

济南市工业化石能源消费碳排放与经济增长脱钩水平及驱动因素分析^{*}

谢玉慧¹ 郭凤佳¹ 张倩¹ 姜雨¹ 陈伟^{1,2#}

(1.山东师范大学地理与环境学院,山东 济南 250358;2.山东师范大学碳中和研究院,山东 济南 250014)

摘要 基于2011—2020年济南市5种主要化石能源消费量,核算了济南市的工业碳排放量。运用Tapio脱钩模型和对数平均迪氏指数分解模型(LMDI),探究了济南市工业碳排放与经济增长的脱钩关系及驱动因素。结果发现,济南市工业总碳排放量由2011年的29.30 Mt增长到了2020年的43.17 Mt,莱芜市的加入是济南市工业碳排放增加的重要原因。尽管至2020年,济南市工业碳排放与经济增长基本实现了强脱钩,但2011—2020年整体脱钩状态不稳定,不同工业行业脱钩的趋势也存在差异。工业人口规模、经济产出、能源强度、能源结构、碳排放因子对济南市工业碳排放有正向驱动效应,而产业结构对碳排放有负向驱动效应。

关键词 工业碳排放 对数平均迪氏指数分解模型 Tapio脱钩模型 化石能源消费 济南市

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.10.022

Decoupling level and driving factors of fossil energy consumption based industrial carbon emissions and economic growth in Jinan XIE Yuhui¹, GUO Fengjia¹, ZHANG Qian¹, JIANG Yu¹, CHEN Wei^{1,2}. (1.College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan Shandong 250358; 2.Institute of Carbon Neutrality, Shandong Normal University, Jinan Shandong 250014)

Abstract: Based on the consumption of 5 major fossil energy sources in Jinan from 2011 to 2020, the industrial carbon emissions of Jinan were calculated. By using Tapio decoupling model and logarithmic mean Divisia index model, the decoupling relationship between industrial carbon emissions and economic growth, and its driving factors were explored. Results showed that total industrial carbon emissions in Jinan increased from 29.30 Mt in 2011 to 43.17 Mt in 2020. The incorporation of Laiwu was an important cause of increase. Despite that the decoupling status of industrial carbon emissions and economic growth in Jinan realized strong decoupling, it was unstable during 2011 to 2020. Moreover, there were differences for decoupling trends in various industrial sectors. Industrial population size, economic production, energy intensity, energy structure and carbon emission factor had promotion effects on industrial carbon emissions, while industrial structure had inhibition effects.

Keywords: industrial carbon emission; logarithmic mean Divisia index model; Tapio decoupling model; fossil energy consumption; Jinan

温室效应引起的全球变暖已成为社会关注的焦点,因此减少温室气体排放,推进经济绿色低碳转型刻不容缓。工业生产消耗大量化石能源,由此产生的碳排放量在碳排放总量中占比达70%^[1]。济南市作为老工业城市,产业结构偏重,能源结构偏煤^[2],产业结构和能源消费都尚未实现与碳排放完全脱钩。目前,济南市是山东省唯一入选国家低碳城市、气候适应型城市的“双试点城市”^[3],因此厘清其工业化石能源碳排放与经济增长脱钩水平演变趋势,甄别造成碳排放的关键驱动因素对于科学制定碳减排战略、有效降低工业活动碳排放具有重要意义。

现有研究主要采用Tapio脱钩模型研究工业与

碳排放的依赖关系^[4-6],并运用对数平均迪氏指数分解模型(LMDI)分析碳排放的驱动因素^[7-8],通常考虑人口规模^[9]、经济产出^[10]⁸¹、产业结构^[11]、能源强度^[12]、能源结构^[10]⁷⁹、碳排放因子^[13]等。济南市工业能源碳排放测算和驱动因素分析已有一些研究^[14-15],但缺乏专门针对济南市工业化石能源碳排放与经济增长的脱钩关系及驱动因素的研究。

本研究采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)的《2006年IPCC国家温室气体排放清单指南》测算济南市工业化石能源消费碳排放量,运用Tapio脱钩模型分析碳排放与经济增长的脱钩关系,并利用LMDI探究济南市工业化石能源消费碳排放

第一作者:谢玉慧,女,2000年生,硕士研究生,主要从事资源环境管理及区域可持续发展研究。# 通讯作者。

^{*} 2022年度济南市哲学社会科学课题“济南市打造碳达峰碳中和示范城市路径研究”(No.JNSK22B04)。

的关键驱动因素,进而提出促进济南市工业低碳发展的对策建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 碳排放核算方法

根据济南市工业化化石能源消耗的实际情 况,选择原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油 5 种化石能源进行直接碳排放核算。不同工业行业的各种化石能源消费碳排放量计算公式见式(1):

$$E_{i,j}=A_{i,j}\times F_j=\frac{44}{12}A_{i,j}\times N_j\times C_j\times O_j\quad (1)$$

式中: $E_{i,j}$ 为*i*行业*j*化石能源消费碳排放量,t; $A_{i,j}$ 为*i*行业*j*化石能源的消费量,t,折算成标准煤计; F_j 为*j*化石能源的碳排放因子,t/t,以CO₂计; N_j 为*j*化石能源的平均低位热值,J/t; C_j 为*j*化石能源的含碳量,t/J; O_j 为*j*化石能源的碳氧化率。

1.2 LMDI 分解

考虑工业人口规模、经济产出、产业结构、能源强度、能源结构、碳排放因子 6 个驱动因素进行 LM-DI 分解,计算公式见式(2)。

$$E_{i,j}=P\times \frac{G}{P}\times \frac{G_i}{G}\times \frac{A_i}{G_i}\times \frac{A_{i,j}}{A_i}\times \frac{E_{i,j}}{A_{i,j}}\quad (2)$$

式中: P 为工业从业人口; G 为工业生产总值,亿元; G_i 为*i*行业的工业生产总值,亿元; A_i 为*i*行业的化石能源消费量,t。

令 $E_A=\frac{G}{P}$ 、 $I_S=\frac{G_i}{G}$ 、 $E_1=\frac{A_i}{G_i}$ 、 $E_S=\frac{A_{i,j}}{A_i}$ 、 $\frac{E_{i,j}}{A_{i,j}}$ 即 F_j 、 P 、 E_A 、 I_S 、 E_1 、 E_S 、 F_j 分别代表了工业人口规模、经济产出、产业结构、能源强度、能源结构、碳排放因子 6 个驱动因素,式(2)则可以简写为 $E_{i,j}=P\times E_A\times I_S\times E_1\times E_S\times F_j$ 。其中某一驱动因素引起的碳排放贡献量($\Delta E,t$)可按式(3)计算。

$$\Delta E=\sum_i\sum_j\frac{E_{i,j}^{t_1}-E_{i,j}^{t_0}}{\ln E_{i,j}^{t_1}-\ln E_{i,j}^{t_0}}\times \ln \frac{X^{t_1}}{X^{t_0}}\quad (3)$$

式中: $E_{i,j}^{t_1}$ 、 $E_{i,j}^{t_0}$ 分别为结算期 t_1 和起算期 t_0 时*i*行业*j*化石能源消费碳排放量,t; X^{t_1} 、 X^{t_0} 分别为 t_1 、 t_0 时的某一驱动因素数值,单位根据实际情况而定。

1.3 脱钩分析

采用 Tapio 脱钩模型探究济南市工业生产总 值增长与碳排放量之间的关系,公式见式(4):

$$\epsilon=\frac{\Delta E/E^{t_0}}{\Delta G/G^{t_0}}\quad (4)$$

式中: ϵ 为工业经济增长与碳排放量之间的脱钩指数; E^{t_0} 为 t_0 时的相应碳排放量,t; ΔG 为 t_1 、 t_0 间的工业生产总值变化量,亿元; G^{t_0} 为 t_0 时的工业生产总值,亿元。Tapio 脱钩模型可分为 3 大状态和 8 种具体类型,详见表 1。

1.4 数据来源

以 2011—2020 年为研究区间,参照 2012—2021 年济南市统计年鉴,将工业行业划分为采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业 3 大类。各行业的工业生产总值、化石能源的消费量、从业人口等数据来源于济南市统计年鉴,2019 年莱芜市并入济南市,因此 2019—2020 年各项数据为包括了莱芜市并入后的合并数据。各类化石能源的平均低位热值来源于中国能源统计年鉴,碳排放核算所需的各类化石能源的碳排放因子、含碳量、碳氧化率等数据参考 LIU 等^[16]的研究结果。为剔除价格变动因素的影响,采用工业生产者出厂价格指数^[17]将历年工业生产总值折算为 2011 年不变价格。

2 结果分析与讨论

2.1 济南市工业碳排放特征分析

济南市 2011—2020 年工业不同化石燃料的碳排放量如图 1 所示。工业总碳排放量由 2011 年的 29.30 Mt 增长到了 2020 年的 43.17 Mt,年均增长率为 4.40%。2011—2018 年,济南市工业总碳排放量在 22.98~29.30 Mt 波动,比较稳定。2019 年由于莱芜市的并入使济南市工业总碳排放量达到 49.80 Mt。又随着《济南市低碳发展工作方案(2018—2020 年)》的实施,2020 年济南市工业总碳排放量较 2019 年减少 6.63 Mt。其中,采矿业对济南市工业总碳排放量贡献较小,2011—2020 年的平均贡献只有 3.42%,2011—2013 年在 0.01 Mt 以下,2014—2019 年在 1.13~2.02 Mt 波动,2020 年又降至 0.18 Mt。制造业对济南市工业碳排放量贡献达到

表 1 脱钩类型划分
 Table 1 Decoupling status classification

参数	脱钩状态			负脱钩状态			连接状态	
	强脱钩	弱脱钩	衰退脱钩	强负脱钩	弱负脱钩	扩张负脱钩	扩张连接	衰退连接
ΔG /亿元	>0	>0	<0	<0	<0	>0	>0	<0
ΔE /t	<0	>0	<0	>0	<0	>0	>0	<0
ϵ	<0	0~<0.8	≥1.2	<0	0~<0.8	≥1.2	0.8~<1.2	0.8~<1.2

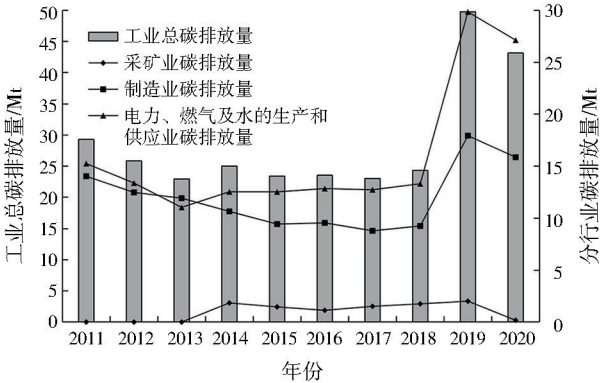


图 1 2011—2020 年济南市工业碳排放量

Fig.1 Carbon emissions of Jinan's industry from 2011 to 2020

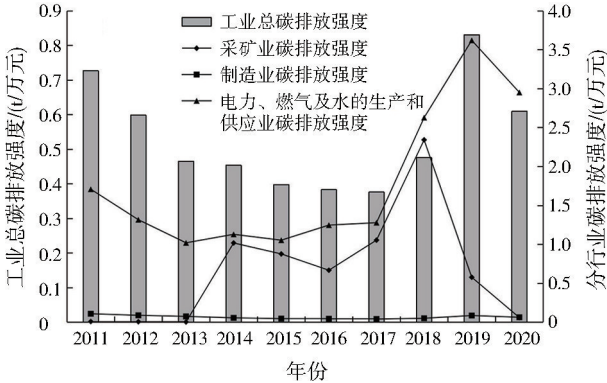


图 2 2011—2020 年济南市工业碳排放强度

Fig.2 Carbon emission intensity of Jinan's industry from 2011 to 2020

41.29%，2011—2018 年呈下降趋势，由 14.03 Mt 下降至 9.25 Mt，2018—2019 年因莱芜市的并入增加了 8.68 Mt，2020 年又降低至 15.87 Mt。可见，济南市制造业快速发展，如何实现其减污降碳已成为济南市的关键问题。电力、燃气及水的生产和供应业对济南市工业碳排放量贡献最大，达 55.29%，碳排放量 2011 年为 15.25 Mt，2020 年升高至 27.13 Mt，演变趋势与济南市工业总碳排放量基本一致，这是因为济南市电力结构以煤电为主^[18]。综上所述，制造业、电力、燃气及水的生产和供应业是造成济南市工业化石能源消费碳排放的主要行业，应成为节能减排的重点管控行业。

碳排放强度常被用来衡量经济发展与碳排放量之间的关系。2011—2020 年济南市工业总碳排放强度变化如图 2 所示。2011—2017 年为第一阶段，工业总碳排放强度逐年降低；2017—2019 年为第二阶段，工业总碳排放强度呈上升态势；2019—2020 年为第三阶段，工业总碳排放强度又呈降低态势。2019 年之前，即莱芜市并入之前，济南市工业总碳排放强度整体呈下降趋势，与工业总碳排放量变化趋势大体一致，说明工业碳排放强度降低可能是导致工业碳排放量下降的重要原因。2019—2020 年，

3 大行业碳排放强度均有下降，以采矿业最为突出（降幅为 89.66%），其次是制造业（降幅为 33.33%），电力、燃气及水的生产和供应业降幅为 18.51%。马艳梅等^[19]研究发现，2011—2016 年山东省工业碳排放强度呈下降趋势，与本研究中市的结果一致。山东省和济南市的工业结构和工业发展方式相似，是两者工业碳排放强度演变趋势相似的原因之一。未来在改变能源结构的同时应注重能源效率的提升及清洁能源的开发利用，以降低工业化石能源消费的碳排放强度，实现经济与环境的协同增效。

2.2 济南市工业经济增长与碳排放脱钩分析

考虑到 2019 年莱芜市并入等短期外部冲击的影响，对 2011—2020 年济南市工业经济增长与碳排放关系进行逐年脱钩分析，结果见表 2。由表 2 可见，不同行业的碳排放脱钩状态演化趋势存在共性与差异。3 大行业的强脱钩年份集中于 2011—2013 年，工业生产总值增长的同时工业化石能源消费碳排放量下降。2017—2018 年，济南市工业生产总值下降但工业化石能源消费碳排放量增加，使 3 大行业都出现极不理想的强负脱钩状态。采矿业多呈强负脱钩、弱脱钩、衰退脱钩的欠佳状态，至 2020 年未能实现经济增长与碳排放脱钩的理想状态。制造业

表 2 济南市工业经济增长与碳排放脱钩状态

Table 2 The decoupling state of Jinan's industry between economic growth and carbon emission

年份	脱钩状态			
	采矿业	制造业	电力、燃气及水的生产和供应业	工业
2011—2012	强脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩
2012—2013	强脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩
2013—2014	强负脱钩	强脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩
2014—2015	衰退脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩
2015—2016	强脱钩	弱脱钩	强负脱钩	弱脱钩
2016—2017	强负脱钩	衰退脱钩	弱负脱钩	衰退脱钩
2017—2018	强负脱钩	强负脱钩	强负脱钩	强负脱钩
2018—2019	弱脱钩	扩张负脱钩	扩张负脱钩	扩张负脱钩
2019—2020	衰退脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩

在 2011—2015 年都处于强脱钩状态,后经历了弱脱钩、衰退脱钩、强负脱钩、扩张负脱钩等不理想状态,但到 2020 年再次实现了强脱钩。电力、燃气及水的生产和供应业的脱钩状态极不稳定,经历了强脱钩、扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩 4 种状态,最终于 2020 年达到强脱钩。济南市工业大部分时间处于较为理想的强脱钩与弱脱钩交替状态。2019 年莱芜市并入济南市,在提高济南市工业生产总产值的同时增加了济南市的工业化石能源消费碳排放量,这可能是导致 2018—2019 年济南市工业呈扩张负脱钩状态的主要原因。在“双试点城市”有关政策推动

下,济南市积极推进工业经济结构向低碳转型,使得工业经济增长与碳排放在 2020 年达到了比较理想的强脱钩状态。魏营等^[20]同样发现,镇江市被确定为国家低碳城市试点后,工业碳排放与经济增长也实现了强脱钩。不过,济南市 2020 年的强脱钩状态并不稳定,还需进一步发展低碳经济,推进低碳高效能源体系建设,实现稳定脱钩。

2.3 济南市工业碳排放驱动因素分析

表 3 反映了 2011—2020 年各驱动因素对工业化石能源消费碳排放量变化的影响。

人口规模对济南市工业化石能源消费碳排放量

行业	影响因素	2011—2012 年	2012—2013 年	2013—2014 年	2014—2015 年	2015—2016 年
采矿业	人口规模	5.47×10^2	2.59×10^2	-5.27×10^3	3.23×10^4	-7.76×10^4
	经济产出	2.15×10^2	8.80×10^2	4.01×10^4	7.57×10^4	1.32×10^5
	产业结构	1.60×10^3	1.00×10^3	-7.94×10^4	-2.46×10^5	-2.93×10^4
	能源强度	-3.48×10^3	-4.74×10^3	1.73×10^6	-2.45×10^5	-3.52×10^5
	能源结构	-6.35×10^2	-4.78×10^2	1.53×10^5	-1.00×10^3	-1.07×10^3
	碳排放因子	6.94	-1.17×10	9.79×10^{-1}	1.08×10	1.39×10
制造业	人口规模	6.58×10^5	3.70×10^5	-1.87×10^5	1.97×10^5	-5.71×10^5
	经济产出	2.59×10^5	1.26×10^6	1.43×10^6	4.61×10^5	9.71×10^5
	产业结构	2.64×10^5	4.08×10^4	8.96×10^4	1.19×10^4	9.60×10^4
	能源强度	-2.60×10^6	-2.10×10^6	-3.15×10^6	-1.88×10^6	-3.85×10^5
	能源结构	-1.34×10^5	-1.18×10^5	5.47×10^5	-1.24×10^4	5.39×10^3
	碳排放因子	-7.72×10	-6.20×10^2	3.33×10^3	1.65×10^2	-1.21×10^2
电力、燃气及水的生产和供应业	人口规模	7.11×10^5	3.69×10^5	-1.98×10^5	2.46×10^5	-7.63×10^5
	经济产出	2.80×10^5	1.26×10^6	1.51×10^6	5.76×10^5	1.30×10^6
	产业结构	8.58×10^5	-8.59×10^5	-1.01×10^6	3.32×10^4	-2.36×10^6
	能源强度	-3.72×10^6	-3.11×10^6	1.20×10^6	-8.65×10^5	2.14×10^6
	能源结构	2.70×10^3	-8.02×10^2	2.07×10^3	1.59×10^2	1.74×10^3
	碳排放因子	-4.55×10	-2.18×10^{-1}	-3.00×10	1.49×10	2.49×10
行业	影响因素	2016—2017 年	2017—2018 年	2018—2019 年	2019—2020 年	2011—2020 年
采矿业	人口规模	-5.17×10^4	-5.62×10^4	1.39×10^5	6.18×10^3	1.90×10^3
	经济产出	4.78×10^4	-2.40×10^5	1.62×10^5	1.18×10^5	3.26×10^4
	产业结构	-2.13×10^5	-7.67×10^5	2.60×10^6	-2.20×10^5	1.74×10^4
	能源强度	6.01×10^5	1.30×10^6	-2.64×10^6	-1.69×10^6	1.11×10^5
	能源结构	-1.32×10^2	-1.09×10^2	-3.15×10^3	-5.21×10^4	1.45×10^3
	碳排放因子	2.06	3.37	-5.64	6.99	4.59×10
制造业	人口规模	-3.60×10^5	-3.10×10^5	9.67×10^5	1.40×10^5	4.59×10^5
	经济产出	3.33×10^5	-1.32×10^6	1.13×10^6	2.67×10^6	7.88×10^6
	产业结构	2.44×10^4	1.86×10^5	-3.07×10^5	1.09×10^5	7.24×10^5
	能源强度	-7.64×10^5	1.89×10^6	6.87×10^6	-5.00×10^6	-7.78×10^6
	能源结构	5.12×10^3	2.41×10^4	2.78×10^4	9.72×10^3	5.46×10^5
	碳排放因子	1.69×10^2	2.33×10^2	3.87×10^2	4.77×10	4.83×10^3
电力、燃气及水的生产和供应业	人口规模	-5.02×10^5	-4.48×10^5	1.51×10^6	2.36×10^5	6.40×10^5
	经济产出	4.64×10^5	-1.91×10^6	1.76×10^6	4.50×10^6	1.10×10^7
	产业结构	-3.91×10^5	-6.44×10^6	6.70×10^6	-1.63×10^6	-1.10×10^7
	能源强度	3.16×10^5	9.38×10^6	6.56×10^6	-5.82×10^6	1.13×10^7
	能源结构	-4.50×10^2	5.75×10^2	4.37×10^3	-1.92×10^3	1.31×10^4
	碳排放因子	6.94	6.69	-8.36	7.42	2.82

总体呈正向驱动,2011—2020 年累计贡献量为 1.10×10^6 t。其中,人口规模对采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业分别贡献 1.90×10^3 、 4.59×10^5 、 6.40×10^5 t。韩媛媛等^[21]对北京市的工业碳排放驱动因素分析结果同样表明,人口规模具有促进作用。

经济产出是济南市工业化石能源消费碳排放的重要正向驱动因素,2011—2020 年累计贡献量为 1.89×10^7 t。其中,经济产出对采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业分别贡献 3.26×10^4 、 7.88×10^6 、 1.10×10^7 t。由此可见,济南市仍存在高耗能高碳排的生产方式,低碳改造工作需要进一步推进。

产业结构是济南市工业化石能源消费碳排放的重要负向驱动因素,2011—2020 年累计贡献量为 -1.03×10^7 t,主要是对电力、燃气及水的生产和供应业负向驱动,贡献量达 -1.10×10^7 t。LIN 等^[22]对上海市的研究同样发现,产业结构对工业碳排放呈负向驱动作用。原因可能是钢铁等污染密集型产业的搬迁降低了济南市与上海市的能源消耗与碳排放^[23-24]。因此,产业结构调整对济南市工业碳减排具有积极作用。

能源强度对济南市工业化石能源消费碳排放总体呈正向驱动,2011—2020 年累计贡献量为 3.63×10^6 t,但对制造业的贡献量为 -7.78×10^6 t,而且在有些年份,对采矿业和电力、燃气及水的生产和供应业的贡献也为负。因此,降低能源强度也是实现济南市工业低碳化的重要途径。

能源结构是济南市工业化石能源消费碳排放的正向驱动因素,2011—2020 年累计贡献量为 5.61×10^5 t。其中,能源结构对采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业分别贡献 1.45×10^3 、 5.46×10^5 、 1.31×10^4 t。然而,2011—2012、2012—2013、2014—2015、2019—2020 年,能源结构对济南市工业化石能源消费碳排放的贡献为负。济南市应继续实施一系列能源结构调整措施,以促进工业碳减排。

碳排放因子是济南市工业化石能源消费碳排放的正向驱动因素,2011—2020 年累计贡献量为 4.88×10^3 t,采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业分别贡献 4.59×10 、 4.83×10^3 、 2.82 t。原因可能与济南市的电力结构以煤电为主有关。2011—2012、2012—2013、2015—2016 年,碳排放因子对济南市工业化石能源消费碳排放的贡献为负。

3 结论与建议

3.1 结 论

(1) 济南市工业总碳排放量由 2011 年的 29.30 Mt 增长到了 2020 年的 43.17 Mt,年均增长率为 4.40%。电力、燃气及水的生产和供应业对工业总碳排放量贡献最大,采矿业贡献最小。

(2) 2011—2020 年济南市工业经济增长与碳排放整体上大部分时间处于较为理想的强脱钩与弱脱钩交替状态,至 2020 年基本实现了强脱钩,但不同工业行业碳排放与经济增长的脱钩状态具有差异,2020 年制造业,电力、燃气及水的生产和供应业均为强脱钩,而采矿业为衰退脱钩。

(3) 济南市工业碳排放驱动因素分析结果表明,总体上,只有产业结构对碳排放起负向驱动,工业人口规模、经济产出、能源强度、能源结构和碳排放因子都起正向驱动。

3.2 建 议

(1) 为应对以煤电为主的电力结构导致的电力、燃气及水的生产和供应业碳排放高的现状,建议充分利用济南市资源禀赋条件,加强对太阳能、风能等清洁能源的使用,降低煤电在济南市电力结构中的比例,可考虑建设智能电网。此外,建议充分利用黄河沿线的区位优势,合理布局输水管道及水处理站点,降低水运输过程中的碳排放,也将有利于济南市工业碳减排。

(2) 未来应推进传统产业低碳改造。一方面严格限制“双高”产业发展,坚决淘汰低效落后产业,加快东部老工业区“双高”产业搬迁改造,促进水泥行业等的整合提升;另一方面,加快发展战略性新兴产业及高新技术产业,加强创新技术投资,引进节能减碳的生产技术,加大对低碳行业的扶持,促进工业产业结构进一步优化升级。

(3) 针对莱芜市并入后济南市脱钩状态欠佳的情况,未来应结合莱芜区和钢城区的产业基础,延长“双高”行业产业链,以实现工业碳排放与经济发展脱钩的稳定化和常态化。

参考文献:

- [1] 陈瑶.区域异质视角下中国工业 CO₂协同减排及扩展效应分析[J].学海,2022(6):98-105.
- [2] 杨新明,钟雅琪,李国锋,等.典型工业城市大气降尘中重金属分布特征及其来源解析——以济南市为例[J].环境化学,2022,41(1):94-103.

[3] 冯瑜.济南争当“碳”路先锋[N].济南日报,2022-06-16(1).

[4] 戴胜利,张维敏.中部六省工业碳排放影响效应及其变化趋势分析[J].工业技术经济,2022,41(4):152-160.

[5] 王凤婷,方恺,于畅.京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证[J].工业技术经济,2019,38(8):32-40.

[6] TAPIO P.Towards a theory of decoupling:degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J].Transport Policy,2005,12(2):137-151.

[7] ANG B W,ZHANG F Q,CHOI K H.Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J].Energy,1998,23(6):489-495.

[8] ANG B W.Decomposition analysis for policymaking in energy:which is the preferred method? [J].Energy Policy,2004,32(9):1131-1139.

[9] 周衍平,李晶,陈会英.清洁能源示范省政策对试点地区碳排放量及经济发展水平的影响——基于多期 PSM-DID 的验证[R].青岛:山东科技大学经济管理学院,2023.

[10] 刘博文,张贤,杨琳.基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(4).

[11] 袁伟彦,方柳莉,罗明.中国工业碳排放驱动因素及其脱钩效应——基于时变参数 C-D 生产函数的分解和测算[J].资源科学,2022,44(7):1422-1434.

[12] 陈芳,曹晓芸.长三角差异化工业碳达峰路径研究[J].苏州大学学报(哲学社会科学版),2022,43(4):41-51.

[13] 田华征,马丽.中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J].自然资源学报,2020,35(3):639-653.

[14] 郭倩雯.济南市碳排放计算及排放特征分析[D].济南:山东大学,2014.

[15] 张雪华,董会忠.“2+26”城市碳排放时空演变特征及其驱动因素研究[J].资源开发与市场,2021,37(12):1448-1456.

[16] LIU Z,GUAN D,WEI W,et al.Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J].Nature,2015,524(7565):335-338.

[17] 国家统计局.工业生产者出厂价格指数[EB/OL].[2022-12-15].https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm? cn=C01.

[18] 济南市统计局,国家统计局济南调查队.2021 年济南市国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].[2022-12-15].http://jntj.jinan.gov.cn/art/2022/3/4/art_18254_4745381.html.

[19] 马艳梅,吴玉鸣.山东省工业碳减排政策研究——基于空间效应视角[J].生态经济,2019,35(7):39-43.

[20] 魏营,杨高升.低碳试点城市工业碳排放脱钩因素分解研究——以镇江市为例[J].资源开发与市场,2018,34(6):766-773.

[21] 韩媛媛,皮荷杰,时泽楠,等.京津冀地区工业 CO₂ 排放测度及其影响因素研究[J].世界地理研究,2020,29(1):140-147.

[22] LIN B,XU B.Growth of industrial CO₂ emissions in Shanghai city:evidence from a dynamic vector auto-regression analysis[J].Energy,2018,151:167-177.

[23] CHAI J F,LEI P H,XIA X Y,et al.Pollution patterns and characteristics of perfluorinated compounds in surface water adjacent potential industrial emission categories of Shanghai, China[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2017,

145:659-664.

[24] 陈传美.重点钢铁企业搬迁对当地税源的影响[D].济南:山东大学,2018.

编辑:陈锡超
 （收稿日期:2022-11-07）

（上接第 1439 页）

[14] 陈子栋,黄林培,陈丽,等.云南 4 个湖泊浮游生物碳、氮稳定同位素的季节变化及其影响因子[J].湖泊科学,2021,33(3):761-773.

[15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》委员会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[16] 胡京九,张虎才,常凤琴,等.程海表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素[J].沉积学报,2020,38(2):340-348.

[17] 张龙吴.大屯海和长桥海沉积物有机质空间分布特征及其来源示踪[D].昆明:云南师范大学,2019.

[18] 曾海鳌,吴敬禄.外源对太湖河口沉积物有机质贡献的同位素示踪[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(1):109-114.

[19] 杨曦光,黄海军,严立文,等.近岸水体表层悬浮泥沙平均粒径遥感反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(2):164-169.

[20] 张龙吴,张虎才,常凤琴,等.云南异龙湖沉积物粒度空间变化特征及其环境指示意义[J].第四纪研究,2019,39(5):1159-1170.

[21] 吴汉,常凤琴,张虎才,等.泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素[J].沉积学报,2016,34(4):679-687.

[22] 顾成军,戴雪荣,张海林,等.巢湖沉积物粒度特征与沉积环境[J].海洋地质动态,2004,20(10):10-13.

[23] 李东义,徐勇航,王爱军,等.福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析[J].沉积学报,2015,33(4):724-734.

[24] 李华勇,张虎才,陈光杰,等.云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J].沉积学报,2017,35(3):499-507.

[25] 冯仡哲,张虎才,常凤琴,等.云南剑湖水体及表层沉积物氮、磷空间分布特征及对湖泊环境的影响[J].第四纪研究,2020,40(5):1251-1263.

[26] 吕晓霞,宋金明,袁华茂,等.南黄海表层不同粒级沉积物中氮的地球化学特征[J].海洋学报,2005,27(1):64-69.

[27] 吕晓霞,宋金明.南黄海表层沉积物中氮的区域地球化学特征[J].海洋科学进展,2003,21(2):174-180.

[28] 苗慧,沈峥,蒋豫,等.巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J].生态环境学报,2017,26(12):2120-2125.

[29] 李雷.巢湖湿地沉积物中有机碳、氮、磷分布特征及其相关性研究[D].合肥:安徽师范大学,2010.

[30] 张晋,李安春,万世明,等.南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(2):1-10.

[31] PETERSON B J,FRY B.Stable isotopes in ecosystem studies[J].Annual Review of Ecology and Systematics,1987,18(1):293-320.

[32] RENBERG I,BRÄNNVALL M L,BINDLER R,et al.Stable lead isotopes and lake sediments - a useful combination for the study of atmospheric lead pollution history[J].Science of the Total Environment,2002,292(1):45-54.

编辑:徐婷婷
 （收稿日期:2022-12-22）