

# 时空维度下城市地面公交系统双目标评价方法

吴冕, 安琨, 曾淋, 李水滢

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为量化评价公交运营中广泛存在的供需时空分布不平衡、车辆空驶导致道路时空资源浪费等现象, 基于对人、车、路间相互作用的解析, 提出了时空维度下的城市地面公交系统双目标评价方法。评价体系主要由供需时空匹配指数及时空资源占用指数构成。其中, 供需时空匹配指数可以直观刻画出行需求与运能供给的匹配程度; 时空资源占用指数可用于衡量公交系统运营中对道路时空资源的人均占用情况。基于公交 GPS 数据和 IC 卡数据等进行评价指标的计算, 选择上海市 4 条不同特征的公交线路进行实例分析, 并根据指数实际计算结果的累积频率曲线标定了双目标评价体系的分级阈值。分析结果表明, 提出的双目标评价方法能够为公交系统的基础设施建设及后评价、车型配置及发车计划等调度方案的制定提供科学有效的参考依据。

**关键词:** 交通工程; 公交效益; 双目标评价; 供需匹配; 时空资源占用

中图分类号: U491

文献标志码: A

## Spatiotemporal Bi-objective Evaluation Method for Urban Bus Systems

WU Mian, AN Kun, ZENG Lin, LI Shuiying

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The mismatching of supply and demand in bus systems in the space-time dimension leads to the waste of spatiotemporal resources as near-empty buses are still running according to schedules, especially during off-peak hours. In order to quantify the above problems, a bi-objective evaluation method was built upon the investigation of the interactions among passengers, buses, and road resources. The evaluation system consists of two indexes, the supply-demand matching index (SDMI) and the space-time occupancy index (STOI). The SDMI quantifies the matching degree of

travel demand and bus line capacity, while the STOI measures the per capita occupancy of spatiotemporal resources in bus operation. The calculation of the SDMI and STOI were based on the global positioning system (GPS) data and the integrated circuit (IC) card transaction data, etc. Finally, four bus lines with different characteristics in Shanghai were used for case study. Considering the actual distribution of the two indexes, the classification thresholds of the bi-objective evaluation system were identified according to the cumulative frequency curve of the SDMI and STOI. The proposed method can be further utilized in the evaluation of public transit infrastructures and the optimization of bus type selection and bus scheduling, etc.

**Key words:** traffic engineering; public transit performance; bi-objective evaluation; supply and demand matching; space-time resources occupancy

随着国民经济的快速增长, 居民出行需求不断增加, 现有的道路资源难以满足快速增长的出行需求, 交通供需矛盾加剧, 造成道路交通压力剧增, 交通污染加重。然而交通基础设施建设周期长、耗资大, 有限的城市空间也无法支撑路网的无限扩张。为了实现可持续发展, 减少私人机动车的使用, 我国提出了公交优先发展战略, 大量的资源投入到了公交基础设施建设中。然而现有公交系统采用固定车型、固定发车间隔和站站停的运营模式, 导致僵化的运能供给难以匹配动态波动的出行需求, 车辆高峰超载和平峰空驶的现象屡见不鲜, 造成了公交服务水平的下降以及城市道路资源的浪费。建立针对供需匹配和时空资源利用的评价体系, 对上述现象进行准确量化, 从而发现运营方案存在的问题, 是对现

收稿日期: 2021-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(72101186, 52131204); 上海市科技创新行动计划(21692110900)

第一作者: 吴冕(1997—), 女, 博士生, 主要研究方向为需求响应型公交系统分析与优化。

E-mail: wumian@tongji.edu.cn

通信作者: 安琨(1987—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复杂交通网络分析与优化。

E-mail: kuanan@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

有公交系统进行改善和优化的基础,也是城市公交系统建设和升级的决策依据。

针对公交系统效益评价的现有研究多从设施配置、服务水平、社会经济效益等层面进行。其中设施配置评价对象主要为公交系统的线路、站点和车辆等基础设施,常用指标包括线网密度、非直线系数、站点覆盖率、万人公交车保有量等<sup>[1]</sup>。大部分针对设施配置的研究主要关注公共交通系统的可达性<sup>[2]</sup>和可用性<sup>[3]</sup>,同时也有部分研究关注公平性<sup>[4]</sup>等。服务水平评价可分为主观和客观两个角度:主观评价主要指乘客对于公交服务的主观满意度,常用指标包括乘坐舒适度、对服务整体期望及满足程度等<sup>[5]</sup>;客观评价涵盖范围则更加广泛,如运营效率(行驶速度、候车时间、换乘时间、满载率、公交与小汽车出行时耗差等<sup>[6-8]</sup>),可靠度(准点率、到站时刻偏离量等<sup>[9-10]</sup>),安全性(交通事故率、财产安全等<sup>[11]</sup>),客观舒适度(噪声、温度、加减速等<sup>[12]</sup>)等。社会经济效益,从企业角度出发主要考虑公交运营效益,即运输成本和收益、车辆周转率等<sup>[13]</sup>;从社会角度出发则主要考虑公交出行分担率、出行便捷性,以及拥堵缓解和土地增值等间接效益<sup>[7]</sup>。综上所述,现有评价指标多面向公交系统的设施利用及运输效率,难以有效刻画某一公交线路在不同时间与空间范围内的超载与空驶等问题。因此难以量化评价公交系统供需不平衡的时空差异性,及公交车辆对于道路时空资源的无效占用。

公交系统的综合评价往往涵盖上述多个层面,涉及众多评价指标,指标的评价因子的选择直接决定了评价结果。现有研究多采用灰色聚类<sup>[14]</sup>、模糊综合评价<sup>[15-16]</sup>、粗糙集综合评价<sup>[17]</sup>、云模型<sup>[18]</sup>等方法对众多指标进行综合。其中指标评价因子的确定往

往采用层次分析法<sup>[19]</sup>、Delphi法等主观赋权法<sup>[13]</sup>,或主客观结合的属性层次模型(AHM)-熵权法<sup>[20]</sup>、层次分析-离差最大法等,极易受主观判断的影响。

针对上述问题,本文从公交系统中最根本供需矛盾入手,提出供需时空匹配指数,以刻画出行需求与公交运力之间的不平衡性,即人与车的供需关系;提出时空资源占用指数,以反映不同调度方案执行过程中公交系统对于道路时空资源的占用情况,即车所占用的路是否有效服务于人。进一步构建双目标评价体系,并基于上海市实际数据进行评价指标计算和评价阈值的标定。研究成果对于公交系统效益评价、设施建设、资源配置、调度方案的比选和优化等具有实际参考价值。

## 1 机理解析

有限的道路资源和不断增长的出行需求之间的矛盾、固定的运能供给和动态变化的需求之间的矛盾,本质上是交通系统中人、车、路之间的矛盾,其中,人作为交通出行的主体,每一次出行的集合构成了交通系统的总体需求分布;车作为载运工具,根据调度方案提供运输能力,服务于出行需求;路作为交通运输的基础,为车辆提供时空通行权。

为了更好地描述公共交通系统中的出行需求、运能供给(调度方案)以及道路时空资源之间的关系和相互作用,本文从车与人之间的供需匹配程度,以及对于路的时空资源占用两个维度入手,对公交系统的资源配置(车型、车辆数等),调度方案(发车间隔、停站计划等),基础设施(公交专用道、公交信号优先等)的实际效果进行评价,如图1所示。

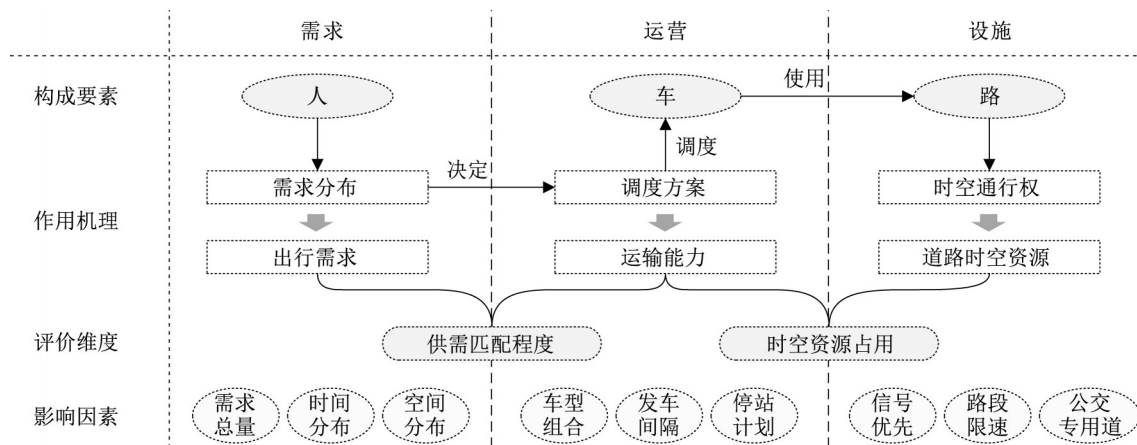


图1 交通系统供需机理分析

Fig. 1 Supply and demand interaction mechanism in traffic systems

对于公共交通系统而言,出行需求与运输能力的匹配程度,可以直接体现出车辆调度方案的优劣。传统评价指标中,反映供需匹配情况的指标为满载系数,其中全天线路平均满载系数定义为“线路乘客周转量(人公里)与客位行程(人公里)的比值”;高峰满载系数定义为“线路高单向高断面上乘客通过量与该断面通过车辆的额定客位数总和的比值”<sup>[21]</sup>。满载系数侧重反映线路整体实际载客情况,无法直观表述不同评价时段、不同线路区段(公交线路相邻两站点之间称为一个线路区段,以下简称“区段”)的供需差异性。同时,真实的出行需求从乘客到达站点候车就已产生,与线路实际载客量并不完全等同。本文通过时间和空间的离散化,分别计算每个时段每个区段的供需差异,如图2所示,以直观反映运能供给与需求之间的时空匹配情况。

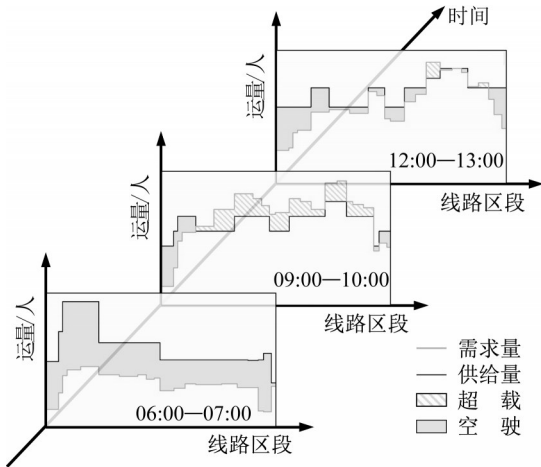


图2 供需差异的时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of supply-demand differences

除公交系统内部的供需关系外,公交车辆在道路上行驶时所需占用时间和空间资源。车辆*b*对道路时空资源的占用 $\rho_b$ 主要与车辆速度 $v_b$ 、车辆长度 $l_b$ (含安全空距)等有关,如图3所示。对于站点*i*到站点*i+1*间区段(后文简称区段*i*),车辆平均速度越快( $v_1 > v_2$ ),通过路段所需的时间越少( $t_1 < t_2$ );速度相同时,车长越小( $l_1 < l_2$ ),对道路空间的占用越少。服务相同的人公里(实际载客量 $n_1 = n_2$ ,行驶距离为区段长度 $\delta_i$ ),不同车型对道路时空资源的占用存在很大差异。除车型外,随着发车频率的增加,总班次增加,对道路时空资源的占用也会增加。

传统评价体系对于公交系统对道路时空资源的占用考虑较少,相关指标如专用道利用率<sup>[22]</sup>等,也仅

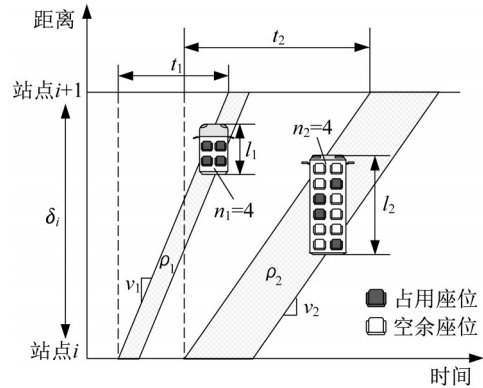


图3 不同车型对道路时空资源的占用示意图

Fig. 3 Illustration of spatiotemporal occupation of road resources by vehicles of different types

能反映出车辆对于车道的占用,而被占用的时空资源是否有效服务于出行者并不能从车道利用率中得以体现。本文提出了人均时空资源占用指数,以反映资源配置、调度方案和基础设施等对道路时空资源占用的影响,具体指标定义见2.2节。

## 2 评价指标定义

### 2.1 供需时空匹配指数

为了体现高峰、平峰供需匹配程度之间的差异,将一天划分为若干个评价时段分别进行评价,如1 h。定义第 $\tau$ 个评价时段内区段*i*的供需时空匹配指数(supply-demand matching index, SDMI)如下:

$$SDMI_{\tau,i} = \frac{D_{\tau,i} - S_{\tau,i}}{D_{\tau,i}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_{\tau,i}$ 为评价时段 $\tau$ 内区段*i*的总需求人次(包括评价时段 $\tau$ 内实际通过区段*i*的人数和站点*i*的候车人数); $S_{\tau,i}$ 为总运量供给,即评价时段 $\tau$ 内通过区段*i*的公交车额定载客总量。 $D_{\tau,i} - S_{\tau,i}$ 为需求量与供给量之间的差值。为排除需求规模大小的影响,进一步除以总需求量 $D_{\tau,i}$ 。SDMI $_{\tau,i}$ 取值范围如下:

$$\begin{cases} SDMI_{\tau,i} \in (0, 1], & \text{供给} > \text{需求} \\ SDMI_{\tau,i} = 0, & \text{供给} = \text{需求} \\ SDMI_{\tau,i} \in (-\infty, 0), & \text{供给} < \text{需求} \end{cases} \quad (2)$$

计算一天内线路整体供需匹配情况时,为防止正负相消,应对各个评价时段、各个区段内的供需差值取绝对值后再相加,记为|SDMI|。

$$|SDMI| = \frac{\sum_{\tau} \sum_i |D_{\tau,i} - S_{\tau,i}|}{\sum_{\tau} \sum_i D_{\tau,i}} \times 100\% \quad (3)$$

## 2.2 时空资源占用指数

定义时空资源占用指数(space-time occupancy index, STOI)表示乘客乘车出行过程中对于道路时空资源的人均占用。由于乘客上下车只发生在站点,即站点间每辆车载客情况不会发生变化,因此以区段*i*、车辆*b*为单位,定义STOI如下:

$$STOI_{i,b} = \frac{\omega_i l_b t_{i,b}}{\delta_i n_{i,b}} = \frac{\omega_i l_b}{\delta_i n_{i,b}} \left( \frac{\delta_i}{v_b} + \hat{t}_{i,b} \right) \quad (4)$$

式中: $\omega_i$ 为区段间的车道宽度; $l_b$ 为车辆*b*的车长(含安全空距); $t_{i,b}$ 为车辆*b*经过区段*i*所需时间,包括行驶时间和停站时间两部分; $\delta_i$ 为区段长度; $n_{i,b}$ 为车辆*b*在区段*i*的实际载客人数; $v_b$ 为车辆*b*的平均行驶车速; $\hat{t}_{i,b}$ 为车辆*b*在区段*i*内的停站时间,也即在站点*i+1*的停站时间(包括进出站加减速时间)。为排除不同区段长度差异造成的影响,除以区段长度以便进行区段间的横向比较。STOI<sub>*i,b*</sub>的单位为(m·s)·人<sup>-1</sup>,取值范围为[0, ∞)。

为精确反映每辆车实际载客量不同、车型特征参数不同所导致的人均时空资源占用差异,计算线路整体时空资源占用情况时,应对各个评价时段、各个区段的每辆车分别计算人均时空资源占用后再进行平均。

$$STOI = \frac{1}{TI} \sum_{\tau=1}^T \sum_{i=1}^I \left( \frac{1}{B_{\tau,i}} \sum_{b=1}^{B_{\tau,i}} \frac{\omega_i l_b t_{i,b}}{\delta_i n_{i,b}} \right) \quad (5)$$

式中: $T$ 为评价时段总数; $I$ 为线路区段总数; $B_{\tau,i}$ 为评价时段 $\tau$ 内经过区段*i*的车辆总数。

根据式(1)和式(4),总需求人次*D*和实际载客人数*n*分别作为乘数出现在SDMI和STOI的分母中。对于平峰时段或需求量较小的郊区段,可能会出现评价时段或评价区段内需求为零或无人乘车的情况,此时SDMI和STOI数值将趋于无穷大。为了避免无穷大的存在导致求和平均时覆盖其他有效信息,本文在计算需求人次、额定载客量和实际载客量时,均将驾驶员考虑在内,也即*D*和*n*的最小值均为1。此时,针对某一确定的车型和车速,当除驾驶员外车上无其他乘客时,SDMI和STOI将分别取得最小值和最大值,和评价指标所期望反映的特征一致,因此该处理方式不会影响评价结果的相对趋势。

## 3 双目标评价模型

SDMI反映了公交系统内部出行需求和车辆供给之间的匹配关系,STOI则反映了公交系统对道路

基础设施的占用情况,如图4所示。因此,SDMI与STOI构成的双目标评价体系能够有效联结公交系统和道路设施系统,针对供需匹配和对道路时空资源的占用两个层面对公交系统效益进行时空维度的评价。

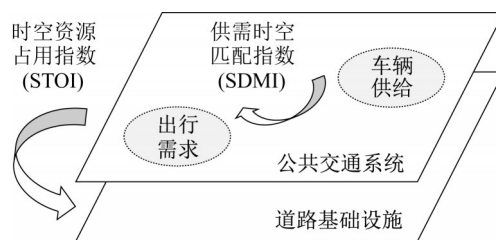


图4 评价对象及层面示意图

Fig. 4 Illustration of evaluation objects and levels

在相同需求下,随着发车频率的增加或车型的增大,运能供给增加,车辆对道路时空资源的总占用也随之增加,因此SDMI与STOI整体趋势呈负相关,如图5所示。SDMI大于零时需求大于供给,车辆超载,乘客舒适度低,公交公司收益高,公交系统对道路时空资源的人均占用往往较小;SDMI小于零时乘客舒适度高,而公交公司收益低,同时对道路时空资源的人均占用较高。现实场景中运能受车型、发车频次的限制而离散变化,不同调度方案对应的SDMI及STOI离散分布,帕累托最优解集如图5中黑点所示。

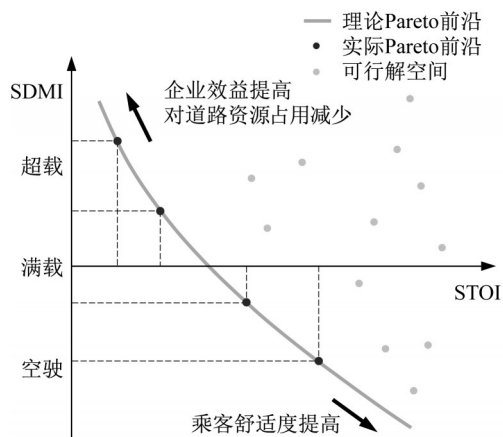


图5 STOI-SDMI帕累托前沿示意图

Fig. 5 Illustration of STOI-SDMI Pareto fronts

根据实际数据得到STOI-SDMI的分布如图6a所示。综上所述,将双目标体系的评价结果划分为“高效/拥挤”“较高效/较拥挤”“正常/一般”“较低效/较舒适”及“低效/舒适”5个等级,如图6b所示。阈值的标定详见5.2节。

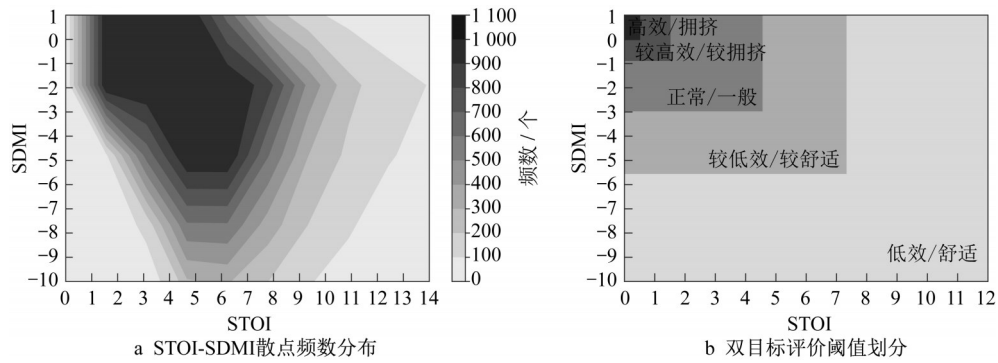


图 6 双目标评价模型示意图

Fig. 6 Illustration of the bi-objective evaluation model

### 4 评价指标计算方法

#### 4.1 数据需求及指标计算方法

SDMI 和 STOI 的计算所需输入信息主要包括线网及车辆的基本信息、乘客需求、车辆的实际运行情况等。如图 7 所示,线网数据主要包括站点经纬度、站间距、车道宽度等;车辆信息主要包括车辆长度和额定载

容量等;乘客需求信息可以通过公交 IC 卡数据进行推算;车辆运行情况可由公交 GPS 数据反映。首先,将公交 GPS 轨迹数据匹配至路网和站点,获得车辆到离站时刻,推算出行驶速度、停站时间等信息。进而将 IC 卡数据与 GPS 数据进行匹配,获得各个区段的实际载客人数。假设乘客到达站点候车服从泊松分布,则可获得各个时段内的需求人次。

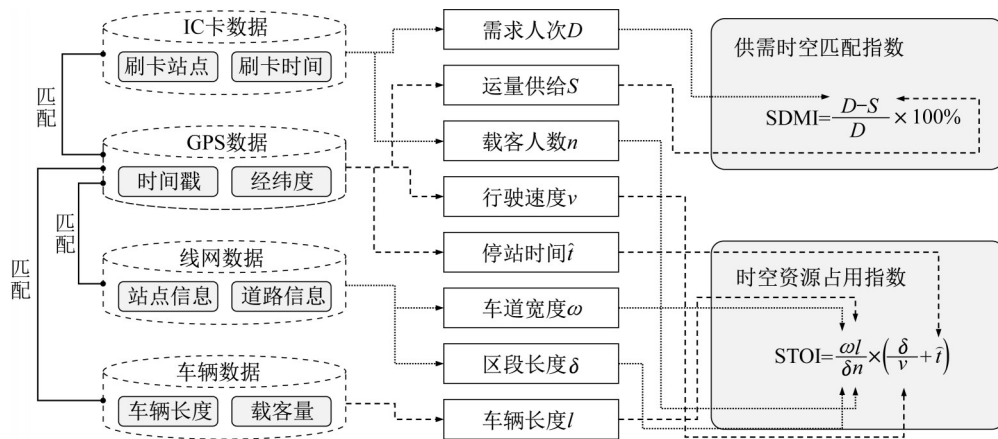


图 7 评价指标计算流程示意图

Fig. 7 Illustration of indexes calculation process

#### 4.2 数据处理方法

在图 7 列出的 4 类数据中,线网数据和车辆数据一般无需进行预处理,而 IC 卡数据和 GPS 数据则需要进行一定的处理和转化,以获得乘客的需求分布和车辆的到离站时刻。

公交 IC 卡数据主要用于反映乘客的需求和乘车情况,用于获取乘客需求及实际载客人数。IC 卡数据的核心字段是上下车的站点和刷卡时间。由于大部分城市公交车只需上车刷卡,下车站点及时间信息缺失,因此通常首先需要根据出行链<sup>[23]</sup>、出行概率分布<sup>[24]</sup>等进行下车站点及下车时间的推算。

公交 GPS 数据主要包括车辆运行过程中的经

纬度、速度、方向等信息,可处理得到车辆到离站时刻作为 IC 卡数据上下车站点推算的重要输入,同时也可用于 STOI 的计算。GPS 数据处理流程主要包括:

- (1) 数据清洗,对异常 GPS 数据(错误数据、重复数据等)进行预处理,如剔除、去重等。
- (2) 路网匹配,使用 ArcGIS 中的近邻分析工具将 GPS 数据匹配至道路路段上。
- (3) 方向匹配,部分城市公交 GPS 数据不区分上下行,可根据轨迹的起止点确定班次的运行方向。
- (4) 站点匹配,首先采用预匹配算法剔除站点间的 GPS 数据<sup>[25]</sup>,再按照最近距离匹配等原则对 GPS

数据进行站点匹配,用于确定公交车在各个站点的到站和离站时间。

(5)数据填补,根据站点的平均停站时间和区段的平均行驶时间对缺失数据进行填补。

## 5 实例分析

### 5.1 线路及数据概况

本文以上海市北安线、71路、561路和871路为例进行案例分析,4条线路在上海市的地理位置分布如图8所示。北安线和561路为外环外到中心城区的城郊线,其中北安线线路长度约30.7 km,561路线路长度约16.9 km;71路为外滩至虹桥国际机场的中运量快速公交系统(BRT)骨干线路,线路长度约17.5 km;871路为市区线路,线路长度约17.6 km。

本文使用上述4条公交线路两周(2019年6月10日至6月16日、2019年12月2日至12月8日)的IC卡数据和GPS数据进行案例分析和阈值标定。

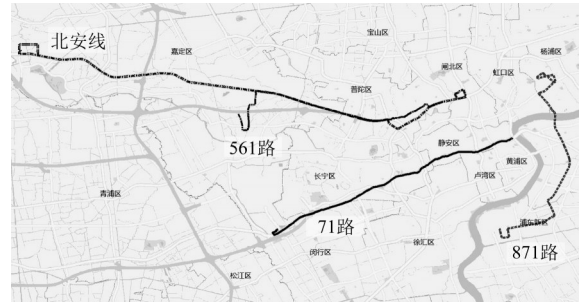


图8 案例线路所处地理位置

Fig. 8 Geographic locations of the investigated bus lines in Shanghai

考虑到近年来迅速增长的刷码支付乘车的比例,本文在工作日平峰和晚高峰对561路进行了跟车调查,确定了IC卡在全支付方式(现金支付、移动支付、IC卡等)中的覆盖率约为56%,并由此对乘客需求量和实际载客人数进行折算。

### 5.2 阈值标定

将SDMI和STOI分别按升序排列,并绘制频数分布直方图与累积频率曲线,结果如图9所示。

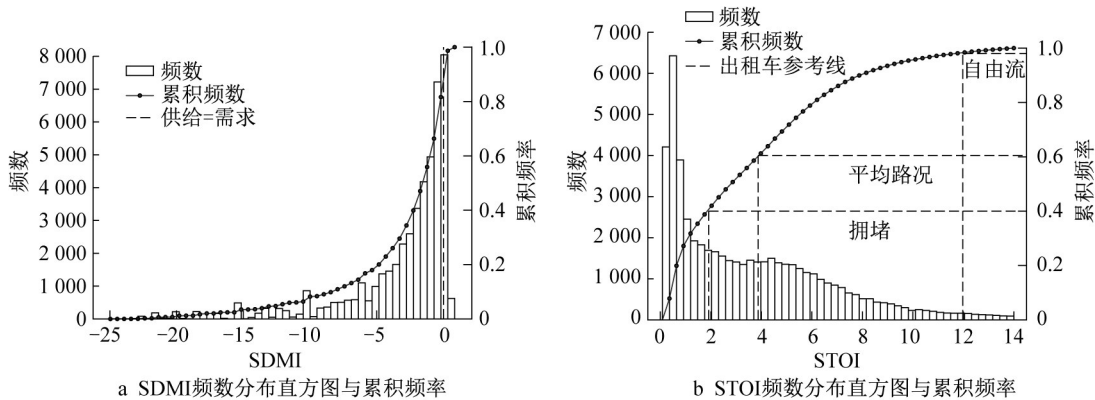


图9 公交线路SDMI及STOI累积频率

Fig. 9 Cumulative frequency of SDMI and STOI of bus lines

由图9a可知,近90%的SDMI为负值,说明在目前公交系统中供大于需的现象普遍存在,运能浪费较严重。为了更加直观地反映现状公交系统对于时空资源的占用情况,计算出租车在不同路况下的STOI作为参考线,如图9b所示。由于出租车无需停站,因此出租车STOI计算可简化为

$$STOI = \frac{\omega l}{nv} \quad (6)$$

式中: $\omega$ 为路段宽度,取3.5 m; $l$ 为车长(含安全空距),取6 m; $n$ 为载客人数,取1人; $v$ 为车速。路况的不同会导致出租车行驶速度不同,进而导致出租车服务相同人公里时占用的道路时空资源不同——速度越小,占用的时空资源越多。因此本文以“自由流

车速”“平均车速”“拥堵车速”,分别对应出租车就时空资源占用而言最少、平均、最多等3个状态。不同状态下的速度由实际GPS数据进行标定,其中,平均车速为 $5.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,自由流车速取95%分位数 $10.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,拥堵车速取5%分位数 $1.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由图9b可知,约40%的公交STOI小于自由流下的出租车STOI,在时空资源占用程度上较出租车有绝对优势。同时,少数情况下(3%左右)公交系统的人均时空资源占用情况较拥堵路况下的出租车更差,此时道路时空资源浪费非常严重,运营调度方案亟需优化调整。

本文采用百分位法确定分级阈值。在双目标评

价体系中,SDMI 越小代表舒适度越高,STOI 越大代表资源利用效率更高。基于图 9 中的累积频率曲线,分别取 SDMI(升序)及 STOI(降序)的 15%、35%、65% 及 85% 分位数作为单一指标的评级阈值,如表 1 所示。

### 5.3 评价分析

#### 5.3.1 单目标评价及分析

(1)单线路分析。图 10 以北安线下行方向(安亭汽车站开往北区汽车站)为例,给出了早晚高峰及平峰各取 1 h,各个区段两周工作日指标计算平均值。图 10a、10b 分别为 SDMI 及 STOI 的均值,图 10c 为平均行驶速度。安亭汽车站(图示 S01 站点)

表 1 双目标评价阈值表  
**Tab. 1 Performance classification thresholds of bi-objective evaluation**

分位数/%	STOI	SDMI	评级
0	$\infty$	$-\infty$	低效/舒适
15	6.85	-5.92	较低效/较舒适
35	4.37	-2.71	
65	1.44	-0.78	正常/一般
85	0.51	-0.10	较高效/较拥挤
100	0	1.00	高效/拥挤

位于上海市嘉定区安亭镇,属于外环外;北区汽车站(图示 S36 站点)位于闸北区内环高架路与南北高架路立交下。其中,在曹安公路沿线部分路段设置有公交专用道。

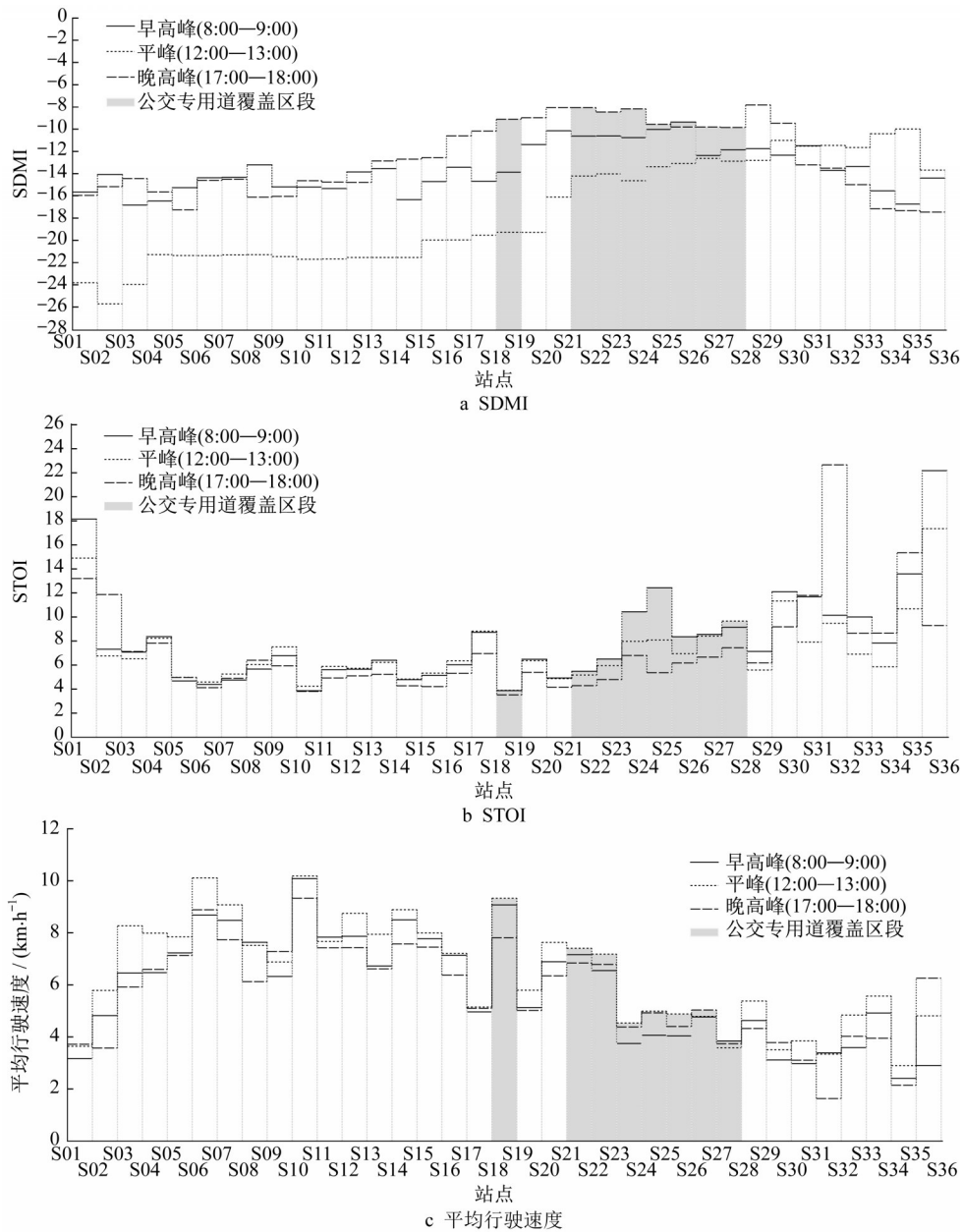


图 10 北安线指标计算结果

Fig. 10 Index calculation result of Bei'an Line

由图10a可知,北安线下行整体供大于需的问题较为突出。同时,线路的供需匹配情况体现出明显的时空差异特征:空间上,往市中心方向SDMI整体呈上升趋势,郊区段供大于需的程度更大;时间上,早晚高峰供需匹配程度较为相似,而平峰时段空驶更为严重,郊区、市区区段间的不均衡尤为凸显。

由于北安线采用单一车型,影响各区段STOI的主要为车速、发车频率和实际载客人数。结合图10a、10b,虽然区段S18~S19供需匹配程度和前后相邻路段差异不大,但STOI却有明显下降。结合图10c,可知公交专用道使得该区段的平均车速明显提高,对道路时空资源的占用随之减小。由此可知,除发车频率、车型等运营调度相关因素外,STOI还能够反映公交专用道等设施对公交系统的影响。

(2) 线路对比分析。对4条线路的全天整体|SDMI|和STOI进行计算,绘制时变图如图11a、

11b所示。根据式(3),线路整体|SDMI|为绝对值均值,越大表示供需差异越大。为了与传统指标进行比较,本文选取传统指标中较为相关的平均上座率及平均行驶速度进行对比分析,见图11c、11d。

从图示结果可知,|SDMI|呈现出早晚高峰匹配程度相对平峰时段更高的整体趋势,表明平峰时段的调度方案更需优化调整;而针对STOI,北安线则呈现出了相反的趋势,可能的原因是早晚高峰车辆的载客情况更加不均衡,部分车辆空驶而部分车辆超载,导致平均人均时空资源占用偏大。对比4条线路,无论是供需差异还是对道路时空资源的占用,北安线表现均较差,线路运营调度方案或基础设施亟需优化。71路、871路和561路|SDMI|趋势和大小较为相似,而71路的STOI明显高于871路和561路,可能的原因是71路采用了18m的中运量铰接车,车型特征导致人均对道路时空资源的占用更高。

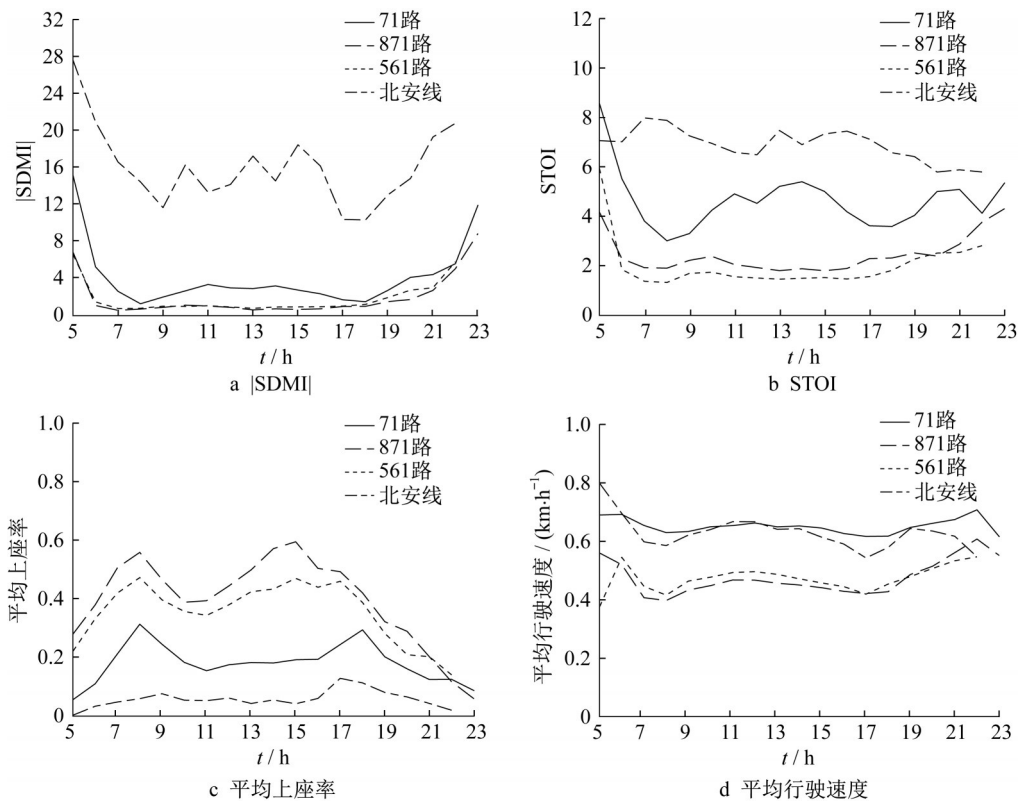


图11 案例线路指标时变图

Fig. 11 Time-varying indexes of investigated bus lines

对比图11a、11c可以发现,|SDMI|与平均上座率所反映出的规律整体上趋势相同。然而|SDMI|从乘客需求产生时开始计算乘客需求,发车频率越低,乘客候车时间越长,供需差异越大。因此图11a中发车频率低于其他3条线路的北安线|SDMI|显著高于其他3条线路。|SDMI|考虑了乘客候车时

间,反映了运能供给与实际需求在时空分布上的差异,相比上座率更能突出公交系统供需的不均衡性。

STOI指标定义中涉及到实际载客人数和行驶速度、停站时间等多方面的运营参数,传统的公交评价指标中目前尚无类似指标。从图11可看出STOI的变化趋势和相对大小与平均上座率、平均行驶速



度均有较大差异,无法由单一指标进行替代。如71路作为专有路权的BRT,平均行驶速度高于其他线路,但由于车型较大、上座率不高,导致其对道路时空资源的人均占用也相对较多。因此,STOI是多个传统指标的综合,能简洁有效地反映对道路时空资源的占用情况。

### 5.3.2 双目标评价及分析

以2019年6月11日(星期二)为例,4条公交线路双目标评价结果如图12所示。从图12可看出,各条线路在空间维度上的一般规律为首末区段较中间区段供给大于需求的程度更高,对时空资源的人

均占用更多;在时间维度上则体现出早晚高峰与平峰时段的差异。针对每条线路的双目标评价结果进行具体分析,可反映出以下特征和问题:北安线作为一条连通中心城区与郊区的长线专线,供给总体大于需求,时空资源利用效率整体较低,且体现出了空间上的不均衡;71路作为BRT,额定载客量大,因此即使服务需求量大的客流走廊也基本均处于供需较为均衡的状态,仅在早晚高峰出现供小于需的情况;561路和871路的总体规律较为相似,线路整体人均时空资源占用较少,能够很好地发挥公共交通集约运输的优势,但相应地,乘客舒适度或有待提高。

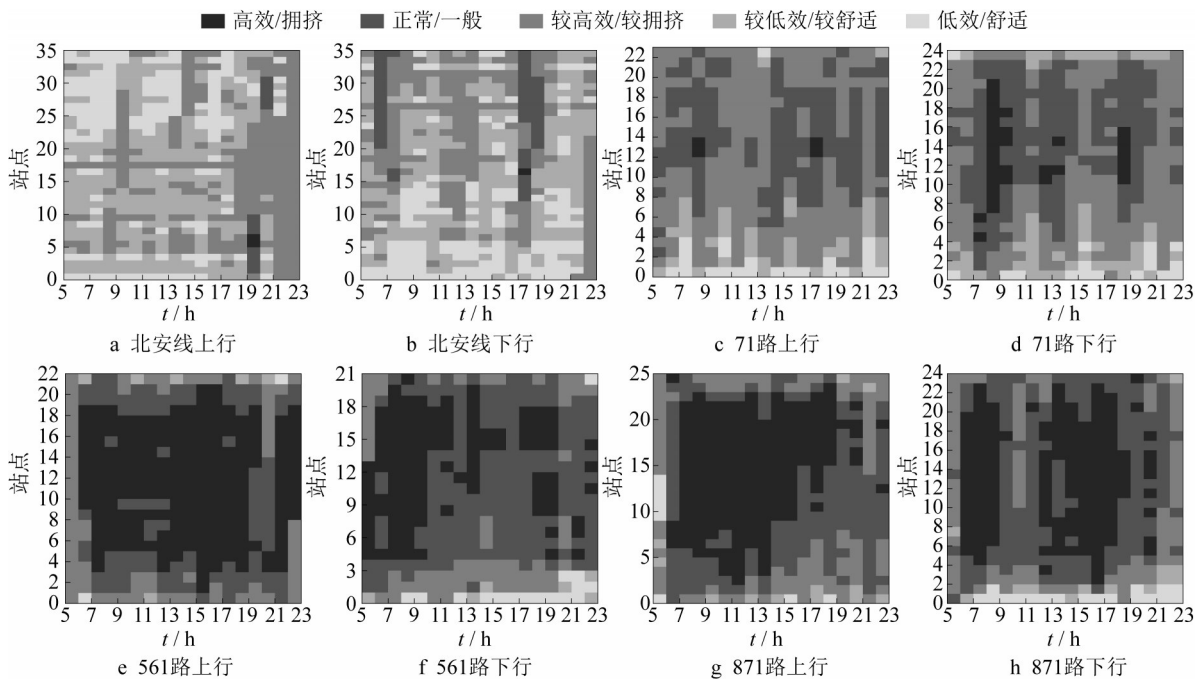


图12 案例线路双目标评价结果

Fig. 12 Bi-objective evaluation results of investigated bus lines

## 6 结论

(1)本文以科学量化公交系统供需匹配程度和对道路时空资源的占用情况为目标,提出了由供需时空匹配指数SDMI、时空资源占用指数STOI构成的时空维度下的双目标公交系统评价方法。本文基于公交GPS数据和IC卡数据等进行指标计算,并根据得到的累积频率曲线,确定了评价分级阈值。通过对上海市4条公交线路进行评价分析,验证了评价指标的优越性:SDMI考虑了乘客候车时间,相比传统的上座率更能突出公交系统的供需矛盾;STOI综合考虑了线路的运能配置(车型、发车间隔等)和运营状况(实际载客情况、实际运行速度等),可以反

映公交系统对道路时空资源的占用情况。

(2)与传统公交评价方法针对公交系统设施配置或性能表现的评价出发点不同,本文提出的双目标评价体系能够对公交系统中最根本的供需矛盾进行直接刻画,同时能够对公交这一集约运输模式的重要目标——以更少的道路时空资源服务更多出行需求,进行量化评价。该评价方法既能量化反映公交系统在各个时段和各个区段中运能供给与乘客需求的匹配情况,也可以反映出车辆空驶、低速行驶等所造成的道路时空资源的浪费。因此,该评价指标体系能够指导公交专用道等基础设施的建设和使用,并为线路资源配置和运营调度方案的优化提供决策依据。

(3)受上海市 IC 卡数据条件的限制,本文在案例分析中对上车站点和下车站点均需进行推算,推算结果可能与实际客流存在一定的偏差。若采用信息更加全面的 IC 卡数据进行指标计算,如同时包含上车站点和下车站点刷卡记录的北京市 IC 卡数据,评价准确度会进一步提高。尽管如此,基于 IC 卡数据和 GPS 数据的上下车站点推算的相关研究已相对成熟,因此本文所提出的评价指标及其计算方法仍可适用于各个城市的不同数据条件,具有良好的普适性。

#### 作者贡献声明:

吴 冕:评价方法提出,评价结果分析,主要内容撰写。

安 琨:论文命题提出与构思,论文修订与审核。

曾 淋:评价方法提出,评价指标计算。

李水滢:评价方法提出,数据预处理。

#### 参考文献:

- [1] 黄莎,蒙井玉,王晓艺.中小城市公共交通评价指标体系研究[J].交通信息与安全,2011,29(1):32.  
HUANG Sha, MENG Jingyu, WANG Xiaoyi. Evaluation system for public traffic in the small and medium-sized cities [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29 (1): 32.
- [2] CHANDRA S, BARI M E, DEVARASETTY P C, *et al.* Accessibility evaluations of feeder transit services [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 52: 47.
- [3] RYUS P, AUSMAN J, TEAF D, *et al.* Development of Florida's transit level-of-service indicator [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1731: 123.
- [4] LINOVSKI O, BAKER D M, MANAUGH K. Equity in practice? Evaluations of equity in planning for bus rapid transit [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 113: 75.
- [5] 张文会,刘委,王圣鼎,等.基于结构方程的城市常规公交满意度评价[J].交通运输工程与信息学报,2021,19(1):43.  
ZHANG Wenhui, LIU Wei, WANG Shengding, *et al.* Evaluation of passenger satisfaction to conventional public transit based on a structural equation [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(1): 43.
- [6] 杨晓光,安健,刘好德,等.公交运行服务质量评价指标体系探讨[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(4):13.  
YANG Xiaoguang, AN Jian, LIU Haode, *et al.* Evaluation architecture discussion of route-level transit service quality [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(4): 13.
- [7] 毛霖.公交智能化运营调度评价方法研究[D].南京:东南大学,2018.  
MAO Lin. Research on the evaluation method of intelligent public transport scheduling [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [8] BOARD T. Transit capacity and quality of service manual [M]. 3rd ed. Washington D C: Transit Capacity and Quality of Service Manual, 2013.
- [9] 高桂凤,魏华,严宝杰.城市公交服务质量可靠性评价研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程),2007,31(1):140.  
GAO Guifeng, WEI Hua, YAN Baojie. Study on reliability evaluation of urban public transit service quality [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2007, 31(1): 140.
- [10] TROMPET M, LIU X, GRAHAM D J. Development of key performance indicator to compare regularity of service between urban bus operators [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2216(1): 33.
- [11] KITTELSONS I, NAKANISHI Y. TCRP Report 88: a guidebook for developing a transit performance-measurement system [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2003.
- [12] ZHANG K, ZHOU K, ZHANG F. Evaluating bus transit performance of Chinese cities: developing an overall bus comfort model [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2014, 69: 105.
- [13] HASSAN M N, HAWAS Y E, AHMED K. A multi-dimensional framework for evaluating the transit service performance [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 50: 47.
- [14] 李煜华,胡运权.灰色聚类法在城市公共交通发展水平评价中的应用[J].数学的实践与认识,2006(2):125.  
LI Yuhua, HU Yunquan. Gray clustering method applied to evaluation of urban public transit development level [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006(2): 125.
- [15] 陈明伟.城市公交系统满意度模糊多目标综合评价研究[D].成都:西南交通大学,2006.  
CHEN Mingwei. Study on satisfactory of urban public transportation system with fuzzy synthesis evaluation method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [16] MURUGESAN R, MOORTHY N. Level of public transport service evaluation: a fuzzy set approach [J]. Journal of Advanced Transportation, 2010, 32(2): 216.
- [17] 张喜成,汪江洪.粗糙集综合评价法在公交服务水平评价中的应用[J].统计与决策,2006(4):46.  
ZHANG Xicheng, WANG Jianghong. Application of rough set comprehensive evaluation method in bus service level evaluation [J]. Statistics & Decision, 2006(4): 46.
- [18] 郭晓凡,李林波,王艳丽,等.基于熵权法-云模型的公交服务满意度评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(9):101.