

“双碳”目标下我国农村能源发展现状与分析

字琼珍, 王昌梅, 吴凯, 杨斌, 尹芳[✉], 张无敌
(云南师范大学, 云南昆明 650500)

摘要: [目的]通过对人类利用能源的历史、中国农村能源的现状分析,总结出我国农村主要的能源结构特点。[方法]通过文献法、对比分析法等研究方法去探究农村能源发展现状,识别农村能源发展存在的问题以及未来发展趋势。[结果]从农村能源使用的多元化来看,薪柴的使用量逐渐减少、农村沼气的发展逐渐趋于平缓、农村电网改造完成后农村用电趋于饱和、随着“西气东输”政策的实施燃气占比逐年上升、太阳能热利用大面积普及后稳中有降、随着光伏发电技术的突破太阳能发电量快速提升。[结论]针对中国农村能源现状,农村能源中传统利用方式逐渐被改变,新能源的发展得到了重视,文章结合国家政策找出了农村能源相应的能源特点,探究“节能减排”的新时期“双碳”目标下农村能源的发展趋势。

关键词: “双碳”目标; 农村能源多元化利用; 节能模式; 生物质能; 多能互补

中图分类号: TK01; TK6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0001-10

OA: <https://www.energychina.press/>

Current Situation and Analysis of Rural Energy Development under the "Dual Carbon" Goal

ZI Qiongzhen, WANG Changmei, WU Kai, YANG Bin, YIN Fang[✉], ZHANG Wudi
(Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: [Introduction] By analyzing the history of human utilization of energy and the current situation of China's rural energy, this paper summarizes the main energy structure characteristics of rural areas in China. [Method] Through literature method, comparative analysis and other research methods, this paper explored the current situation of rural energy development and identified the existing problems and future development trends of rural energy development. [Result] From the perspective of the diversification of rural energy use, the usage of firewood is gradually decreasing, the development of rural biogas tends to be stable, the rural electricity consumption is becoming saturated after the completion of rural power grid transformation, the proportion of gas is increasing year by year with the implementation of the "West-to-East Gas Transmission" policy, the solar thermal utilization is steadily declining after the large-scale popularization, and the solar power generation is rapidly increasing with the breakthrough of photovoltaic power generation technology. [Conclusion] According to the current situation of rural energy in China, the traditional way of using rural energy has been gradually changed, and the development of new energy has been paid attention to. In combination with national policies, the corresponding energy characteristics of rural energy have been found, and the development trend of rural energy under the "dual carbon" goal in the new era of "energy saving and emission reduction" has been explored.

Key words: "dual carbon" goal; rural energy diversified utilization; energy-saving mode; biomass energy; multi-energy complementation

0 引言

农村能源主要来源于当地的资源,包括沼气、薪柴、电力、煤炭、太阳能等能源。改革开放时期,我

国试图构建一个以农村能源为发展目标的能源发展体系,因为农村能源与可再生能源存在着紧密联系、关系到国家能源安全,并为能源供给多样化服务。20世纪80年代末至21世纪初,我国开始实施“三

收稿日期: 2023-06-03 修回日期: 2023-10-18

基金项目: 云南省万人计划产业技术领军人才项目(20191096); 云南省国际科技合作专项(202003AF140001)

北”防护林体系建设工程,这一工程在保护和改善生态环境、促进农业生产的同时也推动着农村能源建设的步伐。在温室气体排放量增多、全球变暖的背景下,中国农村能源面临着加强应对气候变化的能力这一新的任务,利用农林工业残余物和大规模植树造林及种植能源作物已成为可再生能源开发的优先选择。2020年9月22日,在第七十五届联合国大会上,国家主席习近平明确表示,中国的目标是在2030年之前使二氧化碳排放量达到顶峰,并致力于在2060年前达到碳中和的目标。伴随着“双碳”目标的提出,国家和政府更加关注生态环境问题,竭力从各个方面实现节能减排。实现农村能源节能减碳,有助于农村“碳达峰”“碳中和”,构建农村能源体系深度融合互联互通,采用“太阳能+”方式,协同空气能、生物质能等清洁能源,是实现能源低碳化、振兴乡村的重要基石。

当前,全球正积极开展节能减排工作,因此,农村能源建设面临新的历史课题,清洁能源成为了农村能源发展的政策重点。近年来,我国经济以及科学技术不断发展,农村能源也得到了进一步发展^[1]。在挖掘农村能源的过程中,不仅要兼顾能源的经济效益、社会效益,同时也要注意生态效益。因此,根据我国各个时期能源发展特点,针对存在的农村能源问题,探究“双碳”视域下我国农村能源发展模式。

1 农村能源

1.1 农村能源的含义

农村能源是农村地区生产、生活所需要的能源供应及消费的总称,主要包括煤、薪柴等传统能源、新能源和可再生能源^[2]。

1.2 我国农村能源发展历史

中国四千多年的农耕文明,展现了“天人合一”的原始生态观:“燧人氏”钻木取火的发现使人类学会吃熟肉;“伏羲氏”教人们结网、打猎、养殖牲畜;“神农氏”教人们种五谷、制造农具,原始的耕种农业由此展开。人力、畜力、水车、风车、手工生产和马车等的应用,中国走过了悠长的农业文明时代。

进入工业革命时代,为满足新中国发展建设需要,我国提出“能源工业发展以电力为中心”,由于我国城乡分治,侧重于工业和城市用能,导致农村电力供应长期不足,电气化水平不高;农村过度依赖薪柴,森林面积减少,污染环境;农村能源体系建设不发达,消费层次相对低^[3]的局面。

在改革开放的时代背景下,我国致力于构建一个以可再生能源为核心的可持续能源体系。鉴于农村能源与可再生能源之间的天然联系,农村的能源政策更多地关注国家的能源安全,并致力于满足能源供应的多样化需求。随着温室气体的排放量逐渐上升和全球气候变暖的趋势,气候变化的问题已经超越了国家的边界因此,如何有效地利用农、林、工业废弃物和种植能源作物已成为可再生能源开发的第一选择。

中国四大经济区划分为东部、中部、西部和东北部4个地区,不同地区能源使用形式不一样,主要使用电、煤气、天然气、液化石油气、柴草、煤、沼气、太阳能等能源,具体分布如表1所示。

由表1可知,东部沿海地区经济发达,能源使用更加多元化,森林拥有量较少,薪柴和沼气使用较少,生物质能、煤、电力和液化石油气的消费相对较高,东部地区取暖比重较中西、东北地区低,热水需求比

表 1 我国四大经济区主要生活能源结构

Tab. 1 Main living energy structure of China's four economic zones

能源种类	全国/%	东部地区/%	中部地区/%	西部地区/%	东北地区/%
电	58.6	57.2	59.3	59.5	58.7
煤气、天然气、液化石油气	49.3	69.5	58.2	24.5	20.3
柴草	44.2	27.4	40.1	58.6	84.5
煤	23.9	29.4	16.3	24.8	27.4
沼气	0.7	0.3	0.7	1.2	0.1
太阳能	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1
其他	0.5	0.2	0.2	1.3	0.1

注:此指标每户可选两项,分项之和大于100%。数据来源2016年国家统计局第三次全国农业普查主要数据公报(第四号)。

重较其他地区高。中西部地区地多人口也多, 依旧有许多农户使用薪柴和电; 东北地区冬季温度低且严寒, 需要取暖, 农户多使用柴草来取暖^[4]。

2 我国农村能源使用分析

2.1 农村用电情况

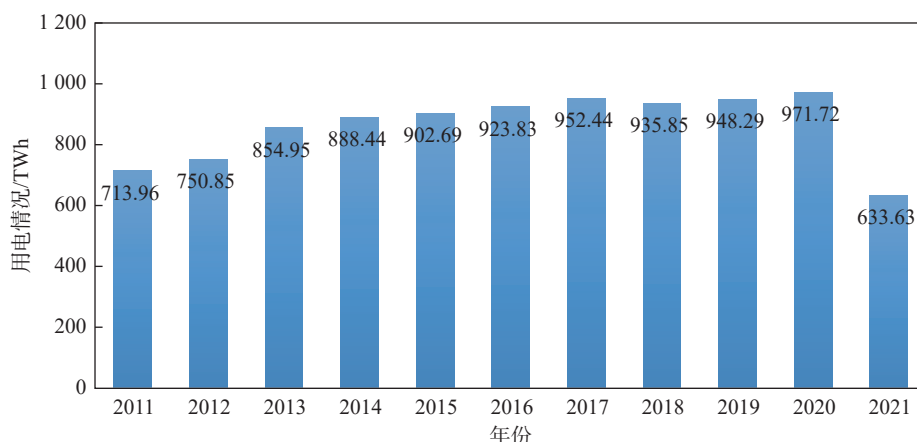


图 1 2011—2021 年我国农村用电量^[6]

Fig. 1 Rural electricity consumption from 2011 to 2021 in China^[6]

20 世纪 60 年代我国农村电气化开始发展, 2010 年国家大力发展农村无电地区的电力工程, 2012 年国家完成“户户通”用电建设, 为边疆、山区和少数民族地区提供电力, 2013 年制定了无电地区用电的“三年”计划书, 自此, 农村地区开始大量使用电气。2017 年完成“农网改造”, 2018 年脱贫攻坚完成, 农村电力发展达到一个饱和的状态, 农村用电增速变缓, 2018 年国家乡村振兴战略的提出, 农村用电又呈现增长趋势。2020 年上半年农村用电量下降了 1.3%, 主要受疫情影响, 下半年增加了 3.1%。我国农村用电排名前三的是江苏、广东、上海, 由于当地经济发展水平较高, 发电量在前三的是四川、云南、福建, 这些地方水利资源丰富。

电能的主要来源有火电、核电、水电, 我国农村用电的方式主要是火电和水电^[7]。火电主要使用煤、石油、天然气等固体和燃煤等方式发电, 在发电过程中会产生 CO_2 、 SO_2 , 增加大气中的烟尘, 污染大气, 会对人体的呼吸道产生影响, 同时, 火电厂除灰需要大量的水资源, 不仅浪费水资源, 而且会污染土壤, 对农作物的产量造成影响。

因此, 国家大力发展清洁发电方式, 水电可以防

农村用电情况与经济发展水平密切相关, 近年来, 由于我国农村经济收入不断提高, 农村用电量也逐年增加, 基础设施不断完善^[5]。由图 1 可知^[6], 我国农村用电量逐年增加, 农村电网的发展, 使得农村生活用电更加方便。

洪、灌溉、供水、旅游, 不会产生三废, CO_2 、 SO_2 的排放量比火电低, 水电代替火电可以减少 5.03 亿吨碳的排放, 属于绿色能源工程^[8]。

2.2 农村燃气

燃气包括人工煤气、液化石油气和天然气^[9]。目前在人民生活中应用较广泛的是天然气^[10], 2020 年, 农、林、牧、渔业中天然气消费量达到了 1.28 亿 m^3 。我国煤炭资源主要集中在内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、陕西省、山西省、河南省等。2013 年我国煤品的消费达到峰值, 增长了 61%, 之后呈波动下降趋势^[11], 如图 2 所示^[12]。

2020 年我国东部地区和西部地区的燃气使用人口大幅度上升, 这是由于西部地区中的陕西、四川、新疆三大省份的燃气产量高, “西气东输”工程的开展促进了东部地区燃气的使用, 同时, “煤改气”工程促进了燃气电气装机量的持续增加, 进一步刺激了燃气的使用。

煤的燃烧会污染环境, 造成雾霾天气。燃气的热效率相对燃煤较高, 供热范围扩大^[13]。刘昊洋对天津地区的燃煤供热站做了调研, 他发现燃煤存在低效高污染的问题^[14]。煤燃烧需要较大的空间, 在

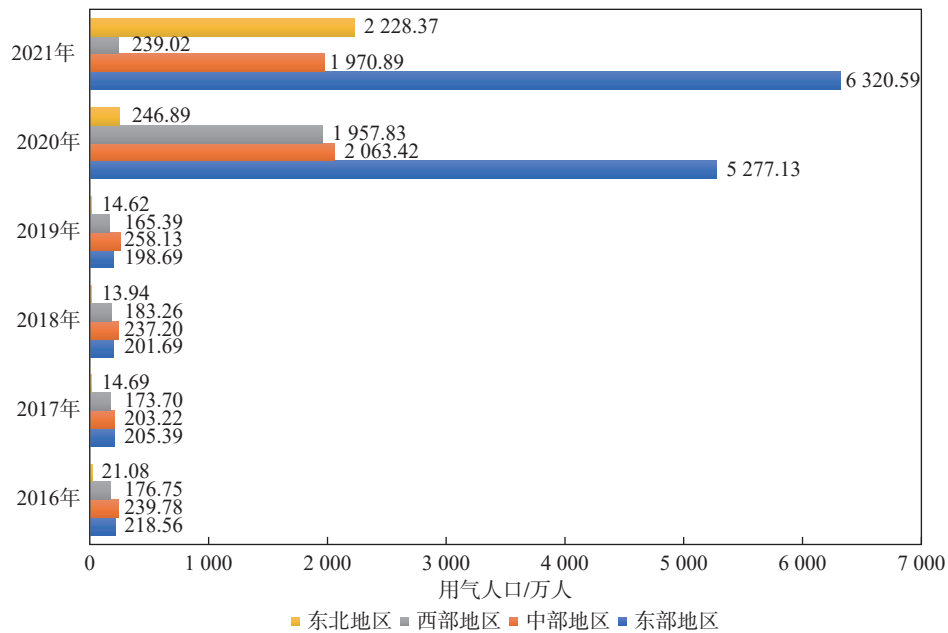


图 2 2016—2021 年我国农村燃气使用人口分布情况^[12]

Fig. 2 Population distribution of rural gas use in China during 2016-2021^[12]

燃烧过程中产生的气体会使煤燃烧不充分,而燃气的燃烧空间较小,产生的烟量比煤燃烧小^[15]。

“双碳”目标的提出会使燃煤发电需求减少,天然气的需求增加,燃气替代燃煤可以减少污染、设备成本降低、可以灵活调节^[16]。

2.3 农村薪柴

薪柴是我国农村地区使用最多的生活能源之一,属于林木生物质能源^[17]。根据图 3^[6],西部地区较多,同时西部地区薪柴使用量较大。

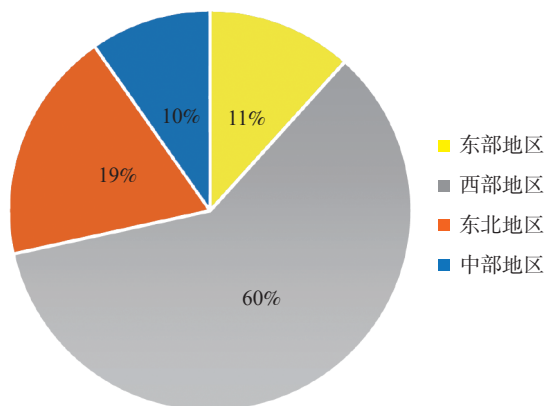


图 3 2021 年中国林森林蓄积量分布情况^[6]

Fig. 3 Distribution of forest stock in China in 2021^[6]

对薪柴能源的过分依赖,是一种低值化、粗放型的利用方式,会导致室内空气污染,森林植被的退化,进而会对人体的健康和生态环境产生影响,因此,要

了解农民使用薪柴的原因,并从源头上进行控制,从而加速将传统的生物能源转化为高效清洁能源,这对中国农村以及其他发展中国家的农村来说,具有非常重要的意义^[18]。在薪柴来源方面,在使用薪柴的家庭中,收集途径主要包括了:自家果树枝叶、集体林业、速生林、建筑废弃木材等以及其他^[19]。地理环境、居民生活消费水平等原因决定农户使用薪柴^[20],农民将森林用作燃料,导致植被破坏和生态问题。

农村的薪柴可以用电和沼气替代,陈飞霞^[21]通过对长汀县绿康沼气合作社调查发现,1 m³的沼气产生的热值相当于 4.3 kWh 电产生的热值,需要燃烧 3 kg 的薪柴。沼气可以有效减少薪柴的使用,保护林地,减少碳排放。

2.4 农村沼气

农村可再生能源种类多,有农作物秸秆、人畜排泄物、太阳能、风能、水能等^[22],农村可再生能源能够对农村生态环境起到保护作用,提高农民的生活质量,缓解全国的能源危机,推动可持续发展^[23]。沼气在日常生活中可以进行炊事、供暖、发电,沼渣和沼液可以作为有机肥为作物的生长提供养分^[24]。

由图 4、图 5 可知^[25],2014 年到 2015 年我国农村沼气池产气量增加,2016—2021 年产气量一直下降;2014—2015 年我国农村沼气工程产气量在增加,

但2016—2017年沼气工程产气量减少,2017—2021年农村沼气工程产气量持续增加。2015年农村沼气转型,农村沼气的应用从户用沼气向大型沼气工程、生物天然气项目方向发展,沼气工程的规模不断扩大^[26]。但是出现了增速下降的趋势,这是因为原有沼气项目不能满足农户需求、重建轻管问题突出、不能发挥沼气的综合效益^[27]。城市化进程加快、农民进城打工、从事养殖业的人数变少,户用沼气池没有畜禽粪便作为主要发酵原料;农村户用沼气池始终存在进出料难,容易结壳等难以克服的问题导致农村沼气的发展出现了增速下降的现象^[28]。

农户安装10 m³沼气池可以满足一家五口一年

中对清洁能源的需求,农村安装1000 m³沼气池加80 kW的发电机组,相当于600 MWh电产生的能量,8 m³的沼气池可以产生500 m³的气,需要烧1.5 t的干柴、1 t的煤炭、100 kWh的电,可以节约农民300元的燃料费,可以产生35 m³的沼肥,省去农民450元去买农药和化肥。

我国农村户用沼气产气量减少、沼气工程产气量逐年增加,未来农村沼气工程将按规模化发展,沼气发电机组、净化后的沼气可以为城市供气,小型沼气发生装置可以用于处理厨余垃圾、厕所垃圾,符合“双碳”目标下的碳减排,发展前景巨大。

2.5 农村太阳能

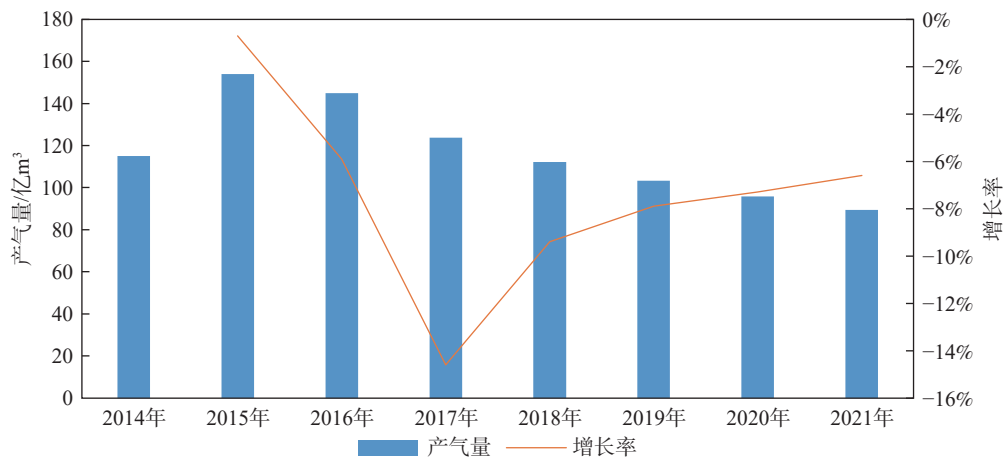


图4 2014—2021年我国农村沼气池产沼气总量^[25]

Fig. 4 Total production of biogas from rural biogas digesters in China from 2014 to 2021^[25]

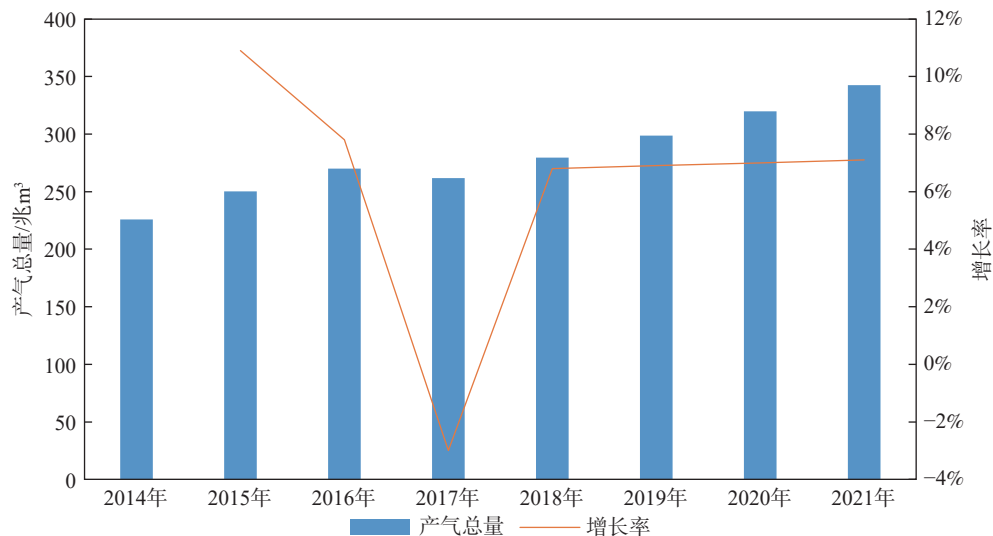


图5 2014—2021年我国农村沼气工程产气总量^[25]

Fig. 5 Total gas production of rural biogas projects in China from 2014 to 2021^[25]

2.5.1 太阳能光热利用

太阳能主要用于热水器、建筑供暖、制冷、空调、光伏发电、太阳灶等方面^[29]。据统计,我国太阳能灶的利用潜力位居世界第二,太阳能热水器的生产和消费居世界首位。由图 6、图 7 可知^[30],2014 年开始太阳能热水器的安装呈现直线上升的趋势,太阳灶的安装数量在 2015 年以前也是一直上升的趋势,近几年太阳能热水器和太阳灶安装数量增速逐渐下降,这是因为太阳能热水器和太阳灶的安装达到一个饱和状态,使用年限较长,许多农户安装以后在短时间内不需要再安装。

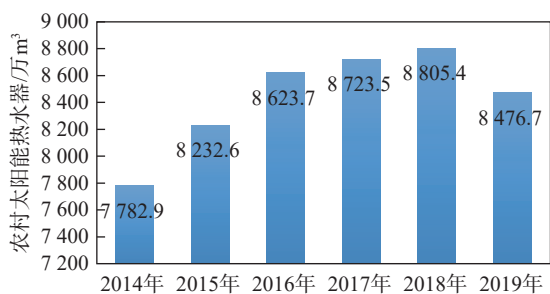


图 6 2000—2019 年我国农村太阳能热水器使用情况^[30]

Fig. 6 Use of solar water heater in rural areas in China from 2000 to 2019^[30]

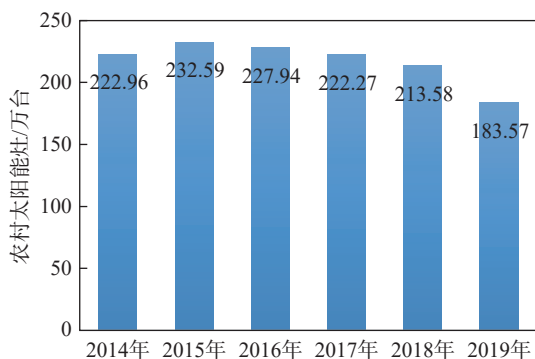


图 7 2014—2019 年我国农村太阳灶拥有情况^[30]

Fig. 7 Ownership of solar cookers in rural areas of China from 2014 to 2019^[30]

2.5.2 光伏发电

光伏发电安全可靠,无噪声污染,适用于边远无电地区,如军民生活用电、家庭屋顶并网发电系统、光伏水泵等。小型光伏发电可为农牧民和野外工程提供电力,便利人民生活^[31]。我国目前为止已经在 60000 余个贫困村建设了 2636 万 kW“千光伏扶贫”电站,此举很好地援助了 400 多万户村民。由

图 8 可知^[32],我国光伏发电量逐年增加,通过分析计算,全国光伏装机将在 2025 年累计减排量 9 亿 t^[33]。

太阳能能源产品应用年限时间较长,常规寿命下 1 m² 的太阳能能源应用可以节约 2.25 t 燃煤资源,1 t 煤在充分燃烧的情况下可以排放 CO₂ 量为 2.277 t,所以 1 m² 的太阳能能源应用可以减少 5.123 5 t 二氧化碳排放^[34],可以降低燃煤、电、柴草的使用^[35]。

光伏发电可有效保护环境、阻止全球气候变暖加剧,未来应用场景更加广泛,尤其是分布式光伏发电发展前景巨大。

3 农村能源存在的问题与发展对策

3.1 农村能源存在的问题

3.1.1 农村能源的主体意识不强

农村能源发展的主体是农民,而受农民的文化水平较低、思想观念落后、思维定式等的影响,导致农民更多喜欢利用秸秆、薪柴、散煤等这些容易产生污染的能源,加之成本的比较,更容易忽视了更多可再生能源的应用。

3.1.2 农村能源配套设施不够完善

我国农村能源利用方式多种多样,但是基础设施不够完善,除了电力比较完善外,其他能源未在农村全面普及,农村居民严重依赖非商业能源,能源商品化利用程度不高。同时,在农村安装能源工程以后没有后期维护人员,导致能源工程的闲置废弃,相应的配套设施不够完善。

3.1.3 农村能源商品化程度不普及

农村生活用能中以非商品能源为主,许多贫困地区仍然使用秸秆、薪柴直燃取暖,污染农村环境,劣质散煤的存在使能源利用效率低下,燃烧不充分,没有形成系列的能源商品化^[36]。

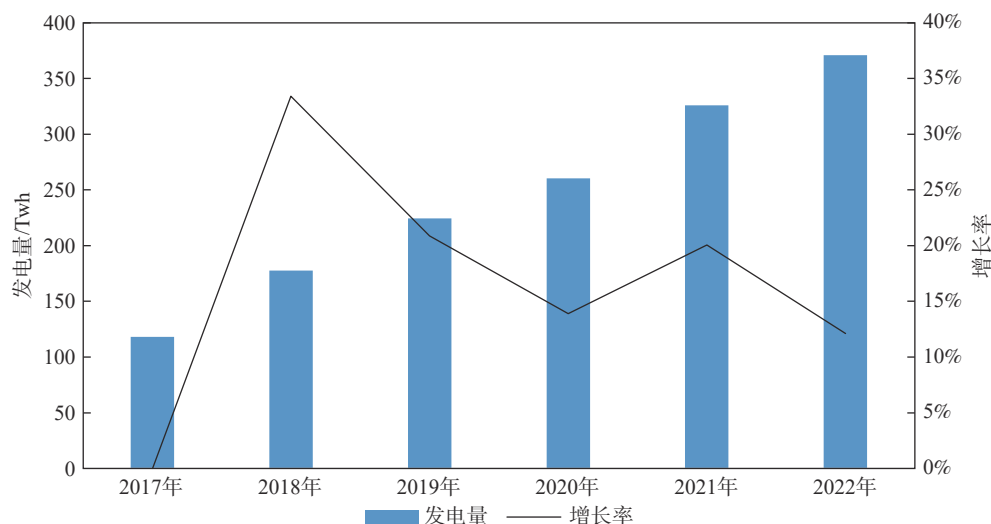
3.1.4 农村能源人均用能不足

农村本应和城市一样获得国家正常的能源公共服务,但农村能源的系统投入和统筹规划更是滞后于城市,农村用能严重短缺,人均用能仅为城市的三分之一左右,农村能源消费不景气。

3.2 “双碳”目标下农村能源发展对策

3.2.1 提升农村能源清洁化水平

在利用煤、石油等资源的过程中应该不断探索太阳能、生物质能和其他可再生能源,注重对资源的可持续利用。不断提高农村电气化水平,促进农村

图8 2017—2022年我国光伏发电量情况^[32]Fig. 8 PV power generation in China from 2017 to 2022^[32]

物流电能的发展;减少煤、薪柴等的使用,应该安全合理地使用天然气,减少污染;因地制宜地发掘太阳能、生物质能等能源,为实现农村能源的绿色发展提供保障;构建现代能源体系,巩固脱贫攻坚成果、促进乡村振兴发展,促进“碳中和”“碳达峰”目标的实现,为农业农村现代化发展提供不竭动力。

3.2.2 完善农村能源基础设施

农村的生产生活需要多种能源的有效结合,需要加速构建一个以可再生能源为核心的能源使用体系,包括广泛推广清洁取暖设备、生物质锅炉、太阳能集热器和太阳能灶等,并根据多能互补的原则来推动我国农村能源的全面发展。那些在城市中难以实施的综合能源服务、清洁能源直供电和隔墙售电等模式,都将在农村获得更广泛的应用,并持续优化农村的能源基础设施。

3.2.3 提高农村能源的商品化程度

在城乡二元结构(城市大工业生产与农村小农经济并存的经济结构)的体制下,积极探索农村能源产业发展途径,缩小“农村能源”与“城市能源”的差距,将长期游离在国家能源总体框架之外的农村能源纳入商品能源体系,支持能源企业与村镇合作,加大能源的科研力度。同时要努力寻找会产生污染能源的替代品,例如可以将玉米秸秆、果蔬枝条等压缩成小颗粒替代木炭;可以将麦秸、稻草压制成大块作为锅炉燃料。生物质资源加工需要较多的电费,可以发展屋顶光伏以此来降低电费成本。

3.2.4 提高农村人均用能

应该加深农户对环保的认识,树立保护环境、节能减排当作自己的事情,管理者在应对农村能源转型时需要全面注重多能融合,由当地的专业化公司或合作社来为农民提供就地开发的新能源以及专业化的技术服务,改变传统的低水平自给自足模式。国家在未来长时期内应加大对农村能源需求的投入,在依靠传统能源很难满足需求的情况下,探究节能减排的多能互补模式,加大农村可再生能源使用力度,进而提高农村人均用能。

4 结论

我国农村能源类型多样,传统能源逐渐被清洁能源取代。农村用电量逐年增加,具有污染性的煤气使用减少,天然气使用增多;水电、风电等清洁发电方式被大量采用;薪柴使用逐年降低,可有效保护森林,涵养水资源;农村沼气中户用沼气产气量减少,但是沼气工程产气量逐年增加;太阳能光热利用及分布式光伏发电均实现了快速增长。

在未来农村能源发展过程中,薪柴、煤气、煤电等具有污染性的能源将继续减少,水电、太阳能、风电、沼气、天然气等清洁能源逐渐被人们所接受,这些清洁能源的使用符合我们国家在大力推行的“双碳”目标,能够减少对环境的影响,降低农村碳排放量。

农村能源发展从单一地注重经济效益到生态环境优先的变迁,生态文明建设为中国农村能源建设提供了新的机遇,同时面对产业转型升级以及生态环境压力下,农村能源应更加关注技术创新以及推广应用,让新能源服务于农村。

参考文献:

- [1] NAUMANN M, RUDOLPH D. Conceptualizing rural energy transitions: energizing rural studies, ruralizing energy research [J]. *Journal of rural studies*, 2020, 73: 97-104. DOI: [10.1016/j.jrurstud.2019.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.12.011).
- [2] 王婷,凌一波,谢奋慧,等.对新疆农村能源开发利用的思考[J].*新疆农业科技*, 2023(3): 10-12. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3574.2023.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3574.2023.03.005).
WANG T, LING Y B, XIE F H, et al. Thinking on the development and utilization of rural energy in Xinjiang [J]. *Xinjiang agricultural science and technology*, 2023(3): 10-12. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3574.2023.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3574.2023.03.005).
- [3] 束传琳.工程伦理视域下水利工程建设中的环境问题探究——评《水利工程伦理学》[J].*人民黄河*, 2022, 44(4): 162.
SHU C L. Research on environmental problems in hydraulic engineering construction from the perspective of engineering ethics——comments on hydraulic engineering ethics [J]. *Yellow river*, 2022, 44(4): 162.
- [4] 孙若男,杨曼,苏娟,等.我国农村能源发展现状 & 开发利用模式[J].*中国农业大学学报*, 2020, 25(8): 163-173. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2020.08.16](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2020.08.16).
SUN R N, YANG M, SU J, et al. Current situation of rural energy development and its development and utilization modes in China [J]. *Journal of China agricultural university*, 2020, 25(8): 163-173. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2020.08.16](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2020.08.16).
- [5] LI J L, CHEN C, LIU H X. Transition from non-commercial to commercial energy in rural China: insights from the accessibility and affordability [J]. *Energy policy*, 2019, 127: 392-403. DOI: [10.1016/j.enpol.2018.12.022](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.022).
- [6] 国家统计局.中国统计年鉴 2022 [M].北京:中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022.
- [7] 孙意菲.能源——火电、核电、水电比较[J].*黑龙江水利科技*, 2011(5): 210-211. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7596.2011.05.110](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7596.2011.05.110).
SUN Y F. Energy——comparison of thermal power, nuclear power and hydropower [J]. *Heilongjiang science and technology of water conservancy*, 2011(5): 210-211. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7596.2011.05.110](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7596.2011.05.110).
- [8] 李香云,杨力行.煤电与水电能源转换中的生态环境效应对比分析[J].*水利发展研究*, 2006, 6(5): 27-30. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1408.2006.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1408.2006.05.006).
LI X Y, YANG L X. Comparative analysis of eco-environmental effect in energy conversion between coal and hydropower [J]. *Water resources development research*, 2006, 6(5): 27-30. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1408.2006.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1408.2006.05.006).
- [9] 马玉兰,吴群莉,赵让梅.对人工煤气、液化石油气、天然气气相色谱分析方法的研究[J].*中国仪器仪表*, 2007(3): 41-44. DOI: [10.3969/j.issn.1005-2852.2007.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-2852.2007.03.008).
MA Y L, WU Q L, ZHAO R M. Determination of gas chromatography analytical method standards applied to artificial coal gas, liquefied petroleum gas and natural gas [J]. *China Instrumentation*, 2007(3): 41-44. DOI: [10.3969/j.issn.1005-2852.2007.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-2852.2007.03.008).
- [10] 袁吉滨,王月明.人工煤气、天然气、液化石油气不安全燃烧及其对策[J].*今日科苑*, 2009(15): 150-170.
YUAN J B, WANG Y M. Unsafe combustion of artificial gas, natural gas and liquefied petroleum gas and its countermeasures [J]. *Modern Science*, 2009(15): 150-170.
- [11] 张保留,吕连宏,吴静,等.农村居民生活碳达峰路径及对策[J].*环境科学研究*, 2021, 34(9): 2065-2075. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.22](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.22).
ZHANG B L, LÜ L H, WU J, et al. Rural household carbon-peak path and countermeasures [J]. *Research of environmental sciences*, 2021, 34(9): 2065-2075. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.22](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.22).
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴 [M].北京:中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. China urban-rural construction statistical yearbook [M]. Beijing: Beijing China Planning Publishing House, 2021.
- [13] 鞠颂,李慧星.燃气锅炉与燃煤锅炉运行经济效益分析[J].*科技资讯*, 2018, 16(23): 75-78,80. DOI: [10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.23.075](https://doi.org/10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.23.075).
JU S, LI H X. Analysis of operating economic benefits of gas-fired and coal-fired boilers [J]. *Science & technology information*, 2018, 16(23): 75-78,80. DOI: [10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.23.075](https://doi.org/10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.23.075).
- [14] 刘昊洋.中国北方集中供热系统燃煤改造成燃气的可行性研究 [D].天津:河北工业大学, 2014.
LIU H Y. Feasibility study of fuel-switching projects from coal-fired to gas-fired for district heating system in the northern of China [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [15] 王丽辉.小型燃煤锅炉改烧燃气的研究[J].*煤气与热力*, 1999, 19(5): 44-48. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4416.1999.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4416.1999.05.014).
WANG L H. On changing coal into gas for boiler [J]. *Gas & heat*, 1999, 19(5): 44-48. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4416.1999.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4416.1999.05.014).
- [16] 李丽娟.燃气锅炉替换燃煤锅炉的环保节能措施探讨[J].*机电信息*, 2015(18): 79-80. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0797.2015.18.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0797.2015.18.046).
LI L J. Discussion on environmental protection and energy saving measures of gas boiler replacing coal boiler [J]. *Mechanical & electrical information*, 2015(18): 79-80. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0797.2015.18.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0797.2015.18.046).

- 3969/j.issn.1671-0797.2015.18.046.
- [17] 赵思语, 耿利敏. 我国生物质能源的空间分布及利用潜力分析 [J]. *中国林业经济*, 2019(5): 75-79. DOI: 10.13691/j.cnki.cn23-1539/f.2019.05.020.
- ZHAO S Y, GENG L M. Analysis of spatial distribution and utilization potential of biomass energy in China [J]. *China forestry economics*, 2019(5): 75-79. DOI: 10.13691/j.cnki.cn23-1539/f.2019.05.020.
- [18] 王琦. 不同石漠化等级地区农村薪柴消费的影响因素 [J]. *贵州农业科学*, 2020, 48(6): 120-124,134. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2020.06.028.
- WANG Q. Consumption influential factors of firewood energy in karst rural area with different rocky desertification levels [J]. *Guizhou agricultural sciences*, 2020, 48(6): 120-124,134. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2020.06.028.
- [19] 刘志雄. 京津冀农村地区传统生物质能源消费及其影响因素研究——以薪柴和秸秆为例 [J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(11): 200-206. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20191125.
- LIU Z X. Study on traditional consumption on biomass energy in rural area of Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors — Evidence from firewood and straw [J] *Chinese journal of agricultural resources and regional planning*, 2019, 40(11): 200-206. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20191125.
- [20] 宋莎, 刘庆博, 温亚利. 基于效用视角的自然保护区周边农户薪柴消费影响因素分析——以秦岭太白山自然保护区为例 [J]. *林业经济问题*, 2015, 35(5): 412-417. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9709.2015.05.006.
- SONG S, LIU Q B, WEN Y L. Analysis on influencing factors to firewood consumption of households in nature reserve adjacent community from the perspective of utility—a case study of Qingling Taibai nature reserve [J]. *Issues of forestry economics*, 2015, 35(5): 412-417. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9709.2015.05.006.
- [21] 陈飞霞. 南方水土流失严重地区农村非薪柴替代能源的生态经济初探——以长汀县绿康沼气合作社农民生活用能非薪柴替代为例 [J]. *发展研究*, 2019(5): 78-81. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0670.2019.05.013.
- CHEN F X. Ecological and economic exploration of non-fuelwood alternative energy in rural areas with severe soil erosion in southern China: a case study of non-fuelwood alternative energy for farmers in Lukang biogas cooperative in Changting county [J]. *Development research*, 2019(5): 78-81. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0670.2019.05.013.
- [22] 罗国亮, 张嘉昕, 郭晓鹏, 等. 我国农村能源发展状况与未来展望 [J]. *中国能源*, 2019, 41(2): 37-43,24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.008.
- LUO G L, ZHANG J X, GUO X P, et al. China's rural energy development status and future prospects [J]. *Energy of China*, 2019, 41(2): 37-43,24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.008.
- [23] 金永康. 农村可再生能源发展现状及对策研究 [J]. *南方农业*, 2020, 14(5): 154-161. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2020.05.078.
- JIN Y K. Research on development status and countermeasures of rural renewable energy [J]. *South China agriculture*, 2020, 14(5): 154-161. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2020.05.078.
- [24] 陈飞霞. 长汀县农村沼气电力替代薪柴的生态经济效益初探——以绿康沼气合作社为例 [J]. *亚热带水土保持*, 2019, 31(2): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2651.2019.02.003.
- CHEN F X. Initial study on the eco-economic benefit on the replacement of firewood by biogas & electricity in Changting county — case study in Lv kang biogas cooperatives [J]. *Subtropical soil and water conservation*, 2019, 31(2): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2651.2019.02.003.
- [25] 智研咨询. 中国农村沼气建设行业建设现状及存在问题分析: 农村户用沼气池数量超过 3380 万个 [EB/OL]. (2021-02-02) [2024-07-30]. <https://www.chyxx.com/industry/202102/928737.html>.
- Zhiyan Consulting. Analysis of the construction status and existing problems of China's rural biogas construction industry: the number of rural household biogas digesters exceeds 33.8 million [EB/OL].(2021-02-02) [2024-07-30]. <https://www.chyxx.com/industry/202102/928737.html>.
- [26] 杨波, 李胤奇. 我国农村能源转型发展的现状、困难及建议 [J]. *农业发展与金融*, 2022(4): 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1006-690X.2022.04.013.
- YANG B, LI Y Q. Current situation, difficulties and suggestions on the transition development of rural energy in China [J]. *Agricultural development and finance*, 2022(4): 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1006-690X.2022.04.013.
- [27] 曾惠芳, 李超, 赵炳雪, 等. 云南保山市农村能源建设现状、存在问题与发展措施 [J]. *农业工程技术*, 2021, 41(14): 46-47. DOI: 10.16815/j.cnki.11-5436/s.2021.14.028.
- ZENG H F, LI C, ZHAO B X, et al. Current situation, existing problems and development measures of rural energy construction in Baoshan, Yunnan province [J]. *Agricultural engineering technology*, 2021, 41(14): 46-47. DOI: 10.16815/j.cnki.11-5436/s.2021.14.028.
- [28] 胡国全. 农村沼气发展现状、问题及对策 [J]. *农业工程技术(新能源产业)*, 2008(5): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5404-C.2008.05.006.
- HU G Q. Development status, problems and countermeasures of rural biogas [J]. *Agricultural engineering technology (new energy industry)*, 2008(5): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5404-C.2008.05.006.
- [29] LI Z S, ZHANG G Q, LI D M, et al. Application and development of solar energy in building industry and its prospects in China [J]. *Energy policy*, 2007, 35(8): 4121-4127. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.02.006.
- [30] 智研咨询. 2020 年中国农村太阳能资源利用情况统计分析 [EB/OL]. (2021-02-03) [2024-07-30]. <https://baijiahao.baidu.com>

- com/s?id=1690639922278312257.
Zhiyan Consulting. Statistical analysis of the utilization of solar energy resources in rural China in 2020 [EB/OL]. (2021-02-03) [2024-07-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1690639922278312257>.
- [31] 洪振国. 中国农村家庭能源消费与清洁可再生能源节能潜力评估 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2020.
HONG Z G. Assessment of energy consumption and energy saving potential of clean renewable energy in rural China [J]. Gansu: Lanzhou University, 2020.
- [32] 中能传媒研究院. 光伏引领能源绿色发展 [EB/OL]. (2022-11-08) [2024-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/4K7HfhX6V2E87RCamBgvwQ>.
China Energy Media Research Institute. Photovoltaic leads the green development of energy [EB/OL]. (2022-11-08) [2024-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/4K7HfhX6V2E87RCamBgvwQ>.
- [33] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1338-1351. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220516.
HAN M Y, XIONG J, LIU W D. Spatio-temporal distribution, competitive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation [J]. *Journal of natural resources*, 2022, 37(5): 1338-1351. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220516.
- [34] 刘忠云. 农村太阳能资源利用节能减排效果的分析 [J]. 农村实用技术, 2021(11): 118-119.
LIU Z Y. Analysis of energy saving and emission reduction effect of rural solar energy resources utilization [J]. *Rural practical technology*, 2021(11): 118-119.
- [35] 邹晓霞, 万运帆, 李玉娥, 等. 我国农村太阳能资源利用节能减排效果研究 [J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 93-98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2010.03.021.
ZOU X X, WAN Y F, LI Y E, et al. The effect of energy-saving and emission reduction of solar energy resource utilization in rural areas of China [J]. *Renewable energy*, 2010, 28(3): 93-98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2010.03.021.
- [36] 宋荣平, 胡华清, 黄晶心, 等. 云南省农村能源多元化发展建设——基于嵩明县的沼气用能调研 [J]. 中国沼气, 2022, 40(4): 55-60. DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022040055.
SONG R P, HU H Q, HUANG J X, et al. Diversified development and construction of rural energy in Yunnan province — based on the survey of biogas energy use in songming [J]. *China biogas*, 2022, 40(4): 55-60. DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022040055.

作者简介:



字琼珍

字琼珍(第一作者)

1996-, 女, 农业工程与信息技术硕士, 主要从事农业生物环境工作(e-mail) 3182319334@qq.com。



尹芳

尹芳(通信作者)

1967-, 女, 教授, 博导, 主要从事农业生物环境与能源工程教学科研工作(e-mail) yf6709@sina.com。



张无敌

张无敌

1965-, 男, 研究员, 博导, 主要从事生物质能与环境工程教学科研工作(e-mail) wootichang@163.com。

(编辑 徐嘉铨)