李姗姗,费 翔,董洪光,等.基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4052-4063.
Li S S, Fei X, Dong H G, et al. Analysis of carbon emission influencing factors and forecast in Shanxi Province based on LMDI and LEAP model [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4052-4063.

基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测

李姗姗,费 翔*,董洪光,马雨晴,姜 佩 (安徽理工大学经济与管理学院,安徽 淮南 232001)

摘要：基于 IPCC 方法测算了山西省 2010~2022 年的碳排放量,通过构建 Kaya-LMDI 模型识别出影响山西省碳排放的主要因素,以 2022 年为基准年建立了 LEAP-Shanxi 模型,对山西省 2023~2060 年的碳排放量进行预测.结果表明:经济发展水平效应是山西省碳排放增长的关键促进因素,而能源强度效应是关键抑制因素;至 2060 年,在工业节能增效情景、交通低碳转型情景、新能源需求加速情景和电力结构优化情景下节能降碳效果更为显著,分别使对应部门碳排放量降低 42.16,3.21,1.38 和 31.73Mt;在基准情景和综合情景下,山西省均能在 2030 年达到碳达峰,碳排放量分别为 764.33 和 742.34Mt.而综合情景与基准情景在 2060 年相比,减排 107.42Mt 的碳排放量.研究结果可为山西省提供有效的低碳发展理论依据以制定相关降碳减排措施.

关键词：碳排放；LMDI 模型；LEAP 模型；情景预测
中图分类号：X321 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4052-12

Analysis of carbon emission influencing factors and forecast in Shanxi Province based on LMDI and LEAP model. LI Shan-shan, FEI Xiang*, DONG Hong-guang, MA Yu-qing, JIANG Pei (School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4052~4063

Abstract：This study applied the IPCC methodology to estimate carbon emissions in Shanxi Province from 2010 to 2022. A Kaya-LMDI model was employed to identify the key drivers influencing carbon emissions in the region. Using 2022 as the baseline year, the LEAP-Shanxi model was developed to forecast carbon emissions from 2023 to 2060. Economic development acted as the primary driver of carbon emission growth, whereas energy intensity emerged as the dominant restraining factor; By 2060, under four specific scenarios—industrial energy efficiency improvement, low-carbon transportation transition, accelerated new energy adoption, and optimized power structure—energy conservation and carbon reduction effects would become particularly pronounced, these measures could reduce sectoral emissions by 42.16, 3.21, 1.38 and 31.73Mt respectively; Both baseline and integrated scenarios indicate that Shanxi Province could reach its carbon peak by 2030, with projected emissions of 764.33 and 742.34Mt respectively; The comprehensive scenario demonstrates a potential reduction of 107.42Mt in carbon emissions compared to the baseline projections for 2060. These findings can offer a robust theoretical foundation for Shanxi Province to develop targeted low-carbon strategies and implement effective emission reduction measures.

Key words：carbon emissions；LMDI model；LEAP model；scenario prediction

随着全球范围内碳排放量不断攀升[1],中国提出力争在 2030 年前实现碳达峰和 2060 年前实现碳中和的“双碳”的目标[2-3].山西省作为中国的能源大省,煤炭的高消耗导致其碳排放量居于全国首列.对于当前“双碳”政策,山西省需积极探索低碳发展道路,实现低碳经济增长.

目前,国内外学者关于碳排放影响因素的研究较多,其中包括回归分析法[4-6]和指数分解分析法[7-9].回归分析法需要减少关联变量的数量,对于数据的要求较高,而指数分解模型则具有对数据的需求较低,更具灵活性的优点,其典型代表为 LMDI 指数分解模型,因此大多数研究采用该方法来识别碳排放的影响因素.学者们运用该方法分别在国家层面[10-11]、省域层面[12-14]、行业层面[15]识别影响碳排放情况的主要因素.例如,Jiang 等[16]和刘浩东等[17]采用 LMDI 分解指数模型分别对中国及黑龙江省的碳排放影响因素进行识别;而邵志国等[18]则分析了中国交通运输业碳排放的驱动因素.

对于碳排放的预测,国内外学者们多采用“自上而下”或“自下而上”两个角度开展研究.“自上而下”的模型主要从宏观层面进行预测,例如 CGE 模型[19-20]和 STIRPAT 模型[21-22].CGE 模型是一种相对

收稿日期：2024-12-03
基金项目：安徽省高校优秀科研创新团队项目(2022AH010054);国家自然科学基金资助项目(52304195);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心项目(EC2023004);国家重点研发计划项目(2023YFC3009002)
* 责任作者, 硕士, 18255489981@163.com

静态的政策分析模型,具有在特定时间点模拟各种政策变化和有效利用经济数据的特点,但应用于碳排放预测中,无法准确地刻画动态的技术进步,模型的准确性和可靠性可能会受到质疑.STIRPAT 模型是一种分析环境影响的回归模型,具有允许将各因素的影响作为参数进行估计的优点,但模拟结果在特定情景下存在考虑不足的问题,且受数据质量、样本选择、模型设定等主观因素影响不能进行准确分析的缺点.而“自下而上”的微观预测方法则通过能源消费整体详细分解的角度对碳排放量进行预测.“自下而上”的微观预测方法如:MARKAL 模型[23]、AIM 模型[24]、LEAP 模型[25-26]等.相较于 MARKAL 模型和 AIM 模型,LEAP 模型具有数据输入透明和灵活度高等优点,且适用于预测不同政策下中长期的能源供应和碳排放情况[27].例如 Ahmad 等[28]和 Wang 等[29]分别对巴基斯塔和中国的低碳发展路径提供了有效依据,同时该方法广泛应用于区域和行业的能源需求和环境发展预测[30-31].

综上所述,以往大多碳排放影响因素研究主要采用单一分解模型或单一的碳排放预测方法,缺少多模型组合研究,对山西的碳排放研究较少或数据相对陈旧.为尽可能涵盖山西省所有的碳排放来源,本研究从行业部门与居民生活两个角度,运用LMDI模型来识别山西省碳排放量的影响因素;以 LMDI 的结果为依据,并结合相关情景,构建 LEAP−Shanxi 模型对山西省碳排放量进行预测;对山西省各部门针对性设置情景,预测不同情景下各部门的碳排放发展趋势及其特征,通过对比分析找出最优降碳路径,并进行拟合形成山西省降碳减排综合情景,探究在该情景下山西省的排放情况,为实现山西省低碳经济的发展提供依据.

1　研究设计与数据来源

1.1　碳排放核算方法

将碳排放量按照不同部门和不同能源品种的计算方法[32],其中共选取 7 大部门(农林牧渔业、工业、建筑业、交通业、批发零售业、其他行业、居民生活)和 5 种主要能源(原煤、焦炭、油品、电力、天然气)作为核算单元,测算山西省 2010~2022 年的能源消费碳排放量.

$$C=\sum_{i=1}^{7}\sum_{j=1}^{5}\mathrm{EF}_{ij}\cdot\mathrm{EF}_{j} \tag{1}$$

式中:C 为终端部门碳排放总量;EF_{ij} 表示 i 部门 j 能源的消费量;EF_{j} 表示 j 能源的碳排放系数.

1.2　Kaya−LMDI 分解模型

1.2.1　LMDI 指数分解模型的构建　Kaya 恒等式可以从宏观层面去分析碳排放量与能源消费量、经济规模和人口三者之间的关系.基于此,LMDI 指数分解模型是由 Ang 等[33]学者在 Kaya 恒等式的基础上扩展而成,相较于 Kaya 恒等式的优势在于分解过程中消除了方程残差项和加减乘除法之间的灵活转换.LMDI 分解模型包括加法和乘法两种,加法侧重于变化量,其计算结果代表的是该指标的贡献值;乘法侧重于变化率,其计算结果代表是该指标的贡献率,本文选用加法分解的计算方法[34].

结合山西省的能源消费的实际情况,将山西省碳排放的来源分为行业生产端和居民生活端.依据相关文献[35-36]选取行业碳排放强度、能源强度、行业能源结构、产业结构、经济发展水平 5 个因素作为行业生产端因素;生活碳排放强度、生活能源结构、人均能耗、人口规模 4 个因素作为居民生活端因素,构建山西省 Kaya 恒等式的扩展模型,如式(2):

$$\begin{aligned}C=\mathrm{IC}+\mathrm{LC}=&\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{5}\frac{\mathrm{IC}_{ij}}{\mathrm{IE}_{ij}}\cdot\frac{\mathrm{IE}_{ij}}{\mathrm{IE}_{i}}\cdot\frac{\mathrm{IE}_{i}}{\mathrm{IG}_{i}}\cdot\frac{\mathrm{IG}_{i}}{G}\cdot G+\\&\sum_{j=1}^{5}\frac{\mathrm{LC}_{j}}{\mathrm{LE}_{j}}\cdot\frac{\mathrm{LE}_{j}}{\mathrm{LE}}\cdot\frac{\mathrm{LE}}{P}\cdot P\end{aligned} \tag{2}$$

式中:C 为山西省碳排放总量;IC 为行业生产端碳排放量;LC 为居民生活端碳排放量;IC_{ij} 表示第 i 个行业 j 能源的碳排放量;IE_{ij} 表示第 i 个行业 j 能源的消费量;IE_{i} 表示第 i 行业的能源消费总量;IG_{i} 表示第 i 行业的生产总值;G 表示地区生产总值;LC_{j} 表示居民生活端 j 能源的碳排放量;LE_{j} 表示居民生活端 j 能源的消费量;LE 表示居民生活端能源消费总量;P 表示地区常住人口.

将式(2)进一步简化可得式(3):

$$\begin{aligned}C=\mathrm{IC}+\mathrm{LC}=&\sum\mathrm{ICE}\cdot\mathrm{IS}\cdot\mathrm{IE}\cdot\mathrm{IK}\cdot G+\\&\sum\mathrm{LCE}\cdot\mathrm{LS}\cdot\mathrm{LK}\cdot P\end{aligned} \tag{3}$$

各参数含义见表 1.结合上述构建的 Kaya 拓展恒等式(式(3))和 IPCC 的假定,能源碳排放系数为常数且短期内不会发生变化,即碳排放系数效应为零,

所以$\Delta C_{\mathrm{ICE}} = \Delta C_{\mathrm{LCE}} = 0$.构建的 LMDI 碳排放影响因素分解模型如式(4):

$$\begin{aligned}\Delta C&=C_T - C_0\\&=\Delta C_{\mathrm{IS}} + \Delta C_{\mathrm{IE}} + \Delta C_{\mathrm{IK}} + \Delta C_G + \Delta C_{\mathrm{LS}} + \Delta C_{\mathrm{LK}} + \Delta C_P\end{aligned} \tag{4}$$

依据 LMDI 分解方法,计算各个影响因素效应值,如式(5):

$$\Delta C_X = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{X_{ij}^T}{X_{ij}^0} \tag{5}$$

表 1 指标的参数设置及含义

Table 1 Parameter setting and meaning of indicators

符号	定义	含义
ICE	行业碳排放强度	ICE=IC_{ij}/IE_{ij} 为行业生产端第 i 个行业 j 能源的碳排放量与第 i 个行业 j 能源的消费量之比
IS	行业能源结构	IS=IE_{ij}/IE_i 为行业生产端第 i 个行业 j 能源的消费量与第 i 行业的能源消费总量之比
IE	能源强度	IE=IE_i/IG_i 为行业生产端第 i 行业的能源消费总量与表示第 i 行业的生产总值之比
IK	产业结构	IK=IG_i/G 为行业生产端第 i 行业的生产总值与地区生产总值之比
G	经济发展水平	G 为地区生产总值
LCE	生活碳排放强度	LCE=LC_j/LE_j 居民生活端 j 能源的碳排放量与居民生活端 j 能源的消费量之比
LS	生活能源结构	LS=LE_j/LE 居民生活端 j 能源的消费量与生活端能源消费总量之比
LK	人均能耗	LK=LE/P 居民生活端能源消费总量与地区常住人口之比
P	人口规模	P 为地区常住人口

1.2.2 指标说明 能源结构:化石能源与非化石能源不同比例的能源消费对碳排放有着直接影响,由于化石能源自身特性其碳排放系数大于其他能源,在能源消耗过程中将释放大量 CO_2.为探讨能源结构对山西省碳排放影响因素,本文将行业不同品种能源消耗量与能源消费总量的比值,表示山西省行业能源结构.

能源强度:能源强度是衡量能源使用效率的经济指标,它反映了单位经济产出所需的能源量.能源强度越低,意味着该地区的能源使用效率越高.从而降低能源消耗,来降低碳排放量.本文采用能源消费总量与地区 GDP 的比值表示能源强度.

产业结构:第一、第二和第三产业的不同占比情况,反映该地区的产业发展水平.产业结构的不同一定程度上影响着碳排放的产生,在山西省不同产业中,过多的重工业及高碳能源企业导致第二产业的比重居高不下,其特征就是日常作业中将消耗大量能源,从而造成 CO_2 的大量排放.本文将各产业的产值与山西省生产总值的比值表示产业结构.

经济发展水平:经济发展水平反映了该地区人民的生活水平以及社会发展程度,这些会对能源消费量产生影响,进而影响碳排放量.本文采用地区生产总值表示山西省经济发展水平.

人均能耗:人民生活水平的提高,能源消费量不断增加,CO_2 排放量日益增加.因此有必要研究人均能耗对碳排放的影响.本文采用能源消费量与常住人口的比值表示人均能耗.

人口规模:人口规模主要通过两种机制对地区碳排放产生影响,一是“人群效应”,即人口数量的增加导致能源需求上升,从而正向推动碳排放量的增加,表现为促进作用;二是“文明效应”,随着居民教育水平和环保意识的提高,能在一定程度上使得能源需求下降,而减少碳排放量的增加,表现为抑制作用.本文以山西省的常住人口来衡量人口规模.

1.3 LEAP−Shanxi 模型的构建

1.3.1 LEAP−Shanxi 模型的机理 LEAP−Shanxi 模型是结合山西省发展现状,以山西省的人口和经济等主要发展驱动参数为基础,通过设定不同政策情景,对能源加工、转化等环节进行测算,从而得到碳排放情况.目前,山西省统计年鉴数据更新至 2022 年,以 2022 年为基准年,2023 年为预测模型的第一年,2060 年为目标年,时间跨度为 2023~2060 年.碳排放的来源为终端消费部门和加工转换部门之和[37],计算公式如式(6):

$$Q = C + S \tag{6}$$

式中:Q 为碳排放总量;C 为终端部门碳排放量;S 为加工转换部门碳排放量.

1.3.2 关键参数设置 依据本文 LMDI 计算得出的山西省碳排放影响因素分解结果,经济发展水平效应是山西省终端碳排放贡献最大的促进性因素,产业结构效应为第二抑制性因素.因此本文以 GDP 增长率、产业结构占比变化和人口增长率等作为山

西省关键参数设置.山西省 2023~2060 年的参数预测,城镇化率依据《中国人口与劳动问题报告》[38]和山西省“十四五”规划;人口规模参考《中国人口预测报告》[39];产业结构占比主要依据山西省“十四五”规划;GDP 的年均增长率来源于山西省“十四五”规划和《世界经济展望报告》[40].货运和客运周转量的增速依据山西省“十四五”规划,具体预测数据如表 2 所示.

表 2　山西省活动水平的参数设置

Table 2　Activity level parameter setting in Shanxi Province

参数指标	2025 年	2030 年	2060 年
城镇化率(%)	65.5	68.8	72.4
人口规模(万人)	3458.55	3420.87	3023.28
第一产业占比(%)	5.1	4.9	4.3
第二产业占比(%)	52.6	48.7	37.5
第三产业占比(%)	42.3	46.4	58.2
GDP 年均增速(%)	6.83	5.17	3.58
货运周转量年均增速(%)	3	−1	−0.25
客运周转量年均增速(%)	2	−0.75	−0.25

1.3.3　情景设置　为寻求出合理的山西省未来低碳发展路径,根据相关文献研究[41],山西省“十四五”规划以及未来发展等实际因素,共为山西省能源消耗碳排放设置了基准情景、11 个低碳政策情景和综合情景.

(1)基准情景:基准情景指将各部门能源强度和能源结构的数据设定于 2022 年的基准数据上,实行山西省“十四五”等现行能源发展规划,只有社会经济和人口规模的活动水平,在目前现状和政策规划的基础上发展,不采取特别的低碳政策措施.

(2)低碳政策情景:低碳政策情景指在基准情景的基础上,结合已明确实施的山西省及国家政策和规划,并根据本文 LMDI 计算得出的山西省碳排放影响因素分解结果,以能源结构、能源强度和人均能耗等方面对山西省各部门进行针对性低碳情景设置.其余参数设置与基础情景相同,参数指标设置见表 3.

能源结构细分为行业能源结构和生活能源结构,以发展电力和天然气等清洁能源,降低煤炭和油品等化石能源占比为基准.主要设定于工业结构优化情景、交通低碳转型情景、电力结构优化情景和新能源需求加速情景.

表 3　情景指标的设置

Table 3　Setting of scenario indicators

部门情景	子情景	情景含义	指标政策依据
基准情景	–	推行山西省“十四五”等现行能源发展规划,不采取特别的低碳政策措施	山西省“十四五”节能减排实施方案
农业情景	低碳循环农业	推进农机、渔机节能减排、作业时选用低碳节能装备.到 2030 年能耗强度降至 0.24t/万元,电力消耗占比达 55%	山西省碳达峰实施方案
工业情景	工业结构优化	优化产能规模和布局,鼓励以新能源、天然气等替代煤炭.到 2025 年煤炭占比降至 22.8%,电力占比达 46.5%,天然气占比达 28.9%	山西省工业领域碳达峰实施方案
	工业节能增效	锚定单位能耗先进值目标,推动实现能源高效利用、资源高效转化.到 2030 年,工业终端能耗强度降至 1.366t/万元	山西省工业领域碳达峰实施方案
建筑业情景	城乡绿色建设	提升建筑能效水平,到 2030 年,能耗强度降至 0.159t/万元	山西省加快推动建筑领域节能降碳工作实施方案
交通业情景	交通低碳转型	推进新能源、清洁能源在交通运输领域的有序发展,逐步降低燃油车辆占比.到 2030 年,新能源、清洁能源的交通工具比例超 43%,其中电力占比 35%,天然气占 8%	国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)的通知
	优化运输结构	积极发展多式联运、甩挂式运输等高效运输组织模式.持续降低运输能耗,积极推进“公转铁”,到 2030 年,营运交通工具周转量碳排放强度下降 5%	山西省碳达峰实施方案
服务业情景	完善节能机制	布局绿色低碳创新项目.到 2030 年,其他行业能耗强度降至 0.837t/万元	山西省碳达峰实施方案
电力系统情景	低碳电力系统	合理统筹新能源发电建设和资源供给,大力推动煤炭和新能源优化组合,适应以新能源为主体的新型电力系统.到 2030 年,风力和光伏发电量占比达 28%	山西省电力发展“十四五”规划
	电力结构优化	新能源加速,提升清洁能源装机容量.到 2025 年,新能源和清洁能源装机占比达 50%,风力发电装机力争达到 3000 万 KW,光伏发电装机力争达到 5000 万 KW,2030 年,达 1.2 亿 KW 左右	山西省碳达峰实施方案
居民生活情景	绿色生活方式	增强社会人员绿色低碳意识.到 2030 年,城镇人均能耗降至 0.565t/人,农村人均能耗降至 0.557t/人	山西省碳达峰实施方案
	新能源需求加速	推广“煤改电”,积极推进“煤改气”,提高电力占居民消费比重,到 2030 年电力占比达 52%,天然气占比达 40%	山西省碳达峰实施方案
综合情景	–	将各行业最优减排情景进行拟合,构建山西省碳排放最优低碳情景	山西省碳达峰实施方案

注:数值以标准煤计,能耗强度单位为t/万元,人均能耗为t/人.

能源强度作为山西省碳排放最关键的抑制性因素,通过挖掘各部门的节能降碳和技术进步能力.主要设定于低碳农业情景、工业节能增效情景、城乡绿色建设情景、优化运输结构情景、完善节能机制情景、低碳电力系统情景.

人均能耗作为山西省碳排放第二促进因素,通过增强人员绿色低碳意识、推广绿色出行及节能生活.设定于居民生活端的绿色生活方式情景.

1.4 数据来源

山西省 2010~2022 年碳排放核算所需的原煤、焦炭、油品、电力和天然气能源消耗量以及碳排放影响因素所涉及的产业结构、经济发展水平、人口规模数据来自于 2011~2023 年《山西省能源平衡表》、《山西省统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》.碳排放的基础计算数据来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》、《省级温室气体清单编制指南》、《2021 年电力二氧化碳排放因子》.

情景设定依据来源于《山西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》、《山西省碳达峰实施方案》、《山西省工业领域碳达峰实施方案》、《山西省电力发展“十四五”规划》等低碳政策文件.

2 结果与讨论

2.1 山西省碳排放影响因素

基于山西省 2010~2022 年碳排放量的时间序列数据,结合 LMDI 分解模型对山西省行业生产端和居民生活端能源消耗碳排放的影响因素进行识别.各影响因素的逐年效应如表 4 所示,并将各影响因素平均效应的正负分为正向和抑制作用.

表 4 山西省碳排放的 LMDI 因素分解结果($\times10^4$t)

Table 4 Decomposition results of LMDI factors for carbon emissions in Shanxi Province($\times10^4$t)

年份	行业部门				居民生活		
	IS	IE	IK	G	LS	LK	P
2010~2011	−602.45	−3458.65	638.14	4378.55	−41.97	315.89	−9.95
2011~2012	5.05	142.48	−742.55	1728.81	7.61	232.36	−13.02
2012~2013	−668.44	293.00	−424.30	936.45	174.78	184.90	−13.27
2013~2014	799.79	2592.75	−2933.34	302.38	19.12	−80.21	−6.78
2014~2015	332.24	2858.67	−3614.90	9.52	42.02	133.67	−10.49
2015~2016	100.90	1353.54	−1216.16	538.81	−150.88	−76.35	−4.37
2016~2017	−387.97	−5600.55	2499.42	4400.88	−37.93	424.37	−4.33
2017~2018	−385.68	−329.20	−1547.83	2043.78	−89.61	−121.57	−8.81
2018~2019	528.92	−1173.81	1710.89	323.64	231.02	369.71	−6.46
2019~2020	127.57	−461.46	−136.43	980.99	−38.70	67.20	−7.97
2020~2021	−411.64	−8802.60	3191.72	6884.96	−96.55	148.88	−12.63
2021~2022	1042.92	−4442.23	1842.11	3714.24	−67.02	249.63	1.12
平均效应	481.20	−17028.06	−733.22	26243.02	−48.13	1848.49	−96.96

由表 4 可知,山西省碳排放的影响因素指标效应值从大到小依次为:经济发展水平(26243.02)>人均能耗(1848.49)>行业能源结构(481.2)>居民能源结构(−48.13)>人口规模(−96.96)>产业结构(−733.22)>能源强度(−17028.06).

2.1.1 正向促进因素

(1)行业能源结构:在 2010~2022 年间,行业能源结构效应对山西省行业终端碳排放整体平均效应为正值,累计贡献了 481.2 万.近些年,行业结构效应由负效应缓慢转正说明目前山西省的终端能源消费结构仍存在一些化石能源消费占比过高,清洁能源占比较低的问题,能源消费结构转型应继续进行.

(2)经济发展水平:经济发展水平是对山西省行业终端碳排放贡献最大的促进因素,在 2010~2022 年研究期间累计贡献碳排放 26243.02 万 t.研究期间山西省 GDP 增长率同经济发展水平效应的变化趋势基本一致,通过加快向全面协调可持续的经济发展方式转变,能够使经济效益与碳排放逐渐脱钩.

(3)人均能耗:人均能耗效应为第二促进因素,累计贡献 1848.49 万 t 的碳排放量.说明山西省的生活人均能耗逐年递增,刺激能源需求增加,从而使得生活部门碳排放量不断增长.因此控制人均能耗的增长是居民生活碳减排的关键因素之一.

2.1.2　负向抑制因素　(1)能源强度:行业能源强度是山西省行业终端碳排放贡献最大的抑制因素,累计抑制了 17028.06 万 t 碳排放量.除 2012~2016 年外,各行业能源消费量增速大于产业产值的增速,导致产能过剩,使得行业能源强度效应呈现正向促进作用.正是经济发展水平效应与能源强度效应的两者影响效果的相互抵消,才使得山西省碳排放量并未随着经济加速发展呈线性增长趋势.

(2)产业结构:产业结构效应贡献值有正有负,这一特征与山西省产业结构的变化趋势基本吻合,但整体呈现为负向效应,累计抑制了 733.22 万 t 碳排放量.随着第二产业占比降低,第三产业占比不断上升,其产业结构不断优化,说明产业结构调整优化是山西省行业终端碳减排的有效举措.

(3)居民能源结构:居民能源结构效应对碳排放的贡献值整体上为负值,累计抑制了 48.13 万 t 碳排放量,影响程度最低.其中 2015~2016 年贡献值最低,为−150.88 万 t,2018~2019 年贡献值最高,为 231.02 万 t.侧面表明能源结构优化是一个漫长的过程,短时间内很难改变居民能源结构.

(4)人口规模:人口规模效应除 2021~2022 年贡献 1.12 万 t 碳排放量外,整体累计抑制了 96.96 万 t 碳排放量,影响效果不明显.从人口增长现状来看,除 2022 年人口数量增加了 0.87 万人,其变化率与人口规模贡献值的变化趋势相一致.因此,未来人口规模效应引起显著碳排放增加的可能性较小.

2.2　基准情景下山西省的碳排放预测分析

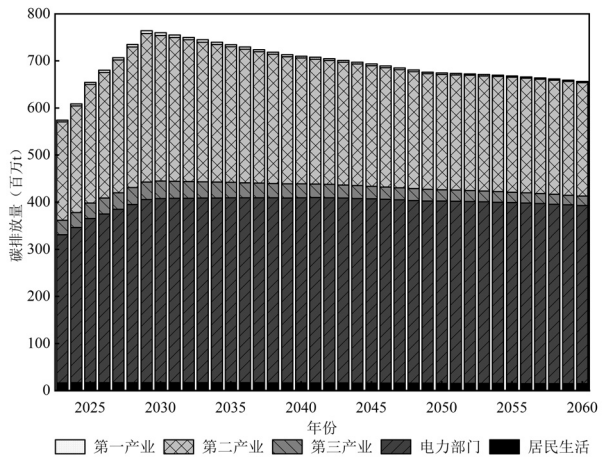


图 1　山西省基准情景下碳排放量的变化情况

Fig.1　The variation of carbon emissions in Shanxi Province under the baseline scenario

根据上述对基准情景的设定,应用 LEAP-Shanxi 模型对山西省 2023~2060 年的碳排放量进行预测分析,具体如图 1 所示:

由图 1 可知,第二产业和电力部门的碳排放量是山西省碳排放的主要来源.在基准情景下,山西省碳排放先呈快速上升,再下降,后趋于平稳的态势.山西省碳排放总量在 2029 年达到峰值,为 764.33Mt, 2060 年降至 656.57Mt.其中第二产业的碳排放量变化幅度最大,在 2029 年达到峰值 316.05Mt 后,2060 则降至 241.2Mt,电力部门在 2060 年碳排放量占总量的 57.58%.

2.3　不同情景下山西省分部门的碳排放预测分析

根据上述各部门已设定的情景,通过 LEAP-Shanxi 模型从煤炭、油品、天然气等能源消耗情况,对不同情景下 2023~2060 年山西省各部门碳排放的减排潜力进行预测分析.

2.3.1　农业　由图 2 可知,农业各类能源碳排放量呈现倒“V”型趋势.在基准情景下(图 2(a)),农业碳排放总量在 2029 年达到峰值,为 5.5Mt,2060 年降至 2.43Mt.油品的碳排放量在 2029 年达到峰值 2.86Mt 后持续减排,2060 年降至 1.67Mt;天然气的碳排放量在 2025 年达到峰值 0.099Mt,至 2050 年降为 0Mt.在低碳循环农业情景下(图 2(b)),由于农业作业时各类节能装置的有效配备,2029 年的碳排放量峰值为 5.14Mt,相比基准情景下降了 0.36Mt,2060 年降至 1.97Mt.其中油品的碳排放量 2029 年达到峰值,为 2.71Mt,2060 年降至 1.35Mt,煤炭和天然气的碳排放量受到同幅度下降.

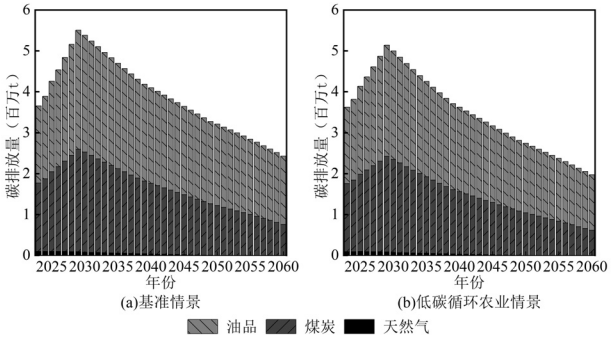


图 2　山西省不同情景下农业碳排放量的变化情况

Fig.2　Carbon emissions of agriculture in Shanxi Province under different scenarios

2.3.2　工业　由图 3 可知,工业节能增效情景对山西省工业部门实现节能减排目标更加有效.在基准

情景下(图 3(a)),工业部门碳排放量在 2029 年达峰,为 313.65Mt,随之呈下降趋势,2060 年降至 192.92Mt.其中天然气碳排放量占比最高(36.95%),在 2029 年达到峰值 115.89Mt,2060 年降至 96.92Mt.在工业结构优化情景下(图 3(b)),工业部门的碳排放量略微降低,2029 年峰值达 299.7Mt,相较于基准情景下降了 13.95Mt, 2060 年降至 174.93Mt.但天然气的峰值占比相较于基准情景有所上升(40.52%),所以该情景下碳排放量下降得益于煤炭能源消耗占比的降低.在工业节能增效情景下(图 3(c)),由于能源强度的降低,2029 年的峰值相较基准情景下降了 20.61Mt,在 2060 年差距更加明显,达 42.16Mt.

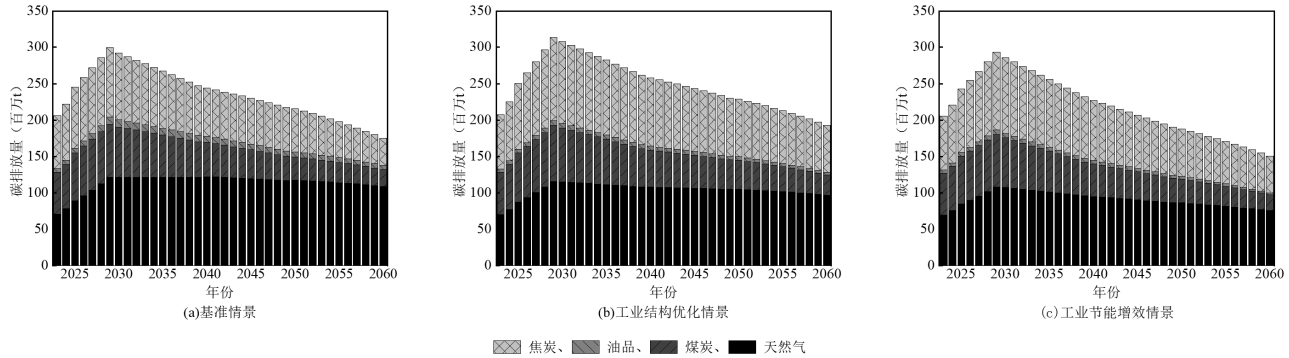


图 3 山西省不同情景下工业碳排放量的变化情况

Fig.3 Carbon emissions of industry in Shanxi Province under different scenarios

2.3.3 建筑业 图 4 展示了 2023~2060 年建筑业基准情景、城乡绿色建设情景下山西省建筑业不同能源碳排放量的预测情况.

由图 4 可知,山西省建筑业的碳排放量主要来源于油品.在基准情景下(图 4(a)),2029 年建筑业碳排放量达到峰值 2.4Mt,后趋于稳定,2060 年为 2.14Mt.其中 2029 年油品的碳排放量占比最高,占比达 97.5%.在城乡绿色建设情景下(图 4(b)),由于能源强度的略微降低,建筑业整体碳排放量减排能力小幅提高,2029 年峰值达 2.34Mt,2060 年降至 2.04Mt.其中油品、天然气、煤炭的碳排放占比同基准情景,油品 2029 年达 2.28Mt,2060 年降至 2Mt.

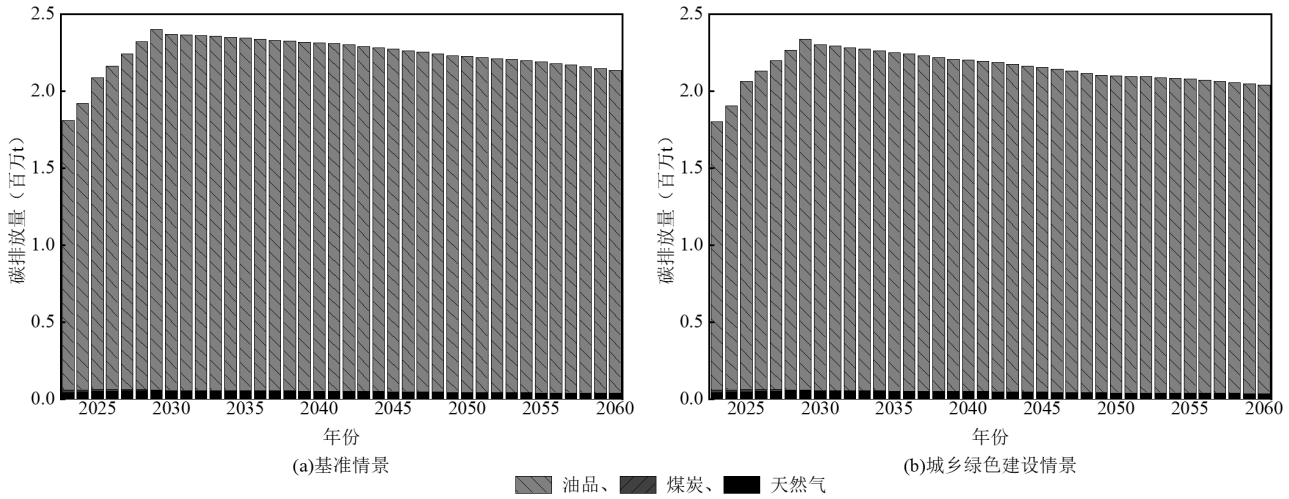


图 4 山西省不同情景下建筑业碳排放量的变化情况

Fig.4 Carbon emissions of construction industry in Shanxi Province under different scenarios

2.3.4 交通业 由图 5 可知,交通低碳转型情景对山西省交通业碳减排效果更佳.在基准情景下(图 5(a)),2029 年交通业碳排放量达到峰值,为 32.72Mt.随后进入减排节能期,至 2040 年,降至 26.25Mt.至 2060

年,处于减排平缓期,达 18.41Mt.油品碳排放量 2060 年降至 14.57Mt,占比最高(79.17%),天然气碳排放量降为 3.83Mt.在交通低碳转型情景下(图 5(b)),由于石油等化石能源消耗比例下降,天然气比例的上升,导致 2029 年交通业碳排放量峰值降至 31.73t, 2060 年为 15.2Mt,油品降至 10.1Mt,占比为 66.45%,天然气碳排放量提升至 5.1Mt.在优化运输结构情景下(图 5(c)),由于提高能效能力,交通业碳排放量 2029 年峰值降为 32Mt,油品峰值为 25.77Mt,2060 年降至 16.23Mt,油品降至 13.15Mt,变化趋势同基准情景.

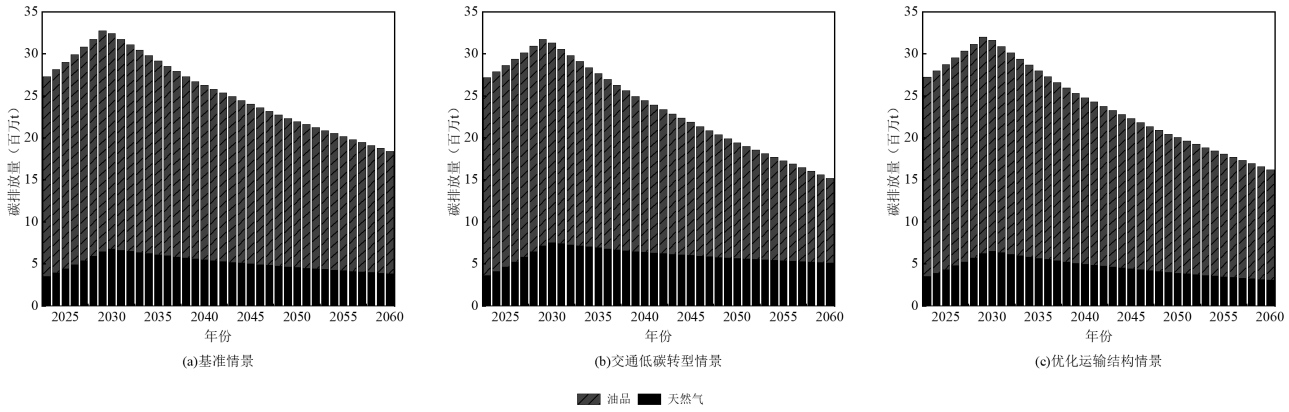


图 5　山西省不同情景下交通业碳排放量的变化情况

Fig.5　Carbon emissions of transportation industry in Shanxi Province under different scenarios

2.3.5　服务业　由图 6 可知,山西省服务业碳排放量主要来源于天然气.在基准情景下(图 6(a)),2029 年山西省服务业碳排放量达到峰值,为 5.56Mt,天然气峰值为 5.11Mt,占比高达 91.9%.随后油品和煤炭排放量占比逐渐减低,碳排放总量呈现下降趋势,2060 年降为 2.62Mt.在完善节能机制情景下(图 6(b)),降低服务业能耗强度,碳排放总量峰值为 5.45Mt,2060 年降为 2.18Mt,油品和煤炭的碳排放量进一步降低.

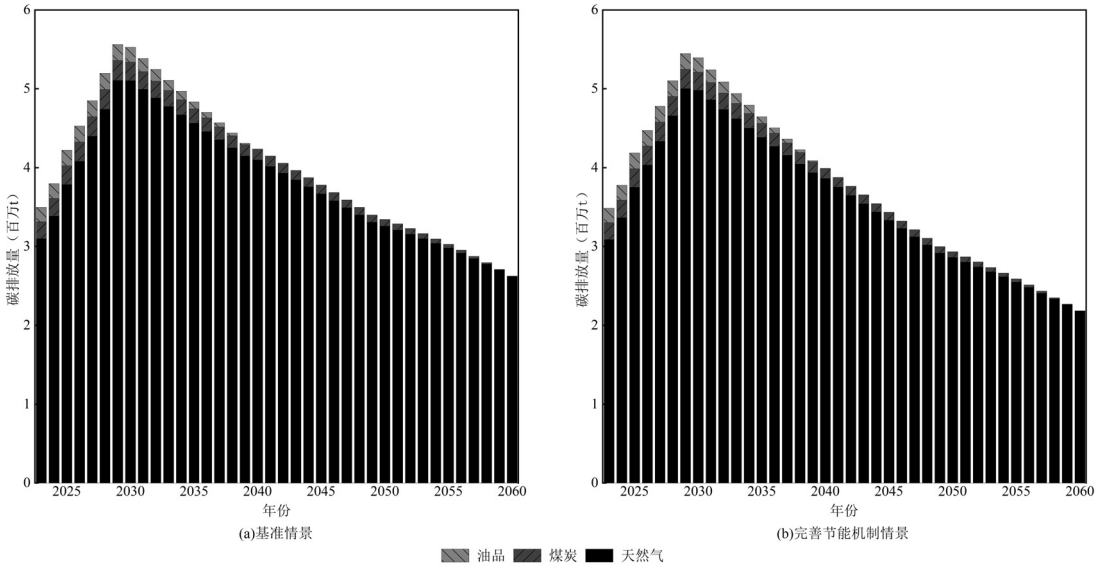


图 6　山西省不同情景下服务业碳排放量的变化情况

Fig.6　Carbon emissions of service industry in Shanxi Province under different scenarios

2.3.6　居民生活　由图 7 可知,新能源需求加速情景对山西省居民生活碳排放的减排效果更优.在基准情景下(图 7(a)),2030 年达到峰值,为 17.18Mt,至 2060 年平缓降至 14.75Mt.其中天然气在 2040 年达到峰值,为 13.49Mt,占比达 81.6%,2060 年,降为 13.33Mt.煤炭和油品的排放量整体呈下降趋势.在绿

色生活方式情景下(图 7(b)),居民提高了节能意识,能源消耗量得到降低,2060 年碳排放总量降为 14.16Mt,整体能源占比变化不大.在新能源需求加速情景下(图 7(c)),居民增强电力需求侧,能源消耗结构得到改变.使得碳排放总量峰值降至 16.95Mt,2060 年降为 13.36Mt,相较于绿色生活方式情景,降低了 0.8Mt.其中天然气碳排放量在 2032 年时达到峰值,为 12.88Mt,占比降为 76.7%.

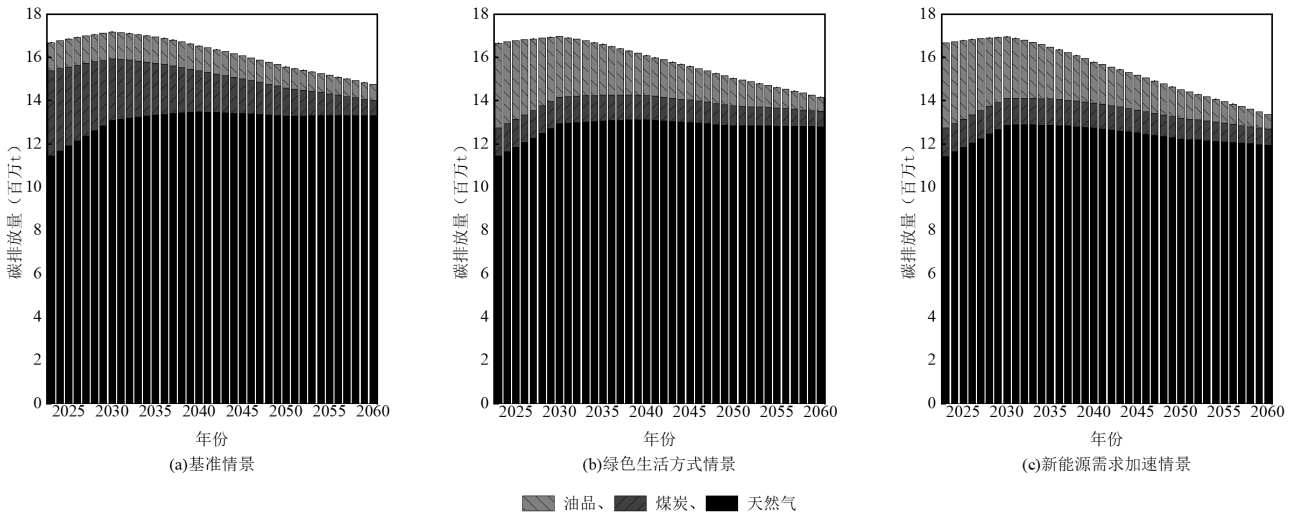


图 7 山西省不同情景下居民生活碳排放量的变化情况

Fig.7 Carbon emissions of residents' lives in Shanxi Province under Different Scenarios

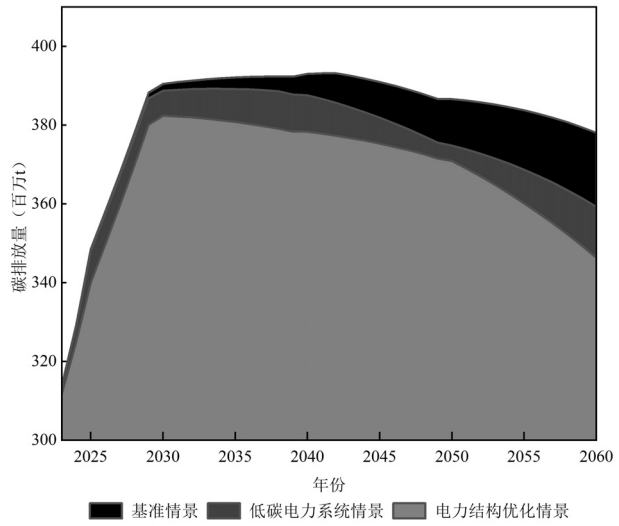


图 8 山西省不同情景下电力系统碳排放量的变化情况

Fig.8 Carbon emissions of power system in Shanxi Province under different scenarios

2.3.7 电力部门 由图 8 可知,在所有情景中,电力结构优化情景对电力行业减少碳排放的贡献最为显著.在基准情景下,电力部门在 2043 年时碳排放量达到峰值,为 392.53Mt,至 2060 年碳排放量降为 378.07Mt.在低碳电力系统情景下,因新能源电力系统逐渐提高发电份额,电力部门 2034 年的峰值为 389.24Mt,2060 年碳排放量降为 359.25Mt.在电力结构优化情景下,因淘汰落后煤电装机容量,加快清洁能源装机容量,电力部门 2030 年的峰值降为 382.42Mt,2030~2050 年间,碳排放量减排速率稍显平缓,在 2050 年后减排速率大幅提升,至 2060 年碳排放量降至 346.34Mt, 相比基准情景下降了 31.73Mt.

2.4 综合情景下山西省的碳排放预测分析

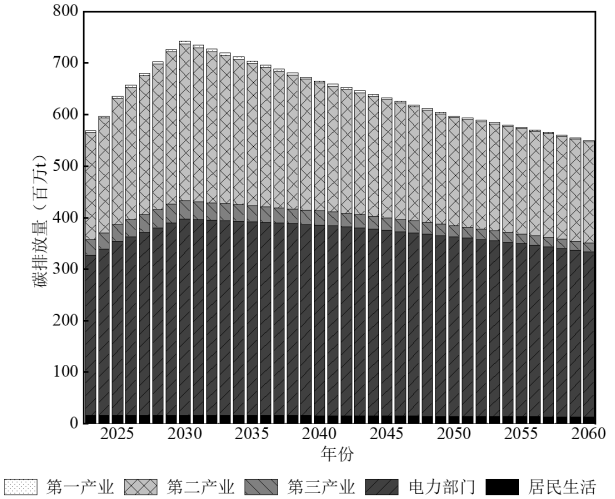


图 9 山西省综合情景下碳排放量的变化情况

Fig.9 The variation of carbon emissions in Shanxi Province under the comprehensive scenarios

将上述各部门低碳情景中的最优减排情景(低碳循环农业情景、工业节能增效情景、城乡绿色建设情景、交通低碳转型情景、完善节能机制情景、新能源需求加速情景、电力结构优化情景)进行拟合,构建合理的山西省节能减排综合情景.

由图 9 可知,在综合情景下山西省碳排放先呈上升,在 2030 年达峰值后呈下降的态势.山西省碳排放总量在2030年达到峰值,为 742.34Mt,2060 年降至 549.15Mt,相比基准情景降低了 107.42Mt.至 2060 年,由于第二产业的节能增效效果显著,碳排放量降为 196.44Mt,同时电力部门的占比增为 58.39%.

2.5　建议

2.5.1　大力扶持高新低碳企业　经济发展水平效应作为山西省碳排放影响因素的关键促进因素.因此,政府需以发展低碳经济为导向,寻求经济多模式发展.来引导高碳企业向低碳和低能耗转变,扶持新能源企业以及大力发展创新新型企业,在节能降碳的同时要统筹与经济发展之间的关系,依托山西省节能降碳示范企业,包括山西钢科碳材料有限公司等 38 家“绿色工厂”,深入实施能效“领跑者”制度,打造一批达到国际先进水平的节能低碳园区,开启低碳且高质量的经济新增长.

2.5.2　促进能源领域技术创新　能源强度效应作为山西省碳排放影响因素的关键抑制因素.因此,加速发展绿色低碳技术,并优先资助煤炭行业的低碳化技术整合与应用;加快先进节能低碳技术研发和装备配置,建设山西合成生物产业生态园;加强新能源、氢能等情景能源的生产、储存;增强企业作为创新主体的角色,鼓励企业与高校、科研机构等合作.推动怀柔实验室山西基地、中国科学院大学太原能源材料学院等基础建设,布局建设一批绿色低碳领域省重点实验室、省级技术创新中心,打造碳达峰碳中和战略科技力量,鼓励校企联合组建山西碳达峰碳中和产教融合发展联盟,共同建立低碳创新联合体.

2.5.3　加快产业升级改造步伐　第二产业和电力部门的碳排放量是山西省碳排放的主要来源.因此,逐步削减第二产业中的发电部门、水泥、钢铁等高能耗行业规模,充分发挥山西焦炉煤气富氢优势,鼓励就近消纳,降低工业副产氢供给成本,逐步推动构建清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系,稳步推进氢能多元化示范应用,有序推动氢燃料重卡生产、氢燃料电池生产、氢能关键零部件制造等多产业结合的氢能产业集群建设.提升低能耗、高效率企业的比重,来优化第二产业的能源配置.同时,积极推动服务业等第三产业的发展,巩固并扩大清洁产业的市场份额.

2.5.4　提高居民低碳生活意识　随着居民生活质量的提高,居民生活的碳排放量也在增加.因此,需加强生态文明宣传教育、大力倡导适度的绿色生活方式和消费理念、鼓励低碳出行.生活中改善用能结构,尽快实现零煤炭,并且推动电能替代工作.充分调动全民参与碳达峰碳中和的积极性,建设绿色校园、绿色社区,将绿色低碳理念有机融入到日常教育和生活.

3　结论

3.1　根据 LMDI 分解模型的结果表明:在影响山西省终端碳排放的因素中,经济发展水平效应、人均能耗效应和行业能源结构效应为促进因素;能源强度、产业结构、人均规模和居民能源结构为抑制因素.其中经济发展水平效应和能源强度效应分别是促进和抑制山西省碳排放的关键性因素.

3.2　分部门的碳排放预测结果表明:在工业节能增效、交通低碳转型、新能源需求加速以及电力结构优化这 4 种低碳情景中,使得相应部门的碳排放量节能减排效果最为显著.相较于 2060 年的基准情景,碳排放量分别减少了 42.16,3.21,1.38,31.73Mt.

3.3　在基准和综合情景下碳排放结果预测表明:基准情景下山西省碳排放总量在 2029 年达到峰值为 764.33Mt,而综合情景在 2030 年达到峰值,为 742.34Mt.上述情景均能够完成《山西省碳达峰实施方案》在 2030 年前力争实现碳达峰的目标,而综合情景相比基准情景的碳排放量在峰值时降低了 21.99Mt.综合情景在 2060 年与基准情景相比,碳排放量下降了 107.42Mt.

参考文献:

[1] IEA (International Energy Agency) CO_2 emissionsin 2023 [EM/OL]. 2023-03-01 [2025-5-10]. https://ourworldindata.org/grapher/annual-CO_2-emissions-per-country.

[2] 国务院.中国应对气候变化的政策和行动 [EB/OL]. 2021-10-27 [2025-5-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/27/content_5646697.

htm.
The State Council. China's policies and actions to address climate change [EB/OL]. 2021-10-27 [2025-5-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/27/content_5646697.htm.

[3] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021,(31):48-58.
The State Council. Notice on issuing the action plan for peaking carbon emissions before 2030 [J]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021,(31):48-58.

[4] 孔旻蔚,胡 宏,张宏镭,等.2000~2020 年长三角地区城市低碳竞争力时空演化 [J]. 地理研究, 2023,42(10):2713-2737.
Kong M W, Hu H, Zhang H W, et al. Spatio-temporal evolution of urban low-carbon competitiveness in the Yangtze River delta from 2000to 2020 [J]. Geographical Research, 2023,42(10):2713-2737.

[5] 田 云,蔡艳蓉.长江经济带农业碳排放 EKC 检验及其驱动因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(11):2403-2417.
Tian Y, Cai Y R. EKC-based test for agricultural carbon emissions in Yangtze River economic belt and analysis of driving factors [J]. Resources and Environment in the Yangtze River, 2023,32(11):2403-2417.

[6] 傅俊越,周启刚.重庆市碳排放及主要污染物的环境库兹涅茨曲线特征研究 [J]. 应用化工, 2023,52(3):764-768,774.
Fu J Y, Zhou Q G. Study on environmental Kuznets curve characteristics of carbon emission and major pollutants in Chongqing [J]. Applied Chemical Industry, 2023,52(03):764-768,774.

[7] 安庆贤,邹雨晴,熊贝贝.基于 PDA-IDA 分解法的碳强度影响因素研究 [J]. 运筹与管理, 2023,32(4):140-146.
An Q X, Zhou Y Q, Xiong B B. Research on Influencing Factors of Carbon Intensity Based on PDA-IDA Decomposition Method [J]. Operations Research and Management Science, 2023,32(4):140-146.

[8] 刘晨曦,支小军,孙雪英.新疆工业碳排放因素分解——基于 GDIM 模型的实证研究 [J]. 地域研究与开发, 2023,42(4):125-129,142.
Liu C X, Zhi X J, Sun X Y. Decomposition of industrial carbon emission factors in Xinjiang: A case study based on Generalized Dirichlet Index Method [J]. Areal Research and Development, 2023, 42(4):125-129,142.

[9] Zhang Y, Li M X, Cai X, et al. Drivers of industrial carbon emissions in the Yangtze River Delta region, China: A combination of decoupling and LMDI models [J]. Energy Sources Part B Economics Planning and Policy, 2024,19(1):2384551.

[10] 周云柯,吴建国.中国碳排放影响因素分析与碳中和路径探寻 [J]. 中国国土资源经济, 2025,38(4):12-24.
Zhou Y K, Wu J G. Analysis of influencing factors of carbon emissions and exploration of carbon neutrality path in China [J]. Natural Resource Economics of China, 2025,38(4):12-24.

[11] Peng D, Liu H B. Measurement and driving factors of carbon emissions from coal consumption in China based on the Kaya-LMDI model [J]. Energies, 2023,16(1):439.

[12] 陈军华,李乔楚.成渝双城经济圈建设背景下四川省能源消费碳排放影响因素研究——基于 LMDI 模型视角 [J]. 生态经济, 2021, 37(12):30-36.
Chen J H, Li Q C. Research on the influencing factors of energy consumption carbon emission in Sichuan Province under the background of the construction of Chengdu-Chongqing Double City economic circle: from the perspective of LMDI method [J]. Ecological Economy, 2021,37(12):30-36.

[13] 赵 强,李迎迎,刘 嵩,等.基于 MEIC 数据的长三角地区 CO_2 排放时空演变及影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2024,37(8):1666-1679.
Zhao Q, Li Y Y, Liu S, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of CO_2emissions in the Yangtze River Delta Region based on MEIC data [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(8): 1666-1679.

[14] Liu Y X, Jiang Y J, Liu H, et al. Driving factors of carbon emissions in China's municipalities: a LMDI approach [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29(15):21789-21802.

[15] Jia L H, Wang M Y, Yang, S L, et al. Analysis of agricultural carbon emissions and carbon sinks in the Yellow River Basin based on LMDI and Tapio decoupling models [J]. Sustainability, 2024,16(1):468.

[16] Jiang P, Gong X J, Yang Y R, et al. Research on spatial and temporal differences of carbon emissions and influencing factors in eight economic regions of China based on LMDI model [J]. Scientific Reports, 2023,13(1):7965.

[17] 刘浩东,邱 微,陈 爽.黑龙江省能源碳排放核算及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):4117-4126.
Liu H D, Qiu W, Chen S. Accounting and driving factors analysis of energy carbon emissions in Heilongjiang Province [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):4117-4126.

[18] 邵志国,李可心,李梦笛.“双碳”背景下中国交通运输业碳排放驱动因素及脱钩效应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):571-582.
Shao Z G, Li K X, Li M D. Driving factors and decoupling effect of carbon emissions in China's transportation industry under the background of "dual carbon" [J]. China Environmental Science, 2025, 45(1):571-582.

[19] 李晨光,王 帅,郭雨蕙.碳中和背景下钢铁行业低碳转型发展政策工具与路径分析——基于动态 CGE 模型的模拟研究 [J]. 经济问题探索, 2023,(1):34-59.
Li C G, Wang S, Guo Y H. Analysis of policy tools and pathways for low carbon transformation development of iron and steel industry—A simulation study based on dynamic CGE model [J]. Inquiry into Economic Issues, 2023,(1):34-59.

[20] 袁永科,王奕潼,王奕兴.中国碳排放关键部门碳市场减排策略的情景分析 [J]. 环境经济研究, 2022,7(4):61-84.
Yuan Y K, Wang Y T, Wang Y X. Scenario analysis of carbon market emission reduction strategies for key sectors of China's carbon emissions [J]. Journal of Environmental Economics, 2022,7(4):61-84.

[21] 黄威翔,高川作,吴 波,等.基于 STIRPAT 模型的广西碳达峰路径 [J]. 环境科学, 2025,46(2):682-695.
Huang W X, Gao C Z, Wu B, et al. Development path of Guangxi to reach the carbon emission peak based on STIRPAT model [J]. Environmental Science, 2025,46(2):682-695.

[22] 梁力军,冯江林,孙玉璇.区域碳排放达峰预测模型构建与实现路径研究 [J]. 生态经济, 2024,40(8):30-36.
Liang L J, Feng J L, Sun Y X. Construction and research of regional carbon emission peak prediction model and its realization path [J]. Ecological Economy, 2024,40(8):30-36.

[23] 王宏伟,刘一晗,张芸栗,等.辽宁省公共机构能源供应结构优化设计 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020,36(6):1106-1112.
Wang H W, Liu Y H, Zhang Y L. Optimization design of energy supply structure for public building in Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020,36(6):1106-1112.

[24] Bijay B P, Ram M S, Bundit L. Achieving the paris agreement's 2degree target in Nepal: the potential role of a carbon tax [J]. Climate Policy, 2020,20(3):387-404.

[25] Nieves J A, Aristizábal A J, Dyner I, et al. Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application [J]. Energy, 2019,169:380-397.

[26] 洪竞科,李沅潮,蔡伟光.多情景视角下的中国碳达峰路径模拟—基于 RICE-LEAP 模型 [J]. 资源科学, 2021,43(4):639-651.
Hong J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model [J]. Resources Science, 2021,43(4):639-651.

[27] 罗　闯,黎　林,王雨豪,等.基于 LEAP 模型的江苏省重点行业碳达峰碳中和情景 [J]. 环境科学, 2025,46(1):1-9.
Luo C, Li L, Wang Y H, et al. Carbon peak and carbon neutrality scenarios for key industries in Jiangsu Province based on LEAP model [J]. Environmental Science, 2025,46(1):1-9.

[28] Ahmad R, Liu G Y, Rehman S A U, et al. Pakistan road towards paris agreement: potential decarbonization pathways and future emissions reduction by a developing country [J]. Energy, 2025,314:134075.

[29] Wang N, Zhao Y X, Song T ,et al. Accounting for China's Net Carbon Emissions and Research on the Realization Path of Carbon Neutralization Based on Ecosystem Carbon Sinks[J]. Sustainability, 2022,14:14750.

[30] 方涵潇,刘　灿,蒋　康,等.湖南省交通运输领域碳排放达峰路径研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023,23(4):61-69.
Fang H X, Liu C, Jiang K, et al. Pathway towards carbon peak in transportation sector of Hunan Province [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023,23(4):61-69.

[31] 陈　浩,胡静茹,王寿兵,等.中国钢铁行业 CO_2 排放特征和减排路径研究-基于 ARIMA-LEAP 模型 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3531-3543.
Chen H, Hu J R, Wang S B, et al. Research on carbon dioxide emission characteristics and emission reduction path of China's iron and steel industry based on ARIMA-LEAP model [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3531-3542.

[32] 吕　晨,张　哲,陈徐梅,等.中国分省道路交通二氧化碳排放因子 [J]. 中国环境科学, 2021,41(7):3122-3130.
LÜ C, Zhang Z, Chen X M, Study on CO_2 emission factors of road transport in Chinese provinces. [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3122-3130.

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

[34] 郭旭悦.山西省各市能源消费碳排放的影响因素分析及预测 [D]. 太原:山西大学, 2023.
Guo X Y. Analysis and forecast of factors affecting carbon emissions from energy consumption in various urbanitys of Shanxi Province. [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.

[35] 李宝珠,刘雅洁,张少聪.基于 LEAP 模型的天津市多情景能源消费和碳排放预测 [J]. 环境科学, 2025,46(3):1492-1501.
Li B Z, Liu Y J, Zhang S C. Multi-scenario energy consumption and carbon emission prediction in Tianjin based on LEAP model [J]. Environmental Science, 2025,46(3):1492-1501.

[36] 胡浩威,王钦章,朱　力,等.基于 LEAP 模型和 LMDI 分解的建筑碳排放预测分析 [J]. 北京建筑大学学报, 2023,39(3):80-87.
Hu H W, Wang Q Z, Zhu L, et al. Prediction and analysis of carbon emission in building sector based on LEAP model and LMDI decomposition [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023,39(3):80-87.

[37] Handayani K, Anugrah P, Goembira F, et al. Moving beyond the NDCs: ASEAN pathways to a net-zero emissions power sector in 2050 [J]. Applied Energy, 2022,311:118580.

[38] 张车伟.中国人口与劳动问题报告 No.19 [M]. 北京:社会科学文献出版社, 2018.
Zhang C W. Reports on China's population and labor No.19 [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018.

[39] 梁建章,任泽平,黄文政,等.中国人口预测报告 [EB/OL]. (2023-2-17) [2025-5-10]. https://file.c-ctrip.com/files/6/yuwa/0R70l12000ap4aa8z4B12.pdf.
Liang J Z, Ren Z P, Huang W Z, et al. China population forecast report [EB/OL]. (2023-2-17) [2025-5-10]. https://file.c-ctrip.com/files/6/yuwa/0R70l12000ap4aa8z4B12.pdf.

[40] 国际货币基金组织.世界经济展望报告 [EM/OL]. (2021-10-1) [2025-5-10]. https://www.shihang.org/zh/publication/global-economic-prospects.
International Monetary Fund. World economic outlook report [EM/OL]. (2021-10-1) [2025-5-10]. https://www.shihang.org/zh/publication/global-economic-prospects.

[41] 陆　彪,郝永康,陈德敏,等.基于情景分析法的安徽省能源消耗及碳排放分析 [J]. 环境工程技术学报, 2024,14(3):788-797.
Lu B, Hao Y K, Chen D M, et al. Analysis of energy consumption and carbon emissions in Anhui Province based on scenario analysis [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(3):788-797.

作者简介：李姗姗(1992-),女,河北保定人,副教授,博士,主要从事环境治理理论与方法、“双碳”管理与政策.发表论文 20 余篇.shanshanli0809@163.com.