

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.03.007

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:张巍,徐可欣,李丹妮.“双碳”目标下陕西省工业碳减排路径模拟研究[J].西安理工大学学报,2024,40(3):373-381.

ZHANG Wei, XU Kexin, LI Danni. Simulation study of industrial carbon emission reduction path in Shaanxi Province under the “Double-carbon” target[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(3): 373-381.

“双碳”目标下陕西省工业碳减排路径模拟研究

张巍, 徐可欣, 李丹妮

(陕西科技大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 实现“双碳”目标,陕西省工业经济必须推进碳减排。为统筹经济社会发展确定减排最优路径,本文利用2005—2021年的相关数据,对STIRPAT模型中的变量进行扩展,通过岭回归分析,构建出陕西省工业碳排放预测方程。设置未来陕西省工业经济发展的基准情景、低速发展情景和高速发展情景,通过情景参数设定,模拟分析9种途径下陕西省工业2060年前的碳排放量,选择出陕西省工业经济的最优减排路径,即人口规模最早在2021年达峰,最晚在2030年达峰;工业经济增速不超过6.5%,且持续下降;按照国家约束性目标控制碳排放强度;化石能源消费比重年均降幅保持在-3.3%至-3.05%之间。陕西省工业经济最早在2052年,最晚在2056年实现碳中和。根据研究结果,对陕西省工业碳排放的影响因素进行了讨论,提出推广节能降碳技术、推进能源结构调整、优化产业降碳格局、完善市场化机制等建议。

关键词: 双碳目标; 工业碳减排; STIRPAT模型; 情景模拟

中图分类号: F427

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)03-0373-09

Simulation study of industrial carbon emission reduction path in Shaanxi Province under the “double-carbon” target

ZHANG Wei, XU Kexin, LI Danni

(School of Economics & Management, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To achieve the “double-carbon” goal, it is necessary for the industrial economy of Shaanxi Province to promote carbon emission reduction. In order to determine the optimal path of emission reduction for coordinated economic and social development, this paper uses the relevant data from 2005 to 2021, extends the variables in the STIRPAT model, and constructs the industrial carbon emission prediction equation in Shaanxi Province through ridge regression analysis. Setting the benchmark scenario, low speed development scenario and high-speed development scenario for the industrial economic development of Shaanxi Province in the future, this paper simulates an analysis of the carbon emissions by Shaanxi Province industry in 9 ways before 2060 through the scenario parameter setting. It selects the optimal emission reduction path of industrial economy of Shaanxi Province, that is, the population size reaches the peak in 2021 at the earliest and 2030 at the latest; the growth rate of industrial economy does not exceed 6.5%, and the carbon emission intensity is controlled according to the national binding target; the annual decline of fossil energy consumption remains between -3.3% and -3.05%. The industrial economy of Shaanxi Province will achieve carbon neutrality by 2052 at the earliest and by 2056 at the latest. According to the research results, the influencing factors of industrial carbon emission in Shaanxi

收稿日期: 2023-10-13; 网络首发日期: 2024-01-10

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20240109.1656.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171281); 陕西省软科学资助项目(2023-CX-RKX-045)

通信作者: 张巍,男,硕士,副教授,研究方向为国民经济管理与可持续发展。E-mail: 406940188@qq.com

Province are discussed, and it put forward suggestions including promoting energy conservation and carbon reduction technology, thus promoting energy structure adjustment and optimizing industrial carbon reduction pattern and perfecting the market mechanism.

Key words: double carbon target; industrial carbon emission reduction; STIRPAT model; scenario simulation

陕西省地处“一带一路”建设的核心区,自改革开放以来经济增长迅速,工业为全省经济稳增长提供了强有力的支撑。随着工业实力的不断提升,工业发展对能源的依赖程度在不断加强,工业能耗呈现递增趋势,2022 年全省工业能源消费量占能源终端消费总量的 68.9%,工业能源产生的碳排放量持续上升,已经带来较为严重的环境问题。加大工业碳减排力度,推动减污降碳协同增效,已经成为推进陕西省工业绿色低碳转型的主要工作内容。分析陕西省工业碳排放影响因素,预测工业碳排放趋势,并在工业部门进行碳减排路径设计,对于实现陕西省“碳达峰”目标和“碳中和”愿景具有重要的现实意义。

已有关于工业碳排放的研究主要集中在碳排放量的测算、影响因素、碳达峰预测等方面。碳排放量的计算方法主要有实测法、模型估算法和碳排放系数法。实测法需要通过专业的检测设备,计算结果误差较大。模型估算法主要用于国家层面的宏观碳排放计算。因此在计算区域或行业碳排放量时通常采用碳排放系数法,即能源消费量乘以各能源相对应的碳排放系数。碳排放系数主要采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)、国家发改委和国家碳排放管理标准委发布的工业企业碳排放核算方法和参照指南^[1]。已有研究表明,采用碳排放系数法的误差很小,更贴近中国实际^[2]。工业碳排放的影响因素方面,学者们主要采用 Tapio 脱钩模型、空间计量模型与 LMDI 方法等进行分析,认为工业化水平、能源强度、能源结构、产业结构、技术进步、投资效率等是影响工业碳排放的主要因素^[3-6]。碳达峰是国家、地区或行业的年度碳排放量在增长到一定峰值之后逐步下降的过程。工业碳达峰的预测,基本上是根据碳排放的影响因素,结合情景分析来预测达峰年份和峰值,采用的预测模型主要有 Kaya 恒等式、EKC 模型、LEAP 模型、CGE 模型和 STIRPAT 模型等^[7-10]。相比较其他模型中将环境压力与各个影响因素之间的关系简单地处理为同比例线性关系,STIRPAT 模型(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology)是一个多变量非线性模型,提供了一个人文因素对环境影

响的因果分析框架,更能反映出多种因素变化对环境压力的影响变化程度,因此逐渐成为碳排放影响因素分析和预测的主流手段^[11]。

梳理相关文献可以看出,当前对于工业碳排放的研究较为全面、系统,集中于回答区域或产业实现“双碳”目标存在的问题和挑战以及构建碳减排模式^[12]。但对于工业碳减排路径的研究多停留在定性分析的阶段,缺乏根据区域实际情况进行最优路径的量化探索。鉴于此,本文借鉴相关研究,在测算陕西省工业碳排放量的基础上,构建碳排放预测方程,对“双碳”目标下陕西省工业碳减排路径进行情景模拟,以选择出最优减排路径。本文对情景分析法进行深入探讨,力求为工业碳减排最优路径的选择建立一种范例,希望研究成果能够为陕西省在实现《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(简称《意见》)和《2030 年前碳达峰行动方案》(简称《方案》)分解的省级目标方面出台相应政策提供更精准的决策支撑,对国内其他地区也有一定的借鉴作用。

1 研究方法

本文主要采用情景分析法,通过参数的设置对不同减排路径下的发展情景进行模拟,预测陕西省工业部门整体 2060 年前的碳排放量变化趋势,根据模拟结果确定统筹经济社会发展和实现“双碳”目标的最优路径,回答陕西省工业能否提前实现碳中和,并提出发展对策建议。

1.1 碳排放量计算方法

本文采用工业部门的终端能源消费量计算碳排放量,计算公式为:

$$C = \frac{44}{12} \sum_j E_j V_j F_j \quad (1)$$

式中: C 表示工业能源消费碳排放总量; E_j 表示第 j 种能源消费的实物量; V_j 表示第 j 种能源的折标准煤系数; F_j 表示第 j 种能源的碳排放系数;44/12 表示二氧化碳的分子量与碳原子量的比值。查询《中国能源统计年鉴》和相关文献^[13],各种能源的折标准煤系数和碳排放系数见表 1。

表1 各种能源的折标准煤系数和碳排放系数

Tab. 1 Converted standard coal coefficient and carbon emission coefficient for various energy sources

能源名称	原煤	焦炭	天然气	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	电力
折标准煤系数	0.714 3	0.971 4	1.330 0	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	0.122 9
碳排放系数	0.755 9	0.855 6	0.448 3	0.586 0	0.553 8	0.574 3	0.591 9	0.618 5	0.267 8

1.2 碳排放量预测模型

STIRPAT 模型是被广泛采用的对环境压力预测的模型,其基本形式为:

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (2)$$

式中: I 代表环境压力; P 、 A 、 T 分别代表三个影响因素,即人口规模、富裕程度、技术水平; a 、 b 、 c 、 d 为弹性系数; e 为模型误差项。根据研究的需要,STIRPAT 模型可以对 P 、 A 和 T 三个因素进行扩展,引入无量纲变量,既能评估各因素对环境压力的影响程度,也可以通过参数估计来进行预测。本文的研究对象为工业部门,环境压力选择碳排放量,根据实证的需要,对相关变量进行修正和扩展。

1.3 情景模拟

“情景”是对事物未来发展状态的可能性的描述。情景分析是对可能出现的情况或引起的后果做出预测的方法。情景模拟就是根据判定的碳排放的重要影响因素,对各因素的未来发展做出预计,即对 STIRPAT 模型中的变量进行基本参数设定,然后改变变量的参数值,模拟可能出现的状态,通过设定不同发展情景预测碳排放趋势并进行比较分析。将情景模拟法用于碳排放量预测中,可比较选择出碳减排的优化路径。

本文设定未来陕西省工业经济发展情景主要有三种。

1) 基准情景,即按照目前增速和政策进行发展的模式。该情景下,陕西省工业经济平稳运行,不采取额外的减排行动,未来能源消费仍然以煤炭等化石能源为主,低碳技术应用率不高,能源效率提升速度不快。作为比较的基准点,基准情景为不同低碳政策的实施效果提供了参照。

2) 低速发展情景,即受各种环境要素影响,工业经济体量增长放缓,同时为了更快促进碳达峰和实现碳中和而采取低碳发展模式。该情景下,经济发展虽然还是主要目标,但为了实现《意见》和《方案》中的主要目标,会在一定程度上降低经济增速,同时加大节能减排技术应用和能源结构调整的力度。因此,本文假定工业经济增速处于低位值变化,碳排放强度和能源结构的降幅呈现高位值变化。

3) 高速发展情景,是为了保持经济社会快速发

展,适当放宽碳减排政策措施的发展模式。当前国际政治经济形势波谲云诡,全球气候谈判举步维艰,后疫情时代全球经济复苏乏力。用高速发展情景来模拟各种风险冲击下,中国为保证经济增长而放宽产业与能源转型约束。陕西省工业经济产出以高位值增长,碳排放强度呈现低位值变化,而降低原煤消费则适当放缓,能源结构的变化处于低位值。

本文将基于样本期的数据进行回归分析,确定扩展的 STIRPAT 模型中的各项系数,再依据发展情景,按照五年规划的时间阶段对相关变量的变化进行设置,根据参数赋值预测陕西省工业碳排放量,并分析变化趋势,预测年份为 2022—2060 年。

2 陕西省工业碳减排路径模拟

2.1 模型扩展

参照已有研究,本文对陕西省工业碳减排路径模拟分析时,需要对 STIRPAT 模型中的因素进一步扩展。用碳排放量 C 代表陕西省工业经济产生的环境压力 I 。经济生产的最终目的都是满足人类生存与发展的物质产品,因此人口规模是影响工业碳排放的重要因素。本文在进行分析时,把全省总人口规模作为扩展的 STIRPAT 模型中的一个解释变量。其次,用经济产出代表富裕程度 A ,是碳排放的驱动因素,本文用人均工业增加值来表示经济产出。要实现“双碳”目标,必须大力推动绿色低碳技术创新,随着清洁能源的大量利用,碳排放强度逐渐降低,碳排放水平会持续下降,最终实现碳中和。因此本文在分析时,将 STIRPAT 模型中的技术水平 T 扩展为影响陕西省工业碳排放的两个因素,即碳排放强度和能源结构两个变量。最终确定的研究变量说明见表 2。

构建扩展的模型方程为:

$$C = aP^{\beta_1} A^{\beta_2} T^{\beta_3} S^{\beta_4} \quad (3)$$

对方程左右两边取自然对数,得到:

$$\ln C = \ln a + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln T + \beta_4 \ln S \quad (4)$$

式中: β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为弹性系数,表示当 P 、 A 、 T 、 S 每变化 1% 时,引起 C 的 $\beta_1\%$ 、 $\beta_2\%$ 、 $\beta_3\%$ 、 $\beta_4\%$ 的变化。

表 2 陕西省工业碳排放预测方程各变量说明

Tab. 2 Explanation of each variable for the industrial carbon emission prediction equation in Shaanxi province

变量	单位	变量说明
碳排放量 C	10^4 t	工业能源消费产生的碳排放量
人口规模 P	10^4 人	总人口数
经济产出 A	10^4 元/人	人均工业增加值(按行业增加值和总人口数计算)
碳排放强度 T	t/ 10^4 元	单位工业增加值排放的二氧化碳
能源结构 S	%	化石能源在工业能源消费总额中所占的比例

2.2 数据来源

根据陕西省的实际情况,本文确定 2005—2021 年为研究基期,选取年末总人口数、工业增加值、能源消费等数据进行研究,数据来源于《陕西统计年鉴》(2006—2022),其中:①人口数来源于年鉴中的“年底总人口”;②为保证数据的可比性,以 2005 年为基准年,按照“分行业增加值指数”对工业增加值进行处理;③按照处理后的工业增加值和人口数计算“人均工业增加值”;④根据各年度“主要能源平衡

情况”中的工业各种能源的终端消费量,计算工业能源消费量,以标准煤记;⑤利用式(1)测算工业碳排放量;⑥以每年的工业碳排放量除以处理后的工业增加值计算碳排放强度。

2.3 岭回归分析

参阅相关文献,为消除影响陕西省工业碳排放的变量间的多重共线性问题,提高方程参数估计的准确性,本文运用 SPSS 软件对式(4)进行岭回归分析,结果见表 3。

表 3 岭回归估计结果

Tab. 3 Ridge regression estimation results

变量	系数	标准误差	标准系数	T 统计值	sig
$\ln P$	2.914	0.985	0.252	2.958	0.013
$\ln A$	0.704	0.052	1.146	13.520	0.000
$\ln T$	0.395	0.132	0.305	2.998	0.012
$\ln S$	0.886	0.337	0.178	2.625	0.024
Constant	-15.129	8.118	0.000	-1.864	0.089

注: $R^2=0.993$, F 值=207.979, $\text{sig } F=0.000$ 。

从岭回归的拟合结果来看,可决系数 R^2 为 0.993, F 值为 207.979, $\text{sig } F$ 为 0.000,说明回归方程显著。 $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 、 $\ln S$ 通过了 5% 的显著性水平检验,常数项通过了 10% 的显著性水平检验,拟合效果良好。因此得到岭回归方程为:

$$\ln C = 2.9141 \ln P + 0.704 \ln A + 0.395 \ln T + 0.886 \ln S - 15.129 \quad (5)$$

从系数来看,人口规模、人均工业增加值、碳排放强度和能源结构都是陕西省工业碳排放增长的驱动因素。其中,人口规模的影响最大,数量每增长 1%,陕西省工业能源消费产生的碳排放将增加 2.914%。化石能源消费比重的影响排在第二位,每提高 1%,陕西省工业能源消费产生的碳排放将增加 0.886%。人均工业增加值和碳排放强度每增加 1%,碳排放量就分别增加 0.704% 和 0.395%。

基于回归分析结果,构建出陕西省工业碳排放预测方程为:

$$C = \exp(2.9141 \ln P + 0.704 \ln A + 0.395 \ln T + 0.886 \ln S - 15.129) \quad (6)$$

将陕西省工业部门相关变量的历史数据带入式(6)中计算 2005—2021 年的碳排放量拟合值,比较拟合值与利用式(1)计算的估算值,平均误差百分比为 2.78%,表明误差较小,可以在接受范围之内,进一步说明扩展的 STIRPAT 模型的拟合效果较好,符合实证精度要求。

2.4 情景参数设定

基于扩展的 STIRPAT 模型,对未来陕西省工业碳排放量进行预测,需要首先确定岭回归方程各变量的数值。可以对人口规模、经济产出、碳排放强度和能源结构等变量进行参数设定,再带入预测方程中进行测算。为简便预测和减少误差,对变量的参数设置固定变化率。本文将样本期最近五年的各变量年均增速设定为基期值,根据变量的发展趋势在基期值基础上设定固定变化率作为未来阶段的增速基准值。

1) 人口规模。《国家人口发展规划(2016—2030)》提出我国人口变动的趋势之一是“2030 年前后达到峰值,此后持续下降”。本文按 2030 年人口达峰设定增速基准值,即:2030 年前年均人口增长

2.5 路径模拟

按照陕西省工业经济发展的基准、低速、高速三种

情景,再结合上文中的变量增速参数设定,本文将未来陕西省工业经济发展的路径模拟为 9 种,见表 5。

表 5 陕西省工业经济发展路径设定

Tab. 5 Development path setting of industrial economy in Shaanxi Province

情景分类	模拟路径	人口规模	人均工业增加值	碳排放强度	能源结构
低速	路径 1	低速	低速	低速	低速
	路径 2	低速	低速	基准	基准
	路径 3	低速	低速	高速	高速
基准	路径 4	基准	基准	低速	低速
	路径 5	基准	基准	基准	基准
	路径 6	基准	基准	高速	高速
高速	路径 7	高速	高速	低速	低速
	路径 8	高速	高速	基准	基准
	路径 9	高速	高速	高速	高速

综合上述路径设定,按照表 4 中的变量增速参数设定结果,利用式(6)对 2022—2060 年间陕西省

工业碳排放量进行预测,得到 9 种路径下的碳排放数据,见图 1。

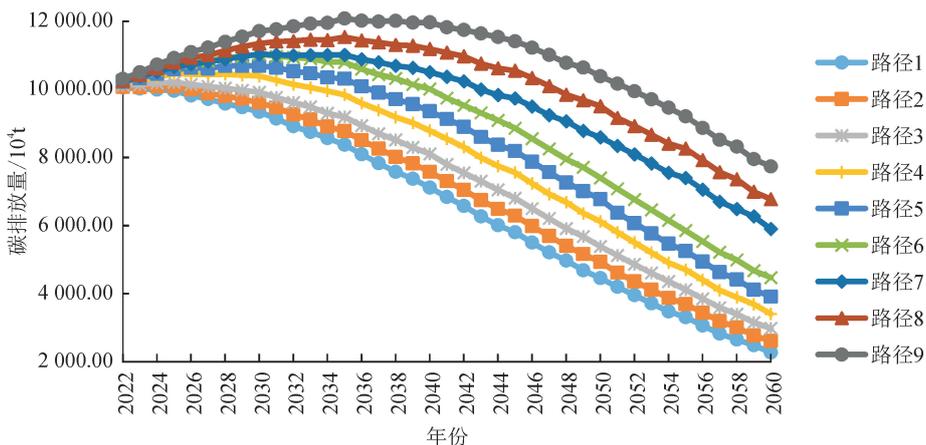


图 1 2022—2060 年陕西省工业碳排放量预测结果

Fig. 1 Forecast results from industrial carbon emissions in Shaanxi Province from 2022 to 2060

根据预测结果,不同路径下陕西省工业经济的碳排放达峰时间、峰值以及 2060 年的碳排放量见表 6。

3 陕西省工业碳减排最优路径分析

3.1 最优路径

基于扩展的 STIRPAT 模型,本文构建陕西省工业碳排放预测方程,模拟分析 9 种路径下的陕西省工业 2022—2060 年碳排放量变化。由结果可知,路径 1 至路径 5 都可以在 2030 年前实现达峰,路径 6 和路径 7 可以在 2030 年实现碳达峰,而路径 8 和路径 9 不能在 2030 年前实现碳达峰。从不同情景来看,高速发展情景下,所有的工业发展路径都不能

如期实现碳达峰目标,因此不能作为陕西省工业经济的碳减排最优路径;低速发展情景和两个基准情景下,都能在 2030 年前实现碳达峰目标。低速发展情景需要设定过低的人口增长目标和人均工业增加值增速目标,鉴于陕西省经济社会发展仍不很发达,在推进中国式现代化建设中仍然需要保持一定的增长速度,所以低速发展情景虽然能够实现碳达峰目标,但是不符合全省经济社会发展战略要求,就不能作为陕西省工业碳减排的最优路径。

进一步分析表明,控制人口增长、经济增长、降低碳排放强度和化石能源消费比重,能够保证陕西省工业经济实现碳达峰目标;进一步降低人口和经济增速,

同时加大碳排放强度降低幅度以及进一步提高非化石能源消费比重对实现碳中和愿景更为有利。

表6 陕西省工业碳排放量预测

Tab.6 Peak time and peak value of carbon emissions of industrial economy of Shaanxi province

碳排放路径	碳达峰时间/年	碳排放峰值/ 10^4 t	2060年碳排放量/ 10^4 t
路径1	2022	10 051.10	2 272.49
路径2	2024	10 088.29	2 611.01
路径3	2025	10 201.88	2 981.82
路径4	2025	10 459.38	3 406.42
路径5	2028	10 687.63	3 913.85
路径6	2030	11 032.36	4 469.70
路径7	2030	11 026.42	5 895.06
路径8	2035	11 534.92	6 773.21
路径9	2035	12 079.41	7 735.13

通过上述分析,结合“双碳”目标与陕西省经济社会发展规划目标,可以选择路径3、路径4和路径5所代表的发展区间作为陕西省工业碳减排的最优路径,即:人口规模最早在2021年达峰,最晚在2030年达峰;工业经济增速不超过6.5%,且持续下降;按照国家约束性目标控制碳排放强度;化石能源消费比重年均降幅保持在一3.3%至一3.05%之间。

3.2 碳中和时间预测

森林是陆地生态系统中最大的碳库,固碳作用非常显著,在实现“双碳”目标中发挥着不可替代的作用。根据李树强等^[14]的计算,2020年陕西省199个国有林场森林植被固碳量为 5.027×10^7 t。假设2060年前维持陕西省森林蓄积量不变,且陕西省工业经济的碳排放全部被森林碳汇吸收,则按照上文中的碳减排最优路径,可以推算出陕西省工业经济实现碳中和的时间最早为2052年,最晚为2056年。

4 讨论与建议

4.1 讨论

本文利用碳排放系数法、扩展的STIRPAT模型和情景分析法,对“双碳”目标下的陕西省工业碳减排路径进行模拟分析。根据研究结果,对影响陕西省工业碳排放的因素,即人口规模、经济产出、碳排放强度和能源结构进行讨论。

1) 从长期来看,人口规模负增长是一种不可逆转的趋势,因此要重视挖掘“人才红利”。国家统计局发布数据显示,2022年全国人口负增长。从陕西省的统计数据来看,“十三五”期间陕西省人口规模

年均增长0.56%,2022年陕西省人口自然增长率为-0.28%。在常住人口比上年增加的背景下,人口规模负增长的主要原因是出生率的下滑。生育率下降会导致人口老龄化进程的加快,加重劳动力缺乏、社保赡养压力增加等问题,引发出增长动力减弱,对国民消费结构、产业结构、投资结构等造成影响。碳减排不能以牺牲经济发展作为代价,为保证工业经济的稳健增长,必须保证劳动力的有效供给。因此,人才就是发展的宝贵资源,把选拔、培养和使用人才作为发展中的战略工程,以此抵消人口规模的负增长效应。

2) 在“双碳”目标要求下,陕西省工业经济需统筹质的有效提升和量的合理增长,必须推进工业绿色低碳转型发展。优化产业结构是陕西省工业碳减排的关键。在调整工业产业结构时,应逐步降低高耗能工业在国民经济中的比重,形成以资源减量化、排放低量化、智能数字化为主要特征的低碳产业体系。必须顺应产业升级和消费升级趋势,坚持高端化、智能化、绿色化发展方向,严把高耗能、高排放、低水平(简称“两高一低”)项目准入关,推行绿色低碳设计,组织开展存量项目的能效水平审核,挖掘节能减排潜力,探索建设工业“绿岛”、“零碳或近零碳”供应链示范项目,打造低碳企业群和低碳产业链。

3) 降低碳排放强度仍然是陕西省工业碳减排的重点。从碳汇来看,未来陕西省的森林蓄积量变化不大,只能吸收部分碳排放,实现碳中和主要还是要依靠减少碳排放量,碳中和目标能否实现的关键在于通过CCUS(carbon capture, utilization and storage,碳捕获、利用与封存技术)应用。但是由于工业部门具有“碳锁定效应”,CCUS的大规模普及应用还存在较大的挑战,因此现阶段新能源的开发利用和加强低碳技术创新是降低碳排放强度的核心。

4) 减少化石能源消费比重,进而优化能源结构有助于减少陕西省工业碳排放,有助于尽快实现“双碳”目标。陕西省工业能源消费中以一次能源为主,在三种化石能源中,煤炭占比很高且含碳量最高。在保障能源安全稳定的前提下降低煤炭依赖性,需大幅提升能源利用效率,提升非化石能源占比。发展非化石能源,主要在于加快推进工业节能提效,构建以新能源为主体的新型电力系统,实现彻底的清洁能源替代和零碳替代。

4.2 建议

“双碳”目标下,实现陕西省工业经济高质量发展,扎实推进节能降碳意义重大。本文聚焦碳减排

最优路径的选择,为助推陕西省工业绿色低碳转型,提出以下对策建议。

1) 推广节能降碳技术。制定重点行业节能减排先进适用技术目录,积极推广工业重大低碳技术目录和高耗能行业重点领域节能降碳技术改造指南,推动工业主要产品工艺升级与节能技术改造,开展以节能降碳为目的的全流程优化控制研究与应用,通过管理手段降低能源漏损率,推动重点用能设备节能增效。加大能源 R&D 支出,鼓励研发创新,加强对企业技术革新支持力度,组织实施多元化储能、资源综合利用、智慧能源管控中心建设、节能产业培育等示范项目,全面推广节能示范项目的先进经验。加强信息技术在能源消费与碳排放等领域的监测与分析应用,提升重点用能设备碳排放的数字化管理、网络化协同、智能化管控水平。打造重点行业碳达峰碳中和公共服务平台,强化数字化信息化在工业领域的降碳增效作用。加大政策引导和资金支持,推进“减碳去碳”向零碳工厂、低碳企业的转变。

2) 推进能源结构调整。加强工业生产流程节能综合治理,有序推进高碳产业煤炭减量替代,推广节能降耗技术。发挥煤炭原料功能,提升能源转换效率和资源利用率,推动煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展。促进煤炭分质分级梯级高效清洁利用,有序引导工业用天然气增长,提升氢能、太阳能、风能、地热能等清洁能源比重。推进源网荷储一体化和多能互补发展,加快工业绿色微电网建设,引导企业、园区加快分布式光伏、分散式风电、多元储能、高效热泵等一体化系统开发运行。

3) 优化产业降碳格局。加快产业结构升级,壮大绿色环保战略性新兴产业,着力构建“6+5+N”现代制造业新体系,加快促进低碳高效产业的发展。加快化工、钢铁、建材等原材料产业布局优化和工艺流程低碳化改造,推进食品、轻工、纺织等传统产业提质升级。立足高技术层次、高产品附加值、高配套能力、高市场竞争力发展目标,培育低碳装备优秀技术企业,推行绿色供应链管理,降低工业平均碳成本。

4) 完善市场化机制。作为一项激励型环境规制制度,碳排放交易是利用市场机制促进节能减排的举措,有利于企业碳减排。陕西省应充分发挥市场机制在碳排放总量和强度双控目标完成中的重要作用,落实全国碳排放交易市场政策,探索在园区内、企业间开展用能权交易,助推企业实施节能技术改造、减碳降污,促进能源高效配置。鼓励企业开展

绿色电力交易,打通认购、交易、使用的绿色通道。落实绿色产品认证与碳标签制度,试点“消费碳额度”(消费碳票)制度,倒逼企业绿色低碳生产方式的转变。鼓励企业参与碳汇项目开发,协同提升生态功能与增强碳汇能力。

参考文献:

- [1] 张朝英,白银芬,朱彩红,等. 工业企业能源消费碳排放核算方法研究[J]. 统计科学与实践, 2022(9): 28-30,50.
- [2] 景侨楠,侯慧敏,白宏涛,等. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 420-427.
JING Qiaonan, HOU Huimin, BAI Hongtao, et al. A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO₂ emissions[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 420-427.
- [3] 刘腾,董洪光,高乐红,等. 宁夏工业碳排放脱钩影响因素分析及减排对策研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2023(4): 356-361.
LIU Teng, DONG Hongguang, GAO Lehong, et al. Factors influencing decoupling of industrial carbon emissions and countermeasures to reduce emissions in Ningxia[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2023(4): 356-361.
- [4] 刘腾,董洪光,高乐红,等. 江苏省工业碳排放演变特征及影响因素识别研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2022, 25(1): 105-111.
LIU Teng, DONG Hongguang, GAO Lehong, et al. Research on identification of evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission in Jiangsu Province[J]. Journal of Xi'an University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2022, 25(1): 105-111.
- [5] 戴梦圆,赵培培,沈晓梅. LMDI 的盐城市工业碳排放影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(2): 14-18.
DAI Mengyuan, ZHAO Peipei, SHEN Xiaomei. Influencing factors of industrial carbon emission in Yancheng City based on LMDI model[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(2): 14-18.
- [6] 关伟,王勇,许淑婷. 中国工业碳排放的网络结构及影响因素研究[J]. 资源与产业, 2023, 25(5): 40-49.
GUAN Wei, WANG Yong, XU Shuting. Network structure and factors of China's industrial carbon emission[J]. Resources & Industries, 2023, 25(5): 40-49.
- [7] 王健,甄庆媛. 经济增长与 CO₂ 排放的关系研究——以长江经济带为例[J]. 金融与经济, 2018(4): 36-45.

- WANG Jian, ZHEN Qingyuan. Growth and carbon dioxide emissions—Taking the Yangtze Economic Belt as an example [J]. *Finance and Economy*, 2018 (4):36-45.
- [8] 蒋惠琴,李奕萱,陈苗苗,等. 碳中和愿景下浙江省工业部门碳达峰预测与实现策略[J]. *地域研究与开发*, 2022,41(4):157-161,168.
- JIANG Huiqin, Li Yixuan, CHEN Miaomiao, et al. Prediction and realization strategy of the carbon peak of the industrial sector in Zhejiang Province under the vision of carbon neutrality[J]. *Areal Research and Development*, 2022,41(4):157-161,168.
- [9] 杜涵蓓,赵立君,刘臣炜,等. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2022,38(8):983-991.
- DU Hanbei, ZHAO Lijun, LIU Chenwei, et al. Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022,38(8):983-991.
- [10] 凯吾沙·塔依尔,黎华,古丽米热·艾尔肯,等. FLUS 与灰色预测模型支持下的乌鲁木齐地区碳排放时空演变与预测[J]. *水土保持学报*, 2023,37(4):214-226.
- TAYIER Kaiwusha, LI Hua, AIERKEN Gulimire, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon emissions in Urumqi region based FLUS and grey prediction model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):214-226.
- [11] 王永刚,王旭,孙长虹,等. IPAT 及其扩展模型的应用研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2015,26(3): 949-957.
- WANG Yonggang, WANG Xu, SUN Changhong, et al. Research progress on the application of IPAT model and its variants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(3):949-957.
- [12] 廖志高,钟震,高英腾,等. “双碳”目标下中国碳减排模式及对策[J]. *广西职业技术学院学报*, 2022,15(1): 1-12.
- [13] 李新运,吴学锰,马俏俏. 我国行业碳排放量测算及影响因素的结构分解分析[J]. *统计研究*, 2014,31(1): 56-62.
- LI Xinyun, WU Xuemeng, MA Qiaoqiao. The measure of China's industry carbon emissions and the structural decomposition analysis of influencing factors [J]. *Statistical Research*, 2014,31(1):56-62.
- [14] 李树强,高丽,李桦,等. 陕西省国有林场森林植被固碳量时空演变及其驱动因素研究[J]. *林业经济*, 2022,44 (11):58-75.
- LI Shuqiang, GAO Li, LI Hua, et al. Study on spatial-temporal evolution and driving factors of forest vegetation carbon sequestration in state forest farms in Shaanxi province [J]. *Forestry Economics*, 2022, 44 (11): 58-75.

(责任编辑 王绪迪)