

ICCSA 合作应对气候变化
携手推动低碳转型
Step up
for Change

中国 CHINA
PAVILION
COP28

中国东北地区 电热能源耦合系统 碳中和转型路径研究

刘培、李忱息、宋四明

清华大学能源与动力工程系

ICCSA

目录

1. 电热耦合部门脱碳的主要结论.....	7
2. 建筑清洁供电供暖面临的挑战和机遇.....	11



中国东北地区电热能源耦合系统 碳中和转型路径研究¹

刘培、李忱息、宋四明
清华大学能源与动力工程系

气候变化是目前面临的迫切需要解决的全球性问题。为了应对这一问题，必须尽快采取严格的脱碳措施。为了响应众多国际组织碳减排的号召，目前已有多个国家的政府提出了减少碳排放甚至碳中和的气候目标²。其中，中国政府已宣布在 2030 年前实现碳达峰，争取在 2060 年实现碳中和³。各个部门的减排是实现全国碳减排及碳中和的基础。建筑部门是中国能源消费的三个主要部门之一（其余两个为工业和交通部门），其碳排放由直接排放如居民用天然气和间接排放如供电供热用化石能源构成，占全国总排放的近 40%。其中，建筑部门的碳排放主要来自于电力和热力

1 能源基金会资助清华大学和哈佛大学共同开展的“中美深度脱碳技术创新与政策比较研究”二期项目” (G-2203-33706)
2 Net Zero Tracker. Net Zero Stocktake 2022[EB/OL]. [2023-04-24]. <https://zerotracker.net/analysis/net-zero-stocktake-2022>.
3 Luo S, Hu W, Liu W, et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 166: 112618. Doi: 10.1016/j.rser.2022.112618.

的间接排放。根据清华大学建筑节能研究中心发布的《中国建筑节能年度发展研究报告》计算⁴，2019年中国建筑的用电量约为1.89万亿度，相当于11亿吨间接二氧化碳排放量。此外，中国北方的集中供暖导致了约4.5亿吨间接二氧化碳排放量。建筑用电和集中供暖导致的间接排放约占全国建筑运行阶段二氧化碳排放总量的75%。随着建筑电气化的快速推进和未来住宅供暖区域的增加，建筑部门的电力需求和供暖需求将持续增加。如果不对建筑供电供热采取有效的脱碳措施，未来建筑行业由于电热需求导致的间接二氧化碳排放量将大幅上升。因此，为了控制建筑行业的碳排放，在建筑部门实施减排措施例如推广节能建筑以减少电热需求，采用可再生能源供暖制冷以及在电力部门实施碳捕集和封存技术等是非常必要的。

目前，中国的发电燃料仍然以煤炭为主，煤电占全国总发电量的比例约为60%。尽管近年来国内一直在大力发展风能、太阳能和水电等可再生能源，非化石燃料的电力在全国能源结构中的占比也一直在稳步增加，但是由于发电量大且发电相比其他国家更加依赖煤炭，中国电力系统的碳排放量仍然超过40亿吨。根据生态环境部发布的《关于做好2023-2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》，2022年全国电网的平均碳排放因子仍然高达0.5703 t CO₂/MWh⁵。

由于中国南北跨度较大，气候条件差异很大。相比于南方，北方地区天气更加寒冷，对供暖的需求也更高，因此全国的集中供暖目前以北方地区为主，并且主要由燃煤锅炉提供。燃煤取暖是造成空气污染的主要原因之一，这在过去十年里被国内政府重点关注。为了减少空气污染，中国政府一直在积极推进天然气和电力等清洁能源供暖。近年来，在京津冀等北

4 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(2021)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

5 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. (2023-02-07)[2023-04-24]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.

方地区天然气供暖的使用量迅速增加。中国政府近年来一直在投资建设天然气管道和储存设施，以支持天然气使用量的增长。同时，在中国南方部分供暖需求较低的城市，电力也被用作热源。由于电供暖的便利性和低碳性，电供暖的使用越来越广泛。由于环境污染，过去

十年实施的“煤改气”和“煤改电”等以环保为出发点的供暖政策在一定程度上为中国的清洁供暖奠定了坚实的基础，并且缓解了未来实现零碳供暖的部分压力。

之前多数研究表明，为了实现电力系统快速碳减排并实现碳中和的目标，需要关闭大量的燃煤发电机组^{6,7}。然而，目前中国北方有相当多的火电厂承担着集中供暖的任务，例如，在中国东北地区同时承担供电和供热任务的燃煤热电联产机组占煤电机组总量的70%左右⁸。与其他供暖方式相比，燃煤热电联产机组有巨大的优势。首先，热电联产机组的供暖成本较低，和热泵供暖的成本基本相同，仅为燃煤锅炉供暖成本的82%、电力供暖成本的21%和天然气供暖成本的35%⁹。尽管和可再生供热方式相比，热电联产机组供热仍然存在少量的碳排放，但是热电联产机组对自然资源的依赖性较低，可控性更强，并且可以通过同时供电和供暖减少50%以上的碳排放¹⁰。此外，四部委最新推出的《2022年中国北方清

6 Li T, Liu P, Li Z. Quantitative relationship between low-carbon pathways and system transition costs based on a multi-period and multi-regional energy infrastructure planning approach: A case study of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110159. Doi: 10.1016/j.rser.2020.110159.

7 李政, 陈思源, 董文娟, 刘培, 杜尔顺, 麻林巍, 何建坤. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 3987-4001. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210671.

8 Zheng W, Zhang Y, Xia J, et al. Cleaner heating in Northern China: potentials and regional balances[J]. *Resources, Conservation and Recycling* 2020, 160: 104897. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104897.

9 许磊, 黎家麟. 几种常用的供热方式供热成本分析[J]. *供热制冷*, 2019, 2: 23-24.

10 赵旭, 黄天科. 热电机组供热比碳排放强度关联影响分析[J]. *中国设备工程*, 2021, 488(24): 107-108.

1. 电热耦合部门脱碳的主要结论

洁取暖计划》也在鼓励将现有的纯火电机组改造为热电联产机组¹¹，这也表明尽管面临严格的碳排放控制要求，热电联产机组的比例和总量仍然很可能在未来一段时间内继续增加。在规划中国电力系统的低碳发展路径时，仅考虑供电得到的关闭大量燃煤发电机组的结论显然是不符合现行政策的，这也可能导致未来供热不足或能源转换部门（供电和供热）的整体低碳转型成本更高。因此，对中国电力系统转型的研究，尤其是北方地区燃煤发电机组的转型，必须要和供热同时考虑。

中国东北地区的电热系统耦合最密切，因此被当做研究的案例，这可以给其他地区的电热耦合转型提供参考。为了研究东北地区电力和热力耦合系统的减排以及燃煤基础设施的未来发展，我们提出了一个自下而上的优化模型，为具有减排目标的电力和集中供暖系统提供最经济的能源系统转型路径。优化模型考虑了不同能源技术的投资、运营和维护成本，可以输出满足碳减排目标的最佳能源系统转型路径，同时将总体成本降至最低。为了体现燃煤发电和燃煤供暖的稳定性优势，这一模型的时间分辨率为一小时。同时，为了反映热电联产机组的运行特性，模型中还描述了其爬坡速率限制和启停时间限制。研究一共设立了四种场景来分析转型路径，其中四种场景的差异在于是否允许新建煤电以及是否允许改造原有煤电，如表1所示。

名称	是否允许新建煤电	是否允许改建煤电
A	√	√
B	√	×
C	×	√
D	×	×

表 1. 情景设置

通过模型计算，我们发现在未来几十年内，风电将逐渐在中国东北地区的能源结构中占据主导地位。据估计，到 2050 年时，东北地区 60% 以上的电力需求都将由风电提供，这也意味着煤电在电力系统中角色的重大转变。未来只有少量煤电机组会被保留，并被配备有碳捕集与封存技术的生物质电厂抵消掉相关二氧化碳排放以实现碳中和。尽管研究表明，到 2060 年约有 65% 的燃煤发电机组将被拆除，但是与其他不考虑供暖系统的纯电力系统减排研究相比，这一比例已经下降了 25 个百分点¹²。如果未来既不新建煤电机组，也不改造现有煤电机组，那么煤电将逐渐被生物质取代，如图 1(a) 所示。就供热系统而言，我们的结果表明，与热泵相比，直接用电供暖在任何时候都不会是一个更好的选择，因为电加热的耗电量相对更高，经济性也更低。随着技术的发展与进步，燃煤锅炉将逐渐被热电联产机组取代，因为其具有更高的效率和更低的排放。由于未来更严格的碳排放限制，热电联产机组又将逐渐被热泵取代。这表明热电联产机组是实现清洁供暖的过渡性技术，在实现碳中和的前期应该被优先考虑。总体而言，研究结果强调了风电在中国东北能源转型中能发挥核心作用的潜力，并且强调了能源系统低碳减排规划时综合考虑供电和供热系统的必要性。通过实施全面且综合的能源系统规划方法，东北地区可持续和低碳的能源系统在未来是很有可能实现的。

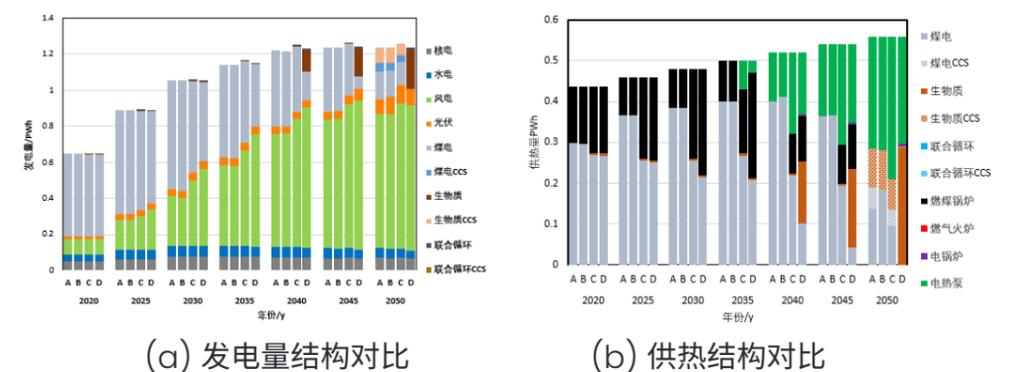


图 1 中国东北地区能源结构

¹¹ 北方地区清洁取暖四年规划 2022-2025 年：重在建立长效机制 [EB/OL]. [2023-04-24]. <http://www.nuanfeng.com.cn/public/index.php/home.news.newsshow.id.1114.html>

¹² He J, Li Z, Zhang X, et al. Towards carbon neutrality: A study on China's long-term low-carbon transition pathways and strategies[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2022, 9:100134. Doi: 10.1016/j.ese.2021.100134.

当可再生能源在电力系统中的渗透率越来越高时，确保电力供应的稳定和电力系统的供需平衡非常重要。这可以通过大量的灵活性可调节电源来实现，这些电源的组合能够满足不同季节的不同能源需求。以情景 A 为例。风电在春季的利用率最高，而燃煤热电联产机组主要在夏季和冬季使用，如图 2 所示。这是因为夏季风电的可用性较差，冬季有较高的供暖需求。由于未来电力系统中可再生能源占比不断增加，可再生能源的弃电率也呈现出上升趋势，如图 3 所示。由于煤电为灵活性电源，且 2035 年前存量较高，因此可以发现，在 2035 年前可再生能源的弃电率一直维持在相对较低的水平。但是，由于燃煤发电机组的大量减少和可再生发电机组的增加，2035 年后弃电率迅速上升。不允许新建或翻新现有燃煤发电的情况下完全淘汰燃煤发电可能会对未来可再生能源浪费的比例产生相当大的影响。到 2050 年，可再生能源的弃电率可能超过 10%，这甚至可能会阻碍可再生能源在电力系统中实现更高的渗透率。这表明，保留一些现有的燃煤基础设施更有利于消纳可再生资源。此外，燃煤发电机组也可以用来平衡可再生能源的间歇性，从而提高电力系统的稳定性和可靠性。

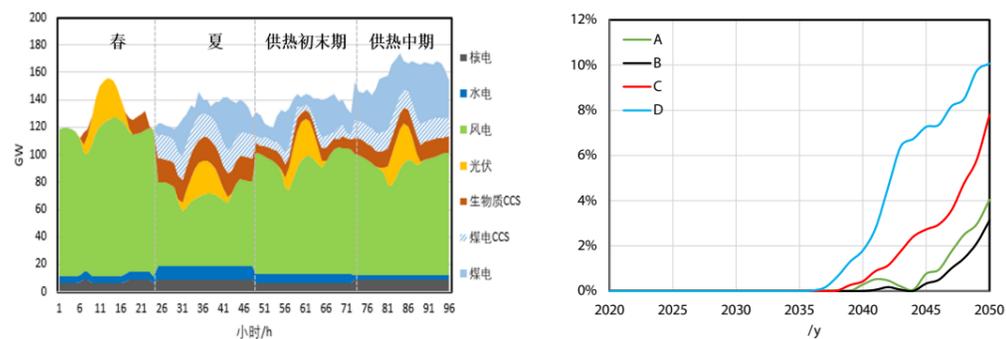


图 2 发电设备运行情况

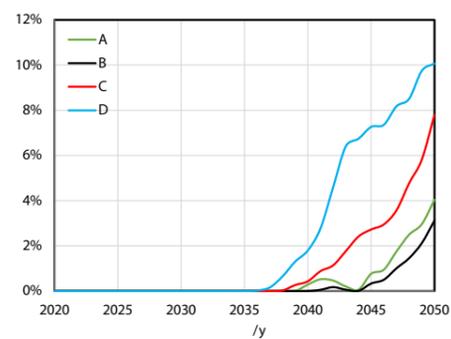


图 3 可再生能源弃电率

我们对能源供应系统结构的长期减排路径的分析表明，热电联产机组将在实现中期碳减排目标方面发挥关键作用。而通过将燃煤发电机组改造为热电联产或配备碳捕集装置的机组，可以显著延长其使用寿命。延长现有燃煤机组的使用寿命可以带来多种好处。首先，它可以帮助在能源系统中中期减少碳排放，同时保持稳定的电力供应。相比于普通的燃煤机组或燃煤锅炉，热电联产机组能源利用效率极高，因为它们可以同时发电供热，因此能更有效地利用能源。此外，对有机组的改造可以避免建造新的基

础设施，节约时间和成本。图 4 说明了在各种情景下燃煤发电机组的潜在建设和寿命延长情况。允许改造可能会导致至少 60 GW，甚至可能高达 90 GW 的燃煤基础设施的持续使用，这大约相当于 2019 年中国东北地区的燃煤发电总装机容量¹³。如果既不允许建造燃煤机组，也不允许改造以延长其使用寿命，则需要建造大量的生物质热电机组来提供低碳热力。为了满足东北地区的供暖需求，还需要 50 GW 的生物质供暖机组，这几乎是 2020 年全国生物质装机容量的两倍¹⁴。然而，鉴于中国的生物质资源极为有限，只有约 17 EJ 可被用作燃料¹⁵，因此大量建设生物质机组并严重依赖生物质供暖是极不现实的。

13 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

14 国家可再生能源信息管理中心. 2020 年各省(区、市)生物质发电建设情况发布 [EB/OL]. (2021-02-02) [2023-04-24]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210204/1134651.Shtml>.

15 壳牌能源远景. 中国能源体系 2060 碳中和 [EB/OL]. [2023-04-24]. www.shell.com/ChinaSketch

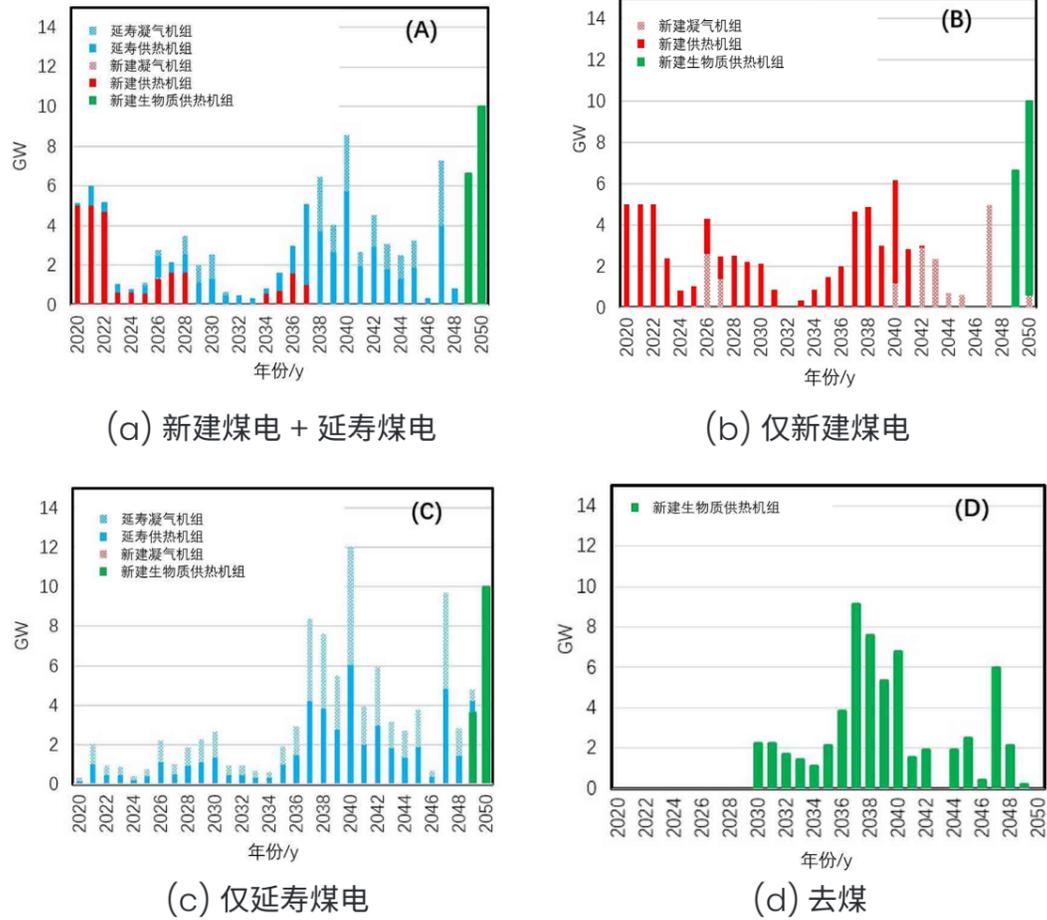


图 4 未来 30 年火电新建及延寿情况

根据我们的研究，对燃煤基础设施采取不同的处理方式可能会导致中国东北地区转型成本的巨大差异。为了在 30 年内实现东北地区电热耦合部门的净零排放，转型成本预计在 3921 亿元至 5006 亿元之间。同时，允许对燃煤基础设施进行改造可以将总转型成本降低约 16%，而允许新建燃煤基础设施可以使总转型成本下降约 20%。因此，虽然东北地区的电热耦合系统需要在 30 年内实现碳中和，但仍有必要新建适量的燃煤机组，并对部分机组进行低碳或供热改造，这可以节省巨大的潜在低碳转型成本。向零碳社会的转型需要大量的投资，而各地区成本更低的转型路径取决于各地区的实际情况。以中国东北地区为例，分析表明，包括适当使用燃煤基础设施在内的平衡方法是实现电力和供热部门碳中和的一种成本效益高的方法。然而，燃煤基础设施的使用必须与减少温室气体排放和促进可持续能源的目标相一致。

2. 建筑清洁供电供暖面临的挑战和机遇

- 目前，中国在地理上被秦岭和淮河分为北方和南方。集中供暖在北方城市很常见，而南方很少有城市拥有集中供暖基础设施。然而，随着中国经济的快速发展和人们对生活质量要求的提高，冬季相对低温的南方供暖需求正在上升。与北方城市的煤电机组相比，南方城市的火电机组在建设初期对未来供暖改革的考虑较少。因此，大规模的供热改革在南方燃煤发电机组中可能是不可行的。需要探索低碳的方式满足中国南方潜在的巨大供暖需求，北方的清洁供暖路线不容复制。
- 其次，建筑供暖的热源类型与建筑群的分布密切相关。中国的人口分布逐渐呈现出向主要城市群集中的特征，从而形成一个非常集中且以高层建筑为主的特大型城市。聚集式高层建筑群更适合使用集中供暖形式，如燃煤锅炉、燃气锅炉和生物质锅炉。然而，中国的生物质资源稀缺，零碳供暖不需要燃烧化石燃料，否则就需要安装大量碳捕集设备，这可能会导致巨大的成本和能源损失。清洁供暖方式，如热泵和太阳能，更适合人口和建筑密度低的地区。因此，如果城市中的建筑仍然人口稠密，那么可再生能源的广泛使用可能会很困难，这与技术的发展无关。
- 第三，以电为动力的供暖技术可能会导致整个社会对电力的需求大幅增长（包括热泵、电加热）。电力系统与供暖系统都需要尽快实现碳减排。在相同的碳减排目标下，满足更多的电力需求意味着电力系统可再生能源发电量的增加以及储能等相关配套设施的数量的增加。这可能会使电力系统的低碳转型更加复杂。

机构介绍

- 低碳转型的需求也为中国电热耦合行业带来了机遇。首先，中国可以减少对化石燃料的依赖，加强能源安全。例如，目前需要从澳大利亚等国进口大量的煤炭用于供电供热。通过开发太阳能、风能和水电等清洁、丰富且在可全国广泛使用的可再生能源，可以大幅减少对进口化石燃料的依赖。
- 此外，向低碳能源供应体系的转型也可以为中国创造新的经济机会。例如，可再生能源的开发可以在过去可能依赖化石燃料行业的地区创造新的就业机会并刺激经济增长。碳捕获技术在电力系统中的广泛使用也可以为新技术的开发和新服务的提供创造新的机会。总的来说，向低碳能源体系的转型有助于中国经济的可持续发展和繁荣。

清华大学气候变化与可持续发展研究院成立于 2017 年 10 月。气候院致力于打造跨学科研究、人才培养和政策交流协同创新平台，整合国内外优质资源，为应对全球气候变化与实现可持续发展提供智慧和方案。气候院的工作内容包括对话与交流、战略研究、教育与培训三大板块，已经成功打造“气候变化大讲堂”、“巴黎协定之友”、“世界大学气候变化联盟”等品牌旗舰项目，开展了“中国低碳发展及转型路径”、“气候与环境协同治理”等战略研究，搭建了“甲烷减排合作平台”和“应对气候变化的基于自然解决方案”合作平台，并组织了两期南南气候合作培训班。目前已经形成了国际品牌影响力、国内外资源整合能力和专业研究实力三大优势，成长为领域内知名智库。

