

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.014

基于云物元分析的水光互补容量配置方案评价

郭晓茜¹, 黄显峰¹, 吴迪², 李旭³, 周文¹, 方国华¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司)

摘要: 针对水光互补系统容量配置方案的多属性、多等级、不确定性评价问题, 构建了涵盖安全性、环保性、经济性、技术性 & 社会性 5 个因素层的 3 级评价指标体系, 提出了基于组合赋权与云物元分析法的综合评价模型。该模型通过 AHP-云模型修正确定主观权重, 引入改进熵权法获取客观权重, 基于欧氏距离实现权重融合, 并运用云物元理论计算方案的各评价等级隶属度与综合评分, 将等级边界从刚性阈值拓展为柔性分布, 从而更合理地刻画评价过程中的随机波动与模糊过渡。澜沧江西藏段清洁能源基地实例验证结果表明: 该模型在多种容量配置方案的比选中表现出良好的区分效果, 评价结果与工程运行特征吻合, 能够有效协调多维度指标间的冲突; 综合评价模型兼顾了权重确定的全面性与等级判定的稳健性, 可为清洁能源基地容量配置提供科学、可靠的决策支持。

关键词: 云物元分析法; 水光互补容量配置; 指标体系; 改进熵权法; 综合评价

Evaluation of hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes based on cloud matter-element analysis

Guo Xiaoxi¹, Huang Xianfeng¹, Wu Di², Li Xu³, Zhou Wen¹, Fang Guohua¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc.)

Abstract: To address the multi-attribute, multi-level, and uncertain evaluation problem of capacity allocation schemes for hydro-photovoltaic complementary systems, a three-level evaluation index system covering five factor layers of security, environmental protection, economy, technicality, and sociality was constructed, and a comprehensive evaluation model based on combined weighting and cloud matter-element analysis method was proposed. In this model, subjective weights were determined through correction by the AHP-cloud model; objective weights were obtained by introducing the improved entropy weight method; weight fusion was realized based on Euclidean distance. Moreover, the cloud matter-element theory was applied to calculate the membership degrees of each scheme to evaluation grades and the comprehensive scores, expanding the grade boundaries from rigid thresholds to flexible distributions, thereby more reasonably depicting the random fluctuations and fuzzy transitions in the evaluation process. The results of the case verification for the clean energy base in the Xizang section of the Lancang River indicate that the model exhibits a good differentiation effect in the comparison and selection of multiple capacity allocation schemes. The evaluation results are consistent with the engineering operation characteristics, and the conflicts among multi-dimensional indicators can be effectively coordinated. The comprehensive evaluation model considers both the comprehensiveness of weight determination and the robustness of grade judgment, and it can provide scientific and reliable decision support for the capacity allocation of clean energy bases.

Key words: cloud matter-element analysis method; hydro-photovoltaic complementary capacity allocation; index system; improved entropy weight method; comprehensive evaluation

在全球能源体系正加速低碳化演进的背景下, 推动电力系统向高比例新能源接入转型已成为我国能源发展的关键路径^[1-2]。截至 2025 年 3 月, 我国可再生能源装机规模达到 19.66 亿 kW, 约占总装机容量的 57.3%, 其中水电、光伏发电装机分别为 4.38 亿、9.45 亿 kW, 光伏与风电装机规模已历史性超越全口径火电^[3]。然而, 风电、光伏出力的随机性与波动性, 对其大规模可靠并网及电力系统的稳定运行提出了更高要求^[4-7]。《2025 年能源工作指导意见》强调, 需“统筹新能源发展和消纳体系建设”“建立健全配电网发展指

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179012); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H20); 中核集团科技项目(XJYH-2024-DL-QT011)

作者简介: 郭晓茜(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事多能互补系统容量配置研究。E-mail: stream0403@163.com

通信作者: 黄显峰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事多能系统协同与优化调度研究。E-mail: xfhuang@hhu.edu.cn

标评价体系”。在此背景下,推进多能互补系统建设、优化系统结构与容量配置,已成为提升能源消纳能力与电网支撑效能的关键路径。

水电具有技术成熟、调节灵活的突出优势,是支撑多能互补系统运行的关键调节资源^[8-9]。容量配置作为多能互补系统在规划设计阶段的首要问题,直接决定了系统综合效益^[10]。围绕多能互补系统的优化运行与容量配置,现有研究通常是在综合考虑资源、电网与负荷等多重约束的基础上,以特定目标构建容量配置优化模型,采用优化算法求解以获得最优容量配置方案^[11]。常设定的优化目标有系统总成本最小、发电量最大、净收益最大、能源消纳率最高、负荷波动最小、调峰能力最大等^[12-13]。范志勇等^[14]以运行期内发电量最大为目标,构建了水风光蓄优化运行模型,利用混合整数线性规划进行求解,针对雅鲁藏布江中游区域开展了容量配置;He 等^[15]以金沙江下游为例,构建了以弃电量最小为目标的水光互补系统容量配置模型,并以混沌局部搜索求解了不同输送通道容量下的最优比例;Fang 等^[16]以光伏全寿命期内净收益最大为目标,构建了光伏电站并入水电站的容量配置模型,计算得到龙羊峡水光互补系统在 3 种出力情景下的最佳光伏配比;马超等^[17]以系统发电量最大和总出力波动最小为目标,构建了混合抽蓄-风-光多能互补系统短期协同运行优化模型,并通过全生命周期评价优化容量配置。然而,现有研究在评价维度方面仍存在明显局限,多数研究聚焦于优化互补系统的经济运行效率与供电可靠性,主要采用系统总成本^[18]、年净收益^[19]、平均度电成本^[20]等经济性指标,弃能电量^[21]、失负荷概率^[22]等可靠性指标作为核心评价准则。以水光互补为代表形式的多能互补系统涉及资源禀赋、调度运行、经济成本及综合效益等多重属性,其容量配置需统筹解决出力稳定、能源消纳、投资效率与区域发展等多目标协同问题^[23]。但现有研究对环保性、社会影响等外部效益的系统性考量仍显不足,制约了对方案综合效益的准确评估。因此,构建一套能够全面揭示方案表现的多维评价体系与综合评价模型,已成为实现容量配置科学优选的迫切需求。

评价方法上,国内外学者已采用多种决策方法开展了广泛研究。夏翔等^[24]采用层次分析(AHP)与灰色模糊综合评价方法进行多能互补工程项目的综合效益评价;赵凤展等^[25]结合 G1-CV 法与物元可拓法评估了系统的建设与运行成果;Zhang 等^[26]基于云模型对高比例清洁能源电力系统开展了可靠性评价;Yu^[27]等利用 TOPSIS 法对多能互补离网系统的不同运行方案进行了评估。然而,在应对多能互补系统的多属性、多等级、强不确定性评价问题上,现有评价方法仍难以实现科学、全面的综合分析。云物元分析法耦合了云模型处理模糊-随机共生的数学刻画能力与物元理论解决不相容问题的结构建模优势,能够自然实现定性概念与定量等级间的不确定性转换。当前,该方法在系统优化、安全或风险评估、资源环境管理等领域的复杂决策中展现出良好的适用性^[28],为构建多能互补系统容量配置的综合评价模型提供了新的方法视角。

鉴于此,本文面向清洁能源基地的规划需求,构建了 3 级水光互补容量配置评价指标体系,建立了基于组合赋权与云物元分析法的综合评价模型,并以澜沧江西藏段清洁能源基地为例开展实例验证,实现不同容量配置方案的综合评价与量化优选,以期对相关多能互补系统的容量决策提供技术支撑。

1 水光互补容量配置方案评价指标体系

1.1 评价指标体系的构建

评价指标体系的构建需契合能源安全保障要求、顺应绿色发展导向及市场化改革趋势,水能与光能在时空分布上的互补性要求其能够反映出力的稳定性与灵活性,并动态捕捉多时间尺度下的运行特征演变。该体系的构建核心在于回答“如何科学衡量方案实施水平”这一核心问题。本文遵循“科学性、系统性、可操作性”等多能系统评价的通用原则^[23],以“方案实施水平”为总体目标,从安全性、环保性、经济性、技术性和社会性 5 个维度建立因素层,分别对应系统运行稳定、能源利用高效、投资收益合理、技术效率达标及区域发展促进等核心关注点。通过分析各维度内涵和系统运行特征,参照相关规范及既有研究成果^[4,10],构建了涵盖供需平衡、运行弹性、资源利用、投资强度、电价水平和经济社会贡献等方面的候选指标集,在此基础上通过重要性比较与冗余性筛选,选择 15 项关键指标构建了“目标层-因素层-指标层”3 级水光互补容量配置方案评价指标体系,如图 1 所示。

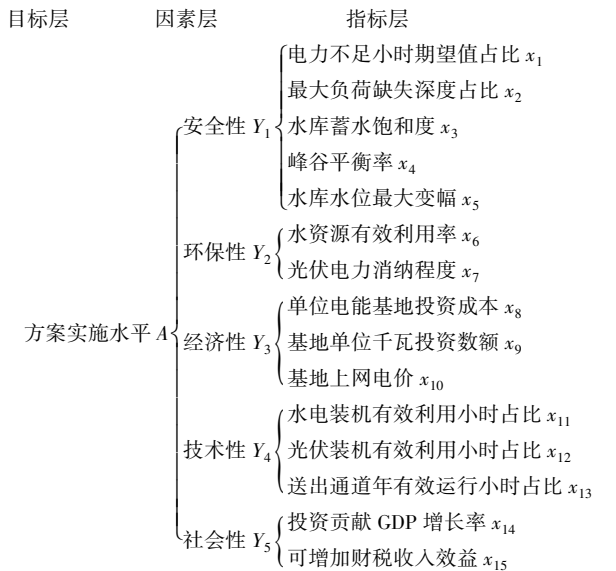


图 1 水光互补容量配置方案评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes

1.2 评价指标分级标准

为进行容量配置方案的定量判别与对比,将其实施水平划分为 4 个等级:Ⅰ(优秀)、Ⅱ(良好)、Ⅲ(一般)与Ⅳ(不合格)。基于 NB/T 11554—2024《水风光储可再生能源综合开发项目技术规范》,结合行业数据与相关研究^[20,29],确立了各评价指标分级标准及取值范围(表 1)。

表 1 评价指标分级标准和等级范围划分

Table 1 Grading criteria and grade range classification for evaluation indicators

评价等级	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	x_5/m	$x_6/\%$	$x_7/\%$	$x_8/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$
Ⅰ(优秀)	<20	<70	>45	>55	<3	>95	>95	<3
Ⅱ(良好)	20~<25	70~<80	>35~<45	>45~<55	3~<4	>90~<95	>90~<95	3~<3.3
Ⅲ(一般)	25~<35	80~<90	>25~<35	>35~<45	4~<5	>80~<90	>80~<90	3.3~<3.5
Ⅳ(不合格)	≥35	≥90	≤25	≤35	≥5	≤80	≤80	≥3.5

评价等级	$x_9/\text{元}$	$x_{10}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	$x_{11}/\%$	$x_{12}/\%$	$x_{13}/\%$	$x_{14}/\%$	$x_{15}/\text{亿元}$
Ⅰ(优秀)	<8 500	>0.4	>55	>20	>75	>55	>50
Ⅱ(良好)	8 500~<9 000	>0.35~<0.4	>50~<55	>15~<20	>65~<75	>50~<55	>45~<50
Ⅲ(一般)	9 000~<9 500	>0.3~<0.35	>40~<50	>10~<15	>60~<65	>45~<50	>40~<45
Ⅳ(不合格)	≥9 500	≤0.3	≤40	≤10	≤60	≤45	≤40

1.3 指标权重

1.3.1 AHP-云模型计算主观权重

为兼顾专家评判蕴含的经验信息,同时表征指标权重存在的不确定性与模糊性,本文先通过 AHP 法求解初始权重,再引入云模型对权重结果优化修正,使其更贴合真实工况。具体计算流程:①基于 AHP 法,通过同层成对比较与一致性检验等计算得到各因素层、指标层权重的初始值,作为云模型的样本输入;②通过逆向云发生器计算云特征参数:期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,分别刻画权重的集中趋势、分散程度和稳定性;③基于云特征参数,利用正向云发生器生成大量云滴,求均值得到主观权重。

1.3.2 改进熵权法计算客观权重

熵权法基于信息熵原理量化指标差异程度,属于客观权重赋值法,具体计算步骤如下:

a. 数据标准化。对于各方案的原始评价指标值,采用极值法同向化处理收益型(正向)和损失型(负向)两类指标,得到标准数据矩阵。

b. 根据式(1)计算特征比重。

$$q_{kp} = z_{kp} / \sum_{k=1}^m z_{kp} \quad (k = 1, 2, \cdots, m; p = 1, 2, \cdots, n)$$

(1)

式中: q_{kp} 为方案 k 中指标 p 的特征比重; z_{kp} 为方案 k 中指标 p 的标准取值。

c. 根据式(2)计算各指标熵值 e_p ,由式(3)确定对应熵权 w_{op} 。

$$e_p = - \sum_{k=1}^m q_{kp} \ln q_{kp} / \ln m \tag{2}$$

$$w_{op} = (1 - e_p) / \sum_{p=1}^n (1 - e_p) \tag{3}$$

传统熵权模型存在一定缺陷,当 e_p 接近阈值 1 时,指标间细微的熵值差异将导致熵权产生非线性变化,形成权重坍塌。为此引入线性压缩修正,改进的熵权 w_{ip} 计算公式为:

$$w_{ip} = \frac{\sum_{g=1}^n e_g + 2 - 3e_p}{\sum_{l=1}^n (\sum_{g=1}^n e_g + 2 - 3e_l)} \tag{4}$$

式(4)仍满足 $0 \leq w_{ip} \leq 1$, $\sum_{p=1}^n w_{ip} = 1$ 的权重基本准则,并保持与熵值的负相关关系。改进的熵权公式通过对 e_p 进行线性压缩,将接近 1 区间内的熵值差异“拉平”,抑制了极端熵值对权重的放大效应,能够有效平缓指标间的权重差异,避免极端情况下的权重失真。

1.3.3 欧氏距离法计算组合权重

确定组合权重时,常采用乘法归一化进行处理。然而,在部分指标的主、客观权重差异较大时,该方法常出现偏离原始权重的极端值,导致分配结果产生显著偏差,影响了综合评价的准确性。因此,引入基于欧氏距离的组合权重确定方法,通过其差异度方程计算主客观权重的偏好程度系数,从而确定组合权重:

$$\begin{cases} w_p = uw_{sp} + vw_{ip} \\ u + v = 1 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} D(w_{sp}, w_{ip}) = \sqrt{(w_{sp} - w_{ip})^2} \\ D(w_{sp}, w_{ip})^2 = (u - v)^2 \end{cases} \tag{6}$$

式中: w_p 为指标 p 的组合权重; w_{sp} 、 w_{ip} 分别为该指标的主观权重和客观权重; u 、 v 分别为主、客观权重的偏好程度系数; $D(w_{sp}, w_{ip})$ 为欧氏距离函数。

2 基于云物元分析的综合评价模型

2.1 云物元模型

容量配置方案的综合评价需在多维指标体系下兼顾结构层次与不确定特性。物元理论以对象主体 N 、属性 C 、量值 V 三大元素构建基础物元 $R=(N, C, V)$,通过设定经典域、节域计算关联度并进行等级判定,具有明确的层次结构和逻辑可追溯性。但在容量配置方案评价场景中,指标取值常受波动与边界模糊影响,单一确定量值难以反映其实际特征。因此,引入云模型参数特征(E_x, E_n, H_e)替代传统量值 V ,使量值由“点”扩展为“分布”,以实现结构层次与不确定性的统一表征。基于此,构建云物元模型如下:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x,1}, E_{n,1}, H_{e,1}) \\ & C_2 & (E_{x,2}, E_{n,2}, H_{e,2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{x,n}, E_{n,n}, H_{e,n}) \end{bmatrix} \tag{7}$$

期望 E_x 描述 C 在 V 的集中趋势,反映了该指标的典型取值;熵 E_n 度量 C 在 V 上的取值不确定性,体现评价值的分散和边界模糊程度;超熵 H_e 则刻画 E_n 的稳定性, H_e 越大表示评价对象在 C 上的波动性越强。

在水光互补容量配置方案综合评价中,以“方案实施水平”为目标层云物元 $R_0=(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5)^T$,下设安全性、环保性等 5 个因素层云物元,并映射到指标层,形成“目标层-因素层-指标层”3 级云物元结构。

2.2 关联参数转换

不同等级区间的云参数可由区间上下限转化得到,云模型参数特征可表示为:

$$E_x = (c_{\max} + c_{\min}) / 2 \tag{8}$$

$$E_n = (c_{\max} - c_{\min}) / 6 \tag{9}$$

$$H_e = k' \tag{10}$$

式中: $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 分别为评价指标在该等级区间的最大值、最小值; k' 为常数,用以控制云层厚度与隶属度扰动程度,可综合评价指标的模糊性与专家评估进行取值调整,一般取 $k'=0.005$ 。

2.3 确定评价等级隶属度

云物元隶属度用于建立评价指标与云物元等级之间的量化对应关系,实现指标值到评价等级的映射,需依次计算评价体系各层级隶属度,逐层汇总后形成方案的等级判定。

a. 计算指标层隶属度。根据各等级区间的云参数特征,将指标量值作为云滴输入,产生正态随机数 $E'_n \sim N(E_x, (H_e)^2)$,进而可得到该指标对各评价等级的隶属度:

$$E'_n = \text{random}(1)H_e + E_n \tag{11}$$

$$\mu_j(I_{ih}) = \exp\left[-\frac{(x_{ih} - E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \quad (i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, 3, 4; h = 1, 2, \dots, n_i) \tag{12}$$

式中: $\text{random}(1)$ 为服从标准正态分布的随机数; $\mu_j(I_{ih})$ 为因素 Y_i 中指标 h 对评价等级 j 的隶属度; x_{ih} 为该评价指标的量值; n_i 为因素 Y_i 所包含的评价指标总数, $\sum_{i=1}^5 n_i = n = 15$ 。对式(12)多次模拟取均值,作为指标层最终隶属度。

b. 加权合成因素层隶属度。结合第 1.3 节所得权重可得出因素层隶属度为:

$$\mu_j(Y_i) = \sum_{h=1}^{n_i} w_{ih}\mu_j(I_{ih}) \tag{13}$$

式中: $\mu_j(Y_i)$ 为因素 Y_i 对评价等级 j 的隶属度; w_{ih} 为因素 Y_i 中指标 h 的组合权重。

c. 将因素层隶属度加权汇总至目标层,得到目标层云物元的评价等级隶属度为:

$$\mu_j(A) = \sum_{i=1}^5 w_i\mu_j(Y_i) \tag{14}$$

式中: $\mu_j(A)$ 为目标层云物元对评价等级 j 的隶属度; w_i 为因素 Y_i 的权重。

2.4 方案等级判定与评分

基于隶属度最优准则,目标层云物元隶属度最大值 $\max(\mu_j(A))$ 所对应的等级即为容量配置方案实施水平的最终评价等级。

为对方案进行量化排序,引入级别特征值法对方案进行综合评分^[10]。定义等级向量 $g = (g_1, g_2, g_3, g_4)$,取值为(100, 90, 80, 60),待评价方案的综合评分为:

$$T_p = \sum_{j=1}^4 \mu_j(I_p)g_j \tag{15}$$

$$T = \sum_{p=1}^n w_p T_p \tag{16}$$

式中: T_p 为指标 p 在评价等级集下的得分; $\mu_j(I_p)$ 为指标 p 对评价等级 j 的隶属度; g_j 为评价等级 j 所对应的标准分值; T 为待评价方案的综合评分。

综上,基于云物元分析的水光互补容量配置方案综合评价流程如图 2 所示。

3 实例验证

3.1 工程概况

澜沧江上游干流具备典型清洁能源基地特征。流域河道长约 379 km,天然落差 1 080 m,平均比降 2.85‰。水能充沛、径流稳定,适宜布置大中型梯级电站,可提供稳定的调节能力和充足的清洁电力。基地

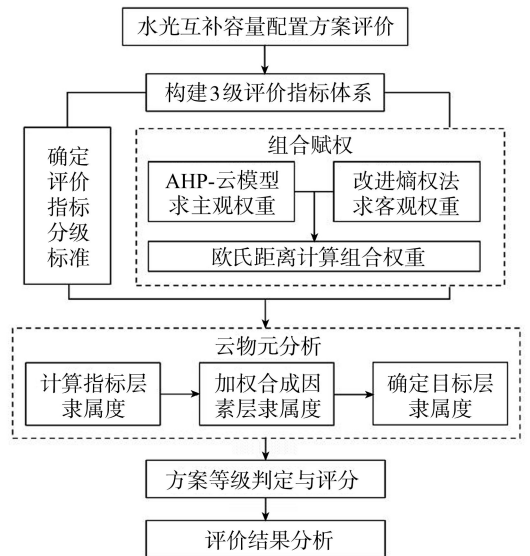


图2 水光互补容量配置方案评价流程
Fig.2 Evaluation process for hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes

光照条件优越,年日照时数约 2 200 h,年总辐射量 5 800~6 700 MJ/m²,稳定度达 0.65,分布均衡,具备建设大规模光伏电站的良好基础。

依托水光资源在时序和空间上表现的明显互补性,该基地适宜建设大型水光互补清洁能源体系。结合水电调节性能、光伏消纳水平、输电通道承载力以及外送需求等多方面约束,最终拟定两档水电配置容量与四档光伏配置容量,记水电容量档集合 $H=\{952.5\text{ 万 kW}, 1\,000\text{ 万 kW}\}$ 、光伏容量档集合 $P=\{1\,000\text{ 万 kW}, 1\,100\text{ 万 kW}, 1\,200\text{ 万 kW}, 1\,400\text{ 万 kW}\}$,通过两集合笛卡尔积共形成 8 种水光互补装机容量配置方案,记为 $H_aP_b(a=1,2;b=1,2,3,4)$,其中 a 、 b 分别为水电、光伏容量档位编号,用于后续综合评价与方案优选。

3.2 水光互补容量配置方案评价

3.2.1 评价指标权重计算

依据所建立的评价指标体系,结合规划资料、相关统计年鉴及仿真计算结果,得到 8 种容量配置方案中各评价指标的初始值。采用第 1.3 节的组合赋权方法获得指标层各类权重。

a. 主观权重计算。采用 AHP-云模型量化专家判断,取云滴权重均值并在同层归一化后得到因素层及指标层权重,结果如图 3 所示。云团越窄、峰值越尖,表明专家判断越一致、权重稳定性越高;云团偏移则反映相对重要性差异。由图 3 可知,各云团整体均呈近似正态,厚度适中,可直观比较不同要素与指标的主观重要性。因素层权重结果为:安全性最高(0.344 0),其次为经济性(0.194 5),环保性与技术性较为接近,分别为 0.167 8、0.162 6,社会性相对较低(0.131 1)。指标层权重依此分配,得到用于评价计算的整体主观权重, H_1P_3 方案的结果见表 2。

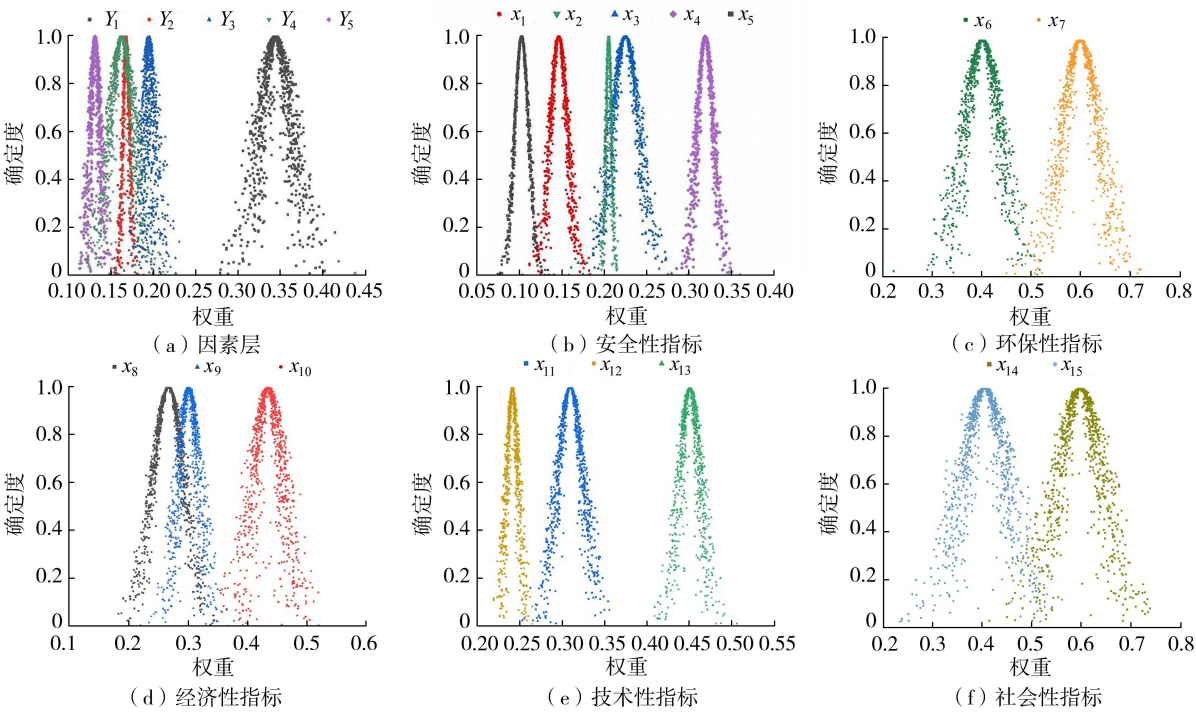


图 3 主客观权重分布

Fig. 3 Distribution of subjective weights

b. 组合权重计算。利用改进熵权法获得指标层客观权重值后,采用欧氏距离进行主、客观权重融合,指标层权重计算结果见表 2。

3.2.2 容量配置方案综合评价结果

采用云物元分析法对水光互补容量配置方案进行评价,计算各方案指标层评价等级隶属度后,依据组合权重逐层汇总,可得到待评价方案在目标层上的隶属度及综合评价等级。以 H_1P_3 方案为例,计算结果见表 2、表 3。依据隶属度最优原则, H_1P_3 方案的安全性因素层评价等级为良好,环保性为优秀,经济性、技术性、社会性因素层评价等级均为良好;该方案在目标层“方案实施水平”的隶属度评价向量为 (0.159 6, 0.765 2, 0.073 5, 0.001 8),判定等级为良好,整体呈现“环保性最优、其余维度稳定良好”的格局。

表 2 H₁P₃ 方案指标层评价等级隶属度

Table 2 Membership degrees of H₁P₃ scheme to evaluation grades at indicator level

因素	指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标值	评价等级隶属度				评价等级
						优秀	良好	一般	不合格	
Y ₁	x ₁	0.050 5	0.102 5	0.082 5	23.06%	0.000 6	0.998 9	0.000 2	0.000 3	良好
	x ₂	0.070 7	0.072 2	0.081 3	73.40%	0.007 0	0.993 0	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₃	0.077 5	0.053 6	0.066 2	40.02%	0.001 9	0.998 1	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₄	0.109 8	0.035 3	0.061 7	55.69%	0.832 1	0.167 9	0.000 0	0.000 0	优秀
	x ₅	0.035 5	0.052 6	0.029 7	3.77 m	0.000 0	0.999 5	0.000 3	0.000 2	良好
Y ₂	x ₆	0.067 3	0.095 2	0.102 1	96.64%	0.999 8	0.000 0	0.000 0	0.000 2	优秀
	x ₇	0.100 5	0.039 8	0.063 7	93.39%	0.000 0	0.999 4	0.000 0	0.000 6	良好
Y ₃	x ₈	0.070 6	0.043 4	0.048 8	3.25 元/(kW·h)	0.015 9	0.979 6	0.002 0	0.002 5	良好
	x ₉	0.048 8	0.039 5	0.030 7	8 921 元	0.000 0	0.996 6	0.003 4	0.000 0	良好
	x ₁₀	0.043 3	0.162 1	0.111 8	0.379 2 元/(kW·h)	0.004 1	0.994 6	0.001 2	0.000 1	良好
Y ₄	x ₁₁	0.060 1	0.064 5	0.061 8	48.46%	0.004 8	0.000 1	0.994 2	0.000 9	一般
	x ₁₂	0.046 7	0.054 0	0.040 2	18.54%	0.017 0	0.983 0	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₁₃	0.087 7	0.068 4	0.095 6	69.45%	0.000 1	0.999 5	0.000 0	0.000 4	良好
Y ₅	x ₁₄	0.078 2	0.062 8	0.078 2	51.47%	0.005 2	0.993 6	0.000 0	0.001 2	良好
	x ₁₅	0.052 9	0.054 2	0.045 7	45.13 亿元	0.060 5	0.653 1	0.255 9	0.030 5	良好

表 3 H₁P₃ 方案评价等级结果

Table 3 Evaluation grade results of H₁P₃ scheme

因素	评价向量	评价等级
Y ₁	(0.162 2, 0.837 7, 0.000 1, 0.000 0)	良好
Y ₂	(0.615 5, 0.384 1, 0.000 0, 0.000 4)	优秀
Y ₃	(0.006 5, 0.991 1, 0.001 7, 0.000 7)	良好
Y ₄	(0.005 0, 0.683 6, 0.310 9, 0.000 5)	良好
Y ₅	(0.025 6, 0.868 1, 0.094 3, 0.012 0)	良好

各容量配置方案的目标层评价等级隶属度及综合评分结果见表 4。8 种方案的评价等级主要集中Ⅱ级,部分位于Ⅲ级,方案整体实施水平良好。方案集综合评分位于 86.78~90.81 分区间,其中 H₁P₃ 方案(水电 952.5 万 kW+光伏 1 200 万 kW)评分最高(90.81 分),其次为 H₂P₄(90.05 分)、H₁P₄(89.89 分),P₁ 组评分相对靠后。H₁、H₂ 组内比较,即在水电容量固定情况下,方案由 P₁ 向 P₃、P₄ 演进时,Ⅰ、Ⅱ级隶属度整体上升,综合评分普遍提升约 2~4 分;而在光伏规模固定时,两水电容量档位之间差异较小。与水电容量相比,提高光伏配置规模对等级提升更为明显,主要原因为 在既定来水和通道约束下,水电装机已基本匹配可利用水量,扩容的边际效益有限;而增加光伏规模可显著提升光伏消纳和水资源利用效率,并抬升其他因素层得分。

表 4 各容量配置方案目标层评价等级隶属度

Table 4 Membership degrees of various capacity allocation schemes to evaluation grades at target level

容量配置方案	评价等级隶属度				综合评分
	Ⅰ(优秀)	Ⅱ(良好)	Ⅲ(一般)	Ⅳ(不合格)	
H ₁ P ₁	0.169 1	0.371 3	0.453 3	0.006 3	86.97
H ₁ P ₂	0.082 3	0.673 6	0.238 6	0.005 5	89.07
H ₁ P ₃	0.159 6	0.765 2	0.073 4	0.001 8	90.81
H ₁ P ₄	0.131 9	0.642 4	0.172 1	0.053 6	89.89
H ₂ P ₁	0.168 4	0.351 5	0.475 5	0.004 6	86.78
H ₂ P ₂	0.111 1	0.631 3	0.254 3	0.003 3	89.67
H ₂ P ₃	0.122 2	0.689 2	0.187 1	0.001 5	89.81
H ₂ P ₄	0.131 2	0.608 8	0.257 4	0.002 6	90.05

3.2.3 评价结果分析

H₁P₃ 容量配置方案在容量配置评价体系下的综合评分最高,为 8 个容量配置方案中的最优选择。该容量组合与清洁能源基地“水电以调节为主、光伏规模化消纳”的总体思路相契合,符合基地总体建设规划,体现了评价模型在安全、经济、环保等多维目标权衡中的工程适用性。为识别优势指标与可能的约束环节,围绕 H₁P₃ 方案,结合其指标层评价等级隶属度结果,按因素层逐一开展机理性分析。

a. 方案安全性(Y_1)因素层下,峰谷平衡率(x_4)评价等级为优秀,客观体现了水光互补系统在电力调峰与平抑电网负荷波动方面成效显著,带动了清洁消纳与系统调节能力的同步提升,支撑了系统的安全稳定。电力不足小时期望值占比(x_1)评价等级为良好,表明系统有效降低了短时失供频次,保障了供电稳定。最大负荷缺失深度占比(x_2)为良好,说明系统的优化调控能将负荷缺失控制在较低水平,提高了用电可靠性。水库蓄水饱和度(x_3)评价等级为良好,反映库容利用与发电时序匹配合理,年调节水库能迅速形成可支配水量,为光伏出力提供时移承载并增强互补调节弹性。水库水位最大变幅(x_5)同为良好,显示在水光互补系统协同运行下,库水位过程线较为平缓,增强了系统的稳定性和电力支撑能力。安全性因素层评价结果表明:水电协同调节能够显著抑制光伏波动,改善供应缺口状况,凸显了水光互补对系统安全边界的积极作用。

b. 方案环保性(Y_2)这一因素层的评定等级为优秀,其中,水资源有效利用率(x_6)、光伏电力消纳程度(x_7)评价等级分别为优秀、良好,该结果表明,清洁能源基地在水光协同运行机制下实现了对水能与太阳能的高效利用,该机制在无需额外环境代价的前提下,扩大了清洁电量的就地消纳规模,优化了能源利用结构与环境绩效,进一步巩固了清洁能源基地的低碳属性。

c. 方案经济性(Y_3)因素层下,单位电能基地投资成本(x_8)评价等级为良好,水光资源的联合优化能够提升等效利用小时,减少冗余配置,从而降低了基地的初始投资强度。基地单位千瓦投资数额(x_9)和基地上网电价(x_{10})评价等级为良好,得益于光伏就地消纳率的提高与出力波动显著收敛,提升了基地的发电盈利能力。总体而言,该方案在经济性维度形成了“高利用-低损失-稳收益”的组合优势,经济性作为市场竞争力的关键将有力促进基地的建设和推广。

d. 方案技术性(Y_4)因素层下,水电装机有效利用小时占比(x_{11})评价等级为一般,光伏装机有效利用小时占比(x_{12})和送出通道年有效利用小时占比(x_{13})的评价等级为良好,表明在水光互补优化下,系统整体可用性与送出保障较强,但由于负荷端需求变化及光伏波动性等叠加影响,部分时段内水电机组和光伏机组未得到有效利用。技术性维度是将资源禀赋转化为稳定、可调的供电能力的关键环节,可通过滚动预测与分时联调、机组运行节奏优化、视需要引入储能或需求响应等措施进一步强化。

e. 方案社会性(Y_5)因素层下,投资贡献 GDP 增长率(x_{14})和可增加财税收入效益(x_{15})的评价等级均为良好,表明清洁能源基地不仅有利于提升能源的有效利用,还能间接对区域经济财政形成拉动效应,带动就业与产业配套,为区域经济与公共财政带来积极外溢价值。方案的社会性反映了当地人民及政府对清洁能源基地规划建设的认可度,其优势与其他维度相互支撑,体现出综合公共效益。

综上所述, H_1P_3 方案在各因素层表现均衡且较为突出,充分彰显了水光互补的综合优势,验证了评价模型在工程实践中的合理性和适用性,可为清洁能源基地水光互补容量配置方案的优选及多层次因素评估提供参考。后续可因地制宜挖掘水电与光伏的差异化特性,以进一步巩固提升系统运行成效。

4 结 语

构建了 1 个核心目标、5 个因素层、15 项指标的 3 级综合评价指标体系,突破了传统评价多侧重于经济与技术性能的局限,为全面衡量容量配置方案的综合效益提供了系统的框架基础。提出了结合组合赋权与云物元分析法的综合评价模型,有效融合了决策者的经验判断与指标数据的内在规律。AHP-云模型与改进熵权法的结合,兼顾了权重分配的主观偏好与客观差异性;云物元理论的引入,则科学刻画了评价等级边界的模糊性与随机性,使方案优选更加合理准确。实例验证中,8 种容量配置方案的综合评分范围为 86.78~90.81,整体实施水平较高。横向对比显示,固定水电规模下,适当提高光伏容量配置可提升综合评分 2~4 分,光伏规模的扩大对等级提升的影响更为明显。该模型在澜沧江清洁能源基地的实践中具有良好的适用性与解释力,可作为清洁能源基地容量配置优选、比选与阶段性复核的实用性工具。未来可结合多源数据持续校正分级阈值,进一步扩展至含风电、储能等更为复杂的多能互补系统评价中,并与动态调度运行相结合,以构建全周期的评价与优化机制。

参考文献:

[1] 陈述,陈琼,任康,等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):20-27.
(Chen Shu, Chen Qiong, Ren Kang, et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River

- considering renewable energy accommodation[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 20-27. (in Chinese))
- [2] 王立平, 马实一, 郭旭, 等. 风电光伏发电抽水蓄能联合优化调度方法[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 58-63. (Wang Liping, Ma Shiyi, Guo Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 58-63. (in Chinese))
- [3] 李晓峰, 刘玉宏, 王晓, 等. 具备主动支撑能力和灵活调节能力的光储集成同步发电机技术研究[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(10): 1557-1572. (Li Xiaofeng, Liu Yuhong, Wang Xiao, et al. Study on photovoltaic-energy storage virtual synchronous generator technology with active grid support and flexible regulation capabilities[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(10): 1557-1572. (in Chinese))
- [4] 尹丽君, 许昌, 黄显峰, 等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(5): 65-69. (Yin Lijun, Xu Chang, Huang Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(5): 65-69. (in Chinese))
- [5] 张验科, 罗笙月, 卢垚键, 等. 风光混蓄长周期互补发电优化调度研究[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(4): 60-66. (Zhang Yanke, Luo Shengyue, Lu Yaojian, et al. Research on optimal operation for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage system[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 60-66. (in Chinese))
- [6] 黄显峰, 黄晗, 鲜于虎成, 等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(2): 38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(2): 38-45. (in Chinese))
- [7] 张晓会, 王丹彤. 基于《2025 年能源工作指导意见》的思考[J]. *电池*, 2025, 55(3): 561-564. (Zhang Xiaohui, Wang Dantong. Thoughts based on the *Guidance on Energy Work in 2025*[J]. *Battery Bimonthly*, 2025, 55(3): 561-564. (in Chinese))
- [8] 方国华, 王海政, 吴承君, 等. 考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 20-27. (Fang Guohua, Wang Haizheng, Wu Chengjun, et al. Study on mid-and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 20-27. (in Chinese))
- [9] 钟加星, 董增川, 孟金玉, 等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaxing, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [10] 黄显峰, 周引航, 张启凡, 等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(1): 44-51. (Huang Xianfeng, Zhou Yinhang, Zhang Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 44-51. (in Chinese))
- [11] 陈祥鼎, 刘攀, 吴迪, 等. 水风光互补系统装机容量配置解析优化及敏感性分析[J]. *水利学报*, 2023, 54(8): 978-986. (Chen Xiangding, Liu Pan, Wu Di, et al. Analytical optimization and sensitivity analysis of installed capacity configuration of hydro-wind-photovoltaic complementary systems[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(8): 978-986. (in Chinese))
- [12] 李继清, 龙健, 刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [13] 韩晓言, 丁理杰, 陈刚, 等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(13): 2709-2722. (Han Xiaoyan, Ding Lijie, Chen Gang, et al. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(13): 2709-2722. (in Chinese))
- [14] 范志勇, 原文哲, 唐莉华, 等. 雅江中游流域水风光蓄布局及容量配置优化研究[J]. *水力发电学报*, 2025, 44(9): 27-37. (Fan Zhiyong, Yuan Wenzhe, Tang Lihua, et al. Optimizing layout and capacity allocation for hydroelectric-wind-photovoltaic-pumped storage system in middle Yarlung Zangbo River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2025, 44(9): 27-37. (in Chinese))
- [15] He Yaoyao, Hong Xiaoyu, Wang Chao, et al. Optimal capacity configuration of the hydro-wind-photovoltaic complementary system considering cascade reservoir connection[J]. *Applied Energy*, 2023, 352: 121927.
- [16] Fang Wei, Huang Qiang, Huang Shengzhi, et al. Optimal sizing of utility-scale photovoltaic power generation complementarily

operating with hydropower;a case study of the world's largest hydro-photovoltaic plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017,136:161-172.

[17] 马超,刘璐,练继建,等. 基于综合评价的混合抽蓄-风-光多能互补系统容量优化配置研究[J]. *水利学报*,2025,56(6): 726-738. (Ma Chao,Liu Lu,Lian Jijian,et al. Research on capacity design for hybrid pumped storage-wind-PV power system based on comprehensive evaluation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2025,56(6):726-738. (in Chinese))

[18] 王筱,李高青,姬生才,等. 计及风光不确定性的互补发电系统容量优化配置研究[J]. *动力工程学报*,2024,44(11):1750-1759. (Wang Xiao,Li Gaoqing,ji Shengcai,et al. Research on optimal capacity configuration of complementary power generation system considering wind-solar uncertainty[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2024,44(11):1750-1759. (in Chinese))

[19] 赵宇洋,赵钰欢,郭英军,等. 离网型风光氢储系统容量配置与控制优化[J]. *太阳能学报*,2024,45(7):50-59. (Zhao Yuyang,Zhao Yuhuan,Guo Yingjun,et al. Capacity configuration and control optimization of off-grid wind solar hydrogen storage system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*,2024,45(7):50-59. (in Chinese))

[20] 袁文楠,黄显峰,鲜于虎成,等. 基于客观权重赋权-优劣解距离法的水光互补能源基地补偿效益分摊[J]. *电网技术*, 2024,48(5):2003-2011. (Yuan Wennan,Huang Xianfeng,Xianyu Hucheng,et al. Compensation benefit sharing of hydro-photovoltaic complementary energy based on critic-topsis method[J]. *Power System Technology*,2024,48(5):2003-2011. (in Chinese))

[21] 李宁,齐尚敏,刘海洋,等. 基于机组出力特征解析的风光储联合规划[J]. *热力发电*,2022,51(8):91-98. (Li Ning,Qi Shangmin,Liu Haiyang,et al. Wind power-photovoltaic-energy storage joint planning based on unit output characteristic analysis [J]. *Thermal Power Generation*,2022,51(8):91-98. (in Chinese))

[22] 于佰建,陈卓尔,宋长城,等. 基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2024,52(5):93-100. (Yu Baijian,Chen Zhuoer,Song Changcheng,et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2024,52(5):93-100. (in Chinese))

[23] 屈小云,吴鸣,李奇,等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. *中国电力*,2021,54(11):153-163. (Qu Xiaoyun,Wu Ming,Li Qi,et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems [J]. *Electric Power*,2021,54(11):153-163. (in Chinese))

[24] 夏翔,方建亮,谢颖捷,等. 基于层次分析与灰色模糊综合评价的多能互补工程项目综合效益评估[J]. *济南大学学报(自然科学版)*,2020,34(1):76-84. (Xia Xiang,Fang Jianliang,Xie Yingjie,et al. Comprehensive benefit evaluation of multi-energy complementary engineering project based on analytic hierarchy process and gray fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*,2020,34(1):76-84. (in Chinese))

[25] 赵凤展,李奇,张启承,等. 多能互补能源系统多维度综合评价方法[J]. *农业工程学报*,2021,37(17):204-210. (Zhao Fengzhan,Li Qi,Zhang Qicheng,et al. Multi-dimensional comprehensive evaluation of multi-energy complementary energy system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2021,37(17):204-210. (in Chinese))

[26] Zhang Bin,Xu Longxun,Shu Hongchun,et al. A cloud model-based optimal combined weighting framework for the comprehensive reliability evaluation of power systems with high penetration of renewable energies[J]. *Sustainability*,2025,17(5):2273.

[27] Yu Lei,Yan Xiaobin,Yang Shenhao,et al. Comprehensive benefit evaluation analysis of multi-energy complementary off-grid system operation[J]. *Energies*,2025,18(9):2159.

[28] 魏盛宇,梁文彪,翟越,等. 基于博弈论组合赋权云物元模型的城市道路交通系统风险评价[J]. *科学技术与工程*,2024,24(10):4359-4367. (Wei Shengyu,Liang Wenbiao,Zhai Yue,et al. Risk evaluation of urban road transportation system based on cloud matter element model of game theory combination[J]. *Science Technology and Engineering*,2024,24(10):4359-4367. (in Chinese))

[29] 顾建伟,高洁,刘一兵,等. “双碳”目标下我国风光水火储多能互补标准体系研究[J]. *中国标准化*,2025(6):77-86. (Gu Jianwei,Gao Jie,Liu Yibing,et al. Research on standards system of wind/solar/hydro/thermal/storage multi-energy complementary project under carbon peaking and carbon neutrality goals in China[J]. *China Standardization*,2025(6):77-86. (in Chinese))