四川省物流业碳排放脱钩效应及驱动因素分析

祁宇寒，易世志

（重庆交通大学经济与管理学院，重庆 400074）

摘要：物流业是中国产生碳排放的重点行业之一，在“双碳”目标下，推进物流业低碳发展尤为重要。本文以四川省物流业碳排放为研究对象，基于2008—2022年的能源统计数据对物流业碳排放进行测算与分析，运用Tapio脱钩模型测定碳排放与产值的弹性关系，应用LMDI（logarithmic mean divisia index）模型探究能源结构效应、能源强度效应、运输结构效应、产业结构效应对四川省物流业碳排放的影响。结果表明，研究期内碳排放总体呈上升趋势，2022年在产值正增长的同时实现排放微降。强脱钩状态出现5次，扩张负脱钩2次。能源结构优化贡献最大，其次为产业结构，运输结构与能源强度贡献较小。

关键词：物流业；碳排放；Tapio模型；LMDI；驱动因素

中图分类号：X322；F259.27 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)10－0057－08

全球气候的变化，正对人类社会可持续发展的步伐产生深远影响。在此背景下，推动绿色低碳转型已成为国际社会的共同追求。中国主动确立了“双碳”目标：力争2030年前碳排放达到峰值，2060年前实现碳中和。这一明确承诺，为各行业制定减排方案设立了更严苛的规范。物流业作为连接生产与消费的核心环节及战略性产业，既是现代化经济体系的关键构成，也是能源消耗与碳排放的重点领域。

四川省位于“一带一路”与长江经济带的战略交会地带，是连接中国内陆与中亚、南亚及东南亚区域的核心通道。近年来，该省深度参与国际物流通道的构建进程。作为西部陆海新通道的关键支撑点，四川省在物流网络建设中承担着不可替代的角色。现阶段，四川省正加快生态文明建设步伐，积极响应国家“双碳”目标要求。在此情境下，如何统筹物流业规模扩张与绿色低碳发展之间的矛盾，成为亟待破解的关键议题。

“脱钩效应”作为衡量经济增长与资源环境压力分离程度的重要指标，为评估物流业可持续发展能力及探索减排路径提供了科学的分析工具。2005年，Tapio[1]以芬兰道路交通状况作为研究实例，首次将弹性概念融入脱钩理论体系之中，并明确界定8种脱钩类型。丁利杰和朱泳丽[2]利用脱钩模型研究中国交通运输业碳排放区域差异；陈猛和谈晓勇[3]利用脱钩模型研究西部陆海新通道物流业碳排放特征；蒋岩等[4]利用脱钩模型研究分析江苏省粮食生产碳排放和总产值间的脱钩关系。

在碳排放驱动因素中，常见的元素分解方法有结构分解法和指数分解法，指数分解法中使用LMDI分解法的学者居多。Engo[5]基于改进的Kaya恒等式，结合LMDI方法，对喀麦隆运输部门能源相关二氧化碳排放与增长的脱钩关系进行研究。刘爱东等[6]利用LMDI方法研究中国碳排放与进出口贸易之间的关系。罗世兴和吴青[7]选择27种能源利用LMDI方法对采矿业能源消费碳排放进行研究。穆晓央等[8]以西部地区11省份为研究对象，使用LMDI方法对2011—2017年物流业碳排放变化进行研究。初丽霞和黄梦瑶[9]利用LMDI加法分解研究山东省总体碳排放，研究表明能源强度与第三产业效应为主要抑制因素。赵鑫宇等[10]在传统LMDI基础上引入“财政激励效应”和“财政减排效应”两项政策变量。

通过系统梳理相关文献可知，当前针对物流业碳排放及其脱钩效应的研究对象主要集中在国家层面，且在驱动因素分析层面，现有研究多聚焦于常规能源结构和能源效率因素。然而，实证研究表明，物流运输结构作为关键影响因素，也会对物流业碳排放水平产生显著作用。因此，本文在以往学者的研究基础上，采用Tapio脱钩模型与LMDI（logarithmic mean divisia index）因素分解法相结

收稿日期：2025-10-14

作者简介：祁宇寒（2003—），女，湖北黄冈人，硕士研究生，研究方向为绿色物流、供应链管理；通信作者易世志（1976—），男，重庆人，博士，副教授，研究方向为绿色物流。

合的方式，以四川省物流业为研究对象，进一步分析物流能源结构、物流能源强度、运输结构、产业结构因素对物流业碳排放脱钩状态产生的影响，为四川省物流业减排提供借鉴，促进经济低碳持续发展。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

由于目前还未在统计数据中单独设立“物流业”类别，参照张立国等[11]、宛清敏[12]的做法，物流业所消耗的能源数据采用《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》《四川统计年鉴》中“交通运输、仓储及邮政业”相关数据。

1.2　碳排放测算方法

中国的能源消耗是碳排放的主要来源，其中物流行业的碳排放主要源于运输、配送和仓储等活动所消耗的能源。以物流行业终端所消耗的能源所产生的二氧化碳作为测算物流业碳排放的指标，即原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气和电力 8 种能源。用这些能源消耗量乘以对应的标准煤系数和碳排放系数。同时采用联合国 IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）于 2006 年在报告中提出的碳排放量估算方法，具体计算公式为

$$C=\sum_{i=1}^{8}C_i=\sum_{i=1}^{8}E_i\alpha_i\beta_i \tag{1}$$

式中：C 为碳排放总量；i 为能源种类；C_i 为能源 i 的碳排放量；E_i 为能源 i 的实际消耗量；α_i 为能源 i 的标准煤折算系数；β_i 为能源 i 的碳排放系数，数据分别来自《中国能源统计年鉴》附录、《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，如表 1 所示。

1.3　脱钩模型构建

1.3.1　LMDI 影响因素分解法

为了分析各因素对四川省物流业碳排放脱钩的影响，以 Kaya[13] 于 1989 年提出的 Kaya 恒等式为基本思想，采用 Ang[14] 提出的 LMDI 因素分解法对四川省物流业碳排放和脱钩驱动因素进行分解，并且参考周颖和胡天美[15]的做法，根据物流业碳排放特征，从能源结构、能源强度、运输结构、产业结构 4 个方面进行分解研究，建立碳排放 Kaya 恒等式。

$$C=\sum_{ij}C_{ij}^{t}\sum_{ij}\frac{C_i^t}{E_i^t}\frac{E_i^t}{E^t}\frac{E^t}{G^t}\frac{F_j^t}{F^t}\frac{R^t}{G^t}=\sum_{ij}A_i^tS_i^tI^tT^tD^t \tag{2}$$

式中：C^t 为第 t 年的碳排放量；C_i^t 为能源 i 在第 t 年的碳排放量；E_i^t 为第 t 年能源 i 的消耗量；E^t 为第 t 年消耗的能源总量；G^t 为第 t 年物流业的产值；j 为运输方式，$j=1$、2、3、4，分别代表铁路、公路、水运、航空 4 种运输方式；F_j^t 为第 t 年运输方式 i 的货运量；F^t 为第 t 年的总货运量；R^t 为第 t 年物流行业的增加值。令 $A_i^t=\frac{C_i^t}{E_i^t}$，表示第 t 年能源 i 的碳排放量与其消耗量的比值，即碳排放系数；$S_i^t=\frac{E_i^t}{E^t}$，表示第 t 年能源 i 的消耗量占物流业总消耗能源量的比例，即能源结构；$I^t=\frac{E^t}{G^t}$，表示第 t 年单位物流业产值 G 消耗的能源总量 E，即能源强度；$T^t=\frac{F_j^t}{F^t}$，表示第 t 年第 j 种运输方式（铁路、公路、水运、航空）的货运量占总货运量的比例，即运输结构；$D^t=\frac{R^t}{G^t}$，表示第 t 年单位物流业增加值与 GDP 的比值，即产业结构变化。

根据 LMDI 的加法分解法对式（2）进行分解，将基期到 t 期的物流业碳排放量变化分解成各因素差值的和，即

$$\Delta C=C^t-C^0=\Delta C_{\mathrm{A}}+\Delta C_{\mathrm{S}}+\Delta C_I+\Delta C_{\mathrm{T}}+\Delta C_{\mathrm{D}} \tag{3}$$

各因素根据 LMDI 加法分解法得到的四川省物流业碳排放贡献值表达式如下。

$$\Delta C_{\mathrm{A}}=\sum_{i=1}^{8}\frac{C_i^t-C_i^0}{\ln C_i^t-\ln C_i^0}\ln\frac{A_i^t}{A_i^0} \tag{4}$$

$$\Delta C_{\mathrm{S}}=\sum_{i=1}^{8}\frac{C_i^t-C_i^0}{\ln C_i^t-\ln C_i^0}\ln\frac{S_i^t}{S_i^0} \tag{5}$$

$$\Delta C_{\mathrm{I}}=\sum_{i=1}^{8}\frac{C_i^t-C_i^0}{\ln C_i^t-\ln C_i^0}\ln\frac{I^t}{I^0} \tag{6}$$

$$\Delta C_{\mathrm{T}}=\sum_{j=1}^{4}\sum_{i=1}^{8}\frac{C_i^t-C_i^0}{\ln C_i^t-\ln C_i^0}\ln\frac{T_j^t}{T_j^0} \tag{7}$$

$$\Delta C_{\mathrm{D}}=\sum_{i=1}^{8}\frac{C_i^t-C_i^0}{\ln C_i^t-\ln C_i^0}\ln\frac{D^t}{D^0} \tag{8}$$

式中：C^t 和 C^0 分别为第 t 年和基期的碳排放量；

表 1　8 种能源的折标准煤系数和碳排放系数

变量	煤炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力	液化石油气
折标准煤系数	0.714 3	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.426 8	1.330 0	0.122 9	1.714 3
碳排放系数	1.900 3	2.925 1	3.017 9	3.095 9	3.170 5	1.790 0	2.213 0	3.101 3

ΔC 为碳排放变化值;ΔC_A、ΔC_S、ΔC_I、ΔC_T、ΔC_D分别为能源排放强度、能源结构因素、能源强度因素、运输结构因素、产业结构因素引起的碳排放差值。由于能源的碳排放系数是个定值,因此 ΔC_A 值为 0,后续不做讨论。

1.3.2 Tapio 模型

由 Tapio 提出的脱钩程度精细化分类方法,能精准剖析经济增长与环境压力之间的多样组合形态,凭借逻辑清晰、操作简便的特点,明显优于其他复杂的分析模式。设定式(9)为四川省物流业碳排放与 GDP 的脱钩弹性表达式。

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \tag{9}$$

式中:e 为脱钩指数;$\Delta C/C$ 为碳排放增长率(环境压力增长率);$\Delta G/G$ 为物流业产值增长率(经济增长率)。

根据 Tapio 脱钩模型,可以将脱钩状态分为 8 种,如表 2 所示。

表 2 脱钩状态分类

脱钩状态	脱钩类型	$\Delta C/C$(环境压力)	$\Delta G/G$(经济增长)	e(弹性值)
负脱钩	扩张负脱钩	>0	>0	$e>1.2$
	强负脱钩	>0	<0	$e<0$
	弱负脱钩	<0	<0	$0<e<0.8$
脱钩	弱脱钩	>0	>0	$0<e<0.8$
	强脱钩	<0	>0	$e<0$
	衰退脱钩	<0	<0	$e>1.2$
连接	增长连接	>0	>0	$0.8<e<1.2$
	衰退连接	<0	<0	$0.8<e<1.2$

将式(3)及 $\Delta C_F=0$ 代入式(9),可得

$$\begin{aligned} e &= \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} = \frac{\Delta C_S + \Delta C_I \Delta C_T + C_D}{\Delta G/G} \\ &= \frac{\Delta C_S/C}{\Delta G/G} + \frac{\Delta C_I/C}{\Delta G/G} + \frac{\Delta C_T/C}{\Delta G/G} + \frac{\Delta C_D/C}{\Delta G/G} \\ &= e_S + e_I + e_T + e_D \end{aligned} \tag{10}$$

式中:e_S、e_I、e_T、e_D 分别为物流能源结构脱钩指标、物流能源强度脱钩指标、物流运输结构脱钩指标、产业结构脱钩指标。

2 实证分析

2.1 四川省物流业碳排放现状

基于四川省 2008—2022 年的物流业能源消耗数据,根据式(1),计算四川省 2008—2022 年物流业碳排放量,碳排放量及四川省物流业生产值如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,2006—2019 年四川省物流业碳排放量总体呈波动上升趋势,2019—2022 年转为“先急降后小幅回弹”的阶段性回调;同期碳排放量与物流业产值呈现一定关联趋势。碳排放整体有增长,物流业产值持续上扬,二者变化趋势有相似性,在年份波动上,如 2019—2020 年碳排放量出现断崖式下滑,当年生产总值也同步轻微下降;2021—2022 年碳排放虽小幅回升,但尚未恢复至 2019 年峰值,而产值已恢复增长,表明物流业正经历“产值恢复、排放趋稳”的再平衡过程。

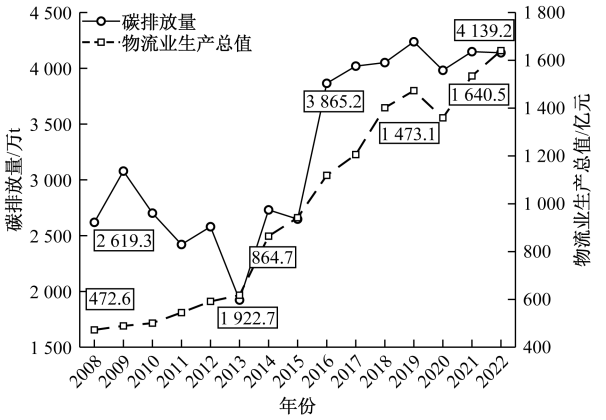


图 1 2008—2022 四川省物流业二氧化碳排放量和物流生产总值趋势

根据构建的 Tapio 脱钩模型,计算出 2009—2022 年四川省的物流业碳排放脱钩指数与脱钩状态如表 3 所示。

2009—2022 年四川省物流业碳排放脱钩演进呈现阶段性波动特征。研究期内出现五类脱钩状态,即强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩、增长连接及弱负脱钩。其中,强脱钩作为理想状态占比最高(5/14),典型表现为 2013 年碳排放下降 25.5%伴随经济增长 4.4%,以及 2022 年经济增速 6.9%下碳排放微降 0.2%。但扩张负脱钩现象仍存在隐患,如 2016 年碳排放激增 46.0%远超经济 18.8%的增速。整体趋势显示,2020 年受外部冲击导致经济衰退 7.7%与碳排放降低 6.0%的弱负脱钩后,2021—2022 年连续回归脱钩轨道,反映低碳转型取得阶段性成效。

2.2 碳排放测算结果及分析

表 4 为四川省物流业 8 种能源的消耗量、能源消耗总量、物流业增加值及 GDP 指数。根据式(1)计算 2008—2022 年四川省物流业 8 种能源的碳排放量及碳排放总量,结果如表 5 所示。2008—2022 年四川省碳排放量呈现“波动上升与阶段性减排”特征。碳排放总量由2 619.33万 t 增至4 139.22万 t,但年度波动特征显著。三次跃升峰值出现在

表 3　2009—2022 年四川省物流业碳排放脱钩指数与脱钩状态

年份	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	脱钩指数	脱钩状态	年份	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	脱钩指数	脱钩状态
2009	0.175	0.035	4.966	扩张负脱钩	2016	0.460	0.188	2.448	扩张负脱钩
2010	−0.122	0.024	−5.165	强脱钩	2017	0.040	0.078	0.514	弱脱钩
2011	−0.104	0.088	−1.180	强脱钩	2018	0.008	0.162	0.047	弱脱钩
2012	0.066	0.086	0.765	弱脱钩	2019	0.046	0.051	0.904	增长连接
2013	−0.255	0.044	−5.753	强脱钩	2020	−0.060	−0.077	0.782	弱负脱钩
2014	0.420	0.399	1.052	增长连接	2021	0.042	0.129	0.325	弱脱钩
2015	−0.030	0.089	−0.340	强脱钩	2022	−0.002	0.069	−0.034	强脱钩

表 4　四川省物流业 2008—2022 年 8 种能源的消耗量及能源消耗总量、物流业增加值和 GDP

年份	煤炭 /万 t	汽油 /万 t	煤油 /万 t	柴油 /万 t	燃料油 /万 t	天然气 /亿 m^3	电力 /亿 kWh	液化石油气 /万 t	能源消耗量 /万 t	物流业增加值 /亿元	GDP /亿元
2008	15.75	244.97	120.26	222.32	0	0.49	20.29	0	890.00	472.60	12 756.2
2009	17.04	278.19	145.08	267.50	0	0.57	22.89	0	1 144.00	489.30	14 190.6
2010	10.00	221.20	159.51	223.02	0	6.30	25.66	0	1 214.00	500.90	17 224.8
2011	32.27	168.73	191.39	173.23	0	4.98	29.49	0	1 281.00	545.00	21 050.9
2012	5.03	183.90	192.35	185.32	15.00	4.82	32.28	0.63	1 376.00	591.70	23 922.4
2013	5.00	104.43	125.07	181.60	0	2.11	36.16	14.49	930.00	617.90	26 518.0
2014	4.85	189.70	186.4	218.59	0	5.96	35.32	13.22	1 254.00	864.70	28 891.3
2015	4.52	204.58	215.67	160.01	0	5.86	36.63	10.90	1 522.30	941.90	30 342.0
2016	3.10	274.60	296.12	283.67	0	6.10	42.60	11.00	1 739.60	1 118.80	33 138.5
2017	4.20	280.61	302.20	299.68	0	7.92	48.19	15.20	1 849.10	1 205.90	37 905.1
2018	4.20	211.06	205.10	485.87	0.40	5.23	58.30	0.80	1 813.40	1 401.70	42 902.1
2019	2.34	240.07	210.94	493.81	0.46	5.65	64.71	0.70	1 909.40	1 473.10	46 363.8
2020	0.07	238.89	156.89	490.81	0.68	8.02	69.31	0.40	1 814.70	1 359.50	48 501.6
2021	0.07	250.38	166.85	505.94	1.01	7.82	84.71	0.36	1 898.90	1 534.70	54 088.0
2022	0.07	249.32	165.23	504.42	3.17	7.80	81.32	0.35	1 875.80	1 640.50	56 610.2

表 5　四川省物流业 2008—2022 年 8 种能源的碳排放量及总量

年份	煤炭 /万 t	汽油 /万 t	煤油 /万 t	柴油 /万 t	燃料油 /万 t	天然气 /亿 m^3	电力 /亿 kWh	液化石油气 /万 t	总量 /万 t	ΔC
2008	21.38	1 054.35	534.02	1 002.89	0	1.17	5.52	0	2 619.33	
2009	23.13	1 197.33	644.23	1 206.70	0	1.36	6.23	0	3 078.98	459.65
2010	13.57	952.04	708.31	1 006.05	0	15.00	6.98	0	2 701.96	−377.02
2011	43.80	726.21	849.87	781.45	0	11.86	8.02	0	2 421.21	−280.74
2012	6.83	791.50	854.14	835.99	67.86	11.47	8.78	3.35	2 579.91	158.70
2013	6.79	449.47	555.38	819.20	0	5.02	9.83	77.04	1 922.73	−657.18
2014	6.58	816.47	827.72	986.07	0	14.19	9.61	70.28	2 730.91	808.18
2015	6.14	880.51	957.69	721.81	0	13.95	9.96	57.95	2 648.01	−82.90
2016	4.21	1 181.88	1 314.93	1 279.65	0	14.52	11.59	58.48	3 865.25	1 217.24
2017	5.70	1 207.74	1 341.93	1 351.87	0	18.86	13.11	80.81	4 020.02	154.76
2018	5.70	908.40	910.75	2 191.78	1.81	12.45	15.86	4.25	4 051.00	30.99
2019	3.18	1 033.26	936.69	2 227.59	2.08	13.45	17.60	3.72	4 237.57	186.57
2020	0.10	1 028.18	696.68	2 214.06	3.08	19.09	18.85	2.13	3 982.16	−255.41
2021	0.10	1 077.63	740.90	2 282.31	4.57	18.62	23.04	1.91	4 149.09	166.93
2022	0.10	1 073.07	733.71	2 275.46	14.34	18.57	22.12	1.86	4 139.22	−9.86

2014 年、2016 年和 2019 年，其中 2016 年增幅达 45.9%为历史极值；减排阶段则以 2013 年、2020 年和 2022 年为关键节点。其中，2022 年在经济正增长背景下实现总量微降，印证同期强脱钩状态；2013 年深度减排与强脱钩形成双重验证。观察末期趋势，2021—2022 年均增量收窄至 78.54 万 t，表明碳排放增速趋缓，低碳转型进入平稳期。

2.3　碳排放驱动因素分析

基于 LMDI 分解模型，利用式(5)～式(8)对四川省物流业 2009—2022 年的碳排放驱动因素进行分解，得到能源结构、能源强度、运输结构、资金投入因素对四川省物流业碳排放量的贡献值和贡献率，结果如表 6 所示。

表 6　2009—2022 年四川省物流业碳排放驱动因素分解

年份	能源结构(ΔC_S)	能源强度(ΔC_I)	运输结构(ΔC_T)	产业结构(ΔC_D)	总效应
2009	−254.065	614.997	325.691	−204.212	482.411
2010	−548.009	103.537	−166.512	−490.461	−1 101.445
2011	−417.555	−78.078	−317.747	−295.957	−1 109.337
2012	−29.102	−26.261	−281.799	−112.327	−449.489
2013	262.150	−946.229	−245.799	−129.798	−1 059.676
2014	121.820	−85.298	1 263.886	574.838	1 875.246
2015	−602.593	290.470	876.283	97.900	662.06
2016	788.484	−124.289	−1 177.110	269.754	−243.161
2017	−85.839	−54.888	−964.740	−234.204	−1 339.671
2018	107.825	−672.591	−1 309.027	105.366	−1 768.427
2019	−27.136	7.881	705.766	−115.643	570.868
2020	−46.745	120.557	−170.251	−514.219	−610.658
2021	−17.432	−308.370	−1 298.260	49.600	−1 574.462
2022	40.847	−326.917	−348.050	87.376	−546.744
贡献率/%	36.700	11.000	19.900	32.500	

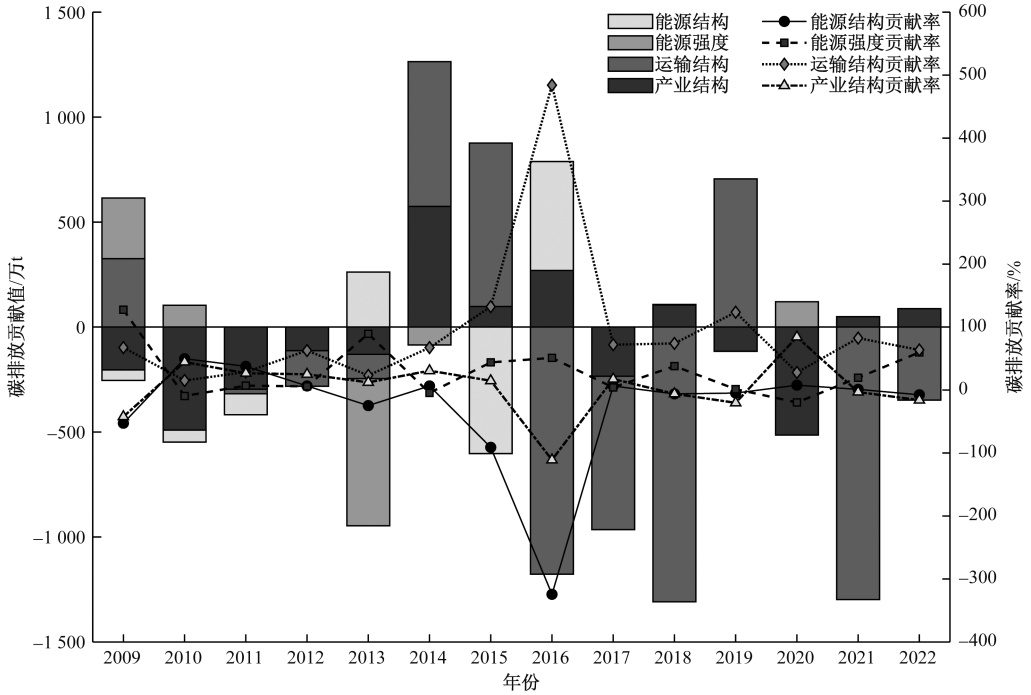


图 2　2009—2022 年四川省物流业碳排放驱动因素分解

根据表 6 和图 2 可知,2009—2022 年四川省物流业碳排放变化的主导因子依次为能源结构、产业结构、运输结构、能源强度。能源结构优化是减排最大贡献源,其贡献率为 36.7%,表明通过增加清洁能源的使用比例,可以显著降低碳排放。能源强度的降低对碳排放的减少贡献较小,贡献率为 11%,但仍然重要。提高能源使用效率,如采用更高效的运输工具和物流操作,是减少碳排放的有效途径之一。

根据式(9)进一步得出各因素对四川省物流业碳排放脱钩弹性指数的贡献值,结果如表 7 所示。

表 7　2009—2022 年物流业碳排放脱钩指数

年份	e_S	e_I	e_T	e_D
2009	−2.771	6.708	3.553	−2.228
2010	−7.416	1.401	−2.253	−6.637
2011	−1.756	−0.328	−1.336	−1.245
2012	−0.140	−0.126	−1.353	−0.539
2013	2.309	−8.336	−2.165	−1.143
2014	0.159	−0.111	1.647	0.749
2015	−2.479	1.195	3.605	0.403
2016	1.584	−0.250	−2.365	0.542
2017	−0.285	−0.182	−3.200	−0.777
2018	0.166	−1.033	−2.010	0.162
2019	−0.131	0.038	3.416	−0.560
2020	0.143	−0.369	0.522	1.576
2021	−0.034	−0.600	−2.527	0.097
2022	0.143	−1.142	−1.216	0.305

2.3.1　能源结构效应

利用LMDI因素分解模型，研究了2008—2022年四川省物流业能源结构变化对碳排放变化的贡献，结合四川省物流业碳排放变化值得到图3。

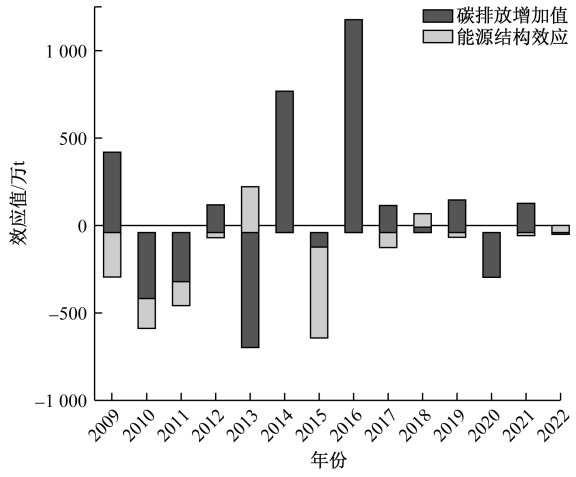


图3　能源结构效应和物流业碳排放增加值

能源结构效应(ΔCs)反映能源消耗种类占比对碳排放的影响。由表6可知，2009—2022年能源结构效应对四川省物流业碳排放的贡献率为36.7%，是主导减排的核心因素，表明通过增加清洁能源的使用比例，如天然气和电力，减少煤炭和石油的使用。

从表7可知，在大多数年份中，能源结构效应对碳排放的贡献为负值，表明能源结构的优化有助于减少碳排放。特别是在2010年和2015年，能源结构效应的负贡献值较大，分别为－7.416和－2.479，显示了能源结构调整在这些年份对减少碳排放的显著影响。2016年作为“十三五”开局之年，四川省承接东部地区产业转移的步伐加快，外向型经济与内需增长共同引致物流规模急剧扩张，对时效性要求高的公路货运需求暴增，直接推动了高碳能源的消费。四川省是中国的能源大省，拥有丰富的水力资源，这为能源结构的优化提供了天然优势。然而，煤炭仍是四川省能源消费的主要部分，这在一定程度上限制碳排放的减少，因此可以加大对清洁能源的投资和利用，特别是水电、风能和太阳能，以减少对煤炭的依赖。

2.3.2　能源强度效应

能源强度效应反映单位物流业产值消耗的能源总量变化对碳排放的影响。根据表6和表7的数据，可以看出能源强度效应在不同年份的贡献值波动比较大，既有正值也有负值，表明能源强度的变化对碳排放的影响不稳定，可能受到多种因素的影响。2009年物流规模扩张快于能效技术升级，煤炭依赖导致单位产值能耗居高；2013年实施的《四川省节能减排综合方案》推动淘汰高耗能货车，碳排放控制取得一定成效。2016—2022年以负向效应为主，尤其2021—2022年连续显著抑制，主要得益于2019年《四川省新能源货车推广方案》落地，电动货车渗透率提升，2021年京东成都“亚洲一号”智能物流园光伏项目投运，推动单位产值能耗加速下降。如图4所示。

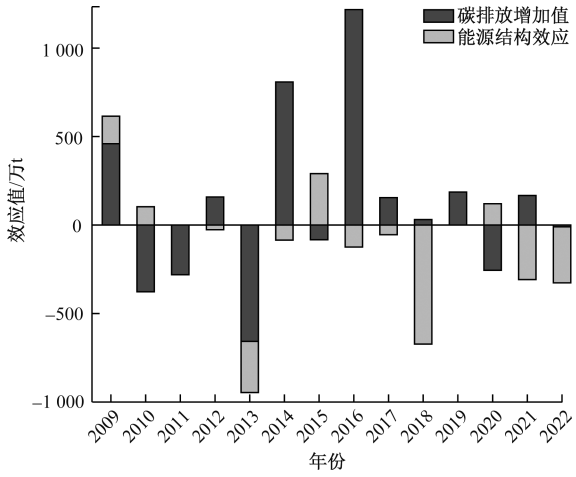


图4　能源强度效应和物流业碳排放增加值

2.3.3　运输结构效应

运输结构是指不同的运输方式承担的货运量占总货运量的比例。2012—2015年，运输结构对碳排放有抑制作用，2020—2022年，运输结构持续负贡献。2014年四川省开通成渝高铁货运专线，铁路货运量占比提升，但同期公路货运量因电商爆发式增长，导致运输结构对碳排放起短期抑制作用。2021年四川省实施《成渝地区双城经济圈碳达峰实施方案》，推动“水水中转”和铁路集装箱运输，公路货运占比下降，运输结构持续优化。

2.3.4　产业结构效应

产业结构是指物流业增加值占四川省生产总值总量的比例。产业结构的变化对碳排放的影响显著，贡献率达到32.5%。从表6可以看出，产业结构在多数年份对碳排放有负向贡献。2009—2011年，四川经济多元化，电子信息、装备制造崛起，物流业占比下降，抑制了碳排放；2016—2018年，2016年“去产能”导致工业物流收缩，2019年经济复苏后物流占比回升，产业结构效应呈波动变化；2020—2022年，经济转型，物流业增速低于

GDP,产业结构优化,助力碳减排。

3 结论与建议

3.1 结论

本文基于 Tapio 脱钩模型与 LMDI 因素分解法,估算了 2008—2022 年四川省物流业碳排放的演变特征、脱钩状态及其驱动因素,得出以下主要结论。

(1)四川省物流业的碳排放总量变化趋势与其生产总值变动趋势大致相同。现阶段,汽油和柴油仍旧是物流业能源消耗的主要类型,且两种能源在能源消费构成中的占比不断上升,这一态势对物流业实现低碳转型目标有明显阻碍。

(2)四川省物流业碳排放总体呈波动上升趋势,后期显现再平衡迹象,年均增长 2.94%,2022 年在经济正增长背景下实现总量微降,表明行业已迈入"产值恢复、排放趋稳"的再平衡阶段。

(3)LMDI 分解结果显示,能源结构效应是抑制四川省物流业碳排放增长的最大贡献因素,是减排的核心驱动力,显著优于其他因素。这表明提高清洁能源在物流能源消费中的占比对降低碳排放具有决定性作用。

(4)产业结构调整与运输结构优化贡献显著,产业结构效应是第二大减排贡献因素,表明物流业增加值占 GDP 比例的合理变化能有效抑制碳排放增长。运输结构效应在部分时期发挥了持续的负向作用,表明优化运输方式结构对减排至关重要。

3.2 建议

基于以上结论,为促进四川省物流业经济增长和能源碳排放脱钩,提出以下建议。

(1)加速能源结构清洁化转型,充分利用四川省丰富的水电资源,并积极布局光伏、风电等可再生能源在物流基础设施的应用。其次,政府可以制定新能源汽车的购置补贴和运营激励政策,加速淘汰老旧高排放燃油车辆。

(2)深化运输结构优化调整,加快西部陆海新通道、长江黄金水道等骨干通道的铁路、水运基础设施建设,提升铁路货运能力和内河航运效率。

(3)提升能源利用效率,优化物流组织与运营效率,发展智慧物流平台,促进车货高效匹配,减少空驶率。在大型物流企业推广能源管理系统(EMS)和物联网技术实现精细化管理。

(4)对接双城经济圈,推动产业协同减排。将物流园区布局与成渝地区先进制造、跨境电商、冷链生鲜等产业集群深度融合,通过共享仓储、共同配送等模式,减少无效搬运,实现物流业规模经济与碳效率同步提升。

参考文献

[1] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.

[2] 丁利杰,朱泳丽. 中国交通运输业碳排放区域差异及脱钩效应[J]. 东南学术,2023(4):162-174.

[3] 陈猛,谈晓勇. 西部陆海新通道物流业碳排放特征及驱动因素研究[J]. 铁道运输与经济,2024,46(12):100-107.

[4] 蒋岩,韦陈华,董振杰,等. 江苏省粮食生产碳排放时序特征及脱钩弹性分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):239-245.

[5] ENGO J. Decoupling analysis of CO_2 emissions from transport sector in Cameroon[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101732.

[6] 刘爱东,曾辉祥,周琼. 中国碳排放与出口贸易间脱钩关系实证[J]. 中国科技论坛,2014(10):85-91.

[7] 罗世兴,吴青. 中国采矿业能源消费碳排放脱钩及因素分解分析[J]. 资源与产业,2018,20(1):61-67.

[8] 穆晓央,王力,徐蓉,等. 西部省域物流业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. 环境科学与技术,2020,43(4):214-219.

[9] 初丽霞,黄梦瑶. 山东省碳排放脱钩效应及影响因素研究——基于 Tapio 脱钩指数和 LMDI 模型分析[J]. 环境科学与管理,2022,47(9):20-25.

[10] 赵鑫宇,张庭婷,谢晓敏,等. 长三角地区碳排放驱动因素及脱钩分析[J]. 环境科学研究,2025,38(4):767-776.

[11] 张立国,李东,周德群. 中国物流业二氧化碳排放绩效的动态变化及区域差异——基于省级面板数据的实证分析[J]. 系统工程,2013,31(4):95-102.

[12] 苑清敏,张文龙,宁宁宁. 京津冀物流业碳排放驱动因素及脱钩效应研究[J]. 科技管理研究,2016,36(5):222-226.

[13] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response strategies working Group, IPCC, 1989.

[14] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.

[15] 周颖,胡天美. 河北省物流业碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. 石家庄铁道大学学报(社会科学版),2025,19(1):9-17.

Analysis of the Decoupling and Driving Factors of Carbon Emissions in the Logistics Industry in Sichuan Province

QI Yuhan, YI Shizhi

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The logistics industry is one of the key sectors contributing to carbon emissions in China. Under the "dual carbon" strategic goals, promoting low-carbon development in the logistics sector is of particular importance. Focusing on carbon emissions from the logistics industry in Sichuan Province, carbon emissions from the logistics industry was scalculated and analyzed based on energy statistics from 2008 to 2022. The Tapio decoupling model was used to determine the elasticity relationship between carbon emissions and output value. The LMDI model was applied to investigate the effects of energy structure, energy intensity, transportation structure and industrial structure on carbon emissions from the logistics industry in Sichuan Province. The results indicate that carbon emissions show an overall upward trend during the study period, with emissions slightly decreasing in 2022 despite positive growth in output value. Strong decoupling occurs five times, and expansionary negative decoupling occurs twice. Energy structure optimization contributes the most, followed by industrial structure, while transportation structure and energy intensity contributes relatively less.

Keywords: logistics industry; carbon emissions; Tapio model; LMDI; driving factors