

# 区域可再生能源发电项目开发影响因素改进 解释结构模型研究

陈玉龙,赵振宇

(华北电力大学 中澳可持续发展研究所,北京 102206)

## Study on the Improved Interpretive Structural Modeling of the Factors Influence the Development of Regional Renewable Energy Power Generation Projects

CHEN Yulong, ZHAO Zhenyu

(China-Australia Sustainable Research Unit, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Energy crisis, environmental pollution and global warming make the world recognize the importance of renewable energy power generation (REPG). Through literature review and semi-interview, 12 critical factors influence the development of regional REPG projects in China are identified. And the hierarchy structure of critical influence factors is obtained by improved interpretive structural modeling. Furthermore, the 12 critical influence factors are further classified into four clusters by applying the Matrice d'Impacts croises-multiplication appliqué a classement (MICMAC) technique. It is concluded that regional economy and urbanization development, government incentive policy are most influential and powerful factors in the development of regional REPG projects in China.

**KEY WORDS:** renewable energy; power generation; interpretive structural modeling; Matrice d'Impacts croises-multiplication appliqué a classement (MICMAC)

**摘要:** 能源危机、环境污染和全球变暖使世界各国普遍认识到可再生能源发电的必要性。从系统科学的思维角度和理论出发,通过文献调查和专家访谈,挖掘出影响我国区域可再生能源发电项目开发的12个关键因素,运用改进解释结构模型分析关键影响因素间的层级递阶结构关系。在此基础上,运用交叉影响矩阵相乘法模拟关键影响因素的驱动力——依赖性分布。结果表明:区域经济和城市化发展、政府

激励政策对区域可再生能源发电项目开发的驱动力最强,同时也是最根本的影响因素。

**关键词:** 可再生能源;发电;解释结构模型;交叉影响矩阵相乘法

长期以化石能源为主的能源结构使我国从2006年开始成为全球最大的CO<sub>2</sub>排放国,由此也造成了一系列环境问题<sup>[1-3]</sup>。开发可再生能源发电项目,对实现我国能源结构低碳转型、改善环境质量、促进节能减排以及保证国民经济可持续发展具有重要的战略意义<sup>[4-8]</sup>。2017年我国可再生能源发电项目累计装机容量达650 GW,其中水电341 GW,风电164 GW,太阳能光伏发电130 GW,生物质发电15 GW,风电和太阳能光伏发电项目累计装机容量连续多年保持世界第一<sup>[9-10]</sup>。然而,在快速发展的同时,近年来逐渐暴露出的诸如区域可再生能源发电项目开发无序<sup>[11]</sup>、可再生能源资源浪费严重<sup>[12-13]</sup>等问题也越来越严峻。为了优化区域可再生能源发电项目开发及促进可再生能源发电产业良性发展,亟待深入研究区域可再生能源发电项目开发的影响因素。

可再生能源发电项目开发的动力和障碍,一直是相关学者关注的焦点。文献[14]认为技术水平低、独立研发和创新能力弱、技术标准体系不完善对我国新能源发电项目开发的制约性影响不容忽视。文献[15]指出优质的区域可再生能源资源水平和较大的电力需求是区域可再生能源发电项目开发的重要保障。文献[16]分析了“十一五”至“十三五”期间

**基金项目:** 国家留学基金管理委员会加中学者交流项目(201606735039);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016XS71)。

Project Supported by the Canada-China Scholar Exchange Programme (CCSEP) of China Scholarship Council (201606735039); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2016XS71)。

实施的一系列政策对我国可再生能源发电项目开发及产业发展的影响。此外,还有文献指出社会接受度<sup>[17]</sup>、区域经济发展水平<sup>[18]</sup>、税收支持<sup>[19]</sup>和融资机制<sup>[20]</sup>、远距离输电设施<sup>[21]</sup>和资源预测及评估<sup>[22-23]</sup>等也是影响区域可再生能源发电项目开发的重要因素。

可以看出,区域可再生能源发电项目开发受多种因素影响,已有研究多从微观角度尝试解释某一个或几个因素对区域可再生能源发电项目开发的影响,鲜有研究涉及对影响因素间相互关系的建模分析。因此,本研究将在已有研究的基础上,挖掘影响我国区域可再生能源发电项目开发的关键因素,并构建模糊解释结构模型分析关键影响因素间的层级关系,在此基础上,运用交叉影响矩阵相乘法,研究建立关键影响因素的驱动力和依赖性分布矩阵。本研究旨在为可再生能源发电项目投资者和政府决策提供依据。

## 1 改进解释结构模型

解释结构模型(interpretative structural modeling, ISM)由美国学者 J. Warfield 于 1973 年提出,主要用于分析组成复杂系统的大量元素间的关系(包括单向或双向因果关系、大小关系、排斥关系、相关关系、从属或领导关系等),并以多级递阶结构的形式表示出来<sup>[24]</sup>。传统解释结构模型只考虑系统元素间是否存在相互关系,对系统元素间关系的判断只有 1(有影响)和 0(没有影响)2 个值,而不涉及影响关系的强弱。但在实际中,系统元素间的影响强度是不同的。因此,考虑到影响因素间相互关系的强弱差异,本研究将模糊矩阵的概念引入解释结构模型,构建模糊解释结构模型,以实现影响因素间相互关系确定从定性到定量的转变,确保分析结果的合理性与准确性。模糊解释结构模型的建模步骤如下。

第一步:识别相关因素,可采用文献分析、专家访谈和调查问卷等。

第二步:邀请专家对因素间相互影响程度进行评分,其值在 0~1 之间,并根据专家判断结果,生成模糊关联矩阵  $T$ 。

第三步:选取合适的模糊隶属度函数,计算关联强度矩阵  $B$ 。

第四步:确定阈值  $\lambda$ ,生成邻接矩阵  $A_0$ 。

第五步:计算可达矩阵  $R$ 。

第六步:对可达矩阵进行层次划分。

第七步:绘制多级递阶结构模型。

本研究将按照上述步骤,对我国区域可再生能源发电项目开发的关键影响因素进行模糊解释结构模型构建,并给出相关分析。

## 2 建立改进的解释结构模型

### 2.1 区域可再生能源发电项目开发关键影响因素挖掘

基于文献[14-23, 25-27]的研究成果,并通过调研我国可再生能源领域的 17 位专家,本研究归纳出影响我国区域可再生能源发电项目开发的 12 个关键因素,为了便于讨论,将其定义为变量  $F_1 \sim F_{12}$ ,并建立关键影响因素集合  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_{12}\}$ :可再生能源电力消纳基础设施( $F_1$ )、技术研发( $F_2$ )、区域经济和城市化发展( $F_3$ )、可再生能源电力上网电价( $F_4$ )、可再生能源电力成本( $F_5$ )、可再生能源发电项目投融资( $F_6$ )、政府激励政策( $F_7$ )、可再生能源发电设备质量和项目施工水平( $F_8$ )、环保压力( $F_9$ )、设备制造产业标准和市场准入( $F_{10}$ )、区域电力需求( $F_{11}$ )和可再生能源电力上网电量( $F_{12}$ )。

### 2.2 因素间影响程度评分和生成模糊关联矩阵

在确定关键影响因素后,本研究通过邮件再次联系 2.1 中所述的 17 位专家,请其就 12 个关键影响因素间的相互影响程度进行打分。17 位专家中有 12 位来自高校和可再生能源领域的顶级研究院,5 位来自可再生能源发电领域相关企业。17 位专家从事可再生能源领域的时间均超过 20 a,他们丰富的学术和实践经验为本研究提供了科学性和准确性保障。使用平均法统计因素模糊关联关系,得到区域可再生能源发电项目开发关键影响因素模糊关联矩阵  $T$ ,如表 1 所示。

### 2.3 选取模糊隶属度函数和计算关联强度矩阵

本研究选取如式(1)所示的隶属度函数,对表 1 所示的模糊关联矩阵  $T$  进行处理,按式(2)可得关键影响因素关联强度矩阵  $B$ ,如表 2 所示。

$$b_{ij} = t_{ij} / (t_i + t_j - t_{ij}) \quad (1)$$

$$B = (b_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

### 2.4 确定阈值和生成邻接矩阵

通过阈值  $\lambda$  对关联强度矩阵  $B$  进行筛选。阈值

表1 关键影响因素模糊关联矩阵

Tab. 1 Fuzzy relation matrix of the 12 critical influence factors

因素	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$
$F_1$	0.00	0.12	0.30	0.43	0.62	0.78	0.10	0.09	0.66	0.15	0.10	0.80
$F_2$	0.54	0.00	0.05	0.07	0.60	0.82	0.03	0.70	0.67	0.84	0.11	0.34
$F_3$	0.58	0.61	0.00	0.05	0.07	0.82	0.20	0.05	0.72	0.13	0.89	0.78
$F_4$	0.20	0.17	0.14	0.00	0.10	0.70	0.08	0.05	0.55	0.06	0.05	0.71
$F_5$	0.21	0.17	0.04	0.81	0.00	0.75	0.02	0.07	0.15	0.21	0.06	0.78
$F_6$	0.16	0.21	0.11	0.20	0.73	0.00	0.03	0.11	0.57	0.20	0.10	0.67
$F_7$	0.80	0.78	0.02	0.76	0.76	0.96	0.00	0.09	0.82	0.67	0.61	0.92
$F_8$	0.15	0.07	0.14	0.17	0.80	0.76	0.11	0.00	0.62	0.11	0.10	0.71
$F_9$	0.13	0.11	0.17	0.15	0.57	0.71	0.02	0.30	0.00	0.20	0.05	0.69
$F_{10}$	0.12	0.80	0.17	0.11	0.14	0.76	0.07	0.82	0.14	0.00	0.06	0.73
$F_{11}$	0.62	0.11	0.13	0.10	0.10	0.73	0.08	0.07	0.60	0.14	0.00	0.75
$F_{12}$	0.13	0.08	0.24	0.19	0.20	0.74	0.04	0.10	0.70	0.11	0.16	0.00

表2 关键影响因素关联强度矩阵

Tab. 2 Relation intensity matrix of the 12 critical influence factors

因素	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$
$F_1$	0.00	0.02	0.06	0.06	0.08	0.07	0.02	0.01	0.07	0.02	0.02	0.07
$F_2$	0.07	0.00	0.01	0.01	0.07	0.07	0.01	0.11	0.07	0.12	0.02	0.03
$F_3$	0.07	0.08	0.00	0.01	0.01	0.07	0.04	0.01	0.07	0.02	0.14	0.07
$F_4$	0.03	0.03	0.03	0.00	0.01	0.07	0.02	0.01	0.07	0.01	0.01	0.07
$F_5$	0.03	0.03	0.01	0.15	0.00	0.07	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.08
$F_6$	0.02	0.03	0.02	0.03	0.10	0.00	0.01	0.02	0.07	0.04	0.02	0.07
$F_7$	0.08	0.08	0.00	0.08	0.07	0.07	0.00	0.01	0.07	0.07	0.07	0.07
$F_8$	0.02	0.01	0.03	0.03	0.10	0.07	0.02	0.00	0.07	0.02	0.02	0.07
$F_9$	0.02	0.02	0.04	0.03	0.08	0.07	0.01	0.06	0.00	0.03	0.01	0.07
$F_{10}$	0.02	0.13	0.03	0.02	0.02	0.07	0.02	0.15	0.01	0.00	0.01	0.07
$F_{11}$	0.10	0.02	0.03	0.02	0.01	0.07	0.02	0.01	0.07	0.02	0.00	0.07
$F_{12}$	0.02	0.01	0.06	0.03	0.03	0.07	0.01	0.02	0.09	0.02	0.03	0.00

$\lambda$ 选取得越小,系统划分得越粗,阈值 $\lambda$ 选取得越大,系统划分的越细。系统划分的粗细程度会影响系统的总体性能,文献[28]研究表明阈值 $\lambda$ 取0.05~0.08时系统总体性能最优。据此,本研究选取阈值 $\lambda=0.07$ ,并按照式(3)和式(4)对关联强度矩阵  $B$  进行处理,得到阈值 $\lambda=0.07$ 水平下的邻接矩阵  $A_0$ ,如表3所示。

$$A_0 = (a_{ij})_{n \times n} \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & b_{ij} \geq \lambda \\ 0, & b_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

### 2.5 计算可达矩阵

可达矩阵表示矩阵形式的各要素间经过一定长度的通路后可以到达的程度。设  $A_1 = A_0 + I$ , 其中  $I$  是单位矩阵,对矩阵  $A_1$  进行求幂布尔代数运算,通过判别式(5)可得阈值 $\lambda=0.07$ 水平下的可达矩阵  $R$ ,

如表4所示。

$$(A_1)^1 \neq (A_1)^2 \neq (A_1)^3 \neq \dots \neq (A_1)^m = (A_1)^{m+1} = R \quad (5)$$

式中,  $m$  为运算次数。

### 2.6 对可达矩阵进行层次划分

对可达矩阵进行层级划分的具体过程如式(6)~式(9)所示。表5~表8为关键影响因素的层级划分过程。

$$RS(F_i) = \{F_j | F_j \in F, r_{ij} = 1\} \quad (6)$$

$$AS(F_i) = \{F_j | F_j \in F, r_{ji} = 1\} \quad (7)$$

$$IS(F_i) = RS(F_i) \cap AS(F_i) \quad (8)$$

$$L_i = \{F_j | F_j \in F - L_0 - L_1 - \dots - L_{i-1}, IS(F_i) = RS(F_i)\} \quad (9)$$

式中:  $RS(F_i)$  为关键影响因素  $F_i$  的可达集;  $AS(F_i)$  为先行集;  $IS(F_i)$  为可达集和先行集的交集;  $L_i$  代表第  $i$  层,且  $i=1, 2, \dots, l; l \leq n; L_0 = \emptyset$ 。

表3 关键影响因素邻接矩阵  
Tab.3 Adjacency matrix of the 12 critical influence factors

因素	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$
$F_1$	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_2$	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
$F_3$	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
$F_4$	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
$F_5$	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
$F_6$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
$F_7$	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
$F_8$	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_9$	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
$F_{10}$	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
$F_{11}$	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
$F_{12}$	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

表4 关键影响因素可达矩阵  
Tab.4 Reachability matrix of the 12 critical influence factors

因素	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$
$F_1$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_2$	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
$F_3$	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
$F_4$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_5$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_6$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_7$	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$F_8$	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1
$F_9$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_{10}$	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
$F_{11}$	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1
$F_{12}$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1

表5 关键影响因素水平层次1  
Tab.5 Level 1 partitioning of the 12 critical influence factors

因素	可达集	先行集	交集	层次
$F_1$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_7/F_{10}/F_{11}$	$F_1$	
$F_2$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_{10}/F_{12}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	
$F_3$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_3$	$F_3$	
$F_4$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	1
$F_5$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	1
$F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	1
$F_7$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_7$	$F_7$	
$F_8$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_8$	
$F_9$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	1
$F_{10}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_{10}/F_{12}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	
$F_{11}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_{11}/F_{12}$	$F_2/F_7/F_{11}$	$F_{11}$	
$F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6/F_7/F_{10}/F_{11}/F_{12}$	$F_1/F_2/F_3/F_4/F_5/F_6$	1

表6 关键影响因素水平层次2  
Tab.6 Level 2 partitioning of the 12 critical influence factors

因素	可达集	先行集	交集	层次
$F_1$	$F_1$	$F_1/F_2/F_3/F_7/F_{10}/F_{11}$	$F_1$	2
$F_2$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	
$F_3$	$F_3/F_7/F_{10}/F_{11}$	$F_3$	$F_3$	
$F_7$	$F_3/F_7/F_{10}/F_{11}$	$F_7$	$F_7$	
$F_8$	$F_8$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_8$	2
$F_{10}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	
$F_{11}$	$F_3/F_{11}$	$F_3/F_7/F_{11}$	$F_{11}$	

表7 关键影响因素水平层次3  
Tab.7 Level 3 partitioning of the 12 critical influence factors

因素	可达集	先行集	交集	层次
$F_2$	$F_2/F_{10}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	3
$F_3$	$F_3/F_{10}/F_{11}$	$F_3$	$F_3$	
$F_7$	$F_3/F_7/F_{10}/F_{11}$	$F_7$	$F_7$	
$F_{10}$	$F_2/F_{10}$	$F_2/F_3/F_7/F_{10}$	$F_2/F_{10}$	3
$F_{11}$	$F_{11}$	$F_3/F_7/F_{11}$	$F_{11}$	3

表8 关键影响因素水平层次4  
Tab.8 Level 4 partitioning of the 12 critical influence factors

因素	可达集	先行集	交集	层次
$F_3$	$F_3$	$F_3$	$F_3$	4
$F_7$	$F_7$	$F_7$	$F_7$	4

2.7 绘制多级递阶结构模型

根据对可达矩阵的层次划分结果,得到关键影响因素的4个层级及其结构关系,据此可得区域可再生能源发电项目开发关键影响因素多级递阶结构模型,如图1所示。

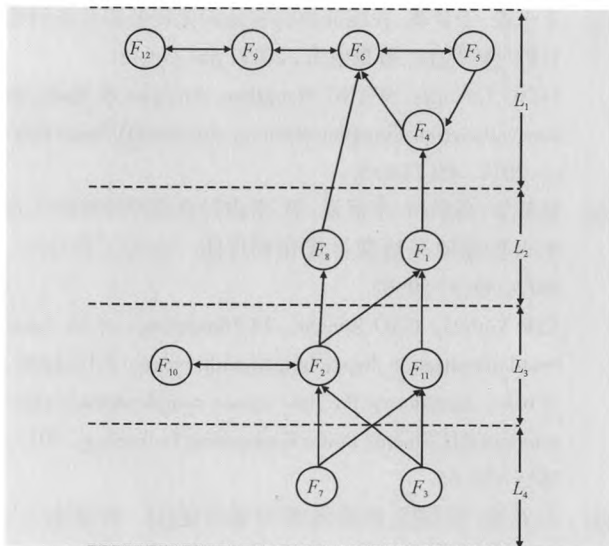


图1 区域可再生能源发电项目开发关键影响因素多级递阶解释结构模型

Fig. 1 Hierarchal interpretative structural model of the 12 critical influence factors for the development of regional renewable energy power generation projects

由图1可知,可再生能源电力上网电价( $F_4$ )、可再生能源电力成本( $F_5$ )、可再生能源发电项目投融资( $F_6$ )、环保压力( $F_9$ )、可再生能源电力上网电量( $F_{12}$ )这5个关键因素位于解释结构模型的最顶层,代表这些是我国区域可再生能源发电项目开发最直接的关键影响因素。区域经济和城市化发展( $F_3$ )和政府激励政策( $F_7$ )这2个关键因素位于解释结构模型的最底层,代表我国区域可再生能源发电项目开发最根本的关键影响因素。

### 3 关键影响因素MICMAC分析

交叉影响矩阵相乘法(matrice d'impacts croises-multiplication appliqué a classement, MICMAC)常与解释结构模型结合使用,来识别系统中具有高动力性和高依赖性的变量<sup>[29]</sup>。该方法将系统因素分为自发、依赖、联动和驱动4个集群,如图2所示。其中,自发集群中的因素驱动力和依赖性都较弱;驱动集群中的因素驱动力较强但依赖性较弱;联动集群中的因素其驱动力和依赖性都较强;依赖集群中的因素驱动力较弱但依赖性较强。对系统因素进行MICMAC分析的目的就是找出因素中哪些是驱动因素,哪些是依赖因素,从而找到管理和干预的重点。

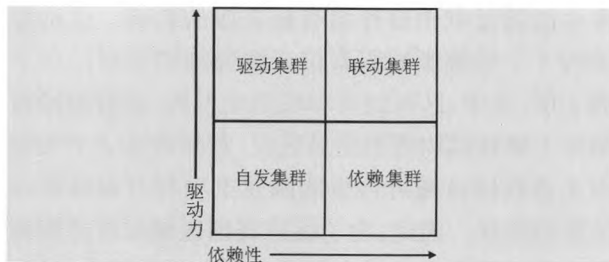


图2 交叉影响矩阵相乘法示意图

Fig. 2 Diagram of MICMAC analysis

MICMAC分析结果可以通过坐标轴形象地表达出来,纵坐标代表驱动力,横坐标代表依赖性。系统中每个因素的驱动力  $DF(F_i)$  和依赖性  $DP(F_i)$  可基于可达矩阵计算得出,具体计算方法如式(10)和(11)所示。

$$DF(F_i) = \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$DP(F_i) = \sum_{j=1}^n r_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

根据MICMAC方法的原理及如表4所示的可达矩阵,可得我国区域可再生能源发电项目开发关键影响因素的驱动力和依赖性分布,如图3所示。

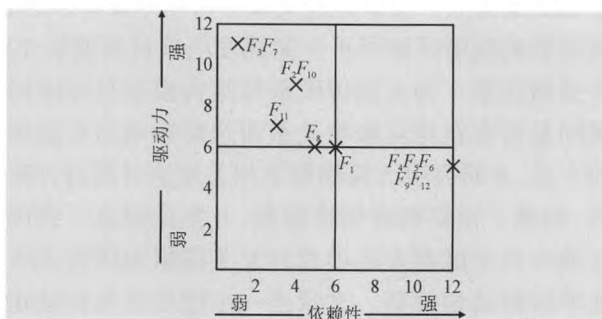


图3 区域可再生能源发电项目开发关键影响因素驱动力-依赖性分布

Fig. 3 Driving-force and dependence-power diagram of the 12 critical influence factors for the development of regional renewable energy power generation projects

由图3可知,技术研发( $F_2$ )、区域经济和城市化发展( $F_3$ )、政府激励政策( $F_7$ )、设备制造产业标准和市场准入( $F_{10}$ )和区域电力需求( $F_{11}$ )属于驱动集群因素。可再生能源电力上网电价( $F_4$ )、可再生能源电力成本( $F_5$ )、可再生能源发电项目投融资( $F_6$ )、环保压力( $F_9$ )和可再生能源电力上网电量( $F_{12}$ )属于依赖集群因素。

结合图1和图3可知,依赖集群的5个关键影响因素位于解释结构模型的最顶层,对我国区域可

再生能源发电项目开发有最直接的影响。驱动集群的5个关键影响因素位于解释结构模型的最下面2层,其中,区域经济和城市化发展、政府激励政策位于解释结构模型的最底层,意味着这2个关键因素是我国区域可再生能源发电项目开发最根本的影响因素。因此,为了促进我国区域可再生能源发电项目开发及可再生能源发电产业的健康发展,应着力于这2个关键影响因素。区域经济和城市化发展与区域电力需求息息相关,并且随着城市化进程的不断加快,对绿色电力的需求必将进一步增大。而政府政策是保证行业稳定有序发展的前提,虽然近年来中国可再生能源发电激励政策陆续出台,但一些重要政策仍亟待完善,如可再生能源电力省间交易机制以及可再生能源电力配额制、可再生能源绿色电力交易证书制度等。

## 4 结语

挖掘区域可再生能源发电项目开发关键影响因素及因素间的层次递阶结构关系,有助于找到管理和决策重点。文章通过文献分析和专家访谈,归纳出影响我国区域可再生能源发电项目开发的12个关键因素。为克服传统解释结构模型只考虑因素间是否存在相互影响关系而忽略影响关系强弱的不足,本研究引入模糊数学相关理论对其进行改进,构建了模糊解释结构模型,并据此建立了我国区域可再生能源发电项目开发关键影响因素多级递阶解释结构模型。文章进一步使用交叉影响矩阵相乘法研究了各关键影响因素的驱动力和依赖性。研究表明,区域经济和城市化发展、政府激励政策是我国区域可再生能源发电项目开发最根本的影响因素,对其驱动效果也最强,应作为管理的重点。同时,可再生能源电力上网电价、可再生能源电力成本、可再生能源发电项目投融资、环保压力和可再生能源电力上网电量依赖性最强,是我国区域可再生能源发电项目开发最直接的影响因素。

### 参考文献

- [1] ZHAO Z Y, CHANG R D, ZILLANTE G. Challenges for Chinas energy conservation and emission reduction[J]. *Energy Policy*, 2014, 74(11):709-713.
- [2] 童光毅,王梦真.我国能源结构低碳化转型的有关问题分析与研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(7):6-8.  
TONG Guangyi, WANG Mengzhen. Analysis & Study on low-carbon transformation of energy structure[J]. *Smart Power*, 2017, 45(7):6-8.
- [3] 夏新华,高宗和,李恒强,等.考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(5):59-65.  
XIA Xinhua, GAO Zonghe, LI Hengqiang, et al. Combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases considering the time-space complementary characteristics[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(5):59-65.
- [4] 石元春.我国生物质能源发展综述[J]. *智慧电力*, 2017, 45(7):1-5,42.  
SHI Yuanchun. Overview of biomass energy development in China [J]. *Smart Power*, 2017, 45(7):1-5,42.
- [5] 周静,孙媛媛.未来电力能源系统数据分析面临的需求与挑战[J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(4):39-45.  
ZHOU Jing, SUN Yuanyuan. Data analysis requirements and challenges in the future power energy domain[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2016, 14(4):39-45.
- [6] 王骏,丁晓群,孙士云,等.考虑光照概率性的含光伏发电系统的配电网无功优化[J]. *广东电力*, 2017, 30(1):103-107,137.  
WANG Jun, DING Xiaoqun, SUN Shiyun, et al. Reactive power optimization for power distribution network with photovoltaic generation system considering illumination probability[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(1):103-107,137.
- [7] 方必武,刘涤尘,王波,等.基于小波变换和改进萤火虫算法优化LSSVM的短期风速预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(8):37-43.  
FANG Biwu, LIU Dichen, WANG Bo, et al. Short-term wind speed forecasting based on WD-CFA-LSSVM model [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(8):37-43.
- [8] 王敏,许建,潘永春.计及风电预测可靠性的含风电电力系统优化调度模型[J]. *广东电力*, 2017, 30(4):43-49.  
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun. Optimized dispatching model for power system with wind power considering wind power forecasting reliability [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(4):43-49.
- [9] 2017年全国电力工业统计快报数据一览表[EB/OL]. (2018-02-05) [2018-02-06]. <http://www.cec.org.cn/>

- guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2018-02-05/177726.html.
- [10] 张顺,葛智平,郭涛,等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1):106-110.  
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1):106-110.
- [11] 赵振宇, 闫红, 令文君. 我国生物质发电产业SWOT分析[J]. 可再生能源, 2012, 30(1):127-132.  
ZHAO Zhenyu, YAN Hong, LING Wenjun. SWOT analysis on the biomass power generation industry in China[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(1):127-132.
- [12] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10):146-154.  
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10):146-154.
- [13] 王深哲, 高山, 尤国伟, 等. 考虑多安全性约束的风电场穿透功率极限研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):57-61, 81.  
WANG Shenze, GAO Shan, YOU Guowei, et al. Wind penetration limitation research considered multiple security constraints [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):57-61, 81.
- [14] WU G, ZENG M, PENG L L, et al. Chinas new energy development: Status, constraints and reforms[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53(1):885-896.
- [15] DONG L, LIANG H W, GAO Z Q, et al. Spatial distribution of Chinas renewable energy industry: Regional features and implications for a harmonious development future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58(5):1521-1531.
- [16] ZHAO Z Y, CHEN Y L, CHANG R D. How to stimulate renewable energy power generation effectively—China's incentive approaches and lessons[J]. Renewable Energy, 2016, 92(7):147-156.
- [17] YUAN X L, ZUO J, HUISINGH D. Social acceptance of wind power: a case study of Shandong Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92(4):168-178.
- [18] LIN B Q, MOUBARAK M. Renewable energy consumption—Economic growth nexus for China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40(12):111-117.
- [19] 赵文会, 钟孔露, 王辉, 等. 影响风力发电决策的政府激励机制研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7):118-124.  
ZHAO Wenhui, ZHONG Konglu, WANG Hui, et al. Impacts of government incentive mechanism on decisions of wind power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7):118-124.
- [20] DONG J, FENG T T, SUN H X, et al. Clean distributed generation in China: Policy options and international experience[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57(5):753-764.
- [21] 蔡帜, 罗志强, 杨军峰, 等. 考虑大规模可再生能源接入的输电设备检修计划[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21):96-101.  
CAI Zhi, LUO Zhiqiang, YANG Junfeng, et al. Transmission maintenance scheduling with large-scale renewable energy integration [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21):96-101.
- [22] 何如, 欧艺, 苏志, 等. 广西风能资源分布高分辨率数值模拟应用研究[J]. 广东电力, 2016, 29(6):24-29, 77.  
HE Ru, OU Yi, SU Zhi, et al. Application research on high resolution numerical simulation on Guangxi wind energy resource distribution [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6):24-29, 77.
- [23] 胡菊, 靳双龙, 宋宗朋, 等. 基于云计算的全球可再生能源资源精细化评估方法[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(3):25-29.  
HU Ju, JIN Shuang-long, SONG Zong-peng, et al. A refine assessment method of global renewable energy resources based on cloud computing [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(3):25-29.
- [24] 杨晓艳, 陈杰. 供应链协调中知识流要素的解释结构模型[J]. 软科学, 2013, 27(5):140-144.  
YANG Xiaoyan, CHEN Jie. ISM model of the knowledge flow element in the supply chain coordination[J]. Soft Science, 2013, 27(5):140-144.
- [25] 闫金定. 我国生物质能源发展现状与战略思考[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(4):151-158.  
YAN Jinding. Biomass to energy in China: Development status and strategic consideration[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2014, 34(4):151-158.
- [26] 马哲, 马中, 翟俊, 等. 中国农林生物质发电产业发展区域适宜性分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4):290-294.

- MA Zhe, MA Zhong, ZHAI Jun, et al. Regional suitability analysis of the agricultural and forestry biomass power generation industry development in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(4):290-294.
- [27] 俞文政, 朱梦悦, 潘进军, 等. 太阳能资源光伏利用驱动机制研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(5):66-70.
- YU Wenzheng, ZHU Mengyue, PAN Jinjun, et al. Driving mechanisms of solar photovoltaic utilization[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 40(5):66-70.
- [28] 章锡俏, 袁亚龙, 孙志超. 居民出行成本影响因素的改进解释结构模型研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(7):101-105.
- ZHANG Xiqiao, YUAN Yalong, SUN Zhichao. Improved interpretive structural model of influencing factors of resident travel cost[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2017, 36(7):101-105.
- [29] LUTHRA S, KUMAR S, KHARB R, et al. Adoption of smart grid technologies: An analysis of interactions among barriers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33(5):554-565.
- 
- 收稿日期:2017-10-16。
- 作者简介:  
陈玉龙(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为能源经济、能源政策;  
赵振宇(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为能源项目管理。
- (编辑 董小兵)
- 
- (上接第148页)
- mics, 2016, 59(1):76-89.
- [26] DETERT N, KOTANI K. Real options approach to renewable energy investments in Mongolia[J]. *Energy Policy*, 2013, 56(5):136-150.
- [27] 张明明, 周德群, 周鹏. 基于实物期权的中国光伏发电项目投资评价[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2014, 16(6):26-33.
- ZHANG Mingming, ZHOU Dequn, ZHOU Peng. Evaluation of chinese photovoltaic power generation projects investment based on real option[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2014, 16(6):26-33.
- [28] 努尔买买提·库尔班, 刘洋, 段金辉, 等. 不同情景下太阳能光伏分布式电源投资决策评估研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(12):209-212.
- NUER Maimaiti, LIU Yang, DUAN Jinhui, et al. Investment decision-making assessment study of solar photovoltaic distributed power under different scenarios[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(12):209-212.
- [29] 赵文会, 李阮, 王辉, 等. 关于电动汽车综合效益的再思考[J]. *价格理论与实践*, 2016, 33(7):151-154.
- ZHAO Wenhui, LI Ruan, WANG Hui, et al. On comprehensive benefits of electric vehicles[J]. *Price Theory and Practice*, 2016, 33(7):151-154.
- [30] KUMBAROGLU G, MADLENER R, DEMIREL M. A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(4):1882-1908.
- 
- 收稿日期:2017-06-01。
- 作者简介:  
赵文会(1977—),女,博士,教授,研究方向为能源环境政策分析和系统分析与优化等;  
李阮(1993—),男,通信作者,硕士研究生,研究方向为能源经济;  
付强(1992—),男,硕士研究生,研究方向为能源互联网。
- (编辑 冯露)