

文章编号: 1673-1646(2026)02-0068-10

基于对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子的 能源结构分析 ——以山西省为例

曲国华, 赵阳, 李晓明

(山西财经大学 管理科学与工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 随着双碳目标的推进, 清洁能源在能源结构中的地位逐步受到重视。但山西省“一煤独大”, 煤炭在能源结构中占据主导地位, 消耗量持续上升的现状未能得到彻底性改变。针对这一现状, 本文提出三种方案, 以期助力山西省能源结构转型升级。通过邀请专家对三种方案的经济效益、环境效益、技术可行性以及政策支持进行评估。在能源方案决策过程中, 多属性信息往往具有模糊性与不确定性, 传统决策方法在处理此类复杂的多属性模糊信息时存在局限性。对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子能够更加精准地反映不同属性间的相互关系, 在整合多属性信息时可避免信息丢失或扭曲, 从而更全面、准确地刻画能源方案的综合特征, 因此构建对偶犹豫模糊信息决策矩阵, 利用对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子进行计算和分析。结果表明方案C的得分函数和精确函数最大, 为最佳方案。最后, 基于结论为山西省在能源结构转型方面提供启示。

关键词: *Heronian* 平均算子; 能源经济; 对偶犹豫模糊集; 能源结构转型

中图分类号: F49

文献标识码: A

doi: 10.62756/xbsk.1673-1646.2026037

引用格式: 曲国华, 赵阳, 李晓明. 基于对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子的能源结构分析: 以山西省为例[J]. 中北大学学报(社会科学版), 2026, 42(2): 68-77.

Energy Structure Analysis Based on Dual Hesitant Fuzzy Geometric Weighted *Heronian* Mean Operator ——Case Study of Shanxi Province

QU Guohua, ZHAO Yang, LI Xiaoming

(School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: With the promotion of the dual-carbon goal, the position of clean energy in the energy structure has gradually been paid attention to, but Shanxi Province is known to have “the largest coal”, coal occupies a dominant position in the energy structure, and the current situation of continuous rise in consumption has not been completely changed. In view of this situation, this paper puts forward three schemes to help Shanxi Province’s energy structure transformation and upgrading. By inviting experts to evaluate the economic benefits, environmental benefits, technical feasibility and policy support of the three schemes. In the process of energy scheme decision-making, multi-attribute information often has fuzziness and uncertainty, traditional decision-making methods have limitations when dealing with such complex multi-attribute fuzzy information. The dual hesitant fuzzy geometric weighted *Heronian* average operator can more accurately reflect the interrelationships among different attributes. When integrating multi-attribute information, it can avoid information loss or distortion, thereby more comprehensively and accurately describing the comprehensive

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 教育部哲学社会科学研究后期资助项目: 考虑对偶犹豫模糊信息的几类多属性决策方法及应用研究(23JHQ093)

作者简介: 曲国华(1982—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事专业: 大数据与企业环境行为。E-mail: qugh@sxufe.edu.cn.

sive characteristics of energy schemes. Therefore, a dual hesitant fuzzy information decision matrix is constructed. The calculation and analysis are carried out by using the dual hesitant fuzzy geometric weighted Heronian average operator. The results show that scheme C has the largest score function and the exact function and is the best scheme. Finally, based on the conclusion, it provides enlightenment for Shanxi Province in the energy structure transformation.

Key words: Heronian mean operator; energy economy; dual hesitation fuzzy set; energy structure transformation

随着工业化进程的加速,全球温室气体排放不断增加,受到全球各界的广泛关注,而化石燃料的过度消费继续主导全球能源系统,对环境和人类生存构成重大挑战^[1,2]。习近平总书记在中共中央政治局第十二次集体学习中指出,积极发展清洁能源,推动绿色低碳转型,已经成为国际社会应对全球气候变化的普遍共识,而加快构建清洁低碳安全高效的能源体系,正是我国能源革命的主攻方向^[3]。党的二十届三中全会进一步提出,必须完善生态文明制度体系,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,积极应对气候变化,加快完善落实“绿水青山就是金山银山”理念的体制机制,完善生态文明基础体制,健全生态环境治理体系,健全绿色低碳发展机制^[4]。党的二十大报告也明确指出我国积极稳妥推进碳达峰碳中和,致力于推动能源绿色转型等重要任务^[5]。

推动“双碳”目标的实现,有益于加速中国能源结构的转型升级,带动经济和环境系统的协调发展,提升能源利用效率,筑牢国家能源安全防线,实现经济社会可持续发展^[6-9]。在我国经济发展中,煤炭占据绝对的主导地位,这与世界以石油为主要能源的情况不同,煤炭的大量使用为我国的可持续发展不断增压,我国能源结构的合理性与各国的平均水平存在着较大差距。基于当前经济发展状况,实现高质量的可持续发展需要摆脱传统的能源经济,致力于发展新能源。根据毕马威《世界能源统计年鉴 2024》,如图 1 所示,在世界能源消费结构中,石油占比为 32%,而我国石油在能源消费结构中占比仅为 19%,如图 2 所示,即使中国早在 2004 年就超越日本成为了世界第二大石油消费国,但石油消费量占比依旧远低于煤炭^[10]。在世界能源消费结构中,煤炭位居第二,占比 27%;在中国能源消费结构中,煤炭位居第一,占比 54%,远超其他能源的使用,中国的煤炭总消费量占世界煤炭总消费量的 56%,2023 年印度的煤炭消费量虽增幅明显,但依旧无法撼动中国作为世界第一煤炭消费大国的地位。

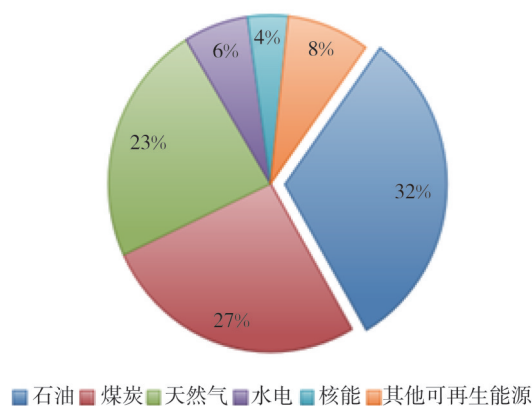


图 1 世界能源消费结构

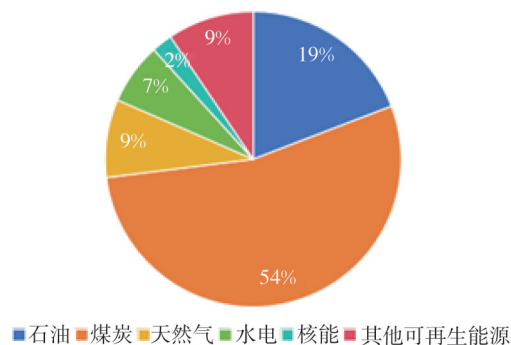


图 2 我国能源消费结构

天然气、水电、核能以及其他可再生能源在我国能源消费结构中的占比均不超过 10%,核能仅占 2%,可见我国虽大力发展清洁能源,但对传统能源结构的影响依旧较小。近 20 年,尽管可再生能源的使用量在快速增加,煤炭的使用量已从 60%左右的占比下降到 2023 年的 54%,但煤炭作为经济发展的基础能源这一事实并未改变,我国能源结构形成的原因之一是煤炭在我国已探明的化石能源资源储量中位列第一,占比 94%^[11]。《中国能源展望 2060(2024 年版)》数据显示,到 2060 年,我国终端能源消费结构中,电能将成为主体,占比达 57%,天然气占比 13%、氢能占比 12%、煤炭占比不足 5%。在“十四五”现代能源系统的规划中,中国提出了到 2025 年非化石能源消费 20% 的短期目标^[12]。“十五五”规划出台后,工业部门由于钢铁、

水泥、石化等重点碳排放行业的规模收缩、先进产能替代落后产能以及节能降耗工作持续取得进展,碳排放有望于“十五五”初陆续达到峰值,此后至2060年将以年均5.0%的速率快速下降。但目前我国煤炭消费占据主导地位、石油天然气的消费居高不下,新能源发展缓慢等一系列问题都使我国能源结构转型面临巨大压力。

模糊数将具有不确定性的事物作为研究对象,适应了描述复杂事物的需求,被学者应用于多个领域。王雯琦等对可能度和偏好顺序进行了调整,提出了一种新的语言直觉模糊多属性群决策方法,并将其应用于制造业^[13]。谢小军等针对风险投资问题,在考虑区间直觉模糊数的背景下,建立了基于投影测度和TOPSIS方法的多属性决策模型^[14]。李鹤等以中国股市行业为背景进行实证分析,将投资者动态损失厌恶和证券市场的模糊不确定性纳入考虑范围,构建了模糊多目标模型^[15]。为应对多种模糊集带来的复杂决策信息挑战,苏加福等提出了一种新的混合犹豫模糊集^[16]。彭娟娟等对图片模糊偏好信息下的双边匹配问题进行了改进,并提出了基于TODIM的图片模糊双边稳定匹配决策方法^[17]。刘烈璋等基于TODIM满意度和公平度相结合的匹配方法,将匹配主体对于风险的态度纳入考虑范围^[18]。考虑到模糊数在解决不确定性问题上的有效性,王庆荣等利用三角模糊数构建了应急选址路径模型,对应急物资中心选址进行了优化^[19]。赵程伟等提出了一种模糊异构环境下考虑属性方案双重交互及决策者不完全理性心理的模型,弥补了完全理性假设建模的不足^[20]。Li等采用模糊集定性比较分析方法探究了中国能源结构转型的演化路径,旨在揭示加速能源结构成功转型的途径,并为未来能源结构的低碳清洁转型提供参考^[21]。可见,学者们针对特定的环境对模糊数进行了改进和有效利用,但上述研究中鲜有将非隶属度纳入考虑范围,并且与能源结构相结合的研究较少,而能源结构调整方案的制定与选择具有复杂性、不确定性的特征,同时,能源结构作为改善碳排放的重要影响因素之一^[22],中国想要实现“双碳”目标,推动经济的高质量发展,必须应对这一挑战,而山西省作为主要的煤炭供给城市,应积极响应政府号召。因此,本文利用对偶犹豫模糊几何加权Heronian平均算子,在提高对于非隶属度重视程度的基础上,对得到的对偶犹豫模糊信息决策矩阵进行计算,引入对偶犹豫模糊数的得分函数和精确函数,进一步对处理所得数据进行排序,以得到最优决策结果。根据得到的最优决策结果,选择出合

适的能源结构调整方案,为山西省能源结构调整提供一种新的思路。

综上所述,本文基于对偶犹豫模糊理论和多属性决策方法,旨在提出一种不同视角下山西省煤炭转型的能源结构优化决策方法。首先,对山西省能源现状进行调查与分析,将研究视角聚焦于山西省煤炭转型背景下的能源结构优化方案。其次,结合案例,将专家的评估表示为对偶犹豫模糊元素,以解决专家难以用精确数值表达对能源结构优化方案的评估,此外,在研究内容中综合考虑多种因素构建多方位评价体系,以更全面地考量各种因素的影响。最后,由于制定与选择能源结构调整方案具有复杂性、不确定性的特征,为了有效解决专家在能源结构决策过程中面临的问题,创新性地运用对偶犹豫模糊几何加权Heronian平均算子处理能源结构决策问题,通过计算各个方案的综合评估值,从而选出最优方案。

1 山西省能源结构现状及方案的确定

煤炭在山西能源结构中占据绝对主导地位。山西是我国煤炭能源的主产区,山西全省含煤面积6.48万平方千米,占全省国土总面积的40%^[23]。中华人民共和国成立以来,山西累计产煤192亿吨,占全国总产煤量的25%。山西煤炭储量丰富、煤种齐全,拥有大同动力煤、阳泉无烟煤、西山焦煤等知名煤种,是我国重要的煤炭生产基地,其煤炭产量多年稳居全国前列。在能源消费端,火电依托本地煤炭资源蓬勃发展,大量煤电装机保障华北等地区电力供应,工业领域如钢铁、炼焦、化工等高耗能产业,也以煤炭及煤炭加工品为主要能源投入,煤炭直接、间接消费占比远超其他能源类型。但是,作为资源型地区,山西省仍需从传统利用方式进一步转变为煤炭清洁高效利用。党的二十届三中全会《决定》中提出坚定不移地朝向能源转型的重要方向和目标推进发展,加快推进新型能源体系的规划与建设。能源转型的重大挑战之一就是传统的煤炭利用产生高碳排放,因此,为加快推进新型能源体系的规划与建设,煤炭清洁高效利用迫在眉睫^[24]。为进一步推动煤炭清洁高效利用与能源转型,需要山西进一步加强相关领域基础理论研究和应用技术研发,借助能源技术革新推动煤炭清洁高效利用,发展低碳和负碳技术,发展现代煤化工延伸煤炭产业链、提升产品附加值,同步加快新能源装机、消纳体系建设,促进能源结构向清洁低碳、安全高效方向过渡,逐步改变“一煤独大”的格局,构建

多元互补、绿色低碳能源生态^[25]。

1.1 山西省能源结构现状

表 1 为山西省主要能源消耗量表。为更好对比各类能源的消耗量以及发展趋势,将表 1 数据进行单位换算,记录为表 2。如表 2 所示,从 2010—2022 年,煤炭消耗量整体呈现稳步上升的趋势。2010 年煤炭消耗量为 21 293.82 万吨标准煤,2022 年增至 86 718.77 万吨标准煤。这表明煤炭在山西省能源消费结构中仍占据重要地位,在这一阶段山西省的经济活动对煤炭资源有着持续的需求,虽然当前能源转型在推进,但对煤炭的依赖短期内难以彻底改变。

表 1 山西主要能源消耗量

年份	主要能源消耗量		
	煤炭/万吨	电力/亿千瓦时	天然气/亿立方米
2010	29 865.10	1 460.00	28.93
2011	33 479.00	1 650.00	31.93
2012	34 551.00	1 765.78	37.39
2013	36 636.51	1 832.35	45.08
2014	37 587.43	1 822.63	50.35
2015	43 880.62	1 737.00	64.92
2016	43 566.14	1 797.18	69.35
2017	45 916.08	1 990.61	74.90
2018	48 940.14	2 160.53	75.21
2019	51 331.61	2 261.90	91.70
2020	53 739.03	2 342.00	93.41
2021	113 548.72	2 608.00	96.74
2022	121 625.20	2 835.11	99.46

表 2 以标准煤计量的山西主要能源消耗量

年份	主要能源消耗量		
	煤炭/万吨标准煤	电力/万吨标准煤	天然气/万吨标准煤
2010	21 293.82	1 794.34	384.77
2011	23 870.53	2 027.85	424.67
2012	24 634.86	2 170.14	497.29
2013	26 121.83	2 251.96	599.56
2014	26 799.84	2 240.01	669.66
2015	31 286.88	2 134.77	863.44
2016	31 062.66	2 208.73	922.36
2017	32 738.17	2 446.46	996.17
2018	34 894.32	2 655.29	1 000.29
2019	36 599.44	2 779.88	1 219.61
2020	38 315.93	2 878.32	1 242.35
2021	80 960.24	3 205.23	1 286.64
2022	86 718.77	3 484.35	1 322.82

电力消费量在这期间一直保持着增长的趋势,从 2010 年的 1 794.33 万吨标准煤增长至 2022 年的 8 505.33 万吨标准煤,这反映出山西省社会电气化程度不断加深,各行业生产以及居民生活等对电力的需求日益增长。一方面,工业领域不断发展,各

类生产设备电气化水平提高,对电力的依赖增强;另一方面,居民生活质量提升,家庭电器的普及和使用时长增加等也促使电力消耗增多。

天然气消耗量呈现增长趋势,从 2010 年的 384.77 万吨标准煤增长至 2022 年的 3 484.35 万吨标准煤,增长幅度显著。这表明山西省在能源结构优化方面取得积极进展,天然气作为一种相对清洁的能源,其应用范围在不断扩大,在工业生产中替代部分煤炭等高污染能源,在居民生活方面用于城市燃气供应、冬季取暖等,在交通运输领域也逐步推广天然气车辆等,使得天然气消费量持续攀升。

如图 3 所示,对比三种能源,虽然三种能源的消耗量都在增加,但煤炭消耗量的增长幅度相对较大,说明传统能源在能源结构中仍占主导地位。电力和天然气的消耗占比在逐步上升,电力作为一种通用且高效的能源形式,在各领域的应用不断拓展;天然气凭借其清洁性优势,在能源转型过程中占据越来越重要的位置,整个能源结构正朝着更有利于可持续发展的方向优化。

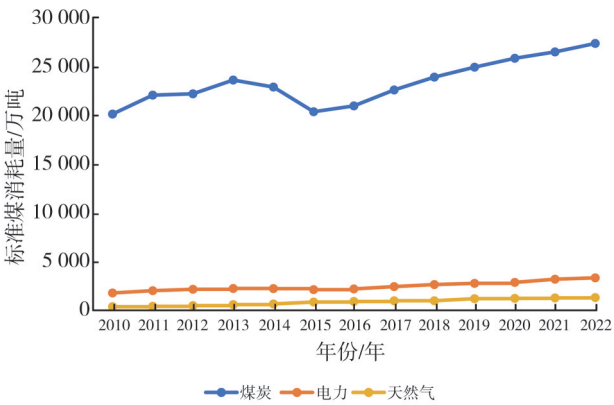


图 3 山西主要能源消耗量

由表 1、表 2 及图 3 可知,虽然清洁能源的消费比重在不断增加,但煤炭在山西能源结构中依然占据绝对主导地位,而实现可持续发展的关键措施之一是减少对不可再生能源的依赖^[26]。因此,进一步实现煤炭清洁高效利用与能源转型以及实现可持续发展依然存在一定难度。值得关注的是,新质生产力的出现为山西省能源转型带来了新的机遇与思路。在能源领域,发展新质生产力意味着要依靠科技创新,深度挖掘新能源以及传统能源清洁高效利用的潜力。对于传统煤炭产业而言,新质生产力则体现在通过运用大数据、人工智能、先进的清洁燃烧和转化技术等,实现煤炭的清洁高效利用,将煤炭在生产、加工、使用等各环节的碳排放尽可

能降低,提升煤炭利用效能,使其更好地与新能源协同发展,而不是简单地被替代。

作为我国重要的煤炭供给基地,一方面,山西面临着供给全国煤炭的压力;另一方面,其煤炭消费量也在逐年上升。因此,在“十五五”规划以及新质生产力的发展背景下,山西省应采取何种措施改善自身的能源消费结构、经济落后、环境污染严重的现状,是山西省急需解决的问题。本文将利用对偶犹豫模糊数,对三种方案进行测度,选出最优方案,具体方案如下:

1) 方案A:智能多元能源融合与煤炭低碳转型。

依托先进的智能能源管理系统,深度融合太阳能、风能、水能等多种可再生能源,构建多元化能源供应体系,同时运用前沿低碳技术推动煤炭产业从开采到利用全链条的低碳转型,实现能源消费结构的高效、清洁与可持续优化。

2) 方案B:创新驱动的可再生能源主导与煤炭高端转型。

依靠科技创新驱动,大力发展以太阳能、风能、水能、氢能等可再生能源,使其在能源消费结构中占据主导地位,同时引导煤炭产业向高端化、精细化、智能化方向转型升级,构建具有特色的现代能源产业体系,实现能源高质量发展与消费结构深度优化。

3) 方案C:绿色能源生态循环与煤炭清洁共生。

以绿色能源为核心,构建生态循环产业链,将太阳能、风能、水能、生物质能等可再生能源的开发利用与生态农业、生态工业、生态旅游等产业有机结合,形成能源生态循环系统,同时实现煤炭与清洁能源在生产、利用环节的清洁、共生发展,全面优化山西能源消费结构并提升生态环境质量。

1.2 能源结构方案的选择

1.2.1 方案A的选择

1) 能源结构平稳过渡与优化并重。《山西省节约能源“十四五”规划》指出推动新能源和可再生能源发展,助力能源结构绿色转型^[27]。方案A通过深度整合多种可再生能源构建多元化能源供应体系,可逐步提高清洁能源的占比,实现从传统煤炭主导到多元能源协同的平稳过渡。同时,通过低碳技术手段降低煤炭使用过程中的污染,科技的迅猛发展为煤炭低碳转型提供了可能,应用前沿低碳技术推动煤炭产业全链条低碳转型,既保障了当下能源供应的稳定性,又避免了因过快削减煤炭使用带来的能源短缺风险。

2) 智能管理提升能源利用综合效益。先进的智能能

源管理系统是方案A的一大亮点。在数字化时代,借助大数据、人工智能等技术手段,可以实时收集与分析各类能源数据,对太阳能、风能、水能等可再生能源进行精准调度和优化配置。3) 契合低碳发展与传统产业升级需求。随着全球对气候变化的关注度不断提高,《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》强调深入推动煤炭清洁高效利用,推动煤电低碳化改造和建设,山西需积极响应低碳发展要求^[28]。方案A在促进可再生能源发展的同时,聚焦于煤炭产业从开采到利用各环节的低碳转型,这有利于盘活传统产业资产、保障就业,避免因能源转型对传统产业造成过大冲击,实现传统能源产业可持续发展与升级。

1.2.2 方案B的选择

科技创新引领能源高质量发展。《山西省经济会议报告》指出要不断加大科技研发投入,助力能源产业升级^[29]。1) 科技创新引领能源高质量变革。《“十四五”能源领域科技创新规划》指出科技创新是引领能源发展的第一动力^[30]。方案B紧紧围绕这一点,凭借强大的科技创新力量大力发展各类可再生能源,使其在能源消费结构中占据主导地位。同时引导煤炭产业向高端化、精细化转型,通过技术创新全面提升能源产业的质量和效益,推动山西能源产业从传统向现代、从粗放向集约转型。2) 适应未来能源市场竞争与长远规划。根据我国《“十四五”现代能源体系规划》,要大力推进风电光伏等新能源的发展,使可再生能源成为主体电源^[31]。方案B着重构建可再生能源主导的能源消费结构,提前在市场竞争中占据有利地位,有助于山西减少对传统化石能源的依赖,增强能源供应的自主性和安全性。同时,通过对煤炭产业的高端化转型,挖掘煤炭资源的源新价值潜力,使其与可再生能源相互补充协同发展。3) 带动新兴产业发展与经济结构优化。大力发展可再生能源以及推动煤炭高端转型,会催生一系列新兴产业。这些新兴产业不仅技术含量高、附加值大,还能吸引大量的投资、人才和创新资源,创造众多的就业机会,成为山西经济新增长点,有力地推动地区经济结构由单一依赖煤炭向多元化、高端化转型,优化产业布局,提升整体经济发展的活力和质量。

1.2.3 方案C的选择

1) 多产业协同实现综合价值最大化。《2030年前碳达峰行动方案》进一步细化了可再生能源发展的具体行动,为生态产业发展提供稳定的清洁能源支持^[32]。方案C构建的绿色能源生态循环系统,将可再

生能源与生态农业、生态工业、生态旅游等多产业有机结合,形成紧密的产业链条和循环体系。这种跨产业协同模式能够充分发挥不同产业的优势,实现资源的高效循环利用。通过各产业间的协同共生,创造出经济、生态、社会等多方面的综合价值,实现地区发展的全面优化。2)生态友好与能源结构优化协同推进。以绿色能源为核心打造生态循环产业链,是一种高度生态友好的发展模式,可再生能源的利用过程清洁无污染,且在与其它产业结合过程中进一步减少了对生态环境的影响。同时,实现煤炭与清洁能源在生产、利用环节的清洁共生发展,逐步优化能源消费结构,降低煤炭在能源体系中的占比,在保障能源供应稳定的基础上,提高清洁能源的使用比例,使生态环境改善与能源结构优化相辅相成、同步推进。3)提升能源资源利用效率与可持续性。《山西省人民政府关于加快建立健全我省绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》提出要推动传统能源绿色转型,继续支持传统能源特别是煤炭、煤电发挥兜底保障作用,促进燃煤清洁高效开发转化利用^[33]。通过构建能源生态循环系统以及实现清洁共生发展,不同能源之间、能源产业与其他产业之间能够更好地实现资源互补和循环利用,提高能源资源的整体利用效率^[34]。这种模式增强了能源资源利用的可持续性,确保山西在长期的能源发展过程中,能够以更高效、更环保的方式满足经济社会发展对能源的需求,实现能源、经济、生态的和谐共生与可持续发展。

2 对偶犹豫模糊基本理论

笔者于2016年发表的论文中给出了对偶犹豫模糊集的基本定义和运算方法^[35]。

定义 1: 令 X 是一个固定的集合,将 X 上的对偶犹豫模糊集 D 定义为: $D = \{ \langle x, h(x), g(x) \rangle | x \in X \}$ 。其中, $h(x)$ 与 $g(x)$ 为两个集合, $h(x) \subset [0, 1]$, 表示 $x \in D$ 的可能隶属度, $g(x) \subset [0, 1]$, 表示 $x \in D$ 的可能非隶属度。

性质 1: $\forall \alpha \in h(x), \forall \beta \in g(x), \alpha^+ \in h^+(x) = U_{\alpha \in h(x), x \in X} \max \{ \alpha \}, \beta^+ \in g^+(x) = U_{\beta \in g(x), x \in X} \max \{ \beta \}$, 有 $S(h_1) > S(h_2)$ 。

定义 2: 假设 X 为一个固定集合, H 和 F 是 X 上的两个对偶犹豫模糊集:

$$H = \{ \langle x, f_H(x_i), g_H(x_i) \rangle | x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n \},$$

$$F = \{ \langle x, f_F(x_i), g_F(x_i) \rangle | x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n \}.$$

H 和 F 的运算法则如下:

$$\begin{aligned} 1) \quad H \oplus F &= \{ f_H \oplus f_F, g_H \oplus g_F \} = \\ &= \bigcup_{\alpha_H \in f_H, \beta_H \in f_H, \alpha_F \in f_F, \beta_F \in f_F} \{ \{ \alpha_H + \alpha_F - \alpha_H \alpha_F \}, \{ \beta_H \beta_F \} \}, \\ 2) \quad H \otimes F &= \{ f_H \otimes f_F, g_H \otimes g_F \} = \\ &= \bigcup_{\alpha_H \in f_H, \beta_H \in f_H, \alpha_F \in f_F, \beta_F \in f_F} \{ \{ \alpha_H \alpha_F \}, \{ \beta_H + \beta_F - \beta_H \beta_F \} \}, \\ 3) \quad nF &= \bigcup_{\alpha_F \in f_F, \beta_F \in f_F} \{ 1 - (1 - \alpha_F)^n, \beta_F^n \}, \\ 4) \quad F^n &= \bigcup_{\alpha_F \in f_F, \beta_F \in f_F} \{ (\alpha_F)^n, 1 - (1 - \beta_F)^n \}. \end{aligned}$$

其中 $n \geq 0$, 上述运算法则的运算结果也是对偶犹豫模糊集。

定义 3: 设 h_1 与 h_2 为两个对偶犹豫模糊集, $h_i = (\alpha_i, \beta_i) (i = 1, 2)$ 。

$$\begin{aligned} 1) \quad \text{则称 } S(h_i) &= \frac{1}{\gamma} \sum \alpha_i - \frac{1}{\eta} \sum \beta_i \text{ 为其得分函数,} \\ 2) \quad \text{则称 } P(h_i) &= \frac{1}{\gamma} \sum \alpha_i + \frac{1}{\eta} \sum \beta_i \text{ 为其精确函数.} \end{aligned}$$

其中, γ 和 η 分别为 h_1 与 h_2 的隶属度与非隶属度的元素个数。

定义 4: 基于得分函数与精确函数规定 h_1 与 h_2 的大小关系排序如下:

1) 如果 $S(h_1) > S(h_2)$, 则 h_1 大于 h_2 , 记作 $h_1 > h_2$ 。

2) 如果 $S(h_1) = S(h_2)$, 则:

假如 $P(h_1) > P(h_2)$, 则 h_1 大于 h_2 , 记作 $h_1 > h_2$ 。

假如 $P(h_1) = P(h_2)$, 则 h_1 等于 h_2 , 记作 $h_1 = h_2$ 。

定义 5: 笔者于2022年发表的《基于对偶犹豫模糊型几何 Heronian 平均算子的多属性决策方法及其应用》中引入对偶犹豫模糊几何 Heronian 平均算子 (DHFGHM 算子), 设 $\lambda'_i = \bigcup_{\alpha_i \in h_{(x)}, \beta_i \in g_{(x)}} \{ \{ \alpha_i \}, \{ \beta_i \} \}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 且 $p, q > 0$, 则对偶犹豫模糊几何 Heronian 平均算子为:

$$\begin{aligned} DHFGHM^{p,q} &= (\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \dots, \lambda'_n) = \\ &= \frac{1}{p+q} \left(\bigotimes_{i=1, j=i}^n (p\lambda'_i \oplus q\lambda'_j)^{\frac{2}{n(n+1)}} \right) \\ &= \bigcup_{\alpha_i \in h_{(x)}, \alpha_j \in h_{(x)}, \beta_i \in g_{(x)}, \beta_j \in g_{(x)}} \{ a, b \} \text{ 其中:} \\ a &= 1 - (1 - \prod_{i=q, j=i}^n (1 - (1 - \alpha_i)^p (1 - \alpha_j)^q)^{\frac{2}{n(n+1)}})^{\frac{1}{p+q}}, \\ b &= (1 - \prod_{i=1, j=i}^n (1 - \beta_i^p \beta_j^q)^{\frac{2}{n(n+1)}})^{\frac{1}{p+q}} \quad [36] \end{aligned}$$

定义6: 笔者在2016年发表的论文中引入对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子 (*DHFGWHM* 算子), 设 $\lambda'_i = \bigcup_{\alpha_i \in h_{(x)}, \beta_i \in g_{(x)}} \{\{\alpha_i\}, \{\beta_i\}\} (i=1, 2, \dots, n)$, 各方案属性的指标权重为 $w_i (w_i > 0)$, $\sum w_i = 1$ 且 $p, q > 0$, 则对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子为:

$$DHFGWHM^{p,q} = (\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \dots, \lambda'_n) = \frac{1}{p+q} \left(\bigotimes_{i=1, j=i}^n (p\lambda'_i{}^{w_i} \oplus q\lambda'_j{}^{w_j})^{\frac{2}{n(n+1)}} \right) = \bigcup_{\alpha_i \in h_{(x)}, \alpha_j \in h_{(x)}, \beta_i \in g_{(x)}, \beta_j \in g_{(x)}} \{a, b\} \text{ 其中:}$$

$$a = 1 - (1 - \prod_{i=q, i=j}^n (1 - (1 - \alpha_i^{w_i})^p (1 - \alpha_j^{w_j})^q)^{\frac{2}{n(n+1)}})^{\frac{1}{p+q}}, b = (1 - \prod_{i=1, j=i}^n (1 - (1 - (1 - \beta_i^{w_i})^p (1 - (1 - \beta_j^{w_j})^q)^{\frac{2}{n(n+1)}})^{\frac{1}{p+q}})^{\frac{1}{p+q}} [35]$$

3 基于对偶犹豫模糊集的能源结构多属性决策方法

3.1 案例选择

当前能源转型背景下, 能源结构优化已成为全

球发展的重要趋势。山西作为传统能源大省, 其煤炭资源长期在能源体系中占据主导地位。但随着时代发展, 各类能源的综合利用与协同发展备受关注, 只有科学合理地规划能源布局, 精准把握能源市场动态, 才能提升能源战略决策的科学性与前瞻性。因此, 基于对偶犹豫模糊几何 *Heronian* 平均算子, 本文选择了方案A、方案B、方案C, 并邀请相关专家对它们进行四种属性评估, 分别是: 经济效益(C_1)、环境效益(C_2)、技术可行性(C_3)、政策支持(C_4), 在专家打分时为保证评分的有效性, 针对四个属性分别给专家提供三个层面: 经济效益属性从大气污染物排放强度^[36]、能源自给量^[37]、经济质量、经济结构^[38]; 环境效益属性从碳排放强度、非化石能源消费比例; 技术可行性从科技产出^[39]、科技发展投入^[40]、技术效率^[41]; 政策支持从环境规制水平^[40]、技术创新补偿政策^[41]、技术支持共十二个层面作为评分依据, 在多个专家对三个方案信息进行分析决策后, 构建对偶犹豫模糊信息决策矩阵, 各方案属性评价结果均为对偶犹豫模数集, 将参数 p, q 定义为1, 同时, 根据专家意见确认了四个属性的权重 w_i , 具体结果如表3所示。

表3 对偶犹豫模糊信息决策矩阵

	C_1	C_2	C_3	C_4
A	{{0.1, 0.3, 0.4}, {0.1, 0.2, 0.3}}	{{0.2, 0.3, 0.5}, {0.1, 0.2, 0.3}}	{{0.1, 0.2, 0.4}, {0.1, 0.3, 0.5}}	{{0.2, 0.1, 0.3}, {0.2, 0.1, 0.4}}
B	{{0.1, 0.2, 0.3}, {0.1, 0.2, 0.6}}	{{0.1, 0.2, 0.3}, {0.1, 0.3, 0.4}}	{{0.1, 0.3, 0.5}, {0.1, 0.2, 0.4}}	{{0.1, 0.2, 0.4}, {0.2, 0.3, 0.2}}
C	{{0.2, 0.4, 0.5}, {0.1, 0.2, 0.3}}	{{0.2, 0.3, 0.6}, {0.1, 0.2, 0.3}}	{{0.1, 0.3, 0.4}, {0.2, 0.3, 0.4}}	{{0.3, 0.2, 0.4}, {0.1, 0.2, 0.2}}
w_i	0.3	0.3	0.2	0.2

根据对偶犹豫模糊数信息决策矩阵, 利用 *DHFGWHM* 算子对四个属性进行集成, 得出结果如表4所示。

表4 计算结果

方案	计算结果
A	{{0.615 1, 0.686 7, 0.797 1}, {0.031 9, 0.055 5, 0.107 5}}
B	{{0.563 7, 0.683 4, 0.770 6}, {0.031 9, 0.070 3, 0.135 2,}}
C	{{0.660 2, 0.741 2, 0.833 6}, {0.031 9, 0.060 7, 0.086 7}}

根据集成后的结果, 计算方案A、方案B、方案C的得分函数与精确函数, 得出结果如表5所示。

表5 各方案得分函数和精确函数值

方案	得分函数	精确函数
A	0.634 7	0.764 6
B	0.593 4	0.751 7
C	0.685 3	0.804 7

比较各方案的得分函数与精确函数可知, $S_3 > S_1 > S_2, P_3 > P_1 > P_2$, 即方案C的得分函数和精确函数都是最大的, 根据定义4的比较方法确定最佳

方案为方案C。

3.2 结果分析

上文中利用对偶犹豫模糊几何 *Heronian* 平均算子从客观层面对三种方案进行了选择, 得出方案C为最优选择。为保证结果的合理性, 本文从主观层面, 结合相关政策和山西省经济效益、环境效益、技术可行性、政策支持方面进行了进一步分析。

3.2.1 经济效益方面

方案A: 建设智能能源大数据平台、打造分布式能源微电网集群以及发展能源互联网技术应用等, 需要前期投入大量资金用于技术研发和基础设施建设等。方案B: 在可再生能源主导发展方面, 培育可再生能源产业集群、拓展创新应用等举措能吸引大量投资, 形成完整的产业链, 提高产业的规模效益和市场竞争能力; 煤炭高端转型向精细化、高端化工产品开发迈进, 能极大提升煤炭产业的利润空间; 并且智能化

升级改造也有助于降低成本、提高生产效率,进一步增强经济收益能力。方案C:绿色能源生态循环与多产业结合会带动一系列关联产业发展。煤炭作为我国的主体能源,其高质量发展是保障我国能源安全的重要前提;煤炭与清洁能源的清洁共生模式可以实现资源共享、优势互补,从而促进煤炭高质量发展,提高整体经济效益^[42]。

对比结论:从经济效益维度考量,方案B的优势相对明显,因为其通过科技创新推动可再生能源和煤炭产业双向深度转型,有望在多个新兴产业领域创造高经济价值,同时提升产业附加值和市场竞争力的潜力巨大。

3.2.2 环境效益方面

方案A:通过构建智能多元能源融合体系,减少对煤炭的依赖,运用前沿低碳技术推动煤炭全链条低碳转型,可显著降低碳排放,对大气环境改善作用显著。同时,智能能源管理有助于优化调配能源,避免能源浪费产生的间接环境压力,从多方面促进环境质量提升。方案B:大力发展可再生能源,提高可再生能源在能源消费总量中的占比,从而有力推动能源低碳替代,这将导致传统煤炭等高污染能源占比大幅下降,从源头减少污染物排放及温室气体排放,是煤电环境责难下的关键举措^[43]。同时,在引导煤炭产业向高端化、精细化、智能化转型的过程中,促使企业采用更环保的生产工艺和节能减排措施,进一步降低环境影响。方案C:侧重于构建绿色能源生态循环系统,强调各种可再生能源与不同产业的有机结合,可再生能源的利用过程本身相对清洁,而且这种生态循环模式还能进一步减少废弃物排放、提升资源利用率。具体来说,生物质能与生态农业协同模式中对农业废弃物的循环利用,以及在煤炭与清洁能源清洁共生方面减少了煤炭单独利用时的污染排放,整体对生态环境的综合改善效果突出,不仅涉及大气环境,还涵盖土壤、水资源等多方面的生态优化。

对比结论:从环境影响角度来看,方案C相对更优,因其全方位、多环节地构建了生态循环和清洁共生模式,对整体生态环境的协同优化效果更显著,涉及的生态改善维度更为广泛。

3.2.3 技术可行性方面

方案A:智能能源管理系统及其相关的大数据、人工智能等技术应用,虽然目前这些技术在不断发展,但要实现多种可再生能源的深度融合、精准预测和优化调度等功能,技术要求极高,需要攻

克数据安全、算法准确性、系统兼容性等诸多难题。煤炭低碳转型涉及的部分前沿技术,目前仍面临成本高昂、技术复杂且大规模应用还不够成熟等问题,整体实施难度较大。方案B:所聚焦的前沿可再生能源技术大多仍处于研发与示范阶段,同时,新能源的大规模安全利用技术仍存在挑战,距离大规模产业化尚有距离,技术不确定性较高^[44]。同时,现阶段绿色低碳产业依然面临着诸多现实困境,如与数字技术相融合程度不足、协同创新难度大等^[45]。方案C:绿色能源生态循环模式涉及的技术多是现有可再生能源利用技术与传统产业技术的结合与优化,易于推广应用,技术难点主要在于如何更好地实现产业间的协同衔接和资源的高效循环利用,但相较于方案A的前沿技术集成难度稍低。煤炭与清洁能源的清洁共生方面也基于现有的煤炭清洁生产技术和部分可再生能源互补技术,可行性相对较高。

对比结论:从技术可行性角度判断,方案C相对更具可操作性,它可依托现有的相对成熟的技术进行优化组合与产业协同,在短期内更易于落地实施,而方案A和方案B涉及较多尚在探索和发展中的前沿技术,面临的技术风险相对更高。

3.2.4 政策支持层面

方案A:《山西省煤炭行业碳达峰实施方案》等^[46]政策文件聚焦于煤炭产业的低碳改造。从开采环节的绿色开采技术推广和节能减排要求,到利用环节的低碳技术应用及污染物控制等全链条都有相应政策约束与激励措施,有力支撑了运用前沿低碳技术推动煤炭全链条低碳转型这一要点。方案B:《山西省“十四五”现代能源体系规划》^[47]为各类可再生能源发展制定了明确的发展目标与路径,并通过政策引导加大对太阳能、风能等可再生能源研发、生产与应用环节的投入。山西省在多个能源发展规划中强调提升可再生能源在能源消费结构中的占比,使其逐步占据主导地位,并大力推动可再生能源产业发展壮大,契合方案B中可再生能源主导的发展思路。方案C:在国家倡导循环经济发展的大背景下,山西省积极落实,出台了诸多关于生态农业、生态工业、生态旅游等产业发展及协同融合的政策。这为构建以绿色能源为核心的生态循环产业链提供了丰富的政策土壤。同时,围绕能源清洁利用与环境保护,山西省制定了严格的煤炭清洁生产标准、污染物排放标准等政策文件,要求煤炭在生产、利用环节与清洁能源实现清洁共

生,以减少对环境的影响。

根据上述分析可以看出,难以绝对评判哪个方案的政策支持程度更好,三个方案各有其独特的政策支持优势和适用场景,山西省需要根据自身实际发展阶段和战略目标来综合考量并选择合适的方案推进实施。

基于对经济效益、环境效益、技术可行性、政策支持四个主要方面的对比分析,并结合当前山西地区更注重在短期内以相对可行的方式实现能源消费结构优化,同时兼顾生态环境改善、经济效益提升以及保障能源稳定供应综合判定,方案C为更优的方案。

4 结 论

本文针对当前山西省能源结构现状及未来发展需求提出三种方案,邀请专家对其进行多属性决策评价,采用对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子进行排序,从经济效益、环境效益、技术可行性以及政策支持四个层面进行考量。方案B以可再生能源发展为主,带动新型产业发展,能够创造巨大的经济收益。因此,从经济层面考虑,方案B较优;方案C的着力点在于构建绿色生态循环系统,涉及多方面的生态优化,对整体生态环境的协同优化效果显著,所以方案C的环境效益优于其他两个方案;在技术可行性方面,方案C绿色能源生态循环模式可以依托现有的技术,面临的技术困境较小,技术可行性更大;但政策层面受到的外界环境影响较大,因此很难对三个方案进行排序。综合考虑下,本文认为山西省在制定能源结构调整方案时可以利用对偶犹豫模糊几何加权 *Heronian* 平均算子,并重点关注绿色能源生态循环与煤炭清洁共生的相关方案。

参考文献

- [1] TAO W L, WENG S M, CHEN X L, et al. Artificial intelligence-driven transformations in low-carbon energy structure: Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2024(136): 107719.
- [2] 靳羽西, 吴青龙. 碳排放权交易、ESG表现与企业价值: 基于碳排放权交易试点政策的准自然实验[J]. *中北大学学报(社会科学版)*, 2025, 41(1): 127-135.
- [3] 中青在线. 大力推动我国新能源高质量发展, 为共建清洁美丽世界作出更大贡献[EB/OL]. 2024-03-01 [2025-01-14]. https://news.cyol.com/gb/articles/2024-03/01/content_gG0ZvASlne.html.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 中国共产党第二十届中央委员会第三次全体会议公报[EB/OL]. 2024-07-18 [2025-01-14]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202407/content_6963409.htm.
- [5] 高举中国特色社会主义伟大旗帜, 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. 2022-10-25 [2025-01-14]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2022-10/25/c_1129079926.htm.
- [6] 赖新峰, 王鑫, 陈志祥, 等. 跨国合同制造供应链减排技术垂直一体化决策[J]. *系统工程学报*, 2026, 41(1): 194-208.
- [7] 郭小强, 张爱琴, 刘章良, 等. 数字化转型何以促进光伏企业绿色创新绩效?: 基于全要素生产率的中介作用[J]. *中北大学学报(社会科学版)*, 2025, 41(3): 217-224.
- [8] LEI H F, XU W. How does the transformation of the energy structure impact the coordinated development of economy and environment? [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2023, 30(52): 112368-112384.
- [9] 孙嘉轶, 张颖, 滕春贤. 碳权交易下供应链环境履行为[J]. *系统工程学报*, 2025, 40(6): 895-913.
- [10] 屈有明. 国际石油价格变动对中国经济的影响[J]. *中北大学学报(社会科学版)*, 2007, 23(S1): 1-4.
- [11] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(12): 1-8.
- [12] ZHU H T, CAO S, SU Z M, et al. China's future energy vision: Multi-scenario simulation based on energy consumption structure under dual carbon targets [J]. *Energy*, 2024(301): 13751.
- [13] 王雯琦, 江登英. 基于可能度的语言直觉模糊 PROMETHEE 多属性群决策[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(8): 2581-2592.
- [14] 谢小军, 马虹, 黄鹏, 等. 基于投影测度和 TOPSIS 方法的区间直觉模糊多属性决策模型[J]. *统计与决策*, 2024, 40(20): 183-188.
- [15] 李鹤, 金秀, 侯羽婷. 基于投资者动态损失厌恶模糊多目标投资组合问题研究[J]. *运筹与管理*, 2024, 33(7): 200-207.
- [16] 苏加福, 徐保健, 刘红雨, 等. 混合犹豫模糊集下基于改进 CRITIC-ORESTE 的多准则群决策方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2025, 31(3): 1048-1058.
- [17] 彭娟娟, 谭灏, 隆清琦, 等. 基于改进 TODIM 与图片模糊偏好信息的多属性双边匹配决策方法[J]. *系统科学与数学*, 2024, 44(8): 2384-2411.
- [18] 刘烈璋, 陶媛, 乐琦. 考虑基于风险态度的满意度和公平度的犹豫模糊双边匹配行为决策方法[J]. *系统科学与数学*, 2024, 44(7): 2013-2030.

- [19] 王庆荣, 李裕杰, 朱昌锋, 等. 基于模糊需求应急选址路径问题的超启发算法研究[J]. 控制工程, 2025, 32(12): 2113-2115.
- [20] 赵程伟, 徐选华, 刘瑞环, 何继善. 模糊异构环境下考虑双重交互及不完全理性心理的多属性群决策及应用[J]. 中国管理科学, 2025, 33(6): 182-195.
- [21] LI J T, SUN H, CHENG L, et al. The path driving China's energy structure transformation from the perspective of policy tools[J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8703.
- [22] 蒋语聪, 李艳颖, 王顺平, 等. 基于减排水平指数的中国区域碳排放影响因素分析[J]. 环境科学, 2025, 46(9): 5415-5427.
- [23] 朱美峰, 赵国浩. 山西省能源依赖型经济转型发展研究[J]. 科技管理研究, 2013, 33(22): 237-241.
- [24] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203-223.
- [25] 柴麒麟, 刘伯翰, 马玉洁, 等. 能源转型与技术创新的全球盘点: 进展与评估[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(6): 747-756.
- [26] CHEN H M, XU Y M. Industry energy dependence characteristics under different energy consumption accounting scopes: A comparison between China and the U. S. [J]. Sustainability, 2024, 16(22): 10121.
- [27] 山西省人民政府. 山西省节约能源“十四五”规划[EB/OL]. 2022-12-29 [2025-01-14]. https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfwj/202212/t20221229_7699838.shtml.
- [28] 中共中央国务院. 关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见[EB/OL]. 2024-08-21 [2025-01-14]. https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6967663.htm.
- [29] 暨省委经济工作会议举行[EB/OL]. 2024-12-28 [2025-01-14]. <http://epaper.tyrbw.com/tywb/resfile/2024-12-28/02/tywb2024122802.pdf>.
- [30] 中共中央国务院. “十四五”能源领域科技创新规划[EB/OL]. 2022-04-03 [2025-04-14]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [31] 国家发展改革委 国家能源局. 《“十四五”现代能源体系规划》[EB/OL]. 2022-03-23 [2025-01-14]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [32] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. 2021-10-26 [2025-01-14] https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [33] 山西省人民政府. 山西省人民政府关于加快建立健全我省绿色低碳循环发展经济体系的实施意见[EB/OL]. 2022-06-06 [2025-01-14]. http://www.lishi.gov.cn/zxxw/sxyw/wj/202206/t20220606_1657695.shtml.
- [34] 樊燕萍, 晁坤, 牛冲槐. 优化我国能源结构的基本对策[J]. 中北大学学报(社会科学版), 2006, 22(3): 50-53.
- [35] 曲国华, 张汉鹏, 刘增良, 等. 基于直觉模糊 λ -Shapley Choquet 积分算子 TOPSIS 的多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(3): 726-742.
- [36] 曲国华, 王彬宇, 曲卫华, 等. 基于对偶犹豫模糊几何 *Heronian* 平均算子的多属性决策方法及其应用[J]. 中国管理科学, 2022, 30(11): 216-228.
- [37] 邢文婷, 刘明珠, 李利娟. 长江经济带能源绿色低碳转型与减污降碳协同效应时空演进及地区差异[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4198-4210.
- [38] 张雪薇, 杜凤莲, 申晓燕, 等. 黄河流域经济-能源-生态-科技耦合协调发展时空格局及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7): 2545-2556.
- [39] 岳文慧, 张丽君, 秦耀辰, 等. 黄河流域高碳制造业减污降碳协同效应及其影响因素[J]. 环境科学, 2025, 46(9): 5566-5576.
- [40] 金都, 刘新平. 中国能源结构转型: 碳减排效应、驱动因素及碳达峰探索[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4908-4916.
- [41] 吕桁宇, 马春爱, 汤桐, 等. 环境规制、技术创新与工业企业能源强度[J]. 统计与决策, 2023, 39(10): 59-64.
- [42] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
- [43] 林晶, 吴赐联. 基于期权博弈的可再生能源投资定价策略[J]. 系统工程学报, 2024, 39(3): 428-443.
- [44] 张友国, 蒋鸿宇. 统筹“双碳”目标下的能源转型与能源安全[J]. 世界社会科学, 2023(4): 121-146.
- [45] 方玉霞, 袁红林, 刘晨. 数字技术赋能全球产业链绿色低碳化: 理论机制与实施路径[J]. 江西财经大学学报, 2024(6): 25-35.
- [46] 山西省能源局. 山西省煤炭行业碳达峰实施方案[EB/OL]. 2023-01-20 [2025-01-14]. http://www.lvliang.gov.cn/szdt/szfxw/wj/202301/t20230120_1731186.html.
- [47] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. 2022-03-22 [2025-01-14] https://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf eqid=83e707a300018ec000000003648a7808.