

# 辽宁省建筑业碳排放与经济发展 脱钩现象研究

孙艳丽,刘雪媛

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**建筑业作为辽宁省支柱产业,其节能减排潜力较大。通过能源消耗量和投入产出分析对辽宁省建筑业碳排放量进行了核算,利用 Tapio 脱钩模型和 EKC 曲线分析了辽宁省建筑业碳排放与经济发展之间的关系。结果表明:辽宁省建筑业碳排放总量在 2010—2020 年间呈几字形变化,于 2015 年到达拐点;脱钩弹性呈 W 形波动;EKC 曲线总体呈上升趋势。最后结合 2010—2020 年辽宁省建筑业碳排放与经济发展脱钩情况提出了辽宁省建筑业的碳减排建议。

**关键词:**建筑业;碳排放;脱钩理论;EKC 曲线

**中图分类号:** TU111.19

**文献标志码:** A

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)于 2021 年 8 月 9 日发布了《2021 气候变化:自然科学基础》的气候变化评估报告,报告指出,将人为引起的全球变暖限制在一个特定水平上,就意味着限制二氧化碳累积排放量至少需要达到净零排放。2020 年,“十四五”规划中提到要促进经济社会发展全面绿色转型,制定了以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的制度,深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型。

近年来国内外学者对碳排放与经济发展的关系开展了大量研究。Niyonzima 等<sup>[1]</sup>应用 ECM 曲线分析了 2010—2019 年 10 个不同国家的二氧化碳排放量与经济发展速度间的关系,得到了“国内生产总值与二氧化碳排放量之间的短期关系为负,长期相关性为正”这一结论;Shan 等<sup>[2]</sup>应用 Tapio 模型对

2005—2015 年间中国 294 个城市的碳排放情况与经济增长脱钩程度进行了研究,结果表明只有 11% 的城市呈现强脱钩状态,而 65.6% 的城市呈现弱脱钩状态,23.4% 的城市没有呈现脱钩状态;段林丰等<sup>[3]</sup>应用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 指数分解模型对 2000—2018 年中国四大典型城市群的碳排放脱钩效应进行了研究,结果表明碳排放与经济发展情况呈现弱脱钩状态,经济总量效应是促进碳排放量增加的主要因素;康文梅等<sup>[4]</sup>应用 IPCC 法和 Tapio 脱钩模型对汉江生态经济带碳排放量进行了测算,并分析了其与经济增长的脱钩关系,结果表明大部分地级市处于弱脱钩状态;胡怀敏等<sup>[5]</sup>研究了长江经济带交通能源碳排放脱钩情况,结果表明其脱钩状态不稳定,整体以弱脱钩状态为主;彭红松等<sup>[6]</sup>对 EKC 曲线、脱钩模型等多种理论进行了综述,梳理了区域经济增长

与环境压力方面的研究进展。

以往对碳排放与经济发展间关联的研究主要集中在全国及主要经济带等区域,对省级行政区内建筑行业的研究较少。在以上学者研究基础上,本研究以辽宁省建筑业为研究对象,对2010—2020年的建筑业碳排放量进行核算,分析建筑业碳排放与经济发展是否存在脱钩现象,并提出相关建议为建筑业碳减排工作指引方向,以期对辽宁省未来达成“双碳”目标提供理论支撑。

## 一、数据来源与模型构建

### 1. 数据来源

以辽宁省作为研究对象,所涉及的辽宁省分行业各项能源消耗、建筑业总产值等数据均来源于相应年份的《中国能源统计年鉴》和《辽宁统计年鉴》,各类能源折标准煤系数来源于《综合能耗计算通则》,完全消耗系数根据2012年和2017年的《辽宁省投入产出表》计算得出。

### 2. 建筑业碳排放量核算

建筑业碳排放包括建筑业本身所产生的直接碳排放和关联行业所产生的间接碳排放两部分<sup>[7]</sup>。对于间接碳排放量选取了与建筑业关联最密切的10个行业(煤炭开采和洗选业,石油和天然气开采业,金属矿采选业,石油加工、炼焦和核燃料加工业,化学原料和化学制品制造业,非金属矿物制品业,金属冶炼和压延加工业,金属制品业,交通运输设备制造业,电力、热力的生产和供应业)的能源消耗进行计算<sup>[8]</sup>。直接碳排放量以建筑业对煤炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力7种能源的消耗为依据进行计算<sup>[9]</sup>,其计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^n E_i \times k_i \times \rho \times N_i \quad (1)$$

式中: $F$ 为建筑业消耗能源产生的直接碳排放量; $E_i$ 为建筑业第*i*类能源年消耗量; $k_i$ 为第*i*类能源的折标准煤系数(标准煤换算系数); $\rho$ 为标准煤碳排放因子,即每消耗1t标准煤所产生的 $\text{CO}_2$ 排放量, $\rho = 2.277$ (参照《综合能耗计算通则》中数据); $N_i$ 为能源

的碳氧化率, $N_i = 1$ 。

对于间接碳排放的计算首先要算出建筑业关联行业的直接碳排放量,其计算方法同式(1);其次采用投入产出分析法,利用各行业间的完全消耗系数进行计算

$$P = F_j \times Y_j \times X/X_j \quad (2)$$

式中: $P$ 为建筑业对*j*行业的间接碳排放量; $F_j$ 为*j*行业的直接碳排放量; $Y_j$ 为建筑业对*j*行业的完全消耗系数; $X$ 为建筑业总产值; $X_j$ 为*j*行业的总产值。

建筑业碳排放总量是建筑业直接碳排放量与间接碳排放量的和,其计算公式为

$$C = F + \sum_{j=1}^n P \quad (3)$$

式中: $C$ 为建筑业碳排放总量。

### 3. Tapio 脱钩模型

脱钩理论是指经济发展与环境污染程度间关系的理论,本研究中的“脱钩”主要指建筑业总产值与碳排放量联系不断削弱的过程。常见的脱钩模型包括经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)提出的脱钩指数法、Tapio脱钩弹性模型和基于IPAT方程的脱钩评价方法<sup>[10]</sup>。由于OECD提出的脱钩指数法受基期影响较大,基于IPAT方程的脱钩评价方法影响因素较多且并不常见,因此选用更为常用且划分更为精细的Tapio脱钩模型对辽宁省建筑业碳排放与经济增长的脱钩关系进行研究,其计算公式为

$$T = \frac{\Delta(E_{\text{CO}_2})/E_{\text{CO}_2}}{\Delta(I_{\text{GDP}})/I_{\text{GDP}}} \quad (4)$$

式中: $T$ 为碳排放与经济增长的脱钩弹性; $E_{\text{CO}_2}$ 和 $I_{\text{GDP}}$ 分别为基期的碳排放总量和建筑业总产值; $\Delta(E_{\text{CO}_2})$ 和 $\Delta(I_{\text{GDP}})$ 分别为从基期到末期碳排放总量和建筑业总产值的变化值。根据脱钩弹性指数的不同可以将脱钩程度分为8类<sup>[11]</sup>,具体脱钩程度和划分标准如表1所示。

### 4. EKC 曲线模型检验

EKC曲线是反映环境质量与收入关系的模型,即在经济发展初期,环境污染程度随经济的发展不断加剧,但在经济发展到一定

表 1 Tapio 脱钩弹性指数对照表

脱钩程度		$\Delta(E_{CO_2})$	$\Delta(I_{GDP})$	脱钩弹性 $T$	发展类型
一级	二级				
负脱钩	扩张负脱钩	$>0$	$>0$	$T > 1.2$	低效扩张
	强负脱钩	$>0$	$<0$	$T < 0$	粗放扩张
	弱负脱钩	$<0$	$<0$	$0 < T < 0.8$	发展迟滞
脱钩	弱脱钩	$>0$	$>0$	$0 < T < 0.8$	集约扩张
	强脱钩	$<0$	$>0$	$T < 0$	挖掘发展
	衰退脱钩	$<0$	$<0$	$T > 1.2$	发展迟滞
连结	扩张连结	$>0$	$>0$	$0.8 \leq T \leq 1.2$	低效扩张
	衰退连结	$<0$	$<0$	$0.8 \leq T \leq 1.2$	发展迟滞

水平时则出现拐点,环境污染情况随经济的增长而好转。借鉴 EKC 理论及已有研究,参照胡婉玲等<sup>[12]</sup>、艾怡凝等<sup>[13]</sup> 相关研究建立拟合曲线模型,其表达式为

$$\ln A_{CO_2} = \alpha + \beta_1 \ln A_{GDP} + \beta_2 \ln^2 A_{GDP} + \beta_3 \ln^3 A_{GDP} + \theta$$

(5)

式中: $\alpha$  为常数项; $A_{CO_2}$  为建筑业人均碳排放量; $A_{GDP}$  为建筑业人均生产总值; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  为模型参数; $\theta$  为随机误差。对相关变量进行取对数处理,以消除异方差影响<sup>[14]</sup>。

二、建筑业碳排放与经济发展脱钩现象分析

1. 辽宁省建筑业碳排放

根据式(1)~式(3)计算出 2010—2020 年辽宁省建筑业碳排放情况(见表 2)。由表 2 可知,关联行业所产生的间接碳排放是建筑业碳排放的主要来源,占比均在 96% 以上且所占比例持续上升,2018 年后均保持在

建筑材料研发、提高绿色建筑材料的利用率 99% 以上。因关联行业的碳排放与建筑材料的生产、加工行为关系密切,故重视绿色是降低建筑业间接碳排放量的重要渠道。建筑业直接碳排放量的占比相对较小但不容忽视,整体上呈现出逐年下降的趋势,由 2010 年的 271.91 万 t 下降至 2020 年的 24.34 万 t,说明建筑业对一次能源的直接消耗量逐年减少,随着科技产业的发展,二次能源逐渐代替了一次能源,且绿色建筑、装配式建筑近年来发展势头渐猛,在提高建筑效率和节约成本的同时也使得建筑业的直接碳排放量减少。

由表 2 可知,2010—2020 年辽宁省建筑业碳排放总量在整体表现上呈现出先上升后下降的趋势,总体呈几字形变化。随着经济增长和建筑行业的迅猛发展,2010—2014 年建筑业碳排放总量增长迅速,于 2014 年达到峰值(11 531.96 万 t),是 2010 年的 1.67 倍。2015 年后建筑业逐步走向稳步发展阶段,大规模工程建设与基础改建工程逐渐减少,且由于辽宁省在成为国家首批低碳试点地区后不断落实各项减碳措施、国务院在 2013 年起严控高耗能高污染行业新增产能以减少大气污染物排放量以及“十二五”规划任务的完美收官,建筑业碳排放总量在 2015 年以后急速下降,由 2015 年的 11 531.17 万 t 短期内下降至 2016 年的 5 765.71 万 t,且在之后的 5 年间均处于低波动状态。

2. 碳排放与经济增长的脱钩分析

根据式(4)的 Tapio 脱钩模型测算了 2011—2020 年辽宁省建筑业碳排放与经济

表 2 2010—2020 年辽宁省建筑业碳排放情况

年份	碳排放量/万 t			间接碳排放比例/%
	直接碳排放量	间接碳排放量	碳排放总量	
2010	271.91	6 620.14	6 892.05	96.47
2011	269.81	8 849.07	9 118.88	97.04
2012	218.87	10 796.00	11 014.87	98.01
2013	217.50	12 434.94	12 652.44	98.28
2014	138.74	11 393.22	11 531.96	98.80
2015	90.73	11 440.44	11 531.17	99.21
2016	77.43	5 688.28	5 765.71	98.66
2017	74.09	5 341.15	5 415.24	98.63
2018	4.87	6 411.68	6 416.55	99.92
2019	18.66	6 651.07	6 669.72	99.72
2020	24.34	6 947.23	6 971.57	99.65

增长的脱钩弹性及脱钩状态(见表3)。由表3可知,脱钩弹性 $T$ 在研究期内呈W型曲线波动,其中脱钩状态以连结状态为主,依次可分为连结、负脱钩、脱钩3种状态。

表3 2011—2020年辽宁省建筑业碳排放与经济增长脱钩指数及脱钩状态

年份	$\Delta(E_{CO_2})/E_{CO_2}$	$\Delta(I_{GDP})/I_{GDP}$	脱钩弹性 $T$	脱钩状态	发展类型
2011	0.244 2	0.245 7	0.993 8	扩张连结	低效扩张
2012	0.172 1	0.175 6	0.980 0	扩张连结	低效扩张
2013	0.129 4	0.125 6	1.030 6	扩张连结	低效扩张
2014	-0.097 2	-0.098 8	0.983 6	衰退连结	发展迟滞
2015	-0.000 1	-0.000 1	1.000 0	衰退脱钩	发展迟滞
2016	-1.000 0	-0.999 3	1.000 7	衰退连结	发展迟滞
2017	-0.064 7	-0.064 7	1.000 2	衰退连结	发展迟滞
2018	0.156 1	-0.045 3	-3.443 2	强负脱钩	粗放扩张
2019	0.038 0	0.007 4	5.160 7	扩张负脱钩	低效扩张
2020	0.043 3	0.068 6	0.631 5	弱脱钩	集约扩张

2011—2013年,辽宁省建筑业碳排放与经济发展呈扩张连结状态,碳排放与经济发展均处于增长状态且增速相当,属于低效扩张发展类型。2011年作为“十二五”的开局之年,基本建设规模的持续增长为建筑业发展提供了良好的市场环境,而经济的增长引发了一定程度的环境压力<sup>[15]</sup>。2014—2017年,建筑业碳排放与经济发展的脱钩类型以衰退连结为主,在此状态下碳排放与经济发展均呈下降趋势,进入到发展迟滞阶段,考虑到建筑物数量的逐渐饱和,以及社会各行业对节能降碳工作的关注度不断提升,建筑业碳排放量开始下降,建筑业总产值也随之降低。2018—2019年的脱钩程度为负脱钩,且由粗放扩张的强负脱钩转向了低效扩张的负脱钩,这是低碳转型发展中不太理想的状态,考虑到可能是建筑业发展遇到平台期,且在降低碳排放量方面仍处在探索阶段,此阶段的建筑业碳排放脱钩状态仍不稳定。在2020年,负脱钩状态转为弱脱钩,随着碳排

放量的增加,建筑业总产值也在增加,且碳排放量增速略慢于建筑业总产值增速,随着“十三五”规划的结束以及对重点领域节能降碳工作的推进,建筑业总产值与碳排放量之间的脱钩状态逐渐呈现出理想状态。

综上所述,2011—2020年辽宁省建筑业碳排放与经济发展脱钩状态并不稳定,并未呈现出代表低碳转型成功的理想状态(强脱钩状态),建筑业发展对能源的依赖依然较强。2014年至今,辽宁省不断探索建筑业的低碳发展道路,未来也应重视关联行业的碳减排工作,实现建筑业碳排放与经济发展的强脱钩仍任重道远。

3. EKC 曲线拟合结果分析

运用 SPSS 软件与拟合曲线模型(式(5))对辽宁省建筑业人均碳排放量与建筑业人均生产总值进行回归分析(见表4)。3种模型的 $F$ 统计量显著性均小于0.05,说明2011—2020年辽宁省建筑业人均碳排放量与建筑业人均生产总值显著相关。

表4 模型回归结果

模型	$F$	$R^2$	$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
一次模型	78.441	0.897	-8.973	1.045	—	—
	(0.000 ***)		(0.000 ***)	(0.000 ***)	—	—
二次模型	40.834	0.911	-18.178	5.054	-0.435	—
	(0.000 ***)		(0.060 *)	(0.200)	(0.300)	—
三次模型	41.012	0.911	-15.232	3.090	0.000	-0.032
	(0.000 ***)		(0.026 **)	(0.128)	(0.476)	(0.293)

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示在10%、5%、1%的水平上显著。

对比一、二、三次模型的回归结果,发现二次模型和三次模型的拟合优度 $R^2$ 较高,均

为0.911,但均存在系数显著性水平大于0.05。因此一次模型的回归结果更优, $F$ 统



计量(78.441)也更大,常数项系数  $\alpha$  和一次项系数  $\beta_1$  显著性水平均为 0.000,在 1% 水平上显著,说明 2011—2020 年辽宁省建筑业人均碳排放量与建筑业人均生产总值的关系符合一次模型的拟合回归结果。

数据的拟合曲线如图 1 所示,其中  $\beta_1 > 0$ ,说明建筑业人均碳排放量随着人均生产总值的增长而增加。从图 1 可以看出,辽宁省建筑业人均生产总值与建筑业人均碳排放量尚未完成从促进到抑制的倒 U 型关系的转化,其发展状况更符合倒 U 型的左半部分,但 2017—2020 年的拟合曲线出现了明显波动,表明二者关系开始好转,符合脱钩分析中脱钩状态发生转变出现弱脱钩的现象。2016—2020 年建筑业生产总值呈现下降趋势,建筑业发展进入迟滞阶段,在建筑行业碳排放中,间接碳排放占主要部分,建成项目在运行阶段仍产生大量的碳排放,因此存在建筑业生产总值下降而碳排放量仍小幅增长的现象。从拟合曲线整体变化趋势来看,辽宁省建筑业尚未实现碳达峰,但将在未来迎来拐点并走向抑制阶段。

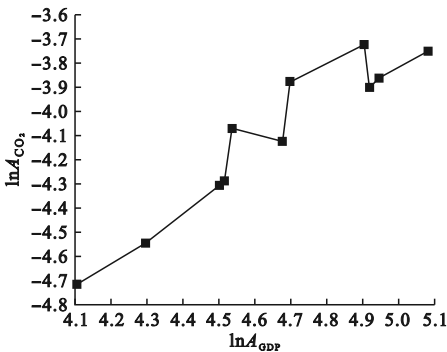


图 1 2011—2020 年辽宁省建筑业碳排放与经济增长的拟合曲线

三、结论与建议

1. 结 论

以 2010—2020 年辽宁省建筑业能源消耗量和建筑业总产值为原始数据,对建筑业碳排放总量进行了核算,得到了“关联行业的间接碳排放是建筑业碳排放的主要部分,其占比为总量的 96% 以上”这一结果。运用 Tapio 脱钩模型对辽宁省建筑业碳排放与经

济发展脱钩问题进行了研究,结果显示:在研究期内碳排放总量和建筑业生产总值的变化趋势相似,且在 2015 年后都呈现出迅速下降的趋势,脱钩状态由连结转向负脱钩再转向弱脱钩,逐渐向良好的趋势发展,研究期内尚未出现强脱钩状态。

2. 建 议

(1)改善能源结构。能源消耗是建筑业碳排放的直接来源,减少一次能源使用量是降低碳排放量、实现可持续发展战略的有效手段。适当调整建筑业能源利用结构,改变传统单一粗放的能源结构形式,增加清洁能源的使用率,对建筑垃圾进行资源化处理从而提升能源利用率,构建清洁低碳、安全高效的建筑业能源消耗体系。

(2)以技术创新促进经济发展。自 2016 年起,随着建筑业发展速度的放缓,碳排放量逐年减少,建筑业生产总值也随之下降。相关部门应加大对绿色技术资金的投入,加大科技攻关力度,推广节能技术应用,研发可回收、可降解建筑材料,运用新技术、新方法对既有建筑进行节能改造;企业应通过研发高新技术改进设备、培养专业技术人才等方法来提高生产技术,在提升生产效率的同时减少碳排放量,进而获得更大经济效益。

(3)从源头上节约材料。为有效降低间接碳排放量,可从建筑设计源头控制材料消耗量,利用数字建造等先进技术在建筑设计阶段进行建模、算量等可视化分析,在确保建筑安全和使用性能的同时减少高碳排放的建筑材料使用量。改进传统粗放式产业结构,精细化施工设计,倡导施工单位制定绿色施工方案。

(4)完善减碳制度和激励机制。政府应制定更有针对性的制度来激励建筑企业主动将碳减排纳入企业发展规划,建立完善的碳减排奖罚机制和税费机制,制定科学的行业碳减排目标并落实监管,建立健全建筑业低碳节能法律体系。

参考文献:

[1] NIYONZIMA P, YAO X L, OFORI E K. How

- do economic growth and the emissions of carbon dioxide relate? [J]. Open access library journal, 2022, 9(3): 1-16.
- [2] SHAN Y L, FANG S, CAI B F, et al. Chinese cities exhibit varying degrees of decoupling of economic growth and CO<sub>2</sub> emissions between 2005—2015[J]. One earth, 2021, 4(1): 124-134.
- [3] 段林丰, 卢培利, 蒲寅羽, 等. 典型城市群碳排放的脱钩效应及驱动机制研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(11): 55-62.
- [4] 康文梅, 夏克郁. 区域经济增长与碳排放的脱钩: 基于汉江生态经济带的实证分析[J]. 企业经济, 2022, 41(5): 23-31.
- [5] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 862-877.
- [6] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593-606.
- [7] 杜强, 张诗青, 张智慧. 建筑业碳排放与经济增长脱钩及影响因素研究: 以陕西省为例[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 172-176.
- [8] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1): 53-57.
- [9] 周琳, 宋梦歌. 沈阳市既有建筑碳排放量核算及节能减排对策研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2017, 19(5): 509-513.
- [10] 孙叶飞, 周敏. 中国能源消费碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究[J]. 经济与管理评论, 2017, 33(6): 21-30.
- [11] 王越, 赵婧宇, 李志学, 等. 东北三省碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 190-196.
- [12] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56-62.
- [13] 艾怡凝, 咎晓辉, 姚建. 四川省工业发展环境经济特征的耦合研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S2): 205-209.
- [14] 范跃民, 余一明, 孙博文. 旅游业收入增长对旅游业碳排放存在非线性影响吗?: 基于环境库兹涅茨曲线(EKC)的拓展分析[J]. 华南师范大学学报(社会科学版), 2019(3): 132-138.
- [15] 韩燕. 经济发展与资源环境承载力脱钩研究: 以甘肃省为例[J]. 统计与决策, 2021, 37(2): 121-124.

## Research on Decoupling between Carbon Emission of Construction Industry and Economic Development in Liaoning Province

SUN Yanli, LIU Xueyuan

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** As a pillar industry in Liaoning Province, the construction industry has great potential for energy conservation and emission reduction. Through energy consumption and input-output analysis, the carbon emissions of Liaoning construction industry are calculated, and the relationship between carbon emissions of Liaoning construction industry and economic development is analyzed using Tapio elastic decoupling model and EKC curve. The results show that the total carbon emissions of the construction industry in Liaoning Province changed in Chinese character of “几” shape from 2010 to 2020, reaching an inflection point in 2015. The decoupling elasticity fluctuates in “W” shape and the EKC curve shows an overall upward trend. The decoupling level is closely related to carbon emissions, so carbon reduction suggestions are proposed from different aspects of direct and indirect carbon emissions.

**Key words:** construction industry; carbon emission; decoupling theory; EKC curve

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)