

基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策

张珣^{1,2}, 扶昭¹, 林刚², 张迎春^{3*}

1. 北京工商大学计算机学院, 北京 100048

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3. 北京工商大学信息网络中心, 北京 100048

摘要 针对能源发展中的高能耗问题和碳排放问题,以山东省沿海城镇带为研究区域,将二氧化碳排放因子纳入能源消费结构优化之中,采用多目标规划的方法构建了以碳排放成本最小、能源消费产生的污染治理费用最小为目标函数,以经济发展规划、能源消费总量、能源消费结构及碳排放量为约束函数的山东省沿海城镇带能源消费结构多目标优化模型。研究区2035年的能源发展多目标优化结果为:煤炭消费量占能源消费总数下降为36%;油类能源消费量占能源消费总数的17%;天然气消费量占能源消费总数的25%;清洁能源占能源消费总数的比例提高到22%,各项指标均满足山东省能源消费的多个目标和约束。同时,针对山东省沿海城镇带低碳情景下的未来发展,提出了加快能源供给侧和能源消费侧的结构性改革、实施清洁能源和电能替代等建议,以加快转变高耗能生产方式,促进经济结构优化升级,实现节能减排、低碳环保的可持续发展。

关键词 能源消费结构;碳排放;多目标优化决策模型

能源是人类社会发展的关键命脉,然而这一经济的资源载体预计将在21世纪上半叶迅速接近枯竭,从而导致世界经济危机和冲突的加剧^[1]。中国是目前世界上第一大能源生产国和消费国,在维护

全球能源安全方面发挥着越来越重要的作用。山东省作为中国的第二港口大省,海陆运输便利,交通网络完善,经济发展迅速,独特的区位优势使其成为“一带一路”海陆交通的重要节点。随着联合

收稿日期:2019-12-10;修回日期:2020-03-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0507800);“十三五”时期北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划项目(CIT&TCD201904037);中国博士后科学基金资助项目(2017M620885)

作者简介:张珣,副教授,研究方向为GIS软件技术、地理空间智能,电子信箱:zhangxun@btbu.edu.cn;张迎春(通信作者),实验师,研究方向为图像识别,电子信箱:zhangyingchun@btbu.edu.cn

引用格式:张珣,扶昭,林刚,等.基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策[J].科技导报,2020,38(11):89-97;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.010

国可持续发展目标(SDGs)和国家发展战略规划中对能源、经济和环境问题关注度的日益提高,如何统筹能源、经济、环境的全面协调可持续发展,已成为山东省沿海城镇带进一步发展的重要问题。

目前,针对能源发展和碳排放问题的研究主要集中在2个方面:(1)影响能源发展和碳排放的要素。Bilgen等^[2]利用全球能源消耗数据,研究世界范围内能源消耗所产生的 SO_x 、 NO_x 和 CO_2 排放对环境的影响,从宏观角度阐述了能源消费将是未来社会发展、经济增长、环境气候变化的重要依据;Brantley等^[3]研究了人口统计学因素和城市化过程对碳排放和能源消耗的影响,表明人口数量与能源消耗以及碳排放呈复杂而非线性关系,同时城市化的程度与能源消费以及碳排放成正相关;王锋等^[4]探究了中国社会发展中影响碳排放的能源强度、燃料结构、产值份额、GDP等各类因素,最终确定了人均GDP数据对碳排放有最显著的驱动效果;邵敏等^[5]测算了山东省历年能源消费产生的碳排放量,得出经济和人口数据对山东省的碳排放起到了推动作用,并且经济因素影响占主导地位的结论。(2)能源种类分布。Mensah等^[6]使用计量经济学方法,对化石燃料能源消耗和经济发展数据进行分析,揭示了能源消耗与经济增长之间有双向因果关系;Sadorsky等^[7]对碳排放和石油价格之间的关系进行了分析,提出了化石燃料能源消耗和经济增长以及碳排放之间的因果关系,构建了可再生能源消耗的经验模型,提出了人均国内生产总值(GDP)和人均 CO_2 的增加是人均可再生能源消费的主要驱动力的观点;陆家亮等^[8]提出加快天然气产业发展,对中国实现能源消费结构优化和节能减排有正相关推动作用;黄华等^[9]结合煤炭产量、消耗量、污染物排放量等因素,探究了煤炭产量与能源消费和污染物排放之间的关系曲线;崔欣欣等^[10]通过SWOT分析法对火力发电企业节能减排管理现状进行研究,提出了热电厂节能减排的具体措施。以上研究分别从不同角度出發,探究不同要素和能源品种对能源发展和节能减排的影响,但从统一协调经济、能源数量和结构、碳排放等方面的综合研究较少,且研究的能源品种的数量较为单一。

本研究综合经济发展、能源消费及结构、碳排放等要素,构建山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策模型,利用其2008—2017年的煤炭、石油、天然气和其他清洁能源消费量等数据进行实验分析,得到能源结构优化的可行性方案。

1 研究区与数据

1.1 研究区

山东省沿海城镇带是中国北方沿海城镇发育较好、创新要素富集、资源环境特色鲜明的区域,具有广阔的发展前景和独特的区位优势。山东省沿海城镇带规划的范围包括青岛、烟台、威海、日照、潍坊、东营、滨州等沿海7个区市(24个市辖区)、4个县、11个县级市,陆域面积4.56万 km^2 ,管辖海域4.73万 km^2 。近年来,随着山东省沿海城镇带经济的快速发展和整体生活水平的逐渐提高,人们对能源消费的需求日益增加。煤炭、石油、天然气等不可再生能源的大规模、无节制的开发和消费,不仅使自然资源面临枯竭的危机,更引发了一系列温室气体排放和污染的问题。山东沿海城镇带在中国海洋强国战略中具有突出地位。因此,研究其能源消费情况,探究其能源消费结构的合理优化对中国沿海地区能源发展具有重要的实践意义。

1.2 数据来源

本研究涉及的数据来自《中国能源统计年鉴》《山东统计年鉴》《山东省沿海城镇带规划(2018—2035年)》《山东省政府工作报告》《中国能源报告》、国家统计局官网、国家发改委官网、山东省统计局官网等。数据包括能源消费数据、碳排放数据、污染排放数据、经济数据、人口数据等。

1.3 目标函数数据预处理

1) 二氧化碳排放成本数据处理。

通过查阅国家发展和改革委员会相关碳排放数据,确定二氧化碳中碳的排放系数为3.67 t/tce,煤炭的碳排放系数为0.656 t/tce,石油的碳排放系数为0.586 t/tce,天然气碳排放系数为0.442 t/tce,其他可再生清洁能源的消费不产生二氧化碳,故此处不计。二氧化碳的外部排放成本为50 \$/t,折合

人民币 353.77 元/t(美元汇率 7.0754)。整理能源品种的碳排放系数和二氧化碳排放系数如表 1 所示。

表 1 各类能源的碳排放系数及成本

能源品种	碳排放系数/(t·tce ⁻¹)	二氧化碳排放系数/(t·tce ⁻¹)	二氧化碳排放成本/(元·t ⁻¹)
煤炭	0.656	2.41	852.59
石油	0.586	2.15	760.61
天然气	0.442	1.62	573.11

2) 各能源品种污染治理成本数据处理。

从《中国能源报告》中获取了能源消费产生的主要污染物治理费用信息如下:二氧化硫排放污染治理费用最低估值 3300 元/t;氮氧化物排放污染治理费用最低估值 3300 元/t;烟尘排放治理费用为 373.33 元/t。按照已有文献中对 3 种化石能源燃烧产生的单位污染物治理费用取单位费用均值的方法^[11-12],确定各品种能源产生的排污治理费,整理结果如表 2 所示。

表 2 能源品种污染物排放费用

能源品种	污染治理费/(元·t ⁻¹)
煤炭	117.89
石油	39.94
天然气	2.73

2 研究方法

2.1 多目标优化模型构建思路

山东省沿海城镇带能源生产主要以煤炭、石油、天然气为主,然而未来的经济增长会对能源的需求日益加大,如何在实现经济平稳发展的前提下节能减排、保护环境,是山东省沿海城镇带能源消费结构优化的主要方向。针对以上问题,构建山东省沿海城镇带能源消费结构优化模型的思路如下:(1) 搜集研究区历年的能源消费数据、碳排放数据、污染物排放数据、经济数据、人口数据等各类基本数据;(2) 基于降低研究区的碳排放总成本和减少环境污染治理的总体目标设置目标函数;(3) 对研究区的碳排放、能源消费总量、能源消费结构以及经济发展等各因子进行分解,确定多目标优化模型的约束条件;(4) 利用山东省的各类发展规划确定多目标优化决策模型的中对于碳排放、能源和经济发展的要求设定优化的约束条件,最终实现能源结构的合理优化。多目标优化模型的构建思路如图 1 所示。

基于碳排放约束的能源消费结构模型构建方法,主要是将各类消费品种在一次能源中消费占比的优化,将能源中的煤炭、石油、天然气和清洁能源

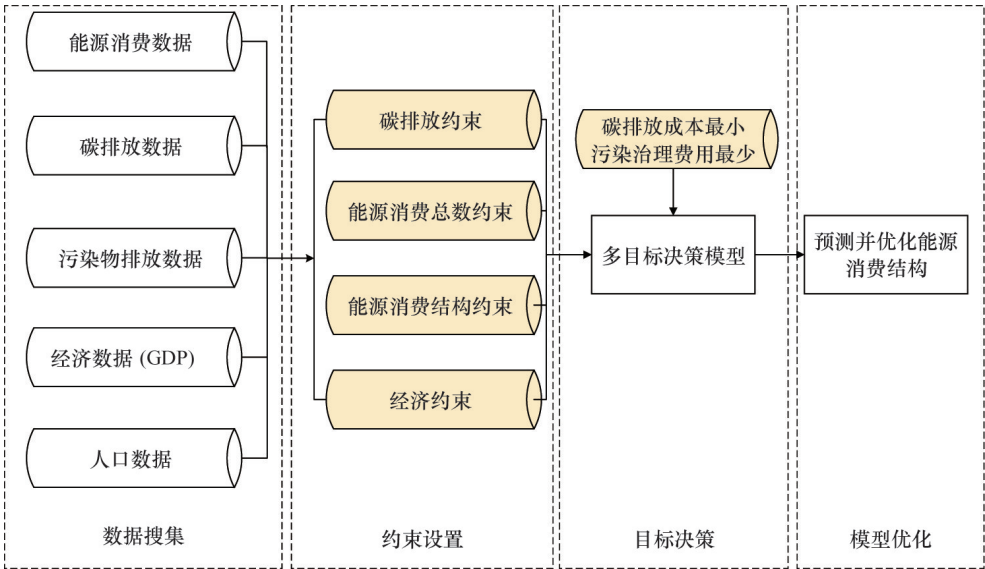


图 1 山东省沿海城镇带多目标优化决策模型

的消费量作为变量,设置优化目标为碳排放总成本最小和环境污染治理成本最小,建立多目标决策模型^[13-16]。

设置目标函数

$$\min F(x) = \min(f_1(x), f_2(x)) \quad (1)$$

经过加权处理

$$\min F(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (2)$$

其中, $F(x)$ 为总目标函数, 包括碳排放成本最小目标和消费各种能源品种产生的污染物治理费用最小目标; x_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别代表煤炭、石油、天然气和其他能源消费量; λ ($i=1, 2$) 分别为 2 个最小化目标成本所占权重。 $f_1(x) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \mu x_i$ 为二氧化碳排放成本目标函数, α_i 为各种能源的单位二氧化碳排放系数, μ 为二氧化碳的排放成本; $f_2(x) = \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i$ 为污染物治理费用目标函数, β_i 为各能源品种污染治理成本。

根据二氧化碳排放成本处理后的数据(表 1), 得到 $f_1(x)$, 即二氧化碳排放成本与各类能源消费量之间的函数为

$$f_1(x) = 852.59x_1 + 760.61x_2 + 573.11x_3 \quad (3)$$

根据各能源品种污染治理成本的数据(表 2), 得到 $f_2(x)$, 即能源消费后产生的各类污染物的综合治理费用, 与各类能源消费量之间的函数为

$$f_2(x) = 117.89x_1 + 39.94x_2 + 2.73x_3 \quad (4)$$

此外, 为了简化分析, 在构建山东省沿海城镇带能源发展多目标优化模型时, 根据《山东省统计年鉴》中的能源数据, 本研究限定于传统能源, 即煤炭、石油、天然气的二氧化碳排放问题, 其他能源存在的碳排放问题暂未考虑。

2.2 多指标约束系统

1) 碳排放约束。

本研究的碳排放主要是指由化石燃料燃烧所产生的二氧化碳排放, 其数值是能源消费量乘以相应的二氧化碳排放系数(表 1)。本研究采用 2015 年通过的《巴黎协定》中提出的“中国将在 2030 年左右达到碳排放峰值”的基本判断, 利用中国社会科学院渠慎宁等提出的碳排放总量的约束^[17], 分析和计算中国在 2035 年左右的碳排放峰值, 在满足

低于这一峰值的前提下, 向全国各省市县实施分区域、分领域的“减碳”策略和指标, 由此获得山东省沿海城镇带的碳排放目标。

基于上述山东省沿海城镇带的碳排放目标, 和煤炭、石油、天然气等各类能源消费的碳排放相关系数数据, 设置 2035 年山东省沿海城镇带的碳排放上限约束函数

$$2.41x_1 + 2.15x_2 + 1.62x_3 \leq 50839.35 \quad (5)$$

2) 能源消费总数约束。

依据《我国能源发展 2035·2050“两个阶段”展望》中对全国能源消费量的预测结果, 在满足社会长期稳定发展、经济平稳高质量增长的基础上, 设定全国能源消费总数约束, 再向全国各省市县分配区域能源消费指标, 由此获得山东省沿海城镇带的能源消费总数约束。

根据 2015 年能源消费数据和 2035 年能源发展规划数据, 对山东省沿海城镇带能源消费总数设置约束函数

$$24671.84 \leq \sum_{i=1}^4 x_i \leq 27652.98 \quad (6)$$

3) 能源消费结构约束。

《我国能源发展 2035·2050“两个阶段”展望》中指出: 煤炭消费占比下降到约为 37%; 石油消费占比约为 17%; 天然气占比约为 17%; 非化石能源的消费占比迅速提升。为满足构建清洁低碳、安全高效的能源体系, 高碳排放能源的比例应适当降低, 低碳排放能源和清洁能源的比例应适当提升^[18]。因此, 综合考虑多方面因素, 得出山东省沿海城镇带的能源消费结构约束函数

$$\begin{cases} \frac{x_1}{\sum_{i=1}^4 x_i} \leq 37\% \\ \frac{x_2}{\sum_{i=1}^4 x_i} \leq 17\% \\ \frac{x_3}{\sum_{i=1}^4 x_i} \geq 17\% \end{cases} \quad (7)$$

4) 经济约束。

通过对《山东省统计年鉴》以及统计口径的数据统计和分析, 得到山东省沿海城镇带研究区的历年 GDP 及各类能源消费数据, 结果如图 2 所示。

根据其数据特征, 采用多元线性回归方法, 确

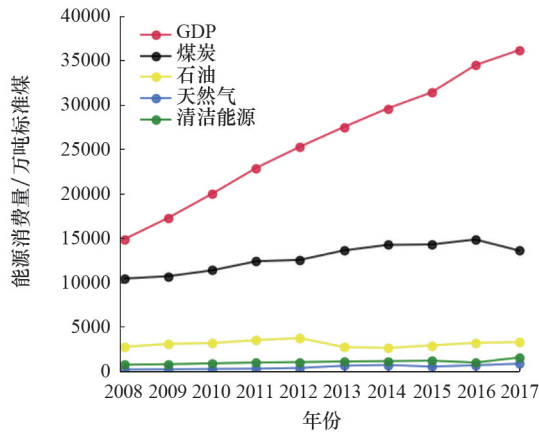


图2 山东省沿海城镇带历年数据

定各变量之间的依赖关系。实验结果表明:煤炭消费量每增加1个单位,GDP增加2.76个单位;石油消费量每增加1个单位,GDP增加7.15个单位;天然气消费量每增加1个单位,GDP增加2.5个单位;清洁能源消费量每增加1个单位,GDP增加0.31个单位。

依据上述分析,设置经济约束,根据已有数据对2035年山东省沿海城镇带的区域生产总值进行预测,并根据山东省的经济发展规划,在满足能源消费的合理优化配置下,保证经济由高速发展向高质量稳定发展模式转变,依据《山东省政府工作报告》中确保全省生产总值年均增长6.5%以上的目标,设定到2035年山东省沿海城镇带的经济最低年增速为6.5%,得到山东省沿海城镇带的经济约束函数

$$2.76x_1 + 7.15x_2 + 2.5x_3 + 0.31x_4 \geq 79057.65 \quad (8)$$

2.3 基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化

山东省沿海城镇带能源消费结构优化模型是对碳排放控制系统、能源消费总量系统、能源消费结构系统以及经济系统等各个系统的目标进行分解,确定多目标优化模型的目标和约束,并在深入分析碳排放系统、能源系统以及经济系统的约束条件的前提下,提出基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化模型,具体的多目标决策模型如下。

(1) 目标函数

$$\min F(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (9)$$

其中,

$$\min \begin{cases} f_1(x) = 852.59x_1 + 760.61x_2 + 573.11x_3 \\ f_2(x) = 117.89x_1 + 39.94x_2 + 2.73x_3 \end{cases}$$

(2) 约束函数

$$\begin{cases} \frac{x_1}{\sum_{i=1}^4 x_i} \leq 37\% \\ \frac{x_2}{\sum_{i=1}^4 x_i} \leq 17\% \\ \frac{x_3}{\sum_{i=1}^4 x_i} \geq 17\% \\ 24671.84 \leq \sum_{i=1}^4 x_i \leq 27652.98 \\ 2.41x_1 + 2.15x_2 + 1.62x_3 \leq 50839.35 \\ 2.76x_1 + 7.15x_2 + 2.5x_3 + 0.31x_4 \geq 79057.65 \end{cases} \quad (10)$$

运用 MATLAB R2016b 数据分析工具,使用多目标决策函数求解构建的能源消费结构问题,得到2035年山东省沿海城镇带能源消费量结果,分别为:

$$\begin{cases} x_1 = 9918 \text{ 万t标准煤} \\ x_2 = 4683 \text{ 万t标准煤} \\ x_3 = 6888 \text{ 万t标准煤} \\ x_4 = 6061 \text{ 万t标准煤} \end{cases}$$

由此可以得到山东省沿海城镇带各类能源总体消费量为:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 27550 \text{ 万t标准煤}$$

2035年,山东省沿海城镇带的能源消费结构分别是:

$$\begin{cases} \frac{x_1}{\sum_{i=1}^4 x_i} = 36\% \\ \frac{x_2}{\sum_{i=1}^4 x_i} = 17\% \\ \frac{x_3}{\sum_{i=1}^4 x_i} = 25\% \\ \frac{x_4}{\sum_{i=1}^4 x_i} = 22\% \end{cases}$$

2035年,山东省沿海城镇带二氧化碳排放量为:

$$2.41 \times 9918 + 2.15 \times 4683 + 1.62 \times 6888 = 45129.39 \text{ 万t}$$

3 结果和分析

通过模型优化分析,2035年山东省沿海城镇带能源消费总量为27550万t标准煤。其中,多目标优化决策函数求解的最优能源消费结构中,煤炭消费量9918万t标准煤,石油消费量4683万t标准煤,天然气消费量6888万t标准煤,其他清洁能源消费量6061万t标准煤。各项数据都符合山东省沿海城镇带规划中的指标约束,因此优化分析结果符合山东省沿海城镇带的实际发展需求,具有一定的参考意义。

(1) 各项数据指标符合山东省发展“十三五”规划。2015年山东省年煤炭消费量在能源消费结构中占绝对组成部分,由于煤炭相较于其他化石能源,其热值与折标准煤参考系数更低,而碳排放和污染物排放系数更高,容易造成巨大的能源消耗和环境污染^[19]。因此加大高耗能产业升级改造力度,加快化解淘汰落后产能步伐,削减煤炭消费总量是调整能源结构的重要举措。

2035年山东省沿海城镇带多目标决策函数求解的最优能源消费结构,其优化结果与2015年山东省沿海城镇带的能源消费数据对比如图3所示,其中,优化后煤炭消费量占能源消费总数的36%;石油能源消费量占能源消费总数的17%;天然气消费量占能源消费总数的25%;清洁能源占能源消费总数的比例提高到了22%,各项指标均在满足“十三五”规划的前提下,符合各类能源消费的约束。

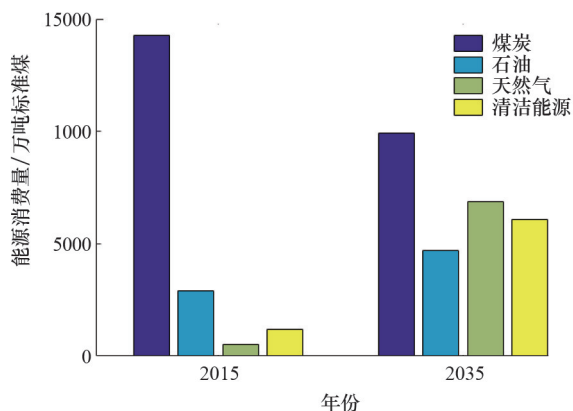


图3 山东省沿海城镇带各类能源消费数据对比

此外,优化结果适当降低了煤炭能源的消费占比,提高了清洁能源的所占比例,可以明显减少碳排放总量。符合山东省节能减排、低碳发展的实际需要,具有可参考的实际意义,并可为未来山东省发展“十四五”规划的制定和政策的实施提供依据。

(2) 各类能源消费占比有所调整和改善。优化结果中煤炭消费量占能源消费比例有所下降,但仍然是山东省沿海城镇带的主要支柱能源种类之一。为了山东省沿海城镇带的节能减排和可持续发展,必须实施煤炭总量控制约束,加大高耗能产业升级和结构调整力度,加快化解过剩产能和淘汰落后产能步伐,削减煤炭消费总量,有序推进“煤改气”“煤改电”“煤制氢”工程,积极推进煤炭清洁高效利用。能源结构优化后,天然气的消费量占比有一定幅度提高,一方面原因是天然气燃烧效率高,且燃烧的产物只有二氧化碳和水,不存在严重的污染排放,一直以来在中国的能源消费中占主导地位。但通过对山东省能源消费现状的研究发现,山东省天然气消费的占比略低于国家的规划,因此适当加快天然气的开发和利用,是山东省能源结构优化的一项重要决策。另一方面原因是,煤炭和天然气的消费数量对研究区经济发展的影响较大,为满足山东省沿海城镇带发展的各项规划,在减少煤炭消费占比的同时,适当提升天然气的消费占比是实现经济快速稳定发展的必要条件和重要保证。同时,天然气的碳排放和污染物排放指数远低于煤炭,因此,适当提升能源消费结构中天然气的数量占比,是保障资源供给,满足社会需求,优化能源消费结构的重要措施。清洁能源占能源消费总数的比例从2015年的7%增长到2035年的22%,达到了“十三五”规划的目标要求,表明清洁能源和非化石能源的开发和利用规模逐渐得到提高,为山东省优化能源体系的构建和可持续发展提供了支持。因地制宜,科学有序地利用清洁能源如风电、光伏发电、生物质发电、抽水蓄能等,是提高山东省沿海城镇带清洁能源占比,实现全面协调可持续发展的重要举措。

(3) 总体能源消费比例结构趋向均衡合理。对比山东省沿海城镇带2015年能源消费结构图,

煤炭消费占比达到了70%以上,而优化后研究区2035年煤炭能源的消费量占比降低到合理区间,石油、天然气和清洁能源的占比接近1:1:1,且清洁能源的占比略高于石油,各类能源消费的比例结构在整体上趋向协调发展。均衡合理的能源消费比例结构是经济增长速度从高速到中高速,发展方式从规模速度型转向质量效益型的重要保证,也是能源安全的重要保障^[20-21]。据国家能源局测算,到21世纪中叶,全球的清洁能源在一次能源消费中的占比和竞争力将超过化石能源,未来的能源发展模式将出现巨大转变。山东省作为中国能源发展的重要组成部分,应全面深化能源供给侧和能源消费侧的结构性改革,实施清洁能源和电能替代等有效措施,加快产业结构优化升级,合理配置利用资源,使山东省的能源消费结构趋向全面、协调、均衡发展,融入世界能源转型的大趋势。同时应处理好自然、社会、生态、经济以及能源利用过程中的基本关系,促进经济增长方式由粗放型向集约型转变,以确保国家的可持续发展战略。

综上所述,基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策模型和方案,统筹了经济发展、能源消费与结构,以及碳排放等多类要素,降低了煤炭能源的消费比例,提高了天然气和清洁能源的所占比重,使研究区总体能源消费结构趋向均衡合理的同时减少碳排放总量,总体实现节能减排的可持续发展目标。山东省沿海城镇带作为全国沿海高质量发展区域,在新时代海洋强国战略中具有重要的战略地位。“一主两副、三湾三区、陆海统筹、网络发展”的城镇带格局使其发展模式具有较强的区域性;但相对粗放的能源消费模式带来的供给不足和环境污染问题是目前能源消费的共性问题,对其研究的过程具有普适性。因此,基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化的决策结果,可以为山东省能源发展规划提供了参考。

4 结论

在充分参考各类可持续发展目标,能源发展规

划和山东省“十三五”规划的基础上,探究和分析了山东省能源消费结构优化的途径。通过对煤炭、石油、天然气和其他清洁能源等能源品种的回归分析,得到了山东省沿海城镇带经济发展与能源消费数量和比例,以及碳排放之间的依赖关系。构建了基于碳排放约束的山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策模型,以期得到相对合理的能源消费总量和能源比例结构的优化预测结果,对于山东省优化能源结构,减少碳排放的举措有一定参考价值。优化预测的结果符合山东省融入“节约、清洁、安全”的国家能源发展方针,满足“节约优先、立足国内、绿色低碳和创新驱动”的国家能源发展战略,为山东省未来发展的规划和政策的制定提供了理论支持。

基于山东省沿海城镇带能源发展多目标优化决策模型实验的结果,充分结合山东省沿海城镇带的发展现状,理论联系实际,提出以下2点建议。

1) 适当降低煤炭能源的消费占比,提高清洁能源的所占比例,可以明显减少碳排放总量。山东省沿海城镇带的节能减排和可持续发展,必须实施煤炭总量控制约束,加大高耗能产业升级和结构调整力度,加快化解过剩产能和淘汰落后产能步伐,削减煤炭消费总量,有序地推进“煤改气”“煤改电”“煤制氢”工程,积极推进煤炭清洁高效利用。

2) 全面深化能源供给侧和能源消费侧的结构性改革,实施清洁能源和电能替代等有效措施,加快产业结构优化升级,合理配置利用资源,使山东省的能源消费结构趋向全面、协调、均衡发展。

由于所选研究区限制,未来的研究方向可以考虑从市县的尺度出发,基于多目标优化的理论和实证两部分内容,研究能源消费结构的优化途径。

参考文献(References)

- [1] 克莱尔. 资源战争: 全球冲突的新场景[M]. 上海: 上海译文出版社, 2002: 10-15.
- [2] Bilgen S. Structure and environmental impact of global energy consumption[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014(38): 890-902.
- [3] Brantley, Liddle. Impact of population, age structure, and

- urbanization on carbon emissions/energy consumption: Evidence from macro-level, cross-country analyses[J]. *Population and Environment*, 2014, 35(3): 286-304.
- [4] 王锋, 冯根福, 吴丽华. 中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解[J]. *经济研究*, 2013, 48(8): 143-155.
- [5] 邵敏, 郝晴, 闫桂焕, 等. 山东省能源消费碳排放影响因素分析[J]. *科学与管理*, 2019(4): 64-68.
- [6] Mensah I A, Sun M, Gao C X, et al. Analysis on the nexus of economic growth, fossil fuel energy consumption, CO₂ emissions and oil price in Africa based on a PMG panel ARDL approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(228): 161-174.
- [7] Sadorsky. Renewable energy consumption, CO₂ emissions and oil prices in the G7 countries[J]. *Energy Econ*, 2009, 3(31): 21-28.
- [8] 陆家亮, 赵素平. 中国能源消费结构调整与天然气产业发展前景[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 9-15.
- [9] 黄华. 煤矿节能减排多目标优化研究[J]. *工矿自动化*, 2017(6): 7714.
- [10] 崔欣欣. 火力发电企业节能减排管理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [11] Yang X, Wang S J, Zhang W Z, et al. Impacts of energy consumption, energy structure, and treatment technology on SO₂ emissions: A multi-scale LMDI decomposition analysis in China[J]. *Applied Energy*, 2016(184): 714-726.
- [12] 王飞. 基于碳排放约束的浙江省能源消费结构优化研究[D]. 杭州: 浙江财经大学, 2018.
- [13] 张春莲. 基于遗传算法的河北省能源结构多目标优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [14] 任艳. 基于遗传算法的能源结构多目标优化模型的研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- [15] 杜广巍. 能源消费总量约束下的青海产业结构优化研究[J]. *青海环境*, 2019, 29(1): 28-31.
- [16] 孙小强, 张求明. 一种基于粒子群优化的多目标优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(18): 40-42.
- [17] 渠慎宁, 郭朝先. 基于STIRPAT模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12): 10-15.
- [18] Feng T W, Sun L Y, Zhang Y. The relationship between energy consumption structure, economic structure and energy intensity in China[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(12): 5475-5483.
- [19] Liu Y Q, Zhao G H, Zhao Y S. An analysis of Chinese provincial carbon dioxide emission efficiencies based on energy consumption structure[J]. *Energy Policy*, 2016(96): 524-533.
- [20] 仇方道, 张纯敏, 唐晓丹. 基于能源约束的江苏省工业结构优化及空间重组[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(5): 54-59.
- [21] 李爽. 低碳目标约束下我国能源消费结构优化研究[J]. *山西大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 38(4): 108-115.

Multi-objective optimal decision-making of energy development in coastal town belt of Shandong province with carbon emission constraints

ZHANG Xun^{1,2}, FU Zhao¹, LIN Gang², ZHANG Yingchun^{3*}

1. School of Computer science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3. Center of Information Network, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Abstract This paper studies the problems of the high energy consumption and the carbon emissions in the energy development, focusing on the coastal urban belt of Shandong Province, putting the factor of the carbon dioxide emission into the optimization of the energy consumption structure, and building a multi-objective optimization model of the energy consumption structure of the coastal urban belt of Shandong Province by using the method of the multi-objective planning, with the objective function as to minimize the cost of the carbon emission and the cost of the pollutant treatment from the energy consumption and with the constraint functions based on the economic development planning, the total energy consumption, the energy consumption structure and the carbon emissions. The results of the multi-objective optimization of the energy development in 2035 are as follows: the coal consumption accounts for 36% of the total energy consumption; the oil consumption accounts for 17% of the total energy consumption; the natural gas consumption accounts for 25% of the total energy consumption; and the clean energy accounts for 22% of the total energy consumption. All indicators are in line with the multiple objectives and the constraints of the energy consumption of Shandong Province. Finally, suggestions are made for the future development of the coastal cities and towns within the low carbon scenario: speeding up the structural reform of the energy supply side and the energy consumption side, and implementing effective measures such as clean energy and electricity substitution, in order to accelerate the transformation of the high-energy-consuming production mode, promoting the optimization and the upgrading of the economic structure, to achieve a sustainable development of the energy saving, the emission reduction and the low-carbon environmental protection.

Keywords energy consumption structure; carbon dioxide emission; Multi-Objective Decision Model ●



(责任编辑 傅雪)