



电力行业碳达峰及促进全社会碳减排影响分析

周原冰^{1,2}, 张士宁¹, 侯方心¹, 任宏涛³, 徐鹏飞¹

(1. 全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031; 2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031;
3. 华东理工大学商学院, 上海 200237)

摘要: 电力行业碳排放占能源领域碳排放 40% 以上, 是能源领域减排的主战场。在全社会实现 2030 年前碳达峰背景下, 电力行业碳达峰的时间关系着终端各个部门以及全社会碳达峰。首先, 分析了已经实现碳达峰国家电力行业与全社会及其他行业碳达峰时间先后关系; 其次, 理论推导了电力行业碳达峰需要满足的条件以及不同情景下非化石能源发电量占比要求; 最后, 量化评估了电能替代对终端用能部门和全社会的碳减排影响。研究表明, 电力生产碳强度下降率是决定电力行业碳达峰的重要约束条件, 在 2030 年发电量为 13 万亿 kW·h 的基准情景下, 非化石能源发电量占比需要达到 56.3%, 意味着 2023—2030 年每年新增风光装机容量 2.4 亿 kW 以上, 电力行业可以在 2030 年实现碳达峰; 电能替代促进全社会碳减排受电力生产非化石能源发电量占比影响, 只有非化石能源发电量占比超过一定临界值, 终端用能部门和全社会才能实现同步碳减排。

关键词: 电力行业; 碳达峰; 碳强度; 非化石能源发电量占比; 电能替代

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202405093

0 引言

2020 年, 中国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”目标。目前围绕中国全社会和终端用能部门碳达峰时间和路径已开展了大量研究工作^[1-6]。电力行业碳排放占能源领域排放 40% 以上^[7], 是实现碳达峰目标的主战场。研究学者采用综合评估模型^[1-2,8-9]、LMDI 分解法^[3-5,10-13]、投入产出法^[14]、情景分析法^[15-18]、理论推导法^[19]、机器学习法^[20-21]等研究方法, 对中国电力行业碳达峰时间、峰值、区域特征进行了研究^[9,12,18,21-23]。

文献^[16, 24]梳理了不同学者对中国全社会及电力行业碳达峰时间和峰值的研究结论。全社会碳达峰时间介于 2026—2035 年, 碳排放峰值为 94 亿~132.1 亿 t 二氧化碳。电力行业碳达峰时间介于 2018—2040 年, 碳排放峰值为 25.1 亿~72.4 亿 t 二氧化碳。文献^[19]推导了中国能源部

门实现碳达峰的边界条件, 提出 2030 年前实现全社会碳达峰需要非化石能源消费占比达到 25% 以上; 文献^[3]提出 2025 年电力行业碳达峰需要清洁电力达到 3.6 万亿 kW·h; 文献^[18, 22]研究得出 2030 年电力行业碳达峰时碳排放量占能源系统碳排放总量的比重将增加至 50%; 文献^[21]研究得出 2030 年全社会发电量将达到 11.16 万亿 kW·h, 对应清洁电力比例达到 52.7%; 文献^[8]研究得出电力行业碳达峰时间为 2029 年, 晚于钢铁、建筑、水泥等行业。

从机理上来看, 电力行业实现碳达峰主要取决于未来电力需求增长情况以及电力生产碳强度下降趋势。如果电力需求增速大, 而碳强度下降过慢, 则电力行业碳排放将呈现持续上升态势, 从而无法实现碳达峰; 如果电力需求增速一定情况下, 碳强度下降速度超过一定临界值, 则电力需求增长与碳强度下降对碳排放净增量影响可以相互抵消, 从而实现碳达峰。现有研究中电力行业碳达峰时间和峰值研究结论存在较大差异^[16,20-21,25], 缺少明确的碳达峰理论模型和机理研究方法。同时, 电能替代会影响电力行业碳排放和碳达峰, 因此需要进一步量化评估电能替代对

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-08-06。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72140006, 72371102)。

电力行业 and 全社会碳减排成效的影响。

为此,本文首先理论推导电力行业碳达峰理论条件;然后分析电力行业碳达峰可行性、不同情景下非化石能源发电量占比需求、电力行业碳达峰时间以及对应的可再生能源装机增量需求;最后量化评估工业、交通、建筑、农业等终端用能部门电能替代对电力行业及全社会碳减排的影响。

1 历史数据分析

1.1 国际情况

截至 2022 年底,全球已有 49 个国家实现全社会碳达峰^[26],主要为西方发达国家(见表 1)。通过对比发达国家全社会碳达峰时间与其他行业碳达峰时间,可以为研究中国电力行业与全社会碳达峰时间关系提供参考。由表 1 可以看出,除加拿大外,其他国家电力行业与全社会碳达峰时间相同,或晚于全社会碳达峰时间。其中,意大利电力行业相比全社会碳达峰滞后 2 年,法国滞后 3 年,英国滞后 9 年,瑞士滞后 26 年;德国、美国、西班牙电力行业与全社会实现同步碳达峰;加拿大电力行业相比全社会碳达峰提前 4 年。

表 1 世界主要国家全社会碳达峰年份及行业达峰年份比较
Table 1 Comparison of carbon peaking time for the whole-society and various industries in major countries

国家	全社会	电力	工业	交通	其他
德国	1979	1979	1973	1999	1979
美国	2007	2007	1979	2007	1970
英国	1970	1979	1973	2007	1979
法国	1973	1976	1971	2001	1973
加拿大	2007	2003	1974	未达峰	1972
意大利	2004	2006	1974	2007	2005
瑞士	1970	1996	1973	2007	1976
西班牙	2007	2007	2004	2007	2006

注:已实现碳达峰国家数据来源为世界资源研究所(World Resource Institute, WRI)。

发达国家进入工业化后期,通过高耗能产业转移,工业部门相比全社会碳达峰稍早,亦早于电力行业碳达峰时间。其中,德国工业部门相比全社会和电力行业提前 6 年实现碳达峰;美国提前 28 年,西班牙提前 3 年,加拿大提前 33 年;英国工业部门相比全社会晚达峰 3 年,但比电力

行业早 6 年实现碳达峰;法国工业部门比全社会碳达峰时间早 2 年,比电力行业碳达峰时间早 5 年。

伴随经济发展,全球乘用车数量持续增加,交通部门碳达峰时间最晚,均晚于全社会和电力行业碳达峰时间。其中,德国交通部门比全社会碳达峰时间晚 20 年,英国晚 37 年,法国晚 28 年,瑞士晚 37 年;美国和西班牙交通部门与全社会实现同步达峰。

1.2 中国情况

相比于发达国家,中国电力行业还未实现碳达峰。通过分析中国发电量、用电量历史数据^[27],可以发现中国化石能源发电量占总发电量比重逐年降低,主要得益于非化石能源发电量逐年增加。2009 年化石能源发电量占比为 80%,2023 年降至 63.5%,缺口由非化石能源发电量满足(见图 1)。非化石能源发电量增长迅速,但仍不满足全社会用电量增量。2016 年以来,非化石能源发电量增量约 2000 亿 kW·h,2023 年为 2420 亿 kW·h,但非化石能源发电量增量仍无法全部满足全社会电力消费增量。非化石能源发电量增量占电力消费增量比重约为 50%(见图 2),也就是仍有一半左右的电力需求增量由化石能源发电满足,导致中国电力行业碳排放仍处于上升阶段。

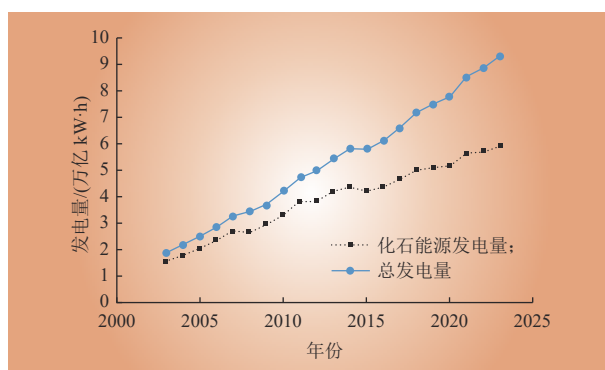


图 1 中国总发电量与化石能源发电量历史数据
Fig. 1 Historical data of total power generation and fossil-fuel power generation in China

随着中国清洁能源发展和发电效率的不断提升,电力生产碳强度呈现逐年下降趋势(见图 3)。2000 年碳强度为 864.5 g/(kW·h),2021 年下降至 556.8 g/(kW·h),降幅 35.6%,年均下降率为 2.1%。未来,电源结构调整和效率提升将推动碳强度持续下降,从而实现电力行业碳达峰。根据本文研究,按照 2030 年前风光新增装机规模 2.0 亿~3.5 亿 kW

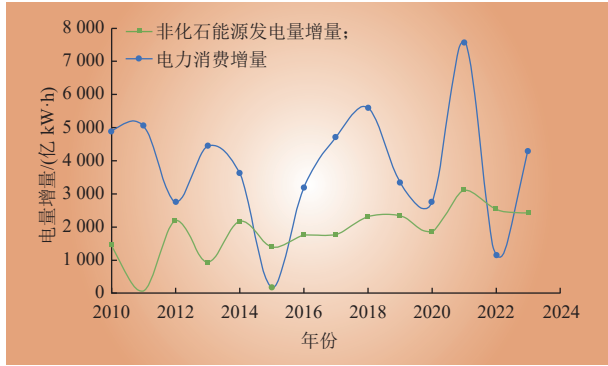


图 2 中国电力消费增量与非化石能源发电量增量对比
Fig. 2 Comparison of incremental electricity consumption and non-fossil fuel power generation in China

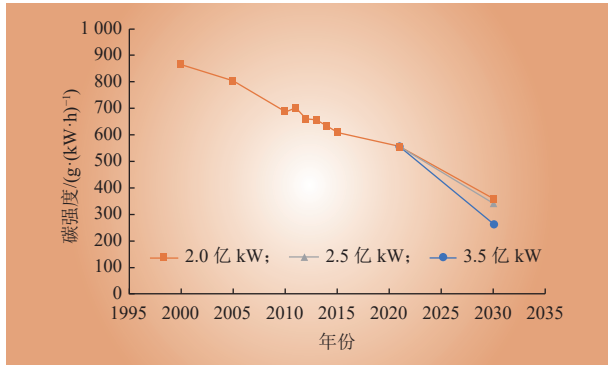


图 3 中国电力生产碳强度历史数据及变化趋势
Fig. 3 Historical data and change trends of carbon intensity in power production in China

计算，2030 年碳强度将下降至 260~370 g/(kW·h) (见图 3)。

2 电力行业碳达峰理论分析

2.1 理论公式

参考相关研究和要求^[19,28]，电力行业碳排放可以表示为

$$C(t) = E(t) \frac{C(t)}{E(t)} = E(t)C_1(t) \quad (1)$$

式中： $C(t)$ 为水平年 t 的电力行业碳排放； $E(t)$ 为水平年 t 的发电量； $C_1(t)$ 是水平年 t 的电力生产碳强度（度电排放因子）。

根据函数的求导法则，碳排放变化率可以推导为

$$\frac{dC(t)}{C(t)} = \frac{d(E(t)C_1(t))}{E(t)C_1(t)} = \frac{dE(t)C_1(t) + E(t)dC_1(t)}{E(t)C_1(t)} = \frac{dE(t)}{E(t)} + \frac{dC_1(t)}{C_1(t)} \quad (2)$$

根据微分的几何定义，用切线段来近似代替曲线段，式（2）可以近似表示为

$$\frac{\Delta C(t)}{C(t)} \approx \frac{\Delta E(t)}{E(t)} + \frac{\Delta C_1(t)}{C_1(t)} = r_E(t) + r_{C_1}(t) \quad (3)$$

式中： $r_E(t) = \frac{\Delta E(t)}{E(t)}$ 表示发电量年均增速，%； $r_{C_1}(t) = \frac{\Delta C_1(t)}{C_1(t)}$ 表示电力生产碳强度变化率，%。

从式（3）可以得出，如果 $r_E(t) \leq -r_{C_1}(t)$ ，则 $\Delta C(t) \leq 0$ ，也就是在水平年 t 实现了碳达峰。

假设从基年 t_B （如 2021 年）到达峰年 t_P （如 2030 年）经济增速逐渐放缓，发电量增速逐年下降，则基年到达峰年的平均发电量增速 \bar{r}_E 要大于达峰年的发电量增速 $r_E(t_P)$ 。假设从基年到达峰年随着可再生能源快速发展，电力生产碳强度变化率绝对值逐年增大，则基年到达峰年的平均电力生产碳强度变化率（考虑负值） \bar{r}_{C_1} 要大于达峰年的电力生产碳强度变化率 $r_{C_1}(t_P)$ 。

因此，如果 $\bar{r}_E \leq -\bar{r}_{C_1}$ ，那么一定有

$$r_E(t_P) \leq -r_{C_1}(t_P) \quad (4)$$

也就是，从基年 t_B 到达峰年 t_P 发电量年均增速小于等于期间电力生产碳强度变化率平均值，则电力行业一定可以实现碳达峰。

2.2 非化石能源发电量占比理论值

非化石能源发电量占比是衡量电力系统低碳程度的重要表征，也是影响电力行业碳达峰的重要因素。非化石能源发电量占比是决定电力生产碳强度最重要的因素，而电力行业碳达峰年的发电量决定了发电量年均增速，因此通过 $\bar{r}_E \leq -\bar{r}_{C_1}$ 的关系，可以建立电力行业碳达峰条件下达峰年发电量 $E(t)$ 及对应非化石能源发电量占比 $S(t)$ 的一一对应关系（见图 4），从而可以计算不同碳达峰情景下非化石能源发电量占比情况。

参考中国电力发展历史数据及文献^[18, 21-22, 25]中对 2030 年发电量预测，基准情景为 13 万亿 kW·h，同时设计高情景和低情景作为对比，对应

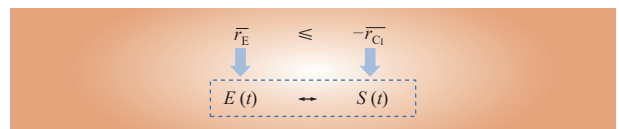


图 4 发电量与非化石能源发电量占比关系推导框架
Fig. 4 Framework for deriving the relationship between power generation and proportion of non-fossil fuel power generation

发电量分别为 13.5 万亿、12.5 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，2023—2030 年高情景、基准情景、低情景下发电量年均增速分别为 5.5%、4.9%、4.3%，3 种情景下发电量趋势如图 5 所示。如果电力行业 2030 年实现碳达峰，根据 $\bar{r}_E \leq -\bar{r}_{C1}$ 判断条件，相应 3 种情景的非化石能源发电量占比分别为 58.0%、56.3%、54.3%。

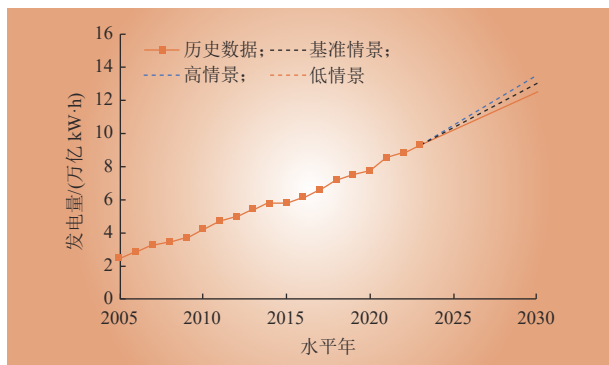


图 5 3 种情景下发电量趋势

Fig. 5 Power generation trends under three scenarios

根据 $\bar{r}_E \leq -\bar{r}_{C1}$ 判断条件，2030 年电力行业实现碳达峰情景下发电量与非化石能源发电量占比曲线关系如图 6 所示。图中红线为不同发电量情景下非化石能源发电量占比临界值曲线，意味着非化石能源发电量占比在曲线及以上时电力行业可以实现碳达峰。

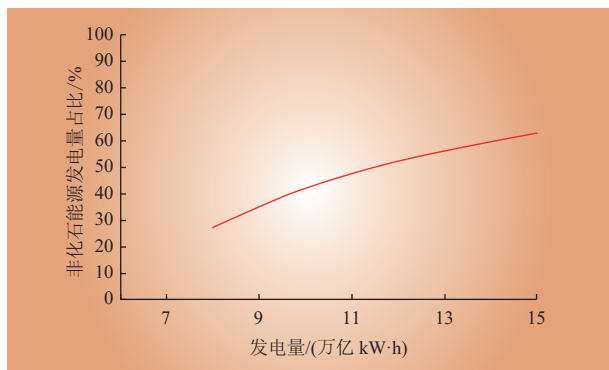


图 6 电力行业 2030 年碳达峰情景下发电量与非化石能源发电量占比关系理论曲线

Fig. 6 Theoretical curve of proportion of non-fossil fuel power generation versus power generation for carbon peaking in power sector in 2030

3 电力行业碳达峰情景分析

3.1 政策规划情景

根据《“十四五”可再生能源发展规划》中

可再生能源发电目标，2025 年可再生能源年发电量将达到 3.3 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 左右。“十四五”期间，可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过 50%，风电和太阳能发电量实现翻倍。根据《“十四五”现代能源体系规划》，2025 年，常规水电装机容量达到 3.8 亿 kW 左右，核电运行装机容量达到 7000 万 kW 左右；2030 年风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿 kW 以上。

1) 十四五期间（2025 年前）。

“十四五”期间，可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过 50%，意味着仍有部分用电量增量需由化石能源发电满足，因此按照当前政策规划情景发展，2025 年前电力行业将无法实现碳达峰。截至 2023 年底，风电和太阳能发电量合计 1.5 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，是 2020 年（7273 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ）的 2 倍，表明中国已提前 2 年完成了“风电和太阳能发电量实现翻倍”的目标。

2) 十五五期间（2030 年前）。

截至 2023 年底，中国风电、太阳能发电装机容量累计达到 10.5 亿 kW ，相比 2022 年（7.58 亿 kW ）新增 2.92 亿 kW 。按照当前新能源发展速度，预计 2024 年底将达到 12 亿 kW 以上，提前 6 年完成规划目标。

2023 年中国全社会发电量为 92 888 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，2016—2023 年发电量年均增速为 6.1%。基准情景下，2030 年全社会发电量为 13 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，相比 2023 年新增电量为 3.7 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。按照水电装机增量 2000 万 kW ，利用小时数 3 270 h；核电装机增量 6000 万 kW ，利用小时数 7 560 h 计算，水电和核电发电量增量分别为 650 亿、4500 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。假设 2030 年风电、太阳能发电装机容量累计超过规划目标，达到 16 亿 kW ，风电、太阳能发电利用小时数分别为 2 080 h、1 080 h 计算，风电和太阳能发电量增量分别为 5 400 亿、3 100 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。新增非化石能源发电量合计为 1.4 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，远小于全社会发电量增量需求（3.7 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ），相应缺口只能由化石能源发电满足，这样仍会造成电力行业碳排放增加，从而无法实现碳达峰。目前风电和太阳能发电发展速度远超预期，如果能保持当前持续高速发展态势，“十五五”后期新增非化石能源发电量基本能满足新增电力需求，那么 2030 年前实现碳达峰还是完全可能的。



综上，未来电力行业实现碳达峰时间取决于电力需求增速和碳强度下降速度的相对关系。

3.2 电力行业碳达峰时间

根据电力行业与全社会实现碳达峰的先后时间关系，设计 3 种情景，分析不同碳达峰时间情景下非化石能源发电量占比要求。假定电力行业碳达峰时间分别为 2027 年、2030 年、2033 年，对应发电量分别为 12 万亿、13 万亿、14 万亿 kW·h，以 2023 年为基准年，对应的发电量年均增速分别为 6.6%、4.9% 和 4.2%。考虑到中国未来产业结构调整 and 用电效率进一步提升，发电量年均增速将呈现逐渐放缓的趋势，并略低于当前用电量增速。3 种情景下对应非化石能源发电量占比分别为 52.6%、56.3%、59.4%，风电和太阳能发电总装机需要分别达到 25.9 亿、27.0 亿、28.8 亿 kW。因此，若以 2023 年为基准年，并考虑未来弃电率标准会适当调整，每年新增风光装机 3.8 亿 kW 以上，电力行业 2027 年有可能实现碳达峰；若每年新增风光装机 2.4 亿 kW，2030 年可以实现碳达峰；若每年新增风光装机 1.8 亿 kW 以下，则电力行业存在碳达峰滞后的风险。

总体来看，中国实现“双碳”目标基础较好，但实现难度很大，关键是统筹好电源装机结构优化、新能源消纳及电力系统调节能力等关键问题。一方面，中国“双碳”目标确立后，相继出台“沙戈荒”大型风电、光伏基地建设，以及分布式光伏发展等支持政策，2023 年中国风电、太阳能发电装机容量年均新增 2.92 亿 kW，实现了新能源发电的快速增长；另一方面，新能源快速增长将面临灵活性调节资源不足问题，关键是要多措并举充分挖掘现有系统调峰能力、加大调峰电源规划建设力度、优化电力调度运行、大幅提高需求侧响应能力等。未来如果保持新能源快速发展良好势头，确保年均新增装机 2.4 亿 kW 以上，并有效保障新能源利用率，那么 2030 年电力行业可以实现碳达峰。

4 电能替代边际减排成效分析

电力行业碳达峰不仅是电力行业自身问题，而且会受到终端行业电能替代影响。以电代煤、以电代油、以电代气等电能替代技术可以有效促

进工业、交通、建筑行业碳减排。但电能替代会带来全社会用电量增长，如果新增电量产生的碳排放高于替代能源的碳排放，从全社会角度来看，碳排放总量是增加的。只有当电力生产的非化石能源发电量占比超过一定临界值，电能替代才能在促进行业减排的同时，促进全社会碳减排。从全社会碳达峰全局考虑，需要衡量不同部门的电能替代对全社会的边际减排成效。本章主要分析工业、交通、建筑等终端用能部门电能替代对全社会碳排放的净增量影响。

4.1 工业部门

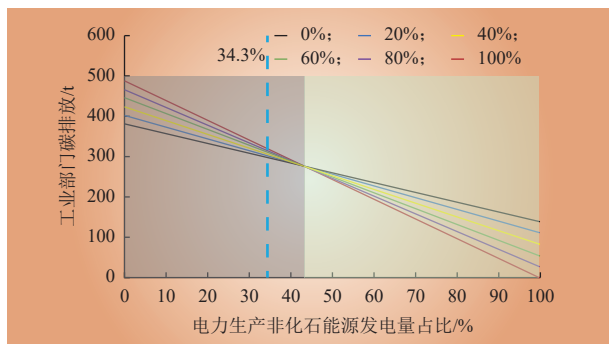
2021 年煤炭终端消费量为 6.88 亿 t，其中 82.6% 用于工业部门。当前电锅炉、电窑炉、电炼钢等电能替代技术可以减少工业部门碳排放。假设煤炭燃烧效率为 70%，电制热效率为 90%，则工业电能替代提供同样热值，产生等量碳排放对应的电力生产非化石能源发电量占比临界值为 43%（见表 2）。在临界值左侧，电能替代率越大，碳排放净增量越大；在临界值右侧，电能替代率越大，碳减排效果越明显（见图 7）。2022 年中国非化石能源发电占比为 34.3%，小于临界值 43%，因此现阶段工业部门过快推进电能替代可以降低工业部门碳排放，但全社会碳排放会有所增加。通过电能替代促进工业部门减排，同时仍需要加快电源结构优化，这样才能保障工业部门和全社会实现同步减排。

表 2 工业部门电力生产非化石能源发电量占比临界值分析
Table 2 Analysis on the critical value of proportion of non-fossil fuel power generation in industrial sector

项目	煤炭	电力
热需求/TJ	1	1
热效率	0.70	0.98
能源量/TJ	1.43	1.02
碳排放因子/(t·TJ ⁻¹)	98.30	241.69
非化石能源发电量占比/%	—	43
碳排放/t	140.4	140.4

4.2 交通部门

2021 年交通运输、仓储和邮政业能源消费为 4.37 亿 t 标准煤，其中 73.5% 为油品消费。油品消费中汽油、煤油、柴油、燃料油、石油沥青、液化石油气消费占比分别为 28.5%、14.9%、45.3%、



注：图中 0%、20%、40%、60%、80%、100% 为电能替代率（下同），纵坐标为提供单位热值对应的碳排放。

图 7 电力生产非化石能源发电量占比对工业部门电能替代减排效果影响

Fig. 7 The impact of proportion of non-fossil fuel power generation on emissions reduction through electricity substitution in industrial sector

10.2%、0.5%、0.6%。以电动汽车替代汽油燃油车为例，基于中国 CLTC-P 工况下，燃油车油耗为 9 L/(100 km)^[29]，纯电动汽车电耗为 15 kW·h/(100 km)^[30]。行驶相同里程时燃油车和电动汽车产生碳排放分别为 20.3 kg/(100 km) 和 12.9 kg/(100 km)，假设电力生产全部为化石能源，行驶相同里程时电动汽车产生的碳排放是燃油汽车产生碳排放的 64%；按照当前电力生产非化石能源发电量占比 34.3% 计算，这一比例进一步降低至 42%。因此当下以电动汽车为主的电能替代技术可以实现交通部门和全社会同步减排。同时，由图 8 可以看出，电能替代率越大，碳减排效果越明显。

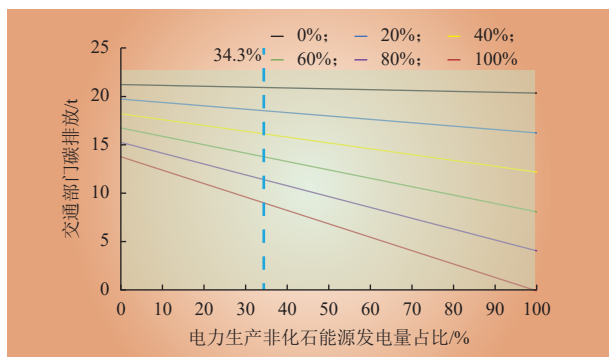


图 8 电力生产非化石能源发电量占比对交通部门电能替代减排效果影响

Fig. 8 The impact of proportion of non-fossil fuel power generation on emissions reduction through electricity substitution in transportation sector

4.3 建筑部门

2021 年中国居民生活能源消费 4.63 亿 t 标准

煤，非电能源消费中天然气消费占比为 23.8%。在建筑部门可以通过电采暖、电烹饪技术减少化石能源消费。以电制热替代天然气制热为例，假设天然气炊事热效率为 60%，电制热效率为 90%，则建筑部门电能替代提供同样热值，产生等量碳排放对应的电力生产非化石能源发电量占比临界值为 65%（见表 3）。在临界值左侧，电能替代率越大，碳排放净增量越大；在临界值右侧，电能替代率越大，碳减排效果越明显（见图 9）。2022 年中国非化石能源发电占比为 34.3%，小于临界值 65%，因此现阶段建筑部门以电代气的电能替代技术可以降低建筑部门碳排放，但会造成全社会碳排放的增加。当前，通过电能替代促进建筑部门减排，同时仍需要加快电源结构优化，这样才能保障建筑部门和全社会实现同步减排。

表 3 建筑部门电力生产非化石能源发电量占比临界值分析
Table 3 Analysis on the critical value of the proportion of non-fossil fuel power generation in building sector

项目	天然气	电力
热需求/TJ	1	1
热效率	0.58	0.90
能源量/TJ	1.72	1.11
碳排放因子/(t·TJ ⁻¹)	54.58	241.69
非化石能源发电量占比/%	—	65
碳排放/t	94.1	94.1

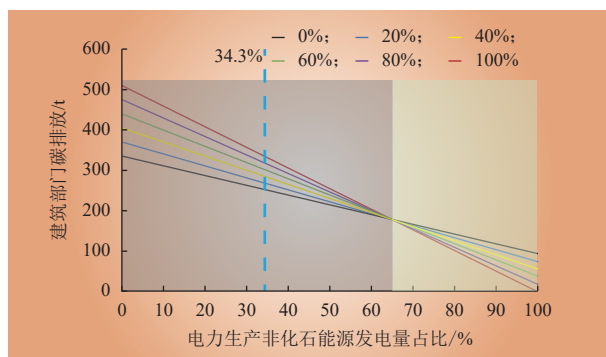


图 9 电力生产非化石能源发电量占比对建筑部门电能替代减排效果影响

Fig. 9 The impact of proportion of non-fossil fuel power generation on emissions reduction through electricity substitution in building sector

4.4 综合分析

考虑到终端用能部门不同行业电能替代技术多样、能源利用效率差异以及能源排放因子区



别，工业、交通、建筑、农业领域电能替代对应电力生产非化石能源发电量占比临界值分析全景图如图 10 所示。其中工业领域及建筑领域以电代生物质需要电力生产非化石能源发电量占比达到 100%（假设生物质全生命周期未产生净排放）；按照柴油和煤油机效率 40%~50% 计算，航海航空领域以电代柴油、煤油对应的临界值分别为 31%~45%、33%~47%；建筑领域热泵技术效率高，对应的非化石能源发电量占比程度要求较低，假设天然气热效率为 80%~90%，采用空气源热泵以电代气对应的非化石能源发电量占比临界值为 15%~25%，低于 2022 年实际值 34.3%，因此当下该减排技术可以促进建筑部门和全社会同步减排；农业领域，按照热效率 60%~70% 计算，以电代煤和以电代柴油（灌溉使用）对应的非化石能源发电占比临界值分别为 39%~48% 和 66%~71%。空气源热泵技术产生的碳排放仅为煤炭作为燃料的 50%~58%，因此空气源热泵电能替代方案可以实现部门和全社会同步减排。

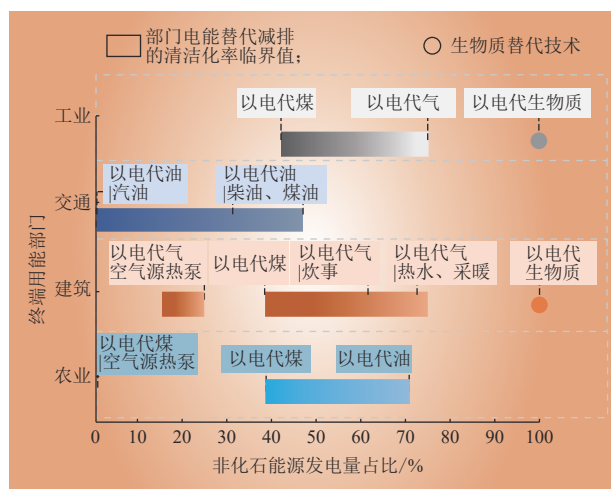


图 10 工业、交通、建筑、农业电能替代减排的电力生产非化石能源发电量占比临界值

Fig. 10 Critical values of the proportion of non-fossil fuel power generation for emissions reduction in industry, transportation, building, and agriculture sectors industrial

5 结论

本文分析了实现碳达峰国家的电力行业与全社会碳达峰时间关系，理论推导了电力行业碳达峰理论条件，量化分析了电力行业碳达峰时间及非化石能源发电量占比和可再生能源装机增量需

求；系统分析了终端行业电能替代对电力行业碳排放及全社会碳排放影响，主要结论如下。

1) 电力行业碳达峰理论研究表明，从基年到达峰年发电量年均增速小于等于期间电力生产碳强度下降率平均值，则电力行业一定可以实现碳达峰。基准情景下，2030 年发电量为 13 万亿 kWh，非化石能源发电量占比需要达到 56.3%。

2) 结合当前可再生能源政策规划和发展实际，在保持新能源发展速度基础上，统筹解决电源装机结构优化、新能源消纳水平及电力系统调节能力问题，每年保持新增风光装机容量 2.4 亿 kW 以上，电力行业可在 2030 年前实现碳达峰。

3) 只有当电力生产的非化石能源发电量占比超过一定临界值，电能替代才能实现终端行业和社会同步减排，因此全社会实现碳达峰需要优先推进清洁替代，电能替代需要考虑行业差异并注意推进节奏。本文计算绘制的终端全行业电能替代技术减排临界值全景图为推进电能替代技术的时间线和路线图提供了参考依据。

参考文献：

- [1] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题 [J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, *et al.* Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system [J]. *Electric Power*, 2022, 55(5): 1-11.
- [2] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.
YU Biying, ZHAO Guangpu, AN Runying, *et al.* Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(2): 17-24.
- [3] NIU Z H, XIONG J L, DING X S, *et al.* Analysis of China's carbon peak achievement in 2025 [J]. *Energies*, 2022, 15(14): 5041.
- [4] FANG G C, WANG L, GAO Z Y, *et al.* How to advance China's carbon emission peak? —a comparative analysis of energy transition in China and the USA [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(47): 71487-71501.
- [5] ZHANG S N, YANG F, LIU C Y, *et al.* Study on global industrialization and industry emission to achieve the 2 °C goal based on MESSAGE model and LMDI approach [J]. *Energies*, 2020, 13(4):



- 825.
- [6] 张士宁, 谭新, 侯方心, 等. 全球碳中和形势盘点与发展指数研究 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 264–272.
- ZHANG Shining, TAN Xin, HOU Fangxin, *et al.* Research on global carbon neutrality target and development index[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(3): 264–272.
- [7] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究 [J]. 电力科技与环保, 2021, 37(3): 9–16.
- ZHU Fahua, WANG Yushan, XU Zhen, *et al.* Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's power industry[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, 37(3): 9–16.
- [8] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 13–26.
- WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, *et al.* Roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality pathway[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24(4): 13–26.
- [9] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.
- SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, *et al.* Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 1–14.
- [10] SUN Z R, LIU Y D, YU Y N. China's carbon emission peak pre-2030: exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China's regions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 963–979.
- [11] MAI L N, RAN Q Y, WU H T. A LMDI decomposition analysis of carbon dioxide emissions from the electric power sector in Northwest China[J]. *Natural Resource Modeling*, 2020, 33(4): e12284.
- [12] MA Z Y, ZHANG S N, HOU F X, *et al.* Exploring the driving factors and their mitigation potential in global energy-related CO₂ emission[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 413–422.
- [13] 叶爱山, 李晓华, 邓洋阳, 等. “双碳”目标下中国碳达峰预测和减排路径研究 [J]. 科技和产业, 2023, 23(23): 34–43.
- YE Aishan, LI Xiaohua, DENG Yangyang, *et al.* Research on China's carbon peak prediction and emission reduction path under the "dual carbon" goal[J]. *Science Technology and Industry*, 2023, 23(23): 34–43.
- [14] LUO F, GUO Y, YAO M T, *et al.* Carbon emissions and driving forces of China's power sector: input-output model based on the disaggregated power sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 121925.
- [15] LUO S H, HU W H, 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.
- [16] TANG B J, LI R, YU B Y, *et al.* How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 365–381.
- [17] SU K, LEE C M. When will China achieve its carbon emission peak? a scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106138.
- [18] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景 [J]. 科学通报, 2024, 69(8): 983–989.
- ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Prospect of China's energy and power system under dual carbon goals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(8): 983–989.
- [19] QI Y, STERN N, HE J K, *et al.* The policy-driven peak and reduction of China's carbon emissions[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(2): 65–71.
- [20] 陈怡, 田川, 曹颖, 等. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 632–640.
- CHEN Yi, TIAN Chuan, CAO Ying, *et al.* Research on peaking carbon emissions of power sector in China and the emissions mitigation analysis[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(5): 632–640.
- [21] WU G Q, NIU D X. A study of carbon peaking and carbon neutral pathways in China's power sector under a 1.5°C temperature control target[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(56): 85062–85080.
- [22] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245–6259.
- LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6245–6259.
- [23] 张士宁, 马志远, 杨方, 等. 全球可再生能源发电减排技术及投资减排成效评估分析 [J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 328–338.
- ZHANG Shining, MA Zhiyuan, YANG Fang, *et al.* Assessment of carbon emission reduction and costs of global renewable energy investment[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(4): 328–338.
- [24] DONG F, HUA Y F, YU B L. Peak carbon emissions in China: status, key factors and countermeasures —a literature review[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2895.



- [25] WANG Z X, ZHANG J J, PAN L, *et al.* Estimate of China's energy carbon emissions peak and analysis on electric power carbon emissions[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5(4): 181-188.
- [26] DAI D W, LI K X, ZHAO S H, *et al.* Research on prediction and realization path of carbon peak of construction industry based on EGM-BP model[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 981097.
- [27] 国家统计局. 电力平衡表 [EB/OL]. (2024-01-01)[2024-05-10]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0707&sj=2016>.
- [28] 生态环境部. 发电设施企业温室气体排放核算与报告指南 [S]. 北京: 生态环境部, 2022.
- [29] 李朝阳, 李永光, 周猛. 基于中国工况的轻型汽车油耗特性研究 [J]. *小型内燃机与车辆技术*, 2023, 52(1): 57-61.
- LI Chaoyang, LI Yongguang, ZHOU Meng. Research on fuel consumption characteristics of light-duty vehicle under China automotive test cycle[J]. *Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique*, 2023, 52(1): 57-61.
- [30] 余才光, 高上览, 汤伟诚, 等. 纯电动汽车电耗分析及未来电耗推测 [J]. *制造业自动化*, 2024, 46(1): 191-198.
- YU Caiguang, GAO Shanglan, TANG Weicheng, *et al.* Power consumption analysis and future power consumption forecast of pure

electric vehicle[J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(1): 191-198.

作者简介:

周原冰 (1971—), 男, 硕士, 高级工程师 (教授级), 从事能源电力发展战略规划、政策、能源互联网、能源经济环境等研究, E-mail: yuanbing-zhou@geidco.org;

张士宁 (1987—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事全球能源发展战略规划、能源经济与能源供需、可再生能源发电等研究, E-mail: shining-zhang@geidco.org;

侯方心 (1990—), 女, 博士, 高级工程师, 从事能源规划、能源供需、综合评估模型、可再生能源发电等研究, E-mail: fangxin-hou@geidco.org;

任宏涛 (1977—), 男, 博士, 副教授, 从事能源系统优化建模、能源系统多目标优化、能源大数据技术分析等研究, E-mail: ren@ecust.edu.cn;

徐鹏飞 (1991—), 男, 博士, 高级工程师, 从事全球能源发展战略规划、电力系统规划等研究, E-mail: pengfei-xu@geidco.org.

(责任编辑 李博)

Analysis of Carbon Peaking in Power Sector and its Impact on Promoting Whole-Society Carbon Emissions Reduction

ZHOU Yuanbing^{1,2}, ZHANG Shining¹, HOU Fangxin¹, REN Hongtao³, XU Pengfei¹

(1. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China; 3. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The carbon emissions from the power sector account for over 40% of the total carbon emissions in the energy sector, making it the primary battleground for emissions reduction in the energy sector. Against the backdrop of the whole society striving to achieve carbon peaking by 2030, the timing of power sector's carbon peaking is crucial for the end-use sectors and whole-society to achieve carbon peaking. Firstly, an analysis was conducted on the temporal relationship between the power sector's carbon peaking and the carbon peaking of the whole society and other sectors in countries that have already achieved carbon peaking. Secondly, theoretical derivations were made regarding the conditions that the power sector's carbon peaking needs to meet and the proportional requirements of non-fossil fuel power generation under different scenarios. Finally, a quantitative analysis was carried out on the impact of electricity substitution on emissions reduction in the end-use sectors and the whole society. The study indicates that the decline rate of carbon intensity in power production is a crucial constraint determining the power sector's carbon peaking. Under the baseline scenario that power generation reaches 13 TW·h in 2030, the proportion of non-fossil fuel power generation needs to reach 56.3%, which implies that the annual increase in newly installed capacity of wind and solar power should exceed 240 GW from 2023 to 2030 so that the power sector can achieve carbon peaking before 2030. The promotion of electricity substitution for emissions reduction in the whole society is influenced by the proportion of non-fossil fuel power generation in the total power generation. Only when the proportion exceeds a certain critical value can the synchronous emissions reduction in the end-use sectors and the whole society be achieved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.72140006, No.72371102).

Keywords: power sector; carbon peaking; carbon intensity; proportion of non-fossil fuel power generation; electricity substitution