

工业型城市能源转型的综合评价——以苏州市为例

王永真^{1,2}, 林伟¹, 李成宇³, 朱轶林^{4*}, 张靖¹, 高峰¹

(1. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京市 海淀区 100084;

2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京市 海淀区 100084;

3. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东省 淄博市 255000;

4. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190)

Comprehensive Evaluation of Energy Transition in Industrial Cities: A Case Study of Suzhou

WANG Yongzhen^{1,2}, LIN Wei¹, LI Chengyu³, ZHU Yilin^{4*}, ZHANG Jing¹, GAO Feng¹

(1. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong Province, China;

4. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The quantitative evaluation of urban energy transition is helpful for the sustainable development of urban economy and society, especially for the guidance of industrial urban energy system transition. However, the comprehensive evaluation of energy transition faces the challenges of multi dimensional variables, multi-structure coupling and multi level structures. Taking Suzhou as an example, this paper proposes a comprehensive evaluation system for China's industrial city energy transition based on the interpretative structural model and analytic hierarchy process, solving the direct correlation and hierarchical relation of multidimensional variables of industrial urban energy transition. On this basis, a comprehensive evaluation model and system for quantifying the energy transition of industrial cities can be obtained through binary comparison. By substituting the statistical data of Suzhou from 2013 to 2018, the development of Suzhou urban energy transition during this period was summarized and evaluated. The results show that the overall development of Suzhou urban energy transition is on the rise, and the most significant progress is in energy efficiency, energy structure,

and industrial development. However, the self-sufficiency rate of electricity has dropped from 79% to 70%, so the pressure on energy security has increased, causing the score of energy supply capacity to fluctuate and increase. The score of energy consumption intensity decreased annually from 2013 to 2017 and increased in 2018. The situation of energy intensity control was grim. The R&D intensity scores for 2017 and 2018 were lower than those for 2016, and further investment is required. Finally, based on the above data analysis, we provide five suggestions for the subsequent energy transition in Suzhou.

Keywords: energy transition; comprehensive evaluation; interpretative structural model; analytic hierarchy process

摘要: 城市能源转型的量化评价有助于城市经济社会的可持续发展,特别是对工业型城市能源系统的转型提供指导。但能源转型的综合评价面临多维度变量、多结构耦合以及多层次结构的挑战。以苏州市为例,提出基于解释结构模型及层次分析法的工业型城市能源转型的综合评价体系,在此基础上,通过二元对比,获得用于量化工业城市能源转型的综合评价模型。分析苏州2013—2018年的城市能源转型发展过程,得出苏州城市能源转型程度总体呈上升进步趋势,其中能源效率、能源结构、产业发展的进步最为显著,但电力自给率从79%下降至70%,能源安全压力增加,供能能力的得分呈波动上升趋势。能耗强度得分从2013—2017年逐年下降,2018年有所上升,能耗强度控制的形势严峻;2017年和2018年的研发强度得分低于2016年,需要进一步加大投入。最后,为苏州后续的能源转型发展提出5点建议。

关键词: 能源转型; 综合评价; 解释结构模型; 层次分析法

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52006114); 中国博士后科学基金课题(2019M660634); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA081)。

National Natural Science Foundation of China (52006114); China Postdoctoral Science Foundation Project (2019M660634); Major Projects of National Social Science Foundation (19ZDA081).

0 引言

为应对气候变化及环境问题挑战, 能源系统正在经历从化石燃料向可再生能源供能的转型。城市作为能源消耗的主体之一, 其能源转型的量化评价有助于经济社会的可持续发展, 特别是对工业型城市能源转型提供指导。这方面, 多指标评价体系的量化评价方法获得广泛应用。例如, 世界能源委员会 (World Energy Council, WEC) 从能源公平、能源安全、能源系统环境可持续性之间构成的三元困境 (又称“能源不可能三角”) 出发, 提出采用一次能源多样性、能源依赖程度等33项指标评价国家的能源系统发展^[1]; 世界银行也开发了城市及国家级的可持续能源监管指标 (Regulatory Indicators for Sustainable Energy, RISE), 并于2016年开始大规模应用, RISE包含供电能力、能源效率、可再生能源、清洁烹饪4个大项, 32个子项, 每个子项下另有3~8条评价标准^[2]。

对于城市能源系统的发展程度及其影响因素, 国内学者也有广泛的研究。如李治等 (2010) 分析了1995—2006年中国不同城市能源能效及其影响因素, 发现城市能效变化以2000年为分界点呈现明显的“倒U型”, 且各因素的影响因城市而异^[3]。潘哲 (2015) 通过分析全国285个地级市的能效, 得出增加第三产业占比能显著提升城市能效, 城市开放程度、城市规模对能效有正向影响, 而行政分割程度、政府干预度、城市能源禀赋的提高不利于提升城市能效^[4]。张博茹 (2017) 分析了影响长三角城市群能效的因素, 发现经济发展水平和产业结构对能效有显著影响^[5]。郭斌 (2019) 通过分析283个地级市的能效, 认为处于不同区域、不同资源丰裕度和不同能效水平的城市, 其能效影响因素不同^[6]。国外研究方面, Kemmler A等 (2007) 建立了发展中国家能源系统的可持续发展评价指标, 认为与发达国家相比, 发展中国家更需要考虑能源发展过程中的贫困和公平问题, 能源指标不仅限于经济和环境, 同样与社会问题紧密相关^[7]。Patlitzianas K等 (2008) 回顾和总结了国际组织建立的能源指标, 提出了选择指标的标准, 并列举了建议的指标体系^[8]。Jovanovic M等 (2010) 运用模糊集理论, 从经济、环境、社会3个方面建立数学模型, 评价城市能源系统的可持续性, 并在模型预测的基础上, 预测和评估塞尔维亚贝尔格莱德的能源系统的不同发展情形^[9]。Marquez-Ballesteros M J等 (2019) 回顾了以往的城市可持续性评价和排名方法, 以国际

公认的可持续性发展目标为基础建立了城市能源可持续性指数, 并用于评价2座西班牙城市的能源可持续性^[10]。Ali-Toudert F等 (2020) 开发了多指标的城市可持续发展系统, 通过生态、资源、气候等8个主题、40项指标对城市综合可持续性进行评价, 并通过160个可持续城市项目的数据证明其可用性, 为开发计算决策工具提供理论基础^[11]。

一方面, 通过比较不同城市乃至国家间的能效, 过往的研究建立了对于一般特征城市能源系统的影响因素集, 并系统分析了能效的空间分布, 但难以通过代入具体特征的城市能源数据得出进一步的结论。另一方面, 工业是中国能耗的第一大行业, 2017年工业能耗占终端能耗的65%^[10]。2020年, 中国也提出了“内循环”促进“双循环”的发展路径以及“碳达峰、碳中和”的能源气候目标。因此, 工业型城市的能效评价以及能源转型, 将直接关系到上述目标的量化以及转型举措的实施。

总体上, 工业型城市能源转型的综合评价面临多维度变量、多结构耦合以及多层次结构的挑战。本文在过往研究基础上, 进一步深挖工业城市能源转型影响因素之间的关系, 提出基于解释结构模型及层次分析法的中国工业型城市能源转型的综合评价体系, 以期厘清工业型城市能源转型多维变量间的层次关系。并以中国大型工业城市——苏州市为例, 应用上述体系和模型, 从时间演变角度分析苏州能源系统的变化趋势和特点, 并提出苏州能源转型的一些建议。

1 基于ISM和AHP的城市能源转型综合评价体系

为了研究评价指标间的影响关系, 并为指标赋权, 本文采用解释结构模型与层次分析法相结合的方式, 计算各个指标的权重。其中, 解释结构模型 (interpretative structural modelling, ISM) 将复杂系统的影响因素分析问题拆分成各个影响因素之间的逻辑关系和矩阵计算问题, 将复杂系统的研究结构化、系统化^[12]。层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 通过少量信息以定性定量相结合的方式分析不同指标权重的层次化系统^[13]。ISM能够得出指标间的逻辑结构, 将一般AHP中的“目标层、准则层、方案层”细化为更多层次, 以研究更为复杂的系统, 但ISM本身无法量化分析指标的权重。AHP通过二元对比, 建立指标影响力的量化关系, 最终得到城市能源

转型的评价体系。该过程主要分为6个步骤，如图1所示。

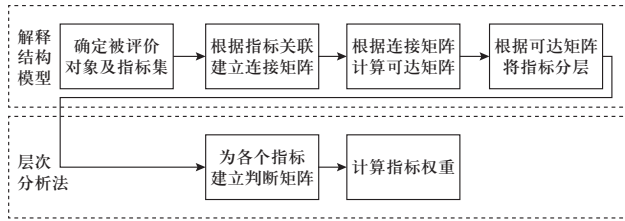


图1 指标权重计算方法

Fig. 1 Calculation method of index weight

1) 确定被评价对象，记为 S_0 。根据相关专业知识、文献、经验、专家意见等，确定能够影响被评价对象的因素集，即评价指标集。

2) 根据评价指标之间的相互关联，建立连接矩阵 A 。若评价指标 S_i 能够直接影响 S_j ，则 a_{ij} 为1，若无影响，则为0。对角线上的元素 a_{ii} 为0。由此，建立起评价指标间关系的初步模型。

3) 建立指标集的可达矩阵。连接矩阵有如下性质，即对 A 求 k 次幂，则 A^k 中的分量表示 S_i 与 S_j 之间长度为 k 的链路的个数。因此，通过计算

$$(A+I)^k, \quad k=1,2,3 \dots n-1 \quad (1)$$

将其中大于等于1的项置为1，直到

$$(A+I)^k = (A+I)^{k+1} \quad (2)$$

可以得到评价指标之间的影响情况，即可达矩阵，记为 $M=\{m_{ij}\}$ 。在可达矩阵中，若 S_i 能够影响 S_j ，包括直接和间接影响，则 m_{ij} 为1，否则为0。

4) 根据可达矩阵将评价指标分层。对于评价指标 S_i ，找到 S_i 能影响的评价指标的集合 P ，即

$$P(S_i) = \{S_j | m_{ij} = 1\} \quad (3)$$

称 P 为可达集合，找到能影响 S_i 的指标的集合 Q ，即

$$Q(S_i) = \{S_j | m_{ji} = 1\} \quad (4)$$

称 Q 为先行集合。再根据

$$L_1 = \{S_i | P(S_i) \cap Q(S_i) = P(S_i)\} \quad (5)$$

求出 L_1 ，即第一层对应的评价指标。删除 S_i 在可达矩阵中对应的行与列，重复步骤4)的操作，直到将所有评价指标分配完毕。由此，可以得到被评价对象的ISM，能够进一步加深对被评价对象的理解。

5) 采用AHP计算各个评价指标的影响权重。对于评价指标 S_i ，找到能直接影响 S_i 的 m 个指标，记作 b_1, b_2, \dots, b_m 。若 $m=1$ ，则该影响因素与 S_i 的权重相同。

若 $m \neq 1$ ，构建判断矩阵 B ：

$$B = b_{ij} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mm} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中： b_{ij} 为 b_i 与 b_j 相比的重要程度，两者具有同样的重要性，则 $b_{ij}=1$ ；若 b_i 比 b_j 稍重要，则 $b_{ij}=3$ ；若 b_i 比 b_j 明显重要，则 $b_{ij}=5$ ；若 b_i 比 b_j 强烈重要，则 $b_{ij}=7$ ；若 b_i 比 b_j 极端重要，则 $b_{ij}=9$ 。2、4、6、8为中间值。计算 B 的最大特征值 λ_{\max} 及其对应的正向单位特征向量 W ，则影响 S_i 的 m 个元素中，第 j 个元素对 S_i 的影响力权重因子记为 w_{ij} 。判断矩阵需要按照式(7)进行一致性检验，若 $C_1 < 0.1$ 则一致性检验通过。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (7)$$

6) 根据ISM，按照从上到下的顺序求解评价指标 S_i 对 S_0 的权重因子 w_{i0} 。对于评价指标 S_i ，找到其能够直接影响的 k 个评价指标，则

$$w_{i0} = \sum w_{ik} w_{k0} \quad (8)$$

式中： w_{ik} 为 S_i 对 S_k 的影响权重， w_{k0} 为 S_k 对 S_0 的影响权重。最后，将所有权重因子做归一化处理，得到每个评价指标的归一化评分。

2 选取研究对象及设定综合评价参数

2.1 选取研究对象

苏州是中国工业实力最强的城市之一，2020年上半年，苏州实现规模以上工业总产值1.55万亿元^[14-15]。苏州以外向型经济为主导，IT、造纸、钢铁、化工产业发达，近年来新兴产业的发展也尤为迅猛，产业升级速度不断加快，比如2018年，新能源汽车产量同比增长83%，3D打印设备产量增长51.4%，工业机器人产量增长32.2%^[15-16]。

工业是苏州城市能耗的主要来源，2018年苏州规模以上工业企业能源消费总量达8704万t标煤，占终端能耗的80%左右^[15]。黑色金属冶炼和电力热力生产能耗占规模以上工业企业用能的比例超过60%（全国平均水平约为50%）。煤炭消费约4806万t标煤，占到一次能源消费的63.7%。

电力消费方面，2018年苏州全社会用电量为1562亿kWh，工业用电量占比约78.6%。2012年12月，锦屏—苏南±800 kV直流特高压输电工程竣工并完成试运行，投入商业运行后满送时段日均输送电量高达

1.6亿kWh, 占迎峰度夏期间电网供电量的1/3^[17]。苏州本地的可再生能源并不丰富, 2018年全市光伏、风电、生物质等可再生能源发电累计装机仅约87万kW。

总体上, 苏州城市能源系统正在不断向清洁化、高效化发展, 但仍面临煤炭消费占比高、碳排放强度大、可再生能源有待开发, 以及需求侧灵活资源、产业结构调整、能源系统源网荷互动有待挖掘等问题。

2.2 研究对象综合评价体系的设定

本文选取的被评价对象为工业城市能源系统转型程度, 记为 S_0 。基于相关性、可量化性、可得性、全面性等原则, 结合政府信息公开信息, 如表1所示, 选取供能能力(S_{29})、能耗强度(S_{30})、能源效率(S_{31})、能源结构(S_{32})、研发强度(S_{33})、产业发展(S_{34}) 6项一级指标, 对应28项二级指标对苏州城市能源转型进行评价。6项一级指标分别反映出能源转型应该达到的目标: ①能够在任意时间向接入系统的任意用能负荷输送其需要的能源(供能能力); ②用尽可能少的能耗满足城市生产生活的正常运转(能耗强度); ③高效的能源转换和利用(能源效率); ④降低能源利用的碳排放(能源结构); ⑤为能源行业的未来发展提供技术创新(研发强度); ⑥推动经济发展(产业发展)。其中, 最大用电负荷来源于国网苏州供电公司的企业信息公开年报, 全社会用电量中可再生能源占比计算需要的区外清洁电力总量来源于国家能源局关于全国可再生能源电力发展监测评价通报, 其余数据来源于苏州统计年鉴, 或经年鉴中的数据换算得到。

供能能力 S_{29} 为供能系统对能源需求的满足程度, 一定程度上也体现了区域的能源安全。其中, 电力自给率 S_1 为发电量与全社会用电量的比例; 最大用电负荷 S_2 为当年电网调度最大负荷; 人均天然气供气管道长度 S_3 为城市天然气供气管道总长度除以当年常住人口, 反映城市天然气的供气能力。

能耗强度 S_{30} 为城市在节能领域的努力, 反映城市能源总量控制及与经济脱钩的情况。规模以上工业企业化石能源用量按照原煤、焦炭、天然气、汽油等化石能源的消费量减去用于原材料的用量, 再根据其热值换算为kg标煤得到。考虑到城市规模的变化, 工业领域按照GDP、其他领域按照常住人口进行标准化。

能源效率 S_{31} 为火力发电的供电效率和工业生产

过程中单位产品的用能效率。考虑到苏州产业结构中炼钢、化工、纺织、造纸行业的能耗显著高于其他行业, 且炼钢行业的能耗显著高于其他三者, 因此取这4个行业的代表产品作为评估工业生产能效的指标。

能源结构 S_{32} 为城市在减煤方面的努力, 及可再生能源的贡献, 也从侧面反应能源系统对生态环境的影响。规模以上工业企业原煤及其他煤制品消耗量包括原煤、洗精煤、其他洗煤、煤制品、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气, 均扣除用于原材料的量后按照热值换算得到。

研发强度 S_{33} 反映能源领域的科技创新情况及潜力, 是未来能源发展的重要动力, 规模以上电力、热力生产和供应业专利申请数量 S_{22} 、大中型企业研发人才数量 S_{23} 、研发投入资金 S_{24} 分别从成果产出、人才投入、资金规模3个角度, 评价能源领域的研发成果和潜力。

产业发展 S_{34} 为能源对区域经济的贡献, 能源系统中新兴产业的发展也是未来城市能源发展情况的重要风向标, 通过规模以上电力及供热企业工业总产值 S_{28} 评价能源产业整体发展规模, 并通过能源新兴产业中较为典型的新能源产业 S_{25} 、智能电网与物联网产业 S_{26} 、节能环保产业 S_{27} 的总产值评价能源产业的未来发展潜力。

需要注意的是, S_{29} — S_{34} 为城市能源转型评价的6个方面, 不作为评价指标, 只在计算中发挥结构性作用, 将二级指标与目标指标关联起来。

表1 城市能源转型评价指标
Table 1 Evaluation index of urban energy transition

编号	一级指标	编号	二级指标	单位
S_{29}	供能能力	S_1	电力自给率	%
		S_2	最大用电负荷	万kW
		S_3	人均天然气供气管道长度	m
S_{30}	能耗强度	S_4	规模以上工业企业用能总量(标煤)/万元GDP	t/万元
		S_5	规模以上工业企业化石能源用量(标煤)/万元GDP	t/万元
		S_6	规模以上工业企业用电/万元GDP	kWh/万元
		S_7	规模以上工业企业工业用热/万元GDP	MJ/万元
		S_8	全社会用电量/人	kWh/人
		S_9	城市天然气供气总量/人	m ³ /人
		S_{10}	城市液化石油气供气总量/人	kg/人

续表

编号	一级指标	编号	二级指标	单位
S ₃₁	能源效率	S ₁₁	火电厂供电煤耗(标煤)	g/kWh
		S ₁₂	火力发电厂用电率	%
		S ₁₃	吨钢综合能耗(标煤)	kg/t
		S ₁₄	万米丝织品综合能耗(标煤)	kg/万m
		S ₁₅	吨涤纶综合能耗(标煤)	kg/t
		S ₁₆	机制纸及纸板综合能耗(标煤)	kg/t
S ₃₂	能源结构	S ₁₇	规模以上工业企业天然气消耗量占比	%
		S ₁₈	规模以上工业企业原煤及其他煤制品消耗量占比	%
		S ₁₉	可再生能源电占全社会用电量的比例	%
		S ₂₀	规模以上工业企业余热余热利用与用热的比例	%
		S ₂₁	规模以上工业企业垃圾与生物质能利用	t/MJ
		S ₂₂	规模以上电力、热力生产和供应业专利申请数量	个
S ₃₃	研发强度	S ₂₃	规模以上电力、热力生产和供应业大中型企业研发人才数量	个
		S ₂₄	规模以上电力、热力生产和供应业大中型企业研发投入资金	万元
S ₃₄	产业发展	S ₂₅	新能源产业总产值	亿元
		S ₂₆	智能电网与物联网产业总产值	亿元
		S ₂₇	节能环保产业总产值	亿元
		S ₂₈	规模以上电力及供热企业工业总产值	亿元

根据相关文献和专家经验,结合苏州城市能源供应与消费特征,确定各个评价指标之间直接影响关系如表2所示。通过表2,可以按照步骤2)描述的方法得到连接矩阵。不同城市影响因素间的直接关联可能不同,但整体结构不会发生大的变化。

表2 城市能源转型评价指标的直接影响关系

Table 2 Direct influence of evaluation index of urban energy transition

指标	其直接影响指标	指标	其直接影响指标
S ₀	—		
S ₁	S ₂₉	S ₁₈	S ₁₁ , S ₃₂
S ₂	S ₂₉	S ₁₉	S ₄ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₃₂

续表

指标	其直接影响指标	指标	其直接影响指标
S ₃	S ₂₉	S ₂₀	S ₄ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₃₂
S ₄	S ₃₀	S ₂₁	S ₄ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₃₂
S ₅	S ₄	S ₂₂	S ₅ , S ₁₁ , S ₂₅ , S ₂₆ , S ₂₈ , S ₃₃
S ₆	S ₄ , S ₈	S ₂₃	S ₂₂ , S ₂₆ , S ₂₈ , S ₃₃
S ₇	S ₄	S ₂₄	S ₂₂ , S ₂₅ , S ₂₆ , S ₂₈ , S ₃₃
S ₈	S ₁ , S ₃₀	S ₂₅	S ₁ , S ₁₉ , S ₂₈ , S ₃₄
S ₉	S ₃₀	S ₂₆	S ₁ , S ₂ , S ₁₁ , S ₁₉ , S ₂₈ , S ₃₄
S ₁₀	S ₃₀	S ₂₇	S ₈ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₃₄
S ₁₁	S ₄ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₃₁	S ₂₈	S ₁ , S ₂ , S ₃₄
S ₁₂	S ₁₁	S ₂₉	S ₀
S ₁₃	S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₃₁	S ₃₀	S ₀
S ₁₄	S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₃₁	S ₃₁	S ₀
S ₁₅	S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₃₁	S ₃₂	S ₀
S ₁₆	S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₃₁	S ₃₃	S ₀
S ₁₇	S ₁₁ , S ₃₂	S ₃₄	S ₀

按照前述步骤3)和步骤4),可以得到城市能源转型评价指标的ISM。由此可以得到评价指标的层次结构图,如图2所示。

可以看出,研发强度相关指标位于ISM的最底层,反映出研发为能源系统效益的根本影响因素;其次为产业发展相关指标;能耗强度、效率的优化为产业、研发发展的结果。

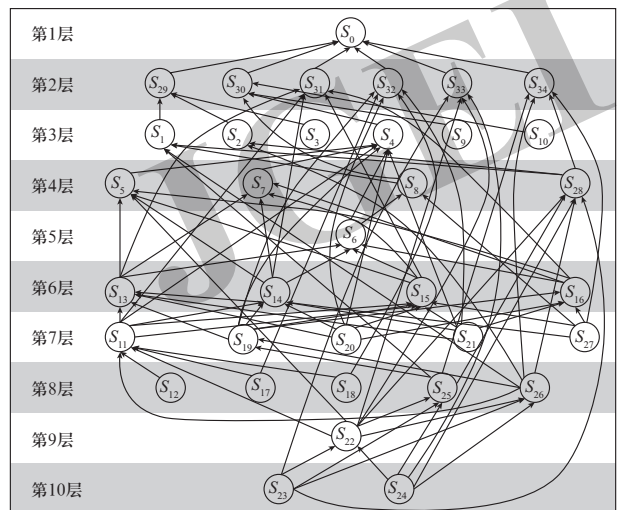


图2 城市能源转型评价指标的层次结构图

Fig. 2 Hierarchical structure of evaluation index of urban energy transition

按照前述步骤5) 和步骤6), 为每个指标建立判断矩阵, 并根据判断矩阵的特征值得到相对权重, 最后根据指标的层次关系, 结合具体指标对能源转型目标的影响能力, 得到权重计算结果, 如表3所示。

表3 评价指标的影响权重计算结果
Table 3 Result of weights of evaluation index

二级指标	权重因子	二级指标权重/%	一级指标权重/%
S_1	0.054 2	2	供能能力 S_{29} : 4.4
S_2	0.054 2	2	
S_3	0.010 8	0.4	
S_4	0.182 1	6.6	能耗强度 S_{30} : 19.7
S_5	0.056 3	2	
S_6	0.113 1	4.1	
S_7	0.034 7	1.3	
S_8	0.113 4	4.1	
S_9	0.021 1	0.8	
S_{10}	0.021 1	0.8	
S_{11}	0.271 8	9.9	
S_{12}	0.015	0.5	
S_{13}	0.203 1	7.4	
S_{14}	0.068 8	2.5	
S_{15}	0.068 8	2.5	
S_{16}	0.068 8	2.5	
S_{17}	0.136 2	5	能源结构 S_{32} : 20
S_{18}	0.136 2	5	
S_{19}	0.128 2	4.7	
S_{20}	0.115 7	4.2	
S_{21}	0.034 5	1.3	
S_{22}	0.124 3	4.5	研发强度 S_{33} : 15.3
S_{23}	0.148 6	5.4	
S_{24}	0.148 6	5.4	产业发展 S_{34} : 15.3
S_{25}	0.088 1	3.2	
S_{26}	0.136 7	5	
S_{27}	0.1	3.6	
S_{28}	0.096	3.5	

同时, 为系统分析权重对系统综合评价的主观影响, 本文将上述权重分布记为“场景1”。此外, 通过平均分配每个指标的权重至1/28, 可以得到“场景2”。仅考虑能耗强度、能源效率和能源结构的情况下, 平均分配评价指标的权重, 即 S_4 — S_{21} 的权重为1/18, 其余指标权重均为0, 可以得到“场景3”。3种场景下的权重分布如图3所示。

可以看出, 本指标体系的评价结果对火电厂供电煤耗、吨钢综合能耗、规模以上工业企业用能总量/万元GDP的指标的变化最为敏感, 且突出了研发强度、能源结构、能源效率对能源转型的影响。随着第三产业的加速发展, 产业结构由传统工业向高新技术产业升级, 规模以上工业企业用能总量/万元GDP的权重将逐渐下降。火电厂供电煤耗的高权重反映出当前苏州供电系统以化石燃料为主的现状, 随着清洁电力占比不断增加, 该指标的重要性将持续下降, 或替换为“综合供电煤耗”等其他类似指标。权重的分布反映出对城市能源转型的期待。在本指标权重分布中, 3个重点指标都对城市的碳排放有较大影响。在碳达峰、碳中和目标的要求下, 未来对碳排放影响较大的指标的权重还可以进一步提高。

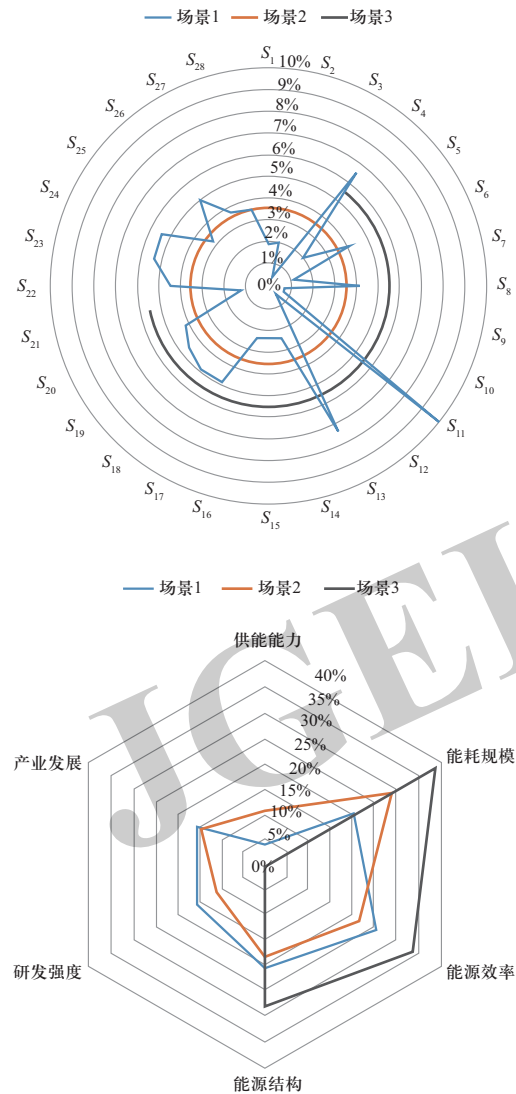


图3 敏感性分析图

Fig. 3 Results of sensitivity analysis

3 评价结果及分析

3.1 基于ISM和AHP的苏州城市能源转型总体评价

通过输入2013—2018年的苏州市相关统计数据,以各指标在各年中的最小值和最大值分别作为标准化的最小值和最大值,可以得到如图4的评价结果。

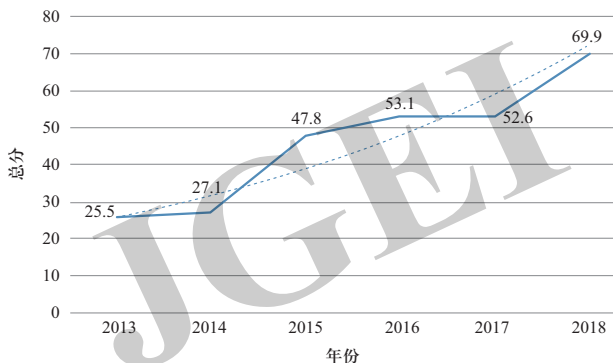


图4 苏州城市能源转型总体评价变化

Fig. 4 Changes of the total score of Suzhou energy transition evaluation

总体来看,苏州城市能源系统转型在2013—2018年间快速发展,总得分的平均年增长率为15.46%,其中2018年的进步尤为显著。分项结果如图5所示。

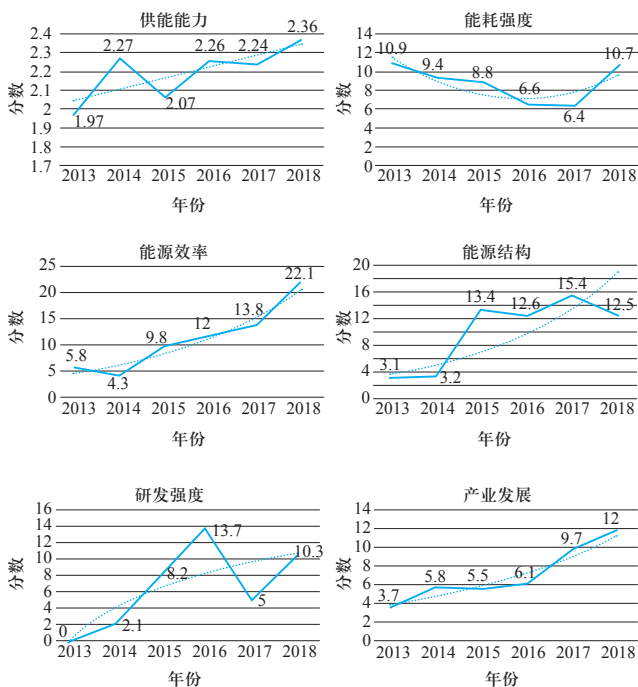


图5 苏州城市能源转型在6个维度的评价变化

Fig. 5 Changes of scores of Suzhou energy transition evaluation in 6 dimensions

其中,供能能力在2013—2018年间波动上升。产生这一趋势的主要原因在于,一方面,电力自给率逐年下降。随着全社会电力需求的不断增加,苏州电力供应增长的速度落后于电力需求增加的速度,电力自给率从2013年的79%下降至2018年的70%。当前,锦苏直流为苏南电网提供了大量的区外来电,南部电网的可靠性高度依赖锦苏直流的稳定运行。因此,电力自给率的下降增加了应对故障时的压力。另一方面,最大用电负荷的增加弥补了电力自给率下降带来的得分下降,反映出苏州强劲的经济增长势头带来的用电需求增加,电网的调度能力不断增强。此外,人均城市供气管道长度从2013年的1.14 m增至2018年的1.71 m,增加了50%,有力保障了供气能力。

能耗强度方面,经历了2013—2017年先下降,随后在2018年后上升的过程。该项指标的得分主要受规模以上工业企业每万元GDP用能总量、规模以上工业企业每万元GDP用电量、全社会用电量这3个因素影响。产生这一趋势的原因在于单位GDP工业能耗的下降与全社会人均用电量上升之间构成的对抗关系。统计结果表明,2013—2018年间,工业能耗强度在2016年以前基本保持稳定,在2017年和2018年显著下降,而全社会人均用电量逐年上涨,因而在2017年出现了拐点。此外,在工业领域,规模以上工业企业每万元GDP用电量在2013—2017年间逐年增加,2018年略有下滑。其可能的原因在于新兴产业的发展带动了电力需求占比的增加,以及工业企业电气化程度的提升。随着人均非工业领域的能耗增长趋缓和产业升级带来的效率提升,该指标还有进一步增长空间。

能源效率方面,2013—2018年间苏州的能效显著提升,也是总分上升的最大贡献领域。这主要得益于发电厂供电煤耗和吨钢综合能耗的快速下降,反映出苏州在淘汰落后产能方面取得的成效。此外,钢铁产业和化工行业的节能措施成效显著,2018年吨钢综合能耗相比2013年下降23%,吨涤纶综合能耗下降16%。造纸行业的能耗水平无明显变化。纺织行业的能耗强度快速上升,万米丝织品综合能耗从700 kg标煤增至1 343.5 kg标煤,需要额外关注。

能源结构方面,2013—2018年间整体呈波动上升趋势。一方面,“煤改气”政策取得一定成效,天然气占规模以上工业企业能源消费的比例从2013年的5.82%提升至2018年的9.44%,煤炭占比则从2013年的76.86%降低至2018年的73.09%。从绝对值上看,苏州仍然面临煤炭消费占比大、刚性强的问题,仍面临巨

大的减煤压力。规模以上工业企业余压余热利用与用热的比例在2016年达到最大值22.73%之后开始下降,2018年为18.61%,说明余压余热有进一步开发利用的潜力。

研发强度方面,除2017年外,电力和供热领域的研发强度均有明显的上升。此处应指明的是,2017年电力和供热领域的研发投入资金可能存在一定的统计误差。2018年,此领域的人均研发资金为47.1万元,2016年为31.5万元,而2017年仅为9.76万元,与其他年份相比存在较大波动。此外,2018年的研发人员数量和资金投入数量相比2016年都有明显下降,虽然专利数量保持了增长势头,但仍需要警惕研发投入不足带来的负面影响。

产业发展方面,2013—2018年间苏州的新能源、智能电网、节能环保产业、电力及供热产业均取得了长足的发展,其中又以新能源产业的发展最为迅猛,为苏州城市能源的进一步发展提供了良好的产业基础。

3.2 苏州城市能源转型的建议

苏州城市能源系统的发展优势与短板并存,在产业发展、能源结构优化、能源效率提升方面的发展成效显著,后续可重点关注以下几个方面。

1) 优化能源产业结构。结合现有优势产业,密切关注数字新基建以及“双循环”、“碳中和”战略,优化产业结构向高质量、低能耗、高附加值的新兴产业过渡,控制能源消费增速。

2) 提升本地能源供应。积极开发本地分布式、分散式可再生能源,缩短供能中心与负荷中心的距离。如本地分布式光伏、地源热泵、生物质以及储能(冷、热、电、氢)的泛在、规模化应用。

3) 加强能源互联互通。一方面,加强外来能源通道建设,如跨区域氢能输送通道、西南水电的引入、电力能源的交易;另一方面,加强市域内本址区域、园区内外能源的互联互通,大力推动能源互联网、综合能源系统的建设。

4) 推广多元电能替代。一方面,加强医药、电子、材料等行业的电能替代,优化负荷侧调控能力;另一方面,挖掘余热回收及工艺网络耦合潜力,如热泵、有机朗肯循环、烟气深度冷却在钢铁、炼化企业的余热余能回收。

5) 优化源荷互动能力。优化电力市场改革,加强分布式电源、储能、虚拟电厂、负荷聚合商、电动

汽车的协同建设,激活工业与民用能源柔性负荷的资源调度潜力,推进源、网、荷互动电网调度模式。

最后,提高能源交叉领域研发资金投入和复合型人才的培养,优化全民参与的综合能源服务生态。加强对智慧能源、能源互联网、综合能源系统、综合能源服务以及众多能源资源物理融合系统的关键技术创新和典型商业模式创新,强化能源市场节能管理及信誉意识,培养全民参与的能效提升生态。

4 结论与研究展望

本文结合ISM和AHP,为中国工业城市能源转型指标体系的建设提供了思路。通过ISM,使评价指标之间的复杂影响关系清晰化、结构化、系统化,再根据AHP量化结构化评价指标的影响力。最后代入苏州2013—2018年的相关数据,检验模型的有效性。该方法不仅适用于苏州市,也可结合不同城市的能源特点,更改具体的评价指标内容和判断矩阵,将此评价体系的框架推广至其他不同的工业城市。例如,对于不同的城市,引入不同行业的典型产品综合能耗,如钢铁行业能耗主要以热能为主、余压余热利用为重要的节能手段,而纺织业的电能占能源消费的比例较大。

对于主导产业不同的城市,评价指标的选取、分层、赋权均会产生较大变化。例如,对于以服务业为主的城市,建筑能耗往往对总能耗有较大影响,因此可以将建筑能耗作为一级指标之一,并通过二级、三级指标对建筑能耗的影响因素进行颗粒度更细的评估。对于产出以化石能源为主的资源型城市,需要统筹考量矿产开采、生态和环境影响。

由于引入了具体的数据,而不仅仅计算评价指标的影响权重,使指标的选择受到了数据可得性和可量化性的限制。例如,能源领域的三废排放、碳排放强度等指标因数据缺失无法纳入指标体系。但数据的引入提供了更为丰富的结论,通过分析数据间的关联,还可对评价指标间的关系、重要性关系进行量化求证,为城市能源转型的进一步发展和能源政策的制定提供定量参考。

进一步研究可以引入其他城市的数据,与苏州平行对比,一方面更多的数据可以使标准化过程更加准确,更能反映出城市能源转型在该项评价指标上的发展优劣;另一方面,通过多个城市的平行比较,能更准确的反映出城市发展的短板。此外,通过评价结果

的走向,与相关能源政策的颁布时间进行对比,可以对能源政策的效果进行复盘,为后续政策的制定提供效果预期和参考。

不过,该评价方法仍存在优化空间。首先,指标的选取、指标间的相关性、判断矩阵的取值均存在一定的主观性,判断矩阵的取值依赖于对能源转型目标的主观理解,不同的研究可能得出不同的权重因子。其次,在指标的选取上,受到数据可得性的限制,一些具有参考价值的指标无法纳入评价。最后,标准化过程仍有优化空间,通过最大值、最小值确定得分标准的方法的科学性仍需进一步讨论。其他多指标评价方法还包括熵权法、灰色关联分析、期望效用法等。其中熵权法通过数据离散程度反映重要性,虽然评价方法完全客观,但依赖大量数据,且未考虑指标之间的相互影响,权重可能失真。灰色关联分析通过数据间的走势关系衡量其关联度,需要与AHP或熵权法结合求取权重,如果能够延长统计数据的年份跨度,可以将其作为构建ISM模型的参照依据。

参考文献

- [1] World Energy Council, Oliver Wyman. World energy trilemma index 2019[R/OL]. [2019][2020-07-05] <https://trilemma.worldenergy.org/reports/main/2019/2019%20Energy%20Trilemma%20Index.pdf>.
- [2] World Bank. Regulatory indicators for sustainable energy (RISE) 2020 - sustaining the momentum [R/OL]. (2020)[2020-07-05]. <https://hubs.worldbank.org/docs/imagebank/pages/docprofile.aspx?nodeid=32668096>.
- [3] 李治, 李国平. 中国城市能源变化趋势特征及影响因素分析[J]. 产业经济研究, 2010(2): 25-30.
LI Zhi, LI Guoping. Characteristics and causes of Chinese urban energy efficiency[J]. Industrial Economics Research, 2010(2): 25-30(in Chinese).
- [4] 潘哲. 中国城市能源效率的空间差异及影响因素[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [5] 张博茹. 长三角城市群能源效率的时空分异及影响因素分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [6] 郭斌. 中国地级市全要素能源效率测度及影响因素研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.
- [7] KEMMLER A, SPRENG D. Energy indicators for tracking sustainability in developing countries[J]. Energy Policy, 2007, 35(4): 2466-2480.
- [8] PATLITZIANAS K D, DOUKAS H, KAGIANNAS A G, et al. Sustainable energy policy indicators: Review and recommendations[J]. Renewable Energy, 2008, 33(5): 966-973.
- [9] JOVANOVIC M, AFGAN N, BAKIC V. An analytical method for the measurement of energy system sustainability in urban areas[J]. Energy, 2010, 35(9): 3909-3920.
- [10] MARQUEZ-BALLESTEROS M J, MORA-LÓPEZ L, LLORET-GALLEGO P, et al. Measuring urban energy sustainability and its application to two Spanish cities: Malaga and Barcelona[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 335-347.
- [11] ALI-TOUDERT F, JI L M, FÄHRMANN L, et al. Comprehensive assessment method for sustainable urban development (CAMSUD) - A new multi-criteria system for planning, evaluation and decision-making[J]. Progress in Planning, 2020, 140: 100430.
- [12] WARFIELD J N. Participative methodology for public system planning[J]. Computers & Electrical Engineering, 1973, 1(2): 187-210.
- [13] VAIDYA O S, KUMAR S. Analytic hierarchy process: an overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [14] 国家统计局. 年度数据[EB/OL]. (2020)[2020-07-11]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [15] 苏州统计局. 苏州统计年鉴2019[EB/OL]. (2019)[2020-07-05]. <http://tjj.suzhou.gov.cn/sztjj/tjnj/2019/indexce.htm>.
- [16] 中国统计信息网. 苏州市2018年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2019-05-10)[2020-07-05]. <http://www.tjcn.org/tjgb/10js/36013.html>.
- [17] 城市商报. 厉害! 锦苏特高压线入苏电量已达1000亿千瓦时! [EB/OL]. (2016-05-16)[2020-07-05]. <https://www.nengapp.com/news/detail/638375>.

收稿日期: 2020-10-17; 修回日期: 2020-12-04。



王永真

作者简介:

王永真(1988),男,博士后,主要从事能源互联网战略转型、中低品位多能互补综合能源系统建模及优化的研究工作, E-mail: wyz80hou@mail.tsinghua.edu.cn。

林伟(1995),男,硕士研究生,研究方向为综合能源评价, E-mail: wei.lin@rwth-aachen.de。

李成宇(1988),男,讲师,主要从事中低品位热能高效利用、热泵等技术的研究。

朱轶林(1989),男,博士后,主要从事储能系统关键技术及商业模式、城市能源转型的研究。通信作者, E-mail: zhuyilin@iet.cn。

张靖(1971),女,副研究员,主要从事企业能源转型、综合能源业务设计以及机制模式研究。

高峰(1977),男,教授级高工,主要从事能源互联网相关产业战略转型、能源大数据价值挖掘的研究。

(责任编辑 张宇)