

基于改进 AHP 法组合赋权的变权可拓云的乡村能源系统效益评估

裴越^{1,2}, 张靖², 唐孜童^{1,2}, 廖卓颖^{1,2}, 刘雨兵², 刘通³, 舒杰^{1,2}

(1. 中国科学技术大学能源科学与技术学院, 广州 510640; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 在“双碳”和“乡村振兴”战略目标的驱动下, 针对乡村能源能效低、清洁能源占比少等问题, 乡村能源绿色转型迫在眉睫。乡村综合能源系统作为提升能源利用效率、降低碳排放的有效途径, 已成为当前研究热点, 然而针对该系统的效益评估研究仍显不足。为此提出了一种基于组合赋权的变权可拓云模型的乡村综合能源评估方法。首先构建了涵盖乡村经济、技术、生态、社会4个方向的评估指标体系; 然后运用改进 AHP 法主观赋权降低了计算复杂度, 使用反熵法客观赋权, 然后使主客观权重最小化求解最优组合权重, 最后运用改进的可拓云模型对乡村综合能源系统指标数据进行评估, 通过对指标数据自适应变权更加突出系统短板和优势指标。以广西古辣镇示范工程数据为例对其进行评估, 结果表明所提出的方法有效、科学。

关键词: 乡村综合能源; 变权可拓云模型; 综合能源系统评估方法; 改进 AHP 法

Benefit Evaluation of Rural Energy Systems Based on Variable-Weight Extension Cloud with Combined Weighting via Improved AHP

PEI Yue^{1,2}, ZHANG Jing², TANG Zitong^{1,2}, LIAO Zhuoying^{1,2}, LIU Yubing², LIU Tong³, SHU Jie^{1,2}

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Driven by the strategic goals of "dual carbon" and "rural revitalization", and in response to issue such as low rural energy efficiency and a low proportion of clean energy in rural areas, the green transition of rural energy has become an urgent priority. As an effective approach to improve energy utilization efficiency and reduce carbon emissions, the rural integrated energy system has emerged as a current research focus. However, researches on the benefit evaluation of this system remains insufficient. To address this gap, a rural integrated energy evaluation method is proposed based on a variable-weight extension cloud model with combined weighting. Firstly, an evaluation index system covering four dimensions is constructed: rural economy, technology, ecology, and society. Secondly, the improved analytic hierarchy process (AHP) is adopted for subjective weighting to reduce computational complexity, while the anti-entropy method is used for objective weighting. Subsequently, the optimal combined weights are obtained by minimizing the deviation between subjective and objective weights. Finally, the improved extension cloud model is applied to evaluate the index data of the rural integrated energy system, and the adaptive variable weighting of index data is implemented to better highlight the system's shortcomings and advantageous indicators. Taking the data of the demonstration project in Gula Town, Guangxi as an example, the evaluation is conducted. The results show that the method proposed is effective and scientific.

Key words: rural integrated energy; variable-weight extension cloud model; evaluation method for integrated energy systems; improved analytic hierarchy process (AHP)

0 引言

能源作为全球经济运转与社会进步的核心支撑,其稳定供给与合理利用直接关系到人类文明的持续发展。但长期以来,全球能源供给体系高度依赖化石燃料,在社会发展进程的同时也涌现了诸如化石能源储量的日益枯竭,能源安全面临严峻挑战,化石燃料消费产生的 CO_2 和 NO_x 污染物气体,加剧了全球气候变暖和空气质量的下降,对生态环境与人类生存空间造成了巨大的破坏。在此背景下,我国基于国家可持续发展战略与全球气候治理责任,明确提出“双碳”^[1]的战略目标。然而,我国能源消费现状仍存在能源结构性失衡与能源效率性的问题,能源结构中不可再生化石能源消费占比过高,风能、太阳能等可再生能源利用率偏低,整体能耗强度居高不下^[2-3]。因此调整能源结构提高可再生能源占比、降低碳排放已成为当前我国能源领域发展的核心任务,具有极强的现实必要性与战略紧迫性。

近年来,随着社会经济对能源需求的持续增长,以及电、热、气、冷等不同类型能源系统间的耦合关联性日益加深,加之“双碳”目标下有强烈的提升能源综合利用效率的现实需求^[4],综合能源系统作为一种新型能源系统模式应运而生。其核心逻辑在于打破传统能源系统中电力、热力、燃气等领域各自独立规划、运营的壁垒,形成多种能源全环节的协调利用,从而精准匹配工业、商业、居民等多元化的用能负荷需求^[5-6],还整合了生物质能、风能、太阳能、水能、氢能^[7-8]等多种能源,通过智能化管理实现能量平衡和能源的高效利用^[9-10]。

在“双碳”目标下建立更加高效环保的综合能源系统是必然趋势,为了评估综合能源多维度效益从而对综合能源系统规划提供指导,文献[11]建立了包含火用效率的3个维度的综合能源系统的能效评估体系。文献[12]总结了适配园区综合能源系统的指标构建原则和指标类型和主流的评估方法。董福贵^[13]等人在综合能源系统的评估中提出了主客观法相结合的组合赋权的方式来进行权重赋值,并验证了其可靠性。董文洁等人^[14]结合能源互联网建立了生产、输配、消费框架下的评估体系,并基于博弈论理论实现权重分配的科学性与合理性。文献[15]提出了针对区域综合能源系统评估的数据包络法,

但其提出的指标体系仅局限与传统的经济、生态方面。当前学界与产业界对于评估领域已形成多种主流方法,其中应用较为广泛的包括3种,一是理想解排序法,通过计算正负理想解贴近度来评估^[11];二是层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)适用于存在较多定性与定量指标耦合的评价场景^[16];三是模糊综合评价法,该方法可有效处理评价过程中存在的模糊性与不确定性^[17]。但这些研究缺乏对乡村综合能源系统的评估体系方面的研究。

乡村综合能源系统多种能源耦合更深,涉及生物质能、风能、太阳能等多种能源协调互补,风光功率波动性更强,时空分布更广^[18-20],为了探究乡村综合能源系统的多维度效益评估体系及方法从而为其发展规划运行提供指导从而实现综合能源系统的长期稳定、经济运行,对其进行科学合理评估至关重要。

鉴于传统评估方法存在单一赋权方法主观性强、对于指标均匀性要求高、无法突出优势及短板指标、乡村场景研究不足等问题,本文依托美丽乡村示范工程,建立了经济、技术、生态、社会4个维度的适用乡村地区能源系统的评估指标体系,根据乡村地区可再生能源资源丰富的特点加入了可再生能源渗透率指标,根据乡村地区生物质资源禀赋加入生物质气化池效率的相关指标,考虑到乡村地区建设经济成本承受能力提出了综合投资回收期指标,考虑到系统建设对乡村地区的影响提出了定性指标乡村社会发展、乡村农业人均产值等指标,其余指标基于已有文献研究^[21],并且提出了分别使用改进AHP法和反熵法对指标权重赋值,弥补了单一赋权法的缺陷,减少了计算复杂度,并让主客观权重偏差最小化来取得最佳组合权重,最后利用变权可拓云模型处理模糊性和随机性法,提高了评估区分度和科学性。

1 乡村综合能源系统低碳评估指标体系

1.1 经济维度

1.1.1 综合投资回收期

综合投资回收期作为乡村综合能源系统经济评价指标意义在于其能精准契合乡村能源系统的特性与决策需求:它通过折现考虑资金时间价值,适配乡村项目“前期投入大、回收周期长”的特点,采用静态和动态回收期相叠加的方式;以直观的回收时

间为输出,回应投资者对“成本能否安全收回、多久收回”的核心需求,契合乡村项目对风险可控性的诉求。其表达式为:

$$T_{DA} = \frac{T_{DP} + T_{AP}}{2} \quad (1)$$

$$\sum_{b=0}^{T_{DP}} [A_{cin}(b) - A_{cout}(b)(1+r)^{-b}] = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{b=0}^{T_{AP}} [A_{cin}(b) - A_{cout}(b)] = 0 \quad (3)$$

式中: T_{DA} 为综合投资回收期; T_{DP} 、 T_{AP} 分别为动态、静态投资回收期; $A_{cin}(b)$ 为第 b 年因系统运行而产生的经济效益; $A_{cout}(b)$ 为第 b 年总投资; r 为年利率。

1.1.2 系统维护成本

系统维护成本是乡村综合能源系统购买系统设备的成本和系统设备运行时产生的经济成本,能直观地展示出乡村综合能源系统的经济成本。

$$A_1 = \sum_{i=1}^N S_i w_i + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} W_{i,t} r_i \quad (4)$$

式中: S_i 为系统设备 i 的额定容量; w_i 为系统设备 i 的单位设备投资费用; $W_{i,t}$ 为系统设备逐时负荷; r_i 为单位系统设备运行费用; A_1 为系统维护成本。

1.1.3 用户人均用能成本

用户人均用能成本作为乡村综合能源系统的核心评估指标之一,其核心意义体现在对系统经济性与民生价值的直接量化。能够直观反映乡村居民在能源消费中的实际经济负担,直接关联到乡村居民的可支配收入与生活成本优化,是衡量系统是否真正惠及民生的关键依据。从系统评估维度而言,将该指标纳入评估体系,突破了仅关注能源供应效率或技术性能的单一视角,转而聚焦于能源系统与乡村经济生态的适配性,若人均用能成本长期处于合理低位,说明系统在能源生产、消费、收益循环中形成了良性平衡,具备在乡村场景推广的经济基础。其表达式为:

$$A_2 = \left(\frac{A_{BUY} - I_{biom}}{N_p} \right) \quad (5)$$

式中: A_{BUY} 为村民全年能耗总支出; N_p 为乡村综合能源系统用户数量; I_{biom} 为村民卖出生物质废料所获得的收益。

1.2 技术维度

1.2.1 设备利用率

设备利用率 $\eta_e(\%)$ 是系统设备实际已运行时间

和系统生命周期时间的对比,用于衡量乡村综合能源系统设备的利用程度。

$$\eta_e = \sum_{a=1}^N \frac{T_a}{N_b T_2} \quad (6)$$

式中: T_2 为系统生命周期时间; T_a 为第 a 台设备实际已运行时间; N 为设备数量; N_b 为系统能源环节设备数量。

1.2.2 供能可靠性

从乡村综合能源系统在运行周期内是否满足多元负荷需求来衡量,取系统供能可靠性 $\lambda(\%)$ 作为评估指标。

$$\lambda = \frac{\sum_{t=1}^T P_{elo}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{ede}(t)} \quad (7)$$

式中: T 为系统运行时间周期; $P_{elo}(t)$ 为系统 t 时刻供能功率; $P_{ede}(t)$ 为 t 时刻系统各种负荷需求功率。

1.2.3 生物质气化池效率

乡村地区存在着丰富的生物质资源,应通过乡村综合能源系统将生物质能利用起来,生物质气化池通过厌氧发酵的方式将生物质转化为沼气,生物质气化池效率($\%$),能够反映乡村地区生物质能利用的充分性。

$$\eta_s = \frac{Q_z}{Q_b} \quad (8)$$

式中: η_s 为生物质气化池效率; Q_z 为一个时间周期内产生沼气总热值; Q_b 为一个时间周期内输入的生物质总热值。

1.3 生态维度

1.3.1 污染物排放成本

污染物排放成本 A_E (元)为乡村综合能源系统每年排放的各种污染物的经济成本:

$$A_E = \sum V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{NO_x} + V_{DUST} \quad (9)$$

式中 V_{CO_2} 、 V_{SO_2} 、 V_{NO_x} 、 V_{DUST} 分别为乡村能源系统每年运行产生各种污染导致的经济成本。

1.3.2 可再生能源发电渗透率

乡村综合能源系统中周期内可再生能源发电量占乡村综合能源系统周期内运行总发电量的比重用于衡量系统清洁能源的使用率,公式如下。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^T W_r^T}{\sum_{i=1}^T W^T} \quad (10)$$

式中: P 为周期内可再生能源发电渗透率; $\sum_{i=1}^T W_r^T$ 为周期内已消纳的可再生能源发电量, MWh; $\sum_{i=1}^T W^T$ 为周期内乡村综合能源系统总发电量, MWh。

1.4 社会维度

1.4.1 居民生活质量

由于乡村综合能源系统的建设运行, 乡村居民用能成本的降低与收入水平的提升, 能源供应的可靠性、居民生活的舒适度以及可再生能源的利用效率均得到显著改善, 这些积极变化共同推动居民整体生活质量实现质的提升。在此背景下, 为全面评估乡村综合能源系统产生的社会影响, 有必要引入定性指标如居民生活质量, 通过衡量乡镇社会发展成效与居民生活质量的改善程度开展评估工作, 而该类定性指标所需的数据, 通过问卷打分获取。

1.4.2 乡村社会发展

因乡村综合能源系统的建设推动乡村产业结构升级、创造更多就业岗位, 并带动乡村经济社会发展, 因此需引入居民生活质量改善相关指标, 建立涵盖乡村社会发展各方面的定性指标, 通过问卷打分获取。

1.4.3 乡村农业人均产值

衡量因乡村综合能源系统建设而推动乡村农业生产进步的指标。

$$V_a = \frac{Y_a C}{N_p} \quad (11)$$

式中: V_a 为乡村农业人均产值; Y_a 为乡村农业产品产量; C 为农产品价格; N_p 为乡村综合能源系统用户总数。

综合以上评价指标, 本文构建的乡村综合能源系统评估指标体系如图 1 所示。

2 评估方法建模

2.1 数据预处理

乡村综合能源系统不同评估指标对评估目标的影响有一定差异, 并且同时存在定性和定量指标数据, 数据还分为正向和负向数据需要对其进行标准化消除量纲影响。

对于定性指标本文采用五级定义评语集, 各等级定义如表 1 所示。

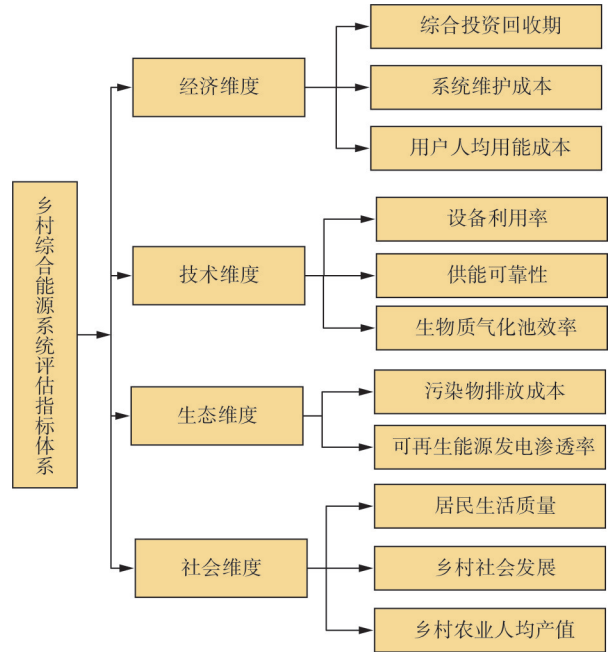


图 1 评估指标体系

Fig. 1 Evaluation indexes system

表 1 定性指标专家打分表

Tab. 1 Expert scoring sheet for qualitative indicators

等级	好	较好	一般	较差	差
分值	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

对效益型指标标准化:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j) + \varepsilon} \quad (12)$$

对成本型指标标准化:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j) + \varepsilon} \quad (13)$$

式中: x'_{ij} 为标准化后值; $\varepsilon = 10^{-8}$ 为避免分母为 0 的小常数; x_{ij} 为第 i 个方案的第 j 个指标值。

主观赋权方法在权重确定过程中易受人为主观因素的干扰, 导致结果的主观倾向性较为明显; 客观赋权方法仅依据数据自身的统计特征进行权重计算, 往往会忽视评价指标本身所具备的固有物理意义。针对主、客观两类权重赋值方法存在的上述局限性^[18], 本文提出改进 AHP-反熵法-博弈论相结合的组合权重确定方法, 利用博弈论的方法求解改进层次分析法和反熵法所计算出来的主客观权重的加权系数, 最终通过上述步骤确定出最优组合权重。

2.2 改进 AHP 法主观权重赋值

层次分析法核心优势在于能够将多准则、多目标的复杂决策问题拆解为清晰的层级结构(如目标

层、准则层、方案层),并通过对各层级影响因素的定性判断与定量转化,实现对决策信息的综合整合。该方法既保留了定性分析对模糊问题的解释力,又借助定量计算提升了决策结果的客观性,同时具备逻辑清晰、操作简便的特点,因此目前已被广泛应用于工程项目可行性评估、方案优选、绩效评价等多个领域^[22]。传统的AHP法在实际应用中存在显著局限:其判断矩阵的构建依赖专家对因素重要性的两两比较,必须开展复杂的一致性检验工作,这一过程不仅需要繁琐的计算步骤,还会占用大量的计算资源,在处理层级较多、因素较复杂的问题时尤为明显。

为解决传统AHP的计算效率问题,改进型层次分析法在关键环节进行了优化,核心体现在判断矩阵的标度方式上。传统AHP多采用9标度法,而本文方法则引入(-1, 0, 1)三级标度法:当两个因素相比,前者更重要时记为1,后者更重要时记为-1,两者重要性相当则记为0。这种简化的标度逻辑更简单,降低了专家给出判断的难度,同时从根本上规避了传统方法中因标度区间过宽导致的判断矛盾,使得判断矩阵天然具备一定的一致性,从而省去了传统AHP中耗时耗力的一致性检验环节^[23],通过矩阵运算直接得到权重,无需计算特征向量,简化了整体计算流程,在保证决策科学性的前提下,显著提升了方法的应用效率,尤其适用于对计算资源有限或决策时效性要求较高的场景。

改进AHP算法的步骤如下。

1)指标用三级标度法(-1, 0, 1)来建立判断矩阵。含有 n 个指标的判断矩阵 J 如式(14)所示。

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1n} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{n1} & J_{n1} & \cdots & J_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $J_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{指标}m\text{比}n\text{重要} \\ 0, & \text{指标}m\text{与指标}n\text{一样重要} \\ -1, & \text{指标}n\text{比指标}m\text{重要} \end{cases}$

确定最佳传输矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 如式(15)所示。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 $b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n J_{il} + J_{ij}$ 。

确定最佳一致性矩阵如式(16)所示。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 $c_{ij} = \exp(b_{ij})$, b_{ij} 值为最佳传输矩阵 B 中对应元素。

2)计算主观权重 w_{pi} :

$$w_{pi} = \frac{(\prod_{j=1}^n c_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n c_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad (17)$$

2.3 反熵法客观赋值权重

熵权法作为多指标评价中常用的指标赋权方法,虽应用广泛,但存在权重值波动较大、权重极端化、易忽略部分指标的问题。与之相比,反熵权法对指标变异度的敏感性较差^[24],反熵权法与熵值法相反,反熵值越大意味着数据的波动性越小,能够有效规避因各指标权重波动性过大而导致部分指标评估失效的情况^[24]。

反熵法步骤如下。

1)评估指标去量纲化后形成评价矩阵;

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{m,1} & \cdots & V_{m,N} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中 $V_{m,N}$ 为指标 m 相对于指标 N 的评价。

2)对矩阵 V 中的每项评估指标计算其反熵;

$$e_i = -\sum_{l=1}^N p(V_{i,l}) \ln(1 - p(V_{i,l})) \quad (19)$$

式中 $p(V_{i,l})$ 为第 i 个指标对 l 个指标的特征比重,

$$p(V_{i,l}) = \frac{V_{m,N}}{\sum_{l=1}^N V_{m,N}}。$$

3)计算指标权重。

$$w_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^m e_i} \quad (20)$$

2.4 博弈论思想求主客观组合权重

博弈论属于运筹学范畴,其假设所有决策都是决策者作出的最理性的决策^[25],因此本文提出利用博弈论的方法对改进AHP法和反熵法得到的分别

依赖于主观判断和数据离散程度的赋权结果进行组合优化,基于博弈论的思想通过使主客观权重间的偏差最小化来得到最佳主客观加权重系数^[26],最后通过计算机线性规划寻优方法求解,找到一个平衡点使主客观权重偏差最小化,避免了主观权重和客观权重的局限性,提高综合评估模型可信度。

1)分别设改进 AHP 法得到的主观权重和反熵法得到的主客观权重向量为 $\mathbf{w}_1 = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n})$, $\mathbf{w}_2 = (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n})$ 视为博弈的主体寻找最佳组合权重 $\mathbf{w}$, 公式如下。

$$\mathbf{w} = a_1 \mathbf{w}_1^T + a_2 \mathbf{w}_2^T \quad (21)$$

式中 a_1 和 a_2 分别为主观和客观权重系数,迭代求解。 $\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_{pi}$, $\mathbf{w}_2 = \mathbf{w}_i$ 权重分别为上文所求主观和客观权重。

2)根据博弈论的思想,以最小化主观和客观权重偏差为目标即最大收益对加权系数向量 $\mathbf{a}_i = (a_1, a_2)$ 进行优化,公式如下。

$$\min \|\sum_{i=1}^2 \mathbf{a}_i \mathbf{w}_i^T - \mathbf{w}_i\|_2 \quad (22)$$

式中 $a_1 + a_2 = 1$ 为收益分配系数。

其对应的线性方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T & \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2^T \\ \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_1^T & \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T \\ \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_2^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

然后运用编程计算出 (a_1, a_2) , 然后进行归一化处理公式如下。

$$a_i^* = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^2 a_i} \quad (24)$$

式中 a_i^* 为归一化收益分配系数。

最后得到博弈论计算的最佳组合权重 $\mathbf{w}^*$ 如下。

$$\mathbf{w}^* = \sum_{i=1}^2 a_i^* \mathbf{w}_i^T \quad (25)$$

2.5 变权可拓云模型

应用传统可拓学中的物元理论 $R = (N, C, v)$, N 为事物、 C 为评价指标, v 为取值范围。为将事物特征表达为处理模糊性指标提供了有效方法。在乡村综合能源系统评价中,评估指标具有多样性和模糊性,而仅仅通过系统设备采样数据计算得出的确定性评价指标,显然无法全面反映这种不确定性特征。传统的确定性物元描述在乡村综合能源评估场景下不再适用,需要对传统物元模型进行可拓云模型改进^[27],发挥云模型在处理模糊性、随机性数据

方面的优势,因为系统规模和应用场景的不同所以需要邀请专家打分从而构建新的适配实际的乡村综合能源系统指标体系的云等级界限。

1)根据专家打分划定等级界限后利用如下公式建立等级界限云模型,用 (E_x, E_n, H_e) 替代 v 。

$$\begin{cases} E_x = \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{6} \\ H_e = s \end{cases} \quad (26)$$

式中: E_x 为评价等级的中心值; E_n 为模糊性程度; H_e 为随机性程度; s 为常数, s 越大云模型的离散程度越大,本文选择为 0.000 2。

2)按不同等级的正态云模型随机生成服从期望值为 E_n 、标准差为 H_e 的正态分布随机数 E_n , 然后利用正态云模型 $x_i \sim N(E_x, E_n')$ 生成 m 个云滴, $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。得到的可拓云模型如下。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中: R_j 为乡村综合能源系统综合评估的等级界限; (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) 为某评估指标 C_n 的正态云分布,为评价指标 C_n 在等级 R_j 的正态云模型; N_i 为待评价对象。

最终,根据式(27)计算出各指标数据 x_i 与乡村综合能源系统各综合评价等级界限之间的云关联度 k , 其计算公式如下。

$$E_n' \sim N(E_n, H_e) \quad (28)$$

$$k = e^{\left(\frac{-(x_i - E_n)^2}{2(E_n)^2} \right)} \quad (29)$$

本文采用蒙特卡洛模拟进行多次计算(本文取 $F=10\ 000$ 次),取平均值作为最终关联度 $\bar{k}$ 。

$$\bar{k} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F k_f \quad (30)$$

式中: k_f 为第 f 次模拟计算得到的云关联度; $\bar{k}$ 为 F 次模拟的平均云关联度。

最后利用上式得到的乡村综合能源系统的等级关联度矩阵如下。

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ k_{12} & k_{22} & \cdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nm} \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中: k_{ij} 为待评价指标 C_i 关于综合评价等级 j 的界限可拓云模型之间的关联度; n 为评价指标数; m 为综合评价等级。

3) 自适应变权

根据乡村综合能源系统指标与各等级的关联度矩阵 K_{ij} 和指标体系上文计算得到的组合权重 W 可得出指标的综合关联度向量 $K_j^* = W * K_{ij}$ (*为卷积符号)。令 $K_j^* = [a_1, a_2, \dots, a_m]$, 其中 $a_j = (1, 2, \dots, 5)$ 定义为指标 j 关于各等级的云综合关联度。当 $a_j = \max a_j$ 时, 系统的综合评价等级即为 j 。为了对传统可拓云模型的均匀指标进行惩罚提高评估区分度, 本文引入变权理论^[28-29]根据各评价指标的均匀性进行自适应变权以评估指标数据 x_i 与变权前综合关联度最高的等级 j 的界限中心期望 E_{ij} 之间的距离作为标准线, 通过对远离关联度最高的界限中心 E_{ij} 的指标权重进行自适应调整增加, 适当提高短板和优势指标的权重, 提高评估区分度, 避免评估结果失真, 本文将自适应变权准则设定为: 距离关联度最高等级中心期望 E_{ij} 越近, 该指标相对权重越小, 具体公式如下。

$$d_{ij} = \frac{|x_i - E_{ij}|}{E_{ij}} \quad (32)$$

$$y_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (33)$$

$$W'(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{W_i y_{ij}^{c-1}}{\sum_{i=1}^n W_i y_{ij}^{c-1}} \quad (34)$$

式中: W' 为变权后的权重向量; W_i 为变权前权重; c 为自适应变权系数, $0 < c \leq 1$; x_i 为第 i 个指标的待评价数据; E_{ij} 为指标 i 关于等级 j 的界限中心期望; $d_{ij} = |x_i - E_{ij}| / E_{ij}$ 为指标数据与界限中心期望的相对距离。

本文对变权系数 c 从 0 到 1 变化的数据综合关联度进行了敏感性分析, 可拓云评估方法是对比各个等级的综合关联度, 取最高综合关联度的等级为评估结果, 本文等级界限中心为较好等级, 由图 2 可知 c 系数变化对较好等级的综合关联度影响最大, c 系数越大指标数据在较好等级的综合关联度越大即离等级界限中心越远的指标权重越小变权影响越小, 在 c 系数在取接近 0.55 的数值时指标数据评估结果将由一般变为较好等级, 这将与变权前评估结

果一致。由于 $c=0.5$ 时界限中心较好等级的综合关联度在 $[0, 1]$ 之间大概处于中间值, 因此可以认为当 $c < 0.5$ 时, 变权对指标数据影响较大; 当 $c \geq 0.5$ 时, 指标变权对于系统评估结果的影响逐步降低^[30], 本文取 c 为 0.5 为中间较为保守的值。

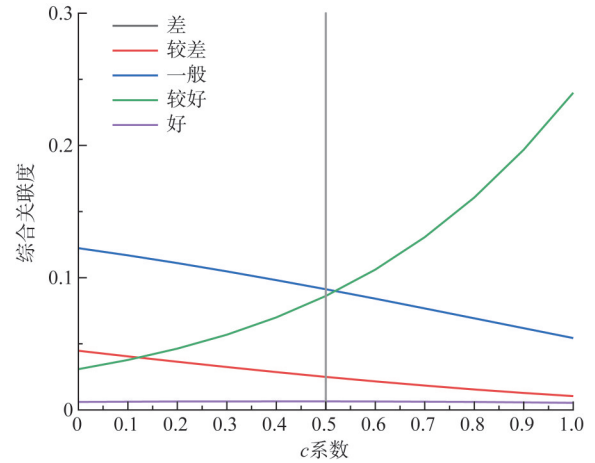


图2 c 变权系数敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of variable weight coefficients c

最终指标评价向量计算如式(35)所示。

$$K_j^* = W' K_{ij} \quad (35)$$

4) 置信度检验

云滴 x_i 与正态云之间的云关联度 k 计算过程具有随机性, 因此需要进行 H 次计算来对综合评估结果进行置信度检验。令 $f = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ 为乡村综合能源系统综合评估结果最高关联度分别符合某个等级的次数, 从而计算置信度 θ 如式(36)所示。

$$\theta = 1 - \frac{\max H(f)}{H} \quad (36)$$

式中 θ 值越大, 表明评估结果的分散性越强, 置信度越小; 反之则置信度越高, 本文中取 $\theta \leq 0.005$ 时评估结果为可靠。

3 算例分析

3.1 算例背景

本研究依托美丽乡村分布式智慧能源系统示范工程项目的广西古辣镇示范工程进行。古辣镇示范区位于宾阳东南五镇的中心, 距南宁市区约 70 km, 下辖 2 个社区、9 个村委、81 个自然村, 总人口约 53 560 人, 总面积为 112 m², 本文就该示范工程 2024 年运行数据进行评估。整体流程图如图 3 所示, 运行数据如表 2 所示。

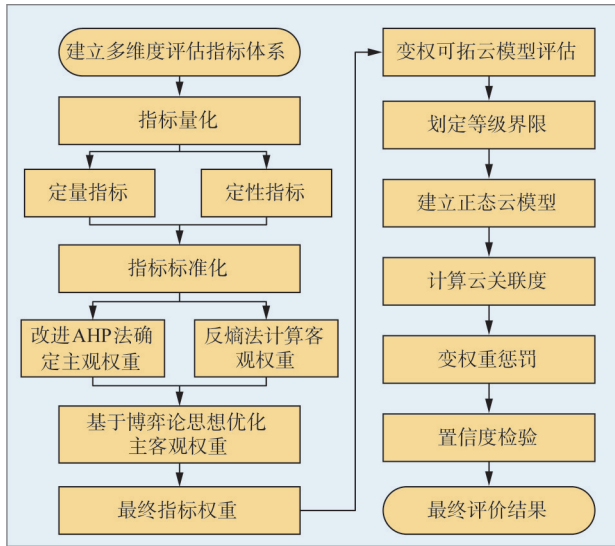


图3 整体流程框图

Fig. 3 Overall process block diagram

表2 示范工程运行数据

Tab. 2 Operational data of demonstration projects

项目	数据
综合投资回收期 A_1/a	5.4
系统维护成本 $A_2/万元$	8.6
人均用能成本 $A_3/万元$	0.082 7
设备利用率 $B_1/\%$	78.32
供能可靠性 $B_2/\%$	99.11
生物质气化池效率 $B_3/\%$	69.56
污染物排放成本 $C_1/万元$	3.2
可再生能源发电渗透率 $C_2/\%$	30.22
居民生活质量 D_1	0.81
乡村社会发展 D_2	0.56
乡村农业人均产值 $D_3/万元$	0.681

3.2 德尔菲法指标重要性评估

德尔菲法在评估指标相对重要性评估中被广泛使用。

本文依据参考文献[18, 21]构建乡村综合能源评估指标并根据专家打分表(见表3), 最终得到各指标的平均分、专家评分标准差、变异系数如表4所示, 本文筛选出平均分大于3的指标来对乡村综合能源系统进行评估。

再计算出专家评分协调度系数为 $R=0.682\ 1$ 一致性优秀, 计算公式如下。

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (37)$$

表3 德菲尔法专家评分表

Tab. 3 Expert scoring sheet of Delphi method

专家	评分项目											
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	D_1	D_2	D_3	
专家1	5	1	5	5	5	3	5	4	5	3	5	
专家2	5	3	5	4	3	5	1	4	4	3	5	
专家3	4	5	3	3	3	5	5	5	4	3	4	
专家4	1	5	1	5	5	3	3	3	3	3	3	
专家5	3	5	4	3	4	2	4	1	2	3	5	
专家6	5	5	3	5	5	4	3	3	5	4	4	
专家7	4	1	3	5	5	4	2	4	4	4	4	
专家8	5	5	4	5	2	4	1	3	1	4	3	
专家9	4	1	3	3	3	5	3	3	4	5	3	
专家10	1	5	2	5	3	5	4	5	3	3	4	

表4 德尔菲法指标评分结果

Tab. 4 Indicator scoring results of the Delphi method

指标	平均分	标准差	变异系数
综合投资回收期	3.7	1.486 6	0.401 7
系统维护成本	3.6	1.800 0	0.500 0
用户人均用能成本	3.3	1.187 4	0.359 8
设备利用率	4.3	0.900 0	0.209 3
供能可靠性	3.8	1.077 0	0.283 4
生物质气化池效率	4.0	1.000 0	0.250 0
污染物排放成本	3.1	1.374 7	0.443 4
可再生能源发电渗透率	3.5	1.118 0	0.319 4
居民生活质量	3.5	1.204 2	0.344 0
乡村社会发展	3.5	0.670 8	0.191 6
乡村农业人均产值	4.0	0.774 6	0.193 6

$$CV_i = \frac{s_i}{\bar{x}_i} \quad (38)$$

$$\overline{CV} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m CV_i \quad (39)$$

$$R = 1 - \overline{CV} \quad (40)$$

式中: n 为专家数量; m 为评估指标数量; $\bar{x}_i$ 为专家对指标 i 的平均分; s_i 为第 i 个指标专家评分的标准差; x_{ij} 为第 j 位专家对第 i 个指标的评分; CV_i 为第 i 个指标评分的变异系数; $\overline{CV}$ 为全部指标变异系数的平均值。

再对评分协调度进行置信度检验^[31], 其计算过程如下。

$$\chi^2 = b(k-1)R \quad (41)$$

式中: χ^2 为卡方检验统计量; b 为参与评分的专家数量; k 为评估指标数量; R 为专家评分协调度系数。

本文 $b=10$, $k=11$, 根据自由度 $\nu = k - 1 = 8$ 查卡方界值表 95 % 的置信度的卡方值为 18.31。根据式(39)计算得 $\chi^2 = 68.21 > 18.31$, 所以可以认为在 95 % 的置信度下认为专家评分达成了一致。

3.3 权重确定

本文使用的改进 AHP 法使用(1、0、-1)三标度法打分, 使专家能够更容易对不同指标间的重要性做出判断, 使专家更容易达成共识, 因而提高了决策效率, 并且省去了一致性检验所需的复杂计算量。

由表 5 和图 4 可知改进 AHP 法在一致性和计算时间方面具有优势而指标数据量越大优势会越明显, 改进 AHP 法减少了判断精细度, 对评分结果微小变化较传统 AHP 法不敏感, 从而指标权重波动更小更稳定, 改进 AHP 法对设备利用率和供能可靠性指标权重方面偏差小但较传统 AHP 法损失了一些区分度。

表 5 改进 AHP 法与传统 AHP 法计算时间对比

Tab. 5 Comparison of calculation time between the improved AHP and traditional AHP

方法	一致性比率 CR	计算时间/s
改进 AHP(3 标度)	0	0.005
传统 AHP(9 标度)	1.162 4	0.095

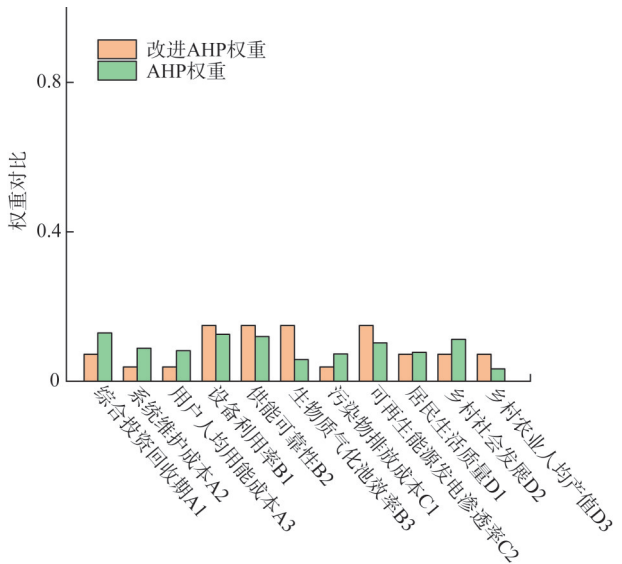


图 4 改进 AHP 法与传统 AHP 法权重对比
Fig. 4 Comparison of weights between the improved AHP and traditional AHP

为了验证反熵法的可靠性, 本文在同一数据上分别使用反熵法和熵权法求权重进行对比验证得

到图 5。

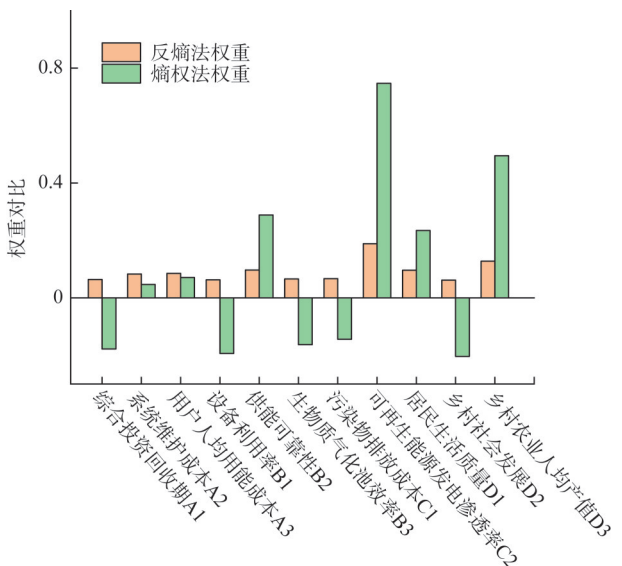


图 5 反熵法与熵权法权重对比
Fig. 5 Comparison of weights between the anti-entropy method and entropy weight method

根据图 5 反熵法与熵权法求出的客观权重对比, 熵权法在本文变异系数较大的数据集上表现得不稳定极端权重更多, 而反熵法权重分布更均匀, 验证了反熵法在本文数据求取客观权重的可靠性。

本文依照第 2 节所述的指标权重计算方法, 通过改进 AHP 法计算出该乡村综合能源系统的主观权重, 再通过客观赋权反熵法计算出客观权重, 最后结合博弈论的方法计算出主客观权重的加权系数将主客观权重变为组合权重, 所得的一级指标权重结果如图 6 所示。

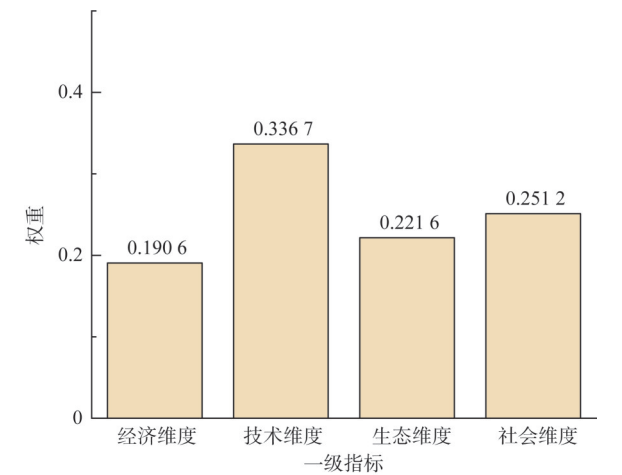


图 6 一级指标组合权重图
Fig. 6 Combined weight chart of first-level indicators

由图 6 可知一级指标中技术维度的权重最大为 0.336 7, 其次社会维度权重为 0.251 2。由改进 AHP 法和反熵法以及最小化主客观权重偏差后所得各指标主、客观权重和组合权重如表 6 所示。

表 6 权重赋值表

Tab. 6 Weight assignment table

评估指标	主观权重	客观权重	组合权重
A_1	0.072 1	0.064 1	0.068 1
A_2	0.038 2	0.083 2	0.060 7
A_3	0.038 2	0.085 4	0.061 8
B_1	0.149 3	0.062 7	0.106 0
B_2	0.149 3	0.097 1	0.123 2
B_3	0.149 3	0.065 8	0.107 5
C_1	0.038 2	0.067 0	0.052 6
C_2	0.149 3	0.188 8	0.169 0
D_1	0.072 1	0.096 2	0.084 1
D_2	0.072 1	0.061 7	0.066 9
D_3	0.072 1	0.128 1	0.100 1

由表 6 可知可再生能源发电渗透率 C_2 指标组合权重最高为 0.169 0, 供能可靠性 B_2 指标组合权重次之为 0.123 2, 生物质气化池效率 B_3 指标组合权重较高为 0.107 5。

3.4 变权可拓云模型计算结果

根据式 (26) 不同等级云的数字特征计算得到等级云模型界限双约束空间形式结果见表 7。

3.5 指标变权权重

依上文方法计算出变权前可拓云模型评估的综合关联度表如表 8 所示。

由表 8 可知变权前较好等级的综合关联度为 0.239 8 最大, 即变权前的评估结果较好, 所以方案等级界限中心为较好等级。

如表 9 所示, 由于变权前较好等级为等级界限中心 E_{ij} , 所以 E_{ij} 较远的技术维度指标 A_1 和 A_2 都提高了变权权重, A_3 距离等级界限中心近则降低了变权权重。社会维度指标 D_2 提高了变权权重, D_1 、 D_3 则降低了变权权重。技术维度指标 B_1 、 B_3 的 E_{ij} 较近则降低了变权权重, B_2 则提高了变权权重。生态维度指标 C_1 提高了变权权重, C_2 则降低了变权权重。

3.6 可拓云模型惩罚变权后最终评估结果

依据式 (32) — (34) 计算出变权后各个评估指标的各个等级的综合关联度如表 10 所示。

由表 10 和图 7 可知, 综合投资回收期 A_1 最大云关联度为 0.486 75 为一般等级, 系统维护成本 A_2 最大云关联度为 0.110 25 为一般等级, 用户人均用能成本 A_3 指标表现突出 (0.652 31) 为较好等级, 设备利用率 B_1 最大云关联度为 0.044 38 为较好等级, 供能可靠性 B_2 最大云关联度为 0.023 88, 生物质气化池效率 B_3 最大云关联度为 0.991 33 为较好等级, 污染物排放成本 C_1 指标最大云关联度为 0.197 92 为一般等级, 可再生能源发电渗透率 C_2 指标最大云关联度为 0.016 36 为较好等级, 居民生活质量 D_1 最大关联度为 0.026 14 为好等级, 乡村社会发展 D_2 指标最大云关联度为 0.197 92 为一般等级, 乡村农业人均产值最大云关联度为

表 7 等级界限表

Tab. 7 Grade boundary table

评估指标	差	较差	一般	较好	好
	(E_x, E_n, H_e)	(E_x, E_n, H_e)	(E_x, E_n, H_e)	(E_x, E_n, H_e)	(E_x, E_n, H_e)
A_1	(9, 0.333, 0.0002)	(7, 0.333, 0.0002)	(5, 0.333, 0.0002)	(3, 0.333, 0.0002)	(1, 0.333, 0.0002)
A_2	(18, 0.666, 0.0002)	(14, 0.666, 0.0002)	(10, 0.666, 0.0002)	(6, 0.666, 0.0002)	(2, 0.666, 0.0002)
A_3	(0.225, 0.008, 0.0002)	(0.175, 0.008, 0.0002)	(0.125, 0.008, 0.0002)	(0.075, 0.008, 0.0002)	(0.025, 0.008, 0.0002)
B_1	(10, 3.333, 0.0002)	(30, 3.333, 0.0002)	(50, 3.333, 0.0002)	(70, 3.333, 0.0002)	(90, 3.333, 0.0002)
B_2	(10, 3.333, 0.0002)	(30, 3.333, 0.0002)	(50, 3.333, 0.0002)	(70, 3.333, 0.0002)	(90, 3.333, 0.0002)
B_3	(10, 3.333, 0.0002)	(30, 3.333, 0.0002)	(50, 3.333, 0.0002)	(70, 3.333, 0.0002)	(90, 3.333, 0.0002)
C_1	(4.5, 0.166, 0.0002)	(3.5, 0.166, 0.0002)	(2.5, 0.166, 0.0002)	(1.5, 0.166, 0.0002)	(0.5, 0.166, 0.0002)
C_2	(5, 1.666, 0.0002)	(15, 1.666, 0.0002)	(25, 1.666, 0.0002)	(35, 1.666, 0.0002)	(45, 1.666, 0.0002)
D_1	(0.1, 0.033, 0.0002)	(0.3, 0.033, 0.0002)	(0.5, 0.033, 0.0002)	(0.7, 0.033, 0.0002)	(0.9, 0.033, 0.0002)
D_2	(0.1, 0.033, 0.0002)	(0.3, 0.033, 0.0002)	(0.5, 0.033, 0.0002)	(0.7, 0.033, 0.0002)	(0.9, 0.033, 0.0002)
D_3	(0.1, 0.033, 0.0002)	(0.3, 0.033, 0.0002)	(0.50, 0.033, 0.0002)	(0.7, 0.033, 0.0002)	(0.9, 0.033, 0.0002)

表 8 变权前最大综合关联度表

Tab. 8 Table of maximum comprehensive correlation degree before variable weighting

等级	差	较差	一般	较好	好
最大云关联度	0	0.010 4	0.054 3	0.239 8	0.005 4

表 9 指标变权权重表

Tab. 9 Indicator variable weight assignment table

评估指标	常权	变权
A_1	0.068 1	0.137 4
A_2	0.060 7	0.090 1
A_3	0.061 8	0.044 6
B_1	0.106 0	0.082 4
B_2	0.123 2	0.179 2
B_3	0.107 5	0.019 2
C_1	0.052 6	0.126 3
C_2	0.169 0	0.140 9
D_1	0.084 1	0.075 2
D_2	0.066 9	0.067 5
D_3	0.100 1	0.037 2

表 10 变权后指标云关联度表

Tab. 10 Table of indicator cloud correlation degrees after variable weighting

评估指标	差	较差	一般	较好	好
A_1	0	9.929×10^{-6}	0.486 75	0	0
A_2	0	0	0.110 25	0.000 50	0
A_3	0	0	3.016×10^{-6}	0.652 31	0
B_1	0	0	0	0.044 38	0.002 16
B_2	0	0	0	0	0.023 88
B_3	0	0	3.333×10^{-8}	0.991 33	6.838×10^{-9}
C_1	0	0.197 90	0.000 15	0	0
C_2	0	0	0.007 41	0.016 36	0
D_1	0	0	0	0.004 32	0.026 13
D_2	0	0	0.197 92	0.000 15	0
D_3	0	0	4.013×10^{-7}	0.850 03	0

0.850 03 为较好等级。

根据式(35)计算出的变权后最大综合关联度如表 11 所示。由表 11 可知, 指标数据在一般等级综合关联度最大为 0.091 23, 所以变权后可拓云模型

表 11 变权后最大综合关联度表

Tab. 11 Table of maximum comprehensive correlation degree after variable weighting

等级	差	较差	一般	较好	好
最大云关联度	7.78×10^{-15}	0.024 99	0.091 23	0.086 13	0.006 42

评估乡村综合能源系统的评估结果为一般, 但较好等级的综合关联度仅次于一般等级, 表明最终评估结果应为一般偏向较好等级。

由表 8 变权前评估结果可知变权前指标数据在较好等级综合关联度最大为 0.239 8, 所以系统变权前评估结果为较好, 由表 9 可知这是因为变权后对指标权重进行了自适应权重调整, 由于 C_1 指标评估为较差距离较好等级界限中心相差两个等级, 所以大幅度提高了生态维度的污染物排放成本 C_1 指标的权重由 0.052 6 提高至 0.126 3, 暴露了短板指标, 同时降低了较好等级界限中心的 D_1 、 D_2 、 D_3 等指标权重, A_1 、 A_2 等短板指标也提高了变权权重, 而 B_2 等优势指标优势不明显只略微提高了权重, 导致系统评估结果由较好趋向于一般, 表明本文提出的模型对各指标的均匀性、变化趋势较为敏感, 使评估结果更为科学符合实际情况。结果置信度 $\theta = 0.000\ 27 < 0.005$ 显示结果可靠。

3.7 变权可拓云模型鲁棒性分析

为验证评估结果可靠性, 本文对原始指标数据取 $\pm 5\%$ 噪声浮动采用蒙特卡洛法进行了 1 000 次仿真模拟。

由图 8 鲁棒性测试可知 70.1 % 的评估等级结果均为较好, 置信度为 70.1 %, 说明本文方法在较大扰动下具有良好的鲁棒性, 加入变权后评估方法对评估数据变化更为敏感。

3.8 不同评估方法间对比

TOPSIS 法是以贴进度来评估数据优劣并进行排序的一种评估方法, 为了对比 TOPSIS 法与本文方法, 本文对原始数据进行随机浮动增加了 3 组数据进行综合评估, 如表 12 所示。

由表 13—14 可知, TOPSIS 法和本文方法对运行数据的优劣评估基本一致, 但 TOPSIS 法中 1 组数据相对贴进度为 0.487 4 远大于 3 组、4 组一般的指标, 表明 TOPSIS 法没有暴露出 1 组数据的短板指标污染物排放成本 C_1 , 而本文方法即暴露了短板指标也放大了优势指标, 但 C_1 短板指标距离较好等级界限中心太远导致其极大地拉低了系统的评分, 使得本文方法更有区分度。

最后根据运行数据各指标的评估情况该示范工程应该在降低污染物排放成本和降低系统经济成本方面做出努力。

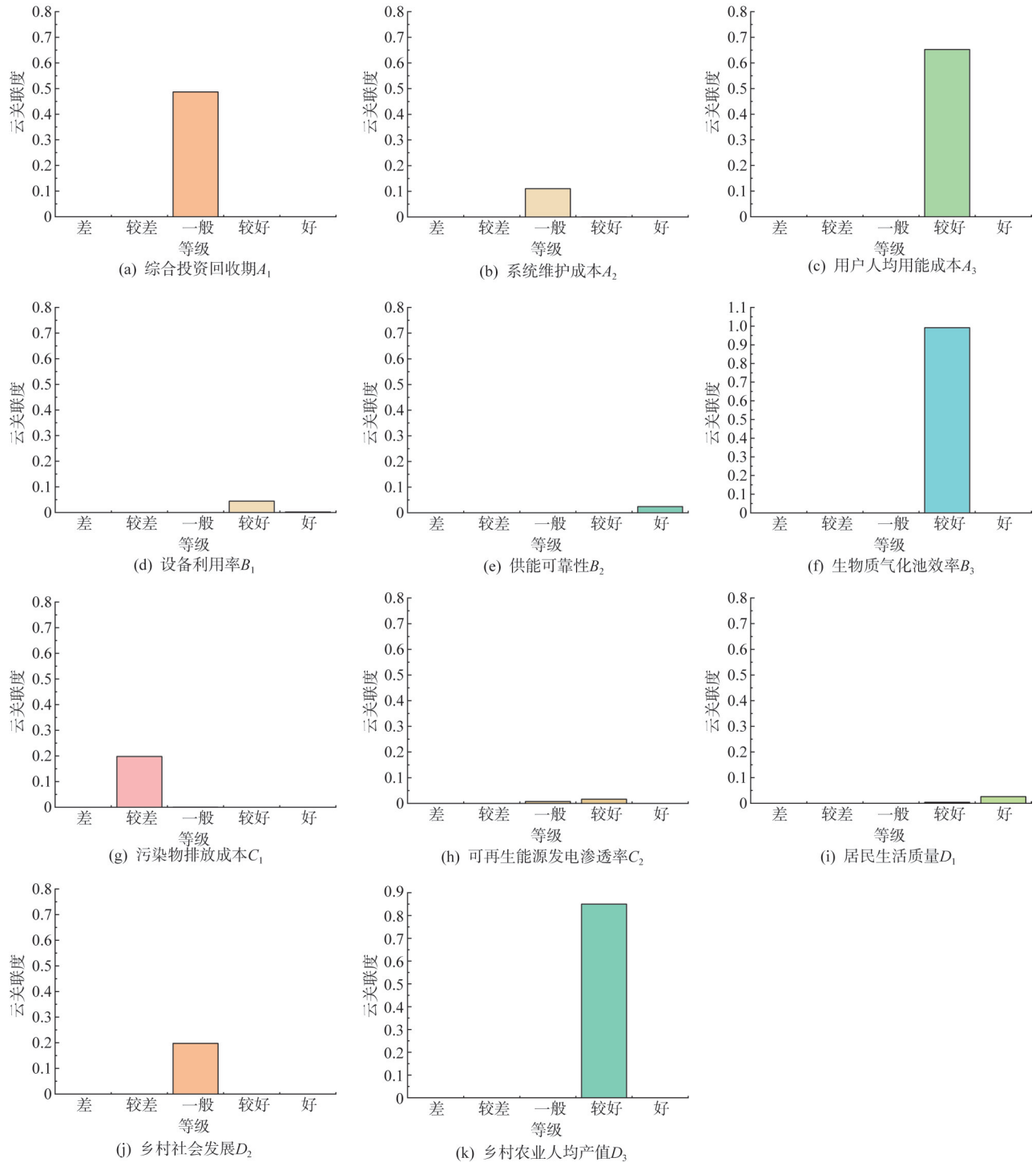


图7 变权后各指标与各等级最大关联度

Fig. 7 Maximum correlation degrees between each indicator and each grade after variable weighting

4 结论

乡村综合能源系统具有分散性强、能效低等问题，且其评估因素涵盖乡村社会各方面模糊性强。针对此，本文提出了一种基于博弈论结合主客观赋

权的变权可拓云模型的乡村综合能源评估方法，得到了以下结论。

1) 本文提出的模型在现有的技术维度基础上，增加了经济维度、乡村社会维度、生态维度的多方面评估指标体系涵盖了乡村综合能源系统的主要评

表 12 评估指标数据

	综合投资回 收期/年	系统维护 成本/万元	用户人均用 能成本/万元	设备利用 率/%	供能可 靠性/%	生物质气 化池效率/%	污染物排 放成本/万元	可再生能源发 电渗透率/%	居民生活 质量	乡村农业人 均产值/万元
1 组	5.4	8.6	0.082 7	78.32	99.11	69.56	3.2	30.22	0.81	0.681
2 组	6.3	7.8	0.102 9	66.34	98.45	72.48	2.1	40.12	0.73	0.675
3 组	8.1	9.5	0.138 1	76.88	98.33	71.56	2.6	29.43	0.59	0.765
4 组	5.9	10.1	0.124 7	80.21	99.45	71.42	4.5	31.54	0.62	0.713

表 13 TOPSIS 法评估结果

数据	与正理想解 距离	与负理想解 距离	相对接近度	TOPSIS 排名
1 组	0.030 025 09	0.028 557 298	0.487 472 414	2
2 组	0.014 581 117	0.039 340 748	0.729 588 048	1
3 组	0.037 462 363	0.021 547 66	0.365 152 548	4
4 组	0.034 710 228	0.020 391 28	0.370 067 554	3

表 14 本文方法评价结果

数据	评价等级	最大关联度值
1 组	一般	0.091 235 174
2 组	较好	0.134 026 201
3 组	一般	0.175 962 196
4 组	一般	0.203 189 013

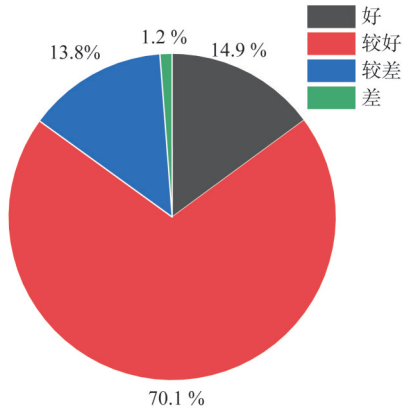


图 8 变权可拓云模型鲁棒性测试

Fig. 8 Robustness test of the variable weight extension cloud model

估目标, 具有乡村特色和普适性, 为美丽乡村工程的实施奠定基础。

2) 主观赋权方面使用改进 AHP 法, 使用三标度法, 减少了专家打分的复杂性, 避免了一致性检验的复杂计算量, 降低了模型复杂度。客观赋权方面采用反熵法避免了传统熵权法客观权重赋值对于

无序度较高的指标敏感性不足的问题。该方法相较于单一的赋权方法具有实用性强、指标敏感度高等特点, 对于乡村综合能源系统指标分散性强的特点具有实适用性。

3) 在使用改进 AHP 法-反熵法进行主客观赋值后借鉴博弈论的思想最小化主客观权重偏差避免了主客观赋权法各自的局限性, 对权重加权系数进行组合优化。

4) 乡村综合能源系统评估体系中定性、定量指标并存, 模糊性强, 采用变权可拓云模型不仅更易于理解, 并且能够很好地处理指标的模糊性问题。使用变权惩罚能够更好地处理掩盖短板指标和优势指标, 导致评估结果失真的问题。

根据本文方法的评估结果, 该乡村综合能源系统首先应在降低污染物排放的生态维度方面做出努力, 该短板指标极大地拉低了系统评价, 应提高可再生能源占比, 加入碳排放捕集, 利用与封存技术, 对系统运行过程中产生的 CO₂ 进行有效捕集与资源化利用。应优化能源梯级利用体系, 提高工业余热等低品位热能的回收效率, 通过热电联产、热泵技术等手段实现能源的高效循环利用, 从而系统性降低各类污染物如 SO₂、NO_x、CO₂ 的排放总量, 切实改善乡村生态环境质量。其次应在综合投资回收期、系统维护成本的经济性等方面做出改变, 提高系统能源协调性和智能化管理水平, 还可探索多元化的商业模式, 如能源服务外包、碳交易机制等, 进一步降低系统运维成本。

综上, 本文提出的方法为乡村综合能源系统的评估开辟了新的路径, 能为乡村能源建设的未来发展提供科学评价依据, 使政府与投资者能更直观地判断项目的可行性与战略价值。这一研究有助于推动乡村能源结构的优化升级, 改善乡村生态环境的基础上, 切实提升乡村居民生活质量, 推动乡村振兴战略的实现。

参考文献

- [1] 陈磊,戎士敏,王聪,等.考虑需求侧资源参与的区域综合能源系统低碳协同调度[J].电力建设,2024,45(12):54-64.
CHEN Lei, RONG Shimin, WANG Cong, et al. Low-carbon co-dispatch of integrated regional energy systems considering demand side resource participation [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 54-64.
- [2] 彭寒梅,张玲,谭貌,等.重构与抢修协同下电-气区域综合能源系统多阶段博弈故障恢复方法[J].电力建设,2024,45(12):27-38.
PENG Hanmei, ZHANG Ling, TAN Mao, et al. Multi-stage game fault recovery method for electricity-gas regional integrated energy system under reconfiguration and repair coordination [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 27-38.
- [3] 粟世玮,吴仕龙,李咸善,等.考虑生物质-太阳能耦合的综合能源系统冷热电优化调度[J/OL].南方电网技术:1-14 [2025-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250604.0927.004>.
SU Shiwei, WU Shilong, LI Xianshan, et al. Optimal scheduling of cooling, heating and power in an integrated energy system considering biomass-solar coupling [J/OL]. Southern Power System Technology: 1-14 [2025-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250604.0927.004>.
- [4] 吕佳伟,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021.
LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction [J]. Proceedings of the CSEE, 41(12): 4001-4021.
- [5] 林亭君,董坤,赵剑锋,等.综合能源系统内外协同优化调度技术研究现状及展望[J].智慧电力,2021,49(6):1-8.
LIN Tingjun, DONG Kun, ZHAO Jianfeng, et al. Research status and prospects of internal and external collaborative optimization scheduling technology for integrated energy system [J]. Smart Power, 2021, 49(6): 1-8.
- [6] 曾鸣,刘英新,周鹏程,等.综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J].电网技术,2018,42(6):1697-1708.
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and Prospects of Integrated Energy System Modeling and Benefit Evaluation [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [7] 燕兵,杨志林,张岩,等.含海上风电制氢和多重响应的综合能源系统源-荷多时间尺度优化调度[J].南方电网技术,2025,19(6):105-118.
YAN Bing, YANG Zhilin, ZHANG Yan, et al. Optimization of source-charge multi-time scale for hydrogen integrated energy system including hydrogen production from offshore wind power and multiple responses [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(6): 105-118.
- [8] 王秋杰,王昊,谭洪,等.计及光伏光热和阶梯碳交易的园区综合能源系统氢储能优化配置[J].南方电网技术,2026,20(3):61-73.
WANG Qiujie, WANG Hao, TAN Hong, et al. Optimization configuration of hydrogen storage in park integrated energy system considering photovoltaic photothermal and stepped carbon trading [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(3): 61-73.
- [9] 黎静华,朱梦姝,陆悦江,等.综合能源系统优化调度综述[J].电网技术,2021,45(6):2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems [J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [10] 丁雨昊,吕干云,刘永卫,等.考虑碳排放目标约束和需求侧响应的综合能源系统日前优化调度[J].南方电网技术,2022,16(8):1-11.
DING Yuhao, LÜ Ganyun, LIU Yongwei, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission target constraints and demand side response [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 1-11.
- [11] 连文翰,崔双喜,李宇智,等.基于改进TOPSIS的区域综合能源系统综合能效评估[J].可再生能源,2024,42(10):1355-1362.
LIAN Wenhan, CUI Shuangxi, LI Yuzhi, et al. Comprehensive energy efficiency evaluation of regional integrated energy system based on improved TOPSIS [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(10): 1355-1362.
- [12] 金飞.综合能源系统效益评估指标及方法综述[J].水电与新能源,2023,37(9):29-31,60.
JIN Fei. Benefit evaluation indexes and methods for integrated energy system: an overview [J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(9): 29-31,60.
- [13] 董福贵,张也,尚美美.分布式能源系统多指标综合评价研究[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3214-3223.
DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3223.
- [14] 董文杰,田廓,陈云斐,等.能源互联网下基于博弈与证据理论的综合能源系统评价方法研究[J].智慧电力,2020,48(7):73-80.
DONG Wenjie, TIAN Kuo, CHEN Yunfei, et al. Evaluation method of comprehensive energy system based on game theory & evidence theory under Energy Internet [J]. Smart Power, 2020, 48(7): 73-80.
- [15] 李金良,刘怀东,王睿卓,等.基于交叉超效率CCR模型的综合能源系统综合效率评价[J].电力系统自动化,2020,44(11):78-86.
LI Jinliang, LIU Huaidong, WANG Ruizhuo, et al. Comprehensive efficiency evaluation of integrated energy system based on cross-super-efficiency CCR model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 78-86.
- [16] 郭艳飞,任雪桂,鞠力,等.基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):121-128.
GUO Yanfei, REN Xuegui, JU Li, et al. The comprehensive efficiency evaluation method for integrated energy system based on AHP [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 121-128.
- [17] 韩志辉,毛毅,姜庆国,等.基于AHP—熵权法的综合能源服务商业模式模糊综合评价[J].电力设备管理,2025(2):264-269.
HAN Zhihui, MAO Yi, JIANG Qingguo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of integrated energy service business

- models based on AHP-Entropy weight method [J]. *Electric Power Equipment Management*, 2025(2): 264 – 269.
- [18] 杜若芸, 牛东晓, 余敏, 等. 基于博弈论和模糊灰色投影的农村综合能源系统 MCDA 评估[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 580 – 588.
- DU Ruoyun, NIU Dongxiao, YU Min, et al. MCDA framework for rural integrated energy systems with game theory and fuzzy grey relational projection method [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(S2): 580 – 588.
- [19] HUANG F, WANG Z, LIU J, et al. Exploring rural energy choice from the perspective of multi-dimensional capabilities: Evidence from photovoltaic anti-poverty areas in rural China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(283): 124586.
- [20] 丛宏斌, 赵立欣, 王久臣, 等. 中国农村能源生产消费现状与发展需求分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 224 – 231.
- CONG Hongbin, ZHAO Lixin, WANG Jiuchen, et al. Current situation and development demand analysis of rural energy in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 224 – 231.
- [21] 童子豪. 农村综合能源系统运营优化及效益评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [22] MOMOH J A, ZHU J. Optimal Generation scheduling based on AHP/ANP [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, Cybernetics*, 2003, 33(3): 531 – 535.
- [23] 程江洲, 冯梦婷, 李欣, 等. 基于组合赋权逼近理想解排序法—物元可拓模型的农业园区综合能源系统评价[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(29): 12892 – 12899.
- CHENG Jiangzhou, FENG Mengting, LI Xin, et al. Evaluation of integrated energy system in agricultural park based on combination weighting TOPSIS-MEE model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(29): 12892 – 12899.
- [24] 闻旻, 刘育权, 胡泉, 等. 含分布式供能设备的综合能源系统规划评价[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(21): 68 – 74.
- WEN Min, LIU Yuquan, HU Xiao, et al. Evaluation of integrated energy system planning with distributed energy devices [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(21): 68 – 74.
- [25] 贾梦雨, 李锰, 韩松, 等. 基于博弈论组合赋权的农村电网综合评价体系研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2): 69 – 75.
- JIA Mengyu, LI Meng, HAN Song, et al. Research on rural power system comprehensive evaluation system based on game theory combination weight [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 69 – 75.
- [26] 李贞涛, 李媛, 刘守恒. 基于改进博弈论组合赋权-逼近理想解排序法的综合能源系统评价[J]. *现代电力*, 2024, 41(5): 926 – 934.
- LI Zhentao, LI Yuan, LIU Shouheng. Evaluation of integrated energy system based on improved game theory combination and weighted TOPSIS method [J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(5): 926 – 934.
- [27] 姜晓雨, 张斌, 徐朝锐, 等. 基于改进AHP的可拓物元云模型的抽水蓄能电站下库大坝安全评价[J]. *水利科技与经济*, 2024, 30(11): 150 – 156.
- JIANG Xiaoyu, ZHANG Bin, XU Chaorui, et al. Safety evaluation of lower reservoir dam of pumped storage power station based on improved AHP extension matter element cloud model [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2024, 30(11): 150 – 156.
- [28] 于明海, 李岳智, 童玉升. 基于变权理论的尾矿库稳定性评价可拓云模型[J]. *现代矿业*, 2025, 41(1): 160 – 164.
- YU Minghai, LI Yuezhi, TONG Yusheng. Extension cloud model for stability evaluation of tailings pond based on variable weight theory [J]. *Modern Mining*, 2025, 41(1): 160 – 164.
- [29] 杨帆, 卫水平, 任意, 等. 变权-混合决策评估的复合功能并网逆变器多目标协同优化控制方法[J]. *中国电力*, 2024, 57(3): 113 – 125.
- YANG Fan, WEI Shuiping, REN Yi, et al. Multi-objective collaborative optimization control method of composite function grid connected inverters considering variable weight hybrid decision evaluation [J]. *Electric Power*, 2024, 57(3): 113 – 125.
- [30] 马丽叶, 张涛, 卢志刚, 等. 基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2789 – 2799.
- MA Liye, ZHANG Tao, LU Zhigang, et al. Comprehensive evaluation of regional integrated energy system based on variable weight extension cloud model [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(11): 2789 – 2799.
- [31] 程琮, 刘一志, 王如德. Kendall协调系数W检验及其SPSS实现[J]. *泰山医学院学报*, 2010, 31(7): 487 – 490.
- CHENG Cong, LIU Yizhi, WANG Rude. The test for Kendall's coefficient of concordance W conducted by SPSS [J]. *Journal of Taishan Medical College*, 2010, 31(7): 487 – 490.

收稿日期: 2025-08-28; 网络首发日期: 2025-12-25

作者简介:

裴越(2002), 男, 硕士研究生, 从事电力系统优化调度、光伏预测方面的研究工作, peiyue@ms.giec.ac.cn;

张靖(1996), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为主动配电网优化、综合能源系统优化, zhangjing1@ms.giec.ac.cn;

舒杰(1969), 男, 通信作者, 研究员, 博士, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术, shujie@ms.giec.ac.cn.