

快速路晴雨天环境运行特征差异及最佳服务流率

云美萍¹, 杨书敏¹, 沈峰², 李富香³, 赵晓敏³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海电科智能系统股份有限公司, 上海 200063;

3. 青海职业技术大学, 青海 西宁 810003)

摘要: 城市快速路雨天较晴天通行缓慢、拥堵频发, 通过对比雨天、晴天环境下快速路运行特征, 揭示晴雨环境下服务流率与车速的动态关系, 是城市快速路智能化动态管理的首要问题, 为此研究快速路晴雨天环境下的最佳服务流率分析方法。首先, 利用线圈检测数据分析雨天和晴天环境下流率、速度、占有率的分布特征, 采用 K-S 检验证实了晴雨天交通流存在显著差异; 分别对雨天和晴天进行通行能力及运行失效分析, 结果显示按现行规范标准确定的饱和度 (V/C) 并不适用于雨天交通流服务水平分析, 存在侧重强调最大通过量而对发生交通失效后表达不准确的局限性。鉴于此, 提出兼顾一定运行车速且最大化服务交通量的方法, 给出最佳服务流率的概念及其确定方法。建立综合流量—速度—占有率的 3 维 K -Means 聚类模型, 得到雨天、晴天运行失效前后的交通状态聚类结果, 阐释了运行失效前后的服务流率与服务水平关系, 指出运行失效前稳定流率可以作为最佳服务流率。

关键词: 通行能力; 最佳服务流率; 3 维 K 均值聚类; 城市快速路; 天气条件

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Differences in Expressway Traffic Characteristics and Optimal Service Flow Rate on Sunny and Rainy Days

YUN Meiping¹, YANG Shumin¹, SHEN Feng², LI Fuxiang³, ZHAO Xiaomin³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai SEARI Intelligent System Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 3. Qinghai Vocational Technical University, Xining 810003, China)

Abstract: This paper investigates the analysis method of the optimal service flow rate of the expressway on sunny and rainy days. First, the distribution characteristics of

flow, speed, and occupancy rate on rainy and sunny days are analyzed using coil loop data. Then, the K-S test is used to confirm the significant difference in traffic flow on sunny and rainy days. The capacity and the bottleneck breakdown analyses are performed on rainy and sunny days, respectively. It is shown that the V/C calculated according to the current standard does not apply to the analysis of the level of service (LOS) of rainy-day traffic flow, and there is a limitation in emphasizing the maximum throughput and inaccurate information after the bottleneck breakdown. Therefore, this paper proposes an academic idea of maximizing the service traffic volume while taking into account a certain operating speed and provides the concept of optimal service flow rate and its determination method. It, then, establishes a three-dimensional K -means clustering model with integrated flow-speed-occupy to obtain the traffic state clustering results before and after breakdown on rainy and sunny days. The results explain the relationship between service flow rate and LOS before and after breakdown, and point out that the pre-queue transition flow can be used as the optimal service flow rate.

Keywords: traffic capacity; optimal service flow rate; three-dimensional K -means clustering model; urban expressways; weather conditions

“一下雨就堵”的交通病对市民生活和城市运转造成了严重影响, 究其原因, 降雨会造成道路湿滑、积水, 同时驾驶员视线受干扰, 故行驶速度降低, 导致通行能力和效率下降^[1-3]。为此, 有必要分析雨天和晴天环境下交通运行特征是否存在差异, 进一步解析雨天、晴天环境下运行车速与服务流率的动态关系, 这是主动型、智能化快速路管理的前提和

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(52172307)

第一作者: 云美萍, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统工程与理论。

E-mail: yunmp@tongji.edu.cn

通信作者: 杨书敏, 博士生, 主要研究方向为智能交通系统工程。E-mail: 2011655@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

基础。

以往通行能力相关研究主要关注通行能力估计模型^[4-5]、影响因素识别^[6]等,如美国的通行能力手册(Highway Capacity Manual, HCM)^[1]。国内学者以Greenshields流密速关系为基础形成了中国版的《公路通行能力手册》^[7]。然而,这些研究得到的通行能力往往是极限状态下的极值通行能力,侧重强调道路的最大容量,对运行车速考虑不足,常用于规划设计阶段。为了探讨以车速为指标的服务水平,期望通行能力的概念被提出^[8-9],由于运行失效可作为交通拥堵产生的表征,期望通行能力即为考虑道路在运行失效发生前后的最大通过量。将独立瓶颈点在发生运行失效时刻之前的断面稳定流时段的小时流率称为失效前稳定流率(Pre-queue Transition Flow, PQF),将独立瓶颈点从发生运行失效时刻开始至失效结束时间段内断面的消散小时流率称为失效后稳定消散流率(Queue Discharge Flow, QDF)。由于期望通行能力并不一定是统计时段中的最大值,存在随机性,生存分析法被用于考虑随机性下的通行能力计算,称为随机通行能力^[10-11]。在实际交通运行中,需要对交通流发生拥堵前和拥堵后分别采取不同的管理措施,而极值通行能力和期望通行能力会高估拥挤状态下路段通过量,不利于交通管理策略制定,因此运行通行能力被提出^[12],由交通通畅时的稳定流率和发生交通拥堵后不同拥堵程度下的消散流率组成。运行通行能力是一个多值通行能力,可用于一般交通自适应控制中。然而,在预约车道、优先车道等智能化交通管理中,需要精准确定期望运行车速下的最佳服务流率,这样才能兼顾快速路的快速与高运量。

此外,以往对针对雨天的通行能力分析中,侧重考虑不同降雨程度下自由流车速和通行能力的折减^[13]。如:HCM^[1]中指出在高速公路上,降雨程度为小雨时自由流车速降低约 $1.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大雨时降低 $4.8 \sim 6.4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,暴雨天气会导致高速公路通行能力平均下降14%^[14];城市快速路在小、中、大雨下通行能力折减百分比分别为6%~8%、10%~11%、13%~15%^[15]。已有研究以解析降雨条件与车速之间的关系为主,尚未直接考虑雨天通行能力和运行车速的关系、过于重视最大通行能力而忽视道路服务水平,无法为雨天避免缓行、拥堵的主动预防管理提供依据。

鉴于此,提出兼顾一定运行车速且最大化服务交通量的学术思想,给出了最佳服务流率的概念及

其确定方法。以城市快速路为研究对象,利用线圈检测数据,分析雨天和晴天交通流分布特征及其差异,采用统计检验分析差异的显著性。在通行能力分析 & 运行失效分析的基础上,剖析现行规范标准对通行能力和服务水平分析的缺陷,构建综合流量—速度—占有率的3维K-Means聚类模型描述雨天和晴天快速路交通运行状态。研究运行失效前和失效后服务流率与车速的对应关系,以此得出适用于快速路精准化管控的最佳服务流率,为雨天和晴天环境下的主动型交通管理提供参考。

1 研究对象及数据来源

以上海市南北高架快速路为研究对象,如图1所示,南北高架是上海“申”字型路网中的南北向关键通道,与快速环路和东西向关键通道互联互通,全天时段交通运行处于近饱和状态。研究的瓶颈断面位于由延安高架、重庆南路上匝道至徐家汇路下匝道段,行车方向为自北向南,快速路主线为四车道,瓶颈段全长1706m,最高限速 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

选择工作日断面交通流数据进行研究,根据历史天气及降雨量信息(数据来源于:<https://rp5.ru/>),采集2017年10月11日(星期三)和10月16日(星期一)2个下雨天的检测数据,以及2017年10月23日(星期一)、10月18日(星期三)及10月30日(星期一)3个晴天的检测数据。将3个星期一的数据作为实验分析组,2个星期三的数据作为结论验证组。雨天的降雨量数据如表1所示。线圈检测数据采集周期为5 min,检测参数是区分大、中、小3种车型的流量(veh)、车速、占有率。

为完整覆盖所有交通运行状态,选取4:00—23:55时段的数据,并进行清洗处理。实测数据中,小车占比超过90%,故按大车2.0、中车1.5、小车1.0的换算系数将车流量(veh)转化为当量交通量(pcu)。由于检测线圈位置距离出、入口匝道距离均超过800 m,车道间的差异较小可不考虑,故以整体断面为单位进行后续分析。

2 晴雨天环境下快速路交通流运行特征分析

从流量、速度和占有率3个参数分别对雨天和晴天环境下研究断面的交通流运行特征及差异进行分析,通过统计学检验雨天和晴天交通流运行特征

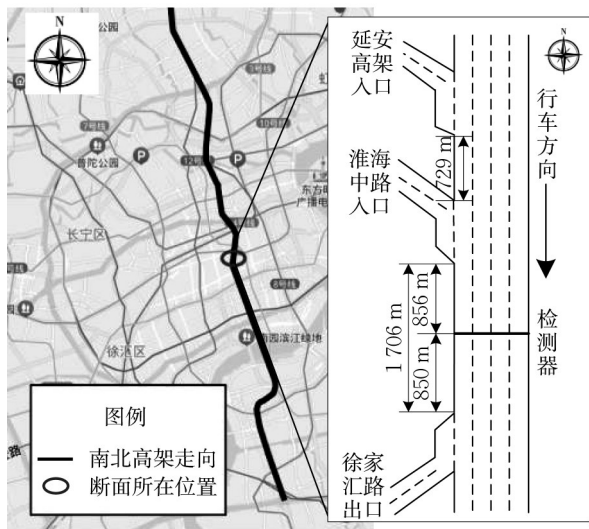


图 1 数据采集断面示意

Fig. 1 Schematic diagram of bottleneck cross-section

差异的显著性。

2.1 流量分布特征

星期一雨天(10月16日)和晴天(10月23日、10

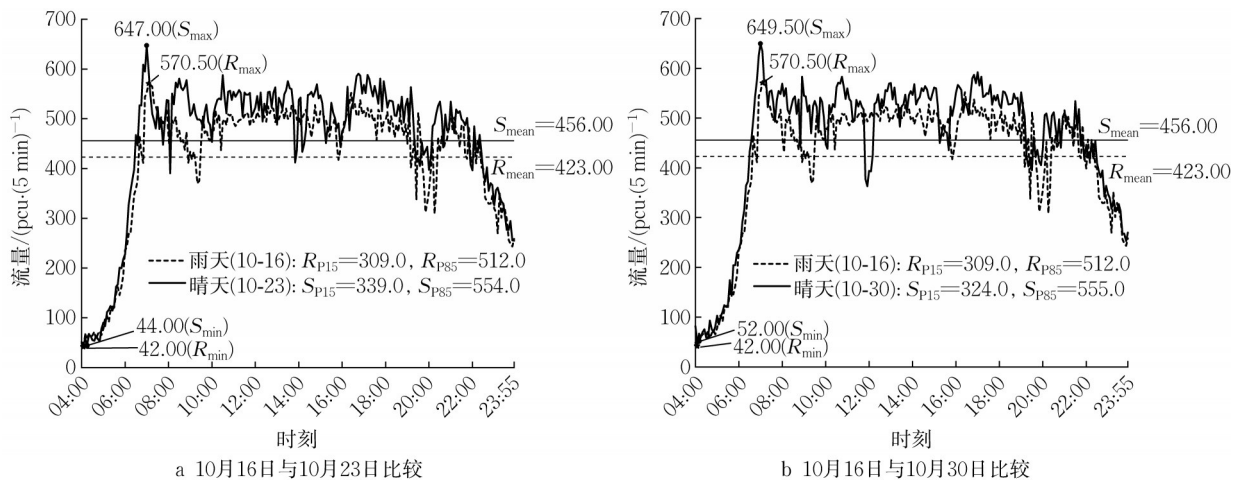


图 2 雨天和晴天快速路交通流量分布

Fig. 2 Distribution of traffic flow on rainy and sunny days

图 3 为验证组的流量分布图, 显示了星期三雨天和晴天的流量分布, 可以看出与图 2 分析得出的①③⑤特征类似。但验证组既有早高峰又有晚高峰, 且晴天晚高峰比雨天早 30 min 开始。晴天极值出现在早上 7:00 附近, 雨天极值出现在晚高峰 17:00 附近。

2.2 速度特征分析

检测器采集的数据显示, 瓶颈断面在星期一雨天(10月16日)和晴天(10月23日、10月30日)速度分布特征如图 4 所示, 可以发现雨天、晴天车速分布

表 1 雨天降雨量数据
Tab. 1 Rainfall on rainy days

单位: mm

日期	天气	2:00	8:00	14:00	20:00
10-11	小雨	17.0	13.0	2.0	降水迹象
10-16	小雨	9.0	7.0	14.0	7.0

月 30 日)断面流量分布如图 2 所示, 图中 R_{max} 、 R_{min} 、 R_{mean} 、 R_{P15} 、 R_{P85} 分别表示雨天最大值、最小值、平均值、15%分位数、85%分位数; S_{max} 、 S_{min} 、 S_{mean} 、 S_{P15} 、 S_{P85} 分别表示晴天最大值、最小值、平均值、15%分位数、85%分位数。由图 2 可见, 晴雨天交通量分布的主要差异包括: ① 雨天交通流量均低于晴天交通量。② 雨天和晴天的早高峰出现在 6:30—8:00 时段, 极大值出现在 7:00 附近。③ 在 9:00—18:00 工作时段雨天流量比晴天更加稳定, 波动相对较小。在 18:30—20:30 下班时段, 雨天流量波动较大, 但无明显高峰。④ 在 20:30—22:00 夜间时段雨天和晴天都会出现小高峰, 之后雨天流量下降比晴天更迅速。

的主要差异有: ① 雨天车速低于晴天。雨天车速均值为 $46.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 较晴天车速均值 ($51.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) 低 10%。② 雨天的速度波动更大, 85% 位车速为 $58.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 比最高限速 ($80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) 低 27%, 比晴天 ($62.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) 低 7.3%; 15% 位车速为 $35.1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 比 85% 位车速低 39.8%, 比晴天 ($42.4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) 低 17.2%。③ 雨天不仅在高高峰期车速较低, 平峰期运行车速也低于晴天车速的平均值。④ 在 17:00—19:30 晚高峰时段, 雨天和晴天的速度处于波谷且波动较大。⑤ 在 20:30—22:30 夜间时段, 雨天和晴天

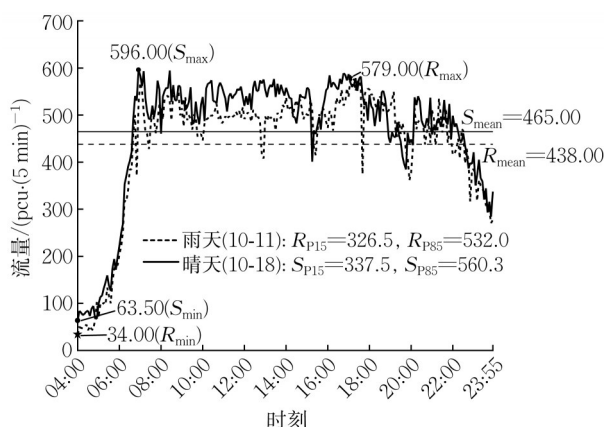


图3 验证组交通流量分布

Fig. 3 Traffic flow distribution of validation group

速度还会出现明显波动,这可能与南北高架路夜间仍处于车流量高位运行有关。

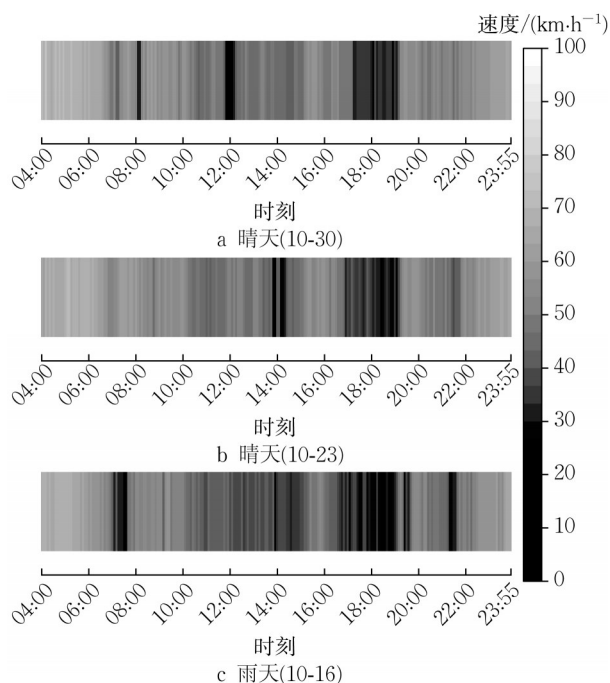


图4 雨天和晴天快速路速度分布

Fig. 4 Speed distribution on rainy and sunny days

图5为验证组的初速分布,星期三雨天、晴天速度分布特征与图4相近,显示雨天与晴天的速度参数存在差异。

2.3 占有率特征分析

星期一雨天(10月16日)和晴天(10月23日、10月30日)占有率参数分布特征如图6所示,结果显示:①雨天占有率分布特征与晴天差异不明显,原因在于南北高架快速路作为上海市南北方向主通道,晴天时全天处于交通量高位运行,呈现拥挤状

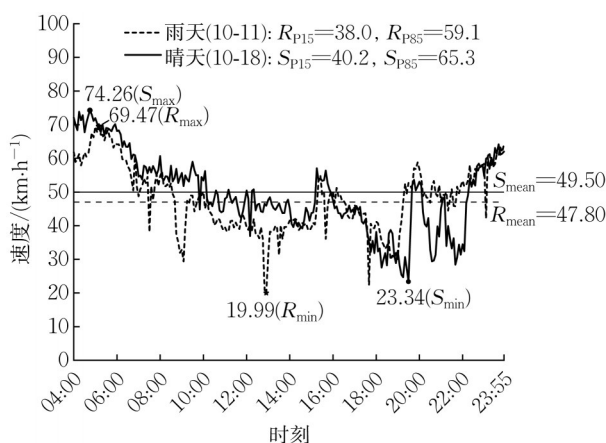


图5 验证组车速分布

Fig. 5 Speed distribution of verification group

态,占有率较高。而雨天路面摩擦系数降低、驾驶员视线受影响,车头间距保持在一定水平,因此雨天和晴天的占有率统计特征相似。②在6:30—8:00、17:00—20:00时段,雨天和晴天占有率出现峰值,且雨天会更分散。③在8:00—15:00时段,雨天占有率趋于平稳主要集中在15%~30%,而晴天波动更大。

图7为验证组的占有率分布,表明星期三雨天、晴天与图6的规律一致,即雨天和晴天的占有率参数差异不明显。

2.4 雨天与晴天环境下交通流差异的显著性检验

为进一步分析雨天与晴天的交通运行差异,采用统计检验方法来验证流量、速度、占有率3个参数分布差异的显著性。由于这3个参数不服从正态分布,故采用非参数检验中的Kolmogorov—Smirnov检验,结果如表2所示,累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)图如图8所示。

根据显著性检验结果,雨天与晴天的流量和速度2个参数 $P < 0.05$,表明存在显著性差异,占有率参数存在 $0.05 < P < 0.10$,差异显著性不明显但仍在可接受范围;而晴天与晴天的3个参数均 $P > 0.05$,差异不显著。可知雨天环境下交通流受干扰大,与晴天状况良好时差异显著,有必要针对雨天进行通行能力与服务水平分析。

3 晴雨天环境下快速路通行能力与服务流率分析

通行能力反映了道路在指定条件下所能承载车辆运行的能力,在规划设计阶段,针对理想条件提出

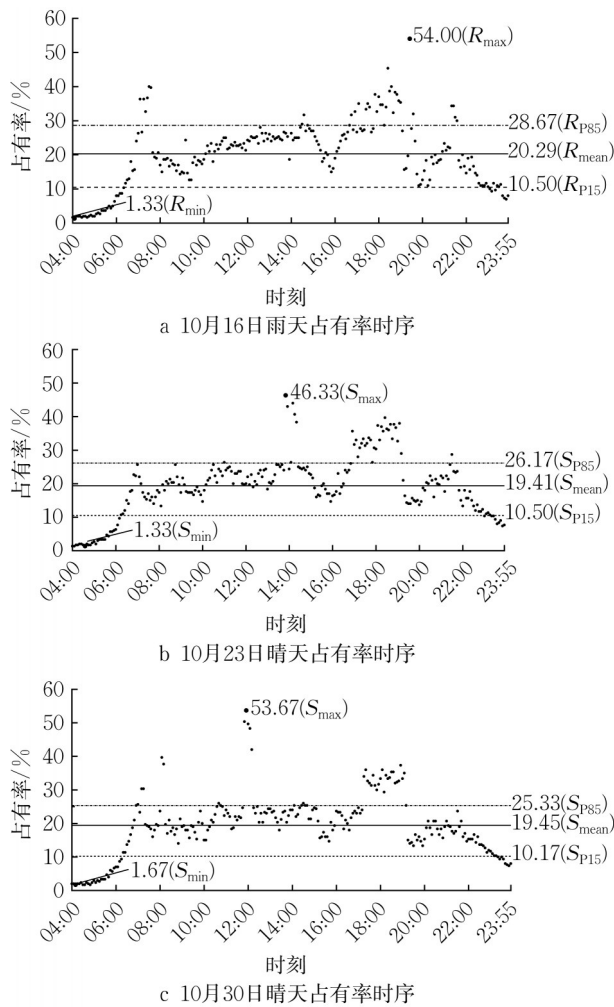


图 6 雨天和晴天快速路占有率分布

Fig. 6 Occupancy distribution on rainy and sunny days

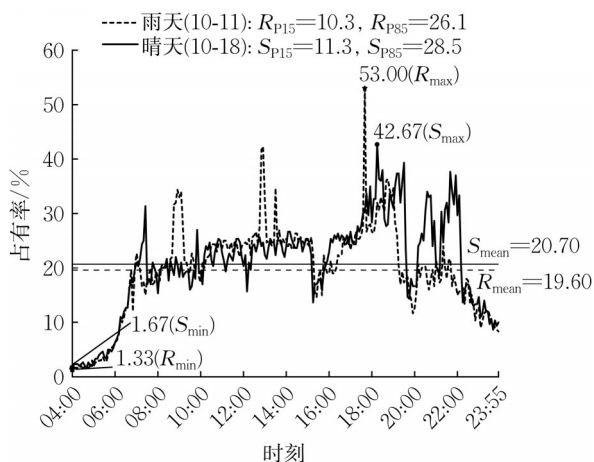


图 7 验证组占有率分布

Fig. 7 Occupancy distribution of validation group

了极值通行能力、期望通行能力;启用运行后,运行通行能力可用于常规交通管理(见表3)。然而,面对

雨天环境以及专用道、预约车道等精准化管控措施时,未能兼顾服务水平。为此,提出兼顾服务水平的最佳服务流率确定方法,不仅能服务较多的车流量,还可保障一定的运行车速,可服务于快速路精准化交通管控。

最佳服务流率是指在一定的可接受速度下能保证交通稳定运行、不会演化为运行失效的最大通过量。需先从计算极值通行能力、期望通行能力和运行通行能力入手,分析运行失效,在此基础上建立服务流率与服务水平的关系模型,据此得出最佳服务流率。

3.1 极值通行能力

由线圈检测数据可得到雨天和晴天快速路流量—速度—占有率关系如图9所示,采用HCM中15 min最大小时流率的估算方法,可得到雨天断面的极值通行能力为 $1\ 703.5\ \text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$,晴天极值通行能力为 $1\ 948.5\ \text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$,以及最大流率对应的车速与占有率如表4所示。2016年版《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)^[16]中指出,快速路对应 $80\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 限速下,基本通行能力推荐值 $2\ 100\ \text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$ 、设计通行能力值 $1\ 750\ \text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$,据此计算可得饱和度(V/C)及对应的服务水平,结果见表4。

由表4可知,雨天和晴天极值通行能力相差3%~13%,服务水平相差1个等级(3级、4级),雨天服务水平更高(3级)。然而,在极值通行能力下,根据现行规范标准,晴天断面的服务水平处于4级(饱和和流),对应车速 $52.9\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。而雨天处于3级(稳定流),但对应的速度均值为 $39.4\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,比最高限速降低了50%。如此得出雨天较晴天通行能力更低、车速更低而服务水平却更高的谬论,这与结果显然自相矛盾,且与实际脱节,更无法应用于快速路精准化管控。

3.2 期望通行能力

期望通行能力的估算依赖于运行失效分析,分别考虑运行失效发生前、后的最大小时交通量,且失效前稳定流率PQF和失效后稳定消散流率QDF存在不一致现象,被称为双通行能力^[11]。

基于Zhang等^[8]和孙剑等^[9, 11]对瓶颈失效识别的研究,采用以速度和占有率为双阈值的失效识别法,选定连续5 min平均车速低于 $50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 且占有率高于20%作为晴天瓶颈失效发生的阈值。但雨天受路面摩擦系数减小、驾驶员视线不良的影响,车速会低于晴天,参考10月11日和11月16日2个雨天的

表 2 雨天与晴天环境下交通流非参数检验 P 值(双尾)

Tab. 2 P-value for non-parametric test of traffic flow on rainy and sunny days

样本	Kolmogorov-Smirnov 检验		
	流量	速度	占有率
10-16(雨天)和10-23(晴天)	0	0.000 005	0.088
10-16(雨天)和10-30(晴天)	0	$1.323 1 \times 10^{-7}$	0.028
10-23(晴天)和10-30(晴天)	0.370 00	0.130 000	0.697
10-11(雨天)和10-18(晴天)	0.000 08	0.000 055	0.228

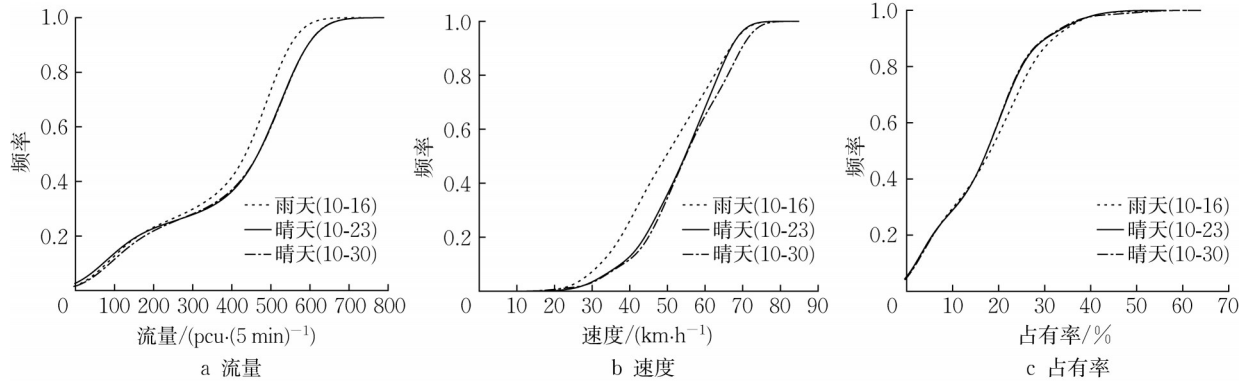


图 8 累积分布函数

Fig. 8 Cumulative distribution function

表 3 通行能力类型及适用场景

Tab. 3 Types of capacity and application scenarios

类型	定义	特点	适用场景
极值通行能力	不考虑交通流运行状态, 1h内所能通过标准车辆的最大辆数。	只强调最大通过量, 静态单值	制定道路最大承载量上限
期望通行能力	考虑运行失效, 在失效发生前和发生后, 1h内道路所分别能合情合理通过标准车辆的最大辆数。	考虑服务水平下最大通过量, 静态双值	交通管理与控制中最大限流量
运行通行能力	在通常的道路、交通和管制条件下, 在一定时间段内能合情合理地期望车辆通过车道、道路中某一点或均匀断面的最大小时流率。	不同交通条件(管控)下的多值通行能力, 动态多值	交通自适应控制

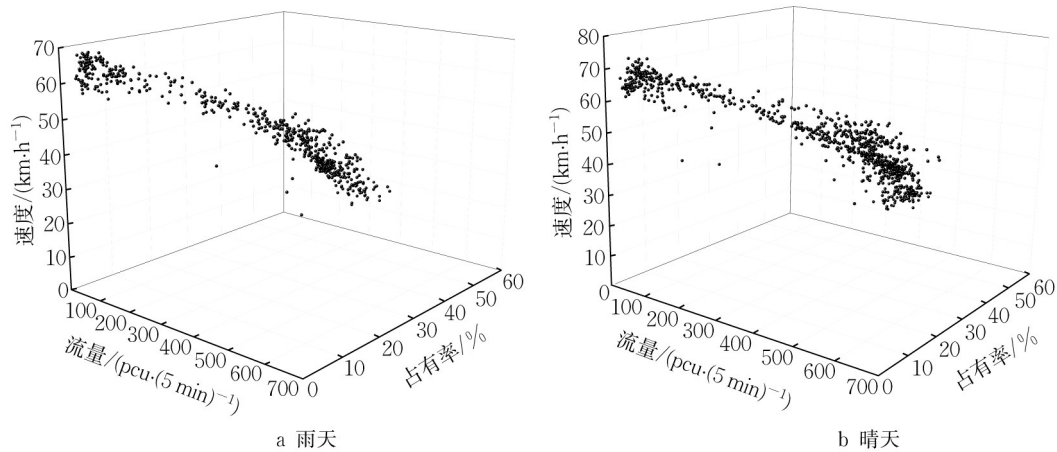


图 9 晴雨天环境下流量—速度—占有率关系

Fig. 9 Relationship among flow, speed, and occupancy on rainy and sunny days

交通流速度参数平均值分别为 $47.8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $46.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 结合雨天快速路交通参数时间序列变化特征, 将雨天瓶颈失效识别的阈值定为速度 $45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、占有率 20%。图 10 为瓶颈断面在 10 月

16 日雨天的速度和占有率时序图, 识别出当天出现 5 次瓶颈失效状态。

图 11 反映了雨天环境下考虑双通行能力下的期望通行能力和极值通行能力的关系, 其中 C_M 表示

表 4 快速路极值通行能力与服务水平关系
Tab. 4 Relationship between extreme capacity and LOS

天气	日期	极值通行能力/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$)	极值对应速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	极值对应占有率/%	饱和度	服务水平等级
雨天	10-16	1 703.50	34.78	33.11	0.81	3级
	10-11	1 715.00	44.07	25.44	0.82	3级
	平均值	1 709.25	39.43	29.28	0.81	3级
晴天	10-23	1 850.50	52.36	23.56	0.88	4级
	10-30	1 948.50	50.85	24.78	0.93	4级
	10-18	1 774.00	55.60	20.78	0.84	4级
	平均值	1 857.75	52.94	23.04	0.88	4级

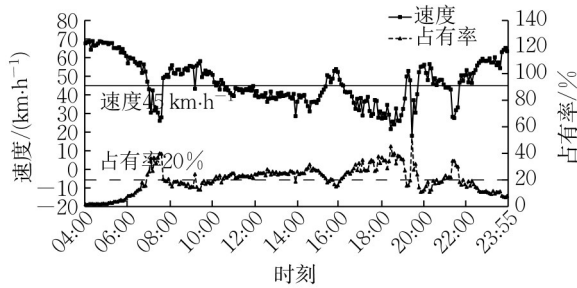


图 10 雨天瓶颈失效识别

Fig. 10 Identification of bottleneck breakdown on rainy days

极值通行能力, C_{PQF} 表示失效前通行能力, C_{QDF} 表示失效后通行能力, QDF 显著高于 PQF, 存在早发性失效现象, 与文献[10]得到的结论一致。

对雨天、晴天环境下快速路期望通行能力、极值通行能力和服务水平的分析如表 5 所示, 结果表明: 一方面, 雨天环境下 QDF 与极值通行能力更接近, 且雨天与晴天的 PQF、QDF 平均分别相差 $106.5 \text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$ 、 $132.5 \text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$ 。另一方面, 以现行规范中服务水平等级划分标准, 在 PQF 和 QDF 下的饱和度接近且服务水平等级相同, 然而交通流量达到 QDF 时已发生运行失效, 其对应的速度和占

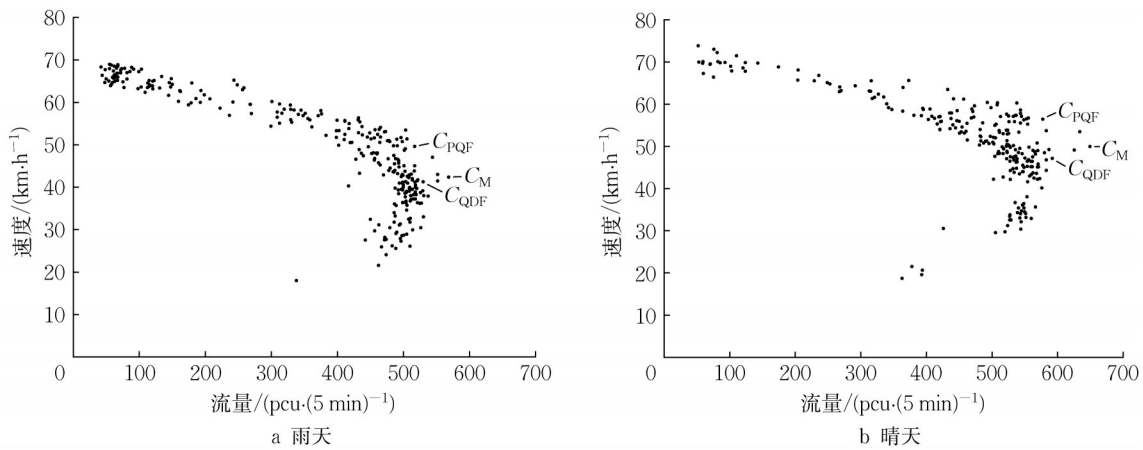


图 11 晴雨天环境下瓶颈失效与双通行能力

Fig. 11 Bottleneck breakdown and dual capacity phenomenon on rainy and sunny days

表 5 快速路期望通行能力与服务水平关系
Tab. 5 Analysis of expected capacity and LOS

天气	日期	通行能力/ $(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1})$			服务水平			
		C_{PQF}	C_{QDF}	C_M	PQF		QDF	
					车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	饱和度	车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	饱和度
雨天	10-16	1 551.00	1 590.00	1 703.50	49.59	0.74	41.25	0.76
	10-11	1 617.00	1 677.00	1 737.00	51.69	0.77	44.39	0.80
	平均值	1 584.00	1 633.50	1 720.25	50.64	0.75	42.82	0.78
晴天	10-23	1 717.50	1 771.50	1 580.50	55.58	0.82	47.80	0.84
	10-30	1 663.50	1 761.00	1 948.50	55.26	0.79	49.24	0.84
	10-18	1 690.50	1 765.50	1 774.00	53.16	0.81	45.99	0.84
	平均值	1 690.50	1 766.00	1 857.75	54.67	0.81	47.68	0.84

有率与失效前有较大差距,实际服务水平明显降低了。表明饱和度指标并不适用于发生运行失效后通行能力与服务水平对应关系划分,还需要综合考虑速度和占有率参数。

3.3 运行通行能力

在运行通行能力研究中,将畅通时的运行通行能力等效于PQF,将拥堵时的运行通行能力离散为不同拥堵程度下的拥挤消散流率(Congestion Discharge Flow, CDF)^[12]。

CDF可以根据速度或占有率进行区间划分,为了更准确地描述通行能力与服务水平之间的关系,以速度进行分组,将瓶颈失效前作为一组,瓶颈失效后以每 $5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度值为间隔划分。根据实测数

据,分别得到雨天和晴天的运行通行能力及对应占有率如表6和表7所示。结果表明,在发生瓶颈失效前雨天和晴天的PQF相差6%,在发生失效后CDF差异更大,最大达到11%。

可见,运行通行能力分析可得到不同速度区间下的拥挤消散流率,初步反映了运行失效后通行能力与服务水平之间的关系。但这一分析是以主观的速度划分为前提的,仍缺乏对运行失效前后的整合分析,缺乏基于实际检测数据对服务流率与服务水平之间关系的客观分析,无法指导交通管控实践。因此,在实测交通流数据的基础上,亟需采用合理的解析模型描述快速路运行失效前后服务流率与服务水平之间的关系,据此得到最佳服务流率。

表6 雨天快速路运行通行能力与对应占有率

Tab. 6 Operational capacity and corresponding occupancy on rainy days

流率	速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	通行能力/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$)			占有率/%	
		平均值	最小值	最大值	平均值	区间
PQF	> 45	1 584.00	1 551.00	1 617.00	13.89	1.33 ~ 24.00
	40 ~ 45	1 539.50	1 251.00	1 737.00	23.96	21.33 ~ 26.67
	35 ~ 40	1 530.50	1 447.50	1 669.50	26.25	23.67 ~ 32.00
CDF	30 ~ 35	1 520.75	1 350.00	1 711.50	32.98	28.67 ~ 36.67
	25 ~ 30	1 456.50	1 327.50	1 542.00	35.24	34.00 ~ 40.00
	20 ~ 25	1 294.25	1 123.50	1 422.00	45.00	40.00 ~ 53.00
	15 ~ 20	1 118.25	1 014.00	1 222.50	48.17	42.33 ~ 54.00
	10 ~ 15	1 118.25	1 014.00	1 222.50	48.17	42.33 ~ 54.00

表7 晴天快速路运行通行能力与对应占有率

Tab. 7 Operational capacity and corresponding occupancy on sunny days

流率	速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	通行能力/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1}$)			占有率/%	
		平均值	最小值	最大值	平均值	区间
PQF	> 50	1 690.50	1 663.50	1 717.50	13.91	1.33 ~ 31.33
	45 ~ 50	1 641.50	1 446.00	1 948.50	22.71	20.33 ~ 25.67
	40 ~ 45	1 647.25	1 375.50	1 764.00	25.07	20.33 ~ 30.33
	35 ~ 40	1 608.00	1 234.50	1 746.00	29.08	23.67 ~ 33.00
CDF	30 ~ 35	1 553.75	1 278.00	1 680.00	34.17	29.67 ~ 42.00
	25 ~ 30	1 453.25	1 300.50	1 608.00	37.27	32.33 ~ 44.00
	20 ~ 25	1 258.75	1 134.00	1 359.00	44.33	37.33 ~ 50.33
	15 ~ 20	1 134.00	1 179.00	1 089.00	51.00	48.33 ~ 53.67
	10 ~ 15	1 134.00	1 179.00	1 089.00	51.00	48.33 ~ 53.67

4 晴雨天环境下快速路服务流率与服务水平关系建立

考虑到服务流率与服务水平并不是单值对应的关系,可利用真实交通流数据通过聚类算法表达两者之间的对应关系。聚类算法是一种无监督学习模式,可以根据样本数据内部的相互关系将相似度高的样本划分在同一簇,差别较大的划分到不同簇^[17-18],既反映出样本之间的联系,又不改变原始数据的特征。因此,在对晴雨天极值通行能力、期望通

行能力和运行通行能力分析的基础上,加入速度和占有率,构建3维样本,建立聚类模型以解析快速路服务流率与服务水平关系。为提高聚类准确率,将运行失效前、后的样本分别聚类。

4.1 3维K-Means聚类模型构建

经典聚类算法中,K-Means聚类算法具有鲁棒性高且收敛快的特点,适用于本文的小样本数据,且本文同时考虑交通流的流率(q_i)、速度(s_i)和占有率(o_i)3个参数分布特征,构建3维样本,故选用3维K-Means聚类算法解析快速路服务流率与服务水平关

系。在 3 维 K-Means 聚类模型中,对于给定容量为 n 的样本集 $D = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 将搜寻一个分为 k ($k \leq n$) 簇的最优簇划分 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$,使所有样本点到所在簇质心距离的误差平方和(sum of squared error, SSE)最小。

在 3 维样本 $X_i = [q_i, s_i, o_i]$ 中,由于流率(q_i)、速度(s_i)和占有率(o_i) 3 个指标的量纲差距较大,需要分别进行归一化处理,将数据映射到 $[0, 1]$ 之间。计算如式(1)所示:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, x'_i \in [0, 1] \quad (1)$$

式中: x'_i 为映射后的参数值; x_i 为原始参数值; x_{\min} 为参数值中的最小值; x_{\max} 为参数值中的最大值。

K-Means 聚类算法的第 1 步需要先选定 k 值。通过计算轮廓系数(silhouette coefficient)和误差平方和,并结合 3 维样本数据特征,寻找最佳簇数 k 值。

轮廓系数取值范围为 $[-1, 1]$,其值越大表示聚类效果越好,计算如式(2)所示:

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i = \frac{Y_i - W_i}{\max\{Y_i, W_i\}} \quad (2)$$

式中: L 为整体聚类结果的平均轮廓系数; n 为样本集的样本总个数; L_i 为第 i 个样本的轮廓系数; W_i 为样本 i 与同簇其他样本之间的平均距离,也称簇内不相相似度; Y_i 为样本 i 与不同簇内各样本之间的平均距离的最小值,也称簇间不相相似度。

误差平方和是对簇相似度的衡量,采用欧氏距离进行相似度度量,计算如式(3)所示:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{X_i \in g_k} \|X_i - m_k\|^2 \quad (3)$$

式中: g_k 为第 k 个簇; X_i 为簇 g_k 中第 i 个样本点; m_k 为簇 g_k 的质心,即聚类中心。

分别对雨天和晴天发生运行失效前、后的样本数据进行计算,得到 k 为 2~8 时的轮廓系数和 SSE 分别如图 12 和图 13 所示。

根据轮廓系数和 SSE 的计算结果可知,在雨天,虽然 $k = 2$ 时轮廓系数最大,但其 SSE 也最大,且类别单一并不能较好地反映快速路服务流率与服务水平之间的关系。失效前 $k = 4$ 时和失效后 $k = 5$ 时轮廓系数较高,且 SSE 处于拐点数值较小,聚类效果更优。在晴天,失效前 $k = 4$ 时轮廓系数较大,且 SSE 处于拐点数值较小,失效后 $k = 6$ 时轮廓系数最大,且 SSE 处于拐点,故选定雨天失效前后的 3 维 K-Means 聚类簇数分别为 4、5,晴天是 4、6。

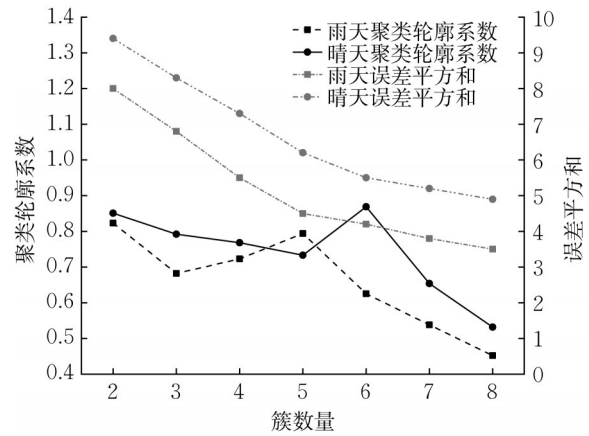


图 12 运行失效前的聚类轮廓系数与误差平方和

Fig. 12 Silhouette coefficient and SSE before bottleneck breakdown

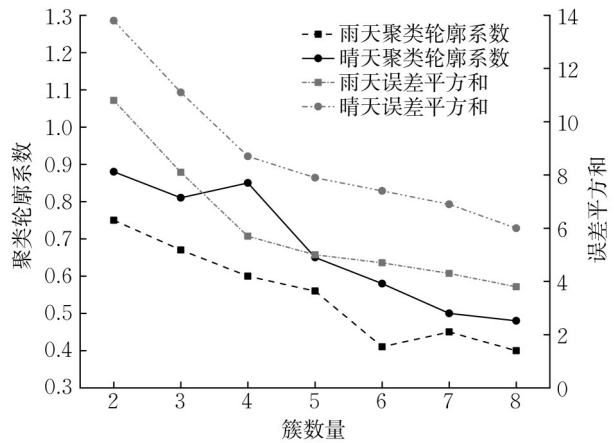


图 13 运行失效后的聚类轮廓系数与误差平方和

Fig. 13 Silhouette coefficient and SSE after bottleneck breakdown

4.2 服务流率与服务水平关系

基于线圈检测数据获得雨天运行失效前 295 个样本、失效后 281 个样本以及晴天运行失效前 398 个样本、失效后 322 个样本。利用确定好的 3 维 K-Means 聚类模型分析,聚类结果如图 14 和图 15 所示。

为使关系模型更加清晰直观,对聚类结果中的各簇内样本进行整理,得到设计速度 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的单向 4 车道城市快速路服务流率与服务水平关系模型如表 8 和表 9 所示。

表 8 和表 9 建立了运行失效前后服务流率与服务水平对应关系,从雨天和晴天环境下的服务流率与服务水平关系分析,可得出最佳服务流率应取运行失效前的稳定流率 PQF 值,以该值进行精细化交通管控将既能充分利用道路资源还能保障交通处于较高的服务水平。同时还存在:①在相同服务水平

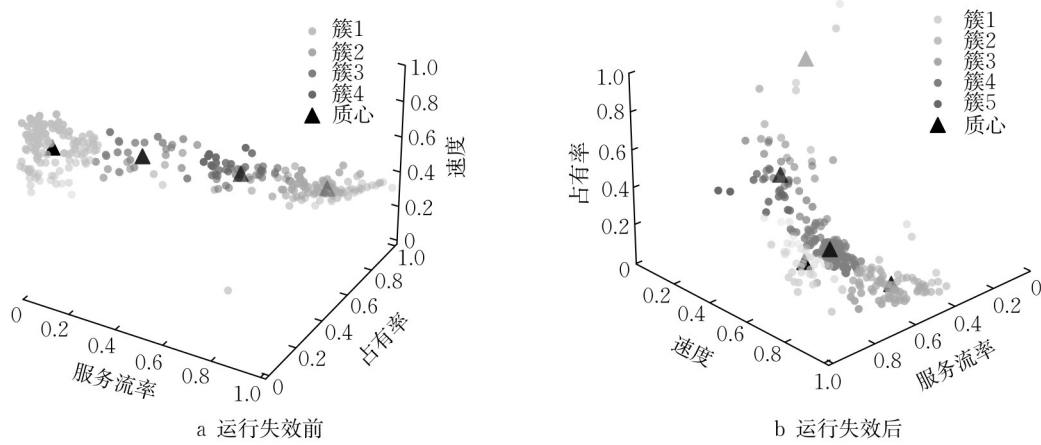


图 14 雨天聚类结果

Fig. 14 Clustering results on rainy days

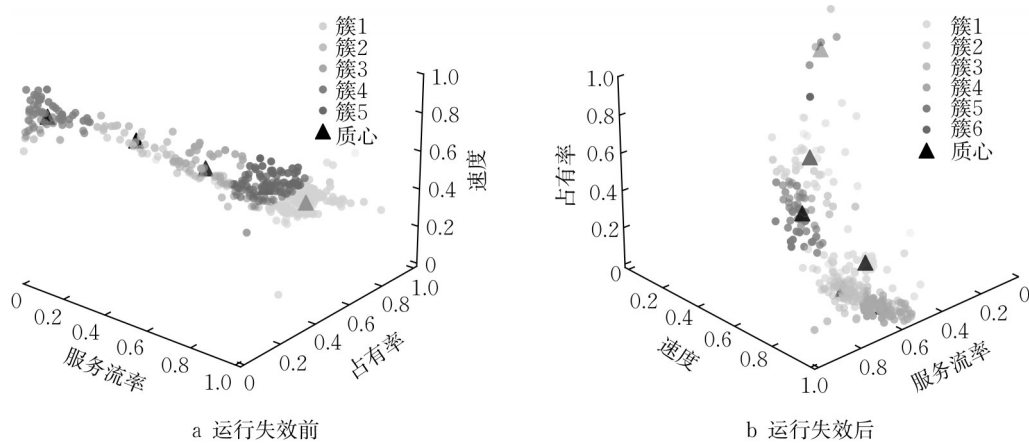


图 15 晴天聚类结果

Fig. 15 Clustering results on sunny days

表 8 雨天环境下服务流率与服务水平关系

Tab. 8 Relationship between flow rate and LOS on rainy days

交通状态	速度/(km·h ⁻¹)	占有率/%	服务流率/(pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)	饱和度	服务水平
失效前	≥65	≤4	≤433	< 0.21	1级
	60~65	4~8	433~804	0.21~0.38	2级
	55~60	8~15	804~1 231	0.38~0.58	2级
	45~55	15~20	1231~1 665	0.58~0.79	3级
PQF	50.64	13.89	1 584	0.75	3级
失效后	40~45	20~25	1 251~1 737		
	35~40	25~30	1 448~1 670		
	30~35	30~35	1 350~1 712		
	25~30	35~40	1 328~1 542		
	≤25	≥40	≤1 328		

下,雨天的服务流率明显低于晴天,且雨天和晴天的最佳服务流率存在显著差别。②在运行失效前,随着服务流率的增加,快速路服务水平逐渐降低;运行失效后,服务流率的变化不能反应真实服务水平,以速度和占有率综合考虑作为评价指标将更加准确。因此,为兼顾交通运行效率和保障驾驶员获得期望

服务水平,城市快速路应选择最佳服务流率用于精细化的主动交通管控措施,而不能仅强调通行能力。

由失效前的聚类结果与现行规范中服务水平划分标准(V/C)对比可知,聚类结果可呈现更加精细化的服务流率与服务水平关系,并补充了失效后二者之间的对应关系。研究成果克服了以往仅采用饱

表 9 晴天环境下服务流率与服务水平关系
 Tab. 9 Relationship between flow rate and LOS on sunny days

交通状态	速度/(km·h ⁻¹)	占有率/%	服务流率/(pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)	饱和度	服务水平
	≥70	≤7	≤687	< 0.34	1级
失效前	60~70	7~15	687~1 264	0.34~0.60	2级
	55~60	15~20	1 264~1 621	0.60~0.77	3级
	50~55	20~30	1 621~1 941	0.77~0.92	3至4级
	PQF	54.67	13.91	1 691	0.80
失效后	45~50	20~25	1 446~1 948		
	40~45	25~30	1 375~1 764		
	35~40	30~35	1 235~1 764		
	30~35	35~40	1 278~1 680		
	25~30	40~45	1 301~1 608		
	≤25	≥45	≤1 301		

和度描述失效前后服务水平、侧重最大通过量的缺陷。

5 结语

城市中心区快速路由于交通需求高,往往呈现长时间、高饱和度下的缓慢通行状态,不仅未能发挥其快速通行功能,服务交通量也明显下降。如果碰上雨天,其服务水平和交通量更是大打折扣。为此,首先分析了城市快速路雨天、晴天环境下的流率、速度、占有率的分布特征及其显著差异性,并指出以往通行能力分析仅强调最大通过量而对发生交通失效后表达不准确的局限性,明确了兼顾一定运行车速且最大化服务交通量的学术思想,据此提出了最佳服务流率的概念及其确定方法。利用线圈检测数据,建立了雨天和晴天环境下综合流量—速度—占有率的 3 维 K-Means 聚类模型,可综合考虑雨天、晴天及运行失效前后的运行特征,阐释了服务流率和服务水平的对应关系,并给出了最佳服务流率的确定方法。研究成果可为城市快速路精准化交通管理提供参考和依据。主要结论归纳如下:

(1)雨天快速路的流量和速度明显低于晴天,断面流量低约 7%~19%,车速低约 7%~17%,K-S 检验表明了上述差异的显著性。

(2)对雨天和晴天环境下快速路极值通行能力、期望通行能力和运行通行能力进行估算,结果表明,雨天的极值通行能力低于晴天,在运行失效前低于晴天 6%,在运行失效后较晴天降低约 11%。以现行规范标准中的饱和度(V/C)对雨天交通流尤其是运行失效后的交通流的服务水平分析,与实际交通状态脱节严重。

(3)以流率、速度和占有率三参数构建 3 维聚

类,进行 3 维 K-Means 聚类,得到雨天、晴天交通运行状态聚类,建立晴天和雨天环境下快速路服务流率和服务水平的关系模型,研究成果弥补了运行失效后饱和度不能准确反映服务水平的不足,且能综合考虑期望的运行车速和最大的服务交通量,可为快速路精准化交通管控提供参考。

(4)提出最佳服务流率的概念及其确定方法,指出运行失效前的最大服务流率可作为快速路最佳服务流率,且综合考虑了期望运行车速和最大服务交通量,研究成果可为快速路主动型精准化交通管理策略(高乘载专用道、预约出行)提供参考。

作者贡献声明:

云美萍:总体框架,论文审阅与修改。
 杨书敏:论文写作,模型构建,数据分析。
 沈峰:数据提供,数据分析。
 李富香:数据分析。
 赵晓敏:数据分析。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway Capacity manual 2010 [M]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- [2] BILLOT R, EL FAOUZI N E, DE VUYST F. Multilevel assessment of the impact of rain on drivers' behavior [J]. Transportation Research Record, 2009, 2107(1): 134.
- [3] 张存保,万平,梅朝辉,等.雨天环境下高速公路交通流特性及模型研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(3):63-67.
 ZHANG Cunbao, WAN Ping, MEI Zhaohui, et al. Traffic flow characteristics and models of freeway under rain weather [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(3): 63.
- [4] 杨晓光,赵靖,马万经,等.信号控制交叉口通行能力计算方法研究综述[J].中国公路学报,2014,27(5):148.
 YANG Xiaoguang, ZHAO Jing, MA Wanjing, et al. Review on calculation method for signalized intersection capacity [J].

- China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 148.
- [5] 孙剑, 胡家琦, 孙杰. 城市快速路交织区通行能力估计模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 114.
SUN Jian, HU Jiaqi, SUN Jie. Capacity estimation model on weaving segments of urban expressway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 114.
- [6] ZHENG J, SUN J, YANG J. Relationship of lane width to capacity for urban expressways [J]. Transportation Research Record, 2015, 2483(1): 10.
- [7] 周荣贵, 钟连德. 公路通行能力手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
ZHOU Ronggui, ZHONG Liande. China highway capacity manual [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd. 2017.
- [8] ZHANG L, LEVINSON D. Some properties of flows at freeway bottlenecks [J]. Transportation Research Record, 2004, 1883(1): 122.
- [9] SUN J, MA Z, CHEN X. Some observed features of traffic flow phase transition at urban expressway diverge bottlenecks [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2018, 6(4): 320.
- [10] 孙剑, 张娟. 城市快速路瓶颈交通流失效生存分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 530.
SUN Jian, ZHANG Juan. Survival analyses of traffic flow breakdown at urban expressway bottlenecks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(4): 530.
- [11] 孙剑, 郑进炫. 城市快速路通行能力再认识与新分析体系构建[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 127.
SUN Jian, ZHENG Jinxuan. Revisit of capacity model and reconstruction of capacity analysis framework at urban expressway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5): 127.
- [12] WU X, MICHALOPOULOS P, LIU H X. Stochasticity of freeway operational capacity and chance-constrained ramp metering [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 741.
- [13] YUWEI B, QIU T Z, CAN Z, *et al.* Introducing weather factor modelling into macro traffic state prediction [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017(1): 4879170.
- [14] MAZE T H, AGARWAL M, BURCHETT G. Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow [J]. Transportation Research Record, 2006, 1948(1): 170.
- [15] 杨中良, 林瑜, 高霄. 恶劣天气条件下城市快速路通行能力研究[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(1): 75.
YANG Zhongliang, LIN Yu, GAO Xiao. Urban expressway capacity under adverse weather conditions [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010, 28(1): 75.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban road engineering: CJJ 37—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [17] 刘继新, 董欣放, 徐晨, 等. 基于密度峰值的终端区航迹聚类与异常识别[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 214.
LIU Jixin, DONG Xinfang, XU Chen, *et al.* Aircraft trajectory clustering in terminal area and anomaly recognition based on density peak [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 214.
- [18] 纪少波, 张珂, 李伦, 等. 基于纯电动汽车高频数据的驾驶风格分类方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 273.
JI Shaobo, ZHANG Ke, LI Lun, *et al.* Driving style classification method based on high-frequency data from pure electric vehicles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(2): 273.