

基于 DEMATEL-ISM 模型的居民屋顶光伏设备安装意愿的影响因素研究

蔡永自¹, 郭丽平², 徐建军^{3,*}

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315100)

(2. 国网浙江余姚市供电有限公司, 浙江 余姚 315400)

(3. 宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 研究以宁波居民为调查对象, 首先就居民屋顶光伏设备安装的采纳意愿进行了调查, 进而采用 DEMATEL-ISM 方法就居民屋顶光伏设备安装意愿的影响因素进行了实证分析. 统计表明居民愿意安装屋顶光伏发电设备的占被调查人员的 73.77%, 城市居民光伏发电设备安装意愿略高于农村居民, 近期有打算安装光伏发电设备的被调查者约占 3.56%; DEMATEL 分析表明中心度排在前四位的因素分别是分布密度、补贴力度、投资回报时间和安装成本, 它们对于居民光伏发电设备安装意愿有着非常重要的影响; ISM 分析进一步表明售后服务和住房特征是影响居民安装光伏发电设备安装意愿的直接影响因素, 而光伏法规、补贴力度、并网技术、设备质量是影响居民家庭屋顶光伏设备安装意愿最根本的因素.

关键词: 光伏; 采纳意愿; 决策试验和评价实验法; 解释性结构模型

1 引言

围绕“美丽浙江”和“国家清洁能源示范省”建设主题、加快推进光伏发电的推广应用, 浙江省政府于 2016 年 9 月颁发了《关于推进浙江省百万家庭屋顶光伏工程建设的实施意见》, 努力将百万家庭屋顶光伏工程建设成为具有“普及面广、美观优质”特点的民生工程, 总目标是 2016-2020 年全省建成家庭屋顶光伏装置 100 万户以上, 总装机规模 300 万千瓦左右. 但据浙江省太阳能行业协会官方统计, 截至 2017 年 12 月底, 家庭屋顶光伏并网户数还只有 15.8 万户. 尽管当前居民分布式光伏发电已具备大规模发展的可能, 但要使得居民分布式光伏发电变成现实, 其推广工作仍然面临着建设条件限制过多、相关法律和金融支持政策缺失、补贴政策执行较难到位、政策稳定性和可预期性差等诸多障碍. 在不了解家庭用户对光伏发电应用真实需求及其意愿的情况下, 制定和推行相关的推广政策必将脱离实际, 也将面临重重困难. 为了顺利推进浙江家庭屋顶光伏工程建设, 有必要对浙江居民家庭屋顶光伏设备安装的现状进行调查研究, 揭示光伏发电推广过程中存在的突出问题, 洞悉影响居民屋顶光伏设备安装意愿的影响因素.

收稿日期: 2018-12-08

资助项目: 教育部人文社会科学研究青年基金 (16YJCZH124; 17YJCZH218); 浙江省科技厅软科学研究项目 (2018C35G2070227); 国网宁波供电公司创新咨询项目资助

* 通信作者

尽管部分文献对影响太阳能光伏发电推广的相关问题进行了初步探索. 如: Muhammad Sukki 等 (2011)^[1] 针对马来西亚的调查研究表明政府政策对太阳能光伏发电的推行影响较大; 何露等 (2012)^[2] 针对三江源的调查发现, 经济成本和居民知识水平对居民是否愿意安装光伏发电设备的决策具有显著的影响; 朱玉知等 (2012)^[3] 就上海居民的调查发现, 居民对光伏发电了解程度较低, 对光伏发电的投资需求较弱; 丁丽萍等 (2015)^[4] 基于武汉居民的调查分析表明, 政府政策对公众的节能意识、太阳能光伏发电设备的选择倾向和采纳意愿均具有显著的影响, 而公众节能意识又对太阳能光伏发电设备的采纳意愿也有显著的影响; 沈小波 (2013)^[5] 的调查认为, 居民认为政府对家庭光伏发电的补贴标准还不够高, 已安装的用户抱怨光伏发电设备安装后没有获得收益. 总之, 现有研究虽然对居民家庭屋顶光伏设备安装意愿的影响因素进行了相关分析, 但对公众太阳能光伏发电设备安装意愿的关键因素没有采用科学的工具进行刻画, 也缺少针对浙江情景的实践调查和分析.

为此, 本研究以浙江宁波全市居民为调查对象, 基于决策试验和评价实验法 (DEMATEL) 和解释性结构模型 (ISM) 就居民家庭屋顶光伏设备安装意愿及其影响因素进行研究, 相关的成果不仅可以进一步丰富相关的理论文库, 促进清洁能源发展理论的深化, 也可为浙江家庭屋顶光伏工程推广政策的调整提供经验证据.

2 研究方法步骤

决策试验和评价实验法 (DEMATEL) 是一种进行因素分析与识别的有效方法, 根据系统中各个要素之间的相互影响程度矩阵可以计算出每个要素的中心度与原因度, 可以对已知的系统中各因素之间的关系有无及其强弱程度进行分析和判断, 揭示该系统的结构关系 (周德群等, 2008; 赵娟等, 2016)^[6-7]. 解释结构模型 (ISM) 把复杂的系统分解成若干子系统, 结合人们的实践经验, 借助画图工具, 最终将系统构造成一个多级阶梯的模型结构 (覃睿等, 2014)^[8]. 本研究把浙江宁波居民分布式光伏发电采纳意愿及其影响因素作为一个系统来对待, 利用 DEMATEL/ISM 方法将居民屋顶光伏设备安装意愿及其影响因素之间复杂的关系构建一个清晰的多层次结构图. 具体步骤如下:

第一步, 收集信息, 明确影响居民家庭分布式光伏发电采纳意愿的影响因素, 记做 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$.

第二步, 邀请专家采用头脑风暴方式按照两两因素之间没有影响关系、微弱影响关系、中等程度影响关系、较强影响关系、极其强烈影响关系共五个等级的划分分别赋值 0、1、2、3 和 4, 进而构造一个 $n \times n$ 阶的非负的直接影响矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times n}$, 且对于 z_{ij} 而言, 当 $i = j$ 时, 主对角线上的元素设为 0.

第三步, 根据公式 (1) 计算正规化的直接影响矩阵 $H = (h_{ij})_{n \times n}$, 且 $0 \leq h_{ij} \leq 1$.

$$H = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}}, \text{ 其中 } i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

第四步, 根据公式 (2) 计算综合影响矩阵 $T = (t_{ij})_{n \times n}$. 其中, 元素 t_{ij} 表示因素 i 和 j 的间接影响关系, I 表示为单位矩阵, 综合影响矩阵反映了因素间的综合影响关系.

$$T = H(I - H)^{-1} \quad (2)$$

第五步, 根据公式 (3) 和 (4) 分别求出影响度和被影响度. 综合影响矩阵 T 中的每行元

素之和为该行对应因素对所有其他因素的综合影响值, 称为影响度 (P); 综合影响矩阵 T 中的每列因素之和为该列对应因素受其他各元素的综合影响值, 称为被影响度 (Q).

$$P = [\sum_{i=1}^n t_{ij}] \quad (3)$$

$$Q = [\sum_{j=1}^n t_{ij}] \quad (4)$$

第六步, 计算中心度和原因度. 影响度与被影响度之和称为中心度 (P+Q), 影响度与被影响度之差称为原因度 (P-Q).

第七步, 根据公式 (5), 由综合影响矩阵 (T) 加上单位矩阵 (E) 得到整体影响矩阵.

$$\Omega = T + E \quad (5)$$

第八步, 计算可达矩阵. 以整体矩阵 Ω 为基础, 采用阈值法得到可达矩阵 B. 当整体矩阵中的元素超过设定阈值 λ , 该元素设为 1; 否则设为 0(申霞等, 2015)^[9]. 可达矩阵中元素值设为 1 表示该行因素对列因素有直接或间接的影响, 元素值设为 0 表示该行因素对列因素没有直接或间接的影响关系.

第九步, 在可达矩阵的基础上, 满足 (6) 式的各因素归为一个层次的因素集.

$$R(S_i) = R(S_i) \cap A(S_i) \quad (6)$$

其中, $R(S_i)$ 表示因素 S_i 的可达集, 由因素 S_i 可以到达的因素集合构成; 用 $A(S_i)$ 表示因素 S_i 的前因集, 由可以达到因素 S_i 的因素集合构成. 类似地, 剔除可达矩阵中第一个层级的因素对应的行和列后, 重复上述思路得到第二层级的因素集, 如此反复直至最后一个矩阵中的所有因素都满足 (6) 式为止.

第十步, 根据因素等级划分的结果, 构建解释结构模型.

3 居民分布式光伏发电采纳意愿及其行为的影响因素分析

3.1 居民分布式光伏发电采纳意愿的调查结果

我们于 2017 年 7 月 -2018 年 1 月, 在宁波市海曙、江北、鄞州、镇海、北仑、宁海、象山、慈溪、余姚、奉化在内的 10 个地区实际发放了《居民家庭分布式光伏发电设备安装意愿调查表》520 份问卷, 实际回收 435 份, 有效问卷 382 份; 回收率 83.65%, 有效率 87.82%. 调查发现, 宁波城市和农村居民对光伏发电采纳意愿存在微弱的差异. 表 1 所示, 74.84% 的被调查城市居民愿意安装光伏发电设备, 25.16% 的居民不愿意投资该项目; 72.69% 的农村居民愿意安装光伏发电设备, 而不愿意的农村居民则达到 27.31% 的比例. 综合来看, 愿意安装光伏发电设备的占被调查人员的 73.77%, 不愿安装的被调查人员占 26.24%. 对于有安装意愿人员 281 人的进一步调查发现, 他们没有打算近期安装的人数 141 人, 持迟疑态度 130 人, 近期有打算安装仅有 10 人, 约占被调查者的 3.56%.

表 1 居民安装光伏发电设备意愿的统计结果

| | 愿意安装光伏发电设备 | | 不愿意安装光伏发电设备 | |
|----|------------|--------|-------------|--------|
| 城市 | 116 | 74.84% | 39 | 25.16% |
| 农村 | 165 | 72.69% | 62 | 27.31% |
| 合计 | 281 | 73.77% | 101 | 26.24% |

3.2 影响宁波居民分布式光伏发电设备安装意愿的因素描述

虽然影响居民屋顶光伏设备安装意愿的因素很多,通过实地调查和专家咨询,我们总结归纳了图 1 中的 20 个影响. 这些因素从左往右分别是: S1 补贴力度; S2 光伏法规; S3 监管力度; S4 并网技术; S5 过网费; S6 单位电价; S7 安装成本; S8 投资回报周期; S9 推广力度; S10 售后服务; S11 设备质量; S12 分布密度; S13 环保意识; S14 文化程度; S15 从事行业; S16 住房特征; S17 地理位置; S18 家庭用电量; S19 居民家庭收入; S20 年龄.

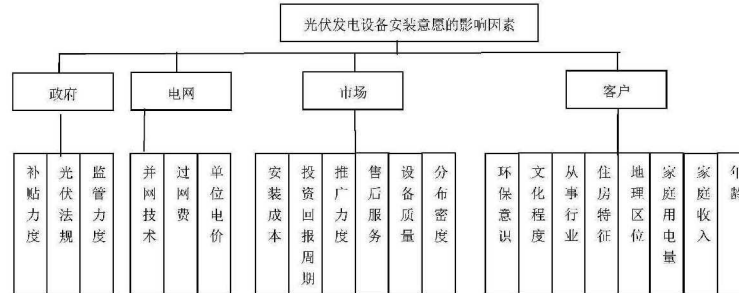


图 1 光伏发电设备安装意愿的影响因素

3.3 DEMATEL 分析过程

我们将 20 个因素的直接影响关系表示成矩阵 $Z(Z=\{z_{ij}\}_{20 \times 20})$ 如表 2 所示.

表 2 各因素之间的直接影响矩

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 3 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| S7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| S9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S12 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| S15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| S16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 |

结合 MATLAB 软件,根据 DEMATEL 方法的分析步骤第三至第四步可以得到综合影响矩阵 T 如表 3 所示.

根据五至六步,基于综合影响矩阵 T 可以得到影响度、被影响度、中心度和原因度,结果如表 4 所示.

表 3 综合影响矩阵

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| S1 | 0.16 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.15 | 0.40 | 0.43 | 0.33 | 0.07 | 0.00 | 0.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.00 |
| S2 | 0.14 | 0.00 | 0.17 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.14 | 0.09 | 0.24 | 0.13 | 0.01 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 |
| S3 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.17 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| S4 | 0.12 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.13 | 0.02 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| S5 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.26 | 0.03 | 0.22 | 0.15 | 0.03 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.02 | 0.00 |
| S6 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.18 | 0.12 | 0.02 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.01 | 0.00 |
| S7 | 0.14 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.12 | 0.08 | 0.39 | 0.27 | 0.06 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.03 | 0.00 |
| S8 | 0.17 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.08 | 0.22 | 0.05 | 0.00 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.10 | 0.08 | 0.00 |
| S9 | 0.08 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.11 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.11 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| S10 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| S11 | 0.06 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.26 | 0.26 | 0.10 | 0.10 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.00 |
| S12 | 0.30 | 0.00 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.07 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.11 | 0.01 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.00 |
| S13 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| S14 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.10 | 0.17 | 0.00 | 0.15 | 0.12 | 0.00 | 0.04 | 0.18 | 0.00 |
| S15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.15 |
| S16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| S17 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| S18 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 |
| S19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.09 | 0.00 |
| S20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.09 | 0.15 | 0.00 |

表 4 原因度和中心度的计算结果

| 因素 | 影响度 | 被影响度 | 中心度 | 原因度 |
|-----------|-------|-------|-------|--------|
| S1 补贴力度 | 2.358 | 1.366 | 3.724 | 0.993 |
| S2 光伏法规 | 1.266 | 0.00 | 1.266 | 1.266 |
| S3 监管力度 | 0.532 | 0.471 | 1.004 | 0.061 |
| S4 并网技术 | 0.752 | 0.318 | 1.07 | 0.434 |
| S5 过网费 | 1.100 | 0.656 | 1.757 | 0.444 |
| S6 单位电价 | 0.790 | 1.080 | 1.870 | -0.289 |
| S7 安装成本 | 1.704 | 1.456 | 3.160 | 0.248 |
| S8 投资回报周期 | 1.309 | 2.048 | 3.357 | -0.738 |
| S9 推广力度 | 0.828 | 2.087 | 2.915 | -1.260 |
| S10 售后服务 | 0.191 | 0.831 | 1.022 | -0.639 |
| S11 设备质量 | 1.071 | 0.113 | 1.184 | 0.958 |
| S12 分布密度 | 1.489 | 3.129 | 4.618 | -1.640 |
| S13 环保意识 | 0.141 | 0.396 | 0.537 | -0.256 |
| S14 文化程度 | 0.872 | 0.00 | 0.872 | 0.872 |
| S15 从事行业 | 0.465 | 0.154 | 0.619 | 0.311 |
| S16 住房特征 | 0.098 | 0.430 | 0.528 | -0.332 |
| S17 地理区位 | 0.399 | 0.00 | 0.399 | 0.399 |
| S18 家庭用电量 | 0.275 | 1.122 | 1.398 | -0.847 |
| S19 家庭收入 | 0.267 | 0.720 | 0.987 | -0.453 |
| S20 年龄 | 0.469 | 0.00 | 0.469 | 0.469 |

影响度和被影响度相减得到的原因度指标反映了各个影响因素之间的关联程度, 原因度大于为原因因素, 原因度小于为结果因素, 其绝对值的大小分别反应了该因素对其它因素的影响程度或受到其它因素的影响程度. 由表 4 可知, 原因因素一共有 11 个, 包括 S1 补贴力度、S2 光伏法规、S3 监管力度、S4 并网技术、S5 过网费、S7 安装成本、S11 设备

质量、S14 文化程度、S15 就职行业、S17 地理位置、S20 年龄. 其中, 排在前三位的原因因素分别是光伏法规 (1.266)、补贴力度 (0.993) 和设备质量 (0.958), 这意味着居民屋顶光伏设备安装意愿的形成最易受到这三个因素的影响, 光伏法规越健全、补贴力度越大、光伏设备的质量越好更容易增进居民屋顶光伏设备安装的意愿. 将所有 20 个因素的原因度和中心度描绘成图 2 的曲线, 由图 2 可知, S2 光伏法规、S14 文化程度、S17 地理区位和 S20 年龄因素的原因度和中心度高度重合, 表明这四个因素的被影响度为, 这意味着四个因素只对其它因素产生影响而不受其它因素的影响. 作为结果因素一共有 8 个, 包括 S6 光伏单位电价、S8 投资回报时间、S9 推广力度、S10 售后服务、S12 分布密度、S13 环保意识、S16 住房特征、S18 家庭用电量和 S19 家庭收入. 其中, 排在前三位的分贝是分布密度 (-1.260)、推广力度 (-1.640) 和家庭用电量 (-0.847), 这意味着在居民屋顶光伏设备安装意愿的改变过程中, 最易受到其它因素影响的因素分别是分布密度、推广力度和家庭用电量.

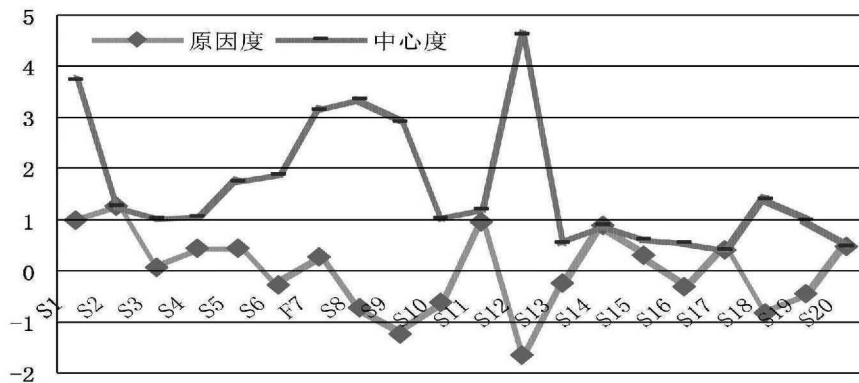


图 2 影响因素的中心度和原因度的曲线图

影响度和被影响度相加得到的中心度反映了各个影响因素对居民屋顶光伏设备安装意愿的影响程度, 中心度越高说明该影响因素对屋顶光伏设备安装意愿的影响越大. 由表 4 可知, 中心度排在首位的因素是 S12 分布密度 (4.618), 表明现有屋顶光伏的安装密度对潜在客户的影响非常大, 分布密度对居民屋顶光伏设备安装意愿的增强实质是大众的“从众心理”发挥了作用. 所谓从众心理, 是说个人的观念行为在群体的引导和压力下, 不知不觉或不由自主地与大多数人保持一致的社会心理现象, 并且一定范围内, 从众心理会随着规模的增大而增大. 因此, 当光伏发电设备安装的密度达到了一定程度后, 人们的从众心理则会发挥作用进而会增进人们对于光伏发电设备安装的意愿. 此外, 中心度排在第二至四位的因素分别是 S1 补贴力度 (3.724)、S8 投资回报时间 (3.357) 和 S7 安装成本 (3.160), 这同样表明这三个因素对居民屋顶光伏设备安装意愿的形成起着较为重要的作用. 事实上, 只要光伏安装的客是一个“经济人”, 在做出光伏设备安装与否的决策时一定会先考虑在其成本收益, 自然会优先关注到光伏设备的安装成本、政府的补贴力度以及相应的投资回报周期.

3.4 用 ISM 方法建立影响因素层次模型

由于 DEMATEL 不能划分居民屋顶光伏设备安装意愿影响因素系统的结构层次, 也不能识别系统中基础性要素 (覃睿, 2014)^[8], 而这 ISM 正好弥补了上述不足, 下文用 ISM 方法建立影响居民屋顶光伏设备安装意愿因素的层次结构模型. 首先第七步得到综合影响矩阵,

再根据第八步基于经验, 当 $\lambda=0.10$ 时得到的可达矩阵如表 5 所示.

表 5 可达矩阵

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| S16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

进而, 按照 Dematel/ISM 建模方法中第九步的描述, 可得第一级可达因素和前因素, 如表 6 所示.

表 6 第一级可达因素与前因素

| | R(S _i) | A(S _i) | R(S _i)∩A(S _i) |
|-----|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| S1 | i=1,6,7,8,9,12 | i=1,2,4,7,8,12 | i=1,8,12 |
| S2 | i=1,2,3,7,9,10,12 | i=2 | i=2 |
| S3 | i=3,9,10 | i=2,3 | i=3 |
| S4 | i=1,4,5,9,12 | i=4,5,9,12 | i=4,5,9,12 |
| S5 | i=5,6,8,9,12 | i=5 | i=5 |
| S6 | i=6,8,9,18 | i=1,5,6,18 | i=6,18 |
| S7 | i=1,6,7,8,9,12 | i=1,2,7,11,12 | i=1,7,12 |
| S8 | i=1,8,9,12,18 | i=1,5,6,7,8,11,12 | i=1,8,12 |
| S9 | i=5,9,12,18 | i=1,2,3,4,5,6,7,8,9,12 | i=5,9,12 |
| S10 | i=10 | i=3,9,10,12 | i=10 |
| S11 | i=7,8,11,12 | i=11 | i=11 |
| S12 | i=1,5,7,8,9,10,12 | i=1,2,4,5,7,8,9,11,12,17 | i=1,5,7,8,12 |
| S13 | i=13 | i=13,14,20 | i=13 |
| S14 | i=13,14,15,16,19 | i=14 | i=14 |
| S15 | i=15,16,18,19 | i=14,15 | i=15 |
| S16 | i=16 | i=14,15,16,19 | i=16 |
| S17 | i=12,17 | i=17 | i=17 |
| S18 | i=6,18 | i=6,8,15,18 | i=6,18 |
| S19 | i=16,19 | i=14,15,19,20 | i=19 |
| S20 | i=13,19,20 | i=20 | i=20 |

由表 6 可以看出最高层, 也即第一层级 L1 因素集包括 S10, S13, S16, S18. 类似地, 可得到第二层级 L2 因素集包括 S9, S19, 第三层级 L3 因素包括 S3, S8, S15, S20, 第四层级 L4 因素集合包括 S6, S12, S14, 第五层级 L5 因素集包括 S5, S7 和 S17, 第六层级 L6 因素集包括 S1, S11, 第七层级 L7 因素集包括 S2, S4. 将可达矩阵 B 按照 L1-L7 的层级顺序重新排列后, 再减去单位矩阵 I, 以此构建相应的递阶结构模型如图 3 所示.

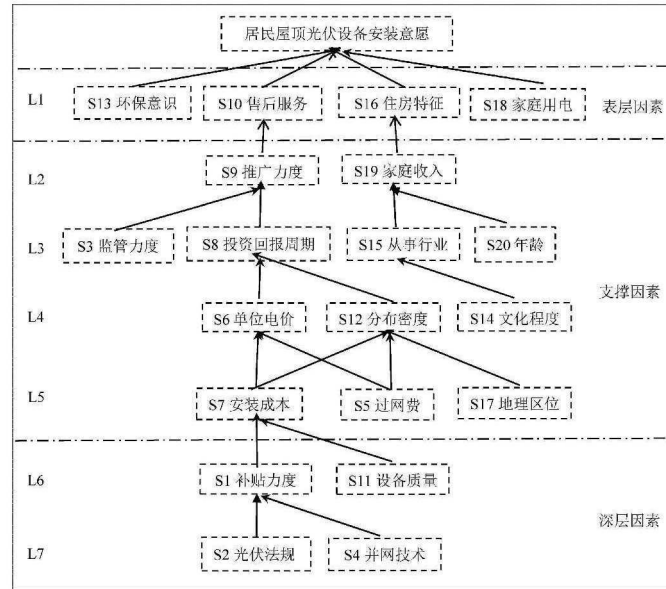


图 3 影响因素分层结构图

由影响因素分层结构图 3 可知, 影响居民屋顶光伏设备安装意愿的影响因素共是一个具有七个等级的多层次递阶结构:

第一层因素为表层因素, 这些因素具体包括售后服务、住房特征、家庭用电和环保意识, 它们对居民屋顶光伏设备安装意愿有着最直接的影响. 由于所有第二至七层的影响因素通过不同的路径和方式最终都指向第一层的售后服务和住房特征两个因素, 这表明售后服务和住房特征是影响居民屋顶光伏设备安装意愿的最直接原因. 由于直接因素还包括环保意识和家庭用电, 因此, 对一些用电较大而且又有一些有条件安装屋顶光伏发电设备的家庭要做好更深入的宣传工作、不仅要从收益性, 更要从环境保护的社会性角度促进大众对屋顶光伏设备安装的意愿.

第二、三、四、五层的影响因素作为中间层因素, 是通过直接因素影响居民屋顶光伏设备安装意愿的. 其中, 第三层的影响因素包括监管力度、投资回报周期、所从事行业和年龄, 第四层影响因素包括分布密度、单位电价和文化程度, 第五层影响因素包括安装成本、过网费和地理位置. 这些因素的作用于屋顶光伏设备安装意愿的路径有三条线: 其中一条作用路径是, 安装成本和过网费影响光伏单位电价进而影响光伏设备投资的回报周期, 再经由光伏发电的推广力度通过表层的售后服务作用于居民屋安装意愿; 第二条作用路径是安装成本、过网费和地理位置共同影响光伏设备安装的分布密度, 进而影响到光伏发电的投资回报周期, 再经由光伏发电的推广力度通过表层售后服务作用于光伏设备安装意愿的; 第三条作用路径是, 居民的文化程度影响其所从事的职业, 进而影响到居民家庭收入, 最终通过表层的住房

特征因素直接影响到居民光伏设备安装意愿。

第六和七层因素也是影响居民屋顶光伏设备安装最基础的因素,是深层次的原因,包括光伏法规、并网技术、补贴力度和设备质量四个因素。光伏设备安装的相关的政策文件体现了国家和地方政府在居民分布式光伏支持的制度安排;并网技术体现了光伏发电的消纳能力;补贴力度体现了国家和地方政府对居民分布式光伏发电的财政支持,设备质量体现了分布式光伏发电的运行能力。若政府能完善相关的政策文件并给予更多的资金补贴,光伏生产与安装企业能严把光伏设备的质量关,国家电网公司能解决好光伏发电的并网和消纳问题,就能很好地增进人们的屋顶光伏设备安装意愿。

4 结论与启示

本研究以浙江宁波居民为调查对象,首先就居民屋顶光伏设备安装的采纳意愿进行了调查,进而采用 DEMATEL-ISM 方法就居民屋顶光伏设备安装意愿的影响因素进行了实证分析,得到以下三点结论:

1) 调查发现,被调查居民愿意安装屋顶光伏发电设备的占被调查人员的 73.77%,不愿安装的被调查人员占 26.24%;宁波城市和农村居民对待“光伏发电”的安装意愿差异较小,74.84%的被调查城市居民和 73.77%的农村居民愿意安装光伏发电设备愿意安装光伏发电设备;近期有打算安装光伏发电设备约占被调查者人数的 3.56%。

2) DEMATEL 分析发现,现有光伏的分布密度对居民屋顶光伏设备安装意愿的影响非常大,中心度排在前四位的因素分别是分布密度、补贴力度、投资回报时间和安装成本,这表明不仅光伏设备安装的分布密度对居民屋顶光伏设备安装意愿也有着非常重要的影响,而且政府补贴力度、光伏安装成本和投资回收周期会对居民家庭屋顶光伏设备安装意愿有着较为重要的影响。

3) ISM 分析表明,售后服务和住房特征是影响居民屋顶光伏设备安装意愿的最直接影响因素,而光伏法规、补贴力度、并网技术和设备质量是影响居民屋顶光伏设备安装意愿最根本的因素。

上述结论启示我们在优化现有的屋顶光伏推广政策时不仅要关注那些能够影响光伏设备安装意愿的直接因素,更要关注那些影响居民光伏设备安装意愿的深层次因素。具体来说,首先,应加大宣传力度,通过讲座、广告等方式提高居民对安装光伏发电设备的经济效应、节能环保的社会效应和使用便捷的个人效应等方面认识;其次,做好光伏设备安装“示范”和“试点”工程项目,做好光伏设备安装的售前、售中和售后服务,通过已安装光伏设备的居民户对周边居民起到“示范”和“带动”作用,进而促进当地光伏设备安装密度的稳步提升;再次,通过光伏发电设备安装的合理补贴、通过集体采购和组团安装的方式降低光伏发电设备的采购和安装成本,能很好地提高居民对光伏发电设备安装的意愿;最后,有必要简化居民光伏发电并网以及余电回购流程、提高居民光伏并网发电结算工作的管理优化进而增进居民屋顶光伏设备的安装意愿。

参考文献

- [1] Muhammad-Sukki, Firdaus, Ramirez-Iniguez, Roberto, Abu-Bakar, Siti Hawa, Mcmeekin, Scott G,

- Stewart, Brian G. An evaluation of the installation of solar photovoltaic in residential houses in Malaysia: Past, present, and future[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 7975-7987.
- [2] 何露, 张永勋, 阎庆文, 赵贵根. 三江源移民安置区居民对太阳能资源的认知、使用意愿及其影响因素研究 [J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2026-2033.
- [3] 朱玉知, 孙海彬, 杨静. 家用光伏发电政策认知与需求的调查研究 [J]. 经济纵横, 2012(5): 66-69.
- [4] 丁丽萍, 帅传敏, 李文静, 闫琼, 郭晴. 基于 SEM 的公众太阳能光伏发电认知和采纳意愿的实证研究 [J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1414-1423.
- [5] 沈小波. 个人分布式光伏电站困局 [J]. 能源, 2013(4):74-75.
- [6] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究 [J]. 管理科学学报, 2008(4): 20-26.
- [7] 翁异静, 邓群钊, 杜磊. 复杂系统视角下的地方政府行政编制规模影响因素系统分析——基于 DEMATEL-ISM 集成方法 [J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(23): 110-119.
- [8] 覃睿, 王瑞, 秦雪. 国家创业系统的结构层次及关键要素识别——基于 DEMATEL 与 ISM 的集成法 [J]. 地域研究与开发, 2014, 33(6): 45-50.
- [9] 申霞, 夏越, 杨校毅, 张路. 集成 DEMATEL/ISM 的煤矿工人违章行为影响因素研究 [J]. 中国安全科学学报, 2015(9): 145-150.

Study of the Influencing Factors of the Installation Willingness to Residents' Roof Photovoltaic Equipment Based on DEMATEL-ISM Model

CAI Yong-zi¹, GUO Li-ping², XU Jian-jun³

(1. Ningbo Power Supply Company, Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

(2. State Grid Zhejiang Yuyao Power Supply Co., Ltd., Yuyao 315400, China)

(3. Institute of Science & Technology Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: This study takes Ningbo citizens as the survey object. Firstly, it studies the residents' willingness to install photovoltaic(PV) equipment on the roof. Then, the DEMATEL-ISM method is used to analyze the influencing factors of residents' willingness to install PV equipment. Statistical results show that about 73.77% of Residents are willing to install PV power equipment, and the urban residents' willingness to adopt is slightly higher than that of rural residents. The number of respondents who plan to install PV equipment in the near future is about 3.56%. The DEMATEL analysis shows that the top four factors of center degree are distribution density, subsidy intensity, investment return time and installation cost, which have a very important impact on the willingness of residents to adopt PV equipment; The ISM analysis further shows that after-sales service and housing characteristics are the direct influences affecting the installation decision of PV installation equipment, while PV regulations, state-of-the-art technology, subsidies, and equipment quality are the most fundamental factors affecting the installation willingness to residents' roof PV equipment.

Keywords: photovoltaic; willingness to adopt; DEMATEL; ISM