



碳达峰背景下中国电力行业碳排放因素和脱钩效应

李旭东¹, 谭青博², 赵浩辰¹, 乔宁³, 刘力纬⁴, 谭彩霞¹, 谭忠富¹

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206; 2. 俄罗斯乌拉尔联邦大学, 俄罗斯 叶卡捷琳堡 620002;
3. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 4. 对外经济贸易大学 国际商学院, 北京 100029)

摘要: 探求电力行业 CO₂ 排放驱动因素和脱钩效应既能促进“双碳”目标实现, 也有利于改善中国环境总体质量, 极具现实意义。对 2004—2020 年中国电力行业 CO₂ 排放量进行测算, 并采用 LMDI 模型和 Tapio 脱钩模型对电力行业 CO₂ 排放的驱动因素和脱钩状态进行研究, 在此基础上基于 SSA-LSSVM 预测模型对中国电力行业 2021—2030 年 CO₂ 排放量和脱钩状态进行预测分析。研究结果表明: 1) 电力行业 CO₂ 排放影响因素中, 经济增长是主要因素, 电力生产结构效应和电力生产强度效应对电力行业 CO₂ 排放量起到明显的抑制作用; 2) 整个研究期内, 电力行业 CO₂ 排放量与经济增长处于弱脱钩状态; 3) 从电力行业 CO₂ 排放预测值来看, 基准情景、低碳情景、强低碳情景下电力行业 CO₂ 排放量均呈现上升趋势, 2022—2030 年电力行业 CO₂ 排放与经济增长均处于弱脱钩状态。基于研究结果, 为降低中国电力行业 CO₂ 排放量, 建议转变经济增长方式, 实现经济绿色低碳增长; 发展清洁能源, 构建新型电力系统; 推进低碳技术创新, 实现电力行业碳排放脱钩。

关键词: CO₂ 排放; LMDI 模型; 电力行业; Tapio 脱钩

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202306019

0 引言

温室气体排放所引起的极端气候频繁出现, 已经严重影响人类社会生活和经济发展, 降低温室气体排放已然成为各国应对极端气候变化的重要举措。2020 年中国提出力争于 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和“双碳”目标。2021 年中国能源消费结构依然以化石能源消费为主^[1], 其中煤炭消费量约为 42.3 亿 t^[2], 碳排放结构占比中, 电力行业碳排放占比超过 40%^[3]。因此实现“双碳”目标关键是要减少能源碳排放, 实现电力行业低碳转型。2020—2022 年中共中央、国务院先后发出《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》等文件, 指出要大幅提高能源利用效率、控制化石能源消费、严格管控煤电装

机规模, 在 2030 年国内能耗比 2020 年下降 13.5%, 碳排放强度比 2005 年降低 65%, 顺利实现碳达峰目标。

由于碳中和目标的时间节点为 2060 年, 与本文开展研究的时间节点距离过大, 无法确保研究的准确性, 基于此, 本文主要对碳达峰目标下的电力行业碳减排路径进行研究。识别电力行业碳排放驱动因素, 甄别电力行业碳减排与经济增长的关联性, 探求经济增长和电力行业碳达峰平衡路径是中国经济高质量增长的必然选择。识别电力行业 CO₂ 排放影响因素, 分析电力行业碳排放与经济增长是否脱钩, 探求电力行业碳达峰路径既对促进“双碳”目标实现、应对极端气候有重要现实意义, 也能对工业领域其他行业的防污减排提供指导, 总体改善中国环境质量。

随着各国对生态环境关注度持续上升以及经济增长对电力稳供的需求增加, 国内外学者对碳排放开展了大量研究与探讨并取得了丰富成果。研究主要集中于碳排放因素分解、碳排放与经济增长脱钩、碳达峰的可行性推断和碳达峰路径研究等方面。

收稿日期: 2023-06-05; **修回日期:** 2024-03-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(碳中和愿景下能源系统“源网荷储”互补运行优化模型与机制, 72174062)。

在碳排放因素分解的研究领域，文献[4]采用 LMDI 模型（logarithmic mean dix index）将中国碳排放的影响因素划分为人均碳排放、能源结构、能源强度、经济发展 4 个因素；文献[5]通过 MRIO 模型（multi-regional input-output model）测算中国生产侧碳排放总量，并通过 SDA（structural decomposition analysis）方法将碳排放影响因素划分为生成规模和生成结构等影响因素；文献[6]对中国国家、省级碳排放进行分析，采用生产理论分解分析法（PDA）和指数分解分析（IDA）相结合的方法，将碳排放影响因素划分为技术效率、经济增长、规模效应等 9 个影响因素；文献[7]提出了一种改进的 PDA 方法，将碳排放影响因素分解为 7 个影响因素，并指出经济发展是碳排放量增加的最大因素；文献[8]构建了基于 Shapley 值的碳排放因素分解模型，并预测了 2020 年京津冀地区的能源消耗与碳排放量。

在碳排放脱钩的研究领域，国内外学者一般采用 Tapio 模型开展研究^[9]。为准确找到影响脱钩状态的主要因素，学者们往往将 LMDI 模型^[10]和脱钩模型相结合。文献[11]将 Tapio 模型和 LMDI 模型相结合，对闽三角地区的碳排放影响因素和脱钩状态开展研究，指出优化能源结构是实现碳减排的重要措施；文献[12]对全球主要国家碳排放与经济增长的脱钩关系开展研究，结果表明中国仍处于弱脱钩状态；文献[13]利用 LMDI 方法和 Tapio 脱钩模型分析 12 个主要工业的碳排放量驱动因素及其对脱钩关系的影响关系；文献[14]运用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 方法对天津市的碳排放脱钩态势及碳减排潜力进行分析，结果表明天津市经济与碳排放总量呈现“弱脱钩”状态；文献[15]利用碳排放 Tapio 脱钩弹性分解模型对世界主要国家碳排放与经济增长脱钩关系进行研究，比较了不同国家脱钩关系的特征演化。

在碳达峰路径的研究领域，文献[16]利用 Mann-Kendall 趋势来判断能源碳达峰路径，并分别从年度和季度时间尺度判断碳达峰情况；文献[17]则在 LMDI 分析碳排放影响因素的基础上采用系统动力学方法对不同场景下碳排放量进行预测；文献[18]基于 STIRPAT 模型分解出影响四川省碳排放的主要因素，并在此基础上采用线性回归分别对粗放情景、基准情景、低碳节能情

景、经济放缓情景下的碳排放量进行预测分析；文献[19]在可持续发展理论、环境库兹涅茨曲线理论的基础上，运用 STIRPAT 模型研究了东北地区 2030 年的碳排放达峰路径；文献[20]以能源系统优化模型为基础，以 2030 年碳达峰为目标，研究了中国的碳排放水平及达峰路径。

以上文献多从整个国家或地区角度开展碳排放总量测算，少有基于某一行业或者具体到电力行业开展碳排放总量测算及相关影响因素分析，相关因素分解并未与碳达峰预测紧密联系。在进行碳排放峰值预测后并未考虑不同场景下的碳排放与经济增长脱钩效应。

樽海鞘群优化算法（salp swarm algorithm, SSA）相对于传统随机方法能够以大概率找到全局最优解，效率高、鲁棒性强。最小二乘支持向量机（least squares support vector machine, LSSVM）具有较快的预测速度和较高的拟合精度^[21-22]。文献[23]分别对比 LSSVM 与 SSA-LSSVM 预测精度，结果表明 SSA-LSSVM 预测能有效拟合实际数据，证明 SSA-LSSVM 预测模型的优越性。

因此，本文基于中国 2004—2020 年数据，测算中国电力行业碳排放，分解电力行业碳排放影响因素，并在此基础上分析不同影响因素对电力行业碳排放脱钩的影响，基于公布的社会发展目标，设定不同情景下的影响因素变动趋势，利用 SSA-LSSVM 模型预测不同场景下的电力行业碳排放趋势，并分析其脱钩效应变动情况，为中国相关部门实现“双碳”提供政策建议。

1 模型构建

1.1 电力行业碳排放计算

本文采用 IPCC（The Intergovernmental Panel on Climate Change）的方法估算中国电力行业 CO₂ 排放。由于水电、风电、光伏和核电几乎不产生碳排放，本文排放源主要考虑火力发电。由于各地区火力发电的能源投入仍以化石燃料为主，根据国家统计局公布的能源数据，本文选取了石油、煤炭、焦炭、原油、煤油、汽油、燃料油、柴油和天然气等 9 种化石燃料进行核算。电力行业碳排放量计算为

$$E_{CE} = \sum_{j=1}^9 E_{E_j} E_{\alpha_j} E_{NCV_j} E_{CC_j} E_{COF_j} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中： E_{CE} 为电力行业碳排放量，t； E_{E_j} 为第 j 种能源消耗量，t； E_{α_j} 为第 j 种能源的标准煤折算系数； E_{NCV_j} 为第 j 种能源的平均低位发热量，GJ/t； E_{CC_j} 为第 j 种能源的单位热值含碳量，t/GJ； E_{COF_j} 为第 j 种能源的碳氧化系数； $E_{NCV_j} E_{CC_j} E_{COF_j}$ 为第 j 种能源的碳排放系数；44/12为二氧化碳排放系数与碳排放系数比。

1.2 LMDI 和脱钩模型

1.2.1 LMDI 模型

为进一步探讨中国电力行业碳排放变化的影响因素，需要对电力行业碳排放量变化进行因素分解，其中指数分解法中的LMDI分解法具有全分解、无残差等优点。采用LMDI分解法构建的电力行业碳排放量分解模型为

$$E_{CE} = \sum_{j=1}^9 E_{ce_j} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}}{m} \frac{m}{g_f} \frac{g_f}{g} \frac{g}{E_{gdp}} E_{gdp} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{CF} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}}{m} \\ E_{FH} = \frac{m}{g_f} \\ E_{PS} = \frac{g_f}{g} \\ E_{EX} = \frac{g}{E_{gdp}} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中： E_{ce_j} 为第 j 种化石能源消耗所产生的碳排放量； m 为计算后综合能源标准煤物理消耗量； g_f 为该年度火力发电量； g 为该年度发电量； E_{gdp} 为该年度第二产业国民生产总值； E_{CF} 为碳排放系数，表示燃料的碳转换效率； E_{FH} 为燃料转化率，反映燃料转化为火力发电的效率； E_{PS} 为电力生产结构系数，表示火力发电占发电的比率； E_{EX} 为电力生产强度指数，反映电力的使用效率。

基于文献[24]提出的LMDI分解法，将 $t-1$ 至 t 时段内的中国电力行业碳排放量分解为

$$\Delta E_{CE} = \Delta E_{CF} \Delta E_{FH} \Delta E_{PS} \Delta E_{EX} \Delta E_{gdp} \quad (4)$$

$$\Delta E_{CF} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}^t - E_{ce_j}^{t-1}}{\ln E_{ce_j}^t - \ln E_{ce_j}^{t-1}} \ln \left(\frac{E_{CF}^t}{E_{CF}^{t-1}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta E_{FH} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}^t - E_{ce_j}^{t-1}}{\ln E_{ce_j}^t - \ln E_{ce_j}^{t-1}} \ln \left(\frac{E_{FH}^t}{E_{FH}^{t-1}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta E_{PS} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}^t - E_{ce_j}^{t-1}}{\ln E_{ce_j}^t - \ln E_{ce_j}^{t-1}} \ln \left(\frac{E_{PS}^t}{E_{PS}^{t-1}} \right) \quad (7)$$

$$\Delta E_{EX} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}^t - E_{ce_j}^{t-1}}{\ln E_{ce_j}^t - \ln E_{ce_j}^{t-1}} \ln \left(\frac{E_{EX}^t}{E_{EX}^{t-1}} \right) \quad (8)$$

$$\Delta E_{gdp} = \sum_{j=1}^9 \frac{E_{ce_j}^t - E_{ce_j}^{t-1}}{\ln E_{ce_j}^t - \ln E_{ce_j}^{t-1}} \ln \left(\frac{E_{gdp}^t}{E_{gdp}^{t-1}} \right) \quad (9)$$

式中： ΔE_{CE} 、 ΔE_{CF} 、 ΔE_{FH} 、 ΔE_{PS} 、 ΔE_{EX} 和 ΔE_{gdp} 分别为 t 时段与 $t-1$ 时段的碳排放量差值、碳排放系数差值、燃料转化率差值、电力生产结构系数差值、电力生产强度指数差值和国民生产总值差值。

1.2.2 脱钩模型

基于上述分解因子得到电力行业碳排放与经济增长之间的脱钩指数和脱钩分解公式为

$$e = (\Delta E_{CE}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) = (\Delta E_{CF}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) + (\Delta E_{FH}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) + (\Delta E_{PS}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) + (\Delta E_{EX}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) + (\Delta E_{gdp}/E_{CE}) / (\Delta E_{gdp}/E_{gdp}) \quad (10)$$

脱钩状态判别标准^[25]如表1所示。

表 1 脱钩状态判别标准
Table 1 Decoupling status discrimination criteria

脱钩状态		ΔE_{CE}	ΔE_{gdp}	e
脱钩	强脱钩	<0	>0	$(-\infty, 0]$
	弱脱钩	>0	>0	$(0, 0.8]$
	衰弱脱钩	<0	<0	$(1.2, +\infty)$
连接	增长连接	>0	>0	$(0.8, 1.2]$
	衰弱连接	<0	<0	$(0.8, 1.2]$
负脱钩	强负脱钩	>0	<0	$(-\infty, 0]$
	弱负脱钩	<0	<0	$(0, 0.8]$
	增长负脱钩	>0	>0	$(1.2, +\infty)$

1.3 SSA-LSSVM 预测模型

在LMDI模型分解电力行业碳排放影响因素的基础上，本文对碳达峰背景下电力行业碳排放进行预测。

在SSA方法中，樽海鞘群以目标F搜寻食物，根据该生物搜寻食物的行为，建立特定的优化步骤如下。

1) 设置初始参数：在SSA算法中，主要的初始参数包括变量个数、初始种群个数、最大迭代



次数、变量的上界和下界等 5 个参数。

2) 构建适应度函数：通过构建适应函数计算每个樽海鞘的合适度，具有最佳适应度的樽海鞘将被视为目标 F ，适应度函数为

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(s_{11} \ s_{12} \ \cdots \ s_{1d}) \\ f(s_{21} \ s_{22} \ \cdots \ s_{2d}) \\ \vdots \\ f(s_{n1} \ s_{n2} \ \cdots \ s_{nd}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： s_{ij} 为第 i 个樽海鞘群的第 j 个变量的数值。

3) 进行迭代：为避免搜寻到的结果为局部最优，所有的樽海鞘均需要通过 SSA 方法更新自己的位置，其中领导者的位置更新方式为

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 [(u_j - l_j)c_2 + l_j], & c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1 [(u_j - l_j)c_2 + l_j], & c_3 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： x_j^1 为领导者在第 j 个维度的位置； F_j 为目标的位置； u_j 和 l_j 为种群的上限和下限； c_1 ， c_2 ， c_3 为随机数。

追随者的位置更新方式为

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (13)$$

上述步骤都在迭代过程中执行，直到达到 SSA 方法迭代的结束标准。

1.4 数据来源

本文基于 2004—2020 年的《中国电力年鉴》获取各年度的火力发电量和发电量数据，并按照《中国能源统计年鉴》所附录的《各种能源折标准煤参考系数》计算各年度的电力行业能源标准煤消耗总量。按照式 (1) 计算电力行业碳排放。人口数据、各年度第二产业 GDP 数据、经济结构占比数据均来自《中国统计年鉴》。

2 实证结果分析

2.1 电力行业 CO₂ 排放量规模

根据上述分析方法和数据，可以计算得出 2004—2020 年中国电力行业产生的 CO₂ 排放量。如图 1 所示，从排放规模上看，中国电力行业 CO₂ 排放量从 2004 年的 18.999 68 亿 t 增加到 2020 年的 40.816 45 亿 t，增加了 114.83%，呈现持续增长的状态。从增长趋势来看，仅在 2014—2016 年期间 CO₂ 年排放量处于负增长状态，电力

行业 CO₂ 年排放量总体处于增长状态。随着经济的增长，电力需求不断上升，且中国电力结构依然以火力发电为主，导致火力发电量逐年增加，火力发电 CO₂ 排放量不断增加，随着清洁能源加速发展以及火电灵活性改造，2016—2020 年电力行业 CO₂ 排放量总体处于低增长状态。



图 1 2004—2020 年中国电力行业排放规模变化
Fig. 1 China's electric power industry emissions change in 2004-2020

2.2 LMDI 分析

根据上文所列的模型对 2004—2020 年电力 CO₂ 排放量进行指数分解，分解结果如表 2 所示，2004—2020 年经济发展对电力行业 CO₂ 排放量增长的贡献度大多超过 100%，只有 2014—2015 年和 2015—2016 年的贡献度分别为 -83.40% 和 -37.20%，这表明已有的电力结构下，经济增长仍是电力行业 CO₂ 排放量增长的主要因素。电力生产结构效应和电力生产强度效应对电力行业 CO₂ 排放量增长的贡献度大多为负值，年平均贡献度分别为 -30.25% 和 -57.71%，对电力行业 CO₂ 排放量起到明显的抑制作用，这意味着随着清洁能源大规模发展以及电力利用效率的提高，传统火电将逐步退出发电主体，起到辅助调控作用，电力行业整体碳排放水平降低。碳排放系数效应和燃料转化率效应对电力行业 CO₂ 排放量的影响处于波动状态，但整体而言对其起到抑制作用，年平均贡献度分别为 -0.70% 和 -2.41%，这表明随着技术进步和燃料利用效率提高，电力行业 CO₂ 排放量将逐步降低。

2004—2005 年间，CO₂ 排放增加 2.137044 亿 t，对此时期电力行业 CO₂ 排放起抑制作用的驱动因素为碳排放系数效应、燃料转化率效应、电力生产结构效应、电力生产强度效应，其贡献度分别为 -1.57%、-0.27%、-10.97%、-48.32%；起促进

表 2 2004—2020 年中国电力行业排放规模分解
因素影响率

Table 2 China's electric power industry emissions de-
composition factor impact rate for 2004-2020

单位：%

周期	ΔE_{CF}	ΔE_{FH}	ΔE_{PS}	ΔE_{EX}	ΔE_{gdp}	ΔE_{CE}
2004—2005	-1.57	-0.27	-10.97	-48.32	161.13	100.00
2005—2006	-1.00	-32.40	17.58	-25.33	141.16	100.00
2006—2007	-1.71	-50.71	0.49	-72.80	224.74	100.00
2007—2008	-3.06	-54.20	-136.07	-621.82	915.15	100.00
2008—2009	-1.29	-30.96	13.33	-5.89	124.81	100.00
2009—2010	-1.38	-216.39	-30.99	-110.71	459.47	100.00
2010—2011	-0.32	-10.60	16.78	-46.73	140.86	100.00
2011—2012	-0.37	68.18	-231.13	-134.08	397.40	100.00
2012—2013	-0.02	14.95	-2.06	6.28	80.85	100.00
2013—2014	0.08	125.53	49.16	8.63	-83.40	100.00
2014—2015	0.36	72.30	44.27	20.27	-37.20	100.00
2015—2016	-0.57	7.28	-105.43	34.59	164.12	100.00
2016—2017	-0.03	33.65	-15.42	-26.84	108.64	100.00
2017—2018	-0.12	-60.22	-17.05	24.24	153.14	100.00
2018—2019	0.07	49.57	-45.44	-3.11	98.91	100.00
2019—2020	-0.25	45.69	-31.06	78.33	7.29	100.00

作用的驱动因素为经济发展效应，其贡献度为 163.13%。

“十一五”期间，CO₂ 排放增加 8.093384 亿 t，对此时期电力行业 CO₂ 排放起抑制作用的驱动因素为碳排放系数效应、燃料转化率效应、电力生产结构效应、电力生产强度效应，其贡献度分别为 -8.44%、-384.66%、-135.67%、-863.55%；起促进作用的驱动因素为经济发展效应，其贡献度为 1865.32%。

“十二五”期间，CO₂ 排放增加 2.699652 亿 t，对此时期电力行业 CO₂ 排放起抑制作用的驱动因素为碳排放系数效应、电力生产结构效应、电力生产强度效应，其贡献度分别为 -0.26%、-122.98%、-145.62%；起促进作用的驱动因素为燃料转化率效应和经济发展效应，其贡献度分别为 270.36% 和 498.50%。

“十三五”期间，CO₂ 排放增加 8.886695 亿 t，对此时期电力行业 CO₂ 排放量起抑制作用的驱动因素为碳排放系数效应、电力生产结构效应，其贡献度分别为 -0.89% 和 -214.40%；起促进作用的

驱动因素为燃料转化率效应、电力生产强度效应、经济发展效应，其贡献度分别为 75.98%、107.21%、532.10%。

2.3 Tapio 分析

整个研究期内，电力行业 CO₂ 排放量与经济增长的脱钩状态多处于弱脱钩的状态下，也存在部分年份出现增长负脱钩和扩张连接等较差的情况，具体情况如表 3 所示。从时间维度上表现出从好到差的状态，2013 年之前，电力行业 CO₂ 排放量以弱脱钩为主。2013—2015 年，电力行业 CO₂ 排放量以强脱钩为主，在“十一五”和“十二五”期间，中国出台一系列节能减排政策，能源行业消费增速明显下缓，电力行业碳排放增速下降，电力行业 CO₂ 排放与经济增长出现弱脱钩效应，在“十二五”后半期，即 2013—2015 年之间，中国出台《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020 年）》等政策，同时伴随着产业结构调整和经济增长动力转换，电力行业 CO₂ 排放量与经济增长实现强脱钩。在“十三五”期间，随着电力市场改革和经济快速发展，发电量快速增长，电力行业 CO₂ 排放量与经济增长表现出增长连接和增长负脱钩效应，经济增长与碳排放之间表现出正相关关系。

为寻找电力行业 CO₂ 排放与经济增长脱钩状态的驱动因素，计算各驱动因素的脱钩指数，结果如表 4 所示，其中各驱动因素的脱钩指数之和为表 3 中的脱钩指数。在 2019—2020 年期间之前，经济效益指数是促进电力行业 CO₂ 排放与经济增长脱钩的主要因素，贡献比占到 80%。在

表 3 2004—2020 年中国电力行业排放与经济之间
脱钩状态

Table 3 Decoupling status between emissions and economy in China's electric power industry, 2004-2020

周期	脱钩指数	脱钩状态	周期	脱钩指数	脱钩状态
2004—2005	0.5396	弱脱钩	2012—2013	1.1450	弱脱钩
2005—2006	0.6112	弱脱钩	2013—2014	-1.2065	强脱钩
2006—2007	0.3843	弱脱钩	2014—2015	-2.7414	强脱钩
2007—2008	0.0991	弱脱钩	2015—2016	0.5901	弱脱钩
2008—2009	0.7537	弱脱钩	2016—2017	0.8489	增长连接
2009—2010	0.1945	弱脱钩	2017—2018	0.6140	弱脱钩
2010—2011	0.6145	弱脱钩	2018—2019	0.9635	增长连接
2011—2012	0.2394	弱脱钩	2019—2020	13.3877	增长负脱钩



2019—2020 年，随着电力消费强度指数和燃料转换指数快速提升，电力行业 CO₂ 排放与经济增长脱钩状态指数也快速提升，从 0.963 5 提升至 13.3877，电力行业 CO₂ 排放与经济增长的相关性增强，造成这种趋势的原因是：一方面，伴随国际经济萎靡和贸易战的加剧，中国经济增速放缓，同比仅增加 2%；另一方面，这一时期煤炭消耗量和发电量增加，伴随着电力市场改革深化、电能替代推进以及产业结构调整，2019 年全国煤炭消费小幅增长。基于上述因素，电力行业 CO₂ 排放与经济增长脱钩状态表现为增长负脱钩。

表 4 2004—2020 年中国电力行业排放各驱动因素脱钩指数分解

Table 4 Decoupling index decomposition for each driving factor of emissions in China's electric power industry, 2004-2020

周期	碳排放转换指数	燃料转换指数	电力生产结构指数	电力消费强度指数	经济效益指数
2004—2005	-0.008 5	-0.001 5	-0.059 2	-0.260 7	0.869 4
2005—2006	-0.006 1	-0.198 0	0.107 4	-0.154 8	0.862 8
2006—2007	-0.006 6	-0.194 9	0.001 9	-0.279 8	0.863 8
2007—2008	-0.003 0	-0.053 7	-0.134 9	-0.616 4	0.907 2
2008—2009	-0.009 7	-0.233 4	0.100 5	-0.044 4	0.940 7
2009—2010	-0.002 7	-0.420 9	-0.060 3	-0.215 3	0.893 7
2010—2011	-0.001 9	-0.065 1	0.103 1	-0.287 1	0.865 6
2011—2012	-0.000 9	0.163 2	-0.553 2	-0.320 9	0.951 2
2012—2013	-0.000 2	0.171 2	-0.023 6	0.071 9	0.925 7
2013—2014	-0.001 0	-1.514 6	-0.593 1	-0.104 2	1.006 3
2014—2015	-0.009 8	-1.982 0	-1.213 7	-0.555 7	1.019 8
2015—2016	-0.003 3	0.043 0	-0.622 2	0.204 1	0.968 5
2016—2017	-0.000 2	0.285 7	-0.130 9	-0.227 9	0.922 3
2017—2018	-0.000 7	-0.369 7	-0.104 7	0.148 9	0.940 2
2018—2019	0.000 6	0.047 8	-0.437 8	-0.029 9	0.953 0
2019—2020	-0.033 2	6.116 8	-4.157 6	10.486 3	0.975 3

2.4 脱钩路径研究

2.4.1 情景模拟

本文在参考国家现有政策规划、产业报告、前人研究文献的基础上，根据前文对电力行业 CO₂ 排放驱动因素的相关分析，选择城镇化率、第三产业经济占比、标准煤物理消耗量、火力发电量、年度发电量、第二产业占比、人口数据等指标构建情景模拟的预测影响因素指标。在此基

础上本文参考电力行业 CO₂ 排放的发展趋势，分别考虑电力行业正常发展、电力行业低碳转型、电力行业低碳转型且转型顺利等发展路径，分别设置基准场景、低碳场景、强低碳场景 3 种情景，在基准情景下，电力行业 CO₂ 排放按照当前的态势发展，在低碳场景下和强低碳场景下，考虑到碳达峰目标的时间进程、相关低碳政策、低碳技术推广、清洁能源发展等因素，各因素年变化率有所不同，具体数值如表 5 所示。

表 5 2021—2030 年情景参数年均增长率设定
Table 5 Average annual growth rate of scenario parameters set for 2021-2030

单位：%

情景	城镇化率	第三产业经济占比增长率	标准煤物理消耗量增长率	火力发电量增长率	年发电量增长率	第二产业增长率	人口数据增长率
基准	0.9	1.24	3.4~1.6	-2.74	4.4	4.40	0.31~0.50
低碳	2.4	2.24	3.0~1.2	-4.74	3.4	4.15	0.56~0.25
强低碳	3.9	3.24	2.6~0.8	-6.74	2.4	3.90	0.81~0

1) 城镇化率：2030 年中国城市人口预计将占总人口的 70%^[26]，以此为基准情景，设定城镇化率增速为 0.9%。在此基础上随着低碳演进和经济发展，城市发挥更强的聚集效应，中国城镇人口将进一步提高，设定低碳场景和强低碳场景的城镇化率在基准场景的基础依次上浮 1.5 个百分点，分别为 2.4% 和 3.9%。

2) 第三产业经济占比：根据 2020 中国电力规划发展论坛发布的《中国能源转型与“十四五”电力规划研究》，到 2025 年第三产业占比将达到 57%，将第三产业占比增速设定为 1.24%，以此为基准情景，在此基础上考虑到随着低碳技术的进步和绿色经济、绿色消费、绿色服务的持续深化，设定低碳场景和强低碳场景的第三产业经济占比在基准场景的基础依次上浮 1 个百分点，分别为 2.24% 和 3.24%。

3) 标准煤物理消耗量增长率：文献^[27]对中国能源消耗进行预测，结果显示到 2025 年中国标准煤耗将达到 54.90 亿 t，2021—2025 年增速分别为 3.4%、2%、1.8%、1.6%，本文在此基础上假设 2025—2030 年增长率保持原数值进行增长，并以此为基准情景，设定低碳场景和强低碳情景的标准煤物理消耗量增长率在基准情景的基础上



依次分别下降 0.4 个百分点。在低碳场景中，增速依次为 3%、1.6%、1.4%、1.2%、1.0%。在强低碳情景中，增速依次为 2.6%、1.2%、1.0%、0.8%、0.6%。

4) 火力发电量和年发电量：根据能源生产和消费革命战略（2016—2030）、中国“十四五”电力发展规划研究的相关成果，到 2025 年电力总量年均增速达到 4.4%，2030 年非化石能源发电量占比 50%。将火力发电量占比年增长速度设为 -2.74%，以此为基准情景，设定低碳情景和强低碳情景的火力发电量和年发电量在基准情景的基础上依次分别下降 2 个百分点和 1 个百分点。在低碳情景中，火力发电增长率和年发电量增长率分别为 -4.74% 和 3.4%。在强低碳情景中，火力发电增长率和年发电量增长率分别为 -6.74% 和 2.4%。

5) 第二产业占比增长率：文献 [28] 对中国经济总量及其结构进行预测，结果显示到 2035 年中国经济总量将达到 2050639 亿元，第二产业占比将下降至 10.4%，以此为基准情景，考虑到产业结构升级和高能耗产业低碳改造的推进，设定低碳情景和强低碳情景的第二产业增长率在基准情景的基础上依次分别下降 0.25 个百分点，分别为 4.15% 和 3.90%。

6) 人口数据：国务院印发的《国家人口发展规划（2016—2030 年）的通知》中指出中国总人口将在 2030 年前后达到峰值，人口将达到 14.5 亿人左右，该时间点与碳达峰时间点一致。文献 [29] 对中国人口规模进行预测，预测结果显示到 2035 年中国人口将降低到 13.42 亿人，人口规模较早达到峰值。因此本文在此基础上假定 2021—2030 年各年份的人口增长率分别为 0.31%、0.30%、0.22%、0.18%、0.05%、-0.10%、-0.20%、-0.40%、-0.50%、-0.50%，以此确定基准情景的人口变化，考虑到随着低碳政策的推进，环境问题得到有效改善，人口生育环境得到有效改善，低碳情景和强低碳情景的人口增速在此基础上依次上浮 0.25 个百分点。在低碳情景中，人口增长率依次为 0.56%、0.55%、0.47%、0.43%、0.30%、0.15%、0.05%、-0.15%、-0.25%、-0.25%。在强低碳情景中，人口增长率依次为 0.81%、0.80%、0.72%、0.68%、0.55%、0.40%、0.30%、0.10%、0%、0%。

2.4.2 电力行业 CO₂ 排放量预测

将 2004—2020 年电力行业 CO₂ 排放驱动因素分别代入 LSSVM 和 SSA-LSSVM 预测模型中，对比模型预测结果的绝对误差和相对误差，其中绝对误差取其绝对值，结果如表 6 所示。

表 6 SSA-LSSVM 和 LSSVM 预测模型对比
Table 6 Comparison of SSA-LSSVM and LSSVM prediction models

年份	实际值/ 亿t	SSA-LSSVM			LSSVM		
		预测 值/亿t	绝对误 差/亿t	相对误 差/%	预测 值/亿t	绝对误 差/亿t	相对误 差/%
2004	19.00	20.472	1.47	7.75	26.84	7.84	41.29
2005	21.14	21.983	0.85	4.00	27.29	6.16	29.12
2006	23.88	23.923	0.05	0.20	27.89	4.01	16.79
2007	26.11	25.710	0.40	1.53	28.51	2.40	9.18
2008	26.61	26.471	0.14	0.51	28.84	2.23	8.37
2009	28.09	27.540	0.55	1.97	29.33	1.24	4.41
2010	29.23	29.243	0.01	0.04	29.98	0.75	2.57
2011	32.94	31.941	1.00	3.02	30.88	2.06	6.26
2012	33.60	32.638	0.96	2.87	31.31	2.29	6.82
2013	36.60	34.547	2.05	5.61	32.05	4.55	12.44
2014	33.97	34.086	0.11	0.34	32.27	1.70	5.01
2015	31.93	33.367	1.44	4.50	32.43	0.50	1.57
2016	32.71	34.090	1.38	4.21	32.93	0.21	0.65
2017	35.35	35.863	0.51	1.45	33.60	1.75	4.94
2018	37.11	37.536	0.43	1.15	34.24	2.87	7.73
2019	38.95	38.758	0.19	0.49	34.67	4.28	10.99
2020	40.82	39.859	0.96	2.35	34.98	5.83	14.29

由表 6 可知，由 LSSVM 预测模型得到的 CO₂ 排放量绝对误差的最大值为 7.84 亿 t，最小值为 0.21 亿 t，相对误差的最大值为 41.29%，最小值为 0.65%；由 SSA - LSSVM 预测模型得到的 CO₂ 排放量绝对误差的最大值为 2.05 亿 t，最小值为 0.01 亿 t，相对误差的最大值为 7.75%，最小值为 0.20%。根据以上数据可知 SSA-LSSVM 预测模型的预测精度更高，且该模型预测的相对误差在以 8% 内，远低于 LSSVM 预测模型的预测误差。

因此，本文采用 SSA-LSSVM 预测模型进行电力行业 CO₂ 排放量预测， $c=6\ 945.004\ 69$ ， $\sigma^2=19\ 337.1471$ ，模型拟合精度可以达到 97% 以上，结果显示预测值与实际值基本吻合，进一步验证了 SSA-LSSVM 预测的可行性。因此可以采用



SSA-LSSVM 预测模型对不同情景下的电力行业 CO₂ 排放进行预测。

2021—2030 年基准情景、低碳情景、强低碳情景电力行业 CO₂ 排放预测值如图 2 所示。由图 2 可知，2021—2030 年间基准情景、低碳情景、强低碳情景电力行业 CO₂ 排放量均呈现出上升趋势，但各个情景下电力行业 CO₂ 排放量有所区别，其中，强低碳情景电力行业 CO₂ 排放量最低，在 2030 年排放量为 42.90 亿 t；低碳情景电力行业 CO₂ 排放量其次，在 2030 年排放量为 44.81 亿 t；基准情景电力行业 CO₂ 排放量最高，在 2030 年排放量为 47.30 亿 t。3 种情景下 2030 年电力行业 CO₂ 排放量已达到峰值，在此基础上探究电力行业 CO₂ 脱钩路径。

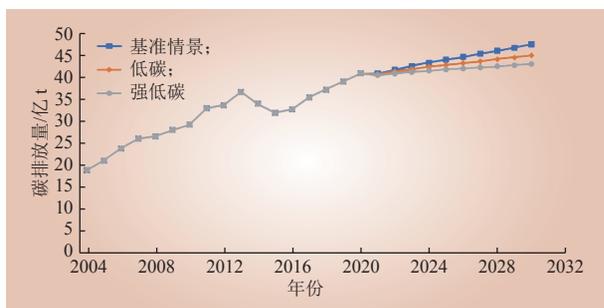


图 2 2021—2030 年电力行业碳排放预测值

Fig. 2 Electric power industry carbon emissions forecast for 2021-2030

2.4.3 电力行业 CO₂ 脱钩路径

在计算不同情景下电力行业 CO₂ 排放量的基础上，将不同情景下 2021—2030 年各个驱动因素的预测值和电力行业 CO₂ 排放量值代入式 (10)，计算得出不同情景下的各年电力行业 CO₂ 脱钩状态，结果如表 7 所示。

由表 7 可知，2022—2030 年电力行业 CO₂ 排放与经济增长均处于弱脱钩状态，2021 年处于强脱钩状态。2021 年 5 月，“双碳”工作领导小组召开第一次会议，7 月建立全国碳市场，10 月正式印发碳达峰指导意见，政策导向形成强脱钩状态。此后 2022—2030 年期间随着“双碳”工作的不断推进、清洁能源消纳能力提高、新型电力系统不断推进，中国电力行业 CO₂ 排放与经济增长将始终处于弱脱钩状态。从数值来看，2021—2030 年各情景下的脱钩数据均小于 2004—2020 年脱钩数据，同时强低碳场景的脱钩数值小于低碳

表 7 2021—2030 年电力行业脱钩路径
Table 7 Decoupling path of the electric power industry for 2021-2030

年份	基准情景		低碳情景		强低碳情景	
	脱钩指数	脱钩状态	脱钩指数	脱钩状态	脱钩指数	脱钩状态
2021	-0.03	强脱钩	-0.27	强脱钩	-0.61	强脱钩
2022	0.30	弱脱钩	0.20	弱脱钩	0.11	弱脱钩
2023	0.30	弱脱钩	0.20	弱脱钩	0.11	弱脱钩
2024	0.27	弱脱钩	0.19	弱脱钩	0.11	弱脱钩
2025	0.29	弱脱钩	0.19	弱脱钩	0.11	弱脱钩
2026	0.30	弱脱钩	0.20	弱脱钩	0.11	弱脱钩
2027	0.28	弱脱钩	0.19	弱脱钩	0.13	弱脱钩
2028	0.31	弱脱钩	0.22	弱脱钩	0.15	弱脱钩
2029	0.34	弱脱钩	0.24	弱脱钩	0.17	弱脱钩
2030	0.31	弱脱钩	0.23	弱脱钩	0.17	弱脱钩

场景和基准场景，这意味随着“双碳”政策的不断推进，电力行业 CO₂ 排放与经济增长的脱钩状态将愈发明显，电力行业 CO₂ 排放对经济增长的影响愈发削弱。因此电力行业应积极推动清洁能源发展，促进清洁能源消纳，逐步推动清洁能源进入电力市场并做好火电灵活性改造，优化电力生产结构。

3 结论和政策建议

随着中国电力行业 CO₂ 排放量增长趋势愈发明显，识别电力行业 CO₂ 排放驱动因素，量化各个因素对电力行业 CO₂ 排放的影响程度，判断电力行业 CO₂ 与经济增长的脱钩状态，实现碳达峰目标，并制定针对性的政策，是需要研究解决的问题。本文基于中国 2004—2020 年的数据，通过 LMDI 模型把中国电力行业 CO₂ 排放变化分解为 4 种驱动因素，得出以下结论。

1) 电力行业 CO₂ 排放影响因素中，经济增长是电力行业 CO₂ 排放量增长的主要因素，电力生产结构效应和电力生产强度效应对电力行业 CO₂ 排放起明显的抑制作用，碳排放系数效应和燃料转化率效应对电力行业 CO₂ 排放量的影响处于波动状态，但整体而言起抑制作用。

2) 整个研究期内，电力行业 CO₂ 排放与经济增长的脱钩状态处于弱脱钩的状态下，经济效益指数是促进电力行业 CO₂ 排放与经济增长的主要

因素,在 2019—2020 年,随着电力消费强度指数和燃料转换指数快速提升,电力行业 CO₂ 排放与经济增长脱钩状态指数也快速提升。

3) 从电力行业 CO₂ 排放预测值来看,2020—2030 年基准情景、低碳情景、强低碳情景下电力行业 CO₂ 排放量均呈现出上升趋势,2021 年电力行业 CO₂ 排放与经济增长处于强脱钩状态,2022—2030 年电力行业 CO₂ 排放与经济增长均处于弱脱钩状态,强低碳场景的脱钩数值小于低碳场景和基准场景。

基于上述结论,为实现碳达峰目标,促进电力系统低碳化转型,构建新型电力系统,本文提出以下建议。

1) 转变经济增长方式,实现经济绿色低碳增长。中国需要由高排放类型经济转变为绿色低碳经济,需要从牺牲环境、消耗过量资源为代价的增长模式转变为创新驱动、内生增长的增长模式,实现产业结构低碳化转型,提高能源利用效率,在保证经济增长的同时,实现一次性能源消耗减少,降低电力行业 CO₂ 排放量。

2) 发展清洁能源,构建新型电力系统。大力发展清洁能源,转变电力生产结构,提高电力生产强度,推动新型电力系统构建。借助新技术、新材料和新思维,采用多元化的能源结构,推广可再生能源,提高能源利用效率,减少污染排放,实现经济效益和环境效益的双赢,同时提升电力系统智能化、信息化和安全性水平,以适应清洁能源的大规模接入和可持续发展的需要。

3) 推进低碳技术创新,实现电力行业碳排放脱钩。推广清洁发电技术,推进火电机组的低排放和节能改造力度,实现电力行业碳排放脱钩。加强政策支持,鼓励电力企业加大对低碳技术研发的投入;加强产学研合作,共同研发低碳技术项目,推进技术创新。

参考文献:

- [1] 梁福生,曹俐,葛智越.空间溢出视角下绿色信贷的碳排放效应研究:基于财政分权的调节作用[J].调研世界,2022(10):38-48.
LIANG Fusheng, CAO Li, GE Zhiyue. Research on the carbon emission effect of green credit from the perspective of spatial spillover—moderating effect based on fiscal decentralization[J]. The World of Survey and Research, 2022(10): 38-48.
- [2] 王成仁,陈妍,刘梦.我国化石能源保供稳价形势研判及对策建议[J].价格理论与实践,2023(3):31-37,64.
WANG Chengren, CHEN Yan, LIU Meng. Analysis and suggestions on the situation of ensuring supply and stabilizing price of fossil energy in China[J]. Price: Theory & Practice, 2023(3): 31-37, 64.
- [3] 李海龙,唐献凤.区块链嵌入下电力企业新型碳绩效管理体系构建[J].财会月刊,2023,44(7):85-92.
- [4] 郭玲,宁才晟,王文烂.中国林产品生产侧碳排放量的测度与效应分解:基于多区域投入产出与结构分解分析模型[J].林业经济,2022,44(5):23-40.
GUO Ling, NING Caisheng, WANG Wenlan. Measurement and effect decomposition of carbon emissions on the production side of forest products in China—based on the multi-regional input-output and structural decomposition analysis model[J]. Forestry Economics, 2022, 44(5): 23-40.
- [5] LIU B Q, SHI J X, WANG H, et al. Driving factors of carbon emissions in China: a joint decomposition approach based on meta-frontier[J]. Applied Energy, 2019, 256: 113986.
- [6] WANG Q W, CHIU Y H, CHIU C R. Driving factors behind carbon dioxide emissions in China: a modified production-theoretical decomposition analysis[J]. Energy Economics, 2015, 51: 252-260.
- [7] 闫庆友,王雅娟,于振华,等.基于 Shapley 值的京津冀火电行业碳排放因素分解[J].生态经济,2018,34(12):29-34.
YAN Qingyou, WANG Yaxian, YU Zhenhua, et al. Decomposition analysis of carbon dioxide emissions from thermal electricity generation in Beijing, Tianjin and Hebei: a study based on shapley value[J]. Ecological Economy, 2018, 34(12): 29-34.
- [8] OECD. Indicators to measure decoupling of environment pressure from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002: 13-14.
- [9] 向彩虹,覃秋蓓.基于脱钩指数与 LMDI 的湖南省绿色低碳发展路径研究[J].环境科学导刊,2022,41(3):19-26.
XIANG Caihong, QIN Qiubei. Study on green and low-carbon development path of Hunan province based on decoupling index and LMDI model[J]. Environmental Science Survey, 2022, 41(3): 19-26.
- [10] 侯丽朋,王琳,钱瑶,等.“双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析[J].生态学报,2022,42(23):9663-9676.
HOU Lipeng, WANG Lin, QIAN Yao, et al. Decoupling status and driving mechanisms of carbon emissions in the Golden Triangle of Southern Fujian under "carbon peaking and neutrality" goals[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [11] 杨英明,孙健东.世界主要国家能源消费碳排放脱钩及驱动因素研



- 究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(7): 173–177.
- YANG Yingming, SUN Jiandong. Carbon emission decoupling and drivers of energy consumption in major countries[J]. Coal Engineering, 2019, 51(7): 173–177.
- [12] DONG J, LI C, WANG Q. Decomposition of carbon emission and its decoupling analysis and prediction with economic development: a case study of industrial sectors in Henan province[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 129019.
- [13] 曲健莹, 李科. 工业增长与二氧化碳排放“脱钩”的测算与分析[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2019, 39(5): 92–104.
- QU Jianying, LI Ke. Measurement and analysis of "decoupling" between industrial growth and carbon dioxide emissions in China[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2019, 39(5): 92–104.
- [14] 李健, 王尧, 王颖. 天津市碳排放脱钩态势及碳减排潜力分析: 基于 2007—2016 年的面板数据[J]. 生态经济, 2019, 35(4): 26–32.
- LI Jian, WANG Yao, WANG Ying. Tianjin carbon emissions decoupling analysis and carbon emission reduction potential: based on panel data from 2007 to 2016[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(4): 26–32.
- [15] 陈赟, 沈浩, 王晓慧, 等. 基于 Mann-Kendall 趋势检验的城市能源碳达峰评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 928–938.
- CHEN Yun, SHEN Hao, WANG Xiaohui, *et al.* Assessment method for urban energy carbon emission peak based on Mann-Kendall trend test[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(7): 928–938.
- [16] 玉琦彤. 中国电力行业碳排放脱钩效应情景模拟[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 194–200.
- YU Qitong. Scenario simulation of decoupling effect of carbon emission in China's power industry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 194–200.
- [17] 廖祖君, 张剑宇, 陈诗薇. 碳排放影响因素及达峰路径研究: 基于四川省的分析[J]. 软科学, 2023, 37(9): 95–101.
- LIAO Zujun, ZHANG Jianyu, CHEN Shiwei. Factors influencing carbon emission and carbon peak reaching pathways: evidence from Sichuan province[J]. *Soft Science*, 2023, 37(9): 95–101.
- [18] 马宇恒. 东北地区 2030 年碳排放达峰路径研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- MA Yuheng. Study on the peak path of carbon emission in Northeast China in 2030[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [19] 马丁, 陈文颖. 中国 2030 年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊 1): 1–4.
- [20] ANG B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?[J]. *Energy policy*, 2004, 32(9): 1131–1139.
- [21] 杨海柱, 田馥铭, 张鹏, 等. 基于 CEEMD-FE 和 AOA-LSSVM 的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 126–133.
- YANG Haizhu, TIAN Fuming, ZHANG Peng, *et al.* Short-term load forecasting based on CEEMD-FE-AOA-LSSVM[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 126–133.
- [22] 于霄宇, 纪正森, 嵇灵, 等. 双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 25–31, 39.
- YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, *et al.* Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in China under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. *Smart Power*, 2024, 52(2): 25–31, 39.
- [23] 张浩然, 汪晓东. 回归最小二乘支持向量机的增量和在线式学习算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(3): 400–406.
- ZHANG Haoran, WANG Xiaodong. Incremental and online learning algorithm for regression least squares support vector machine[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(3): 400–406.
- [24] 何忠华, 张涛, 胡娱欧, 等. 考虑大气污染防治措施影响的短期电力负荷预测模型研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 1–9.
- HE Zhonghua, ZHANG Tao, HU Yuou, *et al.* Short-term electric load forecasting model considering the influence of air pollution prevention and control policy[J]. *Smart Power*, 2019, 47(5): 1–9.
- [25] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素: 基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证[J]. 工业技术经济, 2019, 38(8): 32–40.
- WANG Fengting, FANG Kai, YU Chang. Decoupling between industrial energy-related carbon emissions and economic growth and its driving factors in Beijing, Tianjin and Hebei urban agglomeration—empirical study based on tapio decoupling and LMDI model[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(8): 32–40.
- [26] The United Nations Economic and Social Affairs. World urbanization outlook report [EB/OL]. (2014-07-20)[2022-04-25]. <https://www.un.org/development/desa/zh/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>.
- [27] 廖华, 向福洲. 中国“十四五”能源需求预测与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 1–8.
- LIAO Hua, XIANG Fuzhou. Forecast and prospect of energy demand in china's "14th five-year" plan period[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(2): 1–8.

[28] 李平, 娄峰, 王宏伟. 2016—2035 年中国经济总量及其结构分析预测 [J]. *中国工程科学*, 2017, 19(1): 13–20.

LI Ping, LOU Feng, WANG Hongwei. Analysis and forecast of China's total economy and its structure from 2016–2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(1): 13–20.

[29] 国务院发展研究中心课题组. 认识人口基本演变规律 促进我国人口长期均衡发展 [J]. *管理世界*, 2022, 38(1): 1–19, 34, 20.

Group of the Development Research Center of the State Council. Understand the basic laws of population evolution and promote the long-term balanced development of China's population[J]. *Journal of*

Management World, 2022, 38(1): 1–19, 34, 20.

作者简介:

李旭东 (1997—), 男, 博士研究生, 从事电力技术经济研究, E-mail: 1169771877@qq.com;

刘力纬 (1976—), 女, 教授, 从事新能源技术经济研究, E-mail: vliu6868@163.net;

谭忠富 (1964—), 男, 通信作者, 教授, 从事电力技术经济、能源经济研究, E-mail: tanzhongfu@sina.com。

(责任编辑 李博)

Carbon Emission Factors and Decoupling Effects of China's Power Industry under the Background of Carbon Peak

LI Xudong¹, TAN Qingbo², ZHAO Haochen¹, QIAO Ning³, LIU Liwei⁴, TAN Caixia¹, TAN Zhongfu¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Ural Federal University, Ekaterinburg 620002, Russia; 3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 4. International Business School, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

Abstract: It is of great practical significance to explore the driving factors and decoupling effects of CO₂ emissions in electric power industry, which can not only promote the realization of "dual carbon" goal, but also improve the overall environmental quality in China. In this paper, the CO₂ emissions of China's electric power industry from 2004 to 2020 are estimated, and the driving factors and decoupling status of CO₂ emissions of the electric power industry are studied with the LMDI model and Tapio decoupling model. On this basis, the CO₂ emissions and the decoupling status of the electric power industry during 2021–2030 were analyzed based on the SSA-LSSVM prediction model. The results show that: (1) the economic growth is the main factor of CO₂ emission growth in the electric power industry, and the effects of power production structure and power production intensity have an obvious inhibition effects on CO₂ emissions; (2) during the whole study period, the CO₂ emissions from the power industry was in a weak decoupling status from economic growth; (3) from the predicted value of CO₂ emissions from the electric power industry, the CO₂ emissions from the electric power industry show an upward trend under the baseline scenario, low-carbon scenario and strong low-carbon scenario, and the CO₂ emissions from the electric power industry is in a weak decoupling status from economic growth during 2022–2030. Based on the research results, in order to reduce the CO₂ emissions of China's electric power industry, it is proposed to change the economic growth mode to achieve the green and low-carbon economic growth, to develop clean energy to build a new power system, to promote low-carbon technology innovation to realize the decoupling of carbon emissions of electric power industry.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Optimization Model and Mechanism of Complementary Operation of Energy System "source, Network, Load, Storage" Under the Vision of Carbon Neutrality, No.72174062).

Keywords: CO₂ emissions; LMDI model; electric power industry; Tapio decoupling