

中国农村能源消费碳排放区域非均衡性及 驱动因素动态识别*

张恒硕 李绍萍 彭 民

摘要：本文基于2000—2018年全国八大地区30个省份农村能源消费的碳排放测算数据，运用两权重配比变异系数及Dagum基尼系数分析农村能源消费碳排放的区域差异及贡献来源，通过核密度估计法分析农村能源消费碳排放区域非均衡的时空演化特征，利用自适应Lasso模型选取农村能源消费碳排放驱动因素并结合逐步回归与普通最小二乘法的参数估计结果进行比较。研究发现：2000—2018年中国农村能源消费碳排放的区域差异呈现先缩小后扩大的态势，动态演进过程中农村能源消费碳排放的空间非均衡发展程度不断加深，八大地区农村能源消费碳排放的主导类型存在差异性；全国视角下农村生产生活要素投入、农村人口发展规模、农村生活质量水平及能源消费水平等因素对农村能源消费碳排放产生不同程度的影响，地区视角下各类驱动因素对农村能源消费碳排放的驱动效果及影响作用具有时间及空间差异性。对此，农村地区碳排放管治过程中应明确“全国统筹、区域协调、地区专治”的管理思路，秉承“分地区、分时段、分类型”的分类管理方式，以地区碳排放水平划分减排的重点管理区域，以驱动因素的作用机制作为减排的管理导向，从而实现农村地区“生态承载—环境保护—经济增长”的绿色协调、高质量发展。

关键词：农村碳排放 区域非均衡性 能源消费 驱动因素 自适应Lasso模型

中图分类号：F323.214 X24 **文献标识码：**A

一、引言

化石能源消耗导致的碳排放及其引发的气候问题已严重威胁生态环境可持续发展（刘贤赵等，2019）。新冠疫情影响下世界各国因能源使用所产生的碳排放急剧下降，全球能源消费碳排放将伴随后疫情时代世界经济的复苏而达到峰值^①。中国是全球最大的温室气体排放国，2018年中国二氧化碳排

*本文研究获得国家社会科学基金一般项目“驱动资源型地区高质量转型发展的智慧生态创新模式与路径研究”（编号：20BJY045）、黑龙江省哲学社会科学规划项目“协同治理框架下的黑龙江省农村环境污染防治研究”（编号：19JYE257）的资助。感谢匿名审稿人的意见，文责自负。本文通讯作者：李绍萍。

^①资料来源：BP Statistical Review of World Energy 2019，<https://webcast.bp.com/economics/statsreview/08/registration/>。

放量达 9.42 亿余吨，其排放规模占世界总排放量的 27.96%，较 2000 年占比上升了 13.99%^①。为积极参与全球气候治理，中国于 2014 年承诺 2030 年前实现碳达峰，并于 2020 年在联合国大会上承诺 2060 年前实现碳中和。“双碳”目标作为十四五时期污染防治攻坚战的重要挑战，现已上升至新时期国家战略目标。当前中国的单位 GDP 能耗为世界平均水平的 1.5 倍，单位能源碳强度比世界平均水平高出近 30%，实现“双碳”目标任务仍十分艰巨（王一鸣，2021）。面临气候环境恶化与减碳目标的双重压力，国内全方位、多领域、深层次的碳减排问题已成为热议话题。城市与工业碳排放是政府减排规制的核心，而中国作为传统农业大国，农村与农业的碳排放问题亦不容忽视（吴贤荣等，2014）。

农村能源问题关乎全国近 50%以上的人口生产和生活的基础供能及质量保障（中国科学技术协会和中国农业工程学会，2016），伴随农村能源消费由传统非商品性能源向商品性能源的进阶转化，农村能源问题现已成为政府节能减排战略的重要组成部分（史清华等，2014）。根据 2001—2019 年历年《中国能源统计年鉴》的统计，农村能源消费总量由 2000 年的 10207.14 万吨标准煤上升到 2018 年的 21145.52 万吨标准煤，2018 年的农村能源消费总量是 2000 年的 2.07 倍。这进一步证实了农村能源消费亦是促进中国碳排放增长的潜在因素。此外，农村环境治理工作正值乡村振兴战略的关键时期、生态新农村建设的攻坚时期以及农村高质量发展的爬坡时期，而 2018 年中共中央、国务院印发的《乡村振兴战略规划（2018-2022 年）》明确指出，农村环境及生态问题较为突出，中国发展不平衡不充分问题在乡村地区尤为明显。因此，开展对中国农村能源消费碳排放的深入研究就显得尤为必要。

1970—2010 年，全球化石燃料消耗及工业使用所产生的碳排放量占全球温室气体排放增量的比重不断上升并接近 78%，由碳排放引发的全球环境问题日益被国际社会广泛关注（IPCC，2014；王少剑等，2015）。近年来能源消费碳排放的研究成果颇为丰硕，主要集中在对国际社会（Baye et al., 2021）、国家及地区（武红等，2013）、省份及城市（Wang et al., 2019）、行业（张樾樾等，2020）、居民生活（Yao, 2012）等领域能源消费碳排放的研究。例如，Adekoya et al.（2021）评估了 2000—2014 年全球 126 个国家和地区的可再生能源使用及碳排放对人类社会发展的影响。程叶青等（2013）基于 8 类化石能源消费数据估算 1997—2010 年中国能源消费碳排放水平，并运用空间面板计量模型探究人均 GDP、能源强度、能源结构等因素对碳排放强度的影响。赵选民和卞腾锐（2015）在测算 2002—2007 年陕西省 7 种主要能源消费碳排放的基础上进一步分解碳排放因素。张馨等（2011）运用碳排放系数及生活方式分析法挖掘居民家庭的直接与间接能源消费碳排放，并阐述 2000—2007 年城市化进程中居民家庭能源消费碳排放的趋势变化。以农村能源消费碳排放作为研究对象的相关研究，目前鲜有学者涉足；而现有对农村能源消费碳排放的研究多以农村生产或生活单个维度进行考量，以农村生产和居民生活两个维度衡量农村能源消费碳排放状况的研究较为少见。因此，以农村能源消费碳排放为主体的综合分析显得尤为重要。

此外，能源消费碳排放的研究内容主要围绕能源消费碳排放的测算（Ma et al., 2019）、时空特征（苏泳娴等，2013）、影响机制（Rahman and Kashem, 2017）、减排政策（董梅和李存芳，2020）及

^①数据来源：Energy Outlook 2020，<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>。

达峰预测（王勇等，2019）等维度展开。能源消费碳排放的测算方法主要包括实测法、物料衡算法和排放系数法（谢守红等，2014），能源消费碳排放的时空特征分析主要以时序变动、空间差异及格局、演进特征分析为研究倾向（王强等，2011）。基于对能源消费碳排放影响机制的深层探讨，已有研究主要从因素间的作用关系以及多因素影响机制两个维度展开。例如，郭文和孙涛（2017）探究了人口结构对能源消费碳排放的影响机制，指出人口年龄结构、教育结构及职业结构的变动具有减缓碳排放增长的作用；张乐勤等（2012）认为人均 GDP 能耗、单位 GDP 能耗以及全社会固定资产等因素是影响能源消费碳排放的驱动因子。对于碳减排政策的优化思考，金书秦等（2021）建议碳交易市场范围中加入农业碳减排；陈菡等（2020）提出分区、分批实现碳达峰及空气质量达标的协同治理路径。对于碳达峰的预测估计，洪竞科等（2021）指出碳排放约束情景下中国碳排放将于 2033 年达峰，而供给侧结构性改革情景下将于 2030 年前实现达峰。能源消费碳排放研究内容多元化，但对能源消费碳排放分时段、分类型、分区域不均衡发展的研究较为缺乏。中国区域碳减排规制及农村地区环境治理正值绿色发展的关键时期，因此，基于区域非均衡视角深入分析农村能源消费碳排放的区域差异、主导类型及动态演进水平显得尤为紧要执本。

能源消费碳排放驱动因素分析作为碳排放规制及管控时期的研究热点，不同学者对能源消费碳排放驱动因素分析方法的使用也各不相同。一方面，相关学者以分解法对能源消费碳排放驱动因素进行分析。例如，李国志和李宗植（2010）运用 LMDI 模型将农业能源消费碳排放分解为能源排放强度、能源结构及能源效率等因素，并考察其对能源消费碳排放的影响。又如黄蕊等（2016）基于 STIRPAT 模型研究探究人口数量、富裕度及城市化水平等因素对江苏省能源消费碳排放的影响作用。另一方面，相关学者在现有研究基础上构建能源消费碳排放驱动因素指标体系，并通过参数估计方法分析其对碳排放的作用机制。例如，刘贤赵等（2016）选取产业结构、经济发展水平、人口规模等 5 个因素与能源消费碳排放进行空间回归分析，发现人口规模、能源消费强度等因素能够驱动省域碳排放增长；杜海波等（2021）选择 GDP、年末常住人口、城市人口占总人口比重以及能源强度等 7 个因素，研究发现经济发展水平、城镇化水平与人口规模对碳排放的驱动作用明显。采用分解法进行驱动因素选择受到分解法恒等式的影响，考察的因素个数受限且不具有灵活性；而通过构建指标体系选择驱动因素的方式受主观因素影响大，容易在模型中纳入无效变量或遗漏有用变量。现有研究较少重视与关注驱动因素作用机制分析中的驱动因素选择，而驱动因素的选择对模型估计的准确度影响颇大，就能源消费碳排放驱动因素的研究强化其驱动因素的选择方法尤为关键。

综上所述，能源消费碳排放已有研究之不足有三：一是能源消费碳排放研究的对象涉及多领域，但涉猎农村地区的研究成果甚少；二是能源消费碳排放研究的内容涵盖多方面，但对区域非均衡性的分析较少；三是目前常见的能源消费碳排放驱动因素的分析方法具有局限性。为此，本文首先在测算的 2000—2018 年 30 个省份农村能源消费碳排放的基础上运用变异系数与基尼系数分析农村能源消费碳排放的区域差异及贡献来源，其次结合核密度估计就非均衡发展的动态演进趋势进行分析，最后在构建的农村能源消费碳排放驱动因素指标体系中采用自适应 Lasso 模型对驱动因素进行初期筛选，并运用 OLS 参数估计进行后续的影响机制识别。本文的创新点有三：一是从区域差异性、排放类型演进

及时空趋势角度对农村能源消费碳排放的区域非均衡性进行动态分析；二是从地区经济发展水平、农村生产生活要素投入、农村人口发展规模、农村生活质量水平及能源消费水平等方面构建农村能源消费碳排放驱动因素指标体系，并运用自适应 Lasso 模型进行驱动因素选择；三是采用分时段、分区域及分类型的方式对农村能源消费碳排放的驱动因素进行多方位对比分析，以期对农村环境的分区治理及减排政策的制定有所裨益。

二、研究设计

（一）研究方法

1. 区域非均衡性及动态演进分析。首先，本文在传统变异系数（参见孙畅和吴芬，2020）的基础上，结合农村能源消费的两大类型（农村生产能源消费与农村生活能源消费）构造农村能源消费碳排放两权重配比变异系数，衡量中国八大地区^①农村能源消费碳排放的区域差异性。两权重中，其一是区域农业总产值权重，以区域内农业总产值标准差与极差之比来衡量；其二是区域农村人口权重，以区域内农村人口标准差与极差之比来衡量。本文构造的新变异系数的计算公式如下所示：

$$CP = \frac{S_i S_{AP_i}}{\bar{y}(AP_{Max} - AP_{Min})} + \frac{S_i S_{RP_i}}{\bar{y}(RP_{Max} - RP_{Min})} \quad (1)$$

（1）式中： CP 为两权重配比变异系数， AP_i 为第 i 个省份的农业总产值， RP_i 为第 i 个省份的农村人口， S 表示区域内农村能源消费碳排放的标准差， \bar{y} 表示区域内农村能源消费碳排放的均值， $AP_{Max} - AP_{Min}$ 表示区域内农业总产值的极差， $RP_{Max} - RP_{Min}$ 表示区域内农村人口的极差。

其次，本文选择 Dagum 基尼系数衡量农村能源消费碳排放的区域非均衡性，并根据 Dagum (1997) 提出的基尼系数分解方法对八大地区农村能源消费碳排放的区域差异及贡献来源进行深入分析。

Dagum 基尼系数的标准定义如下：

$$G = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{f=1}^{n_k} |y_{ji} - y_{kf}| / 2n^2 \mu \quad (2)$$

（2）式中： G 为总体基尼系数， m 和 n 分别表示划分的区域个数与省份个数， n_j (n_k) 表示区域 j (k) 内的省份个数， y_{ji} (y_{kf}) 表示区域 j (k) 内省份 i (f) 的农村能源消费碳排放， μ 表示所有省份农村能源消费碳排放的均值。

区域内的基尼系数 G_{jj} 及区域间的基尼系数 G_{jk} 分别如（3）式与（4）式所示：

$$G_{jj} = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{f=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jf}| / 2n_j^2 \mu_j \quad (3)$$

^①参考国务院发展研究中心公布的《地区协调发展的战略与政策》中对经济区域的划分方法，本文将全国 30 个省份划分为八大地区，因数据缺失研究对象未涉及西藏及港澳台。其中，东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁；北部沿海地区包括北京、河北、山东、天津；东部沿海地区包括江苏、上海、浙江；南部沿海地区包括福建、广东、海南；黄河中游地区包括河南、内蒙古、山西、陕西；长江中游地区包括安徽、湖北、湖南、江西；大西南地区包括广西、贵州、四川、云南、重庆；大西北地区包括甘肃、宁夏、青海、新疆。

$$G_{jk} = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{f=1}^{n_k} |y_{ji} - y_{kf}| / n_j n_k (\mu_j + \mu_k) \quad (4)$$

农村能源消费碳排放总体基尼系数可分解为三个部分，即区域内差异贡献 G_a （表示区域内部省份碳排放差异的贡献）、区域间差异贡献 G_b （表示区域间碳排放差异的净贡献）及超变密度贡献 G_t （表示划分子群过程中交叉项对总体差异的贡献），且满足： $G = G_a + G_b + G_t$ 。三者分别表示为：

$$G_a = \sum_{j=1}^m G_{jj} (n_j / n) (n_j \mu_j / n \mu) \quad (5)$$

$$G_b = \sum_{j=2}^m \sum_{k=1}^{j-1} D_{jk} G_{jk} n_j n_k (\mu_j + \mu_k) / n^2 \mu \quad (6)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^m \sum_{k=1}^{j-1} (1 - D_{jk}) G_{jk} n_j n_k (\mu_j + \mu_k) / n^2 \mu \quad (7)$$

(6) 式与 (7) 式中， D_{jk} 表示区域 j 与区域 k 之间的农村能源消费碳排放的相对影响，其定义如 (8) 式所示：

$$D_{jk} = (d_{jk} - p_{jk}) / (d_{jk} + p_{jk}) \quad (8)$$

$$d_{jk} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-v) dF_k(v) \quad (9)$$

$$p_{jk} = \int_0^{\infty} dF_k(y) \int_0^y (y-v) dF_j(v) \quad (10)$$

(8) ~ (10) 式中： d_{jk} 为区域间农村能源消费碳排放的差值，表示区域 j 内省份 i 与区域 k 内省份 f 的农村能源消费碳排放差值大于 0（即 $y_{ji} - y_{kf} > 0$ ）的样本值加总的数学期望； p_{jk} 为超变一阶矩阵，表示区域 j 内省份 i 与区域 k 内省份 f 的农村能源消费碳排放差值小于 0（即 $y_{ji} - y_{kf} < 0$ ）的样本值加总的数学期望； $F_j(v)$ 及 $F_k(v)$ 表示区域 j 及区域 k 农村能源消费碳排放的累计密度分布函数。

再次，本文运用核密度估计方法刻画 2000—2018 年中国农村能源消费碳排放的动态分布及演进态势。核密度曲线分布的位置反映农村能源消费碳排放水平的高低程度，波峰的高度及宽度分别反映农村能源消费碳排放的区域间的聚集程度和分散程度，波峰数量反映农村能源消费碳排放区域分布的极化程度，曲线延展性反映农村能源消费碳排放最高与最低省份之间的区域差异程度（参见王晶晶等，2021）。随机变量 y 的密度函数如 (11) 式：

$$f(y) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{y_i - \mu}{h}\right) \quad (11)$$

(11) 式中： y_i 为独立同分布的 30 个省份的农村能源消费碳排放， μ 为 30 个省份农村能源消费碳排放的均值， N 为样本数， h 为带宽， $K(\bullet)$ 为核函数。本文选取高斯核函数估计方法分析全国及八大地区农村能源消费碳排放的分布形态、延展性及演进趋势，其表达式如下：

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \quad (12)$$

最后，为探究区域间农村能源消费碳排放类型的时空变化及农村能源消费碳排放的主导类型，本文以全国农村能源消费碳排放均值作为衡量标准，若某地区农村能源消费碳排放高于全国农村能源消

费碳排放均值则定义为高碳排放类型；反之，则定义为低碳排放类型（农村生产及农村生活能源消费碳排放类型的界定也采取此衡量标准）。首先，根据上述比较结果，本文将农村能源消费碳排放类型划分为双高碳排放型、低农村生产高农村生活碳排放型、双低碳排放型、高农村生产低农村生活碳排放型。其次，根据农村能源消费碳排放的主导类型，本文将八大地区划分为高农村能源消费碳排放区域的农村生产主导类型（表明高农村能源碳排放由高农村生产能源消费碳排放所导致）、高农村能源消费碳排放区域的农村生活主导类型（表明高农村能源碳排放由高农村生活能源消费碳排放所导致）、低农村能源消费碳排放区域的农村生活主导类型（表明低农村能源碳排放由低农村生活能源消费碳排放所导致）、低农村能源消费碳排放区域的农村生产主导类型（表明低农村能源碳排放由低农村生产能源消费碳排放所导致）。

2. 驱动因素分析。农村能源消费碳排放的驱动因素错综复杂，建模过程中如何有效剔除无关变量或较少遗漏有用信息以提高模型估计及预测的准确度值得深入关注。Tibshirani（1996）提出的 Lasso（least absolute shrinkage and selection operator）方法是一种收缩估计，即在传统最小二乘估计的基础上施加约束条件，即对系数添加约束条件以消除多重共线性的影响，从而达到筛选有效驱动因素和构建最优模型的目的。基于农村能源消费碳排放驱动因素的初始选择，本文构建自适应 Lasso 模型选取农村能源消费碳排放的驱动因素，具体构造的数学形式及步骤如下。

以标准化处理后的面板数据为基础，设 N 为样本量个数，解释变量为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)^T$ ， i 为第 i 个样本（ $i=1, 2, \dots, N$ ）。被解释变量为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N)^T$ 。记 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_z)^T$ ， z 为解释变量维度。假设 y 与 x_1, x_2, \dots, x_z 满足如下函数关系： $Y = \beta X + \varepsilon$ （ ε 为随机扰动项），则 β 的 Lasso 估计定义为：

$$\hat{\beta}_{Lasso} = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta x_i)^2 + \lambda \sum_{q=1}^z |\beta_q| \quad (13)$$

(13) 式中， $q \in z$ ； λ 为约束参数。 $\hat{\beta}$ 的估计值与约束参数 λ 有关，令： $\lambda = \sum \hat{\beta}$ ，调节约束条件（即使 λ 在 0~1 之间变化）对回归系数 $\hat{\beta}$ 施加不同程度的压缩。如果变量 x_i 的估计系数被压缩为 0，则该解释变量将被模型所剔除，即该变量 x_i 不视为农村能源消费碳排放的驱动因素。在 λ 约束下构造广义交叉验证统计量 GCV ，如 (14) 式所示：

$$GCV(\lambda) = \frac{|Y - X \hat{\beta}_{\lambda}|^2}{(1 - e(\lambda) / N)^2} \quad (14)$$

则交叉验证统计量取值最小的 λ 即为最优选择的 λ （参见吴翌琳和李宪，2018）。Zou（2006）在传统 Lasso 模型基础上提出自适应 Lasso（adaptive lasso）模型，将不同 $\hat{\beta}$ 的约束参数赋予相应权重，且使 $\hat{\beta}$ 估计具有渐进正态性，其定义形式如 (15) 式所示：

$$\hat{\beta}_{Lasso} = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta X_i)^2 + \lambda \sum_{q=1}^z \omega_q |\beta_q| \quad (15)$$

(15) 式中， ω_q 为权重，且 $\omega_q = (|\beta_{q,(OLS)}|)^{-\gamma}$ 。其中， $\beta_{q,(OLS)}$ 为 β_q 的最小二乘估计量， γ 为可调整参数。在运用自适应 Lasso 模型选取驱动因素的过程中结合拓展的贝叶斯信息准则（EBIC）及赤池信息准则（AIC）等准则，得到最优的回归系数 $\hat{\beta}$ ，以达到构建最优模型的目的。在此基础上结

合 $\hat{\beta}$ 的正负号判断相应驱动因素对农村能源消费碳排放产生的效应：若驱动因素的回归系数 $\hat{\beta}$ 为正，则该驱动因素对农村能源碳排放产生正效应；反之，则产生负效应。

（二）变量设定

1. 被解释变量测算。本文结合农村生产及生活能源消费碳排放两方面，基于农村地区 21 种能源品类^①消费数据，采用 2006 年 IPCC 提供的系数估算法对农村能源消费碳排放（ y ）进行测算，如（16）式所示：

$$y = \sum AE \times NCV \times EF \times O \times \frac{44}{12} \quad (16)$$

（16）式中： AE 为能源消费量， NCV 为平均低位热值， EF 为单位热值含碳量， O 为碳氧化率， $44/12$ 为 C 转换为 CO_2 的系数。此外，21 种能源品类中的电力和热力的碳排放量为能源消费量与碳排放系数^②的乘积。

2. 解释变量设定及处理。在运用自适应 Lasso 模型选取驱动因素之前，本文从地区经济发展水平、农村生产生活要素投入、农村人口发展规模、农村生活质量水平及能源消费水平等方面进行驱动因素指标体系的初始选择。（1）地区经济发展水平方面。本文选取农业总产值及地区经济结构来体现，农业总产值以 2000 年为基期利用农产品生产者价格指数平减，地区经济结构以农业增加值占地区生产总值的比重代替。（2）农村生产生活要素投入方面。本文从农村生产、农村生活及能源投入三方面考量。其中，农村生产投入选取农业机械总动力及总播种面积，以反映土地及机械在农业生产中的投入情况（吴昊玥等，2020）；农村生活投入以农村住户固定资产投资完成额体现，并以 2000 年为基期利用固定资产投资价格指数平减；以能源强度反映农村生产生活的能源投入水平，能源强度用能源消费量与农业总产值之比来表示。（3）农村人口发展规模方面。本文用农村总人口及农村人口占地区总人口的比重反映。此外，考虑到农村地区的老龄化问题日趋显现以及农村劳动力外移使得老人“留守”现象突显（郑伟等，2014），本文在指标体系中加入乡村老年抚养比指标以检验农村老龄化是否会对农村能源消费碳排放产生外部效应^③。（4）农村生活质量水平方面。本文以农村居民人均可支配收入及农村居民人均消费支出反映，并利用农村居民消费价格指数对其平减^④。（5）能源消费水平方面。本文以能源价格、能源消费结构及人均能源消费量反映能源消费水平。参照杭雷鸣和屠梅曾（2006）的处理，本文以 2000 年为基期的出厂价格指数作为能源价格的替代变量，将原煤消费量占能源消费总量的比例来表示能源消费结构。此外，由于当前农业结构中表现出“农业以种植业为主、种植业以粮

^①21 种能源品类包括原煤、电力、天然气、汽油、柴油、型煤、润滑油、液化石油气、液化天然气、热力、焦炭、焦炉煤气、燃料油、煤油、石油沥青、其他洗煤、其他煤气、洗精煤、炼厂干气、石油焦及其他石油制品。

^②电力和热力的碳排放系数分别取自《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》（数据来源：https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml）和吴开亚等（2013）。

^③乡村老年抚养比指农村 65 岁及以上人口占 15~64 岁人口的比重（参见罗光强和谢卫卫，2013）。

^④受 2000 年和 2001 年农村居民消费价格指数数据缺失的影响，因此，2000 年及 2001 年的数据是利用农业生产资料价格指数进行平减。

食为主”的格局（高强和孔祥智，2014），因此，本文将农业内部结构（种植业产值占农业总产值的比重）及粮食总产量作为种植业发展水平指标纳入影响农村能源消费碳排放的指标体系中。

（三）数据来源及样本描述

本文的数据类型为2000—2018年30个省份的面板数据。测算农村能源消费碳排放的基础数据中，能源消费量数据取自2001—2019年历年的《中国能源统计年鉴》，平均低位热值参见《综合能耗计算通则（GB/T 2589-2020）》，单位热值含碳量及碳氧化率参见《省级温室气体清单编制指南（试行）》。指标变量的基础数据中，农业总产值、农村总人口、农村人口占地区总人口比重取自2001—2019年历年的《中国统计年鉴》；农业机械总动力、总播种面积、农村住户固定资产投资完成额、农村居民人均可支配收入、农村居民人均消费支出、能源价格、农业内部结构、粮食总产量取自2001—2019年历年的《中国农村统计年鉴》；乡村老年抚养比取自各省份2001—2019年的历年统计年鉴；能源强度、能源消费结构、人均能源消费量据2001—2019年历年的《中国能源统计年鉴》相关数据计算所得。相关基础数据的描述性统计如表1所示。

表1 主要变量的描述性统计

	变量名称	均值	标准差	最小值	最大值
农村能源消费碳排放	农村能源消费碳排放总量（万吨标准煤）	1052.73	734.83	66.68	4451.67
	农村生产能源消费碳排放量（万吨标准煤）	412.44	289.85	5.38	1563.41
	农村生活能源消费碳排放量（万吨标准煤）	640.29	556.73	1.83	3646.37
地区经济发展水平	农业总产值（亿元）	2145.57	1921.26	57.00	9425.95
	地区经济结构（%）	12.30	6.60	0.30	37.90
农村生产生活要素投入	农业机械总动力（万千瓦）	2778.01	2674.79	94.00	13353.00
	总播种面积（千公顷）	5317.30	3586.09	103.80	14902.70
	农村住户固定资产投资完成额（亿元）	177.69	149.45	1.21	723.06
	能源强度（吨标准煤/万元）	0.37	0.33	0.71	2.44
农村人口发展规模	农村总人口（万人）	2391.32	1713.62	194.00	7968.80
	农村人口占地区总人口比重（%）	52.20	17.60	10.40	86.90
	乡村老年抚养比（%）	13.90	4.70	4.30	34.80
农村生活质量水平	农村居民人均可支配收入（元/人）	5245.01	3194.09	1374.16	19504.41
	农村居民人均消费支出（元/人）	4105.61	2494.80	1084.00	12967.94
农村能源消费水平	能源价格（指数）	154.23	36.17	97.59	291.76
	能源消费结构（%）	37.80	25.50	0.00	93.50
	人均能源消费量（吨标准煤/人）	0.29	0.20	0.02	1.11
种植业发展水平	农业内部结构（%）	52.60	8.70	34.20	74.60
	粮食总产量（万吨）	1809.45	1468.54	34.10	7506.80

三、农村能源消费碳排放区域非均衡性分析

（一）农村能源消费碳排放区域差异性分析

基于（1）式两权重配比变异系数（ CP ）衡量的农村能源碳排放区域差异性结果如图1所示。在

全国层面，2000—2018年八大地区的区域变异系数变化幅度较小，2005—2010年区域变异系数逐渐下降至最低点，2010—2013年区域变异系数增长迅速，而2015—2018年其增长速度有所放缓。2005年后，新一轮能源危机对区域能源消费结构及区域能源消费能力造成重大影响，而受2008年国际金融危机影响国内采取大规模刺激内需的经济及政策举措，各地区的能源消费水平在快速上升的同时区域间能源消费碳排放的空间差异也随之扩大。伴随近年来对大气污染物排放的严格管控及农村能源消费结构的不断优化，区域间碳排放差异水平的增速有所放缓。

在区域层面，以两权重配比变异系数的年际均值作为衡量区域内部差异性大小的原则进行排序：北部沿海（0.687）>大西北（0.601）>南部沿海（0.595）>大西南（0.394）>东部沿海（0.347）>黄河中游（0.334）>东北（0.223）>长江中游（0.222）。其中，2000—2018年，北部沿海地区内部变异系数的变化较大，且2009—2018年间增长幅度较为明显；大西北地区内部变异系数2000—2014年间的整体变化幅度较小，而2014—2018年增速较快；南部沿海地区表现为内部变异系数较大且变化幅度明显；大西南地区内部变异系数呈现下降趋势，在2016—2017年出现转折后于2018年迅速下降到0.286；东部沿海地区内部变异系数以2004年为拐点呈现递增态势，2009—2018年增长趋势有所放缓；黄河中游地区内部变异系数呈现下降趋势，2010年后变化幅度较为稳定；2000—2018年间东北地区内部变异系数呈现波动徘徊的变化趋势，且变动幅度较大；长江中游地区内部变异系数整体较小，但年际间变化剧烈，在0.015~0.222之间的范围波动。区域间的农村能源消费结构及消费水平进一步助长了农村能源消费碳排放差异，且区域内部差异及变化趋势存在差异性特征。

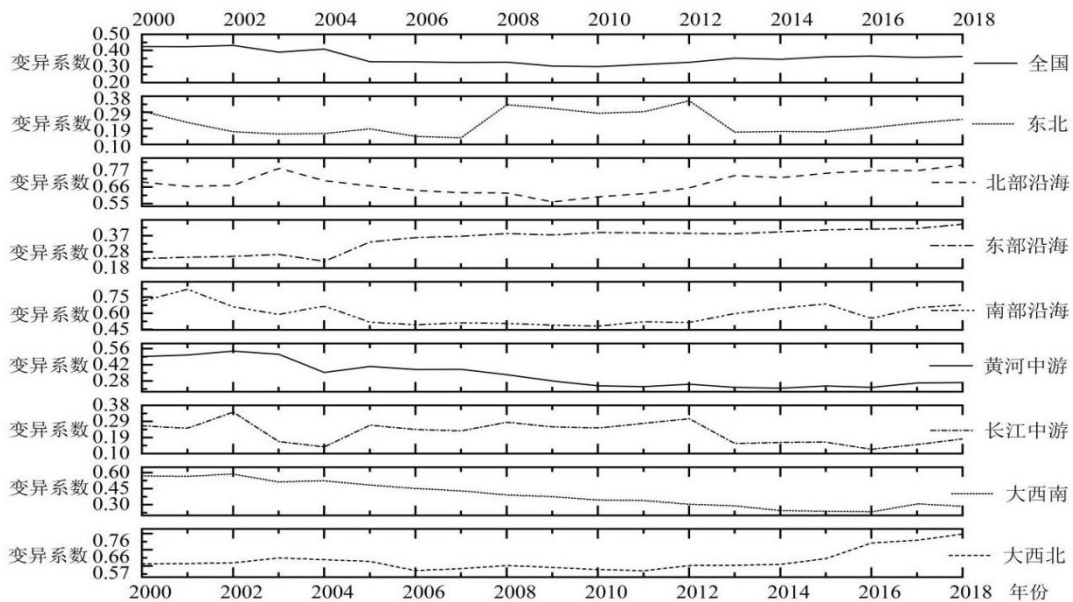


图1 农村能源消费碳排放区域差异测度

(二) 农村能源消费碳排放区域差异分解及贡献识别

1.碳排放区域差异的时空变化。农村能源消费碳排放的总体基尼系数(G)的年际均值为0.363^①,2000—2018年间总体基尼系数呈现先下降后上升的趋势,但整体变化幅度较小。Dagum基尼系数与两权重配比变异系数所测算的区域内差异变动趋势具有一致性。其中,在区域差异的时间变化方面,以黄河中游地区的区域内差异(即 G_{jj})的年际变化最为明显,而东北地区的区域内差异的年际变化最为稳定。在区域差异的空间变化方面,由2000年南部沿海地区的区域内差异最大演变为2018年北部沿海地区的区域内差异最大,北部沿海、南部沿海及大西北地区的内部各省份间农村能源消费碳排放差异明显。而东北及长江中游地区的区域内差异较小,适合开展内部省份间的碳减排协同治理。区域内差异变化基本呈现如下时空特征:东北、东部沿海及长江中游地区的区域内差异小,而北部沿海及南部沿海地区的区域内差异大,且时间纵向差异较小而空间横向差异较大。

2.区域间碳排放差异对比。在农村能源消费碳排放的区域间差异(即 G_{jk})的横向对比中,北部沿海与东部沿海之间、北部沿海与南部沿海之间、北部沿海与大西北之间以及南部沿海与大西北之间的区域间差异较大,基尼系数均高于0.400。其中,北部沿海与大西北的区域间农村能源消费碳排放差异最为明显。而东北与东部沿海之间、黄河中游与长江中游之间的区域间农村能源消费碳排放差异较小,且黄河中游与长江中游在地理位置上相邻,更适于开展农村能源消费碳排放管治的跨区域合作。

3.碳排放区域差异的贡献来源。样本考察期内区域内差异贡献(即 G_a)变化较为稳定,若以2000年为基期,2018年贡献水平仅下降1.03%。相较于区域内差异贡献,区域间差异贡献(即 G_b)较高,除2000年、2005年和2017年对总体基尼系数的贡献水平低于超变密度贡献(即 G_t)外,其余各年份的区域间差异贡献始终最高。这说明,八大地区的区域间差异是导致中国农村能源消费碳排放区域差异的主要原因。2000—2018年,区域间差异贡献呈现N型变动趋势,若以2000年和2009年为基期,则区域间差异贡献分别上升2.6%和下降15.46%。这说明,区域间农村能源消费碳排放差异的贡献份额波动较大,以2000年与2009年贡献份额的年份差异对比表现得最为明显。超变密度贡献在样本考察期内整体呈现V型变动趋势,相较于2000年,2018年超变密度贡献下降1.57%,而相较于2009年其贡献水平则上升14.79%。按样本考察期内贡献水平的年际均值,总体基尼系数的贡献份额排序为:区域间差异贡献>超变密度贡献>区域内差异贡献。

(三)农村能源消费碳排放区域非均衡动态演进

1.农村能源消费碳排放的分布动态。图2描述了全国农村能源消费碳排放以及农村生产、农村生活能源消费碳排放基于(12)式高斯核函数的核密度估计结果。由图2(a)可知,若以2000年为基期,2003年、2006年、2009年、2012年、2015年及2018年核密度曲线峰值中心逐渐向右移,这说明全国农村能源消费碳排放随着时间的推移,空间非均衡程度在逐渐加深。2015年与2018年新波峰的出现说明碳排放出现了两极分化,核密度曲线的拖尾较长说明农村能源消费碳排放的区域间差异较大。与2000年相比,2018年的核密度曲线峰值下降且变化幅度较大,表明区域差异在2018年明显变大且两极化现象变弱。由图2(b)可知,核密度曲线中心呈现先右移再左移的运动态势,说明农村生

^①限于文章篇幅,本文未对Dagum基尼系数测算结果进行展示,如有需要,可同笔者索要。

产能源消费碳排放的空间非均衡程度表现为先加深后减弱的变化态势。2003年、2009年及2012年均出现双峰。其中，2003年和2009年皆为主峰较低而侧峰较高；而与2003年和2009年相比，2012年的侧峰右移且主峰高于侧峰。这表明，农村生产能源消费碳排放存在一定程度的梯度效应。伴随农业生产方式及生产要素的绿色与节能化发展趋势，由农业生产导致的碳排放贡献差异在农村碳排放结构中的地位不断下降。由图2(c)可知，峰值逐年下降的同时核密度曲线的中心逐渐向右移，但移动速度放缓。此外，核密度曲线由尖峰逐渐向宽峰发展，分布延展性不断扩宽且变化幅度有所增大。

以上分析表明，农村生活能源消费碳排放量逐渐升高，同时区域间非均衡程度不断扩大。随着农村现代化设施及交通工具的不断普及与完善，农村地区的年际人均生活能源消费增长率远高于城市地区（Jiang et al., 2021），这也使得区域间农村生活能源消费碳排放差异逐渐成为农村碳排放区域间差异增长的主要贡献。

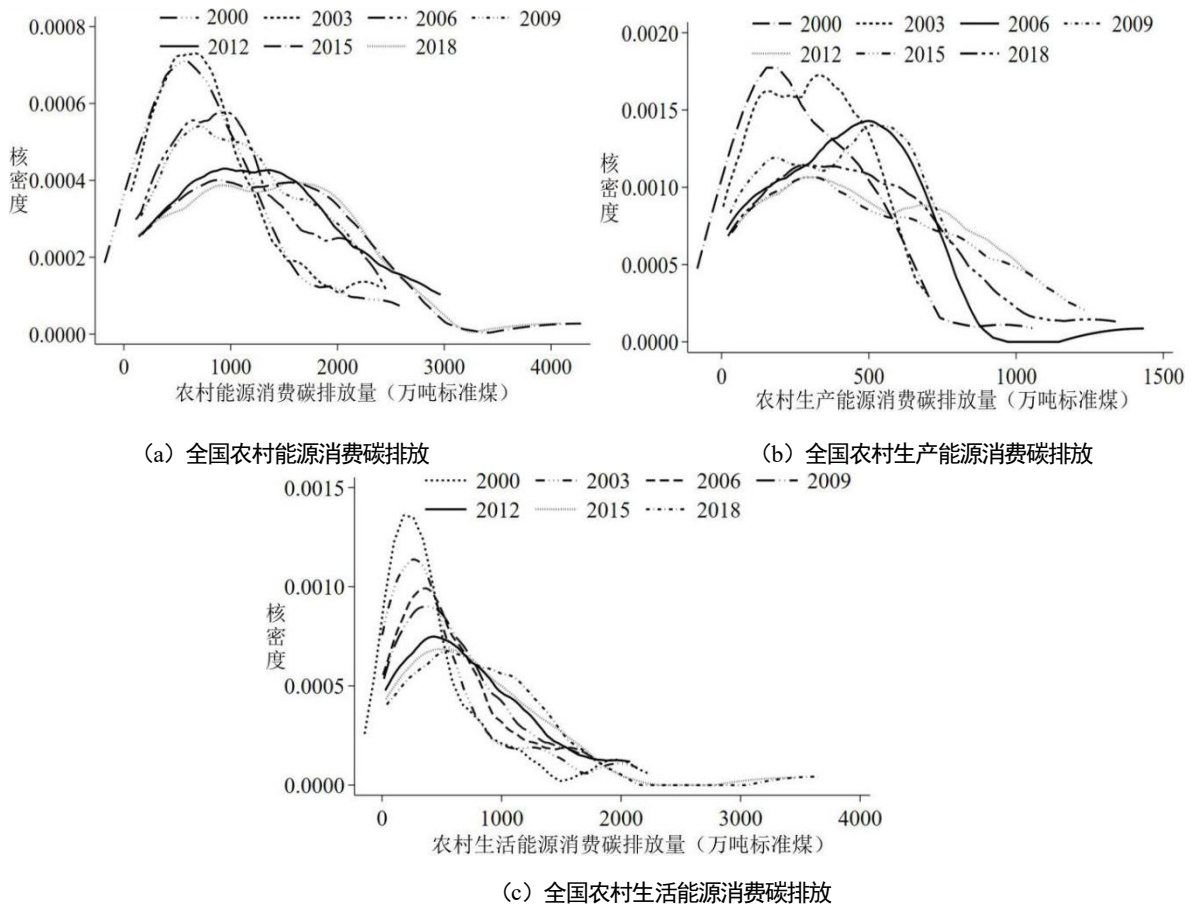


图2 全国农村能源消费碳排放核密度动态演进

2.农村能源消费碳排放类型的时空变化。对八大地区碳排放类型的分类结果表明：黄河中游地区属于双高碳排放型；大西北及南部沿海地区属于双低碳排放型；东北及东部沿海地区属于高农村生产低农村生活碳排放型；长江中游地区在双高碳排放型与高农村生产低农村生活型之间徘徊；而大西南地区在低农村生产高农村生活碳排放型、双高碳排放型及双低碳排放型之间波动。

双高碳排放型区域由 2000 年的北部沿海地区、黄河中游地区演变为 2018 年的黄河中游地区及长江中游地区，该类型中以黄河中游地区的表现最为明显。低农村生产高农村生活碳排放型在 2000 年以大西南地区为主要表现，而在 2012 年后以北部沿海地区为主要表现。双低碳排放型的地区个数由 2018 年前的 2 个上涨到 2018 年的 3 个，反映出近年来部分地区的农村减排措施有所成效。例如，南部沿海、大西南及大西北地区较其他地区的农村碳减排压力小。

对八大地区的农村能源消费碳排放主导类型的识别结果可以反映出不同地区的农村能源消费碳排放的主导类型。在农村能源消费碳排放较高（高于全国平均水平）的地区中，北部沿海及大西南地区的农村能源消费碳排放水平受较高的农村生活能源消费碳排放主导，长江中游的农村能源消费碳排放水平受较高的农村生产能源消费碳排放主导，而黄河中游的农村能源消费碳排放水平受较高的农村生产及生活能源消费碳排放的共同影响。在农村能源消费碳排放较低（低于全国平均水平）的地区中，东北与东部沿海地区的农村能源消费碳排放受较低的农村生活能源消费碳排放主导，而南部沿海与大西北地区的农村能源消费碳排放水平受较低的农村生产及生活能源消费碳排放的共同影响。

四、农村能源消费碳排放驱动因素分析

（一）驱动因素识别分析

1. 全国视角下驱动因素识别。本文采用自适应 Lasso 模型识别出全国视角下农村能源消费碳排放的驱动因素，包括：农业总产值、地区经济结构、农业机械总动力、总播种面积、能源强度、农村总人口、农村人口占地区总人口比重、农村居民人均可支配收入、能源价格、能源消费结构、人均能源消费量、农业内部结构及粮食总产量（见表 2）。结合逐步回归及普通 OLS 对参数的估计结果，本文进一步验证了自适应 Lasso 模型选取的驱动因素具有稳健性及有效性。

由表 2 可知，对农村能源消费碳排放具有较大且显著驱动作用（影响系数在 0.1 以上且在 1% 水平下显著）的变量为总播种面积、农业机械总动力、人均能源消费量、能源强度、农业总产值、能源消费结构、农村总人口、农村居民人均可支配收入。其中，总播种面积对驱动农村能源消费碳排放增长的作用最大，农业机械总动力每增加 1% 会刺激农村能源消费碳排放增长 0.477%。这表明，高耗能式的生产方式是引发碳排放增长的重要因素。因此，加速生产方式的绿色转型有助于减缓农村能源消费碳排放增长。随着农村地区的经济发展及居民生活质量的提高，居民收入与能源消费水平对农村能源消费碳排放的驱动作用持续增强。此外，农村地区以煤炭为主导的能源消费结构也是导致碳排放增长的重要原因。对农村能源消费碳排放增长具有显著抑制作用的变量表现为粮食总产量及农业内部结构。这说明，粮食产量的提高不仅不会刺激农村能源消费碳排放增加，反而可以充分发挥粮食作物的碳汇功能抑制碳排放增长。

表 2 自适应 Lasso、逐步回归及普通 OLS 估计结果的比较

变量	自适应 Lasso	逐步回归	普通 OLS
	系数	系数	系数
农业总产值	0.244***	0.252***	0.251***

中国农村能源消费碳排放区域非均衡性及驱动因素动态识别

地区经济结构	0.090***	0.076***	0.088***
农业机械总动力	0.477***	0.473***	0.478***
总播种面积	0.731***	0.721***	0.733***
农村住户固定资产投资完成额			-0.010
能源强度	0.335***	0.330***	0.335***
农村总人口	0.144***	0.130***	0.146***
农村人口占地区总人口比重	-0.044		-0.042
乡村老年抚养比			-0.0004
农村居民人均可支配收入	0.121***	0.122***	0.140
农村居民人均消费支出			-0.019
能源价格	0.052*	0.051*	0.054*
能源消费结构	0.201***	0.192***	0.201***
人均能源消费量	0.363***	0.380***	0.363***
农业内部结构	-0.120***	-0.122***	-0.121***
粮食总产量	-0.458***	-0.448***	-0.461***
Adj R ²	0.820	0.820	0.819
F 值	199.560	216.290	161.290

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平。

2.地区视角下驱动因素识别。全国八大地区的农村能源消费碳排放驱动因素的选择及参数估计结果如表 3 所示。东北地区的地区经济结构、农村总人口、能源消费结构及人均能源消费量驱动了该地区农村能源消费碳排放的增长。东北地区的农业发展在地区经济结构中的影响较为突出，且东北地区属于高农村生产低农村生活碳排放型，农业增加值占地区生产总值比重的下降将抑制东北地区农村能源消费碳排放的增长；此外，东北地区人口流失以及农村地区人口外移现象带动农村人口占地区总人口比重下降的同时在一定程度上抑制了东北地区的农村能源消费碳排放水平。对于北部沿海地区，对农村能源消费碳排放产生显著正效应的驱动因素为农业总产值、地区经济结构、粮食总产量、能源价格、能源消费结构、农村居民人均消费支出；对农村能源消费碳排放产生显著负效应的驱动因素为农村住户固定资产投资完成额和农村人口占地区总人口比重。受北部沿海地区河北与山东两省农村人均能源消费水平偏高的影响，地区经济发展水平及能源消费水平类指标对农村能源消费碳排放增长的驱动作用较大。东部沿海地区作为以高农村生产为主导的碳排放类型，农业机械总动力、总播种面积、农业总产值及能源强度对其农村能源消费碳排放皆表现为显著的正效应。南部沿海地区作为双低碳排放型，农村生产、能源投入及地区经济发展水平类指标对农村能源消费碳排放增长的驱动作用更为明显。对于双高碳排放型的黄河中游地区，对农村能源消费碳排放产生显著正效应的驱动因素为人均能源消费量、农业机械总动力、粮食总产量、农村总人口、能源强度、地区经济结构；对农村能源消费碳排放产生显著负效应的驱动因素为总播种面积、人均消费支出、农业总产值、农村人口占地区总人口比重。对于长江中游地区，能源消费水平类指标变量对农村能源消费碳排放的驱动作用最明显。对于大西南地区，能源消费结构、能源强度及人均能源消费量对农村能源消费碳排放的驱动作用显著，这意味着该地区加速清洁能源转型及提高单位能源消耗的经济产出水平可对农村能源消费碳排放增长

有较大的抑制作用。对于大西北地区，乡村老年抚养比每提升 1% 会刺激农村能源消费碳排放增长 0.106%；农村总人口对其碳排放增长的驱动作用也较为突出，农村人口发展规模类指标对大西北地区农村能源消费碳排放的增长产生显著的正效应。

以上分析结果表明，区域间农村能源消费碳排放的驱动因素及作用效果存在较大差异，驱动因素的非均衡发展加大了农村碳减排的协同治理难度。

表 3 分地区自适应 Lasso 模型的驱动因素选择结果

变量	东北	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	大西南	大西北
	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数
农业总产值	0.044	1.027***	0.353***	0.553***	-0.512***		0.155***	0.307***
地区经济结构	0.087***	0.973***	0.336***	0.328***	0.184*			
农业机械总动力			0.557**	0.762**	0.934***			0.094
总播种面积	0.035		1.014***		-1.320***	0.162***	0.394***	0.104
农村住户固定资产投资完成额		-0.997***	0.255***	-0.290***	0.004			-0.135***
能源强度	0.053	0.112	0.370**	0.371***	0.234***	0.130***	0.565***	
农村总人口	0.375***	-0.645***	0.195		0.755***			0.391***
农村人口占地区总人口比重	-0.331***		-0.425***		-0.462***			
乡村老年抚养比			-0.006		-0.048			0.106***
农村居民人均可支配收入			0.049		0.345			
农村居民人均消费支出		0.123**	0.233	-0.135*	-0.554**			-0.197***
能源价格		0.166**	0.120**		0.046		0.090**	-0.036
能源消费结构	0.115***	0.159**	0.045	0.080***	0.031	0.183***	0.395***	0.110**
人均能源消费量	0.772***	0.047		0.238***	0.942***	0.818***	0.456***	0.547***
农业内部结构	0.015	0.056	-0.062		0.056		-0.090***	
粮食总产量		0.774***	-1.201***		0.911***		0.135***	0.04

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平。

（二）纵向对比：驱动因素时间演变分析

本文基于 BIC、AIC 等 4 种准则并结合自适应 Lasso 模型选取农村能源消费碳排放的驱动因素，根据其系数的时间变化进一步分析全国农村能源消费碳排放驱动因素的时间演进趋势，如图 3 所示。其中，农业机械总动力的影响程度在 2000—2018 年期间呈现“下降—上升—下降”的变化趋势，2018 年参数估计的影响系数较 2000 年下降了 0.335；总播种面积在样本考察期内的影响程度经历先上升后下降的过程，其影响系数在 2018 年较 2000 年下降了 0.287。该两类驱动因素影响程度下降的原因在于：近年来全国农业生产方式逐渐向低碳化、可持续化方向过渡，据《中国农业绿色发展报告 2019》，全

国已建成 100 个农业绿色标准化生产示范基地，农业生产方式持续向绿色化转型^①。样本考察期内能源强度指标对农村能源消费碳排放影响程度随时间变化逐渐减弱，到最后未纳入自适应 Lasso 模型。这表明，样本考察期内农村生产生活投入要素中生产投入及能源投入对碳排放的影响持续下降。能源消费结构在前期影响效应较弱，后期影响效应逐渐增强；人均能源消费量于 2010 年后逐渐纳入自适应 Lasso 模型中，与 2010 年相比 2018 年影响系数提高了 0.366，且 2014—2018 年间对碳排放的驱动作用越发明显。这表明，能源消费水平对碳排放增长的驱动作用越发突出。此外，农村总人口对农村能源消费碳排放的影响系数由 2000 年的 0.141 提高到 2018 年的 0.788，其对碳排放的驱动效果逐渐增强，意味着农村生活能源消费逐渐成为农村地区能源消费碳排放增长的主导类型。

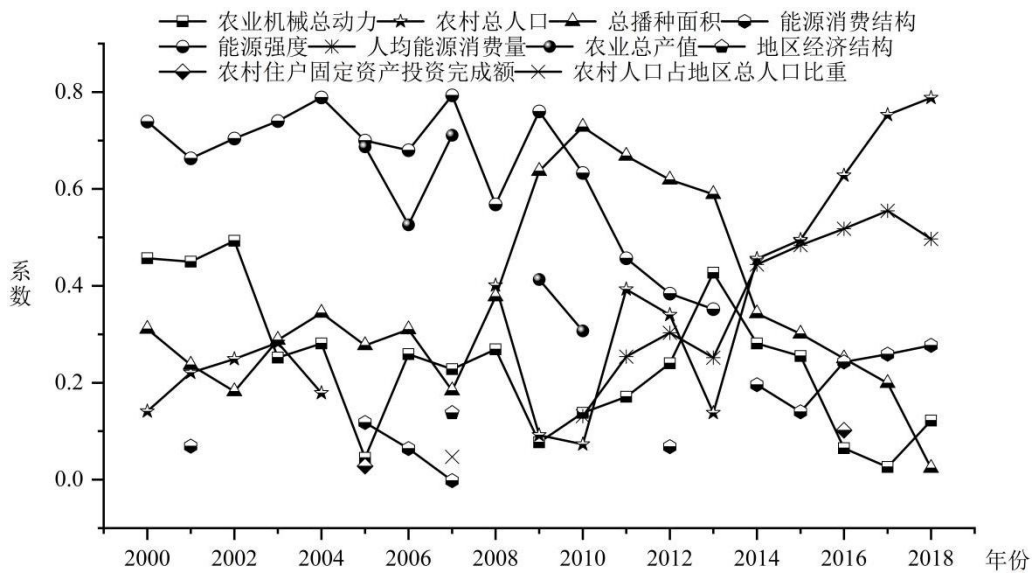


图3 农村能源消费碳排放驱动因素时间演变

(三) 横向对比：驱动因素空间差异分析

全国八大地区 30 个省份农村能源消费碳排放驱动因素的空间差异状况如图 4 所示。地区经济发展水平指标中，农业总产值在江西、浙江等地对农村能源消费碳排放的驱动作用明显，而地区经济结构在北京、广东等地对农村能源消费碳排放的抑制作用更为突出。此外，农业内部结构对区域间农村能源消费碳排放的抑制作用尤为明显，表明大力发展绿色种植业对于抑制农村地区能源消费碳排放增长有所裨益。

农村生产生活要素投入对农村能源消费碳排放的作用效果具有异质性特征。生产要素投入指标中，农业机械总动力在北京、山东、山西、湖北、贵州等地对农村能源消费碳排放增长表现为显著的正效应；而总播种面积在山西、贵州、宁夏等地对农村能源消费碳排放增长表现为显著的负效应。农村生活要素投入在吉林、河北、山西、陕西、云南等地对农村能源消费碳排放增长表现为显著的正效应；而在辽宁、北京、上海等地对农村能源消费碳排放增长表现为显著的负效应，伴随上述地区城镇化不

^①资料来源：《中国农业绿色发展报告 2019》，<https://www.caas.cn/xwzx/mtbd/304537.html>。

断深化以及城镇功能向农村地区不断扩张，辽宁、北京、上海等地的生活要素投入并不会对农村能源消费碳排放产生驱动作用。能源要素投入对福建、河南、贵州、宁夏等地的农村能源消费碳排放增长表现为显著的正效应；而在北京、广东等地能源消费结构的不断优化及地区碳排放管控政策持续实施的影响下，能源要素投入对农村能源消费碳排放增长表现为显著的负效应。

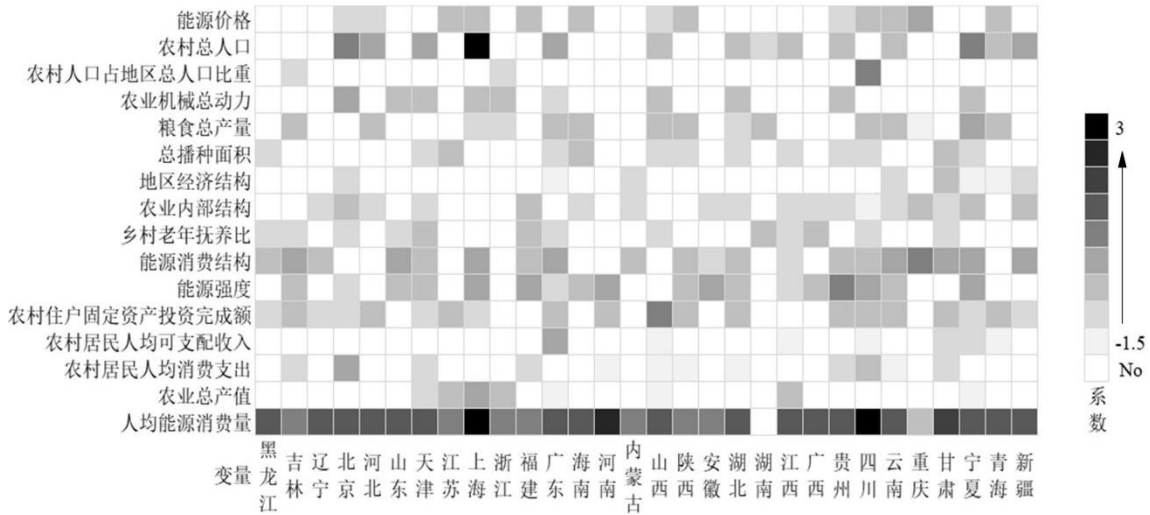


图4 农村能源消费碳排放驱动因素空间差异

注：变量系数大小的变化幅度为-1.5~3.0，“No”表示对应的变量未纳入模型。

农村人口发展规模对地区间农村能源消费碳排放增长产生正效应，但对不同地区的作用程度差异较大，如农村总人口对农村能源消费碳排放的影响系数在青海为 0.192，而其影响系数在北京为 0.927。农村居民人均消费支出对农村能源消费碳排放的影响效应在四川、北京等地表现为显著的驱动作用，而在福建、河南、山西、湖北等地发挥着显著的抑制作用。受地区间农村生活质量及经济发展水平差异的影响，农村生活质量水平对农村能源消费碳排放的作用效果也不相同。

能源消费水平对农村能源消费碳排放的作用效果在不同地区之间的差异较大。人均能源消费量作为刺激农村能源消费碳排放增长的显著变量，在全国 29 个省份中皆表现为显著的驱动作用。能源消费结构对农村能源消费碳排放的作用效果在黑龙江、新疆、重庆等省份表现为显著的正效应，在江西、安徽及内蒙古等地所表现的正效应不显著。此外，能源价格对农村能源消费碳排放增长的作用效果在陕西、云南、重庆等地与在河北、山西等地之间也具有差异性。

五、机制检验：两类型碳排放驱动机制的分化特征

农村生产能源消费与生活能源消费是农村能源消费碳排放的两大类型。本文基于 2000—2018 年全国及八大地区上述两类型的基础数据，根据自适应 Lasso 模型对驱动因素的选择结果来分析农村生产与生活能源消费碳排放的驱动机制，结果如表 4 及表 5 所示。

由表 4 可知，总播种面积对全国农村生产能源消费碳排放增长的驱动作用最为明显，而农业内部结构对全国农村生产能源消费碳排放增长发挥显著的抑制作用。这说明，农业生产规模的扩张具有驱

动农村生产能源消费碳排放增长的作用，农业生产耕种面积的增加会进一步刺激碳排放增长。东北地区农业发展程度在全国平均水平之上且属于高农村生产低农村生活碳排放型，农业总产值、人均能源消费量及总播种面积对农村生产能源消费碳排放增长的贡献明显；而农村人口占地区总人口比重、农村住户固定资产投资完成额及农村居民人均可支配收入皆对农村生产能源消费碳排放增长表现为负效应。北部沿海的粮食总产量、农业内部结构及能源消费结构对农村生产能源消费碳排放增长产生正效应，而能源价格、地区经济结构对农村生产能源消费碳排放增长产生负效应。东部沿海地区农村生产能源消费碳排放的驱动因素以农业总产值最为突出，而南部沿海地区的能源强度是刺激农村生产能源消费碳排放增长的重要因素。粮食总产量对农村生产能源消费碳排放的作用效果在黄河中游地区以及长江中游地区之间具有差异性，而能源强度在两地皆对碳排放增长具有显著的驱动作用。粮食总产量、人均能源消费量和农业总产值对大西南与大西北地区的农村生产能源消费碳排放增长具有显著的驱动作用。此外，在大西南地区，能源强度对农村能源消费碳排放增长同样具有显著的驱动作用；在大西北地区，农村总人口对农村能源消费碳排放增长具有显著的正效应，农业机械总动力、人均消费支出对农村能源消费碳排放增长的负效应更为突出。

表4 检验一：农村生产能源消费碳排放驱动因素的选择结果

变量	全国	东北	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	大西南	大西北
	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数
农业总产值	0.144**	0.541***		0.468***	0.151**		0.474**	0.495**	0.290**
地区经济结构		0.021	-0.483**				0.381***	-0.286*	0.034
农业机械总动力		0.239		0.108		0.093	0.269**		-0.495**
总播种面积	0.818***	0.299**						-0.268	
农村住户固定资产投资完成额	0.088*	-0.300***		0.371***			0.123		
能源强度	0.216***	0.014			0.757***	0.234***	0.313***	0.354***	-0.189**
农村总人口	-0.132***	0.199***					0.722***	-0.724***	0.130**
农村人口占地区总人口比重		-0.324***		0.245***	-0.123		-0.961***		
乡村老年抚养比	0.036					-0.09	0.154**	-0.369***	-0.097**
农村居民人均可支配收入		-0.651***					-0.122		
农村居民人均消费支出								-0.267	-0.334**
能源价格		-0.042	-0.123*		0.160*		0.108	-0.327**	-0.102*
能源消费结构		0.031	0.275***	-0.162***		0.0002	0.121**	0.13	-0.170**
人均能源消费量	0.439***	0.416***			0.012	0.857***	0.178	0.665***	0.406***
农业内部结构	-0.146***	-0.086	0.325***	-0.189***	0.109*	-0.027	0.067	-0.409***	-0.243**
粮食总产量	0.078	0.239	1.160***			0.431***	-0.636***	0.759***	0.969***

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平。

由表 5 可知，全国农村生活能源消费碳排放驱动因素在农村人口发展规模、农村生产生活要素投入、能源消费水平及地区经济发展水平方面表现明显。

地区经济发展水平对区域间农村生活能源消费碳排放的异质性影响表现明显，地区经济结构在北部沿海、东部沿海及南部沿海地区的影响系数皆超过 0.500 且通过显著性检验，而在大西北地区表现出对碳排放增长显著的抑制作用。其主要原因在于：大西北地区的农业增加值占地区生产总值的比重不断下降，受农业经济在地区经济结构及产业发展中的地位逐渐弱化的影响，地区经济结构对大西北地区的农村生活能源消费碳排放增长产生抑制作用。农村生活要素投入在东北地区发挥显著的正效应，但区域间农村生活要素投入对碳排放增长的影响效果差异较大。农村总人口在东北、黄河中游、大西北地区对农村生活能源消费碳排放增长产生显著的正效应，表明上述地区的农村人口发展规模缩小会抑制农村能源消费碳排放增长；而农村总人口在北部沿海及南部沿海地区对农村能源消费碳排放产生显著的负效应，意味着北部沿海及南部沿海地区农村人口规模的缩小会驱动农村生活能源消费碳排放增长。此外，能源消费水平指标中能源价格变量对农村生活能源消费碳排放在不同地区发挥着异质性作用，而能源消费结构及人均消费量对农村生活能源消费碳排放的影响在东北、长江中游、大西南及大西北地区具有同质性，均产生显著的驱动作用。

表 5 检验二：农村生活能源消费碳排放驱动因素的选择结果

变量	全国	东北	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	大西南	大西北
	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数	系数
农业总产值	0.208***		1.246***	0.094	0.393***	-0.742***		-0.153*	
地区经济结构	0.116***	-0.075	0.833***	0.519***	0.539***			0.135*	-0.105**
农业机械总动力	0.612***	-1.080***	0.309	0.831*	1.170***	0.956***			0.437***
总播种面积	0.516***	0.103		1.191**	0.365*	-0.534*	0.233***	0.661***	
农村住户固定资产投资完成额		0.174**	-1.231***	0.164	-0.240**	0.102			-0.239***
能源强度	0.338***		0.17	-0.231	0.187**	0.182**	0.100*	0.602***	0.126***
农村总人口	0.240***	0.341***	-1.296***		-0.321***	0.881***		0.112	0.518***
农村人口占地区总人口比重			0.965***	-0.839***	0.196**	-0.500**		0.123	
乡村老年抚养比				-0.013	0.004	-0.056	0.052	0.185***	0.175***
农村居民人均可支配收入	0.171	0.619***				1.191***			
农村居民人均消费支出	-0.018		0.236***	0.457***		-1.315***		0.254***	
能源价格	0.094*	0.333***	0.258***	0.074	-0.139*	0.149	-0.300***	0.277***	
能源消费结构	0.241***	0.335***	0.081	0.310***		0.025	0.105**	0.456***	0.325***
人均能源消费量	0.274***	0.812***	0.219*	0.066	0.381***	0.627**	1.009***	0.290***	0.575***
农业内部结构	-0.092		-0.065		-0.109*	0.186*	-0.275***		0.101*

粮食总产量	-0.616***	-0.309	0.548**	-1.992***
-------	-----------	--------	---------	-----------

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平。

六、结论与启示

（一）结论

本文在测算 2000—2018 年全国八大地区农村能源消费碳排放水平的基础上，首先，运用两权重配比变异系数、Dagum 基尼系数、核密度估计分析农村能源消费碳排放区域发展的区域差异及动态演进；其次，运用自适应 Lasso 模型进行驱动因素的选取；再次，在全国及地区视角下识别与分析农村能源消费碳排放的驱动因素及时空差异动态；最后，对农村生产及生活两类型的驱动机制进行分析。本文研究结论主要体现在以下几个方面。

第一，农村能源消费碳排放时空差异明显且非均衡程度不断深化。2000—2018 年，农村能源消费碳排放区域间差异呈现先缩小后扩大的发展态势，全国及八大地区的农村能源消费碳排放的区域非均衡特征明显，区域差异表现为区域间差异大而区域内差异小。不同地区间农村生产及生活能源消费碳排放主导类型具有差异性，农村生活能源消费碳排放逐渐演变为推动农村能源消费碳排放增长的主导类型。

第二，农村能源消费碳排放驱动因素的作用效果具有时空异质性。全国及八大地区的农村能源消费碳排放驱动因素的作用效果存在区域间差异，驱动因素的非均衡发展程度加大了区域间农村碳减排的协同治理难度。基于驱动因素的时空动态识别表明，农村人口发展规模及能源消费水平逐渐成为刺激农村能源消费碳排放增长的重要因素，而各类指标对农村能源消费碳排放的驱动效果及影响作用具有时间及空间差异性。

第三，农村生产及生活能源消费碳排放驱动机制存在分异及分化特征。全国视角下，在以农村生产为主导的能源消费碳排放的驱动因素中，生产要素投入及能源要素投入的影响效果较突出，总播种面积的驱动作用最为明显。此外，在以农村生活为主导的能源消费碳排放的驱动因素中，农村人口发展规模、农村生产生活要素投入、能源消费水平及地区经济发展水平表现的影响效果明显。地区视角下，农村生产及生活能源消费碳排放驱动因素的作用机制及影响程度表现出“因区而异、因类而异”的特点。

（二）政策启示

鉴于此，本文提出以下政策启示。

第一，管控结合、分异治理。中国的农村能源消费碳排放涨幅趋势明显，农村地区的碳减排应尽早纳入政府碳排放重点管治对象体系之中，提高社会各层面对农村碳减排治理的重视与关注程度。此外，农村能源消费碳排放的区域非均衡发展程度加大了区域间跨区合作及区域内协同治理的难度，故而农村碳排放管治过程中应明确“全国统筹、区域协调、地区专治”的管理思路，秉承“分地区、分时段、分类型”的分类管理方式，以区域碳排放水平划分减排的重点管理区域，以驱动因素的作用机制作为减排的管理导向，实现农村地区“生态承载—环境保护—经济增长”的绿色协调、高质量发展。

第二,以实促改,精准施策。各地区应结合自身实际情况及农村能源消费碳排放驱动因素在本地地区发挥的不同作用,加强地区内的碳排放管治重点,完善与制定相应的碳减排措施与政策。东北地区应进一步提高农业绿色生产技术,降低重型农用机械的污染排放程度,加快大功率电力驱动农用机械的生产研发及投入使用步伐。北部沿海地区应优化农村能源消费结构,加快农村能源消费由传统化石能源向清洁能源的消费倾向过渡,积极引导农村居民的低碳能源消费偏好。东部沿海地区应加快农村生产减排措施的实施与完善,提高农村地区绿色农业发展的指导与服务力度,充分利用农业财政资源积极鼓励农户绿色、科学的生产方式。南部沿海地区应优化农村经济发展结构,加快转变农村地区新的经济增长方式,推进农村经济向低排放、可持续、高附加值方向发展。黄河中游地区应提高农业生产低碳能源使用率,加快生产方式向绿色低碳型转变,积极推进黄河流域生态保护和高质量发展战略在农村地区的部署与实施。长江中游地区应依靠附近流域优势充分利用水资源,降低化石能源引发的高排放、高污染程度,继续深化循环生态农业的发展方向,加快农牧渔业资源使用的循环转换。大西南地区应提高农村能源的使用效率,采取阶梯电价及鼓励清洁能源使用等复合型措施以改善农村地区的能源消费习惯。大西北地区应注重培养农村居民的节能环保意识,进一步深化农村生活的用能结构,鼓励与引导农村居民节能减排的生活方式。

参考文献

- 1.程叶青、王哲野、张守志、叶信岳、姜会明,2013:《中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量》,《地理学报》第10期,第1418-1431页。
- 2.陈菡、陈文颖、何建坤,2020:《实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径》,《中国人口·资源与环境》第10期,第12-18页。
- 3.董梅、李存芳,2020:《低碳省区试点政策的净碳减排效应》,《中国人口·资源与环境》第11期,第63-74页。
- 4.杜海波、魏伟、张学渊、纪学朋,2021:《黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据》,《地理研究》第7期,第2051-2065页。
- 5.高强、孔祥智,2014:《中国农业结构调整的总体估价与趋势判断》,《改革》第11期,第80-91页。
- 6.郭文、孙涛:《人口结构变动对中国能源消费碳排放的影响——基于城镇化和居民消费视角》,《数理统计与管理》第2期,第295-312页。
- 7.杭雷鸣、屠梅曾,2006:《能源价格对能源强度的影响——以国内制造业为例》,《数量经济技术经济研究》第12期,第93-100页。
- 8.洪竞科、李沅潮、蔡伟光,2021:《多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型》,《资源科学》第4期,第639-651页。
- 9.黄蕊、王铮、丁冠群、龚洋冉、刘昌新,2016:《基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测》,《地理研究》第4期,第781-789页。
- 10.李国志、李宗植,2010:《中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于LMDI模型》,《农业技术经济》第10期,第66-72页。

- 11.刘贤赵、高长春、张勇、余光辉、宋炎, 2016:《中国省域能源消费碳排放空间依赖及影响因素的空间回归分析》,《干旱区资源与环境》第10期,第1-6页。
- 12.刘贤赵、郭若鑫、张勇、张东水、王志强、高长春、谢金宁, 2019:《中国省域碳排放空间依赖结构的非参数估计及其实证分析》,《中国人口·资源与环境》第5期,第40-51页。
- 13.罗光强、谢卫卫, 2013:《中国人口抚养比与居民消费——基于生命周期理论》,《人口与经济》第5期,第3-9页。
- 14.金书秦、林煜、牛坤玉, 2021:《以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径》,《改革》第5期,第29-37页。
- 15.史清华、彭小辉、张锐, 2014:《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》,《管理世界》第5期,第80-92页。
- 16.孙畅、吴芬, 2020:《中国高端服务业与先进制造业匹配发展的空间分异及收敛性》,《数量经济技术经济研究》第12期,第3-24页。
- 17.苏泳娴、陈修治、叶玉瑶、吴旗韬、张虹鸥、黄宇生、匡耀求, 2013:《基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理》,《地理学报》第11期,第1513-1526页。
- 18.王晶晶、焦勇、江三良, 2021:《中国八大综合经济区技术进步方向的区域差异与动态演进: 1978~2017》,《数量经济技术经济研究》第4期,第3-21页。
- 19.王强、伍世代、李婷婷, 2011:《中国工业经济转型过程中能源消费与碳排放时空特征研究》,《地理科学》第1期,第36-41页。
- 20.王少剑、刘艳艳、方创琳, 2015:《能源消费CO₂排放研究综述》,《地理科学进展》第2期,第151-164页。
- 21.王一鸣, 2020:《百年大变局、高质量发展与构建新发展格局》,《管理世界》第12期,第1-13页。
- 22.王勇、韩舒婉、李嘉源、李博, 2019:《五大交通运输方式碳达峰的经验分解与情景预测——以东北三省为例》,《资源科学》第10期,第1824-1836页。
- 23.吴昊玥、何艳秋、陈文宽、黄瀚蛟, 2020:《中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究——基于空间Dubin模型》,《农业技术经济》第3期,第110-123页。
- 24.武红、谷树忠、关兴良、鲁莎莎, 2013:《中国化石能源消费碳排放与经济增长关系研究》,《自然资源学报》第3期,第381-390页。
- 25.吴开亚、郭旭、王文秀、张浩, 2013:《上海市居民消费碳排放的实证分析》,《长江流域资源与环境》第5期,第535-543页。
- 26.吴贤荣、张俊飏、田云、李鹏, 2014:《中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于DEA-Malmquist指数分解方法与Tobit模型运用》,《资源科学》第1期,第129-138页。
- 27.吴翌琳、李宪, 2018:《劳动力市场匹配效率的影响因素研究》,《统计研究》第5期,第110-118页。
- 28.谢守红、王利霞、邵珠龙, 2014:《国内外碳排放研究综述》,《干旱区地理》第4期,第720-730页。
- 29.张乐勤、李荣富、陈素平、祝亚雯、许信旺, 2012:《安徽省1995年—2009年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测——基于STIRPAT模型》,《资源科学》第2期,第316-327页。

- 30.张馨、牛叔文、赵春升、胡莉莉, 2011:《中国城市化进程中的居民家庭能源消费及碳排放研究》,《中国软科学》第9期,第65-75页。
- 31.张樾樾、郑珊、余粮红, 2020:《中国海洋碳汇渔业绿色效率测度及其空间溢出效应》,《中国农村经济》第10期,第91-110页。
- 32.赵选民、卞腾锐, 2015:《基于LMDI的能源消费碳排放因素分解——以陕西省为例》,《经济问题》第2期,第35-39页。
- 33.郑伟、林山君、陈凯, 2014:《中国人口老龄化的特征趋势及对经济增长的潜在影响》,《数量经济技术经济研究》第8期,第3-20页、第38页。
- 34.中国科学技术协会、中国农业工程学会, 2016:《农业工程学科发展报告》,北京:中国科学技术出版社。
- 35.Adekoya, O. B., J. K. Olabode, and S. K. Rafi, 2021, "Renewable Energy Consumption, Carbon Emissions and Human Development: Empirical Comparison of the Trajectories of World Regions", *Renewable Energy*, 179(12):1836-1848.
- 36.Baye, R.S., A. Ahenkan, and S. Darkwah, 2021, "Renewable Energy Output in Sub Saharan Africa", *Renewable Energy*, 174(8):705-714.
- 37.Dagum, C., 1997, "A New Approach to the Decomposition of the Gini Income Inequality Ratio", *Empirical Economics*, 22(4): 515-531.
- 38.IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
- 39.Jiang, A., Q. Zhong, Y. Wang, Y. Ao, and C. Chen, 2021, "Influencing Factors of Commercial Energy Consumption Intention of Rural Residents: Evidence from Rural Chengdu", *Energies*, 14(4):1010-1024.
- 40.Ma, X. J., C. X. Wang, B. Y. Dong, G. C. Gu, R. M. Chen, Y. F. Li, H. F. Zou, W. F. Zhang, and Q. N. Li, 2019, "Carbon Emissions from Energy Consumption in China: Its Measurement and Driving Factors", *Science of the Total Environment*, 648:1411-1420.
- 41.Rahman, M. M., and M. A. Kashem, 2017, "Carbon Emissions, Energy Consumption and Industrial Growth in Bangladesh: Empirical Evidence from ARDL Cointegration and Granger Causality Analysis", *Energy Policy*, 110(11):600-608.
- 42.Tibshirani, R., 1996, "Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 58(1): 267-288.
- 43.Wang, Y. L., Q. L. Ma, Y. K. Li, T. Sun, H. J. Jin, C. Y. Zhao, E. Milne, M. Easter, K. Paustian, H. W. A. Yong, and J. McDonagh, 2019, "Energy Consumption, Carbon Emissions and Global Warming Potential of Wolfberry Production in Jingtai Oasis, Gansu Province, China", *Environmental Management*, 64(6): 772-782.
- 44.Yao, C. S., C. Y. Chen, and M. Li, 2012, "Analysis of Rural Residential Energy Consumption and Corresponding Carbon Emissions in China", *Energy Policy*, 41:445-450.
- 45.Zou, H., 2006, "The Adaptive Lasso and Its Oracle Properties", *Journal of the American Statistical Association*, 101(476): 1418-1429.

(作者单位: 东北石油大学经济管理学院)

(责任编辑: 黄 易)

Regional Imbalance of Carbon Emissions from China's Rural Energy Consumption and Dynamic Identification of Driving Factors

ZHANG Hengshuo LI Shaoping PENG Min

Abstract: Based on the calculated data of rural energy consumption carbon emissions in 30 provinces within eight regions of China from 2000 to 2018, this article analyzes the regional differences and contribution sources of carbon emissions of rural energy consumption by using two-weight ratio coefficient of variation and Dagum Gini coefficient, and analyzes the spatial-temporal evolution characteristics of regional imbalance of carbon emissions of rural energy consumption by using the Kernel density estimation. The driving factors of carbon emissions of rural energy consumption are selected by using the Adaptive Lasso Model. It also compares the results with stepwise regression and ordinary least squares parameter estimation. It finds that the regional differences of carbon emissions from rural energy consumption in China from 2000 to 2018 show a trend of narrowing first and then widening. The spatial unbalanced development degree of carbon emissions from rural energy consumption deepens during the dynamic evolution, and there are differences in the dominant types of carbon emissions from rural energy consumption in the eight regions. From the national perspective, factors such as rural production and living factor investment, rural population development scale, rural living quality and energy consumption level have different degrees of impact on rural energy consumption carbon emissions. From the regional perspective, the driving effects and impacts of driving factors on rural energy consumption carbon emissions have time and space differences. Therefore, in the process of carbon emission governance in rural areas, the management idea of “national overall planning, regional coordination, and regional specialization” should be clearly defined, the classification management method of “by region, by time period, and by type” should be adhered to, the key management areas of emission reduction should be divided according to the regional carbon emission level, and the mechanism of driving factors should be taken as the management orientation of emission reduction, so as to realize the green coordination and high-quality development of ecological bearing, environmental protection and economic growth in rural areas.

Keywords: Rural Carbon Emission; Regional Imbalance; Energy Consumption; Driver; Adaptive Lasso Model