

袁长伟, 彭 琛. 城市公交碳排放效率评价及驱动因素分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 139-148.

YUAN Chang-wei, PENG Chen. Carbon emission efficiency and driving factors analysis of urban bus transportation[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 139-148.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.04.013

# 城市公交碳排放效率评价及驱动因素分析

袁长伟, 彭 琛

(长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**近年来,交通碳排已成为城市发展过程中的重要碳排放源之一,为促进城市公交低碳高效发展,对城市公交二氧化碳排放效率及其驱动因素进行量化分析。以陕西省城市公交系统为例,利用 2017~2021 年公交能源消耗数据,考虑电网碳排放因子的时间变化特性,采用“自上而下”法测算出公交二氧化碳排放量,选取公交标准运营车辆数、运营线路总长度、能源消耗总量作为投入变量,客运量与碳排放量作为产出变量,建立基于松弛变量的超效率测度模型(super-efficiency slack-based measurement, super-SBM)分析城市公交碳排放效率。此外,运用对数平均迪氏指数法(logarithmic mean Divisia index, LMDI)分析各驱动因素对公交碳排放量的影响程度。并根据研究结果为陕西省公交行业提出了节能减排政策建议。结果表明:陕西省城市公交碳排放效率均值为 0.65,还有较大的投入和产出空间,其中,延安、西安和铜川碳排放效率较高,渭南、汉中、安康碳排放效率靠后,陕西省各地区间公交碳排放效率差异明显,呈陕北地区>陕西省均值>关中地区>陕南地区的格局。研究期内,陕西省城市公交碳排放量总体呈下降趋势,运输强度因素对公交碳排放影响效应最为显著,且体现为抑制作用,其他各影响因素对公交碳排放起促进作用,效应值由强到弱依次为能源结构强度、经济发展、能源消耗和人口规模因素,其影响效应值分别为  $10.48 \times 10^4$ 、 $9.89 \times 10^4$ 、 $4.35 \times 10^4$ 、 $3.42 \times 10^4$  t。

**关键词:**交通工程;碳排放效率;super-SBM 模型;城市公交;驱动因素

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)04-0139-10

## Carbon emission efficiency and driving factors analysis of urban bus transportation

YUAN Chang-wei, PENG Chen

(College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In recent years, transport carbon emissions have become one of the important sources of carbon emissions in the process of urban development. In order to promote the development of urban public transport in a low-carbon and efficient manner, the efficiency of carbon dioxide emissions from urban public transport and its driving factors was quantitatively analyzed. The urban public transport system in Shaanxi Province was taken as an example, using the data of public transport energy consumption from 2017 to 2021, and the temporal and spatial

收稿日期:2024-03-01

基金项目:陕西省杰出青年科学基金项目(2021JC-27);陕西省重点科技创新团队项目(2023-CX-TD-11)

作者简介:袁长伟(1981-),男,湖南邵阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:changwei@chd.edu.cn。

characteristics of the carbon emission factor of the power grid was considered, the top-down method was used to measure the carbon dioxide emission of public transport. The number of standard operating vehicles, total length of operating routes, and total energy consumption of public transport were selected as input variables, and passenger traffic and carbon emissions as output variables, and the super-SBM model was established to analyse the carbon emission efficiency of urban public transport. In addition, the LMDI was used to analyse the influence of each driving factor on the carbon emissions of public transport. Based on the results of the study, energy-saving and emission reduction policy recommendations were proposed for the public transport industry in Shaanxi Province. The results show that the average value of urban public transport carbon emission efficiency in Shaanxi Province is 0.65, and there is still a large input and output space, of which, Yan'an, Xi'an and Tongchuan have higher carbon emission efficiency, and Weinan, Hanzhong and Ankang have backward carbon emission efficiency, and the differences in public transport carbon emission efficiency among different regions in Shaanxi Province are obvious, the northern region is larger than the northern region, and the Guanzhong region is larger than the southern region of Shaanxi Province. In the study period from 2017 to 2021, urban public transport carbon emissions in Shaanxi Province in general showed a downward trend, the transport intensity factor has the most significant effect on the impact of public transport carbon emissions, and embodied in the inhibition, the other influencing factors on the public transport carbon emissions to promote the role of the effect of the value of the strongest to the weakest in order of intensity of the energy structure, economic development, energy consumption and the population size factor, the effect of the value of the impact of the effect of the value of the following, respectively 104 800, 98 900, 43 500 and 34 200 t. 4 tabs, 2 figs, 26 refs.

**Key words:** traffic engineering; carbon emission efficiency; super-SBM model; urban bus transport; driving factor

0 引 言

在经济持续增长和城市化步伐加快的背景下,居民出行需求急剧增加,城市机动化程度也显著提高,带来交通能源消耗和碳排放量的激增、城市交通拥堵问题日益严重以及雾霾污染频发等一系列负面效应,交通运输碳排放已成为城市发展过程中的重要碳排放源之一<sup>[1]</sup>。城市私家车的数量庞大且分散,并且由于其私有性质和个体化的使用特点,使得政府难以实施有效的管控来降低城市交通碳排,而公交作为公共交通工具,通常由政府指定的运营商所有和管理,这种集中式的管理模式使得政府能够更容易实施统一的规范和标准,如车辆排放标准、行驶路线、班次安排等。因此测度城市公交碳排放效率、厘清其碳排放驱动因素,能为有关部门制定碳减排政策提供可靠的决策依据,合理平衡公交碳排放与行业经济发展之间的关系、促进低碳交通发展。

在碳排放效率分析中,存在 2 种主要的评价法:单要素评价法和全要素评价法。单要素评价法聚焦于某一特定的投入指标与碳排放之间的关联。如 Kaya 等采用地区生产总值与碳排放量之比表示碳生产效率<sup>[2]</sup>。卢建锋等采用不同运输方式的换算周转量与其二氧化碳排放量的比值研究其碳排放效率<sup>[3]</sup>。虽然单要素碳排放效率指标易于理解且计算方便,但交通系统是一个涉及车辆、道路设施、能源等资源投入,以及客流效益和碳排放产出的复杂体系,从单要素的角度来衡量碳排放效率具有一定局限性。而全要素评价法则更为全面和综合,它根据研究对象的特性,选取多个投入指标,从而实现对碳排放效率的综合、多角度的测算。因此,本文从全要素的视角探究城市公交碳排放效率:将碳排放量作为非期望产出,在给定要素投入(车辆、线路、能源)下得到的总产出和总投入的比率,同等投入下产生的碳排放量越少且产出的运输效益越大,则城市公交碳排放效率越

高。数据包络法(data envelopment analysis, DEA)是全要素效率测度的常用方法,已广泛应用于能源、交通、城市、经济等领域,Sow等用DEA的方法研究了塞内加尔公交线路的相对效率,发现部分线路存在改进的可能性<sup>[4]</sup>。Ustadi等利用DEA模型对马来西亚半岛北部地区的公交枢纽效率进行研究,发现大部分地区的交通枢纽为DEA有效<sup>[5]</sup>。李琼等利用三阶段DEA模型,在剔除城市GDP、人口等外生环境因素的随机干扰后,计算了2016~2019年中国36个中心城市的城市公交运营效率,发现大部分城市公交运营效率未达到DEA有效,处于规模报酬递增阶段<sup>[6]</sup>。在传统DEA模型基础上,Tone将松弛变量纳入目标函数,提出了SBM模型,考虑了投入产出要素的松弛性问题对效率的影响<sup>[7]</sup>,为解决SBM模型可能存在多个决策单元效率值同时为1,无法进行比较的问题,Tone还融合了超效率DEA模型,提出超效率SBM模型,其效率值可以大于1,以便于各个决策单元进行比较分析<sup>[8]</sup>。吴茜等利用超效率SBM模型定量测度了2013~2018年福建省城市公交效率,发现福建省城市公交效率总体呈缓慢增长态势,并且具有明显的空间分异特征,且中部经济带比东部沿海经济发达地区和西部贫困山区公交效率高<sup>[9]</sup>。以上研究利用DEA方法分析了公交运营效率,但并未考虑到碳排放量作为非期望产出对公交运营效率的影响。章玉利用“自上而下”法,根据各类能源消耗量和各能源二氧化碳排放系数测算了中国35个大中城市公交碳排放量,并将碳排放量作为非期望产出研究公交碳排放效率<sup>[10]</sup>,但并未考虑电能消耗产生的间接碳排放。陈丹等根据中国生态环境部发布的全国电网平均二氧化碳排放因子,建立了电能驱动公交车二氧化碳排放测算模型<sup>[11]</sup>,但对电网碳排放因子的时空变化特性亦考量不足。

在碳排放驱动因素分析方面,多从交通行业整体开展研究<sup>[12-14]</sup>。常用的方法有KAYA模型、STIRPAT模型、对数平均迪氏指数分解模型(LMDI)等,其中,LMDI模型具有分解结果残差为零、具备加法特性以及便于分析等优点,因此,本文采用该模型来探究公交碳排放的驱动因素。张国兴等将交通运输碳排放影响因素扩展为交通能源强度、交通运输总周转量单位能耗、单位GDP交通运输总周转量、人均GDP以及人口规模5个因素,运用LMDI分解模型探究了黄河流域交通运输碳排放驱动因素,

结果表明,人均GDP是黄河流域交通运输业碳排放增长的第一主导因素,交通运输强度是抑制碳排放增长的关键因素<sup>[15]</sup>。杨绍华等运用LMDI方法分析了交通运输业碳密度、能源效率、能源强度、运输结构、经济结构、经济水平以及人口规模因素对长江经济带11个省份交通运输碳排放的贡献度,发现长江上中下游以及各省市之间的驱动效应具有显著差异性<sup>[16]</sup>。也有学者分析了轨道交通<sup>[17]</sup>、港口<sup>[18]</sup>以及物流企业<sup>[19]</sup>碳排放效率影响因素。袁振洲等对2010~2019年中国城市轨道交通系统碳排放量影响因素进行分析,发现行业发展因素和交通运输业生产效率对中国城轨系统碳排放有抑制作用,经济发展、人口规模、交通运输业能源结构强度和能源消耗强度因素对城轨系统碳排放有促进作用<sup>[20]</sup>。

国内外学者在碳排放的计算以及碳排放效率的测算、影响因素分析等方面,已经积累了部分理论与研究成果。但在交通碳排放的测算方面,很少包含二次能源,如电力消耗产生的二氧化碳,而当下公交行业电力消耗占比不断提高,忽略这一部分碳排放的测算会对结果造成一定偏差,本文考虑了电网碳排放因子的时变特性,建立了电网碳排放因子测算模型,测算结果更加准确。其次,在现有研究中更多聚焦于公交运营效率涉及城市公交碳排放效率的成果还相对较少,且并未进一步深入挖掘公交碳排放的驱动因素。

本文在既有研究的基础上,建立电网碳排放因子测算模型,基于“自上而下”法计算出公交运营二氧化碳排放量,利用考虑非期望产出的Super-SBM模型测算城市公交碳排放效率,再通过LMDI方法分析能源结构强度、能源消耗强度、运输强度、经济发展、人口规模5个驱动因素对公交碳排放的贡献值,以期提升公交资源利用效率,制定科学有效的节能减排策略提供一定的依据。

## 1 研究方法

### 1.1 碳排放量测算

在二氧化碳测度方面,《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》中提供了2种测度方法:一是“自下而上”法,基于不同类型车辆数、单位里程能源消耗量和行驶里程等来计算,此方法数据收集较为困难,不同区域误差可能较大;二是“自上而下”法,根据各类能源碳排放系数与各能源消耗量的乘积得出,计算结果精度高,应用更加广泛。本文采用“自上而下”法,测算城市公交二氧化碳排放量。

公交车燃料类型包括汽油、柴油、天然气等化石能源以及电能,近年来电力作为公交车燃料的比重逐渐上升。尽管车辆消耗电能并不直接排放二氧化碳,但在发电过程中,部分电力由火力发电产生,而火力发电燃烧化石能源会释放二氧化碳。因此本文测算的城市公交碳排放量包括消耗化石能源所产生的直接碳排放以及消耗电力所产生的间接碳排放。

传统公交车排放二氧化碳核算模型如下

$$C_{\text{fuel}} = \sum_j E_j F_j \quad (1)$$

$$F_j = 10^{-6} A_{\text{LV},j} C_{\text{EF},j} C_{\text{OF},j} \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{fuel}}$ 为传统公交车二氧化碳排放量; $E_j$ 为能源 $j$ 的消耗量; $F_j$ 为能源 $j$ 的碳排放因子; $A_{\text{LV},j}$ 为能源 $j$ 的平均低位发热量; $C_{\text{EF},j}$ 为能源 $j$ 的单位热值含碳量; $C_{\text{OF},j}$ 为能源 $j$ 的碳氧化率。

耗电类公交车排放二氧化碳核算模型如下

$$C_{\text{el}} = E_{\text{el}} F_{\text{el}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{el}}$ 为耗电类公交车  $\text{CO}_2$  排放量; $E_{\text{el}}$ 为电能消耗量; $F_{\text{el}}$ 为电力碳排放因子。

电力碳排放因子计算如下

$$F_{\text{el},i,t} = \frac{S_{i,t}}{M_{i,t}} \quad (4)$$

式中: $F_{\text{el},i,t}$ 为城市 $i$ 在第 $t$ 年的电力碳排放系数; $S_{i,t}$ 为城市 $i$ 所属省份在第 $t$ 年火力发电消耗化石能源排放的二氧化碳,采用“自上而下”法计算; $M_{i,t}$ 为城市 $i$ 所属省份第 $t$ 年的总发电量。

则城市公交碳排放总量 $C$ 为

$$C = C_{\text{fuel}} + C_{\text{el}} \quad (5)$$

## 1.2 非期望产出超效率 SBM 模型

DEA 方法最早由 Charnes 等提出,旨在有效评价多个投入产出问题的效率<sup>[21]</sup>。对于 CCR、BCC 等传统的 DEA 模型,没有将松弛性问题考虑在内,Tone 引入了 SBM 模型,该模型充分考虑了松弛变量的影响,并且能够处理非期望产出,此外,为了解决存在多个有效决策单元,即决策单元效率值同时为 1,无法对其进行进一步比较的问题,其还提出了超效率 SBM 模型,决策单元效率值可以大于 1<sup>[7]</sup>。本文将公交二氧化碳排放量作为非期望产出,利用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型测算公交系统的碳排放效率。

假设需要评价 $n$ 个决策单元的效率,每个决策单元有 $m$ 个投入指标, $S_1$ 个期望产出指标和 $S_2$ 个非期望产出指标,用向量来表示这 3 个指标,即:

$x \in \mathbf{R}^m, y^g \in \mathbf{R}^{S_1}, y^b \in \mathbf{R}^{S_2}$ , 矩阵  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}^g, \mathbf{Y}^b$  的定义如下:  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}, \mathbf{Y}^g = [y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g] \in \mathbf{R}^{S_1 \times n}, \mathbf{Y}^b = [y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b] \in \mathbf{R}^{S_2 \times n}$ , 设定  $\mathbf{X} > 0, \mathbf{Y}^g > 0, \mathbf{Y}^b > 0$ , 则涵盖了生产过程中所有可能的投入与产出组合,即生产可能性合集  $P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq \mathbf{X}\theta, y^g \geq \mathbf{Y}^g\theta, y^b \leq \mathbf{Y}^b\theta, \theta \geq 0\}$ , 生产前沿面指那些在生产可能集  $P$  中,能以最小资源投入实现最大产出的生产组合所构成的边界。进一步,考虑非期望产出的 SBM 模型如(6)所示

$$\begin{aligned} \rho = \min & \left\{ \left( 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}} \right) \left[ 1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right) \right]^{-1} \right\} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} x_0 = \mathbf{X}\theta + S^- \\ y_0^g = \mathbf{Y}^g\theta - S^g \\ y_0^b = \mathbf{Y}^b\theta + S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \theta \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $(x_0, y_0^g, y_0^b)$  为决策单元;  $S^-, S^g, S^b$  分别为决策单元的投入、期望产出和非期望产出的松弛量;  $\theta$  为调整矩阵;  $\rho$  为决策单元(DMU)的效率值,当  $0 \leq \rho < 1$  时认为 DMU 无效,当  $\rho = 1$  时,则认为 DMU 有效。

式(6)中是一个非线性公式,为方便计算效率值,可通过 Charnes-Cooper 方法转换为线性公式,即在模型中引入标量 $t$ ,转化后模型如下

$$\begin{aligned} \tau = \min & t - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} 1 = t + \frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right) \\ x_0 t = \mathbf{X}\mu + S^- \\ y_0^g t = \mathbf{Y}^g\mu - S^g \\ y_0^b t = \mathbf{Y}^b\mu - S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \mu \geq 0 \\ t > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为引入标量 $t$ 后的新变量。

为防止出现多个决策单元效率值同时为 1,无法进行排序比较,将超效率模型与 SBM 模型相结合,计算公式如式(8)所示

$$\begin{aligned} \rho^* = \min & \left\{ \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}} \right) \left( \frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \frac{\bar{y}_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{r0}^b} \right) \right)^{-1} \right\} \end{aligned}$$

s. t.

$$\left\{\begin{aligned} \bar{x} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \theta_j x_j \\ \bar{y}^g &\leq \sum_{j=1, j \neq k}^n \theta_j y_j^g \\ \bar{y}^b &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \theta_j y_j^b \\ \bar{x} &\geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b, \theta_j \geq 0 \end{aligned}\right. \quad (8)$$

式中:  $(\bar{x}, \bar{y})$  为决策变量的参考点;  $\theta_j$  为权重向量;  $\rho^*$  为公交碳排放效率, 其值可以大于 1, 有利于效率值的比较和分析。

1.3 LMDI 因素分解分析法

日本学者构建了著名的 Kaya 恒等式<sup>[22]</sup>, 广泛应用于碳排放量的变化驱动因素研究中, 本文在已有研究成果基础上, 结合研究内容, 对 Kaya 恒等式进行扩展和改写, 即

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \frac{E_i}{V_i} \frac{V_i}{G_i} \frac{G_i}{P_i} P_i \quad (9)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  市的公交碳排放量;  $E_i$  为第  $i$  市的公交能源消耗量;  $V_i$  为第  $i$  市的客运量;  $G_i$  为第  $i$  市的地区生产总值, 以 2000 年为基期, 对数据进行平减处理, 以剔除物价变动的影响;  $P_i$  为第  $i$  市的常住人口数量。

令  $U_i = \frac{C_i}{E_i}, H_i = \frac{E_i}{V_i}, Q_i = \frac{V_i}{G_i}, D_i = \frac{G_i}{P_i}$  则公交系统碳排放量影响因素分解模型如下

$$C = \sum_i U_i H_i Q_i D_i P_i \quad (10)$$

式中:  $U_i$  为能源结构强度因素, 即消耗单位能源所产生的碳排放量, 与行业能源结构情况密切相关;  $H_i$  为能源消耗强度因素, 即单位客运量能耗;  $Q_i$  为运输强度因素, 即单位产值的客运量;  $D_i$  为经济发展因素, 即人均 GDP;  $P_i$  为人口规模因素, 即地区常住人口数量。

采用 LMDI 因素分解法对公式进行无残差分解, 公交碳排放量第  $t$  年  $C^t$  与基年  $C^0$  的差值总效应  $\Delta C$  表示如下

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_U + \Delta C_H + \Delta C_Q + \Delta C_D + \Delta C_P \quad (11)$$

$$\Delta C_U = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{U_i^t}{U_i^0} \quad (12)$$

$$\Delta C_H = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{H_i^t}{H_i^0} \quad (13)$$

$$\Delta C_Q = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{Q_i^t}{Q_i^0} \quad (14)$$

$$\Delta C_D = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{D_i^t}{D_i^0} \quad (15)$$

$$\Delta C_P = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{P_i^t}{P_i^0} \quad (16)$$

式中:  $\Delta C_U, \Delta C_H, \Delta C_Q, \Delta C_D, \Delta C_P$  分别为第  $t$  年能源结构强度、能源消耗强度、运输强度、经济发展、人口规模 5 个因素对公交碳排放的贡献值, 当某因素的贡献值  $< 0$  时, 表示该因素对公交碳排放起抑制作用; 贡献值  $> 0$  时, 表示该因素对公交碳排放起促进作用。

2 实证分析

2.1 指标选取及数据说明

使用 Super-SBM 模型对公交碳排放效率进行测算, 关键在于投入产出指标的选取。城市公交效率的投入指标主要包括线路规模、公交车辆数、公交从业人员数以及能源的消耗量等<sup>[23-26]</sup>。而在产出指标的选择上, 客运量是最有代表性的产出指标, 其次还有收益、运营里程、空气污染、碳排放量等指标。本文在已有研究的基础上, 结合城市公交系统特点, 并考虑到数据的可获取性以及模型的简洁性, 选取标准运营车辆数、运营线路总长度以及能源消耗总量作为投入指标; 选取客运量作为期望产出指标; 选取二氧化碳排放量作为非期望产出指标, 如表 1 所示。

表 1 公交碳排放效率投入产出指标

Tab. 1 Public transport carbon efficiency input-output indicators		
类别	指标名	单位
投入指标	标准运营车辆数	标台
	运营线路总长度	km
	能源消耗总量	标准吨煤
期望产出指标	客运量	10 <sup>4</sup> 人
非期望产出指标	二氧化碳排放量	10 <sup>4</sup> t

本文的分析样本为 2017~2021 年陕西省 10 个地市的(不含杨凌示范区)公交系统。标准运营车辆数、运营线路总长度以及客运量来源于历年陕西省统计年鉴, 各类能源消耗数据均来源于陕西省道路运输事业发展中心, 能源消耗总量由各能源消耗量统一折算为标准煤, 其中电力按当年电厂发电标准煤耗折算。火力发电能源消耗量可通过中国能源统计年鉴获取, 不同方式发电量来源于中国电力年鉴。

2.2 碳排放量测算结果

为了更好地契合中国的实际情况, 本文各类能源单位热值含碳量与碳氧化率来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》, 缺失部分参考《IPCC 2006 年国家温室气体排放清单指南》, 各能源平均低位发

热量和折算标准煤系数参考《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)。

火力发电是陕西省电力生产的主要来源,2017~2021 年陕西省平均火力发电量占比为 86%。根据式(4)计算得出陕西省 2017~2021 年电力碳排放系数见表 2,可以看出 2017~2020 年陕西省电力碳排放系数呈上升趋势,直到 2021 年电力碳排放系数出现下降。

表 2 2017~2021 年陕西省电力碳排放系数

Tab. 2 Carbon emission factors for electricity in Shaanxi Province from 2017 to 2021 $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$					
年份	2017	2018	2019	2020	2021
电力碳排放系数	0.603	0.609	0.613	0.618	0.586

陕西省公交碳排放总量及人均公交碳排放量如图 1 所示,本文考虑了电网碳排放系数的时间变化特性,因此测算结果精度更高。可见,2017~2019 年陕西省公交碳排放量总体呈缓慢下降趋势,2020 年受疫情影响公交碳排放总量骤降,较 2019 年减少  $13.26 \times 10^4 \text{ t}$ ,2021 年公交碳排放量较 2020 年有所上升。公交人均碳排放量由 2017 年的  $16.67 \text{ kg}/\text{人}$  到 2021 年的  $14.53 \text{ kg}/\text{人}$ ,变化趋势与公交碳排放总量基本同步。

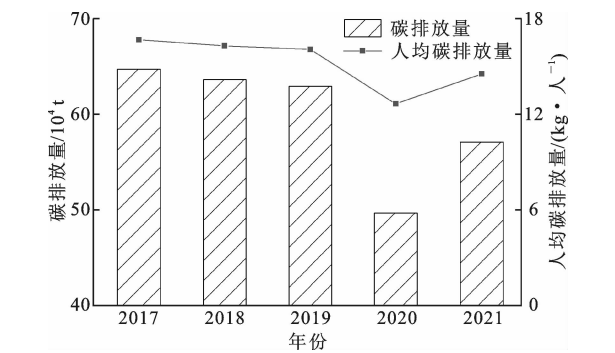


图 1 2017~2021 年陕西省公交碳排放趋势

Fig. 1 Trend of carbon emissions from public transport in Shaanxi Province from 2017 to 2021

2.3 碳排放效率分析

本文利用 MATLAB 软件测算陕西省各市 2017~2021 年公交碳排放效率值,测算结果见表 3。可见,2017~2021 年陕西省城市公交碳排放效率大于或等于 1 的城市个数分别为 2、3、3、1、2,这些城市公交碳排放效率都达到了 DEA 有效的状态,即资源投入所带来的运营效益(客运量)高而且产生的碳排放也相对较少。其中,延安市公交碳排放效率每年都处在生产前沿面上,西安市与铜川市有 3 年处在生产前沿面上,说明这 3 个城市的碳排放效率比同期其他决策单元较高,资源配置

相对合理。其余 7 个城市公交碳排放效率 5 年来都小于 1,说明陕西省大部分城市的公交碳排放效率相对较低。

表 3 2017~2021 年陕西省各地市公交碳排放效率

Tab. 3 Carbon emission efficiency of public transport across cities in Shaanxi Province from 2017 to 2021						
地区	城市	2017	2018	2019	2020	2021
陕北	延安	1.12	1.12	1.09	1.21	1.09
	榆林	0.74	0.74	0.80	0.59	0.79
关中	西安	1.37	1.40	1.33	0.58	0.78
	铜川	0.64	1.05	1.06	0.67	1.07
	宝鸡	0.63	0.62	0.56	0.47	0.62
	咸阳	0.68	0.56	0.48	0.31	0.46
	渭南	0.48	0.51	0.47	0.27	0.42
陕南	汉中	0.29	0.33	0.30	0.24	0.25
	安康	0.25	0.40	0.41	0.33	0.42
	商洛	0.41	0.39	0.49	0.46	0.55
均值		0.66	0.71	0.70	0.51	0.65

从总体来看,陕西省历年公交碳排放效率均值分别为 0.66、0.71、0.70、0.51、0.65,均小于 1,反映出陕西省城市公交的碳排放效率总体水平偏低。可见,当前陕西省城市公交系统的资源要素利用效率并不高,重复建设和低效利用现象较严重,公交碳排放效率仍有很大的提升空间。2017~2019 年陕西省公交碳排放效率呈上升趋势,在 2020 年骤降,从投入和产出角度的变化可以解释 2020 年碳排放效率的波动。2020 年受疫情冲击,部分公交线路停运、公交车辆限制乘坐人数等,使得居民出行受到影响,即使居民出行观念也更加偏向与人员接触少的交通方式,导致 2020 年公交客运量下滑严重。同时由于公交的公益性质,其投入指标,如运营车辆数和运营线路长度并未减少,因此 2020 年陕西省公交碳排放效率显著下降。2021 年,公交客运量逐渐恢复到疫情前水平,其碳排放效率升高。

陕西省公交碳排放效率排名前三的城市依次为延安、西安、铜川,公交碳排放效率均值分别为 1.13、1.09 和 0.90,是公交碳减排工作的“领航者”。西安市作为西北地区的经济、政治和对外交往的中心,有着得天独厚的区位优势,西安的经济增速在中国范围内都处于领先地位,这在很大程度上促进了公交行业的发展,同时节能减排政策落实较好,因此碳排放效率水平高。铜川市域面积较小,公交的投入要素较少,虽然客运量也少,但能源利用率较高,非期望产出远低于其他地区,因此公交碳排放效率较高。

延安市面积辽阔,但除主要城区外,其他地区的人口密度相对较低,公交资源利用率高,虽延安市有部分县区公交发展仍处于较低水平,但其能源消耗量和碳排放量较其他地区更低,因此总体上延安市公交碳排放效率高。

陕西省公交碳排放效率排名后三位的城市依次为汉中、安康和渭南,公交碳排放效率均值分别是 0.28、0.36 和 0.43,是公交碳减排工作的“追赶者”,这 3 座城市的效率均值与排名第一位的延安效率均值相差 3 倍,说明陕西省内部城市之间效率差异较大,末几位城市的公交碳排放效率急需提高。渭南、商洛碳排放效率相差不大,但渭南市的公交资源利用效率不高,因此碳排放效率较商洛低。汉中和安康都位于陕南地区,经济相对落后,且道路条件差,同时,对环境污染问题的治理投入不足,公交汽油、柴油消耗占比较高,在经济、地理、自然等因素作用下,公交碳排放效率较低。

图 2 为 2017~2021 年分地区公交碳排放效率变动趋势,从图 2 可以看出,陕西省各地区间公交碳排放效率有显著差异,存在明显的空间异质性。陕北地区公交碳排放效率平均值最高,为 0.93,明显高于陕西省平均水平,碳排放效率变化较为平稳,均处于 0.9~1 的区间内。其次为关中地区,碳排放效率平均值为 0.70,效率波动较大,2018 年效率达到最高 0.83,2020 年效率最低,为 0.46,这可能是由于关中地区城市人口密集,2020 年公交效率受疫情冲击较其他地区大,除 2020 年外,公交碳排放效率均在陕西省均值水平之上;陕南地区碳排放效率平均值最低,为 0.37,均在陕西省平均水平之下,但陕南地区碳排放效率总体呈上升趋势,这是因为陕南地区公交还处于稳步发展阶段,同时能源结构的持续改善促进了陕南地区公交碳排放效率的提升。

2.4 LMDI 分解模型结果分析

以 2017 年的数据为基数,利用 LMDI 模型,可相应计算出陕西省公交系统碳排放各驱动因素的分解结果,如表 4 所示。

可见,根据 LMDI 分解结果,从 2017~2021 年整体来看,能源结构强度、经济发展、能源消耗强度和人口规模因素对陕西省公交碳排放增长起促进作用;运输强度因素对陕西省公交碳排放增长起抑制作用。

能源结构强度在研究区间内除了 2020~2021 年对公交碳排放起抑制作用外,其余年份均起正向

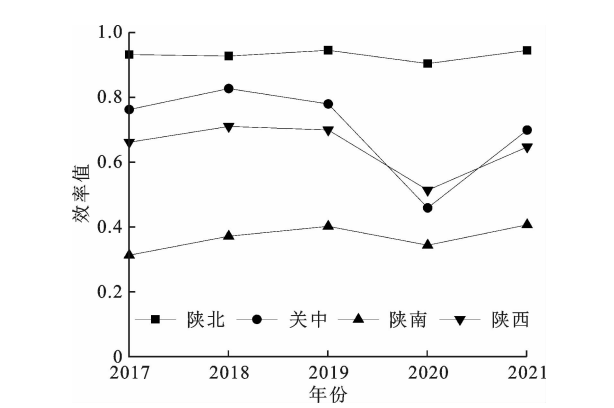


图 2 2017~2021 年分地区公交碳排放效率变动趋势  
Fig. 2 Trends in public transport carbon efficiency changes by region from 2017 to 2021

表 4 陕西省城市公交碳排放变化分解结果

Tab. 4 Decomposition results of urban public transport carbon emission changes in Shaanxi Province						
10 <sup>4</sup> t						
年份	$\Delta C_U$	$\Delta C_H$	$\Delta C_Q$	$\Delta C_D$	$\Delta C_P$	$\Delta C$
2017~2018	3.57	-5.82	-3.78	3.50	1.45	-1.08
2018~2019	4.79	-6.22	-3.02	2.78	0.98	-0.68
2019~2020	2.47	11.44	-28.90	0.58	1.15	-13.26
2020~2021	-0.35	4.94	-0.03	3.03	-0.17	7.42
累计效应	10.48	4.35	-35.73	9.89	3.42	-7.60

驱动作用,累计增加  $10.48 \times 10^4$  t 碳排放量,是驱动陕西省公交碳排放量增长的核心因素。虽然陕西省公交消耗能源中电能占比大幅增加,由 2017 年的 5.06% 上升至 2021 年的 43.15%,但 2017~2020 年陕西省电能碳排放系数逐年上升,直到 2021 年才出现下降,这与能源结构强度变化趋势相同,因此,降低火力发电比例,增加风能、太阳能及水力等清洁能源发电比例是降低陕西省公交碳排放量的有效途径。

能源消耗强度在 2017~2019 年对公交碳排放起抑制作用,2019~2020 年对碳排放起促进作用,研究期间累计促进作用大于抑制作用。能源消耗强度能够反映出能源利用效率的高低,能源消耗强度增加碳排放效应较为明显说明陕西省能源利用效率总体呈下降趋势。公交行业在技术创新和管理优化的驱动作用下,不断提升公交运营的能源利用率,能有效降低能源消耗强度。

经济发展是陕西省公交碳排放增长的重要因素,累计增加  $9.89 \times 10^4$  t 碳排放,经济发展水平是城市公交发展的重要驱动力,经济发展水平越高的地区,由于经济活动频繁,往往伴随着更大的交通需求,这种交通需求的增长,会推动公交客运量的提升,从而导致公交碳排放量的增加。

人口规模因素累计促进公交碳排放量增长  $3.42 \times 10^4$  t, 人口规模的增加会扩大交通活动区域、提高人员流动性, 进而带动运输需求的增长。在这一过程中, 由于运输活动的增多, 能源的消耗量也必然随之上升, 进而导致碳排放量的增加。研究期内陕西省人口变化幅度较小, 人口规模的贡献率相对较低。

运输强度对公交碳排放增长有较好的抑制作用, 累计减少碳排放  $35.11 \times 10^4$  t, 运输强度描述了公交客运量与地区生产总值的关系, 研究期间地区生产总值是逐年增长的, 当陕西省公交客运量的增速低于地区生产总值的增速, 或者客运量下降时, 运输强度就会下降, 增长率为负, 从而抑制公交碳排放的增加。

## 2.5 政策建议

结合已有研究结果和陕西省公交发展现状, 提出以下几点建议:

(1) 提高技术减排力度, 加大对节能技术的研发投入力度, 提高新能源车辆的性能, 从根源上减少碳排放量。大力建设智能交通系统, 对于公交车实施公交智能调度, 对公交优先信号交叉口进行合理布局, 提高公交运行效率。

(2) 优化能源结构, 降低电能碳排放系数。电能 在公交运行能源消耗中占比逐年增加, 2020 年陕西公交电能碳排放量已超过天然气碳排放量成为公交碳排放的重要组成部分。研究期间陕西省火力发电占比始终在 80% 以上, 降低火力发电比例, 增加太阳能、风能发电投入对陕西省控制碳排放意义重大。

(3) 针对陕西省城市公交碳排放效率差异问题, 应对南部山地地区, 增加技术经济投入促进发展, 完善线路建设, 缩小地区差异; 对西安市应该进一步加强公交与地铁在服务时间、服务规模及信息指引等方面的协同配合, 并根据现有地铁网络对公交线路进行优化调整, 提高居民公交出行意愿。

## 3 结 语

(1) 本文以陕西省公交系统为研究对象, 采用自上而下的方法并考虑电网碳排放因子的时间波动性计算出 2017~2021 年陕西省各市公交系统碳排放量。基于多投入产出视角, 结合非期望产出超效率 SBM 模型, 分析了陕西省各市公交碳排放效率差异及变动情况。利用 LMDI 模型分解分析公交碳排

放的驱动因素。

(2) 研究期间陕西省城市公交碳排放量总体呈下降趋势, 陕西省公交碳排放效率均值为 0.65, 仍然处于较低水平, 说明当前陕西省城市公交系统的资源要素利用效率并不高, 还有较大的投入和产出空间。陕西省各地区间公交碳排放效率有显著差异, 呈陕北地区 > 陕西省均值 > 关中地区 > 陕南地区的格局。在陕西各市中, 延安、西安和铜川公交碳排放效率较高, 其中延安每年都达到 DEA 有效; 汉中、安康和渭南公交碳排放效率较低, 需要科学配置其资源投入, 加配置要素间的协调性, 减少投入冗余并发挥其最佳效益。

(3) 陕西省公交碳排放增长的主要驱动因素是能源结构强度与经济发展水平, 有效抑制碳排放增长的驱动因素是运输强度, 要想从总量和结构上抑制公交碳排放的增长, 应重点从公交能源消耗结构及能源利用效率入手解决。

(4) 本文主要利用车辆终端能源消耗测算碳排放量, 忽略了基础设施建设及车站运营维护的能耗, 未来可以考虑包括建设阶段、运营阶段、维护阶段的全过程消耗, 从全生命周期的视角分析城市公交碳排放效率。

## 参考文献:

### References:

- [1] 金 昱. 国际大城市交通碳排放特征及减碳策略比较研究[J]. 国际城市规划, 2022, 37(2): 25-33.  
JIN Yu. Comparative study on characteristic and planning strategies of transportation carbon emissions in global megacities[J]. Urban Planning International, 2022, 37(2): 25-33.
- [2] KAYA Y, YOKOBORI K. Global environment, energy and economic development[R]. New York: United Nations University, 1993.
- [3] 卢建锋, 傅 惠, 王小霞. 区域交通运输业碳排放效率影响因素研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(2): 25-30.  
LU Jian-feng, FU Hui, WANG Xiao-xia. Research on the impact of regional transportation emissions efficiency factors[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(2): 25-30.
- [4] SOW O, OUKIL A, NDIAYE B M, et al. Efficiency



analysis of public transportation subunits using DEA and bootstrap approaches — Dakar Dem Dikk case study[J]. *Journal of Mathematics Research*, 2016, 8 (6):114-127.

[5] USTADI M N, SHOPI N A M. A study towards the efficiency of public transportation hub characteristics: A case study of northern region, Peninsular Malaysia [J]. *Procedia Economics and Finance*, 2016, 35: 612-621.

[6] 李 琼, 朱士卜, 朱文英. 城市公交运营效率评价研究——基于三阶段 DEA 方法的分析[J]. *价格理论与实践*, 2022(6):152-155, 195.  
LI Qiong, ZHU Shi-bu, ZHU Wen-ying. Research on evaluation of urban public transport operation efficiency—Base on the analysis of the three stage DEA method[J]. *Price: Theory & Practice*, 2022(6):152-155, 195.

[7] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data development analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3):498-509.

[8] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1):32-41.

[9] 吴 茜, 刘菊梅, 叶士琳. 福建省城市公交效率测度及时空演化特征——基于超效率 SBM 模型和 Malmquist 指数法[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(2):71-80.  
WU Qian, LIU Ju-mei, YE Shi-lin. Measurement and temporal and spatial evolution characteristics of urban public transport efficiency in Fujian Province: Based on super efficiency SBM model and Malmquist index method [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 38(2):71-80.

[10] 章 玉. 考虑非期望产出的大中城市公交运营效率评价[J]. *交通运输研究*, 2016, 2(6):32-37.  
ZHANG Yu. Operation efficiency evaluation for public transport of large and medium-sized cities based on undesirable output [J]. *Transportation Research*, 2016, 2(6):32-37.

[11] 陈 丹, 于 慧, 汤 程, 等. 城市公共客运交通碳排放及其大气环境影响的实证研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(4):1-10.  
CHEN Dan, YU Hui, TANG Cheng, et al. Empirical study on carbon dioxide emissions and atmospheric environment impact of urban public passenger transportation[J]. *Transport Systems Engineering and Information*, 2023, 23(4):1-10.

[12] 王 超, 武丽敏. 基于“双碳”视角的丝绸之路经济带交通碳减排驱动因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(2):9-19.  
WANG Chao, WU Li-min. Factors driving the carbon emission reduction in transport along the Silk Road Economic Belt: An analysis from the perspective of “double carbon”[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(2):9-19.

[13] 王智琦, 李建国, 彭彬彬, 等. 西部地区交通碳排放的驱动因素与脱钩效应分析[J]. *环境工程*, 2023, 41 (10):213-222.  
WANG Zhi-qi, LI Jian-guo, PENG Bin-bin, et al. Driving factors and decoupling effects analysis of transportation carbon emissions in western China[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(10):213-222.

[14] 刘俊豪, 刘榆欣, 黄 蕾. 中国华东地区旅游交通碳排放测度与驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2024, 37 (3):626-636.  
LIU Jun-hao, LIU Yu-xin, HUANG Lei. Measurement and driving factor analysis of carbon emissions from tourism transportation in East China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37 (3): 626-636.

[15] 张国兴, 苏钊贤. 黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测[J]. *管理评论*, 2020, 32(12): 283-294.  
ZHANG Guo-xing, SU Zhao-xian. Analysis of influencing factors and scenario prediction of transportation carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. *Management Review*, 2020, 32(12):283-294.

[16] 杨绍华, 张宇泉, 耿 涌. 基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4817-4826.  
YANG Shao-hua, ZHANG Yu-quan, GENG Yong. An LMDI-based investigation of the changes in carbon emissions of the transportation sector in the Yangtze River economic [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10):4817-4826.

[17] 周 琪, 梁 肖, 黄俊生, 等. 城市轨道交通碳排放效率与影响因素研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(1):30-38, 85.

- ZHOU Qi, LIANG Xiao, HUANG Jun-sheng, et al. Carbon emission efficiency and influencing factors analysis of urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 30-38, 85.
- [18] 戈艳艳, 王姗姗. 考虑碳排放的港口全要素生产率及影响因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 22-29.
- GAO Yan-yan, WANG Shan-shan. Total factor productivity and influencing factors analysis for ports considering carbon emissions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 22-29.
- [19] 郑 琰, 贲宇姝, 王康得, 等. 物流企业的碳排放效率评价及驱动因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 11-21.
- ZHENG Yan, BEN Yu-shu, WANG Kang-de, et al. Carbon emission efficiency evaluation and driving factors analysis of logistics enterprises [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(2): 11-21.
- [20] 袁振洲, 袁晓敬, 杨 洋, 等. 城市轨道交通二氧化碳排放量化及其影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 97-102.
- YUAN Zhen-zhou, YUAN Xiao-jing, YANG Yang, et al. Quantification of carbon dioxide emissions in urban rail transit and its influencing factor analysis[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(10): 97-102.
- [21] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European journal of operations research, 1978, 2(6): 429-444.
- [22] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth; Interpretation of proposed scenarios [R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, 1989.
- [23] 李学文, 徐丽群. 中国城市公共交通行业运营效率评价——基于改进的 SE-DEA-Gini 方法的研究[J]. 管理现代化, 2014(2): 90-92.
- LI Xue-wen, XU Li-qun. Evaluation of operational efficiency in China's urban public transport industry — A study based on the improved SE-DEA-Gini method [J]. Modernization of Management, 2014(2): 90-92.
- [24] 李金培, 徐丽群, 姚 迪. 公共交通效率衡量及无效率解析[J]. 系统管理学报, 2020, 29(4): 684-697.
- LI Jin-pei, XU Li-qun, YAO Di. Efficiency measurement and inefficiency analysis of public transportation [J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(4): 684-697.
- [25] SHARMA M G, DEBNATH R M, OLORUNTOBA R, et al. Benchmarking of rail transport service performance through DEA for Indian railways[J]. International Journal of Logistics Management, 2016, 27(3): 629-649.
- [26] 王白雪, 郭 琨. 北京市公共交通碳排放效率研究——基于超效率 SBM 模型和 ML 指数[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(4): 456-467.
- WANG Bai-xue, GUO Kun. The efficient of carbon emissions efficiency of Beijing public transportation system; Based on super-efficiency SBM model using Malmquist-Luenberger index[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2018, 38(4): 456-467.