

关系。

目前农村能源发展与转型呈现多元化趋势,陈珂等^[3]设计出适用于农村地区的可再生能源管理系统,以高效提升时空用能效率;王守文等^[4]提出一种温控厌氧发酵和阶梯碳交易的综合能源调度模型以降低碳排放量及经济成本;穆献中等^[5]综述了农村生物质能源化的利用研究,指出其受制于收集分散、成本较高和效益不稳等问题,亟须加强潜力评估、技术集成与政策机制完善等研究;王强等^[6]分析了碳中和背景下的能源转型挑战,强调多能互补与跨区域协同发展;舒印彪等^[7]评述了能源转型要素及研究范式,提出跨学科方法与系统性分析。然而,现阶段研究在农村能源网络区域适配性、系统运行稳定性和对全国性能源机制构建等方面涉猎不足。因此,本文将基于筛选的文献样本数据库,系统梳理我国农村能源的时空演化特征及结构成因,分析其结构转型在经济、技术、政策等方面的多维困境及其驱动因素,从系统稳定、技术更新及机制协同三个层面提出农村能源结构转型的优化路径及发展前景展望。

1 我国农村能源结构时空演化特征

政策驱动下,我国农村能源结构转型已产生显著区域差异,其中以传统能源消费为主导的区域能源类型发生结构性变化。2014年国务院设计以“能源革命”为框架的能源转型路径,2022年非化石能源成为增量主体,煤炭依赖大幅下降,清洁能源消纳体系基本形成,特别是在农村能源消费领域,随时间序列呈现出明显的消费结构变迁特征。2014—2022年间我国农村能源消费领域体现为明显的消费结构变迁特征,与相关领域研究热点词演化的阶段性特征形成理论与实践的相互印证,因此选择2014—2022年间相关数据开展我国农村能源结构时空特征分析。

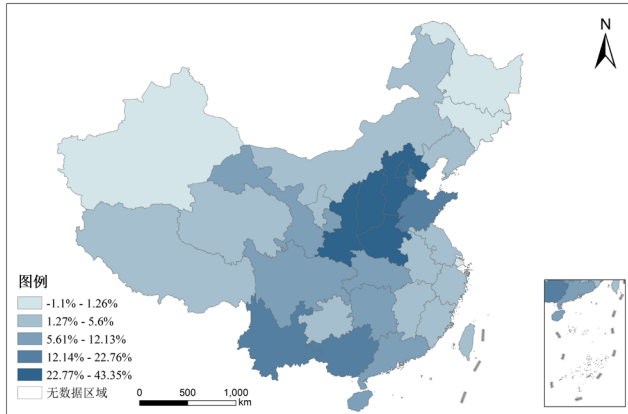
1.1 农村能源结构时空演化现状

农村能源结构的时间演化特征体现为三个方面:一是清洁能源的时间演化呈现鲜明的阶段性差异,这一特征在2014—2022年间表现最为突出;二是传统能源消费随时间下滑的趋势显著且持续;三是能源消费主体的时间稳定性特征突出。我国农村能源结构的演化以时间特征为核心主线。如图2和图3所示,《中国建筑节能年度发展研究报告2024(农村住宅专题)》^[8]及《中国能源统计年鉴2023》^[9]中相关数据显示,我国农村清洁能源消费呈现持续攀升的时间态势,其中消费品类主要集中于液化石油气与天然气两大品类,且不同时间段呈现差异化发展特征。2014年以前,农村天然气使用量近乎为零,随着能源消费革命战略的深入推进,天

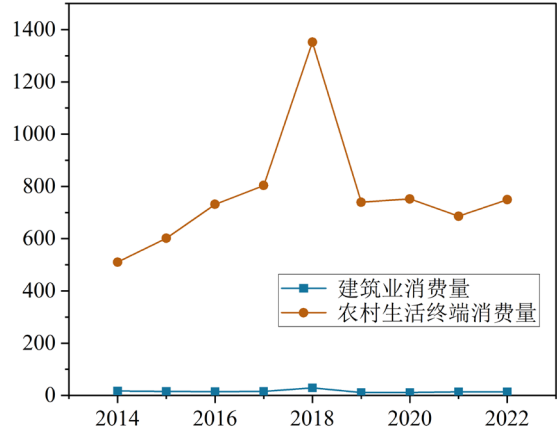
然气消费占比实现快速跃升;2014—2022年间,清洁能源消费量整体保持稳定增长韧性,部分新能源虽增速较快,但基数偏低,其中户用沼气生产总量先增后减,完整呈现出清洁能源从起步到稳步发展的时间轨迹。随着农村能源结构转型的逐步推进,传统煤炭消费占比呈现全域持续下滑的时间特征,伴随这一演化过程,传统高碳能源使用量随时间推移大幅缩减,清晰反映出传统能源逐步退出农村用能市场的时间演化规律。从长期时间演化来看,农村居民生活终端能源消费始终在农村能源总消费中占据核心主导地位,这一特征可通过不同时期的能耗对比得到印证。全建筑业生产物化阶段的直接能耗在绝对规模、增长趋势及相对占比上长期低于农村居民生活终端能源消费量,且农村建筑业能耗占比长期处于低位,这一对比关系随时间推移保持稳定,因此进一步凸显了农村能源结构时间演化过程中居民生活用能的核心主导作用。

我国农村能源空间演化的核心特征显著:一是农村能源消费碳排放呈省际非均衡分布,区域分化与城乡差异的空间格局固化;二是农村电气化转型呈现供需空间错配突出,同时形成多中心联动的扩散式空间演进格局;三是可再生能源发展形成东西差异化空间布局,资源禀赋与消纳需求的空间错配特征凸显。张恒硕等^[10]基于2000—2018年全国30个省份农村能源消费的碳排放测算数据,通过核密度估计法分析得到我国农村能源消费碳排放呈现显著的非均衡空间分布特征。总体上看,省际差异呈现“东部>西部>中部”的空间格局,沿海地区农民的能源消费和城市能源消费差异日渐缩小,但中西部及边远地区的城乡差距依然突出,区域能源消费结构分化严重。在生物质资源层面,西南地区虽然储量丰富,但沼气推广因自然条件复杂与经济效益不足,截至2024年底,云南沼气普及率仅为32.5%,传统薪柴使用仍占58%以上;东西部经济发展不均衡导致东部沿海地区商品能源占比高,而西部仍以传统能源为主,清洁能源普及率低。

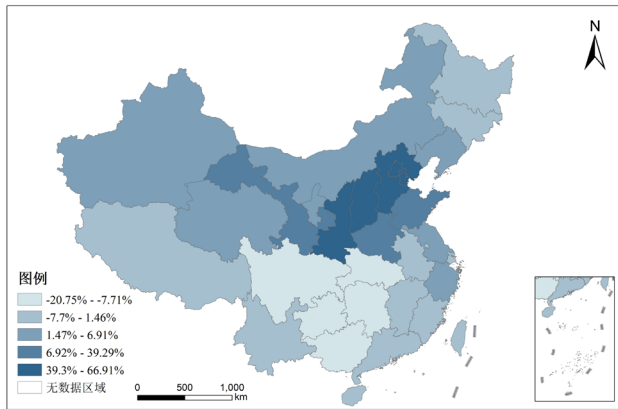
我国电气化转型的关键节点是在2015—2019年间,图4展示了各省市农村发电量与用电量的数据差异,可以看出区域电能供需不均衡,华南、华中、西南地区发电量较强,华东、华南地区电力需求较高,其中华北、东北地区用电量大于发电量。值得注意的是,这种转型态势已突破地域限制,向华中、西北等次重点区域扩散,形成多中心联动的空间演进格局,但仅有河北省和辽宁省基本可以实现供需平衡,华东地区用电量远高于发电量,西南地区用电量则远低于发电量。



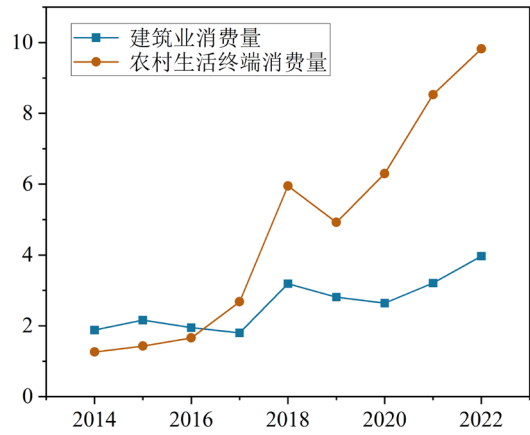
(a) 电能增长率



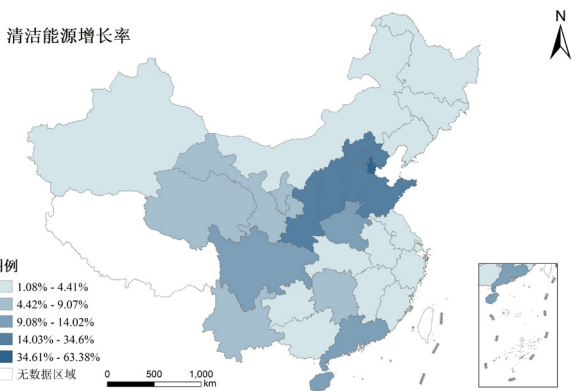
(a) 液化石油气消费量 (万吨)



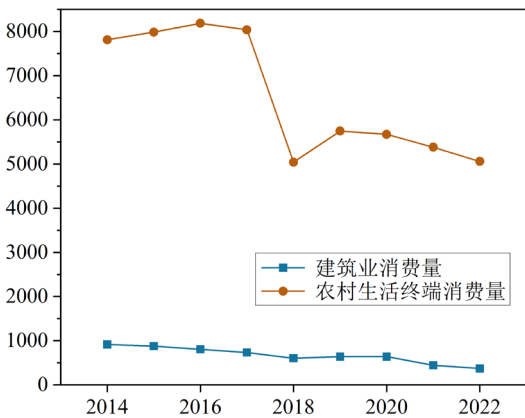
(b) 煤炭使用降低率



(b) 天然气消费量 (10^8m^3)



(c) 清洁能源 (除电能) 增长率



(c) 煤炭消费量 (万吨)

图 2 2014—2022 年农村能源消费增长率变化

图 3 2014—2022 年主要能源消费量变化

注：图中中国地图来源于自然资源部地图技术审查中心承办的“标准地图服务”网站，审图号为GS(2023)2767号，链接为 <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/browse.html?picId=%224o28b0625501ad13015501ad2bfc2187%22>

西北集中式光伏风电基地、东部分布式新能源集群的空间格局，高耗能产业集中的东部地区清洁能源替代压力显著大于能源资源富集的西部地区，空间错配特征明显。

特别是 2017—2024 年间，我国可再生能源消费占比从 14.5% 提升至 25.8%，其中风电、光伏装机容量年均增速分别达 18.2% 和 32.7%，化石能源占比逐年下降，但煤炭占比仍超 50%。在空间维度上形成了

1.2 农村能源结构时空演化成因

通常能源消费的结构差异性主要受教育水平、城乡迁徙、生计资本、低碳意识与政府政策等关键因素影响。虞义华等^[11]发现教育经济投入和受教育

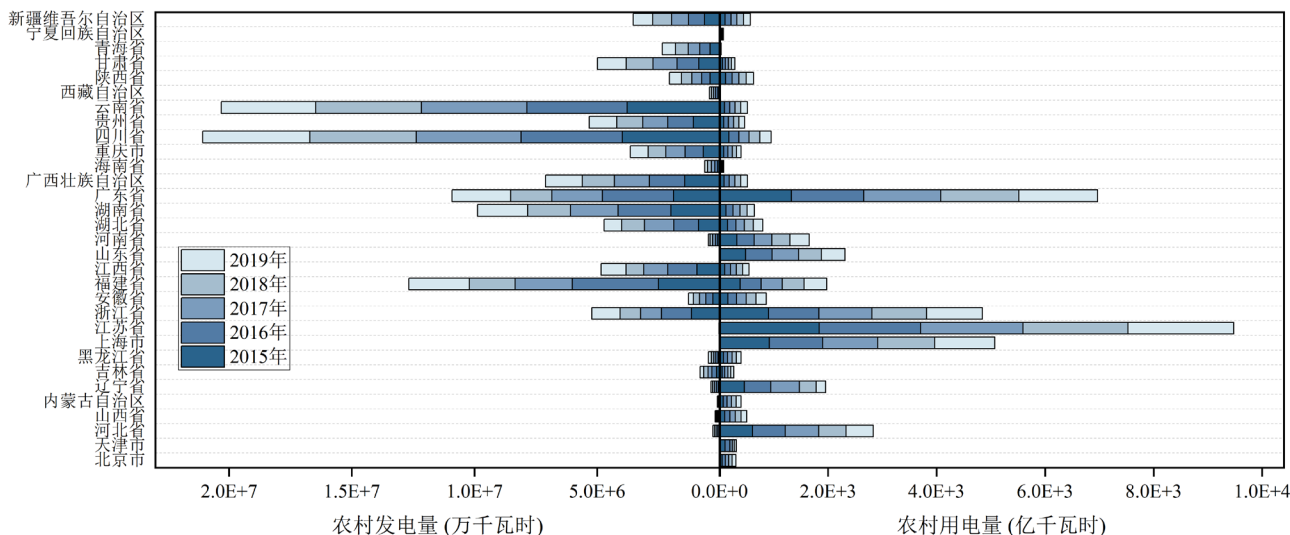


图 4 我国各省市农村发电量与用电量对比

程度高的家庭更倾向选择商品性能源和清洁能源。受教育程度高的家庭更倾向于进行城乡迁徙，城乡人口迁徙通过促进信息传播影响农户能源选择。汪昊等^[12]通过追踪调查与模型计算得到家庭非农就业占比每增加 1%，农户炊事活动使用清洁能源的概率提升 0.05%，同时根据持久收入理论，收入增长会增强这一边际效应。生计资本对清洁能源使用有双向影响^[13]，其中人力资本、物质资本、金融资本、社会资本都可显著推动农村能源消费低碳转型，而自然资本因提供廉价生物质能源，对农户清洁能源消费转型的动力形成负向抑制作用。生计资本与农村居民的低碳意识之间存在复杂的、多层次的相互作用和影响机制。农村居民低碳意识可提高清洁能源消费意愿，其意识程度每增加一级，选择消费清洁能源的概率是不选择的 1.37 倍^[14]。随着农村居民对清洁能源推广关注度的提升，其清洁能源消费 / 采纳概率也会显著提高，表明政策宣传在推动清洁能源消费转型中发挥了重要作用。尽管目前农村的实际用电量仅占农村未来屋顶光伏发电潜力的 1/3 左右，但总的来说，我国农村能源消费格局正在逐步向清洁化、多元化、电气化转型。

然而，能源消费结构的区域差异化成因的侧重点相对不同。黄河中游地区因农业和采暖需求存在高碳依赖，寒冷地区因采暖需求导致碳排放强度高^[15]；南方清洁能源潜力未释放，光电、水电以及生物质能的潜力未被全部开发。李光全等^[16]得到我国农村能源消费区域差异形成原因，其中农村人口规模与可用资源禀赋对能源消费具有正向驱动作用；经济发展水平起到负向抑制作用；能源结构、技术进步、气候条件等也有一定影响作用。此外，不同地区农村能源结构分

布特征的主要驱动因素也不尽相同，东北地区的农业总产值的正向驱动作用显著；北部沿海区域的经济结构、能源价格影响突出；西北区域的农村人口规模和老龄化对碳排放增长的推动作用显著。

2 我国农村能源结构转型的困境

我国农村能源结构转型存在四个维度的困境：一是经济维度存在成本收益失衡，转型主体内生动力与投入能力双重不足；二是环境维度存在自然禀赋先天分化，空间与气候约束加剧转型难度；三是技术维度存在场景适配性不足，全链条技术与运维服务体系短板突出；四是政策维度存在制度设计适配性不足，跨域协同与长效保障机制缺失。农村清洁取暖作为我国农村能源消费低碳转型的核心抓手与典型实践场域，其发展现状、区域分化特征与推进过程中暴露的现实难题，正是上述四大维度转型困境的具象化呈现与现实映射。

在清洁取暖工程改造前，我国大部分农村地区对煤炭、秸秆等传统能源依赖严重，污染与低效并存。北方农村住宅围护结构保温性能差^[17]，尽管随着政策的推行，传统能源使用量显著下降，北方农村地区年取暖燃煤量仍接近 2 亿吨标准煤，大多数农户使用火炕、柴灶、炉子或土暖气等供暖，火炕、煤炉等传统分散式采暖设备热效率仅为 10%~30%，清洁取暖率不到 15%^[18]。受资源禀赋与发展基础制约，我国农村自然条件与资源分布异质性显著，北方冬季采暖需求刚性强，长期依赖低成本煤炭形成高碳路径锁定，清洁替代面临多重障碍；南方清洁能源资源丰富，但山区地形复杂、农户分散导致项目建设成本高出 30%~50%，且电力外送不足，资源潜力难转化，加之农村居民人均可支配收入仅为城镇的 41.2%（以 2024

年为例), 农户与集体经济均缺乏投入能力, 加剧转型难题。

由于区域气候差异, 北方地区冬季取暖散煤依赖度高, 占比超 80%, 且 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物排放强度远超工业燃煤; 农村住宅建筑碳排放在建筑碳排放总量的占比较高^[19], 如 2022 年农村居住建筑碳排放为 4.8 亿吨 CO_2 。

我国农村分散式清洁能源技术应用成熟度低, 推广率低。受限于地形复杂、农户分散等技术适配与服务体系短板, 风电、光伏等新能源技术的建设成本高, 运维难度大, 农村地区经济又相对薄弱, 因此相关技术推广缓慢; 沼气工程等因气候适应性差和服务体系薄弱等原因, 废弃率高。农村能源技术多适配城市规模化场景, 分散应用中存在效率低、运维滞后等问题, 如西南山区小型风电故障修复周期为 15~20 天、闲置率超 20%; 北方沼气工程冬季产气效率降低 40% 以上, 且技术指导缺失致废弃率达 35%; 农村能源服务网点与培训缺位, 影响农户使用意愿。

政策执行与协调不足, 可再生能源项目依赖政策补贴, 缺乏可持续商业模式^[18]; 农民收入低, 难以承担清洁能源设施前期投入; 财政投入存在缺口, 中央和地方配套资金不足, 如湖北孝感市沼气项目真正落实的配套资金基本为零^[20]; 省际区域间碳排放差异明显, 协同治理机制缺失, 导致非均衡性加剧^[10]。基础设施落后, 农村电网、燃气管道覆盖率低, 截至 2021 年底, 北方清洁取暖率仅 73.6%^[21]; 省际协调机制缺失, 中西部与东部未形成利益补偿机制, 跨区域输电滞后引发“弃风弃光”与供给不足的矛盾, 且过度依赖财政补贴, 缺乏市场化激励工具, 转型动力难持续。2022 年全国农村地区能源服务网点密度约为每万平方公里 56.7 个, 仅为城镇地区的 11.67%, 存在服务供给结构性失衡、数字鸿沟显著等问题, 因此我国应根据区域差异调整基础设施与配套设施等相关政策赋能路径。

3 我国农村能源结构转型优化路径

《国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014—2020 年)的通知》提出要加快构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系。通过可再生能源系统稳定性提升、能源生产技术更新与高效节能设备优化和建立能源收入分层干预与跨域协同机制, 削弱甚至消除季节性变化带来的输电负面作用, 实现“削峰填谷”, 推动全国“双碳”目标的实现, 完善政策市场及数字化保障体系, 最终实现农村能源低碳转型、产业升级与乡村振兴的良性循环。

3.1 可再生能源系统稳定性提升

破解农村能源转型中经济维度成本收益失衡、环境维度禀赋先天分化的核心困境, 可主要通过优化供给布局与强化抗扰动能力, 全面提升农村可再生能源系统的整体稳定性解决。在光伏主导的可再生能源网络中, 稳定性问题主要集中于电压、频率及系统的构网能力。Stanchev 等^[22]提出负荷波动和光伏功率注入的非线性耦合是影响电压稳定的关键因素; Smith 等^[23]发现可再生波动引起的非线性动力学会导致电压与频率的复杂扰动。在频率维度, 高智等^[24]强调在高比例光伏接入时, 储能与逆变器的协同控制是缓解频率失稳的关键。与此同时, 张华等^[25]认为构网型储能通过提供虚拟惯量和阻尼支撑, 显著提升光伏为主的能源网络的电压与频率稳定性; Rajendran 等^[26]指出通过智能调控和多能互补, 可实现光伏并网的高效与可靠运行。构网型储能与变流器因具备电压源特性与虚拟阻尼能力, 被视为提升系统韧性的核心技术。Guerrero 等^[27]从电压控制、频率调节、分布式储能与协调控制各方面提出未来研究的关键方向是跨时间尺度的建模与分布式控制架构。如云南省通海县里山乡芭蕉村, 依托年均日照超 2290 小时的资源优势, 推广屋顶分布式光伏并构建光伏+智慧微网系统, 通过分布式储能与智能调控实现光伏电力稳定消纳。综上, 光伏主导的发电系统需要从多源耦合系统的整体视角出发, 发展跨时间尺度的建模与多层次协调控制, 以确保电网长期稳定运行。

随着风电渗透率提高, 电力系统面临频率、暂态、电压及小信号稳定性挑战。在机组与控制层面, Loza 等^[28]强调风电应从“被动电源”向“主动电网单元”转变, 以实现主动支撑电网运行。Zhao 等^[29]提出一种考虑分布式储能系统的直流微电网小信号建模方法, 分析了系统在不同操作条件下的稳定性, 特别是在负载扰动下的动态响应。Mahdavian 等^[30]则指出传统的静态负载模型可能无法准确预测系统的稳定性边界。此外, 风电大规模并网引发的电压不稳定和低电压穿越问题也受到重视。Malik 等^[31]总结了电压稳定性评估方法及柔性交流输电系统装置等改善技术。总体而言, 高比例风电的可再生能源网络稳定性构建需要控制优化、微电网适配和系统规划的多维协同。

生物质能在构建可再生能源网络稳定性中逐渐成为研究热点。Aslani 等^[32]构建了供应不确定性与运输中断对网络运行影响下的生物质能源供应链优化模型; Salehi 等^[33]提出综合考虑需求波动、价格变化及物流中断等不确定因素的生物质供应网络优化框架, 通过

多目标优化方法实现生物质能源系统可持续性与伦理性的平衡。此外,政策与宏观层面的分析表明生物质不仅可在电网中承担调峰与备用角色,还能通过供应安全与价格稳定性提升系统稳定性^[34]。整体而言,生物质融入可再生能源网络并实现稳定高效运行需要实时性强的市场判断模型的建立。

3.2 能源生产技术更新与高效节能设备优化

能源生产技术更新与高效节能设备优化,可从根源上破解农村能源转型中技术维度场景适配性不足、全链条技术与运维服务体系短板突出的核心困境。我国农村能源减排的关键在于成熟技术规模化与瓶颈技术的协同突破。王守文等^[4]提出农村能源热-气协同、风光消纳、储能调节的“产-储-用-排”闭环优化路径,兼顾了北方农村冬季清洁取暖的低碳性与经济可行性。宋晓华等^[35]通过改进的物元可拓模型提出了组合高效光伏板、小型风电装置和厌氧发酵与生物质锅炉、气化炉等多能互补技术的农村综合能源系统,该系统在经济、环境、社会、能源和技术等多个维度上的得分均显著高于传统单一供能方式。此外,对于风资源丰富但电网设施受限的农村地区,汪洋等^[36]提出可采用永磁同步风力发电系统作为中小容量风力发电电源,在风速变化条件下瞬时输出功率可提升约 90%,年发电效率提升约 15%~25%,且运行维护成本降低约 30%~40%。宁夏吴忠市盐池县针对 120 座标准化养殖棚进行电气化改造,配套安装光伏组件供电,单座养殖棚年节电 800 千瓦时、减碳 0.6 吨。综上,技术突破因地制宜采用组合优化的规模性可再生能源系统。

在农村地区清洁能源转型的过程中,作为终端用能的住宅建筑,其低碳高效的被动式技术也成为提升能效的关键路径。曹也等^[37]提出以空气层温度为控制参数的主动式光伏复合墙体热利用方式,相比于被动内循环节约 36% 左右的采暖能耗,主动风机辅助供热效率提升至约 22%。在 30°~40° N 且太阳能资源有限的寒冷地区,李雪平^[38]提出基于集成太阳能热利用与光伏发电技术、风机泵设备及高效建筑材料的建筑节能系统。

在显著降低区域能源消费强度的同时,应同步优化高效节能设备以提高用能效率。张勇等得到实验条件下空气源热泵的性能系数可达 3~5,而实际运行的季节性能系数多在 2.5~4.0 之间^[39]。李晓等^[40]对比了传统燃煤锅炉约 0.7~0.9 的热效率,空气源热泵整体能效提升约 3~5 倍。浙江省湖州市安吉县为 200 余户农户安装高效节能电炊具、空气源热泵热水器,配套建

设村级分布式光伏电站保障电力供应,替代传统高耗能炊具与热水设备,户均年节电 1200 千瓦时,减少燃气消耗 60 立方米。在电力基础设施较完善且耗能较高的农村地区建立能耗采集系统,根据热泵技术性不同、供暖强度或时长不同为农村量身打造热泵取暖方案,并设计电炊具和蓄热炉具的配套使用方式,可提高终端用能效率。

3.3 能源收入分层干预与跨域协同机制

能源收入分层干预与跨域协同机制的确立可以解决制度设计适配性不足,跨域协同与长效保障机制缺失的问题。由于自然因素以及生计资本的影响,不同地区的农户收入有所差异,从而影响能源选择。为达到可再生能源的推广使用与精准干预,应建立以收入分层为导向的干预机制。基于 2024 年我国人均年可支配收入中位数 34707 元的数据,以该数据的 50% 与 100% 为分界,把人群分为三类干预,中位数的选择可避免均值受高收入群体影响存在偏差,而 50% 的中位数通常对应“明显低收入”群体。对于人均年收入低于 17350 元的农村地区,自然资源相对匮乏,清洁能源无法大规模推广,宜通过政府对危房改造的补贴,重点支持户用沼气池与节能灶具,其具有使用周期长、清洁环保、废料可二次利用作农业肥料等优点;在农民人均年收入为 17351~34707 元的地区,可基本实现清洁能源大规模利用,可以利用绿色信贷贴息鼓励个人组建零碳微单元^[41],推广“屋顶租赁+收益分成”模式,保障居民产权与收益权,有利于新能源更新可持续运作;农民人均年收入大于 34707 元的地区可以深入推行碳积分兑换制度,激发高收入农民的环保积极性,重点支持智能家居能源管理系统和社区综合能源站的建立。

通过技术更新与系统性转型结构设计比较(见表 1),我国农村能源要实现长期发展必须进行系统性设计,而农村能源系统的跨域协同主要体现在实施采暖的跨区域合作与协同治理。在采暖方面,北方部分省份可推行联合建设集中供暖系统形式,使能耗降低约 20%~30%^[16];区域间的碳汇交易与生态补偿机制也逐步完善,如东部与西部农村之间建立碳汇交易市场^[42],京津冀地区通过碳交易可实现 15%~25% 的减排;数字化监管体系的构建成为重要支撑^[43],村级能源物联网终端部署不仅可以实时追踪碳排放强度,也可以触发补贴发放;建立政策与市场机制^[44]。此外,政策与市场机制在跨域协同中发挥关键作用,差异化补贴和税收优惠强化了农户参与积极性,由于东西部地区发电与用电的不平衡,能源价格可上下部分调控,以支

表 1 我国农村能源技术更新与系统性转型结构设计比较

维度	新技术开发	系统性转型结构设计
核心目标	单点技术效率提升	系统性能体系优化
减碳效果	直接减排强（如沼气替代煤炭减碳 3~5 吨 / 户）	长期潜力大（结构调整减碳 40%~60%）
实施周期	短期见效（1~3 年）	中长期见效（5 年以上）
成本投入	设备购置与维护成本较高	基础设施与政策协调成本高
区域适配性	需匹配本地资源（如光照、生物质）	需跨区域协作与政策统筹

持当地的能源转型。

4 结论与展望

4.1 结论

本文系统梳理了我国农村能源结构转型的时空演化规律、区域非均衡性及多维治理瓶颈，揭示了农村能源转型的时空规律及优化路径，旨在提出“系统—技术—机制”三位一体的优化路径，助力乡村振兴与“双碳”目标协同推进。主要结论如下：

（1）在时间演化上，我国农村能源结构表现为清洁能源持续增长、传统能源占比逐步下降，2014 年天然气消费启动增长，2015—2019 年电气化转型向外扩散，可再生能源占比提升显著，但煤炭仍主导化石能源消费。在空间演化上，农村能源消费碳排放分布不均，省际差异为“东部>西部>中部”，区域分化显著；清洁能源转型东部压力大于西部，北方存在高碳依赖，南方清洁能源潜力未释放；电能供需空间错配，西南等地区依赖传统能源。

（2）我国农村能源结构转型面临多重困境，传统能源路径依赖显著、清洁取暖推进受阻，分散式清洁能源技术推广不足，加之区域资源禀赋差异与农村经济基础薄弱，进一步制约了转型进程。同时，农村能源政策存在区域协同不足、资金投入缺口、服务体系滞后等问题，且缺乏可持续商业模式，加剧了能源结构转型的难度与非均衡性。

（3）我国农村能源结构转型应坚持“稳态提升—技术更新—机制协同”的优化路径：在技术端强调成熟技术规模化与瓶颈技术协同突破，提出多能互补系统与高效节能设备的应用；在系统端构建区域适配的可再生能源网络，并通过跨时空分析与分布式结构提升稳定性；在制度端提出收入分层干预机制与跨区域协同治理的新思路，将财政补贴、绿色信贷、碳积分等工具与不同收入群体和区域协作挂钩，实现精准低碳转型与公平覆盖。以技术与政策为支撑，实现农村能源低碳转型与乡村振兴良性循环，助力全国“双碳”目标实现。

4.2 展望

既有研究从时空异质性解析与多维路径设计视

角，为我国农村能源结构转型奠定了坚实的理论与实证基础。然而，作为全球农村人口规模最大、区域发展不均衡性显著的国家，我国农村能源转型仍面临高碳依赖难以摆脱、区域适配技术缺位、跨域协同机制尚不成熟等深层挑战，需在复杂外部环境与内部转型压力的双重约束下深化探索。未来农村能源转型需聚焦以下方向：

（1）更加关注多尺度协同与跨学科融合，如在全球气候变化背景下探讨农村能源系统的适应性和稳定性机制。同时，数字化与智能化技术将在能源治理中发挥关键作用，借助能源物联网、区块链和大数据预测，可实现碳排放可视化监管与精准补贴。

（2）深化核心科技问题，提升农村能源系统智能性与适应性。采用混合智能优化算法构建多时间尺度模型，优化成本、碳排与能效，提升区域适配性与用户可操作性；通过模块化集成设计、分布式设备选型与本地化运维机制，实现系统弹性扩展与长期高效运行。

（3）政策与实践层面需要推动城乡融合与国际比较研究，以借鉴发达国家和发展中国家的经验，探索适合中国农村的本土化低碳路径。此外，还应深化社会行为与文化因素对农户能源选择的影响研究，以形成兼顾经济性、公平性和可持续性的综合能源转型模式。

参考文献：

[1] 郝华勇. 我国省域低碳乡村发展水平实证研究 [J]. 科技管理研究, 2014, 34(22): 213-218.

[2] 江亿, 胡姗. 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 272-282.

[3] 陈珂, 王维瑞, 白维生, 等. 基于 GIS 的农村可再生能源管理系统设计研究：以北京市为例 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18965-18969+19001.

[4] 王守文, 叶金根, 徐丽洁, 等. 计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的农村综合能源低碳经济调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 88-97.

[5] 穆献中, 余漱石, 徐鹏. 农村生物质能源化利用研究综述 [J]. 现代化工, 2018, 38(3): 9-13+15.

- [6] 王强,党牛,蒋子龙,等.碳中和背景下能源转型研究综述与展望[J].地理学报,2025,80(3):586-604.
- [7] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等.关于能源转型分析的评述(一)转型要素及研究范式[J].电力系统自动化,2018,42(9):1-15.
- [8] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2024(农村住宅专题)[M].北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [9] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2023[G].北京:中国统计出版社,2024.
- [10] 张恒硕,李绍萍,彭民.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[J].中国农村经济,2022(1):112-134.
- [11] 虞义华,邓慧慧.基于空间 Probit 模型的农村家庭低碳产品购买决策研究[J].求索,2017(12):45-53.
- [12] 汪昊,张俊飏.非农就业对农户清洁能源消费及其持续性的影响:以炊事清洁能源消费为例[J].中国农村观察,2024(3):163-184.
- [13] 王萍,邱雪萍,祝天乐.生计资本对农村家庭能源消费低碳转型的影响[J].西安科技大学学报,2024,44(5):996-1007.
- [14] 董梅,徐璋勇.农村家庭能源消费结构及影响因素分析:以陕西省 1303 户农村家庭调查为例[J].农林经济管理学报,2018,17(1):45-53.
- [15] 支国瑞,杨俊超,张涛,等.我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J].环境科学研究,2015,28(8):1179-1185.
- [16] 李光全,聂华林,杨艳丽.中国农村生活能源消费的区域差异及影响因素[J].山西财经大学学报,2010,32(2):68-73.
- [17] 苗向荣.城镇化背景下农村能源消费现状及调整对策研究:基于北京市农村生活用能的分析[J].人民论坛·学术前沿,2017(10):92-95.
- [18] 廖华.中国农村居民生活用能现状、问题与应对[J].北京理工大学学报(社会科学版),2019,21(2):1-5.
- [19] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告:2023 城市能源系统专题[M].北京:中国建筑工业出版社,2023:22-25.
- [20] 李梅华.资金:制约农村能源低碳利用的瓶颈——以孝感市为例[J].农业经济,2012(4):87-88.
- [21] 李雪玉.减污降碳协同增效的散煤治理策略研究[J].环境保护,2022,50(24):12-14.
- [22] Stanchev P,Luta D,Lita I, et al.Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Systems[J].Energies,2023,16(12):4821.
- [23] Smith O,Kamphorst B,van der Meer A A.The effect of renewable energy incorporation on power grid stability:A dynamical systems approach[J].Plos One,2022,17(12):e0278714.
- [24] 高智,王勇,李军.基于可再生能源的微电网频率稳定控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):115-128.
- [25] 张华,李晓,王鹏.构网型储能及其应用综述[J].电力系统自动化,2025,49(3):1-15.
- [26] Rajendran G,Murugan P,Ramesh T.A Comprehensive Review of Solar PV Integration with AC/DC and Smart Grids[J].Energies,2025,18(5):2056.
- [27] Guerrero J M,Vasquez J C,Meng L.Microgrid stability:A comprehensive review of challenges,solutions,and future directions[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,174:113141.
- [28] Loza B,Rosales-Asensio E,Colmenar-Santos A, et al.Grid-friendly integration of wind energy: A review[J].Sustainability,2024,16(21):9535.
- [29] Zhao L,Li Y.Small-signal modeling and stability analysis of DC microgrid with distributed energy storage system[J].Renewable Energy,2021,178:1244-1256.
- [30] Mahdavian A,Ghadimi A A,Bayat M.Microgrid small-signal stability analysis considering dynamic load model[J].IET Renewable Power Generation,2021,15(10):1615-1624.
- [31] Malik F H,Khan M W,Rahman T U, et al.A comprehensive review on voltage stability in windintegrated power systems[J].Energies,2024,17(3):644.
- [32] Aslani L. Design of a sustainable supply chain network of biomass renewable energy under disturbance[J].Scientific Reports,2024,14:12345.
- [33] Salehi S.Designing a resilient and sustainable biomass supply network[J].Journal of Cleaner Production,2022,356:131789.
- [34] IEA Bioenergy.Bioenergy's role in balancing the electricity grid and enabling system stability[R].Paris:International Energy Agency,2023.
- [35] 宋晓华,苏雨菁,张露,等.基于改进物元可拓模型的农村综合能源系统效益评价[J].价格理论与实践,2022(2):170-174.
- [36] 汪洋,成立.适用于农网的中小功率风力发电电源研究[J].安徽农业科学,2011,39(27):17075-17078.

- [37] 曹也, 李辰琦, 周宏敞. 严寒地区光伏复合墙体冬季主被动热利用模式研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53(6): 927-933.
- [38] 李雪平. 寒冷地区农村住宅建筑的节能设计探讨 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4899-4900+4909.
- [39] 张勇, 王松, 李华, 等. 空气源热泵在华北农村供暖中的性能评价 [J]. 应用能源, 2020, 275: 115342.
- [40] 李晓, 赵云, 吴强. 空气源热泵与燃煤锅炉农村采暖能效对比研究 [J]. 能源与建筑, 2022, 259: 111880.
- [41] 潘家华, 张坤, 蒋尉. 面向碳中和的农村能源变革: 零碳微单元视角 [J]. 经济纵横, 2024(7): 39-47.
- [42] 王金南, 张昕, 王凯军, 等. 中国农村散煤消费现状与替代路径研究 [J]. 中国环境管理, 2020, 12(3): 45-52.
- [43] 张丽, 王伟, 李明, 等. 北方地区农村采暖散煤替代效益分析 [J]. 中国能源, 2021, 43(6): 23-30.
- [44] 沈其林. 浙江省农村能源发展的几点思考 [J]. 中国沼气, 2013, 31(5): 58-60.