

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.013

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:蒋鸿羽,吴金卓.基于两阶段优化的社区团购仓配网络节点选址研究[J].西安理工大学学报,2025,41(3):432-441.
JIANG Hongyu,WU Jinzhuo. Study on node locations of warehouse allocation network for community group purchase by the two-stage optimization method[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2025,41(3):432-441.

基于两阶段优化的社区团购仓配网络节点选址研究

蒋鸿羽, 吴金卓

(东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:通过优化社区团购仓配网络体系,可降低企业物流成本,提高用户满意度,进而有效提升企业的市场竞争力。以“共享仓-中心仓-网格仓-团长”仓配体系为研究对象,首先结合 P -中值法构建以总成本最小为目标的中心仓选址优化模型,并利用遗传算法对模型进行求解;然后在 ArcGIS 平台分别利用最小设施点数模型、有容量限制的最大化覆盖模型和最小化阻抗模型对社区团购的网格仓选址进行优化,最后以山东省某社区团购仓配网络体系为例进行优化分析。结果表明:①在山东省建立 5 个中心仓为最优方案,总成本为 3 381.99 万元;②基于 ArcGIS 平台的网络分析功能,在青岛市建立 12 个网格仓为最优方案,其社区覆盖率最大(97.95%)且更具成本效益。本文两阶段优化法考虑了消费者位置、交通、运输距离和成本等因素,能帮助企业优化社区团购仓配网络节点布局,降低物流成本,提升社区覆盖率,并为不同区域的社区团购网络体系优化提供借鉴和参考。

关键词:社区团购;选址;ArcGIS;网络分析

中图分类号: F252.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2025)03-0432-10

Study on node locations of warehouse allocation network for community group purchase by the two-stage optimization method

JIANG Hongyu, WU Jinzhuo

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: By optimizing the community group purchase warehouse distribution network system, the logistics costs of enterprises can be reduced, customer satisfaction can be improved, and the market competitiveness of enterprises can be effectively enhanced. Taking the warehouse distribution network system which is composed of shared warehouse, central warehouse, grid warehouse and group leaders as the research subject, a central warehouse location optimization model aiming at minimizing the total cost was constructed by P -median method, with the genetic algorithm used to solve the model. Then, the minimum facility points model, maximum coverage model with capacity constraints and minimum impedance model for ArcGIS platform were used respectively to optimize the locations of grid warehouses in community group purchase. Finally, taking the group purchase warehouse distribution network system of a community in Shandong Province as an example, an optimization analysis was conducted. Results show that: ①It was optimal to establish five central warehouses in Shandong Province, with a total cost of 33,819,900 yuan; ②Based on the network analysis function of ArcGIS platform, establishing 12 grid warehouses in Qingdao is the optimal solution, which has the highest community coverage rate (97.95%) and is more cost-effective. The two-stage optimization method for this paper considers

收稿日期: 2023-11-13; 网络首发日期: 2024-06-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240611.1447.011>

基金项目: 黑龙江省经济社会发展重点研究课题(22202)

第一作者: 蒋鸿羽,女,硕士生,研究方向为物流系统规划。E-mail: j1215639405@163.com

通信作者: 吴金卓,女,博士,教授,博导,研究方向为物流与供应链管理。E-mail: wjz@nefu.edu.cn

factors such as consumer locations, traffic, transportation distances and costs. It helps enterprises optimize the node layout of community group purchase warehouse distribution network, reduce logistics cost and improve community coverage and provides references and guidance for optimizing community group purchase network systems in different regions.

Key words: community group purchase; site selection; ArcGIS; network analysis

社区团购是一种以社区为单位,借助互联网进行团购销售,为社区居民提供日常所需商品和服务的消费方式,其网络体系由供应商、仓配体系、门店以及消费者构成^[1]。社区团购源于生鲜电商,先后经历了纯电商、前置仓、到店到家、社区团购的不断演变^[2,3]。社区团购依托用户的社交属性^[4],具有用户呈地域性聚集、消费品类以生鲜和日用品为主、商品消耗迅速且需求量大等特点^[5]。2020年,新冠疫情的爆发深刻地改变了人们的居家消费行为,社区团购就此蓬勃发展^[6]。据统计,2021年中国社区团购市场交易规模超过1 200亿元,同比增长约60%。目前,大多数社区团购平台采用“共享仓-中心仓-网格仓-团长”的四级仓配体系,其中,“中心仓-网格仓”作为承上启下的中转环节,对整个仓配体系的运行效率有决定性影响。因此,优化社区团购仓配体系,尤其是中心仓和网格仓的选址布局,有助于企业扩大下沉市场、降低物流成本、提高配送效率和提高用户满意度,进而提升企业的市场竞争力。

近年来,许多学者就社区团购网络节点的选址问题开展了广泛研究。例如,易海燕等^[7]基于新鲜度损耗等问题,通过建立混合整数选址模型,降低了企业的运营成本,并使选址决策更符合实际的社区团购运营。卢汉松等^[8]通过建立正常需求和激增需求下的两阶段前置仓选址模型,明确了需求变化下两阶段选址的动态过程,并对模型的可行性和有效性进行了验证。王法涛等^[9]通过嵌入自适应混合差分进化算法,设计了一种定界启发式和结构性启发式算法,可用于中心仓库数量的敏感性分析,并阐明了相关参数对总成本的影响。胡玉真等^[10]分析了社区需求变动和网格仓配送决策的相互作用机制,构建了基于支持向量回归算法的需求预测模型和网格仓订单配送路径优化模型。李珂珂^[11]以某社区团购公司为研究对象,构建了考虑货损成本的选址模型及带软时间窗的配送路径优化模型,为配送中心选址和配送路径规划提供了参考。

除了运用数学模型进行选址优化,还有一些学者利用地理信息系统(geographic information system, GIS)结合选址模型进行选址优化。例如,皮骏等^[12]利用 ArcGIS 软件对选址影响因素中可矢量化

的指标进行了空间分析,并构建了通用航空应急救援点选址布局模型。于志金等^[13]运用模型交点法结合 GIS 优化了某消防站点布局,使其风险点覆盖率提升了 10.20%,区域面积覆盖率提升了 12.43%。Qiu 等^[14]建立了木材物流中心选址模型,并结合 ArcGIS 对木材物流中心的选址进行优化分析。Liu 等^[15]充分考虑了城市复杂的地理环境,利用 GIS 的多准则技术,基于空间维度分析了城市自然环境和人文要素等综合影响下的公共设施选址方法,并以城市垃圾站选址为例进行了应用分析。

综上所述,现有关于社区团购物流节点的选址研究大多采用数学建模和优化算法相结合的方法,而较少采用优化模型与 GIS 技术相结合的方式。虽然数学建模方法对求解离散型选址问题具有广泛的适用性,但在复杂的城市路网下,此类方法难以全面考虑单行线、转弯限制和速度限制等道路因素,进而影响到物流节点选址结果的准确性。而利用 ArcGIS 平台的网络分析(Network Analyst)功能,依据路网的拓扑关系和数学模型,可为物流节点选址提供更为可靠、合理的方案^[16-17]。

基于此,本文以“共享仓-中心仓-网格仓-团长”仓配体系为研究对象,首先构建以总成本最小为目标的目标中心仓选址优化模型。其次,采用 ArcGIS 平台的网络分析功能对社区团购的网格仓选址进行优化。其中,网络分析的位置分配模型主要包括最大化市场份额模型(更多考虑资源和市场调查数据)、最大化覆盖范围模型(如何最大限度覆盖目标区域)和最小化设施点数模型(如何以最少的设施数量实现目标点的覆盖)等。经考量,本文选用最小设施点数模型(帮助企业节约资源和成本)、最大化且具有容量限制的覆盖范围模型(在保证选址方案有足够服务范围的同时,提高运行效率)和最小化阻抗模型(使设施点间的路径更有效)进行选址优化。最后,以山东省某社区团购仓配网络体系为例,开展选址优化。研究结果可为不同区域的社区团购网络体系优化提供借鉴和参考。

1 问题描述与相关假设

在社区团购四级仓配体系中,商品先由供应商

发往共享仓或直接发至中心仓,完成初步分拣后再发往网格仓,之后经精细分拣再送往团长处。本文假定企业仅需考虑从中心仓到网格仓再到团长处的总费用。通常,配送距离对中心仓的配送时间和成本有较大影响,而城市道路交通情况则对网格仓的配送效率有重要影响。因此,本文采用两阶段优化法对社区团购仓配网络节点的选址进行优化,即首先在省域范围内进行中心仓选址,然后在市域范围内进行网格仓选址。

1.1 中心仓选址

通常情况下,企业需从备选点中选择足够数量的中心仓为所有网格仓服务,因此社区团购中心仓选址问题属于离散型选址问题。在中心仓的选址过程中,所有中心仓的费用成本、时间成本以及服务范围都是中心仓选址的重要依据。根据相关文献^[5,8,11]作出如下假设:①各需求点有且仅有一个中心仓为其服务;②中心仓能够满足所有需求点的需求;③单位运输费率为常量,且运费与运输距离、运量之间是线性关系;④中心仓所需的租赁费用固定;⑤各需求点的需求量与其所覆盖区域的人口和 GDP 总量相关;⑥货物运输方式为公路运输,为保证商品新鲜度,商品需在到达网格仓当日配送给为其服务的团长。

1.2 网格仓选址

在面积较大、人口较多的市级行政区范围内,常设置多个网格仓分片区进行服务。从备选点中选择足够数量的网格仓为所有团长服务,同时保证网格仓配送总时长最小,且单个团长配送时间不会过长。考虑到各需求点对团购商品需求的不确定性以及网络覆盖性,本文采用 ArcGIS 的网络分析功能进行网格仓选址和优化,依据相关文献^[17-20],作出如下假设:①每个团长负责一个社区的团购业务,社区的位置即团长所在位置;②网格仓能够满足各需求点的需求量;③网格仓每日给团长配送货物,单个团长的货物可一次性配送完。

2 选址模型

2.1 中心仓选址模型

P -中值模型是在给定需求点和备选点的情况下,为 p 个设施寻找最佳位置,并将需求点分配到特定设施,以实现设施和需求点之间运输成本的最小化^[18-19]。本文以成本最小化为目标,结合 P -中值模型建立中心仓选址模型。该模型包含三个主要成本:年物资运输成本、年运营成本 and 年货损成本。

1) 年物资运输成本。运输成本是将团购商品从

中心仓运送至网格仓所产生的费用。运输成本与车辆的行驶速度、行驶距离和汽油单价等有关。为方便计算,将单位运输费率视为常数,且运输成本与运输距离和货物总量成正比。运输成本的计算公式为:

$$C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} 365 \epsilon_1 d_{ij}^i Q_i^j X_{ij} \quad (1)$$

式中: C_1 为年物资运输成本,元; I 为中心仓备选点的集合, $i \in I$; J 为所有需求点的集合, $j \in J$; ϵ_1 为单位货物的运输费率,元/(t · km); d_{ij}^i 为第 i 个需求点到第 j 个备选中心仓的距离,km; Q_i^j 为第 i 个需求点在第 j 个备选点的需求量,t; X_{ij} 为 0-1 变量,表示中心仓为需求点的服务情况, $X_{ij}=1$ 表示选择备选点 i 为需求点 j 服务, $X_{ij}=0$ 表示 i 点未被选择。

2) 年运营成本。中心仓的运营成本包括年租赁成本、人工成本、水电成本和材料成本等,其中年租赁成本为固定值,人工、水电和材料等成本与前置仓的订单量成正比。年运营成本的计算公式为:

$$C_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (A_i + 365 \delta_i) Y_i \quad (2)$$

$$\delta_i = a(1 + P_i) \quad (3)$$

式中: C_2 为年运营成本,元; A_i 为中心仓备选点 i 的租赁成本,元; δ_i 为第 i 个中心仓备选点的租金,元; a 为除租赁成本外中心仓每日的运营费,元; P_i 为备选点 i 所在地区的选址权重; Y_i 为 0-1 变量,当 $Y_i=1$ 表示备选点 i 被选中,否则未被选中。

考虑到各市区的人口及 GDP 水平会对中心仓运营及其建设成本产生影响,在中心仓选址模型中引入选址权重值来修正各市区的年运营成本。通过对各市区的总 GDP、人均 GDP 及人口数量进行排名和打分,最后得到该权重值的综合得分。

3) 年货损成本。货损成本与货损量有关。一般认为,社区团购的货损主要发生在运输阶段,仓储阶段由于储存时间较短,故不考虑货损。假定货损量的大小与运输的货物总量成正比,通过货损量与货物运输总量的比值可以得到货损率。为方便计算,将货损率取为常数,货损成本的计算公式为:

$$C_3 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} 365 \epsilon_2 \epsilon_1 d_{ij}^i Q_i^j X_{ij} \quad (4)$$

式中: C_3 为年货损成本,元; ϵ_2 为运输过程中的货损率,%。

4) 目标函数。基于成本最小的目的,中心仓选址模型的目标函数为运输成本、运营成本及货损成本的总和最小。因此,可建立一个以最小成本为目标的目标中心仓选址模型:

$$\min C = \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (A_i + 365 \delta_i) Y_i + 365 (\epsilon_2 + 1) \epsilon_1 d_{ij}^i Q_i^j X_{ij} \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i \in I} X_{ij} = 1, X_{ij} \leq Y_i \\ \sum_{i \in I} Y_i = 2 \end{cases}$$

式中: C 为总成本,元。

2.2 网格仓选址模型

利用 ArcGIS 的网络分析功能进行网格仓位置分配,该功能可基于路网实际覆盖范围确定设施点的选址^[20-22]。首先,构建目标市区内的交通网络;然后,分别利用 3 个位置分配模型进行网格仓选址及优化。

2.2.1 最小设施点数模型

该模型可结合社区数量得出网格仓最小选址数量。其目标是在所有候选的设施选址中挑选出数目尽量少的设施,使得位于设施最大服务半径之内的设施需求点最多。该模型构建如下:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j \in J} X_j \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j \in N_k} X_j \geq 1 \\ N_k = \{j \in J \mid d_{jk} \leq D_c\} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: J 为网格仓备选点集合, $j \in J$; X_j 为 0-1 变量,表示选中的备选点集合,当 $X_j=1$ 时,表示备选点 j 被选中,反之未被选中; K 为需求点集合, $k \in K$; N_k 为选中的需求点集合; d_{jk} 为 j 到 k 的距离; D_c 为网格仓覆盖的最远路程。

2.2.2 有容量限制的最大化覆盖范围模型

该模型用于求解能够覆盖尽可能多社区的网格仓选址方案。其目标是在所有候选的设施选址中挑选出给定数目的设施空间位置,使最大服务半径之内的设施需求点最多,且每个设施点服务的需求点不超过其容量限制。该模型中,设施点只要在服务半径内,就可享受足够的服务,而不论距离长短。该模型基于最大化覆盖范围模型,为每个设施点增加了服务需求点的数量限制。其模型构建如下:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \max \sum_{j \in J, k \in K} X_{jk} \\ \min \sum_{j \in J, k \in K} d_{jk} X_{jk} \end{cases} \\ & \text{s. t.} \begin{cases} Z_j - \sum_{k \in K} X_{jk} \leq 0 \\ \sum_{j \in J} Z_j = p \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: J 为网格仓备选点集合, $j \in J$; K 为网格仓需求点集合, $k \in K$; X_{jk} 为 0-1 变量,反映需求点被覆盖的情况,当 $X_{jk}=1$ 时, j 为 k 服务,反之不服务; Z_j 为 0-1 变量,反映备选点的选择情况,当 $Z_j=1$ 表示选择备选点 j ,反之不选择; d_{jk} 为 j 到 k 的实际最短路

程,km; p 为待选择的网格仓数量。

2.2.3 最小化阻抗模型

该模型的目标是在所有候选设施选址中按给定数目挑选出设施的空间位置,使所有使用者的出行成本之和最短。其现实意义在于使出行代价最小。本文选用最小化阻抗模型进行选址方案优化,并利用该模型进行去边缘化需求点的稳定性检验。模型构建如下:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} q_k c_{jk} y_{jk} \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j \in M} y_{jk} = 1 \\ \sum_{j \in M} X_j = p \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: q_k 为需求点 k 的需求量; K 为网格仓需求点集合, $k \in K$; c_{jk} 为 j 到 k 的单位运输费用; M 为最小化阻抗模型网格仓备选点集合, $j \in M$; y_{jk} 为 0-1 变量,表示需求点的供应情况,当 $y_{jk}=1$ 时,需求点 k 由网格仓 j 供应,反之不供应; X_j 为被选中的网格仓备选点集合, $X_j=1$ 表示 j 被选中,反之未被选中; p 为待选择的网格仓数量。

3 案例分析

本文以某社区团购平台在山东省内的仓配网络体系为研究对象开展优化分析,即在山东省内进行中心仓选址,然后以青岛市为例进行网格仓选址优化。

3.1 社区团购中心仓选址

3.1.1 基础数据

利用腾讯地图统计得到山东省社区总数共 34 551 个。按每个中心仓可服务社区数量 8 000~10 000 个计算,共需建立 4~5 个中心仓。目前,该社区团购平台有 4 个中心仓,分别位于青岛、济南、烟台和济宁。考虑到提升用户响应速度的需求以及扩大覆盖范围的目标,中心仓的选址数量可以扩大至 5 个,后续将对不同数量的中心仓选址方案进行比较分析。将各市的中心点作为中心仓需求点,共计 49 个,分别记为 $j_1 \sim j_{49}$ 。中心仓备选点的筛选条件为:①仓库面积不小于 10 000 m²;②仓库面积不小于 30 000 m² 的可分割出租;③仓库位置临靠城市主干道;④具备冷藏条件或能够使用冷藏设备。按照上述条件筛选出了 48 个中心仓备选点,分别记为 $i_1 \sim i_{48}$ 。

3.1.2 权重和参数设置

结合研究区各市级行政区的总 GDP、人均 GDP 及人口数量,采用由高到低记分的方式进行权重计算,结果如表 1 所示。全国第七次人口普查数据显示,我国 15~59 岁人口占总人口的 63.35%。另

外,据 QuestMobile 统计,2020 年我国团购微信小程序用户中 19~35 岁人口约占 63.6%。按照每个家庭每周参与线上社区团购 2 次、每次 2 kg 的情况计算,其需求量 D 为:

$$D = W \times \frac{1}{3} \times \frac{2}{7} \times 0.002 =$$

$$\frac{w \times \beta_1 \times \frac{35-19+1}{59-15+1}}{\beta_2} \times \frac{1}{3} \times \frac{2}{7} \times 0.002 \quad (9)$$

式中: W 为该地区的社区团购人口; w 为当地总人口; β_1 为全国 15~59 岁人口比例; β_2 为参与团购的 19~35 岁人口比例。

表 1 山东省各市的选址权重

Tab. 1 Site selection weights of cities in Shandong Province

行政区	地区 GDP/亿元	得分	人口/万人	得分	人均 GDP/万元	得分	总得分	权重/%
青岛	12 400.56	16	1 010.57	15	12.27	15	46	11.27
济南	10 140.91	15	924.16	13	10.97	12	40	9.80
烟台	7 816.42	14	710.37	10	11.00	13	37	9.07
潍坊	5 872.17	13	939.36	14	6.25	7	34	8.33
滨州	4 805.25	12	393.03	5	12.23	14	31	7.60
济宁	4 494.31	11	836.07	11	5.38	5	27	6.62
淄博	3 673.54	10	470.56	6	7.81	9	25	6.13
菏泽	3 483.11	8	879.90	12	3.96	3	23	5.64
枣庄	3 673.54	9	385.86	4	9.52	10	23	5.64
东营	2 981.19	5	219.35	1	13.59	16	22	5.39
德州	3 078.99	7	561.36	8	5.48	6	21	5.15
临沂	2 508.11	3	1 102.57	16	2.27	1	20	4.90
威海	3 017.79	6	291.08	2	10.37	11	19	4.66
泰安	2 766.46	4	547.85	7	5.05	4	15	3.68
聊城	2 316.84	2	595.25	9	3.89	2	13	3.19
日照	2 006.43	1	297.17	3	6.75	8	12	2.94

注:地区 GDP、人均 GDP 及人口数据来源于各市 2022 年的统计数据。

利用遗传算法对中心仓选址模型进行求解。参考文献[23-25],将遗传算法的参数设置如下:种群大小为 1 000、迭代次数为 1 200、交叉概率为 0.9、变异概率为 0.05、代沟取 0.9、染色体长度取 96。另外,年物资运输成本的单位运输费率取 0.8 元/(t·km),年货损成本的货损率取 4.5%。

3.1.3 结果及分析

中心仓选址模型收敛曲线如图 1 所示,经 1 200 次迭代,目标函数已收敛,此时不同选址数量的结果均达到最优。中心仓选址地点如图 2 所示。不同数量的中心仓的年运输成本、年运营成本、年货损成本及总成本如表 2 所示。

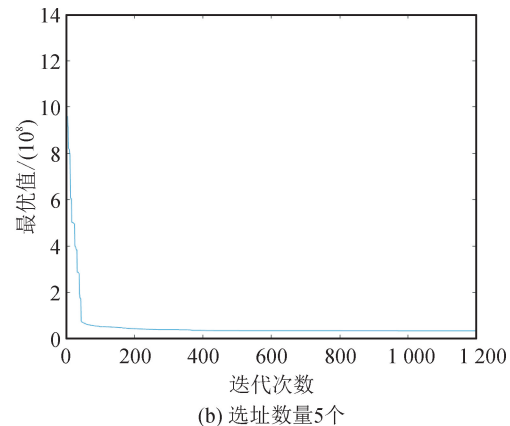
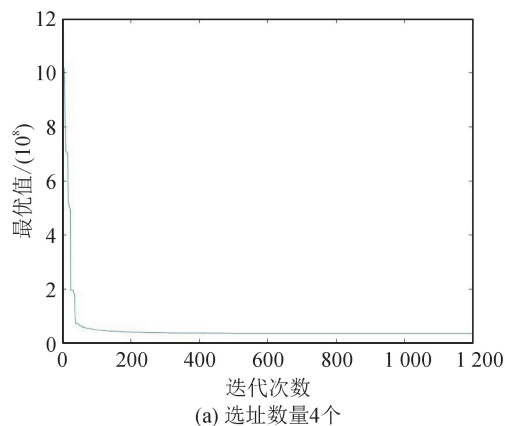


图 1 中心仓选址模型收敛曲线

Fig. 1 Convergence curve of the central warehouse location model

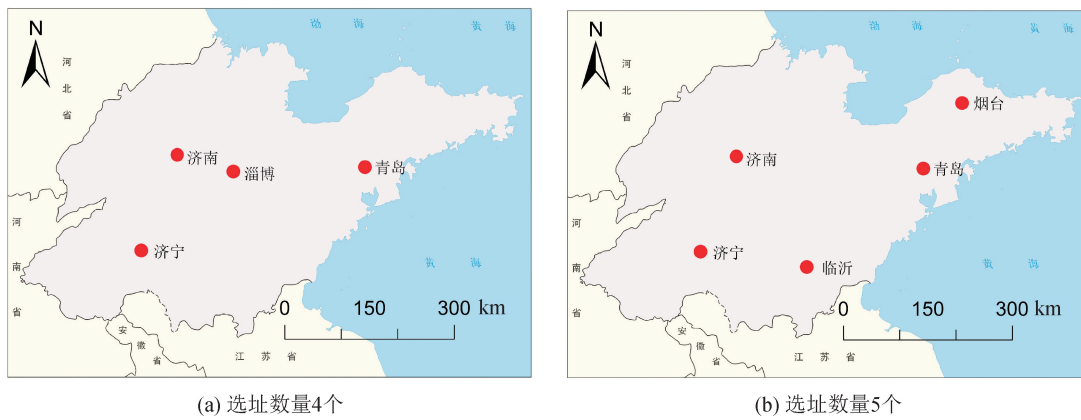


图2 中心仓选址方案

Fig. 2 Location scheme of central warehouse

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3266的标准地图制作,底图无修改。

表2 中心仓选址成本

Tab. 2 Cost of selecting the central warehouse location

选址数/ 个	年运输成 本/万元	年运营成 本/万元	年货损成 本/万元	总成本/ 万元
4	2 136.32	1 210.58	96.13	3 443.03
5	1 754.53	1 548.52	78.95	3 381.99

可以看出,建立5个中心仓的总成本最低,为3 381.99万元,且其运输与货损成本占比也较低。因此,建立5个中心仓的方案更优。5个中心仓分别位于青岛、济南、烟台、济宁、临沂,这与现有设施重合度较高,能充分利用现有资源。另外,考虑到平台未来发展趋势和临沂市的物流优势,建立5个中心仓也比较合理。

3.2 社区团购网格仓选址

3.2.1 数据收集与处理

为使网格仓能更好地适应复杂多变的城市配送环境、确保送达时间^[10],利用网络分析进行网格仓选址。首先,利用ArcGIS构建青岛市内路网。在网络中为道路设置最大行驶速度,并模拟红绿灯等待、转弯或转弯限制及道路限行等规则和限制,以最大限度地模拟实际道路情况。最终,得到青岛市路网图。考虑到一个网格仓大约能服务600个社区,确定网格仓备选点的筛选条件为:①仓库面积在500~1 500 m²范围内,面积高于1 500 m²的仓库可分割出租;②交通便利,可出入车辆,能满足冷藏需求;③平库优先,二楼以上楼库须有货梯。通过空间分析与定性分析相结合的方法,利用腾讯地图提取出51个网格仓备选点的经纬度坐标。利用Python

和腾讯地图,共收集社区及村落坐标点5 083个,即需求点团长的位置。

运用ArcGIS进行网络分析的前提是备选点和需求点均位于路网上。然而,需求点坐标在收集时并未落在路网上。因此,使用Near工具对需求点进行近邻分析,使其附着到最近的路网上,以确保网络分析模型能够搜索到每个备选点和需求点。以市南区某段路网为例,其分析效果如图3所示。

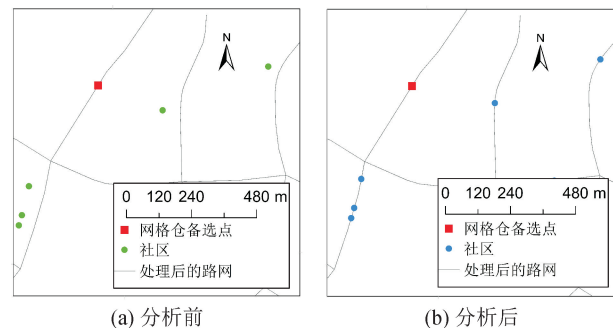


图3 近邻分析前后备选点和需求点位置

Fig. 3 Positions of candidate points and demand points before and after nearest neighbor analysis

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为鲁SG(2023)026的标准地图制作,底图无修改。

3.2.2 不同模型下的网格仓选址

1) 最小设施点数的确定。在网络分析中,将阻抗“车行时间”、“阻抗中断”设为90,以确保网格仓配送时间在90分钟内。最小化设施点数模型初步确定了10个设施点(图4)。由表3可知,这10个设施点总共覆盖了4 942个需求点,社区覆盖率为97.22%,达到了社区覆盖率目标。但设施点41所服务的需求点数量为1 937个,明显超出了合理范围。因此,该方案还需进一步优化。

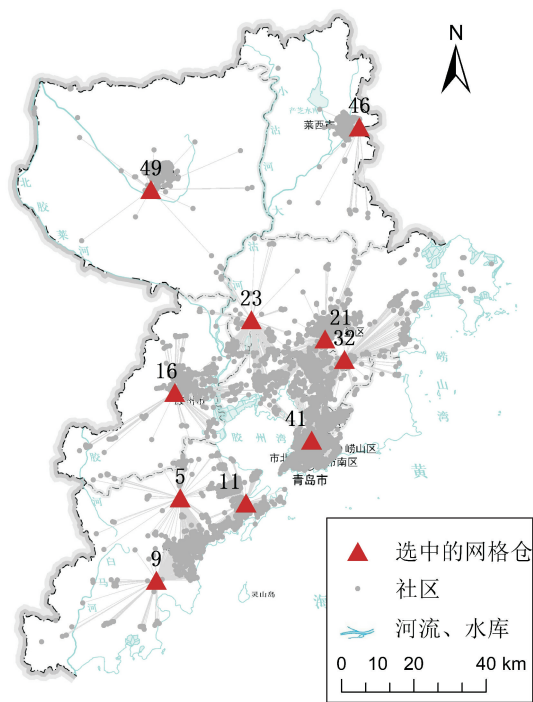


图 4 最小设施点数的覆盖情况

Fig. 4 Coverage of minimum facility points

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为鲁 SG (2023)026 的标准地图制作,底图无修改。

表 3 最小化设施点数模型运算结果

Tab. 3 Results by minimum facility points model

备选点	覆盖社区数量/个	备选点	覆盖社区数量/个
i_5	268	i_9	328
i_{11}	508	i_{16}	373
i_{21}	553	i_{23}	224
i_{32}	401	i_{41}	1 937
i_{46}	180	i_{49}	170

2) 有容量限制的最大化覆盖选址。一般情况下,一个网格仓的服务能力可覆盖 300~600 个团长。考虑到青岛市人口分布密集,一个团长可能负责两个或多个规模较小的社区,故将覆盖容量设为 600。为更准确地确定网格仓的选址数量及位置,分别在选址数量为 10、11、12 和 13 情况下(分别对应方案一至四)进行选址分析,结果如表 4 和图 5 所示。

表 4 不同选址数量下有容量限制的最大化覆盖范围模型的网格仓选址结果

Tab. 4 Site selection results of community group purchase grid warehouse in maximized coverage model with capacity constraints with different site selection quantities

选址方案	选址数量/个	选中的备选点	覆盖社区数量/个	覆盖率/%	覆盖行政区/个
一	10	1、6、14、16、26、32、40、44、46、51	4 806	94.55	8
二	11	11、12、14、16、21、31、40、44、46、49、51	4 972	97.81	9
三	12	6、11、16、21、24、32、34、42、44、46、49、51	4 978	97.93	10
四	13	6、11、13、16、21、26、32、34、40、44、46、49、51	4 978	97.93	10

由图 5 可知,方案一(10 个)未覆盖平度市内大部分社区,不是最优方案。与方案二(11 个)相比,方案三(12 个)、方案四(13 个)在覆盖社区数量上更优,其覆盖率也更高;而且,方案三、方案四可覆盖市内所有行政区,而方案二中李沧区未被覆盖。此外,相较于方案四(13 个),方案三(12 个)的设施数量较少,更具成本效益,故方案三(后文简称为最大化覆盖方案)为有容量限制的最大化覆盖模型的最优解。

3) 最小化阻抗模型的选址优化。为进一步优化方案,减少跨区配送、方便管理,以行政区为单位进行组合,将网格仓的服务区划分为 6 个片区:莱西市,平度市,黄岛区,胶州市,李沧区、城阳区和即墨市,市北区、市南区和崂山区。在最大化覆盖方案的

基础上,应用最小化阻抗模型进行分区域优化,结果如图 6 所示。图 6 中,社区覆盖率达到 97.95%,选址结果覆盖全部行政区。为验证通常情况下社区团购稳定存在的区域内优化方案是否稳定,去除各区域内明显边缘化及零散分部的需求点,得到选址稳定性验证结果,如图 7 所示。

对比图 6 和图 7 发现,仅黄岛区的一个网格仓位置发生了变动,即网格仓位置由 9 号设施点变为 6 号设施点。另外,随着青岛市规模的扩大,城市主要道路逐步向南部地区延伸,而 9 号设施点能够更好地服务于南部社区。因此,最小化阻抗模型的优化结果具备较好的稳定性,且对未来发展具有良好的适应性。

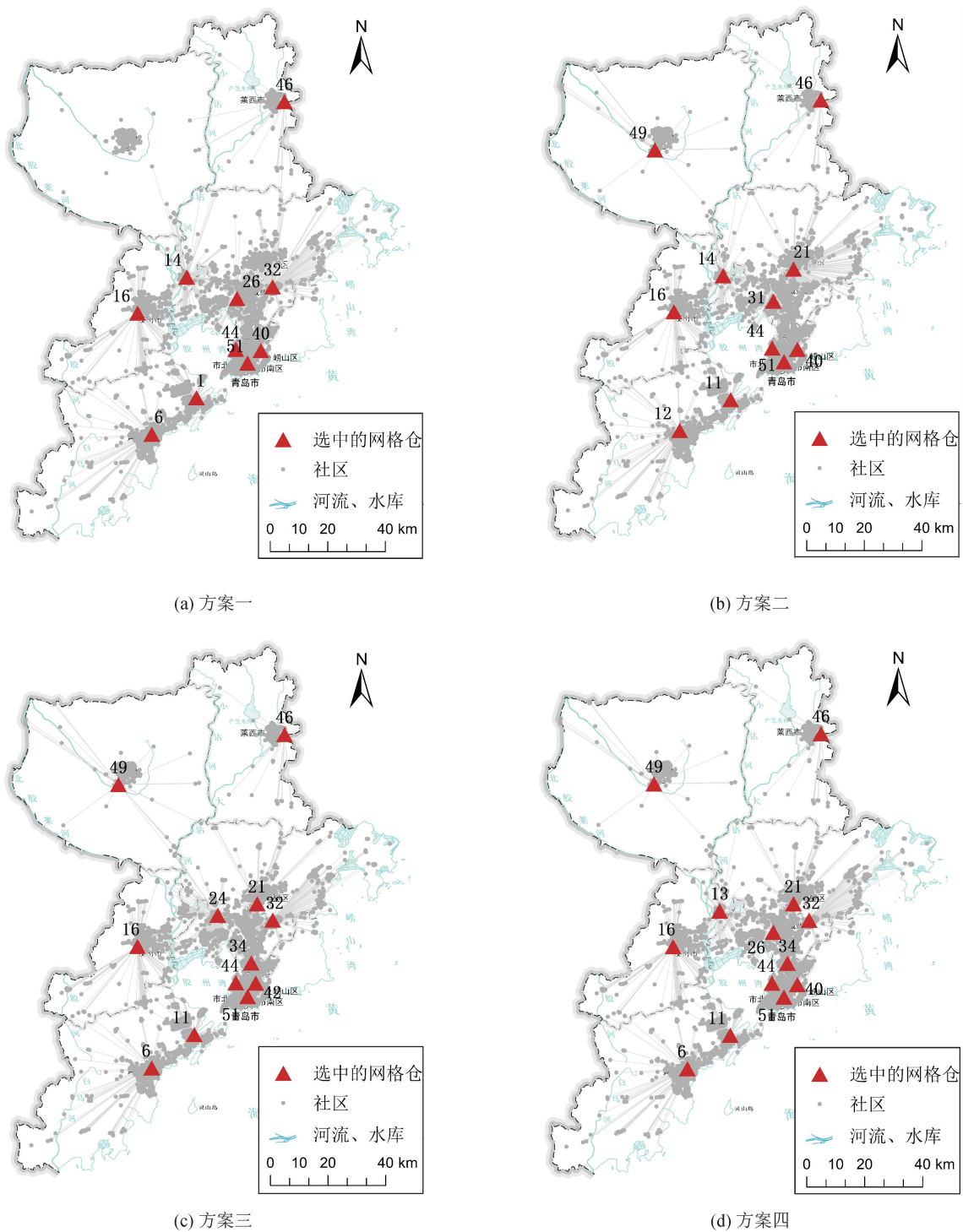


图5 有容量限制的最大化覆盖选址结果

Fig. 5 Maximized coverage location results with capacity constraints

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为鲁SG(2023)026的标准地图制作,底图无修改。

4) 不同模型选址结果对比。相较于最大化覆盖方案,最小化阻抗模型的优化结果在选址点上发生了3处变动,结果显示需求点的覆盖率提升至97.95%,而且,其网格仓在行政区之间的分布更加

均匀。因此,最小化阻抗模型的优化结果更具优越性。

综上,选择最小化阻抗模型的优化结果作为青岛市市区团购网格仓的选址方案。

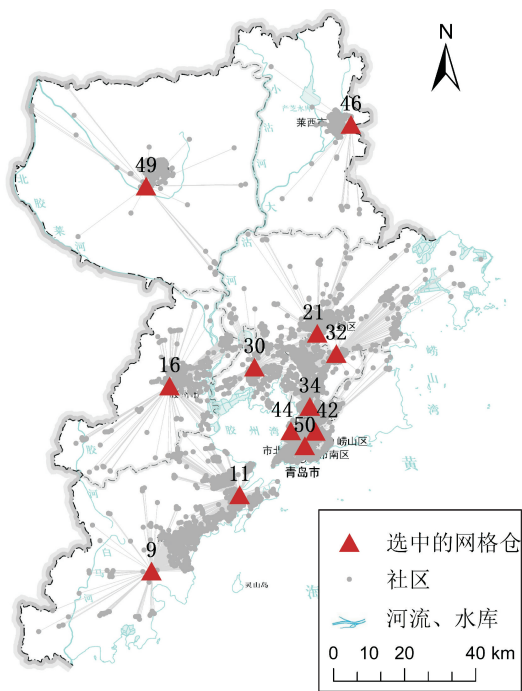


图 6 最小化阻抗优化结果

Fig. 6 Optimization results of minimizing impedance
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为鲁 SG (2023)026 的标准地图制作,底图无修改。

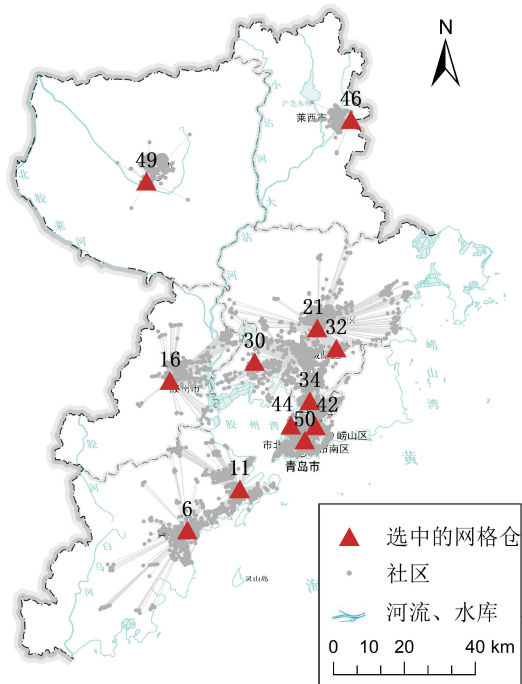


图 7 最小化阻抗选址稳定性验证结果

Fig. 7 Stability verification results of minimizing impedance site selection

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为鲁 SG (2023)026 的标准地图制作,底图无修改。

4 结 语

本文以最小成本为目标,构建了包含三个成本类

型的中心仓选址模型,运用 MATLAB 遗传算法完成了以山东省为例的某社区团购平台中心仓选址任务。结果表明,在山东省建立 5 个中心仓为最优方案,总成本为 3 381.99 万元。这 5 个中心仓分别位于青岛、济南、烟台、济宁、临沂,与现有设施重合度较高,可在充分利用现有资源的同时,兼顾未来的发展趋势。

利用 ArcGIS 网络分析中的最小化设施点数模型、有容量限制的最大化覆盖模型和最小化阻抗模型,构建了一个以实际路网为基础、以社区所在位置精准定位团长位置的社区团购网格仓选址方法,并以青岛为例进行选址优化。结果表明,在青岛建设 12 个网格仓是最优方案,其社区覆盖率能达到 97.95%,高于该社区团购平台 2022 年的报告数据(覆盖率 90%);同时,该方案还具备一定的稳定性,能够适应城市的长期发展。

本文提出了一个结合 GIS 技术与数学建模方法的两阶段社区团购网络节点选址优化方法。该方法考虑了消费者位置、交通状况、运输距离和成本等因素对物流节点选址的影响,能够帮助企业优化社区团购仓配网络节点布局,降低物流成本,提升社区覆盖率。研究结果可为不同区域的社区团购网络体系优化提供借鉴和参考。此外,本研究未考虑消费者需求的动态变化,后续可结合消费者需求预测进一步开展选址优化。

参考文献:

- [1] 李秋香,张静,黄毅敏,等. 基于网络外部性的社区团购供应链营销策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 75-86.
LI Qiuxiang, ZHANG Jing, HUANG Yimin, et al. Research on the marketing strategy of community group buying supply chain based on network externality[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(2): 75-86.
- [2] 张秦. 社区团购视野下廊坊市胜芳蟹流通体系建设[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(9): I0003- I0004.
- [3] JING X, XIE J. Groupbuying: a new mechanism for selling through social interactions [J]. Management Science, 2011, 57(8): 1354-1372.
- [4] 刘畅,姚建明. 社区团购场景下供应链末端配送资源整合优化研究 [J]. 管理学报, 2022, 19(8): 1231-1239.
LIU Chang, YAO Jianming. Optimization of supply chain terminal resources integration under the community group purchase scenario[J]. Chinese Journal of Management, 2022, 19(8): 1231-1239.
- [5] 王炳成,傅晓晖. 社区团购商业模式下团长生成内容对成员持续参与意愿的影响研究——社区团购认同的中介与社区成员生成内容的调节作用[J]. 软科学, 2023, 37(1): 102-108.

- WANG Bingcheng, FU Xiaohui. Research on the influence of team leaders generated content on members' continuous participation intention under the business model of community group buying—mediating role of community group buying identity and moderating role of community members generated content[J]. *Soft Science*, 2023, 37(1): 102-108.
- [6] 胡阳, 张萍萍, 郑晓娜. 社区团购可持续盈利模式问题与对策[J]. *商业经济研究*, 2022(1): 77-80.
- [7] 易海燕, 章圳琰. 基于新鲜度损耗的社区团购电商配送中心选址研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2020, 18(2): 59-67.
- YI Haiyan, ZHANG Zhenyan. Location selection of a community group-buying e-commerce distribution center considering freshness loss[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2020, 18(2): 59-67.
- [8] 卢汉松, 魏海蕊. 考虑激增需求下前置仓两阶段选址研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(1): 73-81.
- LU Hansong, WEI Hairui. Study on two-stage location of forebay considering surge demand[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2023, 40(1): 73-81.
- [9] 王法涛, 白如霜, 丁立会. 社区团购对线下生鲜商品价格波动的影响研究——基于空间计量的实证分析[J]. *时代经贸*, 2023, 20(6): 37-41.
- [10] 胡玉真, 王思睿, 左傲宇. 社区新零售背景下网格仓需求预测—配送决策迭代优化研究[J/OL]. *中国管理科学*, 2023[2023-11-13]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1251>.
- HU Yuzhen, WANG Sirui, ZUO Aoyu. Iterative optimization on demand prediction-distribution decision of grid warehouse under new retail in community[J/OL]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023[2023-11-13]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1251>.
- [11] 李珂珂. 社区团购模式下 S 公司生鲜农产品配送中心选址及配送路径优化研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- LI Keke. Research on location selection and distribution route optimization of fresh agricultural products distribution center of S company under community group-buying model[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [12] 皮骏, 王凯, 齐福强. 通用航空应急救援点选址布局优化研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(2): 270-274.
- PI Jun, WANG Kai, QI Fuqiang. Research on the optimization of location and layout of general aviation emergency rescue points[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(2): 270-274.
- [13] 于志金, 徐澜, 陈霜霜, 等. 基于模型交点法的城市消防站布局规划[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(10): 178-185.
- YU Zhijin, XU Lan, CHEN Shuangshuang, et al. Research on urban fire station layout planning based on model intersection method[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(10): 178-185.
- [14] QIU R, LIN Y, ZHONG C. Location of timber logistics centers based on ArcGIS[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(6): 113-114.
- [15] LIU S, JING C, DU M, et al. Spatial layout optimization and location of urban garbage buildings based on GIS-multicriteria[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(8): 45-49.
- [16] 徐力, 刘云华, 王启富. 自适应遗传算法在机器人路径规划的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(18): 36-41.
- XU Li, LIU Yunhua, WANG Qifu. Application of adaptive genetic algorithm in robot path planning[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(18): 36-41.
- [17] LEI T L. Integrating GIS and location modeling: a relational approach[J]. *Transactions in GIS*, 2021, 25(4): 1693-1715.
- [18] TAO Z, ZHENG Q, KONG H. A modified gravity p-median model for optimizing facility locations[J]. *Journal of Systems Science and Information*, 2018, 6(5): 421-434.
- [19] SONG Z, YAN T, LIU T, et al. A new gravity P-median model and empirical test in urban comprehensive hospital location decision making: take Wuxi as an example[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(4): 420-430.
- [20] 李振宇, 杨松林. 基于 GIS 的多级物流中心选址动态模型分析[J]. *物流技术*, 2011, 30(10): 81-83.
- LI Zhenyu, YANG Songlin. The study of logistics center allocation model based on GIS[J]. *Logistics Technology*, 2011, 30(10): 81-83.
- [21] OZTURK D, KILIC-GUL F. GIS-based multi-criteria decision analysis for parking site selection[J]. *Kuwait Journal of Science*, 2020, 47(3): 415-426.
- [22] JANGRE J, PRASAD K, PATEL D. Application of ArcGIS and QFD-based model for site selection for bio-medical waste disposal[J]. *Waste Management and Research*, 2022, 40(7): 919-931.
- [23] 闫森, 齐金平. 考虑需求不确定的多级应急物流设施选址研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(9): 7-13.
- YAN Sen, QI Jinping. Research on location selection of multi-level emergency logistics facilities under uncertain conditions[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(9): 7-13.
- [24] 刘全, 王晓燕, 傅启明, 等. 双精英协同进化遗传算法[J]. *软件学报*, 2012, 23(4): 765-775.
- LIU Quan, WANG Xiaoyan, FU Qiming, et al. Double elite coevolutionary genetic algorithm[J]. *Journal of Software*, 2012, 23(4): 765-775.
- [25] SU L, NIE T, ON H C, et al. Optimizing pipe network design and central plant positioning of district heating and cooling system: a graph-based multi-objective genetic algorithm approach[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119844.