

# 基于 D-S 证据理论的出租车减排策略评价\*

胡晓伟<sup>1▲</sup> 刘 响<sup>1,2</sup> 孙航航<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨 150090;

2. 深圳市城市交通规划设计研究中心有限公司 广东 深圳 518021)

**摘 要:**针对目前出租车污染减排策略效果的评价缺少数据支持的问题,研究了基于层次分析法及 D-S 证据理论的评价模型。通过文献梳理筛选了出租车维护保养、提高燃油标准、减少出租车空驶里程、定期更换尾气净化装置、推广新能源汽车等 5 种出租车污染减排策略。随后从经济、环境、社会和技术 4 个方面,建立了出租车减排策略效果评价的指标体系。运用层次分析法获得了子准则层指标权重,运用 D-S 证据理论从公众、政府管理者、研究人员、专家等多主体角度综合分析了不同减排策略的效果。结果表明,推广清洁能源汽车策略效果的评价值比提高燃油标准策略高 9.35%,比定期更换尾气净化装置策略高 11.59%,比车辆维修与保养策略高 16.56%,比减少出租车空驶里程策略高 21.29%。

**关键词:**城市客运;出租车;减排策略;D-S 证据理论;数据融合

**中图分类号:**U491.1+ **文献标志码:**A **doi:**10.3963/j.issn.1674-4861.2019.01.015

## Strategies for Evaluating Taxi Emissions Reduction Based on Dempster-Shafer Evidence Theory

HU Xiaowei<sup>1▲</sup> LIU Xiang<sup>1,2</sup> SUN Hanghang<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Shenzhen Urban Transport Planning Center COLTD, Shenzhen 518021, Guangdong, China)

**Abstract:** An evaluation model based on analytic hierarchy process (AHP) and Dempster-Shafer (D-S) evidence theory is studied to evaluate issues that effectiveness of pollution reduction strategies lacks data support. Five kinds of reduction strategies for taxi emission, including maintenance of taxis, improvement of fuel standards, reduction of taxi mileage, regular replacement of exhaust gas purification devices, and promotion of new energy vehicles are analyzed through former studies. From four aspects of economy, environment, society, and technology, an indicator system for evaluating effectiveness of reduction strategies for taxi emission is established. An analytic hierarchy process is used to obtain sub-criteria level index weights. The D-S evidence theory is used to comprehensively analyze effects of different strategies from perspectives of the public, government administrators, researchers, and experts. The results show that the evaluation value of the strategy of promoting clean energy vehicles is 9.35% higher than that of the fuel improvement strategy; 11.59% higher than the strategy of regularly replacing the exhaust gas purification device; 16.56% higher than the strategy of vehicle repair and maintenance; and 21.29% higher than the strategy of reducing driving mileage of taxi.

**Key words:** urban passenger transportation; taxi; emissions reduction strategies; Dempster-Shafer evidence theory; data fusion

收稿日期:2018-05-21

\* 国家自然科学基金项目(71603063)、黑龙江省自然科学基金项目(E2016032)资助

▲第一作者(通信作者)简介:胡晓伟(1984—),博士,副教授。研究方向:交通管理政策,交通行为分析,交通大数据分析。

E-mail: xiaowei\_hu@hit.edu.cn

## 0 引言

出租车是城市道路网络中行驶时间最长、行驶里程最多的车辆,其运营占用了大量的城市道路资源,且其污染排放高于公交车以及轨道交通<sup>[1]</sup>。以北京市为例,出租车、公交车的方式分担率分别为8.8%,25%,测算所得的出租车、公交车尾气污染(HC,CO,NO<sub>x</sub>)分别占到机动车尾气排放总量的12.4%和2.3%<sup>[2]</sup>。按照运营里程来计算,1辆出租车的排放量相当于十几辆同类型小汽车的排放量,同时出租车主要集中在城区,其车辆流动性非常强,排放的污染物离地面较近,污染物在空气中不容易扩散,是城区大气污染的主要来源<sup>[3]</sup>。如何减少出租车的空气污染排放,改善环境空气质量,提高出租车的运营效率,减少空驶率和燃料消耗,是一个亟待研究的问题。目前对于出租车的空气污染减排的研究主要是探讨某一个或者几个出租车减排策略的可行性,但是对于如何比较这些不同的减排策略及量化策略评价的效果,还没有相关的研究成果。

笔者从系统性层面来建立出租车减排策略评价体系,在综合分析前人的基础上,结合目前主要城市的出租车减排策略确定了出租车减排策略的评价指标,利用层次分析法结合专家的调查意见来确定不同的评价指标之间的权重,从而得到基于层次分析法的出租车减排策略评价体系。然后再利用证据理论将收集到的不同主体(主要包括政府管理者、公众、研究人员)对于不同的出租车减排策略的评价信息,基于D-S证据理论,量化比较不同减排策略的效果,为出租车减排策略的制定提供依据。

## 1 出租车减排策略及其评价

现阶段已有研究提出了多种可行的出租车减排策略。如李洪亮等<sup>[4]</sup>分析了不同使用年限车辆的污染物排放,提出了加强车辆维修和保养的减排策略。赵敏等<sup>[5]</sup>提出降低出租车油耗,改变燃料种类以及电话叫车的措施可以降低出租车的污染排放。黄宇等<sup>[6]</sup>主张推进技术创新从而降低汽车能耗污染并且提高油品质量。Barnett等<sup>[7]</sup>得出较高的柴油价格与CO和NO<sub>x</sub>的减少有关,汽油价格的变化对空气污染没有影响。于匡员<sup>[8]</sup>对租车合乘路径进行优化,能够提高出租车的利用率,从而减少出租车排放。Lau等<sup>[9]</sup>利用不同工

作模式下的瞬时空气/燃料比、排放率和排放因子探讨了这4种出租车的排放特性。结果表明,车辆使用和维修不善导致这4种出租车的气体排放量超过排放标准。朱传勇等<sup>[10]</sup>认为要减少出租车的污染排放应该定期进行出租车维护保养以及定期更换三元催化器。An等<sup>[11]</sup>对哈尔滨的出租车进行分析,提出了进行出租车市场管控,引入电动和LPG出租车以及电话叫车的措施来减少出租车污染排放。徐慧智等<sup>[12]</sup>提出采用BEV车辆代替全部汽油和柴油车辆来减少二氧化碳排放。Gao等<sup>[13]</sup>则提出将出租车辆更新为混合动力电动车(HEVs)。周程等<sup>[14]</sup>分析了不同的碳排放政策对减排效果的影响。Latham等<sup>[15]</sup>从多方面提出了出租车减排的策略,比如,提高排放标准,重新设计发动机并采用尾气排放后处理技术,鼓励和补贴更新新型车辆,更新燃料以及加强车辆保养,实施碳补偿措施等。Deyang等<sup>[16]</sup>,Teixeira等<sup>[17]</sup>,Falcão等<sup>[18]</sup>,Bickert等<sup>[19]</sup>分别从电动出租车的生产及运行过程来对比分析电动出租车与传统出租车的排放量,得出电动出租车的排放量比传统出租车排放量低的结论。Hu等<sup>[20]</sup>以柴油出租车为例,研究了轻型柴油车的CO,HC和NO<sub>x</sub>的实际燃料效率和排放特性,确定了燃料消耗和各种道路条件下3种气态污染物排放的明确和类似的模式。

通过分析可知,目前的出租车减排措施主要分为5个方面:①加强出租车的保养与维护,即提高出租车的燃油经济性;②提高燃油标准,这与2013年底我国实施的新标号石油相关,还与所实施的排放标准有较大的联系;③减少出租车空驶里程,这可以从以下途径来实现,即合理布局和设置出租车停靠站点减少出租车的空驶里程、以及采用电话叫车的方式减少出租车在路网中的巡游时间和巡游距离;④定期更换尾气净化装置,即出租车每年更换与车型相匹配的三元催化器;⑤推广清洁能源汽车,主要是推广使用电动出租车,增加新能源出租车的市场占有率。

以上研究可以发现,目前对于出租车减排措施的研究主要是集中于技术层面来讨论某一个或者某些减排措施的可行性,而没有系统地分析评价不同出租车减排措施的效果。

## 2 减排策略及数据

### 2.1 减排策略

打车软件出现后,不仅方便了居民出行,也使

大部分城市出租车空驶率同比下降,全国 150 万辆出租车每年可减少碳排放共计 729 万 t。为了减少尾气污染,北京率先在 2016 年推行了京六标准的汽柴油。京六标准的汽油目前是全球最严格标准的油品,京六汽油可使颗粒物排放下降 10%,京六柴油可使  $\text{NO}_x$  下降 4.6%,颗粒物下降 9.1%。同时,为落实京津冀大气污染防治强化措施的要求,北京市在 2017 年对全市出租车的三元催化器基本完成全部更换。济南市在 2018 年 11 月正式推广新能源电动出租。由上可知,不同城市采取了不同的减排措施,如何选择适合本城市的减排措施是执行者面临的问题。

## 2.2 数据来源

评价指标权重由 35 位高校交通专业及交通行业企业的专家打分确定。专家通过问卷对 4 个指标进行评分,得到该 4 个指标的平均得分,再得到 4 个指标的相对重要程度。通过问卷调查,得到各个指标的评价值。问卷主要通过针对不同措施的重要度进行打分来表达不同措施的重要性及是否有利。满分为 7 分制。

策略评比数据通过网上调查与发放问卷的形式对 3 种不同的人群进行收集,主要包括公众、技术人员与政府及管理部门。网上调查收到有效问卷 200 份,回收有效问卷 200 份,发放纸质问卷 180 份,回收纸质问卷 160 份,其中有效纸质问卷 143 份,纸质问卷回收率为 88.9%,纸质问卷有效率为 89.4%。有效问卷数总计 343 份。分数为正则为有利,分数越高则越重要。

## 3 方法与模型

### 3.1 层次分析法

构造层次结构是将整个评价体系按照重要性程度分层,是对出租车减排措施评价的剖析过程。将该体系分为 4 个层次即目标层、准则层、子准则层、方案层(如图 1 所示)。考虑到研究的目的是为了评价出租车减排策略,因此该评价体系的目标层为出租车减排措施的评价指数。Slowak 和 Taticchi<sup>[21]</sup>两位学者根据 3 300 余篇学术文章,总结了技术、经济和技术 3 个层面的碳污染减排策略。国务院在 2016 年提出要综合运用经济、法律和必要的行政手段,推进《“十三五”节能减排综合工作方案》的实施,方案中涉及了污染减排的技术、政策和管理 3 个方面。在十八大五中全会中,习近平总书记提出了五大发展理念。其中绿色发

展着力要解决的是人与自然和谐问题,目的是建设资源节约和环境友好的美丽中国。出租车减排的目的是减少碳排放,最终目标是保护环境。因此,笔者提出了包括经济、环境、社会以及技术等因素的准则层。

在从经济、环境、社会,以及技术等 4 个方面综合分析的基础上将子准则层确定如下。

首先出租车减排措施在经济上表现为投入费用的多少。北京市出租车每月在车辆维护保养的费用为 760 元。在环境方面出租车减排措施的影响主要表现在  $\text{NO}_x$  的排放的多少,根据目前使用的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》规定,汽油车的  $\text{NO}_x$  排放限值为 0.06 g/km,与国四标准相比,汽油车的  $\text{NO}_x$  排放限值严格了 25%。在社会角度,出租车减排措施在社会层面的影响主要表现为实施减排措施之后对道路交通拥挤的影响及公众对于减排措施的支持程度,交通拥堵指数是根据道路通行情况,一些城市设置的综合反映道路网畅通或拥堵的概念性指数值,它相当于把拥堵情况数字化。以北京为例,拥堵指数在 0~2 之间为“畅通”,2~4 之间为“基本畅通”,4~6 之间为“轻度拥堵”,6~8 之间为“中度拥堵”,8~10 之间为“严重拥堵”。在技术方面,出租车减排措施的影响主要是在减排措施对车辆的安全性能方面的改变及实施该减排措施在技术上的可行性大小。故子准则层的元素为尾气中污染物减少量、政府的支出费用、造成的交通拥挤、车辆安全性、大众支持度、实施难度。方案层为不同的出租车减排策略。图 1 为评价系统的结构图。

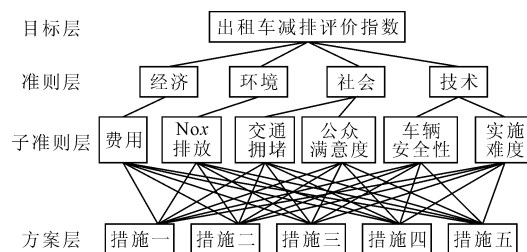


图 1 评价系统的结构图

Fig. 1 The structured diagram of evaluation system

判断矩阵各元素的值是同层的元素两两比较后的相对重要程度。用  $A$  表示该层的上一层,  $b_{ij}$  是因素  $x_i$  与因素  $x_j$  对上一层  $A$  的影响程度之比,用全部的比较结果组成判断矩阵  $B = (b_{ij})_{6 \times 6}$ 。

在确定子准则层的每个指标的相对重要度时,用七分法标度表(见表 1)来确定其特征矩阵

表 1 七分法标度  
Tab. 1 Scale of seven

标度	含义
$b_{ij} = 1$	表示 2 个因素 $x_i$ 与 $x_j$ 相比,对上一层 $A$ 的影响具有同样的重要性(相等)
$b_{ij} = 3$	表示 2 个因素 $x_i$ 与 $x_j$ 相比,对上一层 $A$ 的影响程度略大(较强)
$b_{ij} = 5$	表示 2 个因素 $x_i$ 与 $x_j$ 相比,对上一层 $A$ 的影响程度大(强)
$b_{ij} = 7$	表示 2 个因素 $x_i$ 与 $x_j$ 相比,对上一层 $A$ 的影响程度大很多(很强)
$b_{ij} = 2, 4, 6$	表示 2 个因素 $x_i$ 与 $x_j$ 相比,对上一层 $A$ 的影响程度介于上面两者之间,则 $b_{ij}$ 的取值为 2, 4, 6

各个元素所对应的值。

如果 2 因素  $x_i$  与  $x_j$  之间的重要性之比为  $b_{ij}$ ,反之,可以知道两因素  $x_j$  与  $x_i$  重要性之比为:  $b_{ji} = 1/b_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ );若  $B = (b_{ij})_{6 \times 6}$  满足:  $b_{ij} > 0$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ),且当:  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$  时,称  $B$  为一致性矩阵。该特征矩阵存在唯一并且非零的最大特征值。为避免误差太大的情况,将对矩阵进行一致性检验。

求出判断矩阵  $B$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ ,然后再利用公式  $Bw = \lambda_{\max} w$ ,解出  $\lambda_{\max}$  所对应的单位特征向量,也就是同一层次中各因素对上一层中的各指标的影响程度值。

计算判断矩阵  $B$  的一致性检验指标  $CI$

$$CI = (\lambda_{\max} - 6) / (6 - 1) \quad (1)$$

若  $CI$  的取值越大,说明判断矩阵的一致性越差,需要对判断矩阵的取值进行调整。这里一致性比率  $CR = CI/RI$ 。式中:  $RI$  为平均随机一致性指标。理论上当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵  $B$  有较好的一致性,否则应该对  $B$  进行调整。得到该判断矩阵的最大特征值对应的单位特征向量

通过汇总 35 位专家对准则层 4 个指标(经济、环境、社会、技术)的评分,可以得到准则层各项指标之间的相对重要程度为:(经济:环境:社会:技术) = (0.242:0.269:0.235:0.253)。通过专家对子准则层的 6 个指标进行打分,得到子准则层(费用:  $\text{NO}_x$  排放:交通拥堵:公众满意度:车辆安全性:实施难度的判断矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.01 & 1.20 & 0.97 & 1.04 & 1.03 \\ 0.99 & 1.00 & 1.19 & 0.96 & 1.03 & 1.02 \\ 0.83 & 0.84 & 1.00 & 0.81 & 0.87 & 0.86 \\ 1.03 & 1.04 & 1.24 & 1.00 & 1.08 & 1.07 \\ 0.96 & 0.97 & 1.15 & 0.93 & 1.00 & 0.99 \\ 0.97 & 0.98 & 1.16 & 0.94 & 1.01 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过 Matlab,求得该特征矩阵的最大特征值为 6.000,其对应的特征的向量也即子准则层各指标的权重表达如下:(费用,  $\text{NO}_x$  排放,交通拥堵,车辆安全性,乘客满意度,技术难度) = 0.422, 0.318, 0.318, 0.418, 0.405, 0.405。

可以得到该判断矩阵  $B$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的单位特征向量为:(0.449:0.338:0.338:0.445:0.431:0.431)。

该判断矩阵的一致性检验指标为:  $CI = 0$ ,故  $CR = 0 < 0.1$ ,判断矩阵  $B$  有较好的一致性。

子准则层指标的权重 = 准则层指标的权重 \* 子准则层指标对准则层指标的影响权重。

例:交通拥堵指标的权重 = 社会指标权重 \* 交通拥堵权重 / (交通拥堵权重 + 公众满意度权重) =  $0.235 \times 0.338 / (0.338 + 0.431) = 0.103$ 。

故该评价模型为:  $H = 0.242 \times \text{费用} + 0.269 \times \text{NO}_x \text{ 排放} + 0.103 \times \text{交通拥堵} + 0.132 \times \text{乘客满意度} + 0.129 \times \text{车辆安全性} + 0.124 \times \text{实施难度}$ 。

### 3.2 基于 D-S 证据理论的多元信息融合与数据分析

#### 3.2.1 D-S 证据理论理论基础

针对减排策略评价,本文考虑了社会不同主体的意见,许多评价因素具有模糊性、随机性和不确定性,不同主体对同一指标的评价结果可能会存在较大差异,因此,应将不同主体的评价结果合理地融合。在综合考虑的基础上选择 D-S 证据理论方法评价策略。

D-S 证据理论通过对不确定性信息的描述采用“区间估计”,可用来处理不确定性问题。证据理论依据主体对客观世界的认识,以已有知识对不确定事件做出合理的判断<sup>[22]</sup>。证据理论算法结构简单、融合精度高,能较好的处理不确定性信息,是一种重要的决策融合方法<sup>[23-24]</sup>。D-S 证据理论一方面综合了不同专家的知识,另一方面能够保证事物评价的客观性。

设辨识框架  $\Theta$  为变量  $x$  的所有可能值的穷举集合,且设  $\Theta$  中的各元素是相互排斥的。设  $\Theta$  中有  $N$  个元素,则  $\Theta$  的幂集合  $2^\Theta$  有  $2^N$  个元素,每个幂集合的元素对应于一个关于  $x$  值情况的命题(子集)。一个证据可以为一个或多个命题(对应于  $\Theta$  的一个或多个子集)提供支持,并可用下面的基本概率分配函数,亦称 BPA 函数来表示。

如果集函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  ( $2^\Theta$  为  $\Theta$  幂集)满足

$$\begin{cases} m(\varphi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

则称  $\Theta$  上的基本概率分派函数为 BPA 或基本可信度分配。称  $m(A)$  为  $A$  的基本概率数。若  $\Theta$  中任意 1 个子集  $A$  满足  $m(A) > 0$ , 则称  $A$  为焦点元素。1 个集函数的所有焦点元素的集合则称为集函数的核。

信任函数 ( $Bel$ ) 的定义是: 对于任意  $A \subseteq \Theta$ , 有

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (4)$$

$Bel(A)$  为  $A$  的所有子集合含有的基本分配概率之和。

似然函数 ( $Pl$ ) 的定义是: 对于任意  $A \subseteq \Theta$ , 有

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \varphi} m(B) \quad (5)$$

$Pl(A)$  为所有与  $A$  相容命题本身的基本分配概率之和或  $A$  内的可能性基本分配概率之和。

可以根据已知的同一  $\Theta$  上不同证据的信任函数 ( $Bel$ ), 通过 D-S 进行合成, 最终可以得到各种证据共同作用的信任函数。

设  $Bel_1$  和  $Bel_2$  是同一辨识框架  $\Theta$  上 2 个独立证据的信任函数,  $m_1, m_2$  是这个这 2 个信任函数所对应的基本概率分派函数, 焦点分别为  $A_1, A_2, \dots, A_k$  和  $B_1, B_2, \dots, B_h$ 。由 D-S 合成法则,

根据下式可以得到综合之后的基本概率分配函数

$$m_A \quad m_B。$$
$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \varphi} m_1(A_i)m_2(B_j)}, & A \neq \varphi \\ 0, & A = \varphi \end{cases} \quad (6)$$

其中  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, h$ 。可以通过该规则将框架内的不同的证据结合起来。为了方便后面计算, 记  $K = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \varphi} m_1(A_i)m_2(B_j)$ 。

3.2.2 数据统计与融合

表 2 中为调查问卷的处理结果, 表示的是各类型的人群对不同的指标的评价结果。表 2 中每一减排策略对应的前 3 行数据为每一类人群对各项指标的评分占比。表 2 中每一个出租车减排措施中的最后一行数据对应的是数据融合之后的结果。

这里用  $m_1, m_2, m_3$  表示政府及管理部门, 群众, 技术人员等群体所对应的基本概率分配函数, 用  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  分别表示政府的支出费用, 尾气中污染物减少量, 造成的交通拥挤, 公众接受度, 车辆安全性, 技术难度等指标。

表 2 数据统计及融合  
Tab. 2 Data statistics and integration

减排措施	群体类型	政府支出费用	污染物减少量	造成的交通拥挤	公众接受度	车辆安全性	实施难度
车辆维修与保养	公众	0.105	0.146	0.165	0.186	0.212	0.185
	技术人员	0.143	0.148	0.153	0.177	0.207	0.172
	政府及管理部门	0.095	0.200	0.147	0.189	0.179	0.189
	公众 技术人员 管理部门	0.048	0.147	0.125	0.210	0.265	0.204
提高燃油标准	公众	0.156	0.170	0.163	0.176	0.190	0.146
	技术人员	0.178	0.175	0.153	0.172	0.169	0.153
	政府及管理部门	0.138	0.181	0.149	0.192	0.170	0.170
	公众 技术人员 管理部门	0.141	0.198	0.137	0.204	0.201	0.139
减少出租车空驶里程	公众	0.114	0.165	0.198	0.191	0.184	0.148
	技术人员	0.154	0.157	0.182	0.185	0.165	0.157
	政府及管理部门	0.091	0.182	0.205	0.193	0.182	0.148
	公众 技术人员 管理部门	0.054	0.160	0.250	0.232	0.187	0.117
定期更换尾气净化装置	公众	0.123	0.183	0.156	0.196	0.189	0.154
	技术人员	0.164	0.180	0.151	0.180	0.167	0.159
	政府及管理部门	0.101	0.191	0.169	0.180	0.191	0.169
	公众 技术人员 管理部门	0.071	0.212	0.140	0.224	0.212	0.145
推广清洁能源汽车	公众	0.178	0.188	0.124	0.203	0.177	0.131
	技术人员	0.188	0.193	0.156	0.185	0.153	0.126
	政府及管理部门	0.137	0.179	0.158	0.200	0.179	0.147
	公众 技术人员 管理部门	0.166	0.236	0.111	0.272	0.175	0.078

首先将  $m_1$  与  $m_2$  进行融合得到  $m_1 \quad m_2$  的概率分配函数  $m_1 \quad m_2[C_1], m_1 \quad m_2[C_2], m_1 \quad m_2[C_3], m_1 \quad m_2[C_4], m_1 \quad m_2[C_5], m_1 \quad m_2[C_6]$ 。再将  $m_1 \quad m_2$  与  $m_3$  进行融合, 得到  $m_1$

$m_2$   $m_3$  的概率分配函数  $m_1$   $m_2$   $m_3[C_1], \dots, m_1$   $m_2$   $m_3[C_6]$ 。

对于车辆维修与保养策略,对首先对公众与技术人员进行融合,公众对各指标的分配函数: $m_1[C_1]=0.105, m_1[C_2]=0.146, m_1[C_3]=0.165, m_1[C_4]=0.186, m_1[C_5]=0.212, m_1[C_6]=0.185$ 。技术人员对各指标的分配函数: $m_2[C_1]=0.143, m_2[C_2]=0.148, m_2[C_3]=0.153, m_2[C_4]=0.177, m_2[C_5]=0.207, m_2[C_6]=0.172$ 。各个指标对应一个焦元,故不用考虑集合的范畴,可以简化计算。根据 D-S 证据理论公式可以得到

$$K_{1,2} = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j) = 1 - \{0.105 \times (0.148 + 0.153 + 0.177 + 0.207 + 0.172) + 0.146 \times (0.143 + 0.153 + 0.177 + 0.207 + 0.172) + 0.165 \times (0.143 + 0.148 + 0.177 + 0.207 + 0.172) + 0.186 \times (0.143 + 0.148 + 0.153 + 0.207 + 0.172) + 0.121 \times (0.143 + 0.148 + 0.153 + 0.177 + 0.172) + 0.185 \times (0.143 + 0.148 + 0.153 + 0.177 + 0.207)\}$$

得到  $K_{1,2}=0.171$ ,融合之后的分配概率为

$$m_{1,2}(C_1) = \frac{m_1(C_1)m_2(C_1)}{K_{1,2}} = 0.088$$

同理可以得到: $m_{1,2}(C_2)=0.127, m_{1,2}(C_3)=0.148, m_{1,2}(C_4)=0.193, m_{1,2}(C_5)=0.257, m_{1,2}(C_6)=0.187$ 。

然后再将公众 技术人员与政府部门及管理部门融合,得到

$$K_{1,2,3} = 1 - \{0.088 \times (0.2 + 0.147 + 0.189 + 0.179 + 0.189) + 0.127 \times (0.095 + 0.147 + 0.189 + 0.179 + 0.189) + 0.148 \times (0.095 + 0.2 + 0.189 + 0.179 + 0.189) + 0.193 \times (0.095 + 0.2 + 0.147 + 0.179 + 0.189) + 0.257 \times (0.095 + 0.2 + 0.147 + 0.189 + 0.189) + 0.187 \times (0.095 + 0.2 + 0.147 + 0.189 + 0.179)\}$$

得到  $K_{1,2,3}=0.173$ ,融合之后的分配概率为

$$m_{1,2,3}(C_1) = \frac{m_{1,2}(C_1)m_3(C_1)}{K_{1,2,3}} = 0.048$$

得到  $m_{1,2,3}(C_1)=0.048, m_{1,2,3}(C_2)=0.147, m_{1,2,3}(C_3)=0.125, m_{1,2,3}(C_4)=0.210, m_{1,2,3}(C_5)=0.265, m_{1,2,3}(C_6)=0.204$ 。

即得到出租车减排措施—车辆保养与维修策略下各指标的综合分配函数: $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5,$

$C_6) = (0.048, 0.147, 0.125, 0.210, 0.265, 0.204)$ 。

根据前面利用层次分析法确定的出租车减排策略评价系统模型可以得到实施车辆保养与维修策略下的出租车减排评价指数为 0.157;实施提高燃油标准减排策略下的第一次数据融合结果为  $(0.167, 0.179, 0.150, 0.182, 0.193, 0.134)$ ,综合分配函数: $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) = (0.141, 0.198, 0.137, 0.204, 0.201, 0.139)$ ,减排评价指数为 0.171;实施减少出租车空驶里程减排策略下的第一次数据融合结果为  $(0.104, 0.154, 0.214, 0.210, 0.180, 0.138)$ ,综合分配函数: $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) = (0.054, 0.160, 0.250, 0.232, 0.187, 0.117)$ ,减排评价指数为 0.151;实施定期更换尾气净化装置减排策略下的第一次数据融合结果为  $(0.120, 0.197, 0.141, 0.211, 0.188, 0.146)$ ,综合分配函数: $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) = (0.071, 0.212, 0.140, 0.224, 0.212, 0.145)$ ,减排评价指数为 0.164;实施推广清洁能源汽车减排策略下的第一次数据融合结果为  $(0.198, 0.215, 0.114, 0.222, 0.160, 0.098)$ ,综合分配函数: $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) = (0.166, 0.236, 0.111, 0.272, 0.175, 0.078)$ ,减排评价指数为 0.183。

## 4 结果和讨论

从融合结果可以看出对于一致的评价结果, D-S 证据理论的融合法则能够有效地将不确定范围减少,通过证据理论的融合法则处理,最终结果能综合其一致部分,进行有效的融合<sup>[25]</sup>。

由表 3 可见,车辆维修与保养、减少出租车空驶里程 2 个策略的评价值在上述 5 个减排措施的评价值中最低,推广新能源汽车策略的评价值最高。从各方面综合的角度来说,推广清洁能源策略优于其他减排措施,而提高燃油标准与定期更换尾气净化装置策略则次之,最后是车辆维修与保养策略以及减少出租车空驶里程策略。表 3 中 5 种出租车减排措施的评价值是一个评估值,而不是经过分配之后的占比,故其评价值之和不为 1。

推广清洁能源汽车策略的评价值比提高燃油标准策略高 9.35%,比定期更换尾气净化装置策略高 11.59%,比车辆维修与保养策略高 16.56%,比减少出租车空驶里程策略高 21.29%。减少出租车空驶里程策略与车辆维修与保养策略



表 3 出租车减排策略评价  
Tab. 3 Evaluationoftaxi emissionreductionstrategies

出租车减排策略	评价值
推广清洁能源汽车	0.183
提高燃油标准	0.171
定期更换尾气净化装置	0.164
车辆维修与保养	0.157
减少出租车空驶里程	0.151

虽然在短时间内能够有比较好的效果,但是对于各方面长远的利益来看,费用不低而且长远的减排效果也比较有限,故评价值较其他减排策略低。推广清洁能源汽车策略与提高燃油标准策略的评价值最高是因为,这 2 个减排策略从源头上也即对燃料进行质量控制,因此可见对燃料的质量控制是减排措施的重要一环。

5 结 论

1) 通过文献梳理,筛选出了 5 种出租车污染减排策略,包括出租车维护保养、提高燃油标准、减少出租车空驶里程、定期更换尾气净化装置、推广新能源汽车等,随后综合考虑经济、环境、社会和技术因素,构建了出租车减排策略效果评价的指标体系。

2) 采用层次分析法获得了子准则层指标权重,运用 D-S 证据理论从公众、政府管理者、研究人员、专家等多主体角度综合分析了不同减排策略的效果,能够综合考虑不同主体的意见,量化分析不同出租车减排策略的效果。

3) 该评价模型不仅适用于单个减排策略的评价,还适用于在多种减排策略中寻找最优策略,该方法可以给管理机构构建可持续的城市交通决策提供参考意见。

4) 本文基于层次分析法和 D-S 证据理论得出推广新能源汽车是最优的出租车减排策略,但并非适合每一个城市,寒冷气候会对电池效率有影响。并且需要考虑充电桩的布设,这会给城市带来很大的成本。采取提高燃油标准、定期更换尾气净化装置、车辆维修与保养以及通过“互联网+”手段来减少空驶里程等策略也是减排策略的合理选择。

在之后的研究中,会注意于将实际的案例与该出租车减排策略评价模型进行结合,充分利用更多来源的数据,形成更加全面的证据体系来影响决策。同时在政府投入费用方面不够细化,没有考虑实际费用难度,在未来的研究工作中还需

对指标进行详细量化。

参考文献  
References

[1] CHANL Y, LAUW L, ZOUS C, et al. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in Public Transportation Modes while commuting in urban area of Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2002(36):5831-5840.

[2] 石磊,王岐东,付明亮,等.应用居民出行状况估算北京市机动车污染排放量[J].北京工商大学学报(自然科学版),2009,27(2):12-15.  
SHI Lei, WANG Qidong, FU Mingliang, et al. Application of situation of residents travel to estimate vehicles emission in Beijing[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2009,27(2):12-15. (inChinese)

[3] 李洪亮,邹本存,金世洲,等.基于使用年限的汽车排气污染物检测结果分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(4):738-742  
LI Hongliang, ZOU Bencun, JIN Shizhou, et al. Exhaust pollutants test results analysis of vehicle basedon useful life[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2015,39(4):738-742. (inChinese)

[4] 刘四建.应重视出租车污染问题[N].中国环境报,2014-01-22.  
LIU Sijian. Attention should be paid to the problem of taxi pollution[N]. China Environment News, 2014-01-22. (inChinese)

[5] 赵敏,张卫国,俞立中,等.上海市居民出行方式与城市交通 CO<sub>2</sub> 排放及减排对策[J].环境科学研究,2009,22(6):747-752.  
ZHAO Min, ZHANG Weiguo, YU Lizhong, et al. Resident travel modes and CO<sub>2</sub> emissions by traffi-cin Shanghai city[J]. Research of Environmental Sciences, 2009,22(6):747-752. (inChinese)

[6] 黄宇,吴晓煦.武汉市道路交通业 CO<sub>2</sub> 排放与减排潜力分析[J].环境保护科学,2012,38(6):9-13.  
HUANG Yu, WU Xiaoxu. CO<sub>2</sub> emission from road transport and the emission reduction potential in Wuhan city[J]. Environmental Protection Science, 2012,38(6):9-13. (inChinese)

[7] BARNETT A G, KNIBBS L D. Higher fuel prices are associated with lower air pollution levels[J]. Environment International, 2017(66):88-91.

[8] 于匡员.基于预约模式的出租车合乘路径优化[D].

- 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- YU Kuangyuan. Taxi pooling routing optimization based on reserve pattern[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] LAU J, HUNG W. T, CHEUNG C. S. On-board gaseous emissions of LPG taxis and estimation of taxi fleet emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2011(409):5292-5300.
- [10] 朱传勇,胡京南,鲍晓峰,等. 高里程出租车的排放控制措施[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 265-269.
- ZHU Chuanyong, HU Jingnan, BAO Xiaofeng, et al. Methods for controlling emissions from high mileage taxis[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(3): 265-269. (in Chinese)
- [11] AN S, HU X W, WANG J. Urban taxis and air pollution: A cases tudy in Harbin, China [J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 960-967.
- [12] 徐慧智,裴玉龙,王连震,等. 城市客运交通引入电动汽车二氧化碳减排量研究:以哈尔滨市为例[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(1): 111-117
- XU Huizhi, PEI Yulong, WANG Lianzhen, et al. Emission reduction of CO<sub>2</sub> caused by BEV in urban passenger transport: a case study of Harbin[J]. *Journal of Transport Information and Safety*. 2018, 36(1): 111-117. (in Chinese)
- [13] GAO H. O, KITIRATTRAGARN V. Taxi owners' buying preferences of hybridelectric vehicles and their implications for emissions in New York City[J]. *Transportation Research Part A*, 2008 (42): 1064-1073.
- [14] 周程,王磊,陶君成. 考虑不同低碳政策影响的物流配送优化决策[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2015, 39(3): 479-483.
- ZHOU Cheng, WANG Lei, TAO Juncheng. Research on logistics distribution routing optimization under the different carbon emission policies [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2015, 39 (3): 479-483. (in Chinese)
- [15] LATHAM S, BOULTER P, MCCRAE I, TURPIN K, et al. A best practice guide for reducing emissions from taxi in London: PPR 349 [R]. Wokingham: Transport Research Laboratory TRLLimited, 2008.
- [16] KONG D Y, MA D, WANG M M. A simulation study of upgrading urban gasoline taxis to electric taxis[J]. *Energy Procedia*, 2016(104): 390-395.
- [17] TEIXEIRA A C R, SODRE J R. Simulation of the impacts on carbon dioxide emissions from replacement of a conventional Brazilian taxi fleet by electric vehicles [J]. *Energy*, 2016(115): 1617-1622.
- [18] FALCAO E A M, TEIXEIRA A C R, SODRE J R. Analysis of CO<sub>2</sub> emissions and techno-economic feasibility of an electric commercial vehicle [J]. *Applied Energy*, 2017(193): 297-307.
- [19] BICKERT S, KAMPKER A, GREGER D. Developments of CO<sub>2</sub>-emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany [J]. *Transportation Research Part D*, 2015(36): 138-151.
- [20] HU J N, WU Y, WANG Z S, LI Z H. Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(5): 865-874.
- [21] SLOWA A P, TATICCHI P. Technology, policy and management for carbon reduction: A critical and global review with insights on the role played by the Chinese Academy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(103): 601-619.
- [22] WALTZ E, LLINAS J. Multisensor data fusion [M]. Boston: Artech house, 1990: 11-27
- [23] YAGER R R. Comparing approximate reasoning and probabilistic reasoning using the Dempster-Shafer framework[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009, 50(5): 812-821
- [24] BASIR O, YUAN X H. Engine fault diagnosis based on multi-sensor information fusion using Dempster-Shafer evidence theory[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(4): 379-386.
- [25] 石红国,贺玉娇. 基于 D-S 证据理论的城市轨道交通线网规划评价研究[J]. *铁路运输与经济*, 2018, 40(2): 87-93
- SHI Hongguo, HE Yujiao. Urban rail transit network planning evaluation based on D-S evidence theory[J]. *Railway Transportation and Economy*, 2018, 40(2): 87-93. (in Chinese)