

# 基于 PCA—DEA 的武汉城市生态交通发展综合评价\*

张矢宇, 韦金汎, 仲超, 杨云超, 韦文景

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 为了解武汉城市生态交通建设与发展情况, 根据武汉城市生态交通的发展特点, 从武汉城市生态效率入手, 构建以能源消耗和环境污染为输入指标、交通发展为输出指标的武汉城市生态交通发展评价指标体系, 运用主成分分析(PCA), 结合数据包络分析(DEA), 对武汉城市生态交通发展状况进行综合评价。结果显示, 2005—2016 年武汉城市生态交通发展的综合效率呈波动状态, 2013—2016 年处于较高水平; 纯技术效率在 2009—2012 年相对较低, 规模效率在 2006—2016 年处于上升趋势。

**关键词:** 城市生态交通; 主成分分析(PCA); 数据包络分析(DEA); 生态效率; 综合评价

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671—2668(2018)06—0022—06

可持续发展是现代社会发展的核心目标, 城市更是需要将可持续发展理念融入城市交通发展中, 城市生态交通被认为是实现城市交通可持续发展的最佳途径。武汉作为中国中部地区的中心城市、长江经济带的核心城市之一, 城市化水平不断提高。但也带来日益严重的交通拥堵、环境污染、噪声等问题。对武汉城市生态交通发展进行综合评价, 不仅可掌握武汉城市交通的生态化发展水平, 找出其存在的问题, 还有利于从整体上把握武汉城市交通发展状况, 了解其发展动向, 为武汉城市生态交通规划、建设、管理等提供科学依据。

目前对城市生态交通的研究主要集中在对现状的评价上。近年来, DPSIR 模型及生态综合指数、BP 神经网络模型、主成分分析结合可拓物元理论、层次分析法等被用于评价城市生态交通现状, 取得了丰富成果。但这些方法都是对现状进行评价, 不能突出城市生态交通发展趋势。该文根据武汉城市生态交通的特点构建发展效率评价指标体系, 采用主成分分析(PCA)分别对输入、输出评价指标进行降维处理, 然后使用数据包络分析(DEA)评价武汉城市生态交通发展的相对效率, 进而分析武汉城市生态交通发展变化情况。

## 1 城市生态交通概念

生态城市的概念由联合国教科文组织于 1971

年提出, 此后生态城市理论及实践研究逐渐成为城市规划领域的热点。生态城市是将生态理念融入城市规划建设中, 实现“人—城市—自然环境”和谐共生的复合人居系统。它是一种包含了可持续发展特征的城市发展模式, 被认为是解决城市可持续发展的最佳途径。

Stefan Schaltegger 和 Andreas Sturm 于 1990 年首次提出生态效率的概念, 此后对生态效率的研究不断深入。简单来说, 生态效率就是以最少的资源和能源消耗获得尽可能大的产出, 且对环境的影响最小。

城市交通作为生态城市这个复杂系统中的一个子系统, 也需要向生态化方向发展。因此, 在生态城市与生态效率概念的基础上, 将城市生态交通定义为: 在城市交通规划、建设与管理中, 以生态理念为指导, 以最小的资源消耗和环境污染获得尽可能大的交通发展和交通效益, 形成结构优化、资源节约、污染最小、生态良性循环的城市交通体系。

## 2 研究方法

### 2.1 主成分分析

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是由 Hotling 于 1933 年推广应用到随机变量中, 随后发展起来的一种多元统计分析方法。主要用于对高维变量空间进行降维处理, 从原始变量中

\* 基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金资助项目(185202003); 全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛(第十一届)(1130711)

提取少数几个互不相关的主成分,达到减少指标数目、简化计算的目的,并能保证原始数据信息丢失最少。其优点在于数据降维效果显著,不受主观因素影响,客观性、准确性强。但仅使用该方法不能很好地评价一个系统的情况。

## 2.2 数据包络分析

1978年,A. Charnes等基于“相对效率”提出数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA),该方法常用于评价多个对象(每个对象有同样数量的多个输入和输出)之间的相对效率。其对输入、输出的理解是输入越小越好、输出越大越好,希望以越小的输入获得尽可能大的输出。

DEA法最具代表性的两个模型是CCR、BCC。CCR模型在假定规模报酬不变的前提下对输入、输出指标进行综合技术效率分析;BCC模型将综合技术效率分为纯技术效率和规模效率,根据结果分析DEA相对无效是由技术无效还是规模无效造成的。武汉城市生态交通发展综合评价需以时间为轴线进行纵向评价,规模报酬是变化的,故选取BCC模型进行评价。

假设有 $n$ 个决策单元(DMU),其都具有可比性,每个决策单元有 $m$ 种类型的输入和 $s$ 种类型的输出。 $\lambda_j$ 为 $n$ 个DMU的输入、输出指标权重,为未知变量。 $\epsilon$ 为非阿基米德无穷小, $S^-$ 为剩余变量, $S^+$ 为松弛变量, $\hat{e}^T = e^T = (1, 1, \dots, 1)^T$ , $\theta$ 为线性规划模型的最优值; $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ , $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})$ ( $j=1, 2, \dots, n$ ;  $X_j, Y_j > 0$ )分别为DMU $j$ 的输入向量和输出向量,均为已知数据,可根据历史资料或统计数据得到。则BCC对偶规划模型为:

$$D_{BCC}^I \begin{cases} \min [\theta - \epsilon(\hat{e}^T S^- + \hat{e}^T S^+)] \\ \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j + S^+ = Y_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \\ S^+ \geq 0, S^- \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

假设模型的最优解为 $\theta^0$ 、 $S^{-0}$ 、 $S^{+0}$ 、 $\lambda_j^0$ ,有:1) 若 $\theta^0 < 1$ ,则DMU不为DEA弱有效。2) 若 $\theta^0 = 1$ , $\hat{e}^T S^{-0} + \hat{e}^T S^{+0} > 0$ ,则DMU仅为弱DEA有效。3)

若 $\theta^0 = 1$ , $\hat{e}^T S^{-0} + \hat{e}^T S^{+0} = 0$ ,则DMU为DEA有效。4) 根据 $\lambda_j^0$ 可了解DMU对应的规模收益状况,若 $\sum_{j=1}^n \lambda_j^0 = 1$ ,则表明规模效益不变;若 $\sum_{j=1}^n \lambda_j^0 < 1$ ,则表明规模效益递增;若 $\sum_{j=1}^n \lambda_j^0 > 1$ ,则表明规模效益递减。

## 2.3 PCA-DEA 组合评价法

DEA法的优势在于对指标没有量纲要求,操作简便;劣势是指标选取不宜过多,否则易导致结果准确性不佳。DEA法通常要求DMU个数是输入、输出指标个数的2倍以上。为克服DEA法对输入、输出指标变量个数的限制,运用PCA对多个输入、输出指标进行降维,提取主成分;然后将输入、输出主成分代入DEA模型对决策单元进行相对效率评价,得出结果。这样既能保留原始指标数据的信息完整性,又满足DEA法对输入、输出指标个数的要求,充分体现DEA在评价多个对象相对有效性方面的优势。评价流程见图1。

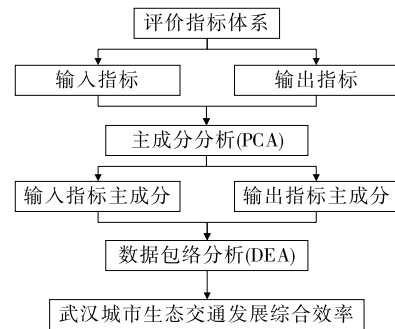


图1 PCA-DEA模型评价流程

## 3 武汉城市生态交通评价指标体系

根据指标体系构建原则和思路,基于指标选取的科学性、综合性和可操作性,结合武汉城市生态交通的特点,从输入、输出两方面构建武汉城市生态交通发展评价指标体系。其中:输入指标包括机动车排放、城市交通噪声、空气质量、交通和环保投资4个层面,主要体现城市交通污染和资源消耗;输出指标包括交通经济、交通工具、交通线路3个层面,主要体现城市交通发展(见表1)。

## 4 武汉城市生态交通发展综合评价

以2005—2016年时间序列为轴线,对武汉城市生态交通发展进行纵向评价,掌握各年武汉城市生态交通发展的相对效率,分析发展中存在的不足。

表1 武汉城市生态交通评价指标体系

指标类型	准则层	次准则层	指标层
输入 指标	环境 污染	机动车	机动车年日均碳排放量 $x_1$
		排放	机动车 $\text{NO}_x$ 排放量 $x_2$
		噪声	交通干线两侧噪声平均值 $x_3$
			区域环境噪声等效 $x_4$
	环境空气	环境空气	环境空气质量指数 $x_5$
	资源 消耗	交通及	环保投资额 $x_6$
		环保	城市交通建设投资额 $x_7$
		投资	轨道交通建设投资额 $x_8$
输出 指标	交通 经济	交通行业	交通行业产值 $y_1$
		轨道交通	轨道交通车辆数 $y_2$
	交通工具	机动车	机动车保有量 $y_3$
		公交车	公交车保有量 $y_4$
	交通 发展	道路交通	道路交通线里程 $y_5$
		轨道交通	轨道交通线里程 $y_6$
		道路交通	道路交通线密度 $y_7$
		轨道交通	轨道交通线密度 $y_8$

## 4.1 采用 PCA 处理输入、输出指标

输入、输出指标数据来自《武汉统计年鉴》、《武汉市机动车污染防治年报》、武汉市环保局等。运用 PCA 法对输入、输出指标进行精简,先对输入、输出指标数据进行标准化处理,然后计算各变量间的相关系数矩阵和协方差矩阵,并计算各主成分的特征根、特征向量及方差贡献率,最后根据累计方差贡献率大于 80% 的原则提取关键主成分。分析过程采用 SPSS22.0 软件实现。分析结果见表 2。

输入指标提取 2 个主成分,累计方差贡献率为 83.165%。由表 2 可知:第一主成分在机动车年日均碳排放量  $x_1$ 、机动车  $\text{NO}_x$  排放量  $x_2$ 、环保投资额  $x_6$ 、城市交通建设投资额  $x_7$ 、轨道交通建设投资额  $x_8$  上有较大载荷,故将第一主成分定义为“排放与投资  $F_1$ ”;第二主成分在交通干线两侧噪声平均值  $x_3$ 、区域环境噪声等效  $x_4$ 、环境空气质量指数  $x_5$  上有较大载荷,故将其定义为“环境影响  $F_2$ ”。输出指标提取 1 个主成分,累计方差贡献率为 91.39%,故将其命名为“交通发展  $O$ ”。

表2 初始因子载荷矩阵、特征值和方差贡献率

输入指标	成分		输出指标	成分
	$F_1$	$F_2$		$O$
机动车年日均碳排放量 $x_1$	0.983	0.153	交通行业产值 $y_1$	0.962
机动车 $\text{NO}_x$ 排放量 $x_2$	0.861	-0.246	轨道交通车辆数 $y_2$	0.953
交通干线两侧噪声平均值 $x_3$	-0.373	0.796	机动车保有量 $y_3$	0.981
区域环境噪声等效 $x_4$	-0.252	0.866	公交车保有量 $y_4$	0.904
环境空气质量指数 $x_5$	-0.131	-0.561	道路交通线里程 $y_5$	0.976
环保投资额 $x_6$	0.976	0.201	轨道交通线里程 $y_6$	0.979
城市交通建设投资额 $x_7$	0.992	0.040	道路交通线密度 $y_7$	0.939
轨道交通建设投资额 $x_8$	0.941	0.284	轨道交通线密度 $y_8$	0.982
特征值	4.748	1.905		7.371
方差贡献率/%	59.351	23.813		92.138
累计方差贡献率/%	59.351	83.165		92.138

为满足 DEA 输入、输出指标为正数的要求,采用改进的极大值标准化方法对输入、输出主成分进行无量纲化处理,公式如下:

$$F'_{ij} = 0.1 + 0.9 \times \frac{F_{ij} - \min F_{ij}}{\max F_{ij} - \min F_{ij}} \quad (2)$$

式中: $F_{ij}$ 、 $F'_{ij}$  分别为变换前后的主成分值; $\min F_{ij}$ 、 $\max F_{ij}$  分别为原主成分中的最小值、最大值。

经过变换的主成分数据全部为  $[0.1, 1]$ , 且不改变原变量数据之间的关系。按式(2)处理后得到的主成分结果见表 3、图 2。

由图 2 可知:1) 交通发展主成分值不断提升。近年来武汉市社会经济稳步增长,交通建设不断完善,交通发展情况不断向好。2) 排放与投资主成分值处于不断上升趋势。近年武汉城市交通基础设施

表3 2005—2016年武汉城市生态交通处理后的输入、输出数据

年份	输入		输入	年份	输入		输入
	$F_1$	$F_2$	$O$		$F_1$	$F_2$	$O$
2005	0.100	1.000	0.100	2011	0.656	0.567	0.347
2006	0.205	0.681	0.130	2012	0.721	0.695	0.515
2007	0.308	0.362	0.174	2013	0.862	0.127	0.640
2008	0.395	0.100	0.239	2014	0.927	0.385	0.755
2009	0.503	0.154	0.225	2015	0.904	0.797	0.835
2010	0.602	0.253	0.294	2016	1.000	0.959	1.000

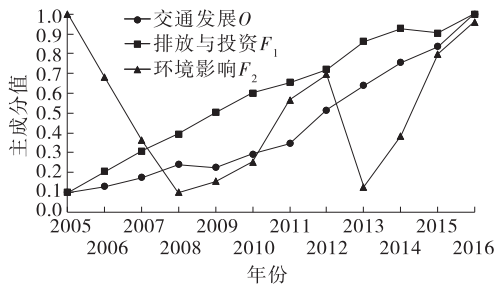


图2 武汉城市生态交通发展主成分发展态势

建设投入力度不断增加,投资额持续增加;同时随着社会经济的发展,人们生活水平有很大提升,机动车

保有量不断攀升,交通排放随之不断增加。3) 环境影响主成分值剧烈波动,表明武汉城市噪声污染、空气质量状况并未得到明显改善,需重点监督和治理城市噪声污染和空气质量。

4.2 DEA模型评价分析

将处理后的输入、输出数据代入DEA-BCC模型,利用DEAP2-1软件计算得到2005—2016年武汉市城市生态交通发展效率(见表4、图3~5)。

由表4及图3~5可知:

(1) 2005—2016年,武汉城市生态交通发展综合效率仅在2005、2013、2016年达到DEA相对有效,表明这3年的输入要素得到了充分利用,并取得了最大产出,即在相应输入条件下获得了最大产出。其余9年均均为相对DEA无效,表明输入要素组合没有达到最优或规模最佳水平。

(2) 2006—2008年,纯技术效率处在接近于1的较高水平,规模效率较低,表明这3年武汉城市生态交通输入要素组合相对合理,导致综合效率相对无效的原因是规模效率较小;2009—2012年,纯技术效率值与规模效率值均较低,说明这4年不仅输入要素组合没有达到最优水平,发展规模也未达到最佳水平。

表4 DEA模型计算结果

年份	综合效率 $TE$	纯技术效率 $PTE$	规模效率 $SE$	规模效益	年份	综合效率 $TE$	纯技术效率 $PTE$	规模效率 $SE$	规模效益
2005	1.000	1.000	1.000	—	2011	0.546	0.688	0.793	IRS
2006	0.634	0.998	0.635	IRS	2012	0.714	0.814	0.877	IRS
2007	0.564	1.000	0.564	IRS	2013	1.000	1.000	1.000	—
2008	0.782	1.000	0.782	IRS	2014	0.984	1.000	0.984	DRS
2009	0.566	0.773	0.732	IRS	2015	0.948	0.964	0.983	IRS
2010	0.589	0.721	0.816	IRS	2016	1.000	1.000	1.000	—

注:  $TE=PTE\times SE$ ;—、IRS、DRS分别代表规模效益不变、递增、递减。

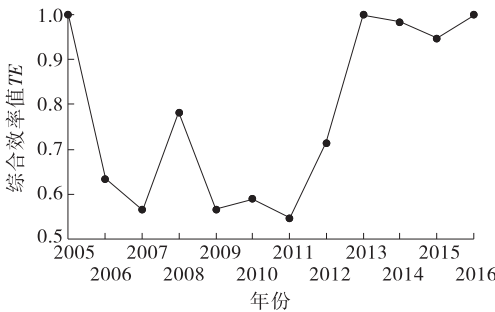


图3 武汉城市生态交通发展综合效率

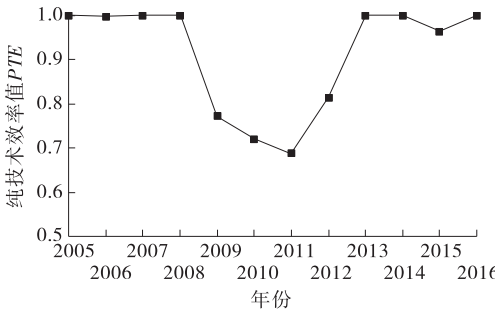


图4 武汉城市生态交通发展纯技术效率

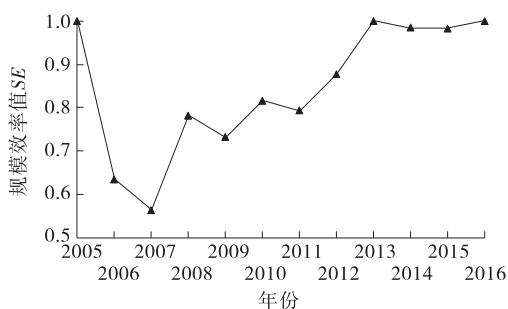


图5 武汉城市生态交通发展规模效率

(3) 综合效率相对无效的9个年份中,2006—2012、2015年规模收益递增,表明这8年的发展规模相对较小;2014年规模效益递减,表明该年的发展规模过大,输入存在冗余。

(4) 武汉城市生态交通发展综合效率存在较大波动,大体呈现4个发展阶段:第一阶段为2005—2007年,综合效率水平大幅降低。期间武汉积极发展城市交通系统,以提高城市交通能力,满足人们的出行需求,提高人们对城市交通的满意度。但对于城市生态交通发展的重视程度不够,城市交通发展规模较小,导致综合发展水平逐年降低。第二阶段为2007—2008年,综合效率有所回升。2008年,武汉城区全年空气质量优良天数为294 d,占全年的80.3%,比2007年多18 d;城市交通道路噪声平均值为69 dB,达到了交通道路两侧功能区噪声标准,比2007年下降0.2 dB。2008年武汉城市环境状况有所改善,城市生态交通综合效率有所提升。第三阶段为2008—2011年,综合效率又呈下降态势。根据图2,2009—2011年,虽然武汉对城市交通的投入有所增加,但交通发展所带来的环境影响也不断增加,导致综合发展效率呈现劣化趋势。第四阶段为2011年之后,综合效率再次呈现上升态势,并在2013—2016年保持在接近于1的较高水平。这几年,武汉市在保持社会经济持续快速发展的基础上进一步加大交通基础设施建设投入,不断优化与完善城市交通环境,增强武汉城市交通服务能力,全市交通建设、运行与管理取得了显著成就,多条轨道交通线先后建成通车,极大改善了城市交通状况。同时对城市交通生态建设的重视度有所提升,积极改善交通环境,积极应对交通发展对环境带来的压力,更加注重居民对交通舒适度的要求,如多次投入新能源出租车、淘汰老旧高排放出租车等。因此,城市生态交通发展呈现良好态势。

(5) 综合分析,2005—2016年武汉城市生态交

通发展不断向好,交通投入要素组合趋于完善,规模效益不断提高,达到了较好规模的发展水平。

#### 4.3 建议

(1) 加强对交通环境的监管力度,降低交通对城市生态环境的影响。生态交通系统的发展应在监管中不断改善和提升,通过加强监管迅速发现交通环境中的不利影响因素,积极采取措施,降低交通对社会的影响。

(2) 加速淘汰老旧机动车、黄标车,整改排放不达标机动车。机动车排放对武汉城市生态交通的发展影响较大,应注重减少机动车排放。老旧机动车、黄标车作为机动车排放的首要贡献者,其对环境的污染十分严重,需加速淘汰。同时对排放不达标的机动车进行整改,降低其对环境的污染。

(3) 积极鼓励与发展新能源汽车。新能源汽车的发展为城市生态交通发展提供了一种新思路,发展新能源汽车可有效减轻环境压力。

(4) 从整体出发,对城市交通资源进行适当投入、合理配置,避免资源浪费;同时合理有效地规划城市交通建设与发展,充分把握交通建设在环境生态方面的可行性。

## 5 结语

该文根据武汉城市生态交通的特点构建以环境污染和资源消耗为输入指标、交通发展为输出指标的武汉城市生态交通评价体系,利用PCA-DEA模型对武汉城市生态交通发展状况进行评价。结果表明:2005—2016年武汉城市生态交通发展波动较大,2011—2016年处于生态化建设发展时期,城市生态交通发展水平呈现良好态势。

采用PCA-DEA模型评价武汉城市生态交通发展状况,综合考虑了多个指标,保证了相关指标的准确性,提高了评价结果的可靠性。但由于城市生态交通涉及交通与生态的诸多因素,评价过程中没有充分考虑当时正在建设的交通设施及城市绿化对城市生态交通的影响,仍需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 姜玉梅,郭怀成,黄凯,等.城市生态交通系统综合评价方法及应用[J].环境科学研究,2007(6).
- [2] 余跃武.基于BP神经网络的城市生态交通系统评价研究[D].南京:南京林业大学,2013.
- [3] 闵雪.武汉城市交通承载力评估研究[D].武汉:武汉理

- 工大学,2016.
- [4] 贾建民.城市低碳生态交通系统综合评价体系研究[D].济南:山东大学,2013.
- [5] 王家祺.深圳市生态交通系统评价研究[D].福州:福建农林大学,2014.
- [6] 吕彬,杨建新.生态效率方法研究进展与应用[J].生态学报,2006,26(11).
- [7] 李晓燕,陈红.城市生态交通规划的理论框架[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1).
- [8] 王学民.对主成分分析中综合得分方法的质疑[J].统计与决策,2007(8).
- [9] A Charnes, W W Cooper, E Rhodes. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6).
- [10] 魏权龄.数据包络分析[M].北京:科学出版社,2004.
- [11] 冯凤玲,武义青,段红霞.基于DEA的综合交通运输协调发展评价研究:以河北省为例[J].科技和产业,2012(7).
- [12] 许乃星.控规下的半建成区低碳交通优化研究:以福州海峡奥体生态城区为例[J].公路与汽运,2016(1).
- [13] 沈沪瑛.道路交通管理和绿色交通[J].公路与汽运,2001(1).
- [14] 钱耀军.生态城市可持续发展综合评价研究:以海口市为例[J].调研世界,2014(12).
- [15] 何如海,叶依广.基于模糊理论的城市交通生态环境综合评价模型研究[J].安徽农业大学学报,2006,33(3).
- [16] 王钊.城市生态交通系统综合评价方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
- [17] 曹国华.绿色交通模式引导生态城市综合交通规划转型与重构[A].2011中国城市规划年会论文集[C].2011.
- [18] 聂康才.注重景观生态的城市交通与道路系统规划研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.
- [19] 龙亮军,王霞,郭兵.基于改进DEA模型的城市生态福利绩效评价研究:以我国35个大中城市为例[J].自然资源学报,2017,32(4).
- [20] 马伟赫.基于生态足迹方法的城市交通可持续性研究[D].天津:河北工业大学,2012.
- [21] 喻伟,方磊,王佳.基于PCA-DEA模型的城市群道路客运一体化协调性评价研究[J].铁道科学与工程学报,2011,8(4).
- 收稿日期:2018-05-21

\*\*\*\*\*

(上接第21页)

分析缺乏科学合理的评估方法的问题,从交通运行状况和衔接路网布局两方面展开衔接路网适应性分析评价,综合二者的影响因素分析得到衔接路网存在的问题,对高速公路与城市道路间接接线适应度评定具有借鉴意义,其评价结果可为城市道路规划提供指导和依据。

#### 参考文献:

- [1] 徐文学,邹志云,余斌,等.高速公路网与城市道路网衔接研究[M].武汉:湖北科技出版社,2008.
- [2] 李淳.城市道路与高速公路间接接线网综合评价研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [3] 高健智.高速公路与城市道路衔接理论与方法[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [4] 夏晓敬.基于快速城市化的城市出入口道路交通特性分析[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [5] 王花兰.高速公路与城市道路间接接线综合评价[J].兰州交通大学学报,2013,32(6).
- [6] 邓亚娟.城市快速路与常规道路衔接问题研究[D].西安:长安大学,2004.
- [7] 史玉娟.城市出入口管理研究:主、次干道分隔带与两侧连接道的管理[D].北京:北京工业大学,2006.
- [8] 黄浚源.高速公路出入口衔接通道交通规划探索:以中山市港口大道为例[J].交通世界,2017(8).
- [9] 张碧琴,闫向阳,王慧.基于AHP的模糊综合评价方法在高速公路与城市道路间接接线综合评价中的应用[J].公路,2013(4).
- [10] 陈修和.高速公路的城市出入口探讨[J].公路交通科技:应用技术版,2011(12).
- [11] 昌宏哲,余丰茹,单飞,等.河南省城市内外交通衔接模式研究[J].公路与汽运,2014(4).
- [12] 李红伟,陆健,马永锋,等.城郊高速出入口匝道选址模型[J].交通信息与安全,2013(5).
- [13] 张世站.基于边界理论的绕城高速公路出入口布局优化[D].兰州:兰州交通大学,2017.
- [14] 朱胜跃.城市快速路出入口设置探讨[J].城市交通,2004(4).
- [15] 聂文涛.高速公路与城市道路衔接问题研究[D].西安:长安大学,2010.
- [16] 吴祖峰,茅国振,高红升,等.公路与城市道路的融合研究:以宁波市江北区为例[J].城市管理与科技,2005(2).
- [17] 陈培健.城市发展与对外公路交通合理布局的研究[J].公路交通科技,2000,17(3).
- 收稿日期:2018-05-26