

引用格式: 韩晓, 魏楚, 吴施美. 中国农村居民生物质能消费估计[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1817-1829. [Han X, Wei C, Wu S M. Estimation of biomass energy consumption in rural China[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1817-1829.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.09

中国农村居民生物质能消费估计

韩晓¹, 魏楚², 吴施美³

(1. 中国宏观经济研究院产业经济与技术经济研究所, 北京 100038; 2. 中国人民大学应用经济学院, 北京 100082; 3. 湖南大学经济与贸易学院, 长沙 410079)

摘要:【目的】农村能源问题事关乡村振兴战略、双碳战略实施和能源资源安全,但由于农村生物质能统计系统的不完善,导致农村能源家底尚未摸清,由此妨碍了科学研究和精准决策。弥补现有能源统计数据的缺失,可为后续经验研究提供可信的数据基础和决策分析依据。【方法】本文依赖已有微观入户大样本调查数据,整合多源异构数据形成中国农村家庭能源消费微观数据集,首次引入贝叶斯时空模型对中国农村生物质能历史消费数据进行估计,重构1992—2016年中国农村生物质用量序列。【结果】①1992—2016年,农村生物质能用量持续下降,从1992年1.95亿t标准煤下降到2016年1.25亿t标准煤,年均降幅为1.7%。“能源消费革命”提出后,中国农村生物质能用量下降幅度明显加快,年均降幅达到3.8%,说明“能源消费革命”卓有成效,极大地推动了农村能源消费转型。②农村使用生物质能的家庭数量也在持续减少,使用薪柴和秸秆的家庭减少了近50%。③在区域层面,生物质能使用主要集中在西部和东北地区,这两个区域薪柴消费量占到全国消费量的80%左右,秸秆消费量占比约为65%~70%。【结论】本文的估计思路和方法在一定程度上可以解决学术研究中面临的数据缺失难题,研究结论可为提升偏远地区高质量用能水平提供理论支撑。

关键词: 农村能源; 生物质消费; 多源异构数据库; 统计推断; 贝叶斯时空模型; 中国

DOI: 10.18402/resci.2023.09.09

1 引言

农村能源问题已经得到中共中央、国务院的高度重视。2018年中央一号文件《中共中央 国务院关于实施乡村振兴战略的意见》中明确提出,要“推进农村可再生能源开发利用”。在2022年中共中央一号文件《关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见》中再次明确,要“推进农村光伏、生物质能等清洁能源建设”。在2022年中央农村工作会议上,更是提出了要“发展生态低碳农业”这一新要求。农村能源革命在乡村振兴的宏伟蓝图中占据重要位置,其重要性体现在三方面:①农村生物质能是农民生产、生活的重要要素,是农民生活水平提升、改善健康环境状况的核心指标,是防止返贫的重要物质保障。②中国农村生物质资源丰富,包

括农业废弃物、林业废弃物、畜禽粪便、有机废水和废渣等。如何高效处置、循环利用这些丰富的生物质能源,是推动农业产业现代化、降低农村生物质引致的环境污染的重要途径。③中国已正式承诺2030年碳达峰目标,并力争实现2060年碳中和。生物质能作为重要的“零碳”能源,将日益发挥重要作用。生物质能源燃料是目前唯一能大规模替代石油燃料的能源产品,大力发展生物质资源能源化是化解中国“十四五”期间能源安全问题的重要途径^[1,2]。如何盘活这一具有巨大减碳潜力的资源,不仅事关乡村振兴战略,更事关双碳战略实施,也是应对党的二十大报告中提出的“确保能源资源安全”的重要体现。

研究农村能源消费问题,并由此制定农村能源

收稿日期: 2023-02-02 修订日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(72261147760; 72103061; 71622014); 全国统计科学研究重大项目(2019LD09)。

作者简介: 韩晓,女,内蒙古乌兰察布人,博士,助理研究员,研究方向为能源经济学。E-mail: xiaohanyouxiang@gmail.com

通讯作者: 魏楚,男,湖北公安人,博士,教授,研究方向为产业经济学、能源与气候变化经济学。E-mail: xiaochu@ruc.edu.cn

革命战略,首先必须要准确反映农村用能情况。揭示农村能源使用的实际情况需要以准确详细的用能数据做支撑。由于农村地区有大量农牧民使用生物质做燃料,准确核算农村生物质用量就显得尤为重要。然而从目前农村生物质统计工作来看,可以为科学研究提供支撑的基础数据仍然严重匮乏,主要原因是由于生物质能类型多样,且缺乏集中交易市场,导致系统性的生物质官方统计体系难以建立。从消费侧来看,国家统计局对工业、交通等部门的能源统计有较为成熟的体系,但对居民部门的用能统计并不完善。微观层面,统计局城调队在历年城镇居民收入支出调查中,有相应的商用能源支出问卷;早年农调队对农村非商品能源生活消费情况进行统计,但2008年后停止公布该数据。宏观层面,统计局发布的能源平衡表并未将生物质能消费核算纳入能源消费总量之中,这与国际机构的统计体系并不一致,例如国际能源署 IEA 是将生物质能归类于可再生能源,进而纳入到一次能源消费总量中。目前,中国能源平衡表的其他能源仅包括城市生活垃圾、生物质废料、其他工业废料和其他燃料、生物汽油、生物柴油及沼气等,并未涵盖农村最常见的薪柴、秸秆、禽畜粪便等燃料来源。从供给侧来看,国家农业农村部、国家林业和草原局、中国畜牧业协会和中国沼气学会分别对农作物秸秆资源、林业生物质资源和畜禽粪便资源的信息进行收集和统计,住建部则是对生活垃圾数据进行了统计,并公布在《中国城市建设统计年鉴》之中。但该类信息统计工作相对分散,数据资料未得到有机整合,并且各单位间缺乏有效的沟通共享机制,数据孤岛现象严重。相应地,各机构统计口径不一致,导致统计结果存在差别甚至差别很大,不适用于综合决策与分析。

数据质量直接决定了研究结论的科学性、可靠性、创新性和可推广性^[3]。为弥补官方统计数据的不足,学者们围绕农村家庭用能情况开展了大量工作,主要贡献集中在以下两个方面。①通过实地调查直接反映局部农村用能图景。这类研究通过获取一手数据,客观描述了一定时期某些地区家庭用能的实际情况^[4-7]。这类研究虽然能够对官方统计

数据进行有效补充,但是由于其调查方法和抽样技术不同,并且所有调查在时空上都具有很大的局限性,导致单独来看,每篇研究都缺乏代表性^[8,9]。牛叔文等^[10]将这类研究进行汇总,样本总量达到12.23万,地域分布覆盖中国31个省的700多个县镇,时期跨越20多年。但是,其没有考虑到微观个体间存在显著的异质性,而是用代表性论文的人均用量均值作为总量核算基础。显然,收入更高的家庭倾向于使用更为清洁的能源^[11],因此,选取的代表性论文调查的是发达地区还是贫困地区将会对总量核算产生显著影响。②通过估算能源需求函数测算全国生物质能用能总量。由于数据的不可得性和方法的不确定性,这方面的研究数量很少。早在20世纪90年代,Sun^[12]基于能源需求函数估算了1990年中国农村实际能源消费情况。他认为,同一地区人均能源使用量主要取决于温度和收入水平这两个变量,因此,农村人均能源使用量可以通过已知的城镇人均能源使用量推导出来。Sun以城镇人均用能来反推农村人均用能,忽略了城乡间限制用能的不仅是收入差异,能源可达性差异也是一个重要因素。尽管Sun的分析存在偏误,但是这种通过构建人均能源需求函数来间接推断用能总量的方法给后来生物质能的核算带来了启发。Tao等^[13]采用上述研究思路,基于一个全国典型调查的4年回忆数据估算了1992—2012年中国农村家庭生物质能用能情况。Peng等^[14]以类似的方式估算了2010年中国农村固体燃料用能总量。

上述第一类文献虽不能全面反映生物质能的历史消费特征,但为重构生物质能历史消费序列提供了原材料;第二类文献虽估算了全国能源消费量,但并没有形成一个连续的时间序列,因此无法呈现农村生物质使用量的变化趋势。为还原农村生物质历史消费情况,解决数据缺失难题,本文在第一类研究的基础上构建中国农村家庭能源消费微观数据库,遵循第二类研究的思路,基于文献中对农村家庭能源消费影响因素的研究,构建贝叶斯框架下家庭能源消费的时空模型,从而还原农村家庭生物质能消费的历史事实,重构1992—2016年的历史消费序列,弥补现有能源统计数据的缺失,为

2023年9月

后续的研究提供可信的数据基础和决策分析依据。

2 模型与数据

2.1 模型选择依据

对于如何解决能源统计数据误差的历史遗留问题,主要方法可分为3类:第一种思路直接根据经济普查数据进行修正。例如,国家统计局根据第三次全国经济普查数据,系统上调了2000—2013年间的煤炭消费量和煤炭产量。这种方法尽管能够部分修正能源数据问题,但是经济普查每五年才会进行一次,在数据修正方面会存在严重的时滞问题。第二种方法汇总社会调查中涉及的能源数据,逐年修正。这种方法尽管解决了时滞问题,但所面临的困境是几乎所有的调查都是基于局部地区和特定时间进行的,并没有全国层面的长时间序列可供参考。第三种则是利用数理方法对能源数据进行统计推断,其中有代表性的是一些学者提出采用人工智能(AI)和特定机器学习(ML)方法来估算能源使用量,可为弥补能源统计数据缺失提供参考借鉴。代表性文献有Yuan等^[15]采用偏最小二乘回归和随机森林对影响农村家庭采暖能耗相关特征进行排序,通过比较模型均方根误差变异系数(CVRMSE)等指标选择最佳特征,并基于支持向量回归建立输入子集模型,对农村家庭采暖煤炭消耗量进行模拟预测。Wang等^[16]建立3种基于机器学习算法的建筑能耗预测模型,并利用平均绝对百分误差(MAP)和均方根误差(RMSE)指标评价模型预测结果的准确性。Tian^[17]将家庭能源消费从微观设备层面聚合到宏观区域层面,以相关影响因素为输入项预测农村家庭对生物质的需求量。

为此,本文将能源需求函数与机器学习算法相结合,以微观调查数据为基础,基于文献中已识别的关键影响因素,构建贝叶斯时空模型,对能源缺失数据进行统计推断。与其他方法相比,基于贝叶斯时空模型的统计推断方法具有以下3点好处:①由于以逐年的调查数据为依据,从而能够克服经济普查的数据时滞问题;②模型建立在微观个体的基

础上,从而能够考虑个体间异质性问题;③贝叶斯时空模型通过数据分布和时空关联预测缺失数据,既能够避免对历史趋势的严重依赖,又可考虑并测度更多的不确定性,提高预测精度。进一步地,贝叶斯时空模型还能克服能源消费数据高时空相关性导致的非独立同分布问题。

除了上述方法上的优势外,本文采用贝叶斯时空模型还主要基于生物质能源消费数据的特征。其主要基于如下两方面的现实考量:

①对能源历史消费数据的还原需要基于文献和统计资料中已有的数据,而这些数据在时间上、空间上往往具有不连续性,想要得到全国层面完整的消费序列,需要在时空上进行补齐。由于中国相似的文化规范,各省居民在能源消费上具有较强的跨省相关性,而且由于行为惯性,消费量在随后几年也具有很强的时间依赖性,这启发我们可以采用经典的时空插值方法,根据已有的调查数据来推测出时空上任意点位的数据^①。在多种时空模型中,贝叶斯时空模型能够对时空变异规律不确定的时空数据进行建模,而且能够融合不同来源的数据,在时空数据预测方面有广泛应用^[18,19]。②由于能源在基层大都是企业或家庭的“自家事”,缺乏精确统计的约束力,统计数据填写随意性大,精度不高,能源调查数据易受调查方式、抽样方法、测量误差等多种因素的影响。面对这些不确定性,不应该期望点估计能够得到合理的预测值,而是应该关注于预测在某个邻域的时间和空间尺度上总体的分布情况,基于某种统计方法,获得在时间或空间维度上预测和预测误差的现实度量,这在一定程度上类似于贝叶斯框架下的时空建模。

2.2 模型设定

贝叶斯时空模型可以通过设定合理的先验分布引入专家知识,然后在给定的协变量下,通过数值模拟的方法得到待插变量在不同时空的联合后验分布,通过使后验概率最大化能够模拟出特定时间、特定空间的预测值^[20]。贝叶斯时空模型的具体

① 在应用贝叶斯模型时,我们首先需要构建30个省份(因数据缺失,不包括西藏、港澳台地区)的邻接矩阵,在空间维度上,例如,若已知江苏省(编号17)的生物质使用量,则可以根据BYM模型推断出与之相邻的浙江省(编号23)、山东省(编号14)等省份的生物质使用量,依次类推,则可以根据部分省份样本推断出全国生物质消费趋势。

预测过程如下:令 $Y_{st} = \{y_{st} | (s, t) \in D \subset \mathbb{R}^2\}$ 表示一组来自时空维度的观测结果,其中 y_{st} 表示在空间 s 和时间 t 观测到的结果值;令 Y_{st}^* 表示一组来自相同时空维度,需要预测的结果值。我们假定 Y_{st} 和 Y_{st}^* 可以同时建模为具有多维参数 ψ 的后验分布,即 $(Y_{st}, Y_{st}^*)^T \sim P(\psi | Y_{st}^T, Y_{st}^{*T})$, 其中 T 表示矩阵转置符号。要预测 Y_{st}^* , 我们需要知道估计量 $\hat{\psi}$, 而 $\hat{\psi}$ 可以通过极大似然估计得到, 即 $\hat{\psi} = \arg \max_{\psi} p(Y_{st}; \psi)$, 其中 $p(Y_{st}; \psi)$ 是 Y_{st} 密度函数。得到 $\hat{\psi}$ 后, 进一步通过估计 Y_{st}^* 的条件均值得到预测值 \hat{Y}_{st}^* , 即 $\hat{Y}_{st}^* = E(Y_{st}^* | Y_{st}; \psi = \hat{\psi})$ 。上述预测过程的流程图如图1所示。

本文采用BYM(Besag-York-Mollié)空间模型^[21]和线性参数化动态趋势^[22]构建贝叶斯时空模型(Bayesian Spatiotemporal Model, BSM)。BYM是目前最成熟、应用最广的基于贝叶斯估计的空间回归模型,该模型考虑到数据可能在空间上相关,并且邻近区域的观测结果可能比较远区域的观测结果更相似,因而包括用于空间自相关的内在条件自回归(ICAR)部分以及用于空间非结构化的异质性随机效应部分。其基本思想是运用邻域结构平滑数据的空间随机效应,以及对不相关噪声进行建模的非结构化处理,进而得到每个地理区域邻近估计值^[23],从而能够有效应对空间非平稳性数据特征。农村生物质收集使用在空间上受地理区位、气候条件以及经济因素影响,很可能存在空间非平稳性特征,基于子区域的邻近推断估计可有效降低空间非平稳性影响,从而对粗糙的及缺失的生物质使用数据有更稳健的参数估计。由于能源消费在时间上具

有较强的连续性,因此,在还原能源消费序列时,引入一个参数化的时间趋势项,并将该趋势项分解为由社会进步导致的共同趋势和因地区差异带来的不同趋势。特定区域的时间趋势项可有效减轻生物质使用数据空间非平稳性的影响,提高模型预测能力。上述时空模型的组合设定既考虑了时间和空间的异质性,又考虑了时空的交互影响,信息量更丰富,包含的变异可能性更多,可提高模型的估计精度。

具体地,本文设定的时空模型为如下形式:

$$Y_{st} = b_0 + u_s + v_s + \text{temporal}_{st} \quad (1)$$

式中: b_0 是截距项; u_s 和 v_s 分别表示结构化和非结构化的空间效应; temporal_{st} 表示时空交互效应。各分项具体定义如下:

结构化空间效应 u_s 服从条件正态分布,即:

$$u_s | u_{-s} \sim \text{normal} \left(\tau_s + \frac{1}{\#N_s} \sum_{j=1}^n a_{sj} (u_j - \tau_j), \omega_s^2 \right) \quad (2)$$

式中: u_s 、 u_j 分别表示地区 s 和地区 j 的空间结构效应; u_{-s} 表示其他地区空间结构效应; τ_s 、 τ_j 分别表示地区 s 和地区 j 的空间结构效应均值; ω_s^2 表示地区 s 的方差,与临近地区的个数成反比。 a_{sj} 是邻接矩阵的元素,如果地区 s 和地区 j 临近,则 $a_{sj} = 1$, 否则 $a_{sj} = 0$ 。

非结构化空间效应 v_s 服从正态分布,即:

$$v_s \sim \text{normal}(0, \sigma_v^2) \quad (3)$$

时空交互效应采用线性参数化形式,即:

$$\text{temporal}_{st} = (\gamma + \delta_s)t \quad (4)$$

式中: γ 表示全局效应; δ_s 识别时空交互影响,且设定 δ_s 服从正态分布。若 $\delta_s < 0$, 意味着特定地区 s

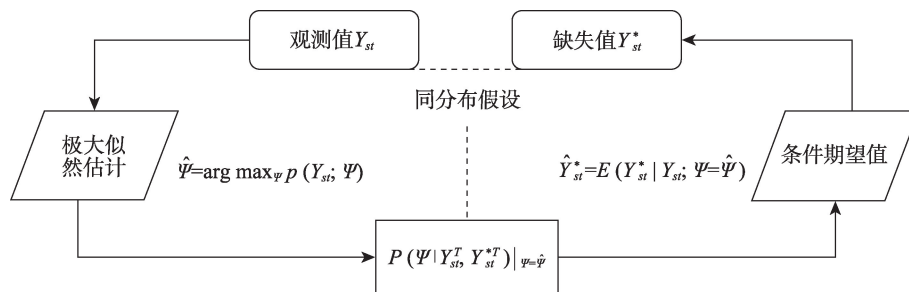


图1 贝叶斯统计推断框架

Figure 1 Framework of Bayesian statistical inference

2023年9月

的时间趋势小于平均趋势;若 $\delta_s > 0$ 意味着特定地区 s 的时间趋势大于平均趋势; $\delta_s = 0$ 意味着特定地区 s 的时间趋势和平均趋势趋同。

基于贝叶斯时空模型,本文采用两步法对生物质历史序列进行统计推断,第一步,估计生物质能各省份历史采用率;第二步,估计生物质能历史人均使用量。第一步中,是否使用某类生物质能源 $ydum_{st}$ 属于二元变量,观测数据 $ydum_{st}$ 以及需要预测的缺失数据 $ydum_{st}^*$ 服从伯努利分布,即 $(ydum_{st}, ydum_{st}^*)^T | \theta_{st} \sim \text{binomial}(\theta_{st}, n)$, 为此构建贝叶斯时空框架下的 Probit 模型,即:

$$Pr(\theta_{st}) = \alpha_0 + \alpha X + u_s + v_t + \text{temporal}_{st} \quad (5)$$

式中: θ_{st} 表示 s 省的家庭在 t 年对某类生物质能源平均采用率的集合,利用观测数据 $ydum_{st}$ 得到 $\hat{\theta}_{st}$ 后,就可以得到是否使用某类生物质能的后验分布,从而在给定协变量下,可以得到 $ydum_{st}^*$ 的估计值。

第二步中,设定使用某类生物质能的家庭,其消费量的对数形式 $\log(y_{st})$ 近似服从正态分布,即 $(\log(y_{st}), \log(y_{st}^*))^T | \eta_{st} \sim \text{normal}(\eta_{st}, \sigma_e^2)$, 为此构建贝叶斯框架下的对数回归模型,即:

$$\eta_{st} = \beta_0 + \beta X + u_s + v_t + \text{temporal}_{st} \quad (6)$$

式中: η_{st} 表示 s 省的家庭在 t 年对某类生物质能源的平均使用量,得到 η_{st} 的估计值后,就可以得到某类生物质使用量的后验分布,从而通过估计 y_{st}^* 的条件均值就可以得到缺失值 y_{st}^* 的估计值。

式(5)、(6)中,影响家庭能源消费的协变量 X , 根据文献,主要选取两类变量:一类是与家庭特征相关的变量,具体包括家庭人口(f_size)、家庭人均耕地面积(r_land)以及家庭收入(f_inc);另一类是和现代能源接入相关的基础设施变量,本文选取乡村人均公路里程(r_road)作为代理变量。乡村人均公路里程越多表明该地区交通运输状况越好,煤炭、液化石油气等能源品相对更容易运输到乡村地区。现代能源品可获得性提高会对生物质消费产生替代作用。

除极少数特殊情况,贝叶斯模型没有闭合形式的似然函数表达式^[24], 因此,需要进行数值近似,备

选的方法有马尔科夫链的蒙特卡洛模拟(MCMC)^[25] 以及集成嵌套拉普拉斯算法(INLA)^[26]。由于在面对大型数据集高纬度的时空复杂性时,蒙特卡洛模拟很难快速收敛,因此,本文采用集成嵌套拉普拉斯算法进行数值模拟。这种方法基于非抽样的数值近似,采用数学积分而不是模拟的方法计算所有参数和每个随机效应的边际后验分布以及联合后验分布。

本文分别对各类能源品(秸秆、木柴、沼气)的采用率和人均使用量进行估计和预测。在推断出缺失的各省户均能源消费量和能源采用率后,在省级层面加总得到全国能源消费量。具体地,全国生物质能使用量 NE 可通过如下公式计算得到:

$$NE = \sum_{j=1}^4 \sum_{s=1}^{31} \hat{y}_{sj} \times hhold_{sj} \times factor_j \quad (7)$$

式中: \hat{y}_{sj} 表示 s 省 j 种能源的户均消费量; $hhold_{sj}$ 表示 s 省使用 j 种能源的家庭户数; $factor_j$ 表示能源品 j 的折标系数^②。

2.3 数据源

本文汇总多位学者历次科学调研的成果并加入到中国住宅能源消费调查(CRECS), 利用计算机技术将多源异构数据进行整合, 解决数据抽样代表性问题、数据准确性问题以及数据标准化问题后, 在此基础上建立统一完善的全国农村家庭能源消费数据库。最终构建的中国农村家庭能源消费微观数据库覆盖中国 30 个省份(除西藏、港澳台地区外) 29278 户农村家庭、时间跨度达 25 年, 变量包括家庭人口、家庭收入、户主年龄等社会人口学特征以及表征能源可达性的代理变量, 如人均公路里程等, 能源消费包括电力、天然气、煤炭、秸秆、沼气等 5 类常见能源品。

最终包括的数据源有以下 4 类: 一是 CRECS (2012—2014、2016 年) 数据库, 纳入本文的研究样本有 19131 户农村家庭, 覆盖中国 28 个省(除西藏、新疆、海南、港澳台地区外)。第二个来源是王效华等^[4,27,28] 的系列调查(1992—1996、2008、2009、2015 年); 其中, 1992—1996 年主要针对江苏扬中地区进行调查研究, 共收集样本 1920 户农村家庭; 2008 年

② 秸秆折标系数为 0.5, 木柴折标系数为 0.571, 沼气折标系数为 0.714。

与世行合作开展研究,调查地区覆盖中国8个省份(河北、江苏、福建、河南、湖北、甘肃、重庆、吉林),收集农村样本1438户家庭;2009年针对江苏9个地级市,共收集4145户农村家庭能源消费量。第三个来源是魏涛远等^[29]在2010年对三省(山西、浙江、贵州)的调查数据,共收集2113户农村家庭样本。第四个来源是牛叔文等^[5,6]2007年的甘肃调查,共包括农村样本187户;2009年的甘肃调查,包括农村样本344户。

3 结果与分析

3.1 重构生物质能历史消费序列

表1给出了1992—2016年农村家庭生物质能源消费的历史估计序列。总体来看,生物质消费量

表1 1992—2016年农村家庭各类生物质能源历史消费情况(百万t标准煤)

Table 1 Historical consumption of each type of biomass energy in rural households, 1992-2016 (Mtce)

年份	秸秆	木柴	沼气	总计
1992	180.10	14.89	0.41	195.41
1993	168.02	16.79	0.43	185.24
1994	161.29	18.85	0.50	180.64
1995	157.51	21.24	0.60	179.35
1996	152.34	23.84	0.71	176.89
1997	150.66	26.35	0.82	177.83
1998	139.01	28.08	0.93	168.02
1999	135.29	31.49	1.08	167.86
2000	133.19	37.13	1.26	171.58
2001	126.28	39.71	1.41	167.40
2002	122.95	44.67	1.64	169.26
2003	118.38	50.78	1.81	170.97
2004	114.60	56.07	2.15	172.81
2005	109.87	62.95	2.43	175.26
2006	84.12	45.84	2.24	132.20
2007	86.11	49.32	2.99	138.42
2008	110.31	56.76	3.09	170.17
2009	73.78	56.40	3.01	133.19
2010	72.31	59.26	3.50	135.07
2011	69.52	63.27	4.05	136.85
2012	61.50	63.02	4.48	129.00
2013	64.12	78.37	5.46	147.95
2014	63.30	88.07	5.99	157.36
2015	51.36	69.75	6.20	127.31
2016	50.96	67.64	7.03	125.63

随时间呈波动下降趋势,从1992年的1.95亿t标准煤下降到2016年的1.25亿t标准煤,年均降幅为1.7%。然而从2014年起,农村生物质用量下降幅度明显加快,年均降幅达到3.8%,甚至超过过去25年年均降幅的2倍,这表明近年来中国正在进行的“能源消费革命”卓有成效,极大地推动了农村家庭的能源转型。

图2进一步清晰展示了1992—2016年农村家庭生物质能源消费的结构变动情况。在这3类生物质能源中,秸秆占比最大,且下降趋势最为明显,从1992年1.8亿t标准煤稳步下降到2016年的0.51亿t标准煤,年均下降率达到7.7%。相比之下,农村家庭木柴使用量呈现增长趋势,从1992年的0.15亿t标准煤增加到2016年的0.67亿t标准煤,年均增幅为3.5%。秸秆用量下降、薪柴使用量上升,其可能原因是,本文研究时期内在24个省份推行了退耕还林政策,尽管当地政府要求开展林地保护,但在偏远农村地区,由于经济贫困和可用生活能源不足,林地面积大幅扩建,潜在结果是进一步提高了农村地区薪柴的可获得性^[30,31],导致在生物质用能结构上出现秸秆占比下降、薪柴占比上升的现象。2012年,薪柴超过秸秆成为最主要的生物质燃料,该结论与北京大学陶澍团队在2012年开展的全国农村居民生活能源结构调查结论相一致^[13]。沼气在生物

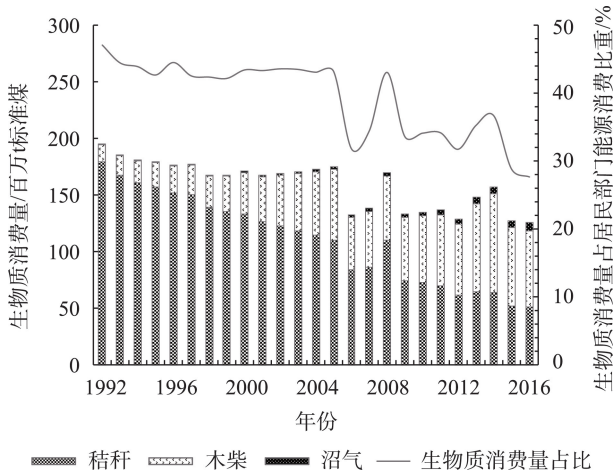


图2 1992—2016年农村家庭生物质能消费占能源总消费比重及生物质内部消费结构

Figure 2 Proportion of rural household biomass energy consumption and the internal consumption structure of biomass, 1992-2016

2023年9月

质燃料中占比很小,年均不足2%。接近陶澍团队2012年调查的3%的结论。

1992—2005年,生物质消费量占居民部门能源消费量的43%~47%,2005年之后,尽管这一比例有所下降,生物质消费量在2016年仍然占居民部门总能源消费量的27%以上。这说明仍然有许多农村家庭依靠生物质来满足他们最基本的烹饪和取暖需求,收入增加和基础设施扩张并没有改善农村地区能源消费不平等情况。2016年,尽管99.7%的村庄通电(11.9%有天然气),但仍然在西部和西北部地区有超过1.03亿农村家庭(约45%)使用秸秆、木材和沼气作为主要烹饪燃料^[32]。由于生物质燃烧效率低,且缺乏管道末端排放控制,家庭排放已成为主要的环境污染源。由此产生的室内空气污染与心血管等病发风险高度相关^[33],估计每年有约100多万人因室内空气污染过早死亡^[34]。因此,推动农村地区生活用能向清洁能源迈进将是改善环境、助力乡村振兴和减轻贫困的关键。

3.2 生物质燃料采用率分析

图3呈现的是农村家庭对薪柴、秸秆、沼气3类生物质能源在时间维度上采用率的变动趋势。由图3可知,在1992年,农村地区有72%的家庭使用薪柴,有40%的家庭用秸秆,18%的家庭采用沼气作为生活能源。而到2016年,农村地区使用薪柴和秸秆的家庭下降了一半,使用沼气的家庭下降了1/3。

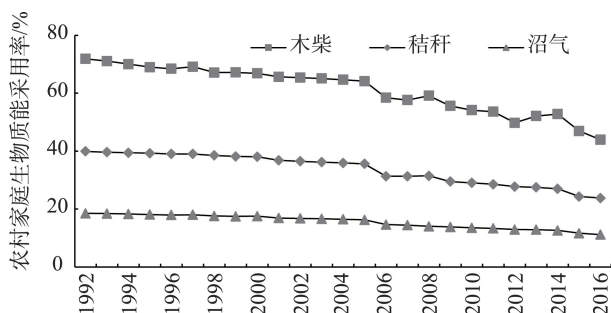


图3 1992—2016年农村家庭各类生物质能采用率历史变动情况

Figure 3 Historical changes in the adoption rate of biomass energy in rural households, 1992 - 2016

3类能源采用率在近25年均呈现出下降趋势,其背后的原因是近年来随着农村电气能源的普遍接入,清洁能源可获得性提高,许多家庭选择转向使用现代清洁能源,表明近20多年来农村生活用能已有明显改善^[32]。对比图2和图3可以发现,木柴采用率在下降,而消费总量却在上升,其潜在原因是到2016年仍然使用生物质能源的家庭,多数处于山地丘陵等偏远区域,经济发展水平较低,现代能源接入性较差,为满足不断增加的能源需求,大幅扩大了对木柴的消费量^[8]。

3.3 生物质消费地区差异比较

图4a呈现了1992—2016年农村秸秆消费量在四大区域间的差异^③。从图中可以看出,秸秆使用主要集中在西部和东北地区,几乎占到全国消费量的80%左右。在时间趋势上,东北地区秸秆使用量全国占比略有上升,西部地区比例略有下降,但两者总量在全国占比保持相对稳定。图4b描绘了农村薪柴消费量在地区间的差异。薪柴消费主要集中在西部和东北地区,1992—2016年间,这两个地区薪柴消费量在全国占比大约维持在65%~70%之间。

3.4 模型稳健性检验

为了确保本文所构建的贝叶斯时空模型适用于能源消费量统计推断,且推断结果可靠、稳健,本文主要从以下五方面对模型进行检验:

(1)检验模型适用于能源消费推断。贝叶斯时空模型通常用于生物、医学、交通等多种领域,然而在能源领域却鲜有人用贝叶斯时空模型进行统计推断。为了验证本文模型在能源领域的适用性,本文基于历史调查数据,使用该模型来预测家庭用电量,并与统计局的能源平衡表中的官方数据进行比较,其结果如表2所示。

从对比结果可以看出,基于模型预测的用电量与农村居民部门统计数据相关性很高($R^2=0.97$, $p<0.001$),说明本文所构建的模型对家庭能源消费预测准确性较高,对家庭能源消费的历史序列进行

③ 根据国家统计局划分标准,本文将中国各省划归到4个地区,分别是东部地区(北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南)、中部地区(山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南)、西部地区(内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆)以及东北地区(辽宁、吉林和黑龙江)。

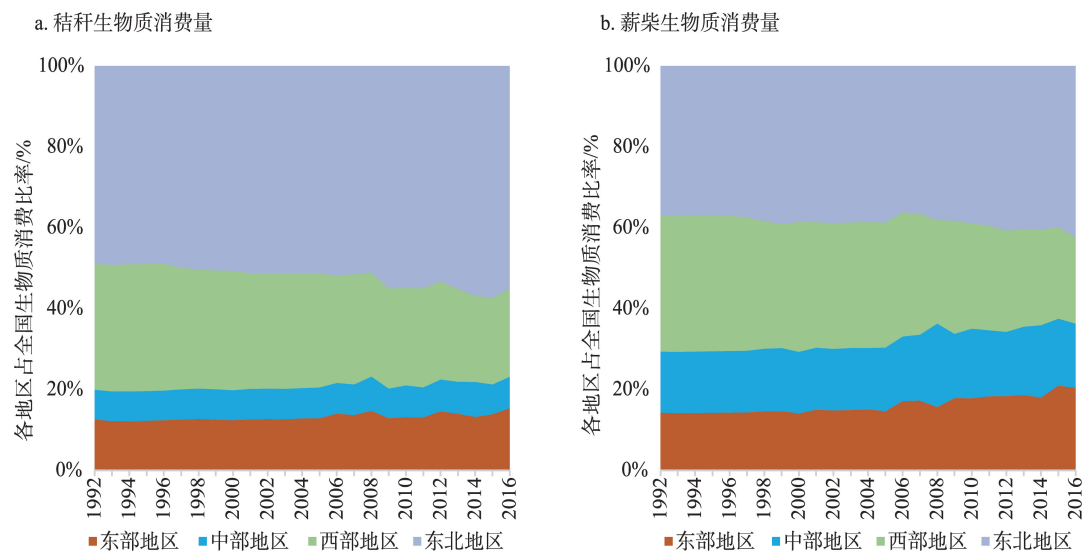


图4 1992—2016年生物质消费量在地区间的差异

Figure 4 Differences of biomass consumption among the four regions, 1992-2016

表2 电力预测结果与统计局数据对比结果

Table 2 Comparison of predicted electricity consumption and data from the Bureau of Statistics

	系数	标准误	t值
Intercept	-0.03	0.09	-0.33
log(pred_ele)	1.0***	0.01	71.36
样本量		25	
R ²		0.97	

注:log(pred_ele)表示模型推断结果的对数形式;*,**、***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

统计推断,其误差相对较小。

(2)检验模型的预测性能。除贝叶斯时空模型(BSM)外,现有的机器学习方法,如支持向量机(SVM)和广义线性回归(GLM)也可以对缺失数据进行填补预测。为评估模型的预测性能,选取最佳模型对生物质历史数据进行预测,将BSM模型与SVM、GLM等两种广泛使用的机器学习方法进行了系统比较。通过5折交叉验证的方式来评估上述模型的预测性能。首先,将数据随机分成5等分,随机抽取80%的数据对模型进行训练,保留20%的数据对模型进行验证,交叉验证重复5次后,将5次的预测结果进行平均得到最终估计值。然后分别计算了预测值与真实值的均方根误差(RMSE值越小,模型预测精度越高)、平均绝对百分比误差(MAPE值越小,模型预测精度越高)以及决定系数(R^2 ,值越大,模型预测精度越高)来评估模型的预测性能。

表3列出了模型的评估结果。若以RMSE为评估指标,最优模型为BSM模型,对于秸秆、木柴和沼气的预测误差都最小;若以MAPE为评估指标,最优模型仍然为BSM模型;若以 R^2 为评估指标,对于秸秆、木柴和沼气,BSM模型仍然具有最高的拟合结果。综合评估,贝叶斯时空模型(BSM)更适用于能源消费量的统计推断,且预测效果最佳。

表3列出了模型的评估结果。若以RMSE为评估指标,最优模型为BSM模型,对于秸秆、木柴和沼气的预测误差都最小;若以MAPE为评估指标,最优模型仍然为BSM模型;若以 R^2 为评估指标,对于秸秆、木柴和沼气,BSM模型仍然具有最高的拟合结果。综合评估,贝叶斯时空模型(BSM)更适用于能源消费量的统计推断,且预测效果最佳。

(3)检验模型估计结果具有合理性(图5)。由于本文模型是对历史能源消费数据进行数值测算,因此,无法直接找到一个有效的统计量来评判模型预测结果是否客观合理,只能将估计结果与真实值进行比较,通过分析误差大小来达到这一目的。本文中,由于农村地区真实的生物质能历史消费数据

表3 机器学习方法预测性能评估

Table 3 Prediction performance of the machine learning methods

评价 准则	评估 对象	贝叶斯时空模 型(BSM)	支持向量机 (SVM)	广义线性回归 (GLM)	最优 模型
RMSE	秸秆	0.296	0.459	0.572	BSM
	薪柴	0.282	0.412	0.436	BSM
	沼气	0.680	0.700	0.750	BSM
MAPE	秸秆	0.004	0.004	0.007	BSM
	薪柴	0.007	0.018	0.011	BSM
	沼气	0.020	0.026	0.024	BSM
R ²	秸秆	0.744	0.619	0.330	BSM
	薪柴	0.743	0.584	0.475	BSM
	沼气	0.370	0.340	0.240	BSM

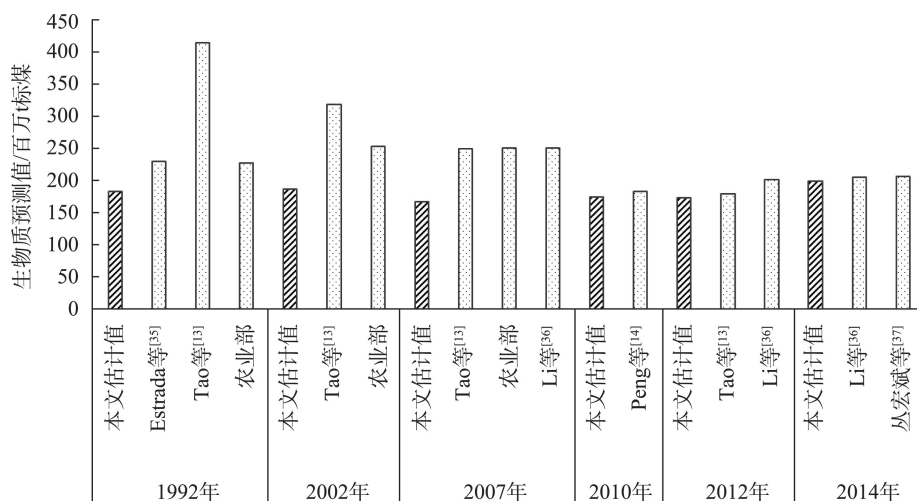


图5 模型预测木柴和秸秆消费量与现有文献对比结果

Figure 5 Comparison of predicted results of firewood and straw consumption with data from the existing literature

无法获得,而且农村生活所用生物质能源也没有官方的长时间序列统计资料,因此,本文只能通过与已有文献资料中对农村生物质用能情况的估计结果进行对比,来检验本文模型在总体估计上的合理性。如图5所示,目前文献中对中国农村生物质能使用量的估计研究相对较少,而且统计预测结果间也存在较大差异。根据已有文献,收集汇总了可以提供比较的文献数据。整体来看,本文估计结果在2007年之前显著低于其他文献,估计值是文献平均值的70%左右,在2007年之后的估计结果与已有文献差异较小,误差在5%左右。本文的估计结果系统低于其他文献,其可能原因是本文额外考虑了生物质采用/渗透率,而文献中通常将人均(或家庭)消费乘以农村人口(或家庭)来计算生物质总用量。生物质采用/渗透率在1992—2007年间下降速度较快,导致本文的估计结果与文献相比,差异较大。从以上结果来看,本文的估计值可以为中国农村生物质消费提供一个稳健的下限结果。

(4)检验模型在空间维度上具有较好的预测精度。通常,预测模型在加总数据上要比分解的数据具有更高的预测精度,因此,仅在国家层面对预测精度进行检验无法验证本文所构建的模型在多维空间,即省级层面仍然具有较高的预测精度,为此,本文将电力消费预测结果降解到省级层面,通过与现有省级统计数据对比(图6),可以发现,本

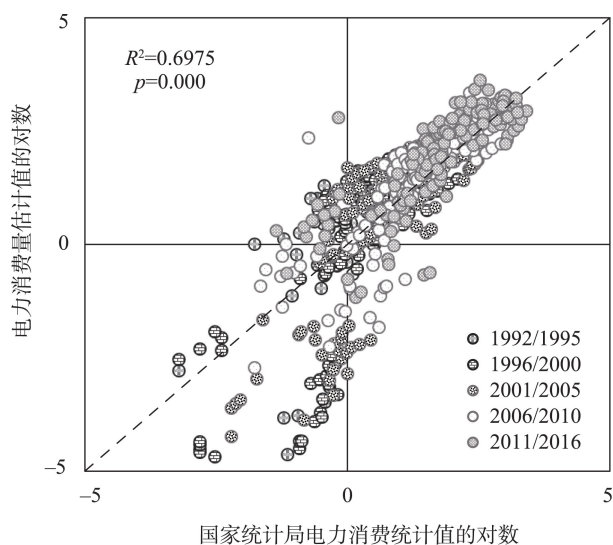


图6 1992—2016年各省预测用电量与国家统计局用电量比较

Figure 6 Comparison of predicted electricity consumption with data from the National Bureau of Statistics, 1992-2016

文预测结果与统计局统计数据具有较高的相关性($R^2=0.6975, p<0.001$),这说明本文所构建的贝叶斯时空模型不仅在加总数据上具有很好的预测精度,而且在更微观层级的数据上,也具有较强的预测能力。

(5)检验模型在时间维度上具有较好的预测精度(图7)。除了在数据加总层面以及空间维度进行验证外,本文利用分解数据在时间维度对模型的预测精度进行检验,以验证本文模型在分省数据时间

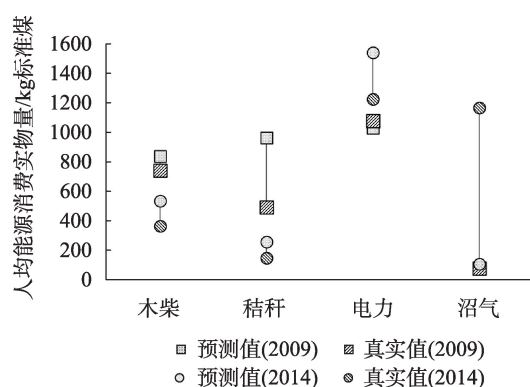


图7 2009、2014年真实值与预测值对比结果

Figure 7 Comparison of the true value and the predicted value, 2009, 2014

序列上,仍具有较高的预测精度。由于本文所构建的家庭能源消费微观数据库中,江苏省的历史数据在时间维度上是最全面的,因此,本文选用江苏省的数据,通过交叉验证的方法来测试估计模型的可靠性和稳健性。具体来说,本文使用江苏省1992—1996年、2008年和2014年的数据来估计该省2009年各类能源品的消费情况,此外为避免极端年份的出现,本文同时使用江苏省1992—1996年、2008年、2009年和2016年的数据来估计2014年的能源消费情况。由各类能源预测值与真实值的对比情况如图7所示。从图中可以看出,除2014年沼气预测误差较大外,其他几组预测误差相对较小,这可能由于2014年沼气调查样本量相对较小,而且原始数据误差较大。

此外,表4进一步汇报了通过回归方法得到的定量结果。与图7一致,即预测误差主要来源于2014年的沼气($R^2=0.31$),当不考虑这一对样本后,预测精度可以达到87.12%($R^2=0.87$)。

表4 真实值与预测值回归结果

Table 4 Regression results of the true value and the predicted value

	预测值	预测值
截距项	256.28(300.51)	130.56(129.76)
真实值系数	0.62(0.38)	1.05*** (0.18)
样本量	16	14
R^2	0.31	0.87

注:第二列回归去掉了2014年沼气的真实值和预测值。括号中为标准误,*、**、***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于贝叶斯时空模型,依赖已有的微观调查数据对1992—2016年中国农村生物质消费历史数据进行重构还原,并对结果稳健性进行了检验。主要结论如下:

(1)从消费总量来看,在近25年间,农村生物质能用量从1992年1.95亿t标准煤下降到2016年1.25亿t标准煤,年均降幅为1.7%。“能源消费革命”提出后,中国农村生物质能用量下降幅度加快,年均降幅达到3.8%。

(2)从能源结构来看,在2012年之前,秸秆是农村生物质能消费的主要来源,2012年之后,薪柴超过秸秆,成为农村家庭最主要的生物质能源。农村家庭对薪柴、秸秆、沼气3类生物质能的采用率在1992—2016年间不断下降,其中,薪柴和秸秆下降幅度达到50%左右,沼气下降近1/3,表明随经济社会发展,农村用能条件已明显改善,越来越多的家庭开始使用现代清洁能源。

(3)从空间分布来看,农村生物质能消费主要集中在西部和东北地区,这两个区域薪柴消费量占到全国消费量的80%左右,秸秆消费量占比约为65%~70%之间。推进农村能源消费转型,西部地区和东北地区是重中之重,在未来还需针对农村生物质能制定行之有效的政策措施。

4.2 政策建议

针对上述研究发现,本文提出如下政策建议:

(1)全面完善生物质能源统计工作。一方面,完善历史数据资料,统筹已有工作资源,在现有生物质能信息获得渠道、数据采集和统计制度上联合打造一个完善的、可持续的数据采集和统计体系。强化对生物质能的统计核算工作,将生物质纳入能源平衡表,使中国能源消费数据与国际数据可比。另一方面,科学开展专项居民能源消费调查,补齐生物质微观数据资料。对于不涉及能源消费量核算的问题(例如家庭主要使用的能源品种)可作为新增项目列入国家统计局住户调查平台中;而对于复杂的居民能源消费核算,则借鉴美国居民能源消费调查(RECS),开展专项调查、核算和统计工作。

2023年9月

(2)仍需持续提升偏远地区高质量用能水平。一是持续提升偏远地区电气化水平。实施农村电网巩固提升工程,提升农村地区电力保障水平,因地制宜,合理配置分布式光伏、风能等可再生能源局域网,充分发挥本地可再生能源发电的潜力,保障电网供电能力和供电质量。二是对适宜在偏远农村地区推广应用的生物质能高效利用技术进行示范建设。在电网难以普及的偏远山村地区,推广生物质气化炉等高效用能设备作为清洁能源替代方案。推进天然气微管网建设试点,推进燃气下乡,多措施提升农村清洁能源利用水平。

参考文献(References):

- [1] 耿爱欣,潘文琦,杨红强. 中国林木生物质能源替代煤炭的减排效益评估[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 536-547. [Geng A X, Pan W Q, Yang H Q. Quantifying the mitigating effects and benefits from substituting wood biomass for coal in energy production in China[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 536-547.]
- [2] 王明新,叶倩,王迪. 中国秸秆优质化能源开发利用特征及影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1791-1800. [Wang M X, Ye Q, Wang D. Development and utilization characteristics and influencing factors of straw-based high quality energy in China[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1791-1800.]
- [3] 聂辉华,江艇,杨汝岱. 中国工业企业数据库的使用现状和潜在问题[J]. 世界经济, 2012, 35(5): 142-158. [Nie H H, Jiang T, Yang R D. Current situation and potential problems of Chinese industrial enterprise database[J]. The Journal of World Economy, 2012, 35(5): 142-158.]
- [4] 冯祯民,王效华. 扬中市农村家庭用能分析[J]. 河南农业大学学报, 1996, 50(4): 97-101. [Feng Z M, Wang X H. Survey of rural household: Energy consumption in Yangzhong County of Jiangsu Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Henanensis, 1996, 50(4): 97-101.]
- [5] Niu S W, Zhang X, Zhao C S, et al. Variations in energy consumption and survival status between rural and urban households: A case study of the Western Loess Plateau, China[J]. Energy Policy, 2012, 49: 515-527.
- [6] 孙永龙,牛叔文,兰志成,等. 牧民家庭能源消费模式的演变及环境效应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 256-262. [Sun Y L, Niu S W, Lan Z C, et al. The evolution and environmental effect of household energy consumption pattern for herdsmen[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 256-262.]
- [7] Cao Z, Qian M, Gao B. The consumption patterns and determining factors of rural household energy: A case study of Henan Province in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111142.
- [8] 翟紫含,付军. 西部少数民族地区农村生活能源消费特征: 基于四川凉山州住户调查数据的分析[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 622-630. [Zhai Z H, Fu J. Rural energy consumption characteristics in western minority regions in China based on surveys of residents in Sichuan Liangshan[J]. Resources Science, 2016, 38(4): 622-630.]
- [9] 史清华,彭小辉,张锐. 中国农村能源消费的田野调查: 以晋黔浙三省 2253 个农户调查为例[J]. 管理世界, 2014, (5): 80-92. [Shi Q H, Peng X H, Zhang R. Field investigation of China's rural energy consumption: A case study of 2253 farmers in the three provinces of Shanxi, Guizhou and Zhejiang[J]. Journal of Management World, 2014, (5): 80-92.]
- [10] Niu S W, Li Z, Qiu X, et al. Measurement of effective energy consumption in China's rural household sector and policy implication[J]. Energy Policy, 2019, 128: 553-564.
- [11] 吴施美,郑新业. 收入增长与家庭能源消费阶梯: 基于中国农村家庭能源消费调查数据的再检验[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(1): 45-66. [Wu S M, Zheng X Y. Revisit of household energy ladder: Empirical evidence from a household survey in rural China[J]. China Economics Quarterly, 2022, 22(1): 45-66.]
- [12] Sun J W. Real rural residential energy consumption in China, 1990[J]. Energy Policy, 1996, 24(9): 827-839.
- [13] Tao S, Ru M Y, Du W, et al. Quantifying the rural residential energy transition in China from 1992 to 2012 through a representative national survey[J]. Nature Energy, 2018, 3(7): 567-573.
- [14] Peng L Q, Zhang Q, Yao Z L, et al. Underreported coal in statistics: A survey-based solid fuel consumption and emission inventory for the rural residential sector in China[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1169-1182.
- [15] Yuan P L, Duanmu L, Wang Z S. Coal consumption prediction model of space heating with feature selection for rural residences in severe cold area in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101643.
- [16] Wang Y Q. Application of deep learning model in building energy consumption prediction[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, DOI: 10.1155/2022/4835259.
- [17] Tian S, Lu Y, Ge X, et al. An agent-based modeling approach combined with deep learning method in simulating household energy consumption[J]. Journal of Building Engineering, 2021, DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103210.
- [18] 朱亚杰,李琦,侯俊雄,等. 运用贝叶斯方法的PM2.5浓度时空建模与预测[J]. 测绘科学, 2016, 212(2): 46-50. [Zhu Y J, Li Q, Hou J X, et al. Spatio-temporal modeling and prediction of PM2.5

- concentration based on Bayesian method[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 212(2): 46–50.]
- [19] Wikle C K. Hierarchical Bayesian Models for predicting the spread of ecological processes[J]. *Ecology*, 2003, 84(6): 1382–1394.
- [20] Currin C, Mitchell T J, Morris M D, et al. Bayesian prediction of deterministic functions, with applications to the design and analysis of computer experiments[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1991, 86(416): 953–963.
- [21] Besag J, York J, Mollié A. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1991, 43(1): 1–20.
- [22] Bernardinelli L, Clayton D, Pascutto C, et al. Bayesian analysis of space: Time variation in disease risk[J]. *Statistics in Medicine*, 1995, 14(21): 2433–2443.
- [23] Muchie K F, Wanjoya A K, Mwalili S M. On hierarchical bayesian spatial small area model for binary data under spatial misalignment [J]. *Journal of Probability and Statistics*, 2022, DOI: 10.1155/2022/3865626.
- [24] Green P, Latuszynski K, Pereyra M, et al. Bayesian computation: A summary of the current state, and samples backwards and forwards[J]. *Statistics and Computing*, 2015, 25(4): 835–862.
- [25] Sorensen D, Gianola D. *Likelihood, Bayesian and MCMC Methods in Quantitative Genetics*[M]. New York: Springer, 2002.
- [26] Rue H, Martino S, Chopin N. Approximate bayesian inference for latent gaussian models by using integrated nested laplace approximations[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2009, 71(2): 319–392.
- [27] Wang X H, Li K Q, Li H, et al.. Research on China's rural household energy consumption: Household investigation of typical counties in 8 economic zones[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 28–32.
- [28] Wang X H, Zhu L Y, Qian Y T, et al. Rural household energy consumption in Jiangsu Province of China[J]. *Energy & Environment*, 2015, 26(4): 631–642.
- [29] Zhang R, Wei T Y, Glomsrød S, et al. Bioenergy consumption in rural China: Evidence from a survey in three provinces[J]. *Energy Policy*, 2014, 75: 136–145.
- [30] 黄杰龙, 王立群. 放松退耕地间种约束的政策合理性与有效性检验: 基于贵州省新一轮退耕还林的农户调查[J]. *资源科学*, 2021, 43(9): 1863–1875. [Huang J L, Wang L Q. Policy feasibility and effectiveness test of relaxing constraints of interplanting in re-turning farmland: Based on a survey of farmers in Guizhou Province[J]. *Resources Science*, 2021, 43(9): 1863–1875.]
- [31] 段伟, 江怡成, 欧阳波. 社区生计与自然保护区冲突趋势: 基于农户自然资源利用的代际差异[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1267–1279. [Duan W, Jiang Y C, Ouyang B. Trend of conflict between community livelihoods and nature reserves: Based on the intergenerational differences of rural households' natural resource [J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1267–1279.]
- [32] 国务院第三次全国农业普查领导小组办公室, 国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报(第四号)[EB/OL]. (2017–12–14) [2023–02–02]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/16/content_5247677.htm. [The Steering Group Office of the Third National Agricultural Census of the State Council, National Bureau of Statistics of China. Communiqué of the Third National Agricultural Census][EB/OL]. (2017–12–14) [2023–02–02]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/16/content_5247677.htm.]
- [33] Yu K, Qiu G K, Chan K H, et al. Association of solid fuel use with risk of cardiovascular and all-cause mortality in rural China[J]. *The Journal of American Medical Association*, 2018, 319(13): 1351–1361.
- [34] Yun X, Shen G F, Shen H Z, et al. Residential solid fuel emissions contribute significantly to air pollution and associated health impacts in China[J]. *Science Advances*, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.aba762.
- [35] Estrada, J, Bergesen H O. *Energy Structures as Determinants of Response to Climate Change: Case Studies of Brazil, China, India and Mexico*[R]. Fridtjof Nansen Institute FNI–R–001/97, 1997.
- [36] Li J, Chen C, Liu H. Transition from non-commercial to commercial energy in rural China: Insights from the accessibility and affordability[J]. *Energy Policy*, 2019, 127: 392–403.
- [37] 丛宏斌, 赵立欣, 王久臣, 等. 中国农村能源生产消费现状与发展需求分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 224–231. [Cong H B, Zhao L X, Wang J C, et al. Current situation and development demand of energy production and consumption in rural China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 224–231.]

Estimation of biomass energy consumption in rural China

HAN Xiao¹, WEI Chu², WU Shimei³

(1. Institute of Industrial Economics and Technical Economics, China Academy of Macroeconomics, Beijing 100038, China;

2. School of Applied Economics, Renmin University of China, Beijing 100082, China; 3. School of Economics and Trade, Hunan University, Changsha 410079, China)

Abstract: [Objective] Rural biomass energy is vital for implementing the rural revitalization and carbon neutrality strategies. However, the absence of a biomass energy statistical system hindered data-based academic research and targeted decision making. [Methods] To fill this research gap, this study integrated various micro household survey data and established a large-sample multi-source heterogeneous dataset—the Chinese Rural Household Energy Consumption dataset. We then applied the Bayesian spatiotemporal model to estimate the historical data of China’s rural biomass energy consumption from 1992 to 2016. [Results] The results show that: (1) During 1992–2016, biomass consumption in rural areas of China experienced a decline, from 195 million tons of standard coal in 1992 to 125 million tons in 2016, with an annual average decline of 1.7%. Since the “energy consumption revolution” initiative was put forward, the decline of rural biomass consumption has obviously accelerated, with an annual average decline of 3.8%, indicating that the “energy consumption revolution” initiative has been very effective and greatly promoted the transformation of rural energy consumption. (2) During 1992–2016, the number of rural households using biomass also continued to decline, with the number of households using firewood and straw reduced by nearly 50%. (3) Biomass consumption is mainly concentrated in the western and north-eastern regions, where firewood consumption accounts for about 80% of national consumption, and straw consumption accounts for about 65%–70%. [Conclusion] The framework and methods of this study are helpful for solving the problem of missing data in academic research, and the research conclusions can provide a theoretical support for improving the level of high-quality energy use in remote rural areas of China.

Key words: rural energy; biomass consumption; multi-source heterogeneous database; statistical inference; Bayesian spatiotemporal model; China