

文章编号:1672-3961(2024)04-0159-10

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.180

山东省综合能源系统可持续发展能力评价

梁涛¹,刘亚祥¹,杨硕²,徐越²,王庆松^{2*}

(1.山东电力工程咨询院有限公司综合智慧能源事业部,山东 济南 250014; 2.山东大学能源与动力工程学院,山东 济南 250061)

摘要:为有效规划和管理能源资源,促进区域可持续发展,以山东省为研究对象,构建山东省综合能源系统可持续发展能力评价指标体系,利用熵权法量化可持续发展能力。研究表明:山东省综合能源系统的经济、环境和社会子系统的可持续发展能力持续升高,资源子系统的可持续发展能力有降低发展趋势,煤炭消耗量、用电量及较高的第二产业占比等是制约山东省综合能源系统可持续发展水平提高的重要因素。山东省应提高第三产业和高新技术产业占比,积极发展新能源和可再生能源,进一步优化电力生产结构与能源消费结构,为山东省综合能源系统高质量可持续发展助力。

关键词:综合能源系统;指标体系;熵权法;可持续发展;政策建议

中图分类号:X-1

文献标志码:A

引用格式:梁涛,刘亚祥,杨硕,等.山东省综合能源系统可持续发展能力评价[J].山东大学学报(工学版),2024,54(4):159-168.

LIANG Tao, LIU Yaxiang, YANG Shuo, et al. Evaluation of sustainable development capacity of comprehensive energy system in Shandong Province[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(4):159-168.

Evaluation of sustainable development capacity of comprehensive energy system in Shandong Province

LIANG Tao¹, LIU Yaxiang¹, YANG Shuo², XU Yue², WANG Qingsong^{2*}

(1. Integrated Smart Energy Division, Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Taking Shandong Province as the research object, this paper constructed the evaluation index system of the sustainable development ability of the comprehensive energy system in Shandong Province, and used the entropy weight method to quantify its sustainable development ability. The results showed that the sustainable development ability of the economic, environmental and social subsystems of the integrated energy system in Shandong Province continues to increase, while the sustainable development ability of the resource subsystem had a downward trend. The reason was that coal consumption, electricity consumption and the high proportion of the secondary industry were the important factors restricting the sustainable development of the comprehensive energy system in Shandong Province. Shandong Province should further accelerate the transformation of old and new kinetic energy, improve the proportion of tertiary industry and high-tech industry, actively develop new and renewable energy, further optimize the power production structure and energy consumption structure, and would provide assistance for the high-quality sustainable development of Shandong Province's comprehensive energy system.

Keywords: comprehensive energy system; index system; entropy weight law; sustainable development; policy recommendation

收稿日期:2023-08-01

基金项目:山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2023MD079)

第一作者简介:梁涛(1983—),男,山东邹平人,高级工程师,博士,主要研究方向为能源互联网、综合能源系统规划评价与运行优化。

E-mail:liangtao@sdepci.com

* 通信作者简介:王庆松(1971—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为可持续能源环境系统管理。

E-mail:wqs@sdu.edu.cn

0 引言

目前全球气候变暖正在加剧,全球平均温度比工业化之前高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,预计到2030年全球平均温升约为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。为积极应对全球气候变暖趋势,控制温室气体排放是全球面临的重要议题之一^[2]。大气中 CO_2 主要源于煤炭等化石燃料的燃烧,随着全球用电量的逐年升高,化石燃料消耗量的增加严重影响了对 CO_2 排放的控制^[3]。文献[4]主张在2030年前禁止并逐步淘汰煤炭开采和燃烧,将其作为2050年或更早之前将全球温室气体排放降至零的重要贡献。近年来,随着德国、英国、法国等20多个国家先后提出和通过了碳减排框架法案,并提出到2050年实现碳中和^[5],中国作为世界上最大的能源消费国也担负着减缓全球气候变暖趋势的重要责任。目前中国的能源市场依旧以煤炭为主,约占能源消费总量的57%^[6]。这种依靠大量资源消耗和高排放维持经济快速增长的发展模式难以为继,必须转变经济发展方式,实现可持续发展。山东省是中国的能源消费大省,据《2020山东省煤炭行业发展年度报告》,2020年山东省煤炭消费约占一次能源消费总量的70%,全国十大发电省份中山东以15 560万kWh位列第一^[7]。根据2023年公布的统计年鉴数据,山东省工业用煤占煤炭消耗总量的95%以上,第二产业的生产总值仅占39.9%,且呈逐年下降趋势;山东省电力消费总量逐年上升,2021年电力消费总量高达7 379.7亿kWh^[8]。由此可见,山东省煤炭消耗量较大且能源消费结构较不合理。因此,以山东省为例,研究区域综合能源系统可持续发展能力具有很好的典型性和代表性。

目前,许多学者对可持续发展理论,尤其是包括经济、社会、资源及环境系统等指标体系的构建方法开展了大量研究,常用方法主要有系统分解法、目标分解法和综合归纳法^[9-10]。联合国统计司根据《Agenda 21》确定了涵盖气候、经济、固体污染物和机构4个维度的指标框架^[11]。联合国环境规划署、美国非政府组织和经济联盟建立了一个通用的可持续发展指标体系框架,这个框架由社会、经济、环境和制度四大系统组成^[12]。一些学者针对不同研究对象开展了指标体系构建方面的研究:文献[13]结合平衡计分卡和压力-状态-响应模型,建立了城市化发展战略对大气环境影响的评价指标体系,并以山东省为例进行了验证;文献[14]针对中国快速城市化地区的生态与经济可持续性问题,构

建了社会-经济-环境系统的多指标模型;文献[15]构建了山东省秸秆资源化利用的指标评价体系,研究了政府财政对秸秆资源化利用水平的影响。以上关于在指标体系构建方面的文献研究成果,为本研究针对山东省综合能源系统可持续发展的指标评价体系构建奠定了很好的基础。

随着指标体系研究的不断发展,针对可持续指标评价的方法也不断涌现,其中列举法最为常用。这类方法通过对指标标准化后进行赋权,最后对指标集成处理,量化指标的可持续性指数^[16]。由于指标体系中各项指标的单位不同,需要对指标进行标准化处理,同时各个指标对于可持续发展水平的影响程度不同,需要对标准化后的指标进行赋权。目前针对指标赋权的方法可分为2类:主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是根据决策者主观上对各属性的重视程度确定指标权重的方法,常采用的方法有层次分析法^[17]、德尔菲方法^[18]等;客观赋权法是根据统计数据计算指标权重,常用的方法有因子分析法^[19]、回归分析法^[20]、熵权法^[21]等。文献[21]采用熵权法确定了指标权重,并建立了3E系统评价协调度模型,研究了山东省可持续发展水平;文献[22]构建了尼洋河流域经济协调发展的指标体系,通过因子分析法确定了影响尼洋河流域经济协调发展的因素。尽管目前的研究针对指标的标准化、赋权等没有统一标准,与其他评估方法相比,熵权法具有不需要对指标的重要性进行主观赋值,能够保证评价结果的完整性,具有较好的可操作性、计算简单、易于实现等特点,因此本研究选用熵权法。

基于以上分析,针对山东省综合能源系统的可持续性评价,应在构建科学合理评价指标体系的基础上,采用客观的量化评价方法,深入分析制约可持续发展的关键因素,并通过追踪溯源的方式寻求可持续发展对策,相关研究结果可为山东省进一步提高综合能源系统可持续发展水平提供实践依据。

1 方法学

1.1 指标体系构建

文献分析表明,国内外研究机构和学者们认为影响区域可持续发展的因素基本包括社会因素、经济因素和环境因素^[23]。基于山东省能源消费总量和温室气体排放量长期处于全国前列的发展现状,为突出资源保障的重要作用,本研究以社会子系统、经济子系统、资源子系统、环境子系统为一级指标要素进行了综合能源系统可持续发展能力指标

体系构建。经济子系统主要反映山东省经济发展速度与发展质量,包含人均 GDP、全社会固定资产投资、财政收入、重工业总产值、GDP 增长率、第二产业占 GDP 比例等 9 个二级指标;资源子系统主要反映新能源发展及能源消费结构变化等相关信息,包含能源消费总量、电力消费总量、原煤消耗总量、火力发电占比、第二产业煤炭消耗占比、能源消费弹性系数、新能源发电量占比等 12 个二级指标;环境子系统主要反映山东省环境治理水平、污染物排放水平、温室气体排放水平及环保投资等方面内容,包含烟尘达标排放率、财政用于环保支出占财政总支出比率、一般工业固废综合利用量、废水排放量、SO₂ 排放量、碳排放总量等 10 个二级指标;社会子系统主要反映人口质量、生存条件、居民生活质量等,包含城镇人口占总人口比例、恩格尔系数、供热面积、城镇居民人均可支配收入、万人拥有病床数、人均公园绿地面积等 11 个二级指标。指标设置具体情况见表 1、2。以上指标数据均来自 2022 年山东省统计年鉴^[8]。

表 1 2009—2021 年山东省综合能源系统可持续发展能力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of sustainable development capacity of comprehensive energy system in Shandong Province from 2009 to 2021

一级指标	二级指标名称	指标来源
经济子系统	E ₁ 人均 GDP/元	文献[8,13]
	E ₂ 全社会固定资产投资/亿元	文献[13,16]
	E ₃ 财政收入/亿元	文献[8,16]
	E ₄ 重工业总产值/亿元	文献[8,25]
	E ₅ GDP 增长率/%	文献[26]
	E ₆ 第一产业占 GDP 比例/%	文献[26-27]
	E ₇ 第二产业占 GDP 比例/%	文献[26-27]
	E ₈ 第三产业占 GDP 比例/%	文献[26-27]
	E ₉ 高新技术产业总产值占 GDP 比例/%	文献[25,28]
资源子系统	R ₁ 能源消费总量/(万 t 标煤)	文献[8,26]
	R ₂ 电力消费总量/(亿 kWh)	文献[8,26]
	R ₃ 发电量/(亿 kWh)	文献[8,26]
	R ₄ 原煤消耗总量/万 t	文献[8,26]
	R ₅ 火力发电占比/%	文献[8,26]
	R ₆ 第一产业煤炭消费占比/%	文献[26-27]
	R ₇ 第二产业煤炭消费占比/%	文献[26-27]
	R ₈ 第三产业煤炭消费占比/%	文献[26-27]
	R ₉ 万元 GDP 能耗/(t 标准煤/万元)	文献[8]
	R ₁₀ 万元 GDP 电耗增长率/%	文献[8]
	R ₁₁ 能源消费弹性系数/无量纲	文献[8,28]
	R ₁₂ 新能源发电量占比/%	文献[28-29]

表 1(续)		
一级指标	二级指标名称	指标来源
环境子系统	H ₁ 烟尘达标排放率/%	文献[25-26]
	H ₂ 财政用于环保支出占财政总支出比率/%	文献[25-26]
	H ₃ 一般工业固废产生量/万 t	文献[25-26]
	H ₄ 一般工业固废综合利用量/万 t	文献[25-26]
	H ₅ 废水排放量/万 t	文献[8]
	H ₆ SO ₂ 排放量/万 t	文献[8]
	H ₇ 烟尘排放量/万 t	文献[8]
	H ₈ COD 排放量/万 t	文献[8]
	H ₉ NH ₃ -N 排放量/t	文献[8]
	H ₁₀ 碳排放总量/百万 t	文献[25,27]
社会子系统	S ₁ 城镇人口占总人口比例/%	文献[8,28]
	S ₂ 恩格尔系数	文献[8,28]
	S ₃ 供热面积/万 m ²	文献[8]
	S ₄ 城镇居民人均可支配收入/元	文献[25,27]
	S ₅ 人均生活用电量/(kWh)	文献[25]
	S ₆ 人口增长率/%	文献[8,28]
	S ₇ 失业保险参保率/%	文献[26]
	S ₈ 养老保险参保率/%	文献[26]
	S ₉ 医疗保险参保率/%	文献[26]
	S ₁₀ 万人拥有病床数/张	文献[26]
	S ₁₁ 人均公园绿地面积/m ²	文献[26]

1.2 熵权法模型构建

1.2.1 数据标准化

由于原始数据的量级、属性等不同,无法直接在评价中使用,故对原始数据矩阵 X 的正、负属性指标分别进行标准化处理,得标准化数据矩阵 Z , 标准化处理公式为:

$$Z_{ij} = \frac{x_{i,j} - x_{i\min,j}}{x_{i\max,j} - x_{i\min,j}}, \quad (1)$$

$$Z_{ij} = \frac{x_{i\max,j} - x_{i,j}}{x_{i\max,j} - x_{i\min,j}}, \quad (2)$$

式中, Z_{ij} 、 $x_{i,j}$ 为矩阵中第 i 行第 j 列的元素, $x_{i\max}$ 、 $x_{i\min}$ 分别为矩阵 X 中第 i 行元素的最大、最小值。

1.2.2 熵权法

熵权法赋权主要依据指标数据的差异程度确定指标的权重^[24], 计算步骤如下。

(1) 矩阵 Z 的第 j 项指标的信息熵

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m Z_{ij} \ln Z_{ij}, \quad (3)$$

式中: $k = (\ln m)^{-1}$, m 为对象数; 规定 $Z_{ij} = 0$ 时, $E_j = 0$ 。

(2) 第 j 项指标的差异性系数

$$h_j = 1 - kE_j. \quad (4)$$

表2 2009—2021年山东省综合能源系统可持续发展能力评价指标数据
Table 2 Data of indicators for evaluation of sustainable development capacity of comprehensive energy system in Shandong Province from 2009 to 2021

年份	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9			
2009	35 894.00	1 903.10	2 198.63	47 013.62	9.80	10.40	53.90	35.70	13.44			
2010	41 106.00	2 327.67	2 749.38	56 689.62	10.40	10.10	52.20	37.70	13.21			
2011	47 335.00	26 769.73	3 455.93	68 485.83	10.70	9.60	51.10	39.30	13.67			
2012	51 768.00	3 125.60	4 059.43	78 024.46	9.70	9.40	49.50	41.10	15.76			
2013	56 323.00	3 678.91	4 559.95	89 142.21	9.40	9.40	47.80	42.80	16.36			
2014	51 933.00	41 599.10	5 026.83	97 577.90	8.50	9.20	46.40	44.40	21.20			
2015	56 205.00	47 381.50	5 529.33	99 188.30	7.80	8.90	44.90	46.20	26.60			
2016	59 239.00	52 364.50	5 860.18	102 477.12	7.40	8.20	43.50	48.30	31.40			
2017	62 993.00	54 236.00	6 098.63	92 221.63	7.30	7.70	42.70	49.60	35.20			
2018	66 284.00	57 490.16	6 485.40	112 960.50	6.30	7.40	41.30	51.30	36.90			
2019	69 901.00	60 882.08	6 526.71	112 734.94	5.30	7.30	39.90	52.80	40.14			
2020	71 825.00	64 595.88	6 559.93	121 486.88	3.50	7.40	39.10	53.50	45.10			
2021	81 727.00	68 342.44	7 284.46	80 079.69	8.30	7.30	39.90	52.80	46.80			
年份	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
2009	23 441.00	2 941.12	2 941.07	34 795.20	99.93	0.25	94.88	4.87	1.07	-3.70	0.48	4.00
2010	24 977.41	3 298.46	3 043.00	37 408.50	98.71	0.23	94.66	5.11	1.02	-0.30	0.60	5.38
2011	31 211.80	3 635.26	3 169.00	38 920.50	98.71	0.17	95.86	3.98	0.86	-0.58	0.62	5.26
2012	32 686.70	3 794.55	3 212.00	37 077.30	97.81	0.21	96.05	3.74	0.82	-4.89	0.48	6.17
2013	34 234.90	4 083.12	3 549.00	37 683.40	97.61	0.24	95.60	4.17	0.72	-1.78	0.50	6.84
2014	35 362.60	4 223.50	4 655.00	39 561.70	97.28	0.23	95.94	3.84	0.70	-4.84	0.38	7.92
2015	39 331.60	5 182.20	4 685.00	40 926.90	97.03	0.21	96.32	3.47	0.71	-6.49	0.50	8.36
2016	40 137.90	5 357.10	5 329.00	40 939.20	96.51	0.22	96.31	3.47	0.68	-1.93	0.28	9.55
2017	40 097.70	5 430.20	5 775.00	38 164.70	96.05	0.14	97.10	2.76	0.64	-6.14	-0.01	10.11
2018	40 580.50	5 916.80	5 920.00	42 319.50	93.32	0.12	97.48	2.40	0.61	2.50	0.19	10.92
2019	41 390.00	6 831.30	5 897.00	43 133.00	89.75	0.11	97.76	2.13	0.59	-3.07	0.37	11.17
2020	42 132.90	6 965.10	5 806.00	38 790.30	88.55	0.11	97.60	2.30	0.58	-1.67	0.30	12.21
2021	44 611.10	7 397.70	6 210.00	39 429.70	85.04	0.06	97.82	2.12	0.56	-1.77	0.71	13.14
年份	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}		
2009	98.00	2.86	14 138.00	13 826.00	386 731.00	159.00	42.00	647.00	67 305.00	717.86		
2010	98.20	3.15	16 038.00	15 297.00	43 6371.00	154.00	39.00	620.50	66 484.00	795.49		
2011	97.90	3.68	19 533.00	18 298.00	443 331.00	183.00	78.00	198.25	172 945.00	830.77		
2012	98.40	3.87	18 343.00	17 073.00	479 100.00	175.00	70.00	192.12	168 583.00	872.91		
2013	98.10	4.63	18 172.00	17 134.00	494 570.00	164.00	70.00	184.57	161 517.00	794.21		
2014	98.40	3.02	19 199.00	18 380.00	514 423.00	159.00	121.00	178.04	155 030.00	819.06		
2015	99.00	2.89	19 797.00	18 308.00	550 230.00	153.00	108.00	175.76	152 208.00	854.46		
2016	98.90	2.73	26 350.00	22 314.00	361 471.00	73.00	62.00	33.80	28 813.00	863.43		
2017	99.10	2.56	28 484.00	23 152.00	357 803.00	42.00	48.00	31.69	25 555.00	835.82		
2018	98.80	2.84	29 995.00	23 831.00	371 738.00	34.00	39.00	29.20	24 847.00	901.65		
2019	99.20	2.85	32 129.00	25 230.00	374 309.00	28.00	37.00	27.57	23 356.00	937.12		
2020	99.10	2.60	24 989.00	19 612.00	376 378.00	19.00	24.00	153.48	53 121.00	936.21		
2021	99.00	2.28	25 233.00	20 028.00	371 082.00	17.00	22.00	156.28	46 436.00	1 052.31		

表2(续)

年份	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁
2019	37.47	32.90	46 770.60	17 006.00	340.95	5.62	14.29	26.40	40.36	34.70	15.10
2010	40.08	32.10	54 709.80	18 970.00	386.16	5.39	14.55	27.69	43.28	38.20	15.80
2011	40.93	33.20	61 120.80	21 677.00	403.80	5.40	14.88	29.41	45.45	41.60	16.00
2012	41.51	34.30	67 422.50	24 496.00	427.70	4.95	15.41	31.48	47.32	47.30	16.40
2013	53.75	29.90	75 721.20	26 882.00	470.60	5.01	16.56	34.34	55.44	49.00	16.80
2014	55.01	29.50	83 003.30	29 221.00	481.70	7.39	11.78	48.37	40.69	50.00	17.10
2015	57.01	28.60	90 150.10	31 545.00	512.60	5.88	12.16	50.05	93.29	52.60	17.40
2016	59.02	28.20	107 112.50	34 012.00	560.10	10.84	12.23	51.53	91.89	54.40	17.90
2017	60.58	27.30	126 587.30	36 789.00	604.40	10.14	12.68	53.22	92.96	58.30	17.80
2018	61.18	26.80	133 997.00	39 549.00	520.90	6.08	13.05	54.71	93.44	60.40	17.60
2019	61.51	26.50	148 256.00	42 329.00	490.40	4.27	13.52	56.79	94.75	62.30	17.60
2020	63.05	27.50	159 346.30	43 726.00	532.30	1.31	14.37	59.73	95.08	63.70	17.70
2021	63.94	27.20	172 858.90	47 066.00	509.80	0.02	15.12	63.27	95.42	66.30	17.90

(3)第j项指标的权重

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (5)$$

某项指标的信息效用值取决于该指标的信息熵 E_j 与 1 之间的差值,用 σ_j 表示,即

$$\sigma_j = 1 - E_j \quad (6)$$

可加性是熵的基本性质之一。如果可持续发展的评价系统是多层的,可以利用下层结构的指标信息效用值,按比例确定对应于上层结构的熵权 w_j。其方法是利用各个指标的效用值 σ_j,对下层结构的每类指标的效用值求和,得到各类指标的效用值和,记作 λ_k (k=1,2,⋯,k)。然后求全部指标效用值的总和

$$\lambda = \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad (7)$$

与此相对应的熵权 w_k = λ_k/λ,指标对应于上层结构的熵权 w_j = σ_j/λ。

用第j项指标权重 w_j 与标准化矩阵中第i个样本第j项评价指标接近度 d_{ij} 的乘积作为 x_{ij} 的评价值 f_{ij},计算公式为:

$$f_{ij} = w_j d_{ij} \quad (8)$$

第i个样本的评价值

$$f_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (9)$$

由公式(1)~(9),可计算出各子系统的可持续发展能力。将各子系统整合,重复上面的计算过程,可得到整个系统的权重 W_j 和可持续发展能力指标 F_i。

2 结果与讨论

2.1 各子系统可持续发展能力评价

利用公式(1)~(9)计算各子系统的信息熵、熵权及可持续发展能力水平,计算结果见表3。

表3 基于熵权法的2009—2021年山东省区域综合能源各子系统可持续发展能力评价
Table 3 Evaluation of sustainable development capacity of comprehensive energy subsystems in Shandong Province from 2009 to 2021 based on entropy weight coefficient method

一级指标	二级指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	权重/%
经济子系统	E ₁	0	0.93	2.03	2.82	3.63	2.85	3.61	4.15	4.81	5.40	6.04	6.38	8.14	8.14
	E ₂	0	0.10	5.79	0.28	0.41	9.25	10.60	11.76	12.19	12.95	13.74	14.61	15.48	15.48
	E ₃	0	0.86	1.96	2.91	3.69	4.42	5.20	5.72	6.09	6.69	6.76	6.81	7.94	7.94
	E ₄	0	0.96	2.12	3.06	4.16	5.00	5.16	5.48	4.47	6.52	6.50	7.36	3.27	7.36
	E ₅	5.12	5.61	5.85	5.04	4.79	4.06	3.49	3.17	3.09	2.28	1.46	0	3.90	5.85
	E ₆	18.10	16.35	13.43	12.26	12.26	11.09	9.34	5.25	2.34	0.58	0	0.58	0	18.10
	E ₇	0	1.04	1.72	2.70	3.74	4.60	5.52	6.37	6.86	7.72	8.58	9.07	8.58	9.07
	E ₈	0	1.03	1.85	2.78	3.65	4.48	5.40	6.48	7.15	8.03	8.80	9.16	8.80	9.16
	E ₉	0.13	0	0.26	1.43	1.77	4.50	7.53	10.23	12.37	13.33	15.15	17.94	18.90	18.90
可持续发展能力		23.25	26.87	35.02	33.28	38.11	50.24	55.85	58.62	59.38	63.50	67.03	71.91	75.01	

表3(续)

一级指标	二级指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	权重/%
资源子系统	R_1	9.45	8.76	5.98	5.32	4.63	4.13	2.36	2.00	2.01	1.80	1.44	1.11	0	9.45
	R_2	7.26	6.68	6.13	5.87	5.40	5.17	3.61	3.32	3.21	2.41	0.92	0.70	0	7.26
	R_3	11.30	10.95	10.51	10.36	9.20	5.38	5.27	3.05	1.50	1.00	1.08	1.40	0	11.30
	R_4	6.16	4.23	3.11	4.47	4.03	2.64	1.63	1.62	3.67	0.60	0	3.21	2.74	6.16
	R_5	0	1.03	1.02	1.78	1.95	2.22	2.44	2.87	3.26	5.55	8.55	9.56	12.52	12.52
	R_6	0	1.06	4.97	2.24	0.81	1.49	2.24	2.11	6.59	8.08	8.89	8.95	11.56	11.56
	R_7	9.88	10.62	6.60	5.94	7.47	6.32	5.04	5.06	2.42	1.14	0.19	0.74	0	10.62
	R_8	0.53	0	2.53	3.07	2.10	2.84	3.67	3.66	5.25	6.04	6.65	6.28	6.68	6.68
	R_9	0	0.52	2.17	2.58	3.58	3.86	3.70	3.99	4.48	4.76	4.95	5.10	5.23	5.23
	R_{10}	3.22	1.45	1.60	3.84	2.22	3.81	4.67	2.30	4.49	0	2.89	2.17	2.22	4.67
	R_{11}	2.30	1.10	0.90	2.30	2.10	3.30	2.10	4.30	7.20	5.20	3.40	4.10	0	7.20
	R_{12}	0	1.11	1.01	1.75	2.29	3.16	3.51	4.47	4.92	5.57	5.77	6.61	7.36	7.36
可持续发展能力		50.10	47.50	46.54	49.52	45.77	44.32	40.23	38.76	49.00	42.16	44.74	49.93	48.30	
环境系统	H_1	0.84	2.51	0	4.18	1.67	4.18	9.21	8.37	10.04	7.53	10.88	10.04	9.21	10.88
	H_2	3.05	4.58	7.36	8.36	12.36	3.89	3.21	2.37	1.47	2.95	3.00	1.68	0	12.36
	H_3	8.97	8.02	6.28	6.87	6.96	6.45	6.15	2.88	1.82	1.06	0	3.56	3.44	8.97
	H_4	8.79	7.66	5.34	6.29	6.24	5.28	5.34	2.25	1.60	1.08	0	4.33	4.01	8.79
	H_5	6.43	4.48	4.21	2.80	2.19	1.41	0	7.43	7.57	7.02	6.92	6.84	7.05	7.57
	H_6	2.53	3.06	0	0.84	2.01	2.53	3.17	11.61	14.88	15.73	16.36	17.31	17.52	17.52
	H_7	5.43	5.63	2.95	3.50	3.50	0	0.89	4.05	5.01	5.63	5.77	6.66	6.80	6.80
	H_8	0	0.30	5.01	5.08	5.17	5.24	5.26	6.85	6.87	6.90	6.92	5.51	5.48	6.92
	H_9	10.45	10.53	0	0.43	1.13	1.77	2.05	14.26	14.58	14.65	14.80	11.86	12.52	14.80
	H_{10}	5.39	4.14	3.57	2.89	4.16	3.76	3.19	3.04	3.49	2.43	1.86	1.87	0	5.39
可持续发展能力		51.88	50.91	34.73	41.26	45.39	34.52	38.46	63.11	67.35	64.98	66.50	69.67	66.02	
社会子系统	S_1	0	0.88	1.17	1.37	5.52	5.94	6.62	7.30	7.83	8.03	8.15	8.67	8.97	8.97
	S_2	1.35	2.13	1.06	0	4.25	4.64	5.51	5.90	6.77	7.25	7.54	6.57	6.86	7.54
	S_3	0	0.72	1.31	1.88	2.64	3.30	3.96	5.50	7.28	7.96	9.26	10.27	11.50	11.50
	S_4	0	0.61	1.44	2.31	3.05	3.77	4.49	5.25	6.11	6.96	7.82	8.25	9.28	9.28
	S_5	7.11	5.89	5.41	4.77	3.61	3.31	2.48	1.20	0	2.25	3.08	1.95	2.55	7.11
	S_6	3.22	3.09	3.10	2.84	2.87	4.24	3.37	6.23	5.83	3.49	2.45	0.74	0	6.23
	S_7	5.18	5.71	6.39	7.49	9.86	0	0.78	0.93	1.86	2.62	3.59	5.34	6.89	9.86
	S_8	0	0.40	0.93	1.57	2.46	6.79	7.31	7.77	8.29	8.75	9.40	10.31	11.40	11.40
	S_9	0	0.81	1.41	1.92	4.16	0.09	14.61	14.23	14.52	14.65	15.02	15.11	15.20	15.20
	S_{10}	0	0.81	1.59	2.91	3.30	3.53	4.14	4.55	5.45	5.94	6.38	6.70	7.30	7.30
	S_{11}	0	1.40	1.80	2.60	3.40	4.00	4.60	5.60	5.40	5.00	5.00	5.20	5.60	5.60
可持续发展能力		16.87	22.45	25.62	29.66	45.13	39.63	57.87	64.45	69.33	72.91	77.66	79.10	85.56	

2.1.1 经济子系统可持续发展能力

分析表3可知,经济子系统可持续发展能力整体发展趋势持续上升,由2009年的23.25上升至2021年的75.01,年均增长率为6.25%。究其原因,主要是山东省政府致力于经济高速发展的同时,加大了资源与环境的保护力度,将绿色、低碳、循环发展一直作为社会发展的主旋律,经济发展质量越来越高。随着经济不断发展,山东省人均GDP逐年增

加,年增长率约17.51%;全社会固定资产投资自2011年后增长迅速;政府财政收入保持稳定增长,年增长率约25.49%。同时,山东省重工业总产值自2020年后下降明显,高新技术产业总产值占GDP比例提升,年增长率约为26.79%。产业结构不断调整,第二产业占GDP比例逐年下降,年下降率约12.23%;第三产业占GDP比例逐年上升,年增长率约为11.38%;第一产业占GDP比例波动较

小。随着新旧动能转换战略的实施,高新技术产业发展迅速,高新技术产业总产值占GDP的比例不断升高表明,其已成为经济系统可持续发展的主要驱动力,权重为18.9%。以上分析结果表明,以煤炭等传统能源消耗为主的能源驱动发展模式已经到了瓶颈期,山东省需要进一步通过技术创新和产业升级提高竞争力。文献[25]的研究亦表明,目前山东省经济发展的首要问题是产业结构调整,高新技术产业将赋予山东高质量发展新动能。

2.1.2 资源子系统可持续发展能力

分析表3可知,资源子系统可持续发展能力由2009年的51.88下降至2021年的48.30,年均下降率为0.60%,尽管有所波动但整体呈下降趋势。究其原因,自山东省政府2007年推行《节能减排综合性工作实施方案》至今,该项工作已持续开展了16a,使山东省经济持续走低碳高质量发展之路,能源消费结构不断得到优化。尽管山东省能源消费总量年增长率约为14.64%,但山东省电力消费总量仍保持较高增速,年增长率约19.35%。其中,新能源发电占比逐年升高,火力发电占比逐年下降,由2009年的99.93%下降到2021年的85.04%。同时,由于山东省工业门类比较齐全,原煤消耗量虽然近年有所下降,但能源结构仍以煤炭为主,第二产业的煤炭消费占比依然维持在较高水平,不利于可持续发展。新能源开发和利用还比较滞后,影响了可持续发展能力。在资源子系统中,阻碍可持续发展的主要影响因素从大到小分别为火力发电占比、第一产业煤炭消费占比、发电量和第二产业煤炭消费占比,其权重分别为12.52%、11.56%、11.30%和10.62%。文献[26]研究表明电力消耗和煤炭消耗已经成为资源可持续发展的重要制约因素,和本研究结论基本保持一致。尽管新能源发电量占比年增长率约为25.27%,但总体上山东省新能源发电量占比仍处于较低水平,能源结构还需不断优化。目前以煤炭为主的火力发电已经不能满足社会高质量发展的需求,需要尽快发展核能、风能、太阳能等新能源和可再生能源。

2.1.3 环境子系统可持续发展能力

分析表3可知,环境子系统可持续发展能力尽管有所波动,但整体发展趋势不断升高,由2009年的51.88上升至2021年的66.02,年均增长率为2.03%。究其原因,这与山东省政府加大对环境的保护力度密切相关。2009—2021年山东省为打好

蓝天、碧水、净土保卫战,陆续出台了一系列诸如《节能减排综合性工作方案》《大气污染防治行动计划》《水污染防治行动计划》《大气环境质量巩固提升行动方案》《水环境质量巩固提升行动方案》《土壤环境质量巩固提升行动方案》等政策,经过多年治理,一般工业固废、废水、SO₂、烟尘、NH₃-N及COD的排放量得到了较好控制,如SO₂年排放量由2009年的159万t下降到2021年的17万t,年均下降率约为17.00%;COD年排放量由2009年的647万t下降到2021年的156.28万t,年均下降率约为11.17%。此外,SO₂、NH₃-N排放量占有较高权重,分别为17.52%和14.80%,表明由传统化石能源大量使用带来的大气及水体污染等明显制约了环境子系统的可持续发展。烟尘达标排放率和财政用于环保支出占财政总支出比率所占权重分别为10.88%和10.36%,表明山东省近几年出台的若干政策的强制作用与管控措施对环境子系统可持续发展有重要影响。同时,还发现碳排放总量的年增长率约为11.28%,温室气体减排已成为山东省急需解决的重要问题。文献[27]基于碳减排目标的能源消费结构优化研究得出相关结论,山东省综合能源系统为保证高质量发展,应改变以末端治理为主的环境保护策略,政府应加大环保相关的财政投入,从源头压减煤炭消费量,促进能源消费结构改革。

2.1.4 社会子系统可持续发展能力

分析表3可知,社会子系统的可持续发展能力持续升高,由2009年的16.87上升至2021年的85.56,年均增长率为14.49%。究其原因,随着城镇化水平的快速发展,山东省在人口质量、生存条件、生活质量及科技水平等方面都取得了迅速发展。人均可支配收入由2009年的17006元,上升到2021年的47066元,年均增长率为8.85%;医疗保险参保率由2009年的40.36%,上升到2021年的95.42%,年均增长率为7.43%;人均公园绿地面积由2009年的15.1m²,上升到2021年的17.9m²,年均增长率为1.43%。此外,失业保险、养老保险、医疗保险参保率在社会子系统可持续发展能力评价中均占有较高权重,分别为9.86%、11.40%和15.20%,表明要提高山东省综合能源系统的可持续发展水平,政府仍需要在推动高质量发展中持续关注人民幸福生活指数,继续按照全覆盖、多层次、可持续的原则保障民生。同时,供热面积在社会子系统可持续发展能力评价中的比例为11.50%。参考文献[28]对山东省清洁供暖政策有效性评估的相

关研究认为,山东省作为中国供热面积最大的省份,应提高集中供热比例,扩大集中供热范围,加强集中供热相关基础设施建设,发展热电联产项目。此外,在集中供暖未覆盖的地方,应推行气代煤、电代煤、热代煤等清洁采暖方式。

2.2 山东省综合能源系统可持续发展能力评价

按照 1.2.2 节给出的方法模型步骤,计算山东省综合能源系统的可持续发展能力,计算结果见表 4。由表 4 可知,山东省综合能源系统可持续发展能力由 2009 年的 35.92 上升至 2021 年的 67.79, 年增长率约为 14.52%;将表 4 中各二级指标权重相加可知,影响山东省综合能源系统可持续水平的主要影响因素依次是资源子系统、社会子系统、经济子系

统和环境子系统,其各自权重依次为 29.77%、25.62%、22.63%、21.98%,影响山东省综合能源系统可持续发展水平的主要因素为资源和社会因素;促进可持续发展的主要驱动因子是高新技术产业总产值占 GDP 比例,其权重为 4.28%,其他影响因素依次为第一产业占 GDP 比例(权重为 4.10%)、医疗保险参保率(权重为 3.89%)、SO₂ 排放量(权重为 3.85%)、火力发电占比(权重为 3.73%)、全社会固定资产投资(权重为 3.50%)、第一产业煤炭消费占比(权重为 3.44%)、发电量(权重为 3.36%)、NH₃-N 排放量(权重为 3.25%)、第二产业煤炭消费占比(权重为 3.16%),以上指标的累计权重为 36.57%。

表 4 基于熵权法的 2009—2021 年山东省综合能源系统可持续发展能力评价
Table 4 Evaluation of sustainable development capacity of comprehensive energy system in Shandong Province from 2009 to 2021 based on entropy weight law

一级指标	二级指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	权重/%
经济子系统	E_1	0	0.02	1.31	0.06	0.09	2.09	2.40	2.66	2.76	2.93	3.11	3.30	3.50	1.84
	E_2	0	0.19	0.44	0.66	0.84	1.00	1.18	1.30	1.38	1.52	1.53	1.54	1.80	3.50
	E_3	0	0.22	0.48	0.70	0.94	1.13	1.17	1.24	1.01	1.48	1.47	1.67	0.74	1.80
	E_4	1.16	1.27	1.32	1.14	1.08	0.92	0.79	0.72	0.70	0.51	0.33	0	0.88	1.67
	E_5	4.10	3.70	3.04	2.78	2.78	2.51	2.12	1.19	0.53	0.13	0	0.13	0	1.32
	E_6	0	0.24	0.39	0.61	0.84	1.04	1.25	1.44	1.55	1.75	1.94	2.05	1.94	4.10
	E_7	0	0.23	0.42	0.63	0.83	1.01	1.22	1.47	1.62	1.81	1.99	2.07	1.99	2.05
	E_8	0.03	0	0.06	0.32	0.40	1.02	1.71	2.32	2.80	3.02	3.43	4.06	4.28	2.07
	E_9	2.81	2.61	1.78	1.58	1.38	1.23	0.70	0.59	0.60	0.53	0.43	0.33	0	4.28
资源子系统	R_1	2.16	1.99	1.82	1.75	1.61	1.54	1.07	0.99	0.95	0.72	0.27	0.21	0	2.81
	R_2	3.36	3.26	3.13	3.08	2.74	1.60	1.57	0.91	0.45	0.30	0.32	0.42	0	2.16
	R_3	1.84	1.26	0.93	1.34	1.20	0.79	0.49	0.48	1.10	0.18	0	0.96	0.82	3.36
	R_4	0	0.31	0.30	0.53	0.58	0.66	0.73	0.86	0.97	1.65	2.55	2.85	3.73	1.84
	R_5	0	0.31	1.48	0.67	0.24	0.44	0.67	0.63	1.96	2.40	2.64	2.66	3.44	3.73
	R_6	2.94	3.16	1.96	1.77	2.22	1.88	1.50	1.51	0.72	0.34	0.06	0.22	0	3.44
	R_7	0.16	0	0.75	0.91	0.63	0.85	1.09	1.09	1.56	1.80	1.98	1.87	1.99	3.16
	R_8	0	0.15	0.65	0.77	1.07	1.15	1.10	1.19	1.34	1.42	1.48	1.52	1.56	1.99
	R_9	0.96	0.43	0.48	1.14	0.66	1.13	1.39	0.68	1.34	0	0.86	0.64	0.66	1.56
	R_{10}	0.68	0.33	0.27	0.68	0.62	0.98	0.62	1.28	2.14	1.55	1.01	1.22	0	1.39
	R_{11}	0	0.33	0.30	0.52	0.68	0.94	1.04	1.33	1.46	1.66	1.72	1.97	2.19	2.14
	R_{12}	0.18	0.55	0	0.92	0.37	0.92	2.02	1.84	2.21	1.65	2.39	2.21	2.02	2.19
环境子系统	H_1	0.67	1.01	1.62	1.84	2.72	0.86	0.71	0.52	0.32	0.65	0.66	0.37	0	2.39
	H_2	1.97	1.76	1.38	1.51	1.53	1.42	1.35	0.63	0.40	0.23	0	0.78	0.76	2.72
	H_3	1.93	1.68	1.17	1.38	1.37	1.16	1.17	0.49	0.35	0.24	0	0.95	0.88	1.97
	H_4	1.41	0.98	0.92	0.61	0.48	0.31	0	1.63	1.66	1.54	1.52	1.50	1.55	1.93
	H_5	0.56	0.67	0	0.19	0.44	0.56	0.70	2.55	3.27	3.46	3.59	3.80	3.85	1.66
	H_6	1.20	1.24	0.65	0.77	0.77	0	0.20	0.89	1.11	1.24	1.27	1.47	1.50	3.85
	H_7	0	0.07	1.10	1.12	1.13	1.15	1.16	1.50	1.51	1.52	1.52	1.21	1.20	1.50
	H_8	2.30	2.31	0	0.09	0.25	0.39	0.45	3.13	3.20	3.22	3.25	2.60	2.75	1.52
	H_9	1.19	0.91	0.79	0.64	0.92	0.83	0.70	0.67	0.77	0.54	0.41	0.41	0	3.25
	H_{10}	0	0.23	0.30	0.35	1.41	1.52	1.70	1.87	2.01	2.06	2.09	2.22	2.30	1.19

表4(续)

一级指标	二级指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	权重/%
社会子系统	S ₁	0.35	0.54	0.27	0	1.09	1.19	1.41	1.51	1.73	1.86	1.93	1.68	1.76	2.30
	S ₂	0	0.19	0.34	0.48	0.68	0.85	1.01	1.41	1.87	2.04	2.37	2.63	2.95	1.93
	S ₃	0	0.16	0.37	0.59	0.78	0.97	1.15	1.35	1.57	1.78	2.00	2.12	2.38	2.95
	S ₄	1.82	1.51	1.39	1.22	0.92	0.85	0.63	0.31	0	0.58	0.79	0.50	0.65	2.38
	S ₅	0.82	0.79	0.79	0.72	0.73	1.08	0.86	1.59	1.49	0.89	0.62	0.19	0	1.82
	S ₆	1.33	1.47	1.64	1.92	2.53	0	0.20	0.24	0.48	0.67	0.92	1.37	1.77	1.59
	S ₇	0	0.10	0.24	0.40	0.63	1.74	1.87	1.99	2.12	2.24	2.41	2.64	2.92	2.53
	S ₈	0	0.21	0.36	0.49	1.07	0.02	3.74	3.64	3.72	3.75	3.84	3.87	3.89	2.92
	S ₉	0	0.21	0.41	0.75	0.85	0.91	1.06	1.17	1.40	1.52	1.63	1.72	1.87	3.89
	S ₁₀	0	0.36	0.46	0.67	0.87	1.03	1.18	1.44	1.39	1.29	1.29	1.34	1.44	1.87
	S ₁₁	15.10	15.80	16.00	16.40	16.80	17.10	17.40	17.90	17.80	17.60	17.60	17.70	17.90	1.44
可持续发展能力		35.92	37.16	35.97	38.95	43.80	42.30	47.89	55.18	60.58	59.88	63.00	66.72	67.79	

基于以上分析,山东省首先应持续加快新旧动能转换战略的实施,不断提高高新技术产业的占比,加快产业结构的优化调整。火力发电依然是制约山东省综合能源系统可持续发展的重要因素,由此引起的煤烟型污染依然不能掉以轻心,如SO₂排放量也是重要的影响因素之一。同时,为了实现“双碳”目标,压减煤炭消费,尤其是减少第二产业煤炭消费占比,不断提高新能源发电量占比,降低火力发电量占比,是山东省在“十四五”期间重点做的一项工作。依照国家新能源和可再生能源发展纲要,到2030年利用风能、水电、太阳能和核能发电量将超过1亿kWh^[29]。山东省作为中国的能源消费大省,应该积极发展新能源和可再生能源,提高清洁能源消费占比,减少煤炭消费,进一步优化能源消费结构,减少污染物排放。为此,山东省政府将上述相关内容列入了《山东省能源绿色低碳高质量发展三年行动计划(2023—2025年)》和《山东省新一轮“四减四增”三年行动方案(2021—2023年)》。

同时,在保持经济高质量发展的同时,除降低能源消费强度和不断加大全社会固定资产投资外,进一步提高居民生活质量水平也是山东省政府必须做好的一项重要工作。

3 结论

本研究构建了含经济-资源-环境-社会4个维度的指标体系对山东省综合能源系统可持续发展能力进行了评价,研究发现山东省综合能源系统可持续发展水平虽然出现过短暂的下降,但整体趋势向好发展。传统化石能源消费导致的污染物排放、

资源消耗等对山东省综合可持续发展水平具有显著影响。通过调整产业结构、优化能源消费结构、大力发展高新技术产业等有利于山东省综合能源系统的可持续发展。基于此,建议山东省政府应持续加快新旧动能转换发展速度,进一步提高高新技术、高附加值产业发展占比,进一步限制高污染、高耗能、低效益产业的扩张;积极发展新能源和可再生能源,提高清洁能源、新能源消费占比,不断优化能源消费结构。生态保护和环境治理是一项系统工程,除做好各类污染物的末端治理外,应建立污染源头预防和过程控制的长效机制。此外,提高人民生活水平,不断满足人民日益增长的生活需求,是山东省政府必须常抓不懈的一项重要工作。

参考文献:

[1] BONGAARTS J. Intergovernmental panel on climate change special report on global warming of 1.5 °C Switzerland: IPCC, 2018 [J]. Population and Development Review, 2019, 45(1): 251-252.

[2] XU X X, ZHAO X Q, SUN P. Greenhouse effect and global climate warming [J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2001, 4: 43-47.

[3] LIU L C, CHENG L, ZHAO L T, et al. Investigating the significant change of coal consumption in China in 2002-2017[J]. Energy, 2020, 207: 118307.

[4] ANTHONY B, STEFANIE F. A coal elimination treaty 2030: fast tracking climate change mitigation, global health and security [J]. Earth System Governance, 2020: 10046.

[5] MA L, LIU L T. Prediction of peak energy consumption in China based on comparison with developed countries [J]. Geographic Science, 2016, 7: 980-988.

[6] National Bureau of Statistics China Statistical Yearbook

- [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2019.
- [7] ZHAO J B, SHI D, DENG Z. Research on the connotation of high quality development [J]. *Economy and Management*, 2019, 11: 15-31.
- [8] National Bureau of Statistics China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022.
- [9] JOANNE Disano. Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies[R]. New York, USA: Division for Sustainable Development, 2007.
- [10] ANG B W, ZHANG F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies [J]. *Energy*, 2000, 25: 1149-1176.
- [11] LIU P Z. Sustainable development theory and China's agenda for the 21st century[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2001.
- [12] AZARNIVAND A, CHITSAZ N. Adaptive policy responses to water shortage mitigation in the arid regions—a systematic approach based on eDPSIR, DEMATEL, and MCDA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(2): 23-27.
- [13] WANG Q S, YUAN X L, ZUO J, et al. Key evaluation framework for the impacts of urbanization on air environment—a case study [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 266-272.
- [14] ZHAN S. Dynamic modelling for ecological and economic sustainability in a rapid urbanizing region [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 242-251.
- [15] YANG S, XU Y, WANG Q S, et al. Research on the path to improve the level of straw resource utilization; taking Shandong Province as an example [J]. *Environment Development and Sustainability*, 2023, 11: 12167-12187.
- [16] HUANG J L. An overview and trend of sustainability assessment methodologies [J]. *Ecological Economy*, 2015, 31: 18-23.
- [17] AZARNIVAND A, CHITSAZ N. Adaptive policy responses to water shortage mitigation in the arid regions—a systematic approach based on eDPSIR, DEMATEL and MCDA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(2): 23.
- [18] ANNA T D, PALOMEQUE F L. Measuring sustainable tourism at the municipal level [J]. *Annals of Tourism Research*, 2014, 49: 22-137.
- [19] Organization for Economic Co-operation and Development. Towards sustainable development; environmental indicators [R]. France: OECD, 1998.
- [20] SUI Y, ZHANG L. Visual tracking via locally structured gaussian process regression [J]. *IEEE Signal Processing Letters (SPL)*. 2015, 22: 1331-1335.
- [21] WANG Q S, YUAN X L, MA C Y, et al. Research on the impact assessment of urbanization on air environment with urban environmental entropy model; a case study [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26: 443-450.
- [22] QI S, YAO X L, SONG L J. Empirical analysis on harmonious development of economy in Niyang river basin under environmental constraint [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2012(6): 62-64.
- [23] GAO J B, HU J. Financial crisis, Omori's law, and negative entropy flow [J]. *International Review of Financial Analysis*, 2014, 33: 79-86.
- [24] ZHAO J C, JI G X, TIAN Y, et al. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 410-422.
- [25] DILLMAN K J, HEINONEN J, DAVIOSDOTTIR B. A development of intergenerational sustainability indicators and thresholds for mobility system provisioning: a socio-ecological framework in the context of strong sustainability [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2023, 100240.
- [26] QI P, DENG Z W, WANG H X. Energy utilization, environmental quality and sustainable economic development; evidence from Shandong Province in China [J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 314-321.
- [27] LIU J X, MA H C, WANG Q S, et al. Optimization of energy consumption structure based on carbon emission reduction target; a case study in Shandong Province, China [J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2022, 20: 125-135.
- [28] WANG Q S, YUAN X L, ZHANG J, et al. Assessment of the sustainable development capacity with the entropy weight coefficient method [J]. *Sustainability*, 2015, 7: 13542-13563.
- [29] ABBASI M H, ABDULLAH B, CASTAÑO-ROSA R, et al. A framework to identify and prioritise the key sustainability indicators; assessment of heating systems in the built environment [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023: 104629.