

江苏省公路集装箱运输燃油效率评价

陈 静^{1,2,3}

(1. 南京大学 政府管理学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京交通职业技术学院, 江苏 南京 211188;
3. 南京交院交通节能减排技术有限公司, 江苏 南京 211188)

摘要: 采用非期望产出的松弛测度(SBM-Undesirable)模型, 选取柴油量和汽油量作为投入指标, 公路集装箱运输量作为期望产出指标, 碳排放量作为非期望产出指标, 构建公路集装箱运输燃油效率评价模型. 在此基础上, 对 2003—2014 年间江苏省公路集装箱运输燃油效率进行评价. 研究结果表明, 燃油效率高低顺序依次为苏南、苏北和苏中地区. 研究时段综合燃油效率总体偏低, 呈现波动下降态势, 从 2003 年的 0.643 5 波动变化到 2014 年的 0.611 6. 纯技术效率与综合效率的变化特征大致相同, 均呈现下降态势, 而规模效率呈现波动上涨趋势, 总体上, 规模效率 > 纯技术效率 > 综合效率. 纯技术效率、规模效率与综合效率的相关系数分别为 0.962 和 0.841, 表明综合效率偏低的主要因素是纯技术效率较低. 最后, 从技术层面与政策层面提出江苏省公路集装箱运输燃油效率改善途径, 以期为公路运输能源管理提供参考依据.

关键词: 公路运输; 集装箱运输; 非期望产出的松弛测度模型; 燃油效率评价; 负外部效应

中图分类号: U489

文献标志码: A

Evaluation of Fuel-Consumption Efficiency of Highway Container Transportation in Jiangsu Province

CHEN Jing^{1,2,3}

(1. Government School, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China; 3. Transport Energy Saving and Emission Reduction Technology Co. Ltd., Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China)

Abstract: In this paper, the SBM-undesirable model is used to construct the evaluation model of fuel efficiency in road container transportation, which takes diesel and gasoline as input indicators, road container transportation as expected output indicators, and carbon emissions as undesired output

indicators. Afterwards, the fuel efficiency evaluation of highway container transportation in Jiangsu Province from 2003 to 2014 is conducted. The results manifest that the fuel efficiency in southern Jiangsu is the highest, followed by that in northern Jiangsu, and central Jiangsu. The comprehensive fuel efficiency value is generally low, which shows a downward trend of fluctuation, from 0.643 5 in 2003 to 0.611 6 in 2014. The change characteristics of technical efficiency and comprehensive efficiency are basically the same, and the efficiency values show a declining state, while the scale efficiency shows a rising trend. Generally speaking, the scale efficiency is greater than the technical efficiency and greater than comprehensive efficiency. The correlation coefficients of technical efficiency, scale efficiency and comprehensive efficiency are 0.962 and 0.841, respectively, indicating that the main factor for low comprehensive efficiency is its low technical efficiency. Finally, from technical and policy aspects, this paper puts forward some policy suggestions to improve the fuel efficiency of highway container transportation, so as to provide reference for highway transportation energy management.

Key words: highway transportation; container transportation; slack based measure-undesirable model; evaluation of fuel consumption efficiency; negative external effect

作为国家综合运输体系的重要组成部分, 公路集装箱运输是现代化经济发展的重要基础, 其油耗量占我国石油能源消费量的比例逐年增加. 随着能源供需矛盾的日益突出, 节能降耗、提高燃油效率成为实现公路集装箱运输可持续发展的主要途径. 目前国内外学者主要从两个方面开展有关公路运输能源效率方面的研究. 在公路运输效率方面, McMullen 等^[1]、Lim 等^[2]和 Apostolides 等^[3]分别

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M611760); 江苏省博士后科研资助计划(1601133C); 江苏高校哲学社会科学研究基金(2017SJB0612)

第一作者: 陈 静(1980—), 女, 副研究员, 博士后, 理学博士, 主要研究方向为交通节能减排. E-mail: chenjing7618@163.com

基于 Data Envelopment Analysis(DEA)-Malmquist 指数和 Tornqvist 生产率指数对美国道路货物运输业生产率进行了测算;杨良杰等^[4]、冯丽霞^[5]、顾瑾等^[6]、段新等^[7]和周和平等^[8]采用 DEA 与非期望产出的松弛测度(SBM-Undesirable)等模型,建立公路运输效率评价体系,并开展相关的实证研究;Brocker^[9]、Small^[10]、陈治亚等^[11]通过模拟参数变化对运输变量的影响,开展公路运输影响因素分析。在公路运输行业油耗测算方面,Woensel 等^[12]在对比分析不同油料碳排放量的基础上,测算交通运输过程中的油耗量及其碳排放量;Ke-bin 等^[13]采用由上而下模型评估 1997—2002 年道路油耗量,在此基础上预测未来 20 年公路运输行业将是中国最大的石油消费部门;Haldenbilen 等^[14]基于遗传算法分析了土耳其交通运输行业能源消费水平;Skeera 等^[15]通过分析历年的客货运周转量与能耗数据预测了未来交通运输行业的能源消耗量;杨世龙^[16]基于运距算法测算货运油耗及其碳排放量。

已有研究取得了许多有价值的成果,但对于公路集装箱运输燃油效率评价研究鲜有报道。因此,本研究在考虑公路集装箱运输过程中产生的负外部效应情况下,运用 SBM-Undesirable 模型,构建公路集装箱运输燃油效率评价模型,定量分析 2003—2014 年间江苏省公路集装箱运输燃油效率水平,并在此基础上,探讨其燃油效率改善途径,为推动公路运输低碳发展提供理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 非期望产出的松弛测度(SBM-Undesirable)模型分析方法

相比其他集装箱运输,公路集装箱运输具有及时性、便利性、灵活性、可达性等优势,但存在运量低、能耗高、污染重等劣势。鉴于石油资源的日益紧缺及其产生的环境影响(这里仅考虑碳排放影响),将公路集装箱运输燃油效率定义为:在不影响公路集装箱运输产出的条件下,实现石油资源投入与负外部效应(碳排放影响)最小化的能力。

非期望产出的松弛测度(SBM-Undesirable)模型分析方法是一种适用于非期望产出参数的处理非参数边界模型的统计分析方法,即要素投入与产出之间的相对效率评价的系统分析方法^[12-13],对于公路运输产生的环境污染等非期望产出较为合适。基于此,可采用 SBM-Undesirable 模型测算公路集装

箱运输燃油效率。具体思路如下:在某省 m 个地区范围内,某地区 $i(i=1,2,\dots,m)$ 公路集装箱运输有 3 个向量,投入向量、期望产出向量与非期望产出向量,分别表示为 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^k$ 、 $\mathbf{y}^g \in \mathbf{R}^{s_1}$ 、 $\mathbf{y}^b \in \mathbf{R}^{s_2}$,其中 k, s_1, s_2 分别为投入、期望产出、非期望产出的个数。定义矩阵 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}^g, \mathbf{Y}^b$ 分别为: $\mathbf{X} = (x_{j,i}) \in \mathbf{R}^{k \times m}$, $\mathbf{Y}^g = (y_{j,i}^g) \in \mathbf{R}^{s_1 \times m}$, $\mathbf{Y}^b = (y_{j,i}^b) \in \mathbf{R}^{s_2 \times m}$ 。生产可能性集合 P 可定义为

$$P = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}^g, \mathbf{y}^b) \mid \mathbf{x} \geq \mathbf{X}\lambda, \mathbf{y}^g \leq \mathbf{Y}^g\lambda, \mathbf{y}^b \geq \mathbf{Y}^b\lambda, \lambda \geq 0\} \quad (1)$$

根据定义,加入非期望产出的 SBM-Undesirable 模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{s_j^-}{x_{j0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \\ \text{s. t. } \mathbf{x}_0 = \mathbf{X}\lambda + \mathbf{s}^-; \\ \mathbf{y}_0^g = \mathbf{Y}^g\lambda - \mathbf{s}^g; \\ \mathbf{y}_0^b = \mathbf{Y}^b\lambda + \mathbf{s}^b; \\ \mathbf{s}^- \geq 0, \mathbf{s}^g \geq 0, \mathbf{s}^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: s_j^- 、 s_r^g 、 s_r^b 分别为第 i 个地区投入冗余量、期望产出不足量及非期望产出超标量, \mathbf{s}^- 、 \mathbf{s}^g 、 \mathbf{s}^b 为其对应的向量; λ 为权重向量; ρ^* 值反映第 i 个地区一定时期内公路集装箱运输的燃油效率水平,取值范围为 $\rho^* \in (0, 1]$ 。当 $\rho^* = 1$ 时,即 $\mathbf{s}^- = 0, \mathbf{s}^g = 0, \mathbf{s}^b = 0$, 决策单元有效率;当 $\rho^* < 1$ 时,即 \mathbf{s}^- 、 \mathbf{s}^g 、 \mathbf{s}^b 三者中至少有一个不等于零,决策单元无效率,存在改进的空间^[17]。

1.2 指标选取与数据来源

开展公路集装箱运输燃油效率评价既要注重运输效率、经济效益等,也应考虑运输过程对环境产生的负效应。借鉴已有研究成果,基于指标的可比性和可获取性,构建江苏省公路集装箱运输燃油效率评价指标体系(表 1),相关指标数据来源于 2004—2015 年《江苏交通统计年鉴》。

(1)投入指标。本研究评价对象是燃油效率,考虑到公路集装箱运输主要以消耗柴油和汽油为主,因此,选取柴油量和汽油量作为投入指标。

(2)期望产出指标。公路运输产出主要包括客货运量、周转量及一些服务性指标,基于对集装箱运输的特性与数据可比性的考虑,本研究选取公路集装箱运输量作为期望产出指标。

(3)非期望产出指标。公路集装箱运输的负外部性产出包括交通事故、环境影响与生态破坏等。基于

数据可获取性与计算准确性的考虑,本研究拟采用公路集装箱运输碳排放量作为非期望产出指标.交通碳排放的测算包括自下而上方法和自上而下方法^[4].本研究采用自上而下方法:根据区域范围内公路集装箱运输燃料消费数据乘以各种燃料的碳排放系数得到碳排放量,计算公式为

$$C = \sum A_i F_i K_i \quad (3)$$

式中: C 为公路集装箱运输能源消耗引起的碳排放量; A_i 为第*i*类能源消耗量; F_i 为第*i*类能源折标准煤系数; K_i 为第*i*类能源碳排放系数,该值采用美国能源情报署、日本能源经济研究所、国家科委气候变化项目和文献^[4]中能源碳排放系数的平均值.

表 1 江苏省公路集装箱运输燃油效率评价指标体系

Tab.1 Fuel efficiency evaluation index system for highway container transportation in Jiangsu Province

指标类型	指标名称	指标解释	指标单位
投入指标	柴油量 X_1	一定时期内公路集装箱运输能源消耗量,反映公路集装箱运输能源投入水平	t
	汽油量 X_2		t
期望产出指标	公路集装箱运输量 Y^a	一定时期内公路集装箱运输工作量,反映公路集装箱运输产出水平	t
非期望产出指标	碳排放量 Y^b	一定时期内公路集装箱运输碳排放量,反映公路集装箱运输的环境负效应状况	t

2 江苏省公路集装箱运输燃油效率评价

2.1 总体效率特征

本研究运用 DEA Solver Pro5.0 软件,采用本文建立的燃油效率评价模型,以柴油量与汽油量作为投入参数,公路集装箱运输量作为期望产出参数,碳排放量作为非期望产出参数,测算江苏省 13 个地级市 2003—2014 年间公路集装箱运输燃油效率值(表 2),对苏南(南京、镇江、苏州、无锡、常州)、苏中(扬州、泰州、南通)和苏北(徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城)分别开展公路集装箱运输燃油效率评价(图 1).图 1 中三大地区燃油效率值是所在地区所有地级市公路集装箱运输燃油效率值的平均值.从图 1 可以看出,三大地区在研究时段燃油效率值均呈现波动变化.其中,苏南地区燃油效率最大值为 0.767 3,最小值为 0.661 6,变化幅度约为 15.98%,效率均值为 0.687 3.苏中地区燃油效率最大值为 0.575 9,最小值为 0.410 3,变化幅度约为 40.35%,效率均值为 0.520 9.苏北地区燃油效率最大值为 0.648 2,最小值为 0.557 6,变化幅度约为 16.25%,

效率均值为 0.606 3.综合比较,燃油效率值从高到低依次为苏南地区、苏北地区和苏中地区.三大地区的公路集装箱运输燃油效率值显著不同,主要原因在于:苏南地区燃油效率水平最高可能是由于货运系统与经济发展存在互动关系^[18],苏南地区经济相对发达,公路集装箱运输基础设施与绿色投资比例较高,道路条件、车辆节能减排技术水平优于苏中、苏北地区,能有效提高单位油耗的公路集装箱运输能力.连云港作为“一带一路”战略支点,基于江苏省政府部门的支持与引导,实行公路集装箱运输“绿色通道”政策,极大地促进公路集装箱运输业的发展,燃油效率水平较高;苏北地区的其他城市(如盐城与淮安等)在研究时段公路集装箱运输刚刚起步,行业发展初具规模,能源消耗与碳排放较少.然而,在研究时段苏中地区公路集装箱运输存在运行效率低、能耗高等问题,从而导致苏北地区公路集装箱运输燃油效率水平高于苏中地区.

表 2 江苏省 13 个地级市公路集装箱运输燃油效率

Tab.2 Fuel efficiency of highway container transportation in 13 prefecture cities in Jiangsu Province

地区	燃油效率					
	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
南京	0.762 2	0.737 2	0.676 6	0.692 0	0.694 0	0.708 0
镇江	0.565 4	0.729 0	0.613 6	0.607 4	0.606 4	0.607 9
苏州	0.659 2	0.779 5	0.704 4	0.685 5	0.673 6	0.662 5
无锡	0.728 2	0.809 8	0.784 5	0.788 4	0.817 1	0.824 3
常州	0.696 1	0.780 9	0.656 4	0.627 9	0.603 0	0.582 5
扬州	0.598 6	0.449 0	0.640 3	0.627 9	0.627 1	0.609 7
南通	0.578 0	0.392 4	0.589 9	0.579 5	0.569 2	0.547 4
泰州	0.551 1	0.389 6	0.458 5	0.417 9	0.434 6	0.411 6
连云港	0.627 8	0.595 4	0.649 6	0.662 9	0.658 3	0.650 6
徐州	0.668 5	0.555 8	0.596 4	0.590 6	0.572 5	0.547 7
宿迁						
淮安			0.590 8	0.639 6	0.631 9	0.622 1
盐城		0.521 5		0.613 8	0.611 8	0.606 4
均值	0.643 5	0.612 7	0.632 8	0.627 8	0.625 0	0.615 1

地区	燃油效率					
	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
南京	0.713 8	0.722 7	0.720 0	0.727 9	0.740 4	0.738 3
镇江	0.602 9	0.599 9	0.587 7	0.586 7	0.585 7	0.582 9
苏州	0.714 6	0.697 0	0.669 4	0.655 6	0.709 0	0.690 7
无锡	0.832 3	0.826 8	0.826 2	0.844 2	0.851 3	0.862 9
常州	0.557 5	0.535 5	0.504 5	0.553 2	0.579 4	0.554 9
扬州	0.607 0	0.604 4	0.582 0	0.618 5	0.606 1	0.600 5
南通	0.541 7	0.536 0	0.510 4	0.544 9	0.528 6	0.520 1
泰州	0.396 0	0.408 3	0.392 5	0.449 0	0.409 4	0.423 6
连云港	0.657 3	0.651 1	0.656 4	0.689 4	0.688 9	0.692 2
徐州	0.539 7	0.518 9	0.509 6	0.532 5	0.513 9	0.502 1
宿迁				0.486 9	0.475 0	0.470 9
淮安	0.624 9	0.616 2	0.618 9	0.650 8	0.646 3	0.646 7
盐城	0.615 5	0.612 0	0.620 3	0.659 6	0.658 4	0.665 4
均值	0.616 9	0.610 7	0.599 8	0.615 3	0.614 8	0.611 6

从图 2 可以看出,江苏省 2003—2014 年间公路集装箱运输燃油综合效率值呈现波动下降态势. 从 2003 年的 0.643 5 波动变化到 2014 年的 0.611 6. 2003 年燃油效率值最高,可能是由于该年“非典”疫情的爆发,江苏省产业关联度较高的企业经济活动减弱和货运需求减少,以及由此带来的集装箱运输规模、运输密度降低,能耗与碳排放量相对较少,燃油效率较高. 总体来说,研究时段燃油综合效率值偏低,存在一定的节油空间.

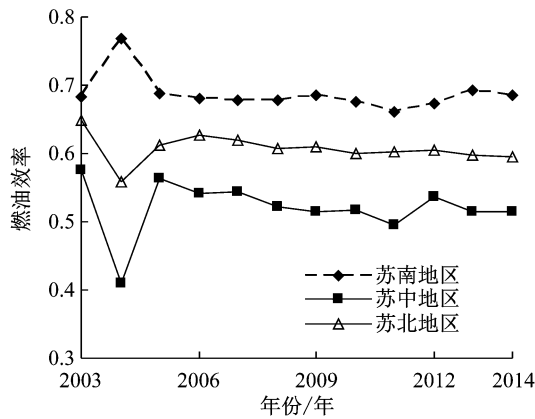


图 1 苏南、苏中与苏北地区公路集装箱运输燃油效率对比

Fig.1 Comparison chart of fuel efficiency of highway container transportation in southern, central, and northern Jiangsu Province

2.2 分解效率特征

采用 DEA Solver Pro 5.0 软件将 2003—2014 年间江苏省 13 个地级市公路集装箱运输燃油综合效率分解成纯技术效率和规模效率(图 2),三者关系见图 3.

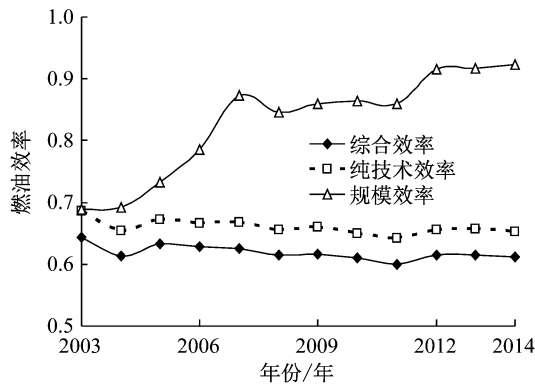


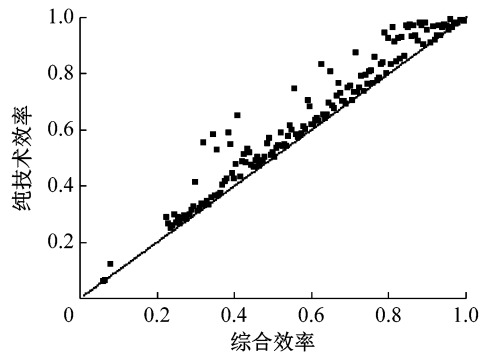
图 2 江苏公路集装箱运输燃油效率及其分解

Fig.2 Fuel efficiency and its decomposition of highway container transportation in Jiangsu Province

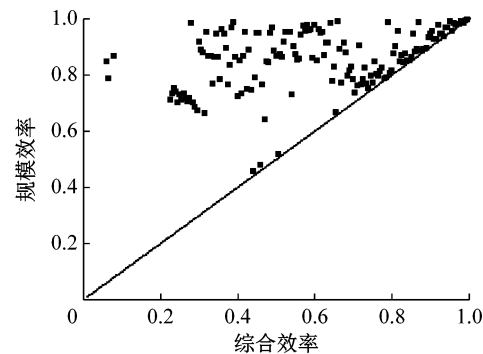
图 2 中,纯技术效率与综合效率的变化特征大致相同,其效率值均呈现下降状态,而规模效率呈现

波动上涨趋势,整体上,规模效率>纯技术效率>综合效率. 其中,纯技术效率值从 2003 年的 0.686 5 下降到 2014 年的 0.652 6,均值为 0.659 9. 规模效率值从 2003 年的 0.689 3 上涨至 2014 年的 0.922 6,均值为 0.829 8. 纯技术效率、规模效率与综合效率的相关系数分别达到 0.962 和 0.841,表明江苏省公路集装箱运输燃油综合效率与其分解效率之间均存在显著的相关性. 相比而言,综合效率与纯技术效率之间的相关程度更大. 因此,纯技术效率是决定综合效率的关键要素.

图 3 中,各市燃油分解效率的散点与 45 度对角线不能很好地吻合,说明江苏省公路集装箱运输燃油效率受到纯技术效率与规模效率的耦合作用. 依据散点与 45 度对角线位置的远近判断分解效率与综合效率相关性的强弱^[4,19],可以发现,图 3b 中规模效率与综合效率构造的散点多位于散点图的偏上部,偏离 45 度对角线程度较大,而图 3a 中纯技术效率与综合效率构造的散点更接近于 45 度对角线,进一步反映了纯技术效率对综合效率的影响及制约能力强于规模效率. 由此可知,江苏省公路集装箱运输燃油效率低下的主要原因是纯技术效率偏低.



a 纯技术效率与综合效率的关系



b 规模效率与综合效率的关系

图 3 分解效率与综合效率的关系

Fig.3 Decomposition efficiency versus comprehensive efficiency

依据燃油效率定义,不论是纯技术效率还是规

模效率,都要在不影响公路集装箱运力的情况下实现油量投入与碳排放的最小化.同时,若要使碳排放量下降的话,有效且根本的措施是减少油耗,因此,对于纯技术效率和规模效率来说,节油是提高燃油效率的关键.一般认为,纯技术效率主要与技术装备、组织运营与管理决策等因素相关,规模效率主要与要素投入规模、资源配置等因素相关^[4].针对纯技术效率偏低问题,可通过加强节油技术研发与能源管理整合提升;而对于规模效率来说,在研究时段后期呈现较高水平,其投入规模已逐渐与资源消化能力及环境吸纳能力相平衡,应严格限制石油资源投

入规模,优化能源结构,实现低碳公路运输.

3 江苏省公路集装箱运输燃油效率改善途径

江苏省公路集装箱运输燃油综合效率主要受纯技术效率制约,而纯技术效率与技术装备、组织运营与管理决策等相关.因此,本研究从这三方面入手,从技术层面、政策层面提出江苏省公路集装箱运输燃油效率改善途径(表 3).针对技术装备因素,在技术层面,加强公路集装箱运输节油降耗技术研发,节

表 3 江苏省公路集装箱运输燃油效率改善途径

Tab.3 Ways to improve fuel efficiency of highway container transportation in Jiangsu Province

影响因素	层面	措施	方法
技术装备	技术层面	行驶效率提高技术	1. 减少行驶阻力技术.低滚阻轮胎技术可通过减少集装箱货车行驶的滚动摩擦阻力以降低能耗 2. 车辆轻量化技术.对车辆构件和相关零部件进行轻量化设计与改造
		发动机运行节能技术	1. 闭缸节油技术.应用行车电脑控制技术调整发动机的气缸开闭数量,减少发动机工作的气缸数,从而改善车辆燃油经济性,降低能耗 2. 曲轴集成启动发电机技术.车辆起动机和发电机集成为一体,直接以某种瞬态功率较大的发动机替代传统的起动机,燃油效率提高约 8.6%~8.9%
组织运营	政策层面	健全公路集装箱运输行业政策法规	1. 建立能耗在线统计监测信息平台,有计划地组织定期检查行业用能状况,实时监测汇总能耗信息 2. 针对用能单位的用能特点,建立完善的能源消耗考核评价与激励奖惩机制,强化监管职能并实施退出机制
管理决策	政策层面	实施燃油经济性标准 ^[20]	1. 借鉴日本基于重量分级的汽车燃油经济性标准,制定适合我国国情的公路集装箱运输车燃油经济性标准 2. 实施措施:①对公路集装箱运输车进行产品认证,要求制造企业申报认证车辆燃油指标,由当地交通运输部门对申报值实施核查.②对超过油耗限值的车辆,对所属企业采取通报批评、罚款等惩罚措施;对符合燃油经济性标准的企业,给予燃油税收优惠政策.③当地交通运输部门对每月燃油消耗量实行信息披露制度
		推广 LNG 作为替代燃料 ^[21]	1. 鼓励购进新型集装箱运输车.政府部门要积极鼓励企业引进 LNG 拖车,对购买 LNG 拖车的企业给予各项燃料价格及税收补贴 2. 支持现有拖车改装.由于 LNG 拖车改装费用较高,多数企业不会实施改装.政府部门要积极制定与推进 LNG 拖车改装鼓励政策 3. 配套加气站的建设.要以中石油、中石化等为天然气加气站建设的主渠道,同时引进社会资本以 PPP(Public-Private-Partnership)模式合作形式参与建设,确保公路集装箱运输行业在推广使用天然气后气源的稳定供应

约能源、减少碳排放;针对组织运营因素,在政策层面,健全公路集装箱运输行业政策法规,完善运营模式;针对管理决策因素,实施公路集装箱运输车燃油经济性标准、推广液化天然气(LNG)作为替代燃料,优化能源管理.

4 结语

(1) 本研究采用非期望产出模型 SBM-Undesirable,以油耗量作为输入参数,公路集装箱运输量与碳排放量作为输出参数,建立公路集装箱运输燃油效率评价模型,不仅关注运输效率,同时考虑了环境方面的负效应.

(2) 在评价模型的基础上,探讨 2003—2014 年间江苏省公路集装箱运输燃油效率水平.燃油效率值由大到小依次为苏南地区、苏北地区和苏中地区,三大地区在研究时段燃油效率值均呈现波动变化态势.综合分析,江苏省公路集装箱运输燃油效率值呈现波动下降态势.从整体上看,研究时段燃油效率值偏低,主要因素是纯技术效率较低,可通过节油措施提高效率水平.

(3) 本研究初步将公路集装箱运输所产生的非期望产出纳入评价体系中,由于数据可获得性等原因只考虑了公路集装箱运输二氧化碳排放,评价体系有所欠缺.在未来数据获取手段完善时,引入其他非期望产出,实证分析结果与现实情况将更加吻合,更

能客观准确地评价公路集装箱运输燃油效率水平.

参考文献:

- [1] MCMULLEN B S, OKUVAMA K. Productivity changes in the U. S. motor carrier industry following deregulation: a Malmquist index approach [J]. *International Journal of Transport Economics*, 2000, 27(3): 335.
- [2] LIM S H, CONDON S. An economic analysis of productivity growth of U. S. general freight trucking, 1999—2003 [J]. *International Journal of Human and Social Sciences*, 2009, 4(15): 1086.
- [3] APOSTOLIDES A D. Estimation and analysis of multifactor productivity in truck transportation: 1987—2003. [R] Washington D C: Department of Transportation Research, 2009.
- [4] 杨良杰, 吴威, 苏勤, 等. 基于 SBM-Undesirable 模型的 1997—2010 年中国公路运输效率评价[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(11): 1602.
YANG Liangjie, WU Wei, SU Qin, *et al.* Evaluation of road transport efficiency in China during 1997—2010 based on SBM-Undesirable Model [J]. *Progress of Geographical Science*, 2013, 32(11): 1602.
- [5] 冯丽霞. 基于 DEA-Malmquist 的吉林省公路运输系统绩效评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
FENG Lixia. Study on performance evaluation of highway transportation system in Jilin province based on DEA-Malmquist [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [6] 顾瑾, 陶绪林, 周体光. 基于 DEA 模型的江苏省道路运输效率评价与分析[J]. *现代交通技术*, 2008, 5(1): 69.
GU Jin, TAO Xulin, ZHOU Tiguang. Evaluation and analysis of highway transportation efficiency in Jiangsu province based on DEA model [J]. *Modern Transportation Technology*, 2008, 5(1): 69.
- [7] 段新, 岑晏青, 路放青. 基于 DEA 模型的 31 省份公路运输效率分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(6): 25.
DUAN Xin, CEN Yanqing, LU Aoqing. DEA model-based efficiency analysis for road transport of China's 31 provinces [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(6): 25.
- [8] 周和平, 陈凤. 基于 DEA 与 SFA 方法的城市公共交通运输效率评价[J]. *长沙大学学报*, 2008, 22(5): 79.
ZHOU Heping, CHEN Feng. Evaluation of urban public transportation efficiency based on DEA and SFA model [J]. *Journal of Changsha University*, 2008, 22(5): 79.
- [9] BROCKER J. Computable general equilibrium analysis in transportation economics [J]. *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, 2004, 12: 269.
- [10] SMALL K A. *Urban transportation economics* [M]. Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 2013.
- [11] 陈治亚, 朱东铁. 公路超限运输效率成本测算研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 16(3): 85.
CHEN Zhiya, ZHU Dongtie. Study on the cost estimation of highway overbound transportation efficiency [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 16(3): 85.
- [12] WOENSEL T V, CRETEN R, VANDAELE N. Managing the environmental externalities of traffic logistics: the issue of emissions [J]. *Production and Operations Management*, 2001(10): 207.
- [13] KE-BIN H, HONG H, QIANG Z, *et al.* Oil consumption and CO₂ emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(12): 1499.
- [14] HALDENBILEN S, CEYLAN H. Genetic algorithm approach to estimate transport energy demand in turkey [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(1): 89.
- [15] SKEERA J, YANJIA W. China on the move: oil price explosion [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 678.
- [16] 杨世龙. 基于碳排放成本的陆路货运经济服务半径研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
YANG Shilong. Overland freight economic service radius study based on carbon emission cost [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [17] 陈绍俭. 中国工业环境效率的区域差异及其空间相关性分析——基于 SBM-Undesirable 模型和 Moran's I 统计量[J]. *兰州商学院学报*, 2012, 28(6): 43.
CHEN Shaojian. Regional differences and spatial correlation analysis in environmental efficiency of China's industrial sector—based on SBM-Undesirable model and Moran's I statistic [J]. *Journal of Lanzhou Commercial College*, 2012, 28(6): 43.
- [18] 金陵, 何明, 吴才锐, 等. 区域综合货运系统与经济发展互动模型[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(5): 127.
JIN Ling, HE Ming, WU Cairui, *et al.* A model for analyzing interaction between regional comprehensive transport system and economic development [J]. *Highway Traffic Science and Technology*, 2010, 27(5): 127.
- [19] 杨清可, 段学军, 叶磊. 基于 SBM-Undesirable 模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区 16 城市为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 712.
YANG Qingke, DUAN Xuejun, YE Lei. Efficiency evaluation of city land utilization in the Yangtze River Delta using a SBM-Undesirable model [J]. *Resource Science*, 2014, 36(4): 712.
- [20] 陈春梅, 姚占辉, 纪世才, 等. 美日汽车燃油经济性标准及对我国的启示[J]. *公路与汽运*, 2008(5): 8.
CHEN Chunmei, YAO Zhanhui, JI Shicai, *et al.* Fuel economy standards of US and Japan automobile and its enlightenment to China [J]. *Highway and Transportation*, 2008(5): 8.
- [21] 潘常虹, 范厚明, 刘益迎, 等. 浅谈深圳市道路集装箱运输行业节能减排[J]. *交通企业管理*, 2011(4): 14.
PAN Changhong, FAN Houming, LIU Yiying, *et al.* Discussion on energy saving and emission reduction of road container transportation industry in Shenzhen [J]. *Transportation Enterprise Management*, 2011(4): 14.