

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

陈军华 李乔楚¹

(西南石油大学 经济管理学院, 四川 成都 610500)

【摘要】: 测算了四川省 2000—2018 年 15 种主要能源消费的碳排放量, 运用 LMDI 分解法将碳排放量增量分解为能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济发展水平效应与人口规模效应, 基于 Visual Studio 集成开发工具编制了“能源系统碳排放影响因素分解软件”。研究结果表明: 2000—2018 年, 能源强度效应与经济发展水平效应分别是减缓和促进区域碳排放增长的关键性因素; 人口规模效应对四川省碳排放主要表现为正向的驱动作用, 但产生的影响程度较小, 几乎可以忽略不计; 能源结构效应与产业结构效应在 2012 年之前以正向的驱动作用为主, 2012 年之后均呈现负向的抑制作用。因此四川省要发展低碳经济、加快构建“清洁能源示范省”, 需要结合四川省发展现状从培育清洁低碳产业体系、推进清洁能源开发利用、加大低碳领域技术创新、加快推动电能替代、积极引导低碳理念等方面入手。

【关键词】: 四川省 能源消费 碳排放 LMDI 分解 影响因素

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)12-030-07

我国明确提出, 二氧化碳排放 2030 年前达峰, 2060 年前实现碳中和。作为世界上最大的发展中国家, 中国自 2009 年起已成为全球碳排放第一大国, 引发了国际气候谈判和国内环境恶化的双重压力。近年来, 以化石能源为主体的能源体系所产生的碳排放问题日显突出, 应对气候变化成为人类社会面临的巨大挑战。四川省是全国重要的优质清洁能源基地, 但多年来煤、油消费所占的比重一直在 60%左右, 能源消费的高碳特征给经济社会发展及生态环境保护带来了巨大压力。随着“成渝双城经济圈建设”上升为国家战略, 将形成区域高质量发展的重要增长极, 为四川省清洁能源示范省创建提供新动力、新路径和新目标, 助力解决四川省能源低碳转型的重要问题。

国内外学者针对碳排放影响因素进行了一系列研究。王瑛和何艳芬^[1]在把握全国 30 个省域碳排放空间分异特征的基础上, 运用 LMDI 分解法从能源结构、能源强度、经济发展和人口规模等角度对碳排放影响因素进行无残差分解。Engo^[2]应用扩展的 Kaya 恒等式和 LMDI 分解法量化和解释了人口规模、能源强度、化石燃料替代以及可再生能源普及等对喀麦隆碳排放的影响效应。黄琳琳等^[3]应用 LMDI 分解法从时间维度的纵向比较和典型城市的横向比较两个维度开展了驱动因素的分解分析, 探讨了闽三角碳排放变化影响因素的时空差异。王剑等^[4]基于 Kaya 等式, 结合 GFI 模型探讨了西安市能源消费碳排放驱动与抑制要素的互动关

¹**作者简介:** 陈军华, 硕士, 教授, 研究方向为能源经济、低碳发展。E-mail:348464869@qq.com;

基金项目: 四川省科技计划软科学项目“温室气体减排路径与政策协同机制研究——以四川清洁能源示范省创建为例”(2020JDR0178); 四川省社会科学研究“十三五”规划基地项目“四川省能源系统低碳转型的驱动因素及政策研究”(SC20EZD062)

系及影响效益。门丹和黄雄^[5]将居民消费纳入碳排放核算清单，采用 LMDI 分解法分别研究了碳排放效率效应、能源消耗强度效应、产业结构效应、经济效率效应对江西省碳排放的影响机制。

目前针对四川省能源消费碳排放影响因素的研究几乎处于空白状态，本文对四川省 2000—2018 年 15 种主要能源消费产生的碳排放量进行核算，结合 LMDI 模型编制“能源系统碳排放影响因素分解软件”，并基于此实证分析能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济发展水平效应、人口规模效应对四川省能源消费碳排放的影响，从而为四川省能源系统低碳转型探索路径，自下而上全面推动落实国家自主贡献目标的省域行动。

1 研究方法

1.1 碳排放核算方法

在能源消费过程中，矿物燃料燃烧是 CO₂ 的主要排放源。本文采用四川省 2000—2018 年的能源消费数据测算碳排放量，共选取 6 大部门 15 种主要能源作为核算单元，根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[6]、《省级温室气体清单编制指南》要求，估算四川省能源消费的碳排放量。

$$C = \sum Qf_i \times NCV_i \times Ef_i \times 10^{-9} \quad (1)$$

式中：C 为能源消费碳排放总量，万吨；i 为能源消费类型，i=1, 2, …, 15；Qf_i 为第 i 类能源的终端消费量，万吨；NCV_i 为第 i 类能源的净发热值，kJ/kg；Ef_i 为第 i 类能源的 CO₂ 排放因子，kg/TJ。

CO₂ 排放因子的确定来源于 IPCC 指南推荐的参考方法以及《中国能源统计年鉴》公布的最新数据。本文采用的产业部门分类以《国民经济行业分类》(GB/T4754—2017) 为标准，其中，第一产业为农、林、牧、渔业，第二产业包括工业、建筑业，第三产业包括交通运输、仓储和邮政业，批发、零售业和住宿、餐饮业，其他。不同种类能源的净发热值及 CO₂ 排放因子汇总于表 1。

表 1 能源的净发热值及 CO₂ 排放因子

能源类型	种类	能源净发热值/(kJ/kg)	有效 CO ₂ 排放因子/(kg/TJ)
煤炭	原煤	20908	98300
	洗精煤	26344	97500
	其他洗煤	8363	97500
	型煤	26344	97500
	焦炭	28435	107000
	焦炉煤气	17981	44400
	其他焦化产品	28435	80700
石油	原油	41816	73300
	汽油	43070	74100

	煤油	43070	71500
	柴油	42652	74100
	燃料油	41816	77400
	液化石油气	50179	63100
	其他石油制品	41816	73300
天然气	天然气	38931	56100

1.2 Kaya 恒等式及其扩展

Kaya 在 1989 年于 IPCC 研讨会上提出 Kaya 恒等式，其基本方程如式 (2) 所示，其中 CO_2 表示碳排放量，PE 表示一次能源消费量，GDP 表示地区生产总值，POP 表示人口规模总数。Kaya 恒等式将碳排放的变化表示为能源消耗、经济发展、人口增长三者共同作用的结果，在温室气体排放等环境问题研究领域得到了广泛应用^[7,8]。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{PE} \times \frac{PE}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP \quad (2)$$

由于 Kaya 恒等式具有良好的开放性和拓展性，本文对 Kaya 恒等式进行扩展分解，基于四川省的实际情况将能源消费的不同部门及种类进行细化，扩展后的 Kaya 恒等式如式 (3) 所示：

$$C = \sum_j C_{ij} = \sum_j \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{E_i}{Q_i} \times \frac{Q_i}{Q} \times \frac{Q}{P} \times P \quad (3)$$

式中：C 为碳排放总量；E 为能源消费总量；Q 为地区生产总值；P 为地区人口总量；i 表示不同行业类型， $i=1, 2, \dots, 6$ ；j 表示不同能源种类， $j=1, 2, \dots, 15$ 。

将式 (3) 进一步简化，即可得到：

$$C = \sum_j Cec_{ij} \times ES_{ij} \times EI_i \times IS_i \times ED \times PS \quad (4)$$

式中： $Cec_{ij}=C_{ij}/E_{ij}$ 为第 i 行业消费第 j 类能源时产生的 CO_2 排放量与能源消费量之比，表示碳排放系数； $ES_{ij}=E_{ij}/E_i$ 为第 i 行业第 j 类能源消费量与行业能源消费总量之比，表示能源消费结构； $EI_i=E_i/Q_i$ 为第 i 行业能源消费总量与行业生产总值之比，表示能源消费强度； $IS_i=Q_i/Q$ 为第 i 行业生产总值与地区生产总值之比，表示区域产业结构； $ED=Q/P$ 为地区生产总值与地区人口总量之比，表示人均富裕程度； $PS=P$ 为地区人口总量，表示人口规模。

1.3 基于 LMDI 的碳排放分解公式构建

结合前文构建的扩展 Kaya 恒等式，依据 Ang^[9] 提出的对数平均迪氏指数分解法 (LMDI)，将四川省能源消费碳排放影响因素

的综合效应分解为碳排放系数效应、能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济发展水平效应以及人口规模效应，构建如式(5)所示的碳排放影响因素分解公式。依据 IPCC 的假定，能源碳排放系数不随时间变化，即碳排放系数效应可以忽略不计。

$$\Delta C = C_T - C_0 = \Delta C_{ES} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{IS} + \Delta C_{ED} + \Delta C_{PS} \quad (5)$$

式中： ΔC 为第 0 年至第 T 年四川省能源消费碳排放的变化量； C_T 为末期第 T 年四川省的碳排放量； C_0 为基期第 0 年四川省的碳排放量； ΔC_{ES} 为基期至末期能源消费结构变化引起的四川省碳排放变化量； ΔC_{EI} 为基期至末期能源消费强度变化引起的四川省碳排放变化量； ΔC_{IS} 为基期至末期产业结构变化引起的四川省碳排放变化量； ΔC_{ED} 为基期至末期经济发展水平变化引起的四川省碳排放变化量； ΔC_{PS} 为基期至末期人口规模变化引起的四川省碳排放变化量。

不同分解因素贡献值的基本方程^[10,11]分别如式(6)~式(10)所示：

$$\Delta C_{ES} = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{ES_{ij}^T}{ES_{ij}^0} \quad (6)$$

$$\Delta C_{EI} = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{EI_i^T}{EI_i^0} \quad (7)$$

$$\Delta C_{IS} = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{IS_i^T}{IS_i^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_{ED} = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{ED^T}{ED^0} \quad (9)$$

$$\Delta C_{PS} = \sum_{ij} \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)}{(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)} \ln \frac{PS^T}{PS^0} \quad (10)$$

不同分解因素的贡献率分别如式(11)~式(15)所示：

$$r_{ES} = \frac{\Delta C_{ES}}{\Delta C} \times 100\% \quad (11)$$

$$r_{EI} = \frac{\Delta C_{EI}}{\Delta C} \times 100\% \quad (12)$$

$$r_{IS} = \frac{\Delta C_{IS}}{\Delta C} \times 100\% \quad (13)$$

$$r_{ED} = \frac{\Delta C_{ED}}{\Delta C} \times 100\% \quad (14)$$

$$r_{PS} = \frac{\Delta C_{PS}}{\Delta C} \times 100\% \quad (15)$$

式中： r_{ES} 为基期至末期能源消费结构变化对四川省能源消费碳排放的贡献率； r_{EI} 为基期至末期能源消费强度变化对四川省能源消费碳排放的贡献率； r_{IS} 为基期至末期产业结构变化对四川省能源消费碳排放的贡献率； r_{ED} 为基期至末期经济发展水平变化对四川省能源消费碳排放的贡献率； r_{PS} 为基期至末期人口规模变化对四川省能源消费碳排放的贡献率。

1.4 指标分析与数据获取

(1) 能源结构 (energy-resource structure)。

能源结构的变化是引起碳排放量变化的重要原因之一^[12]。四川省多年来煤炭及石油消费所占的比重一直在 60%左右，而非清洁能源的高比例消费对碳排放有着直接的影响，由于自身性质其碳排放系数远远大于其他能源，在燃烧过程中将排放大量 CO_2 ，对区域碳减排工作产生极大的阻力。为了研究能源消费结构对四川省碳排放的实际影响，本文选用不同能源消费量占能源消费总量的比重来表示四川省的能源结构现状，用 ES 表示。

(2) 能源强度 (energy intensity)。

能源强度是用于衡量一个国家或者地区能源利用效率的经济指标，能源强度越小，表明区域的能源利用技术越成熟。与此同时，能源技术的创新发展能大幅提高能源的利用效率，减少能源消费总量，从而有效控制能源系统的 CO_2 排放。因此，现有研究常用能源强度反映区域的技术创新水平。本文选用区域能源消费总量与实际 GDP(2000 年不变价格计算)的比值来表示四川省的能源强度现状，用 EI 表示。

(3) 产业结构 (industrial structure)。

产业结构中不同产业之间的相互转化以及每个产业的内部调整均会对碳排放强度产生重要影响。在四川省的经济社会发展历程中，第二产业占据着较为重要的地位，但由于其工艺流程的自身特点，在日常生产作业中将消耗大量化石能源，因此不可避免地造成大量 CO_2 排放^[13]。本文选用不同产业产值占地区生产总值的比重来表示四川省的产业结构现状，用 IS 表示。

(4) 经济发展水平 (economic development level)。

人均 GDP 是国民富裕程度的重要体现，随着人民生活水平的提高，能源消费总量不断增加，对环境造成的影响日益显著。然而，由碳排放强度的概念可知，如果 GDP 的增速超过 CO_2 排放量的增速，碳排放强度将会降低，因此经济发展水平对于区域碳排放的影响并不确定，需要取决于 CO_2 排放量与 GDP 增速的相对大小^[14]。本文选用人均 GDP 反映四川省的经济发展现状，为了消除不同年份价格波动产生的影响，以 2000 年的价格水平作为基准进行换算，用 ED 表示。

(5) 人口规模 (population size)。

人口数量与 CO_2 排放呈正相关作用，庞大的人口总量和持续的增长趋势是我国成为世界上最大温室气体排放国之一的重要原因，因此有必要研究人口规模对区域碳排放的影响。人口因素主要通过“人群效应”和“文明效应”两种模式对区域能源消费碳排放产生影响^[15]：“人群效应”是指人口数量越多，对能源需求量越大，由此产生的 CO_2 排放量也就越大，即对碳排放产生正向驱动作用；“文明效应”是指随着人口集聚，城市公共基础设施的使用效率提高，居民素质及低碳意识不断增强，反而可以减少能源消耗和 CO_2 排放，即产生负向抑制作用。综上所述，人口因素对区域碳排放的影响并不确定。本文选用年末常住人口数反

映四川省的人口规模现状，用 PS 表示。

本文的研究时段为 2000—2018 年。文中计算能源消费碳排放的基础数据来源于《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》以及 2001—2019 年的《中国能源统计年鉴》，能源强度、产业结构、经济发展水平、人口规模指标的基础数据来源于 2001—2019 年的《四川统计年鉴》，能源结构指标的基础数据来源于 2001—2019 年的《中国能源统计年鉴》。

2 能源系统碳排放影响因素分解软件编制

结合上文构建的基于 LMDI 的碳排放分解公式，采用 VisualStudio 集成开发工具进行“能源系统碳排放影响因素分解软件”的编制，从而实现能源系统碳排放核算及影响因素分析的智能化工具。软件旨在实现以下功能：

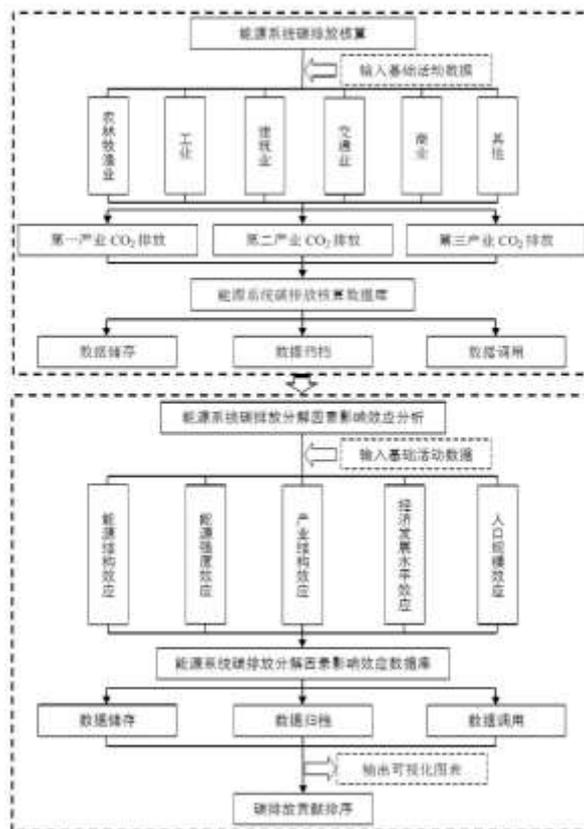


图 1 软件总体编制思路

(1) 完成能源系统主要排放源的碳排放核算。

基于联合国政府间气候变化专门委员会及我国生态环境部对中国温室气体排放清单的编制思路，确定适宜四川省实际状况的能源系统碳排放核算方法与排放因子，输入不同排放单元的基础核算数据后，软件将自行对不同行业、不同种类能源消耗过程中的 CO₂ 排放量进行计算，并以可视化的形式输出，便于使用者对区域能源系统的碳排放现状和重点排放源有直观地了解和把握，并为后续的碳排放影响因素分解提供基础数据支持。

(2) 实现能源系统碳排放分解因素的影响效应分析。

结合扩展 Kaya 恒等式及 LMDI 模型，将区域碳排放影响因素的关键效应分解为能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济发展水平效应以及人口规模效应，输入不同效应分析单元的基期与末期核算数据后，软件自行计算得出研究期限内不同分解因素的影响效应。由于特定期限数据无法反映出碳排放分解因素影响效应的时差差异性，故借助 MicrosoftAccess 数据库以实现不同期限影响效应数据的储存及归档，在研究后期便可通过可视化图表的形式输出结果，以对不同分解因素影响效应的变化趋势进行更深层次的总结分析，从而明确区域碳减排工作的关键领域。软件的总体编制思路及关键功能演示如图 1~图 2 所示。

3 四川省能源消费碳排放影响因素实证分析

基于四川省 2000—2018 年的时间序列数据，结合碳排放 LMDI 模型及“能源系统碳排放影响因素分解软件”实证分析能源结构、能源强度、产业结构、经济发展水平以及人口规模对四川省能源消费碳排放的影响效应。各影响因素的逐年效应及研究期限内的综合效应如表 2 和图 3 所示。

3.1 能源结构效应



图 2 碳排放分解因素影响效应分析功能演示图

表 2 四川省能源消费碳排放 LMDI 因素分解结果 单位：万吨

年限	能源结构	能源强度	产业结构	经济发展水平	人口规模	综合效应	
“十五”期间	2000—2001	-57.80	-318.39	20.71	349.65	-49.95	-55.78
	2001—2002	80.93	229.03	12.45	456.32	-19.89	758.84
	2002—2003	186.51	553.02	161.98	631.97	49.40	1582.88
	2003—2004	89.36	-381.04	202.88	856.21	-77.83	689.58
	2004—2005	-46.96	-666.97	686.34	1404.75	191.07	1568.23
“十一五”期间	2005—2006	-190.68	-468.83	363.33	1108.68	-47.62	764.88

	2006—2007	109.05	-1992.05	206.48	3261.90	-119.56	1465.82
	2007—2008	21.15	-1559.51	1006.93	2665.72	33.96	2168.25
	2008—2009	0.32	-190.44	-1314.73	3644.51	160.18	2299.84
	2009—2010	-584.56	-4910.75	1433.96	4348.28	-526.29	-239.36
“十二五”期间	2010—2011	250.00	-5520.69	836.91	4422.63	30.55	19.40
	2011—2012	367.00	-3543.84	-290.50	3547.62	99.37	179.65
	2012—2013	-771.60	-836.79	-38.54	2929.24	121.63	1403.94
	2013—2014	-294.14	-2883.50	-955.13	2543.40	133.46	-1455.91
	2014—2015	-561.97	-6399.51	-416.94	2083.68	233.98	-5060.76
“十三五”期间	2015—2016	-115.32	-2316.71	-1383.03	1865.36	194.23	-1755.47
	2016—2017	-251.43	-2617.66	-912.29	1950.19	130.24	-1700.95
	2017—2018	-213.86	-2238.09	-446.29	1878.67	123.33	-896.24

由 LMDI 因素分解结果可得，能源结构效应对四川省能源消费碳排放的平均贡献度为-114.23%。2000—2012 年，能源结构效应对碳排放的影响主要呈现出正向的驱动作用，2013 年之后转为负向的抑制作用，这一特征与四川省煤炭、石油等非清洁能源消费占比在 2000—2018 年先增加后减小的变化趋势是一致的。能源活动是四川省碳排放的主要来源，由于化石能源的自身性质，煤炭及石油的碳排放系数远远高于其他能源，在燃烧过程中不可避免地导致大量 CO₂ 排放，因此，逐步建立健全清洁低碳、安全高效的现代能源体系已成为四川省低碳经济发展的必然选择。目前能源结构效应对四川省能源消费碳排放的抑制作用并不显著，这主要由于在技术水平与基础设施约束下，能源重组需要在较长时间跨度内完成^[16]，因此，能源结构优化升级对区域碳减排的优势和效益在短期内并不能有效凸显。但与此同时，四川省作为我国重要的优质清洁能源基地，近年来依托资源禀赋优势不断加大天然气(页岩气)等清洁能源以及风能、水能、光伏太阳能等新能源的开发、推广和利用，能源结构逐步呈现清洁化、低碳化特征，未来能源结构效应对四川省能源消费碳排放的抑制作用将逐渐增强。

3.2 能源强度效应

由 LMDI 因素分解结果可得，能源强度效应对四川省能源消费碳排放的平均贡献度为-2076.34%。2000—2018 年，除个别年份外，能源强度效应对碳排放的影响均呈现出显著的负向抑制作用，成为减缓区域碳排放增长的关键性因素。值得注意的是，能源强度在 2004—2005 年、2009—2010 年与 2014—2015 年三个时间节点对碳排放的抑制效应显著增大，这主要得益于“十五”“十一五”及“十二五”规划目标的加快推进，此现象从侧面凸显了能源强度在国家战略与区域减排效率之间的重要传导作用，为国家五年规划的持续推行提供有效支撑。近年来，能源强度效应出现减缓趋势，说明能源清洁低碳化利用技术的进一步发展存在一定屏障，“十四五”期间，四川省应针对能源领域提出更为细致和合理的规划，着重加强能源领域的技术创新，继续引进先进的生产工艺及高效的节能设备，在有效提升常规能源利用效率的同时不断加强对新能源的利用水平，更好地发挥能源强度效应对四川省能源消费碳减排的激励作用，服务于“国家清洁能源示范省”创建的战略目标。

3.3 产业结构效应

由 LMDI 因素分解结果可得，产业结构效应对四川省能源消费碳排放的平均贡献度为-47.53%。2000—2011 年，产业结构效应对碳排放的影响主要呈现出正向的驱动作用，2012 年之后均呈现负向的抑制作用，这一特征与四川省第二产业比重先增加后降低的变化趋势基本吻合。在三大产业中，以农、林、牧、渔业为主的第一产业能耗较小，并具有一定的固碳作用；以工业和建筑业为主的第二产业普遍存在产能过剩问题，能源消耗具有高度聚集性，碳排放强度明显高于其他产业，近年来随着四川省产业结构不断升级调整，第二产业比重由 2011 年的 48% 不断降低至 2018 年的 38%，从而带动第二产业从 2011 年开始对区域碳排放均呈现抑制作用；以服务业为主的第三产业能耗相对较小，2012 年以前主要呈现抑制效应，但近年来随着居民生活质量的不断提高，人们开始着眼于更高质量的物质需求与精神需求并带动第三产业能源消耗不断增加，第三产业对碳排放的影响开始呈现出驱动作用。随着“成渝双城经济圈”战略的提出，将进一步推动区域产业结构优化升级，第二产业在四川省国民经济中的比重还将继续降低，因此，产业结构效应对四川省能源消费碳排放的抑制作用还将进一步加强。

3.4 经济发展水平效应

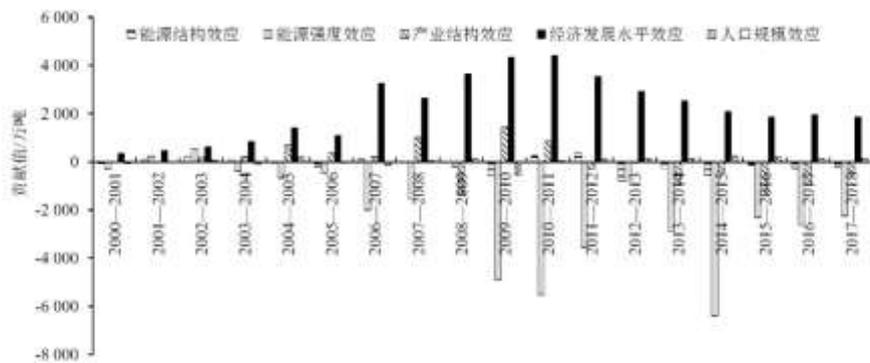


图 3 四川省碳排放分解因素影响效应示意图

由 LMDI 因素分解结果可得，经济发展水平效应对四川省能源消费碳排放的平均贡献度为 2300.08%。2000—2018 年，经济发展水平效应对碳排放的影响始终呈现出正向的驱动作用，且贡献度最高，成为促进区域碳排放增长的关键性因素。经济发展水平效应与能源强度效应的激励与抑制作用形成鲜明的对比，正是两者影响效果的相互抵消，才使得区域碳排放并未随着经济加速发展呈线性增长趋势。进入 21 世纪后，国内外经济环境发生了巨大变化，为了适应新时代的变化、加快向全面协调可持续发展的经济发展方式转变，四川省逐渐进入新型工业化阶段，经济发展水平效应的驱动作用也逐步产生减小趋势，与此同时，随着“成渝双城经济圈”战略的提出，将在西部形成高质量发展的重要增长极，在低碳发展道路下，四川省未来将不断转变经济发展模式，立足于源头不断提升发展质量，因此，经济发展水平效应对四川省能源消费碳排放的驱动作用有待减小。

3.5 人口规模效应

由 LMDI 因素分解结果可得，人口规模效应对四川省能源消费碳排放的平均贡献度为 38.02%。2000—2018 年，人口规模效应对碳排放的影响主要呈现出正向的驱动作用，但贡献度较小。四川省不同区域发展水平差异显著，对于城市地区，人口增长引发城市扩张，建筑道路及基础设施的建设过程都伴随大量的能源消耗，随着生活水平的不断提高，人们的消费规模和消费习惯也会产生巨大变化，其造成的结果必定是碳排放的显著增加；对于农村地区，大量农村人口文化素质较低、受教育程度不高，环保意识薄弱，其结果是在这些区域，绿色低碳理念和清洁生活方式难以推进，减排措施实施效果不佳。21 世纪以来，计划生育政策导致的人口增速减缓有效控制了人口规模效应对碳排放产生的影响，但近年来随着我国老龄化问题逐渐加剧，“三孩生育”新政策开始全面实施，未来人口规模效应对四川省能源消费碳排放的正向驱动作用有待进一步加强。但从人口增长现状来看，鼓励生育政策实施后，四川省并未产生预期的人口浮动，且随着居民素质的提升，绿色低碳的生活方式与消费理念将逐渐深入人心，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。

4 结论与建议

综合前文分析可以看出：能源强度效应与经济发展水平效应分别是减缓和促进区域碳排放增长的关键性因素；人口规模效应对碳排放主要表现为正向的驱动作用，但产生的影响程度较小，几乎可以忽略不计；能源结构效应与产业结构效应对碳排放放在 2012 年之前以正向的驱动作用为主，2012 年之后均呈现负向的抑制作用。

基于以上分析结果，针对性地提出几点建议：

(1) 积极聚焦四川省冶金、建材、化工等碳排放重点行业，尽快将其纳入“碳交易”市场，出台重点行业低碳改造技术指南，倒逼企业不断提升能源效率及生产效率。在四川省“5+1”现代产业体系的政策引导下，加速传统制造业向绿色低碳发展迈进，大力培育新材料、节能环保、油气钻采及海洋工程装备、新能源汽车等先进产业，壮大绿色金融、森林康养等绿色低碳服务业，积极发展大数据、新型电池、电解氢等绿色载能产业，推动区块链、人工智能、5G 等技术在能源领域实现创新，加快发展新经济、培育新动能，做强“一干多支”发展战略的产业支撑。

(2) 充分发挥四川省“丰水多气”，风能、太阳能得天独厚的资源优势，加快常规非常规天然气勘探开发步伐，提升中国“气大庆”建设水平，全面开展生活领域、工业领域和交通领域的“油改气”和“煤改气”，助力“气化全川”；加快建设特高压交流电网、水风光互补一体化清洁能源基地，推进氢能、生物质能、浅层地热能等开发利用，持续提升非化石能源及清洁能源比重。

(3) 加大能源领域的技术创新，联合多方力量开展节能减排共性关键技术的自主研发，推动洁净煤生产与利用、碳捕获与封存、非常规油气勘探开发、氢能与燃料电池等重点领域的科技攻关和成果转化。立足西部(成都)科学城、中国(绵阳)科技城等，积极引进国际低碳技术与专家人才，提高外国直接投资技术溢出效应的吸收与利用能力，推进核心技术装备攻关和新业态新模式发展。

(4) 加快推动电能替代工作，积极引导工业生产、交通运输、农业生产、供暖供冷等领域因地制宜地实施“以电代煤、以电代油、以电代柴”，着力提升电能在终端能源消费的比重。深入研究“成渝双城经济圈”中长期电力增长需要，按照“川渝电网加强、川电送渝增量”的原则，推动川渝电网一体化发展。

(5) 大力倡导简约适度的生产生活方式和消费理念，鼓励低碳出行，突出职住平衡，推行垃圾分类、减量化和就近资源化利用，实施四川省节能节水行动。与此同时，建立健全体现生态价值与环境成本的低碳价格机制，完善支持能源转型的财税金融体制，充分发挥体制机制的引导作用，努力实现低碳能源的规模化，降低清洁能源的使用成本。

参考文献：

[1]王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020(3): 512-522.

[2]Engo J. Decomposition of Cameroon's CO₂ emissions from 2007 to 2014: An extended Kaya identity[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26:16695-16707.

[3]黄琳琳, 王远, 张晨, 等. 闽三角地区碳排放时空差异及影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2020(5): 2312-2320.

[4]王剑, 薛东前, 马蓓蓓. 基于 GFI 模型的西安市能源消费碳排放因素分解研究[J]. 干旱区地理, 2018(6): 1388-1395.

[5]门丹, 黄雄. 江西省碳排放影响因素研究——基于 LMDI 分解法[J]. 生态经济, 2019(5): 31-35.

-
- [6] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M]. 日本: 日本全球环境战略研究所(IGES), 2006: 89-102.
- [7] Yang P G, Liang X, Drohan P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(3): 26495-26501.
- [8] Robalino-López A, García-Ramos J E, Golpe A A, et al. CO₂ emissions convergence among 10 South American countries. A study of Kaya components (1980-2010) [J]. Carbon Management, 2016, 7(1-2): 1-12.
- [9] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [10] Yang J, Cai W, Ma M D, et al. Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods [J]. Science of the Total Environment, 2019, 711: 134569.
- [11] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach [J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 238-246.
- [12] Munguia M. Renewable energy investment in Chile: Make hay while the sun shines [J]. Renewable Energy Focus, 2016, 17(6): 234-236.
- [13] 林发照. 碳排放、产业结构与福建经济增长动态研究——基于 VAR 模型和 Granger 检验 [J]. 中原工学院学报, 2019(2): 36-44.
- [14] 孙欣, 张可蒙. 中国碳排放强度影响因素实证分析 [J]. 统计研究, 2014(2): 61-67.
- [15] Huang J T. Sulfur dioxide (SO₂) emissions and government spending on environmental protection in China—evidence from spatial econometric analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 431-441.
- [16] Peng X, Tao X M. Decomposition of carbon intensity in electricity production: Technological innovation and structural adjustment in China's power sector [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 805-818.