

# 风电供热项目发展能力评价研究

杨文海

中国华能上安电厂, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年12月13日; 录用日期: 2023年1月3日; 发布日期: 2023年2月20日

## 摘要

我国三北地区蕴含大量的风能, 但绝大部分未能被有效利用, 风电供热项目作为电能替代的形式之一, 能够消除北方地区供暖期在电负荷波谷时段的风电并网障碍, 提高风能消纳, 促进能源清洁低碳发展, 进而实现北方地区大气环境的明显改善, 意义重大。本文对风电供热项目发展潜力的影响因素进行研究, 结合层次分析法和模糊综合评价方法, 建立了风电供热项目发展潜力评价指标体系与评价模型。案例分析在一个典型的风电供热项目上开展, 评价结果为“良”。本文的科学价值在于所构建的评价指标体系与评价模型为分析影响风电供热项目推广潜力的因素提供了参考, 对于风电供热项目的发展能力水平评价具有一定的实际意义。

## 关键词

风电供热, 层次分析法, 模糊综合评价

# Evaluation on the Wind Power Heating Project Development

Wenhai Yang

China Huaneng Shangan Power Plant, Shijiazhuang Hebei

Received: Dec. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Feb. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As one of the forms of electrical energy substitution, wind power heating projects can eliminate the obstacles of wind power grid connection in the northern regions during the heating period in the electric load valley, improve the wind power consumption, promote the clean and low-carbon development of energy, and thus realize the obvious improvement of the atmospheric environment in the northern regions, which is of great significance. In this paper, we study the factors influencing the development potential of wind power heating projects, and establish an evaluation

**index system and evaluation model for the development potential of wind power heating projects by combining hierarchical analysis and fuzzy comprehensive evaluation methods. The case study is conducted on a typical wind power heating project, and the evaluation result is "good". The scientific value of this paper is that the evaluation index system and evaluation model provide references for analyzing the factors affecting the promotion potential of wind power heating projects, and are of practical significance for evaluating the development capacity level of wind power heating projects.**

## Keywords

Wind Power Heating, Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Comprehensive Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景

近年来,我国的工业化、城市化进程发展迅速,导致了能源消耗的激增,进而带来了严峻的环境污染、气候变化等问题。作为终端用户用能再电气化的有效手段之一,电能替代已被政府和学者所关注。具体而言,电能替代能够促进终端能源消费结构向利好面调整,提高可再生能源(例如风能、太阳能等)消纳率并增加大气污染防治效力,因此各地政府出台了一系列发展电能替代项目的政策,以加速清洁能源的低碳高效发展进而改善环境、气候等问题[1]。2016年5月,《关于推进电能替代的指导意见》由国家发改委及其他八大部门联合撰写并印发,在该意见中,电能替代被首次视为国家能源战略落实、大气污染防治的关键措施。一年后,《关于推进北方采暖地区城镇清洁供暖的指导意见》接连出台,要求各级政府要因地制宜发展清洁采暖方式,并大力支持新能源储备丰富的地区优先发展新能源供暖[2]。

以电代煤供暖是电能替代的重要手段之一,能够有效解决我国北方地区冬季的大气污染等问题[3]。我国三北地区蕴含大量的风能,但绝大部分未能被有效利用,受丹麦以风电供热的启发,当地政府、有关学者积极研究可再生能源高消纳的方式和手段,以期同时实现清洁供暖与可再生能源高消纳。相关研究发现,风电供暖能够消除北方地区供暖期在电负荷低谷时段的风电并网障碍,提高风能消纳,促进能源清洁低碳发展,进而实现北方地区大气环境的明显改善,意义重大[4]。

### 1.2. 研究现状

近年来,部分学者关注于电采暖以提高弃风消纳,通过技术、经济、环境效益等层面开展了相关研究。陈冬玖将风电和储热式电采暖联合,提出了相应的运行优化模型,并进一步量化分析了联合运行下的发电效益和环境效益[5]。尚庆晓认为热负荷主要与温度有关,因此构建了一个以温度为变量的热负荷模型,通过将风电供暖系统的热源进行有效对比,最终选择了蓄热式电锅炉进行集中供暖[6]。刘寒等人聚焦于一种太阳能热泵联合风电蓄热系统,以最大化太阳辐照量获得以及最小化系统生命周期成本为目标函数,构建了相应的系统动态规划及运行模型[7]。为选择合理的风电-抽凝机组耦合系统供暖方案,张翼等人构建了抽凝机组仿真模型,并利用 Epsilon 软件研究主蒸汽消耗量与电热负荷之间的关系,结果

验证了该供暖方式相较于原抽汽供暖方式的优势[8]。

综上所述，以电供暖，特别是可再生能源发电供暖相较于普通燃煤供暖，能够通过可再生能源高消纳而获利并改善生态环境，因此兼具经济效益和环境效益，发展前景广阔。

### 1.3. 研究内容

本文对风电供暖项目的发展潜力进行了评价。鉴于风电出力与采暖负荷特性存在一定的耦合关系，本文聚焦于利用蓄热式电采暖消纳夜间弃风的方式。因此，本文的研究对象，即风电采暖项目隶属清洁发展项目，对此类项目发展能力的评价应该包括经济、环境、技术和社会的四个方面。此外，本文研究了影响风电供暖项目推广和可持续发展的因素，并进一步建立了风电供暖项目发展潜力评价指标体系与评价模型，以评估风电供暖项目的发展潜力大小，最终为选择具有良好的发展潜力的风电供暖项目提供评价依据和理论支撑。

## 2. 研究方法

### 2.1. 层次分析法

层次分析法(AHP)通过结合定性指标与定量数据，依据决策者历史经验和数据对决策指标进行定量分析，最终有效解决许多非结构化决策问题[9]。层次分析法计算权重的步骤具体如下：

1) 建立层次结构模型。将风电供暖项目发展能力水平从经济方面发展能力、环境方面发展能力、技术方面发展能力和社会系统可持续行四方面描述，然后进一步的详细划分各方面的评价指标层。

2) 构造判断(成对比较)矩阵。基于一致矩阵法(由 Santy 首次提出)确定各层次各因素的权重。首先，按表 1 (9 个重要性等级和相应的赋值)确定判断矩阵元素  $a_{ij}$  的值；接着，计算同一层次两两因素相互比较的结果；最后，将各个结果以形成判断矩阵  $A$ ，如式 1 所示：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

**Table 1.** Scale table

**表 1.** 比例标度表

因素 $i$ 比因素 $j$	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8

3) 层次单排序及一致性检验。

2、层次单排序。分别计算步骤。2)生成的判断矩阵的特征值和特征向量，该特征向量对应于判断矩阵最大特征根  $\lambda_{\max}$ 。进一步地，根据公式 2 对判断矩阵  $A$  进行归一化处理，处理后记为  $w$ ， $w$  中各个元素  $w_i$  表示同一层次因素对于上一层次因素相对重要性的排序权值，即指标权重。

$$w_i = \frac{A_j}{\sum A_j} \quad (2)$$

2、一致性检验。一致性检验指确定判断矩阵  $A$  不一致的允许范围，本文用指标  $CI$  进行计算，如公式 3 所示。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其中， $CI$  越小一致性程度越高。 $CI = 0$  表示有完全的一致性； $CI$  趋近于 0，有满意的一致性； $CI$  越大，不一致程度越高。此外，我们通过引入随机一致性指标  $RI$  来衡量  $CI$  的大小：

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \dots + CI_n}{n} \quad (4)$$

其中，随机一致性指标  $RI$  的大小会受到判断矩阵阶数的影响，一般来说，判断矩阵的阶数越大，一致性随机偏离出现的可能性也就越大。平均随机一致性指标  $RI$  与矩阵阶数的对应关系如表 2 所示。

**Table 2.** Standard values of average random consistency index  $RI$

**表 2.** 平均随机一致性指标  $RI$  的标准值

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

因为导致一致性的偏离的原因还有可能是由于随机原因造成的，因此在进行判断矩阵一致性检验时，还需要比较  $CI$  和随机一致性指标  $RI$ ，得出检验系数  $CR$ ，公式如下：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

一般情况下，如果  $CR < 0.1$ ，那么可以认为该判断矩阵通过了一致性检验，满足一致性要求，否则判断矩阵就不满足一致性，此时需要对判断矩阵进行修改。

4) 层次总排序及其一致性检验。与层次单排序类似，层次总排序是指计算同一层次的所有因素对于最高层也就是目标层相对重要性的权值。

对于风电供暖项目发展能力评价指标体系各指标权重的确定，采用德尔菲技术法，由 10 位专家依据表 1 的 1~9 标度法各自给出对评价层次结构中的每一层次的判断矩阵，然后经过逐轮收集意见和反馈，最终得到各专家统一一致的判断矩阵。然后求出判断矩阵最大特征根对应的特征向量，进而对应各层的指标权重，并通过一致性检验，最终计算得到最底层各指标的权重。

## 2.2. 模糊综合评价法

在建立评价指标体系和通过 AHP 层次分析法构建好权重向量的基础上，通过模糊综合评价方法，确定综合评价的因素集和评语集[10]。针对定性指标采用专家打分法确定各指标评语集的隶属度，针对定量指标建立适合评语集的隶属度函数，构建模糊关系矩阵，最后依据层次分析法确定的指标权重，合成评价矩阵和权重，得到评价结果。具体步骤如下：

1) 确定因素集。首先确定评价指标的因素集， $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，即  $m$  个模糊评价指标。

2) 确定评语集。然后确定因素集的评语集， $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，即确定评价等级论域。需要结合项目自身的特点以及参考国内外文献对项目进行评价的常用方法确定等级论域。

3) 建立模糊评价矩阵。其次确定各个因素对评语集的隶属度函数，构建评价矩阵。针对定性指标，采

用专家打分法确定评价指标对评语集的隶属度；针对定量指标，通过建立隶属度函数确定评价指标对评语集的隶属度。然后对于因素集中的指标进行评价，确定指标对评语集的隶属程度，整理得到模糊关系矩阵。

4) 确定指标权重。需要给组成因素集的各因素赋予权重系数，权重系数的大小可以反映各因素的重要程度，同时由因素集内各因素相应的权重系数组成权重集。

5) 模糊综合评价。最后采用适合的合成因子对其进行合成，即根据各指标权重组成权重集和模糊关系矩阵应用模糊合成方法合成最终的评价结果，并对结果向量进行解释。

AHP - 模糊综合评价方法结合了层次分析法和模糊综合评价两种方法的优点，是一种客观有效的分析评价模型。层次分析法能够有效地消除模糊综合评价法在确立指标权重过程中主观因素的影响，极大地提高了评价结果的可靠性。

### 3. 评价指标体系构建

根据对风电供暖项目发展能力评价内容的分析，同时参考有关文献中提出的评价指标，遵循建立评价指标体系的科学性原则、层析性原则、可比性原则、完备性原则和可能的最少原则，从经济方面、环境方面、技术方面和社会方面四个角度构建了风电供暖项目的发展能力评价指标体系，如表 3 所示。

**Table 3.** Evaluation index system of development capacity of wind power heating projects  
**表 3.** 风电供暖项目的发展能力评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标
风电供热项目发展能力 A	经济方面发展能力 A <sub>1</sub>	供热企业内部收益率 A <sub>11</sub>
		风电企业内部收益率 A <sub>12</sub>
		供热企业投资回收期 A <sub>13</sub>
		风电企业投资回收期 A <sub>14</sub>
		用户单位面积电采暖成本 A <sub>15</sub>
	环境方面发展能力 A <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 减排量 A <sub>21</sub>
		SO <sub>2</sub> 减排量 A <sub>22</sub>
		NO <sub>x</sub> 减排量 A <sub>23</sub>
	技术方面发展能力 A <sub>3</sub>	地区资源合理利用水平 A <sub>24</sub>
		技术先进性 A <sub>31</sub>
		技术可靠性 A <sub>32</sub>
		利用我国改进技术的进步 A <sub>33</sub>
	社会方面发展能力 A <sub>4</sub>	符合我国项目引导方向 A <sub>34</sub>
		改善用户生活水平 A <sub>41</sub>
		促进电力系统平稳运行 A <sub>42</sub>
促进相关产业增长 A <sub>43</sub>		
		促进环境保护意识的传播 A <sub>44</sub>

对于风电供暖项目在经济方面的发展能力评价，采用供热企业内部收益率、风电企业内部收益率、供热企业投资回收期、风电企业投资回收期和用户单位面积电采暖成本一共 5 个二级指标来表征风电供暖项目的经济可持续性，属于定量指标，通过提前设置评价标准，根据项目的各指标的实际定量数值对

风电采暖项目经济层面的发展能力进行评价。

对于风电供暖项目环境方面的发展能力评价，主要从碳减排情况和地区资源利用情况两方面设置二级指标。采用每平方米电采暖的  $\text{CO}_2$  减排量、 $\text{SO}_2$  减排量和  $\text{NO}_x$  减排量来表明风电供暖项目产生的环境效益。此外，地区资源合理利用水平指标指的是项目所在地区对清洁能源的利用程度，清洁能源在用户生活中的使用率越高，表示地区资源合理利用水平越高，项目的环境层面的发展能力越强。地区资源合理利用水平指标为定性分析指标，采用专家打分法并结合模糊综合评价方法得到评价结果。

对于风电供暖项目在技术方面的发展能力评价，从技术先进性、技术可靠性、利用我国改进技术的进步和符合我国项目引导方向四个方面来进行评价。其中，技术先进性和可靠性指标指的是项目是否依托先进、稳定的技术来进行建设和运行。利用我国改进技术的进步指标指的是在项目建设和运营过程中能否利用我国在相关技术层面创新并取得进步的技术。符合我国项目引导方向是指项目建设要与国家整体发展方向相一致，才能维持项目在未来发展中的可持续性。对于技术方面的发展能力评价的四个二级指标均为定性分析指标，采用专家打分法结合模糊综合评价法确定评价结果。

对于风电供暖项目在社会方面的发展能力评价，从改善用户生活水平、促进电力系统平稳运行、促进相关产业增长和促进环境保护意识的传播四个方面来衡量。改善用户生活水平指标指的是风电供暖项目的实施对于用户冬季生活水平的改善和提升程度。促进电力系统平稳运行指标指的是风电供暖项目的实施有利于增加清洁能源上网电量，缓解弃风问题，促进电力系统稳定运行的程度。促进相关产业增长指标是指由于风电供暖项目的实施从而带动风电企业、供暖企业等其它领域产业的的增长，实现电供暖在全社会的可持续发展。促进环境保护意识的传播指标是指风电供暖项目对于提升用户环保意识的程度。由于对项目在社会方面发展能力的评价的二级指标都为定性指标，因此也采用专家打分法和模糊综合评价得到评价结果。

## 4. 案例分析

### 4.1. 数据描述

采用河北省某市一小区目前正在实施的风电供暖项目的盈利能力的分析结果作为对风电供暖项目经济方面发展能力评价的数据，以及该风电供暖项目环境方面的污染物排放情况的数据，数据来源于有关课题项目，具体如表 4、表 5 所示。

**Table 4.** Relevant economic data

**表 4.** 经济方面有关数据

指标	热源站	风电场	采暖用户
内部收益率(%)	7.87	8.25	/
投资回收期(年)	18.07	19.69	/
单位面积采暖成本(元/m <sup>2</sup> )	/	/	31.75

**Table 5.** Relevant data on environment

**表 5.** 环境方面有关数据

污染物排放量	蓄热式电采暖(kg/m <sup>2</sup> )
$\text{CO}_2$	84.72
$\text{NO}_x$	0.024
$\text{SO}_2$	0.027

### 4.2. 指标权重的确定

指标的权重大小会直接影响评价结果的准确性，因此各指标权重在最终评价结果中发挥着极其重要

的作用。通过邀请风电供暖领域的专业专家组成评判小组，通过专家打分法让小组成员利用“1~9 标度方法”对每个层次各项指标的重要性进行判断并打分，获得判断结果，进而构造出两两相比判断矩阵。一级指标由风电供暖项目在经济、环境、技术和社会四个方面的发展能力组成，根据这四个部分对风电供暖项目发展能力的影响不同，通过专家根据各指标的重要性进行打分，对专家打分的结果进行加权汇总计算，构建一级指标层的判断矩阵，如表 6 所示。

**Table 6.** Comparison and judgment matrix of development capacity indicators of wind power heating projects  
**表 6.** 风电供暖项目发展能力指标比较判断矩阵

A	经济方面 发展能力 $A_1$	环境方面 发展能力 $A_2$	技术方面 发展能力 $A_3$	社会方面 发展能力 $A_4$
经济方面发展能力 $A_1$	1	2	3	2
环境方面发展能力 $A_2$	1/2	1	3	2
技术方面发展能力 $A_3$	1/3	1/3	1	1/2
社会方面发展能力 $A_4$	1/2	1/2	2	1

根据供热企业内部收益率、发电企业内部收益率、供热企业投资回收期、发电企业投资回收期、用户电采暖成本对经济方面发展能力的影响程度，对专家打分结果进行汇总建立经济方面发展能力  $A_1$  指标层的判断矩阵，如表 7 所示。

**Table 7.** Judgment matrix of factors affecting economic development capacity  
**表 7.** 经济方面发展能力影响因素判断矩阵

经济方面 发展能力 $A_1$	供热企业内部 收益率 $A_{11}$	发电企业内部收 益率 $A_{12}$	供热企业投资回 收期 $A_{13}$	发电企业投资 回收期 $A_{14}$	用户电采暖成本 $A_{15}$
供热企业内部收益率 $A_{11}$	1	2	1	1	2
发电企业内部收益率 $A_{12}$	1/2	1	1/2	1	1/2
供热企业投资回收期 $A_{13}$	1	2	1	1	2
发电企业投资回收期 $A_{14}$	1	1	1	1	1/2
用户电采暖成本 $A_{15}$	1/2	2	1/2	2	1

根据  $CO_2$  减排量、 $SO_2$  减排量、 $NO_x$  减排量、地区资源合理利用水平对环境方面发展能力的影响程度，对专家打分结果进行汇总建立环境方面发展能力  $A_2$  指标层的判断矩阵，如表 8 所示。

**Table 8.** Judgment matrix of factors affecting the development capacity of environment  
**表 8.** 环境方面发展能力影响因素判断矩阵

环境方面发展能力 $A_2$	$CO_2$ 减排量 $A_{21}$	$SO_2$ 减排量 $A_{22}$	$NO_x$ 减排量 $A_{23}$	地区资源合理利用水平 $A_{24}$
$CO_2$ 减排量 $A_{21}$	1	2	3	1/2
$SO_2$ 减排量 $A_{22}$	1/2	1	2	1
$NO_x$ 减排量 $A_{23}$	1/3	1/2	1	1/2
地区资源合理利用水平 $A_{24}$	2	1	2	1

根据技术先进性、技术可靠稳定性、设备故障情况、安全事故数对技术方面发展能力的影响程度，对专家打分结果进行汇总建立技术方面发展能力  $A_3$  指标层的判断矩阵，如表 9 所示。

**Table 9.** Judgment matrix of factors affecting technical development capability  
**表 9.** 技术方面发展能力影响因素判断矩阵

技术方面发展能力 $A_3$	技术先进性 $A_{31}$	技术可靠稳定性 $A_{32}$	设备故障情况 $A_{33}$	安全事故数 $A_{34}$
技术先进性 $A_{31}$	1	1/2	2	2
技术可靠性 $A_{32}$	2	1	2	2
利用我国改进技术的进步 $A_{33}$	1/2	1/2	1	1/2
符合我国项目引导方向 $A_{34}$	1/2	1/2	2	1

根据改善用户生活水平、促进电力系统平稳运行、促进相关产业增长和促进环境保护意识的传播对社会方面发展能力的影响程度，对专家打分结果进行汇总建立社会方面发展能力  $A_4$  指标层的判断矩阵，如表 10 所示。

**Table 10.** Judgment matrix of influencing factors of social development capacity  
**表 10.** 社会方面发展能力影响因素判断矩阵

社会方面发展能力 $A_4$	改善用户生活水平 $A_{41}$	促进电力系统平稳运行 $A_{42}$	促进相关产业增长 $A_{43}$	促进环境保护意识的传播 $A_{44}$
改善用户生活水平 $A_{41}$	1	1/2	2	3
促进电力系统平稳运行 $A_{42}$	2	1	2	3
促进相关产业增长 $A_{43}$	1/2	1/2	1	2
促进环境保护意识的传播 $A_{44}$	1/3	1/3	1/2	1

确定层次权重系数，计算上述判断矩阵的平均随机一致性指数  $RI$ ，并检查和修正，判断矩阵的表格以通过一致性检验，结果如表 11 和表 12 表示。用 Matlab2018b 进行编程计算判断矩阵的最大特征值和归一化的特征向量，并确定通过随机一致性检验( $CR < 0.10$ )，最终确定风电供暖项目发展能力评价指标权重体系。

**Table 11.** Calculation results and consistency test of primary index weight  
**表 11.** 一级指标权重计算结果及一致性检验

一级指标	权重 $w$	一致性检验
经济方面发展能力 $A_1$	0.42	
环境方面发展能力 $A_2$	0.29	$CI = 0.0237$
技术方面发展能力 $A_3$	0.11	$CR = 0.0263$
社会方面发展能力 $A_4$	0.18	

**Table 12.** Calculation result and consistency test of secondary index weight  
**表 12.** 二级指标权重计算结果及一致性检验

一级指标	二级指标	权重 $w$	一致性检验
经济方面发展能力 $A_1$ 0.42	供热企业内部收益率 $A_{11}$	0.25	$CI = 0.0592$ $CR = 0.0529$
	风电企业内部收益率 $A_{12}$	0.12	
	供热企业投资回收期 $A_{13}$	0.25	
	风电企业投资回收期 $A_{14}$	0.17	
	用户电采暖成本 $A_{15}$	0.20	



Continued

环境方面发展能力 $A_2$ 0.29	CO <sub>2</sub> 减排量 $A_{21}$	0.31	$CI = 0.0691$ $CR = 0.0767$
	SO <sub>2</sub> 减排量 $A_{22}$	0.23	
	NO <sub>x</sub> 减排量 $A_{23}$	0.12	
	地区资源合理利用水平 $A_{24}$	0.34	
技术方面发展能力 $A_3$ 0.11	技术先进性 $A_{31}$	0.28	$CI = 0.0404$ $CR = 0.0449$
	技术可靠性 $A_{32}$	0.39	
	利用我国改进技术的进步 $A_{33}$	0.14	
	符合我国项目引导方向 $A_{34}$	0.20	
社会方面发展能力 $A_4$ 0.18	改善用户生活水平 $A_{41}$	0.29	$CI = 0.0237$ $CR = 0.0263$
	促进电力系统平稳运行 $A_{42}$	0.42	
	促进相关产业增长 $A_{43}$	0.18	
	促进环境保护意识的传播 $A_{44}$	0.11	

### 4.3. 评价结果的确定

本文在建立评价指标体系并确定指标权重向量的基础上，通过模糊综合评价方法，来确定风电供暖项目综合评价的因素集和评语集，并对定量指标建立适合评语集的隶属度函数，构建模糊关系矩阵，对定性指标采用专家打分法确定定性指标的模糊评价矩阵，最后依据层次分析法确定的指标权重，合成评价矩阵和权重，得到风电供暖项目的发展能力水平等级。

1) 确定因素集。影响风电供暖项目发展能力因素集如表 3 中所示的 17 个指标，即

$$A_1 = \{A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}\}, A_2 = \{A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}\}, A_3 = \{A_{31}, A_{32}, A_{33}, A_{34}\}, A_4 = \{A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{44}\}。$$

2) 确定评语集。评语集是指定性表达评价指标所属评价等级的集合，用  $V$  表示。本文将风电供暖项目发展能力分为四个水平， $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ ，其中  $V_1, V_2, V_3, V_4$  分别代表影响风电供暖项目发展能力水平的“优”、“良”、“中”、“差”四个等级，本论文假设评语集的定量指标为

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{1, 0.75, 0.5, 0.25\}。具体评语集如表 13 和表 14 所示。$$

3) 确定各因素集内各指标对评语集的隶属度函数。供热企业内部收益率对评语集  $V$  的隶属度函数如下公式所示。

供热企业内部收益率(%)对于 0.25 的隶属度函数：

**Table 13.** Evaluation criteria for evaluation indicators of economic development capacity

**表 13.** 经济方面发展能力评价指标评价标准

等级	差(0.25)	中(0.5)	良(0.75)	优(1)
供热企业内部收益率(%) $A_{11}$	$A_{11} < 6$	$6 \leq A_{11} < 8$	$8 \leq A_{11} < 10$	$A_{11} \geq 10$
风电企业内部收益率(%) $A_{12}$	$A_{12} < 6$	$6 \leq A_{12} < 8$	$8 \leq A_{12} < 10$	$A_{12} \geq 10$
供热企业投资回收期(年) $A_{13}$	$A_{13} > 20$	$15 < A_{13} \leq 20$	$10 < A_{13} \leq 15$	$A_{13} \leq 10$
风电企业投资回收期(年) $A_{14}$	$A_{14} > 20$	$15 < A_{14} \leq 20$	$10 < A_{14} \leq 15$	$A_{14} \leq 10$
用户电采暖成本(元/m <sup>2</sup> ) $A_{15}$	$A_{15} > 36$	$28 < A_{15} \leq 36$	$20 < A_{15} \leq 28$	$A_{15} \leq 20$

**Table 14.** Evaluation criteria for evaluation indicators of environmental development capacity  
**表 14.** 环境方面发展能力评价指标评价标准

等级	差(0.25)	中(0.5)	良(0.75)	优(1)
CO <sub>2</sub> 减排量(g/m <sup>2</sup> ) A <sub>21</sub>	A <sub>21</sub> < 20,000	20,000 ≤ A <sub>21</sub> < 50,000	50,000 ≤ A <sub>21</sub> < 80,000	A <sub>21</sub> ≥ 800,000
SO <sub>2</sub> 减排量(g/m <sup>2</sup> ) A <sub>22</sub>	A <sub>22</sub> < 10	10 ≤ A <sub>22</sub> < 20	20 ≤ A <sub>22</sub> < 30	A <sub>22</sub> ≥ 30
NO <sub>x</sub> 减排量(g/m <sup>2</sup> ) A <sub>23</sub>	A <sub>23</sub> < 10	10 ≤ A <sub>23</sub> < 20	20 ≤ A <sub>23</sub> < 30	A <sub>23</sub> ≥ 30
地区资源合理利用水平 A <sub>24</sub>	-	-	-	-

$$C_{0.25}(A_{11}) = \begin{cases} 1, & A_{11} \leq 6 \\ \frac{8-A_{11}}{8-6}, & 6 < A_{11} \leq 8 \\ 0, & A_{11} \geq 8 \end{cases} \quad (6)$$

供热企业内部收益率(%)对于 0.5 的隶属度函数:

$$C_{0.5}(A_{11}) = \begin{cases} \frac{A_{11}-4}{6-4}, & 4 \leq A_{11} < 6 \\ 1, & 6 \leq A_{11} < 8 \\ \frac{10-A_{11}}{10-8}, & 8 \leq A_{11} < 10 \\ 0, & A_{11} \geq 10 \end{cases} \quad (7)$$

供热企业内部收益率(%)对于 0.75 的隶属度函数:

$$C_{0.75}(A_{11}) = \begin{cases} \frac{A_{11}-6}{8-6}, & 6 \leq A_{11} < 8 \\ 1, & 8 \leq A_{11} < 10 \\ \frac{12-A_{11}}{12-10}, & 10 \leq A_{11} < 12 \\ 0, & A_{11} < 6 \text{ 或 } A_{11} \geq 12 \end{cases} \quad (8)$$

供热企业内部收益率(%)对于 1 的隶属度函数:

$$C_1(A_{11}) = \begin{cases} 0, & A_{11} < 8 \\ \frac{A_{11}-8}{10-8}, & 8 \leq A_{11} < 10 \\ 1, & A_{11} \geq 10 \end{cases} \quad (9)$$

由于风电企业内部收益率、供热企业投资回收期、风电企业投资回收期、用户采暖成本、CO<sub>2</sub> 减排量等均属于定量数据,且评语集相同,因此这类定量指标对评语集的隶属度函数均采用梯形隶属度函数,与上文类似,所以在此省略。

该项目的供热企业的内部收益率为 7.87%, 因此  $A_{11} = 7.87$  隶属于评语集{1, 0.75, 0.5, 0.25}的隶属度为:  $r_{11} = [C_{0.25}(A_{11}), C_{0.5}(A_{11}), C_{0.75}(A_{11}), C_1(A_{11})] = [0.065, 1, 0.935, 0]$ 。

风电企业内部收益率为 8.25%,  $A_{12} = 8.25$  隶属于评语集{1, 0.75, 0.5, 0.25}的隶属度为:  $r_{12} = [C_{0.25}(A_{12}), C_{0.5}(A_{12}), C_{0.75}(A_{12}), C_1(A_{12})] = [0, 0.875, 1, 0.1]$ 。

供热企业的投资回收期为 18.07 年, 因此  $A_{13} = 18.07$  隶属于评语集{1, 0.75, 0.5, 0.25}的隶属度为:

$$r_{13} = [C_{0.25}(A_{13}), C_{0.5}(A_{13}), C_{0.75}(A_{13}), C_1(A_{13})] = [0.614, 1, 0.386, 0]。$$

风电企业的投资回收期为 19.69 年，因此  $A_{14} = 19.69$  隶属于评语集  $\{1, 0.75, 0.5, 0.25\}$  的隶属度为：

$$r_{14} = [C_{0.25}(A_{14}), C_{0.5}(A_{14}), C_{0.75}(A_{14}), C_1(A_{14})] = [0.938, 1, 0.062, 0]。$$

集中式电采暖用户平均采暖成本为 31.75 元/m<sup>2</sup>，因此  $A_{15} = 19.32$  隶属于评语集  $\{1, 0.75, 0.5, 0.25\}$  的隶属度为： $r_{15} = [C_{0.25}(A_{15}), C_{0.5}(A_{15}), C_{0.75}(A_{15}), C_1(A_{15})] = [0.469, 1, 0.531, 0]。$

从而经济方面发展能力  $A_1$  的模糊评价矩阵  $R_1$ ：

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.065 & 1 & 0.935 & 0 \\ 0 & 0.875 & 1 & 0.125 \\ 0.614 & 1 & 0.386 & 0 \\ 0.938 & 1 & 0.062 & 0 \\ 0.469 & 1 & 0.531 & 0 \end{bmatrix}$$

类似的可以得到环境方面发展能力  $A_2$  的模糊评价矩阵  $R_2$ ：

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.84 & 1 \\ 0 & 0.6 & 1 & 0.4 \\ 0 & 0.3 & 1 & 0.7 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{bmatrix}$$

4) 专家打分法确定定性指标模糊评价矩阵。对于风电供暖项目发展能力评价指标体系中无法定量分析的数据并确定隶属度函数的因素，如技术方面发展能力  $A_3$  和社会方面发展能力  $A_4$  内的定性指标等，邀请 10 名各专业领域的专家进行项目等级评价，成立风电供暖项目发展能力评价专家小组，通过有经验的专家小组成员依据各指标对项目发展能力的影响程度对因素集中无法定量的指标进行评价，获得各因素的评语权重以建立模糊综合评估矩阵。

对专家评分结果进行统计分析，建立风电供暖项目发展能力模糊层次评价矩阵。具体如表 15 与表 16 所示。

**Table 15.** Expert evaluation matrix of technical development capability index  $A_3$

**表 15.** 技术方面发展能力指标  $A_3$  专家评价矩阵

等级	差(0.25)	中(0.5)	良(0.75)	优(1)
技术先进性 $A_{31}$	0	0.3	0.4	0.3
技术可靠性 $A_{32}$	0.1	0.4	0.3	0.2
利用我国改进技术的进步 $A_{33}$	0.1	0.3	0.4	0.2
符合我国项目引导方向 $A_{34}$	0	0.2	0.4	0.4

**Table 16.** Expert evaluation matrix of social development capacity index  $A_4$

**表 16.** 社会方面发展能力指标  $A_4$  专家评价矩阵

等级	差(0.25)	中(0.5)	良(0.75)	优(1)
改善用户生活水平 $A_{41}$	0.2	0.5	0.2	0.1
促进电力系统平稳运行 $A_{42}$	0.1	0.2	0.5	0.2
促进相关产业增长 $A_{43}$	0.1	0.4	0.4	0.1
促进环境保护意识的传播 $A_{44}$	0	0.2	0.6	0.2

即技术方面发展能力  $A_3$  和社会方面发展能力  $A_4$  的模糊评价矩阵  $R_3$  和  $R_4$  如下:

$$R_3 = \begin{bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \\ r_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} r_{41} \\ r_{42} \\ r_{43} \\ r_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \end{bmatrix}$$

5) 确定模糊隶属度矩阵。根据层次分析法确定的各指标权重矩阵, 采用  $M(\cdot, \oplus)$  算子(加权平均型)计算总评价  $B = W \times R$ , 并将得出结果进行归一化处理。

第一, 经济方面发展能力指标  $A_1$  模糊综合评价:

$$W_1 = (0.25, 0.12, 0.25, 0.17, 0.20)$$

$$B_1 = W_1 \times R_1$$

$$B_1 = (0.21, 0.49, 0.29, 0.01)$$

按照模糊综合评价的最大隶属度原则, 该小区风电采暖项目的经济方面发展能力隶属于差的程度为 0.21, 程度为中的隶属度为 0.49, 程度为良隶属度为 0.29, 隶属于优的程度为 0.01。因此可以看出该项目经济方面发展能力隶属于中的程度最大, 所以该项目的经济方面发展能力水平评价等级为“中”。

第二, 环境方面发展能力指标  $A_2$  模糊综合评价:

$$W_2 = (0.31, 0.23, 0.12, 0.34)$$

$$B_2 = W_2 \times R_2$$

$$B_2 = (0.00, 0.13, 0.42, 0.45)$$

同理, 根据模糊综合评价的最大隶属度原则, 该小区风电采暖项目的环境方面发展能力隶属于差的程度为 0.00, 程度为中的隶属度为 0.13, 程度为良的隶属度为 0.42, 隶属于优的程度为 0.45。因此可以看出该项目环境方面发展能力隶属于优的程度最大, 所以该项目的环境方面发展能力水平评价等级为“优”。

第三, 技术方面发展能力指标  $A_3$  模糊综合评价:

$$W_3 = (0.28, 0.39, 0.14, 0.2)$$

$$B_3 = W_3 \times R_3$$

$$B_3 = (0.05, 0.32, 0.37, 0.27)$$

同理, 根据模糊综合评价最大隶属度原则, 该小区风电采暖项目的技术方面发展能力隶属于差的程度为 0.05, 程度为中的隶属度为 0.32, 程度为良的隶属度为 0.37, 隶属于优的程度为 0.27。因此可以看出该项目技术方面发展能力隶属于良的程度最大, 所以该项目的技术方面发展能力水平评价等级为“良”。

第四, 社会方面发展能力指标  $A_4$  模糊综合评价:

$$W_4 = (0.29, 0.42, 0.18, 0.11)$$

$$B_4 = W_4 \times R_4$$

$$B_4 = (0.12, 0.32, 0.41, 0.15)$$

同理，根据模糊综合评价的最大隶属度原则，该小区风电供暖项目的社会方面发展能力隶属于差的程度为 0.12，程度为中的隶属度为 0.32，程度为良的隶属度为 0.41，隶属于优的程度为 0.15。因此可以看出该项目社会方面发展能力隶属于良的程度最大，所以该项目的社会方面发展能力水平评价等级为“良”。

第五，风电供暖项目可持续性发展水平 A 模糊综合评价：

$$W = (0.42, 0.29, 0.11, 0.18)$$

$$B = W \times R$$

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.21, 0.49, 0.29, 0.01 \\ 0.00, 0.13, 0.42, 0.45 \\ 0.05, 0.32, 0.37, 0.27 \\ 0.12, 0.32, 0.41, 0.15 \end{pmatrix}$$

$$B = (0.12, 0.34, 0.36, 0.19)$$

按照模糊综合评价最大隶属度原则，该风电供暖项目发展能力水平隶属于差的程度为 0.12，程度为中的隶属度为 0.34，隶属于良的程度为 0.36，隶属于优的程度为 0.19。因此可以看出该项目在社会方面发展能力隶属于良的程度最大，所以该风电供暖项目的发展能力水平评价等级为“良”。

由于评语也是一种打分，因此可以通过计算清洁能源供暖项目各指标总得分，即进行加权汇总作为评价标准。各等级评语分数为  $V = (0.25, 0.5, 0.75, 1)$ 。

$$S = B \times V^T = (0.12, 0.34, 0.36, 0.19) \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.5 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix} = 0.6570$$

因此该小区的风电供暖项目发展能力总得分为 0.6570 分。这样说明该小区的风电采暖项目的总体发展潜力不是很强，还需要在经济方面、技术和社会方面进行一些改进和完善工作，尤其是提升风电企业和供暖企业的经济效益、降低用户的电采暖成本等工作对于提高风电供暖项目的发展潜力和可持续水平具有重要作用。

## 5. 结论

本文通过研究分析了经济、环境、技术和社会四个方面的因素对风电供暖项目发展能力的影响，并依据评价指标体系建立的原则建立了风电供暖项目发展能力的评价指标体系。通过层次分析法赋予评价指标权重，并应用模糊综合评价方法具体评价项目的发展能力。最后选取河北省某小区某风电供暖项目进行案例分析，最终通过层次分析法确定指标权重并应用模糊综合评价依据最大隶属度原则得出该风电采暖项目整体发展能力评价等级隶属于评价等级“良”，并依据加权平均原则得出风电采暖项目发展能力总得分为 0.6570，说明该风电采暖项目的总体发展能力不是很强，还需要在经济、技术、社会等方面进行一些改进和完善工作。本文构建的发展能力评价指标体系为风电供暖项目的发展能力进行评价提供参考，也为分析风电供暖项目未来的发展潜力存在的问题并提出相关建议奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 屈博, 刘畅, 卜凡鹏, 李德智. 能源结构转型背景下的电能替代发展路径探索[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 1-5.
- [2] 张帆. 山东: 科学构建新能源供热体系多措并举推进清洁供暖[J]. 新能源科技, 2020(12): 11-13+22.
- [3] 向丽. “以电代煤”政策实施问题研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2019.
- [4] 马闯, 张春伟, 刘海波, 左国华. 某风电清洁供暖项目投资分析[J]. 电站系统工程, 2022, 38(4): 65-68.
- [5] 陈冬玖. 促进风电消纳的电采暖负荷聚合管理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [6] 尚庆晓. 基于风电、储(热)供暖系统的风电消纳策略及优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [7] 刘寒, 马小晶, 王宏伟, 宋帆, 贺航. 太阳能热泵联合风电蓄热供暖系统优化研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 104-112.
- [8] 张翼, 魏书洲, 任学武, 张军峰, 杨双华, 白洁, 王金星. 风电-抽凝机组耦合系统供暖方案研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 54-60+67.
- [9] 侯风垒. 基于层次分析法和模糊综合评价法的应急管理综合能力综合评价研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(9): 87-92.
- [10] 林拥军, 肖恬煦, 张曾鹏, 谢远昂. 基于层次分析法-隶属度理论的混凝土框架结构安全性模糊综合评价方法[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 28-38+45.