文章编号：1003-1421(2026)04-0137-13
引用格式：杨中华，李超，王月丽.基于地铁的城市快递物流系统绩效量化模拟研究[J].铁道运输与经济，2026，48(4)：137-149.
YANG Zhonghua，LI Chao，WANG Yueli. Quantitative Simulation Research on Performance of Metro-Based Urban Express Logistics System[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：137-149.

基于地铁的城市快递物流系统绩效量化模拟研究

杨中华[1,2]，李　超[1]，王月丽[1]

(1.武汉科技大学 管理学院，湖北 武汉　430065；2.武汉科技大学 服务科学与工程研究中心，湖北 武汉　430065)

摘　要：为了实现基于地铁的城市快递物流系统(M-UELS)的绩效评价并明确各方利益关系，以地铁公司和第三方物流企业之间的竞争关系为基础建立系统动力学模型，并以武汉市为例通过控制地铁快递单价、发车间隔时间、政府补贴3个参数进行模拟仿真，选取地铁公司利润、第三方物流企业利润、环境成本支出、补贴支出、政府支出、系统平均运输成本、系统平均运输时间、城市运能缺口8个指标来量化M-UELS绩效演化规律。结果表明：在武汉市推行M-UELS总体上是可行的，且运能补贴模式比单价补贴模式更具长期优势，但地铁公司在制定快递单价时仍需要根据富余运能情况来调整价格。

关键词：基于地铁的城市快递物流系统(M-UELS)；系统动力学；绩效量化；单价补贴；运能补贴

中图分类号：U2-9　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250408005

Quantitative Simulation Research on Performance of Metro-Based Urban Express Logistics System

YANG Zhonghua[1,2]，LI Chao[1]，WANG Yueli[1]

(1. School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China; 2. Center for Service Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China)

Abstract: To achieve the performance evaluation of the metro-based urban express logistics system (M-UELS) and clarify the interest relationships among participating stakeholders, a system dynamics model was established based on the competitive relationship between metro companies and third-party logistics (3PL) enterprises. By taking Wuhan City as an example, the simulation was conducted by controlling three parameters: metro express unit price, departure interval, and government subsidies. Eight indicators, including metro profit, 3PL enterprise profit, environmental cost expenditure, subsidy expenditure, government expenditure, system's average transportation cost, system's average transportation time, and urban transportation capacity gap, were selected to quantify the performance evolution law of M-UELS. The results show that implementing M-UELS in Wuhan City is generally feasible, and the capacity subsidy model has more long-term advantages than the unit price subsidy model. However, metro companies still need to adjust the express unit price according to the surplus capacity.

收稿日期：2025-04-08
通信作者：李超(2000—)，男，河南新乡人，武汉科技大学管理学院硕士研究生。
基金项目：国家自然科学基金项目(52475526)

Keywords: Metro-Based Urban Express Logistics System; System Dynamics; Performance Quantification; Unit Price Subsidy; Capacity Subsidy

0　引言

随着电子商务的发展和新零售模式的推动，城市快递物流需求持续上升。以武汉市为例，据武汉市邮政管理局统计，武汉市快递物流量从2014年2.47亿件快速飙升至2024年的26.74亿件，年快递物流量增长了近11倍。2019年，《交通强国建设纲要》（国务院公报2019年第28号）明确提出建设城市地下物流配送系统。基于地铁的城市地下物流系统(Metro-based Underground Logistics System，M-ULS)能够减少地面物流的压力，同时降低地面的交通拥堵问题，提高物流配送效率，促进城市可持续发展[1-2]。

M-ULS的实践最早可以追溯到1927年伦敦的“地铁邮局”，M-ULS利用现有地铁资源，结合现代物流设施设备及技术把地铁站改造成包含储存、转运、配送等物流功能的空间，实现客流与货流的协同[3]。能否满足各参与方的利益诉求是M-ULS投入决策的关键环节[4]，不少学者对其绩效评价展开研究。Xue等[5]采用桌面法和德尔菲法提取了M-ULS项目的关键成功因素，指导从业者和政策制定者在规划和建设过程中的决策；Ma等[6]利用合作博弈和非合作博弈对新兴的地铁一体化物流方式进行了经济分析并量化了系统绩效；Gong等[7]基于不同视角对M-ULS进行系统梳理，呈现其发展脉络，认为公共部门、地铁运营商、物流公司和用户之间的互动在推动M-ULS的发展方面发挥着关键作用；Hu等[8]提出城市地铁货运外部性的评价模型，以北京市为例论证其有效性；Dong等[9]以北京市作为实证背景，提出了4种M-ULS实施策略。在M-ULS绩效评估研究中，系统动力学方法成为最常见的研究方法。Shen等[10]提出了一种系统动力学仿真方法来分析和选择交通发展策略；杨涛等[11]构建了地下物流系统与城市发展互动关系的系统动力学模型，以地下物流系统分担率为控制变量进行仿真分析；颜浩龙等[12]通过构建城市地下智能物流系统的系统动力学仿真模型，并给出多级HUB结构建议；Xu[13]等利用系统动力学仿真的方法对疫情期间利用地铁承担城市快递功能的效率进行仿真和对比。

部分城市将地铁系统纳入城市快递物流系统，形成了基于地铁的城市快递物流系统(Metro-based Urban Express Logistics System，M-UELS)。M-UELS可以视为M-ULS的一部分，是一种更具体的应用，主要关注通过地铁系统实现快速的城市快递配送，针对的是快递、包裹等小型高频次的物流需求。基于此的理论研究中，郭东军等[14]分析地铁-货运系统的研究现状及最新进展，解析我国存量地铁的地下快递物流运输潜力并提出了地铁货运系统落地实施的瓶颈、挑战以及下一步的研究方向。在实际应用层面，北京市交通委员会2023年提出探索利用轨道交通非高峰时段开展物流配送[15]，并于2024年12月在大兴机场线启动“地铁运快递”试点项目。此外，国外目前明确开展地铁快递试点的城市为西班牙马德里，马德里地铁公司于2024年底启动“最后一公里”试点，利用夜间或非高峰时段(如19:00—20:00)进行货物装卸，在12号线和3号线专用列车中运输包裹。对比现有的地铁快递试点城市，马德里地铁快递聚焦多线路联运与减排目标，而北京地铁则验证机场线时效提升潜力。

现有研究通常只针对地铁和第三方物流(Third-Party Logistics，3PL)企业分析，通常忽略了政府在发展M-UELS中的作用。政府补贴是当前公共基础设施建设的重要激励手段之一，政府可以通过单价补贴或者运能补贴方式向承担城市快递服务的地铁公司支付，以此来促进M-UELS的发展[16]。而大部分研究通常忽略了地铁货运加入城市快递系统对地铁公司和第三方物流企业利润以及政府财政压力的影响。因此，以武汉市为例，通过构建系统动力学仿真模型来探究单价补贴模式和运能补贴模式下M-UELS各方参与主体的绩效的演化规律，并对两种不同的政府补贴模式进行对比。

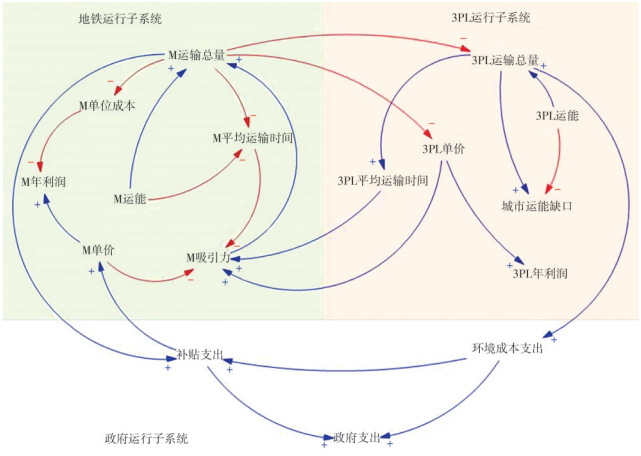
1　M-UELS三方利益互动模型构建

1.1　因果关系与主要回路

M-UELS主要涉及地铁公司、3PL企业和政府三方主体[17-18]。研究界定明确的系统边界分别为地

铁运行子系统、3PL运行子系统和政府子系统，摒除边界外其他因素的影响并做出如下假设。①以揽件之后到转运中心以及转运中心到派件之前的物流环节的成本和价格分别代表全部物流环节的成本和价格；②传统快递模式下的卡车均为燃油车辆；③环境成本支出仅由二氧化碳、氮氧化物、大气颗粒物(PM) 3种排放物决定，政府补贴仅由政府向承担城市快递服务的地铁公司支付，且政府支出只由补贴支出和环境成本支出构成。

分别从三方主体绩效变化以及城市快递系统效率变化对系统进行评价，用年利润指标来衡量地铁公司和3PL企业的绩效，从财政、城市快递系统表现2个角度评价政府绩效。根据变量之间的逻辑关系形成M-UELS因果关系如图1所示。



注：M表示地铁，且文中M含义均相同。

图1　M-UELS因果关系

Fig.1　Causality of M-UELS

系统包含的主要反馈回路如下。

回路1：M运输总量→(−)3PL运输总量→(+)环境成本支出→(+)补贴支出→(−)M单价→(−)M吸引力→(+)M运输总量。回路1是一组负反馈，随着地铁快递运输量降低，3PL运输总量会相对增加，环境成本支出随之上升，政府为改善环境会加大政府补贴，使地铁快递单价降低从而产生更高的吸引力，增加地铁快递运输量。

回路2：M运输总量→(+)M平均运输时间→(−)M吸引力→(+)M运输总量。回路2是一组负反馈，地铁运输量增加，其货运能力限制运输时间，运输时间越长，地铁公司对消费者的吸引力越小，运输量下降。

回路3：M运输总量→(+)补贴支出→(−)M单价→(−)M吸引力→(+)M运输总量。回路3是一组正反馈，因为政府对地铁公司实行单价补贴，也就是地铁公司每承运一单快递，政府会补贴快递单价相应比例的金额，所以地铁公司运输量越大，政府的补贴支出越大，单价更低，吸引力更高。

回路4：M运输总量→(−)3PL运输总量→(+)3PL平均运输时间→(+)M吸引力→(+)M运输总量。回路4是一组负反馈，地铁运输量大会降低3PL企业的市场，当3PL运输量下降时，其平均运输时间也会随之下降，相对来说地铁公司的吸引力下降，从而导致地铁运输总量下降。

回路5：M运输总量→(−)3PL单价→(+)M吸引力→(+)M运输总量。回路5是一组负反馈，地铁快递运输总量的增加会导致3PL企业降价竞争，地铁快递吸引力相对下降，其业务量自然随之减少。

1.2　构建系统存量流量图

通过整合和扩建因果关系图，建立系统存量流量图，划分为3个子系统单独进行描述，根据相关现实情况以及参考相关文献[9, 13]，确定模型中的主要参数如表1所示。

表1　主要参数

Tab.1　Main parameters

参数	取值	参数	取值
卡车容量/(件/辆)	930	M单次列车出行运能/(件/次)	63 360
燃油碳排放量/(kg/L)	2.6	单次列车平均运行时间/(h/次)	1.5
单辆卡车油耗/(L/h)	5	PM排放率/(kg/h)	0.004 8
卡车可出行次数/(次/d)	3	单位PM治理成本/(元/kg)	270
3PL单位成本/(元/件)	1.1	氮氧化物排放率/(kg/h)	0.04
M单位成本/(元/件)	1.4	氮氧化物治理成本/(元/kg)	106
卡车单次往返时间/(h/次)	3	二氧化碳治理成本/(元/kg)	0.73

(1) 地铁运行子系统。地铁运行子系统主要描述在M-UELS中地铁公司利润的变化机制。主要反馈关系为：地铁公司利润随着M运输总量的增加、M单价的增高和M单位成本的降低而增加；M单次列车出行运能及发车间隔时间决定了M运能，单次列车出行运能越大、发车间隔时间越短即M运能越大；二者与M运输总量一起决定M平均运输时间，在M运输总量一定的情况下，M运能越大M平均运输时间越短；M平均运输时间与M单价共同决定M吸引力，提高地铁吸引力需要使两者达到一个合理

的平衡；M吸引力越大则M新增运输需求越多；M新增运输需求与M运能二者共同影响M运输总量，因为地铁无法承担超过运能的快递需求，因而选取M运能和M新增运输需求中的最小值作为运输总量，当新增需求超出现有运能时，运能的提升会使运输总量增加，M总收入会随着运输总量的增加而增加，进而影响M利润；且M运输总量增加会产生规模经济效益，在更多的乘客中分摊固定成本，降低单位成本。此外，政府补贴能够通过直接补助票价或运营成本降低M单价从而增加乘客的需求和客流量，推动总收入的增长。

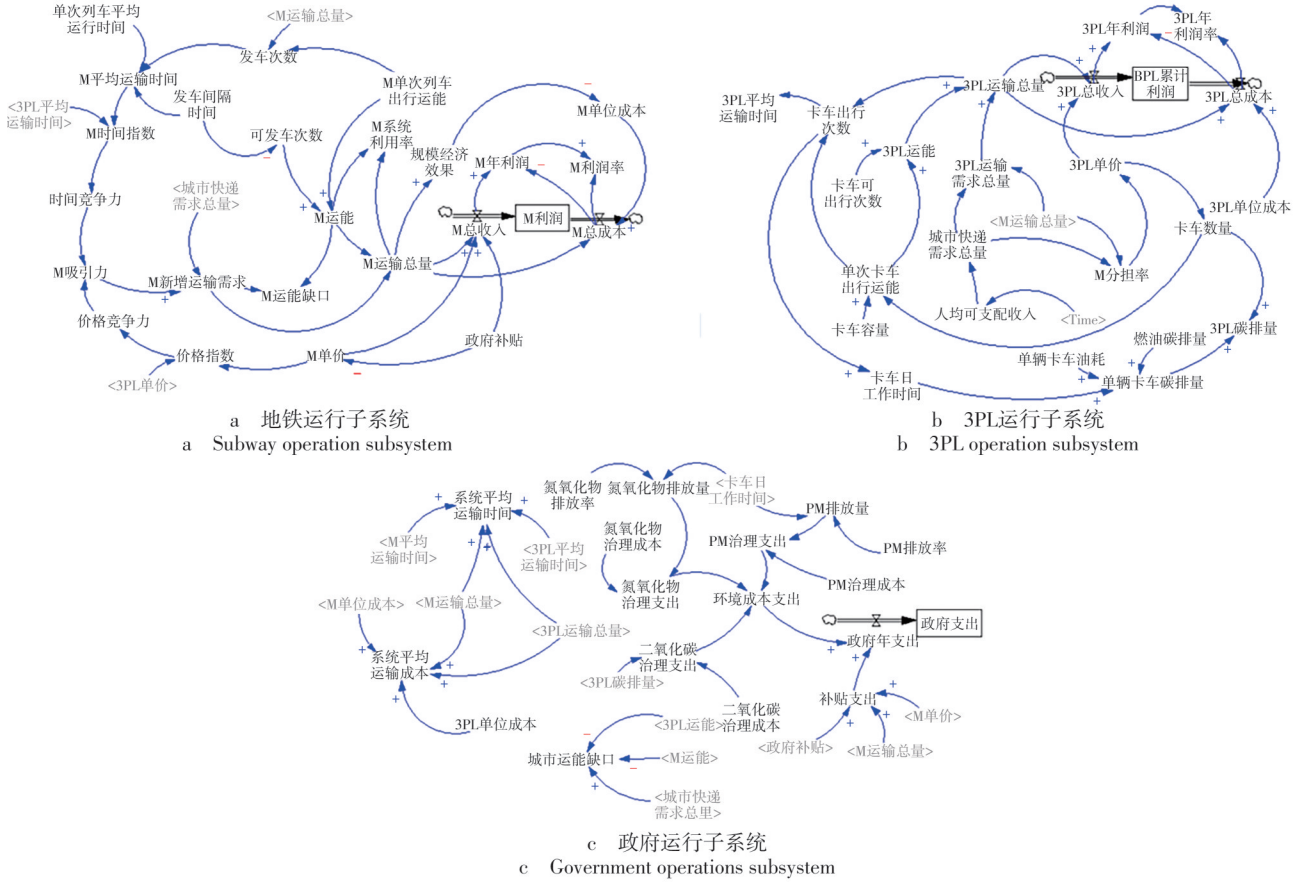
（2）3PL运行子系统。3PL运行子系统主要描述在M-UELS中3PL企业利润的变化机制。主要反馈关系为：卡车数量、卡车容量、卡车可出行次数共同决定3PL运能；城市快递需求总量和M运输总量影响3PL运输需求总量，3PL的需求与运能中的较小值为3PL运输总量；M运输总量决定3PL单价，运输总量和运能决定卡车出行次数和3PL平均运输时间，从而影响3PL碳排量。3PL运输总量、3PL单价、3PL单位成本共同决定3PL年利润。

（3）政府运行子系统。政府运行子系统主要描述在M-UELS中政府的绩效变化机制。主要反馈关系为：各类排放物的排放量和治理成本决定了环境成本支出；M运输总量、M单价和政府补贴共同决定了补贴支出；M平均运输时间、M运输总量、3PL平均运输时间和3PL运输总量共同决定了系统平均运输时间；M单位成本、M运输总量和3PL平均运输总量共同决定了系统平均运输成本；3PL运能、M运能和城市快递需求总量共同决定了城市运能缺口。以上相关因素的具体影响详见表2因素方程。

在确定各个子系统变量以及因果反馈关系的基础上，使用VenSim软件构建模型，单价补贴模式下M-UELS子系统存量流量图如图2所示。

1.3　模型检验

运用VenSim软件建立系统动力学模型流量图，根据收集处理的数据，通过数学计算、回归分析等



a　地铁运行子系统
a　Subway operation subsystem

b　3PL运行子系统
b　3PL operation subsystem

c　政府运行子系统
c　Government operations subsystem

图2　单价补贴模式下M-UELS子系统存量流量图

Fig.2　Stock-flow diagram of M-UELS subsystem under unit price subsidy model

方法推导变量之间关系的方程表达式，部分因素方程如表2所示。

依据上文建立的模型预测武汉市2014—2022年城市快递运输量，并对比同期实际快递业务总量，得到模型有效性检验如图3所示。图中曲线1是2014—2022年城市快递运输量的实际数据，曲线2是2014—2022年城市快递运输量的预测数据。城市快递运输量的实际数据与预测数据大部分趋势一致、误差较小，2020年数据拟合不佳的原因是受新冠疫情影响。因此，除突发事件引起的数据波动外，仿真结果符合效度检验，模型有效性得到验证。

2　单价补贴模式下M-UELS绩效量化模拟

首先，考虑单价补贴模式下M-UELS各参与方绩效演化关系。单价补贴是指政府以单次运输量为核算基准，根据货物重量、运输距离或货类实施补贴，直接降低地铁物流企业单次运输成本的补贴方式。根据M-UELS的运行机制，通过控制地铁快递单价、地铁快递发车间隔、政府补贴这3个因素，观察不同参数下三方的绩效对比。地铁快递单价根据快递企业财报、快递企业经营报告、物流沙龙的统计数据设置，地铁发车间隔参考武汉地铁发车间隔时间，政府补贴比例参考23家地铁公司2022年度的财务报告设置，武汉市M-UELS仿真情景设置如表3所示。

利用VenSim在M-UELS系统动力学模型中输入不同情景对应的参数，以2023—2032年为模拟周期，模拟步长为一年，得到8个情景下各个指标的变化情况与无M情景对比。

2.1　单价补贴模式下3PL绩效

单价补贴模式下3PL年利润变化如图4所示，可以发现随着城市快递运输需求的增加，传统3PL的运输能力在2030年达到饱和。综合来看，在单价补贴模式下，到2032年，在各场景下3PL的利润比无地铁加入城市快递系统之前下降了13.2%~21.6%。

表2　部分因素方程

Tab.2　Partial factor equations

变量	计算公式
M运能	可发车次数 × M单次列车出行运能 × 365
M吸引力	DELAY(0.5 × 时间竞争力 + 0.5 × 价格竞争力，1，0.1)
时间竞争力	WITHLOOKUP(时间指数，[(-10，0)-(10，1)]，(-10，1)，(-1，1)，(-0.7，0.8)，(-0.5，0.65)，(-0.2，0.4)，(0，0.25)，(0.3，0.15)，(0.7，0)，(10，0))
M时间指数	(3PL平均运输时间 - M平均运输时间)/3PL平均运输时间
发车次数	M运输总量/M单次列车出行运能/365
M新增运输需求量	城市快递需求总量 × M吸引力
规模经济效果	WITHLOOKUP(M运输总量，[(0，0)-(-2.147 48e + 09，0.5)]，(0，0)，(1e + 08，0.1)，(2e + 08，0.15)，(3e + 08，0.3)，(1e + 09，0.4)，(2e + 09，0.45)，(3e + 09，0.5))
3PL运输总量	min(3PL运能，3PL运输需求总量)
3PL年利润	(3PL单价 - 3PL单位成本) × 3PL运输总量
3PL单价	WITHLOOKUP((DELAY1I，M分担率，1，0)，[(0，1)-(1，3)，(0，3)]，(0.1，2.9)，(0.2，2.8)，(0.3，2.7)，(0.4，2.5)，(0.5.2.2)，(0.6，2)，(0.7，1.9)，(1，1.5))
3PL碳排放量	卡车日工作时间 × 燃油碳排量 × 单量卡车油耗 × 卡车数量 × 365
补贴支出	M单价/(1 - 政府补贴) × 政府补贴 × M运输总量
政府支出	INTEG(政府年支出，0)
系统平均运输成本	M单位成本 × M运输总量/(M运输总量 + 3PL运输总量) + 3PL单位成本 × 3PL运输总量/(3PL运输总量 + M运输总量)
系统平均运输时间	M平均运输时间 × M运输总量/(M运输总量 + 3PL运输总量) + 3PL平均运输时间 × 3PL运输总量/(3PL运输总量 + M运输总量)
城市运能缺口	城市快递需求总量 - 3PL运能 - M运能

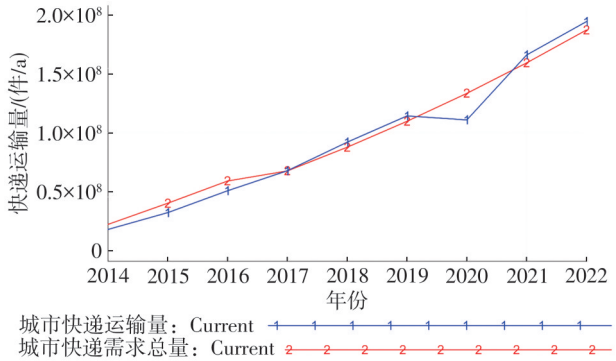


图3　有效性检验

Fig.3　Validity test

表3　武汉市M-UELS仿真情景设置

Tab.3　Simulation scenario settings of M-UELS in Wuhan City

情景设置	地铁快递单价/元	地铁发车间隔/min	政府补贴比例/%
情景1	3.0	6	5
情景2	2.5	6	5
情景3	3.0	10	5
情景4	2.5	10	5
情景5	3.0	6	10
情景6	2.5	6	10
情景7	3.0	10	10
情景8	2.5	10	10
无M情景	传统快递模式，即地铁公司承担快递运输量为0		

注：快递单价3.0元为地铁快递高单价，2.5元为低单价；发车间隔6 min为地铁发车高频次，10 min为低频次；政府补贴10%为高比例，5%为低比例。

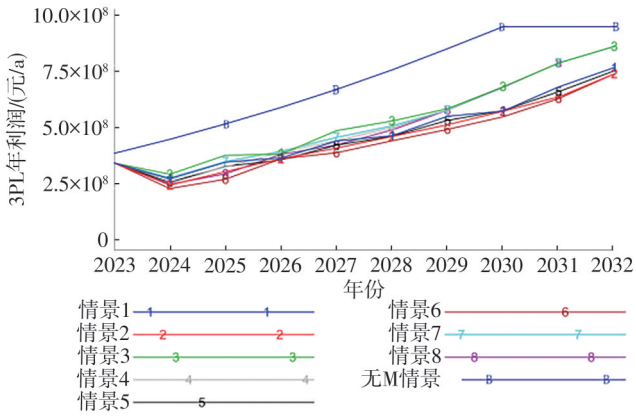


图4　单价补贴模式下3PL年利润变化

Fig.4　Annual profit variation of 3PL under unit price subsidy model

2.2　单价补贴模式下地铁绩效

单价补贴模式下地铁年利润变化如图5所示，由图5可得，情景1和情景5中地铁利润呈整体上升趋势。情景4单价较低导致前期业务量快速达到地铁运能上限，所以大部分时间利润最低。情景1和5的波动是因为随着地铁利用率增加，运输时间逐渐接近上限。综合上述，运能饱和前，城市快递的市场竞争较为激烈，运能饱和后，地铁对外部市场环境变化不敏感。

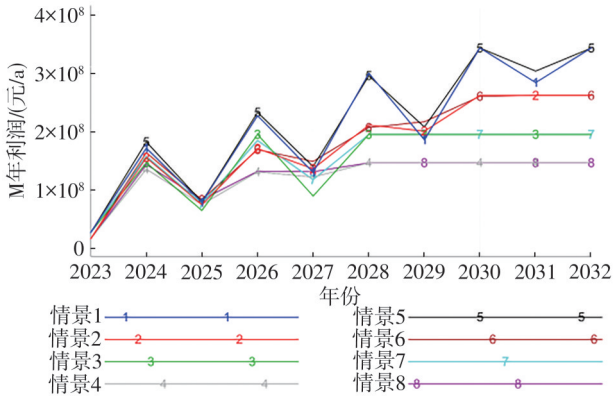


图5　单价补贴模式下地铁年利润变化

Fig.5　Annual profit variation of metro under unit price subsidy model

2.3　单价补贴模式下政府财政绩效

可以从环境成本、补贴支出以及政府支出(环境成本、补贴支出之和)3个方面分析政府财政绩效。单价补贴模式下政府绩效分析如图6所示。

单价补贴模式下环境成本支出的变化如图6a所示，单价补贴模式的环境成本支出始终低于传统快递模式，2种模式之间的环境成本支出差距呈现两头小、中间大的特征。2023年地铁快递初始分担率较低，运输能力强，所以2024年环境成本随传统3PL方运输量的下降而降低，差距变大；到2032年二者的环境成本支出差距变小。地铁快递系统加入后环境成本支出总额变少，增势变缓。2030年以前，M-UELS环境成本支出增速小于传统城市快递系统，2030年后其增长趋势加快，到2032年其环境成本支出仍有0.09亿元~0.16亿元的优势，相比传统快递模式节约3%~5%。

单价补贴模式下补贴支出的变化如图6b所示，前期政府补贴支出波动性大，这是因为运能饱和前地铁快递对市场的敏感性高。情景5下政府补贴支出最高，波动性也最大，原因在于其高单价、高补贴、高运能。而情景4下政府补贴支出最低，则是因为其低单价、低运能、低补贴。不同的补贴比例下，到2032年最高与最低补贴支出相差3.37亿元左右。

单价补贴模式下政府支出如图6c所示，该图反映了2023—2032年的政府支出(环境成本支出和补贴支出之和)的变化情况。可以发现：情景5下，因为

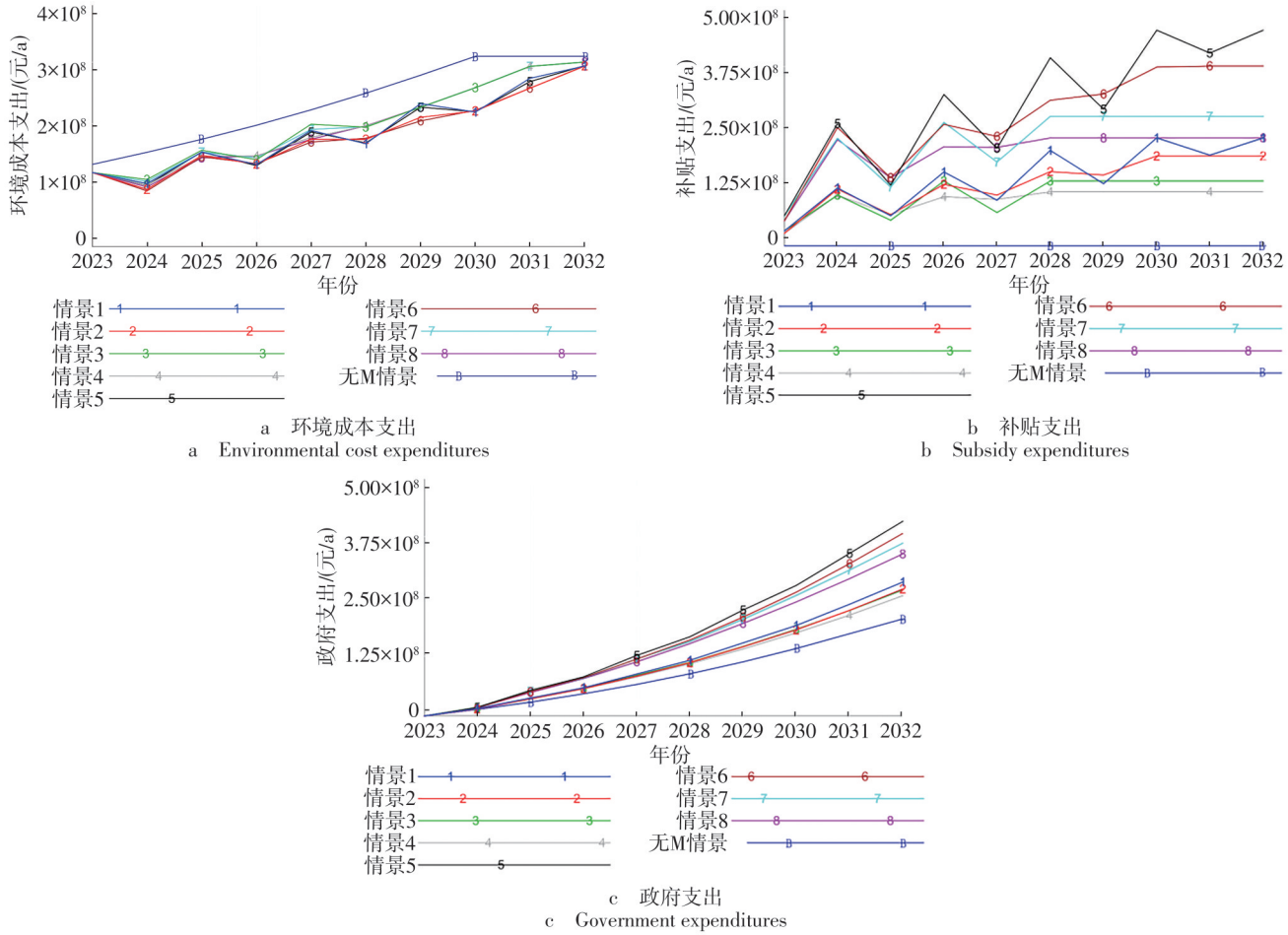


图6　单价补贴模式下政府绩效分析

Fig.6　Analysis of government performance under unit price subsidy model

补贴比例高、单价高且运能大，政府支出在2032年达到了40.7亿元。政府支出最低的是情景4，相比传统快递模式也上升了25%左右，与情景5的参数水平相反。

2.4　单价补贴模式下城市快递系统效率

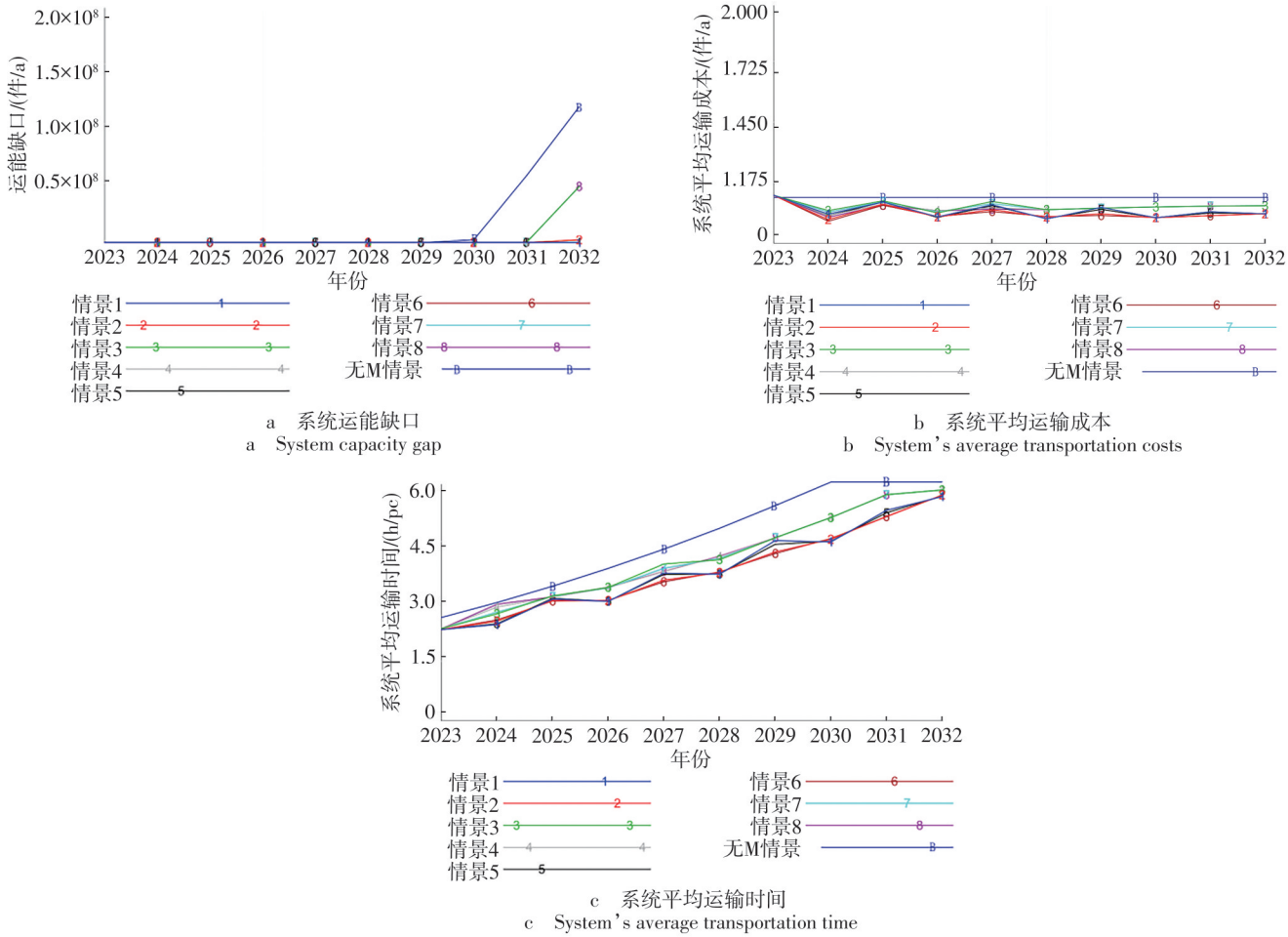
城市快递系统效率，可从运能缺口、系统平均运输成本和系统平均运输时间等3个方面分析。单价补贴下城市快递系统的效率变化如图7所示。

2023—2032年武汉市快递运能缺口变化如图7a所示。到2030年，传统快递模式的城市快递系统运能已无法满足城市快递需求；但在地铁加入后，城市快递系统总运能扩大，到2032年才出现运能缺口，不同情景下的缺口数量在2.2千万件到4.7亿件之间，远远低于没有地铁参与快递系统的情景，表明地铁参与城市快递物流系统后对提升城市快递运能具有显著的改善效果。

单价补贴下系统平均运输成本的变化如图7b所示，该图显示了M-UELS和传统快递系统运输成本的对比情况。单价补贴下M-UELS的成本呈下降趋势，说明单价补贴模式更具成本优势。情景1，2，5，6下降幅度最大，整体下降8%，是因为地铁快递运输量较大，规模经济效果降低了系统平均运输成本。

单价补贴模式下系统平均运输时间的变化如图7c所示，该图揭示了M-UELS和传统城市快递系统平均运输时间的对比情况。可以发现：2023—2032年期间，传统快递模式的平均运输时间一直高于M-UELS，2026—2030年差距最大，后逐渐缩小差距；2030—2032地铁运能、3PL运能达到上限，系统平均运输时间基本达到上限，但是依旧低于传统模式，相对下降6%。

通过不同情景下3PL企业绩效、地铁公司绩



a　系统运能缺口
a　System capacity gap

b　系统平均运输成本
b　System's average transportation costs

c　系统平均运输时间
c　System's average transportation time

图7　单价补贴下城市快递系统的效率变化

Fig.7　Efficiency variation of M-UELS under unit price subsidy model

效、政府财政绩效、城市快递系统效率的对比，可以得出结论：单价补贴模式下M-UELS中的地铁公司利润显著，有利于构建绿色城市，带动绿色经济发展，M-UELS的整体绩效为正。但通过对比发现，由于地铁快递运能的限制，后期M-UELS发挥的作用有限，且为维持地铁快递的竞争力，政府需要不断地进行补贴，不利于市场自由竞争。

3　运能补贴模式下M-UELS绩效量化模拟

常见的单价补贴模式对政府具有长期依赖性，且该模式下地铁快递的运能有限，限制了M-UELS的作用。因此，提出运能补贴模式。运能补贴以保障物流网络基础运能为目标，对地铁企业的固定运营成本、设备维护或运力扩容进行补贴[14]。依据客运优先原则，把地铁快递最小发车间隔时间设定为3 min。情景1—8及无M情景在表2中已详细介绍。据估算，花费12亿元增加自动化装卸搬运设施设备和改造站台可以将列车的发车间隔从10 min缩短到3 min，据此设置表函数来代表情景9—10中的政府补贴运能，武汉市M-UELS的仿真情景9和情景10设置如表4所示。

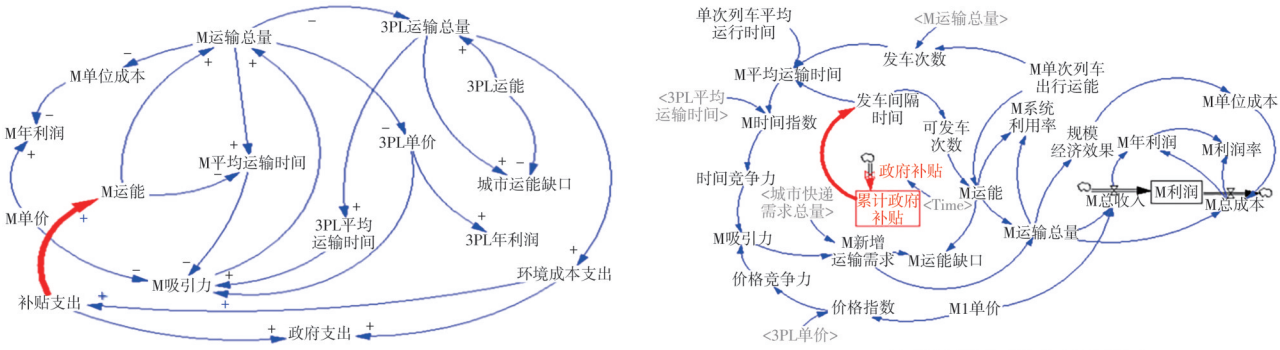
表4　武汉市M-UELS的仿真情景9和情景10设置

Tab.4　Settings of simulation scenario 9 and scenario 10 for M-UELS in Wuhan City

情景设置	地铁快递单价/元	地铁发车间隔/min	政府补贴/亿元
情景9	3.0	3	0~2.4
情景10	2.5	3	0~2.4

注：快递单价3.0元为地铁快递高单价，2.5元为低单价。

由于补贴对象从单价转为运能，所以反馈回路相较单价补贴模式产生变动，其中地铁快递发车间隔时间和政府补贴是直接变化因素。其余部分和单价补贴模式相同，运能补贴模式下的因果循环图和地铁运行子系统存量流量图如8所示。



a　因果循环图
a　Causal loop diagram

b　地铁运行子系统存量流量图
b　Stock-flow diagram of metro operation subsystem

图8　运能补贴模式下的因果循环图和地铁运行子系统存量流量图

Fig.8　Causal loop diagram under capacity subsidy model and stock-flow diagram of metro operation subsystem

新增2条与地铁运能相关的反馈回路且均为负反馈，主要反馈回路为：随着地铁快递运输量降低，3PL运输总量会相对增加，环境成本支出随之上升，政府为改善环境会加大政府补贴，使地铁快递单价降低从而产生更高吸引力，增加地铁快递运输量；地铁运输量增加，其货运能力不足，则会限制运输时间导致运输时间变长，进而使地铁公司对消费者的吸引力减小，使地铁运输总量下降；政府的补贴支出越大，单价更低，吸引力更高；地铁快递运输总量的增加会导致3PL企业降价竞争，地铁快递吸引力相对下降，其业务量自然随之减少。图8b为运能补贴模式下地铁运行子系统的存量流量图，反映了运能补贴模式下M-UELS中的地铁利润变化机制。政府补贴的金额设置从2023年的2.4亿元下降到2032年的0元，之间的间隔用线性插值填充。

3.1　运能补贴模式下3PL绩效

在运能补贴模式下，通过模型仿真可以得到运能补贴模式下3PL年利润变化如图9所示。在情景9和10中，3PL利润呈现缓慢上升趋势，前期利润变化与单价补贴模式几乎一致，后期逐渐低于单价补贴。相比情景1—8，情景9的利润下降了13.4亿~21亿元，情景10下降了15亿~22.6亿元。对3PL来说，运能补贴模式下处于劣势竞争地位。

3.2　运能补贴模式下地铁绩效

同样的，可以得到运能补贴模式下地铁年利润变化如图10所示。可以发现地铁运能扩大后利润波动更大，情景9和情景10的利润大幅增加，到2032年情景9和情景10利润分别为54.36亿元和40.76亿元，相比单价补贴模式下利润最高的情景5，

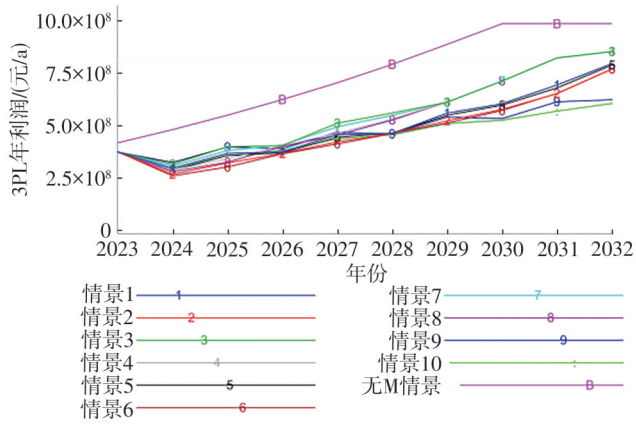


图9　运能补贴模式下3PL年利润变化

Fig.9　Annual profit variation of 3PL under capacity subsidy model

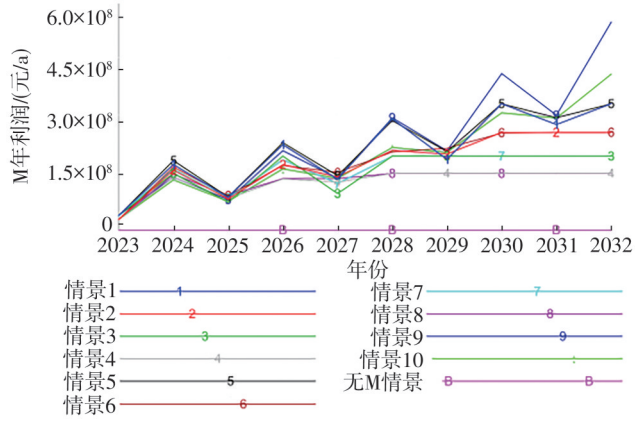


图10　运能补贴模式下地铁年利润变化

Fig.10　Annual profit variation of metro under capacity subsidy model

分别高出65%和23%。对地铁来说，会更倾向于运能补贴模式。

3.3　运能补贴模式下政府绩效

对于政府绩效的分析，可以从环境成本、补贴支出以及政府支出(环境成本、补贴支出之和)3个方

面进行分析。运能补贴模式下政府绩效分析如图11所示。

运能补贴模式下环境成本支出的变化如图11a所示。可以观察到，运能补贴模式下的前期环境成本支出高于单价补贴模式。但单价补贴模式的环境成本增速更快，到2032年情景9—10已完全低于情景1—8，说明运能补贴比单价补贴能带来更多的环境绩效，相较传统快递模式环境成本支出下降了约22.5%，故政府更倾向于运能补贴模式。情景9与情景10对比，情景10的环境改善效果更好。

运能补贴模式下政府补贴支出的变化如图11b所示，补贴支出在运能补贴模式下每年下降，与单价补贴模式相反。情景9和情景10的补贴支出金额相同。至2028年，情景9—10中政府每年补贴支出已经低于单价补贴模式下的所有情景。到2032年补贴结束，政府退出地铁公司与3PL企业的市场竞争，此时地铁运能已大大增长，所以运能补贴模式对政府更有利。

运能补贴模式下政府支出的变化如图11c所示，到2032年，运能补贴模式下大部分情景中政府支出都低于单价补贴模式。相较传统城市快递，运能补贴模式下政府支出上升约38%，但比单价补贴模式和传统快递模式的增速较缓，若系统再运行3~5年，理论上政府支出会变为最低的情景。如果政府从长远利益出发，让快递市场早日回归自然竞争，政府会更倾向于选择运能补贴模式。

3.4　运能补贴模式下城市快递系统效率

运能补贴模式下城市快递系统效率，仍从城市快递的运能缺口、系统平均运输成本和系统平均运输时间3个方面进行分析。运能补贴模式下城市快递系统的效率变化如图12所示。

仿真得到2023—2032年期间城市运能缺口的

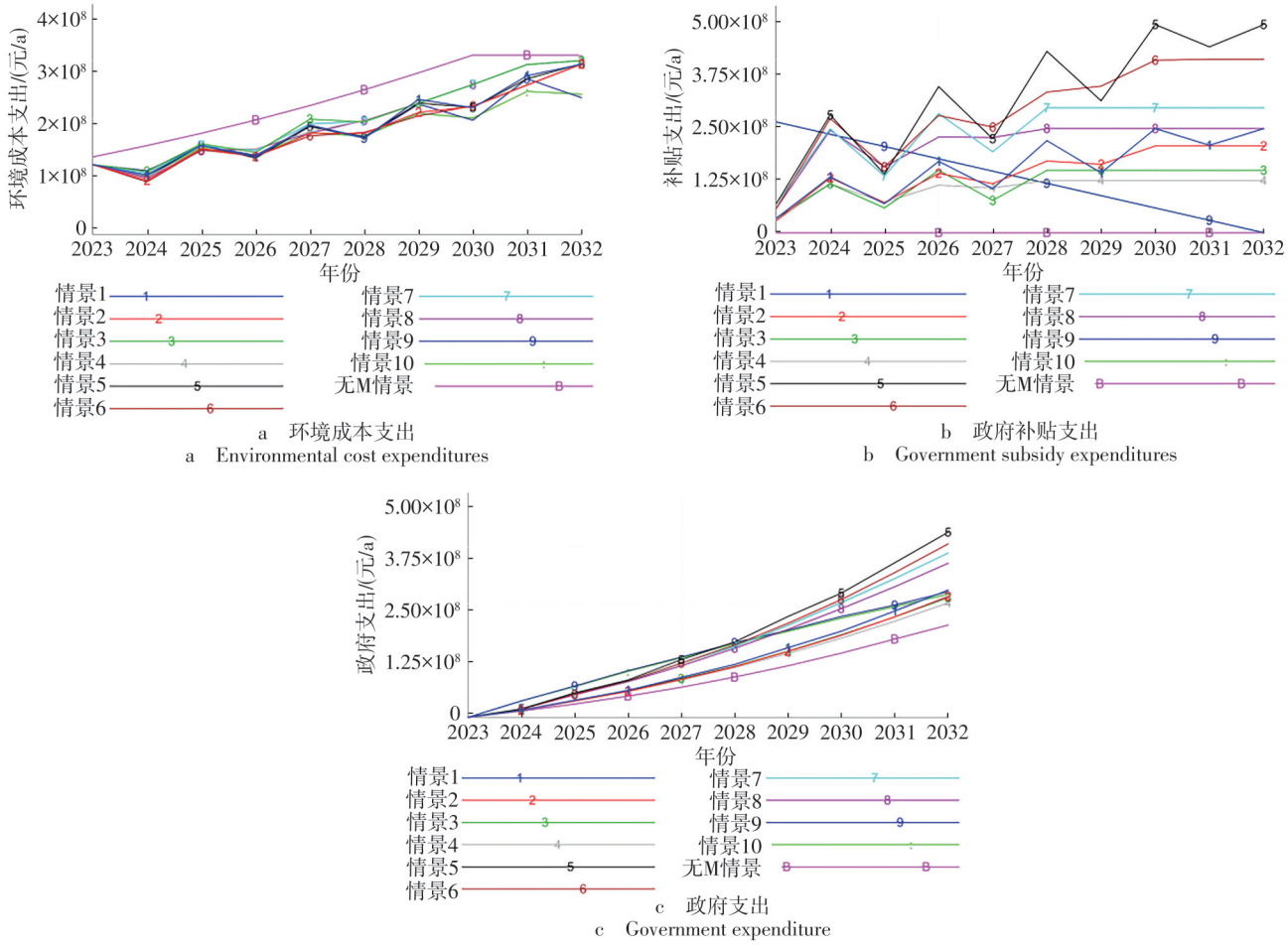


图11　运能补贴模式下政府绩效分析

Fig.11　Analysis of government performance under capacity subsidy model

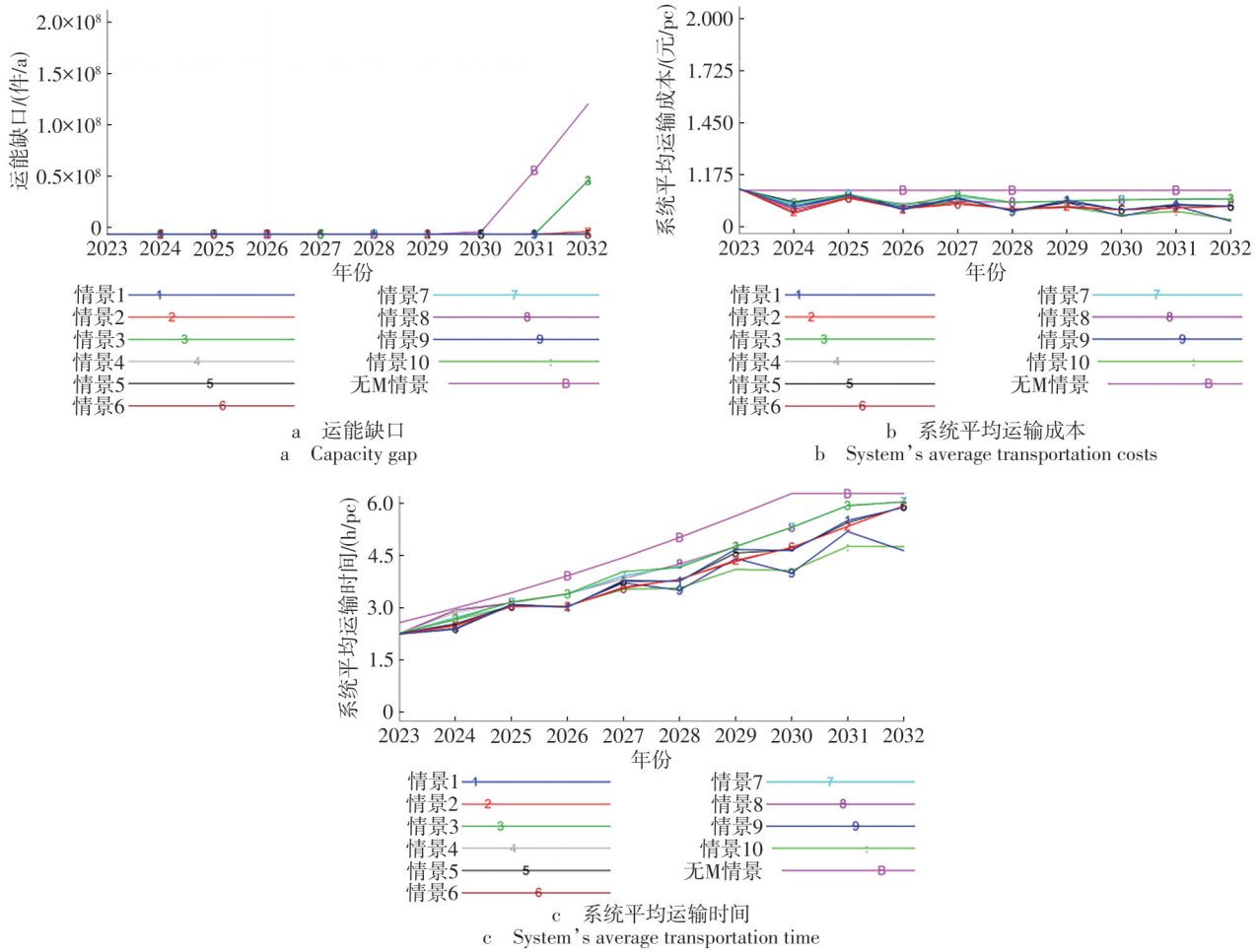


图12　运能补贴模式下城市快递系统的效率变化

Fig.12　Efficiency variation of M-UELS under capacity subsidy model

变化如图12a所示，可以看出情景9—10在模拟期间没有出现运能缺口，说明运能补贴模式下城市快递系统的吞吐能力大大提升，快递行业运作效率在提高。城市快递系统的运能满足城市总的快递需求，较高的快递运输效率有利于提升消费者满意度，刺激消费。

2023—2032年期间运能补贴下系统平均运输成本如图12b所示。2031年以后，情景9—10的平均运输成本显著低于单价补贴模式。单价补贴模式下的所有情景地铁运能已达上限，规模经济效应停止增长，而情景9和10的运能仍在扩展。到2032年，情景9和10的系统平均成本比单价补贴模式的最高成本低约10.3%，比传统快递系统低约12%，这表明运能补贴模式提升了快递行业的效率。

类似地，可以得到运能补贴模式下系统平均运输时间的变化如图12c所示，在同一时期不同情境对比中，情景10的系统平均运输时间最少。到2032年，运能补贴模式下平均运输时间比单价补贴模式至少下降了18.3%，说明运能补贴模式下快递行业运作效率在提高。情景9和10在模拟期间第5年后展现出平均运输时间上的优势。

对比运能补贴模式、单价补贴模式下M-UELS各方绩效变化情况，得出以下结论。

从经济方面看：运能补贴模式下3PL利润大幅下降，相比单价补贴模式的情景1—8，运能补贴模式下情景9的利润下降了13.4亿~21亿元，情景10下降了15亿~22.6亿元；地铁公司利润上升，运能补贴模式下情景9和情景10的利润大幅增加，到2032年利润分别为54.36亿元和40.76亿元，相比单价补贴模式下利润最高的情景5高出65%和23%；运能补贴模式下环境支出成本和补贴支出前期高于单价补贴模式，但是后期大幅度下降，政府支出增势

变缓。因此，对于政府来说，如果考虑长期绩效，增加市场公平性，运能补贴模式是更好的选择。

从效率方面看：在2031年以后，运能补贴模式下情景9—10的平均运输成本显著低于单价补贴模式，到2032年，情景9和10的系统平均成本比单价补贴模式的最高成本低约10.3%，比传统快递系统低约12%；在同一时期不同情境对比中，情景10的系统平均运输时间最少。到2032年，运能补贴模式下平均运输时间比单价补贴模式至少下降了18.3%；就运能缺口而言，运能补贴模式情景9—10在模拟期间没有出现运能缺口，反观单价补贴模式在2032年不同情景已经出现大量运能缺口，这意味着单价补贴模式下有一部分的快递需求无法及时得到满足，会对城市经济运行和居民生活质量造成负面影响。

4　结论

以武汉市为背景，探寻地铁公司、第三方物流企业和政府3方主体之间的利益互动规律，通过控制地铁快递单价、地铁快递发车间隔时间、政府补贴3个参数水平的高低进行模拟仿真，选取地铁公司利润、第三方物流企业利润、环境成本支出、补贴支出、政府支出、系统平均运输成本、系统平均运输时间、城市运能缺口8个指标来量化M-UELS涉及的三方绩效演化规律，得到以下结论。

（1）在武汉市推行M-UELS总体上是可行的，M-UELS绩效相对于传统城市快递系统绩效有显著的提高，证实了M-UELS的有效性。

（2）对于政府而言，运能补贴模式比单价补贴模式更具长期优势，且运能补贴模式下M-UELS各项指标都优于单价补贴模式。

（3）地铁快递单价的设置并非越低越好或者越高越好，地铁公司在制定价格策略时需要兼顾实际运能，根据富余运能情况调整价格。

本研究尚未涉及企业关系，如同质企业的竞合关系、战略联盟关系等，可以对不同企业关系型态下的M-UELS绩效进行研究。

参考文献：

[1] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 城市轨道交通低碳效应研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：8-23，57.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Review on Research of Low-Carbon Effects in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：8-23，57.

[2] 王晓平，鲁　玮，李睿麒，等. 基于地下物流系统的地铁货运文献综述[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(S2)：534-539，548.
Wang Xiaoping，Lu Wei，Li Ruiqi，et al. Literature Review of Metro Freight Based on Subway Transportation System[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2023，19(S2)：534-539，548.

[3] 王　都，李雪飞，王文华，等. 基于轨道交通的北京生态城市建设研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(11)：107-112，132.
WANG Du，LI Xuefei，WANG Wenhua，et al. Study on Ecological Construction of Beijing Based on Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(11)：107-112，132.

[4] 胡万杰，董建军，陈志龙. 基于地铁货运系统的城市物流发展模式探讨[J]. 铁道运输与经济，2022，44(2)：8-15.
HU Wanjie，DONG Jianjun，CHEN Zhilong. Development Patterns of City Logistics for Metro-Based Underground Logistics System[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(2)：8-15.

[5] XUE D，ZHAO X J，DONG J J，et al. Critical Success Factors of Underground Logistics Systems from the Project Life Cycle Perspective[J]. Buildings，2022，12(11)：1979.

[6] MA M Y，ZHANG F N，LIU W，et al. A Game Theoretical Analysis of Metro-Integrated City Logistics Systems[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2022，156：14-27.

[7] GONG D D，TIAN J J，HU W J，et al. Sustainable Design and Operations Management of Metro-Based Underground Logistics Systems：A Thematic Literature Review[J]. Buildings，2023，13(8)：1888.

[8] HU W J，DONG J J，HWANG B G，et al. Using System Dynamics to Analyze the Development of Urban Freight Transportation System Based on Rail Transit：A Case Study of Beijing[J]. Sustainable Cities and Society，2020，53：101923.

[9] DONG J J，XU Y X，HWANG B G，et al. The Impact of Underground Logistics System on Urban Sustainable Development：A System Dynamics Approach[J]. Sustainability，2019，11(5)：1223.

[10] SHEN L Y，DU L，YANG X N，et al. Sustainable Strategies for Transportation Development in Emerging Cities in China：A Simulation Approach[J]. Sustainability，2018，10(3)：844.

[11] 杨　涛，董建军，郭宗逵. 基于系统动力学的地下物流系统对城市发展影响研究[J]. 地下空间与工程学报，2020，16(1)：1-6，34.
YANG Tao，DONG Jianjun，GUO Zongkui. Research on the Impacts of Underground Logistic System on Urban Development Based on System Dynamics[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2020，16(1)：1-6，34.

[12] 颜浩龙，王　晋. 基于系统动力学的城市地下智能物流系统仿真研究[J]. 物流工程与管理，2022，44(2)：1-5.
YAN Haolong，WANG Jin. Simulation of Urban Underground Intelligent Logistics System Based on System Dynamics[J]. Logistics Engineering and Management，2022，44(2)：1-5.

[13] XU Y X，DONG J J，REN R，et al. The Impact of Metro-Based Underground Logistics System on City Logistics Performance under COVID-19 Epidemic：A Case Study of Wuhan，China[J]. Transport Policy，2022，116：81-95.

[14] 郭东军，韦凌翔，赵　光，等. 我国基于存量地铁开展快递物流运输的前景及方向探讨[J]. 隧道建设(中英文)，2024，44(6)：1145-1153.
GUO Dongjun，WEI Lingxiang，ZHAO Guang，et al. Directions and Prospect of Express Logistics Transportation Based on Stock Metro in China[J]. Tunnel Construction，2024，44(6)：1145-1153.

[15] 贾欣然. 地铁送快递北京探索建立地下物流系统[J]. 中国商界，2023(5)：76-77.
JIA Xinran. Beijing Explores Underground Logistics Systems for Metro Parcel Delivery[J]. Business China，2023(5)：76-77.

[16] 张维君，姚凤菊，邢　颖，等. 城际铁路可持续发展运营补贴机制研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(12)：178-185.
ZHANG Weijun，YAO Fengju，XING Ying，et al. Operation Subsidy Mechanism of Intercity Railways for Sustainable Development[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(12)：178-185.

[17] 邸　振，肖妍星，戚建国，等. 考虑时间窗的地铁客货协同运输优化[J]. 铁道科学与工程学报，2022，19(12)：3569-3580.
DI Zhen，XIAO Yanxing，QI Jianguo，et al. Passenger-Freight Coordination Transportation Optimization with Considering Time Windows[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2022，19(12)：3569-3580.

[18] 王晓平，张子宣. 客货“共线不共车”模式下地铁货运站点选择[J]. 地下空间与工程学报，2024，20(4)：1062-1072.
WANG Xiaoping，ZHANG Zixuan. The Selection of Metro Freight Stations under the Mode of “Shared Lines but Not Shared Trains”[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2024，20(4)：1062-1072.

(责任编辑　汪沁萱)