文章编号：1003-1421(2025)12-0108-10
引用格式：田媛媛，卢锦生，李强，等. 中断不确定性下城市轨道交通列车运行图调整的韧性优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(12)：108-117.
TIAN Yuanyuan，LU Jinsheng，LI Qiang，et al. Resilience Optimization of Train Working Diagram Adjustment in Urban Rail Transit under Disruption Uncertainty[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：108-117.

中断不确定性下城市轨道交通列车运行图调整的韧性优化研究

田媛媛[1]，卢锦生[1]，李　强[1]，冯本祥[2]

(1.广州地铁集团有限公司，广东 广州　510220；2.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044)

摘　要：为探讨城市轨道交通系统在双向中断事件不确定性下的列车运行计划调整方案对系统韧性提升问题，建立了考虑风险不确定性的列车运行计划调整模型。通过引入均值-条件风险价值(Mean-CvaR)准则处理中断时长不确定，构建乘客服务率韧性指标，对比分析各突发场景以及Mean-CVaR准则下得到的列车运行调整计划及其对系统韧性恢复的影响。以广州地铁8号线区间双向中断为例进行验证，结果表明：采用Mean-CVaR策略后相较于30 min中断场景，滞留乘客数量、取消停靠点和列车运行时刻总偏差分别降低至9 391人、130次和18 960 s，最大降幅达23.8%，19.0%和16.8%，在保障调度稳定性的同时有效缓释极端风险。此外，当风险厌恶度参数λ设定在0.5~0.7范围内时，可在运营成本与服务质量间实现最优权衡，使系统期望韧性值提高30%以上。研究成果为城市轨道交通系统在中断不确定性下的列车运行图调整提供了一种兼顾风险控制与运营效率的调图方案。

关键词：城市轨道交通；双向中断；列车运行图调整；均值-条件风险价值；韧性优化
中图分类号：U29　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250701003

Resilience Optimization of Train Working Diagram Adjustment in Urban Rail Transit under Disruption Uncertainty

TIAN Yuanyuan[1]，LU Jinsheng[1]，LI Qiang[1]，FENG Benxiang[2]

(1. Guangzhou Metro Group Co Ltd, Guangzhou 510220, Guangdong, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To explore the issue of enhancing the system resilience through the adjustment plans for train working diagrams in urban rail transit systems under the uncertainty of bidirectional disruption uncertainty, a train working diagram adjustment model considering risk uncertainty was established. By introducing the mean-conditional value-at-risk (Mean-CVaR) criterion to address uncertain disruption durations and constructing a passenger service rate resilience indicator, this study conducted a comparative analysis of various emergency scenarios and the train working adjustment plans obtained under the Mean-CVaR criterion, as well as their impact on the resilience recovery of the system. The bidirectional disruption on a section of Guangzhou Metro Line 8 was used as a case study for validation. Results reveal that compared to the 30-minute disruption scenario, the adoption

收稿日期：2025-07-01　　**修订日期**：2025-09-20
基金项目：广州市科技计划项目(2024A03J0762)

of the Mean-CVaR strategy reduces the number of stranded passengers, skipped stops, and total train schedule deviation to 9 391 passengers, 130 instances, and 18 960 seconds, respectively, representing maximum reductions of 23.8%, 19.0%, and 16.8%. This demonstrates the strategy's effectiveness in mitigating extreme risks while maintaining scheduling stability. Furthermore, when the risk aversion parameter is set within the range of 0.5~0.7, an optimal balance between operational cost and service quality can be achieved, resulting in an increase of over 30% in the expected system resilience. These findings offer a train working diagram adjustment plan that balances risk control and operational efficiency under disruption uncertainty in urban rail transit systems.

Keywords: Urban Rail Transit; Bidirectional Disruption; Train Working Diagram Adjustment; Mean-CVaR Criterion; Resilience Optimization

0　引言

城市轨道交通作为城市交通方式的重要部分，成为了乘客选择的主要出行方式。然而，电力故障、信号失灵等突发事件常导致部分区间运行中断[1-2]，影响乘客出行服务质量。轨道交通系统韧性是指其在受到干扰后维持基本服务并恢复正常运行的能力[3-4]。在突发事件下，列车运行调整策略对城市轨道交通韧性的恢复起着关键作用。因此，研究突发事件下科学、合理的列车运行调整方案，有助于提升系统韧性、保障乘客出行安全。

已有大量学者对突发事件下列车运行计划调整进行研究。周玮腾等[5]针对城市轨道交通运营区间双向中断问题，提出基于小交路策略的列车运行调整方法，构建涵盖中断与恢复阶段的网络列车时刻表协同优化模型，并验证其在降低乘客等待时间方面的有效性。Wang等[6]提出了一种面向地铁双向中断应急响应的两阶段优化框架，分别构建列车运行计划调整模型与基于单元传输模型(CTM)的车辆调度模型，有效捕捉交通动态特征，提升应急响应效率。韧性能快速、准确地反映突发事件下系统的恢复能力，因此，大量学者将韧性评估和列车运行计划调整相结合。李卓等[7]通过构建高速铁路时序运输网络，建立了考虑出行时间成本的网络性能指标，将列车运行调整策略与网络韧性评估相结合，量化突发扰动下调整策略对网络性能的影响。曹志超等[8]构建了考虑列车载客能力与实际停站时间的列车运行图鲁棒性优化模型，并采用改进遗传算法求解，以提升城市轨道交通在高密度行车干扰下的运行稳定性。Tang等[9]将列车重排调度与旅客个体改线重规划结合，提出一种基于最优韧性的铁路运行恢复方法，通过滚动时域方法优化地震后高速铁路网络的运营恢复。

上述都是基于中断事件确定情况下对列车运行计划的调整，然而实际上中断持续时长往往是不确定的且难以精准预测[10]。近些年来，学者采用随机规划方法、数据驱动方法、滚动时域方法等处理中断时长不确定问题[11]。王义惠等[12]针对地铁线路双向中断时长不确定的问题，构建集列车运行调整与车底周转优化于一体的模型，提出结合模型线性化的两阶段法与滚动时域优化算法，进而有效应对中断时长不确定性，在保障调图质量的同时显著提升求解效率。Liu等[13]针对高速铁路运行中受强风、降雪等外部扰动影响导致列车时刻偏离的问题，引入场景型机会约束刻画扰动下的速度不确定性，构建基于事件-活动网络的列车时刻表与站台联合重新调度模型，其方法在应对不确定扰动方面具有更高的鲁棒性。Ying等[14]提出基于多智能体深度强化学习的列车运行计划调整方法，将地铁双向中断下的短交路调整建模为马尔可夫决策过程，并通过伦敦地铁数据验证该方法在应对不确定性中断时具备良好的实时性与优化效果。邹林沐等[15]基于事故大数据与乘客刷卡信息，构建了考虑事故不确定性的城市轨道交通折返线配置韧性优化模型，并提出多目标算法提升线路在突发事件下的供需侧韧性。

目前研究针对中断时长不确定性处理多为所有风险场景的平均性能，忽视极端风险产生的恶劣影响。此外，现有韧性研究多关注中断发生前抵抗能力的提升，对中断发生后考虑列车运行计划调整策略的韧性恢复过程较少考虑。因此，针对双向中断场景下城市轨道交通列车运行计划调整问题，综合考虑风险的平均性能与极端水平，构建列车运行计划调整模型，进一步提出以乘客视角为导向的评价指标，评估调整策略对韧性恢复提升的能力，以广州地铁8号线区间双向中断为算例验证模型。

1　问题描述与假设

城市轨道交通系统在发生双向区间中断时，城市轨道交通双向中断场景如图1所示，原定列车运行计划将受到影响，若缺乏合理的运行图调整策略，不仅将导致列车大量取消、到发时刻大幅偏离，还会引发乘客滞留问题，影响运营安全。针对城市轨道交通双向中断场景，对列车到发时刻、停站方案(是否停站及停站时间改变)和折返方案进行调整，并在离中断区间最近具有折返功能的车站$s1$和$s2$分别开行小交路折返列车服务于两侧短区间乘客，进一步提出乘客服务率韧性评估指标，量化运行调整策略对系统韧性恢复的影响，分析得到提升韧性最优的列车运行调整计划，为轨道交通突发事件下的运行组织与韧性提升提供借鉴。

为合理简化问题，提出以下假设，其中的假设(3)参考Li等[16]的研究。

（1）所有运行列车均采用站站停策略，不设跳停或越行方式。

（2）一旦发生区间中断，受影响区段内的列车将继续运行至最近的下一个车站后停止运行。

（3）在中断事件下，OD间出行需求及出发时刻视为已知固定，且乘客路径选择行为基于历史出行数据预先设定。

（4）运营期间将时间划分为等长的离散时间段，假定在每一时段内，乘客至各车站的到达率是基于历史数据统计得到的。

2　考虑恢复韧性的列车运行计划调整模型

2.1　符号说明

为便于表述与建模，符号定义如表1所示。

表1　符号定义

Tab.1　Notation definition

参数名称	含义说明
I	列车总数，列
S	站点总数，个
Ω	场景总数，个
C	列车最大载客数，人
L	=1，列车运行上行方向
$p(\omega)$	中断场景ω发生概率
arr_s	车站s乘客到达率，人/min
$t^{\mathrm{run}}_{i,\,s,\,l}$	线路l上列车i从s站到s+1站的区间运行时间，min
$t^{\mathrm{wt}}_{\min}$	列车最小停站时间，min
$t^{\mathrm{wt}}_{\max}$	列车最大停站时间，min
$h_{\min}$	列车最小追踪间隔，min
$h_{\max}$	列车最大追踪间隔，min
$t^{\mathrm{tn}}_{\min}$	列车最小折返时间，min
$t^{\mathrm{tn}}_{\max}$	列车最大折返时间，min

决策变量	含义说明	类型
$x_{i,\,s,\,l}$	=1，列车i在线路l上s站停车	0-1
$q^{m,\,n}_{i,\,l}(t)$	=1，t时间内从m站到n站的乘客在线路l能够赶上列车i	0-1
$a_{i,\,s,\,l}$	列车i在线路l上s站的到达时间	R^+
$d_{i,\,s,\,l}$	列车i在线路l上s站的出发时间	R^+
$bl_s^{T^N}$	车站s在第T^N个时间段内的滞留乘客数量，人	Z^+
$b_s^{T^N}$	车站s在第T^N个时间段内成功登车的乘客数量，人	Z^+
$bn_s^{T^N}$	车站s在第T^N个时间段内能够登车的乘客数量，人	Z^+

2.2　目标函数

为全面评估突发事件下列车运行图调整的效果，从列车运行角度和乘客角度2个方面构建目标函数。具体包括以下3个子目标。

子目标Q_d为列车到发时刻偏差，用于衡量调整后的实际列车运行时刻相较于原定计划的偏移程度，反映突发事件下运行图调整与原列车运行图的一致性程度。

$$Q_d(\omega)=\sum_{l\in L}\sum_{i\in I}\sum_{s\in S}(a_{i,\,s,\,l}-\bar{a}_{i,\,s,\,l}+d_{i,\,s,\,l}-\bar{d}_{i,\,s,\,l}) \tag{1}$$

式中：$\bar{a}_{i,\,s,\,l}$和$\bar{d}_{i,\,s,\,l}$分别为列车i在线路l上s站的原始到达时间和原始出发时间。

子目标Q_c为列车取消停靠站点次数，是对每一站点的原计划未到达列车服务进行统计，反映中断事件下列车服务能力的变化情况。

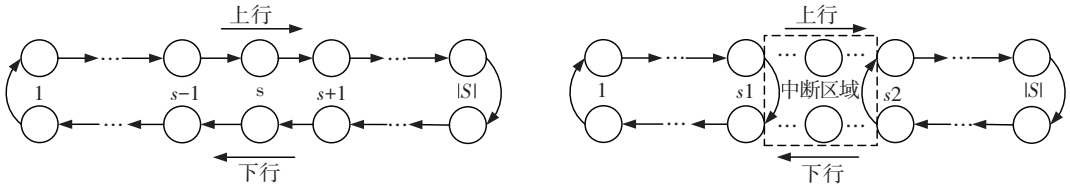


图1　城市轨道交通双向中断场景

Fig.1　Bidirectional disruption scenario in urban rail transit

$$Q_c(\omega)=\sum_{l\in L}\sum_{i\in I}\left(I_0-\sum_{s\in S}x_{i,\,s,\,l}\right) \tag{2}$$

式中：I_0为所有列车初始总的停靠站点次数。

子目标Q_p为未能服务的乘客数量，当中断事件发生后，部分列车无法通过中断区间，导致无法满足通过中断区间的乘客需求，且中断站点两端区间的列车能力下降，进而导致无法满足原有的乘客需求，因此，通过两端运行区间开行小交路列车，可以提高列车运行能力，减少城市轨道交通系统的滞留乘客量，体现调整方案在突发事件下对乘客出行服务质量的提升能力。

$$Q_p(\omega)=\sum_{T^N\in T}\sum_{s\in S}bl_s^{T^N}(\omega) \tag{3}$$

式中：T为突发事件下研究总时间，min；T^N为划分的每一个时间段。

韧性是衡量城市轨道交通系统在面对扰动时，其维持基本服务、快速恢复正常运行的能力。当前城市轨道交通韧性评估主要包括拓扑结构指标(网络整体联通性[17]、平均路径长度[18]和外部交通衔接[19]等)和功能性指标(受影响乘客比例[4]、乘客出行效率[7]和运输服务能力[20]等)，其中，功能性指标从乘客视角出发，更关注实际运行中服务水平的维持与恢复情况，因而逐渐成为韧性研究的主流方向。子目标Q_p反映的是中断事件下乘客的出行服务质量，引入乘客服务率作为韧性评估指标，从乘客视角量化系统在中断事件后的服务保持与恢复能力。

$$R(\omega)=1-\frac{Q_p(\omega)}{Q_0} \tag{4}$$

式中：$R(\omega)$为场景ω下的韧性值；Q_0为研究时间段内进入城市轨道交通系统的人数，人。

考虑不确定场景的概率分布，城市轨道交通系统在不确定性场景下的期望韧性值为

$$\mathrm{E}(R)=\sum_{\omega\in\Omega}p(\omega)R(\omega) \tag{5}$$

通过上述3个目标函数的建立，在突发场景ω下的综合期望损失为

$$G(\omega)=w_1Q_d(\omega)+w_2Q_c(\omega)+w_3Q_p(\omega) \tag{6}$$

式中：$G(\omega)$为场景ω下的目标函数的决策表达式；w_1，w_2和w_3分别为每个子目标的权重系数。

为了提升模型在面对不确定中断场景的鲁棒性，引入条件风险值机制，考虑尾部场景的极端风险，最终目标函数的形式如下。

$$\min\ G_{MCVaR_\alpha}=\lambda\sum_{\omega\in\Omega}p(\omega)\cdot G(\omega)+(1-\lambda)G_{CVaR_\alpha} \tag{7}$$

式中：G_{MCVaR_α}表示在置信水平α下，结合期望值与条件风险价值的加权风险值；G_{CVaR_α}为在置信水平α下，超过系统所能承受的最大损失阈值的期望损失；$\lambda\in[0,\,1]$为调度员对风险的厌恶程度系数，调度员可依据风险偏好进行调整，进而可灵活表示从完全风险中性($\lambda=1$)到高度风险规避($\lambda=0$)的决策情况。

2.3　约束条件

为保证列车在中断不确定场景下实现韧性的运行计划调度，对风险场景控制、列车运行逻辑、折返条件以及乘客上车行为等方面进行约束限制，具体约束条件如下。

(1) 风险场景控制约束。中断事件具有较强的随机性与不确定性，现有研究大多考虑所有风险场景的加权平均结果，未能充分体现严重中断场景所带来的极端风险。而Mean-CVaR准则通过结合期望值与条件风险价值(CVaR)，以加权方式同时衡量风险平均水平与尾部极端风险，从而调整为具有鲁棒性的列车运行图。根据Rockafellar等[21]中断事件下考虑极端风险的模型构建，在置信水平$\alpha\in(0,\,1)$下，CVaR定义如下。

$$G_{CVaR_\alpha}=\eta+\frac{1}{1-\alpha}\cdot\mathrm{E}_{\omega\in\Omega}[\max(G(\omega)-\eta,\,0)] \tag{8}$$

式中：η为辅助变量，用于趋近在置信水平α下的系统所能承受的最大损失阈值。

基于此，Mean-CVaR准则可表示为

$$G_{MCVaR_\alpha}=\lambda\cdot\sum_{\omega\in\Omega}p(\omega)\cdot G(\omega)+(1-\lambda)\cdot\{\eta+\frac{1}{1-\alpha}\cdot\mathrm{E}_{\omega\in\Omega}[\max(G(\omega)-\eta,\,0)]\} \tag{9}$$

(2) 列车运行逻辑约束。当列车不经过中断区间时，即：列车在各站都停车($x_{i,\,s,\,l}=1$)，则需要按照正常时刻表运行，为确保列车运行的时序合理性和安全性，需建立列车在各站点的到达时间、停站时间、出发时间和区间运行时间的相关约束，见式(10)—(12)。

$$a_{i,\,s,\,l}=d_{i,\,s-1,\,l}+t^{\mathrm{run}}_{i,\,s-1,\,l} \tag{10}$$

$$d_{i,\,s,\,l}=x_{i,\,s,\,l}(a_{i,\,s,\,l}+t^{wt}_{i,\,s,\,l}) \tag{11}$$

$$t_{\min}^{\mathrm{wt}} \leqslant t_{i,\,s,\,l}^{wt} \leqslant t_{\max}^{\mathrm{wt}} \tag{12}$$

（3）列车折返时间约束。当列车受中断事件的影响，则该列车需要在离中断站点最近的可折返的站点进行提前折返，进而可在中断区域两端各自形成小交路。当列车在折返站进行折返时，需要满足折返时间的约束。

$$d_{i,\,s,\,l'} \geqslant a_{i,\,s,\,l} + t_{i,\,s,\,l}^{tn} \tag{13}$$

$$t_{\min}^{\mathrm{tn}} \leqslant t_{i,\,s,\,l}^{tn} \leqslant t_{\max}^{\mathrm{tn}} \tag{14}$$

（4）列车追踪间隔约束。为保障同向列车的安全运行，任意2列车在同一方向、同一车站的发车间隔和到达间隔都应该满足列车的追踪间隔限制，约束条件如下。

$$h_a = a_{i+1,\,s,\,l} - a_{i,\,s,\,l} \tag{15}$$

$$h_d = d_{i+1,\,s,\,l} - d_{i,\,s,\,l} \tag{16}$$

$$h_{\min} \leqslant h_a,\ h_d \leqslant h_{\max} \tag{17}$$

式中：h_a和h_d分别为列车到达追踪间隔和发车追踪间隔，min。

（5）乘客乘车约束。乘客到达线路l上的车站s时能否成功上车取决于乘客到达该站的时间与列车到达该站时间之间的关系。在第T^N个时间间隔内，若乘客到达该站的时间小于列车的发车时间，则可以成功上车；否则，无法成功上车。相关约束如下。

$$q_{i,\,l}^{s,\,n}(t) = \begin{cases} 1 & t_{a,\,s} \leqslant d_{i,\,s,\,l} \\ 0 & t_{a,\,s} > d_{i,\,s,\,l} \end{cases} \tag{18}$$

式中：$t_{a,\,s}$为乘客a在车站s的到达时间。

则可得到在第T^N个时间间隔内能够登上列车的乘客数量以及成功登上列车的乘客数。

$$bn_s^{T^N} = \sum_{t=1}^{T^N} q_{i,\,l}^{s,\,n}(t) \tag{19}$$

$$b_s^{T^N} = \min\{C_{T^N},\ bn_s^{T^N}\} \tag{20}$$

式中：C_{T^N}表示在T^N时段内列车容量，人。

进而得到车站s在第T^N个时间段内的滞留乘客数量表示为

$$bl_s^{T^N} = \sum_{t=1}^{T^N} arr_s - b_s^{T^N} \tag{21}$$

2.4　求解方法

上述模型属于典型的混合整数非线性规划问题，需要采用相关线性化方法进行线性化，将其转为混合整数线性规划问题，进而在商业优化求解器CPLEX中直接求解。部分非线性化约束转化为线性化约束转化过程如下。

对非线性约束(8)，引入变量$O(\omega)$对非线性部分$\max(G(\omega)-\eta,\ 0)$处理，使其转换为一组线性不等式约束，线性化的形式如下。

$$O(\omega) \geqslant G(\omega) - \eta \qquad O(\omega) \geqslant 0,\ \forall\omega \in \Omega \tag{22}$$

对非线性约束(10)—(12)，列车在2个站点间或者1个站点的到发关系取决于该列车是否在这2个站点正常停靠。若停靠，则需满足正常列车的运行逻辑约束；否则，则该列车部分取消或者完全取消。因此，通过引入二进制变量$x_{i,\,s,\,l}$和大常数法(Big-M)将非线性化部分进行线性化处理，线性化的形式如下。

$$a_{i,\,s,\,l} \geqslant d_{i,\,s-1,\,l} + t_{i,\,s-1,\,l}^{\mathrm{run}} - M(2 - x_{i,\,s,\,l} - x_{i,\,s-1,\,l}) \tag{23}$$

$$a_{i,\,s,\,l} \leqslant d_{i,\,s-1,\,l} + t_{i,\,s-1,\,l}^{\mathrm{run}} + M(2 - x_{i,\,s,\,l} - x_{i,\,s-1,\,l}) \tag{24}$$

$$d_{i,\,s,\,l} \geqslant a_{i,\,s,\,l} + t_{\min}^{\mathrm{wt}} - M(1 - x_{i,\,s,\,l}) \tag{25}$$

$$d_{i,\,s,\,l} \leqslant a_{i,\,s,\,l} + t_{\max}^{\mathrm{wt}} + M(1 - x_{i,\,s,\,l}) \tag{26}$$

3　案例研究

3.1　案例背景

为验证模型建立的合理性及有效性，选取广州地铁8号线作为研究对象，该线路包含28个站点，其中12个站点为折返站。研究时间设定为10:00—12:30，设置运营中断开始时间为10:30，取3种中断场景(中断时长分别为10 min，20 min和30 min)。中断造成文化公园站至凤凰新村站区间双向无法通车，广州地铁8号线中断示意图如图2所示。列车计划停站时间与区间运行时间为广州地铁官方运营数据，中断后的OD客流数据基于预测得到[22]。模型中其他参数设置如表2所示。

3.2　算例结果

3.2.1　不同场景下列车运行调整计划

在面对突发事件引发的运营中断时，列车运行调整策略需具备良好的适应性与灵活性。为评估所提出方法在不同干扰场景下的适用效果以及分析Mean-CVaR准则下的场景(λ=0.7)的列车运行调整计划与其他场景的关系，本部分对比分析各场景下的运行调整计划，确定性中断持续时长列车运行调整如图3所示。

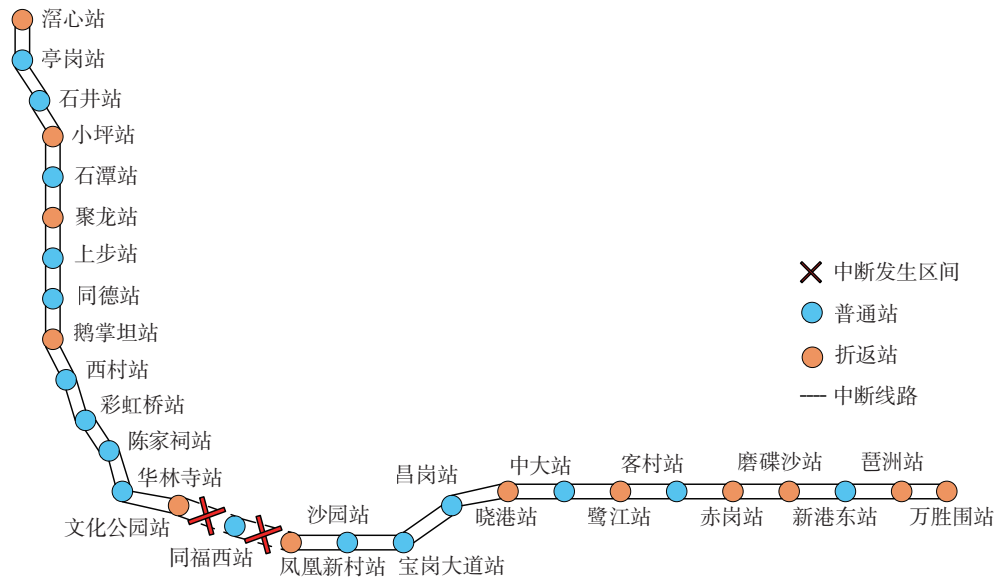


图2　广州地铁8号线区间中断示意图

Fig.2　Disruption on section of Guangzhou Metro Line 8

表2　模型中其他参数设置

Tab.2　Other parameter settings in model

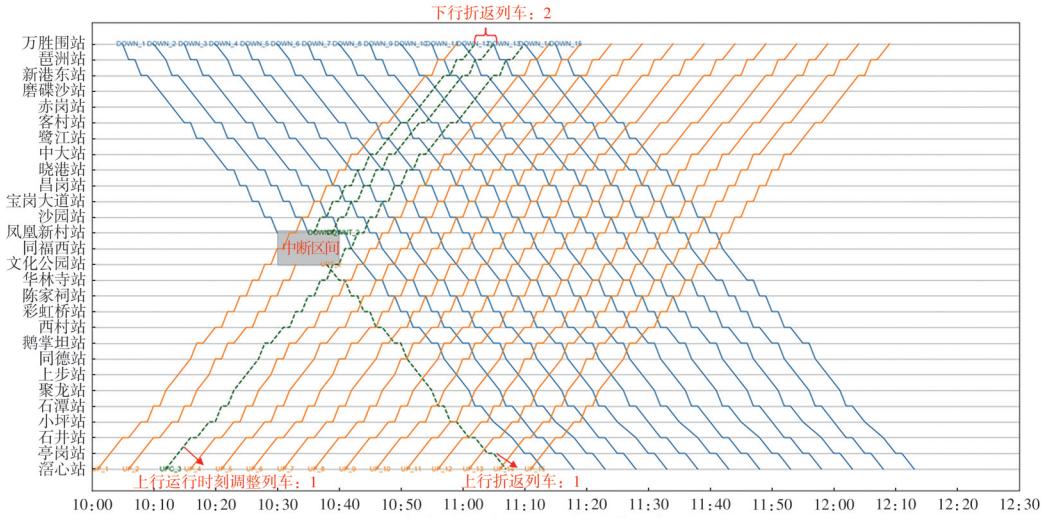
参数	取值
8号线上/下行方向列车数/列	15/15
研究时间粒度/min	1
列车最大载客数/人	2 592
最小/最大发车间隔/s	167/530
最小/最大停站时间/s	33/55
最小折返时间/s	223
中断持续时长发生概率(10 min/20 min/30 min)	0.5/0.25/0.25

通过以上结果可知，10 min场景下因中断影响较小，仅折返3列列车(绿色虚线所示)，调度幅度有限，几乎无须大规模调整，系统运行连续性得到良好维持；但在30 min场景下，为维持网络基本可达性，需要安排11列列车折返，调度成本和复杂性大幅上升，容易引发乘客分流难度增加、乘车时间拉长、列车间隔不均等次生问题。在考虑Mean-CVaR策略下，其结果综合所有可能发生的场景而折返9列车，此方案兼顾了调度稳定性与服务完整性，在牺牲少量运营服务的基础上，其策略不仅减少了乘客的不确定出行成本，也有效控制了调度资源的集中使用，避免原列车运行计划在极端场景下的大幅度偏移。此外，Mean-CVaR的引入本质上也提升了城市轨道交通对中断分布的适应性，通过强化对“风险尾部”的管理，使运行策略在多数场景下保持较优性能，同时在极端场景下避免城市轨道交通系统性能骤降。

3.2.2　不同场景下目标函数对比

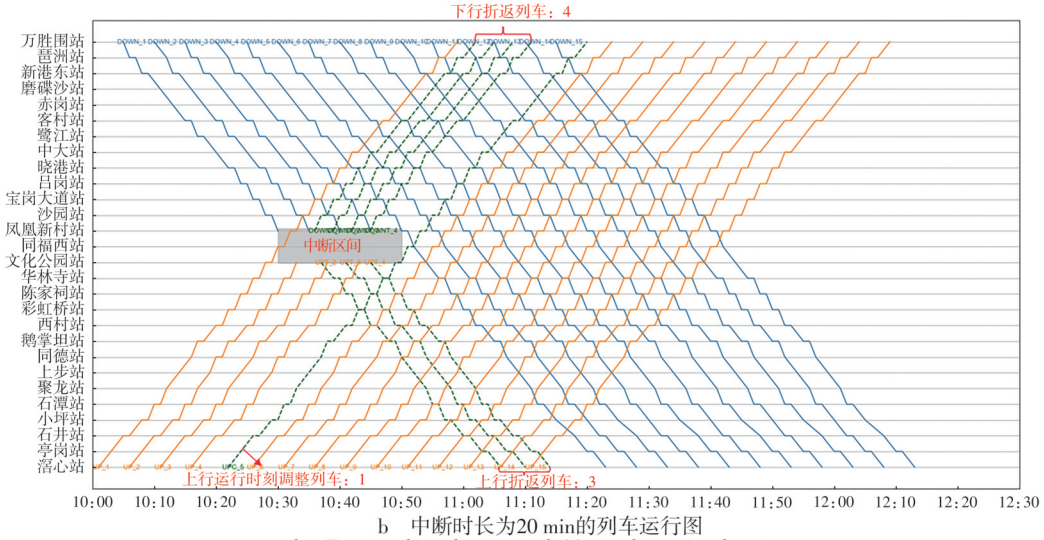
为全面评估列车运行调整方案在不同干扰场景下的优化效果，本部分对比分析了不同场景下以及Mean-CVaR准则下的场景(λ=0.7)关键目标函数值的变化情况。不同场景下的各子目标函数对比如表3所示。

通过以上结果可知，在不同中断时长下，取消停靠站点次数反映了系统对干扰强度的响应能力。10 min中断时，仅取消44次停靠，时刻表偏差为7 440 s；随着中断时间延长至20 min和30 min，取消停靠次数迅速增加，表明系统需要更大的成本应对持续扰动，轨道交通运行的连续性受到显著影响。而在Mean-CVaR准则下，取消停靠次数为130，时刻表偏差为18 960 s，表明调整计划充分考虑极端风险，得到更加稳定的列车运行图。在滞留乘客方面，10 min场景下滞留人数为5 004人，30 min时增至12 324人，表现出一定的非线性增长，反映出服务能力的衰减与乘客需求响应滞后。相比之下，Mean-CVaR准则下滞留人数为9 391人，明显低于30 min场景，表明优化模型通过平衡风险与收益有效减缓了滞留情况。Mean-CVaR准则在应对扰动不确定性时展现出较强的风险缓释能力，较30 min场景分别减少了滞留乘客、取消停靠次数和列车时刻表偏差约24%，19%和17%。



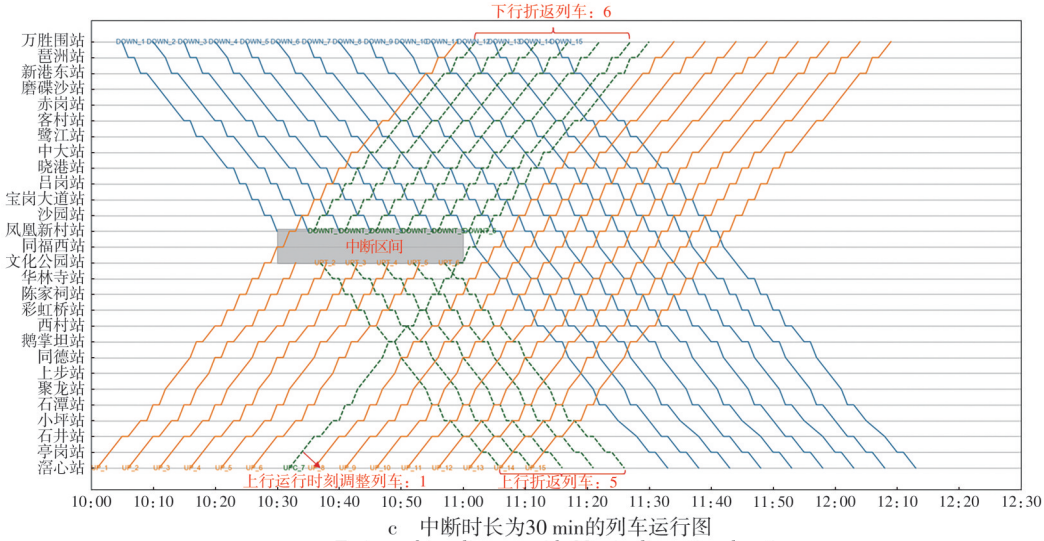
a　中断时长为10 min的列车运行图

a　Train working diagram with 10 min disruption duration



b　中断时长为20 min的列车运行图

b　Train working diagram with 20 min disruption duration



c　中断时长为30 min的列车运行图

c　Train working diagram with 30 min disruption duration

图3　确定性中断持续时长列车运行调整

Fig.3　Train working diagram adjustment under deterministic disruption durations

表3　不同场景下的各子目标函数对比

Tab.3　Comparison of sub-objective functions under different scenarios

场景	列车运行时刻偏差/s	取消停靠站点次数/次	乘客滞留量/人
中断时长10 min	7 440	44	5 004
中断时长20 min	15 120	102	8 664
中断时长30 min	22 800	160	12 324
Mean-CVaR准则	18 960	130	9 391

此外，为分析模型得到的列车运行计划调整策略对城市轨道交通系统韧性恢复的影响，对比了各场景下未开行小交路和开行小交路2种方案下乘客服务率韧性评估指标，不同中断场景下设置与未设置小交路的乘客服务率对比如图4所示。

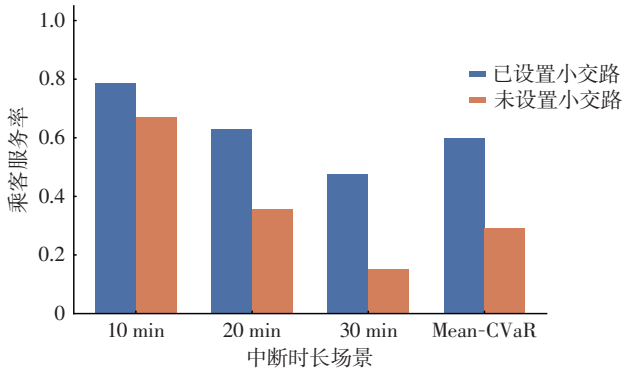


图4　不同中断场景下设置与未设置小交路的乘客服务率对比

Fig.4　Comparison of passenger service rate with and without short-turn service under different disruption scenarios

以上结果得到，设置小交路方案在各中断场景下均显著提升了乘客服务水平，尤其在中断时长为30 min场景下，乘客服务率从0.15提升到了0.47。由此可见，小交路策略可以有效降低滞留，尤其在中断时间较长或不确定场景中，采用风险规避调度结合局部折返策略能够更好地保障乘客出行需求，提升城市轨道交通系统韧性。

3.2.3　风险厌恶度λ对乘客服务率韧性指标影响

为评估列车运行调整策略在突发中断事件下对城市轨道交通系统运行状态与乘客服务能力的影响，本部分探讨了在Mean-CVaR准则下风险厌恶度λ(0.1，0.3，0.5，0.7，0.9)对乘客服务的影响，并进一步得到乘客服务率韧性期望指标值，风险厌恶度对韧性恢复影响如图5所示，不同风险厌恶度系数下相关指标变化情况如表4所示。

上述结果表明，λ值越小，调度策略越倾向于保障乘客服务，在λ=0.1时，未能服务乘客数约为

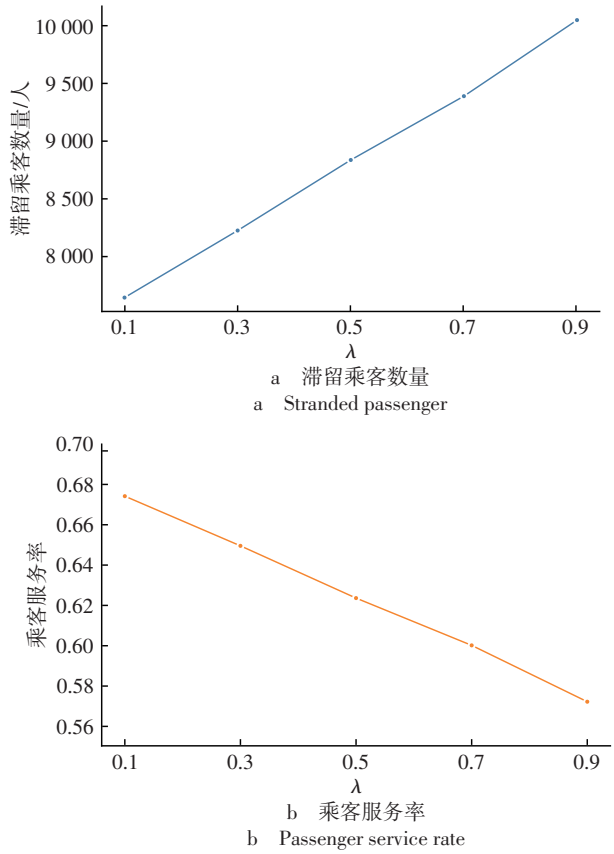


图5　风险厌恶度对韧性恢复影响

Fig.5　Impact of risk aversion on resilience recovery

表4　不同风险厌恶度系数下相关指标变化情况

Tab.4　Variation of relevant indicators under different risk aversion levels

λ	乘客滞留量(Mean-CVaR准则)/人	乘客服务率(Mean-CVaR准则)
0.1	7 650	0.674
0.3	8 200	0.650
0.5	8 850	0.623
0.7	9 391	0.600
0.9	12 450	0.470

7 650人，而当λ为0.9时，乘客滞留量上升至超过10 000人，增幅超过30%。对于乘客服务率韧性指标，λ的选取显著影响调度策略下的服务保障水平，较小的λ强调极端场景下的稳定性，有效减少滞留乘客，提高韧性；当λ≥0.7时，期望韧性值降幅更明显，最差的情况下降至原来的50%以上，表明忽视极端场景可能导致乘客服务能力大幅退化。因此，合理设置风险厌恶系数对提升城市轨道交通系统在突发事件下的韧性具有显著作用。在综合考虑运营成本与乘客出行保障的基础上，实际调度决策中选取λ∈[0.5，0.7]的折中策略，以实现系统效率与服务质量的平衡。

4　结论

针对城市轨道交通在双向中断不确定性下的韧性提升问题，构建了基于Mean-CVaR准则的列车运行计划调整模型，并以广州地铁8号线为例进行算例验证，分析得到如下结论。

（1）列车运行调整计划在不同中断时长下表现出明显的适应性差异。短时中断对系统影响较小，仅需有限的列车折返调度，系统运行连续性良好；而长时中断则需大规模折返列车，调度成本与复杂性显著增加。Mean-CVaR策略通过平衡服务完整性与调度稳定性，有效控制了折返列车数量，提升了系统在多场景下的适应性与鲁棒性。

（2）不同中断时长下，取消停靠次数和滞留乘客数量均呈现明显的增长趋势，反映出系统对扰动强度的敏感性。Mean-CVaR准则在风险规避视角下采取了中等强度的调度调整，既避免了极端干扰下的系统性能骤降，也有效缓解了滞留乘客数量过多的风险，体现了调度方案在保障乘客出行质量和维护系统稳定性方面的平衡优势。

（3）风险厌恶度对调度策略的乘客服务能力和系统韧性影响显著。较低的风险厌恶系数，表明越关注极端风险，有助于提高乘客服务率、减少滞留人数，增强系统在极端事件中的韧性。选择中间区间(0.5~0.7)作为风险厌恶度参数，以实现运营成本与乘客保障的有效权衡，提升城市轨道交通系统应对突发事件的整体韧性。

然而，当前研究仍然有局限性。首先，中断事件下的OD客流基于预测得到，但实际中乘客会因中断事件改变路径选择或换乘模式，未来研究需要将乘客路径选择与运行计划动态调整相结合；其次，以单条地铁线路为研究对象，未考虑跨线换乘客流及更复杂网络下的运行特征与调度需求，后续研究将在多线路、多OD场景下扩展。

参考文献：

[1] 张翕然，李正中，陈绍宽．突发事件下列车运行图调整研究现状及展望[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：1-16.
ZHANG Xiran，LI Zhengzhong，CHEN Shaokuan. Research Status and Prospects of Train Timetable Rescheduling in Emergency Situations[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：1-16.

[2] 肖　晨，王祥进，何跃齐，等．突发事件下城轨列车运行调整模型及算法分析[J]. 交通与运输，2021，37(5)：66-71.
XIAO Chen，WANG Xiangjin，HE Yueqi，et al. Model and Algorithm of Urban Rail Train Operation Adjustment under Emergencies[J]. Traffic & Transportation，2021，37(5)：66-71.

[3] 张开冉，殷苏平，蒋明君．城市轨道交通网络韧性优化研究[J]. 安全与环境学报，2025，25(2)：527-535.
ZHANG Kairan，YIN Suping，JIANG Mingjun. Research on Optimizing the Resilience of Urban Rail Transit Networks[J]. Journal of Safety and Environment，2025，25(2)：527-535.

[4] 张翕然，李正中，张　馨，等．城市轨道交通系统韧性研究现状及展望[J]. 交通信息与安全，2024，42(4)：1-11.
ZHANG Xiran，LI Zhengzhong，ZHANG Xin，et al. Status and Prospects of Studies on Urban Rail Transit Resilience[J]. Journal of Transport Information and Safety，2024，42(4)：1-11.

[5] 周玮腾，钱　蕾，韩宝明，等．运营区间双向中断下城市轨道交通列车运行调整[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2022，52(4)：770-779.
ZHOU Weiteng，QIAN Lei，HAN Baoming，et al. Train Rescheduling of Urban Rail Transit under Bi-Directional Interruption in Operation Section[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2022，52(4)：770-779.

[6] WANG H，LI F，LIU J L，et al. Two-Step Optimization of Train Timetables Rescheduling and Response Vehicles on a Disrupted Metro Line[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2025，174：105078.

[7] 李　卓，何瑞春，李文霞，等．基于列车运行调整的高速铁路运输网络韧性评估方法[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：1974-1987.
LI Zhuo，HE Ruichun，LI Wenxia，et al. Resilience Assessment Method for High Speed Railway Transportation Network Based on Timetable Rescheduling[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(5)：1974-1987.

[8] 曹志超，袁振洲，李得伟，等．城市轨道交通列车运行图鲁棒性优化模型[J]. 中国铁道科学，2017，38(3)：130-136.
CAO Zhichao，YUAN Zhenzhou，LI Dewei，et al. Robust Optimization Model for Train Working Diagram of Urban Rail Transit[J]. China Railway Science，2017，38(3)：130-136.

[9] TANG Y M，LI S，ZHAI C H，et al. Railway Operation Recovery Method of Regional High Speed Railway Based on Optimal Resilience after Earthquakes[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，238：109400.

[10] LI J M，XU X Y，DING X，et al. Bayesian Spatio-Temporal Graph Convolutional Network for Railway Train Delay

Prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2024，25(7)：8193-8208.

[11] ZHAN S G，XIE J M，WONG S C，et al. Handling Uncertainty in Train Timetable Rescheduling：A Review of the Literature and Future Research Directions[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2024，183：103429.

[12] 王义惠，赵康祺，王航宇，等. 地铁线路双向中断时长不确定下的列车运行调整[J]. 中国铁道科学，2023，44(4)：230-240.
WANG Yihui，ZHAO Kangqi，WANG Hangyu，et al. Train Rescheduling under Bi-Directional Interruption with Uncertain Duration of a Metro Line[J]. China Railway Science，2023，44(4)：230-240.

[13] LIU X，ZHOU M，DONG H R，et al. ADMM-Based Joint Rescheduling Method for High Speed Railway Timetabling and Platforming in Case of Uncertain Perturbation[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2023，152：104150.

[14] YING C S，CHOW A H F，YAN Y M，et al. Adaptive Rescheduling of Rail Transit Services with Short-Turnings under Disruptions *via* a Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2024，188：103067.

[15] 邹林沐，王子甲，丁娟娟，等. 事故不确定性下的轨道交通线路韧性优化研究[J]. 铁道学报，2025，47(3)：16-24.
ZOU Linmu，WANG Zijia，DING Juanjuan，et al. Optimization of Rail Transit Line Resilience under Accident Uncertainty[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(3)：16-24.

[16] LI Z X，YIN J T，CHAI S M，et al. Optimization of System Resilience in Urban Rail Systems：Train Rescheduling Considering Congestions of Stations[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，185：109657.

[17] 尹　婷，王朝静，周　旋，等. 大风灾害下高速铁路网络脆弱性评价研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：192-200.
YIN Ting，WANG Zhaojing，ZHOU Xuan，et al. Vulnerability Assessment of High Speed Railway Networks under Wind Disasters[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：192-200.

[18] 陈鹏旭，侯本伟，缪惠全，等. 区域高速铁路网络性能的多维度评估指标对比研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：161-170.
CHEN Pengxu，HOU Benwei，MIAO Huiquan，et al. Comparative Research on Multidimensional Performance Indicators of Regional High Speed Railway Network[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：161-170.

[19] 刘勇凤，魏永存，王　伟. 综合货运枢纽服务能力评价方法及应用[J]. 铁路物流，2025，43(7)：6-14.
LIU Yongfeng，WEI Yongcun，WANG Wei. Evaluation Method for Service Capability of Intermodal Freight Transportation Hubs and Its Application[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：6-14.

[20] 吴华稳. 面向“一带一路”的多式联运发展研究综述[J]. 铁路物流，2025，43(7)：48-53.
WU Huawen. Research Review on Multimodal Transport Development in Context of “Belt and Road Initiative”[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：48-53.

[21] ROCKAFELLAR R T，URYASEV S. Optimization of Conditional Value-at-Risk[J]. The Journal of Risk，2000，2(3)：21-41.

[22] 李浩然，许心越，李建民，等. 考虑稀疏特性的城市轨道交通短时OD时空预测方法[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(10)：3685-3695.
LI Haoran，XU Xinyue，LI Jianmin，et al. A Spatio-Temporal Prediction Method of Short-Term OD in Urban Rail Transit with Sparse Data[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(10)：3685-3695.

(责任编辑　魏　然)

(上接第107页)

联系格局[J]. 地理研究，2012，31(1)：107-122.
MENG Deyou，LU Yuqi. Analysis of Inter-Provincial Accessibility and Economic Linkage Spatial Pattern Based on the Railway Network[J]. Geographical Research，2012，31(1)：107-122.

[19] 唐恩斌，张梅青. 高铁背景下城市铁路可达性与空间相互作用格局：以江西省为例[J]. 长江流域资源与环境，2018，27(10)：2241-2249.
TANG Enbin，ZHANG Meiqing. Urban Rail Accessibility and Interurban Spatial Effects on the Background of High Speed Rail in Jiangxi Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2018，27(10)：2241-2249.

(责任编辑　汪沁萱)