

中文引用格式:黄鲜,嵇涛,邓社军,等.城市公交系统运行韧性测度及时空演变分析[J].中国安全科学学报,2025,35(10):166-173.

英文引用格式:HUANG Xian, JI Tao, DENG Shejun, et al. Operational resilience measurement and spatio-temporal evolution analysis of urban bus systems[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(10):166-173.

城市公交系统运行韧性测度及时空演变分析^{*}

黄鲜¹, 嵇涛^{**1,2}副教授, 邓社军¹教授, 于世军¹副教授,
诸云强²研究员, 邵进亮¹

(1 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127;

2 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1431

基金项目:江苏省基础 Research 计划(青年基金资助)(BK20210833);中国博士后科学基金面上项目资助(2021M703175);江苏省高校哲学社会科学研究基金资助(2024SJYB1515);江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23 1966)。

【摘要】 为刻画不同降雨强度下的城市公交系统性能曲线,构建城市公交系统运行韧性测度模型,以扬州市主城区公交系统为案例,分析不同区域公交线网运行韧性以及公交线路运行韧性测度结果,并基于上述韧性测度结果进一步量化不同等级韧性下公交站点的运行状态,厘清公交网络-线路-站点运行韧性时空演变的特征。结果表明:在降雨事件中,城市公交系统在不同区域的公交线网表现出不同的性能扰动,不同区域公交系统的吸收、恢复、适应能力不同,公交运行韧性表现出明显的空间异质性,早高峰叠加强降雨事件对公交运行韧性的影响较为显著;在不同强度降雨事件下,公交线路在不同区域的运行韧性表现不同,且不同等级韧性对公交站点影响具有显著差异,尤其是在低等韧性下,公交站点可靠性下降(站时间间隔增加、站点准时度下降)。

【关键词】 降雨强度; 城市公交系统; 运行韧性测度; 系统性能; 时空演变

Operational resilience measurement and spatio-temporal evolution analysis of urban bus systems

HUANG Xian¹, JI Tao^{1,2}, DENG Shejun¹, YU Shijun¹, ZHU Yunqiang²,
SHAO Jinliang¹

(1 College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127, China; 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To characterize the performance curve of urban bus systems under different rainfall intensities, a resilience measurement model for urban bus system operations was constructed. Taking the bus system in the main urban area of Yangzhou as a case study, the operational resilience of transit networks across different regions and individual routes were analyzed. Building upon aforementioned

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0166-08; 收稿日期:2025-04-17; 修稿日期:2025-07-29

** 通信作者:嵇涛(1988—),男,江苏扬州人,博士,副教授,主要从事交通大数据分析建模、城市灾害应急救援与辅助决策等方向的研究。
E-mail:jitao@yzu.edu.cn。

resilience measurement results, the operational status of bus stops under different resilience levels was further quantified. The spatio-temporal patterns of resilience evolution within the integrated "network-route-stop" hierarchy were elucidated. The results show that during rainfall events, urban bus systems exhibit varying performance disturbances across different regions. The variations in the absorption, recovery, and adaptation capacities of bus systems across different regions, significant spatial heterogeneity in resilience is observed, resulting in pronounced spatial heterogeneity in operational resilience. The combined effect of morning peak hours and extreme rain events has a notable impact on bus operational resilience. It is also found that the operational resilience of bus routes varies across different regions under rainfall events of varying intensity, and different levels of resilience lead to significant differences in the performance losses of bus stops. Notably, under low resilience conditions, the reliability of stops decreases (an increase in arrival intervals and a decrease in stop punctuality).

Keywords: rainfall intensity; urban bus system; operational resilience measurement; system performance; spatio-temporal evolution

0 引 言

城市公交系统具有便捷、低成本和运载能力大等特点,是城市重要的生命线工程,对支撑和影响城市空间活动和城市功能发挥着基础保障作用^[1]。然而,近年来,多起极端灾害事件对城市公交系统产生了诸如交通拥堵、道路阻断等风险,甚至导致整个城市公交系统运输能力丧失^[2-3]。韧性是衡量城市公交系统在灾害下的抗干扰能力和恢复能力的重要性能指标,为公交的安全管理提供了新的思路。因此,研究极端灾害事件下城市公交系统的韧性,系统分析极端灾害事件下城市公交系统运行的关键节点和韧性时空演变特征,对保障城市公交安全运营及防灾减灾具有重要意义。

国内外有关公共交通系统韧性评估的研究中,存在着鲁棒性^[4-5]、脆弱性^[6-8]、可靠性^[9]和冗余性^[10]等多个概念的单一韧性测度指标,难以全面衡量公交系统网络韧性的变化情况;而且灾害事件对城市公交系统的影响是持续性、长期性、动态性和周期性的,不仅需要研究城市公交系统的性能损失过程,其扰动后的恢复过程也应进一步研究。其次,在公交系统韧性研究中,目前主要通过制定随机攻击和蓄意攻击策略模拟极端灾害事件对城市公交系统的不同扰动情景^[11],鲜有结合实时灾害信息和公交系统现状,量化极端灾害事件影响公交系统时空特征的研究。另外,现有研究多集中于评估单一模式网络的脆弱性和韧性,但随着公共交通系统的发展,研究逐渐转向多模式网络韧性分析^[12],但无论是单一方式交通网络模型,还是多模式交通网络模型,上述研究多侧重于分析交通网络的物理结构特

征,忽略了公共交通在网络-线路-站点上的空间异质性。

鉴于此,笔者拟从韧性概念出发,定义城市公交系统的运行韧性,综合构建城市公交系统运行韧性测度模型,分析不同区域公交系统线网运行韧性以及公交线路运行韧性测度结果,揭示公交系统运行韧性时空演变全过程的异质性,并量化不同等级韧性下公交站点运行的特点,厘清公交系统网络-线路-站点运行韧性演变的时空特征。

1 城市公交系统运行韧性测度模型

1.1 公交系统运行韧性测度指标选取

将暴雨事件下的城市公交系统韧性定义为:公交系统在面对暴雨事件时,能够保持正常运行,并且在遭受破坏或中断后能够快速恢复和调整以满足城市居民出行需求的能力。同时,提出一个适用于城市公交系统运行的韧性评估框架,即城市公交系统在面对各种突发事件、压力或干扰时,利用系统性能曲线刻画公交系统(公交站点(节点)-线路(连边)及其组成的整体公交网络)对比分析应急场景下吸收阶段、恢复阶段、适应阶段的曲线与正常情况下系统性能曲线,测度公交系统的运行韧性,在传统的韧性三角形理论上,提出暴雨天气下城市公交系统性能演变曲线(图 1),研究不同强度降雨事件下公交系统对其吸收、恢复和适应的能力。图 1 中,性能 P (Performance) 表示降雨条件下的城市公交系统线网性能,取值范围为 $[0, 1]$; t_0 为事件开始时间, h ; t_1 为性能扰动开始时间(即系统性能首次下降到 0.95 以下的时刻), h ; t_2 为性能扰动最低点对应的

时间, h ; t_3 为性能扰动结束时间(在扰动发生后的1天内性能值恢复并维持在0.95以上的第1个时间点), h 。

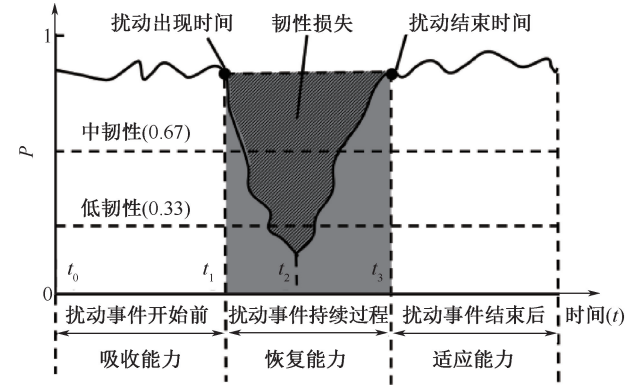


图1 暴雨事件下城市公交系统运行性能曲线

Fig.1 Urban bus system operational performance curve under heavy rain events

选取公交的运行速度作为系统性能的评价指标,选择能够反映公交系统减缓各种干扰事件的影响而维持自身功能的能力,同时能够反映公交系统功能损失的程度、事件的干扰程度,以及公交系统恢复正常功能所需的时间(即初始平衡—相对不平衡—不平衡—动态平衡—恢复平衡)的性能指标^[5]:系统韧性损失强度(Loss of Resilience, LR)、系统扰动时间(Disturbance Time, DT)、系统响应时间(Destructive Phase Time, DPT)、系统响应速率(Destructive Phase Speed, DPS)、系统恢复时间(Recovery Phase Time, RPT)、系统恢复速率(Recovery Phase Speed, RPS),使用这6个指标共同测度不同降雨事件下公交系统的运行韧性(R)。

基于韧性三角形精准刻画公交系统韧性的动态演变特征,通过定量测度降雨事件跟周期性事件(如早晚高峰拥堵)所形成的公交系统运行韧性,分析公交系统在不同降雨强度下的动态韧性时空演变特征。

1.2 城市公交系统运行韧性测度

1.2.1 公交系统性能计算模型

采用每个时刻下城市公交系统路网的相对速度(空间平均车速与路网自由流速度的比值)表示该时刻下的线网性能。空间平均车速、路网自由流速度计算公式如下:

$$V_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_a(i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$V_s = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k V_i(j), j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

式中: V_t 为每条公交线路的时间平均运行速度, km/h ; $V_a(i)$ 为每辆公交车的轨迹点速度, km/h ; n 为每条公交线路的车辆数; k 为每个区域的公交线路数; V_s 为区域公交路网的空间平均车速, km/h ; V_l 为城市道路的自由流速度,选取城市路网每日所有速度的第95分位数^[13]作为自由流速度。

城市公交系统在不受干扰时,系统性能处于稳定的动态均衡状态,因此,本文将无雨事件下的公交系统性能(P)作为系统在暴雨影响下的基准性能, P' 表示暴雨事件下的公交系统性能; V_a' 、 V_t' 、 V_s' 分别为暴雨事件下每辆公交车的轨迹点速度、每条公交线路的时间平均运行速度、区域公交路网的空间平均车速, km/h 。 P 、 P' 的计算如下:

$$P = \frac{V_s}{V_l} \quad (3)$$

$$P' = \frac{V_s'}{V_l'} \quad (4)$$

1.2.2 公交系统运行韧性测度模型

基于韧性三角形的概念,结合刻画的系统性能曲线以及选取的韧性测度指标,构建城市公交系统运行韧性测度模型如下:

$$LR = \int_{t_1}^{t_3} [P - P'] dt \quad (5)$$

$$DT = t_3 - t_1 \quad (6)$$

$$DPT = t_2 - t_1 \quad (7)$$

$$DPS = \frac{P'(t_2) - P'(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

$$RPT = t_3 - t_2 \quad (9)$$

$$RPS = \frac{P'(t_3) - P'(t_2)}{t_3 - t_2} \quad (10)$$

$$R = \frac{\int_{t_1}^{t_3} P' dt}{\int_{t_1}^{t_3} P dt} \quad (11)$$

式中: $P'(t_1)$ 、 $P'(t_2)$ 、 $P'(t_3)$ 分别为公交系统受暴雨事件影响在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻对应的性能。LR 的值越大, R 越小。 R 分为低等韧性 $[0, 0.33]$ 、中等韧性 $(0.33, 0.67]$ 、高等韧性 $(0.67, 1]$ 3个等级。

2 城市公交系统运行韧性时空演变分析

为进一步测度降雨事件下城市公交系统的韧性,验证前文提出的城市公交系统运行韧性测度方法的有效性,以扬州市主城区为例,选取公交车全球定位系统轨迹数据、降雨数据及路网数据构

建研究数据集,同时选择 2023 年 10 月 5 日(降雨量为 68 mm)作为暴雨事件案例,2023 年 7 月 7 日(降雨量为 175 mm)为特大暴雨事件案例,并选取 2023 年 10 月 15 日作为无雨事件案例进行对比分析。

2.1 公交线网运行韧性测度结果及分析

2.1.1 公交系统线网性能变化分析

选择京华城、万达广场、瘦西湖和荷花池为典型职住小区^[14],圈定周边的公交线网进行降雨事件下运行韧性分析。

根据京华城、万达广场、瘦西湖、荷花池这 4 个区域在 6:00—22:00 期间不同降雨事件下的公交线网性能计算值(图 2),分别绘制出其在暴雨、特大暴雨事件下的运行韧性三角形,如图 3 和图 4 所示。图 3 和图 4 中,虚线面积与实线面积的比值为韧性值,阴影面积即为韧性损失值。同时,结合公交系统运行韧性测度模型,测度公交线网运行韧性(表 1、表 2)。比较表 1、表 2 中韧性的相关指标可以发现,不同区域公交线网在不同降雨强度条件下性能曲线所测度的系统韧性存在一定差异。在无雨事件下,京华城、万达广场、瘦西湖、荷花池这 4 个区域所处的公交线网运行韧性分别为 0.93、0.92、0.94、0.94,公交系统运行状况良好。在暴雨事件下,荷花池、瘦西湖、京华城、万达广场所在的公交线网平均运行韧性较无雨情况分别下降 6.38%、5.31%、1.07%、2.17%。在特大暴雨事件下,荷花池、瘦西湖、京华城、万达广场所在的公交线网平均运行韧性较无雨情况分别下降 32.97%、10.63%、27.95%、30.48%。4 个地区的公交线网运行韧性在早晚高峰期间的下降最显著。在早晚高峰期间,与无雨事件相比,荷花池、瘦西湖、京华城、万达广场的韧性在暴雨事件下分别下降 20.65%、5.56%、15.68%、14.89%;在特大暴雨事件下分别下降 59.42%、29.37%、37.66%、43.67%。

表 1 暴雨事件下公交运行韧性测度结果

Table 1 Measurement results of bus operational resilience under heavy rain events

指标	地区			
	荷花池	瘦西湖	京华城	万达广场
R	0.88	0.89	0.92	0.90
LR	1.65	1.57	1.18	1.37
DT	7	6	6	5
DPT	3	3	3	3
RPT	4	3	3	2
DPS	-0.067	-0.059	-0.068	-0.057
RPS	0.054	0.049	0.048	0.072

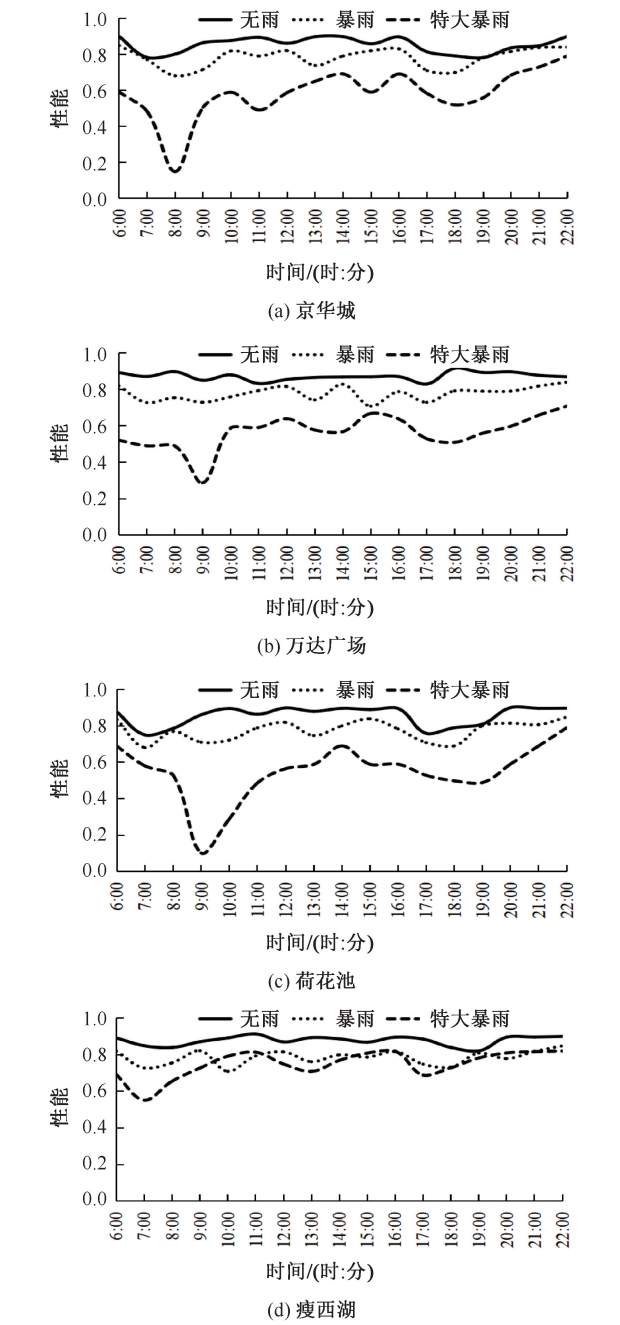


图 2 公交线网性能曲线

Fig. 2 Performance curve of bus system

表 2 特大暴雨事件下公交运行韧性测度结果

Table 2 Measurement results of bus operational resilience under extreme rain events

指标	地区			
	荷花池	瘦西湖	京华城	万达广场
R	0.63	0.84	0.67	0.64
LR	5.40	2.23	4.71	5.11
DT	14	8	12	11
DPT	8	4	7	6
RPT	6	4	5	5
DPS	-0.051	-0.093	-0.135	-0.098
RPS	0.124	0.051	0.111	0.112

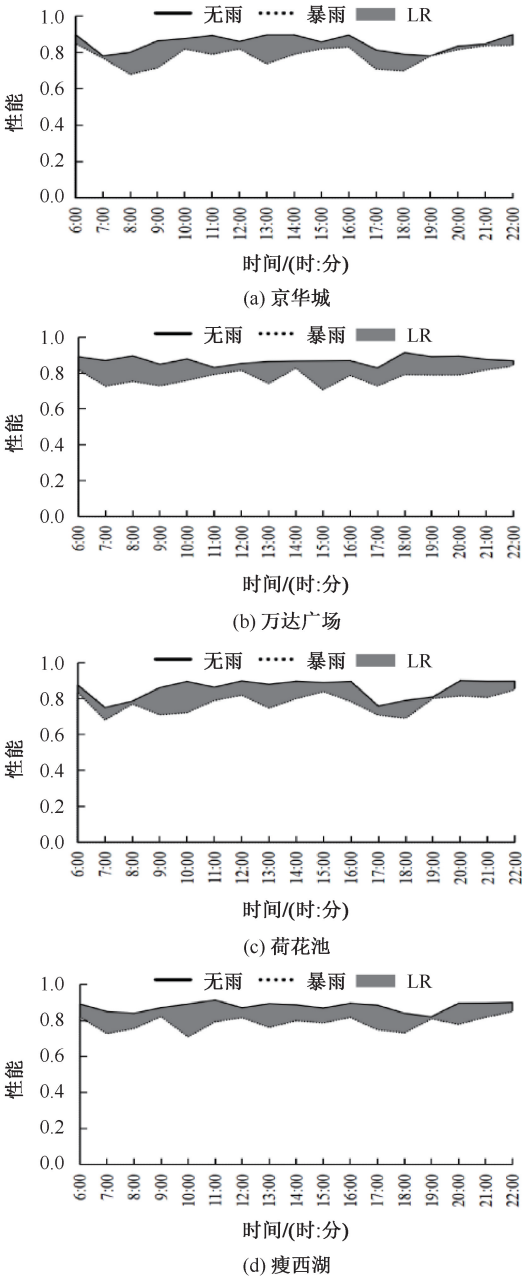


图3 暴雨事件下公交的运行韧性三角形
Fig.3 Operational resilience triangle of bus under heavy rain events

2.1.2 公交线网运行韧性测度结果分析

由表1可知:暴雨事件下荷花池、瘦西湖、京华城所在的公交线网受扰动后的响应速率均大于恢复速率;由表2可知:特大暴雨事件下荷花池、万达广场所在的公交线网受扰动后的恢复速率均大于响应速率。瘦西湖所在的公交线网运行韧性较高,韧性损失最少,荷花池所在的公交线网运行韧性损失最多。呈现上述差异的主要原因:一是降雨事件的影响。降雨对车辆行驶速度存在较大影响,而随着降

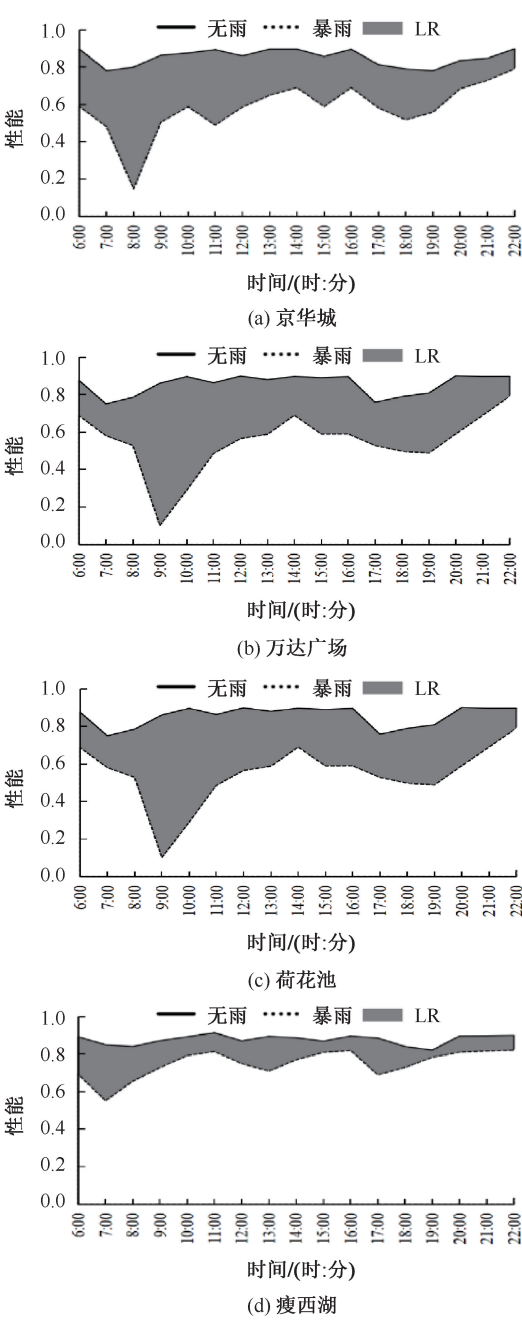


图4 特大暴雨事件下公交的运行韧性三角形
Fig.4 Operational resilience triangles of bus under extreme rain events

雨强度的增加,车辆的行驶速度逐渐下降;同时,由于部分区域排水功能不足会造成路面积水过深,导致道路丧失通行能力,进一步加剧局部拥堵。二是区域内公交资源分布。调查发现4个地区的公交站点数各不相同,从而影响公交线网的抵抗能力。三是职住空间分布。基于扬州市主城区的职住空间识别结果分析发现^[14],瘦西湖地区旅游休闲景点较多,随着降雨强度的增加,以游玩为目的的出行减少,交通压力有所缓解;荷花池地区的医疗教育类兴

趣点占比为 40%,居民通勤、上学和就医等必要出行需求较大,降雨事件的发生会导致居民出行时使用机动车的数量剧增,从而在一定程度上增加该区域的交通压力。

综上所述,在不同降雨强度下,城市公交系统在不同区域的公交线网表现出不同的性能扰动,并且随着降雨强度的增大,公交线网的性能波动范围逐渐变大,受扰动的时间逐渐变长,表现为城市公交线网的性能与降雨强度呈正相关。此外,从公交线网运行韧性的演变特征可以看出,瘦西湖所在的公交线网吸收能力最好,京华城、万达广场所在的公交线网恢复能力最好,且 4 个区域所在的公交系统线网性能均表现出较强的适应能力。

2.2 公交线路运行韧性测度结果及分析

由于公交线网层面分析容易忽略线路或者局部路段的运行韧性情况,为此文中选取途经京华城、瘦西湖、荷花池的 K1 路公交车来进一步测度分析公交线路的运行韧性。

2.2.1 公交线路运行韧性测度结果

不同降雨强度下 K1 路的性能曲线如图 5 所示,由图 5 可知:在不同降雨强度下,K1 路在不同区域的公交线路性能曲线各不相同,且早晚高峰期间波动最为显著。在特大暴雨事件中,K1 路在这 3 个区域的公交线路性能均有显著降低,其中在京华城路段的性能下降最显著,最低性能降到 0.15。

降雨事件下 K1 路在京华城、荷花池、瘦西湖的公交线路运行韧性计算结果见表 3。尽管在无雨和暴雨情况下 K1 路的运行韧性仍然保持在较高水平,但随着降雨强度的增加,公交线路的运行韧性下降速度加快。在暴雨事件下,K1 路在 3 个区域的运行韧性相比无雨事件下平均下降 9.7%;在特大暴雨事件下,相比无雨事件下平均下降 26%。其中,K1 路在荷花池路段相比无雨事件下降 37.6%,其运行韧性仅为 0.58,K1 路在此段受扰动最为显著;K1 路在荷花池路段受早晚高峰影响明显,韧性降低为 0.35,并存在 2.2 h 的中等韧性状态和 2 h 的低等韧性状态。

表 3 K1 路运行韧性测度结果

路段	天气		
	无雨	暴雨	特大暴雨
京华城	0.91	0.86	0.67
瘦西湖	0.93	0.84	0.80
荷花池	0.93	0.80	0.58

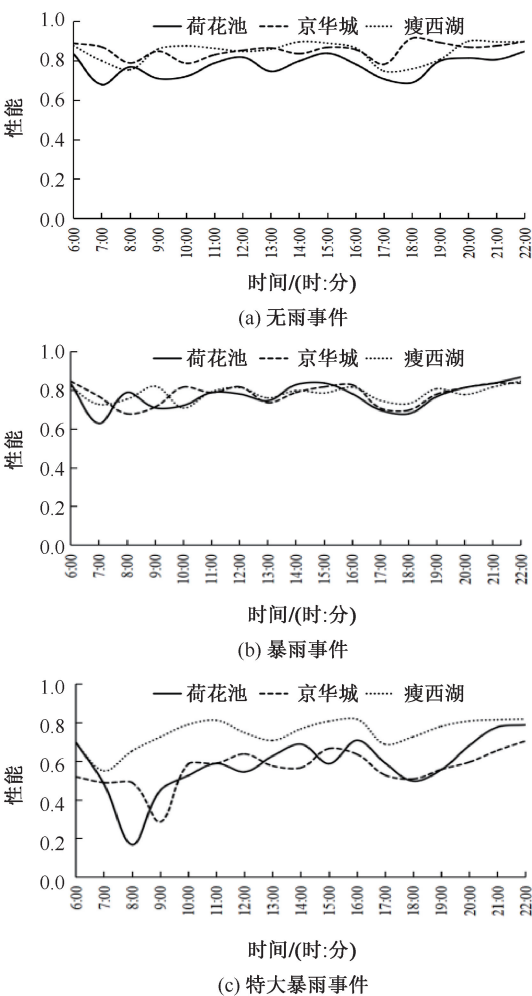


图 5 不同降雨强度下 K1 路的性能曲线
Fig. 5 Performance curves of Route K1 under different rainfall intensities

通过对比暴雨事件下不同区域 K1 的运行韧性,可以发现,随着降雨强度的增加,公交线路的运行韧性下降趋势更为明显,特别是在早高峰时段,公交线路的运行韧性下降速度加快,这可能与早高峰期间乘客数量增多、交通拥堵加剧等因素有关。

2.2.2 不同等级韧性对公交线路站点影响

为量化不同等级韧性对公交线路运行的影响,找出影响公交线路运行的关键节点,分别选取到站时间间隔(公交车到达线路各个站点的间隔时间)、站点准时度(衡量公交车能否准点到站)^[15]这 2 个关于用户服务层次的公交评价指标来进行研究。

研究发现,K1 路在高、中、低等韧性等级下的平均单程耗时分别为 82、87 和 108 min。K1 路在荷花池区域的公交站点分别是市政府、人民大厦、石塔寺、珍园、琼花观。对比 K1 路在低、中、高 3 个韧性等级下上述 5 个站点的运行评价结果(图 6 和图 7)

发现,在低等韧性水平下,K1路在早晚高峰及平峰期间的到站平均时间间隔分别增长84.4%、78%、50%。这表明随着韧性等级的降低,公交车到达站点的间隔时间延长,公交运行效率下降。此外,站点准时度在高等韧性下为92%,中等韧性下为85%,低等韧性下为70%。准时度的下降说明公交车在低韧性等级下更难以保持公交系统的正常运营,反映出不同强度降雨事件对公交站点的韧性影响具有显著差异。

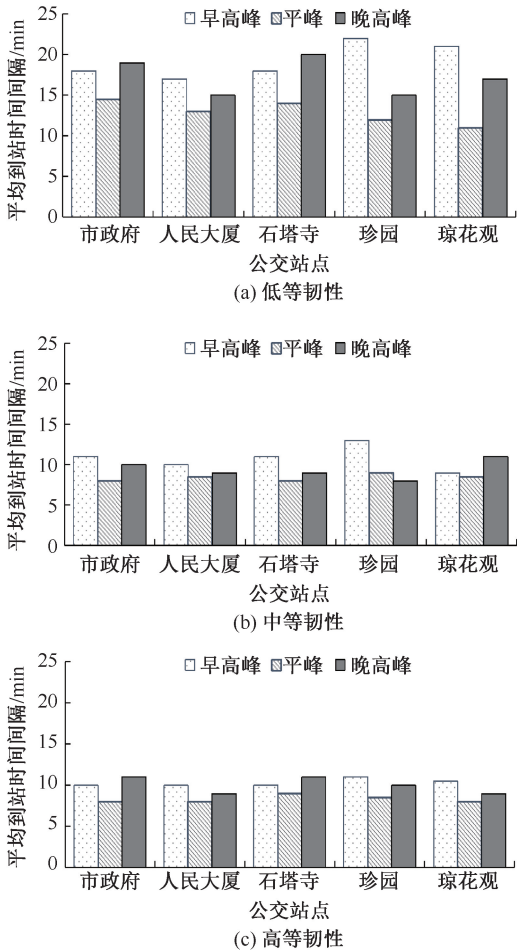


图6 不同韧性等级下到站平均时间间隔

Fig. 6 Average arrival time interval at different resilience levels

到站时间间隔、站点准时度这2个指标与公交线网的可靠性有关^[15],到站时间间隔的增加,站点准时度的下降会导致公交站点的吸收能力下降,从而导致站点的韧性下降。通过上述分析可以发现,

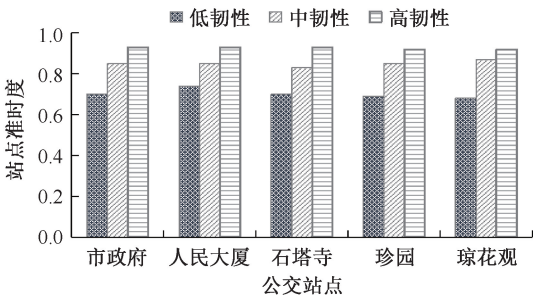


图7 不同韧性等级下站点准时度

Fig. 7 Station punctuality at different resilience levels

各个站点都受到了不同程度的影响,具体表现为:在低等韧性下,珍园站在早晚高峰及平峰期间到站时间间隔分别增长75%、60%、41%,站点准时度下降25%;琼花观站在早晚高峰及平峰期间到站时间间隔分别增长73.6%、61.7%、45%,站点准时度下降26.8%,这2个站点是K1路在荷花池路段受特大暴雨影响最严重的站点。同时,这也反映出珍园站、琼花观站是K1路在荷花池路段上的关键站点。未来重点关注这2个关键站点,以提升K1路在荷花池路段的整体运行效率和抗风险能力。

3 结 论

1) 考虑城市公交系统性能在暴雨事件下的动态变化特征,通过改进“韧性三角形”绘制暴雨事件下城市公交系统性能演变曲线,构建城市公交系统运行韧性评估框架,揭示暴雨事件影响下公交系统在“扰动-响应-恢复”全周期内运行韧性的时空演变态势。

2) 以公交系统运行韧性为导向,选取站时间间隔、站点准时度2个公交评价指标,量化不同等级韧性对公交线路站点的影响,识别公交线路关键站点。

3) 本文主要考虑城市公交系统受特定降雨事件的影响,未来将进一步利用仿真手段整合行为或者流动模型,分析系统韧性的动态过程,利用深度学习算法测算修复或提升韧性的优先次序,建立贴合实际的高精度恢复模型,分析不同恢复水平的网络表现,并针对网络中韧性较弱的节点制定优化策略,以提高公交系统应对突发事件的能力,为城市应急管理部门提供决策支持。

参 考 文 献

[1] GU Yu, FU Xiao, LIU Zhiyuan, et al. Performance of transportation network under perturbations: reliability, vulnerability, and resilience[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 133:DOI:

10. 1016/j. tre. 2019. 11. 003.

[2] SHEN Yi, REN Gang, RAN Bin. Cascading failure analysis and robustness optimization of metro networks based on coupled map lattices: a case study of Nanjing, China[J]. *Transportation*, 2021, 48 (2):537-553.

[3] 李卓, 何瑞春, 李文霞. 考虑时空动态特征的高速铁路网络鲁棒性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(4): 111-120.

LI Zhuo, HE Ruichun, LI Wenxia. Robustness evaluation for highspeed railway network with spatio-temporal dynamic characteristics[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(4):111-120.

[4] 马亮, 胡宸瀚, 陈光伟. 铁路快速货运复杂网络拓扑特征与鲁棒性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6): 178-185.

MA Liang, HU Chenhan, CHEN Guangwei, et al. Analysis on topological characteristic and robustness of complex network of railway express freight transportation[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32 (6):178-185.

[5] 嵇涛, 姚炎宏, 黄鲜, 等. 城市交通韧性研究进展及未来发展趋势[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(5): 1 012-1 024.

Ji Tao, YAO Yanhong, HUANG Xian, et al. Progress and future development trend of urban transportation resilience research[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(5):1 012-1 024.

[6] 张振江, 张玉召, 王小荣. 铁路快捷货运网络鲁棒性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(3):150-156.

ZHANG Zhenjiang, ZHANG Yuzhao, WANG Xiaorong. Robustness analysis of railway express freight network[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(3):150-156.

[7] FERRARI C, SANTAGATA M. Vulnerability and robustness of interdependent transport networks in north-western Italy[J]. *European Transport Research Review*, 2023, 15(1):1-21.

[8] 马敏, 胡大伟, 刘杰, 等. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(12):141-149.

MA Min, HU Dawei, LIU Jie, et al. Invulnerability analysis of urban rail transit network based on weighted passenger flow[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(12):141-149.

[9] XU Xueguo, XU Chen, ZHANG Wenxin. Research on the destruction resistance of giant urban rail transit network from the perspective of vulnerability[J]. *Sustainability*, 2022, 14(12):DOI: 10. 3390/su14127210.

[10] ZENG Junwei, QIAN Yongsheng, LIU Xiaodi, et al. Reliability analysis of Tianjin urban rail transit network based on complex network evolution characteristics [J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35 (4): DOI: 1142/ S0217984921500755.

[11] ZHOU Jian, COIT D W, FELDER F A, et al. Resiliency-based restoration optimization for dependent network systems against cascading failures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 207: DOI:10. 1016/j. res. 2020. 107383.

[12] LIU Hong, YAN Yongze, OUYANG Min, et al. Vulnerability effects of passengers' inter modal transfer distance preference and subway expansion on complementary urban public transportation systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 158:58-72.

[13] LI Daqing, FU Bowen, WANG Yunpeng, et al. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(3): 669-672.

[14] Ji Tao, HUANG Xian, SHAO Jinliang, et al. Study on spatio-temporal patterns of commuting under adverse weather events: case study of typhoon in-fa[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2024, 13(2): DOI:10. 3390/ ijgi13020050.

[15] 万鹏, 张品立, 黄云. 国家公交都市考核评价指标体系及实施策略[J]. *城市道桥与防洪*, 2018(9):10-13.

WAN Peng, ZHANG Pinli, HUANG Yun. National bus metropolis examination evaluation index system and its implementation strategy[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2018(9):10-13.



作者简介: 黄 鲜 (1999—),女,贵州三穗人,硕士研究生,研究方向为交通规划与管理。E-mail: mz120221095@ stu. yzu. edu. cn。