

基于 MCMF 模型的城市地下物流网络优化研究

李滢, 赵建伟, 陈律

(无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214121)

摘要: 地下物流系统 (ULS) 通过地下管道或隧道运输货物有助于低成本高效率地解决新型城市交通拥堵和环境污染。基于 MCMF 模型, 从两个阶段对网络线路优化研究, 第一阶段根据实际货运量和图论知识, 确定一、二级节点之间的物流路线规划; 第二阶段以地下节点及通道间的货物清仓和地下物流网络路线低成本为目标, 建立最小费用最大流模型来优化线路, 得到实现货物运输的最小费用。以南京市仙林区为例, 验证了该模型对求解优化地下物流系统网络具有可行性, 结果表明通过两阶段网络路线的优化, 既能保证配送效率的最大化, 又能使运输成本最低。

关键词: 城市地下物流; 网络优化; 智慧物流; 最小费用最大流 (MCMF)

中图分类号: F252; U12

文献标识码: A

Research on Optimization of Urban Underground Logistics Network Based on MCMF Model

LI Ying, ZHAO Jianwei, CHEN Lü

(Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, Jiangsu, China)

Abstract: Underground logistics systems (ULS) transport goods through underground pipelines or tunnels, which can help solve new urban traffic congestion and environmental pollution with low cost and high efficiency. This article is based on the MCMF model and studies network route optimization from two stages. In the first stage, based on actual freight volume and graph theory knowledge, logistics route planning between primary nodes is determined. The second stage aims to achieve low-cost clearance of goods between underground nodes and channels, as well as low-cost underground logistics network routes. A minimum cost maximum flow model is established to optimize the route and obtain the minimum cost for achieving goods transportation. And taking Xianlin District, Nanjing City as an example, the feasibility of this model in solving and optimizing the underground logistics system network was verified. The results showed that through two-stage network route optimization, it can not only ensure the maximization of distribution efficiency but also minimize transportation costs.

Key words: urban underground logistics; network optimization; intelligence logistics; minimum cost maximum flow (MCMF)

数字交通和智慧物流的创新是新型城市经济协调发展的重要保障^[1-2]。国家“十四五”规划指出, 2035年我国城镇化率将达到70%。人口将进一步向城市集聚, 特别是伴随电商物流的发展, 货运需求也激增, 环境和交通压力显著增

加, 一线城市每年因交通拥堵造成的经济损失高达千亿元^[3]。《交通强国建设纲要》和《“十四五”现代流通体系建设规划》明确指出, 在考虑安全和效率的前提下深度耦合, 对城市地下空间开发利用, 破解交通拥堵、用地紧张、环境恶化

收稿日期: 2024-09-05

作者简介: 李滢, 助教, 硕士, 研究方向为电子商务、管理科学理论与方法

基金项目: 2023年无锡市软科学项目 (编号: KX-23-C051); 2023年无锡职业技术学院科研项目 (编号: GLY-2023-01)

等“大城市病”要依赖城市地下物流配送系统 (underground logistics system, ULS) 的建设。国家层面一系列大政方针充分体现了中国建设城市地下物流体系、低碳绿色城市的战略需求。城市地下物流系统的构建实质要素主要包括地面地下沟通枢纽节点和地下运输网络, 物流网络节点和网络的优化对城市地下物流建设起到关键作用, 通过布局不同货运能力的物流网络与交汇节点, 在满足各区域物流需求的同时大幅度提升物流效率。

1 文献综述及研究现状

城市地下物流网络设计是指依据道路货运现状, 在满足一定服务能力、客户需求、投资预算、共同安全、环境和运输时空约束等条件下, 以提高城市综合货运效能为目标, 对 ULS 节点、隧道等关键基础设施进行选址, 并确定相关系统特征参数^[4-5]。目前, 城市货运地下化建设的必要性和高效益已成为社会的普遍共识, 国内外专家学者关于地下物流网络系统建设研究主要集中在以下方面: ①城市地下物流网络轨道交通网络和选址研究。钱七虎等^[6]针对我国城市发展中日益严峻的交通问题提出要在特大城市建设地下快速路和地下物流系统来优化城市交通体系。穆树录^[7]依托面、点、线多模块层次分析法, 建立集合覆盖模型, 研究分析了大城市地下物流系统的线路规划问题。任睿等^[8]构建了网络选址-分配-路径组合优化模型, 对轴辐式城市地铁-货运系统网络的布局进行了优化。②城市地下物流车辆开行方案和网络线路规划研究。陈慧等^[9]根据城市物流特征刻画一体化网络设施形态, 提出地下货运载具设计依据与多式联运成本测算方法。郑长江等^[10]从碳排放成本出发, 提出利用地铁系统建设城市配送网络的方式可以有效降低物流运输成本。

以上研究充分反映了城市地下物流网络研究重点是其实质要素的研究, 目前在线路研究上主要是在数理模型构建和算法优化上改进, 较少分析建设成本费用和建设周期等其他联合因素。基于此, 本文利用最小费用最大流 (minimum cost maximum flow, MCMF) 模型, 优化交通网络节点, 最大限度降低运输成本, 对积极解决新型城市交通拥堵问题、推动我国新型城市智慧交通建设具有重要参考价值。

2 研究思路和模型构建

2.1 研究思路

城市地下物流系统网络规划和建设有两个基本目标: 一是缓解交通拥堵直至交通畅通, 至少基本畅通; 二是降低物流成本。基于此, 本文从两个阶段对地下物流系统网络路线优化研究, 第一个阶段为一、二级节点之间的路线规划。确定覆盖全部区域的最少物流候选节点个数及位置, 确定一、二级节点的个数、位置及其服务范围、网络路线。第二个阶段为一、二级节点的路线优化。以地下节点及通道间的货物清仓和构建地下物流网络路线低成本为目标, 建立的最小费用最大流模型来优化线路, 得到实现货物运输的最小费用。具体研究思路如图 1 所示。

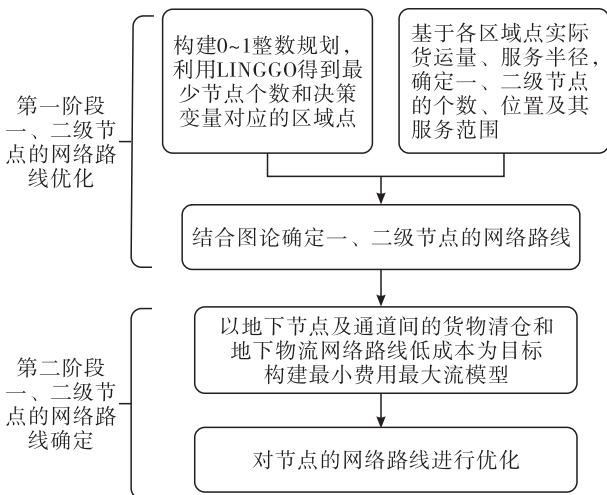


图 1 研究思路图

2.2 基本假设

在模型建立前做如下假设:

(1) 各一级物流候选节点均建设在区域中心点旁边, 并用区域点 * 表示建设在区域点的一级节点, 不考虑物流园区建设和园区内地下节点建设。

(2) 区域内区域点的物流需求量全部由物流节点进行中转; 货物从二级节点至地面后采用人力或小型车辆在节点服务区域内进行运输, 可认为不影响交通。

(3) 总成本包括各节点和通道的建设成本、折旧成本、货物的运输成本。

(4) 物流节点的处理量不能超过其最大处理量, 同时要达到最小处理量才能修建该节点。

2.3 模型构建

本文从两个阶段对地下物流网络路线优化研究,第一个阶段为确定一、二级节点的网络路线。利用比例法将拥堵区域降为畅通或者基本畅通,保证每个区域至少都能被一个节点覆盖,选择最少的节点作为线路网络中的物流节点,构建0~1整数规划模型(如公式1所示),利用LINGGO软件对该模型求最优解,得到最少节点个数及决策变量对应的区域点。假设所有的区域点集合 $z = \{z_1, z_2, z_3 \cdots z_n\}$,地下物流系统可建设的物流节点的候选点集合为 $J = \{1, 2, \cdots, j\}$,对于每一个区域点都引入决策变量 x_i ,建立0~1整数规划模型:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1} x_i \\ s. t. \begin{cases} x_i = 0, 1 \\ \sum_{i=1} x_i \geq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: x_i 表示第*i*个物流候选节点, $x_i=1$ 表示区域点被物流候选节点覆盖, $x_i=0$ 表示区域点没有被物流候选节点覆盖。

第二个阶段为一、二级节点的网络路线优化。对一级节点下的二级节点,直接规划得所有节点的物流路线规划,以各区域的一级节点为建设通道的起始点,计算各通道之间的收发货量,以最大的货运量为设计通道原则,以地下节点及通道间的货物清仓和构建地下物流网络路线低成本为目标,根据物流网络的节点和路线计算各通道之间的货运量和费用,再利用建立的最小费用最大流模型来优化路线,得到实现货物运输的最小费用。

$$\begin{aligned} \min z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} f_{ij} \\ s. t. \begin{cases} f^+(v_i) - f^-(v_i) = \begin{cases} f(v_s), i = s(\text{源}) \\ -f(v_s), i = t(\text{汇}) \\ 0, i \neq s, t(\text{中转点}) \end{cases} \\ 0 \leq l_{ij} \leq f_{ij} \leq u_{ij} [\forall (i,j) \in A] \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,目标函数 Z 是通过网络 A 供应实现总成本最小;对于任意弧 $(v_i, v_j) \in A$, f_{ij} 是节点 v_i 到节点 v_j [弧 (v_i, v_j)]的一个流量; c_{ij} 是弧 (v_i, v_j) 单位流量的费用;约束条件中, $f^+(v_i)$ 和 $f^-(v_i)$ 分别为流出和流入节点 v_i 的流量, $f(v_s)$ 是节点 v_i 的净流出量, l_{ij} , u_{ij} 为弧 (v_i, v_j) 运输流量的上下界函数。

3 实证检验和结果分析

3.1 数据来源

南京市作为江苏省会城市,交通拥堵问题亦十分严重。文章以南京市仙林地区作为分析对象,以保证该地区交通基本畅通、降低物流成本为目标构建南京市地下物流系统网络,具有重要的现实意义。本文数据由南京市仙林区域交通管理相关单位提供,原始数据主要包括两个方面:①南京市仙林区域的交通货运区域划分图、区域拥堵系数和相应的货运OD流量矩阵(单位:吨);②各区域面积及中心点坐标(单位:米)。

3.2 模型求解

3.2.1 第一阶段模型求解

为了让各个区域点都满足货运进出的平衡,将拥堵区域降为畅通或者基本畅通,利用比例法对区域点的个数进行约束,利用LINGGO软件求最优解得到最少的节点个数及其对应的位置,各决策变量对应区域点如表1所示。根据货运OD(origin destination)流量矩阵计算得到各区域点的实际货运量如表2所示。

表1 各个决策变量对应的区域点

决策变量	对应区域点	决策变量	对应区域点	决策变量	对应区域点
x3	896	x81	823	x91	817
x4	874	x82	807	x92	875
x5	791	x83	811	x93	831
x13	898	x84	821	x94	844
x14	900	x85	887	x95	818
x15	854	x86	841	x96	839
x16	890	x87	861	x97	814
x78	853	x88	849	x98	877
x79	882	x89	862	x108	826
x80	847	x90	876	x109	846
				x110	888

由于一级节点和二级节点的服务半径均为3千米,根据区域点的货运量和服务范围确定一级二级节点的个数、位置及其服务范围(表3)。

由于一级节点之间相互连通,一级节点11个,若两两连通共有55条线,根据图论知识,在封闭图形中,当两条线夹角小于等于直角时才会出现第三条线小于前两条线之和,当三个节点连线中存在锐角时才会连第三条线,否则就连两

表 2 各区域点的实际货运量

区域点	发货量/吨	收货量/吨	货运量/吨	区域点	发货量/吨	收货量/吨	货运量/吨
791	1 687. 7	1 596. 09	3 283. 79	853	673. 518	594. 31	1 267. 828
807	932. 724	869. 877	1 802. 601	854	716. 072	670. 35	1 386. 422
811	448. 436	409. 561	857. 997	861	700. 361	664. 253	1 364. 614
814	511. 503	766. 963	1 278. 466	862	451. 134	590. 003	1 041. 137
817	412. 373	374. 206	786. 579	874	2 849. 325	2 742. 422	5 591. 747
818	488. 39	467. 368	955. 758	875	843. 508	864. 852	1 708. 36
821	1 392. 873	1 326. 478	2 719. 351	876	689. 619	561. 084	1 250. 703
823	1 204. 007	1 080. 394	2 284. 401	877	1 139. 816	1 028. 403	2 168. 219
826	1 803. 546	1 786. 651	3 590. 197	882	501. 509	492. 859	994. 368
831	691. 389	724. 834	1 416. 223	887	584. 969	597. 768	1 182. 737
839	2 745. 814	1 938. 84	4 684. 654	889	535. 105	597. 879	1 132. 984
841	601. 276	570. 844	1 172. 12	890	2 080. 225	1 882. 86	3 963. 085
844	777. 382	664. 225	1 441. 607	896	153. 939	252. 769	406. 708
846	688. 422	610. 601	1 299. 023	898	2 378. 161	1 880. 603	4 258. 764
847	867. 576	782. 853	1 650. 429	900	1 203. 344	1 213. 692	2 417. 036
849	491. 889	441. 825	933. 714				

表 3 区域包含的一二级节点及其服务范围

	一级节点	二级节点	区域点		一级节点	二级节点	区域点
791 * 区域	791 *		792/793/794	826 * 区域	826 *	831 **	808/812/822
			795/796/797				825/829/831
			799/800/803/805				832
821 * 区域	821 *	811 ** /818 **	804/809/811	839 * /874 *	839 * /874 *	876 ** /877 **	836/837/838
			816/818/819				840/871/872
			820/824/828				873/876/877
			833/834/835				879/882/884
823 * 区域	823 *	807 ** /814 **	798/801/802	862 * 区域	862 *		857/858/859
			806/807/810				867/868/869
			813/814/815	875 * 区域	875 *	861 **	855/856/860
			817/827/830				861/863/864
			841/842/843				865/866/870
			844/845/846				878/880/881/883
898 * 区域	898 *	853/ ** 854 **	847/848/849	890 * 区域	890 *	887 ** /889 **	885/886/887
			850/851/852				888/889/890
			853/854				891/893
			894/895	900 * 区域	900 *		892/897/899

注: 791 * 指的是 791 区域的一级节点, 811 ** 指的是以 811 区域点旁边建设的二级节点, 其他相同。

条线, 据此根据地图绘制一级节点网络路线图如图 2 所示。

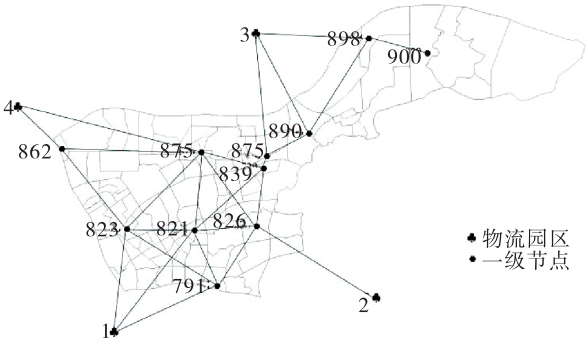


图 2 一级节点之间物流网络路线图

3. 2. 2 第二阶段模型求解

地下节点及通道间的货物每天要清仓, 每两个相邻节点之间地下物流通道双向尺寸一致, 以单向流量较大的为设计准则, 以各区域的一级节点为建设通道的起始点, 计算各通道之间的收发货量, 以其中最大的货运量为设计通道原则, 结合车辆参数, 通过计算得到各通道的位置和实际流量如表 4 所示。

从表 4 中数据知: 各一级节点之间的通道建设均采用的是 5 吨的地下运输车辆, 除了 875 * - 874 *、826 * - 839 * 这两个通道之间货运量较大采用的是双向四轨 (双洞) 的隧道建设形式, 其

表 4 各通道的实际流量、选择隧道形式等

轨道线路	单向最大 流量/吨	选择车辆节 数以及吨数	运行 班次	选择隧道形式
791* - 821*	465.547	4 节 5 吨	18 班次	双向双轨（双洞）
791* - 823*	465.148	4 节 5 吨	24 班次	双向双轨（双洞）
791* - 826*	338.848	4 节 5 吨	17 班次	双向双轨（双洞）
821* - 875*	1 430.721	4 节 5 吨	72 班次	双向双轨（双洞）
821* - 823*	2 439.915	8 节 5 吨	61 班次	双向双轨（双洞）
821* - 826*	981.575	4 节 5 吨	50 班次	双向双轨（双洞）
821* - 874*	3 284.054	8 节 5 吨	83 班次	双向双轨（双洞）
862* - 823*	2 286.974	8 节 5 吨	58 班次	双向双轨（双洞）
862* - 875*	1 513.266	4 节 5 吨	76 班次	双向双轨（双洞）
875* - 826*	271.88	4 节 5 吨	14 班次	双向双轨（双洞）
875* - 874*	3 992.245	8 节 5 吨	100 班次	双向四轨（双洞）
826* - 839*	4 945.245	8 节 5 吨	124 班次	双向四轨（双洞）
839* - 890*	1 519.775	4 节 5 吨	76 班次	双向双轨（双洞）
890* - 898*	414.32	4 节 5 吨	21 班次	双向双轨（双洞）
898* - 900*	2 528.013	8 节 5 吨	64 班次	双向双轨（双洞）
823* - 875*	1 935.906	8 节 5 吨	49 班次	双向双轨（双洞）
839* - 874*	4.638	4 节 5 吨	1 班次	双向双轨（双洞）

他通道之间均采用的是双向双轨（双洞）的隧道建设形式。由于不考虑物流园区建设和园区内地下节点建设，所以该地下物流网络系统每天总成本为各通道折旧成本和货物运输成本及各一、二级节点折旧成本。由于一级节点有 11 个，二级节点有 20 个，一、二级节点的建设费用分别为 1.5 亿元/个，1 亿元/个；通道和节点的设计年限为 10 年，年综合折旧率均为 1%。

通过计算可以得到物流网络的节点和路线，各通道之间的货运量，各通道之间的费用，再利用建立的最小费用最大流模型来优化路线，得到实现货物运输的最小费用。首先，计算优化之前的物流网络体系的总成本，各轨道交通线路总运输成本为 675 775.589 元/天（如表 5 所示），节点折旧成本 100 000 元/天，隧道折旧成本（元）126 027.4 元/天，整个物流网络总成本为 901 802.99 元/天。

因为物流网络体系中，物流园区与一级节点直接相连，某些节点单向直接相连，这些都属于必须要建设的路线，不能进行优化，对于物流网络线路进行筛选后得到需要优化的一级节点的流量通道费用网络如图 3 所示。

图 3 中各弧表示运输通道，弧上节点均为一级节点，表示为节点间的流量、最大容量和费用，如 862* - 875* 弧上（1513/1 800，297 003）表示为从节点 862* 到节点 875*，单向流量为 1 513

表 5 优化之前的物流网络节点成本表

轨道线路	总货运量/吨	公里数	运输成本/元
791* - 821*	525.047	4.1	2 152.69
791* - 823*	726.649	7.2	5 231.87
791* - 826*	443.998	5.3	2 353.19
821* - 875*	1 900.553	5.6	10 643.10
821* - 823*	4 319.122	4.7	20 299.87
821* - 826*	1 251.275	4.3	5 380.48
821* - 874*	4 235.443	6.5	27 530.38
862* - 823*	2 542.077	7.4	18 811.37
862* - 875*	2 643.401	9.9	26 169.67
875* - 826*	522.029	6.6	3 445.39
875* - 839*	4 900.069	4.6	22 540.32
826* - 839*	7 010.914	4.1	28 744.75
839* - 890*	2 990.509	4.5	13 457.29
890* - 898*	683.71	8	5 469.68
1 - 791*	5 866.07	7.7	45 168.77
1 - 821*	4 387.941	9.2	40 369.06
1 - 823*	11 791.354	7	82 539.48
2 - 826*	7 408.042	9.8	72 598.81
3 - 874*	9 198.36	8.8	80 945.57
3 - 898*	2 829.009	8	22 632.07
3 - 890*	7 348.482	8	58 787.86
3 - 900*	3 025.519	4.2	12 707.18
4 - 862*	2 109.184	4.8	10 124.08
4 - 875*	2 421.652	14.1	34 145.29
898* - 900*	943.218	4.2	3 961.52
823* - 875*	2 607.667	7.5	19 557.50
839* - 874*	9.276	0.9	8.35
总计			675 775.59

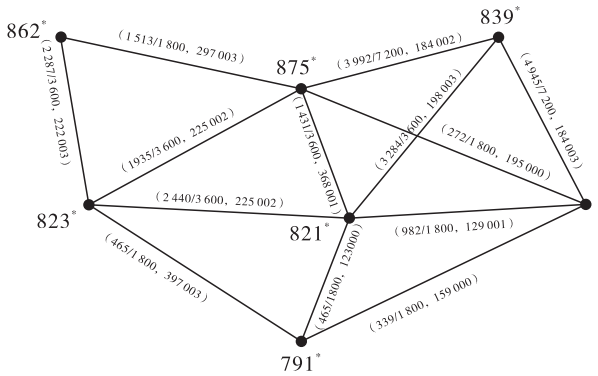


图 3 需要优化的一级节点间流量通道费用网络图

吨，该通道最大容量为 1 800 吨，运输费用为 297 003 元。利用 JAVA 编程对该网络图进行优化，862* 位于区域的边缘，所以选为起始点；839* 虽然位于咽喉位置但是其货运量较大几乎达到容量上限，没有优化的必要，所以选择临近节点 826* 为终点，即 862* 对应标号 0，823* 对应标号 1，875* 对应标号 2，821* 对应标号 3，791* 对应标号 4，839* 对应标号 5，826* 对应标号 6。由程序可得每条增广链路径的费用、流量，

进而得出单位费用如表 6 所示。

表 6 增广路径的单位费用				
增广路径	增广路径线路	费用	流量	单位费用/元
1	862* - 875* - 826*	492 003	272	1 808. 83
2	862* - 823* - 821* - 826*	492 006	982	501. 02
3	862* - 823* - 791* - 826*	597 004	339	1 761. 07
4	862* - 875* - 839* - 826*	665 008	1 241	535. 86
5	862* - 823* - 821* - 839* - 826*	745 011	966	771. 23

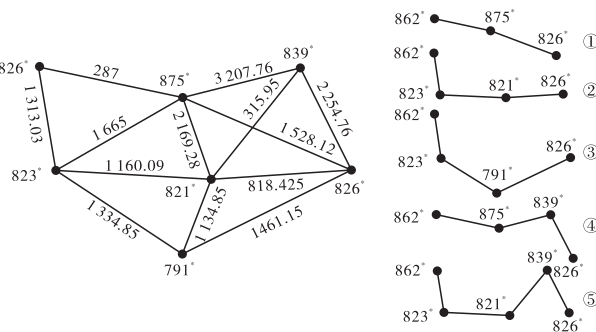


图 4 各通道间的容流差与增广路径图

根据表 6 可知, 单位费用最低的增广路径为第 2 条 862* - 823* - 821* - 826*, 除去公共节点(源点和汇点), 其非公共路径节点为 823*、821*, 结合图 4 通道间容量与流量差值, 考虑可优化增广路径 3 和 4。若优化第 3 条, 节约费用为: $(79 + 97) \times (1761.07 - 501) = 133\,546.612$ 元。若优化第四条, 节约费用为: $(49 + 595) \times (535 - 501) = 15\,456$ 元。

综上优化后节约了费用 133 546. 12 元, 优化后的物流网络体系总成本为 768 256. 37 元。

4 结论

本文通过两阶段网络路线优化, 既能保证配送效率的最大化, 又能使运输成本最低。同时, 从实际出发, 以南京市仙林区为例, 验证了模型对求解优化地下物流系统网络具有可行性, 结果分析表明:

(1) 地下物流网络系统建设中, 受地面拥堵情况、实际货运量(OD 流量矩阵)、服务范围 and 运行费用等限制, 最优物流节点的位置和个数、最优物流线路会发生变化。本文提出的两阶段最小费用最大流物流网络优化模型, 一方面可以最大限度地节约成本, 优化交通网络节点对地下物流系网络系统中资源进行了最优配置; 另一方面

实现了缩短货物运输总里程, 减轻地下物流网络系统运行的压力, 对于构建城市地下空间新型物流运输模式, 优化地下网络通道有实际参考价值。

(2) 城市地下物流网络建设在提高城市物流效率、减少环境污染方面具有巨大潜力。近年来建设地下物流网络的实践案例也相对活跃, 各大城市不断探索, 如我国典型案例雄安新区的城市地下物流建设, 但地下物流系统的建设和维护成本相对较高, 如何高效低成本的长期的运营和维护一直是个难点。本文基于社会福利最大化目标, 提出的方案有利于保障城市地下物流配送效率, 缓解城市交通和经济建设压力, 为城市地下物流网络建设过程中优化网络规划线路以及降低运营成本、提质增效提供了理论依据。

参考文献:

[1] 黄海军, 高自友, 田琼, 等. 新型城镇化导向下的城市群综合交通系统管理[J]. 中国科学基金, 2018, 32(2): 214-223.

[2] 陈一村, 陈志龙, 郭东军, 等. 城市地下物流系统研究现状[J]. 管理现代化, 2019, 39(3): 91-97.

[3] 胡万杰, 董建军, 陈志龙. 基于地铁的城市地下物流系统发展可持续性研究[J]. 综合运输, 2023, 45(10): 67-72.

[4] CHEN Y, LIU Y, GUO D, et al. Freight transit assignments for an integrated network of road transportation and underground logistics systems[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11(2): 04020014-04020014.

[5] VISSER G J. The development of underground freight transport: An overview[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 80: 123-127.

[6] 钱七虎, 陈晓强. 国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2007(2): 191-194.

[7] 穆树录. 城市地下物流系统线路规划研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.

[8] 任睿, 胡万杰, 董建军, 等. 轴辐式城市地铁-货运系统网络布局优化[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(7): 1699-1712.

[9] 陈慧, 胡万杰, 陈一村. 城市地面地下一体化物流网络货运性能研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1420-1427.

[10] 郑长江, 陈宜恒, 沈金星. 基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(1): 89-98.