

# 基于系统动力学模型的城市交通拥堵治理策略研究

王正武<sup>1</sup>, 向梓源<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省交通运输厅规划与项目办公室, 湖南 长沙 410116)

**摘要:**【目的】研究城市交通突出的供需矛盾引起的常发性交通拥堵。【方法】针对多变量、多反馈、非线性城市交通复杂系统,采用系统动力学方法研究治堵措施与城市交通系统的互动关系。首先,确定系统的边界与要素之间的相互关系,绘制因果关系图;然后,基于系统流程图构建结构方程,并对模型进行有效性检验;最后,根据长沙市城市交通实际,基于系统动力学模型分析机动车限行、公交都市等单一措施的治堵效果及其对环境的影响,并通过组合治堵措施的正交试验,寻找城市交通治堵措施的最优组合方案。【结果】通过模型仿真提出了长沙市城市交通治堵措施的最优组合方案。【结论】城市交通治堵措施的实施对缓解城市交通拥堵具有显著作用,但不同治堵措施对治堵效果的影响相差较大。

**关键词:** 城市交通拥堵;系统动力学;模拟仿真;供需;正交试验

中图分类号: U491

文献标志码: A

## Research on management strategy of urban traffic congestion based on system dynamics model

WANG Zheng-wu<sup>1</sup>, XIANG Zi-yuan<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Provincial Transport Department Planning and Project Office, Changsha 410116, China)

**Abstract:** [Purposes] The paper aims to study the frequent traffic congestion caused by the prominent contradiction between supply and demand of urban traffic. [Methods] Aiming at the multi-variable, multi-feedback and nonlinear urban traffic complex system, the method of system dynamics was used to study the interactive relationship between the measure of remission congestion and urban traffic system. Firstly, mutual relationship between the boundary and the element of the system was determined to draw the causal diagram. Then, the structural equation was proposed based a system stock-flow diagram and the validity of the model was tested. Finally, according to current traffic of Changsha City, the effect of traffic congestion control and environmental impact of single measure such as traffic restriction and transit metropolis were analyzed based on the system dynamics model, and the orthogonal test of the combined congestion control measures was performed to find the optimal combination scheme of the urban traffic congestion control measures. [Findings] The optimal scheme of urban traffic congestion control measures in Changsha City was proposed through the simulation of the model. [Conclusions] The implementation of urban traffic conges-

收稿日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678075); 湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2019SK2171); 湖南省交通科技项目(201920)

通信作者: 王正武(1973-), 男, 教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。E-mail: zhengwu.wang@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

tion control measures has a significant effect on alleviating urban traffic congestion, but the impact of different congestion control measures on congestion control effect varies greatly.

**Key words:** urban traffic congestion; system dynamics; simulation; supply and demand; orthogonal test

随着城市化进程的不断加快,城市交通拥堵问题越来越严重,交通拥堵治理势在必行。目前,交通拥堵治理的研究大多集中在内涵、成因、定性定量评估及策略实施等方面,但城市交通系统是一个动态的、拥有多变量多回路的高度复杂系统,仅利用常规的定性定量方法或者以往的经验无法准确地刻画出这个系统的行为与内部变量的相互关系<sup>[1]</sup>。FORRESTER 于 1956 年创立的系统动力学(system dynamics,SD)是系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统反馈结构和行为的一门科学<sup>[2]</sup>。鉴于城市交通复杂系统的上述特点,国内外一些专家学者采用系统动力学方法来研究城市交通问题,如 FIORELLO 等<sup>[3]</sup>应用 SD 对欧洲交通运输系统进行了措施化的情景分析;MANOHAR 等<sup>[4]</sup>建立了城市道路交通中污染物排放的 SD 预测模型;ANI 等<sup>[5]</sup>建立了基于可持续交通的 SD 模型,并进行了场景模拟;姜洋<sup>[6]</sup>将目前流行的拥堵治理措施引入系统动力学模型,分析了疏堵并置型措施对拥堵治理的有效性;张毅等<sup>[7]</sup>建立了以机动车措施为调控因子的 SD 模型,考察了措施干预对交通拥堵的影响。尽管系统动力学在城市交通拥堵治理建模中具有较大的优势,并取得了一定的研究进展,但现状研究仍然存在以下问题:① 主要实施的是 1~2 种干预措施<sup>[3-9]</sup>,尽管文献<sup>[10-11]</sup>研究了同时实施多种拥堵治理措施的治理效果,但也只分析了短期的治理效果,未考虑多措施共同作用下交通拥堵的长期演化规律,也未分析综合措施实施后调控参数的变化情况;② 大部分研究未考虑治理措施对城市发展、环境污染等的影响;③ SD 模型仅考虑了交通供需总量不匹配导致的交通拥堵,未考虑供需结构的非均衡变化<sup>[7]</sup>。

针对上述问题,本研究构建了城市交通拥堵治理的系统动力学模型,刻画了治堵措施对城市拥堵及城市发展、环境污染等的影响,并以长沙市为例,基于正交试验法进行了治堵策略的组合研究,以期找到城市交通治堵组合措施的最优方案。

1 系统动力学模型的构建

在划定系统边界时,位于边界内部且与研究目的相关的要素都应考虑在内,而位于边界外部或与研究目的关系不大的要素应该排除在系统之外,同时还需要考虑就简及有效原则<sup>[12]</sup>。通过对系统边界的分析,确定本研究的 SD 模型主要包括经济发展、人口、环境污染、交通需求、交通供给、交通拥挤程度、机动车保有量 7 个子系统<sup>[12]</sup>。其中,经济发展主要考虑 GDP<sup>[13]</sup>,环境污染主要考虑以 NO<sub>x</sub> 为主的污染源,机动车保有量主要考虑私家车、公交车等客运车<sup>[14]</sup>及主要由城市货运车辆构成的其他机动车。

通过系统内部各要素间的因果关系分析得到因果关系图,如图 1 所示。图 1 中存在的主要因果关系有:① 经济发展<sup>+</sup>人口<sup>+</sup>交通需求<sup>+</sup>交通拥堵<sup>+</sup>交通供给<sup>-</sup>交通拥堵<sup>-</sup>经济发展(正反馈);② 经济发展<sup>+</sup>机动车保有量<sup>+</sup>交通需求<sup>+</sup>交通拥堵<sup>-</sup>经济发展(负反馈);③ 经济发展<sup>+</sup>机动车保有量<sup>+</sup>环境污染<sup>-</sup>人口<sup>+</sup>交通需求<sup>+</sup>交通拥堵<sup>-</sup>经济发展(正反馈)。模型参数见表 1。根据各子系统、要素间的因果关系构建图 2 所示的城市交通系统流程图(图 2 中的黄色部分为治堵措施)及主要的结构方程。

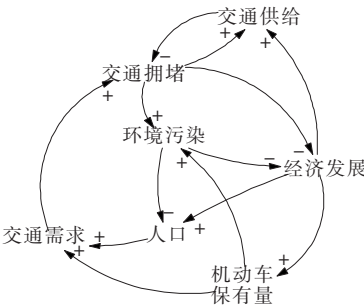


图 1 城市交通系统因果关系图

Fig. 1 Causal diagram of urban traffic system



2.1 参数说明

模型参数主要来自长沙市统计年鉴、长沙市交通年报或由回归分析、数据拟合得到。其中,环境影响系数、社会基础设施投资、交通基础设施投资的拟合函数见式(10)~(12),其他参数见表2。

$$E_{IF}=1.1-0.3S \tag{10}$$

$$I_{SI}=0.155\,8G-197.41 \tag{11}$$

$$I_{TI}=(0.503\,9I_{SI}-73.706)\,C_{IF} \tag{12}$$

表2 2006年长沙城市交通系统部分变量初始值  
Table 2 Initial values of some variables of urban traffic system of Changsha in 2006

变量	初始值	变量	初始值
$G$ /亿元	2 137.82	$N_{TPC}$ /次	2.33
$R_{GDP}$ /%	21.8	$P$ /人	2.5
$P_T$ /万人	630.996	$C$ /km	800
$R_{BT}$ /%	10.06	$U_{RC}$ /(亿元·km <sup>-1</sup> )	0.001
$R_{DT}$ /%	5.05	$I_{CR}$	0.000 3
$P_{CO}$ /万辆	13.876	$C_{NO}$ /万 t	5.56
$B_{OS}$ /万辆	0.269 2	$W$ /t	25
$O_{OMV}$ /万辆	4.711 1	$O$	0.6
$A_{TD}$ /km	4.55	$D_{NO}$	0.25

注:表中的数据来自《长沙市统计年鉴2007》。

2.2 模型检验

为了验证模型是否能准确刻画系统结构和内部因素的相互关系,选取人口、GDP、机动车保有量、私家车保有量4个指标,以2006年为基准年,运行时长为20年,时间步长为1年,通过模型计算得到2015年各指标的预测值,结果见表3。由表3可知,各指标预测值的相对误差均在5%以内,说明所建模型具有较高的可信度<sup>[15]</sup>。

表3 2015年4个指标预测值与实际值的比较  
Table 3 Comparison of predicted and actual values of four indexes for 2015

项目	人口/ 万人	GDP/ 亿元	机动车保 有量/ 万辆	私家车保 有量/ 万辆
预测值	700.099	8 783.780	159.899	143.096
实际值	680.358	8 630.518	156.629	140.867
相对误差/%	2.90	1.78	2.09	1.58

2.3 单一措施效果分析

目前,对居民出行影响较大的治堵措施有机动车限行、公交都市等。本研究将机动车限行、公

交都市这两种治堵措施加入图2所示的系统流程图及主要由式(1)~(9)构成的系统动力学模型中,分析单一交通治堵措施对城市交通系统的影响及治理方案对交通拥挤、环境和经济的影响。

2.3.1 机动车限行措施

本研究考虑2个和3个尾号的机动车限行措施。实施限行措施后会有更多的人选择使用公共交通工具出行,减少了机动车出行总量,而交通供给几乎不受影响,所以交通拥挤程度将有所缓解。通过系统动力学仿真,分别得到限行和不限行情况下交通拥挤程度、NO<sub>x</sub>污染率、GDP随时间的变化过程,如图3所示。由图3可知,交通拥挤程度在2006年至2020年持续上升,在2020年后逐渐趋于平稳,且实施限行措施时拥挤程度更低。可见,限行措施可以在一定程度上缓解交通拥堵,降低污染率,促进GDP更快发展。与限行2个尾号相比,限行3个尾号的效果更佳。

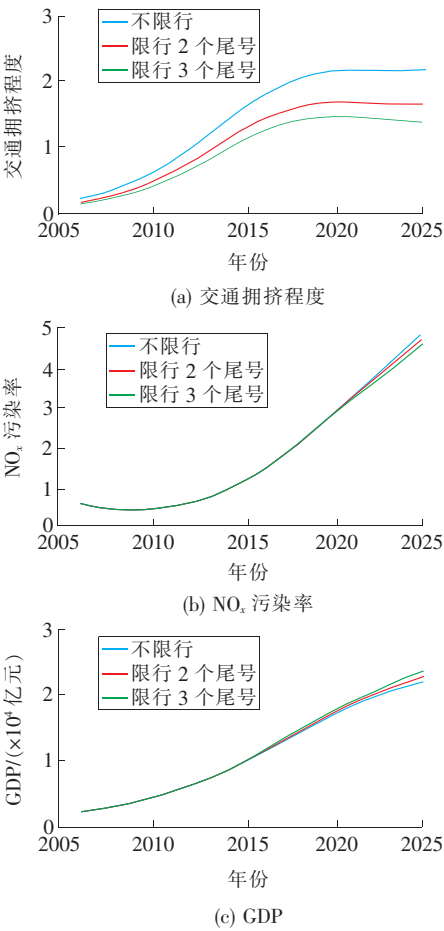


图3 机动车限行措施下3个变量随时间的变化过程  
Fig. 3 Change process of three variables with time under traffic restriction measures



2.3.2 公交都市措施

公交都市建设是为应对小汽车高速增长和交通拥堵所采取的一项以城市公共交通为机动化出行主体的重要交通措施,是一种以城市公共交通引导城市发展的城市布局策略。提高公交分担率,确立城市公共交通在城市交通系统中的主体地位,缓解交通拥堵势在必行。目前,长沙市正在进行公交都市的创建,拟将目前的公交分担率从 43% 提高到 53%。图 4 所示为当公交分担率从 43% 提高到 53% 时,交通拥挤程度、NO<sub>x</sub> 污染率、GDP 随时间的变化过程。

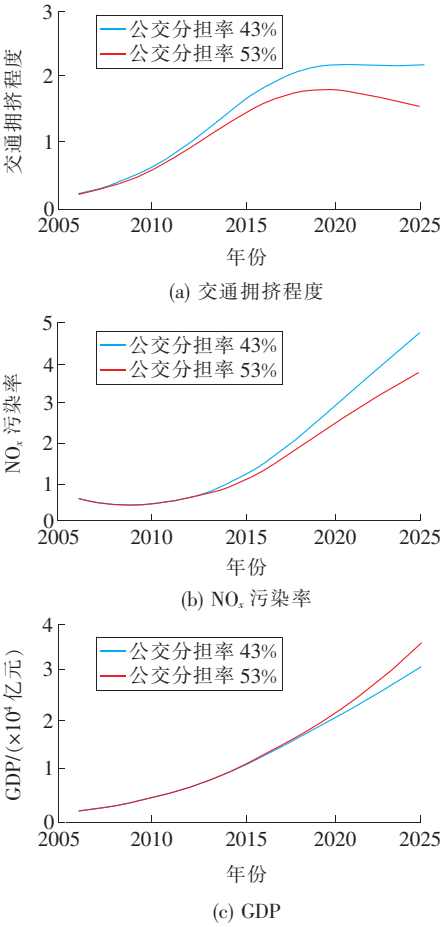


图 4 公交都市措施下 3 个变量随时间的变化过程  
Fig. 4 Change process of three variables with time under transit metropolis measures

由图 4 可知,在原始公交分担率场景下,交通拥挤程度在 2006 年至 2020 年持续上升,而在 2020 年至 2025 年逐渐趋于平稳;将公交分担率提升至 53% 后,交通拥挤程度在 2020 年后呈下降趋势,可见公交分担率 53% 比 43% 的治堵效果更佳。

2.4 多措施组合分析

为了更有效地治理交通拥堵及环境污染,宜

将多种治堵措施优化组合起来实施。本研究主要考虑机动车限行、摇号限购、公交都市、合乘出行、调整交通投资比重、机动车减排、智能交通控制 7 种治堵措施,并基于正交试验法探寻最佳的组合治堵方案。

正交试验法<sup>[16-18]</sup>是利用规则化的正交表合理安排试验来分析多因素问题的一种数理统计方法,适用于分析和整理多因素的交互作用。通过正交试验法寻找最优治堵组合方案的步骤为:① 识别并选择重要影响因素;② 确定影响因素水平,构建影响因素水平表;③ 构建正交试验表;④ 调用城市交通系统流程图及结构方程式;⑤ 影响因素极差分析,确定各影响因素的敏感性排序。

本研究按表 4 所列的 7 个影响因素、3 个水平设计了正交试验表,并通过仿真得到正交试验结果,见表 5。由正交试验结果计算得到极差等统计参数,见表 6。拥堵治理组合方案见表 7。

图 5 反映了参数  $K_{ij}$ 、 $R_j$  对各治堵措施的影响。图 5 中的参数  $K_{ij}$  可由下式计算:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n (\alpha Y_{ijk1} + \beta Y_{ijk2}) \tag{13}$$

式中: $K_{ij}$  为因素  $j$  在  $i$  水平下的统计参数; $n$  为因素  $j$  在  $i$  水平下的试验次数; $Y_{ijkm}$  ( $k=1,2,\cdots,n$ ;  $m=1,2$ ) 为因素  $j$  在  $i$  水平下的第  $k$  个试验结果; $\alpha$ 、 $\beta$  分别为  $Y_{ijk1}$  和  $Y_{ijk2}$  的权重。本研究中  $Y_{ijk1}$  和  $Y_{ijk2}$  分别代表交通拥挤程度和污染率,且在取值时均取最大值; $\alpha$ 、 $\beta$  分别取 0.8 和 0.2。

图 5 中的极差  $R_j$  可用来判断影响因素的显著性水平,其计算公式为:

$$R_j = \max(K_{1j}, K_{2j}, \cdots, K_{rj}) - \min(K_{1j}, K_{2j}, \cdots, K_{rj}) \tag{14}$$

极差越大说明该因素的改变对试验结果的影响越大。极差最大的因素即为最主要的因素,极差较小的因素则为次要因素。

分析表 6 和图 5 可知:

- 1) 由极差  $R_j$  的大小可知本研究所采用的治理交通拥堵的 7 个措施的敏感度排序为:公交都市>摇号限购>机动车减排>智能交通控制>合乘出行>机动车限行>调整交通投资比重。
- 2) 治堵最优组合方案为公交都市 1、摇号限购 1、机动车减排 1、智能交通控制 1、合乘出行 1、机动车限行 1、调整交通投资比重 2。

表 4 各影响因素的取值范围及不同水平下的取值

Table 4 Value ranges and levels of influencing factors						%
治堵措施	实施方案	不同水平下的取值			取值范围	
		1	2	3		
机动车限行	增加限行车辆	20	10	0	0~20	
摇号限购	减少牌照数	15	10	0	0~15	
公交都市	增大公交分担率	10	5	0	0~10	
合乘出行	增加私家车载客量	20	10	0	0~20	
调整交通投资比重	加大交通投资比重	10	5	0	0~10	
机动车减排	减少机动车排放量	20	10	0	0~20	
智能交通控制	减少机动车出行总量	15	10	0	0~15	

表 5 正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results

试验 序号	机动 车限 行/%	摇号 限购/ %	公交 都市/ %	合乘 出行/ %	调整交 通投资 比重/%	机动 车减 排/%	智能交 通控 制/%	交通拥 挤程度 范围	污染率 范围
1	20	15	10	20	10	20	15	[0.133,0.636]	[0.344,1.382]
2	20	10	5	10	5	10	10	[0.150,0.977]	[0.372,2.264]
3	20	0	0	0	0	0	0	[0.179,1.681]	[0.395,4.709]
4	10	15	10	10	5	0	0	[0.187,0.944]	[0.381,1.829]
5	10	10	5	0	0	20	15	[0.171,1.105]	[0.355,2.010]
6	10	0	0	20	10	10	10	[0.158,1.311]	[0.378,3.818]
7	0	15	5	20	0	10	0	[0.195,1.110]	[0.369,2.030]
8	0	10	0	10	10	0	15	[0.176,1.334]	[0.392,3.739]
9	0	0	10	0	5	20	10	[0.200,1.200]	[0.353,1.903]
10	20	15	0	0	5	10	15	[0.152,1.032]	[0.373,2.455]
11	20	10	10	20	0	0	10	[0.141,0.792]	[0.383,2.106]
12	20	0	5	10	10	20	0	[0.167,1.144]	[0.358,2.415]
13	10	15	5	0	10	0	10	[0.181,1.036]	[0.385,2.360]
14	10	10	0	20	5	20	0	[0.176,1.273]	[0.359,2.599]
15	10	0	10	10	0	10	15	[0.159,0.996]	[0.371,2.094]
16	0	15	0	10	0	20	10	[0.187,1.240]	[0.357,2.170]
17	0	10	10	0	10	10	0	[0.223,1.194]	[0.368,1.940]
18	0	0	5	20	5	0	15	[0.166,1.190]	[0.391,3.454]

表 6 参数极差分析结果

Table 6 Parameter range analysis results

参数	机动车 限行	摇号限购	公交都市	合乘出行	调整交通 投资比重	机动车 减排	智能交通 控制
$K_{1j}$	8.076	7.244	6.860	8.146	8.455	7.777	8.061
$K_{2j}$	8.274	8.271	8.156	8.386	8.378	8.216	8.169
$K_{3j}$	8.662	9.700	10.195	8.879	8.563	9.239	8.979
$R_j$	0.586	2.456	3.335	0.733	0.185	1.462	0.918

表 7 组合方案

Table 7 Combination schemes

1	2	3	4	5	6	7
公交都市 1	公交都市 1	公交都市 1	公交都市 1	公交都市 1	公交都市 1	公交都市 1
	摇号限购 1	摇号限购 1	摇号限购 1	摇号限购 1	摇号限购 1	摇号限购 1
		机动车减排 1	机动车减排 1	机动车减排 1	机动车减排 1	机动车减排 1
			智能交通控制 1	智能交通控制 1	智能交通控制 1	智能交通控制 1
				合乘出行 1	合乘出行 1	合乘出行 1
					机动车限行 1	机动车限行 1
						调整交通投资比重 2

注:治堵措施后的数字代表该措施的相应水平。

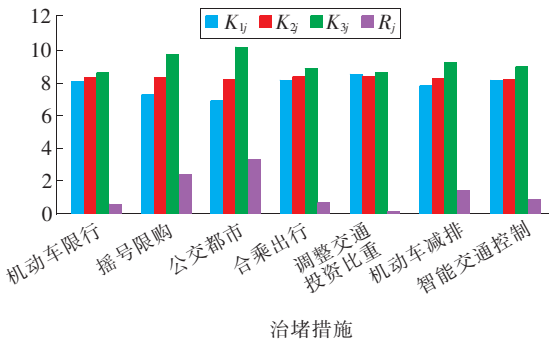


图 5 参数  $K_{ij}$ 、 $R_j$  对各治堵措施的影响

Fig. 5 Influence of  $K_{ij}$  and  $R_j$  on various traffic congestion control measures

3) 公交都市、摇号限购、机动车减排、智能交通控制、合乘出行、机动车限行、调整交通投资比重的极差  $R_j$  依次减小表示治堵效果逐渐变差。其中,交通拥挤和环境污染在公交都市、摇号限购、机动车减排等措施的实施中得到了明显的缓解,而调整交通投资比重对交通拥挤和环境污染没有起到明显的作用。

4) 因为 7 个治堵措施之间没有明显的促进或抵消作用,因而治堵组合方案的确定原则为:按照 7 个治堵措施的敏感度从大到小进行选择,各个参数的水平则根据各自的统计参数  $K_{ij}$  由大到小进行选取。

3 结论

本研究根据城市交通系统复杂性、动态性的特点,建立了考虑治堵措施的城市交通系统动力学模型,并以长沙市为例进行了案例分析,得到了以下结论:

1) 由单一治堵措施的仿真试验可知,限行 3 个尾号的限行措施比限行 2 个尾号在治堵效果方面更好;将公交分担率从 43% 提升至 53%,治堵效果更佳。

2) 由治堵措施组合分析可知,7 种治堵措施的敏感度排序为:公交都市>摇号限购>机动车减排>智能交通控制>合乘出行>机动车限行>调整交通投资比重。根据统计参数  $K_{ij}$  的大小由小到大选取各参数的水平,并最终得到优化后的单一治堵措施以及最优的治堵措施组合方案。

3) 公交都市是治理城市交通拥堵最好的措施,各个城市在选择治堵措施时应优先考虑。

〔参考文献〕

[1] 陆化普,毛其智,李政,等.城市可持续交通:问题、挑战和研究方向[J].城市发展研究,2006(5):91-96.  
LU Hua-pu, MAO Qi-zhi, LI Zheng, et al. Urban sustainable mobility: problems, challenges and research topics[J]. Urban Development Studies, 2006 (5):91-96.

[2] FORRESTER J W. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers[J]. Harvard Business Review, 1958, 36(4):37-66.

[3] FIORELLO D, FERMI F, BIELANSKA D. The ASTRA model for strategic assessment of transport policies[J]. System Dynamics Review, 2010, 26(3): 283-290.

[4] MANOHAR G, DEVI S P, RAO K S. Evaluation of policies to reduce transportation pollution using system dynamics[J]. Environment Protection Engineering, 2014, 40(4):143-153.

[5] ANI M, JENNIFER K, FABIAN L, et al. Integrated

urban mobility policies in metropolitan areas; a system dynamics approach for the Rhine-Ruhr metropolitan region in Germany[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102358.

[6] 姜洋. 系统动力学视角下中国城市交通拥堵对策思考[J]. 城市规划, 2011, 35(11): 73-80.

JIANG Yang. Reflections on anti-congestion policies in Chinese cities from system dynamics perspective [J]. City Planning Review, 2011, 35(11): 73-80.

[7] 张毅, 张丽, 万丽娟, 等. 基于机动车政策的城市交通可持续发展建模研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 142-147, 153.

ZHANG Yi, ZHANG Li, WAN Li-juan, et al. Modelling of sustainable development of urban traffic based on vehicle policy[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(6): 142-147, 153.

[8] 马书红, 孙朝旭. 基于系统动力学的城市交通系统供需分析模型[J]. 长安大学学报(社会科学版), 2017, 19(3): 31-37.

MA Shu-hong, SUN Zhao-xu. Supply-demand analysis model of urban traffic system based on system dynamics[J]. Journal of Chang'an University (Social Science Edition), 2017, 19(3): 31-37.

[9] 唐丽敏, 王艺澄, 王盼. 基于系统动力学的道路运输能源需求预测: 以辽宁省为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 91-96.

TANG Li-min, WANG Yi-cheng, WANG Pan. Road transport energy demand forecasting based on system dynamics: taking Liaoning Province as an example [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38(3): 91-96.

[10] SAYYADI R, AWASTHI A. An integrated approach based on system dynamics and ANP for evaluating sustainable transportation policies[J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2020, 7(2): 182-191.

[11] 高妍南, 郝晴. 低碳经济下城市交通系统动力学模型及政策仿真[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3): 96-104.

GAO Yan-nan, HAO Qing. A system dynamics model and simulation of policy for urban traffic system under low carbon economy [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(3): 96-104.

[12] 靳政. 北京市交通结构演变的系统动力学模型研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 18.

JIN Mei. Study on system dynamics model of Beijing traffic structure evolution [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007: 18.

[13] 黄中祥, 谢雯娉, 许泽昭. 城市客运交通供需结构非均衡 SD 模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(4): 23-30.

HUANG Zhong-xiang, XIE Wen-ping, XU Ze-zhao. System dynamics model of urban traffic supply and demand disequilibrium in structure [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(4): 23-30.

[14] 何南. 城市客运交通需求的系统动力学预测与分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(4): 569-574.

HE Nan. Travel demand forecasting and analysis of urban passenger transportation system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(4): 569-574.

[15] 姚冠新, 范雪茹, 刘路. 枢纽经济视域下的物流枢纽服务和综合交通运输一体化发展的仿真优化[J]. 系统工程, 2021, 39(2): 101-110.

YAO Guan-xin, FAN Xue-ru, LIU Lu. Simulation and optimization of logistics hub service and comprehensive transportation integrated development from the perspective of hub economy [J]. Systems Engineering, 2021, 39(2): 101-110.

[16] 王正武, 陈小兰, 李常乐. 道路交通网络级联失效影响源辨识[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 98-104.

WANG Zheng-wu, CHEN Xiao-lan, LI Chang-le. Identifying influence sources of cascading failure for road traffic network [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 98-104.

[17] 肖华宪. AC-25C 沥青混合料级配正交优化试验研究[J]. 公路工程, 2012, 37(4): 247-249, 252.

XIAO Hua-xian. Orthogonal experimental optimization on graded aggregate of AC-25C asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2012, 37(4): 247-249, 252.

[18] 朱云鹏, 徐晓美. 基于正交试验理论的消声器优化设计[J]. 公路与汽运, 2014(4): 13-15.

ZHU Yun-peng, XU Xiao-mei. Optimization design of muffler based on orthogonal experiment theory [J]. Highways & Automotive Applications, 2014 (4): 13-15.

(编辑 石月珍)