

资源富集城市的低碳转型路径研究

——基于LEAP模型的分析

蔡子建¹, 史贝贝^{1,2,*}

1. 西北大学 榆林碳中和学院, 西安 710069;

2. 西北大学 经济管理学院, 西安 710127



摘 要 : 资源型城市的转型压力日益凸显, 其低碳转型进程直接关系中国碳达峰碳中和目标的全局推进。本文利用长期能源替代规划系统模型, 以榆林市作为资源型城市的代表, 评估能源结构、能源强度、经济活动、产业构成及城镇化等因素变化对碳排放的影响, 并考察不同路径下的经济效益及企业采用碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS) 技术的意愿。结果表明: 在现有发展趋势下, 榆林市的能源需求与碳排放量在预测期内仍将保持增长态势。其中, 工业与电力生产部门碳排放贡献率超过 80%, 整体能源结构对煤炭的依赖程度仍较高。榆林市低碳转型的总经济成本在未来数年内将持续上升, 但随着燃煤机组在 2040 年前后逐步被淘汰, 总成本将显著下降。此外, 若将生态碳汇与 CCUS 相关收益纳入中国核证自愿减排量市场体系, 将有助于控制整体经济成本。目前企业对 CCUS 装置的建设意愿普遍较低, 主要原因包括技术认知不足、实施成本高于碳市场交易支出, 以及政府引导与补贴政策的缺位。基于此, 本文建议榆林市采取综合配套的碳减排政策, 并注重企业低碳化改造的经济效益, 以期实现榆林市的碳减排目标。

关 键 词 : 碳达峰; 碳中和; 资源型城市; 低碳转型

中图分类号 : C939 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 2097-4981(2026)04-0605-16

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2026-0008

0 引言

碳排放是全球气候变化的主要驱动因素之一。为减缓碳排放, 碳中和理念已被广泛推广, 并在政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 发布的《全球 1.5 °C 温升特别报告》中被强调为实现《巴黎协定》长期温控目标的关键。实现这些目标要求全球碳排放尽早达峰, 并逐步迈向碳中和。然而, 全球碳排放量持续

增长, 在 2024 年达到 363 亿吨的历史新高^[1]。前 10 大温室气体排放经济体 (中国、美国、印度、欧盟、俄罗斯、日本、巴西、印度尼西亚、伊朗和加拿大) 的排放总量为 328.182 亿吨 CO₂ 当量, 占全球总排放量的 90% 以上^①。若这些经济体仍不采取重大行动, 全球将难以成功应对气候变化。作为《巴黎协定》的签署国, 中国通过制定碳达峰碳中和 (“双碳”) 目标应对气候变化。2025 年, 在《巴黎协定》达成 10 周年之际, 中国进一步发布最新的国家目标: 到

① 资料来源: <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters>。

收稿日期: 2026-02-15; 接受日期: 2026-05-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (72103163)

作者简介: 蔡子建(1999—), 硕士研究生, 研究方向为能源经济学和碳减排技术应用。E-mail: 202324175@stumail.nwu.edu.cn

通讯作者: 史贝贝(1992—), 副教授, 研究方向为低碳经济学、能源经济学、碳减排。E-mail: shibeibei@nwu.edu.cn

引用格式: 蔡子建, 史贝贝. 资源富集城市的低碳转型路径研究——基于 LEAP 模型的分析[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(4): 605–620.

CAI Z J, SHI B B. Low-Carbon Transition Pathways for Resource-Rich Cities: An Analysis Based on the LEAP Model[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(4): 605–620.

2035年,中国全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%~10%,非化石能源消费占能源消费总量比重提升至30%以上,森林蓄积量达到240亿立方米以上,风电、太阳能发电总装机容量力争达到36亿千瓦^②。同年,《中共中央办公厅 国务院办公厅关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》指出,碳市场是利用市场机制积极应对气候变化、加快经济社会发展全面绿色转型的重要政策工具^③。

研究表明,在“双碳”目标引导下,中国的低碳城市发展取得显著进展,对城市绿色转型产生积极影响^④。这在能源供应中扮演重要角色的资源型城市发展绿色经济提供了政策启示。资源型城市通常位于能源富集地区,其特点是资源驱动的发展模式。虽然这些城市对中国经济增长至关重要,但也对国家碳排放具有显著影响^⑤。在持续推进的“双碳”目标要求下,中国已将碳减排定位为经济社会发展的核心组成部分。在此背景下,资源型城市的传统重工业面临的制约日益增多,转型需求迫切。转型的核心挑战在于淘汰落后产能,为减排创造空间,并实施科学合理的发展规划以支持地方经济和优化能源结构。在此框架下,为资源型城市制定合理可行的碳减排路径,对实现中国低碳转型和可持续发展至关重要^⑥。

目前,大量研究探讨了资源型城市的低碳转型,关注其驱动因素^⑦、挑战^⑧、发展阶段^{⑨-⑪}和路径选择^{⑫-⑭}等。实现高质量、均衡和可持续的增长已被确定为城市低碳转型的核心目标^{⑮-⑰}。这些研究为构建资源型城市低碳转型的系统框架和路径设计提供了宝贵基础。然而,现有研究侧重单一政策工具或特定减排路径的效果,缺乏整合城市发展中多维因素的综合分析。这种相对狭窄的视角可能导致政策不协调,并对城市关键领域产生非预期的长期影响。

本文旨在填补现有关于资源型城市低碳转型研究的空白,以能源富集型资源城市——榆林市为典型案例展开分析。首先,本文从能源结构与强度、经济活动、产业结构及城镇化等多个维度对榆林市进

行综合考察,系统评估并预测该地区2021—2060年的能源需求与碳排放趋势。其次,本文构建发电行业经济成本核算模型,模拟并分析发电行业大规模配备碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)和新能源发电等技术所产生的经济成本。此外,本文进一步探讨将生态碳汇与CCUS纳入中国核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCER)市场的潜在效益。最后,本文创新性引入Logistic模型,对地方企业加装CCUS装置的意愿展开敏感性分析,旨在厘清企业在碳减排设施部署过程中面临的内在阻力,从而为榆林市政府制定促进企业绿色转型与可持续发展的政策提供科学支撑。

1 研究设计

1.1 研究区域

榆林市为资源富集型城市,位于陕西省北部,预估潜在经济价值超过46万亿元^①,其经济结构以资源开采(尤其是化石能源)及化学工业为主导。该市贡献了中国约13%的原煤产量、5.2%的原油产量和10%的天然气产量^②,成为研究区域低碳转型的典型样本。目前,榆林市高碳发展模式已诱发大气污染、生态退化及高碳排放等严峻环境问题,同时面临资源枯竭与经济可持续性挑战。在全球绿色低碳发展浪潮背景下,为响应中国“双碳”目标,榆林市亟须推动低碳转型,提升区域竞争力,促进可持续发展,为居民营造更高质量的生活环境。

1.2 模型构建

长期能源替代规划系统(Long-range Energy Alternatives Planning System, LEAP)模型为榆林市从能耗双控向碳排放双控转变提供有力支撑。该模型具备精确的碳排放核算、政策影响评估、能源结构优化及区域差异化政策制定能力,能够通过多情景分析、动态模拟和成本效益评估等功能,助力决

② 资料来源: <https://world.huanqiu.com/article/4OSmE0nX0WC>。

③ 资料来源: <https://www.qstheory.cn/20250826/ef5e1f07f0084ca7b7327e2337cb1fa1/c.html>。

④ 资料来源: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26264402。

⑤ 资料来源: https://baike.sogou.com/m/fullLemma?lid=63234578&g_ut=3。

策者设定科学的碳排放控制目标，确定最优减排路径，推动绿色低碳转型。在此基础上，本文结合榆林市的实际情况构建LEAP-Yulin模型，模型主要分为3个部分：1）能源、碳排放及电力供应预测；2）电力生产部门低碳化改造的经济效益模型；3）企业加装CCUS技术的意愿敏感性分析。本文构建基准情景、产业结构调整情景、能源结构调整情景、先进技术应用情景及综合情景5种情景。LEAP-Yulin模型框架如图1所示。

1.2.1 能源需求计算

不同产业的能源需求根据其活动水平和最终用途能源强度计算得出，如式（1）所示^[15]：

$$D_{j,t} = \sum_i^n FG_{i,t} \times EI_{i,j,t} \quad (1)$$

式中： $D_{j,t}$ 为第 t 年第 j 种能源的终端能源需求； $FG_{i,t}$ 为第 i 个产业在第 t 年的经济活动水平； $EI_{i,j,t}$ 为第 i 个产业在第 t 年第 j 种能源的能源消耗强度； n 为统计的产业数。榆林市主要部门的能源需求如表1所示。

居民部门的能源消耗总量可按式（2）计算^[15]：

$$E_R = N_u \times e_u + N_r \times e_r \quad (2)$$

式中： E_R 为居民部门的能源消耗总量； N_u 和 N_r 分别为城市居民和农村居民的户数； e_u 和 e_r 分别为城市居民和农村居民的能源消耗强度。

交通运输部门的能源消耗总量可按式（3）计算^[15]：

$$E_t = Veh_m \times Veh_r \times Veh_p \times E_c \quad (3)$$

式中： E_t 为交通运输部门的能源消耗总量； Veh_m 是货运或客运的周转量； Veh_r 是公路运输或铁路运输所占比例； Veh_p 是不同交通运输工具所占的比例； E_c 是不同交通运输工具的能源消耗量。榆林市交通运输部门能源种类分解如表2所示。

1.2.2 碳排放计算

消耗燃料产生的碳排放总量如式（4）所示^[16]：

$$TC = \sum_{i,j} (FE_{i,j}^c \times FE_j) \quad (4)$$

式中： TC 为碳排放总量； $FE_{i,j}^c$ 为第 i 个产业中第 j 种能源的消耗量； FE_j 为第 j 种能源的排放因子。

电力生产部门的碳排放量参考《企业温室气体排放核算与报告指南发电设施》^[17]计算，如式（5）所示：

$$TC^{pg} = \sum_f (FC_f \times C_{ar,f} \times OF_f \times 44 / 12) \quad (5)$$

式中： TC^{pg} 为电力生产部门的碳排放量； FC_f 为第 f 种化石燃料的消耗量，对固体或液体燃料的单位为t，对气体燃料的单位为 10^4 Nm^3 ； $C_{ar,f}$ 为第 f 种化石燃

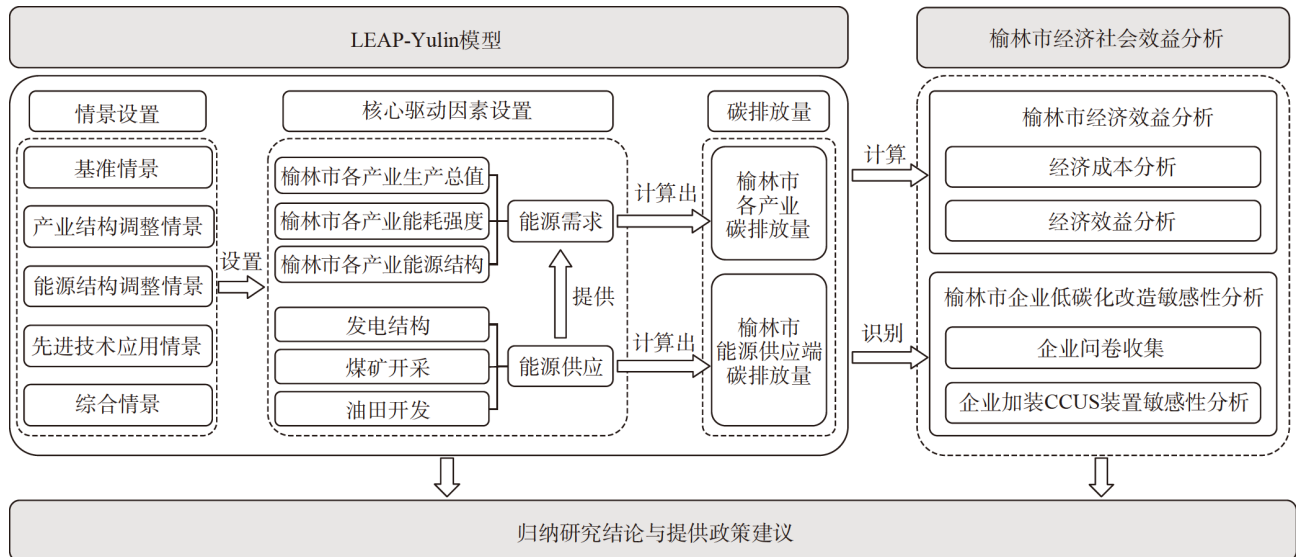


图1 LEAP-Yulin 模型框架

Fig.1 LEAP-Yulin model framework

表1 榆林市主要部门的能源需求

Table 1 Energy demand of major sectors in Yulin City

部门	能源需求种类	单位
农业	煤炭、电力、汽油、柴油	吨标准煤
采矿	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
化工	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
石化	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
有色	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
其他工业	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
建筑业	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
金融服务	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤
居民生活	煤炭、天然气、电力、汽油、柴油	吨标准煤

表2 榆林市交通运输部门能源种类分解

Table 2 Decomposition of energy types in the transportation sector of Yulin City

运输类型	运输方式	运输工具	能源需求种类
客运	公路	公路汽油车	汽油
		公路柴油车	柴油
		公路新能源车	电力
		公路摩托车	汽油
货运	铁路	客运电轨	电力
		客运铁路内燃机	柴油
	公路	货运柴油车	柴油
		货运汽油车	汽油
		货运新能源车	电力
		货运电轨	电力
	铁路	货运铁路内燃机	柴油

料的收到基元素碳含量，对固体或液体燃料的单位为tC/t，对气体燃料的单位为tC/(10⁴ Nm³)；OF_f为第f种化石燃料的碳氧化率，单位为%；44/12为CO₂与碳的相对分子质量之比。

进一步地，为便于比较分析榆林市电力生产部门化石燃料的碳排放量，本文对其中101家发电企业所用燃料的发热量采用实测值。表3为榆林市发电企业温室气体低位发热量和含碳量汇总。

1.2.3 敏感性分析

本文通过敏感性分析，识别各情景下关键参数不确定性带来的具体影响。敏感度系数计算公式如

表3 榆林市发电企业温室气体低位发热量和含碳量汇总

Table 3 Summary of lower heating value and carbon content of greenhouse gases from Yulin City power generation company

项目	热量平均实测值	含碳量平均实测值/(tC/GJ)
烟煤	18.688	0.026 72
煤泥	13.354	0.028 32
煤矸石	11.999	0.027 12
兰炭	22.169	0.028 83
兰炭尾气	75.494	0.021 02
天然气	308.182	0.013 90

注：对固体或液体燃料，热量平均实测值单位为GJ/t；对气体燃料，热量平均实测值单位为GJ/(10⁴ Nm³)。

式(6)所示^[18]：

$$S_a = (\Delta A / A) / (\Delta F / F) \quad (6)$$

式中： S_a 为敏感度系数； $\Delta A / A$ 为结果A的变化率，单位为%； $\Delta F / F$ 为不确定度因子F的变化率，单位为%。敏感度系数由各因子的敏感度相对变化决定。 $|S_a|$ 值越大，评估指标A对不确定度因子F的敏感度越高。敏感度分析的详细内容见附录1^⑥。

1.3 经济社会效益模型构建

1.3.1 经济成本模型

为核算不同情景下电力生产部门低碳化改造的经济效益，全面理性地制定关于榆林市绿色可持续发展的碳减排路径，本文根据既有研究^[19-20]，采用式(7)核算电力生产部门的经济成本：

$$C_T = \sum_{e,j} C_{e,t} \times IC_{e,t} + f_{e,t} \times IC_{e,t} + V_{e,t} \times EG_{e,t} + C_{e,t} \times D_{e,t} \quad (7)$$

式中： C_T 为总成本； $C_{e,t}$ 为第t年第e种发电技术的投资成本； $IC_{e,t}$ 为第t年第e种发电技术的装机容量； $f_{e,t}$ 为第t年第e种发电技术的维修成本； $V_{e,t}$ 为第t年第e种发电技术的可变成本； $EG_{e,t}$ 为第t年第e种发电技术的发电量； $C_{j,t}$ 为第t年第j种能源的成本； $D_{j,t}$ 为第t年第j种能源的需求量。该部门的技术参数指标详见表4（电力生产部门相关数据由附表S2、附表

⑥ 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录1。

S3提供^⑦)。

本文参考现有研究^[21-23]，采用式(8)~式

(11)核算燃煤电厂配备CCUS设施(相关成本数据详见附表S4^⑦)的经济成本:

$$C_T = C_t \times IC_t + C_{CCUS,t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{O\&M,PC,t} + C_{O\&M,CCUS,t} + C_{coal,PC,t} - R_{carbon,CCUS,t}}{(1+r)^t} \quad (8)$$

式中: IC_t 为火电在 t 年的装机容量。

表4 榆林市电力生产部门技术参数指标

Table 4 Technical parameter indicators of Yulin City's power sector

技术指标	单位	技术指标	单位
投资成本	元	销售CO ₂ 收益	元
维修成本	元	燃煤电厂碳排放量	吨
可变成本	元	CO ₂ 捕集率	%
发电量	kWh	CO ₂ 销售价格	元/吨
装机容量	MW	发电寿命	年
化石燃料成本	元/吨	最大利用率	%
化石燃料需求量	吨	过程效率	%
CCUS运维费用	元	发电顺序	-
燃煤电厂燃料成本	元	CCUS投资成本	元
煤炭消费量	吨	煤炭价格	元/吨

$$C_{O\&M,PC,t} = V_{PC,t} \times EG_{PC,t} + f_{PC,t} \times IC_{PC,t} \quad (9)$$

$$C_{coal,PC,t} = P_{coal,PC,t} \times Q_{coal,PC,t} \quad (10)$$

$$R_{carbon,CCUS,t} = \lambda E_{carbon,PC,t} \times P_{carbon,t} \quad (11)$$

式中: C_t 为燃煤电厂第 t 年的投资成本; $C_{CCUS,t}$ 为CCUS设备第 t 年的初始投资; $C_{O\&M,PC,t}$ 和 $C_{O\&M,CCUS,t}$ 分别为第 t 年燃煤电厂和CCUS设备的运维成本; $V_{PC,t}$ 为第 t 年燃煤发电的可变成本; $EG_{PC,t}$ 为第 t 年燃煤发电的发电量; $f_{PC,t}$ 为第 t 年燃煤发电的维修成本; $IC_{PC,t}$ 为第 t 年燃煤发电的装机容量; $C_{coal,PC,t}$ 为第 t 年燃煤电厂的燃料成本; $P_{coal,PC,t}$ 为第 t 年的煤炭价格; $Q_{coal,PC,t}$ 为第 t 年燃煤电厂的煤炭消耗量; $R_{carbon,CCUS,t}$ 为第 t 年销售CO₂的收益; $E_{carbon,PC,t}$ 为燃煤电厂第 t 年的碳排放量; λ 为CO₂捕集率; $P_{carbon,t}$ 为第 t 年CO₂的销售价格; r 为折现率。

1.3.2 经济收益模型构建

碳市场主要分为碳配额交易和CCER市场,生态碳汇和CCUS的减排量最终将纳入CCER市场进行交易,因此榆林市进行碳减排的经济收益主要为CCER市场的收益。CCER市场于2024年重新启动,当年的碳价均价为100元/吨^⑧,本文据此将2021—2024年的碳价均设定为100元/吨。

“十五五”时期的CCER市场将纳入电力、钢铁、有色和化工等高排放产业^⑨,短期内可能会造成CCER市场“供大于需”的局面^[24],该时段的碳价将短暂下降。但从长期角度并结合现有研究看,碳价将会持续上升以助力“双碳”目标的实现^[15,25]。经济收益计算如式(12)所示:

$$EB = N_{i,t} \times P_t \quad (12)$$

式中: EB 为经济收益; $N_{i,t}$ 为第 t 年 i 类型纳入CCER市场的碳排放量; P_t 为第 t 年CCER市场每吨CO₂的价格。

1.3.3 碳汇模型构建

2021年榆林市土地利用分类包括耕地、园地、林地、草地、城镇村及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他土地。本文考虑到耕地碳汇最终进入人类生活,暂不计算;交通运输用地、城镇村及工矿用地中绿化面积相对较少,且难以统计,暂不计算;榆林市地处黄土高原,水域面积较小,暂不考虑水域及水利设施用地的碳汇;其他土地多为设施农用地,暂不计算。因此,榆林市碳汇的土地类型本文主要核算林地和草地。榆林市的林地以乔木林为主,本文采用乔木林的面积代表榆林市的林地面积。

榆林市近年来森林覆盖率由10%增长到36%,以新造林为主(多为乔木林),在固碳方面属于成长状

⑦ 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录2。

⑧ 资料来源: <https://iigf.cufe.edu.cn/info/1013/9570.htm>。

⑨ 资料来源: https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202503/t20250326_1104736.html。

态, 本文参考既有研究^[26-27], 选取4.04 tC/(ha·a)作为林地碳汇系数。基于榆林市地理位置、城镇化等因素, 本文结合现有研究^[28-29], 采用0.021 tC/(ha·a)作为草地碳汇系数。

本文参考既有研究^[30]计算生态碳汇吸收CO₂的量, 如式(13)所示:

$$H = \sum_{l=1}^2 C_l \times S_l \tag{13}$$

式中: H 为碳汇, 单位为tC; C_l 为第 l 类土地的碳吸收因子, 单位为tC/(ha·a); S_l 为第 l 类土地的面积, 单位为ha。 $l=1$ 对应林地, $l=2$ 对应草地。

1.3.4 企业加装CCUS装置的意愿模型构建

(1) Logistic回归模型

为识别企业加装CCUS装置意愿的影响因素, 进一步明确其影响程度和显著性, 本文构建计量经济模型。企业加装CCUS装置涉及企业的重大投资, 且由于经济性问题, 企业无法立即作出建设与否的决策。为更准确评估企业的建设意愿, 本文将因变量(建设意愿)设置为0~10供企业选择, 从而区分不同企业的建设意愿, 属于有序变量。

有序多分类Logistic回归模型在此类情景中具有突出的适用性, 并得到广泛采用。该模型适用于因变量为有序多分类变量的情况, 常用于分析事件发生的概率及其等级变化, 尤其适合测量意愿强度等依序变化的变量。该模型对自变量形式包容性强, 既可包含有序分类变量(如对CCUS技术的了解程度)、名义分类变量(如企业规模), 也可纳入连续变量, 且不区分定性与定量类型。本文选用该模型对影响CCUS建设意愿的因素进行回归分析, 旨在更客观地识别各因素的作用方向, 并更精确地量化其影响程度。

(2) 统计结果分析

不同性质企业加装CCUS装置的建设意愿如表5所示。纯发电行业对CCUS装置的建设意愿均值为4.47, 其他行业中建设意愿均值较高的是建材行业(6.60), 其次是化工行业(5.00)。企业性质中建设意愿值较高的是私营企业(6.50), 国有企业和联营企业的建设意愿值均小于5.00。经营规模和CCUS装置的建设意愿值可能存在相关性, 即企业规模越小,

表5 受访企业对CCUS装置的建设意愿均值
Table 5 Average willingness of surveyed enterprises to install CCUS equipment

自变量	自变量细分	意愿程度平均值
行业类别	纯发电	4.47
	化工(含自备电厂)	5.00
	建材	6.60
	石化	4.00
	有色	2.00
企业性质	国有企业	4.70
	联营企业	4.05
	私营企业	6.50
经营规模	大型企业	4.82
	中型企业	4.71
	小型企业	3.90
化石燃料 燃烧排放量	0~10万吨	4.63
	10万~50万吨	4.26
	50万~100万吨	2.70
	100万吨以上	5.93
2021年配额 盈亏情况	亏损	5.29
	亏损0~10万吨	3.75
	亏损10万~20万吨	3.00
	亏损20万~30万吨	8.50
	亏损30万~40万吨	8.50
	亏损>40万吨	7.00
	盈余	4.32
	盈余0~10万吨	4.38
	盈余10万~20万吨	3.00
	盈余20万~30万吨	3.00
	盈余30万~40万吨	6.50
对CCUS技术的 了解程度	非常不了解	2.00
	不了解	3.50
	一般了解	4.84
	了解	6.71
CCUS技术 成熟度认知	不成熟	2.64
	一般成熟	5.57
	成熟	4.71
CCUS技术 减排成本	一般	5.54
	高	4.97
	非常高	1.50

注: 因样本数为1时数据不具有普遍性, 此表中不展示样本数≤1的自变量类别。

意愿值也越小。本文初步判断,排放量与建设意愿值没有明显的相关性,但排放量超过100万吨的企业对应的建设意愿值较高,为5.93。从受访企业2021年配额盈亏情况可以看出,配额亏损企业的建设意愿值(5.29)大于配额盈余企业的建设意愿值(4.32);配额亏损时,亏损量在20万~40万吨的建设意愿值最高,为8.50,配额盈余时,盈余量在30万~40万吨时意愿值最高,为6.50。企业对CCUS技术的了解程度越高,建设意愿值越大。当企业对该技术“一般了解”时,对应的建设意愿值为4.84,超过所有样本的均值(4.61),“了解”对应的建设意愿值最高,为6.71。可能受近35%企业对该技术“不了解”的影响,企业对CCUS技术成熟度认知与建设意愿值之间没有表现出明显的特点。此外,CCUS技术减排成本对建设意愿程度存在明显影响,即减排成本越高,建设意愿值越低,减排成本为“一般”和“高”时,对应的建设意愿值分别为5.54和4.97。

(3) 模型构建

本文采用有序多分类Logistic回归模型分析控排企业CCUS装置建设意愿的影响因素。有序多分类Logistic回归模型的一般表达如式(14)~式(17)所示:

$$\log it[P(Y \leq i)] = \alpha_i + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_j x_j \quad (14)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 9)$$

$$\log it[P(Y \leq 1)] = \ln \left(\frac{P_1}{1 - P_1} \right) =$$

$$\alpha_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_j x_j (i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 9) \quad (15)$$

$$\log it[P(Y \leq 2)] = \ln \left(\frac{P_1 + P_2}{1 - P_1 - P_2} \right) =$$

$$\alpha_2 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_j x_j (i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 9) \quad (16)$$

$$\log it[P(Y \leq 9)] =$$

$$\ln \left(\frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_9}{1 - P_1 - P_2 - \cdots - P_9} \right) = \alpha_9 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_j x_j (i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 9) \quad (17)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_9$ 和 $\beta_1 \sim \beta_9$ 分别为模型中的截距项与回归系数; $x_1 \sim x_9$ 代表自变量; $P(Y \leq i)$ 代表建设意愿等于 i 出现的概率。若分别对上述9个Logit模型两边同时取指数,则回归系数 β_j 可转换为 e^{β_j} ,可解释为在

其他因素不变的条件下,解释变量每变化一单位所引起的被解释变量发生概率变化的倍数。模型中所涉及变量的定义如表6所示。

以控排企业为单位,选取被访企业的行业类别、企业性质、经营规模、化石燃料燃烧排放量、2021年配额盈亏情况、对CCUS技术的了解程度、对CCUS技术成熟度的认知、对利用CCUS技术减排成本的认知等作为自变量,这些变量能够较好地反映控排企业的基本性质和对CCUS技术的认知特征。样本数据的描述性统计结果如表7所示。

基于已掌握的受访企业当前各方面的基本情况,通过以上分析和筛选,本文初步认为CCUS装置的建设意愿程度与企业规模、配额盈亏状况、对CCUS技术的了解程度、对CCUS技术减排成本的认知存在某种程度的相关性,同时通过各个假设验证进行模型分析。

2 核心参数和情景设置

2.1 核心参数设置

基于经济社会发展实际情况,结合榆林市自身的发展状况和相关规划,LEAP-Yulin模型中核心参数的基础设定主要为各产业生产总值、能耗强度、能源消费结构、交通运输结构等。

各产业生产总值根据《陕西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《榆林市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《共创榆林国家级能源革命创新示范区战略合作协议》确定。相关文件指出,未来到2030年榆林市地区生产总值将以每年5.2%的速度增长,而2030年后的产业发展并未考虑在内。考虑到第二产业在榆林市经济中占据主导地位,结合历史变化趋势及城市的实际产业发展情况,本文假定2021—2030年,以能源化工为主的第二产业每10年年均增长率为5.0%。随着“双碳”目标的持续推进以及清洁能源消费占比的逐步提高,能源化工产业的规模增长率预计逐渐放缓。因此,本文将2030—2060年第二产业每10年年均增长率依次设为2.0%、1.0%和0.5%(各产业活动水平的具体

表6 变量定义
Table 6 Variable description

变量类型	变量名称	变量赋值
解释变量	发电	发电行业=1，其他行业=0
	化工	化工行业=1，其他行业=0
	建材	建材行业=1，其他行业=0
	石化	石化行业=1，其他行业=0
	有色	有色行业=1，其他行业=0
	企业性质	国有企业=1，其他企业=0
	企业规模	微型=1，小型=2，中型=3，大型=4
	化石燃料燃烧排放量	0~10万吨=1，>10万~50万吨=2， >50万~100万吨=3，100万吨以上=4
	配额盈亏状况	亏损40万吨以上=1，亏损>30万~40万吨=2，亏损>20万~30万吨=3， 亏损>10万~20万吨=4，亏损0~10万吨=5，盈亏平衡=6，盈余0~ 10万吨=7，盈余>10万~20万吨=8，盈余>20万~30万吨=9， 盈余>30万~40万吨=10，盈余40万吨以上=11
	对CCUS技术的了解程度	非常不了解=1，不了解=2，一般了解=3，了解=4，非常了解=5
	对CCUS技术成熟度的认知	非常不成熟=1，不成熟=2，一般成熟=3，成熟=4，非常成熟=5
	对利用CCUS技术减排成本的认知	不高=1，一般=2，高=3，非常高=4
被解释变量	周边企业是否有CO ₂ 购买需求	否/不了解=0，是=1
	CCUS装置建设意愿	根据0~10的意愿程度赋值

表7 描述性统计结果
Table 7 Descriptive statistics results

变量	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差
发电	49	0	1	0.673	0.474
化工	49	0	1	0.551	0.503
建材	49	0	1	0.102	0.306
石化	49	0	1	0.082	0.277
有色	49	0	1	0.020	0.143
企业性质	49	0	1	0.470	0.504
企业规模	49	1	4	3.102	0.797
化石燃料燃烧排放量	49	1	4	2.590	1.098
配额盈亏状况	49	1	10	6.061	1.784
对CCUS技术的了解程度	49	1	4	2.780	0.715
对CCUS技术成熟度的认知	49	2	4	2.860	0.645
对利用CCUS技术减排成本的认知	49	1	4	2.820	0.667
周边企业是否有CO ₂ 购买需求	49	0	1	0.080	0.277
CCUS装置建设意愿	49	1	10	4.610	2.589

设定详见附表S6^⑩)。

能耗强度参考《榆林市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》确定。该文件指出，全市在2035年前能耗强度将以每

⑩ 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录3。

年4.0%水平持续降低,因此本文将2021—2040年各产业能耗强度每10年的年均降低率依次设为4.0%和3.0%。2040年后,随着燃煤电厂的逐步退役和清洁能源技术的大规模应用,能耗强度已保持较低水平,因此本文将2040—2060年每10年的年均降低率依次设为1.0%和0.5%(各产业能耗强度设置详见附表S5^①)。

能源消费结构根据榆林市《共创榆林国家级能源革命创新示范区战略合作协议》确定。该文件指出,榆林市争取在2035年实现非化石能源消费占比超过20%。根据历史趋势和实际发展情况,本文将2040年、2050年和2060年的非化石能源消费占比依次设为超过30%、40%和50%(各产业能源消费结构详见附表S7^①)。

交通运输结构根据《榆林市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》确定。该文件指出,未来将持续提升榆林市作为西北地区物流中心地位,并且明确榆林市将加快高铁网络战略布局以及提高新能源汽车保有量。未来榆林市客运和货运的周转量均将迎来较大增长,本文将2021—2060年每10年的年均客运周转量增长率依次设为3.60%、0.68%、0.50%和0.50%,年均货运周转量增长率依次设为5.0%、1.5%、0.1%和0.1%。考虑到文件中明确提及要加快高铁网络布局,未来铁路运输的占比可能将远超公路运输的占比,因此本文将2021—2060年每10年铁路运输占比依次设为73.5%、80.0%、85.0%和90.0%(交通运输部门参数设置详见附表S8^①)。

2.2 情景设置

为厘清不同驱动因素对榆林市能源需求与碳排放趋势的影响,本文参考现有研究^[31-35],构建包含基准情景及4个政策情景的LEAP-Yulin模型。政策情景涵盖产业结构调整情景、能源结构调整情景、先进技术应用情景及综合情景。这些情景旨在分析不同政策措施下榆林市低碳转型的优化路径,各情景的描述与设定如表8所示。

3 结果与分析

3.1 LEAP-Yulin模型分析

3.1.1 能源消费分析

2021—2060年榆林市基准情景下能源消费情况如图2所示。从能源需求角度看,在基准情景下,榆林市能源需求量呈现稳步上升趋势,预计将从2021年的1.113亿吨标准煤增长至2060年的1.390亿吨标准煤。从能源结构角度看,第二产业(主要由工业和建筑业构成)的能源需求量占比高达约80%,其中煤炭消费占比超过80%。由此可见,若缺乏重大政策干预或技术创新,榆林市能源需求量将随社会经济发展持续攀升,未来难以出现明显的需求拐点或下降趋势。

3.1.2 榆林市电力生产部门分析

榆林市2021—2060年5种情景下电力发电量如图3所示。榆林市坐拥丰富的化石燃料储量,加之雄厚的太阳能和风能资源,共同塑造了以火电、太阳能和风电为主的发电结构。在基准情景和产业结构调整情景下,燃煤发电占比仍过高,给碳减排带来了重大挑战。相比之下,能源结构调整情景表明,大幅提高非化石能源占比,仍能保持总发电量的增长。在先进技术应用情景和综合情景下,可再生能源装机容量的快速增长与燃煤电厂技术升级共同作用,既有效控制了总发电量,又促进了能源结构的清洁化和多样化。这些结果强调了将可再生能源扩张与化石能源发电的技术创新相结合的重要性,以此可推动榆林市电力行业渐进性的脱碳进程。

3.1.3 榆林市碳排放变化趋势

5种情景下榆林市的碳排放总量变化趋势如图4(a)所示。在基准情景下,碳排放量从2021年的311.70 Mt增长至2060年的332.90 Mt,在所有情景中排放量最高。这表明若不加以干预,榆林市的碳排放将处于失控状态,碳减排压力与环境挑战加剧。在产业结构调整情景下,通过调整产业发展模式,降低第二产业比重并促进第三产业发展,到2060年碳排放量将降至237.20 Mt,较2021年减少74.50 Mt。

^① 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录3。

表 8 情景设置及解释

Table 8 Policy scenarios and description

路径设置	减排路径解释	设定依据
基准情景	依照现有的政策规划及制度，不采取其他特殊政策	• 《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》
产业结构调整情景	只调整榆林市宏观产业的发展，侧重第三产业的发展，减缓第二产业的增长速度	• 《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《国家碳达峰试点（榆林）实施方案》 • 《陕西省碳达峰实施方案》
能源结构调整情景	只调整榆林市能源结构的变化，通过减少化石能源的使用（如煤炭、石油和天然气），增加新能源的发电比例（如太阳能和风电）	• 《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《国家碳达峰试点（榆林）实施方案》 • 《陕西省碳达峰实施方案》
先进技术应用情景	在保持产业发展和能源结构不变的前提下，在工业和电力领域大规模部署 CCUS 等先进节能技术，提高榆林市煤炭的技术水平和利用效率	• 《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《陕西省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《共创榆林国家级能源革命创新示范区战略合作协议》 • 《国家碳达峰试点（榆林）实施方案》 • 《榆林市减碳降耗三年行动方案（2023—2025 年）》
综合情景	综合利用其他路径减排优势的同时，将 CCUS 和生态碳汇纳入 CCER 市场，创建综合性情景	• 《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《陕西省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》 • 《榆林市国土空间总体规划（2021—2035 年）》 • 《国家碳达峰试点（榆林）实施方案》 • 《陕西省碳达峰实施方案》 • 《榆林市减碳降耗三年行动方案（2023—2025 年）》

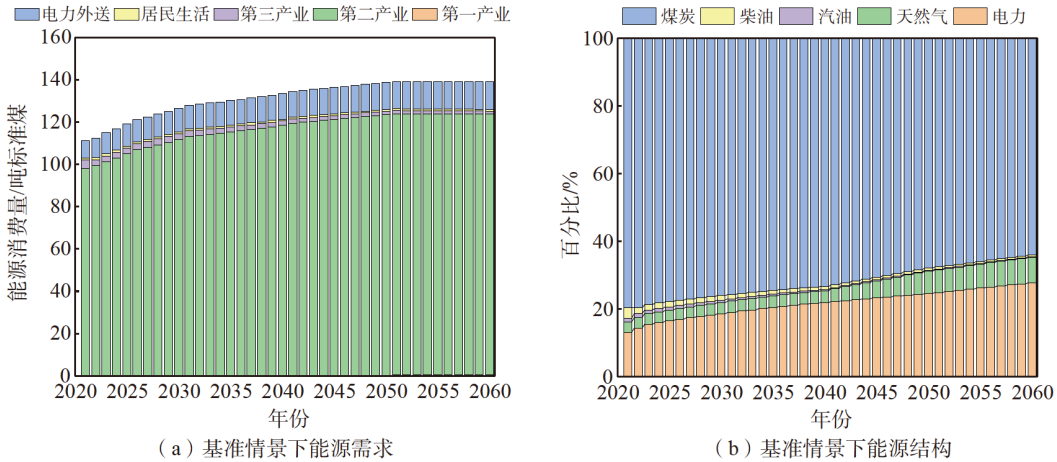


图 2 2021—2060 年基准情景下能源消费情况

Fig.2 Energy consumption under the baseline scenario (2021—2060)

在能源结构调整情景下，通过重组各行业能源结构，以电力为主的二次能源将逐步替代以化石能源为主的一次能源，到2060年碳排放量将减少30.10 Mt。在

先进技术应用情景中，通过采用先进节能与减排技术，碳排放量将较2021年大幅削减192.60 Mt。通过采取多项减排措施，综合情景实现了最显著的减排

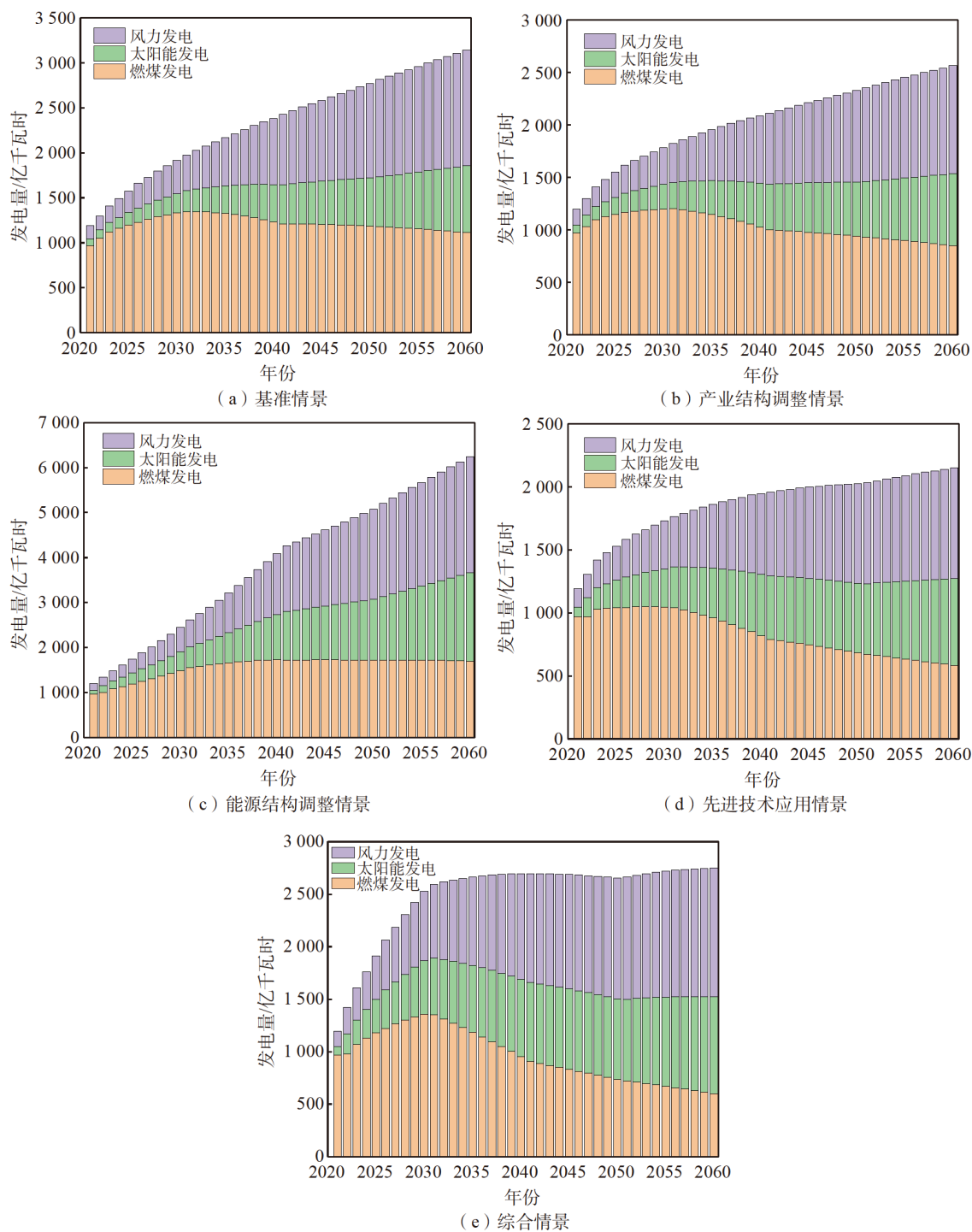


图3 2021—2060年不同情景下电力发电量

Fig.3 Electricity generation under different scenarios (2021—2060)

效果,到2060年碳排放量将降至45.60 Mt,累计减排266.10 Mt。这表明采取多重控制措施的综合策略是实现碳减排有效的途径。

5种情景下榆林市的工业部门碳排放量变化趋势

如图4(b)所示。在产业结构调整情景下,政府优先发展第三产业,减缓工业扩张速度,从而降低工业部门碳排放量。由于工业能源需求结构中电力占比调整,能源结构调整情景下的工业部门碳排放量

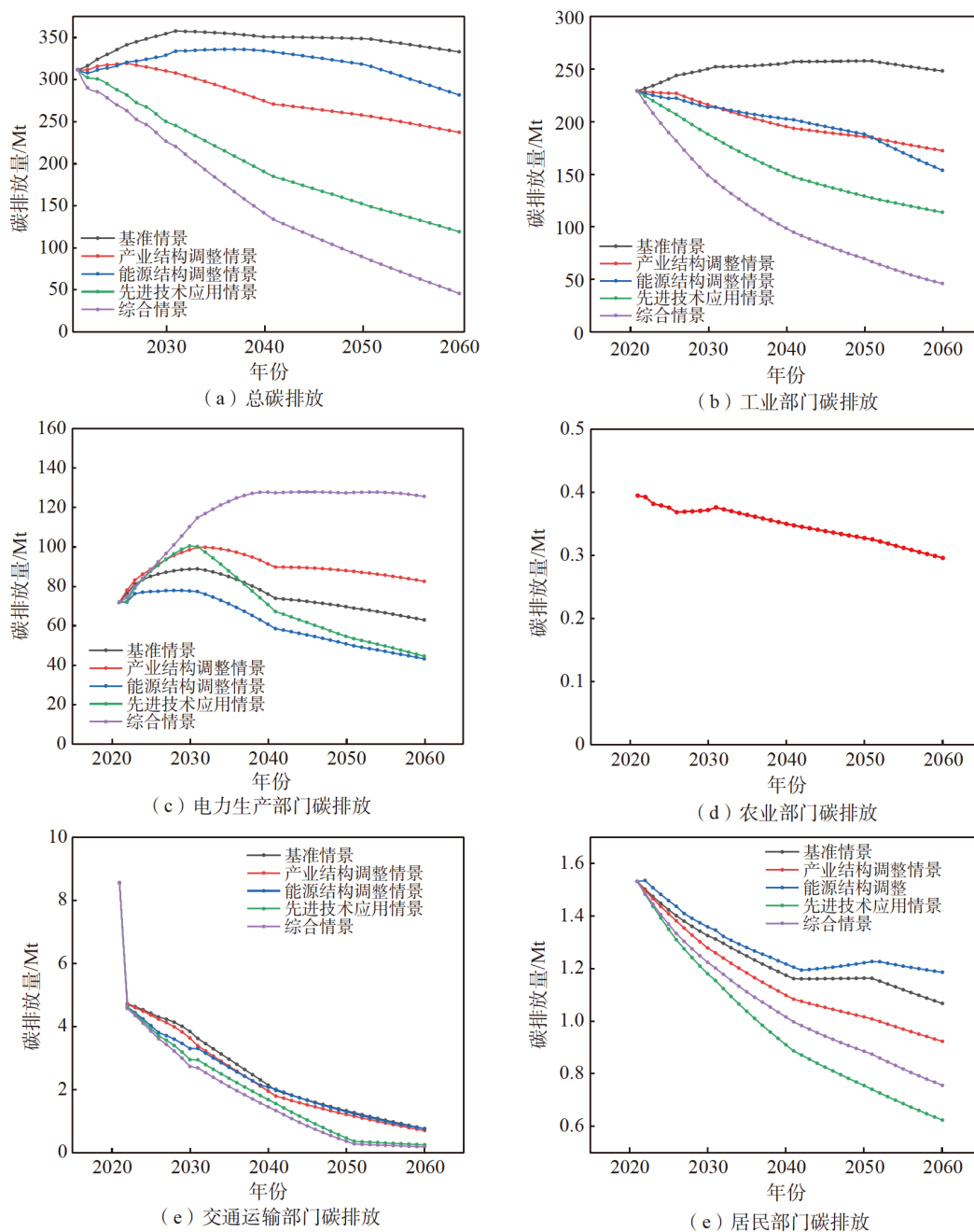


图4 不同情景下各部门2021—2026年的碳排放量变化趋势

Fig.4 Carbon emission trends in different sectors under different scenarios (2021—2060)

注：考虑到农业部门碳排放量在榆林市的占比很小，对整体的碳排放影响可以忽略不计，因此5种情景的变化趋势设置并无差异，在图中共用一条曲线。

显著下降，到2060年将降至281.60 Mt。随着CCUS等清洁能源技术的大规模应用，先进技术应用情景能够大幅削减工业部门碳排放量。通过整合上述情景优势并实施生态碳汇等措施，综合情景达到最低工业碳排放水平，到2060年将降至45.70 Mt。

5种情景下榆林市的电力生产部门碳排放量变化趋势如图4(c)所示。在基准情景下，榆林市的电力生产部门预计于2031年达到碳排放峰值（99.90 Mt），2060年降至82.60 Mt。产业结构调整情景下预计于2031年达到碳排放峰值（88.90 Mt），2060年降至

62.90 Mt。能源结构调整情景下预计于2045年达到碳排放峰值(127.90Mt),2060年降至125.60 Mt。先进技术应用情景下预计于2028年达到碳排放峰值(77.90 Mt),2060年降至43.20 Mt。综合情景下预计于2030年达碳排放峰值(100.40 Mt),2060年降至44.50 Mt。

5种情景下榆林市的农业部门碳排放量变化趋势如图4(d)所示。农业部门的碳排放主要来自柴油消耗。随着天然气使用增加和农村地区电气化设备普及,农业碳排放量预计到2060年降至0.29 Mt,较2021年下降25.04%。

5种情景下榆林市的交通运输部门和居民部门的碳排放量变化趋势分别如图4(e)和图4(f)所示。交通运输部门未来会实现大幅度降碳,这得益于铁路电气化加速推进和高铁网络战略布局替代传统运输方式。随着天然气普及和居民生活电气化推进,居民部门碳排放量呈现持续下降趋势。

上述结果表明,仅调整各产业的能源需求结构(“以电代煤”替代“直接燃煤”),实际效果却面临现实悖论:终端电气化率的快速提升使得地方用电需求猛增,而本地新能源发电能力受资源与并网条件制约,难以覆盖这一新增需求。由此,煤电不仅未能如期减压,反而将面对来自能源保供和新能源调峰的双重压力,从而影响碳减排效果。而通过调整工业发展模式、推广清洁能源技术及加速煤电淘汰,可实现更早碳达峰与更深度碳减排。

3.2 经济社会效益模型分析

3.2.1 榆林市减排路径经济成本比较

榆林市低碳转型的经济成本集中于电力生产部门,如图5(a)所示。5种情景下,电力行业总成本于2040年左右达到峰值,随后快速下降。到2060年,各情景下的成本在1 197亿~1 711亿元之间。作为国家能源保供战略的工业重地,榆林市的经济和工业发展推高了电力需求,发电支出保持上行趋势,电力生产部门总成本呈增长态势。然而,随着2040年后煤电装机停止新增并逐步退役,总成本将下降。

电力生产部门单位碳排放成本如图5(b)所示,5种情景下单位碳排放成本均在2040年达到小幅峰值,分别为0.42、0.51、0.92、0.95、0.42元/kg。在基准情景和产业结构调整情景中,由于未大规模部署CCUS和可再生能源技术,单位碳排放成本在2040年左右将伴随煤电装机停止增长而保持稳定。在能源结构调整情景中,可再生能源技术大规模部署带来的高额经济成本,导致单位碳排放成本在2040年后持续上升。先进技术应用情景通过大规模部署CCUS等低碳技术,在2040年后总成本未显著增加的情况下实现了碳排放量大幅削减,导致单位碳排放成本急剧上升。而在综合情景中,通过将生态碳汇和CCUS纳入CCER市场,能够在实现最大碳减排量的同时,有效控制单位碳排放成本。

3.2.2 榆林市减排路径经济收益比较

将生态碳汇和CCUS纳入CCER市场所带来的经

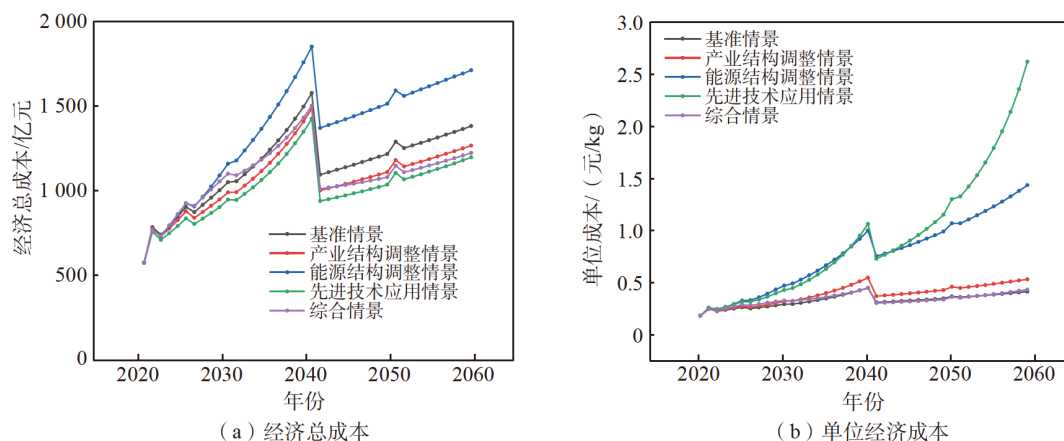


图5 2021—2060年榆林市不同情景下低碳转型成本

Fig.5 Low-carbon transition costs under different scenarios in Yulin City (2021—2060)

济收益如图6所示。在综合情景下，相关经济收益预计显著增长。到2060年，生态碳汇收益预计可达7.62亿元，而CCUS相关收益预计达到34.5亿元。随着CCER市场的持续完善和发展，CCER价格有望逐步上升，这将进一步增加生态碳汇和CCUS技术带来的经济效益。

3.2.3 企业加装CCUS装置意愿的敏感性分析

本文通过对调查数据进行回归分析，考察各影响因素的显著性和影响程度，结果如表9所示。回归

表9 CCUS装置建设意愿影响因素的
Logistic模型回归结果
Table 9 Factors influencing CCUS installation
willingness: Logistic model regression results

自变量	回归系数	估计标准误差	显著性
发电	-0.088	0.740	0.905
化工	-0.351	0.711	0.622
建材	0.518	1.143	0.650
石化	-0.579	1.165	0.619
有色	-1.975	1.941	0.309
企业性质	-0.627	0.657	0.340
企业规模	-0.146	0.506	0.772
化石燃料燃烧排放量	0.397**	0.453	0.035
配额盈缺状况	-0.157	0.170	0.355
对CCUS技术的了解程度	0.805*	0.482	0.095
对CCUS技术成熟度的认知	0.741*	0.478	0.098
对利用CCUS技术 减排成本的认知	-1.037**	0.459	0.024
周边企业是否有CO ₂ 购买需求	0.628	1.214	0.605

注：*、**分别表示在10%、5%统计水平上显著。

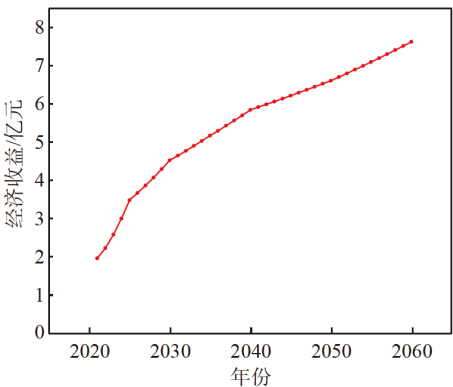
结果表明：化石燃料燃烧碳排放量、对CCUS技术的了解程度、对CCUS技术成熟度的认知以及对利用CCUS技术减排成本的认知4个因素对CCUS装置建设意愿具有显著影响。其中，对利用CCUS技术减排成本的认知影响最为显著。根据实证结果可以得出结论，当前榆林市企业安装CCUS装置意愿偏低的主要原因包括：对CCUS技术了解有限、CCUS实施成本高于碳交易支出，以及政府引导与补贴政策不足。

4 结论与政策建议

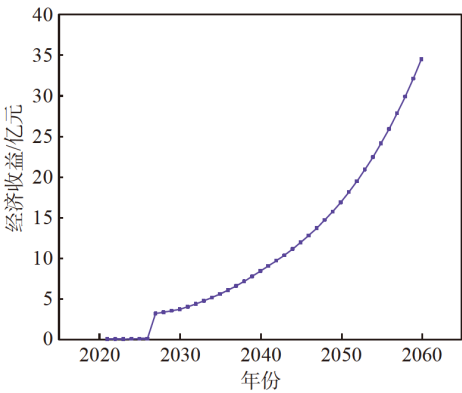
4.1 结论

(1) LEAP-Yulin模型的结果表明，在目前的政策体系下榆林市能源需求总量将保持增长趋势。其中，第二产业能源需求占比维持在80%左右，煤炭消费在此期间将始终占据能源结构的70%以上。由于对化石能源及相关产业的深度依赖，榆林市碳排放量最迟将于2037年达峰。在此背景下，综合情景呈现了一条有效平衡地方经济发展与绿色转型目标的最优路径。

(2) 榆林市低碳转型总经济成本在未来数年内将持续攀升，由于可再生能源与CCUS技术的大规模部署，单位碳减排成本将显著增加。但随着燃煤机组在2040年前后被逐步淘汰，总成本将出现大幅下降。通过将生态碳汇与CCUS纳入CCER市场体系，可有效控制经济成本，同时为地方政府创造可观收益。对当地企业加装CCUS装置意愿的敏感性分析结



(a) 生态碳汇纳入CCER市场的经济收益



(b) CCUS纳入CCER市场的经济收益

图6 2021—2060年经济收益变化趋势
Fig.6 Trends in economic benefits (2021—2060)

果表明,当前企业安装CCUS装置意愿普遍偏低,主要源于对CCUS技术认知不足、实施成本高于碳交易支出,以及政府引导与补贴政策缺位。

(3) 单一政策工具难以兼顾碳减排目标与经济发展,而通过采取加快煤电产能淘汰、扩大CCUS技术部署、大力发展风电与光伏、提升工业能效、优化电力电源结构与帮助企业积极加入碳排放权交易市场等综合配套措施,榆林市可在控制转型成本的前提下实现碳减排目标。

4.2 政策建议

针对榆林市面临的碳减排压力,本文从以下4个方面提出榆林市绿色转型的政策建议:

(1) 发展现代低碳煤化工产业。依托当地能源禀赋条件,榆林市须将经济支柱由单纯煤炭开采转向高附加值的清洁化工生产,在实现经济收入增长的同时兼顾碳减排目标。榆林市可延伸产业链、建设国家能源革命创新示范区,并通过前端减排、过程脱碳和末端固碳推动全面低碳转型,其最终目标是培育高端化、多元化、特色化的化工产业集群。

(2) 促进能源结构和能源技术多元化。榆林市须积极利用其丰富的太阳能和风能资源,大力发展光伏和风电项目,落实国家级新能源示范基地定位。同时,现有燃煤电厂需实施高效减排改造。榆林市可将CCUS技术确立为脱碳关键路径,制定CCUS顶层规划框架,并设立“CCUS中国技术创新中心”。

(3) 打造绿色产业中心与人才枢纽。榆林市应推动大型国有企业与顶尖科研机构协同合作,建立示范项目、创新中心及人才培训基地。建立“一站式”政策保障机制,吸引并留住“双碳”领域高层次人才,确保研发成果转化落地。

(4) 积极建设碳排放权交易市场。必须建立健全的碳排放权交易机制和监测体系,以激励碳减排行为。应鼓励碳金融产品创新,为转型项目提供资金支持。同时,榆林市应通过植树造林和改进耕作方式,率先开展生态碳汇项目,在政府引导下将生态碳汇纳入碳排放权交易市场,在实现居民减碳降碳的同时创造可观的经济收益。

参考文献

[1] Huang M T, Zhai P M. Achieving Paris Agreement temperature

- goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(2): 281–286.
- [2] Qiu S L, Wang Z L, Liu S. The policy outcomes of low-carbon city construction on urban green development: Evidence from a quasi-natural experiment conducted in China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 66: 102699.
- [3] Jia R N, Shao S, Yang L L. High-speed rail and CO₂ emissions in urban China: A spatial difference-in-differences approach[J]. *Energy Economics*, 2021, 99: 105271.
- [4] Peng Y, Bai X M. Financing urban low-carbon transition: The catalytic role of a city-level special fund in Shanghai[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282: 124514.
- [5] 安树伟, 张双悦. 新中国的资源型城市与老工业基地: 形成、发展与展望[J]. *经济问题*, 2019(9): 10–17.
- [6] 刘小玲, 唐卓伟, 孙晓华, 等. 要素错配: 解开资源型城市转型困境之谜[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(10): 88–102.
- [7] Lu S, Zhang W, Yu J, et al. Evolution stage identification and development characteristics of resource-based cities[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 75(10): 2180–2191.
- [8] 徐维祥, 郑金辉, 周建平, 等. 资源型城市转型绩效特征及其碳减排效应[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(1): 39–57.
- [9] Qiao R, Chen W, Qiao Y. Sustainable development path of resource-based cities: Taking Datong as an example[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 14474.
- [10] Fu Y, Li J. Evolutionary game and simulation analysis of resource-based city transformation under path structure framework[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(12): 11–21.
- [11] Li K J, Zhou Y, Huang X H, et al. Low-carbon development pathways for resource-based cities in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(7): 10213–10233.
- [12] 席振鑫, 马丽, 金凤君, 等. 黄河流域典型资源型城市工业转型的时空特征、类型与路径[J]. *资源科学*, 2023, 45(10): 1977–1991.
- [13] Liu B, Wang X, Bian Y. Theoretical analysis and path selection of high-quality urban development in China under the new development pattern[J]. *Reformation*, 2021, 4: 15–23.
- [14] 余林徽, 马博文. 资源枯竭型城市扶持政策、制造业升级与区域协调发展[J]. *中国工业经济*, 2022(8): 137–155.
- [15] Cai L Y, Luo J, Wang M H, et al. Pathways for municipalities to achieve carbon emission peak and carbon neutrality: A study based on the LEAP model[J]. *Energy*, 2023, 262: 125435.
- [16] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva: IPCC, 2006.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022.
- [18] Battulga S, Dhakal S. Energy demand modeling for the transition of a coal-dependent city to a low-carbon city: The case of Ulaanbaatar City[J]. *Energies*, 2023, 16(17): 6291.
- [19] Zhang W R, Meng Z X, Yang J J, et al. Managing the phaseout of coal power: A comparison of power decarbonization pathways in

- Jilin Province[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106216.
- [20] Liang Y Y, Yu B Y, Wang L. Costs and benefits of renewable energy development in China's power industry[J]. Renewable Energy, 2019, 131: 700–712.
- [21] Rubin E S, Davison J E, Herzog H J. The cost of CO₂ capture and storage[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 378–400.
- [22] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国CCUS路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
- [23] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 北京: 中国21世纪议程管理中心, 2023.
- [24] 国家能源集团技术经济研究院. 中国煤炭、电力和碳市场年度报告 (2023—2024年) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2024.
- [25] 杨万佳. 基于机器学习的碳市场价格预测及交易决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- [26] 杨立, 郝晋珉, 艾东, 等. 基于区域碳平衡的土地利用结构调整: 以河北省曲周县为例[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2293–2301.
- [27] 毕君, 王超, 尤海舟. 基于温室气体清单的河北省森林碳汇量研究[J]. 生态科学, 2016, 35(4): 113–118.
- [28] 张一心, 赵吉, 王立新, 等. 不同管理措施下内蒙古草地碳汇潜力分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 318–323.
- [29] 庄洋, 赵娜, 赵吉. 内蒙古草地碳汇潜力估测及其发展对策[J]. 草业科学, 2013, 30(9): 1469–1474.
- [30] 周伟铎, 庄贵阳. 雄安新区零碳城市建设路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 122–134.
- [31] 刘丹丹, 张燕娟. 能源转型对浙江省碳达峰拐点影响的实证模拟[J]. 资源科学, 2024, 46(9): 1699–1708.
- [32] Lin J Y, Kang J F, Khanna N, et al. Scenario analysis of urban GHG peak and mitigation co-benefits: A case study of Xiamen City, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 972–983.
- [33] Zhou N, Price L, Dai Y D, et al. A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030[J]. Applied Energy, 2019, 239: 793–819.
- [34] Hu G X, Ma X M, Ji J P. Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model: A case study of a postindustrial city: Shenzhen China[J]. Applied Energy, 2019, 238: 876–886.
- [35] Yang D W, Liu D D, Huang A M, et al. Critical transformation pathways and socio-environmental benefits of energy substitution using a LEAP scenario modeling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110116.

Low-Carbon Transition Pathways for Resource-Rich Cities: An Analysis Based on the LEAP Model

CAI Zijian¹, SHI Beibei^{1,2,*}

1. Carbon Neutrality College (Yulin), Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. School of Economics and Management, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract : The transition pressure on resource-based cities is becoming increasingly prominent, and their low-carbon transformation process directly affects China's carbon peaking and carbon neutrality goals. This study employs the low emission analysis platform model to analyze the impacts of changes in energy structure, energy intensity, economic activity, industrial composition, and urbanization on carbon emissions in Yulin City, a representative of resource-based cities. It also examines the economic performance under different pathways and corporate willingness to adopt carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology. The results show that under current development trends, Yulin City's energy demand and carbon emissions will continue to grow during the forecast period, with the industrial and power sectors accounting for over 80% of carbon emissions, while the overall energy structure remains heavily dependent on coal. The total economic cost of Yulin City's low-carbon transition will continue to rise in the coming years, but is expected to decline significantly after coal-fired units are gradually phased out around 2040. Furthermore, integrating ecological carbon sinks and CCUS into the China certified emission reduction market could help effectively contain overall economic costs. Corporate willingness to install CCUS equipment is currently low, primarily due to insufficient technological awareness, higher implementation costs than carbon market transaction expenses, and a lack of government guidance and subsidy policies. Based on these findings, it is recommended that Yulin City adopt comprehensive and coordinated emission reduction policies, with attention to the economic benefits of low-carbon retrofitting for enterprises, in order to achieve Yulin City's carbon emission reduction targets.

Key Words : carbon peaking; carbon neutrality; resource-based cities; low carbon transition