文章编号:1673-0291(2026)01-0152-11 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250140

日常扰动下出租汽车系统韧性评估框架与实证

刘 锴[1],高万晨[2]
(1.北京中拓智森交通科技有限公司,北京 100080;2.辽宁对外经贸学院 经济学院,辽宁 大连 116052)

摘要:为探究城市出租汽车系统应对日常扰动的韧性特征,采用动态阈值法识别日常扰动时段,构建包含抵抗性、恢复性与适应性的三维韧性评估框架,并结合行业运营特点设计空车响应效率、空驶冗余度、时空匹配均衡度等9项评价指标.采用熵权法确定指标权重,集成综合韧性指数,以珠海市3周出租汽车订单数据展开实证研究,从日期类型(工作日/非工作日)和时段特征(早高峰/晚高峰/夜间高峰)等多维度解析韧性差异.研究结果表明:系统整体韧性由时段构成与需求结构共同决定,工作日因包含组织化程度高的早高峰时段,其综合韧性显著优于非工作日,其中恢复性指标高出54.75%,适应性指标差异达110.18%;早高峰为工作日韧性表现最优时段,夜间高峰时段最为薄弱,非工作日晚高峰韧性水平接近工作日晚高峰水平;在相同时段构成下(仅含晚高峰与夜间高峰),工作日韧性表现弱于非工作日,揭示出需求模式对韧性水平的关键影响;抵抗性主要依赖空车响应效率与时空匹配均衡度,恢复性受订单完成变化率影响显著,适应性则与单位里程服务效应及跨区域调度效率密切相关.研究构建的评估框架与实证结论可为出租汽车系统韧性优化及日常运营管理提供理论与实践参考.

关键词:出租汽车系统;韧性评估;订单数据;日常扰动;多时段对比
中图分类号:U491.2 **文献标志码**:A

Resilience assessment framework and empirical analysis of taxi systems under daily disturbances

LIU Kai[1], *GAO Wanchen*[2]
(1.Beijing Zhongtuo Zhisen Traffic Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China; 2.School of Economics, Liaoning University of International Business and Economics, Dalian Liaoning 116052, China)

Abstract: To examine the resilience characteristics of urban taxi systems under daily disturbances, this study employs a dynamic threshold method to identify disturbance periods and establishes a three-dimensional resilience assessment framework encompassing resistance, recovery, and adaptability. Nine evaluation indicators tailored to industry operational features, such as empty-vehicle response efficiency, idle mileage redundancy, and spatiotemporal matching balance, are incorporated. Indicator weights are determined using the entropy weight method, and a comprehensive resilience index is constructed. Drawing on three weeks of taxi order data from Zhuhai, an empirical analysis is conducted to explore resilience differences across multiple dimensions, including day type (weekdays vs. non-

收稿日期:2025-09-08;**修回日期**:2025-11-16
基金项目:辽宁省教育厅项目(JYTMS20231007)
Foundation item: Project of the Department of Education of Liaoning Province (JYTMS20231007)
第一作者:刘锴(1988—),男,河北遵化人,工程师,硕士.研究方向为城市交通.**email**:mortonliu@163.com.

引用格式:刘锴,高万晨.日常扰动下出租汽车系统韧性评估框架与实证[J].北京交通大学学报,2026,50(1):152-162.
LIU Kai, GAO Wanchen. Resilience assessment framework and empirical analysis of taxi systems under daily disturbances[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 152-162. (in Chinese)

weekdays) and temporal characteristics (morning peak, evening peak, night peak). Results indicate that the overall system resilience is jointly determined by period composition and demand structure. Weekdays exhibit substantially higher comprehensive resilience than non-weekdays, largely due to the presence of the highly organized morning peak period. Specifically, recovery and adaptability indicators on weekdays exceed those on non-weekdays by 54.75% and 110.18%, respectively. The morning peak exhibits the strongest resilience on weekdays, while the night peak is the most vulnerable. Further analysis reveals that under the same period composition (i.e., only evening and night peaks), weekday resilience performance is weaker than that on non-workdays, highlighting the critical influence of demand patterns on resilience levels. Resistance is primarily driven by empty-vehicle response efficiency and spatiotemporal matching balance; recovery is significantly affected by changes in the order completion rate; and adaptability is closely related to service efficiency per unit distance and cross-regional dispatching efficiency. The proposed assessment framework and empirical findings provide valuable theoretical and practical guidance for enhancing resilience and improving daily operational management of urban taxi systems.

Keywords: taxi system; resilience assessment; order data; daily disturbances; multi-period comparison

城市出租汽车作为城市公共交通系统的重要组成部分,承担着城市居民日常出行需求的同时还在城市应急疏散和特殊时期交通保障中发挥着关键作用.然而在日常运营中,出租汽车系统面临着多种形式的扰动因素,既包括气候变化、突发事件等重大突发扰动,也涵盖日常运营中的高频波动.这些扰动可能导致出租汽车系统运行效率下降、服务能力减弱,甚至可能影响整个城市或区域的交通网络稳定性.现有研究多聚焦于重大突发扰动下的系统响应与恢复机制,对日常高频扰动的关注则相对不足.事实上,日常扰动因发生频率高、累积影响大,其对出租汽车系统常态化运行的冲击更为持久且深远.

城市交通系统韧性研究开始于21世纪初,经过多年的发展已经成为交通领域的研究热点之一.文献[1]指出交通系统韧性已从单一的强调恢复速度工程韧性演进为强调系统适应能力与强调学习与转型的融合体.文献[2]进一步梳理了交通运输系统韧性的研究脉络,认为其核心特征在于既包括对重大灾害的抵抗与恢复,也涵盖对扰动的持续适应.在重大扰动领域,文献[3]运用社会网络分析法从20个车站韧性影响因素筛选出车站韧性的关键影响因素,并得出暴雨灾害下车站的8个关键影响因素.文献[4]针对暴雨内涝构建了城市道路交通系统安全韧性模型,通过模拟积水深度与路网通行能力的关联机制,证实路网结构冗余度与韧性呈正相关.文献[5]对出租汽车市场的研究显示,极端天气下订单完成率波动与供需时空匹配密切相关,但其分析未覆盖日常扰动场景.在日常扰动领域,文献[6]通过对比预期与非预期扰动(如计划施工与突发事故)发现,日常交通事故对交通流的影响持续时间在可接受时间范围内.文献[7]基于日变交通配流数据证实,早晚高峰的常规性拥堵属于典型的"可预期日常扰动",其对路网韧性的损耗呈现"早高峰>晚高峰>平峰"的规律.

对交通系统韧性进行量化评估是交通数据在韧性研究中运用最广泛的领域之一[8].文献[9]构建的贝叶斯网络模型可整合经济发展数据与路网状态,为多维度韧性的动态预测提供算法支撑.文献[10]提出的改进密度峰值聚类算法,能精准识别扰动的影响,为韧性评估的区间划分提供依据.文献[11]采用单层网络、双层网络测算韧性指标与拓扑指标,并利用层间关联性研究策略对各指标的影响.文献[12]在轨道交通站点韧性评估中采用的模糊聚类分析方法,也为出租汽车订单数据的空间聚合提供了借鉴思路,可支撑抵抗性、适应性评估中的供需匹配分析.

对于交通韧性指标构建方面,文献[13]提出的"4R"框架具有里程碑意义,包括抵抗性(Robustness)、恢复性(Rapidity)、冗余性(Redundancy)、资源性(Resourcefulness),该框架将抽象的韧性概念转化为可量化的评估维度.文献[14]利用出租车全球定位系统(Global Positioning System,GPS)数据,发现车辆空间分布多样性与系统韧性显著相关.在抵抗性研究中,现有指标多聚焦宏观层面,如文献[15]提及的恢复计划内"生存系数",文献[16]对比多模式交通韧性时发现,数据驱动下构建韧性指标具有高效性与时效性.在恢复性研究中,现有成果多关注恢复时间(如文献[17]的恢复曲线模型).在适应性维度,现有成果多聚焦司机个体行为(如文献[18]的"跨区域绕行策略"),但缺乏系统层面的评估.文献[19]综述城市道路交通网络韧性时指出,

适应性评估需兼顾服务范围调整与资源利用效率.文献[20]对澳大利亚布里斯班的研究揭示了降雨天气下交通起讫点(Origin-destination,OD)需求的时空重构现象,为适应性指标提供了实证支持.

综上所述,现有在评估出租汽车系统韧性时存在一定局限性,尤其在对“日常扰动”的系统性认知方面.首先,在分析框架上,多数研究侧重于单一维度(如恢复时间),缺乏对“抵抗性-恢复性-适应性”全链条的整合分析,难以支撑系统整体韧性的综合提升,并且现有指标多借鉴路网或公交体系,未能充分体现出租汽车“空车调度-动态接单”的运营核心特征.其次,在动态特征刻画上,相关研究多采用小时级或更大粒度数据,对日常扰动高频、细微的波动特征捕捉不足,导致订单数据挖掘深度有限.这些不足使得当前对出租汽车系统在日常扰动下的韧性规律认知不够全面,难以有效指导系统的日常优化与提升.因此本文以出租汽车系统为研究对象,聚焦日常扰动情境,依托5min粒度订单数据,构建1个适配出租汽车系统运营特征的“抵抗性-恢复性-适应性”三维韧性评估框架,以揭示日常扰动下不同时段的韧性差异规律,从而为提升系统应对高频扰动的能力提供精准的理论与实践依据.

1 问题描述与数据预处理

1.1 问题描述

出租汽车系统韧性是指该系统在面对小规模扰动(如交通拥堵、乘客需求波动等)时,维持正常运营、快速恢复服务水平和适应环境变化的能力.该系统是1个由驾驶员个体决策与平台智能派单共同驱动的复杂自组织系统,其供给数量在时空维度上呈动态变化,其核心由车辆的空车状态所决定:当车辆处于空驶状态时,可视为系统的可供服务资源,接单后则暂时退出供给集合,由此与需求形成动态平衡关系.这一动态特性构成出租汽车系统韧性分析的基础,日常扰动本质上是供需关系的短期失衡,系统韧性的高低直接体现于能够通过高效的资源调配与利用来维持上述动态平衡,因此,其韧性表现很大程度上依赖于其内在的调度与匹配机制,具体体现为车辆的空驶、跨区域流动等运营行为中所蕴含的资源利用效率,该效率是系统在常态化扰动下维持韧性的核心支撑与外在表征.

出租汽车系统面临的日常扰动并非指外生突发事件,而是由规律性出行需求波动所引发的系统高负荷状态.高峰时段是这类扰动的集中体现,相关研究也表明由高峰需求导致的交通状态变化是分析系统韧性的重要切入点[21],其扰动性表现为系统运行指标在短时间内偏离常态水平.因此,高峰扰动定义为系统在正常运行周期内出现的、可预期但具有挑战性的高压运行情境.该类扰动不同于突发性灾害,却能真实反映系统在日常运行中通过优化内部资源流动来抵御和吸收负荷波动,并实现快速恢复与适应的能力,即日常运营韧性.

受数据边界限制,本文研究重点并非拆解系统内部的具体调度方案或算法,而是通过车辆在时空维度上的运营行为,评估系统在扰动下所展现的整体自适应能力.据此,核心解决的问题是:如何利用出租汽车系统的订单数据,精准识别日常高峰扰动,构建一套以资源运营效率为核心观测视角的韧性评价指标体系,以量化评估该系统在日常高频扰动中的综合表现.

1.2 数据预处理

1.2.1 数据描述

数据来源于珠海市属出租汽车的运营记录,时间跨度为3周,核心字段如表1所示.表1中,车辆号为出租汽车唯一身份标识,订单号为唯一识别每笔交易的字符编码,空车开始时间指车辆结束上一订单后进入空驶状态的时刻,上车时间为乘客上车的时刻,下车时间为乘客下车的时刻,空车里程是车辆在空驶状态下行驶的里程,计程公里为载客行驶的里程,上下车位置为经纬度坐标表示的位置信息.上述字段通过时间戳与空间坐标的精准关联,完整记录了出租汽车从空驶寻客到载客运营的全流程特

表1 出租汽车订单数据示例

Tab.1 Example of taxi order data

订单编号	车辆编号	空车开始时间	上车时间	下车时间	空车里程/km	计程公里/km	上车经度/(°)	上车纬度/(°)	下车经度/(°)	下车纬度/(°)
810304448	3340314	2023年9月1日13:10:00	2023年9月1日13:11:00	2023年9月1日13:17:00	5.90	2.00	113.50	22.22	113.54	22.22
810339584	3479321	2023年9月1日13:17:00	2023年9月1日13:50:00	2023年9月1日14:05:00	6.70	17.10	113.51	22.24	113.53	22.22
810340928	3791318	2023年9月1日15:24:00	2023年9月1日15:26:00	2023年9月1日15:32:00	2.00	3.00	113.50	22.25	113.51	22.27

征,为后续的空驶时长测算、运营效率评估及空间分布分析提供了基础数据支撑.

1.2.2　数据清洗

为确保分析结果的准确性与可靠性,需对原始数据进行规范化清洗,剔除不符合逻辑或存在异常的样本.首先,对数据进行时空完整性校验,剔除上下车时间或上下车经纬度字段为空的记录,此类数据因关键时空信息缺失,无法完成基础的运营轨迹重构与时间序列分析;其次,进行时间逻辑校验,剔除时间流向异常数据,包括下车时间早于上车时间、空车开始时间晚于上车时间的记录,此类数据不符合"空驶-载客"的运营流程逻辑,属于数据采集过程中的时序紊乱记录;再次,进行运营合理性筛选,参考城市短途出行合理范围,排除误操作,剔除计程公里小于500 m的订单;最后,对数据空间范围进行校验,剔除上下车位置超出研究区域(珠海市主城区及中山市三乡镇、坦洲镇,1 058个交通小区)的订单.通过经纬度坐标与交通小区矢量边界的空间连接,为每个订单的上下车位置赋值交通小区编号.经过数据预处理后数据总量为1 213 725条,数据的时空逻辑一致性与运营特征典型性得到有效保障,为后续的空驶规律分析与空间分布建模奠定了可靠基础.

2　出租汽车系统韧性指标体系构建

2.1　日常扰动的量化标准

基于城市交通流的周期性特征,提出"高峰时段是出租汽车系统日常扰动的典型分析场景"的核心假设,通过统计建模构建时段划分的量化标准,具体方法包括4个步骤.

步骤1:选取连续21天的出租汽车订单数据,按时间属性划分为工作日组(15天)和非工作日组(6天).采用5 min时间窗对订单数据进行离散化处理,构建时空矩阵$\boldsymbol{X}\in R^{288\times 21}$,其中每列代表窗口订单量时间序列,时间分辨率为每天288个窗口.

步骤2:基于非参数统计方法建立时段划分的双阈值体系,将工作日与非工作日每日订单量集合的均值μ作为基准水平,其标准差σ作为波动强度指标,设定当时段订单量$g_t\geqslant\mu+0.5\sigma$时为高峰扰动时段,当时段订单量$g_t<\mu+0.5\sigma$为平峰非扰动时段.

步骤3:为提高日常扰动时段划分的鲁棒性,对扰动时段进行优化融合.设定日常扰动最小持续时间阈值为15(3个连续窗口),消除瞬时波动干扰,当满足3个连续窗口均为高峰时段时,该3个窗口时段为有效高峰扰动时段,当满足3个连续时间窗口均为平峰非扰动时段时,该3个窗口为有效平峰时段.

步骤4:采用自然断点法求解有效高峰扰动时段概率密度函数$f(t)$的临界值ξ.当研究窗口满足$f(t)>\xi$时,判定为典型高峰扰动时段,并通过时间序列分割与模式识别相结合的方式,对连续高峰扰动时段进行修正,从而有效提取出租汽车系统的日常高峰扰动时段.若两个典型高峰段间隔小于1个窗口,则合并为连续扰动期;若孤立典型高峰段前后两个窗口均为平峰段,则重分类为平峰时段.

2.2　韧性指标设计

结合日常扰动关于系统韧性的"抵抗-恢复-适应"三阶段逻辑,设计了如下量化指标体系.所有指标均基于5 min统计颗粒度计算,且严格依据日常扰动的量化标准,同时区分工作日与周末场景进行针对性分析.韧性指标设计过程中的"调度"并非人工干预或集中式派单策略,而是指系统层面上由司机自主寻客与平台订单匹配共同形成的自组织响应机制.该机制体现了出租汽车系统在供需波动下的自适应能力,而非外部设定的调度方案.因此,通过订单数据刻画系统自然运行中的供需响应与均衡特性,而非评估具体的调度算法或策略.

2.2.1　抵抗性指标

抵抗性聚焦系统在日常扰动发生维持核心服务功能、保障资源利用效率的能力.高峰时段产生的交通拥堵、需求瞬增等,是系统需要抵抗的"不利冲击".抵抗性指标在扰动条件下的稳定性与变化程度体现了系统对不利冲击的应对能力,可被视为韧性的外显表征,能够客观反映系统的抵抗能力,抵抗性包含3个指标.

指标1:空车响应效率(Empty-vehicle Response Efficiency, ERE)指高峰扰动时段内,出租汽车从进入空驶状态到成功接载乘客的平均时间间隔,反映供需实时匹配速度,表达式为

$$\mathrm{ERE}=\frac{1}{N_\mathrm{p}}\sum_{i=1}^{N_\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{o},i}-T_{\mathrm{e},i}\right)\tag{1}$$

式中:N_p为高峰扰动时段总订单数;$T_{\mathrm{o},i}$为第i个订单的上车时间;$T_{\mathrm{e},i}$为第i个订单的空车开始时间.

指标2:空驶冗余度(Idle Mileage Redundancy, IMR)指高峰扰动时段内,平均每单对应的空车里程,反映系统为应对扰动预留的空车资源冗余,表达式为

$$\mathrm{IMR}=\frac{\sum_{i=1}^{N_\mathrm{p}}S_{\mathrm{e},i}}{N_\mathrm{p}}\tag{2}$$

式中:$S_{\mathrm{e},i}$为高峰扰动时段第i个订单的空驶里程.

指标3：时空匹配均衡度（Spatiotemporal Matching Balance，SMB）指高峰扰动时段内，同一辆车上一订单下车点与当前订单上车点在同一小区的订单数比例.反映了局部调度效率，值越高表明车辆在完成订单后越容易在附近获得新订单，减少了无效巡游，表达式为

$$\mathrm{SMB}=\frac{\sum I\left(Z_{\mathrm{d},j}=Z_{\mathrm{o},j+1}\right)}{N_{\mathrm{p}}}\times 100\% \tag{3}$$

式中：$Z_{\mathrm{d},j}$为第j个订单的下车交通小区号；$Z_{\mathrm{o},j+1}$为第$j+1$个订单的上车交通小区号；$I(\cdot)$为指示函数，当条件成立，为1，否则为0.

2.2.2 恢复性指标

恢复性指标关注系统高峰扰动结束到回归平峰稳定期的过渡效率，通过连续订单的时间序列与里程变化，量化空车状态、服务节奏的回归过程.恢复性包括3个指标.

指标1：空车状态恢复时长（Recovery Duration，RD）指扰动结束后，空车里程波动率回归至±20%正常范围所需的时间，这一段时间为恢复期，要求连续3个5 min窗口满足条件才算恢复完成，表达式为

$$\mathrm{RD}=\left(\min_{k\in K^*} t_k^{\mathrm{end}}\right)-t_{\mathrm{e}} \tag{4}$$

$$K^*=\left\{k\left|\sum_{l=k-2}^{k} I\left(\frac{\left|S_l-\bar{S}_{\mathrm{base}}\right|}{\bar{S}_{\mathrm{base}}}\leqslant\varepsilon_0\right)=3\right.\right\} \tag{5}$$

式中：$\bar{S}_{\mathrm{base}}$为平峰时段空车里程均值；t_k^{end}为第k个5 min窗口的结束时刻；K^*为连续3个样本满足基准偏差要求的索引集；S_l为第l个5 min窗口的空车里程均值；ε_0为20%；t_{e}为高峰扰动时段的结束时刻.

指标2：恢复期需求消化率（Recovery Fulfillment，RF）指恢复期内完成的“高峰发起-恢复期结束”订单数占高峰总订单数的比例，聚焦扰动期未完成需求的收尾能力，表达式为

$$\mathrm{RF}=\frac{N_{\mathrm{p}\to\mathrm{r}}}{N_{\mathrm{p}}} \tag{6}$$

式中：$N_{\mathrm{p}\to\mathrm{r}}$为高峰上车、恢复期下车的订单数.

指标3：订单完成变化率（Completion Change Rate，CCR）指高峰扰动时段订单完成率的峰值到恢复期终点窗口订单完成率的平均变化幅度，表达式为

$$\mathrm{CCR}=\frac{\mathrm{FR}_{\max}-\mathrm{FR}_{\mathrm{end}}}{\left|t_{\mathrm{end}}-t_{\max}\right|} \tag{7}$$

式中：$\mathrm{FR}_{\max}$为高峰扰动期内订单完成率最大值；$\mathrm{FR}_{\mathrm{end}}$为恢复期最后1个5 min窗口的订单完成率，确保与恢复时长终点严格对应；t_{end}与$t_{\max}$为对应时间点；订单完成率（Finish Rate，FR）表达式为

$$\mathrm{FR}=\frac{N_{\mathrm{s}\to\mathrm{f}}}{N_{\mathrm{s}}}\times 100\% \tag{8}$$

式中：$N_{\mathrm{s}\to\mathrm{f}}$为窗口内发起且完成的订单数；$N_{\mathrm{s}}$为窗口内发起的订单数.

2.2.3 适应性指标

适应性通过对历史扰动的反馈，优化空车调度逻辑、司机接单偏好或供需匹配规则，逐步降低对同类扰动的敏感度.适应性包括3个指标.

指标1：跨区域服务转移率（Cross-region Transfer，CT）指高峰扰动时段内，出租汽车当前订单上车位置与前一订单下车位置不属于同一时空单元的比例.该指标用于衡量系统通过跨区域调度来平衡供需的空间适应性，表达式为

$$\mathrm{CT}=\frac{\sum I\left(Z_{\mathrm{o},i}\neq Z_{\mathrm{d},i-1}\right)}{N_{\mathrm{p}}}\times 100\% \tag{9}$$

式中：$Z_{\mathrm{o},i}$为第i个订单上车点所在交通小区；$Z_{\mathrm{d},i}$为第i个订单下车点所在交通小区.

指标2：单位里程服务效率（Mileage Efficiency，ME）指恢复阶段内，单位总里程完成的订单数，表达式为

$$\mathrm{ME}=\frac{N_{\mathrm{r}}}{\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{r}}}\left(S_{\mathrm{e},i}+S_{\mathrm{t},i}\right)} \tag{10}$$

式中：N_{r}为恢复阶段内完成的总订单数；$S_{\mathrm{e},i}$为在恢复阶段内完成的第i个订单的空驶里程；$S_{\mathrm{t},i}$为在恢复阶段内完成的第i个订单的计程公里.

指标3：OD需求匹配度（OD Similarity，OS）指本周高峰扰动时段与上周同期高峰时段的“上下车点OD对（起点-终点）相似度”的差异率，OD对基于订单记录的上车点和下车点聚合到交通小区确定，表达式为

$$\mathrm{OS}=\frac{\left|\mathrm{SOD}_w\cap\mathrm{SOD}_{w-1}\right|}{\left|\mathrm{SOD}_w\cup\mathrm{SOD}_{w-1}\right|}\times 100\% \tag{11}$$

式中：OS为OD需求匹配度；SOD为OD对集合；w为周次.

2.3 综合韧性评估

为整合抵抗性、恢复性与适应性指标，构建全面反映出租汽车系统韧性的综合评价体系，提出基于熵权法的多维度综合韧性指标.该方法首先根据韧性指标对系统扰动的相应特性，将9个韧性指标分为正向指标、逆向指标和区间型指标3类，其中正向指标包括时空匹配均衡度、恢复期需求消化率、跨区域服务转移率、单位里程服务效率、OD需求匹配度；逆向指标包括空车响应效率、空车状态恢复时

长、订单完成变化率;区间型指标包括空驶冗余度.为确保指标之间的可比性,本文引入统一的归一化与加权机制.通过对各维度指标进行标准化处理,消除其因量纲、方向及取值范围差异带来的分析偏差,建立统一的比较基准.在此基础上,采用熵权法进行客观赋权,该方法基于信息熵原理,通过指标的变异程度自动确定权重,避免主观因素干扰,确保评估结果的客观性和稳定性.熵权法在交通系统韧性及复杂系统综合评估中已得到广泛应用与验证[22],其优势在于能够自适应处理多源异构指标,准确反映各指标的相对重要性.本文将该方法同时应用于3类指标内部和各维度之间,不仅实现了多维指标的标准化整合,更确保了抵抗性、恢复性与适应性在统一框架下的可比性,为系统综合韧性评估提供了可靠的方法支撑.综合韧性计算包含3个步骤.

步骤1:数据标准化.对正向指标和逆向指标分别采用离差标准化进行归一化处理,表达式为

$$X_{\text{norm}}=\begin{cases}\dfrac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} & \text{正向指标}\\ \dfrac{X_{\max}-X}{X_{\max}-X_{\min}} & \text{逆向指标}\end{cases}\tag{12}$$

对于区间型指标,采用核密度估计法(Kernel density estimation,KDE)计算出最优指标后进行归一化处理,表达式为

$$X_{\text{norm}}=\begin{cases}\dfrac{X-X_{\min}}{X_{\text{opt}}-X_{\min}} & X\leqslant X_{\text{opt}}\\ \dfrac{X_{\max}-X}{X_{\max}-X_{\text{opt}}} & X>X_{\text{opt}}\end{cases}\tag{13}$$

式中:X、$X_{\min}$、$X_{\max}$、X_{opt}、X_{norm}分别为当前指标值、最小指标值、最大指标值、最优指标值、归一化指标值.

步骤2:熵权法权重计算,权重表达式为

$$\omega_a=\frac{1-e_a}{\sum_{k=1}^{m}(1-e_k)}\tag{14}$$

$$e_a=-\frac{1}{\ln n}\sum_{b=1}^{n}p_{ba}\ln p_{ba}\tag{15}$$

$$p_{ba}=\frac{X_{ba}}{\sum_{b=1}^{n}X_{ba}}\tag{16}$$

式中:ω_a为第a个指标的权重;e_a为第a个指标的信息熵值;X_{ba}为第a个指标的第b个样本值;p_{ba}为标准化后的指标占比;m为指标个数;n为样本量.

步骤3:综合韧性的表达式为

$$S=\sum_{b=1}^{n}\sum_{a=1}^{m}\omega_a X_{ba,\text{norm}}\tag{17}$$

式中:S为综合韧性;$X_{ba,\text{norm}}$为标准化后的指标值.

3　实证分析

3.1　数据特征

基于日常高峰扰动量化识别方法,通过自然断点法计算得到,工作日组的高峰概率密度阈值为0.47,周末组的高峰概率密度阈值为0.50.依据此阈值对原始出租汽车订单数据进行处理,得到2个日期类型的不同高峰扰动时段,日常扰动时段划分如图1所示.

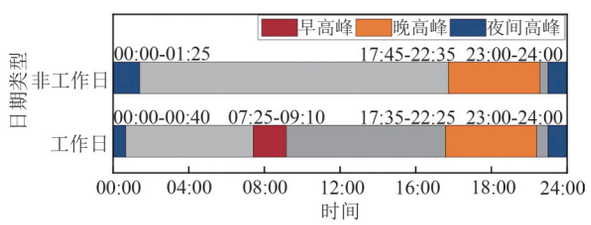


图1　日常扰动时段划分

Fig.1　Classification of daily disturbance periods

日期类型1:工作日高峰时段原始识别结果有00:00至00:40、07:25至09:10、17:35至22:25、23:00至24:00共4个时段.从时间连续性分析,23:00至24:00与00:00至00:40前后衔接,仅因日期切换产生形式上的分割,实际可合并为23:00至00:40的连续时段.合并后工作日形成3个典型高峰扰动时段,均满足高峰概率密度≥0.47的判定标准:07:25至09:10(早高峰,与通勤出行特征匹配)、17:35至22:25(晚高峰,涵盖夜间活跃期)、23:00至00:40(夜间高峰,体现夜间休闲娱乐的返程需求).

日期类型2:非工作日高峰时段原始识别结果有00:00至01:25、17:45至22:35、23:00至24:00共3个时段.非工作日未展现出早高峰,晚高峰为17:45至22:35,与工作日相比晚高峰推迟10 min,持续时间一致.结合周末日期衔接特性与高峰时段时间连续性,周五晚至周六凌晨、周六晚至周日凌晨,23:00至01:25可合并为连续高峰,夜间高峰,概率密度均值分别达0.58、0.60,体现休闲出行的夜间连续性.周日晚至周一凌晨,因周一为工作日,23:00至24:00与00:00至00:40合并为夜间高峰,周日夜间高峰结束时间早于周五、周六,符合周末休闲出行特点.各时段均满足概率密度≥0.50.特别地,不论是否为工作日,因夜间高峰出行需求多数源于前一天,故将夜间高峰归属于高峰扰动开始的日期,如周五晚至周六凌晨的夜间高峰称为周五夜间高峰.

在明确日常扰动时段的基础上,为进一步刻画各时段供需规模的背景特征,表2统计了工作日与

非工作日各典型高峰时段的运营总量与供需比(公式为:订单完成量/在运车辆数).表2中,平均在运出租汽车数表征系统供给能力,平均订单完成量表征出行需求规模,平均供需比则直观反映了单位供给所需承载的需求压力.由表2可知:工作日晚高峰与非工作日晚高峰是系统资源投入最大、服务需求最旺盛的时段,但二者的供需比也最低,表明其单位车辆承载的需求压力相对更大,这为后续解析系统在不同扰动强度下的韧性表现提供了宏观背景.

表 2 各高峰时段运营总量特征

Tab.2 Operational volume characteristics during peak periods

日期类型	高峰时段	平均在运车辆数/辆	平均订单完成量/单	平均供需比
工作日	早高峰	2 122.47	3 423.47	0.621 0
	晚高峰	2 630.00	8 969.60	0.293 8
	夜间高峰	1 945.14	3 297.29	0.590 1
非工作日	晚高峰	2 684.33	9 901.67	0.271 5
	夜间高峰	2 269.00	5 667.33	0.401 2

3.2 韧性指标分析

基于为期3周的出租汽车订单数据,从抵抗性、恢复性、适应性3个维度对系统韧性进行详细评估,并计算综合韧性得分.通过对比工作日与非工作日高峰扰动情景下的指标表现,深入探究系统在不同时段应对需求冲击的韧性特征.

3.2.1 抵抗性分析

抵抗性分析聚焦系统在扰动高峰期间抵抗功能衰退、维持核心功能的能力,主要考察空车响应效率、空驶冗余度及时空匹配均衡度.不同扰动时段抵抗性指标如图2所示.由图2可知:①空车响应效率反映了出租汽车平均接单时间.高峰时段空车响应更快,高峰时段的响应效率普遍优于非高峰时段,表明系统在需求压力下系统调动资源的能力增强;工作日早高峰响应效率提升最为明显,较工作日平峰25.37 min的响应效率显著提升37.60%,展示了系统对高强度通勤需求的强大抵抗性;周日夜间高峰空车响应效率与非工作日平峰基本持平,揭示了该时段系统抵抗扰动、提升服务速度的能力存在短板;非工作日晚高峰空车响应时间短于工作日晚高峰,说明系统承受的瞬时需求压力更强,但系统仍能维持较高响应,这正是其抵抗性发挥作用的有力证据.②空驶冗余度衡量系统在扰动下对核心资源的利用水平.高峰时段冗余度较非高峰显著下降,表明系统通过优化调整成功抵抗了资源浪费的倾向,将有限的空驶资源集中于满足核心出行需求;工作日晚高峰的资源利用效率最高,较工作日非高峰6.68 km/单提升31.44%,具有极强的资源整合与抵抗浪费的能力;非工作日高峰,尤其是晚高峰和周六夜间的空驶冗余度普遍低于工作日高峰,反映出非工作日出行需求在时空上可能更为集中,系统具有更高的资源利用效率;周日夜间高峰效率提升幅度最小,再次印证了该时段系统抵抗力薄弱,资源未能达到最优状态.③时空匹配均衡度体现系统在扰动期维持局部区域供需微循环的能力.高峰时段在同一交通小区内实现连续接单的比例均高于非高峰时段,这表明高峰时段局部区域的出行需求密度增大,系统抵抗了因盲目巡游而导致的效率损失,实现了更高比例的就近接单,证明了提升局部匹配效率是系统应对扰动的普遍性、基础性抵抗策略,其中工作日平峰时空匹配均衡度为9.61%,非工作日平峰时空匹配度为11.36%;非工作日晚高峰的匹配度为所有时段最高,表明其局部协同效能最优.

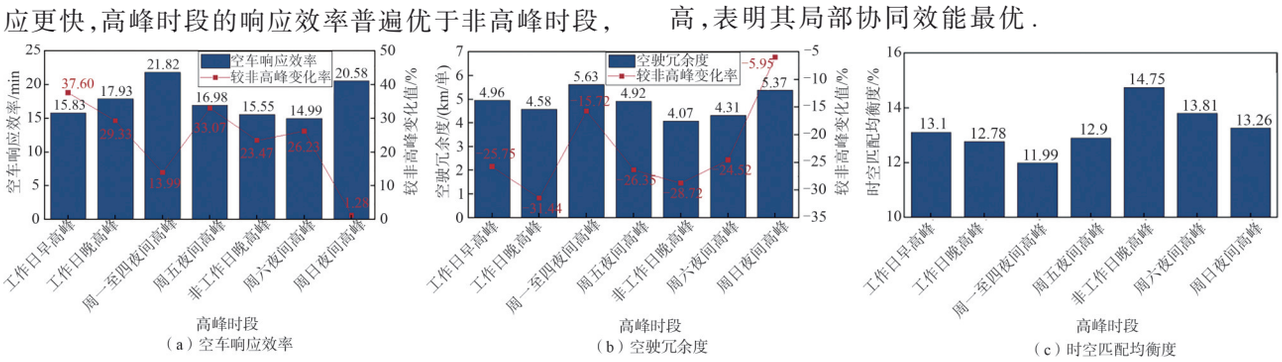


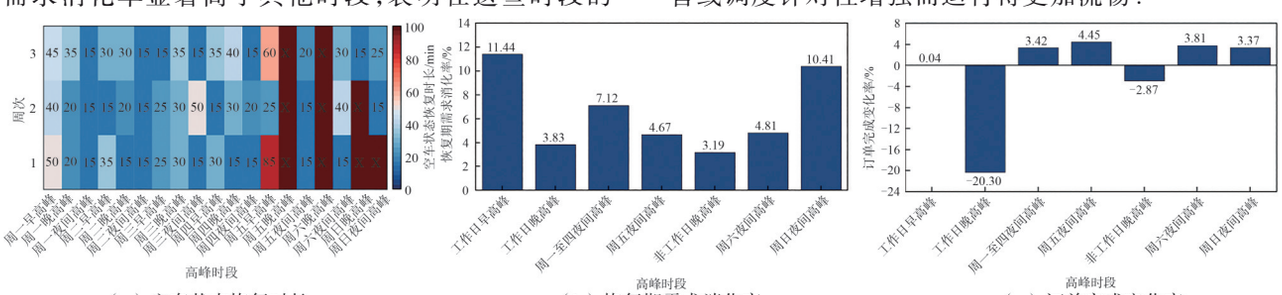
图 2 不同扰动时段抵抗性指标对比

Fig.2 Comparisons of resistance indicators across different disturbance periods

3.2.2 恢复性分析

不同扰动时段恢复性指标对比如图3所示.由图3可知:①空车状态恢复时长衡量系统从高峰扰动中稳定下来的速度.工作日高峰恢复速度较快,其中早高峰恢复时长相对最长为35.33 min,可能与其需求强度大且结束后直接进入平峰有关;晚高峰有3天因紧接着下一个高峰而未观测到完全恢复,这3天均为周五,经计算周五晚高峰供需比为工作

日最低,平均仅为0.276,巨大的运营压力可能是其恢复时长面临挑战的重要原因之一,其他晚高峰平均空车状态恢复时长为26.67 min,周一至周四夜间高峰为18.33 min,周五夜间高峰为16.67 min;工作日晚高峰及夜间高峰的恢复速度快于非工作日对应时段,且非工作日晚高峰恢复存在较大不确定性,仅在1天观测期内达到恢复标准,时长为15 min,其他5天未在观测窗口内恢复,在表2供需对比中,非工作日晚高峰不仅拥有最高的需求总量,其供需比也为所有时段最低,这表明系统在该时段面临极端的供需压力,这也为其未恢复提供了合理解释;周六夜间高峰的空车状态平均恢复时长28.33 min,高于工作日夜间高峰,周日夜间高峰平均恢复时长为20 min.②恢复期需求消化率反映系统在恢复过程起始阶段的系统负载情况,即是否存在从高峰期延续而来的"需求尾巴".工作日早高峰和周日夜间高峰的恢复期需求消化率显著高于其他时段,表明在这些时段的恢复初期,系统需要先行处理一批从高峰末期延续下来的订单,这个消化过程构成了其恢复动态一个关键且耗时的初始阶段;工作日晚高峰及非工作日晚高峰需求消化率值均很低,约为4%,这并非恢复能力更强,而是意味着其高峰期的订单积压相对较少,恢复的挑战主要在于平复系统整体的空车资源波动.③订单完成率变化率刻画订单完成率从高峰峰值到恢复稳定点的演变路径与变化趋势.工作日晚高峰呈现大幅负值,表明其订单完成率从高峰顶点沿着一条明确的下降通道回归常态,这是一种高效、果断的服务节奏切换;非工作日晚高峰的降幅极其微小,结合其高比例的恢复失败现象,其恢复过程的方向性和决心远弱于工作日;在多数夜间高峰,其微小的正值(3.37%～4.45%)表明订单完成率在高峰结束后仍能维持甚至略有提升,这暗示此阶段的恢复伴随着服务效能的持续优化,系统可能因路况改善或调度针对性增强而运行得更加流畅.



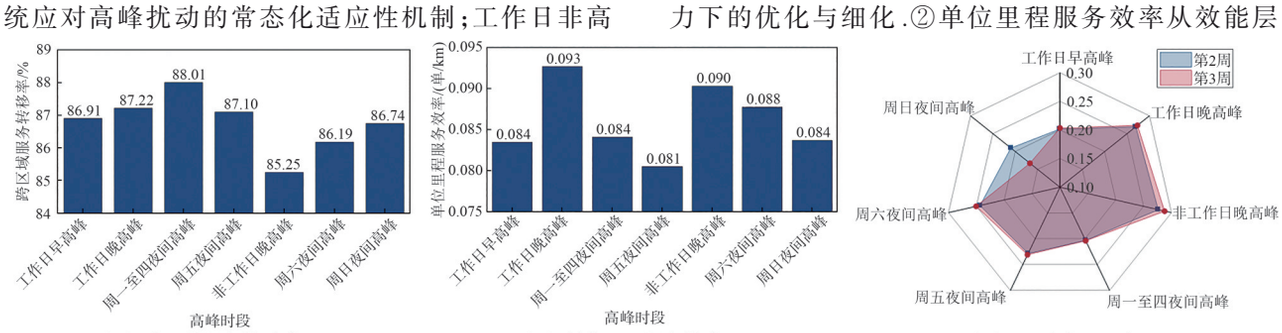
(a)空车状态恢复时长　(b)恢复期需求消化率　(c)订单完成变化率

图3　不同扰动时段恢复性指标对比

Fig.3　Comparisons of recoverability indicators across different disturbance periods

3.2.3　适应性分析

适应性分析探究系统通过调整运营模式(如跨区域调度、效率优化、需求模式适应)应对扰动的能力.不同扰动时段适应性指标对比如图4所示.由图4可知:①跨区域服务转移率从空间行为角度反映系统为应对扰动所采取的核心行动.高峰时段跨区域服务转移率均大于85%,表明跨区域调度是系统应对高峰扰动的常态化适应性机制;工作日非高峰跨区域服务转移率为90.39%,周末非高峰跨区域服务转移率为88.64%,工作日、非工作日与各自非高峰时段水平相近或略低,这表明高度依赖跨区域调度是整个系统的基础运作逻辑;在高峰时段,由于局部区域需求密度增大,系统在更小空间尺度内完成更多订单,从而降低了对长距离调度的依赖,并不是空间自适应行为的减弱,而是调度模式在扰动压力下的优化与细化.②单位里程服务效率从效能层



(a)跨区域服务转移率　(b)单位里程服务效率　(c)OD需求匹配度

图4　不同扰动时段适应性指标对比

Fig.4　Comparisons of adaptability indicators across different disturbance periods

面衡量系统适应性行为的最终产出.恢复期内高峰时段的单位里程服务效率普遍高于非高峰时段,印证了系统适应性优化的积极效果,其中工作日非高峰单位里程服务效率为0.082 1单/km,非工作日非高峰为0.086 9单/km;工作日晚高峰表现最优,较非高峰提升13%,周五夜间、周日夜间高峰出现异常低值,低于各自非高峰时段单位里程服务效率,由于夜间出行目的特殊、终点分散,可能导致大量的长距离空驶返程,从而降低了适应性行为带来的效果.③OD需求匹配度从认知层面衡量了系统出行需求模式的周际稳定性,其数值高低直接反映了系统从历史经验中进行学习并形成预测的潜在能力.工作日晚高峰与非工作日晚高峰展现了最高的周模式稳定性,这种高度的可预测性,为系统提供了坚实的学习基础;工作日早高峰及周一至周四夜间高峰的OD需求匹配度较低,表明这些时段需求模式的可塑性较强,周际波动大,这种内在的不确定性削弱了系统依赖历史数据进行学习的效果,进而增加了适应性提升的难度;第3周周日夜间高峰因数据不全导致OD需求匹配度仅0.167 4,呈现异常低位,从反面印证了历史数据的连续性与完整性是系统进行有效学习的关键前提;总体上,晚高峰稳定的需求模式促使系统具有较强的学习与适应能力,而其他时段的模式不确定性,限制了系统自适应优化能力的充分发挥.

3.3 综合韧性分析

基于熵权法构建的综合韧性评价模型,对工作日与非工作日的系统抗扰动能力进行量化对比.不仅对工作日与非工作日系统整体综合韧性进行计算,还根据韧性维度与高峰扰动时段分别进行了综合韧性计算.

3.3.1 韧性维度差异性

通过解构综合韧性指标,研究发现抵抗性、恢复性与适应性三维度对系统整体韧性的贡献存在显著差异,韧性维度指标差异如表3所示.由表3可知:①工作日在各维度均保持优势,其中适应性指标差异最为显著,工作日的适应性指标是非工作日的2.1倍,该维度中,单位里程服务效率(权重50.4%)和跨区域服务转移率(权重39.1%)贡献最为突出,反映出工作日系统在调度与跨区协同方面具备更强能力.②抵抗性指标方面,工作日较非工作日提升16.24%,该维度以时空匹配均衡度(权重40.5%)和空车响应效率(权重33.4%)为主导,空驶冗余度(权重26.1%)也发挥一定作用.③恢复性指标则显示出较大的日期类型差异,这与非工作日83.3%的恢复失败率相互印证,其内部以订单完成变化率(权重55.0%)和恢复期需求消化率(权重34.5%)为核心驱动,空车状态恢复时长权重相对较低(10.5%),说明系统恢复能力更侧重于服务完成水平的动态调整与需求消化效率.

表3 韧性维度指标差异

Tab.3 Differences in indicators across resilience dimensions

维度	工作日均值	非工作日均值	差异幅度/%
抵抗性指标	1.344	1.156	+16.24
恢复性指标	1.158	0.748	+54.75
适应性指标	2.197	1.045	+110.18

3.3.2 时段维度韧性特征

时段维度按照工作日早高峰、晚高峰、夜间高峰,非工作日晚高峰、夜间高峰进行各自综合韧性指标计算,时段维度指标差异如表4所示.由表4可知:工作日时段早高峰韧性最优,显著优于晚高峰和夜间高峰,夜间高峰表现最弱,得分较早高峰下降24.9%;非工作日晚高峰得分接近工作日晚高峰水平,但夜间高峰时段综合韧性显著低于工作日晚高峰;工作日晚高峰与非工作日晚高峰无显著差异,非工作日夜间高峰综合韧性得分高于工作日7.0%,夜间高峰存在“周末效应”.

表4 时段维度指标差异

Tab.4 Differences in indicators across time periods

维度	早高峰	晚高峰	夜间高峰
工作日综合韧性	0.532 5	0.498 4	0.399 8
非工作日综合韧性	—	0.514 6	0.427 9

3.3.3 日期类型综合韧性特征

基于熵权法构建的综合韧性评价模型,从日期类型维度解析系统韧性的整体表现与内在差异,日期类型综合韧性对比如表5所示.由表5可知:①当考虑完整的运营周期时,工作日综合韧性均值1.431显著高于非工作日综合韧性均值0.945.均值水平方面工作日全时段的综合韧性较非工作日高出51.4%,通过独立样本t检验与曼-惠特尼秩和检验,其结果显示该差异具有显著性($t=8.897$,$p=5.23\times10^{-8}<0.001$;$U=75.0$,$p=0.000\ 13$;$t$与$U$为统计量,$p$为显著性水平),此差异主要源于工作日独有的早高峰,其单时段韧性0.532 5对工作日全时段韧性的贡献率达37.2%,直接拉高了工作日全时段均值,存在高峰数量不对等导致的加权偏差的问题.②为消除高峰数量差异干扰,确保两类日期在可比较时段内对比,剔除工作日独有的早高峰时段,仅保留工作日晚高峰、夜间高峰,与非工作日全时段进行对比,此时工作日综合韧性均值降低至0.898,低于非工作日的0.945.修正后工作日综合韧性较非工作日低4.96%,通过独立样本t检验与曼-惠特尼秩和

检验,其结果显示该差异无显著性($t=-1.042\ 6$, $p=0.310\ 9>0.05$;$U=24.0$,$p=0.266\ 1>0.05$),表明两类日期在可比时段内的韧性水平趋于接近.③为客观评估韧性表现上的稳定性,引入变异系数(Coefficient of Variation, CV)进行分析,可有效消除均值差异的干扰,更适合跨组比较相对波动幅度.工作日剔除早高峰后的变异系数10.56%明显高于非工作日5.39%,可见非工作日因时段类型单一、需求波动更平缓,韧性表现更稳定;工作日剔除早高峰后综合韧性表现出稍大的波动性,主要受部分日期夜间高峰低韧性得分(如2023年9月8日剔除早高峰后得0.725 4)影响.

表 5　日期类型综合韧性对比

Tab.5　Comparison of comprehensive resilience by date type

日期类型	时段构成	综合韧性均值	变异系数/%
工作日	早高峰、晚高峰、夜间高峰	1.431	8.16
	晚高峰、夜间高峰	0.898	10.56
非工作日	晚高峰、夜间高峰	0.945	5.39

4　结论

1)揭示了系统韧性存在显著的日期与时段分异规律:在相同时段构成下(仅含晚高峰与夜间高峰),工作日综合韧性在数据上低于非工作日,但统计上不显著,而非工作日表现出更稳定的韧性特征.工作日早高峰因需求高度集中、方向明确,展现出最优的韧性水平,成为拉升工作日整体韧性的关键时段.

2)识别了需求结构是驱动韧性差异的关键内在机制:工作日早高峰需求集中且方向明确,有助于提升系统调度效率与服务稳定性;非工作日需求随机分散,导致系统恢复期延长与恢复效率下降.

3)发现了不同日期类型下韧性稳定性的差异:在工作日包含全部高峰时段的整体评估中,其韧性表现虽高但波动性大于非工作日;而仅考察晚、夜间高峰时,工作日的波动性依然高于非工作日,进一步印证了需求模式的不稳定性对系统韧性表现具有持续影响.

4)在实践层面,构建的评估框架与实证结论,可为出租汽车系统韧性优化及日常运营管理提供理论依据与决策支持.优化策略的核心理念应遵循“引导而非指令”的原则,通过优化信息环境与激励机制,赋能并增强系统的内生自组织能力.城市管理者可基于韧性评估结果,建立差异化的高峰时期应急运力协同保障机制.例如,针对实证识别出的韧性高风险情景(如非工作日晚高峰的恢复困境),与运营平台建立数据共享与应急联动机制,通过发布权威的交通状态与需求信息,引导车辆向时空匹配均衡度较低的区域流动,以缓解局部供需失衡.此外,推动出租汽车与轨道交通、常规公交在多时空尺度上的协同调度,从城市交通生态的维度,为出租汽车系统应对日常扰动提供结构性支撑.

参考文献(References):

[1] WAN C P, YANG Z L, ZHANG D, et al. Resilience in transportation systems: A systematic review and future directions[J]. Transport Reviews, 2018, 38(4): 479-498. (in Chinese)

[2] 刘洁, 张丽佳, 石振武, 等. 交通运输系统韧性研究综述[J]. 科技和产业, 2020, 20(2): 47-52.
LIU Jie, ZHANG Lijia, SHI Zhenwu, et al. Summary of research on the resilience of transportation system[J]. Science Technology and Industry, 2020, 20(2): 47-52. (in Chinese)

[3] 焦柳丹, 李东荣, 张羽, 等. 暴雨灾害下城市轨道交通车站韧性关键影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 109-115.
JIAO Liudan, LI Dongrong, ZHANG Yu, et al. Key influencing factors of urban rail transit station resilience under rainstorm disaster[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(5): 109-115. (in Chinese)

[4] 唐少虎, 朱伟, 程光, 等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 143-150.
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 143-150. (in Chinese)

[5] WONG R C P, MAK P L, SZETO W Y, et al. Spatio-temporal influence of extreme weather on a taxi market[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(9): 639-651.

[6] DANCZYK A, DI X, LIU H X, et al. Unexpected versus expected network disruption: Effects on travel behavior[J]. Transport Policy, 2017, 57: 68-78.

[7] 吕彪, 高自强, 管心怡, 等. 基于日变交通配流的城市道路网络韧性评估[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1181-1190.
LÜ Biao, GAO Ziqiang, GUAN Xinyi, et al. Resilience assessment of urban road network based on day-to-day traffic assignment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1181-1190. (in Chinese)

[8] 汤俊卿, 安梦琪, 赵鹏军, 等. 时空大数据在交通系统

韧性研究中的应用回顾与展望[J]. 地球信息科学学报，2025，27(3)：553－569.
TANG Junqing，AN Mengqi，ZHAO Pengjun，et al. Review and prospects：Application of spatio-temporal big data in transportation system resilience studies[J]. Journal of Geo-Information Science，2025，27(3)：553－569.(in Chinese)

[9] TANG J Q，HEINIMANN H，HAN K，et al. Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability：A systems-based Bayesian network model[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2020，121：102840.

[10] 鲍震天，郑凡非，郑芳芳. 基于改进密度峰值聚类的交通扰动事件分级评价方法[J]. 交通运输工程与信息学报，2025，23(2)：122－135.
BAO Zhentian，ZHENG Fanfei，ZHENG Fangfang. A classification and evolution method for traffic disturbance events based on improved density peak clustering[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2025，23(2)：122－135.(in Chinese)

[11] 刘志勇，李文帅，李思奇，等. 基于层间关联性的复合公共交通网络布局优化策略[J]. 北京交通大学学报，2024，48(3)：83－91.
LIU Zhiyong，LI Wenshuai，LI Siqi，et al. Composite public transport network layout optimization strategy based on interlayer correlation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2024，48(3)：83－91.(in Chinese)

[12] 陈锦渠，张帆，彭其渊，等. 大客流下城市轨道交通站点韧性评估及划分[J]. 安全与环境学报，2022，22(6)：2994－3002.
CHEN Jinqu，ZHANG Fan，PENG Qiyuan，et al. Resilience assessment and partition of an urban rail transit station under large passenger flow[J]. Journal of Safety and Environment，2022，22(6)：2994－3002.(in Chinese)

[13] BRUNEAU M，CHANG S E，EGUCHI R T，et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra 2003，19(4)：733－752.

[14] KHAGHANI F，RAHIMI-GOLKHANDAN A，JAZIZADEH F，et al. Urban transportation system resilience and diversity coupling using large-scale taxicab GPS data[C]//Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings，Cities，and Transportation. New York，2019：165－168.

[15] GAO Y，WANG J W. A resilience assessment framework for urban transportation systems[J]. International Journal of Production Research，2021，59(7)：2177－2192.

[16] 张洁斐，任刚，唐磊，等. 城市多模式交通网络韧性评估研究综述[J]. 交通信息与安全，2024，42(3)：102－113.
ZHANG Jiefei，REN Gang，TANG Lei，et al. A review about resilience evaluation for urban multimodal transportation networks[J]. Journal of Transport Information and Safety，2024，42(3)：102－113.(in Chinese)

[17] ZHU Y，OZBAY K，XIE K，et al. Using big data to study resilience of taxi and subway trips for hurricanes sandy and irene[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2016，2599(1)：70－80.

[18] TIAN J，LIN Z Y，WANG F. Resilient trade-offs between safety and profitability：Perspectives of sharp-end drivers in the Beijing taxi service system[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics，2022，28(2)：721－733.

[19] 刘庆，龚华凤，何易非，等. 城市道路交通网络韧性研究进展[J]. 城市交通，2025，23(4)：9－24.
LIU Qing，GONG Huafeng，HE Yifei，et al. A Review of the Resilience of Urban Road Transportation Network[J]. Urban Transport of China，2025，23(4)：9－24.(in Chinese)

[20] QI Y M，ZHENG Z D，JIA D Y. Exploring the spatial-temporal relationship between rainfall and traffic flow：A case study of Brisbane，Australia[J]. Sustainability，2020，12(14)：5596.

[21] 徐鹏程，路庆昌，李静，等. 韧性视角下高速公路网络拥堵特性分析[J]. 中国公路学报，2024，37(10)：196－208.
XU Pengcheng，LU Qingchang，LI Jing，et al. Analyzing congestion characteristic of expressway network from perspective of resilience[J]. China Journal of Highway and Transport，2024，37(10)：196－208.(in Chinese)

[22] 鞠艳妮，刘旭，韩珣，等. 城市群多模式交通系统空间网络韧性评估[J]. 安全与环境学报，2025，25(6)：2341－2350.
JU Yanni，LIU Xu，HAN Xun，et al. Resilience evaluation of spatial network in urban agglomeration multimode transportation system[J]. Journal of Safety and Environment，2025，25(6)：2341－2350.(in Chinese)