

## 中国发电企业绿色创新效率及提升路径研究

宋晓华 江水

### Research on the Green Innovation Efficiency and Improvement Path of China's Power Generation Enterprises

SONG Xiao-hua JIANG Shui

在线阅读 View online: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.05.000000](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.05.000000)

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 发电企业低碳转型绩效评价研究

Research on Performance Evaluation of Low-carbon Transition of Power Generation Enterprises in China  
华北电力大学学报(社会科学版). 2021, 2(3): 50 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.03.007](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.03.007)

##### 我国省域新能源发电效率评估及其发展战略研究

Study on Efficiency Evaluation and Development Strategy of New Energy Generation in China  
华北电力大学学报(社会科学版). 2023, 4(2): 24 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.02.004](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.02.004)

##### 考虑双碳目标的新型火力发电企业环境效率测度

Environmental Efficiency Measurements for New-Type Thermal Power Plants Considering Carbon Peak and Neutrality  
华北电力大学学报(社会科学版). 2024, 5(1): 70 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2024.01.008](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2024.01.008)

##### 考虑能源效率的物流业绿色转型研究

Research on Green Transformation of Logistics Industry Considering Energy Efficiency  
华北电力大学学报(社会科学版). 2021, 2(4): 40 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.04.005](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.04.005)

##### 基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站绿色技术创新能力评价研究

Research on the Evaluation of Green Technology Innovation Capability of Pumped-Storage Power Station Based on Combinatorial Weighting-Cloud Model  
华北电力大学学报(社会科学版). 2023, 4(4): 40 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.04.005](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.04.005)

##### 高质量的内部控制会提高企业回函效率吗?

Will High-quality Internal Control Improve the Efficiency of Corporate Response?  
华北电力大学学报(社会科学版). 2024, 5(5): 58 doi: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2024.05.006](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2024.05.006)



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.05.000000

# 中国发电企业绿色创新效率及提升路径研究

宋晓华, 江水

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

**摘要:**在中国“双碳”目标与经济社会发展方式绿色转型的背景下,绿色创新成为发电企业实现效益增长和环境友好的重要支撑。然而,当前发电企业的绿色创新评价体系尚未确立,绿色创新效率处于何种水平尚未可知。因此,本文首先构建了发电企业的绿色创新效率评价指标体系,并运用两段加性网络DEA模型测算了2020—2022年我国发电企业的绿色创新效率;最后采用模糊集定性比较分析(fsQCA),为其设计了两阶段绿色创新效率的综合改善路径。结果表明:(1)发电企业绿色创新整体效率均值仅为0.498,整体效率偏低。(2)绿色创新研发阶段效率略优于成果转化阶段效率,两阶段发展不协调。(3)绿色创新研发阶段可通过内外部协同驱动(H1、H2)实现效率提升,绿色创新成果转化阶段效率存在企业内驱型(H3)和政府主导型(H4)两种提升路径。

**关键词:**发电企业;绿色创新效率;两段加性网络DEA;fsQCA

**中图分类号:**F426.61 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-2603(2024)00-0001-12

## 一、文献综述

2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会提出碳达峰与碳中和的目标,积极应对气候变化挑战,并强调贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念。发电行业作为重要的基础能源产业,在实现“双碳”目标与绿色转型创新中承担重大责任。然而,2022年中国电力行业碳排放量占全国碳排放总量的40%以上,是最大的碳排放部门。同时,火电行业一直是中国大气污染物排放的主要源头<sup>[1]</sup>。可再生能源发电过程中几乎不产生温室气体和污染物排放,但也存在着产能过剩、绿色核心技术“空心化”的问题<sup>[2]</sup>,同时其技术创新带来的环境效益能否满足碳减排要求也尚

收稿日期:2024-04-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目:新配额制下可再生能源电力多尺度耦合交易体系及协同优化机制研究(72074074)。

作者简介:宋晓华,女,华北电力大学经济与管理学院教授,主要从事会计理论与方法、财务管理理论与公司金融、能源投融资管理与效率分析研究;江水,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:财务管理与会计,能源经济。

未可知。作为“创新驱动”和“绿色发展”的融合点<sup>[3]</sup>,绿色创新能够通过研究开发新技术、新思想、新政策,有效减少资源和能源消耗、降低环境污染,持续不断地获得经济效益<sup>[4,5]</sup>,是实现我国“双碳”目标与经济社会绿色转型关键一环,也能够为发电行业带来价值增值与环境友好双重优势<sup>[6]</sup>。

发电企业是发电行业的重要组成部分与微观主体,其绿色创新能力的提高在双碳目标与绿色转型背景下具有重要价值,也是其应对日益严苛的环境规制、赢得市场竞争力的首要选择。科学、客观地评价发电企业绿色创新效率并提出相应的改善路径,是衡量其绿色创新能力、减少绿色创新过程中所产生问题的重要工具。然而,在绿色创新效率研究视角与评价指标体系构建方面,现有研究主要集中在区域和行业的中宏观视角进行分析<sup>[7-9]</sup>,较少使用上市公司数据对微观企业的绿色创新效率进行测算,关于发电企业的绿色创新效率的研究更是微乎其微;在绿色创新效率测算方面,现有研究多采用评价模型从单阶段对绿色创新效率进行评价<sup>[10-12]</sup>,忽略了绿色创新过程的内部结构,容易造成绿色创新过程中的“黑箱”问题,不能对发电企业绿色创新各阶段效率进行深入分析;在绿色创新效率提升路径方面,大都通过方程式的显著性检验、单个影响因素的系数检验和稳健性检验等过程<sup>[13-16]</sup>,而线性关系不足以解释绿色创新效率各个影响因素间的复杂因果关系,缺少从多因素联动的视角去研究绿色创新效率的提升方案。

因此,本文尝试做以下研究:(1)以发电企业这一微观主体为研究对象,构建发电企业绿色创新评价指标体系。发电企业在生产经营中带来的碳排放与环境污染压力不容忽视,本文识别其绿色创新活动的内在关联结构,引入二氧化碳减排量、环境污染指数等指标,构建针对发电企业绿色创新效率评价的指标体系,有助于发电企业进行绿色创新能力自评估和对比。(2)运用两段加性网络 DEA 模型分析发电企业绿色创新效率,实现对发电企业绿色创新效率的全面性与系统性的评价。两段加性网络 DEA 模型能够打破“黑箱”限制,将研究重点投向发电企业绿色创新活动内部运行机制,精准定位效率欠缺环节。(3)采用模糊集定性比较分析(fsQCA)设计发电企业绿色创新研发效率与绿色创新成果转化效率的多因素联动提升路径。由于发电企业两阶段绿色创新受多个前因条件共同作用,fsQCA 能够从整体角度揭示企业规模、劳动者素质和股权集中度等多重因素组合在促进绿色创新发展中的作用与方式,更具针对性与具体性。

## 二、研究设计

### (一) 研究方法

#### 1. 两段加性网络 DEA 模型

传统的 DEA 分析方法把决策单元(DMU)的整个系统内部看作了一个不可以再进行分割的“黑箱”,不能够有效地测量出生产过程不同阶段的单独效率及不同阶段对整体效率的影响<sup>[17]</sup>。为了解决这一问题,Yao 等<sup>[18]</sup>提出了一种两段网络 DEA 的加法模型,系统整体效率为各子过程效率的算术平均。

假设有  $n$  个 DMU(这里指上市发电企业),每个 DMU 的生产过程都可以分解为两个相连续的子过程。其中:绿色创新研发阶段第  $i$  个 DMU 的投入用  $X_i$  表示,  $X_i = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_p)^T$ ; 第  $i$  个 DMU 绿色创新中间产出用  $Z_i$  表示,  $Z_i = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_s)^T$ ; 绿色创新成果的产出用  $Y_i$  表示,  $Y_i = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_q)^T$ 。用  $U = (u_1, u_2, \dots, u_p)^T$  表示输入的权重,  $V = (v_1, v_2, \dots, v_s)^T$  表示中间输出的权重,  $W = (w_1, w_2, \dots, w_d)^T$  表示最终输出的权重。则整体效率为:

$$\theta^0 = \max(W^T Y)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} U^T X_0 = 1 \\ U^T X_i - W^T Y_i \geq 0 \\ U^T X_i - V^T Z_i \geq 0 \\ V^T Z_i - W^T Y_i \geq 0 \\ U \geq \varepsilon\theta_p, V \geq \varepsilon\theta_s, W \geq \varepsilon\theta_q \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon$ 是非阿基米德无穷小量。整体效率与各阶段的效率之间存在如下关系:

$$\theta^0 = W^T Y_0 / U^T X_0 \quad (2)$$

$$\theta^1 = V^T Z_0 / U^T X_0 \quad (3)$$

$$\theta^2 = W^T Y_0 / N^T Z_0 \quad (4)$$

$\theta^0$ 表示绿色创新整体效率,  $\theta^1$ 表示绿色创新研发效率,  $\theta^2$ 表示绿色创新成果转化效率。

## 2. 模糊集定性比较分析(fsQCA)

fsQCA 是一种以案例研究为导向的方法, 对小样本数据有较强的适用性, 其基本原则假定变量之间的因果关系是复杂且可替代的, 社会现象的出现可能是不同机制的组合结果, 打破了传统定量研究中原因与结果的单一对称关系。本文研究对象为 28 家发电企业, 样本量较小, 且发电企业绿色创新效率的变动机制较为复杂, 需通过多个因素的联动来促进绿色创新效率的提高, 符合 fsQCA 的基本假定, 因此本文采用 fsQCA 方法对发电企业绿色创新效率的提升路径进行研究。

### (二) 评价指标体系建立与数据来源

发电企业绿色创新效率评价指标的构建, 既要考虑发电企业绿色创新产生的经济效益及环境效益, 又要考虑其整体绿色创新过程。传统的效率研究将创新活动看作一个黑箱, 无法从系统内在结构出发对其运行机制进行深入研究。因此, 本文将发电企业绿色创新过程可分为绿色创新研发和成果转化两个阶段, 绿色研发阶段是知识成果的产生阶段, 绿色成果转化阶段则是利用第一阶段所产生技术专利等科技成果, 通过管理创新、后续试验、开发、推广直至形成具有经济价值的商业产品, 并带来相应的环境效益。发电企业绿色创新过程如图 1 所示。

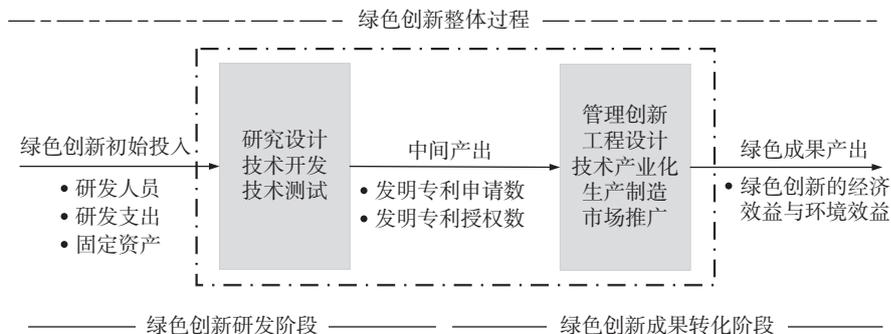


图 1 发电企业绿色创新过程

### 1. 绿色创新研发阶段的投入指标

绿色创新研发阶段离不开人力、资金和物力的投入。人力方面, 科研人员是绿色创新过程中的重中之重, 企业在创新活动中需要配置一定数量的从事研发活动的人员<sup>[19]</sup>。资金方面, 绿色创新

的研发涉及知识生产与技术进步,没有大量科研经费投入是无法实现的。物力方面,固定资产为发电企业的创新研发活动提供了一系列硬件基础,对于企业绿色创新整体运营会有着重要影响<sup>[20]</sup>。因此,本文选取发电企业研发人员数量(X1)、研发投入金额(X2)和固定资产净值(X3)分别作为绿色创新研发阶段的人力投入,财力投入和物力投入。

### 2. 绿色创新研发阶段的产出指标

绿色创新研发阶段的成果主要为科技知识类产出,专利是该阶段的常见产出指标<sup>[21]</sup>。专利包含发明、实用新型和外观设计三种,而三种专利当中的发明专利独创性强、技术门槛高且市场知名度高。因此,本文选取发明专利申请数量(Z1)和发明专利授权数量(Z2)来衡量绿色创新研发阶段的产出成果。

### 3. 成果转化阶段的投入指标

绿色创新研发阶段产生的科技成果并不会直接从整个创新系统中撤出,一般会作为一种技术投入被进行深层次的开发,继续为整个绿色创新过程服务<sup>[22]</sup>。因此,选取专利申请数(Z1)和发明专利授权数量(Z2)作为成果转化阶段的研发投入。

### 4. 成果转化阶段的产出指标

成果转化阶段的产出包括经济产出和环境产出。本文选取营业利润(Y1)来衡量成果转化阶段带来的经济效益。为体现绿色创新对环境的影响,选取发电企业二氧化碳减排量(Y2)作为环境产出,表示发电企业为减少碳排放所做的努力,弥补了已有研究大多忽略发电企业碳排放对环境的影响。同时,采用熵值法对化学需氧量、氨氮排放量、二氧化硫、氮氧化物及烟尘排放量进行负向标准化处理<sup>[11]</sup>,转化为环境综合指标(Y3),表示对环境的污染程度。(见表1)

表1 发电企业绿色创新效率评价指标体系

阶段	指标分类	指标名称
绿色创新研发	投入指标	X1: 研发人员数量(人)
		X2: 研发投入金额(万元)
		X3: 固定资产净值(亿元)
	产出指标	Z1: 发明专利申请数量(个) Z2: 发明专利授权数量(个)
绿色创新成果转化	投入指标	Z1: 发明专利申请数量(个) Z2: 发明专利授权数量(个)
		Y1: 营业利润(亿元)
	产出指标	Y2: 二氧化碳减排量(万吨) Y3: 环境污染指数

本文选取中国发电行业的A股上市公司作为发电企业绿色创新效率的研究样本。考虑到数据的可获得性以及研究结果的合理性,筛选出并收集了28家发电企业上市公司的所有指标数据,数据来源于企业年度报告、社会责任报告及国家知识产权局。

### (三) 影响因素选择与数据来源

本文结合发电企业特点与前人研究成果,从内外部两方面入手确定影响发电企业绿色创新效率的因素。内部因素包括企业规模<sup>[23]</sup>、劳动者素质<sup>[24]</sup>、股权集中度<sup>[25]</sup>;外部因素包括环境规制<sup>[26]</sup>和政府补助<sup>[27]</sup>。企业规模、劳动者素质、股权集中度分别以企业总资产金额(亿元)、本科及以上学历

占在职员工总人数比例(%)、第一大股东持股比例(%)表示,环境规制和政府补助分别以企业环保资金投入(万元)和政府补助金额(万元)表示。选取发电企业的绿色研发效率、绿色创新成果转化效率为结果变量。发电企业内外部因素与绿色创新效率复杂因果关系组态模型如图2所示。

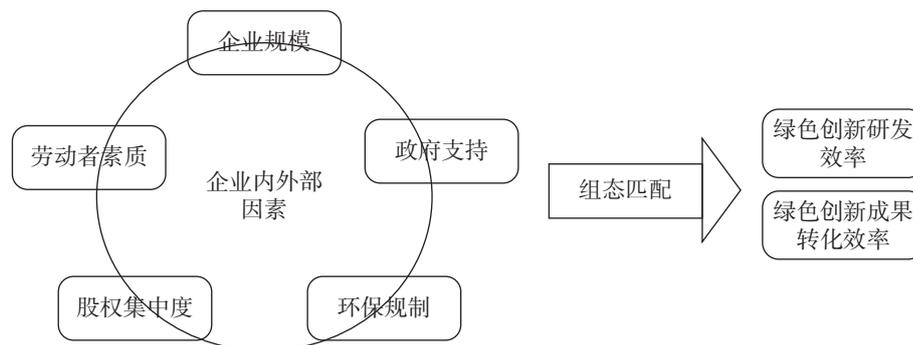


图2 发电企业内外部因素与绿色创新效率复杂因果关系组态模型

大部分发电企业在2022年前未对环保资金数据进行披露,因此本文选取2022年发电企业变量数据进行提升路径分析,数据来自发电企业年度报告、社会责任报告与2022年绿色创新两阶段效率测算结果。

### 三、实证研究

#### (一) 发电企业绿色创新效率分析

##### 1. 绿色创新整体效率

利用两段加性网络DEA进行测算,2020年—2022年发电企业绿色创新整体效率结果如表2所示。

表2 发电企业绿色创新整体效率

企业	2020年	2021年	2022年	均值
长江电力	0.957	0.924	0.707	0.863
华能国际	0.469	0.329	0.507	0.435
福能股份	0.589	0.402	0.39	0.46
国电电力	0.896	0.583	0.514	0.665
粤电力A	0.26	0.12	0.106	0.162
川投能源	0.63	0.605	0.649	0.628
上海电力	0.558	0.446	0.601	0.535
大唐发电	0.677	0.517	0.536	0.576
内蒙华电	0.606	0.612	0.57	0.596
永泰能源	0.231	0.204	0.215	0.217
深圳能源	0.473	0.305	0.403	0.393
华能水电	0.884	0.57	0.691	0.715
长源电力	0.559	0.448	0.633	0.547
广州发展	0.544	0.353	0.3	0.399
晋控电力	0.624	0.331	0.393	0.449
天富能源	0.677	0.557	0.611	0.615

续表 2

企业	2020年	2021年	2022年	均值
新天绿能	0.846	0.711	0.824	0.794
吉电股份	0.425	0.301	0.313	0.347
赣能股份	0.423	0.508	0.352	0.428
穗恒运A	0.606	0.601	0.625	0.611
韶能股份	0.416	0.24	0.345	0.334
明星电力	0.702	0.546	0.766	0.671
太阳能	0.525	0.36	0.254	0.38
芯能科技	0.671	0.611	0.593	0.625
皖能电力	0.277	0.159	0.282	0.239
东旭蓝天	0.586	0.473	0.438	0.499
中国广核	0.55	0.453	0.378	0.46
中国核电	0.521	0.301	0.106	0.309
均值	0.578	0.449	0.468	0.498

综上所述可以发现,中国发电企业绿色创新效率整体水平偏低,超过一半企业的创新整体效率值低于平均水平,各发电企业的绿色创新整体效率值均未达到 1,表明发电企业绿色创新资源利用率较差,绿色创新效率仍有进一步提升空间。从时间维度分析,2020 年-2022 年样本发电企业的创新整体效率均值分别为 0.578、0.449、0.468,绿色创新的整体效率在 2021 年出现明显的下降趋势,可能是由于 2021 年电煤价格上涨使得 2021 年 8 月以来大型发电集团煤电板块整体亏损,影响了其绿色创新进程。

## 2. 绿色创新两阶段效率

### (1) 绿色创新研发阶段效率

利用两段加性网络 DEA 进行测算,2020 年—2022 年发电企业绿色创新研发效率测算结果如表 3 所示。

表 3 发电企业绿色创新研发阶段效率

公司名称	2020年	2021年	2022年	均值
长江电力	0.976	0.859	1.000	0.945
华能国际	0.634	0.475	1.000	0.703
福能股份	0.662	0.554	0.478	0.565
国电电力	1.000	1.000	0.833	0.944
粤电力A	0.190	0.112	0.086	0.129
川投能源	1.000	1.000	1.000	1.000
上海电力	0.467	0.591	0.901	0.653
大唐发电	1.000	0.896	1.000	0.965
内蒙华电	0.999	1.000	0.742	0.913
永泰能源	0.137	0.114	0.121	0.124
深圳能源	0.516	0.356	0.483	0.452
华能水电	0.792	0.439	1.000	0.744
长源电力	0.400	0.482	0.735	0.539
广州发展	1.000	0.451	0.333	0.595
晋控电力	0.536	0.204	0.292	0.344

续表 3

公司名称	2020年	2021年	2022年	均值
天富能源	0.707	0.611	0.912	0.743
新天绿能	1.000	0.552	1.000	0.851
吉电股份	0.270	0.272	0.237	0.260
赣能股份	0.404	0.378	0.275	0.353
穗恒运A	1.000	1.000	0.934	0.978
韶能股份	0.363	0.173	0.258	0.265
明星电力	0.842	0.455	0.666	0.654
太阳能	0.699	0.449	0.231	0.460
芯能科技	0.505	0.791	0.565	0.621
皖能电力	0.204	0.109	0.254	0.189
东旭蓝天	0.848	0.566	0.353	0.589
中国广核	1.000	0.714	0.560	0.758
中国核电	0.814	0.326	0.056	0.399
均值	0.677	0.533	0.582	0.598

综上所述可以发现,中国发电企业三年间绿色创新研发阶段的效率均值为 0.598,仍有较大改进空间,且企业个体间差异较大,虽然一些企业表现出了较高的绿色创新研发效率,但其他企业在此方面表现较差,需要采取强有力的措施来提高其研发能力。2022 年绿色创新研发效率最小值为 0.056,最大值为 1,效率极差甚至接近于 1,说明 2022 年发电企业的绿色创新研发水平差距逐渐拉大。

#### (2) 绿色创新成果转化阶段效率

2020 年—2022 年发电企业绿色创新成果转化效率测算结果如表 4 所示。

表 4 发电企业绿色创新成果转化阶段效率

公司名称	2020年	2021年	2022年	均值
长江电力	0.937	1.000	0.415	0.784
华能国际	0.208	0.021	0.014	0.081
福能股份	0.480	0.127	0.206	0.271
国电电力	0.792	0.167	0.132	0.363
粤电力A	0.630	0.192	0.343	0.388
川投能源	0.260	0.209	0.299	0.256
上海电力	0.755	0.201	0.269	0.408
大唐发电	0.353	0.093	0.071	0.172
内蒙华电	0.213	0.225	0.338	0.259
永泰能源	0.917	1.000	1.000	0.972
深圳能源	0.388	0.163	0.236	0.263
华能水电	1.000	0.869	0.381	0.750
长源电力	0.958	0.378	0.494	0.610
广州发展	0.088	0.135	0.202	0.142
晋控电力	0.789	0.954	0.741	0.828
天富能源	0.635	0.470	0.282	0.462
新天绿能	0.692	1.000	0.649	0.780
吉电股份	1.000	0.407	0.634	0.680
赣能股份	0.467	0.851	0.633	0.650

续表 4

公司名称	2020年	2021年	2022年	均值
穗恒运A	0.213	0.201	0.295	0.236
韶能股份	0.563	0.624	0.682	0.623
明星电力	0.536	0.744	0.916	0.732
太阳能	0.277	0.163	0.354	0.264
芯能科技	1.000	0.384	0.643	0.676
皖能电力	0.635	0.615	0.392	0.548
东旭蓝天	0.278	0.310	0.679	0.422
中国广核	0.100	0.087	0.053	0.080
中国核电	0.161	0.226	1.000	0.462
均值	0.547	0.422	0.441	0.470

综上所述可以发现,中国发电企业绿色创新成果转化效率处于中等偏下水平,从整体上看,28家发电企业2020年到2022年3年间平均成果转化效率值为0.47,相对于绿色创新研发效率较低,企业个体间差异相对较小。大多数企业成果转化效率要低于研发效率,这表明发电企业在绿色创新过程更侧重于知识性成果的开发,而相对忽略了其所能带来的经济和环境效益。

### (二) 基于fsQCA的发电企业绿色创新效率提升路径分析

发电企业的绿色创新活动各阶段的效率会对整体绿色创新效率产生影响,基于前文分析,中国发电企业两阶段绿色创新效率均未达到DEA有效性阈值,因此有必要探索发电企业两阶段绿色创新效率的综合提升路径。

#### 1. 必要性分析

在对条件变量进行组合路径分析之前,要对单个条件变量进行必要性分析,评估单个条件是否构成发电企业绿色创新两阶段效率变化的必要条件。采用fsQCA3.0对其分析,结果如表5所示,五个变量的一致性均小于0.9,均不构成结果变量的必要条件,说明单个条件变量的变化对发电企业两阶段效率变化的解释能力较弱,需要通过多个条件变量进行组合以提升绿色创新两阶段效率。

表5 必要条件分析

变量	绿色创新研发效率		绿色创新成果转化效率	
	一致性	覆盖度	一致性	覆盖度
企业规模	0.63	0.63	0.52	0.56
~企业规模	0.57	0.65	0.79	0.75
劳动者素质	0.55	0.65	0.60	0.68
~劳动者素质	0.64	0.62	0.69	0.63
股权集中度	0.64	0.67	0.57	0.56
~股权集中度	0.54	0.58	0.71	0.72
环境规制	0.60	0.61	0.65	0.63
~环境规制	0.61	0.67	0.72	0.75
政府支持	0.57	0.75	0.50	0.62
~政府支持	0.65	0.58	0.85	0.72

#### 2. 组态分析

在组态分析过程中,本文将样本频数阈值设定为1,原始一致性的阈值设定为0.8,同时将

PRI 值设置为 0.7<sup>[28]</sup>。运用 fsQCA3.0 对发电企业绿色创新两阶段效率的组态路径进行运算, 由于 fsQCA 会给出复杂解、简单解和中间解, 本文以中间解的分析结果为主, 结合简约解对组态进行归纳, 结果整理后如表 6 所示。表中“●”表示核心条件存在, “⊗”表示核心条件缺失, “◉”表示边缘条件存在, “⊙”表示边缘条件缺失, “空格”表示该条件可以存在也可以不存在。

表 6 两阶段绿色创新效率提升路径的组态分析

条件	高绿色创新研发效率		高绿色创新成果转化效率	
	路径H1	路径H2	路径H3	路径H4
企业规模	⊙	●	⊗	⊗
劳动者素质	●	●	●	⊙
股权集中度	●	⊗	⊗	⊗
环境规制	⊗	●		●
政府支持	●	●	⊗	●
原始覆盖度	0.264	0.263	0.394	0.332
唯一覆盖度	0.111	0.11	0.185	0.124
一致性	0.854	0.94	0.982	0.936
解的覆盖度		0.374		0.517
解的一致性		0.869		0.947

### (1) 绿色创新研发阶段效率提升路径

驱动发电企业高研发效率的条件组态共有 H1、H2 两种, 发电企业开展绿色创新活动既有内部资源与能力的支持, 又有政府的外部支撑, 故本文将此两种路径命名为内外部协同驱动型。该阶段解的一致性为 0.869, 意味着条件组合可解释约 86.9% 的发电企业绿色创新研发案例; 解的覆盖度为 0.374, 意味着这两条路径可对 37.4% 的高绿色创新研发效率原因进行解释。

组态 H1 表明即使在企业规模水平较低, 缺乏有力的环境规制的前提下, 以股权集中度为核心条件, 辅之以劳动者素质、政府支持为边缘条件, 内外部要素的协同互动可有效提升发电企业绿色创新研发效率。组态 H1 的典型案件是新天绿能。该企业在股权方面较为集中, 由于大股东控制下的企业往往把追求股东的长远利益作为首要经营目标, 大股东会更注重可持续发展的路径, 重视绿色创新研发活动。同时该企业员工本科以上学历比例达到 60.84%, 并积极寻求政府支持, 积极促进绿色创新研发工作开展。

组态 H2 指出提高劳动者素质以及加强政府支持为核心条件, 辅之以企业规模的扩大与环境规制的要求, 可以促进研发效率的提升。组态 H2 的典型案件是大唐发电。该企业员工本科以上学历比例达到了 57.73%, 其政府补助资金在各样本企业中位于前列。2022 年末该公司总资产较报告初期增长 3%, 环保资金投入达到 7.8 亿元。在绿色创新研发方面, 公司聚焦“卡脖子”难题, 加快能源技术集成创新和先进技术攻关, 推动煤电清洁高效发展, 累计获得发明专利 961 件, 获得行业及以上科技奖励 432 项。

### (2) 绿色创新成果转化阶段效率提升路径

驱动发电企业提高绿色成果转化效率的条件组态共有两种, 即企业内驱型(H3)和政府主导型(H4)。该阶段解的总体一致性为 0.974, 意味着这两条路径可以解释约 97.4% 的发电企业绿色创新成果转化案例; 解的覆盖度为 0.517, 意味着这两条路径可以对 51.7% 的高绿色创新成果转化效率

原因进行解释。

组态 H3 表明企业劳动者素质的提高是促进绿色创新成果转化的关键,环境规制要求的存在与否,不影响发电企业的绿色成果转化能力。在成果转化阶段,发电企业需要将上一阶段的创新成果进行市场化改造、量产,并保证产出的绿色化。劳动者是促使这一环节实现的人力保障,劳动者素质越高,越有利于研发成果的吸收与转化。组态 H3 的典型案例是明星电力,该企业员工本科以上学历比例达到 77.58%,位居样本发电企业前列。同时,公司重视员工培养和发展,开展各类培训覆盖 100% 员工,良好的员工素质为公司全力推动绿色创新成果转化提供了良好的基础。

组态 H4 指出环境规制为核心条件,辅之政府支持为边缘条件,即使在发电企业内生力量的情况下,依然能够提升绿色创新成果转化效率。环境规制作为一种外生力量,是政府矫正企业主体产生的环境负外部性的有效举措,能够有效引导发电企业创新成果的绿色化产出。该组态表明当发电企业内生动力不足时,较强的环境规制能够倒逼发电企业绿色创新成果的转化,同时政府加强对企业绿色创新活动的柔性补贴,能够充分调动企业绿色创新成果转化的积极性。组态 H4 的典型案例是韶能股份,该企业 2022 年在环保资金投入超过 20 亿元,并努力进入政策支持的水电、抽水蓄能、清洁煤电等绿色创新转型领域,加快实现创新成果的绿色化产出。

### 3. 稳健性分析

本文选择提升案例原始一致性阈值的方式进行稳健性检验<sup>[25]</sup>,分别将绿色创新研发效率和绿色成果转化效率组态分析中的原始一致性阈值从 0.80 提高至 0.85 进行分析,显示 fsQCA 分析结果未发生改变,表明本文研究结论稳健。

## 四、结论

面对严峻的环境问题和新的经济发展模式,绿色创新已成为发电企业提升经济与环境效益的必然选择。本文以发电企业为研究对象,建立了适用于发电企业的绿色创新评价指标体系,运用两段加性 DEA 模型测算了发电企业绿色创新效率及绿色创新能力发展情况,并采用 fsQCA 针对发电企业两阶段绿色创新效率提出了相应多因素联动提升路径。得出如下结论:

(1) 中国发电企业绿色创新效率整体偏低。2020—2022 年,发电企业绿色创新整体效率位于 0.106~0.957 区间,均值仅为 0.498,绿色创新整体效率值均未达到 1,这表明大部分发电企业绿色创新的资源利用水平较低,仍有较大的改进空间。

(2) 发电企业绿色创新研发阶段效率略优于绿色创新成果转化阶段效率。2020~2022 年,发电企业绿色创新研发阶段效率均值为 0.598,成果转化阶段效率均值为 0.470,有 32% 的发电企业属于高研发和低成果转化类型。相较于绿色创新研发阶段,绿色创新成果转化为经济利益的能力较弱,带来的环境效益也不明显,是发电企业绿色创新整体发展的主要劣势所在。

(3) 多因素在互动过程中共同影响发电企业绿色创新两阶段效率,进而影响着组态效率的提升。企业规模、劳动者素质、股权集中度、环境规制和政府补助均是影响发电企业绿色创新研发和转化效率的重要因素。任一单一因素均不能构成绿色创新研发与转化效率提升的必要条件,二者效率的提升是发电企业自身资源整合与政府支持等外部要素协同合作实现的。绿色创新研发效率存在两种提升路径,其属于内外部协同驱动类型(H1、H2)。绿色创新成果转化效率存在企业内驱动型(H3)和政府主导型(H4)两种提升路径。各发电企业需根据自身资源、外部因素情况及绿色创新

效率薄弱阶段,选择不同的路径组合,实现绿色创新效率的整体提升。

[参考文献]

- [1] 王栋. 我国电力行业大气污染的控制策略 [J]. 环境工程, 2021, 39(12): 287.
- [2] 蓉倩, 郝晓燕, 赵睿. 金融科技对电力新能源企业绿色创新的影响研究 [J]. 科学管理研究, 2023, 41(02): 143-150.
- [3] Lin B Q, Chen Y F. Does electricity price matter for innovation in renewable energy technologies in China? [J]. *Energy Economics*, 2019, 78: 259-266.
- [4] Jia P R, Li K, Shao S. Choice of technological change for China's low-carbon development: Evidence from three urban agglomerations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1308-1319.
- [5] 彭硕毅, 张莹莹, 何爱平. 中国真实绿色创新效率的测算及空间特征分析 [J]. 统计与决策, 2022, 38(18): 108-113.
- [6] 黄秋爽, 曾森, 王杰峰, 等. 基于熵权-COPARS 的电力企业可持续发展能力评价研究 [J]. *科技管理研究*, 2019, 39(11): 101-106.
- [7] 韩晶. 中国区域绿色创新效率研究 [J]. *财经问题研究*, 2012(11): 130-137.
- [8] 李勋来, 张梦琦, 李泓霖. 山东省城市绿色创新效率评价与影响因素研究 [J]. 青岛科技大学学报(社会科学版), 2019, 35(04): 8-12.
- [9] 张菲菲, 张在旭, 马莹莹. 制造业绿色创新效率及增长趋势研究 [J]. *技术经济与管理研究*, 2020(02): 101-107.
- [10] 陈松奕. 高技术产业绿色创新能力评价指标体系构建及测度 [J]. 统计与决策, 2023, 39(03): 174-178.
- [11] 钱丽, 王文平, 肖仁桥. 技术异质下中国企业绿色创新效率及损失来源分析 [J]. 科研管理, 2022, 43(09): 127-138.
- [12] 张峰, 任仕佳, 殷秀清. 高技术产业绿色技术创新效率及其规模质量门槛效应 [J]. *科技进步与对策*, 2020, 37(07): 59-68.
- [13] 肖仁桥, 沈路, 钱丽. “一带一路”沿线省份工业企业绿色创新效率及其影响因素研究 [J]. 软科学, 2020, 34(08): 37-43.
- [14] 田贵贤, 谢子远, 郑长娟. 中国城市绿色创新效率的空间演化及影响因素 [J]. 江西社会科学, 2021, 41(08): 60-69.
- [15] 李诗琪, 杨晨. 金融发展对绿色创新效率的影响研究 [J]. 江西师范大学学报(哲学社会科学版), 2018, 51(06): 84-92.
- [16] 马媛, 侯贵生, 尹华. 企业绿色创新驱动因素研究——基于资源型企业的实证 [J]. 科学学与科学技术管理, 2016, 37(04): 98-105.
- [17] 宫兴国, 孙新明. 基于两阶段 DEA 模型的物流企业融资效率研究——以 31 家物流上市公司为例 [J]. *会计之友*, 2017(05): 103-107.
- [18] Chen Y, Cook W D, Li N, et al. Additive efficiency decomposition in two-stage DEA [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(03): 1170-1176.
- [19] 王丹, 鲁刚. 多元化企业科技创新人才培养与激励机制探析 [J]. *中国人力资源开发*, 2015(22): 6-13.
- [20] 孟韬, 徐广林. 基于三阶段 DEA 的独角兽上市企业创新效率评价 [J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 206-212.
- [21] 付帼, 卢小丽, 武春友. 中国省域绿色创新空间格局演化研究 [J]. *中国软科学*, 2016(07): 89-99.
- [22] 田泽, 王若梅, 肖钦文, 等. 长三角区域先进制造业绿色技术创新效率研究 [J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2021, 49(05): 137-147.

- [23] 丁显有, 陈杭盛, 田泽, 等. 我国高端制造业绿色创新效率评价研究——基于 YREB 和非 YREB 比较视角 [J]. 生态经济, 2022, 38(05): 68-74.
- [24] 张樾樾, 曹正旭, 徐士元. 创新质量对高技术产业绿色创新效率影响的异质性——基于产业集聚的门槛效应 [J]. 科技管理研究, 2021, 41(18): 10-17.
- [25] 杨晓辉, 游达明. 考虑消费者环保意识与政府补贴的企业绿色技术创新决策研究 [J]. 中国管理科学, 2022, 30(09): 263-274.
- [26] 李晓阳, 赵宏磊, 林恬竹. 中国工业的绿色创新效率 [J]. 首都经济贸易大学学报, 2018, 20(03): 41-49.
- [27] 刘端, 陈诗琪, 王雅帆, 等. 财务冗余、股权集中度与企业产品创新——基于高科技上市公司的实证数据 [J]. 财经理论与实践, 2019, 40(03): 81-87.
- [28] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中 QCA 方法的应用: 定位、策略和方向 [J]. 管理学报, 2019, 16(09): 1312-1323.

## Research on the Green Innovation Efficiency and Improvement Path of China's Power Generation Enterprises

SONG Xiao-hua, JIANG Shui

(School of Economics and Management, North China Electric Power University Beijing 102206, China)

**Abstract:** In the context of carbon peaking and carbon neutrality goals and green transformation, green innovation has become an important support for power generation enterprises to achieve efficiency growth and environmental friendliness. In this paper, the evaluation index system of green innovation efficiency of power generation enterprises is constructed, and the green innovation efficiency of power generation enterprises from 2020 to 2022 is measured by using a two-segment additive network DEA model. Finally, the fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA) is used to design a comprehensive improvement path for the efficiency of green innovation in two stages. The results show that: (1) The average overall efficiency of green innovation of power generation enterprises is only 0.498, and the overall efficiency is low. (2) The efficiency of the green innovation R&D stage is slightly better than that of the achievement transformation stage, and the development of the two stages is not coordinated. (3) In the green innovation R&D stage, efficiency can be improved through internal and external collaborative drive (H1, H2), and there are two ways to improve the efficiency in the transformation stage of green innovation achievements: enterprise internal drive (H3) and government-led (H4).

**Key words:** Power generation enterprises; green innovation efficiency; two-stage additive network DEA; fsQCA

(责任编辑: 杜红琴)