

基于 AHP-DEA 的湖北城市低碳客运效率评价^{*}

何鑫宇, 张庆年

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430061)

摘要: 在低碳经济的大趋势下, 结合客运交通总体情况构建低碳客运运行效率评价指标体系; 针对传统评价方法的不足, 利用层次分析法(AHP)赋予权重并进行优化处理, 再运用数据包络法(DEA)对 2016 年湖北省低碳客运效率进行评价。结果显示, 湖北省大力发展低碳客运的行为取得了初步成效, 12 座重点城市中, 武汉、十堰、荆门等 5 座城市发展良好; 其他 7 座非 DEA 有效的城市在纯技术效率和规模效率上差距不大, 可在适当调整规模的同时做好优化管理技术工作, 结合松弛变量分布进行有针对性的改善。

关键词: 城市交通; 低碳客运; 运行效率; 层次分析法(AHP); 数据包络法(DEA)

中图分类号: U492.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0016-05

随着经济的快速发展, 环境问题日益显著, 低碳经济越来越受到关注。作为中国支柱产业之一的交通运输业发展迅速, 其能源消耗量占比高达 30%~40%, 成为碳排放量仅次于能源业和工业的第三大排放行业。降低城市客运中汽车尾气排放成为改善环境状况的重要措施之一。

已有大量学者从低碳的角度对客运发展进行了研究, 如文献[1]采用 SA-PSO 智能算法对低碳交通下土地的综合利用进行了研究, 文献[2]以北京为例构建了以客运量最优、碳排放量最少为目标的交通结构优化模型, 文献[3]基于云物元综合评价模型提出了深圳市客运低碳综合评价体系并确定了逐步推进减碳的发展模式。在效率评价研究上, 数据包络法(DEA)的运用受到关注, 文献[4]构建基础投入和能源的双角度评价指标体系并综合运用 DEA 进行了分析, 文献[5]从低碳的内部效率和外部效率构建两个指标体系并分别运用 DEA 对物流效率进行了分析, 文献[6]采用三阶段 DEA 法对江苏省 12 座重要城市的物流效率进行分析并提出了相关措施, 文献[7]结合 BCC-DEA 和 Malmquist 指数法从动静双角度计算了 1995—2009 年中国 29 个省份的碳排放效率并找出了影响因素。但少有文献对低碳客运运行效率进行研究。另外, DEA 虽然是一种适用于多输入、多产出的评价方法, 但少有文献考虑输入、输出指标与决策单元数量之间的关系, 只有当 $2 \times (\text{输入指标} + \text{输出指标}) \leq \text{决策单元数量} \leq 3 \times$

(输入指标 + 输出指标) 时, DEA 才能反映输入、输出指标间的内在关系。为保证指标数量上的限制, 同时减少输入指标之间的相关性, 该文运用层次分析法(AHP)进行优化处理, 再运用 DEA 进行分析。

1 研究方法

1.1 AHP 法

AHP 法是将与目标有关的因素分解成目标、准则、方案等层次, 在该层次结构上进行定性、定量的决策方法。为解决输入指标数量过多的问题, 通过专家打分确定二级指标间的重要程度, 用 AHP 计算二级指标的权重, 将标准化处理后的数据赋予权重后相加作为一级指标(即输入指标), 以满足指标、决策单元间数量的关系, 同时减少输入指标间的相关性。步骤如下:

(1) 建立目标的评价层次结构, 对二级指标进行两两对比后排定指标的相对优劣顺序, 构造判断矩阵 A。采取 1~7 标度法, 其重要程度见表 1。

表 1 决策矩阵构建标准

重要性度量	含义
1	两指标同等重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者重要
7	前者比后者明显重要
倒数	后者相对于前者的重要程度取倒数

^{*} 基金项目: 安徽省高校重点自然科学基金项目(KJ2017A787)

(2) 计算判断矩阵每行元素的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

(3) 计算 M_i 的 n 次方根 \bar{W}_1 :

$$\bar{W}_1 = \sqrt[n]{M_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

(4) 将 \bar{W}_1 归一化,并求指标间的相对权重 W_i :

$$W_i = \frac{\bar{W}_1}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

(5) 对判断矩阵进行一致性检验,方法见式(4)~(5)。只有当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性才合理。

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n (AW)_i}{n} W_i \quad (4)$$

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

式中: RI 为平均随机一致性指标。

1.2 DEA 法

DEA 可用来评价部门间的相对有效性。该方法先确定一组输入、输出评价指标,运用数学规划方法将决策单元(DMU)投影到 DEA 的前沿面上,通过比较决策单元偏离 DEA 前沿面的程度评价其相对有效性。主要包括 BCC 和 CCR 模型两大类。

假设有 n 个研究对象(决策单元 DMU),每个研究对象有 m 种输入类型、 s 种输出类型,以 DMU_j 表示第 j 个决策单元, X_{ij} 、 Y_{rj} 分别表示 DMU_j 的第 i 种类型的投入量、第 r 种类型的产出类型,则评价第 j_0 ($j_0 = 1, 2, \dots, n$) 个决策单元 DMU_{j_0} 的效率的 BCC 模型如下:

$$\begin{aligned} & \min [\theta - \epsilon(\hat{e}^T S^- + e^T S^+)] \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} \lambda_j + S^- = \theta X_{i0} \\ \sum_{j=1}^n Y_{rj} \lambda_j - S^+ = Y_{r0}, \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; S^+ \geq 0; S^- \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: θ 为目标规划值; ϵ 为公式变换引入的非阿基米德无穷小量且始终大于零; $\hat{e} = (1, 1, \dots, 1)^T$; $e = (1, 1, \dots, 1)^T$; S^- 、 S^+ 分别表示投入指标的松弛变量(即投入冗余值,表示输入过剩量)、产出指标的松弛变量(即产出冗余值,表示输出不足量), $S^- = (s_1^-, s_2^-, \dots, s_m^-)^T$, $S^+ = (s_1^+, s_2^+, \dots, s_s^+)^T$; X_j 为第 j

个决策单元的输入指标向量, $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$; λ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 为规划决策变量; X_{j_0} 为第 j_0 个决策单元的输入; Y_j 为第 j 个决策单元的输出指标向量, $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})^T$; Y_{j_0} 为第 j_0 个决策单元的输出。

最优解 θ_{j_0} 表示技术效率值。BCC 模型用来评估决策单元在纯技术上的效率,若其满足 $\theta_{j_0} = 1$, 且 $S_{j_0}^- = 0$ 、 $S_{j_0}^+ = 0$, 则决策单元在技术上为 DEA 有效(纯技术效率有效)。

CCR 模型用来评估决策单元的整体效率,其在 BCC 模型的基础上去掉了 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ 的约束条件。若其求得的结果满足 $\theta_{j_0} = 1$, 且 $S_{j_0}^- = 0$ 、 $S_{j_0}^+ = 0$, 则决策单元为 DEA 有效(同时达到了纯技术效率有效和规模效率有效),其中:综合技术效率 = 纯技术效率 \times 规模效率。

2 湖北省城市低碳客运运行效率评价

对湖北省 12 座重点城市的低碳客运运行效率进行评价,结合湖北省客运总体发展情况及发展趋势,构建湖北省低碳客运运行效率指标体系。从规模性、环保性及服务性三个角度选取输入指标,其中:规模性包括交通业固定资产投资、城市内公路里程数、交通业从业人员数量;环保性包括年客运能耗总量、单位里程人均能耗、新能源公交使用率;服务性包括年事故率、公交车准点率。选取城市客运周转量和客运 CO_2 排放量作为输出指标(见表 2)。

指标体系中,年客运能耗总量是指各交通方式下消耗能源(包括煤炭、电力、汽油、柴油等)的总和转化为标准能量的数值,按式(7)计算;单位里程人均能耗反映各种绿色交通(轨道电车、新能源公交、公共自行车等)在能源节约上的贡献,按式(8)计算。

$$a_4 = \sum_{i=1}^n m_i EC_i \quad (7)$$

式中: m_i 表示第 i 种能源的能耗量总和; EC_i 表示转化为标准能量的折算系数。

$$a_5 = \frac{a_4}{qn} \quad (8)$$

式中: q 表示城市的常住人口数量; n 表示人年均里程数。

2.1 数据处理

低碳客运运输效率 DEA 评价指标体系中,年客运能耗总量、单位里程人均能耗、年事故率、 CO_2

表2 湖北省低碳客运运输效率 DEA 评价指标体系

指标类型	一级指标	二级指标	指标意义
输入指标 A	规模性 A_1	交通业固定资产投资 a_1 /亿元	客运投资规模及基础条件
		城市内公路里程数 a_2 /km	
		交通业从业人员数量 a_3 /万人	
	环保性 A_2	年客运能耗总量 a_4 /MJ	低碳客运发展现状
		单位里程人均能耗 a_5 /MJ	
		新能源公交使用率 a_6 /%	
输出指标 B	服务性 A_3	年事故率 a_7 /%	反映客运的安全性、时效性
		公交行车准点率 a_8 /%	
		城市客运周转量 B_1 /(人·km)	客运运输能力
		客运 CO ₂ 排放量 B_2 /t	客运对环境的影响

排放量为逆向指标,其数量越小越好,数据输入前需对其进行处理,将其负效应转换为正效应。考虑到输入的原始数据中有零且 DEA 输入数据不能为负数,对于逆向指标,采用式(9)进行转换;对于正向指标,采用式(10)进行转换。

$$X_{ij}^1 = 0.1 + \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \times 0.9 \quad (9)$$

$$X_{ij}^2 = 0.1 + \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \times 0.9 \quad (10)$$

转换后的指标 $x_{ij} \in [0.1, 1]$, 将规范化后的指标进行 AHP 处理赋予权重。

2.2 AHP 处理

采取专家打分的方式对各一级指标下二级指标的重要程度进行两两比较,结合表1得到决策矩阵。以规模性为目标层,其决策矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

按式(1)~(3)计算,得:

$$W_i = (0.731, 0.188, 0.081)$$

进行一致性检验: $AW_i = (2.238 \ 0, 0.577 \ 2, 0.248 \ 1)$; $\lambda_{\max} = 3.063 \ 7$; $CI = (3.063 \ 7 - 3)/(3 - 1) = 0.031 \ 85$; 当 $n = 3$ 时,平均随机一致性指标 $RI = 0.58$; $CR = 0.031 \ 85/0.58 = 0.054 \ 9 < 0.1$ 。判断矩阵的一致性可接受。

同理,可求得其他二级输入指标的权重,并对输入指标进行转换(见表3)。

采用《2017年湖北省统计年鉴》和《中国能源统计年鉴2017》中的相关数据作为基本数据,按式(6)

表3 输入指标的变换处理

输入指标	指标变换
规模性 A_1	$A_1 = 0.731a_1 + 0.188a_2 + 0.081a_3$
环保性 A_2	$A_2 = 0.258a_4 + 0.637a_5 + 0.105a_6$
服务性 A_3	$A_3 = 0.2a_7 + 0.8a_8$

~(8)计算并赋予权重,得到表4所示数据分布。从中可见, $2 \times (3+2) \leq 12 \leq 3 \times (3+2)$, 满足 DEA 数量上的限制。

表4 DEA 输入、输出数据分布

城市	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2
武汉	0.912 1	0.691 3	0.117 5	0.951 3	0.376 1
宜昌	0.700 4	0.281 9	0.132 3	0.799 0	0.363 2
襄阳	0.810 8	0.235 2	0.628 3	0.684 3	0.539 1
荆州	0.474 8	0.260 4	0.221 8	0.390 7	0.801 3
黄冈	0.426 1	0.248 9	0.380 2	0.356 7	0.372 4
孝感	0.414 0	0.311 0	0.249 3	0.476 5	0.436 7
荆门	0.463 7	0.211 9	0.164 2	0.324 5	0.654 3
十堰	0.475 6	0.610 9	0.226 9	0.423 3	0.765 5
黄石	0.380 4	0.337 6	0.239 5	0.234 5	0.235 6
咸宁	0.267 7	0.219 1	0.364 8	0.345 1	0.452 1
随州	0.258 7	0.381 1	0.296 4	0.234 5	0.545 6
鄂州	0.217 1	0.361 2	0.239 5	0.423 2	0.434 5

2.3 DEA 计算与分析

将表4中输入、输出变量作为 DEA 模型的处理数据,运用 DEA P2.1 进行运算,得到 2016 年湖

北省 12 座城市在低碳视角下的客运效率(见表 5)。

表 5 DEA 运算结果

城市	综合效率	纯技术效率	规模效率	规模报酬
武汉	1.000	1.000	1.000	—
宜昌	0.880	1.000	0.880	IRS
襄阳	0.865	1.000	0.865	DRS
荆州	0.825	0.869	0.949	DRS
黄冈	0.736	0.788	0.934	DRS
孝感	0.665	0.776	0.857	IRS
荆门	1.000	1.000	1.000	—
十堰	1.000	1.000	1.000	—
黄石	1.000	1.000	1.000	—
咸宁	0.478	0.680	0.704	IRS
随州	1.000	1.000	1.000	—
鄂州	0.707	0.814	0.869	IRS
平均值	0.846	0.911	0.922	—

由表 5 可知:1) 从整体上看,湖北省低碳客运综合效率的平均值为 0.846,纯技术效率为 0.911,规模效率为 0.922,在低碳客运的资源配置结构、管理水平和投资规模上处于持平的状态,较稳定。但要达到理想的低碳客运,需同时把握好管理技术水平和规模投资推进,共同发展。2) 从效率上看,12 座城市中,武汉、荆门、十堰、黄石、随州的低碳客运综合效率值为 1,在纯技术效率和规模效率上均达到了 DEA 有效,说明这些城市在低碳客运发展中投入与产出比例达到了最优。这些城市仅占湖北省的 41.67%,相较于全国低碳交通 20% 多的水平,湖北省近年来大力发展绿色交通行动虽取得了一定进步,但整体低碳客运仍处于较低阶段。宜昌、襄阳两城市在纯技术效率上达到了 DEA 有效,其低碳客运管理水平和技术水平已达到最优,但在规模效率上还有所不足,需改进投入规模,才能使投入、产出资源得以充分利用。荆州、黄冈、孝感、咸宁、鄂州在纯技术效率、规模效率上均没有达到 DEA 有效,可能存在投入上的冗杂或产出上的不足,在保持原有投入资源的情况下产出资源仍有增加的空间或在适当减少投入资源的情况下产出水平不变。3) 从规模报酬上看,宜昌、孝感、咸宁、鄂州为规模报酬递增(IRS),这些城市在大条件不变的情况下将低碳客运的投入要素按相同比例增加时将获得更多的产出

数量,即产出资源的增长幅度大于投入资源的增加幅度。襄阳、荆州、黄冈为规模报酬递减(DRS),主要是因为其生产规模不协调,使生产的各方面难以得到有效利用,导致生产效率降低,出现产量增加比例逐渐减小甚至小于投入量的增加比例的现象。以孝感市为例,其低碳客运综合效率值为 0.665,处于 DEA 无效状态;纯技术效率为 0.776,规模效率为 0.857,处于规模报酬递增状态。该市一方面需增强管理水平和科学技术水平,提高对投入资源的有效利用能力;另一方面需调整产业结构,优化投入资源配置,并适当增加低碳客运规模,从根本上提高低碳客运运行效率。

运用 DEAP 2.1 进行计算,得到 BCC 模型下松弛变量情况(见表 6)。

表 6 BCC 模型下松弛变量分布

城市	S_1^+	S_2^+	S_3^+	S_1^-	S_2^-
武汉	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
宜昌	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
襄阳	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
荆州	0.000	0.000	0.166	0.000	0.000
黄冈	0.027	0.000	0.006	0.000	0.078
孝感	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000
荆门	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
十堰	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
黄石	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
咸宁	0.018	0.000	0.072	0.113	0.119
随州	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
鄂州	0.000	0.000	0.000	0.247	0.000

对于纯技术效率无效的城市,可根据松弛变量的数值进行调整和改正,其中 S_1^+ 、 S_2^+ 、 S_3^+ 对应的是投入资源的松弛变量, S_1^- 、 S_2^- 对应的是产出资源的松弛变量。由表 6 可知:荆州、黄冈、孝感、咸宁、鄂州在投入产出上存在冗杂;宜昌和襄阳为纯技术效率有效,但综合效率无效,其冗杂值为零。以宜昌市为例,其低碳客运的技术管理水平已达到最优,但综合技术效率无效,这是由于其规模和投入、产出不匹配。该市处于规模报酬递增,应在保持现有管理水平的前提下适当增加投入规模。

以黄冈市为例,结合表 5 和表 6,其综合效率为 0.736,其中纯技术效率为 0.788,规模效率为 0.934,并为规模报酬递减,其低碳客运仍处于较低水平,其

中低碳客运管理、技术水平低下是其主要影响因素。另外,其第一投入指标的松弛变量为 0.027,相较于第三指标的松弛变量 0.006 影响更大。其对应的是规模因素,说明黄冈市交通业存在投入过剩现象,交通工具资源没有得到有效利用,配线不合理,某些班次可能存在空载或少客返程的现象。其碳排放量输出指标的冗余值为 0.086,在低碳上仍需改进,可通过优化管理技术水平、整合资源配置提高资源利用率,同时适当减少规模投入,更有效地发展低碳客运,实现交通业的可持续发展。

3 结语

该文运用 AHP 法对低碳客运评价体系中的输入、输出指标进行优化处理,运用 DEA 法分析 2016 年湖北省 12 座重点城市低碳客运的综合效率、技术效率和规模效益等情况,并结合各指标因素的松弛变量分布对各城市的输入冗余和输出不足进行分析。结论如下:2012 年以来湖北省大力发展绿色交通的行为已取得了初步成效;武汉、十堰两市作为全国低碳交通建设试点城市,低碳客运发展良好,已逐步形成“一主一副”、“两圈”并重领跑低碳交通的良好格局,并带动了湖北省其他城市的发展。但总体来看,湖北省大部分城市在低碳客运投入上存在冗

杂现象,应因地制宜,根据规模报酬趋势适当调整规模大小,同时优化低碳客运的规划管理,做好各运输方式之间的衔接,改善交通运输的用能结构,提高资源利用率。

参考文献:

- [1] 刘志谦.城市低碳客运交通系统结构与土地利用综合优化研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [2] 闫丽丽.低碳视角下的北京客运交通结构优化研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [3] 赵胜男.深圳市城市客运交通低碳发展模式与评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [4] 李永林.基于 DEA 的我国低碳物流效率研究[J].中国市场,2014(27).
- [5] 汤中明.低碳经济下城市物流效率评价的实证研究[J].物流工程与管理,2016,38(9).
- [6] 杨传明.低碳约束下江苏物流产业效率测度[J].华东经济管理,2018,32(1).
- [7] 仲云云,仲伟周.中国区域全要素碳排放绩效及影响因素研究[J].商业经济与管理,2012,33(1).
- [8] 杨斌,白雪微,白丽莎.基于 PCA 和 DEA 的江苏省物流业碳排放效率评价[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2014,28(2).

收稿日期:2018-03-20

《公路与汽运》杂志 2019 年征订启事

《公路与汽运》杂志由长沙理工大学主办,是一份介绍汽车、道路、桥梁等公路交通领域科技信息的面向国内外公开发行的技术类科技期刊。国际标准刊号:ISSN1671-2668,国内统一刊号:CN43-1362/U。发行代号:国内 42-95,国外 DK43002。该刊为首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、湖南省一级期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,被中国期刊全文数据库及中文科技期刊数据库全文收录、万方数据—数字化期刊群全文上网,并荣获首届《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊奖。

该刊立足公路交通系统,报道国内外汽车与公路交通领域的最新研究成果,荟萃汽车运用与维修技术,传播公路交通安全知识,介绍公路运输行业的新技术与管理经验,刊登公路交通工程的新工艺、新技术、新材料。2019 年拟设主要栏目:汽车工程;交通规划与管理;运输与物流;道路工程;桥隧工程;工程经济与管理等。

本刊为双月刊,逢单月 25 日出版。每期定价 15 元,全年 90 元。欢迎订阅。读者可在当地邮局订阅,也可直接向本刊编辑部索取订单订阅。订阅款请汇至本刊或银行账号。

通信地址:长沙理工大学云塘校区 8 号信箱

联系电话:0731-85258189(含传真)

开户行:长沙市农行高云支行

邮政编码:410004

联系人:王文

户名:长沙理工大学

账号:18-051401040000158