

中、高风险等级新冠肺炎疫情地区的城市轨道交通客流密度控制方法

张 凯¹ 黄 倩¹ 罗安媛¹ 赵 月²

(1. 成都地铁运营有限公司, 610031, 成都; 2. 成都轨道交通集团有限公司, 610041, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 新冠肺炎疫情期间,控制城市轨道交通车站及列车的客流密度是城市疫情防控的重点。基于疫情下中、高风险地区对城市轨道交通列车及车站客流密度的控制要求,建立了城市轨道交通客流密度控制流程,研究了列车满载率的控制方法,以及车站内各关键点位客流控制人数的计算方法,使列车满载率、车站拥挤度这两个客流指标控制在标准阈值范围内。利用 Anylogic 软件进行仿真,验证了城市轨道交通客流密度控制方法的可行性和可操作性。

关键词 城市轨道交通; 新冠肺炎; 疫情风险等级; 客流密度控制; 列车满载率; 车站拥挤度

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.021

Control Methods for Urban Rail Transit Passenger Flow Density in COVID-19 Pneumonia Pandemic Medium-high Risk Areas

ZHANG Kai, HUANG Qian, LUO Anyuan, ZHAO Yue

Abstract During the COVID-19 pneumonia pandemic, passenger flow density control of urban rail transit stations and trains is the focus of city pandemic prevention and control. Based on the control requirements for urban rail transit train and station passenger flow density in pandemic medium-high risk areas, the density control process is established, corresponding control method of train load factor and the calculation method of passenger number control at each key point in the station are studied, so that the train load factor and station congestion two passenger flow indicators are kept within the standard threshold range. The feasibility and operability of urban rail transit passenger flow density control method are verified by simulation in Anylogic software.

Key words urban rail transit; COVID-19 pneumonia; pandemic risk grade; passenger flow density control; train load factor; station congestion

First-author's address Chengdu Metro Operation Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

1 新冠肺炎疫情下城市轨道交通客流密度控制要求

为精准、有效地防止新冠肺炎疫情(以下简称“疫情”)的传播,2020年3月1日,交通运输部出台了交运明电[2020]84号《客运场站和交通运输工具新冠肺炎疫情分区分级防控指南》(以下简称《指南》)。《指南》对不同风险等级疫情地区的城市轨道交通列车和车站的客流密度提出了明确要求:高风险地区车站拥挤度、列车满载率均不超过50%,中风险地区车站拥挤度、列车满载率均不应超过70%^[1]。

疫情发生前,北京、上海及深圳等大城市的城市轨道交通线路高峰时段的车站拥挤度、列车满载率^[2]均超过《指南》对中风险地区的客流控制要求。为此,各城市根据《指南》的要求,并结合自身运营特点,制定了各自的城市轨道交通客流密度控制措施。其中:北京^[3]城市轨道交通按照控制值不超过50%的标准制定了分级预案,当客流达到控制阈值时,开展不同等级的客流控制措施;上海^[4]、深圳^[5]等地的城市轨道交通通过数据收集、客流分析、客流监控及舆情监控等方式,对城市轨道交通线网的行车组织和客运组织进行动态管控,同时通过官方微博、车站广播及告示等方式及时发布限流信息;深圳、西安^[6]等城市的轨道交通除实施客流控制措施外,还试点了预约进站或实名登记制度,以便跟踪乘客进站、乘车及出站等轨迹。

2 不同风险等级疫情地区的城市轨道交通客流密度控制方法

城市轨道交通客流通过车站实现集散,通过列车实现位移,因此,车站和列车是疫情传播的主要场所,也是疫情防控的关键点位。从实施的收效

看,各大城市的城市轨道交通客流控制措施在不同程度上存在系统整体考虑不足、措施细化程度不够及针对性不强等问题。为此,本文提出了不同风险等级疫情地区的城市轨道交通客流密度控制方法。

2.1 客流密度控制流程

应按照“运力保障、线网控流、梯度实施、提前预警”的原则,通过匹配运输计划、增加临时运力、组织备车上线及控制车站客流等措施,达到合理控制疫情防控期间各风险等级地区城市轨道交通的列车满载率和车站拥挤度的目的。

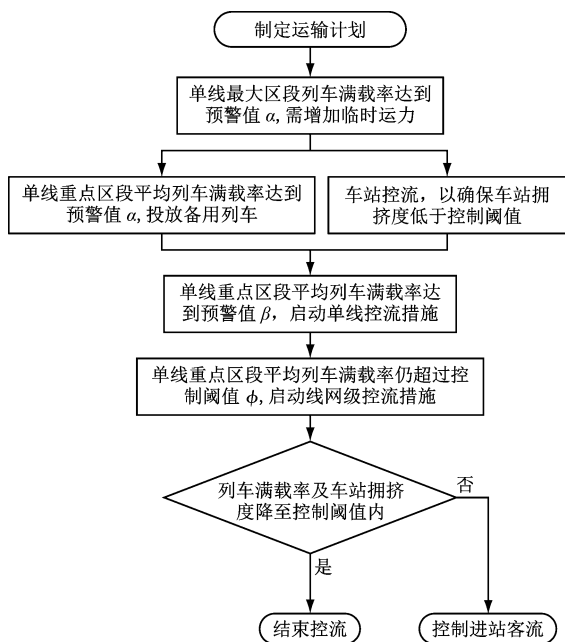
本文以车站拥挤度和列车满载率作为衡量城市轨道交通客流密度的指标。现对相关控制及预警指标做如下定义:

α ——城市轨道交通客流密度 1 级预警值, %;

β ——城市轨道交通客流密度 2 级预警值($\beta > \alpha$), %;

ϕ ——城市轨道交通客流密度控制阈值, %。

当城市轨道交通处于中风险地区时, $\phi = 70\%$; 当城市轨道交通处于高风险地区时, $\phi = 50\%$ 。根据城市轨道交通客流特点及运营实际,本文提出的城市轨道交通客流密度控制流程如图 1 所示。



注:控流——客流控制的简称。

图 1 城市轨道交通客流密度控制流程图

Fig. 1 Flow chart of urban rail transit passenger flow density control

1) 匹配运输计划:根据近期线路的最大断面数据及客流变化趋势,按照单线最大断面拥挤度不超

过 ϕ 的要求提前制定线路的运输计划,主要包括制定列车运行图,以及线路临时运力投放措施、大站空车停放计划和备用车安排等内容。

2) 增加临时运力:实时掌握当日各线路的车站客流及列车满载率情况,当线路客流持续增长、单线最大区段的列车满载率达到 α 后,应采取如缩短行车间隔、增加临时运力等措施,以有效降低列车满载率。

3) 组织备车上线:当重点车站客流持续增大,预判将有大量乘客集中进站乘车,且重点区段平均列车满载率将很快达到 α 时,应视客流情况及时投放备用列车或大站空车,以降低重点区段、重点时段的列车满载率。

4) 车站及单线控流:当车站客流持续增大时,应由车站执行引导、分流及限流等措施,避免乘客在某一区域集中排队。在客流持续增大且线路运力已达上限时,单线重点区段的平均列车满载率达到 β ,应启动线路级的客流控制措施,减缓乘客的进站速度。

5) 线网控流:执行线路客流控制措施后,若客流仍持续增大且单线重点区段平均列车满载率已达到 ϕ ,则应及时启动线网级客流控制措施。

6) 结束控流:列车满载率及车站拥挤度降至控制阈值后,取消各级客流控制措施。

2.2 客流密度控制的关键

2.2.1 运输组织

当车站客流过大时,增加运力投放、加开备用列车或上线大站空车是最直接、有效降低客流密度的方式,因此,做好运输计划是确保客流密度可控的关键措施之一。

2.2.1.1 列车运行图

结合客流情况,按照各线路小时断面客流最大拥挤度不超过 ϕ 的要求铺画列车运行图。当线路的最大列车满载率未达到 α 时,按图行车。小时列车对数及发车间隔的计算式为:

$$S_j = \frac{D_j}{\phi d_y} \quad (1)$$

$$G_j = 3\ 600/S_j \quad (2)$$

式中:

S_j ——第 j 小时所需的上线列车对数(数值须向上取整),对;

D_j ——第 j 小时线路的最大断面客流量,人次/h;

d_y ——列车定员,人/列;
 G_j ——第 j 小时的行车间隔,s。

2.2.1.2 临时运力

在线路运力富余情况下应提前做好临时运力。当线路的最大列车满载率达到 α 时,投放临时运力。临时运力所需的小时列车对数为:

$$L_j = \frac{\varepsilon_j D_j}{\phi d_y} \tag{3}$$

式中:
 L_j ——第 j 小时投放临时运力所需的上线列车对数(数值须向上取整),对;
 ε_j ——第 j 小时的临时运力系数,通常取 0.1 ~ 0.2。

2.2.1.3 备用列车

应根据客流情况,调整备用列车的存放地点和存放数量。当线路客流持续增长、重点区段的平均列车满载率达到 α ,且预判进站客流将持续增长时,组织备用列车上线。

2.2.1.4 空车定点投放

当线路的列车满载率较大,单个或多个车站乘客滞留严重时,应及时投放空车至客流密度大的站点,以降低车站拥挤度,快速疏散和缓解重点区段的客流拥挤情况。

2.2.2 车站客流控制

车站是乘客集散的主要场所。车站客流分布面广,且呈动态变化特征,车站拥挤度难以用量化的标准予以衡量。因此,车站客流控制是整个城市轨道交通系统客流密度控制的难点。车站客流通常汇集于售票设备、安检点位、进出闸机、楼梯口、换乘通道及站台门等关键点位。本文对上述关键点位进行客流调研和分析,按照“由内至外、分区排队”的原则,实施迂回绕行、分批放行等客流引导措施,通过控制关键点位乘客汇集数量来达到控制车站拥挤度的目的。

对于中、高风险疫情地区,城市轨道交通的出行客流以通勤刚需为主,市内弹性出行和城市对外出行占比较少。受疫情影响,非高峰时段的客流大幅减少,车站的高峰客流特征反而更为明显。车站客流分为进站客流、换乘客流及出站客流三类,其中:进站乘客和换乘乘客在站内均有不同程度的停留,这是造成车站拥挤度增加的主要原因;出站乘客则存在快速通行、减少逗留的出行心理,对车站拥挤度影响较小。因此,本文主要研究进站客流和

换乘客流的拥挤度控制方法。

设正常情况下车站内单位面积可容纳的人数为 π ,按照不同风险等级地区城市轨道交通车站拥挤度不超过 ϕ 的控制要求,则车站单位面积内最多容纳乘客数为 $\phi\pi$,因此,卡控点 i 乘客人数控制标准的计算式为:

$$N_i = S_i \phi \pi \tag{4}$$

式中:
 N_i ——点位 i 可容纳的乘客数;
 S_i ——点位 i 可容纳乘客的有效面积。

2.2.2.1 进站客流卡控

进站客流的主要行走路线为:出入口—售票点—安检点—进站闸机—楼梯—站台门。按照客流卡控由内至外的原则,首先对下游客流进行卡控。当乘客数量超过卡控标准时,再依次对上游客流进行卡控,直至在车站出入口实施站外客流控制。

2.2.2.2 换乘客流卡控

换乘客流的主要行走路线为:换出站台—换乘通道/换乘绕行—换入站台。当换乘客流较大时,首选对换入站台进行卡控,其次对换乘通道进行卡控;当换乘通道容纳能力不足时,应组织换乘客流通过站厅绕行,以增加换乘路径,延长换乘行走时间。

2.2.2.3 算例演示

以某城市轨道交通 A 线、B 线换乘站 S 为例进行算例演示。若车站单位面积可容纳 3 人,且该地区处于疫情中风险地区, $\phi = 70\%$,则车站单位面积内最多容纳乘客人数为 2 人,站内各关键点位客流人数卡控标准的计算结果如表 1 所示。

表 1 S 站各关键点位的客流人数卡控标准
Tab.1 Passenger flow control standard for each key point of station S

客流控制点位	进站流线有效面积/m ²	进站流线卡控标准/人	换乘流线有效面积/m ²	换乘流线卡控标准/人
站台门	11.2(A 线), 22(A 线), 11.2(A 线), 22(A 线), 12.8(B 线) 25(B 线) 12.8(B 线) 25(B 线)			
换乘通道(单向)			12.5	25
楼梯口	5.2	10	5.2	10
进站闸机	2.5	5		
安检点	25.2	50		
售票机	8.1	16		
站厅绕行区域 1			27.6	55
站厅绕行区域 2			24.3	48

2.2.3 客流控制的匹配措施

1) 规范等候区域。车站应根据设备布局情况,提前测定各关键点位客流人数的卡控标准,并在等候区地面划定人员排队分割线,引导乘客站在划定位置排队等候,在提示乘客分散排队的同时,有效解决车站工作人员难以对客流进行卡控的难题。

2) 设计合理的流线。换乘站和大客流车站应根据客流情况提前做好客流流线设计,并制定卡控措施,避免流线交叉造成乘客聚集,大客流情况下还应结合车站特点对客流进行分区域控制。

3) 测温处客流卡控。体温检测点位通常设置于安检处,因测量检查导致乘客排队聚集时,应引导乘客分散排队,同时增加体温检测人员;若排队现象仍未缓解,则应加开安检机,引导乘客分散排队安检,以均衡安检客流;当排队客流持续增加时,应按照安检点位卡控标准执行客流控制措施,避免乘客在站内集中排队。

4) 加强信息沟通。行车调度人员需关注重点车站的客流情况,与车站保持信息沟通和联动,及时、灵活组织列车上线;车站工作人员应关注站台、换乘通道等重要点位的客流情况,当乘客滞留情况趋于明显时,可向行车调度部门申请加开列车或大站空车。

5) 加强宣传引导。车站播放均衡排队引导广播,站台工作人员引导乘客分散排队候车,以进一步均衡站台排队客流和列车内客流;统筹安排车站人员,高峰时段在重点区段安排工作人员跟车引导;利用微博、微信及 PIS(乘客信息系统)等渠道,及时发布客流控制、分散排队、错峰出行及错线出行等信息,以便乘客提前规划行程。

3 客流密度控制应用实例及效果仿真

C 市部分区县曾为中风险疫情地区。该市的城市轨道交通 L1 线位于城市通勤主轴线上,为线网骨干线路。疫情前该线工作日的客运量约为 91.7 万人次/d,在该市城市轨道交通线网日均客流总量中的占比为 22%。早高峰时段(08:00—09:00),该线各站的进站总客流量为 7.9 万人次/h,换入客流量为 6.2 万人次/h,列车拥挤度超过 110%。HN 站为 L1 线及 L2 线的两线换乘站,早高峰时段的进站客流量约为 0.2 万人次/h,换乘客流量为 2.2 万人次/h。该站是该市城市轨道交通线网客流压力最大的站点,车站拥挤度较高,L1 线下行站台的乘客

滞留问题尤为显著。现以 L1 线及 HN 站为例,利用 Anylogic 仿真技术,验证城市轨道交通客流密度控制方法的实施效果。

3.1 运输组织

3.1.1 运输计划

取某工作日的客流数据作为制定线路运输计划的依据。该日 L1 线早高峰时段(08:00—09:00)最大断面客流为 20 833 人次,列车定员为 1 468 人/列。按照疫情中风险地区 $\phi \leq 70\%$ 的要求,高峰小时的上线列车对数、发车间隔,以及临时运力所需列车对数的计算结果如表 2 所示。在其余运营时段,应结合线路断面客流情况分别计算小时运力计划及发车间隔,临时运力系数可根据运用车情况适当调整。根据计算结果铺画列车运行图,备用列车应根据线路各站客流情况,选择适当的辅助线进行存放。

表 2 L1 线高峰小时运力计划、发车间隔及临时运力储备计划

Tab.2 Peak hour capacity plan, departure interval and temporary capacity reserve plan of rail transit Line 1

参数	参数值
高峰小时上线列车数/对	21
发车间隔/s	170
临时运力系数	0.15
高峰小时临时运力所需列车数/对	3

3.1.2 行车组织措施

以 $\alpha = 60\%$ 作为单线客流控制的预警值,当线路上最大的列车满载率达到 60% 时,应及时投放临时运力;当 L1 线重点区段(HN 站所在的 2 个区段)连续 3 列车的平均列车满载率达到 60% 时,应加开备用列车。临时运力及备用列车均在始发站投入载客。

若备用列车上线后 L1 线重点区段的列车满载率仍呈增大趋势,HN 站乘客滞留持续增加,则可直接开行大站空车至 HN 站。大站空车沿途不停靠其他车站,直达 HN 站,对 HN 站客流进行单点疏散。

3.1.3 客流联控措施

以 $\beta = 65\%$ 作为客流联控的预警值。当 L1 线重点区段的平均列车满载率达到 65% 时,启动线路客流联控;当 L1 线重点区段的平均列车满载率达到控制阈值(70%)时,应启动线网客流联控。线路/线网客流联控时,车站应根据客流情况开展三

级客流控制,各卡控点位实施分批放行的客流管控措施,避免乘客集中聚集。

3.2 车站控流措施

3.2.1 车站基本情况

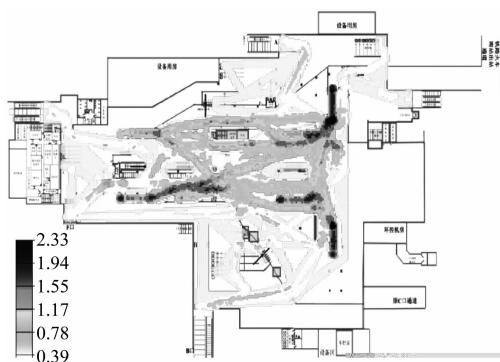
HN站由站厅层、L1线站台层及L2线站台层构成,其中:L1线为岛式站台;L2线为一岛两侧式站台,L2线进站及换乘客流从岛式站台上车,出站及换出客流从2个侧式站台下车。站内早高峰换乘客流以L2线上行及L2线下行换乘至L1线下行方向为主,客流通过站厅进行换乘。从L1线换乘至L2线的客流较小,这部分换乘客流通过换乘通道实现换乘。

根据实地调研,该站每 3 m^2 有效面积内可容纳乘客10人,按照中风险地区车站拥挤度不超过

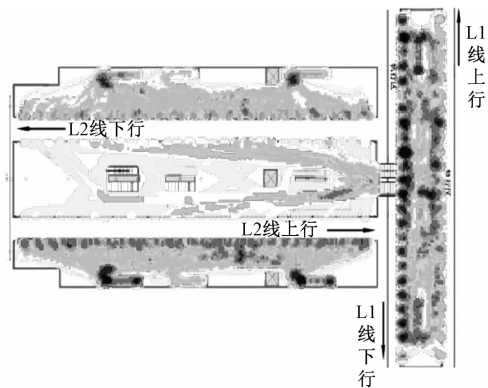
70%的要求,应控制客流,确保每 3 m^2 有效面积内仅容纳乘客7人。结合车站面积及设备布局,可计算得到HN站各卡控点位的客流控制人数,并利用Anylogic进行控流结果对比。

3.2.2 车站控流仿真

图2和图3分别为HN站各关键点位在卡控前和卡控后的车站客流仿真情况。由图2和图3可知:①实施客流卡控前,站厅楼扶梯口、L1线站台下行站台门、L2线站台上行楼扶梯口等关键点位客流较为拥堵,车站拥挤度超过70%;②启动关键点位客流卡控后,乘客迂回绕行,客流在站厅区域的分布更均衡,客流密度降低,上述点位的拥堵现象均有所缓解,车站拥挤度降至70%以下。由此可见,本文所提的车站控流方法取得了预期效果。



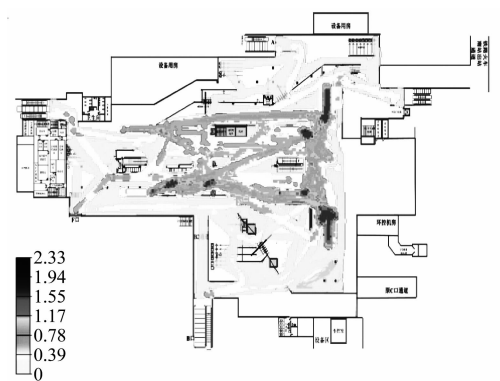
a) HN站站厅



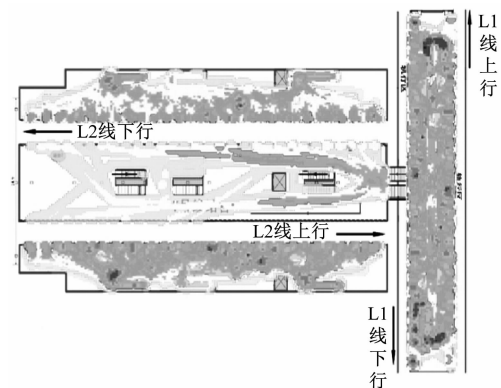
b) HN站台

图2 各关键点位卡控前HN站客流仿真截图

Fig. 2 Screenshot of passenger flow simulation of HN Station at each key point before taking control



a) HN站站厅



b) HN站台

图3 各关键点位卡控后HN站客流仿真截图

Fig. 3 Screenshot of passenger flow simulation of HN Station at each key point after taking control

4 结语

本文按照《指南》的要求,结合城市轨道交通的

运营管控经验,通过采取行车组织、客运组织措施,制定了针对列车满载率、车站拥挤度的细化的城市轨道交通协同控制流程和方法,并配合乘车宣传及

客流引导等辅助手段,将中风险地区车站拥挤度和列车满载率控制在 70% 以内,将高风险地区车站拥挤度和列车满载率控制在 50% 以内。仿真结果显示,该控制方法的实施效果较为理想,其系统协调联动性较强,能有效解决操作层面上存在的量化难、执行难及评估难等问题。

基于城市轨道交通运营管理的复杂性,本文所提的客流控制方法仍为理论层面上的研究成果,需将此理论方法应用到具体的运营生产实际中,以进一步验证其实施效果。在后疫情时代,本控制方法可为城市轨道交通高峰期常态化客流协同控制提供参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 关于分区分级科学做好客运场站和交通运输工具新冠肺炎疫情防控工作的通知: 交运明电 [2020]84 号 [A/OL]. (2020-03-01) [2020-03-02]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202006/t20200623_3316075.html. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Notice on scientific prevention and control of COVID-19 pneumonia pandemic at passenger stations and on transport vehicles by divisions and grades: JYMD [2020] No. 84 [A/OL]. (2020-03-01) [2020-03-02]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202006/t20200623_3316075.html.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通运营企业运营数据报告(2019 年第四季度) [R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020:1.
China Association of Metros. Operation data report of urban rail transit operation enterprises (the fourth quarter of 2019) [R].

(上接第 112 页)

参考文献

- [1] 刘剑锋, 罗铭, 马毅林, 等. 北京轨道交通网络化客流特征分析与启示[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(5): 27.
LIU Jianfeng, LUO Ming, MA Yilin, et al. Analysis on the passenger flow characteristics of Beijing urban rail network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(5): 27.
- [2] 李金海, 李明高, 杨冠华, 等. 北京轨道交通网络化客流特征及成长趋势分析[J]. 交通工程, 2017, 17(3): 53.
LI Jinhai, LI Minggao, YANG Guanhua, et al. An analysis on the passenger volume characteristics and growth trend of networking process of the Beijing urban rail transit[J]. Journal of Transportation Engineering, 2017, 17(3): 53.
- [3] 陈必壮, 王忠强, 王祥. 上海市轨道交通网络化客流特征分析及启示[J]. 城市交通, 2013, 11(6): 28.
CHEN Bizhuang, WANG Zhongqiang, WANG Xiang. Character-

istics analysis of passenger flow on rail transit network in Shanghai

- [3] 北京地铁运营有限公司. 北京地铁“超常超强运行图”诞生记 [J]. 城市轨道交通, 2020(7): 32.
Beijing Subway Operation Co., Ltd. Birth record of 'super normal and super strong operation diagram' of Beijing Subway[J]. China Metros, 2020(7): 32.
- [4] 吴金龙, 丁小兵, 刘志钢. 上海市轨道交通系统防疫策略研究——以新型冠状病毒肺炎疫情为背景[J]. 城市交通, 2020, 18(3): 46.
WU Jinlong, DING Xiaobing, LIU Zhigang. Epidemic prevention strategy of Shanghai rail transit system: taking the COVID-19 pandemic as an example[J]. Urban Transport of China, 2020, 18(3): 46.
- [5] 南方都市报. 深圳地铁 26 站点头高峰期人多! 控流拥挤清单发布, 市民出行请提早 [N/OL]. 南方都市报, (2020-03-11) [2020-03-12]. https://view.inews.qq.com/k/20200311A0FFQC00?web_channel=wap&openApp=false&f=newdc.
Southern Metropolis Daily. Huge passenger volume during peak hours at 26 stations of Shenzhen Metro! The list of flow congestion control is released and citizens please travel with advancement [N/OL]. Southern Metropolis Daily, (2020-03-11) [2020-03-12]. https://view.inews.qq.com/k/20200311A0FFQC00?web_channel=wap&openApp=false&f=newdc.
- [6] 西安大交通发布. 注意! 今天西安地铁这些车站将实施客流控制 [EB/OL]. (2020-03-09) [2020-03-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1660668924259739397&wfr=spider&for=pc>.
Issued by Xi'an Transportation. Be careful! Today, these stations of Xi'an Metro will implement passenger flow control [EB/OL]. Baidu (2020-03-09) [2020-03-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1660668924259739397&wfr=spider&for=pc>.

(收稿日期: 2020-11-05)

istics analysis of passenger flow on rail transit network in Shanghai [J]. Urban Transport of China, 2013, 11(6): 28.

- [4] 陈豪. 上海轨道交通网络化客流特征浅析[J]. 交通与运输, 2013, 29(5): 53.
CHEN Hao. Analysis on the characteristics of Shanghai rail transit network passenger flow [J]. Traffic & Transportation, 2013, 29(5): 53.
- [5] 郭莉, 谢明隆. 深圳市轨道交通网络化运营初期线路客流特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(8): 14.
GUO Li, XIE Minglong. Passenger flow characters and enlightenment in early operation of Shenzhen rail transit network [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(8): 14.
- [6] 史海欧, 孙元广. 广州轨道交通网络化运营客流特征和问题 [J]. 都市快轨交通, 2012, 25(3): 29.
SHI Haiou, SUN Yuanguang. Characteristics and problems of passenger flows in Guangzhou rail transit network operation [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(3): 29.

(收稿日期: 2021-01-07)