

基于系统动力学的城市群交通 供需关系研究*

高东梅¹, 刘佳², 郑山江¹, 李成兵¹

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 基于城市群交通系统的复杂性与动态性特征, 综合考察交通供需与人口、经济和环境等要素的耦合关系, 旨在揭示城市群交通供需失衡的内在机制, 为系统优化提供理论支撑。研究采用系统动力学方法, 首先, 系统解析交通供需的关键影响因素; 其次, 在界定研究主体模块的基础上, 明确系统边界, 绘制因果关系图并深入剖析系统反馈机制; 最后, 构建城市群交通供需非均衡的系统动力学模型, 建立相应的精确分析方程。以京津冀城市群为实证案例, 基于Vensim平台对2024—2032年交通供需关系进行动态仿真, 结果表明, 在自然发展情景下, 该区域交通系统非均衡度呈持续恶化趋势, 2032年非均衡度将降至0.48。进一步通过政策情景模拟发现, 实施人口规模调控(减少20%)和交通基础设施投资扩张(增加20%)两类干预策略后, 非均衡度分别提升至0.59和0.55, 较基准情景改善幅度达22.92%和14.58%。本研究不仅揭示了城市群交通供需失衡的内在机制, 还为政策制定提供了量化决策依据。

关键词: 城市群交通; 供需非均衡; 交通供需; 系统动力学

中图分类号: U491 **文献标志码:** A

在城市群的发展背景下, 交通供给与需求之间的矛盾更加凸显, 二者在时间、区域和质量上均存在显著的不匹配问题。在“春运”“十一”长假等高峰需求时段基本能够实现“走得了”, 但交通方式选择和服务质量的韧性仍有待加强, 京津冀、长三角、粤港澳、成渝四大城市群还存在基础设施利用饱和度较高的现象^[1]。因此, 城市群交通供需匹配还存在结构优化的空间, 深入研究城市群交通供需关系是必要的, 有助于提升交通系统的整体效率和服务质量, 以更好地满足人民日益增长的出行需求。

已有诸多学者对交通供需关系进行研究。在理论基础方面, Haghani等^[2]提出了非均衡交通流理论及相关模型, 并深入研究了模型解的结构特性, 突出了交通流的非均衡性, 并为建模提供了新的视角; 吴文征^[3]借鉴了经济学的均衡理论, 提出了交通运输供求的动态平衡理念, 并从总量规模和运量结构两个方面对我国交通运输发展状况进行了初步分析; Shao等^[4]明确了交通供给和需求的定义, 并构建了非均衡模型, 用以描述交通供需之间的非均衡程度; 李艳艳^[5]提出广泛意义上的交通供求非均衡度定义; Mao等^[6]对供给函数、需求函数及均衡与非均衡模型进行了详尽分析。以上研究为交通供需关系的深入理解提供了不同视角的理论框架和分析方法, 为交通领域的建模和优化提供了丰富的理论基础。

在交通供需关系方面, Chen等^[7]使用地理信息系统评估公共交通供需差距, 为政策制定提供了

* 收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2025-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(62063023); 内蒙古自然科学基金项目(2023MS05036); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22099)

作者简介: 高东梅(1998—), 女, 山西忻州人, 2023级硕士研究生。E-mail: 1696489115@qq.com

通信作者: 李成兵(1982—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士。主要从事交通运输系统仿真与优化研究。E-mail: bingbingnihao2008@126.com

定量评估方法;Joshi等^[8]考虑了现代物流和供应链管理中的复杂性与不确定性,解决多选择成本和随机供需的多目标运输问题;李成兵^[9]通过微分动力学原理构建了城市群交通运输系统的供需非均衡模型,并提出了平衡条件;李效等^[10]对南京城市交通供需平衡进行了研究,通过预测城市交通的供给与需求,量化了未来面临的供需失衡程度;彭志敏等^[11]从供需经济均衡的视角对运输服务供需匹配问题进行了深入分析,突出了经济因素对交通供需关系的影响;Hörcher等^[12]考虑了在不同需求模式下通过基尼系数衡量公共交通需求的不均衡程度;Yang等^[13]针对出租车供需不平衡问题,提出了一种基于动态图卷积网络和门控递归单元的时空预测模型,考虑了出租车流动性和其他交通方式的变化对网格间供需动态的影响;Gao^[14]从时间和空间维度上研究了交通供需的复杂关系,提出了多方面的解决方案以应对高密度需求;韦敬楠^[15]对我国主要城市交通拥堵特征进行实证分析,揭示了城市交通拥堵程度与城市道路资源供需失衡程度呈正向关系;包渊秋等^[16]研究了疫情轻度蔓延期间公交供给与乘客需求之间的动态博弈关系;刘海坤^[17]研究了我国国际航空货运供需的非均衡状况,并通过系统动力学模型分析了影响供需平衡的关键因素。以上研究对交通供需关系进行了特性分析和量化,但大部分研究在分析供需关系时都较少提及其他因素对交通供给和需求的影响,而且缺乏对交通供需相互作用机制的深入分析。

在交通政策方面,Quentin等^[18]研究了交通方式选择与优化交通拥堵之间的关系,通过对交通税和交通分离政策的研究,认为交通政策对于改善交通拥堵是必要条件但非充分条件;Xin等^[19]以福建沿海城市群为例,研究了生态系统服务供需失衡的问题,为优化城市群的生态服务供需关系提出了政策建议;Ma等^[20]将适应性策略纳入交通供需管理策略的制定中,为应对经济和人口增长的不确定性提供了新的思路和方法;韩敏等^[21]从交通需求和交通供给两个方面指出古城交通理性发展的趋向。以上研究从不同角度和层面探索了交通管理的策略,但未能充分考虑交通系统的动态变化对交通供需关系的影响。

综上所述,大部分学者在交通供需研究中,通常侧重于从供给与需求两个方面来分析其关系,主要通过建立供需均衡或非均衡模型来探讨交通系统的动态变化。然而,这些研究往往局限于供需角度,未能充分考虑到整个交通系统中其他因素的影响。实际上,城市群交通系统是一个复杂的系统,各种因素如交通基础设施、交通政策、人口流动和经济发展等都在影响着交通供需的平衡与非均衡。尽管供给与需求之间的关系是交通系统研究的核心,但仅从这两个维度来衡量交通供需失衡的程度,可能忽略了系统中其他重要变量的作用,而这些因素往往在实际交通管理和规划中起着至关重要的作用。基于此,本文将系统动力学与城市群交通相结合,构建城市群交通供需非均衡模型,将交通系统中主要因素的相互关系纳入考量,研究与分析交通供需非均衡的变化趋势,并通过外部政策进行调控,提出相应优化建议,实现交通系统从非均衡状态向均衡状态的过渡。

1 系统动力学在城市群交通系统中的应用

本文将系统动力学与城市群相结合,整体研究交通供需关系。系统动力学是一门基于系统论、信息论和控制论的交叉学科^[22],也是一种通过计算机仿真技术研究系统动态行为的方法论。它聚焦于系统内部元素间的相互作用与反馈回路,通过建立数学模型来模拟和分析系统的动态演化过程。本文建立的系统动力学模型基本流程如图1所示。

城市群交通系统是一个复杂的多层次系统,涉及多个要素(如交通流、车辆、道路网络和政策法规等)及其相互作用。系统动力学可以很好地从宏观角度定量分析城市交通与社会经济之间的关系^[23],能够通过建立模型来捕捉城市群交通系统内部复杂的动态关系,通过模拟这些动态变化,帮助研究者理解系统的整体行为以及系统内部存在的反馈机制,分析其对系统稳定性的影响。其次,系统动力学模型可以通过图形化的方法展示系统中各个要素之间的关系,使复杂的交通系统动态更加易于理解。最后,系统动力学关注的不是求模型最优解,而是政策优化。通过系统动力学模型,可以

改变模型内部的关键变量,探究系统内部各个要素之间是如何相互影响的,预测城市群交通系统的未来发展趋势。决策者可以在虚拟环境中测试不同的交通政策和管理措施,以预测其对系统内部关键变量的影响,从而制定更加有效的交通管理策略。综上所述,系统动力学为城市群交通系统的分析和优化提供了一个强有力的工具,能够帮助研究人员和决策者深入理解系统内部之间的复杂关系,从而制定有效的管理策略。因此,本文从城市群交通系统的供需两方面入手,构建城市群交通供需非均衡模型,探究系统中各个要素之间的关系,分析供需非均衡的演变过程和未来发展趋势。

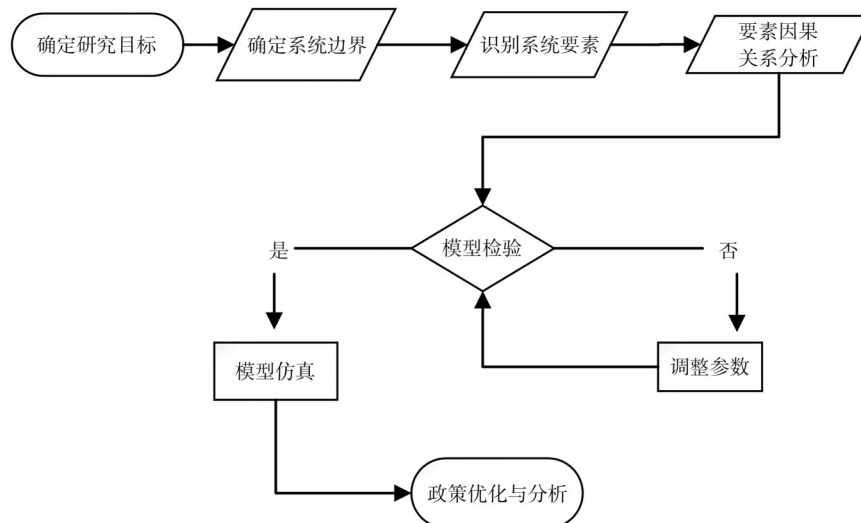


图1 系统动力学模型的基本流程

Fig. 1 Basic process of the system dynamics model

2 城市群交通系统边界和因果关系分析

2.1 系统边界的确定

系统边界是一个想象的轮廓,它根据建模目的规定模型中应纳入与排除的内容,将所研究的系统与外部环境隔开^[24]。对城市群交通系统来说,供需矛盾是当前导致交通问题的主要原因,而交通需求和交通供给的影响因素众多,其中城市人口、经济发展水平、机动车数量和环境等对供应和需求的影响较为明显^[23]。在此基础上确定城市群交通系统的边界,结果如下。

(1) 经济:经济的发展与交通基础设施的投资息息相关,而交通基础设施的建设和发展会直接影响交通供给。

(2) 人口:社会系统的主体是人,人是交通活动的直接参与者,交通活动对社会各个方面的影响,归根结底是通过人们活动来体现的。人口数量的增加会直接导致交通需求的增加。随着城市人口的增长,通勤、购物和娱乐等活动的需求也会增加,从而对交通系统提出更高的要求。此外,人口增长趋势也会对长期交通规划和基础设施建设产生影响。了解和分析人口的规模、分布和结构等因素有助于制定更有效的交通规划和管理策略,以满足不同人群的交通需求,提高交通系统的运输效率和便捷性。

(3) 环境:交通运输是城市环境污染的主要来源之一,交通排放对环境质量和人类健康产生负面影响。因此,环境因素也会影响人们对交通方式的选择,从而影响交通需求的结构。

(4) 交通供给:交通供给决定了系统的承载能力,合理的交通供给能够有效分散交通流量,减少拥堵,提升整体交通运输效率。

(5) 交通需求:交通需求决定了所需的设施和服务类型,并影响出行方式的选择。交通需求与供给之间的平衡是确保交通流动效率的关键。

系,得到模型的主要方程式如表 1 所示。城市群交通供需非均衡度定义为城市群交通供给量与城市群交通需求量之比,城市群交通客运与货运需求量的计算参考李成兵^[9]的方法,通过实际发生的客货运周转量以及其他相关变量数据,利用多元时间序列分析对城市群交通需求总量进行预测。

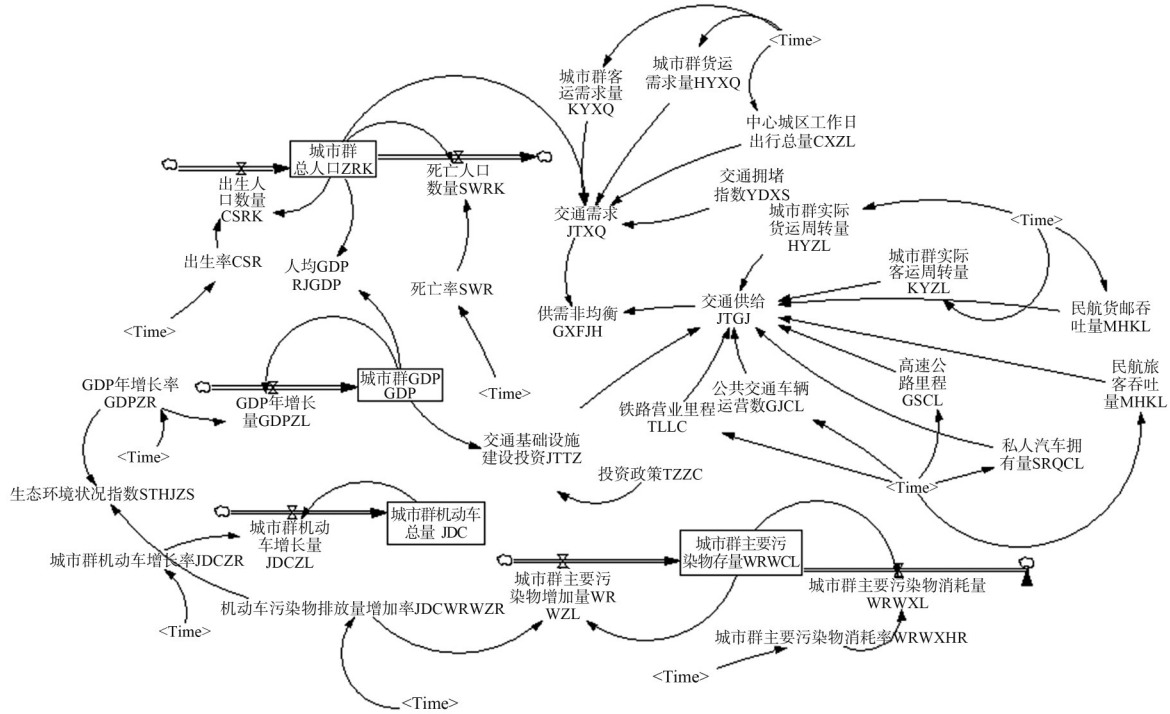


图 3 城市群交通供需系统流图

Fig. 3 Flow diagram of transportation supply and demand system in urban agglomeration

4 模型应用

4.1 因果反馈关系分析

Vensim 是一款由美国 Ventana Systems 公司开发的系统动力学模拟软件,专注于构建、分析和优化动态系统模型,尤其擅长解决复杂反馈系统的动态问题。本文以京津冀城市群为例,利用计算机软件(Vensim PLE)来模拟建立城市群交通供需非均衡系统动力学模型,并进行仿真分析。采用回归分析和参数拟合确定变量初始值和参数,具体数值见表 2。

4.2 模型检验

由于系统动力学是对真实情况的模拟,因此,需要通过模型检验来验证其有效性,确保模型能够反映真实的系统特征。因此,选取城市人口和 GDP 这两个指标,以 2014 年为起始年,2023 年为终止年,仿真步长为 1 年,将模型输出预测结果与实际统计数据比较,并计算两者的相对误差。模型主要变量模拟值如图 4 和 5 所示。

根据 2023 年统计年鉴,模型仿真值与实际值结果如表 3 所示,2023 年京津冀城市群实际总人口为 10943 万人,GDP 总值为 104442.1 亿元。模型输出 2023 年的京津冀城市群总人口和 GDP 分别为 11744.2 万人和 108015.2 亿元,最大相对误差控制在 9% 以内,具有较高的可信度,因此可以用该模型进行城市群交通供需非均衡的仿真和分析。

4.3 模型仿真

4.3.1 发展趋势仿真分析

以 2014 年为起始年,2033 年为终止年,仿真步长为 1 年,模拟运行模型并输出京津冀城市群

每年的交通需求、供给与供需非均衡的仿真结果及其随时间变化趋势的曲线,仿真结果如图6所示。

表1 模型主要状态变量及方程

Table 1 Primary state variables and equations in the model

变量名	类型	变量方程式	单位
X_{ZRK}	①	$X_{ZRK} = \text{INTEG}(X_{CSRK} - X_{SWRK}, \text{初始值})$	万人
X_{CSRK}	②	$X_{ZRK} \cdot X_{CSR}$	万人
X_{SWRK}	②	X_{JDCZL}	万人
X_{RJGDP}	③	X_{GDP} / X_{ZRK}	亿元/人
X_{GDP}	①	$\text{INTEG}(X_{GDPZL}, \text{初始值})$	亿元
X_{GDPZL}	②	$X_{GDP} \cdot X_{GDPZR}$	亿元
X_{JTTZ}	③	$a \cdot X_{TZZC} + b \cdot X_{GDP} \cdot (1 + X_{GXFJH})$	亿元
X_{JDC}	①	$\text{INTEG}(X_{JDCZL}, \text{初始值})$	万辆
X_{JDCZL}	③	$X_{JDC} \cdot X_{JDCZR}$	万辆
X_{WRWCL}	①	$\text{INTEG}(X_{WRWZL} - X_{WRWXL}, \text{初始值})$	ug/m ³
X_{WRWZL}	②	$X_{WRWCL} \cdot X_{JDCWRWZR}$	ug/m ³
X_{WRWXL}	②	$X_{WRWCL} \cdot X_{WRWXR}$	ug/m ³
X_{JTXQ}	③	$X_{KYXQ} \cdot c + X_{HYXQ} \cdot d + X_{CXZL} \cdot e + X_{ZRK} \cdot f + X_{YDXS} \cdot g$	—
X_{GXFJH}	③	X_{JTGJ} / X_{JTXQ}	—
X_{JTGJ}	③	$X_{HYZL} \cdot \alpha + X_{KYZL} \cdot \beta + X_{MHHL} \cdot \gamma + X_{MHKL} \cdot \delta + X_{GSLC} \cdot \eta + X_{SRQCL} \cdot \lambda + X_{GJCL} \cdot \iota + X_{TLLC} \cdot k$	—
X_{TZZC}	③	$\text{RANDOMUNIFORM}(0.5, 1.5, 1)$	—
X_{STHZS}	③	$1 + m \cdot X_{GDPZR} + n \cdot X_{WRWZR}$	—

注:①表示状态变量,②表示速率变量,③表示辅助变量。 $a, b, c, d, e, f, g, k, l, m, n, \alpha, \beta, \eta, \gamma, \iota$ 和 λ 是方程参数,用以衡量不同变量间的相对影响程度。

结果表明,2014—2019年间,交通供需非均衡度一直小于1,表明交通供给未能满足交通需求。在此期间,由于城市经济不断发展和人口增加,人们不再仅仅满足于基本的生产需求,消费需求也显著增加,例如探望亲友和旅游等,带来了日益增长的运输需求,交通基础设施的发展不仅推动了交通需求的上升,也提高了人们的生活质量。此外,机动化程度持续提升,私家车数量在公路交通中占据了绝大多数,旅客的运输需求也随之增加。在此过程中,交通供给与交通需求呈现出相互促进、共同增长的态势。然而,2019—2022年城市群的交通需求因新冠疫情的暴发而迅速减少,供需非均衡度迅速上升,整体呈现波动上升的趋势,尽管在2020年疫情稍有缓解,甚至在2021年出现疫情反弹,但总体交通需求仍在下降,交通供给则缓慢增长。因此,供需非均衡度逐渐大于1。2022年交通供需非均衡度达到最高值1.6766,2020年交通供需非均衡度出现剧增(1.37)。

2022—2025年间,随着疫情逐渐消散,许多行业开始正式运营,人们纷纷复工,交通需求也逐渐恢复。2024—2025年交通供需非均衡度重新回归到1,交通供需再次达成均衡状态。在此期间,城市群的交通供给量与交通需求量相等,由经济学中供需理论可知,京津冀城市群交通供给曲线与交通需求曲线的交点就是平衡点,即此时系统处于供需平衡状态。然而,2025—2033年间,随着交通需求的持续增加,交通供给由于基础设施建设周期较长,未能及时满足增长的交通需求,因此交通供需非均衡度又逐渐上升。与此同时,由于区域和空间的限制,需求增速开始减缓,并逐渐趋于稳定。最终,供给非均衡度下降到一个特定水平后,将保持稳定,不再继续下降。因此,从仿真

结果可知,模型主要变量的变化趋势与实际情况相符,能够准确地展示城市群交通供需非均衡的演化过程。

从图6可以看出,供需非均衡的曲线随时间在 $y=1.0$ 这一水平线上下波动,城市群的交通供需大部分时间处于非均衡状态。这种非均衡状态表明,交通需求和供给之间的差异在不断变化,导致城市群在交通系统的运行中面临着不同程度的压力和挑战。这种供需非均衡的现象反映了城市群在交通管理与规划方面存在一定的短板。尤其是在高峰时段,需求的激增往往使交通供给难以满足,导致拥堵和延误等问题愈发严重。而在低谷时段,交通设施则可能处于闲置状态,资源利用效率低下。这种波动不仅影响城市群内的通行效率,也对居民的出行体验产生消极影响。从供需关系的预测结果可以看出,京津冀城市群交通系统将面临需求持续增长与承载能力不足之间的问题,极有可能陷入系统功能失效的临界状态,因此有必要采取一些外部政策来控制交通需求。

表2 变量初始值及模型参数值

Table 2 Variable initial values and the parameter values

变量	初始值	单位	参数	取值
X_{JDC}	1 505.84	万辆	c	0.395 646
$X_{JDCWRWZR}$	0.207	—	d	0.294 867
X_{ZRK}	10 923	万人	f	0.069 141
X_{CXZL}	2 675	万人	e	0.180 347
X_{YDZS}	4.142 83	—	g	0.06
X_{TLLC}	0.86	万 km	k	0.064 972 3
X_{GSLC}	0.8	万 km	η	0.088 627 3
X_{GJCL}	56.058	千辆	t	0.074 394 6
X_{SRQCL}	1 505.84	万辆	λ	0.109 066
X_{MHKL}	10 956	万人	γ	0.045 939 9
X_{MHHL}	216.62	万 t	α	0.040 840 3
X_{TZZC}	1.5	—	β	0.176 477
X_{GDP}	58 775.5	亿元	a	-111 016
X_{GDPZR}	0.097 5	—	b	-3.631 83
			l	121.49
			m	0.847 84
			n	1.590 98

4.3.2 调控策略仿真分析

影响交通供需的政策有很多,可以从经济、人口和环境等多方面进行控制,如尾号限行和公交优先政策等。地区人口数量以及人口结构直接影响着旅客的运输需求,交通投资政策直接决定了基础设施的建设规模和质量,包括道路、桥梁和轨道交通等,能够有效提升交通供给能力。这些基础设施的完善提升了交通网络的覆盖范围和通行能力,满足了旅客日益增长的交通需求。

本文选择从人口和交通基础设施建设投资两个方面来进行调控。不改变其他变量,考虑对人口出生率分别增加和减少20%,从图7可以看出,当城市群人口数量增长速度比现有人口增长速度大时,城市群人口数量过多会造成交通供给量远远小于交通需求量,甚至到2032年交通供需非均衡度由0.48减少到0.44,交通供需矛盾增大;当城市群人口数量增长速度比现有人口速度小时,城市群

人口总量相对减少,城市群交通的需求量也会减少,此时,2032年交通供需非均衡度由0.48增加到0.59,说明人口数量减少能够有效缓解交通供给与交通需求的非均衡情况。人口结构的变化也会直接影响交通需求,城市中老龄化严重的地区往往比年轻人口多的地区交通需求少。所以在人口方面,京津冀城市群应该控制城市群核心城市的人口数量,优化人口分布,实现由“中心地”到“网络模式”的转变。

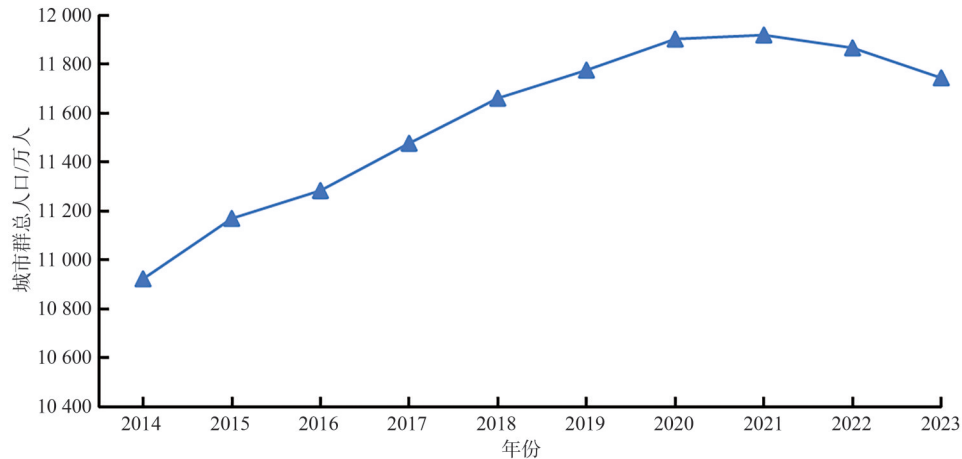


图4 京津冀城市群总人口模拟值

Fig. 4 Simulated total population in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

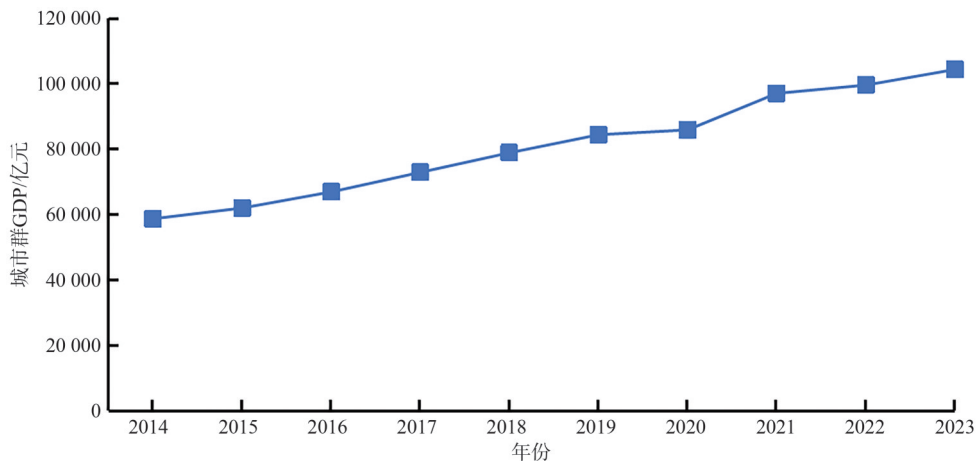


图5 京津冀城市群GDP模拟值

Fig. 5 Simulated GDP in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

在其他情况不变的条件下,通过增加投资和减少投资,分别对京津冀城市群供需非均衡度进行仿真,从图8可以看出,当增加交通基础设施建设的投资时,交通供给随之增加,在2019—2023年期间由于疫情原因,人们的出行需求大幅减少,增加交通基础设施建设的投资能够显著提升交通供给能力,这为后续的经济复苏和出行需求回升奠定了基础。在2032年,供需非均衡度由0.48增加到0.55;当减少交通基础设施建设的投资时,交通供给随之减少,在2032年,供需非均衡度减小到0.43。因此,交通投资政策能够适当地改变交通供给或者交通需求,进一步影响交通供需关系。通过增加交通基础设施投资,可以有效提升交通供给能力,满足旅客不断增长的出行需求;而减少投资则可能导致供需矛盾的加剧,影响城市的可持续发展。因此,未来的交通政策应重点关注投资的合理性和适应性,建立灵活的动态调整机制,以实现交通供需的有效平衡,推动京津冀城市群的持续发展与繁荣。

表 3 模型验证结果

Table 3 Model verification results

年份	人口/万人	预测人口/万人	相对误差/%	GDP/亿元	预测 GDP/亿元	相对误差/%
2014	10923	10923.0	0	58775.5	58775.5	0
2015	10972	11170.3	1.81	62056.9	62889.8	1.34
2016	11013	11284.2	2.46	66992.5	66663.2	0.49
2017	11013	11477.2	4.22	72974.4	71396.3	2.16
2018	11001	11661.2	6.00	78963.5	76394.1	3.36
2019	11022	11775.9	6.84	84479.2	81894.4	3.06
2020	11040	11903.1	7.82	85965.1	83532.3	2.91
2021	11010	11919.3	8.26	97127.8	101073.7	4.06
2022	10967	11866.8	8.20	99661.1	102287.4	2.57
2023	10943	11744.2	7.32	104442.1	108015.2	3.42

注:人口及 GDP 数据访问地址是 <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>。

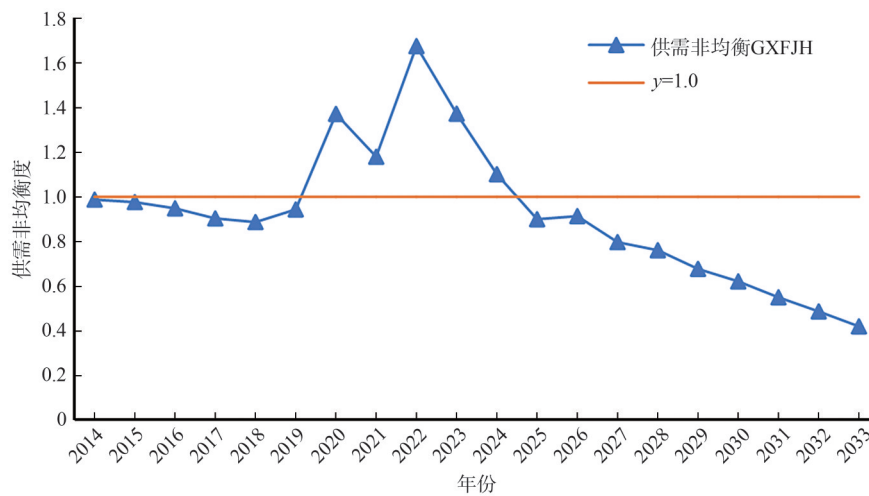


图 6 城市群交通供需非均衡度变化趋势

Fig. 6 Variation trend for transportation supply and demand imbalance in urban agglomerations

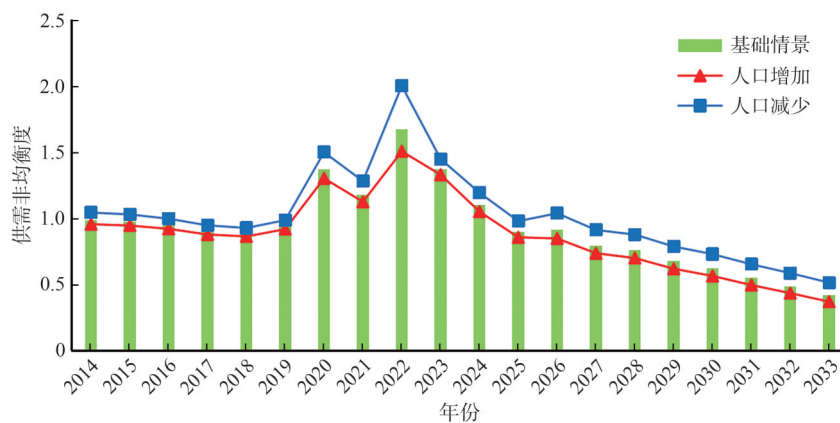


图 7 人口变化对京津冀城市群交通供需非均衡度的影响

Fig. 7 Impacts of population changes on the imbalance of transportation supply and demand in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

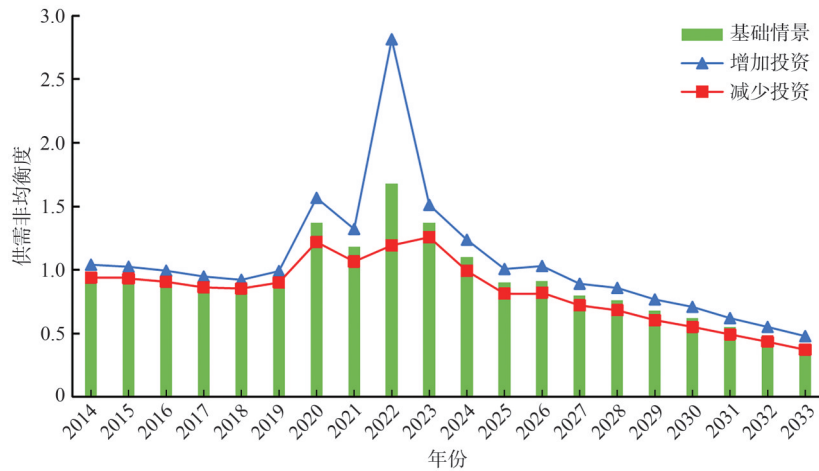


图8 政策变化对京津冀城市群交通供需非均衡度的影响

Fig. 8 Impacts of policy changes on the imbalance of transportation supply and demand in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

5 结论

本文基于城市群交通系统的复杂性和非线性,利用系统动力学的相关理论及应用方法,构建城市群交通供需非均衡模型,对城市群交通的供需关系进行分析,以京津冀城市群为例进行验证,并探讨其交通供需关系的演变趋势,得出以下结论。

(1) 京津冀城市群交通供需大部分时间都处于非均衡状态,要达到均衡状态需要不断地调整和优化。2014—2019年,交通供需非均衡度均小于1,表明交通供给未能完全匹配交通需求。2019—2022年,新冠疫情导致交通需求急剧下降,供需非均衡度大幅上升,2022年达到最高值1.6766。2022—2025年,随着疫情逐渐消退,交通需求逐步恢复,供需非均衡度回归到1,交通供需趋于平衡。2025—2033年,交通需求持续增长,但基础设施建设周期较长,交通供给未能及时满足交通需求,供需非均衡度再次上升,2032年交通供需非均衡度降低至0.48。

(2) 若不采取有效措施,京津冀城市群交通系统将面临严峻挑战。通过在人口和投资策略两方面对其进行调控,仿真结果表明,人口调控与交通投资对供需非均衡度的影响存在显著差异。当城市群总人口减少20%时,2032年交通供需非均衡度从0.48上升至0.59,同比增加22.92%;而将交通投资增加20%后,非均衡度从0.48升至0.55,同比增幅为14.58%,以上表明人口调控提升的效果优于交通供给,但需注意的是,单一的人口调控仍无法完全解决交通供需失衡问题。因此,要实现交通供需均衡,需采取协同策略,既要通过优化人口分布,引导人口向周边城市或新区迁移,避免过度集中,以此来缓解需求压力,又需针对性地增加交通投资,扩大公共交通设施建设,提升交通的运力与效率,并建立动态调控机制以确保政策实施的协调性与时效性。

参考文献:

- [1] 李茜,卢春房,陆化普,等. 基于供需适应性分析的综合交通基础设施发展研究[J]. 中国工程科学,2025,27(1): 216-225.
- [2] HAGHANI A, BANIHASHEMI M, CHIANG K. A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(4): 301-322.
- [3] 吴文征. 交通运输供给与需求均衡的理论研究与实证分析[D]. 延安:延安大学,2005.

- [4] SHAO Q Y, XU Y B. Research on the disequilibrium characteristics of urban traffic supply and demand[C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation(ICICTA). New York:IEEE,2008:282-287.
- [5] 李艳艳. 城市交通供求非均衡特性研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [6] MAO W Z, XUE G R, YI Z, et al. Research for the equilibrium and disequilibrium unified model of traffic system supply and demand[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 475:703-709.
- [7] CHEN Y, BOUFERGUENE A, LI H X, et al. Spatial gaps in urban public transport supply and demand from the perspective of sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195:1237-1248.
- [8] JOSHI V D, AGARWAL P, SINGH J. Balancing costs and uncertainties: Solving multi-objective transportation challenges with varied costs and stochastic supply-demand dynamics[C]//Proceedings of the International Conference on Mathematical Modelling, Applied Analysis and Computation. Cham:Springer, 2025:196-210.
- [9] 李成兵. 城市群交通运输系统供需非均衡模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1):47-53.
- [10] 李效, 叶坚, 徐冉, 等. 南京市城区交通供需分析及管理方法思考[J]. 现代交通技术, 2018, 15(6):50-55.
- [11] 彭志敏, 吴群琪. 基于经济均衡的运输服务供需匹配研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9):146-151.
- [12] HÖRCHER D, GRAHAM D J. The Gini index of demand imbalances in public transport[J]. Transportation, 2021, 48(5):2521-2544.
- [13] YANG H, LI Z. Dynamic graph convolutional network-based prediction of the urban grid-level taxi demand-supply imbalance using GPS trajectories[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2024, 13(2):34.
- [14] GAO B. The supply-demand structural contradictions in transportation: An analysis of the disparities both temporal and spatial in China[J]. Frontiers in Traffic and Transportation Engineering, 2024, 4(1):39-48.
- [15] 韦敬楠. 我国城市交通拥堵程度及影响因素分析:基于道路交通供需平衡的视角[J]. 辽宁工业大学学报(社会科学版), 2023, 25(2):36-40.
- [16] 包渊秋, 金辉, 吴特兰, 等. 防疫关键期公共交通供需冲突图模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(3):46-54.
- [17] 刘海坤. 国际航空货物运输供需非均衡研究[D]. 天津:中国民航大学, 2022.
- [18] QUENTIN D, RENAUD F. Modal choice and optimal congestion[J]. Regional Science and Urban Economics, 2014, 48:12-20.
- [19] XIN R, SKOV-PETERSEN H, ZENG J, et al. Identifying key areas of imbalanced supply and demand of ecosystem services at the urban agglomeration scale: A case study of the Fujian Delta in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791:148173.
- [20] MA X, LO H K. Adaptive transport supply and demand management strategies in an integrated land use and transport model[J]. Transportation Research Record, 2015, 2494(1):11-20.
- [21] 韩敏, 蒋继儒, 周丹. 供需平衡视角下的苏州古城交通优化策略探究[J]. 交通与港航, 2025, 12(1):38-43.
- [22] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2013.
- [23] 朱明皓, 李捷. 交通拥堵的社会经济影响分析[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2012, 11(1):18-26.

[24] 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.

Research on the Relationship between Traffic Supply and Demand of Urban Agglomeration Based on System Dynamics

GAO Dongmei¹, LIU Jia², ZHENG Shanjiang¹, LI Chengbing¹

(1. *Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

2. *Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute Company, Hohhot 010010, China*)

Abstract: Based on the complexity and dynamic characteristics of the traffic system in urban agglomerations, the coupling relationship between transportation supply and demand as well as population, economy, environment and other factors are comprehensively examined, which aims to reveal the internal mechanism of the imbalance between transportation supply and demand in urban agglomerations and provides theoretical support for system optimization. The system dynamics method was used in the study. Firstly, the key influencing factors of transportation supply and demand were systematically analyzed. Secondly, the research subject module was defined, on the basis of which, the system boundary was clarified, the causality diagram was drawn and the system feedback mechanism was deeply analyzed. Finally, the system dynamics model of unbalanced transportation supply and demand in urban agglomeration was constructed, and the corresponding accurate analysis equation was established. Taking the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as an empirical case, the relationships between transportation supply and demand from 2024 to 2032 were simulated using the Vensim platform. The results show that under the natural development scenario, the imbalance degree of transportation system in this area will continue to deteriorate, and it will drop to 0.48 by 2032. Through further policy scenario simulation, it is found that by implementing the two intervention strategies of population size regulation (reduction of 20%) and transportation infrastructure investment expansion (increase of 20%), the imbalance degree is increased to 0.59 and 0.55 respectively, which is 22.92% and 14.58% higher than the benchmark scenario. The study not only reveals the internal mechanism of the imbalance between transportation supply and demand in urban agglomerations, but also provides a quantitative decision-making basis for policy formulation.

Key words: urban agglomeration traffic; unbalanced supply and demand; transportation supply and demand; system dynamics