

文章编号: 1005-0523(2022)03-0080-11



# 降雨对城市公交行程时间可靠性影响分析

粟海琪, 杨海飞

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 降雨天气影响道路条件和驾车环境, 进而影响公交可靠性。为明确降雨对城市公交行程时间可靠性的影响情况, 基于公交 GPS 运行数据及小时降雨量数据, 考虑设置公交专用道的影响, 分析受降雨影响的公交行程时间统计变化规律。为从理论层面进一步探究雨天对公交行程时间可靠性的影响机理, 构建了公交行程时间可靠性评价模型, 通过乘客预留行程时间、缓冲时间、超额延误 3 个参数指标对可靠程度进行评价。研究表明: 降雨天气对公交行程时间存在负面影响, 导致公交行程时间及其波动性增大, 公交专用道能够有效降低波动幅度; 相较于晴好天气, 降雨天气乘客需要预留更长的行程时间以确保能够准时到达目的地, 可靠程度降低, 公交专用道可以有效抑制公交行程时间可靠性的下降。通过构建公交行程时间可靠性评价模型, 形成一套公交行程时间可靠性理论评价体系, 为研究雨天等不良天气条件下公交运行决策和调度提供理论支持。

**关键词:** 降雨天气; 城市公交; 行程时间; 可靠性

中图分类号: U491

文献标志码: A

本文引用格式: 粟海琪, 杨海飞. 降雨对城市公交行程时间可靠性影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 80-90.

## Influence of Rainfall on the Reliability of the Travel Time of Urban Public Transport

Su Haiqi, Yang Haifei

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Rainfall affects road conditions and driving environment, which in turn affects the reliability of public transportation. In order to clarify the impact of rainfall on the reliability of urban bus travel time, this paper analyzes the statistical changes of bus travel time affected by rainfall based on the GPS operating data of public transport and hourly rainfall data considering the impact of setting up bus lanes. In order to further explore the influence mechanism of rainfall on bus travel time reliability at the theoretical level, this paper constructs a bus travel time reliability evaluation model, which evaluates the reliability through three parameters including passenger reserved travel time, buffer time, and excess delay. The research results show that rainfall has a negative impact on bus travel time, leading to increased bus travel time and its volatility, and bus lanes can effectively reduce the fluctuation range. Compared with fine weather, passengers need to reserve longer travel time on rainy days to ensure that they can reach their destination on time, the reliability is reduced, and bus lanes can effectively suppress the decline in bus travel time reliability. By constructing a bus travel time reliability evaluation

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801080); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202068); 江苏省博士后科研资助计划项目(2018K043B)

model, the bus travel time reliability evaluation system is formed to provide theoretical support for the study of bus operation decision-making and dispatch in bad weather of rainy days.

**Key words:** rainy weather; urban public transport; travel time; reliability

**Citation format:** SU H Q, YANG H F. Influence of rainfall on the reliability of the travel time of urban public transport[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 80-90.

交通行程时间可靠性表示出行人员能够在可接受时间范围内完成出行的概率<sup>[1]</sup>,是交通服务水平的重要评价指标,其可靠程度影响出行人员对交通方式、出行路线的选择。目前研究学者主要通过数理统计指标<sup>[2]</sup>、概率型指标<sup>[2-4]</sup>、缓冲时间指标<sup>[3-4]</sup>评价行程时间可靠性。另外,部分研究基于博弈论<sup>[5]</sup>、非集计方法<sup>[6]</sup>等理论,构建模型对行程时间可靠性进行评价。上述研究成果表明,提出评价指标及构建评价模型可为行程时间可靠性提供评价基准,进而为合理制定交通管控方案提供依据。

公交作为居民绿色出行的主要方式之一,其行程时间可靠性影响乘客选择公交出行的意愿。研究发现,对早高峰时段公交乘客而言,行程时间可靠性比运行时长对出行决策的影响更大<sup>[6]</sup>。为了明确公交行程时间可靠性的变化机理,已有学者对相关影响因素进行了研究,结果表明,道路几何条件<sup>[7-10]</sup>、交通流状态<sup>[11-12]</sup>、交通管控方式<sup>[9-12]</sup>、公交车停靠时间<sup>[13]</sup>、道路侧摩擦力<sup>[14]</sup>均会对公交行程时间可靠性造成影响。值得注意的是,公交专用道可以提高乘客在车时间可靠性,降低在车时间的波动性<sup>[15]</sup>。

上述研究结论发现,影响行程时间可靠性的因素众多,其中不良天气会对道路条件及驾驶环境带来负面干扰。相关研究显示,不良天气是导致供给不确定性的的重要因素之一<sup>[16]</sup>,天气特征会影响行程时间及其可靠性<sup>[9,17]</sup>。研究指出,降雨会降低驾驶员的能见度<sup>[18]</sup>及路段、路径、OD对、路网的行程时间可靠性<sup>[19-24]</sup>。通过研究天气变化对行程时间可靠性的影响机理,明确不良天气条件下交通系统的运作规律,为乘客出行决策提供依据,提升乘客行程时间可靠性。

然而,目前国内外学者关于降雨对公交行程时间可靠性影响的研究仍非常有限,主要侧重于天气条件对行程时长的影响<sup>[9,17]</sup>,尚未对可靠性进行系统的定量分析。降雨作为最常见的不良天气类型,通过构建雨天公交行程时间可靠性评价模型,明确降

雨对公交行程时间可靠性的影响规律,可为不良天气条件下公交调度优化提供理论支持。

基于此,利用GPS采集的公交运行数据及小时降雨量数据,并考虑路段设置公交专用道的影响,分析雨天公交行程时间的统计变化规律,通过构建公交行程时间可靠性评价模型,研究雨天对公交行程时间可靠性的影响情况。

## 1 实测数据特征及雨天城市公交行程时间统计分析

### 1.1 实测数据特征

以广东省佛山市126路公交车采集的GPS数据作为公交运行数据基础,降雨数据参考佛山市南海区小时降雨量数据,以晴好天作为参照,并考虑路段设置公交专用道的影响,分析降雨天公交行程时间的统计变化规律。公交运行数据包含GPS显示时间、车辆行驶方向、车辆瞬时速度、所在位置经纬度坐标,覆盖126路公交车线路全程,由禅城区中心医院临时总站到鲤鱼沙站,路线全长17.3 km,经过多种等级道路,包括快速路、主干道、次干道以及支路,部分路段设有公交专用道。选取的降雨数据涵盖小雨、中雨、大雨、暴雨4种等级(小雨:0~0.1 cm/h,中雨:0.1~0.4 cm/h,大雨:0.4~1.0 cm/h,暴雨:1.0 cm/h及以上<sup>[22]</sup>),占比分别为小雨43.51%,中雨27.58%,大雨17.28%,暴雨11.63%,其中小到大雨的数据样本占绝大部分,同时考虑暴雨的情况,降雨量分布数据选取具有代表性。

由于受城市功能区用地及交通潮汐现象的影响,交通流在不同时段呈现不同的交通运行特征。高峰时段交通密度大,道路拥堵,车辆运行受限,公交行程时间波动性增强。平峰时段交通量小,交通压力相对高峰时段降低,车辆运行畅通性提升,同时通过对比分析公交运行行程时间数据发现,降雨天气对平峰时段公交运行特性影响不显著,本文主要研究降雨对高峰时段公交运行时间可靠性的影

响。选取 126 路公交线路的 10 辆公交车在 2019 年 8 月, 9 月份的运行数据进行研究, 考虑天气与公交专用道设置情况的数据组成如表 1 所示。

表 1 数据组成  
Tab.1 Data composition %

Type	Having bus lanes	Not having bus lanes
Rainy days	20.00	19.00
Sunny days	31.00	30.00

## 1.2 雨天对城市公交行程时间影响分析

基于 GPS 采集的公交行驶轨迹数据, 对比分析降雨天气对公交站间行程时间的影响程度。另外, 考虑到公交专用道为公交车辆分配单独路权, 可以保障公交运行速度, 本文进一步研究专用道在降雨条件下对公交行程时间的影响作用。由于不同的站间距离存在差异, 对行程时间进行标准化, 得到站间路段单位行程时间, 并以此作为统计特征分析的研究对象及后续可靠性建模及评价研究的数据基础。

### 1.2.1 雨天公交行程时间的统计变化规律

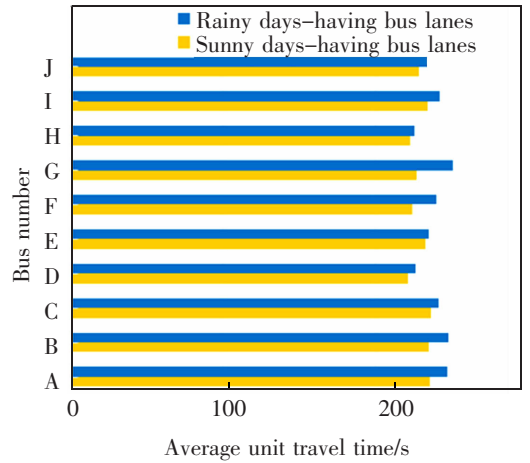
根据时段划分依据, 通过经、纬度数据及时间数据计算公交车高峰时段经过路段的单位行程时间 (s/km), 对每辆公交车的路段单位行程时间求均值, 得到每辆公交车的路段平均单位行程时间如下

$$T_{jk} = \frac{\Delta t_{jk}}{\Delta l_{jk}} \quad (1)$$

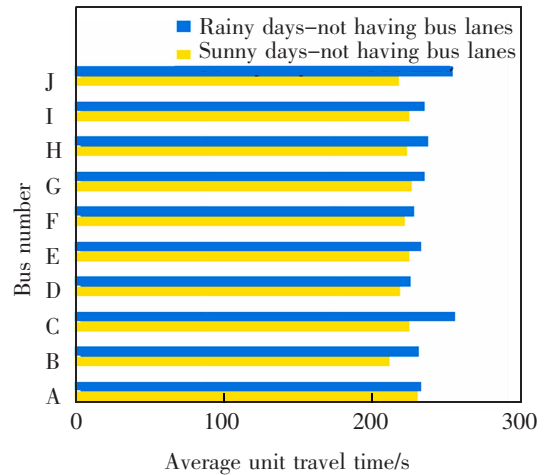
$$\bar{T}_m = \frac{1}{uv} \sum_{j=1}^v \sum_{k=1}^u T_{jk} \quad (2)$$

式中:  $\Delta t_{jk}$  表示第  $k$  趟经过路段  $j$  所花时间, s;  $\Delta l_{jk}$  表示第  $k$  趟经过路段  $j$  所走路程, km;  $T_{jk}$  表示第  $k$  趟经过路段  $j$  的单位行程时间, s;  $u$  表示  $m$  公交车经过路段  $j$  的总趟数;  $v$  表示有专用道 (或无专用道) 的路段总数;  $\bar{T}_m$  表示  $m$  公交车的路段平均单位行程时间, s。通过式 (2) 分别计算 10 辆公交车 (A~J) 雨天无专用道路段、雨天有专用道路段、晴天无专用道路段、晴天有专用道路段的平均单位行程时间, 结果如图 1 所示。

对比图 1(a) 及图 1(b) 可以看出, 雨天条件下的平均单位行程时间均大于晴天天气, 且车辆间行程时间差异性更显著。相对于晴天, 降雨天条件下无公交专用道路段行程时间大于有公交专用道



(a) Comparison of having bus lanes sections in different weather



(b) Comparison of not having bus lanes sections in different weather

图 1 公交车平均单位行程时间对比图

Fig.1 Comparison chart of average unit travel time of buses

路段的程度更明显, 且各车辆间差异波动幅度更大。由此说明, 降雨天气影响公交行程时间, 导致公交行程时间增加, 行程时间稳定性下降, 同时降雨天气条件下驾驶员驾驶行为个性化差异被放大, 以致各公交车之间的行程时间差异程度增大。

图 1 说明, 有公交专用道路段的平均单位行程时间均小于无公交专用道路段, 且波动性更小, 未设置公交专用道路段的行程时间受天气影响更大, 雨天无公交专用道路段行程时间的波动性最强。

雨天影响道路条件和驾驶员行车环境, 驾驶员行车速度降低, 行程时间增加, 行车平稳性下降。公交专用道为公交车辆的运行提供了一条畅通、快捷的绿色通道<sup>[25]</sup>, 为公交车分配单独路权, 路段上交通密度小, 驾驶员可以选择自身期望的速度行车, 公交车运行速度受其他因素干扰小, 公交专用道路段

行程时间及其波动性均小于无公交专用道路段。对于公交专用道路段,天气条件的变化不会对驾驶员行车造成过大的冲击,天气条件对专用道路段的影响比无专用道路段弱。综上所述,降雨天气影响公交行程时间,导致公交行程时间增加,波动性增强。公交专用道可以有效抑制公交行程时间及其波动幅度的增长。

### 1.2.2 公交行程时间概率分布

通过对行程时间数据进行分布拟合,明确公交单位行程时间的概率分布,为后续构建行程时间可靠性评价模型提供支持。以往研究中<sup>[3,15,26-27]</sup>,研究者们多用正态分布、对数正态分布、伽马分布、威布尔分布作为行程时间的拟合分布,为了确定公交车行程时间的分布,本文运用以上4种分布拟合雨天无专用道、雨天有专用道、晴好天无专

用道、晴好天有专用道的路段单位行程时间,正态分布、对数正态分布、伽马分布、威布尔分布的概率密度函数分别为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} x\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), x > 0 \quad (5)$$

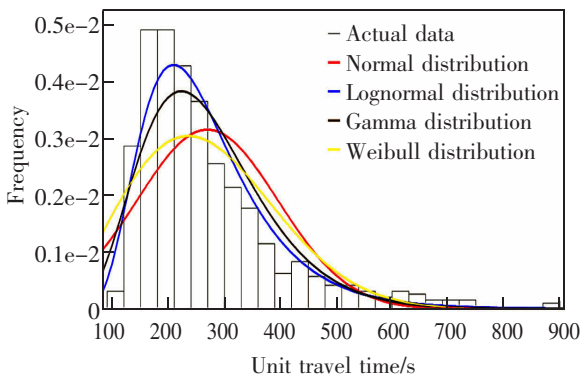
$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(-\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)^k, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

公交单位行程时间分布拟合结果参数值如表2所示。公交单位行程时间的分布拟合效果如图2所示,其中横坐标表示单位行程时间(以s为单位),纵坐标表示频率。

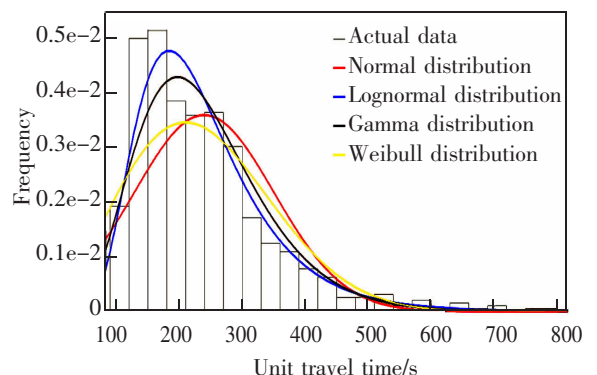
表2 单位行程时间分布拟合结果参数值

Tab.2 Parameter values of the fitted distribution per unit travel time

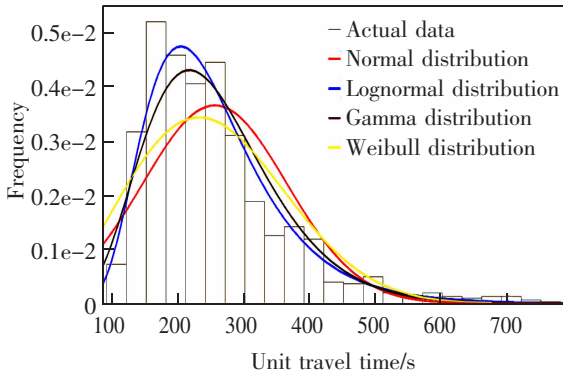
Type	Rainy days-not having bus lanes	Rainy days-having bus lanes	Sunny days-not having bus lanes	Sunny days-having bus lanes
Normal distribution	$\mu=269.50$	$\mu=239.34$	$\mu=254.25$	$\mu=232.58$
	$\sigma=125.99$	$\sigma=110.84$	$\sigma=109.30$	$\sigma=103.03$
Lognormal distribution	$\mu=5.51$	$\mu=5.39$	$\mu=5.46$	$\mu=5.36$
	$\sigma=0.41$	$\sigma=0.42$	$\sigma=0.39$	$\sigma=0.41$
Gamma distribution	$\alpha=5.78$	$\alpha=5.66$	$\alpha=6.55$	$\alpha=5.91$
	$\beta=46.67$	$\beta=42.26$	$\beta=38.81$	$\beta=39.39$
Weibull distribution	$\lambda=305.26$	$\lambda=270.94$	$\lambda=287.13$	$\lambda=262.94$
	$k=2.26$	$k=2.27$	$k=2.42$	$k=2.37$



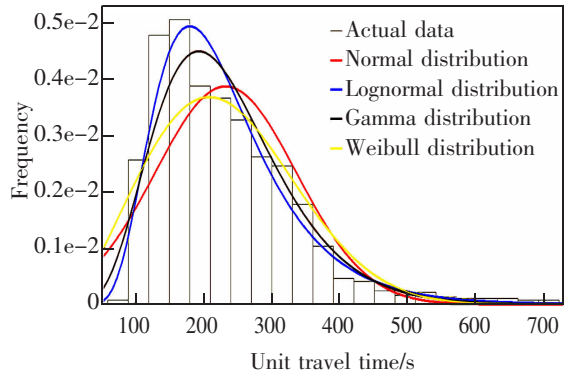
(a) Fitting effect drawing of not having bus lanes in rainy days



(b) Fitting effect drawing of having bus lanes in rainy days



(c) Fitting effect drawing of not having bus lanes in sunny days



(d) Fitting effect drawing of having bus lanes in sunny days

图2 公交单位行程时间分布拟合效果图

Fig.2 The distribution fitting effect of the unit travel time for bus

由图2可知,相较于晴天,雨天情况下分布曲线峰值点右移,但有专用道路段右移的程度极小。由此说明,降雨天公交行程时间增加,而公交专用道能够有效弱化降雨对公交行程时间影响的程度。

根据拟合得到的概率密度函数求累积分布函数和各行程时间区间的累积概率,计算各区间拟合结果的累积概率与实际概率的误差平方和( $SSE$ )和 $R^2$ ,计算结果如表3所示。

表3 拟合结果

Tab.3 Fitting result

Type	Normal distribution		Lognormal distribution		Gamma distribution		Weibull distribution	
	$SSE$	$R^2$	$SSE$	$R^2$	$SSE$	$R^2$	$SSE$	$R^2$
Rainy days-not having bus lanes	0.02	0.66	0	0.93	0.01	0.86	0.02	0.73
Rainy days-having bus lanes	0.02	0.76	0	0.94	0.01	0.91	0.01	0.82
Sunny days-not having bus lanes	0.02	0.85	0	0.97	0.01	0.95	0.01	0.88
Sunny days-having bus lanes	0.01	0.82	0	0.96	0.00	0.94	0.01	0.87

根据拟合结果,对数正态分布的 $SSE$ 值均最小, $R^2$ 值均最大,其拟合效果最佳,选用对数正态分布作为公交实际单位行程时间的拟合分布,为后续行程时间可靠性评价建模做铺垫。

## 2 雨天城市公交行程时间可靠性建模与分析

基于GPS采集数据,上述研究统计分析了降雨天气对公交行程时间的影响规律。基于此,本文通过构建雨天城市公交行程时间可靠性评价模型,从理论层面进一步探究雨天对公交行程时间可靠性的影响机理,形成一套公交行程时间可靠性理论评价体系,为研究降雨天气对公交行程时间可靠性的影响程度提供理论支持。

### 2.1 公交行程时间可靠性评价模型

#### 2.1.1 可靠性评价模型参数定义

公交行程时间受到交通流状态、天气条件等影响,是一个随机量。乘客在出行时为了让自己能够准时到达目的地,会依据自身经验预留搭乘公交的行程时间,即乘客预留的行程时间 $\zeta$ ,但是由于一些意外情况会导致乘客预留的行程时间不足而存在超额延误 $\tau(\tau>0)$ ,将存在超额延误的行程时间定义为超额行程时间 $T_{ET}$ ,超额行程时间即超过乘客预留行程时间 $\zeta$ 的实际行程时间 $T_p$ 。超额延误、乘客预留的行程时间、超额行程时间3者的关系如图3所示。

如图3所示,超额行程时间 $T_{ET}$ 是乘客预留行程时间 $\zeta$ 与超额延误 $\tau(\tau>0)$ 之和,乘客预留行程时间 $\zeta$ 是基准行程时间与缓冲时间之和,其中,缓冲时间是指在出行过程中,为了确保准时到达而比基准行程时间多预留出来的时间。

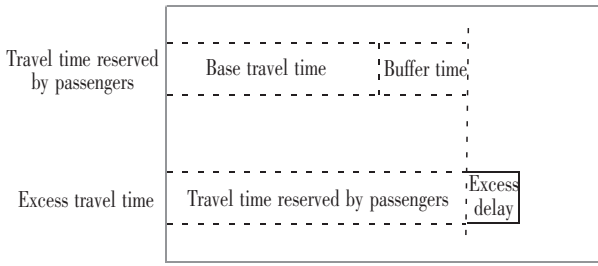


图 3 可靠性评价模型参数关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of the parameter relationship of the reliability evaluation model

2.1.2 可靠性评价建模及评价思路

超额行程时间定义为乘客预留的行程时间与超额延误  $\tau$  之和(式(7)),乘客预留的行程时间定义为基准行程时间与缓冲时间之和(式(8)),本文选取行程时间均值作为基准行程时间<sup>[28]</sup>,参考文献[3]关于缓冲时间的定义,即缓冲时间为行程时间 90%分位值与均值之差,将缓冲时间取值为路段缓冲时间的均值。构建城市公交行程时间计算模型为

$$T_{ET} = \zeta + \tau \quad (7)$$

$$\zeta = E(T_p) + \lambda \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{90} - \bar{T}_j) \right] \quad (8)$$

式中: $E(T_p)$ 为实际单位行程时间均值; $\lambda$ 是考虑天气及路段影响的缓冲时间系数,反映乘客对行程时

间不可靠风险的态度; $N$ 表示参与统计分析的所有路段总数; $T_{90}$ 表示路段单位行程时间的 90%分位值; $\bar{T}_j$ 表示路段  $j$  单位行程时间的平均值; $(T_{90} - \bar{T}_j)$ 表示路段  $j$  的缓冲时间。

另外,需要满足乘客在预留行程时间  $\zeta$  内完成出行的概率不小于  $\alpha$ ,  $\alpha$  取值为 90%<sup>[24]</sup>,计算式为

$$\zeta = \min \{ \zeta \mid P(T_p \leq \zeta) \geq \alpha \} \quad (9)$$

通过乘客预留行程时间  $\zeta$ (式(9))及公交行程时间分布计算不同天气条件、不同路段公交专用道设置情况的  $\zeta$ ,反映乘客出行预留行程时间的差异。根据  $\zeta$  求出缓冲时间系数  $\lambda$ ,比较不同天气条件、不同路段公交专用道设置情况乘客需要预留缓冲时间的差别,体现公交行程时间可靠性的差异。依据超额行程时间  $T_{ET}$ 及  $\zeta$  计算超额延误  $\tau$ ,反映不同情况下的超额延误。通过  $\tau$  的概率分布计算其均值,从超额延误的平均水平反映不同情况下行程时间的不可靠程度。公交行程时间可靠性评价思路如图 4 所示。

$\zeta$  的差异是基准行程时间与缓冲时间差异的集中体现,值越大意味着乘客需要在一定概率下完成出行所需花费的时间越长,行程时间可靠性越难以保障。 $\lambda$  是缓冲时间系数,能够反映不同天气条件、

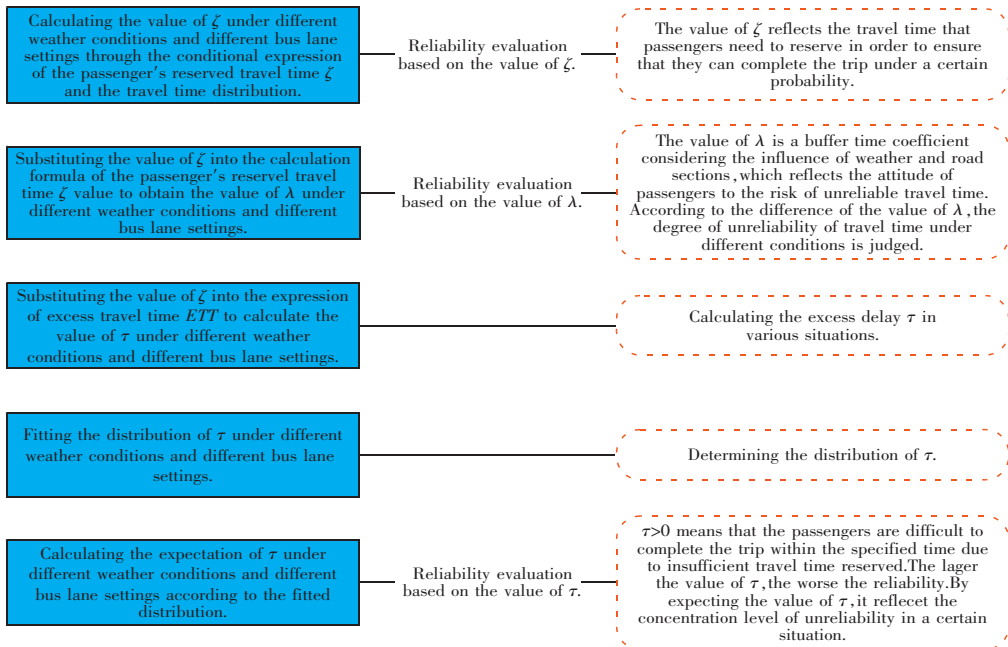


图 4 可靠性评价思路

Fig.4 Ideas for reliability evaluation

不同公交专用道设置情况下乘客需要预留的缓冲时间差异,  $\lambda$  越大表明乘客为了能够准时到达目的地需要预留的缓冲时间越长, 行程时间可靠性越差。  $\tau$  反映超额延误,  $\tau$  大于 0 意味着乘客预留的行程时间不足, 难以准时到达目的地。

通过  $\zeta$ 、 $\lambda$  和  $\tau$  均值从不同的角度反映公交行程时间可靠性情况, 从多角度对可靠程度进行评价。  $\zeta$  基于行程时间分布及期望准时到达目的地的几率阈值确定, 能够反映各种情况下的全局特性。  $\lambda$  受到  $\zeta$  及基准行程时间(即单位行程时间均值)影响, 能够反映乘客预留行程时间与行程时间均值的差异, 进而体现行程时间的波动程度。前两个指标

反映的是乘客规避难以准时到达目的地的态度,  $\tau$  体现乘客由于预留时间不足而延迟到达的情况。

## 2.2 雨天对城市公交行程时间可靠性的影响分析

依据本文提出的公交行程时间可靠性评价模型, 计算不同天气条件、不同公交专用道设置情况下乘客预留行程时间  $\zeta$ 、缓冲时间系数  $\lambda$  及超额延误  $\tau$ , 对比分析不同情况下公交行程时间可靠程度差异性。

### 2.2.1 乘客预留行程时间的变化

根据公交行程时间的对数正态分布拟合结果以及乘客预留行程时间  $\zeta$ (式(9)), 计算 4 种情况下乘客预留行程时间  $\zeta$ , 如表 4 所示。

表 4  $\zeta$  计算结果  
Tab.4 Calculation result of  $\zeta$

Parameter	Rainy days-not having bus lanes	Rainy days-having bus lanes	Sunny days-not having bus lanes	Sunny days-having bus lanes
$\zeta$	415.66	372.94	385.55	361.41

由结果可知, 无公交专用道路段雨天乘客预留的行程时间比晴天多 30.11 s, 与有公交专用道路段相比多 11.53 s。雨天有公交专用道路段乘客预留的行程时间比无公交专用道路段少 42.72 s, 与晴天相比多 24.14 s。可见, 晴天乘客预留的行程时间较雨天少, 有专用道路段乘客预留的行程时间较无专用道路段少, 但是不同情况影响程度不一。

由上述结果可知, 相较于晴天, 由于降雨天路面湿滑、驾驶员视线范围缩小等原因, 道路整体交通运行速度下降, 公交行程时间显著增加, 导致乘客需要预留更长的行程时间确保能够准时到达目的地。另外数据及评价结果显示, 公交专用道能有效降低公交行程时间, 降雨条件下公交专用道抑制公交运行效率下降的效果尤为突出, 能有效提高雨天公交行程时间的可靠性。

### 2.2.2 缓冲时间的变化

将实测单位行程时间数据及  $\zeta$  计算结果(表 4)

代入式(8), 计算 4 种情况下的  $\lambda$  值, 得到如表 5 所示结果。

$\lambda$  的大小反映了乘客需要预留的缓冲时间情况, 体现了乘客对待行程时间不可靠风险的态度。由计算结果可知, 降雨及无公交专用道均会增加乘客需要预留的缓冲时间。对于无公交专用道路段, 雨天需要预留的缓冲时间相对晴天增加了 11.61%; 对于有公交专用道路段, 雨天需要预留的缓冲时间相对晴天增加了 3.64%。另外, 雨天无公交专用道路段需要预留的缓冲时间相对有公交专用道路段增加了 9.65%。

由结果可知, 天气条件是影响乘客预留缓冲时间的因素, 由于降雨的影响, 乘客需要预留更长的缓冲时间以确保准时到达目的地。另外, 上述计算结果表明, 设置专用道可以降低乘客所需预留的缓冲时间, 乘客能准时到达目的地的概率增加, 在一定程度上增强了雨天公交出行的行程时间可靠性。

表 5  $\lambda$  计算结果  
Tab.5 Calculation result of  $\lambda$

Parameter	Rainy days-not having bus lanes	Rainy days-having bus lanes	Sunny days-not having bus lanes	Sunny days-having bus lanes
$\lambda$	1.25	1.14	1.12	1.10

2.2.3 超额延误的变化

存在超额延误意味着乘客预留的行程时间不足,难以在规定时间内完成出行,公交行程时间不可靠。基于实测超额行程时间数据及预留行程时间

结果(表 4),依据式(7)计算超额延误  $\tau$ ,并用正态分布、对数正态分布、伽马分布、威布尔分布分别拟合 4 种情况下的超额延误,拟合结果参数值如表 6 所示。

表 6 超额延误分布拟合结果参数值

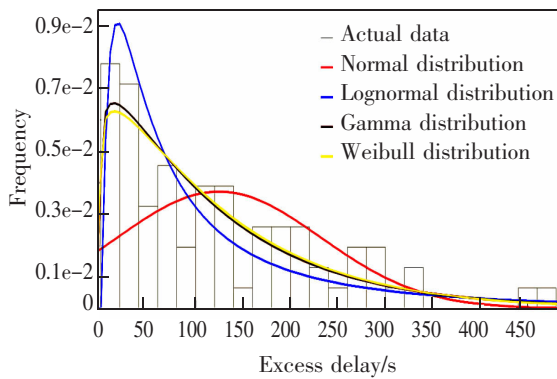
Tab.6 The parameter value of the distribution fitting result for the excess delay

Type	Rainy days-not having bus lanes	Rainy days-having bus lanes	Sunny days-not having bus lanes	Sunny days-having bus lanes
Normal distribution	$\mu=124.71$	$\mu=101.65$	$\mu=101.70$	$\mu=99.58$
	$\sigma=107.22$	$\sigma=102.09$	$\sigma=99.22$	$\sigma=96.37$
Lognormal distribution	$\mu=4.32$	$\mu=3.93$	$\mu=3.95$	$\mu=3.84$
	$\sigma=1.20$	$\sigma=1.48$	$\sigma=1.41$	$\sigma=1.67$
Gamma distribution	$\alpha=1.12$	$\alpha=0.85$	$\alpha=0.87$	$\alpha=0.78$
	$\beta=111.21$	$\beta=119.58$	$\beta=116.17$	$\beta=127.88$
Weibull distribution	$\lambda=129.00$	$\lambda=97.45$	$\lambda=98.45$	$\lambda=93.83$
	$k=1.10$	$k=0.91$	$k=0.93$	$k=0.88$

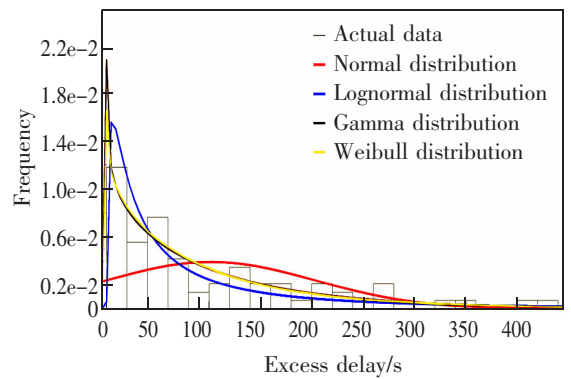
公交行程时间超额延误的分布拟合效果如图 5 所示。

各种情况下的误差平方和(SSE)和  $R^2$ ,结果如表 7 所示。

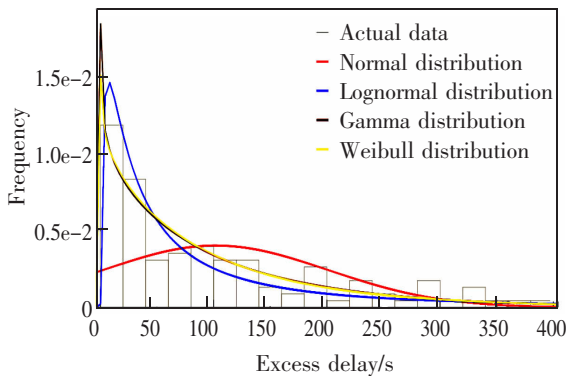
依据分布拟合结果及公交运行实测数据,计算



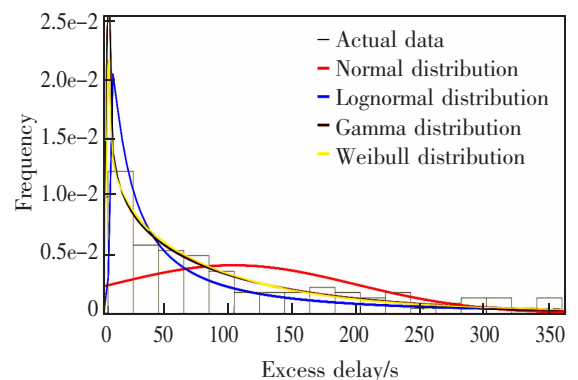
(a) Fitting effect drawing of not having bus lanes in rainy days



(b) Fitting effect drawing of having bus lanes in rainy days



(c) Fitting effect drawing of not having bus lanes in sunny days



(d) Fitting effect drawing of having bus lanes in sunny days

图 5 公交超额延误拟合效果图

Fig.5 Fitting effect diagram of bus excess delay



根据分布拟合结果,选用伽马分布作为公交超额延误的拟合分布,分别计算4种情况下公交超额延误的期望,用以表示公交行程时间不可靠程度的

集中水平,得到如表8所示结果。伽马分布的期望计算式为

$$E(X)=\alpha\beta \quad (10)$$

表7 拟合结果  
Tab.7 Fitting result

Type	Normal distribution		Lognormal distribution		Gamma distribution		Weibull distribution	
	SSE	R <sup>2</sup>	SSE	R <sup>2</sup>	SSE	R <sup>2</sup>	SSE	R <sup>2</sup>
Rainy days-not having bus lanes	0.03	0.32	0.01	0.72	0.01	0.78	0.01	0.77
Rainy days-having bus lanes	0.05	0.29	0.01	0.84	0.01	0.89	0.01	0.88
Sunny days-not having bus lanes	0.05	0.28	0.01	0.90	0.01	0.90	0.01	0.89
Sunny days-having bus lanes	0.05	0.31	0.01	0.85	0.00	0.95	0.00	0.95

表8 超额延误期望计算结果  
Tab.8 The calculation result of the mean value of excess delay

Parameter	Rainy days-not having bus lanes	Rainy days-having bus lanes	Sunny days-not having bus lanes	Sunny days-having bus lanes
Mean	124.66	101.76	101.65	99.62

从计算结果可见,相对于晴好天气,雨天无公交专用道路段超额延误增加了22.64%,雨天有公交专用道路段超额延误增加了2.15%。另外,雨天无公交专用道路段超额延误相对有公交专用道路段增加了22.50%。结果说明,雨天会增加公交的超额延误,即降雨条件下公交行程时间可靠性降低,而公交专用道的设置可以抑制公交行程时间可靠性的下降。

由结果可知,由于降雨天气驾驶员的警惕性提高,行车速度下降,行程时间增加,导致乘客预留的行程时间不足而存在超额延误,进而造成公交行程时间可靠性下降。在设有公交专用道的路段上,交通量小,驾驶员行车速度得到保障,行程时间及其波动性减弱,出现超额延误的概率减小,可以有效抑制雨天公交行程时间可靠程度的降低。

### 3 结论

本文基于公交运行数据,同时考虑公交专用道设置情况的影响,分析了降雨天公交行程时间的统计变化规律。通过构建公交行程时间可靠性评价模型,研究了雨天对公交行程时间可靠性的影响机理,得到如下结论:

1) 降雨天气影响公交行程时间,导致公交行程时间增加,行程时间波动性增强,同时降雨天气条件下驾驶员驾驶行为个性化差异被放大,以致各公交车之间的行程时间差异程度增大;

2) 构建公交行程时间可靠性评价模型,通过乘客预留行程时间、缓冲时间、超额延误3个参数指标评价可靠程度,形成一套公交行程时间可靠性理论评价体系,并基于该模型对佛山市126路公交高峰时段雨天行程时间可靠性进行评价;

3) 降雨天气影响公交行程时间可靠程度,相较于晴好天气,降雨天气乘客需要预留更长的行程时间、缓冲时间以确保能够准时到达目的地,同时出现超额延误的几率增大,雨天导致公交行程时间可靠性下降;

4) 公交专用道为公交车分配单独路权,保障了公交车的运行效率,公交专用道的设置能减少公交行程时间及其波动幅度的增长,同时抑制公交行程时间可靠性的下降;

5) 通过对公交单位行程时间数据及超额行程时间数据进行分布拟合,结果表明单位行程时间服从对数正态分布,超额行程时间服从伽马分布。

## 参考文献:

- [1] 张玉红,尹小庆,莫宇迪,等. 考虑行程时间可靠性的城市公交网络抗毁性研究[J]. 计算机应用研究,2020,37(S2):34-36.  
ZHANG Y H, YIN X Q, MO Y D, et al. Research on the survivability of urban public transport network considering the reliability of travel time[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S2):34-36.
- [2] 黄帅凤. 基于手机数据的高速公路行程时间可靠性评估方法研究[D]. 南京:东南大学,2018.  
HUANG S F. Research on reliability evaluation method of expressway travel time based on mobile phone data[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [3] 陈明明. 基于统计分布的城市道路行程时间可靠性研究[D]. 西安:长安大学,2016.  
CHEN M M. Research on reliability of urban road travel time based on statistical distribution[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [4] 韦学武. 高速公路交通流随机性和行程时间可靠性研究[D]. 长春:吉林大学,2016.  
WEI X W. Research on the randomness of freeway traffic flow and reliability of travel time[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [5] 周礼节. 大城市中心区交通系统可靠性评价[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.  
ZHOU L J. Reliability evaluation of traffic system in central district of big city[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [6] 倪安宁,刘晏尘,崔毓伟,等. 评价公交行程时间可靠性价值的 Mixed Logit 模型[J]. 上海交通大学学报,2019,53(2):146-152.  
NI A N, LIU Y C, CUI Y W, et al. The Mixed Logit model for evaluating the reliability value of bus travel time [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(2):146-152.
- [7] 王殿海,汤月华,陈茜,等. 基于 GPS 数据的公交站点区间行程时间可靠性影响因素[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(2):404-412.  
WANG D H, TANG Y H, CHEN Q, et al. Factors influencing the reliability of interval travel time of public transport stations based on GPS data[J]. Journal of Southeast University (Science), 2015, 45(2):404-412.
- [8] CHEN X M, YU L, ZHANG Y S, et al. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels[J]. Transportation Research Part A, 2009, 43(8):722-734.
- [9] 王芳杰,王福建,王雨晨,等. 基于 LightGBM 算法的公交行程时间预测[J]. 交通运输系统工程与信息,2019,19(2):116-121.  
WANG F J, WANG F J, WANG Y C, et al. Bus travel time prediction based on LightGBM algorithm[J]. Journal of Transportation System Engineering and Information, 2019, 19(2):116-121.
- [10] KAEWUNRUEN S, SRESAKOOLCHAI J, SUN H. Causal analysis of bus travel time reliability in Birmingham, UK [J]. Results in Engineering, 2021, 12:1-5.
- [11] 朱家哲, 赖元文. 道路拥堵程度对公交行程时间可靠性的影响研究[J]. 交通工程, 2017, 17(3):47-52.  
ZHU J Z, LAI Y W. Research on the influence of road congestion degree on the reliability of bus travel time[J]. Journal of Traffic Engineering, 2017, 17(3):47-52.
- [12] ZHEN L M, LUIS F, MAHMOUD M, et al. Modeling bus travel time reliability with supply and demand data from automatic vehicle location and smart card systems [J]. Transportation Research Record, 2015, 2533(1):17-27.
- [13] QU X B, ERWIN O, WENG J X, et al. Bus travel time reliability analysis: A case study[J]. Proceedings of the ICE-Transport, 2014, 167(3):178-184.
- [14] HARSHA M M, MULANGI R H. Impact of side friction on travel time reliability of urban public transit[J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, 19:1221-1237.
- [15] 寇伟彬. 公交乘客行程时间可靠性改善策略优化建模[D]. 北京:北京交通大学,2019.  
KOU W B. Optimization modeling of improvement strategies for bus passenger travel time reliability[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [16] 姜晨明. 基于恶劣天气场景下路径选择异质性的随机网络用户均衡问题[D]. 上海:上海交通大学,2017.  
JIANG C M. Random network user equilibrium problem based on the heterogeneity of path selection in severe weather scenarios[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [17] 韩勇,周林,高鹏,等. 基于 BP 神经网络的公交动态行程时间预测方法研究[J]. 中国海洋大学学报,2020,50(2):142-154.  
HAN Y, ZHOU L, GAO P, et al. Research on dynamic travel time prediction method of public transport based on BP neural network[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 50(2):142-154.
- [18] KURTE K, RAVULAPARTHY S, BERRES A, et al. Regional-scale spatio-temporal analysis of impacts of weather on traffic speed in Chicago using probe data[J]. Procedia Computer Science, 2019, 155:551-558.

- [19] 王婧,何杰,吴炼. 雨天高速公路网行程时间可靠性评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(6):117-123.  
WANG J,HE J,WU L. Evaluation method of travel time reliability of expressway network on rainy days[J]. Journal of Transportation System Engineering and Information,2011,11(6):117-123.
- [20] CHIEN S L,KOLLURI K K. Evaluation of freeway travel time variability and reliability under adverse weather with transmit data[J]. Journal of Civil Engineering and Architecture,2012,6(1):1-11.
- [21] KWON J,BARKLEY T,HRANAC R,et al. Decomposition of travel time reliability into various sources: Incidents, weather,work zones,special events,and base capacity [J]. Journal of the Transportation Research Board,2011,2229(1):28-33.
- [22] 叶佳缘,杨赛霓,刘浩. 降雨对高速公路小型车行程时间的影响[J]. 公路交通科技,2012,29(11):135-139.  
YE J Y,YANG S N,LIU H. The influence of rain on the travel time of cars on the expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,29(11):135-139.
- [23] 沈琪梦. 基于时变特性的城市交通出行路径可靠性研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.  
SHEN Q M. Research on reliability of urban traffic travel path based on time-varying characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.
- [24] 张琦,陈红,刘至真,等. 降雨量对 OD 行程时间可靠性影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2019,19(6):244-249.  
ZHANG Q,CHEN H,LIU Z Z,et al. Analysis on the influence of rainfall on the reliability of OD travel time[J]. Journal of Transportation System Engineering and Information,2019,19(6):244-249.
- [25] 董友邦,李锐,曹怡. 停靠站附近间歇式公交专用道适用条件探究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(1):132-142.  
DONG Y B,LI R,CAO Y. Research on applicable conditions of intermittent bus lanes near stops[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(1):132-142.
- [26] 陈娇娜,张生瑞,靳引利. 高速公路行程时间可靠性模型参数估计方法比较分析[J]. 公路交通科技,2016,33(10):118-124.

CHEN Q N,ZHANG S R,JIN Y L. Comparison and analysis of parameter estimation methods for reliability models of expressway travel time[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(10):118-124.

- [27] 李梁. 基于车牌数据的城市道路行程时间可靠性研究[D]. 北京:北方工业大学,2016.

LI L. Research on reliability of urban road travel time based on license plate data[D]. Beijing: North China University of Technology,2016.

- [28] CHEN A,ZHOU Z. The  $\alpha$ -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times[J]. Transportation Research Part B,2009,44(4):493-513.



第一作者:粟海琪(1996—),女,硕士研究生,2020年获得河海大学学士学位。研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:1837706634@qq.com。



通信作者:杨海飞(1984—),男,博士,副教授,河海大学土木与交通学院硕士研究生导师,研究方向为交通流理论、交通行为建模以及交通运输规划等。2007年本科毕业于河海大学,2010年硕士毕业于河海大学,2015年博士毕业于东南大学交通运输工程专业。E-mail:yanghaifei@hhu.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)