

# 中国家庭能源消费的时空特征、影响因素与趋势预测

庄汝龙<sup>1</sup>, 杨洁<sup>1</sup>, 宓科娜<sup>2\*</sup>, 张朝阳<sup>1</sup>, 职梦露<sup>1</sup>

(1. 宁波大学商学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波财经学院国际经济贸易学院, 浙江 宁波 315175)

**摘要:**随着居民生活水平的持续提高与收入的不断增加,家庭能源消费日益成为中国能源消费的重要增长点,把握家庭能源消费时空特征,判别家庭能源消费影响因素与发展趋势,有助于加快构建现代能源体系、推进能源低碳转型以及“双碳”目标的实现。基于此,论文将家庭能源消费作为研究对象,系统探讨其时空演变特征。进一步借助空间计量模型、灰色预测、情景分析等方法,对家庭能源消费的影响因素及其发展趋势进行系统研究。研究发现:①从时空特征来看,1995—2021年家庭能源消费呈现上升趋势。同时,城乡家庭能源消费的差距逐渐拉大,但其人均家庭能源消费呈现趋同态势。②从家庭能源消费的占比与结构来看,家庭能源消费占能源消费总量的1/10左右,且家庭能源消费结构呈现出多样化与清洁化发展趋势。③从影响因素来看,能源强度、人口规模、家庭规模、教育水平、经济发展、城镇化率与汽车拥有量是家庭能源消费的重要影响因素,但在影响程度上存在差异。④从未来趋势来看,至2040年中国家庭能源消费量将持续增长,且在稳健发展情景下增速较慢,表明政府政策的落实与居民绿色消费理念的普及等对控制家庭能源消费增长表现出积极效果。因此,研究认为应调整能源消费结构,提高天然气消费比重;优化乡村家庭能源消费结构;进一步完善能源发展政策与转变居民消费观念,以控制家庭能源消费过快增长。

**关键词:**家庭能源消费;时空特征;影响因素;趋势预测;中国

作为全球可持续发展的核心议题之一,能源既是经济社会发展的物质基础,也是连接区域可持续发展、全球气候变化和地方环境治理等议题的关键枢纽<sup>[1-2]</sup>。当前,中国在经济发展和进步取得重大成就的同时,也逐渐成为能源消费和碳排放大国,来自资源、环境等多方面的挑战日益涌现。习近平总书记提出“四个革命、一个合作”能源安全新战略,开辟了中国特色能源发展新道路,为新时代中国能源发展指明了方向。《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》指出:“要以开源、节流、减排为重点,调整优化能源结构,创新能源体制机制,严格控制能源消费过快增长,推进能源绿色发展。”在此

背景下,中国全面推进能源消费方式变革,构建多元清洁的能源供应体系,不断深化能源体制改革,持续推进能源领域的国际合作,向能源高质量发展迈进。随着居民收入的不断提高和人口规模的持续扩大,中国家庭能源消费在未来保持增长趋势不可避免,这也将成为中国能源消费和碳排放的重要增长点之一。家庭作为能源消费的基本社会单元,减少家庭能源消费在降低能源消耗总量和改善环境质量方面发挥着越来越重要的作用<sup>[3-6]</sup>。可以预见,家庭能源消费也将成为未来能源发展战略和节能减排的重点方向之一。

通过系统梳理现有文献发现,与本文研究主题

收稿日期:2023-10-17;修订日期:2024-02-05。

基金项目:国家社会科学基金项目(21CJY073)。[Foundation: National Social Science Foundation of China, No. 21CJY073.]

第一作者简介:庄汝龙(1988—),男,山东诸城人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为区域经济绿色、低碳与高质量发展。E-mail: zrlmkn@163.com

\*通信作者简介:宓科娜(1989—),女,浙江慈溪人,博士,讲师,主要研究方向为环境经济与环境地理。

E-mail: mikena@nbufe.edu.cn

引用格式:庄汝龙, 杨洁, 宓科娜, 等. 中国家庭能源消费的时空特征、影响因素与趋势预测 [J]. 地理科学进展, 2024, 43(5): 870-887. [Zhuang Rulong, Yang Jie, Mi Kena, et al. Spatiotemporal characteristics, influencing factors, and trend prediction of household energy consumption in China. Progress in Geography, 2024, 43(5): 870-887.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.05.003

相关的方向主要包括以下两个层面:

一是从家庭能源消费本身展开,主要是对家庭能源消费现状的研究,如消费结构、空间特征以及影响因素等。对于消费结构,近年来,家庭能源消费结构呈现清洁化特征,主要表现为清洁能源对化石能源的替代。如Wang等<sup>[6]</sup>研究发现,天然气、液化石油气等清洁能源有利于降低燃煤量,且家庭能源消费将由煤炭等能源向电力、天然气等能源转变,家庭能源消费结构将逐渐优化。对于空间特征,中国家庭能源消费存在南北差异,且北方家庭能源消费量更高<sup>[7]</sup>。郑新业等<sup>[8]</sup>认为北方家庭能源消费更高的原因在于北方居民相较于南方居民,其对热舒适度的需求更大。此外,中国城乡家庭能源消费在多方面存在差异。在消费效率方面,牛云翥等<sup>[9]</sup>认为乡村家庭能源的使用效率低于城镇。国家对城镇投入了更为完备的公共能源基础设施,加之乡村人口较为分散,公共供暖设施建设难以形成规模效应,使得乡村家庭能源的使用效率较低。在消费总量与结构方面,Zhou等<sup>[9]</sup>认为城镇家庭能源消费量高于乡村,且城镇家庭能源消费的结构更加多样化,城市化和工业化是造成这种差异的主要驱动力。对于家庭能源消费的影响因素,学者们大多将能源价格、城镇化、人口特征、居民收入、能源强度等因素纳入研究<sup>[10]</sup>。例如,Sun等<sup>[11]</sup>认为能源价格的上涨会抑制家庭能源消费,不同城镇化水平下的家庭能源消费存在差异。Wang等<sup>[6]</sup>认为人口、居民收入等因素能够促进家庭能源消费增长,能源强度是家庭能源消费下降的驱动力。同样地,家庭特征也是影响家庭能源消费的重要因素,谢伦裕等<sup>[12]</sup>认为家庭收入水平、家庭人口特征、家庭住房特征等反映家庭特征的因素在不同程度上对家庭能源消费产生了影响。

二是针对家庭能源消费对经济社会发展的影响研究,包括对经济增长、碳排放等的影响。一方面,学者们大多关注能源消费与经济增长之间的关系,而对于家庭能源消费与经济增长关系的研究相对较少。吴巧生等<sup>[13]</sup>研究发现,从长期来看,中国总体上存在能源消费与GDP的双向因果关系。能源消费的增加会带来经济总量的增长,经济总量的扩大也会增加能源消费需求。家庭能源消费作为能源消费的重要组成部分,其对经济增长也可能具有重要影响。另一方面,目前家庭部门已成为能源消费与碳排放的重要来源,对于家庭能源消费与碳排

放关系的研究不断增多。随着家庭能源消费量的增加,家庭能源消费产生的碳排放总量持续增长<sup>[14]</sup>,这一观点基本成为人们的共识。因此,对家庭能源消费量进行合理控制有利于抑制碳排放量,研究家庭能源消费也对中国实现“双碳”目标具有一定现实意义。值得说明的是,对家庭能源消费的相关研究方法渐趋多元,与本文研究主题相关的角度主要分为两方面。一方面,对于家庭能源消费影响因素的分析方法,学者们大多使用计量模型进行研究,例如,Yang等<sup>[15]</sup>运用普通最小二乘模型考察各个变量对家庭能源消费量的影响。而Jiang等<sup>[10]</sup>设置了更具有实际经济和地理意义的嵌套空间权重矩阵,采用4个空间权重矩阵的空间计量经济模型进行影响因素分析。另一方面,对于趋势预测的分析方法,学者们大多采用情景分析法进行研究。如刘惠等<sup>[16]</sup>在进行预测时设定了基准情景、低碳情景及强化低碳情景三种情景,以讨论未来能源消费的变化趋势。

综上所述,近年来关于家庭能源消费的研究不断涌现,并取得了一定进展,相关研究内容不断深化,研究视角日益多元,研究方法更加系统、科学。但通过分析比较发现,一方面,在以往研究中,学者们多倾向于选择某一特定地区或单一省份作为研究对象展开研究,而对于整体视角的分析相对较少。另一方面,在数据使用上,大多以直接获取的能源消费量以及调查问卷的数据为主,而使用终端能源消费量开展的研究有待丰富。鉴于此,本文基于中国1995—2021年相关数据,探讨中国家庭能源消费的时空特征及其结构演变。进一步,选取人口规模、经济发展、城镇化率、能源强度、家庭规模、教育水平与私人汽车拥有量7个因素,采用空间计量模型进行建模,对家庭能源消费的影响因素进行分析。接着,采用灰色预测、情景分析等方法,并结合各影响因素,分别预测三种情景下中国2022—2040年家庭能源消费量。最后,根据研究结论提出相关发展建议。相比其他研究,本文的贡献主要表现在以下三方面:一是本文从全国层面对家庭能源消费进行了客观细致的刻画,既分析了家庭能源消费的现状,也对家庭能源消费量在能源消费总量的占比情况进行研究,凸显了家庭能源消费在能源消费中的重要性;二是相比现有研究,本文在人口特征、经济水平、城镇化、科技水平、家庭特征、教育水平等方面筛选出家庭能源消费的主要影响因素并使用空间计量模型进行分析,可为提高能源利用效率、

控制家庭能源消费总量过快增长提供启示与借鉴；三是本文对家庭能源消费进行了科学预测,可为政府有关部门从家庭能源消费领域寻求实现“双碳”目标的思路 and 有效途径提供有关决策参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 空间相关分析

空间自相关分析可以用于检验该要素与其相邻空间点要素的关联性。全局与局部莫兰指数作为测度空间自相关的重要指标,可以用于反映指标的空间集聚与离散程度。局部莫兰指数(Local Moran's  $I$ )能够有效弥补全局莫兰指数对空间相关性进行全局评估所忽略的空间过程的局部不稳定性,并揭示其空间异质性<sup>[17]</sup>。为了更好地探讨中国各个地区家庭能源消费的空间集聚类型,本文采用局部莫兰指数进行判别,计算公式如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (1)$$

式中: $I_i$ 为每个研究单元的局部莫兰指数; $x_i$ 表示第*i*个地区的观测值; $\bar{x}$ 表示所观测的所有省的平均值; $w_{ij}$ 为空间权重矩阵的值; $S^2$ 为方差。

### 1.2 灰色预测模型

灰色预测主要通过GM模型对系统行为特征的发展变化规律进行预测<sup>[18]</sup>,特别是根据已有数据对其未来发展趋势作出科学的预测分析,该方法在经济、社会、军事等领域应用广泛。其中,GM(1,1)预测主要通过对离散型随机数列进行累加,以获得具有较强的指数规律性的累积产生序列,接着利用序列模型的参数估算,并将结果进行累减,最后将其还原为预测值。主要步骤如下。

首先,生成初始数列。设定原始序列  $x^{(0)}$ :

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (2)$$

对其进行累加,得到新序列  $x^{(1)}$ :

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (3)$$

其中:  $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

接着,在通过指数规律检验的基础上构建微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} = ax^{(1)} = u \quad (4)$$

求解后,将其还原成原始序列  $x^{(0)}$ ,进而得出GM(1,1)模型:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(0)}(k+1) - \hat{x}^{(0)}(k) \\ &= (1 - e^a)(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, n-1$ 。

最后,对模型进行误差检验。计算相对误差以进行残差检验,通过计算后验差比值*C*和小概率误差*p*值进行后验差检验,以检验拟合值与真实值的差别,并进行模型精度等级判断,检验标准见表1。

### 1.3 模型构建

#### 1.3.1 模型设置

普通面板回归模型是定量揭示要素之间因果关系的常用方法,也是计量经济学的传统研究范式。结合本文研究主题,基础模型设置如下:

$$\begin{aligned} \ln jtnyxf_{it} &= \alpha + \beta_1 \ln rk_{gm_{it}} + \beta_2 \ln rjgdp_{it} + \\ &\beta_3 \ln czhl_{it} + \beta_4 \ln nyqd_{it} + \beta_5 \ln jtgm_{it} + \\ &\beta_6 \ln jyzb_{it} + \beta_7 \ln srqc_{it} + a_i + \lambda_t + u_{it} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $jtnyxf$ 表示家庭能源消费量; $rk_{gm}$ 表示人口规模; $rjgdp$ 表示经济发展; $czhl$ 表示城镇化率; $nyqd$ 表示能源强度; $jtgm$ 表示家庭规模; $jyzb$ 表示教育水平; $srqc$ 表示汽车拥有量;对各变量均进行自然对数处理; $\alpha$ 表示常数项; $\beta_1 \sim \beta_7$ 均为系数; $i$ 和 $t$ 分别表示地区和年份; $a_i$ 与 $\lambda_t$ 分别表示个体和时间固定效应; $u_{it}$ 表示随机误差项。

对于可能具有空间相关属性的家庭能源消费及其影响因素而言,利用经典方法对空间样本数据进行回归分析的结果可能存在偏误。而空间计量经济学提供的包括空间滞后、空间误差以及空间杜宾等模型能够更好地捕捉和控制变量之间的空间相关性,也能够更加精准地识别解释变量与被解释变量的因果关系。另外,经济发展具有空间相关性的结论得到了大部分研究证实,加之家庭能源消费与其关系密切,故家庭能源消费也可能存在空间相关性。本文主要参考庄汝龙等<sup>[19]</sup>的研究,在上述普通面板回归模型的基础上,考虑到家庭能源消费及其影响因素可能存在的空间相关性,通过检验选取空间杜宾模型(spatial Durbin model, SDM)进行估计,模型设置如下:

表1 误差检验及模型精度等级标准

Tab.1 Error test and model accuracy class standards

精度等级	后验差比值 <i>C</i>	小概率误差 <i>p</i>
第一等级	<0.35	>0.95
第二等级	0.35~0.50	0.81~0.95
第三等级	0.51~0.65	0.70~0.80
第四等级	>0.65	<0.70



$$\ln jtnyxf_{it} = \rho W \ln jtnyxf_{it} + \beta_1 \ln rkgm_{it} + \beta_2 \ln rjgdp_{it} + \beta_3 \ln czhl_{it} + \beta_4 \ln nyqd_{it} + \beta_5 \ln jtgm_{it} + \beta_6 \ln jyzb_{it} + \beta_7 \ln srqc_{it} + \gamma W \times X + a_i + \lambda_t + u_{it} \quad (7)$$

式中:  $W$ 表示用于反映省级单元空间关系的权重矩阵,本文设置邻接权重矩阵与反距离权重矩阵两类空间权重矩阵; $\rho$ 表示被解释变量的空间滞后项系数向量; $X$ 表示解释变量滞后项的集合; $\gamma$ 表示解释变量滞后项集合的系数。

### 1.3.2 变量说明

根据学者的相关研究以及中国发展的实际情况,本文选取以下变量:

(1) 家庭能源消费量( $jtnyxf$ ):采用各类家庭能源消费量的总和加以衡量。家庭能源消费主要指居民对于家庭炊事、照明、取暖等方面的用能需求,属于终端能源消费。终端能源消费量在核算中扣除了加工转换二次能源的损失量和在输送、分配、储存中的损失量,故其对于反映经济社会发展与居民生活的实际能源消费情况更具真实性与准确性,也能够更为精准地描述经济社会发展与能源消费之间的关系<sup>[19]</sup>。故在参考丁永霞等<sup>[20]</sup>、畅华仪等<sup>[21]</sup>基础上,选取终端能源消费中与家庭能源消费相关的项目,采用《中国能源统计年鉴》中的折标准煤系数,将煤、油品、天然气、热力、电力与其他能源的单位进行折算与加总。

(2) 人口规模( $rkgm$ ):主要参考谢伦裕等<sup>[12]</sup>对变量的选取,采用地区总人口对该指标进行衡量。人口数量越多,家庭能源消费量越大,即人口的增加会带来家庭能源消费的上升,故人口规模是影响家庭能源消费的重要因素。

(3) 经济发展( $rjgdp$ ):采用人均GDP加以衡量,借鉴丁永霞等<sup>[20]</sup>的研究选取该变量。一般来说,随着社会经济水平的增长,居民的购买力不断提升,其对能源的需求也往往增加,即人均GDP的增长会促进家庭能源消费量的增加。

(4) 城镇化率( $czhl$ ):该指标主要参考丁永霞等<sup>[20]</sup>、王蕾等<sup>[22]</sup>的研究,采用城镇人口占常住人口的比重进行衡量。城镇化的推进有利于提高能源使用效率并形成能源利用的规模和聚集效应,从而减少家庭能源的浪费现象。

(5) 能源强度( $nyqd$ ):该指标主要参考孙涵等<sup>[23]</sup>的研究,且考虑到研发经费占比、专利数量等技术指标与工业部门的能源消耗关系更为密切<sup>[10]</sup>,故本文采用单位GDP的能源消费量进行衡量。能源强

度是衡量能源利用效率与能源利用技术水平的重要指标,能源强度的降低能够在一定程度上降低家庭能源消费量。

(6) 家庭规模( $jtgm$ ):采用平均家庭户规模进行衡量,主要参考左玲<sup>[24]</sup>、崔一澜等<sup>[25]</sup>的研究选取该变量。近年来,中国家庭规模逐渐趋向于小型化,小规模家庭户数逐渐增多,以家庭为单位配备的家具、电器设备等数量将增加,使得家庭能源消费量相应增加。

(7) 教育水平( $jyzb$ ):主要参考姜璐等<sup>[3]</sup>的研究,采用财政支出中教育经费占GDP的比重进行衡量。教育经费的占比关系到教育资源的配置和教育质量的提高,一地区教育水平越高,其居民越偏好节能低碳的消费行为,这有利于降低家庭能源消费量。

(8) 汽车拥有量( $srqc$ ):主要参考Sun等<sup>[11]</sup>的研究,考虑到居民交通对家庭能源消费的影响,采用私人汽车拥有量进行衡量。私人汽车作为高耗能产品,居民对其进行购买与使用等行为会引起直接或间接的家庭能源消费。

### 1.4 数据来源

本文以中国30个省级单元为研究样本(西藏、香港、澳门和台湾数据缺失较多,暂不纳入研究范围)。各省家庭能源消费量与能源消费总量的数据来源于《中国能源统计年鉴》中各省“能源平衡表”;其他变量的数据均来源于《中国统计年鉴》。由于2022年及其之后的家庭能源消费量数据暂未公布,充分考虑到各个变量数据的可获取性、连贯性以及权威性,本文将研究时段限定为1995—2021年。

## 2 家庭能源消费时空特征

### 2.1 家庭能源消费总体情况

随着中国经济持续稳定发展,能源消费总量和家庭能源消费总量均呈现波动上升趋势。如图1所示,1995—2021年,中国能源消费总量由1995年的100381.65万tce上升到2021年的364632.45万tce;同期,中国家庭能源消费总量从1995年的13566.82万tce增长至2021年的46296.58万tce。近年来,中国居民收入水平以及生活水平不断提高,家用电器、私家车的购买量与使用量逐渐增多,这都在一定程度上增加了家庭能源消费量。进一步,中国家庭能源消费量的占比情况可分为三个阶段:在1995—2007年间,家庭能源消费量的占比呈现下降



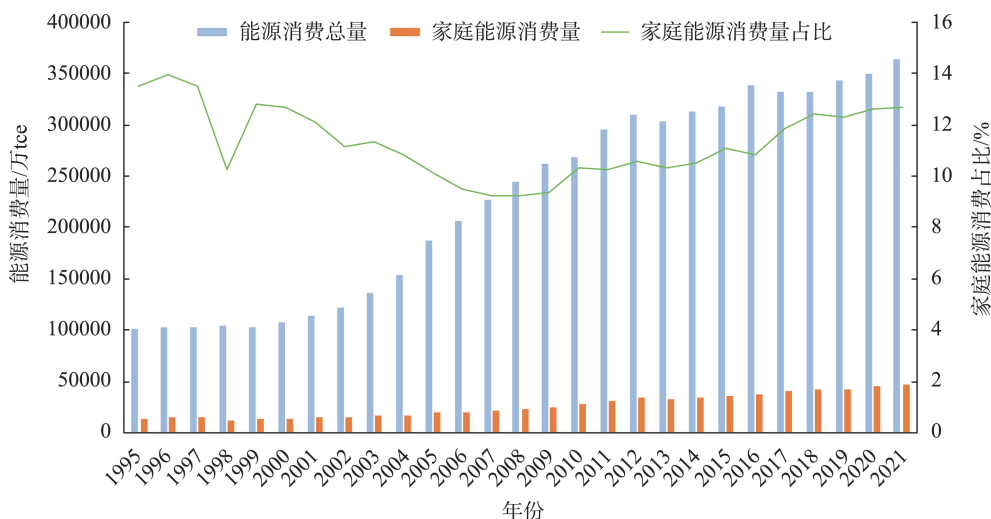


图1 中国家庭能源消费量与能源消费总量的变化情况

Fig.1 Changes in household energy consumption and total energy consumption in China

趋势,从1995年的13.52%下降至2007年的9.27%。究其原因,1995—2007年能源消费总量的年平均增长率相对较高;而同期家庭能源消费量的年平均增长率相对较低,这可能使得家庭能源消费量的占比在此时期呈现下降趋势。在2008—2016年间,家庭能源消费量占比缓慢上升,从2008年的9.3%上升至2016年的10.85%。而2017—2021年间家庭能源消费量占比呈现加速上升的特征,年平均增长率为2.34%,高于2008—2016年(1.83%)。总的来说,虽然中国家庭能源消费量的占比有所波动,但基本上在11.33%的水平上下浮动,最低也不低于9.27%。近年来,中国家庭能源消费的比重逐渐提高,现已占能源消费总量的1/10左右,这表明家庭能源消费已不容忽视,对于中国降低碳排放、发展清洁能源、实现“双碳”目标具有重要意义。

总体上看,通过计算莫兰指数发现,家庭能源消费存在空间相关性。进一步,计算局部莫兰指数并生成LISA集聚图,以考察中国家庭能源的局部空间集聚特征,结果如图2所示。1995年,“高高集聚”主要位于山东和安徽,这两个省级单元自身及其周边的家庭能源消费量较高;“高低集聚”主要位于广东,其自身的家庭能源消费量与周边省级单元相比更高。2010年,“高高集聚”的地区有所增加,主要位于辽宁、河北、山西、河南和安徽;新疆属于“低低集聚”,表明该地区及其周边的家庭能源消费量较低;四川演变为“高低集聚”类型。2021年,“高低集聚”的地区主要位于新疆和四川,而广东变为不显著。可见,在研究期间内,中国家庭能源消费

较高的地区主要集中在河北、河南、山东、安徽等地,这些地区人口众多,可能导致其家庭能源消费较高。另外,家庭能源消费的集聚格局发生了一定变化,如广东、四川与新疆的集聚类型有所改变。具体地,广东从“高低集聚”转变为不显著,表明该地区不存在显著的空间集聚现象。从实际数据来看,2021年广东家庭能源消费量仍高于其他周边省份,但由于周边省份随着经济发展水平的提高,其家庭能源消费量获得了较大提升,缩小了与广东的差距,改变了“高低集聚”的空间格局,使得广东在统计意义上转变为不显著。四川与新疆变为“高低集聚”,表明两地家庭能源消费量出现较快上升且逐渐高于周边省份。对于四川,随着国家西部大开发战略的深入实施,四川步入发展快车道,这可能使得四川在经济迅速发展与人口加速集聚的同时,造成了家庭能源消费量的快速增加。对于新疆,随着“一带一路”倡议的不断推进以及现代交通网络的建设与完善,新疆经济社会发展迅速,在一定程度上提高了该地区的家庭能源消费量。

## 2.2 家庭能源消费结构演变

1995—2021年,中国家庭能源消费结构发生了显著变化,如图3所示。煤炭消费的比重由1995年的75.43%下降到2021年的9.42%,可见,作为非清洁能源的煤炭在家庭能源消费中的地位有所下降。另外,油品、天然气、热力和电力的消费量呈现上升趋势,其中,电力的增长幅度最大,从1995年的9.15%升至2021年的31.15%。近年来,中国家庭能源消费结构呈现多样化发展趋势。煤炭因具有不

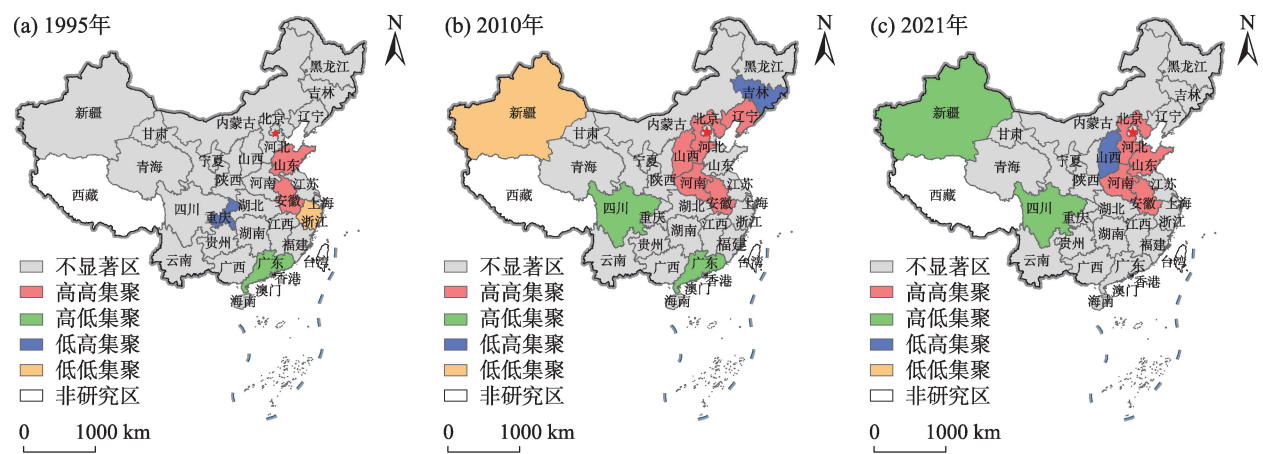
可再生性以及消费的高污染性,其消费比重随着中国绿色发展进程的加快而下降,同时天然气与电力作为清洁能源,其消费比重稳步升高。即中国家庭能源消费逐渐从高污染向清洁、绿色转变。

总的来说,中国家庭能源消费在结构上不断优化,而且在不同时期的发展特征存在差异,如图4所示,现将中国家庭能源消费的结构演变归纳为以下三个阶段。

(1) 第一阶段(1995—2004年):煤炭居于核心地位,电力获得初步发展

在此阶段,中国家庭能源的消费结构仍以煤炭

消费为主,居民对于电力的消费有所提升,但仍处于初步发展与普及阶段。对大部分地区而言,煤炭的消费量虽有所下降,但其比重仍偏高,占家庭能源消费总量的一半以上,可见,在此阶段煤炭消费位于主要地位。为解决电力短缺问题以及提高电力消费的比重,中国灵活运用多种方式进行电力建设,在1995年颁布《中华人民共和国电力法》,并于1999年提出对3000 kW以上的新能源发电项目提供财政贴息<sup>[26]</sup>。进一步,随着工业化进程的推进以及居民生活水平的提高,大量家用电器进入居民日常生活,这也使得家庭生活中的电力消费有所增



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

图2 家庭能源消费量的LISA集聚图

Fig.2 LISA cluster map of household energy consumption

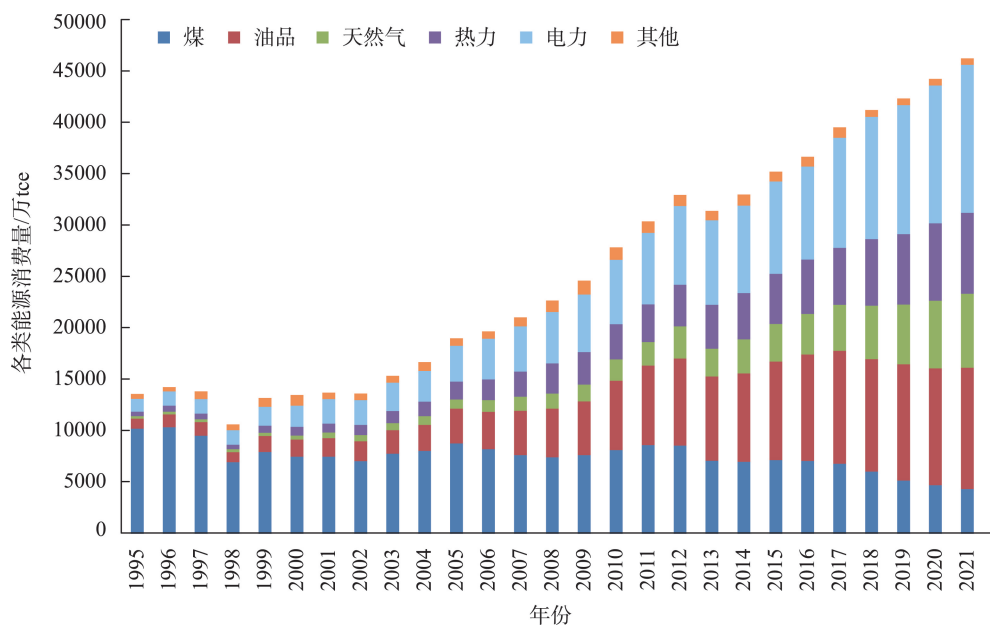


图3 中国家庭能源消费结构

Fig.3 China's household energy consumption structure

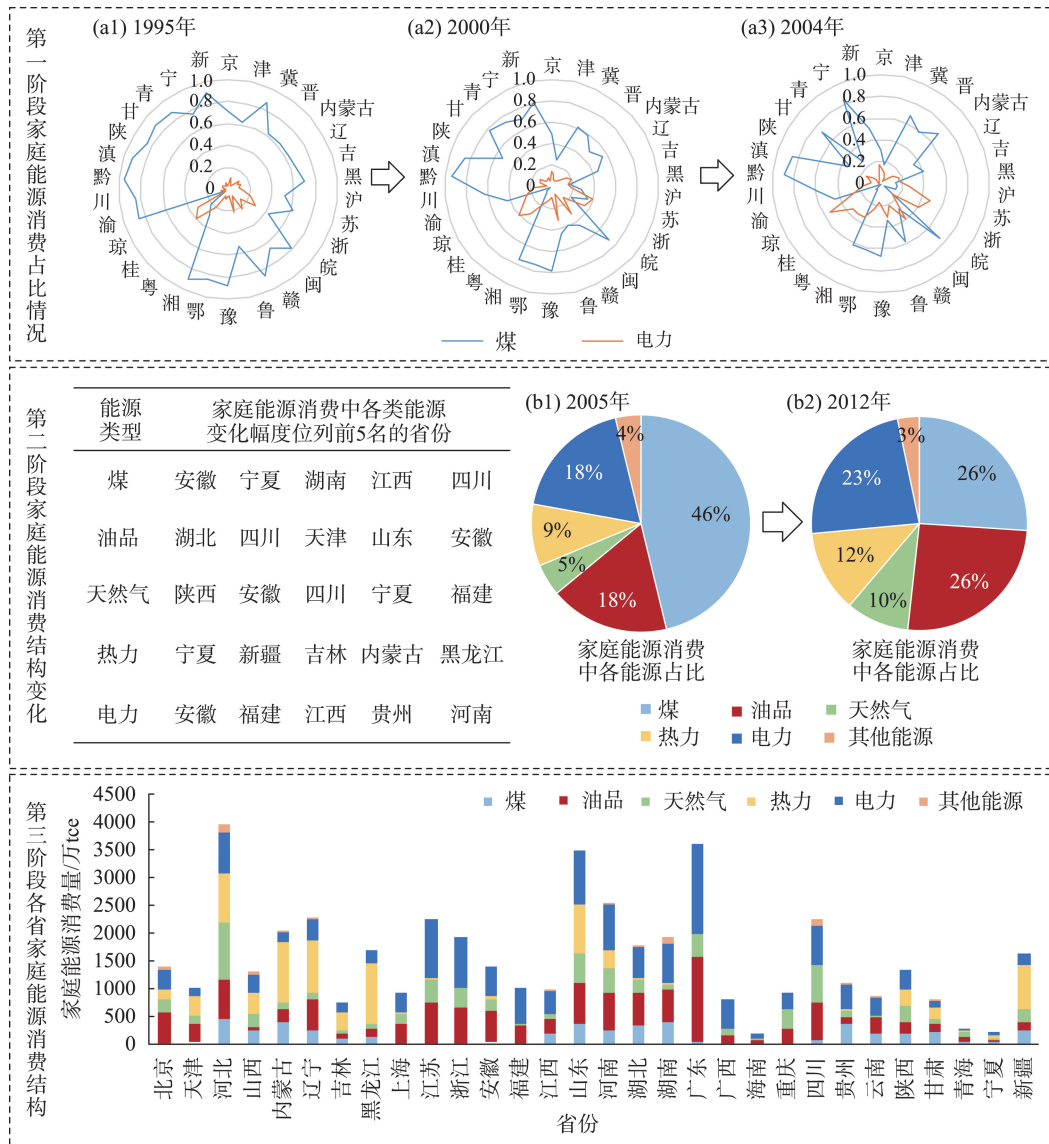


图4 家庭能源消費結構演变

Fig.4 Evolution of household energy consumption structure

长。但中国家庭能源消費量在1998年出現明显下降,这主要由于国务院在1998年下发了《关于关闭非法和布局不合理煤矿有关问题的通知》,通过调整与优化煤炭消費結構,合理开发利用煤炭资源,使得家庭能源消費中煤炭的消費出現大幅下滑,家庭能源消費总量也有所下降。

(2) 第二阶段(2005—2012年):煤炭比重持续下降,能源結構渐趋多样

2005年以来,中国家庭能源消費中煤炭的占比基本低于50%,至2012年,煤炭消費占比降至26%。在此期间,中国煤炭消費在家庭能源消費中的比重显著下降,电力、天然气和油品的消費迅速进入居民生活,家庭能源消費結構呈现多样化发展

趋势。在此阶段,国家加快发展清洁能源,进一步调整煤炭消費比重,中国家庭能源消費結構逐渐多样化。随着天然气供应的不断普及和推广,天然气逐渐进入居民家庭生活,使其消費量有所增长。而且在此期间中国私家车需求量的增加,也使得油品消費量相应增加。同时,居民家用电器数量与品种的增加也拉动了电力消費量的增长。此外,在省际方面,各省家庭能源消費的結構也呈现多样化特征,其中安徽表现较为突出,该省煤炭、油品、天然气和电力变化幅度均排在前5位,煤炭消費量出現大幅下降,油品、天然气、电力的消費量实现增长。同时,宁夏、四川的煤炭消費也有所下降,其天然气等能源的消費有所提高。



(3) 第三个阶段(2013年以后):清洁能源比重提升,天然气占比仍需扩大

在此阶段,中国电力、天然气等清洁能源的消费量在家庭能源消费中的占比明显提高,而煤炭等非清洁能源的消费占比进一步降低,中国家庭能源消费的结构愈加朝着绿色化方向发展。2016年国家出台《能源生产和消费革命战略(2016—2030年)》,加快了我国能源消费结构调整的进程。进一步,中国不断加大对清洁能源的投入和支持,并取得了一定成效。国家能源局指出,中国实施的无电地区电力建设工程,在发展中国家率先实现了人人有电用。但由于我国国土面积广阔、地形多样,加大了天然气供气管道的建设难度,加之我国天然气管道建设滞后于市场需求、储气能力不足,使得天然气在家庭能源消费中的比重较小。为保障国家能源安全与推进能源绿色低碳转型,进一步支持天然气勘探开发与开展天然气管道建设等工作不容忽视。

### 2.3 城乡家庭能源消费情况

由于城镇与乡村居民在生活条件、收入水平、受教育程度等方面存在差异,城乡间家庭能源消费存在一定差距。如图5所示,从总量上看,1995—2021年城乡家庭能源消费均呈现上升趋势,城镇家庭能源消费量从6990.51万tce上升至30116.86万tce,与此同时,乡村家庭能源消费从6576.31万tce增长到

16179.50万tce。从二者差额上看,城镇与乡村的家庭能源消费差额呈现明显的增长趋势,从1995年的414.2万tce上升至13937.36万tce,二者间的差值逐步扩大,这可能与城镇化率、城乡人口规模有关<sup>[9]</sup>。随着中国城镇化率的提高,乡村人口逐渐向城镇转移,人口的集聚在一定程度上造成了城镇家庭能源消费量的增加,使得城乡家庭能源消费差距逐渐拉大。

从人均家庭能源消费量来看,城镇人均家庭能源消费以2001年为界,呈现出先下降后缓慢上升的趋势,乡村人均家庭能源消费整体上呈现上升趋势。比较二者差异,城乡人均家庭能源消费量的差距逐渐缩小,由1995年的122.22 kgce/人下降至2021年的4.75 kgce/人,城乡家庭能源人均消费的不平等性明显下降。一方面,城镇化率的提高可能会带来能源使用效率的提高,使得城镇人均家庭能源消费增速放缓。另一方面,随着乡村居民生活水平的提高,其家庭能源消费量不断增长,加之乡村人口与地域较为分散,使其人均家庭能源消费提高。从消费结构上看,如图6所示,城乡家庭能源消费结构存在差异。城镇家庭能源消费呈现清洁化、多样化,以电力、热力消费为主,其对于天然气的消费显著高于乡村;而乡村家庭能源消费呈现出煤炭消费为主,电力、油品消费为辅的结构。由于经济发展水平与基础设施的限制,乡村家庭能源消费结

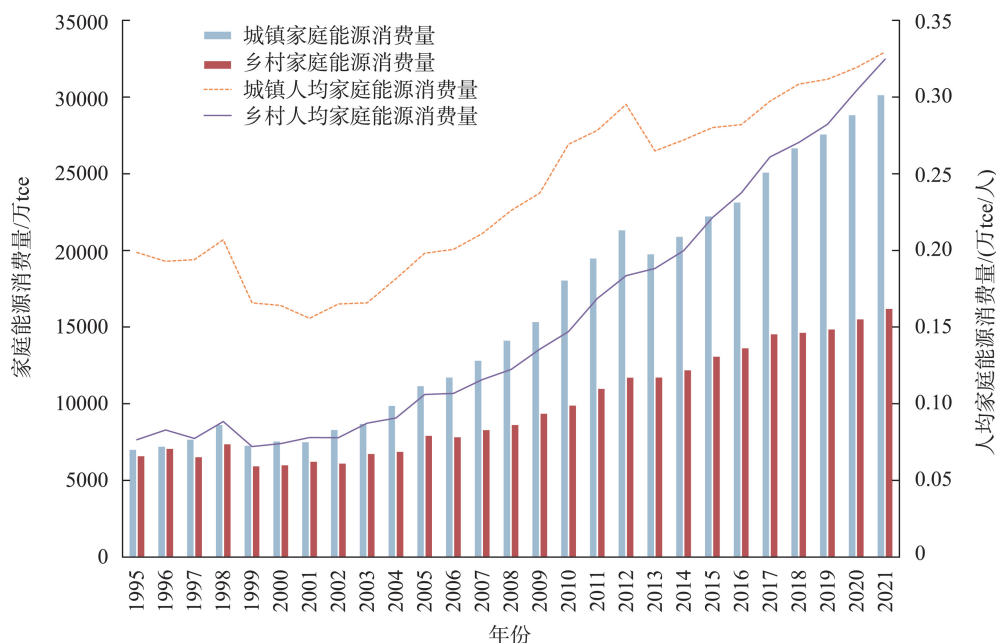


图5 城乡家庭能源消费情况

Fig.5 Energy consumption of urban and rural households

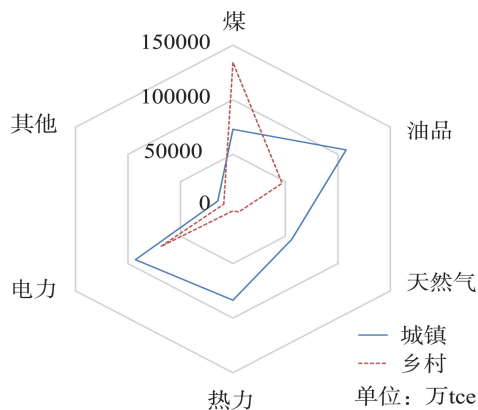


图6 城乡家庭能源消费结构  
Fig.6 Energy consumption structure of urban and rural households

构较为单一,主要的能源类型为煤炭,污染程度较高。因此,发展乡村清洁能源,建立安全、可持续的农村能源供应体系很有必要。

3 家庭能源消费影响因素与趋势预测

3.1 家庭能源消费影响因素的空间计量模型分析

由于空间相关性的存在,为进一步深入识别家庭能源消费的影响因素,本文构建空间计量模型进行验证。首先,进行豪斯曼(Hausman)检验,发现通过了1%水平的显著性检验,故选择固定效应模型。进一步,无论是空间误差模型还是空间滞后模型,拉格朗日检验(Lagrange Multiplier Test)均通过了1%水平的显著性检验,稳健拉格朗日检验(Robust Lagrange Multiplier Test)<sup>[27]</sup>也在不同程度上通过了显著性检验。基于此,进行似然比检验(Likelihood-ratio Test),两个模型均通过了1%水平的显著性检验,因此选用空间杜宾模型。最后,个体固定和时间固定均通过了1%水平的显著性检验,说明采用双向固定效应最合适。综上,本文选择双重固定效应下的杜宾模型进行分析。检验结果见表2。

表3为家庭能源消费影响因素的基准回归结果。从空间计量模型来看,能源强度、人口规模、家庭规模、教育水平、经济发展、城镇化率与汽车拥有量在不同程度上对家庭能源消费产生了影响。具体来看,能源强度对家庭能源消费的影响程度最大,模型的估计系数在0.72左右上下浮动,且通过了显著性检验。可见,随着中国能源科技创新工作的不断推进,能源新技术蓬勃兴起,使得中国能源强度持续下降,能源效率持续提高。但总体上看,

表2 空间计量模型选择检验结果  
Tab.2 Selection results of spatial econometric models

检验方法	统计值	P值
Hausman Test	34.710	<0.0001
LM-Spatial error	23.034	<0.0001
Robust LM-Spatial error	20.364	<0.0001
LM-Spatial lag	9.318	0.0020
Robust LM-Spatial lag	6.648	0.0100
LR-Spatial-lag	70.670	<0.0001
LR-Spatial-error	71.740	<0.0001
LR-SDM-ind	113.540	<0.0001
LR-SDM-time	492.680	<0.0001

表3 基准回归结果  
Tab.3 Benchmark regression results

变量	OLS 模型	空间杜宾模型	
		邻接权重矩阵	反距离权重矩阵
ln rkgm	0.848*** (0.045)	0.306* (0.178)	0.533*** (0.162)
ln rjgdp	0.522*** (0.059)	0.397*** (0.092)	0.344*** (0.093)
ln czhl	0.049 (0.055)	-0.137*** (0.053)	-0.149*** (0.052)
ln nyqd	0.843*** (0.042)	0.719*** (0.059)	0.723*** (0.064)
ln jtgm	-0.947*** (0.182)	0.496 (0.304)	0.617** (0.308)
ln jyzb	0.155*** (0.058)	-0.544*** (0.084)	-0.478*** (0.086)
ln srqc	0.159*** (0.030)	0.100** (0.047)	0.056 (0.040)
常数项	-4.507*** (0.845)		
$\rho$		Yes	Yes
$W \times X$		Yes	Yes
个体固定		Yes	Yes
时间固定		Yes	Yes
N	810	810	810
R <sup>2</sup>	0.830	0.4173	0.6244

注:括号内数据为稳健标准误;\*、\*\*、\*\*\*分别表示 $P<0.1$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ ;Yes表示包含此项。下同。

中国能源效率仍较低,资源浪费严重,不利于国民经济和社会的可持续发展。因此多渠道提高能源利用水平可为实现能源与经济的可持续发展提供助力。而汽车拥有量对家庭能源消费的影响程度相对较小。随着政府不断出台对新能源汽车的财政补贴政策,新能源汽车市场实现飞速增长。另

外,新能源汽车主要将电能、氢燃料等非常规能源作为动力来源,在能源转化和利用过程中的能量损耗更低,从而提高了能源利用率。综合影响下,汽车拥有量对家庭能源消费的影响程度相对较小。

进一步,分析影响家庭能源消费的其他指标,对于正向指标,人口规模、家庭规模、经济发展均在不同程度上通过了显著性检验。具体来看,对于人口规模,其在不同空间权重矩阵下的杜宾模型估计系数在0.4左右上下浮动。随着人口的增长,居民对能源的需求随之增加,进而使家庭能源消费量增长。对于家庭规模,近年来,中国家庭规模趋向于小型化,小规模家庭户数逐渐增多,与此同时,居民对住房以及家庭用品的需求有所上升,使得家庭能源消费量有所增长。对于经济发展,随着社会经济水平的增长,居民收入水平以及购买力逐步提升,使得家庭能源消费量增加。另外,对于影响家庭能源消费的负向指标,一方面,教育水平在不同空间权重矩阵下的杜宾模型估计系数在-0.5左右上下浮动。随着教育水平的提高,人们更加倾向于选择节能低碳的消费行为,进而有利于控制家庭能源消费量的增长。另一方面,城镇化率的提高有利于聚

集高素质人力资本,加快推进改善能源利用效率的新技术的创造与发明,在一定程度上控制了家庭能源消费量的增长。

3.2 稳健性与内生性检验

关于空间计量模型估计的稳健性问题,为了进一步提高结论的可信性,本文采用替换模型的方法进行检验,将空间杜宾模型分别替换为空间滞后模型和空间误差模型,结果如表4所示。结果显示,人口规模、经济发展、能源强度、家庭规模与汽车拥有量都对家庭能源消费具有正向影响,城镇化率与教育水平都对家庭能源消费均具有负向影响,且各影响因素都在不同程度上通过了显著性检验。使用空间滞后模型与空间误差模型可以得到基本一致的结论,印证了上述模型估计的稳健性。

考虑到可能由于多方面原因导致模型设定的内生性问题。为了检验变量是否存在内生性的偏误,本文参考韩峰等<sup>[28]</sup>的做法,将文中解释变量均做滞后一期处理。由于滞后一期的变量与当期变量存在相关性,而与前定当期扰动项不相关,因此可以缓解内生性问题带来的估计偏误。分别在不同空间权重矩阵下使用空间杜宾模型进行估计,估计

表4 空间滞后模型与空间误差模型回归结果

Tab.4 Regression results of the spatial autoregressive model and spatial error model

变量	空间滞后模型		空间误差模型	
	邻接权重矩阵	反距离权重矩阵	邻接权重矩阵	反距离权重矩阵
ln rkgm	0.647*** (0.151)	0.648*** (0.151)	0.646*** (0.151)	0.660*** (0.149)
ln rjgdp	0.277*** (0.086)	0.248*** (0.085)	0.266*** (0.086)	0.236*** (0.083)
ln czhl	-0.090* (0.049)	-0.083* (0.049)	-0.086* (0.049)	-0.090* (0.049)
ln nyqd	0.702*** (0.059)	0.678*** (0.059)	0.692*** (0.059)	0.679*** (0.059)
ln jtgm	0.714** (0.299)	0.742** (0.298)	0.706** (0.299)	0.837*** (0.302)
ln jyzb	-0.524*** (0.082)	-0.530*** (0.082)	-0.525*** (0.083)	-0.552*** (0.082)
ln srqc	0.088** (0.036)	0.096*** (0.036)	0.090** (0.036)	0.098*** (0.034)
$\rho$	Yes	Yes		
$\lambda$			Yes	Yes
个体固定	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	Yes
N	810	810	810	810
R <sup>2</sup>	0.0660	0.0333	0.0609	0.1218



结果如表5所示。人口规模、经济发展、能源强度、家庭规模与汽车拥有量都对家庭能源消费具有正向影响,城镇化率与教育水平均对家庭能源消费具有负向影响,且各影响因素均在不同程度上通过了显著性检验,证明了估计结果的有效性与可信性。

为验证计量模型对家庭能源消费量预测的准确性及更有效直观地展现模型的拟合效果,将研究时段内各变量估计系数代入模型中计算得到预测值,并与对应年份家庭能源消费量的实际值进行比较,找到拟合效果相对较好的模型。此模型下家庭能源消费量的预测值与真实值之间虽存在差异,但二者的变化趋势基本相同,结果如图7所示。因此,可以运用该模型预测中国家庭能源未来消费量。

### 3.3 情景设置与趋势预测

情景分析法指在设定多种具体情景的前提下,对预测对象未来可能出现的情况进行预测的方法。为了考察未来中国家庭能源消费量,本文结合当前现状,根据中国家庭能源消费的时空特征,分别设置基准情景、加速发展情景、稳健发展情景三种情景。进一步,综合运用家庭能源消费的影响因素,分别预测未来中国家庭能源消费量。

表5 内生性处理结果

Tab.5 Endogenous treatment results

变量	空间杜宾模型	
	邻接权重矩阵	反距离权重矩阵
ln rkgm	0.329* (0.188)	0.449*** (0.167)
ln rjgdp	0.356*** (0.095)	0.283*** (0.094)
ln czhl	-0.134** (0.055)	-0.158*** (0.054)
ln nyqd	0.688*** (0.062)	0.671*** (0.066)
ln jtgm	0.646** (0.318)	0.835*** (0.319)
ln jyzb	-0.560*** (0.089)	-0.503*** (0.089)
ln srqc	0.116** (0.049)	0.068 (0.042)
$\rho$	Yes	Yes
$W \times X$	Yes	Yes
个体固定	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes
N	780	780
R <sup>2</sup>	0.4760	0.6430

#### 3.3.1 情景设定

(1) 基准情景:该情景假定其他条件不变,根据历史发展情况对未来发展进行合理外推<sup>[16]</sup>,即运用灰色预测模型,采用1995—2021年的数据来推导2022—2040年中国家庭能源消费情况。在基准情景下,各影响因素将按照目前的趋势发展且不作其他调整,以展现中国在不受未来政策条件下的家庭能源消费水平。

(2) 加速发展情景:该情景在基准情景的基础上,适当加入政策因素,社会整体上以经济发展为导向,中国经济呈现高速发展态势。该情景下,全社会科学技术水平提高,中国家庭能源消费效率有所提高、家庭能源消费结构有所调整,居民节能减排意识有所提高但仍相对较弱,且绿色节能的生活方式并未完全普及。

(3) 稳健发展情景:该情景基于基准情景与加速发展情景,进一步加强诸如国家节能、减排等的政策因素,扩大绿色节能的生活方式与消费观念的推广力度,居民节能减排意识显著提高<sup>[29]</sup>。在这种情景下,中国科研投入进一步提高,技术进步迅速,以反映在国家政策的引导下家庭能源消费的发展情况。与其他情景相比,该情景考虑到中国实际以及相关政府政策文件,各变量参数的设置相对合理。

本文结合空间计量模型,运用情景分析法以及灰色预测模型预测未来中国家庭能源消费情况。为了更好地控制能源消费量与碳排放量,按期达到中国“双碳”目标并对未来发展提供建议,从家庭能源消费入手是促进节能减排的重要措施之一,加之2022年的家庭能源消费量的相关数据尚未公布,故本文将预测总时段设定为2022—2040年,分成2022—2025、2026—2030、2031—2035、2036—2040

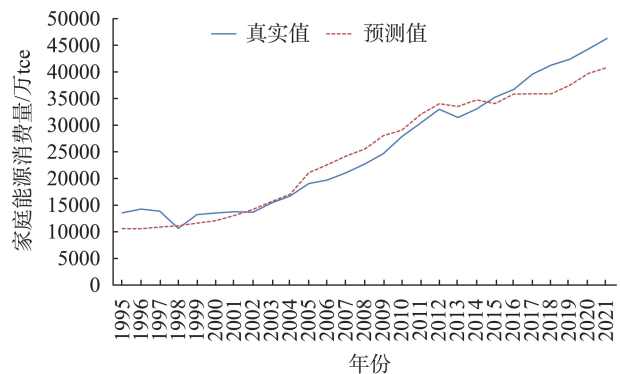


图7 家庭能源消费量真实值与预测值的比较

Fig.7 Comparison of true and predicted household energy consumptions

年4个时段,并分别设置各个参数在不同时间段的年均变化率。三种情景下各影响因素的增速设定见表6。

3.3.2 各影响因素情景设置

(1) 人口规模的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年人口规模的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果显示,后验差比值 $C=0.053<0.35$ ,小概率误差 $p=1.00>0.95$ ,故灰色预测模型可用于预测未来的人口规模。由于联合国《世界人口展望2022》的数据更为全面、权威以及应用广泛,本文将参考该报告进行后续情景设置。对于加速发展情景,《世界人口展望2022》的高方案预测2030年中国总人口将为14.38亿人,2035年将为14.55亿人,2040年将为14.37亿人。加之《国家人口发展规划(2016—2030年)》预测中国人口将在2030年前后达到14.5亿人。基于此,本文设定该情景下中国人口将在2030年达到14.38亿人,2035年达到14.5亿人,2040年达到14.37亿人。对于稳健发展情景,《世界人口展望2022》的中方案预测中国人口在2030年达到14.17亿人,2035年达到14亿人,在2040年达到13.8亿人。本文以其预测值与年

平均增长率设置该情景下的人口规模参数。

(2) 经济发展的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年人均GDP的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果为 $C=0.0458<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故该模型可用于预测未来的人均GDP。对于加速发展情景,国际货币基金组织预测2030年中国人均GDP将达到2.56万美元,且林毅夫曾指出2035年前中国人均GDP的潜在增长率为8%,综合计算得出2022—2030年中国人均GDP的年平均增长速度约为8.68%<sup>[30]</sup>。王文等<sup>[31]</sup>假设美国人均GDP增速维持在每年2%,到2040年中国人均GDP约为美国的60%~70%,本文按照60%的占比进行估算并设置参数。对于稳健发展情景,按“十四五”规划中“到2035年实现经济总量或人均收入翻一番”进行倒算,到2035年中国人均GDP的平均实际增长速度为4.73%,本文将以此计算该情景下中国2022—2035年人均GDP的参数。张自然等<sup>[32]</sup>预测中国人均GDP将在2033年达到2.4万美元,到2050年达到4.1万美元。另外,陈锡康等<sup>[33]</sup>预计2031—2040年中国经济年平均增长速度将为4.4%。综合计算2036—2040年中国人均GDP的年

表6 三种情景下各影响因素的增速设定  
Tab.6 Growth rate of each influencing factor under three scenarios (%)

影响因素	情景设置	2022—2025年	2026—2030年	2031—2035年	2036—2040年
人口规模	基准情景	0.62	0.62	0.62	0.62
	加速发展情景	0.24	0.24	0.17	-0.18
	稳健发展情景	0.08	0.08	-0.24	-0.29
经济发展	基准情景	7.16	7.16	7.16	7.16
	加速发展情景	8.68	8.68	8.40	8.40
	稳健发展情景	4.73	4.73	4.73	3.80
城镇化率	基准情景	2.58	2.58	2.58	2.58
	加速发展情景	1.65	1.65	1.65	1.65
	稳健发展情景	0.87	0.87	0.57	0.70
能源强度	基准情景	-5.74	-5.74	-5.74	-5.74
	加速发展情景	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99
	稳健发展情景	-1.65	-1.65	-1.65	-1.65
家庭规模	基准情景	-1.09	-1.09	-1.09	-1.09
	加速发展情景	-1.35	-1.35	-1.35	-1.35
	稳健发展情景	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34
教育水平	基准情景	2.58	2.58	2.58	2.58
	加速发展情景	1.02	1.02	1.02	1.02
	稳健发展情景	0.65	0.65	0.51	0.51
汽车拥有量	基准情景	10.72	10.72	10.72	10.72
	加速发展情景	7.00	7.00	7.00	7.00
	稳健发展情景	5.70	5.70	5.70	5.70

平均增长速度将为3.8%,并基于此设置该情景下中国人均GDP的参数。

(3) 城镇化率的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年城镇化率的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果为 $C=0.0666<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故该模型可用于预测未来的城镇化率。对于加速发展情景,摩根士丹利发布的蓝皮书报告《中国城市化2.0:超级都市圈》预测,2030年中国城市化率将升至75%。2030年之后城镇化率参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,故本文将按照2030年及其以前的年均增长率来计算加速发展情景下中国2031—2040年城镇化率的参数。对于稳健发展情景,《城市蓝皮书:中国城市发展报告No.12》预测,2030年中国城镇化率将达到70%,2050年将达到80%左右。中国城市经济学会副会长魏后凯在采访中认为,据预测,到2035年中国城镇化率将接近72%,到2050年中国城镇化率将接近80%<sup>[34]</sup>。因此,本文参考其预测值设置稳健发展情景下城镇化率的参数。

(4) 能源强度的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年能源强度的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果为 $C=0.0621<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故该模型可用于预测未来的能源强度。对于加速发展情景,《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》与吴越涛<sup>[35]</sup>均预测中国能源消费总量在2030年将达到60亿tce左右。因此,本文将该情景下2030年中国能源消费量定为60亿tce,借以计算并设置能源强度的参数。由于2030年之后能源强度参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,故本文将按照2030年及其以前的年均增长率来计算加速发展情景下中国2031—2040年能源强度的参数。对于稳健发展情景,2023年9月4日,在2023服贸会能源转型与能源服务论坛中,中国工程院院士黄维和预测,到2040年,中国的能源需求将达到峰值,约为60亿tce。故本文参考其预测值计算中国的能源强度,并以此为基础进行稳健发展情景下的参数设置。

(5) 家庭规模的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年家庭规模的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果为 $C=0.1458<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故该模型可用于预测未来的家庭规模。对于加速发展情景,相关机构利用联合国发布的《世界人口展望2022》对中国家庭户均规模

进行预测,结果显示,到2030年中国家庭户均规模降至2.45人/户。由于2030年之后家庭规模参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,本文将按照2030年及其以前的年均增长率来计算该情景下中国2031—2040年家庭规模的参数。对于稳健发展情景,2020年10月20日,在北京大学国家发展研究院的“中国经济的远景与挑战”专题会议中,雷晓燕认为,到2050年中国平均家庭规模将降至2.51人/户。故本文参考其预测值设置稳健发展情境下家庭规模的参数。

(6) 教育水平的情景设置。对于基准情景,本文基于1995—2021年教育水平的原始数据,运用灰色预测模型进行预测。模型结果为 $C=0.2230<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故该模型可用于预测未来的教育水平。对于加速发展情景,根据岳昌君等<sup>[36]</sup>的预测结果,2035年中国财政性教育经费占GDP的比例将达到4.6%。2035年之后教育水平参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,因此,本文将按照2035年及其以前的年均增长率来计算该情景下中国2036—2040年教育水平的参数。对于稳健发展情景,胡咏梅等<sup>[37]</sup>预测,中国财政性教育经费占GDP的比例将在2030年达到4.23%,2035年达到4.34%。由于2035年之后教育水平参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,故本文将按照2030—2035年的年均增长率来计算该情景下2036—2040年教育水平的参数。

(7) 汽车拥有量的情景设置。对于基准情景,本文运用1995—2021年私人汽车拥有量的原始数据,并使用灰色预测模型进行预测。模型的结果为 $C=0.0601<0.35$ 、 $p=1.00>0.95$ ,故灰色预测模型可用于预测未来的汽车拥有量。对于加速发展情景,据清华大学汽车安全与节能国家重点实验室及清华大学中国车用能源研究中心专家预测<sup>[38]</sup>,中国汽车保有量在2030年将达到3.5亿~4.8亿辆,本文采用4.8亿辆作为该情景下汽车拥有量的参数。对于稳健发展情景,在2021年中国电动汽车百人会论坛上,王青预测,2030年中国汽车保有量约为4.3亿辆,故将稳健发展情景下2030年私人汽车拥有量设定为4.3亿辆。2030年之后私人汽车拥有量参数的相关预测内容较少且缺乏一定权威性,故本文将按照2030年以前的年均增长率来分别计算稳健发展和加速发展情景下中国2031—2040年私人汽车拥有量的参数。



### 3.3.3 趋势预测结果

为预测多要素影响下的中国家庭能源消费水平,本文以上述各个影响因素的参数设置为基础,综合计算得到三种情景下的家庭能源消费量,结果如图8所示。家庭能源消费量在加速发展情景下的预测值最高,在2040年达到94468.77万tce,而同期基准情景与稳健发展情景下的家庭能源消费量分别为65615.02万tce与61191.69万tce。随着经济的增长与生活水平的提高,未来中国家庭能源消费的增加趋势在一段时间内可能无法改变。具体而言,在加速发展情景下,中国家庭能源消费量预测值较高且增速较快,而在稳健发展情景下,家庭能源消费量相对较低且增长较缓。可见,在政府不干预或干预较少的情况下,家庭能源消费将快速增长,而在政府节能减排措施全面深入贯彻落实以及全体居民消费方式发生实质性改变的情况下,居民对各类能源的利用效率普遍提高,家庭能源消费的增长可得到有效抑制。另外,在基准情景下,家庭能源消费也呈现出缓慢上升的态势。近年来,随着中国绿色低碳高质量发展相关工作的不断落实,中国在目前政策条件下在合理控制家庭能源消费方面取得了成效,但仍有一定发展空间。因此,以当前中国经济社会发展的数据为基础,进而使得中国家庭能源消费的预测值在基准情景下呈现缓慢上升的趋势,且略高于稳健发展情景下的预测值。

## 4 结论与建议

本文以中国30个省级单元为样本,对中国家庭能源消费的时空特征进行了系统研究,并基于1995—2021年统计数据,构建空间计量模型以探讨

家庭能源消费的影响因素。进一步采用灰色预测模型与情景分析法预测多要素影响下中国家庭能源消费量。

从家庭能源消费的时空特征来看,一方面,在研究时段内,中国家庭能源消费量呈现上升趋势,家庭能源消费已占能源消费总量的1/10左右。家庭能源消费集聚类型的变化可能与经济发展、人口规模有关。同时,城乡家庭能源消费在消费结构上存在一定差距,但城乡人均家庭能源消费逐渐呈现趋同态势。另一方面,中国家庭能源消费结构逐渐呈现多样化、清洁化特征。分阶段来看,1995—2004年,煤炭居于核心地位,电力获得初步发展;2005—2012年,煤炭比重持续下降,能源结构渐趋多样;2013年以后,清洁能源比重提升,天然气占比仍需扩大。从家庭能源消费的影响因素与趋势预测来看,在影响因素方面,能源强度、人口规模、家庭规模、教育水平、经济发展、城镇化率与汽车拥有量都是家庭能源消费的重要影响因素,但在影响程度上存在差异。在趋势预测方面,研究发现,至2040年,三种发展情景下的中国家庭能源消费量均呈现上升趋势,稳健发展情景下家庭能源消费量相对较低且增长较缓。可见,随着政府节能减排政策的贯彻落实以及居民低碳消费理念的深入人心,家庭能源消费量的增长可得到有效制约。

根据上述研究结论,本文将主要从以下三方面提出对策建议:

(1) 通过时空特征分析发现,在研究时段内,中国家庭能源消费结构渐趋多样化与绿色化,但作为清洁能源的天然气的占比仍相对较低。因此,提高天然气的消费比重有助于优化中国家庭能源结构。一方面,扩大天然气覆盖范围。应加大天然气储备量,扩大供应区域,以实现天然气管道全覆盖,进而相应减少居民对煤炭、油品等能源的消费量,逐渐形成清洁低碳、安全高效的现代能源体系。另一方面,加强天然气管网系统建设。应加快天然气管网的建设和改造进度,进一步完善输配气管网建设,保障燃气供给能力。在满足居民用气需求的基础上,以液化天然气的运输方式努力实现偏远地区天然气全覆盖。

同时,城乡家庭能源消费结构存在一定差异,而且目前中国乡村家庭能源消费仍以煤炭消费为主,对乡村家庭能源消费结构提出政策建议具有一定的现实意义。一是增加分布式新能源,如户用屋

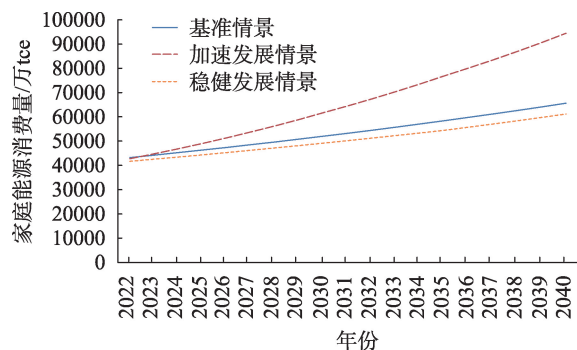


图8 三种情景下的家庭能源消费量

Fig.8 Household energy consumption under three scenarios

顶光伏、村级光伏电站等。具体而言,乡村可以积极推进屋顶分布式光伏开发,建设村级光伏电站与光伏新村,推广农光互补、渔光互补等模式,提升乡村用能清洁化水平。二是加强乡村电网建设与改造,需在合理供电范围内有序推动公用电网的延伸覆盖面积,通过合理配置分布式光伏和风电、储能、柴油发电机等建设改造可再生能源局域网。三是改造常规能源,发展集中式的沼气。目前,煤炭、秸秆等能源消费仍在乡村家庭能源消费中占有一定比例,故可变革传统煤炭使用方式,开发秸秆与牲畜粪便的集中沼气化利用水平,以减少环境污染与缓解乡村能源安全压力。

(2) 分析家庭能源消费的影响因素发现,能源强度是影响家庭能源消费的重要因素之一。能源强度作为能源利用技术水平的重要指标,随着能源强度的降低,家庭能源消费量也会出现下降。因此,提高能源利用水平有利于控制家庭能源消费量过快增长。一是推动技术进步。在该方面可通过提高产品生产部门的技术水平,以减少生产过程中造成的终端能源消费量。故企业可通过创新与应用先进技术,在消耗相同能源的同时生产更多产品,或者在生产相同产品时消耗更少能源,进而提高能源利用效率,降低单位产品能耗。二是提升能源监管效能。政府可监督有关部门落实能源消耗强度下降的目标,通过推广先进的节能技术和装备,提高能源利用效率。与此同时,政府还可通过完善能源消耗核算方法的相关制度,进而加强国家对能源供需、能源结构、能耗强度等统计的监测水平,为合理控制家庭能源消费总量提供可靠数据支撑。

(3) 本文发现,稳健发展情景下家庭能源消费增速能够得到有效抑制,这与政府政策的落实与居民消费观念的转变密切相关。基于此,本文提出相关建议以作参考。一是健全能源发展政策。可通过完善能源税费政策,进一步扩大能源税的计征范围,将一些高耗能、高污染的产品纳入能源消费税的征收范围。同时,还需完善与节能减排相关的税收政策,建立和完善生态补偿机制,加快推进环境保护税的立法工作,探索建立相对完善的绿色税收体系。通过政策的完善与落实控制家庭能源消费过快增长,为“双碳”目标的实现提供保障。二是将节能和环保理念深入落实到居民的生活中,积极推动全民节能减排。通过加强节能环保知识的宣传

和普及力度,进一步提高全民文化素质与转变居民消费观念,使得居民主动实施节能低碳的消费行为,进而有效控制家庭能源消费量的过快增长。

最后,本文尝试从家庭能源消费“需求端”层面探讨其影响因素与发展趋势,但在家庭能源消费的“供给端”层面进行的研究值得进一步深入和拓展。另外,中国现阶段正处于宏观经济调档换速、社会转型的关键时期,在此背景下,对于家庭能源消费的未来趋势也有必要从更多方面进行调研与讨论。随着中国经济的稳步增长,能源以及环境问题将更加突出,对家庭能源消费进行全方位深入研究,有助于实现“十四五”时期现代能源体系建设发展目标、推进碳中和与碳达峰战略的实施以及“美丽中国”的建设。

## 参考文献(References)

- [1] Musti S, Kortum K, Kockelman K M. Household energy use and travel: Opportunities for behavioral change [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(1): 49-56.
- [2] 张馨, 牛叔文. 城乡居民家庭生活能源消费需求的实证分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S1): 1-5. [Zhang Xin, Niu Shuwen. Empirical analysis of energy consumption demand in urban and rural households. China Population, Resources and Environment, 2013, 23 (S1): 1-5.]
- [3] 姜璐, 余露, 薛冰, 等. 青海省家庭能源消费结构地域特征 [J]. 经济地理, 2019, 39(8): 146-152, 176. [Jiang Lu, Yu Lu, Xue Bing, et al. Regional characteristics of household energy consumption structure in Qinghai Province. Economic Geography, 2019, 39(8): 146-152, 176.]
- [4] 曾静静, 张志强, 曲建升, 等. 家庭碳排放计算方法分析评价 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(10): 1341-1352. [Zeng Jingjing, Zhang Zhiqiang, Qu Jiansheng, et al. Analysis and evaluation of methods for household carbon emissions calculation. Progress in Geography, 2012, 31(10): 1341-1352.]
- [5] 牛云翥, 牛叔文, 张馨, 等. 家庭能源消费与节能减排的政策选择 [J]. 中国软科学, 2013(5): 45-55. [Niu Yunzhu, Niu Shuwen, Zhang Xin, et al. Policy options on fuel use, energy conservation and emission reduction in household sector. China Soft Science, 2013(5): 45-55.]
- [6] Wang Q S, Liu P, Yuan X L, et al. Structural evolution of household energy consumption: A China study [J]. Sustainability, 2015, 7(4): 3919-3932.
- [7] 姜璐, 黄耿志, 谢惠春, 等. 空间尺度视角下的家庭能源

- 消费研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(10): 1788-1798. [Jiang Lu, Huang Gengzhi, Xie Huichun, et al. A review of household energy consumption research from the perspective of spatial scale. *Progress in Geography*, 2021, 40(10): 1788-1798. ]
- [8] 郑新业, 魏楚, 虞义华, 等. 中国家庭能源消费研究报告 (2016) [M]. 北京: 科学出版社, 2017. [Zheng Xinye, Wei Chu, Yu Yihua, et al. *Chinese household energy consumption report (2016)*. Beijing, China: Science Press, 2017. ]
- [9] Zhou Q, Shi W. Socio-economic transition and inequality of energy consumption among urban and rural residents in China [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 190: 15-24.
- [10] Jiang L, Shi X N, Wu S, et al. What factors affect household energy consumption in mega-cities? A case study of Guangzhou, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132388. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132388.
- [11] Sun C W, Ouyang X L, Cai H B, et al. Household pathway selection of energy consumption during urbanization process in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 84: 295-304.
- [12] 谢伦裕, 陈飞, 相晨曦. 城乡家庭能源消费对比与影响因素: 以浙江省为例 [J]. 中南大学学报(社会科学版), 2019, 25(6): 106-117. [Xie Lunyu, Chen Fei, Xiang Chenxi. Urban and rural residential energy consumption and the determinants: Evidences from Zhejiang Province. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2019, 25(6): 106-117. ]
- [13] 吴巧生, 陈亮, 张炎涛, 等. 中国能源消费与GDP关系的再检验: 基于省际面板数据的实证分析 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008(6): 27-40. [Wu Qiaosheng, Chen Liang, Zhang Yantao, et al. Retesting the granger causality between energy consumption and GDP in China: Based on the provincial panel data analysis. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2008(6): 27-40. ]
- [14] Zhang Y J, Bian X J, Tan W P, et al. The indirect energy consumption and CO<sub>2</sub> emission caused by household consumption in China: An analysis based on the input-output method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 69-83.
- [15] Yang R L, He J M, Li S, et al. Different effects of main influence factors on household energy consumption in three typical rural villages of China [J]. *Energy Reports*, 2018, 4: 603-618.
- [16] 刘惠, 王真, 曹丽斌, 等. 基于LEAP模型的鹤壁市农村生活碳排放研究 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 25-35. [Liu Hui, Wang Zhen, Cao Libin, et al. Research of rural living carbon emission in Hebi based on LEAP model. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(11): 25-35. ]
- [17] 徐智邦, 王中辉, 周亮, 等. 中国“淘宝村”的空间分布特征及驱动因素分析 [J]. 经济地理, 2017, 37(1): 107-114. [Xu Zhibang, Wang Zhonghui, Zhou Liang, et al. The spatial distribution characteristics and driving factors of "Taobao village" in China. *Economic Geography*, 2017, 37(1): 107-114. ]
- [18] 刘思峰, 邓聚龙. GM(1, 1)模型的适用范围 [J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(5): 121-124. [Liu Sifeng, Deng Julong. The range suitable for GM(1, 1). *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2000, 20(5): 121-124. ]
- [19] 庄汝龙, 宓科娜. 能源消费、结构变化与空气质量: 基于省际面板数据的实证检验 [J]. 地理研究, 2022, 41(1): 210-228. [Zhuang Rulong, Mi Kena. Energy consumption, structural changes and air quality: Empirical test based on inter-provincial panel data. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 210-228. ]
- [20] 丁永霞, 彭守璋. 中国家庭能源消费的空间分布及影响因素研究 [J]. 资源开发与市场, 2020, 36(4): 366-370. [Ding Yongxia, Peng Shouzhong. Study on spatial pattern and influencing factors of household energy consumption in China. *Resource Development & Market*, 2020, 36(4): 366-370. ]
- [21] 畅华仪, 何可, 张俊飏. 挣扎与妥协: 农村家庭缘何陷入能源贫困“陷阱” [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 11-20. [Chang Huayi, He Ke, Zhang Junbiao. Energy poverty in rural China: A psychological explanations base on households. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(2): 11-20. ]
- [22] 王蕾, 魏后凯. 中国城镇化对能源消费影响的实证研究 [J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1235-1243. [Wang Lei, Wei Houkai. The impacts of Chinese urbanization on energy consumption. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1235-1243. ]
- [23] 孙涵, 王洪健, 彭丽思, 等. 中国城镇居民生活完全能源消费影响因素的实证研究 [J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2015, 17(3): 53-59. [Sun Han, Wang Hongjian, Peng Lisi, et al. Empirical study of influence factors of total energy consumption in urban residents' life in China. *Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences)*, 2015, 17(3): 53-59. ]
- [24] 左玲. 东部城镇家庭能源消费影响因素分析 [J]. 市场研究, 2019(4): 53-55. [Zuo Ling. Analysis of influencing factors of household energy consumption in eastern urban areas. *Marketing Research*, 2019(4): 53-55. ]
- [25] 崔一澜, 刘毅, 诸葛承祥. 城市居民生活能源消费研究进展综述 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 117-124. [Cui Yilan, Liu Yi, Zhuge Chengxiang. Review



- of studies on energy consumption of urban households. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26 (12): 117-124. ]
- [26] 周文媛. 新中国成立以来我国新能源政策回顾与展望 [J]. 求知导刊, 2016(10): 21-22. [Zhou Wenyuan. Review and prospect of China's new energy policy since the founding of the People's Republic of China. *Journal of Seeking Knowledge Guide*, 2016(10): 21-22. ]
- [27] 闫东升, 孙伟, 冯月. 城乡收入差距时空演变与驱动因素的空间计量研究: 以长江三角洲为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1040-1054. [Yan Dongsheng, Sun Wei, Feng Yue. Spatial-temporal evolution of urban-rural income gap and driving factors based on spatial econometric models: A case study of the Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(5): 1040-1054. ]
- [28] 韩峰, 庄宗武, 阳立高. 中国制造业出口价值攀升的空间动力来源: 基于要素供给和市场需求的综合视角 [J]. 中国工业经济, 2021(3): 61-79. [Han Feng, Zhuang Zongwu, Yang Ligao. Sources of spatial motivation for export value climbing of Chinese manufacturing: Comprehensive perspective based on factor supply and market demand. *China Industrial Economics*, 2021(3): 61-79. ]
- [29] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 等. 基于IPAT模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测 [J]. 资源科学, 2016, 38 (12): 2316-2325. [Zhu Yuen, Li Lifan, He Sisi, et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis. *Resources Science*, 2016, 38(12): 2316-2325. ]
- [30] 纪思清. 专访林毅夫: 中国今年实际经济增长或超6%, 2030年有望成世界第一大经济体 [EB/OL]. 2023-05-24 [2023-09-05]. <https://www.nse.pku.edu.cn/sylm/xwsd/530153.htm>. [Ji Siqing. Interview with Lin Yifu: China's real economic growth may exceed 6% this year, and it is expected to become the world's largest economy by 2030. 2023-05-24 [2023-09-05]. <https://www.nse.pku.edu.cn/sylm/xwsd/530153.htm>. ]
- [31] 王文, 卞永祖, 刘延洁. 我国人均GDP排名变动情况及人均GDP预测 [J]. 当代金融研究, 2018(6): 18-38. [Wang Wen, Bian Yongzu, Liu Yanjie. Ranking and forecasting China's GDP per capita. *Journal of Contemporary Financial Research*, 2018(6): 18-38. ]
- [32] 张自然, 张平, 刘霞辉, 等. 中国经济增长报告 (2019—2020): 面向2035年的高质量发展 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2020. [Zhang Ziran, Zhang Ping, Liu Xiahui, et al. *Annual report on China's economic growth (2019–2020): High quality development face 2035*. Beijing, China: Social Sciences Academic Press (China), 2020. ]
- [33] 陈锡康, 杨翠红, 祝坤福, 等. 2023年中国经济增长速度的预测分析与政策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38 (1): 81-90. [Chen Xikang, Yang Cuihong, Zhu Kunfu, et al. Forecast of China's economic growth rate in 2023 and policy suggestions. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(1): 81-90. ]
- [34] 郑丹. 研究预测: 2035年我国城镇化率有望达到72% [EB/OL]. 2020-10-31 [2023-09-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1682059185458788915&wfr=spider&for=pc>. [Zheng Dan. Research predicts: China's urbanization rate is expected to reach 72% in 2035. 2020-10-31 [2023-09-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1682059185458788915&wfr=spider&for=pc>. ]
- [35] 吴越涛. 未来10~20年中国能源消费总量预测 [C]// 中国国际经济交流中心. 中国智库经济观察(2013年第2辑). 北京: 社会科学文献出版社, 2014: 119-124. [Wu Yuetao. Forecast of China's total energy consumption in the next 10 to 20 years // China Center for International Economic Exchanges. *China think tank economic observation (Vol. 2 in 2013)*. Beijing, China: Social Sciences Academic Press, 2014: 119-124. ]
- [36] 岳昌君, 邱文琪. 面向2035的我国高等教育规模、结构与教育经费预测 [J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2021, 39(6): 1-16. [Yue Changjun, Qiu Wenqi. The scale and structure of higher education and public educational funding in China: An empirical prediction till 2035. *Journal of East China Normal University (Educational Sciences)*, 2021, 39(6): 1-16. ]
- [37] 胡咏梅, 刘雅楠. 我国公共教育投资比例预测: 基于我国人口结构变化趋势和国际比较的分析 [J]. 教育与经济, 2023, 39(2): 41-52. [Hu Yongmei, Liu Yanan. The prediction of the proportion of public education investment in China: An empirical study based on the changing trends of China's population structure and international comparison. *Education & Economy*, 2023, 39(2): 41-52. ]
- [38] 2030年我国乘用车保有量将达4.8亿辆 [J]. 技术与市场, 2013, 20(1): 143. [In 2030, the number of passenger cars in China will reach 480 million. *Technology & Markets*, 2013, 20(1): 143. ]

## Spatiotemporal characteristics, influencing factors, and trend prediction of household energy consumption in China

ZHUANG Rulong<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, MI Kena<sup>2\*</sup>, ZHANG Chaoyang<sup>1</sup>, ZHI Menglu<sup>1</sup>

(1. Business School, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. School of International Trade & Economics, Ningbo University of Finance & Economics, Ningbo 315175, Zhejiang, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of people's living standards and increasing income, household energy consumption has become an important growth point of energy consumption in China. Grasping the spatiotemporal characteristics of household energy consumption and identifying the influencing factors and development trends of household energy consumption will help to accelerate the construction of a modern energy system, promote low-carbon energy transformation, and achieve the dual carbon goals. This study took household energy consumption as the research object and systematically explored its spatiotemporal evolution characteristics in China. Furthermore, it used the spatial econometric models, grey prediction, and scenario analysis to examine the influencing factors and development trends of household energy consumption. The study found that: 1) From the perspective of spatiotemporal characteristics, household energy consumption showed an upward trend from 1995 to 2021. Meanwhile, the gap in energy consumption between urban and rural households was gradually widening, but their per capita household energy consumption showed a trend of convergence. 2) From the perspective of proportion and structure, household energy consumption accounts for about one tenth of the total energy consumption, and the household energy consumption structure showed a trend of diversification and clean development. 3) From the perspective of influencing factors, energy intensity, population size, household size, education level, economic development, urbanization rate, and car ownership were important influencing factors for household energy consumption, but the degree of impact varied. 4) From the perspective of future trends, China's household energy consumption will continue to grow by 2040, and under the scenario of steady development, the growth rate is slower, indicating that the implementation of government policies and the popularization of green consumption concept among residents have a positive effect on controlling the growth of household energy consumption. Based on the results of this research, this article argued that the energy consumption structure should be adjusted by increasing the proportion of natural gas consumption, the energy consumption structure of rural households should be optimized, and the energy development policy should be further improved and the consumption concept of residents should be changed to control the excessive growth of household energy consumption.

**Keywords:** household energy consumption; spatiotemporal characteristics; influencing factors; trend prediction; China