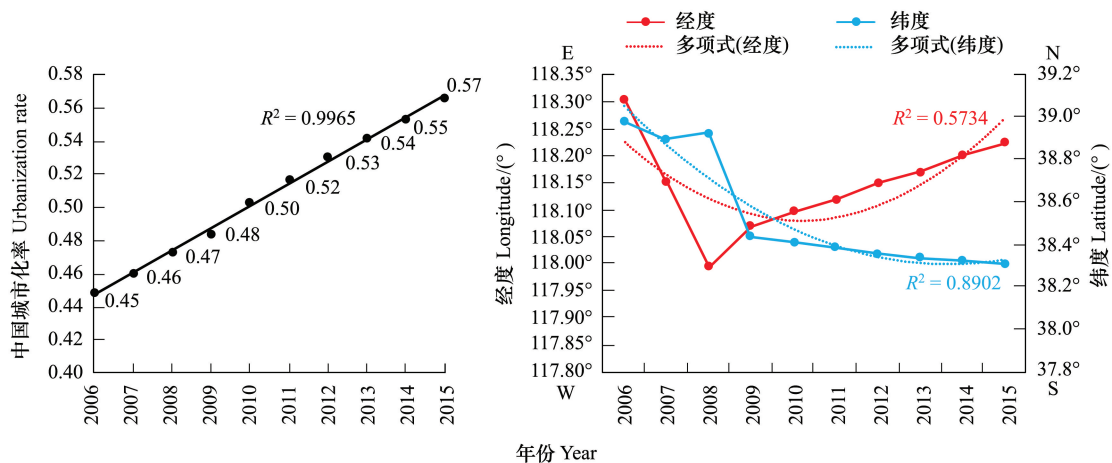
Fig.5 The shift of spatial weight for the efficiency of CO₂ emission

图6 中国城市化率的重心转移

Fig.6 The shift of spatial weight for Chinese urbanization rate

(图8)。这一现象说明东南部区域的地区生产总值增速较其他地区更高。第一产业增加值空间重心在2006—2015年期间出现东、西和南、北反复迁移,但无明显规律。第二产业增加值空间重心自2006—2015年

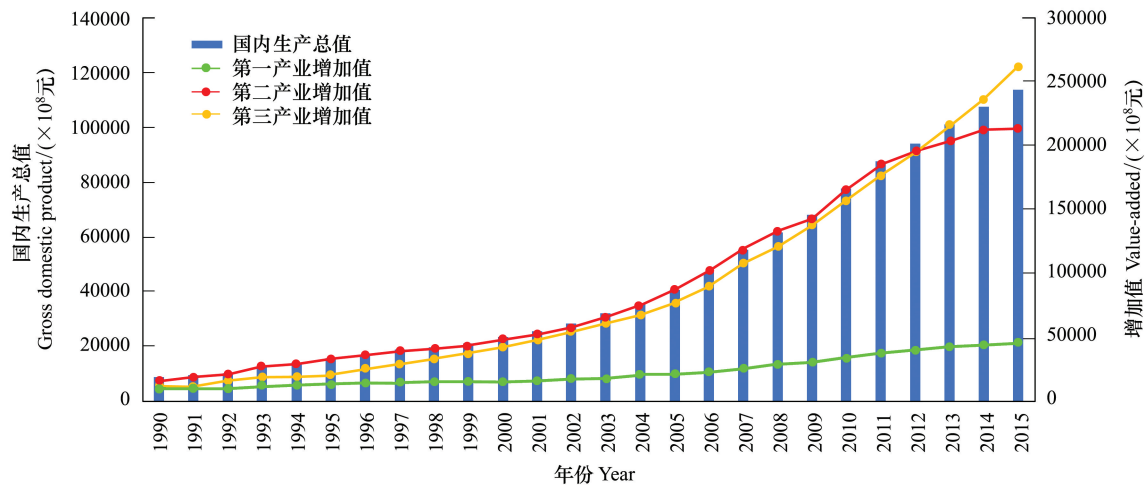


图7 中国国内生产总值及结构变化
Fig.7 The change of Chinese GDP and its structure

总体沿东南方向转移,规律明显。第三产业增加值空间重心在 2006—2015 年总体沿东南方向小范围迁移(图 9)。

3.3 城市发展对城市总能耗的影响特征

运用 F 检验对面板模型是否存在个体效应进行检验,结果表明拒绝采用混合面板模型,说明模型中确实存在个体效应。为了进一步确定是固定效应模型还是随机效应模型,对模型进行 Hausman 检验,结果表明,在 5%的显著水平下,拒绝随机效应模型,故选用固定效应模型。

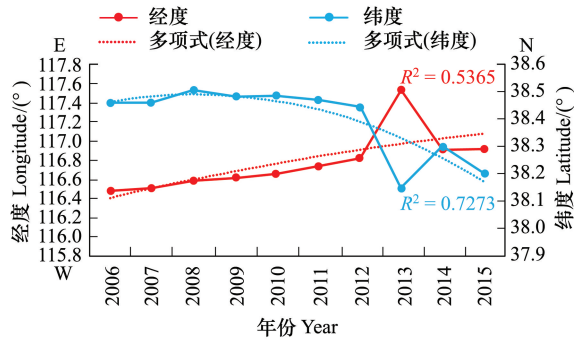


图8 中国 GDP 的重心转移
Fig.8 The shift of spatial weight for Chinese GDP

表 4 总能耗固定效应模型估计结果

Table 4 The fixed effect model estimate of the model

变量 Variable	系数 Coefficient	误差 Std. Error	t 检验 t -Statistic	概率 Prob.
总能耗 C	12.378	0.346	35.751	0.000
城市化率 UR	0.095	0.032	2.921	0.004
第一产业 GDP FI	-0.260	0.037	-7.127	0.000
第二产业 GDP SI	0.132	0.030	4.448	0.000
第三产业 GDP TI	0.307	0.025	12.174	0.000
R^2	0.986	Mean dependent var		30.813
调整后的 R^2 Adjusted R^2	0.985	S.D. dependent var		20.495
回归 S.E. of regression	0.340	Sum squared resid		164.066
F 检验 F -statistic	634.711	Durbin-Watson stat		1.222
R^2	0.000			

从上表可知,模型的拟合优度 R^2 为 0.986,方程的 F 检验 P 值小于 0.05,说明回归方程显著具有统计意义。各个变量的回归系数均满足 5%显著性水平。城市化水平 UR 的回归系数为 0.095,显著性水平为 4%,说明城市化水平与总能耗之间存在正相关,即城市化水平每增加 1 个百分点,总能耗会相应增加 0.095 个百分

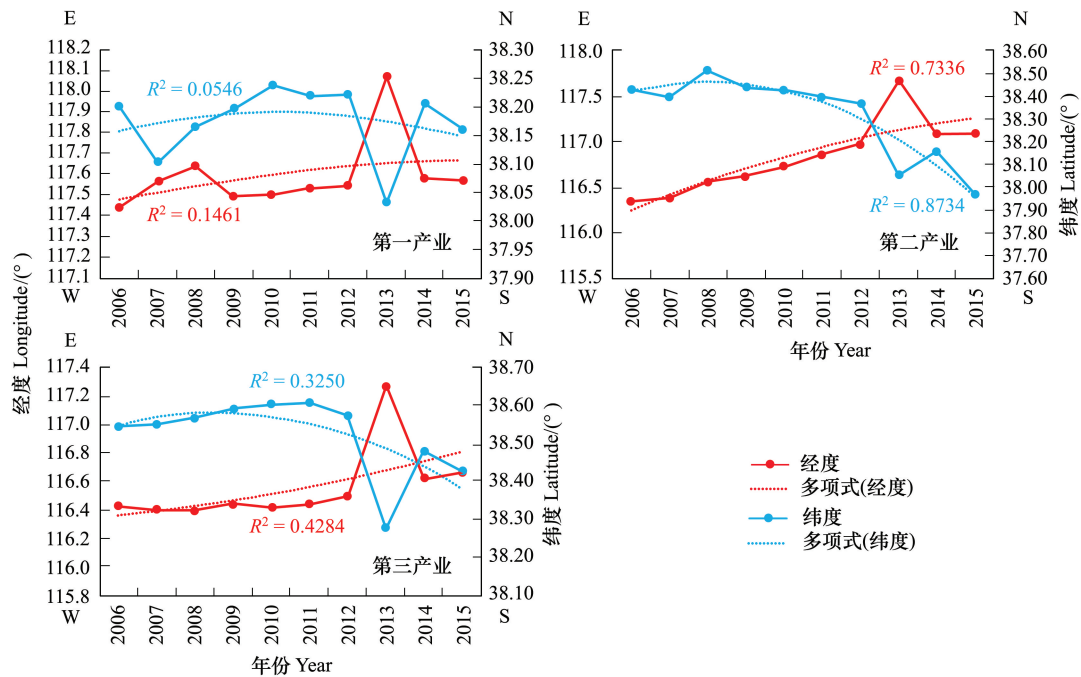


图9 中国三次产业增加值的重心转移

Fig.9 The shift of spatial weight for the value-added of Chinese three industries

点。第一产业产值 FI 的回归系数为 -0.260 , 显著性水平为 0% , 说明第一产业产值与总能耗之间存在负相关, 即第一产业产值每增加 1 个百分点, 总能耗相应减少 0.260 个百分点。第二产业产值和第三产业产值的回归系数分别为 0.132 和 0.307 , 显著性水平均为 0% , 说明第二产业产值、第三产业产值与总能耗之间存在显著正相关, 即第二产业产值、第三产业产值的增加会导致总能耗的增加。

3.4 城市发展对城市总能耗碳排放的影响特征

首先运用 F 检验对面板模型是否存在个体效应进行检验, 结果表明拒绝采用混合面板模型, 说明模型中确实存在个体效应。为了进一步确定是固定效应模型还是随机效应模型, 对模型进行 Hausman 检验。Hausman 检验结果表明, 在 5% 的显著水平下, 拒绝随机效应模型, 故选用固定效应模型。

表5 能耗碳排放固定效应模型估计结果

Table 5 The fixed effect model estimate of the model

变量 Variable	系数 Coefficient	误差 Std. Error	t 检验 t -Statistic	概率 Prob.
能耗碳排放 C	11.886	0.309	38.530	0.000
城市化率 UR	0.043	0.029	1.488	0.137
第一产业 GDP FI	-0.222	0.030	-7.445	0.000
第二产业 GDP SI	0.135	0.025	5.345	0.000
第三产业 GDP TI	0.384	0.022	17.254	0.000
R^2	0.989	Mean dependent var		35.249
调整 R^2 Adjusted R^2	0.987	S.D. dependent var		25.006
回归 S.E. of regression	0.316	Sum squared resid		141.124
F 检验 F -statistic	761.735	Durbin-Watson stat		1.268

从上表可知, 模型的拟合优度 R^2 为 0.989 , 方程的 F 检验 P 值小于 0.05 , 说明回归方程具有显著统计意义。城市化水平 UR 的回归系数为 0.043 , 显著性水平为 13.7% (大于 5%), 说明城市化水平不是碳排放的显著影响因素。第一产业产值 FI 的回归系数为 -0.222 , 显著性水平为 0% , 说明第一产业产值与碳排放之间显

著负相关,即第一产业产值每增加 1 个百分点,碳排放相应减少 0.222 个百分点。第二产业产值和第三产业产值的回归系数分别为 0.135 和 0.384,显著性水平均为 0%,说明第二产业产值、第三产业产值与碳排放之间显著正相关,即第二产业产值、第三产业产值的增加会导致能源碳排放的增加。

3.5 城市发展对城市单位能耗碳排放的影响特征

首先运用 F 检验对面板模型是否存在个体效应进行检验,结果表明拒绝采用混合面板模型,模型中确实存在个体效应。为了进一步确定是固定效应模型还是随机效应模型,对模型进行 Hausman 检验。结果表明,在 5% 的显著水平下,拒绝随机效应模型,故选用固定效应模型。根据 F 和 Hausman 检验结果进行固定效应模型拟合,结果如下(表 6)。

表 6 能耗碳排放逆效率固定效应模型估计结果

Table 6 The fixed effect model estimate of the model

变量 Variable	系数 Coefficient	误差 Std. Error	t 检验 t -Statistic	概率 Prob.
能耗碳排放逆效率 C	-0.439	0.154	-2.854	0.004
城市化率 UR	-0.020	0.014	-1.376	0.169
第一产业 GDP FI	0.065	0.017	3.757	0.000
第二产业 GDP SI	-0.013	0.013	-1.018	0.309
第三产业 GDP TI	0.069	0.013	5.393	0.000
R^2	0.903	Mean dependent var		1.341
调整 $Adjusted R^2$	0.892	S.D. dependent var		0.213
回归 S.E. of regression	0.070	Akaike info criterion		-2.383
残差平方和 Sum squared resid	6.950	Schwarz criterion		-1.832
负对数似然 Log likelihood	2043.157	Hannan-Quinn criter.		-2.178
F 检验 F -statistic	82.244	Durbin-Watson stat		1.188
概率 Prob(F -statistic)	0.000			

从上表可知,模型的拟合优度 R^2 为 0.903,方程的 F 检验 P 值小于 0.05,说明回归方程具有显著统计意义。城市化水平 UR 和第二产业产值的回归系数在 5% 的显著水平下均不显著,说明城市化水平和第二产业产值都不是影响能源效率的显著因素。第一产业产值 FI 的回归系数为 0.065,显著性水平为 0%,说明第一产业产值与能源效率之间显著正相关,第一产业产值每增加 1 个百分点,能源效率相应增加 0.065 个百分点。第三产业产值的回归系数为 0.069,显著性水平为 0%,说明第三产业产值与能源效率之间显著正相关,即第三产业产值每增加 1 个百分点,能源效率相应增加 0.065 个百分点。

4 研究发现

4.1 城市能源消费与能源碳排放变化趋势

研究期内城市总体能源消费及能源消耗产生的二氧化碳排放均呈现下降趋势;但是单位能源消费引起的二氧化碳排放呈现上升趋势。能源消费与能源二氧化碳排放空间重心呈现沿向北方向迁移的特征;而能源二氧化碳排放逆效率则没有发生重心转移。上述趋势说明,能源消费总量、能源碳排放都在逐步降低,但是后者下降速度慢于前者,即单位能源消耗的碳排放量增加。可见我国降低能源碳排放的关键在于提升清洁能源比例。

4.2 城市化与城市产业发展变化趋势

研究期内全国城市的城市化水平呈现出南方城市城市化速度高于北方城市的特征;第三产业、第二产业的比重及增长速度远高于第一产业;且第三产业增速高于第二产业。东南部地区生产总值增速略高于其他区域;第一产业发展速度基本在空间上维持不变;而第三产业、第二产业在东南地区的发展速度略高于其他地区。

4.3 城市发展与能源消耗的耦合关系

以总能耗为被解释变量,发现城市化水平、第二产业产值及第三产业产值与总能耗之间存在正相关关系;而第一产业产值与总能耗之间存在负相关关系。然后以能源碳排放为被解释变量,发现城市化水平不是影响

碳排放的显著因素;第一产业产值与碳排放之间存在负相关关系;第二产业产值、第三产业产值与碳排放之间存在正相关关系。最后以能耗碳排放逆效率(单位能耗碳排放)为被解释变量,得出城市化水平和第二产业产值都不是影响单位能耗二氧化碳排放量的显著因素;第一产业及第三产业产值与能耗二氧化碳排放量之间存在正相关关系。结合第二产业对能源消耗影响的重要性,说明能源消费结构的调整,在第二产业中遇到瓶颈期;鼓励城市发展第三产业有利于单位能源碳排放降低,且第三产业中开展能源结构调整,提升清洁能源比例更易实现。

5 政策建议

(1)城市应加速发展高技术服务业以提高能源碳排放效率

由于第三产业产值每增加 1 个百分点,能源效率相应增加 0.065 个百分点,所以城市应当加速第三产业发展;但另一方面城市化水平提升会增加总能耗,第三产业往往是人力资源依托型产业,会增加城市总能耗,因此,只有重点增加高技术服务业(非低端劳动力依赖)才能在控制总能耗的同时,减少能源总体碳排放。城市需要采取第三产业的产业升级,通过“腾笼换鸟”的方式开展第三次产业替代。

(2)城市应重点提升二三产业的能源利用效率

由于二三产业耗能比重大,能源消耗及能耗碳排放与产值呈现正相关,建议通过二三产业供给侧改革配套制度来提高高耗能企业的能源消耗成本,用制度推进企业节能;注重发展民营经济,民营企业对成本的敏感性更高;鼓励二三产业淘汰落后技术,开展技术创新;鼓励二三产业及跨产业间的产业链合作,尤其是循环经济产业链合作,以达到能源梯级利用目的。

(3)城市应有区别的优化三大产业能源结构

由于第二产业设备类固定资产投资投入大,发展路径粘性明显,所以第二产业能源结构调整难度大,对第二产业用能结构调整,可采用技术创新奖励、以奖代补等技术补贴等方式,扶植企业开展用能替代,从单位热含碳量高的能源向含碳量低的能源替换。对于第一产业一方面鼓励农业规模化经营,以提高先进农机使用率;另一方面对于驱虫补光等低电压用能设备,鼓励采用风能、太阳能等可分布式利用能源替换。对于第三产业重点关注城市服务业的用能结构调整,餐饮业减少煤炭使用,替换为天然气等单位热含碳量低的能源;旅游业多使用电动汽车、风能路灯、太阳能路灯等新能源技术。

参考文献(References):

- [1] Zhang C, Lin Y. Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO₂ emissions: A regional analysis in China. *Energy Policy* 2012;49: 488-98.
- [2] 王海鲲,张荣荣,毕军.中国城市碳排放核算研究——以无锡市为例. *中国环境科学*, 2011;1029-38.
- [3] Wang S, Li G, Fang C. Urbanization, economic growth, energy consumption, and CO₂ emissions: Empirical evidence from countries with different income levels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018,81:2144-59.
- [4] Bilgili F, Kocak E, Bulut U, Kuloglu A. The impact of urbanization on energy intensity: Panel data evidence considering cross-sectional dependence and heterogeneity. *Energy*, 2017;133:242-56.
- [5] Lin B, Zhu J. Energy and carbon intensity in China during the urbanization and industrialization process: A panel VAR approach. *Journal of Cleaner Production* 2017;168:780-90.
- [6] 张伟,朱启贵,高辉.产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展. *经济研究*, 2016;62-75.
- [7] Asumadu-Sarkodie S, Owusu PA. Carbon dioxide emission, electricity consumption, industrialization, and economic growth nexus: The Beninese case. *Energy Sources Part B-Economics Planning and Policy*, 2016,11:1089-1096.
- [8] 仇婷婷.不同经济增长方式下的碳排放影响因素研究[D].西南财经大学,2012.
- [9] 王凯,李泳萱,易静,郑群明.中国服务业增长与能源消费碳排放的耦合关系研究. *经济地理*, 2013;108-14.
- [10] 杜祥琬,杨波,刘晓龙,王振海,易建.中国经济发展与能源消费及碳排放解耦分析. *中国人口·资源与环境*, 2015;1-7.
- [11] Asumadu-Sarkodie S, Owusu PA. Energy use, carbon dioxide emissions, GDP, industrialization, financial development, and population, a causal nexus in Sri Lanka: With a subsequent prediction of energy use using neural network. *Energy Sources Part B-Economics Planning and Policy*, 2016,11:889-99.
- [12] 查建平,唐方方,傅浩.中国能源消费、碳排放与工业经济增长——一个脱钩理论视角的实证分析. *当代经济科学*, 2011;81-9+125.
- [13] 张庆民,葛世龙,吴春梅.三次产业结构演化与碳排放机制研究——基于面板数据模型的实证分析. *科技与经济*, 2012;101-5.
- [14] 盖美,曹桂艳,田成诗,柯丽娜.辽宁沿海经济带能源消费碳排放与区域经济增长脱钩分析. *资源科学*, 2014;1267-77.