

可再生能源电力对碳排放的作用路径及影响

——基于省际数据的中介效应检验

赵振宇 马旭¹

（华北电力大学 经济与管理学院，北京 102206）

【摘要】：面向中国“2030年碳达峰、2060年碳中和”目标，根据2010–2019年30个省份面板数据，借鉴中介效应模型进行检验分析，从可再生能源的装机容量、消纳比率、发电占比三个指标进行横向与纵向对比研究。依据能源系统理论，量化分析可再生能源电力对碳排放量的作用路径及影响。结果表明：上述三个指标对碳减排的中介效应影响值由大到小排序为消纳比率、发电占比、装机容量，其中，促进能源消纳是可再生能源发展的重中之重。通过研究得出，实现“双碳”目标需优化可再生能源电力投资结构与规模，促进可再生能源电力就地消纳，实现高比例可再生能源接入电网，提升可再生能源发电装机容量。研究结果为“双碳”目标的实现路径提供了参考。

【关键词】：可再生能源 碳排放 电力消费量 中介效应

【中图分类号】：X322；F426.61 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1007-5097（2022）07-0065-08

一、引言

2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会上提出中国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。同年12月12日，习近平主席在气候雄心峰会上承诺中国到2030年非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右、风电和太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上。中国作为全球温室气体排放大国，将实施由“高碳”向“低碳”转型的经济发展战略，促进经济绿色发展。可再生能源电力开发利用是中国多轮驱动能源供应体系的重要组成部分，是推进低碳经济发展的重要途径，对于改善能源结构、保护生态环境、应对气候变化、实现经济社会可持续发展影响重大^[1,2]。为此，本文提出并开展省域可再生能源装机及发电等过程对碳排放影响的研究，聚焦分析可再生能源电力消纳对碳排放的具体作用路径及影响、可再生能源装机和发电对碳排放的影响这一重要问题，为“双碳”目标下不同省份确立可再生能源电力消纳与节能减排方面的规划提供借鉴，也为国家和地方发展清洁可再生能源，实现降碳等相关政策、措施的制定与优化提供参考。

二、文献综述

目前，关于可再生能源消费对碳排放的影响研究方面，已有的代表性成果有：陈艳和朱雅丽借助Kaya不等式测算1998–2007年中国农村居民可再生能源生活消费的碳排放量并评估其环境效应^[3]；邱庆全等利用ARDL模型、Granger因果检验法研究

¹**作者简介：**赵振宇（1969—），男（满族），辽宁丹东人，教授，博士生导师，博士，华北电力大学工程建设管理研究所所长，中澳可持续发展研究所所长，研究方向：可再生能源电力开发管理，电力工程项目管理；马旭（1993—），男，安徽宿州人，博士研究生，研究方向：可再生能源电力开发管理，能源电力经济管理。

基金项目：国网山东省电力有限公司科技项目“新型灵活性资源价值评估及市场机制研究”（4000-202057046A-0-0-00）；国网安徽省电力有限公司科技项目“平价时代新能源经济开发规模评价关键技术及应用研究”（4000-202157059A-0-0-00）；北京市自然科学基金资助项目“北京市可再生能源资源时空分异特征对分布式能源建设的适应度研究”（8192043）

发现, 可再生能源消费与能源碳排放存在单向因果关系^[4]; 陈玉龙等利用 1980—2012 年的样本数据, 使用自回归滞后模型研究中国碳排放与可再生能源、非再生能源消费等各影响因素间的长期均衡和短期动态关系, 对比分析可再生能源消费对 EKC 模型的影响^[5]; 王亮和赵涛通过协整检验、脉冲响应分析和方差分解方法, 对 1980—2009 年中国可再生能源消费、碳排放与经济增长之间的动态关系、冲击效应和贡献度进行分析。还有研究发现受碳排放的影响可再生能源消费对经济增长的累积冲击效应为负, 而且正负冲击效应交替出现^[6]; 姚树洁和张帅选取 1990—2014 年世界主要经济体数据, 利用动态面板协整模型 (Fmols 和 Dols), 考察可再生能源使用率与碳排放环境库兹涅茨曲线拐点值之间的动态关系, 发现提高可再生能源使用率是 EKC 越过拐点的关键因素^[7]; 肖德和张媛运用 Han-sen 面板门槛模型, 考察 1994—2016 年 33 个发达国家可再生能源消费与二氧化碳排放间的非线性关系, 确定了可再生能源消费对碳排放的影响存在基于金融发展的显著双门槛效应^[8]; 王嘉康以 1990—2014 年德国碳排放为样本数据, 通过建立 VAR 模型分析碳排放量、能源强度、可再生能源占比与工业化率之间的动态关系, 发现可再生能源占比对碳排放量的影响具有长期负向的冲击效应^[9]; Azam 等以 1990—2014 年多个国家数据为基础, 采用面板完全修正的普通最小二乘法, 分析天然气、可再生能源消费及核能消费对十大碳排放国家经济增长和碳排放的影响^[10]。

关于碳排放与可再生能源其他维度的关系方面, 代表性的研究成果有, Wang 等采用面板协整、长期 FMOLS、DOL 和 Granger 因果关系方法探讨不同国家碳排放量、GDP、可再生和不可再生能源发电量间的动态相互依赖关系^[11]; Vural 运用第二代面板协整方法量化非洲国家贸易产出、可再生能源和碳排放间的关系^[12]; Zhang 等建立非参数可加回归模型, 分析可再生能源投资对中国碳排放量的综合影响^[13]; Omoju 基于经济发展与碳排放间的非线性关系, 使用面板协整方法分析主要国家可再生能源消费的决定因素, 得出经济发展对非水电可再生能源消费的影响^[14]; 张丽娜基于双重差分模型论证碳交易试点的实施对发电企业可再生能源发展程度有显著正向影响, 且发电企业更倾向于通过调整资源配置影响可再生能源发展, 而环境规制对可再生能源发展的影响成“U”型趋势^[15]; 杨忠敏运用向量自回归模型, 对中国可再生能源技术专利、CO₂ 排放与 GDP 之间的动态关系进行实证分析, 得出可再生能源技术创新是实现碳减排的重要途径^[16]; 柳逸月论证中国碳排放的峰值节点和边界条件, 并运用能源系统模拟模型, 分析环境优先和经济优先两种情景下能源系统的转型路径, 提出发展和消纳可再生能源的保障条件^[17]。

从现有文献看, 鲜有关于可再生能源对碳排放影响作用路径的系统性研究成果, 因而亟待开展可再生能源发电占比等因素对碳排放的效应研究, 进行可再生能源对碳排放量影响方面的具体测度分析。根据能源系统理论中的能源生产服务系统、能源消费系统、能源环境系统理论^[18, 19, 20]和 3E 系统理论 (“能源 (Energy) - 经济 (Economy) - 环境 (Environment)”)^[21, 22, 23], 可再生能源资源如风能、太阳能等在发电项目建设过程中产生碳排放, 并在建成后向用户供电实现清洁电力消费, 即可再生能源项目建设和发电过程中分别会带来能源消耗和清洁电力的输出, 从而进一步影响碳排放量。因此, 本文基于电力消费量的中介传导作用视角, 以中国省际间可再生能源装机容量、可再生能源消纳比率、可再生能源发电占比为解释变量, 以省际地区总人口、经济发展等指标为控制变量, 分析总结中国可再生能源对碳排放量的影响方式, 探讨可再生能源对碳排放的作用路径, 明确可再生能源消纳对碳减排的促进机制, 为进一步探究可再生能源投资结构优化、促进可再生能源电力产业发展、实现省域及国家“双碳”目标提供一定参考。

三、模型构建

(一) 指标选取

1. 被解释变量

在碳排放量数据方面, 由于目前相关统计部门暂无专门针对各省 CO₂ 排放量的统计数据, 因此, 在现有以碳排放量 (特别是省域、市域级) 为研究对象的文献中, 通常利用分品种能源消费量和各品种能源对应的碳排放系数进行估算^[24, 25, 26]。本文根据 IPCC (政府间气候变化专门委员会) 公布的估算方法计算各个省份的 CO₂ 排放量, 具体算法如 (1) 式:

$$CO_{2it} = \sum_{j=1}^9 CO_{2itj} = \frac{44}{12} \sum_{j=1}^9 M_{itj} K_j q_j \quad (1)$$

其中：i 表示省份；t 表示年份；j 表示能源； CO_{2it} 表示 i 省 t 年 CO_2 排放总量； CO_{2itj} 表示 i 省 t 年第 j 种能源的 CO_2 排放量； M_{itj} 表示 i 省 t 年第 j 种能源的实物消费量；44/12 表示一吨碳在 O_2 中燃烧后能产生大约 3.67 吨 CO_2 （碳的分子量为 12， CO_2 的分子量为 44，44/12=3.67）； K_j 表示第 j 种能源碳元素质量的折算系数； q_j 表示第 j 种能源的碳排放系数。

2. 解释变量

本文涉及的可再生能源电力三个指标解释变量的含义及计算如下：

（1）可再生能源装机容量（Renewable Energy Installed Capacity, REIC），为可再生能源电力系统实际安装的发电机组额定有效功率的总和。

（2）可再生能源消纳比率（Renewable Energy ConsumptionRate, RECR），为可再生能源电力消纳量/全社会用电量。

（3）可再生能源发电占比（Renewable Energy Penetration, REP），为可再生能源发电量/总发电量。

3. 其他控制变量

为增加模型的可靠性，引入经济发展水平（人均 GDP）、人口规模（总人口）两项控制变量。

为减少原始数据的量纲影响，本文对各指标进行最大最小标准化处理，具体算法见（2）式：

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

其中： X_i 表示最大最小标准化后的数据； x_i 表示原始数据； $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 表示原始数据列中的最大值和最小值。

（二）数据来源

本文以 2010—2019 年中国 30 个省份（不含西藏和港澳台地区）的时间序列数据为研究样本，其中，碳排放量相关运算数据来源于 2020 年《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》；可再生能源装机容量相关运算数据来源于 2020 年《中国电力统计年鉴》《中国电力年鉴》；可再生能源消纳比率相关运算数据来源于国家能源局官网、中电联官网、北极星电力网；可再生能源发电占比相关运算数据来源于 2020 年《中国电力统计年鉴》《中国电力年鉴》《中国新能源发电分析报告》；人均 GDP 和总人口数据来源于 2020 年《中国统计年鉴》；电力消费量数据来源于《中国能源统计年鉴》和《中国电力年鉴》，对个别缺失的年度数据，则使用加权平均法和线性预测法加以估算。

（三）中介效应模型的构建与设定

中介变量可以部分（或全部）解释自变量 X 对因变量 Y 的间接影响。因此，自变量对因变量的影响可分解为 X 自身对 Y 的

直接效应、X 通过中介变量传递到 Y 的间接效应两个部分。

为分析省际层面可再生能源装机容量、消纳比率、发电占比对碳排放量的作用路径及影响，本文选取碳排放量为被解释变量，可再生能源三个指标为核心解释变量，电力消费量为中介变量，人均 GDP 和总人口为控制变量，构建式（3）、式（4）、式（5）三个基本模型：

$$C_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 X_{jit} + \alpha_2 M_{it} + \varepsilon_{it1} \quad (3)$$

$$EC_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{jit} + \beta_2 M_{it} + \varepsilon_{it2} \quad (4)$$

$$C_{it} = \delta_0 + \delta_1 X_{jit} + \delta_2 EC_{it} + \delta_3 M_{it} + \varepsilon_{it3} \quad (5)$$

其中：C 为被解释变量，即碳排放量； X_j 为解释变量， $j=1, 2, 3$ ， X_1 、 X_2 、 X_3 分别为可再生能源消纳比率、装机容量、发电占比；EC 为中介变量，即电力消费量；M 为控制变量，包括经济发展水平、总人口数量； α 、 β 、 δ 为回归系数； ε 为随机误差项；下标 i 代表各个省份；t 代表年份。

中介效应检验有两种方法：一是各回归系数检验方法（逐步检验回归系数法），二是系数乘积检验法（Bootstrap）^[27]。

1. 各回归系数检验方法（逐步检验回归系数）检验思想

（3）式中 α_1 、（4）式中 β_1 、（5）式中 δ_2 显著且不为零，则模型存在中介效应。

若 $\delta_1=0$ ，为完全中介效应，否则为部分中介效应。完全中介效应是指自变量无法直接影响因变量，只能通过中介变量进行调节；部分中介效应是指自变量既可以通过中介变量对因变量进行影响，同时，本身也能影响因变量。

若检验系数 α_1 不显著或 $\beta_1 \delta_2$ 与 δ_1 异号，则为遮掩效应。

2. 系数乘积检验法（Bootstrap）检验思想

中介效应检验的原假设 $H_0: \beta_1 \delta_2=0$ （不存在中介效应）。重复抽样 m 次，分别得到 m 个 $\beta_1 \delta_2$ 的值（抽样分布），将它们从小到大排序，得到 2.5% 和 97.5% 的分位数，构成 $\beta_1 \delta_2$ 的置信度为 95% 的置信区间（也可构造置信度为 90%、99% 的置信区间）。

若该置信区间——[BootLLC, BootULCI] 包含 0，则不拒绝 H_0 （不存在中介效应）；否则拒绝 H_0 （存在中介效应）。

若中介效应存在，则可计算中介/遮掩效应占比，观察中介效应的程度。因为直接效应= δ_1 ，中介效应= $\beta_1 \delta_2$ ，所以总效应=直接效应+中介效应= $\delta_1 + \beta_1 \delta_2$ ，中介效应占比系数为 $\beta_1 \delta_2 / (\beta_1 \delta_2 + \delta_1)$ ，遮掩效应占比系数为 $|\beta_1 \delta_2 \delta_1|$ ，是中介效应的特殊情况。

近年来，系数乘积检验法（Bootstrap）在中介效应检验中的应用越来越多，考虑当中介效应不够强时，逐步检验回归系数检验精准度不高，易产生误判，且系数乘积检验法（Bootstrap）的置信区间比（Sobel-Goodman）得到的置信区间更精确，有更高的检验力，温忠麟^[28]将其归纳为现阶段检验中介效应最为合理、适用的方法，故本文采用系数乘积检验法（Bootstrap）检验中介效应。

四、中介效应的检验结果与影响分析

本文采用 SPSS22.0 中介效应插件 PROCESS Procedure for SPSS Release2.16.3 进行中介效应检验与分析。

（一）消纳比率中介效应的检验结果与影响

参考式（3）-式（5），带入省际面板数据，得到可再生能源消纳比率的中介效应检验结果。

对于变量 X_1 ，中介效应占比系数为 $\beta_1 \delta_2 / (\beta_1 \delta_2 + \delta_1) = 29.3\%$ ，即电力消费量在可再生能源消纳比率对碳排放量的影响作用中具有中介效应，且是部分中介效应，中介效应量为 29.3%。 X_1 相关系数为负，说明促进可再生能源消纳比率的增加会直接降低碳排放量，也可通过电力消费量中介效应进一步降低碳排放量，即可再生能源消纳比率越大，火电用电量的比率越低，一定程度上保证了电力消费的清洁性。

（二）装机容量中介效应的检验结果与影响

对于变量 X_2 ，中介效应占比系数为 $\beta_1 \delta_2 / (\beta_1 \delta_2 + \delta_1) = 96.3\%$ ， δ_1 趋近于 0，即电力消费量在可再生能源装机容量对碳排放量的影响作用中起中介效应，且接近于完全中介效应，中介效应量为 96.3%。 X_2 相关系数为正，表明可再生能源项目在装机建设过程中也会带来一定的能源电力消耗与碳排放。

（三）发电占比中介效应的检验结果与影响

对于变量 X_3 ，中介效应占比系数为 $\beta_1 \delta_2 / (\beta_1 \delta_2 + \delta_1) = 25.6\%$ ，即电力消费量在可再生能源发电占比对碳排放量的影响作用中具有中介效应，且是部分中介效应，中介效应量为 25.6%。 X_3 相关系数为负，说明高比例可再生能源资源（如风光等）接入电网会直接降低碳排放量，且也可通过电力消费量中介效应进一步降低碳排放量，即可再生能源发电占比越大，发电量成分中的可再生能源的比重越大，发电端的电力清洁低碳特性就越强。

五、中介效应的作用路径关系研究

（一）消纳比率中介效应的作用路径关系

参照可再生能源消纳比率的中介效应检验结果，绘制可再生能源消纳比率对碳排放影响作用的路径关系，如图 1 所示。

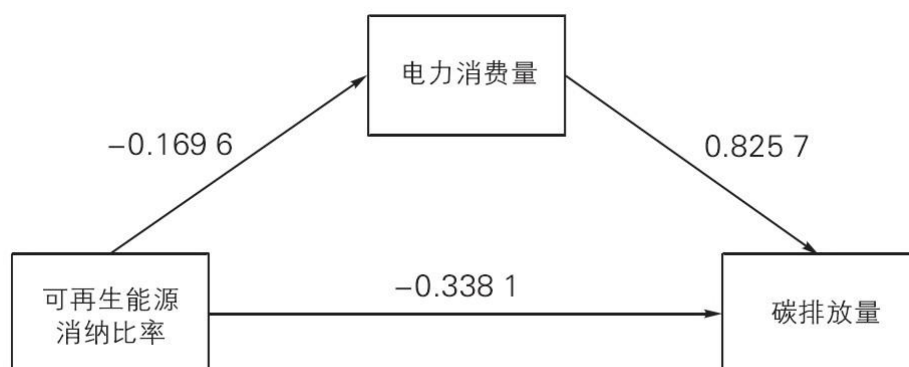


图 1 可再生能源消纳比率—电力消费量—碳排放量中介效应的路径关系

由图 1 可看出，可再生能源消纳比率的提升会降低碳排放量，又通过电力消费量对碳排放产生中介效应。具体表现为：现阶段可再生能源消纳比率每提升 1 个单位，碳排放量直接减少 0.3381 个单位；可再生能源消纳比率每提升 1 个单位，电力消费量减少 0.1696 个单位；电力消费量每提升 1 个单位，碳排放量会增加 0.8257 个单位。相当于可再生能源消纳比率每提升 1 个单位，碳排放量一共减少 0.4781 个单位（ $0.3381+0.1696\times0.8257$ ）。

（二）装机容量中介效应的作用路径关系

参照可再生能源装机容量的中介效应检验结果，绘制可再生能源装机容量对碳排放影响作用的路径关系，如图 2 所示。

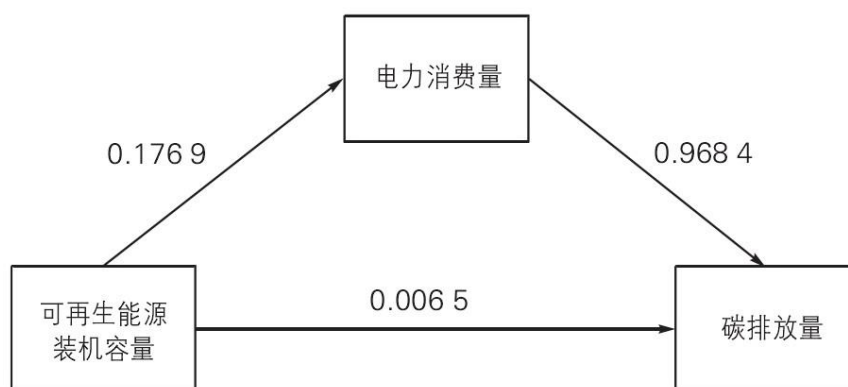


图 2 可再生能源装机容量—电力消费量—碳排放量中介效应的路径关系

由图 2 可看出，电力消费量对碳排放产生中介效应。具体表现为：现阶段可再生能源装机容量每提升 1 个单位，电力消费量增加 0.1769 个单位，而电力消费量每提升 1 个单位，碳排放量会增加 0.9684 个单位。相当于可再生能源装机容量每提升 1 个单位，碳排放量一共增加 0.1778 个单位（ $0.0065+0.1769\times0.9684$ ）。

（三）发电占比中介效应的作用路径关系

参照可再生能源发电占比的中介效应检验结果，绘制可再生能源发电占比对碳排放影响作用的路径关系，如图 3 所示。

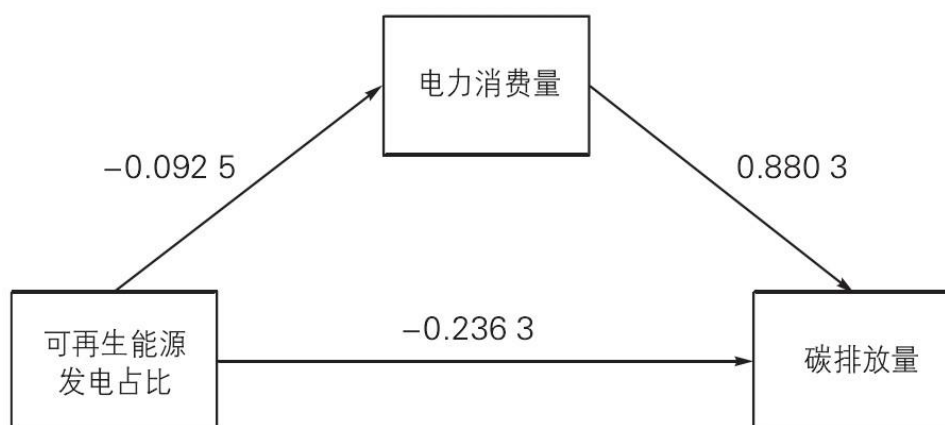


图 3 可再生能源发电占比—电力消费量—碳排放量中介效应的路径关系

由图 3 可看出,可再生能源发电占比的提升会降低碳排放量,又通过电力消费量对碳排放产生中介效应,具体表现为:现阶段可再生能源发电占比每提升 1 个单位,碳排放量直接减少 0.2363 个单位;可再生能源发电占比每提升 1 个单位,电力消费量减少 0.0925 个单位,而电力消费量每提升 1 个单位,碳排放量会增加 0.8803 个单位。相当于可再生能源发电占比每提升 1 个单位,碳排放量一共减少 0.3177 个单位 ($0.2363+0.0925\times0.8803$)。

根据图 1、图 2、图 3 所示的三种中介效应路径关系,进一步得出相应可再生能源对碳排放的作用路径及单位效应影响值,如图 4 所示。



图 4 可再生能源对碳排放的作用路径及单位效应影响值

由图 4 看出,三项可再生能源指标对碳排放量的单位效应影响值依次为:可再生能源消纳比率 (-0.4781)、可再生能源装机容量 (0.1778)、可再生能源发电占比 (-0.3177)。由此可见,促进可再生能源消纳对可再生能源发展的影响最为显著,对降低碳排放、改善环境意义重大。

六、结论

本文以中国“双碳”目标为研究背景,以 2010-2019 年中国 30 个省份(不含西藏和港澳台地区)面板数据为样本,基于地区电力消费量中介传导的新视角,以消纳比率、装机容量、发电占比三个指标分析可再生能源对碳排放量的作用路径及影响,借助中介效应理论测度可再生能源消纳比率、装机容量、发电占比对碳排放量的单位效应影响值,为动态考察可再生能源电力对碳排放的作用路径及影响提供了重要支持。研究结果表明,在可再生能源装机、发电、消纳三个过程中,对碳减排作用最明显的是可再生能源消纳比率,其次是可再生能源发电占比,最后是可再生能源装机容量。可见,促进可再生能源消纳对减少碳排放有极大促进作用,也是可再生能源可持续发展的关键。本文为探讨可再生能源电力对碳排放的作用路径及影响分析提供了一种新型实用工具,并具有良好的推广应用价值,为实现“双碳”目标路径研究提供了一定参考。能源转型是中国实现“双碳”目标最重要的抓手,贯彻能源革命、发展绿色低碳清洁电力体系、能源结构低碳化是中国实现碳中和的关键路径。对此,提出以下建议:

1. 应把消纳问题作为可再生能源发电项目规划和建设的重要考量指标

应根据可再生能源电力消纳的空间特征,通过区域间多维度联动,建立特高压等相关连接通道(如“三北”地区等可再生能源资源富集区向华东、华南等用电负荷集中地区西电东送、跨省区输电的外送通道),实现可再生能源电力向消纳市场的精准输送^[29,30]。以华东地区的安徽电网为例,“皖电东送”工程是我国首条同塔双回路特高压交流输电工程,该工程连接安徽电网和华东电网负荷中心,与向家坝至上海、锦屏至苏南等特高压直流输电系统相互支撑、相互配合,强化了安徽省的华东电网转送枢纽功能,大幅提高了华东电网的安全稳定水平。因此,消除省际间壁垒,加快建设电力外送通道如“皖电东送”等类似电力外送工

程的建设运营对于实现能源区域间联动、促进安徽省乃至华东地区经济发展、助力构建长三角能源共同体、打通华东电力“丝绸之路”具有至关重要的意义。再以华北地区的冀北电网与北京电网为例，由于北京市风光等可再生能源资源有限，故需强化华北电网的“送电进京”通道建设，如推动北京电网与华北电网北部的张家口、承德公司多方联动、合作建设光伏电站、输电线路工程等基础设施，创新光伏+模式，加快推进农业和光伏互补与屋顶式光伏规模化，推动工商业分布式户用光伏发展并最终服务京津冀城市圈的经济发展，为首都构筑绿电入京通道。

2. 制定煤炭合理有序的退出路径，加速煤炭控制和可再生能源规模化发展

应加快落实习近平主席在领导人气候峰会（2021年）上提出的“中国将严控煤电项目，‘十四五’时期严控煤炭消费增长、‘十五五’时期逐步减少”的要求，制定有序退煤的政策框架和实施路径，力争到“十四五”末煤炭的一次能源消费占比下降到50%以下。“十四五”期间严控新增煤电，去除散煤，加速工业领域去煤，严控煤化工等高碳行业发展规模，加快煤炭资源型城市的经济和社会转型，不断优化和减少煤炭与火电利用的结构和规模。应科学测度“双碳”目标中的煤炭峰值年份，统筹规划年度煤炭占比，平衡煤电机组灵活性与保障可再生能源消纳的关系，逐渐使煤电从单纯保障电量供应向提供辅助服务转变，并通过优化电力市场价格机制提升煤炭发电的经济效益。还应合理引导化石能源有序退出，健全风光等高比例可再生能源体系，科学研判煤炭退出给煤炭产业链中采矿设备商、煤炭供应商等行业链条带来的影响，以在绿色电力与经济效益的均衡博弈中制定适宜的退碳目标和路径。

3. 构建以可再生能源电力为主体的低碳能源体系，促进多能互补与储能等能源利用形式有机结合

应明确可再生能源电力的减碳作用与路径，加速落地相关支撑政策，因地制宜地推进集中式和分布式可再生能源的系统化发展，并谨防风光新增装机目标下弃风弃光现象的出现，加速在不同地区试点与应用推广以可再生能源为主体的“源、网、荷、储”一体化能源系统，研究并解决“风光储一体化”试点中出现的电力不平衡、电力安全性不高、省内消纳和外送不畅、区域电网协同发展不足、价格传递机制欠缺等问题，探索储能成本分摊模式，落实通过加强需求侧响应为调节用电峰谷提供经济激励的机制。应从国家层面制定大型清洁能源基地总体发展规划，如在“三北”地区结合生态治理推动光伏基地的建设，总结和推广可再生能源与扶贫、农林生产、生态恢复相结合的经验与模式，因地制宜推进风光等可再生资源的开发应用与基地建设。鼓励中部和南方地区分布式风电和光伏优先发展，推动东部地区海上风电开发建设，实现东西南北中减碳措施多区域联动。此外，还应加强发电侧可再生能源电力规划与用户侧可再生能源消纳间的动态协调，避免因盲目扩增建设可再生能源装机却难以消纳而导致增加碳排放；同时，应全面探查现有可再生能源发电消纳不足的深层次原因，采取有效措施挖掘现有可再生能源消纳潜力；要充分发挥分布式可再生能源容量小、适于就地利用资源就地消纳的优点，做好分布式能源开发，实现分布式和集中式并举，更灵活地进行可再生能源电力项目的规划和建设；通过激励政策和经济手段，如阶梯电价与峰谷分时电价制度，有效提升清洁可再生能源在能源消费侧的占比，多措并举地促进可再生能源消纳，在此基础上实现碳减排。

参考文献：

- [1]何凌云，吴梦，尹芳. 可再生能源投资总量和结构对碳排放的影响研究[J]. 中国地质大学学报（社会科学版），2017, 17(1):76-88.
- [2]WANG Y, ZHANG D Y, JI Q, et al. Regional Renewable Energy Development in China: A Multidimensional Assessment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124:109797.
- [3]陈艳，朱雅丽. 中国农村居民可再生能源生活消费的碳排放评估[J]. 中国人口·资源与环境，2011, 21(9):88-92.
- [4]邱庆全，李爽，夏青. 中国可再生能源消费与能源碳排放影响关系研究[J]. 生态经济，2017, 33(2):19-23.

-
- [5]陈玉龙, 钟章奇, 吴乐英, 等. 中国可再生能源消费、对外贸易和碳排放的关系[J]. 软科学, 2017, 31(9):49-52.
- [6]王亮, 赵涛. 中国可再生能源消费、经济增长与碳排放的动态关系[J]. 技术经济, 2013, 32(11):99-104.
- [7]姚树洁, 张帅. 可再生能源消费、碳排放与经济增长动态关系研究[J]. 人文杂志, 2019(5):42-53.
- [8]肖德, 张媛. 可再生能源消费对二氧化碳排放影响的统计检验[J]. 统计与决策, 2019, 35(10):87-90.
- [9]王嘉康. 德国经济发展进程中可再生能源消费与碳排放关系的动态计量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [10]AZAM A, RAFIQ M, SHAFIQUE M, et al. Analyzing the Effect of Natural Gas, Nuclear Energy and Renewable Energy on GDP and Carbon Emissions: A multi-variate Panel Data analysis[J]. Energy, 2020, 219(13):119592.
- [11]WANG Z J, JEHLI M B, MADALENO M, et al. Does Export Product Quality and Renewable Energy Induce Carbon Dioxide Emissions: Evidence from Leading Complex and Renewable Energy Economies[J]. Renewable Energy, 2021, 171:360-370.
- [12]VURAL G. How do Output, Trade, Renewable Energy and Non-renewable Energy Impact Carbon Emissions in Selected Sub-Saharan African Countries?[J]. Resources Policy, 2020, 69:101840.
- [13]ZHANG M M, YANG Z K, LIU L Y, et al. Impact of Renewable Energy Investment on Carbon Emissions in China—An Empirical Study Using a Nonparametric Additive Regression Model[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785:147109.
- [14]OMOJU O E. 关于二氧化碳排放与可再生能源转型的经济驱动的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [15]张丽娜. 碳排放权交易对可再生能源发展的影响[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2020.
- [16]杨忠敏. 我国可再生能源技术专利、碳排放与经济增长的关系研究——基于 VAR 模型的实证分析[J]. 科技管理研究, 2012, 32(9):22-26, 67.
- [17]柳逸月. 中国能源系统转型及可再生能源消纳路径研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [18]张志耀, 赵慧娟. 能源系统工程学[M]. 太原: 山西经济出版社, 2016.
- [19]LIU P, PISTIKOPOULOS E N, LI Z. An Energy System Engineering Approach to the Optimal Design of Energy Systems in Commercial Buildings[J]. Energy Policy, 2010, 38(8):4224-4231.
- [20]DEMIRHAN C D, TSO W W, POWELL J B, et al. A Multi-scale Energy System Engineering Approach Towards Integrated Multi-product Network Optimization[J]. Applied Energy, 2021, 281:116020.
- [21]张华, 魏晓平. “能源—经济—环境”系统的约束与解约束: 理论与实证[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2015, 17(3):53-59.

-
- [22]黄新焕, 王文平, 蔡彬清. 我国能源—经济—环境系统协调发展评价[J]. 统计与决策, 2015(9):68-70.
- [23]宋杰鲲, 宋卿, 张冬, 等. 山东省能源经济环境系统预测与动态分析[J]. 华东经济管理, 2014, 28(12):6-12, 68.
- [24]张丽华, 任佳丽, 王睿. 金融发展、区域创新与碳排放——基于省际动态面板数据分析[J]. 华东经济管理, 2017, 31(9):84-90.
- [25]田泽, 景晓栋, 肖钦文. 长江经济带碳排放-产业结构-区域创新耦合度及时空演化[J]. 华东经济管理, 2020, 34(2):10-17.
- [26]IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. (2019-05-12) [2021-07-10]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [27]温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004(5):614-620.
- [28]温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5):731-745.
- [29]杨蕙嘉, 赵振宇, 叶慧男. 输电网络联通下的可再生电力消纳省际空间特征研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(1):113-120.
- [30]赵振宇, 苑曙光, 胡明辉. 基于空间聚类统计模型的风电消纳潜力区域分析[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3641-3647.