

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312031



应用 LMDI 模型的江西省交通运输业 碳排放驱动力分析

刘安^{1,2}, 习明星¹, 邵志超², 李雪洁³

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330000;

2. 江西省交通咨询有限公司, 江西 南昌 330000;

3. 同济大学 城市交通研究院, 上海 200092)

摘要: 通过统计分析江西省 2011—2020 年公路运输、水路运输、铁路运输和民航运输总的能源消耗数据, 确定了江西省交通运输业二氧化碳排放的变化趋势。利用对数平均权重(LMDI)法, 分析了模式分担、能源结构、规模效应、能源强度、经济效应对江西省交通运输部门碳排放变化产生的不同影响。研究结果表明: 2011—2020 年, 江西省能源使用最多的是汽油和柴油; 公路运输部门是江西省交通运输部门碳排放最多的部门; 对碳排放的增长起推动作用的是模式分担与经济效应, 起抑制作用的是能源结构与规模效应, 而能源强度波动较大。

关键词: 碳排放; 交通运输业; 驱动力因素; 对数平均权重(LMDI)法; 公路运输; 江西省

中图分类号: U 116.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0276-07

Driving Force Analysis of Transportation Industry Carbon Emissions in Jiangxi Province Using LMDI Model

LIU An^{1,2}, XI Mingxing¹, SHAO Zhichao², LI Xuejie³

(1. Jiangxi Province Transportation Investment Group Limited Company, Nanchang 330000, China;

2. Jiangxi Province Transportation Consulting Limited Company, Nanchang 330000, China;

3. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Through statistic analysis of the total energy consumption data of the road transportation, the waterway transportation, the railway transportation, and the civil aviation transportation in Jiangxi Province from 2011 to 2020, the change trend of carbon dioxide emissions from the transportation industry in Jiangxi Province is determined. Using the logarithmic mean weight division index (LMDI) method, the mode sharing, the energy structure, the scale effect, the energy intensity, and the economic effect on the carbon emission changes of the transportation sector in Jiangxi Province are analyzed. The research results show that from 2011 to 2020, the gasoline and diesel are the most used energy sources in Jiangxi Province; highway transportation is the sector with the highest carbon emission in the transportation sectors of Jiangxi Province; the mode sharing and the economic effect play a driving role in the growth of carbon emission, the energy structure effect and the scale effect play a restraining role, while the energy intensity fluctuates greatly.

收稿日期: 2023-12-03

通信作者: 刘安(1988-), 男, 高级工程师, 主要从事公路与桥梁工程方面的研究。E-mail: 547001499@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(52372340); 江西省交通厅重点项目(2022C0003); 学科交叉联合攻关项目(2022-5-YB-03); 上海市自然科学基金资助项目(21ZR1466600)

Keywords: carbon emissions; transportation industry; driving force factor; logarithmic mean weight division index (LMDI) method; highway transportation; Jiangxi Province

根据 2019 年国际能源署(IEA)年统计数据,交通运输业二氧化碳排放量占全球碳排放量的五分之一^[1]。我国交通运输业二氧化碳排放量为 9.1 亿 t,接近全国排放量的十分之一,并且预计将继续保持高速扩张趋势^[2]。《江西省“十四五”综合交通运输体系发展规划》中指出,“十三五”期间江西省运输大通道和综合交通枢纽体系建设取得新进展^[3]。截至 2022 年底,全省综合交通网络里程达到 26 万 km,汽车保有量 760.9 万辆,年增长率为 6.0%。与湖北、湖南、安徽这 3 个临近省份相比,江西省虽然汽车保有量较少,但增长率在同一水平,其增长潜力巨大^[4]。江西省在全国率先发布了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》,该文件强调要加快构建绿色低碳交通运输模式^[5]。《江西省“十四五”能源发展规划》中提出江西省面临着较高的向低碳转型的压力^[6]。

当前,用于评估不同要素对能源消耗和二氧化碳排放变化的影响的方法有很多,如结构分解分析(SDA)和指数分解分析(IDA)等,其中,IDA 中的对数平均权重法(LMDI)能够有效地处理残差及零值问题,而且符合“完美分解方法”的所有要求,因此是实际研究中最常用的碳排放变化分解方法^[7-11]。国内外学者利用 LMDI 方法对交通行业碳排放驱动因素进行了诸多研究,其影响因素通常分解成能源强度、模式分担、经济效应、人口密度、碳排放系数等^[12-19]。

通过江西省交通运输业碳排放影响因素及其机理,可了其碳排放的关键驱动因素,对促进交通运输业节能减排和能源结构调整具有重要意义,对实现“双碳”目标也起到关键作用。本文考虑铁路运输、公路运输、水路运输和民航运输 4 种方式,应用 LMDI 模型分析江西省交通运输业碳排放驱动力。

1 研究数据及方法

1.1 研究数据

研究数据均来自 2012—2021 年的《江西统计年鉴》^[20]《中国统计年鉴》^[4]《中国铁道年鉴》^[21]和《中国能源统计年鉴》^[22],水运船舶的油耗系数定为 $50\text{ kg}\cdot(\text{万 t}\cdot\text{km})^{-1}$ ^[23]。

因为货物周转量和旅客周转量不能直接相加,根据交通运输部的客货运周转量转换系数,把 4 种运输方式(公路运输、铁路运输、水路运输及民航运输)的周转量均转换为货物周转量^[24],最后,统一使用亿 $\text{t}\cdot\text{km}$ 作为单位。4 种运输方式的客、货运周转量转换系数分别为 5.00,1.00,3.03,13.88。

1.2 江西省交通运输业能源消耗的测算

1.2.1 公路运输业能源消耗的测算 依据《2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南》(IPCC 指政府间气候变化专门委员会),交通运输行业有“自下而上”和“自上而下”两种碳排放计算方法。“自下而上”计算方法即通过不同类型的机动车型、保有量、行驶里程及单位行驶里程燃料消耗等进行计算;“自上而下”计算方法即通过对交通运输工具燃油消耗的统计数据计算。由于我国机动车型、行驶里程等数据难以获取,因此,采用“自上而下”的计算方法,结合公路运输、水路运输、铁路运输和民航运输总的能源消耗数据估算江西省交通运输部门产生的碳排放。

4 种运输方式用的能源包括石油制品、电力、燃气和煤炭等,电力视为清洁能源,不计算碳排放。《中国能源统计年鉴》^[22]中只计算了交通运输部门营运车辆的燃油消耗,而私家车其他部门的燃油消耗不包含在统计年鉴数据中。依据各油品平衡表、相关行业能耗统计数据及相关专家的咨询,交通运输消耗的汽油由 95%的工业(含建筑业)和服务行业消费的汽油,以及全部居民生活和农业消费的汽油构成;而柴油由 35%的工业(含建筑业)和服务行业消费的柴油,以及 95%的居民生活和农业消费的柴油构成^[24]。

江西省交通行业所消耗的能量是由地区能源平衡表中终端消费量中交通运输、仓储和邮政业、建筑业、居民生活、农业消费和工业中的能源消费组成。汽油使用场景只用于公路部门;而柴油使用场景较为丰富,包括公路运输、铁路运输和水路运输。可先计算铁路运输、水路运输的柴油使用量,然后从总量中减去这两部分柴油量,从而得出公路运输的柴油消耗。

1.2.2 铁路运输业能源消耗的测算 铁路运输业能碳排放来源主要为柴油(电力不计算间接排

放)^[26],铁路内燃机车燃油消耗量计算公式为

$$N_{\text{内}}=N_{\text{客内}}+N_{\text{货内}}。 \tag{1}$$

式(1)中: $N_{\text{内}}$ 为内燃机车柴油消耗量; $N_{\text{客内}},N_{\text{货内}}$ 分别为客运、货运内燃机车柴油消耗量。

$$N_{\text{客内}}=Z_{\text{客合}}\times\frac{RC_{\text{货内}}\times RC_{\text{货内}}}{RC_{\text{货合}}\times RC_{\text{货内}}}\times NX_{\text{客内}}。 \tag{2}$$

式(2)中: $Z_{\text{客合}}$ 为客运机车合计旅客周转量; $RC_{\text{货合}}$ 为货运机车合计日产量; $RC_{\text{货内}}$ 为货运内燃机车日产量; $NX_{\text{客内}}$ 为客运内燃机车油耗系数。

$$N_{\text{货内}}=Z_{\text{货合}}\times\frac{RC_{\text{货合}}\times RC_{\text{货内}}}{RC_{\text{货合}}\times RC_{\text{货内}}}\times NX_{\text{货内}}。 \tag{3}$$

式(3)中: $Z_{\text{货合}}$ 为货运机车合计货物周转量; $NX_{\text{货内}}$ 为货运内燃机车油耗系数。

1.2.3 水路运输业能源消耗的测算 柴油和燃料油是水路运输业的主要能源消费来源^[26]。水路船舶柴油消耗量计算公式^[23]为

$$N_{\text{水}}=(0.065\times Z_{\text{客}}+Z_{\text{货}})\times NX_{\text{水}}。 \tag{4}$$

式(4)中: $N_{\text{水}}$ 为船舶柴油消耗量; $Z_{\text{客}}$ 为水路运输客运周转量; $Z_{\text{货}}$ 为水路运输货物周转量; $NX_{\text{水}}$ 为船舶油耗系数。

全部燃料油在江西省地区能源平衡表(实物量)中被用于水路运输。

1.2.4 民航运输业能源消耗的测算 民航运输部门碳排放来源主要是煤油^[22],《中国能源统计年鉴》中交通运输、仓储及邮电通信业的终端煤油消耗量全部为航空煤油消费量。

1.3 江西省交通运输业碳排放的测算

交通运输业碳排放测算公式^[27]为

$$C^t=\sum_{j=1}^4\sum_{i=1}^nN_{i,j}\times EF_{i,j}。 \tag{5}$$

式(5)中: C^t 为 t 年交通运输部门的碳排放; i 为能源消耗的类型; j 为交通运输方式(公路运输、铁路运输、水路运输、民航运输); $N_{i,j}$ 为第 j 种运输方式消耗的第 i 种能源的消耗量; $EF_{i,j}$ 为第 j 种运输方式的第 i 种能源的碳排放因子。

燃料碳排放因子查阅《中国能源统计年鉴》^[22],汽油,柴油,燃料油,煤油的碳排放因子分别为 2.26,2.73,2.98,2.56。

1.4 江西省交通运输业碳排放变化驱动因素的 LMDI 分解

1.4.1 江西省交通运输业碳排放影响因素表达方法 Kaya 恒等式可将交通部门的碳排分解成多个因素^[8],即

$$C^t=\sum_{i,j}C_{i,j}^t=\sum_{i,j}\frac{C_{i,j}^t}{N_{i,j}^t}\times\frac{N_{i,j}^t}{N_j^t}\times\frac{N_j^t}{T_j^t}\times\frac{T_j^t}{T^t}\times\frac{T^t}{GDP^t}\times GDP^t=\\ \sum_{i,j}CI_{i,j}^t\times SS_{i,j}^t\times TS_j^t\times TP_j^t\times TG^t\times GDP^t。 \tag{6}$$

式(6)中: $C_{i,j}^t$ 为基于燃料类型 i 的第 j 种运输方式 t 年的碳排放; $N_{i,j}^t$ 为基于燃料类型 i 的第 j 种运输方式 t 年能源消耗; N_j^t 为基于 j 种运输方式的 t 年能源消耗; T_j^t 为基于 j 种运输方式的 t 年货物周转量; T^t 为 t 年的货物周转量; GDP^t 为 t 年经济产出; $CI_{i,j}^t$ 为第 t 年第 j 种运输方式的第 i 种燃料的碳排放系数; $SS_{i,j}^t$ 为第 t 年第 j 种运输方式的第 i 种能源的能源结构; TS_j^t 为第 t 年第 j 种交通运输方式的能源强度; TP_j^t 为模式分担; $TG^t=T^t/GDP^t$ 为规模效应。

1.4.2 江西省交通运输业碳排放变化驱动因素的 LMDI 分解方法 应用对数平均权重(LMDI)法,目标年 t 和基准年 0 之间的碳排放变化的影响可以拆分为以下 6 种影响,即

$$\Delta C_{\text{tot}}=\Delta C_{\text{CI}}+\Delta C_{\text{SS}}+\Delta C_{\text{TS}}+\Delta C_{\text{TP}}+\Delta C_{\text{TG}}+\Delta C_{\text{GDP}}, \tag{7}$$

$$\Delta C_{\text{CI}}=\sum_j\Delta C_{\text{CI},j}=\begin{cases}\Delta C_{\text{CI},j}=0, & C_j^t\times C_j^0=0, \\ \Delta C_{\text{CI},j}=\sum_jL(C_j^t,C_j^0)\ln\left(\frac{CI_j^t}{CI_j^0}\right), & C_j^t\times C_j^0\neq 0,\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}\Delta C_{SS} &= \sum_j \Delta C_{SS,j} = \begin{cases} \Delta C_{SS,j} = 0, & C_j^t \times C_j^0 = 0, \\ \Delta C_{SS,j} = \sum_j L(C_j^t, C_j^0) \ln\left(\frac{SS_j^t}{SS_j^0}\right), & C_j^t \times C_j^0 \neq 0, \end{cases} \quad (9) \\ \Delta C_{TS} &= \sum_j \Delta C_{TS,j} = \begin{cases} \Delta C_{TS,j} = 0, & C_j^t \times C_j^0 = 0, \\ \Delta C_{TS,j} = \sum_j L(C_j^t, C_j^0) \ln\left(\frac{TS_j^t}{TS_j^0}\right), & C_j^t \times C_j^0 \neq 0, \end{cases} \quad (10) \\ \Delta C_{TP} &= \sum_j \Delta C_{TP,j} = \begin{cases} \Delta C_{TP,j} = 0, & C_j^t \times C_j^0 = 0, \\ \Delta C_{TP,j} = \sum_j L(C_j^t, C_j^0) \ln\left(\frac{TP_j^t}{TP_j^0}\right), & C_j^t \times C_j^0 \neq 0, \end{cases} \quad (11) \\ \Delta C_{TG} &= \sum_j \Delta C_{TG,j} = \begin{cases} \Delta C_{TG,j} = 0, & C_j^t \times C_j^0 = 0, \\ \Delta C_{TG,j} = \sum_j L(C_j^t, C_j^0) \ln\left(\frac{TG_j^t}{TG_j^0}\right), & C_j^t \times C_j^0 \neq 0, \end{cases} \quad (12) \\ \Delta C_{GDP} &= \sum_j \Delta C_{GDP,j} = \begin{cases} \Delta C_{GDP,j} = 0, & C_j^t \times C_j^0 = 0, \\ \Delta C_{GDP,j} = \sum_j L(C_j^t, C_j^0) \ln\left(\frac{GDP_j^t}{GDP_j^0}\right), & C_j^t \times C_j^0 \neq 0, \end{cases} \quad (13) \\ L(a,b) &= (a-b)/(\ln a - \ln b). \quad (14)\end{aligned}$$

式(7)~(14)中: ΔC_{tot} 为交通部门碳排放变化的影响; ΔC_{CI} 为排放系数变化对碳排放的影响; ΔC_{SS} 为能源结构变化对碳排放的影响; ΔC_{TS} 为能源强度变化对碳排放的影响; ΔC_{TP} 为模式分担变化对碳排放的影响; ΔC_{TG} 为规模效应变化对碳排放的影响; ΔC_{GDP} 为经济效应变化对碳排放的影响。

2 研究结果与分析

2.1 碳排放变化分析

2011—2020 年交通运输业碳排放比较, 如图 1 所示。图 1 中: C 为碳排放。

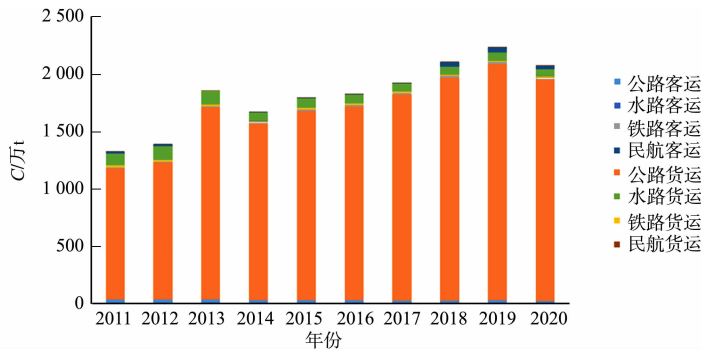


图 1 2011—2020 年交通运输业的碳排放比较

Fig. 1 Comparison of carbon emissions in transportation industry from 2011 to 2020

由图 1 可知以下 2 点结论。

1) 除了 2013—2014 年和 2019—2020 年, 江西省交通运输业碳排放一直处于增长状态, 总量从 2011 年 1 328 万 t 增加至 2020 年 2 076 万 t, 年均增长率达到 5.7%; 2013 年碳排放比 2012 年大幅增加的主要原因是公路运输汽油消耗量的大量增长, 而公路运输汽油消耗量增长的原因是 2013 年民用汽车保有量比 2012 年增加了 21.1%, 其余年份平均增长率仅为 14.8%; 2020 年, 碳排放下降主要是因为当年国内新型冠状病毒肺炎疫情肆虐, 居民出行活动受到了很大程度的限制, 导致交通运输业各模式周转量下降, 从而碳排放比 2019 年低。

2) 从运输模式看, 2011—2020 年, 公路货运对碳排放总量始终具有极高的贡献度, 2013 年后占比稳定在 90% 以上, 且公路货运碳排放量呈现平稳上升的走势, 年均增长率达 6.8%。其余各运输方式对碳排放总量贡献均较小; 2020 年, 水路货运、民航客运、公路客运占碳排放总量占比分别为 3.1%, 1.6%, 1.0%, 分列 2, 3, 4 位, 水路货运碳排放呈下降趋向, 年均减少 3.6%, 可能与柴油船舶逐渐替代燃料油船舶有关, 而民航客运则保持迅猛增长态势, 10 a 间碳排放实现了翻倍增长, 表明随着经济发展

与航空事业建设,人们对高质量远距离出行的需求不断增长。总体而言,在 4 种运输方式中,铁路货运产生碳排放最少,这很可能是由于电力机车逐步取代柴油机车。

在上述分析基础上,进一步对客运、货运碳排放中不同运输方式占比进行分析。在客运方面,碳排放占比呈现着铁路运输、公路运输、民航运输“三分天下”的格局,2017 年前,公路运输、铁路运输贡献了绝大部分碳排放,分居第 1,2 位,而 2018 年后民航运输成为客运碳排放的主力,2020 年占比达 50.9%,这同样与我国航空事业的蓬勃发展密不可分。在货运方面,与总体碳排放情况相似,公路运输占比始终保持在 90%以上,其次为水路运输,铁路运输、民航运输占比较少。

以上分析表明:2011—2020 年,公路运输部门是江西省交通运输部门碳排放最多的部门,尤其以公路货运为主,最少的是铁路货运碳排放。这是因为 2011—2020 年,江西省高速公路里程翻倍,客、货车保有量持续增加,公路运输占比持续增加,成为江西省交通部门碳排放的主导要素。随着人们对灵活性和便利性需求的不断扩大,高速公路的碳排放也在快速上升,这与产业结构的转变和人民对美好生活的不断追求密切相关。

2.2 碳排放影响因素分析

2011—2020 年江西省交通运输业的碳排放影响,如图 2 所示。由图 2 可知:2011—2020 年,碳排放虽有波动,但整体呈现稳定上升趋势,年均增长率高达 89%。在 5 个影响因素中,对碳排放变化的增长起推动作用的是模式分担与经济效应,起抑制作用的是能源结构与规模效应;而能源强度情况波动较大,在 2018 年前主要起到抑制作用,在 2019,2020 年则起促进作用。

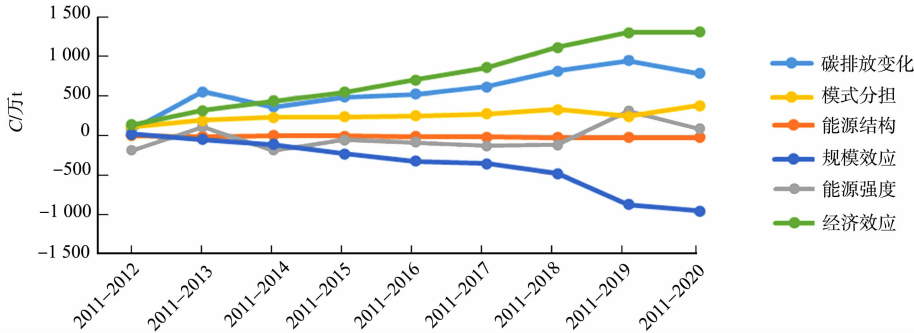


图 2 2011—2020 年江西省交通运输业的碳排放影响

Fig. 2 Carbon emission influence of transportation industry in Jiangxi Province from 2011 to 2020

经济效应是 2011—2020 年碳排放持续增加的主要推手。运输需求与经济效应息息相关,江西省人均 GDP 由 2011 年 26 157 元增长到 2020 年的 56 846 元,年增长率达到 17.32%。目前,江西省仍处于机动化和城市化的早期阶段。随着经济水平的增长,人们对生活品质的追求越来越高,交通的便利性也成为不可或缺的一环。现代物流系统的发展为客货运输带来了新的挑战,因此,高效的物流服务成为当今社会发展的重要支柱。

相较而言,模式分担对增加运输部门碳排放的推动力更小,但依然具有不容忽视的作用。2011—2020 年,铁路运输占运输服务总量的占比从 36.17%下降到 21.00%,公路运输占比从 57.78%上涨到 72.34%,民航运输从 0.46%上涨到 0.76%。燃油消耗更少、相对更为清洁的铁路运输所占比重不断被能耗与碳排放更多的公路运输挤占,从而促进了碳排放的逐年增长。

能源强度对江西省交通运输的碳排放的影响处于波动状态,这可能与运输模式的转变有关,反映了江西省交通运输业从铁路等能源消耗较少的模式向公路运输和民航运输等能源消耗较密集的运输方式的转变。

规模效应在降低运输部门碳排放方面起到主导作用,货物周转量增加值小于 GDP 的增加值,规模效应普遍下降。这是由于随着经济的发展,同样的运输服务为经济提供了更多的附加值,从而降低了规模效应。同时,交通运输方式日益转向不太环保的公路运输和航空运输。

能源结构是运输部门碳排放减少的另一个因素。铁路部门二氧化碳减少主要归功于电力机车替代柴油机车,水运部门二氧化碳减少归功于柴油船舶替代燃料油船舶。

3 结论与建议

3.1 结论

1) 从碳排放角度,从 2011 年至 2020 年,除 2013—2014 年和 2019—2020 年外,江西省交通运输业碳排放情况整体呈现持续增长趋势,总量从 1 328 万 t 增加至 2 076 万 t,年均增长率达 5.7%。

2) 从交通结构角度,在江西省交通运输业中,道路交通部门占据了最重要的地位,对碳排放的影响最为显著。2011—2020 年,公路运输占运输服务总量的占比从 57.78% 上涨到 72.34%,2013 年后公路货运对碳排放总量的贡献稳定在 90% 以上,且呈现平稳增长的趋势。

3) 从能源结构角度,江西省交通运输业能源消耗从 2014 年 759 万 t 增长到 2020 年 1 208 万 t,年均增长率高达 5.93%,能源使用最多的是汽油和柴油,使用较少的是燃料油和煤油。柴油和燃料油的消耗量占比逐渐减小,汽油和煤油的消耗占比逐年增加。

4) 从驱动力角度,江西省交通运输业碳排放增加的主要驱动力为经济效应,模式分担效应同样具有不容忽视的促进作用;规模效应在降低运输部门碳排放方面起到主导作用,能源结构同样起到微弱抑制作用;而能源强度对碳排放的影响处于波动状态,2018 年后随着运输方式的转变对碳排放增加产生促进作用。

3.2 政策建议

1) 优化交通运输结构。目前,江西省的交通运输结构中碳排放相对较高的公路运输占据了主导地位。应当适当控制公路的发展速度,减少公路的投资比例,大力推进“公转铁”“公转水”,以促进多式联运,尤其是进一步加快高速铁路的发展,充分利用高速铁路运量大、速度快、安全、舒适和能耗低的优势,较大程度上转移公路的运输量;依托江西省丰富的水资源,发展水运运输大宗货物的优势,提升省内九江港、南昌港等码头的运输能力,实现省内交通运输结构的优化。对于目前迅猛发展的民航运输方式,可以通过提高飞机的能源效率,优化航线设计,以及推动短途旅行的铁路替代等方式,逐步降低碳排放。

2) 优化能源结构。柴油、汽油和煤油等化石燃料是目前江西省交通运输业的主要能源,碳排放均相对较高。为优化能源结构,实现各类运输方式低碳化转型,应积极推广新能源技术,推动新能源汽车的普及。由于江西省内有丰富的稀土资源作为新能源汽车的原材料保障,所以省内电动汽车的发展前景相对更好。同时,应加强对生物燃料和氢能等清洁能源的研发和推广,逐步替代化石燃料。

参考文献:

- [1] 杨东,李艳红,田春林. 交通运输行业碳排放自然达峰特征与峰值预测研究[J/OL]. 交通运输系统工程与信息, 2024(1):1-17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4520.U.20240226.1543.004.html>.
- [2] 喻洁,达亚彬,欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10):112-119. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.10.015.
- [3] 江西省综合交通运输事业发展中心. 江西省人民政府办公厅关于印发江西省“十四五”综合交通运输体系发展规划的通知[EB/OL]. (2023-02-17)[2023-11-14]. http://jxgl.jt.jiangxi.gov.cn/art/2023/2/17/art_82893_4699781.html.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴(2012—2021)[M]. 北京:中国统计出版社,2012—2021.
- [5] 江西省人民政府. 最新发布关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见[EB/OL]. (2022-04-06)[2023-11-14]. https://www.jiangxi.gov.cn/art/2022/4/8/art_4990_3913111.html.
- [6] 江西省人民政府办公厅. 关于印发江西省“十四五”能源发展规划的通知[EB/OL]. (2022-05-24)[2023-11-14]. <https://www.tongdow.com/zixun/xitu/hangyepinglun/2022-05-24-571089.html>.
- [7] CHANG C C. A multivariate causality test of carbon dioxide emissions, energy consumption and economic growth in China[J]. Applied Energy, 2010, 87(11):3533-3537. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.05.004.
- [8] ZHANG Ming, LI Huanan, ZHOU Min, *et al.* Decomposition analysis of energy consumption in Chinese transportation sector[J]. Applied Energy, 2011, 88(6):2279-2285. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.12.077.
- [9] ANG B W, Zhang F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J]. Energy, 2000, 25(12):1149-1176. DOI:10.1016/S0360-5442(00)00039-6.
- [10] ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation

[J]. *Energy*, 2001, 26(6): 537-548. DOI: 10. 1016/S0360-5442(01)00022-6.

[11] ZHANG Yuejun, DA Yabin. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1255-1266. DOI: 10. 1016/j. rser. 2014. 09. 021.

[12] SCHOLL L, SCHIPPER L, KIANG N. CO₂ emissions from passenger transport[J]. *Energy Policy*, 1996, 24(1): 17-30. DOI: 10. 1016/0301-4215(95)00148-4.

[13] MAZZARINO M. The economics of the greenhouse effect: Evaluating the climate change impact due to the transport sector in Italy[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(10): 957-966.

[14] LAKSHMANAN T R, HAN Xiaoli. Factors underlying transportation CO₂ emissions in the USA: A decomposition analysis[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1997, 2(1): 1-15. DOI: 10. 1016/S1361-9209(96)00011-9.

[15] LU I J, LIN S J, LEWIS C. Decomposition and decoupling effects of carbon dioxide emission from highway transportation in Taiwan, Germany, Japan and South Korea[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(6): 3226-3235. DOI: 10. 1016/j. enpol. 2006. 11. 003.

[16] TIMILSINA G R, SHRESTHA A. Factors affecting transport sector CO₂ emissions growth in Latin American and Caribbean Countries: An LMDI decomposition analysis[J]. *International Journal of Energy Research*, 2009, 33(4): 396-414. DOI: 10. 1002/er. 1486.

[17] LUO Xiao, DONG Liang, DOU Yi, *et al.* Regional disparity analysis of Chinese freight transport CO₂ emissions from 1990 to 2007: Driving forces and policy challenges[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 56: 1-14. DOI: 10. 1016/j. jtrangeo. 2016. 08. 010.

[18] WEI Qingqi, ZHAO Songzheng, XIAO Wei. A quantitative analysis of carbon emissions reduction ability of transportation structure optimization in China[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(3): 10-17. DOI: 10. 1016/S1570-6672(13)60109-9.

[19] WANG Wenwen, ZHANG Min, ZHOU Min. Using LMDI method to analyze transport sector CO₂ emissions in China[J]. *Energy*, 2011, 36(10): 5909-5915. DOI: 10. 1016/j. energy. 2011. 08. 031.

[20] 江西省统计局, 国家统计局江西调查总队. 江西统计年鉴(2012—2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012—2021.

[21] 中国国家铁路集团有限公司. 中国铁道年鉴(2012—2021)[M]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2012—2021.

[22] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2012—2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012—2021.

[23] 环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[Z]. 北京: 环境保护部, 2014.

[24] 《交通大辞典》编委会. 交通大辞典[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.

[25] 王庆一. 按国际准则计算的中国终端用能和能源效率[J]. *中国能源*, 2006, 28(12): 5-9.

[26] 王庆一. 2019 能源数据[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2019.

[27] The intergovernmental panel on climate change (IPCC). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. (2020-07-01)[2020-09-22]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)