

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.003

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:侯佳奇,吴金卓.东三省物流业隐含碳排放测算及预测分析[J].西安理工大学学报,2026,42(2):176-186.

Hou Jiaqi, Wu Jinzhuo. Measurement and forecasting analysis of embodied carbon emissions in logistics industry across China's three northeastern provinces[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 176-186.

东三省物流业隐含碳排放测算及预测分析

侯佳奇, 吴金卓

(东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 精准测算物流业隐含碳排放量并预测其未来趋势,有助于制定精准的减排策略,从而推动我国“双碳”目标的实现。本文以东三省为研究对象,运用行业剥离法和投入产出法测算 2000—2022 年物流业隐含碳排放量,并采用 ARIMA 模型进行预测。结果表明:①2000—2022 年东三省物流业隐含碳排放具有区域分化特征,黑龙江、辽宁两省总体上呈持续上升趋势,而吉林省则呈现先升后降的发展趋势。②东三省物流业直接碳排放占比总体呈现先上升后下降的趋势,其中黑龙江与吉林差异较小,分别为 18.85%~43.84%和 10.55%~43.57%,而辽宁省占比相对较小,处在 13.83%~31.36%。③2000—2022 年东三省物流业隐含碳排放强度呈先降后升的发展趋势,2019 年以后趋于平稳,最终在 10.5 t/10⁴ 元(黑龙江)、6 t/10⁴ 元(吉林)、11 t/10⁴ 元(辽宁)上下浮动。④2023—2027 年,东三省物流业隐含碳排放量均呈下降趋势,降幅分别为 2.12%、2.78%、3.71%。最后,针对以上结论提出了东三省差异化减排建议。

关键词: 物流业隐含碳;投入产出法;ARIMA 模型**中图分类号:** X322; F259.2; F127.3**文献标志码:** A**文章编号:** 1006-4710(2026)02-0176-11

Measurement and forecasting analysis of embodied carbon emissions in logistics industry across China's three northeastern provinces

Hou Jiaqi, Wu Jinzhuo

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Accurately measuring the embodied carbon emissions of the logistics industry and predicting its future trends can help formulate precise emission reduction strategies, thereby promoting the achievement of China's "Dual Carbon" goals. This study takes the three northeastern provinces as the research object, uses the industry stripping method and the input-output method to measure the embodied carbon emissions of the logistics industry from 2000 to 2022, and employs the ARIMA model for prediction. The results show that: ① From 2000 to 2022, the embodied carbon emissions in the logistics industry of the three northeastern provinces exhibits regional divergence. Heilongjiang and Liaoning Provinces generally maintains a continuous upward trend, while Jilin Province shows a development trend of first increasing and then decreasing. ② The proportion of direct carbon emissions in the logistics industry of the three northeastern provinces overall displays a trend of first rising and then falling. The ranges for Heilongjiang and Jilin are similar, at 18.85%~43.84% and 10.55%~43.57% respectively, while the proportion for Liaoning is relatively smaller, ranging from 13.83% to 31.36%. ③ From 2000 to 2022, the embodied carbon emission intensity of the logistics industry in the three northeastern prov-

收稿日期: 2025-05-20; **网络首发日期:** 2025-12-12**网络首发地址:** <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20251211.1926.002>**基金项目:** 黑龙江省经济社会发展重点研究课题资助项目(22202)**第一作者:** 侯佳奇,女,硕士生,研究方向为物流与供应链管理。E-mail:1439658176@qq.com**通信作者:** 吴金卓,女,博士,教授,研究方向为物流与供应链管理。E-mail:wjz@nefu.edu.cn

inces shows a development trend of first decreasing and then increasing. After 2019, it stabilizes, ultimately fluctuating around $10.5 \text{ t}/10^4 \text{ CNY}$ (Heilongjiang), $6 \text{ t}/10^4 \text{ CNY}$ (Jilin), and $11 \text{ t}/10^4 \text{ CNY}$ (Liaoning). ④From 2023 to 2027, the embodied carbon emissions of the logistics industry in the three northeastern provinces are projected to show a declining trend, at the reduction rates of 2.12%, 2.78% and 3.71% respectively. Finally, based on the above conclusions, differentiated emission reduction recommendations for the three northeastern provinces are proposed.

Key words: logistics embodied carbon; input-output analysis; ARIMA model

随着经济的快速发展,化石能源被加速消耗并产生了大量温室气体,气候问题已成为全球关注的焦点。在此背景下,中国提出了“双碳”目标^[1]。物流行业作为国民经济重要组成部分,渗透社会经济活动的各个领域,是三大耗能部门之一^[2],其碳排放问题不容忽视。东三省作为老工业基地,在保障国家能源、粮食和工业品运输需求的同时,在新一轮东北振兴战略背景下,正面临经济发展与环境保护的双重压力。因此,有必要研究东三省物流业的碳排放现状,预测其未来发展趋势,为东三省物流业低碳转型提供关键的数据支撑,以期助力制定精准的减排策略,从而推动我国“双碳”目标的实现。

近年来,学术界围绕隐含碳排放开展了广泛的研究,涉及国家^[3-4]、省域^[5-6]、市域^[7]多个空间尺度。从研究区域分布来看,现有研究多聚焦于发达地区或沿海城市群,如京津冀地区^[8]、黄河流域^[9-10]、珠江流域^[11]、长江经济带^[12]等。研究对象也逐步扩展至工业^[13-14]、建筑业^[15]、农业^[16]等重点行业。目前,主要采用两种方法测算隐含碳排放量,分别是生命周期法(LCA)和投入产出法(I-O)。前者是基于产品生命周期自下而上的测算方法^[17],后者通过构建数学模型,基于投入产出表获取直接、间接碳排放系数,从而计算出隐含碳排放量。相比之下,生命周期法因数据获取难度大,更适用于微观产品层面的精确核算,而投入产出法基于官方公布的能源消耗数据和投入产出表进行计算,在数据可得性与计算普适性方面具有显著优势,因而已成为隐含碳排放测算的主流方法。

由于物流业尚未被纳入我国的产业分类体系,学者们进行物流业碳排放相关研究时,通常用交通运输、仓储和邮政业代替物流业,导致测算结果并未全面反映物流业实际碳排放特征。因此有学者将行业剥离法应用于物流行业剥离^[18]。此外,当前物流业碳排放研究多聚焦于直接能源消耗产生的直接碳排放,忽视了产业链上下游关联活动引发的间接碳排放。有研究表明我国物流业直接 CO_2 排放量仅占隐含 CO_2 排放量的 30% 左右^[19],过往研究中以直接

碳排放量代表物流业碳排放量的方法低估了物流行业真实的碳排放量。而当前,针对物流行业隐含碳排放的研究仍相对匮乏,有限的研究聚焦于隐含碳排放的空间特征和时空演变^[20]、隐含碳排放驱动因素^[21-22]、物流业碳转移及责任划分^[23-24]。李想^[20]通过投入产出模型测算了 2015、2017、2018 和 2020 年中国物流业隐含碳排放量,在此基础上运用假设提取法分解并量化物流业碳排放与其他行业之间的联系。王丽萍^[22]基于 1997—2014 年中国物流业隐含碳排放的测算结果,使用 LMDI 分解法从经济规模、经济结构、行业效率、低碳技术四个方面,对物流业隐含碳排放的影响因素展开研究。卢大江^[23]从生产侧和消费侧两个视角分析了 2000—2015 年中国、美国和日本三国的物流业隐含碳排放转移,结果表明中国物流业进出口隐含碳均明显增长,并且出口大于进口。

在精准测算物流业碳排放量的基础上,科学预测物流业碳排放量对于制定差异化减排政策以及推动物流业低碳转型具有指导意义。现有的碳排放量预测方法分为两大类,分别是基于时间序列模型和基于机器学习的预测方法。前者包括灰色预测模型、自回归移动平均模型 ARIMA、自回归条件异方差模型 ARCH 及其扩展模型等。朱怡俊^[25]基于 2000—2021 年数据测算江苏省物流业碳排放量,使用 ARIMA 模型预测其 2022 至 2026 年的碳排放趋势,结果显示未来五年该省物流业碳排放仍呈线性增长态势。机器学习方法可分为单模型(如回归模型、支持向量机 SVM 等)和集成学习模型(如随机森林、AdaBoost 等)。高晓明^[26]等构建了变分模态分解(VMD)联合长短期记忆网络(LSTM)的碳排放预测模型对高速公路综合场站碳排放进行预测。鉴于碳排放系统的复杂非线性特征,学者们也尝试构建混合模型以提高预测精度,如宋永朝等^[27]采用 Lasso 回归-SVM 组合模型对区域交通运输业碳排放量进行预测。

综上,当前我国物流业隐含碳排放领域的研究较少,已有的研究主要聚焦于隐含碳排放核算测度、

时空演进和影响因素分析,鲜有涉及物流业隐含碳排放的预测研究,同时区域物流业隐含碳相关研究亟待深入。因此,本文以东三省为研究对象,基于 2000—2022 年分行业能源排放数据和省域投入产出表测算东三省物流业隐含碳排放量并分析其区域特征。测算过程中结合了行业剥离法重新界定物流业统计范围,以克服过往研究中因采用“交通运输、仓储和邮政业”数据近似替代物流业所导致的核算范围不全问题,提高核算结果的准确性。随后运用 ARIMA 时间序列模型预测东三省 2023—2027 年物流业隐含碳排放趋势,并提出三条针对性建议,以期对东北地区物流业碳减排措施的制定和实施提供数据支撑与决策参考,助力我国“双碳”目标的实现。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

本文所使用数据的时间跨度为 2000—2022 年,数据所属区域为黑龙江、吉林、辽宁三省。分行业能源消耗数据来源于《中国能源统计年鉴》,投入产出表来自各省统计年鉴。我国从 1987 年开始,逢 2 和 7 年份开展全国投入产出调查,因为产品结构、产品技术在较短的时间里几乎不会产生较大改变,所以每隔五年统计一次投入产出数据,在研究期间有 2002、2007、2012 和 2017 年 4 个投入产出表,参考该研究领域普遍采用的处理方法^[28-29],本文将研究期 2000—2022 分为四个阶段,分别是 2000—2004、2005—2010、2011—2016、2017—2022,再分别对应各阶段内的投入产出表进行计算。数据具有一定滞后性是投入产出模型的共性问题,且国家的经济结构短期内不会出现剧烈变动,所以研究仍具有时效性^[30]。

由于隐含碳排放量的计算需要分行业能源消耗数据与投入产出表计算的完全消耗系数对应相乘,所以需要对投入产出表中的 42 个行业进行预处理,以保证其行业分类与《中国能源统计年鉴》中的行业分类保持一致。参考黄瑒^[31]对物流业投入产出表编制方法,结合行业剥离法,最终将 42 个行业合并为农林牧渔业、采矿业、制造业、电力热力水和燃气供应业、建筑业、物流业、批发零售住宿和餐饮业、其它行业、居民生活 9 大行业。

1.2 行业剥离法

在进行物流业隐含碳排放量测算时,为了获取更精准的物流行业的碳排放数据,首先需要将物流相关行业重新剥离合并成物流业。行业剥离

法借鉴了旅游业产值剥离法,剥离系数等于该行业的物流业增加值与其 GDP 增加值的比值。数据来源于《中国物流年鉴》和《中国统计年鉴》。由于交通运输、仓储与邮政业与物流业具有较高的一致性,剥离系数稳定在 1 左右,批发零售、住宿和餐饮业与物流业的一致性较低,剥离系数稳定在 0.1 左右。本文参照文献^[24]将两大行业的剥离系数分别设置为 1.0 和 0.1,作为后续隐含碳排放核算的基础。

1.3 碳排放系数法

直接碳排放的测算方法主要有碳排放系数法、质量平衡法和实测法^[32],由于质量平衡法和实测法数据收集难度较大,碳排放测算中最为常用的是碳排放系数法^[33],计算公式为:

$$C_t = \sum_k C_k = \sum_{k=1}^n E_k^t \theta_k \quad (1)$$

式中: k 为能源种类; n 为能源种类数量; C_t 为第 t 年碳排放总量; C_k 为能源 k 的碳排放量; E_k^t 为第 t 年能源 k 的消耗量; θ_k 为能源排放系数。

能源消耗量数据来源于《中国能源统计年鉴》,由于其行业分类中不包含物流业,因此需要运用行业剥离法重新计算物流业能源消耗。选取物流业消耗量较大的煤炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、热力、电力 9 类能源。通过《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)、《省级温室气体清单编制指南》(修订版)中各能源的净热值、单位热值含碳量、碳氧化因子等计算 7 种化石能源的碳排放系数;热力的碳排放系数来源于《企业温室气体排放核算与报告指南》;由于电力是受技术进步影响较大的二次能源,在 2000—2022 年间,电力的碳排放系数有明显降低,为此,本文分 4 个阶段(2000—2004、2005—2010、2011—2016、2017—2022)确定了东北区域电力碳排放系数。各能源的碳排放系数见表 1。

表 1 能源碳排放系数
Tab. 1 Carbon emission factors by energy types

能源	碳排放系数	能源	碳排放系数
煤炭	1.904 8 kg CO ₂ /kg	天然气	1.977 7 kg CO ₂ /m ³
原油	3.008 9 kg CO ₂ /kg	热力	0.011 0 kg CO ₂ /MJ
汽油	2.928 7 kg CO ₂ /kg		1.198 3 t CO ₂ /MWh
煤油	3.037 2 kg CO ₂ /kg	电力	1.129 3 t CO ₂ /MWh
柴油	3.099 8 kg CO ₂ /kg		1.117 1 t CO ₂ /MWh
燃料油	3.189 4 kg CO ₂ /kg		1.067 3 t CO ₂ /MWh

1.4 投入产出法

采用投入产出法核算物流业隐含碳排放量。首先基于投入产出表中的数据计算完全消耗系数,在投入产出表中,经济体被划分为 n 个部门,其主体部分是一个 n 阶方阵,反映了各部门之间投入要素的消耗和使用情况。投入产出表还包含各部门的产出情况,反映了产品在制造生产后的分配和使用流向。假设 i 为横向部门, j 为纵向部门,根据投入产出表的平衡关系构建投入产出模型,模型的公式为

$$\begin{cases} X_{11} + X_{12} + X_{13} \cdots + Y_1 = X_1 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} \cdots + Y_2 = X_2 \\ \cdots \cdots \\ X_{n1} + X_{n2} + X_{n3} \cdots + Y_n = X_n \end{cases} \quad (2)$$

基于投入产出模型计算隐含碳排放步骤如下。

1) 直接消耗系数 A 。根据模型可知,每个部门的总产出 X 分为两部分,一部分用于满足其他部门的生产需求,即 AX , 另一部分用于最终需求 Y , 其公式为:

$$AX + Y = X \quad (3)$$

式中: A 是直接消耗系数矩阵,记为 (a_{ij}) , 表示生产部门 j 单位的产品所需的部门 i 的产品数量; X 是总产出向量, x_i 表示部门 i 的总产出; Y 是最终需求向量, y_i 表示对部门 i 产品的最终需求。

2) 里昂惕夫逆矩阵。将式(3)简化后的基本的投入产出模型进行调整后可得式(4)。

$$X = (I - A)^{-1}Y = LY \quad (4)$$

式中: I 是单位矩阵; $(I - A)^{-1} = L$ 是里昂惕夫逆矩阵,表示最终需求对总产出的直接和间接影响。

3) 完全消耗系数。完全消耗系数记为 b_{ij} , 是指第 j 产品部门每提供一个单位最终使用时,对第 i 产品部门货物或服务的直接和间接消耗之和,其计算公式为:

$$B = (I - A)^{-1} - I \quad (5)$$

4) 隐含碳排放量。部门 i 的隐含碳排放量 C_i 等于其直接和间接排放的二氧化碳总量,等于该部门对其它部门的完全消耗系数分别乘以各部门的碳排放总量,计算公式为:

$$C_i = \sum_j b_{ij} C_j \quad (6)$$

1.5 ARIMA 模型

ARIMA(自回归积分移动平均模型)是一种经典的时间序列分析方法,用于预测未来的趋势^[28],其公式为:

$$ARIMA(p, d, q) = AR(p) + I(d) + MA(q) \quad (7)$$

式中: $AR(p)$ 表示自回归模型; $I(d)$ 表示差分模型; $MA(q)$ 表示移动平均模型。差分操作用于消除原始数据的非平稳性,消除趋势和季节性等影响, d 表示差分次数。

自回归模型公式假设当前时刻的观测值是过去若干个时刻观测值的线性组合再加上一个随机扰动项。自回归阶数 p 表示当前时间点与前面 p 个时间点的值有关,其公式为:

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \cdots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (8)$$

式中: X_t 是时间序列在 t 时刻的值; $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_p$ 是自回归系数,度量了过去值对当前值的影响程度; ε_t 是一个均值为 0, 方差为 σ^2 的白噪声序列,且 ε_t 与 $X_{t-1}, X_{t-2}, \cdots, X_{t-p}$ 均不相关。

移动平均公式常用于平滑时间序列数据,消除短期波动,显示出数据的长期趋势,移动平均阶数 q 表示当前时间点与前面 q 个时间点的误差。其公式为:

$$Y_t = \mu + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (9)$$

式中: Y_t 是时间序列在 t 时刻的观测值; μ 是时间序列的均值; ε_t 是 t 时刻的白噪声,也就是均值为 0, 方差为常数 σ^2 的独立分布; 随机变量 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_q$ 是移动平均阶数,反映了过去不同白噪声对当前观测值的影响程度。模型的建模分为以下 4 个步骤。

1) 平稳性检验

ARIMA 模型进行预测时,要求数据序列是平稳序列,常用的检验方法是 ADF 检验,其判断规则是如果 ADF 统计量小于对应显著性水平的临界值或 p 值小于设定的显著性水平,则拒绝原假设,认为序列是平稳的,否则需要对数据进行差分化处理。

2) 模型定阶

确定 ARIMA 模型中自回归阶数(p)和移动平均阶数(q)的常用方法是信息准则法,此方法通过最小化信息准则的值来选择最优模型,综合考虑了模型的拟合优度和复杂度。

3) 模型检验

ARIMA 模型检验的常用方法是 Ljung-Box 检验法,假设残差序列为白噪声序列(即不存在自相关),若 p 值小于给定的显著性水平(常用 0.05)就拒绝原假设,即认为残差序列不存在自相关性,模型在捕捉数据的自相关结构方面表现较好;否则还需要进一步拟合模型。

4) 预测

通过以上步骤确定最优模型,并对时间序列的未来值进行预测。

2 结果与讨论

2.1 东三省物流业隐含碳排放量

由图 1 可知,2000—2022 年间,东三省物流业隐含碳排放呈现出明显的区域分化特征,且各省的隐含碳排放曲线与其物流业 GDP 的变化趋势基本一致,这是由于物流经济水平的提升不可避免地需要更多的能源消耗,从而产生更多的隐含碳排放。具体来看,黑龙江、辽宁两省物流业隐含碳排放量整体上呈持续上升的趋势,且辽宁的排放总量始终位居三省之首,自 2000 年起,其排放量近似黑、吉两省的二倍,2016 年以后逐步扩大至三倍左右。而吉林省以 2012 年为拐点,呈现出先上升后下降的倒 U 型趋势,峰值排放量为 $9.037 6 \times 10^7$ t,2017 年后黑龙江两省的物流业隐含碳排放量逐渐趋于稳定。

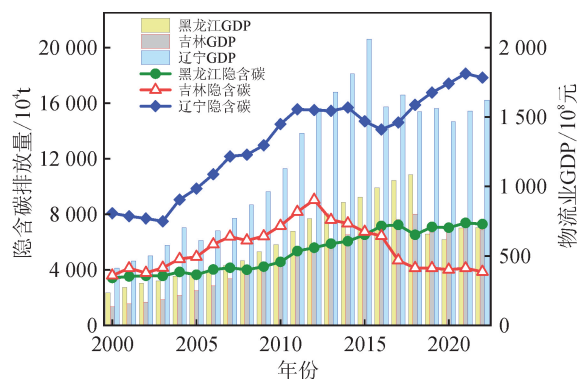


图 1 东三省物流业 GDP 及隐含碳排放量

Fig. 1 GDP and embodied carbon emissions from the logistics sector in China's Northeast Region

从分省数据来看,黑龙江省物流业隐含碳排放整体上呈现出稳步增长的发展趋势,可划分为三个阶段。2000—2008 年处于平稳波动期,排放总量在 2003 年最低值 $3.557 7 \times 10^7$ t 和 2007 年的最高 $4.147 8 \times 10^7$ t 之间波动,年平均增长率仅为 2.16%;2008—2017 年进入快速增长期,受 2008 年金融危机后国内经济复苏与政策刺激影响,物流行业快速发展。同时,随着互联网的高速发展与普及,电商行业迎来发展的黄金期,交通运输、仓储邮政业迎来井喷式增长,物流行业规模显著提升。在此背景下能源消耗增加导致隐含碳排放量也随之升高。物流业隐含碳排放量从 2008 年的 $4.005 7 \times 10^7$ t 快速攀升至 2017 年的峰值 $7.229 6 \times 10^7$ t,累计涨幅达 80.48%,年平均增长率高达 8.94%;2017 年以后是政策引导下的减排及稳定阶段,进入十三五发展阶段,国家大力推动物流业降本增效与高质量发展,黑龙江省随之出台《黑龙江省物流业降本增效专项行动方案》,加之公转铁政策的实施,2018 年隐

含碳排放大幅下降 9.83%,随着主要结构调整与技术推广基本完成,2019—2022 年间,隐含碳排放量在 $7.026 5 \times 10^7$ t 至 $7.371 8 \times 10^7$ t 之间小幅度波动,表明黑龙江省物流业逐步进入低碳转型的平台期与结构巩固阶段。

吉林省物流业隐含碳排放的演变可划分为三个阶段。2000—2012 年是快速增长期,在此阶段物流业隐含碳排放量从 $3.582 3 \times 10^7$ t 激增至 $9.037 6 \times 10^7$ t,增长超 2.5 倍,年平均增长率达 21.02%。这一时期的高速增长主要受到区域经济扩张与物流需求激增的共同驱动;2011 年《吉林省“十二五”现代物流业发展规划》实施,规划提出构建“一核三通、四层节点”的物流空间网络、推动多式联运体系发展等多项举措,2016 年公转铁政策的加持更有效推动了物流业整体能效的提升,隐含碳排放量自 2012 年起呈快速下降趋势,直至 2018 年达到 $4.124 3 \times 10^7$ t,下降了 54.36%。2018—2022 年最大波动幅度为 $2.665 2 \times 10^6$ t,隐含碳排放量趋于平稳,表明吉林省物流行业在完成初步结构调整后,也进入了低碳转型的平台期与稳态阶段。

辽宁地处东北亚中心腹地,是东三省中唯一同时沿海且沿边的省份,拥有大连港、营口港等重要出海口,承担着东北腹地大量的进出口货物转运任务,外贸的繁荣直接拉动了对海运、港口装卸、集疏运等物流需求的暴涨,其隐含碳排放水平远远高于黑龙江省和吉林省。辽宁省物流业隐含碳排放的演变可划分为四个阶段。2000—2003 年是下降期,此阶段隐含碳排放量从 $8.071 0 \times 10^7$ t 缓慢下降至 $7.493 5 \times 10^7$ t,降幅 7.15%。这一趋势与辽宁省产业结构调整密切相关,重工业产值占比从 2000 年的 68.2%降至 2003 年的 65.7%,大宗货物运输量增速同比下降 4.3%^[34]。得益于物流基础设施初步完善、运输组织集约化以及清洁能源的使用增加,隐含碳排放实现了稳步下降。2003—2014 年是高速增长期,从 $7.493 5 \times 10^7$ t 激增至 $1.568 4 \times 10^8$ t,增幅达 109.30%,年平均增长率 9.93%。这一迅猛增长主要受到两大政策利好的推动,其一是 2003 年国家实施东北老工业基地振兴战略,其二是中国在 2001 年加入 WTO 后,2014—2016 年进入政策强控下的显著下降期,其核心驱动力来自于国家层面启动的“大气污染防治行动计划”与“供给侧结构性改革”。2017—2022 年进入增长期,经济复苏与电商物流爆发式增长所带来的巨大货运需求,在一定程度上覆盖了前期产业结构调整的减排效果。2018 年启动的《推进运输结构调整三年行动计划》强力推

动大宗货物“公转铁”、“公转水”,以大连港、营口港为核心的多式联运体系日益完善,加之新能源物流车的推广和智慧物流平台的普及,其隐含碳排放曲线在 2022 年出现触顶回落的积极信号,可能预示着辽宁省物流业隐含碳排放量从高速增长向平稳发展过渡,这也与黑吉两省的发展趋势相吻合。

2.2 东三省物流业隐含碳排放量构成

由图 2 可知,东三省物流业直接碳排放量总体上呈现上升趋势,按排放量由高到低依次为辽宁省、黑龙江省、吉林省。物流业直接碳排放与物流业 GDP 的发展趋势一致^[34],进入 21 世纪以来,随着东北振兴战略的深入实施和“一带一路”倡议的持续推

进,东北区域物流网络不断完善,东三省物流产业规模持续扩大,能源消耗产生的直接碳排放量随之持续增长。辽宁省从最初的 $1.116\ 1\times 10^7\ \text{t}$ 上升至 2019 年峰值 $4.509\ 0\times 10^7\ \text{t}$,涨幅 304%;黑龙江省从 $6.437\ 7\times 10^6\ \text{t}$ 激增至 2016 年峰值 $2.891\ 8\times 10^7\ \text{t}$,涨幅达 349%;吉林省从 $4.276\ 0\times 10^7\ \text{t}$ 增加至 2015 年峰值 $2.117\ 0\times 10^7\ \text{t}$,涨幅高达 395%。到达峰值之后,黑吉两省(2017 年起)与辽宁省(2019 年起)的直接碳排放量均呈小幅下降。这一回落趋势与同期各省物流业 GDP 的下降趋势一致,验证了经济规模收缩对碳排放减少的关联性。

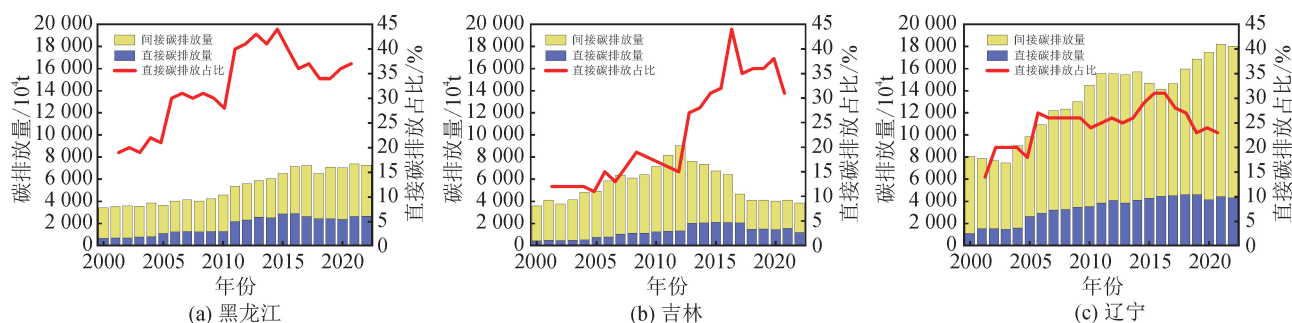


图 2 东三省物流业隐含碳排放构成

Fig. 2 Composition of embodied carbon emissions in the logistics industry of the three provinces in Northeast China

东三省物流业直接碳排放占比始终处于低位,黑吉两省的占比峰值达到 45%,而辽宁的占比峰值不足 35%,这一特征反映出物流行业作为第三产业,其碳排放结构高度依赖上下游产业的中间消耗,直接碳排放并非其主要碳源,印证了对物流业开展隐含碳排放核算的必要性。辽宁物流业直接碳排放占比低于黑吉两省,主要原因可能是其临海区位带来的运输结构优势。辽宁拥有大连、营口等重要港口,大宗货物运输中海运比例较高,而海运的单位碳排放强度远低于公路运输,从而显著降低了直接碳排放占比。黑吉两省作为内陆省份,货物运输更依赖公路货运,所以其直接碳排放占比相对偏高。

从演变趋势来看,研究期内东三省物流业直接碳排放占比总体上呈先波动上升而后下降的发展趋势。直接碳排放占比上升可能有以下两方面的原因:一方面是物流业自身高碳模式的锁定效应,区域电商经济与高端制造业发展带动的公路货运需求持续旺盛,而新能源物流车的普及与能效提升速度未能与之匹配,导致直接碳排放占比快速增长;另一方面,东三省能源消耗与上游工业的清洁化转型已初见成效,使得物流业的间接排放增速相对放缓。然而物流业自身的低碳进程未能与上游工业的绿色转型同步,导致了直接碳占比的相对升高。2008—

2012 年与 2015 年之后,东三省物流业直接碳排放占比出现了两次具有区域共性的下降。第一阶段 2008—2012 年的下降主要对应十一五中后期节能减排政策的强化与公路货运能效提升政策的推进。该阶段通过淘汰高排放车辆、推广节能驾驶与管理优化,降低了单位运输活动的直接燃料消耗,从而带动直接碳排放占比的初步下降。第二阶段的下降则与大气污染防治行动计划、公转铁密切相关。这一阶段大宗货物从公路向铁路、水路转移,直接减少了柴油货车的使用,其次加快物流领域电气化与清洁能源替代,例如港口岸电、园区电动车辆推广等,使部分直接排放转化为电力间接排放。

2.3 东三省物流业隐含碳排放强度

由图 3 知,研究期内东三省物流业隐含碳排放强度呈现出先降后升的演变趋势。黑吉辽三省隐含碳排放强度分别从 2000 年的 $14.52\ \text{t}/10^4\ \text{元}$ 、 $26.64\ \text{t}/10^4\ \text{元}$ 、 $19.51\ \text{t}/10^4\ \text{元}$ 降至 2018 年的 $6.01\ \text{t}/10^4\ \text{元}$ 、 $5.15\ \text{t}/10^4\ \text{元}$ 以及 2015 年的 $7.12\ \text{t}/10^4\ \text{元}$,降幅分别为 58.61%、80.67%、63.50%。这一成效得益于国家与地方层面推动的碳减排举措,例如多式联运体系的完善、新能源物流车的推广以及智慧物流平台的建设,共同驱动了能源利用效率的快速提升。

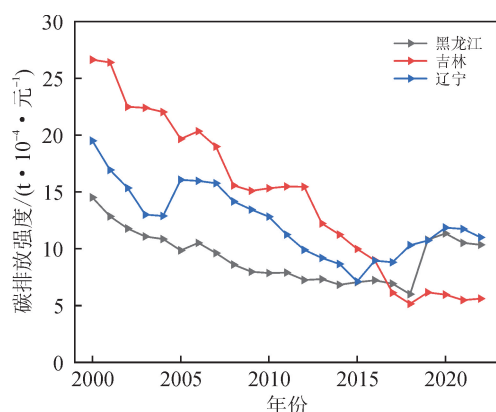


图3 东三省物流业隐含碳排放强度

Fig. 3 Embodied carbon emission intensity of the logistics industry of the three provinces in Northeast China

隐含碳排放强度降至低点后进入了反弹与分化期,黑吉两省在 2018 年后出现同步回升,这一现象背后存在多重动因。其一是技术边际效应递减,初期通过设备更新与管理优化带来的能效提升空间收窄,技术红利减弱。其二是物流总量与结构的矛盾,尽管“公转铁”等政策优化了长距离运输结构,但电商驱动下的公路货运需求激增,部分抵消了结构优化带来的减排效益。辽宁的反弹拐点则更早,始于 2015 年,这可能是由于区域产业结构差异的影响,辽宁省作为传统重工业基地,其钢铁、石化等上游高碳产业规模更大,物流需求与高耗能产业绑定更深。

表2 ADF 平稳性检验

Tab. 2 Augmented Dickey-Fuller test

时间序列数据	差分阶数	p	ADF	临界值		
				1%	5%	10%
黑龙江	0	0.921 7	-2.641 9	-3.769 7	-3.005 4	-2.642 5
	1	0.043 6	-0.326 1	-4.068 8	-3.127 1	-2.701 7
吉林	0	0.171 3	-2.301 8	-4.068 8	-3.127 1	-2.701 7
	1	0.000 0	-6.710 7	-4.068 8	-3.127 1	-2.701 7
辽宁	0	0.001 3	-4.021 6	-4.012 0	-3.104 1	-2.690 9

2.4.2 模型定阶及检验

利用 AIC 和 BIC 定阶准则判断参数 p 、 q 的值,通过遍历不同的参数组合,选择使信息准则值最小化的 p 、 q 组合作为最优模型阶数。最终得出黑龙江省最优模型为 ARIMA(1,1,0),吉林省最优预测模型为 ARIMA(1,1,0),辽宁省最优预测模型为 ARIMA(1,0,1),模型拟合优度见表 3。

黑龙江、吉林、辽宁三省的最佳 ARIMA 模型 Ljung-Box 检验的 p 值见表 3,检验值分别为 0.968 1、0.936 1、0.804 4,大于显著性水平 0.05,接受原假设,即模型的残差序列是白噪声序列,不存

2015 年后,其经济结构的路径依赖可能率先触发了碳排放强度的回调。2019 年以后三省隐含碳排放强度趋于平稳,最终稳定在 $10.5 \text{ t}/10^4 \text{ 元}$ (黑龙江)、 $6 \text{ t}/10^4 \text{ 元}$ (吉林)、 $11 \text{ t}/10^4 \text{ 元}$ (辽宁)上下浮动,且有小幅下降的趋势。

2.4 东三省物流业隐含碳排放预测

2.4.1 平稳性检验

ARIMA 模型要求数据序列是平稳序列,所以首先进行平稳性检验,如果原始序列是非平稳序列,则需要差分操作以消除趋势和季节性等影响,差分次数用字母 d 表示。由表 2 可知,黑龙江省原始数据 ADF 统计量为 -2.641 9,大于 10% 显著性水平的临界值 -2.642 5,存在单位根,且 p 值为 0.921 7,说明原始时间序列为非平稳,需要进行差分操作。一阶差分后 ADF 统计量降至 -0.326 1,小于 5% 显著性水平的临界值 -3.127 1, p 值为 0.043 6,小于给定的显著性水平 0.05,且,序列达到平稳状态,差分次数 $d=1$ 。同样的,吉林省原始数据是不平稳的时间序列,经过一阶差分后序列达到平稳状态,差分次数 $d=1$ 。反观辽宁省原始数据的 ADF 统计量为 -4.012 9,小于 1% 显著性水平的临界值, p 值为 0.001 3,小于给定的显著性水平 0.05,说明辽宁省原始数据平稳,无需进行差分操作,差分次数 $d=0$ 。

在显著的自相关关系,说明模型对数据相关性的捕捉较为充分,没有明显的相关信息被遗漏。

表3 最佳模型残差检验及拟合优度

Tab. 3 Residual diagnostic tests and goodness-of-fit for the optimal model

省份	最佳模型	Ljung-Box 检验值	拟合优度 R^2
黑龙江	(1,1,0)	0.968 1	0.938 2
吉林	(1,1,0)	0.936 1	0.913 4
辽宁	(1,0,1)	0.804 4	0.960 7

为了更加直观地展示残差的检验结果,东三省

最佳 ARIMA 模型残差序列的 ACF 图与 PACF 图见图 4,各滞后阶数下的残差自相关系数和偏自相关系数均落在 95% 置信区区间内,未表现出显著的自相关特征,说明模型合理,拟合效果理想。

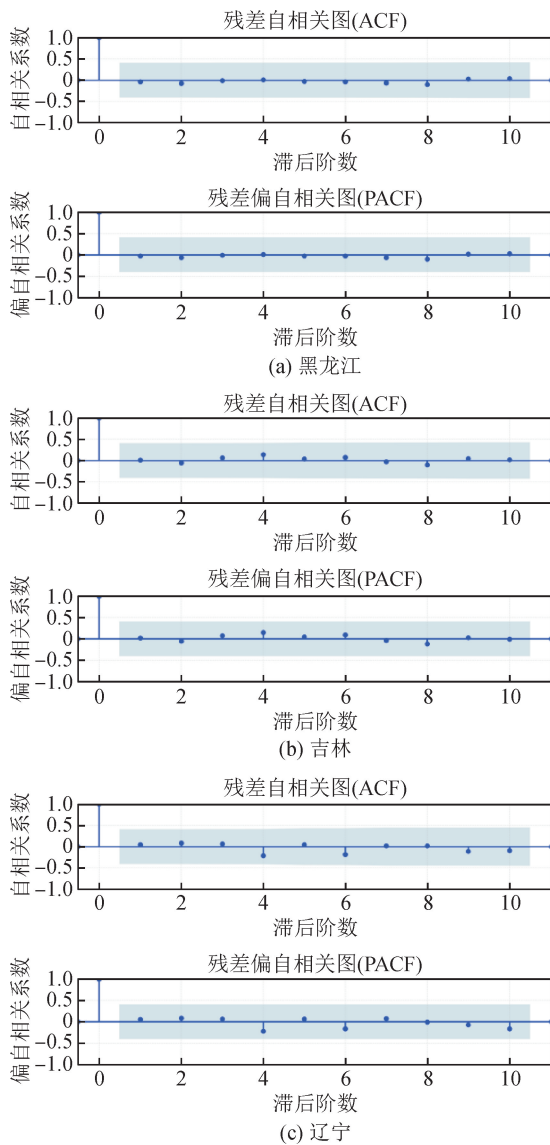


图 4 残差 ACF 与 PACF 图
Fig. 4 Residual ACF and PACF plots

2.4.3 预测结果

东三省最优 ARIMA 模型 2001—2022 年拟合值与实际值相对误差见表 4。结果表明 ARIMA 模型对东三省隐含碳排放序列的整体拟合效果良好,但是吉林省 2017 年的相对误差达到 0.19,主要原因是该年隐含碳排放量较 2016 年骤降 27.29%,导致基于历史线性趋势的 ARIMA 模型难以捕捉此次结构性突变。该突变的根源在于核算方法的数据基础变动,2017 年吉林省投入产出表中物流业对制造业的完全消耗系数较前一阶段下降 0.24,反映出该省制造业与物流业之间的技术经济关联趋弱以及供

应链效率提升,同时也表明投入产出表阶段性更新导致核算结果的突变,会显著影响时间序列的连续性。这一方面揭示了投入产出法在跨期比较中的局限性,另一方面也说明,外部政策或产业结构剧变可能导致隐含碳排放路径脱离线性演化规律,进而影响传统时间序列模型的拟合精度,但是吉林省最佳 ARIMA 模型的拟合优度达到 0.913 4,且其他年份的相对误差均处于较低水平,能够展现出比较好的预测效果。

表 4 拟合值与实际值相对误差

Tab. 4 Relative error between fitted values and actual values

年份	黑	吉	辽	年份	黑	吉	辽
2001	0.02	0.05	0.04	2012	0.03	0.06	0.02
2002	0.00	0.07	0.03	2013	0.05	0.12	0.01
2003	0.02	0.09	0.04	2014	0.03	0.00	0.01
2004	0.07	0.12	0.13	2015	0.07	0.06	0.07
2005	0.07	0.01	0.05	2016	0.09	0.01	0.02
2006	0.09	0.13	0.11	2017	0.01	0.19	0.03
2007	0.01	0.05	0.02	2018	0.10	0.01	0.07
2008	0.04	0.08	0.01	2019	0.09	0.11	0.01
2009	0.05	0.05	0.06	2020	0.01	0.02	0.04
2010	0.06	0.08	0.07	2021	0.05	0.07	0.02
2011	0.12	0.09	0.03	2022	0.01	0.04	0.02

未来研究可尝试通过逐年推算投入产出表提升长期序列的连贯性。

东三省最优 ARIMA 模型 2001—2022 物流业隐含碳排放预测结果见图 5。预测结果表明,2023—2027 年间,东三省物流业隐含碳排放量均呈下降趋势。降幅分别为 2.12%(黑龙江)、2.78%(吉林)、3.71%(辽宁),虽然降幅差距不大,但由于辽宁省物流业隐含碳排放的基数远高于黑吉两省,其下降趋势最为显著,预计排放总量将从 2023 年的 1.7355×10^7 t 下降至 2027 年的 1.6712×10^7 t,累计减排 6.43×10^6 t,而黑、吉两省各自的减排量均在 1×10^6 t 左右。

预测结果也印证了黑龙江、吉林两省物流业已逐步进入低碳转型的平台期与结构巩固阶段,减排动能趋于稳定。相比之下,辽宁省隐含碳排放量呈显著下降趋势的可能原因有以下三点:其一,辽宁作为沿海省份,港口群与多式联运体系比较完善,随着公转水、公转铁政策持续推进,运输结构低碳化改革潜力更大;其二,辽宁省重工业比重高,产业链长,伴随产业绿色升级与电气化,物流业隐含碳下降空间

更为明显;其三,区域物流枢纽的集约效应与政策协同,更容易形成规模减排。

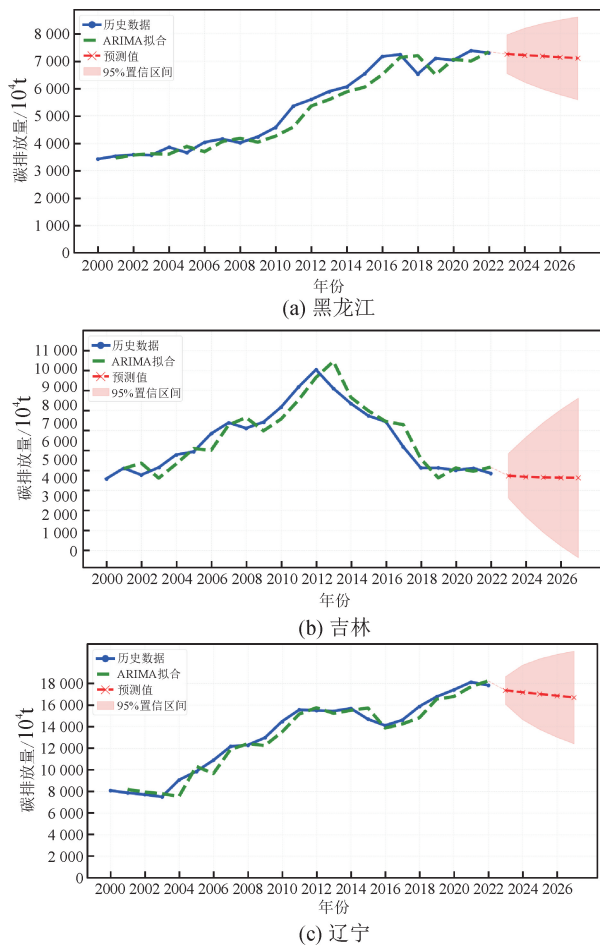


图5 东三省物流业隐含碳排放实际值及预测值

Fig. 5 Actual and predicted embodied carbon emissions in the logistics sector of the three northeastern provinces

3 结论与政策建议

3.1 结论

本文以东三省为研究对象,计算 2000—2022 年物流业隐含碳排放总量及其构成,分析隐含碳排放强度变化趋势,在此基础上采用 ARIMA 模型对 2023—2027 年隐含碳排放量做出预测,得到以下主要结论。

1) 2000—2022 年东三省物流业隐含碳排放具有区域分化特征,黑龙江、辽宁两省总体上呈持续上升趋势,吉林则呈现出先升后降的发展趋势。辽宁作为东北地区唯一的沿海省份,承担着东北地区大量的进出口货物转运任务,在研究期内,其物流业隐含碳排放量从黑吉两省的二倍逐渐攀升至近三倍。

2) 东三省物流业直接碳排放占隐含碳排放的比例呈波动上升趋势,但占比始终处于低位,黑吉两省的占比峰值达到 45%,而辽宁的占比峰值不足

35%,这是由于临海区位带来的运输结构优势,辽宁的大宗货物运输中海运比例较高,而显著降低了直接碳排放占比。

3) 东三省物流业隐含碳排放强度整体上呈现先降后升的发展趋势,展示出东三省物流业低碳发展成效显著,虽然近年受技术边际效应递减、能源回弹效应等因素影响,隐含碳排放强度出现回升趋势,但在 2019 年后逐渐稳定在相对合理的区间。

4) 预测结果显示,未来五年东三省物流业隐含碳排放量呈下降趋势,黑龙江、吉林两省受限于经济结构与技术进步等因素,进入低碳转型的平台期与结构巩固阶段,进一步减排难度大,下降幅度小。辽宁省因承担区域海运门户职能,物流业隐含碳排放总量基数大,凭借其结构性优势,未来减排潜力相对更大。

3.2 政策建议

1) 黑龙江省作为农业大省和对俄贸易枢纽,宜采取适应性减排策略。着力建设绿色跨境物流走廊,探索适用于寒地气候的低碳运输技术,同时加强对中小物流企业的转型支持,通过能效提升和清洁能源替代巩固现有减排成果。

2) 吉林省处于工业化中期阶段,应聚焦技术性减排突破。一方面要发挥汽车产业优势,加快推进货运车辆新能源化,完善充换电基础设施网络;另一方面要发展智慧仓储与精益物流,通过数字化手段提升供应链效率,突破内陆省份的减排瓶颈。

3) 辽宁省作为东北地区海运门户,其物流业隐含碳总量基数大但减排空间广阔。建议实施结构性减排路径,重点推进“近零碳港口”建设,通过岸电系统全覆盖和港作机械清洁化改造降低直接排放;同时深化“公转铁、公转水”集疏运体系改革,构建以大连港、营口港为核心的多式联运网络,从运输结构上实现根本性减排。

参考文献:

- [1] 刘国伟. 中国等 57 国将在 2030 年实现碳达峰 各国携手迈向碳中和[J]. 环境与生活, 2021(1): 8-23.
 - [2] Lamb W F, Wiedmann T, Pongratz J, et al. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16: 073005.
 - [3] 康文梅, 王谋. “双碳”目标下我国出口隐含碳的动态演进及驱动因素[J]. 统计与决策, 2025, 41(20): 69-74.
 - [4] 郭正权, 荣彤. 中国区域间贸易隐含碳转移时空格局演变分析[J]. 山西大学学报(哲学社会科学版), 2021, 44(6): 97-108.
- Guo Zhengquan, Rong Tong. Spatial and temporal

- pattern evolution of embodied carbon emissions in China's interregional trade[J]. *Journal of Shanxi University (Philosophy and Social Science Edition)*, 2021, 44(6):97-108.
- [5] 黄丽,张瑞琳. 中国省际隐含碳转移的空间关联研究——基于有向加权网络的分析[J]. *世界地理研究*, 2025, 34(11):140-153.
- Huang Li, Zhang Ruilin. Research on the embodied carbon transfer network of China's inter-provincial trade: based on directed weighted network[J]. *World Regional Studies*, 2025, 34(11):140-153.
- [6] 宋鹏,韩玲,晋雨萱,等. 我国省域碳减排责任核算与碳排放权分配方案——基于公平和效率视角[J]. *统计研究*, 2025, 42(10):65-79.
- Song Peng, Han Ling, Jin Yuxuan, et al. China's provincial responsibility of carbon emission reduction and carbon emission rights allocation scheme: based on fairness and efficiency[J]. *Statistical Research*, 2025, 42(10):65-79.
- [7] 肖红,李鑫汝,许荟珍,等. 成渝城市群物流业集聚对物流业碳排放的时空异质性影响研究[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(1):53-60, 81.
- Xiao Hong, Li Xinru, Xu Yunzhen, et al. Spatial-temporal heterogeneity impact of logistics industry agglomeration on carbon emissions from logistics industry in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(1):53-60, 81.
- [8] 邢会,安鹏钊,李元杰,等. 京津冀区域间贸易隐含碳测算及产业转移贡献度分析[J]. *环境科学与技术*, 2025, 48(8):213-224.
- Xing Hui, An Pengzhao, Li Yuanjie. Measurement of embodied carbon in Beijing-Tianjin-Hebei Inter-regional trade and analysis of the contribution of industries transfer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 48(8):213-224.
- [9] 康彦霞,马忠. 黄河流域省区隐含碳排放及其碳转移研究[J]. *资源开发与市场*, 2022, 38(8):930-938.
- Kang Yanxia, Ma Zhong. Embodied carbon emission and carbon transfer at the provincial level of the Yellow River Basin[J]. *Resources Development & Market*, 2022, 38(8):930-938.
- [10] 张永姣,王耀辉. 基于省际贸易隐含碳排放视角的流域生态补偿测算——以黄河流域为例[J]. *生态经济*, 2023, 39(2):26-33.
- Zhang Yongjiao, Wang Yaohui. The calculation of ecological compensation in the basin based on the perspective of the embodied carbon emissions of inter-provincial trade: taking the yellow river basin as an example[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(2):26-33.
- [11] 何函芮,孟彦菊,郑瑞杰,等. 城市贸易隐含碳转移及碳补偿研究——以珠江流域为例[J]. *生态学报*, 2026, 46(10):5176-5191.
- He Hanrui, Meng Yanju, Zheng Ruijie, et al. Embodied carbon transfer and compensation in urban trade: a case study of the Pearl River Basin. *Ecological Economy* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(10):5176-5191.
- [12] 张天骄,许铃川,温璐歌. 基于多区域投入产出模型的长江经济带隐含碳排放研究[J]. *企业经济*, 2022, 41(11):142-151.
- Zhang Tianjiao, Xu Qianchuan, Wen Luge. Research on embodied carbon emissions of Yangtze River Economic Belt based on multi-regional input-output model[J]. *Enterprise Economy*, 2022, 41(11):142-151.
- [13] 王兆华,王烁涵,李浩,等. 碳达峰约束下中国工业隐含碳流动网络结构及演化[J]. *管理评论*, 2025, 37(4):3-16.
- Wang Zhao Hua, Wang Shuo Han, Li Hao, et al. The structure and evolution of industrial embodied carbon emission flow network in China under the constraint of carbon peaking[J]. *Management Review*, 2025, 37(4):3-16.
- [14] 杨玮,郭嫚雨,龙涛,等. 中国采矿业隐含碳流动时空演变格局及减排路径[J]. *金属矿山*, 2025(6):284-292.
- Yang Wei, Guo Manyu, Long Tao, et al. Spatial-temporal evolution patterns and emission reduction pathways of embodied carbon flow in China's mining industry[J]. *Metal Mine*, 2025(6):284-292.
- [15] 李志信,王瑶,贺廉政,等. 乡村建筑业碳排放定量分析与优化策略[J]. *建筑科学*, 2025, 41(10):27-34, 45.
- Li Zhixin, Wang Yao, He Lianzheng, et al. Quantitative analysis and optimization strategies for carbon emissions in rural construction industry[J]. *Building Science*, 2025, 41(10):27-34, 45.
- [16] 史俊晖,戴小文. 我国省域农业隐含碳排放及其驱动因素时空动态分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(8):169-180.
- Shi Junhui, Dai Xiaowen. Spatial dynamics of agricultural embodied carbon emissions in provinces of CHINA and the related driving factors[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(8):169-180.
- [17] 郭嘉利,李屹然,胡晓. 中美进出口贸易的隐含碳分析及对我国的启示——基于生命周期评估模型[J]. *现代商业*, 2024(5):24-28.
- [18] 鄢慧丽,熊浩. 基于行业剥离的物流增加值和物流费用测算[J]. *统计与决策*, 2018, 34(24):35-38.
- Yan Huili, Xiong Hao. Calculation of logistics added value and logistics cost based on industry dissection[J]. *Statistics & Decision*, 2018, 34(24):35-38.
- [19] Huang Qiu, Ling Jiaojiao. Measuring embodied carbon

- dioxide of the logistics industry in China: based on industry stripping method and input-output model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 52780-52797.
- [20] 陈艺骋,李祥龙,张园园. 责任共担视角下中国省域物流业碳排放时空演变分析[J]. *环境科学*, 2025(5): 2874-2885.
- Chen Yicheng, Li Xianglong, Zhang Yuanyuan. Analysis of the Temporal and spatial evolution of carbon emissions in the provincial logistic industry in China from the perspective of shared responsibility[J]. *Environmental Science*, 2025(5): 2874-2885.
- [21] 李想. 基于投入产出表和假设提取法的物流业隐含碳排放分析[J]. *物流工程与管理*, 2023, 45(12): 1-6, 19.
- Li Xiang. Implicit carbon emission analysis of logistics industry based on input-output table and hypothesis extraction method[J]. *Logistics Engineering and Management*, 2023, 45(12): 1-6, 19.
- [22] 王丽萍,刘明浩. 基于投入产出法的中国物流业碳排放测算及影响因素研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 195-206.
- Wang Liping, Liu Minghao. Carbon emission measurement for China's logistics industry and its influence factors based on input-output method[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 195-206.
- [23] 卢大江. 我国物流业碳排放转移测算与比较[J]. *交通运输部管理干部学院学报*, 2020, 30(1): 22-26.
- Lu Dajiang. Calculation and comparison on the carbon emissions transfer of China's logistics industry[J]. *Journal of Transport Management Institute of Ministry of Transport*, 2020, 30(1): 22-26.
- [24] 代银帅. 省域物流业碳排放测算及碳转移研究[J]. *产业创新研究*, 2024(12): 48-50.
- [25] 朱怡俊. 物流业碳排放评估及其影响因素分析——以江苏省为例[J]. *产业创新研究*, 2023(12): 79-81.
- [26] 高晓明,许文峰,邱浪,等. 基于 VMD-LSTM 的高速公路综合场站碳排放预测研究[J]. *西安理工大学学报*, 2025, 41(4): 499-508.
- Gao Xiaoming, Xu Wenfeng, Qiu Lang, et al. Carbon emission prediction of expressway integrated station based on VMD-LSTM[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2025, 41(4): 499-508.
- [27] 宋永朝,舒秦,金程容,等. 中国区域交通碳排放预测与碳达峰路径规划[J]. *环境科学*, 2025(4): 1995-2008.
- Song Yongchao, Shu Qin, Jin Chengrong, et al. Regional transport carbon emission forecasting and peak carbon pathway planning in China [J]. *Environmental Science*, 2025(4): 1995-2008.
- [28] 梁湘瑶,何正磊. 中国造纸工业隐含碳排放测算及其影响因素分析[J]. *中国造纸*, 2025, 44(2): 72-80.
- Liang Xiangyao, He Zhenglei. Embodied carbon accounting and influencing factors analysis of China's paper industry[J]. *China Pulp & Paper*, 2025, 44(2): 72-80.
- [29] 王康丽,郝淑丽. 中国对 OECD 纺织服装出口贸易隐含碳测算研究[J]. *北京服装学院学报(自然科学版)*, 2025(4): 105-112.
- Wang Kangli, Hao Shuli. Research on the calculation of embodied carbon in China's textile and garment export trade to OECD[J]. *Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition)*, 2025(4): 105-112.
- [30] 刘慧文,刘学,陈甄妮. 复杂网络视角下中国省际贸易隐含碳排放及区域公平研究[J]. *生态经济*, 2025, 41(12): 22-30.
- Liu Huiwen, Liu Xue, Chen Zhenni. Research on embodied carbon emissions and regional equality in China's inter-provincial trade from the perspective of complex networks[J]. *Ecological Economy*, 2025, 41(12): 22-30.
- [31] 黄璆. 我国物流业投入产出表的编制方法[J]. *统计与决策*, 2019, 35(16): 5-9.
- Huang Qiu. Compilation method of input-output table of China's logistics industry[J]. *Statistics & Decision*, 2019, 35(16): 5-9.
- [32] 张伟杰,唐晓旭,王肖欣,等. 碳排放核算方法综述[J]. *工程质量*, 2024, 42(增刊 2): 167-169.
- Zhang Weijie, Tang Xiaoxu, Wang Xiaoxin, et al. Overview of carbon emission accounting methods [J]. *Engineering Quality*, 2024, 42(S2): 167-169.
- [33] 包耀东,李晏墅,张世忠. 长三角区域物流业碳排放规模及其影响因素研究[J]. *生态经济*, 2020, 36(11): 25-31, 53.
- Bao Yaodong, Li Yanshu, Zhang Shizhong. Study on the scale of carbon emission of logistics industry and its influencing factors in the Yangtze River Delta [J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(11): 25-31, 53.
- [34] 王昭,吴金卓. 东北三省交通行业碳排放脱钩状态及驱动因素分析[J]. *交通科技与经济*, 2024, 26(5): 73-80.
- Wang Zhao, Wu Jinzhao. Decoupling status and driving factors of carbon emissions for the transportation industry in three northeastern provinces of China [J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2024, 26(5): 73-80.

(责任编辑 王绪迪)