

基于双 LMDI 模型和情景分析的浙江省碳排放影响因素研究

张 浩, 郁 丹*, 唐 人, 郭雨涵, 朱维骏, 何勇玲

(浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 浙江省低碳发展条件相对优越, 可作为率先实现碳达峰和碳中和(“双碳”)的示范省份。本文采用对数平均迪氏指数分解法(LMDI), 从经济活动和居民生活两方面分别考量, 对浙江省 2000—2019 年碳排放变化量的驱动因素进行分解。通过情景分析, 即浙江省分别在 2060 年(国家战略)和 2050 年(区域率先)实现“双碳”目标, 对未来浙江省人均碳排放量趋势进行预测, 并结合历史分解结果对两种情景下碳排放变化量的驱动因素进行分解预测。结果表明: (1)经济活动方面, 人均 GDP 增加是碳排放的主要驱动因素(累计增量 520 Mt), 而单位 GDP 能耗降低是碳排放的主要抑制因素(累计减量 210 Mt); (2)居民生活方面, 人均能耗增加是碳排放的主要驱动因素(累计增量 12.6 Mt), 而能源结构低碳化则是主要的碳排放抑制因素(累计减量 1.5 Mt); (3)为实现碳中和目标, 两种情景下减排重点均是能源结构的低碳转型, 但转型关键时间线有所不同; 对于 2060 年和 2050 年碳中和情景的转型关键时间线分别在于 2031—2045 年和 2036—2050 年。

关键词: 碳排放; LMDI 模型; 情景分析; 浙江省

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 03-0114-07

编制并发布各省(市)的碳达峰和碳中和(“双碳”)方案对于实现中国“双碳”重要承诺显得尤为重要, 探究区域碳排放驱动因素成为当务之急。浙江省人均 GDP 为 100 620 元(2020 年), 处于国内领先水平, 且人均碳排放和单位 GDP 能耗相对较低, 省内各城市发展相对平衡, 并且提出了全国首个省级碳达峰、碳中和行动方案, 承诺于 2025 年率先实现碳达峰。因此, 率先在浙江省构建新型的高质量、绿色低碳发展区域经济体, 对于其他各省(市)发展具有深远的借鉴意义, 同时浙江省所面对的也是未来其他各省(市)即将面对的。在建立减排路径与制定减排政策之前, 碳排放特征与历史规律、各时期碳排放的驱动因素、各驱动因素的作用程度是需要首先明确的关键问题。

对数平均迪氏指数分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)被广泛应用于能源和碳排放问题方面的因素分解研究, 具有分解后残差为零、结果唯一的显著优点。全球层面, Dong 等^[1]利用

LMDI 分解法得出低收入国家的经济发展和人口增长是全球碳排放的主要驱动力。国家层面, 对于中国^[2], 经济快速增长是导致 CO₂ 排放量增加的主要驱动力, 而能源强度则是主要的抑制因素。此外, 印度方面^[3]的研究也得到了类似的结果。行业层面, LMDI 分解法也被广泛应用于电力^[4]、工业^[5-6]、交通^[7]、建筑^[8]等部门的能耗强度和碳排放驱动因素分解研究。省(市)层面, 人均 GDP 和人口增长是推动广东省能源消费增长的主导因素^[9]。不同的研究主体具有不同的分解方法, 并且分解方法应确保包含影响研究主体的所有重要因素。Alajmi 等^[10]将沙特阿拉伯温室气体排放的驱动因素分解为人口、经济活动、能源消费。Xie 等^[11]将电力部门的驱动因素增加到 8 个效应, 分别是经济规模、能源强度、供电与用电比、电力结构、技术效率、火电能源结构、CO₂ 排放系数。Gu 等^[12]将上海市碳排放分解为 13 个驱动因素, 但可归类为社会经济规模、结构、城市出行、强度和居民生活五大类效应。

收稿日期: 2022-09-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 上海市软科学重点计划项目(21692105000)。

第一作者: 张浩(1970-), 男, 浙江湖州人, 高级工程师, 主要研究方向: 碳电协同与电网规划. E-mail: 864408897@qq.com

*通信作者: 郁丹(1982-), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 主要研究方向: 综合能源与电网规划. E-mail: 610829794@qq.com

然而在区域碳排放影响因素分解研究中,多数模型均选择单一分解式,并未考虑到经济活动和居民生活有不同的影响因素。同时,当前碳排放影响因素分解研究中仅关注历史趋势,并未通过其分解结果对未来情景进行预测,因而无法为未来低碳发展道路提供量化建议。本文以浙江省碳排放为研究对象,旨在深究浙江省碳排放变化在2000—2019年,以及2019年到实现碳中和年份期间的影响因素,从而为浙江省绿色低碳发展提供数据支撑和政策建议。本文首先采用LMDI模型分解浙江省2000—2019年经济活动(6因素)与居民生活(5因素)的CO₂排放变动量,然后预测浙江省到碳中和年份前的人均碳排放量变化率,最后基于上述结果分别计算2060年、2050年实现碳中和两种情景发展下各影响因素的驱动效应。

1 研究方法

1.1 LMDI 分解模型

为了系统、量化地了解浙江省二氧化碳排放形势,采用LMDI模型分解各类驱动因素对于浙江省经济活动和居民生活两部分CO₂排放量变化的影响作用。LMDI模型分为加法形式和乘法形式两种,都具有完美分解驱动因素的特点且结果相同,为了提高计算速率,本文采用加法形式分解。

基于Kaya恒等式^[13]与相关改进^[6],建立浙江省碳排放影响因素分解模型如下:

$$C = C_{\text{economic}} + C_{\text{residential}}, \quad (1)$$

$$C_{\text{economic}} = \sum_{i,j} P \cdot \frac{G_{\text{GDP}}}{P} \cdot \frac{G_i}{G_{\text{GDP}}} \cdot \frac{E_i}{G_i} \cdot \frac{E_{i,j}}{E_i} \cdot \frac{C_{i,j}}{E_{i,j}} = \sum_{i,j} P \cdot Q \cdot S_i \cdot I_i \cdot M_{i,j} \cdot F_{i,j}, \quad (2)$$

$$C_{\text{residential}} = \sum_{i,j} P \cdot \frac{P_i}{P} \cdot \frac{E_i}{P_i} \cdot \frac{E_{i,j}}{E_i} \cdot \frac{C_{i,j}}{E_{i,j}} = \sum_{i,j} P \cdot S_i \cdot I_i \cdot M_{i,j} \cdot F_{i,j}, \quad (3)$$

式中: C 、 C_{economic} 和 $C_{\text{residential}}$ 为分别浙江省碳排放总量、经济活动方面碳排放量和居民生活方面碳排放量; P 为常住人口; G_{GDP} 为省内生产总值; G_i 为行业 i 的生产总值; E_i 为行业或生活区 i 中各种能源的消费总量(统一折算为标准煤); $E_{i,j}$ 为行业或生活区 i 中能源 j 的消费量; $C_{i,j}$ 为行业或生活区 i 因使用能源 j 所导致的碳排放总量; P_i 为生活区 i 的人口数。

同时定义 $Q = G_{\text{GDP}} / P$ 表示产出水平,即人均GDP; $S_i = G_i / G_{\text{GDP}}$ 或 $S_i = P_i / P$ 表示行业结构(即行业 i 的省内生产总值(或增加值)占省内生产总值的比重)或生活区结构(即城乡结构); $I_i = E_i / G_i$ 或 $I_i = E_i / P_i$ 表示能源强度; $M_{i,j} = E_{i,j} / E_i$ 表示能源结构; $F_{i,j} = C_{i,j} / E_{i,j}$ 表示能源碳排放强度。

采用Ang等^[14]提出的LMDI分解模型中的加法分解法,将浙江省从基准年(0)到目标年(t),经济活动方面的碳排放变化量 $\Delta C_{\text{economic}}$ 和居民生活方面的碳排放变化量 $\Delta C_{\text{residential}}$ 分别分解如下:

$$\Delta C_{\text{economic}} = C_t - C_0 = \Delta C_{\text{pop}} + \Delta C_{\text{gdp}} + \Delta C_{\text{eco-str}} + \Delta C_{\text{eco-int}} + \Delta C_{\text{mix}} + \Delta C_{\text{f}}, \quad (4)$$

$$\Delta C_{\text{residential}} = C_t - C_0 = \Delta C_{\text{pop}} + \Delta C_{\text{res-str}} + \Delta C_{\text{res-int}} + \Delta C_{\text{mix}} + \Delta C_{\text{f}}, \quad (5)$$

式中: C_t 和 C_0 分别为目标年和基准年的碳排放量; ΔC_{pop} 、 ΔC_{gdp} 、 $\Delta C_{\text{eco-str}}$ 、 $\Delta C_{\text{res-str}}$ 、 $\Delta C_{\text{eco-int}}$ 、 $\Delta C_{\text{res-int}}$ 、 ΔC_{mix} 和 ΔC_{f} 分别为人口规模效应、产出水平效应、行业结构效应、城乡结构效应、单位GDP能源强度效应、单位人口能源强度效应、能源结构效应和能源碳排放强度效应。由于本文选择能源碳排放系数为定值,所以碳排放强度效应作用为0。

根据LMDI模型,浙江省经济活动碳排放变化量被完全分解,各效应对碳排放的影响分别如下:

$$\Delta C_{\text{pop}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{P_t}{P_0} \right), \quad (6)$$

$$\Delta C_{\text{gdp}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{Q_t}{Q_0} \right), \quad (7)$$

$$\Delta C_{\text{eco-str}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{S_{\text{eco-}i,t}}{S_{\text{eco-}i,0}} \right), \quad (8)$$

$$\Delta C_{\text{res-str}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{S_{\text{res-}i,t}}{S_{\text{res-}i,0}} \right), \quad (9)$$

$$\Delta C_{\text{eco-int}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{I_{\text{eco-}i,t}}{I_{\text{eco-}i,0}} \right), \quad (10)$$

$$\Delta C_{\text{res-int}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{I_{\text{res-}i,t}}{I_{\text{res-}i,0}} \right), \quad (11)$$

$$\Delta C_{\text{mix}} = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j,t} - C_{i,j,0}}{\ln C_{i,j,t} - \ln C_{i,j,0}} \ln \left(\frac{M_{i,j,t}}{M_{i,j,0}} \right). \quad (12)$$

1.2 情景设定

根据国家碳中和发展目标和浙江省低碳发展

条件相对优越实情,设定浙江省 2060 年碳中和、2030 年碳达峰(2060 年碳中和情景)和 2050 年碳中和、2025 年碳达峰(2050 年碳中和情景)两条路径。其中,2060 年碳中和情景包括 3 个阶段,分别为 2019—2030 年、2031—2045 年、2046—2060 年;2050 年碳中和情景包括 3 个阶段,分别为 2019—2025 年、2026—2035 年、2036—2050 年。

在碳达峰前,即第一发展阶段,设定人均碳排放量年变化率(S_1)为 1%(2000—2019 年平均增长率为 5%);同时设定第三发展阶段人均碳排放量年变化率(S_3)分别为第二发展阶段(S_2)的 200%($S_3/S_2=2$)和 50%($S_3/S_2=0.5$)两种情景。

根据《浙江蓝皮书》^[15]对于人口的预测,设定关键年份的人口数量见表 1。以党的十九届五中全会上最新战略目标(即人均 GDP 在 2035 年达到 27 000 美元,在 2050 年达到 45 000 美元)为基础,设定各阶段年人均 GDP 平均增速见表 2。

表 1 浙江省人口数量历史数据及未来预测 万

年份	人口
2019 年	5 850
2025 年	5 803
2030 年	5 716
2035 年	5 622
2050 年	5 539
2060 年	5 539

表 2 浙江省年人均 GDP 平均增速历史数据及未来预测 %

时间段	年平均增速
2010—2019 年	0.086
2020—2025 年	0.050
2026—2035 年	0.035
2036—2050 年	0.030
2051—2060 年	0.020

为重点关注能源结构效应在碳中和发展路径中的作用效果,忽略行业结构和城乡结构的驱动效应,同时设定第一阶段中能源强度效应等于单位 GDP 能源强度效应和单位人口能源强度效应的历史年平均效应总和。

1.3 数据来源与处理

以 2000—2019 年为研究样本区间,浙江省为研究对象,人口、城镇化率与经济数据来源于 2000—

2020 年《浙江省统计年鉴》,能源实物消费量来源于 2000—2020 年《中国能源统计年鉴》。其中,能源实物消费量根据《中国能源统计年鉴》所附“各种能源折标准煤参考系数”折算为标准煤消费量,能源消费量计算式如式(13)所示,碳排放计算式如式(14)所示:

$$E = F + I - O + L, \quad (13)$$

$$C_{i,j} = E_{i,j} \cdot N_j \cdot H_j \cdot Q_{i,j}, \quad i \in \{1, 47\}, j \in \{1, 20\}, \quad (14)$$

式中: E 、 F 、 I 、 O 和 L 分别为能源消费量、终端消费量、加工转化投入量、加工转化产出量和过程损失量; N_j 为能源 j 的碳排放因子; H_j 为能源 j 的净热值; $Q_{i,j}$ 为行业 i 使用能源 j 时的氧化效率。

2 实证分析

2.1 经济活动碳排放驱动因素分解

整体来看,人口规模效应和产出水平效应在浙江省经济活动碳排放中一直具有正向作用,以产出水平效应作用最为显著(表 3),行业结构效应、能源强度效应和能源结构效应呈正负交替作用关系,但累计效应对于碳排放均起到抑制作用(图 1)。从逐年综合效应来看,2003—2007 年为碳排放快速增长时期,年变化量均超过 30.0 Mt,2011—2015 年整体碳排放出现下降趋势,但在 2015—2018 年出现反弹,碳排放再次增加 24.1 Mt;期间,产出水平的平均效应达到 26.7 Mt,为最大的正向作用效应,能源强度的平均效应达到-10.1 Mt,为最大负向作用效应。从累计作用效果来看,2000—2019 年期间,产出水平和人口规模的累计效应分别达到 522.7 Mt 和 58.3 Mt,能源强度、行业结构和能源结构的累计效应分别达到-208.9、-84.9、-52.7 Mt,这与

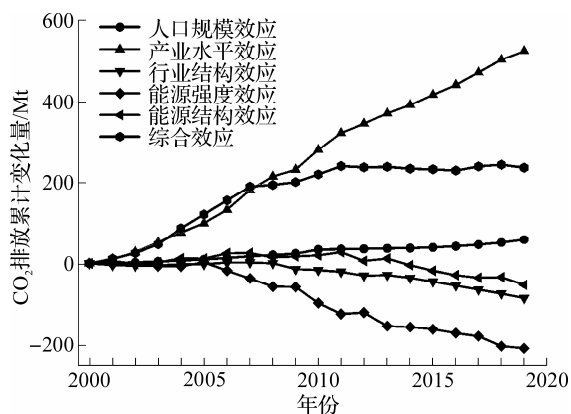


图 1 2000—2019 年浙江省经济活动碳排放累计变化量

表3 2000—2019年浙江省经济活动碳排放逐年变化
驱动因素分解

时间段	Mt CO ₂				
	人口规模效应	城镇化率效应	能源强度效应	能源结构效应	综合效应
2000—2001年	1.18	10.14	-4.13	-1.71	6.03
2001—2002年	1.26	17.44	-1.76	4.12	-7.27
2002—2003年	2.21	23.84	0.96	-9.13	3.52
2003—2004年	2.32	24.48	2.90	-0.59	10.19
2004—2005年	2.65	22.57	0.11	10.04	-0.87
2005—2006年	3.69	33.55	4.06	-20.44	13.14
2006—2007年	4.30	47.92	-0.03	-18.98	0.79
2007—2008年	3.12	33.46	-1.72	-20.16	-10.70
2008—2009年	3.40	16.58	-14.28	-1.09	2.39
2009—2010年	9.59	48.17	-2.36	-38.95	2.45
2010—2011年	0.81	23.35	-9.39	3.76	-21.52
2011—2012年	1.25	25.77	1.61	-33.34	5.72
2012—2013年	0.57	20.92	-6.94	-2.59	-16.36
2013—2014年	1.77	25.09	-9.35	-5.57	-13.34
2014—2015年	2.95	24.20	-10.08	-9.72	-10.60
2015—2016年	3.90	30.37	-9.82	-7.74	-6.64
2016—2017年	2.70	27.65	-3.79	-10.53	-2.06
2017—2018年	5.17	31.40	-9.50	-24.40	1.58
2018—2019年	7.16	21.19	-11.01	-5.52	-19.24
平均效应	3.16	26.74	-4.45	-10.13	-3.30

注: 统计时间段分别为上年度的年末至本年度的年末, 与表4同。

浙江省社会经济的快速发展、新型科技行业的崛起、传统能源行业的弱化关系密切。

各驱动效应对浙江省经济活动碳排放的累计贡献率如图2所示, 排序为产出水平效应>人口规模效应>能源结构效应>行业结构效应>能源强度效应

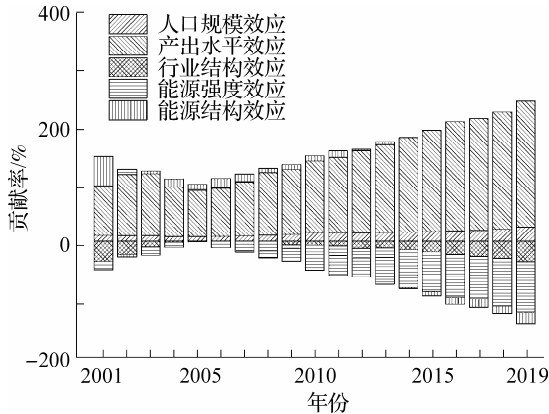


图2 2000—2019年各驱动效应对浙江省经济活动碳排放的累计贡献率

效应, 其中产出水平效应累计贡献度为222.9%, 是促进经济活动 CO₂ 排放的主要驱动因素, 而能源强度效应的累计贡献度为-89.1%, 是减缓 CO₂ 排放的主要驱动因素。产出水平效应和人口规模效应的累计贡献度分别自2000年和2006年起, 正向贡献度逐渐加强; 能源强度效应和行业结构效应的累计贡献度分别自2006年和2009年起负向贡献度逐渐加强。

2.2 居民生活碳排放驱动因素分解

整体来看, 人口规模效应和能源强度效应在浙江省居民生活碳排放中一直具有正向作用(表4); 城镇化率和能源结构的平均效应分别为-10 kt 和-80 kt。从逐年综合效应来看, 仅2000—2002年、2015—2016年和2018—2019年这3个期间的综合效应为碳排放减少(或保持)阶段, 其他年份平均综合效应为增加碳排放 920 kt; 期间, 能源强度平均效应达到 660 kt, 为最大的正向作用效应, 这与人民生活极大丰富有关。从累计作用效果来看(图3),

表4 2000—2019年浙江省居民生活碳排放变化
驱动因素分解

时间段	Mt CO ₂				
	人口规模效应	城镇化率效应	能源强度效应	能源结构效应	综合效应
2000—2001年	0.03	0.06	0.12	-0.21	0.00
2001—2002年	0.04	0.00	0.15	-0.39	-0.20
2002—2003年	0.06	0.02	0.34	0.08	0.50
2003—2004年	0.07	0.02	0.20	0.01	0.30
2004—2005年	0.09	0.03	2.06	1.12	3.30
2005—2006年	0.14	0	0.66	-0.30	0.50
2006—2007年	0.10	-0.03	0.71	0.23	1.01
2007—2008年	0.11	0.00	0.90	-0.12	0.89
2008—2009年	0.11	0.01	0.81	0.36	1.29
2009—2010年	0.37	-0.05	0.87	0.01	1.20
2010—2011年	0.02	0	0.42	0.16	0.60
2011—2012年	0.03	-0.03	0.99	-0.19	0.80
2012—2013年	0.06	-0.02	0.10	0.67	0.81
2013—2014年	0.02	0.13	1.02	-0.46	0.71
2014—2015年	0.09	-0.03	1.29	0.14	1.49
2015—2016年	0.16	-0.07	0.72	-0.92	-0.11
2016—2017年	0.21	-0.07	0.32	-0.45	0.01
2017—2018年	0.24	-0.06	0.69	-0.61	0.27
2018—2019年	0.34	-0.12	0.16	-0.59	-0.20
平均效应	0.12	-0.01	0.66	-0.08	0.69

2000—2019 年期间, 能源强度和人口规模的累计效应分别达到 12.6 Mt 和 2.3 Mt, 能源结构和城镇化率的累计效应分别达到-1.5 Mt 和-0.2 Mt.

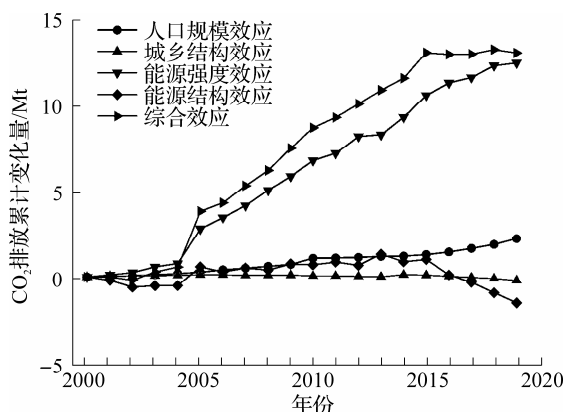


图3 2000—2019 年浙江省居民生活碳排放变化量

各驱动效应对浙江省经济活动碳排放的累计贡献率如图 4 所示, 排序为能源强度效应>人口规模效应>城镇化率效应>能源结构效应, 其中能源强度效应累计贡献度为 95.5%, 是促进经济活动 CO₂ 排放的主要驱动因素, 而能源结构效应累计贡献度为-11.5%, 是减缓 CO₂ 排放的主要驱动因素. 能源强度效应和人口规模效应的累计贡献度自 2003 年一直保持在正向贡献; 能源结构效应和城镇化率效应的累计贡献度在 2005—2016 年期间一直保持在正向贡献, 但在 2017 年后保持负向贡献.

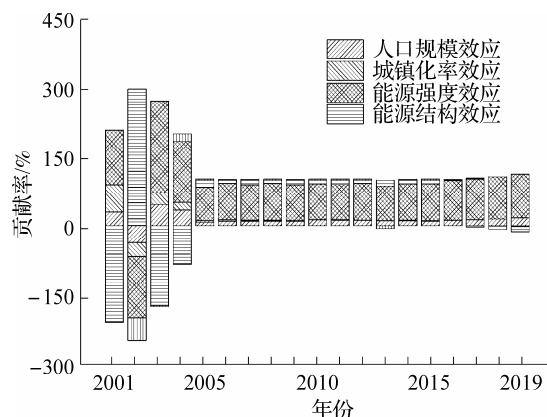


图4 2000—2019 年各驱动效应对浙江省居民生活碳排放的累计贡献率

2.3 2060 年碳中和情景与 2050 年碳中和情景

浙江省生态系统碳汇为 48.2 Mt CO₂^[16], 因此当 2050 年和 2060 年人均碳排放量为 0.87 t 时即可实现碳中和. 根据情景设定, 浙江省不同阶段下的人均碳排放量变化率见表 5.

表 5 浙江省不同情景下的人均碳排放量变化率 %

阶段	2060 年碳中和情景		2050 年碳中和情景	
	$S_3/S_2=2$	$S_3/S_2=0.5$	$S_3/S_2=2$	$S_3/S_2=0.5$
第一阶段	1.0	1.0	1.0	1.0
第二阶段	-4.6	-9.2	-5.0	-11.4
第三阶段	-9.2	-4.6	-10.0	-5.7

不同情景下, 浙江省碳排放累计变化驱动因素分解分别如图 5~图 8 所示. 在 2060 年碳中和情景中, 第一阶段人口规模、产出水平、能源强度和能源结构的效应分别为-9.0、185.2、-104.2、-37.4 Mt; 而第二、第三阶段的人口规模、产出水平和能

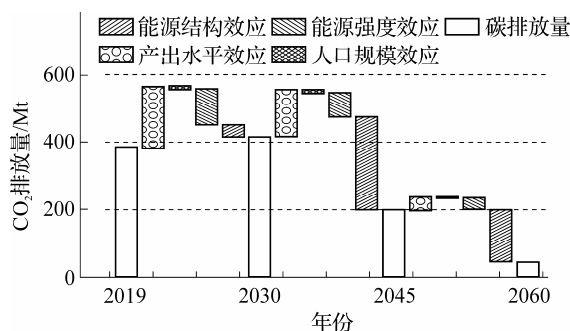


图5 在 2060 年碳中和情景、 $S_3/S_2=2$ 条件下, 浙江省碳排放累计变化量

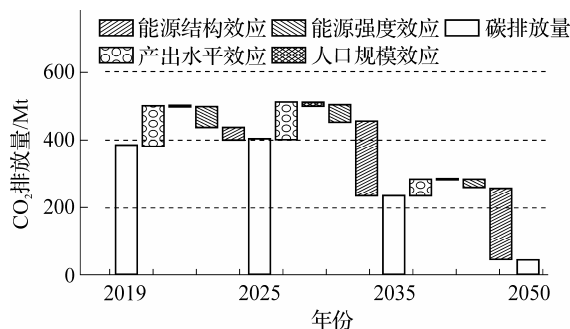


图6 在 2050 年碳中和情景、 $S_3/S_2=2$ 条件下, 浙江省碳排放累计变化量

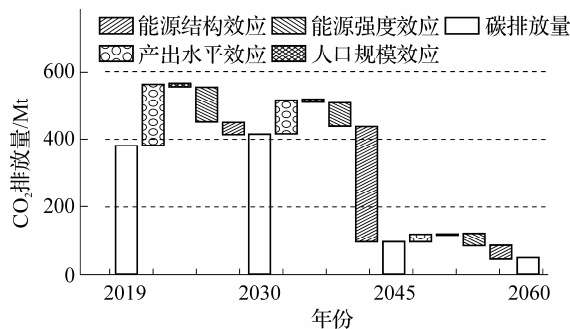


图7 在 2060 年碳中和情景、 $S_3/S_2=0.5$ 条件下, 浙江省碳排放累计变化量

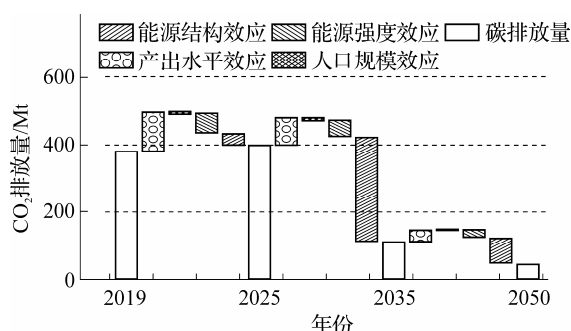


图8 在2050年碳中和情景、 $S_3/S_2=0.5$ 条件下，浙江省碳排放累计变化量

源强度均在逐渐降低；能源结构效应在第二阶段明显增大，尤其当 $S_3/S_2=0.5$ ，甚至达到了-345.6 Mt，这也就意味着在2060年碳中和情景中，能源结构的优化工作难点将凸显在第二阶段，即2030—2045年；第二、第三阶段能源结构效应均是主要影响因素；相比于 $S_3/S_2=2$ ，当 $S_3/S_2=0.5$ 时，人口规模和产出水平效应减小，而能源结构效应在第二阶段增大70.6 Mt，在第三阶段减小117.3 Mt。

在2050年碳中和情景中，除人口规模效应先增大后减小，各因素的变化趋势与2060年碳中和情景相同。相比于2060年碳中和情景，2050年碳中和情景人口规模和产出水平的总效应均较低；而能源结构效应在第一、第二阶段下减排量均较低，但在第三阶段下的减排量则明显增大，这意味着在2050年碳中和情景中，能源结构的优化工作难点将凸显在第三阶段，即2036—2050年之间。

3 结论与建议

本文将LMDI模型和情景分析相结合，从经济活动和居民生活两方面对浙江省历史碳排放影响因素和实现碳中和前碳排放影响因素进行分解。研究结论如下：(1)经济活动方面，人均GDP增加是促进碳排放的重要因素(累计增量520 Mt)，而单位GDP能耗降低是抑制碳排放的主要因素(累计减量210 Mt)，目前能源结构的抑制作用尚不明显(累计减量50 Mt)；(2)居民生活方面，人均能耗增加是促进碳排放的重要因素(累计增量12.6 Mt)，而能源结构低碳化是抑制碳排放的唯一因素(累计减量1.5 Mt)；(3)在碳达峰之后，浙江省人均碳排放量的降低速率在4.6%~11.4%之间。对于2060年碳中和情景，2019—2030年期间能源强度降低是浙江省碳

排放主要抑制因素。但在2031—2060年期间，最大抑制因素则转变为能源结构。对于2050年碳中和情景，趋势与2060年碳中和情景相同，但在2036—2050年期间能源结构减排效应明显增大，明显加大了对能源结构转型的要求。

提出以下建议：(1)建设率先实现碳中和的示范省份不能以牺牲经济发展为代价，而是要实现工业化、城镇化过程中的零碳发展；(2)在保证能源安全的前提下，强化能源结构效应的抑制作用，具体包括倡导无碳能源(太阳能、风能、水力、核能、生物质能、地热能等新能源)的开发和利用，加快新能源技术研发，加大与优化新能源产业的扶持政策，优化电网设计，提高终端用能部门的电气化水平，推动“绿氢”规模化利用；(3)建设紧凑型、多中心目标规划生活城区，减少人均生活能耗；(4)部署和预留森林与绿地发展的空间，增加生态碳汇。

参考文献:

- [1] Dong K Y, Hochman G, Timilsina G R. Do drivers of CO₂ emission growth alter overtime and by the stage of economic development?[J]. Energy Policy, 2020, 140: 111420.
- [2] Yang J, Cai W, Ma M, et al. Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711:134569.
- [3] Ortega-Ruiz G, Mena-Nieto A, Garcia-Ramos J E, et al. Is India on the right pathway to reduce CO₂ emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990—2016[J]. Science of the Total Environment, 2020, 737:139638.
- [4] Hasan M M, Chongbo W. Estimating energy-related CO₂ emission growth in Bangladesh: The LMDI decomposition method approach[J]. Energy Strategy Reviews, 2020, 32:100565.
- [5] Zhang W, Wang N. Decomposition of energy intensity in Chinese industries using an extended LMDI method of production element endowment[J]. Energy, 2021, 221: 119846.
- [6] Wen L, Li Z. Provincial-level industrial CO₂ emission drivers and emission reduction strategies in China: Combining two-layer LMDI method with spectral clustering[J]. Science of the Total Environment, 2020, 700:134374.

- [7] Liu M Z, Zhang X X, Zhang M Y, et al. Influencing factors of carbon emissions in transportation industry based on C—D function and LMDI decomposition model: China as an example[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 90:106623.
- [8] Ma M D, Yan R, Du Y J, et al. A methodology to assess China's building energy savings at the national level: An IPAT-LMDI model approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143:784-793.
- [9] Chong C, Liu P, Ma L, et al. LMDI decomposition of energy consumption in Guangdong Province, China, based on an energy allocation diagram[J]. *Energy*, 2017, 133:525-544.
- [10] Alajmi R G. Factors that impact greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: Decomposition analysis using LMDI[J]. *Energy Policy*, 2021, 156:112454.
- [11] Xie P, Gao S, Sun F. An analysis of the decoupling relationship between CO₂ emission in power industry and GDP in China based on LMDI method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211:598-606.
- [12] Gu S, Fu B, Thriveni T, et al. Coupled LMDI and system dynamics model for estimating urban CO₂ emission mitigation potential in Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240:118034.
- [13] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group, 1989.
- [14] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, 86:233-238.
- [15] 浙江省社会科学院. 浙江省蓝皮书: 2017 年浙江发展报告[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2017.
- [16] Wang B, Liu M C, Zhou Z C. Preliminary estimation of soil carbon sequestration of China's forests during 1999–2008[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1):17-26.

Study on the influencing factors of carbon emission in Zhejiang Province based on LMDI dual model and scenario analysis

ZHANG Hao, YU Dan*, TANG Ren, GUO Yuhan, ZHU Weijun, HE Yongling

(Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: With relatively favorable conditions for carbon reduction, Zhejiang Province as a pioneer is believed to be the leading province in reaching the target for carbon neutrality. Based on the collected data, logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) is used to analyze the driving factors of the change of economic activities and residential carbon emission in Zhejiang Province from 2000 to 2019 in which time the two scenarios are projected. Using the scenario analysis, the trend of per capita carbon emissions in Zhejiang Province in the future is predicted, and the driving factors of carbon emissions change under the two scenarios are decomposed and projected based on the historical decomposition results. The results show that: 1) In terms of economic activities, the per capital GDP effect is the main driving factor for carbon emissions (cumulative increase of 520 Mt), while the energy intensity effect is the main inhibiting factor of carbon emissions (cumulative reduction of 210 Mt); 2) In terms of residential activities, the energy intensity effect is the main driving factor of carbon emissions (cumulative increase of 12.6 Mt), while the energy mix effect is the main inhibiting factor of carbon emissions (cumulative reduction of 1.5 Mt); 3) In order to achieve carbon neutrality, the focus of emission reduction in both scenarios is the low-carbon transformation of energy mix, but the key time period of the transformation is different. The key transition timelines for the 2060 carbon neutral scenario and the 2050 carbon neutral scenario are 2031–2045 and 2036–2050, respectively.

Key words: carbon emissions; LMDI model; scenario analysis; Zhejiang Province

(责任编辑 章践立)