

doi:10.13582/j.cnki.1672-7835.2019.01.011

# 基于 STIRPAT 模型的农村生活能源消费的生态效应分析<sup>①</sup>

李风琦

(上海财经大学 财经研究所,上海 200433)

**摘要:**农村生活能源消费规模、消费能力和使用设备技术等对生态环境有着重大影响。消费规模的扩大会加重生态环境压力,而消费能力增强、能源使用设备的技术更新既能推动农村生活能源向市场化、清洁化方向发展,也能提高农村生活能源利用效率,从而改善农村生活能源消费的生态环境。

**关键词:**STIRPAT 模型;农村生活能源消费;生态足迹;生态效应

**中图分类号:**F328

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-7835(2019)01-0075-09

能源消费是导致生态环境恶化的主要因素之一。一直以来,人们对生产能源的消费,特别是工业用能源消费所导致的生态环境问题及其生态效应更加关注。但随着我国经济的持续发展,农村居民的收入水平和能源消费观念发生质的变化,农村生活能源消费已成为能源消费总量中的重要组成部分,其对生态环境的影响也越来越大,对环境的污染也越来越严重。因此,为科学合理指导农村生活能源消费,加快农村生活能源消费升级,与生态环境实现同步发展,对农村生活能源消费的生态效应进行研究,有着重要的理论价值和实践意义。

## 一 农村生活能源消费影响生态环境的机理分析

农村生活能源消费的现实情况比较复杂,既涉及到传统生物质能源消费,又有商品性能源消费,还受地理、气候环境等外在因素的影响。在分析农村生活能源消费时,从消费主体的角度看,农村生活能源消费影响生态效应的主要机理有三:一是农村生活能源消费规模对生态环境的影响;二是农村生活能源消费能力对生态环境的影响;三是农村生活能源消费使用对生态环境的影响。

### (一)农村生活能源消费规模对生态环境的影响

相对于城市生活能源消费,农村生活能源消费对生态环境产生的影响更大。一般地,农村生活能源消费规模与农村生活能源消费人口的总量紧密相关,主要有消费规模的外延式增长和内涵式增长。农村生活能源消费规模的外延式增长是在能源消费结构和人均能源消费量不变的情况下,由于农村生活能源消费人口的增长而带动生活能源消费规模增长。内涵式增长是在能源消费结构和能源消费人口不变的情况下,由于人均消费量的增长而带动能源消费规模增长。这两种规模增长方式都会加重生态环境压力,进而加大对生态环境的破坏作用。改革开放以来,随着农村居民收入水平的不断提升和城镇化的发展,农村居民总人口持续下降<sup>①</sup>,人均生活能源消费持续增长,因而外延式消费规模处于缩减趋势,内涵式消费规模处于扩张趋势,最终能源消费规模对生态环境的影响要由这两种消费规模综合作用来决定。同时,我国农村地区广阔,不同区域的农村生活能源消费规模

<sup>①</sup> 收稿日期:2018-06-25

**基金项目:**湖南省社会科学成果评审委员会重大项目(XSP2016040508);湖南省社会科学成果评审委员会重点项目(XSP18ZDI002);湖南省哲学社会科学基金项目(18YBA150);湖南省社科智库课题(ZK2019006)

**作者简介:**李风琦(1978-),男,湖南安仁人,博士生,湖南省社会科学界联合会副研究员,主要从事能源经济与环境政策研究。

<sup>①</sup>秦翔:《中国居民生活能源消费研究》,山西财经大学博士学位论文,2013。

差异较大,表现为东部和西部农村地区生活能源消费规模相对较小,中部农村地区能源消费规模较大的特征。更具体地讲,农村生活能源消费规模基本以华北——西南地区为中心线,越是远离中心线的农村地区其消费规模就越小,且这种减少趋势越是远离中心线越是明显<sup>①</sup>。因此,从农村生活能源消费规模看,中部农村地区农村能源消费对生态环境的影响最大。

### (二)农村生活能源消费能力对生态环境的影响

农村居民的生活能源消费能力由其收入水平决定。农村生活能源消费能力的增强,会推动着农村生活能源消费结构多元化、推动着农村生活能源消费向市场化、清洁化方向发展,进而对生态环境产生影响。具体来说,随着收入水平的提升,农村居民的生活能源消费能力也不断增强,会推动着农村生活能源消费从两个方面影响生态环境。一方面,农村生活能源消费能力增强后,将逐步改变过去的生活能源消费观念,从而有效降低薪柴等生物质能源的消费量<sup>②</sup>,相应地也减少了这些生物质能源消费所导致的环境污染。Demurger 在分析中国北方农村贫困地区广泛使用薪柴消费问题时,进一步证实了由农村居民的经济财富所导致的生活能源消费能力对生物质能源使用的重要影响<sup>③</sup>。另一方面,农村生活能源消费能力增强后,会推动农村生活能源消费结构的多元化,会增加农村生活能源消费中商品性能源、清洁能源的消费比重(特别是电力的使用),从而使农村生活能源消费对生态环境破坏的作用力减少。因此,农村生活能源消费能力的增强,整体上会减少对生态环境的破坏性影响。我国改革开放以来,农村居民收入水平不断提升,加上近年来农村普惠金融体系建设的推进<sup>④</sup>,农村生活能源消费能力不断增强,很多农村地区基本不用上山砍柴,生态环境已有明显好转,森林覆盖率大大提高。

### (三)农村生活能源消费的使用设备对生态环境的影响

生活能源的消费必须要借助一定的终端设备

才能发挥作用。农村生活能源消费品种较多,不同的能源品种用于生活消费时,必须使用不同的终端设备。不同的生活能源使用设备代表一定的技术因素,有着一定的能源转换效率和对生态环境的影响作用。农村生活能源消费的使用设备的更替,根据其类型的不同,大致可分为两种情况。第一种情况是在不变动生活能源消费结构的情况下变更使用设备,提高(降低)能源使用效率,降低(增大)能源消费对环境的污染。比如,在传统生物质能源消费中,将原来的土灶改为节柴灶就可提高薪柴的使用效率并减少大气污染;在清洁能源消费中,将电冰箱进行换代升级也能提高电能使用效率并减少环境污染。第二种情况是在能源消费结构变动时,原有能源使用设备被新的用能设备代替,也会对能源使用效率和生态环境影响产生作用。因为能源消费的使用设备与生产这个设备的技术水平有关,一般地可以将能源消费的使用设备看成代表技术的因素。

以上是影响生态环境较大的三个方面。分析中国40年改革开放进程,农村生活能源消费的发展趋势基本上是能源消费规模的内涵式增长较快,外延式为负增长趋势,对生态环境的影响要看内涵式增长规模与外延式增长规模的综合作用。若综合起来的能源消费规模是增加的,就会加重生态环境的恶化,若总的能源消费规模是下降的,就会减缓生态环境的恶化。农村居民的能源消费能力的提升会促使农村生活能源消费结构进一步多元化,商品性能源与清洁能源消费比重增加,相应地会减缓生态环境恶化。生活能源消费使用设备的技术发展,会扩大节能型、清洁型能源终端使用设备的使用范围,提高能源效率,相应地会减缓生态环境恶化。

同时,农村生活能源消费对生态环境的影响,除以上所讲的直接效应外,还有相应的间接效应。比如,农村电力消费是清洁能源,但电能中有相当比重来自火力发电,这也会导致生态环境污染,火力发电等产生的电能在农村生活中消费后将导致农村生活能源消费的间接生态效应。

①李光全,聂华林,杨艳丽,等:《中国农村生活能源消费的空间格局变化》,《中国人口·资源与环境》2010年第4期。

②Demurger S, Fournier M. "Rural poverty and fuelwood consumption: Evidence from Labagoumen Townshioip (China)". <https://ssrn.com/abstract=553761>, 2007-10-30.

③Demurger S, Fournier M. "Poverty and firewood consumption: A Case Study of Rural Households in Northern China", *China Economic Review*, 2010, 22(4): 512-523.

④谢家智,涂先进,叶盛:《金融借贷、心理财富与农户消费》,《金融经济研究》2017年第6期。

## 二 农村生活能源消费对生态环境影响的实证分析

### (一) 描述性分析

近 40 年来,我国农村的经济社会发生了质的飞跃,农村居民的收入水平普遍提升,生活能源的消费结构日益多元化,整体上生活能源消费对生

态环境的破坏性影响在减少。为易于理解,此处通过《中国能源统计年鉴》《中国农村统计年鉴》相关数据计算整理,得到从 2002 年至 2015 年农村生活能源消费规模与消费结构的变化趋势,以及农村生活能源消费对生态环境的影响,如图 1、图 2、图 3 所示。

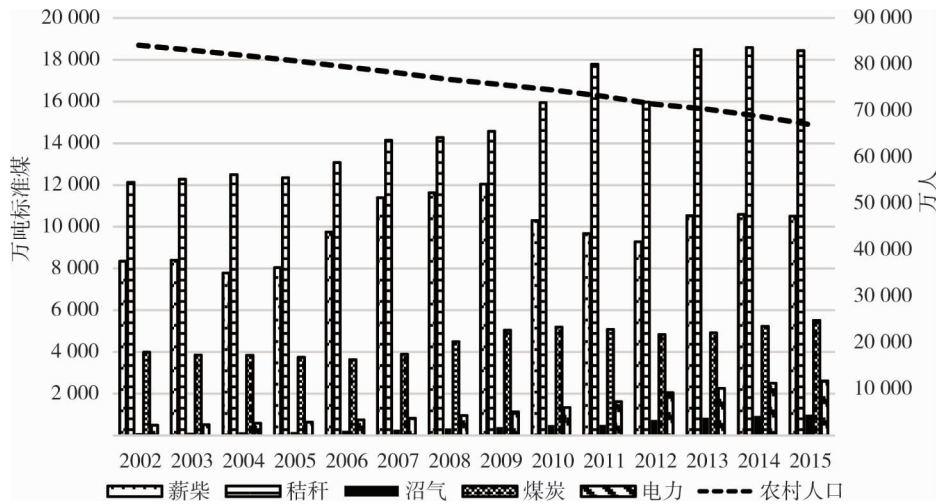


图 1 农村人口与农村生活能源消费品种的变化趋势

从图 1 可知,随着我国城镇化的发展,农村人口总数不断减少,即农村生活能源消费的外延式规模在缩小,但生活能源消费总量在增加,因而生活能源消费的内涵式规模在快速扩大,即农村生活能源消费的人均消费量的增速超过农村人口减少所减少的能源消费量。具体分析各种类型的能源消费品种可知,生物质能源的消费仍占相当重

要的比重,清洁能源(沼气、电力)虽增速要快些,但所占比重并不高。

从图 2 分析,随着我国城镇化的发展,农村居民的人均收入持续增长,相应地能源消费能力也增强,推动能源消费总量增长,特别是商品性、清洁化能源消费量的增长。

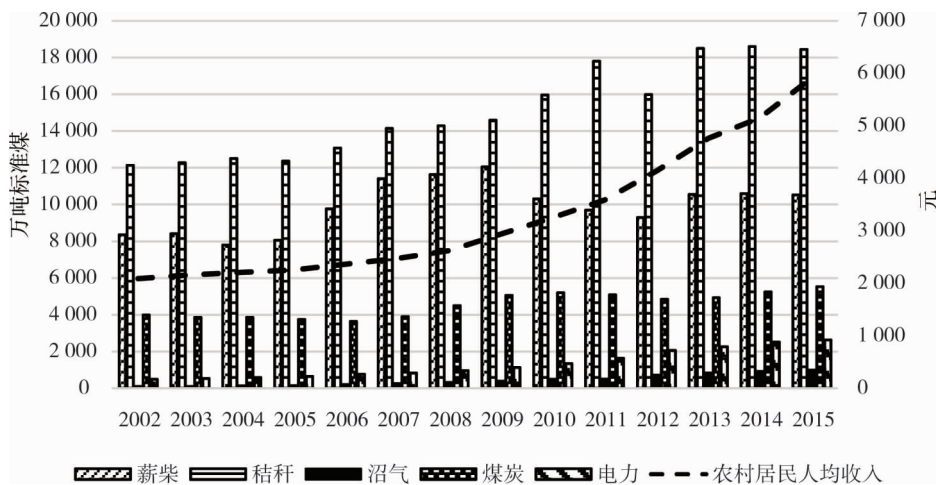


图 2 农村居民人均收入与农村生活能源消费品种的变化趋势

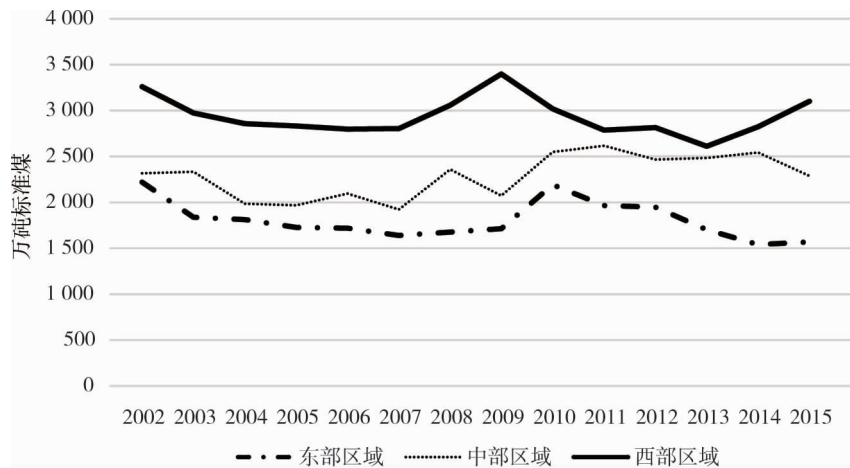


图3 东中西三区域农村生活能源消费总量变化趋势

从区域性分析农村生活能源消费,由图3可知,东部区域农村生活能源消费总量最小,中部其次,最多的是西部地区。事实上东中部区域的农村人口总数要多于西部区域。产生这种现象的原因是,东部地区农村整体生活水平比较高,商品性能源、清洁能源使用比重较高,因而能源利用效率高。而西部区域农村生活能源消费多以传统生物质能源的简单使用为主,使用效率低下,同时对生态环境的污染也较东部或中部农村区域严重。

(二) 农村生活能源消费的生态足迹分析

1. 农村生活能源消费的生态足迹估算

生态足迹是目前比较常用的测算环境可持续性发展的指标,它能将不同类型农村生活能源消费的生态环境效应转化成—个综合性指标——生物生产型土地面积,因而具有易于计算、容易理解的特征,相对来说可以比较真实地反映农村能源消费者对环境系统的综合性影响,用生态足迹作为农村生活能源消费的表征指标是比较实际的<sup>①</sup>。首先,计算农村生活能源消费排放的温室气体值,其估算公式为

$$Q_j = \sum_i^n C_{ij} E_{ij} \quad (1)$$

其中,  $Q_j$  表示  $j$  区域农村生活能源消费所排放的

温室气体总量(即  $CO_2$ 、 $CH_4$  或  $N_2O$  的排放总量);  $C_{ij}$  为  $j$  区域对第  $i$  类型农村生活能源消费的排放因子;  $E_{ij}$  为  $j$  区域对第  $i$  类型农村生活能源消费总量。考虑到农村生活能源消费的实际情况,能源消费的类型主要分为薪柴、秸秆、沼气、煤炭、电力等5种。

为了分析的方便,各省级区域的排放因子统一取《2006年IPCC国家温室气体清单指南(第二卷,能源)》(以下简称《指南》)中提供的缺省值。由于农村生活用煤主要为原煤,其排放因子取该《指南》中各类煤炭缺省排放因子的平均值;薪柴的排放因子参照固体生物燃料中木材的缺省值选取;秸秆的排放因子参照固体生物燃料中其他主要固体生物量的缺省值选取;户用沼气参照气体生物量的排放因子选取。由于《指南》中的排放因子单位为“kg/TJ”,这里根据统计数据特点和折标准煤系数统一转换为“g/kg”。另外,由于中国的电力生产以火电为主(2008年占80.95%),而火电生产多以煤炭等化石能源作燃料,因此农村生活电力的消费也意味着温室气体的间接排放,相关的排放因子直接采用狄向华等人所测算的值<sup>②</sup>。因而,农村生活能源消费的主要温室气体排放因子见表1。

表1 不同类型农村生活能源的温室气体排放因子

类型	薪柴/(g·kg <sup>-1</sup> )	秸秆/(g·kg <sup>-1</sup> )	沼气/(g·kg <sup>-1</sup> )	煤炭/(g·kg <sup>-1</sup> )	电力/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
CO <sub>2</sub>	187 3.31	146 3.50	114 1.58	202 6.40	107 0.00
CH <sub>4</sub>	0.07	0.06	0.00	0.03	64.60
N <sub>2</sub> O	0.50	0.44	0.02	0.02	26.00

①徐中民,程国栋,邱国玉:《可持续性评价的ImPACTS等式》,《地理学报》2005年第2期。

②狄向华,聂祚仁,左铁镞:《中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单》,《中国环境科学》2005年第5期。

然后,根据 IPPC (2006) 和 Wackernagel M<sup>①</sup> 利用已知化石能源的平均 CO<sub>2</sub> 吸纳能力直接折算为 CO<sub>2</sub> 的生态足迹 (5.2 t/hm<sup>2</sup>), 以及通过其全球变暖潜势将 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 的生态足迹折算成 CO<sub>2</sub> 当量值后再进行估算。因而,相应区域农村生活能源消费的生态足迹估算公式为

$$EF_{\text{tot}} = EF_{\text{CO}_2} + EF_{\text{CH}_4} + EF_{\text{N}_2\text{O}}; \quad (2)$$

$$EF_{\text{tot}} = \frac{1}{5.2} (Q_{\text{CO}_2} + 21Q_{\text{CH}_4} + 310Q_{\text{N}_2\text{O}}). \quad (3)$$

在表达式 (3) 中,  $EF_{\text{tot}}$  表示农村生活能源消费的总生态足迹,  $EF_{\text{CO}_2}$ 、 $EF_{\text{CH}_4}$ 、 $EF_{\text{N}_2\text{O}}$  分别表示温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的生态足迹,  $Q_{\text{CO}_2}$ 、 $Q_{\text{CH}_4}$ 、

$Q_{\text{N}_2\text{O}}$  分别表示农村生活能源消费中温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量。21、310 则分别是 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的全球变暖潜势<sup>②</sup>。

利用 (3) 的估算公式, 采用《中国统计年鉴 2015》《中国能源统计年鉴 2015》和《中国农村统计年鉴》的相关数据, 估算中国 2014 年各省级行政区域内 (不含西藏自治区和港澳台地区) 农村生活能源消费的温室气体排放量和生态足迹。在分析中考虑到农村生活能源消费中电力有较大比例来自火电, 因而采用全国火力发电平均比重, 将其比例值定为 0.8。根据分析, 中国农村生活能源消费所排放温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的情况见表 2。

表 2 不同类型农村生活能源的温室气体排放量

类型	薪柴/(万 t)	秸秆/(万 t)	沼气/(万 t)	煤炭/(万 t)	电力/(万 t)	总排放/(万 t)
CO <sub>2</sub>	8 806.83	107 178.84	1 111.16	11 871.32	34 087.08	163 055.24
CH <sub>4</sub>	0.33	4.39	0	0.17	2 057.97	2 062.86
N <sub>2</sub> O	2.35	32.22	0.02	0.12	1 035.36	862.99

由表 2 和公式 (3) 可计算得知薪柴、秸秆、沼气、煤炭和电力的生态足迹量分别是 1 835.05, 22 549.85, 214.88, 2 290.79, 76 589.63 万 hm<sup>2</sup>, 相应的比例分别是 1.77%, 21.79%, 0.21%, 2.21%, 74.01%。整个农村生活能源消费所产生的生态足迹总量是 91 135.04 万 hm<sup>2</sup>。

由上面分析可知, 农村生活能源消费中, 间接产生的生态足迹量 (主要是电力) 最大, 几乎是其他所有能源消费足迹的 3 倍; 其次是直接产生的生态足迹, 如秸秆, 约占总量的 1/5; 沼气的生态足迹最小, 主要原因是沼气在农村生活能源消费中所占比重很小, 可以忽略不计, 再者沼气对环境污染也要小。从人均量来看, 农村生活能源消费所排放的温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总量分别是 2.64, 0.03, 0.01 t; 人均薪柴、秸秆、沼气、煤炭和电力的生态足迹量是 0.03, 0.36, 0.00, 0.04, 1.24 hm<sup>2</sup>。虽然我国农村人口基数大, 但人均能源消费的温室气体排放量和生态足迹都比较小。

## 2. 区域间生态足迹比较分析

以省级行政区域来看, 不同类型的能源消费生态足迹存在着显著的空间差异性。总体状况是, 山东省的农村生活能源消费生态足迹最大, 为

42 106.54 万 hm<sup>2</sup>, 最小的是上海, 只有 430.48 万 hm<sup>2</sup>。从人均量来看, 最大的是福建, 最小的仍然是上海。从分项来看, 煤炭的生态足迹中最大的是山东, 最小的是海南; 电力的生态足迹中最大的是广东, 最小的是上海; 薪柴的生态足迹中最大的是广西, 最小的是上海和宁夏; 秸秆的生态足迹中最大的是河南, 最小的是上海; 沼气的生态足迹中最大的是四川, 最小的是上海。从上面的估算统计可知, 上海的农村生活能源消费生态足迹最小, 这主要是因为上海已经是城镇化水平很高的城市, 农村居民的能源消费观念与消费行为与城市居民消费几无差别, 商品性、清洁性能源消费已成为日常能源消费的首选, 另一方面上海的农村居民人数也很少, 即使人均消费的生态足迹大些, 其总量也很小。分析我国东、中、西部三大区域的农村生活能源消费生态足迹, 其关系如表 3 和表 4 所示。

首先, 三大区域都是农村电力的生态足迹最大, 然后依次是秸秆、煤炭、薪柴和沼气, 这反映了农村生活能源消费生态足迹的一般规律。即电力能源消费因国家多年实行“村村通电工程”“城乡用电同网同价”等政策, 农村居民也能方便实惠

<sup>①</sup>Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. "National natural-capital accounting with the ecological footprint concept", *Ecological Economics*, 2000, 29(3): 375-390.

<sup>②</sup>杨振:《农村生活能源消费的环境效应及影响因素分析》,《农业工程学报》2011 年第 1 期。

的用上电能,从而其消费量比较大,相应的电力生态足迹也较大。农村秸秆来源于各种粮食作物,通常是小麦、水稻、玉米、薯类、油菜、棉花、甘蔗和其它农作物(如粗粮)在收获籽实后的剩余部分,

在中国农村地区广为分布,是较为容易利用的生物质能源,因而也是利用量较大的能源消费品种,所以其生态足迹较大。

表3 中国三大区域内不同类型农村生活能源的生态足迹

区域	薪柴	秸秆	沼气	煤炭	电力	总量
东部	544.33	6 308.11	39.64	853.72	33 163.05	40 908.85
中部	584.85	10 046.01	53.48	814.34	20 804.41	32 303.09
西部	236.73	5 398.10	85.17	932.69	11 298.05	17 950.73

表4 中国三大区域内不同类型农村生活能源的生态足迹比例

区域	薪柴	秸秆	沼气	煤炭	电力	总量
东部	1.33	15.42	0.10	2.09	81.07	100
中部	1.81	31.10	0.17	2.52	64.40	100
西部	1.32	30.07	0.47	5.20	62.94	100

其次,从三大区域内部生态足迹比例结构来看,东部区域中电力生态足迹所占比重最大,为81.07%,明显高于中部区域的64.40%和西部区域的62.94%,说明城镇化水平越高的区域,对电力这种便利、清洁性能源越加偏好。再看生物质能源的生态足迹,东、中、西三个区域在各自总生态足迹中所占比例分别为16.85%,33.08%,31.86%,中部区域的生物质能源消费的生态足迹在其总生态足迹中所占比例最大,但中西部的差距不大。

最后,从三大区域的分项生活能源消费的生态足迹比较来看,薪柴的生态足迹是中部区域最大,占总薪柴生态足迹的比例为42.82%;其次是东部区域,占总薪柴生态足迹的比例为39.85%;西部最少,占总薪柴生态足迹的比例为17.33%。这一方面反映了中国东中部区域的薪柴资源禀赋相对于西部区域丰富,农村居民较为容易获取薪柴资源,同时其成本也比较低,因而东中部的薪柴消费的生态足迹比例要高于西部。再看秸秆消费的生态足迹,也是中部区域最大,占总秸秆生态足迹的比例为46.18%;其次是东部区域,占总秸秆生态足迹的比例为29.00%;西部较东部稍稍少些,占总秸秆生态足迹的比例为24.82%。沼气的

生态足迹是西部区域最大,占总沼气生态足迹的比例为47.77%;其次是中部区域,占总沼气生态足迹的比例为30.00%;东部区域最少,占总沼气生态足迹的比例为22.23%。煤炭的生态足迹是西部区域最大,占总煤炭生态足迹的比例为35.86%;其次是东部区域,占总煤炭生态足迹的比例为32.83%;中部区域煤炭生态足迹少些,占总煤炭生态足迹的比例为31.31%。简单地说,东、中、西部在煤炭消费的生态足迹上是三分天下的。电力消费的生态足迹是东部区域最大,中部次之,西部最少,三大区域的农村电力消费生态足迹所占比例分别为50.81%,31.88%,17.31%。

从上分析可知,在经济越好的区域,农村电力的消费量越大,其生态足迹也越多;煤炭的消费足迹西部区域稍多些,因西部各省多为煤炭资源大省,农村居民用煤炭的成本相对较低。生物质能源消费的生态足迹以中部区域最多,这与中部区域资源丰富、农村人口众多密不可分的。

(三) STIRPAT 模型分析

1. 模型的构建

1971年,美国斯坦福大学 Paul P. Ehrlich 教授提出 IPAT 方程,目的是辨别人口数量、富裕度和技术对环境的影响<sup>①</sup>。Fischer-Kowalski 通过 IPAT 分析人口规模、富裕度和技术对环境的影响,认为人口规模和技术对环境的影响要强于富裕度<sup>②</sup>。Dietz 和 Rose 将 IPAT 等式表示成随机形式,即通过人口、富裕度和技术的随机回归分析各

①Chertow M R. "The IPAT equation and its variants: changing views of technology and environmental impact", *Journal of industry ecology*, 2000, 4(4): 13-30.

②Fisher-Kowalski M, Amann C. "Beyond IPAT and Kuznets curves: globalization as a vital factor in analyzing the environmental impact of socio-economic metabolism", *Population and environment*, 2001, 23(1): 7-47.

驱动力对环境压力的影响,简称为 STIRPAT 模型<sup>①</sup>。其后 STIRPAT 模型在能源消费的生态效应分析中得到广泛的应用,特别是分析能源消费及其与 CO<sub>2</sub> 排放量。Preston 通过分析认为人口规模对于碳排放的影响程度约为 20%~60%<sup>②</sup>。邵帅等基于改进的 STIRPAT 模型和广义矩估计方法分别对上海市工业分行业能源终端消费碳排放规模和强度的影响因素进行了实证分析<sup>③</sup>。Yeh J C et al 利用台湾省 1990~2014 年的数据,通过 STIRPAT 模型分析人口、富足和技术对全球暖化中个体潜在的影响<sup>④</sup>。

一般地,STIRPAT 模型对人口规模、富裕程度和能源利用技术等因子进行分析,其表达式为

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (4)$$

其中, $I, P, A, T$  分别为第  $i$  区域的能源消费生态足迹、人口规模、富裕程度和能源利用技术;常数项  $a$  标度这个模型, $b, c, d$  分别为  $P, A, T$  的指数项, $e$  为模型中的误差项。

由于对于能源使用技术的测量没有统一的指标,一般都是采用残差项来代替。实际应用中将式(4)两边取对数,同时将  $T$  的影响都归于残差项  $\mu$ 。从而,上述 STIRPAT 模型变为

$$\ln(I_i) = \ln a + b \ln(P_i) + c \ln(A_i) + \ln \mu_i \quad (5)$$

York R 和杨莉等认为(5)的残差项包含了  $P, A$  之外的所有其他的影响因素,这个影响因素主要是技术,但该残差项的逆对数却是可以解释能源使用技术的生态影响乘子,从而可用来解释技术的生态效益<sup>⑤⑥</sup>。 $b, c$  则分别反映  $P, A$  与能源生态足迹的弹性关系,就是当保持其它自变量不发生变化时, $P$  或  $A$  的单位百分比变化所引起能源生态足迹变化的百分比。

## 2. 模型分析

在 STIRPAT 分析中,用年底农村人口数表示人口规模,农村居民人均可支配收入表示富裕水平,采用《中国统计年鉴 2015》的相关数据,以最小二乘法估计 STIRPAT 模型中相关的系数。一般情况下,采用最小二乘法进行回归分析时,其参数估计有可能会产生多重共线性,或是异方差等情况。这里用 Stata 软件进行这两个变量的相关性分析,人口规模与富裕水平的相关性很小(-0.05),且在应用这些数据时已经进行了对数变换,其误差项也只是一种相对误差,因而多重共线性问题几乎不存在。另一方面,本文采用的 STIRPAT 模型能较好地解决异方差问题<sup>⑦</sup>。因此,考虑总生态足迹以及薪柴、秸秆、沼气、煤炭、电力的生态足迹,作为因变量构成模型(1)~模型(6),其回归建模的结果见表 5。

表 5 农村生活能源消费生态足迹的建模估计

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)	模型(5)	模型(6)
常数项	-5.648 5 *	-25.757 0	2.218 5	27.098 2 **	2.176 3	-9.428 9 ***
人口规模	1.151 9 ***	3.087 5 ***	1.112 3 ***	1.795 5 ***	1.244 2 *	1.207 8 ***
富裕水平	0.524 6 *	0.587 7	-0.471 1	-4.256 7 ***	-0.851 3	0.842 5 ***
R <sup>2</sup>	0.856 0	0.457 2	0.607 1	0.706 8	0.155 6	0.844 2
F 统计量	80.26	11.37	20.86	32.55	2.49	73.13
Prob>F	0.000	0.000 3	0.000 0	0.000 0	0.102 0	0.000 0

注:\*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 10%, 5%, 1% 的水平上显著

由表 5 的信息可知,在这 6 个模型中除第 5 个模型(煤炭生态足迹的建模回归分析)外,整体

①Dietz T, Rose E A. "Rethinking the environmental impact of population, affluence and technology", *Human Ecology Review*, 1994(1): 277-300.

②Preston S H. "The Effect of Population Growth on Environmental Quality", *Population Research and Policy Review*, 1996, 15(2): 95-108.

③邵帅,杨莉莉,曹建华:《工业能源消费碳排放影响因素研究——基于 STIRPAT 模型的上海分行业动态面板数据实证分析》,《财经研究》2010 年第 11 期。

④Yeh J C, Liao C H. "Impact of population and economic growth on carbon emissions in Taiwan using an analytic tool STIRPAT", *Sustainable Environment Research*, 2016(2).

⑤Yeh J C, Liao C H. "Impact of population and economic growth on carbon emissions in Taiwan using an analytic tool STIRPAT", *Sustainable Environment Research*, 2016(2).

⑥杨莉,刘宁,戴明忠:《城镇化进程中居民生活消费的生态环境压力评估——以江苏省江阴市为例》,《生态学报》2008 年第 11 期。

⑦徐中民,程国栋,邱国玉:《可持续性评价的 ImPACTS 等式》,《地理学报》2005 年第 2 期。

的回归方程的 F 统计量都在 1% 的水平上显著,表明农村人口规模、富裕水平对生态足迹有着较强的解释能力。除模型(5)中人口规模系数的 t 统计值在 10% 水平上显著外,其余模型都在 1% 水平上显著,说明 STIRPAT 模型分析农村生活能源消费的生态效应是有效的。

首先,从农村生活能源消费规模的影响来看,这 6 个模型中人口规模的回归系统都大于 1,表明在保持其它条件不变的情况下,农村人口数量每增加 1 个百分点就会导致农村生活能源消费生态足迹增加的比例超过 1%。实际上,农村人口数量的增加,相应的会在吃、穿、住、交通等方面增加能源需求,自然也会增加生活能源消费的生态足迹。因此,城镇化的发展促使农村人口向城镇人口转化,减少农村人口规模,相应地减少农村生活能源消费的生态足迹。

其次,从农村生活能源消费能力的影响来看,这 6 个模型中以农村居民人均可支配收入表示富裕水平对模型(1),模型(4),模型(6)的回归系统通过 t 检验,即农村居民人均可支配收入对总生态足迹、沼气消费的生态足迹、电力消费的生态足迹的影响作用明显。这说明,在保持其它条件不变的情况下,农村居民收入水平每提高一个百分点,相应的总生态足迹同向增加 0.524 6%,沼气消费的生态足迹逆向减少-4.256 7%,电力消费的生态足迹同向增加 0.842 5%。表明收入水平对总能源消费的生态影响是显著的,因为农村居民收入的提升会改善农村居民的生活条件,从而会加大农村生活能源消费量,并带动生态足迹增加。具体来看,收入水平的提升,农村居民会偏向清洁性、便利性的能源消费,首当其冲的是电力消费的增加,同时是传统生物质能源消费的减少,从而促进农村居民的生活能源消费模式和结构向城镇居民能源消费方式靠近。这种农村生活能源消费形式的变化符合 Omar R 等人所提出的“能源阶梯”的理论框架,即农村居民收入水平越高就会对舒适型、便利性、清洁性的能源要求越高<sup>①</sup>。

再次,分析模型中的残差逆值,其代表着农村生活能源消费足迹变动的技术因素。York 指明

在 STIRPAT 模型中,平均残差逆为 1,代表着平均使用能源设备的效率,若值小于 1 则表示其能源消费的技术效益超过平均水平,值越小代表着技术效益水平越高<sup>②</sup>。从模型的残差逆值来看,总生态足迹的技术效应中,上海的技术效益最高,福建最低。其它各类能源消费品种的生态足迹技术效应中没有特别明显的优势。

最后,从总生态足迹的回归模型看,估计结果表明人口规模、富裕水平可以解释农村生活能源消费的总生态足迹变化的 85.60%。人口规模的回归系数在 1% 水平上显著,回归系数为 1.151 9;富裕水平的回归系数在 10% 水平上显著,回归系数为 0.524 6。说明这两个回归自变量与生态足迹之间存在着不同比例的变化关系。由此可见,人口规模相对富裕水平对生态足迹的作用更为显著。

### 3. 结果分析

农村生活能源消费的温室气体排放量以 CO<sub>2</sub> 的排放量为主,秸秆消费所产生的生态足迹量最大。首先,从 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 三种温室气体中排放比例来分析,几乎全部是 CO<sub>2</sub> 的排放,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量很小,一起所占比例不足 2%。从能源消费品种来分析,秸秆消费所产生的温室气体量最大,占总比例的 65.73%。沼气消费所产生的温室气体量最少。再从农村能源消费的生态足迹量来分析,电力消费的生态足迹量最大,生态足迹量第二大的是秸秆,生态足迹量最小的是沼气,因为沼气是清洁能源,是农村所用能源中最为环保的。

在东中西部三大区域内,东部区域的农村能源消费的生态足迹量最多,西部最少。从比例来看电力消费的能源消费足迹最多,沼气的生态足迹最少;从生态足迹量比较来看,东中西部区域都是按电力、秸秆、煤炭、薪柴、沼气的顺序依次减少。

对比人口规模与富裕度对生态足迹的影响程度,可知人口规模的重要性要远大于富裕度。一般来说,农村人口数量每增加 1 个百分点,就会导致农村生活能源消费生态足迹增加的比例超过

<sup>①</sup>Omar R, Masera. "From linear fuel switching to multiple cooking strategies: A critique and alternative to the energy ladder model", *World Development*, 2000, 28(12): 2083-2103.

<sup>②</sup>York R, Rosa E A, Dietz T. "STIRPAT, Impat and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts", *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.



1%,富裕度每增加 1 个百分点就会导致沼气消费的生态足迹逆向减少-4.256 7%,电力消费的生态足迹同向增加 0.842 5%。

总生态足迹的技术效益中,上海的农村生态足迹的技术效益最好,福建的农村生态足迹的技术效益最差,上海是福建的 8.86 倍。当从薪柴、秸秆、沼气、电力、煤炭等分别来考虑时,农村生态足迹的技术效益呈现出复杂性。特别是很多省份的煤炭生态足迹的技术效益低于全国平均值,说明这些省份农村地区煤炭的能源效率有待进一步提高。

### 三 结论与建议

第一,农村生活能源消费规模对生态环境影响方式有内涵式和外延式两种。内涵式的能源消费规模通过提升人均能源消费量增加总能源消费量,从而加重生态环境压力;外延式的能源消费规模因农村人口持续且大量地城镇化而逐步缩小,从而减轻生态环境压力。最终能源消费规模的影

响由这两者合力决定。

第二,农村生活能源消费能力对改善生态环境有着显著的影响。一般地,农村居民收入水平的提升会使农村生活能源消费能力的增强,进而推动农村生活能源消费结构多元化,推动农村生活能源消费市场化、清洁化,从而减轻农村的生态环境压力,改善农村生态环境。

第三,农村生活能源消费的使用设备的技术更新对改善生态环境有着显著的影响。能源使用设备的技术更新会提升能源的使用效率,相应地减轻对生态环境的负面影响。

以上三点是农村生活能源消费对生态环境影响的基本规律,政府相关能源供给部门应创造条件为农村生活能源提供市场化、清洁化的能源供给系统,引导农村居民在生活能源消费量中不断增大清洁能源的消费比重,引导农村居民更新能源利用效率低的用能设备,以减轻生活能源消费对生态环境的破坏性影响,实现农村生活能源消费与生态环境友好和谐发展。

## Analysis of Ecological Effects of Rural Household Energy Consumption Based on STIRPAT Model

LI Feng-qi

(Institute of Finance and Economics, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The scale of rural living energy consumption, consumption capacity, and the use of equipment and technology all have a significant impact on the ecological environment. The expansion of consumption scale will aggravate the pressure of ecological environment. It promotes the development of rural domestic energy towards a market-oriented and clean direction by enhanced consumption capacity and technological renovation of energy-using equipment. At the same time, it can improve the energy efficiency of rural life and the ecological environment of rural domestic energy consumption.

**Key words:** the STIRPAT model; rural living energy consumption; ecological footprint; ecological effect

(责任校对 刘兰霞)