

计及时空分异的新型电力系统 低碳运行评价指标体系构建与应用

朱虹滔¹, 刘德旭¹, 吕思宇¹, 钟海旺^{2*}

- (1. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610213;
2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Construction and Application of a Spatiotemporal Differentiated Evaluation Indicator System for Low-carbon Operation in New-type Power Systems

ZHU Hongtao¹, LIU Dexu¹, LYU Siyu¹, ZHONG Haiwang^{2*}

- (1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Given the constraints of the “dual carbon” goals and “dual control” policies, accurately analyzing spatiotemporal differences in electricity carbon emissions and evaluating the low-carbon operation levels of power systems are crucial. This study proposes a new evaluation method for low-carbon operation in power systems, considering spatiotemporal differentiation. By normalizing statistical indicators across spatiotemporal scales, it addresses the limitations in indicator applicability. A multi-dimensional evaluation indicator system is constructed based on the carbon emission factor method and carbon emission flow theory, reflecting the impacts of power structure transitions, grid operations, and policy regulation. The random forest algorithm is used to optimize indicator weights, and the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method is applied for comprehensive evaluation. Applications show the method effectively reflects low-carbon operation performance, enables spatiotemporal comparisons, and supports decision-making for low-carbon management in new-type power systems.

KEY WORDS: spatiotemporal differentiation; low-carbon operation evaluation; indicator system; new-type power system; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

摘要: 在“双碳”目标与“双控”政策的双重约束下, 准确分析电力碳排放时空差异并评价电力系统低碳运行水平至关重要。该文提出一种计及时空分异的新型电力系统低碳运

行评价方法。该方法充分考虑碳排放的时空异质性, 对不同统计指标时空尺度进行归一化处理, 以克服指标适用范围的局限性; 基于碳排放因子法和碳排放流理论, 构建新型电力系统碳排放多维评价指标体系, 全面反映电源结构转型、电网运行和政策调控等对电力碳排放的影响; 最后, 采用随机森林算法优化指标权重, 采用逼近理想解排序法进行综合评价和实证应用。在新型电力系统不同运行方式、发展阶段及子系统中的应用表明, 该文指标体系与评价方法能够综合全面反映系统低碳运行水平, 直观比较不同时空状态下系统低碳性差异, 具有灵活的时空尺度选择性和广泛的适用性, 可为新型电力系统低碳运行与碳排放管理提供决策支持。

关键词: 时空分异; 低碳运行评价; 指标体系; 新型电力系统; 逼近理想解排序法

0 引言

在“双碳”战略目标愿景下, 清洁低碳已成为我国能源转型升级的硬约束而非软指标。2024年7月, 国务院办公厅印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》, 明确要求构建碳排放总量和强度双控制度体系, 推动能耗双控向碳排放双控转型^[1]。在“双碳”与“双控”的双重约束下, 电力作为碳排放中的首要碳源, 评估电力生产的清洁低碳水平具有极高的现实紧迫性。然而, 电力碳排放具有多主体、多时空、多核算单元等复杂特点^[2], 时间视角既涉及当下运行, 也涉及全生命周期, 空间范围既有仅包含单一主体的小单元, 又有覆盖全体对象的大单元。时空交错导致现有电力系统碳排放评价分析方法普遍存在局限性^[3], 不同地区电力系统或

基金项目: 国家自然科学基金项目(U24B2077)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U24B2077).

同一系统不同条件下的低碳状态缺乏可比性，即无法精确评估和对比电力系统低碳运行水平。

目前，政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指南框架下的电力系统低碳运行评价方法为碳排放因子法(carbon emission factor approach, CEFA)^[4]，该方法基于特定边界内的直接碳排放，通过碳排放因子(emission factor, EF)^[5]的相对大小评价低碳水平，该方法评价过程简便，核心在于EF这一单一指标的计算，文献[6]基于实际消纳数据和多类型能源占比改进了适用于省内各区域的综合碳排放因子计算方法；文献[7]结合电网实际数据，构建动态碳排放系数回归模型以精确计算碳排放因子。然而，受限于直接碳排放计量主体几乎只有火电，EF忽略了风电、光伏及储能等电源的全生命周期间接碳排放^[8-9]，导致高比例新能源电力系统的EF显著低估。同时，EF的统计核算及发布周期通常为年，计算结果具有滞后性^[10]，导致CEFA评价方法无法精准刻画低碳运行的季节性变化及旬、周、日等小时间尺度下的微观过程。因此，CEFA适用于时空尺度较大的行业宏观碳总量评价^[11]，无法满足新型电力系统碳要素日益多元背景下的精细化碳评价要求。

近年来，碳排放流理论(carbon emission flow theory, CEFT)被国内外学者应用于电力系统碳分析中，该理论耦合碳排放与电力网络物理特性，实现了电力系统直接和间接碳排放分布与转移规律解析^[12]，文献[13]基于CEFT提出电力系统全环节碳计量方法，通过电力碳表系统实现分钟级、用户级的精准实时碳计量。文献[14]对以CEFT为代表的碳轨迹追踪类碳核算方法落地实现及应用场景进行归纳整理，展望了其在碳排放核算体系中的应用潜力。目前，CEFT已较成熟地应用到电力系统碳计量、碳核算工作中，碳评价方面的应用较少。由CEFT的计算模型易知，CEFT系统性建立了电-碳联系，通过碳势、碳流密度等指标进行低碳运行评价具备可行性，其物理含义为碳流阻塞程度越高，系统运行低碳性越低。

然而，CEFT指标应用于碳评价目前仍存在一些堵点：1) 碳流指标刻画主体主要为电网节点、线路^[15]，主体范围需由局部扩大至全系统；2) 碳流指标刻画了小时级、分钟级的碳通量状态^[16]，对碳评价业务而言时间颗粒度过小；3) 碳评价以碳

总量和碳强度直接评价为主，碳踪迹、碳阻塞的间接评价尚缺乏评价标准^[14]。为此，电力系统低碳运行评价应用CEFT首先要解决指标时空尺度扩大问题，而后逐渐建立相关评价标准体系。

直接与间接相结合的综合评价能确保评价结果的公平性和可行性。对电力系统低碳运行而言，新能源电量增加也间接反映了系统低碳性的增强，此外，政策的干预作用也不容忽视，文献[17]表明，可再生能源政策支持与实施对电力行业用能结构和减排效应影响显著。

综上，CEFA和CEFT分别从总量和通量两个维度评价碳排放，具有各自的时间和空间分辨率，无法精确反映电力系统碳排放的时空差异性，现有的低碳性评价方法虽各有优势，却难以全面覆盖电力系统碳排放的各个维度，为系统性整合不同角度的碳排放影响因素，亟需构建更加全面且具备实用性的低碳性综合评价体系。

新能源发展主导的新型电力系统中，电力调度运行目标正经历从单纯追求经济性到低碳性与经济性并重的深刻转变。然而，与经济性目标相对明确且易于计算不同^[18]，低碳性的量化与评价面临诸多挑战，其涉及碳排放量的准确测算、电源结构的优化评价及复杂能源结构下的综合评估，相关信息难以直接获取并量化^[19]。且低碳性综合评价方法缺失，导致不同地区电力系统或同一电力系统在不同运行条件下的低碳水平难以直观得出和比较。

综上，本文在已有研究的基础上，总结电力系统碳核算的时空分异特征，提出对不同统计指标时空尺度差异进行归一化处理，以克服指标适用范围的局限性；选取或提出具有灵活时空范围适应性的评价指标，构建电力系统低碳运行多维评价指标体系，全方位、多角度反映电力系统低碳运行水平；最后，利用随机森林法(random forest, RF)与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)对电力系统低碳性进行综合评价，实现电力系统不同运行方式、发展阶段及子系统的低碳运行直观对比。

1 电力系统碳排放的时空分异理论

1.1 电力系统碳排放的碳源与碳流

电力系统碳源主要为火电，随着碳管控的精细化，电力系统碳源逐步扩大至“清洁能源发电”，其在能源转换过程中并无直接碳排放产生，但在全

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)中存在间接碳排放,作为电力系统重要组成部分,清洁能源发电 LCA 碳排在净零排放分析中应抵消一部分其所产生的碳汇。同理,电力系统碳源还包括高压变电站、长距离输电线路等电网资产设备 LCA 碳排放以及负荷侧间接碳排放责任。

图 1 为电力系统碳源与碳流示意图。由图 1 可知,电力系统碳排放具有虚拟流动特征,电源侧完

成一次能源-电力转换,向电网注入潮流和碳流,在电网各节点和线路间流动、损耗、转移、传递,最终在负荷侧各用电单元下网输出;电力系统碳排放可能发生在电网任何位置,碳排放注入电网可能发生在任何时段,具有时空分异、交错耦合的特点。因而电力系统碳排放评价分析涉及多核算主体、多组成单元、多运行状态,全面、精确的碳核算与评价分析需辨识明确碳源、碳流的时空特征。

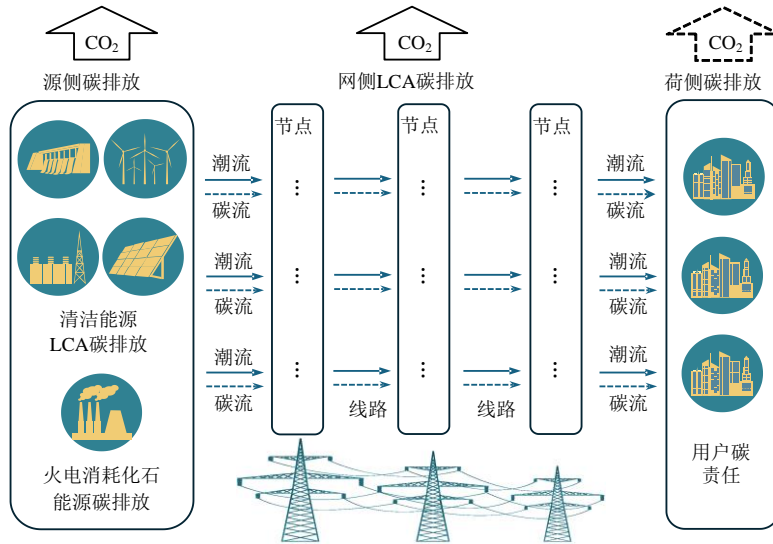


图 1 电力系统碳源与碳流

Fig. 1 Carbon sources and carbon flows in the power system

1.2 电力系统碳核算的时空分异特征

在电力系统碳排放核算与分析中,空间尺度由大至小分异有全国电网、区域电网、省级电网、地市电网以及电网内场站、线路、节点等,时间尺度由大至小分异有年度、季度、月度以及月内日、小时、分钟等,空间尺度与时间尺度叠加可产生不同尺度组合,以服务于不同核算分析任务。

图 2 为电力系统碳核算时空分异特征示意图。

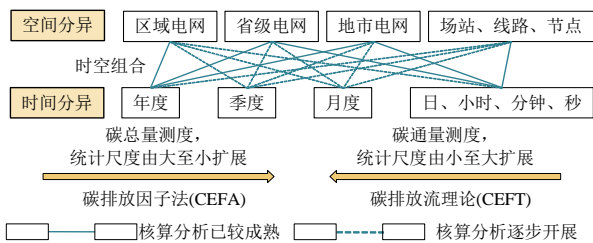


图 2 电力系统碳核算的时空分异特征

Fig. 2 Spatial and temporal differentiation characteristics of carbon accounting in the power system

由图 2 可知,CEFA 核算方法着重碳总量,时空尺度较大,目前常见指标有年度全国电网平均碳排放因子、年度区域电网碳排放因子等。CEFT 核算方法着重碳通量,用节点、线路电力含碳率表征

碳排放的空间转移,CEFT 所研究的时空尺度较小,精细化程度较高,为碳排放权、绿电、绿证等交易提供了量化基础。

总结时空尺度特点可知,CEFA 统计尺度或可由大至小扩展,在国家、区域、省级电力碳排放核算分析成熟开展后,可延伸开展地市、场站的碳总量核算分析;CEFT 统计尺度或可由小至大扩展,在综合园区、配网、地市等试点验证通过后,可延伸开展省级、区域电网的碳流计算,分析跨省跨区的碳转移。

对基于 CEFA 和 CEFT 的统计指标,其统计尺度扩展可使用平均法^[20],如长时间尺度统计变量使用短时间尺度统计变量 M 的平均值计算:

$$x_L(t_M) = G_{LL}[x_L(t_0)]\Delta t_L + \sum_{\delta=1}^{M-1} \frac{G_{LS}[x_S(t_\delta)]}{M} \Delta t_L + x_L(t_0) \tag{1}$$

式中: x_L 、 x_S 分别为长、短时间尺度统计变量; G_{LL} 为长时间尺度变量受自身的影响; G_{LS} 为长、短时间尺度变量之间的耦合; Δt_L 为时间步长。

短时间尺度统计变量则使用长时间尺度统计

变量的插值，即：

$$x_L(t_\delta) = x_L(t_0) + \frac{t_\delta - t_0}{t_M - t_0} [x_L(t_M) - x_L(t_0)] \quad (2)$$

平均法仅进行数值计算，对变量性质无要求，因此，大、小空间尺度转换也可同理使用平均法。

为此，借助时空尺度变换使 CEFA 能够用于小时空范围，CEFT 能够用于大时空范围，充分覆盖大、小时空范围克服时空分异影响，在选定分析期和分析范围后，基于 CEFA 和 CEFT 的统计指标均能应用，二者实现时空尺度统一，更全面服务于给定时空条件下的系统低碳性分析。

2 新型电力系统低碳运行多维评价指标体系

2.1 考虑碳排放时空分异的碳分析

电力系统碳分析的前置条件为封闭时空范围、统一时空尺度，选取或建立的评价分析指标应具有时间分异属性和空间分异属性，即能够分化时空范围，计算给定时空条件的碳排放特征。各指标的时空范围分化方式包括求和、取平均、取百分比等，具体应结合指标物理含义恰当选取。

此外，电力系统碳分析的目的是评价电力系统碳排放的高低，即系统低碳运行水平，受碳源、碳

流时空分布不均特性影响，碳分析指标选取或建立应多维度考虑，全方位、多角度评价分析给定电力系统的低碳性。

2.2 新型电力系统碳排放多维度评价指标

以现有 CEFA 和 CEFT 为基础，考虑电力系统碳排放的时空分异特征，结合碳排放“双控”等碳管控要求，将碳排放双控政策体系所要求的碳总量和碳强度纳入评价体系作为核心维度，增设碳踪迹、碳减排和碳控排维度，以确保评价体系既能对接国家政策要求，又能全面覆盖源网荷储各环节低碳特性以及外部环境影响，建立电力系统碳排放多维度指标体系。

碳总量、碳强度维度指标兼顾了源侧、网侧主要碳源运行和负荷侧用电负荷对系统碳排放的影响，对系统碳排放总量及强度进行测算。碳踪迹维度指标用来综合评估节点、线路、网架的碳流量、趋势和损耗。碳减排、碳控排维度指标用来反映政策约束和人为管控条件下系统碳排放产生的变化。通过 5 个不同角度选取的碳排放评价维度，能够最大化避免维度间的信息冗余。

通过系统运行数据可以计算出各维度碳排放指标，计算关系如图 3 所示。基于自选时空尺度的模拟运行，获取机组出力、机组碳排放、系统负荷

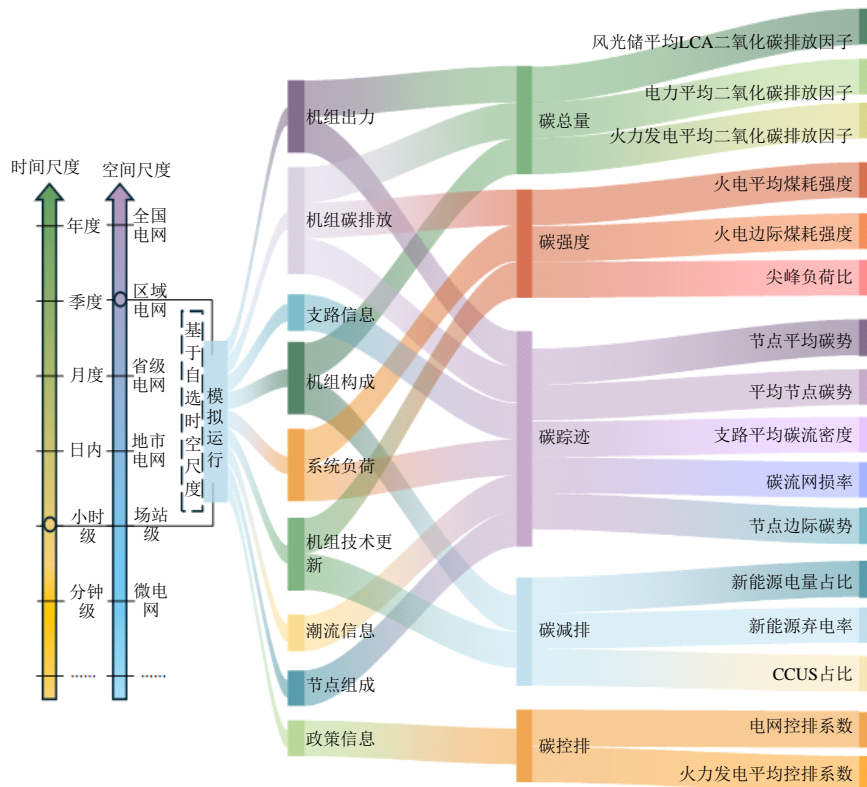


图 3 各维度碳排放指标与系统运行结果关系

Fig. 3 Relationship between multidimensional carbon emission indicators and system operation results

等运行数据,可以计算出碳总量、碳强度、碳足迹、碳减排与碳控排5个维度下的一系列碳排放指标。

各维度碳排放评价指标计算方法具体如下。

2.2.1 碳总量维度

碳总量维度评价指标利用电力系统碳排放量与发电量之间的关联,用排放因子与发电量相乘得到碳排放总量,在相同发电量条件下,排放因子越小,碳总量越低,低碳性越好。现有基于CEFA的评价指标符合该维度特征,主要有电力平均二氧化碳排放因子、风光储LCA平均二氧化碳排放因子和火力发电平均二氧化碳排放因子。在能源转型背景下,应重点关注系统发展中以风光储为代表的增量部分而非存量部分。电网资产和火电站的LCA碳排放属于基础设施层面的长期固定排放,其核算结果对短期运行优化的指导作用相对有限,因此,在LCA碳排放核算角度暂不考虑此二者。

电力平均二氧化碳排放因子计算方法和数据时效性均具有国际可比性,计算式为,

$$Q_{\text{sys},z,t} = \frac{C_{\text{sys},z,t} + \sum_r (Q_{\text{imp},r,t} E_{\text{imp},r,t})}{E_{\text{sys},z,t} + \sum_r E_{\text{imp},r,t}} \quad (3)$$

式中: Q_{sys} 为电力平均二氧化碳排放因子, $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$; z 为统计评价区域; t 为统计评价期; $C_{\text{sys},z,t}$ 为 z 区域 t 时期发电产生的二氧化碳排放量; $E_{\text{sys},z,t}$ 为 z 区域 t 时期总发电量; $Q_{\text{imp},r,t}$ 为与 z 区域互联的 r 区域 t 时期电力平均二氧化碳排放因子; $E_{\text{imp},r,t}$ 为 r 区域 t 时期向 z 区域的净送电量。

风光储LCA平均二氧化碳排放因子包括式(4)风电LCA平均二氧化碳排放因子、式(5)光伏LCA平均二氧化碳排放因子和式(6)储能LCA平均二氧化碳排放因子。计算式为:

$$Q_{\text{LCA},w,z} = \sum_{i \in w} \frac{G_i}{G_{w,z}} Q_{\text{LCA},w,i} \quad (4)$$

$$Q_{\text{LCA},pv,z} = \sum_{i \in pv} \frac{G_i}{G_{pv,z}} Q_{\text{LCA},pv,i} \quad (5)$$

$$Q_{\text{LCA},s,z} = \sum_{i \in s} \frac{G_i}{G_{s,z}} Q_{\text{LCA},s,i} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{LCA},w,z}$ 、 $Q_{\text{LCA},pv,z}$ 、 $Q_{\text{LCA},s,z}$ 分别为 z 区域风电、光伏、储能LCA二氧化碳排放因子, $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$; G_i 为 i 电站装机容量, $i \in (w,pv,s)$; $G_{w,z}$ 、 $G_{pv,z}$ 、 $G_{s,z}$ 分别为 z 区域风电、光伏、储能总装机容量; $Q_{\text{LCA},w,i}$ 、 $Q_{\text{LCA},pv,i}$ 、 $Q_{\text{LCA},s,i}$ 分别为单个风电、光伏、储能电站

LCA二氧化碳排放因子。

火力发电平均二氧化碳排放因子计算式为

$$Q_{\text{the},z,t} = \sum_{i \in \text{the}} \frac{G_i}{G_{\text{the},z}} \cdot Q_{\text{the},i,t} \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{the},z,t}$ 为 z 区域 t 时期火力发电平均二氧化碳排放因子, $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$; G_i 为 i 电站装机容量, $i \in \text{the}$; $G_{\text{the},z}$ 为 z 区域火电总装机容量; $Q_{\text{the},i,t}$ 为 i 电站发电碳排放因子。

2.2.2 碳强度维度

碳强度维度对电力系统直接碳排放的排放速率进行刻画,由于排放速率难以连续监测计量,碳强度转由火电燃料消耗强度间接表示,主要有火电煤耗强度、火电边际煤耗强度。此外,考虑到新能源出力不具有调节性,当用电负荷急剧增加时,火电参与调峰导致煤耗强度升高,因此,本文定义尖峰负荷电量比,从侧面反映负荷变化导致的煤耗强度变化,尖峰负荷电量比越高,碳强度越高。

式(8)为火电煤耗强度,式(9)为火电边际煤耗强度,式(10)为尖峰负荷电量比。

$$I_{\text{the},z,t} = (\varepsilon R_{z,t}) / E_{\text{the},z,t} \quad (8)$$

$$\Delta I_{\text{the},z,t} = dI_{\text{the},z,t} / dt \quad (9)$$

$$I_{\text{load},t} = Q_{\text{sum},t}^{\text{peak}} / Q_{\text{sum},t} \quad (10)$$

式中: $I_{\text{the},z,t}$ 为 z 区域 t 时期火电平均煤耗强度, $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; ε 为原煤标煤折算系数; $R_{z,t}$ 为 z 区域 t 时期原煤消耗量; $E_{\text{the},z,t}$ 为 z 区域 t 时期火电发电量; $\Delta I_{\text{the},z,t}$ 为火电边际煤耗强度, $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; $I_{\text{load},t}$ 为 t 时期尖峰负荷电量比; $Q_{\text{sum},t}^{\text{peak}}$ 为 t 时期尖峰负荷总电量; $Q_{\text{sum},t}$ 为 t 时期调度期内总电量。

2.2.3 碳足迹维度

碳足迹维度基于CEFT的节点碳势、支路碳流密度等指标,对电力碳排放的分布、转移、传递进行描述。由于节点碳势、支路碳流密度为小尺度、小范围测度,不能评估系统级低碳运行,考虑到碳势、碳流具有线性可加性,本文以给定时间范围取平均得空间平均值、给定空间范围取平均得时间平均值的方式,克服指标适用范围的局限性。

定义给定时间段 T 内的节点碳势加权平均值为节点平均碳势,计算式如下:

$$T_{\text{node},T} = (\sum_{i \in l} T_{\text{node},T,i} W_{\text{node},i}) / I \quad (11)$$

$$T_{\text{node},T,i} = (\sum_{i \in T} e_{\text{node},i,t}) / T \quad (12)$$

$$W_{\text{node},I} = P_{\text{node},i} / (\sum_{i \in I} P_{\text{node},i}) \quad (13)$$

式中： $T_{\text{node},T}$ 为给定时间范围 T 条件下的节点平均碳势， $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； $T_{\text{node},T,i}$ 为给定空间范围 I 条件下 i 节点的节点碳势平均值； $e_{\text{node},i,t}$ 为 i 节点在时段 t 的节点碳势； $W_{\text{node},I,i}$ 为 i 节点的节点功率权重； $P_{\text{node},i}$ 为 i 节点的节点功率。

定义给定空间范围 I 内的节点碳势加权平均值为平均节点碳势，计算式如下：

$$T_{\text{node},I} = (\sum_{t \in T} T_{\text{node},I,t} W_{\text{node},I,t}) / T \quad (14)$$

$$T_{\text{node},I,t} = (\sum_{i \in I} e_{\text{node},i,t}) / I \quad (15)$$

$$W_{\text{node},I,t} = Q_{\text{sum},t} / (\sum_{i \in I} Q_{\text{sum},i,t}) \quad (16)$$

式中： $T_{\text{node},I}$ 为给定空间范围 I 条件下的平均节点碳势， $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； $T_{\text{node},I,t}$ 为给定空间范围 I 条件下 t 时刻的节点碳势平均值； $W_{\text{node},I,t}$ 为 t 时刻的负荷权重。

定义给定时间范围 T 内的支路碳流密度加权平均值为支路平均碳流密度，计算式为如下：

$$T_{\text{line},S} = (\sum_{s \in S} T_{\text{line},S,s} W_{\text{line},S,s}) / S \quad (17)$$

$$T_{\text{line},S,s} = \frac{\int R dt}{\int P dt} = \frac{F_s}{E_s} \quad (18)$$

$$W_{\text{line},S,s} = (\sum_{t \in T} P_{B,s,t}) / (\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} P_{B,s,t}) \quad (19)$$

式中： $T_{\text{line},S}$ 为系统的支路平均碳流密度， $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； $T_{\text{line},S,s}$ 为支路 s 碳流密度平均值； R 为支路碳流率； F_s 为支路 s 碳流量； P 为支路功率； E_s 为流经支路 s 电量； $W_{\text{line},S,s}$ 为支路 s 的支路潮流权重； $P_{B,s,t}$ 为 s 支路在时段 t 的支路功率。

另外，电力系统网损对碳足迹也存在影响，定义碳流网损率来评价，碳流网损率越高，碳足迹的阻塞越高，计算式如下：

$$T_{\text{net},t} = \Delta P_{\text{net}}^{\text{loss}} / P_{\text{net}} \quad (20)$$

$$\Delta P_{\text{net}}^{\text{loss}} = [L_{\theta}, L_U] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中： $T_{\text{net},t}$ 为系统时段 t 的碳流网损率； $\Delta P_{\text{net}}^{\text{loss}}$ 为系统总网损； P_{net} 为系统总发电； L_{θ} 、 L_U 分别为网损对各相角、幅值偏导构成的系数向量； $\Delta \theta$ 、 ΔU 分别为各节点电压相角、幅值的变化量向量。

2.2.4 碳减排维度

碳减排维度对低碳运行减少的碳排放进行评

价。电力系统碳减排途径主要有新能源替代火电和二氧化碳捕获、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS)，因此，用新能源电量占比、新能源弃电率和 CCUS 占比对碳减排进行评价，计算式如下：

$$R_{\text{abs},z,t} = \frac{E_{w,z,t} + E_{\text{pv},z,t} + \sum_r (R_{\text{abs},r,t} E_{\text{imp},r,t})}{E_{\text{sys},z,t} + \sum_r E_{\text{imp},r,t}} \quad (22)$$

$$R_{\text{des},z,t} = \frac{E_{w,z,t}^{\text{loss}} + E_{\text{pv},z,t}^{\text{loss}} + \sum_r (R_{\text{des},r,t} E_{\text{imp},r,t})}{E_{\text{sys},z,t} + \sum_r E_{\text{imp},r,t}} \quad (23)$$

$$R_{\text{ccs},z,t} = \frac{C_{\text{sys},z,t}^{\text{ccs}} + \sum_r (R_{\text{ccs},r,t} Q_{\text{imp},r,t} E_{\text{imp},r,t})}{C_{\text{sys},z,t} + \sum_r (Q_{\text{imp},r,t} E_{\text{imp},r,t})} \quad (24)$$

式中： $R_{\text{abs},z,t}$ 为 z 区域 t 时期新能源电量占比； $E_{w,z,t}$ 、 $E_{\text{pv},z,t}$ 、 $E_{\text{sys},z,t}$ 分别为 z 区域 t 时期风电发电量、光伏发电量和全网总发电量； $R_{\text{abs},r,t}$ 为与 z 区域互联的 r 区域 t 时期新能源电量占比； $E_{\text{imp},r,t}$ 为 r 区域 t 时期向 z 区域的净送电量； $R_{\text{des},z,t}$ 为 z 区域 t 时期新能源弃电率； $R_{\text{des},r,t}$ 为与 z 区域互联的 r 区域 t 时期新能源弃电率； $R_{\text{ccs},z,t}$ 为 z 区域 t 时期 CCUS 占比； $C_{\text{sys},z,t}^{\text{ccs}}$ 为 z 区域 t 时期 CCUS 碳减排量； $R_{\text{ccs},r,t}$ 为与 z 区域互联的 r 区域 t 时期 CCUS 占比；其余符号释义同前。

2.2.5 碳控排维度

考虑政策调控、主动控排对电力碳排放的影响，构建碳控排维度评价指标对其进行表征。考虑到政策及人为干预的主观性，本文将碳排放核算主体实际产生碳排放与目标管控碳排放的比值定义为碳控排系数，碳控排系数越小，说明控排力度越大，核算主体低碳性越高。电力系统碳排放核算主体通常为全系统和火电，其中，火电作为电力碳排放重点监管对象与核算主体，可对全网火电企业碳控排力度取平均，得到火电平均控排系数。系统控排系数与火电平均控排系数计算式为：

$$C_{\text{sys},z,t} = C_{\text{sys},z,t} / C_{\text{ctrl},z,t} \quad (25)$$

$$C_{\text{the},t} = \sum_{i \in \text{the}} C_{\text{the},i,t} / I_{\text{the}} \quad (26)$$

$$C_{\text{the},i,t} = C_{\text{the},i,t} / C_{\text{ctrl},i,t} \quad (27)$$

式中： $C_{\text{sys},z,t}$ 为 z 区域 t 时期系统控排系数； $C_{\text{ctrl},z,t}$ 为 z 区域 t 时期目标管控碳排放量； $C_{\text{the},t}$ 为火力发电平均控排系数； $C_{\text{the},i,t}$ 为 i 火电厂 t 时期控排系数； I_{the} 为火电厂总数； $C_{\text{the},i,t}$ 为 i 火电厂 t 时期碳排放量； $C_{\text{ctrl},i,t}$ 为 i 火电厂 t 时期目标管控碳排放量。

3 基于RF-TOPSIS的电力系统低碳运行综合评价方法

所构建的新型电力系统指标体系具备多维、多属性特征,同时指标间存在复杂非线性关系,亟须构建既能综合刻画指标耦合关系,又能直观反映不同系统或同一系统不同状态低碳运行水平对比的评价方法。在选择多维综合评价方法时,应从两方面考虑:一是确保赋权过程客观、避免信息冗余;二是使加权评价对多个目标尽量全面。

现有权重确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法^[21]。由于主观方法依赖人为判断,难以适

应电力系统低碳运行分析的复杂场景,而传统的熵权法等在处理指标量纲差异及非线性关联时亦存在不足^[22]。为此,本文借助RF算法,通过构造大量决策树捕捉指标间复杂非线性关系,利用特征重要性自动客观量化各指标对决策目标的贡献^[23],在评价方法上,采用TOPSIS处理多特征、多目标问题^[24]。该方法通过对数据矩阵进行正向归一化,再结合RF提取的权重构建评估矩阵,使评估结果与RF捕捉的指标复杂关系相结合,进而实现对电力系统多维指标的综合、客观评价,具备较高的方法互补性。综上,本文提出一种基于RF-TOPSIS的多维指标综合评价方法如图4所示。

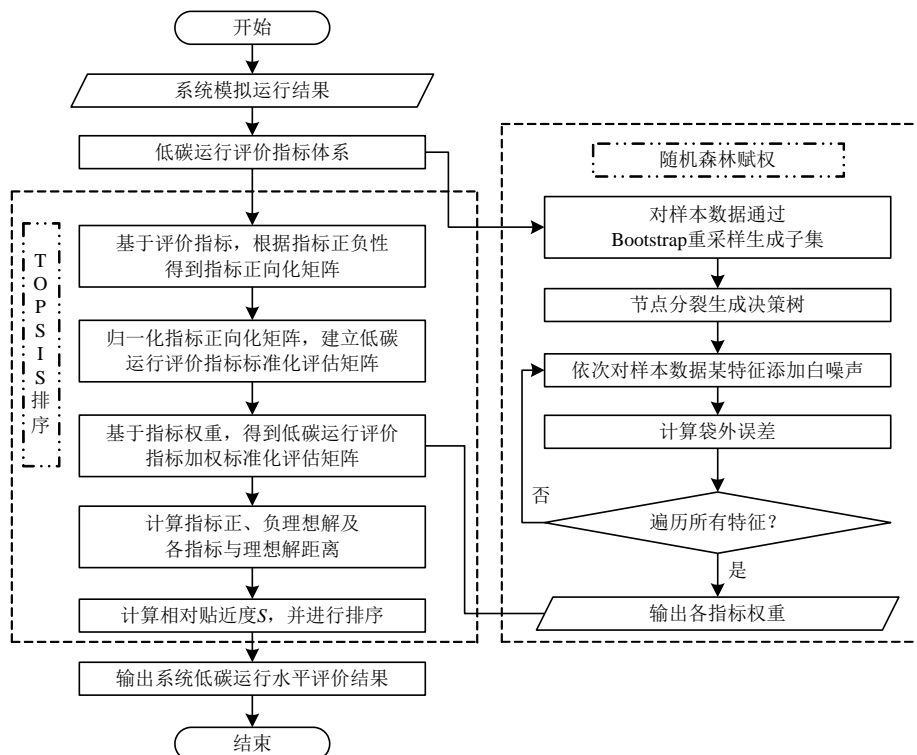


图4 RF-TOPSIS综合评价方法

Fig. 4 RF-TOPSIS comprehensive evaluation method

首先,通过系统模拟运行数据得到碳排放指标;然后,基于RF为指标赋予权重;最后,通过TOPSIS方法对系统低碳运行水平进行优劣排序。

3.1 基于RF的权重计算

RF是一种基于集成学习的机器学习算法,广泛应用于特征选择问题当中。其通过结合多棵决策树的预测结果,提高整体模型的预测精度和鲁棒性。在特征选择方面,RF具有降低过拟合风险、可处理高维数据能力等优势^[25]。

RF的实施包括以下步骤:首先,通过自助法(bootstrap)对原始数据集进行有放回的重复随机抽样,抽取到的数据用于生成子集并划分为训练集和

测试集,未抽取到的数据被称为袋外数据(out of bag, OOB);随后,对每个子集构建一棵决策树,并利用训练集对模型进行训练;模型训练完成后,对测试集进行预测,并将所有决策树的预测结果进行加权平均以生成最终的预测结果。

在决策树进行训练与预测时,通常会使用袋外数据评估模型误差。通过人为随机改变某特征的取值(对特征增加白噪声),可计算出相应的OOB误差,并与原始数据的OOB误差进行对比得到特征重要性程度^[25],特征权重计算式如下:

$$X_i^{\text{importance}} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K |e_{\text{OOB}2,j} - e_{\text{OOB}1,j}| \quad (28)$$

式中： $X_i^{importance}$ 为第 i 个特征的权重； K 为决策树数量； $e_{OOB1,j}$ 、 $e_{OOB2,j}$ 分别为第 j 棵决策树打乱特征值前后的 OOB 误差。

在基于真实系统数据构建的训练模型，将系统低碳评价指标作为特征加入白噪声，从而计算相应的 OOB 误差以及特征权重，并通过 RF 的训练-预测过程，可有效避免多维度指标之间的重叠或矛盾，得到多维指标复杂关系下的指标权重。

3.2 基于 TOPSIS 法的低碳运行评价排序

TOPSIS 方法适合解决有限方案的多目标决策问题^[26]，其主要特点在于综合考虑多个指标的权重和影响，通过对正向指标和负向指标的统一处理，实现对多维指标体系的全面评价。该方法在面对复杂性、不确定性较高的多目标问题时，能够提供一种客观而可靠的分析框架，通过对各方案下的指标进行综合计算得到优劣排序，使评价结果更具科学性和准确性^[27]。

TOPSIS 方法通过对数据正向化与标准化处

理，确保不同类型指标在相同尺度上可比，并结合 RF 权重生成加权标准化评估矩阵；基于评估矩阵可计算每个指标对应的正、负理想解，并对每一个待评估方案计算其指标与正理想解的距离 D_+ 、与负理想解的距离 D_- ；最后，通过式(29)计算各方案与最优解的相对贴近度，并以此排序来评价系统低碳运行水平的优劣。

$$S = \frac{D_-}{D_+ + D_-} \quad (29)$$

4 应用分析

4.1 基于 RF 的指标权重计算

利用 RF 对某实际电力系统运行数据、碳排放数据进行训练，得到各评价指标权重优化结果，所用算例参数详见文献[28]。同时，为验证 RF 改进赋权的有效性，将权重计算结果与传统信息熵赋权进行对比。计算得到 RF 赋权与信息熵赋权的指标权重如图 5 所示。

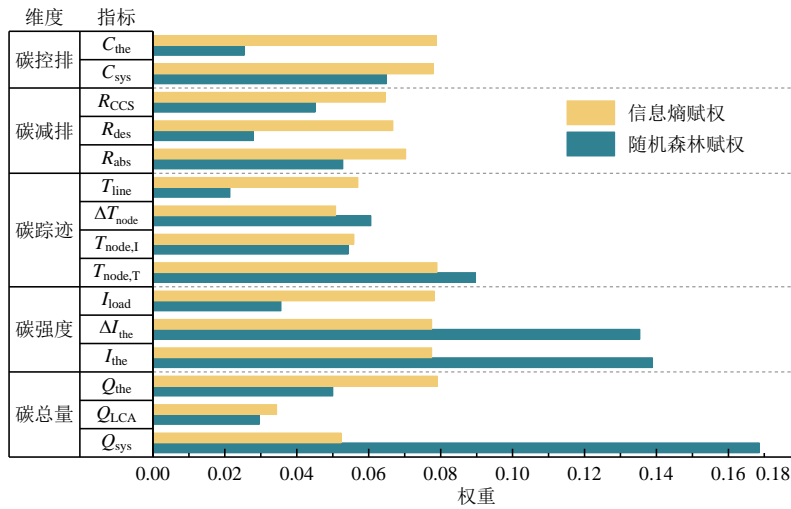


图 5 RF 与熵权法下碳排放指标权重

Fig. 5 Weight of carbon emission indicators under RF and entropy weight method

由图 5 可知，指标权重总和为 1，但两方法权重分布差异较大，信息熵赋权指标权重最低 0.034，最高 0.079，分布相对均匀；RF 赋权指标权重最低 0.021，最高 0.169，分布相对离散，对碳总量、碳强度指标赋予了高权重，对碳踪迹、碳减排和碳控排指标则赋予了较低权重。事实上，根据现行的双控制度体系，碳总量与碳强度在碳排放约束方面具有核心地位，其相对大小直接反映碳排放结果。而其他维度指标与碳排放结果之间存在推导关系链，例如，新能源占比指标相对大小间接反映系统火发电量占比以及系统碳排放高低，是对系统低碳运

行的间接刻画，侧面反映系统低碳运行水平。因此，RF 赋权较信息熵赋权更贴近实际应用需要，对重要程度较高的关键指标赋予高权重，对重要程度次之的指标则赋予较低权重。

将 RF 训练所得指标权重应用于 TOPSIS 评价模型中，对电力系统低碳运行水平进行综合评价和对比。指标权重表明，在对新型电力系统低碳运行综合评价时，碳总量与碳强度维度对评价结果影响程度最高，而其他维度影响程度相对较低。

4.2 不同条件系统低碳运行综合评价

为验证本文指标体系与评价方法的广泛适用

性,设置不同系统条件,开展低碳运行综合评价与分析,案例设置及说明如表1所示,共设置3项案例,分别对比评价不同运行方式、不同发展阶段及不同地区系统低碳运行差异。

表1 系统低碳运行综合评价案例设置

Table 1 Cases setting for comprehensive evaluation of low-carbon operation of the system

案例序号	案例名	案例说明	应用系统
I	不同运行方式	对比评价不同运行方式系统低碳性的差异	改进的IEEE30节点系统
	不同发展阶段	对比评价不同时期系统低碳性的差异	改进的IEEE30节点系统
III	不同地区	对比评价不同地区系统低碳性的差异	某区域电力系统

其中,案例I是同一系统不同运行方式(短期)的低碳性对比,依据新型电力系统的高比例新能源特征,对风光储独立运行和风光储联合运行两种典型运行方式进行对比,应用系统为改进的IEEE30节点系统,系统拓扑及基本参数详见文献[28]。

案例II是同一系统不同发展阶段(中长期)的低碳性对比,参考文献[29],考虑新型电力系统中长期发展趋势,设置现阶段、加速转型期、总体形成期和巩固完善期4个阶段进行对比评价,应用系统仍采用改进的IEEE30节点系统,各阶段负荷及风光渗透率变化如表2所示。

表2 同一系统不同阶段负荷与风光渗透率变化

Table 2 Variations in load and wind-solar penetration rate at different stages of the same system

场景	最大负荷/MW	风光渗透率/%
现阶段	1086.6	28.6
加速转型期	1253.5	39
总体形成期	1567.2	51.9
巩固完善期	1819.4	65.1

案例III对不同地区电力系统低碳运行差异进行分析,应用系统为某实际区域电力系统,该系统包含5个地区子系统,各子系统负荷曲线和机组构成等数据采用南方电网“十四五”发展规划中5省份2025年数据,各类型电源装机容量如表3所示。

表3 各类型电源装机容量

Table 3 Installed capacity of various types of power sources

地区	火电/万kW	水电/万kW	风电/万kW	光伏/万kW	储能/万kW
1	14636	848	2536	2811	600
2	3688	2033	1843	800	120
3	4673	2311	900	3100	40
4	1829	9066	2269	1794	40
5	1281	94	149	540	60

以上述系统模拟运行结果为输入,分别计算各评价指标,并结合指标权重优化结果,对系统低碳性进行综合评价,具体结果与分析如下。

4.2.1 不同运行方式低碳运行评价分析

对案例I进行计算,得到新型电力系统风光储独立与联合运行的指标值差异总体较小,碳总量维度指标独立运行略高于联合运行,而碳控排维度指标独立运行略低于联合运行,同时,存在碳强度维度指标互有高低,仅凭指标比较无法评价哪种运行方式更具低碳性。

利用RF-TOPSIS对两种运行方式的评价指标进行综合评价与排序,得到不同运行方式低碳运行水平排序如表4所示。由表4可知,风光储独立运行方式下,系统低碳运行与理想解相对贴度为0.349,低于联合运行方式下的0.651,且联合运行方式低碳性排序为1,高于独立运行方式排序。由此可知,新型电力系统采用风光储联合运行方式实现的低碳效果优于独立运行方式,利用本文方法可为新型电力系统制定低碳运行方式提供决策支持。同时可知,RF-TOPSIS评价方法不仅简便、直观,而且相对贴度及其排序能够对指标值的细微差异进行放大,实现差异较小的不同运行方式的低碳性对比。

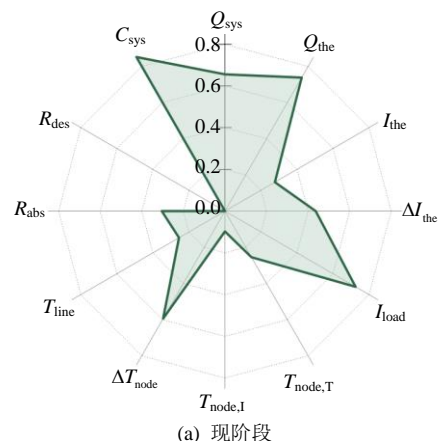
表4 不同运行方式系统低碳运行水平排序

Table 4 Ranking of low-carbon operation levels for systems with different operating modes

场景	D_+	D_-	相对贴度	排序结果
风光储独立运行	0.022	0.012	0.3489	2
风光储联合运行	0.012	0.022	0.6511	1

4.2.2 不同发展阶段低碳运行评价分析

对案例II进行计算,得到不同发展阶段低碳运行评价指标值如图6所示。由图6可知,随着新型电力系统发展阶段的递进,碳总量、碳强度、碳控



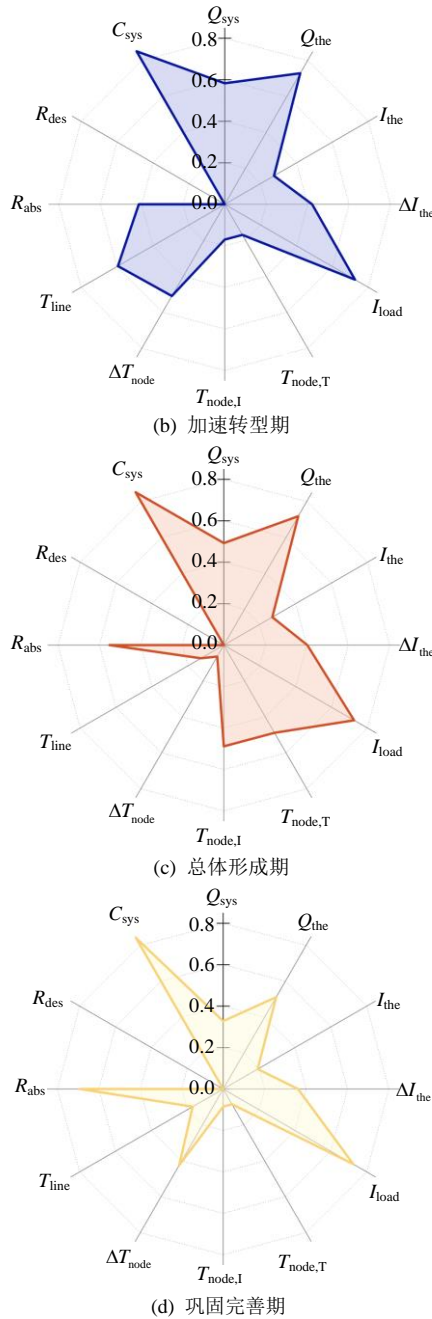


图 6 不同发展阶段低碳运行评价指标值
Fig. 6 Evaluation index values for

low carbon operation at different stages of development

排评价指标值总体呈减小趋势，如电力平均二氧化碳排放因子由现阶段的 0.655，逐步减小至 0.583、0.492，至巩固完善期减至最低 0.328；火电煤耗强度由现阶段的 0.261，逐步减小至 0.258、0.254，至巩固完善期减至最低 0.181。碳足迹和碳减排评价指标则由于各阶段电源和负荷的差异，单调变化趋势不统一或不明显，如碳减排维度下新能源电量占比呈增加趋势，而新能源弃电率呈减小趋势；碳足迹维度下评价指标均先增大，而后减小。

将各维度下的二级指标依据 RF 权重进行加权

平均得到维度评价价值，以简化、直观对比各评价维度在不同时期的变化，得到不同发展阶段低碳运行评价维度值如图 7 所示。

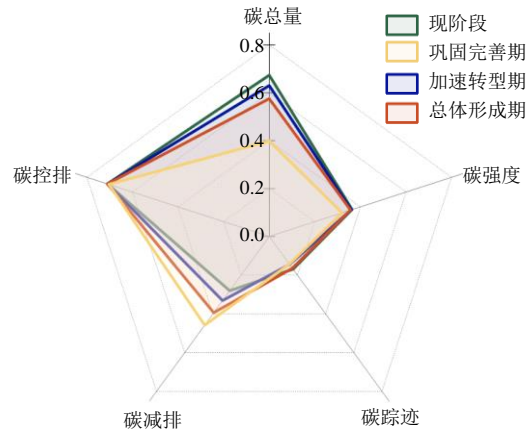


图 7 不同发展阶段低碳运行评价维度值

Fig. 7 Dimension values for low-carbon operation evaluation at different stages of development

由图 7 可知，随着新型电力系统建设不断推进，系统碳总量与碳强度维度减小，碳减排维度增大，其余维度变化不明显。这是由于碳总量、碳强度和碳足迹评价维度与系统低碳运行理想解方向相反，其值越小，系统低碳性越高；碳减排评价维度则与系统低碳运行理想解方向一致，其值越大，代表系统低碳性越高；碳控排评价维度基本无变化，因其受到系统能源结构、减排手段、排放管控等多因素的影响，案例输入数据有限条件下难以有效量化及体现差异。随着新能源渗透率不断提高及火电电量占比逐渐减少，系统低碳性的理论变化方向为提高，故各维度有此变化趋势。

进一步计算不同发展阶段低碳运行水平排序，同时采用传统熵权 TOPSIS 方法开展评价以作对比，结果如表 5 所示。由表 5 可知，新型电力系统低碳运行水平巩固完善期>总体形成期>加速转型期>现阶段，与理论变化趋势一致，说明所建多维评价指标体系及综合评价方法能准确评价同一系统不同时期低碳运行的差异；而传统方法则得到巩

表 5 不同阶段低碳运行水平评价综合排序结果

Table 5 Comprehensive ranking results of low-carbon operation levels in different stages of system

场景	熵权 TOPSIS 评价排序	RF-TOPSIS 评价结果			
		D_+	D_-	相对贴近度	排序结果
现阶段	3	0.228	0.049	0.176	4
加速转型期	2	0.219	0.058	0.208	3
总体形成期	4	0.195	0.081	0.294	2
巩固完善期	1	0.002	0.276	0.999	1

固完善期>加速转型期>现阶段>总体形成期的结论，这与电力系统低碳发展趋势不符，反映出传统方法不能合理评估新型电力系统低碳状态，本文方法具备有效性和突出优势。

进一步开展指标灵敏度分析，控制其余指标不变条件下逐一微调单一指标，观察其对综合评价结

果影响。结果显示，碳总量和碳强度指标的微小变化可引起评价结果的明显波动，而其他指标影响较弱，这与RF赋权结果中指标权重分布基本一致。

4.2.3 不同地区低碳运行评价分析

对案例III进行计算，得到不同地区低碳运行评价指标值如图8所示。

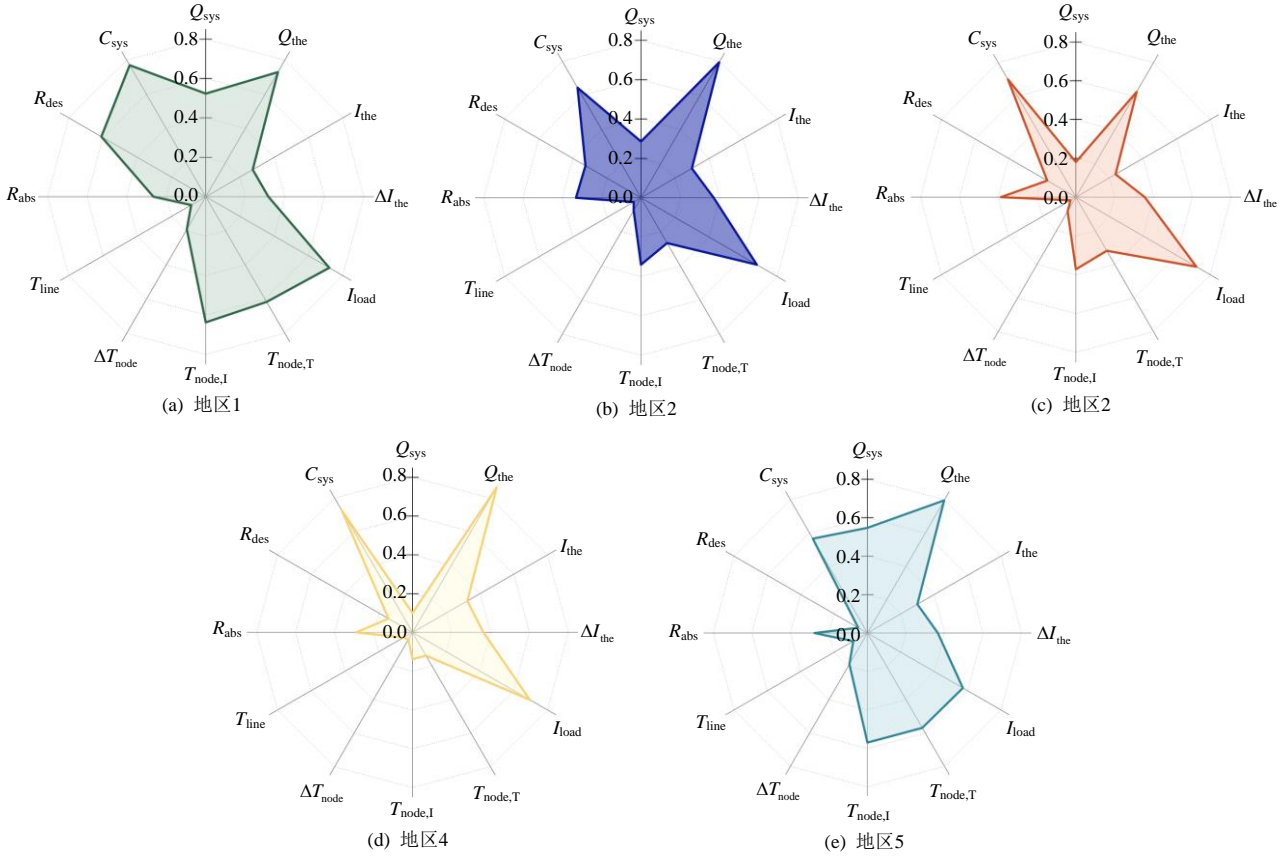


图8 不同地区低碳运行评价指标值

Fig. 8 Evaluation index values for low carbon operation in different regions

由图8可知，地区1与5评价指标值总体相近，即除火电煤耗强度、火电边际煤耗强度、节点边际碳势和支路碳流密度4个指标较小外，其余指标均较大；地区2、3和4评价指标值总体相近，即除火力发电平均二氧化碳碳排放因子、尖峰负荷电量比和系统控排系数3个指标较大外，其余指标均较小。这种多维评价指标的相似性和差异性与地区电源组成、网架及负荷有关。例如，电力平均二氧化碳排放因子受到火电出力占比影响较大，火电占比最大的地区1和5对应指标值明显高于其余地区；而新能源弃电率受到负荷变化与新能源占比等因素影响，即使地区1风光装机容量最大，受到日内较大负荷变化影响，其实际新能源弃电率指标明显高于其他地区。

进一步做出不同地区低碳运行评价维度值如

图9所示。由图9可知，在碳总量维度，低碳运行水平地区4>地区3>地区2>地区1>地区5，而在其他维度则无此排序，说明不同维度的评价角度不同，得到的评价结果也不同，单一维度的对比评价较片面。

对5个地区进行综合评价，得到传统方法与本文方法对不同地区低碳运行水平的排序如表6所示。根据本文方法，对于该区域电力系统的5个地区子系统，低碳运行水平地区4>地区3>地区2>地区1>地区5，与碳总量维度一致，体现出综合评价方法能够充分抓住主要变化的指标及维度，排除无明显差异指标及维度的干扰，对5个地区子系统低碳性做出综合评价；而传统方法评价低碳性地区2>地区3，从指标结果来看，地区2电力平均二氧化碳碳排放因子及新能源弃电率指标明显高于地区3，

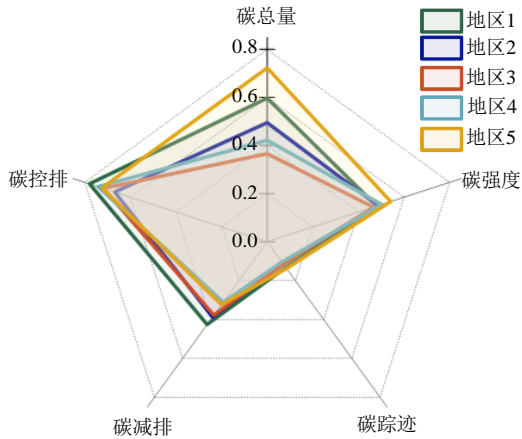


图 9 不同地区低碳运行评价维度值

Fig. 9 Dimension values of low-carbon operation evaluation in different regions

表 6 不同地区低碳运行水平评价综合排序结果

Table 6 Comprehensive ranking results of low-carbon operation levels for different regions

场景	熵权 TOPSIS 评价排序	RF-TOPSIS 评价结果			
		D_+	D_-	相对贴近度	排序结果
地区 1	4	0.301	0.055	0.155	4
地区 2	2	0.213	0.143	0.401	3
地区 3	3	0.167	0.188	0.530	2
地区 4	1	0.091	0.265	0.745	1
地区 5	5	0.335	0.021	0.059	5

说明地区 2 低碳水平应低于地区 3，表明传统方法在新型电力系统碳评价方面存在局限性。此外，对地区 2 各指标进行灵敏度分析再与地区 3 进行比较可知，各指标变化与权重分布吻合，表明评价结果稳定可靠。

由分析结果可知，对于风光资源富集的地区 1，可以通过优化储能配置与利用、完善新能源消纳机制降低新能源弃电率；对于传统能源依赖严重的地区 5，可以推进煤电能效改造并提高新能源消纳量以减少火电依赖。

综上，在不同运行方式、发展阶段及子系统中的应用表明，所建新型电力系统低碳运行多维评价指标体系与综合评价方法能够开展同一系统不同运行条件、不同地区电力系统的低碳性对比与评价分析，具有广泛的适用性。

5 结论

本文基于电力系统碳排放时空分异特征，构建了电力系统低碳运行多维评价指标体系与 RF-TOPSIS 综合评价方法，通过多场景算例验证了其科学性与实用性，主要结论如下：

1) 所建指标体系突破传统评价方法的单一片

面性和时空局限性，通过时空尺度自适应转换，实现不同条件下低碳运行水平的可量化和可对比，为电力系统碳评价与管理提供了精细化、灵活化的分析工具。

2) 所提方法在电力行业关键场景中具有广泛应用价值，将本文低碳评价作为前置工作，嵌入电网规划可支撑实践不同区域碳均衡与低碳改造，嵌入调度运行可助力实现低碳目标与经济性、安全性目标的协同优化，嵌入电碳市场业务可辅助碳交易组织与碳配额制定。

3) 本文研究为相似行业碳评价与管理提供了分析范式，指标维度与 RF-TOPSIS 评价方法可迁移拓展至建筑、冶金、交通等高碳行业，支撑差异化碳管控政策制定与机制设计，助力推动多行业低碳转型与“双碳”目标早日实现。

参考文献

- [1] 国务院办公厅. 加快构建碳排放双控制度体系工作方案 [EB/OL]. (2024-07-30)[2024-08-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966080.htm. General Office of the State Council of the People's Republic of China. Work plan for accelerating the establishment of a dual-control system for carbon emissions[EB/OL]. (2024-07-30)[2024-08-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966080.htm(in Chinese).
- [2] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323-1342. ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323-1342(in Chinese).
- [3] 吴杏平, 康重庆, 袁启恒. 我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 1-18. WU Xingping, KANG Chongqing, YUAN Qiheng. A review of the impact factors of carbon emissions and the accounting methods for electricity carbon emissions in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 1-18(in Chinese).
- [4] LI Yaowang, YANG Xuxin, DU Ershun, et al. A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry[J]. Applied Energy, 2024, 359: 122681.
- [5] 江亿, 张吉, 张涛, 等. 电力动态碳排放责任因子[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7024-7038. JIANG Yi, ZHANG Ji, ZHANG Tao, et al. Dynamic

- carbon emission responsibility factor of electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7024-7038(in Chinese).
- [6] 彭天海, 蔡萱, 瞿子涵, 等. 计及大规模电网分级分区解耦的区域电网供电碳排放因子计算模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 894-904.
PENG Tianhai, CAI Xuan, QU Zihan, et al. Research on calculation model of power supply carbon emission factor in regional Power grid considering hierarchical and regional decoupling of large-scale power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 894-904(in Chinese).
- [7] YU Hui, YANG Yang, LI Bin, et al. Research on the community electric carbon emission prediction considering the dynamic emission coefficient of power system[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 5568.
- [8] POLVERINI D, ESPINOSA N, EYNARD U, et al. Assessing the carbon footprint of photovoltaic modules through the EU Ecodesign Directive[J]. Solar Energy, 2023, 257: 1-9.
- [9] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2235.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2235(in Chinese).
- [10] 孙菁阳, 孔祥玉, 陈一, 等. 电力系统全环节碳排放核算方法综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(18): 1-13.
SUN Jingyang, KONG Xiangyu, CHEN Yi, et al. Review of carbon emission accounting methods for power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(18): 1-13(in Chinese).
- [11] 易俊, 赵明欣, 秦晓辉, 等. 电碳协同理论技术探索与实践[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(19): 7427-7443.
YI Jun, ZHAO Mingxin, QIN Xiaohui, et al. Review of exploration and practice of electric-carbon coordination theory and technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(19): 7427-7443(in Chinese).
- [12] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85(in Chinese).
- [13] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳排放计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12(in Chinese).
- [14] 李姚旺, 刘昱良, 杨晓斌, 等. 计及电量交易信息的用电碳计量方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 439-450.
LI Yaowang, LIU Yuliang, YANG Xiaobin, et al. Electricity carbon metering method considering electricity transaction information[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 439-450(in Chinese).
- [15] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 10-16.
KANG Chongqing, CHENG Yaohua, SUN Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16(in Chinese).
- [16] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1683-1691.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1691(in Chinese).
- [17] 王育宝, 樊鑫. 电力行业碳强度配额交易市场与可再生能源支持政策协同减碳机制研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(8): 31-41.
WANG Yubao, FAN Xin. Carbon reduction through the synergy between carbon intensity quota trading market and renewable energy support policy in electric power industry[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(8): 31-41(in Chinese).
- [18] ZHONG Haiwang, YAN Xinfei, TAN Zhenfei. Real-time distributed economic dispatch adapted to general convex cost functions: a secant approximation-based method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2089-2101.
- [19] WANG Rutian, WEN Xiangyun, WANG Xiuyun, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. Applied Energy, 2022, 311: 118664.
- [20] 陈垣, 张波, 谢帆, 等. 电力电子化电力系统多时间尺度建模与算法相关性研究进展[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 172-183.
CHEN Yuan, ZHANG Bo, XIE Fan, et al. Research progress of interrelationship between multi-time-scale modeling and algorithm of power-electronized power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 172-183(in Chinese).

- [21] 袁文腾, 陈亮, 王春波, 等. 基于氨储能技术的电转氨耦合风-光-火综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 6992-7003.
YUAN Wenteng, CHEN Liang, WANG Chunbo, et al. Bi-level optimal scheduling of power-to-ammonia coupling wind-photovoltaic-thermal integrated energy system based on ammonia energy storage technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6992-7003 (in Chinese).
- [22] 甘芸芸, 陈涛, 刘欣宇, 等. 基于改进 TOPSIS 组合赋权法的配电自动化通信系统多属性决策设计[J]. 电力与能源, 2024, 45(3): 300-307, 323.
GAN Yunyun, CHEN Tao, LIU Xinyu, et al. Multi-attribute decision-making design for distribution automation communication systems based on improved TOPSIS combined weighting method[J]. Power & Energy, 2024, 45(3): 300-307, 323(in Chinese).
- [23] BROWN M G L, PETERSON M G, TEZAUR I K, et al. Random forest regression feature importance for climate impact pathway detection[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2025, 464: 116479.
- [24] 杨晓梅, 郭林明, 肖先勇, 等. 基于可调品质因子小波变换和随机森林特征选择算法的电能质量复合扰动分类[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3014-3020.
YANG Xiaomei, GUO Linming, XIAO Xianyong, et al. Classification of multiple power quality disturbances based on TQWT and random forest feature selection algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3014-3020(in Chinese).
- [25] 魏勤, 陈仕军, 黄炜斌, 等. 利用随机森林回归的现货市场出清价格预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1360-1367.
WEI Qin, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Forecasting method of clearing price in spot market by random forest regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1360-1367(in Chinese).
- [26] CHEN Man, ZHU Hongtao, PENG Yumin, et al. Decision-making method for pumped storage power stations in the electricity energy and frequency regulation markets[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 10(4): 60-72.
- [27] 孔维进, 刘洋, 曹云东, 等. 基于改进加权 TOPSIS 与 Pelt 算法的交流接触器退化状态划分研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7306-7316.
KONG Weijin, LIU Yang, CAO Yundong, et al. AC contactor degradation state classification based on improved weighted topsis and pelt algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7306-7316 (in Chinese).
- [28] 谢平平, 吕思宇, 刘德旭, 等. 考虑火电碳排放强度区间分异的火风光储系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 142-151.
XIE Pingping, LYU Siyu, LIU Dexu, et al. Low-carbon economic optimal dispatch of thermal-wind-solar-storage systems considering interval differentiation of thermal power carbon emission intensity[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 142-151 (in Chinese).
- [29] 饶宏, 卢斯煜, 卓映君, 等. “双碳”目标下南方区域新型电力系统重点问题研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 74-83.
RAO Hong, LU Siyu, ZHUO Yingjun, et al. Key problems of new power systems in the southern region towards carbon peak and carbon neutrality[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 74-83(in Chinese).



朱虹滔

在线出版日期: 2025-02-28。

收稿日期: 2024-07-21。

作者简介:

朱虹滔(2001), 男, 学士, 助理工程师, 研究方向为新型电力系统下的电力市场运行, zhuht1924@163.com;

刘德旭(1996), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新型电力系统低碳经济运行, liudexus@tsinghua-eiri.org;

吕思宇(1992), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统低碳规划、调度、电力市场, lvsiyu@tsinghua-eiri.org;

*通信作者: 钟海旺(1986), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力市场等, zhonghw@tsinghua.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 张蕾)