

# “双碳”目标下中国省域绿色物流发展时空演变分析

黄爱玲, 马瑞晨, 王佳美, 秦建民

北京交通大学交通运输学院, 北京 100044

**摘要** 中国物流业的绿色发展是“双碳”目标的重点关注领域。结合物流行业绿色发展内涵, 研究构建了绿色物流发展水平指标体系。基于2014—2019年中国省级尺度交通运输物流仓储行业碳排放清单及统计年鉴数据, 采用因子分析法对绿色物流发展指标降维形成8个影响因子, 应用地理加权回归模型来解释中国物流行业碳排放强度驱动因素的省级区域差异及其时空演化规律。研究发现, 在样本考察期内中国省域尺度物流业碳排放强度出现逐年弱化的聚集现象, 并呈现出“西强东弱”空间分异的基本模式, 因子重心表现出从东部向中部转移的趋势。其中物流粗放发展因子和物流装备因子对碳排放强度产生最强正向效应, 而能源清洁化因子、货运结构调整因子和模式创新因子产生抑制效应。结合分析结果, 立足各省资源禀赋及发展战略, 提出中国绿色物流发展的政策建议。

**关键词** 绿色物流; 碳排放强度; 地理加权回归模型; 时空异质性

物流业是支撑国民经济发展的基础性、战略性产业, 由于社会总成本提升、过度能源消耗及高排放带来高额的环境溢出效应, 2008—2018年交通运输行业碳排放量复合增长率达7.5%, 明显高于世界交通碳排放的增速(2.3%)及我国整体碳排放增速(5.6%)<sup>[1]</sup>。2019年中国交通运输行业货运碳排放量达到8.697亿t(不含管道)<sup>[2]</sup>, 占全国排放总量的6.17%。其中物流行业能源消耗和碳排放分别达到4.4亿t标准煤和8.6亿t二氧化碳, 占全国

能耗和碳排放量的比重分别为9.0%和8.8%<sup>[3]</sup>。随着我国人均国内生产总值(GDP)的增长, 交通运输行业的碳排放上行压力较大, 物流业成为实现“双碳”目标的重点关注行业 and 关键发展领域。2021年国务院关于《加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》指出, 健全绿色低碳循环发展的流通体系, 打造绿色物流<sup>[4]</sup>。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提到“完善能源消费总量和强度双

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2023-09-04

基金项目: 中国科协创新战略研究院项目(2022-hjs-09); 国家高端智库重点研究课题(T23GDZK00010); 国家自然科学基金面上项目(72371021)

作者简介: 黄爱玲, 教授, 研究方向为物流系统工程, 电子信箱: alhuang@bjtu.edu.cn

引用格式: 黄爱玲, 马瑞晨, 王佳美, 等. “双碳”目标下中国省域绿色物流发展时空演变分析[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 47-57; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.007

控制制度,重点控制化石能源消费”“深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型”,以及“锚定努力争取2060年前实现碳中和,采取更加有力的政策和措施”,明确了现阶段控制碳排放强度和实现碳中和的目标<sup>[5]</sup>。

绿色物流自20世纪末期开始逐渐得到国内外学者的关注,国内外学者主要从绿色物流的特点、理论基础、目标<sup>[6]</sup>、实现方式<sup>[7]</sup>、所包含的环节<sup>[8]</sup>来探讨低碳物流的内涵,然而还未对绿色物流的概念形成统一的定义<sup>[7]</sup>。中国2021年出版的《物流术语》对绿色物流的定义是:通过充分利用物流资源、采用先进的物流技术,合理规划和实施运输、储存、装卸、搬运、包装、流通加工、配送、信息处理等物流活动,降低物流活动对环境影响的过程<sup>[9]</sup>。本文在此基础上进一步明确了绿色物流的模式、实现方式以及发展目标,认为其内涵是:绿色物流是新发展理念下,统筹新发展格局、考虑“双碳”目标约束的一种高效率、低能耗、低排放、低污染的物流模式,通过集约化、清洁化、减量化、智能化、标准化、循环化运作,实现物流活动的一体化高效协同,最终构建起系统完备、绿色低碳、智能高效、保障发展的现代化绿色物流体系。

国内外物流业碳排放的研究集中在核算方法、因素分解和区域差异等领域。其中联合国政府气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的核算方法得到学界认可,物流业碳排放因素分解和区域差异成为学者关注的重点。碳排放驱动因素分解研究中广泛采用对数平均迪氏指数分解技术<sup>[10]</sup>。而泰尔指数、Dagum基尼系数和变异系数法常被用于量化中国碳排放的空间差异程度<sup>[11]</sup>。然而,单一量化研究并不能完全解释当前物流业碳排放的区域差异化特征。在解释绿色物流发展影响因素时,应尤其关注时空非平稳过程。一方面,物流业碳排放强度往往是由空间多个不同因素共同作用决定的,且同一种影响因素在不同区域会有不同的作用强度;另一方面,影响因素的作用强度会发生时空转移,只有精确把握各因素作用重心的演化规律,才能识别出绿色物流的减碳空间和发展路径。因此,立足区域(省域或市

域)发展差异提出相应的减排政策,对于中国物流行业整体高质量绿色发展具有重要意义。目前,在跨尺度描述和解释空间非平稳过程研究方面仍然缺乏强有力的理论方法,而地理加权回归作为科学解释空间异质性的主要模型之一,近年来已得到广泛应用,例如,应用于城市住宅价格评估<sup>[12]</sup>、土壤和环境科学<sup>[13]</sup>,以及疾病传播<sup>[14]</sup>等领域。本文旨在应用地理加权回归模型分析2014—2019年中国物流业省域碳排放强度的影响因素及其时空演变特征。

## 1 时空演变分析模型

### 1.1 数据来源

采用的中国2014—2019年省域交通运输物流仓储行业化石燃料(不包含电力)二氧化碳排放数据来自Carbon Emission Accounts & Datasets (CEADs)官方网站公开的排放核算数据集。由于交通运输、仓储和邮政业占据了整个物流产业83%以上的产业份额,当前相关文献普遍采用交通运输、仓储和邮政业的统计数据来替代物流业数据<sup>[15]</sup>。本研究对象为除西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区外的30个省级行政单位。直接获取到的社会经济、交通运输等方面数据来源于国家统计局和各省的统计年鉴、交通运输行业发展统计公报、《2006年IPCC国家温室气体清单指南》《中国物流年鉴》等。

### 1.2 变量提取

物流行业的碳排放量受到产业规模、产业结构、技术水平等多种因素影响。考虑到数据的可获得性,所提出绿色物流内涵包括系统完备、绿色低碳、智能高效、保障发展4个方面,构建了阐释绿色物流发展水平的指标体系(表1),综合考虑共23个潜在影响因素,探究其对物流行业碳排放强度的影响。物流业碳排放强度定义为单位GDP对应的物流业CO<sub>2</sub>排放(Mt/万亿)。该指标规避了各省份产业规模、经济规模、人口规模等单一因素对物流业碳排放的影响,可以用来综合衡量国民经济增长对物流业能源消耗的依赖程度。

表1 绿色物流评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	数据来源	
系统完备	基础设施	铁路营业里程/万 km	a	
		公路里程/万 km	a	
		内河航道里程/万 km	a	
		仓库面积/万 m <sup>2</sup>	a	
	服务能力	快递营业网点密度/(处·万 km <sup>2</sup> )	a	
绿色低碳	绿色环保	物流业就业人员数量/万人	a	
		民用载货汽车拥有量/万辆	a	
	能耗状况	绿地覆盖面积/万 hm <sup>2</sup>	a	
		货物运输量铁比公/1	a	
		物流业电力消耗量占比/1	a	
智能高效	模式创新	物流业汽、柴油消耗总量/万吨标准煤	a	
		交通运输、邮政、仓储业能源消耗总量/万吨标准煤	a	
		连锁餐饮企业统一配送商品购进额/亿元	a	
	保障发展	经济环境	社会消费品零售总额/亿元	b
			经营单位所在地进出口总额/千美元	b
第三产业增加值/亿元			b	
第二产业增加值/亿元			b	
人口规模		第一产业增加值/亿元	b	
业务规模	人口总数/万人	b		
	人口自然增长率/‰	b		
	快递业务量/万件	b		
需求规模	货物运输量/万 t	a		
	货物周转量/(亿 t·km)	a		

注:a为国家及省市统计年鉴;b为国家及省市国民经济和社会发展统计公报。

### 1.3 因子分析

应用因子分析法来解决收集到的23项指标变量间高度重叠和高度相关带来的回归方程参数估计不准确的难题。因子分析以丢失最少的信息为原则,将原有变量浓缩为几个代表性的因子来减少计算工作量,其数学模型可以表达为 $X=AF+\varepsilon$ 。其中, $X_{(m \times 1)}$ 为原有变量向量, $F_{(n \times 1)}$ 表示公共因子向量, $A_{(m \times n)}$ 称为因子载荷矩阵,其中元素 $a_{ij}(i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n)$ 称为因子载荷,表示第*i*个原有变量在第*j*个因子上的载荷。因子分析的主要步骤包括以下4步<sup>[6]</sup>:(1)考察原有变量是否适合进行因子分析;(2)因子提取和因子载荷矩阵的求解;(3)因子命名;(4)计算因子得分。

### 1.4 多元线性回归模型

多元线性回归模型用于反映被解释变量与其

他多个解释变量之间的线性关系,如式(1)所示。被解释变量 $y_i$ 的变化由*n*个解释变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的线性变化 $\beta_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_nx_n$ 及随机误差 $e$ 所组成。 $\beta_0$ 和 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 分别称为回归常数和偏回归系数。在普通最小二乘(OLS)的统计拟合准则下,寻找参数估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_n$ ,使得样本观测点与回归面对应点在垂直方向上的偏差距离的综合最小。

$$y_i = \beta_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e \quad (1)$$

### 1.5 地理加权回归(GWR)模型

地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型将数据的空间位置嵌入回归参数中,利用局部加权最小二乘法而非全局进行逐点参数估计,从而研究随空间变化的回归关系。GWR模型计算公见式(2),式中 $y_i$ 指的是*i*省的物流业碳排放强度; $(u_i, v_i)$ 为*i*省形心的地理坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$

为截距项; $\beta_{ik}(u_i, v_i)$ 为第*i*省的第*k*个影响因素的回归系数; $x_{ik}$ 为*i*省第*k*个变量的值; $\varepsilon_i$ 为随机误差,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_{ik}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

由于回归系数 $\beta_{ik}(u_i, v_i)$ 对每个地理要素都不同,需用加权最小二乘法进行参数估计,即在普通最小二乘的基础上,GWR模型的参数估计向量引入空间权重矩阵。地理学第一定律表明,空间权重变化的基本原则为“距离越近,赋予的权重值越高;反之权重值越低”。高斯核函数是一个连续单调递减函数,可以表示权重随距离的衰减关系,如式(3)所示。其中 $w_{ij}$ 为用空间已知点*j*去估计待测点*i*时的权重; $d_{ij}$ 为被插值点*i*与样点*j*间的欧氏距离; $h$ 为带宽。当 $d_{ij} \geq h$ 时,权重都被赋予为0。GWR模型的带宽选择通常以最小化拟合优度指标加以选取,如采用最小AIC信息准则(Akaike information criterion)进行判断<sup>[16]</sup>。

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{h}\right)^2 & d_{ij} < h \\ 0 & d_{ij} \geq h \end{cases} \quad (3)$$

本文采用一体化Python语言实现工具PySAL中的子库mgwr(2.0.1版)来拟合GWR模型及多元线性回归模型,其提供了高效的模型拟合、*t*值诊断能力,这是ArcGIS和R所不具备的<sup>[17]</sup>。同时对GWR模型进行T检验,T检验结果可以去除不显著参数的估计值,进而更加精确地呈现结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 我国物流业碳排放强度聚集规律分析

我国2014—2019年物流业碳排放强度的Moran's *I*统计结果如表2所示,数值全部通过5%显著性检验,即*P*值小于0.05(通过95%置信度检验),且*Z*得分超过临界值1.96,说明我国在新冠疫情爆发前的6年间物流业碳排放强度省域分布并非随机,而是具有较明显的聚集特征。而且Moran's *I*指数值逐年降低,空间聚集特征逐年弱化。以2019年为例,我国省域碳排放强度分布分为5个等级(图1),西北、东北及西南地区为碳排放“高

值”聚集区域,而东南沿海及四川、陕西等部分内陆省份表现为碳排放“低值”聚集。

表2 我国2014—2019年物流业碳排放强度的Moran's *I*统计结果

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Moran's <i>I</i> 指数	0.4194	0.3137	0.3168	0.3156	0.2572	0.2425
<i>Z</i> 得分	3.75	2.87	2.90	2.8927	2.4097	2.2882
<i>P</i> 值	0.001*	0.006*	0.005*	0.007*	0.014*	0.018*



基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底边无修改

图1 2019年我国物流业碳排放强度省域分布图

### 2.2 因子分析及模型构建

物流业省域碳排放强度变化受多种因素影响,与此同时自变量间可能存在多重共线性而相互干扰。本文通过因子分析法将相关性较高的因素进行分组降维,提取出公共因子,克服共线性对回归模型的影响。巴特利特球度检验统计量的观测值为6279.93,概率*P*值接近0,由于概率*P*值小于显著性水平,应拒绝原变量相关系数矩阵与单位阵无显著差异的原假设。同时*KMO*值为0.779(>0.7),原有变量适合做因子分析。随后采用主成分分析法结合相关矩阵特征值和因子方差贡献率选择因子数目为8,提取出的8个因子共解释了原有变量总方差的91.747%,说明公共因子可以较好地解释总体方差。最后采用方差最大法对因子载荷矩阵实施正交旋转以使因子具有命名解释性,图2所示

热力图展示了因子载荷矩阵  $A_{(m \times n)}$ , 热力图单元格为 因子载荷  $a_{ij}$ , 表示特征对因子的贡献。

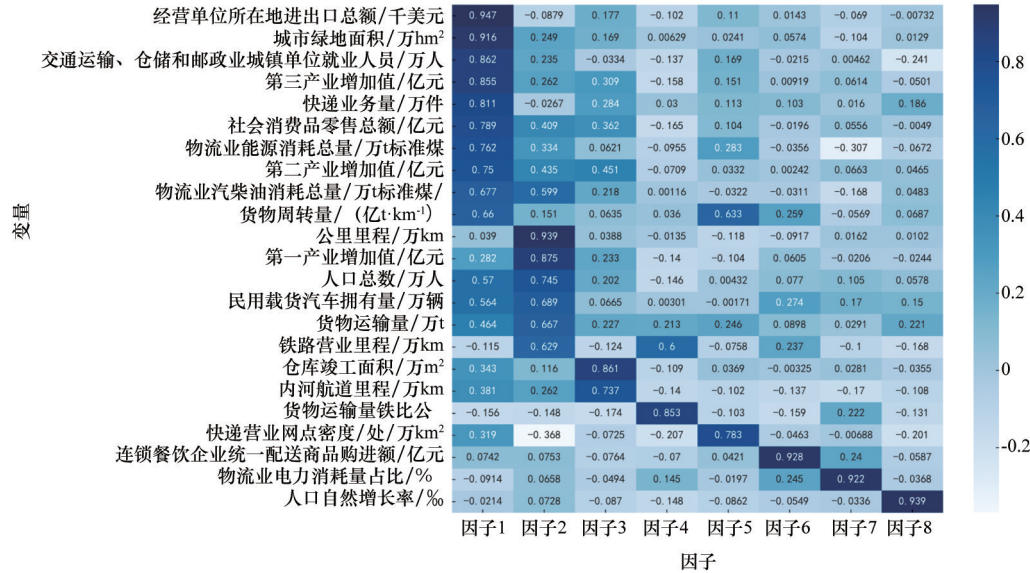


图2 因子旋转后的因子载荷矩阵

从因子旋转矩阵中提取出8个因子所解释的变量如表3所示,分别为物流粗放发展因子、物流基础保障因子、物流装备因子、货运结构调整因子、物流发展规模因子、模式创新因子、能源清洁化因子以及物流需求潜力因子。最后采用回归法估计因子得分系数,输出8个因子的得分作为GWR模型的输入指标数据。其中,一方面物流粗放发展因子(因子1)与能源消耗、人员及物资投入端相关,如物流业能源消耗总量、物流业汽柴油消耗总量、

城镇单位就业人员;另一方面与产出端相关,如第二、三产业增加值等;由于投入端因子评分为正数,产出端因子评分多为负数,根据因子评分正负,可以推测该因子表征物流粗放发展程度,即资源的投入不能带来相应的产值增加。物流基础保障因子(因子2)多涉及货运基础设施指标,且因子评分均为正数,故该因子可以表征基础设施建设对物流业发展的支撑作用。物流装备因子(因子3)的含义及表意同因子2类似。其他5个因子均为单一指标

表3 各因子解释变量及因子含义说明

因子	解释变量	因子含义
1	经营单位所在地进出口总额;城市绿地面积;交通运输、仓储和邮政业城镇单位就业人员;第三产业增加值;快递业务量;社会消费品零售总额;物流业能源消耗总量;第二产业增加值;物流业汽柴油消耗总量;货物周转量	物流粗放发展因子
2	公路里程;第一产业增加值;铁路营业里程;人口总数;民用载货汽车拥有量;货物运输量	物流基础保障因子
3	仓库竣工面积;内河航道里程	物流装备因子
4	货物运输铁比公	货运结构调整因子
5	快递营业网点密度	物流发展规模因子
6	连锁餐饮企业统一配送商品购进额	模式创新因子
7	物流业电力消耗量占比	能源清洁化因子
8	人口自然增长率	物流需求潜力因子

构成,具有同指标一致的因子解释。值得注意的是,由于已有数据无法追溯发电源头,本文假设电网清洁度较高,将物流业电力消耗量占比定义为能源清洁化因子(因子7)。

### 2.3 OLS和GWR模型的统计诊断

本文采用基于OLS估计的全局最小二乘模型以及GWR模型对碳排放强度的省域变化进行解释,两者拟合参数统计见表4。相比OLS模型,

GWR模型的残差平方和更小,校正拟合度(Adj.  $R^2$ )更大,其值均大于0.6,表明GWR模型对因变量的解释程度可达60%以上,模型可以很好地描述碳排放强度与各相关社会经济驱动因子的空间关系。进一步针对GWR模型的残差进行全局莫兰指数分析,可得2014—2019年模型残差的莫兰指数全部不显著,表明GWR模型能够充分解释我国物流业省域碳排放强度的空间聚集现象。

表4 OLS和GWR模型的拟合参数统计

模型	评估指标	2014	2015	2016	2017	2018	2019
OLS	AICc	73.491	79.139	95.458	94.685	85.027	84.424
	残差平方和	7.102	8.573	9.021	11.766	9.044	8.756
	$R^2$	0.763	0.714	0.508	0.608	0.699	0.659
	Adj. $R^2$	0.673	0.605	0.320	0.458	0.584	0.529
GWR	AICc	80.58	81.374	92.838	88.636	87.134	89.063
	残差平方和	5.033	5.406	5.423	6.601	5.050	5.034
	$R^2$	0.832	0.820	0.809	0.780	0.832	0.827
	Adj. $R^2$	0.696	0.676	0.650	0.605	0.694	0.685
	残差莫兰指数P值	0.285	0.369	0.493	0.460	0.421	0.304

### 2.4 影响因子的时空演化规律分析

2019年物流业碳排放强度的GWR模型的各项系数统计描述见表5,连续3年的回归系数空间分布如图3所示,各子图(a~h)按照时间顺序分别展示了2015、2017和2019年各因子的时空演化特征。灰色区域如西藏自治区及台湾省,表示数据缺失地区;阴影部分区域表示 $t$ 检验90%置信度下不显著的区域。其中,因子2全域不显著,因此并未体现在图3中。

表5 2019年碳排放强度影响因素GWR模型系数统计描述

变量	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
截距项	-0.10	0.10	-0.22	-0.13	0.17
因子1	59935.51	17122.73	45590.34	54104.75	131444.43
因子2	333.72	6101.08	-6821.23	-1470.98	23012.44
因子3	31829.78	9929.46	24283.57	29637.64	75711.64
因子4	-22735.10	3187.30	-32602.12	-20915.12	-19893.53
因子5	8303.81	1443.65	6970.39	8081.37	14747.61
因子6	-13241.53	1220.68	-17362.98	-12789.16	-11863.60
因子7	-23628.92	4202.87	-40096.75	-21694.265	-20134.91
因子8	7122.32	855.18	6115.58	6787.88	9482.62

截距项可用于反映区位因素对碳排放强度的影响,如图3(a)所示,其值在-0.28~0.22之间,表明兼具正向影响及负向影响。从系数绝对值来看,截距项影响强度在所有因子中最小,说明空间位置对于碳排放强度的影响小于社会经济活动的影响。如果以“胡焕庸线”为分界线,正向影响高值主要集中在“胡焕庸线”西北侧,而负向影响值则集中在东南侧。随着时间的发展,截距项高值呈现缓慢下降趋势,但是新疆、内蒙古等西北地区仍是物流业高碳排放强度的聚集地区。而截距项影响低值从东部沿海逐步转移到中部偏东地区。

如图3(b)所示,物流粗放发展因子(因子1)在系数显著的区域对碳排放强度的影响均为正向,且系数绝对值在所有因子中最大,表明资源投入驱动下的物流发展模式是各省碳排放强度空间格局产生差异的主要影响因素。单位粗放发展因子的增加,造成我国西北、东北地区碳排放增量高于我国中、东部及东南地区。一方面,东部地区通过转变经济增长方式、调整产业结构,将高耗能产业逐渐

向中西部资源大省转移,资源集中型的经济结构带来了较高的碳排放<sup>[11]</sup>。另一方面,西部省份经济基础薄弱,往往维系着“低投入、低产出”的物流运作模式<sup>[18]</sup>。在考察期内,粗放型物流发展区域在内陆省份发生空间转移,新疆始终是粗放式发展因子影响强度最大的省份,且内蒙古及东北地区因子系数分布同新疆的差异扩大,这可能是由于重工业衰退等原因造成东北地区碳排放强度减缓。

图3(c)的物流装备因子(因子3)具备显著的正向影响,表明仓库竣工面积、内河航道里程的增加会造成物流业碳排放强度不同程度的增加,且该因素影响大小由西北向东南递减。考察期内内蒙古和东北地区从全国范围相对高值地区变化为相对低值地区。我国东部和南部地区成为回归系数绝对值最小的区域,这些地区在产业规模、物流仓储规模扩大的同时较好地践行了绿色发展模式。

如图3(d)所示,货运结构调整因子(因子4)显著且负向影响碳排放强度,反映出“公转铁”货运结构调整,即货运量“铁公比”的升高,会使单位GDP产生的运输碳排放降低。从回归系数空间分布来看,考察期内,中国西北、东北以及京津冀地区系数绝对值较大,表明这些地域在通过货运结构调整降低碳排放方面具有较大的潜力。从全国系数绝对值变化方差来看,2019年该因子系数方差小于2015年系数方差,表明该影响因子作用强度的空间异质性减弱,在区域货运结构优化实践方面已取得初步成效<sup>[19]</sup>,例如,我国环渤海、长三角地区等17个主要港口煤炭集港全部改为铁路和水运<sup>[20]</sup>。2019年以来,湖南省、广东省、江苏省等地陆续出台了一系列运输结构调整政策<sup>[21]</sup>,积极推进大宗货物、集装箱运输“公转铁”“公转水”。

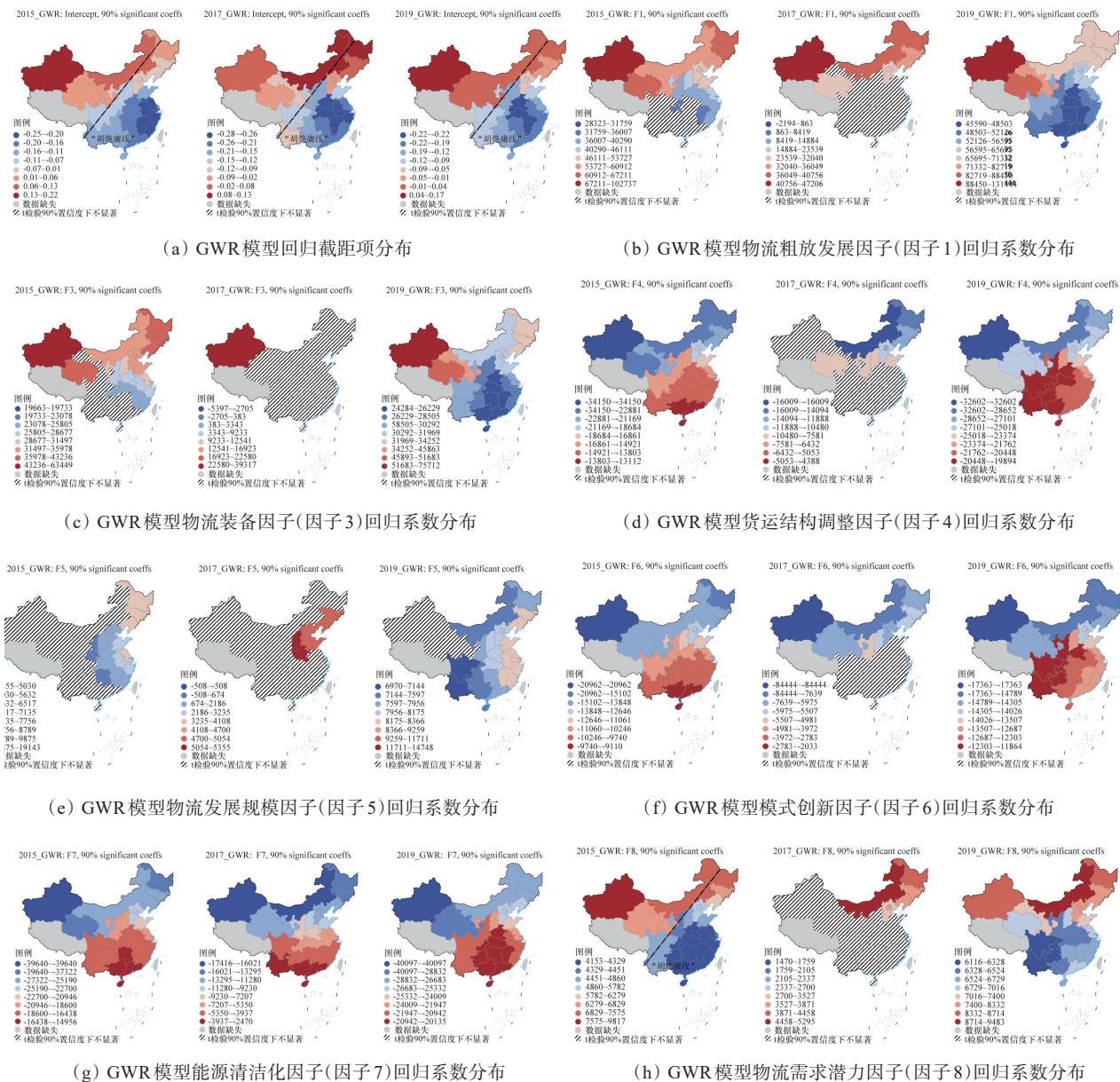
如图3(e)所示,物流发展规模因子(因子5)仅在中国东北和东、中部部分地区显著,且对碳排放强度有正向促进作用,表明快递服务网络的加速下沉、城乡快递网点密度的增大、物流运营规模的扩张会增加碳排放强度。该因子回归系数重心由我国东北地区转移至东部地区,中国邮政局数据表明,这些中东部省份2019年快递业务量增速均超

过30%。而西南地区,如四川省、云南省物流规模发展的碳排放影响作用相对较弱。

如图3(f)所示,模式创新因子(因子6)显著且对碳排放强度产生负向影响作用,表明采用高效的物流运作模式促进了碳排放强度的降低。本文的模式创新主要指对物流配送要素上的各个企业进行横向集成,通过第三方物流在统一调度计划下开展共同配送服务,实现物流环节的“增值效益”<sup>[22]</sup>。连锁餐饮企业统一配送商品购进额可以反映餐饮物流统一配送的规模,在一定程度上能反映物流行业共同配送的规模。模式创新因子系数绝对值的高值落在除宁夏外的西北以及东北地区,而系数绝对值的低值则由南部地区转移至西南地区及河南省、陕西省等中部地区。

如图3(g)所示,能源清洁化因子(因子7)从物流业能源结构的角度解析省域碳排放强度时空异质性,其同样负向影响碳排放强度,且90%置信度下于考察期内全域显著。中国物流业属于资源密集型产业,长期依赖汽油、煤油、柴油3种能源消耗<sup>[23]</sup>,如能采用绿色电力取代传统化石能源则极具减碳潜力。该因子系数绝对值的高值分布在西北及东北地区,表明这些地区通过能源清洁化的措施实现减碳效益具有更大的潜力;而因子系数绝对值的低值在第1阶段由南部地区扩散至西南地区,于第2阶段转移至中部偏东大范围省份,但其绝对值整体升高,表明能源清洁化减碳范围不断扩大,减碳效益更加明显。整体上,我国物流业逐渐从传统化石能源为主导向低碳能源系统转变,能源消费结构也逐渐由单一化向多元化转变,能源清洁化的减碳作用愈发明显。

如图3(h)所示,物流需求潜力因子(因子8)主要反映人口增长带来的物流需求扩张对碳排放强度的影响。该因子显著且正向影响,“胡焕庸线”以西地区的效应高于“胡焕庸线”以东地区,说明以西地区人口增长带来的物流需求引发的碳排放强度相对较大。且该因子系数高值在考察期内由新疆转移至内蒙古,影响低值由中东部地区转移至西南内陆地区。



基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底边无修改

图3 我国2015、2017、2019年各因子与碳排放强度的GWR模型回归系数分布(90%置信度)

### 2.5 影响因子的作用机制分析

在解析中国物流业碳排放强度影响因素时空演变规律之后,本文进一步探究主要因子的作用强度与作用机制,为提出绿色物流高质量发展的政策建议提供支撑。将表5 GWR模型系数统计描述中各系数均值的绝对值从大到小排列:物流粗放发展因子(因子1\*)>物流装备因子(因子3\*)>能源清洁化因子(因子7)>货运结构调整因子(因子4)>模式创新因子(因子6)>物流发展规模因子(因子5\*)>

物流需求潜力因子(因子8\*)>物流基础保障因子(因子2)>截距项,依次表示影响强度降低。其中\*表示正向效应因子。

#### 2.5.1 正向效应因子

根据碳排放强度的定义,该指标本身能间接反映不同产业结构下的碳排放分异。图4为我国2014—2019年间各省、自治区、直辖市单位GDP货运量柱状图,青海、山西、宁夏、内蒙古等中西部能源大省和自治区依托于资源的开发和利用<sup>[1]</sup>,单位

GDP 货运量位居全国前列,2019 年数据分别为 12.50、11.34、11.29 和 10.96 t 每万元 GDP,而服务业产值比例高的北京市,单位 GDP 货运量仅为 0.64 t 每万元 GDP。因此,在资源投入相当的情况下,产业结构推动不同省域的货运量变化,进而产生不同量级的碳排放。在 4 项正向效应影响因子中,物流粗放发展因子(因子 1\*)的作用强度最大、标准差最大,这是因为产业结构成为决定经济发展方式、影响环境质量的关键因素<sup>[24]</sup>,这也构成了省域物流业碳排放强度“西强东弱”空间分异的基本模式。在东部地区产业转移战略下,中西部地区承接东部产业的同时也引发了该因子系数由东向西的重心转移。物流装备因子(因子 3\*)成为第二作用强度因素,过高的投入容易造成资源配置的失衡,仓库资源未能得到充分的利用,在物流仓库装备扩张、升级过程中也会引发碳排放强度的增加。物流发展规模因子(因子 5\*)以及物流需求潜力因子(因子 8\*)对于碳排增加的正向效应较弱、标准差较小,物流业作为支撑国民经济发展、提高人民生活水平的生产型服务业,要在满足人民物流需求核心业务的基础上实现碳排放与经济增长间的脱钩。

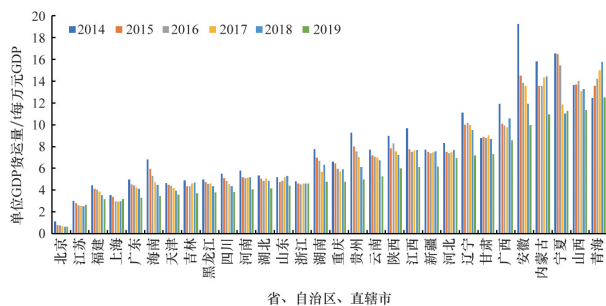


图4 中国2014—2019年间各省单位GDP货运量柱状图

### 2.5.2 负向效应因子

在 3 项显著的负向效应影响因子中,能源清洁化因子(因子 7)的作用强度最大、标准差最大。强度大是因为现阶段我国能源结构稳定,物流业发展仍然高度依赖传统化石能源<sup>[1]</sup>,能源清洁化能带来显著的减碳效果。标准差大则体现出各地区的物流业发展水平、能源消耗以及节能潜力存在较大的差异。该负向因子表明实现清洁能源的结构优势,

会极大改善能源利用效率、降低碳排放强度。考察期内我国西部地区物流行业减碳空间巨大,能源清洁化对减碳效果的贡献作用均大于东部地区,2015、2019 年分别约为东部地区的 2.5 倍、2 倍;中、东部大范围地区减碳效果逐年提升,东中西部地区的差距逐渐减小,能源结构调整的时滞效应逐步减弱。由于能源结构变化的传导具有明显的时滞效应,全国范围内优化能源结构将是一项长期的工作。货运结构调整因子(因子 4)成为第 2 大负向作用强度因素,说明调整货运结构现今对于我国碳减排仍起到积极促进作用。由于公路运输具有总运量大、运距短、占比稳定的结构优势,我国社会物流长期处于公路运输量与周转量持续攀升的态势。据测算,铁路与公路单位货物周转量能耗比是 1:7,主要污染物排放量之比是 1:13<sup>[25]</sup>,而中国货运平均运距却在不断上升,2015、2017 和 2019 年的货运平均运距为 396.18、410.02 和 418.53 km,公路货运长期占据高位的运输结构成为物流高能耗的重要来源。因此,“公转铁”的大力推广以及构建更加绿色低碳的多式联运体系有助于实现交通行业碳达峰、碳中和目标,这一方面也可从货运结构调整因子系数绝对值较大得到印证。模式创新因子(因子 6)的负向效用紧随其后,且方差较小。有大量研究已经证实传统的直配模式容易造成运力资源利用率低和能源耗散,共同配送可以有效地减少物流作业中的碳排放,减轻物流活动对环境的不良影响<sup>[26]</sup>。例如,日本构建了包含物流中心、配送中心、货运站等在内的层级物流网络实施共同配送(73%)和第三方物流(80%),其物流费用占 GDP 的比重仅为 5%<sup>[27]</sup>,而我国这一数字在 2019 年为 14.7%。因此,在我国各省份推动连锁企业的共同配送将对绿色物流发展起到重要作用。

## 3 建议

通过对省域物流业碳排放强度的时空演变差异及其内在结构特征的分析,提出我国绿色物流发展建议。

1) 因地制宜完善减排政策,推动物流供应链

全链条绿色化。中国绿色物流的发展质量整体上呈现出“东强西弱”的空间异质性格局,在东部产业转移战略下,中西部产业结构进行着一轮又一轮变革,加之经济基础、技术选择、经营模式各异,致使区域发展差异不断加大。需要从实际出发,针对各省发展制约瓶颈、兼顾各省资源禀赋,因地制宜、差异施策,才能实现物流减碳全国“一盘棋”。我国中西部内陆地区的物流业连接着原料与成品互换的产业链两端,经济基础薄弱、减碳压力巨大,既要承接东部转移产业,也要坚持能源集约化的产业准入原则。严格的环境规制对产业结构升级具有“倒逼作用”,要通过引导清洁要素流入物流供应链上下游,有序淘汰高污染、高能耗产业,提高投入资源的绿色使用率,促使产业结构的绿色转型升级。

2) 改善能源消费结构,加快货物运输结构调整。能源消费结构既从源头上奠定了碳排放强度空间异质性的基本模式,也受物流过程的能源消耗方式牵引。一方面,要立足中国“富煤贫油少气”的能源资源禀赋特征,严格合理控制化石能源消费增长,有序淘汰低效落后产能<sup>[1]</sup>,逐步提升电能等清洁能源结构占比。另一方面,促进重点区域运输结构调整,推动大宗货物集装箱“公转铁”“公转水”,形成中长距离干线运输以铁路和水路为主的发展格局。在运输结构调整重点区域,加强港口、铁路堆场等场站的资源整合,打造便捷高效的协同联运模式和谱系化运输产品。例如,推进晋陕蒙等煤炭主产区运输绿色低碳转型、打造长三角、珠三角等沿海沿江地区铁水联运、江海联运发展<sup>[21]</sup>。

3) 加快绿色技术装备升级,鼓励绿色物流运作模式创新。要加快树立政府倡导与扶持、物流企业参与与实践、消费者践行与互馈的绿色物流发展理念。政府端要加大对物流企业绿色化实践的扶持与鼓励力度,提升整个行业的绿色减排积极性。企业端要重视社会责任,一方面,要提高物流节能减排技术,提高物流各个环节中能源利用率,同时也要注意技术进步所导致的能源消费回弹效应。另一方面,要探索集约化物流发展新模式,例如,推动发展第三方物流和共同配送,实现减少终端自有库存积量、减少配送车辆空载率、减少能源消耗的“三减”目标。

## 参考文献 (References)

- [1] “碳中和”专题系列研究报告 | 中国碳中和重点行业分析(交通运输篇)[EB/OL]. (2021-08-04) [2023-04-08]. <http://www.oscpzfo.cn/post/1214.html>.
- [2] 毛保华,周琪,李宁海,等.“双碳”目标下中国货物运输体系可持续发展策略[J]. 科技导报, 2022, 40(14): 65-72.
- [3] 任豪祥:积极落实碳达峰碳中和目标,加快推进物流行业绿色低碳转型[EB/OL]. (2022-06-15) [2023-04-08]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ko6rEbhYcK9XqMNtpPbgXA>.
- [4] 国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL]. (2021-02-22) [2023-03-28]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content\\_5588274.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm).
- [5] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-03-28]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [6] 赵洁玉,刘然,刘哲,等.中国绿色物流的发展现状及建议[J]. 中国经贸导刊(中), 2019(8): 46-47.
- [7] 张颖.我国绿色物流研究的知识结构与研究热点——基于 CiteSpace 的图谱量化研究[J]. 物流科技, 2022, 45(16): 56-59.
- [8] 闫述丽.“双碳”目标下绿色物流对流通企业绩效的影响[J]. 商业经济研究, 2022(20): 136-139.
- [9] 中国物流与采购联合会. 物流术语: GB/T 18354—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [10] 张晔,宋国华,尹航,等.综合交通运输系统碳排放预测的不确定性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(1): 64-79.
- [11] 刘华军,田震,石印.中国二氧化碳排放的空间差异及其双维内在结构解析: 2000—2019年[J]. 地理研究, 2023, 42(3): 857-877.
- [12] 沈体雁,于瀚辰,周麟,等.北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, 40(3): 75-83.
- [13] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.基于地理加权回归模型的土壤有机碳密度影响因子分析[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 247-254.
- [14] Mansour S, Al Kindi A, Al-Said A, et al. Sociodemographic determinants of COVID-19 incidence rates in Oman: Geospatial modelling using multiscale geographically weighted regression(MGWR)[J/OL]. Sustainable Cities and Society, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102627>.

- [15] 张立国. 中国物流业二氧化碳排放变化驱动因素分析[J]. 中国流通经济, 2016, 30(12): 29-39.
- [16] 薛薇. SPSS统计分析方法及应用[M]. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [17] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M, et al. Geographically weighted regression modelling spatial non-stationarity[J]. *Society*, 2010, 47(3): 431-443.
- [18] Oshan T M, Li Z, Kang W, et al. MGWR: A python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(6): 269.
- [19] Wen Q, Qi X L. Evaluation of green logistics efficiency in Northwest China[J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2022, 14(11): 1-14.
- [20] 交通运输部:“公转铁”“公转水”成效显著 运输结构持续优化[EB/OL]. (2022-10-31)[2023-03-28]. <https://m.gmw.cn/baijia/2022-10/31/36126790.html>.
- [21] 零排放货运行动. 中国零排放货运年度进展报告[R]. 北京: 零排放货运行动, 2023.
- [22] Pankaj D, Choi T M, Somani S, et al. Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.102067.
- [23] 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, 322(5): 69-76.
- [24] 侯美玲, 周晓艳, 洪松, 等. 环境规制下京津冀及周边地区 SO<sub>2</sub> 污染治理效应与路径[J/OL]. [2023-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1542.N.20230329.1042.002.html>.
- [25] 冯文波. 我国运输结构优化调整影响因素与策略研究[J]. *铁道运输与经济*, 2019, 41(9): 18-23.
- [26] Wang L. Research on logistics carbon emissions under the coupling and coordination scenario of logistics industry and financial industry[J]. *PLoS One*, 2021, 16: 1-14.
- [27] 柯晶琳, 姜维军, 杨兴锐. 中日绿色物流发展差距比较及经验借鉴[J]. *对外经贸实务*, 2018(12): 87-91.

## Analysis of the spatiotemporal evolution of green logistics development in Chinese provinces under the carbon peaking and carbon neutrality goals

HUANG Ailing, MA Ruichen, WANG Jiamei, QIN Jianmin

School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** The green development of China's logistics industry is a key area for the carbon peaking and carbon neutrality goals. This article combines the connotation of green development in the logistics industry to study and construct a green logistics development level indicator system. Based on the carbon emissions inventory and statistical yearbook data of China's provincial-level transportation, logistics, and warehousing industry from 2014 to 2019, factor analysis was used to reduce the dimensionality of green logistics development indicators to form 8 influencing factors. A geographic weighted regression model was applied to explain the provincial differences and spatiotemporal evolution patterns of the driving factors of carbon emissions intensity in China's logistics industry. The study found that during the sample investigation period, the carbon emission intensity of China's logistics industry at the provincial level showed an aggregation phenomenon of weakening year by year, and showed a basic spatial differentiation pattern of "strong in the west and weak in the east". The factor center of gravity showed a trend of shifting from the east to the central region. The factors of extensive logistics development and logistics equipment have the strongest positive effects on carbon emission intensity, while the factors of energy cleanliness, freight structure adjustment, and innovation have inhibitory effects. Based on the analysis results and the resource endowments and development strategies of each province, policy implications for the development of green logistics in China were proposed.

**Keywords** green logistics; carbon emission intensity; geographically weighted regression model; spatial and temporal heterogeneity ●



(责任编辑 卫夏雯)