



中国省际物流业碳排放的空间效应及其传导机制

刘琦^{1,✉}, 范鑫坤²

1. 湖南工业大学经济与贸易学院, 株洲 412007; 2. 湖南工业大学商学院, 株洲 412007

摘 要 物流业是我国仅次于工业、建筑业第三大碳排放源, 研究省际物流资源要素的空间效应及其传导机制可以为物流业低碳转型发展提供科学依据。运用 GeoDa 软件分析我国 2013—2020 年 30 个省物流业碳排放时空关联性及其局部空间差异波动性, 将 STIRPAT 模型和 EKC 模型相结合探究我国省际物流业碳排放影响因素对碳排放的空间效应并明晰其传导机制。结果表明, 我国物流业碳排放量呈现出“东高西低”的空间分布特征; 省际物流业碳排放聚集分布的二元结构明显, 呈现“高一高”和“低—低”集聚为主的空间分布特征; 我国省际物流业碳排放存在空间溢出性特征, 对本地区物流业碳排放产生正向促进作用的影响因素由强至弱依次为物流业的能源消耗量、产业规模、基础设施, 毗邻地区对其产生正向影响的因素是物流业基础设施; 物流业基础设施在直接效应与间接效应下对碳排放均产生显著的正向影响, 物流业的产业规模和能源消耗量仅在直接效应下对碳排放产生正向影响。我国物流业碳排放的空间集聚、区域差异的形成与演变是在省际物流业的产业规模、能源消耗量、基础设施等多种物流业资源要素协同作用下产生的结果, 据此提出省际物流业“协同降碳”建议, 推动我国物流业的低碳转型。

关键词 物流业碳排放; 空间效应; 传导机制; 空间杜宾面板数据模型

2022 年我国社会物流总额达 3.476×10^{15} 元, 同比增长 3.4%, 物流需求稳定增长的同时也加剧了物流业碳排放。目前中国物流业能耗已占全社会总能耗的 20% 以上, 是我国碳排放增长最快的产业之一^[1]。我国“十四五”现代物流发展规划将绿色物流作为发展方向, 各级政府均积极推进本地区物流业低碳转型, 探究我国省际物流业碳排放影响因素对碳排放的空间效应, 明晰其对碳排放的传导机制, 对我国物流业实现碳中和战略目标至关重要。

国内外学者对物流业碳排放空间效应研究中, 研究对象多为单位换算周转量碳排放量和交通运输碳排放效率等, 研究方法多为社会网络分析法等。GREENING 等^[2] (1999) 通过自适应权重方法分析了 10 个 OECD 国家单位货运周转量碳排放量的时间变化规律; REQUIA 等^[3] (2015) 使用空间自相关分析和高/低聚类分析来表征巴西联邦区交通运输碳排放的空间格局。邵海琴和王兆峰^[4] (2021) 运用社会网络分析法探究中国省域交通碳排放效率的空间关联网络结构; 张帅等^[5] (2019) 采用社会网络分析法研究中国 29 个省域交通运输碳排放的网络结构演变、空间分布及聚集特征。对物流业碳排放的传导机制研究中, 学者重点关注的是各影响因素对本地区物流业碳排放产生的直接影响, 忽略了区域之间存在的空间关联性, 没有深入研究物流业碳排放影响因素的溢出效应以及辐射作用。XU 和 LIN^[6] (2015) 构建非参数加性回归模型, 采用省级面板数据探究影响中国交通运输业碳排放的主要因素; 姚冠新等^[7] (2017) 构建 STIRPAT 模型探究影响农村物流碳排放的因素, 发现地区经济是影响农村物流碳排放的首要因素; 马飞等^[8] (2021) 运用面板 Tobit 模型对中国省际物流业碳排放绩效驱动因素进行探索; 刘琦和范鑫坤^[9] (2023) 基于省级面板数据, 运用逐步回归模型探究我国物流业碳排放影响因素。

现有物流产业研究文献的研究对象多是集中在京津冀等局部区域, 研究方法多是采用社会网络分析、基准回归模型等方法, 研究侧重于关注本地区物流业碳排放影响因素产生的直接影响, 鲜有物流业碳排放影响因素在空间上的溢出效应以及传导作用的研究成果。鉴于此, 本研究选取 2013—2020 年我国 30 个省(市、区, 不含西藏和港、澳、台) 作为研究对象, 运用 GeoDa 软件分析我国物流业碳排放时空关联性及其局部空

收稿日期: 2023-09-28; 录用日期: 2023-12-19

基金项目: 2022 年湖南省教育厅资助项目 (22A0405); 湖南工业大学研究生科研创新资助项目 (CX2341)

第一作者: 刘琦 (1977—), 女, 博士, 讲师, 20429781@qq.com; ✉通信作者

间差异波动性，将 STIRPAT 模型和 EKC 模型相结合探究我国省际物流业碳排放影响因素对碳排放的空间效应并明晰其传导机制，对推动我国物流业低碳发展将具有参考价值。

1 指标构建与研究方法

1.1 指标选取及数据来源

本研究结合相关研究成果，建立影响物流业碳排放的因素体系，具体解释说明如表 1 所示，数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境生态环境统计年报》《交通运输行业发展统计公报》及 30 个省统计年鉴。

表 1 指标选取说明

Table 1 Index selection instructions

变量名称	变量符号	解释说明	单位
物流业碳排放量 ^[10]	Cc	各省物流业二氧化碳排放量	10 ⁸ t
物流业货物周转量 ^[11]	FRM	各省物流业货物周转量	10 ⁸ t·km
物流业能源消耗量 ^[12]	EC	各省物流业 8 类主要能源折算为标准煤消耗量	10 ⁴ t
物流业基础设施 ^[13]	Infrastructure	各省物流业公路、铁路、水路和航运营业里程	km
物流业产业规模 ^[14]	IS	各省物流业增加值	10 ⁸ 元
科技投入经费 ^[15]	R&D	各省研究与试验发展经费	10 ⁸ 元
生产总值 ^[16]	GDP	各省生产总值	10 ⁸ 元
人口发展 ^[17]	P	各省年末常住人口总数	10 ⁴ 人

1.2 物流业碳排放的测算方法

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 计算碳排放量的“方法 1”是根据燃烧的燃料数量以及缺省排放因子来估算 CO₂ 排放^[18]。该方法相对简单且易于操作，滕王滕菲等^[19] (2023) 和姜宛贝等^[20] (2020) 国内学者都采用该方法估算我国的二氧化碳排放量。本研究也采用 IPCC 提供的“方法 1”来估算我国 30 个省 2013—2020 年的物流业碳排放数据，具体估算方法如式 (1) 所示。

$$CO_2 = \sum_{i=1}^{14} CO_{2,i} = \sum_{i=1}^{14} E_i \times NCV_i \times CEF_i \quad (1)$$

式中：CO₂ 表示待估算的二氧化碳排放量；*i* 代表煤炭等 14 种能源^[21]；E_{*i*} 代表各种能源的燃烧消费量；NCV_{*i*} 为各种能源的平均低位发热量，用于将各种能源消费量转化为能源单位 (TJ)；CEF_{*i*} 表示各种能源的二氧化碳排放因子^[22]，其计算公式如式 (2) 所示。

$$CEF_i = CC_i \times COF_i \times (44/12) \quad (2)$$

式中：CC_{*i*} 为各种能源的碳含量；COF_{*i*} 为各种能源的碳氧化因子，通常该值为 1，表示能源被完全氧化，本研究借鉴陈诗—^[23] (2011) 设定煤炭、焦炭为 0.99，其余为 1；(44/12) 为二氧化碳与碳的分子量比率^[24]。具体参数值如表 2 所示。

1.3 模型设计

1) 探索性空间数据分析方法。探索性空间数据分析分为全局与局部空间自相关，文献中常见的是以 Moran's I 指数度量经济体的空间自相关性^[25]，分别用来测度物流业碳排放的空间整体分布模式和局部空间分布关系，测算矩阵采用 Queen 邻接矩阵^[26]，其具体表达式如式 (3) 所示。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (3)$$

式中：*n* 为研究对象的观测单元总数，ω_{*ij*} 为构建的空间权重矩阵，用于度量省份 *i* 与省份 *j* 之间的距离；

表 2 碳排放量计算方法中涉及的各种指标及参数值

Table 2 Various indexes and parameter values involved in the calculation method of carbon emission

能源名称	NCV/(kJ·kg ⁻¹)	CEF/(kg·TJ ⁻¹)	能源名称	NCV/(kJ·kg ⁻¹)	CEF/(kg·TJ ⁻¹)
煤炭	20 908	95 977	汽油	43 070	70 033
焦炭	28 435	105 996	煤油	43 070	71 500
焦炉煤气	17 981	44 367	柴油	42 652	74 067
高炉煤气	3 855	259 600	燃料油	41 816	77 367
转炉煤气	8 585	181 867	液化石油气	50 179	63 067
其他煤气	18 273.6	44 367	天然气	38 931	56 100
原油	41 816	73 333	液化天然气	44 200	64 167

注：NCV数据来源于《中国能源统计年鉴2017》；CEF数据来自联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) (2006)。

x_i 、 x_j 分别表示省份 i 和省份 j 的物流业碳排放量，Moran's I 指数的取值在 $[-1,1]$ ，正值表示变量在空间上存在着正相关，负值表示变量在空间上负相关，取值为 0 则表示变量在空间上无相关性^[27]。

在全球 Moran's I 指数确定观测单元在整体区域内存在空间相关性之后，运用局部 Moran's I (也可称为 LISA) 指数对研究对象的局部区域内的空间集聚情况进行检验，具体公式如式 (4) 所示。

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma_x} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \frac{(x_j - \bar{x})}{\sigma_x} \quad (4)$$

式中： σ_x 为该变量的方差，其余字母对应含义与前文相同。 I_i 为正表示某一地区的高 (低) 值周围都是高 (低) 值，为负表示高 (低) 值的周围是低 (高) 值。

2) 空间杜宾面板数据模型设定。将 STIRPAT 模型和 EKC 模型相结合来检验各省资源要素对物流业碳排放空间效应的影响^[28]。由于经济系统和碳排放系统具有复杂性和相关性^[29]，在实际回归模型中，除了包括物流业货物周转量 (FRM)、物流业能源消耗量 (EC)、物流业基础设施 (Infrastructure)、物流业产业规模 (IS) 等核心解释变量外，还加入了科技投入经费 (R&D)、生产总值 (GDP) 和人口发展 (P) 等控制变量，将 STIRPAT 模型扩展，具体公式如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} \text{Ln}C_{it} = & \alpha_{it} + \beta_{1it}\text{Ln}FRM + \beta_{2it}\text{Ln}EC + \beta_{3it}\text{Ln}Infrastructure + \\ & \beta_{4it}\text{Ln}IS + \beta_{5it}\text{Ln}GDP + \beta_{6it}\text{Ln}R\&D + \beta_{7it}\text{Ln}P + \mu_t + \phi_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中： i 、 t 分别表示样本和时间， α_{it} 为常数项， $\beta_{1it} \sim \beta_{7it}$ 为对应变量的回归系数， μ_t 表示时间固定效应，用来控制从时间层面不随地区变化的影响因素， ϕ_i 表示地区固定效应，通过去均值消除不随时间变化的地区变量。为更客观地检验我国物流业碳排放空间相关性和异质性，考察因变量受到本地区自变量及毗邻地区因变量和自变量的影响，以 STIRPAT 扩展模型为基础，构建含有空间滞后因变量和空间滞后自变量的空间杜宾面板数据模型，具体模型设计如式 (6) 所示。

$$\begin{aligned} \text{Ln}C_{it} = & \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}C_{jt} + \text{Ln}\alpha + \beta_1 \text{Ln}FRM_{it} + \beta_2 \text{Ln}EC_{it} + \beta_3 \text{Ln}IS_{it} + \beta_4 \text{Ln}Infrastructure_{it} + \beta_5 \text{Ln}R\&D_{it} + \\ & \beta_6 \text{Ln}GDP_{it} + \beta_7 \text{Ln}P_{it} + \epsilon_{it} + \mu_t + \phi_i + \gamma_1 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}FRM_{jt} + \gamma_2 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}EC_{jt} + \gamma_3 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}IS_{jt} + \\ & \gamma_4 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}Infrastructure_{jt} + \gamma_5 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}R\&D_{jt} + \gamma_6 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}GDP_{jt} + \gamma_7 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Ln}P_{jt} \end{aligned} \quad (6)$$

式中：其他字母含义与上文解释相同， δ 是量化这种空间依赖性的参数， α 为常数项， γ 是量化解释变量空间影响的系数， W_{ij} 为构建的空间邻接矩阵中的元素， ϵ_{it} 为随机扰动项。

2 结果与分析

2.1 物流业碳排放时空演化分析

1) 全国物流业碳排放总量分析。根据式 (1) 和式 (2) 计算得出我国 2013—2020 年物流业碳排放总量及增

长率，结果如图 1 所示。2013 年到 2019 年，我国物流业碳排放呈现出明显的增长趋势，从 2013 年的 5.97×10^8 t 增长到 2019 年的 7.63×10^8 t，随后在 2020 年出现小幅下降，2020 年的中国物流业碳排放总量为 6.88×10^8 t，相比 2019 年的中国物流业碳排放总量下降了 0.76×10^8 t。我国物流业碳排放增长率只有 2013、2020 年为负数，其他年间增长率均为正，整体呈现先增长后下降的循环趋势，增长率从 2013 年的 -6.82% ，增长到 2016 年的 5.28% ，再下降到 2020 年的 -9.91% 。总体而言，我国物流业碳排放总量从 2013—2020 年增长了 0.9×10^8 t，相对于工业的碳排放量而言，整体增长缓慢。

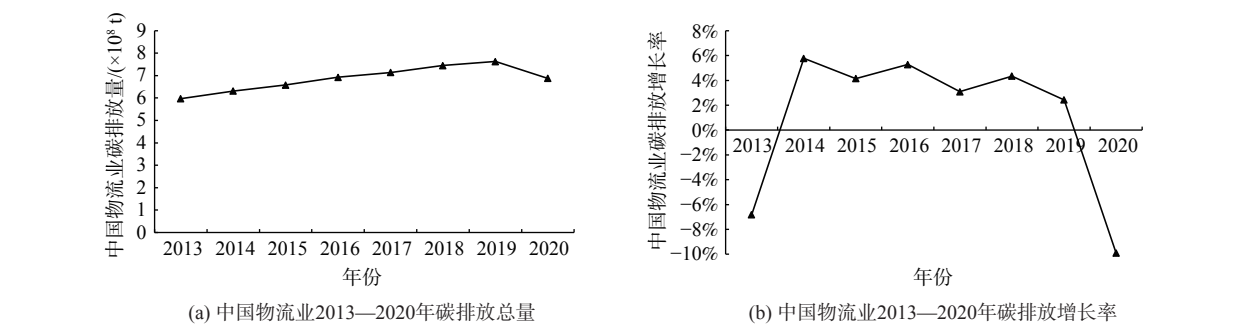


图 1 中国物流业 2013—2020 年碳排放总量及增长率

Fig. 1 Total carbon emissions and growth rate of China's logistics industry from 2013 to 2020

2) 区域物流业碳排放量时空演化分析。按照地理位置、经济发展水平等综合因素将 30 个省划分为东部、中部和西部三大区域^[30]，整理得到 8 年间区域物流业碳排放情况，如表 3 所示。2013—2020 年我国物流业整体碳排放量呈现出东部高、西部低的特征，其中，东部地区的物流业碳排放量接近中部和西部的总和，整体上看，物流业碳排放量与区域经济发展水平基本相匹配。

运用 ArcGIS10.8 对我国省际物流业碳排放进行空间可视化，分析我国 30 个省的物流业碳排放水平特征和空间分布趋势，分布情况如表 4 所示。2013 年广东省物流业碳排放量最高，上海市、山东省、辽宁省、江苏省、湖北省、浙江省、内蒙古自治区、河南省和湖南省等省份物流业碳排

表 3 中国物流业 2013—2020 年碳排放量区域描述统计

Table 3 Regional Description and statistics of carbon emissions of China's logistics industry from 2013 to 2020

年份	×10 ⁸ t		
	东部	中部	西部
2013	3.048 9	2.035 1	1.095 2
2014	3.166 2	2.166 2	1.204 4
2015	3.260 6	2.272 4	1.274 1
2016	3.473 0	2.277 2	1.415 8
2017	3.620 3	2.317 6	1.455 4
2018	3.660 5	2.323 4	1.466 0
2019	3.742 1	2.373 0	1.516 1
2020	3.267 5	2.197 6	1.410 2

表 4 2013 年、2016 年及 2020 年中国物流业碳排放水平分布情况

Table 4 Distribution of carbon emission levels in China's logistics industry in 2013, 2016 and 2020

年份	高碳排放区	中碳排放区	低碳排放区
2013	广东省	上海市、山东省、辽宁省、江苏省、湖北省、浙江省、内蒙古自治区、河南省、湖南省	黑龙江省、北京市、云南省、河北省、安徽省、福建省、山西省、吉林省、重庆市、新疆维吾尔自治区、陕西省、广西壮族自治区、四川省、贵州省、江西省、甘肃省、天津市、海南省、宁夏回族自治区、青海省
2016	广东省、上海市	江苏省、山东省、辽宁省、湖北省、四川省、浙江省、湖南省、河南省、黑龙江省、北京市	福建省、云南省、安徽省、新疆维吾尔自治区、河北省、山西省、重庆市、内蒙古自治区、广西壮族自治区、吉林省、贵州省、陕西省、江西省、甘肃省、天津市、海南省、宁夏回族自治区、青海省
2020	广东省、江苏省	上海市、湖北省、山东省、辽宁省、湖南省、河南省、四川省、浙江省、云南省、福建省	安徽省、江西省、北京市、重庆市、内蒙古自治区、广西壮族自治区、新疆维吾尔自治区、贵州省、黑龙江省、河北省、山西省、陕西省、吉林省、甘肃省、天津市、海南省、青海省、宁夏回族自治区

放量次之。2016年广东省仍然是物流业碳排放量最高的地区,并且上海市、四川省、北京市和黑龙江省物流业碳排放呈增长趋势。因受疫情影响,2020年全国各省际物流业碳排放量相较往年呈下降趋势。由于不同省际物流作业量不同,其碳排放量在不同年份呈现差异性,山东省、湖北省、湖南省、河南省、辽宁省、浙江省和广东省等地区8年间物流业碳排放量一直处于较高水平,海南省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区和甘肃省等地8年间的物流业碳排放量处于较低水平。2020年北京市由中碳排放区变为低碳排放区,可能原因是2018年北京市发布《北京市推进运输结构调整三年行动计划(2018—2020年)》,通过调整运输结构逐渐减少了物流业碳排放量。

考虑到我国省际物流作业量具有差异性,本研究进一步分析省际单位货物周转二氧化碳排放量(各省物流业碳排放量/各省物流业货物周转量)^[31],以深入探究省际物流业碳排放量差异特征。根据式(1)、式(2)得出的物流业碳排放量,结合我国30个省统计年鉴的物流业货物周转量,计算得出我国物流业2013—2020年间单位货物周转二氧化碳排放量及8年间平均单位货物周转二氧化碳排放量变化情况,如表5和图2所示。

表5 中国物流业2013—2020年单位货物周转二氧化碳排放量

省份	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
北京市	3.064 3	3.284 7	3.671 9	3.582 7	3.629 7	3.514 3	3.107 5	2.171 5
天津市	0.153 0	0.259 9	0.371 5	0.411 0	0.449 5	0.438 8	0.398 7	0.346 4
河北省	0.156 7	0.132 9	0.141 4	0.162 7	0.135 9	0.133 5	0.140 9	0.108 8
山西省	0.501 8	0.479 0	0.551 4	0.547 9	0.484 3	0.425 4	0.396 1	0.261 3
内蒙古自治区	0.585 8	0.583 6	0.637 3	0.423 0	0.365 2	0.325 5	0.405 2	0.396 6
辽宁省	0.299 9	0.317 3	0.322 7	0.318 7	0.307 2	0.358 2	0.421 2	0.621 8
吉林省	0.009 9	0.969 0	1.171 0	1.079 9	0.967 5	0.593 7	0.564 9	0.531 6
黑龙江省	1.035 7	1.176 3	1.384 8	1.427 4	1.215 5	0.987 9	0.980 9	0.875 6
上海市	0.229 1	0.218 2	0.218 6	0.245 4	0.207 5	0.179 3	0.177 2	0.134 0
江苏省	0.334 2	0.349 7	0.547 8	0.500 9	0.445 9	0.474 9	0.438 6	0.424 9
浙江省	0.307 2	0.293 1	0.300 9	0.303 8	0.305 7	0.260 9	0.226 2	0.237 6
安徽省	1.493 3	1.511 4	0.197 1	0.190 7	0.192 8	0.193 1	0.215 0	0.209 3
福建省	0.458 2	0.409 6	0.378 6	0.361 7	0.342 3	0.322 0	0.320 3	0.268 4
江西省	0.350 4	0.342 2	0.379 2	0.370 2	0.357 0	0.383 4	0.485 6	0.465 5
山东省	0.359 0	0.463 7	0.465 3	0.459 4	0.466 9	0.442 2	0.443 5	0.337 6
河南省	0.327 4	0.337 4	0.387 1	0.360 6	0.324 0	0.357 5	0.368 3	0.375 6
湖北省	0.563 7	0.513 1	0.513 4	0.599 9	0.597 4	0.574 1	0.685 5	0.668 0
湖南省	0.546 1	0.611 4	0.730 3	0.727 8	0.724 6	0.764 6	1.336 2	1.312 1
广东省	0.459 2	0.391 1	0.417 2	0.311 1	0.246 4	0.247 2	0.245 3	0.229 0
广西壮族自治区	0.362 9	0.456 0	0.450 7	0.441 6	0.444 2	0.422 2	0.508 0	0.412 1
海南省	0.436 1	0.386 1	0.506 5	0.539 7	0.698 9	0.664 1	0.363 5	0.166 6
重庆市	0.717 0	0.593 8	0.675 9	0.657 6	0.607 7	0.510 0	0.524 5	0.506 7
四川省	0.650 8	0.935 1	0.937 0	1.252 0	1.232 3	1.117 4	1.271 8	1.151 2
贵州省	1.004 6	0.952 1	1.082 6	1.109 8	0.869 8	0.860 2	1.339 1	1.337 9
云南省	1.445 8	1.540 0	1.431 5	1.398 5	1.245 4	1.295 0	1.797 8	1.686 3
陕西省	0.433 2	0.484 1	0.480 6	0.460 4	0.442 9	0.433 6	0.495 1	0.398 5
甘肃省	0.438 1	0.420 7	0.448 2	0.453 1	0.409 3	0.354 2	0.344 1	0.361 1
青海省	0.581 8	0.552 3	0.684 3	0.737 3	0.760 9	0.799 8	0.811 4	1.045 2
宁夏回族自治区	0.381 1	0.419 3	0.441 6	0.463 5	0.527 7	0.489 3	0.497 4	0.439 1
新疆维吾尔自治区	0.616 0	0.577 3	0.733 9	0.658 8	0.607 5	0.456 0	0.513 2	0.437 3

由表 5 可知, 2013—2020 年我国 30 个省的单位货物周转二氧化碳排放均呈现波动变化趋势, 且差异较大。其中北京市单位货物周转二氧化碳排放量最大, 可能原因是《北京市“十三五”时期物流业发展规划》、《北京物流专项规划》等实施以来, 北京市进行了大范围的公铁路运输线路、大型物流基地、物流园区以及众多配送中心等物流基础设施建设, 直接碳排放以及长期运营过程中产生的隐性碳排放, 都导致物流业碳排放量的增加。

由图 2 可知, 北京市平均单位货物周转二氧化碳排放量最大, 达到了 $3.305\ 6\ \text{t}\cdot 10^{-4}\ \text{t}\cdot \text{km}$, 河北省平均单位货物周转二氧化碳排放量最小, 为 $0.136\ 9\ \text{t}\cdot 10^{-4}\ \text{t}\cdot \text{km}$ 。除河北省外, 上海市、浙江省和广东省等地区的平均单位货物周转二氧化碳排放量也较小, 可能原因是沿海省份货物周转主要靠水运实现, 水运相对于公路和铁路运输等形式, 碳排放量相对较少, 因此平均单位货物周转平均二氧化碳排放量处于较低水平。

2.2 物流业碳排放空间效应分析

运用 Geoda 软件对 2013—2020 年我国 30 个省的物流业碳排放在地理位置上的相互依赖性进行全局及局部检验。全局检验结果如表 6 所示, 2013—2020 年我国物流业碳排放的全局 Moran's I 指数均为正值, Z 值均大于 0, 并且均通过了 5% 的显著性水平检验, 表明研究区域内物流业碳排放呈正向空间依赖性, 即物流业碳排放相近的省份在空间分布上更加集中, 具体表现为物流业碳排放较高的省份聚集在一起, 物流业碳排放较低的省份也聚集在一起。

为从局部特征变化视角探究某地区与毗邻地区的差异, 对省际物流业碳排放的局部 Moran's I 进行空间聚类分析, 如表 7 所示。按照 5 个象限进行分类, 分别对应第一象限高—高 (H-H) 集聚型、第二象限低—高 (L-H) 集聚型、第三象限为低—低 (L-L) 集聚型、第四象限为高—低 (H-L) 集聚型、跨象限区域 5 种不同的局部空间关联模式, 以展示我国省际物流业碳排放 8 年中集聚状态的演化情况。2013—2020 年我国省际物流业碳排放空间聚集状态相对稳定, 研究期内各象限的省份数量变动不大, 空间差异较为明显, 多数省份主要分布在第一、三象限, 即“高—高” (H-H)、“低—低” (L-L) 象限, 说明这些省份对毗邻地区物流业碳排放产生正向促进作用; 少数省份分布在第二、四象限, 即“低—高” (L-H)、“高—低” (H-L) 象限, 说明这些省份对毗邻地区物流业碳排放产生负向抑制作用。2013 年、2016 年及 2020 年 3 个年份中, 分布在“高—高”和“低—低”象限的省份数量分别占 30 个省份数量的 57%、47%、77%, 说明我国省际物流业碳排放的空间上主要表现为“高—高”和“低—低”集聚, 即物流业碳排放聚集分布呈现较为明显的二元结构。“高—高”聚集地区主要分布在安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省等省份, 这些省份已经形成较为完善的物流业发展体系, 因此呈现出明显的空间集聚特征; “低—低”集聚地区主要分布在西部地区 and 东北地区, 包括陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、黑龙江省等省份, 这些省份受地形地貌等自然条件和经济发展水平限制, 物流业碳排放均偏低。

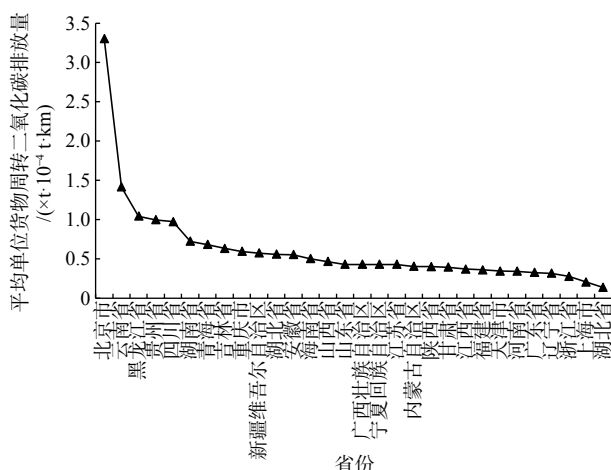


图 2 中国 30 个省物流业 2013—2020 年平均单位货物周转二氧化碳排放量

Fig. 2 The average carbon dioxide emissions per unit of goods turnover in the logistics industry of 30 provinces in China from 2013 to 2020

表 6 2013—2020 年中国物流业碳排放的全局 Moran's I

Table 6 Global Moran's I of carbon emissions in China's logistics industry from 2013 to 2020

年份	Moran's I	Z 统计量	P 值
2013	0.159**	2.156	0.016
2014	0.148**	2.031	0.021
2015	0.162**	2.185	0.014
2016	0.154**	2.080	0.019
2017	0.148**	2.004	0.023
2018	0.146**	1.973	0.024
2019	0.147**	1.983	0.024
2020	0.204***	2.598	0.005

注: **、*和*分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平下通过检验。

表 7 2013—2020 年中国物流业碳排放集聚情况

Table 7 Carbon emission concentration of China's logistics industry from 2013 to 2020

年份	第一象限 H-H象限	第二象限 L-H象限	第三象限 L-L象限	第四象限 H-L象限	跨象限 区域
2013	安徽省、浙江省、上海市、吉林省、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省、河北省、山西省、山东省、辽宁省、黑龙江省 (14)	海南省、天津市、江西省 (3)	贵州省、四川省、广西壮族自治区、陕西省、新疆维吾尔自治区、重庆市、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省 (9)	内蒙古自治区、云南省、北京市、广东省 (4)	—
2014	安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省、辽宁省、黑龙江省 (10)	海南省、天津市、江西省、贵州省、河北省 (5)	陕西省、重庆市、新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省 (6)	四川省、内蒙古自治区、云南省、北京市、广东省 (5)	山西省、山东省、吉林省、广西壮族自治区 (4)
2015	安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省、辽宁省、黑龙江省 (10)	海南省、天津市、江西省、贵州省、河北省 (5)	陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省 (4)	四川省、内蒙古自治区、云南省、北京市、广东省 (5)	吉林省、广西壮族自治区、山西省、山东省、重庆市、新疆维吾尔自治区 (6)
2016	浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省、黑龙江省 (8)	海南省、天津市、江西省、吉林省、贵州省 (5)	广西壮族自治区、陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区 (6)	云南省、北京市、四川省、广东省 (4)	辽宁省、安徽省、河北省、山西省、山东省、重庆市、新疆维吾尔自治区 (7)
2017	安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省 (8)	海南省、天津市、江西省、吉林省、贵州省、河北省 (6)	陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区 (5)	云南省、北京市、四川省、辽宁省、山东省、广东省 (6)	广西壮族自治区、山西省、黑龙江省、重庆市、新疆维吾尔自治区 (5)
2018	安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省 (8)	海南省、天津市、江西省、吉林省、贵州省、河北省、重庆市 (7)	陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、黑龙江省 (6)	云南省、北京市、四川省、广东省、新疆维吾尔自治区、辽宁省 (6)	山东省、广西壮族自治区、山西省 (3)
2019	浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省 (7)	海南省、天津市、江西省、吉林省、贵州省、重庆市、河北省 (7)	陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、黑龙江省 (6)	北京市、四川省、广东省、辽宁省 (4)	安徽省、云南省、新疆维吾尔自治区、山东省、广西壮族自治区、山西省 (6)
2020	安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省 (8)	海南省、天津市、吉林省、贵州省、重庆市 (5)	山西省、陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、黑龙江省、河北省、新疆维吾尔自治区 (9)	山东省、辽宁省 (2)	江西省、广西壮族自治区、北京市、云南省、四川省、广东省 (6)

2.3 物流业碳排放空间效应的传导机制分析

运用 Stata16 软件对空间杜宾面板数据模型在 3 种固定效应下回归估计,结果如表 8 所示。从变量的显著性来看,时间固定效应下的回归结果要明显优于地区固定效应和时间地区双固定效应的结果,但从极大似然估计数 Log-likelihood 和模型拟合优度 R^2 来看,时间固定效应的极大似然估计数为 318.854,远远小于地区固定效应的 550.443 与时间地区双固定效应的 552.285,且时间地区双固定效应下模型的拟合优度仅次于地区固定效应下模型的拟合优度。综合 R^2 与 Log-likelihood2 个指标来看,时间地区双固定效应模型更优,因此选取时间地区双固定效应模型的结果进行后续分析。

表 8 中时间地区双固定效应模型下物流业碳排放的滞后项系数 Spatial rho 为-0.807,在 5% 的水平上显著不为 0,说明我国省际物流业碳排放存在显著负向外溢性,进一步验证我国省际物流业碳排放存在空间相关性,且本地区物流业碳排放受到毗邻地区物流业碳排放的影响。

物流业产业规模 LnIS 对碳排放存在正向影响且在 1% 的水平上显著,物流业产业规模每扩大 1%,碳排

放量增加 0.142%，说明物流业产业规模快速扩张的同时碳排放量也相应增加；物流业产业规模空间滞后项 $W*LnIS$ 的回归系数为 0.189，在各显著性水平上都不显著，说明本地区物流业碳排放间接受到毗邻地区物流业产业规模发展的影响，但是其空间上的扩散效应并不明显。

物流业基础设施 $LnInfrastructure$ 对碳排放存在正向影响且在 5% 的水平上显著，物流业基础设施水平每提高 1%，碳排放量增加 0.166%。由于省际物流业基础设施具有通达性，物流业基础设施的空间滞后项 $W*LnInfrastructure$ 的回归系数为 0.132，且十分显著，说明毗邻地区物流业基础设施对本地区碳排放的正向推动作用明显。

物流业能源消耗量 $LnEC$ 对碳排放存在正向影响且在 1% 的水平上显著，物流业能源消耗量每增加 1%，碳排放增加量 0.651%。物流业能源消耗量的空间滞后项 $W*LnEC$ 的回归系数为 -0.284，说明毗邻地区物流业能源消耗量对本地区碳排放起到抑制作用，物流业能源消耗量是导致碳排放量增加的最大因素。

物流业货物周转量 $LnFRM$ 每提高 1%，碳排放量增加-0.013%，且不显著。物流业货物周转量的空间滞后项 $W*LnFRM$ 的回归系数为 -0.048，说明毗邻地区物流业货物周转量对本地区碳排放的空间扩散效应不显著。

控制变量中仅有人口发展 LnP 每提高 1%，碳排放量增加-0.741%，说明本地区人口密度越高，越有利于发挥集约优势，一定程度上降低碳排放量；其空间滞后项 $W*LnP$ 的回归系数为 8.916，在 1% 水平下显著。由于地理位置相近和经济发展水平相近的城市存在人口流动的现象，毗邻地区人口的工作、旅游、生活和学习等因素对本地区碳排放存在显著的推动作用。

为进一步探究模型中的边际效应，分析各解释变量间作用的差异性 & 空间外溢效应，将各个变量空间效应分解成直接效应和间接效应，如表 9 所示。

物流业产业规模 $LnIS$ 在 3 种效应下的估计结果均为正，其中直接效应在 1% 的水平上显著，间接效应和总效应在各水平上均不显著，说明物流业产业规模每正向变化 1%，会导致本地区碳排放量增加 0.141%。同时，由于本地区物流业产业规模的发展将周边技术、就业人员等资源集中在本地集聚区内，降低了毗邻地区物流业对能源的需求，从而对毗邻地区碳排放的促进作用不显著。

表 8 空间杜宾面板数据模型在 3 种固定效应下的回归结果
Table 8 Regression results of spatial durbin panel data model under three fixed effects

变量名称	时间固定效应	地区固定效应	时间地区双固定效应
$LnIS$	0.158*** (3.15)	0.147*** (4.55)	0.142*** (4.18)
$LnInfrastructure$	0.158*** (4.35)	0.111 (1.63)	0.166** (2.14)
$LnEC$	0.823*** (18.40)	0.672*** (10.10)	0.651*** (8.97)
$LnFRM$	0.117** (2.20)	-0.016 (-0.76)	-0.013 (-0.58)
$LnGDP$	-0.487*** (-3.68)	0.069 (0.62)	0.088 (0.75)
LnP	0.085* (1.87)	-0.634** (-1.96)	-0.741** (-2.19)
$LnR\&D$	0.295*** (3.77)	0.019 (0.27)	0.026 (0.33)
$W*LnIS$	-0.817** (-2.31)	0.128 (0.57)	0.189 (0.69)
$W*LnInfrastructure$	0.230 (0.64)	-0.140 (-0.31)	0.132*** (3.53)
$W*LnEC$	2.289*** (4.28)	0.054 (0.11)	-0.284 (-0.36)
$W*LnFRM$	0.594** (2.50)	-0.062 (-0.77)	-0.048 (-0.47)
$W*LnGDP$	-0.827 (-1.23)	-0.500 (-0.96)	0.566 (0.57)
$W*LnP$	1.394*** (3.72)	11.830*** (6.73)	8.916*** (3.89)
$W*LnR\&D$	-0.129 (-0.29)	-0.565 (-1.43)	-0.780 (-1.42)
Spatial rho	-1.794*** (-5.62)	-0.526** (-1.99)	-0.807** (-2.51)
Variance sigma _{2_e}	0.003*** (9.41)	0.000*** (10.17)	0.000*** (10.05)
R^2	0.442	0.806	0.772
Log-likelihood	318.854	550.443	552.285

注：括号内数值为t值，***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平下通过检验。

物流业基础设施 LnInfrastructure 在直接效应与间接效应下显著为正,总效应为正且不显著,说明物流业基础设施每正向变化 1%,本地区碳排放量增加 0.143%,毗邻地区碳排放量增加 0.197%,有显著的空间溢出效应。由于物流业基础设施水平的提高与完善,吸引了更多的物流企业入驻本地区,使得本地区运输、仓储、流通等物流活动增加,物流业基础设施网络结构进一步完善,对毗邻地区的生产与消费产生一定影响,对能源的需求也随之增加,从而造成本地区与毗邻地区碳排放的增加。

物流业能源消耗量 LnEC 的直接效应显著为正,间接效应为负,总效应为正且不显著。直接效应的绝对值高于间接效应的绝对值,说明物流业能源消耗量对本地区碳排放的促进作用大于对毗邻地区碳排放的抑制作用。

物流业货物周转量 LnFRM 在 3 种效应下的估计结果均为负,且均未通过显著性检验,说明虽然物流业货物周转量对本地区及毗邻地区的碳排放存在一定抑制作用,但是空间溢出效应并不明显。

控制变量中仅有人口发展 LnP 直接效应显著为负,间接效应和总效应显著为正,说明年末常住人口数每正向变化 1%,会导致本地区碳排放量减少 0.990%,毗邻地区碳排放量增加 5.759%,且间接效应的绝对值高于直接效应的绝对值,由于存在人口流动的现象,在一定程度上加剧了毗邻地区的碳排放。

3 总结与建议

3.1 总结

- 1) 我国物流业碳排放量整体呈现波动上升的趋势,东部沿海地区的物流业碳排放量高于中部地区和西部地区;省际单位货物周转二氧化碳排放均呈现波动变化趋势且差异较大。
- 2) 我国物流业碳排放空间上呈显著正相关关系,省际物流业碳排放聚集分布的二元结构明显,呈现“高—高”和“低—低”集聚为主的空间分布特征。“高—高”聚集地区主要分布在安徽省、浙江省、上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省、湖北省等省份,“低—低”集聚地区主要分布在西部地区和东北地区,包括陕西省、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、黑龙江省等省份。
- 3) 我国省际物流业碳排放存在空间溢出性特征,对本地区物流业碳排放产生正向促进作用的影响因素由强至弱依次为物流业的能源消耗量、产业规模、基础设施,毗邻地区对其产生正向影响因素是物流业基础设施。物流业基础设施在直接效应与间接效应下显著为正,对本地区与毗邻地区碳排放产生正向促进作用;物流业的产业规模和能源消耗量仅在直接效应下显著为正,对本地区碳排放有一定的促进作用且空间溢出效应明显。

3.2 建议

省际物流资源要素对物流业碳排放的空间效应及其传导机制揭示了我国省际物流业碳排放非均衡空间分布的规律,合理调配和控制我国省际物流业的能源消耗量、产业规模和基础设施等资源要素能实现物流业减污降碳、协同增效。降碳建议如下。

政府应加大清洁能源的推广力度,优化各省物流业的能源结构。一是要推动各省物流业加快生物燃料、天然气、太阳能等清洁能源的应用;二是山东省、湖北省、江苏省和广东省等东中部高碳排放地区的政府应大力发展轨道交通和绿色交通,加快纯电动与插电式混合动力汽车等新能源汽车推广,完善绿色物流运输体

表 9 空间杜宾面板数据模型的效应分解
Table 9 Effect decomposition of spatial durbin panel data model

变量名称	直接效应	间接效应	总效应
LnIS	0.141***	0.030	0.170
	(4.41)	(0.18)	(0.98)
LnInfrastructure	0.143**	0.197**	0.422
	(2.17)	(2.52)	(1.01)
LnEC	0.681***	-0.463	0.218
	(9.58)	(-0.94)	(0.43)
LnFRM	-0.011	-0.019	-0.030
	(-0.43)	(-0.29)	(-0.42)
LnGDP	0.053	0.271	0.324
	(0.41)	(0.45)	(0.51)
LnP	-0.990***	5.759***	4.769**
	(-3.13)	(3.02)	(2.45)
LnR&D	0.058	-0.459	-0.402
	(0.80)	(-1.43)	(-1.18)

注:括号内数值为t值,***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平下通过检验。

系布局；三是高一高聚集的地区如上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省和湖北省的政府应建立能源价格长效机制，转变物流企业的能源消费理念，促进省际物流业低碳转型的均衡发展。

省级政府应实施省际间的物流业“协同降碳”计划。一是针对上海市、福建省、江苏省、湖南省、河南省和湖北省等高一高聚集地区实施跨省际的物流业碳减排联合协作，产生省际物流业协同碳减排的规模效应，控制聚集区的物流业碳排放，实现聚集区域内部分工协作和资源最优化组合；二是分区域因地制宜制定物流业碳排放控制措施，广东省、上海市、江苏省和浙江省等沿海高碳排放地区重点发挥海运港口优势，加快多式联运现代综合物流运输体系建设，通过调整运输结构减少能源消耗，实现物流业碳减排；青海省、广西壮族自治区、宁夏回族自治区和甘肃省等物流业碳排放水平趋缓的西部地区依托陆海新通道发挥铁海联运优势，持续推动多种运输方式深度融合，促进区域内物流业降碳提效；三是东部地区依托相对良好的物流业发展环境、完善的物流业基础设施、丰富的物流业低碳技术资源，采取措施实现资源共享、科技互助，助力中西部地区物流业实现低碳转型目标。

参考文献

- [1] 李健, 白子毅, 李柏桐. 双碳背景下京津冀物流业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. 城市问题, 2022(5): 69-76.
- [2] GREENING L A, TING M, DAVIS W B, et al. Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: trends from 10 OECD countries for the period 1971-1993[J]. Energy Economics, 1999, 21(4): 331-361.
- [3] REQUIA W J, KOUTRAKIS P, ROIG H L, et al. Spatial distribution of vehicle emission inventories in the Federal District, Brazil[J]. Atmospheric Environment, 2015, 112: 32-39.
- [4] 邵海琴, 王兆峰. 中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 32-41.
- [5] 张帅, 袁长伟, 赵小曼. 中国交通运输碳排放空间聚类及关联网络结构分析[J]. 经济地理, 2019, 39(1): 122-129.
- [6] XU B, LIN B Q. Factors affecting carbon dioxide (CO₂) emissions in China's transport sector: a dynamic nonparametric additive regression model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 101: 311-322.
- [7] 姚冠新, 赵子琪, 胡百灵. 中国农村物流碳排放与地区经济增长的脱钩趋势研究[J]. 华东经济管理, 2017, 31(11): 51-56.
- [8] 马飞, 胡江坤, 孙启鹏, 等. 中国省际物流业碳排放绩效测度及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(9): 27-33+39.
- [9] 刘琦, 范鑫坤. 碳中和目标下物流业低碳转型发展路径研究[J]. 商业经济研究, 2023(8): 80-84.
- [10] 刘渝, 李莱. 中国各省物流业碳排放的脱钩及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 177-181.
- [11] 李晓梅, 崔靛. 数字物流、区域经济与碳环境治理耦合及影响因素——基于我国30个省级面板数据的实证检验[J]. 中国流通经济, 2022, 36(2): 11-22.
- [12] 韩丽萍, 李明达, 刘炯. 中国物流业碳排放影响因素及产业关联研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2022, 21(1): 86-93.
- [13] 李玉民, 刘昱哲, 郭利利. 基于投影寻踪法的区域物流低碳竞争力评价及实证研究[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(2): 28-33.
- [14] 刘战雄, 孙夏令. 中国物流业绿色全要素生产率的时空演化及动因分析[J]. 软科学, 2018, 32(4): 77-81+114.
- [15] 徐博禹, 刘霞辉. 进出口贸易对第一产业的碳排放效应研究——基于中国省级研发投入数据的门槛检验[J]. 经济问题, 2022(2): 27-33.
- [16] 臧新, 潘国秀. FDI对中国物流业碳排放影响的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 39-46.
- [17] 戢晓峰, 白淑敏, 陈方, 等. 效率视角下省域交通碳排放配额分配研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 1-7.
- [18] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究, 2010, 45(2): 123-136.
- [19] 滕王滕菲, 冯套柱, 郭道燕. 西北地区碳排放的驱动因素与脱钩效应研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(2): 260-268.
- [20] 姜宛贝, 刘卫东, 刘志高, 等. 中国化石能源燃烧碳排放强度非均衡性及其演变的驱动力分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(9): 1425-1435.
- [21] LIANG C Y, LIU Z Y, GENG Z F, et al. Assessing e-commerce impacts on China's CO₂ emissions: testing the CKC hypothesis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(40): 1-18.
- [22] 王慧英, 王子瑶. 我国试点城市碳排放权交易的政策效应与影响机制[J]. 城市发展研究, 2021, 28(6): 133-140.
- [23] 陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011, 34(4): 124-143.
- [24] 黄蓉. 制造业集聚与碳减排空间溢出效应研究——基于技术交易视角的检验[J]. 生态经济, 2022, 38(2): 22-26+90.
- [25] 周腰华, 王振华, 张广胜. 中国县域经济增长的影响因素及其空间溢出效应分析[J]. 云南财经大学学报, 2017, 33(1): 35-47.
- [26] 徐振剑, 吕拉昌, 辛晓华. 中国城市数字经济发展空间分异及其影响因素[J]. 经济纵横, 2023(8): 71-79.
- [27] 吕周洋, 凌丹丹, 陈军飞, 等. 能源生态效率对碳排放的影响及空间溢出效应研究——以长江经济带110个城市为例[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2023, 22(1): 95-110+112.
- [28] 赵桂梅, 耿涌, 孙华平, 等. 中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 49-55.
- [29] 张友国, 郑玉歆. 碳强度约束的宏观效应和结构效应[J]. 中国工业经济, 2014(6): 57-69.
- [30] 潘喜莲, 侯宇恒. 影响我国碳排放的因素分解——基于省级面板数据的实证分析[J]. 科学决策, 2021(12): 84-94.
- [31] 周叶, 王道平, 赵耀. 中国省域物流作业的CO₂排放量测评及低碳化对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 81-87.

(责任编辑: 金曙光)

Spatial effects and transmission mechanism of carbon emissions from interprovincial logistics industry in China

LIU Qi^{1,*}, FAN Xinkun²

1. School of Economics and Trade, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. Business School, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China

*Corresponding author, E-mail: 20429781@qq.com

Abstract The logistics industry is the third largest carbon emission source after the industry and construction industry in China. Studying the spatial effects and transmission mechanism of resource elements related to inter-provincial logistics can provide a scientific basis for the low-carbon transformation development of the logistics industry. GeoDa software was used to analyze the spatial-temporal correlation and the volatility of local spatial differences in carbon emissions from the logistics industry in 30 provinces from 2013 to 2020. STIRPAT model and EKC model were combined to explore the spatial effects of influencing factors on carbon emissions from the logistics industry in China and clarify the transmission mechanism. The results showed that the carbon emissions of China's logistics industry presented the spatial distribution characteristics of “high in the east and low in the west”. The dual structure of carbon emission concentration distribution in the provincial logistics industry was obvious, showing the spatial distribution characteristics of “high-high” and “low-low” concentration. The carbon emission of China's inter-provincial logistics industry had the characteristics of spatial spillover. The influencing factors that positively promoted the carbon emission of the logistics industry in the region from strong to weak were energy consumption, industrial scale, and infrastructure of the logistics industry, and the factors that had a positive impact on the carbon emission of the logistics industry in the adjacent areas were infrastructure of the logistics industry; under both direct and indirect effects, logistics infrastructure had a significant positive impact on carbon emissions, while the industrial scale and energy consumption of logistics had a positive impact on carbon emissions only under direct effects. The spatial agglomeration of carbon emissions and the formation and evolution of regional differences in China's logistics industry were the result of the synergistic effect of various logistics resource factors such as the industrial scale, energy consumption and infrastructure of the inter-provincial logistics industry. Accordingly, the suggestion of “collaborative carbon reduction” is put forward to promote the low-carbon transformation of China's logistics industry.

Keywords carbon emissions of logistics industry; spatial effect; transmission mechanism; spatial durbin panel data model