

基于改进云模型的区域电网电能替代综合效益评价

郑杨¹, 任禹丞², 王雨薇^{1*}, 徐丁吉¹, 杨慧敏³

(1. 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 江苏省 镇江市 212002; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210019; 3. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Evaluation of Comprehensive Benefits of Electric Energy Substitution in Regional Power Grids Based on Improved Cloud Model

ZHENG Yang¹, REN Yucheng², WANG Yuwei^{1*}, XU Dingji¹, YANG Huimin³

(1. Zhenjiang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Zhenjiang 212002, Jiangsu Province, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210019, Jiangsu Province, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

摘要:【目的】针对区域电网电能替代效益评估中多维度协同性不足、环境效益量化不完善及动态反馈缺失等问题,提出一种多源数据融合的动态评价方法,以提升电能替代工程决策精度。【方法】构建涵盖“供给侧优化-需求侧转型-环境减排协同”的三维评价指标体系,明确跨区消纳能力、电替代渗透率及污染物减排等21个指标,形成多层次量化评估框架;设计基于熵权法与改进序关系法的耦合赋权策略,通过线性加权平衡主客观权重偏差;提出贝叶斯动态云模型,结合贝叶斯反馈机制优化云模型超熵参数,实现评估结果的动态修正。【结果】所提模型能有效量化电能替代综合效益,精准识别跨区消纳与终端替代短板,并通过动态反馈机制提升评估精准性,增强与工程实际的匹配度。【结论】该评估方法突破了传统效益评估中指标维度单一、权重分配失准及静态偏差显著等瓶颈,可为提高电能替代效益评价准确性提供参考。

关键词: 新型电力系统; 新能源; 低碳转型; 碳中和; 区域电网; 电能替代; 贝叶斯动态云模型; 综合效益评价; 碳排放

ABSTRACT: [Objectives] To address issues such as insufficient multi-dimensional coordination, incomplete quantification of environmental benefits, and the lack of dynamic feedback in evaluating the benefits of electric energy substitution in regional power grids, a dynamic evaluation

method based on multi-source data fusion is proposed to enhance the decision-making accuracy of electric energy substitution projects. [Methods] A three-dimensional evaluation index system covering “supply-side optimization, demand-side transformation, and environmental emission reduction synergy” is established, identifying 21 indicators including cross-regional consumption capacity, electric substitution penetration rate, and pollutant reduction, thereby forming a multi-level quantitative evaluation framework. A coupling weighting strategy based on the entropy weight method and an improved rank correlation method is developed to balance subjective and objective weight deviations through linear weighting. A Bayesian dynamic cloud model is proposed, optimizing the hyper-entropy parameters of the cloud model by incorporating a Bayesian feedback mechanism to achieve dynamic correction of evaluation results. [Results] The proposed model can effectively quantify the comprehensive benefits of electric energy substitution, accurately identify shortcomings in cross-regional consumption and terminal substitution, and improve evaluation accuracy through the dynamic feedback mechanism, enhancing alignment with practical engineering. [Conclusions] This evaluation method overcomes the bottlenecks in traditional benefit evaluation, such as single-dimensional indicators, inaccurate weight allocation, and significant static deviations, providing a reference for improving the accuracy of electric energy substitution benefit evaluation.

KEY WORDS: new power system; new energy; low-carbon transition; carbon neutrality; regional power grid; electric energy substitution; Bayesian dynamic cloud model; comprehensive benefit evaluation; carbon emission

基金项目: 国家自然科学基金项目(62293500, 62293505); 国家电网有限公司科技项目(5400-202318574A-3-2-ZN)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (62293500, 62293505); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202318574A-3-2-ZN).

0 引言

在全球能源需求增长与可持续发展目标驱动下，电力系统正加速低碳化变革^[1-4]。电网自动化与安全水平持续提升，为电能生产向低碳转型奠定了技术基础^[5]。然而，电能替代效益评价需突破单一维度局限，从供需双侧协同及经济-环境多维视角构建综合评价框架，以实现效益的精准量化^[6]。目前，国内外在电能替代效益评价体系构建方面已有较多研究^[7-13]。

安全性、灵活性、低碳性等是近年来电力系统评价体系中的重要维度^[14-16]。在安全性方面，文献[9]针对船舶电力系统特性，构建了涵盖电源结构风险、电网架构脆弱性等的风险评价体系；文献[10]聚焦小规模输电网场景，提出了适应区域性电网的可靠性评估框架；文献[11]针对网络攻击对智能电网的影响，提出了基于负载恢复、生产线容量恢复等的安全评估体系。在灵活性方面，文献[17]从外送输电容量、安全传输裕度及传输灵活性3个方面构建灵活性评价体系；文献[18]引入平均功率灵活性指数，评估新能源并网对电网的影响。在低碳性方面，文献[19]构建了包含可再生能源利用率和碳排放强度的低碳效益评价体系；文献[20]构建了单位发电碳排放率、低碳电力调度效益等的电网低碳指标体系。此外，有研究从系统整体出发，以“源-网-荷-储”为主要维度，构建效益评价指标体系^[21-23]。综上所述，现有评价体系虽然覆盖多领域，但缺乏对新型电力系统多环节协同特性的综合分析。

当前区域电网电能替代评价多采用层次分析法、熵权法、模糊综合评价法等。文献[24-25]分别基于层次分析法和熵权法提出单一赋权评估模型。文献[26]通过模糊综合评价法进行定量评估，适用于解决非确定性问题。文献[27]将层次分析法与熵权法结合，通过实例分析验证了方法的有效性。文献[28]结合层次分析法和模糊综合评价法评估电力系统发展水平及智能电网应急风险，所得结果更加客观公正。文献[29]通过云模型对虚拟电厂及智能电网进行综合评价，将定性指标与定量指标有效结合。

本文结合区域电网电能替代发展目标，构建涵盖“供给-需求-环境”协同的综合效益评价指标体系，并提出将熵权-序关系赋权法与基于贝叶斯反馈算法的云模型相结合的综合评价方法，实现效益指标的动态评估。

1 区域电网电能替代综合效益评价体系

1.1 电能替代综合效益指标体系

在全球碳中和目标驱动下，电力系统低碳转型已成必然趋势。风电、光伏等新能源大规模接入可替代化石能源，但高渗透率带来的源荷不确定性将提高系统成本。通过设立低碳经济维度，可有效评估区域电网电能替代的低碳性与经济性。本文所建立的指标体系分为3个维度，包括9个一级指标和21个二级指标，如表1所示。

表1 区域电网电能替代综合效益指标

Tab.1 Comprehensive benefit indicators of electric energy substitution in regional power grids

主要维度	一级指标	二级指标	
供给侧 效益A	清洁能源参与 发电调度 A_1	清洁能源发电占比 A_{11}	
		清洁能源发电量增长率 A_{12}	
	跨省跨区电能 替代 A_2	清洁电外送电量占比 A_{21}	
		清洁电外送电量增长率 A_{22}	
	电力辅助服务 A_3	新能源参与调峰电量占比 A_{31} 新能源参与调峰电量增长率 A_{32}	
需求侧 效益B	以电代气 B_1	电采暖取代燃气取暖电量增长率 B_{11} 电锅炉取代燃气锅炉电量增长率 B_{12}	
		电动汽车增长率 B_{21}	
	以电代油 B_2	岸电增长率 B_{22} 机井通电增长率 B_{23}	
		清洁能源 B_3	清洁能源取代燃气取暖电量增长率 B_{31} 清洁能源取代燃气锅炉电量增长率 B_{32}
	环境减排 效益C	发电侧减排 C_1	新能源并网投资比例 C_{11} 单位储能资产最大负荷供应能力 C_{12}
			低碳电力调度比例 C_{21}
输配电减排 C_2		电压合格率改善比率 C_{22} 六氟化硫减排比率 C_{23}	
		用电侧减排 C_3	充电站电力消耗增长率 C_{31} 分布式电源电量增长率 C_{32} 需求侧总节约电量增长率 C_{33}

1.2 发电侧电能替代效益指标

发电侧电能替代效益评价体系包括清洁能源调度、跨区电能替代和电力辅助服务三大模块。清洁能源调度评估渗透率和增速；跨区电能替代

关注外送电量和功率增长；电力辅助服务通过调峰贡献和增速量化新能源支撑能力。主要指标如下：

1) 清洁能源发电占比 χ ，表示为

$$\chi = \frac{Q_{CN}}{Q_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中： Q_T 为发电总量； Q_{CN} 为清洁能源发电量。

2) 清洁能源发电量增长率 ζ_{CN} ，表示为

$$\zeta_{CN} = \frac{Q_{CN}^t - Q_{CN}^{t-1}}{Q_{CN}^{t-1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 Q_{CN}^t 、 Q_{CN}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻清洁能源发电量。

3) 清洁电外送电量占比 δ ，表示为

$$\delta = \frac{Q_{CNO}}{Q_{CN}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 Q_{CNO} 表示清洁电外送电量。

4) 清洁电外送电量增长率 ζ_{CNO} ，表示为

$$\zeta_{CNO} = \frac{Q_{CNO}^t - Q_{CNO}^{t-1}}{Q_{CNO}^{t-1}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 Q_{CNO}^t 、 Q_{CNO}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻清洁电外送电量。

5) 新能源参与调峰电量占比 ε ，表示为

$$\varepsilon = \frac{Q_{CNP}}{Q_P} \times 100\% \quad (5)$$

式中： Q_{CNP} 为参与调峰的新能源发电量； Q_P 为调峰电量。

6) 新能源参与调峰电量增长率 ζ_{CNP} ，表示为

$$\zeta_{CNP} = \frac{Q_{CNP}^t - Q_{CNP}^{t-1}}{Q_{CNP}^{t-1}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 Q_{CNP}^t 、 Q_{CNP}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻参与调峰的新能源发电量。

1.3 用电侧电能替代效益指标

用电侧电能替代效益评价聚焦气改电、油改电和清洁能源替代三大路径。气改电评估电采暖/锅炉替代渗透率增速；油改电通过电动汽车普及、岸电覆盖和农灌机井通电提升减排；清洁能源替代方面，重点量化光伏发电、空气源热泵等清洁能源在替代燃气供能中的强度和比例。主要指标如下：

1) 电采暖取代燃煤取暖电量增长率 ζ_{EH} ，表示为

$$\zeta_{EH} = \frac{Q_{EH}^t - Q_{EH}^{t-1}}{Q_{EH}^{t-1}} \times 100\% \quad (7)$$

式中 Q_{EH}^t 、 Q_{EH}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电采暖取代燃煤取暖电量。

2) 电锅炉取代燃煤锅炉电量增长率 ζ_{EB} ，表示为

$$\zeta_{EB} = \frac{Q_{EB}^t - Q_{EB}^{t-1}}{Q_{EB}^{t-1}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 Q_{EB}^t 、 Q_{EB}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电锅炉取代燃煤锅炉电量。

3) 电动汽车增长率 ζ_{EV} ，表示为

$$\zeta_{EV} = \frac{Q_{EV}^t - Q_{EV}^{t-1}}{Q_{EV}^{t-1}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 Q_{EV}^t 、 Q_{EV}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电动汽车保有量。

4) 岸电增长率 ζ_{SE} ，表示为

$$\zeta_{SE} = \frac{Q_{SE}^t - Q_{SE}^{t-1}}{Q_{SE}^{t-1}} \times 100\% \quad (10)$$

式中 Q_{SE}^t 、 Q_{SE}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻的岸电电量。

5) 机井通电增长率 ζ_{PS} ，表示为

$$\zeta_{PS} = \frac{Q_{PS}^t - Q_{PS}^{t-1}}{Q_{PS}^{t-1}} \times 100\% \quad (11)$$

式中 Q_{PS}^t 、 Q_{PS}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻机井通电电量。

6) 清洁能源取代燃气取暖电量增长率 ζ_{EHG} ，表示为

$$\zeta_{EHG} = \frac{Q_{EHG}^t - Q_{EHG}^{t-1}}{Q_{EHG}^{t-1}} \times 100\% \quad (12)$$

式中 Q_{EHG}^t 、 Q_{EHG}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻清洁能源取代燃气取暖电量。

7) 清洁能源取代燃气锅炉电量增长率 ζ_{EBG} ，表示为

$$\zeta_{EBG} = \frac{Q_{EBG}^t - Q_{EBG}^{t-1}}{Q_{EBG}^{t-1}} \times 100\% \quad (13)$$

式中 Q_{EBG}^t 、 Q_{EBG}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻清洁能源取代燃气锅炉电量。

1.4 电能替代的环境减排效益指标

环境减排效益评价从发电、输配电和用电3个环节选取指标。发电侧通过清洁能源占比和储能调节能力来评估替代效果；输配电侧以低碳调度、电网损耗改善和六氟化硫减排来衡量低碳运行；用电侧通过充电设施用电增速、分布式电源

发展和节电效果来衡量终端转型。主要指标如下：

1) 新能源并网投资比例 ψ ，表示为

$$\psi = \frac{V_{CN}}{V} \times 100\% \quad (14)$$

式中： V_{CN} 为新能源并网投资总额； V 为电网年度建设投资总额。

2) 单位储能资产最大负荷供应能力 θ ，表示为

$$\theta = \frac{S_s}{C_s} \times 100\% \quad (15)$$

式中： S_s 为新建储能装置的最大负荷供应能力； C_s 为提高储能装置最大负荷供应能力的资产。

3) 低碳电力调度比例 η ，表示为

$$\eta = \frac{Q_{CN}}{Q_w} \times 100\% \quad (16)$$

式中 Q_w 为地区总供电量。

4) 电压合格率改善比率 ϖ ，表示为

$$\varpi = \frac{U^t - U^{t-1}}{U^t} \times 100\% \quad (17)$$

式中 U^t 、 U^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻的电压合格率。

5) 六氟化硫减排比率 ϕ ，表示为

$$\phi = \frac{F^t - F^{t-1}}{F^t} \times 100\% \quad (18)$$

式中 F^t 、 F^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻六氟化硫净排放量。

6) 充电站电力消耗增长率 ζ_{CP} ，表示为

$$\zeta_{CP} = \frac{Q_{CP}^t - Q_{CP}^{t-1}}{Q_{CP}^{t-1}} \times 100\% \quad (19)$$

式中 Q_{CP}^t 、 Q_{CP}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电力消耗量。

7) 分布式电源电量增长率 ζ_{DP} ，表示为

$$\zeta_{DP} = \frac{Q_{DP}^t - Q_{DP}^{t-1}}{Q_{DP}^{t-1}} \times 100\% \quad (20)$$

式中 Q_{DP}^t 、 Q_{DP}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电源电量。

8) 需求侧总节约电量增长率 ζ_{DS} ，表示为

$$\zeta_{DS} = \frac{Q_{DS}^t - Q_{DS}^{t-1}}{Q_{DS}^{t-1}} \times 100\% \quad (21)$$

式中 Q_{DS}^t 、 Q_{DS}^{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻总节约电量。

2 基于云模型的区域电网电能替代模型

2.1 模型框架

本文采用熵权-序关系方法组合赋权，利用贝叶斯反馈云模型对电能替代指标进行评价。首先，

计算综合权重并构建标准云图；然后，利用贝叶斯反馈修正法调整指标云图；最后，根据标准云图评估指标和整体水平，若结果为优，则输出最终发展水平，否则，调整低水平指标并重新评估，直到达到优良等级。

2.2 指标赋权方法

本文采用主客观结合的熵权-序关系方法对指标赋权，为关键维度指标定制权重，确保评价模型准确反映各指标的实际影响。

1) 序关系法赋权

采用序关系法对指标赋权过程如下：

① 确定序关系。步骤 1，专家在指标集 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 中选出最重要的一个指标，记为 x_1^* ；步骤 2，专家在余下的 $m-1$ 个指标中选出最重要的一个指标，记为 x_2^* ；以此类推，步骤 k ，专家在余下的 $m-(k-1)$ 个指标中选出最重要的一个指标，记为 x_k^* 。经过 $m-1$ 次挑选，确定唯一序关系 $x_1^* > x_2^* > \dots > x_m^*$ 。

② 确定相邻指标之间的相对重要程度。相邻指标 x_{k-1} 与 x_k 重要程度之比 r_k 表示为

$$r_k = \omega_{k-1} / \omega_k \quad (22)$$

式中 ω_k 为第 k 个指标的权重， $k=m, m-1, \dots, 3, 2$ 。各指标之间相对重要程度的赋值参考文献[27]，当 m 较大时，取 $r_k=1$ 。当 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 之间有序关系时，必有 $r_{k-1} > r_k$ 。

③ 计算指标权重。若 r_k 满足式(22)，则指标 x_m 的权重 w_m 可表示为

$$w_m = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i)^{-1} \quad (23)$$

而 $w_{k-1} = r_k w_k$ ，即可得到所有评价指标的权重。

2) 熵权法赋权

采用熵权法对指标赋权过程如下：

① 构建标准化判断矩阵。设进行综合评价的指标维度为 z ，指标数为 n ，由标准化后的数据构造判断矩阵 X^* ，表述为

$$X^* = (x_{ij}^*)_{z \times n} \quad (24)$$

② 计算各指标的信息熵。第 j 个指标的信息熵 H_j 表示为

$$H_j = -q \sum_{i=1}^z f_{ij} \ln f_{ij} \quad (25)$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^z x_{ij}^*} \quad (26)$$

$$q = \frac{1}{\ln z} \quad (27)$$

式中: f_{ij} 为标准化数据 x_{ij}^* 的权重; q 为常数。

③指标赋权。第 j 个指标的权重 v_j 表示为

$$v_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (28)$$

式中 $0 \leq v_j \leq 1, \sum_{j=1}^n v_j = 1$ 。

3) 组合赋权

结合熵权法和序关系法, 进行组合赋权, 得综合权重 $S_k = \alpha w_k + \beta v_k$, 其中 α 和 β 分别为主观与客观权重系数。

2.3 基于贝叶斯反馈修正的云模型综合评价方法

2.3.1 云模型基本理论

云模型通过正逆向云发生器实现定性定量概念的相互转换^[29]。对于正逆向云发生器存在双边约束的情况, 可采用指标近似法代替逆向云发生器算法, 计算云模型特征值:

$$E_x = (B_{\min} + B_{\max}) / 2 \quad (29)$$

$$E_n = (B_{\max} - B_{\min}) / 6 \quad (30)$$

$$H_e = p \quad (31)$$

式中: E_x 为期望值, 表征云图中心最高点, 代表定性概念; E_n 为熵, 是对定性概念的度量, 反映概念的模糊性和随机性, 熵值越大, 概念范围越大; H_e 为超熵, 是对熵的不确定性度量, 反映云的厚度, 超熵值越大, 云越厚, 概念共识程度越低; $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ 分别为指标评价值范围的上下限; p 为常数, 可依据指标的随机性进行调整。

2.3.2 基于贝叶斯反馈的云模型计算方法

为了降低云模型的不确定性, 利用贝叶斯反馈算法进行修正, 流程如图1所示。修正过程具体如下:

1) 由式(29)~(31)生成特征值 E_x 、 E_n 、 H_e 。

2) 通过正向云发生器算法的计算, 将特征值 E_x 、 E_n 、 H_e 转化为 n 个云滴 (x_i, y_i) 构成的云图。

3) 基于贝叶斯反馈的云滴筛选及检验。对正向云算法生成的 n 个云滴进行检验, 并使描述定性

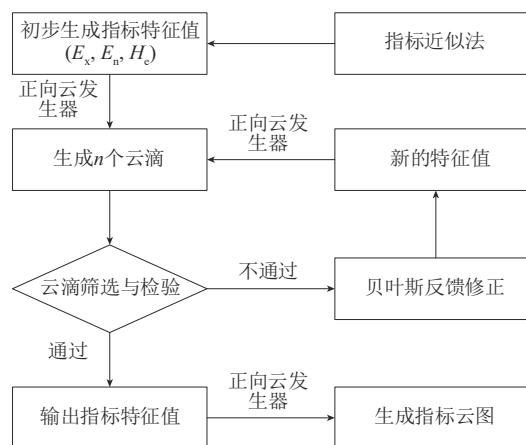


图1 基于贝叶斯反馈修正的云模型计算流程图

Fig. 1 Flowchart of cloud model calculation based on Bayesian feedback correction

概念的云滴服从期望为 E_x 、方差为 $E_n^2 + H_e^2$ 的正态分布。步骤如下: 选取 $X \in [E_x - z_{\alpha/2} \sqrt{E_n^2 + H_e^2}, E_x + z_{\alpha/2} \sqrt{E_n^2 + H_e^2}]$ 的云滴样本值, 其中, $z_{\alpha/2}$ 为标准正态分布的双侧百分位点。设定 X_L 为 $x < E_x - z_{\alpha/2} \sqrt{E_n^2 + H_e^2}$ 的样本均值, X_H 为 $x > E_x + z_{\alpha/2} \sqrt{E_n^2 + H_e^2}$ 的样本均值。当满足 $|(d - d_0)/d| \times 100\% \leq 20\%$ 的标准时 (其中, $d = X_H - X_L$, $d_0 = 2z_{\alpha/2} \sqrt{E_n^2 + H_e^2}$), 云滴筛选通过检验, 无需修正参数; 否则, 删除不合格的云滴, 并将参数中的 H_e 变为原来的 95%, 利用新的超熵 H_e' 、原期望 E_x 和熵 E_n , 生成相同数量的云滴。

4) 基于贝叶斯反馈的云模型参数修正。针对新生成与检验后的云滴, 利用贝叶斯后验概率公式, 可得

$$F(E_x/x) = \frac{F(E_x)F(X/E_x)}{\int_{-\infty}^{+\infty} F(E_x)F(X/E_x)dE_x} \quad (32)$$

修正后云模型参数分别为:

$$E_x^c = \frac{\frac{X}{(E_n^2 + H_e'^2)/n} + \frac{E_x}{E_n^2}}{\frac{1}{(E_n^2 + H_e'^2)/n} + \frac{1}{E_n^2}} \quad (33)$$

$$E_n^c = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X - E_x^c| \quad (34)$$

$$H_e^c = \sqrt{s^2 - (E_n^c)^2} \quad (35)$$

式中 s 为样本方差。

至此, 可得修正后的云模型数字特征, 对云

滴进行重新校验，若不通过则继续修正，直至通过为止。

3 算例分析

3.1 评价指标赋权

3个地区代表3种电能替代模式：发电侧替代(模式1)、用电侧替代(模式2)和发用电联动(模式

3)。发电侧替代通过提高清洁能源比重替代传统煤电；用电侧替代通过优化电能使用提升清洁能源利用；发用电联动通过发用电协同，提高系统效率和低碳度。将3种模式代表地区评价指标的基本数据结合标准化模型进行无量纲化处理，得到标准化数据，见表2。根据本文赋权方法，权重系数 $\alpha=0.56$ ， $\beta=0.44$ ，所得综合权重见表3。

表2 标准化数据

Tab. 2 Standardized data

指标	模式1			模式2			模式3		
	2019年	2020年	2021年	2019年	2020年	2021年	2019年	2020年	2021年
A_{11}	60.00	68.50	78.95	68.50	74.77	82.61	77.58	89.98	100.00
A_{12}	67.58	60.00	79.18	100.00	83.65	69.77	64.07	79.66	76.83
A_{21}	73.18	60.00	79.34	60.00	68.68	74.01	80.11	97.21	100.00
A_{22}	60.00	78.30	83.55	98.41	100.00	93.12	78.10	82.18	83.55
A_{31}	96.60	90.80	100.00	62.75	60.00	70.22	72.25	76.76	80.56
A_{32}	60.00	100.00	77.11	69.95	7.61	99.00	90.05	98.81	81.19
B_{11}	75.93	82.29	100.00	60.00	62.75	65.73	87.34	93.30	99.37
B_{12}	60.00	66.17	72.17	87.99	94.65	76.70	75.83	82.54	100.00
B_{21}	76.70	86.76	99.94	72.53	89.74	100.00	60.00	67.48	74.23
B_{22}	97.66	100.00	85.73	74.04	76.61	83.74	62.46	71.35	60.00
B_{23}	85.42	94.46	74.46	64.94	70.36	60.00	89.28	95.18	100.00
B_{31}	78.90	87.80	100.00	60.00	65.90	65.40	69.80	79.80	87.80
B_{32}	60.00	66.59	77.35	89.10	95.24	100.00	64.31	71.55	77.25
C_{11}	60.00	67.57	82.44	72.45	86.48	100.00	80.59	83.17	91.14
C_{12}	84.14	100.00	79.86	60.00	64.84	71.89	88.54	68.29	60.36
C_{21}	90.30	78.42	92.70	60.00	69.92	85.40	91.72	100.00	80.82
C_{22}	60.00	73.25	70.48	86.27	99.64	75.66	100.00	86.27	63.86
C_{23}	100.00	67.54	99.69	65.91	72.63	77.12	60.00	69.55	73.70
C_{31}	90.14	93.80	100.00	60.00	63.68	72.85	75.68	82.47	88.61
C_{32}	87.97	66.25	60.00	93.75	100.00	81.49	65.67	65.04	60.52
C_{33}	100.00	96.54	68.86	86.02	87.68	84.22	81.87	72.32	60.00

表3 基于熵权-序关系法的综合权重结果

Tab. 3 Comprehensive weight based on entropy weight-rank correlation method

指标	权重值	指标	权重值
A_{11}	0.037	B_{31}	0.024
A_{12}	0.043	B_{32}	0.053
A_{21}	0.075	C_{11}	0.033
A_{22}	0.116	C_{12}	0.031
A_{31}	0.063	C_{21}	0.029
A_{32}	0.023	C_{22}	0.077
B_{11}	0.036	C_{23}	0.063
B_{12}	0.033	C_{31}	0.069
B_{21}	0.051	C_{32}	0.038
B_{22}	0.036	C_{33}	0.030
B_{23}	0.038		

3.2 云模型评价及结果分析

3.2.1 指标评价标准等级划分及评价云图构建

邀请专家对一级指标进行百分制评分。设置各指标评价等级标准，如表4所示。

表4 评价等级划分

Tab. 4 Evaluation grade classification

等级区间	[90, 100]	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	<60
等级	优秀	良好	一般	较低	差

根据表4划分的云模型特征值为：优秀(100, 10/3, 0.5)，良好(85, 5/3, 0.5)，一般(75, 5/3, 0.5)，较低(65, 5/3, 0.5)，差(0, 20, 0.5)。依此可制定区域电网电能替代水平评价判定标准。标准云图见图2。

3.2.2 指标特征值计算及云图分析

根据专家的评分情况，计算2021年该省区域电网电能替代主要维度指标的特征值。利用贝叶斯反馈算法对云模型进行修改，修正后的特征值如表5、6所示。

根据各指标的特征值，采用贝叶斯反馈云模

型构建指标云图。主要维度云图如图 3 所示，可以看出，2021 年该省电能替代的环境减排效益为“优秀”，表现良好；供给侧效益和需求侧效益均处于“良好”区间，但供给侧效益位于“良好”

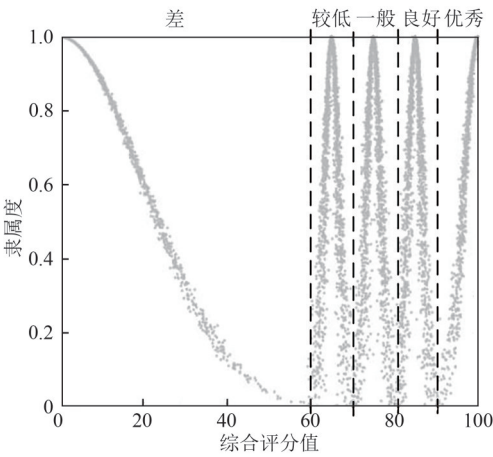


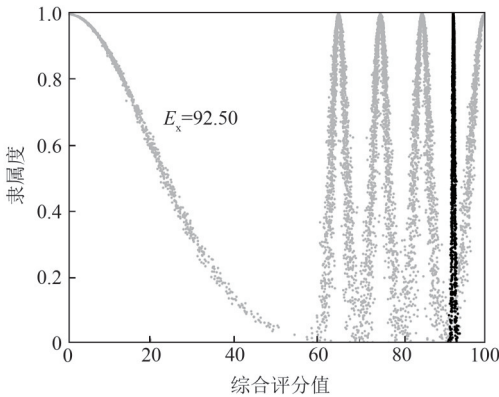
图 2 区域电网电能替代发展水平评价标准云图
Fig. 2 Cloud map of evaluation criteria for development level of electric energy substitution in regional power grids

表 5 一级与二级指标特征值
Tab. 5 Characteristic values of primary and secondary indicators

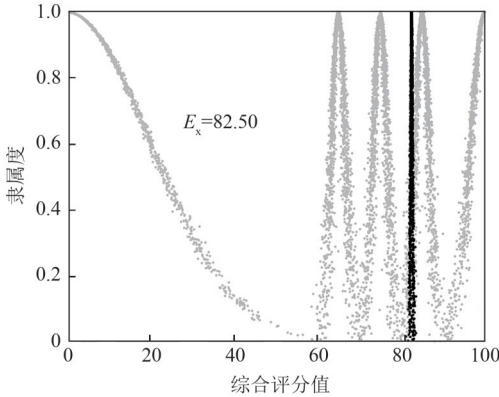
一级指标	一级指标特征值			二级指标	二级指标特征值		
	E_x	E_n	H_e		E_x	E_n	H_e
A_1	91.50	0.31	0.10	A_{11}	92.80	0.27	0.10
				A_{12}	88.30	0.33	0.10
A_2	87.30	0.36	0.19	A_{21}	89.50	0.40	0.20
				A_{22}	84.52	0.43	0.21
A_3	89.50	0.54	0.21	A_{31}	90.50	0.53	0.25
				A_{32}	91.80	0.67	0.30
B_1	84.30	0.27	0.10	B_{11}	85.20	0.33	0.10
				B_{12}	86.20	0.33	0.10
B_2	80.60	0.33	0.10	B_{21}	86.50	0.23	0.10
				B_{22}	83.72	0.33	0.10
				B_{23}	81.66	0.23	0.10
B_3	85.20	0.41	0.15	B_{31}	85.30	0.67	0.30
				B_{32}	87.85	0.33	0.10
C_1	87.80	0.33	0.10	C_{11}	89.00	0.33	0.10
				C_{12}	86.50	0.33	0.10
C_2	86.40	0.27	0.12	C_{21}	84.00	0.27	0.14
				C_{22}	86.83	0.30	0.13
				C_{23}	87.20	0.27	0.13
C_3	93.32	0.33	0.10	C_{31}	94.50	0.33	0.10
				C_{32}	95.80	0.33	0.10
				C_{33}	91.70	0.33	0.10

表 6 综合云图及主要维度特征值
Tab. 6 Comprehensive cloud map and characteristic values of main dimensions

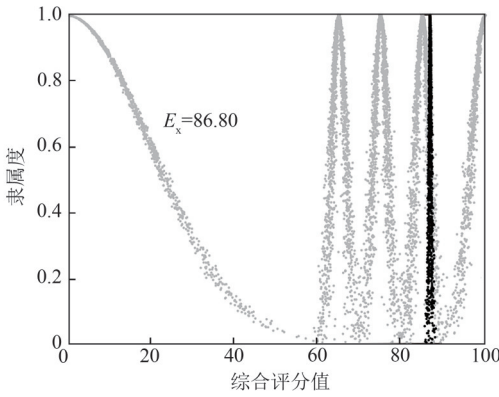
项目	E_x	E_n	H_e	
云图指标	87.52	0.22	0.11	
主要维度	供给侧效益	82.50	0.20	0.10
	需求侧效益	86.80	0.22	0.14
	环境减排效益	92.50	0.24	0.10



(a) 环境减排效益



(b) 供给侧效益



(c) 需求侧效益

图 3 主要维度云图
Fig. 3 Cloud maps of main dimensions

区间的边缘，需要重点提升。
综合云图如图 4 所示，可以看出，2021 年该

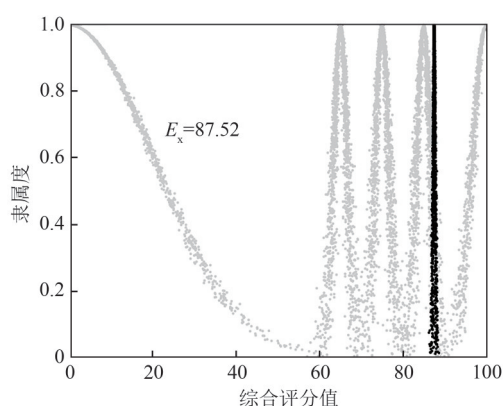


图4 综合云图

Fig. 4 Comprehensive cloud map

省电能替代整体发展指数位于“良好”区间的较高水平,表明已取得了一定成就,但仍有提升空间。通过分析主要维度和一级指标云图等级,对于接近“优”的指标,如清洁能源参与发电调度和用电侧减排等,应保持优势;对于尚未达到“优”的指标,如跨区电能替代、电力辅助服务、以电代气、以电代油及发电侧减排等,应采取有针对性的措施,提高该省区域电网电能替代整体发展水平。

4 结论

提出并构建了区域电网电能替代综合指标评价体系,并结合组合赋权和贝叶斯反馈修正的云模型进行评价,结论如下:

1) 所提出的区域电网电能替代水平指标评价体系,综合考虑了安全性、经济性和清洁化等维度,能够对我国区域电网电能替代水平进行合理评估。

2) 采用基于贝叶斯反馈修正的云模型评价方法,结合评价指标的随机性特征,显著提升了传统云模型的评价效能,实现了指标的合理量化,并通过云图的直观展示,揭示了电能替代水平的综合评价结果。

参考文献

- [1] 汲国强, 吴姗姗, 谭显东, 等. 2021年我国电力供需形势分析及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 568-575.
- JI G Q, WU S S, TAN X D, et al. Analysis and

prospect of China's power supply and demand situation in 2021[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 568-575.

- [2] 周勤勇, 李根兆, 秦晓辉, 等. 能源革命下的电力系统范式转换分析[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 1-11.
- ZHOU Q Y, LI G Z, QIN X H, et al. Analysis of power system paradigm shift under energy revolution[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 1-11.
- [3] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳流追踪的电力系统源网荷低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 108-119.
- YANG Y, YI W F, WANG C Q, et al. Low-carbon and economic optimal scheduling of power system source-grid-load based on carbon flow tracing method[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 108-119.
- [4] 辛保安, 周原冰, 肖晋宇, 等. 全球电力发展指数研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(6): 613-626.
- XIN B A, ZHOU Y B, XIAO J Y, et al. Research on global electricity development index[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(6): 613-626.
- [5] 李立新, 周宇昊, 郑文广. 能源转型背景下分布式能源技术发展前景[J]. 发电技术, 2020, 41(6): 571-577.
- LI L X, ZHOU Y H, ZHENG W G. Development prospect of distributed energy technology under the background of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 571-577.
- [6] 刘可真, 王骞, 赵明, 等. 基于多方合作博弈及梯级化的电能替代效益分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 711-718.
- LIU K Z, WANG Q, ZHAO M, et al. Benefit analysis of electric energy substitution based on multi-player cooperative game and cascade model[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 711-718.
- [7] 冷喜武, 刘闯, 何蕾, 等. 可调节负荷并网运行标准研究与应用[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 834-842.
- LENG X W, LIU C, HE L, et al. Research and application of grid-connected operation standard for adjustable load[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 834-842.
- [8] 祁毓, 林佳颖, 郑家宝. 支持绿色低碳发展的财政政策研究: 逻辑阐释、现实挑战及路径优化[J]. 财政科学, 2023(7): 63-73.
- QI Y, LIN J Y, ZHENG J B. Research on fiscal policies to support green and low-carbon development: logical interpretation, real challenges and path optimization[J]. Fiscal Science, 2023(7): 63-73.
- [9] 韩哲鹏, 张笛. 基于动态贝叶斯网络的船舶电力推进系

- 统可靠性评估[J]. 船舶工程, 2021, 43(11): 118-124.
- HAN Z P, ZHANG D. Reliability evaluation of ship electric propulsion system based on dynamic Bayesian network[J]. Ship Engineering, 2021, 43(11): 118-124.
- [10] 刘文飞, 曾嘉志, 潘海涛, 等. 计及电力安全事故风险的输电网可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 126-132.
- LIU W F, ZENG J Z, PAN H T, et al. Evaluation on the reliability of power transmission network considering risk of electric power safety accidents[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 126-132.
- [11] 吕思佳, 罗岚. 中国城市低碳发展质量评价及障碍分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(9): 106-114.
- LYU S J, LUO L. Low-carbon development quality of cities in China: evaluation and obstacle analysis[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(9): 106-114.
- [12] 张红斌, 冯明灿, 孙钦斐, 等. 基于主成分分析法的煤改电综合效益评价模型研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 99-104.
- ZHANG H B, FENG M C, SUN Q F, et al. Research on comprehensive benefit evaluation model of coal-to-electricity based on principal component analysis [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 99-104.
- [13] 陈星彤, 张宁, 王轶楠, 等. 基于混合赋权和MARCOS模型的低碳园区综合效益评价研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 23-30.
- CHEN X T, ZHANG N, WANG Y N, et al. Comprehensive benefit evaluation of low-carbon industrial parks based on combination weighting and MARCOS model[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 23-30.
- [14] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
- WU S, BIAN X Y, ZHANG J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [15] 沈豫, 韩钟宽, 曾振松, 等. 基于改进WCVaR的电力系统低碳经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 102-111.
- SHEN Y, HAN Z K, ZENG Z S, et al. Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 102-111.
- [16] 郝伟韬, 蔡国田, 卢俊瞳, 等. 源网荷储互动减碳研究综述[J]. 广东电力, 2023, 36(11): 64-74.
- HAO W T, CAI G T, LU J T, et al. Review of source-grid-load-storage interactive carbon reduction research[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 64-74.
- [17] 刘俊峰. 基于电力系统光传输网络优化改造的分析[J]. 通讯世界, 2017, 24(6): 197-198.
- LIU J F. Analysis of optical transmission network optimization and transformation based on power system[J]. Telecom World, 2017, 24(6): 197-198.
- [18] 林芝羽, 李华强, 苏韵掣, 等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 46-57.
- LIN Z Y, LI H Q, SU Y C, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.
- [19] 李军, 笪耀东, 刘雪敏, 等. 我国锅炉装备绿色低碳发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 212-221.
- LI J, DA Y D, LIU X M, et al. Green and low-carbon development path of boiler equipment in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 212-221.
- [20] 苗芳. 加速推进碳达峰碳中和标准计量体系建设助力东北绿色能源低碳发展[J]. 智慧中国, 2022(7): 32-33.
- MIAO F. Accelerate the construction of carbon neutral standard measurement system in peak carbon dioxide emissions to help the low-carbon development of green energy in Northeast China[J]. Wisdom China, 2022(7): 32-33.
- [21] 刘宇航, 陈致远, 戈君, 等. 新型电力系统下的源-网-荷-储能协调优化模型研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(2): 221-226.
- LIU Y H, CHEN Z Y, GE J, et al. Research on source-grid-load-energy storage coordination optimization model under new power system[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(2): 221-226.
- [22] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.
- LI J L, GUO Z D, MA S L, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [23] 王绪利, 潘东, 施天成, 等. 新型电力系统背景下源网荷储一体化项目友好性评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 72-82.
- WANG X L, PAN D, SHI T C, et al. A friendliness evaluation method for the source-network-load-storage

- integration project under the background of new power system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 72-82.
- [24] 邓红雷, 周晨, 夏桥. 基于综合赋权法和模糊层次分析法的输电线路异物挂线故障率模型[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 30-32.
- DENG H L, ZHOU C, XIA Q. Model of failure rate of hanging up foreign matter for power transmission lines based on composite weighting method and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4): 30-32.
- [25] 谢瀚阳, 江疆, 彭泽武, 等. 基于熵权法的智能电网管理水平评价指标量化方法[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(7): 69-72.
- XIE H Y, JIANG J, PENG Z W, et al. Quantitative method of evaluation index of smart grid management level based on entropy weight method[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(7): 69-72.
- [26] 马伟哲, 陈洪云. 基于深度学习的配电网故障风险及状态检修[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 87-94.
- MA W Z, CHEN H Y. Fault risk and condition maintenance of distribution network based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 87-94.
- [27] 张杰, 薛太林, 解张超, 等. 基于改进AHP法和改进熵权法结合的组合电量预测模型[J]. 电气自动化, 2022, 44(6): 28-31.
- ZHANG J, XUE T L, XIE Z C, et al. Combined electric quantity forecasting model based on the combination of improved AHP method and improved entropy weight method[J]. Electrical Automation, 2022, 44(6): 28-31.
- [28] 钱啸, 章姝俊, 陈楚楚, 等. 多应用场景下基于云模型直觉模糊层次分析法的储能技术综合评估方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(9): 68-80.
- QIAN X, ZHANG S J, CHEN C C, et al. Comprehensive evaluation method of energy storage technology based on cloud model intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process in multiple application scenarios[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(9): 68-80.
- [29] 曾鸣, 潘婷, 贺薪颖, 等. 基于贝叶斯反馈修正云模型的虚拟电厂运营风险综合评价方法[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 715-723.
- ZENG M, PAN T, HE X Y, et al. A comprehensive evaluation method for operational risk of virtual power plants based on Bayesian feedback modified cloud model[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(5): 715-723.

收稿日期: 2024-03-07.

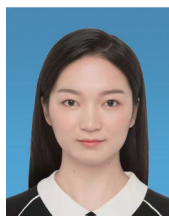
修回日期: 2024-05-10.

作者简介:



郑杨

郑杨(1982), 男, 硕士, 高级经济师, 研究方向为电力需求侧管理、节能减碳、新能源发展应用, 9249526@qq.com;



王雨薇

王雨薇(1993), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为综合能源技术, 本文通信作者, 15262967080@163.com;



杨慧敏

杨慧敏(1998), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为低压配网、负荷辨识, 1456629706@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)