

基于 LEAP 模型的省域货运物流 碳达峰路径分析

王君¹,张萌萌¹,付建村²,解晓燕²,徐畅²

1. 山东交通学院交通与物流工程学院,山东 济南 250357;2. 山东省交通科学研究院,山东 济南 250100

摘要:为分析省域层面货运物流碳达峰路径,以某省为例,应用长期能源替代规划系统(long-range energy alternatives planning systems, LEAP)模型,预测基准情景和低碳情景下2019—2050年某省货运物流领域的能源需求、CO₂排放和减排潜力,并提出碳达峰路径方案。结果表明:基准情景下某省货运物流能源需求和CO₂排放均将于2038年左右达峰,低碳情景下达峰时间分别有望提前到2034年、2033年。公路货运的减排潜力巨大,应大力推进“公转铁”“公转水”,不断提高交通工具的能效水平及新能源、清洁能源的应用比例,配套建设新能源与清洁能源基础设施,加快低碳技术在货运物流中的创新应用。

关键词:LEAP模型;货运物流;碳达峰路径;低碳

中图分类号:U492.3⁺13;X73

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0049-08

引用格式:王君,张萌萌,付建村,等.基于LEAP模型的省域货运物流碳达峰路径分析[J].山东交通学院学报,2023,31(2):49-56.

WANG Jun, ZHANG Mengmeng, FU Jiancun, et al. Analysis of CO₂ emission peak path of provincial freight logistics based on LEAP Model[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(2): 49-56.

0 引言

物流业是国民经济发展的纽带和加速器,能源消耗大、碳排放高,是对气候变化产生影响的重点领域^[1-2]。近年来物流业碳排放量约占全社会碳排放总量的18%,并且碳排放量以年均20%的速度增长^[3]。随着《巴黎协定》1.5℃温控目标和我国碳达峰、碳中和目标的提出,物流业节能减排成为国内外研究热点^[4-5]。

已有研究多集中于物流业碳排放量测算、碳排放效率、碳排放影响因素及低碳技术创新应用等方面,研究数据多取自交通运输、仓储和邮政业^[6-8]。原雅坤等^[9]选取碳排放量、人力资本、固定资产投资作为投入变量,货运量、国内生产总值(gross domestic product, GDP)作为产出变量,评价低碳约束下的冷链物流效率。Chelly等^[10]从物流供应链企业角度分析,认为物流业碳排放主要来自生产、运输和储存活动。但物流领域双碳路径的研究较少,且多侧重于国家和省级层面的碳达峰路径^[11-12]。王深等^[13]研究基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径,提出未来我国碳减排工作重点领域依次为电力、供热与交通。刘方舟^[14]采用长期能源替代规划系统(long-range energy alternatives planning systems, LEAP)模型预测城市层面2021—2030年的碳排放量,分析碳排放规律并探索碳达峰路径。宋鹏等^[15]以重庆市为例构建本地化LEAP模型,探寻重庆市碳达峰目标的关键影响因素及其碳减排路径特征。

收稿日期:2022-09-12

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021RKY07128);山东省社会科学规划研究项目(22CJJJ31);山东省交通运输厅科技计划项目(2022BH03)

第一作者简介:王君(1980—),女,河北衡水人,理学博士,主要研究方向为交通与环境、绿色评价, E-mail: wangjunsjmd2005@163.com。

目前关于省域层面物流领域碳达峰的研究较少,考虑物流作业中93%的CO₂排放来自运输环节,7%来自仓储等其他环节^[1],及研究数据的可获得性等因素,本文以某省为例,选取能决定物流碳排放趋势的省域货运物流为研究对象,基于LEAP模型,分析基准情景和低碳情景下的能源需求及CO₂排放水平,并提出碳达峰的实现路径。

1 研究方法

1.1 LEAP 模型数据结构

LEAP模型是瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发的用于能源-环境和温室气体排放的情景分析软件,是一种“自下而上”的核算工具,适用于社区、城市、省、国家、大区域在近、中、远期的能源预测及温室气体减排分析^[16]。该模型的输入参数包括分领域的活动水平数据、工艺结构、设备能效、燃料种类等微观参数,及GDP、人口、城市化率等宏观经济参数;输出结果为各种情景下该领域的能源需求量、CO₂排放量等。LEAP模型可根据行业特征灵活构建数据结构,实现对能源终端消费部门全面、详细的评价,数据结构灵活、输入透明^[17],广泛应用于交通、能源、环境等领域中的政府节能减排决策、企业节能减排规划和科学研究^[18-21]。

本文以2019年为基准年,2050年为目标年,以货运周转量为活动水平,以单位货运周转量综合能耗为能源效率,公路货运以汽油、柴油、天然气、氢能、电力为能源结构,铁路货运以柴油、电力为能源结构,民航货运以航空煤油和生物航空煤油为能源结构,水路(不含远洋运输)货运以燃料油和生物燃油为能源结构,构建省域货运物流LEAP模型数据结构。

1.2 能源需求量与CO₂排放量测算方法

货运物流LEAP模型输出为能源需求量与CO₂排放量,货运物流第 k 种能源需求量

$$E_{T,k} = \sum E_{i,k} Q_{i,k},$$

式中: $E_{i,k}$ 为第 i 种货运物流使用第 k 种能源的单位货运周转量的能源需求量,tce/(t·km); $Q_{i,k}$ 为第 i 种货运物流使用第 k 种能源的货运周转量,t·km。

货运物流CO₂排放量

$$F_T = \sum E_{T,k} F_{CO_2,k},$$

式中: $F_{CO_2,k}$ 为第 k 种能源相对标准煤的CO₂排放系数。

2 预测情景设置

2.1 情景定义及描述

基于LEAP模型设置基准、低碳2种情景,采用情景分析法^[22]预测分析货运物流未来能源需求及CO₂排放。

基准情景是以现阶段货运物流需求为基础,综合考虑现有各种政策措施,按照目前的实施力度执行将能实现的碳达峰状态;低碳情景是在基准情景基础上,通过调整运输结构、优化运输工具能源结构及提高燃油效率等降碳措施,促进货运物流碳达峰状态。

2.2 数据来源

某省货运物流CO₂排放测算过程涉及的各年度GDP、产业结构、人口、城镇化率、货运量、货运周转量等经济社会指标和货运活动水平基础数据,来自文献^[23]及某省统计局公开数据;由交通行业企业能耗调查数据获取各类能耗数据;依据文献^[24-26]中的平均低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率等参数计算获取各类能源的CO₂排放系数,结果如表1所示。

主要依据货运物流领域的历史趋势推算,并结合近期出台的相关中长期规划、政策文件和相关研究

成果预测得出情景分析中货运活动水平、能源结构和能源效率^[27-28]。

表 1 各种能源的 CO₂ 排放系数

能源类型	能源平均 低位发热量	单位热值含碳量/ (t·TJ ⁻¹)	碳氧化率	折标准煤系数	CO ₂ 排放系数
汽油	43 124 kJ/kg	18.90	0.98	1.471 4	1.99
煤油	43 124 kJ/kg	19.60	0.98	1.471 4	2.07
柴油	42 705 kJ/kg	20.20	0.98	1.457 1	2.13
燃料油	41 816 kJ/kg	21.10	0.98	1.428 6	2.24
液化石油气	50 242 kJ/kg	17.20	0.98	1.714 3	1.81
液化天然气	51 498 kJ/kg	17.20	0.98	1.757 2	1.81
天然气	38 979 kJ/m ³	15.30	0.99	1.330 0	1.62

2.3 关键参数假设

2.3.1 货运需求总量

通过综合分析货运需求总量随 GDP、人口、城镇化率、产业发展等社会经济因素的影响规律,发现近 10 a 的货运强度(每万元 GDP 产生的货物运输量)与 GDP 间存在较强的相关性,货运强度

$$S = Q/G_{\text{GDP}},$$

式中:Q 为货运需求总量,G_{GDP} 为地区生产总值。

选用运输强度趋势外推法预测货运需求总量,得到回归模型为:

$$\begin{cases} Y = -325.1 \ln X + 2137.4 \\ R^2 = 0.9737 \end{cases},$$

式中:Y 为预测货运需求总量,X 为年份序列数,X=1,2,3...,其中 2019 年 X=1,以后年份依次取值。

结合近期出台的相关规划、政策文件中对应的参量分析进行修正后,得到 2025、2030、2035、2040、2050 年 Y 分别为 11 695、13 757、15 948、17 953、18 134 亿 t·km。

2.3.2 运输结构

某省货物流运输结构将随产业转型和货物运输方式的多样化而不断调整,未来多式联运将成为重要的货运模式。“十三五”期间公路货运周转量占比逐年递减,但占比仍然最大。2015 年公路货运周转量占货运周转总量的 75%,2020 年降至 72%;铁路货运周转量占比略增,由 2015 年的 14%增至 2020 年的 17%;水路货运周转量占比基本稳定,维持在 11%。公路货运具有高效、便利的明显优势,在全省货运体系的主导地位不变,但随大宗物资“公转铁”“公转水”趋势增强,公路货运周转量占比将逐年降低;2023 年小清河通航及京杭运河三改二工程实施后,预计水路货运周转量占比在一定时期内增长较快,但总体受全省内河及沿海运能等条件限制,未来增量有限;考虑未来铁路专用线建设,铁路货运周转量占比将增大;民航货运周转量占比略增。结合相关规划^[27,29],不同情景下省域货物流周转量占比预测结果如表 2 所示。

表 2 不同情景下省域货运周转量占比预测结果

%

货运类型	2025 年		2030 年		2035 年		2040 年		2050 年	
	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景
公路	69.20	67.00	65.95	62.00	64.75	60.80	63.74	59.80	61.54	57.80
铁路	18.76	20.96	22.00	25.95	23.10	27.05	24.00	27.94	26.00	29.74
水路	12.00	12.00	12.00	12.00	12.10	12.10	12.20	12.20	12.40	12.40
民航	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06

2.3.3 能源结构与能源效率

货运工具的能源结构是影响能源需求及 CO₂ 排放的关键因素。未来货运物流领域将出现一系列重大变革,氢燃料车与电动车可替代传统燃油车。随货运工具的优化和技术进步,能源效率不断提高。到2030年,新能源、清洁能源动力交通工具占比约为40%,营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降约9.5%^[29]。根据文献[27-29],不同情景下省域货运物流能耗相关参数预测如表3所示。

表3 不同情景下省域货运物流能耗相关参数预测

年份	营运车辆单位周转量能耗较 2019年下降/%		营运船舶单位周转量能耗较 2019年下降/%		铁路实现 电气化年份		民航运输生物质 燃料占比/%	
	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景
	2025	5.0	8.7	3.5	5.1			0
2030	9.5	14.0	6.8	10.8			0	0
2035	14.0	20.0	11.0	17.3	2035	2035	0	0
2040	18.0	26.0	15.2	18.2			3.3	5.0
2050	22.0	31.0	19.4	19.5			3.3	5.0

3 结果分析

3.1 货运物流能源需求和 CO₂ 排放趋势

基准情景和低碳情景下,2019—2050年省域货运物流能源需求和 CO₂ 排放的变化趋势如图1所示。

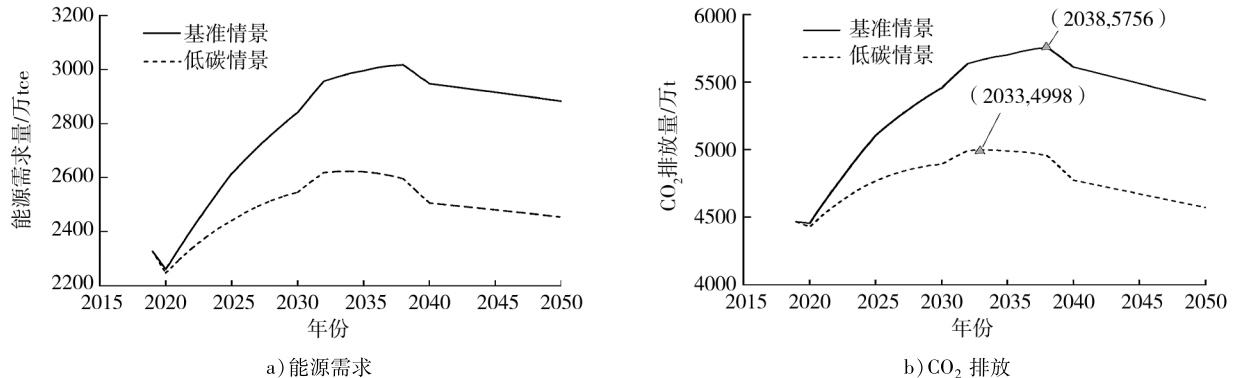


图1 2种情景下省域货运物流能源需求和 CO₂ 排放的变化趋势

由图1可知:2种情景下全省货运物流的能源需求均表现为先增长达峰后缓慢降低的演变趋势。基准情景下,能源需求虽有增加,但年增长率减小,2038年达到峰值3017万tce;低碳情景下,随节能措施的加强,能源需求预测提前到2034年达峰,相比于基准情景,能源需求峰值降低约13%。全省货运物流 CO₂ 排放表现为与能源需求极为相似的变化趋势,随能源需求的增加,CO₂ 排放也将保持增长,但幅度明显小于能源需求,基准情景下 CO₂ 排放峰值预测出现在2038年,为5756万t;低碳情景下,随减排措施力度加大,CO₂ 排放达峰时间提前到2033年,且峰值降低为4998万t,比基准情景下降约13%。

关键年份各参数的情景预测结果如表4所示。由表4可知:总货运需求预测值不变时,基准情景下省域货物物流在2025年、2030年、2035年、2040年、2050年的 CO₂ 排放总量分别约为5105万、5456万、5699万、5611万、5367万t,低碳情景下分别约为4768万、4891万、4990万、4773万、4572万t,低碳情景比基准情景的 CO₂ 减排量分别为337万、565万、709万、838万、795万t;4种货运类型的能耗强度、CO₂ 排放强度均有不同程度的降低。说明通过不断调整运输结构、能源结构和能源效率,能有效降低能耗水平和 CO₂ 排放。

表4 省域货运物流关键年份各参数预测结果

货运类型	年份	周转量/(亿 t·km)		能源需求量/万 t ^①		CO ₂ 排放量/万 t		能耗强度/ (kg/(ht·km) ⁻¹) ^①		CO ₂ 排放强度/ (kg/(ht·km) ⁻¹)	
		基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景	基准情景	低碳情景
公路	2025	8 091.00	7 836.00	2 523.00	2 351.00	4 908.00	4 572.00	3.120	3.000	6.070	5.830
	2030	7 713.00	7 251.00	2 740.00	2 448.00	5 239.00	4 680.00	3.550	3.380	6.790	6.450
	2035	8 908.00	8 364.00	2 896.00	2 530.00	5 486.00	4 792.00	3.250	3.020	6.160	5.130
	2040	11 443.00	10 736.00	2 836.00	2 401.00	5 370.00	4 547.00	2.480	2.240	4.690	4.240
	2050	11 160.00	10 481.00	2 769.00	2 347.00	5 121.00	4 340.00	2.480	2.240	4.590	4.140
铁路	2025	2 220.00	2 475.00	18.08	19.39	39.53	41.12	0.081	0.078	0.178	0.166
	2030	2 030.00	2 573.00	12.53	14.04	26.57	29.78	0.049	0.046	0.103	0.098
	2035	3 178.00	3 721.00	1.81	1.97	3.84	4.18	0.006	0.005	0.012	0.011
	2040	4 309.00	5 016.00	2.02	2.12	4.28	4.50	0.005	0.004	0.010	0.009
	2050	4 715.00	5 393.00	2.21	2.28	4.68	4.84	0.005	0.004	0.010	0.009
水路	2025	1 380.00	1 380.00	54.33	53.47	118.40	116.60	0.390	0.390	0.860	0.840
	2030	1 403.00	1 403.00	62.18	59.51	135.50	129.70	0.440	0.420	0.970	0.920
	2035	1 665.00	1 665.00	68.30	63.47	148.90	138.40	0.410	0.380	0.890	0.830
	2040	2 190.00	2 190.00	73.11	70.52	161.50	153.70	0.330	0.320	0.740	0.700
	2050	2 249.00	2 249.00	75.05	72.40	163.60	157.80	0.330	0.320	0.730	0.700
民航	2025	4.68	4.68	18.92	18.11	39.74	38.04	40.400	38.700	84.900	81.300
	2030	5.85	5.85	26.30	24.76	55.22	52.00	45.000	42.300	94.400	88.900
	2035	6.88	6.88	28.74	26.38	60.35	55.40	41.800	38.300	87.700	80.500
	2040	10.77	10.77	36.72	32.55	77.11	68.36	34.100	30.200	71.600	63.500
	2050	10.88	10.88	37.09	32.88	77.88	69.05	34.100	30.200	71.600	63.500

①按标准煤计量。

3.2 货运物流 CO₂ 减排潜力

为进一步探究各种低碳措施对省域货运物流碳减排的影响程度,将基准情景下4种运输方式产生的 CO₂ 排放量减去低碳情景下的 CO₂ 排放量,得到每年4种货运类型的 CO₂ 减排潜力,如图2所示。

由图2可知:基准情景下,公路货运的减排空间巨大,通过低碳情景下“公转水”“公转铁”等措施调整货运结构、能源结构和能源效率,公路货运 CO₂ 排放在2040年有望减少800万 t,其他货运类型 CO₂ 的减排空间均小于10万 t。低碳情景下,铁路货运在2032年后将几乎全部实现电气化,比基准情景下提前3 a。因此,由铁路运输消耗化石能源产生的直接 CO₂ 排放在2035年前有一定的减排潜力,2035年后减排潜力表现不突出。随电力和清洁能源的应用,水路货运的能耗强度降低,由此产生的 CO₂ 减排空间

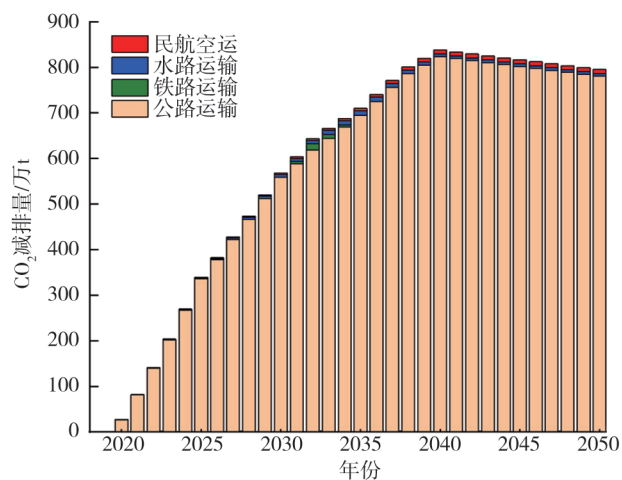


图2 低碳情景相对于基准情景的碳减排潜力

逐年提高,在2035年减排量为近10万t。由于航空煤油能源效率提高及应用较高比例的生物质燃料,2034年以后的民航货运CO₂减排潜力表现较突出,平均每年CO₂的减排量约为8万t。

综上,低碳情景下,2040年CO₂减排空间最大,CO₂减排总量约为850万t;2050年CO₂减排总量约为800万t,公路运输CO₂减排量贡献占比近98%,减排潜力较高,水路、民航运输的CO₂减排量贡献分别为0.73%、1.11%,铁路实现了全部电气化,碳减排贡献不突出。

3.3 货运物流碳达峰路径

货运物流是省域物流领域碳排放最主要来源,是实现全省物流业碳达峰的重要领域。通过不同情景的预测分析,提出全省货运物流碳达峰和碳减排路径。

1) 优化货运物流的组织结构。公路货运是实现碳减排最关键的领域,未来应加快大宗货物和中长距离货物运输“公转铁”“公转水”,大力发展以铁路、水路为骨干的多式联运,推进多式联运“一单制”落地实施,构建以电气化铁路、节能环保船舶为主的中、远途货运系统,以低排放、新能源车为主的短途货运系统。

2) 加快货运装备的新清洁能源化。随中、重型货车电池技术的不断成熟,公路货运纯电动和氢燃料中、重型货车应成为中长期重点推广车型;在水路运输领域,应积极推进液化天然气、电能等新能源和清洁能源动力船舶发展,淘汰高排放老旧营运船舶;积极引进并逐步提高生物质能源在民航货运的应用占比;及早实现铁路货运的电气化。同时,应加快完善充电桩、泊位岸电、液化天然气与压缩天然气加注站、加氢站和油气回收等新能源、清洁能源的配套基础设施建设改造。

3) 提高货运装备的燃油经济性。对货运装备排放进行及时检验与维修治理,完善车辆排放检验与维护制度,换用高品质燃油等,提升运输装备的燃油经济性。

4) 推进低碳技术的创新应用。突破纯电动、氢燃料电池、液化天然气车船和固碳路面等制约货运物流低碳发展的核心技术,开展“互联网+货运物流”等新业态、新模式的创新应用,攻克关键技术在中长途运输、港口作业、城市配送等多种场景应用的难题,创建一批全电动货运试点、氢能源货运试点示范项目,以点带面逐步构建适应碳达峰、碳中和的科技创新体系。

4 结论

本文采用LEAP模型,分析省域货运物流领域在基准情景和低碳情景下的能源需求、CO₂排放与CO₂减排潜力,提出全省货运物流碳达峰和碳减排路径,为省域层面货运物流碳达峰路径研究提供借鉴参考。

1) 基准情景下,省域货运物流能源需求预测2038年达到峰值,为3017万t标准煤;低碳情景下,预测提前到2034年达峰,相比于基准情景,能源需求峰值降低约13%。

2) 基准情景下,省域货运物流碳排放将于2038年左右达到峰值,CO₂排放量为5756万t;低碳情景下,随减排措施的实施力度加大,碳达峰时间有望提前到2033年,峰值降低约13%。

3) 低碳情景下,2050年省域货运物流的CO₂减排空间约为800万t,较基准情景减排15%;公路货运是全省货运物流碳排放最高的领域,也是CO₂减排潜力最大的运输类型,2050年碳减排贡献率接近98%。

4) 为促进省域货运物流尽快实现碳达峰,应不断优化物流货运结构,大力推进“公转铁”“公转水”,发展铁路和水路货运,加快货运交通工具的新清洁能源化,提高货运装备的燃油经济性,推进低碳技术的创新应用。

参考文献:

- [1] 姜晓红,陈莎,张毅.物流企业碳排放总量与效率测算方法[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(2):313-321.
JIANG Xiaohong, CHEN Sha, ZHANG Yi. Calculation method of total carbon emission and efficiency of logistics enterprises [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022,22(2):313-321.
- [2] 任国强,赵翠明.碳源视角下中国物流业碳排放地区差距及变动[J].环境科学与技术,2021,44(3):191-199.

- REN Guoqiang, ZHAO Cuiming. Regional disparity and changes in China's logistics industry carbon emissions from the perspective of carbon sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(3): 191-199.
- [3] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [4] 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.
- HAN Liping, LI Mingda, LIU Jiong. On the influencing factors of carbon emission of China's logistics industry and its industrial linkage[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2022, 21(1): 86-93.
- [5] 齐豫, 徐超毅. 基于 LMDI 河南省物流业碳排放影响因素研究[J]. *洛阳理工学院学报(社会科学版)*, 2022, 37(1): 47-53.
- QI Yu, XU Chaoyi. A study on the factors of influencing carbon emission in Henan logistics industry based on LMDI[J]. *Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Social Science Edition)*, 2022, 37(1): 47-53.
- [6] 马越越, 王维国. 中国物流业碳排放特征及其影响因素分析: 基于 LMDI 分解技术[J]. *数学的实践与认识*, 2013, 43(10): 31-42.
- MA Yueyue, WANG Weiguo. Character of carbon emission of logistics industry in China and its affecting factors decomposition analysis: based on LMDI technique[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43(10): 31-42.
- [7] 张文龙. 基于 LMDI 模型的京津冀物流业碳排放脱钩研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2016.
- ZHANG Wenlong. Research on decoupling of carbon emissions of logistics industry in Jing-Jin-Ji based on LMDI model[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2016.
- [8] 徐卫赣. 低碳背景下我国省域物流业碳排放效率评价研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- XU Weigan. Study on carbon emission efficiency measurement in logistics industry of China under low-carbon[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [9] 原雅坤, 陈久梅, 但斌. 碳约束下冷链物流效率及其收敛性研究: 以生鲜农产品为例[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(14): 253-260.
- YUAN Yakun, CHEN Jiumei, DAN Bin. Research on the efficiency and its convergence of cold-chain logistics considering carbon constriction: taking fresh agricultural products as an example[J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(14): 253-260.
- [10] CHELLY A, NOUIRA I, FREIN Y, et al. On the consideration of carbon emissions in modelling-based supply chain literature: the state of the art, relevant features and research gaps[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 57(1): 4977-5004.
- [11] DE M, GIRI C. Modelling a closed-loop supply chain with a heterogeneous fleet under carbon emission reduction policy[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 133: 101813.
- [12] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 78-86.
- LIU Bowen, ZHANG Xian, YANG Lin. Decoupling efforts of regional industrial development on CO₂ emissions in China based on LMDI analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(4): 78-86.
- [13] 王深, 吕连宏, 张保留, 等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰碳中和路径研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2044-2055.
- WANG Shen, LÜ Lianhong, ZHANG Baoli, et al. Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9): 2044-2055.
- [14] 刘方舟. 基于 LEAP 模型的城市碳排放达峰预测研究[D]. 武汉: 中钢集团武汉安全环保研究院, 2021.
- LIU Fangzhou. Study on the prediction of city's carbon emission peak based on LEAP model[D]. Wuhan: Sinosteel Wuhan Safety & Environmental Protection Research Institute, 2021.
- [15] 宋鹏, 张慧敏, 毛显强. 面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1446-1455.
- SONG Peng, ZHANG Huimin, MAO Xianqiang. Research on Chongqing's carbon emission reduction path towards the goal of carbon peak[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1446-1455.
- [16] Stockholm Environment Institute, Tellus Institute. LEAP: long range energy alternatives planning system, user guide for LEAP 2005[EB/OL]. [2022-08-18]. [http://forums.seib.org/leap/documents/Leap 2005 User Guide English. pdf](http://forums.seib.org/leap/documents/Leap%202005%20User%20Guide%20English.pdf).

- [17] 黄莹,郭洪旭,廖翠萍,等.基于LEAP模型的城市交通低碳发展路径研究:以广州市为例[J].气候变化研究进展,2019,15(6):670-683.
HUANG Ying, GUO Hongxu, LIAO Cuiping, et al. Study on low-carbon development path of urban transportation sector based on LEAP model:take Guangzhou as an example[J]. Climate Change Research, 2019,15(6):670-683.
- [18] 池莉.基于LEAP模型的北京市未来客运交通能源需求和污染物排放预测[D].北京:北京交通大学,2014.
CHI Li. The prediction of Beijing passenger traffic energy demand and pollutants emission in future based on LEAP model [J]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2014.
- [19] 张翠霞.基于LEAP模型的电动汽车发展对广州能源环境影响研究[D].北京:华北电力大学,2013.
ZHANG Cuixia. Research on the development of electric vehicle impact on energy and environment in Guangzhou based on LEAP model[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2013.
- [20] 唐飞,陈文抗,石琴.基于LEAP模型的城市客运交通能耗和污染物排放预测[J].交通节能与环保,2015,11(6):31-36.
TANG Fei, CHEN Wenkang, SHI Qin. The prediction research on passenger transport energy consumption and pollutant emissions based on the LEAP model [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2015, 11(6):31-36.
- [21] 郭秀锐,刘芳熙,符立伟,等.基于LEAP模型的京津冀地区道路交通节能减排情景预测[J].北京工业大学学报,2017,43(11):1743-1749.
GUO Xiurui, LIU Fangxi, FU Liwei, et al. Scenarios prediction of energysaving and emission reduction in the road transport sector of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(11):1743-1749.
- [22] 黄莹,廖翠萍,赵黛青.基于情景分析法的广东交通运输节能减排潜力研究[J].开放导报,2011(4):40-43.
HUANG Ying, LIAO Cuiping, ZHAO Daiqing. On potential in reduction of emission ofGuangdong transportation industries based on situation analysis[J]. China Opening Journal,2011(4):40-43.
- [23] 山东省统计局.山东省统计年鉴(2006—2021)[M].北京:中国统计出版社,2006—2021.
- [24] 中国生态环境部.省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南:环办气候函〔2021〕85号[R/OL].(2021-06-28)[2022-09-05].<https://www.doc88.com/p-28961729758312.html>.
- [25] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心.省级温室气体清单编制指南(试行)[R/OL].(2020-03-19)[2022-09-05].http://www.nesc.org.cn/SY/tjkhybg/202003/t20200319_769763.shtml.
- [26] 全国能源基础与管理标准化技术委员会.综合能耗计算通则:GB/T 2589—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [27] 山东省人民政府.山东省“十四五”综合交通运输发展规划[R/OL].(2021-07-10)[2022-09-05].http://jtt.shandong.gov.cn/art/2021/7/20/art_15843_10292055.html.
- [28] 山东省发改委.山东省新能源汽车产业发展规划(2021—2025年)[R/OL].(2021-10-08)[2022-09-05].<http://fgw.shandong.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=879843f0a0734bfd894bdc3e8dc736b7.pdf>.
- [29] 山东省交通运输厅.山东省交通运输节能环保“十四五”发展规划[R/OL].(2021-12-30)[2022-09-05].<http://jtt.shandong.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=8c6266abda0145588dd868dade025407.pdf>.

Analysis of CO₂ emission peak path of provincial freight logistics based on LEAP Model

WANG Jun¹, ZHANG Mengmeng¹, FU Jiancun², XIE Xiaoyan², XU Chang²

1. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250100, China

Abstract:In order to analyze the carbon peak path of logistics at the provincial level, the long-run energy alternatives planning (LEAP) model is applied to predict the energy demand, CO₂ emission and emission

(下转第88页)