

中国建筑领域2035低碳转型战略 路径研究成果摘要

研究单位：清华大学建筑节能研究中心

一、我国建筑领域碳排放现状与未来发展趋势

2021年我国建筑运行过程的碳排放总量为22亿吨CO₂，其中直接碳排放5.1亿tCO₂，占比23%，电力相关间接碳排放12.4亿tCO₂，占比57%，热力相关间接碳排放4.3亿tCO₂，占比20%。

1. 建筑运行直接碳排放

2021年建筑直接碳排放为5.1亿吨CO₂，其中城乡炊事的直接排放约2.3亿吨CO₂，分户燃气燃煤采暖排放约1.5亿吨CO₂，其余还有1.3亿吨CO₂是天然气用于热水、蒸汽锅炉及吸收式制冷造成的直接排放

近年来随着在农村地区大力推进“煤改电”、“煤改气”和清洁采暖，我国建筑领域的直接碳排放已经在2015年左右达峰，目前处于缓慢下降阶段。只要在新建建筑中，持续推进电气化转型，建筑领域的直接碳排放就会持续下降，不会出现新的峰值。

建筑领域直接碳排放实现零排放的关键在于推进“电气化”的时间点和力度。推行建筑电气化主要的障碍不是经济成本，而是用能理念认识转变以及炊事文化转变。加大公众对于电气化实现建筑零碳的宣传，在各

类新建和既有建筑中推广“气改电”，是实现建筑运行直接碳排放归零的最重要途径。

2. 建筑运行电力间接碳排放

2021年我国建筑运行用电量为2.2万亿kWh，电力间接碳排放为12.4亿吨CO₂。目前我国建筑领域人均用电量是美国、加拿大的六分之一，是法国、日本等的三分之一左右，单位面积建筑用电量为美国、加拿大的三分之一。生活方式和建筑运行方式的差异，是造成我国与发达国家用电强度差异的最主要原因之一。

近年来建筑用电量增长造成的碳排放增加，超过了电力碳排放因子下降造成的碳排放降低，建筑用电间接碳排放将持续增长，尚未达峰。维持我国绿色节约的生活方式和建筑使用方式，避免出现美日等发达国家历史上在经济高速增长期之后出现的建筑用能剧增现象，预测在2060年建筑用电量4万亿kWh（建筑面积750亿m²）即可满足我国人民对于美好生活的需求和建筑用能。在此基础上，通过全面推广“光储直柔”配电方式，可以使建筑用电的零碳排放先于全国电力系统零碳排放

的实现。

3. 建筑运行热力间接碳排放

2021年我国北方采暖建筑面积162亿 m^2 ，建筑运行热力的间接碳排放为4.3亿吨 CO_2 。

近年北方地区集中采暖面积和采暖热需求持续增长，但单位平米的供热能耗和碳排放持续下降，北方采暖热力间接碳排放呈缓慢增长趋势。进一步加强既有建筑节能改造，充分挖掘各种低品位余热资源，淘汰散烧燃煤锅炉，可以在2025年左右实现建筑运行使用热力的间接碳排放的达峰。之后跟随电力部门对剩余火电的零排放改造（CCUS和生物质燃料替代）的逐步完成，可与电力系统同步实现建筑热力间接碳排放的归零。

为了实现这一目标，要持续严抓新建建筑的标准

提升和既有建筑的节能改造，使北方建筑冬季采暖平均热耗从目前的 $0.35GJ/m^2$ 降低到 $0.25GJ/m^2$ ，从而减少供热需热量对热源的压力。2020~2035年期间：主要通过集中供热系统末端改造以降低回水温度，从而有效回收热电厂余热和工业低品位余热。通过现有热源供热能力的挖潜，来满足建筑采暖需热量的增加。对北方沿海核电进行热电联产改造，为我国北方沿海法线200公里以内地区提供热源。2035年起：配合电力系统火电关停的时间表，同步建设跨季节蓄热工程来解决关停火电厂造成的热源功率减少。至2045年：依靠跨季节蓄热工程，收集核电全年余热、调峰火电全年余热及各类低品位余热热源的全年余热。这样可在电力系统实现零碳排放的同时实现建筑热力间接碳排放的零排放。

二、建筑领域碳达峰和碳中和战略路径与重点任务

建立新型城乡能源系统。为了实现建筑运行碳排放的中和目标，在能源系统层面，应该全面推进用能电气化，并协助建设零碳的新型电力系统和余热为主的零碳热力系统。针对新型电力系统面对的风光安装空间和消纳不足、电源生产与电源消费不匹配的问题，应该利用城镇“光储直柔”建筑与私人电动车的储能资源，实现建筑的柔性充电与电动车的有序可调充电，来发挥需求侧的柔性协助电力系统实现零碳。同时应该充分利用我国农村建筑的屋顶空间，建立以屋顶光伏为基础的新型能源系统，通过农村的需求侧调控方式实现用电柔性和余电有序上网，有力支撑城镇电力消费。针对余热资源与末端用户在时间、空间和参数上的不匹配，应该利用北方集中供热管网，建立余热为主的“产调储输”零碳供热系统，来实现北方地区冬季采暖的零碳用热。

在建筑层面实现节能、高效、灵活、柔性。在建筑侧，首先应坚持生态文明理念下的绿色生活方式和建筑使用模式，在此基础上开展新建建筑的节能和既有建筑

的节能改造，通过建筑本体和机电系统的节能高效，来实现建筑用能需求的合理增长，这是实现零碳电力和热力系统的前提条件。

因此可以总结出，面向未来的零碳能源系统，我国建筑实现运行零碳的几大关键任务就是：

(1) 节能是实现建筑低碳的前提条件，应该以生态文明的发展理念作为基础，追求绿色生活方式和“部分时间、部分空间的”建筑使用模式，避免发达国家在历史上出现的建筑能耗剧烈增长。

(2) 发展创新的建筑节能技术，实现新建建筑的节能和既有建筑的改造，实现建筑围护结构和能源系统的能效提升，降低建筑的能源需求。

(3) 全面实现城乡建筑用能的电气化，包括炊事、生活热水、分散采暖的电气化，不再在建筑中使用任何化石燃料，从而使得建筑中的直接碳排放归零。

(4) 在城镇和农村屋顶安装分布式光伏，实现建筑从电力的单纯消费者到“产储调消”四位一体转型，助



力以可再生能源为主体的零碳新型电力系统的建设,实现建筑用电的零碳。

(5) 发展零碳余热资源,建立“采调储输”一体的零碳供热系统,实现北方建筑冬季采暖的零碳。

预计随着各项节能低碳工程的推进,我国建筑领域可在2030年前实现达峰,在2060年前实现零排放。

三、新型农村能源系统实现碳中和示范案例

农村有着丰富的土地资源,是发展太阳能、风能、生物质能等多种可再生能源的重要基础;发挥农村地区的资源禀赋、发展农村可再生能源,对于优化城乡能源供给结构、改善农民居住生活水平、推动农村经济建设等诸多方面都有重要意义。2020年,清华大学研究中心与山西省芮城县合作,将芮城作为低碳发展的试点县,提出了建立以屋顶光伏为基础的新型农村能源系统,从而在2025年实现碳达峰,2035年实现碳中和的目标,并将韧性与包容性协同发展的理念融入到芮城碳达峰碳中和发展规划中。协同发展低碳、韧性与包容性,或许是对抗能源转型中不确定性、保持稳定性和可持续性的关键。未来,芮城样板能够持续为农村能源系统实现清洁低碳转型和碳中和目标,同时助力乡村振兴和新型电力系统建设,实现包容韧性和城乡协调发展实践提供参考。

1. 芮城县基本情况

芮城县隶属于山西省运城市,总面积1178.76平方公里。2018年末全县总人口41.26万人,其中城镇常住人口21.2万人,乡村常住人口20万人。2019年生产总值91.85亿元,人均22313元。

2019年芮城全县消耗煤炭12.88万吨标煤,天然气总用量4446Nm³,石油总用量2.32万吨,全社会用电量7.24亿kWh。2019年芮城县风电光电年总上网电量已

除运行阶段以外,建筑领域相关的碳排放还包括建造相关的碳排放总量约为15亿吨,实现这部分排放的中和应避免“大拆大建”,使建筑的维修改造成为建筑业的主要任务,积极研究新型的低碳建材和与其相配套的结构体系和建造方式,减少建材的需求,实现低碳建造。

达到8.25亿kWh,大于全县总用电量,但由于风电光电存在“夏季多冬季少”“白天多晚上少”问题,只有58%的用电消纳了可再生电力,其余42%仍要从外电网取电。2019年芮城县各部门由于化石燃料燃烧所产生的直接碳排放总计53万tCO₂。

芮城县具有较好的零碳资源禀赋。目前建成一期二期集中光伏电站装机容量达97万kW,年发电潜力为11.6亿kWh。集中风电装机容量17万kW,年上网电量1.5亿kWh。根据估算,芮城县农村屋顶分布式光伏装机潜力为2496MW,年发电潜力为23.1亿kWh。城区屋顶分布式光伏装机潜力为426MW,年发电潜力为4.9亿kWh。芮城县可利用生物质资源总量约25.32万tce。

2. 芮城县发展规划

根据芮城县的社会发展预测与规划,2035年芮城县全社会用能106万tce(按照发电煤耗法折合),人均2.42tce/人,比目前芮城高240%,比目前全国平均低32%。全县总用电量32.6亿kWh,人均约7500kWh,燃料需求8万吨标煤。

根据规划,芮城县将于2030年前首先实现能源导致的碳排放总量为零,即化石能源的碳排放总量小于净输出的可再生电力×全国平均电力碳排放因子。并于2035年前实现化石能源燃烧的零碳排放,同时解决可再生电力的消纳问题,实现电力系统的碳中和,将从外



界大电网输入的电力削减为零,实现本地可再生电力的自给自足。

为实现2035年前碳中和的目标,近期任务是大力发展分布式光伏和生物质商品能源,逐步替代燃煤、燃气,以减少化石能源排放。以电代煤、以电代气、以电代油,在满足工业增长的前提下,控制对燃料的需求。通过发展光伏和减少化石燃料用量,实现用能导致的碳排放总量的中和。农村发展屋顶光伏180万kW来解决农民生活、生产、交通用能。城市发展43万kW屋顶光伏解决部分建筑用电和各种电动车充电问题。

中期目标为全面电气化、光伏全面发展和建成农村新能源系统,建成智能充电桩网络,通过全县12万辆电动车以及电动车、电动农机具和农副产品生产的“需求侧响应”用电模式解决一天内光电与负荷的不匹配问题。开发利用25万tce的生物质能源,其中8万tce满足全县燃料需求,其余17万tce用于生物质调峰电厂。全面实现汽车电气化、农业生产电气化,实现化石能源归零。

远期目标是建设35万kW生物质电厂,解决冬季光伏不足时的电力供给。在6万kW引黄灌溉工程的基础上建成抽水蓄能电站,解决短周期内的电力平衡。并全面发展“光储直柔”建筑配电,彻底解决光伏电力与用电负荷的平衡,实现电力系统零碳。到2035年实现能源领域零碳,并实现社会经济大幅度发展与增长。

3. 主要工作

根据以上目标,芮城县在2035年前计划实施的八大重点工程及时间安排如下:

1) 农村“光储直柔”配电系统,实现农村用能电气化(2021年-2035年)

农村建筑屋顶安装分布式光伏,每户装机容量大于20kW。农户生活、炊事、冬季取暖等全部电气化,采暖方式采用墙体蓄热或热风机。户内采用直流配电,并安装3~5kWh电池或双向充电桩。从2021年开始对部分农户试点进行改造,到2025年预计完成改造2万户左右,2026年到2030年阶段进入改造高峰,每年改造1万

户,2031年至2035年完成剩余户的改造,至2035年完成农村屋顶光伏装机180万kW的目标。

2) 全面开发生物质资源,建立商品能源产销系统(2021年-2025年)

2025年前完成目前25万tce生物质的采集,并转换为商品能源,制作成颗粒,压块或生物质燃气。使用光伏电力采用需求侧响应方式生产生物质燃料。建立采集—加工—销售渠道,研究不与牲畜争食,不与农田争肥的机制和措施,研究沼渣、沼液返田,工业生产用生物质燃料替代燃煤、燃气的措施。

3) 建立智能充电桩网络,实现汽车电气化(2021年-2030年)

建立完善的智能充电桩系统,实现“一位一桩”,助力电动车的推广。实现根据光伏的变化灵活充电,并在电力不足时为建筑补充电力。芮城县新增车辆全部为电动车,并积极实施燃油车的取代,预计2025年前新增0.9万辆电动车,至2030年增加至4.6万辆,至2035年实现除长途货车外,全部12万辆车全为电动车

4) 推广城市光伏屋顶和部分建筑的“光储直柔”(2021年-2030年)

开发利用各类建筑可利用的屋顶资源,部分公共建筑以及今后的新建建筑采用“光储直柔”配电方式,发展柔性负载。没有采用“光储直柔”的建筑,屋顶光伏优先供应智能充电桩,剩余部分逆变发电上网。到2025年预计完成城市屋顶光伏装机8万kW,2026年到2030年每年增加5万kW,2031年至2035年完成剩余的城市建筑屋顶光伏系统安装,至2035年完成城市屋顶光伏装机43万kW的目标。

5) 建立35万kW生物质电厂,实现电力零碳(2028年-2030年)

2030年建成发电能力 2×17.5 万kW的生物质热电联产电厂,年发电5亿kWh,年运行小时1700h,冬季同时为中心城区1100万平米的建筑供热。

6) 建立以生物质电厂余热为热源的中心城区的集中供热系统(2030年)



在中心城区利用生物质电厂发电余热供热,部分(<20%)中心城区建筑采用空气源热泵或其它热泵形式,其它城镇建筑采用电驱动热泵供热,农村利用光伏直接电热或空气源热泵采暖。热泵方式可尝试需求侧响应用电模式,协助为电网调峰。

7) 建立抽水蓄能电站,为光电风电调峰(2028年-2029年)

为协助解决几日内的电力调峰问题,在引黄灌溉工程的基础上建成抽水蓄能电站,储能容量为36万

kWh,最大放电功率6万kW

8) 工业生产的全面电气化(2025年-2035年)

采用电动热泵以及生物质燃料锅炉替代燃气锅炉,实行可中断方式生产,有效消纳光电。

芮城县申请成为碳中和示范县,完成以上八大工程的示范项目,争取于2035年前实现全县域内的碳中和,并通过新能源系统的建设,拉动制造业、旅游业及对外咨询业务的发展,推动芮城县社会经济发展。

四、政策建议

推进我国建筑领域实现碳达峰和碳中和的转型,推进各项关键技术与措施也同时需要相应的政策支持和保障措施,因此对我国建筑领域实现碳达峰和零碳排放的路径提出以下政策建议。

(一)建立科学的建筑碳排放核算体系,完善建筑碳排放核算方法,支持对建筑领域碳达峰和碳中和的路径规划与政策决策。推进建筑用电的实时碳排放责任因子体系的研究,建立建筑用电实时碳排放责任因子的方法、体系与数据,实现城镇光储直柔建筑和农村屋顶光伏系统减碳效果的科学合理核算,以推动建筑运行碳排放降低的各项措施。

(二)顶层规划城乡能源系统,开展零碳能源系统重构的基础设施建设。在城乡能源系统层面进行顶层设计与规划,全面布局建设城乡适应新型电力系统的“产消调蓄一体”用电终端和集“采、调、储、输”于一体的零碳供热系统。

(三)坚持绿色建筑发展方向,提倡绿色生活方式,避免“大拆大建”合理规划控制城镇建筑规模总量,由大规模建设转入既有建筑的维护与功能提升。

(四)大力推行建筑用能“电气化”与建筑能效提升,实现新建和既有建筑的绿色、低碳、灵活、高效运行。

(五)加强“光储直柔”建筑的技术研发与标准制订,实现建筑应该从能源系统的使用者,转变为能源系统的生产者、使用者和储存调控者。将智能有序充电桩网络建设纳入建筑的规划、建设和管理体系。

(六)在农村大力发展电力产消一体的农村新型能源系统,实现电力生产和消纳一体化,也以此作为构建我国新型电力系统的突破口与着力点。

(七)由国务院能源主管部门会同国务院发展改革部门牵头制订北方地区余热清洁供热专项规划,同时大力发展基于核电余热的热水热联产技术、大规模跨季节蓄热技术、降低回水温度的技术的研发、示范和推广。

